



"Leggere il Cielo" raccoglie le lezioni dei corsi di aggiornamento tenutosi a Bologna nel 1999-2000 per gli insegnanti delle scuole elementari e medie. L'obiettivo dei corsi era quello di fornire nuovi stimoli per la conoscenza dei contenuti e per proporre strategie didattiche adeguate per sensibilizzare gli studenti alla lettura del cielo.

Leggere il Cielo

1. Presentazione
2. Brevi cenni di storia dell'astronomia
3. Breve e parziale storia del tempo
4. La sfera celeste
5. La gravità
6. La radiazione elettromagnetica
7. Le relazioni dell'astrofisica
8. Le sorgenti di energia nucleare nelle stelle
9. La genesi del Sistema solare
10. I corpi del Sistema solare
11. L'esplorazione del Sistema solare
12. Dove sono gli altri?
13. Le stelle e la loro evoluzione
14. Visita guidata attraverso la Via Lattea
15. Le galassie oltre la Via Lattea
16. Gli indicatori di distanza
17. Introduzione alla cosmologia
18. Esperienze didattiche

Gli autori



Osservatorio Astronomico
di Bologna



Giornale di Astronomia



Università degli Studi
di Bologna
Dipartimento
di Astronomia

Realizzazione di Gianluigi Parmeggiani

Presentazione

Bruno Marano¹

Leggere il Cielo può sembrare un titolo al tempo stesso semplice ed ambizioso, per un volume che raccoglie i contributi presentati in occasione di due corsi di aggiornamento rivolti agli insegnanti delle scuole elementari, medie inferiori e superiori, promossi dall'Osservatorio Astronomico di Bologna in collaborazione con il Dipartimento di Astronomia dell'Università di Bologna e con la Provincia di Bologna. Eppure, proprio nell'intento di avvicinare il pubblico alla lettura del cielo già da anni viene tenuto un programma divulgativo, intitolato "Il Parco delle Stelle", nato per rispondere ad una diffusa richiesta di un contatto diretto con la strumentazione e la ricerca astronomica da parte di un pubblico sempre più interessato e partecipe.

L'astronomia si trova, oggi come in passato, ad essere oggetto di una larga attenzione. In essa si mescolano ed integrano motivazioni apparentemente assai lontane: il gusto "naturalistico" della conoscenza dei fenomeni, l'attrazione per le "scienze esatte", l'interesse per le tecnologie avanzate, il ragionare sul cosmo e sull'infinito in connessione col pensiero filosofico. Esaltata dall'interesse dei media per i fenomeni astronomici recenti, quali la cometa Hale-Bopp, l'eclisse dell'agosto 1999 e la stessa decantata fine del millennio, l'attenzione nei confronti dell'astronomia risente senz'altro anche di un elemento ulteriore: pur senza dividerne presupposti, obiettivi e metodi, l'attrazione di cui sono oggetto astrologia, supposti influssi zodiacali ed oroscopi ha costituito infatti una sorta di alone pubblicitario intorno all'astronomia.

Senza costituire materie autonome di insegnamento nelle scuole, l'astronomia, l'astrofisica e la cosmologia costituiscono un terreno culturale vasto e variegato e - come si dice con termine forse abusato - interdisciplinare. È così parso naturale dar prosecuzione al programma divulgativo con un corso d'aggiornamento, che non si desse tanto l'obiettivo di spiegare "come" o "cosa" si deve insegnare, quanto quello di fornire degli stimoli, sia per quanto riguarda i contenuti, sia per quanto riguarda i metodi, con la descrizione di strumenti multimediali e di esempi di attività didattica "sul campo". La proposta, a lungo discussa, di un corso ampio, quasi "onnicomprensivo", rispetto ad una possibile impostazione più specialistica e mirata, discende dal volere innanzi tutto far cogliere le molte facce, i molti spazi della disciplina.

Ideato ed organizzato nel 1998, il primo ciclo di *Leggere il Cielo* ha incontrato una notevolissima partecipazione da parte degli insegnanti della Provincia di Bologna, così da indurci a riproporlo, articolato in due moduli, nel 1999-2000. L'attiva e partecipe presenza degli insegnanti è stata una componente fondamentale del corso, realizzando una continua dialettica tra astronomi e mediatori dell'astronomia nelle scuole al fine di predisporre uno strumento didattico quanto più possibile utile ed agile al tempo stesso; l'apporto degli insegnanti che hanno frequentato il corso ha costituito infatti un momento assai significativo di incontro tra il mondo della ricerca astronomica e quello della didattica scolastica, nel tentativo di realizzare un linguaggio comune per trasmettere una disciplina ai ragazzi e, magari, fargliela

amare.

Nel pubblicare oggi questo volume si è pensato quindi di fornire non solo una sorta di dispensa per chi aveva frequentato il corso stesso, ma uno strumento che potesse servire anche ad altri insegnanti per un aggiornamento sulle tematiche astronomiche. I singoli interventi pertanto, che rispecchiano le lezioni tenute durante il corso, sono stati concepiti all'interno di un discorso organico sull'astronomia, ma dotati ciascuno di autonomia relativamente all'argomento sviluppato.

Nel ringraziare chi ha preso parte a *Leggere il Cielo*, sia in veste di docente che di discente, nonché e i curatori di questo volume, mi auguro che il contatto stabilito con le scuole possa proseguire anche negli anni futuri, nel tentativo di avvicinare all'astronomia in modo corretto gli studenti, fin dalle scuole elementari e via via accompagnandoli nel corso dei loro studi.

¹Direttore del Dipartimento di astronomia della Università di Bologna e dell'Osservatorio Astronomico di Bologna

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

Introduzione

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lecture

Le prime testimonianze del pensiero umano e dei suoi legami con le cose del cielo appaiono molte migliaia di anni or sono: abbondano sepolcri, graffiti e sculture e si riconoscono simboli legati agli oggetti celesti incisi sulle rocce oltre a coscienti orientamenti solari in primitivi tumuli sepolcrali. Si può immaginare, da queste vaghe testimonianze, che l'astronomia sia stata tra le più antiche delle scienze, dal momento che l'attenzione del genere umano venne sicuramente attratta dalla grande scenografia astronomica fin dai tempi più remoti e, primo fra tutti, dal fenomeno più ovvio e appariscente, l'alternanza del giorno e della notte.

Prima dell'invenzione della scrittura, si conoscevano le fasi della Luna, il movimento diurno delle stelle, che presenta le costellazioni ogni notte con uno schema immutabile, la differente posizione in cielo del Sole nel corso dell'anno ed il periodico ritorno delle stagioni. Le prime nozioni di aritmetica aiutarono a "numerare" quegli eventi ricorrenti e le prime nozioni di cosmografia - intesa alla lettera, proprio come "descrizione delle cose del cielo" - nacquero certamente per venire incontro alle necessità pratiche di naviganti, nomadi e agricoltori. Da quei tempi molta strada è stata percorsa e l'astronomia occidentale ha conosciuto le gerarchie della cosmologia di Aristotele e le complicazioni di deferenti ed epicicli di Ipparco e Tolomeo, la descrizione alto-medievale del Cosmo come Casa di Dio e il riaffermarsi di una disciplina, l'astrologia, che pretendeva di comprendere le influenze dei corpi celesti sulle cose dell'Uomo, le critiche neoplatoniche e copernicane alle antiche descrizioni del Mondo e gli ultimi tentativi geocentrici di Tycho Brahe, la "rivoluzione scientifica" con Galilei, Keplero e Newton e le conferme osservative del sistema eliocentrico, l'accurata misurazione del Cosmo ottocentesca e la contemporanea lenta nascita dell'"astronomia fisica", il grande dibattito sulla nostra Galassia e sulle galassie, l'evoluzione dell'Universo e le teorie cosmologiche newtoniane e relativistiche, l'esplorazione dei pianeti e lo sbarco sulla Luna, l'osservazione nelle varie bande dello spettro elettromagnetico ed i satelliti astronomici, per arrivare, ai giorni nostri, ai grandi telescopi a terra e al Telescopio Spaziale, i quali hanno dilatato a dismisura i confini osservati dell'Universo e la comprensione della sua natura e della sua evoluzione.

Con questa premessa è facile, allora, capire come la storia dell'astronomia percorra completamente tutta la storia dell'uomo e del suo pensiero ed è altrettanto facile comprendere come descrivere questa storia in poche pagine sarebbe oltremodo riduttivo. Si rimanda, quindi, alla lettura dei testi consigliati in bibliografia la possibilità di affrontare il quadro complessivo delle vicende astronomiche e di approfondire, a seconda della preparazione e degli interessi personali di ciascuno, diversi argomenti. È, invece, intenzione di chi scrive utilizzare lo spazio disponibile per

cercare di indicare uno o più fili conduttori, all'interno della storia dell'astronomia, che possano servire come suggerimenti didattici agli insegnanti delle differenti discipline. Proprio perché l'interesse verso i fenomeni del cielo, come vedremo, è stato in molte epoche strettamente legato a numerose espressioni del pensiero umano, esso si presta ad un utilizzo multidisciplinare più di altre discipline scientifiche, favorendo in tal modo presso gli studenti la comprensione della complessità della nostra cultura attraverso i legami tra le varie discipline ed i vari periodi storici. Legami che, sovente, nella scuola non sono fortemente evidenziati, spesso per motivi dovuti anche ad esigenze di tempo e di programmi, rischiando in tal modo di favorire nello studente una conoscenza delle singole discipline parzialmente, quando non completamente, ristretto alla materia in esame.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

Gli inizi

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

Le osservazioni del regolare rivolgersi degli oggetti celesti, intese a definire dei cicli temporali utili alle comuni attività, insieme al tranquillizzante desiderio che le divinità celesti favorissero la consueta regolarità di tali moti, hanno certamente favorito due correnti di pensiero: da una parte, il tentativo razionale di comprendere l'esistenza di leggi naturali e immutabili, dall'altra, il tentativo mistico di collocare nei cieli esseri soprannaturali e onnipotenti che presiedessero a quelle leggi. Nella storia del pensiero umano - e, perché no, ancora oggi - si riconoscono queste due correnti di pensiero, a volte indissolubilmente legate, a volte drammaticamente separate.

Sono queste le idee che devono avere dato inizio ai primi miti e culti stellari, che hanno un posto importante nelle varie religioni primitive. Per quanto si torni indietro nella storia dell'uomo, infatti, si incontrano pensieri e concetti di tipo cosmogonico. In tutte le epoche, in tutte le latitudini e in ogni livello di civilizzazione, l'uomo si è interrogato sulle sue origini, sulla nascita della Terra e dei cieli, sulla comparsa della vita e, evento tristemente ricorrente, sulla sua ineluttabile fine. Essendo gli interessi guidati da qualcosa di più della semplice curiosità, i nostri progenitori tentarono di formulare risposte prima di essere perfino in grado di esprimere correttamente le domande. I legami tra certi fenomeni celesti e terrestri, in particolare tra il ciclo delle stagioni e le diverse altezze del Sole sull'orizzonte e i differenti punti della sua levata furono, così, conosciuti molto presto.

Accanto ai grandi fenomeni periodici, talora ne appaiono in cielo di eccezionali, come eclissi e comete, i quali vennero interpretati come i segni divini di propositi maligni, più spesso che benigni, in quanto interrompevano la quotidiana regolarità. Allo stesso modo il comportamento irregolare di alcuni corpi celesti (i pianeti, gli "astri erranti"), rispetto al ciclico rivolgersi delle stelle, fu trovato misterioso. Così si andava sviluppando un miscuglio di astronomia, astrolatria e religione, la prima spesso al servizio delle altre due.

Prima dell'età dei greci, nelle grandi civiltà di Mesopotamia, Egitto e Cina vedevano la luce cosmologie mitiche, assieme alla divisione del cielo in costellazioni e alla misura del tempo e dei movimenti delle stelle, la quale, nei suoi incerti inizi e per millenni, non ebbe altro ausilio strumentale che l'occhio umano. Allo scopo di misurare il tempo, durante il giorno e durante l'anno, poteva venir usato lo "gnomone", un bastone piantato nel terreno, che consentiva di osservare le variazioni della sua ombra prodotte dal differente percorso del Sole. Allo scopo di osservare le variazioni nell'altezza di stelle o gruppi di stelle ed il moto irregolare dei pianeti, venivano usati strumenti, spesso normali bastoni, forniti di fessure o mirini da usare quali traguardi, che consentissero di eseguire delle semplici triangolazioni per misurare angoli o distanze, utilizzati anche da agrimensori per definire le

dimensioni di un campo. Strumenti derivati da questi, con modifiche più o meno sostanziali, rimasero in uso per secoli e scomparvero solo con le invenzioni del cannocchiale e dell'orologio a pendolo. Con essi si realizzarono nel III secolo a.C. i primi cataloghi di stelle e le prime tavole di moti planetari, allo scopo di effettuare delle previsioni astronomiche e di formulare le prime teorie sul "Sistema del Mondo". Con strumenti come questi Ipparco prima e Tolomeo poi, tra il II secolo a.C. e il II d.C., costruirono quell'accurato sistema geometrico e matematico di epiclici e deferenti che, sotto il nome di Sistema tolemaico, fu portato alla perfezione dagli astronomi arabi e, infine, messo in discussione da Copernico.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

L'eredità delle civiltà mediterranee

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

La nascita della cultura greca lasciò il primo segno nella storia dell'astronomia occidentale e delle altre scienze naturali. Un nuovo modo di occuparsi della natura inizia, infatti, nel VI secolo a.C., all'interno della cosiddetta "scuola ionica". Scienza e religione furono separate e l'aspetto soprannaturale fu rimosso dalle spiegazioni dei fenomeni. Talete, i suoi discepoli e i suoi successori giunsero a un concetto del mondo dove gli dei giocavano un ruolo secondario. *"I primi animali* - affermava Anassimandro, con una intuizione decisamente evoluzionista, pur nella sua ingenuità - *furono prodotti nell'umidità e furono coperti di un tegumento villosa; col passare del tempo si diffusero sulla Terra. Quando l'involucro si aprì, cambiarono subito il loro modo di vivere; le creature viventi nacquero dall'elemento umido fatto evaporare dal Sole. Dapprima l'uomo somigliava ad un altro animale, cioè ad un pesce*". Collegare queste antiche idee all'evoluzionismo di Darwin e sottolineare le critiche che furono mosse allo scienziato britannico in pieno Ottocento, ma non ad Anassimandro oltre 2000 anni prima, e le censure che ancora oggi vengono esercitate sull'evoluzionismo in alcuni paesi può rendere evidente come le condanne di eresia siano sempre presenti, ma fortemente legate alle strutture sociali e culturali in cui vengono espresse e non alle idee che vengono condannate. In altre parole, le idee non sono eretiche in quanto tali, ma lo sono solo in funzione di coloro che le giudicano. Come è noto, gli "infiniti mondi" per i quali venne condannato Giordano Bruno nel 1600 e i moti della Terra poi forzatamente abiurati da Galileo erano gli stessi liberamente descritti da Nicolò Cusano, cardinale, vescovo e legato pontificio, ben due secoli prima!

Contemporaneamente alla fioritura della scuola ionica, nasceva nell'Italia meridionale la scuola di Pitagora. Fondata su una concezione matematica del mondo, reintroduceva concezioni "religiose" nello studio della natura, attribuendo proprietà geometriche mistiche a numeri e figure. Ambedue queste scuole di pensiero diedero vita alle grandi scoperte dell'antichità. In campo astronomico, in particolare, si devono segnalare il riconoscimento della Terra come un corpo celeste isolato nello spazio e perfettamente sferico, la direzione di caduta dei gravi diretta verso il centro della Terra, la teoria delle eclissi, le ingegnose costruzioni geometriche capaci di spiegare il moto apparente dei pianeti sulla sfera celeste, la prima rozza misura delle dimensioni della Terra, della Luna e del Sole e delle relative distanze.

Il comprendere come i primi tentativi razionali di osservazione della natura siano poi stati abbandonati e ripresi, per un breve intervallo, solo alcuni secoli più tardi nella scuola ellenistica, per risorgere a nuova vita dopo il Quattrocento, costituisce, senz'altro, un utile esercizio di studio interdisciplinare, che può uscire dai ristretti limiti della scienza per spaziare nella filosofia, nella religione, nella letteratura, nell'arte e, perché no, anche

nell'educazione civica. Può, infatti, suscitare un certo interesse il comprendere come, in molte epoche e non solo lontane, la religione di Stato - meglio, l'ideologia di Stato ai fini della propria sopravvivenza e autoconservazione, possa aver cercato di esercitare un'opera di oppressione intellettuale del tutto incompatibile con la diffusione e lo sviluppo della cultura, anche mediante la creazione di gruppi privilegiati che fossero i soli depositari delle conoscenze o dei mezzi per diffonderle. Vedi il caso della "casta" degli scribi nell'antico Egitto, il giuramento pitagorico di non diffondere le conoscenze al di fuori della cerchia degli adepti e, in tempi più vicini e con le debite differenze, il modo in cui le informazioni (non solo scientifiche) vengono selezionate e diffuse.

Tornando alle vicende astronomiche, il progredire delle osservazioni e del tentativo di comprenderle all'interno dei sistemi filosofici che si andavano sviluppando tre soli nomi per tutti: Democrito, Platone, Aristotele - faceva nascere quella descrizione del Cosmo che sarebbe andata sotto il nome di "sistema geocentrico". La gerarchizzazione e la sistematizzazione all'interno del primo reale tentativo di fornire una spiegazione fisica ai fenomeni, eseguito da Aristotele, e le convincenti descrizioni geometriche, in accordo con la realtà osservativa dei tempi, fornite da Ipparco e Tolomeo, finirono per far "considerare conclusa" l'avventura della conoscenza astronomica alle soglie del III secolo d.C. Tale brillante conclusione, pur nella sua completezza astronomica, fisica e metafisica, lasciò, tuttavia, agli astronomi *tre postulati* che bloccavano lo sviluppo della scienza celeste.

Primo tra tutti era la *concezione geocentrica* o, meglio, *geostatica*, che sosteneva che *la Terra*, assolutamente immobile, *occupava il centro dell'Universo*. Secondo postulato era la *divisione gerarchica dell'Universo in due mondi*: il *Cosmo*, un mondo di purezza dove nulla poteva mutare, mondo dell'etere, del "cristallino" e del moto circolare, e il *mondo sublunare*, un mondo di impurità e di mutamenti, mondo della Terra, dei quattro elementi e del moto rettilineo. L'ultimo postulato sosteneva che il *moto circolare uniforme*, o una combinazione di moti di questo tipo, fosse *l'unico moto possibile per i corpi celesti*.

Tali postulati cosmologici regnarono praticamente inalterati per secoli. Unica eccezione fu il sistema che era stato proposto da Aristarco di Samo nel III secolo a.C. Costui pose il Sole al centro dell'Universo, sviluppando forse un'antica idea pitagorica dell'esistenza di un fuoco centrale, e attribuì alla Terra un moto di rotazione sul suo asse ed uno di rivoluzione intorno al Sole, ponendo inoltre le stelle a una distanza infinitamente grande da noi. Le opinioni di Aristarco furono immediatamente respinte dai sostenitori delle ipotesi geostatiche. Fra tutti i denigratori di Aristarco, primi furono gli astrologi, che avevano fatto del sistema geocentrico il fondamento delle loro previsioni. Si arriva così al trionfo completo della dottrina di Tolomeo esposta nella *Sintassi Matematica*, restituita poi dagli arabi al mondo occidentale nel XII secolo, con il nome di *Almagesto* (cioè *al-meghiste*, il più grande).

In verità, dubbi sulla realtà fisica di un sistema geocentrico e geostatico rimasero nella storia del pensiero, pur se come labili tracce, e fu proprio seguendo questi dubbi che Copernico arriverà alla definizione di un sistema come quello di Aristarco.

"Occorrerà anche ricercare se il Mondo si aggiri intorno alla Terra immobile, o se la Terra si muova stando fisso il mondo. Dissero infatti alcuni che noi ci muoviamo a nostra insaputa e il levare e il tramonto degli astri non deve essere prodotto dal movimento del cielo, ma dal nostro. È cosa degna d'essere esaminata se vogliamo sapere come sono le cose: se la nostra sede sia immobile oppure velocissima: se Dio conduca in giro noi oppure l'Universo intorno a noi. ... Non

sono ancora 1500 anni che i Greci si sono occupati di astronomia. ... Verrà un tempo in cui, a forza di pazienti ricerche, si rivelerà ciò che oggi è nascosto. ... Verrà un tempo nel quale i nostri discendenti saranno sorpresi che noi abbiamo ignorato cose così ovvie". Quante volte sui nostri banchi, faticosamente immersi nel dizionario di latino, abbiamo tradotto Seneca. Perché non ci è mai stato commentato a fondo questo brano delle *Naturales Quaestiones*? Scritto nel I secolo d.C., con i suoi interrogativi, i suoi desideri di comprendere la realtà delle cose al di là dei postulati ben definiti, la sua consapevolezza della ignoranza dei tempi, le sue previsioni di un sicuro sviluppo della conoscenza, dimostra una impressionante modernità e ben si presta a sviluppare un discorso in grado di avvicinare più discipline.

La forte presenza di significati astronomici nella quotidianità, sia per scopi pratici, come si diceva, sia per scopi mistici e rituali, si può ritrovare in numerose espressioni del pensiero. Anche in questo caso, un utile esercizio di ricerca interdisciplinare può consentire di legare insieme pagine di storia e di letteratura, di arte e di filosofia, utilizzando come filo conduttore proprio i simboli, più o meno espliciti, legati alle cose del cielo.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

La cosmologia aristotelica e l'astronomia tolemaica "funzionarono", così, per quattordici secoli, senza variazioni di rilievo attraverso tutto il Medioevo, il quale spesso compare nell'immaginario collettivo come l'epoca dei "secoli bui": niente di più sbagliato!

La storia della scienza medievale è la storia di come è stata disseminata, assimilata, modificata e rinnovata la scienza precedente, sostanzialmente quella greca, nel suo passaggio dall'Impero bizantino (quanti sottolineano come la presenza di Bisanzio in Italia sia durata oltre mezzo millennio?) al mondo islamico e successivamente all'Occidente europeo. Questo fantastico viaggio culturale millenario ripercorre, dapprima, la graduale disintegrazione e trasformazione del mondo romano, le nuove forme di vita sociale ed economica, il trionfo del Cristianesimo, la crescita di un pensiero che, in opposizione al razionalismo ellenistico, portava a distaccarsi dalle cose terrene nell'aspettativa di un mondo spirituale, la diffusione di dottrine ermetiche, che rimasticavano al loro interno elementi di platonismo, pitagorismo e stoicismo, il tentativo di comprendere e spiegare la natura e l'universo attraverso l'intuizione e il misticismo.

Poi, con un fenomeno che per esigenze di periodizzazione storica si suole chiamare "la rinascita dell'anno Mille", inizia il viaggio attraverso i movimenti che hanno portato alla formazione dell'Europa moderna e dei modelli attuali di vita sociale e culturale dell'Occidente. Tutto questo avviene con la riscoperta del mondo antico, principalmente attraverso la mediazione islamica, e con l'elaborazione ed il rinnovamento delle idee di quel mondo. Tutto ciò, nel corso di pochi secoli, porterà al Rinascimento e alla rivoluzione scientifica. L'interpretazione e la grande sintesi del pensiero aristotelico in chiave cristiana, eseguite da Tommaso d'Aquino, favoriscono un atteggiamento razionale verso la comprensione della natura: "rivelazione e ragione procedono dalla stessa fonte e la rivelazione non si oppone alla ragione umana, la quale può, con diverso cammino, giungere alla verità". Inoltre, "questo nostro mondo è connesso in modo necessario ai movimenti del mondo superiore", da cui l'importanza dello studio e della conoscenza delle cose celesti, soprattutto attraverso la lettura che ne viene fatta dall'astrologia. Questa disciplina dalle antiche origini si parla della Mesopotamia e dell'inizio del primo millennio a.C. nata dalla commistione di forme di astrolatria, negromanzia e mantica, si riafferma in quest'epoca, grazie anche all'importanza che aveva assunto nel mondo islamico, e, attraverso la matematica, la geometria e la scienza naturale, cerca di spiegare in che modo i mutamenti del cielo causano quelli sulla Terra. La divisione tra coloro che vedono una naturale causalità nei giudizi degli astri e coloro, invece, che pretendono che una maggiore libertà individuale derivi proprio da una migliore conoscenza dei moti dei corpi celesti

- "gli astri sollecitano, ma non costringono" - percorre larga parte della storia del pensiero astronomico occidentale. La stessa Divina Commedia ne è un significativo esempio. L'opera di Dante, che peraltro aveva studiato anche astronomia nel suo soggiorno bolognese, si rifà, per la sua concezione dell'Universo, ad Aristotele, attraverso il commento di Tommaso al *De Coelo*, a *Li livres dou tresor* di Brunetto Latini, enciclopedia erudita di modesto livello del secolo precedente, e, soprattutto, alla traduzione di Gerardo di Cremona degli *Elementi di Astronomia* di al-Farghânî. Negli ultimi anni delle scuole superiori meriterebbe sicuramente molta attenzione, come esempio di collaborazione tra materie scientifiche ed umanistiche, una lettura della Divina Commedia in chiave astronomica, con tutta la astronomia e la astrologia, esplicite e simboliche, che vi si ritrovano, a specchio di una cultura diffusa nella quale la conoscenza del cielo era parte fondamentale.

Il lento declino dell'astrologia esplicitamente condannata da una bolla di Sisto V nel 1586 - venne poi favorito, sia dallo sviluppo degli studi medici, nei quali la previsione astrologica aveva svolto un ruolo fondamentale, sia dalla crescita delle idee neoplatoniche che concedevano vasta autonomia alle capacità intellettuali dell'uomo, centro dell'Universo. È da queste idee e dalla rielaborazione delle antiche cosmologie che viene attuata nel corso del Quattrocento, che fiorisce, all'interno del Rinascimento la cosiddetta "rivoluzione scientifica", della quale la pubblicazione, nel 1543, del *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Niccolò Copernico potrebbe essere considerato evento paradigmatico. Copernico venne quasi sicuramente stimolato ad una revisione critica di Tolomeo dai suoi studi bolognesi, avvenuti in un ambiente, appunto, neoplatonico, presso l'insegnante di Astronomia, Domenico Maria Novara, che lo aveva iniziato allo studio dell'astronomia e alle osservazioni astronomiche, osservazioni che da tempo mostravano come qualcosa nei vecchi sistemi non funzionasse a dovere. Il Sole venne posto al centro del Cosmo e la Terra fu condotta al rango di pianeta: dei tre postulati che avevano impedito lo sviluppo dell'astronomia, quello geocentrico fu esplicitamente rimosso, ma, nonostante così venisse implicitamente negata anche la dicotomia gerarchica dell'Universo, il principio del moto circolare, ne uscì rafforzato.

Da una parte, il moto della Terra intorno al Sole aveva aperto un nuovo campo di indagine per l'astronomia, grazie al quale Keplero scoprì le leggi che regolano i moti dei pianeti. Dall'altra parte, la cosmologia copernicana era fundamentalmente incompatibile con la fisica aristotelica. Copernico non aveva proposto una nuova fisica e questo creava una situazione nuova e dinamica: tutti coloro che volevano adottare la cosmologia copernicana erano costretti ad abbandonare la fisica aristotelica e a cercare di definirne una nuova, il che spiega anche le difficoltà incontrate dal nuovo sistema nel corso del Cinque e Seicento. Fu Galileo a comprendere la giusta direzione, avviando la costruzione di una nuova fisica, grazie alla quale il lavoro di Copernico veniva ad assumere un significato veramente rivoluzionario.

Soprattutto, nel cosmo copernicano vi è una relazione semplice e armonica tra l'ordine dei pianeti e i loro periodi di rivoluzione: quanto più un pianeta è lontano dal Sole tanto più lentamente percorre la sua orbita in cielo e fu proprio questa "armonia cosmica" che riuscì ad esprimere nella "terza legge dei moti planetari". Nonostante ciò, la discussione tra i due sistemi, quello geocentrico-geostatico e quello eliocentrico, rimase aperta per lungo tempo e non solo per motivi ideologici o religiosi, ma proprio per una impossibilità di dimostrare la superiorità di un sistema rispetto all'altro, che aveva funzionato per molti secoli consentendo previsioni e poggiandosi su di una fisica che non si riusciva ancora a modificare. Lo stesso Tycho Brahe, il primo astronomo a perfezionare gli strumenti degli antichi e a migliorare di gran lunga la precisione delle osservazioni,

preferì optare per un sistema intermedio e, da un punto di vista puramente cinematico, più pratico, che fu poi seguito anche per larga parte del Seicento, con le modifiche introdotte dal gesuita Giovan Battista Riccioli. La Terra veniva considerata immobile al centro dell'Universo con il Sole che le ruotava intorno, mentre Mercurio e Venere ruotavano intorno al Sole. Le orbite di Marte, Giove e Saturno comprendevano, infine, tutti gli altri pianeti, Terra compresa. Venivano un po' rimescolate le gerarchie, ma l'immobilità della Terra e la uniformità della circolarità dei moti erano ancora salve.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

Le nuove osservazioni

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

Incerta è l'origine dell'invenzione del cannocchiale, che probabilmente risale ad ambienti italiani della fine del Cinquecento, mentre è certo il nome di colui, Galileo Galilei, che per primo, tra la fine del 1609 e l'inizio del 1610, comprese la realtà fisica di ciò che stava osservando in cielo.

La Via Lattea fu risolta in milioni di stelle; gli apparvero gli anelli di Saturno pur se ancora incomprensibili e supposti essere due satelliti - e rari dettagli di quella che credeva essere la superficie di Giove; le misure delle ombre sulla Luna gli permisero di stimare l'altezza dei monti lunari; ma soprattutto osservò le fasi di Venere, impossibili nella descrizione tolemaica del Cosmo. Inoltre, con la scoperta dei satelliti di Giove, dimostrò in modo inequivocabile che non esisteva un unico centro del moto in tutto l'Universo, come sosteneva la fisica aristotelica. Sia che si preferisse la teoria eliocentrica o quella geocentrica, vi era oramai evidenza dell'esistenza di almeno due centri di rivoluzione: la Terra, attorno a cui ruota la Luna, e Giove, attorno a cui ruotano i quattro satelliti, dallo stesso Galilei chiamati "stelle Medicee". Partito da semplici ipotesi cinematiche, il sistema di Copernico stava divenendo una realtà fisica, ma, nel frattempo, stava anche per essere ampiamente superato. L'assioma del moto circolare uniforme era stato abolito, le leggi kepleriane dei moti planetari avevano aperto la via ad una nuova comprensione dei moti apparenti dei pianeti, gli esperimenti di Galileo sulla caduta dei gravi avevano portato alla "legge di inerzia", quelli sulle traiettorie dei proiettili, sviluppati poi da Torricelli e da Cartesio, portarono all'assioma che il moto naturale avviene per linea retta e non è circolare: la fisica aristotelica è costretta a scomparire.

La reazione della Chiesa cattolica fu estremamente dura: impegnata in quel rafforzamento dottrinale contro la riforma protestante che prese il nome di Controriforma, non poteva accettare alcun tipo di ipotesi che mettesse in discussione i testi sacri e le loro tradizionali interpretazioni. La scomunica e la condanna per eresia di Giordano Bruno, la diffida e poi il processo a Galileo, costretto ad abiurare, screditarono le tesi di Copernico, che furono solennemente condannate quasi novant'anni dopo la loro pubblicazione. L'Italia, che era stata la culla delle nuove idee umaniste e rinascimentali ed aveva prodotto ed ospitato generazioni di studiosi, scienziati e uomini di cultura, subisce un arresto nello sviluppo scientifico, particolarmente dell'astronomia e della fisica, che sul suo territorio era invece stato in precedenza molto intenso. Per quasi un secolo gli scienziati faticano ad esprimere, e soprattutto ad insegnare, la nuova fisica e la nuova astronomia nate con Copernico, Keplero e Galileo, sull'onda del rinnovamento quattrocentesco. Una scuola intera di artigiani esperti nella produzione di strumenti scientifici, tra i migliori d'Europa, finisce rapidamente e non riuscirà praticamente più a riprendersi, lasciando così ad altre nazioni il primato. E proprio in altre nazioni, principalmente Francia ed Inghilterra, proseguirà la

"rivoluzione scientifica", stimolata a favorire la crescita delle conoscenze scientifiche, anche per l'interesse dei sovrani impegnati in vaste espansioni coloniali, militari e politiche.

È questo un ulteriore esempio che si può portare a dimostrazione del fatto che protezionismo intellettuale e pretesa di guida culturale non favoriscono certo lo sviluppo del pensiero e come, quindi, uno studio della storia della scienza separato da quello delle vicende "sociali" nel loro complesso finisca, di conseguenza, per essere estremamente limitato.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

La nascita dell'astronomia moderna

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

Simultaneamente e indipendentemente, lo studio della Terra e quello dei corpi celesti stavano procedendo a passi da gigante. Keplero e Galileo ed i loro discepoli e seguaci avevano analizzato e notato fatti senza comprenderne a fondo le cause e senza riuscire ad unificare questi due nuovi campi di indagine, ma erano riusciti, tuttavia, a preparare il terreno per il lavoro di Newton.

Nella ossessiva ricerca di quei piccoli spostamenti apparenti delle stelle sulla volta celeste, che avrebbe dovuto portare alla definitiva comprensione della realtà del sistema del mondo, gli astronomi svilupparono grandemente le loro tecniche d'osservazione. Insieme alla formulazione della legge della Gravitazione universale di Newton, tale sviluppo strumentale soprattutto l'applicazione del micrometro ai cannocchiali e l'utilizzo del pendolo nella misura del tempo - portò alla nascita di una nuova disciplina: la "meccanica celeste", come venne chiamata da Laplace, consistente nell'applicazione delle leggi della meccanica universale allo studio dei moti e degli equilibri dei corpi celesti, i quali subiscono l'azione di forze di origine gravitazionale. Uno dei maggiori meriti di Newton è, forse, di aver fornito agli astronomi la possibilità di descrivere il Cosmo per mezzo di leggi indipendenti dall'ordine spirituale del mondo. L'ultimo ostacolo al progresso della astronomia era così rimosso! L'Universo non consisteva più di due parti: la stessa legge governava la caduta dei corpi terrestri e i moti dei corpi celesti. Per la prima volta l'astronomia aveva a disposizione uno strumento con il quale poter dedurre dallo stato di un sistema ad un determinato istante il suo stato negli istanti immediatamente successivi. Prima di Newton la scienza dei moti celesti aveva a disposizione solamente delle tavole numeriche legate a modelli geometrici arbitrari ed artificiali oppure a leggi empiriche come quelle di Keplero, in grado di descrivere solo i moti complessivi.

Nel corso del Settecento e della prima metà dell'Ottocento, in tutte le istituzioni astronomiche fiorirono programmi di osservazione il cui scopo era di contribuire alle misure di posizioni di stelle e pianeti. La scoperta dell'esistenza dell'*aberrazione annua della luce* delle stelle dovuta alla combinazione del moto della Terra intorno al Sole con la velocità finita della luce - ad opera di Bradley, nel 1727, e subito confermata da Manfredi a Bologna aveva fornito l'evidenza osservativa del sistema eliocentrico. Gli esperimenti effettuati nell'ultimo decennio del Settecento a Bologna da Giovan Battista Guglielmini, sulla deviazione dalla verticale dei gravi in caduta libera, forniscono, invece, la prova fisica della rotazione della Terra intorno al proprio asse. La determinazione, ad opera di Bessel all'inizio dell'Ottocento, della prima *parallasse stellare* - il piccolo spostamento apparente della posizione di una stella osservata da due punti diversi dell'orbita terrestre - costituì anche il primo significativo passo per conoscere le dimensioni dell'Universo.

Dalla costruzione dei primi grandi telescopi a specchio, alla raffinatezza meccanica dei cerchi meridiani, questo programma di "misura del Cosmo" favorisce lo sviluppo di strumenti completamente nuovi e di tecniche di osservazione sempre più accurate. Interi Osservatori vennero costruiti, il cui principale scopo era proprio di "misurare" le posizioni degli astri, realizzando estesi atlanti celesti ed esatte tavole astronomiche. La nascita della nuova tecnica fotografica, nella metà del XIX secolo, favorì i programmi che prevedevano la realizzazione di una mappa dettagliata del cielo e, quindi, di tutto l'Universo conosciuto. Le scoperte dei nuovi pianeti - Urano, ad opera di Herschel nel 1781, e Nettuno, ad opera di Galle e Le Verrier nel 1846 - segnano, soprattutto agli occhi dell'opinione pubblica dei tempi, il clamoroso risultato a cui era in grado di giungere l'astronomia coniugando la tecnica strumentale e osservativa con le leggi della meccanica celeste.

Con la Rivoluzione industriale - iniziata in Inghilterra alla fine del Settecento e ben presto diffusasi in Europa e negli Stati Uniti, durante tutto l'Ottocento e con il nuovo ordine sociale ed economico che stava sorgendo, le scienze divennero ben presto la base dello sviluppo tecnologico e la nuova borghesia assistette al loro sviluppo, convinta che il progresso tecnico e lo studio della natura fossero necessariamente buoni e benèfici per i propri interessi. Lo sviluppo dell'astronomia dimostrò che l'utilità pratica non era l'unico motivo di interesse nelle scienze: dopo la matematica, fu proprio l'astronomia ad essere considerata come il più ragguardevole campo di ricerca, in quanto scienza preposta allo studio dei meccanismi che governano la natura.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

Home

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

"Avendo oscurata la mia stanza e praticato un piccolo foro negli scuri della finestra, per lasciar filtrare una quantità conveniente di luce solare, posi il mio prisma in modo da poter vedere rifratta la luce sull'opposta parete. Fu all'inizio un vero piacere il vedere i colori intensi e vividi prodotti da quello." Così come aveva contribuito alla nascita della meccanica celeste, Newton si può considerare, con i suoi esperimenti sulla natura della luce, anche l'iniziatore della "fisica stellare", pur se questa disciplina dovrà attendere almeno un secolo per svilupparsi. Fino all'inizio dell'Ottocento, infatti, l'astronomia si era dedicata quasi interamente alla descrizione dei moti dei corpi celesti e all'indagine sulle cause di questi moti, mentre riguardo alla composizione chimica delle stelle e alle loro condizioni fisiche era costretta ad accontentarsi di semplici supposizioni, essendo ben salda l'idea che sarebbe stato impossibile conoscerle, essendo impossibile "andare fin lì e osservarle da vicino".

Numerosi scienziati, tuttavia, come Ångström, Foucault e Stokes si accorsero che una coppia di righe osservate, sin dal 1817, da Fraunhofer nello spettro del Sole - una delle prime applicazioni dello spettrografo - coincidevano in lunghezza d'onda con un'identica coppia di righe osservate in laboratorio nello spettro del sodio. Il piccolo passo che separava dal comprendere che il Sole contiene realmente del sodio fu compiuto immediatamente. Fu poi Kirchhoff a fondare le basi dell'analisi chimica dei corpi mediante la spettroscopia: dopo aver misurato le lunghezze d'onda di migliaia di righe nello spettro solare, egli si accorse che una gran quantità di quelle erano dovute a elementi come l'idrogeno, il sodio, il magnesio e il calcio. Verso la metà dell'Ottocento crebbe l'interesse verso le strutture del Sole, in particolare verso la sua atmosfera esterna, la cromosfera e la corona, visibili solo durante le eclissi totali, e nel 1868 furono ottenuti da Janssen i primi spettri della cromosfera durante un'eclissi. Un nuovo elemento venne prima osservato nello spettro solare, da cui il nome "elio", e solo dopo sulla Terra. Alla fine del secolo, mediante le leggi che descrivono l'emissione della radiazione, espresse da Kirchhoff, Boltzmann e Wien, si ottenne una stima ragionevole della temperatura della superficie solare, circa 6000 gradi kelvin. Dopo numerose ipotesi, anche stravaganti, si riuscì molto lentamente a comprendere l'origine dell'energia emessa dal Sole e la sua relazione con gli altri corpi del Sistema solare, compresi i primi tentativi di dare una spiegazione all'origine della vita e alla sua possibilità di esistenza anche in altri degli "infiniti mondi" preconizzati da Giordano Bruno, tema ancora oggi di grande attualità e oggetto di numerose ricerche. L'applicazione degli studi spettroscopici all'astronomia non fu limitata solo allo studio del Sole, ma anche alle stelle più brillanti, riconoscendovi la presenza di elementi simili a quelli che venivano trovati sul Sole e sulla Terra, e dando origine, così,

ai fondamenti della classificazione stellare, strumento che si rivelerà indispensabile per gli studi sull'evoluzione degli oggetti celesti. Fu, così, l'astronomia a dare un sostanziale contributo alla fisica e alla chimica ed i legami tra queste discipline divennero allora sempre più stretti: si può quindi a ragione cominciare a parlare di "astronomia fisica" o "astrofisica".

Anche in questo caso, gli sviluppi dell'astronomia possono contribuire ad uno studio di alcuni capitoli della fisica e della chimica secondo un percorso scolastico originale. L'analisi del cammino storico che aveva favorito quegli sviluppi, mostrando agli studenti le difficoltà che quei ricercatori dovettero risolvere e le domande che le nuove conoscenze presentavano costantemente, può sicuramente consentire una migliore comprensione delle leggi della fisica e della chimica scaturite dalle strettissime relazioni tra queste discipline e l'indagine astronomica.

Come l'aumentata precisione degli strumenti e delle tecniche d'osservazione aveva consentito di iniziare a costruire i primi scalini di quella scala delle distanze che porterà gli astronomi all'osservazione dei più lontani oggetti dell'Universo e all'intuizione, quindi, delle sue dimensioni, così la nuova tecnica spettroscopica consentirà di studiare la struttura fisica e la composizione chimica dei corpi celesti fino alla comprensione della loro natura, della loro evoluzione e dell'evoluzione dell'Universo tutto. Un ruolo importante nei primi passi di questa nuova disciplina venne svolto da astronomi italiani: in particolare Giovan Battista Donati, Lorenzo Respighi, Angelo Secchi, Pietro Tacchini. I loro studi e la *Società degli Spettroscopisti Italiani* - fondata nel 1871 dagli ultimi due (poi divenuta *Società Astronomica Italiana*) e le cui *Memorie* costituiscono la prima rivista al mondo interamente dedicata agli studi astronomici spettroscopici e, quindi, astrofisici - contribuirono a portare l'astronomia italiana ai vertici della ricerca internazionale.

La certezza di poter disporre di tecniche osservative e di ipotesi fisiche per poter finalmente indagare i confini più lontani dell'Universo e comprenderne l'origine e l'evoluzione favorirono, all'inizio del Novecento, un enorme sviluppo dell'astronomia, anche nei confronti dell'immagine che essa finiva per avere agli occhi dei non specialisti. La costruzione dei grandi telescopi riflettori, lo sviluppo della fotografia e delle nuove tecniche elettroniche, la nascita della radioastronomia e le prime osservazioni al di fuori dalla nostra atmosfera consentiranno agli astronomi di proseguire in quell'opera, iniziata dagli antichi filosofi naturali greci, di "salvare i fatti", inquadrando le nuove osservazioni nelle nuove teorie fisiche - da Planck ad Einstein e alle altre successive - e da queste traendo nuovi stimoli per sempre migliori strumenti che consentissero sempre più accurate osservazioni.

L'osservazione degli spettri delle "nebulose" e la loro corretta interpretazione al termine di quello che è passato alla storia come "il grande dibattito" avvenuto agli inizi del Novecento, dimostrò una estensione dell'Universo osservato al di là di ogni limite anche solo immaginabile pochi decenni prima. La scoperta della presenza di uno spostamento verso il rosso nelle righe spettrali delle galassie consentì di misurarne la velocità di allontanamento da noi: proprio come l'abbassamento di tono del fischio di un treno rivela che questo si sta allontanando, così, per lo stesso effetto Doppler, lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali dimostra che un oggetto celeste si sta allontanando da noi. L'Universo non era più un oggetto immobile, eterno ed immutabile, bensì qualcosa di tremendamente dinamico, e la Terra, che a fatica Aristotele e Tolomeo e la Congregazione dell'Indice avevano cercato di mantenere immobile al centro del Creato e che con altrettanta fatica Copernico, Galileo, Keplero, Newton e tanti altri avevano cercato di rimuovere dal centro del Sistema solare, ora veniva sempre più spostata ai margini di una galassia, la nostra Via Lattea, non

particolarmente significativa, né come composizione né come posizione, rispetto alle altre galassie che si vedevano costituire l'Universo osservato. La stessa differenza tra i concetti di "universo osservato", "universo osservabile" e "universo non osservabile", oltre alla possibilità teorica di "altri universi" e alla comprensione che l'osservazione dell'universo lontano ci spostava non solo nello spazio, ma anche nel tempo, introduceva e non solo tra gli specialisti una differente concezione dell'uomo e del suo posto nella natura. Benché osservativamente, e anche razionalmente, oramai da un paio di secoli si rifuggisse sempre più dall'antropocentrismo, tuttavia, queste idee non sono mai state rimosse del tutto dalla mente umana, che, evidentemente, si rifiuta di pensarsi "insignificante" in un pianeta "insignificante", intorno ad una stella "insignificante", in una galassia "insignificante" e forse anche in un universo "insignificante"! Sono così rinate, negli ultimi tempi, idee cosmologiche, basate su ipotesi fisiche e non più su sillogismi aristotelici, che, in qualche modo tenderebbero a riportare l'Uomo al centro del Cosmo, in una visione più o meno finalista della sua creazione. Ma questo fa parte oramai della cosmologia moderna e come tale verrà trattato in altre parti di questo corso. Qui sia consentito solo l'accenno a come anche solo un rapido percorso storico delle idee cosmologiche può consentire di far risaltare nel pensiero umano, al di là delle certezze delle scoperte scientifiche, una terribile insicurezza riguardo al proprio ruolo nell'universo ed una insoddisfazione perenne a tutti i tentativi di dare delle risposte alle antiche domande: "chi siamo?", "dove siamo?" e, soprattutto, "perché ci siamo?".

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

Oggi

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

La mancanza di spazio, cui si accennava all'inizio non consente di arrivare a delineare il percorso storico dell'astronomia di questi ultimi decenni, se non per sottolineare, da una parte, l'importanza che hanno sempre più le nuove tecnologie, che consentono la realizzazione di telescopi e radiotelescopi di grandi dimensioni, di satelliti per l'osservazione fuori dalla nostra atmosfera e in differenti regioni dello spettro elettromagnetico, di sonde per l'esplorazione del Sistema solare, di strumenti di calcolo sempre più potenti e veloci e in istantanea comunicazione; dall'altra parte, le relazioni sempre più strette tra l'astronomia e la fisica atomica e nucleare, che considerano l'universo come l'ambiente ideale per "realizzare esperimenti" con energie e tempi-scala impensabili sulla Terra, ai fini di migliorare la conoscenza dei processi di produzione dell'energia e delle possibilità di controllo a scopi pratici.

Nonostante l'astronomia, come si diceva, abbia fatto passi da gigante nel XX secolo, tuttavia, i problemi che oggi si trova a dover affrontare sono ancora estremamente vasti e assolutamente non di secondo ordine. Come si scoprì l'espansione dell'Universo osservando lo spostamento verso il rosso della radiazione emessa dalle galassie, aprendo così la strada alla formulazione della teoria del *Big Bang*, la cui prima verifica sperimentale si ebbe osservando la radiazione di fondo a microonde, così oggi gran parte della ricerca astronomica è rivolta a rispondere ad alcune importanti domande riguardo alla definitiva comprensione dell'Universo:

- perché la radiazione di fondo è apparentemente così uniforme?
- quanta materia è presente nell'Universo, dove si trova e di che cosa è fatta e come si può scoprire quel 90 per cento di "massa mancante" prevista teoricamente?
- quando si sono formate le galassie e come, dal momento che a oltre 10 miliardi di anni luce si sono scoperte centinaia di quasar, mentre a quella distanza si dovrebbero trovare poche galassie, impiegando queste numerosi miliardi di anni per formarsi?
- qual è l'età dell'Universo: 13 miliardi di anni, come hanno dedotto i cosmologi estrapolando a ritroso la velocità di espansione o oltre 15 miliardi di anni, come sembra derivare dallo studio delle stelle più vecchie che si riescono ad osservare negli ammassi globulari?

Cercare di rispondere ai quesiti lasciati ancora aperti dalla ricerca astronomica (solo alcuni dei quali sono stati ricordati) e bilanciare correttamente tutti gli aspetti legati allo sviluppo tecnologico, alle collaborazioni internazionali e al reperimento delle risorse economiche necessarie non è facile e sarà questo uno dei problemi principali del millennio che sta per iniziare. Il millennio che si concludendo - in particolare, l'ultimo secolo - avendo già dato il suo contributo nell'ampliare enormemente la conoscenza del nostro Universo.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

...e domani?

Introduzione

Gli inizi

L'eredità delle civiltà mediterranee

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

Le nuove osservazioni

La nascita dell'astronomia moderna

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

Oggi

...e domani?

Lettere

Nonostante gli enormi sviluppi della conoscenza, non solo astronomica, che, molto rapidamente e sinteticamente, abbiamo percorso in queste pagine, si deve, tuttavia, riconoscere come, proprio sul terminare di questo millennio, la scienza abbia perso la sua battaglia nei confronti dell'immagine che ha di essa il grande pubblico. Alla fine dell'Ottocento, come si è visto, la gente si rivolgeva alla scienza con atteggiamento fiducioso, nella speranza che solo dalla scienza potesse venire un mondo nuovo e migliore, nel quale l'umanità venisse sottratta alla miseria, alle sopraffazioni, alla guerra: proporre la storia della scienza ed i suoi successi al pubblico e divulgarne i contenuti era, di conseguenza, un'impresa educativa e morale. Un atteggiamento che derivava già dalle idee illuministe del secolo precedente. D'Alembert aveva espresso proprio questi concetti sin dal *Discours préliminaire* a l'*Encyclopédie*, sostenendo come la storia della scienza e della tecnica serva egregiamente ad *"illustrare la marcia dello spirito umano dalle tenebre originarie della credulità e della superstizione fino al regno radioso della ragione"*.

Le due grandi guerre della prima metà di questo secolo, le numerose altre, piccole, ma non meno distruttive, che si sono susseguite e che si svolgono tuttora, l'incubo della "bomba", i problemi dell'inquinamento nelle nazioni in fase di sviluppo, la fame nei paesi sottosviluppati e tante altre miserie e sopraffazioni ancora in atto hanno finito per far dimenticare come tutto questo sarebbe stato senz'altro peggiore senza le enormi conquiste scientifiche e senza lo sviluppo tecnologico che ne è derivato. Anzi, sembra quasi che la colpa principale di tutto questo sia da attribuirsi proprio alla tecnologia e alla sua madre, la scienza. Non si vuole certo sostenere la completa innocenza della scienza e degli scienziati, ma nell'immaginario collettivo oramai, dopo la perdita della fiducia ottocentesca, è come stata espressa una condanna di piena colpevolezza.

Le difficoltà, inoltre, insite nella comprensione di larga parte della tecnologia che ci circonda, ce la fanno apparire come ammantata di mistero: è tanto misteriosa l'accensione della luce quando si torna a casa quanto vedere in televisione la trasmissione in diretta di un avvenimento lontano. Tutto questo, unito alla grande quantità di problemi di tutti i tipi non ancora risolti, ha fatto perdere completamente la fiducia in un mondo "nuovo e migliore", "regno radioso della ragione". Ecco allora come, di fronte al mondo incognito e impreveduto che ci attende, l'uomo si rivolge ai miti, proprio come era successo millenni or sono, all'alba della civiltà. Miti che non sono più quello dell'eroe in grado di combattere il drago o del santo che rifugge dalle mille tentazioni del demonio e che, per le loro gesta umane, assurgevano nel cielo delle costellazioni o in quello dell'Empireo, ma miti, invece, che pretendono di far arrivare dall'esterno all'uomo stesso un futuro migliore e la salvezza dalle miserie di tutti i giorni: dagli extraterrestri, dal paranormale, da nuove forme

e nuovi modi di credenze religiose, da nuovi riti, dalla *new age*. E in tutto questo non c'è più posto per la scienza e neanche per la conoscenza in senso generale. Insieme al rifiorire, quindi, di forme di integralismo e di fondamentalismo, che forniscono maggiore sicurezza per l'ansia ed il panico che ci assalgono, c'è il rischio di creare nuovamente dei gruppi chiusi, delle "caste", dove si possono radunare i pochi adepti ancora in grado di parlare criticamente di scienza e di portare avanti, nel chiuso dei loro "misteriosi" centri di ricerca, gli sviluppi della tecnologia. Nel frattempo il resto della gente "comune" dimentica la tavola pitagorica. Viene in mente un vecchio racconto di fantascienza, nel quale veniva visto con molto sospetto un personaggio che era in grado di risolvere somme, sottrazioni e persino moltiplicazioni e divisioni, con il solo uso di carta e matita.

Sono questi i motivi per i quali sostenevamo essersi persa, oggi, la battaglia per la diffusione della scienza. Rimane la speranza che non si sia persa la guerra e tale speranza non può che fondarsi su quelle sedi, quelle istituzioni e quelle persone che sono preposte, per compito e vocazione, all'illustrazione della conoscenza: la scuola e gli insegnanti. È lì che può essere ancora vinta questa guerra, senza tentare di creare il mito della scienza in grado di risolvere tutti i problemi, ma cercando di produrre cultura e, soprattutto, fornire strumenti critici nei confronti di quella stessa cultura. Importante quanto la conoscenza della scienza è la conoscenza del metodo critico che ha portato al progresso scientifico. La storia dell'umanità, di cui la scienza non è che una parte e l'astronomia una più piccola ancora, ha insegnato che è solo così che si può procedere verso un mondo "nuovo" e se questo mondo sarà anche migliore dipenderà quindi solo dal nostro impegno di oggi.

Brevi cenni di storia della astronomia

Fabrizio Bònoli

Lettere

Introduzione

AA. VV., *Storia delle scienze. Vol. I: Gli strumenti, Vol. II: Fisica e Astronomia*, Einaudi, Torino, 1991, 1992;

Gli inizi

C.A. Böhm, *Le chiavi del cosmo: Storia dell'astronomia dalla meccanica celeste al Big Bang*, Muzzio, Padova, 1989;

L'eredità delle civiltà mediterranee

B. Farrington, *Scienza e politica nel mondo antico*, Feltrinelli, Milano, 1982;

La strada verso la "rivoluzione scientifica"

F. Francescato, *Le scoperte dell'astronomia: cronologia e protagonisti*, Muzzio, Padova, 1998;

Le nuove osservazioni

G.C. Garfagnini, *Cosmologie medievali*, Loescher, Torino, 1978;

La nascita dell'astronomia moderna

A. Köstler, *I sonnambuli. Storia delle concezioni dell'Universo*, Jaca Book, Milano, 1990;

Dai primordi dell'astrofisica all'attualità

F.F. Repellini, *Cosmologie greche*, Loescher, Torino, 1980;

G. Romano, *I Maya e il cielo: astronomia, cosmologia e matematica maya*, CLEUP, Padova, 1999;

S. Sambursky, *Il mondo fisico dei Greci*, Feltrinelli, Milano, 1973;

Oggi

G. Schiaparelli, *Scritti sulla storia della Astronomia antica* (3 voll.), Mimesis, Milano 1997 (ristampa anastatica dell'edizione Zanichelli 1925);

...e domani?

W.H. Jr. Stiebing, *Antichi astronauti. Dalle pile di Babilonia alle piste di Nazca*, Avverbi, Roma, 1998;

Lettere

J-P. Verdet, *Storia dell'Astronomia*, Longanesi, Milano, 1995;

C. Walker, *L'astronomia prima del telescopio*, Dedalo, Bari, 1997.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole **Prologo**

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lettere

"L'intuizione e la rappresentazione della modalità secondo la quale i singoli eventi si susseguono ...; intuizione peraltro condizionata da fattori ambientali ... e psicologici ... e diversificata storicamente da cultura a cultura", così è definito il tempo nel dizionario Treccani; ma anche "Successione di istanti ... capace di essere suddivisa, misurata e distinta ...; è in genere in questa accezione ... che viene considerato il tempo in fisica". Due "tempi" sembrano dunque sussistere, quello della fisica (detto anche obiettivo, o reale) e quello della psicologia (detto anche soggettivo, o fenomenico). Si presuppone in genere che soltanto il tempo della fisica sia reale, e che il tempo soggettivo sia una "brutta copia" di quello oggettivo: come la percezione del calore è relativa e la temperatura "vera" è data dal termometro, così gli intervalli temporali "veri" sono quelli misurati dall'orologio. In realtà nessuno sa cosa sia il tempo. Alcuni lo ritengono un fatto di natura, con il soggetto immobile spettatore di un divenire esterno reale; altri considerano il tempo un fatto dello spirito, tramite il quale il soggetto esplora un mondo sostanzialmente immobile. Con una certa dose di ironia, il filosofo inglese Berkeley (1685-1753) affermò che *"tempo, luogo e moto, presi in particolare e nel concreto sono ciò che ognuno sa, ma dopo essere passati per le mani di un metafisico divengono troppo astratti e sottili per essere compresi da uomini di senso comune"*. D'altra parte neanche il tempo dei fisici è esente da contraddizioni. Si ritiene che la freccia del tempo punti nella direzione indicata dai processi *irreversibili* che introducono maggior *disordine*, come l'evaporazione del profumo che abbandona spontaneamente la boccetta che lo contiene senza farvi più ritorno. Non vi è tuttavia accordo sulle origini di tale irreversibilità né sulle cause che, in apparente contraddizione con la freccia temporale, permettono la formazione spontanea di strutture sempre più complesse - e dunque più *ordinate* - quali, ad esempio, gli organismi viventi.

Noi non tratteremo direttamente né del tempo dei fisici né di quello dei filosofi, ma della concezione che del tempo ebbero gli uomini nel corso dei millenni. Tale concezione, lungi dall'essere un contenitore inerte delle azioni umane, influenzò queste azioni, ed esse, di riflesso, modificarono la percezione del tempo in un continuo interscambio che portò l'uomo, nel corso della sua storia, a trasformare la sua visione della natura da un cosmo ciclico ed immutabile ad un mondo in continua evoluzione.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole Il tempo degli antichi...

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lecture

Ne *Il mito dell'eterno ritorno* l'antropologo e storico delle religioni romeno Mircea Eliade ha sostenuto che, nella vita del genere umano, i popoli si ribellano contro la nozione storica di tempo e si sono aggrappati per lo più all'idea del ciclo temporale, nel quale il passato è futuro, non esiste una vera storia, e l'umanità si dispone a rinascere e a rigenerarsi. Si può cercare sollievo al tempo storico compiendo riti religiosi, come la ripetizione di frasi o gesti che ricreano simbolicamente gli eventi originari. Fuori dall'Occidente, Cinesi, Indiani, Buddisti e civiltà mesoamericane, tutti considerano un tempo che si rinnova periodicamente. In Occidente, non c'è dubbio che il mito egiziano di Osiride, simbolo del sole nascente, fatto a pezzi dal fratello Seth e resuscitato per opera di Iside sua sposa, sia ispirato alle inondazioni del Nilo che rivitalizzavano ciclicamente il terreno. In Osiride si identificava il faraone, che si assicurava così l'immortalità.

Anche la Mesopotamia veniva inondata dal Tigri e dall'Eufrate, ma si trattava, in questo caso, di eventi disastrosi ed erratici. Per poter prevedere ed avere un qualche controllo sugli eventi avversi, i Babilonesi rivolsero l'attenzione al cielo. Il moto periodico dei corpi celesti testimoniava infatti di un ordine cosmico rassicurante a cui fare riferimento. Ad ogni evento astronomico venne associata una controparte terrena, dando origine così all'astrologia.

Non è possibile, nell'antica Grecia, isolare un'unica concezione del tempo. La civiltà greca vide nascere i primi filosofi, molti dei quali portatori di una visione personale del tempo. Eraclito, sulla base dei continui mutamenti del mondo circostante, riteneva il tempo essenziale nel regolare il perenne cambiamento derivante dall'antagonismo degli opposti quali freddo e caldo, secco e umido, e così via. Parmenide e Platone (427-347 a.C.), al contrario, sottolinearono l'inconsistenza del tempo, un'illusione derivante dal mutevole mondo dell'apparenza contrapposto alla realtà rivelata dalla ragione, fissa e atemporale. Zenone di Elea, un discepolo di Parmenide, architettò diversi paradossi, tra cui quello celeberrimo di Achille e la tartaruga, per evidenziare le contraddizioni a cui si va incontro nell'attribuire realtà al tempo. Per Aristotele (384-322 a.C.) il tempo è identificato dal processo di numerazione degli eventi associato alla nostra percezione del prima e del dopo. Rimane aperto il problema della realtà del tempo nel caso non vi sia un soggetto a percepirlo (su questo tema dell'autoconsapevolezza Aristotele sembra aver anticipato di oltre duemila anni i moderni psicologi).

Anche nella Roma del II e III secolo d.C. coesistono diverse concezioni del tempo derivanti dal fiorire di nuove religioni. Gli Stoici, ad esempio, ritenevano che, una volta che Luna, stelle e pianeti avessero ripreso sulla sfera celeste la stessa posizione relativa iniziale, la storia si sarebbe ripetuta,

sarebbero rinati gli stessi uomini, costruite le stesse città, ecc. Ma a prevalere fu infine la concezione ebraico-cristiana di una storia con una direzione, volta ad un fine, la storia della salvezza e del compimento del disegno divino. Questa concezione lineare della storia era destinata a rivoluzionare la percezione del tempo e la visione del mondo in Occidente. Tuttavia tale rivoluzione si sarebbe compiuta pienamente solo dopo molti secoli. Nella vita quotidiana vigeva invece una certa indifferenza verso il concetto di tempo originata essenzialmente dall'incapacità di misurarlo. Infatti i metodi pratici per la misurazione del tempo erano ancora quelli ereditati dagli Egiziani, e non cambiarono fino alla fine del XIII secolo. Gli egiziani calibravano i quadranti delle meridiane con dodici suddivisioni ineguali, in modo da compensare la diversa lunghezza dell'ombra dello gnomone (lasta della meridiana) in periodi diversi della giornata. L'intervallo diurno era dunque suddiviso in dodici ore, ed altre dodici coprivano l'arco della notte. Pertanto la lunghezza delle ore del giorno e della notte differivano tra loro e variavano durante l'anno. I Romani non avevano dimestichezza né interesse verso la misurazione delle ore. La prima meridiana pubblica arrivò a Roma da Catania nel 264 a.C. e segnò per oltre un secolo l'ora sbagliata, giacché i Romani ignoravano la necessità di correzioni di taratura dipendenti dalla latitudine. Le ore notturne venivano misurate mediante orologi ad acqua, in cui il livello del liquido variava uniformemente per riempimento o svuotamento. Solo in pochi casi, quali, ad esempio, lo scandire dei turni di guardia, questi orologi venivano incontro ad esigenze reali; per il resto essi rappresentavano una curiosità, uno status symbol ad appannaggio dei più ricchi. Contrariamente alle meridiane, gli orologi ad acqua avrebbero potuto permettere agli antichi di misurare ore sempre uguali che scandiscono il passaggio di un tempo uniforme. Ma questo non accadde. Al contrario, gli orologi ad acqua recavano segni di calibrazione distanziati in modo diseguale per simulare il tempo vero delle meridiane. I tempi non erano maturi per astrarre il tempo dalla realtà del passaggio giornaliero del Sole. Questo stato di cose ebbe termine alla fine del 1200, grazie ad un'invenzione destinata a sovvertire profondamente sia la vita quotidiana e sociale, sia la visione del mondo dell'uomo occidentale.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole ...e quello dei moderni

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lettere

Pare che l'orologio meccanico sia stato inventato alla fine del XIII secolo, ma non sappiamo dove, né da chi. È tuttavia ragionevole credere che esso sia stato realizzato all'interno di qualche monastero, perché in quel tempo gli uomini di chiesa erano gli unici ad avere un reale interesse nella misura del tempo, dovendo scandire la giornata in fasi di preghiera e di lavoro. Inoltre, solo nei monasteri era allora possibile trovare persone culturalmente in grado di pervenire alla costruzione di un oggetto di così alto contenuto tecnologico.

I primi orologi non avevano lancette e segnalavano l'ora tramite i rintocchi di una campana. Gli orologi erano posti in cima ad una torre sia per motivi di ingombro che per avere uno spazio sufficiente lungo cui far scendere il peso che comunicava il moto ai ruotismi. Mancavano le lancette e l'ora era annunciata tramite i rintocchi di una campana. L'errore di 15 minuti al giorno era decisamente elevato per gli attuali standard, ma assolutamente inessenziale per i ritmi della vita quotidiana di allora. Nel Seicento, tuttavia, si ottenne un balzo nella precisione passando ad un errore di 10 secondi grazie all'applicazione del pendolo, il cui isocronismo era stato scoperto da Galileo (1564-1642).

La diffusione degli orologi pubblici in Europa occidentale fu alquanto rapida e portò all'adozione di un'ora uniforme di 60 minuti di cui si avvalsero principalmente le industrie, adottandola come unità di tempo lavorativo. Gli operai nelle fabbriche ed i professori nelle scuole, così come molti professionisti, cominciarono ad andare al lavoro in orari precisi. Sapere l'ora divenne un'esigenza sempre più stringente ed incentivò la produzione di orologi trasportabili da poter mettere in casa. Con l'introduzione della molla come forza di trascinamento si giunse, già nel Cinquecento, alla realizzazione di orologi sufficientemente piccoli da poter essere portati in una tasca. Si dovette però attendere la fine della I guerra mondiale per assistere alla diffusione dell'orologio da polso. Gli uomini ritenevano infatti poco virile adornare il proprio braccio, sia pure con uno strumento tecnologico. Ma per esigenze belliche e pratiche l'esercito degli Stati Uniti dotò i suoi soldati di orologi da polso, e il tabù venne infranto.

Si è giunti così all'attuale asservimento nei confronti dell'orologio. Misurare il tempo che passa è un'ossessione che pervade ogni attività umana, ed anche i record più ottusi assurgono a dignità sportiva quando realizzati in competizione con il cronometro (maggior numero di salsicce mangiate in un minuto, e amenità del genere). La ricerca di una misura sempre più precisa del tempo appare quasi maniacale, ma è in realtà resa necessaria dall'utilizzo delle attuali tecnologie (le modalità di funzionamento dei calcolatori si valutano sulla scala dei milionesimi di secondo). Grazie agli orologi atomici siamo oggi giunti a misurare il tempo con un errore di 1 secondo in tre milioni di

anni. Una precisione davvero straordinaria per misurare qualcosa che per metà dei filosofi non esiste!

Ma più che i riflessi nella vita quotidiana e sociale, a noi interessa capire quale fu l'impatto dell'orologio meccanico nella visione scientifica del mondo. In effetti esso svincolò il tempo dal ciclico alternarsi dei giorni e delle stagioni, e contribuì in maniera essenziale alla percezione da parte dell'uomo di un tempo lineare ed uniforme. Fu grazie all'orologio che Isaac Newton (1642-1725) poté scrivere nei *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*: "*Il tempo, per sua natura, scorre uniformemente, senza alcuna relazione con l'esterno*". L'utilizzo di orologi nello studio dei moti celesti, e il successo della fisica newtoniana nel prevedere questi moti, generarono l'idea meccanicistica che il cosmo stesso fosse assimilabile ad un grande orologio i cui movimenti potevano essere previsti, una volta data la carica iniziale. A Napoleone che gli chiedeva che fine avesse fatto Dio, il fisico e matematico Pierre Simon Laplace (1749-1827) rispose che si trattava di "*un'ipotesi non necessaria*". Lo studio delle cause, e dello sviluppo temporale degli effetti da esse generati, portò l'uomo a volgere lo sguardo al suo passato ed ad interrogarsi sulle proprie origini e su quelle del pianeta su cui vive. Da una cosmogonia statica e atemporale si giunse all'attuale concetto di evoluzione. Ma il percorso compiuto non sempre fu lineare, e vecchi pregiudizi contrastarono nuove intuizioni rendendo laboriosa l'introduzione di un *passato* e di un *futuro* nella storia dell'uomo e dell'universo. Vale la pena considerare più da vicino questo percorso.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole **Il tempo dei naturalisti ...**

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lecture

La domanda "*quanto è vecchia la Terra?*", che a noi appare oggi così naturale, non venne presa in considerazione da nessuna delle civiltà del passato, dai Babilonesi agli Egiziani, ai Greci e ai Romani. I Greci, ad esempio, erano ben consci che gli eventi naturali si originavano da meccanismi fisici e non da miti (si pensi all'atomismo di Democrito e Leucippo); essi avevano anche notato che la forma delle coste andava continuamente cambiando ad opera dell'incessante erosione delle onde. Ma queste osservazioni ebbero scarso impatto. L'uomo del passato, pienamente immerso in una natura che si rinnova regolarmente, rimase legato alla concezione di un tempo ciclico in cui tutto veniva periodicamente riproposto. Chiedersi quale fosse l'età della Terra all'interno di un ciclo destinato a ripetersi in eterno rappresentava una curiosità priva di reale interesse, e questo spiega la sostanziale indifferenza degli antichi per questo quesito. In questo clima culturale i fossili marini ritrovati sulle pendici delle montagne vennero in genere considerati stranezze di scarso interesse. Anassimandro, Pitagora ed Erodoto in Grecia, e successivamente Leonardo da Vinci (1452-1519), avevano correttamente dedotto che quelle montagne in passato dovevano trovarsi sott'acqua. Ma si trattava di voci isolate, e per tutto il Medioevo circolarono fantasiose interpretazioni riguardo tali fossili. Alcuni credevano che fossero prototipi difettosi di organismi che il Creatore aveva rinunciato a portare in vita. Altri pensavano che rappresentassero il vano tentativo di Satana di emulare l'azione creatrice di Dio. Altri ancora ritenevano che i fossili fossero stati trascinati sulle montagne dall'azione del Diluvio Universale. Ancora nel '700 un personaggio come Voltaire (1694-1778) poteva in tutta serietà avanzare l'ipotesi che i fossili fossero stati messi a bella posta da qualcuno.

Finalmente, nel XVII secolo, grazie anche alla recente invenzione del microscopio, fu possibile spiegare come la sostanza organica in un fossile possa essere lentamente rimpiazzata da sostanze inorganiche. La mineralizzazione di reperti organici mostrava che le rocce non erano sempre state solide, ma in passato dovevano avere avuto la consistenza della melma per potersi infiltrare all'interno degli scheletri animali. Questa melma trasportata dalle correnti marine si accumula in strati orizzontali e solidifica in rocce sedimentarie a causa della pressione. Strati rocciosi diversi, contenenti ognuno fossili specifici, hanno dunque età diverse, il successivo essendo più giovane del precedente. Le età implicate, benché non quantificabili, dovevano certamente essere superiori a quelle che potevano dedursi dalla Bibbia. Basandosi infatti sulla genealogia dei personaggi biblici, diversi studiosi (Lutero e Newton, tra gli altri) fissarono la nascita della Terra intorno al 4000 a.C. I seimila anni resi così disponibili erano decisamente pochi. Si ricorse pertanto alla teoria del catastrofismo con cui si ipotizzavano una serie di cataclismi a livello planetario in cui alluvioni e terremoti, causando violenti spostamenti di terra

e di mari, erano in grado di produrre nel breve tempo a disposizione le discontinuità osservate tra i diversi strati di roccia. A questo punto, però, era chiaro che un unico Diluvio non era più sufficiente, e le discrepanze con la Bibbia, che si era tentato di lasciare fuori dalla porta, rientravano dalla finestra. Le implicazioni derivanti dallo studio dei fossili erano dunque di portata tale da non venire riconosciute ed accettate nell'immediato. Per circa un secolo si continuò a catalogare rocce e fossili accantonando il problema della datazione.

Fu James Hutton (1726-1797), un geologo scozzese, a gettare le basi del metamorfismo, ovvero lo studio dei processi di trasformazione delle rocce. Come Copernico si liberò in un colpo della complicata teoria degli epicicli ed interpretò le traiettorie dei pianeti spostando il centro del sistema solare dalla Terra al Sole, così Hutton si sbarazzò del catastrofismo e delle sue ignote cause mostrando che gli stessi processi attualmente in atto sulla superficie terrestre (erosione, sedimentazione, vulcani, terremoti) erano anche responsabili delle variazioni geologiche purché avessero a disposizione un tempo sufficientemente lungo. Già i Greci, come abbiamo detto, avevano messo in luce i continui cambiamenti delle rocce a causa dell'erosione. Ma lo scozzese fu il primo a sottolineare che le rocce venivano anche ripristinate dall'attività vulcanica dal cui magma si originano le rocce dette, appunto, ignee. Hutton, tuttavia, non aveva in mente un'evoluzione lineare della Terra, ma piuttosto un andamento ciclico di continue distruzioni e ricostruzioni il cui periodo, benché assai lungo a causa della lentezza dei meccanismi in atto, non era però quantificabile.

Nel XIX secolo la visione ciclica di Hutton era destinata ad essere smentita. L'accumulo di dati e la conseguente catalogazione degli strati di roccia aveva indotto la speranza di poter calcolare il tempo geologico. Ma non in tutti i luoghi la successione degli strati era la stessa, a causa delle diverse condizioni locali di calore e pressione derivanti dall'erosione e formazione di montagne o dalla collisione di continenti. Non è dunque banale ripercorrere la storia della Terra tramite gli strati dovuti a sedimentazioni successive. Fortunatamente i fossili racchiusi nelle rocce mostravano una regolarità assai maggiore. Anche se strati coevi sono composti da rocce diverse in luoghi diversi, essi contengono lo stesso tipo di fossili. Alcune specie perdurarono così a lungo che i loro fossili si ritrovano in numerosi strati, altri solo in pochi strati; la nascita e l'estinzione di alcune specie sono avvenute all'interno di un solo strato. Era chiaro che il succedersi dei fossili nei diversi strati rappresentava una sorta di calendario in cui erano registrati gli eventi geologici. Questo calendario mostrava un andamento lineare, e non ciclico, del susseguirsi degli eventi: man mano che ci si sposta a strati superiori, e dunque più recenti, i fossili in essi contenuti tendono a diventare sempre più complessi, e una volta che un determinato fossile sparisce esso non riappare più. Questo pur avvenire solo per un tempo unidirezionale, e non ciclico. Chiaramente i fossili non erano in grado di fornire una stima assoluta del tempo trascorso, ma solo una scala relativa della successione degli eventi. Fu dunque possibile suddividere il passato della Terra nelle tre ormai familiari ere geologiche (cenozoica, mesozoica e paleozoica) con i loro periodi (quaternario, terziario, ecc.), ma l'estensione di tale passato rimaneva incognita. Data la lentezza dei processi considerati, paleontologi e geologi necessitavano di tempi abissali e la cronologia biblica risultava ovviamente scardinata. I tempi erano ormai maturi per azzardare l'ipotesi che, se il mondo inanimato evolveva, tale evoluzione doveva coinvolgere anche gli esseri viventi: nel 1859 Charles Darwin (1809-1882) pubblicò *L'Origine delle specie* in cui si sosteneva una comune ascendenza per l'intero mondo animale da cui si sarebbero evolute le varie specie. Anche in questo caso erano richiesti tempi enormi. Paradossalmente, a contrastare tale richiesta, ricoprendo in un certo senso il ruolo di conservatori, furono proprio i fisici e gli astronomi che pure, nei secoli precedenti, risultarono

determinanti nello spezzare alcuni dogmi aristotelici difesi dalla Chiesa (si pensi a Copernico, Keplero e Galileo).

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole ...e quello dei fisici

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lettere

Già Cartesio (1596-1650) aveva proposto una teoria della formazione del Sistema solare tramite una sorta di gerarchia di vortici. Benché la teoria fosse sbagliata (la Terra risultava essere una sorta di Sole ormai spento), essa ebbe tuttavia il merito di affrancarsi da un'accettazione letterale della Genesi e di stimolare nuove idee sulla *evoluzione* cosmica. Nel 1796 Laplace e, indipendentemente, Immanuel Kant (1724-1804), forti della dinamica newtoniana, pervennero all'ipotesi nebulare dell'origine del sistema solare: inizialmente il Sole era avvolto da un'atmosfera rotante sul piano equatoriale. Con il passare del tempo alcune parti di questa atmosfera vennero a scontrarsi e a comprimersi condensandosi, tramite la gravità, negli attuali pianeti. Questa ipotesi spiega perché i pianeti si trovano più o meno sullo stesso piano e ruotano tutti nella stessa direzione. L'ipotesi nebulare, opportunamente aggiornata, è ancora oggi ritenuta valida. Se dunque la Terra si era formata dalla coalescenza di regioni gassose, essa doveva essere inizialmente assai calda ed è andata via via raffreddandosi fino alla temperatura attuale. Calcolare il tempo di raffreddamento della Terra equivale pertanto a scoprire la sua età. A questo scopo diversi ingegnosi metodi vennero utilizzati da vari studiosi nel corso del XVIII e XIX secolo. In particolare, William Thomson (1824-1907), divenuto poi Lord Kelvin, tenendo conto della conducibilità termica delle rocce e di altri fattori, giunse a fissare il tempo di raffreddamento nell'ordine di 40 milioni di anni. Un intervallo di tempo più lungo dei seimila anni biblici, ma decisamente troppo breve rispetto agli eoni richiesti dai geologi e dalla teoria darwiniana della selezione naturale (sappiamo oggi che i primi resti fossili risalgono a circa 550 milioni di anni fa, e che i primi organismi unicellulari apparvero 4 miliardi di anni fa). Data l'immensa reputazione di cui godeva Kelvin, tra i più celebrati scienziati inglesi con le sue oltre seicento pubblicazioni scientifiche, questa valutazione venne accettata acriticamente ed unanimemente dalla comunità scientifica. Ma sebbene nessuno ancora poteva rendersene conto, un anno prima che Lord Kelvin pubblicasse i suoi risultati era già stato scoperto un orologio naturale che li avrebbe smentiti. Per un singolare intreccio di destini che a volte si verifica nella storia non solo scientifica dell'umanità, alla scoperta di questo orologio parteciparono studiosi lontani, per formazione ed interessi, dai geologi, paleontologi ed astronomi. Questi studiosi rivolgevano il loro interesse non al problema dell'età della Terra ma alla struttura interna dell'atomo e, in particolare, al suo nucleo.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole **Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo**

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lecture

Il fenomeno della *radioattività* dell'uranio venne scoperto casualmente nel 1896 da Henri Becquerel (1852-1908) e studiato approfonditamente da Marie Curie (1867-1934) insieme al marito Pierre (1859-1906). A pochi anni dalla sua scoperta due fatti divennero chiari riguardo alla radioattività. Il primo è che essa è un processo esotermico e produce, pertanto, calore: quando i raggi emessi da una sostanza radioattiva collidono con le molecole dell'aria, essi vengono assorbiti da queste molecole e la loro energia cinetica è trasformata in calore. La seconda caratteristica è che tracce di radioattività sono presenti ovunque attorno a noi, nel suolo, nelle rocce, nella pioggia e nella neve. La grande produzione di calore da parte di questa radioattività invalidava i calcoli di Lord Kelvin, dal momento che egli aveva assunto che il calore disperso dalla Terra fosse quello originario della formazione; ora invece divenne chiaro che l'energia termica irradiata veniva continuamente rimpiazzata attraverso i processi radioattivi. Pertanto la Terra non sta raffreddando e la cronologia di Kelvin si sgretolò lasciando campo libero a quella darwiniana.

Ma la radioattività ricopre un ruolo assolutamente peculiare nella storia che andiamo descrivendo perché non si limitò a discriminare una cronologia piuttosto che un'altra, ma rappresentò essa stessa un orologio affidabile con cui calcolare l'età della Terra. Ai tempi della scoperta della radioattività l'atomo era ancora considerato una singola entità indivisibile. Di lì a poco, tuttavia, si arrivò a capire che in realtà esso è costituito da elettroni con carica elettrica negativa che orbitano attorno ad un nucleo composto da protoni positivi e neutroni privi di carica elettrica. Ciò che distingue le diverse sostanze è il numero di protoni contenuti negli atomi che le costituiscono. I nuclei di una sostanza instabile si sfaldano emettendo raggi composti dai frammenti dovuti a questo sfaldamento. Quando i nuclei di una sostanza radioattiva (sostanza *madre*) perdono protoni, essi diventano necessariamente un'altra sostanza (sostanza *figlia*). Il processo di decadimento radioattivo è di tipo statistico: dati, poniamo, 1000 nuclei della sostanza madre A, non è possibile dire quali nuclei si saranno trasformati nella sostanza figlia B dopo un tempo fissato. È però possibile definire un tempo, detto *tempo di dimezzamento*, passato il quale si avranno 500 atomi A e 500 B. Trascorso un altro tempo di dimezzamento si avranno 250 atomi A e 750 B; poi ancora 125 A e 875 B, e così via. Pertanto, conoscendo il tempo di dimezzamento caratteristico della sostanza A, è possibile risalire al tempo trascorso tramite il conteggio dei nuclei A e B. Il tempo di dimezzamento dell'uranio-238 (ovvero contenente 238 particelle nel nucleo), ad esempio, è di 4,5 miliardi di anni; quello dell'uranio-235 704 milioni di anni; quello del carbonio-14 5.730 anni. Anche se nella pratica la datazione tramite sostanze radioattive presenta alcune difficoltà su cui non ci soffermiamo, essa ha realizzato il

sogno dei geologi del '700 e siamo oggi in grado di datare in maniera assoluta, e non solo relativa, i vari strati rocciosi. Si è potuta anche misurare l'età degli asteroidi che cadono sulla Terra: essi sono coevi della Terra ed hanno il vantaggio di non aver subito alcuna trasformazione dal tempo della loro formazione, contrariamente a quanto accade alla superficie terrestre sottoposta a continue modifiche da parte di processi vulcanici ed erosivi. All'interno di uno scarto di 100 milioni di anni, l'età di tutti questi asteroidi, e dunque del sistema solare, risulta essere 4,5 miliardi di anni.

Come abbiamo visto, non fu facile per i primi studiosi, adusi alla cronologia biblica, concepire simili intervalli temporali, ed anche per noi, oggi, risulta difficoltoso abbracciare con la mente un simile arco di tempo. Per meglio rendersi conto del peso relativo delle varie tappe della vita della Terra pur essere utile considerare il seguente schema in cui il Sistema solare è assunto avere un anno di vita, un intervallo con cui siamo decisamente più familiari. La Terra si forma il primo gennaio; le prime forme di vita acquatiche vengono alla luce alla fine di maggio; piante ed animali compaiono alla fine di novembre; il 25 dicembre si estinguono i dinosauri (evento accaduto in realtà 65 milioni di anni fa); l'homo sapiens appare alle ore 23 del 31 dicembre; l'impero romano dura dalle 23:59:45 alle 23:59:50; la scoperta dell'America avviene alle 23:59:57.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole **L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo**

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lettere

Gli astrofisici, nel corso del '900 sono riusciti a valutare l'età di altre stelle oltre il Sole, scoprendo che ve ne sono di tutte le età, da quelle ancora in formazione nella nebulosa di Orione, a quelle molto giovani come le Pleiadi, a quelle molto vecchie (12-15 miliardi di anni) che si trovano negli ammassi globulari, grappoli contenenti fino a 100.000 stelle e presenti sia nella nostra che in altre galassie. Anche le stelle, che per millenni erano assunte a paradigma di immutabilità e stabilità, mostravano di nascere, invecchiare ed infine morire (alcune tramite una spettacolare esplosione detta supernova) al pari degli organismi viventi. Ma il concetto di evoluzione si era ormai fatto strada e venne esteso senza traumi anche ai corpi celesti di ogni tipo. Le galassie, ad esempio, nel corso della loro vita mutano il contenuto di stelle e gas variando in luminosità e spesso anche in morfologia.

Nel 1929 Edwin Hubble scoprì che le galassie, al pari degli acini di uvetta all'interno di un panettone in lievitazione, si allontanano le une dalle altre con velocità proporzionale alla reciproca distanza. Estrapolando questo moto indietro nel tempo, si concluse che in passato tutte le galassie, e più in generale, tutta la materia doveva essere compressa in un ridottissimo volume con densità e temperature inimmaginabili. L'universo dunque si è originato dal Big Bang, una grande esplosione iniziale a seguito della quale esso continua ad espandersi. Nel 1965 Penzias e Wilson rilevarono una radiazione cosmica di fondo uniforme ed isotropa che rappresenta il residuo dell'enorme calore iniziale dell'esplosione e costituisce la prova più stringente della teoria del Big Bang. Dalla distanza tra le galassie e dalla loro velocità di allontanamento l'età dell'universo viene valutata attualmente tra i 12 e i 18 miliardi di anni. È importante sottolineare che le varie età a cui abbiamo fatto riferimento (relativamente a Terra, stelle e universo) sono ottenute tramite tecniche diverse (radioattività, modelli stellari, misurazione della distanza delle galassie e della loro velocità di regressione). Il fatto che tali stime non siano in contraddizione tra loro - come sarebbe accaduto se, ad esempio, l'universo fosse risultato più giovane della Terra induce a guardare alla nostra attuale cosmogonia con una certa fiducia.

Se dunque l'universo ha avuto un inizio risulta naturale chiedersi cosa c'era prima. È possibile, in verità, che questa sia una domanda mal posta, legata alla concezione newtoniana di un tempo assoluto che scorre indifferente agli accadimenti. La teoria della relatività ci ha insegnato che questo non è vero, in quanto il tempo scorre diversamente per osservatori in moto relativo: è noto il cosiddetto paradosso dei gemelli (verificato sperimentalmente) secondo cui un astronauta di ritorno da un viaggio spaziale compiuto a velocità paragonabile a quella della luce risulta più giovane del gemello rimasto a terra. Inoltre, già Gottfried Leibniz

(1646-1716) aveva polemizzato con Newton sostenendo che noi deriviamo il tempo dal succedersi degli eventi, e non il contrario: se non ci fossero fenomeni non ci sarebbe il tempo. Esso è l'ordine con cui si susseguono gli eventi a partire, ad esempio, dalla Creazione. Chiedersi cosa c'era prima non ha senso, in quanto presuppone un tempo esterno agli eventi. Alcuni cosmologi contemporanei, tra cui Steven Hawking, hanno riformulato il quesito in termini moderni chiedendosi come il tempo possa essere emerso dal Big Bang. Queste speculazioni affondano le loro radici nelle pieghe della meccanica quantistica e rappresentano, al momento, pioneristiche congetture.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole **Epilogo**

Prologo

Il tempo degli antichi...

...e quello dei moderni

Il tempo dei naturalisti...

...e quello dei fisici

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

Epilogo

Lettere

Pochi anni prima della scoperta di Hubble, Einstein realizzò un modello matematico di universo basandosi sulla teoria della relatività generale da lui stesso formulata nel 1915. Questo modello prevedeva un universo instabile e propenso ad espandersi. Dal momento che questo contrastava con l'opinione corrente di un universo statico, Einstein modificò ad hoc le equazioni in modo che l'universo risultasse effettivamente stazionario. Il fisico tedesco perse dunque l'occasione di prevedere, in base ai soli calcoli e senza alcun supporto osservativo, l'espansione dell'universo. Gli Egiziani rifiutarono il tempo uniforme pur misurandolo con gli orologi ad acqua, ed i Greci non colsero l'occasione di anticipare il concetto di evoluzione pur osservando i fossili marini sulle pendici dei monti. Così Einstein - che pure aveva rivoluzionato gli abituali concetti di spazio e di tempo - rimase vittima del pregiudizio di un universo statico ed immutabile, nonostante che tale pregiudizio fosse già stato abbandonato da geologi e biologi. Molti episodi simili sono accaduti nel corso della storia della scienza, e molti ancora, presumibilmente, ne accadranno.

Breve e parziale storia del tempo.

Da una cosmogonia atemporale all'universo in espansione

Annibale D'Ercole **Letture**

Prologo

Trattazione storica.

Il tempo degli antichi...

Aveni, *Gli imperi del tempo. Calendari, orologi e culture*, Dedalo, Bari, 1993;

...e quello dei moderni

J.E. Barnett, *Time's pendulum*, Plenum Trade, New York, 1998;

Il tempo dei naturalisti...

*A. Borst, *Computus. Tempo e numero nella storia d'Europa*, Il Melangolo, Genova, 1997;

...e quello dei fisici

A. D'Ercole, *Storia del tempo*, in *Giornale di Astronomia* n. 3, 1998, pp.2-17;

Dal nucleo dell'atomo all'abisso del tempo

D.E. Duncan, *Il Calendario. L'eterna sfida dell'uomo per dominare il tempo*, Piemme, Casale Monferrato (Torino), 1999;

M. Eliade, *Il mito dell'eterno ritorno*, Borla, Roma, 1988;

L'evoluzione cosmica e l'inizio del tempo

F. Maiello, *Storia del calendario. La misurazione del tempo 1450-1800*, Einaudi, Torino, 1996;

*E.G. Richards, *Mapping Time*, Oxford University Press, Oxford, 1998;

Epilogo

D. Van Rossum, *History of the hour*, The University of Chicago Press, Chicago, 1996;

G.J. Withrow, *Time in History*, Oxford University Press, Oxford, 1989.

Letture

Trattazione fisica e cosmologica.

M. Ageno, *Le origini dell'irreversibilità*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992;

D'Ercole, *Frecce del tempo*, in *Coelum* n. 2, 1985, pp.69-84;

T. Gold (Ed.), *The nature of Time*, Cornell University Press, New York, 1967;

La freccia del tempo, Napoli, CUEN, 1997;

D. Layzer, *La freccia del tempo*, in *Le Scienze* n. 92, 1976, pp.26-39 e *Le Scienze quaderni* n. 85, 1995;

I. Prigogine, *The End of Certainty*, The Free Press, New York, 1997;

M. Rees, *Prima dell'inizio. Il nostro universo e gli altri*, Raffaello Cortina, Milano, 1999

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

La sfera celeste

Pierluigi Battistini

Le costellazioni

Le costellazioni

Sistemi di coordinate

Nascere e tramontare degli astri

Variazioni delle coordinate: precessione e nutazione

Elissoide terrestre

Usando l'immaginazione è facile in una notte stellata raggruppare le stelle in configurazioni geometriche a formare figure che possono rappresentare oggetti, animali od altro. Un numero notevole di tali configurazioni è stato inventato e codificato fin dai tempi più antichi ed in questo modo sono stati sistemati in cielo eroi, semidei, animali ed altri personaggi della mitologia. Con aggiunte recenti oggi vengono riconosciute 88 costellazioni i cui confini sono stati rigorosamente definiti in modo ufficiale dalla Unione Astronomica Internazionale nel 1930. In questo modo le costellazioni formano un sistema che ci permette di identificare le stelle sulla volta celeste.

Il neofita di astronomia è invitato, mediante l'uso di carte, a familiarizzarsi con le posizioni degli oggetti in cielo imparando a riconoscere le costellazioni.

Una osservazione un po' più accurata ci mostra subito che le costellazioni non rimangono fisse nel cielo ma si muovono, con tutta la sfera celeste, ora dopo ora, come fanno il Sole e la Luna. Tale moto apparente è dovuto alla rotazione in 24 ore della Terra. È facile verificare questo moto controllando, a distanza di qualche tempo, la posizione delle stelle rispetto ad elementi del paesaggio. Le stelle che si trovano nella parte orientale della sfera celeste salgono (sorgono), quelle a sud si muovono da sinistra a destra e quelle ad ovest tramontano. Le stelle verso nord hanno un moto più peculiare: sembrano muoversi in cerchi concentrici attorno ad una stella piuttosto brillante: la Stella polare.

Consideriamo ora un secondo moto apparente di tutta la volta celeste, e quindi dell'insieme delle costellazioni, molto più lento dovuto al moto della Terra attorno al Sole. Questo moto fa sì che ciascuna stella raggiunga una determinata posizione in cielo 4 minuti in anticipo ogni 24 ore. Così una stella che sorge alle 22 all'inizio di gennaio sorgerà alle 20 all'inizio di febbraio, alle 18 all'inizio di marzo e così via. In questo modo le costellazioni si muovono gradualmente da est ad ovest, spariscono e vengono sostituite da altre mentre l'anno procede.

Così diciamo che Orione, Il Cane Maggiore ed il Toro sono tipiche costellazioni invernali perché è in inverno che sono alte nel cielo notturno; il Leone, la Vergine e la Chioma di Berenice sono tipiche costellazioni primaverili; la Lira, il Cigno, il Sagittario e lo Scorpione sono estive mentre nel cielo autunnale brillano le stelle di Perseo, Andromeda e Pegaso.

Le costellazioni attorno alla Stella polare nel loro giro attorno al polo nord celeste non tramontano mai e sono dette circumpolari. Il numero di queste dipende dalla posizione dell'osservatore sulla Terra: se si trova al polo nord la polare sarà allo zenit e tutte le costellazioni visibili saranno circumpolari, se si trova all'equatore la polare sarà all'orizzonte e nessuna costellazione sarà circumpolare.

La sfera celeste

Pierluigi Battistini

Home

Le costellazioni

Sistemi di coordinate

Primo sistema di riferimento locale: coordinate orizzontali

Secondo sistema di riferimento locale: coordinate orarie

Sistema di riferimento equatoriale

Relazioni fra sistema orario e sistema equatoriale

Sistema di coordinate eclittiche

Nascere e tramontare degli astri

Variazioni delle coordinate: precessione e nutazione

Elissoide terrestre

Sistemi di coordinate

Come abbiamo detto il *moto diurno* della *sfera celeste* è una conseguenza del moto di rotazione della Terra. Esso è il moto relativo dell'insieme del cielo stellato rispetto ad un sistema di riferimento locale, solidale con l'osservatore. Un tale sistema di riferimento non è però sufficiente. È comodo infatti riferire le posizioni delle stelle, individuate da direzioni sulla sfera celeste, ad un sistema di coordinate al quale esse siano legate in modo invariabile: il *sistema equatoriale* di coordinate celesti.

Per descrivere il moto diurno sarà allora sufficiente descrivere il moto del sistema di riferimento equatoriale rispetto a quello locale: ciò ci porterà a definire il *tempo siderale* e la *latitudine del luogo*; mentre per rapportare tra loro i diversi sistemi locali (diversi osservatori in luoghi diversi) occorrerà inoltre definire la *longitudine* e ciò ci porterà ad alcune considerazioni sul geoide terrestre.

Primo sistema di riferimento locale: coordinate orizzontali

Esiste per ciascun luogo una direzione privilegiata, che abbiamo buone ragioni di ritenere invariabile nel tempo e che può essere determinata fisicamente con altissima precisione: la *verticale* o direzione della forza di gravità (forza peso). Il punto di intersezione Z di questa direzione con la sfera celeste è detto *zenit* (vedi figura 1). Il cerchio massimo della sfera celeste, intersezione del piano tangente alla superficie di un liquido omogeneo in equilibrio è l'*orizzonte* (detto anche *orizzonte matematico* o *orizzonte astronomico*); esso ha per poli lo zenit e il punto della sfera celeste diametralmente opposto, detto *nadir* (N). Orizzonte, zenit e nadir sono elementi della sfera celeste detta anche, in questo contesto, *sfera locale*.

Detto ciò, risulta naturale scegliere l'orizzonte come piano fondamentale del sistema di riferimento locale. Su di esso scegliamo come origine delle coordinate il punto sud, indicato con S in figura. Consideriamo un punto generico R della sfera celeste che definisce la direzione di un astro qualunque e tracciamo il semicerchio massimo ZRN. Esso è detto circolo verticale di R e interseca l'orizzonte nel punto R'.

L'arco SR', corrispondente all'angolo α , contato sull'orizzonte (da 0° a 360°) in senso orario è l'*azimut* (A) di R, mentre l'angolo RR' è l'*altezza* (h) del punto R, misurata in gradi, positivamente verso lo zenit e negativamente verso il nadir. Spesso quest'ultima coordinata è sostituita dal suo complemento algebrico, la *distanza zenitale* ZR, che si conta da 0° a 180° e si indica con z. Azimut ed altezza (o distanza zenitale) sono le *coordinate orizzontali* (o coordinate altazimutali) del punto R.

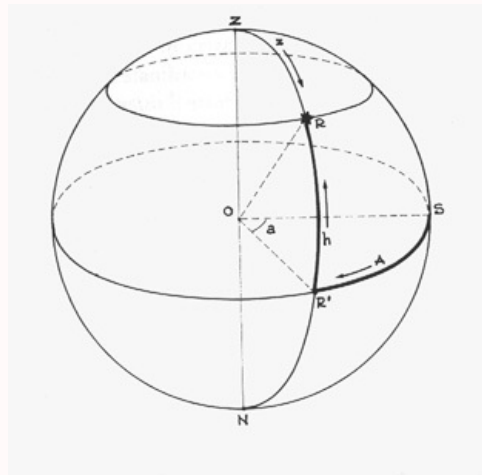


Figura 1. Sistema di riferimento orizzontale.

Il cerchio minore avente per polo lo zenit e passante per R è detto *cerchio di altezza* (o *almucantarato*) del punto R. Cerchi verticali e cerchi di altezza sono le linee coordinate del sistema orizzontale (analoghe a meridiani e paralleli per le coordinate geografiche).

A causa del moto diurno, le coordinate orizzontali di un astro sono variabili e la loro variazione è descritta da leggi piuttosto complicate.

Secondo sistema di riferimento locale: coordinate orarie

Il moto diurno della sfera celeste può essere considerato come una rotazione attorno ad un asse istantaneo con un periodo di poco inferiore alla durata del giorno solare medio. L'asse istantaneo di rotazione della sfera celeste è detto *asse del mondo* (è un asse passante per l'osservatore e parallelo all'asse di rotazione terrestre). I punti di intersezione di tale asse con la sfera celeste sono detti poli (rispettivamente *polo nord celeste* quello dell'emisfero boreale, e *polo sud celeste* quello dell'emisfero australe).

Si chiama *meridiano astronomico* (o *meridiano*, o *meridiano del luogo*) il circolo massimo intersezione fra il piano verticale che contiene l'asse del mondo (detto piano del meridiano) e la sfera celeste (vedi figura 2). Esso è un elemento della sfera locale. Una delle due intersezioni del meridiano con l'orizzonte (quella dalla parte del meridiano che non contiene il polo) è detta punto sud (S) ed è l'origine della coordinata azimut. L'altro punto di intersezione è detto nord (N), mentre a 90° abbiamo il punto est (E) ed il punto ovest (W). La coordinata azimut si conta quindi da sud verso ovest.

L'altezza del polo sull'orizzonte (angolo NOP) definisce la latitudine del luogo, che di solito viene indicata con la lettera greca φ .

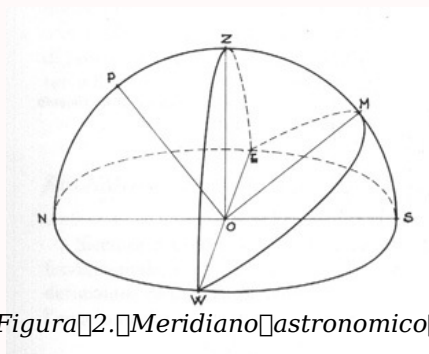


Figura 2. Meridiano astronomico e latitudine del luogo.

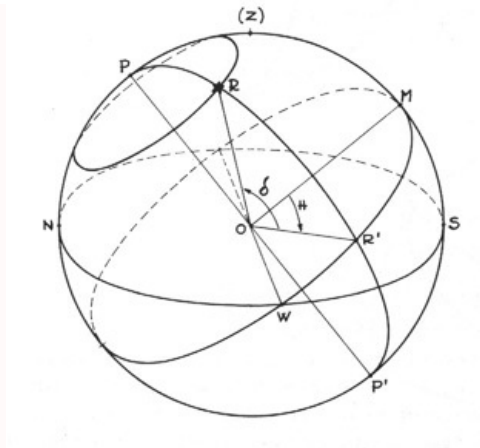


Figura 3. Sistema di riferimento orario.

L'*equatore celeste* è il cerchio massimo che ha per polo il polo celeste. È un elemento invariabile della sfera locale poiché il moto diurno avviene attorno all'asse ad esso normale (OP). Adottiamo quindi il piano equatoriale (il piano contenente l'equatore) come piano fondamentale di un altro sistema locale di coordinate. Dei due punti di intersezione del meridiano con l'equatore, quello sopra l'orizzonte viene chiamato *mezzocielo*.

Analogamente a quanto abbiamo fatto sopra, tracciamo il semicerchio massimo passante per il polo e per il punto generico R: sarà questo il *cerchio orario* del punto R. Esso interseca l'equatore celeste nel punto R'. L'arco MR' (che misura l'angolo diedro formato dal cerchio orario e dal semimeridiano sud) è chiamato *angolo orario* (H) del punto R. Esso viene contato in senso retrogrado (verso il punto W) e di solito viene misurato in ore minuti e secondi da 0^h a 24^h (vedi figura 3).

Il cerchio minore avente per polo il polo nord celeste e passante per R è detto *parallelo celeste* di R. La distanza angolare RR' dal parallelo celeste all'equatore è la *declinazione* (δ) del punto R. Viene misurata in gradi (da 0° a 90°) positivamente verso il polo nord celeste e negativamente verso il polo sud celeste. Siccome a causa del moto diurno una stella qualunque percorre, almeno in prima approssimazione, un parallelo celeste, la sua declinazione è invariabile nel tempo.

Angolo orario e declinazione sono le coordinate orarie del punto R.

Sistema di riferimento equatoriale

Poiché il moto diurno può essere rappresentato come una rotazione della sfera delle stelle fisse rispetto ad un sistema di riferimento locale, per poterlo descrivere ci occorre anche un sistema di riferimento solidale con le stelle. Esso permetterà una descrizione geometrica del cielo stellato e delle costellazioni dato che, in un tale sistema, la posizione delle stelle è, almeno in prima approssimazione, invariabile.

Il piano fondamentale è ancora quello che contiene l'equatore celeste. L'origine degli angoli su questo piano è il punto intersezione dell'eclittica con l'equatore celeste, detto *punto vernale* (o punto Υ o equinozio di primavera); esso è, almeno in prima approssimazione, fisso rispetto alle stelle.

L'*ascensione retta* (α) di un punto R sulla sfera celeste è l'angolo fra il cerchio orario di R e quello del punto Υ . Viene contato positivamente nel senso diretto (senso opposto a quello del moto diurno). Con questa convenzione gli astri passano in meridiano successivamente in ordine di ascensione retta crescente. Come nel caso dell'angolo orario, l'ascensione retta viene misurata in ore e frazioni sessagesimali (da 0^h a 24^h). La seconda delle coordinate equatoriali è la distanza angolare RR' del punto R dall'equatore celeste, già definita più sopra: la *declinazione* (δ).

Come per l'altezza, talvolta la declinazione viene sostituita dal suo complemento algebrico, la *distanza polare*, contata a partire dal polo nord celeste da 0° a 180° .

Ascensione retta e declinazione sono le *coordinate equatoriali* del punto R. Esse sono indipendenti dal moto diurno e possono variare solo se il piano fondamentale e/o il punto Υ mutano la loro posizione rispetto alle stelle. Vedremo più avanti che, se è legittimo considerarli fissi nell'arco di qualche ora o di qualche giorno, non lo sarà in assoluto perché in realtà essi cambiano di posizione, ancorché questo cambiamento risulti essere apprezzabile su intervalli di tempo sufficientemente lunghi.

Relazioni fra sistema orario e sistema equatoriale

Siccome il sistema orario ed il sistema equatoriale hanno lo stesso piano fondamentale, e quindi lo stesso polo, la loro posizione relativa dipende dalla definizione di un solo parametro. Risulta naturale scegliere come parametro l'angolo orario del punto Υ al quale è stato dato il nome di *tempo siderale*.

Data questa definizione, l'angolo orario H di un punto R della sfera celeste è legato alla sua ascensione retta e al tempo siderale T dalla relazione algebrica fondamentale

$$H = T - \alpha \quad (T = H + \alpha)$$

come si può vedere facilmente dalla figura 4 tenendo conto dei sensi positivi dei vari angoli.

Un caso particolarmente importante si ha quando $H = 0$ o $H = 12^h$. Si dice allora che l'astro è in meridiano: in *culminazione superiore* nel primo caso, in *culminazione inferiore* nel secondo. In culminazione superiore si ha:

$$T = \alpha \quad (H = 0)$$

da cui discende una nuova definizione di tempo siderale: è l'ascensione retta degli astri in culminazione superiore. Questa definizione ci consente una misura diretta del tempo siderale, una volta nota con precisione l'ascensione retta di un astro e disponendo di uno strumento che permetta di determinare con precisione l'istante del passaggio in meridiano.

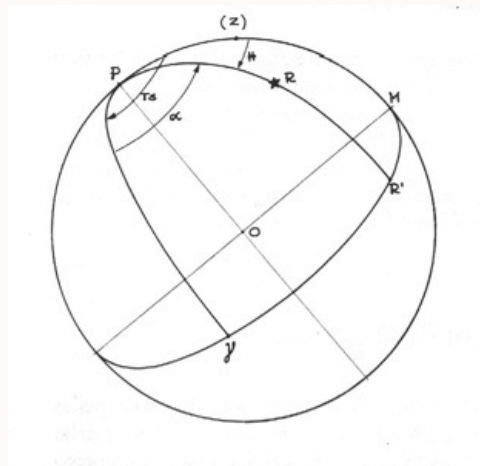


Figura 4. Relazione fra angolo orario e ascensione retta.

Sistema di coordinate eclittiche

Il centro del disco solare in un anno descrive un cerchio massimo sulla sfera delle stelle fisse. La sua orbita relativa è dunque situata su di un piano contenente la Terra. A questo piano, come pure al cerchio massimo che lo rappresenta, si dà il nome di *eclittica*. Ciò a causa del fatto che le eclissi possono aver luogo solo quando la Luna lo attraversa. D'altra parte la Luna ed i pianeti visibili ad occhio nudo non si allontanano mai molto dall'eclittica. Si dà il nome di *zodiaco* o fascia zodiacale alla parte di sfera celeste limitata da due paralleli situati ad una distanza di $8^{\circ},5$ da una parte e dall'altra dell'eclittica e che contiene al suo interno la traiettoria apparente di tutti gli astri mobili degli antichi.

Formule di trasformazione delle coordinate.

Le relazioni che legano il sistema orario di coordinate al sistema orizzontale sono le seguenti, nelle quali i simboli sono già stati tutti definiti.

Dalle coordinate orizzontali alle coordinate orarie:

$$\begin{aligned}\sin \delta &= \sin h \sin \varphi - \cos h \cos \varphi \cos A \\ \cos \delta \sin H &= \cos h \sin A \\ \cos \delta \cos H &= \sin h \cos \varphi + \cos h \sin \varphi \cos A\end{aligned}$$

Dalle coordinate orarie alle coordinate orizzontali:

$$\begin{aligned}\sin h &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos H \\ \cos h \sin A &= \cos \delta \sin H \\ \cos h \cos A &= -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos H\end{aligned}$$

Le relazioni che legano il sistema eclittico a quello equatoriale sono le seguenti.

Dalle coordinate equatoriali alle coordinate eclittiche:

$$\begin{aligned}\sin \beta &= \sin \delta \cos \varepsilon - \cos \delta \sin \varepsilon \sin \alpha \\ \cos \beta \cos \lambda &= \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \beta \sin \lambda &= \sin \delta \sin \varepsilon + \cos \delta \cos \varepsilon \sin \alpha\end{aligned}$$

Dalle coordinate eclittiche alle coordinate equatoriali:

$$\begin{aligned}\sin \delta &= \sin \beta \cos \varepsilon + \cos \beta \sin \varepsilon \sin \lambda \\ \cos \delta \cos \alpha &= \cos \beta \cos \lambda \\ \cos \delta \sin \alpha &= -\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon \sin \lambda\end{aligned}$$

Dei due punti di intersezione fra eclittica ed equatore è detto *nodo ascendente* quello che il Sole attraversa passando dall'emisfero australe a quello boreale. Il passaggio avviene

attorno al 21 marzo, all'equinozio di primavera, da cui il nome di *punto vernale* (dal latino *ver* = primavera). Il punto dell'eclittica attraversato dal Sole (o da un qualunque altro corpo del Sistema solare) passando dall'emisfero boreale a quello australe è detto *nodo discendente*. Il moto di un astro nella fascia è detto *diretto* se ha luogo nel senso della ascensione retta crescente, *retrogrado*, se ha luogo nel senso opposto. Nell'istante in cui il moto in ascensione retta si inverte si dice che il pianeta è *stazionario*.

Per i corpi del sistema solare si usa spesso un sistema di riferimento che adotta come piano fondamentale il piano dell'eclittica e come origine delle coordinate il punto vernale; i poli corrispondenti sono il polo nord e il polo sud dell'eclittica.

Per definire la posizione dell'eclittica sulla sfera celeste (rispetto al sistema equatoriale) bisogna dare anche la sua inclinazione sull'equatore. Tale angolo, detto *obliquità dell'eclittica*, viene indicato con ϵ . Il suo valore varia lentamente nel tempo e può essere, con ottima approssimazione, determinato dall'espressione:

$$\epsilon = 23^\circ 26' 21'',448 - 46'',8150 T - 0'',00059 T^2 + 0'',001813 T^3$$

dove T è il tempo misurato in secoli giuliani di 36525 giorni a partire dall'epoca standard J2000.0:

$$T = \frac{JD - 2451545}{36525}$$

Il suo valore per l'anno in corso può essere espresso da:

$$\epsilon = 23^\circ,440592 - 0,00000036 d$$

dove d è il numero di giorni trascorsi dall'inizio dell'anno.

L'eclittica è stata adottata fin dall'antichità come piano di riferimento per la definizione di un sistema di coordinate celesti dette *coordinate eclittiche*. L'origine, come per le coordinate equatoriali, è il punto vernale e il senso è quello diretto. Sull'eclittica si misura la *longitudine celeste* (λ) da 0° a 360°; l'altra coordinata è la *latitudine celeste* (β) e viene misurata a partire dall'eclittica positivamente verso il polo nord dell'eclittica e negativamente verso quello sud, da 0° a 90°.

La sfera celeste

Pierluigi Battistini

Le costellazioni

Sistemi di coordinate

Nascere e tramontare degli astri

Variazioni delle coordinate: precessione e nutazione

Elissoide terrestre

Nascere e tramontare degli astri.

Le stelle della zona compresa tra i due paralleli celesti tangenti all'orizzonte, rispettivamente a nord e a sud, sorgono e tramontano. Le stelle dell'emisfero boreale la cui declinazione è maggiore del complemento algebrico della latitudine (colatitudine = 90° - latitudine) del luogo di osservazione restano sempre al di sopra dell'orizzonte e sono dette stelle circumpolari nord; le stelle circumpolari sud sono quelle invisibili perché restano sempre sotto l'orizzonte per un osservatore posto nell'emisfero nord della Terra.

L'angolo orario dell'astro all'istante del tramonto viene chiamato arco semidiurno e esprime, in tempo siderale, il tempo intercorso dal passaggio in meridiano al tramonto (o dal sorgere al passaggio in meridiano). L'arco semidiurno può essere determinato semplicemente dall'espressione:

$$\cos H = -\tan \varphi \tan \delta$$

Per un astro che si trova sull'equatore ($\delta = 0$) si vede che, essendo $\tan \delta = 0$ e quindi $\cos H = 0$ (da cui $H = 90^\circ$), l'arco semidiurno risulta uguale a 6 ore. Per un astro boreale ($\delta > 0$), esso è maggiore di 6 ore, mentre per un astro australe ($\delta < 0$) è minore di 6 ore.

La distanza dal punto ovest di un astro che tramonta (o la distanza dal punto est dello stesso che sorge) si determina facilmente dalla relazione:

$$\sin A = \frac{\sin \delta}{\cos \varphi}$$

dove il segno dell'angolo A è quello della declinazione.

Nota bene: in tutto questo paragrafo è stata trascurata la rifrazione atmosferica.

La sfera celeste

Pierluigi Battistini

Le costellazioni

Sistemi di coordinate

Nascere e tramontare degli astri

Variazioni delle coordinate: precessione e nutazione

Elissoide terrestre

Variazione delle coordinate: precessione e nutazione.

Fin qui abbiamo supposto l'invariabilità delle coordinate equatoriali ed eclittiche, avendo trattato l'equatore celeste e l'eclittica come piani invariabili rispetto alle stelle fisse. Su un arco di tempo sufficientemente lungo però tali ipotesi non sono più legittime.

La variazione secolare (lenta) delle longitudini celesti, alla quale oggi diamo il nome di *precessione degli equinozi*, è stata scoperta nel secondo secolo avanti Cristo da Ipparco di Nicea (194-120 a.C.) confrontando la longitudine della stella α Virginis (Spica), da lui determinata, con quella ottenuta un secolo e mezzo prima da Timocari.

Avendo come base tale osservazione, Ipparco interpretò la precessione come un moto di rotazione diretto della sfera delle stelle fisse attorno ai poli dell'eclittica: poli la cui posizione è invariabile anche su tempi lunghi. Fu poi Copernico che diede l'interpretazione fisicamente corretta: la direzione dell'asse di rotazione terrestre non è costante nello spazio, ma descrive un cono di rivoluzione e la traiettoria corrispondente del polo celeste sulla sfera delle stelle fisse è un cerchio minore di latitudine eclittica $90^\circ - \varphi$. Ad una velocità di $50''{,}29$ per anno, il punto γ impiega un po' meno di 26000 anni a percorrere l'eclittica. Questo valore corrisponde al periodo di rivoluzione dei poli celesti attorno ai poli dell'eclittica.

Verso il XVII secolo ci si è resi conto che anche l'obliquità dell'eclittica non è costante, ma è soggetta ad una variazione di circa $47''$ per secolo, e circa un secolo più tardi Bradley mostrò che il piano dell'equatore celeste subisce spostamenti periodici, piccoli ma non trascurabili, attorno ad una posizione media: è il fenomeno della *nutazione*. A causa di questi movimenti dovuti a perturbazioni da parte di altri corpi del sistema solare sul moto di rotazione e di rivoluzione della Terra, le coordinate celesti variano lentamente nel tempo. La teoria, fondata sulla legge di gravitazione universale, è in grado di fornire la posizione dei piani fondamentali ad una certa epoca t , una volta note ad un'epoca di riferimento t_0 .

Si definiscono *coordinate medie* quelle riferite alla posizione dell'equinozio e dell'equatore che si avrebbero se il sistema di riferimento fosse animato dal solo moto di precessione.

Si definiscono *coordinate vere* quelle riferite alla posizione dell'equinozio e dell'equatore vero tenendo conto di tutti i moti dovuti alle perturbazioni, compresa la nutazione.

Esiste però un altro fenomeno, di tutt'altra natura, che determina la posizione degli astri sulla sfera celeste: è una variazione apparente della direzione verso cui si trova l'astro, dovuta al moto relativo dell'osservatore rispetto

all'astro e al fatto che i segnali luminosi si propagano con velocità finita. Il fenomeno, detto *aberrazione*, fu scoperto da Bradley nel 1729 sulle basi delle misure della velocità della luce effettuate da Römer nel 1676.

Si definiscono coordinate apparenti quelle vere corrette per l'aberrazione.

Vediamo ora come si possono ricavare le coordinate equatoriali medie ad un istante t , una volta che siano note ad un istante t_0 .

Se non è richiesta una grande accuratezza, se le due epoche non sono troppo lontane e se l'astro non è troppo vicino al polo, la variazione annua delle coordinate è data dalle seguenti espressioni:

$$\Delta \alpha = m + n \sin \alpha \tan \delta$$

$$\Delta \delta = n \cos \alpha$$

dove m ed n sono quantità lentamente variabili nel tempo. Esse sono date da

$$m = 3^s,07496 + 0^s,00186 T$$

$$n = 20'',0431 - 0'',0085 T$$

dove T è il tempo misurato in secoli giuliani a partire dall'epoca standard J2000.0 (cfr. sistemi di coordinate).

**Variazioni di coordinate equatoriali per effetto della precessione:
formule rigorose.**

Per un calcolo più rigoroso, valido anche per le stelle circumpolari, si dovrà tenere conto degli angoli che definiscono la posizione dell'equinizio e dell'equatore medi all'istante finale rispetto a quella all'istante iniziale.

Se t_0 è l'epoca iniziale e t quella finale, espresse in giorni giuliani:

$$T_0 = \frac{t_0 - 2451545}{36525} \quad \text{e} \quad T = \frac{t - t_0}{36525}$$

esprimono le stesse epoche in secoli giuliani a partire dall'epoca standard. Gli angoli suddetti sono allora espressi da:

$$\begin{aligned} \zeta &= (2306'',2181 + 1'',39656 T_0 - 0'',000139 T_0^2) T \\ &\quad + (0'',30188 - 0'',000344 T_0) T^2 + 0'',017998 T^3 \\ z &= (2306'',2181 + 1'',39656 T_0 - 0'',000139 T_0^2) T \\ &\quad + (1'',09468 + 0'',000066 T_0) T^2 + 0'',018203 T^3 \\ \theta &= (2004'',3109 - 0'',85330 T_0 - 0'',000217 T_0^2) T \\ &\quad - (0'',42665 + 0'',000217 T_0) T^2 - 0'',041833 T^3 \end{aligned}$$

Le formule di trasformazione sono allora

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \cos (\alpha_0 + \zeta) \sin \theta \cos \delta_0 + \cos \theta \sin \delta_0 \\ \sin (\alpha - z) \cos \delta &= \sin (\alpha_0 + \zeta) \cos \delta_0 \\ \cos (\alpha - z) \cos \delta &= \cos (\alpha_0 + \zeta) \cos \theta \cos \delta_0 - \sin \theta \sin \delta_0 \end{aligned}$$

dove abbiamo indicato con α_0 , δ_0 , α , δ le coordinate equatoriali rispettivamente alle epoche t_0 e t .

La sfera celeste

Pierluigi Battistini

Home

Le costellazioni

Sistemi di coordinate

Nascere e tramontare degli astri

Variazioni delle coordinate: precessione e nutazione

Elissoide terrestre

Elissoide terrestre

La superficie della Terra viene descritta dal geoide definito come la superficie equipotenziale che verrebbe assunta dai mari della Terra in condizioni di equilibrio. Il geoide è una superficie complessa, ma è molto ben approssimato da un *ellissoide* di rivoluzione appiattito ai poli. Esso è sufficientemente vicino alla superficie reale (tenuto conto di una eventuale correzione per l'altitudine) da poter costituire una superficie di riferimento comodo in geodesia ed accettabile in astronomia.

Le dimensioni dell'ellissoide terrestre sono definite dalla lunghezza del suo semiasse maggiore, a , e dal fattore di appiattimento, $f = (a-b)/a$, dove b è il semiasse minore. I valori di queste due grandezze, raccomandati dall'Associazione Internazionale di Geodesia (IAG) nel 1975 e adottati dall'Unione Astronomica Internazionale (IAU) nel 1976, sono:

$$a = 6378140 \text{ m} \quad f = 1/298,257 = 0,00335281$$

Si definiscono le coordinate di un punto sulla Terra nel modo seguente:

La *latitudine geografica* (o *astronomica*) Φ di un luogo è l'angolo fra la verticale e il piano dell'equatore, espressa in gradi da -90° (polo Sud) a $+90^\circ$ (polo Nord). Questa definizione è numericamente identica a quella data più sopra.

La *longitudine* λ di un luogo è l'angolo diedro fra il meridiano del luogo ed il *primo meridiano* scelto convenzionalmente come origine (meridiano dell'Osservatorio di Greenwich). Dal 1982 l'Unione Astronomica Internazionale ha stabilito di esprimere le longitudini da 0° a 360° positivamente verso Est, mentre nella vecchia convenzione, ancora molto diffusa, veniva espressa in gradi (da -180° a $+180^\circ$) o in ore (da -12h a $+12\text{h}$) positivamente verso ovest e negativamente verso est.

Oltre alla latitudine geografica viene definita la *latitudine geocentrica* (Φ') come l'angolo fra la retta congiungente l'osservatore col centro dell'ellissoide terrestre e il piano dell'equatore. La latitudine geocentrica a differenza della latitudine geografica dipenderà dalla definizione dell'ellissoide (vedi figura 5).

Le quantità che di solito vengono utilizzate sono le coordinate rettangolari $\rho \cos \Phi'$ e $\rho \sin \Phi'$, essendo ρ la distanza dell'osservatore dal centro della terra espressa in unità del semiasse maggiore dell'ellissoide. Tali quantità possono essere determinate conoscendo la latitudine geografica mediante le seguenti espressioni

$$\begin{aligned} \rho \sin \Phi' &= S \sin \Phi \\ \rho \cos \Phi' &= C \cos \Phi \end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned} S &= 0,9949743 - 0,0016708 \cos 2\varphi + 0,0000021 \cos 4\varphi \\ C &= 1,0016799 - 0,0016820 \cos 2\varphi + 0,0000021 \cos 4\varphi \\ Q &= 0,9983271 + 0,0016764 \cos 2\varphi - 0,0000035 \cos 4\varphi \end{aligned}$$

Se il luogo considerato si trova ad una altezza h (espressa in metri) sul livello del mare ad S e C bisogna aggiungere la quantità:

$$\Delta = \frac{h}{a} = \frac{h}{6378140}$$

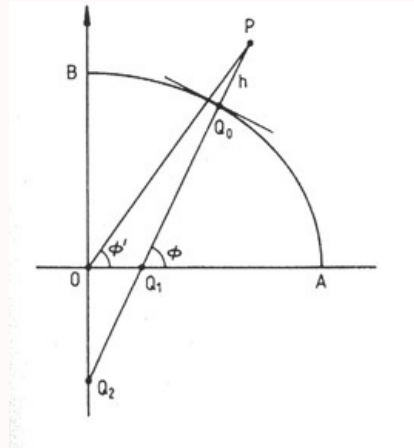


Fig. 5 - Coordinate geografiche e geocentriche.

Le coordinate celesti riportate sulle effemeridi hanno come origine dei sistemi di riferimento il centro della Terra e sono quindi dette coordinate geocentriche. Per gli astri vicini, ad esempio la Luna, per fare confronti con le osservazioni (ad esempio nel calcolo di una eclissi) occorre trasformare tali coordinate in un sistema di riferimento con origine nell'osservatore (*coordinate topocentriche*).

Se consideriamo ad esempio (come si usa di solito) il sistema orario, le trasformazioni da coordinate orarie geocentriche a coordinate orarie topocentriche sono le seguenti:

$$\begin{aligned} \cos \delta' \cos H' &= \cos \delta \cos H - (\rho \cos \varphi') \sin \pi \\ \cos \delta' \sin H' &= \cos \delta \sin H \\ \sin \delta' &= \sin \delta - (\rho \sin \varphi') \sin \pi \end{aligned}$$

dove δ' e H' sono la declinazione e l'angolo orario topocentrici ($H = T - \alpha'$, essendo α' l'ascensione retta topocentrica), $\rho \cos \varphi'$ e $\rho \sin \varphi'$ le coordinate rettangolari definite sopra e π la *parallasse diurna*. Quest'ultima è definita come l'angolo sotto cui è visto il semiasse maggiore dell'ellissoide terrestre dall'astro considerato. Quest'ultima quantità per la Luna è riportata nelle tabelle mensili. Si può comunque facilmente determinare, nota la distanza, mediante l'espressione:

$$\sin \pi = \frac{a}{\text{distanza}}$$

dove a è il semiasse maggiore dell'ellissoide.

La gravità

Roberto Bedogni

Introduzione	
Introduzione	Il problema del significato del concetto di "peso", attribuito ai corpi materiali, fu dibattuto sin dall'antichità. Già Aristotele notò che "ogni movimento verso il basso di un corpo d'oro o di piombo, o di ogni altro materiale, dotato di peso è tanto più veloce quanto più esso è grande". Questa idea fissò il significato della gravità pre-galileiana e venne generalizzata nell'assunto che tutti i corpi, siano essi di metallo, di legno od altro materiale cadono nello stesso modo verso il basso. A queste conclusioni giunse anche Galileo in seguito alle famose esperienze del moto dei gravi su di un piano inclinato ed all'esperienza, peraltro apocrifa, della caduta dei gravi dalla torre di Pisa. Possiamo così riassumere le conclusioni a cui giunse Galileo: "se lasciamo cadere un sasso oppure una piuma, facendo astrazione dall'effetto di resistenza dell'aria, entrambi gli oggetti, seppure differenti per composizione chimica e struttura fisica, raggiungono il suolo allo stesso istante".
La gravità newtoniana	
La gravità di Einstein	
Conclusioni	
Lecture	

La gravità

Roberto Bedogni

La gravità newtoniana

Introduzione

La gravità newtoniana

L'ipotesi geocentrica e eliocentrica

Le leggi di Keplero e la Gravitazione Universale

La scoperta di nuovi pianeti

La gravità di Einstein

Conclusioni

Lecture



Figura 1.

L'aver capito l'importanza del concetto di massa pose però Newton al di sopra dei suoi predecessori e contemporanei. Galileo, infatti, non distinse fra peso e massa e Huygens usò indifferentemente i due termini in tutti i suoi lavori. Newton si rese invece conto che il "peso" non è una proprietà invariabile del corpo, come fino ad allora si era ritenuto, bensì variabile e che ad ogni corpo è inerente una proprietà quantitativa che ne determina il movimento ed è diversa dal peso: la "massa". Venivano così per la prima volta distinti i concetti di massa e di peso.

I maggiori successi della meccanica newtoniana si ebbero nella definitiva comprensione del moto dei pianeti nel Sistema solare. Prima quindi di approfondire ulteriormente il problema della gravità, alla luce della Legge di Gravitazione Universale di Newton, facciamo un passo indietro e vediamo come erano descritti i moti dei pianeti nei principali sistemi pre-newtoniani, quello geocentrico ed eliocentrico.

L'ipotesi geocentrica e eliocentrica

I pianeti propriamente detti sono facilmente riconoscibili sulla volta celeste in quanto sono molto brillanti e, cosa che ne facilita il riconoscimento, si trovano sempre nella fascia dello Zodiaco. È possibile distinguerli, a seconda della rapidità con cui si muovono sulla Sfera celeste, in *pianeti inferiori* e *pianeti superiori*.

Già gli antichi osservarono che il moto di Mercurio e Venere (pianeti inferiori), rispetto al Sole, avviene lungo una direzione comune, quella dell'Eclittica, ma ora con moto *diretto*, ora con moto *retrogrado*. Non si accorsero però della presenza di *fasi planetarie*. È interessante notare come

Venere e Mercurio (sebbene sia di difficile osservazione per Mercurio) presentino le stesse fasi della Luna in quanto entrambi riflettono la luce solare nello stesso modo del satellite della Terra. A questa importante conclusione giunse per la prima volta Galileo in seguito ad osservazioni delle fasi di Venere mediante l'uso del cannocchiale.

Non molto diverso dal moto dei pianeti inferiori è quello dei pianeti superiori, Marte, Giove e Saturno. Questo portò a produrre un comune modello interpretativo, in modo da ricondurre la complessità di quanto osservato nella Sfera celeste ad un unico schema.

Qual è la macchina celeste che, con il suo funzionamento, fa sì che un osservatore al centro della Sfera celeste osservi i moti planetari nel modo in cui appaiono?

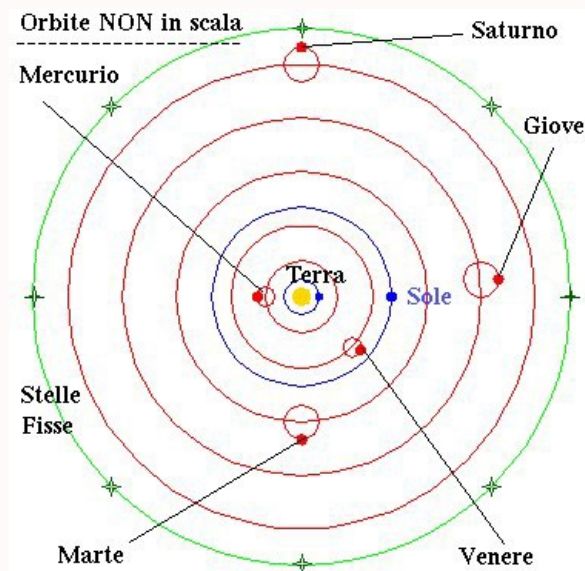


Figura 2.

Per rispondere a questa domanda bisognava formulare delle ipotesi, riguardanti i moti dei pianeti, cioè costruire dei modelli del mondo che rendessero conto, per quanto possibile, di tutte le apparenze. Non era difficile spiegare il moto diurno della Sfera celeste, bastava supporre che tutto il firmamento: stelle, Sole, Luna e gli altri corpi celesti fossero portati intorno alla Terra da una sfera cristallina, mobile di moto uniforme ed imperniata ai poli celesti. Ciò era pienamente conforme a quanto si osservava.

Alla base di questo "sistema" sta il principio della circolarità ed uniformità dei moti celesti, uno dei cardini delle concezioni aristoteliche. Il modello mentale era quello, per dirla con Platone, di *subordinare le leggi fisiche a principi divini e trascendenti salvando i fatti*, cioè di ricondurre le apparenze, costituite dalle vistose irregolarità dei moti planetari, alla *realtà* di un moto che si supponeva *dover essere circolare ed uniforme*, in quanto perfetto, senza inizio e senza fine.

Nel sistema geocentrico, così chiamato appunto perché la Terra è immobile al centro dell'Universo, ogni corpo celeste ruota con moto uniforme attorno alla Terra. Le stelle fisse sono incastonate alla Sfera celeste e ruotano con essa. Si trattava di una grandiosa costruzione geometrica, capace di rappresentare in modo completo, *particolareggiato ed anche quantitativo*, tutti gli aspetti del cielo e di prevedere il corso di quei corpi celesti denominati *pianeti*. Esso venne proposto già da Ipparco e rielaborato più tardi, nel secondo secolo d.C., dall'astronomo alessandrino Tolomeo, nell'opera tradotta e tramandata dagli arabi col nome di *Almagesto*, da cui il nome di Sistema tolemaico.

In questo contesto ed in un clima culturale particolare,

appare nel 1543 il *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Nicolò Copernico (1473-1543), nel quale è introdotto il sistema eliocentrico. Tale ipotesi era stata, per la verità, già formulata nel passato da Aristarco di Samo e da alcuni altri, ma i tempi non erano ancora maturi per accoglierla.

Copernico pone il Sole al centro dell'Universo ed i pianeti Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno ruotanti intorno al Sole su orbite circolari, in ordine di distanza crescente. La Terra, inoltre, viene dotata di un movimento di rotazione su se stessa in senso antiorario, in modo da spiegare l'apparente rotazione diurna della Sfera celeste nel verso orario. La Luna, infine, è dotata di un moto di rivoluzione intorno alla Terra, che ne spiega le fasi.

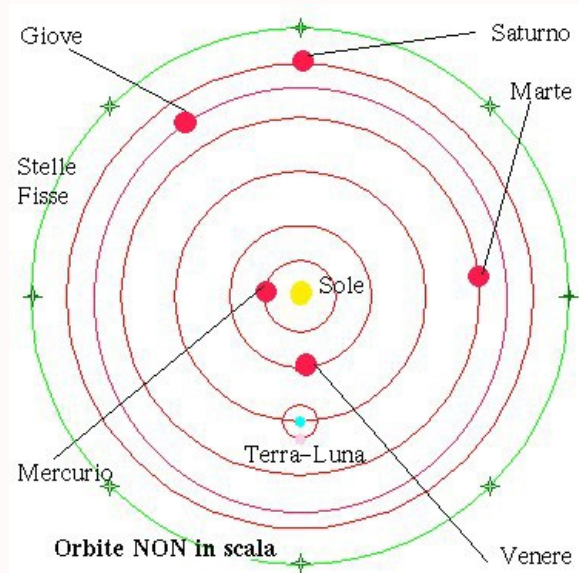


Figura 3.

Già dalla descrizione *qualitativa*, la concezione copernicana ha il grande vantaggio di una maggiore semplicità rispetto a quella tolemaica. Da un punto di vista *quantitativo*, con l'ausilio di precisi calcoli matematici, la nuova ipotesi si concilia con le osservazioni e permette di rendere conto di tutte le *apparenze* meglio ancora del Sistema tolemaico anche se in maniera non molto più semplice. La concezione copernicana abolisce il privilegio di centralità conferito alla Terra e consentirà poi una più accettabile visione fisica.

Scrivono Thomas Khun che: "*il De Revolutionibus costituì la miccia di una rivoluzione che esso aveva a mala pena delineato. È un testo che provoca una rivoluzione più che un testo rivoluzionario*".

In alcuni casi (p. es. il sistema Sole-Terra) la costruzione copernicana è addirittura più complessa di quella tolemaica. Questa complicazione verrà superata da Keplero (1571-1630), alcune decine di anni dopo Copernico, con l'introduzione d'orbite ellittiche e della costanza della velocità areolare.

Le leggi di Keplero e la Gravitazione Universale

La prima ed importante verifica della validità del Sistema copernicano, venne da Keplero che poté utilizzare osservazioni di Marte molto accurate fatte dal suo maestro Tycho Brahe (1546-1601). Dopo vari tentativi e dieci anni di lavoro, Keplero pervenne in modo empirico alla formulazione delle tre leggi che portano il suo nome:

1ª Legge di Keplero: *I pianeti descrivono intorno al Sole delle orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei fuochi.*

Con questa legge cade il principio della circolarità dei moti planetari. Inoltre le orbite descritte dai pianeti acquistano identità fisica rispetto alle circonferenze tolemaiche, enti puramente geometrici.

II^a Legge di Keplero: *Le aree descritte dal raggio vettore di ciascun pianeta sono proporzionali ai tempi impiegati a descriverle; ossia, il raggio vettore di un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.*

Come conseguenza di questa legge, un pianeta si muove più velocemente quando è più vicino al Sole (perielio) e più lentamente quando è più lontano (afelio). Questa legge segna la caduta del principio dell'uniformità dei moti planetari.

III^a Legge di Keplero: *I quadrati dei tempi di rivoluzione dei pianeti intorno al Sole sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle rispettive orbite.*

Ne segue che la velocità media di un pianeta sulla propria orbita è tanto minore quanto più esso è lontano dal Sole.



Figura 4.

Le leggi di Keplero descrivono compiutamente il moto dei pianeti, ma non ne risalgono alle cause. Perché i pianeti circolano intorno al Sole, anziché allontanarsene in linea retta? Perché un corpo qualsiasi lasciato cadere precipita al suolo mentre questo non accade ai pianeti (Terra compresa) che non precipitano sul Sole?

I gravi in caduta libera con moto accelerato, ma pure i pianeti costretti a muoversi intorno al Sole e la Luna intorno alla Terra, provano l'esistenza di forze centrali che deviano i corpi materiali dalla condizione di moto rettilineo uniforme. Nel 1684 Newton fu in grado di enunciare la Legge di Gravitazione Universale:

due punti materiali qualsiasi si attraggono lungo la loro congiungente con una forza direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

In formula, dette m_1 ed m_2 le masse dei due corpi, d la loro distanza ed F la forza agente, si ha: $F = G(m_1 m_2) / d^2$, dove G è la costante di Gravitazione ($6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{Kg}^2$)

La Legge di Gravitazione è stata definita "Universale" in quanto la forza che regola la caduta dei gravi sulla Terra ed il moto dei pianeti nel cielo è la stessa. I cieli non sono più imperturbati e regolati da leggi divine, ma soggiacciono alle

stesse leggi che regolano i fenomeni terrestri. Con l'opera di Newton (i cui risultati furono pubblicati nel 1687 nei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) alla *visione del mondo* che salva la realtà metafisica, si sostituisce una visione del mondo che descrive la realtà attraverso *leggi fisiche*, di valore universale, che hanno come banco di prova *l'esperimento*. La Storia ci dice che questo passaggio non fu indolore.

La scoperta di nuovi pianeti

La Meccanica celeste, che tratta della cinematica e della dinamica delle orbite dei pianeti del Sistema solare, dopo il grande sviluppo del calcolo differenziale legato all'opera d'illustri matematici (Newton, Leibniz, Lagrange, Laplace, Poincaré, solo per citarne alcuni) si sviluppò sino a diventare una delle massime espressioni della fisica moderna. La possibilità di determinare in modo esatto le orbite dei pianeti nel Sistema solare fu uno dei maggiori successi della fisica "deterministica".

Grande era però il grado di difficoltà legato alla determinazione dei parametri dell'orbita di un pianeta, se raffrontato alle limitatezze degli strumenti di calcolo. Tra i pochi "strumenti matematici" a disposizione degli astronomi vi erano le tavole dei logaritmi e delle funzioni trigonometriche. I calcoli della determinazione delle orbite (ma anche quelli del sorgere o tramontare del Sole e della Luna) richiedevano mesi, se non anni, di duro lavoro. Ciò che oggi è possibile effettuare (il calcolo delle Effemeridi) con un normale Personal Computer, solo il secolo scorso era un'autentica sfida alle risorse di calcolo dei matematici e fisici dell'epoca. Nel secolo XIX, la conoscenza del moto delle orbite dei pianeti conosciuti, da Mercurio ad Urano, permise di prevedere l'esistenza di nuovi pianeti non ancora osservati sulla volta celeste.

Dopo la scoperta di Urano se ne determinò l'orbita trovando, nel 1830, una differenza tra le previsioni e la posizione vera di 20 secondi d'arco circa. Dal momento che la posizione di un pianeta nella sua orbita non dipende solo dall'attrazione gravitazionale del Sole ma anche dall'azione combinata degli altri pianeti, si diffuse in breve la certezza che la posizione d'Urano fosse sbagliata, perché non si era tenuto conto dell'attrazione di un corpo celeste situato ancora più lontano dal Sole.

Per identificare l'oggetto che produceva la perturbazione sull'orbita d'Urano occorreva conoscerne la posizione in cielo; il che richiedeva la soluzione di un'enorme quantità di calcoli effettuati tramite la teoria delle perturbazioni. Adams a Cambridge e Le Verrier a Parigi eseguirono i calcoli per determinare la posizione del nuovo pianeta utilizzando le posizioni note di Giove, Saturno ed Urano. A questo punto la mano passò agli astronomi che andarono a ricercarne la posizione predetta dai calcoli teorici.

La sera del 23 settembre 1846, l'astronomo Galle notò la presenza di un astro relativamente brillante dove la carta del cielo non riportava nulla. Encke, con il grande telescopio equatoriale dell'osservatorio di Berlino, notò che il nuovo corpo aveva la forma di un disco e che durante la notte presentava un moto significativo rispetto alle stelle di fondo. La posizione vera del nuovo pianeta risultava distare solo 55' dalla posizione indicata da Le Verrier e di circa il doppio da quella indicata da Adams: al nuovo pianeta fu dato il nome di Nettuno. In seguito si capì che se la ricerca del pianeta avesse avuto luogo qualche anno più tardi, date le incertezze sulla sua posizione teorica, difficilmente lo si sarebbe trovato.

Alla fine del secolo scorso Percival Lowell pose mano al problema delle residue perturbazioni dell'orbita di Nettuno.

In conseguenza dello studio di queste perturbazioni, nel 1915 si dedusse la presenza di un pianeta di massa uguale a 6,5 masse terrestri ad una distanza di 42 U.A. nella costellazione dei Gemelli. Contemporaneamente allo studio dell'orbita di Nettuno nei primi anni del secolo furono quindi esaminate migliaia di fotografie del cielo prese nei pressi del piano dell'eclittica al fine di determinare in modo diretto l'esistenza di un nuovo pianeta.

Lowell morì nel 1916 e solo nel 1929 fu ripresa la ricerca del pianeta non ancora noto. Nel 1930 Tombaugh, nel momento in cui la costellazione dei Gemelli era in opposizione al Sole, trovò il nuovo pianeta assai vicino alla posizione definita da Lowell e gli venne dato il nome di Plutone. Poiché le dimensioni erano troppo piccole rispetto a quelle previste, rimase per molto tempo il dubbio che si trattasse veramente del pianeta di Lowell.

Il programma di ricerca continuò così fino al 1943, e fu esteso ad una vastissima zona di cielo ma nessun altro astro (nemmeno più piccolo di Plutone) fu scoperto. Nel frattempo l'accumularsi dei dati sulle posizioni di Urano e Nettuno permise di ridurre il numero delle perturbazioni di cui tenere conto. La massa di Plutone, che era stata prevista maggiore di quella effettivamente trovata, venne ricalcolata riducendola ad un valore inferiore a quella terrestre. La scoperta poi di un satellite di Plutone permise una più corretta valutazione della massa riducendola ulteriormente al valore di 0,0026 MT (masse terrestri).

Il fatto curioso, in questa fortunata previsione, è che la massa effettivamente osservata non avrebbe potuto in nessun modo influenzare le orbite di Urano e Nettuno, per cui risultò incomprensibile come mai Plutone fosse stato trovato proprio nel punto previsto da Lowell.

La gravità

Roberto Bedogni

Home

Introduzione

La gravità
newtoniana

La gravità di
Einstein

Il principio di
equivalenza

L'inerzia e il principio
di Mach

Lo spazio-tempo
relativistico

Conclusioni

Lecture

La gravità di Einstein



Figura 5.

Lo sviluppo ed il superamento della gravità newtoniana, si ebbero agli inizi del XX secolo con Einstein e la Relatività Generale. Senza entrare nel dettaglio di una teoria fisico-matematica tanto complessa indichiamo alcuni dei punti principali su cui essa è basata. La gravità è interpretata come effetto geometrico, in quanto la *materia* presente nell'Universo determina la *curvatura dello spazio-tempo*. Le equazioni di Einstein esprimono semplicemente la relazione fra la curvatura da un lato e la materia ed energia dall'altro.

Lo *spazio-tempo* è un'entità a quattro dimensioni (tre spaziali + una temporale) che sostituisce lo *spazio* ed il *tempo* della teoria newtoniana. Non solo lo spazio ed il tempo non sono più assoluti ma sono pure intrinsecamente connessi! Ciò che rende particolarmente difficile questa teoria è una sorta di "anello di retroazione". Vale a dire: la curvatura dello spazio-tempo è determinata dalla distribuzione della materia ed energia distribuita nell'Universo, che a sua volta è governata dalla curvatura dello spazio-tempo stesso! La teoria di Einstein dà un'interpretazione della gravità comprensiva della teoria di Newton, che rimane peraltro valida come caso particolare laddove le masse che generano la gravità (ad esempio nel Sistema solare) non sono troppo grandi.

Il principio di equivalenza

Le ragioni che indussero Einstein a costruire la Relatività Generale, si possono spiegare, nei loro principi di base, ricorrendo a degli esperimenti ideali. Il più importante è noto come l'*ascensore di Einstein*.

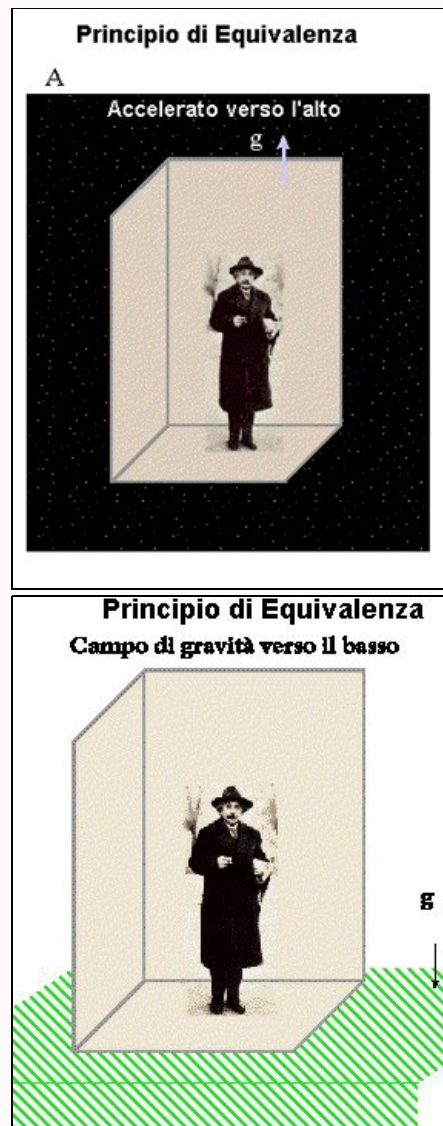


Figure 6 e 7.

Tutti gli oggetti cadono al suolo con la stessa accelerazione e già questo era noto a Galileo. Immaginiamo ora un ascensore all'ultimo piano di un grattacielo e supponiamo che non vi sia aria in esso. Di colpo si spezza il cavo portante e la cabina inizia a cadere liberamente con *accelerazione costante*. Contemporaneamente una persona che si trova nel suo interno lascia cadere un sasso ed una piuma. La forza di gravità attrae allo stesso modo sia i due oggetti che l'ascensore, per cui la velocità relativa tra sasso e piuma è nulla. *In altre parole sia il sasso che la piuma non arrivano a toccare il fondo dell'ascensore, dal momento che quest'ultimo sta cadendo con la loro stessa accelerazione.* L'uomo all'interno della cabina potrebbe quindi a buon diritto affermare di trovarsi in una zona dello spazio *lontana dall'azione gravitazionale* di stelle e pianeti, dal momento che i due oggetti lasciati a se stessi rimangono sospesi a mezz'aria.

Consideriamo ora la situazione opposta: la cabina viene posta in una zona dello spazio dove non agiscono forze gravitazionali, ad esempio in una navetta spaziale in orbita terrestre. Supponiamo inoltre che la cabina venga "tirata" verso l'alto sempre con accelerazione costante tramite una fune collegata al soffitto. *Se la persona all'interno dell'ascensore lascia andare la piuma ed il sasso essi rimarranno al loro posto dal momento che nessuna forza agisce su di loro.* Il pavimento però si sta muovendo verso l'alto e, prima o poi, raggiungerà i due oggetti. La persona all'interno dell'ascensore, ignorando la situazione esterna, può credere di trovarsi dentro *un campo gravitazionale* dal momento che, lasciando andare la piuma ed il sasso, essi "cadono" sul pavimento contemporaneamente. La persona

stessa inoltre "sente" il proprio peso a causa del pavimento che spinge contro i piedi.

Si può quindi affermare che: gli effetti di *un'accelerazione costante* su di un osservatore sono equivalenti a quelli di *un campo gravitazionale uniforme* sullo stesso osservatore supposto in quiete. In questo consiste il famoso *principio di equivalenza* formulato da Einstein nel 1911. Sono state effettuate diverse verifiche sperimentali del *principio di equivalenza* e le principali prendono in considerazione due tipi di esperimenti: la bilancia gravitazionale ed il red-shift gravitazionale. Il grado di precisione con cui è stato verificato il *principio d'equivalenza* è talmente elevato da risultare uno dei pilastri dell'intera fisica moderna.

L'inerzia e il principio di Mach

Un altro dei tratti caratteristici della Relatività Generale riguarda l'introduzione dello spazio-tempo e la perdita della possibilità di dare un senso fisico al concetto di spazio assoluto.

La prima legge del moto di Newton afferma che ogni corpo tende a mantenere il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme. La *seconda legge del moto* stabilisce che ogni corpo possiede un'inerzia espressa dalla sua massa m , che si oppone agli agenti esterni (le forze F) che tendono ad alterare il suo stato dinamico ed a fornirgli un'accelerazione a : $F = ma$).

Ad esempio quando partiamo in automobile, impieghiamo un certo tempo a raggiungere la velocità di crociera perché il veicolo tende a rimanere fermo. Viceversa, se freniamo bruscamente, impieghiamo del tempo a fermarci del tutto perché l'automobile tende a mantenere la velocità di crociera.

La seconda legge del moto di Newton vale però solo per "sistemi di riferimento inerziali" che sono quei sistemi privi di accelerazione. La Terra non è un sistema di riferimento inerziale perché ruota su se stessa ed intorno al Sole. Anche il Sole però non costituisce un sistema inerziale in quanto ruota nella Galassia, e la Galassia nel Gruppo Locale ecc. Sembra proprio che non si riesca a trovare un sistema di riferimento "fisso", il cosiddetto spazio assoluto di Newton, in cui le leggi del moto (incluso anche la *terza legge del moto*, il principio di azione e reazione) siano verificate con la massima precisione.

La difficoltà inerente al concetto di spazio assoluto non era naturalmente sfuggita al genio di Newton, ma egli credette di averla risolta con il famoso esperimento del secchio rotante. Se un secchio pieno d'acqua è messo in rotazione attorno al suo asse verticale, dapprima l'acqua rimane ferma senza partecipare alla rotazione delle pareti del recipiente e la sua superficie rimane intatta. Successivamente, man mano che la rotazione del secchio si trasmette all'acqua, questa comincia a ruotare manifestando un rialzamento della superficie libera al bordo ed una depressione al centro. Dunque all'inizio l'acqua ruota rispetto al secchio ma "in realtà" (cioè rispetto allo spazio assoluto) è in quiete perché la sua superficie è piana; successivamente essa è ferma rispetto alle pareti ma "in realtà" ruota perché la sua superficie s'incurva. Secondo Newton esperimenti di questo tipo permettono di distinguere tra moti relativi e moti assoluti.

Berkeley prima e Mach poi contestarono questo modo di vedere le cose. Se escludessimo le stelle fisse, sostenevano, l'acqua del secchio non s'incurverebbe mai escludendo così la possibilità di individuare lo spazio assoluto. Il succo del loro ragionamento è il seguente: noi non possiamo dire se un corpo si muova di moto uniforme o se stia fermo, a meno che

non vi sia un secondo corpo rispetto al quale misurare la velocità del primo. Questo vale anche per un corpo accelerato. Infatti, in assenza di un secondo corpo di riferimento, non siamo in grado di dire se un oggetto percorra una traiettoria curva o rettilinea, e se varia o meno la sua velocità.

Il *principio di Mach* afferma che: *"le masse laggiù determinano l'inerzia qua"*. L'inerzia, cioè la proprietà di un corpo di continuare a muoversi di moto uniforme finché non viene disturbato da una forza, non può essere una proprietà intrinseca al corpo, ma deve essere determinata dalla sua interazione con le altre masse dell'Universo; tolte via queste masse, anche l'inerzia sparirebbe perché non si vede rispetto a cosa il corpo potrebbe accelerare o rallentare il suo moto.

Lo spazio-tempo relativistico

Rivolgendosi a Charlie Chaplin dopo la prima di un suo film Albert Einstein gli disse: *"Lei è famoso perché è capito da tutti, io sono invece famoso perché solo pochi mi comprendono"*.

La teoria delle Relatività Generale, ha mostrato che per costruire un sistema di riferimento adatto all'Universo è necessario collegare lo spazio con il tempo. Lo spazio-tempo che ne risulta è a quattro dimensioni tre delle quali spaziali e la restante temporale. Ogni punto dello spazio-tempo è quindi individuato da quattro coordinate che definiscono un "evento".

Quanto la variabile tempo sia essenziale nella descrizione dell'Universo appare evidente dal fatto che noi *oggi* (in conseguenza della finitezza della velocità della luce) osserviamo oggetti, in quanto lontani, vecchi di milioni e miliardi di anni. Scrutando l'Universo abbiamo sotto gli occhi il passato; tanto più remoto quanto più lontani sono i corpi celesti che si osservano.

Il *principio d'equivalenza* rappresenta il cardine, insieme al *principio di Mach*, su cui è costruita la Relatività Generale. In modo un po' provocatorio si può affermare, seguendo le idee guida di Einstein, che la gravità non esiste. L'effetto di un qualsiasi corpo materiale è quello di "incurvare" lo spazio intorno a sé. Tale "curvatura" fa deviare i corpi dalla loro traiettoria rettilinea provocando in questo modo quella che noi chiamiamo attrazione gravitazionale. Due oggetti dal peso tanto diverso, come una piuma ed un sasso, cadono a terra con la stessa accelerazione in quanto essi semplicemente si muovono in uno spazio curvo che deflette le loro traiettorie in uguale misura.



Figura 8.

Nel 1905 con l'avvento della teoria della Relatività Ristretta fu stabilita da Einstein un'equivalenza (da non confondersi con il "principio" di equivalenza) tra massa ed energia

tramite la celebre formula: $E = mc^2$. Ne risulta che la massa è una forma di energia molto concentrata; per cui se la gravità agisce sulle masse allora deve agire anche sull'energia.

Vediamo come l'azione gravitazionale di un corpo massiccio, ad esempio il Sole, possa essere messa in evidenza utilizzando le traiettorie dei raggi luminosi. Supponiamo di scattare, di notte tramite un telescopio, una foto di una zona del cielo in modo da stabilire la posizione di una serie di stelle ed assumiamo queste come le loro posizioni "vere". Cerchiamo ora di osservare le stesse stelle in un differente periodo dell'anno, in cui esse si trovano alla portata del nostro telescopio, ma di giorno; ad esempio durante un'eclissi di Sole! I raggi di luce di queste stelle devono allora, passando vicino al bordo del Sole, essere deflessi dal suo campo gravitazionale. Questo significa, esagerando l'effetto, che bisogna spostare il telescopio in modo che punti verso il bordo del Sole sebbene la posizione "vera" delle stelle sia quella dietro il Sole. In altri termini ne risulterà una differenza tra la loro posizione "vera" e la posizione "apparente". Nel caso del Sole l'effetto previsto dalla Relatività Generale è molto piccolo: 1,7 secondi d'arco. È proprio quanto Sir Artur Eddington riuscì a misurare nel 1919 verificando clamorosamente la teoria di Einstein.

Mercurio è il più piccolo dei pianeti "terrestri", che comprendono anche Venere, Terra e Marte. Il diametro del pianeta è circa un terzo di quello della Terra mentre la quantità di luce ricevuta dal Sole è, data la minore distanza, circa 6,67 volte maggiore di quella della Terra. La sua orbita è fortemente inclinata sull'eclittica, caratteristica questa condivisa solo con il pianeta più esterno Plutone; infatti la sua eccentricità è molto elevata (0,2056) per cui al perielio la sua distanza dal Sole è di 46 milioni di km mentre all'afelio risulta di 76 milioni di km. Il perielio della sua orbita precede molto lentamente e gli astronomi del secolo scorso ritenevano la meccanica newtoniana inadeguata per spiegare tale precessione, arrivando persino a sospettare l'esistenza di un altro pianeta (chiamato Vulcano) vicino all'orbita di Mercurio. Solo la teoria della Relatività Generale di Einstein spiegò tale discrepanza (di 40 secondi d'arco per secolo) rinunciando all'esistenza di Vulcano. La corretta spiegazione della precessione del perielio è stata un'altra importante verifica di tale rivoluzionaria teoria.

La gravità

Roberto Bedogni

Home

Introduzione

La gravità
newtoniana

La gravità di
Einstein

Conclusioni

Lettere

Conclusioni

I successi e le applicazioni della Relatività Generale non si esauriscono qui. Di straordinaria importanza per la fisica moderna sono i modelli cosmologici che forniscono una visione inedita, ma soprattutto completa, dell'evoluzione dell'intero Universo. Da non dimenticare inoltre le previsioni teoriche riguardanti gli oggetti compatti che hanno trovato nell'astrofisica degli oggetti collassati (nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri) un'importante controparte osservativa, ma questi argomenti vanno ben al di là di questa semplice e limitata trattazione.

Ringraziamenti: si ringraziano il Annibale D'Ercole dell'Osservatorio Astronomico di Bologna e Franco Zavatti del Dipartimento di Astronomia di Bologna per la preziosa collaborazione offerta nella stesura del testo.

La gravità

Roberto Bedogni

Lecture

Introduzione

*P. Bergmann, *L'enigma della Gravitazione*, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori (EST), Milano, 1978;

La gravità newtoniana

*P. Davies (a cura di), *La Nuova Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992 ;

La gravità di Einstein

H. Georgi, *Una teoria unificata delle particelle e delle forze*, in *Le Scienze*, n 154, 1981, pp.56-80;

Conclusioni

S. Hawking, *La meccanica quantistica dei Buchi Neri*, in *Le Scienze*, n 105, 1977, pp.38-44;

Lecture

*J. N. Islam, *Il destino ultimo dell'Universo*, Zanichelli, Bologna, 1988 ;

T. Kuhn, *La Rivoluzione Copernicana. L'astronomia planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale*, Einaudi, Torino, 1972;

Y. Ne'Eman, Y. Kirsch *Cacciatori di Particelle*, Bollati Boringhieri, Torino, 1986.

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

La radiazione elettromagnetica

Valentina Zitelli

Introduzione

Introduzione

Cenni di struttura della materia

Lo spettro elettromagnetico

Astronomie non fotoniche

La luce che ci illumina durante il giorno altro non è che radiazione elettromagnetica. Essa ha avuto un ruolo molto importante per lo sviluppo delle conoscenze del nostro universo grazie a tutte le informazioni che racchiude e ancora oggi, epoca di grande sviluppo tecnologico, è la base su cui è fondata l'astrofisica moderna. Tutte le nostre conoscenze astronomiche sono partite dall'informazione che ci ha dato la radiazione elettromagnetica e, in particolare, da quella parte di radiazione cui l'occhio umano è sensibile e che ha permesso di formulare le prime leggi della fisica: la *radiazione visibile*.

Il termine luce sottintende, nel linguaggio comune, quella parte di radiazione emessa dai corpi celesti cui l'occhio umano è sensibile, ma è solo una parte di tutta la radiazione che ci proviene dagli oggetti celesti e che sappiamo essere generata dalla combustione dei loro componenti nucleari. La luce o, meglio, lo studio della emissione, della propagazione e dell'assorbimento della luce, ha formato fino a poco tempo fa un capitolo a se stante della fisica e fu solo all'inizio del '900, in seguito alle teorie di Maxwell e Lorentz, che fu chiaro che cosa le permetteva di arrivare fino a noi. Ora sappiamo che la luce, per arrivare ai nostri occhi, ha bisogno di un mezzo che la trasporti e questo mezzo è l'onda generata dall'alternarsi di due fenomeni fisici, il campo elettrico e quello magnetico, propagati da una sorgente luminosa, come può essere una stella, una pulsar o un quasar. Il termine radiazione elettromagnetica, discende, quindi, dai fenomeni fisici che la originano e il suo comportamento è spiegabile come un fenomeno ondulatorio.

Ma la luce non è l'unico fenomeno ondulatorio con cui abbiamo a che fare nella esperienza quotidiana, anche il suono arriva alle nostre orecchie per mezzo di un moto ondulatorio e il segnale di una radio o di una televisione ci arriva per mezzo di un'onda.

Individuiamo nell'onda il mezzo che permette all'energia di essere trasferita da un punto a un altro senza trasferimento di materia.

Ma come avviene questo trasferimento di energia? Le leggi della fisica ci insegnano che una carica elettrica in moto genera una corrente elettrica che, a sua volta, genera un campo magnetico. Se il campo magnetico varia, anche il campo elettrico varia e, a sua volta, genera un altro campo magnetico variabile. Quindi cariche elettriche accelerate generano "luce" mentre se sono a riposo o si muovono a una velocità costante non producono radiazione.

La radiazione elettromagnetica è rappresentata graficamente come una funzione sinusoidale, ogni sinusoide ha delle creste e delle valli. Definiamo *lunghezza d'onda* la distanza fra due creste o due valli, è misurata in Ångström (1 Ångström = 10^{-10} m), ma può anche essere misurata con dei

multipli dell'Ångström come il micron (μm), ($1\mu\text{m} = 10000$ Ångström) o il cm. La distanza fra una cresta e una valle è detta *ampiezza*. Definiamo *frequenza* il numero di creste (o oscillazioni) che passano in un secondo per un dato punto. Diventa intuitivo capire come la frequenza sia inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda. È però anche importante conoscere la *velocità* con cui si muove un'onda: la velocità si trova moltiplicando la lunghezza di un'onda per la sua frequenza.

La radiazione elettromagnetica

Valentina Zitelli

Cenni di struttura della materia

Introduzione

Cenni di struttura della materia

Relazione Energia-Temperatura

Lo spettro elettromagnetico

Astronomie non fotoniche

Prima di continuare nel discorso della radiazione elettromagnetica è opportuno dare alcuni cenni di struttura della materia. La materia con cui noi ogni giorno abbiamo a che fare e che compone anche il nostro Universo è costituita da atomi. Un atomo è composto da un nucleo di protoni (cariche elettriche positive) e neutroni (cariche neutre) e da una nuvola di elettroni che vi ruotano attorno (cariche negative). In condizioni normali l'atomo è elettricamente neutro, cioè possiede un ugual numero di protoni ed elettroni, tale numero caratterizza l'elemento chimico. Se l'atomo perde o acquista elettroni è chiamato ione. Da elemento a elemento gli atomi sono diversi tra loro, mentre gli atomi dello stesso elemento sono tutti uguali fra loro. Gli atomi diversi possono combinarsi dando luogo alle molecole, ad esempio due atomi di idrogeno combinati con un atomo di ossigeno originano la molecola dell'acqua. Le molecole possono essere o molto semplici, ad esempio formate da due atomi, o molto complesse come quelle del DNA.

Il nucleo contiene il 99 % della massa totale dell'atomo, per cui è estremamente denso. La materia si presenta in quattro stati fondamentali: liquido, solido, gassoso e plasma, in tutte queste fasi gli atomi e le molecole sono in moto continuo e caotico.

Un elemento può passare da uno stato fondamentale all'altro variando le sue condizioni fisiche, ad esempio la temperatura o la pressione, l'effetto di questi parametri fisici è quello di intervenire sulla disposizione degli atomi che costituiscono l'elemento.

Nella fase solida gli atomi o le molecole vibrano attorno a una posizione fissa. Se si fornisce loro energia, aumenta la vibrazione degli atomi o delle molecole e si passa alla fase liquida. Aumentando ancora energia, si passa a una fase gassosa. Se aumentiamo ancora l'energia, le molecole si dissociano, ma non solo esse, anche gli atomi si separano dai loro componenti e si passa allo stato di plasma: una sorta di gas formato da ioni ed elettroni liberi. Il plasma, quindi, non è elettricamente neutro come gli atomi. Anche se lo stato di plasma non è comunemente trovato nella esperienza quotidiana, lo troviamo in abbondanza nell'Universo.

Relazione Energia-Temperatura

Dopo questi cenni di struttura della materia, per analizzare il modo in cui avviene il trasporto dell'energia, dobbiamo rifarci al modello atomico di Bohr: un nucleo centrale con elettroni che gli ruotano attorno occupando zone definite dette orbitali. L'energia posseduta da un elettrone dipende dall'orbitale dove risiede, se l'elettrone si sposta da un orbitale a un altro la sua energia cambia. Ogni atomo è caratterizzato da orbitali ben precisi per cui un salto di un

elettrone ad altri livelli di orbitali può corrispondere a uno stato di equilibrio non stabile. In questo caso l'elettrone tende a passare a una configurazione stabile, che in generale è a minor energia, emettendo l'energia in eccesso in quantità definite e tutte multiple di una quantità detta fotone.

L'energia di un fotone (E) è proporzionale alla frequenza di oscillazione della carica (ν) che lo emette secondo la relazione $E = h\nu$ dove h è la costante di Planck.

L'unità di misura dell'energia dei fotoni è l'elettronvolt (eV) che è definito come l'energia acquisita da un elettrone libero accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt (V), per cui $1eV = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Joule.

Poiché un atomo è caratterizzato dal numero degli orbitali che possiede può assorbire o emettere solo fotoni con valori di energia e , quindi, di frequenza determinati, per cui osservare una certa lunghezza d'onda invece di un'altra significa rivelare un certo componente invece di un altro.

L'esperienza quotidiana ci insegna che se scaldiamo un corpo questo ci riscalda, cioè irradia e più lo scaldiamo più irradia. Questo è un esempio di radiazione termica. Se, inoltre, tale corpo è completamente isolato dal sistema in cui si trova, diciamo che siamo in presenza di una radiazione di corpo nero: mentre gli oggetti celesti presi singolarmente non sono dei veri corpi neri, il cosmo nel suo complesso si comporta come tale.

Ora la domanda è: come è legata l'energia di un corpo alla sua temperatura? La risposta è data da Stefan e Boltzmann con la relazione $E = \sigma \cdot T^4$, essendo σ la costante di Stefan-Boltzmann. Come si distribuisce questa energia nelle varie frequenze? La figura 1 ci mostra l'andamento di tale energia. Si chiama distribuzione di corpo nero e vediamo che l'energia ha un valore massimo a una ben precisa lunghezza d'onda. Questo massimo corrisponde a valori tipici della temperatura superficiale T del corpo in esame. Vediamo ancora che tutti i valori massimi non corrispondono a una stessa lunghezza d'onda, ma si dispongono lungo una curva. Tale andamento è descritto dalla legge di Wien che lega la temperatura superficiale T al valore massimo di lunghezza d'onda secondo la formula $\lambda = 0.51/T$. Questa legge spiega perché il Sole, che ha una temperatura T di circa $6000^\circ C$, emette nella banda ottica.

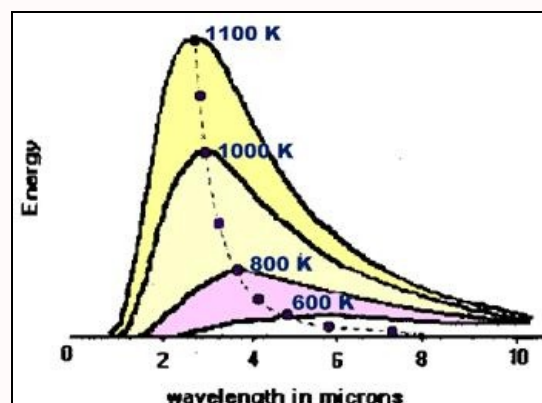


Figura 1. In ascissa la lunghezza d'onda in micron, in ordinata l'energia in unità arbitrarie

La tabella 1 mostra la relazione fra l'energia di ciascun fotone e la frequenza di appartenenza nelle bande in cui è suddivisa la radiazione elettromagnetica. Si può vedere come l'energia di questi fotoni vari da parecchi miliardi di eV a una frazione di eV .

La relazione Energia-Temperatura è valida in caso di equilibrio termico, per questo motivo la radiazione è detta termica, cioè dipendente solo dalla temperatura del corpo

che emette. Nelle parti estreme dello spettro elettromagnetico le temperature sono troppo alte per poter essere spiegate con emissioni di tipo puramente termico, per cui si è ricorsi al concetto di radiazione non termica il cui processo più comune in astronomia è la emissione per sincrotrone oppure per effetto Compton. Tali emissioni sono causate da elettroni liberi che si muovono a velocità relativistiche per effetto di campi magnetici, le energie richieste per accelerare questi elettroni devono essere molto elevate, questo spiega la prevalenza di questo tipo di emissione nelle parti estreme dello spettro elettromagnetico.

Radiazione	Lunghezza d'onda	Frequenza (Hz)	Energia(h · ν) / Fotone(J)	Energia/Fotone (eV)	Temperatura (°K)
Gamma	<0.1nm	> 3·10 ¹⁰	> 2·10 ⁻¹⁵	>12000	10 ⁸
X	0.001nm-100nm	3·10 ²⁰ - 3·10 ¹⁵	2·10 ⁻¹³ - 2·10 ⁻¹⁸	12·10 ³ - 10	10·10 ¹⁰ - 10 ³
Ultravioletto(UV)	10nm-300nm	3·10 ¹⁴ - 10 ¹⁵	2·10 ⁻¹⁷ - 7·10 ⁻¹⁹	120 - 5	10·10 ⁴ - 5·10 ⁴
Ottica	300nm-1 μm	10 ¹⁵ - 3·10 ¹⁴	7·10 ⁻¹⁹ - 2·10 ⁻¹⁹	0.5 - 1	5·10 ⁴ - 10 ⁴
Infrarossa	1 μm-1mm	3·10 ¹⁴ - 3·10 ¹¹	2·10 ⁻¹⁹ - 2·10 ⁻²²	12·10 ⁻¹ - 12·10 ⁻⁴	10 ⁴ - 10
Microonde	1mm-3cm	3·10 ¹¹ - 10 ¹⁰	2·10 ⁻²² - 7·10 ⁻²⁴	12·10 ⁻⁴ - 50·10 ⁻⁴	10·0.5
Radio	1mm-30cm	3·10 ¹¹ - 10 ⁹	2·10 ⁻²² - 7·10 ⁻²⁷	12·10 ⁻⁴ - 50·10 ⁻⁹	10 - 5·10 ⁻⁴
Cosmici				10 ²⁰ - 10 ²¹	
Cosmici di laboratorio				100 GeV	

Dove:
1 Joule = 6.242 · 10¹⁸ eV ; 1 eV = 1.602 · 10⁻¹⁹ J ; 1 °K = -273.16 °C;
h (costante di Planck) = 6.626 · 10⁻³⁴
σ (costante di Stefan-Boltzman) = 5.670 · 10⁻⁸ J · m⁻² · K⁻⁴ · sec⁻¹

Tabella 1. Lo spettro elettromagnetico

La tabella 1 ha introdotto in modo implicito il concetto di spettro elettromagnetico: l'insieme della radiazione elettromagnetica distribuita in tutte le sue lunghezze d'onda e che gli astronomi hanno raggruppato in bande. Da quanto è stato detto precedentemente, ora sappiamo che tali bande si differenziano per la distanza delle creste dell'onda che si forma, tutte si muovono nel vuoto alla stessa velocità, l'unica cosa che le contraddistingue è la frequenza e il processo fisico che genera i fotoni.

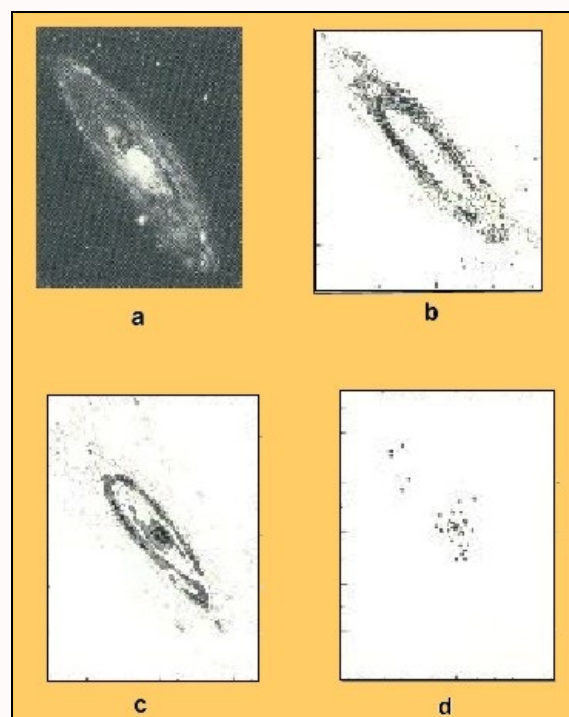


Figura 2.

Quindi studiare oggetti alle varie lunghezze d'onda significa

studiare caratteristiche diverse dello stesso oggetto o vedere oggetti diversi. La figura 2 evidenzia bene questo punto con alcune immagini di Andromeda ottenute:

- a) col filtro blu (4500 Å), una sottobanda della banda ottica: si vedono stelle blu e le regioni più brillanti di idrogeno ionizzato (regioni HII) che danno una visione di insieme della galassia.
- b) con osservazioni radioastronomiche in riga a 21 cm: si vede idrogeno neutro (HI) confinato nei bracci a spirale.
- c) con osservazioni a 60 μ m, una sottobanda dell'infrarosso osservata dallo spazio: mostra la radiazione in gran parte dovuta a polvere interstellare scaldata a 30-40 gradi Kelvin. Questa polvere è tendenzialmente concentrata nei bracci della galassia, ma ne troviamo tracce anche nel suo nucleo.
- d) con osservazioni in banda X. Sono mostrate circa 80 sorgenti distinte che originano l'emissione in tale banda. Molto probabilmente sono oggetti compatti come resti di supernovae (stelle di neutroni o black holes) o nane bianche in sistemi binari con temperature di parecchi milioni di gradi. Con questa immagine notiamo che si perde la visione generale della galassia per distinguere solo quelle zone che emettono in tale banda.

La radiazione elettromagnetica

Valentina Zitelli

Lo spettro elettromagnetico

Introduzione

Cenni di struttura della materia

Lo spettro elettromagnetico

La banda radio

Astronomia infrarossa

Ultravioletto

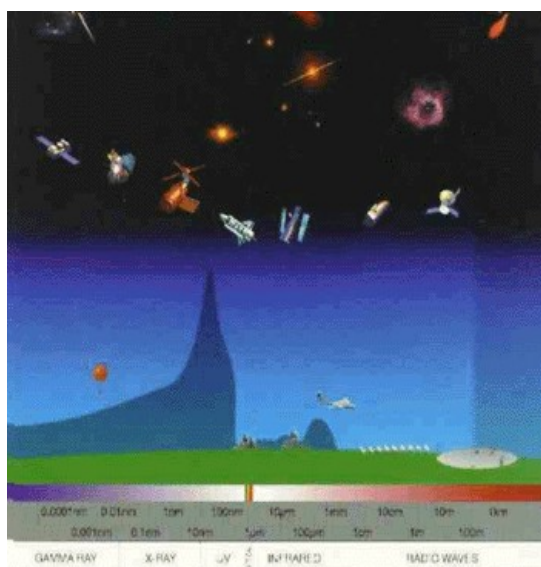
X e Gamma

La banda ottica: il seeing astronomico

Astronomie non fotoniche

Nel suo complesso, lo spettro elettromagnetico è un intervallo continuo di lunghezze d'onda che va da 0 a infinito, ma gli astronomi hanno diviso lo spettro in bande inquadrando così ogni intervallo di lunghezza d'onda in una ben precisa branca di ricerca, per cui abbiamo la radiazione Gamma (γ) che è quella a più corta lunghezza d'onda, poi la radiazione X, quella Ultravioletta (UV), l'Ottica, l'Infrarossa (IR) e, infine, quella Radio a lunghezza d'onda più lunga. I valori che contraddistinguono i confini delle diverse bande sono poco definiti e possono differire anche di centinaia di Ångström, tanto che ad esempio la banda radio alle sue più corte lunghezze d'onda si confonde con l'infrarosso e le tecniche osservative si identificano.

La banda ottica risiede in una zona molto limitata rispetto a tutto il dominio dello spettro elettromagnetico, ma insieme con la radiazione nella banda radio, è l'unica che non è assorbita dall'atmosfera terrestre. La parte di radiazione che è assorbita ha dovuto attendere il progresso tecnologico e lo sviluppo della tecnologia spaziale per dare informazioni di una certa rilevanza scientifica. Vediamo in particolare ogni banda dello spettro elettromagnetico.



La banda radio

La banda radio è, insieme con la banda ottica, osservabile da strumenti posti a terra. I gas della bassa atmosfera assorbono le lunghezze d'onda più corte di 1 mm, mentre la ionosfera riflette la radiazione più lunga di 30 m, questo fatto ha permesso la trasmissione oltreoceano, ma ha

limitato l'espansione della radioastronomia a lunghezze d'onda maggiori. Onde di valore intermedio fra 1 mm e 30 m, che definiscono la banda radio, possono penetrare sia la ionosfera che la bassa atmosfera. A causa della facilità di comunicazione, oggi l'intera banda radio è contaminata dalle frequenze usate dai media più comuni come radio, televisione o altri sistemi ricetrasmittenti.

Gli strumenti capaci di rivelare tale emissione radio sono i radiotelescopi. Ogni radiotelescopio è progettato per lavorare a lunghezze d'onda specifiche, come ad esempio il Lowell Telescope (76 m) a Jodrell Bank che lavora a corte lunghezze d'onda, o quello di Cambridge formato da 1000 dipoli che lo rendono molto potente e capace di rivelare segnali deboli.

L'astronomia radio ha rivelato sorgenti di natura extragalattica molto energetiche, come radiogalassie e quasar. Ha rivelato l'esistenza di molecole presenti nel mezzo interstellare: a tutt'oggi sono state trovate più di 60 molecole, tutte confinate fra la riga a 21 cm e il millimetrico, fra queste sono da citare il monossido di carbonio, l'ammoniaca, la formaldeide, il metanolo e molecole organiche estremamente complesse. La banda radio ha anche rivelato l'emissione dell'idrogeno, ma gli atomi di idrogeno neutro che popolano lo spazio interstellare nella nostra galassia e che originano la radiazione a 21 cm, potrebbero essere residui di radiazione primordiale, questo ha motivato il lancio di COsmic Background Explorer (COBE): un satellite lanciato per analizzare la radiazione cosmica di fondo originata dal Big Bang.

Astronomia infrarossa

La regione infrarossa copre lo spettro fra 1 μm e 1000 μm , ma il limite tradizionale è posto fra 1.1 e 350 μm . Il nostro Sole produce molta radiazione infrarossa, ma non è considerato fra le maggiori sorgenti di tale banda, la sua abbondanza è dovuta alla vicinanza alla Terra. Gli astronomi suddividono ulteriormente la banda IR in differenti regioni:

- Il lontano rosso è una estensione della banda ottica e può essere osservato con telescopi infrarossi collocati a terra, il resto della banda è in gran parte assorbito dal vapore acqueo dell'atmosfera e dal biossido di carbonio. Caratteristica comune di tutte queste sottobande è che tale radiazione può penetrare la polvere che oscura la vista degli oggetti distanti. Tale polvere ha circa le stesse dimensioni della lunghezza d'onda nel visibile e lascia passare radiazione di lunghezza d'onda maggiore delle loro dimensioni. Grazie a questa radiazione si sono mostrate zone di grande attività e formazioni stellari ricche di polveri e materia interstellare.
- Vicino IR: ha poche finestre visibili da terra e accessibili da telescopi posti in alta montagna. Come ci muoviamo verso le lunghezze d'onda maggiori lo scenario cambia notevolmente. Gli oggetti visibili sono nettamente più freddi di quelli delle bande a lunghezza d'onda inferiore. Nell'intervallo fra 1 e 4 μm la temperatura è fra 1000 e 2000 gradi.
- Medio IR: è dovuto alla emissione per riscaldamento. Qui potremmo vedere stelle ancora più fredde, attorno a 100 gradi Kelvin, ma non conosciamo stelle così fredde e riveliamo la polvere presente vicino ai corpi celesti. Il satellite IRAS ha portato conoscenze sulla distribuzione di polvere nella Via Lattea e in altre galassie. La polvere interstellare assorbe la luce delle stelle vicine e si riscalda fino a raggiungere temperature di alcune decine di gradi. L'energia assorbita viene riemessa e ha il massimo nell'IR lontano.
- Lontano IR: è totalmente non osservabile da terra, ed è stato accessibile solo in seguito ai lanci spaziali. È in larga misura inesplorato, rivela un universo attorno a

- zero gradi assoluti di temperatura.
- Submillimetrico: è in una zona intermedia fra la banda radio e quella IR. È facilmente assorbito dal vapore acqueo presente nella bassa atmosfera per cui i telescopi che lavorano in questa banda sono posti in alta montagna.

Ultravioletto

Tale radiazione è prodotta dalle transizioni atomiche degli elettroni appartenenti agli orbitali più esterni e da sorgenti termiche come il Sole, tale banda ha lunghezze d'onda inferiori a 3100 Ångström: circa le dimensioni di un virus.

L'UV è in piccola quantità benefico all'uomo perché fissa la vitamina D nelle ossa, ma un eccesso di questa radiazione è dannoso. Il suo naturale schermo è l'ozono (una forma poco comune di idrogeno). L'ozono, che si estende in maniera continua su tutta la banda ottica, è trasparente alla luce visibile. Esso assorbe la radiazione UV in modo efficace. Questo fatto si è mostrato essenziale alla formazione della vita, ma, per contro, ha ostacolato l'astronomia che ha dovuto attendere i progressi tecnologici e l'avvento dell'era spaziale per portare i telescopi al di sopra dello strato di ozono. Va detto che, mentre per le astronomie più tradizionali, compreso l'IR vicino, è sufficiente collocare i telescopi in alta montagna, chi deve osservare in UV ha più problemi perché lo strato di ozono si estende per 3 ordini di grandezza sopra il livello del mare, neanche il monte Everest risulterebbe sufficiente allo scopo. Il primo telescopio che ha lavorato in questa banda è stato lanciato su pallone, quelli successivi sono stati messi in orbite più alte tramite razzi vettore.

La ricerca che si può affrontare con questi telescopi è lo studio degli oggetti più caldi quindi, seguendo i criteri evolutivi, si vedono oggetti giovani. Nell'estremo UV si vedono oggetti con temperature tipiche di 100.000 gradi Kelvin. Ma le sorprese maggiori sono state ottenute da EUV studiando i nuclei di galassie attive, queste galassie hanno mostrato un centro piccolo e brillante che produce quantità di onde di diverso tipo la cui provenienza è stata attribuita a un disco di gas in un buco nero.

X e Gamma

Pur avendo le radiazioni X e Gamma alto potere di penetrazione, sono assorbite dagli atomi e dalle molecole presenti nell'alta atmosfera. I raggi X sono prodotti dalle transizioni più interne degli atomi o dalle decelerazioni di particelle cariche come elettroni, sono radiazioni prevalentemente di tipo non termico e sono generate da gas superiscaldato da eventi esplosivi presenti in stelle o quasar. La lunghezza d'onda X corrisponde alla distanza tra gli atomi dei solidi. È la stessa radiazione usata in campo medico.

I raggi Gamma sono le radiazioni elettromagnetiche più penetranti e più energetiche di tutto lo spettro elettromagnetico. Una esposizione prolungata può avere effetti dannosi sul corpo umano. Sono radiazioni che possono essere emesse nelle transizioni di un nucleo atomico da uno stato a un altro, per cui in astronomia sono indicatori di certi processi nucleari che avvengono in oggetti celesti come pulsar o quasar. La parte di radiazione Gamma a più corte lunghezze d'onda (alte energie) trasporta tanta energia nell'alta atmosfera da produrre burst di luce Cerenkov che può essere rivelata da telescopi collocati a terra. Le radiazioni gamma più energetiche che oggi si conoscono non sono quelle prodotte dall'uomo tramite le centrali atomiche, ma quelle di origine naturale cioè cosmica.

Satelliti X come ROSAT, EINSTEIN e Skylab hanno studiato sorgenti dalla corona solare fino a resti di supernova e buchi neri. Il satellite COS-B e il Compton Gamma Ray ha studiato pulsar, nubi di gas interstellare bombardato da particelle subatomiche ad alta velocità e il nucleo di galassie attive distanti.

La banda ottica: il seeing astronomico

Abbiamo definito operativamente *luce visibile* quella parte di radiazione elettromagnetica cui l'occhio umano è sensibile. L'emissione di luce visibile è particolarmente probabile quando gli elettroni che compiono le transizioni sono quelli che risiedono nelle orbite esterne. La sorgente più familiare di luce visibile è il Sole, ma, pur emettendo principalmente in questa banda con un picco attorno ai 5500 Å, non è fra le sorgenti più potenti che conosciamo.

I media e Internet ci hanno abituato a vedere immagini ottiche spettacolari, soprattutto in seguito al telescopio spaziale Hubble. Perché le immagini dallo spazio risultano più nitide di quelle che otteniamo con i telescopi da terra? Che cosa ostacola l'acquisizione di informazioni da parte dei telescopi da terra? È l'atmosfera terrestre che, con la sua turbolenza, costituisce un serio ostacolo alle osservazioni astronomiche. Questo perché un'onda elettromagnetica, nella fase finale del suo percorso, prima di arrivare al telescopio deve attraversare gli strati che compongono l'atmosfera e che, normalmente, hanno un moto turbolento. L'effetto è quello di diminuire la nitidezza dell'immagine, più o meno un effetto simile lo abbiamo quando osserviamo i fondali di un fiume dove scorre dell'acqua limpida. Il risultato è equivalente a una riduzione della qualità ottica del telescopio il che vanifica i costi affrontati nella sua realizzazione. Diventa molto importante quindi lo studio del sito e dell'atmosfera sovrastante il sito astronomico. Di recente astronomi e fisici dell'atmosfera hanno iniziato uno studio per capire quali parametri meteorologici influenzano i parametri atmosferici, in modo da poter prevedere la qualità dell'immagine ottica risultante.

Un modo di superare il problema è stato ottenuto col telescopio spaziale Hubble che, pur avendo uno specchio di 2.4 m di diametro, sta permettendo osservazioni mai effettuate prima d'ora. Tale soluzione però è molto costosa per cui è ancora più conveniente cercare di costruire telescopi sulla terra e studiare siti particolarmente adatti dove collocarli.

Tale studio è abbastanza recente, partito negli anni Sessanta, ha avuto un impulso negli anni Settanta con la teoria della propagazione delle onde elettromagnetiche in un mezzo turbolento quale è l'atmosfera e si sta dimostrando promettente mostrando immagini sempre migliori e nitide.

La radiazione elettromagnetica

Valentina Zitelli

Astronomie non fotoniche

Introduzione

Cenni di struttura della materia

Lo spettro elettromagnetico

Astronomie non fotoniche

L'astronomia multibanda ha rivelato un cosmo che non ci aspettavamo, alle onde corte il cielo è dominato da oggetti altamente energetici e dal gas supercaldo in cluster di galassie. L'astronomia ultravioletta ha mostrato nuovi aspetti di oggetti che credevamo di conoscere. I telescopi infrarossi hanno rivelato zone dove possono nascere le stelle mentre con i radiotelescopi possiamo osservare resti di esplosioni di supernovae, nubi di elettroni emesse da galassie distanti e quanto resta della radiazione primordiale. Ma molti oggetti celesti possono emettere anche sotto forma di altri tipi di energia: per esempio una stella doppia massiva ci manda *onde gravitazionali*. È presumibile pensare che l'energia gravitazionale sia quantizzata come l'energia elettromagnetica e, per similitudine, chiamiamo gravitone il quanto energetico, così come chiamiamo fotone il quanto elettromagnetico. Questa branca dell'astronomia è ancora pionieristica perché tratta energie molto difficili da rivelare a causa della concorrenza della forza gravitazionale terrestre, inoltre l'onda gravitazionale è continuamente deviata dalla gravità degli oggetti incontrati lungo il suo percorso.

Esistono poi le *onde acustiche* o magnetodinamiche generate vicino alla superficie solare e che sono trasmesse dalla corona solare.

Alla radiazione elettromagnetica si affianca la radiazione cosmica: è una radiazione dovuta a particelle con massa dotata di altissima energia che giunge sulla terra dal cosmo e la cui origine non è ancora chiarita. Sostanzialmente la radiazione cosmica è formata da una radiazione detta primaria, composta da nuclei di idrogeno (H 94%) ed elio (He 5.5%) con grande energia (fino a 10^{21} eV per particella). Per dare un'idea, è l'energia di una palla da tennis che viaggia a 100 Km/h, ma concentrata in un solo nucleo atomico. Tale radiazione ci arriva in minima parte perché frenata dalle interazioni con i componenti dell'atmosfera, questi processi danno origine a particelle di minor energia che costituiscono la *radiazione cosmica secondaria*. I raggi cosmici sono particelle di protoni ed elettroni che si muovono a velocità prossime a quella della luce e che prima di colpire la Terra percorrono decine di milioni di anni di spazio. Sono di interesse astronomico in quanto la loro origine è connessa ai fenomeni più energetici che si manifestano nell'universo. La loro energia si collega a fenomeni esplosivi in stelle e galassie lontane. Vi è una differenza fondamentale fra luce e raggi cosmici: la luce (come tutta la radiazione elettromagnetica) viaggia nel vuoto in linea retta, i raggi cosmici, essendo particelle cariche (nuclei atomici), sono continuamente deviati dai campi magnetici che incontrano, per cui è persa l'informazione della direzione da cui provengono. L'unica informazione diretta è ottenibile tramite la rivelazione di raggi gamma o di neutrini prodotti dalla interazione dei raggi cosmici stessi. Quindi, l'astronomia gamma e neutrinica di alte energie

rappresentano due importanti strumenti di indagine sulla natura dei raggi cosmici.

In ultimo, fra le particelle includiamo anche i *neutrini*, accennati sopra. La loro rilevazione è piuttosto complessa perché possono attraversare tranquillamente qualsiasi mezzo.

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

Introduzione	
Introduzione	
La misura della distanza delle stelle	L'intuizione che le stelle siano altrettanti "Soli", meno appariscenti del nostro solo perché più lontani, emerge e diventa una chiave di interpretazione del cosmo nell'opera di Giordano Bruno. Trasformare questa intuizione in quella che è una certezza scientifica in senso moderno comporta il saper determinare, indipendentemente dalla loro tenue apparenza, le caratteristiche intrinseche delle stelle, attraverso la determinazione delle loro quantità fisiche fondamentali.
Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?	Di queste la prima, e chiave per conoscere le altre, è la <i>distanza</i> . Ma per rispondere alla domanda se il Sole è una di tante stelle, ovvero se le stelle sono tanti "Soli", dobbiamo poterne conoscere e confrontare la <i>luminosità</i> , la <i>massa</i> , la <i>temperatura della superficie</i> . Nel far questo si compiono i primi passi verso la comprensione della struttura delle stelle, della sorgente della loro energia, del processo di formazione, vita e morte delle stesse. Ci si muove da una conoscenza "geometrica" dell'universo verso una conoscenza fisica. Riprendendo una vecchia distinzione, per molti aspetti ormai superata, ci si muove dall' <i>Astronomia</i> verso l' <i>Astrofisica</i> .
Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?	Vedremo nel seguito quali sono i criteri, i metodi, le inevitabili approssimazioni e semplificazioni che consentono la conoscenza dei parametri fisici delle stelle. Vedremo poi come il confronto tra essi permette una rudimentale, ma già molto istruttiva, costruzione di uno schema della loro vita: un esempio embrionale di come, collegando i parametri empirici tra di loro, sia possibile costruire un "modello di comportamento" delle stelle.
Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle	
Vita delle stelle	

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

La misura della distanza delle stelle

Introduzione

La misura della distanza delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

Si possono "pesare" le stelle?

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Vita delle stelle

Il primo problema che si pone, volendo trasformare l'immagine del cielo proiettata sulla volta celeste in una visione tridimensionale, in cui entri la "profondità", è quello di conoscere la distanza delle singole stelle. Si tratta di determinare la distanza di oggetti inaccessibili, attraverso un metodo di triangolazione, usato normalmente anche in misure topografiche sulla terra.

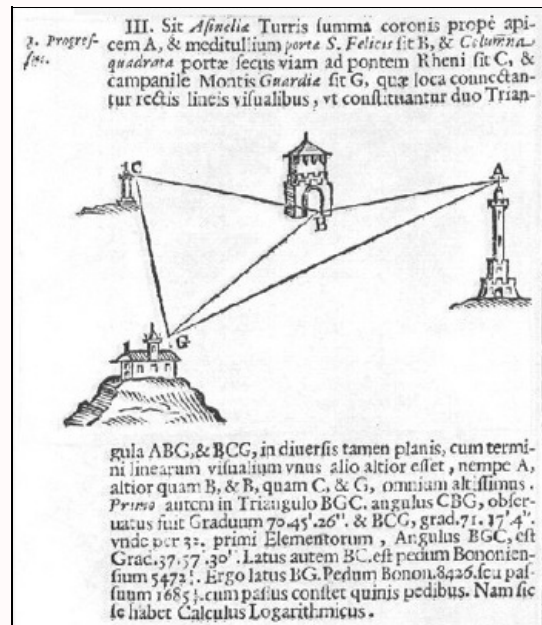


Figura 1. Figura tratta da *Geographiae et hydrographiae reformatae* di G.B. Riccioli (1672)
(Biblioteca del Dipartimento di Astronomia, Università di Bologna)

La figura 1 mostra la logica della triangolazione, utilizzando un antico disegno, riferito ad alcuni edifici salienti della città di Bologna. Misurati la distanza tra i due punti accessibili **A** e **B** (rispettivamente la Torre degli Asinelli e Porta San Felice) e gli angoli GAB e GBA, il triangolo ABG è univocamente definito, e i lati GA e GB, cioè le distanze tra il punto inaccessibile **G** (nella figura il Monte della Guardia, noto per il Santuario della B.V. di S.Luca) ed **A** e **B**, risultano determinati. Un'analoga operazione per verifica è effettuata sul triangolo BCG, usando come base di triangolazione la colonna quadrata del ponte sul Reno e Porta San Felice. È anche chiaro che, al crescere della distanza di G da A e B, l'angolo in G (detto "parallasse") diviene sempre più piccolo, e gli angoli in A e B si avvicinano progressivamente a due angoli retti, fino a divenirne indistinguibili, per effetto della precisione limitata della misura. Il metodo della triangolazione, o della parallasse, trova quindi un limite

quando la base della triangolazione AB diviene molto più piccola della distanza del punto G. Ne segue la necessità di adottare, per la misura di distanze di oggetti esterni al Sistema solare, la base di triangolazione più ampia possibile. Essa è fornita dal moto annuo della Terra attorno al Sole: osservando il variare della posizione apparente di ciascuna stella nel corso dell'anno (si veda la fig.1 dell'articolo di Gisella Clementini) si effettua una operazione analoga a quelle descritte prima. La variazione di posizione, ricondotta per uniformità ad una base di triangolazione pari al semiasse maggiore dell'orbita terrestre, prende il nome di "parallasse stellare". Per nessuna stella essa risulta maggiore di un secondo d'arco. Alfa del Centauro, ben nota per essere, con la compagna Proxima, la stella più vicina a noi, ha una parallasse di circa 0,7 secondi d'arco. Questo equivale a dire che la distanza della stella è circa 300.000 volte la lunghezza della base di triangolazione, data, come già detto, dalla distanza Terra-Sole. Adottando come unità di misura la distanza percorsa dalla luce nel tempo di un anno, Alfa del Centauro risulta così distare dal Sole quattro anni-luce.

La tavola che segue elenca alcune ben note stelle di prima grandezza e la loro distanza ottenuta col metodo della parallasse.

Sirio	9 a.l.
Arturo	34 a.l.
Alfa Cen.	4 a.l.
Vega	25 a.l.
Betelgeuse	1400 a.l.
Antares	522 a.l.

Tab. 1. La distanza delle stelle più brillanti

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

Introduzione

La misura della distanza delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

Si possono "pesare" le stelle?

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Vita delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

La tavola precedente mostra come stelle di prima grandezza, che ci appaiono quindi di luminosità apparente simile, si collochino a distanze molto diverse. Ne viene che esse devono avere una luminosità propria, intrinseca, assai diversa. In termini qualitativi, il fatto che Betelgeuse appaia dalla terra brillante come Arturo, pur essendo cinquanta volte più distante, è segno del fatto che essa è notevolmente più luminosa. L'espressione che permette di valutare quantitativamente questo effetto è ben nota: la luminosità apparente di una sorgente decresce come il quadrato della sua distanza. Esprimendosi in formule, se **I** è la luminosità apparente di una sorgente a distanza **D**, la sua luminosità reale, intrinseca **L** sarà data da:

L = 4 π D² I

Pertanto, una volta determinata la distanza **D** di una stella e la sua luminosità come osservabile dalla Terra **I**, si può ottenere la sua luminosità assoluta.

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

Si possono "pesare" le stelle?

Introduzione

La misura della distanza delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

Si possono "pesare" le stelle?

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Vita delle stelle

Ricordando che il peso è la forza esercitata su un corpo dall'attrazione terrestre, bisognerà rinunciare a questa espressione intuitiva e chiedersi se si può determinare la **massa** delle stelle.

La legge di gravitazione universale di Newton ci dà uno strumento per determinare la massa di un corpo in presenza di un satellite che orbita attorno ad esso. Così periodo e distanza della Luna permettono di determinare la massa della Terra, periodo e distanza dei pianeti dal Sole permettono di determinare la massa del Sole. Se ci limitiamo a considerare orbite circolari, la massa risulta espressa da:

$$M = 4 \pi R^3 / (G T^2)$$

dove **R** è il raggio dell'orbita, **T** il periodo di rivoluzione del pianeta e **G** la costante di gravità.

Nel caso di sistemi esterni al nostro Sistema solare, l'osservazione di pianeti è ancora impossibile. Per essere più precisi, è troppo embrionale per consentire le misure necessarie.

Nel caso di stelle doppie, che orbitano una attorno all'altra, invece, la determinazione di dimensioni e periodi delle orbite è spesso possibile e consente una valutazione delle masse in gioco ragionevolmente precisa. L'attenzione dedicata, nell'astronomia, ai sistemi doppi o multipli, è primariamente dovuta alla possibilità che questi ci riservano di determinarne un parametro così fondamentale come la massa.

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

Introduzione

La misura della distanza delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

Si possono "pesare" le stelle?

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Vita delle stelle

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Nel linguaggio comune la misura della temperatura di un corpo è associata all'uso di un termometro a mercurio o di una sonda posti a contatto del corpo stesso. Nel caso delle stelle, il fatto che siano inaccessibili costringe a considerare metodi di misura molto diversi (e, val appena la pena ricordare, le temperature in gioco impedirebbero l'uso di qualsiasi strumento composto di sostanze solide o liquide). Dalla fisica si sa che la radiazione emessa da un corpo porta il "segno" della temperatura del corpo che l'ha emessa. Così corpi a temperature tipiche dell'ambiente terrestre emettono radiazione infrarossa; corpi a temperatura di 700-1000°C iniziano ad emettere parte della radiazione nel rosso (per questo le braci ardenti appaiono rosse). Al crescere della temperatura la luce emessa è progressivamente dominata dal rosso (2000-3000 °C), dal giallo (5000-6000 °C), dal bianco/blu (10.000 °C) e più oltre dall'ultravioletto.

Una analisi accurata dello spettro della luce di una stella, basata sulla decomposizione della luce stessa nei suoi colori, permette di determinare un indice che, mutuando una espressione dal parlare comune, è chiamato "colore" della stella. Questo individua la temperatura della stella stessa con ragionevole precisione

La tabella seguente elenca le temperature di alcune ben conosciute stelle di prima grandezza, ottenute con questo metodo.

Temperature stellari	
Rigel	20.000 °C
Vega, Sirio	10.000 °C
Sole, Alfa Cen	6.000 °C
Arturo, Aldebaran	4.000 °C
Betelgeuse	3.000 °C

Tabella 2.

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

Introduzione

La misura della distanza delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

Si possono "pesare" le stelle?

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Vita delle stelle

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Una volta ottenuta, per un campione rappresentativo di stelle, una determinazione di massa, luminosità e temperatura, è possibile verificare che, per tutte le stelle che hanno una vita "stabile", queste tre quantità sono strettamente connesse tra loro. Consideriamo, in fig. 2, la relazione tra massa e luminosità. È immediato constatare la forte interdipendenza tra massa e luminosità: stelle di ugual massa hanno anche, con minime variazioni, ugual luminosità.

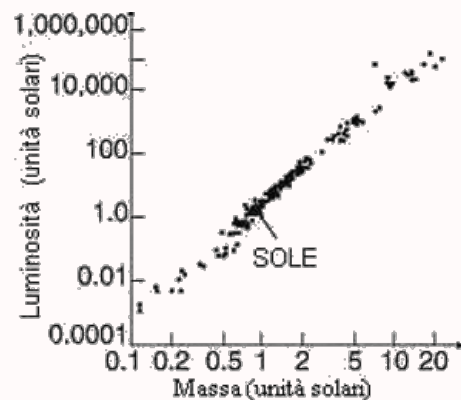


Figura 2.

Un analogo diagramma, noto col nome di diagramma di Hertzsprung-Russell, rappresenta la relazione tra temperatura e luminosità (Fig.3). Analogamente a quanto accade a massa e luminosità, il diagramma di H-R mostra una stretta dipendenza tra temperatura e luminosità (e, di conseguenza, tra massa e temperatura).

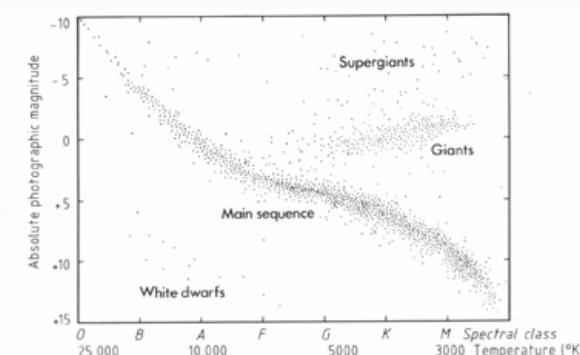


Figura 3. Diagramma di Hertzsprung-Russell (da Richard M. West (Ed.) *Understanding the universe*. Reidel publishing company, 1983).

Una stella di una certa massa ha, forzatamente, una data luminosità e una data temperatura. Le stelle risultano essere, nella stragrande maggioranza, sistemi dotati di un equilibrio interno rigidissimo. Non è una sorpresa: questa estrema stabilità e interdipendenza delle condizioni fisiche è ciò che ha assicurato, nel caso del Sole, la costanza del flusso di energia nell'arco di miliardi di anni e consentito il sorgere delle molecole complesse e della vita. Se l'emissione di energia da parte del Sole fosse soggetta a variazioni importanti, sarebbero mancate le condizioni per il formarsi della vita o mancherebbero quelle per il suo mantenersi.

Per giungere a questo importante risultato non abbiamo dovuto far uso di alcuna conoscenza della struttura interna delle stelle. Esso deriva in modo diretto dall'osservazione di un insieme di stelle, interpretata attraverso poche leggi fisiche fondamentali: gravitazione universale, conservazione dell'energia, fisica della radiazione elettromagnetica.

Una più attenta lettura della fig.2 ci fornisce un altro importante risultato, che possiamo utilizzare per costruire un modello, rudimentale ma efficace, di "comportamento" delle stelle. Mentre la massa delle stelle considerate varia da circa 0,1 masse solari a 20 masse solari, la luminosità delle stesse varia da 0,0001 a 1.000.000 di luminosità solari: una stella 10 volte più massiccia del Sole è ben 1000 volte più luminosa del sole stesso; una stella di massa pari a un decimo della massa del Sole è 1000 volte meno brillante. La luminosità dipende strettamente dalla massa, ma non è proporzionale ad essa, quanto alla sua terza potenza:

$$L \propto M^3$$

Cumulando in una stella una massa maggiore, il processo di produzione e emissione dell'energia prodotta all'interno risulta molto accelerato. Lo studio della struttura interna delle stelle e dei processi di fusione nucleare che avvengono nella regione più interna di esse dà ragione di questo risultato osservativo. Senza inoltrarci in questo studio, possiamo però ugualmente elaborare, su basi più intuitive, un modello di "vita" delle stelle.

Un qualsiasi "combustibile" può liberare una quantità di energia proporzionale alla sua massa (... riempiendo a metà il serbatoio dell'auto, avremo a disposizione per il motore metà dell'energia disponibile col "pieno"...). Ciò si applica alle situazioni in cui l'energia è ottenuta per combustione, per fissione nucleare e, infine, per fusione nucleare.

Quest'ultimo caso è quello che si applica alle stelle: in esse la trasformazione dell'idrogeno in elio, che ha luogo nell'interno, produce una energia pari al 0,7% dell'energia (mc^2) associata alla massa di ciascun atomo coinvolto.

Se assumiamo che, nel corso della vita di ogni stella, una stessa frazione della massa totale sia coinvolta nel processo di fusione, potremo allora appunto concludere che l'energia totale disponibile **E** è proporzionale alla massa **M**:

$$E \propto M$$

Se **L** è la luminosità della stella, cioè l'energia emessa al secondo, il tempo **t** di vita della stella che ha un "serbatoio" totale di energia **E** è:

$$t = E/L$$

Componendo le tre formule precedenti, risulta:

$$t \propto M/M^3$$

ovvero

$$t \propto 1/M^2$$

Il tempo di vita di una stella (una quantità non osservabile in

modo diretto) decresce col quadrato della massa: una stella di due masse solari si esaurisce in un tempo quattro volte più breve di quanto non accada al Sole. La tavola che segue esprime in forma numerica questo risultato per diverse masse stellari: in essa massa **M** e luminosità **L** sono espresse in rapporto a quelle solari, i tempi di vita in milioni di anni.

Le relazioni dell'astrofisica

Bruno Marano

Le relazioni dell'astrofisica

Introduzione

La misura della distanza delle stelle

Si può misurare la luminosità "reale" delle stelle?

Si possono "pesare" le stelle?

Si può misurare la temperatura della superficie delle stelle?

Le relazioni tra massa, luminosità e temperatura delle stelle

Vita delle stelle

Vita delle stelle

<i>Stella</i>	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>vita</i>
Rigel	10	44.000	2 10⁷ anni
Sirio	2.3	23	10⁹ anni
Alfa Cen	1.1	1.4	7 10⁹ anni
Sole	1.0	1.0	10¹⁰ anni
Proxima Cen	0.1	0.00006	>10¹² anni

Tabella 3.

Sulla base di questa ricostruzione, le stelle più brillanti di un ammasso ci dichiarano il tempo trascorso dalla sua formazione. Ad esempio le stelle più brillanti del gruppo delle Pleiadi denunciano un' età di "soli" 20 milioni di anni: se ne fossero passati di più, le sette stelle più brillanti, visibili ad occhio nudo, si sarebbero esaurite, e l'aspetto dell'ammasso, col mutare della sua popolazione di stelle, sarebbe molto diverso.

Le sorgenti di energia nucleare nelle stelle

Flavio Fusi Pecci

Fonte primaria di energia nel Sole

Gli attori protagonisti delle reazioni nucleari e le regole del gioco

Fattori che regolano il ritmo di produzione dell'energia e con chi si deve combattere

I processi nucleari più importanti nelle stelle e la nucleosintesi degli elementi

Conclusioni

Fonte primaria di energia nel Sole

Sebbene il tema originale della lezione fosse una discussione generale sulle sorgenti di energia nei corpi celesti, data la ristrettezza dei tempi, ci limiteremo a trattare esclusivamente e molto sommariamente le sorgenti di energia nucleare nelle stelle, partendo da alcune semplici considerazioni sul Sole.

Con calcoli non particolarmente complicati si può dimostrare come nessuna sorgente di energia "classica" possa consentire una costanza di emissione di energia da parte del Sole per oltre 4 miliardi di anni, come implicano le evidenze sperimentali sulla Terra.

Se si considerano infatti l'energia termica e quella gravitazionale si ha, facendo i calcoli per ordine di grandezza, che:

$$E_{\text{grav}} \cong -\frac{M_{\text{sole}}^2 G}{R_{\text{sole}}} \cong \frac{[2 \times 10^{33}]^2 \cdot 6.68 \times 10^{-8}}{7 \times 10^{20}} \cong 5 \cdot 10^{48} \text{ erg}$$

Dove G è la costante di gravitazione universale, M_{sole} la massa del Sole e R_{sole} il raggio solare.

$$E_{\text{term}} \cong \frac{3}{2} \cdot \frac{K \cdot T}{m} \cdot M_{\text{sole}} \cong \frac{3}{2} \cdot \frac{1.38 \cdot 10^{-16} \cdot 10^7 \cdot 2 \times 10^{33}}{1.67 \times 10^{-24}} \cong 5 \times 10^{48} \text{ erg}$$

dove K è la costante di Boltzmann, T la temperatura al centro del Sole, m la massa del protone e M_{sole} la massa del Sole.

Questo è il serbatoio massimo di energia a disposizione del Sole se, per così dire, lo spremessimo come un limone estraendo completamente tutto il suo "succo". Poiché il Sole in questo momento ha una luminosità pari a circa $4 \cdot 10^{33} \text{ erg/sec}$ (cioè emette complessivamente questa energia ogni secondo), si può calcolare per quanti anni potrebbe averlo fatto a questo ritmo semplicemente dividendo la capacità del serbatoio per il consumo. Facendo ciò si ottiene un tempo pari a circa 10^{10} secondi e, ricordando che in un anno ci sono $60 \times 60 \times 24 \times 365$ secondi, cioè circa $3 \cdot 10^7$ secondi, si ricava che il Sole (basandosi solo su queste sorgenti di energia) potrebbe vivere a questo ritmo di consumo energetico per circa 10^8 anni, cioè solo qualche centinaio di milioni di anni al massimo, mentre sappiamo che è rimasto più o meno costante nella sua emissione per oltre quattro miliardi di anni. Evidentemente deve esistere una fonte alternativa e più efficace sul lungo periodo.

Parlando molto schematicamente, oggi sappiamo che un grammo di materia può di fatto fornire fino ad un milione di volte più energia se viene "spremuto" tramite le reazioni nucleari di quanto si possa ottenere "spremendolo" per via

termica e gravitazionale. Di nuovo, con un calcolo fatto per ordini di grandezza, si vede allora che il "serbatoio nucleare" del Sole è circa:

$$E_{\text{nucl}} = M_{\text{sole}} \cdot c^2 = 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{33} \times 9 \times 10^{20} \cong 10^{50} \text{ erg}$$

Questo perché, come vedremo, non tutta la materia può essere trasformata in energia, ma solo una frazione inferiore al millesimo. Aumentando il serbatoio potenziale di oltre cento volte, anche la vita del Sole sale a circa 10 miliardi di anni, diventando così compatibile con le evidenze sperimentali. Inoltre questo ci dice anche che il Sole "è nel mezzo del cammin della sua vita".

Le sorgenti di energia nucleare nelle stelle

Flavio Fusi Pecci

Fonte primaria di energia nel Sole

Gli attori protagonisti delle reazioni nucleari e le regole del gioco

Fattori che regolano il ritmo di produzione dell'energia e con chi si deve combattere

I processi nucleari più importanti nelle stelle e la nucleosintesi degli elementi

Conclusioni

Gli attori protagonisti delle reazioni nucleari e le regole del gioco

Le reazioni nucleari fondamentali che avvengono nelle stelle sono nella stragrande maggioranza dei casi quelle cosiddette di "fusione" in cui due particelle si avvicinano fra loro fino a formare un sistema legato (fondendosi) e, allo stesso tempo, rilasciando energia (pari alla trasformazione in energia della lieve diminuzione della massa totale) che verrà poi progressivamente trasportata dalla zona di produzione (in generale nell'interno della stella) verso l'esterno. L'altro tipo di reazioni nucleari, la cosiddetta "fissione" in cui si ottiene energia spezzando particelle pesanti, è, di norma, totalmente trascurabile. Siccome la stragrande maggioranza delle stelle per gran parte della loro vita sono fatte di circa il 74% in massa di idrogeno, il 24% di elio e meno del 2% restante di tutti gli altri elementi, e poiché idrogeno ed elio sono elementi leggeri, è abbastanza naturale immaginare che la fusione sia il meccanismo alla base della produzione di energia nelle stelle.

A questo proposito è interessante notare che la osservazione che le stelle siano fatte sostanzialmente di idrogeno ed elio costituisce una delle evidenze sperimentali più forti a sostegno della teoria del Big Bang che appunto prevede la formazione primordiale quasi esclusivamente di idrogeno ed elio e di pochi altri elementi leggeri (*D*, *Li*, *Be*, *B*) in piccolissime quantità.

Ma, tornando agli attori, si ha che i veri protagonisti delle reazioni nucleari sono riconducibili alle 7 particelle per cui vengono elencate le proprietà fondamentali in Tabella 1. Come si vede elettrone e protone hanno cariche elettriche opposte e massa molto diversa (il protone ha una massa circa 1840 volte più grande dell'elettrone), il positrone è di fatto un elettrone con carica positiva, il neutrone ha massa lievemente maggiore del protone, ma è neutro elettricamente (e questo gli conferisce proprietà molto particolari, come vedremo), il neutrino e l'antineutrino sono "animali strani" con carica elettrica nulla e massa a riposo certamente piccola, ma sconosciuta (forse anche zero), con profonde implicazioni cosmologiche (anche di questo parleremo in seguito), i fotoni infine sono i ben noti quanti di energia indicati spesso con il nome di raggi gamma.

Per chi avesse maggiore dimestichezza con la fisica, va detto che le varie particelle sono anche caratterizzate da un ulteriore parametro chiamato "spin", per cui se lo spin ha valore intero esse obbediscono alla statistica di Bose-Einstein, se invece è semintero obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac. Ciò ha importanti conseguenze nel trattamento della materia stellare in varie condizioni ed in particolare quando si va ad altissime densità, ma non è possibile qui dilungarsi oltre.

Come in tutte le sceneggiature, gli attori debbono muoversi

ed interagire obbedendo a certe regole. Nel caso delle reazioni nucleari le regole base sono:

- a) si deve conservare la massa-energia
- b) si deve conservare la carica totale delle particelle in gioco
- c) si deve conservare il numero delle "particelle" e delle "anti-particelle"
- d) si deve conservare il numero dei "leptoni" e degli "antileptoni" (vedi Tab.1)
- e) si deve conservare il numero dei "barioni" e degli "anti-barioni" (vedi Tab.1)

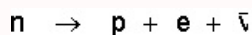
Particella	Simbolo	Massa a riposo g	Massa a riposo MeV	Carica esu	Tempo di vita medio sec	Classe
Fotone	γ	0	0	0		Fotone
Neutrino	ν	0	0	0		Leptone
Antineutrino	$\bar{\nu}$	0	0	0		Antileptone
Elettrone	e	$9 \cdot 10^{-28}$	0.511	$-5 \cdot 10^{-10}$		Leptone
Positrone	e^+	$9 \cdot 10^{-28}$	0.511	$+5 \cdot 10^{-10}$		Antileptone
Protone	p	$1.6 \cdot 10^{-24}$	938.256	$+5 \cdot 10^{-10}$		Barione
Neutrone	n	$1.6 \cdot 10^{-24}$	939.550	0	$6.4 \cdot 10^{-2}$	Barione

Tabella 1. Alcune particelle che prendono parte in molte reazioni nucleari. (da Astrophysical Concepts, Springer-Verlag, 1988).

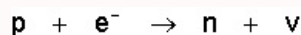
Avendo assunto queste regole come vincolo generale non violabile, i tipi base di reazioni nucleari che avvengono nelle stelle sono:

I. Decadimento Beta

Un neutrone, come particella libera o come nucleone all'interno di un nucleo, può "decadere" dando luogo ad un protone, un elettrone ed un antineutrino

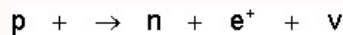


Questa reazione può avvenire spontaneamente (il neutrone libero ha infatti una vita media di solo 8 minuti, e questo ha profonde implicazioni nella nucleosintesi degli elementi). Ma questa reazione può anche avvenire in senso opposto, in tal caso si parla di reazione "Beta inversa"



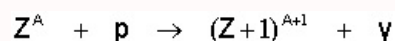
II. Decadimento di un positrone

In questo caso un protone dà luogo ad un neutrone, un positrone ed un neutrino. Tale processo richiede energia, dal momento che la massa del neutrone e del positrone insieme è maggiore di quella del protone



III. Processi (p, γ)

Un protone reagisce con un nucleo di carica elettrica Z e massa A (= Z + N = numero di protoni + numero di neutroni) per produrre una particella più massiccia con carica (Z+1) . L'energia è liberata sotto forma di un fotone



IV. Processi (α, γ) e (γ, α)

In questi processi, una particella alfa - cioè un nucleo di elio, costituito da due protoni e due neutroni per formare il nucleo più stabile in natura - viene aggiunta ad un nucleo preesistente o viene da esso espulsa. L'energia liberata nell'aggiungere la particella alfa viene portata fuori dal fotone. Quella necessaria per estrarre la particella alfa viene simmetricamente aggiunta dal fotone. Questo tipo di reazione è particolarmente importante nei nuclei che contengono un numero pari di protoni e neutroni perché gli elementi che sono costituiti da un multiplo intero di particelle alfa sono fra i più stabili ed abbondanti in natura.

V. Processi (n, γ) , e (γ, n)

Tali processi coinvolgono l'aggiunta o la sottrazione di un neutrone. Il nucleo emette o assorbe un fotone per garantire il bilanciamento energetico totale. Hanno un ruolo centrale nella nucleosintesi degli elementi &pesanti& e possono avvenire in diverse condizioni.

Le sorgenti di energia nucleare nelle stelle

Flavio Fusi Pecci

Fonte primaria di energia nel Sole

Gli attori protagonisti delle reazioni nucleari e le regole del gioco

Fattori che regolano il ritmo di produzione dell'energia e con chi si deve combattere

I processi nucleari più importanti nelle stelle e la nucleosintesi degli elementi

Conclusioni

Fattori che regolano il ritmo di produzione dell'energia e con chi si deve combattere

I fattori che entrano in ballo sono numerosi e complessi, ma schematicamente possono essere riassunti dicendo che il numero di reazioni nucleari che coinvolgono due elementi (1) e (2) è proporzionale a:

- la densità numerica delle particelle di tipo (1);
- la densità numerica delle particelle di tipo (2);
- la frequenza delle collisioni, che a propria volta dipende dalla velocità relativa con cui le due si avvicinano;
- la cosiddetta "sezione d'urto" delle particelle; per capirsi con un esempio molto rozzo, questo vuole dire che più "larga" è la particella e più "va piano" e maggiore è la probabilità che dia luogo ad un urto.

D'altra parte però, come abbiamo visto in precedenza, le particelle in gioco almeno nelle reazioni fondamentali sono cariche elettricamente. Poiché inoltre nelle reazioni di "fusione calda" che avvengono nelle stelle a milioni di gradi, tutti gli atomi sono ionizzati (e quindi gli elettroni negativi sono liberi e di fatto indipendenti dai nuclei, cioè il gas è un plasma), la fusione deve avvenire fra particelle che hanno la stessa carica elettrica. Queste, quindi, per la ben nota legge di Coulomb, avvicinandole si respingono. Inoltre, più grande è la carica in gioco (cioè più numerosi sono i protoni - e quindi più grande è la particella) e più forte è la repulsione. Ciò significa che, per fare avvenire la reazione, bisogna superare la cosiddetta "barriera coulombiana". Come se ci fosse un muro o, meglio, come se avessimo da fare rotolare una pallina lungo il fianco di un vulcano, più si sale e più si fa fatica, ma fino ad un certo punto, perché quando si arriva in cima ci può essere una bella sorpresa. Ma anche allorché si superasse la barriera coulombiana, l'avventura non è finita. Infatti bisogna valutare la cosiddetta probabilità di interazione, cioè la probabilità che realmente il "matrimonio" vada a buon fine. Ciò è fortemente dipendente dal tipo di interazione fondamentale coinvolta.

In natura si conoscono quattro interazioni fondamentali che hanno raggio di azione e "forza" molto diversa, tali da renderle dominanti o irrilevanti a seconda dei corpi che interagiscono e delle mutue distanze. In sintesi estrema esse sono le interazioni:

- FORTE (detta anche forza di colore), che agisce fra i "quarks" e la cui componente a lungo raggio è anche detta "forza nucleare forte";
- ELETTROMAGNETICA, che regola la interazione fra cariche elettriche e magnetiche;
- DEBOLE, che, fra le altre cose, è responsabile del citato decadimento Beta;
- GRAVITAZIONALE, che è in realtà la più debole fra le quattro e che regola il comportamento delle masse.

Mentre la gravitazione e l'elettromagnetismo hanno un intervallo di interazione potenzialmente infinito, l'effetto della interazione forte è ristretto alle dimensioni nucleari (pur essendo fortissima e dominante su quella scala) e quello della forza debole è anche inferiore (quasi fosse ridotta ad un punto, riguardando la struttura interna stessa delle particelle) ma, a livello delle subparticelle, è assolutamente dominante e fortissima.

Ora, dal momento che alcune reazioni (vedi il decadimento Beta) implicano il coinvolgimento non solo di interazioni elettromagnetiche e forti, ma anche di quelle deboli (che a cortissimo raggio dominano), la probabilità di interazione è fortemente controllata dalla loro presenza.

Infine, il numero delle reazioni nucleari che avvengono è fortemente regolato dalla distribuzione delle velocità delle particelle che, in un gas assimilabile in prima approssimazione ad un gas ideale, è descrivibile con la cosiddetta curva "Maxwelliana a campana" dipendente dalla temperatura. In sostanza, a parità di numero di particelle, più alta è la temperatura e più la campana che descrive il numero di particelle per intervallo di velocità si sposta con il massimo verso velocità più alte e popola via via una coda più estesa verso le altissime velocità. In altre parole, la temperatura non è altro che la misura delle velocità [quadratica] media delle particelle: più ci si agita e più è caldo!

Combinando insieme tutti questi fattori complessi, ma calcolabili separatamente in modo spesso sufficientemente accurato, almeno per le reazioni più semplici, si ricava il numero di reazioni per elementi coinvolti 1 e 2 per grammo, per secondo, in ogni punto della stella avente composizione chimica, temperatura e densità nota. In fondo, quindi, la stella non è altro che una bomba atomica che si autoregola e non esplode se non in condizioni eccezionali e finali della sua vita.,

Quando si calcola il contributo complessivo tramite un integrale che tralasciamo per semplicità, si vede che in pratica le particelle che danno luogo alla stragrande maggioranza delle reazioni "con successo" sono quelle contenute in uno stretto intervallo di velocità per cui è alto il prodotto della probabilità di penetrazione per il numero di particelle aventi quella certa velocità. Tale piccolo picco nella distribuzione delle particelle, noto anche con il nome di "picco di Gamow", è quindi formato dalle particelle che sono abbastanza veloci (molto più della media in genere) per essere abbastanza "penetranti la barriera" (cioè avere una sufficiente probabilità di penetrazione) ed ancora abbastanza numerose nel campione di gas per dare luogo ad una frequenza significativamente diversa da zero agli incontri.

A questo punto si può prestare maggiore attenzione alle condizioni di temperatura e densità necessarie nelle reazioni di interesse per le stelle e alla quantità di energia liberata. Intanto va detto che le reazioni nucleari diventano possibili solo quando le particelle arrivano a distanze reciproche confrontabili o minori a quelle delle dimensioni nucleari, 10^{-13} cm. Inoltre, se uno calcolasse semplicemente quale energia (temperatura) dovrebbe avere il gas per avere con certezza il superamento della barriera coulombiana, si vedrebbe facilmente che, nel caso dell'interno del Sole, si dovrebbero avere oltre 10 miliardi di gradi, mentre sappiamo che la sua temperatura centrale è solo di 10 milioni di gradi circa. Ciò accade proprio perché le particelle che cadono nel picco di Gamow hanno una probabilità molto inferiore di 1 di superare la barriera, ma anche significativamente diversa da 0, per cui è un po' come se fossero capaci di scavarsi un "tunnel" nella barriera stessa e passare.

Questi fattori congiunti fanno sì che le reazioni procedano a sufficienza. La differenza fondamentale con il laboratorio è che mentre in laboratorio vorremmo che la reazione fosse

efficiente e veloce (cioè che avessimo tantissime reazioni in poco tempo per renderla vantaggiosa economicamente), nelle stelle non c'è fretta e "si è in tanti a lavorare". Una reazione che ha una probabilità molto bassa di trasformare due particelle in un sola "se la può prendere comoda" ed impiegare miliardi di anni per farla avvenire. Per questo la vita delle stelle dura tempi "astronomici", perché le reazioni fondamentali sono altamente improbabili e purtuttavia avvengono in numero sufficiente e controllato per garantire stabilità e lunga vita alle stelle.

Le sorgenti di energia nucleare nelle stelle

Flavio Fusi Pecci

Fonte primaria di energia nel Sole

Gli attori protagonisti delle reazioni nucleari e le regole del gioco

Fattori che regolano il ritmo di produzione dell'energia e con chi si deve combattere

I processi nucleari più importanti nelle stelle e la nucleosintesi degli elementi

Conclusioni

I processi nucleari più importanti nelle stelle e la nucleosintesi degli elementi

Il numero ed il tipo di reazioni nucleari che possono avvenire nelle stelle sono svariatiissimi. Non potendo trattarli tutti, ci limitiamo a discutere i più importanti, elencandoli nell'ordine di successione con cui avvengono nel corso della vita delle stelle prototipo.

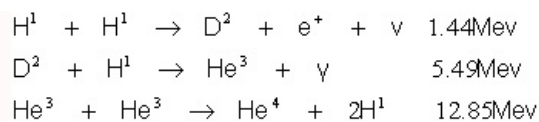
Quando una stella si forma ed inizia la sua evoluzione contraendosi dalla nube protostellare, irraggia energia gravitazionale e le condizioni di temperatura e densità centrali non sono sufficienti a consentire l'innesco di reazioni nucleari. Allorché la temperatura centrale raggiunge circa un milione di gradi, si innescano le prime reazioni nucleari che portano abbastanza rapidamente alla combustione di alcuni elementi leggeri presenti in modesta quantità, trasformandoli in Elio (He^3 e He^4). Queste reazioni sono:

$D^2 + H^1 \rightarrow He^3$	5.5Mev
$Li^6 + H^1 \rightarrow He^3 + He^4$	4.0
$Li^7 + H^1 \rightarrow 2He^4$	17.3
$Be^9 + 2H^1 \rightarrow He^3 + 2He^4$	6.2
$B^{10} + 2H^1 \rightarrow 3He^4 + e^+$	19.3
$B^{11} + H^1 \rightarrow 3He^4$	8.7

in cui H^1 è il protone = nucleo dell'atomo di idrogeno H , D il deutone (formato da 1 protone ed 1 neutrone), Li è il litio, Be il berillio, e B il boro. Durante questa fase rapida (fino a qualche decina di milioni di anni, a seconda della massa), questi elementi sono bruciati ovunque nella stella che, fra l'altro, è totalmente convettiva, mescolando quindi con continuità gli strati e rendendo sostanzialmente omogenea la composizione chimica. Da un punto di vista energetico totale, queste reazioni contribuiscono molto poco, anche se rivestono un forte interesse per una serie di implicazioni sulla evoluzione chimica delle stelle, della Galassia e, addirittura, delle prime fasi evolutive dell'Universo.

Nel momento in cui la temperatura centrale raggiunge circa i 10 milioni di gradi, inizia la combustione dell'idrogeno. Tale combustione costituirà la fonte di energia dominante per quasi il 90% della vita totale della stella. Essa può avvenire tramite due processi diversi e non necessariamente alternativi.

(a) Il ciclo "protone - protone" ($p - p$)
Ad una temperatura di circa $3 \cdot 10^7$ gradi si innesca il seguente ciclo che porta alla fusione di quattro protoni in un nucleo di elio:



Per completarlo, la prima e la seconda reazione debbono avvenire due volte per fornire i reagenti alla terza. Non tutta l'energia contribuisce alla luminosità della stella. Infatti 0.26 Mega-elettronvolt (= $1\text{MeV} = 1$ milione di elettronvolt) vengono portati fuori dal neutrino che, data la sua sezione d'urto trascurabile (di circa 20 ordini di grandezza inferiore a quella del protone), attraversa praticamente tutto il Sole senza interagire con nessuno. In totale quindi per ogni nucleo di elio formato si ha un contributo di energia pari a 26.2 MeV .

In questo ciclo si possono notare tante cose interessanti che permettono di riallacciarsi ai discorsi fatti in precedenza ed alla cosmologia. Innanzitutto è bene guardare alle reazioni nucleari un po' come si guarda alle reazioni chimiche: bisogna cioè che tutti i "conti" a sinistra e a destra della freccia "si pareggino", ricordando le regole base che abbiamo elencato. Se si fa questo, si vede subito che, prendendo ad esempio la prima reazione del ciclo, mentre a sinistra (dove interagiscono fra loro due protoni carichi positivamente) si tratta di fatto di superare la barriera di repulsione coulombiana (e nel fare ciò ci si avvale dell'effetto "tunnel" descritto sopra), nella parte destra, comparando un positrone ed un neutrino, oltre alla interazione nucleare forte viene chiamata in gioco la interazione debole che, su questa scala di distanze, è molto forte e dura da vincere. Per questo motivo il tempo scala di reazione (cioè l'inverso della probabilità) è così lungo. In altre parole, è talmente improbabile che la reazione vada in porto che solo 1 ogni 14 miliardi di incontri va a buon fine. Questo di fatto spiega come mai i tempi-scala della vita delle stelle regolata dal ciclo $p - p$ siano dell'ordine di miliardi di anni e il cosiddetto "tempo di reazione" riportato per la reazione "più lenta" (= più improbabile) controlla in sostanza i tempi di vita della stella.

Venendo al neutrino, la cui produzione è in qualche modo causa ed effetto delle improbabilità della reazione, bisogna dire subito che da comprimario è diventato negli ultimi anni sempre più il vero attore protagonista, ricercato e vezzeggiato come una grande diva dello schermo. Come mai? È presto detto. Tutto sta nel capire se ha o non ha "massa a riposo" uguale a zero. In altre parole, il neutrino viaggia a velocità altissime, quasi comparabili con la velocità della luce, e non interagendo praticamente con nessuno, è difficilissimo da catturare. Se però lo si potesse fermare e si trovasse che, una volta fermato, avesse una massa diversa da zero, allora, poiché è difficilissimo distruggerlo mentre in moltissime reazioni viene prodotto in quantità incredibili, il "mare" di neutrini prodotti potrebbe contribuire in modo molto significativo alla massa totale dell'Universo (costituendo, almeno in parte, la cosiddetta "materia oscura"). Come conseguenza, la densità media dell'Universo potrebbe essere uguale o superiore a quella critica e, quindi, provocare in tempi più o meno lontani la inversione della espansione dell'Universo, portandolo a ricontrarsi su se stesso, come in una specie di cammino inverso del "Big Bang".

Per questo motivo è iniziata la caccia spasmodica ai neutrini (ad esempio nei laboratori del Gran Sasso, in cui si usa il Gran Sasso per schermare i rivelatori da tutte le altre particelle che avendo sezioni d'urto maggiore vengono intrappolate, mentre i neutrini passano). Purtroppo per quanti accorgimenti si usino e nonostante i miliardi di miliardi di miliardi di neutrini che attraversano ogni centimetro quadro di rivelatore (enormi vasche di liquido speciale) ogni secondo, a mala pena se ne "acchiappa" qualcuno al giorno, e questo basta a spiegare la difficoltà dell'impresa. Ci si chiederà: che cosa dicono le misure attuali

al riguardo? Sebbene le misure dei neutrini solari diano valori pari a circa un terzo di quanto ci si aspetterebbe (anzi in un certo senso proprio per questo, perché ciò viene interpretato come una conferma che esistono tre tipi di neutrini che "oscillano" e che, dal momento che "oscillano", debbono avere massa a riposo diversa da zero e prestarsi alla cattura da parte degli esperimenti classici solo per un terzo), molti studiosi ritengono che possano avere una massa a riposo fra 3 e 10 eV (cioè da 200 mila a 500 mila volte inferiore a quella del protone). Se questo fosse confermato, vedremmo ancora una volta come le conoscenze sull'"infinitamente piccolo" consentono di avere informazioni cruciali per capire l'"infinitamente grande" e viceversa.

(b) Il ciclo CNO

Tornando alle reazioni nucleari di combustione dell'Idrogeno, si ha che tale combustione può avvenire anche attraverso un ciclo molto diverso e più complesso che coinvolge altri elementi e che si innesca a temperature un po' maggiori, intorno ed oltre i 10 milioni di gradi (perché la repulsione coulombiana è maggiore coinvolgendo più cariche dello stesso segno).

Il ciclo completo consiste nelle seguenti reazioni che, guardate con attenzione, mostrano nuovamente come quattro protoni vengano alla fine trasformati in un nucleo di elio, esattamente come nel ciclo $p - p$, seppure passando per un percorso molto più tortuoso.

$C^{12} + H^1 \rightarrow N^{13} + \gamma$	1.94Mev
$N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu$	2.22
$C^{13} + H^1 \rightarrow N^{14} + \gamma$	7.55
$N^{14} + H^1 \rightarrow O^{15} + \gamma$	7.29
$O^{15} \rightarrow N^{15} + e^+ + \nu$	2.76
$N^{15} + H^1 \rightarrow C^{12} + He^4$	4.97
$N^{15} + H^1 \rightarrow O^{16} + \gamma$	12.1
$O^{16} + H^1 \rightarrow F^{17} + \gamma$	0.60
$F^{17} \rightarrow O^{17} + e^+ + \nu$	2.76
$O^{17} + H^1 \rightarrow N^{14} + He^4$	1.19

In buona sostanza, in questo ciclo la combustione dell'idrogeno avviene usando come "catalizzatore" il C^{12} . L'insieme delle reazioni contiene il cosiddetto "ciclo del carbonio" o quello ancora più elaborato detto "bi-ciclo del CNO" dal momento che sono coinvolti sia il carbonio che l'ossigeno e l'azoto. È da notare che la seconda parte del ciclo avviene circa $4 \cdot 10^{-4}$ volte meno frequentemente perché la catena $N^{15} (p, \alpha) C^{12}$ è 2500 volte circa più probabile di quella $N^{15} (p, \gamma) O^{16}$. Inoltre, nel decadimento della particella di N^{13} , si ha una emissione di un neutrino che porta via 0.71 MeV. Il totale dell'energia prodotta per atomo di elio formato è in tale caso 25.0 MeV, quindi un poco meno di quanto non dia la catena $p - p$. La predominanza relativa fra il ciclo $p - p$ e quello CNO è totalmente regolata dalla temperatura come si può vedere nella Figura 1. A basse temperature domina la catena $p - p$, ad alte quella CNO. Il Sole si trova circa al punto di pari importanza fra i due cicli.

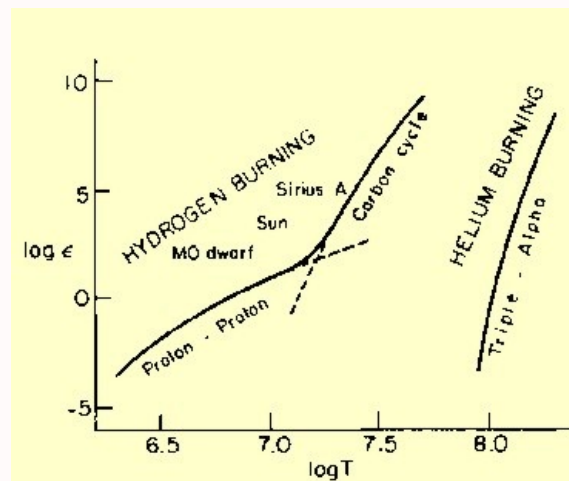


Figura 1.

Anche nel caso del ciclo *CNO* si possono fare tante note interessanti che hanno un profondo impatto su altri aspetti della evoluzione stellare e della astrofisica più in generale. La prima è che, coinvolgendo questa catena tanti altri elementi ed i loro isotopi (cioè stesso numero di protoni, ma diverso numero di neutroni), e non essendo i tempi (le probabilità) di reazione uguali da reazione a reazione, da una parte ci vuole del tempo prima che il ciclo vada in equilibrio (cioè tanti elementi si producono e tanti vengono distrutti, etc.), dall'altra, è possibile che su un elemento prodotto in una reazione intermedia si inneschino catene collaterali, tramite altri processi, che alterano l'andamento del ciclo e la composizione chimica risultante. In particolare, questo fa sì che l'abbondanza relativa del *CNO* in uno strato in cui avviene la reazione di combustione dell'idrogeno tramite il ciclo *CNO* non rimanga costante, nonostante che la combustione primaria sia quella dell'idrogeno e non quella del *CNO*. Un esempio tipico di cui parleremo in seguito è quello legato al fatto che ad esempio il C^{13} può agire da sorgente di neutroni e dare luogo ad una catena molto diversa. Se ciò avviene, combinando gli effetti (anche in una fase evolutiva molto successiva) della convezione (che mescola gli strati interessati) e la perdita di massa per vento stellare, ciò può portare a fare emergere strati con composizione chimica fortemente diversa da quella "classica" di tipo solare o primordiale (dominata da *H* e *He*).

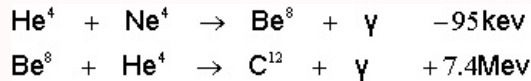
Rimanendo infine alla considerazione della parte più classica del ciclo *CNO*, costituito dalle prime sei reazioni, si può vedere che esso può essere diviso a metà: le prime tre reazioni portano dal C^{12} al N^{14} , le seconde tre riportano dal N^{14} al C^{12} , avendo formato un nucleo di He^4 e bruciato 4 protoni. Questa simmetria mostra in modo diretto ed evidente il ruolo di catalizzatore del C^{12} che entra all'inizio del ciclo e si ritrova alla fine.

(a) Il ciclo 3α

Quando la fase di combustione dell'idrogeno si è conclusa, perché l'idrogeno si è esaurito dando luogo alla creazione di un "core" di elio, la stella si contrae per accrescere la temperatura nelle zone centrali finché, quando essa raggiunge circa i 100 milioni di gradi, si innescano le reazioni di combustione dell'Elio. La stella cioè si comporta come l'uomo: nel momento in cui si esaurisce la sorgente primaria di energia, cerca di usare la combustione delle scorie della combustione precedente. Tale processo è ovviamente meno efficiente e produttivo. Tuttavia permette alla stella di "prendere fiato" nella sua corsa verso la fine. In particolare, possiamo già anticipare che la combustione dell'elio fornisce alla stella un tempo di vita ulteriore che è circa 10 volte più corto di quello garantito dalla combustione dell'idrogeno. Pertanto, rispetto al totale, una stella vive in media fra il 5 e il 10% della propria vita bruciando in modo

predominante (o a volte esclusivo) elio.

La catena "classica" per la combustione dell'elio è quella in cui tre particelle alfa (cioè tre nuclei di elio) si fondono per produrre un nucleo di carbonio, fornendo circa 7 MeV. Il ciclo 3-alfa consiste in:



Anche in questo caso ci sono delle note importanti da fare. La prima e più importante è che la prima reazione del ciclo non solo non fornisce energia, ma addirittura ne richiede. Infatti il nucleo di berillio è instabile e tende a decadere spontaneamente nelle due particelle alfa iniziali. Si stabilisce allora un equilibrio fra le particelle alfa e i nuclei di berillio in cui la concentrazione del berillio è molto piccola, dell'ordine di solo 10^{-10} di quella delle particelle alfa. Poi, dal momento che invece il berillio ha una grandissima affinità ("risonanza") per catturare una terza particella alfa e produrre il carbonio che è invece stabilissimo, si ha che la catena procede, seppure lentamente.

Un ulteriore aspetto molto importante da notare è che si può dedurre e capire dalla Figura 1, in cui sono mostrate le dipendenze della efficienza di ogni singolo ciclo dalla temperatura, è il fatto che la efficienza dei tre cicli è progressivamente più dipendente dalla temperatura (curva via via più ripida). Questo significa che piccole variazioni di temperatura (purché si sia al di sopra della soglia di innesco) danno un incremento molto più grande della efficienza nelle reazioni 3α e via via meno nel ciclo CNO e infine $p-p$. Letto in modo diverso, questo implica che lo strato in cui avviene la combustione 3α è molto più "stretto" radialmente (perché spostandosi anche di poco la temperatura cala e l'efficienza crolla rapidamente) di quanto non sia nelle altre combustioni. Come conseguenza, poiché si viene ad avere un grande gradiente di produzione/trasporto di energia prodotta su un tratto molto piccolo, si ha come un "ingolfamento" del trasporto che (parlando in modo assolutamente rozzo) provoca l'innesco di moti convettivi. Quindi le zone in cui si ha combustione di tipo CNO e soprattutto 3α tendono ad essere convettive, mentre quelle in cui domina il ciclo $p-p$ tendono ad avere un trasporto di energia di tipo radiativo (cioè senza movimento di materia, e quindi mescolamenti che alterano la composizione chimica).

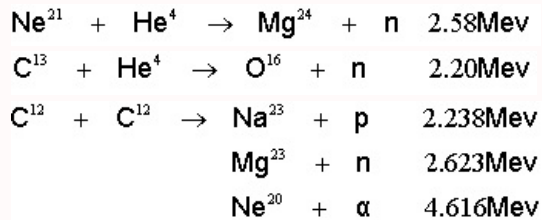
(b) Catture α e processi successivi

A temperature ancora più alte, quando anche l'elio è esaurito ed il "core" si è ulteriormente contratto (ma il Sole non ci arriverà mai perché è troppo poco massiccio), si innescano processi del tipo (α, γ) per formare O^{16} , Ne^{20} , Mg^{24} . Come si vede dai numeri di massa, questi elementi contengono un multiplo intero di particelle alfa (che valgono 4 in questa numerazione essendo composti da 2 protoni e due neutroni) e sono pertanto estremamente stabili. Se la stella riesce a fare salire ulteriormente la temperatura fino ad un miliardo di gradi (cioè se è abbastanza massiccia) si possono avere altre reazioni di tipo (γ, α) o quelle dette "processi-e" (di equilibrio) che portano a formare silicio, zolfo, calcio. Questa catena termina nel cosiddetto "Picco del ferro" (Fe^{56}). Questi elementi sono i più stabili in natura perché la loro massa per nuclide è minima e, molto schematicamente separano gli elementi che si possono formare per "fusione" dando energia, da quelli che invece forniscono energia per "fissione".

(c) Processi "s" e "r" dovuti ai neutroni

In una generazione di stelle che non sia puramente costituita da materia primordiale (cioè una che si sia formata in un mezzo interstellare già inquinato dagli elementi pesanti prodotti da una popolazione precedente già evoluta o addirittura "morta"), si possono avere altre reazioni, alcune delle quali coinvolgono i neutroni e che rivestono una

fondamentale importanza nello studio della evoluzione chimica delle stelle e dell'Universo stesso. Ad esempio si hanno le seguenti reazioni:



Queste reazioni sono di straordinaria importanza perché, come si vede, conducono alla produzione di un neutrone libero. Il neutrone è uno "strano signore sfortunato" perché, da una parte, avrebbe il grande pregio di non avere carica elettrica e quindi di essere un attore ideale nelle reazioni nucleari, non soffrendo del problema di dovere "perforare" la barriera coulombiana, dall'altra però, soffre il grave problema di decadere, se libero, in solo 8 minuti. Questo vuole dire che, se si vuole "sposare" o "accasare" in un nucleo, o la fa molto velocemente o non lo farà più. L'unico modo per avere quindi tanti "matrimoni" in cui uno degli sposi sia il neutrone è quindi quello di fare la "festa" quando esistono moltissimi neutroni liberi, ad esempio prodotti da un flusso continuo di reazioni del tipo delle due sopra riportate. Questi neutroni sono in massima parte catturati dagli elementi pesanti, particolarmente quelli del gruppo del Ferro, e questi possono poi a propria volta accrescersi per diventare elementi ancora più pesanti. Ad esempio in questo modo si possono creare elementi pesanti quanto il Bi^{209} . Questo processo, legato a neutroni prodotti da reazioni del tipo di quelle citate sopra, è dovuto a neutroni relativamente poco energetici e "veloci" per cui il processo stesso è chiamato in inglese "slow", da cui a propria volta deriva il nome per gli elementi prodotti per questa via di "s-elements". Il tempo scala tipico di questi processi è da qualche anno a qualche migliaia di anni, che è quindi molto corto rispetto ai tipici tempi nucleari, ma lungo rispetto ai decadimenti Beta. Pertanto, di fatto, con questo meccanismo si riescono a creare nuclei in cui il neutrone va ad accrescere una struttura di per sé stabile, mentre non si riescono a produrre elementi più complessi o instabili. Deve pertanto esistere una via alternativa. Va anche aggiunto che i processi -s- diventano particolarmente efficaci durante la fase di gigante rossa, specialmente quando si hanno i cosiddetti "Helium shell flashes" che portano a complessi fenomeni di mescolamento e variabilità della stella.

Una alternativa ai processi "slow" è data dai processi "rapid"-r-. In questo caso, come dice il termine stesso, i neutroni prodotti sono invece molto energetici e "veloci" e, proprio perché energetici, sono in grado di accrescere nuclei anche più pesanti ed instabili, creando quasi tutti gli elementi finora mancanti. Tali fenomeni avvengono tuttavia a temperature dell'ordine di 10 miliardi di gradi e con un flusso enorme di neutroni.

I pochissimi altri elementi restanti al di fuori di tutti i processi citati, ad esempio l'uranio ed i suoi isotopi ed altri isotopi ricchi di protoni, vengono probabilmente prodotti tramite altri processi, quali ad esempio i "p-processes". Tuttavia, sebbene questi elementi abbiano una grande importanza per lo studio della evoluzione chimica generale delle stelle e del mezzo interstellare, dal punto di vista energetico sono assolutamente irrilevanti.

Un'ultima nota può essere importante da ricordare. Tutti questi processi che richiedono altissime temperature e densità di materia o di "proiettili" altissime o peculiari avvengono generalmente in fasi evolutive molto avanzate e, spessissimo, in fasi finali esplosive del tipo di quelle legate al fenomeno della Supernova. Anche per questo tutta questa parte dello studio della nucleosintesi viene di solito indicata con il termine "nucleosintesi esplosiva".

Le sorgenti di energia nucleare nelle stelle

Flavio Fusi Pecci

Fonte primaria di energia nel Sole

Gli attori protagonisti delle reazioni nucleari e le regole del gioco

Fattori che regolano il ritmo di produzione dell'energia e con chi si deve combattere

I processi nucleari più importanti nelle stelle e la nucleosintesi degli elementi

Conclusioni

Conclusioni

Questa descrizione molto veloce ed inevitabilmente un po' superficiale ed approssimativa in varie parti dovrebbe tuttavia avere almeno chiarito alcuni aspetti che forse è bene riassumere sinteticamente.

- a. Le reazioni nucleari costituiscono l'essenza del "motore" che fa vivere le stelle per la maggior parte della loro vita, sebbene altre sorgenti di energia (tipo la gravitazionale, termica, etc.) possano avere una importanza cruciale in alcune specifiche fasi evolutive.
- b. I "combustibili nucleari primari" sono l'idrogeno (per quasi il 90% della vita) e l'elio (per quasi tutto il restante 10%). I processi nucleari fondamentali sono di "fusione" e, oltre alle interazioni nucleari forti e a quelle elettromagnetiche, essi coinvolgono spesso le interazioni deboli. Ciò fa sì che il numero di reazioni che avvengono per unità di tempo per unità di materia siano regolate da una complessa griglia di regole e di probabilità che portano, ad esempio nel caso della più semplice reazione, $p - p$ a tempi scala dell'ordine di miliardi di anni.
- c. Oltre che a fornire energia, le reazioni nucleari contribuiscono a variare la composizione chimica degli strati in cui avvengono. Inoltre, se a ciò si unisce la presenza (in una qualunque fase evolutiva) di fenomeni convettivi che vadano ad interessare zone in cui avvengono o sono avvenute reazioni nucleari, questo induce rimescolamenti e variazioni di composizione chimica anche in strati mai interessati dalle reazioni nucleari. Se a questo si aggiunge infine la perdita di massa che fa emergere alla "superficie" strati prima più profondi, si possono avere abbondanze "superficiali" profondamente alterate e molto diverse dalle composizioni chimiche iniziali o primordiali.
- d. Lo studio delle abbondanze chimiche e dei meccanismi di formazione di tutti gli elementi e di come essi vengono a trovarsi stratificati nelle stelle o distribuiti nel mezzo interstellare costituisce uno dei mezzi più potenti di indagine per ricostruire la evoluzione chimica non solo della Galassia, ma di tutto l'Universo, consentendo addirittura di fare misure e verifiche cruciali per discriminare fra i vari modelli cosmologici

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Introduzione

I modelli basati sulla "turbolenza"

La teoria "mareale"

Le teorie di "accrescimento"

La teoria "nebulare" di Laplace e Kant

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti e l'età del Sistema solare

La misura del rapporto deuterio/idrogeno nei pianeti giganti

Il contributo delle osservazioni delle zone di formazione stellare

Le fasi della formazione del Sistema solare: una possibile sequenza di eventi

La legge (o relazione) di Titius-Bode

La relazione di Titius-Bode: legge o coincideza?

Il problema del momento angolare

Conclusioni

Lecture

Introduzione

Il problema riguardante l'origine del Sistema solare è stato affrontato in modo esauriente solo dopo la rivoluzione copernicana e la definizione del sistema eliocentrico.

I contributi fondamentali di Copernico, Keplero, Galilei e Newton nella costruzione dapprima del sistema eliocentrico e, in seguito, dell'interpretazione dei moti dei pianeti nel Sistema solare alla luce della legge di gravitazione universale, permisero di definire una nuova visione del "mondo" come un sistema completo ed esauriente fondato su fatti fisici e non su presupposti filosofici. I primi modelli di formazione del Sistema solare cercarono innanzitutto di rendere conto, in modo qualitativo, dei principali dati osservativi riguardanti le orbite dei pianeti, le cui caratteristiche principali si possono così riassumere:

- le orbite dei pianeti sono prossime al piano orbitale terrestre;
- sono praticamente circolari (esclusa l'orbita di Plutone, scoperto nel 1929);
- i pianeti ruotano nello stesso senso, che è pure quello di rotazione del Sole;
- le distanze eliocentriche obbediscono alla legge empirica di Titius-Bode.

Inoltre, verso la fine del XIX secolo, i fisici teorici dedicarono particolare attenzione al problema del momento angolare. Il Sole contiene il 99% della massa del Sistema solare ma possiede solo il 2% del momento angolare posseduto dagli altri pianeti! Dalla metà del XX secolo le nuove teorie riguardanti la formazione stellare, insieme alla determinazione delle età dei vari corpi minori, ad esempio i meteoriti, fornirono nuovi elementi di riflessione per le nuove e più moderne teorie cosmogoniche. Questo insieme di conoscenze portò a costruire diversi modelli:

- la teoria della formazione "turbolenta";
- la teoria "mareale";
- le teorie di "accrescimento";
- la teoria "nebulare".

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

I modelli basati sulla "turbolenza"

René Descartes (1596-1650) fu il primo che cercò di dare una spiegazione scientifica dell'esistenza del Sistema solare e che per primo introdusse l'idea di evoluzione. Nella sua opera Teoria dei vortici, pubblicata nel 1644, Descartes avanza l'ipotesi che l'Universo sia costituito da materia ed etere e sia pieno di vortici di diverse dimensioni. Non è però chiaro il meccanismo fisico tramite il quale dai "vortici" si siano poi prodotti i pianeti. Infatti, il modello è soltanto qualitativo ed una delle maggiori obiezioni che gli si può rivolgere riguarda il fatto che non favorisce la formazione dei pianeti sul piano dell'eclittica. Venne abbandonato dopo la scoperta delle leggi della gravità di Newton. Il concetto di turbolenza fu però ripreso e riconsiderato da numerosi autori nel XX secolo (Von Weizsäcker, ter Haar, Kuiper, Whipple e McCrea).

La teoria "mareale"

Secondo un'altra interpretazione il materiale utilizzato nella formazione del Sistema solare era invece stato espulso dal Sole. La teoria mareale venne sviluppata, come teoria catastrofica di formazione del Sistema solare, dal naturalista Buffon (1707-1788). In essa si ipotizza che la sua formazione sarebbe avvenuta a causa di una "estrazione" di materiale dal Sole in seguito ad una collisione o ad un passaggio ravvicinato con una cometa avvenuto circa 70.000 anni fa. La credibilità di questa teoria era legata al fatto che, a quei tempi, la natura delle comete era completamente sconosciuta e che non si avevano criteri attendibili per una stima delle età dei corpi celesti.

Bickerton nel 1880 e Chamberlain nel 1901 sostituirono la cometa con una stella rendendo più accettabile, dal punto di vista fisico, l'intensità della forza mareale. Secondo questo meccanismo, la stella, avvicinandosi al Sole avrebbe strappato parte del suo materiale producendo filamenti con elevato momento angolare che poi si sarebbero condensati sul piano dell'eclittica. Rimane però difficile spiegare, con questo meccanismo, la formazione dei pianeti giganti esterni anche se vengono risolte due delle maggiori obiezioni relative al modello di Kant e Laplace:

- il problema del momento angolare;
- la diversa composizione chimica dei pianeti rispetto al Sole.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Le teorie di "accrescimento"

Queste teorie si basano, invece, sulla possibilità che il Sole sia riuscito a "catturare" del materiale interstellare. Per escludere che questo materiale a sua volta collassi nel Sole, è necessario presupporre un'azione stabilizzante dovuta ad una stella vicina. Secondo Schmidt la presenza di un'altra stella potrebbe aver permesso la coalescenza del gas e delle polveri in modo da formare i pianeti.

Un'altra interpretazione, più moderna del modello di "accrescimento", sostiene che il Sole abbia incontrato, nel suo moto lungo il piano delle Galassia, due distinte nebulose:

- una consistente di polveri da cui sono nati i pianeti interni;
- una di gas, principalmente idrogeno, che ha prodotto i pianeti esterni.

La maggiore obiezione a questa teoria è legata al fatto che le collisioni tra le particelle avrebbero portato ad una dispersione delle stesse; salvo il caso in cui fossero confinate lungo strutture ad anello simili a quelle dei pianeti giganti. In questo modo si potrebbero produrre corpi simili ai satelliti dei pianeti ma non i pianeti veri e propri!

La teoria "nebulare" di Laplace e Kant

L'idea di una nebulosa primitiva, da cui si formarono sia il Sole che i pianeti, fu proposta da Kant (1724-1804) e Laplace (1749-1827). Secondo Laplace la nebulosa si contrae per effetto della gravitazione e la sua velocità rotazionale cresce sino a quando non collassa in un disco. In seguito gli anelli di gas, che così si generano, sono rimodellati e vanno a condensarsi in strutture che portano alla formazione dei pianeti e dei loro satelliti.

Questo modello ha il merito di spiegare tutti i fenomeni, relativi al Sistema solare, noti nel XVIII secolo ed in particolare quelli riferiti ai moti dei pianeti. Due importanti obiezioni al modello di Kant e Laplace, tuttavia, apparvero all'inizio del XIX secolo:

1. come Maxwell (1831-1879) mostrò è piuttosto difficile spiegare la formazione di un pianeta in seguito all'accrescimento da un anello di planetoidi;
2. la maggior parte del momento angolare risiede nei pianeti mentre nel modello di Kant e Laplace rimane al Sole.

Dal momento che il Sole costituisce la maggior parte della massa del Sistema Solare, si sarebbe dovuto "trascinare" dietro anche la maggior parte del momento angolare. Avvenne invece proprio il contrario in quanto il 99.5 % del momento angolare (sia di rivoluzione che di rotazione dei futuri pianeti) è detenuto dai pianeti che hanno solo 1/750 della massa complessiva!

L'idea attuale di formazione del Sistema solare si è sviluppata dalla teoria di Kant e Laplace ed è riassunta nel modello della "nebulosa molecolare primitiva". I modelli d'evoluzione del disco protoplanetario si suddividono oggi in due categorie:

Il modello della nebulosa massiva di Cameron.

Questo modello presuppone che la formazione si sia iniziata da un disco di circa 1 Massa solare (M_S). Una gran parte della sua massa, circa l'85 %, venne spazzata via dal vento solare in un tempo piuttosto breve di circa 100.000 anni. Ciò che rimase andò a formare il Sole, mentre i pianeti si sarebbero formati direttamente dalla nebulosa primordiale in seguito all'innescò delle instabilità gravitazionali.

Il modello della nebulosa a piccola massa di Safronov ed Hayashi.

Secondo quest'altra ipotesi, invece, la massa del disco, di circa $0.01 M_S$, collassò. Il disco poi andò raffreddandosi, la polvere si accumulò nel piano centrale e formò i planetesimi di massa pari a 10^{18} g. Dai planetesimi, in seguito alla loro combinazione, si produssero poi i pianeti.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Andiamo ad analizzare in dettaglio il meccanismo di formazione del Sistema solare alla luce dei principali dati osservativi. L'efficacia dei modelli di formazione del Sistema solare risiede essenzialmente nella loro capacità di rispondere a tre domande.

1. Ammesso che il Sole ed i pianeti si siano formati assieme dove e quando ciò è avvenuto?
2. È avvenuta una formazione differenziata tra pianeti interni e pianeti esterni?
3. Il Sistema solare si è formato da materiale interstellare freddo o da materiale solare riprocessato dalle reazioni termonucleari avvenute nel suo interno?

A queste tre domande le evidenze osservative permettono di dare una risposta esauriente con un buon grado d'accuratezza. Per dare una "sostanza" quantitativa oltre che qualitativa alle premesse fisiche dei modelli di formazione, è necessario a questo punto affrontare:

- il problema dell'età delle rocce terrestri e lunari e dei meteoriti, che pongono dei vincoli oggettivi ai tempi in gioco nei modelli di formazione;
- la misura del rapporto deuterio/idrogeno nei pianeti esterni (Giove, Saturno, ecc.) che ci illumina sulla composizione della nebulosa primordiale;
- indagare su come avviene la formazione stellare nella nostra Galassia.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti e l'età del Sistema solare

Il principio della datazione si fonda sulla misura degli elementi radioattivi presenti nelle rocce sottoposte ad esame. Un elemento radioattivo "primario" dissociandosi dà luogo ad elemento "secondario". In un intervallo di tempo t le abbondanze si modificano seguendo una legge del tipo:

$$d = d_0 + p (e^{\lambda t} - 1);$$

dove d_0 è l'abbondanza iniziale dell'elemento primario d , p è l'abbondanza iniziale dell'elemento secondario, T è l'intervallo di tempo preso in considerazione e λ una costante di decadimento.

Nel caso in cui d' sia un isotopo stabile dell'elemento d , sempre nel tempo T abbiamo:

$$d/d' = (d/d')_0 + (p/d') (e^{\lambda t} - 1).$$

Al fine di determinare l'età del Sistema solare, si utilizzano degli "orologi" a lungo termine derivati dal decadimento di alcune specie fisiche. In particolare le coppie:

- K^{40} (kriptone), Ar^{40} (argon) con tempo di decadimento $5.8 \cdot 10^{11}$ per anno;
- Rb^{87} (rubidio), Sr^{87} (stronzio) con tempo di decadimento $1.4 \cdot 10^{11}$ per anno;
- U^{238} (uranio), Pb^{238} (piombo) con tempo di decadimento $1.5 \cdot 10^{11}$ per anno.

Le misure fatte con questi elementi su campioni di meteoriti, mostrano che l'età del Sistema solare è, approssimativamente, $4.55 \cdot 10^9$ anni, cioè 4.55 miliardi di anni. Inoltre, le misure delle abbondanze del Pu^{244} (plutonio), e dello I^{129} (iodio) che hanno dei tempi di decadimento più corti, danno un'indicazione relativa al tempo della condensazione del materiale planetario. Essi mostrano che non sono stati necessari più di 100 milioni di anni per la formazione dei pianeti dopo che il materiale protosolare si è isolato da quello interstellare. Quest'ultima stima d'età potrebbe corrispondere al momento in cui la nube protosolare è passata attraverso uno dei bracci a spirale della Galassia. Ciò implica che il Sole ed i pianeti si siano formati contemporaneamente, durante il passaggio in una parte della Galassia particolarmente densa e ricca di polveri.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

La misura del rapporto deuterio/idrogeno nei pianeti giganti

Il deuterio è presente nel mezzo interstellare ma viene distrutto nelle stelle in seguito alle reazioni termonucleari. Il tempo in cui avviene la reazione che trasforma il deuterio è molto più breve (circa 1 minuto) delle altre reazioni (con tempi di 1 milione di anni). Dal momento che, nei pianeti giganti, il valore del rapporto D/H è maggiore di quello prevalente nel mezzo interstellare se ne ricava che questo dato può indicare l'abbondanza di tale rapporto 4.55 miliardi di anni fa. Se il materiale planetario fosse un tributo del materiale solare l'abbondanza di deuterio sarebbe uguale a zero come nel Sole, dal momento che il deuterio venne distrutto dentro il Sole appena iniziarono le reazioni nucleari.

Questo fatto è molto importante, in quanto indica che i pianeti NON si sono formati da materiale trasformatosi nell'interno del Sole in seguito alle reazioni termonucleari.

Ne consegue quindi che:

- le teorie mareali vanno scartate poiché ammettono che il materiale da cui si sono formati i pianeti è di origine solare;
- potrà essere quindi attendibile solo una versione migliorata della teoria nebulare in accordo con questi dati osservativi.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Il contributo delle osservazioni delle zone di formazione stellare

Importanti sono le osservazioni delle regioni di formazione stellare nella Galassia. Nelle associazioni stellari O-B ci sono le condizioni per produrre le instabilità gravitazionali atte ad innescare il processo di formazione planetaria. Un'onda d'urto, prodotta dall'esplosione di una supernova, può facilitare l'innescio del processo di coalescenza gravitazionale comprimendo le nubi molecolari preesistenti. Questo meccanismo però non è strettamente necessario, in quanto l'instabilità gravitazionale può avere luogo anche a partire da piccoli frammenti (di circa un centesimo di massa solare) formatisi da stelle di poche masse solari!

Inoltre l'origine degli elementi a breve vita radioattiva come Al^{26} nella nebulosa protosolare appare prodotta nelle atmosfere delle giganti rosse di circa una massa solare, ne consegue che il modello che presuppone l'esplosione di una supernova nelle vicinanze del sito di formazione planetaria non è strettamente necessario!

Andiamo ora a considerare in dettaglio, nell'ambito della teoria nebulare "moderna" di Kant e Laplace, le singole fasi del processo di formazione.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Introduzione

I modelli basati sulla "turbolenza"

La teoria "mareale"

Le teorie di "accrescimento"

La teoria "nebulare" di Laplace e Kant

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti e l'età del Sistema solare

La misura del rapporto deuterio/idrogeno nei pianeti giganti

Il contributo delle osservazioni delle zone di formazione stellare

Le fasi della formazione del Sistema solare: una possibile sequenza di eventi

La legge (o relazione) di Titius-Bode

La relazione di Titius-Bode: legge

Le fasi della formazione del Sistema solare: una possibile sequenza di eventi

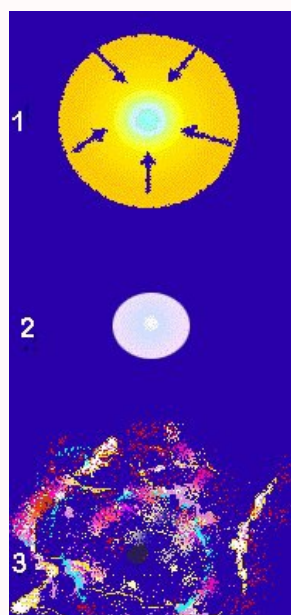


Figura 1.

1) L'instabilità gravitazionale

Ipotizziamo una sfera di gas con raggio $R = 10000 R_{\odot}$ (Raggio solare) che corrisponde all'orbita di Plutone e densità media $\rho \cong 10^{-12} \rho_{\odot}$ (Densità solare) (analoga alla densità nella cromosfera solare che consiste principalmente di idrogeno molecolare H_2 e polvere).

Per un corpo in equilibrio si ha :

$$\Omega^2 R = g_{eq}$$

dove

- Ω = velocità di rotazione della nebulosa;
- R = raggio delle nebulosa;
- g_{eq} = accelerazione di gravità all'equatore.

Mano a mano che la nebulosa si contrae la temperatura aumenta e questo determina la dissociazione dell'idrogeno molecolare H_2 . Il coefficiente di compressione adiabatica:

$$\gamma = d \ln p / d \ln \rho \text{ decresce.}$$

Quando γ è minore di $4/3$ si instaura una instabilità gravitazionale. In particolare Schatzman ha dimostrato che ciò continua fino a che risulta $\gamma = 4/3$. Dopo di che il collasso

o coincideza?

si ferma ad un raggio $R = 100 R_S$.

Il problema del momento angolare

2) La massa coinvolta nella contrazione

In base alla legge di conservazione del momento angolare

$$GM/R^2 = \Omega R$$

Conclusioni

dove:

- G = costante di gravitazione universale;
- M = massa della nube;
- R = raggio della nube;
- Ω = velocità di rotazione della nebulosa;

Lecture

si può calcolare la massa persa nel piano equatoriale in seguito alla contrazione. Secondo le stime più attendibili la massa che non è coinvolta nella contrazione del Sole e che rimane a disposizione per la formazione dei pianeti è pari al 10 % di quella totale. La massa necessaria per formare i pianeti interni è doppia di quella della Terra cioè $6 \cdot 10^{-6} M_S$. Questi pianeti sono composti principalmente da materiale solido a cui dovremmo aggiungere i gas (idrogeno, elio ed altri componenti gassosi della nebulosa primitiva) che sono sfuggiti ad essi e che contribuiscono al 99 % della massa totale. In questo modo la massa necessaria sale ad un valore pari a $6 \cdot 10^{-4} M_S$.

Il contributo dei pianeti esterni va ulteriormente aggiunto al valore precedente ed è pari a $2 \cdot 10^{-3} M_S$. Il valore complessivo della massa, coinvolta nella formazione dei pianeti sia interni che esterni, sale a: $3 \cdot 10^{-3} M_S$.

Dal momento che la quantità di materiale coinvolto nella contrazione è pari al 10% della massa solare M_S , se ne ricava che questo è un valore sufficiente a determinare la formazione dei pianeti sia interni che esterni.

3) Il disco protoplanetario

Il disco protoplanetario:

- ha una massa iniziale $M_{\text{disco}} = 10^{-2} M_S$
- è posto ad una distanza $D_{\text{disco}} \cong 7 \text{ UA}$ (tra l'orbita attuale di Giove e di Saturno)
- ha una densità superficiale pari a $\sigma \cong 1000 \text{ g/cm}^2$

Si può calcolare lo spessore del disco stesso, assumendo che la sua componente principale (il che è verificabile a posteriori) sia quella della componente verticale g_z del campo gravitazionale del Sole. Utilizzando l'ipotesi d'equilibrio idrostatico, ne risulta un disco protoplanetario quasi piatto ma con uno spessore

$$h_{\text{disco}} \cong (1/10) \cdot D_{\text{disco}} \cong C / \Omega$$

dove:

- C è la velocità del suono del gas $\cong 100000 \text{ cm/s} = 1 \text{ km/s}$;
- Ω è la velocità di rotazione pari a $10^{-8} / \text{s}$. cioè $h_{\text{disco}} \cong 0.7 \text{ UA}$.

4) Il limite di Roche

Nel 1847 il fisico Roche mostrò che un satellite in orbita circolare attorno ad un corpo centrale sarebbe distrutto dalle forze mareali se venisse a trovarsi più vicino al corpo centrale di un certo limite; il cosiddetto *limite di Roche*. Per un corpo rigido di forma sferica, simile ad un pianeta, orbitante attorno al Sole questo limite, a_R , è dato da:

$$a_R/R_S = 2.5 \left(\rho_s / \rho_g \right)^{1/3}$$

dove ρ_s = densità media del Sole, ρ_g = densità media del gas nel disco ed R_S = raggio del Sole.

Da questa relazione è possibile ricavare una *densità critica* oltre la quale l'instabilità gravitazionale si sviluppa ad una data distanza eliocentrica. Si è trovato che tale *densità critica* è $\cong 10$ volte la densità superficiale ρ_g . Questo permette di affermare che:

- con una nebulosa a piccola massa $\cong 0.01 M_S$ *NON* si formano i pianeti direttamente da un'instabilità gravitazionale,
- mentre con una nebulosa ad alta massa $\cong 100 M_S$ è possibile innescare la formazione dei pianeti.

Se vale il modello di una nebulosa primordiale ad alta massa, rimane tuttavia, la necessità di eliminare tutta la massa non direttamente utilizzata nella formazione del Sistema solare (si veda, più avanti, come possa avvenire la rimozione di questa massa eccedente a causa del vento stellare del Protosole).

5) La formazione dei grani

A partire da una certa temperatura la nebulosa molecolare raffredda lentamente determinando una progressiva condensazione delle sue componenti ad iniziare da quelle più refrattarie. Partendo dalle abbondanze degli elementi misurate nel Sole è possibile ricostruire la sequenza di condensazione.

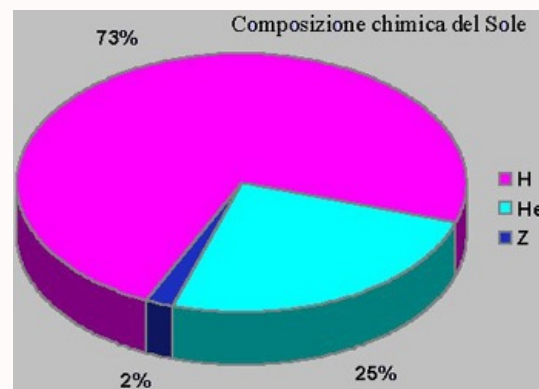


Figura 2.

6) La sequenza di condensazione

Dapprima avviene la condensazione dei seguenti elementi:

- da 1880 a 880° K (gradi Kelvin) - Al, Ti, Ca, Mg, Si, Fe, Na, S;
- in seguito, quando le temperature si abbassano sino a valori 200°-300° K, anche H, O, C ed N si condensano.

La fase di condensazione è stabile a temperature attorno ai 1400° e le abbondanze così ottenute sono in eccellente accordo con quelle misurate nelle meteoriti condriti. Va tuttavia notato che la sequenza dipende strettamente dal rapporto iniziale C/O, per cui una diversa sequenza di condensazione è attesa se il valore di tale rapporto invece di 0.55 è, ad esempio, 1.2 !

7) La crescita dei grani per condensazione

Per dare un'idea della velocità con cui accrescono i grani per condensazione assumiamo che:

ogni collisione tra una molecola ed un grano produce un "incollamento" della molecola al grano stesso

Se la massa dei grani è definita come $m \cong \rho_p r^3$, dove

- r è il raggio dei grani,
- ρ_p la densità dei grani = 1 g/cm³,

ecco che il ritmo ai cui i grani accrescono è dato dalla equazione

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\rho_g \alpha C}{\rho_p} A^{1/2}$$

dove:

- ρ_g = densità del gas = 10⁻¹⁰ g/cm³;
- C è la velocità del suono del gas $\cong$ 1 km/s;
- α = 0.01 è il rapporto tra materiale condensato e gas;
- A la massa molecolare $\cong$ 20.

Ne risulta un valore $dr/dt = 10^{-8}$ cm/s cioè, tradotto in termini più semplici, un accrescimento dei grani di 1 cm all'anno!

Questo meccanismo si dimostra molto efficace e rapido e permette ai grani di un micron di formarsi rapidamente e crescere ulteriormente.

8) Il collasso dei grani verso il piano equatoriale

Le particelle solide, più massive del gas, hanno una tendenza a migrare verso il piano equatoriale del disco. Se, in prima approssimazione, assumiamo che vi sia equilibrio tra le forze gravitazionali e le forze viscosi otteniamo un tempo caratteristico perché esse raggiungano il piano equatoriale dato da

$$t \cong \frac{\rho_g C}{\rho_p r \Omega^2}$$

dove: r = spessore dei grani = 1 -3 cm, mentre le altre quantità sono già definite nel paragrafo precedente.

Se ne ricava che t ha un valore pari a circa 100 anni! I grani quindi si accumulano nel piano equatoriale in un tempo molto breve. Quando i corpi solidi iniziano ad accumularsi nel piano equatoriale le collisioni inelastiche diventano sempre più importanti. Esse hanno come effetto di diminuire lo spessore del disco di polvere sino a che, lo spessore del disco, non raggiunge le dimensioni dei corpi stessi.

9) La formazione dei pianeti per accrescimento

Le collisioni inelastiche nel piano equatoriale determinano poi un'accelerazione nella crescita dei planetoidi. A partire da dimensioni di 1 cm, essi acquisiscono massa per accrescimento in seguito a reciproche collisioni.

Sia m la massa del corpo ed r il suo raggio, il ritmo di crescita può essere espresso dall'equazione

$$\frac{dm}{dt} = \pi l^2 \rho_0 V$$

dove:

- ρ_0 = densità delle particelle all'orbita del corpo nel piano equatoriale;
- πl^2 = sezione d'urto effettiva del corpo;
- V = velocità relativa tra il corpo e le particelle.

Per effetto della gravità la sezione d'urto è maggiore della sezione geometrica. Tramite una serie di conti, che qui non esporremo, alla distanza di 1 Unità Astronomica (U.A.) il ritmo di crescita è costante ed il raggio cresce linearmente

nel tempo secondo la legge :

$$r = \sigma_0 (1 + 2\theta)t / (P\Delta)$$

dove:

- P = periodo orbitale della nube nell'orbita attorno al Sole;
- Δ = densità del corpo (che si assume costante);
- $\theta = G m/r V^2$ con valori da 3 a 7;
- σ_0 = densità superficiale della nube.

Ne consegue che è possibile accrescere dei corpi fino a dimensioni di alcune centinaia di km in tempi di circa 100 milioni di anni.

Riassumiamo a questo punto i processi essenziali:

1. il processo di condensazione ha permesso ai grani di crescere sino alle dimensioni di qualche micron;
2. il processo di "attrazione gravitazionale" ha portato alla formazione dei pianeti attuali a partire da "corpi solidi" di dimensioni di qualche centimetro passando attraverso la formazione dei "planetoidi";
3. la formazione dei "planetoidi" è stata spiegata da Safronov in seguito ai processi di collisione "inelastica" che hanno determinato, invece della loro distruzione, l'incollamento dei grani in strutture di dimensioni sempre più grandi.

4. 10) *L'effetto del vento solare*

Per analogia con quanto osservato nelle stelle giovani, assumiamo che il Sole, nella prima fase della sua esistenza manifesti un' intensa attività magnetica. In particolare, secondo quello che è il confronto con le stelle di tipo T-Tauri, è possibile stimare l'intensità del vento solare primordiale come 108 volte maggiore di quella attuale. La pressione esercitata sulle particelle dal vento solare primordiale era quindi circa 100.000 volte quella del vento solare odierno!

L'effetto di questa pressione sulle particelle, che agisce in modo antagonista all'azione attrattiva della gravità solare, è proporzionale alla massa delle particelle e quindi dipendente da r^3 . In questo modo è possibile determinare un valore di distanza r_0 in cui le due forze che si oppongono l'una all'altra (quella determinata dal vento solare primordiale e la forza di gravità del Sole) si annullano.

Oggi il valore di r_0 è pari ad 1 micron mentre all'origine del Sistema solare era pari, al più, a 10 cm. Si può dedurre da quest'ultimo valore, il fatto che il *vento solare primordiale* era sufficientemente intenso per spazzare via le particelle di dimensioni minori del cm.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

La legge (o relazione) di Titius-Bode

Conclusa la descrizione delle principali fasi della formazione del Sistema solare, torniamo al contesto generale in particolare alla "*legge di Titius-Bode*". In questo modo viene, e veniva, indicata una relazione empirica riguardante le distanze medie dei pianeti dal Sole espresse in Unità Astronomiche (UA). La legge, benché fosse stata scoperta nel 1741 dall'astronomo tedesco Wolf e riscoperta dal compatriota Johann Titius nel 1772, è nota soprattutto per l'opera di divulgazione di Johann Bode, che, nel 1778, ne ha dato anche una formulazione matematica precisa.

Secondo essa, le distanze dei pianeti dal Sole, in UA, si trovano dalla serie 0 - 3 - 6 - 12 - 24 - 48 - 96 - ..., in cui ogni numero, a partire dal terzo, è il doppio del precedente; aggiungendo 4 ad ogni numero e dividendo il risultato per 10 si ottiene 0.4 - 0.7 - 1 - 1.6 - 2.8 - 5.2 - 10 - 19.6 - ... Matematicamente, la serie precedente si esprime con la relazione $d = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n$, dove n è un numero che vale *meno infinito* per Mercurio, 0 per Venere, 1 per la Terra, 2 per Marte e così via. Le distanze vere dei pianeti sono ben approssimate fino ad Urano: la differenza tra la legge di Bode e la distanza reale non supera mai il 5 %. Nel caso di Nettuno la differenza supera il 22% e per Plutone è del 49%.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

La relazione di Titius-Bode: legge o coincideza?

Malgrado questa sia una relazione empirica, e cioè senza alcuna base fisica, la legge ha avuto il pregio di far sospettare, già nel Settecento, l'esistenza di un pianeta con $n=3$ che doveva essere posto tra Marte e Giove. La scoperta di Cerere, un asteroide, da parte di padre Piazzi, a Palermo, nel 1801, confermò la validità della legge, anche se negli anni successivi si verificò che gli asteroidi sono migliaia, la maggior parte dei quali ha orbite comprese tra quella di Marte e di Giove.

Rimase per molto tempo diffusa tra gli astronomi la convinzione che gli asteroidi siano il risultato della distruzione di un pianeta posto originariamente tra Marte e Giove. In realtà si è ora convinti che i pianetini siano materiale originario *di accrescimento*, cioè proveniente direttamente dalla nebulosa dalla quale è nato il Sistema solare, in via (teorica) di accorpamento, che non riuscì mai a dare origine ad un pianeta, a causa della piccola massa complessiva.

Molti autori hanno tentato di spiegare questa relazione tramite dei modelli cosmogonici sperando di utilizzarla come un test di verifica degli stessi modelli. La scoperta di numerosi nuovi satelliti di Giove e Saturno ha permesso di comprendere come questa relazione non vi si applica, nonostante si possano a tutti gli effetti intendere come dei sistemi solari su scala più piccola. Inoltre Henon nel 1969 e Lecar nel 1973 hanno mostrato che una distribuzione casuale di numeri potrebbe soddisfare una relazione come quella di Titius-Bode con il solo vincolo che siano abbastanza prossimi l'uno all'altro. Ne consegue che questa relazione è del tutto casuale e non ha quindi nessuno "status" di legge.

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Il problema del momento angolare

Rimane da affrontare, e risolvere, il problema del momento angolare, accennato sin nelle prime pagine di quest'esposizione. Nella risoluzione del problema sembrano determinanti:

- le teorie di evoluzione stellare sulle fasi iniziali di vita delle stelle;
- la teoria dinamica del campo magnetico (magneto-idrodinamica).

Una stella rotante, dotata di vento stellare e di un forte campo magnetico iniziale, tende a diminuire la sua rotazione per un effetto di "frenamento" dovuto al flusso delle particelle del vento lungo le linee di forza del campo magnetico. Questo può determinare un trasporto delle particelle ad una distanza a maggiore del raggio R della stella. Anche una piccola perdita di massa può produrre una grande perdita di momento angolare in quanto proporzionale ad $(a/R)^2$.

In questo modo, se la perdita di massa è solo 0.003 masse solari M_S per anno questo meccanismo è sufficiente per rallentare il periodo di rotazione del Sole. Per di più nelle stelle giovani, del tipo *T-Tauri*, si misura una forte perdita di massa associata ad un'intensa attività magnetica e quindi un forte decremento del periodo di rotazione.

Il Sole altro non è che un esempio dell'evoluzione di questi tipi di stelle giovani!

La genesi del Sistema solare

Roberto Bedogni

Lecture

B. Bertotti, *L'esplorazione del sistema di Saturno*, in *Le Scienze*, n. 334, 1996, pp.26-34;

N. Booth, *Sistema Solare. Un viaggio di pianeta in pianeta*, De Agostini, Novara, 1996;

Braccisi, G. Caprara, M. Hack, *Alla scoperta del Sistema Solare*, Mondadori, Milano, 1993;

G. Briggs, F. Taylor, *Atlante Cambridge dei pianeti*, Zanichelli, Bologna, 1997;

T. Encrenaz, J.-P. Birbing, M. Blanc, *The Solar System*, Springer Verlag, Berlin, 1995;

*D.L. Goodstein, J.R. Goodstein, *Il moto dei pianeti intorno al Sole: una lezione inedita di R. Feynmann*, Zanichelli, Bologna, 1997;

P. Kennet, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992;

K.R. Lang, C.A. Whitney, *Vagabondi nello spazio: ricerche e scoperte nel Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1987;

D.H. Menzel, J.M. Pasachoff, *Stelle e pianeti*, Zanichelli, Bologna, 1990;

E. Nesme-Ribes, S.L. Baliunas, D. Sokoloff, *La dinamo stellare*, in *Le Scienze*, n. 338, 1996, pp.37-42;

M. Rigutti, *Comete, meteoriti e stelle cadenti*, Giunti, Firenze, 1997;

R. Smoluchowski, *Il Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1989.

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Introduzione

Introduzione

Mercurio

Venere

Terra

Marte

Pianetini e comete

Giove

Saturno

Urano

Nettuno

Plutone

Lo studio del Sistema solare è molto importante per molteplici motivi:

1. Fin dall'antichità i pianeti hanno attirato l'attenzione dell'uomo sia perché sono gli astri più brillanti del cielo sopravanzando lo splendore di Sirio, sia per i loro moti complicati fra le stelle; lo studio dei loro movimenti ha costituito il problema fondamentale dell'astronomia fino al secolo scorso.
2. In tempi recenti l'inizio dell'era spaziale e la scoperta di nuove tecniche astrofisiche hanno permesso all'uomo di interagire direttamente con i corpi del Sistema solare facendo su di essi dei veri e propri "esperimenti".
3. Lo sviluppo delle telecomunicazioni via satellite e lo studio della Terra dallo spazio hanno richiesto una conoscenza approfondita dell'ambiente al di sopra dell'atmosfera: dei campi magnetici, delle tempeste solari, del pericolo di impatto con meteoriti.
4. I pianeti vengono studiati con metodi del tutto analoghi a quelli usati per la Terra: la struttura interna con la sismologia, la superficie con foto da satelliti artificiali, il campo magnetico e gravitazionale con sonde spaziali. La pubblicazione di riviste come Astronomy and Geophysics testimonia questa tendenza ad estendere la geografia ai corpi del Sistema solare. Come esiste una "Zoologia comparata", così sta sorgendo una "Planetologia comparata".

Quadro riassuntivo delle caratteristiche fisiche dei pianeti

PIANETA	a (UA)	Periodo di rivoluzione (anni)	Massa Terra = 1	Raggio Terra = 1	Densità (g/cm ³)	Periodo di rotazione (giorni)
Mercurio	0.38710	0.240842	0.0558	0.3825	5.43	58.6462
Venere	0.72333	0.615187	0.8148	0.9488	5.24	-243.02
Terra	1.00000	1	1	1	5.52	0.99727
Marte	1.52369	1.880816	0.1074	0.5326	3.94	1.02596
Giove	5.20381	11.86178	317.83	11.209	1.33	0.41354
Saturno	9.53885	29.45657	95.16	9.449	0.69	0.44401
Urano	19.1833	84.01880	14.50	4.007	1.30	-0.7167
Nettuno	30.0578	164.788	17.20	3.883	1.76	0.6808
Plutone	39.4400	247.688	0.0022	0.1805	2.07	-6.3872

I termini di cui si fornisce di seguito la definizione sono utili per una migliore comprensione della tabella e del testo:
Rotazione: tutti i pianeti ruotano intorno ad un proprio asse ed il periodo di rotazione è il tempo necessario a compiere una rotazione completa e definisce il giorno del pianeta.
Rivoluzione: i pianeti, oltre a ruotare intorno al proprio asse, compiono una traiettoria quasi circolare intorno al Sole detta rivoluzione ed il periodo necessario per compierla caratterizza l'anno del pianeta.
Eclittica: viene così definito il piano dell'orbita della Terra

intorno al Sole.

Inclinazione delle orbite: presa come riferimento l'eclittica, l'inclinazione dei pianeti è l'angolo che i piani di rivoluzione hanno con l'eclittica stessa.

Obliquità: è l'inclinazione dell'equatore del pianeta rispetto al piano della sua orbita (mediamente tutti i pianeti hanno obliquità inferiore a 30° con eccezione di Venere che ha 180° e Urano con 98°).

Unità astronomica (U.A.): è la distanza media Terra-Sole. Con a si indica il semiasse maggiore dell'orbita di ogni pianeta misurato in Unità astronomiche.

Il periodo di rotazione negativo indica che il pianeta, visto dal polo Nord dell'eclittica, ruota in senso orario (opposto a quello della rivoluzione). Il periodo di rotazione della Terra $= 1$ giorno siderale è leggermente inferiore al giorno solare medio a causa del moto di rivoluzione.

Dalla tabella si vede che i pianeti possono essere suddivisi in due gruppi in base a massa, raggio e densità: Mercurio, Venere, Terra e Marte sono rocciosi, piccoli e densi; Giove, Saturno, Urano e Nettuno sono gassosi, grandi e di bassa densità. Plutone costituisce un caso a sé.

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Mercurio

Introduzione

È difficilmente osservabile perché è il pianeta più vicino al Sole.

Mercurio

A causa dell'elevata eccentricità ($e = 0.206$) la massima distanza angolare dal Sole può variare fra 18 e 28°.
L'inclinazione dell'orbita sull'eclittica ($i = 7^\circ$) è superata solo da quella di Plutone (17°).

Venere

Terra

Marte

Pianetini e comete

Giove

Saturno

Urano

Nettuno

Plutone

Mercurio ruota su se stesso in senso antiorario in 58.646 giorni, pari ai $\frac{2}{3}$ del periodo di rivoluzione attorno al Sole (87.969 giorni). La sua orbita non è chiusa in quanto presenta un moto di precessione dell'asse maggiore di $574''/\text{secolo}$, di questi $42''.98/\text{secolo}$ sono giustificabili solo attraverso la teoria della relatività generale a causa della distorsione dello spazio tempo prodotta dal Sole.

Mercurio è circondato da un'atmosfera estremamente tenue. La superficie può apparire praticamente identica a quella lunare essendo entrambe butterate da crateri da impatto di ogni dimensione. L'assenza di acqua ed atmosfera fa sì che manchi completamente il fenomeno dell'erosione, né ci sono evidenze di attività vulcaniche passate, per cui la superficie di Mercurio viene annoverata, come quella lunare, fra quelle "inattive". La struttura più appariscente sulla superficie di Mercurio è il bacino Caloris Planitia, uno dei più vasti crateri del Sistema solare del diametro di circa 1300 Km. L'urto violento del meteorite che lo creò circa 3.6 miliardi di anni fa, sollevò catene di montagne alte circa 2 Km, generò un sistema di valli e fratture che si irradiano dal bacino per 1000 km. Per questo il bacino Caloris è circondato da una serie concentrica di altopiani che si irradiano rispetto al cratere vero e proprio.

Solo recentemente si sono scoperte, da misurazioni radar, due zone polari con un alto potere riflettente. Si suppone che l'acqua, portata da comete e meteoriti, si sia accumulata in crateri e crepacci dove la temperatura non supera mai i 123°K e, coperta da uno strato di regolite, abbia resistito all'azione dei raggi cosmici ed ultravioletti.

Nonostante la composizione chimica sia quella tipica dei pianeti rocciosi, l'alta densità e la presenza di un debolissimo campo magnetico fanno pensare ad un nucleo fluido a bassa viscosità di ferro e nichel che costituisce $2/3$ della massa totale.

La superficie esterna è composta da una crosta di silicati di Fe e Mg e da ossidi refrattari.

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Venere

Introduzione

Mercurio

Venere

Terra

Marte

Pianetini e comete

Giove

Saturno

Urano

Nettuno

Plutone

È il pianeta che assomiglia di più alla nostra Terra per raggio, massa e struttura interna; è invece piuttosto diverso se si considerano la superficie e il campo magnetico. Visto da Terra è l'oggetto più brillante del cielo dopo il Sole e la Luna. Nell'antichità era chiamato *Stella della sera* o *Stella del mattino*. La densa atmosfera di Venere ad una quota tra i 50 e 70 km dalla superficie è composta da nubi che ruotano intorno al pianeta con una velocità di circa 100 m/s, simulando un periodo di rotazione di 4 giorni.

A causa della spessa coltre di nubi che lo avvolge non è possibile analizzare la sua superficie, tuttavia, tramite osservazioni radar da satelliti artificiali, si è potuta fare una mappa dettagliata di essa, soprattutto grazie alla sonda Magellano, che ha fornito splendide immagini con un potere risolutivo di poche decine di metri. Venere è un mondo privo di mari; le pianure, tormentate da fratture, crateri e canali, occupano circa l'85% della superficie ed i rilievi si innalzano isolati, come i monti Maxwell, alti 11 km.

L'atmosfera di Venere, molto compressa (90 atm.) e calda (450°), è costituita soprattutto da anidride carbonica (96.5%), responsabile dell'effetto serra, azoto molecolare e anidride solforosa. La concentrazione di quest'ultima è variabile nel tempo, essendo diminuita di 4 volte in 15 anni; si pensa che ciò sia dovuto a un fenomeno vulcanico seguito da una lenta deposizione del gas.

Tra le 1500 formazioni vulcaniche di Venere, il Maat Mons è il più probabile responsabile della gigantesca eruzione che avrebbe causato il brusco aumento di SO₂ nell'atmosfera del pianeta. L'attuale superficie di Venere non può avere più di 500 milioni di anni; si tratta quindi di un terreno geologicamente giovane, soggetto ad episodi di vulcanismo globale in grado di rinnovare completamente la crosta; ciò spiega l'assenza su Venere di grandi crateri, presenti, per esempio, sulla Luna che, avendo una superficie molto più antica, conserva il ricordo della fase iniziale della formazione di crateri ad opera di asteroidi di dimensioni maggiori.

Si è scoperto che su Venere sono rari anche i piccoli crateri da impatto; ciò è dovuto all'azione della densa atmosfera che distrugge i piccoli meteoriti prima che possano arrivare al suolo. Una delle caratteristiche uniche del vulcanismo venusiano sono i gruppi di piccoli domi vulcanici circolari (10-20 Km di diametro), detti "vulcani a brioché" che popolano tutto il pianeta. La loro origine potrebbe essere legata alla presenza di un tipo di lava

particolarmente viscosa, che li avrebbe costruiti risalendo da bocche apertesi in zone pianeggianti.

Come Mercurio, Venere non ha satelliti naturali.

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

	Terra
Introduzione	
Mercurio	La caratteristica fondamentale della Terra è di essere l'unico laboratorio finora conosciuto in cui si sia sviluppata la vita. Le proprietà che contribuiscono a renderla abitabile sono: la distanza dal Sole che fa in modo che la sua temperatura media sia di 15° centigradi, la presenza di un'atmosfera contenente ossigeno, la presenza di acqua allo stato liquido in superficie, il periodo di rotazione di durata opportuna, l'inclinazione dell'asse terrestre sull'eclittica che dà origine alle stagioni e la vicinanza di un satellite di grande massa, la Luna, che rende stabile la direzione dell'asse terrestre.
Venere	
Terra	
Marte	
Pianetini e comete	
Giove	La Terra è il più grande ($R = 6370 \text{ Km}$) e pesante ($M = 5.976 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$) dei pianeti rocciosi. Esso è il più denso fra tutti i pianeti. La composizione chimica della sua atmosfera attuale (76% di azoto molecolare, 21% di ossigeno molecolare, 1% di argo e 1% di vapor acqueo) è il risultato di una complessa evoluzione che sarebbe stata completamente diversa se il pianeta fosse stato 10 milioni di Km più vicino al Sole o 70 milioni più lontano.
Saturno	
Urano	
Nettuno	
Plutone	

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Home

Marte

Introduzione

Mercurio

Venere

Terra

Marte

Pianetini e comete

Giove

Saturno

Urano

Nettuno

Plutone

Il "pianeta rosso" è il più esterno dei pianeti rocciosi e, per diversi aspetti, il più simile alla Terra: il periodo di rotazione di 24 ore e mezza e l'inclinazione dell'asse di rotazione sul piano dell'orbita di 24° danno origine all'alternarsi del dì e della notte e delle quattro stagioni come sulla Terra. Benché sia piuttosto freddo e secco, dopo la Terra è certamente il pianeta più abitabile ed il più adatto a ricevere una missione spaziale con uomini a bordo.

Il suolo di Marte è quello meglio esplorato sia da satelliti in orbita, che da sonde fatte posare sul suolo. Le sonde Viking nel 1976 e Pathfinder nel 1997 hanno rivelato che lo strato superficiale è costituito da silicati e da ossidi di ferro. A ciò è dovuto il colore rossastro della superficie. Numerosi canyon solcano la superficie di Marte, il sistema più imponente è quello della valle Marineris che attraversa la zona equatoriale e si estende su quasi mezzo pianeta. Solo recentemente si sta chiarendo il quadro di come questi canyon possono essersi formati: 4 miliardi di anni fa la temperatura del pianeta crebbe bruscamente, facendo irrompere in superficie una quantità d'acqua pari a quella del Mediterraneo e del Golfo del Messico sommate assieme, provocando catastrofiche inondazioni.

Anche se attualmente l'atmosfera di anidride carbonica ha una pressione inferiore a 1/100 di quella terrestre, è capace di sollevare notevoli quantità di polvere. Un esempio dell'azione dei venti sulla superficie marziana sono le dune dei depositi di sabbia basaltica nei pressi del Polo nord e l'esistenza di crateri completamente spianati, appena disegnati su un piano orizzontale. Le tempeste di polvere si sviluppano tendenzialmente a cavallo del solstizio di estate per l'emisfero sud, quando Marte è al perielio. La spiegazione è legata alla forte eccentricità dell'orbita di Marte (0.09), che fa sì che al perielio il pianeta assorba il 45% di energia in più rispetto all'afelio.

Entrambe le sonde Viking hanno prelevato campioni di materiale che sono stati accuratamente analizzati e i risultati escludono la presenza di materia organica complessa. È possibile che un tempo l'aria marziana abbia contenuto notevoli quantità di ossigeno oggi imprigionato nel suolo sotto forma di ossidi. Su Marte, in altre epoche, possono essere stati presenti tutti gli ingredienti necessari alla vita.

Attorno a Marte ruotano due piccoli satelliti, Phobos e Deimos, che mostrano al pianeta sempre la stessa faccia.

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Pianetini e comete	
Introduzione	Oltre che dai pianeti con i loro satelliti il Sistema solare è popolato da una miriade di corpi minori che orbitano vicino al Sole. Questi vengono classificati, in base alla loro natura e alla loro massa, in pianetini, comete, meteoroidi e polveri interplanetarie. Pianetini e comete ne costituiscono i componenti più importanti e appariscenti. I primi sono corpi rocciosi ricchi di silicati e metalli, confinati, in genere, in una zona posta fra le orbite di Marte e di Giove, detta Fascia Asteroidale Principale. Il più grande, Cerere, scoperto nel 1801 da Piazzi, ha un diametro di circa 1000 Km e raccoglie in sé circa un terzo della massa totale di tutti i pianetini; Pallade e Vesta hanno un diametro di circa 500 Km. Alla fine del 1999 erano stati scoperti 63.000 pianetini. Di questi 850 possono avvicinarsi al Sole più della Terra e sono chiamati "oggetti Apollo".
Mercurio	
Venere	
Terra	
Marte	
Pianetini e comete	Le comete sono conglomerati di ghiacci e altri materiali volatili, uniti a roccia, che sviluppano, avvicinandosi al Sole, una chioma e una o più code lunghe milioni di Km. I ripetuti passaggi vicino al Sole le consumano lentamente. Poiché se ne osservano sempre di nuove, si pensa che esse provengano da due serbatoi praticamente inesauribili: la "cintura di Kuiper", situata nel piano dell'eclittica oltre l'orbita di Nettuno e la "nube di Oort" di forma sferica con un raggio di circa 50 mila AU. Le perturbazioni dovute ai pianeti di massa maggiore alterano le orbite delle comete facendo diminuire i periodi di rivoluzione. Ad esempio la cometa di Halley gira attorno al Sole in circa 76 anni.
Giove	
Saturno	
Urano	
Nettuno	
Plutone	

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Home

Introduzione

Mercurio

Venere

Terra

Marte

Pianetini e comete

Giove

Saturno

Urano

Nettuno

Plutone

Giove

Dopo il Sole è il corpo più grande (il suo diametro è 11 volte quello terrestre) e pesante (la sua massa è pari a 318 volte quella della Terra) del Sistema solare ed è il maggiore dei pianeti gassosi, corpi di dimensioni notevoli ma di bassa densità, costituiti soprattutto da idrogeno e elio. Non hanno una superficie solida, ma un'atmosfera molto estesa che in profondità sviluppa formidabili pressioni, mentre probabilmente al centro si trova un nucleo roccioso. Sono accompagnati da molti satelliti e tutti sono circondati da un sistema di anelli. Giove è visibile al telescopio come un disco giallo solcato da bande chiare dette "zone" e altre scure dette "fasce", caratterizzate rispettivamente da nubi ascendenti calde e nubi discendenti fredde che si alternano come strisce parallele all'equatore.

L'uniformità di questo disegno è interrotta dalla cosiddetta "Grande macchia rossa", avente forma ovale di 39 mila km di lunghezza e 14 mila km di larghezza. La sua natura non è del tutto certa: dovrebbe trattarsi di una colonna di gas che si muove a spirale verso l'alto, simile ad un uragano terrestre. Il colore è probabilmente dovuto alla presenza di fosforo rosso o zolfo.

Per esplorare in modo diretto l'atmosfera di Giove, nel 1989 è stata lanciata la sonda Galileo comprendente un'astronave madre e un modulo di discesa, che è stato fatto cadere sul pianeta attaccato a un paracadute. Attraversando l'atmosfera esso ha trasmesso dati che hanno modificato le nostre conoscenze di Giove. Le dense nubi sono immerse in un'atmosfera costituita da idrogeno molecolare, elio e in minima parte da metano, ammoniaca e acqua. L'abbondanza di elio è poco più della metà che sul Sole. Si ritiene che, se Giove avesse avuto una massa circa 40 volte maggiore, la sua contrazione sarebbe stata sufficiente a innescare un processo di fusione nucleare e sarebbe diventato una stella.

Giove è il pianeta dotato del più potente campo magnetico, pari a 4 Gauss all'equatore. La sua magnetosfera è così estesa che, se fosse visibile, apparirebbe nel cielo più grande della Luna piena.

Nel 1610 Galileo scoprì quattro satelliti molto luminosi oggi chiamati satelliti galileiani: Io, Europa, Ganimede e Callisto. Mentre Io e Europa sono per lo più composti di silicati, la bassa densità di Ganimede e Callisto indica la presenza di un miscuglio di silicati e ghiaccio, in quantità grosso modo equivalenti.

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

	Saturno
Introduzione	
Mercurio	Con i suoi anelli, ben visibili da Terra anche con un piccolo telescopio è la meraviglia del Sistema solare. È il pianeta con la più bassa densità media (0.69 volte quella dell'acqua), il più forte schiacciamento ai poli ed il maggior numero di satelliti (22).
Venere	
Terra	
Marte	
Pianetini e comete	
Giove	L'atmosfera di Saturno è costituita soprattutto da elio e da idrogeno; quest'ultimo, legandosi con carbonio ed azoto, forma idrocarburi ed ammoniaca. L'atmosfera del pianeta risulta divisa in fasce nuvolose parallele all'equatore, a volte interrotte da giganteschi vortici in cui i venti raggiungono velocità di 1800 km/h. Gli anelli di Saturno sono costituiti da una miriade di piccoli corpi di ghiaccio d'acqua che recano al loro interno gas o polveri. Questi ruotano attorno al pianeta ognuno con il proprio periodo.
Saturno	Le sonde Voyager hanno messo in evidenza una struttura più complessa, rispetto a quella degli anelli di altri pianeti esterni. Gli anelli di Saturno si estendono radialmente nello spazio circostante il pianeta per 66.500 Km; nonostante la loro grande estensione hanno uno spessore di solo 100 m; la loro massa complessiva è pari a 1/100.000 di quella del pianeta. Probabilmente gli anelli si sono formati in seguito alla frantumazione di un satellite abbastanza grande (come Mimas) per lo scontro con un asteroide o una cometa. Questa ipotesi è confermata dal fatto che la massa totale degli anelli è prossima a quella di Mimas.
Urano	
Nettuno	
Plutone	Il 15 ottobre 1997 è stata lanciata verso Saturno una sonda denominata Cassini, che nel 2004 esplorerà il pianeta ed i satelliti minori. Da essa si staccherà una sonda più piccola, chiamata Huygens, che scenderà sul principale satellite di Saturno, Titano, fra i satelliti del Sistema solare secondo per dimensioni solo a Ganimede. La missione riveste molta importanza in quanto Titano presenta una densa atmosfera (caso unico tra i satelliti del Sistema solare) che impedisce di osservarne la superficie.

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

	Urano
Introduzione	
Mercurio	Scoperto nel 1781 da Herschel, è un astro verde azzurro di sesta magnitudine. La sua particolarità è di avere l'asse di rotazione quasi contenuto nel piano dell'eclittica, per cui il Sole è visibile da uno stesso polo per 42 anni (metà del periodo di rivoluzione). Le orbite dei satelliti maggiori giacciono sul piano equatoriale del pianeta.
Venere	
Terra	
Marte	
Pianetini e comete	Urano ha una densa e fredda atmosfera (52 °K) composta principalmente da idrogeno molecolare (85%) e da elio (15%): tale composizione rispecchia quella della nebulosa solare primordiale.
Giove	
Saturno	L'inclinazione dell'asse di rotazione e la presenza di venti analoghi alle correnti a getto terrestri fanno sì che non vi siano grandi differenze di temperatura fra i poli e l'equatore. Urano ha un nucleo roccioso composto da ferro e silicati, ricoperto da un oceano ghiacciato di acqua, metano ed ammoniaca. Tra questo e l'atmosfera si trova uno strato di idrogeno gassoso-liquido. Recenti modelli teorici ed esperimenti di laboratorio hanno portato a supporre che l'interno di Urano, come pure quello di Nettuno, contenga carbonio allo stato di diamante. Urano è l'unico dei pianeti giganti a non avere una propria fonte interna di calore. Il pianeta presenta un asse magnetico inclinato di circa 60° rispetto all'asse di rotazione e spostato di 0.3 raggi uraniani dal centro; esso ruota in senso antiorario con lo stesso periodo di rotazione del pianeta di 17 ore ed ha un'intensità all'equatore di 0.23 G (quello terrestre è di 0.5 G). Prima della sonda Voyager 2 si conoscevano 5 lune e 9 anelli, questi ultimi scoperti attraverso l'osservazione di occultazioni stellari; la sonda ha portato a 15 il numero dei satelliti (nell'ottobre 1999 è salito a 21) e ad 11 quello degli anelli scuri e circolari; l'anello epsilon, il più esterno, ha forma ellittica ed un albedo ancora più basso degli altri. I dieci satelliti scoperti dal Voyager 2 hanno dimensioni molto piccole; due di essi fungono da "satelliti pastori" per l'anello epsilon. Il Voyager 2 ha inoltre esaminato le caratteristiche dei cinque satelliti principali che sono, dal più esterno al più interno, Oberon, Titania, Umbriel, Ariel e Miranda.
Urano	
Nettuno	
Plutone	

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

	Nettuno
Introduzione	
Mercurio	La scoperta di Nettuno costituisce una delle pagine più entusiasmanti della storia dell'astronomia. L'esistenza di un nuovo pianeta fu ipotizzata da Adams e Leverrier in base alle perturbazioni osservate sul moto di Urano, ma fu effettivamente confermata nel 1846 da Galle, che trovò il pianeta a 55' di distanza dalla posizione calcolata da Leverrier.
Venere	
Terra	
Marte	
Pianetini e comete	A causa della riflessione della luce blu e dell'assorbimento delle componenti più rosse da parte del metano atmosferico Nettuno ci appare come una perla turchese variegata di bianco.
Giove	La sonda Voyager 2 ha fotografato una grande macchia scura che si estende per oltre 10000 Km, ruotante in senso antiorario, per molti aspetti simile alla grande macchia di Giove. La sonda ha potuto individuare numerose altre strutture nell'atmosfera del pianeta: violente tempeste e cicloni semipermanenti di forma ovale e lunghe catene di nubi bianche, simili a cirri giganteschi.
Saturno	
Urano	
Nettuno	
Plutone	Il campo magnetico di Nettuno ha un'intensità dello stesso ordine di grandezza di quello di Urano e può essere approssimato con quello di un dipolo; inaspettatamente l'asse magnetico è inclinato di 47° rispetto all'asse di rotazione. Attorno a Nettuno ruotano cinque anelli, la loro peculiarità consiste nel fatto che alcuni hanno una larghezza variabile: ad archi sottilissimi seguono altri molto grossi. Delle 8 lune la più interessante è Tritone, uno dei satelliti più grandi del Sistema solare, che percorre un'orbita circolare con moto retrogrado. La grande luna di Nettuno presenta un numero di crateri piuttosto contenuto e quindi, da un punto di vista geologico, la sua superficie è giovane. Avvolto da una tenue atmosfera di azoto, presenta delle fenditure di distensione dette graben e macchie scure causate probabilmente da vapori fuoriusciti da geyser. La temperatura è estremamente bassa, 38 °K .

I corpi del Sistema solare

Corrado Bartolini

Introduzione	
Mercurio	Più piccolo della Luna, Plutone fu scoperto nel 1930 da C.W. Tombaugh; Plutone è l'unico pianeta a non essere stato esplorato da sonde spaziali.
Venere	Nel 1978 fu scoperto il satellite Caronte, fonte di numerose informazioni sul pianeta. Le misure del periodo orbitale del sistema Plutone-Caronte (6.387 giorni) e della loro distanza media (19640 Km) hanno permesso il calcolo della somma delle loro masse (1/400 di quella terrestre).
Terra	
Marte	
Pianetini e comete	
Giove	Fra il 1985 e il 1990 la Terra si è venuta a trovare sul piano dell'orbita di Caronte attorno a Plutone; in tale situazione, dalla Terra l'orbita è vista "di taglio" ed è possibile osservare le mutue eclissi; la loro durata (circa 4 ore) ha permesso di calcolare il diametro di Plutone (2284 Km) e quello di Caronte (1190 Km). Il rapporto delle loro masse (circa 1:12) è il più alto nel Sistema solare, tanto che il sistema Plutone-Caronte può essere considerato come un pianeta doppio.
Saturno	
Urano	
Nettuno	
Plutone	Dalla massa totale e dai diametri del sistema Plutone-Caronte, si ricava una densità media pari a circa 2.07 g/cm3, più alta di quella dei pianeti gassosi, che indica che Plutone possiede un grande nucleo roccioso. Plutone è molto simile a Tritone, satellite di Nettuno. Ciò suggerisce che entrambi si siano formati come corpi indipendenti nelle regioni più esterne della nube solare primordiale, ecco la ragione della loro somiglianza chimica; in seguito Tritone sarebbe stato catturato da Nettuno. Dalla sintesi di molte foto prese dall'Hubble Space Telescope si è scoperto che la superficie di Plutone presenta forti contrasti; queste macchie causano variazioni di luminosità durante la sua rotazione ed hanno permesso il calcolo del periodo di rotazione e la verifica del fatto che il sistema Plutone-Caronte è sincrono, cioè entrambi i corpi si rivolgono sempre la stessa faccia. Nel giugno del 1988 Plutone transitò davanti ad una stella e, grazie all'eclissi di questa, sono stati acquisiti nuovi elementi circa la composizione della sua atmosfera. Durante l'occultazione la luminosità della stella ha subito un decremento progressivo dovuto all'assorbimento e alla rifrazione da parte di una tenue atmosfera di azoto, monossido di carbonio e metano. Quando il pianeta si avvicina al Sole, il riscaldamento provoca la sublimazione di una parte della sua superficie, come avviene per le comete. Plutone può forse essere considerato l'esempio più grande e riflettente di una nuova classe di oggetti denominati Plutini, che girano attorno al Sole su orbite esterne a Nettuno, e fanno parte del gruppo più ampio dei Kuiper Belt Objects (KBO); questi si differenziano dalle comete perché le loro orbite non sono troppo inclinate sull'eclittica.

L'esplorazione del Sistema solare

Pierluigi Battistini

Le missioni verso Venere e Mercurio

Le missioni verso Marte

Le missioni verso i pianeti esterni

Le missioni verso Venere e Mercurio

Dalle primissime missioni agli inizi degli anni '60 sono circa quarant'anni di esplorazione. Facciamo un bilancio di fine secolo riportando le principali missioni verso i pianeti del Sistema solare.

Sputnik 7 - 4 febbraio 1961 - La prima sonda lanciata verso Venere. Il lancio ebbe successo, ma fallì il trasferimento dall'orbita terrestre a quella interplanetaria.

Venera 1 - 12 febbraio 1961 - Lanciata con successo, iniziò il suo volo verso Venere, ma il 19 febbraio, 7 giorni dopo il lancio, fu perso il contatto mentre la sonda era a circa 2 milioni di km dalla Terra.

Mariner 1 - 22 luglio 1962 - La prima sonda americana lanciata verso Venere fu il Mariner 1, ma, a causa di un guasto, si dovette procedere all'autodistruzione del vettore di trasporto, all'altezza di 160 km, per motivi di sicurezza.

Mariner 2 - 26 agosto 1962 - Destinato a sorvolare Venere, arrivò il 14 dicembre 1962 e sorvolò con successo il pianeta da 34.800 km di distanza. L'ultima trasmissione fu ricevuta il 3 gennaio 1963. Misurò, mediante un radiometro a microonde, una temperatura superficiale di 430°C, confermando le misure da Terra, e rilevando l'assenza di un campo magnetico intorno al pianeta.

Venera 2 - 12 novembre 1965 - Lanciata con successo, furono persi i contatti prima che potesse raggiungere il pianeta.

Venera 3 - 16 novembre 1965 - Destinata ad atterrare sul pianeta, arrivò il primo di marzo 1966. Il sistema di comunicazione fu distrutto dall'impatto; non furono quindi ricevuti dati.

Venera 4 - 12 giugno 1967 - Entrò nell'atmosfera di Venere e sganciò due termometri, un barometro, un radio altimetro ed uno strumento per la misura della densità. Trasmise dati per 94 minuti fino ad una altezza di 24,96 km dal suolo, poi interruppe il contatto.

Mariner 5 - 14 giugno 1967 - Questa sonda era destinata a sorvolare Marte; fu invece deciso di inviarla verso Venere. Passò a 4.000 km dalla superficie del pianeta il 19 ottobre 1967. I suoi strumenti effettuarono, fra l'altro, misure del campo magnetico del pianeta e di quello interplanetario. La missione fu compiuta con pieno successo.

Venera 5 - 5 gennaio 1969 - Molto simile a Venera 4, il 16 maggio 1969, mentre scendeva col paracadute nell'atmosfera di Venere trasmise dati per 53 minuti.

Venera 6 - 10 gennaio 1969 - Simile alla precedente, trasmise dati per 51 minuti, il 17 maggio 1969, mentre scendeva nell'atmosfera. Tra i vari dati raccolti dalle due sonde fu rilevata una percentuale di anidride carbonica atmosferica del 97%.

Venera 7 - 17 agosto 1970 - Costruita per sopportare oltre 500°C di temperatura e 180 kg/cm² di pressione: essa atterrò sulla superficie di Venere il 15 dicembre 1970 e trasmise dati per 23 minuti prima di essere messa fuori uso dalle condizioni ambientali. La sonda misurò una temperatura alla superficie di oltre 470°C e una pressione 90 volte superiore a quella terrestre. Fu il primo apparecchio

costruito dall'uomo a trasmettere dati dalla superficie di un altro pianeta.

Venera 8 - 27 marzo 1972 - Entrò nell'atmosfera di Venere il 22 luglio 1972 e rilasciò una sonda che atterrò sulla superficie. Trasmise dati sull'ambiente venusiano per 50 minuti e misurò l'intensità della luce sulla superficie planetaria. Contrariamente alle previsioni la superficie di Venere è risultata abbastanza luminosa da consentire riprese fotografiche senza illuminazione artificiale. Questa sonda, facendo misure sulle rocce circostanti il punto di atterraggio trovò una percentuale di elementi quali potassio, uranio e torio simili alle rocce granitiche terrestri tipiche dei continenti.

Mariner 10 - 3 novembre 1973 - Fu il settimo lancio eseguito con successo della serie Mariner. È stata la prima missione che prevedeva l'utilizzo della forza gravitazionale di un pianeta (Venere) per raggiungerne un altro (Mercurio). Sorvolò Venere il 5 febbraio 1974 da una distanza di 4200 km. Intersecò poi l'orbita di Mercurio il 24 marzo 1974 da una distanza di circa 704 km dalla superficie del pianeta. Un secondo incontro con Mercurio si ebbe il 21 settembre dello stesso anno da una distanza di 47000 km. Un terzo ed ultimo incontro si ebbe, da una distanza di soli 327 km il 16 marzo 1975. La missione terminò il 24 marzo quando la riserva di gas per il controllo dell'orientamento della sonda si esaurì. Furono raccolte migliaia di fotografie dell'atmosfera di Venere e della superficie di Mercurio.

Nota: Fu grazie ai calcoli del prof. Giuseppe Colombo (professore di meccanica delle vibrazioni all'Università di Padova, prematuramente scomparso) che la sonda poté sorvolare Mercurio non una volta, come era inizialmente previsto nei piani della NASA, ma ben tre volte.

Venera 9 - 8 giugno 1975 - Ha iniziato una nuova generazione di sonde spaziali per lo studio di Venere. Era costituita di un veicolo destinato a rimanere in orbita attorno al pianeta (orbiter) e di uno destinato ad atterrare (lander). La separazione fra i due avvenne il 20 ottobre 1975 e il lander atterrò il giorno 22 col sole allo zenith. Riuscì a operare per 53 minuti sulla superficie del pianeta. Furono trovati nuovi costituenti dell'atmosfera come HCl, HF, Br, ed I; fu misurata una pressione al suolo di 90 atmosfere ed una temperatura superficiale di 485°C; furono misurati livelli di illuminazione confrontabili con quelli terrestri alle medie latitudini in un giorno estivo con cielo coperto; furono anche riprese diverse immagini televisive del suolo in cui si vedono varie rocce delle dimensioni di 30-40 cm esenti da erosione, l'atmosfera si presenta limpida e priva di polveri in sospensione.

Venera 10 - 14 giugno 1975 - Come la precedente. La separazione dal lander avvenne il 23 ottobre 1975 e quest'ultimo atterrò il giorno 25. Trasmise alcune immagini televisive del suolo.

Pioneer Venus 1 - 20 maggio 1978 - Detto anche Pioneer Venus Orbiter è la prima di due sonde una destinata ad orbitare attorno al pianeta e l'altra (Pioneer Venus 2) a sganciare quattro sonde minori nell'atmosfera di Venere. Entrato in orbita il 4 dicembre 1978 ha trasmesso dati a varie riprese fino all'agosto del 1992. Ha fatto misure dettagliate della ionosfera e dell'alta atmosfera nonché dell'interazione della ionosfera di Venere col vento solare.

Pioneer Venus 2 - 8 agosto 1978 - Detto anche Pioneer Venus Probe Bus. Le quattro sonde atmosferiche si sono sganciate diversi giorni prima di raggiungere Venere. Due di queste piccole sonde sono entrate nell'atmosfera di Venere dalla parte in ombra, le altre due, una piccola ed una più grande, sono entrate dalla parte illuminata. Il Bus a sua volta è entrato nell'atmosfera ed ha trasmesso dati finché non si è distrutto ad una altezza di 15 km dalla superficie.

Venera 11 - 9 settembre 1978 - Assieme a Venera 12 costituisce una missione a due veicoli per lo studio di Venere e del mezzo interplanetario. Il sorvolo di Venere avvenne il 25 dicembre 1978 ad una altezza di 34.000 km. Il lander, compiuto un atterraggio morbido, trasmise dati per circa un'ora.

Venera 12 - 14 settembre 1978 - Come la precedente. Sorvolò Venere il 21 dicembre 1978 ad una altezza di 34000 km. Il lander costruito principalmente per lo studio della composizione chimica dell'atmosfera atterrò senza problemi.

Venera 13 - 30 ottobre 1981 - Atterrò il primo marzo 1982 nella regione Phoebe. Ha raccolto dati principalmente sulla composizione chimica e isotopica. Durante la discesa nell'atmosfera registrò intense scariche elettriche.

Venera 14 - 4 novembre 1981 - Atterrò a 930 chilometri a sud-est della precedente il 5 marzo 1982.

Venera 15 - 2 giugno 1983 - Assieme a Venera 16 costituisce una missione a due veicoli per lo studio dettagliato della superficie mediante tecniche radar. Furono poste in orbita quasi polare e forniscono una mappa del pianeta dal polo nord fino a circa 30 gradi di latitudine N.

Venera 16 - 7 giugno 1983 - Vedi Venera 15.

Vega 1 - 15 dicembre 1984 - Destinata, come la sua gemella Vega 2, a raggiungere Venere e ad utilizzare la sua gravità per essere diretta verso la cometa di Halley, rilasciò una sonda sul pianeta l'11 giugno 1985 e fu il primo veicolo a raggiungere Halley il 6 marzo 1986.

Vega 2 - 21 dicembre 1984 - Come la precedente. Raggiunse la cometa di Halley tre giorni dopo.

Magellan - 4 maggio 1989 - Missione americana a basso costo dotata di un radar ad apertura sintetica e destinata, una volta posta in orbita quasi polare, a fornire: una mappa radar globale di Venere con una risoluzione ottica equivalente di 1 km; una mappa topografica globale con una risoluzione spaziale di 50 km e di 100 m in altitudine; il campo gravitazionale sulla superficie con una risoluzione spaziale di 700 km ed una accuratezza di 2-3 milligal (1 gal = 1 cm/s²); informazioni sulla struttura geologica del pianeta, sulla distribuzione di densità e sulla dinamica eventuale delle zolle. Durante la prima fase (dall'arrivo il 15 settembre 1990 fino al 15 maggio del 1991) ha eseguito una ripresa radar dell'84% del suolo di Venere. Nella seconda fase, fino al 15 gennaio 1992, ha raccolto immagini della regione polare sud ed ha riempito le lacune della prima fase. Nella terza fase (dal 24 gennaio 1992 al 15 settembre 1992) ha completato le prime due fasi. Nella quarta (fino al maggio 1993) ha raccolto dati sulla gravità. Successivamente (dal 24 maggio al 2 agosto 1993) ha effettuato una manovra di "aerobraking" per porsi in orbita meno eccentrica. Nella quinta fase (dal 3 agosto 1993 al 29 agosto 1994) ha raccolto dati ad alta risoluzione sul campo gravitazionale per il 95% del pianeta. Infine è stato lanciato sul pianeta per ottenere, durante l'attraversamento dell'atmosfera, dati sulla sua densità; si è perso il contatto il 12 ottobre 1994 e probabilmente è bruciato uno o due giorni dopo.

L'esplorazione del Sistema solare

Pierluigi Battistini

Le missioni verso Marte

Le missioni verso
Venere e Mercurio

Le missioni verso
Marte

Le missioni verso i
pianeti esterni

Mars 1 - 1 novembre 1962 - La prima sonda sovietica lanciata con successo verso Marte: si perse il contatto a circa 190.000 km dal pianeta.

Mariner 3 - 5 novembre 1964 - La prima sonda americana inviata verso il pianeta rosso: fu perso il contatto e la sonda rimase in orbita solare.

Mariner 4 - 28 novembre 1964 - Raggiunse la meta il 14 luglio 1965, arrivando a circa 9850 km da Marte. La sonda trasmise una ventina di immagini televisive della superficie che, sebbene non eccezionalmente nitide, bastarono per ridimensionare le aspettative sulla possibilità di esistenza di qualche forma di vita diffusa. La sonda misurando la rifrazione delle onde radio rilevò una pressione atmosferica di 8 millibar (0,8% di quella terrestre), e un campo magnetico 3000 volte inferiore a quello della Terra.

Zond 2 - 30 novembre 1964 - Si persero i contatti nel maggio del 1965.

Mariner 6 - 24 febbraio 1969 - Il 31 luglio 1969 arrivò a 3400 km dal pianeta; trasmise 75 immagini di cui una trentina riprese da 1 milione di km e le rimanenti a distanza ravvicinata dall'emisfero meridionale. La sonda era dotata di due telecamere, di spettrometri e radiometri all'infrarosso e ultravioletto per lo studio della composizione atmosferica e la rilevazione delle temperature. Le immagini del pianeta, più nitide di quelle riprese dal Mariner 4, mostrarono un corpo desertico con crateri sparsi, mentre le macchie visibili dalla Terra svanirono con il progressivo avvicinarsi della sonda al pianeta: tali macchie non erano dovute a particolari della superficie planetaria ma a zone che presentavano una diversa riflettività per la composizione del suolo. La sonda confermò una pressione atmosferica di 6/7 millibar, misurò temperature di -125°C al polo sud e -73°C notturni all'equatore; rilevò che la componente principale dell'atmosfera era l'anidride carbonica.

Mariner 7 - 27 marzo 1969 - Arrivato alla minima distanza da Marte il 4 agosto 1969, trasmise 126 foto dell'emisfero meridionale.

Mariner 8 - 8 maggio 1971 - Fallì il lancio con la caduta nell'Oceano Atlantico del modulo spaziale.

Cosmos 419 - 10 maggio 1971 - Bruciò il 12 maggio nell'atmosfera terrestre.

Mars 2 - 19 maggio 1971 - Questa sonda, che raggiunse il pianeta il 27 novembre 1971, era composta da due veicoli, il Mars 2 orbiter che si collocò su un'orbita fortemente ellittica e il Mars 2 lander che doveva scendere sulla superficie per compiere rilievi sull'ambiente marziano. Purtroppo il lander si schiantò sulla superficie del pianeta mentre l'orbiter, con a bordo 2 telecamere e vari strumenti scientifici, trasmise dati sull'atmosfera.

Mars 3 - 28 maggio 1971 - Questa sonda, arrivata a destinazione il 2 dicembre 1971, gemella del Mars 2, era sempre composta da due veicoli, uno destinato ad orbitare intorno al pianeta e l'altro a compiere un atterraggio morbido sulla superficie. Stavolta il Mars lander riuscì ad atterrare sulla superficie di Marte, ma il contatto venne perso dopo circa 20 secondi e non venne trasmesso alcun

dato utile.

Mariner 9 - 30 maggio 1971 - Arrivò su Marte il 13 novembre 1971 inserendosi su un'orbita molto ellittica. All'arrivo della sonda era in corso su Marte una tempesta di sabbia che impedì le riprese di superficie fatta eccezione per le cime vulcaniche più alte che risultavano visibili. Dopo alcune settimane, al termine delle tempeste di sabbia, la sonda (riprogrammata dalla Terra) trasmise più di 7300 fotografie della superficie e dei satelliti, con una risoluzione massima dell'ordine del chilometro. Queste riprese, che coprirono circa il 70% della superficie, rivoluzionarono completamente la conoscenza della superficie marziana e furono indispensabili per programmare le zone di atterraggio delle missioni Viking. Gli altri strumenti presenti sulla sonda effettuarono studi dettagliati sulla composizione dell'atmosfera e del suolo trasmettendo una grandissima quantità di dati. Il contatto con la sonda fu perso il 27 ottobre 1971 dopo oltre 500 giorni di attività, di cui quasi un anno in orbita attorno a Marte.

Viking 1 - 20 agosto 1975 - Le sonde Viking comprendevano due velivoli come i Mars sovietici: uno progettato per entrare in orbita intorno a Marte e l'altro destinato ad atterrare sulla sua superficie. La sonda arrivò nei pressi del pianeta il 19 giugno 1976; i due moduli non si separarono subito ma l'atterraggio fu posticipato per la scelta di un luogo più idoneo di quello programmato utilizzando le riprese del Mariner 9. A differenza delle missioni sovietiche, dove tutta la missione veniva prestabilita da terra, nelle sonde Viking (come nel Mariner 9) potevano essere eseguite variazioni sui programmi della missione, aumentando così notevolmente le probabilità di riuscita anche di fronte a situazioni impreviste e consentendo il perfezionamento delle scelte iniziali nel corso della missione stessa.

Il 20 luglio 1976 il lander del Viking 1 atterrò con successo a Chryse Planitia, nell'emisfero settentrionale (a 48° di latitudine nord e 226° di longitudine ovest), mentre l'orbiter continuava il suo moto intorno al pianeta. Il lander del Viking 1 interruppe le comunicazioni con la Terra nell'aprile del 1980, dopo quasi 4 anni di attività.

Viking 2 - 9 settembre 1975 - Arrivò a destinazione il 7 agosto 1976, e il suo lander atterrò con successo il 3 settembre 1976 a Utopia Planitia, in una località (situata a 22° di latitudine nord e 47° di longitudine ovest) distante circa 6500 km dal Viking 1. Marte veniva contemporaneamente studiato dalle due sonde orbitanti (orbiter) e dai due lander sulla superficie.

Le telecamere degli orbiter fotografarono la superficie di Marte con una risoluzione che arrivava fino a poche decine di metri, fornendo immagini a colori e stereoscopiche. Trasmisero oltre 40.000 foto del pianeta rivelando una grande varietà di crateri, pianure modellate da antichi ghiacci e invase da antiche inondazioni, altipiani e canali modellati dalle acque, probabilmente esistenti 2 o 3 miliardi di anni fa, canyon e immagini ravvicinate di immensi vulcani spenti come il monte Olympus.

Furono trasmesse anche immagini ad altissima risoluzione dei satelliti Phobos e Deimos che in alcune riprese rivelavano particolari di pochi metri di diametro. Gli orbiter hanno inoltre confermato che le calotte polari sono composte oltre che da anidride carbonica anche da ghiaccio d'acqua.

I due moduli, ubicati a 6500 km di distanza l'uno dall'altro, effettuarono molte analisi del suolo, ma non furono rivelate tracce di vita. Anche le telecamere di cui erano dotati i lander e con le quali si ottennero 4500 immagini ravvicinate della superficie non rivelarono segni di vita. L'esistenza di una forma di vita complessa era già stata scartata nelle precedenti missioni; con i Viking non sono state individuate neppure forme di vita più semplici. Il lander del Viking 2 interruppe le comunicazioni con la Terra nel novembre 1982, dopo quasi 6 anni di attività.

Phobos 1 - 7 luglio 1988 - Destinata ad atterrare sulla omonima luna di Marte, nel settembre del 1988 vennero persi i contatti.

Phobos 2 - 12 luglio 1988 - Aveva un programma simile alla

precedente. Entrò in orbita intorno a Marte il 29 luglio 1989 e trasmise dati fino al 27 marzo 1990, ma quando iniziò ad avvicinarsi al satellite vennero definitivamente persi i contatti.

Mars Observer - *25 settembre 1992* - Doveva essere la prima di una serie di missioni destinate a studiare la geologia e l'atmosfera di Marte. Il lancio ebbe successo ma fu perso il contatto il 21 agosto 1993, tre giorni prima del previsto ingresso in orbita marziana.

Mars 94 - - La missione, composta di un orbiter, due lander e due piccole sonde destinate a penetrare nel suolo marziano, fallì.

Mars Global Surveyor - **7 novembre 1996** - Destinata ad orbitare per due anni in orbita polare allo scopo di fornire una mappa dettagliata della superficie marziana per quanto riguarda morfologia, topografia, composizione, gravità, dinamica dell'atmosfera e campo magnetico. È arrivata su Marte il 12 settembre 1997 e, a causa di alcuni malfunzionamenti, ha iniziato la fase di presa dati nell'aprile del 1999. È ancora in piena attività. La sonda è stata costruita utilizzando parte delle strumentazioni progettate per la Mars Observer, oltre a nuovi strumenti tra i quali ricordiamo: uno spettrometro infrarosso per misurare il riscaldamento e raffreddamento diurno del suolo, analizzare la sua composizione minerale, studiare l'atmosfera e le nubi di polvere; un altimetro laser per mappare la morfologia verticale del territorio con una risoluzione di 10 metri; un magnetometro per individuare la presenza di un eventuale campo magnetico, telecamere per ottenere mappature a grande campo e ad alta risoluzione dell'intero pianeta fino ad ottenere particolari di soli 2 o 3 metri. Il sistema di telecomunicazioni viene utilizzato anche per lo studio del campo gravitazionale del pianeta che permetterà di ricavare informazioni sulla crosta e sulla costituzione interna di Marte.

Mars Pathfinder - *4 dicembre 1996* - La sonda, destinata ad atterrare su Marte, è entrata nell'atmosfera del pianeta il 4 luglio 1997 direttamente dall'orbita di trasferimento ad una velocità di 7300 m/s. Per circa 3 mesi ha inviato sulla Terra un grande quantità di dati anche utilizzando il Rover Sojourner, un veicolo a sei ruote che ha percorso la superficie attorno alla stazione fino ad una distanza di alcune decine di metri.

Mars Climate Orbiter - *10 dicembre 1998* - Questa sonda, destinata ad entrare in orbita marziana il 23 settembre 1999, e la successiva fanno parte del progetto Mars Surveyor 98. Purtroppo, per un errore nel trasferimento di informazioni fra il gruppo responsabile del veicolo in Colorado e il gruppo responsabile della navigazione in California, è fallita la manovra di inserimento in orbita marziana. La sonda dopo un paio di mesi di aerobraking era destinata ad entrare in orbita definitiva per iniziare la raccolta di dati scientifici, principalmente per lo studio del clima marziano.

Mars Polar Lander - *3 gennaio 1999* - Anche il Mars Polar Lander, destinato ad atterrare sul pianeta il 3 dicembre 1999, in una regione prossima alla calotta polare nord, ha purtroppo fallito la sua missione. Durante la discesa avrebbe dovuto inviare sulla superficie di Marte due piccolissime sonde (delle dimensioni di una palla da baseball) che arrivando ad una velocità di circa 200 m/s e sprofondando nel suolo marziano per circa 2 metri avrebbero dovuto inviare poi a terra dati sul sottosuolo.

Planet-B (Nozomi) - Questa sonda, frutto di una collaborazione internazionale con a capo il Giappone, fu ribattezzata "Nozomi" (speranza in giapponese) dopo il lancio effettuato con successo. Avrebbe dovuto raggiungere il pianeta rosso nell'ottobre 1999, ma, durante l'accensione di un motore in occasione della manovra di "gravity assist" in vicinanza della Luna, una valvola si è aperta in modo irregolare ed il veicolo è finito fuori rotta. Raggiungerà comunque Marte nel gennaio del 2004.

L'esplorazione del Sistema solare

Pierluigi Battistini

Home

Le missioni verso
Venere e Mercurio

Le missioni verso
Marte

Le missioni verso i
pianeti esterni

Le missioni verso i pianeti esterni

Pioneer 10 - Lancio: *3 marzo 1972*; Giove: *3 dicembre 1973*
- Nel febbraio del 1969 veniva varato il programma per la costruzione di due sonde interplanetarie da inviare verso i pianeti esterni Giove e Saturno; queste sonde vennero battezzate Pioneer 10 e 11.

La prima sorvolò Giove da circa 130.000 km il 3 dicembre 1973. Inviò a terra più di 300 fotografie del pianeta, della Grande Macchia Rossa e delle lune galileiane sebbene, di queste ultime, le immagini fossero poche e di bassa risoluzione. Inoltre verificò che l'eliosfera, cioè il vento solare è esteso oltre Giove ed effettuò misurazioni del campo magnetico del pianeta che risultò 12 volte più intenso di quello terrestre. Terminata la sua missione il Pioneer 10 si diresse verso i confini del Sistema solare che vennero superati il 13 giugno 1983 con l'attraversamento dell'orbita di Nettuno che, in quel punto, era più esterna di quella di Plutone. La missione è nominalmente terminata il 31 marzo 1997, ma i contatti non sono ancora stati persi: il primo ottobre 1998 la sonda si trovava ad una distanza dalla terra di 10,57 miliardi di chilometri (19 ore e 34 minuti luce).

Pioneer 11 - Lancio: *6 aprile 1973*; Giove: *4 dicembre 1974*; Saturno: *1 settembre 1979* - Sorvolò Giove nel dicembre del 1974, inviò 130 foto della superficie planetaria e riprese alcuni satelliti sempre con bassa risoluzione, scoprendo il polo sud ghiacciato di Callisto. Come il Pioneer 10 anche l'11 effettuò misurazioni sulla magnetosfera e l'atmosfera di Giove; quindi, sfruttando l'attrazione gravitazionale del pianeta, fu proiettato verso Saturno che raggiunse il primo settembre 1979. Scoprì la presenza di un nuovo anello, battezzato F, e di un nuovo satellite nelle sue vicinanze. Questa missione era importante sia per raccogliere informazioni preliminari sull'ambiente di Saturno che per riprogrammare al meglio le traiettorie delle sonde Voyager, che in quel periodo avevano appena superato Giove ed erano dirette a loro volta verso Saturno. Il Pioneer 11 inviò le prime foto ravvicinate di Saturno, dei suoi anelli e delle sue lune (sorvolò Titano da 360.000 km); inoltre misurò il campo magnetico del pianeta che risultò 1000 volte più intenso rispetto a quello terrestre. La NASA, il 30 settembre 1995, interruppe le comunicazioni con la sonda che si trovava, dopo oltre vent'anni di attività, in cattive condizioni operative a circa 6,5 miliardi di km dalla Terra.

Voyager 1 - Lancio: *5 settembre 1977*; Giove: *5 marzo 1979*; Saturno: *12 novembre 1980* - Nei primi anni settanta la NASA iniziò il progetto per la costruzione delle due sonde gemelle Voyager 1 e 2 destinate a ritornare su Giove e Saturno, per poi spingere l'esplorazione (con il Voyager 2) fino ai pianeti Urano e Nettuno.

Il Voyager 1 che giunse a destinazione il 5 marzo 1979, in anticipo sull'altra sonda partita prima perché viaggiò su una traiettoria più corta; sorvolò Giove da 22.000 km ed oltre ad ottenere immagini eccellenti del pianeta, fornì anche riprese ad alta risoluzione di Io, Ganimede e Callisto; su Io scoprì almeno 12 vulcani attivi. Venne confermata l'esistenza dell'anello di Giove, furono scoperte 3 nuove lune e misurata l'estensione e i valori della magnetosfera gioviana che risultò la più estesa ed intensa fra i pianeti del Sistema Solare.

Il Voyager 1 continuò quindi il suo viaggio verso Saturno, che raggiunse il 12 novembre 1980. Sorvolò l'emisfero meridionale di Saturno osservando il piano inferiore degli anelli e diversi satelliti. L'11 novembre 1980 il Voyager 1 sorvolò Titano (il satellite maggiore di Saturno con diametro di 5150 km) da circa 7000 km, rivelando un'uniforme atmosfera rossastra (colore forse dovuto all'Azoto e al metano) che impediva riprese della superficie; l'atmosfera di Titano risultò composta principalmente da Azoto, metano e Argon ad una temperatura di -180°C, mentre la pressione al suolo risultò di circa 1,5 atmosfere.

Conclusa la missione principale i Voyager sono ancora attivi per la Voyager Interstellar Mission che si prevede potrà proseguire ancora per un paio di decenni. Il Voyager 1 l'11 settembre 1998 si trovava ad una distanza di 10 miliardi e 689 milioni di km (19 ore e 51 minuti luce).

Voyager 2 - Lancio: 20 agosto 1977; Giove: 9 luglio 1979; Saturno: 26 agosto 1981; Urano: 24 gennaio 1986; Nettuno: 25 agosto 1989 - Il Voyager 2 che sorvolò Giove il 9 luglio 1979 da 700.000 km. Sorvolò quindi Europa, Ganimede e Callisto; riprese inoltre Io da circa 1.000.000 di km confermando l'intensa attività vulcanica del satellite.

Poi il Voyager 2 proseguì il suo viaggio verso Saturno che raggiunse il 25 agosto 1981 e continuò successivamente alla volta di Urano, raggiunto nel gennaio del 1986, e Nettuno nell'agosto del 1989. I Voyager, oltre a migliorare le conoscenze e a definire meglio la forma e le caratteristiche del campo magnetico di Giove, hanno verificato che il satellite Io è connesso al pianeta da un flusso di elettroni e ioni; questo flusso trasporta una corrente di 5 milioni di ampère che fluisce da Io a Giove attraverso il campo magnetico di quest'ultimo.

Anche questa sonda, dal 1989, partecipa alla Voyager Interstellar Mission. L'11 settembre 1998 si trovava ad una distanza di 8 miliardi e 348 milioni di km (15 ore e 21 minuti luce).

Ulysses - Lancio: 6 ottobre 1990; Giove: 8 febbraio 1992 - Lanciato dallo Space Shuttle Discovery, ha raggiunto Giove nel febbraio del 1992, dove una manovra di "gravity assist" lo ha posto in un'orbita solare polare, dalla quale ha potuto osservare il polo sud del Sole nel 1994 e il polo nord nel 1995. La missione Ulisse ha esplorato per la prima volta l'eliosfera ad alte latitudini lontano dal piano dell'eclittica. I principali risultati di questa missione sono stati lo studio delle proprietà della corona solare ad alte latitudini, del vento solare, del campo magnetico dell'eliosfera dei raggi cosmici galattici e delle onde di plasma.

Galileo - Lancio: 18 ottobre 1989; Venere: 10 febbraio 1990; Terra: 8 dicembre 1990; Gaspia: 29 ottobre 1991; Terra: 8 dicembre 1992; Ida: 28 agosto 1993; Giove: 7 dicembre 1995 - La sonda Galileo è costituita da due moduli: un orbiter, destinato ad entrare in orbita intorno a Giove e un veicolo (Probe), costruito per penetrare nell'atmosfera del pianeta ed analizzarla. Inizialmente il viaggio della sonda fu previsto in due anni e mezzo con un'orbita diretta verso Giove, ma, a causa della tragica esplosione dello Space Shuttle avvenuta nel gennaio del 1986, venne abbandonato il progetto di utilizzare come propulsore il razzo Centaurus ad idrogeno ed ossigeno liquidi a favore del più sicuro, ma meno potente, razzo bistadio IUS a propellenti solidi.

Questo comportò un notevole aumento dei tempi e della complessità del viaggio; l'orbita studiata per la sonda si avvaleva della tecnica del "gravity assist", con la quale il veicolo spaziale, utilizzando la spinta gravitazionale della Terra e di Venere, avrebbe acquistato la velocità necessaria per arrivare a destinazione. La Galileo venne lanciata da Cape Canaveral il 29 ottobre del 1989 con arrivo su Giove previsto per il dicembre 1995, dopo 6 anni complessivi di viaggio.

Nell'aprile del '91 la mancata apertura dell'antenna ad alto guadagno fu un gravissimo incidente in grado di pregiudicare il risultato della missione; l'antenna ad ombrello non si aprì completamente e gli innumerevoli tentativi fatti per sbloccarla non servirono a nulla. L'unica

speranza, per non pregiudicare la missione, era di utilizzare l'antenna a basso guadagno con una notevolissima perdita di efficienza nella trasmissione dei dati. A questo scopo la Galileo venne completamente riprogrammata tra il gennaio e il febbraio del 1995, e vennero inoltre potenziate le stazioni di ricezione a terra.

Il 7 dicembre del 1995 il Probe penetrò nell'atmosfera di Giove, mentre l'orbiter si immetteva in orbita intorno al pianeta. La capsula penetrò alla velocità di 170.000 km/h protetta dallo scudo termico che la fece decelerare e si riscaldò fino a 12.000°C; seguirono quindi l'apertura del paracadute, il distacco dello scudo termico e finalmente gli strumenti iniziarono la raccolta dati. La capsula atmosferica penetrò fino a 156 km di profondità rispetto alla zona di riferimento dell'atmosfera gioviana (che presenta la pressione di 1 bar) prima di interrompere la trasmissione dati alla sonda madre; a quella profondità la pressione era di 23 atmosfere e la temperatura di 150°C.

La missione dell'orbiter era quella di compiere passaggi ravvicinati e ripetuti dei satelliti Ganimede, Callisto ed Europa, per fornire immagini ad altissima risoluzione delle loro superfici. La missione è stata terminata con successo nel dicembre del 1997. Data la buona salute della sonda, a partire dal gennaio 1998 è stata avviata la Galileo Europa Mission con lo scopo di rivolgere particolare attenzione a questo satellite probabile candidato ad ospitare acqua allo stato liquido e quindi forme di vita primitive al di sotto della superficie. Anche quest'ultima fase è stata compiuta con un successo molto superiore alle aspettative

Cassini - Lancio: *15 ottobre 1997*; Venere: *26 aprile 1998*; Venere: *giugno 1999*; Terra: *agosto 1999*; Giove: *dicembre 2000*; Titano: *luglio 2004*; Saturno: *luglio 2004* - Nell'ottobre del 1997 la grande sonda Cassini ha iniziato il suo lungo viaggio con destinazione Saturno. La missione è il frutto di una collaborazione internazionale che coinvolge la NASA, l'ESA (Agenzia Spaziale Europea), l'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e alcuni altri partners europei sia accademici che industriali. Numerose sofisticate apparecchiature scientifiche effettueranno 27 esperimenti e ricerche destinati ad indagare i misteri del pianeta. La sonda è costituita di due parti: una destinata a rimanere in orbita attorno a Saturno ed una destinata ad atterrare sul satellite Titano. L'interesse per quest'ultimo è dovuto soprattutto al fatto che possiede una atmosfera ed il suo ambiente, nonostante la bassa temperatura, è probabilmente simile a quello della terra primordiale. Secondo il programma, Cassini dovrà inviare i suoi dati scientifici a terra fra il 2004 e il 2008.

Dove sono gli altri?

Giorgio G.C. Palumbo

La ricerca di vita intelligente e pianeti abitabili nell'Universo

La mattina di giovedì 17 febbraio del 2000 saranno trascorsi 400 anni da quando Giordano Bruno venne messo al rogo in Piazza dei Fiori a Roma per aver sostenuto, nei suoi scritti, che "...la magnificenza di Dio è glorificata non in uno ma in mille soli; non in una terra, un singolo mondo, ma in migliaia di migliaia, io dico una infinità, di mondi". Bruno non era un astronomo ma un filosofo, impregnato di misticismo e magia medioevale, si teneva a rispettosa distanza dalle osservazioni e disprezzava la matematica. Per educazione e carattere non era incline all'umorismo. Pagò il prezzo più caro per aver creduto nelle conclusioni a cui lo portava la ragione.

Sicuramente qualcuno prima di lui (sembra Epicuro sia stato il primo, almeno tra i personaggi della storia della civiltà occidentale) e molti dopo di lui hanno sostenuto la stessa opinione. Alcuni con toni salottieri, come Bernard le Bovier de Fontenelle (*Entretiens sur la pluralité des mondes*, 1686) o Nicolas Camille Flammarion (*Le meraviglie del cielo*, 1885), o, con argomentazioni fisico-matematiche, Lord Kelvin (1871).

Non esiste telescopio così potente da poter produrre immagini dirette di pianeti intorno a stelle diverse dal Sole, per questo motivo la conferma che il nostro Sistema solare non è unico è arrivata con una certa lentezza.

Miliardi di stelle, rosse, gialle, arancione, blu e bianche brillano negli spazi a distanze che si misurano in milioni di miliardi di chilometri, migliaia di volte più lontane del più lontano dei pianeti del nostro Sistema solare. Nel 1995, per la prima volta, sono stati rivelati i primi segni dell'esistenza di pianeti extrasolari attraverso le minuscole oscillazioni che questi pianeti inducono sulla stella intorno alla quale orbitano. Negli anni seguenti gli astronomi hanno dimostrato che la presenza di pianeti e di sistemi planetari non è confinata al Sole, ma si tratta piuttosto di un processo generale che accompagna la formazione delle stelle. Le premesse fanno sperare che nei prossimi decenni saremo in grado di sapere su quali, di questi pianeti, si trova l'acqua e, forse, la vita. Nelle pagine seguenti cercheremo di percorrere le tappe che hanno portato a questi risultati e discuteremo, brevemente, quali strade si percorrono e si potranno percorrere, per entrare in comunicazione con esseri intelligenti, qualora essi esistano, che abitino altri pianeti.

Prima di iniziare una ricerca di pianeti intorno a stelle che non siano il Sole, è opportuno conoscere il nostro Sistema solare. L'argomento è stato ampiamente trattato in precedenti lezioni e pertanto evidenziamo solo alcuni punti di particolare rilievo per il nostro discorso. Il 99% della massa del Sistema solare risiede nel Sole e i pianeti, da questo punto di vista, contribuiscono pochissimo. Contrariamente ad affermazioni che si sentono e si leggono

spesso, il Sole non è una stella qualunque e non solo perché è la "nostra" stella, ma perché è una delle più brillanti della nostra Galassia (per la precisione entro il 5% più brillante). Ogni secondo 600 milioni di tonnellate di idrogeno nel suo interno sono convertite in elio, generando una energia tale che a 149 milioni di chilometri di distanza (questa è l'Unità Astronomica), dove ci troviamo noi, concentrando la luce che ci raggiunge con una lente di un occhiale da miope si riesce ad incendiare un foglio di carta. Il pianeta più vicino al Sole, Mercurio, ruota piano, cosicché i giorni e le notti sono lunghi e gli sbalzi di temperatura enormi. Durante il giorno su Mercurio si misurano circa 400 °C, mentre di notte circa 200 sotto zero. Solo Venere è più caldo e solo Urano, Nettuno e Plutone sono più freddi. La superficie di Mercurio è altrettanto disarmante, di aspetto lunare cosparsa di crateri. Venere, ancorché a distanza doppia dal Sole di Mercurio, ha costantemente una temperatura di circa 450 °C a causa di una densa atmosfera di ossido di carbonio che produce un effetto serra di estrema efficienza, che intrappola la radiazione solare. Ancorché ostile, Venere assomiglia in modo sorprendente alla Terra. La Terra non ha bisogno di presentazione: per il 71% ricoperta da acqua, ha una atmosfera ricca di piogge che alimentano la copiosa vegetazione. L'atmosfera è una mistura di volatile ossigeno (21%) e di inerte idrogeno (78%). Parte dell'ossigeno forma uno strato di ozono che, convenientemente, scherma il pianeta Terra e le creature, vegetali ed animali, che lo abitano dalle radiazioni ultraviolette, ad esse nocive. La Terra è il solo dei 4 pianeti piccoli (i più vicini al Sole) che abbia una luna. L'ultimo dei 4, Marte, non condivide nessuna delle piacevoli condizioni terrestri. Di dimensioni circa la metà del nostro pianeta, Marte è un deserto, la cui sottile atmosfera non possiede né ossigeno né ozono. In passato Marte può essere stato più caldo e più umido e, forse, ha ospitato la vita. Ci sono stati innumerevoli annunci di "prove" di esistenza di "marziani", tra le quali l'ultima nel 1996, quando venne annunciato che fossili di vita marziana erano stati trovati in un meteorite proveniente da quel pianeta e ritrovato in Antartide. Le critiche a questa scoperta sono state molte, ma hanno comunque favorito l'approvazione di una missione con astronauti verso il pianeta rosso in un prossimo futuro. Intorno a Marte orbitano due piccolissimi satelliti, Fobos e Deimos, probabilmente meteoriti catturati. Passata la cintura degli asteroidi si incontra il gigantesco Giove, undici volte più grande della Terra, che contiene circa il doppio della massa di tutti gli altri pianeti messi insieme. Giove è un gigante gassoso, una massa di idrogeno ed elio con, sembra, un nucleo solido. Con la poderosa attrazione gravitazionale che esercita trattiene 16 satelliti, quattro dei quali, i medicei o galileiani, hanno masse maggiori della nostra Luna. Saturno, che con i suggestivi anelli appare così diverso dai compagni, è un altro gigante gassoso la cui massa è però un terzo di quella di Giove. Nonostante ciò Saturno è circondato da 19 satelliti di cui Titano, il maggiore, ha dimensioni maggiori della Luna e un'atmosfera composta in gran parte di azoto e molto più spessa di quella terrestre. Urano e Nettuno sono di massa inferiore a Giove e Saturno e non sono gassosi; idrogeno ed elio fanno parte delle loro atmosfere, ma il pianeta è solido, probabilmente un miscuglio di acqua e roccia. L'ultimo dei "viandanti" (questo il significato dell'originale termine greco) è Plutone, così lontano dal Sole che la temperatura alla superficie raggiunge i -200 °C; Plutone è solido e, a causa dell'orbita molto ellittica, è stato, negli ultimi dieci anni, più vicino al Sole di Nettuno.

La distanza dal Sole determina la temperatura, il periodo orbitale e la dimensione di un pianeta. In prima approssimazione Venere si trova a distanza doppia di Mercurio dal Sole, Saturno a distanza doppia di Giove e Urano a distanza doppia di Saturno; questa regola, nota come legge di Titius-Bode, potrebbe essere rispettata anche in altri sistemi planetari diversi dal nostro. La temperatura di un pianeta è legata alla distanza dalla stella e, per favorire la vita, deve essere in quel piccolo intervallo (0-100 gradi) in

cui è permessa l'acqua allo stato liquido. Naturalmente un altro fattore importante è la presenza di una atmosfera con una certa composizione. Se l'atmosfera c'è e contiene gas che permettono l'effetto serra, allora temperature elevate possono essere raggiunte anche se il pianeta si trova a distanze relativamente grandi dalla stella centrale. Nel nostro Sistema Venere è, come si è detto, più caldo di Mercurio anche se a distanza doppia dal Sole, e sulla Terra l'acqua è quasi ovunque allo stato liquido. Se non ci fosse l'effetto serra, la superficie del nostro pianeta sarebbe a -50 °C e la vita non sarebbe stata possibile. Ci sono poi Giove, Saturno e Nettuno che generano più calore di quanto non ne assorbano dal Sole, dal quale sono, in verità, molto distanti. A causa di questi diversi fattori stimare la temperatura di un pianeta non è facile e, quando si parla di pianeti intorno ad altre stelle, si possono dare solo valori necessariamente approssimati.

Forse una delle caratteristiche più salienti del nostro Sistema solare sta nel fatto che i pianeti piccoli Mercurio, Venere, Terra e Marte sono solidi e vicini al Sole (densità media 4-5 volte quella dell'acqua), mentre i rimanenti grandi e, se non gassosi, meno densi (densità media uguale a quella dell'acqua), sono tutti molto lontani. Si pensi che, mentre la luce solare impiega da un minimo di 3 a un massimo di 12 minuti per raggiungere i primi 4 pianeti, essa impiega da una a cinque ore e mezzo per raggiungere quelli esterni. La massa dei quattro pianeti interni ammonta a circa due masse terrestri. Tutti e quattro sono simili in composizione, presentando roccia e ferro e sulle loro solide superfici la vita avrebbe benissimo potuto evolversi se la temperatura lo avesse permesso. Dal momento che su uno di essi ce l'ha fatta, è ragionevole pensare che questi sono i corpi celesti che si devono cercare, ma sfortunatamente la loro massa è così piccola che sono difficili da trovare. All'estremo del Sistema solare si trova la cintura di Kuiper, una zona di piccoli corpi ghiacciati alcuni dei quali sfuggono e diventano comete di breve periodo. Molto più lontano, sempre allontanandosi dal Sole, c'è un'altra cintura di corpi ghiacciati, la nube di Oort, da cui nascono le comete a lungo periodo.

La distanza dal Sole determina la durata dell'anno di un pianeta: più lontano un pianeta si trova dal Sole, più lungo sarà il suo anno e viceversa. Come esempio estremo si pensi a Mercurio e Plutone; il secondo è cento volte più lontano dal Sole del primo, di conseguenza la sua orbita è cento volte più larga, inoltre si muove a velocità cento volte inferiore, pertanto mentre Mercurio fa un giro intorno al Sole in circa tre dei nostri mesi, Plutone impiega due secoli e mezzo per compiere lo stesso percorso. Questa relazione tra periodo orbitale e distanza dalla stella centrale è di estrema utilità per l'astronomo cercatore di pianeti extrasolari. Supponiamo che si osservi una stella simile al Sole e si noti che essa è disturbata da un pianeta che orbita intorno ad essa ogni 12 anni. Anche se il pianeta non può essere visto, si può dedurre che il pianeta è ad una distanza dalla stella simile a quella di Giove dal Sole e quindi dedurre che il pianeta è, con ogni probabilità, troppo freddo per poter ospitare la vita. Va inoltre tenuto presente che, se la stella non è simile al Sole, le cose cambiano; un pianeta tipo Giove intorno ad una nana rossa, con massa un quarto di quella solare, completerebbe la propria orbita in un tempo 4 volte più lungo, ovvero in 24 anni.

Tutti i pianeti nel nostro Sistema ruotano intorno al Sole nella stessa direzione, che è anche quella in cui ruota il Sole. Ciò suggerisce che essi ebbero origine da un disco corotante quando il Sole era in formazione. L'ipotesi più accreditata è che i pianeti si siano formati da particelle solide che, ammassate in dense fasce intorno al Sole grazie ad un meccanismo che produce effetti simili alla centrifuga, si sono compattate in grosse masse spaziate tra loro. Altra caratteristica è la quasi circolarità delle orbite; nel Sistema solare solo i pianeti più leggeri hanno eccentricità maggiori

di 0.10 (la scala è 0.00 per un cerchio perfetto e 1.00 per l'elongazione massima permessa dalla attrazione gravitazionale tra i due corpi). Dal momento che le stelle doppie (circa la metà delle stelle) hanno eccentricità molto alte, la misura dell'eccentricità è un buon mezzo diagnostico per separare i compagni dubbi. Si è visto che i satelliti sono comuni per i pianeti del Sistema solare ma, va notato, solo 7 hanno dimensioni lunari. Giove ne ha 4, Saturno e Nettuno uno e naturalmente la Terra ha la Luna che, con gli effetti mareali, produce un continuo movimento delle acque oceaniche grazie al quale, si ritiene, la vita si è potuta trasferire dal mare alla Terra.

Per il momento, ciò che si sa dei pianeti vicino a noi dipende dalla distanza di ognuno di essi da noi e dal numero di veicoli spaziali che, con successo, si sono avvicinati e ci hanno inviato informazioni. Per ora mentre tutti, ad eccezione di Plutone, sono stati sorvolati almeno una volta da una navicella spaziale, solo intorno a 3 (Venere, Marte e Giove), oltre naturalmente alla Terra, ne è stata messa in orbita una e solo su Venere e Marte una sonda è scesa fin sulla superficie. Molta strada, quindi, deve ancora essere percorsa, prima che si possa ritenere di conoscere i componenti del nostro Sistema solare. D'altra parte, chi ci assicura che i sistemi planetari siano la norma? Il fatto che la nostra stella ne possieda uno non garantisce che non sia unico. È quindi necessario esaminare gli aspetti salienti delle teorie di formazione stellare per cercare di capire quali siano le probabilità secondo le quali possiamo aspettarci altri casi anche se la risposta finale alla domanda se esistano altri pianeti su cui è possibile la vita verrà dalle osservazioni.

Se si percorrono 40.000 miliardi di chilometri (4.3 anni luce) attraverso il freddo spazio interstellare si raggiunge la gialla stella Alfa del Centauro, la stella nostra vicina. In una sfera con una dozzina di anni luce di raggio si trovano circa 25 stelle, le più sono deboli ma alcune abbastanza brillanti, alcune sono bianche o gialle ma la maggioranza sono arancione o rosse. Anche se nel cielo stellato le stelle brillanti sembrano dominanti, questa è solo una illusione o, come si dice in gergo astronomico, un effetto di selezione. Circa 80% delle stelle della nostra Galassia sono nane rosse, il 9% nane K, il 5% nane bianche e solo il 4% del totale sono di tipo G, ovvero stelle di sequenza principale e del tipo a cui appartiene il Sole. Un trascurabile 2% comprende tutte le altre. Se si è propensi a credere che la probabilità di trovare pianeti, magari con tracce di vita, è maggiore intorno a stelle tipo Sole e, per motivi di sensibilità dei telescopi, ci si limita alle stelle più vicine, vale la pena considerare solo 4-5 stelle ogni cento. Questo dato è scoraggiante, anche se in totale sui circa 1000 miliardi di stelle della nostra Galassia circa 40 miliardi sono simili al Sole. Su queste basi si potrebbe immediatamente concludere che nella Galassia quasi sicuramente una o alcune di queste stelle di tipo solare hanno dei pianeti su cui esiste qualche forma di vita, ma altrettanto sicuramente nessuna è così vicina a noi da permetterci di sperare di osservarli.

Gli astronomi hanno lottato per secoli con il problema di misurare la distanza delle stelle; il metodo tuttora in vigore è quello della misura della parallasse.

A causa della diversa posizione della Terra rispetto al Sole, durante una rotazione una stella è vista con diversa prospettiva: lo spostamento apparente, o parallasse, è tanto maggiore quanto più vicina è la stella. Questo effetto è analogo a quanto si osserva attraversando una strada, allorché il cartello stradale sembra spostarsi molto di più delle lontane montagne sullo sfondo. Alcune stelle poi sembrano mutare posizione nel corso degli anni, rispetto alle altre stelle vicine. Questo "moto proprio" è dovuto al fatto che esse sono più vicine a noi delle altre e ciò accade perché le stelle viaggiano attraverso lo spazio su cammini diversi tra

loro e da quello percorso dal Sole. Continuando con il paragone della strada, il moto proprio è analogo a ciò che vede un autista quando percorre a velocità sostenuta una strada: i segnali stradali sembrano sfrecciare velocemente, mentre le lontane montagne sullo sfondo sembrano spostarsi molto lentamente. La tecnica di misurare parallasse e moto proprio è l'astrometria, che ci permette di catalogare le stelle a seconda della loro distanza da noi.

L'astrometria ci permette anche di individuare quali stelle sono doppie e quali triple e, con la stessa tecnica, quali hanno pianeti e quali no. Un tempo sia Sirio che Prozione erano ritenute stelle singole, come lo è il Sole. Le invisibili compagne furono messe in evidenza per la prima volta nel 1844 dal matematico e astronomo tedesco Friedrich Wilhelm Bessel, il quale notò che i loro moti propri non erano costanti e propose che la causa delle variazioni fosse una compagna troppo debole per essere osservata. Se si potesse osservare il Sole da una distanza di 10 anni luce, si potrebbe notare che la presenza di Giove (che ha una massa che è un millesimo di quella solare) crea oscillazioni di 1.6 millesimi di secondo d'arco (ovvero un angolo che è uguale a una parte su tre milioni e seicentomila di un grado, ovvero lo spessore di un capello umano visto da 3 chilometri di distanza). Gli altri pianeti perturberebbero il Sole molto meno, data la minore massa. La speranza di misurare la presenza della Terra appare nulla! In altri Sistemi solari tutto dipende dalla massa della stella centrale: minore è la massa più un pianeta la fa oscillare. Nulla ci impedisce di credere, però, che stelle più piccole abbiano pianeti più piccoli; se questo fosse vero il vantaggio svanirebbe. La consistenza dell'oscillazione astrometrica è dipendente dalla distanza stella-pianeta, più che dalla massa. Nel nostro Sistema solare, ad esempio, Urano e Nettuno hanno circa la stessa massa, ma Nettuno produce una oscillazione astrometrica circa doppia di Urano. La causa di ciò risiede nel fatto che la stella ed il pianeta ruotano intorno al centro di massa, che è il punto dove si porrebbe il fulcro se si unissero le due masse e le si volesse porre in equilibrio. Il centro di massa si trova quindi tra i due oggetti ed è più vicino all'oggetto più pesante. In conclusione è molto più facile rivelare un pianeta pesante e lontano dalla stella per cui, nel caso del nostro Sistema solare, sarebbero facilmente rivelabili i pianeti esterni.

Per molte ragioni la ricerca di pianeti extrasolari si è concentrata su stelle vicine, non ultimo il fatto che le oscillazioni astrometriche della stella in apparente moto sono più facilmente visibili.

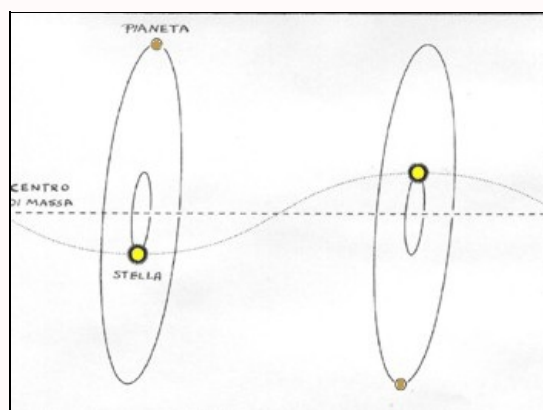


Figura 1. Il centro di massa di un sistema stella-pianeta non si muove, ma sia la stella che il pianeta gli ruotano intorno (linea tratteggiata). Gli astronomi possono, quindi, scoprire l'esistenza del pianeta (altrimenti non visibile) se osservano le oscillazioni astrometriche intorno al centro di massa (curva punteggiata).

Appartenente alla costellazione della Lira, associata dagli antichi Greci alla musica, Vega è la quinta stella più brillante del firmamento. Dal 1983, quando è entrato in funzione un

satellite chiamato IRAS (Infrared Astronomical Satellite), con a bordo un telescopio capace di misurare la radiazione infrarossa emessa dai corpi celesti, è noto che Vega emette una cospicua quantità di radiazioni a lunghezza d'onda centrata sui 100 micron (la lunghezza d'onda di un micron, ovvero un millesimo di millimetro, è un po' maggiore di quella della luce rossa visibile). Tale emissione era totalmente inaspettata, poiché Vega è una stella di tipo A0 con massa circa il doppio di quella del Sole e, secondo le moderne teorie di evoluzione stellare, dovrebbe essere molto debole a 100 micron. È però noto che materia solida ricca di carbonio e silicio, non importa di quale dimensione, dal grano di polvere all'asteroide al pianeta, assorbe la luce ultravioletta emessa da una stella vicina e la riemette nell'infrarosso. Questo effetto è osservabile frequentemente quando il Sole tramonta, poiché la luce solare al tramonto attraversa una quantità maggiore di atmosfera di quando è alto sull'orizzonte e quindi incontra maggiori quantità di gas e polvere che la assorbono e la riemettono nel rosso e infrarosso; per questo i tramonti sono rossi.

Dapprima si pensò che ciò che si vedeva intorno a Vega fosse un asteroide, ma una stima della massa e distanza che avrebbe dovuto avere per spiegare la radiazione misurata da IRAS produsse valori esagerati e quindi impossibili. La conclusione finale fu che Vega è circondata da un anello di polvere ma, e qui viene la scoperta, tali grani non hanno dimensioni simili alla polvere interstellare (meno di un micron), ma sono migliaia di volte maggiori, il che suggerisce il fatto che, per la prima volta, si è rivelato un anello di materiale che indica la formazione di un futuro sistema planetario. Queste grosse particelle, insomma, dovrebbero essere ciò che rimane della nube prenatale di gas e polvere rimasta dopo la formazione della stella, nel nostro caso Vega. Questo è in accordo con una accreditata teoria di formazione di sistemi planetari basata sul nostro Sistema solare. Inoltre le particelle potrebbero essere cresciute da particelle più piccole, oppure residui di urti di asteroidi e comete avvenuti nel passato. In entrambi i casi, Vega potrebbe possedere anche pianeti, possibilmente un completo sistema planetario, non visibile da IRAS. Una accurata analisi dei dati IRAS (200.000 sorgenti infrarosse) ha prodotto altri candidati, dei quali tre di tipo A come Vega, tra cui Beta Pictoris. (Si fa qui riferimento alla classificazione delle stelle basata sulle caratteristiche dei loro spettri. Tale classificazione venne stabilita ad Harvard tra la fine dell'Ottocento e gli inizi del Novecento, mantenendo il principio definito da padre Angelo Secchi, che aveva ordinato gli spettri secondo temperature stellari decrescenti e, di conseguenza, colori passanti dal bianco al rosso. Si va così dalle stelle più calde, di tipo O, alle più fredde, attraverso i tipi B, A, F, G, K, M, R, N, S. Oltre alla temperatura, gli spettri stellari sono influenzati dalla pressione e dalla composizione chimica; il diagramma di Hertzsprung e Russell, riportato in questo volume da Bruno Marano, è uno degli strumenti utilizzati dagli astronomi per approfondire le conoscenze sulle caratteristiche fisiche delle stelle.) Non si pensi che le stelle di tipo A abbiano qualcosa di strano; esse sono solo molto brillanti e scaldano la polvere che le circonda molto meglio di altre stelle e quindi la rendono visibile nella banda dei rivelatori IRAS. Se intorno a Vega vi fosse un satellite IRAS, il Sole, con tutti i corpi del Sistema solare, sarebbe solo l'1% più brillante di una qualsiasi stella G sua simile.

Un'altra stella del catalogo IRAS immersa nella polvere è Epsilon Eridani. Questa scoperta è stata la più eccitante, in quanto Epsilon Eridani è una stella vicina a noi e molto simile al nostro Sole: se si fosse trovata alla distanza di Vega, IRAS non avrebbe potuto rivelare la radiazione che la polvere emette. Ritorneremo a parlare di questa stella perché, poco dopo le scoperte di IRAS, gli astronomi hanno ottenuto una immagine fotografica del disco intorno ad Epsilon Eridani e quindi prova di un possibile Sistema planetario.

Nel 1995 due astronomi svizzeri hanno fatto una delle più spettacolari scoperte del ventesimo secolo, allorché hanno trovato il primo, vero pianeta in orbita intorno ad una stella che non sia il Sole. La stella in questione appartiene alla costellazione autunnale di Pegaso, il cavallo alato, e nei cataloghi astronomici è indicata come la cinquantunesima. A 50 anni luce da noi, 51 Pegasi appare come apparirebbe il Sole a pari distanza. Come Alfa Centauri, 51 Pegasi è quasi una virtuale gemella del Sole, cioè una stella di sequenza principale di tipo spettrale G gialla e brillante.

Michel Mayor, dell'Osservatorio Astronomico di Ginevra ed il suo ex studente Didier Queloz avevano costruito un apparato capace di misurare la velocità con cui si muovono (allontanano o avvicinano) le stelle rispetto a noi con una precisione di 13 metri al secondo (ovvero 46.8 chilometri l'ora; si ricorda che la Terra si muove lungo la propria orbita a circa 100000 chilometri all'ora). Questa misura è possibile osservando contemporaneamente e paragonando lo spettro che si ottiene dalla stella in esame con un analogo spettro emesso da una lampada di calibrazione appositamente costruita in laboratorio. Nell'aprile del 1994 ebbe inizio la ricerca di pianeti extrasolari presso il telescopio dell'alta Provenza, nel sud della Francia. Mayor e Queloz avevano una lista di 142 stelle candidate da osservare, tutte molto simili al nostro Sole, cioè di tipo G (di colore giallo) o K (arancione). In settembre venne il turno di 51 Pegasi, ma le velocità registrate differivano da una notte alla seguente anche di 60 metri al secondo, cioè circa 4 volte la precisione dello strumento. Scartate tutte le ipotesi che implicavano un malfunzionamento dello strumento, nel gennaio del 1995 venne ricavato l'andamento del moto di 51 Pegasi e qui riportato in figura 2.

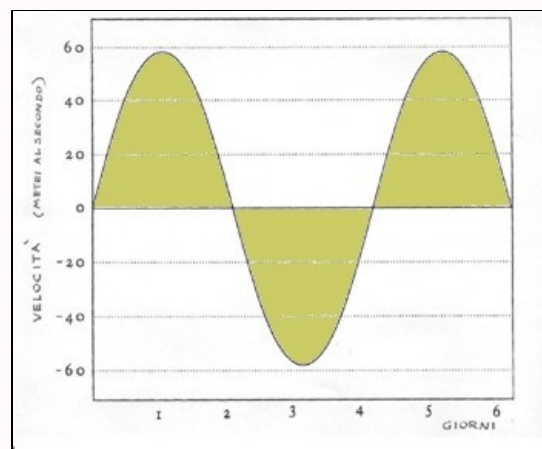


Figura 2. Oscillazioni della stella 51 Pegasi causate dalla presenza di un pianeta in orbita intorno ad essa. La stella si muove verso di noi, quindi inverte la direzione del moto e si allontana da noi ogni 4.2 giorni (ovvero 4 giorni, 4 ore e 48 minuti)

Tale oscillazione periodica non poteva che essere causata dalla presenza di un secondo corpo massiccio in rotazione intorno a 51 Pegasi, immediatamente si pensò che per la prima volta si era "visto" un pianeta extrasolare.

La prima cosa che colpì i due astronomi fu la breve durata del periodo di rotazione del pianeta appena scoperto, se si pensa che Mercurio impiega 88 giorni a compiere un'intera rotazione intorno al Sole. Il nuovo pianeta dunque sembrava essere ciò che non si riteneva possibile, un pianeta gassoso vicinissimo alla stella. Prima che i due ricercatori potessero ripetere le misure, la stella, a causa della rotazione terrestre, sparì dietro il Sole e non fu più osservabile per circa 3 mesi. Questo tempo fu impiegato in laboriosi calcoli volti a predire dove sarebbe stato l'ipotetico pianeta "strano" non appena

fosse nuovamente osservabile. In luglio, al giorno predetto, con trepidazione, venne fatta la prima misura e poi la seconda, le misure cadevano esattamente dove i calcoli avevano predetto. Altre misure seguirono febbrilmente: era confermata la periodicità del moto della stella, fu stappato lo champagne ma non c'era ancora la "prova" che esistesse il pianeta. Vennero prese in esame tutte le spiegazioni possibili che non coinvolgessero la presenza di un pianeta: pulsazioni della stella, stella compatta come compagno, gigantesche macchie simili alle macchie solari sulla superficie di 51 Pegasi, ecc., ma tutte vennero scartate. Il 6 ottobre, ad una conferenza tenutasi a Firenze, presenti circa 300 scienziati ed esponenti della stampa internazionale, Mayor e Queloz annunciarono la loro scoperta: un nuovo pianeta di periodo 4.2 giorni, a 0.05 unità astronomiche da 51 Pegasi, con temperatura stimata circa 1000 °C, molto maggiore di quella di qualsiasi pianeta del nostro Sistema solare. Inoltre, e questo è il dato più sorprendente, il nuovo pianeta ha una massa circa la metà di quella di Giove e si presume sia interamente gassoso. Questa scoperta non ha ottenuto l'eco che ci si sarebbe potuti aspettare. Buona parte dei presenti alla conferenza espone ragioni per essere dubbiosi della scoperta annunciata.

In ambiente astronomico le notizie viaggiano veloci. Il 17 ottobre Marcy e Butler, due astronomi in California, confermavano, con tecniche diverse, la scoperta dei due Svizzeri. Questa volta *The New York Times*, *The Washington Post* e altri quotidiani americani pubblicarono la notizia in prima pagina e, il giorno seguente, la stessa notizia apparve sulla prima pagina di tutte le testate del mondo. Naturalmente gran parte degli articoli riferivano la scoperta come "americana".

Oggi la lista di stelle che presentano dei pianeti in orbita è cresciuta. Pianeti "strani", simili a quello di 51 Pegasi e che contraddicono le teorie sono stati rivelati intorno a Rho Cancri A, Tau Bootes A, Ipsilon Andromedae, Rho Coronae Borealis; un pianeta gigante classico, tipo Giove, si è visto intorno a 47 Ursae Majoris. Pianeti simili ai 4 "terrestri" sono stati rivelati solo intorno a 3 stelle compatte e pulsanti (pulsars). La loro scoperta, anche se di grande interesse scientifico, non appare particolarmente attraente, perché non esiste la benché minima speranza che su tali pianeti vi sia una qualche traccia di vita, in considerazione della totale inadeguatezza della pulsar a fornire l'energia di supporto necessaria a sostenere la vita quale la conosciamo.

Un passo fondamentale è stato fatto, ma la strada da percorrere rimane lunga. Mentre oggi si può affermare che i pianeti sono la norma, piuttosto che l'eccezione, intorno a stelle simili alla nostra, non è ancora chiaro quanti di questi siano in condizioni favorevoli per lo sviluppo della vita. Intanto la ricerca continua e continua pure la dettagliata esplorazione dei pianeti nostri vicini. Sonde spaziali sono in viaggio e molte altre sono in fase di realizzazione o semplicemente di progettazione, con mete verso Marte, Giove, Titano ecc. Si prevedono, in un futuro non troppo lontano, missioni planetarie con astronauti, che riportino non solo dati, ma materia di altri pianeti. Lo scopo di tutto ciò è riuscire ad accumulare sufficiente informazione per comprendere quali sono le condizioni essenziali per produrre e sostenere la vita. La caccia ai pianeti extrasolari è appena iniziata, ma quando si identificheranno con precisione pianeti di masse diverse, magari simili in dimensioni alla Terra, cosa oggi non ancora possibile, allora si potrà spostare l'attenzione verso la composizione chimica e le condizioni fisiche dei corpi celesti individuati, per meglio comprendere quanto simili a quelle terrestri essi siano. Allora saremo vicini a confermare le predizioni di Giordano Bruno e sarà giunto il momento di porsi domande diverse da quelle puramente fisiche ed astronomiche.

Se oggi siamo all'inizio dell'esplorazione di altri mondi, nel 1956 pensare ad esseri intelligenti su mondi lontani sembrava fantascienza, se non follia, eppure Giuseppe Cocconi e Philip Morrison quell'anno pubblicarono sulla prestigiosa rivista inglese *Nature* un articolo nel quale suggerivano che su un pianeta in orbita intorno ad una qualche stella simile al Sole, nella nostra Galassia, poteva esistere una civiltà simile alla nostra, ma molto più avanzata e proponevano modi per entrare in comunicazione con essa via radio. La radioastronomia era da poco diventata una via complementare allo studio del cosmo con telescopi ottici. Il rapido sviluppo delle tecniche di ricezione favoriva estrapolazioni positive; sembrava ovvio cercare di dare una risposta scientifica alla sintetica domanda posta da Enrico Fermi pochi anni prima, "dove sono gli altri?", che riassumeva perfettamente l'interrogativo rimasto inalterato attraverso tutta la storia dell'umanità, da Epicuro a Lord Kelvin. Le motivazioni per l'esistenza di altri esseri intelligenti era basata su argomentazioni statistiche: se esistono migliaia di miliardi di stelle nella Galassia, anche se solo una modesta percentuale è simile al Sole, vi sono almeno parecchi miliardi di stelle simili al Sole, anche se una piccola percentuale di esse ha pianeti esistono centinaia di milioni di pianeti e così via fino a concludere che non siamo soli.

Queste argomentazioni possono essere discusse secondo le regole del metodo scientifico su cui si basano tutte le nostre conoscenze. Non così se si adotta il così detto principio antropico, secondo il quale dal momento che noi esistiamo, l'intero universo deve essere stato costruito (creato) in modo da permettere la nostra esistenza, ovvero l'intero cosmo è funzionale alla presenza degli umani. Questa è una idea che trascende la scienza ed entra nei territori della filosofia e della religione, nei quali non intendiamo sconfinare.

Prima di incominciare a prendere sul serio l'idea di comunicare con gli extraterrestri, molti lavori furono pubblicati e presentati per discussione. I principali interpreti di questa disciplina furono il russo Iosif S. Shklovskiy e l'americano Carl Sagan e, subito dopo Frank Drake che fisicamente dette inizio e per anni continuò il progetto SETI (Search For Extraterrestrial Intelligence). Tutti gli argomenti a favore di SETI si basano sull'opinione (oggi confermata) che i pianeti sono un comune sottoprodotto della formazione delle stelle. Se esistono migliaia di milioni di pianeti in circolo intorno a stelle simili al Sole, non è difficile convincersi che almeno alcune abbiano sviluppato la vita e che questa si sia evoluta, magari sorpassandoci di millenni in sviluppo tecnologico. Qual è la probabilità che un pianeta vicino a noi ospiti tale civiltà? Partendo da questi interrogativi Drake arrivò a concludere che il numero di possibili interlocutori (civiltà osservabili) è proporzionale al numero di stelle favorevoli (tipo Sole) moltiplicato per il numero che rappresenta la frazione di esse che ha pianeti, moltiplicato per il numero di questi pianeti con condizioni simili alla Terra, cioè capaci di mantenere la vita, moltiplicato per il numero di civiltà che su essi si sono sviluppate capaci di comunicare attraverso gli spazi interstellari (vita sono anche gli alberi e gli animali, ma né funghi né dinosauri sono in grado di trasmettere o ricevere segnali radio), moltiplicato per la frazione di esse interessate a farlo (particolari leggi, religioni o convinzioni filosofiche potrebbero inibire questa curiosità), moltiplicato per la durata di queste civiltà, moltiplicato per la frazione di questa durata in cui rimangono comunicative.

L'equazione di Drake, anche se un semplice prodotto di termini, è soggetta a grandi incertezze poiché alcuni dei termini stessi sono o altamente incerti o addirittura sconosciuti. Paradossalmente il più difficile da stimare è la durata di una civiltà. Non esistono esempi e l'unica nota, la nostra, esiste da qualche migliaio di anni, è comunicativa da meno di un secolo e non abbiamo nessun indizio, e forse solo una tenue speranza, che durerà e nessuna idea per quanto

tempo.

In conclusione, per sapere se non siamo soli, per ora non vi è altro modo che ascoltare e sperare che "gli altri" trasmettano. Le ricerche di intelligenza extraterrestre sono state svariate nei decenni passati e alcune sono in corso. La strategia è fondamentalmente la stessa: si ricerca nella banda dello spettro radio, nella zona delle microonde, la presenza di segnali di banda stretta (di una sola frequenza) che abbiano origine dall'esterno del Sistema solare. La banda da 1 a 50 gigahertz ha il più basso contenuto di rumore di fondo e questo vale anche per gli alieni intelligenti, i quali dovrebbero accorgersene. La nostra atmosfera ci limita da 1 a 12 gigahertz e, se i nostri ragionamenti sono corretti, lo stesso dovrebbe valere per "gli altri". Per il momento possiamo solo sperare che qualcuno ci invii un segnale di proposito, un fascio puntato verso di noi, come fanno le trasmissioni radio-televisive. In California il progetto Phoenix mira alle stelle entro 200 anni luce da noi, con strumentazione che ascolta tra 1.2 e 3.0 gigahertz attraverso due miliardi di canali. Altri progetti (BETA, META II, SERENDIP., ARGUS, COSETI, ecc.) sono in corso sia nell'emisfero nord che sud.

Resta molto tenue la speranza di poter "noi" trasmettere a "loro" essenzialmente perché, anche alle massime potenze ottenibili, non si arriverebbe oltre qualche decina di anni luce con segnali rilevabili (si ricordi che l'intensità di un segnale diminuisce con il quadrato della distanza tra emettitore e ricevitore). Si noti anche che, in caso di "contatto" con esseri extraterrestri intelligenti il dialogo sarebbe terribilmente complicato: ricevuto un segnale e accertato che proviene da un pianeta che ruota intorno ad una data stella, si risponde, si aspetta otto o più anni (perché qualsiasi "altra stella" dista dal Sole più di quattro anni luce) ed eventualmente si riceve un segnale, che viene inviato, si aspettano altri otto o più anni...e così via

In questo "gioco" di ricerca degli extraterrestri ci si deve rendere conto che le distanze tra noi e "loro" sono tali che non è immaginabile, neanche in un lontano futuro, visitare gli eventuali pianeti con astronavi o simili. D'altro canto abbiamo ampie prove che le leggi della fisica e della chimica che noi conosciamo valgono in ogni parte dell'universo finora noto e sembra vana l'illusione di invocare leggi che contraddicano ciò che sappiamo. Più veloce della luce non si può andare e muovere corpi materiali, anche a velocità relativamente modeste, richiede energie immense. Per il momento le colonie spaziali che trasportano generazioni attraverso centinaia di anni luce sono dominio della fantascienza. Esiste poi una carta Jolly nel gioco: gli scienziati non sono ancora riusciti a formulare una definizione soddisfacente di vita. I microbiologi non sono sicuri di quanto piccola possa essere la più piccola "cosa" vivente. Lord Kelvin suggerì che la vita potesse arrivare dallo spazio e c'è chi, come Sir Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe, ha ripreso l'idea e molte cose sembrano plausibili anche se non tutto si riesce, per ora, a spiegare con questa ipotesi. Una regola è certa: più piccolo e semplice è un organismo, più alta è la probabilità che sopravviva nelle estreme condizioni degli spazi interstellari. Chi può dire, se esistono i "nanobatteri", che essi possano essere i veri viaggiatori spaziali e, se ne potesse raccogliere, forse avremmo in laboratorio i discendenti di colonie interstellari o magari intergalattiche.

Sicuramente molti pensano che perseguire seriamente studi di questo tipo sia tempo e danaro sprecato. Da queste speculazioni sono nati e nascono sottoprodotti di estrema importanza per le varie discipline, dalla radioastronomia alla microbiologia. Riflettere e argomentare in modo speculativo intorno a questioni come la vita extraterrestre e l'esistenza

di civiltà aliene e come entrare in comunicazione con loro è, come la matematica, la musica e altre attività del pensiero, uno dei modi di differenziarci dai coinquilini del nostro pianeta, i compagni del regno animale. Cercare non sempre porta risultati, ma se non si cerca sicuramente non si trova.

Le stelle e la loro evoluzione

Francesco Ferraro, Livia Origlia

Home

Introduzione

Fonti di energia

Studio della
radiazione emessa

Popolazioni stellari

Lettere

Introduzione

Le stelle sono costituenti fondamentali dell'Universo e lo studio della loro formazione ed evoluzione riveste un'importanza primaria anche per capire la formazione ed evoluzione delle galassie e dell'Universo stesso.

Le stelle sono sfere di gas formatesi per collasso gravitazionale di nubi molecolari presenti nel mezzo interstellare delle galassie. Sono fatte (come del resto gran parte dell'Universo) essenzialmente di idrogeno (75%), elio (23%) e una piccola frazione di metalli (2%). La struttura di una stella può essere rappresentata schematicamente con un modello a due componenti: un piccolo nucleo a temperatura molto elevata che produce energia e un enorme involucro che trasporta questa energia verso la superficie, da cui viene poi irradiata.

L'involucro non partecipa mai alla produzione di energia, si occupa solo di trasportarla verso la superficie, e questo perché le condizioni fisiche di queste due componenti sono molto differenti: ad esempio, la temperatura nel nucleo raggiunge alcune decine di milioni di gradi, mentre la parte più esterna dell'involucro, cioè la superficie della stella, può avere una temperatura che va da alcune migliaia ad alcune decine di migliaia di gradi.

In questa breve dissertazione saranno schematicamente discusse le principali conoscenze che abbiamo finora acquisito sulle stelle e sulla loro evoluzione, ed alcuni dei metodi usati per ottenere queste informazioni, decodificando i messaggi contenuti nella luce che le stelle stesse ci inviano.

Le stelle e la loro evoluzione

Francesco Ferraro, Livia Origlia

Fonti di energia

Introduzione

Fonti di energia

Studio della radiazione emessa

Popolazioni stellari

Lecture

La fonte di energia nel centro delle stelle deve essere estremamente efficiente, dovendo produrre molta energia per un tempo lunghissimo. Ad esempio, il Sole produce in un secondo 10 milioni di volte l'energia che un uomo mediamente consuma in un anno, e tale produzione dura da almeno 4.5 miliardi di anni. L'unico meccanismo di produzione energetica che possa rispondere a questi requisiti sono le reazioni termonucleari.

Ci sono due tipi di reazioni termonucleari: la fusione di elementi leggeri e la fissione di elementi pesanti. In natura l'elemento più abbondante è l'idrogeno, che è anche l'elemento più leggero, essendo costituito da un protone e da un neutrone nel nucleo e da un unico elettrone orbitante attorno ad esso. È quindi logico che le reazioni termonucleari responsabili della produzione di energia negli interni stellari siano di fusione.

In questo tipo di reazioni, nuclei di atomi leggeri vergono "fusi" per generare "nuovi" nuclei più pesanti (con un numero maggiore di protoni e neutroni nel nucleo). Il numero di protoni nel nucleo di un atomo caratterizza infatti l'atomo stesso: atomi con 1 protone nel nucleo vengono chiamati idrogeno o isotopi dell'idrogeno, atomi con 2 protoni vengono chiamati elio o isotopi dell'elio, con 3 protoni carbonio o isotopi del carbonio, e così via.

Il processo di fusione sintetizza dunque nuovi elementi e nello stesso tempo genera l'energia necessaria alla stella. Naturalmente i protoni sono particelle con carica elettrica positiva, e dunque i nuclei degli atomi (essendo costituiti da protoni e neutroni, particelle neutre) hanno SEMPRE carica elettrica positiva. È quindi logico aspettarsi che nuclei carichi dello stesso segno oppongano una certa resistenza a fondersi insieme (forza di Coulomb): l'entità di questa "resistenza" dipende dal numero di protoni presenti in ciascun nucleo.

È a causa di questa naturale "resistenza" che le reazioni termonucleari di fusione NON possono avvenire in ambienti "normali" (cioè in ambienti a cui siamo normalmente abituati).

Ma certo è possibile immaginare un ambiente adatto, ad alta densità e temperatura, in cui un gran numero di nuclei (grazie all'alta densità) si muovano, in modo disordinato, a grande velocità (grazie all'alta temperatura).

In un ambiente di questo genere ci si può aspettare che un certo numero di nuclei interagiscano tra di loro, superando la forza di Coulomb, e riescano a fondersi insieme per sintetizzare un nuovo elemento chimico. Le condizioni necessarie perché questo processo si inneschi sono dunque alta densità e alta temperatura, quindi non a caso le reazioni termonucleari avvengono esclusivamente nel nucleo delle stelle. In questo scenario, tutti gli elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio sarebbero stati sintetizzati all'interno delle stelle. E infatti l'Universo inizialmente era interamente

costituito da idrogeno ed elio: qualunque elemento più pesante dell'elio è stato generato negli interni stellari: il metallo delle nostre auto, il carbonio della nostra matita, parte del nostro corpo ecc., una volta erano parte di una stella.

Abbiamo detto che le stelle si formano da nubi gassose che si contraggono per collasso gravitazionale e man mano aumentano la loro temperatura al centro. Quando questa raggiunge i 10 milioni di gradi si innesca nel nucleo la prima reazione termonucleare, la fusione di due atomi di idrogeno in un atomo di elio, attraverso il cosiddetto ciclo protone-protone (particolarmente efficiente nel caso delle stelle di piccola massa), che costituisce la principale sorgente di energia per la maggior parte della vita della stella.

Naturalmente, nuclei di atomi via via più complessi necessitano di temperature e densità sempre maggiori per interagire tra loro, dovendo vincere una "resistenza" via via più grande. Perciò, quando l'idrogeno si è esaurito al centro essendosi trasformato tutto in elio, la stella non è pronta per innescare il processo di fusione dell'elio: la sua struttura deve modificarsi per creare le condizioni di temperatura e densità necessarie per la fusione dell'elio.

Il nucleo comincia quindi a contrarsi per aumentare la sua temperatura e densità. Nel frattempo, man mano che la temperatura nell'interno aumenta, le condizioni per la combustione dell'idrogeno vengono raggiunte in un guscio sottile attorno al nucleo. E così in questa fase la stella si trova a produrre energia attraverso due canali: la contrazione del nucleo e la combustione di idrogeno in elio nel guscio. Questo eccesso di energia deve essere smaltito dall'involuppo che, per "far passare" tale flusso energetico in eccesso, si espande.

È questa una fase in cui la struttura macroscopica della stella cambia in maniera significativa: il raggio della stella aumenta fino a 100 volte quello iniziale, implicando dunque un abbassamento della temperatura superficiale ed un aumento notevole della luminosità. Questa fase viene indicata come "fase di gigante rossa".

Quando, in seguito alla contrazione del nucleo, la temperatura al centro raggiunge finalmente i 100 milioni di gradi, si innesca la reazione termonucleare di combustione dell'elio in carbonio e l'involuppo torna ad assumere le sue dimensioni iniziali. La stella ricomincia un periodo di tranquilla combustione di elio nel nucleo.

In definitiva, la vita di una stella si può schematizzare come una sequenza di fasi di equilibrio caratterizzate dalla combustione nucleare al centro di un certo combustibile (in sequenza H, He, C, N, O ecc. fino al Fe), alternate a fasi transitorie e relativamente brevi, che potremmo definire di assestamento, caratterizzate dalla contrazione del nucleo, dalla combustione dello stesso combustibile in gusci sottili attorno al nucleo e dalla contemporanea espansione dell'involuppo. Durante queste fasi la struttura della stella si modifica in maniera significativa, mentre durante le lunghe fasi di combustione nel nucleo le caratteristiche strutturali delle stelle rimangono inalterate.

Ad esempio, sappiamo con sicurezza che nessuna delle caratteristiche macroscopiche del Sole è cambiata in maniera significativa negli ultimi 4.5 miliardi di anni, perché anche piccole variazioni di luminosità o temperatura del Sole avrebbero alterato drammaticamente le condizioni ambientali sulla Terra.

La fase di gran lunga più duratura è la combustione nucleare dell'idrogeno, con una durata circa 10 volte superiore a quella di combustione dell'elio. Le altre fasi successive di combustione nucleare sono ancora più brevi.

Sappiamo che il tempo di vita di una stella in una

determinata fase dipende sostanzialmente dalla sua massa: più è grande, meno vive e più veloci sono anche tutte le fasi di combustione nucleare. Ad esempio, una stella come il Sole impiega circa 7 miliardi di anni a bruciare l'idrogeno al centro, mentre una stella di massa dieci volte maggiore impiega soltanto circa 25 milioni di anni.

Ma la massa non regola soltanto la vita delle stelle, ne determina in maniera univoca anche la morte: infatti dalla massa totale della stella dipende anche la capacità di contrazione e riscaldamento del suo nucleo e dunque quale reazione termonucleare riuscirà a innescare. Una stella come il Sole, per esempio, non ha la massa sufficiente per contrarsi abbastanza, raggiungere la temperatura di 100 milioni di gradi e innescare la combustione dell'elio in carbonio al centro.

In pratica, quando avrà esaurito l'idrogeno al centro e avrà un nucleo di elio, il Sole attraverserà la fase di gigante rossa, tenterà di contrarsi ma senza riuscire ad innescare la combustione dell'elio, e quindi espellerà la parte esterna dell'involuppo, la cosiddetta fase di "nebulosa planetaria", e poi dapprima diventerà una stella molto compatta e calda, ovvero una "nana bianca", e poi lentamente si raffredderà fino a spegnersi.

Stelle di massa progressivamente maggiore di quella del Sole potranno innescare sempre più reazioni termonucleari via via più complesse (bruciando elio, carbonio e così via). Ma anche questo ciclo non è infinito, infatti le reazioni termonucleari di fusione producono energia bruciando elementi più leggeri del ferro: da questo elemento in poi, le reazioni di fusione per avvenire necessiterebbero di una quantità di energia maggiore di quella che riuscirebbero a produrre, diventerebbero cioè endoenergetiche (anziché esoenergetiche, come fino a quel momento) e dunque non sarebbero più utili per produrre energia.

La sintesi termonucleare del nucleo di ferro rappresenta l'ultimo anello della catena di reazioni termonucleari esoergoniche per fusione. Tuttavia, le stelle che arrivano a questo livello di evoluzione, dopo aver bruciato in vario modo gli elementi più leggeri del ferro, sperimentano una delle fasi più spettacolari dell'intera evoluzione stellare.

Infatti, a questo punto la densità e la temperatura nel nucleo della stella hanno raggiunto dei livelli inimmaginabili (la temperatura è attorno al miliardo di gradi), e in queste condizioni estreme avvengono dei processi che portano alla distruzione dei costituenti base della materia (elettroni e protoni), almeno nella forma in cui siamo abituati a vederla.

I protoni e gli elettroni cominciano a interagire, generando un neutrone e un neutrino. Quest'ultima è una particella che ha scarsissima interazione con la materia, e dunque attraversa l'intera stella senza interagire con alcun elemento, trasportando con sé energia che di fatto viene sottratta al nucleo. Questa reazione tende a raffreddare il nucleo che, per reazione, comincia a contrarsi, aumentando così la densità e favorendo di fatto la reazione elettroni-protoni.

Questo processo, una volta innescato, si autoalimenta: più sottrae energia alla stella più diventa efficiente, non a caso venne denominato "processo URCA" (dal nome di un famoso casinò di Rio de Janeiro in cui i clienti erano sottoposti allo stesso trattamento: più perdevano, più giocavano, più perdevano, più giocavano e così via). Il "processo URCA", una volta innescato, può convertire su tempi scala brevissimi la struttura centrale della stella in un nucleo fatto solo di neutroni. I neutroni, dal canto loro, non avendo carica elettrica, sono molto più compattabili dei protoni, e dunque la materia costituita solo di neutroni può raggiungere densità di gran lunga maggiori della materia normale. Si pensi che se la massa della Terra fosse costituita da neutroni potrebbe essere compressa in un sfera di pochi metri di

raggio.

Dunque il nucleo di una stella, convertito in neutroni, si compatta istantaneamente in una sfera di pochi chilometri di raggio. Naturalmente, questo produce un effetto disastroso sulla struttura globale della stella: le parti più esterne, che poggiavano sul nucleo, venute a mancare la base di appoggio, precipitano in caduta libera verso il nucleo denso e l'impatto dell'involuppo su di esso genera un'onda d'urto che distrugge gran parte della stella, ad eccezione del nucleo di neutroni ultra-denso, che invece resiste a questo urto e rimane intatto.

Questo processo produce uno dei fenomeni più spettacolari dell'Universo: la cosiddetta "esplosione di supernova", la stella si distrugge, la sua luminosità aumenta di milioni di volte, e diventa visibile a grandissime distanze. L'esplosione di supernova è dunque l'ultimo segnale di una stella massiccia che è collassata: quello che rimane è una nube di gas e una stella di neutroni oppure un buco nero, dipende dalla massa in gioco.

Abbiamo visto che la formazione degli elementi fino al gruppo del ferro trova una spiegazione naturale attraverso le reazioni termonucleari di fusione negli interni stellari. Tuttavia, questo tipo di reazioni non riesce a spiegare la formazione di elementi più pesanti del ferro. Per formare questi elementi bisogna ricorrere a processi più complessi e più rari, come ad esempio la cosiddetta "cattura neutronica". Si tratta della cattura di un neutrone da parte di un nucleo pesante: questo processo può, in linea di principio, avvenire facilmente, visto che i neutroni non sono elettricamente carichi e quindi non oppongono resistenza a combinarsi con nuclei carichi. In questo caso però il problema è trovare neutroni liberi che possano essere facilmente catturati. Neutroni di questo tipo possono essere generati da un processo chiamato "fotodisintegrazione del ferro", ovvero, in condizioni particolari, un fotone di alta energia colpisce un atomo di ferro e lo scompone in 13 atomi di elio più 4 neutroni.

Questi neutroni liberi, catturati dagli atomi, decadono a loro volta in protone ed elettrone, e quindi generano atomi via via più pesanti. Reazioni di questo tipo possono avvenire durante le fasi esplosive della supernova, che dunque rappresenta anche una fase importante per la sintesi degli elementi chimici.

Le stelle e la loro evoluzione

Francesco Ferraro, Livia Origlia

Studio della radiazione emessa

Introduzione

Fonti di energia

Studio della radiazione emessa

Popolazioni stellari

Lecture

Le stelle emettono radiazione elettromagnetica su tutto lo spettro di lunghezze d'onda, dai raggi gamma e X alle onde radio. Molta di questa radiazione è tuttavia assorbita dall'atmosfera terrestre, quindi da terra è possibile fare osservazioni solo in alcune "finestre" particolari, quali ad esempio l'intervallo di lunghezze d'onda visuali e le onde radio.

È solo attraverso l'analisi e la "decodificazione" dei messaggi contenuti in questa radiazione elettromagnetica che noi possiamo ottenere informazioni sulle proprietà fisiche e chimiche delle stelle e delle galassie.

Molta parte della storia dell'astronomia è andata quindi di pari passo con la capacità dell'uomo di sviluppare telescopi e ricettori elettronici via via più potenti e sofisticati, per captare i segnali di sorgenti celesti sempre più deboli e lontane. Si sono quindi sviluppati strumenti da terra per captare la radiazione visibile e le onde radio, mentre, per captare tutta quella radiazione che non giunge sulla Terra perché assorbita dall'atmosfera terrestre, si sono lanciati vari tipi di satelliti e sonde in orbita attorno alla Terra. Naturalmente la piccola frazione di radiazione proveniente dallo spazio che riusciamo a raccogliere è preziosa e occorre sfruttarla al massimo, cercando cioè di decifrare tutte le informazioni contenute in essa.

La luce che proviene dalle stelle, per esempio, contiene una grande quantità di informazioni preziose, non solo sulla loro luminosità, ma anche sulla loro temperatura e perfino sulla composizione chimica. Vediamo schematicamente come è possibile ricavare queste informazioni.

Le stelle emettono tipicamente radiazione di "corpo nero" nell'intervallo di lunghezze d'onda visibili. Tale emissione ha una curva caratteristica (luminosità in funzione della lunghezza d'onda) per ogni temperatura. Si ha quindi che, facendo misure di luminosità a differenti lunghezze d'onda, cioè in diverse bande spettrali (usando ad esempio filtri opportuni), è possibile risalire alla temperatura superficiale della stella. Generalmente, da due misure di luminosità in bande diverse si deriva quello che si chiama "indice di colore", che è definito come il rapporto tra le due misure di luminosità.

È possibile calibrare questo indice in funzione della temperatura, utilizzando le curve teoriche di corpo nero, e dedurre quindi la temperatura della stella dal rapporto in luminosità in due regioni dello spettro elettromagnetico. Si ha quindi che attraverso misure di luminosità si ottengono informazioni non soltanto su quanta energia ha una stella, e quindi sulla sua massa, ma anche sulla sua temperatura.

Se poi analizziamo la radiazione elettromagnetica che giunge dalle stelle utilizzando uno "spettrometro", ovvero uno strumento che scompone la luce nelle varie lunghezze d'onda, siamo anche in grado di avere informazioni sulla composizione chimica. Per capire come possiamo ricavare

questa informazione, supponiamo di avere una lampadina la cui luce viene fatta passare attraverso un prisma. Per il fenomeno della rifrazione la luce viene scomposta nelle sue varie componenti di lunghezza d'onda, e dunque, proiettando su uno schermo la luce scomposta, avremmo una sequenza continua di colori dal blu al rosso, generando quello che viene definito uno "spettro" di emissione.

Se fra la lampadina e il prisma mettessimo degli atomi di un certo elemento chimico, succederebbe che questi ultimi assorbirebbero alcune lunghezze d'onda tipiche (dipende dalla struttura elettronica degli atomi in questione) e quindi nello spettro finale comparirebbero

delle righe, in corrispondenza delle lunghezze d'onda mancanti perché assorbite dagli atomi. Gli atomi di ciascun elemento chimico hanno un proprio spettro di righe caratteristico, una sorta di impronta digitale.

In una stella succede in pratica la stessa cosa: l'energia prodotta al suo interno viene trasportata in superficie, dove ci sono atomi di vari elementi chimici (idrogeno, elio ed elementi più pesanti), quelli di cui è composto il gas, e poi irraggiata. Quando analizziamo lo spettro della radiazione emessa da una stella, otteniamo quindi una sequenza continua di colori dal blu al rosso, solcata però da un certo numero di righe caratteristiche. È proprio analizzando la presenza e l'intensità di queste righe che possiamo dedurre se, e quanti atomi di un certo elemento chimico sono presenti sulla superficie della stella.

Le stelle e la loro evoluzione

Francesco Ferraro, Livia Origlia

Popolazioni stellari

Introduzione

Fonti di energia

Studio della radiazione emessa

Popolazioni stellari

Lettere

Abbiamo visto come analizzando opportunamente la luce proveniente dalle stelle possiamo ottenere informazioni sulle loro caratteristiche strutturali e fisiche (luminosità, temperatura, composizione chimica, ecc.). Per poter però tracciare la storia evolutiva di una stella occorre "fotografarla" durante tutti i momenti significativi della sua vita, cioè almeno ogni volta che avvengono cambiamenti sostanziali nella sua struttura.

L'uomo tuttavia vive troppo poco per poter dedurre l'evoluzione delle stelle dall'osservazione di una sola di esse. Anche se potesse osservare una stella per tutta la sua vita, non vedrebbe nessun cambiamento apprezzabile perché in 100 anni molte delle proprietà delle stelle rimangono praticamente inalterate. La natura però ha aiutato l'uomo, infatti le stelle possono formarsi sia singolarmente che in aggregati, detti ammassi stellari. Gli ammassi stellari sono caratterizzati da stelle di differente massa e luminosità, legate gravitazionalmente fra loro. Queste stelle hanno tutte la stessa distanza, età e composizione chimica, essendosi originate nello stesso istante dalla stessa nube di gas. Abbiamo visto che le stelle di massa più grande evolvono più rapidamente di quelle di massa più piccola, perché consumano più velocemente il combustibile nucleare. Questo fa sì che osservando un ammasso stellare è possibile osservare le stelle in diversi stadi evolutivi (quelle più massicce negli stadi finali, quelle meno massicce negli stadi iniziali). Si capisce quindi come lo studio degli ammassi stellari rivesta un'importanza astrofisica fondamentale per analizzare le varie fasi evolutive che attraversano le stelle durante la loro vita. Infatti, solo osservando intere "popolazioni" di stelle in differenti ammassi stellari, ciascuno caratterizzato da una certa età e composizione chimica, si può avere un quadro più accurato e completo dell'evoluzione.

Nella nostra Galassia e in quelle vicine, come le Nubi di Magellano o Andromeda, si possono studiare sia ammassi stellari giovani che vecchi, come gli ammassi globulari. Questi ultimi possono contenere anche decine di migliaia di stelle e rappresentano gli oggetti più vecchi osservabili nell'Universo, hanno circa 15 miliardi di anni e il loro studio ha anche una grande importanza cosmologica. Infatti la loro precisa datazione fornisce un limite inferiore all'età dell'Universo, mentre lo studio della loro composizione chimica può dare interessanti indicazioni sulle abbondanze dei vari elementi chimici nelle prime fasi di vita dell'Universo, dopo la grande esplosione iniziale.

Gli ammassi stellari giovani, con età che vanno da alcuni milioni a centinaia di milioni di anni, sono popolati soprattutto da stelle massicce, luminose e calde, che stanno bruciando idrogeno e elio al centro. Sono quindi particolarmente luminosi alle basse lunghezze d'onda, emettendo radiazione molto energetica. Gli ammassi stellari vecchi (miliardi di anni) sono invece soprattutto popolati da stelle più fredde e di piccola massa, avendo quelle calde e

massicce già terminato la loro vita.

Abbiamo visto come, con due misure di luminosità in due filtri diversi, si può derivare l'indice di colore, che è un indicatore di temperatura. Combinando una misura di luminosità con l'indice di colore si ottiene il cosiddetto diagramma colore-magnitudine, che costituisce lo strumento base di indagine per quanto riguarda l'evoluzione stellare. In particolare, nel caso di osservazioni relative ad un ammasso stellare, visto che le stelle sono alla stessa distanza da noi, differenze in luminosità tra le stelle dell'ammasso possono essere interpretate come differenze in massa o in fase evolutiva.

Se misuriamo infatti la luminosità in due filtri diversi per un numero sufficiente di stelle in un ammasso stellare, possiamo ricavare per ciascuna di essa l'indice di colore e riportarlo in un diagramma insieme alla sua luminosità. Quello che si ottiene è che le misure non si distribuiscono a caso, ma definiscono delle sequenze ben precise e differenti a seconda dell'età della "popolazione" stellare considerata.

Queste sequenze corrispondono alle varie fasi di bruciamento di combustibile, di cui abbiamo parlato in precedenza, e in pratica costituiscono fotografie istantanee delle caratteristiche strutturali e fisiche di ciascuna delle stelle esaminate. Proprio però per il fatto che se ne osservano tante e in fasi evolutive differenti, è possibile ricostruire tutta la loro storia evolutiva, anche se si svolge su tempi scala enormemente più grandi di quelli umanamente sperimentabili.

Le stelle e la loro evoluzione

Francesco Ferraro, Livia Origlia

	Lettere
Introduzione	*B. Cester, <i>Corso di astrofisica</i> , Hoepli, Milano, 1984;
Fonti di energia	*V. Castellani, <i>Astrofisica Stellare</i> , Zanichelli, Bologna, 1985;
Studio della radiazione emessa	*V. Castellani, P. Giannone, <i>Evoluzione stellare</i> , Edizioni Sistema, Roma, 1977;
Popolazioni stellari	*L. Gratton, <i>Introduzione all'astrofisica</i> volumi I e II, Zanichelli, Bologna, 1984;
Lettere	*Harwit M., <i>Astrophysical concepts</i> , Springer Verlag, Berlin, 1998;
	R. Sexl, H. Sexl, <i>Nane Bianche e Buchi Neri</i> , Bollati Boringhieri, Torino, 1990.
	<i>I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento</i>

Visita guidata attraverso la Via Lattea

Giorgio G.C. Palumbo

La Via Lattea è quella luminosa striscia, densa di stelle, che attraversa il cielo notturno e, alle nostre latitudini è meglio visibile nelle serate estive. Essa è nota anche come "la Galassia" dall'omonimo termine greco che significa latte. Osservata e studiata con potenti telescopi da circa un secolo in tutte le bande dello spettro elettromagnetico (ovvero la radiazione che copre le lunghezze d'onda dalle onde radio: metri, centimetri, millimetri, alla luce visibile e ultravioletta: Ångström o centomillesimi di millimetro, X, centomilionesimi di millimetro, e Gamma, miliardesimi di millimetro) oggi sappiamo che è composta da centinaia di miliardi di stelle, gas, polvere, particelle cosmiche; il tutto permeato da un diffuso e non uniforme campo magnetico e da un campo di radiazione anch'esso diffuso, ovvero da "luce" (in quanto segue il termine luce va esteso a tutta la radiazione elettromagnetica a cui si è accennato prima cioè di tutte le lunghezze d'onda dalle radio onde ai fotoni ottici, X e Gamma dove per praticità quando la radiazione ha lunghezze d'onda grandi, si parla di onde e per lunghezze d'onda corte, si parla di fotoni). La parte non stellare è anche nota come Mezzo Inter Stellare (MIS). Simile a molte altre galassie lontane anche quella in cui ci troviamo è una galassia spirale ed una tra le più grandi. In un disco di circa 130.000 anni luce di diametro in cui sono distribuiti gli ingredienti prima elencati, si identificano: i bracci a spirale, ricchi di gas, polvere e stelle, il "bulbo" o rigonfiamento contenente il Centro Galattico (CG) polveroso e oscurato nel visibile, un alone di stelle quasi sferico che contiene sia il bulbo che il disco, questo alone si stima abbia una luminosità totale equivalente a circa 15 miliardi di soli; un alone scuro, non emittente luce, ma massiccio che circonda tutto e si estende molto al di là del disco più alone luminoso. Questo alone scuro non è mai stato direttamente "visto" ma la sua presenza è richiesta, in modo indiretto, per spiegare alcune osservazioni. Si calcola che la massa della Galassia, grazie alla presenza di questo alone scuro, sia circa 70 volte maggiore di quella stimata utilizzando la sola massa luminosa. Se ciò è vero significa che, attraverso lo studio della radiazione elettromagnetica, prodotta da processi fisici noti che avvengono nella materia, possiamo conoscere solo una frazione di quanto realmente esiste. La Galassia ruota intorno ad un asse perpendicolare al disco in modo differenziale, cioè non come un corpo rigido ma come l'acqua nel lavandino pieno quando si toglie il tappo dallo scarico: più velocemente al centro e più lentamente ai bordi.

Il Sole si trova a circa 27.000 anni luce dal Centro Galattico, dunque più vicino al centro che ai bordi, e vi ruota intorno percorrendo un completo giro in circa 230 milioni di anni. Si deduce che la velocità del Sole è di 220 chilometri al secondo ovvero circa 800.000 chilometri all'ora. Tutte queste componenti la Galassia (ed anche le altre galassie spirali poiché abbiamo ragione di credere che anche le altre siano del tutto simili) sono tenute insieme dalla reciproca attrazione gravitazionale delle varie componenti massive.

Non verranno qui discusse le stelle e la loro evoluzione

poiché altrove questi argomenti vengono trattati in dettaglio. Basti qui ricordare che le più brillanti tra esse emettono in un giorno più luce di quanta non ne emetterà il Sole per i prossimi 2000 anni e le più deboli, se fosse possibile porle al posto del Sole, illuminerebbero, a mezzogiorno, meno di quanto non illumini, di notte, la luna piena. Le stelle più calde emettono copiose quantità di luce ultravioletta e appaiono blu mentre le più fredde appaiono rosse. Poste al centro del Sistema solare le stelle più grandi arriverebbero fino a toccare Saturno, le più piccole sono invece delle dimensioni della Sicilia. Le stelle più vecchie della nostra Galassia hanno più di 15 miliardi di anni mentre almeno una decina per anno sono appena nate e qualche decina sono certo più giovani di chi sta leggendo queste pagine. Accenneremo invece alla formazione delle stelle che è possibile grazie alla condensazione del gas e della polvere presente nel MIS. La massa del MIS è circa un dodicesimo della massa totale contenuta in tutte le stelle, pari ad alcuni miliardi di soli, cioè tutt'altro che trascurabile.

Brevemente parleremo anche delle stelle spente, oggetti estremamente densi e compatti noti come stelle di neutroni e buchi neri, di come essi si formino e tramite quali processi. Questo ci servirà per spiegare l'origine del materiale del MIS da cui si formano nuove stelle.

La materia interstellare fu introdotta come ipotesi per spiegare due tipi di osservazioni: la presenza di "buchi" nella distribuzione delle stelle osservati per la prima volta dall'astronomo inglese W. Herschel nel 1700 e la discrepanza ottenuta misurando la distanza delle stelle in ammassi aperti usando due diversi metodi, notata, per la prima volta nel 1930, dall'astronomo americano Trumpler. Non poca fu la resistenza della comunità astronomica all'introduzione di materia frammentata in piccole particelle (detta anche di "polvere") in un quadro dell'Universo che sempre più si allontanava dall'immagine delle perfette sfere descritte dai moti dei corpi celesti in un vuoto perfetto e si avvicinava velocemente alla casuale e caotica distribuzione di interferenze di attrazioni reciproche in un mezzo sporco e polveroso. È ironico che, meno di un secolo più tardi, la stessa polvere, ipotizzata come fastidiosa sorgente di errore nelle misure astronomiche, è considerata il catalizzatore fondamentale nel processo di formazione di stelle e pianeti. Lo studio della polvere interstellare oggi rappresenta un capitolo dell'astronomia in grande espansione tanto da essere talvolta individuato come "astrochimica". Esso presenta formidabili sfide al fisico e chimico che si accingono, utilizzando i pochi, ma crescenti, dati osservativi, a definirne le proprietà di base.

Tutti i campi della fisica sono necessari per comprendere le proprietà fisiche dei granelli che compongono la polvere cosmica. Per capire secondo quali leggi essi interagiscono con l'abbondante radiazione presente nel MIS bisogna utilizzare sia i risultati della fisica dello stato solido, che le leggi dei campi elettromagnetici. La fisica delle superfici aiuta a comprendere come i grani interstellari assorbano energia dal gas circostante tramite urti, questa energia, tramutata in calore, li riscalda ed essi poi la riemettono sotto forma di radiazione a lunghezze d'onda maggiori diventando sorgenti infrarosse. La chimica insegna come reazioni sulla superficie dei grani medesimi, stimulate dall'impatto con molecole di diversa natura, permettano la formazione di complesse strutture molecolari contenenti catene formate da decine di atomi. Processi fisici, tipici dello stato solido, sono necessari per descrivere la carica elettrica che i grani possono acquisire o perdere mentre la termodinamica e la fisica statistica ci aiutano a formulare modelli che spieghino l'aumento di temperatura dei grani piccoli. La chimica terrestre è molto interessata alla formazione di gruppi di molecole complesse, nel MIS alcuni di questi gruppi possono essere formati grazie alle condizioni estreme di temperatura

e densità dell'ambiente. Questi gruppi molecolari, oltre a spiegare le osservazioni, si pensa siano il seme da cui si possono far crescere i grani di polvere cosmica fino alle dimensioni osservate di (0.1- 1) micron (pari ad un millesimo di millimetro) dimensioni tipiche delle particelle di fumo. Su scale atomiche i grani sono come montagne, ognuno di essi contiene migliaia di miliardi di atomi. Queste nucleazioni potrebbero avvenire in prossimità delle atmosfere stellari dove le molecole sono prodotte e dove modelli di crescita dei grani stessi suggeriscono vi siano gli ingredienti ed i meccanismi necessari perché avvenga. In sintesi i granelli di polvere che si trovano tra le stelle e che, all'inizio, vennero introdotti come spiegazione di una sorgente di disturbo, l'assorbimento della luce, oggi offrono sia la spiegazione a una serie di dati osservativi altrimenti incomprensibili, che la ragionevole base per un modello di formazione di stelle e relativi sistemi planetari, offrendo l'opportunità di studiare la materia in stati di aggregazione non ottenibili in laboratorio.

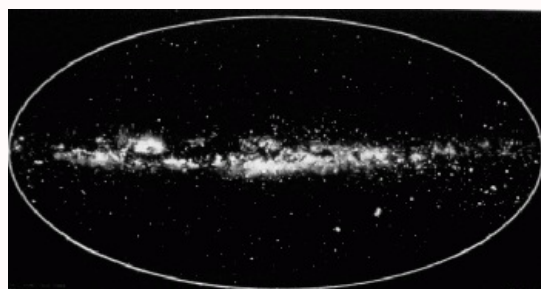


Figura 1. Ricostruzione della luminosità della Galassia. Qui l'intera Via Lattea è distesa in un'unica fascia orizzontale; le due estremità, a destra e a sinistra si toccano. Il centro della galassia è al centro dell'immagine mentre l'anticentro è all'estremità. La larga fascia scura a sinistra del centro si estende fino al Cigno ed è la maggiore concentrazione di nubi molecolari.

Morendo, una stella fertilizza lo spazio con i prodotti delle sue fornaci interne. Una stella brucia l'idrogeno di cui è fatta e, attraverso il processo di fusione, produce i vari elementi. Questo processo è spiegato in dettaglio nell'articolo di Flavio Fusi Pecci. Quando il centro della stella raggiunge i 5 miliardi di gradi la situazione si fa critica. L'energia termica minaccia di superare l'energia di fusione dei nuclei. Come una pietanza in un forno troppo caldo, l'arrosto nucleare rischia di bruciare. I preziosi nuclei, pazientemente preparati dalla stella durante la sua lunga vita, rischiano di decomporsi nuovamente nei loro componenti, in nucleoni. Il disastro è imminente. La situazione è salvata in parte dalla fuga dei neutrini, prodotti in abbondanza, ma il risultato è una caduta libera della materia stellare verso il centro. Questa caduta fa partire una esplosione formidabile: una luce accecante pari a centinaia di milioni di soli sprigiona dalla stella. Visto dalla terra questo evento è chiamato supernova. Alla velocità di migliaia di chilometri al secondo, gli elementi prodotti e disposti in sfere concentriche intorno al nucleo della stella, sono lanciati nello spazio. L'espansione dura millenni, la materia, su scala stellare, ripercorre la storia dell'universo primordiale durante i primi minuti, diventa diluita e fredda ma con una enorme differenza, adesso la materia contiene nuclei pesanti. Possiamo considerare l'esplosione di una stella come un'altra via che la natura usa per aumentare il grado di complessità. Non è possibile formare legami elettrici per formare atomi alle tremende temperature all'interno delle stelle. Questo si verifica nel freddo e vasto spazio interstellare. Nei primi tempi in cui è esistita la Galassia le sue stelle erano composte di solo idrogeno ed elio; la situazione è cambiata nelle seguenti generazioni, attraverso i resti delle supernovae il mezzo interstellare diventa sempre più ricco di elementi pesanti. Questo non è un cambiamento da poco, le

stelle delle generazioni successive si formano da gas arricchito di questi elementi pesanti. Dopo 15 miliardi di anni di successive aggiunte, cioè durante la vita della Galassia, gli atomi pesanti sono solo l'uno per cento di tutti gli atomi presenti ma hanno un ruolo assolutamente cruciale. Le supernovae sono eventi abbastanza rari; nella Galassia si stima la frequenza di supernovae basandosi sia sulle rimanenze osservate che sugli eventi storici. Con notevole incertezza si pensa che nella Via Lattea scoppi una stella ogni circa 100 anni. Si tenga conto però che l'ultima supernova la osservò Keplero. Si studiano quindi con attenzione le supernovae che si osservano in galassie vicine e simili alla nostra. È da questi eventi che deriva buona parte di ciò che sappiamo.

Quando una stella massiccia (massa molto più grande di quella del Sole) esplode, non si disperde interamente nello spazio, la zona centrale cade su se stessa. Appare un nuovo oggetto con proprietà straordinarie: una stella fatta di soli neutroni. La densità di materia in una "stella di neutroni" si misura in centinaia di milioni di tonnellate per centimetro cubo. Questo equivale alla massa di una petroliera concentrata in una capocchia di spillo. Non sono ben noti i fenomeni fisici che avvengono in queste estreme circostanze ma sappiamo che i nuclei atomici non possono reggere la pressione e si fondono insieme. I protoni si trasformano in neutroni e la forza dominante non è più né quella elettrica che domina gli atomi né quella nucleare che domina i nuclei, ma la gravità. Per questo si chiamano di neutroni. Alcune di queste stelle, rimasugli di supernovae esplose tempo fa, emettono luce da una porzione della loro superficie e girano vorticosamente su se stesse. Il risultato è che noi, da terra, vediamo passare periodicamente questo fascio innanzi al telescopio e riveliamo un impulso: queste sono le "pulsar".

In alcuni casi il resto di una supernova può diventare anche più denso di una stella di neutroni. In tal caso la gravità che agisce su di esso è estremamente forte, tanto da trattenere la luce prigioniera e non lasciarla sfuggire. Il corpo pertanto diventa scuro ed invisibile, di qui il nome di "buco nero".

Qual è la massa di un buco nero ? Qualsiasi, un grammo, un miliardo di tonnellate o un miliardo di volte la massa del Sole, basta che sia contenuta in un volume sufficientemente piccolo. Un buco nero con la massa del Monte Bianco potrebbe essere contenuto in un volume pari a quello di un atomo, un buco nero con il volume del Monte Bianco avrebbe una massa pari a quella del Sole.

I buchi neri si possono "vedere" nonostante la mancanza di emissione di radiazione non aiuti. In aiuto ci viene invece la forte attrazione gravitazionale che essi esercitano. Se il Sole, quasi per magia, diventasse di colpo un buco nero, il suo raggio diverrebbe minore di un chilometro e non emanerebbe più luce ma i pianeti continuerebbero a ruotargli intorno come se nulla fosse accaduto. In cielo circa la metà delle stelle sono binarie, cioè hanno una compagna ed insieme ruotano intorno ad un punto posto in una posizione particolare sul segmento che le separa e che dipende dalle masse delle due stelle. Se una delle stelle è un buco nero e l'altra una stella normale la materia e la luce che la stella normale emette è prontamente attratta dal buco nero che la attira a sé. Cadendo sul buco nero la materia si incanala, per attrito si scalda ed emette radiazione X e gamma che, osservata da terra, ci fornisce una inconfondibile prova di ciò che accade. Oggi molte stelle sono note per avere come compagna un candidato buco nero.

Va ricordato, per completezza, che stelle di piccola massa, cioè come il Sole, non muoiono in modo così drammatico e non attraversano la fase di supernova. A causa della modesta massa non raggiungono mai la temperatura necessaria e si accontentano di spegnersi diventando "nane bianche", anch'esse "stelline" di volume simile a quello della terra ma,

paragonate alle stelle di neutroni, molto più grandi (le stelle di neutroni hanno un volume simile a quello di una montagna) e molto meno dense (una tonnellata per centimetro cubo contro centinaia di milioni di tonnellate per le stelle di neutroni).

Studiare stelle e nebulose nella galassia vuol dire guardare attraverso il disco e più distanti sono gli oggetti osservati più difficile diventa osservarli a causa non solo della diminuzione di flusso in ragione inversa al quadrato della distanza ma dell'oscuramento che produce il gas e la polvere diffusa lungo il piano galattico. Il gas intergalattico però produce onde radio, grazie alla presenza di elettroni e campo magnetico, tali onde penetrano il mezzo diffuso e permettono all'astronomo di osservare dove la luce non penetra. Gran parte di ciò che sappiamo sulla struttura del disco galattico ci proviene da osservazioni di gas e materiale posto nello spazio tra le stelle. Questo materiale viene dai detriti di stelle esplose in passato, le supernovae. In media il MIS ha una densità di un atomo per centimetro cubo. Si pensi, per contrasto, che l'atmosfera terrestre contiene 25 miliardi di miliardi di molecole nello stesso volume. Anche il vuoto più spinto, mai raggiunto artificialmente nei nostri laboratori, arriva a malapena a qualche centinaio di miliardi di atomi per centimetro cubo, questo ci aiuta a comprendere quanto sia difficile simulare le condizioni del MIS sulla Terra. La situazione è ulteriormente aggravata dal fatto che la temperatura media del MIS si aggira intorno a (10-100) °K, ovvero (170-200) °C sotto zero e i tempi concessi agli atomi per formare molecole, grani ed eventualmente nubi sufficientemente massicce da poter cadere sotto l'attrazione della propria gravità e formare stelle, si misurano in milioni di anni.

Naturalmente può sembrare ovvio chiedersi se, in condizioni di estrema rarefazione, sia sensato porsi il problema del collasso della materia in nubi e, successivamente, in stelle. Le dimensioni della Galassia sono tali che anche densità basse, cioè di un atomo per centimetro cubo, distribuite su tutto il volume ammontano ad alcuni miliardi di masse solari.

L'elemento di gran lunga più comune nel MIS, e nell'Universo, è l'idrogeno (H) anche se compaiono, in proporzioni diverse ed in concentrazioni disuniformi, anche tutti gli altri. L'H atomico, la forma più comune nel MIS, trasmette radio-onde della lunghezza d'onda di 21 cm. L'H molecolare (H_2), formato da due atomi di H uniti tra loro, è molto fragile e può esistere solo in nubi dense che lo schermino dalla radiazione ultravioletta, abbondantemente prodotta dalle stelle, che separerebbe i due H. Per queste ragioni l'H atomico è più comune nelle parti esterne della Galassia mentre quello molecolare nelle parti interne del disco, più ricche di polveri. Si stima che circa il 70% degli atomi di idrogeno si trovino più lontani del Sole dal CG mentre il 90% delle molecole di idrogeno si trovino più vicine. Le molecole di H non emettono radio onde e, quindi, sono difficili da studiare perché "non si fanno vedere". L'ossido di carbonio (CO), molecola che coesiste con quella dell'H anche se molto meno abbondante, emette radiazione di lunghezza d'onda 2.6 cm e può essere usata come tracciante dell' H_2 . Attraverso lo studio dettagliato della distribuzione del CO si è scoperto che gran parte del gas molecolare è contenuto in giganteschi complessi detti Nubi Molecolari (NM) che, a loro volta, contengono frammenti più densi. Una NM tipica contiene circa 200000 masse solari di gas e ha dimensioni medie di 150 anni luce. Si noti che in una sfera immaginaria, di circa un centinaio di anni luce di raggio, centrata sul Sole, si contano più di 10000 stelle, questo dato ci aiuterà a capire come nelle NM mediamente si trovino sempre molte stelle, le quali emettono luce che talvolta ne illumina porzioni a noi visibili oppure è assorbita creando l'effetto di oscure figure stagliate su uno sfondo di stelle lontane. Nelle NM esistono le condizioni necessarie

per creare dei centri di formazione stellare. Una fucina di stelle a 1500 anni luce da noi è la nebulosa di Orione. In essa l'intensa luce ultravioletta emessa da alcune stelle di tipo O e B ha strappato l'elettrone di una gran parte degli atomi di H presenti nelle vicinanze creando una regione di H ionizzato che emette luce visibile e che, data la prossimità a noi di Orione, si può osservare anche ad occhio nudo.

Le nebulosità che si osservano nel piano della Galassia sono di tre tipi: nebulosità scure e due tipi di nebulose luminose. Come si spiegano queste differenze? La luce stellare viene riflessa dalla superficie dei grani e produce le "nebulose a riflessione" quali si osservano nelle Pleiadi, mentre nelle altre il gas, che coesiste con la polvere, viene eccitato dalla luce stellare ed emette luce per incandescenza. La grande nebulosa in Orione, è una delle nebulose ad emissione. Le nebulosità scure, invece, semplicemente assorbono la radiazione e la polvere si scalda, la nube quindi diviene una forte emittente nell'infrarosso ma non è "visibile" dai tradizionali telescopi ottici e appare come una macchia scura nelle immagini. Nelle nebulosità come quella del Granchio, ad esempio, che sono il resto di una stella esplosa nell'anno 1054, come è stato possibile ricostruire con precisione da testi di astronomi cinesi dell'epoca, si osservano bagliori azzurrini, questa radiazione è di un tipo particolare, viene detta "di sincrotrone" ed è analoga alla luce emessa nei tubi in cui i fisici accelerano particelle cariche con velocità prossime a quelle della luce. Osservare luce di sincrotrone nella nebulosa del Granchio, dunque, vuol dire che vi si trovano particelle ultrarapide che, si ritiene, siano state accelerate proprio durante l'esplosione della stella. Le stesse particelle, lasciata velocemente la nebulosa, si propagano nella Galassia e divengono parte del gran flusso di "Raggi Cosmici" che arrivano anche a bombardare perennemente l'atmosfera della terra. La funzione dei raggi cosmici è molteplice, ad esempio vi sono tre elementi chimici che le stelle non sono in grado di sintetizzare: il litio, il berillio ed il boro. La loro struttura, infatti, è debole e non resiste alle alte temperature presenti all'interno della stella stessa. Essi vengono però prodotti nei grandi freddi interstellari quando un raggio cosmico incontra un nucleo di un atomo di carbonio o di ossigeno che, nell'impatto si spezza ed alcuni dei residui servono a formare, appunto, atomi degli elementi litio, berillio o boro. Questi eventi sono rari e giustificano la scarsità, nella Galassia, di questi elementi; un grammo di acido borico acquistato in farmacia contiene più atomi di boro di quanti non se ne formino, in un volume pari a quello occupato dal Sole, in un miliardo di anni. I Raggi Cosmici appariranno anche altrove, essi, quando furono scoperti, vennero così chiamati quasi a confessare una duplice ignoranza poiché raggi significa che non si sapeva che cosa fossero e cosmici che non si sapeva di dove venissero. Oggi si conosce con buona approssimazione, sia la composizione della radiazione cosmica, perlopiù protoni, che l'origine di essa, dai "flares" solari e stellari, alle supernovae a meccanismi di accelerazione nel campo magnetico galattico ed infine per i più energetici, forse, ai nuclei delle galassie.,

I resti di supernova, dopo alcune decine di migliaia di anni, si sono espansi nello spazio ed occupano un volume di diametro alcune decine di anni luce. La nebulosa del Cigno è un buon esempio in cui si osservano filamenti colorati che si intrecciano come il fumo di una sigaretta. La temperatura di ciò che resta dell'esplosione iniziale, si avvicina a quella delle nubi interstellari, poche decine di gradi al di sopra dello zero assoluto. Ciò nonostante non tutto è morto e spento, l'attività chimica riprende vigorosa. È l'idrogeno che guida il processo unendosi ad atomi pesanti per formare nuove molecole a noi note poiché fanno parte della vita quotidiana: acqua (idrogeno e ossigeno), ammoniaca (idrogeno e azoto), metano e altri idrocarburi (idrogeno e

carbonio). Alcune di queste molecole sono tenute insieme da un legame particolarmente versatile detto "legame ad idrogeno" che è il legame che permette alle molecole d'acqua di unirsi tra loro e di avere una temperatura di ebollizione particolarmente alta. Per esempio, senza questo legame gli oceani sarebbero prontamente evaporati e non sarebbe possibile la vita. Si pensa che le molecole contenenti idrogeno formino un sottile strato "ghiacciato" sulla superficie dei grani di polvere. Siamo quindi in possesso di tutti gli ingredienti che, per azione dei Raggi Cosmici e dei fotoni ultravioletti emessi dalle stelle, possono formare le molecole più complesse.

I Raggi Cosmici sono i responsabili iniziatori dell'evoluzione chimica. Nello spazio essi urtano i granelli di polvere e liberano le molecole congelate sulla loro superficie. I frammenti si ricombinano casualmente dando inizio ad una nuova chimica. Attraverso queste unioni casuali si formano molecole di notevoli dimensioni che contengono anche più di 10 atomi. Sono già state osservate, grazie alla loro emissione nella banda radio, molecole di ossido di carbonio (2 atomi), acqua (3 atomi), ammoniaca, acetilene, formaldeide (4 atomi), metano ed acido formico (5 atomi), alcool metilico (6 atomi) alcool etilico (9 atomi) per citare quelle che hanno un "nome" noto. Le molecole prodotte in questo modo lasciano le zone in cui sono state generate e quindi i grani che ne hanno permessa la nascita, per trasferirsi altrove e "vivere una loro vita" indipendente. Come si è detto ogni molecola emette una radiazione che permette di identificarla. Questa radiazione è generalmente sotto forma di radio onde. Osservazioni con radiotelescopi ci hanno permesso di identificare, fino ad oggi, più di 100 molecole nello spazio interstellare. Nessuno aveva osato immaginare che tanta complessità potesse avere origine da spazi soggetti a condizioni di temperatura e densità tanto estreme. La scoperta di strutture così organizzate ci ha colti di sorpresa, la materia sembra possedere l'imprevista capacità di trarre vantaggio anche dalle circostanze più avverse.

Nel passato si credeva nella generazione spontanea cioè: l'immondizia lasciata marcire genera vermi e topi. Pasteur ha sradicato questa convinzione dimostrando che, sulla terra, la vita è generata da esseri viventi. Oggi con la imprevista scoperta di una molteplicità di molecole complesse nello spazio è ritornata la confusione tra animato ed inanimato, è pensabile che la vita emerga dalla combinazione delle varie componenti, con cui costruire aminoacidi, con i quali, a sua volta, si formano le proteine e le basi con cui costruire il DNA. L'evento, considerato assai "improbabile", dell'apparizione della vita, combinato con l'evento, ora non solo probabile ma che si sta rivelando "comune", della presenza di pianeti intorno a stelle, rendono il "miracolo" della vita non più una sovrapposizione di coincidenze, una più straordinaria dell'altra, ma una possibilità che va riconsiderata. Che cos'è la vita? Nel senso più ampio la parola denota la tendenza che la materia mostra ad organizzarsi in livelli di crescente complessità. La produzione di elementi nelle fornaci stellari, come la formazione di molecole complesse sulle superfici gelate di granelli di polvere interstellare, sono conferme della stessa tendenza, evidente nella proliferazione di vegetazione nelle foreste dell'Amazzonia. Si noti che tutte le molecole che comprendono più di 3 atomi contengono anche uno o più atomi di carbonio, fornito di 4 "ganci" (in chimica si direbbe di valenza 4) e particolarmente adatto per combinazioni molecolari. Anche sulla terra il carbonio è presente in gran parte delle grandi strutture molecolari. Si è dunque scoperto che il carbonio non è predominante solo nella biosfera terrestre ma nell'intera Galassia, e probabilmente anche nelle altre. Sembra dunque sempre meno unica la presenza della vita e sempre più probabile l'esistenza di altre forme di vita altrove. Alla domanda: "siamo soli?" la risposta che oggi si può dare è: "probabilmente no". Sembra si sia ancora lontani, invece, dal saper rispondere alla seconda, più difficile, domanda: "dove sono gli altri?"

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

Come sono le galassie

Come sono le galassie

La classificazione di Hubble

Le galassie *Early Type*

Le galassie *Late Type*

La formazione delle galassie

Lecture

Guardando il cielo stellato in una notte serena potremmo avere l'impressione che l'Universo sia popolato di stelle, più o meno luminose e di colori diversi. Tale impressione è errata, infatti **tutte** le stelle che vediamo distintamente ad occhio nudo appartengono alla nostra Galassia, la Via Lattea. In realtà, le osservazioni astronomiche rivelano che i "mattoni" costituenti dell'Universo sono le galassie, immensi sistemi composti da gas, polveri e fino a diverse centinaia di miliardi di stelle, mantenuti uniti dalla forza di gravità. A loro volta, una grossa frazione del numero totale di galassie è raggruppata in strutture gravitanti ancora più grandi, composte anche da migliaia di galassie, gli *ammassi di galassie* (*galaxy clusters* in inglese). Il lavoro intellettuale necessario all'uomo per arrivare a questo quadro dell'Universo è stato ovviamente faticoso, non sempre le congetture formulate durante questo cammino si sono rivelate corrette e sono state quindi abbandonate in favore di altre più solide, attraverso il collaudato percorso scientifico di mutuo scambio e verifica tra teoria, modelli, ed osservazioni. Per ragioni di spazio non possiamo in questa sede neanche accennare alla stragrande maggioranza dei risultati teorici ed osservativi connessi all'astrofisica delle galassie: considereremo tuttavia raggiunto lo scopo di questa lezione se alla fine i concetti di base qui presentati risulteranno chiari ed assimilati.

Possiamo far iniziare la nostra storia (in maniera piuttosto arbitraria) nella seconda metà del 1700 (più esattamente nel 1748), quando l'astronomo francese Charles Messier, essendo molto interessato alla scoperta di nuove comete, compilò un catalogo degli oggetti astronomici dall'aspetto "nebuloso" che il telescopio in suo possesso era in grado di rivelare (circa un centinaio), e che rimanevano immobili rispetto alle stelle fisse. Con tale catalogo a disposizione gli era infatti più facile identificare le nuove comete: anche questi oggetti appaiono come macchie luminose dai contorni indefiniti, ma a differenza degli oggetti del suo catalogo si muovono molto velocemente sulla volta celeste. Pochi anni dopo, l'inglese William Herschel, con l'aiuto della sorella Caroline e di un telescopio più potente, compilò un elenco di circa 2500 nebulose. Nel 1888 J.L.E. Dreyer completò tre cataloghi ancora più grandi, il *New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (NGC), e i due *Index Catalogues* (IC): appariva ormai chiaro che il numero di oggetti astronomici dall'aspetto "nebuloso" era notevolmente superiore a quanto inizialmente trovato da Messier, e che aumentando la potenza dei telescopi disponibili tale numero sarebbe cresciuto ancora.

Cominciò così a porsi sempre più pressante il problema della natura di questi oggetti, che venivano allora raggruppati tutti sotto il nome generico di nebulose. Un passo importante verso la chiarificazione del problema fu compiuto verso il 1850, quando il grande telescopio costruito da Lord Rosse in Irlanda (il più grande telescopio al mondo dell'epoca) fu rivolto verso gli oggetti del catalogo di Messier e si vide che una frazione di tali oggetti manteneva l'aspetto nebuloso ed

amorfo anche con questo strumento, mentre i rimanenti presentavano o un aspetto più o meno ellittico, senza mostrare segni particolari, oppure avevano una forma fortemente schiacciata, caratterizzata da un inconfondibile disegno a spirale. In particolare, questi ultimi oggetti furono chiamati *nebulose a spirale*. La questione originale, necessariamente generica, cominciò ad articolarsi in domande più specifiche: cosa sono le nebulose? Si tratta di oggetti appartenenti alla stessa famiglia oppure di oggetti fra loro completamente diversi che hanno aspetto telescopico nebuloso solo per l'inadeguatezza degli strumenti utilizzati per la loro osservazione? Quanto distanti da noi sono le nebulose? Quanto sono grandi? Di cosa sono composte?

Gli studi successivi hanno mostrato che la categoria di oggetti astronomici nota sotto il nome di nebulose è in realtà costituita da due classi distinte di oggetti, totalmente diversi nelle loro proprietà. Nella prima classe rientrano quelle che oggi sono conosciute come nebulose gassose (o nebulose propriamente dette), cioè immense nubi di gas e polveri, che appaiono luminose a causa di diversi fenomeni fisici. L'altra categoria di oggetti comprende sistemi formati dall'aggregazione gravitazionale di gas e polveri e da un numero enorme di stelle: questi sistemi furono chiamati galassie. Le nebulose gassose sono quindi parte delle galassie, e di queste in generale molto più piccole: purtroppo ancora oggi una letteratura divulgativa non sempre all'altezza del suo compito chiama in maniera del tutto impropria col nome di nebulose anche i sistemi stellari che dovrebbero essere chiamati galassie.

Per quanto riguarda le galassie, il dibattito divampò feroce tra coloro che sostenevano trattarsi di agglomerati di stelle contenuti dentro la Via Lattea (e quindi notevolmente più piccoli di essa), e i sostenitori dell'audace ipotesi che potesse trattarsi di sistemi stellari grandi come o più della Via Lattea (e quindi enormemente lontani da essa). Da entrambe le parti della contesa si portarono argomenti di plausibilità anche molto profondi e, come spesso accade nello sviluppo delle conoscenze scientifiche, il problema fu infine risolto una volta per tutte soltanto da osservazioni incontrovertibili. Infatti, nel 1924 l'astronomo americano Edwin Hubble, riuscendo a misurare la distanza di tali oggetti con i telescopi di monte Wilson, risolse definitivamente la questione a favore della teoria extragalattica: la Via Lattea perdeva quindi il suo status privilegiato, diventando così una fra le innumerevoli galassie di cui l'Universo risultava popolato, fino ai suoi estremi confini osservabili.

Il compito che ha tenuto occupati gli astronomi e gli astrofisici negli anni a seguire (e che li impegna ancora oggi) è stato quello di tentare di "mettere ordine" all'interno del mondo delle galassie. Ciò comporta la definizione di vari criteri di classificazione, che possano consentire di mettere in evidenza le principali proprietà delle galassie, e possibilmente di classificarle in base a precise proprietà fisiche. Dall'epoca della scoperta di Hubble sono stati proposti molti (e validi) criteri di classificazione, basati sulla misura di proprietà dinamiche, fotometriche, e strutturali delle galassie. Uno dei più famosi (anche per la sua semplicità) è rimasto senza dubbio quello di Hubble. Si tratta di un criterio tipicamente "morfologico", cioè basato essenzialmente sull'aspetto delle galassie. La classificazione delle galassie effettuata secondo questo criterio porta il nome di "classificazione di Hubble".

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

La classificazione di Hubble

Come sono le galassie

La classificazione di Hubble

Le galassie *Early Type*

Le galassie *Late Type*

La formazione delle galassie

Lecture

Prima di passare ad una breve (ma ragionevolmente completa nelle sue linee essenziali) descrizione della classificazione di Hubble, ricordiamo alcuni fatti essenziali relativi alle galassie come classe di oggetti astronomici.

Il numero di stelle che usualmente compongono una galassia va da circa 10^8 (qualche centinaio di milioni) fino a più di 10^{11} (qualche centinaio di miliardi). Poiché risulta molto difficile determinare osservativamente le dimensioni delle galassie, sfumando le loro immagini fino a confondersi con lo spazio circostante, senza tagli "netti", le loro dimensioni caratteristiche sono usualmente definite considerando una circonferenza (con origine nel centro della galassia in questione) che contenga metà della sua luce totale: il raggio di tale circonferenza è dell'ordine di alcuni kiloparsec (ricordiamo che 1 kiloparsec, abbreviato kpc, equivale a 10^3 parsec, e $1\text{ pc} = 3.08 \cdot 10^{18} \text{ cm}$). Le velocità caratteristiche delle stelle all'interno delle galassie si possono misurare con tecniche opportune e sono dell'ordine di qualche decina di chilometri al secondo nelle galassie più piccole, potendo raggiungere qualche centinaio di chilometri al secondo in quelle più grandi.

Una sorprendente constatazione che viene spontanea a chiunque si avvicini per la prima volta al mondo delle galassie è il fatto che, nonostante l'elevatissimo numero di questi oggetti che possiamo osservare nell'Universo attualmente accessibile attraverso i più grandi telescopi, la stragrande maggioranza di essi possa essere raggruppata in pochi tipi comuni. Questo risultato è alla base del successo della classificazione di Hubble. Ovviamente non ci è qui possibile scendere nei dettagli tecnici di come tale classificazione venga in pratica realizzata, è sufficiente ricordare che le galassie possono essere divise tra due tipi fondamentali, cioè galassie *early type* e galassie *late type*. A loro volta le galassie *early type* vengono suddivise in galassie *Ellittiche* ed *S0*, mentre le galassie *late type* in galassie *Spirali* ed *Irregolari*. I moti interni delle stelle che compongono le galassie possono essere molto "complicati" (come nel caso delle galassie Ellittiche, S0 ed Irregolari) o relativamente "semplici" (come nel caso delle galassie Spirali). Infatti, nel caso delle stelle che si trovano nei dischi galattici, i moti sono abbastanza ben descritti da orbite quasi circolari; al contrario, i moti delle stelle nelle galassie Ellittiche sono notevolmente complessi ed una descrizione semplificata ce li può far visualizzare come una "nuvola" di stelle che si muovono in tutte le direzioni, alcune più velocemente ed altre più lentamente. Poter misurare le velocità stellari all'interno delle galassie (cosa resa possibile dagli spettroscopi) è estremamente importante, in quanto utilizzando (ad esempio) il cosiddetto *Teorema del Viriale* è possibile misurare la massa delle galassie conoscendo le loro dimensioni e le velocità caratteristiche delle stelle al loro interno. Quando questo può essere fatto, si scopre che in molti casi la massa visibile (stelle e gas) è soltanto una frazione della massa totale del sistema in questione. La

massa che ci deve essere (per produrre le velocità osservate) ma che non emette onde elettromagnetiche (e quindi che non è visibile) viene chiamata materia oscura. Le quantità di materia oscura presenti nelle galassie possono essere superiori di varie volte alla materia che gli astronomi riescono a vedere con i loro telescopi.

Prima di concludere questa breve rassegna delle più importanti proprietà delle galassie, ricordiamo che intorno alle galassie si trova un consistente numero di ammassi globulari (fino a qualche migliaio per le galassie più grandi!), sistemi stellari di forma sferica e molto compatti, contenenti da qualche centinaio di migliaia fino a vari milioni di stelle coeve, di età molto avanzata.

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

Le galassie *Early Type*

Come sono le galassie

La classificazione di Hubble

Le galassie *Early Type*

Le galassie *Late Type*

La formazione delle galassie

Lecture

La caratteristica comune delle galassie *early type* è quella di presentare un colore rossastro, generalmente interpretato come sinonimo di "vecchiaia" per la popolazione stellare che compone queste galassie. Inoltre, in questi sistemi stellari la quantità di gas freddo e polveri è trascurabile o del tutto assente. Da un punto di vista morfologico le galassie *early type* non presentano particolari evidenti nella loro distribuzione di luce. Come abbiamo già detto, le galassie appartenenti a questa classe si dividono nelle due grandi famiglie delle Ellittiche e delle S0. La brillantezza superficiale di questi sistemi (una misura della luminosità delle loro immagini punto per punto, come viste ad esempio al telescopio) decresce in genere senza discontinuità apprezzabili allontanandosi dal centro della galassia, sfumando al di sotto della soglia di rivelabilità e confondendosi con lo spazio circumgalattico (Figura 1). Le curve di uguale luminosità (isofote) delle galassie Ellittiche hanno una caratteristica forma ellittica (da cui il nome della famiglia), con rapporti assiali compresi tra 0 (galassie E0) e 3 (galassie E7).

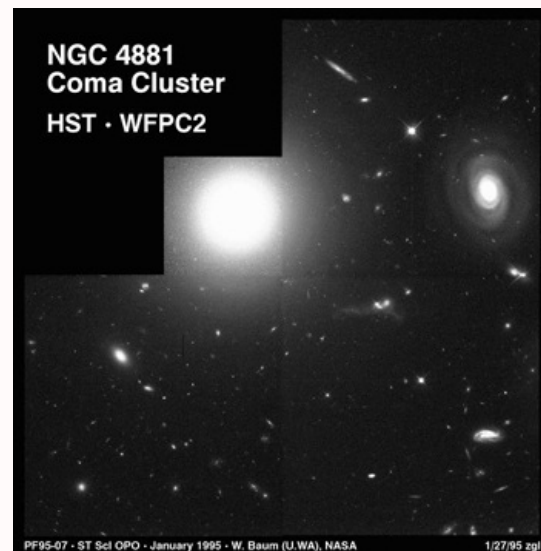


Figura 1. La figura mostra un campo di galassie lontane, osservato dal Telescopio Spaziale "Hubble" il 4 marzo 1994. La galassia più grande in alto a sinistra è la galassia ellittica NGC 4881, nell'ammasso di galassie di Coma. Si possono notare anche molte galassie di dimensione minore, alcune delle quali sono Spirali.

In generale una particolare galassia ellittica viene indicata col simbolo E_n , dove $n=10(1-b/a)$, e b ed a sono rispettivamente l'asse minore e maggiore isofotale. Quindi, una galassia E0 presenta delle isofote perfettamente circolari. A differenza delle galassie Ellittiche, le galassie S0 sono caratterizzate dalla presenza di un grosso disco stellare, con un rigonfiamento centrale che viene chiamato

bulge, che le fa assomigliare (quando viste di taglio) a delle gigantesche lenti da ingrandimento; il bulge a sua volta è molto simile ad una galassia ellittica "in miniatura". Finiamo questa breve descrizione ricordando che con l'avvento dei primi satelliti artificiali sensibili ai raggi X si è scoperto che le galassie *early type* possono contenere anche significative quantità di gas caldo (con temperature intorno al milione di gradi), diffuso attorno ad esse in un'ampia corona di bassa densità.

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

Come sono le galassie

La classificazione di Hubble

Le galassie *Early Type*

Le galassie *Late Type*

La formazione delle galassie

Letture

Le galassie *Late Type*

A differenza delle galassie *early type*, le galassie *late type* hanno un colore tendente al blu, usualmente interpretato come sintomo di una popolazione stellare più giovane di quella delle galassie Ellittiche ed S0. Inoltre, la morfologia delle galassie *late type* è molto più complicata di quella delle galassie *early type*, poiché questi sistemi contengono anche una sostanziale quantità di gas freddo e polveri interstellari. Cominciamo col descrivere la categoria di gran lunga più rappresentativa dell'insieme delle galassie *late type*, ossia quella delle Spirali (ricordiamo qui per inciso che anche il nostro Sistema solare è situato nel disco di una galassia a spirale, la Via Lattea). Così come per le S0, anche la forma di questi sistemi è a disco e quando visti di taglio assomigliano anch'essi ad enormi lenti da ingrandimento, con un rigonfiamento più o meno accentuato nelle loro regioni centrali. Tale rigonfiamento (il bulge) è composto di stelle dal colore rossastro, analogo al bulge delle galassie S0.

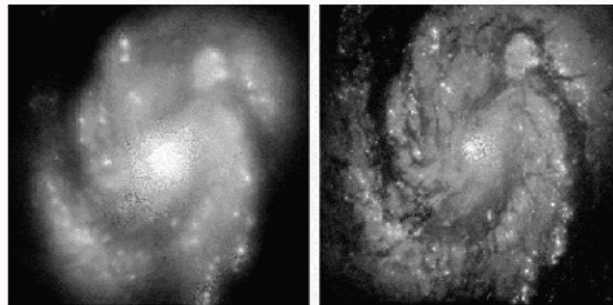


Figura 2. La galassia Spirale M100, come osservata dal Telescopio Spaziale "Hubble" prima (a sinistra) e dopo (a destra) la riparazione in orbita. M100 è una delle galassie più grandi dell'ammasso di galassie della Vergine, e la sua struttura è molto simile a quella della nostra Via Lattea. La regione più fittamente popolata di stelle nella regione centrale è il bulge.

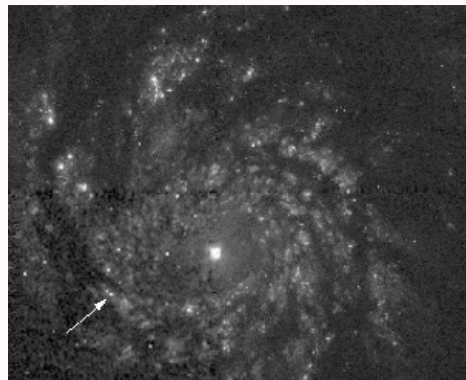


Figura 3. La galassia Spirale M51, come osservata dal Telescopio Spaziale "Hubble". La freccia indica la posizione della supernova 1994I. Una supernova è una

violentissima esplosione stellare che distrugge una stella e che espelle i prodotti delle reazioni nucleari stellari nel gas interstellare. Gli elementi di cui è formata la Terra (e anche il nostro corpo!), hanno avuto origine in un'esplosione simile avvenuta nella nostra Via Lattea miliardi di anni fa.

In base alla grandezza relativa del bulge rispetto al disco galattico (in ordine di importanza decrescente), le galassie a Spirale vengono indicate come *Sa*, *Sb*, ed *Sc*. A differenza delle *S0* però, dove in genere non è riscontrabile traccia di gas freddi né strutture che risaltino in maniera evidente, sui dischi delle Spirali, quando visti di fronte, si nota immediatamente una chiara struttura a spirale (da qui il loro nome), una delle strutture più belle e maestose che sia dato osservare nel cielo (Figura 2 e Figura 3). Il disco delle galassie a spirale è in realtà costituito da varie componenti di gas e di stelle. Per quanto riguarda la parte stellare, si ha un disco sottile ed una componente di alone, con le stelle di alone considerevolmente più vecchie delle stelle del disco. Anche il gas è distribuito in un disco sottile ed un disco spesso. È inoltre importante ricordare che la struttura dei bracci di spirale (lungo i quali è presente formazione stellare e quindi una popolazione stellare blu) risulta (in media) fortemente correlata alla dimensione (relativa) del bulge, per cui in genere galassie *Sa* hanno un bulge grande, poco gas, braccia molto avvolte e generalmente ben definite, mentre galassie di tipo *Sc* a volte non presentano quasi traccia del bulge, hanno bracci molto aperti, ed una notevole frazione della materia è in fase di gas. Esistono poi tre classi "parallele" di galassie a spirale, le cosiddette *Spirali Barrate*. In questi sistemi il bulge è sostituito da una struttura marcatamente asimmetrica rispetto al loro centro della galassia, a forma di barra (Figura 4). Di conseguenza, si parla di galassie *SBa*, *SBb*, *SBc*, ed anche *SB0*, ovvero galassie *S0* (vedi sopra) barrate.

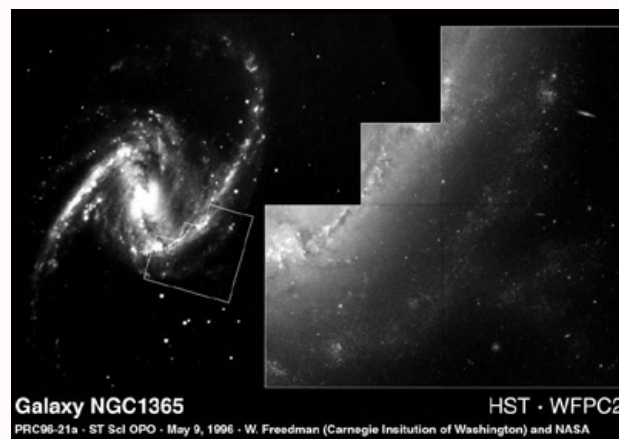


Figura 4. La galassia Spirale barrata NGC1365 osservata dal Telescopio Spaziale "Hubble" il 9 maggio 1996. La galassia appartiene all'ammasso di galassie della Fornace. Si confronti questa immagine con quella delle due galassie a Spirale (non barrate) mostrate in Figura 2 e 3: la barra di stelle nella regione centrale è perfettamente visibile.

Al contrario delle Spirali, che possono essere anche sistemi di massa e dimensioni enormi, le galassie Irregolari sono in genere galassie di piccola massa, senza una struttura ben definita, molto ricche di gas e con una popolazione stellare relativamente giovane: il loro colore è quindi fortemente blu.

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

La formazione delle galassie

Come sono le galassie

La classificazione di Hubble

Le galassie *Early Type*

Le galassie *Late Type*

La formazione delle galassie

Lecture

Le regolarità riscontrate nella classificazione di Hubble, e la stretta relazione fra le varie proprietà strutturali e dinamiche all'interno dei vari tipi morfologici (quantità di gas e polveri, dimensione relativa del bulge e del disco, importanza e grado di avvolgimento dei bracci per le spirali, luminosità totale e velocità medie delle stelle all'interno delle galassie Ellittiche e Spirali), ci porta a ritenere che tali regolarità possano fornire preziose indicazioni sulla possibile formazione delle galassie.

Una delle domande più pressanti a questo riguardo, sulla quale lavorano attivamente ricercatori di tutto il mondo, è la seguente: le galassie *early type* e *late type* "nascono" come tipi diversi, oppure nell'Universo si forma soltanto un tipo di galassie e l'altra classe si origina per "evoluzione" di questa prima generazione? Purtroppo una risposta definitiva all'interrogativo sopra formulato, nonostante l'immensa mole di conoscenze sia teoriche che osservative, è attualmente mancante. Accenniamo qui soltanto brevemente ai due scenari. Nel primo caso (quello cioè in cui le galassie *early type* e *late type* si formano per processi fisici fra loro diversi), si ritiene che in entrambi i casi la formazione sia stata determinata da un lento raffreddamento di immense nubi di gas primordiale, le quali per progressivo raffreddamento e conseguente contrazione e frammentazione si trasformano nelle galassie come oggi le vediamo. In questo scenario le galassie Ellittiche si sarebbero formate a seguito di un rapidissimo (rispetto ai tempi cosmologici!) processo di frammentazione, processo più rapido del successivo collasso. Al contrario, le galassie che presentano dischi (come le Spirali) nascerebbero a seguito di processi di frammentazione molto più lenti, nei quali prima la nube di gas collasserebbe in un disco, e solo successivamente si formerebbe la maggioranza delle stelle. Nel secondo scenario, poiché risulta per vari motivi (che non possiamo qui discutere) impossibile sostenere che le galassie *late type* si formino per evoluzione delle galassie *early type*, si suppone che nell'Universo primordiale si formino soltanto galassie *late type* (essenzialmente Spirali), le quali poi "fondendosi" a seguito di interazioni gravitazionali darebbero origine alle galassie *late type* (essenzialmente Ellittiche).

Inutile dire che entrambi gli scenari di formazione hanno i loro pregi e difetti, punti di forza e debolezze, sia osservativi che teorici. Forse, come già successo nel 1924 per la disputa sulla natura delle galassie, sarà necessario attendere la costruzione (già in corso presso vari istituti di ricerca internazionali) di strumenti ancora più potenti di quelli attualmente disponibili, che ci possano permettere di osservare "in diretta" la formazione delle galassie. È ragionevole ritenere che nei prossimi dieci anni tale domanda abbia risposta.

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

Lecture

Come sono le galassie

M. Begelman, M. Rees, L'attrazione fatale della gravità. I buchi neri dell'Universo, Zanichelli, Bologna, 1997;

La classificazione di Hubble

*A. Braccisi, Esplorando l'universo, Zanichelli, Bologna, 1998;

Le galassie *Early Type*

G. Cecchini, Invito al Firmamento, UTET, Torino;

J. Lacroux, Dalla Terra alle Stelle, Zanichelli, Bologna, 1989;

Le galassie *Late Type*

M.S. Longair, Our evolving Universe, Cambridge University Press, Cambridge, 1996;

La formazione delle galassie

*J.V. Narlikar, La struttura dell'Universo, Einaudi, Torino, 1984;

*M. Rowan Robinson, The cosmological distance ladder, W.H. Freeman and Company, New York, 1985 ;

M. Rowan Robinson, L'Universo, Zanichelli, Bologna, 1992;

C.C. Petersen, J.C. Brandt, Hubble Vision. Astronomy with the Hubble Space Telescope, Cambridge University Press, Cambridge 1995;

*A. Unsold, Il Nuovo Cosmo, Piccin, Padova, 1969;

Xuan Thuan Trinh, Big Bang. Origine e destino dell'Universo. Electa Gallimard, Torino, 1993.

Si consiglia poi la lettura del periodico L'Astronomia e, in particolare, dei seguenti numeri, dove sono pubblicati articoli pertinenti all'argomento trattato: N. 182 dicembre 1997; N. 188 giugno 1998; N. 189 luglio 1998; inoltre si veda Nuovo Orione N. 82 marzo 1999.

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta, il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

...Ho serie ragioni per credere che il pianeta da dove veniva il piccolo principe è l'asteroide B612. Questo asteroide è stato visto una sola volta al telescopio da un astronomo turco. Aveva fatto allora una grande dimostrazione della sua scoperta ad un Congresso Internazionale d'Astronomia. Ma in costume com'era, nessuno lo aveva preso sul serio.....L'astronomo rifece la sua dimostrazione nel 1920, con un abito molto elegante. E questa volta tutto il mondo fu con lui. Se vi ho raccontato tanti particolari sull'asteroide B612 e si vi ho rivelato il suo numero, è proprio perché i grandi amano le cifre. Quando voi gli parlate di un nuovo amico, mai si interessano alle cose essenziali. Non si domandano mai: "Qual è il tono della sua voce? Quali sono i suoi giochi preferiti? Fa collezione di farfalle?" Ma vi domandano: "Che età ha? Quanti fratelli? Quanto pesa? Quanto guadagna suo padre?" Allora soltanto credono di conoscerlo. Se voi dite ai grandi: "Ho visto una bella casa in mattoni rosa, con dei gerani alle finestre, e dei colombi sul tetto", loro non arrivano a immaginarsela. Bisogna dire: "Ho visto una casa di centomila lire", e allora esclamano: "Come è bella".
Da: Antoine De Saint-Exupery *Il Piccolo Principe*.

Introduzione

A che distanza si trovano i corpi celesti che ci circondano? quanto sono lontane da noi le stelle e le galassie che riempiono il nostro cielo? quanto è grande l'Universo?

Come dice il Piccolo Principe, per "conoscere" gli adulti hanno bisogno di sapere "quanto", e per arrivare ad "immaginare" hanno bisogno di riuscire a stabilire degli agganci, dei paragoni con le grandezze e le dimensioni presenti nella vita di tutti i giorni. La domanda "quanto è distante?" richiama subito l'altra "quanto tempo ci vuole per andarci?". Quanto tempo ci vuole per raggiungere le stelle a noi più vicine e le più lontane? Tratteremo alcuni di questi argomenti e vedremo come man mano che ci allontaniamo dal nostro piccolo Sistema solare gli orizzonti si aprano e l'Universo si ingrandisca fino ai bordi della nostra attuale conoscenza.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Home

Spazio e tempo in astronomia

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta , il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

L'orizzonte intellettuale della razza umana in ogni epoca è stato inestricabilmente legato alla sua percezione delle dimensioni dell'Universo. Quando guardiamo alla storia delle idee sulle dimensioni dell'Universo, troviamo che il concetto moderno di un Universo infinito attraverso cui si muovono innumerevoli stelle e pianeti non è per nulla moderno, ma era già fermamente posseduto dagli atomisti greci, ed è presente in alcune delle più antiche scuole cosmologiche cinesi. La percezione dei concetti di "spazio" e "tempo" del mondo occidentale è ampiamente mutuata dal modo di pensare dei Greci. La geometria euclidea è talmente radicata nel nostro modo di pensare che diviene difficilissimo anche semplicemente afferrare il concetto della curvatura spazio tempo. Per quanto riguarda le idee che i Greci avevano invece sulla natura del tempo troviamo delle controversie che persistono ancora nel secolo presente. Per Democrito il tempo è "mera apparenza", un "incidente degli incidenti" per Epicuro, è la "non coscienza di sé" per Lucrezio. Il problema se il tempo esistesse prima del mondo causò non pochi grattacapi ai teologi medioevali e solo Sant'Agostino risolse brillantemente la questione con l'affermazione che il mondo non fu creato "nel" tempo, ma "con" il tempo: "l'Universo ed il tempo ebbero un inizio comune e uno non anticipò l'altro".

Tuttora non vi è risposta più convincente alla domanda "Cosa c'era prima del big-bang?". Un elemento fondamentale nel binomio "quanto lontano - quanto tempo occorre per andarci" è la velocità con cui ci muoviamo per percorrere le distanze. In base alle nostre attuali conoscenze fisiche il modo più veloce che abbiamo per muoverci nell'esplorazione dell'immenso cosmo che ci circonda è quello di viaggiare alla velocità della luce, ma la velocità della luce c non è illimitata ($c = 299792458.6 \pm 0.3\text{m/s}$), non sono quindi possibili spostamenti e/o trasmissioni di informazioni istantanee. La "limitatezza" della velocità di spostamento possibile fa sì che anche viaggiando alla velocità della luce occorra un tempo finito per percorrere lo spazio intorno a noi e che, viceversa, anche la luce inviata verso di noi dai corpi celesti ci arrivi con un certo ritardo dovuto al fatto che essa impiega un tempo finito per raggiungerci. Ad esempio, la luce della stella a noi più vicina, il Sole, impiega circa 8 minuti per raggiungerci ogni mattina. Un'altra conseguenza è che potremmo veder brillare ancora in cielo oggetti in realtà ormai spenti da tempo, ma così lontani da noi che il messaggio della loro morte non ci ha ancora raggiunto. In Astronomia andare a distanze via via più grandi equivale a guardare l'Universo ad età via via sempre più giovani, perché possiamo vedere gli oggetti lontani solo "come sono" nel loro stato di miliardi di anni fa, quando la luce che ci stanno inviando iniziò il suo viaggio verso di noi.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta , il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Riuscire a misurare la distanza dei corpi celesti e di oggetti via via più lontani ha costituito e costituisce tuttora uno dei primi e più affascinanti problemi astronomici. I Greci furono i primi a cimentarsi nella misura delle distanze astronomiche. Per quanto sappiamo i primi tentativi di misura del Sistema solare risalgono infatti ad Aristarco di Samo, vissuto nel III secolo a.C. e contemporaneo di Eratostene (il primo ad aver tentato la misura del raggio terrestre). Aristarco utilizzò il fenomeno delle eclissi di Luna per valutare la distanza Terra-Luna e successivamente tentò di misurare la distanza Terra-Sole a partire dalla stima dell'angolo formato dalle direzioni Sole-Luna e Sole-Terra quando la Luna è in quadratura. Il metodo di Aristarco fu ripreso e migliorato da Ipparco nel II sec. a.C. e successivamente da Tolomeo, ma occorrerà attendere il XVII secolo, l'introduzione del procedimento trigonometrico e del concetto di "parallasse" per avere la prima "buona" stima della distanza Terra-Sole.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta, il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Quando si entra nel mondo delle "distanze astronomiche" gli agganci e paragoni con la vita di ogni giorno divengono difficili, l'Universo che conosciamo è troppo grande per poterlo misurare in chilometri. Il chilometro può essere ancora una buona unità di misura fin tanto che restiamo nell'ambito della distanza Terra-Luna (distanza media 384.400 km), ma già comincia ad essere poco pratico quando si parla di distanza Terra-Sole (distanza media 149.597.870 km). Il passaggio alle grandezze astronomiche richiede l'introduzione di nuove unità di misura, l'unità astronomica (U.A.), l'anno luce (a.l.), il parsec (pc).

La distanza media Terra-Sole è divenuta la prima nuova naturale unità di misura adottata per le distanze astronomiche: "l'unità astronomica" (U.A.). Una unità astronomica è uguale a 149.600.000 km. L'unità astronomica è abbastanza pratica fin tanto che si rimane nell'ambito del Sistema solare, ma appena si esce da esso le dimensioni aumentano così rapidamente che si vede subito la necessità di introdurre unità più grandi. Dopo il Sole, la stella a noi più vicina, α Centauri, si trova ad una distanza di circa 40.000 miliardi di chilometri, ovvero circa 254.000 U.A. Chilometri ed unità astronomiche divengono unità scomode già al primo passo fuori dal Sistema solare. La luce inviataci da α Centauri impiega poco più di 4 anni per raggiungerci. Ecco un numero "relativamente" piccolo, e una unità di misura "relativamente" grande: "l'anno luce", ovvero la distanza percorsa dalla luce in un anno viaggiando alla velocità di 300.000 chilometri al secondo. Dunque α Centauri si trova ad una distanza di 4.2 anni luce. Questa enorme distanza che pur è tra le più piccole del nostro Universo, acquista una familiarità tutta speciale al pensiero che la luce di α Centauri che stiamo vedendo in questo momento ha iniziato il suo viaggio verso di noi mentre nasceva nostro figlio di 4 anni.

Finché si rimane relativamente vicini, immaginare è relativamente facile. Viaggiando alla velocità della luce in 11 ore siamo fuori dal Sistema solare. Potremmo partire dalla nascita del nostro primo figlio, ed andare indietro al matrimonio, la laurea, la maturità superiore, ed ancora indietro al primo giorno di scuola e al giorno della nostra nascita con l'equivalente del tempo necessario ad andare da α Centauri fino ad alcune delle stelle più brillanti visibili ad occhio nudo (Arturo = 37 a.l., Capella = 44 a.l.). Avremmo quindi mosso solo qualche passo oltre il nostro Sistema solare. Nei duemila anni intercorsi dalla nascita di Cristo avremmo percorso meno di 1/10 della distanza tra noi ed il centro della nostra Galassia. Infatti impiegheremmo 25.000 anni (~ 25.000 a.l. = 7.000-8.000 pc) per raggiungerlo, mentre per attraversare la Galassia da un estremo all'altro ci vorrebbero 100.000 anni (100.000 a.l. = 31.000 pc), più o meno il tempo intercorso tra noi e la comparsa sulla terra del primo homo sapiens, l'uomo di Neanderthal. Di qui in poi le distanze aumentano smisuratamente, e ci è richiesto un grande sforzo di astrazione per riuscire ad immaginarle.

Andromeda (M31), la galassia spirale a noi più vicina ed appena visibile ad occhio nudo in una limpida notte autunnale, dista più di 2.000.000 di anni luce. Ipotetici osservatori che potessero osservare la Terra da un qualunque pianeta intorno ad una stella di Andromeda vedrebbero l'uomo come una scimmia appena in grado di muovere i primi passi su due sole zampe, l'homo erectus, l'aspetto che l'uomo aveva 2 000 000 milioni di anni fa. La nostra Galassia, con M31, M33 e circa 30 altre galassie di dimensioni minori tra cui spiccano le Nubi di Magellano, "nuvolette" chiaramente visibili ad occhio nudo dall'emisfero Sud, formano il cosiddetto "Gruppo Locale". Usciti dal Gruppo Locale dovremmo viaggiare alla velocità della luce per 6-10 milioni di anni prima di trovare i successivi insieme di galassie: i gruppi di Sculptor e di M81.

Ci vorrebbero 15-20 milioni di anni per giungere al gruppo di galassie che contiene la spirale gigante M101, e 40 milioni di anni sarebbero appena sufficienti per raggiungere la periferia dell'ammasso di galassie della Vergine, un agglomerato di migliaia di galassie. Infine gli ammassi di galassie più lontani di cui siamo in grado di stimare la distanza si trovano ad oltre 300 milioni di anni luce. L'orizzonte dell'Universo attualmente conosciuto si perde indietro a circa 13 miliardi di anni luce.

Gli astronomi hanno introdotto una ulteriore unità di misura, il "parsec". La definizione del parsec è legata al concetto di parallasse trigonometrica e verrà discussa nel prossimo paragrafo. Il parsec è l'unità di misura comunemente usata dagli astronomi per distanze superiori a quelle tipiche del Sistema solare.

Unità astronomica, anno luce e parsec sono legate tra di loro ed al km dalle seguenti relazioni

$$1 \text{ U.A.} = 149.600.000 \text{ km}$$

$$1 \text{ a.l.} = 63.240,6 \text{ U.A.} = 9.460.800.000.000 \text{ km}$$

$$1 \text{ parsec} = 3,26 \text{ a.l.} = 206.265 \text{ U.A.} = 30.860.000.000.000 \text{ km}$$

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta , il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta , il modulo di distanza

Quando si osserva un oggetto celeste occorre tenere presente che la luminosità che giunge all'osservatore dipende sia dalla quantità di energia effettivamente emessa dall'oggetto, che dalla distanza cui l'oggetto si trova rispetto all'osservatore. Infatti, a parità di energia emessa, un oggetto apparirà tanto più brillante quanto più è vicino all'osservatore. In particolare, il flusso "S" di energia ricevuta da un osservatore a distanza "d" sarà proporzionale all'inverso del quadrato della distanza:

$$S \propto 1/d^2$$

Gli astronomi descrivono la luminosità stellare osservata in termini di magnitudine apparente "m". Per confrontare correttamente le luminosità degli oggetti celesti occorre eliminare l'effetto prodotto sulla luminosità osservata dalla distanza sorgente-osservatore, dobbiamo cioè trasportare idealmente tutti gli oggetti alla stessa distanza da noi. Gli astronomi operano questo "spostamento ideale" introducendo il concetto di "magnitudine assoluta". La magnitudine assoluta "M" è la magnitudine apparente che una stella avrebbe se si trovasse alla distanza di 10 parsec (cioè 32.6 a.l.). Il confronto delle magnitudini assolute di oggetti diversi ci dice immediatamente quale oggetto emetta più energia. Ad esempio il Sole ci appare più brillante di Capella, ma se esse fossero entrambe poste alla distanza di 10 pc, vedremmo ancora Capella come una delle stelle più brillanti in cielo, mentre il Sole sarebbe una stella appena visibile ad occhio nudo. La differenza m-M tra magnitudine apparente e magnitudine assoluta di una stella è chiamato modulo di distanza della stella. Il modulo distanza è legato alla distanza della stella dalla relazione:

$$m-M = -5 + 5 \log d \text{ (pc)}$$

dove d è la distanza dell'oggetto espressa in parsec.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

	Le distanze all'interno della nostra Galassia
Introduzione	
Spazio e tempo in astronomia	a) La misura diretta: la parallasse trigonometrica, da 0 a 100pc In astronomia il modo più diretto per misurare la distanza di un oggetto celeste è attraverso la "parallasse trigonometrica": lo spostamento angolare rispetto ad uno sfondo lontano subito da un oggetto che venga osservato dai due estremi di una linea di base. La linea di base usata per misurare le parallasse astronomiche è il raggio dell'orbita terrestre intorno al Sole. Man mano che la Terra percorre la sua orbita intorno al Sole le direzioni apparenti delle stelle in cielo cambiano e le stelle più vicine sembrano descrivere rispetto allo sfondo delle stelle più lontane delle piccole orbite ellittiche (o dei cerchi, per stelle al polo dell'eclittica, e dei segmenti, per stelle sul piano dell'eclittica), di dimensioni via via più piccole man mano che si considerano oggetti via via più lontani. La parallasse astronomica di una stella, " π ", è il semiasse maggiore dell'ellissi descritta dalla stella e viene misurata in secondi d'arco (arcsec; vedi Fig.1).
Cenni storici: le prime misure in astronomia	
Le unità di misura: il chilometro non basta più	
Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta , il modulo di distanza	
Le distanze all'interno della nostra Galassia	
Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza	
Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc	
Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre	
Le incertezze della scala delle distanze astronomiche	

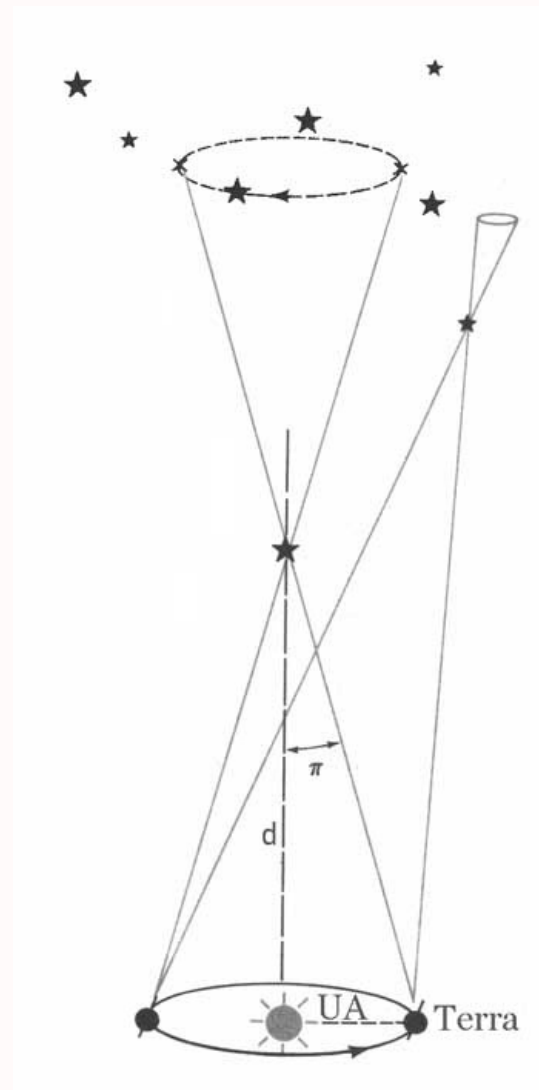


Figura 1. Geometria della parallasse trigonometrica.

Il parsec è la distanza a cui si troverebbe una stella che avesse una parallasse di un secondo d'arco. La distanza espressa in parsec di una stella con una parallasse osservata " π " è data da

$$d(\text{pc}) = 1/\pi$$

In realtà, data la loro grande distanza anche le stelle più vicine hanno parallassi molto piccole e sempre minori di 1". La stella con parallasse maggiore è Centauri che ha una parallasse di 0.76", la parallasse si misura quindi più convenientemente in milli-secondi d'arco (mas): 10^{-3} arcsec. La possibilità di misurare le parallassi stellari diminuisce rapidamente man mano che si va ad oggetti più lontani, inoltre le parallassi trigonometriche misurate da terra sono spesso state affette da notevoli errori difficili da eliminare e non sempre realmente stimabili. Questo intero campo dell'Astronomia è stato rivoluzionato di recente dal satellite astrometrico "Hipparcos", lanciato dall'Agenzia Spaziale Europea nel 1989, il quale ha effettuato misure astrometriche con l'accuratezza del "milli-arcsec", una precisione mai raggiunta prima. L'errore nelle parallassi misurate da Hipparcos aumenta però rapidamente per distanze superiori ai ~100 pc. Questa è, in media, la massima distanza per cui il satellite è riuscito a misurare le parallassi con una accuratezza del 10% (la precisione corrispondente a stimare la distanza tra Bologna e Rimini, circa 100 km, con un errore di 10 km). Oltre le stelle singole entro un raggio di 100 pc troviamo anche alcuni degli ammassi aperti più vicini, in particolare le Iadi ($d \sim 46$ pc). Gli ammassi aperti sono agglomerati debolmente concentrati di 100 - 10 000 stelle prevalentemente disposti sul disco della

Galassia con distanze che in media vanno dai 40 ai 7000 pc.

La misura diretta delle distanze tramite il metodo della parallasse trigonometrica ha tuttora una "applicabilità locale", tuttavia esso costituisce il primo e più sicuro metodo per determinare la distanza degli oggetti astronomici vicini e il punto fermo cui ancorarsi per calibrare i metodi e gli indicatori di distanza cui si deve inevitabilmente ricorrere per misurare la distanza di oggetti più lontani.

b) I moti propri: la parallasse statistica (0-500 pc)
Tutte le stelle nella Galassia (e con esse il Sole) sono in movimento, esse ruotano intorno al centro galattico e a causa della mutua attrazione gravitazionale esercitata dalle stelle vicine posseggono un ulteriore moto casuale. Per effetto di questi due moti un osservatore vedrà che le stelle non rimangono in una posizione fissa in cielo, ma si spostano rispetto allo sfondo delle stelle più lontane. Questo spostamento prende il nome di "moto proprio". Il moto proprio del Sole può essere usato per ricavare la distanza delle stelle per cui il raggio dell'orbita terrestre è troppo piccolo come linea di base per misurare la parallasse trigonometrica (in un anno il Sole percorre nel suo moto intorno al centro della Galassia una distanza pari a quattro volte il raggio dell'orbita terrestre). Le parallasse che si basano sul moto proprio solare prendono il nome di "parallasse secolari". Poiché però non è facile separare la componente di moto proprio dovuta esclusivamente al moto solare, dalla componente peculiare dovuta al moto di ogni singola stella, il metodo non viene applicato a stelle singole, bensì viene utilizzato per ricavare la "distanza media" di "gruppi di stelle" dinamicamente omogenee, nell'ipotesi che mediando i moti propri di un insieme di stelle la componente casuale si annulli. Le parallasse misurate in questo modo prendono il nome di "parallasse statistiche". Il metodo della parallasse statistica consente di ricavare la distanza media di "gruppi" di stelle fino a distanze dell'ordine dei 500 pc.

L'impatto scientifico dei risultati di Hipparcos nel campo della misura delle distanze astronomiche è stato spettacolare, tuttavia le stelle misurate da Hipparcos sono tutte "relativamente brillanti", ovvero "relativamente vicine". Un nuovo orizzonte nelle possibilità di ottenere misure dirette di distanza attraverso il metodo della parallasse si aprirà con la messa in orbita da parte dell'ESA del satellite astrometrico GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) il cui lancio è previsto per il 2009. GAIA consentirà di misurare la parallasse con una accuratezza dell'ordine del micro-arcosecondo (10^{-6} arcsec), delle stelle negli ammassi globulari della nostra Galassia. Gli ammassi globulari sono agglomerati di 10⁵-10⁶ stelle legate gravitazionalmente che popolano prevalentemente l'alone delle galassie e che nella nostra Galassia sono disposti in simmetria sferica intorno al centro galattico a distanze che variano dai 3000 ai 35 000 pc ed oltre.

Il futuro non molto lontano ci riserva quindi inimmaginabili progressi nella nostra capacità di misurare le distanze astronomiche. Tuttavia, al momento, come vengono stimate le distanze degli ammassi aperti oltre le Iadi e degli ammassi globulari? cioè, come si riesce a spingersi a misurare fino ai bordi della nostra Galassia?

c) Il fit della sequenza principale: la distanza degli ammassi aperti (da 40 a 7000 pc) e globulari (da 3000 a 10 000 pc)
La sequenza principale è la regione del diagramma colore-magnitudine (diagramma di Hertzsprung-Russell - HR) dove vengono ad addensarsi le stelle in cui la produzione di energia all'interno del nucleo stellare centrale (core) avviene attraverso la combustione dell'idrogeno in elio. Per agglomerati di stelle di stessa composizione chimica ed età, e poste tutte alla stessa distanza da noi, quali le stelle di un ammasso aperto o globulare, la sequenza principale è una linea sottile, molto ben definita che taglia obliquamente il diagramma HR.

Confrontando la sequenza principale di un ammasso a distanza nota (ad esempio le Iadi) nel diagramma "magnitudine assoluta - colore", con la sequenza principale nel diagramma "magnitudine apparente - colore" di un ammasso di cui non si conosce la distanza, si può risalire alla distanza di quest'ultimo. Di quanto dobbiamo spostare nella direzione verticale il secondo diagramma per portare a coincidere esattamente le due sequenze principali è la quantità $M-m$, ovvero il modulo di distanza dell'ammasso aperto a distanza incognita. Nel caso degli ammassi globulari il procedimento è più complicato perché, non esistendo ammassi globulari di cui si sia potuta misurare direttamente la distanza, quindi la sequenza principale a distanza nota, da usare come riferimento, non può essere quella di un ammasso particolare, ma va cercata tra sequenze su cui vanno ad addensarsi stelle "di campo" più simili alle stelle degli ammassi globulari. Siccome le stelle di sequenza principale negli ammassi globulari sono stelle di piccola massa, e bassa metallicità nella fase di combustione di idrogeno nel nucleo centrale, le stelle da usare come riferimento sono le subnane di campo di basso contenuto metallico di cui è stata misurata la parallasse trigonometrica.

d) Le parallassi spettroscopiche e fotometriche: oltre 10.000 pc

Con il fit della sequenza principale degli ammassi globulari possiamo giungere a distanze di circa 10.000 pc, tutto questo è però ancora poco rispetto alle dimensioni della nostra Galassia (diametro 30.000 pc). La possibilità di spingersi oltre è legata alla abilità di identificare tipi particolari di stelle e di calibrare le loro magnitudini assolute.

Le stelle hanno colori diversi. Il diverso colore riflette la diversa temperatura superficiale: le stelle rosse sono più fredde con temperature da 2.500 a 3.500 °K, le blu sono le stelle più calde con temperature da 12.000 a 30.000 °K ed oltre, il Sole è una stella gialla ed ha una temperatura superficiale di circa 6000 gradi.

Se si scompone la luce proveniente da una stella nelle varie componenti spettrali, se ne ottiene cioè lo "spettro", si vede che la diversità in colore è anche accompagnata da una diversità nelle righe presenti nello spettro. A parità di colore, ovvero a parità di righe presenti nello spettro, le stelle possono poi avere luminosità molto diverse a seconda di quanto esse siano grandi (giganti, subgiganti, nane). Gli astronomi classificano le stelle oltre che in base alla loro luminosità (magnitudine), in base alla loro grandezza (classe di luminosità) e al loro colore/spettro (indice di colore/tipo spettrale). Queste caratteristiche di una stella (magnitudine, colore/tipo spettrale, classe di luminosità) sono alla base dei metodi delle parallassi spettroscopiche e fotometriche. Studiando stelle vicine di luminosità e colori (ovvero tipi spettrali) diversi per cui sia nota la distanza è possibile costruire un diagramma che dà l'andamento della magnitudine assoluta in funzione del colore (tipo spettrale) ed al variare della classe di luminosità. Quindi a tutte le stelle che dallo spettro risultano avere un certo tipo spettrale e una data classe di luminosità, si può attribuire la magnitudine assoluta media M tipica di quel tipo spettrale e classe di luminosità. Con questo metodo si possono stimare distanze sino ai limiti della nostra Galassia ed oltre fino a 10^7 pc.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta, il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

La distanza degli oggetti celesti al di fuori della nostra Galassia viene stimata attraverso tecniche di misura "indirette". Queste tecniche si basano sulla identificazione di oggetti celesti che costituiscano degli "indicatori di distanza", cioè oggetti o classi di oggetti la cui luminosità intrinseca (e quindi magnitudine assoluta) è "costante" e "nota", i quali ci appaiono a luminosità (magnitudini) apparenti diverse solo perché si trovano a distanze diverse da noi.

Gli astronomi chiamano questi oggetti "candele standard". Il punto cruciale di tutte le tecniche basate sulle "candele standard" è che esse devono essere accuratamente calibrate, cioè la magnitudine assoluta dell'indicatore deve essere determinata con grande accuratezza prima che esso possa essere utilizzato per stimare la distanza di oggetti celesti più lontani. In astronomia la possibilità di spingersi a misurare distanze sempre più grandi e con accuratezze sempre maggiori è stata ed è indissolubilmente legata alla capacità di identificare indicatori di distanza (i) sempre più attendibili, e stabili (cioè con magnitudine assoluta costante), (ii) facilmente individuabili in sistemi stellari via via più lontani, perché intrinsecamente molto brillanti (ad esempio le Novae e le Supernovae) o con caratteristiche che li rendessero facilmente riconoscibili (la particolare forma della curva di luce nel caso delle variabili Cefeidi, RR Lyrae e Mira), e (iii) di essere in grado di fissarne in modo sempre più accurato la magnitudine assoluta. Il metodo degli "indicatori di distanza" è venuto evolvendo per passi successivi e parallelamente alla necessità di misurare distanze sempre più grandi. Il primo di questi passi è l'identificazione di oggetti di luminosità intrinseca costante e distanza nota (ad esempio attraverso la misura della parallasse) "all'interno della nostra Galassia", per poi andare a cercare questo stesso tipo di oggetti a distanze via via maggiori, in sistemi stellari sempre più lontani. Questo tipo di procedimento ha dato ottimi risultati fino a distanze dell'ordine dei 10^7 pc. Quando però ci si vuole spingere oltre, i singoli oggetti divengono troppo deboli per essere visti e riconosciuti, il passo successivo è allora quello di utilizzare come indicatori le "proprietà globali" di intere classi di oggetti (la luminosità integrata degli ammassi globulari, le classi di luminosità delle galassie spirali, l'esistenza della relazione colore-luminosità nelle galassie ellittiche). L'individuazione di questo secondo tipo di indicatori è in generale molto più difficile e controversa, e le distanze da essi stimate risultano inevitabilmente più incerte perché su di esse si propaga l'incertezza con cui è nota la distanza degli indicatori locali su cui vengono calibrati. Di conseguenza gli "indicatori di distanza" hanno un "rango" e una "bontà" diverse e vengono perciò suddivisi in indicatori "primari", "secondari" e "terziari". La Figura 2 mostra i più importanti metodi ed indicatori di distanza comunemente usati in astronomia e l'intervallo di distanze entro cui essi vengono impiegati.

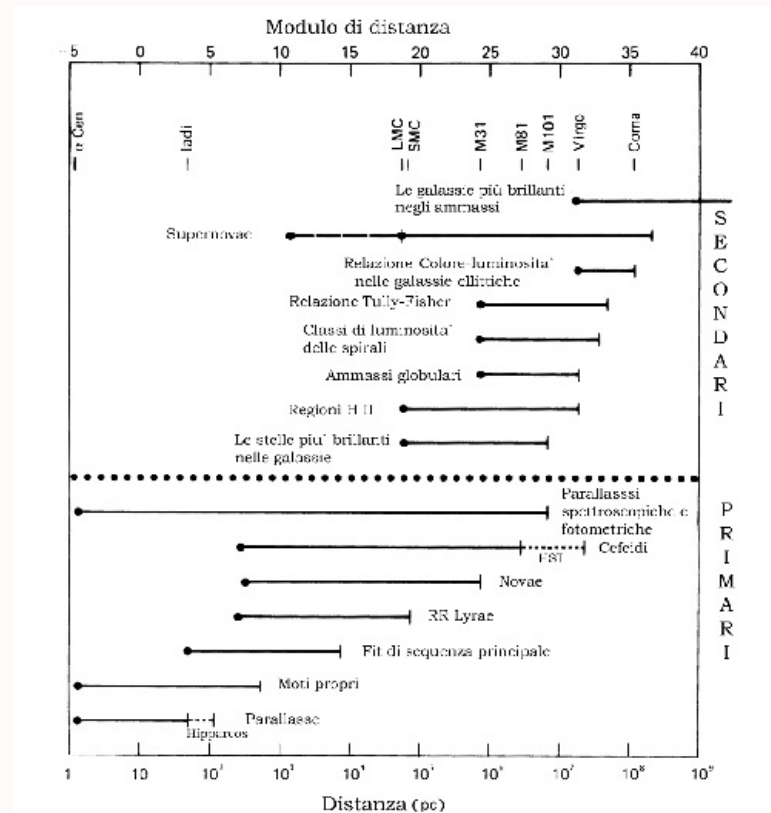


Figura 2. Scala delle distanze cosmologiche ed intervalli di applicabilità dei vari metodi di misura ed indicatori di distanza. Gli intervalli corrispondenti alla parallasse trigonometrica ed alle Cefeidi, sono stati estesi (porzioni tratteggiate) per includere i più recenti risultati ottenuti tramite il satellite astrometrico Hipparcos e il Telescopio Spaziale Hubble (HST).

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta, il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Vengono chiamati "primari" gli indicatori utilizzati per misurare la distanza di oggetti al di fuori della nostra Galassia, la cui magnitudine assoluta può essere fissata (ovvero che possono essere calibrati) attraverso l'osservazione di oggetti all'interno della nostra Galassia. I principali indicatori primari sono le variabili Cefeidi, le RR Lyrae, le Novae e le Supernovae, cui, in tempi più recenti, si sono aggiunte anche le Mira, le binarie ad eclissi, il "red clump", i modelli dinamici degli ammassi globulari, e così via. I metodi che si basano su questi indicatori possono essere definiti prevalentemente "osservativi", esiste tuttavia un secondo gruppo di metodi i quali hanno una connotazione più spiccatamente teorica. La teoria dell'evoluzione stellare consente infatti di seguire nel tempo l'evoluzione di una stella e predire quale sarà la sua luminosità in corrispondenza di ciascuna delle fasi evolutive indicate nel diagramma HR. Di queste fasi evolutive, quelle a luminosità costante possono essere usate per ottenere stime di distanza. Ad esempio fanno parte di questi approcci più "teorici" il metodo della "luminosità alla sommità del ramo gigante" e i metodi basati sui "modelli teorici di braccio orizzontale". I metodi "teorici", risentendo dell'incertezza ancora presente nella fisica di base dei modelli teorici, sono tuttavia da considerarsi globalmente più incerti.

◦ le Cefeidi

Le Cefeidi sono stelle giganti la cui luminosità varia con periodi tra 2 e 150 giorni. La variazione luminosa avviene con ampiezza dell'ordine delle due magnitudini, ed è prodotta da un periodico movimento di espansione e contrazione dell'involuppo stellare (pulsazione) che si ripete con regolarità da un ciclo all'altro. Scoperte agli inizi del 1900, circa una dozzina di Cefeidi sono visibili ad occhio nudo. Le Cefeidi sono oggetti brillanti, facilmente identificabili anche in sistemi stellari lontani grazie alla forte variazione della luminosità e alla particolare forma della curva di luce, ma ciò che le ha rese uno degli indicatori di distanza più importanti in astronomia è che la loro luminosità intrinseca aumenta con l'aumentare del periodo. Questa proprietà fondamentale è comunemente nota come relazione periodo-luminosità. Se dunque conosciamo la magnitudine assoluta di una qualunque Cefeide, ad esempio perché ne abbiamo misurato la parallasse trigonometrica, la relazione periodo-luminosità ci consentirà di risalire alla magnitudine assoluta e quindi alla distanza di qualsiasi altra Cefeide e dei sistemi stellari in cui le Cefeidi vengono osservate.

Hipparcos ha misurato la parallasse trigonometrica per un certo numero di Cefeidi galattiche consentendo così un'accurata calibrazione della relazione periodo-luminosità, che applicata alle Cefeidi osservate al telescopio spaziale Hubble nelle galassie esterne al Gruppo Locale ha consentito di stimare distanze fino a $3 \cdot 10^7$ pc.

◦ le RR Lyrae

Circa 3 o 4 magnitudini meno brillanti delle Cefeidi, le

RR Lyrae sono le variabili pulsanti più frequenti negli ammassi globulari e nell'alone della nostra Galassia. RR Lyrae sono state osservate in molte delle galassie del Gruppo Locale, la Grande Nube di Magellano in particolare, dove ne sono state identificate più di 9000. La variazione luminosa delle RR Lyrae avviene con ampiezze tra 0.5 e 1 magnitudine e con periodi da 0.3 a 1 giorno. La teoria dell'evoluzione stellare le descrive come stelle di circa una massa solare nella fase di bruciamento dell'elio nel nucleo stellare e dell'idrogeno in un sottile guscio intorno al nucleo.

In base alla loro luminosità media nel diagramma colore-magnitudine si posizionano in una regione a luminosità costante chiamata "braccio orizzontale". Il fatto di avere luminosità media pressoché costante le rende degli ottimi indicatori di distanza per gli oggetti stellari in cui vengono osservate, purché ne sia stata determinata la magnitudine assoluta. Le RR Lyrae sono troppo distanti per poterne misurare la parallasse trigonometrica, (Hipparcos è riuscito a misurare la parallasse trigonometrica con un errore inferiore al 10% per una sola RR Lyrae, la più vicina). I metodi più comunemente usati per stimare la magnitudine assoluta delle RR Lyrae sono le parallasse statistiche e il metodo della "brillanza superficiale" (metodo Baade-Wesselink).

- le Novae

Le Novae sono delle variabili esplosive che mostrano un improvviso enorme aumento della luminosità con crescite che possono anche superare le 12 magnitudini (un aumento in luminosità di circa 60.000 volte) ed avvengono su tempi scala molto corti (uno o due giorni), seguite da un declino molto lento che può durare anni. Sono piccole stelle nane meno massicce del Sole e molto probabilmente componenti di sistemi binari. Dopo l'esplosione la maggior parte delle Novae ritornano più o meno alla luminosità della fase pre-esplosiva, alcune danno luogo a più di un fenomeno esplosivo e, per questo, vengono chiamate "ricorrenti". Le luminosità raggiunte nella fase di massimo le collocano tra le stelle più luminose delle galassie, più brillanti delle Cefeidi e quindi potenziali indicatori di distanza per galassie ampiamente oltre il Gruppo Locale. Storicamente le Novae sono state i primi oggetti usati per stimare le distanze al di fuori della Galassia. La magnitudine assoluta raggiunta al massimo di luce dalle Novae può essere molto diversa da una variabile all'altra, ma è molto bene correlata alla rapidità con cui avviene il declino dopo il massimo di luce: le Novae che raggiungono le luminosità più elevate hanno un declino più rapido. La relazione luminosità-tempo di declino, una volta calibrata sulle Novae galattiche, può essere usata per ricavare le distanze di galassie esterne quali M81 ed M101 ed oltre fino a spingersi all'ammasso della Vergine.

- le Supernovae

Le Supernovae sono stelle molto più massicce del Sole che negli ultimi stadi della loro evoluzione raggiungono temperature centrali così alte da esplodere. Durante l'esplosione divengono milioni di volte più luminose del Sole ed espellono enormi quantità (1-2 masse solari) di materiale gassoso nello spazio circostante. Nei testi storici si trova menzione di almeno 6 o 7 esplosioni di Supernova avvenute all'interno della nostra Galassia negli ultimi duemila anni. L'esplosione di Supernovae avviene in tutti i tipi di galassie, le energie coinvolte e le luminosità raggiunte sono tali da rendere queste stelle visibili a grandissime distanze e quindi degli ottimi indicatori fino a distanze dell'ordine dei 10^8 pc. Uno dei metodi sviluppati più recentemente per determinare la distanza delle Supernovae si basa sulla misura dell'anello di espansione della Supernova. Questo metodo ha consentito una stima molto accurata della distanza della Supernova esplosa nel 1987 nella Grande Nube di Magellano, la galassia irregolare del Gruppo

- Locale a noi più vicina.
 - le Mira
- Le variabili di tipo Mira sono stelle giganti e supergiganti rosse che mostrano delle variazioni di luminosità dell'ordine delle 5 magnitudini, che si ripetono con abbastanza regolarità e con periodi tra tre mesi e due anni (comunemente 10 mesi). Mira, il prototipo di questa classe di variabili, è una stella di circa 10 masse solari, periodo 330 giorni, e temperatura superficiale di circa 2000-2600 K. Al pari delle Cefeidi anche le variabili Mira seguono una relazione periodo-luminosità che è stata calibrata per mezzo di alcune stelle Mira di cui Hipparcos ha misurato la parallasse trigonometrica.

La possibilità di impiegare gli indicatori primari nel misurare oggetti via via più lontani e l'accuratezza con cui consentono di stimare le distanze degli oggetti lontani sono cresciuti parallelamente al progredire delle capacità tecnologiche da un lato, (ad esempio l'Hubble Space Telescope ha consentito di rivelare le Cefeidi nelle galassie fino a distanze di 107 pc) e della precisione con cui si è in grado di misurare le distanze localmente, dall'altro. In questo ambito l'impatto di Hipparcos è stato enorme perché oltre alla maggiore accuratezza delle singole parallassi trigonometriche misurate ha consentito anche la ri-calibrazione di alcuni dei principali indicatori primari quali, ad esempio, la relazione periodo-luminosità delle variabili pulsanti, la parallasse statistica delle RR Lyrae, il fit di sequenza principale degli ammassi aperti e globulari, le parallassi spettroscopiche e fotometriche.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta, il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Chiamiamo "secondari" quegli indicatori che dipendono per la loro calibrazione dalla nostra conoscenza della distanza di alcune galassie vicine, misurate per mezzo degli indicatori "primari". Gli indicatori secondari divengono indispensabili quando si vuole andare a misurare la distanza delle galassie oltre il Gruppo Locale ed M81. Infine, vengono chiamati "terziari" gli indicatori la cui calibrazione dipende dalla nostra conoscenza della distanza delle galassie misurate tramite indicatori secondari.

Vengono utilizzati come indicatori "secondari":

- la luminosità delle stelle più brillanti delle galassie. L'osservazione delle stelle più brillanti nelle galassie del Gruppo Locale e nei gruppi di M81 ed M101 ha mostrato che le "stelle rosse più brillanti" hanno la stessa magnitudine assoluta visuale in tutte le galassie, aprendo così la possibilità di utilizzarle come indicatori di distanza;
- le più brillanti regioni di idrogeno ionizzato (HII) nelle galassie, sfruttando la correlazione esistente tra dimensioni angolari delle regioni HII e le classi di luminosità delle galassie;
- la funzione di luminosità degli ammassi globulari. La distribuzione in luminosità degli ammassi globulari è uguale in tutte le galassie ed è indipendente dalla luminosità della galassia in cui gli ammassi vengono osservati (galassia ospitante), con questo metodo si arriva a distanze di $10\text{-}20 \cdot 10^6$ pc;
- la relazione Tully-Fisher. In questo caso viene sfruttata la correlazione esistente tra l'intensità della riga a 21 cm emessa dall'atomo di idrogeno neutro e la magnitudine assoluta della galassia. Con questo metodo si arriva fino a distanze di $100 \cdot 10^6$ pc;
- la correlazione tra colore e luminosità nelle galassie ellittiche. Con questo metodo si arriva a stimare le distanze fino all'ammasso della Vergine (circa 10^7 pc).

Vengono classificati come indicatori "terziari":

- la classe di luminosità delle galassie spirali: la magnitudine assoluta delle galassie spirali di una data classe di luminosità è costante, questo metodo consentirebbe di stimare distanze dell'ordine dei $300 \cdot 10^6$ pc. C'è stata tuttavia molta discussione sulla sua attendibilità e negli ultimi anni si è giunti alla conclusione che la correlazione non sia così forte e che il metodo sia piuttosto approssimativo;
- la dimensione delle galassie e la sua correlazione con la luminosità e la classe di luminosità. Poiché la dimensione delle galassie è una quantità notevolmente difficile da stimare anche questo è un indicatore di distanza piuttosto rozzo.
- Infine, per spingere la nostra capacità di misurare alle distanze cosmologiche ($> 10^9$ pc) si usa come indicatore

di distanza la "luminosità totale delle galassie più brillanti" negli ammassi ricchi di galassie, nell'ipotesi che essa sia costante ed uguale in tutti gli ammassi. Questo metodo può essere calibrato osservando ammassi di galassie relativamente vicini (ad esempio l'ammasso della Vergine) la cui distanza a sua volta è stata stimata con più metodi diversi. Anche questa tecnica presenta però una serie di problemi, dei quali il primo è rappresentato dall'evoluzione delle galassie con il tempo; infatti, quando si va indietro a galassie estremamente distanti, esse sono viste ad età notevolmente più giovani delle galassie vicine e quindi le loro proprietà fisiche, luminosità in particolare, potrebbero essere molto diverse da quelle delle galassie "locali" che usiamo come calibratori. Un altro problema è rappresentato dalla tendenza delle galassie più luminose e massicce ad inghiottire le galassie vicine per effetto mareale.

Gli indicatori di distanza

Gisella Clementini

Introduzione

Spazio e tempo in astronomia

Cenni storici: le prime misure in astronomia

Le unità di misura: il chilometro non basta più

Alcuni concetti di base: la magnitudine apparente ed assoluta, il modulo di distanza

Le distanze all'interno della nostra Galassia

Oltre i confini della Galassia: gli indicatori di distanza

Gli indicatori primari: da 500 a $3 \cdot 10^7$ pc

Gli indicatori secondari e terziari: da $2 \cdot 10^5$ a 10^9 pc ed oltre

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

Le incertezze della scala delle distanze astronomiche

La grande Nube di Magellano, la galassia irregolare del Gruppo Locale a noi più vicina rappresenta una delle pietre miliari nella misura delle distanze astronomiche. La Figura 3 riassume le principali stime della distanza della Grande Nube ottenute recentemente tramite alcuni degli indicatori di distanza mostrati in Figura 2.

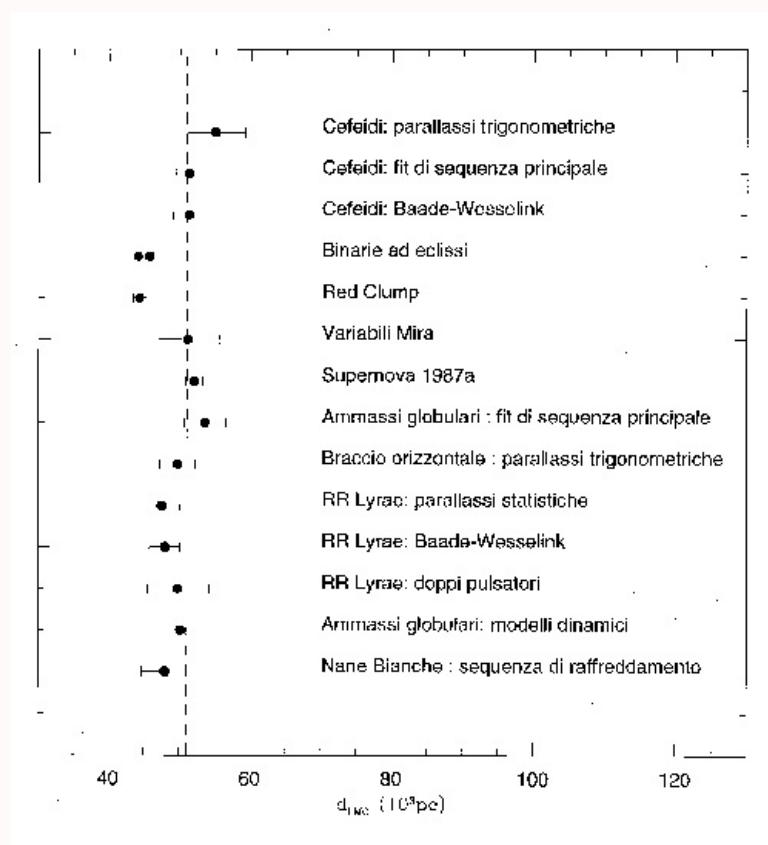


Figura 3. La distanza della Grande Nube di Magellano stimata attraverso alcuni degli indicatori di distanza mostrati in Figura 2. La linea tratteggiata individua il valore attualmente più accreditato per la distanza della Nube (51000 ± 1000 pc), su cui i più recenti studi mostrano che è possibile riconciliare la scala "corta" e la scala "lunga".

A seconda del metodo usato per misurarla la distanza della Nube varia da un valore minimo di 44.000 a un valore massimo di 55.000 pc, insomma come se a seconda del modo in cui la misuriamo (in passi, con un metro, in termini di distanza Bologna-Rimini) la distanza tra Bologna e Milano (200 km) possa essere 160 o 250 km!!!

I vari indicatori portano a due scale di distanza diverse, una scala "corta" in cui la distanza media della Grande Nube di

Magellano è circa 44.000 pc, ed una scala "lunga" in cui la Grande Nube si troverebbe a più di 51.000 pc da noi; la differenza tra le due scale corrisponde circa alla distanza tra il Sole ed il centro della Galassia e viaggiando alla velocità della luce impiegheremmo più di 23.000 anni per percorrerla.

Non è senza sgomento che per anni si è guardato a questa dicotomia ed alla indeterminatezza generale che essa provocava nella conoscenza delle distanze astronomiche. Infatti, se per oggetti così "vicini" l'indeterminatezza è tanto grande, quanto grande è l'incertezza sulle distanze degli oggetti più lontani? Ed è solo di recente e con enorme sollievo che sembra si sia trovata la via per riconciliare le varie stime di distanza della Grande Nube su un comune valore di 51.000 pc. D'altra parte il cammino dell'uomo attraverso il cosmo infinito procede per lenti passi successivi ed attraverso innumerevoli errori, ed è forse appena spuntata l'alba del giorno in cui guarderemo al problema della dicotomia tra scala "lunga" e scala "corta" con la stessa curiosità divertita con cui oggi guardiamo le prime stime della distanza delle Nubi di Magellano pubblicate da Hertzprung nel 1913, le quali ponevano queste galassie irregolari all'interno della nostra Galassia.

Nel concludere, infine, questo viaggio attraverso i metodi di misura delle distanze in astronomia, mi auguro di essere riuscita a dare, almeno in parte, la percezione del "Quanto grande" e del "Quanto lontano", affinché con ritrovato stupore si possa esclamare "Come è bello!".

Introduzione alla cosmologia

Alberto Cappi

Nell'Unità Originaria dell'Ente Primo risiede la Causa Secondaria di Tutte le Cose, e il Germe del loro Inevitabile Annichilamento. Edgar Allan Poe, Eureka (1848)

Introduzione

L'universo in espansione

Il Big Bang

L'inflazione dell'universo

Altri universi?

Lettere

Introduzione

La cosmologia, intesa come scienza che si propone di descrivere l'evoluzione dell'universo nella sua globalità, anche al di là di ciò che noi possiamo osservare, è nata nel XX secolo. Ciò è stato reso possibile dal progresso tecnologico che ha portato alla costruzione di grandi telescopi e di strumentazione sempre più sensibile, e dalle nuove, rivoluzionarie teorie che hanno dato origine alla fisica moderna, la meccanica quantistica e la teoria della relatività. Inoltre la cosmologia contemporanea ha visto una feconda interazione fra fisica delle particelle elementari e astronomia. Infatti, nelle prime fasi di vita dell'universo si sono verificati processi fisici ad energie talmente elevate da risultare inaccessibili a qualunque acceleratore di particelle, ma che hanno lasciato delle tracce osservabili sulle proprietà dell'universo attuale.

La cosmologia scientifica parte da una ipotesi fondamentale: si assume che le leggi della fisica siano valide ovunque, nello spazio e nel tempo. Naturalmente le teorie fisiche hanno limiti di validità, che per essere superati richiedono la costruzione di una teoria più generale; entro quei limiti, comunque, esse devono valere ovunque. L'idea che esistano leggi universali è alla base della scienza moderna e dei suoi successi (basti pensare all'idea di Newton che la mela che cade e la Luna che orbita intorno alla Terra sono fenomeni descritti da una stessa legge). Osserviamo ad esempio galassie lontane miliardi di anni-luce, e le vediamo dunque come erano miliardi di anni fa; eppure esse risultano obbedire alle stesse leggi fisiche che abbiamo scoperto e che valgono sulla Terra.

In questa breve presentazione sono riassunti i risultati della cosmologia classica e sono brevemente descritti gli sviluppi recenti e le prospettive future.

Introduzione alla cosmologia

Alberto Cappi

L'universo in espansione

Introduzione

L'universo in espansione

Il Big Bang

L'inflazione dell'universo

Altri universi?

Lettere

La forza che regola il moto dei corpi celesti è la gravità. Eppure essa è debolissima se paragonata alla forza elettromagnetica. Ad esempio, due elettroni posti ad una certa distanza esercitano una mutua forza repulsiva, dovuta alla loro identica carica, enormemente superiore alla loro attrazione gravitazionale. Però le cariche elettriche positive e negative, attraendosi, tendono a compensarsi, e per questo nell'universo stelle e pianeti sono elettricamente neutri, mentre la gravità, unicamente attrattiva, diviene la forza dominante e determina il moto dei corpi celesti. Per questo la legge della gravitazione universale di Newton, pubblicata nel 1687, offriva potenzialmente la possibilità di porre su basi scientifiche il problema della struttura dell'universo. Newton riteneva che lo spazio fosse popolato da una distribuzione infinita ed uniforme di stelle. Però in questo caso la sua legge di gravitazione non permette una descrizione matematica coerente. Inoltre, supponendo che un tale universo esista da sempre, si dovrebbe avere un cielo luminoso come la superficie del Sole (paradosso di Olbers).

A parte i problemi teorici, vi era poi il problema di misurare le distanze dei corpi celesti. Ancora agli inizi del XX secolo non era chiaro se le nebulose come quella di Andromeda facessero parte della nostra galassia o fossero lontani sistemi stellari, vale a dire altre galassie. L'astronomo americano Edwin Hubble riuscì a risolvere definitivamente il problema, identificando in Andromeda una particolare classe di stelle variabili, le Cefeidi, la cui luminosità intrinseca è legata al periodo di variazione della loro luce. Una volta che di un oggetto si conosca la luminosità intrinseca e si misuri la sua luminosità apparente, si è in grado di determinarne la distanza. Fu con questo metodo che Hubble dimostrò definitivamente che Andromeda è situata ben al di fuori della nostra galassia, e che l'universo è popolato di galassie.

La formulazione della relatività generale nel 1916 da parte di Einstein ha consentito invece una descrizione matematica coerente dell'universo. In questa teoria le proprietà dello spazio sono alterate dalla presenza dei campi gravitazionali, e la luce stessa ne viene deviata. Attraverso la soluzione delle equazioni della relatività generale, a partire da alcune ipotesi semplificatrici, si ottengono dei modelli matematici che descrivono la dinamica dell'universo. L'ipotesi più importante alla base dei modelli standard è che la distribuzione della materia sia omogenea, ovvero che, qualunque regione dell'universo si consideri, essa debba avere la stessa densità di stelle e galassie. Naturalmente basta dare uno sguardo al cielo per constatare che questo non è vero *localmente*, dato che le stelle sono concentrate nella Via Lattea. Gli astronomi hanno poi scoperto che le galassie si trovano in gruppi ed ammassi, e che vi sono strutture ancora più estese e grandi vuoti. È comunque ragionevole pensare che, considerando regioni di universo abbastanza grandi (attorno ai 300 milioni di anni-luce), l'universo sia davvero omogeneo (la conferma di questa ipotesi è data dall'isotropia della radiazione cosmica di fondo, che vedremo più avanti).

Fu proprio Einstein nel 1917 a proporre il primo modello cosmologico relativistico, in cui l'universo non ha limiti, ma ha un volume finito; il classico analogo bidimensionale è la superficie di una sfera, che ha un'area finita ma illimitata. Einstein riteneva che l'universo fosse statico, e per ottenere questo risultato introdusse la sua famosa costante cosmologica Λ . Ben presto risultò però evidente che l'universo di Einstein era instabile e che, con o senza costante cosmologica, l'universo deve o contrarsi o espandersi, come dimostrato dal russo Alexander Friedmann nel 1922, e successivamente dal belga George Lemaître.

Nei modelli standard senza costante cosmologica, la storia dell'universo è legata in modo semplice alla geometria dello spazio, e dipende dalla densità di materia ρ . Se la densità è molto elevata, superiore ad una soglia critica ρ_c , allora l'universo è destinato in futuro a rallentare e fermare la propria espansione, per poi collassare su se stesso; la geometria dello spazio è l'equivalente tridimensionale della geometria su una superficie sferica: il volume dell'universo è finito, ma non ha limiti, come nel caso dell'universo di Einstein. Di solito si usa il rapporto fra densità dell'universo e densità critica, $\Omega = \rho/\rho_c$; in questo caso Ω è maggiore di 1, e si parla di universo "chiuso". Se l'universo ha invece una densità inferiore alla densità critica (Ω è dunque inferiore a 1), allora, pur rallentando, è destinato ad espandersi per sempre, è infinito spazialmente ed ha una geometria iperbolica ("universo aperto"); infine, se l'universo ha esattamente la densità critica (Ω è uguale ad 1), allora esso è infinito e destinato ad espandersi per sempre, come nel caso precedente, ma in questo caso vale l'abituale geometria euclidea.

Occorre però precisare che se la costante cosmologica è diversa da zero, allora queste semplici relazioni fra geometria e destino dell'universo si complicano. Alcune osservazioni, come vedremo, suggeriscono la presenza di una costante cosmologica positiva, il che corrisponde, in termini newtoniani, ad una forza repulsiva: l'universo non starebbe dunque rallentando, ma accelerando.

Mentre i primi modelli cosmologici venivano prodotti in Europa da una ristretta cerchia di teorici in grado di maneggiare le equazioni della relatività, negli Stati Uniti gli astronomi Slipher e, successivamente, Humason e Hubble, ottenevano i primi spettri di galassie. Ricordiamo che lo spettro è una scomposizione della luce nelle sue varie lunghezze d'onda; la luce rossa corrisponde a lunghezze d'onda più grandi e la luce blu a lunghezze d'onda più piccole. Gli astronomi furono inizialmente sorpresi nel constatare che la lunghezza d'onda λ delle righe degli elementi identificati nelle galassie era sistematicamente superiore alla lunghezza d'onda λ_0 delle righe degli stessi elementi misurate in laboratorio. Tale spostamento verso lunghezze d'onda più grandi, dunque verso il colore rosso, è noto con il termine inglese di redshift, ed è definito quantitativamente nel modo seguente:

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

Uno spostamento delle righe indica un moto relativo della sorgente rispetto a noi, ed è noto come effetto Doppler. È stato scoperto nel secolo scorso per le onde sonore (è per questo effetto che il suono della sirena di un'ambulanza risulta più acuto quando si avvicina a noi e più grave quando si allontana). Lo spostamento verso lunghezze d'onda più grandi indica un moto di allontanamento e, in base all'effetto Doppler classico, una galassia con redshift z si allontana da noi con una velocità $v = c \times z$, dove c è la velocità della luce (circa 300.000 km/s).

Nel 1929, Hubble mostrò che la velocità di allontanamento V

delle galassie era proporzionale alla loro distanza D da noi:

$$V = H \times D$$

dove H è chiamata costante di Hubble (H è in realtà costante nello spazio, ma varia nel tempo).

L'interpretazione naturale della legge di Hubble è che l'universo intero sia in espansione, e che perciò ogni galassia si allontani dalle altre, in pieno accordo i modelli relativistici, anche se, a priori, avremmo potuto trovare l'universo in fase di collasso: in effetti, la cosmologia classica non ci dice perché l'universo si stia espandendo. L'interpretazione relativistica della legge di Hubble ci dice che è lo spazio stesso che si sta espandendo, ed è opportuno notare che la formula classica $v = c \times z$, ottenuta moltiplicando il redshift per la velocità della luce, è un'approssimazione, e non deve essere intesa come una velocità fisica della galassia: lo si vede dal fatto che quando il redshift di una galassia è superiore a 1 otterremmo una velocità superiore a quella della luce. Il redshift misura in realtà l'espansione dello spazio. Siccome la velocità della luce è finita, più gli oggetti sono lontani più li vediamo indietro nel tempo: ad esempio, una galassia con un redshift uguale a 1 ci appare com'era quando la scala dell'universo era la metà di quella attuale, e la densità media 8 volte superiore. Questo fatto può apparire come una complicazione, ma ci offre anche la possibilità di osservare l'evoluzione delle galassie.

Introduzione alla cosmologia

Alberto Cappi

Home

Introduzione

L'universo in espansione

Il Big Bang

L'inflazione dell'universo

Altri universi?

Lettere

Il Big Bang

L'istante iniziale

Se l'universo è in espansione, allora nel passato le galassie dovevano essere più vicine fra loro, e la densità più elevata. Andando indietro nel tempo, arriviamo a un'epoca in cui non potevano esistere le stelle, ma solo gli atomi, e prima solo i nuclei atomici, e così via fino ad arrivare alla remota epoca dei quark, le particelle elementari che costituiscono i protoni e i neutroni. Lemaître suggerì nel 1931 che l'universo fosse nato dalla frammentazione di "un atomo primordiale", un'idea che rappresenta il primo passo verso la teoria del Big Bang (anche se Edgar Allan Poe nel 1848 aveva avanzato un'ipotesi analoga in un contesto newtoniano nel suo affascinante poema in prosa *Eureka*). Andando a ritroso nel tempo, si dovrebbe comunque arrivare ad un istante iniziale in cui la densità era infinita.

I fisici Hawking e Penrose hanno dimostrato negli anni '70 che in relatività generale la singolarità iniziale, ovvero l'istante in cui la densità dell'universo era infinita, è inevitabile. Occorre però ricordare che questa è solo una estrapolazione dei modelli; la relatività generale non può più essere applicata nei primi istanti di vita dell'universo, quando tutto era concentrato su scale microscopiche, che sono descritte invece dalla meccanica quantistica. Purtroppo la meccanica quantistica non ha una formulazione compatibile con la relatività generale, e non può essere applicata all'universo. Per questo motivo è in corso già da molti anni un intenso lavoro teorico, su strade diverse, per unificare la meccanica quantistica e la relatività generale, e costruire una teoria quantistica della gravitazione, che sola potrebbe descrivere le prime fasi di vita dell'universo.

Le conferme

Big Bang, o "grande botto", è un termine che voleva essere spregiativo, coniato negli anni '50 da Fred Hoyle, il quale era scettico e filosoficamente ostile all'idea di un inizio dell'universo e aveva proposto insieme a Bondi e Gold una teoria alternativa, la teoria dello Stato Stazionario, in cui l'universo esiste da sempre ed è in continua espansione, ma vi è creazione continua di materia che mantiene la sua densità costante. Le osservazioni hanno mostrato che questa teoria non è corretta, e che l'universo nel passato era diverso da come è nel presente.

Vi sono diverse e convincenti conferme della validità della teoria del Big Bang. Vi è innanzitutto la sostanziale coincidenza fra l'età dell'universo che si può calcolare ripercorrendo all'indietro l'espansione dell'universo fino a quando tutto doveva essere concentrato in un punto, e l'età delle stelle più vecchie, attorno ai 15 miliardi di anni. A priori, le due età potrebbero essere totalmente diverse, e solo il Big Bang offre una spiegazione naturale di questa coincidenza. Si legge talvolta sui giornali di una crisi del Big Bang, dovuta al fatto che alcune stelle risulterebbero più vecchie dell'età attribuita all'universo; in realtà, incertezze sperimentali a parte, quelle misure possono escludere solo alcuni dei diversi modelli che si possono costruire a partire

dal Big Bang.

La natura cosmologica del redshift delle galassie è ormai ampiamente confermata, nonostante alcuni casi di oggetti apparentemente vicini con redshift molto diversi, studiati soprattutto dall'astronomo americano Halton Arp, che però possono essere interpretati come allineamenti casuali o anche come miraggi gravitazionali. Ad esempio, è possibile adesso misurare la distanza delle galassie indipendentemente dal redshift, e questa velocità è sempre in buon accordo con quella stimata dal redshift (tenendo conto naturalmente del fatto che una galassia, oltre a partecipare all'espansione dell'universo, ha anche una sua velocità, dovuta ad esempio all'attrazione gravitazionale di galassie vicine).

Un altro grande successo della teoria del Big Bang è la spiegazione della formazione e delle abbondanze degli elementi che osserviamo nell'universo. Andando indietro nel tempo, come si è detto, densità e temperatura dell'universo dovevano essere sempre più elevate. Attorno al primo secondo dopo il Big Bang, l'universo era composto da protoni, neutroni, elettroni, fotoni, e neutrini. Per qualche minuto, finché temperatura e densità furono abbastanza elevate, vi fu una serie di reazioni nucleari che portò alla formazione di nuclei di elio (due protoni e due neutroni legati dalle forze nucleari) e, in misura minore, di altri elementi leggeri. Le abbondanze osservate di questi elementi sono in accordo con quelle previste dalla teoria del Big Bang. Col procedere dell'espansione, e la diminuzione di densità e temperatura, la nucleosintesi primordiale si è arrestata, senza poter produrre gli elementi pesanti, che troviamo in abbondanza sulla Terra e che sono essenziali per la vita, come il carbonio, l'azoto o l'ossigeno. Ma questo non è un problema. Sappiamo infatti che a produrre gli elementi più pesanti è stata la fusione nucleare all'interno delle stelle. Le prime generazioni di stelle massicce, esplodendo, hanno diffuso nello spazio interstellare gli elementi pesanti da loro prodotti, elementi finiti nel gas che, per contrazione gravitazionale, ha dato origine ad altre stelle, come il nostro Sole.

Alcune centinaia di migliaia di anni dopo l'istante iniziale, vi fu la cosiddetta epoca della ricombinazione: la temperatura divenne sufficientemente bassa, attorno al migliaio di gradi, da permettere ad elettroni e protoni di legarsi stabilmente, formando atomi di idrogeno. Soltanto allora i fotoni poterono propagarsi liberamente nello spazio, e l'universo divenne "trasparente". Oggi continuiamo ad essere circondati da quei fotoni che, perdendo energia durante l'espansione, si trovano ora ad una temperatura di 2,73 gradi sopra lo zero assoluto, e costituiscono la cosiddetta radiazione cosmica di fondo. Questa radiazione fu scoperta casualmente nel 1965, e successive osservazioni in altre lunghezze d'onda hanno mostrato che essa ha le caratteristiche previste dalla teoria del Big Bang. In particolare ha la proprietà di essere isotropa, ovvero la sua temperatura è la stessa con una precisione elevatissima, qualunque sia la direzione nel cielo in cui viene misurata. Ciò conferma che l'universo su grandi scale deve essere omogeneo: infatti, se all'epoca della ricombinazione vi fossero state grosse fluttuazioni nella densità di materia, queste avrebbero dovuto causare delle grosse fluttuazioni nella temperatura della radiazione di fondo.

Formazione delle galassie e materia oscura

Abbiamo però visto che l'universo locale non è omogeneo, e negli ultimi venti anni sono state osservate strutture complesse, grandi vuoti, filamenti e "muraglie" di galassie, su scale di 100 milioni di anni-luce. Per spiegare la formazione di queste strutture occorre che, all'epoca della ricombinazione, vi fossero piccole fluttuazioni di densità nel gas primordiale costituito essenzialmente da atomi di idrogeno e di elio. Le zone in cui la densità era un po' più alta tendevano ad esercitare un'attrazione gravitazionale

superiore, e sono divenute progressivamente più massicce, sino a formare stelle e galassie, nel corso di un processo durato alcune centinaia di milioni di anni. Ci si aspetta pertanto che la radiazione cosmica di fondo non sia perfettamente isotropa, ma conservi la traccia della formazione delle prime strutture sotto forma di piccole fluttuazioni di temperatura, che sono però molto difficili da misurare, e sono state rivelate soltanto nel 1992 da un satellite della NASA. Questo ha rappresentato un ulteriore, importante conferma della teoria del Big Bang, ma non risolve definitivamente il problema della formazione delle galassie.

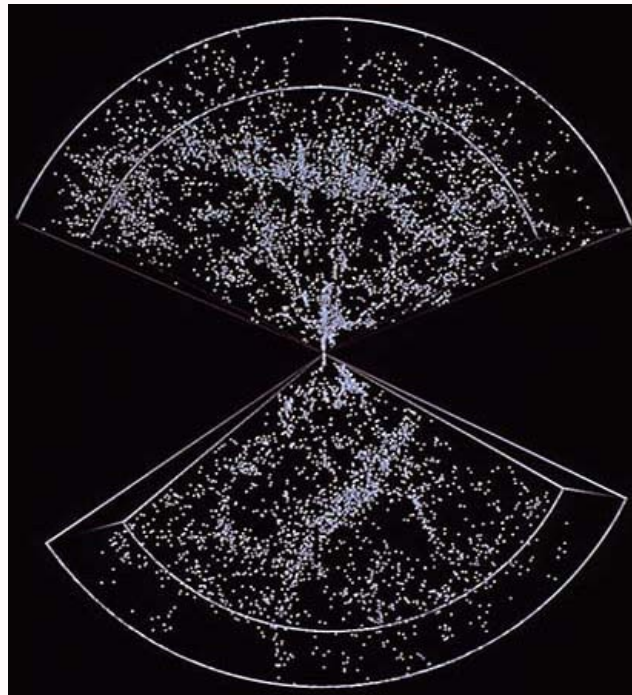


Figura 1. Una mappa dell'universo vicino. Ogni punto rappresenta una galassia, e la sua distanza è stata ottenuta misurandone il redshift. È evidente che la distribuzione delle galassie non è uniforme, e che esistono strutture molto estese. Uno dei problemi principali della cosmologia è quello di spiegare la formazione di queste strutture. (mappa di da Costa et al. 1994)

Infatti, le fluttuazioni sono così piccole, con variazioni di appena un centomillesimo rispetto alla temperatura media, che, anche in 15 miliardi di anni, appare impossibile formare le galassie e le strutture che si osservano oggi con la sola materia che conosciamo. Si è dunque ipotizzata l'esistenza di un altro tipo di materia che avrebbe potuto condensarsi più rapidamente senza provocare variazioni nella temperatura della radiazione cosmica di fondo. In questo modo le condensazioni di materia all'epoca della ricombinazione sarebbero state più importanti, e avrebbero attratto più materia in minor tempo, permettendo la formazione delle strutture attuali. L'idea non è un puro parto della fantasia, ma deriva sia dalle osservazioni che dagli sviluppi della fisica delle particelle.

In effetti, nell'universo vi è una gran quantità di materia che noi non vediamo, materia oscura, ma che possiamo rivelare studiando il moto delle stelle e del gas nelle galassie, o delle galassie stesse negli ammassi. Si stima che nelle galassie vi sia 10 volte più massa di quella che noi possiamo osservare sotto forma luminosa. Negli ammassi di galassie si misura addirittura una massa 100 volte superiore a quella visibile sotto forma di galassie. In tutti i casi, appare difficile che la materia oscura sia tutta sotto forme a noi note, come stelle poco massicce o buchi neri, perché le nostre conoscenze sulla nucleosintesi primordiale pongono dei limiti superiori alla quantità di protoni e neutroni che possono essersi

formati. I neutrini sono un candidato possibile per la materia oscura, ed in effetti recenti esperimenti mostrano che sono dotati di massa, ma questa è troppo piccola per dare un contributo cosmologico dominante, e in più le simulazioni effettuate al computer hanno mostrato che anche con i neutrini non si riescono a riprodurre le caratteristiche delle strutture osservate. È possibile invece che esistano particelle più massicce, suggerite dalle teorie di grande unificazione della fisica. I candidati sono tanti, ma l'esistenza di almeno una di queste particelle è ancora da dimostrare.

L'esistenza di materia oscura ha ovvie ripercussioni sul problema che riguarda la geometria e il destino dell'universo. Infatti, come abbiamo visto, quanto più alta è la densità di materia dell'universo, tanto più l'attrazione gravitazionale è forte e rallenta l'espansione. Anche considerando il contributo della materia oscura nelle galassie e negli ammassi di galassie, si arriva soltanto a circa un quarto della densità necessaria per chiudere l'universo. Se però la materia oscura fosse distribuita in modo diverso da quella luminosa, allora sarebbe possibile in linea di principio arrivare alla densità critica e, superandola anche di poco, a chiudere l'universo e a provocarne il collasso in un lontanissimo futuro.

Un modo alternativo per capire quanta materia c'è nell'universo è quello di misurare direttamente la variazione della velocità di espansione. Ci aspettiamo in fatti che, quanta più materia c'è, tanto più l'espansione sia rallentata. Si tratta di una misura molto ardua da effettuare, e finora nessuno è riuscito ad ottenere dei risultati convincenti. Occorre avere una classe di oggetti di cui sia nota la luminosità intrinseca, e misurarne la luminosità apparente, in modo da poterne dedurre la distanza, così come aveva fatto Hubble con le Cefeidi. Il problema è che per distinguere fra i vari modelli occorre spingersi a redshift elevati, almeno attorno all'unità, ed occorrono dunque oggetti molto luminosi; per questo non si possono usare le Cefeidi, ma fortunatamente vi è un particolare tipo di supernovae (stelle che esplodono) di cui si può stimare la luminosità intrinseca in maniera sufficientemente precisa e che può essere osservato anche ad alto redshift. I risultati preliminari di due gruppi di ricerca che osservano supernovae lontane indicano sorprendentemente che l'universo non sta rallentando, ma accelerando. Questo fatto può essere spiegato dalla presenza di una costante cosmologica positiva, che in effetti agisce come una forza repulsiva. In questo caso, l'età dell'universo sarebbe più grande di quella stimata finora, risolvendo ogni eventuale contraddizione con l'età delle stelle più vecchie. Inoltre le proprietà della distribuzione delle galassie sono meglio descritte proprio da quei modelli che includono la costante cosmologica.

Nella fisica moderna, la costante cosmologica viene interpretata come una manifestazione dell'energia del vuoto. Infatti, il vuoto nella fisica quantistica non è il "nulla"; ha proprietà ben precise ed è popolato da particelle "virtuali". Se i risultati delle osservazioni verranno confermati, la costante cosmologica dominerebbe l'energia dell'universo. La maggior parte dell'energia rimanente sarebbe dovuta alla componente oscura, mentre la materia visibile costituirebbe solo una frazione trascurabile. Paradossalmente, il valore osservato della costante cosmologica è piccolo rispetto al numero enorme predetto dalla fisica delle particelle. Dunque vi è ancora molto lavoro da fare sia dal punto di vista sperimentale che teorico per comprendere la natura di ciò che contribuisce all'energia dell'universo.

Introduzione alla cosmologia

Alberto Cappi

Home

Introduzione

L'universo in espansione

Il Big Bang

L'inflazione dell'universo

Altri universi?

Letture

L'inflazione dell'universo

La teoria del Big Bang ha avuto molti successi. Essa non rappresenta però la teoria finale, poiché lascia senza risposta un certo numero di interrogativi, legati sostanzialmente al fatto che assume come condizioni iniziali alcune importanti e specifiche proprietà del nostro universo.

In primo luogo, la cosmologia classica assume come condizione iniziale la presenza di fluttuazioni di densità in un universo che viene peraltro considerato omogeneo, e non dice che cosa ha generato quelle fluttuazioni.

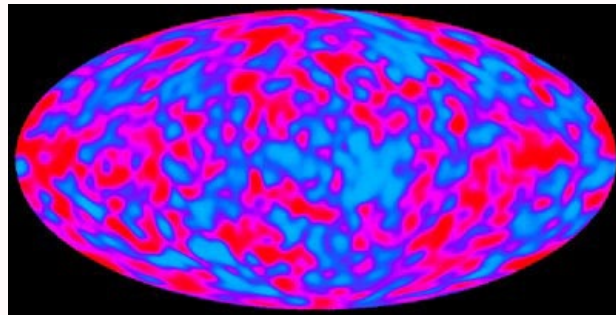


Figura 2. Mappa del cielo che mostra le piccole variazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo, misurate per la prima volta da un satellite della NASA, COBE, nel 1992. Queste variazioni sono la traccia fossile delle fluttuazioni di densità esistenti quando l'universo aveva poche centinaia di migliaia di anni, che hanno poi portato alla formazione delle galassie.

Vi è poi il cosiddetto problema dell'orizzonte: la radiazione di fondo proveniente da direzioni opposte del cielo ha avuto origine da regioni dell'universo che fin dall'inizio sono sempre state separate. Allora perché hanno la stessa temperatura?

Un ulteriore problema è quello della "piattezza"

dell'universo: il rapporto Ω fra densità dell'universo e densità critica risulta maggiore di 0,1 e non può essere sicuramente di molto superiore all'unità. Il problema è che varia nel tempo, e se oggi differisce da 1 anche per un fattore 10, nel passato Ω doveva valere 1 con una precisione straordinaria. Questo spiega il pregiudizio di gran parte dei teorici a favore di un universo che abbia esattamente la densità critica, e la cui geometria è quella euclidea (universo piatto): in tal caso Ω rimane uguale a 1 a tutte le epoche. Ma perché il valore di Ω dovrebbe proprio essere quasi uguale, se non uguale ad 1?

Infine, la fisica delle particelle elementari prevede che nelle prime fasi di vita dell'universo si sia formato un numero enorme di monopoli magnetici, che dovrebbe dominare la

densità dell'universo, in completo contrasto con le osservazioni e col fatto che non è mai stato rivelato sperimentalmente nessun monopolio magnetico.

L'idea che ci porta oltre la teoria standard del Big Bang e che permette di risolvere in un sol colpo tutti questi problemi è quella dell'inflazione. Supponiamo che, nelle sue prime fasi di vita, l'universo abbia attraversato una fase di espansione rapidissima, esponenziale. In tal caso, una piccola regione di spazio si sarebbe potuta gonfiare enormemente, fino ad assumere quelle dimensioni che oggi ha il nostro universo. Le diverse regioni dell'universo osservabile sarebbero state in contatto nel passato, e questo spiegherebbe l'alto grado di isotropia della radiazione cosmica di fondo. Inoltre, l'espansione rapidissima avrebbe reso piatta la geometria dell'Universo (la superficie di un pallone ci appare evidentemente curva, ma se gonfiamo questo pallone fino alle dimensioni della Terra, la sua curvatura diventa meno percepibile, e non è un caso che l'umanità per lungo tempo abbia creduto la Terra piatta). Infine, i monopoli magnetici, per quanto numerosi, sarebbero stati enormemente diluiti, a tal punto che nell'intero universo oggi osservabile non dobbiamo aspettarci di osservarne. Al contrario, la materia che è oggi presente nell'universo si sarebbe formata dopo la fine di questa espansione esponenziale, e per questo motivo non sarebbe stata diluita come i monopoli.

Questo quadro generale ha una sua giustificazione fisica nelle moderne teorie di Grande Unificazione, ma occorre sottolineare che non ne discende necessariamente. Inoltre sono stati prodotti diversi scenari nel quadro dell'inflazione, e ognuno di questi ha i suoi problemi. Infine, non vi è sostanzialmente la possibilità di serie verifiche osservative (anche se l'andamento delle fluttuazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo è consistente con quanto predetto dall'inflazione). L'idea di un'espansione esponenziale dell'universo è comunque finora l'unica che possa risolvere i problemi precedentemente elencati, ed è convinzione diffusa fra i cosmologi che possa essere sostanzialmente corretta, anche se le sue cause fisiche potrebbero rivelarsi diverse da quelle oggi più accreditate.

Introduzione alla cosmologia

Alberto Cappi

Altri universi?

Introduzione

L'universo in espansione

Il Big Bang

L'inflazione dell'universo

Altri universi?

Lecture

Secondo il principio copernicano, noi non siamo osservatori privilegiati nell'universo. Al tempo stesso, non ci troviamo in un posto qualunque, ma attorno ad una stella di tipo G vecchia di alcuni miliardi di anni, su un pianeta con l'acqua nelle tre fasi, solida, liquida e gassosa, e potremmo aggiungere molte altre proprietà che, si ritiene, siano essenziali allo sviluppo della vita che conosciamo. Considerazioni di questo tipo hanno portato ad enunciare il cosiddetto principio antropico debole: i valori di tutte le quantità fisiche e cosmologiche non sono ugualmente probabili, ma sono vincolati dal fatto che devono esistere luoghi in cui la vita basata sul carbonio ha potuto evolvere e che l'universo deve essere abbastanza vecchio da aver permesso questa evoluzione. In questa sua forma, essenzialmente non controversa, esso permette di giustificare alcune coincidenze numeriche che sembrerebbero altrimenti sorprendenti, e notate a suo tempo dal fisico Dirac.

Taluni però si sono spinti più in là, dando una formulazione forte del principio antropico: l'universo deve avere quelle proprietà che consentono lo sviluppo della vita intelligente in qualche momento della sua storia. In effetti, le costanti fondamentali della fisica hanno valori che, se cambiati anche di poco, non darebbero luogo alle condizioni necessarie per la nascita della vita. In quest'ottica, escludendo la visione finalistica, che chiuderebbe per definizione ogni discussione, vi è un'ipotesi abbastanza popolare attualmente fra i cosmologi, quella dell'esistenza di un insieme di universi, in cui le costanti della fisica assumerebbero valori diversi. Una tale ipotesi potrebbe essere inquadrata nello scenario di universo caotico inflazionistico proposto dal fisico russo Andrei Linde, dove il nostro universo è una "bolla" fra tante altre. Secondo questa versione del principio antropico, il nostro non sarebbe altro che uno fra gli universi possibili, e magari di tipo rarissimo. Perciò noi non dobbiamo stupirci che il nostro universo abbia proprietà apparentemente mirate alla nostra esistenza: gli altri universi che non hanno queste proprietà non potranno mai essere osservati da nessuno.

Si può constatare in queste speculazioni un cambiamento di attitudine filosofica. In effetti, all'epoca della cosmologia classica e del dibattito fra teoria dello stato stazionario e Big Bang, la convinzione dei cosmologi era che con la teoria della relatività generale si potesse arrivare ad una descrizione dell'universo nella sua totalità. Ora però, nel corso di un processo che è già avvenuto in passato, ad esempio quando si è scoperto che la nostra galassia non rappresentava l'intero universo ma che certe nebulose erano altre galassie (non a caso battezzate per un certo periodo universi-isola), si affaccia l'ipotesi dell'esistenza di altri universi, con proprietà differenti dal nostro. Ciò significa, allora, che nella cosmologia scientifica chiamiamo universo qualcosa che non è la totalità di ciò che esiste (lasciando poi da parte ogni riferimento alla coscienza e al problema della mente, che andrebbe incluso in una spiegazione

dell'universo in senso filosofico).

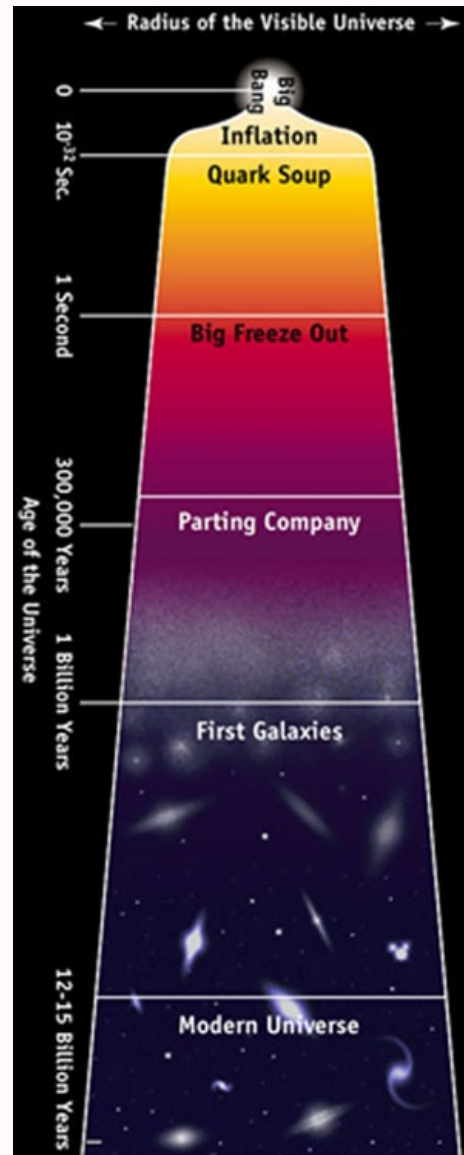


Figura 3. Grafico riassuntivo dell'evoluzione dell'universo, dove viene rappresentata la variazione delle dimensioni dell'universo in funzione del tempo, e sono segnati gli eventi principali della storia del cosmo.

Al di là di questi discorsi affascinanti ma altamente ipotetici, è chiaro che la cosmologia del XXI secolo è destinata a nuovi progressi, per gli stessi motivi che hanno determinato i successi della cosmologia del XX secolo, ovvero da un lato la costruzione di nuova strumentazione e di grandi telescopi (probabilmente ne verrà lanciato uno nello spazio con un diametro fra i 6 e i 10 metri), dall'altro gli sviluppi della fisica teorica che, se coronati da successo, ci consentiranno di rispondere a molti interrogativi oggi senza risposta.

Introduzione alla cosmologia

Alberto Cappi

	Lettere
Introduzione	J.D. Barrow, <i>Teorie del tutto. La ricerca della spiegazione ultima</i> , Adelphi, 1992;
L'universo in espansione	S. Hawking, <i>Dal Big Bang ai Buchi Neri</i> , Rizzoli, Milano, 1988;
Il Big Bang	M. Rees, <i>Prima dell'inizio. Il nostro Universo e gli altri</i> , Raffaello Cortina Editore, Milano, 1998;
L'inflazione dell'universo	H. Reeves, <i>Dernières nouvelles du cosmos</i> , Éditions du Seuil, Paris, 1994;
Altri universi?	H. Reeves, <i>La première seconde</i> , Éditions du Seuil, Paris, 1995;
Lettere	H. Reeves, <i>L'evoluzione cosmica. La storia della natura dalla origini ad oggi</i> , Rizzoli, Milano, 1993;
	L. Smolin, <i>La vita del cosmo</i> , Einaudi, Torino, 1998;
	S. Weinberg, <i>I primi tre minuti</i> , Mondadori, Milano, 1986.

Esperienze didattiche

Angela Turricchia

Introduzione

Introduzione

Queste pagine vogliono presentare alcuni spunti didattici utilizzabili nelle classi e che sono frutto di un'esperienza di lavoro di diversi anni come insegnante dell'Aula Didattica Planetario del Comune di Bologna.

Suggerimenti didattici

Conclusioni

Le esperienze presentate devono essere modificate e adattate a seconda delle singole realtà didattiche e, soprattutto, a seconda dei diversi livelli di apprendimento degli studenti, ma su questo non c'è dubbio che, proprio tenendo conto delle singole competenze, gli insegnanti sanno eseguire le opportune correzioni e modifiche.

Testi introduttivi e divulgativi

Lecture per la scuola dell'obbligo

Lecture

L'astronomia in quanto materia autonoma non è presente in alcun ordine di scuola, lo svolgimento di temi legati ad essa è invece argomento per tutti i gradi scolastici, dalle elementari alle superiori. Nessuno di noi adulti ha più l'abitudine, e nemmeno la necessità, di osservare il cielo per orientarsi, per dedurre la possibilità che alcuni fenomeni hanno di ripetersi; è molto più semplice guardare la televisione o comunque aspettare che qualcuno ci informi dell'accadere di un dato evento; la stessa cosa accade ai ragazzini in età scolare che non osservano nemmeno il moto dei due corpi più evidenti per noi, cioè il Sole e la Luna. Questi due corpi sono facilmente osservabili, fanno parte della nostra vita quotidiana, scandiscono e hanno sempre scandito il trascorrere del tempo e degli eventi e, da un punto di vista storico, costituiscono un ottimo elemento di confronto fra le conoscenze antiche e quelle attuali e anche un tentativo di appropriarsi del "metodo scientifico" attraverso un argomento, l'astronomia, che tanto affascina i bambini.

Esperienze didattiche

Angela Turricchia

Suggerimenti didattici	
Introduzione	
Suggerimenti didattici	
Orientamento	
Distanze, dimensioni e riproduzioni in scala	
Dimensioni del Sole	
Le macchie solari	
I fusi orari	
La Luna e le sue fasi	
Le stagioni	
Conclusioni	
Testi introduttivi e divulgativi	
Letture per la scuola dell'obbligo	
Letture	• Uno dei temi fondamentali, soprattutto nelle scuole elementari, ma che viene riproposto in tutti i livelli scolastici, è l'orientamento. Molto spesso si usa il metodo di introdurre i punti cardinali attraverso lo studio dell'ombra di un bastone dopo aver osservato il moto apparente diurno del Sole. In realtà in questa operazione si dà per scontato che il bambino sappia già che il Sole sembra percorrere cammini diversi in giornate diverse; poche volte, prima di questa esperienza, viene fatto osservare ai ragazzi il fatto che il Sole non ci sembra sorgere dallo stesso punto sull'orizzonte durante l'anno. Questo è confermato dal fatto che molti ragazzi, almeno tra quelli a cui ho posto la domanda (212 bambini di terza elementare durante l'anno scolastico 98-99 e che quindi frequentano il Planetario), non sembrano notare una variazione dell'altezza del Sole sull'orizzonte durante un anno: questo dato mi sembra significativo in quanto ci ricorda la "non osservazione" o comunque la scarsa osservazione di uno dei più semplici fenomeni naturali. Credo sia quindi importante far prima un lavoro di osservazione del Sole in giornate diverse, ma alla stessa ora e solo successivamente introdurre l'osservazione del Sole durante le ore attorno al mezzogiorno per portare i bambini alla determinazione della linea meridiana. Lo gnomone usato ha le forme più diverse: da un semplice bastone, a un bastone appuntito o ancora meglio un bastone con all'estremità una barretta metallica con un foro; in quest'ultimo caso l'immagine luminosa del foro ci permette di studiare il moto apparente del Sole tentando di eliminare, il più possibile, gli effetti di diffrazione. Riprodurre in una scuola media o in una scuola superiore il percorso con lo gnomone è, a mio avviso, discutibile e forse poco produttivo: i ragazzi si stancano e si annoiano di situazioni già viste. Ritengo però questo un concetto importante e la sua riproposizione in modi diversi può costituire un momento di consolidamento di informazioni già acquisite. È estremamente utile a questo proposito utilizzare meridiane ed orologi solari che siano presenti sul territorio; nel caso di Bologna: la meridiana di San Petronio, le corti del quartiere Savena, la meridiana posta sul muro di una casa di via San Vitale, in modo da spingere i ragazzi ad osservare, utilizzando, e quindi appropriandosi, di uno degli elementi fondamentali del metodo scientifico: l'osservazione. • Proprio per questo l'osservazione del moto apparente del Sole nell'arco di un giorno, ma poi anche nell'arco dell'anno, può essere svolta nel seguente modo senza dover per forza ricorrere ad uno strumento e a un metodo già usato come quello della meridiana. Basta avere a disposizione una scatola da scarpe o

ancora meglio una scatola di compensato, internamente scura e opaca e perfettamente chiusa. Su una parete interna della scatola si appoggia un foglio di carta fotosensibile (ovviamente l'operazione di sistemazione della carta fotosensibile va fatta al buio), sulla parete opposta si è fatto un forellino senza sbavature di tre-quattro millimetri. Si cerca una finestra con davanzale esposto a Sud, si traccia sul davanzale il contorno della scatola in modo da poterla spostare mantenendo la stessa posizione e si espone la scatola al Sole una volta ogni ora (il periodo può essere scelto dai ragazzi) per circa tre, quattro minuti (il foro va scoperto dopo che la scatola è stata messa in posizione e coperto prima di spostarla).

La luce Sole, entrando attraverso il foro, lascerà una traccia sulla carta sensibile sul fondo della scatola. Alla fine della giornata potremo, al buio, levare la carta e farla sviluppare (basta metterla nel fissaggio senza fare tutte le operazioni di stampa di una fotografia). Avremo tutta una serie di grossi punti che rappresentano il moto del Sole nella giornata considerata; i punti possono essere uniti fino ad ottenere una curva.

L'esperimento può essere ripetuto in periodi diversi dell'anno, ma per fare questo avremo bisogno di poter riprodurre con estrema facilità la posizione della scatola altrimenti diventa complicata la riproduzione dell'esperienza stessa e il confronto dei dati. Si può così misurare il "cammino" del Sole durante un'ora direttamente misurando la distanza fra due macchie successive lasciate dal Sole sulla carta in due misurazioni successive.

Lo strumento, invece di essere posto su un davanzale, può essere posizionato su un piedistallo inclinato in modo da tener conto della latitudine geografica del luogo, in modo tale cioè che l'asse dello strumento punti verso la Polare. Ripetendo l'esperienza in periodi diversi dell'anno (fine settembre, gennaio, marzo, fine maggio) otterremo una serie di punti che danno origine a curve che risultano essere diverse. Questo serve a ribadire il concetto che il Sole non si trova sempre alla stessa altezza sull'orizzonte nell'arco dell'anno.

A questo punto si può procedere con la costruzione di una meridiana, di un orologio solare, di un quadrante, che permetta l'applicazione di alcuni concetti già acquisiti. Chiaramente queste ultime fasi sono più semplicemente fattibili con ragazzi delle scuole medie e medie superiori, dove diventa argomento fondamentale nei corsi di geografia astronomica il concetto di tempo. Per un ragazzo di scuola elementare, e per alcuni versi anche di scuola media, è fondamentale il concetto di mezzogiorno locale per permettergli di affrontare un discorso sulle convenzioni mentre quando parliamo a ragazzi delle superiori diventano importanti altri concetti, ammesso che i primi siano già stati acquisiti.

- Per i ragazzi delle superiori può essere interessante invece costruire un sestante e procedere a una misurazione che tenga conto degli errori di misura. Una esperienza di questo tipo è stata presentata alla mostra "Quando il Sole si nasconde" dagli insegnanti E. Baiada e M. Baldazzi eseguita con due prime classi dell'ITIS Belluzzi di Bologna durante le ore del laboratorio di Fisica (attualmente una scelta dei lavori della mostra è visibile in <http://www.pd.astro.it/solescuro>). In questa esperienza la fantasia e la creatività dei ragazzi si è sbizzarrita nella costruzione di strumenti eseguiti con materiali molto diversi. In questa situazione, in cui gli insegnanti sono docenti di fisica, "scopo dell'esperienza è quello di approfondire i concetti di teoria della misura; ha però il difetto di essere molto lunga. Questo è uno svantaggio perché spesso i ragazzi perdono spinta quando un lavoro si protrae troppo, ma è anche un pregio perché dà l'idea di un lavoro vero, che non può esaurirsi, come le esperienze didattiche, nello spazio dei 100 minuti di laboratorio".
- Allo scopo di invitare i ragazzi all'osservazione del cielo,

anche notturno, occorre che sappiano riconoscere i gruppi di stelle più importanti per l'orientamento, in particolare Carro Grande, Cassiopea e quindi la Polare. Può quindi essere utile l'utilizzo di un semplice strumento costituito di due cerchi, uno più grande dell'altro. Nel più piccolo vengono disegnati i gruppi di stelle detti prima; il secondo invece viene diviso in 24 spicchi su cui, in verso antiorario, vengono scritte le ore del giorno. Montati uno sovrapposto all'altro e fermati da un'asola metallica attraverso la quale guardare la Polare, possono ruotare l'uno sull'altro, permettendo di osservare, al trascorrere delle ore, il moto apparente del cielo. È in pratica una semplificazione del notturnale che è però di più semplice lettura per i bambini, anche perché sono presenti poche costellazioni e quindi più facilmente identificabili nel cielo. Lo stesso strumento può poi anche essere utilizzato per l'orientamento perché, tralasciando la Polare dal foro, permette di individuare il Polo Nord celeste e quindi, abbassando una perpendicolare sull'orizzonte, il punto cardinale Nord.

Distanze, dimensioni e riproduzioni in scala

- Quando parliamo di sistema solare, solo per citare gli oggetti più vicini alla Terra, molto difficilmente riusciamo a capire e quindi a far capire le distanze "reali" che esistono tra i vari corpi, i numeri hanno "troppi zeri", sono cioè troppo grandi per poter essere visualizzati. Inoltre tutte le volte che gli studenti utilizzano una carta geografica, sono abituati a lavorare con delle riproduzioni in scala; l'estensione di questo concetto anche a distanze astronomiche è per loro quasi immediato. Proprio per questo ritengo importante tentare di dare almeno un'idea di questi valori in modo che i ragazzi capiscano che le riproduzioni che loro vedono di questi oggetti sui libri non sono in scala e inoltre che le dimensioni della Terra rispetto a quelle di altri corpi celesti sono trascurabili. Una delle prime rappresentazioni che si può fare e che bene si presta a far comprendere le dimensioni relative dei corpi celesti è di fare una riproduzione del sistema Sole-Terra-Luna.

Nome	Diametro in centimetri	Distanza in metri dal Sole
Sole	140	
Terra	1.3	150
Luna	0.3	0.40

Tabella 1.

Ritengo questo lavoro particolarmente adatto per ragazzini dell'ultimo ciclo delle elementari, soprattutto in questo periodo in cui abbiamo assistito da poco all'eclisse solare, anche perché permette un avvicinamento al discorso delle distanze astronomiche. Nelle ultime classi elementari è già stata fatta la riduzione in scala e quindi i ragazzi dovrebbero essere in grado di ricostruirselo con abbastanza chiarezza (la scala proposta è di 1 a 1 miliardo).

- Il passaggio successivo della riproduzione in scala di tutto il sistema solare ci fa cambiare le dimensioni sia dello spazio necessario per costruirlo che della scala; sarebbe pertanto utile che i ragazzi eseguissero loro stessi la riduzione e proprio in questo caso devono sapere già eseguire le proporzioni, strumento enormemente utilizzato nella scuola media inferiore.

Nel caso invece siano ragazzi di scuola elementare, tranne alcune eccezioni, si possono dare i calcoli già eseguiti e limitarsi ad una rappresentazione. In questo caso l'importanza dell'attività è legata al fatto che ciò che si costruisce, che si riproduce, tende a essere ricordato: la ricostruzione è quindi un momento di consolidamento delle conoscenze acquisite. In genere la scala che suggerisco è di 1 a dieci miliardi: questo permette di "vedere" i diversi corpi, e contemporaneamente di vedere la distanza complessiva che è di circa seicento metri; una scala maggiore fa perdere il concetto di "insieme" rendendo però più visibili le dimensioni dei pianeti, una minore permette di vedere meglio l'insieme, ma non rende apprezzabile la grandezza delle dimensioni dei pianeti stessi.

Nome	Diametro in mm	Distanza dal Sole in metri
Sole	140.0	
Mercurio	0.5	5.8
Venere	1.2	10.8
Terra	1.3	15.0
Marte	0.7	22.8
Giove	14.0	77.8
Saturno	11.5	142.0
Urano	5.0	287.0
Nettuno	4.5	450.0
Plutone	0.3	590.0

Tabella 2.

Occorre ricordare agli studenti l'unità di misura in cui stiamo facendo la riproduzione. Al termine dell'esperienza i ragazzi non avranno chiare le dimensioni reali, avranno però almeno un'idea della lontananza di corpi celesti presi in esame. È un argomento particolarmente interessante da un punto di vista interdisciplinare perché, se come stiamo facendo in questo periodo, la riproduzione avviene sulla strada di una città, il posizionamento dei pianeti permette uno studio di palazzi, piazze di monumenti storici che si trovano lungo il cammino. Uno degli obiettivi di esperienze didattiche di questo tipo è far comprendere che lo spazio all'interno del sistema solare è essenzialmente vuoto, quasi tutta la materia è contenuta nel Sole.

Dimensioni del Sole

- Quella che presento ora è una semplice esperienza, già nota, particolarmente utilizzabile in una scuola media o in un biennio delle scuole superiori. In particolare per le scuole medie è un modo di applicare le proporzioni, particolarmente utilizzate in questo tipo di scuola, ad un'esperienza pratica. Partiamo dall'ipotesi di conoscere la distanza del Sole dalla Terra e usiamo un semplice tubo chiuso ad un'estremità con della pellicola di alluminio, ma con un piccolo foro al centro. Dalla parte opposta una carta semitrasparente, possibilmente millimetrata in modo da facilitare la lettura. La luce del Sole entra attraverso il foro e produce una macchia luminosa dall'altra parte. Inversamente, possiamo dare per note le dimensioni del diametro solare e calcolare la distanza Terra-Sole.

A seconda dell'età dei ragazzi che eseguono l'esperienza, questa può essere utilizzata per dimostrare come da semplici calcoli si possano ottenere risultati accettabili. La stessa esperienza può essere riprodotta con tubi di lunghezza diversa ottenendo così dimensioni della macchia diverse: più lungo è il tubo,

più larga, ma più "sfuocata" risulta la macchia. Più corto è il tubo, più nitida è la macchia e quindi facilmente leggibili risultano essere le sue dimensioni. Nel primo caso gli errori di lettura incidono meno che nel secondo. Sei ragazzi sono delle superiori questo permette di affrontare il discorso dell'errore e quindi del metodo più idoneo per ottenere alcuni tipi di risultati.

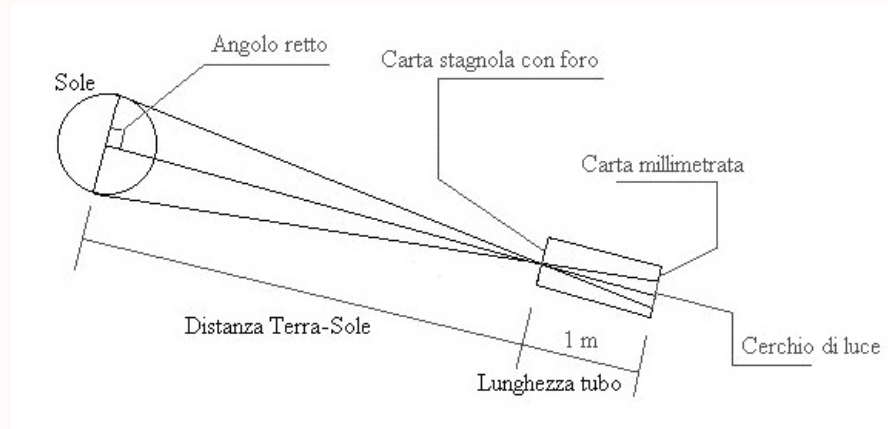


Figura 1. Misura del diametro solare

D = distanza dal Sole; L = lunghezza del tubo x = diametro del Sole; d = diametro dell'immagine solare sul foglio di carta.

Noto D dai testi, misurando d ed L , possiamo ricavare x dalla semplice proporzione: $D/L = x/d$

Le macchie solari

- Gli studenti sono ormai abituati a pensare al Sole come a un oggetto fermo; l'idea che spesso hanno di fermo, è un po' particolare perché spesso per loro vuol dire anche stabile, che non si modifica. Sanno ormai tutti, che il Sole fra molto tempo "si spegnerà", ma questo sembrano ritenere accadrà all'improvviso: nel frattempo il Sole sta fermo e rimane uguale a se stesso. Proprio per far comprendere che "l'essere fermo" è diverso dall'essere costante nella forma e nell'aspetto fisico, nasce la proposta di un lavoro sulle macchie solari sperimentato quest'anno al Planetario grazie alla collaborazione con uno studente di fisica dell'Università di Ferrara.

L'idea è che i ragazzi osservino indirettamente il Sole (viene così introdotta anche l'idea di osservazione e "misura" indiretta di un corpo). Per fare l'esperimento abbiamo ovviamente bisogno di giornate di Sole, e di giornate non di Sole quieto, cioè giornate in cui siano presenti sulla superficie del Sole le macchie solari. Si punta il telescopio, il foglio bianco dalla parte opposta dell'oculare e si osserva sul foglio bianco l'immagine che appare. Il momento dell'osservazione è estremamente importante in parte perché spesso è il primo momento in cui i ragazzi vengono a contatto con uno strumento astronomico e quindi l'osservazione può costituire un momento di rinforzo dell'interesse. Proprio per questo aspetto di rinforzo può essere anche un buon momento intermedio in un percorso di scienze o un momento finale di conclusione dell'attività: buon momento per ogni livello di scuola (l'esperienza è stata fatta con classi finali dei tre ordini di scuola).

Dopo l'osservazione c'è un momento di analisi di immagini preparate da altri: diapositive con immagini del Sole in diversi giorni. Le immagini proiettate in sequenza permettono di vedere uno spostamento delle macchie sulla superficie solare. Dopo un altro momento di osservazioni indiretta, si può passare a visitare il sito

internet dove sono visibili le immagini eseguite da astronomi professionisti di diverse località. Questo ultimo momento non è casuale o di effetto, può servire ad introdurre o meglio a consolidare le informazioni relative alla rotazione diurna della Terra. In effetti si trovano alcune immagini, mentre quelle provenienti da altri paesi non sono ancora visibili. Ritengo questo momento estremamente importante perché, visto l'inserimento di questo percorso all'interno dell'iter scolastico, serve per ribadire concetti precedenti, ma sull'acquisizione dei quali non c'è più stata alcuna verifica né alcun controllo e ben sappiamo, come insegnanti, che o le informazioni vengono riprese, oppure vengono in parte dimenticate e in parte rimosse.

I fusi orari

- È un argomento trattato essenzialmente in quinta elementare, successivamente non viene più ripreso in nessun livello di scuola, dove viene comunemente dato per acquisito. In realtà è un argomento che nasconde notevoli insidie in quanto i bambini sono abituati a lavorare con meridiani e paralleli, soltanto raramente lavorano con rappresentazioni cartografiche particolari, quindi fanno fatica a capire la differenza fra fusi orari e meridiani. Per questa attività è opportuno che i ragazzi abbiano acquisito il concetto che il mezzogiorno è tipico del punto in cui ci si trova (basta spostarsi di un po' e l'attimo è diverso); e il "moto diurno della Terra".

Permette di affrontare diversi problemi, quali:

- problema del punto sulla Terra in cui considerare inizio del giorno
- necessità di affrontare l'importanza dell'idea di convenzione

Inoltre, sotto un argomento di questo tipo c'è il discorso della convenzionalità, della comodità anche economica, di alcune scelte. Proprio per questo credo che per affrontare un argomento di questo tipo sia più utile partire da un lavoro storico mettendo in evidenza quindi la necessità, la comodità della convenzione e quindi l'utilità della introduzione di un nuovo reticolato che risulta notevolmente diverso da quello dei meridiani e dai paralleli. A questo proposito è utile un piccolo strumento che permette di semplificare la spiegazione. Costruzione: si parte da una semplice fotocopia di un testo che contenga una carta con i fusi orari e quindi una rappresentazione rettangolare. La si arrotola e la si chiude alle due estremità: otteniamo così una rappresentazione in qualche modo cilindrica. Illuminandola con una torcia e facendola ruotare si può notare la variazione delle ore nei diversi paesi. Credo che sia importante a questo punto ricordare che la Terra è suddivisa in 24 fusi uguali tra loro; in ogni fuso l'ora è quella del meridiano centrale del fuso. Gli eventuali spostamenti delle linee ottenute e che spesso vediamo nei libri sono dovuti a aggiustamenti delle singole nazioni o di gruppi di nazioni per superare problemi interni.

La Luna e le sue fasi

- Altro corpo particolarmente interessante nel sistema solare è la Luna che è sicuramente intrigante con il fatto di essere visibile alle ore più impensabili durante la giornata. In effetti i bambini delle elementari partono dall'idea che la Luna è l'astro notturno, mentre il Sole quello diurno e non sembrano avere osservato che la Luna la si vede spesso anche di giorno. Questa è una

osservazione che va sollecitata, non è un'osservazione che riescano a fare autonomamente, se non in casi particolari; sembra quasi che la Luna che vedono durante le ore diurne, proprio per il fatto che appare bianca, non sia la stessa che vedono di notte. Proprio ancora per sollecitare l'osservazione, una delle proposte che faccio è quella di osservare la Luna durante il giorno e di disegnare come la vedono tenendo così quello che chiamano un diario lunare.

Questo tipo di osservazione è decisamente un lavoro lungo e complicato, in quanto i ragazzi devono giungere a capire da soli che è importante fissare il punto di osservazione, che è importante determinare da che parte dell'orizzonte stanno guardando e non credo che sia utile dare troppi consigli; occorre invece che procedano per prove ed errori, anche perché in questo modo giungono ad osservazioni sempre più accurate aggiungendo sempre maggiori particolari alle informazioni che acquisiscono da queste loro osservazioni: ad esempio un bambino di quinta elementare mi diceva: "quando vedo la Luna di mattina ha sempre la pancia rivolta dalla stessa parte".

È una proposta didattica che riservo a ragazzi di quinta elementare o di scuola media, dove è già stata sperimentata. Obiettivo finale di questa esperienza è che la classe, dopo numerose osservazioni, riesca ad indicare una giornata in cui possiamo osservare la Luna durante le ore diurne e poi tirare tutte le conclusioni possibili su come osservare la Luna, quale posizione occupa nel cielo e come orientarsi con la Luna. Oltre che abituarli all'osservazione, scopo dell'esperienza è avvicinarli alla comprensione delle fasi lunari che risultano al termine del lavoro abbastanza chiare, soprattutto se alcuni concetti vengono supportati dall'uso di strumenti come il tellurio.

,

Le stagioni

- Argomento particolarmente complicato sembra essere quello delle stagioni che troppo spesso vengono liquidate nei sussidiari delle scuole elementari come dovute a una vicinanza o una lontananza della Terra dal Sole senza tener conto che la rappresentazione piana del fenomeno è di difficile lettura e genera errori di comprensione. Il moto orbitale della Terra attorno al Sole alle dimensioni delle immagini dei testi è una circonferenza (la differenza di distanza dell'afelio rispetto al perielio è irrilevante quando le dimensioni dell'immagine complessiva sono massimo 10 cm) l'immagine che vediamo è però vista "in prospettiva" e quindi risulta schiacciata proprio agli equinozi e quindi questi appaiono, a una lettura superficiale, essere i punti in cui la Terra è più vicina al Sole. Molto spesso inoltre la vicinanza e la lontananza della terra dal Sole vengono indicati come causa delle stagioni. Troppo spesso, nell'affrontare questo argomento, ci si dimentica e quindi lo facciamo dimenticare anche ai nostri allievi, che quando parliamo dell'alternarsi delle stagioni ci riferiamo ad un fenomeno che avviene nel singolo paese, nella singola località, nel singolo "emisfero" e come tale deve essere esaminato. Ritengo utile a questo proposito l'uso del classico tellurio o anche delle palline di gommapiuma illuminate da una torcia o da una candela. Partendo dalla situazione in cui l'asse di rotazione della Terra è perpendicolare al piano dell'orbita, ed esaminando con i ragazzi quali problemi emergono si giunge, per approssimazioni successive al moto della terra rispetto al sole (o viceversa del Sole rispetto alla Terra). Sono esperienze banali, di uso comune, le conclusioni risultano molto spesso molto meno ovvie di quello che

avremmo creduto. Resta comunque vero che un'esperienza di questo tipo, che deve essere ovviamente svolta in un ambiente totalmente buio, rimane impressa nella mente dei bambini, come rimangono anche impresse le conclusioni che si generano dalla discussione successiva.

Esperienze didattiche

Angela Turricchia

[Home](#)

[Introduzione](#)

[Suggerimenti
didattici](#)

[Conclusioni](#)

[Testi introduttivi e
divulgativi](#)

[Lettture per la
scuola dell'obbligo](#)

[Letture](#)

Conclusioni

Ho riportato alcune delle esperienze che svolgo normalmente con i ragazzini che vengono al planetario; ritengo comunque di dover ricordare che è sempre estremamente importante l'osservazione: le ipotesi, le verifiche ed eventualmente le conclusioni, sono sempre momenti successivi all'osservazione che, come in tutto il metodo scientifico è il primo elemento della catena deduttiva; proprio per questo è estremamente importante che i ragazzi si abituino ad osservare, non a guardare soltanto, le cose che li circondano.

Questi suggerimenti ovviamente possono, come già visto essere inseriti all'interno dell'iter scolastico, proprio sfruttando l'interdisciplinarietà dell'astronomia. Possono quindi essere utilizzati come stimolo che avvicina i ragazzi allo studio di altre discipline che possono essere considerate più noiose. Proprio per tener conto di questo, gli argomenti che ho presentato sono fattibili in tutti gli ordini di scuola e quindi da docenti con preparazioni molto diverse. Misure della costante solare, metodo di Eratostene, calcolo del moto dei satelliti di Giove richiedono che l'insegnante abbia una preparazione fisica e questo è estremamente difficile tenendo conto di quali sono gli insegnanti che svolgono le lezioni di "astronomia" all'interno della scuola italiana. Proprio a questo proposito ricordo che l'astronomia nella scuola elementare si trova a scavalco di materie come geografia e scienze; lo stesso vale nella scuola media inferiore; nella scuola media superiore è all'interno dei programmi di Scienza della Terra per i bienni o nell'ultimo anno dei licei nella parte di geografia astronomica.

Esperienze didattiche

Angela Turricchia

Testi introduttivi e divulgativi

Introduzione

P. Bianucci, *Stella per stella. Guida turistica dell'universo*, Giunti, Firenze, 1997;

Suggerimenti didattici

P. Bianucci, *Nati dalle stelle. Un viaggio nel cosmo alla scoperta delle nostre origini*, Simonelli, Milano, 1997;

Conclusioni

F. S. Delli Santi, *Introduzione all'Astronomia*, Zanichelli, Bologna, 1996;

Testi introduttivi e divulgativi

J. Gribbin, *Enciclopedia Garzanti dell'astronomia e della cosmologia*, Garzanti, Milano, 1998;

Lecture per la scuola dell'obbligo

D. Malin, *Universo invisibile*, Mondadori, Milano, 1999;

Lecture

J. Mitton, S. Mitton, *Guida alla scoperta dell'Astronomia*, Idealibri, Milano, 1999;

P. Morrison, P. Morrison *Potenze di dieci*, Zanichelli, Bologna, 1986;

S.Odenwald, *The Astronomy Cafe*, W.H.Freeman and Company, New York, 1998;

G. Romano, *Introduzione all'astronomia. Esercitazioni e problemi per lo studio dei fenomeni celesti*, Muzzio, Padova, 1993;

G. Romano, *L'uomo e il cosmo attraverso antiche testimonianze venete e vecchi strumenti*, S.I.T., Dosson di Casier (Treviso), 1997

G. Vanin, *Atlante fotografico dell'Universo*, Mondadori, Milano, 1995.

Esperienze didattiche

Angela Turricchia

Lettere per la scuola dell'obbligo

Introduzione

AA.VV., *A scuola di luna. Miti, domande, immagini e strumenti astronomici per incontrare la luna*, Macro edizioni, Bellaria (Fo), 1998;

Suggerimenti didattici

AA.VV., *Il cielo sopra di noi*, Edizioni E Elle, Trieste, 1993 (da anni 6);

Conclusioni

Testi introduttivi e divulgativi

E. Beaumont, M.R. Pimont, *Il tuo primo libro dello spazio*, Larus, Bergamo, 1998 (per ragazzi);

E. Bencivenga, *La filosofia in trentadue favole*, Mondadori, Milano, 1997;

Lettere per la scuola dell'obbligo

C.A. Böhm, *Dall'astrolabio al telescopio spaziale*, Editoriale Scienza, Trieste, 1996;

Lettere

Cappi, *E la luce fu: nascita ed evoluzione dell'Universo dal Big Bang alla vita intelligente*, Atti dell'XI Meeting Associazione Amici dei Planetari, Bologna, 1996;

J. Cole, D. Bruce, *Dentro il Sistema Solare*, Mondadori, Milano, 1996 (da anni 6);

T. Deary, B. Allen, *La famiglia Scintilla: viaggio spaziale*, Editoriale Scienza, Trieste, 1999 (da anni 8);

H. Ford, *Il mio primo libro d'astronomia*, Edicart, 1999;

J.-L. Heudier *Le livre du ciel*, Z'Editions, Nice, 1995;

J.-L. Heudier *Le livre de la Lune*, Z'Editions, Nice, 1996;

M. Hoffman, *Sole, Luna e stelle*, Mondadori, Milano, 1998;

F. Lorenzoni, *Con il cielo negli occhi*, Marcon, Città di Castello, 1991;

M.V. Lugli, *Il Girotondo delle stelle. Le dieci più belle favole che hanno dato il nome alle costellazioni*, Il Fiorino, Modena, 1998;

M.V. Lugli, *Il Girotondo delle stelle 2. Altre dieci divertenti favole che hanno dato il nome alle costellazioni*, Il Fiorino, Modena, 1999;

L. Miles, A. Smith, *Una guida completa. Astronomia e spazio*, Usborne, 1999;

J. Mitton, S. Mitton, *Guida alla scoperta dell'astronomia*, Idealibri, Milano, 1999;

G. Parmeggiani, *La nascita dei fusi orari*, Planetario Comune di Bologna, Bologna, 1999;

I. Ridpath, *Mitologia delle costellazioni*, Muzzio, Padova, 1988;

I. Ruchlis, *Non è vero, ma ci credo. Superstizioni popolari e verità scientifiche*, Dedalo, Bari, 1997;

J.-P. Verdet, *Atlante del cielo*, Edizioni E.Elle, Trieste, 1996
(da anni 6/7);

J.-P. Verdet, *Il cielo. Caos e armonia del mondo*, L'Unità,
Roma, 1993;

J.-P. Verdet, *Il cielo, il sole e il giorno*, Edizioni E.Elle,
Trieste, 1989 (da anni 6);

J.-P. Verdet, R. Mettler, *Pianeti a sorpresa*, Editoriale
Scienza, Trieste, 1999 (da anni 6);

J.-P. Verdet, *Stelle a sorpresa*, Editoriale Scienza, Trieste,
1999 (da anni 6).

Esperienze didattiche

Angela Turricchia

Lecture

Introduzione

AA.VV., *L'Astronomia nel sapere scientifico: un itinerario didattico*. Quaderni IRRSAE Calabria;

Suggerimenti didattici

W. Schröder, *Astronomia Pratica*, Longanesi, Milano, 1967;

Conclusioni

Schede didattiche del *Giornale di Astronomia* - Sait;

Lecture per la scuola dell'obbligo

Schede didattiche di Jeanne Bishop - Atti dell'XI meeting nazionale dell'Associazione Amici dei Planetari-Bologna, 1996;

Lecture

Laboratorio di didattica delle scienze- Facoltà di Scienze- Università di Roma "La Sapienza" *Quaderni* - a cura di Nicoletta Lanciano;

Il Bollettino - IRRSAE Umbria n.3 - ottobre 1993 (monografico sul tempo);

Les Cahiers Clairaut- Les fiches pedagogiques du Clea (per diversi livelli di scuola);

1-2 -3 International summer school - European Association for Astronomy Education.

Gli autori

	Corrado Bartolini
Bartolini	Corrado Bartolini, docente di Astronomia, insegna Fisica dei Pianeti e Fisica Stellare presso l'Università di Bologna. Si è interessato di stelle variabili e stelle binarie; attualmente è impegnato nella ricerca di controparti ottiche di "lampi gamma".
Battistini	
Bedogni	
Benacchio	
Bonòli	Pierluigi Battistini
Cappi	Pierluigi Battistini è docente di Laboratorio di Astronomia presso l'Università di Bologna. La sua attività di ricerca è stata rivolta allo studio delle stelle e degli ammassi globulari ed attualmente si occupa di informatica applicata all'astronomia.
Ciotti	
Clementini	
D'Ercole	
Ferraro	Roberto Bedogni
Fusi Pecci	Roberto Bedogni, astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna, studia l'evoluzione delle stelle nelle fasi finali della loro vita mediante lo sviluppo di modelli numerici. La sua attività si rivolge anche alla divulgazione dell'astronomia nelle scuole medie superiori realizzando ipertesti didattici.
Marano	
Origlia	
Palumbo	
Turricchia	Leopoldo Benacchio
Zitelli	Leopoldo Benacchio è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Padova, dove si occupa da anni di tecnologie informatiche per l'astronomia e l'astrofisica. Dal 1997 è responsabile del progetto di didattica e divulgazione "Prendi le Stelle nella Rete!".
	Fabrizio Bonòli
	Fabrizio Bònoli insegna Storia dell'Astronomia all'Università di Bologna ed è responsabile del Museo della Specola. È Vice Presidente della Società Astronomica Italiana e Direttore del <i>Giornale di Astronomia</i> (edizione italiana ed araba). Si è occupato di ricerche in astrofisica per molti anni ed attualmente la sua attività è dedicata alla storia dell'astronomia.
	Alberto Cappi
	Alberto Cappi ha conseguito il dottorato di ricerca in astrofisica all'Università di Parigi XI ed è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna. La sua attività di ricerca riguarda principalmente lo studio degli ammassi di galassie e della struttura su grande scala dell'universo.

Luca Ciotti

Luca Ciotti ha conseguito il dottorato di ricerca in astronomia presso l'Università di Bologna ed è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna. I suoi principali interessi di ricerca sono la dinamica stellare (di cui tiene il corso presso la Scuola Normale Superiore di Pisa) e l'idrodinamica del gas nelle galassie ellittiche.

Gisella Clementini

Gisella Clementini è stata borsista dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) presso lo Space Telescope Institute di Baltimora (USA). Attualmente è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna, dove si occupa dello studio degli ammassi globulari e delle variabili RR Lyrae, e del loro ruolo come indicatori di distanza nell'ambito della definizione della scala delle distanze astronomiche.

Annibale D'Ercole

Annibale D'Ercole è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna e si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica applicate alle nebulose ed al gas interstellare delle galassie. La sua attività si rivolge inoltre alla divulgazione dell'astronomia.

Francesco Ferraro

Francesco R. Ferraro ha conseguito il dottorato di ricerca in astronomia all'Università di Bologna ed è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna. Si occupa dello studio delle popolazioni stellari negli ammassi globulari nella nostra Galassia e nelle galassie vicine e di tecniche osservative nell'ottico e nell'ultravioletto.

Flavio Fusi Pecci

Flavio Fusi Pecci, astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna, si occupa di evoluzione stellare e di formazione ed evoluzione della Galassia e delle altre galassie del Gruppo locale nel quadro più vasto della cosmologia. È Direttore della Stazione Astronomica di Cagliari e Coadiutore Scientifico della Strumentazione per il Telescopio Nazionale Galileo.

Bruno Marano

Bruno Marano è Ordinario di Astronomia presso l'Università di Bologna e Direttore dell'Osservatorio Astronomico e del Dipartimento di Astronomia. Si occupa dello studio di quasar e galassie.

Livia Origlia

Livia Origlia ha conseguito il dottorato di ricerca in astronomia all'Università di Firenze ed è astronomo dal 1993, dapprima presso l'Osservatorio Astronomico di Torino e dal 1997 presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna. Si

occupa dello studio delle popolazioni stellari nelle galassie e di tecniche strumentali e osservative nell'infrarosso

Giorgio Palumbo

Giorgio Palumbo dopo aver conseguito il dottorato di ricerca all'Università di Calgary (Canada) è stato ricercatore del Consiglio Nazionale delle Ricerche ed è docente di Fisica Spaziale presso l'Università di Bologna.

Si occupa di radiazione cosmica, Supernovae, galassie e gruppi di galassie, nuclei galattici attivi, astrochimica. È inoltre *mission scientist* per l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) sulla missione per Astronomia Gamma INTEGRAL.

Angela Turricchia

Angela Turricchia, insegnante di Matematica e Fisica, dal 1994 è responsabile dell'Aula Didattica Planetario del Comune di Bologna progettando, svolgendo e verificando percorsi didattici per tutti i livelli scolastici.

Valentina Zitelli

Valentina Zitelli è astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna dove da anni gestisce la stazione osservativa di Loiano. Si interessa di galassie attive e di tecniche astrofisiche per osservazioni ottiche.