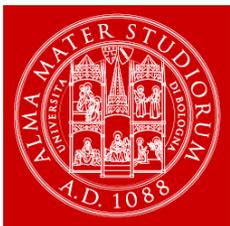


Conferenze alla Specola



Neutrini in profondità

*Vita, morte e miracoli dei neutrini rivelati
sotto terra, sotto i ghiacci o in fondo al
mare*



Maurizio Spurio
Bologna, 05/05/2016



CHE RUOLO HANNO PER NOI I NEUTRINI?

- ⦿ La materia ordinaria è costituita da **protoni, neutroni** (nuclei) **elettroni**;
- ⦿ Abbiamo consuetudine con i **fotoni** (radiazione elettromagnetica) prodotti dal moto di particelle con carica elettrica; oggetti *astrofisici continuamente emettono fotoni*;
- ⦿ Sono state sviluppate tecniche sperimentali che ci permettono di rivelare i fotoni di tutte le frequenze/lunghezze d'onda/energie prodotti dall'uomo e da oggetti astrofisici
- ⦿ Analogamente ai fotoni, siamo soggetti ad un **flusso continuo di neutrini** prodotti da oggetti astrofisici (e dalla radioattività delle rocce, dalle centrali nucleari,...)

CHE RUOLO HANNO PER NOI I NEUTRINI?

*«di qua, di là, di giù, di sù li mena;
nulla speranza li conforta mai,
non che di posa, ma di minor pena. »*

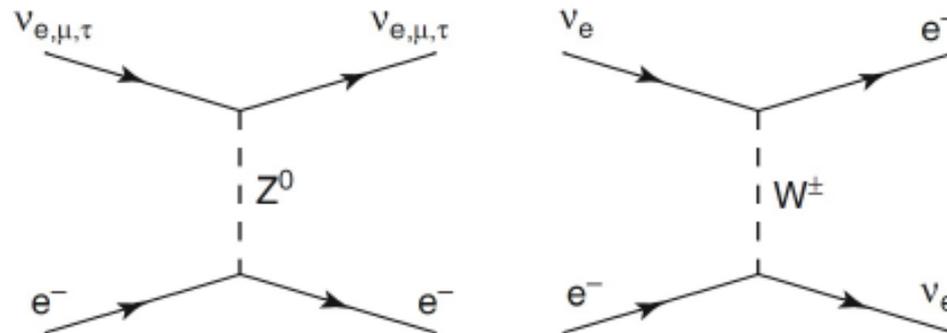
Inferno, Canto V



(si noti, siamo già «underground»)!

PERCHE' IL ν E' DIFFICILE DA RIVELARE?

- ⦿ Perché non ha carica elettrica
 - Quindi non ha la proprietà di eccitare/ionizzare la materia attraversata e manifestarsi nei rivelatori di particelle
- ⦿ Perché ha "accoppiamento" ridotto con la carica elettrica rispetto al fotone
- ⦿ Si manifesta solo attraverso le cosiddette "interazioni deboli", interazioni estremamente poco probabili con la materia



- ⦿ **Ma allora le "interazioni deboli" sono importanti?**

VITA, MORTE E MIRACOLI COI ν .

1. VITA



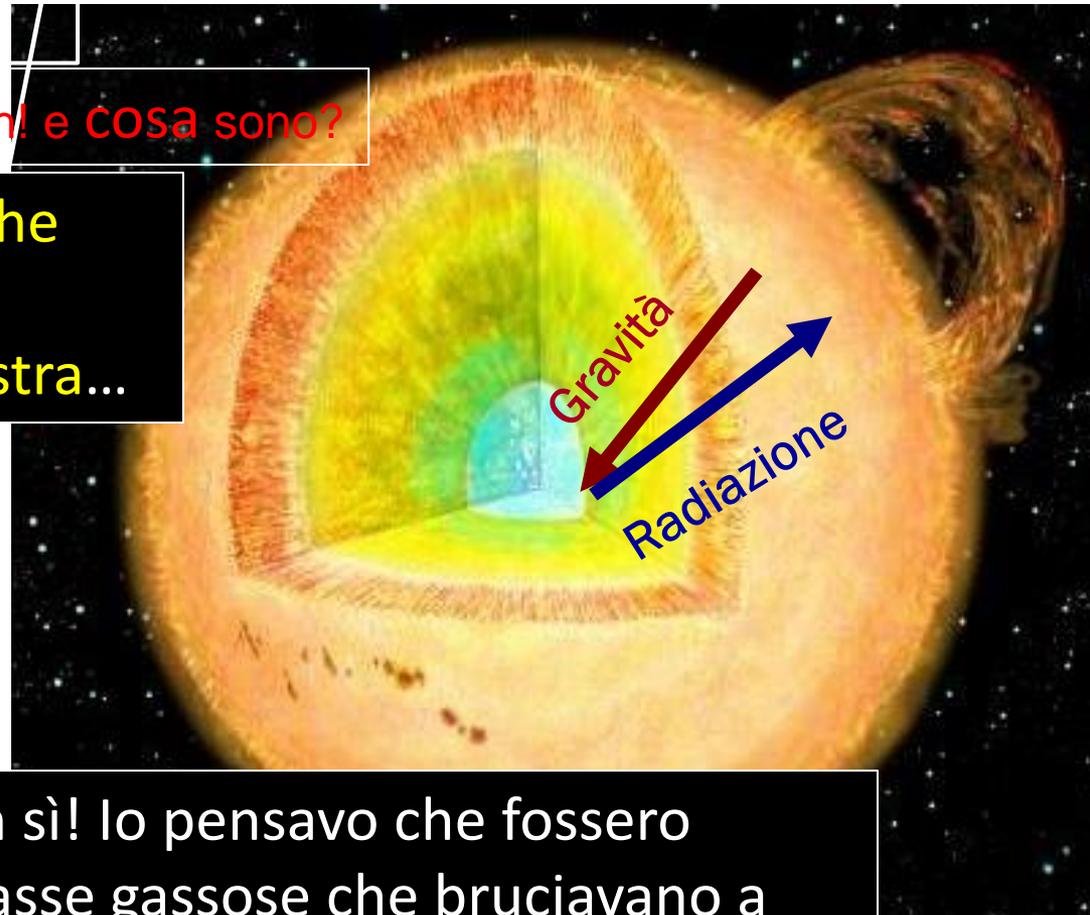
Timon, ti sei mai domandato che cosa siano quei lumicini lassù?

Pumbaa, io non mi faccio domande. Io le cose le so!

LA VITA DELLA STELLA

Oh! e cosa sono?

Sono delle lucciole, lucciole che sono rimaste attaccate a quell'enorme cosa nero-bluastro...



Oh sì! Io pensavo che fossero masse gassose che bruciavano a miliardi di km di distanza!

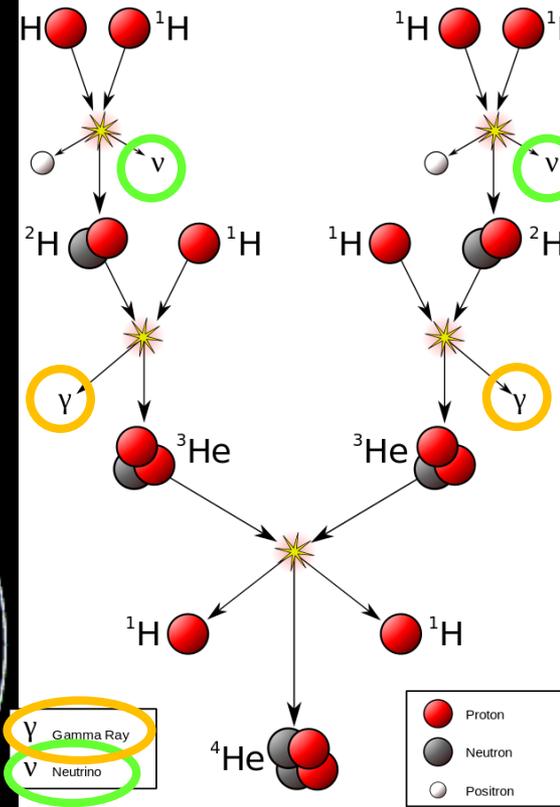
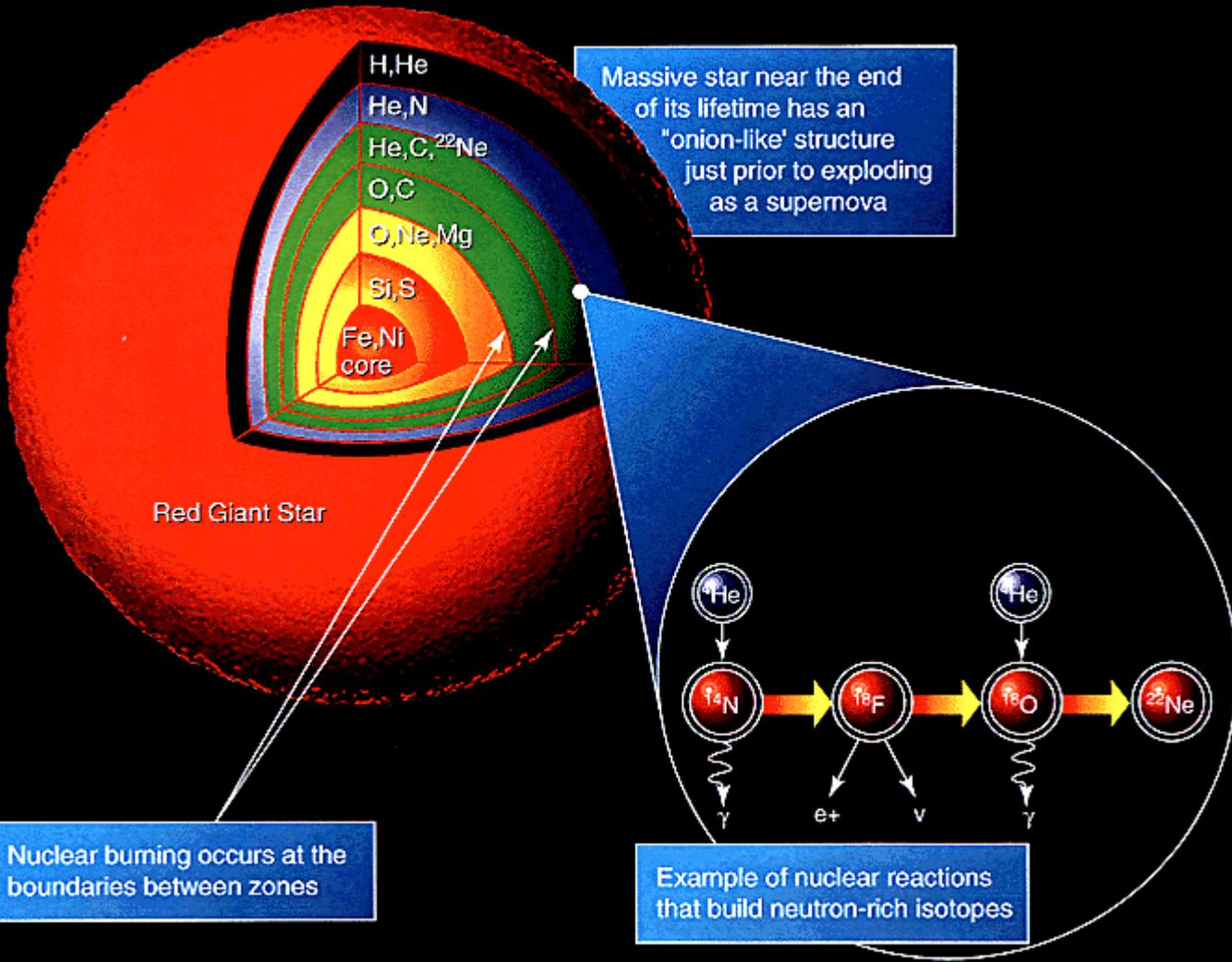
COSA CI RICORDA?

- ⦿ Cosa ci ricordano tre personaggi, di cui:
 - Uno osserva il cosmo e si pone domande
 - Uno le cose «*le sa*»
 - Un nobile personaggio ascolta

- ⦿ Sagredo, Simplicio, e Salviati



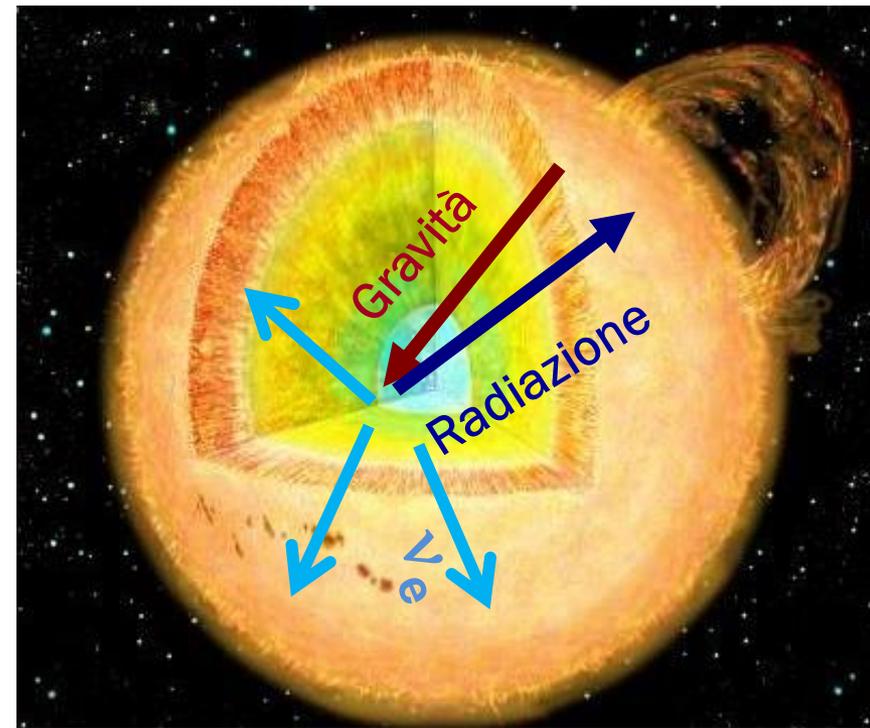
COSA ACCADE «DENTRO» LE STELLE?



SOLE= SORGENTE DI ν_e

- ⊙ Energia dal sole = radiazione di fotoni + ν_e
- ⊙ I fotoni di alta energia prodotti nelle reazioni nucleari “lavorano” per mantenere il Sole in equilibrio
- ⊙ Una misura “diretta” di ciò che avviene all’interno del sole è possibile misurando i **neutrini**
- ⊙ I neutrini “non lavorano” *
- ⊙ Flusso di ν_e del Sole sulla Terra:
 $6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

** Per gli esperti: questo perché la sezione d’urto dei ν_e con la materia è enormemente più piccola di quella dei fotoni*



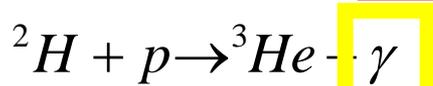
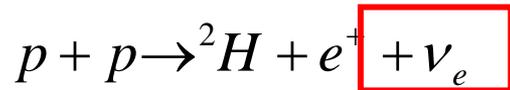
ORIGINE DEI NUCLEI SINO AL FERRO

1	1 H 1.0094	2	He 4.00260	Non-Metals															
	s-block		d-block										p-block						
	IIA		Transition Metals										III A, IV A, V A, VI A, VII A						
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.179	
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIB	9 VIIB	10 IIB	11 IB	12 IIB	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
4	19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.847	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80	
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.91	54 Xe 131.29	
6	55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 to 71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.21	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)	
7	87 Fr (223)	88 Ra 226.03	89 to 103	104 Unq (261)	105 Unp (262)	106 Unh (263)	107 Uns (262)	108 Uno (265)	109 Une (266)	110 Uun (267)	(Mass Numbers in Parentheses are from the most stable of common isotopes.)							Phases	
	Metals																	Solid Liquid Gas	

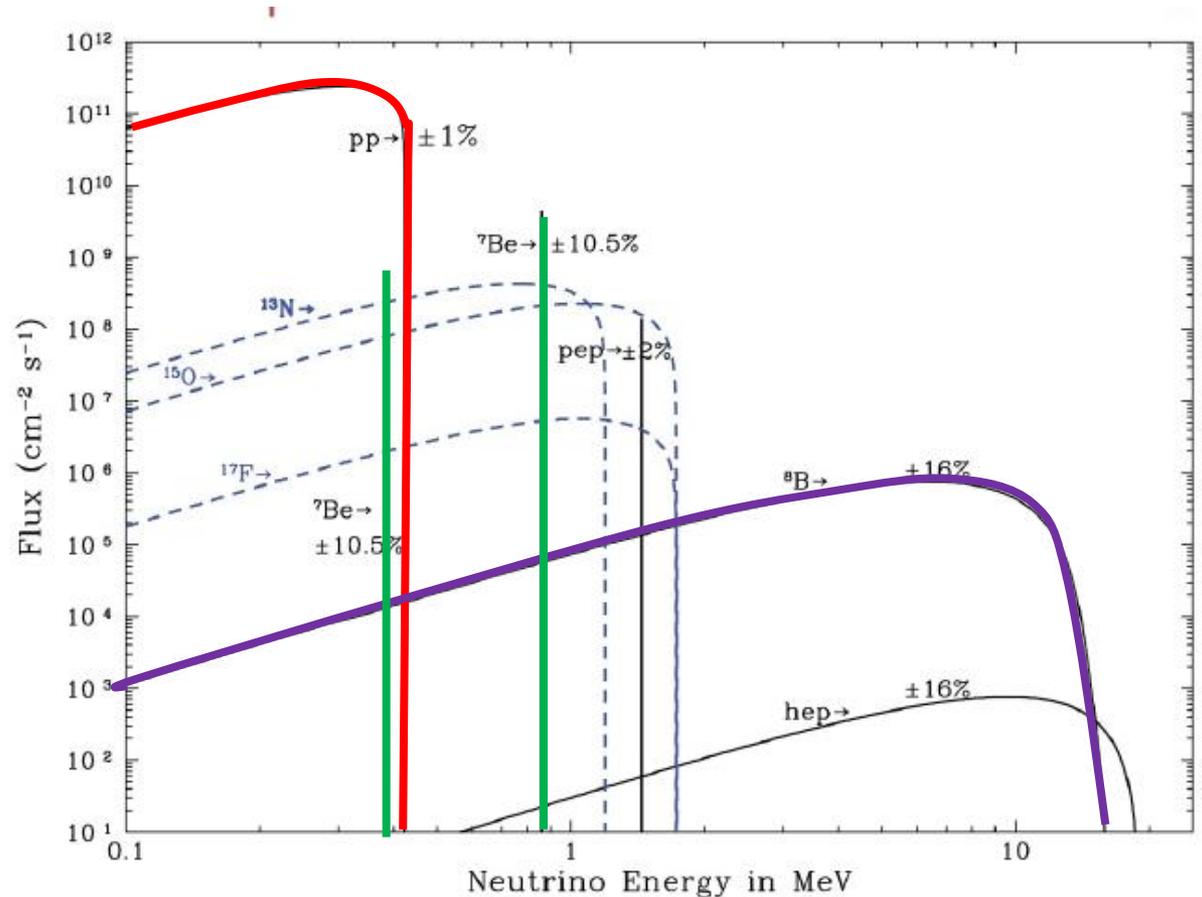
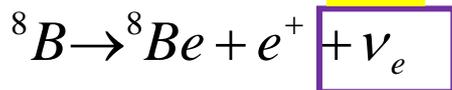
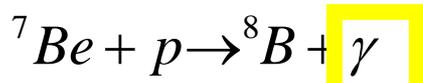
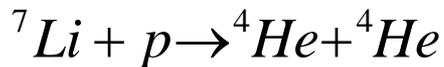
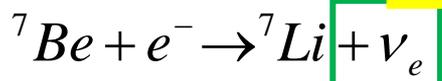
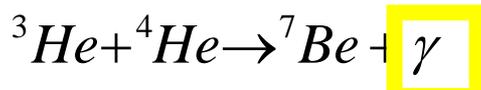
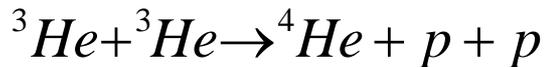
Rare Earth Elements	d-block														f-block							
Lanthanide Series	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97							
Actinide Series	89 Ac 227.03	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np 237.05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)							

ENERGIA DAL SOLE ↔ FLUSSO DI NEUTRINI

È a seguito dell'interazione debole e della presenza dei ν che il sole funziona da 5 mld di anni. Vedi le seguenti reazioni nucleari



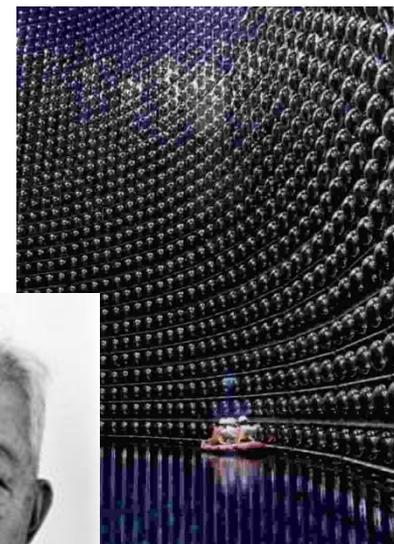
Formazione dell'elio



PERCHÉ PER RIVELARE NEUTRINI OCCORRE ANDARE UNDERGROUND ?

- ⊙ I Raggi Cosmici costituiscono il rumore che nasconde ogni possibile segnale dovuto all'interazione dei neutrini
- ⊙ Per schermarsi dal fondo, i rivelatori per neutrini sono situati in laboratori sotterranei (***underground***)
- ⊙ I rivelatori devono essere inoltre il più **radio-puri** possibile
- ⊙ Lo studio sperimentale dei neutrini dal sole (=comprensione dei processi che forniscono energia alle stelle) è stato un enorme sforzo degli anni 70 → oggi

PREMIO NOBEL 2002 PER LO STUDIO DI NEUTRINI DI ORIGINE ASTROFISICA



Masatoshi Koshiba

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/koshiba-lecture.pdf

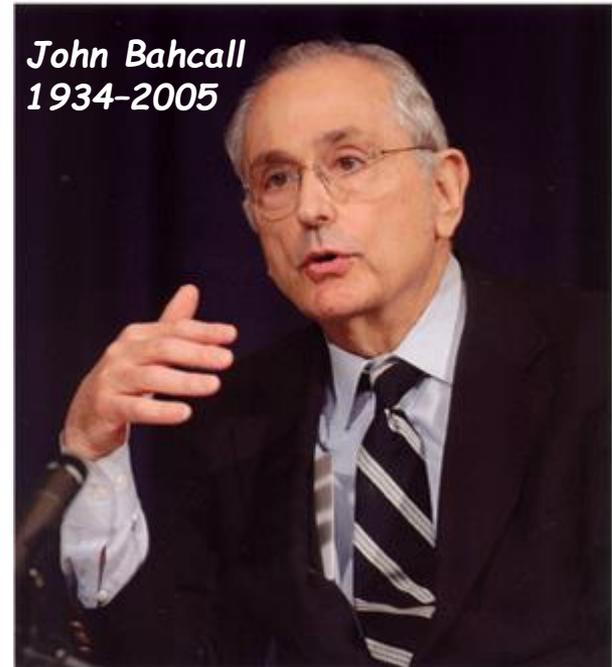
Raymond Davis Jr.

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/davis-lecture.pdf

NON-PREMIO NOBEL (E ANCOR PIÙ MERITEVOLE DI ESSERE RICORDATO)

- ⊙ J. Bahcall: The main author of the SSM
- ⊙ The standard solar model is derived from the conservation laws and energy transport equations of physics, applied to a spherically symmetric gas (plasma) sphere
- ⊙ Constrained by the luminosity, radius, age and composition of the Sun

<http://www.sns.ias.edu/~jnb/>

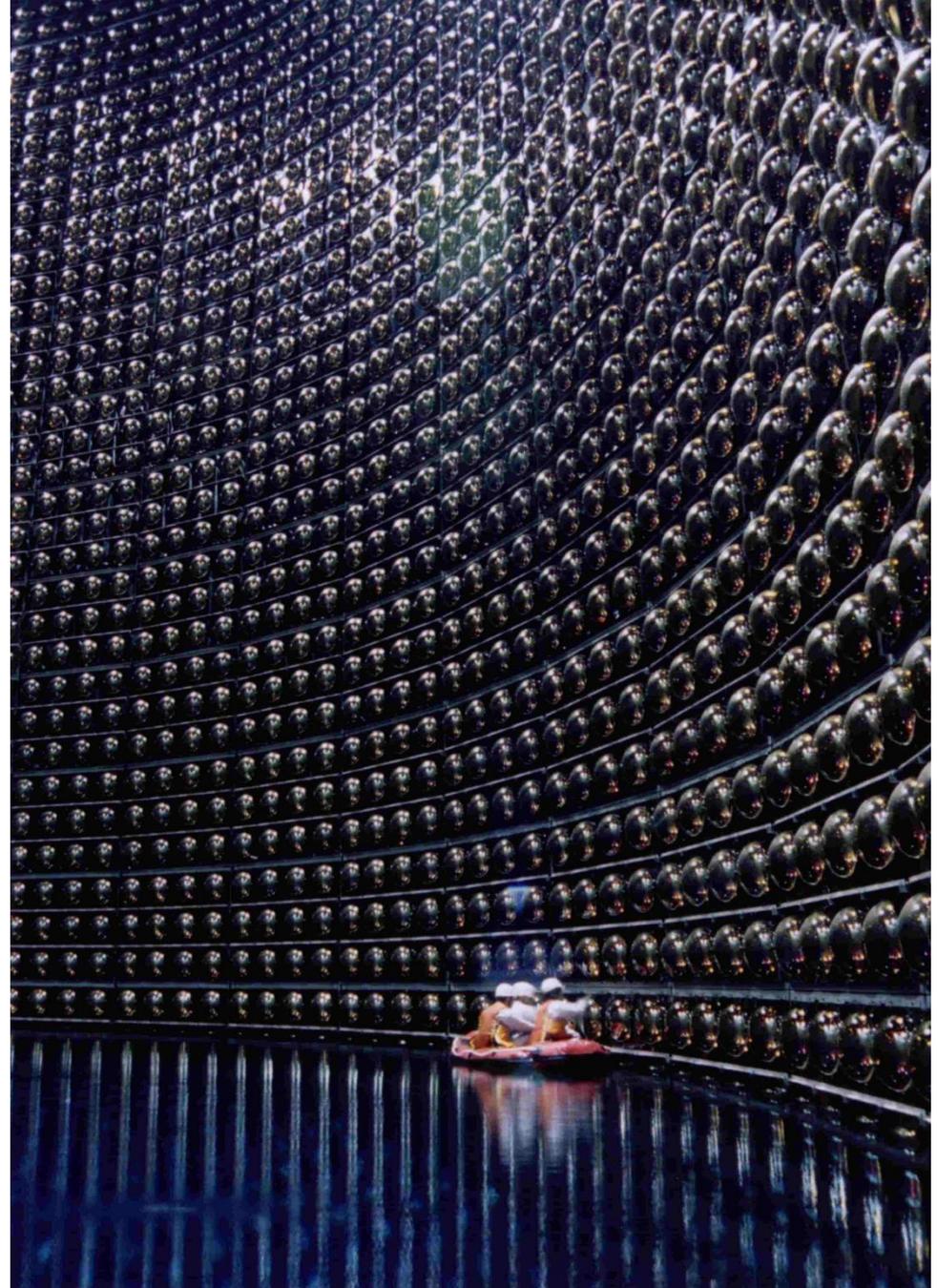


Nota: Leggere l'articolo (tradotto anche in italiano)

<http://www.sns.ias.edu/~jnb/Papers/Popular/Nobelmuseum/italianmystery.pdf>

RIVELATORI ENORMI!

- ⊙ Super-Kamiokande in Giappone
 - 1000 m Underground
 - 50.000 ton di acqua purificata
 - 11000 +2000 “**fotomoltiplicatori**”
PMTs
 - Attivo dal 1996

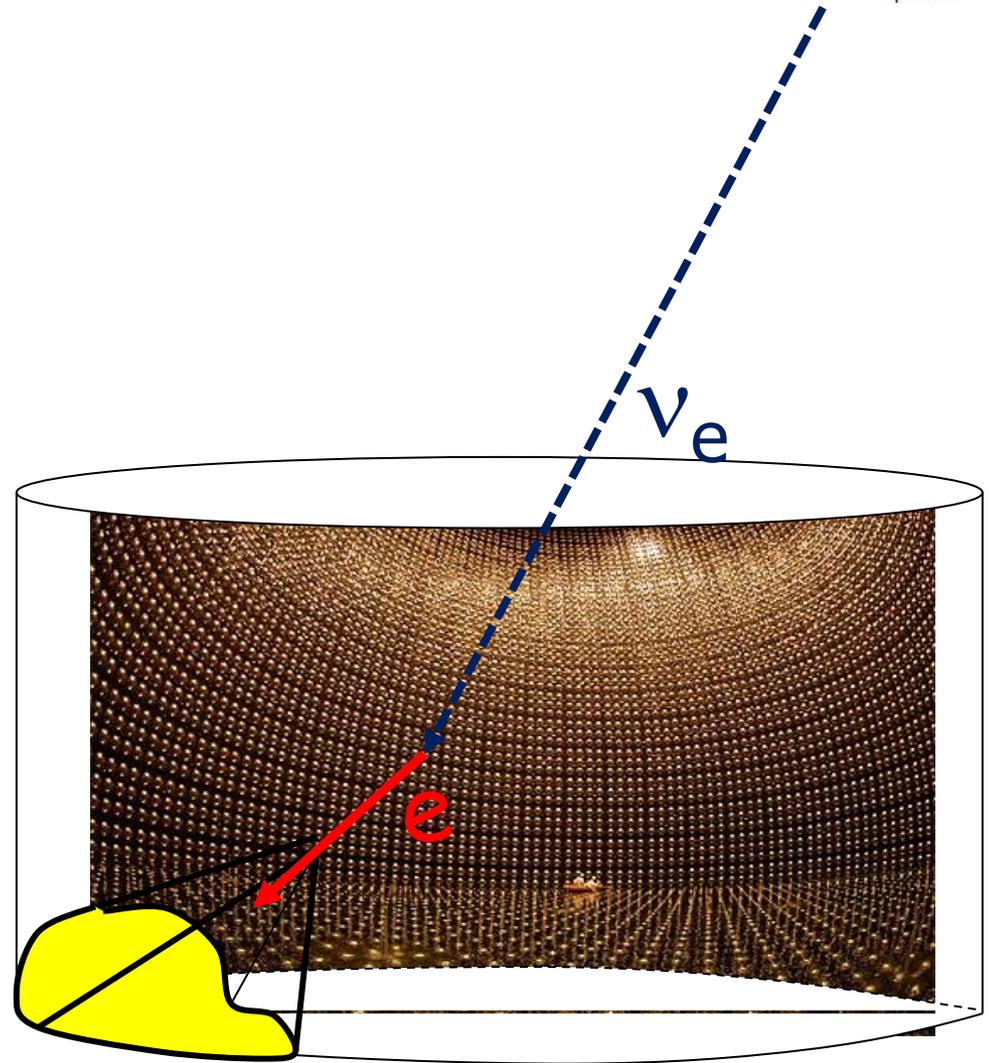
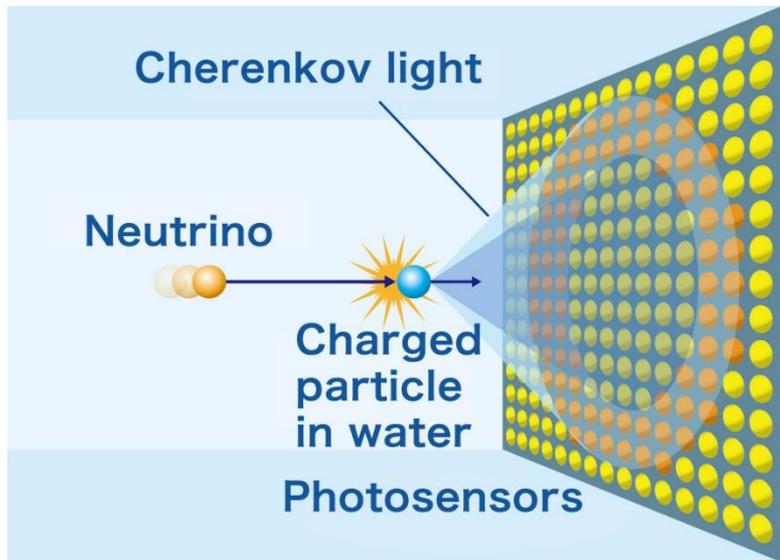


SUPERKAMIOKANDE: NEUTRINI DAL SOLE

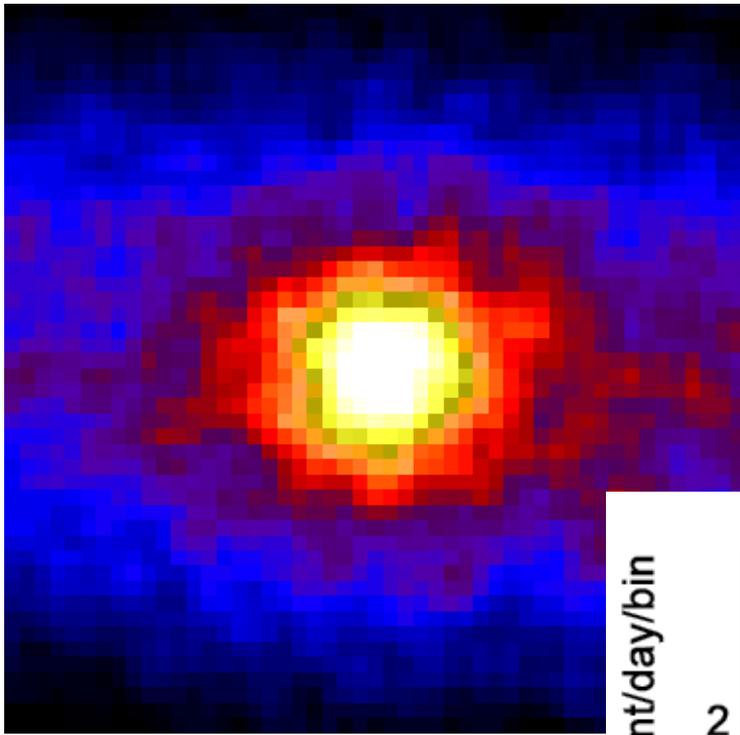
$$\nu_e e \rightarrow \nu_e e$$



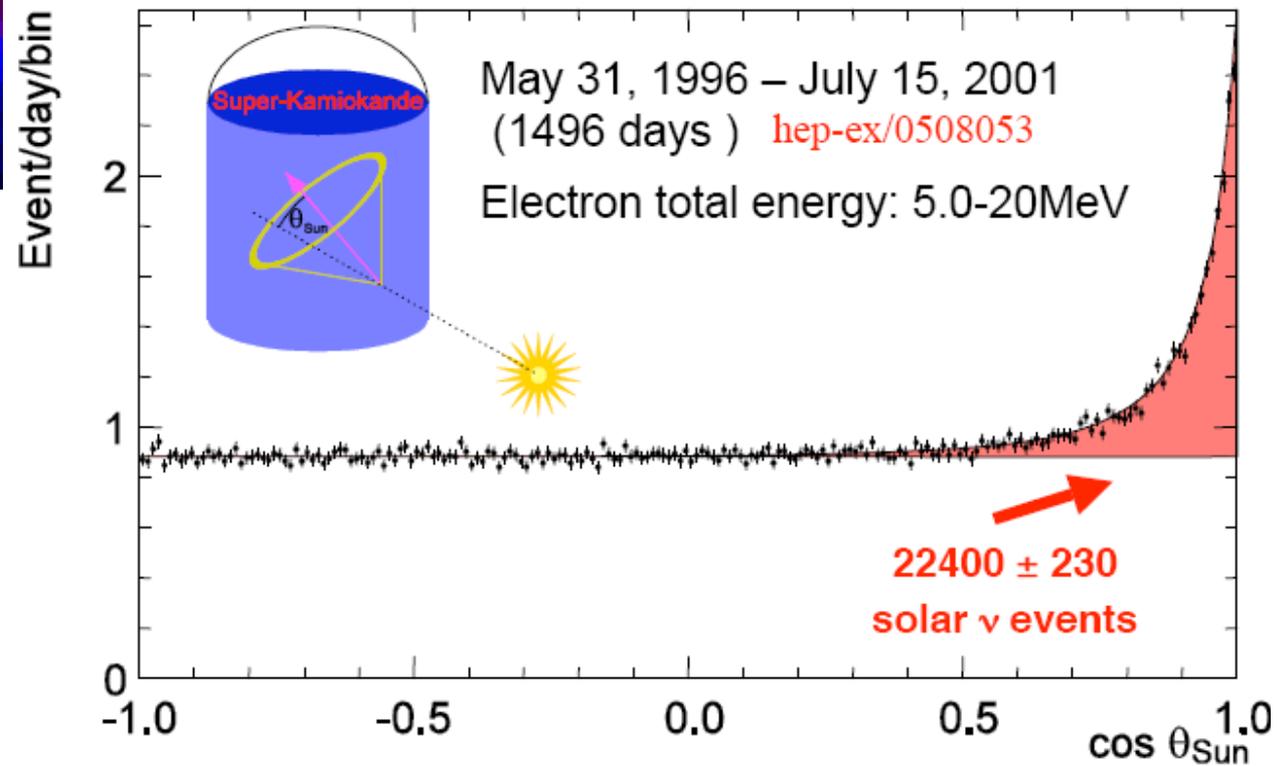
«effetto Cherenkov»



IL SOLE VISTO COI NEUTRINI DI SK



SK-I: ^8B Solar Neutrino Flux

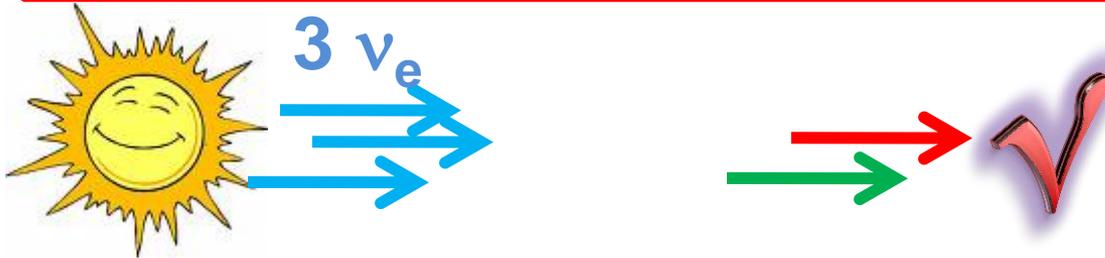


PROBLEMA: I NEUTRINI DAL SOLE SEMBRAVANO TROPPO POCHI!

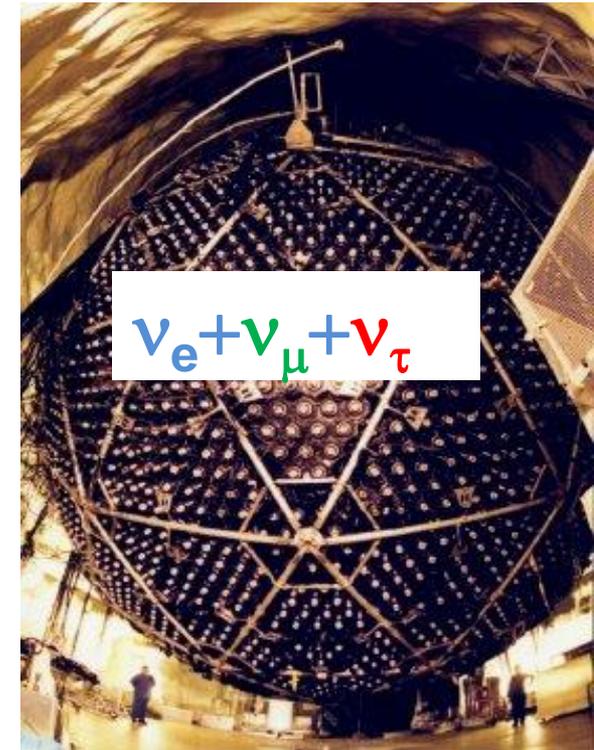
- ⦿ Problema nell'astrofisica del sole o cattivi esperimenti?
- ⦿ NO: proprietà del neutrino! (Massa non nulla)

❖ Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Canada

- ❖ Sfera di 18m , ad una profondità di 2.5 km
- ❖ Riempita di acqua pesante (sensibile a tutti i sapori)
- ❖ 10000 PMTs



Scoperta che i neutrini hanno
massa: “oscillazioni”





Sphère acier
13.7 m diamètre

Nylon Sphère
 1000 m
 8.5m Ø
 rock

2200 PM

Veto muon:
200 PM

100 ton
fiducial volume

Nylon film
Rn barrier

scintillateur
(300 tonnes)

pseudocumèr

1.2 $\mu/m^2/h$

eau

Holding Strings

Stainless Steel Water Tank

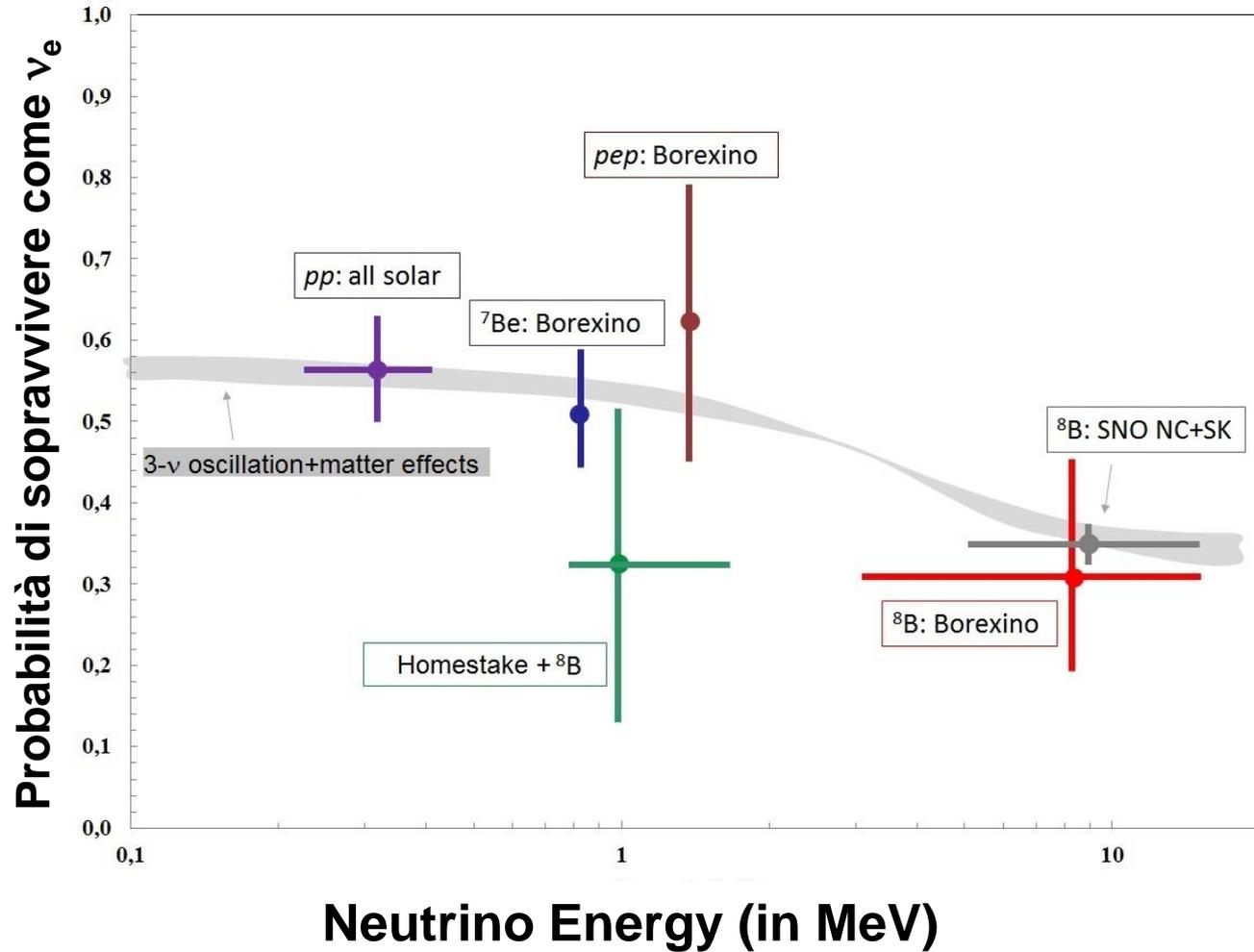
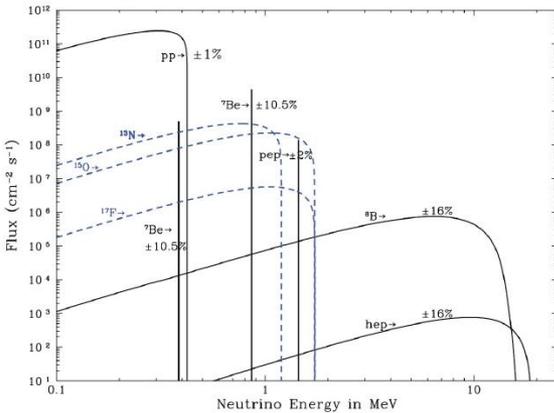
Steel Holding Plate

Strumenti eccezionali ai laboratori del

Gran Sasso: BOREXINO

...DOPO 40 ANNI, SAPPIAMO COME FUNZIONA IL SOLE E ALCUNE PROPRIETA' DEI NEUTRINI

(previsione della teoria)



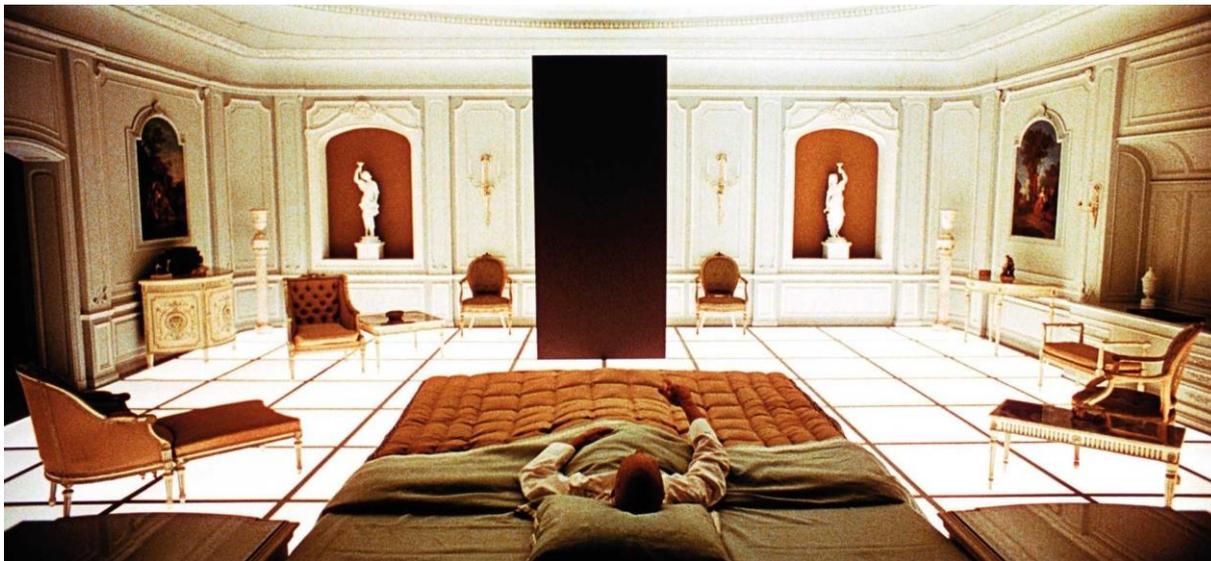
VITA, MORTE E MIRACOLI COI v.

2. MORTE



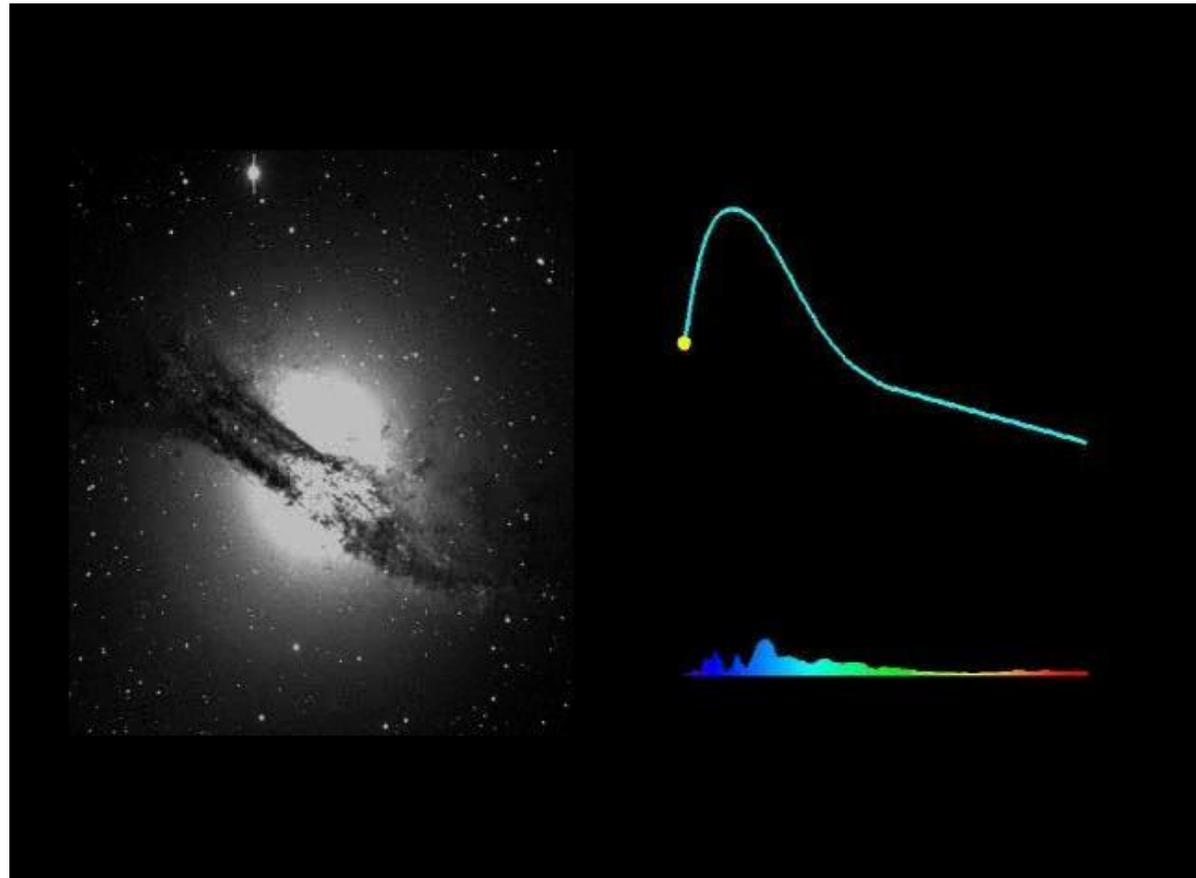
VITA, MORTE E MIRACOLI COI v.

2. MORTE



✓ E IL PIÙ AFFASCINANTE FENOMENO OSSERVATO DAGLI ASTRONOMI

Una supernova nella Galassia Centaurus A. Il clip preparato dal “**Supernova Cosmology Project**” con il Lawrence Berkeley National Laboratory's Computer Visualization Laboratory (N. Johnston: animazione) al “National Energy Research Scientific Computing Center”



...NASCITA DEI NUCLEI OLTRE IL FERRO

1	1 H 1.0094	2 He 4.00260																	
	s-block												Non-Metals						
													13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0122	d-block										5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.179	
			Transition Metals										p-block						
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3 IIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIB	9 VIIB	10 IB	11 IB	12 IIB	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
4	19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.847	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80	
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.91	54 Xe 131.29	
6	55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 to 71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.21	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)	
7	87 Fr (223)	88 Ra 226.03	89 to 103	104 Unq (261)	105 Unp (262)	106 Unh (263)	107 Uns (262)	108 Uno (265)	109 Une (266)	110 Uun (267)	(Mass Numbers in Parentheses are from the most stable of common isotopes.)							Phases	
			Metals															Solid Liquid Gas	

Rare Earth Elements	d-block														f-block														
Lanthanide Series	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97														
Actinide Series	89 Ac 227.03	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np 237.05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)														

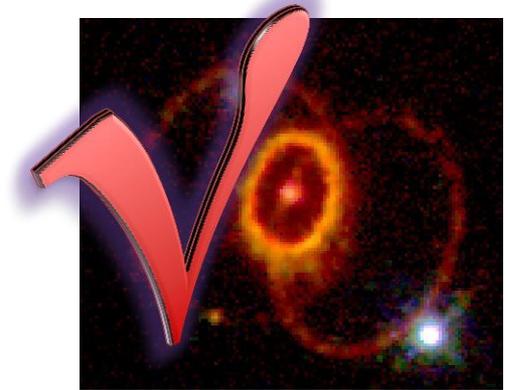
ENERGIA VIENE RILASCIATA NELLA SN

- ⊙ Supernova da stella di massa $\sim 10 M_{Sole}$
- ⊙ Energia di legame gravitazionale liberata:

$$E_b \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg} = 17\% M_{Sole} c^2$$

- ⊙ Ingredienti:

- 99% neutrini
- 1% energia cinetica dell'esplosione
- 0.01% luce

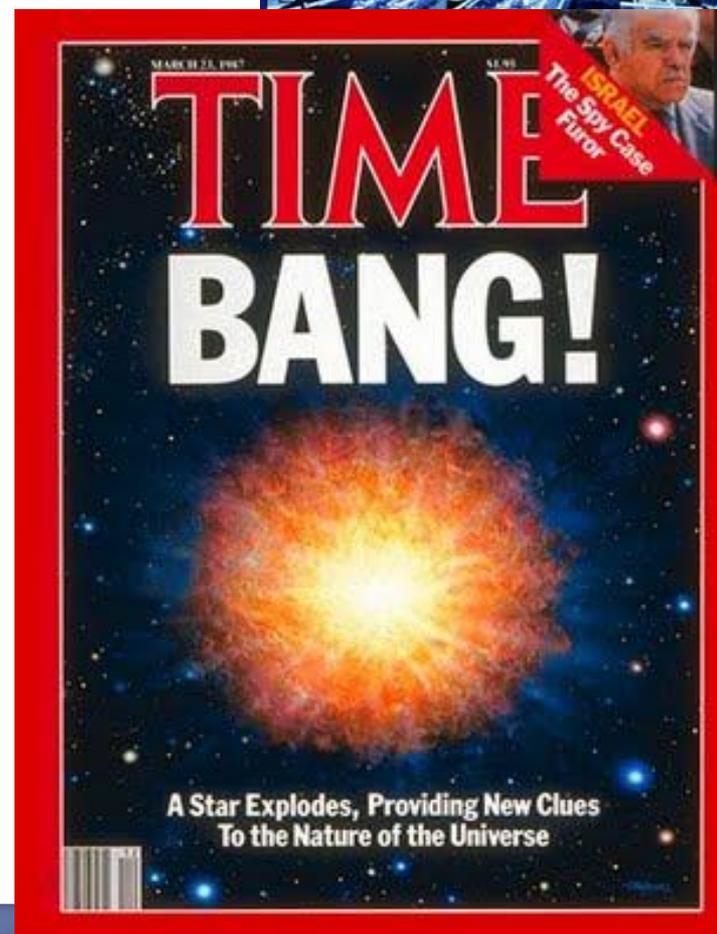
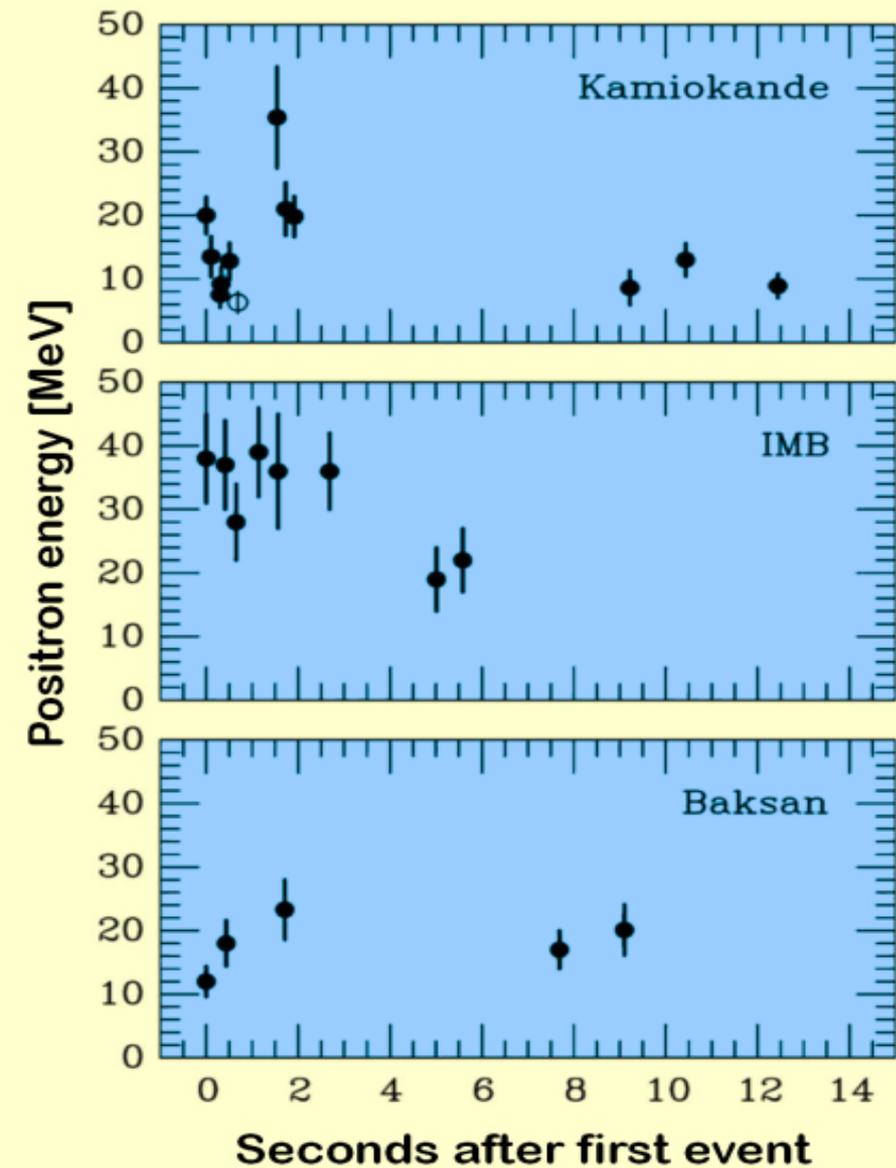


- ⊙ L'emissione avviene in un intervallo di ~ 10 secondi
- ⊙ Impulso di neutrini visibile in rivelatori sulla Terra.
- ⊙ Problema: le esplosioni osservabili sono rare (1/30 anni)



Anno	Dove furono registrate	Brillantezza
185	Cina	>Venere
369	Cina	>Marte o Giove
1006	Cina, Corea, Giappone, Europa, Arabia	>Venere
1054	Cina, India, Arabia	>Venere
1572	Europa	~Venere
1604	Europa	~Giove
1987	(Chile)	

NEUTRINI DA SN1987A



IL RIVELATORE LVD AL GRAN SASSO

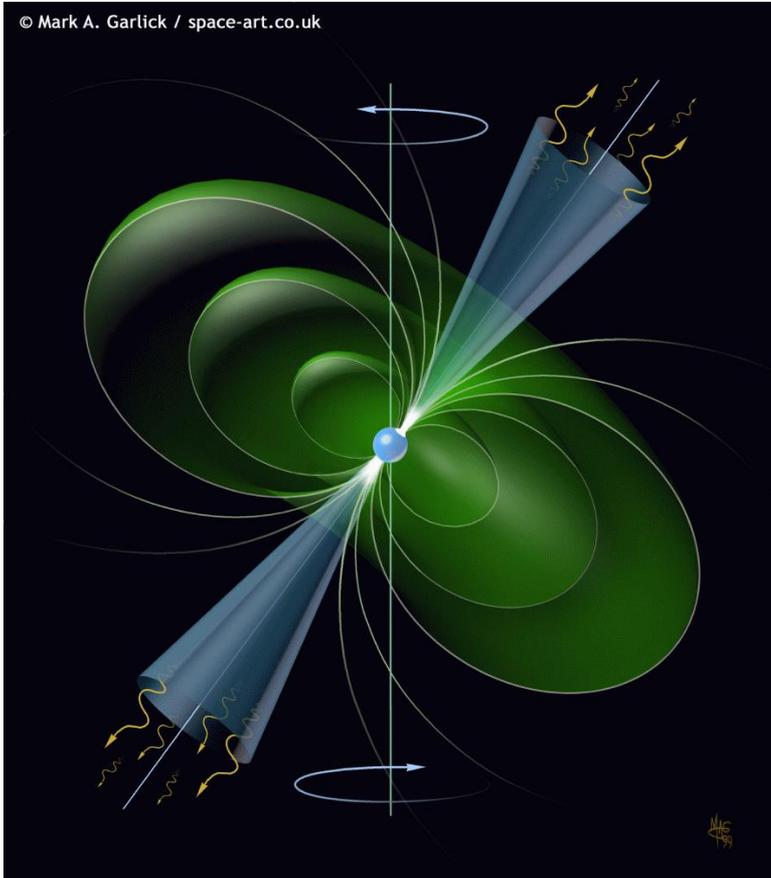


VITA, MORTE E MIRACOLI COI v.

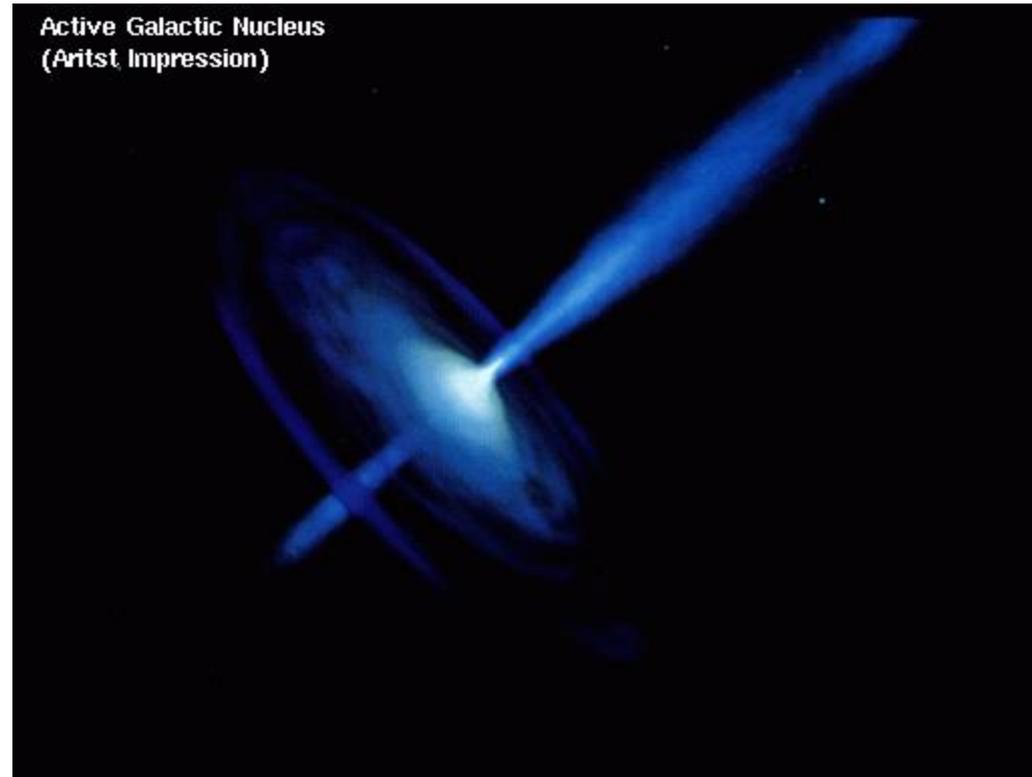
3. "MIRACOLI"



DOPO LA “MORTE” IN ASTROFISICA

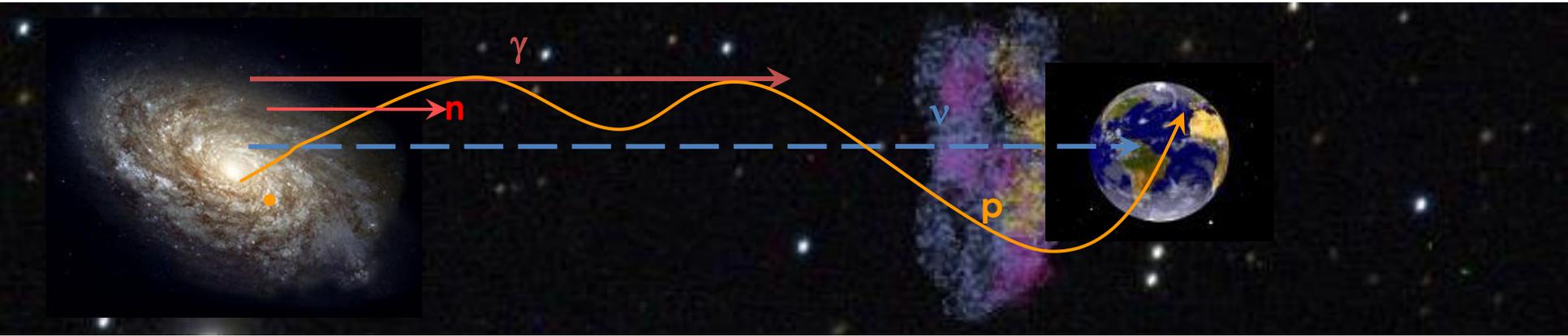


- Oggetti collassati galattici: PULSAR



- Oggetti extragalattici: AGN
Nucleo centrale: buco nero di massa 1 miliardo di volte il Sole

RAGGI COSMICI: neutrini, protoni e fotoni



Fotoni: interagiscono con la materia e la radiazione

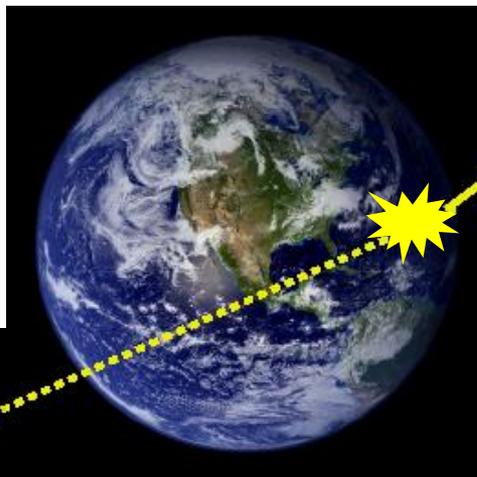
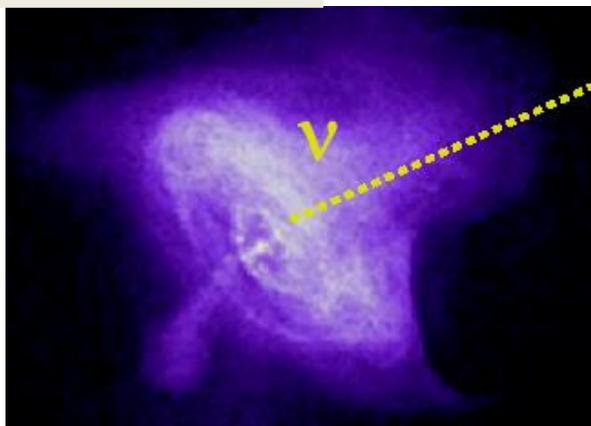
Protoni: (HE)interagiscono con la Radiazione cosmica di fondo (CMB) e sono deflessi da campi magnetici (se di bassa energia)

Neutroni: non sono stabili

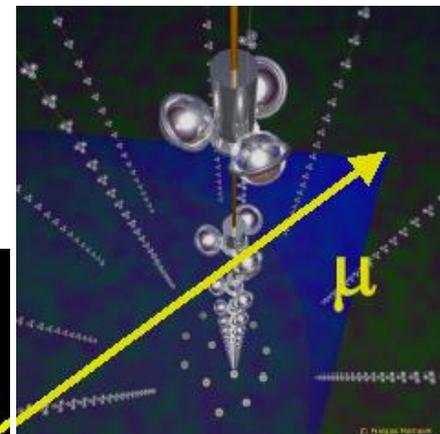
Inconveniente neutrini: enormi rivelatori (\sim GTon) sono necessari

NUOVE SONDE PER L'ASTROFISICA: I NEUTRINI

Neutrini sono emessi da potentissime sorgenti nella nostra Galassia o in Galassie lontane



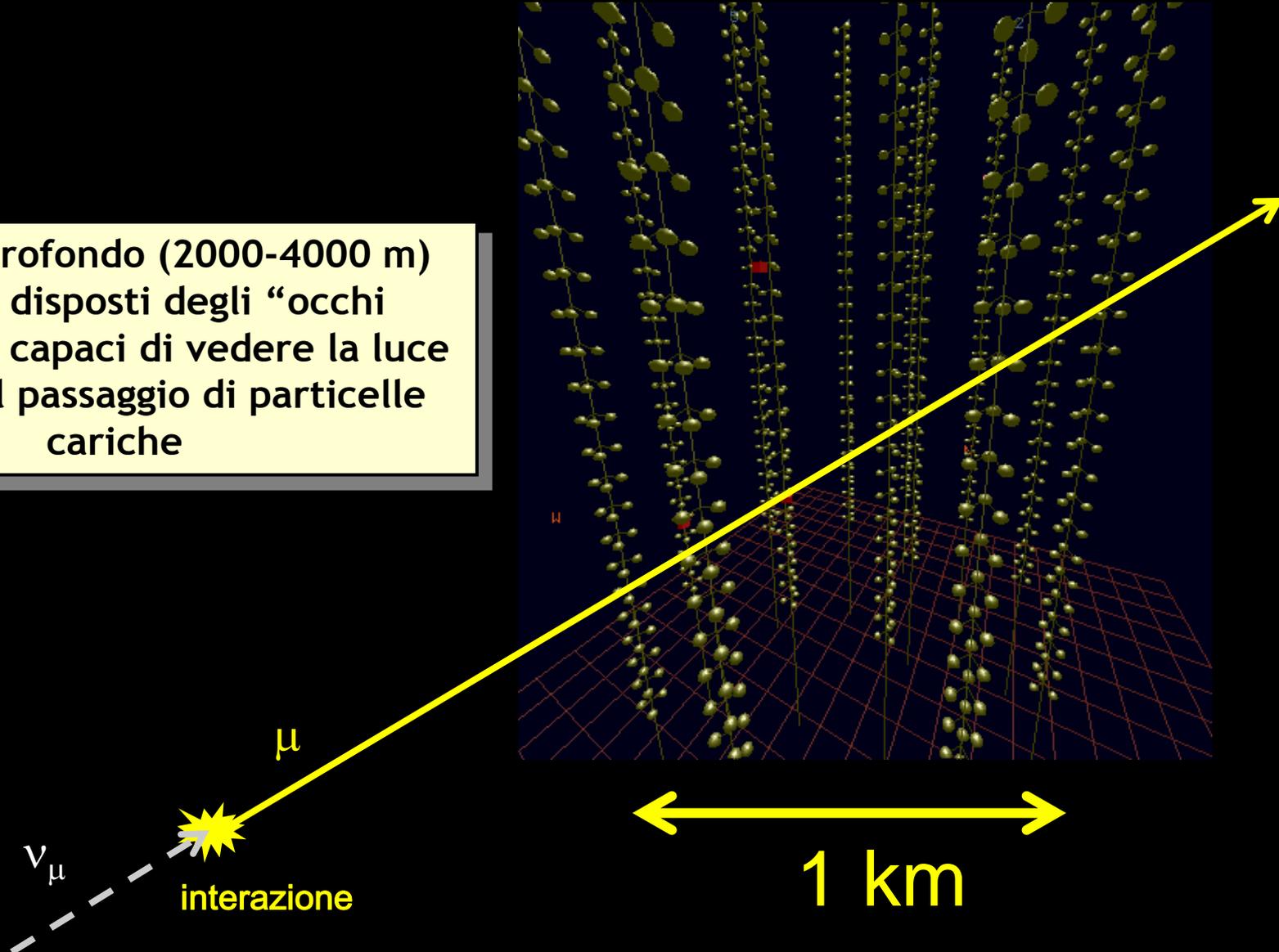
ν interagiscono nella Terra e producono μ



Muoni emettono luce in acqua/giaccio

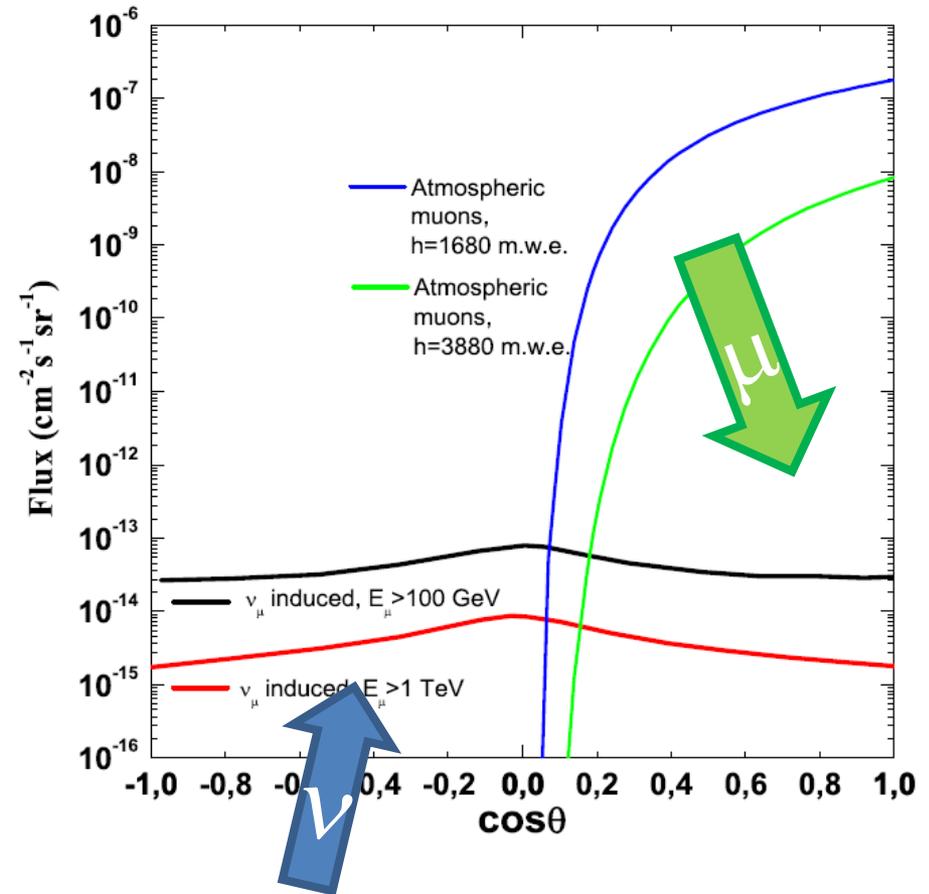
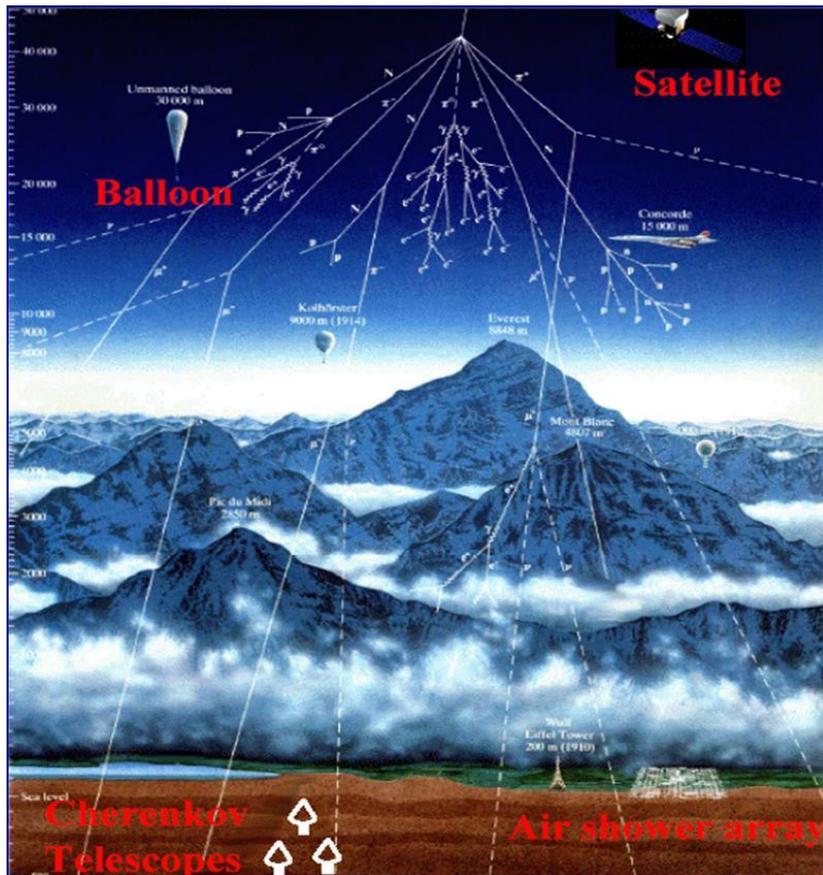
UN TELESCOPIO PER NEUTRINI

Nel mare profondo (2000-4000 m) vengono disposti degli “occhi elettronici” capaci di vedere la luce emessa dal passaggio di particelle cariche



TELESCOPIO PER ν = UN RIVELATORE CHE GUARDA IN BASSO!

Il flusso di muoni atmosferici dall'alto domina di molti ordini di grandezza il flusso di eventi indotti da interazioni di neutrini.



TELESCOPI DI NEUTRINI



ANTARES
→ Km³



AMANDA
ICECUBE

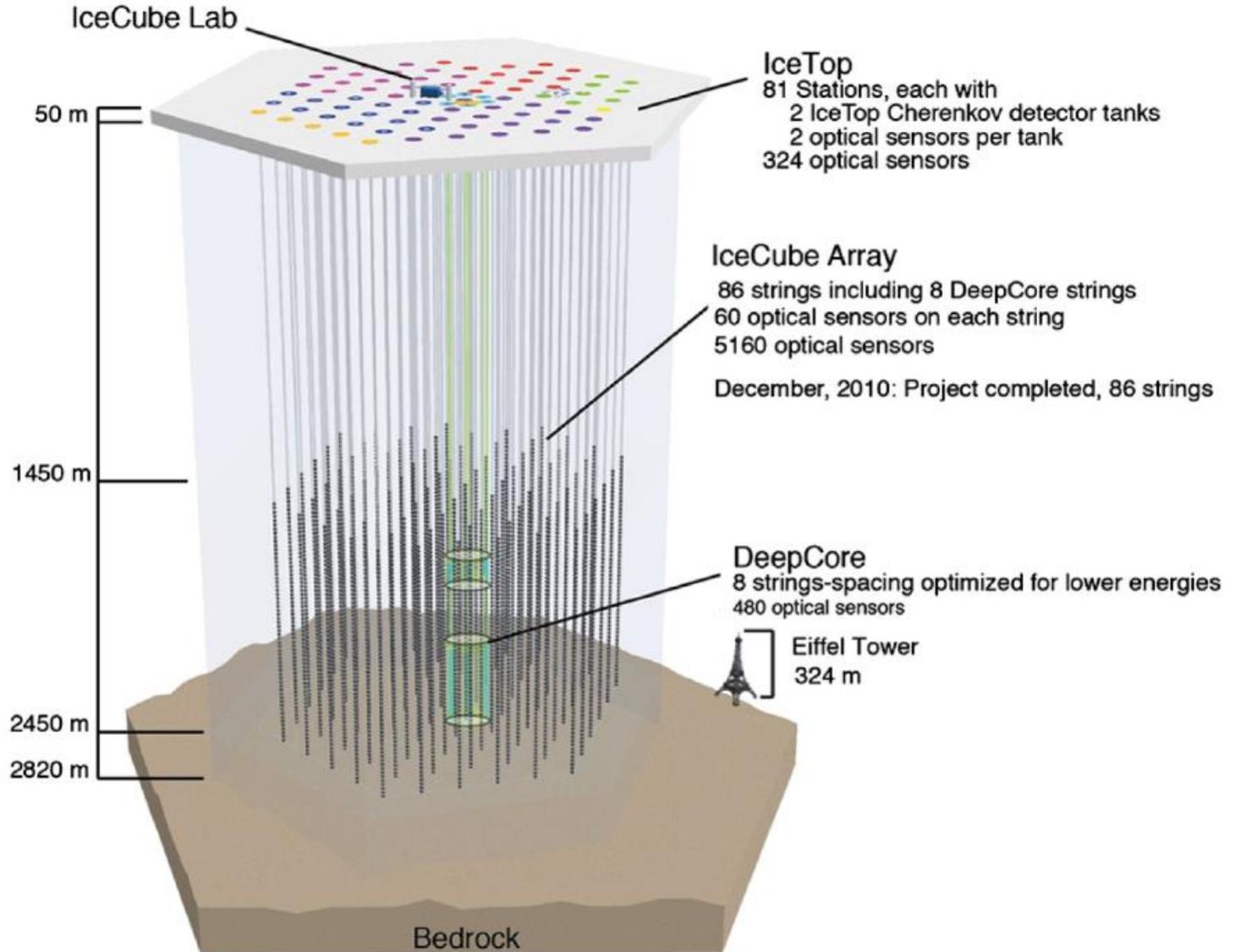
DIFFERENZE: IL GHIACCIO



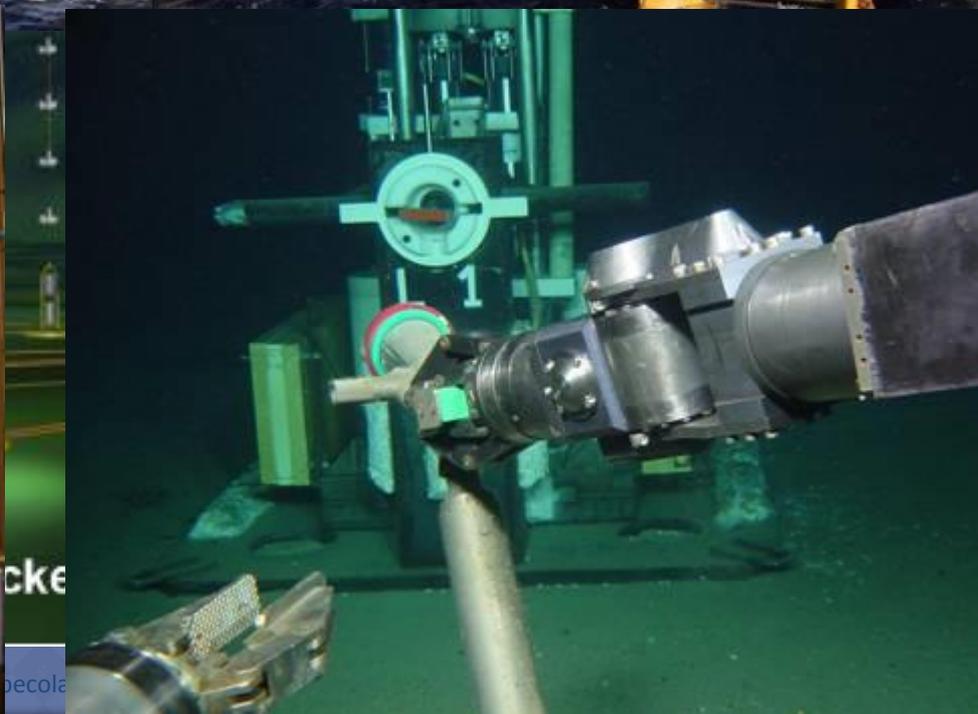
...E L'ACQUA



ICECUBE AL POLO SUD

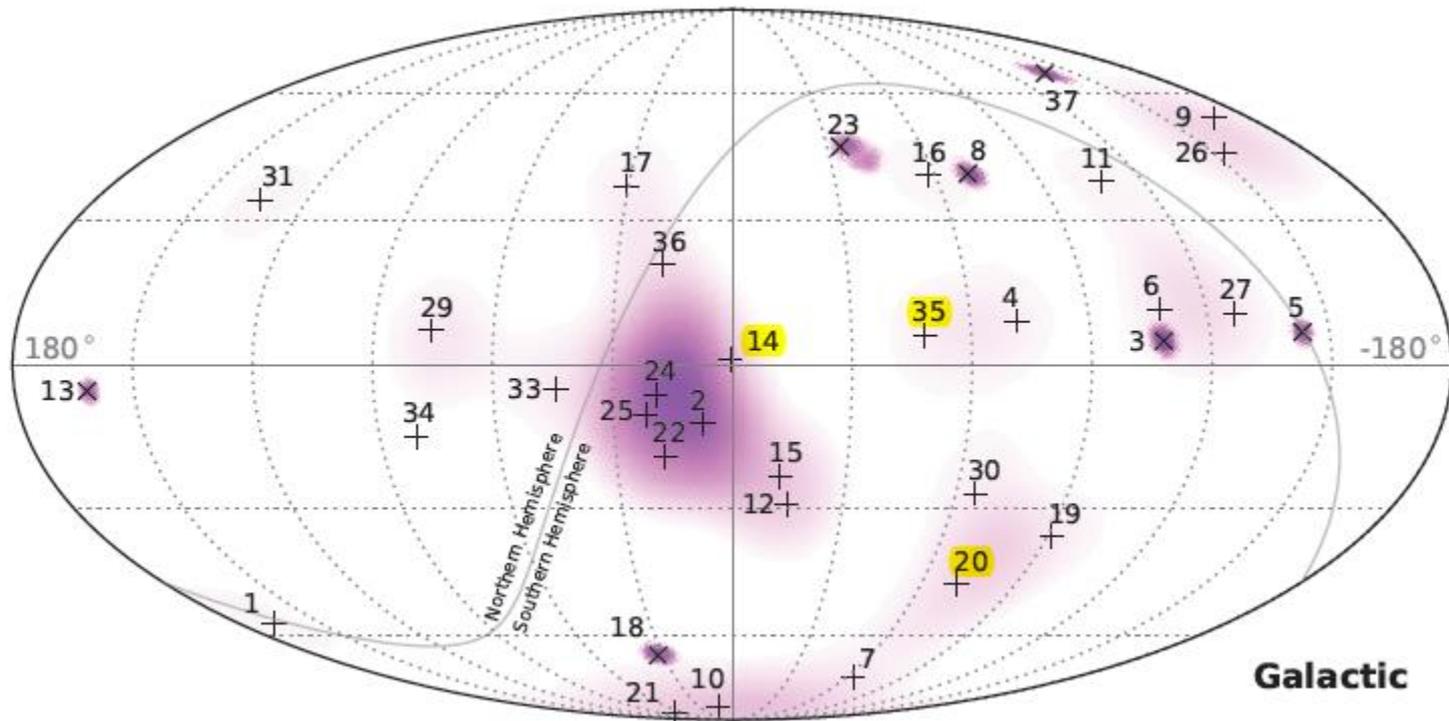


ANTARES



PRIMA EVIDENZA DI NEUTRINI COSMICI

- Distribuzione in coordinate galattiche di eventi di IceCube classificati come neutrini cosmici diffusi.
- Provenienza incerta (galattica/extragalattica?)



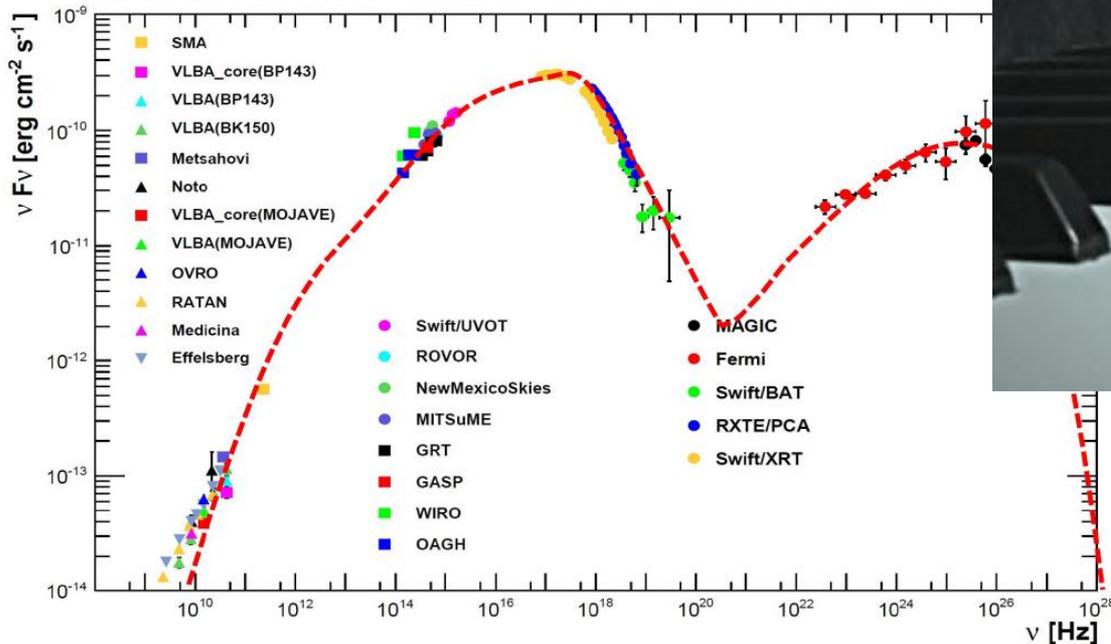
CONCLUSIONI: I ν ...

- ⊙ ... sono tra i Raggi Cosmici quelli che sono i più elusivi
- ⊙ ... sono emessi in un gran numero di processi astrofisici
- ⊙ ... trasportano informazioni complementari rispetto ai fotoni
- ⊙ ... hanno piccola probabilità d'interazione
 - Fuggono senza interagire dalle sorgenti
 - Sono per questo motivo difficili da rivelare
- ⊙ ...hanno permesso di verificare il funzionamento del Sole (fusione nucleare nelle stelle)
- ⊙ ...sono stati rivelati dal collasso gravitazionale della SN1987A (99% dell'energia di legame della stella in neutrini)
- ⊙ ...nuove sonde per l'astrofisica delle alte energie

CONCLUSIONI

- Astrofisica con “luce”: come una sonata con un pianoforte con oltre 20 ottave

AGN: MKN421



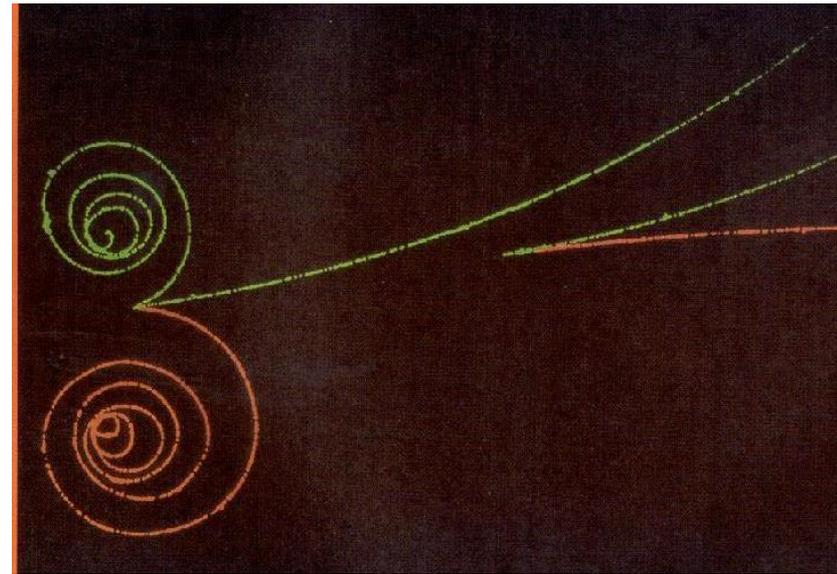
- Astrofisica con neutrini: è aggiungerci il suono del



PER SAPERNE DI PIÙ

COME «VEDERE» ν_e SOLARI ?

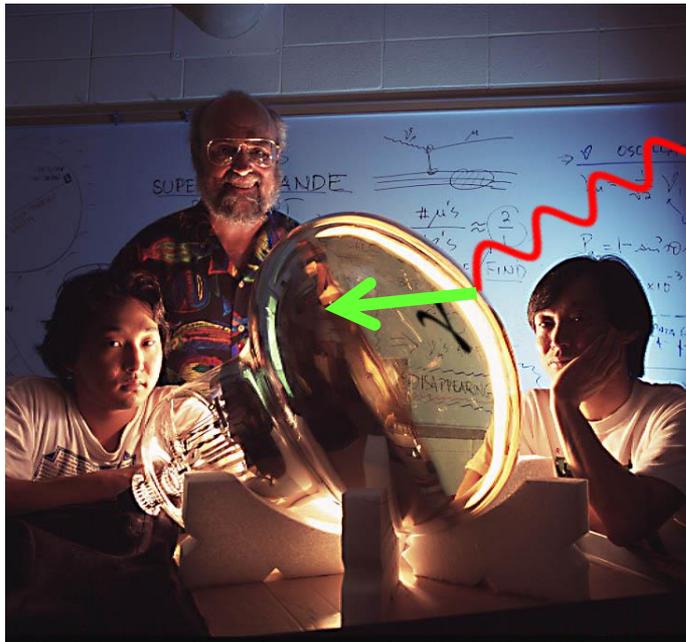
- ◉ In generale: «vediamo» con rivelatori il passaggio di particelle cariche, che *infastidiscono* un mezzo
- ◉ I neutrini (come i fotoni) devono interagire (producendo particelle cariche) per essere rivelati



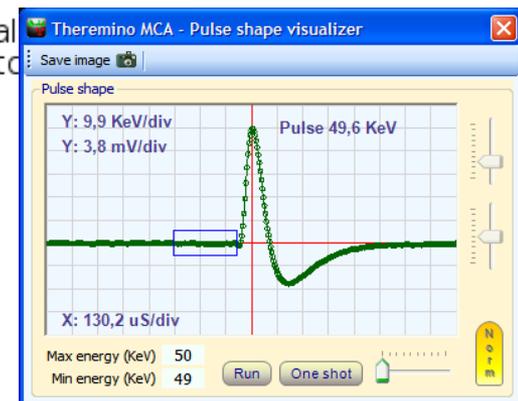
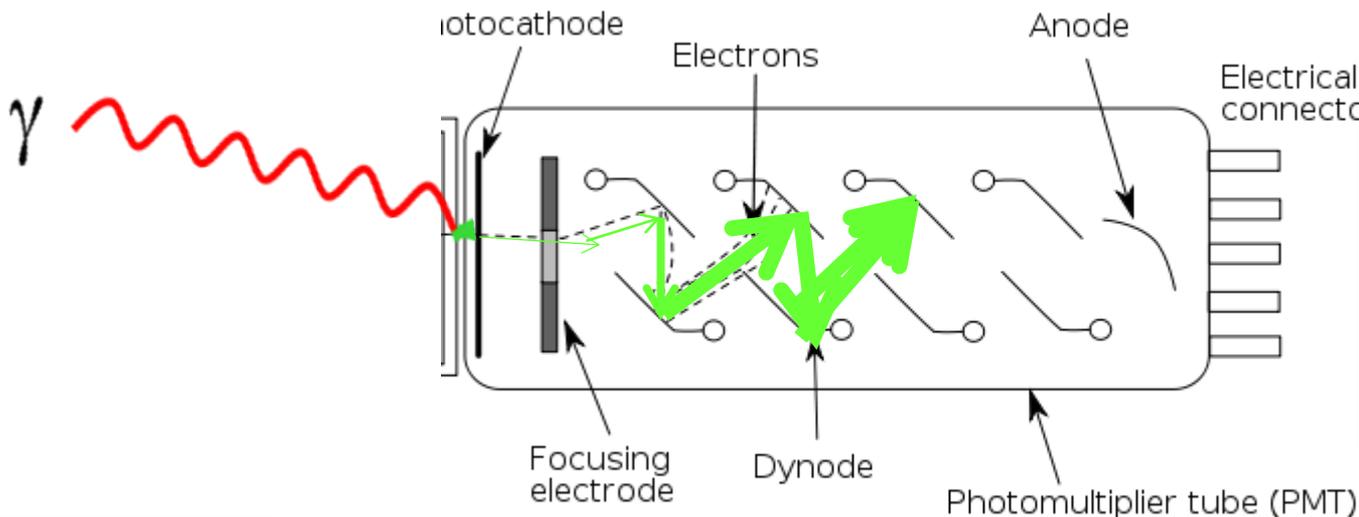
- ◉ **Regolamento**: *i ν_x quando interagiscono*
 - *O rimangono ν_x*
 - *OPPURE diventano X*
- ◉ *Si deve conservare la carica elettrica*
- ◉ *Si deve conservare l'energia*



IL FOTOMOLTIPLICATORE



1. Un fotone (visibile) arriva sul fotocatodo
2. emette un e^- per effetto fotoelettrico
3. L' e^- è focalizzato verso lo stadio di moltiplicazione (regione ad alta tensione)



Astronomy and Astrophysics Library

Maurizio Spurio

Particles and Astrophysics

A Multi-Messenger Approach

This book is an introduction to "multi-messenger" astrophysics. It covers the many different aspects connecting particle physics with astrophysics and cosmology and introduces astrophysics using numerous experimental findings recently obtained through the study of high-energy particles. Taking a systematic approach, it comprehensively presents experimental aspects from the most advanced laboratories and detectors, as well as the theoretical background. The book is aimed at graduate students and post-graduate researchers with a basic understanding of particle and nuclear physics. It will also be of interest to particle physicists working in accelerator/collider physics who are keen to understand the mechanisms of the largest accelerators in the Universe.

The book draws on the extensive lecturing experience of Professor Maurizio Spurio from the University of Bologna.

Astronomy / Astrophysics

ISBN 978-3-319-08050-5



► springer.com



Spurio



Particles and Astrophysics

Astronomy and Astrophysics Library

Maurizio Spurio

Particles and Astrophysics

A Multi-Messenger Approach



Springer

