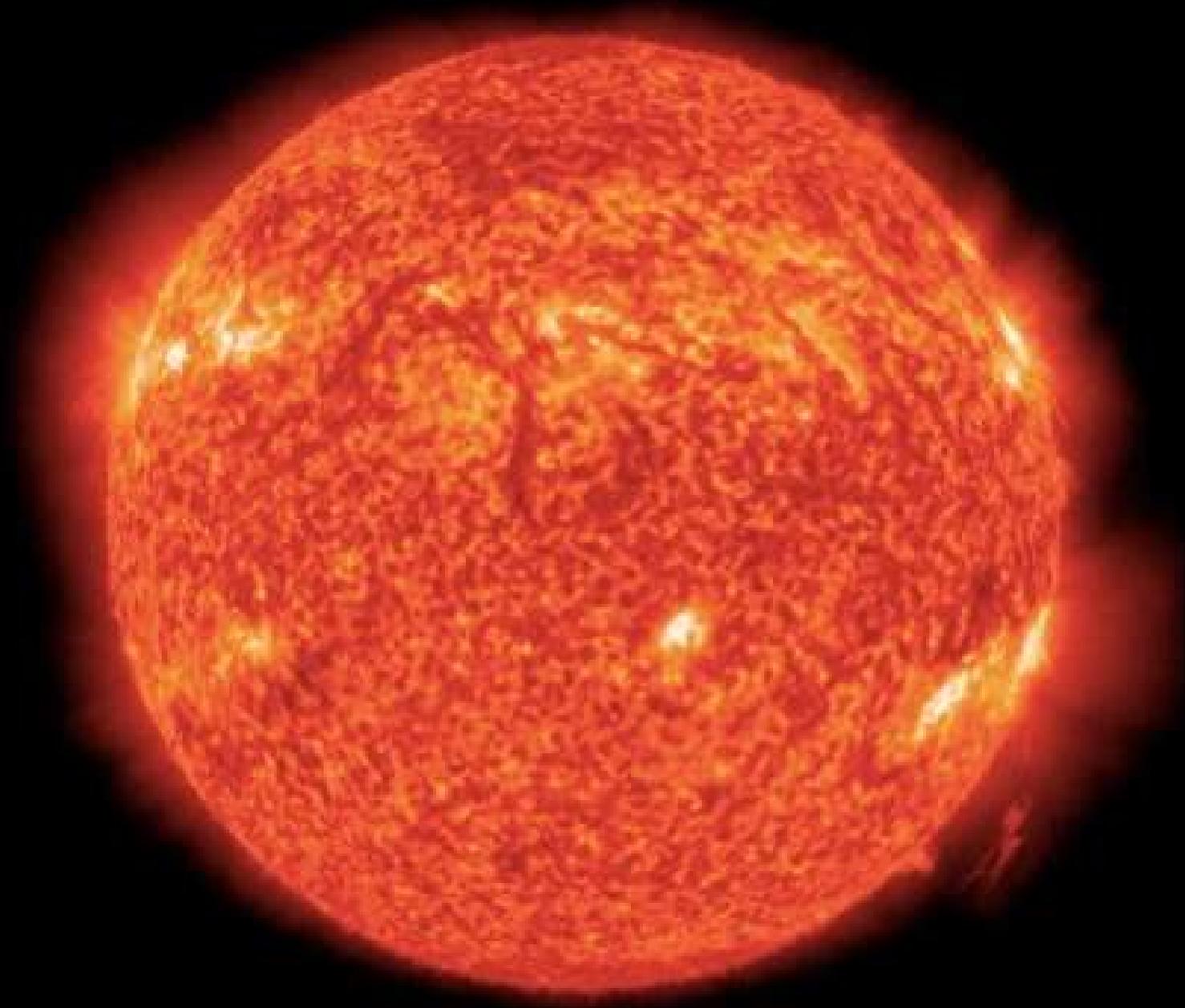




SOSTENIBILITA' STELLARE:

come vivono, muoiono e *resuscitano* le stelle

Mario Cadelano
Università di Bologna
INAF-OAS Bologna





**Si definisce STELLA un sistema composto di plasma,
AUTOGRAVITANTE ed in condizioni di equilibrio**

La condizione di equilibrio è garantita dal perfetto bilanciamento tra:

1) La forza gravitazionale

2) La forza prodotta dalle reazioni termonucleari nelle regioni centrali



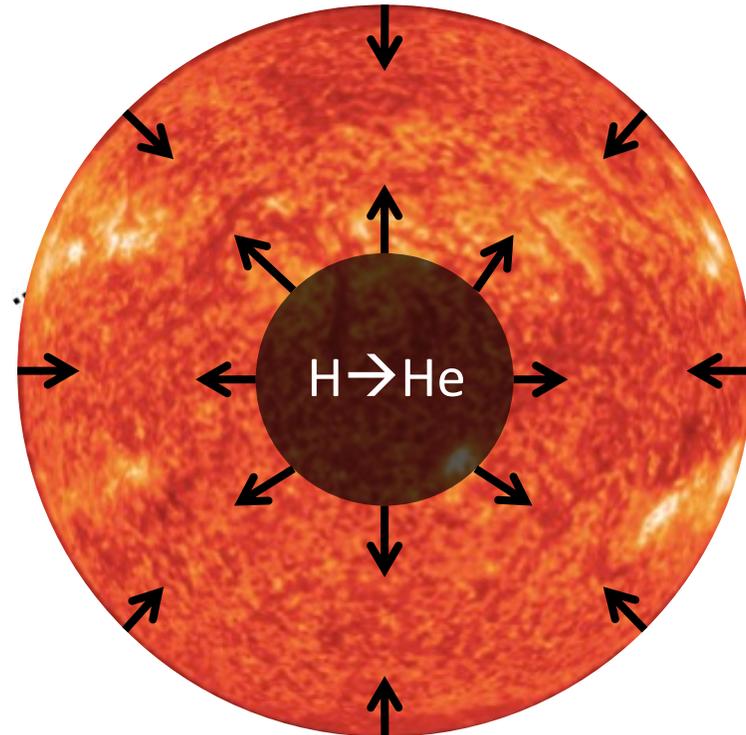
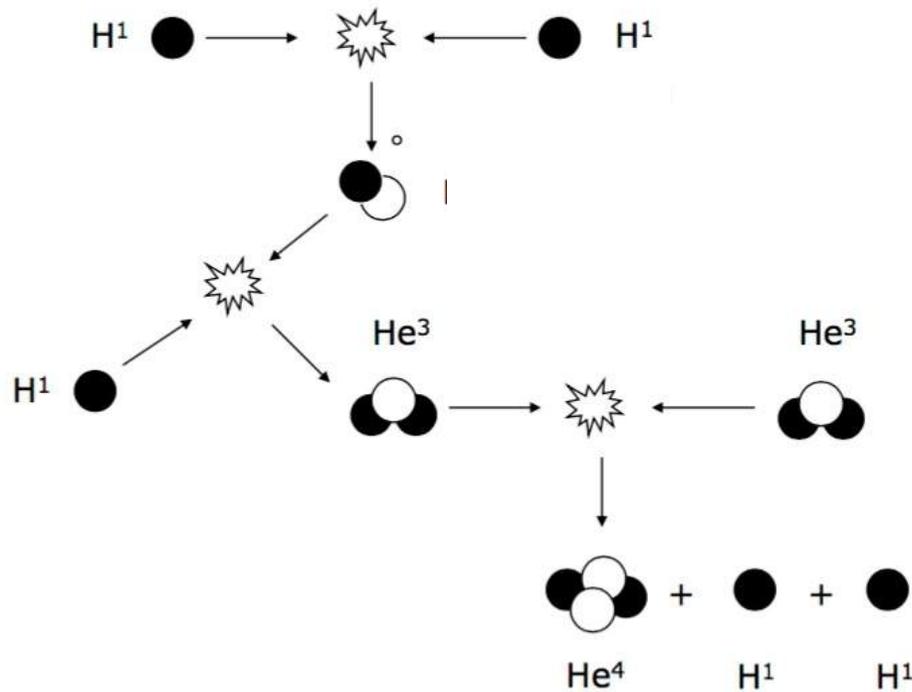


Credit: NASA/STScI



Evoluzione Stellare

Le reazioni termonucleari sono in grado di produrre l'energia che si oppone alla forza gravitazionale.

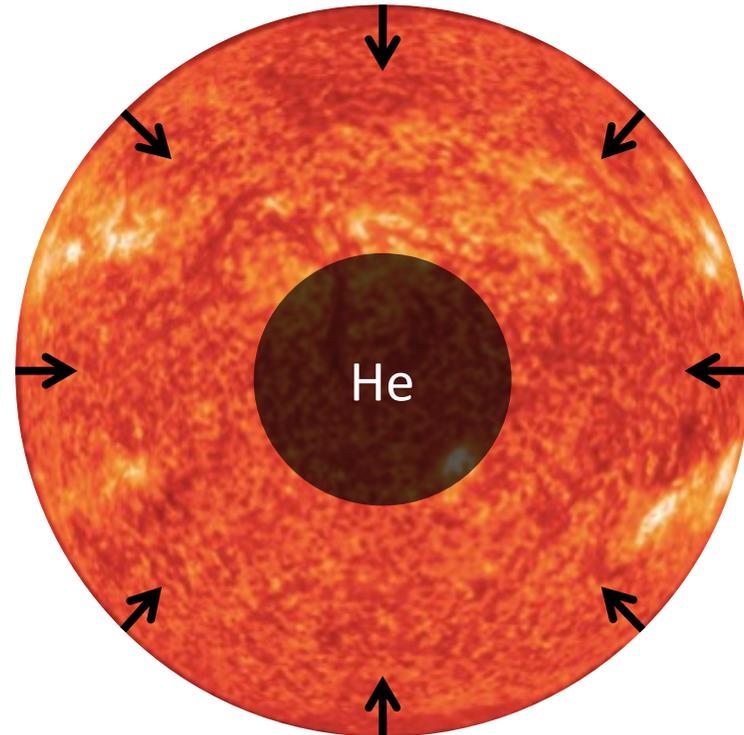


Reazioni termonucleari sono **ESOERGONICHE**

Evoluzione Stellare

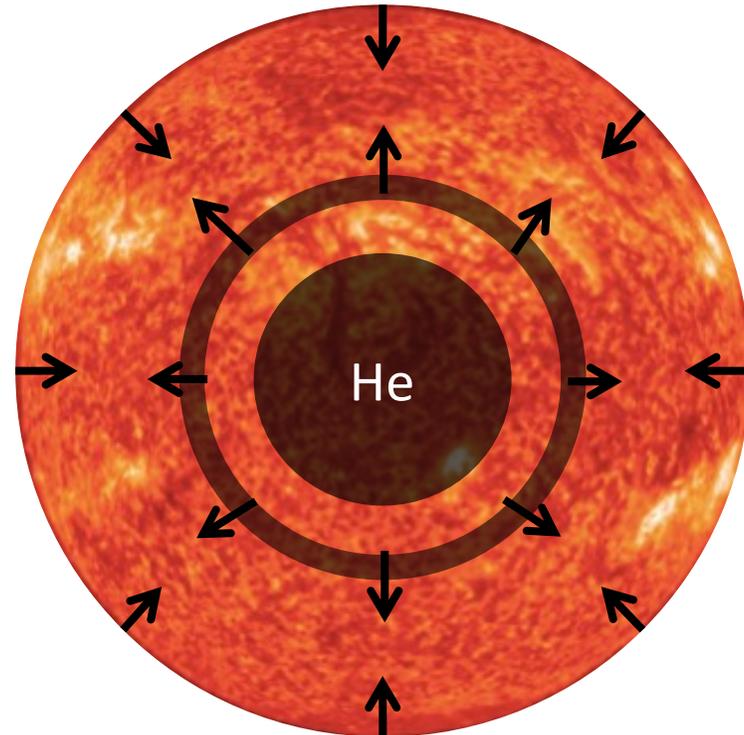
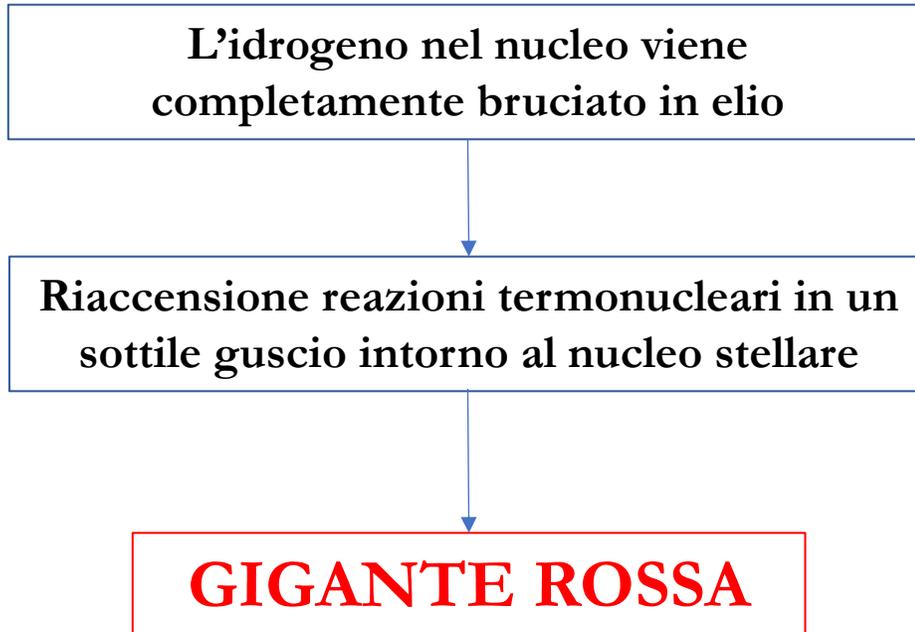
Le reazioni termonucleari sono in grado di produrre l'energia che si oppone alla forza gravitazionale.

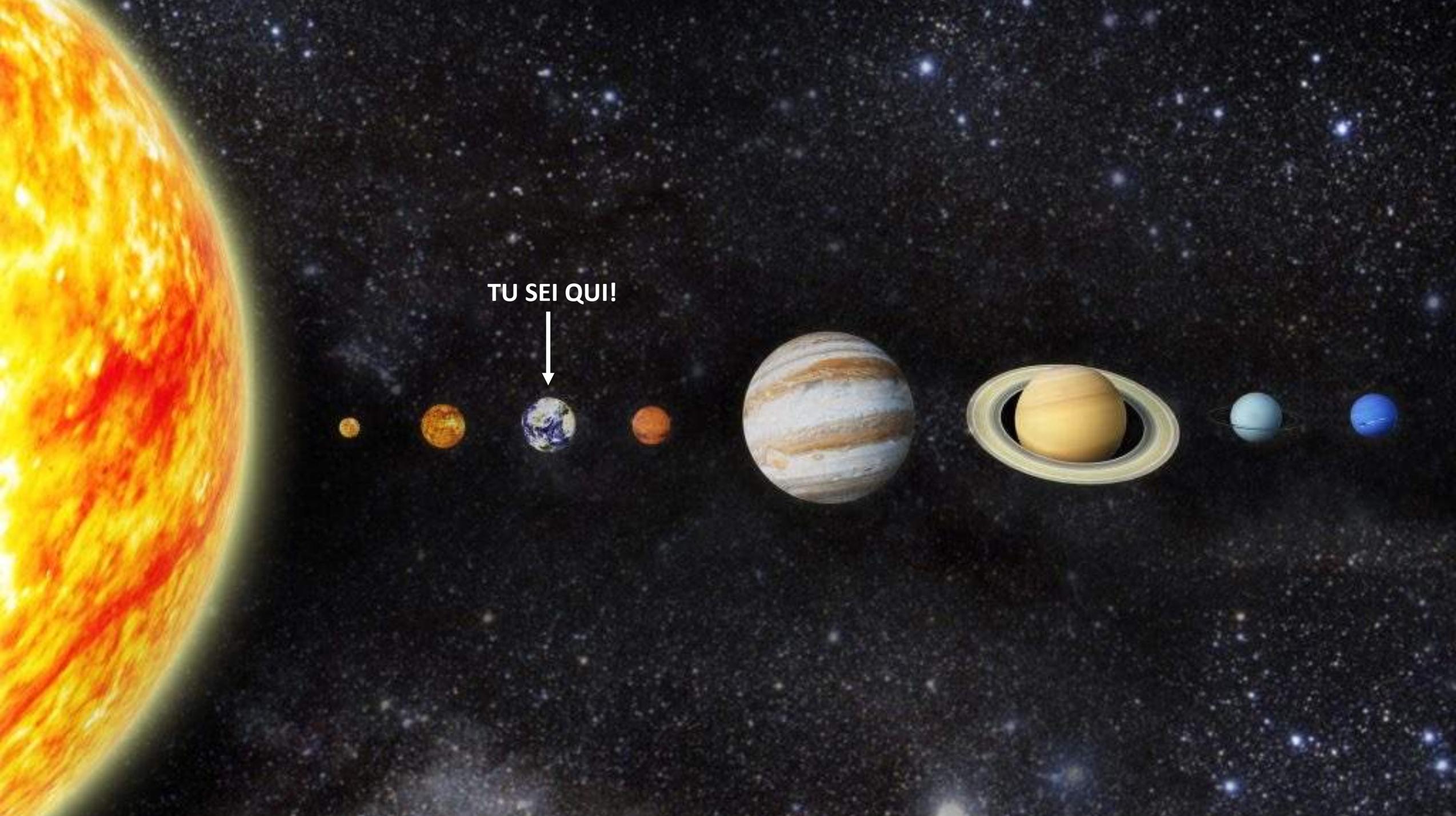
L'idrogeno nel nucleo viene
completamente bruciato in elio



Evoluzione Stellare

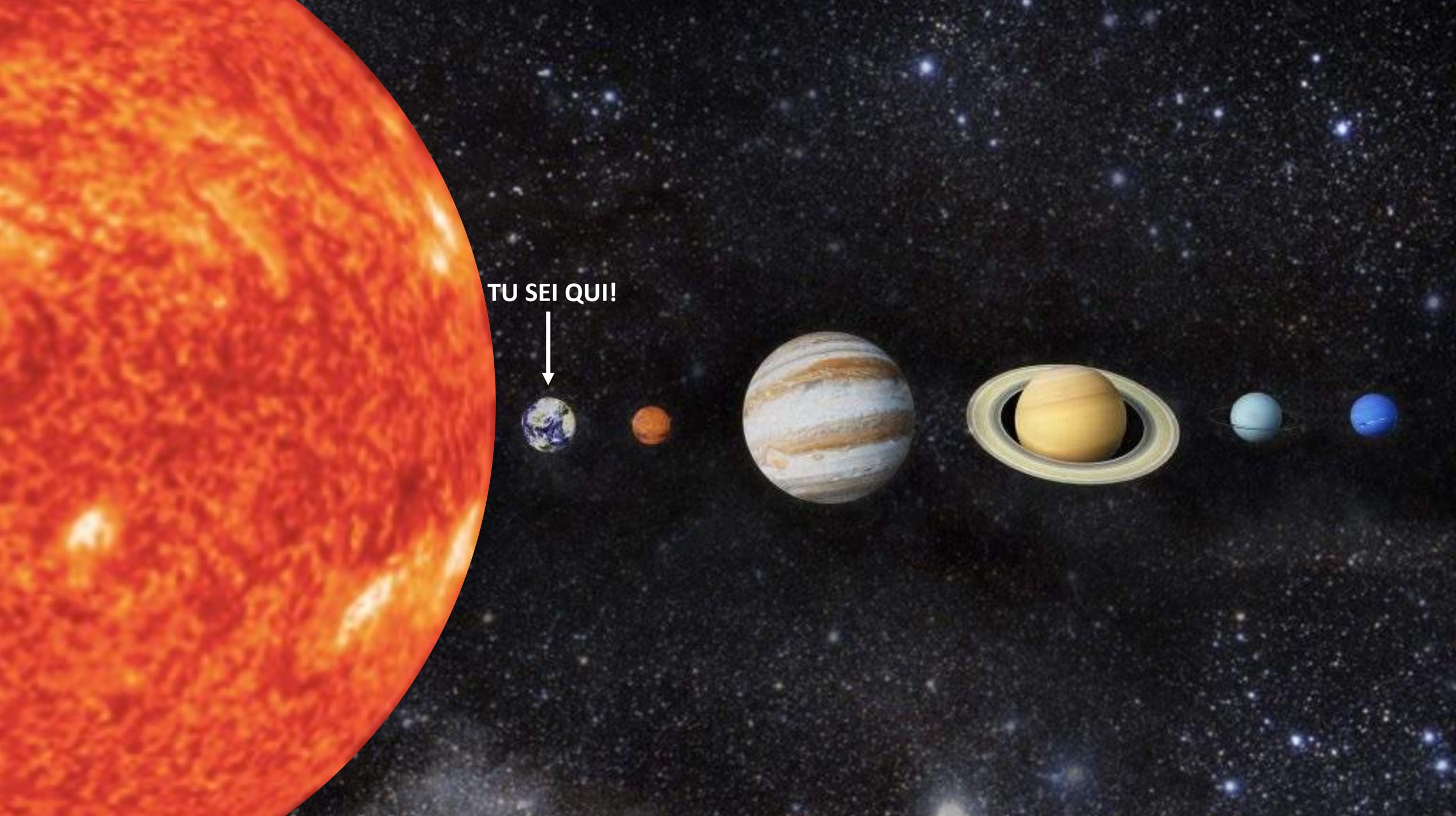
Le reazioni termonucleari sono in grado di produrre l'energia che si oppone alla forza gravitazionale.





TU SEI QUI!



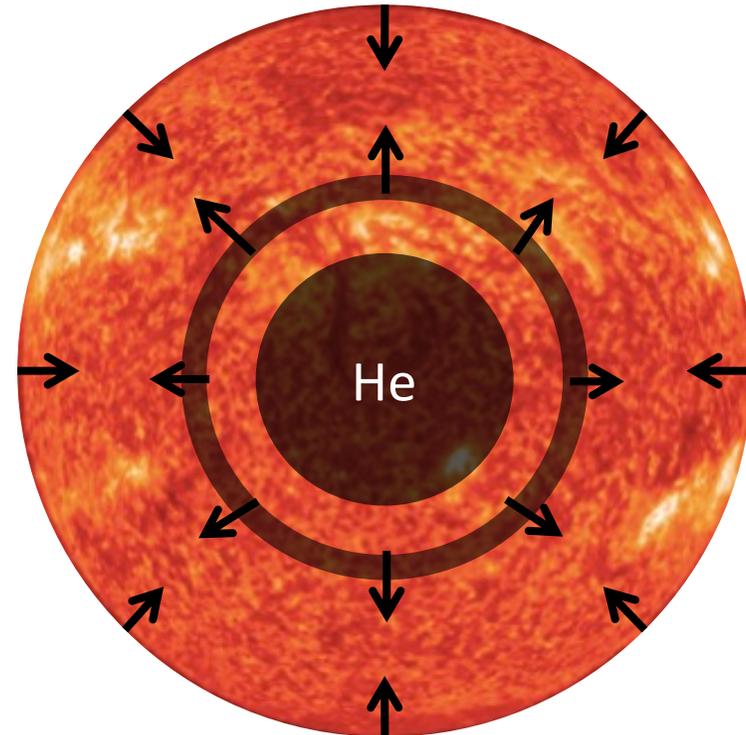
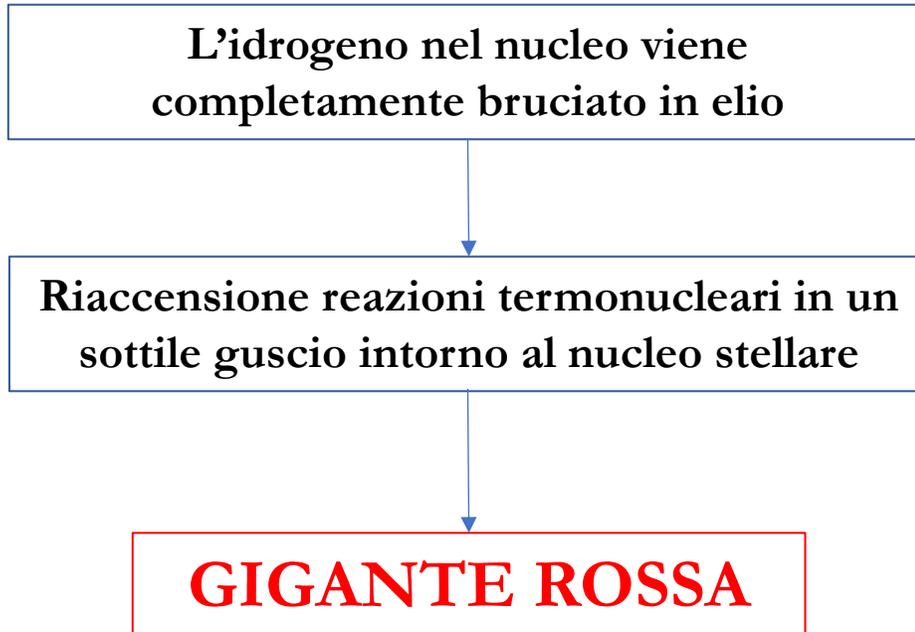


TU SEI QUI!



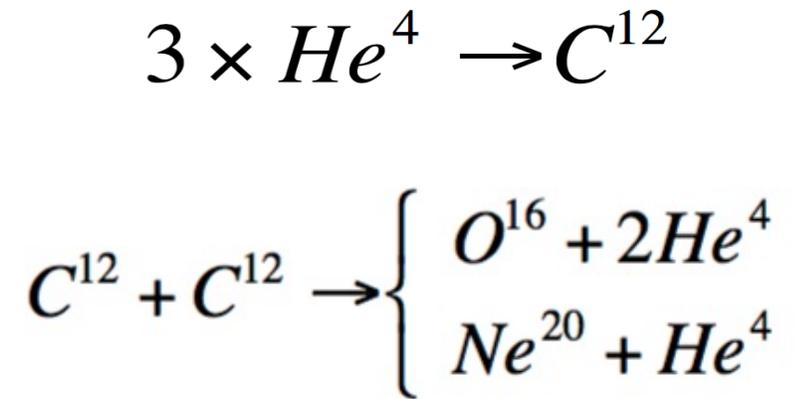
Evoluzione Stellare

Le reazioni termonucleari sono in grado di produrre l'energia che si oppone alla forza gravitazionale.

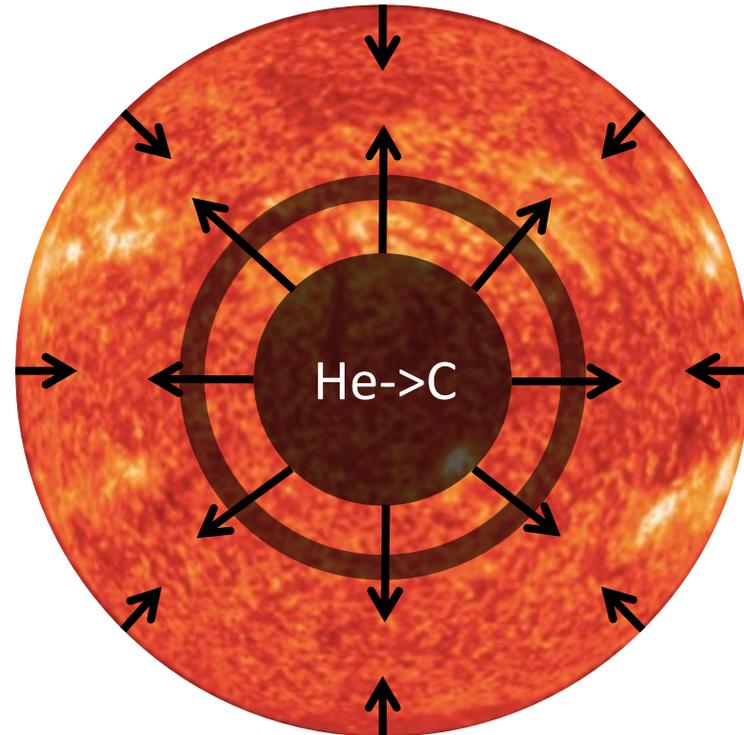


Evoluzione Stellare

Le reazioni termonucleari sono in grado di produrre l'energia che si oppone alla forza gravitazionale.



Il nucleo della stella brucia tutto il suo elio
in carbonio ed ossigeno

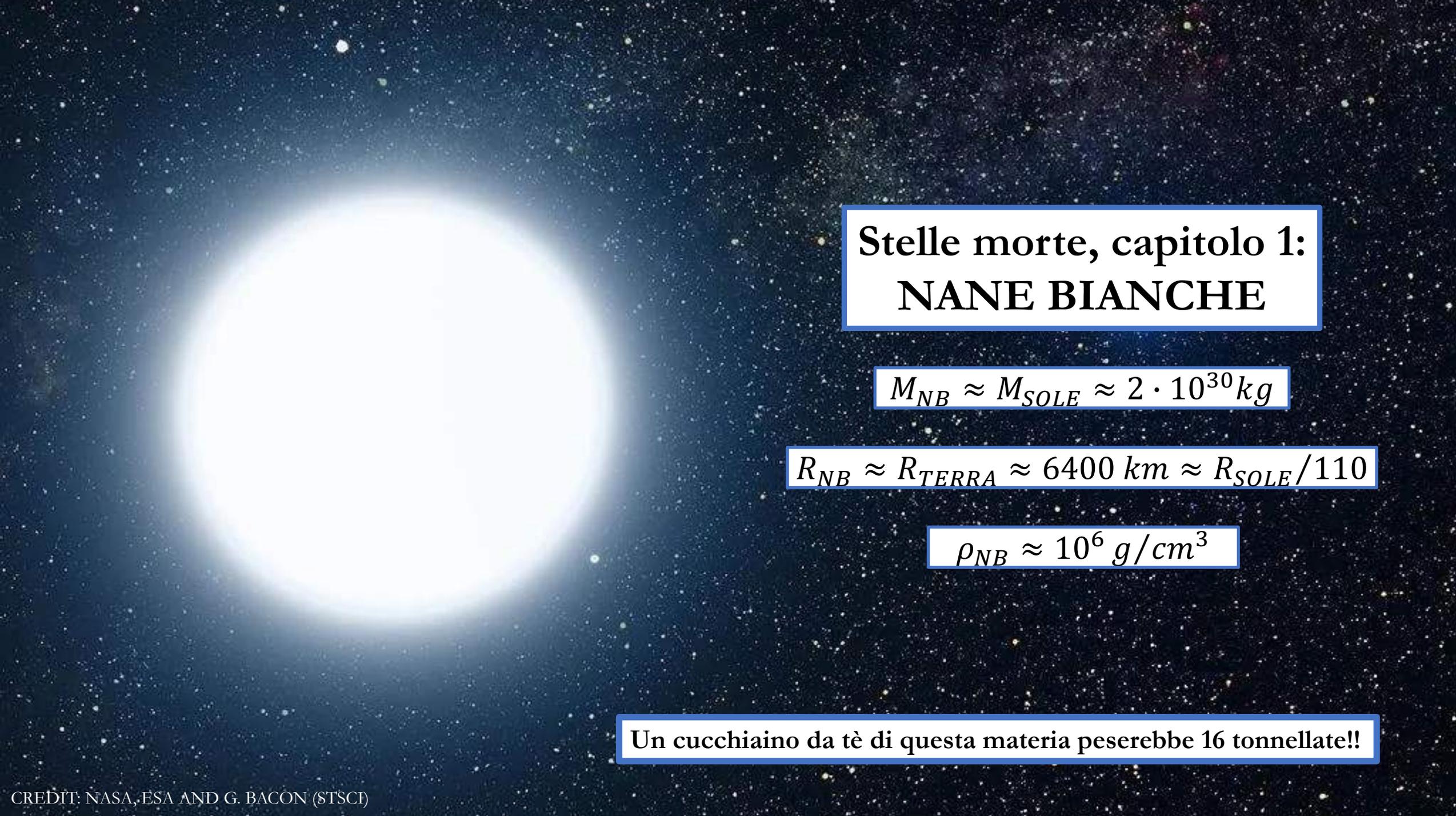


Se la massa della stella è < 8 volte la massa del Sole...



NEBULOSA PLANETARIA





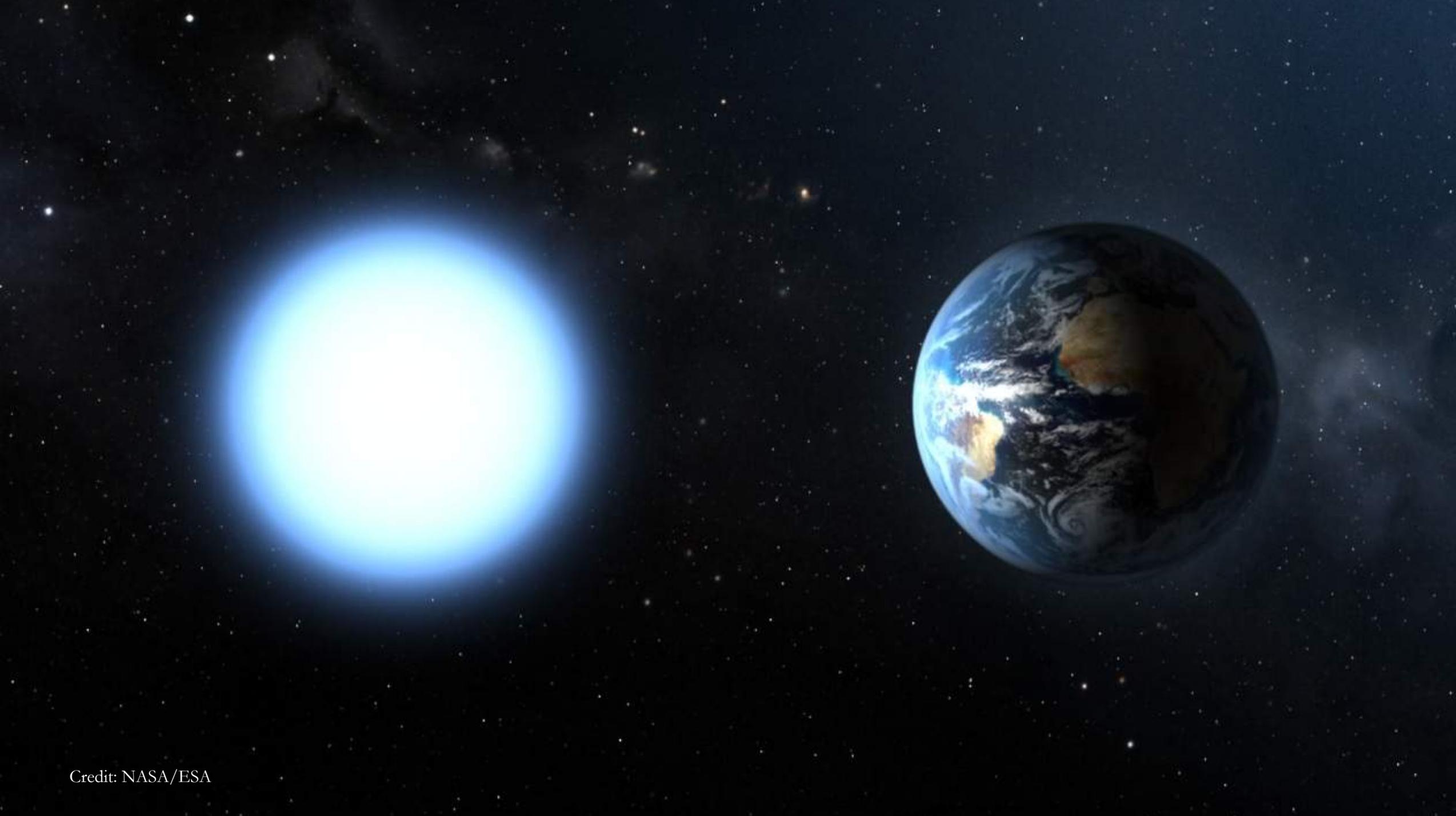
Stelle morte, capitolo 1: NANE BIANCHE

$$M_{NB} \approx M_{SOLE} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{NB} \approx R_{TERRA} \approx 6400 \text{ km} \approx R_{SOLE}/110$$

$$\rho_{NB} \approx 10^6 \text{ g/cm}^3$$

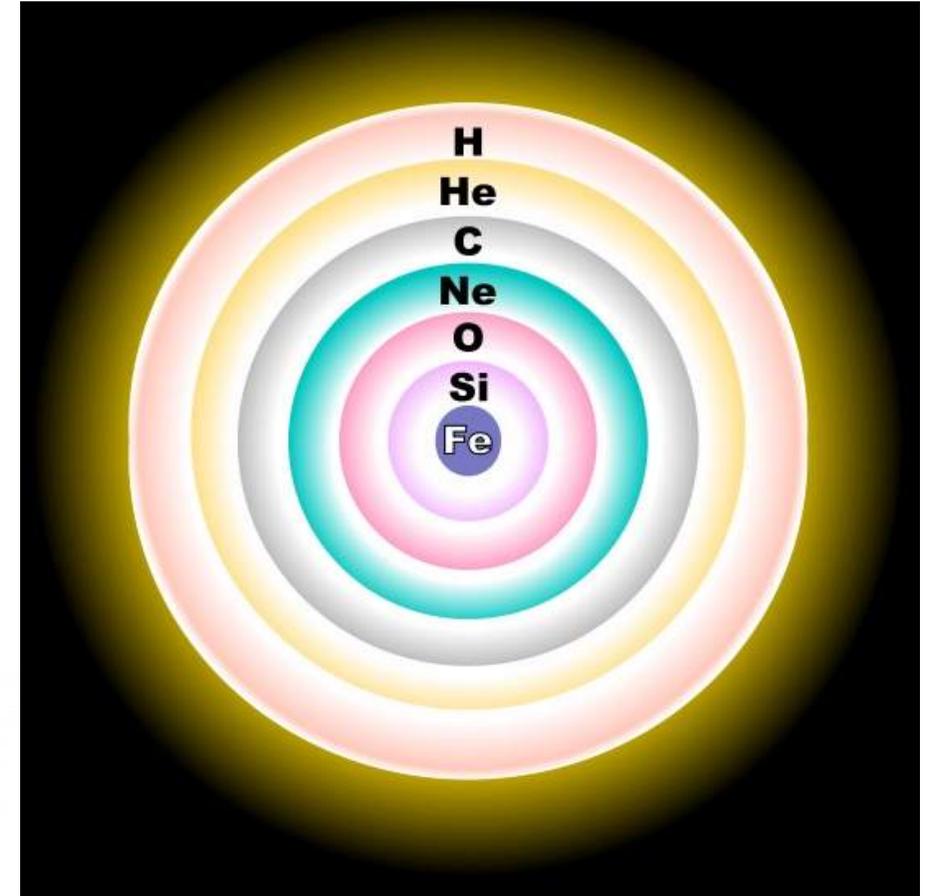
Un cucchiaino da tè di questa materia peserebbe 16 tonnellate!!



Credit: NASA/ESA

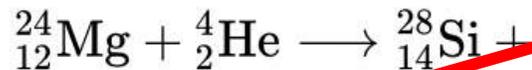
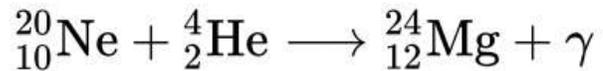
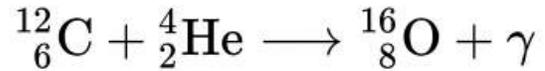
Stelle con massa > 8 volte la massa del Sole

Stelle con massa maggiore di 8 masse solari proseguono il ciclo di contrazione gravitazionale ed accensione reazioni nucleari.

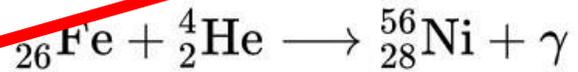


Stelle con massa > 8 volte la massa del Sole

Stelle con massa maggiore di 8 masse solari proseguono il ciclo di contrazione gravitazionale ed accensione nucleare.



${}_{14}^{28}\text{Si}$



SUPERNOVA!!!





Se la massa della stella è $< 20-30$ volte la massa del Sole...

Stelle morte, capitolo 2: STELLE DI NEUTRONI

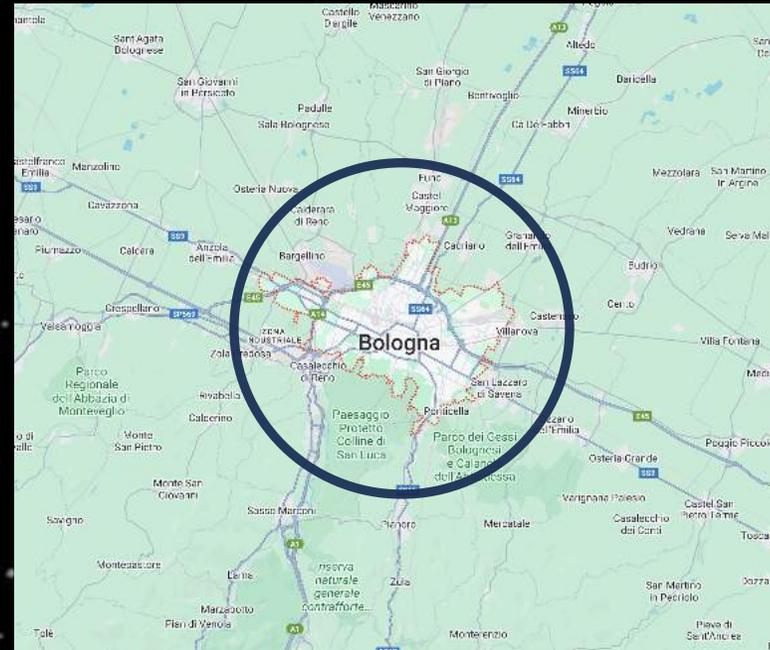


$$R_{SN} = 10 - 15 \text{ km}$$

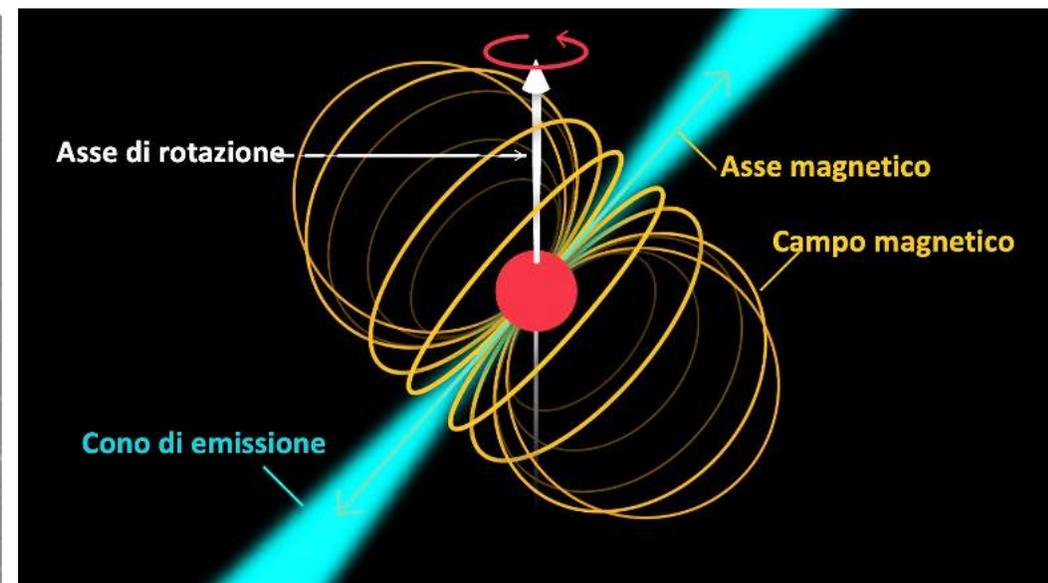
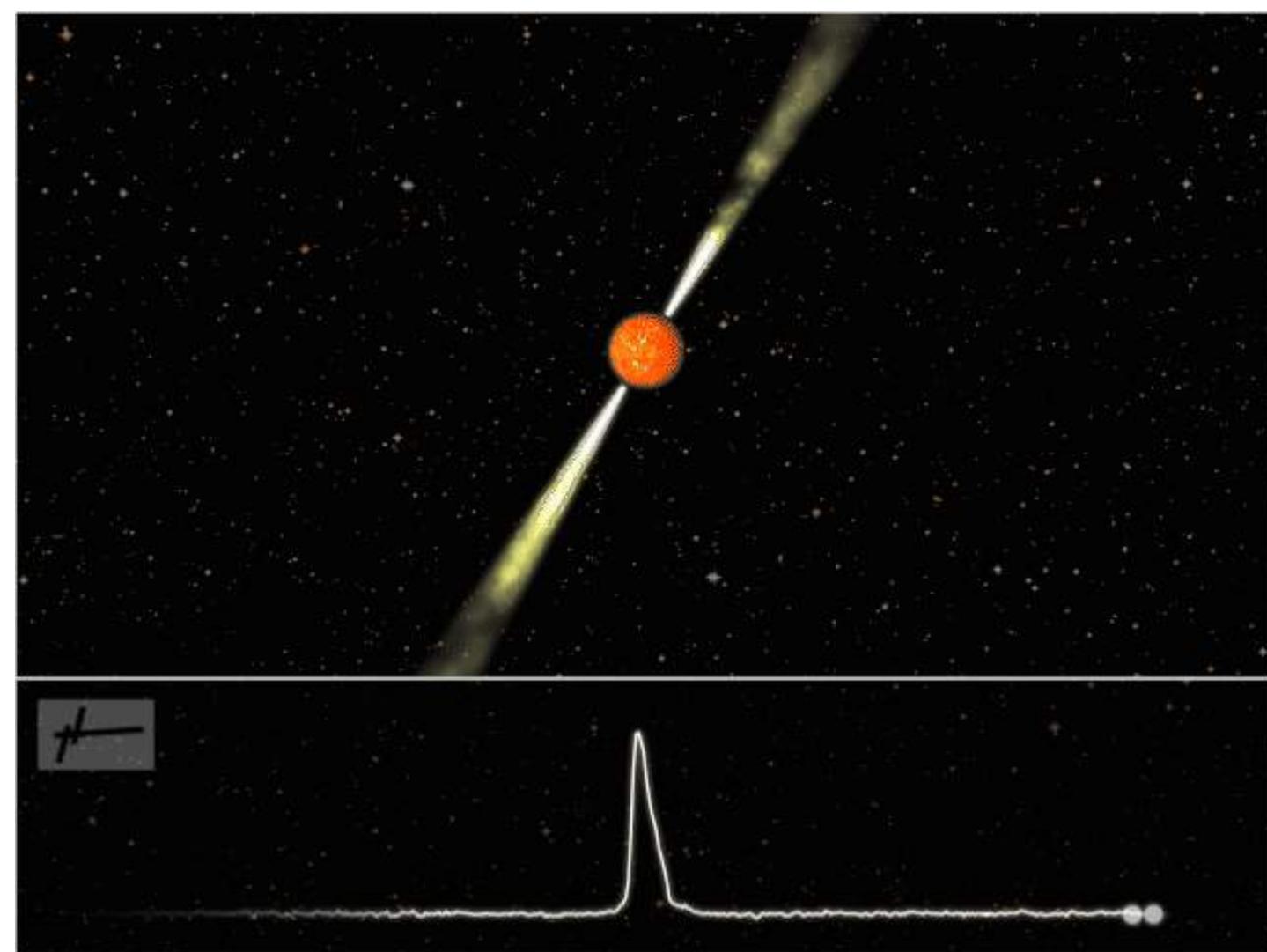
$$M_{SN} \approx 1.4 M_{SOLE}$$

$$\rho_{SN} \approx 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

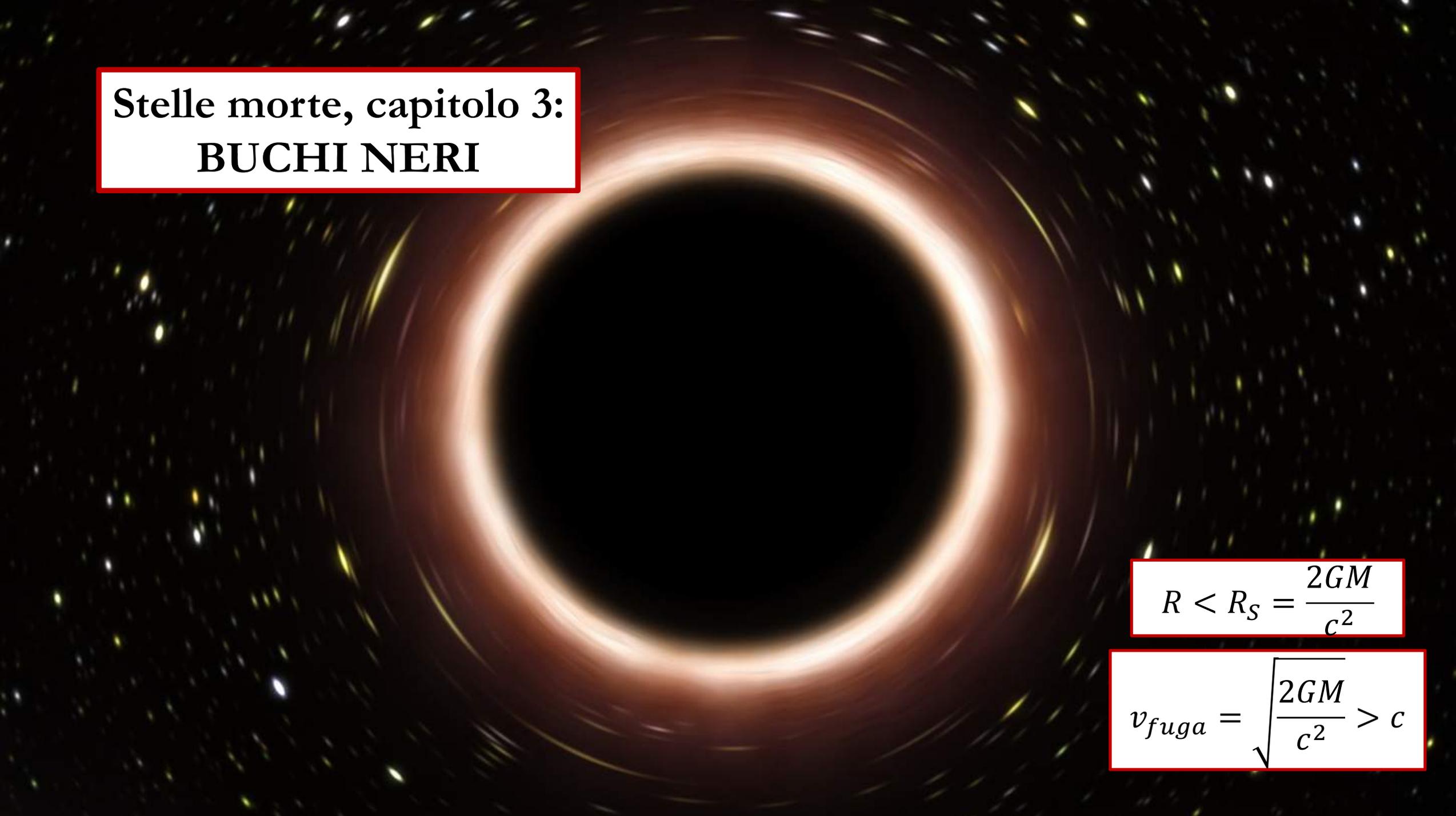
Un cucchiaino da tè di questa
materia peserebbe più
dell'umanità intera!!



Stelle di Neutroni -> Pulsar



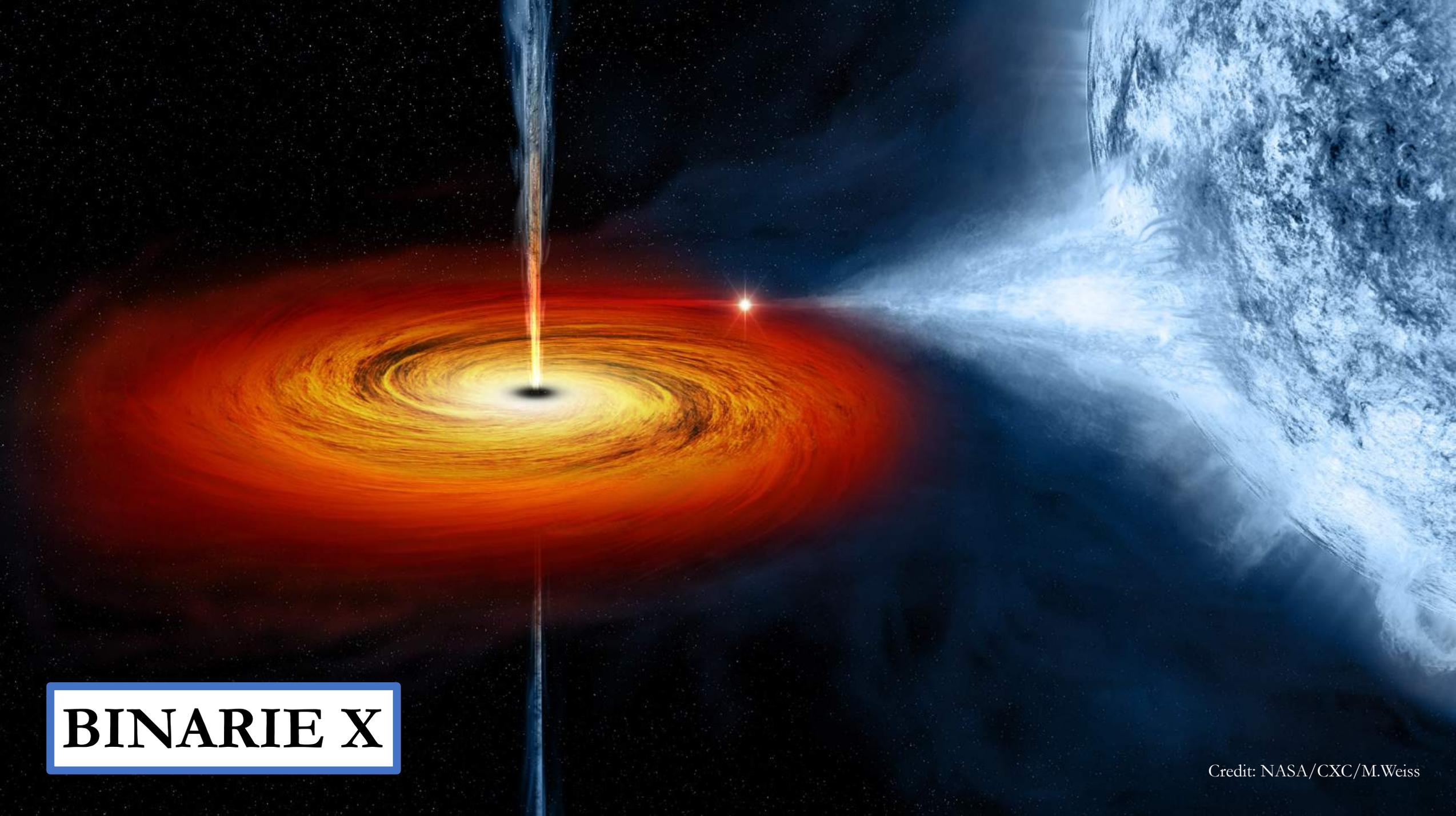
Se la massa della stella è > 30 volte la massa del Sole...



Stelle morte, capitolo 3:
BUCHI NERI

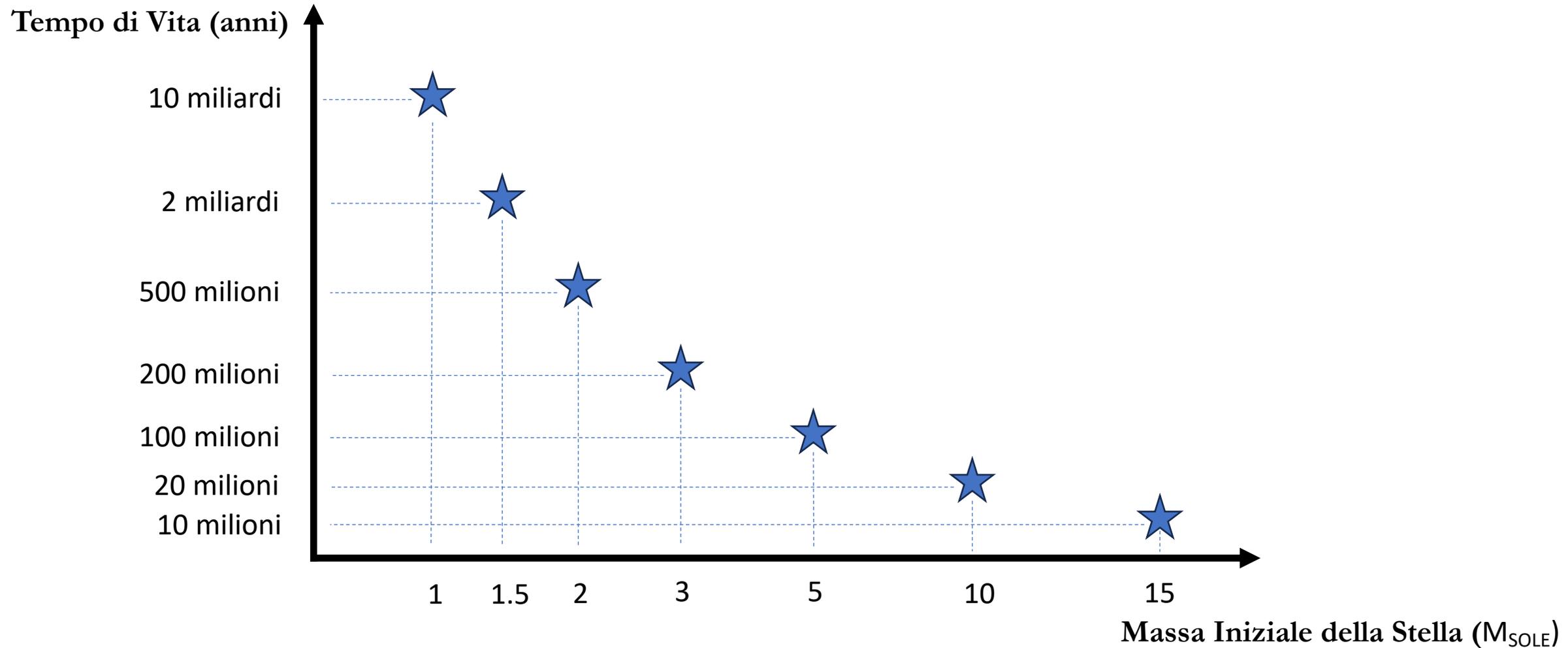
$$R < R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

$$v_{fuga} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2}} > c$$



BINARIE X

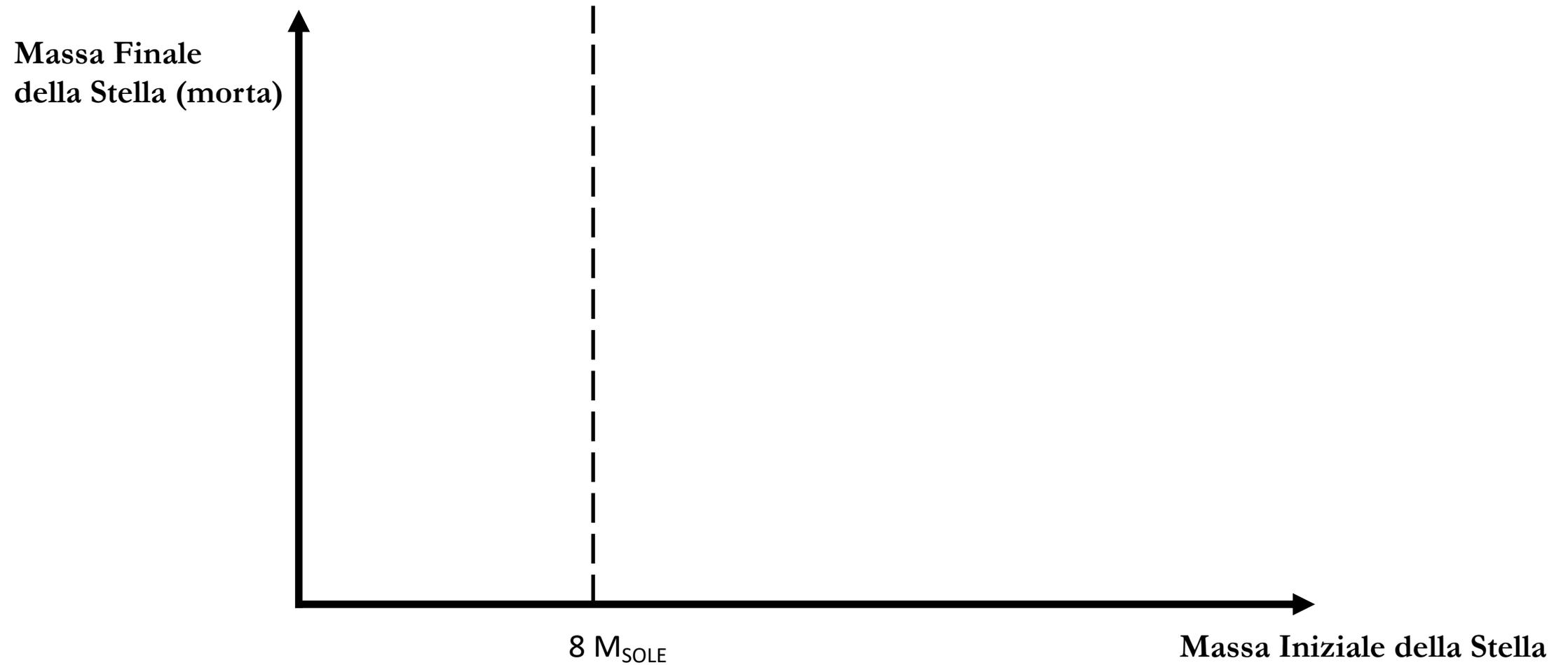
La durata della vita una stella



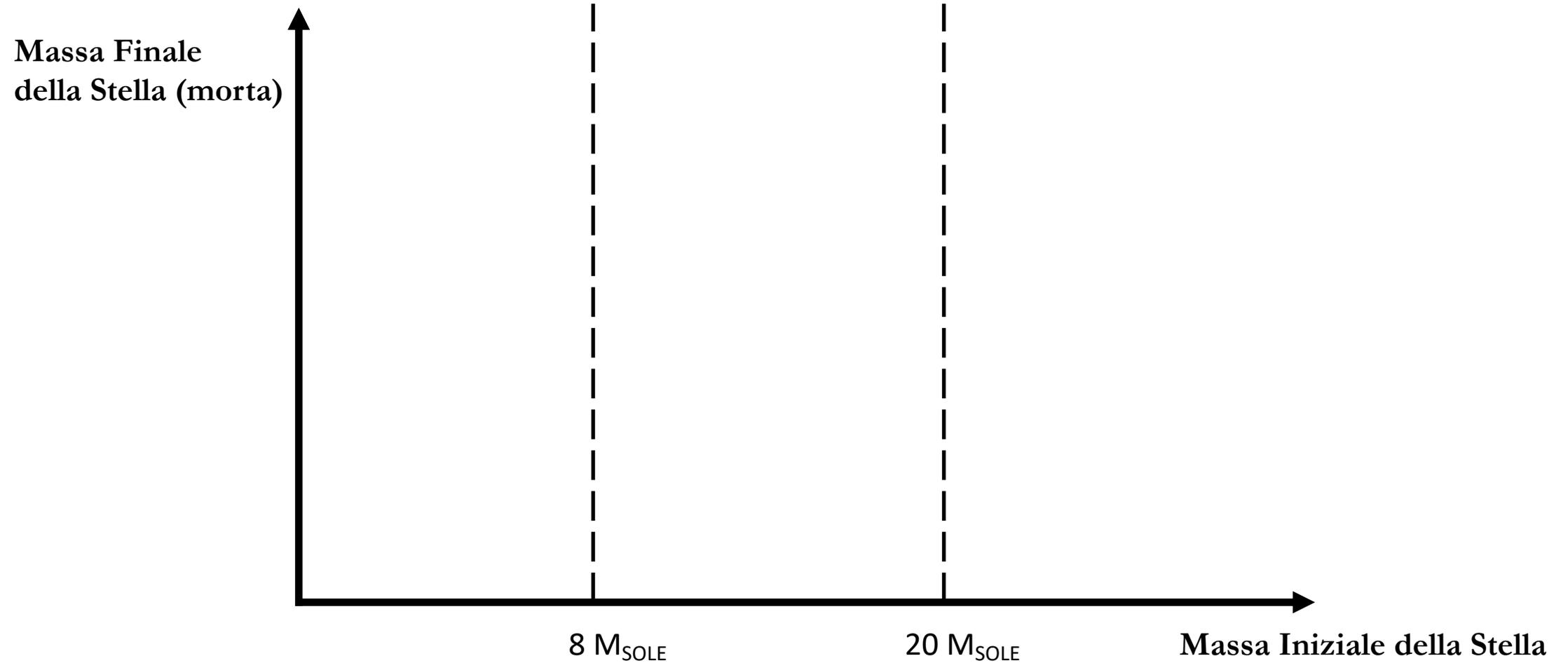
Il destino di una stella



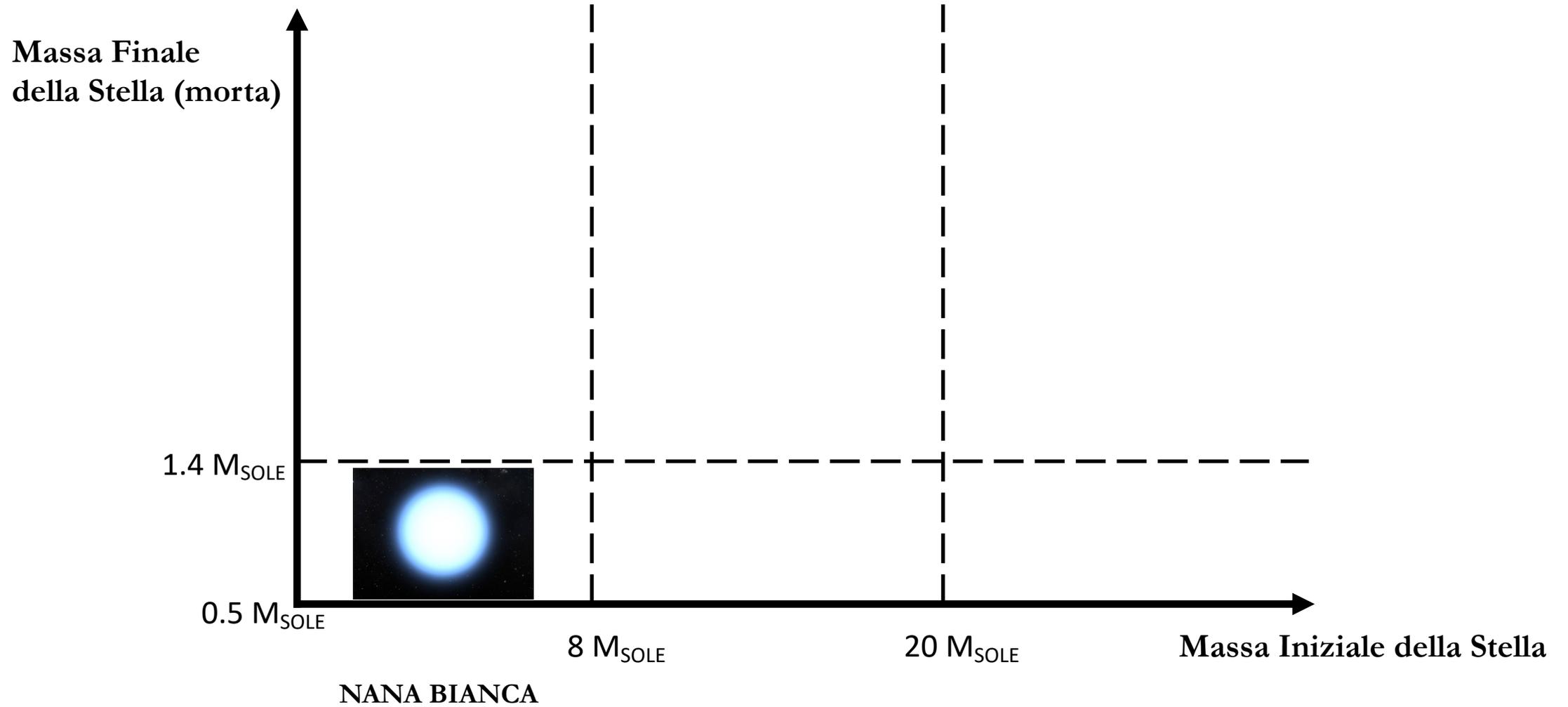
Il destino di una stella



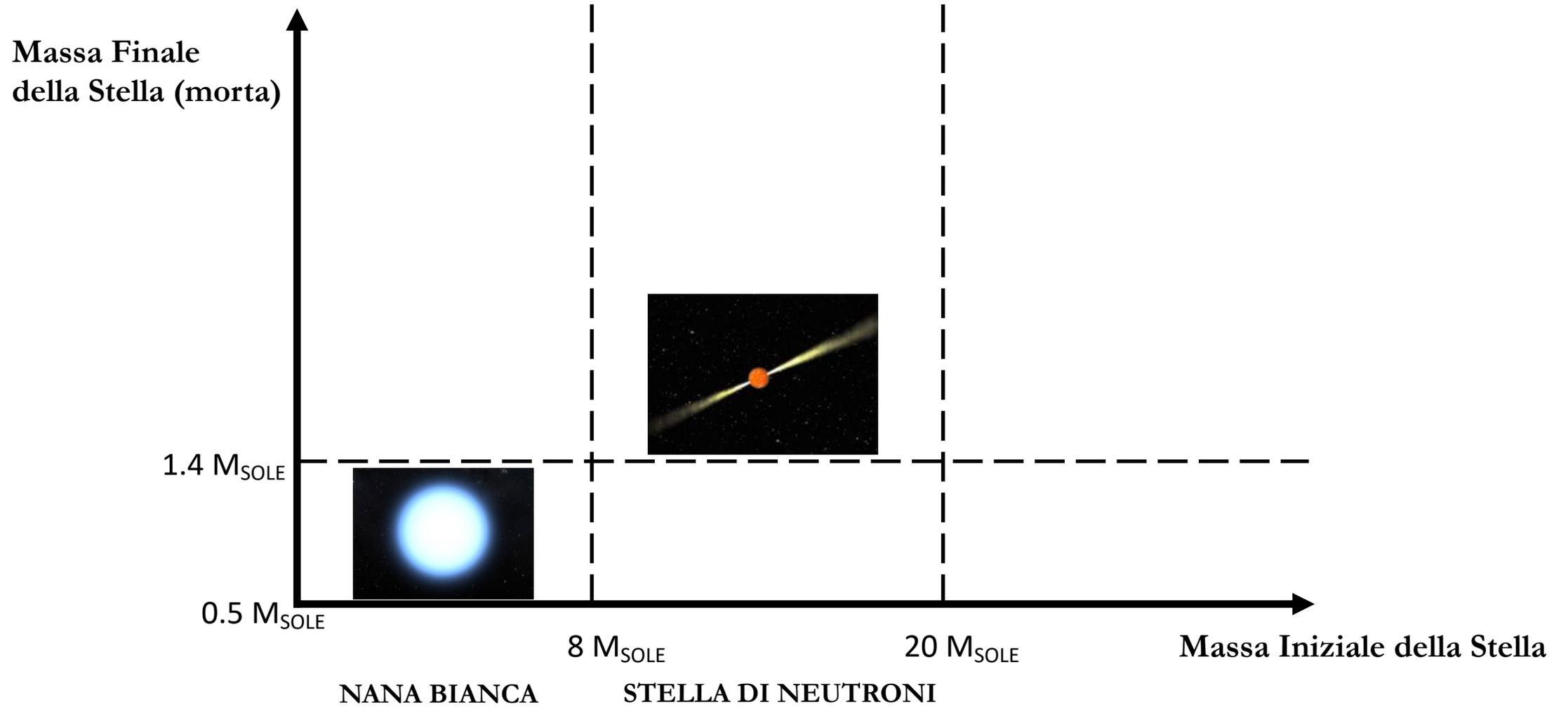
Il destino di una stella



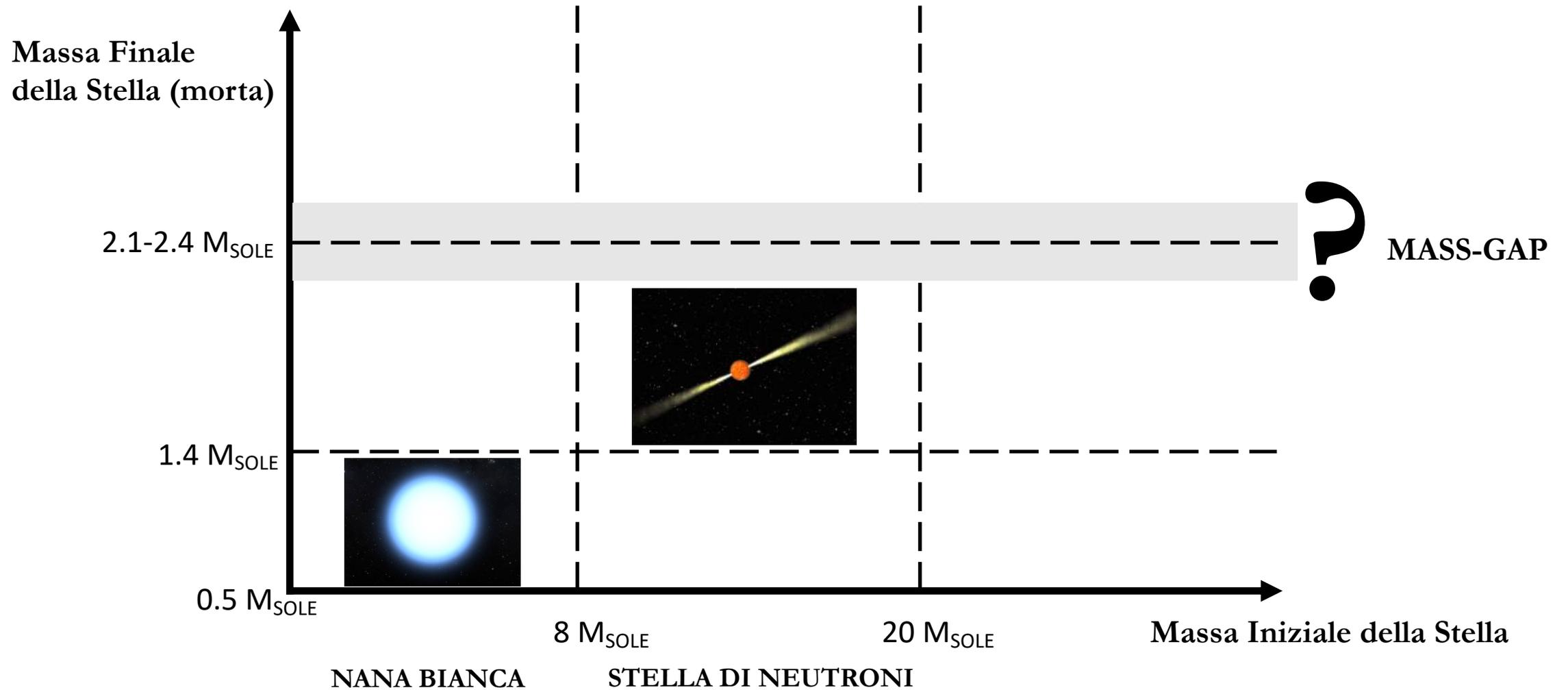
Il destino di una stella



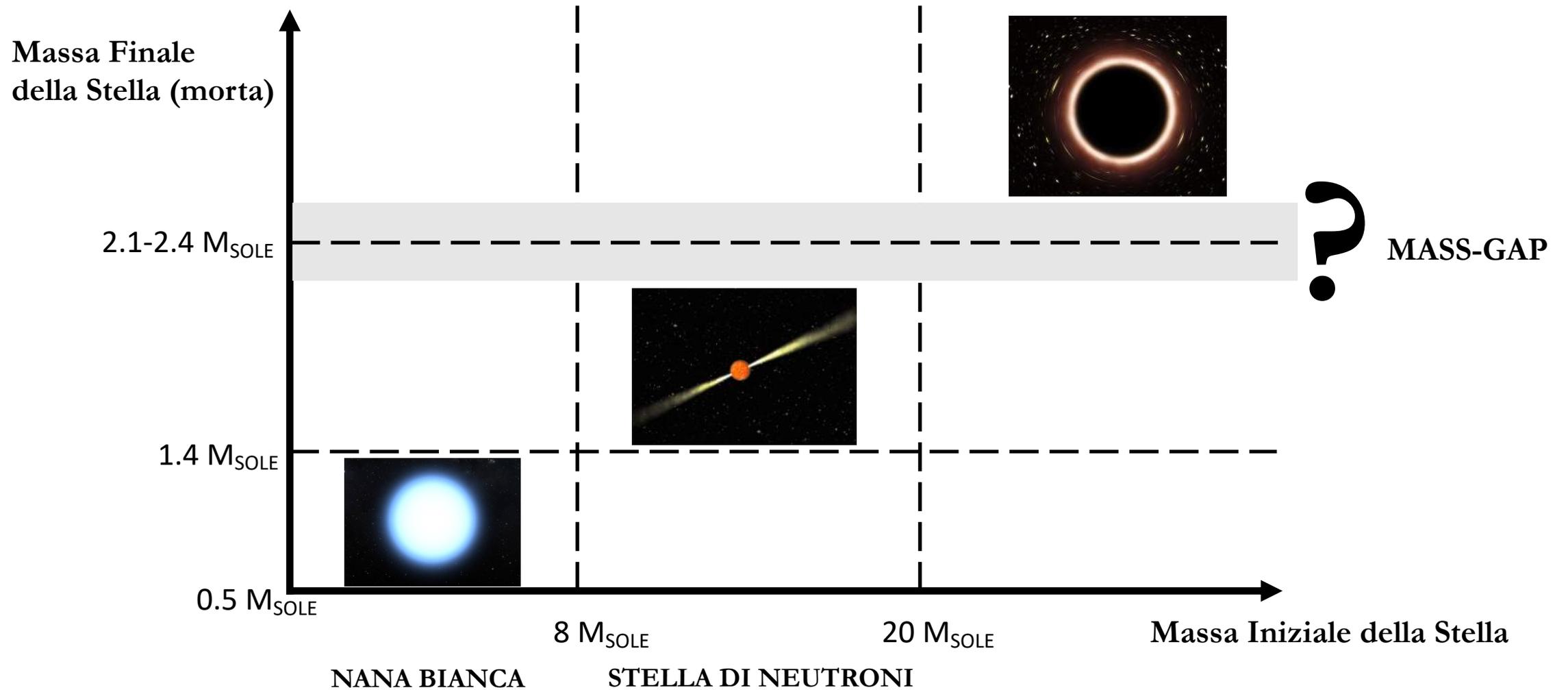
Il destino di una stella

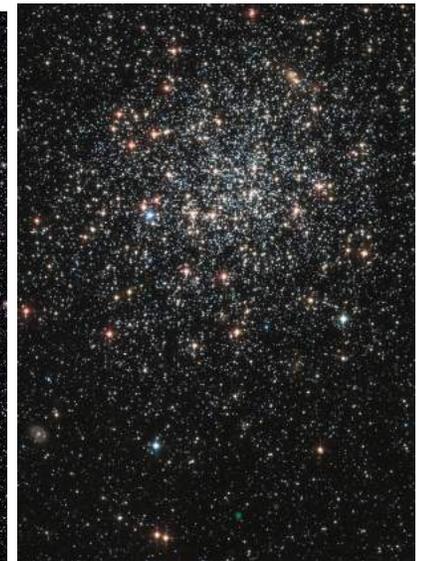
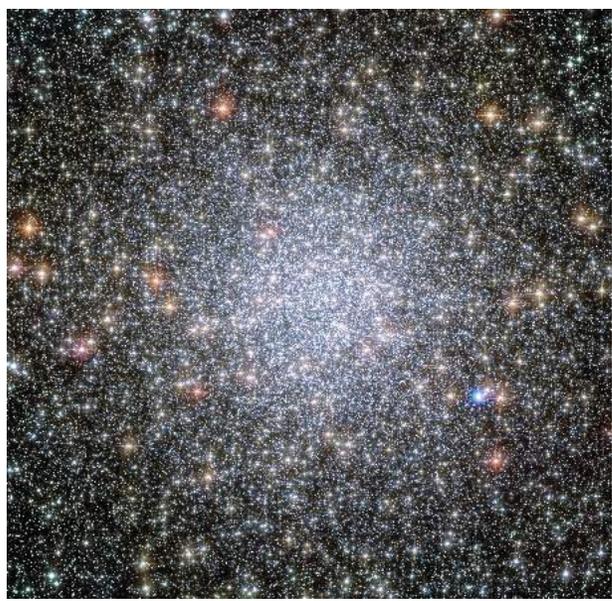


Il destino di una stella

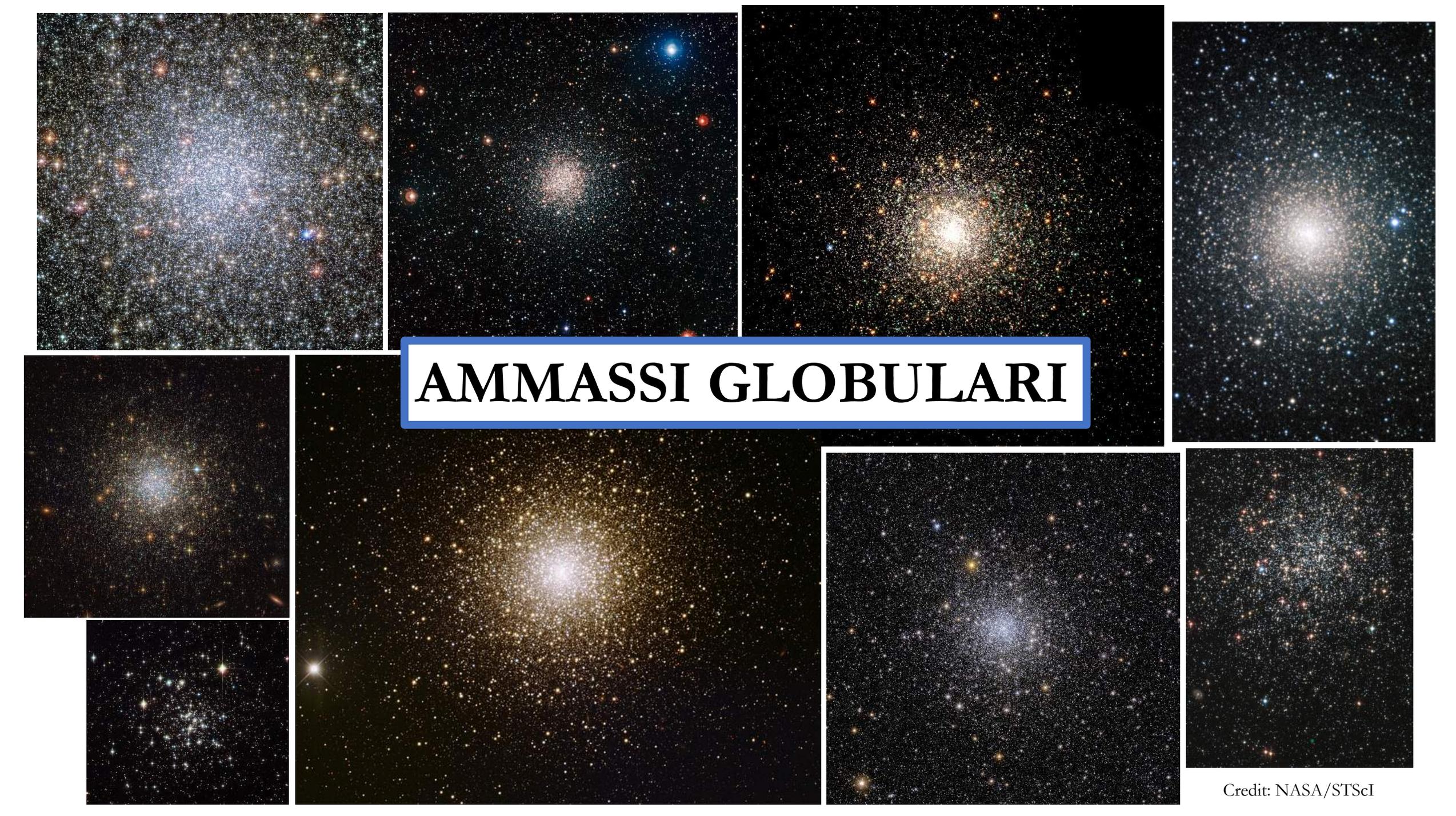


Il destino di una stella

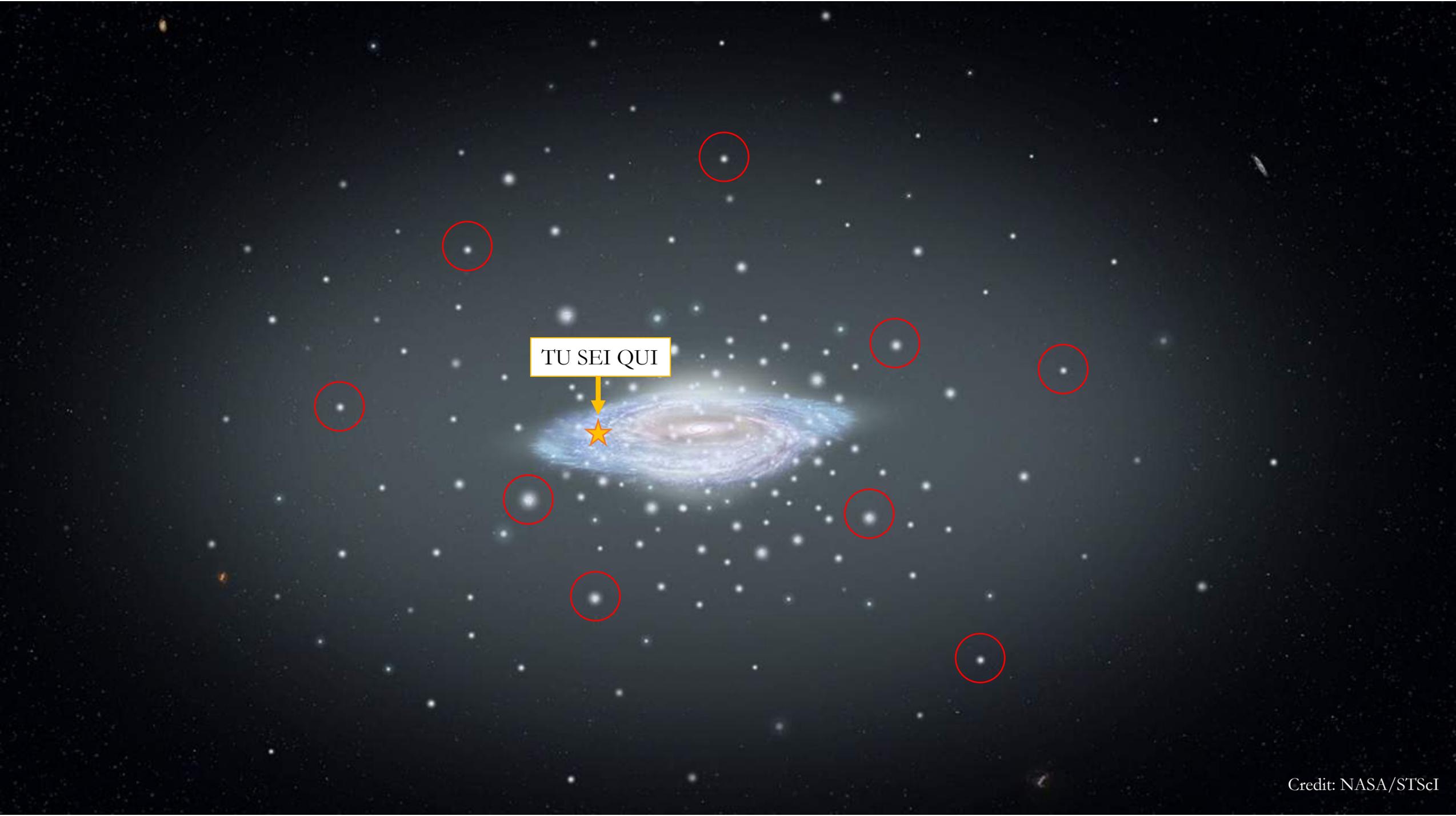




Credit: NASA/STScI



AMMASSI GLOBULARI



TU SEI QUI

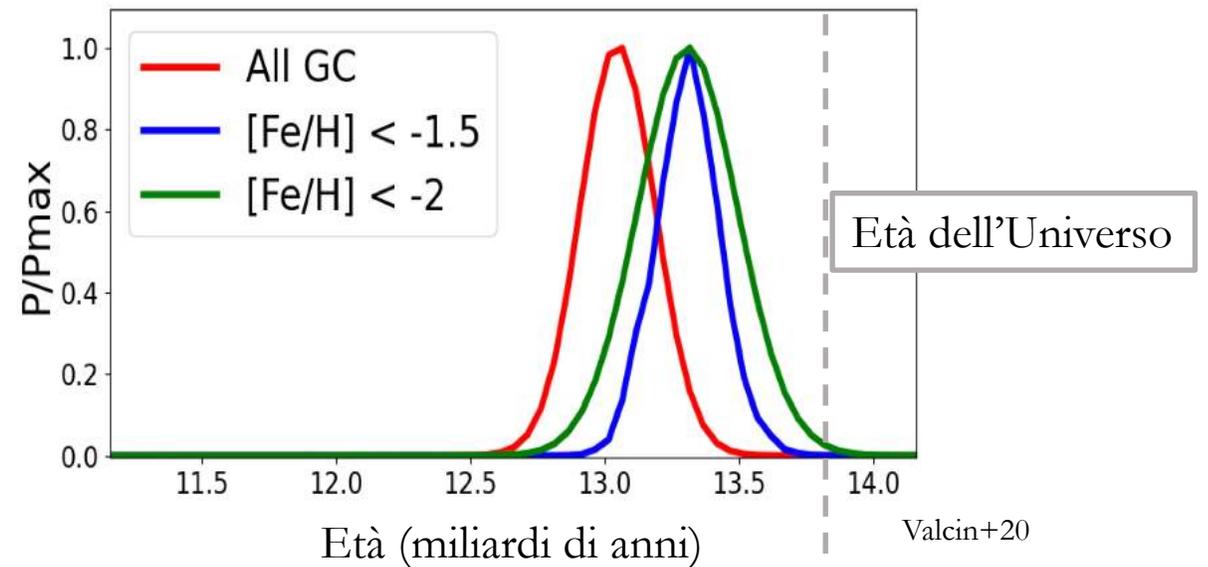
Ammassi Globulari

Nella Via Lattea ci sono circa 150 ammassi globulari, tutte le stelle all'interno dello stesso ammasso hanno la stessa età e la stessa composizione chimica



Massa = $10^4 - 10^5 M_{\text{sun}}$

$N_{\text{star}} = 10^5 - 10^6$



FOSSILI VIVENTI DEL PROCESSO DI FORMAZIONE DELLA GALASSIA!

AMMASSO GLOBULARE



Gli ammassi globulari sono le uniche regioni dell'Universo in cui le stelle interagiscono continuamente le une con le altre durante la loro vita

$t_{relax} \approx 100$ mila anni \ll età dell'ammasso

GALASSIA

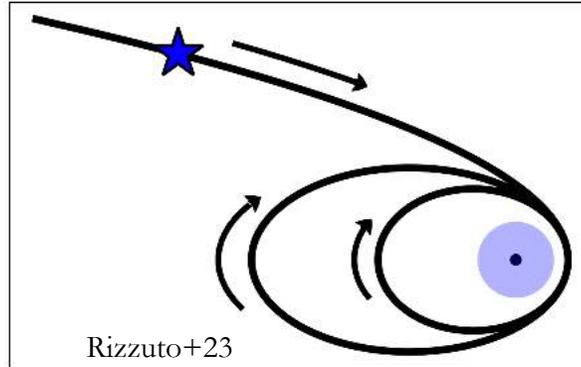


$t_{relax} \approx 10$ milioni di miliardi di anni \ll età della Galassia

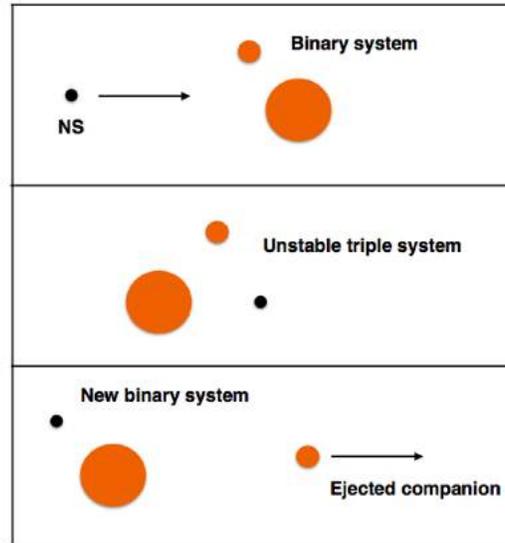
L'ambiente «vivace» degli Ammassi Globularari



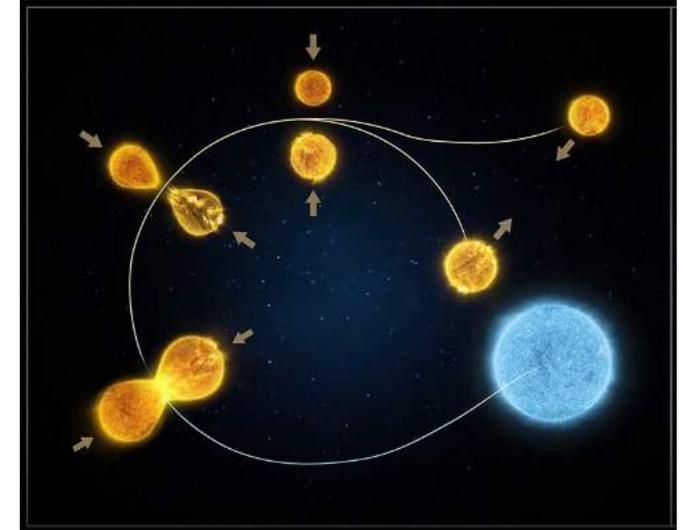
CATTURA MAREALE



CAMBIO PARTNER



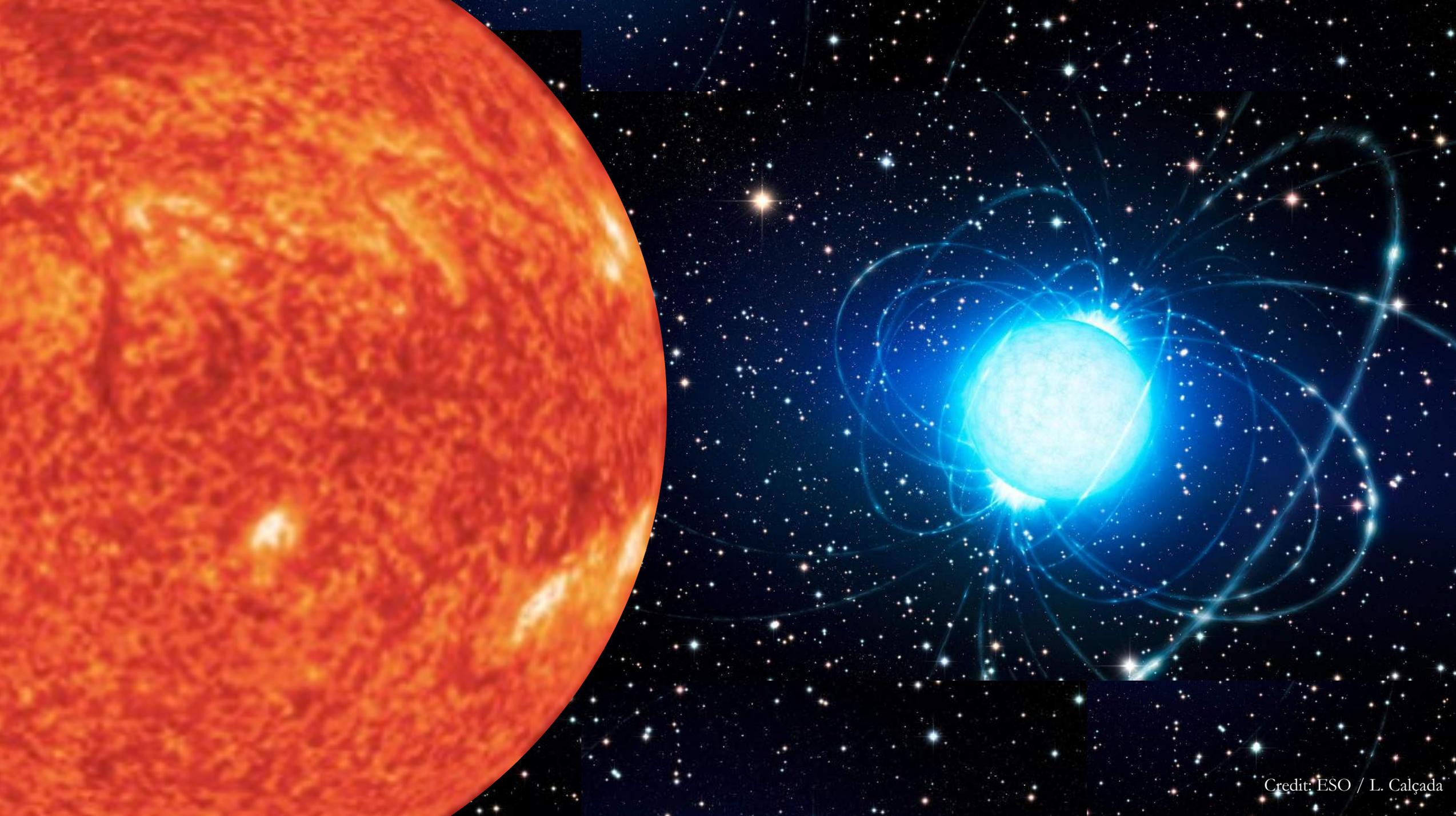
COLLISIONI



Credits:NASA/ESA

DISTRUZIONE DI BINARIE



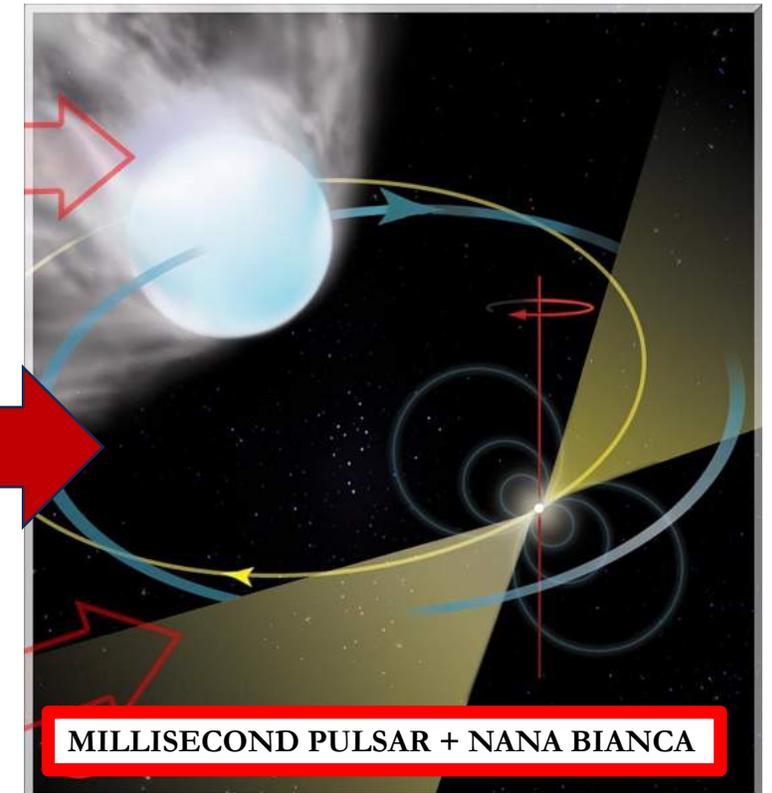
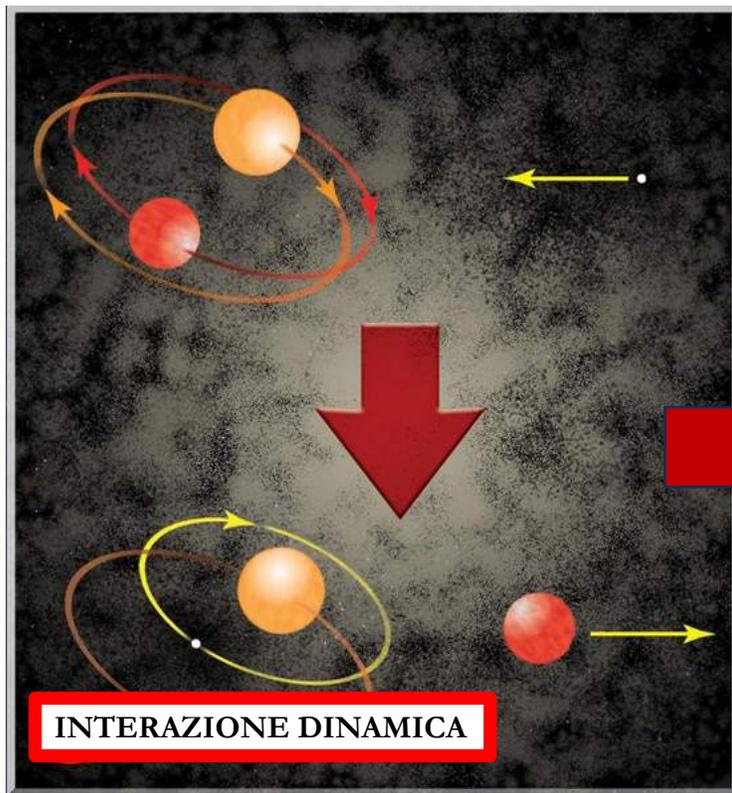




FORMAZIONE DI UNA MILLISECOND PULSAR

Sostenibilità stellare: come riciclare una stella di neutroni

FORMAZIONE DI UNA MILLISECOND PULSAR



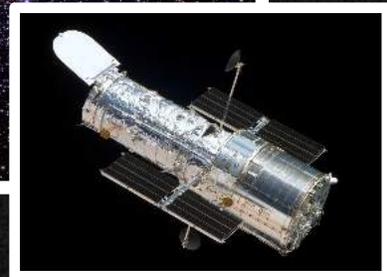
Credit: B. Saxton, NRAO/AUI/NSF

L'Ammasso Globulare NGC 1851

$$M_{AG} \cong 100000 M_{SOLE}$$

Eta' \cong 13 miliardi di anni

$$M_{stella} < 0.8 M_{SOLE}$$

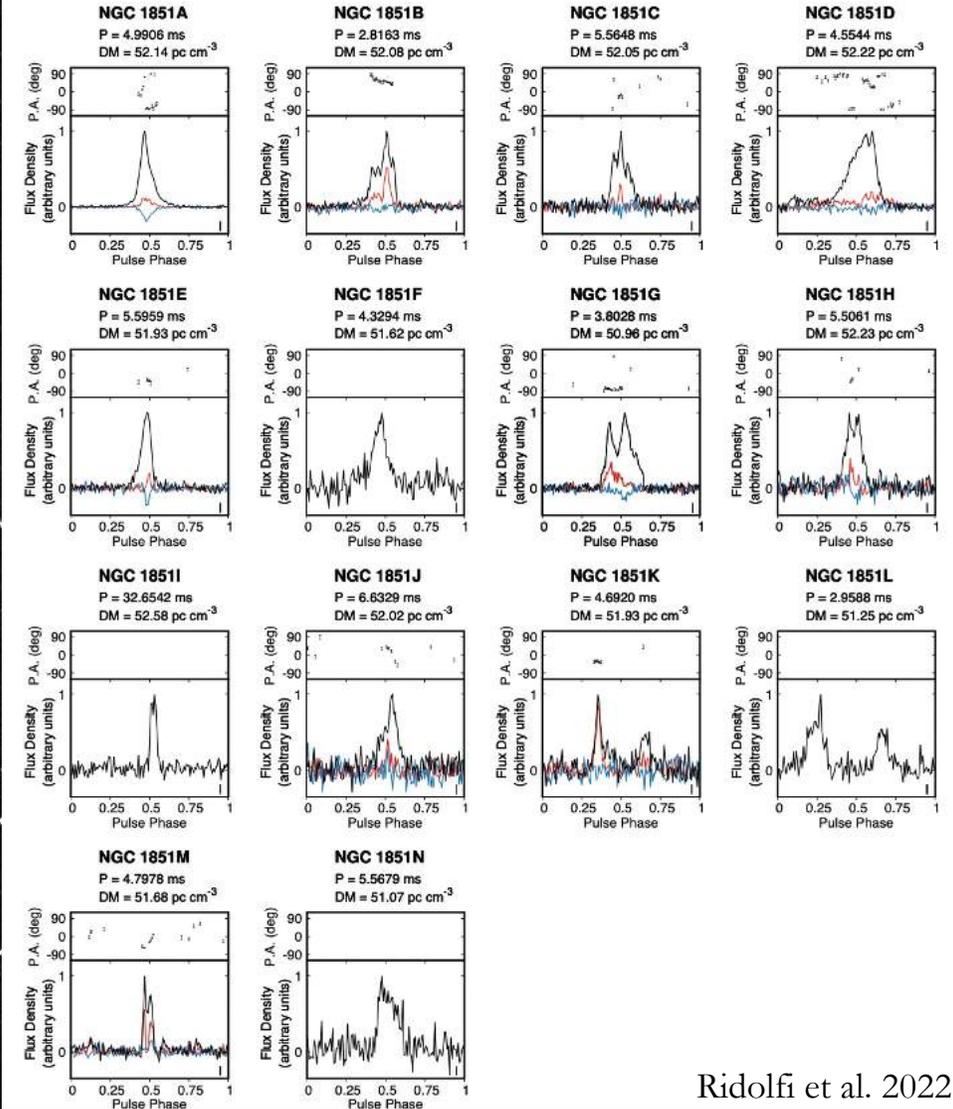


L'Ammasso Globulare NGC 1851

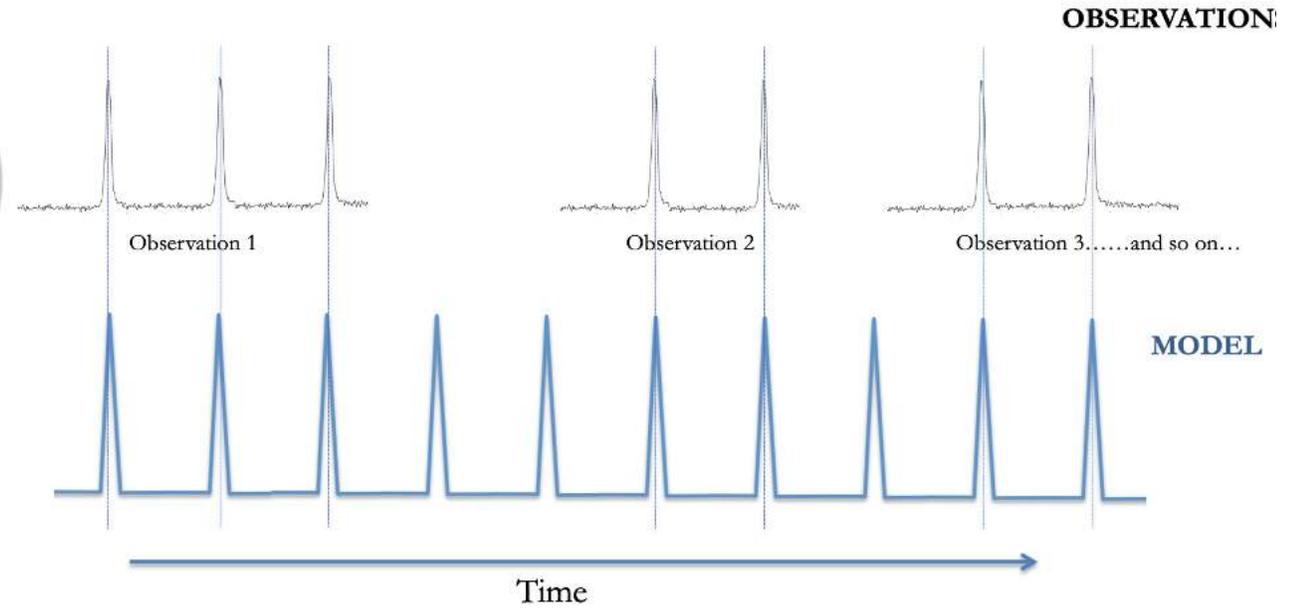
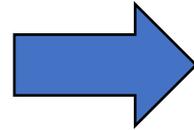
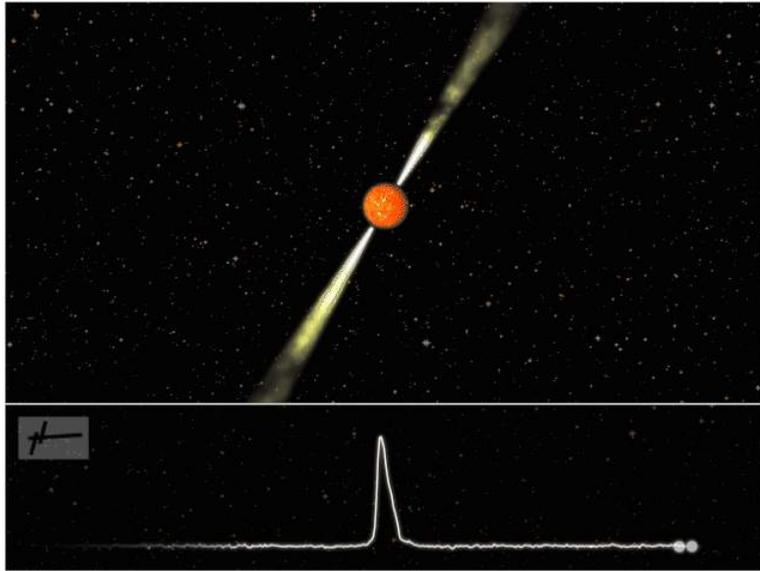
Green Bank Radiotelescopio



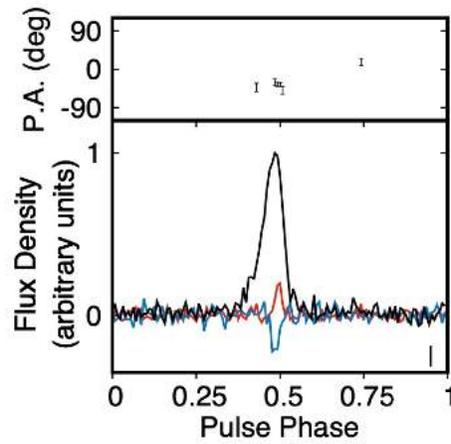
MeerKAT Radiotelescopio



Timing di NGC 1851E



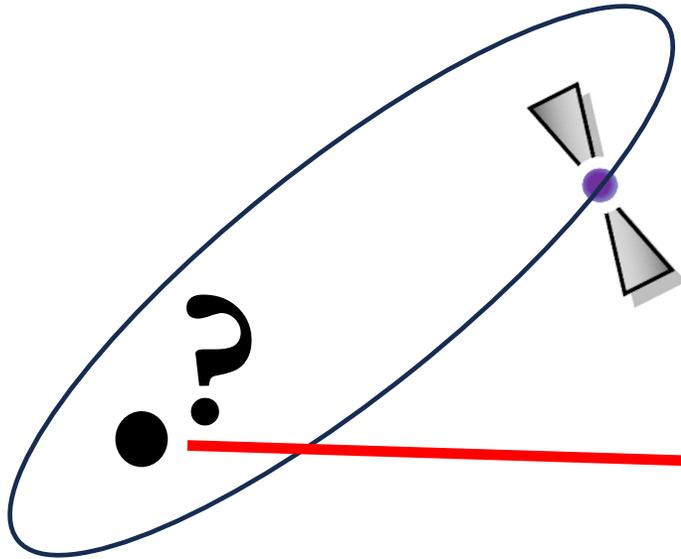
NGC 1851E



$$P_{\text{orb}} = 7.4478966582 \text{ giorni} \pm 0.6 \text{ millisecondi}$$
$$e = 0.70793232 \pm 0.00000085$$

NGC 1851E

$$P_{\text{orb}} = 7.4478966582 \text{ giorni} \pm 0.6 \text{ millisecondi}$$
$$e = 0.70793232 \pm 0.000000085$$



$$M_{\text{TOT}} = M_{\text{PULSAR}} + M_{\text{COM}} = 3.8870 \pm 0.0045 M_{\text{SOLE}}$$

Il sistema binario di due stelle di neutroni piú massicce noto ha massa:

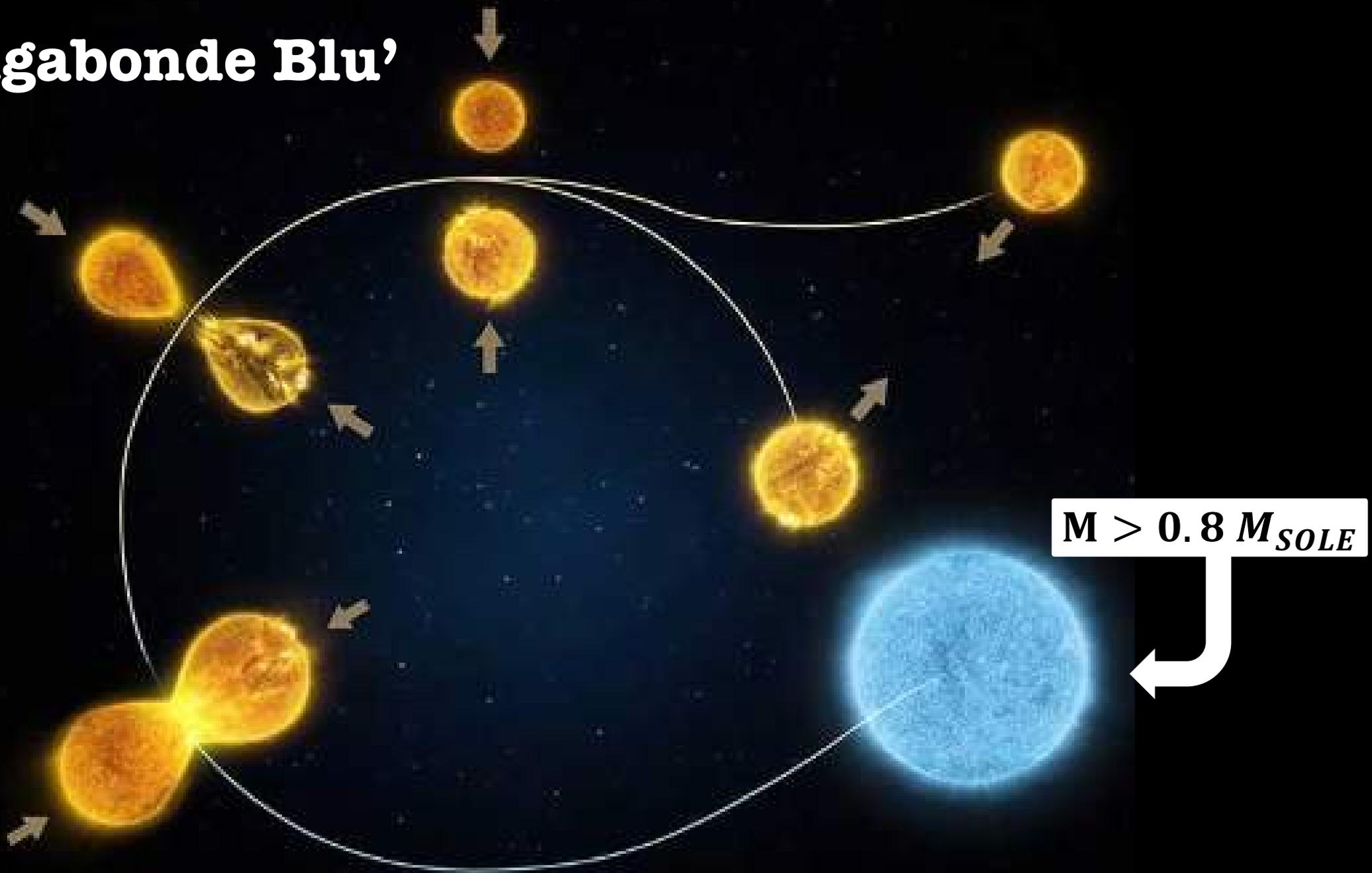
$$M_{\text{COM}} = 2.09 - 2.71 M_{\text{SOLE}}$$

~~$M_{\text{TOT}} = 2.8887 \pm 0.0006 M_{\odot}$ (Ferdman+20)~~



GW190425 merger di due stelle $M_{\text{stelle}} < 0.8 M_{\text{SOLE}}$ a oggetto con massa:
 $M = 3.3 - 3.4 M_{\odot}$ (Abbot+20)

Le 'Vagabonde Blu'

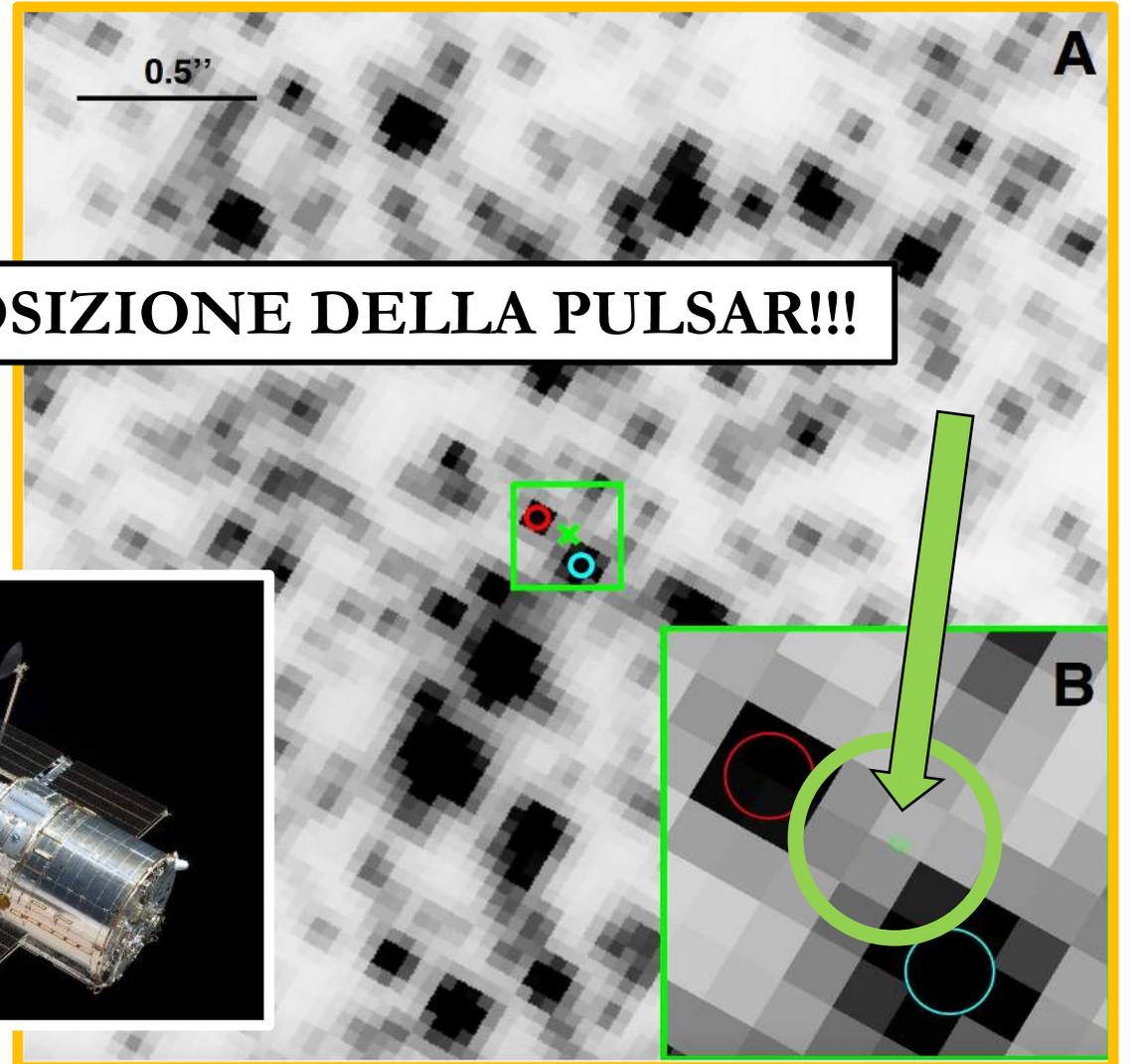
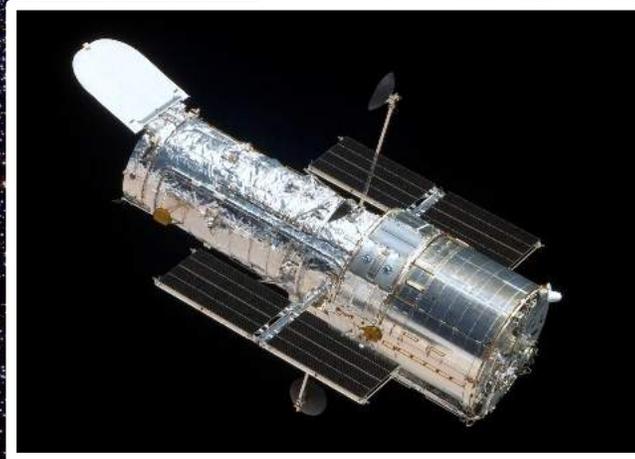


$M > 0.8 M_{SOLE}$

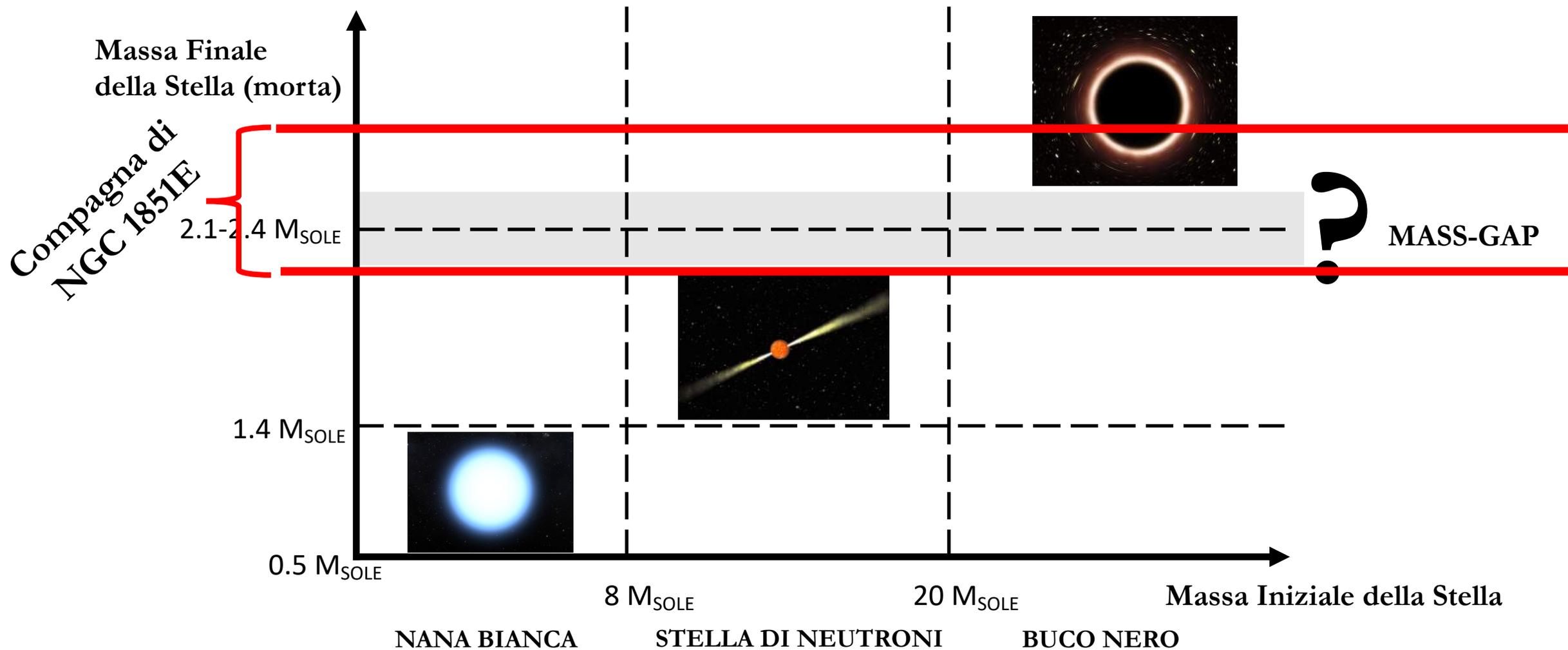
Alla ricerca di una *compagna vagabonda* blu



NESSUNA STELLA ALLA POSIZIONE DELLA PULSAR!!!



Un'oscura compagna...



Un'oscura compagna...

Credit: NASA

Science
AAAS

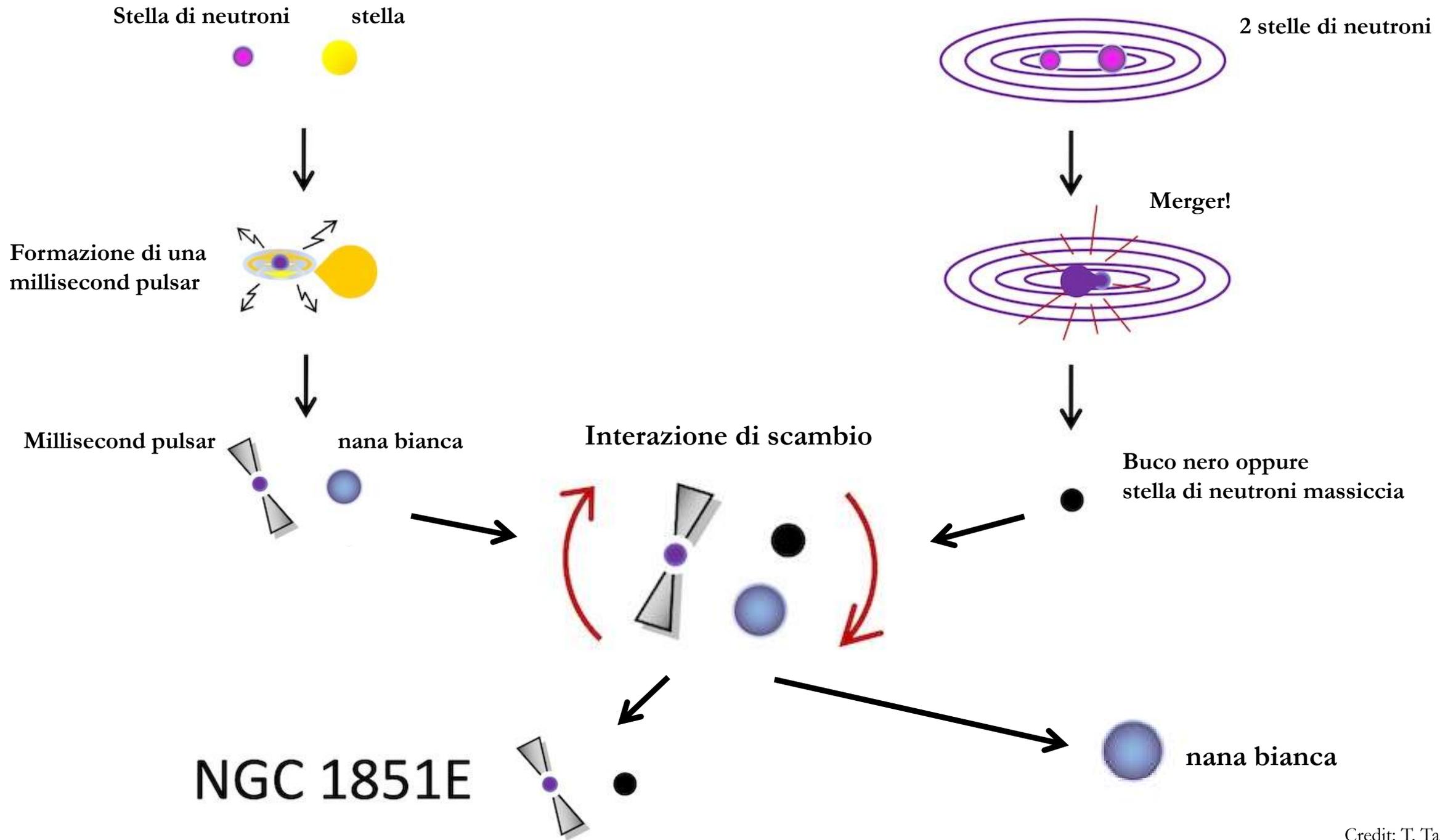
Possibilità 2: il compagno di NGC 1851E è un buco nero particolarmente leggero

A pulsar in a binary with a compact object in the mass gap between neutron stars and black holes

Ewan D. Barr,^{1*†} Arunima Dutta,^{1*†} Paulo C. C. Freire,¹ Mario Cadelano,^{3,4}
Tasha Gautam,¹ Michael Kramer,¹ Cristina Pallanca,^{3,4} Scott M. Ransom,⁹
Alessandro Ridolfi,^{1,7} Benjamin W. Stappers,² Thomas M. Tauris,^{1,13}
Vivek Venkatraman Krishnan,¹ Norbert Wex,¹ Matthew Bailes,^{5,6}
Jan Behrend,¹ Sarah Buchner,⁸ Marta Burgay,⁷ Weiwei Chen,¹
David J. Champion,¹ C. -H. Rosie Chen,¹ Alessandro Corongiu,⁷
Marisa Geyer,^{8,12‡} Y. P. Men,¹ Prajwal V. Padmanabh,^{1,10,11} Andrea Possenti⁷

Possibilità 1: la compagna di NGC 1851E è una stella di neutroni particolarmente massiccia





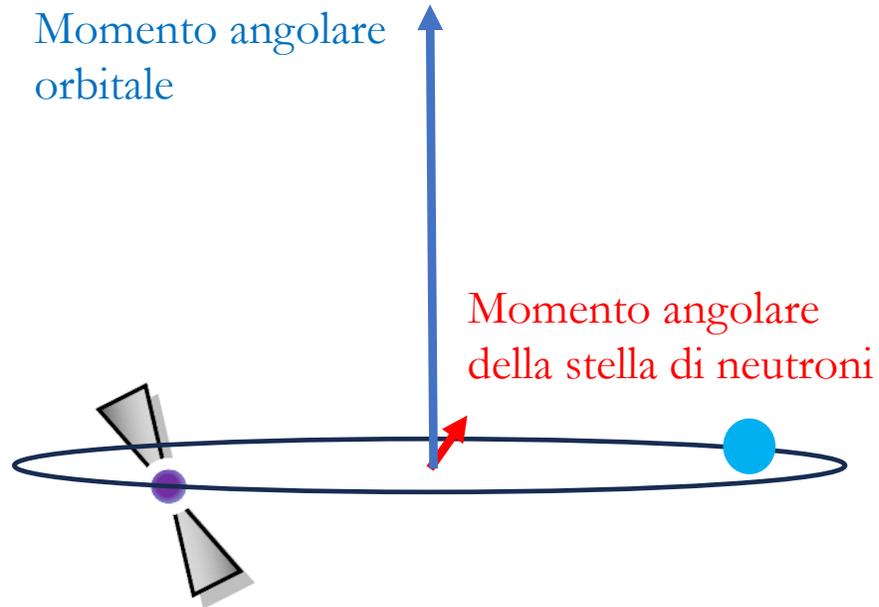


Credit: Matthew Bailes

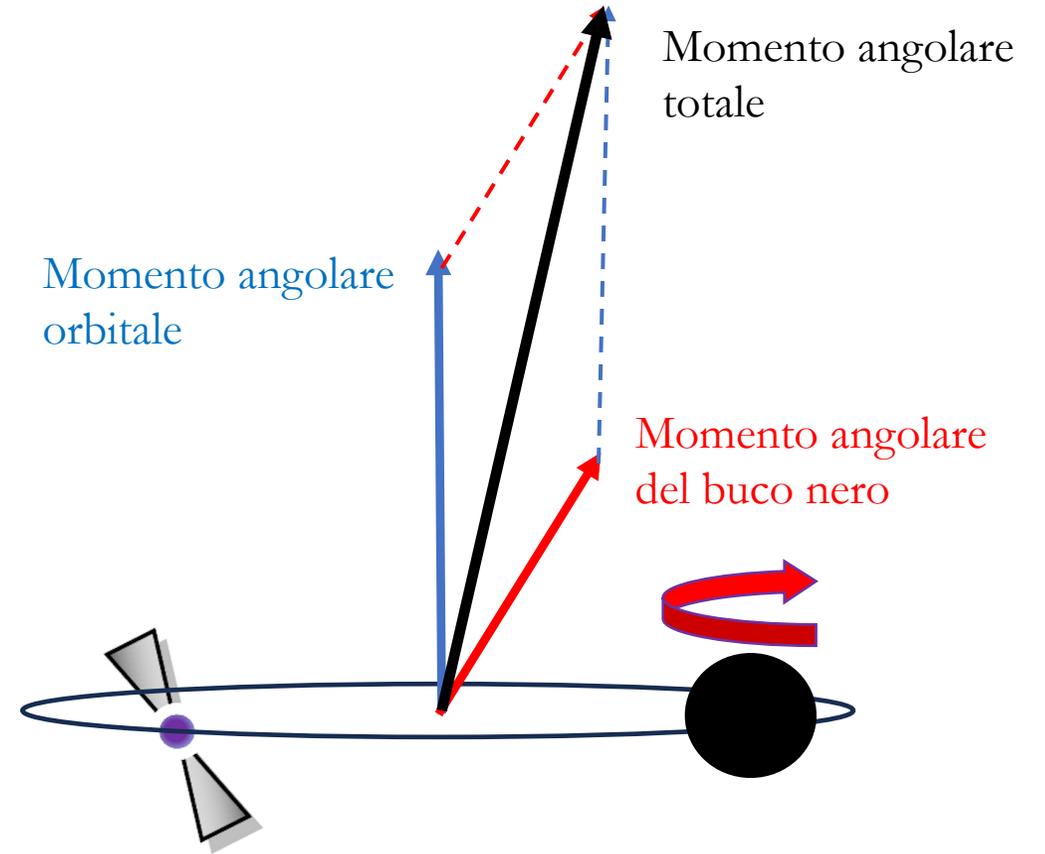
Stella di neutroni supermassiccia

VS

Buco nero superleggero



NO PRECESSIONE

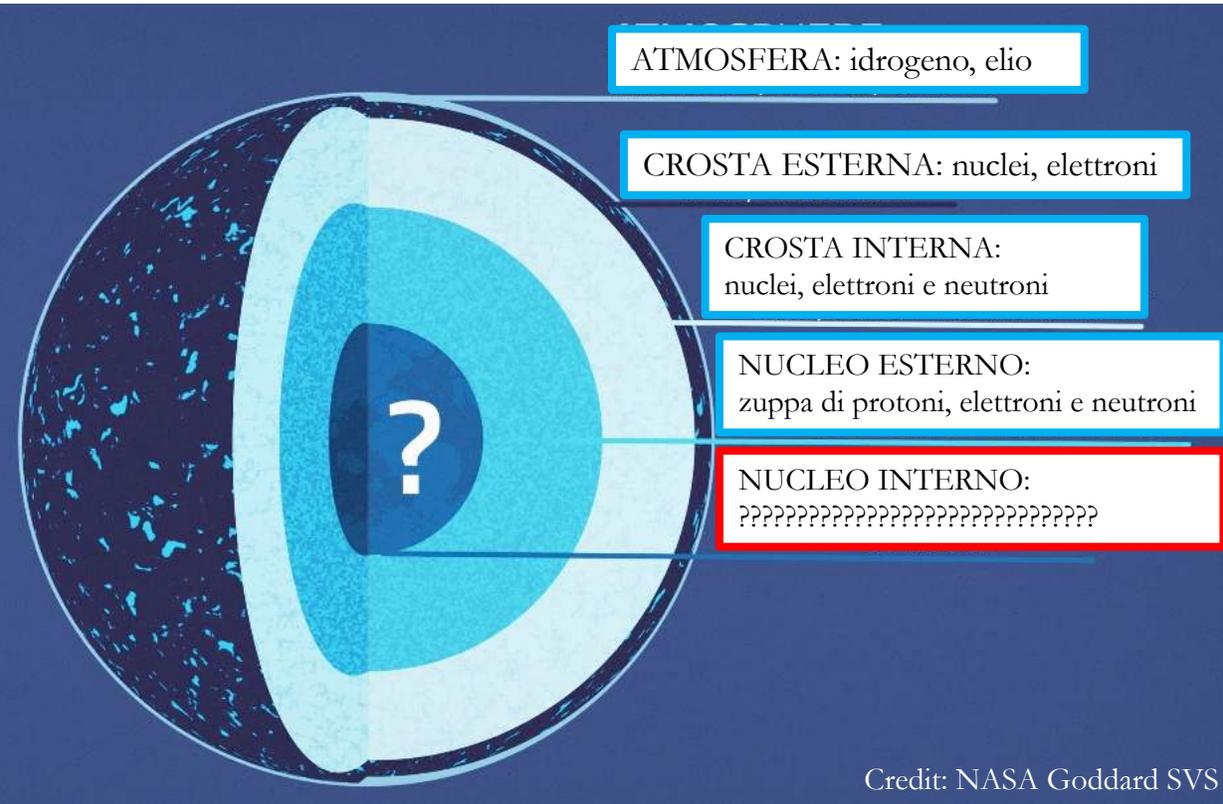


PRECESSIONE DI LENSE-THIRRING

Stella di neutroni supermassiccia

VS

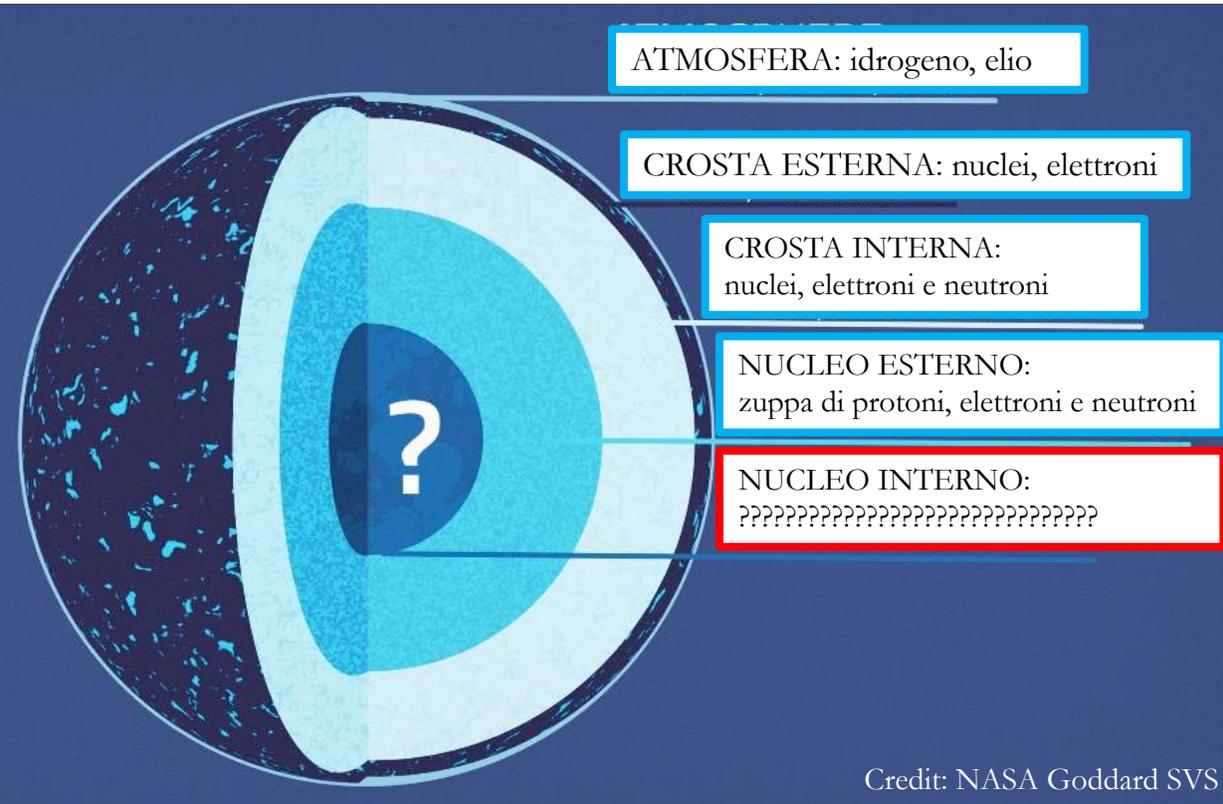
Buco nero superleggero



Stella di neutroni supermassiccia

VS

Buco nero superleggero



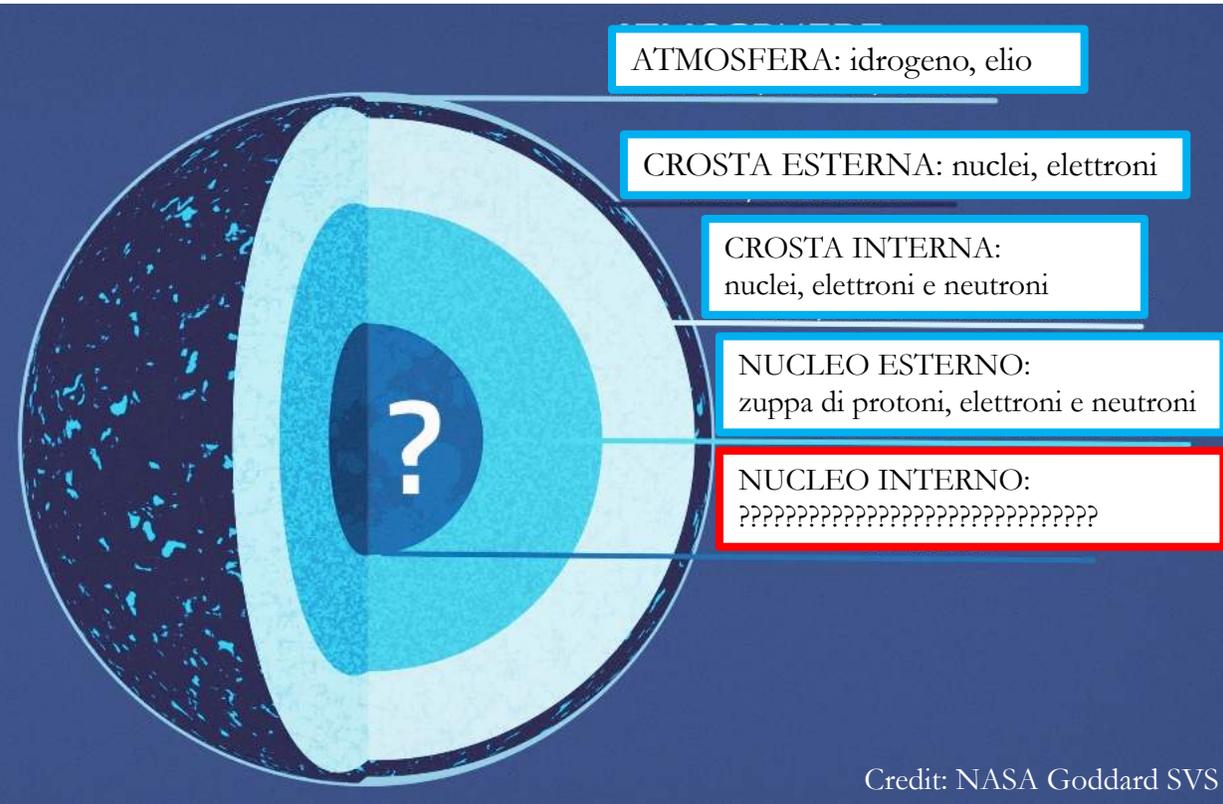
1) Test sull'ipotesi di censura cosmica di Penrose



Stella di neutroni supermassiccia

VS

Buco nero superleggero



- 1) Test sull'ipotesi di censura cosmica di Penrose
- 2) Test sul teorema *senza capelli*





Grazie per l'attenzione!