

Stelle e nuclei atomici: insospettabile intesa

Rosario Gianluca Pizzone

Dipartimento di Fisica e Astronomia,
UNICT

& INFN LNS - Catania



DIPARTIMENTO di
FISICA e ASTRONOMIA
"Ettore Majorana"





■ Tarxien and Haghar Qim Temples Malta (3000 AC)



■ Disco di Nebra (2000 AC)

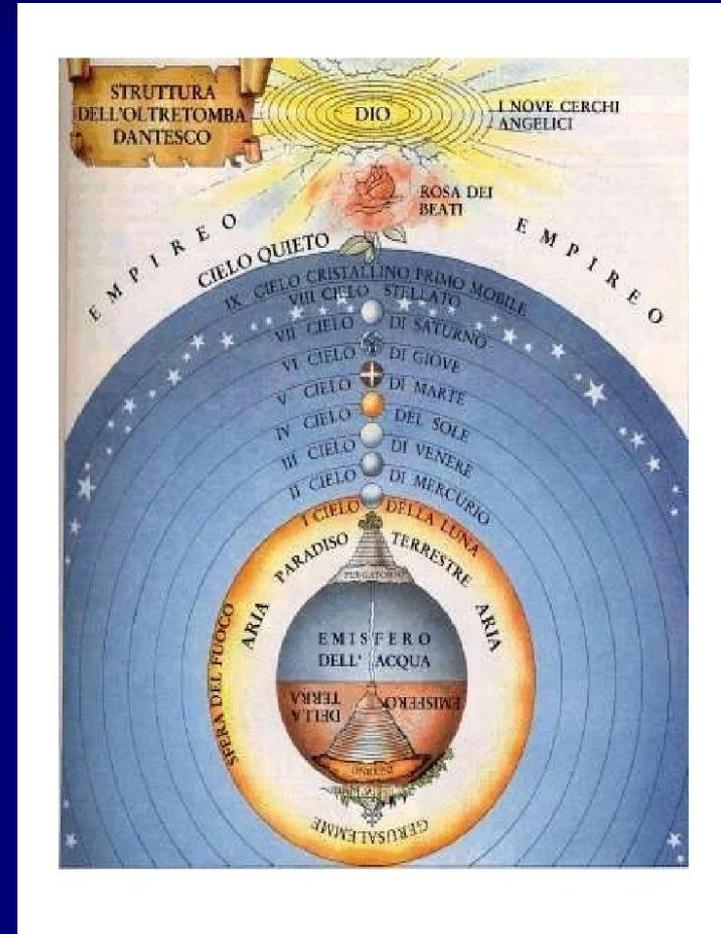


Astrofisica, ovvero studio dell'Universo attraverso le leggi della fisica

- All'inizio: i primi miti (leggende di vari popoli in tutto il mondo)
- Ipotesi "varie": Sfere infuocate, Cosmo perfetto,

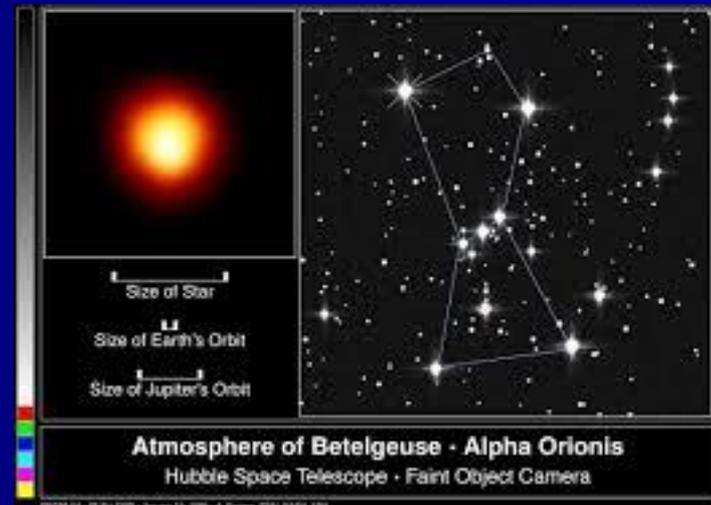
Solo ai primi del '900 la fisica stellare diventa una **scienza** vera e propria perché le evidenze possono essere confrontate con metodo scientifico.

Osservazioni → modelli → predizioni di comportamento



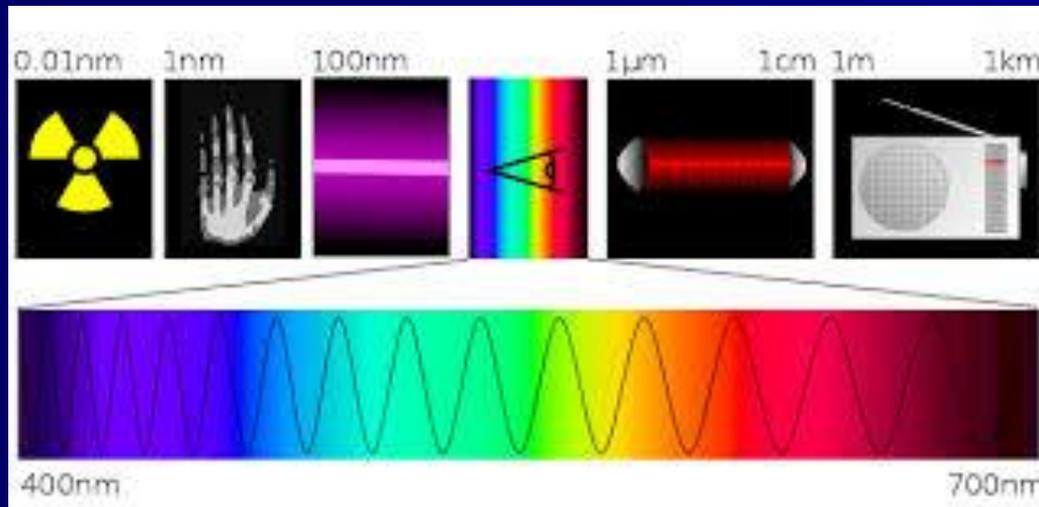
Evidenze osservative

- Le stelle emettono luce (e non solo)
- Le stelle variano i loro comportamenti nel tempo
- Le stelle si muovono
- Le stelle nascono e muoiono
- Fenomenologie Inspiegabili: pulsar, Supernovae, Novae
- Ci siamo noi e gli atomi che ci formano!



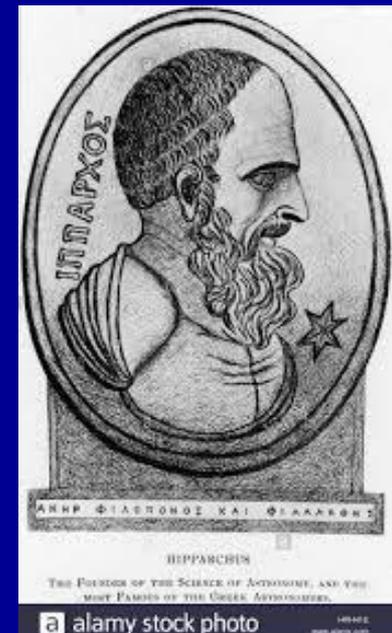
■ Osservazioni fotometriche

■ La fotometria è una tecnica astronomica che permette di misurare il flusso di una sorgente astronomica (quanta energia emette per unità di tempo e di superficie).



■ Spettro elettromagnetico
Luce visibile ed altre bande

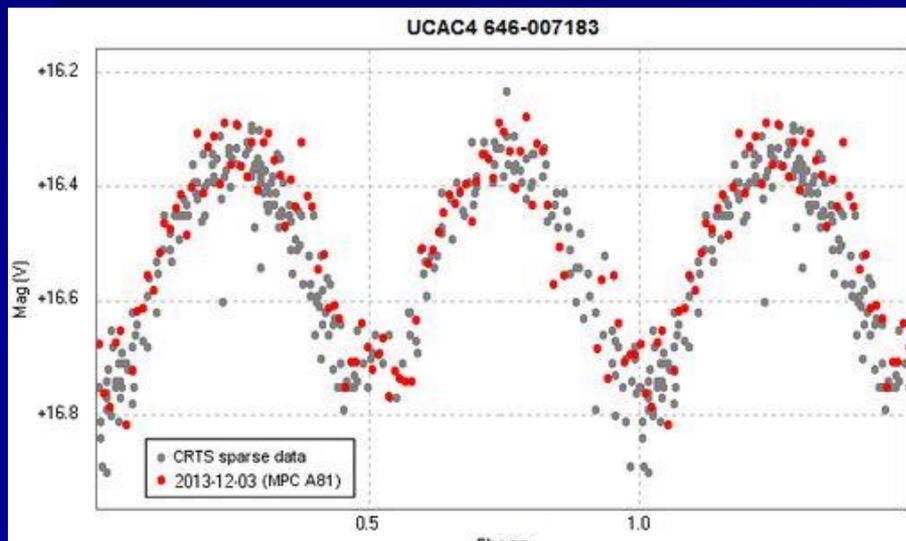
- Primi cenni fotometria: osservatori antichi, magnitudini stellari, cataloghi stellari
- → osservazioni ad occhio nudo e poi telescopio.



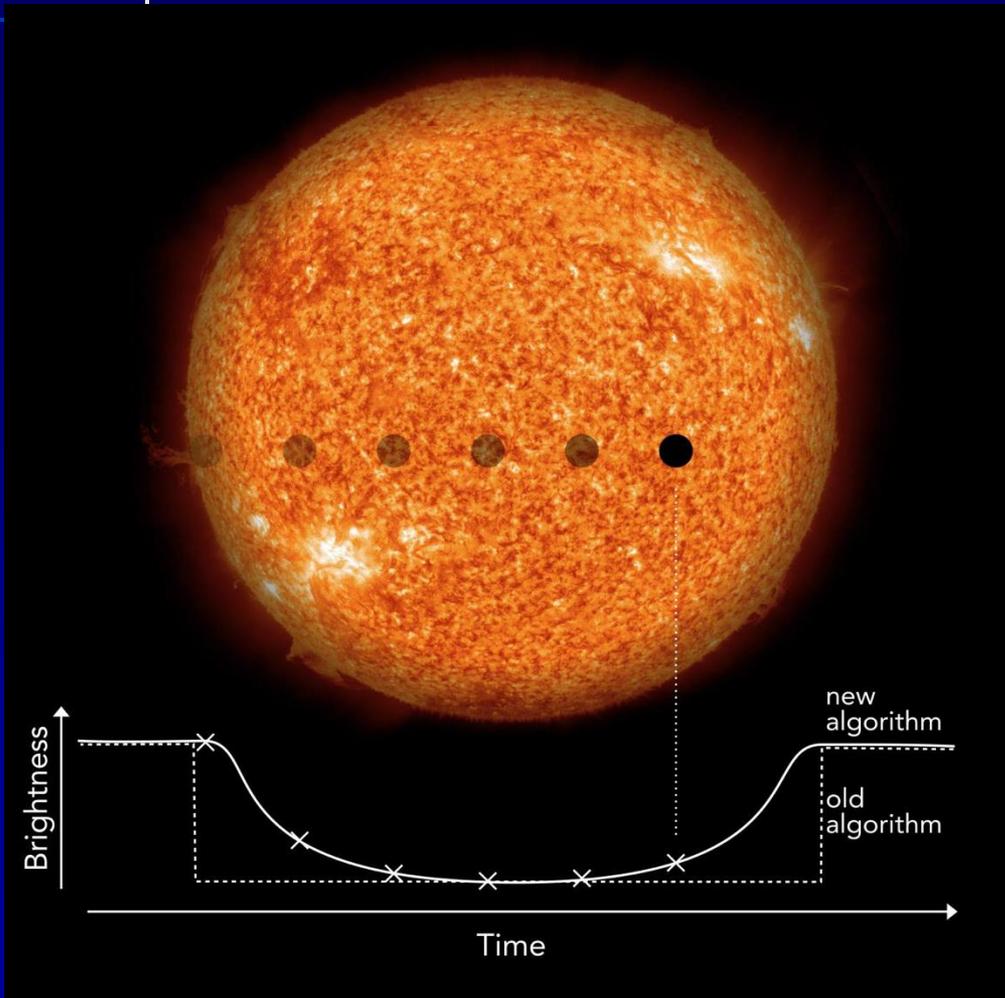
La scala di Ipparco risultò congegnata in modo tale che una stella di 1a grandezza era all'incirca 100 volte più luminosa di una di 6a , con i numeri più piccoli che indicavano le brillantezze più intense.

La scala così concepita, tramandataci da Tolomeo, non era del tutto arbitraria, poiché rispettava le sensazioni della nostra vista, che sono di tipo logaritmico e non lineare. Questo comporta che l'energia luminosa non produce sui nostri sensi una sensazione equivalente alla sua intensità, ma molto inferiore.

■ Dopo XIX secolo misure quantitative di luminosità con Rivelatori (lastre fotografiche, fotomoltiplicatori, CCD)

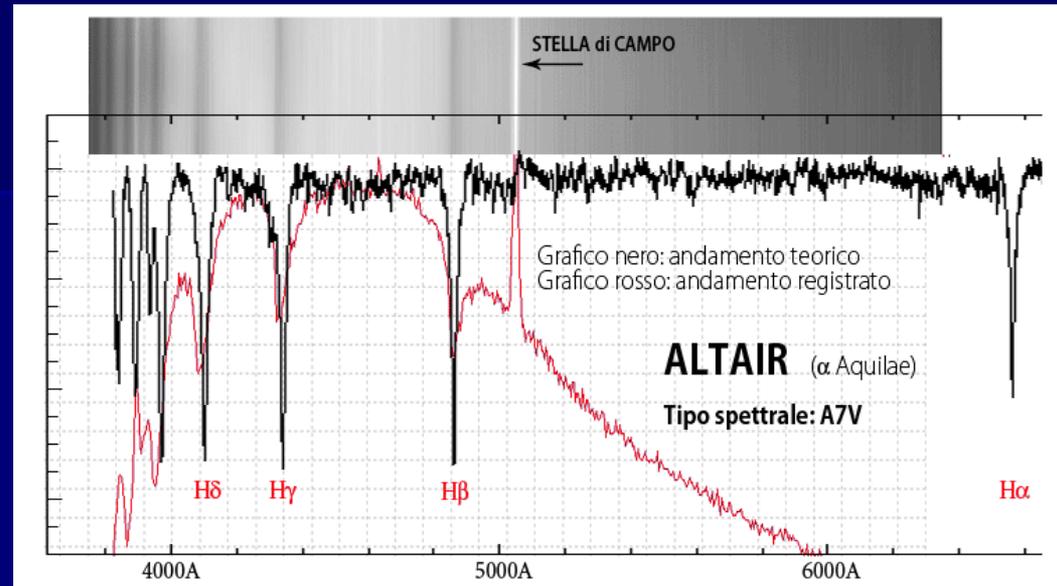


- Da questi studi: misure massa, scoperta variabilità stellare, scoperta di ESOPIANETI.
Misura di distanza astronomiche attraverso particolari tipi di stelle (Cefeidi)

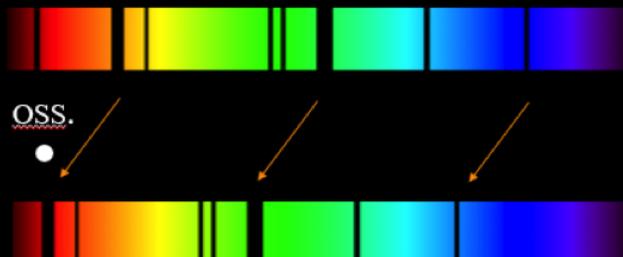


Spettroscopia

■ Quando un fascio di luce viene fatto passare attraverso un prisma ottico od un altro mezzo, viene scomposto nelle varie lunghezze d'onda che lo costituiscono, lo spettro. Lo spettro di luce fornisce molte informazioni sulla composizione chimica della sorgente e del suo stato fisico (temperatura, densità e grado di ionizzazione).



SPETTRO CON SORGENTE FERMA



SPETTRO OSSERVATO [REDSHIFT]

v ←

- Effetto Doppler
- Misura moto delle stelle, presenza stelle compagne o esopianeti,
- Moti galattici e/o cosmologici

■ Lo studio fisico delle stelle non può prescindere dalla definizione di un modello di stella. Secondo le ipotesi della fisica.

Cosa è una stella? Una **stella** è un ammasso di gas (in gran parte ionizzato) ed in Equilibrio gravitazionale (quasi...) che brilla di radiazione elettromagnetica propria.

Per definire un modello che verifica le proprietà di una stella occorre che esso abbia alcune proprietà:

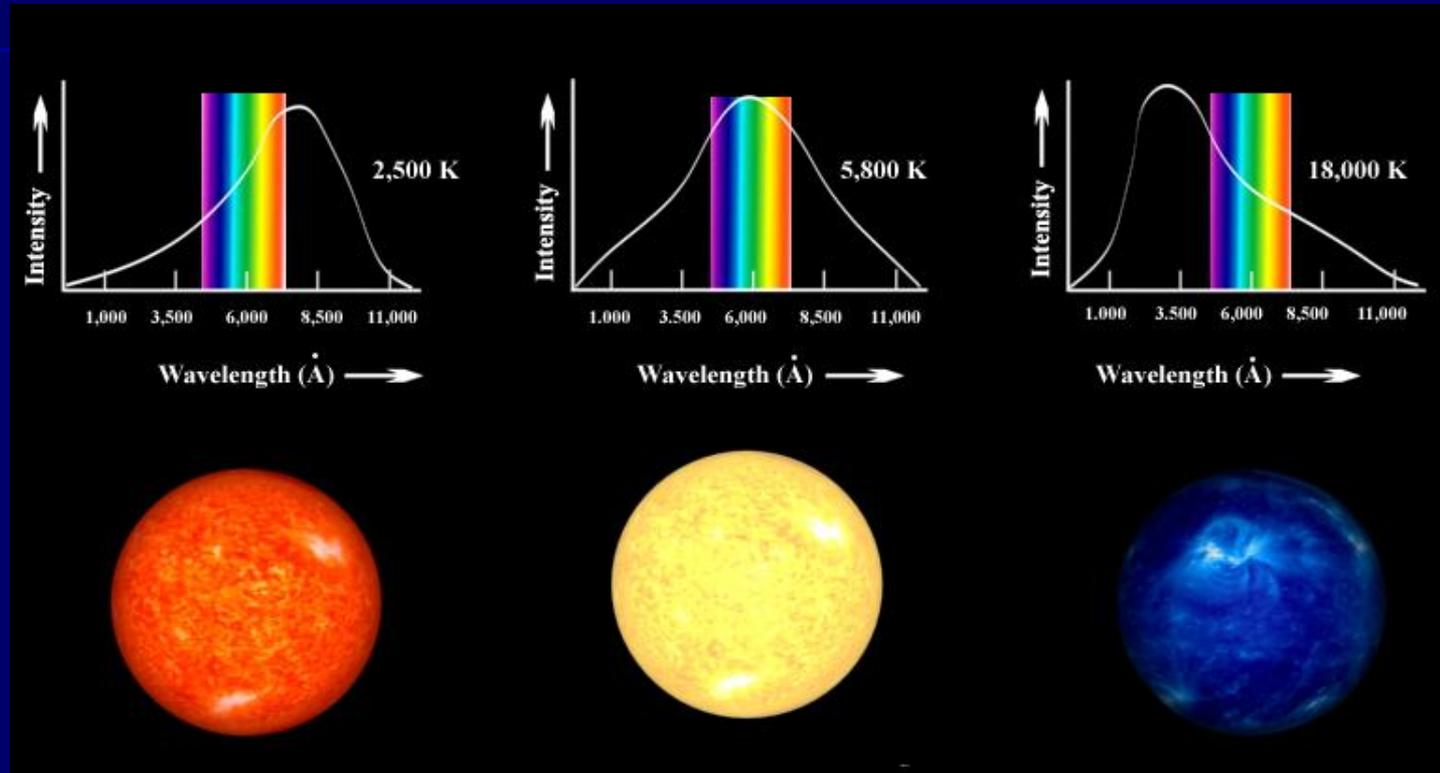
- Modello a simmetria sferica
- Equilibrio idrostatico tra gravità e pressione
- Esiste una sorgente di energia interna alla stella che ne genera l'emissione di radiazione
- Esistono meccanismi di trasporto di energia dal centro della stella alla superficie.

Questi quattro capisaldi del modello stellare diventano poi 4 equazioni fondamentali che Sono dette equazioni di struttura stellare.

Colore Stellare

- Le stelle appaiono di colore diverso (rosse, blu, gialle etc.). Questo è noto dalla notte dei tempi.

- Corpo nero e Legge di Wien



- Quindi il colore di una stella ci da' informazioni sulla temperatura di una stella.

Il »motore» stellare

da misure geologiche e dai meteoriti si stima l'età del sistema solare essere circa 4.6 miliardi di anni. → l'età del sole DEVE essere almeno similare.

Necessità luminosità del Sole costante su tempi scala del miliardo di anni....

■ Vari possibili motori:

- Termodinamico (contrazione Sole porta aumento Energia termica) → tempi scala 10^7 anni
- **Nucleare** (generazione energia per fusione nucleare) → tempi scala 10^9 anni



- L'energia derivante da reazioni di fusione nucleare è l'unica in grado di mantenere la Luminosità stellare circa costante per i tempi richiesti.
- Come per tutti i processi nucleari si ha la trasformazione di alcune specie nucleari in altre (oltre alla produzione di energia.)
- Una stella è quindi un ammasso di gas che genera energia proveniente da fusione nucleare «in equilibrio»

Come si forma una stella???

Formazione Stellare

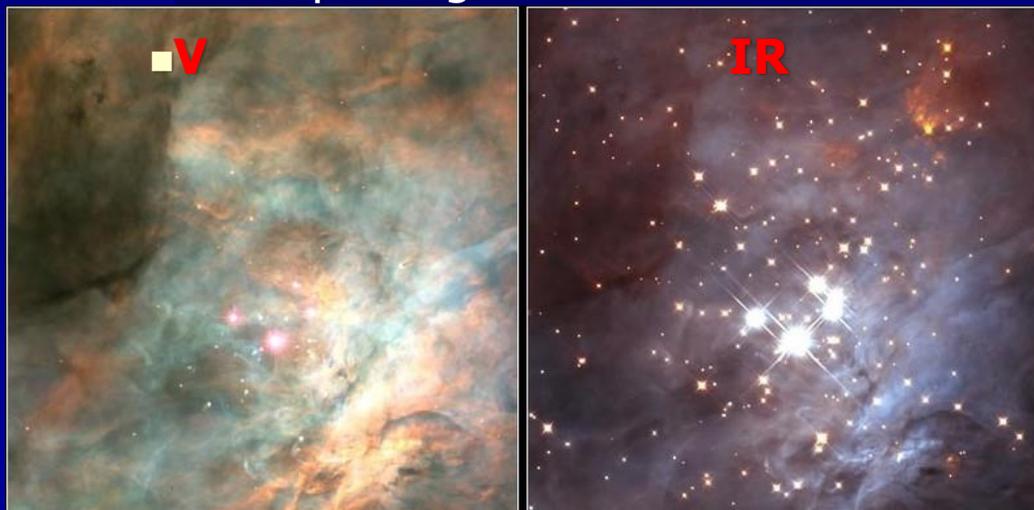
- Mezzo interstellare, nubi molecolari fredde (10 K)
In accrescimento.

Massa limite per contrazione gravitazionale:

$$M_{\text{jeans}} \sim T/\rho$$

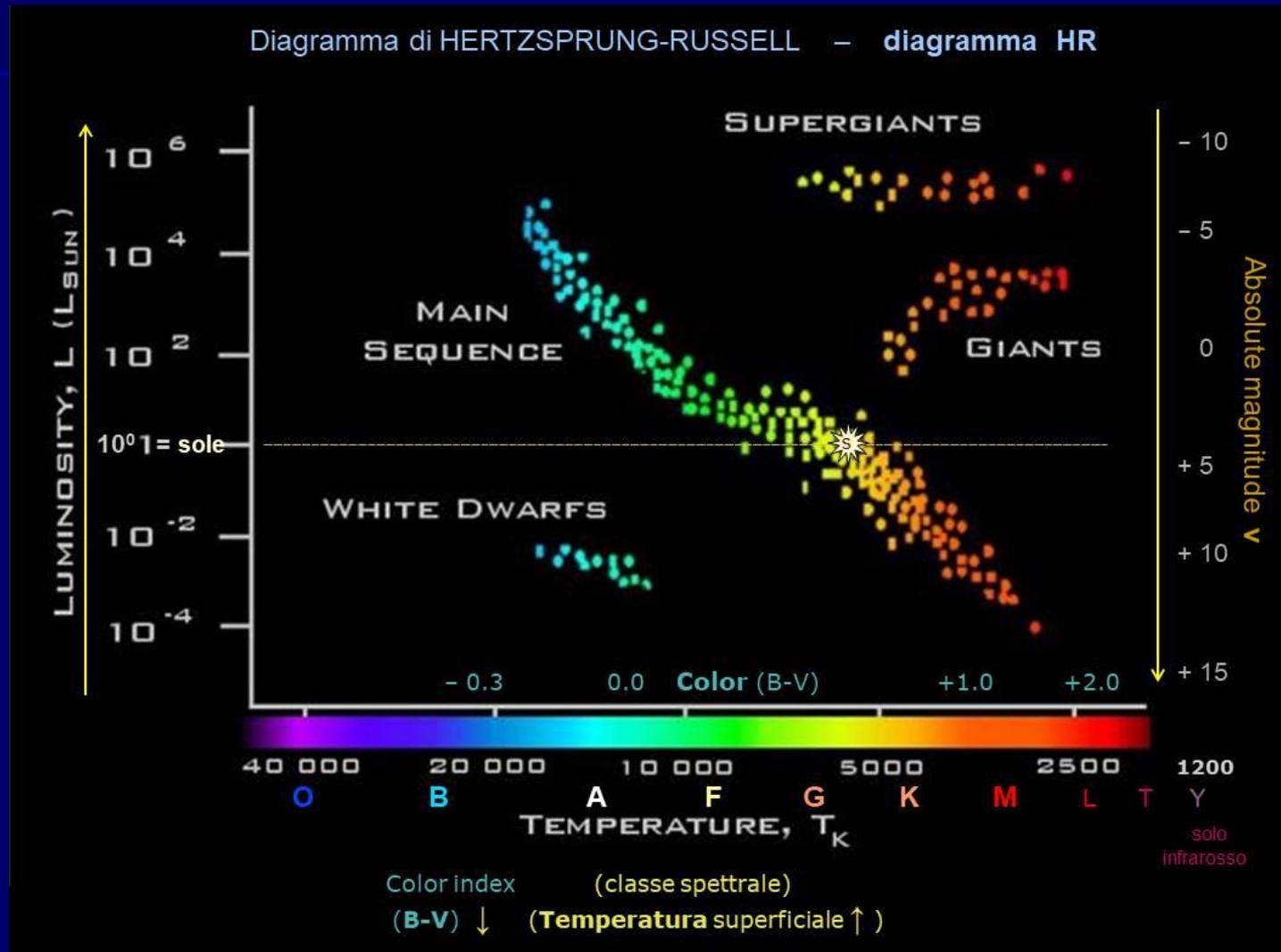
Innescata da:

- Onde d'urto SN
- Venti stelle massicce
- Interazioni tra galassie
- Bracci di spirale galattici



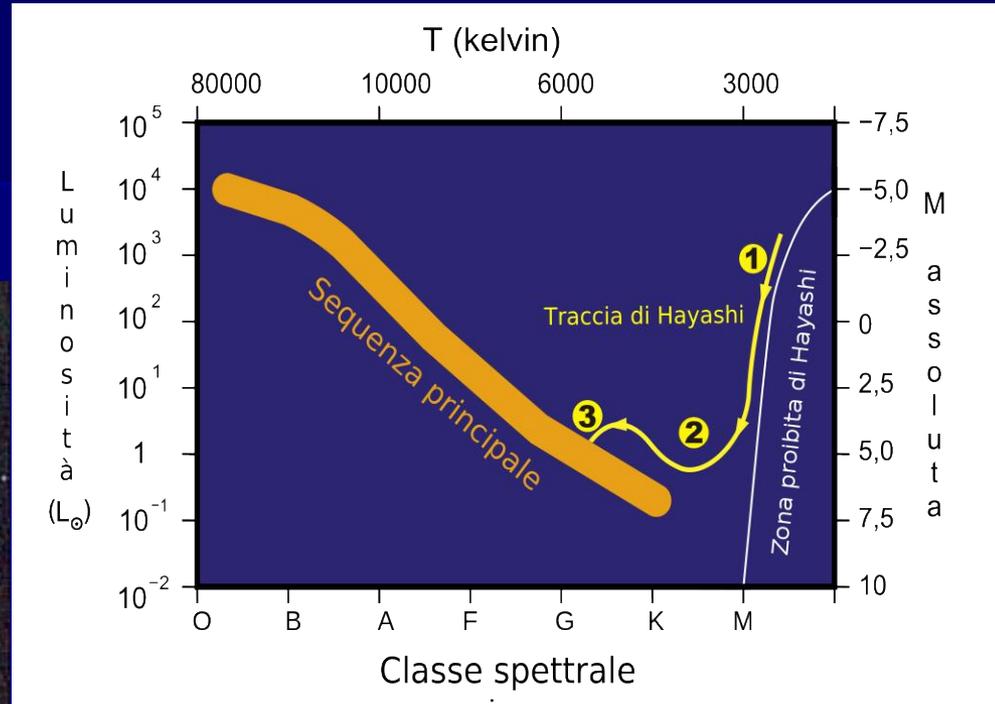
■ Diagramma HR

Una «fotografia» delle popolazioni stellari della Galassia che è indice di quale fase dell'evoluzione stellare sta avvenendo. E' un diagramma luminosità vs. Temperatura superficiale.



■ Fasi iniziali della vita di una stella

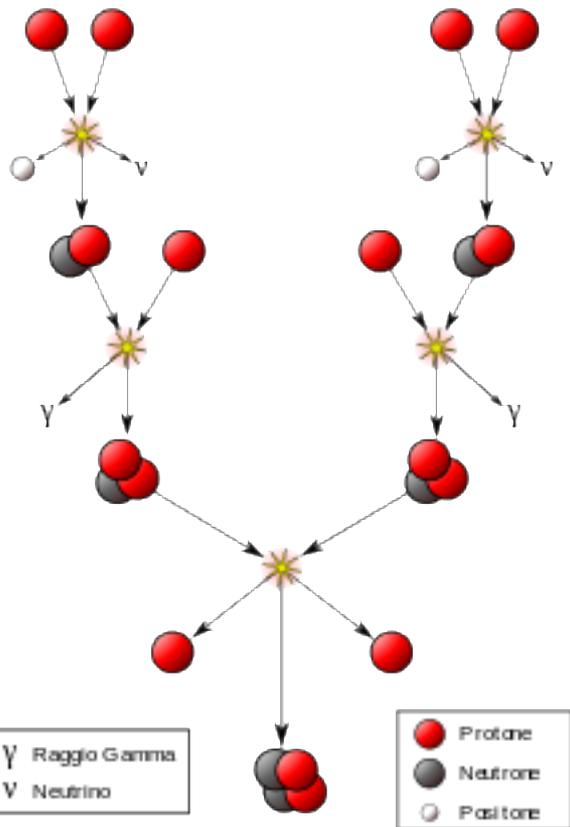
- La protostella contrae lentamente riscaldandosi al centro fin quando al centro non si accenderanno i processi nucleari (tempi brevi circa 10 milioni di anni);



- Queste stelle presentano ampia emissione in IR e spesso presentano dischi Planetari di accrescimento (Stelle T Tauri).

■ Sequenza principale

■ Corrisponde alla fusione nucleare al centro della stella di 4 idrogeni che diventano Elio. La modalità con cui questa si realizza dipende dalla massa della stella. Massa $> 3 M_{\odot}$ ciclo CNO. Massa $< 3 M_{\odot}$ catena protone-protone



- Ciclo CNO molto veloce → grandi stelle «vivono» poco
- Catena pp molto lenta → stelle piccole vivono tanto (Sole)

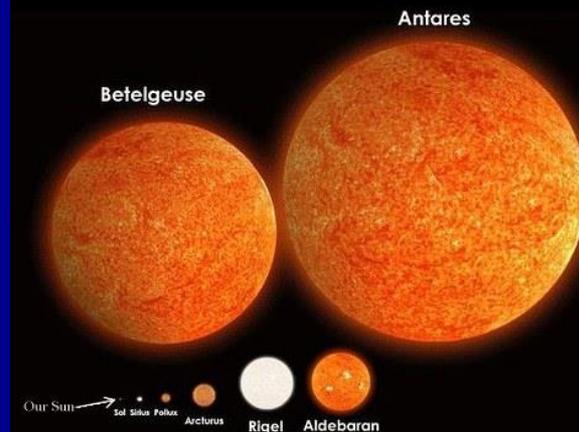
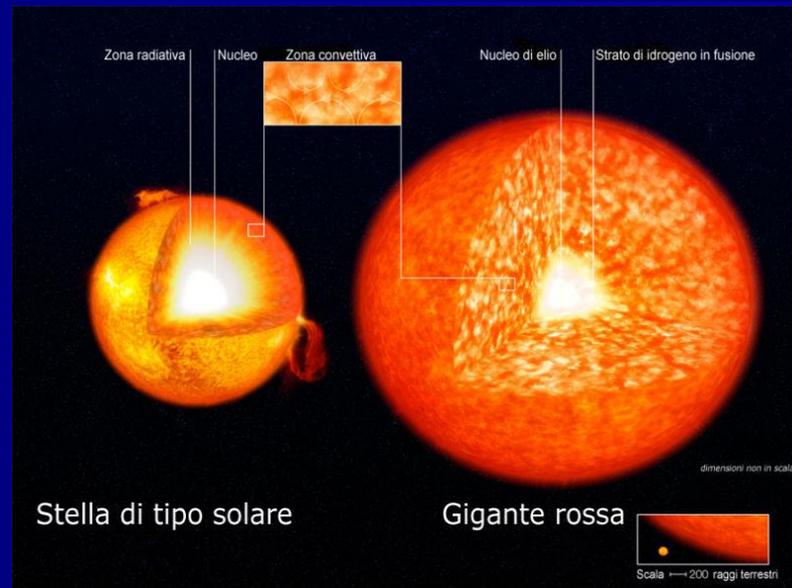
Massa originale (in M_{\odot})	Luminosità nella SP (in L_{\odot})	Durata della SP ($\times 10^8$ anni)
30	10 000	0,006
10	1 000	0,01
3	100	0,30
1	1	10
0,3	0,004	800

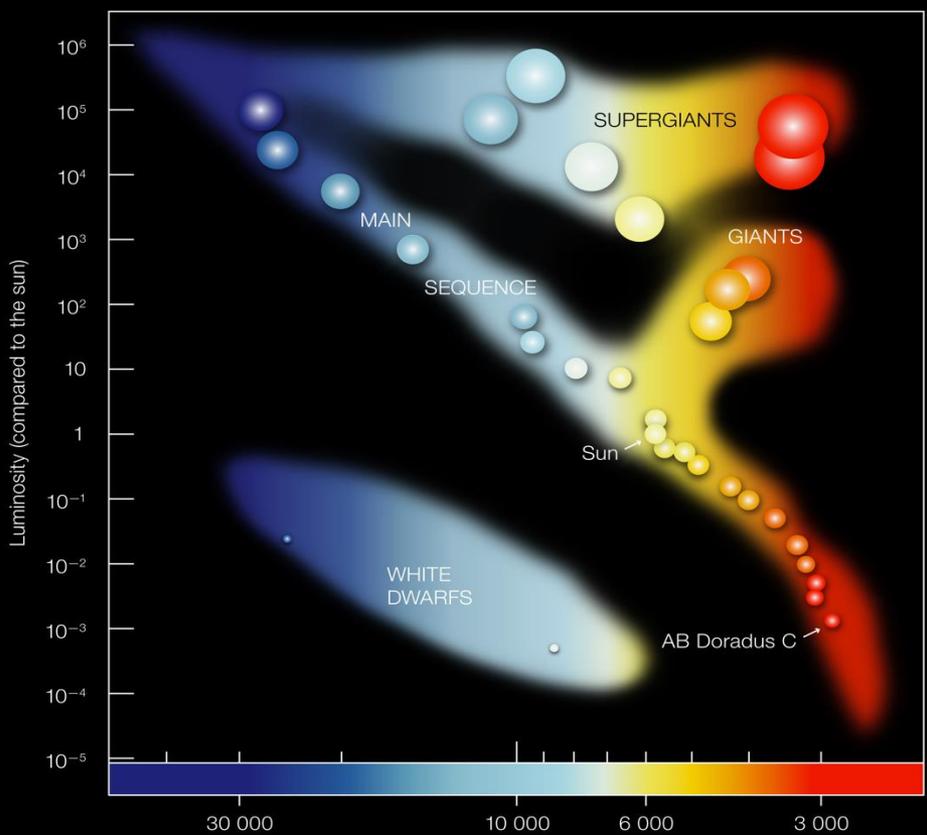
Cosa succede quando la stella «finisce» il combustibile??

Un po' come un fuoco non bene alimentato prova a «bruciare» carburante non tanto efficiente ovvero quanto era risultato dalla prima fase di fusione nucleare

Per prima cosa la stella brucia l'idrogeno in una zona piu' periferica del nucleo. Questo causa una espansione (con relativa rarefazione della parte esterna). La stella diventa una **GIGANTE ROSSA**

Successivamente la stella quindi reagisce ai cambiamenti e prova a bruciare quanto rimane dalla fase precedente di evoluzione cioe' l'elio. Dove? Nella parte centrale della stella mentre la fusione dell'idrogeno si sposta in una parte un po' piu' periferica.





A seconda della massa iniziale della stella
 Diversi sono i percorsi dell'evoluzione
 Stellare

Stelle tipo solare $0,01 < M/M_{\odot} < 3$

Stelle massicce $M/M_{\odot} > 3$

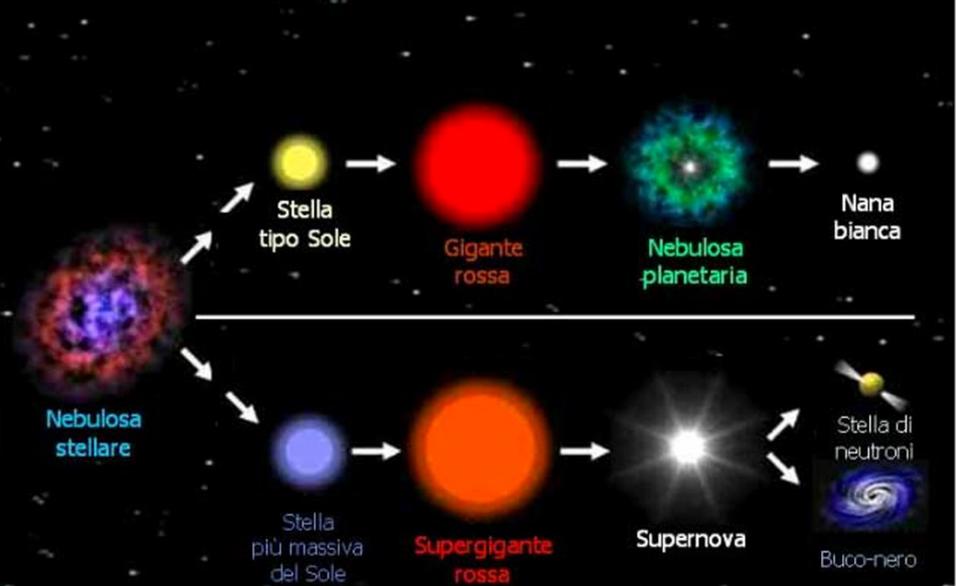
Diversa sarà il loro percorso, diversa la
 Loro fine e diverso sarà cio' che
 producono

Massa originale (in M_{\odot})	Luminosità nella SP (in L_{\odot})	Durata della SP ($\times 10^8$ anni)
30	10 000	0,006
10	1 000	0,01
3	100	0,30
1	1	10
0,3	0,004	800



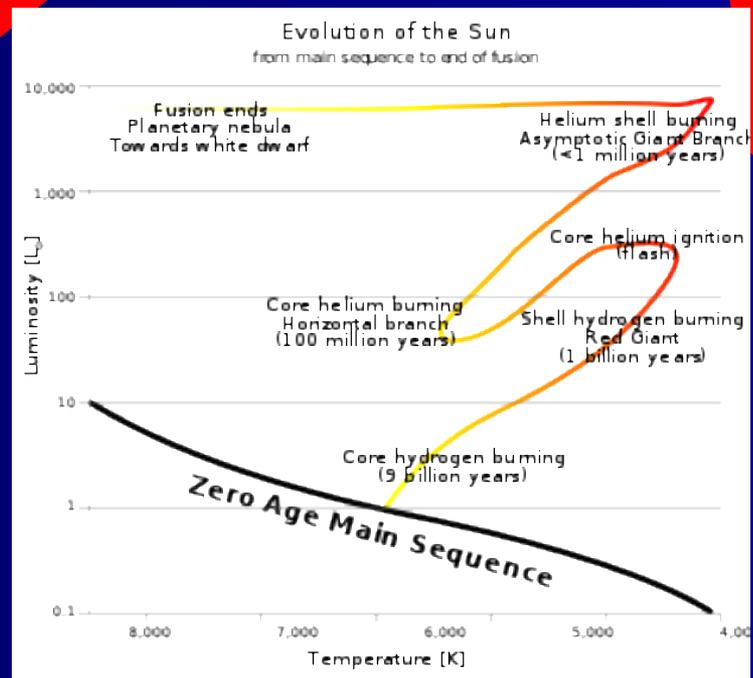
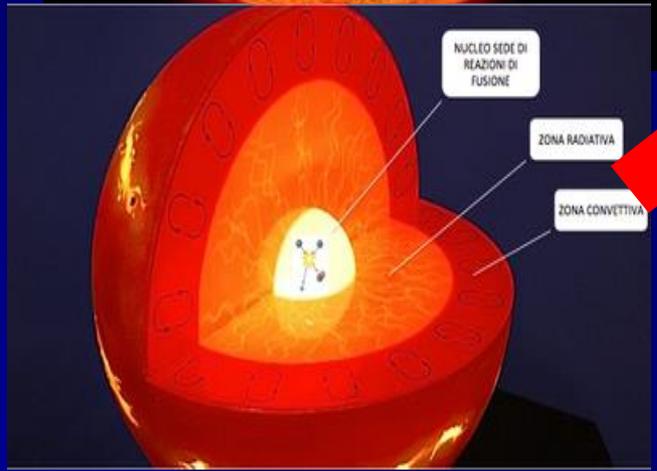
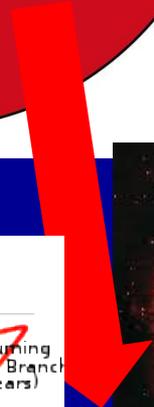
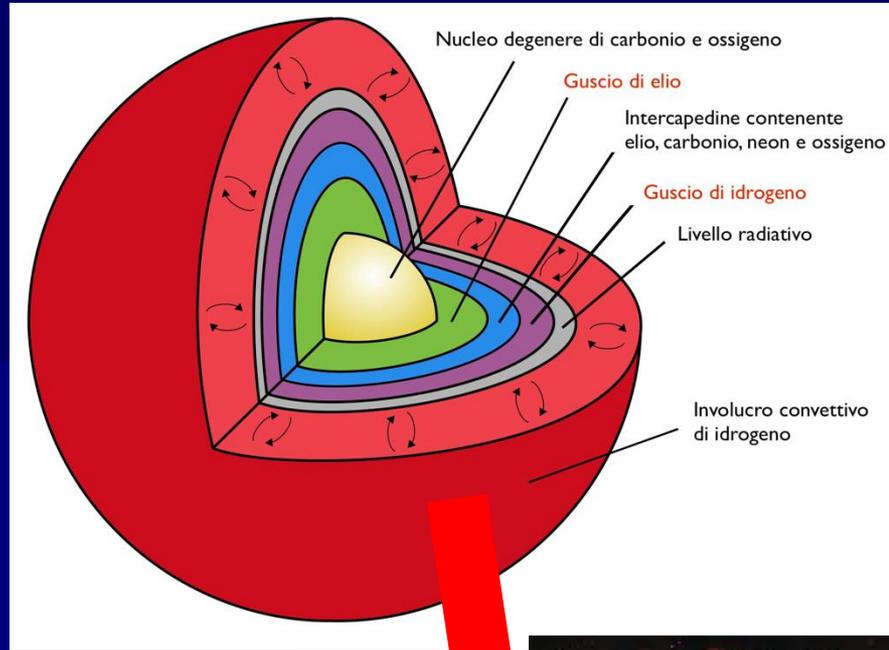
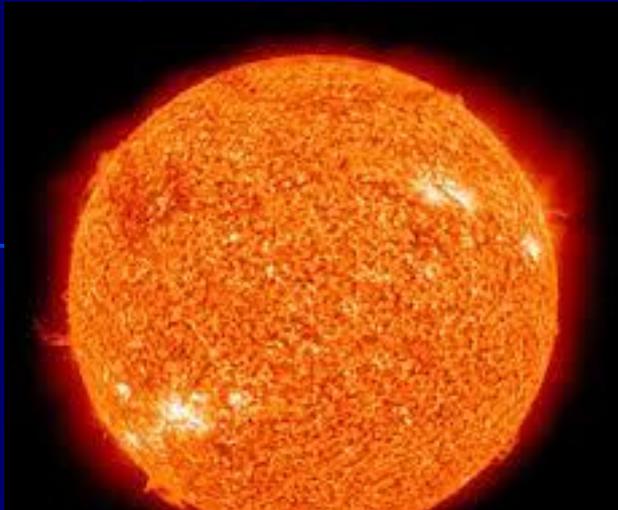
ESO Press
 This image is copyright

Fasi principali dell'evoluzione stellare

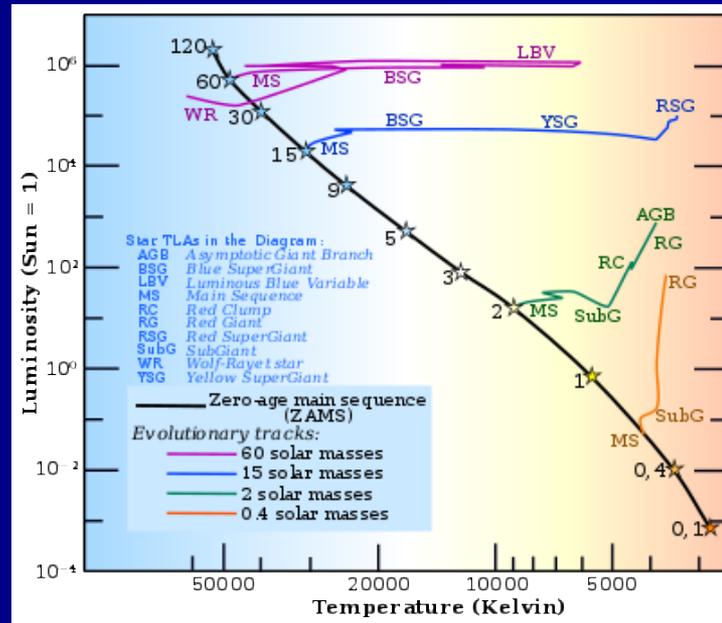
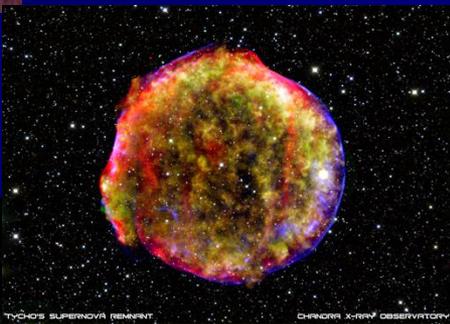
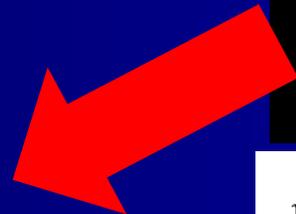
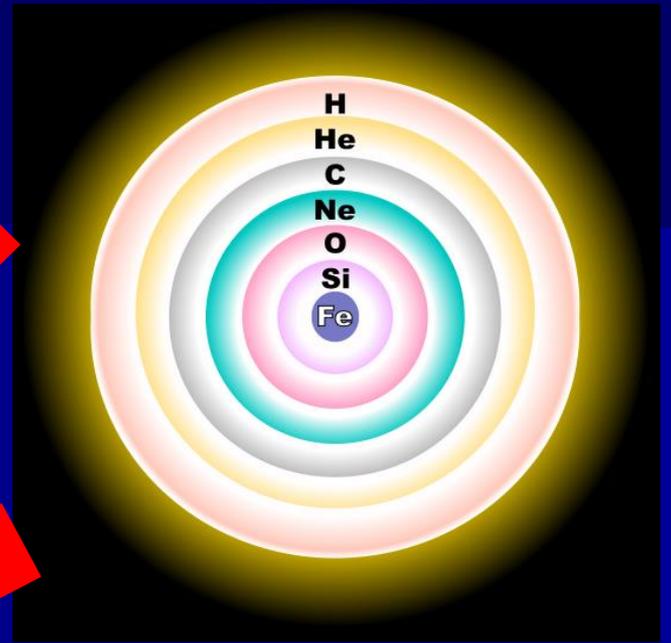
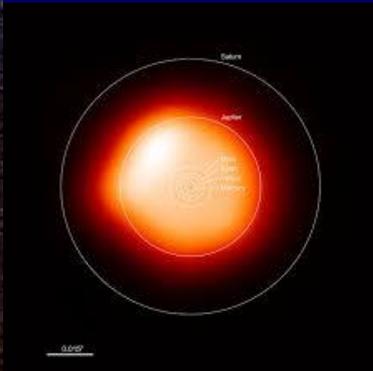


@ Corrado Ruscica

Percorso stelle piccola massa

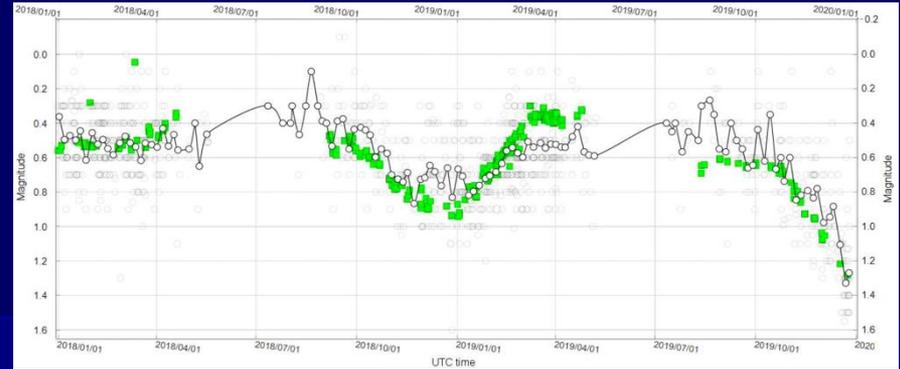
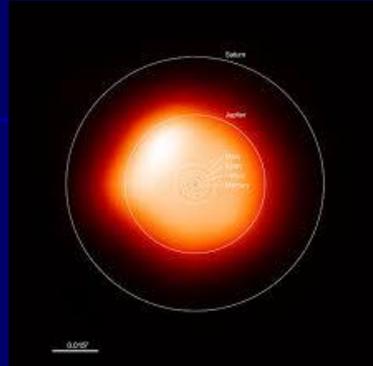


Percorso stelle grande massa

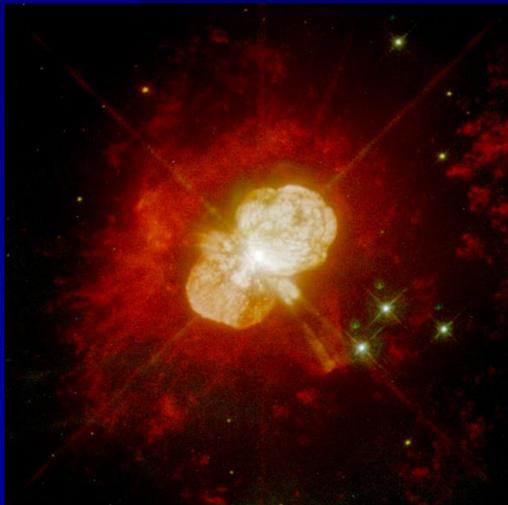




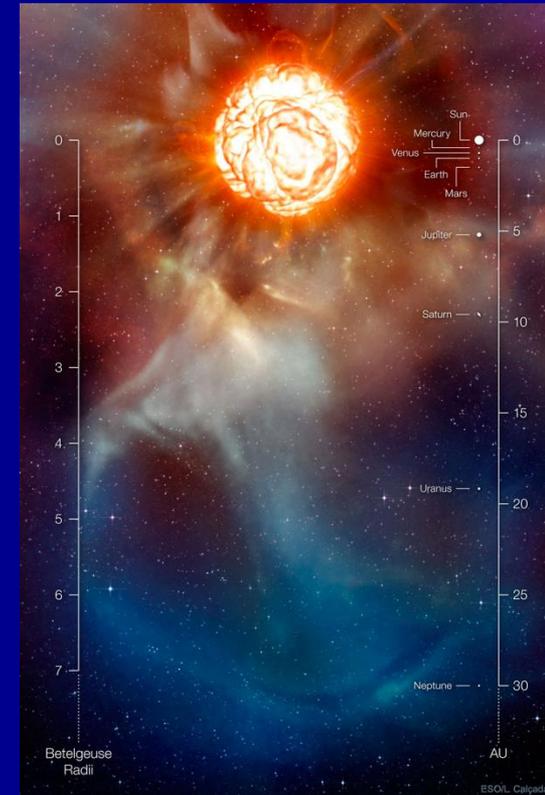
Betelgeuse



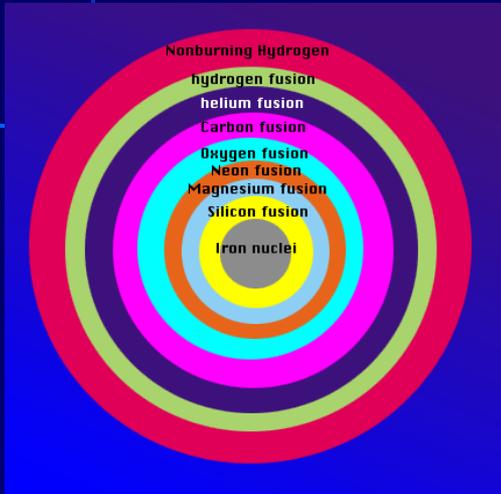
Eta carinae



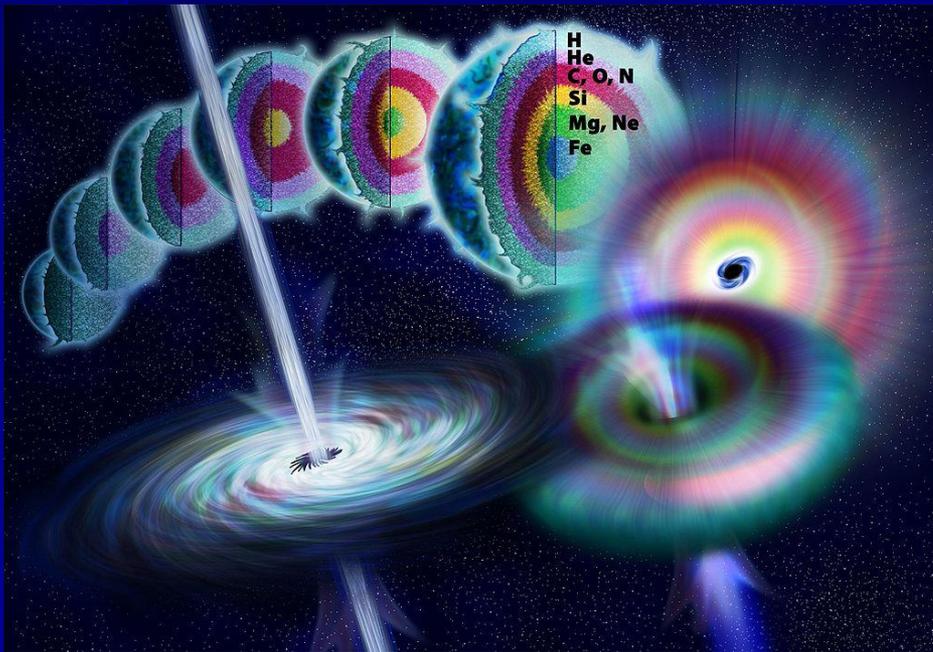
Betelgeuse è, come molte delle Stelle molto evolute, una stella Variabile. Negli ultimi mesi la sua Luminosità è diminuita di 1.5 Mag. (più che dimezzata). Questo è un Comportamento tipico di stelle Molto vecchie nelle ultime fasi della Loro vita (meno di 1000000 anni) Comportamento Simile Eta Carinae.



Come si formano gli elementi chimici?



Una stella di grande massa ($25 M_{\odot}$)
attuа al suo interno differenti
fusioni nucleari, producendo
energia e formando gli elementi
fino al ferro. Esso non può essere
trasformato in niente altro e
rimane "inerte"



Quando poi la stella esplode come
SN essa disperde nella Galassia
tutti gli elementi prodotti dentro di
essa.

Elementi più pesanti del ferro
(Au, Ag, Pt, U) prodotti in fasi
molto brevi di esistenza
stellare \Rightarrow più rari (e preziosi).

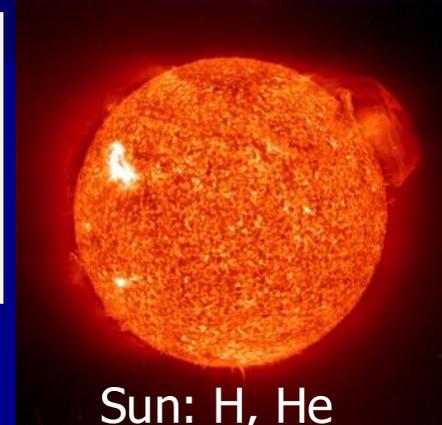
Da dove derivano i 90 elementi naturali? Come Vengono prodotti?



Earth: Fe, Si, O, Mg



Au



Sun: H, He



U



Li

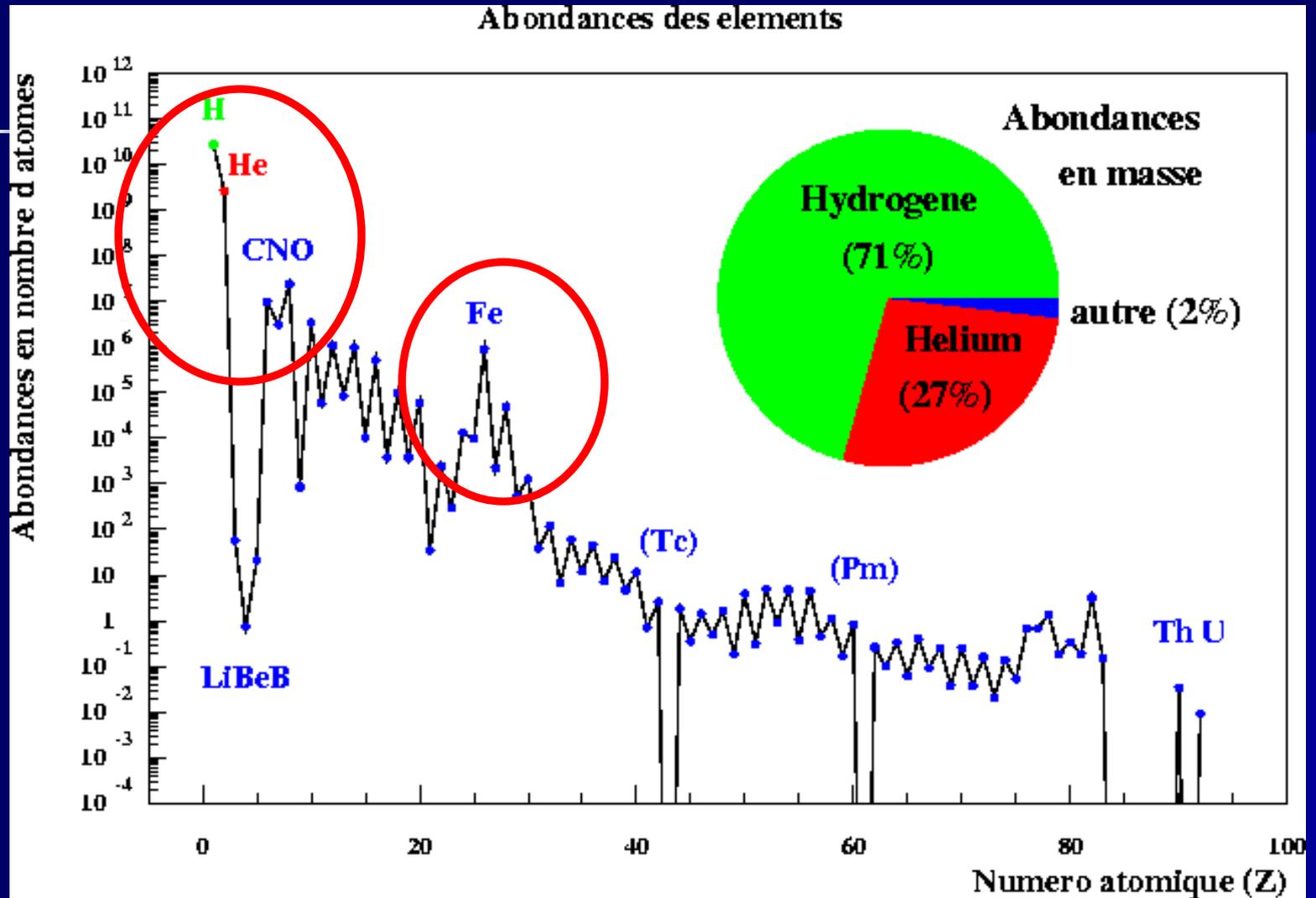


Meteorites: Fe, Ni



Una abbondanza «universale» degli elementi?

Come si formano gli elementi chimici che vediamo oggi??



Siamo polvere di stelle?

E noi?

Composizione tessuti viventi:

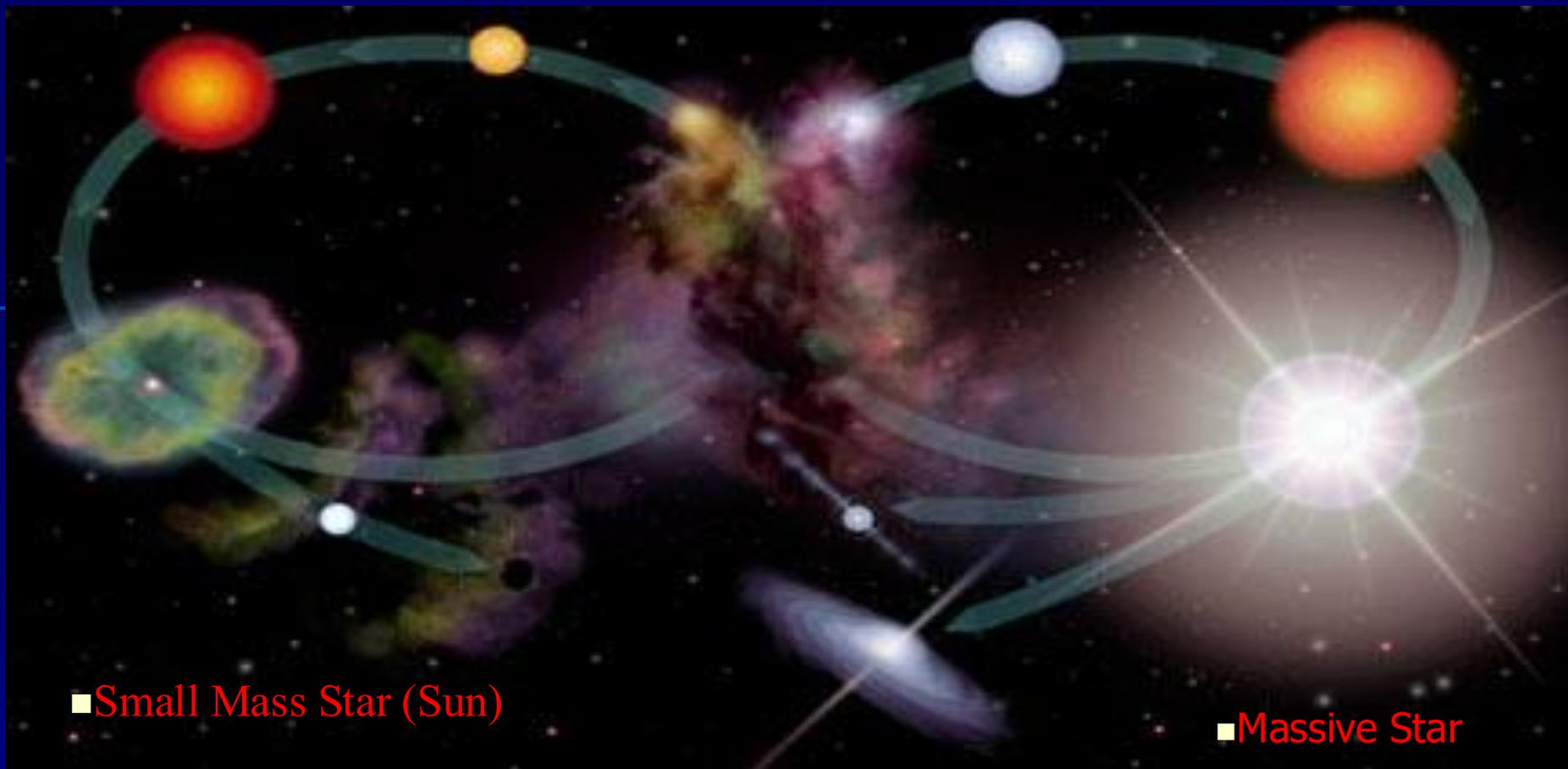
- H prodotto nel Big Bang (inizio universo)
- C prodotto nelle giganti rosse
- O prodotto nelle giganti rosse
- N prodotto in stelle grande massa (ciclo CNO)
- Fe prodotto in stelle grande massa



Fusione nucleare

Se non ci fosse stata una SN 5 miliardi di anni fa ...

*“It is the stars, the stars above us govern our conditions
(King Lear, W. Shakespeare)*



Le abbondanze chimiche degli elementi sono misurate nel sistema solare o in regioni ad esso prossime e vengono poi ASSUNTE come universali. Esse vengono misurate nel Sole, Sulla Terra, sulle meteoriti o in stelle attraverso differenti metodi. Sono visibili molte caratteristiche peculiari nella curva che ne deriva.

■ L'unica energia disponibile nel plasma stellare è quella derivante dall'agitazione termica:

- Nel core Solare: $T=1.5 \times 10^7 \text{ K} \rightarrow E=kT \sim \text{keV}$
- In stelle massicce: $T \sim 10^9 \text{ K} \rightarrow E \sim 500-1000 \text{ keV}$

Sono possibili reazioni nucleari con temperature così «basse»? Con quale *probabilità e velocità di reazione?*

Ad es. Repulsione p+p corrisponde a una repulsione (elettrostatica) di 500 keV (500 VOLTE più grande dell'energia termica media al centro del Sole).

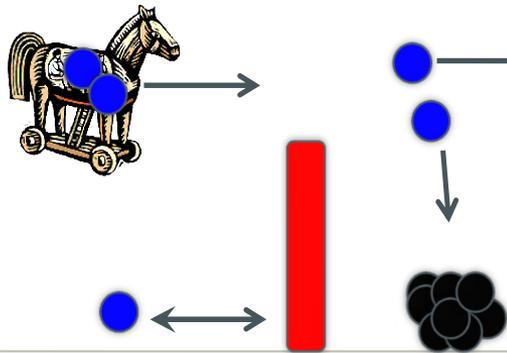
Quindi per fare interagire 2 nuclei (carichi +) in un laboratorio occorre TANTA energia

=> **ACCELERATORE DI PARTICELLE**

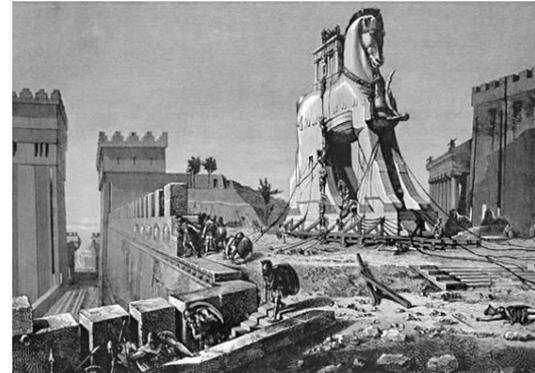
In astrofisica nucleare si deve misurare ad energie tipiche delle stelle:

Nel core Solare: $T=1.5 \times 10^7 \text{ K} \rightarrow E=kT \sim$ pochi keV
Si devono quindi accelerare appropriatamente le particelle. Ma se do un'energia di pochi keV come richiesto devo poi superare una repulsione coulombiana di almeno 1MeV (1000 keV) per fare avvicinare i nuclei interagenti

Metodo del Cavallo di Troia

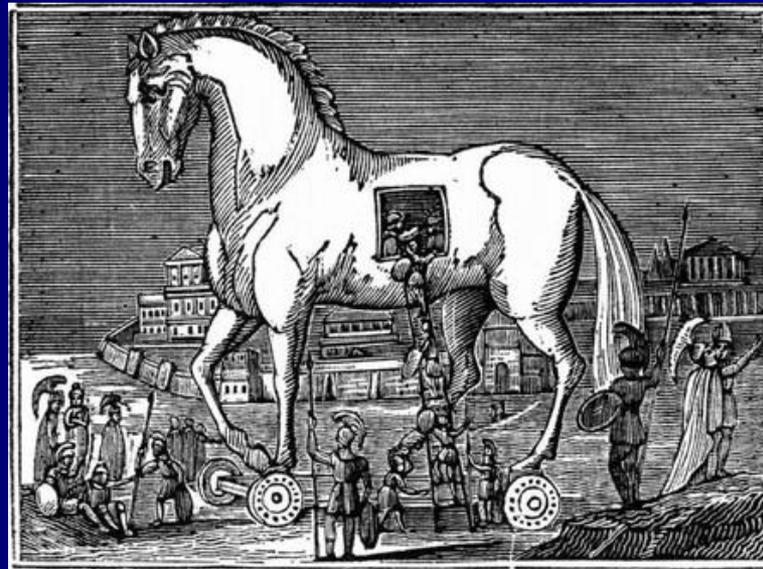


Il nucleo «cavallo di Troia» porta in se la particella che interessa reagisca e ha energia sufficiente a superare la repulsione. Superata questa, rilascia la particella studiata. Sviluppato @ LNS-UNICT





Dalle condizioni cinematiche (angolo, energia) e dal tipo di Particelle rivelate si ricostruisce Quanto è accaduto nella camera di reazione (come se ricostruissimo un tiro di biliardo dai suoi esiti)





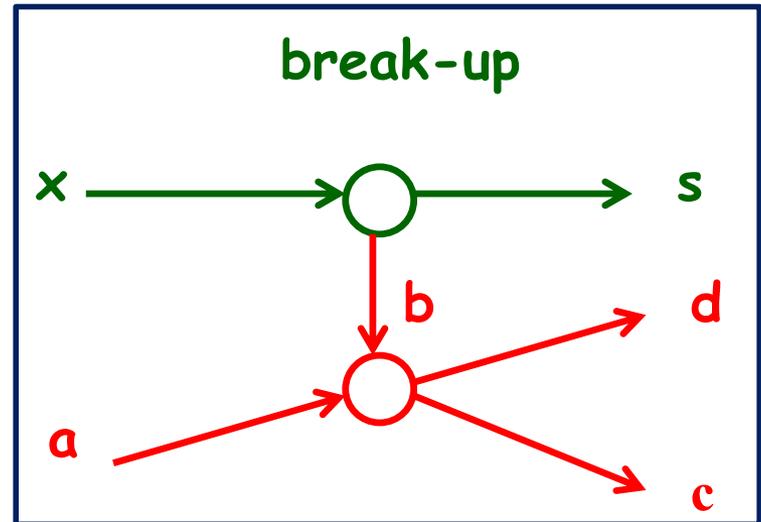
Trojan Horse Method

If the incoming energy of the incident particle is larger than the Coulomb barrier energy

the TH nucleus x can be brought into nuclear field of nucleus a and the cluster b induces the virtual reaction

NO Coulomb-suppression

NO Screening effects



virtual two body reaction



C. Spitaleri et al., PRC 64(2001)068801

C. Spitaleri et al., PRC 69(2004)055806

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ @LNS TANDEM on NATURE

Maggio
2018

LETTER

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0149-4>

An increase in the $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ fusion rate from resonances at astrophysical energies

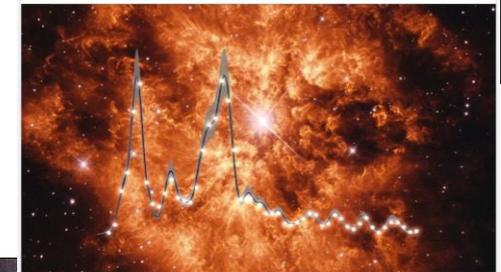
A. Tumino^{1,2*}, C. Spitaleri^{2,3}, M. La Cognata², S. Cherubini^{2,3}, G. L. Guardo^{2,4}, M. Gulino^{1,2}, S. Hayakawa^{2,5}, I. Indelicato², L. Lamia^{2,3}, H. Petrascu⁴, R. G. Pizzone², S. M. R. Puglia², G. G. Rapisarda², S. Romano^{2,3}, M. L. Sergi², R. Sparta² & L. Trache⁴

Risultati: circa 400 pubblicazioni
scientifiche per conoscere meglio il cosmo
partendo da Catania!

<https://www.facebook.com/asfin.lns>



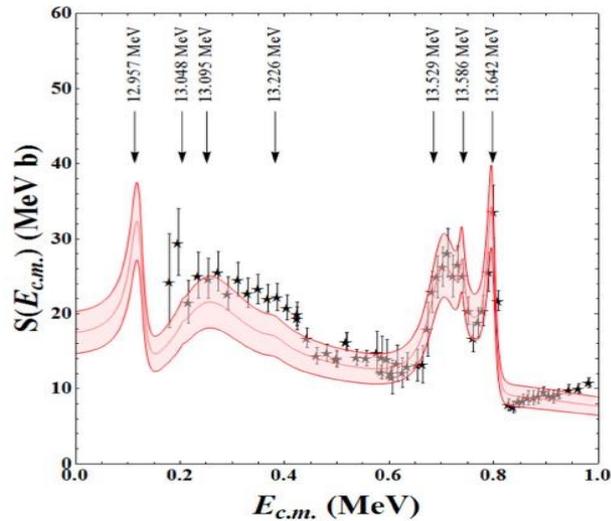
AsFIN - Nuclear AstroPhysics Group at LNS
Pubblicato da Gianluca Pizzone · 24 maggio 2018 ·
At the feet of Mt. Etna one of the most elusive reactions determining stellar evolution, the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion, is finally uncovered on NATURE!
Aurora Tumino Claudio Spitaleri Marco La Cognata Silvio Cherubini Giovanni Luca Guardo Marisa Gulino Iolanda Indelicato Livio Lamia Gianluca Pizzone Giuseppe Rapisarda Stefano Romano Letizia Sergi Roberta Sparta



HOME.INFN.IT
UN CAVALLO DI TROIA PER STUDIARE L'EVOLUZIONE STELLARE

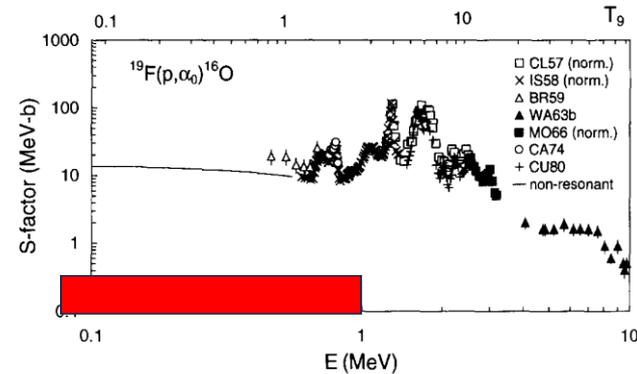


The $^{19}\text{F}(p,\alpha_0)^{16}\text{O}$ reaction via THM



La Cognata et al. The Astroph. Journal Lett., 739:L54 2011

Indelicato et al. The Astroph. Journal, 845:19, 2017

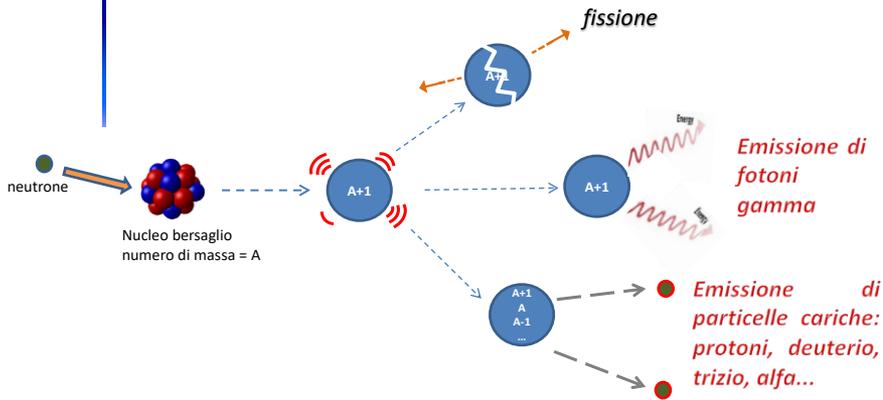


- Confirmation of the resonance at 251 keV (13.095 MeV)
- First measurement of the resonance at 113 keV (12.957 MeV)
- Important impact on Reaction Rate

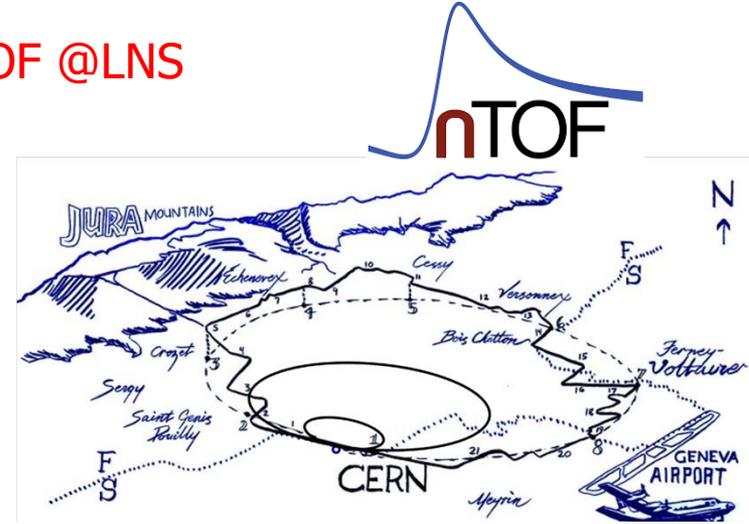
Prima Estrapolazione teorica → nostra misura → dati sperimentali nella zona di Interesse astrofisico

Cos'è n_TOF (neutron_Time Of Flight)?

È una infrastruttura del CERN che per produrre fasci di neutroni in un ampio intervallo energetico, finalizzata a misurare con grande accuratezza reazioni nucleari indotte dai neutroni.



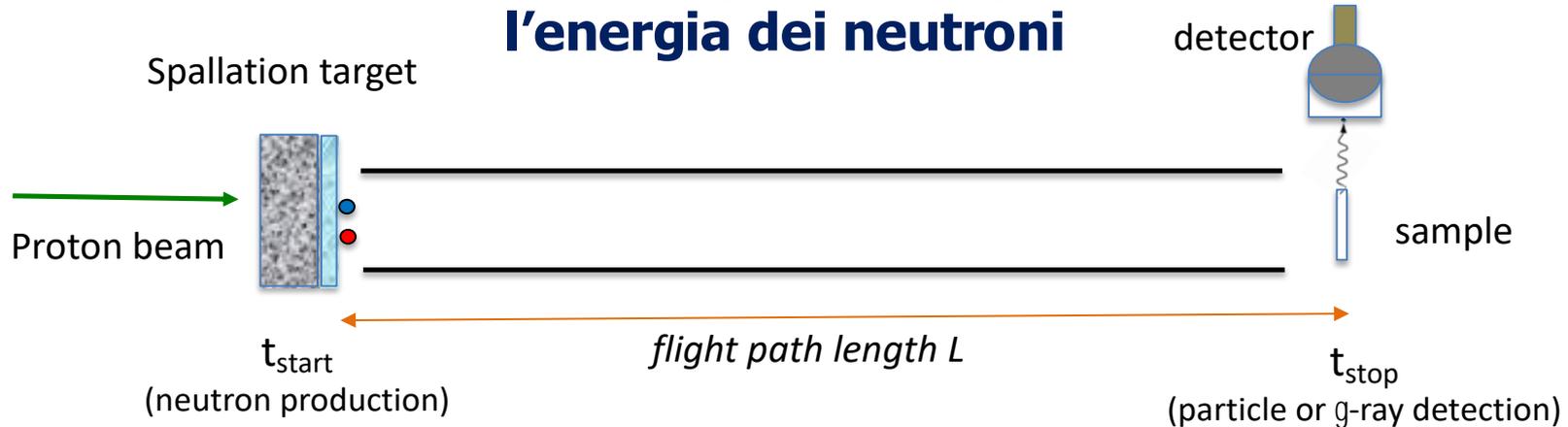
N-TOF @LNS



Come produciamo i fasci di neutroni utilizzati per gli esperimenti?

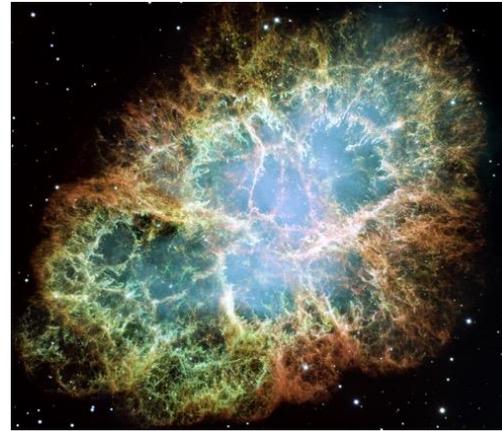
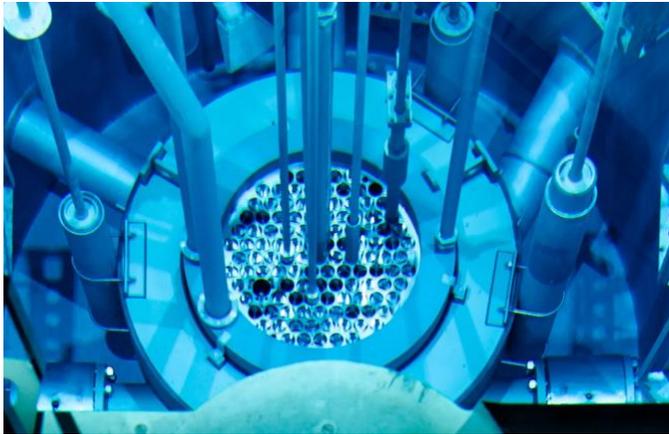
I protoni accelerati dal sincrotrone PS ad una energia di 20GeV vengono fatti urtare con un bersaglio di **piombo**. Le reazioni innescate producono un gran quantitativo di neutroni (alcune centinaia per ogni protone), per via di un processo fisico chiamato **spallazione**. Produzione circa 300 n per ogni protone.

La tecnica del tempo di volo per misurare l'energia dei neutroni



Perché studiare le reazioni con i neutroni è importante?

- Per la Nucleosintesi stellare ed esplosiva: tutti gli elementi chimici più pesanti del ferro presenti nell'universo, vengono prodotti in **reazioni nucleari indotte da neutroni** all'interno delle stelle e in eventi esplosivi come la fusione di stelle di neutroni e l'esplosione di supernove.



- **Nelle centrali nucleari**: I neutroni innescano le reazioni di fissione nucleare, necessarie per la produzione di energia elettrica. Saranno presenti in grande quantità nei futuri reattori a fusione
- Sono utilizzati per terapie innovative contro i tumori, come la **BNCT** (Boron Neutron Capture Therapy)

Formiamo i nuovi astrofisici nucleari della comunità internazionale

Around 80 participants/edition

Schools in NUCLEAR ASTROPHYSICS in CATANIA

LA SUMMER SCHOOL. Sino a sabato l'annuale raduno di cervelloni promosso da Università di Catania e INFN

Astrofisica, la Scuola di Santa Tecla nell'élite della ricerca mondiale



Conferenza dei 50 ricercatori e studenti provenienti da tutto il mondo al tavolo dei Laboratori del Sud nel complesso ENTPN, diretto dal prof. Claudio Di Stefano, con la partecipazione attiva del direttore, Antonio Spitaleri, e del vice direttore, Giuseppe Pagano.



L'evento dei Laboratori del Sud dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare a Catania, a Santa Tecla, è organizzato dal prof. Claudio Di Stefano, con la partecipazione attiva del direttore, Antonio Spitaleri, e del vice direttore, Giuseppe Pagano.

The 9th European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics

September 2017
Santa Tecla Palace Hotel, Sicily, Italy

Big Bang and Stellar Nucleosynthesis, Plasmas in Stars and Laboratories, Direct and Indirect Measurements, Detectors and Facilities for Nuclear Astrophysics, Experiments with RIB

Director of the School
C. Spitaleri (Catania)

Scientific Committee	Local Committee
M. Alotta (Rörsburg)	M. G. Pizzani (chair)
M. Busso (Parigi)	G. Agnello
A. Coc (Orsay)	S. Andersson
M. E. Eidi (Bairgi)	V. Palenzuela
T. Kajino (Tokyo)	G. B. Rossi (chair)
K.L. Kratz (Mainz)	M. W. R. Russe
S. Kubota (Tokyo)	M.L. Serp
G. Langanke (Darmstadt)	S. Sporn
Wu Liping (CIAE)	
J. J. M. (Barcelona)	
T. Motoki (Tokyo)	
A. Mukhamedzhanov (TAMU)	
E. Nappi (Bari)	
O. Straniero (Taranto)	
R. Vogels (TAMU)	
C. Rolfs (Bochum)	
L. Traub (Bacharach)	
R. Tribble (BNL & TAMU)	
M. Wiescher (South Bend)	

Scientific Secretary:
S. Leoni

Contact:
Email: astro2015@inf.it
Website: <http://agenda.infn.it/conference.php?paperid=8678>




The 10th European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics

June 16-23, 2019
Catania, Sicily, Italy

Big Bang and Stellar Nucleosynthesis, Plasmas in Stars and Laboratories, Neutron star mergers, Direct and Indirect Measurements, Detectors and Facilities for Nuclear Astrophysics, Experiments with RIB

Director of the school
C. Spitaleri (Catania)

Scientific Committee	Local Committee
M. Alotta (Rörsburg)	M. G. Pizzani (chair)
M. Busso (Parigi)	L. Lomax (scientific secretary)
A. Coc (Orsay)	S. Agnello
M. E. Eidi (Bairgi)	M. La Cognata
T. Kajino (Tokyo)	F. Lefebvre
K.L. Kratz (Mainz)	S. Palenzuela
S. Kubota (Tokyo)	T. Palenzuela
G. Langanke (Darmstadt)	S. Sporn
Wu Liping (CIAE)	R. Sporn
J. J. M. (Barcelona)	
T. Motoki (Tokyo)	
A. Mukhamedzhanov (TAMU)	
E. Nappi (Bari)	
O. Straniero (Taranto)	
R. Vogels (TAMU)	
C. Rolfs (Bochum)	
L. Traub (Bacharach)	
R. Tribble (BNL & TAMU)	
M. Wiescher (South Bend)	

Contacts
astro2019@inf.it
<http://agenda.infn.it/event/astro2019>







European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics: 2001 – 2024 (and beyond)