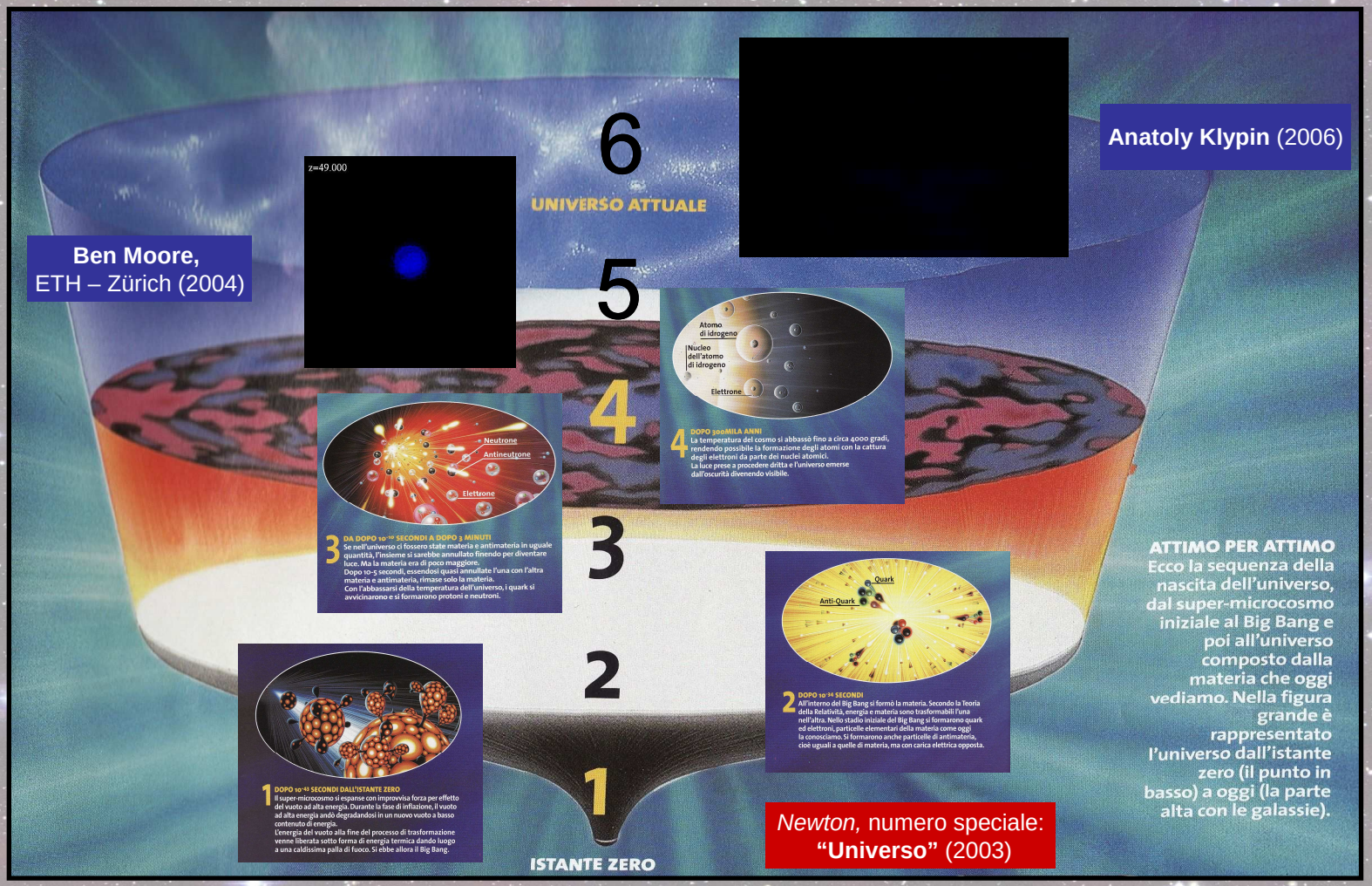
LA VITA DELLE STELLE
ERICA BISESI

Sommario

- Le grandi ere cosmiche
- Le galassie
  - Formazione galattica
  - Teorie e modelli
  - Struttura e classificazione
  - Popolazioni stellari
- Le stelle
  - Classificazione
  - Il diagramma HR
  - Nascita, evoluzione, morte
  - Reazioni termonucleari
- Nane bianche
- Supernovae
- Stelle di neutroni e pulsar
  - Pulsar millisecondo
  - Evoluzione
- Binarie X
- Buchi neri

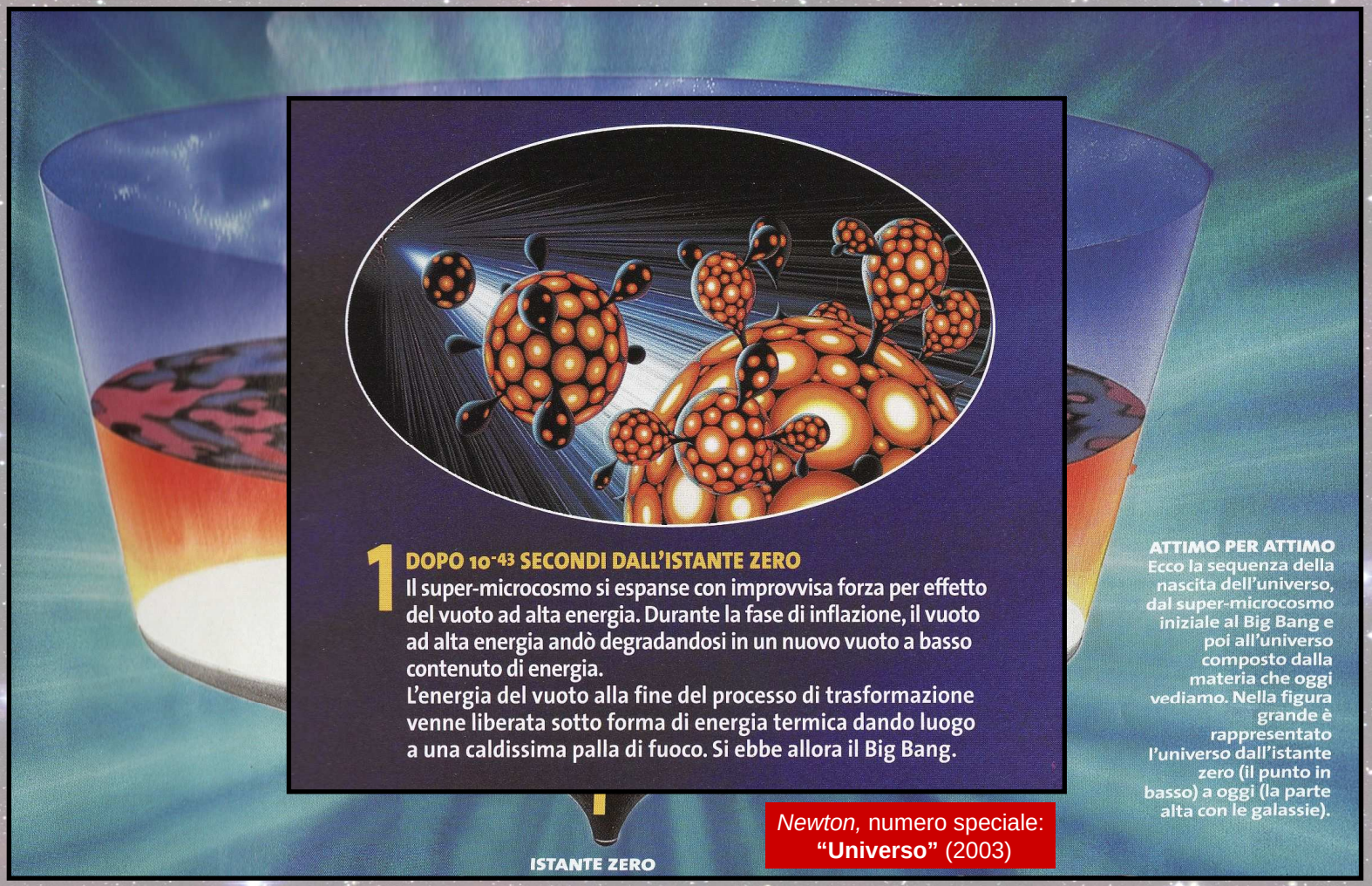
ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le grandi ere cosmiche



ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le grandi ere cosmiche



Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le grandi ere cosmiche

Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

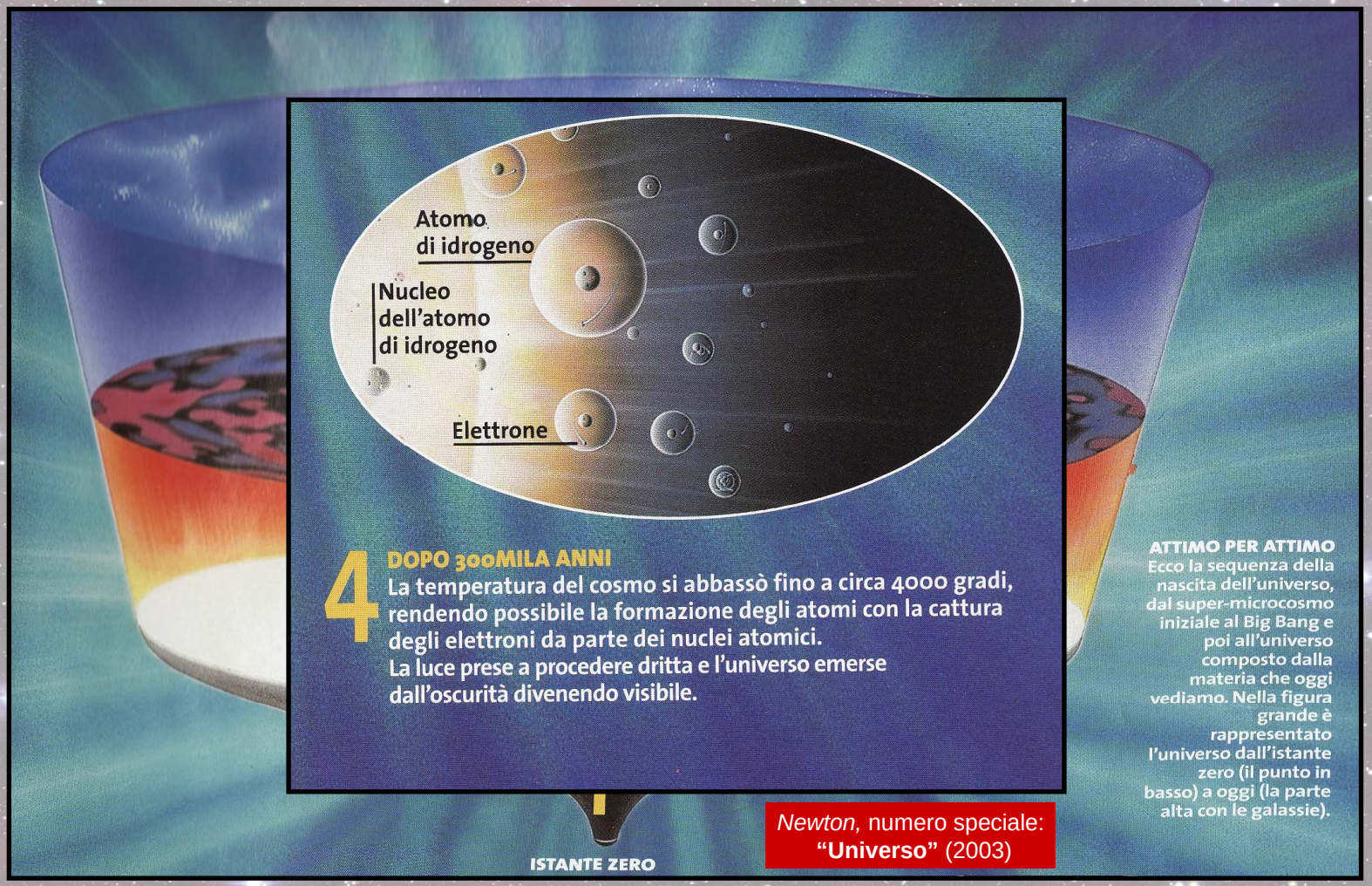
ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le grandi ere cosmiche

Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le grandi ere cosmiche



Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

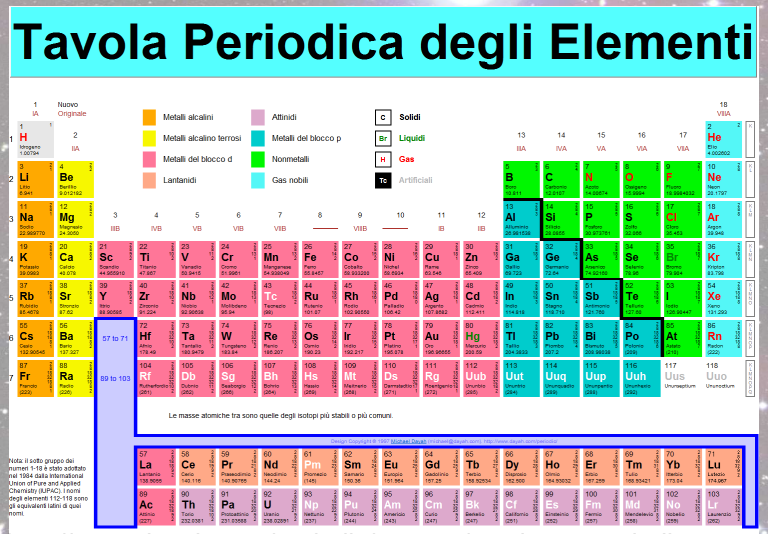
Formazione degli elementi chimici

- Elementi primordiali:
  - Big Bang
- Elementi pesanti, fino al ferro:
  - reazioni termonucleari nelle stelle
- Elementi più pesanti del ferro:
  - cattura neutronica
- Molecole:
  - collisioni atomiche nel mezzo interstellare

Elementi primordiali

Nucleosintesi:

25% di elio-4
circa 1% di deuterio
tracce di litio e berillio
e nessun altro elemento pesante



http://www.dayah.com/periodic/Images/tavola%20periodica.png

La misura dell'abbondanza osservata è considerata una prova sicura per la teoria del Big Bang.
La nucleosintesi primordiale comincia circa un minuto dopo il Big Bang, quando l'Universo si è raffreddato abbastanza per formare protoni e neutroni stabili, dopo la bariogenesi.
Subito dopo, a tre minuti dal Big Bang, l'universo diventa troppo freddo per far avvenire fusioni nucleari.
A questo punto, l'abbondanza di elementi è fissa, e cambia solo quando i prodotti radioattivi della nucleosintesi decadono.

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le galassie

Formazione galattica (Chiara Donadio, 2004)

Grazie alla radiazione di fondo trovata da Wilson e Penzias, ci si è resi conto che prima l'Universo era paragonabile all'immagine che possiamo avere del mare guardandolo dall'alto, senza movimenti e piatto; ma stando su una barca ci si rende conto di quanto il mare sia messo in subbuglio dalle onde. Così anche l'Universo primordiale era attraversato da perturbazioni, dovute all'incessante moto delle particelle calde che viaggiavano alla velocità della luce.
La forza di gravità in questo caso ha giocato a favore delle perturbazioni, facendo in modo che ogni piccola perturbazione potesse ingrandirsi raccogliendo altra materia in modo anche irregolare; tali disomogeneità sono presenti ancora oggi.

Teorie e modelli

1. bottom-up
2. top-down

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

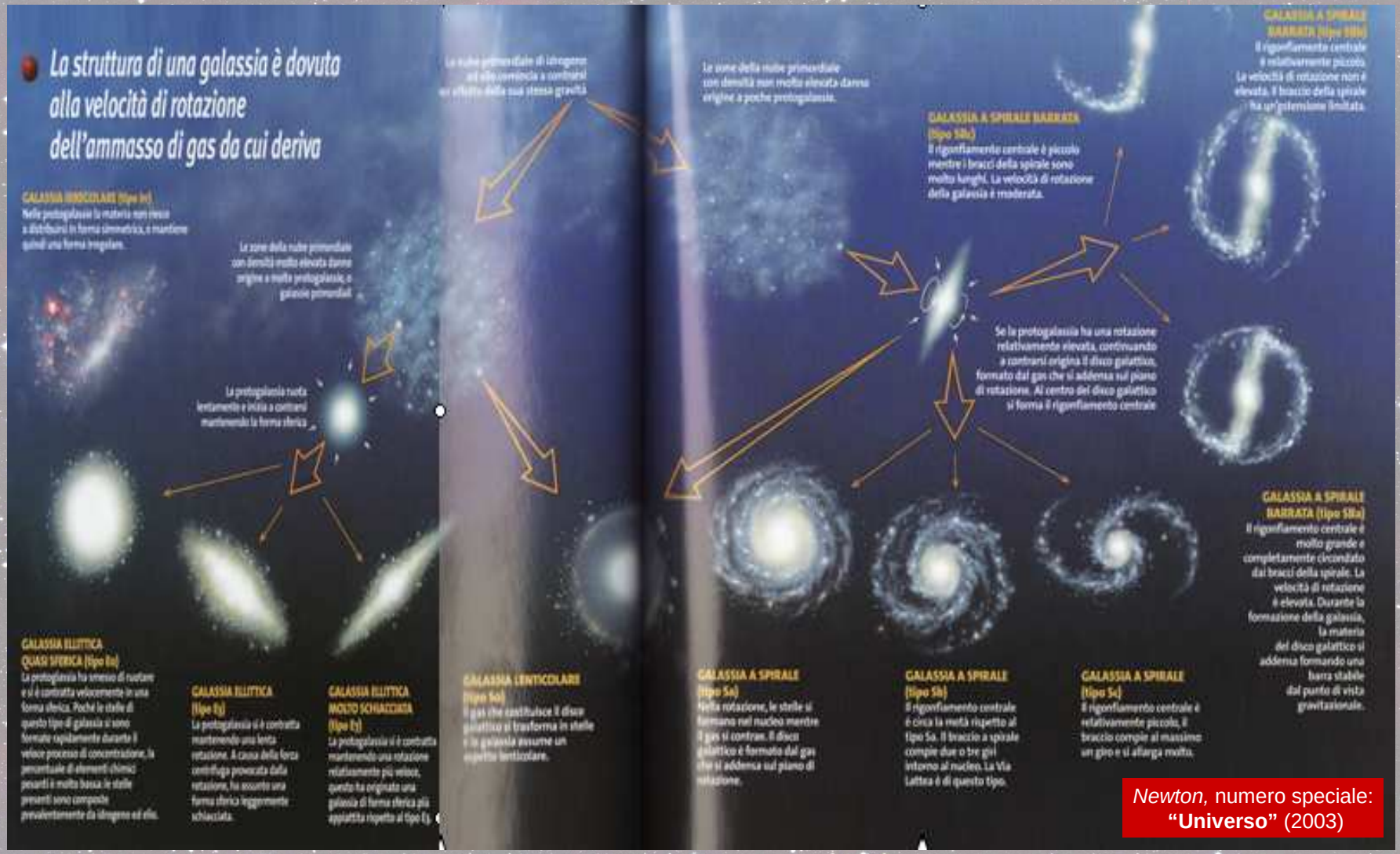
1. **bottom-up:** teoria gerarchica della formazione delle galassie, in cui oggetti più piccoli si legano a formare corpi di massa sempre maggiore. Tutto partì dalla pressione dell'Universo primordiale, dovuta alla elevata temperatura, che tese ad allontanare le strutture che la forza di gravità teneva insieme; per bloccare questo allontanamento c'era bisogno di una maggiore forza di attrazione che, per vincere la pressione interna, si tradusse in masse o dimensioni più grandi della perturbazione stessa. Le strutture che per prime si formarono furono quella con una massa intorno al milione di volte quella del Sole e furono i primi ammassi stellari. Le strutture di massa minore vennero disgregate dalla pressione interna, quelle di massa maggiore furono più lente nel far agire la forza di gravità e aggregarsi in un volume minore. Così, le galassie si formano per aggregati di strutture più piccole, quali gli ammassi stellari. Le galassie stesse poi si raggrupparono tra loro a decine o centinaia nei superammassi di galassie, in cui ammassi e galassie singole venivano legati tra loro dalla forza di gravità – estendendosi per anni luce.

2. **top-down:** la formazione delle galassie sarebbe avvenuta "al contrario", ovvero da strutture enormi si sarebbero ottenute le galassie e l'Universo come lo vediamo oggi. Alcuni credevano infatti che la teoria dell'evoluzione termica prevedesse prima la formazione dei superammassi – ma con una struttura piatta, e non sferica, dovuta alle forze di gravità e di espansione causate dal Big Bang. Questo foglio opaco era poi costretto a contrarsi e a ridursi i filamenti lunghi migliaia di anni luce che, sempre per l'espansione, si sarebbe iniziato a frammentare, dando vita agli ammassi di galassie, dalla cui nube sarebbero emerse le galassie arricchitesi col passare dei millenni di stelle luminose.

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Le galassie

Struttura e classificazione



Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

Le galassie

Popolazioni stellari (Chiara Donadio, 2004)

Le galassie sono classificate anche per l'età delle stelle che le compongono. Infatti, gli astronomi riconoscono diverse popolazioni stellari, ovvero diverse classi di stelle che si sono formate nello stesso momento.

1. **popolazione I:** le stelle più giovani e quelle che si stanno formando;
2. **popolazione II:** quelle nate anche circa un miliardo di anni dopo il Big Bang, e che ora hanno quindi circa 14 miliardi di anni.

Le stelle appartenenti a queste due classi differiscono tra loro per **colore** (le più vecchie sono maggiormente rosse) e per **composizione chimica.**
Si capisce perciò come le stelle di popolazione II devono per forza essersi formate dal materiale che costituiva l'Universo primordiale, ma i nuclei di tali stelle esaurivano presto il combustibile e "morendo" – talvolta con potenti esplosioni, rilasciavano i materiali più pesanti, come ferro e ossigeno, che andavano a formare i corpi più giovani: nuove stelle e i pianeti.
La differenza tra le galassie è che quelle **ellittiche** sono formate da stelle della **popolazione II** e i loro **nuclei** appaiono **più rossicci,** mentre i nuclei delle **galassie a spirale** sono **bluastri,** prova di **stelle giovani o ancora in formazione.**

Le stelle

Calssificazione

- Spettri stellari

(O,B,A,F,G,K,M,N,C)

- Colore , temperatura, luminosità

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

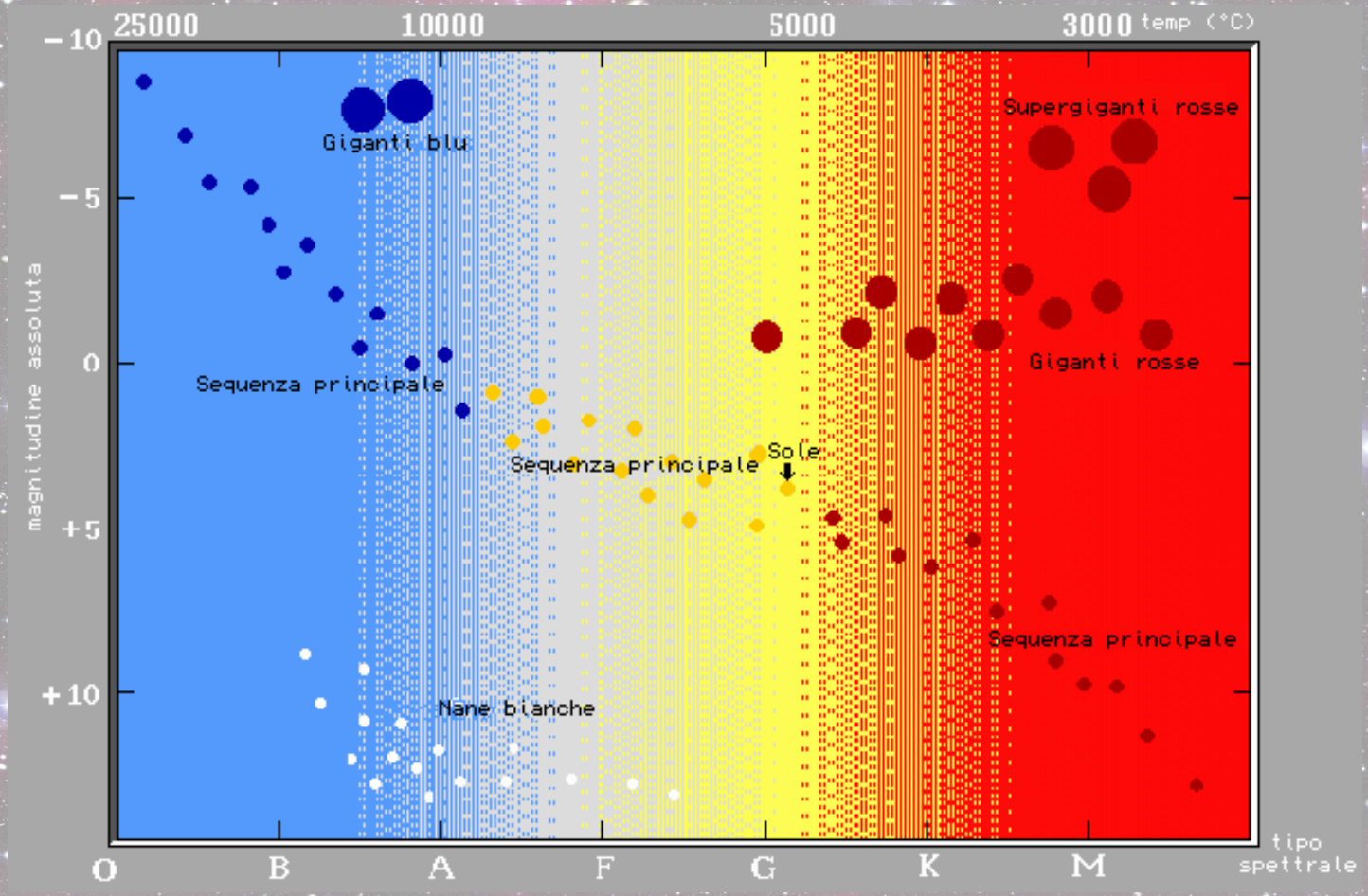
Le stelle

FIG. 1.3. Stellar properties. Various astrophysical parameters for main sequence stars of various spectral types, having a chemical composition not too different than that of the Sun. MS lifetime reflects average time [in billions of years (Ga)] on the main sequence. The last two columns list peak wavelength emitted and the dominant color (observed near the star). IR, infrared; UV, ultraviolet. The calculations of the approximate main sequence lifetimes are based on the assumption that the Sun will be on the main sequence for 10 Ga. The luminosities are calculated using the Stephan-Boltzmann Law, *i.e.*, integrated over all wavelengths. Values for stars that have left the main sequence (Sec. 1C), brown dwarfs (Sec. 1B), Jupiter, and Earth are listed for comparison. (*At specific wavelengths only.)

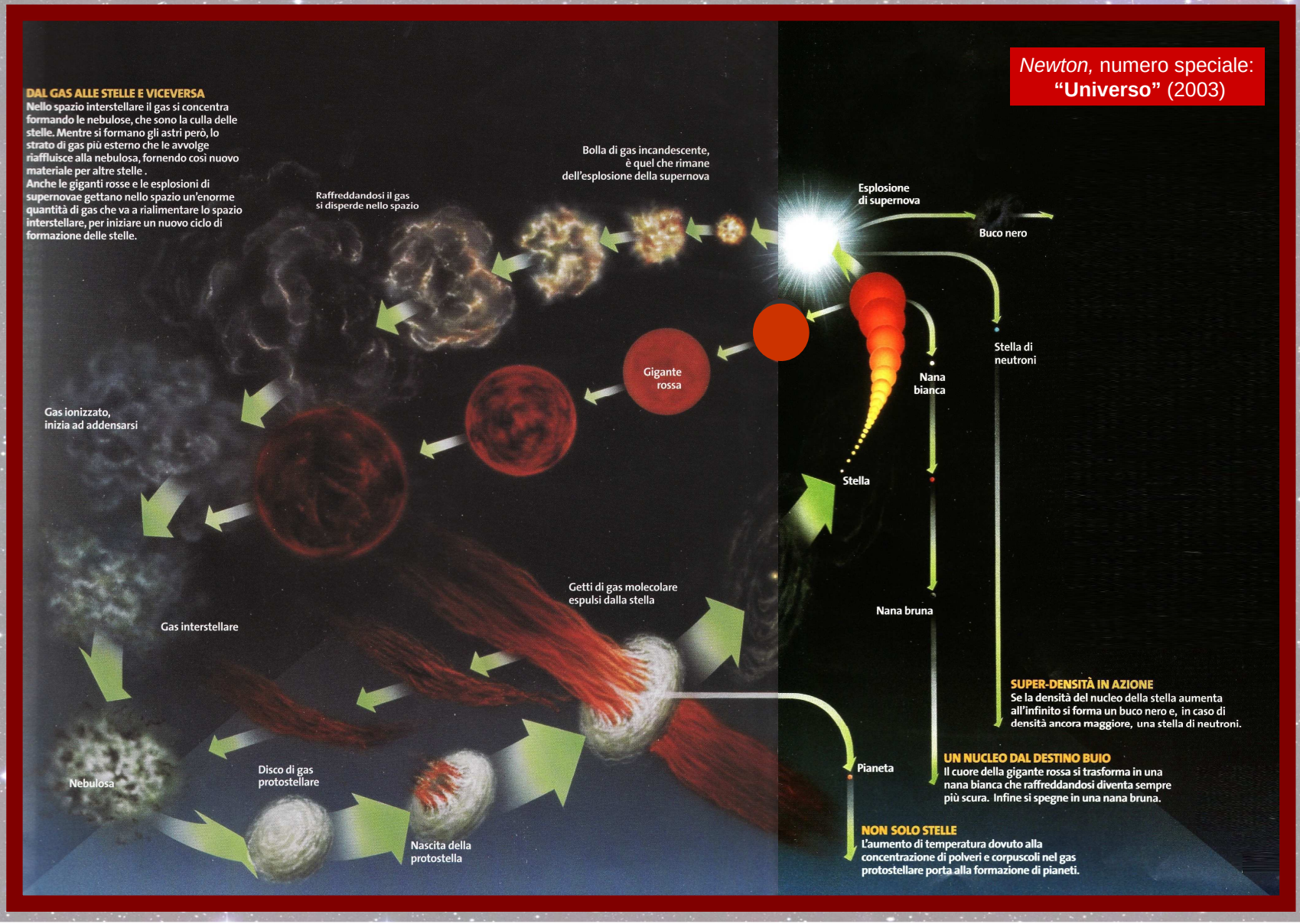
Spectral type	mass [M_{Sun}]	radius [R_{Sun}]	luminosity [L_{Sun}]	surface temp. [K]	MS lifetime [Ga]	λ_{peak} [nm]	peak color (appearance)
O5	60	12	400,000	42,000	0.0004	70	UV (blue)
B0	17.5	7.4	40,000	30,000	0.008	100	UV (blue)
B5	5.9	3.9	700	15,200	0.1	190	UV (blue)
A0	2.9	2.4	50	9,790	0.7	300	UV (blue)
A5	2.0	1.7	10	8,180	1.8	350	UV (blue)
F0	1.5	1.5	6	7,300	3.6	400	violet (white)
F5	1.4	1.3	3	6,650	4.3	440	blue (white)
G0	1.05	1.1	1.3	5,940	8.9	490	blue (white)
G5	0.92	0.92	0.7	5,560	12	520	green (white)
K0	0.79	0.85	0.5	5,150	18	560	yellow (white)
K5	0.67	0.72	0.2	4,410	27	660	red (white)
M0	0.51	0.60	0.07	3,840	54	750	red (yellow)
M5	0.21	0.27	0.007	3,170	490	910	IR (orange)
Pulsar	1.5	1.5×10^{-5}	1,000*	several M	-	-	
Red Giant	1-3	20	100	4,000	-	720	red (yellow)
White Dwarf	0.6	0.004	0.001	10,000	-	290	UV (blue)
Brown Dwarf	0.04	0.1	1×10^{-5}	1,000	300	3,000	IR (red)
Jupiter	1×10^{-3}	0.1	1×10^{-8}	180	-	16,000	IR (invisible)
Earth	3×10^{-6}	0.004	1×10^{-9}	280	-	10,000	IR (invisible)

Le stelle

Il diagramma HR



Evoluzione stellare



Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

Evoluzione stellare

Nascita

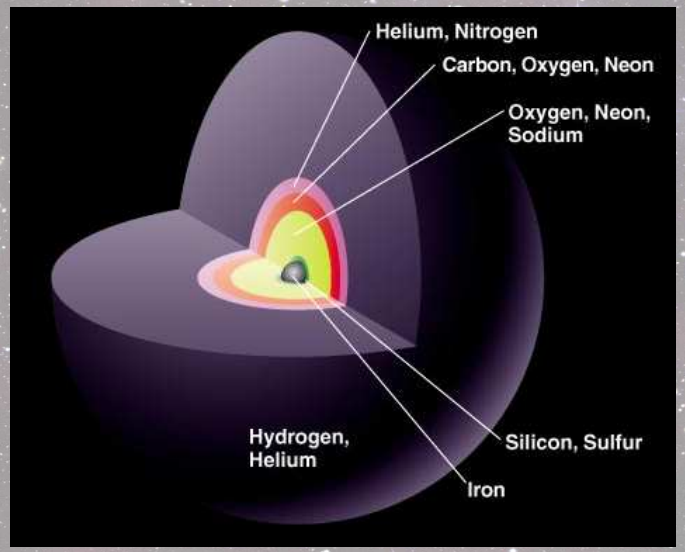
- Globuli di Bok
- Fase di sequenza principale

Evoluzione

- Reazioni termonucleari
- Evoluzione in gigante rossa

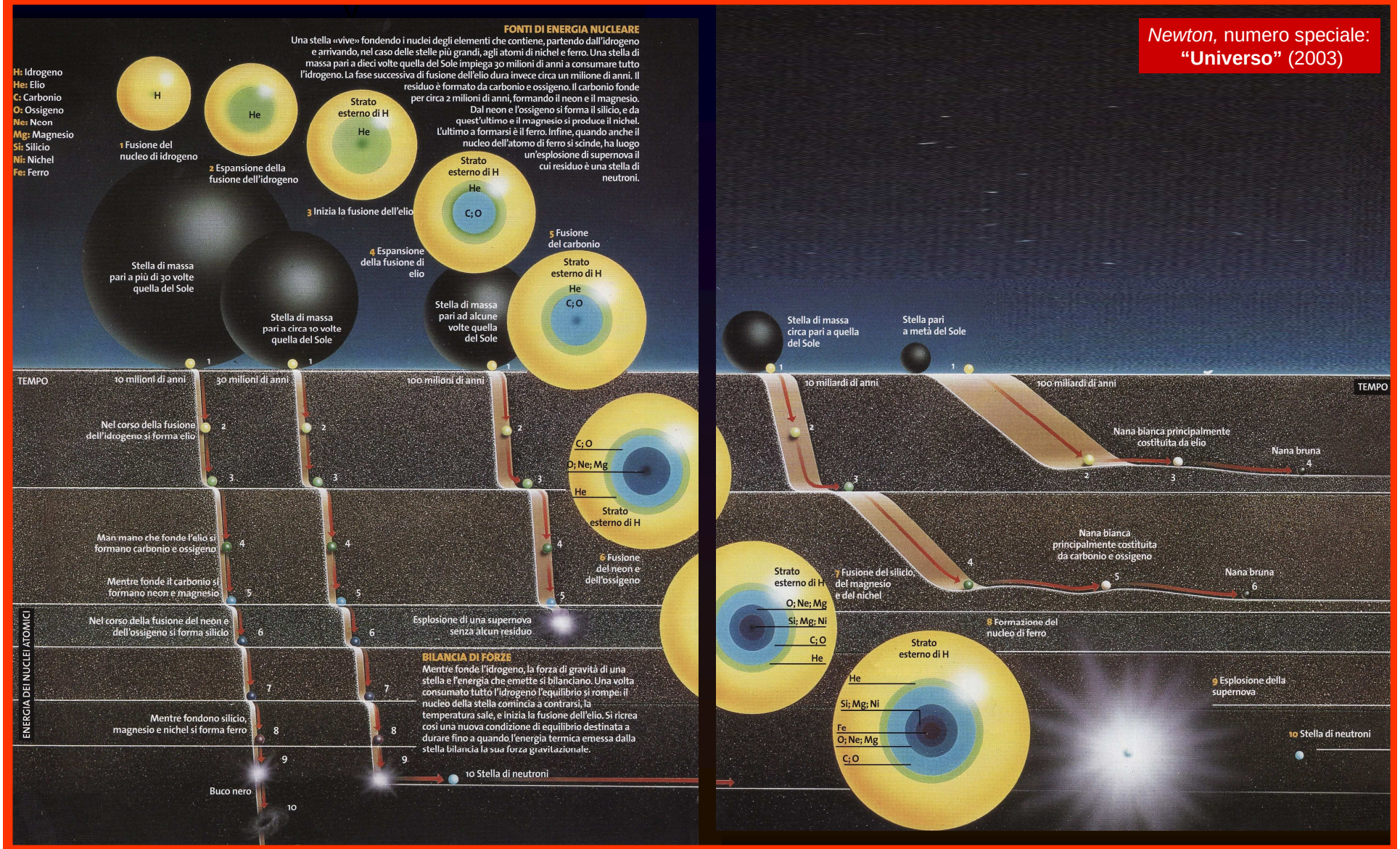
Morte

- Nane bianche
- Esplosione di supernova
  - Stelle di neutroni
  - Buchi neri



ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Evoluzione stellare

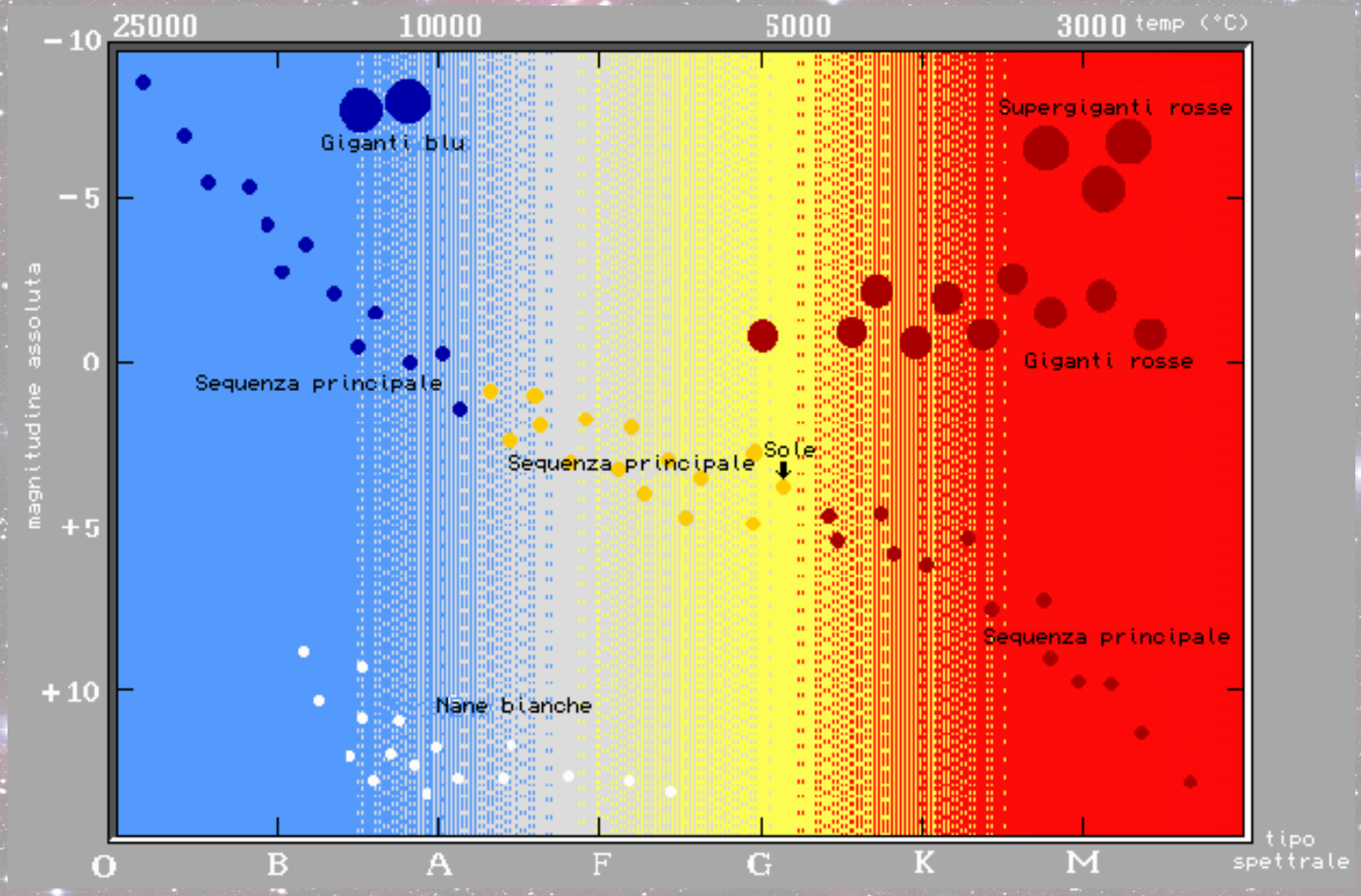


Newton, numero speciale: **"Universo"** (2003)

Evoluzione stellare

Popolazioni stellari

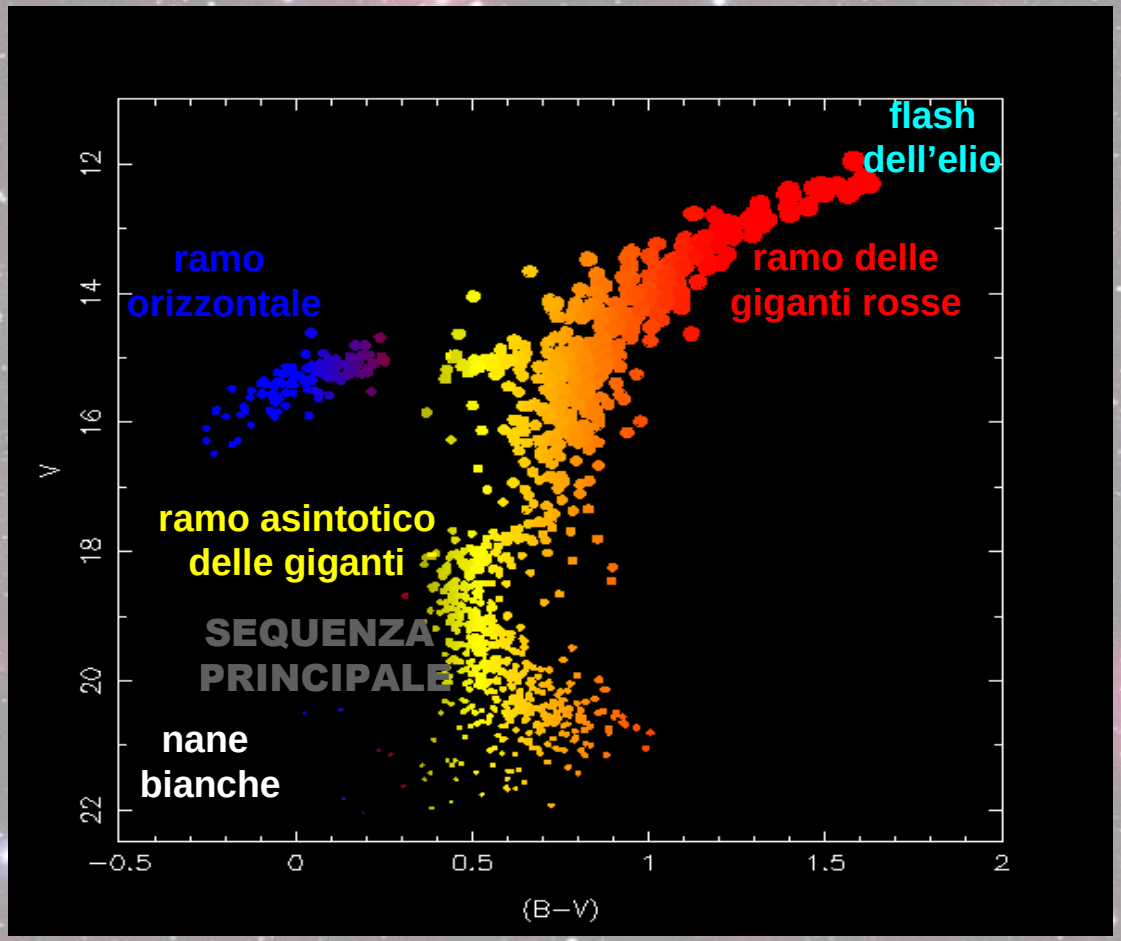
http://www.dur.ac.uk/ian.smail/gcCm/gcCm_top.html



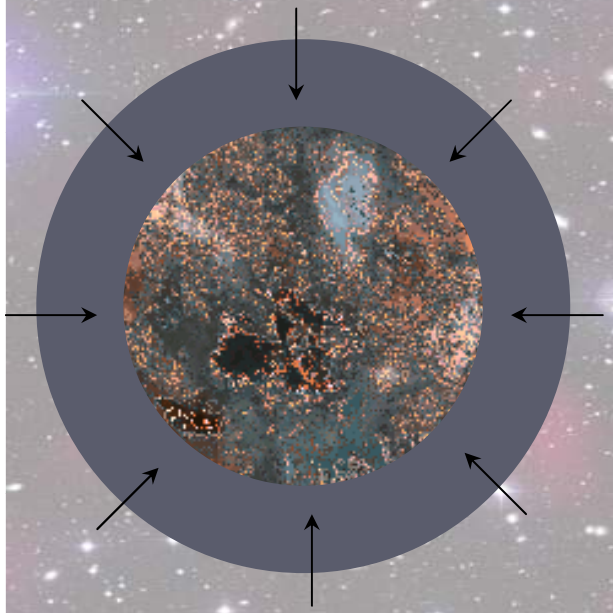
Evoluzione stellare

Popolazioni stellari

http://www.dur.ac.uk/ian.smail/gcCm/gcCm_top.html



COMBUSTIONE DELL'H (1° equilibrio)



$$4H \rightarrow {}^{4}He + 2\beta^{+} + 2\nu + 26\ MeV$$

Cenere del bruciamento nucleare

Sorgente dell'energia

I due principali meccanismi:

catena protone-protone e ciclo CNO

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Reazioni termonucleari

la catena protone-protone

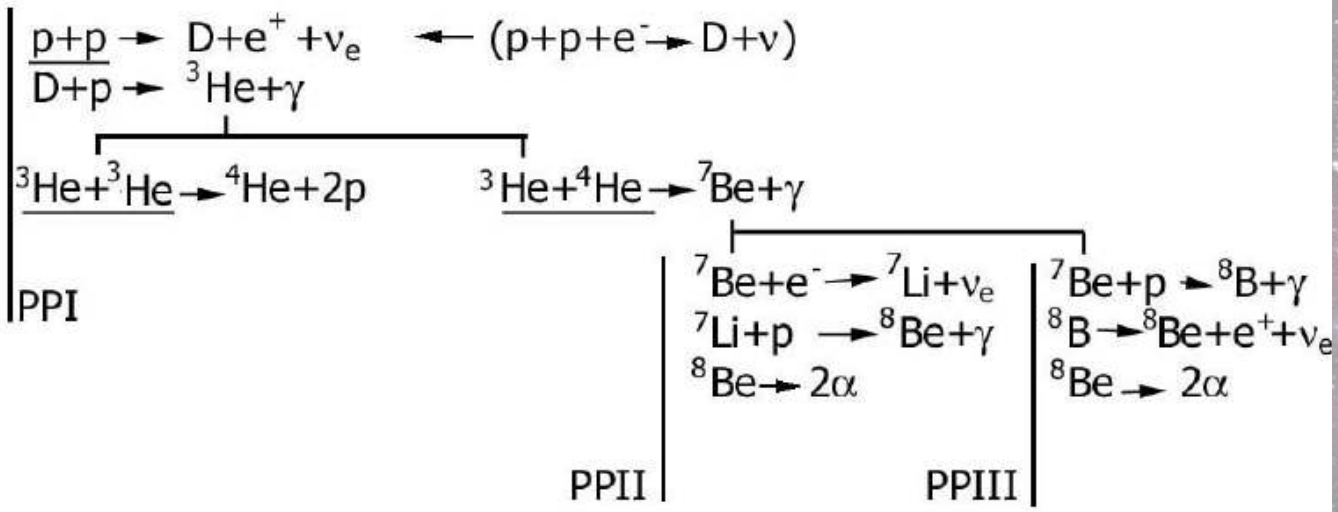
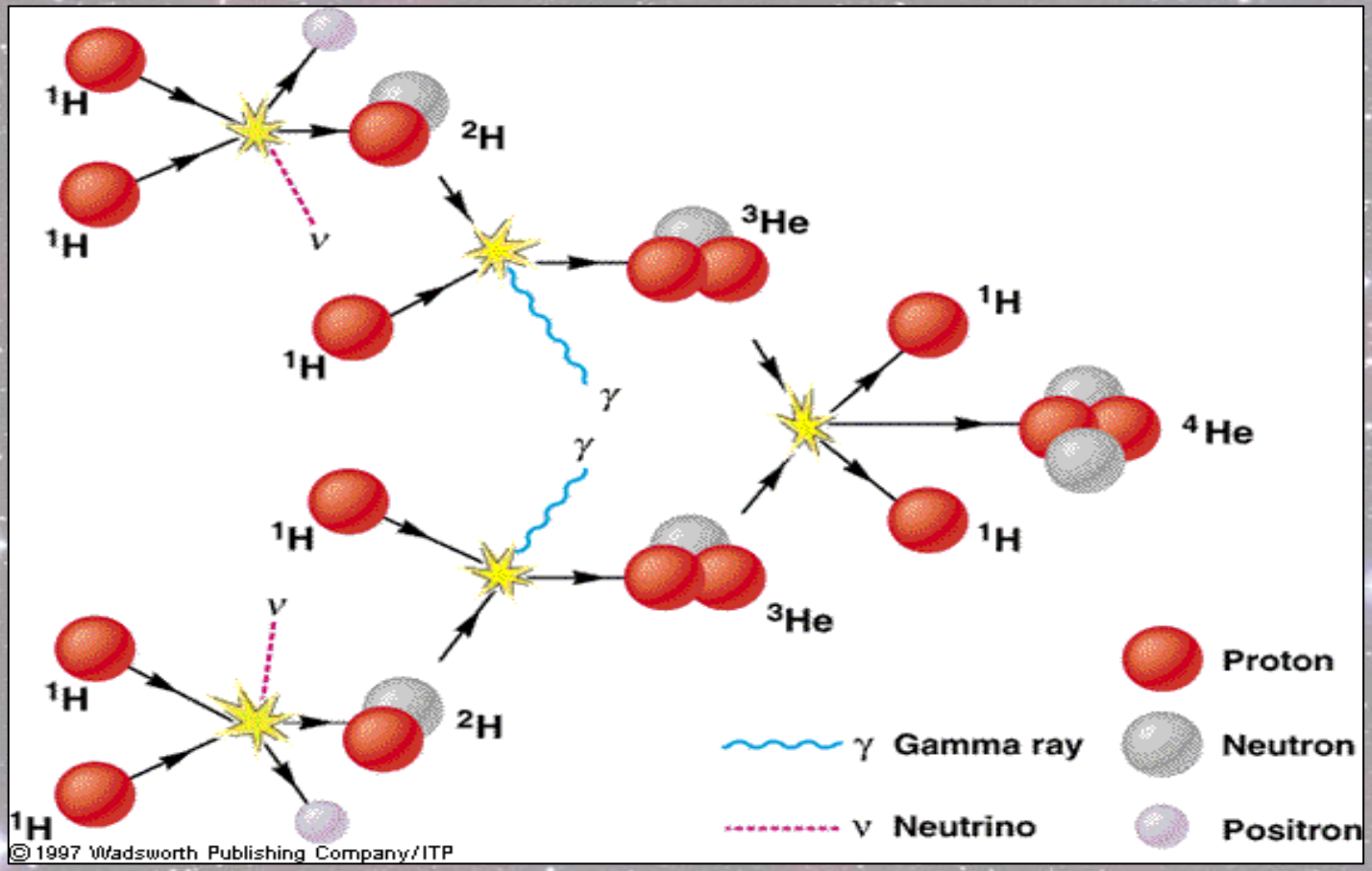


Fig. 4.1. Le reazioni della catena protone-protone, con sottolibeate le reazioni *primarie*.

Reazioni termonucleari

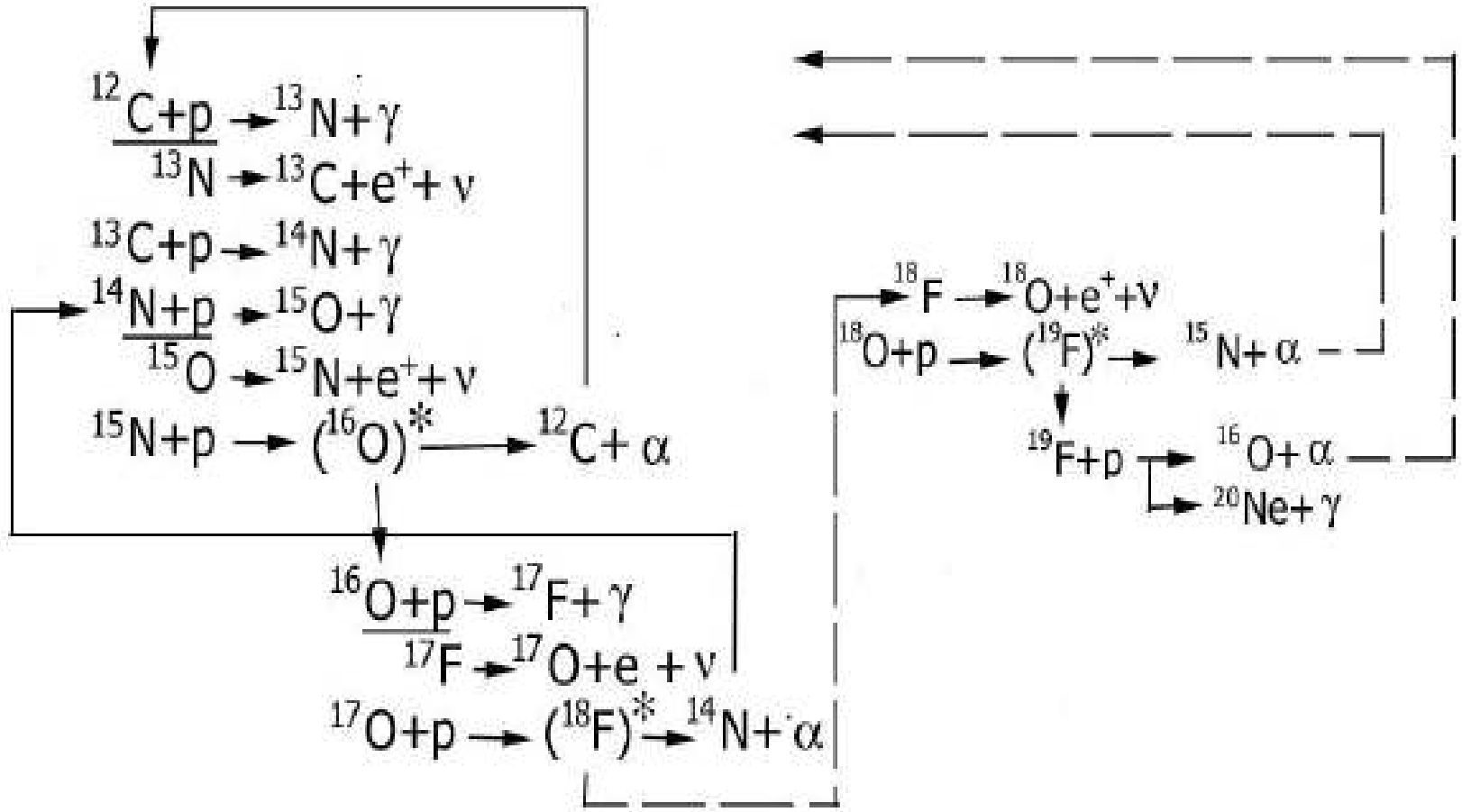
la catena protone-protone



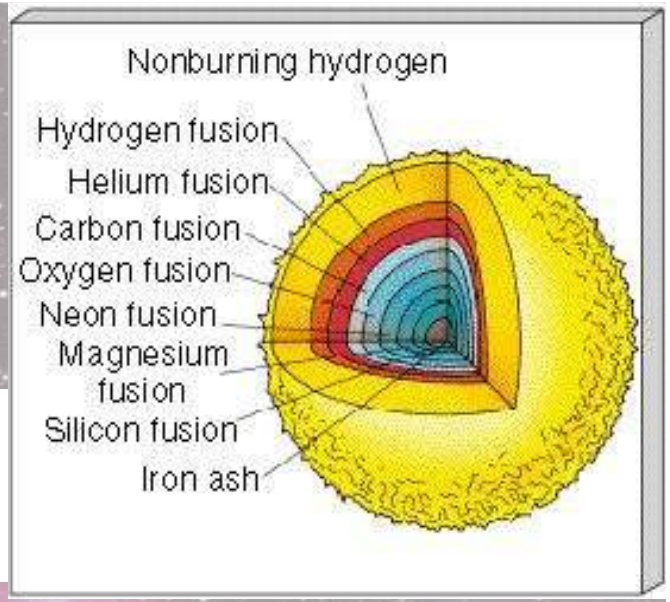
ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Reazioni termonucleari

il biciclo CN-NO



SINTESI : PRINCIPALI PROCESSI



1- Combustione dell'idrogeno

(conversione di idrogeno in elio)

2- Combustione dell'elio

(conversione dell'elio in carbonio, ossigeno…)

3. Combustione del carbonio, ossigeno, neon

(produzione di elementi $16<A<60$)

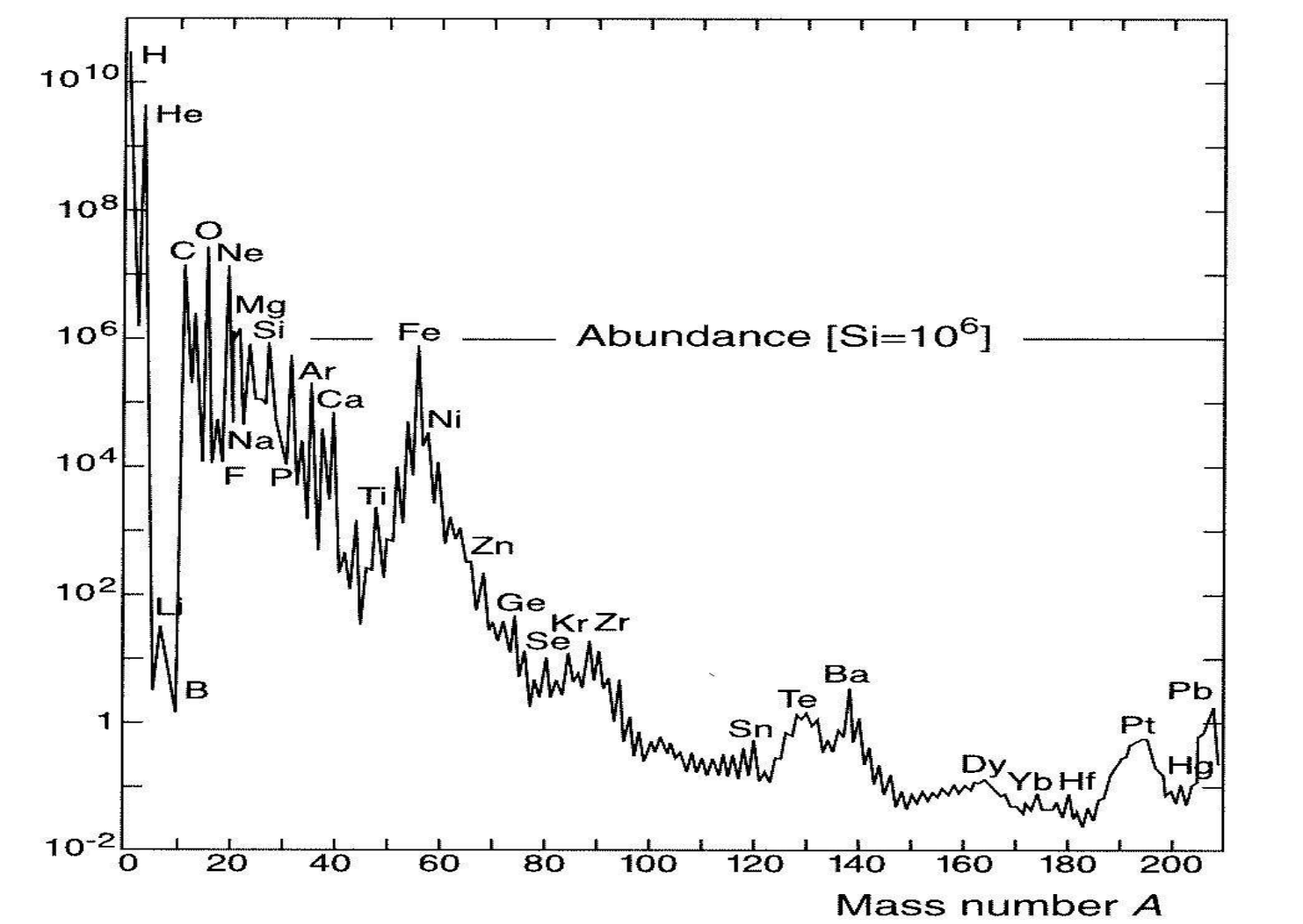
4. Combustione del silicio

(produzione di elementi con $28<A<60$)

5. processi s, r, e p

(produzione di elementi con $A>60$)

Reazioni termonucleari



ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Fasi finali dell'evoluzione stellare

- **Nane bianche:**

  $M < 1.4\ M_{\odot}$

http://www.spacetelescope.org/videos/

- **Stelle di neutroni:**

  $1.4\ M_{\odot} < M < 3\ M_{\odot}$

- **Buchi neri:**

  $M > 3\ M_{\odot}$

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Supernovae

Una supernova è l'*unico* meccanismo naturale conosciuto per produrre gli elementi più pesanti del ferro (tra cui cobalto, uranio, nichel, piombo, iodio, tungsteno, oro e argento), indispensabili alla nostra civiltà e alla vita come la conosciamo, che si formano nell'atmosfera rovente della Supernova, sfruttando l'enorme energia a disposizione.

- **Tipo I**
- **Tipo II**

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Supernovae

- Le supernovae di **tipo Ia** non contengono elio, e mostrano invece linee di assorbimento del silicio. Si pensa che siano causate dall'esplosione di una nana bianca.

- Le supernovae di **tipo II** hanno origine quando il nucleo di una stella molto massiccia (almeno 8 masse solari, se non di più) ha prodotto una notevole quantità di ferro, la cui fusione assorbe energia invece di liberarla. Quando la massa del nucleo di ferro raggiunge il limite di Chandrasekhar, esso decade spontaneamente in neutroni, attraverso un processo di fotodisintegrazione e cattura elettronica e – sotto l'effetto della sua stessa gravità – implode.

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Pulsar

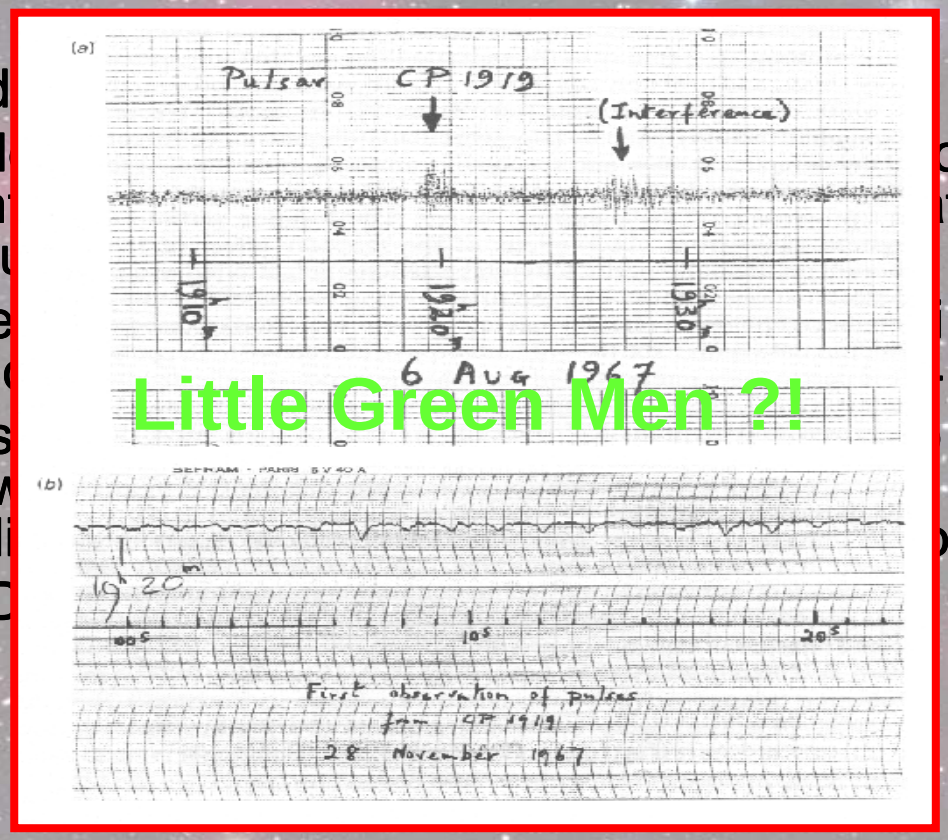
Un po' di storia… (www.ca.astro.it/damico/lezioni/web/)

- Nel 1932 Chadwick scopre il neutrone
- Nel 1934 Baade & Zwicky suggeriscono che "stelle" costituite prevalentemente da neutroni dovrebbero essere formate in esplosioni di supernova
- Nel 1939 Oppenheimer & Volkov calcolano dimensioni e masse di queste "stelle di neutroni", che stimano ~20 km e ~1.4$M_{\odot}$
- Nel 1967 una studentessa, Jocelyn Bell, durante il suo lavoro di tesi con A. Hewish su un esperimento di scintillazione, scopre un segnale periodico extra-terrestre di 1.337 s alla posizione:
  RA 19:19:36, DEC +21:47:16

Pulsar

Un po' di storia… (www.ca.astro.it/damico/lezioni/web/)

- Nel 1932 Chad
- Nel 1934 Baad … ostituite prevalentemen … te in esplosioni di Su …
- Nel 1939 Oppe … e masse di queste "stelle … $M_\odot$
- Nel 1967 una s … lavoro di tesi con A.Hew … scopre un segnale periodi … one: RA 19:19:36, D …

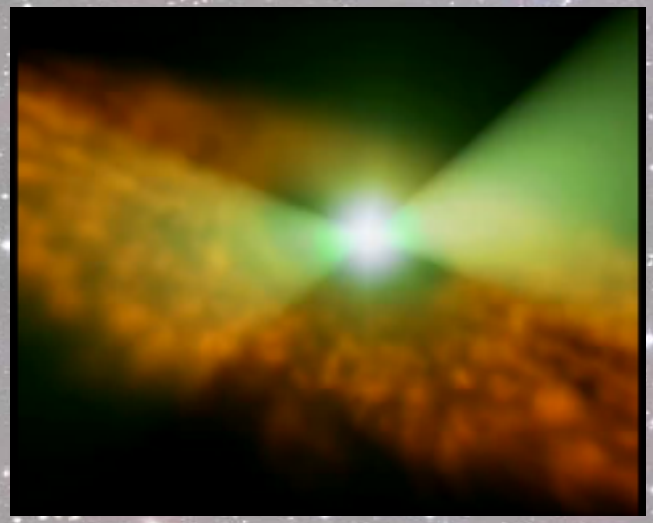


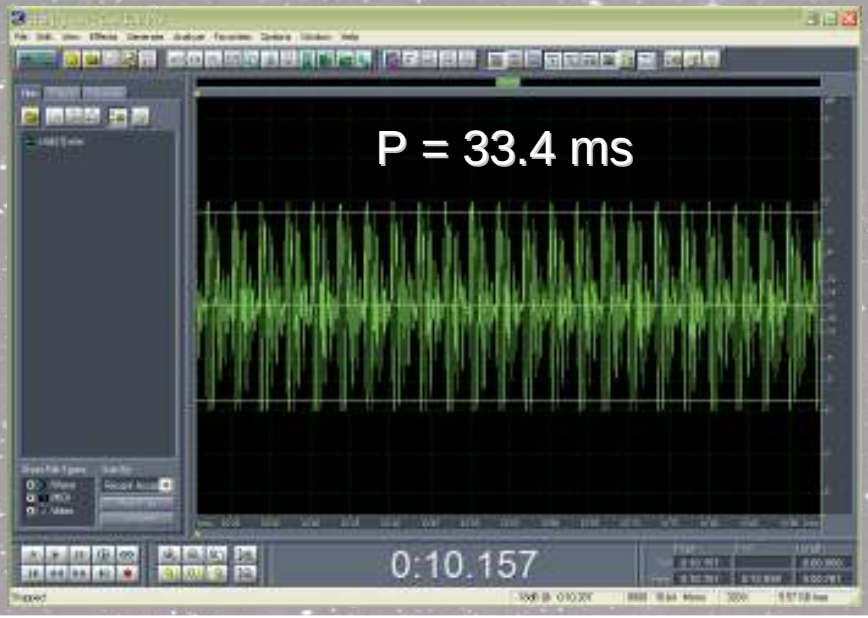
ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Pulsar

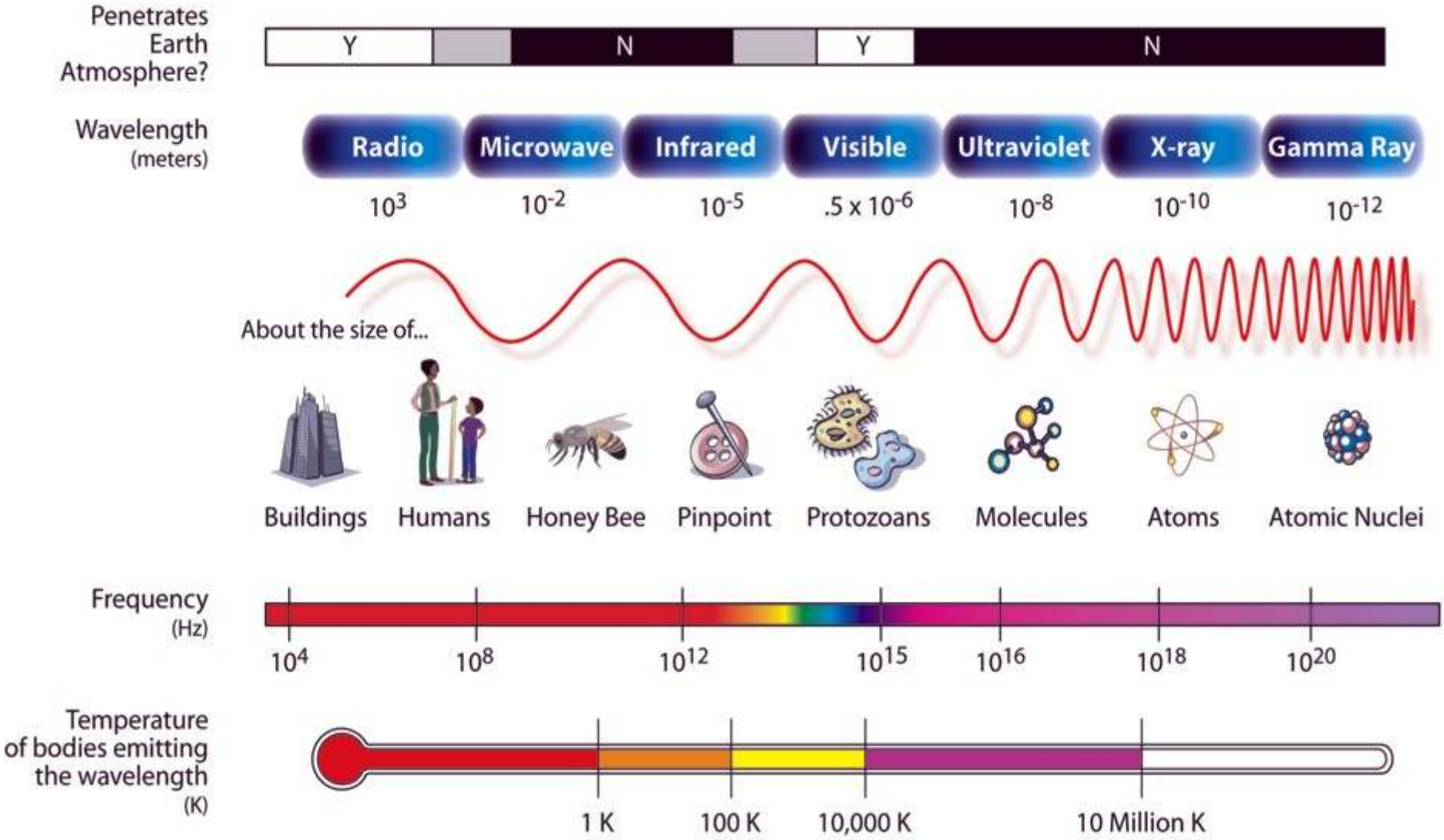
Crab

http://www.spacetelescope.org/videos/



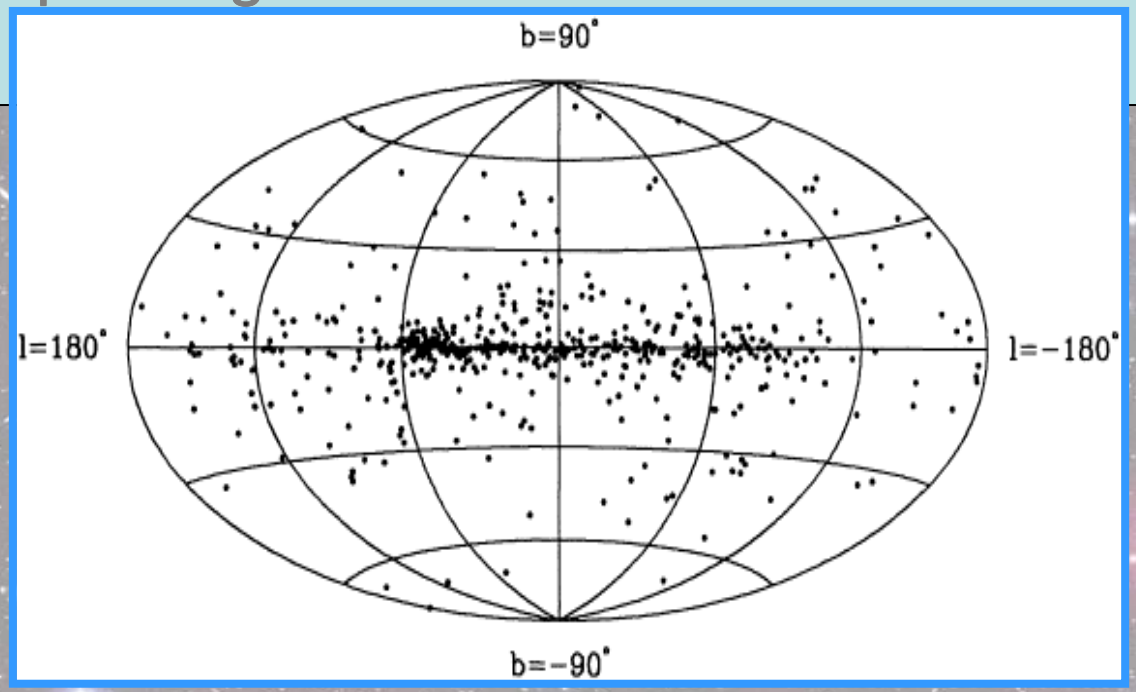


THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Proprietà osservative delle pulsar (Tempesti, 1985)

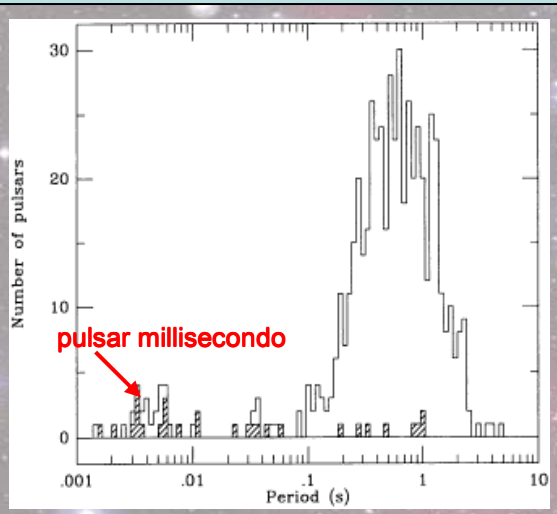
Allo stato attuale (2007) si conoscono circa 700 pulsar radio: tra esse, vi sono circa 60 pulsar X facenti parte di sistemi binari e 7 pulsar gamma.



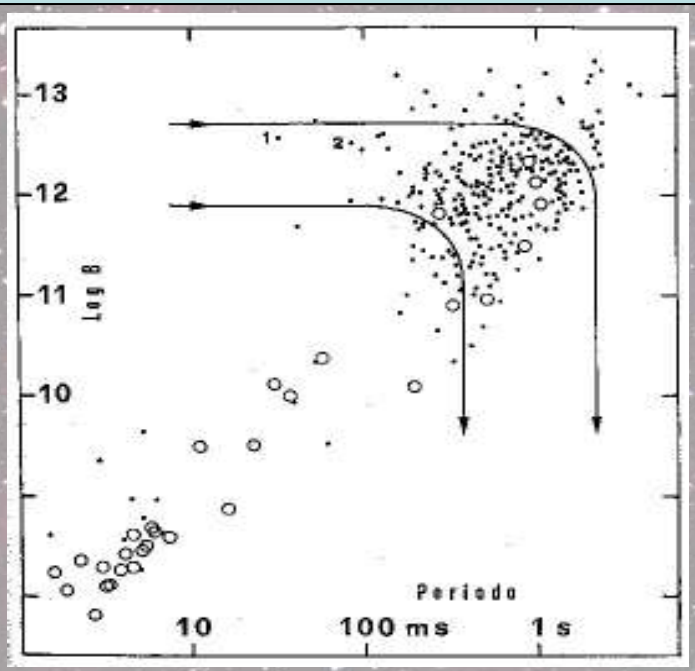
Popolazione galattica

Proprietà osservative delle pulsar (Tempesti, 1985)

Allo stato attuale si conoscono circa 700 pulsar radio: tra esse, vi sono circa 60 pulsar X facenti parte di sistemi binari e 7 pulsar gamma.



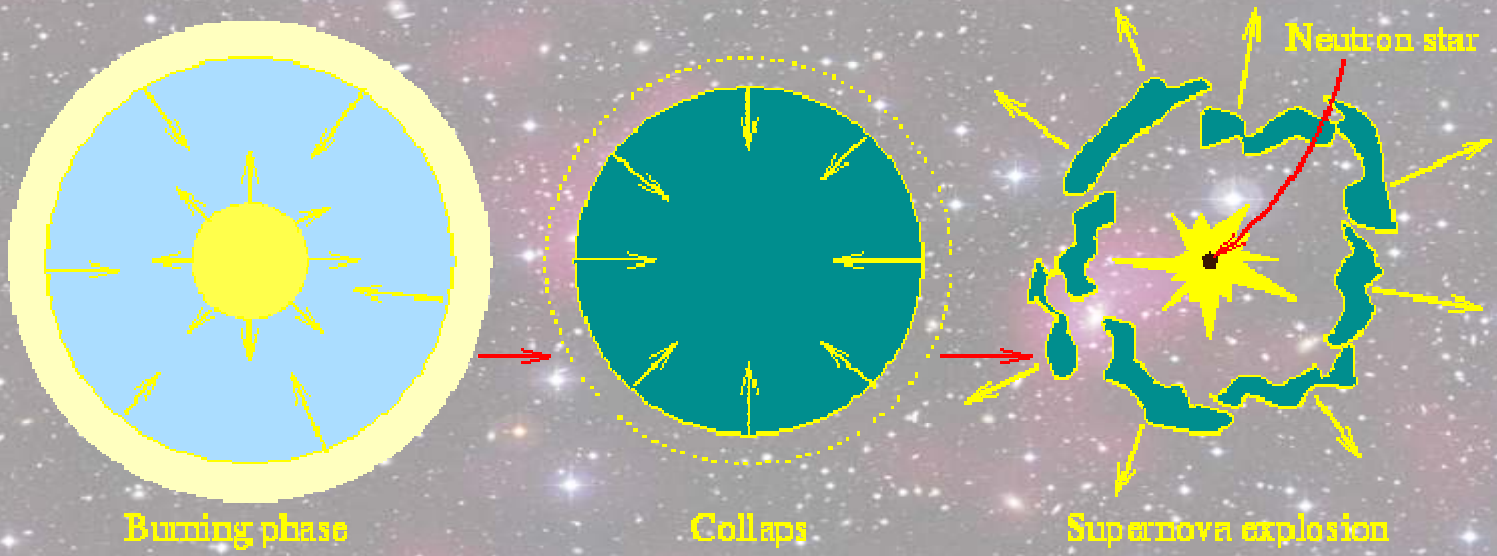
Periodo di rotazione:
estrema regolarità,
lento e progressivo rallentamento



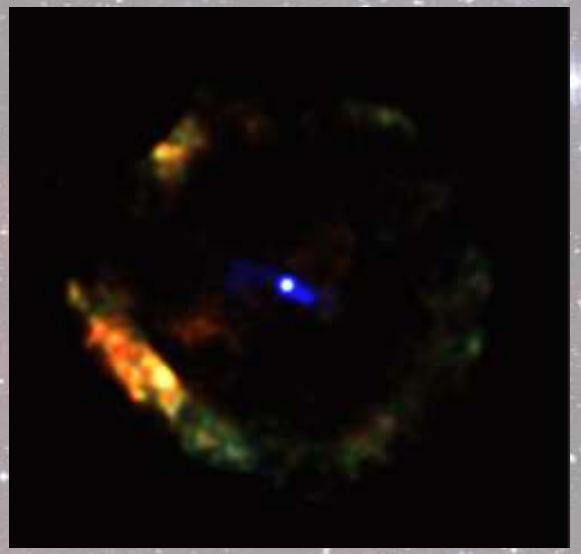
Campo magnetico:

Formazione delle pulsar

Le Pulsar si formano in una esplosione di Supernova

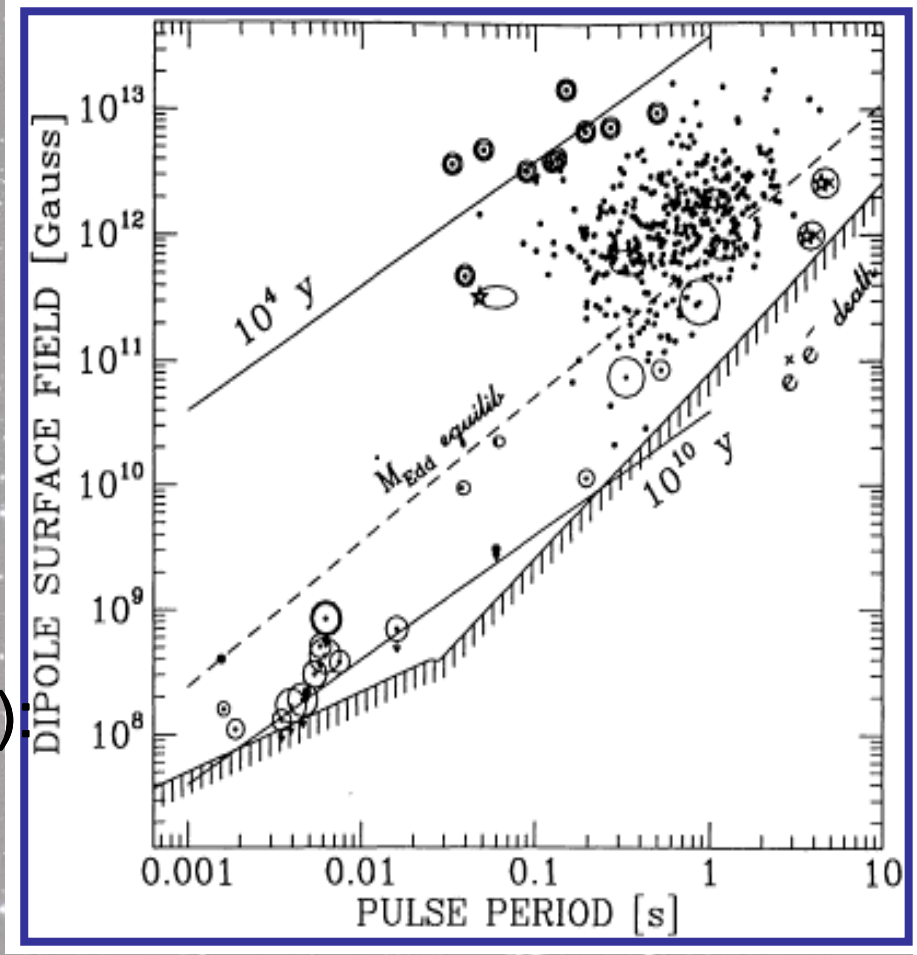


Il momento angolare
e il flusso magnetico
si conservano



Popolazioni di pulsar

- pulsar millisecondo:
  $10^8 – 10^9$ G;
- pulsar binarie:
  $10^{10} – 10^{11}$ G;
- pulsar isolate giovani:
  $10^{11} – 10^{13}$ G;
- magnetars ($B_{crit} = 4.413 \cdot 10^{13}$ G):
  $10^{14} – 10^{16}$ G.



ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Popolazioni di pulsar

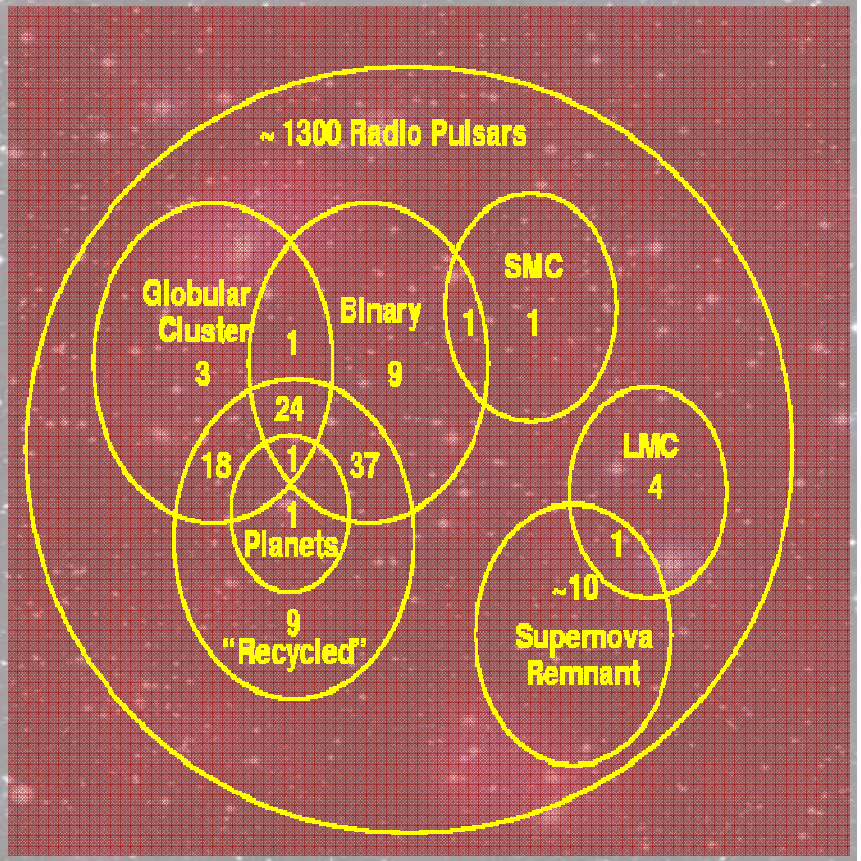
- pulsar millisecondo:

  $10^8 – 10^9$ G;
- pulsar binarie:

  $10^{10} – 10^{11}$ G;
- pulsar isolate giovani:

  $10^{11} – 10^{13}$ G;
- magnetars ($B_{crit} = 4.413 \cdot 10^{13}$ G):

  $10^{14} – 10^{16}$ G.



Proprietà delle pulsar

$R = 1.2 \cdot 10^6$ cm;
$M = 1.4\ M_\odot$;
$I = 1.4 \cdot 10^{45}$ g cm^2;
$E \sim 10^{49}$ erg;
$\dot{E} \sim 10^{39}$ erg s^{-1};
$B_p \sim 10^{12}$ G.

Modelli di emissione

- **Modello a rotatore obliquo (Pacini, 1968; Gunn & Ostriker, 1969):**

  il rallentamento osservato nella rotazione delle pulsar è attribuibile alla perdita di energia per emissione elettromagnetica dovuta all'azione frenante del campo di dipolo, unitamente al contributo relativo all'emissione di onde gravitazionali.

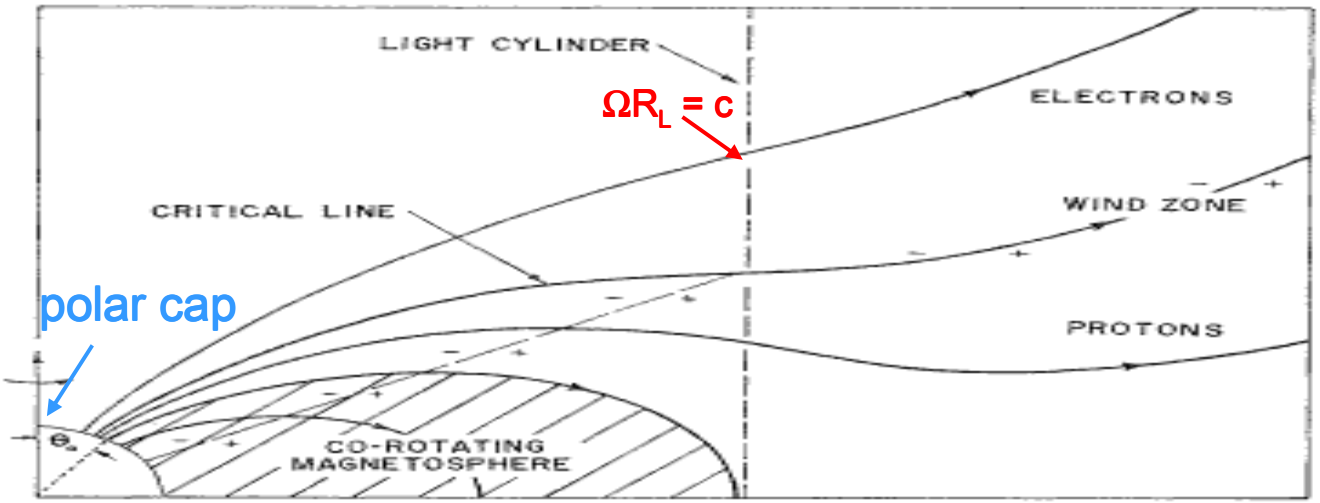
Modelli di emissione

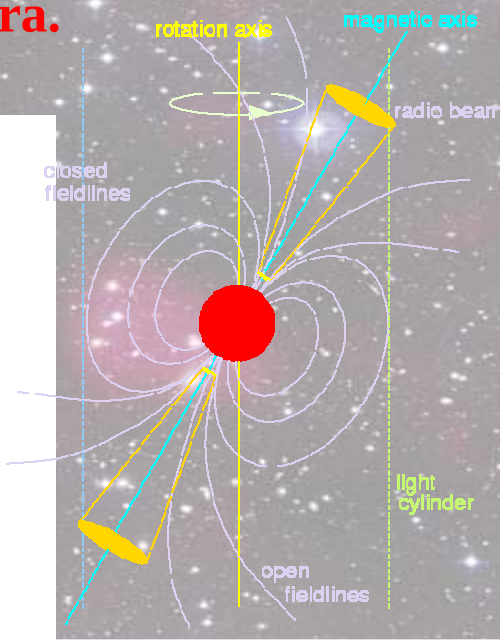
- **Modello a rotatore allineato (Goldreich & Julian, 1969):**

  non è lecito considerare le stelle di neutroni magnetizzate e rotanti come immerse nel vuoto. Il frenamento nella rotazione della pulsar è dovuto alla perdita di energia tramite l'accelerazione di particelle cariche.

  Teorema di Alfvén: il plasma trascina con sé il campo magnetico che, ancorato alla stella di neutroni, è costretto a co-rotare con esso.

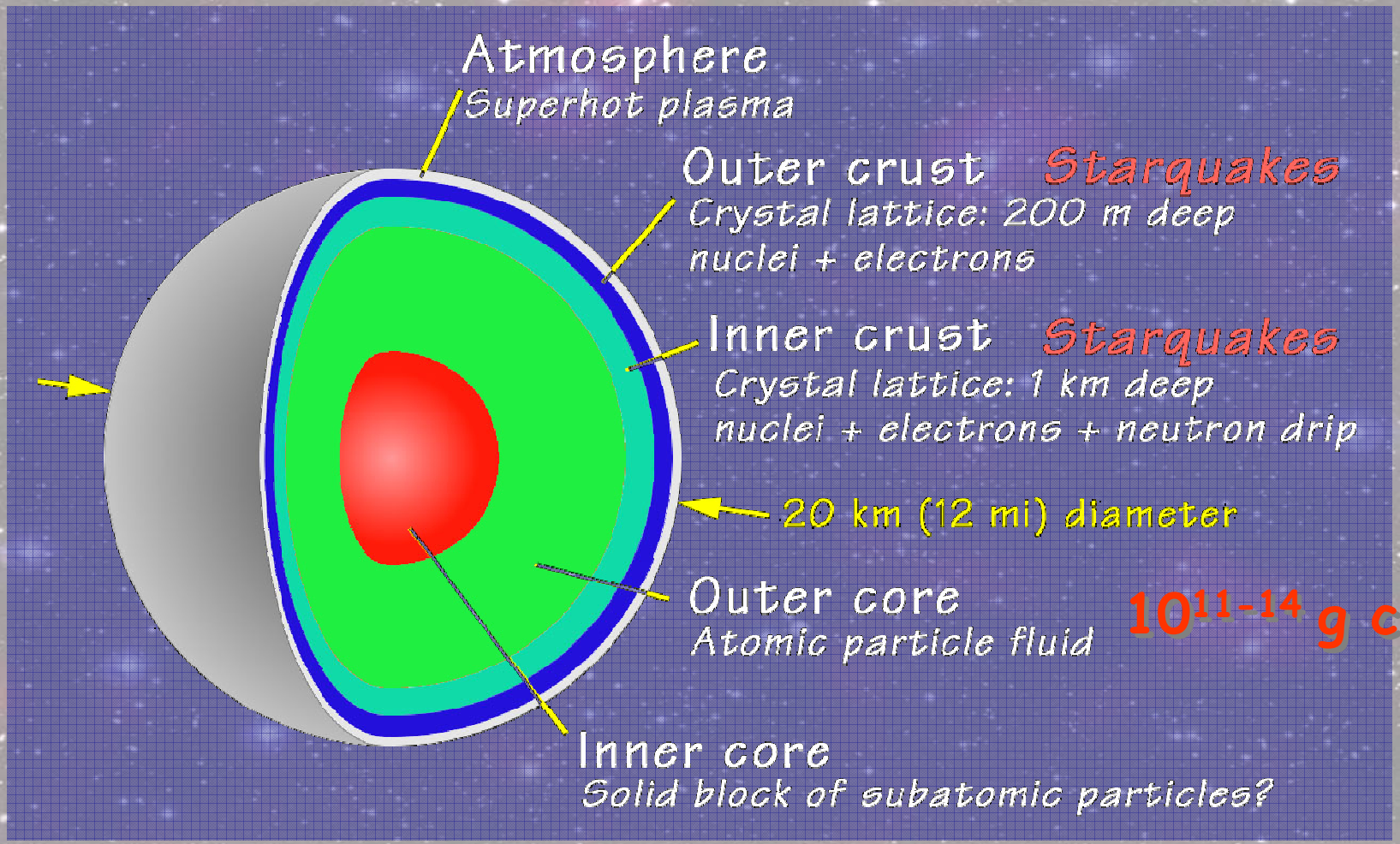
  Le pulsar devono perciò possedere una densa **magnetosfera.**





Dimensione e struttura

- **Molto dipendente dalla equazione di stato**
- **I risultati attuali indicano:**



Pulsar millisecondo

- **Backer & Kulkarni, 1982:** scoperta della **PSR 1937+21,**
  la prima millisecondo

- rotazione eccezionalmente rapida, **P=0,0015578… s**

↓

deve tattarsi di **pulsar giovanissime**

- frenamento da 1000 a 10000 volte più lento che per le comuni pulsar

↓

deve tattarsi di pulsar **molto vecchie,** con un

- campo magnetico di **$4 \cdot 10^8$ G,**
  5000 volte più debole che nelle pulsar normali

Pulsar millisecondo

- **Backer & Kulkarni, 1982:** scoperta della **PSR 1937+21,**
la prima millisecondo

- rotazione eccezionalmente rapida, **P=0,0015578… s**

deve tattarsi di **pulsar giovanissime**

Grande dilemma!

- frenamento da 1000 a 10000 volte più lento che per le comuni pulsar

deve tattarsi di pulsar **molto vecchie,** con un

- campo magnetico di **$4 \cdot 10^8$ G,**
5000 volte più debole che nelle pulsar normali

Una via d'uscita venne ben presto proposta:

la pulsar un tempo faceva coppia con una stella normale ed era animata da velocità di rotazione confacente alla propria età.

La compagna, raggiunto lo stadio di evoluzione in gigante ed espansa fino a raggiungere il punto neutro, avrebbe cominciato a travasare materia verso la stella neutronica dando inizio al fenomeno dell'accrescimento.

La stella di neutroni, sotto la spinta della materia in caduta, avrebbe così accelerato a poco a poco, fino a raggiungere velocità elevatissime.

Poiché quando il fenomeno ha inizio la stella neutronica può essere molto antica o addirittura essersi estinta come pulsar, le pulsar che subiscono questo processo vengono dette riciclate o ringiovanite.

Che fine poteva avere fatto la compagna?

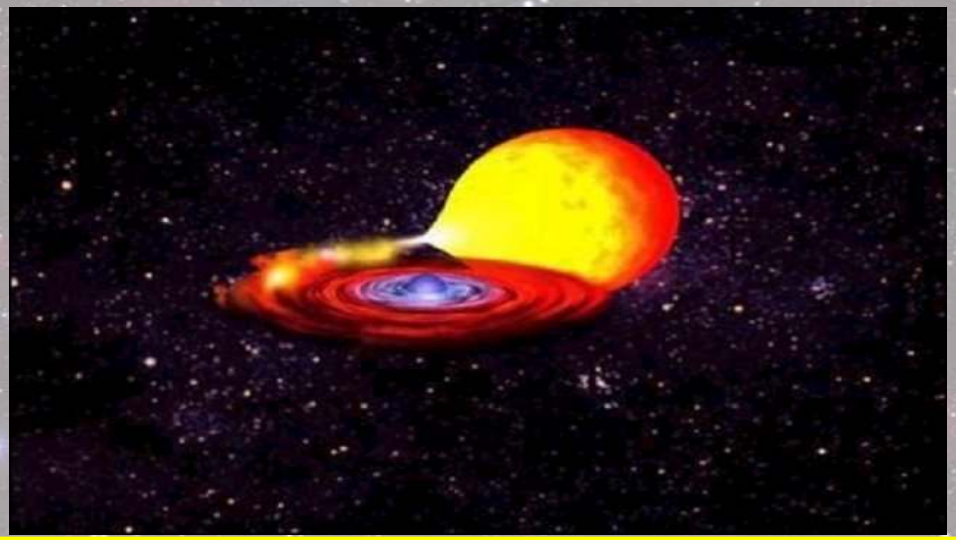
Una via d’uscita venne ben presto proposta:

la pulsar un tempo faceva coppia con una stella normale ed era animata da velocità di rotazione confacente alla propria età.

La compagna, raggiunto lo stadio di evoluzione in gigante ed espansa fino a raggiungere il punto neutro, avrebbe cominciato a travasare materia verso la stella neutronica dando inizio al fenomeno dell’accretion.

La stella di neutroni, sotto la spinta della materia in caduta, avrebbe così accelerato a poco a poco, fino a raggiungere velocità elevatissime.

Poiché quando il fenomeno ha inizio la stella neutronica può essere molto antica o addirittura essersi estinta come pulsar, le pulsar che avrebbero subito questo processo vengono dette riciclate o ringiovanite.



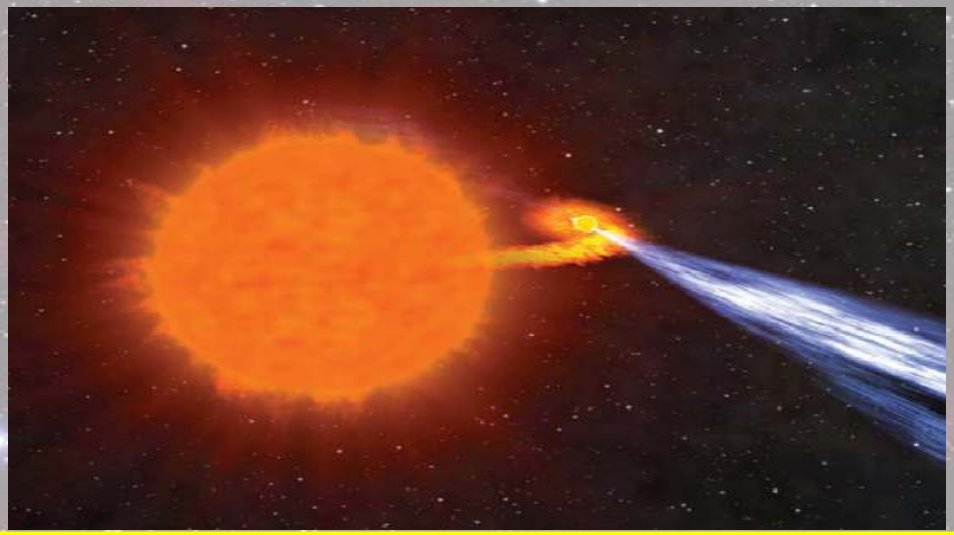
Una via d’uscita venne ben presto proposta:

la pulsar un tempo faceva coppia con una stella normale ed era animata da velocità di rotazione confacente alla propria età.

La compagna, raggiunto lo stadio di evoluzione in gigante ed espansa fino a raggiungere il punto neutro, avrebbe cominciato a travasare materia verso la stella neutronica dando inizio al fenomeno dell’accretion.

La stella di neutroni, sotto la spinta della materia in caduta, avrebbe così accelerato a poco a poco, fino a raggiungere velocità elevatissime.

Poiché quando il fenomeno ha inizio la stella neutronica può essere molto antica o addirittura essersi estinta come pulsar, le pulsar che avrebbero subito questo processo vengono dette riciclate o ringiovanite.



Binarie X (Tempesti, 1985)

- **Nel quadro evolutivo delle pulsar millisecondo, c'è una fase precedente in cui la vecchia pulsar – già notevolmente rallentata – viene accelerata dalla caduta di materia ceduta dalla compagna evolutasi in gigante. Dato l'intensissimo campo gravitazionale alla superficie della stella neutronica, la materia cade a così alta velocità che si scalda a temperature dell'ordine di 10 milioni di gradi ed emette intensi raggi X.**

- **Pulsar radio: l'emissione è alimentata a spese dell'energia rotazionale della stella neutronica (processo non termico);**

  Binarie X: l'emissione è alimentata dall'energia gravitazionale della materia che cade (processo termico).

- **Per questo motivo, i periodi di rotazione delle prime si allungano continuamente col continuo rallentamento della rotazione; i periodi delle seconde, invece, progressivamente si accorciano, poiché la materia cadendo sulla stella neutronica ne accelera la rotazione.**

Binarie X

- **Le binarie X vengono distinte in due grandi classi:**
  - **quelle di alta massa (HMXB, come Cen X-3), che hanno come compagna della stella neutronica una supergigante azzurra di grande massa (da 10 a 30 $M_\odot$), e**
  - **quelle di piccola massa (LMXB), in cui la compagna ha massa di ordine solare, e che hanno un ruolo fondamentale nella storia evolutiva delle pulsar millisecondo.**

- **Le pulsar millisecondo non possono essere generate da binarie X di grande massa.**
  Infatti, per accelerare una stella neutronica dal periodo di un secondo ad un periodo di millisecondi è necessario, secondo i calcoli dinamici, l'accrescimento di 0.1 $M_\odot$; d'altra parte, il tasso di accrescimento non può superare $1.5 \cdot 10^{-8}$ $M_\odot$ per anno: se il flusso di materia superasse tale limite, detto limite di Eddington, nella caduta sulla stella di neutroni si svilupperebbe un calore tale che la pressione della radiazione termica equilibrerebbe la forza di gravità e la materia cesserebbe di cadere. Ammettendo un regime di accrescimento pari al limite di Eddington, per ringiovanire un'antica pulsar, riaccelerandola a centinaia di giri al secondo, ci vorrebbero 7 Myr. Ciò mette fuori gioco le HMXB, nelle quali la fase di trasferimento di materia si esaurisce in tempi assai più brevi, dell'ordine dei 100 kyr.

Percorsi evolutivi

Il sistema binario può distruggersi nell'esplosione di supernova

→ **Molte pulsar sono isolate**

Nella fase di "pre-riciclaggio" osserviamo pulsar in orbita con una stella di sequenza principale

LMXB con riciclaggio in corso: scoperta nel 1998

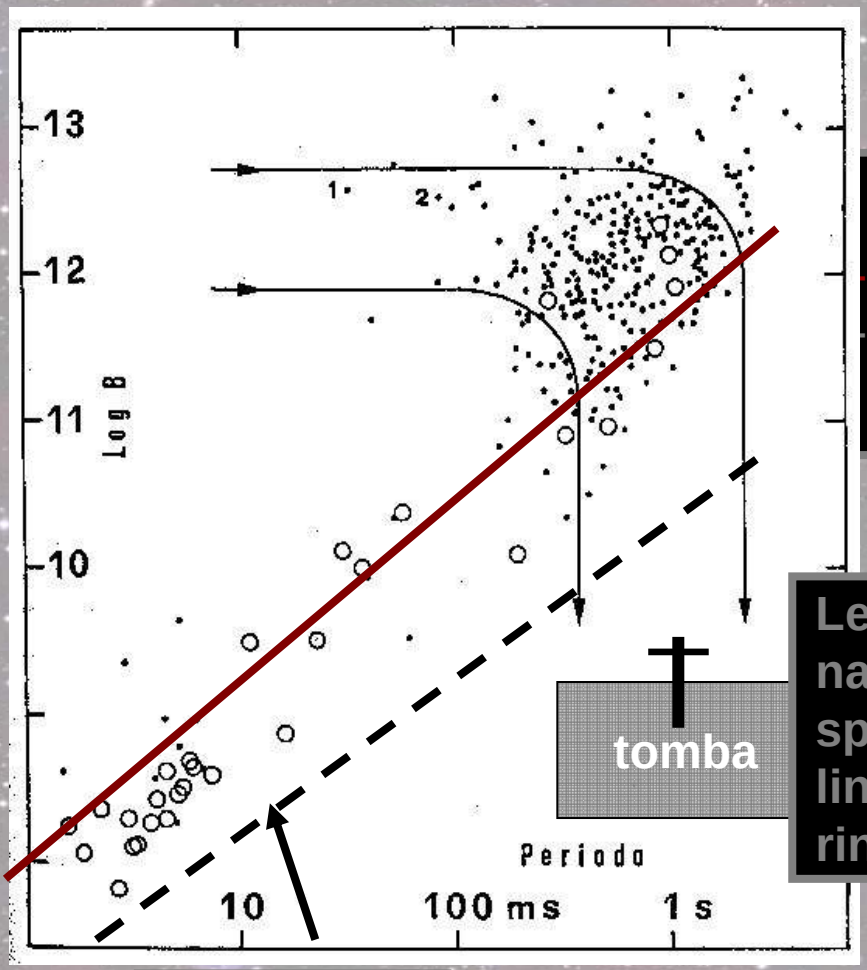
Le LMXB hanno periodi lunghi di accrescimento

→ **Sistemi pulsar-WD circolari**

HMXB: hanno periodi brevi di accrescimento e vanno incontro a una seconda esplosione di supernova (SN)

→ **Molti sistemi distrutti, e osserviamo solo pochi sistemi NS-NS eccentrici**

Diagramma evolutivo (Tempesti, 1985)



- linea di accelerazione: $P = 1.9\ B^{6/7}$
- linea di spegnimento: $\log B = 2 \log P + \log E$

$(E \geq B^2/P)$

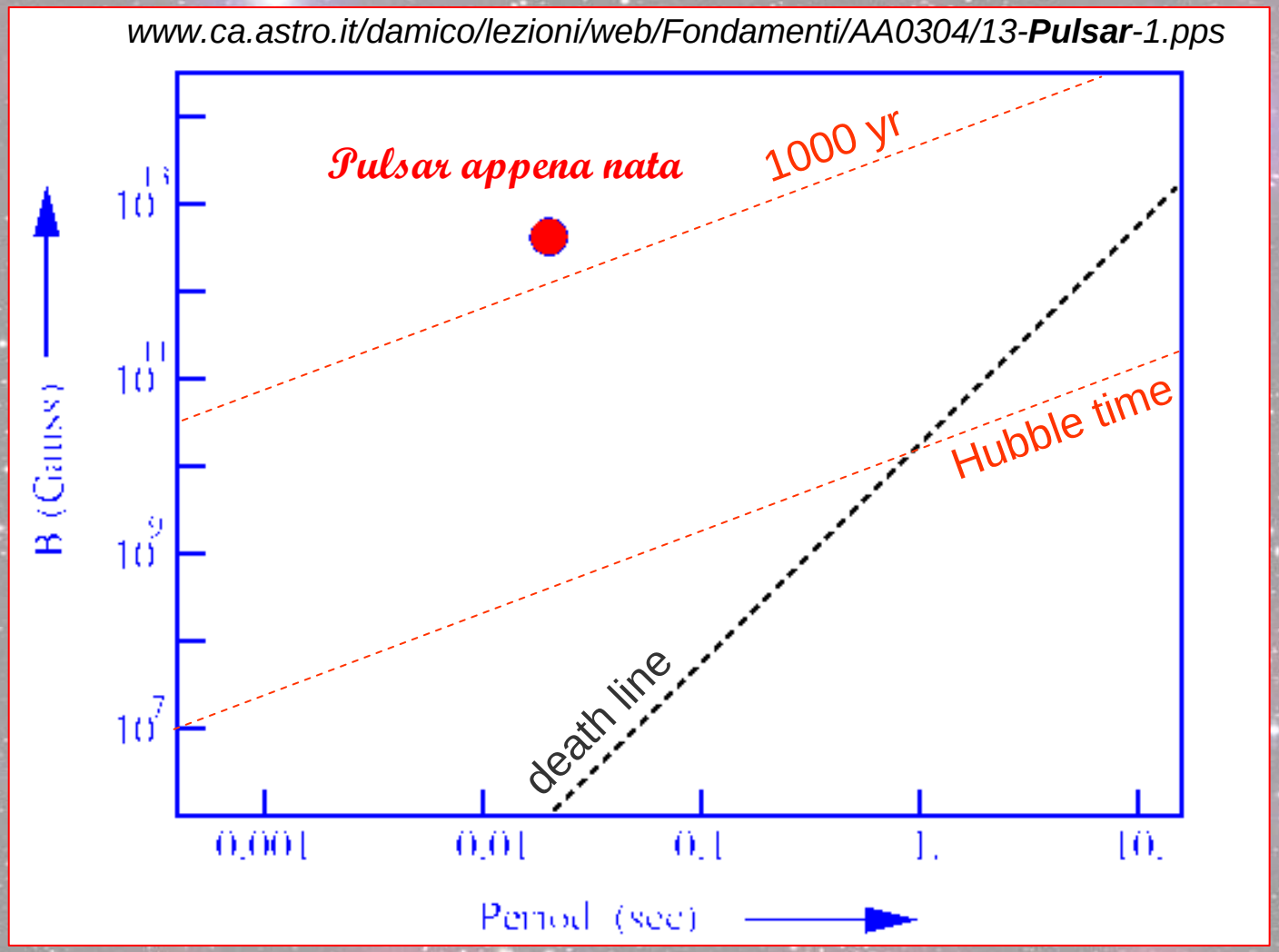
tomba

Le pulsar risuscitate emergono dalla tomba nascostamente e, sempre nascostamente, si spostano verso sinistra. Se raggiungono la linea di accelerazione, ricompaiono, ringiovanite, come pulsar millisecondo.

area di accelerazione

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

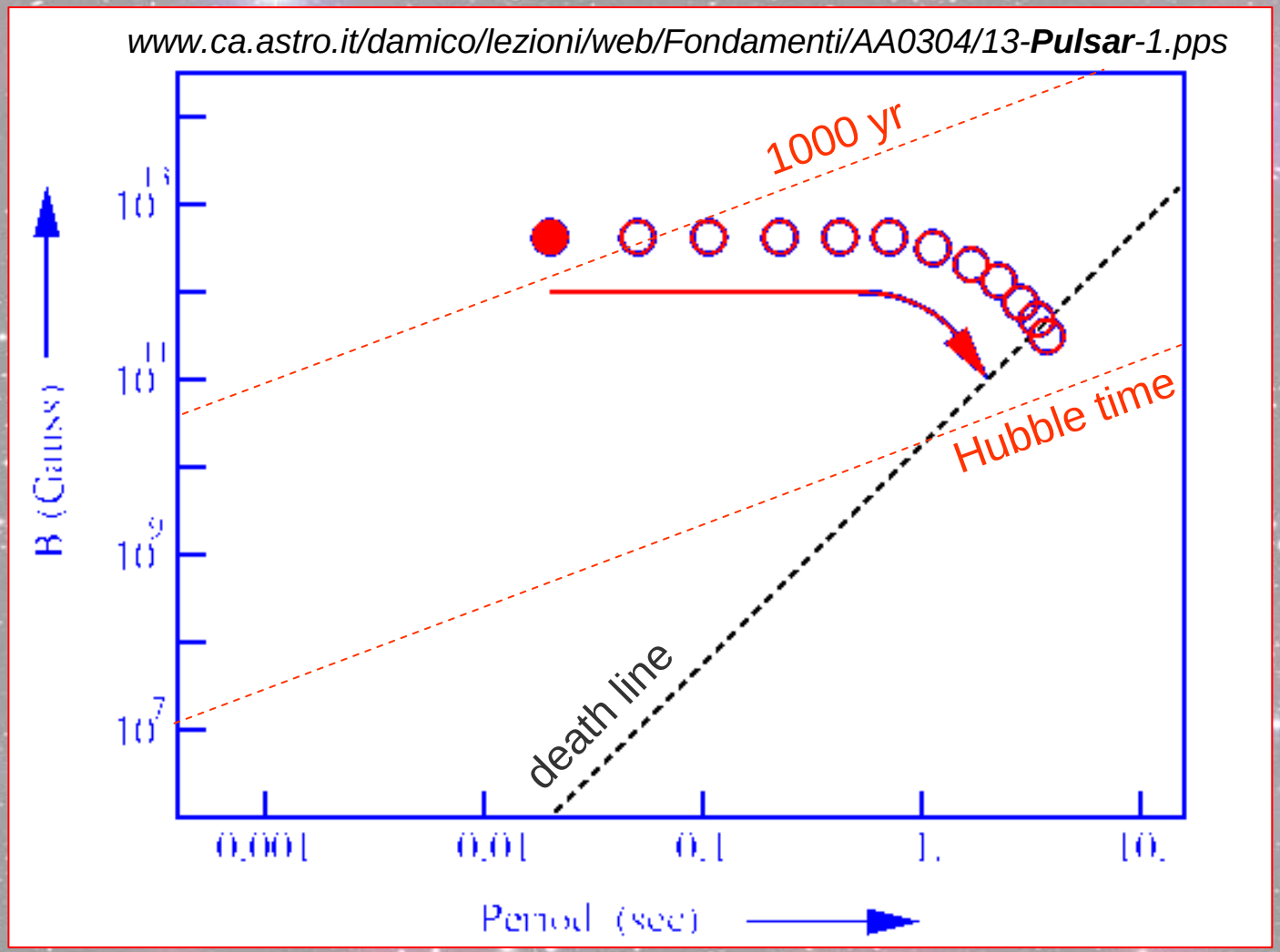
www.ca.astro.it/damico/lezioni/web/Fondamenti/AA0304/13-**Pulsar**-1.pps



Una pulsar appena nata ha un campo magnetico elevato e un periodo di spin relativamente breve

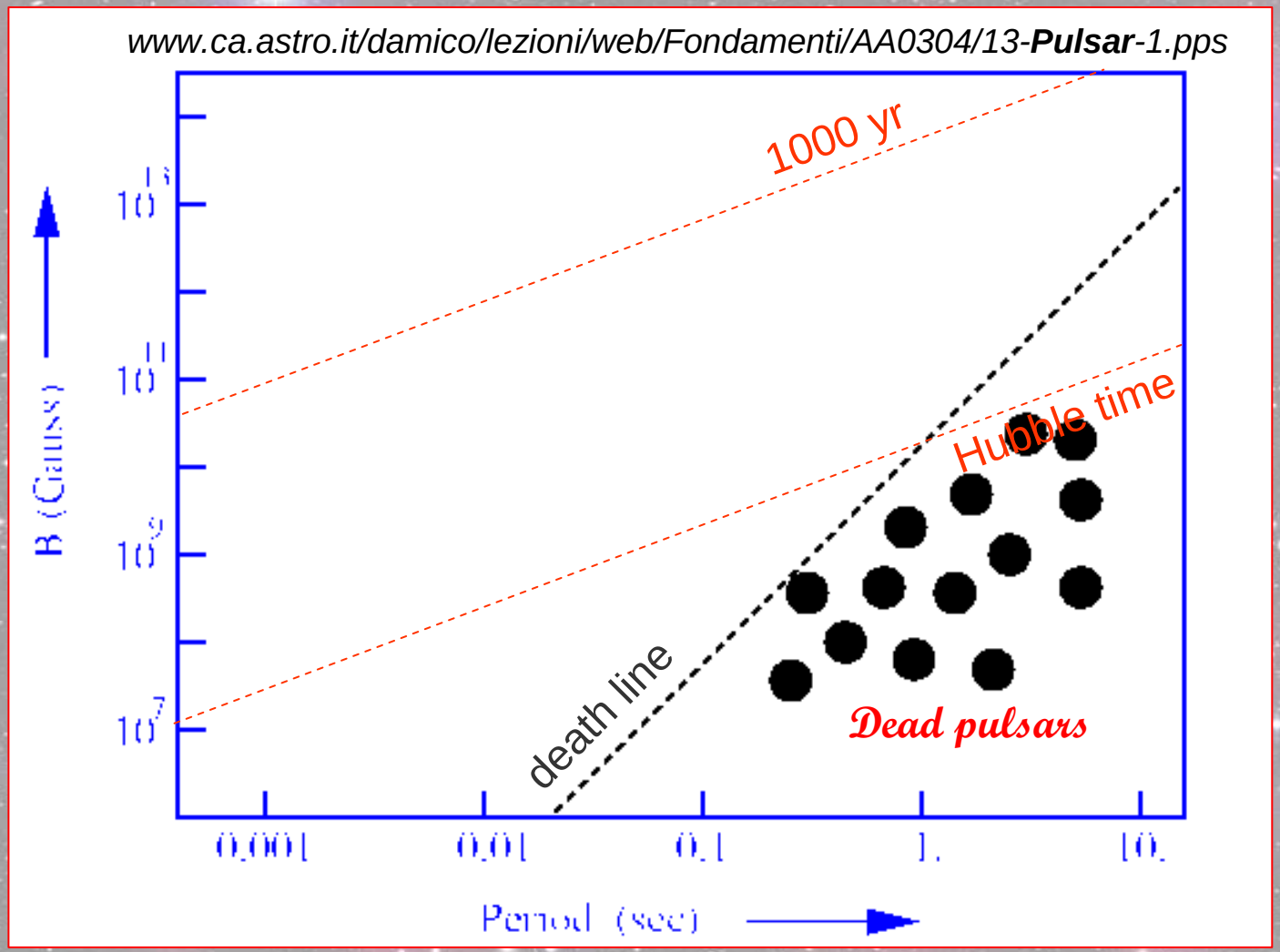
ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

www.ca.astro.it/damico/lezioni/web/Fondamenti/AA0304/13-**Pulsar**-1.pps



Una pulsar giovane evolve molto rapidamente e rallenta.

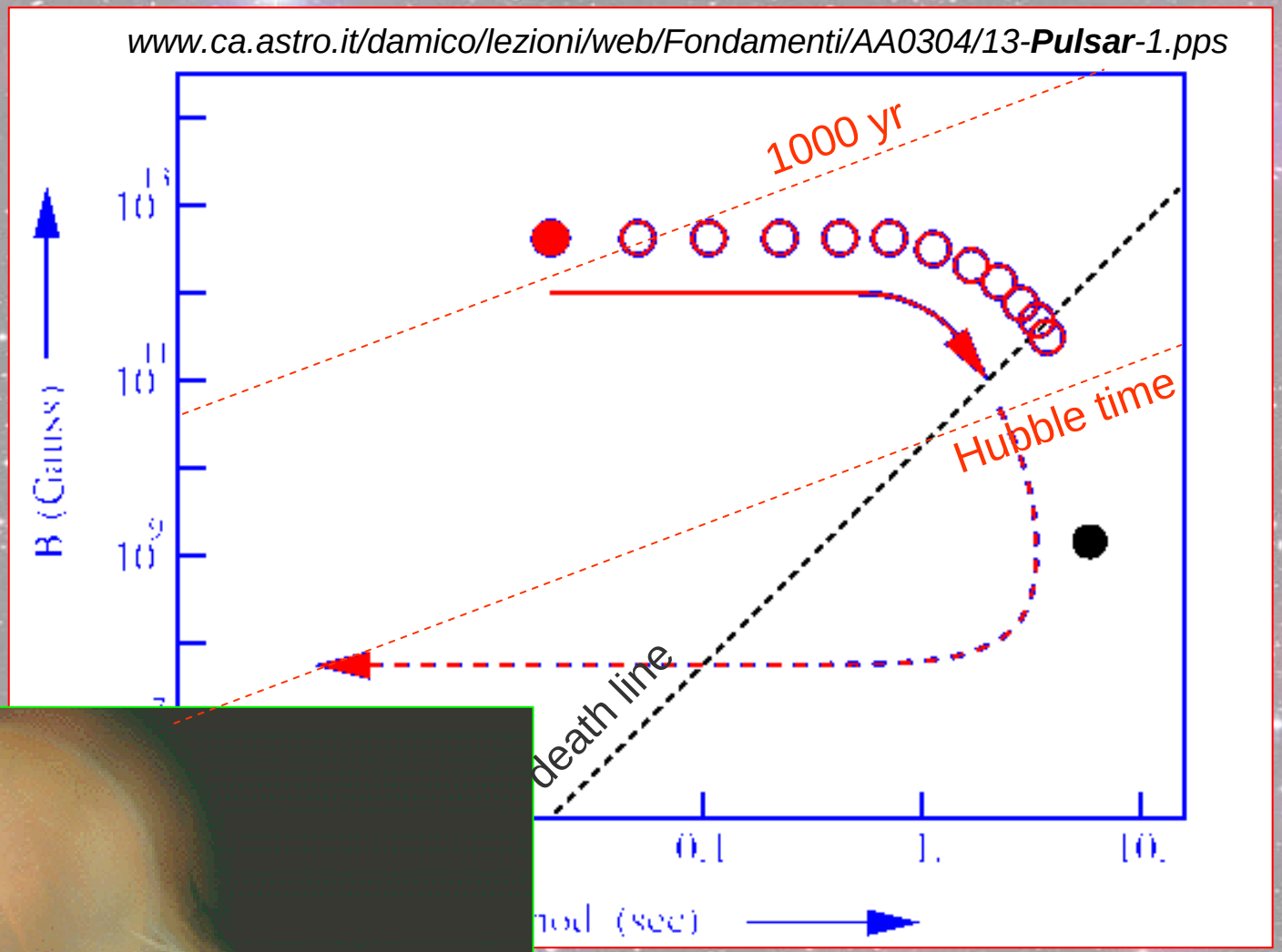
Il suo campo magnetico può smorzarsi col tempo

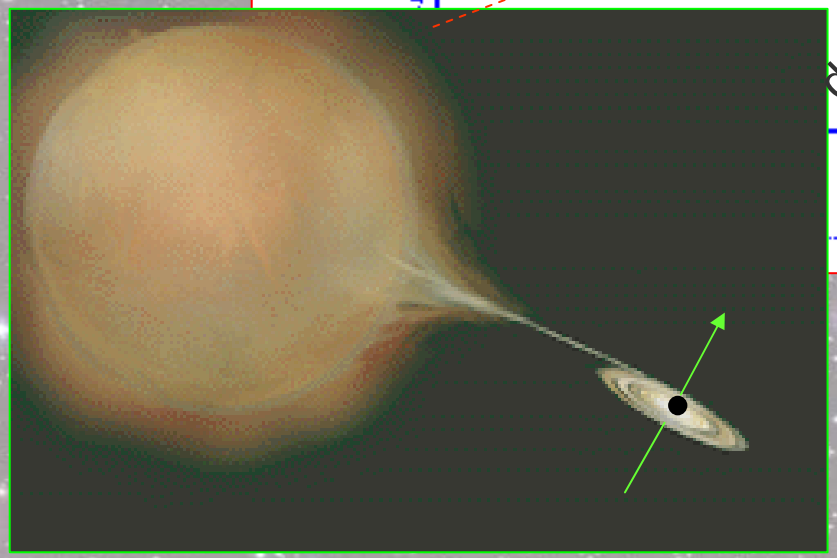


Le pulsar lente con un campo magnetico basso non sono più osservabili come radiosorgenti

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

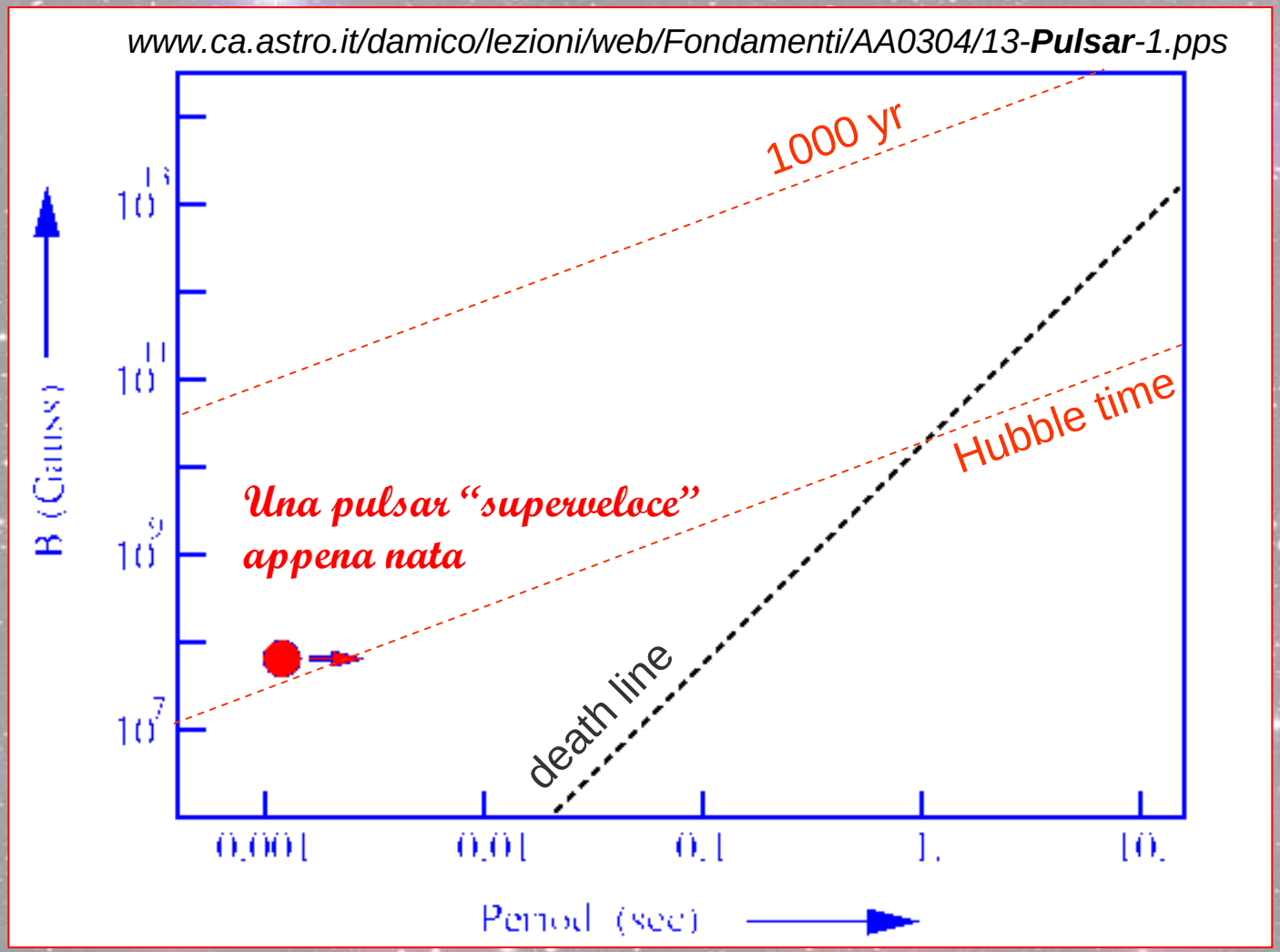
www.ca.astro.it/damico/lezioni/web/Fondamenti/AA0304/13-**Pulsar**-1.pps





Un pulsar “morta” può essere riaccelerata e “ringiovanita” da una stella compagna durante la sua evoluzione.

www.ca.astro.it/damico/lezioni/web/Fondamenti/AA0304/13-**Pulsar**-1.pps



E' nata una nuova pulsar "superveloce"!

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

Pulsar riciclate e binarie X

- **Il trasferimento di massa da una stella compagna “riaccelera” una pulsar “morta”**
- **La durata di questa fase di trasfermento di momento angolare determina il periodo di spin finale (osservato fino a 1.5 ms)**

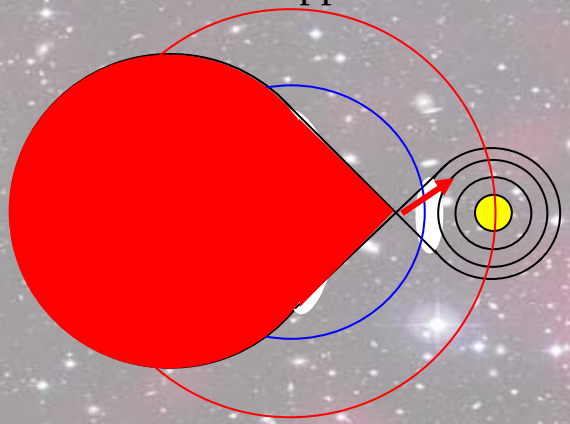
http://www.spacetelescope.org/videos/

- **La pulsar rinasce come “recycled pulsar”**

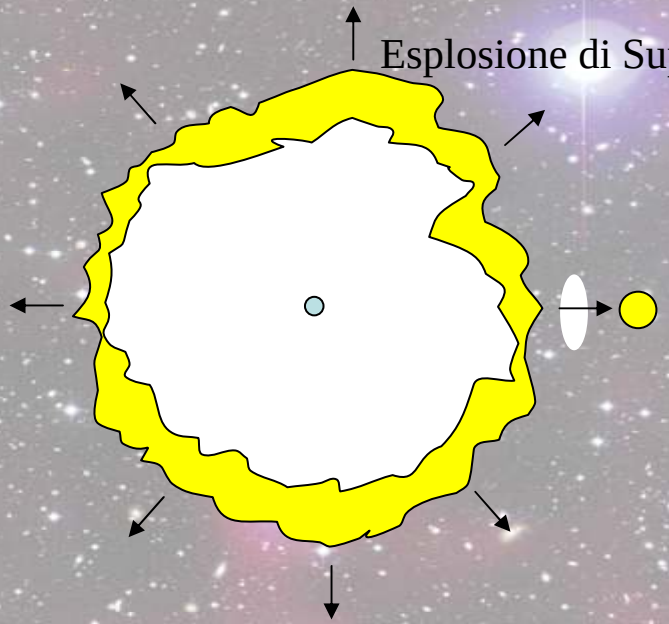
1) Stella primaria massiva e stella secondaria leggera

La stella più massiva evolve prima

Può eventualmente appesantire la compagna

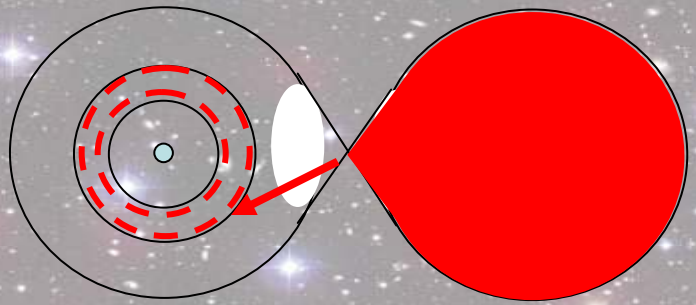


> 6 $M_\odot$ ~1 $M_\odot$

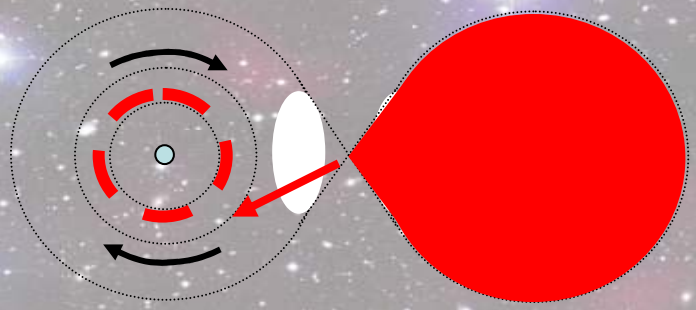


In una esplosione di supernova, il sistema può restare legato se la massa espulsa è < ½ M_{tot}. Se c'è stato abbastanza accrescimento nella fase precedente, questo è possibile

Orbite eccentriche



Tempo di evoluzione lungo della stella leggera: spin-up della NS

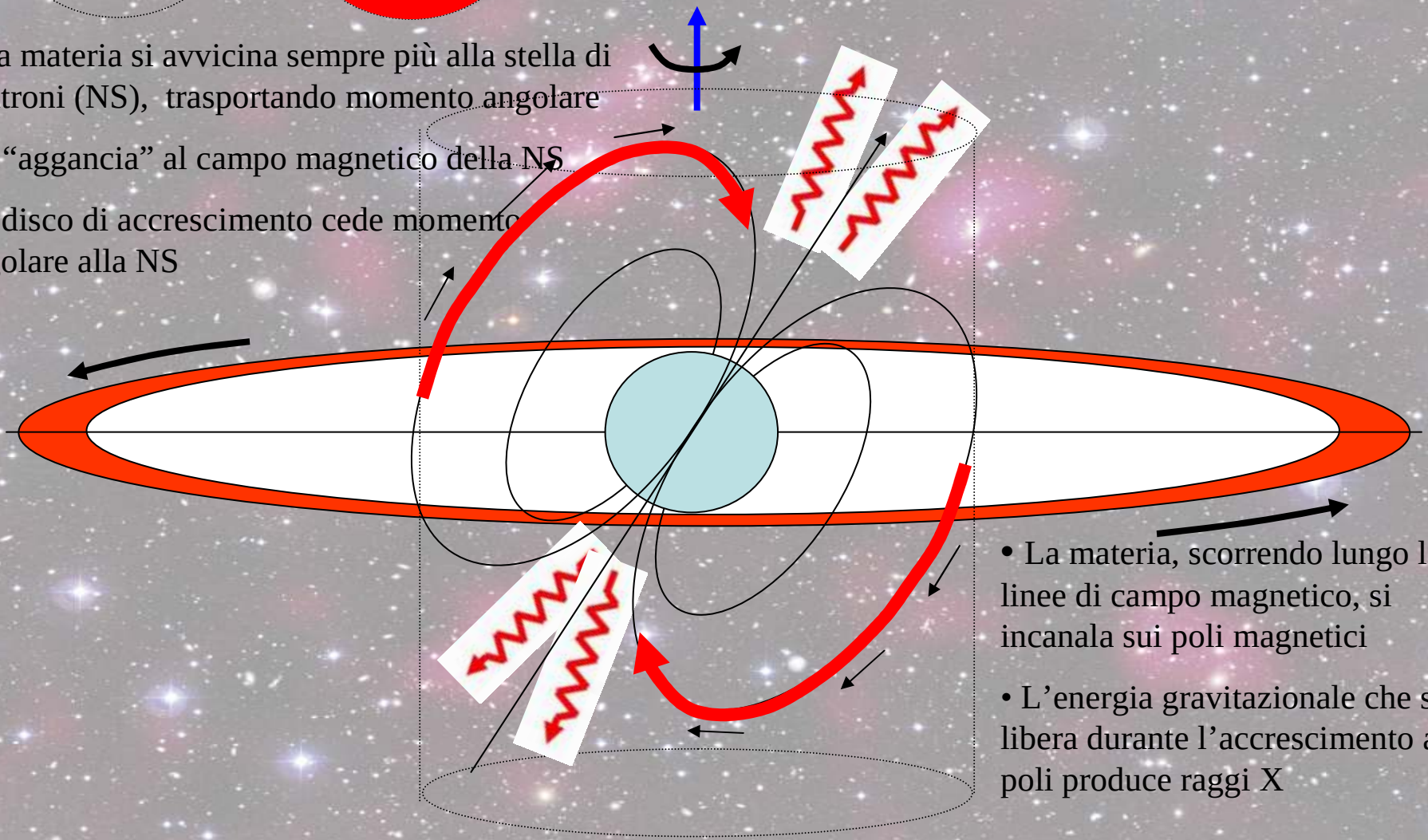


Come abbiamo detto, la fase di evoluzione della stella di piccola massa è molto lunga e consente la formazione di un “disco di accrescimento” intorno alla stella di neutroni

• La materia si avvicina sempre più alla stella di neutroni (NS), trasportando momento angolare

• si “aggancia” al campo magnetico della NS

• Il disco di accrescimento cede momento angolare alla NS



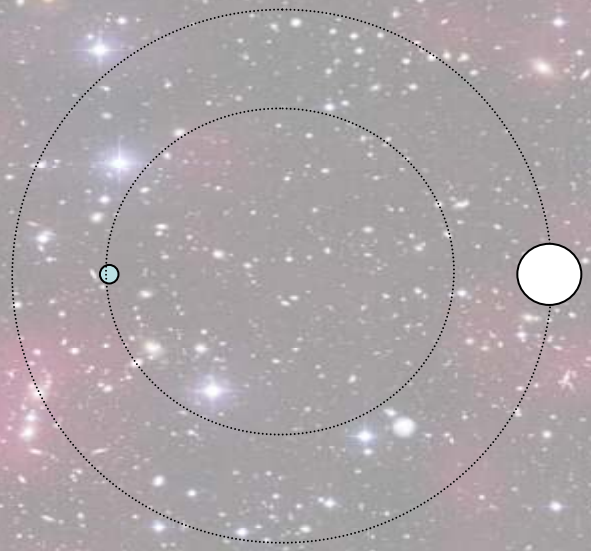
• La materia, scorrendo lungo le linee di campo magnetico, si incanala sui poli magnetici

• L’energia gravitazionale che si libera durante l’accrescimento ai poli produce raggi X

• Quando la secondaria ha terminato la sua evoluzione, l'emissione di raggi X cessa e rimane un sistema composto da una nana bianca e una stella di neutroni.

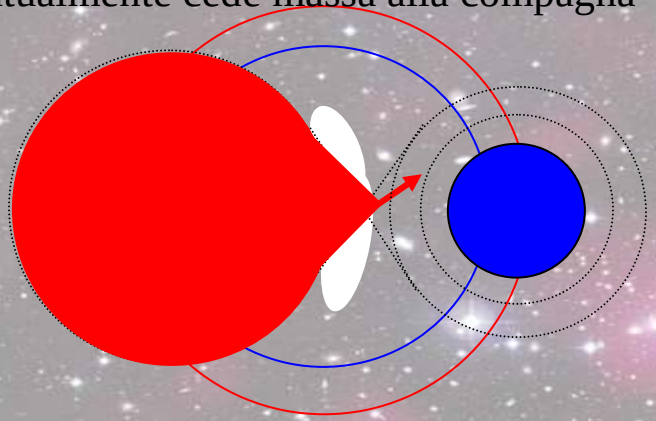
• L'orbita si è circolarizzata, a seguito di effetti di marea occorsi durante la fase di accrescimento.

• La stella di neutroni ha acquistato un notevole momento angolare di spin ed è osservabile come una radiopulsar superveloce.



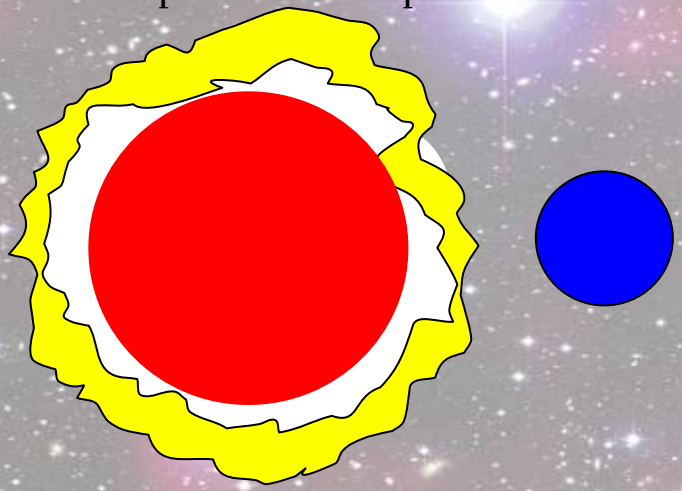
2) Stella primaria e stella secondaria massive

La stella più massiva evolve prima ed eventualmente cede massa alla compagna

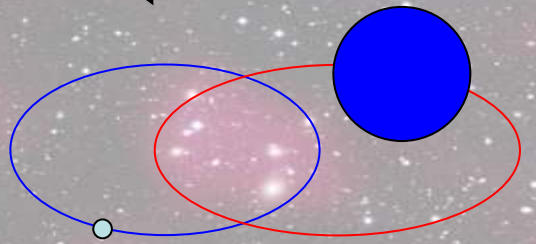


~ 10 $M_\odot$ ~6 $M_\odot$

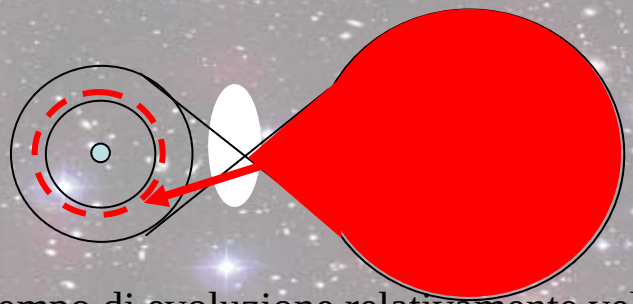
Esplosione di Supernova



A seconda di quanta massa è stata ceduta alla compagna e di quanta ne viene espulsa nell'esplosione, il sistema può restare legato



Orbite eccentriche

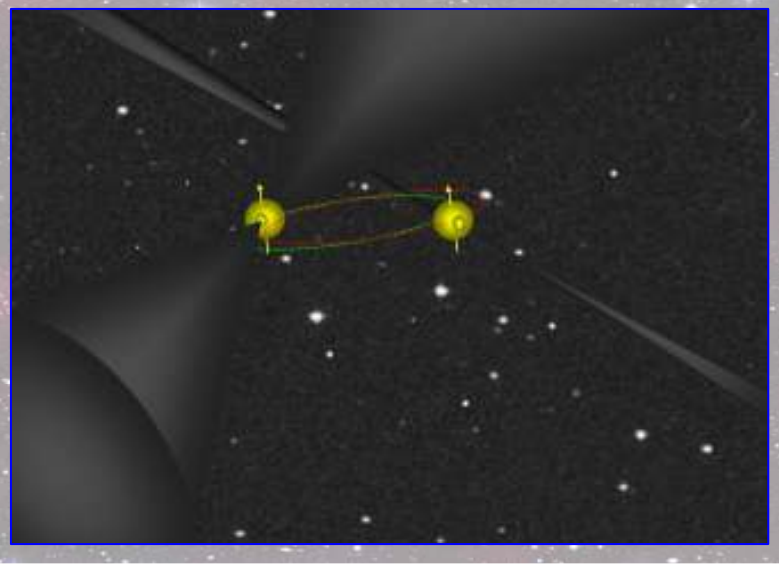


Tempo di evoluzione relativamente veloce della stella (relativamente massiva): spin-up della NS moderato

• Quando la secondaria ha terminato la sua evoluzione, esplode come supernova. Se il sistema rimane legato, rimane un sistema composto da due stelle di neutroni.

• L'orbita che si era eventualmente circolarizzata, a seguito di effetti di marea occorsi durante la fase di accrescimento, per effetto dell'esplosione sarà di nuovo eccentrica.

• La stella di neutroni primaria ha acquistato un moderato momento angolare di spin (la fase di accrescimento della secondaria relativamente massiva è relativamente rapida), mentre la stella di neutroni secondaria ha il periodo di spin connesso alla sua "nascita". Il sistema è potenzialmente osservabile come una pulsar doppia.



Buchi neri

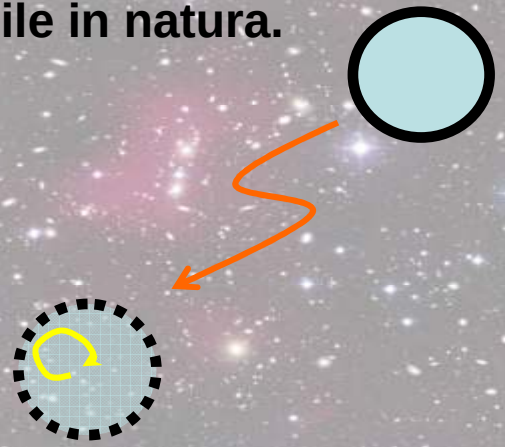
Velocità di fuga

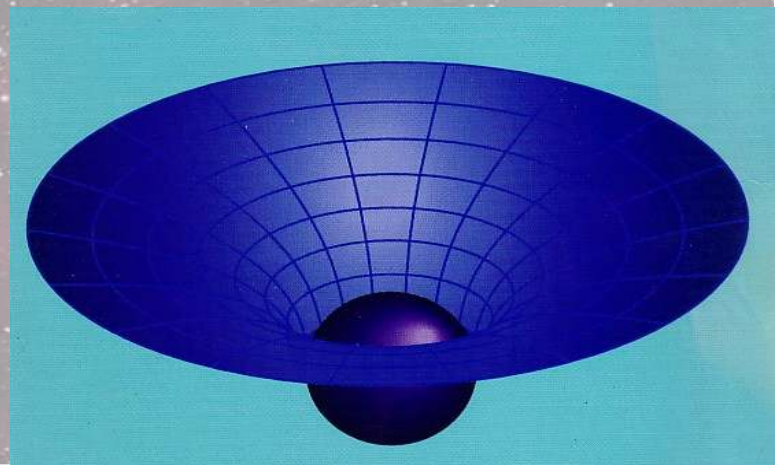
- la velocità necessaria a sfuggire a un campo gravitazionale

$$v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

- la velocità di fuga per la Terra è di 11.2 km/s
- supponiamo di comprimere la Terra entro il raggio di 1 cm: la velocità di fuga diverrebbe c = 300,000 km/s, la velocità della luce – la massima velocità possibile in natura.

HORIZON:
informatie kan niet naar buiten



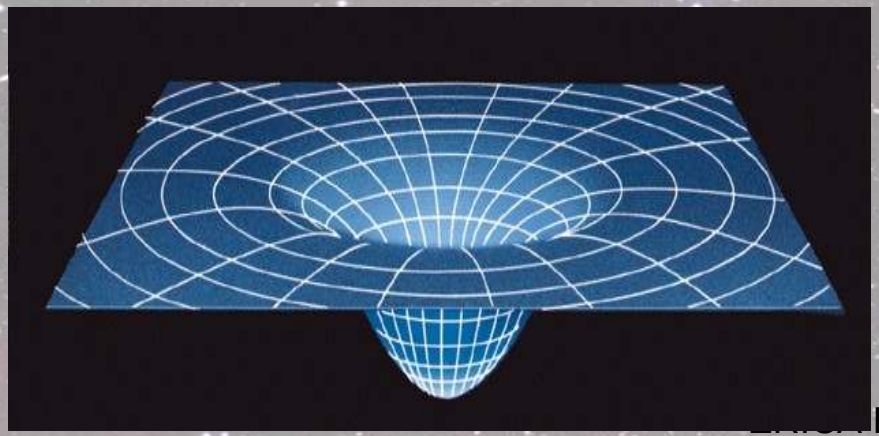


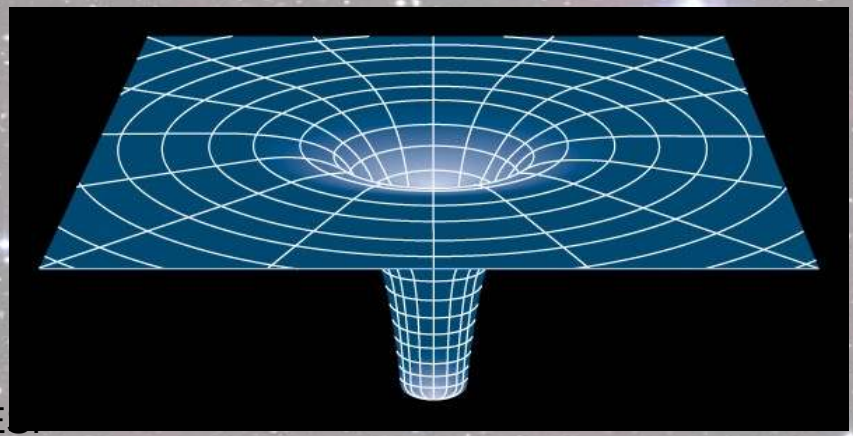
Buchi neri

Un oggetto massiccio deforma lo spazio-tempo nelle sue vicinanze. La forza di gravità che percepiamo è il risultato di tale deformazione.

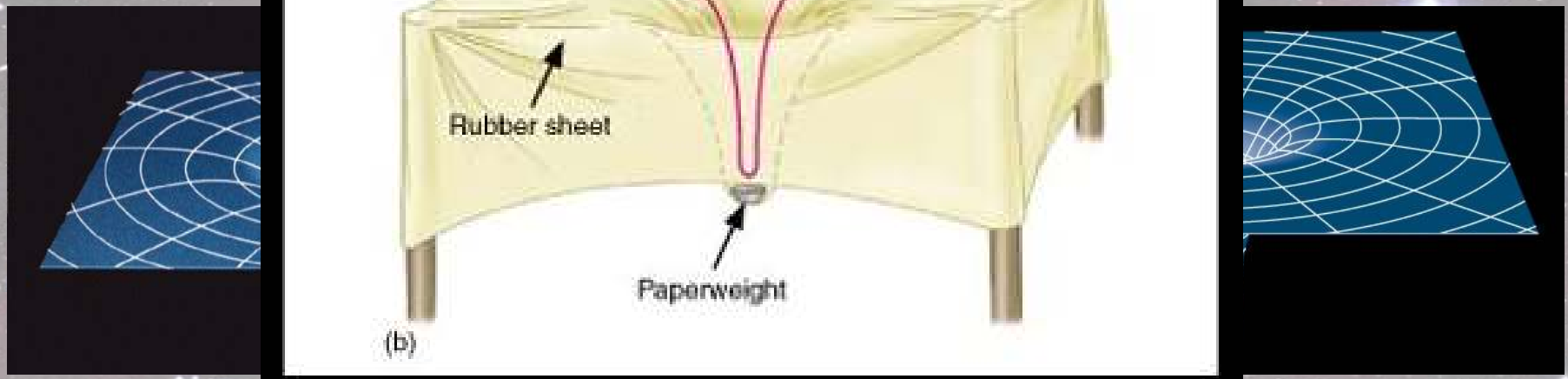
I satelliti si muovono in orbita intorno alla Terra perchè seguono la curvatura dello spazio-tempo causata dalla massa della Terra. Più grande è la massa del corpo, maggiore la curvatura.

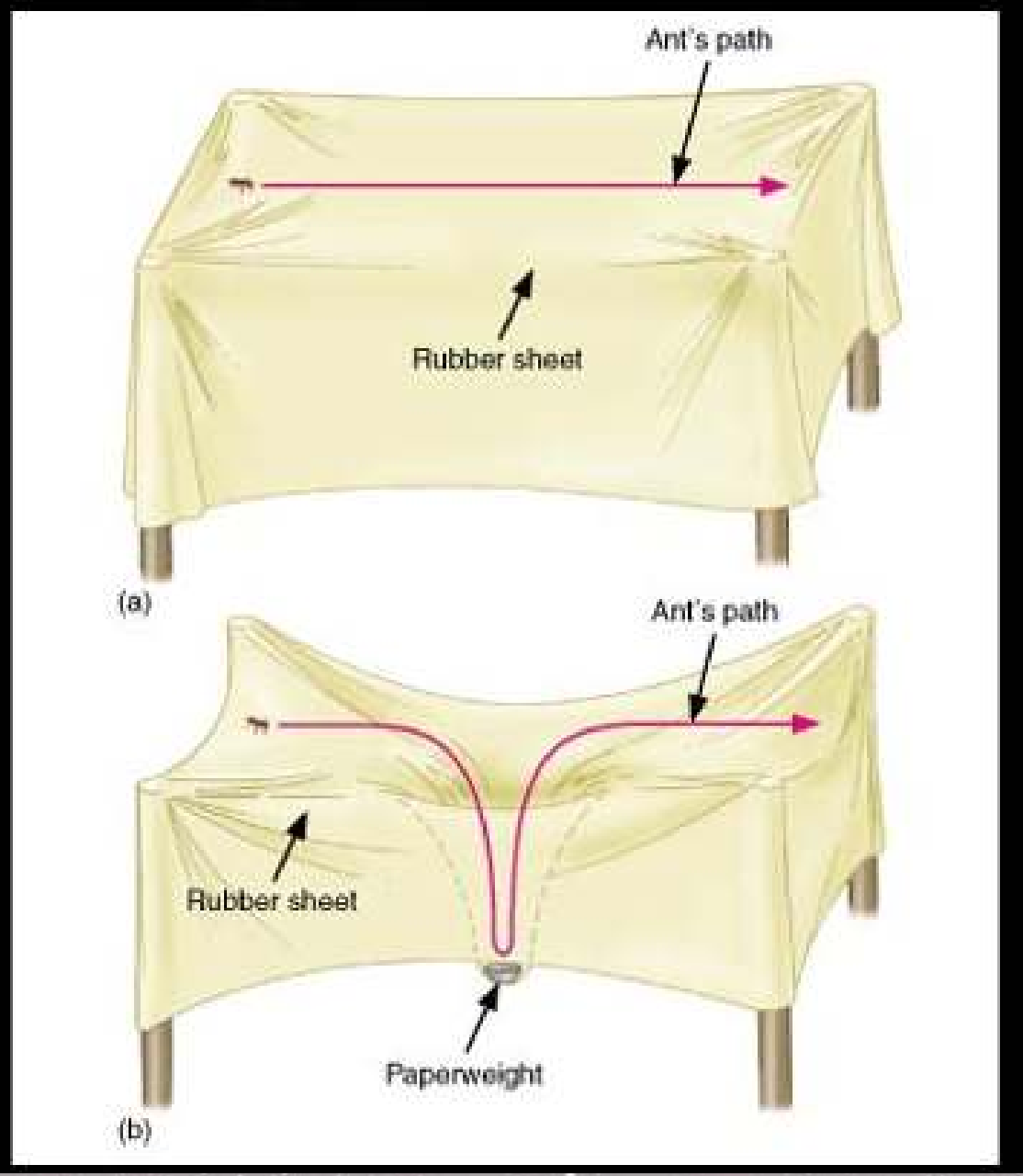
massa >>>

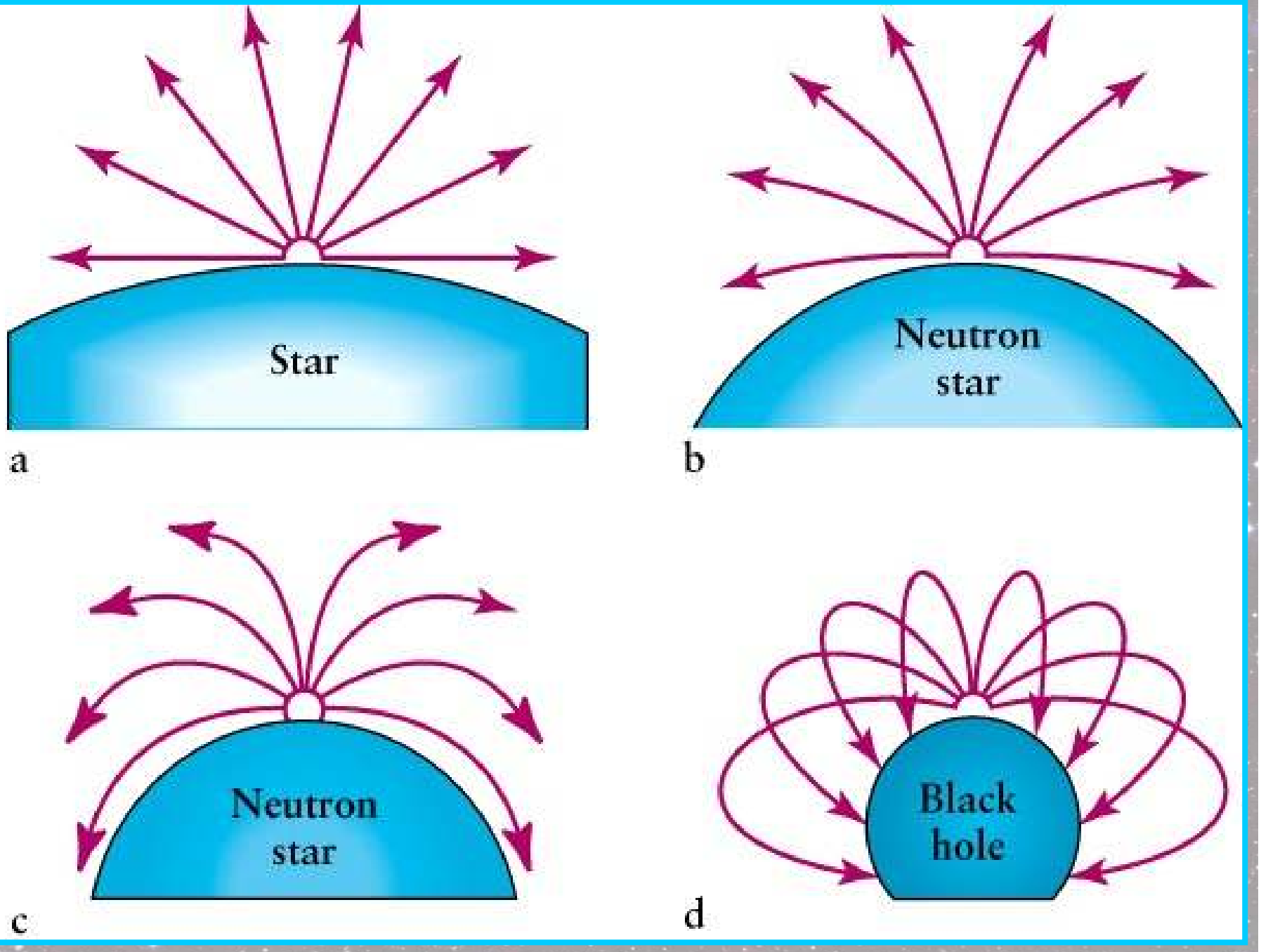




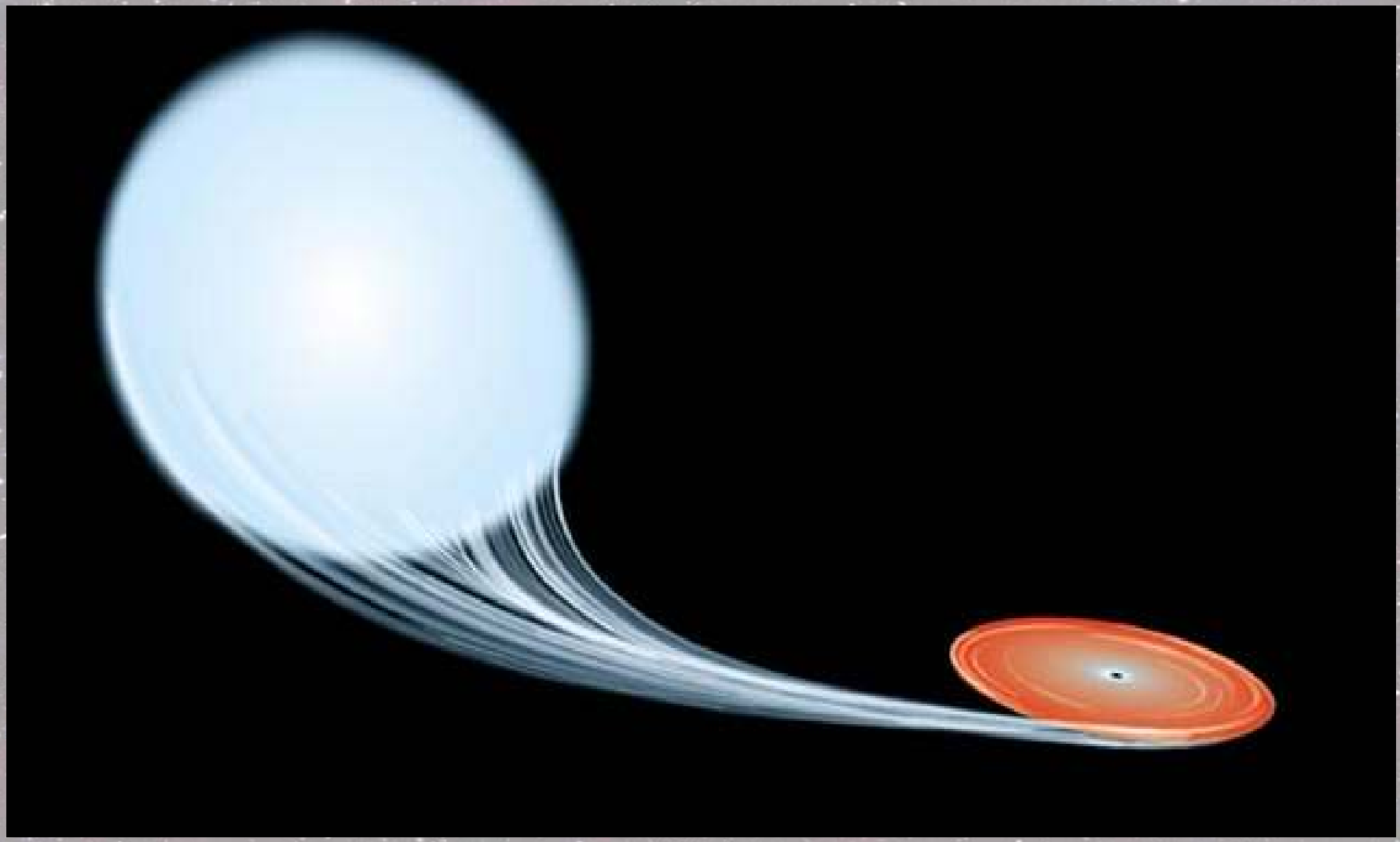
Un oggett elle sue
vicinan è il
risultat
I satelliti s erchè
seguon ata dalla
massa corpo,
maggio






Star
a
Neutron star
b
Neutron star
c
Black hole
d

Cygnus X-1



Buchi neri

ERICA BISESI
ASTROFISICA, UniTre Gorizia

GRAZIE