

**Academy of Distinction**

# **SUPERNOVAE E RESTI DI SUPERNOVA**

Laboratori astrofisici, fucine di elementi, acceleratori galattici

**Marco Miceli**

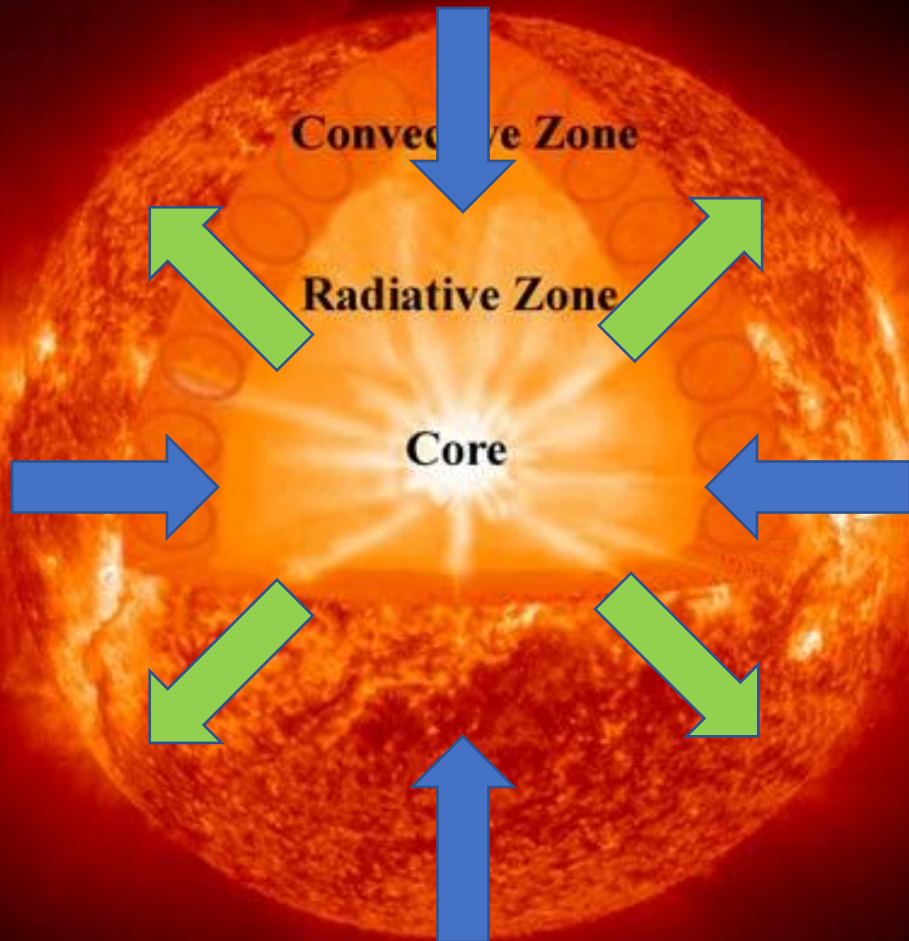
Dipartimento di Fisica e Chimica E. Segrè, Università di Palermo

INAF-OAPa

# Le stelle

**Perché le stelle esplodono?** Per capirlo dobbiamo prima capire...perché non esplodono!

Il Sole ha circa 5 miliardi di anni, come mai la **forza di gravità** non lo fa collassare su se stesso?



Deve esserci una **forza che si oppone alla forza peso**. Questa forza nasce dalla differenza di pressione fra il centro del Sole e la sua superficie esterna

# Le pressione nelle stelle

Espressione approssimata per la pressione al centro di una stella

$$P = P_0 + dgh \quad \text{Stevino}$$

$$P_c \approx dgR \quad \text{nella stella (dove } P_0 \approx 0)$$

$$P_c \approx \frac{M}{4/3\pi R^3} \frac{GM}{R^2} R$$

$$P_c \approx \frac{GM^2}{4/3\pi R^4}$$

# Le temperatura nel nucleo delle stelle

$$P_c \approx \frac{GM^2}{4/3\pi R^4}$$

Gas perfetto non degenerare

$$PV = NkT \Rightarrow P = \frac{N}{V}kT = \frac{mN}{mV}kT$$

$$P_c = \frac{d}{m}kT_c$$

$$P_c = \frac{M}{m4/3\pi R^3}kT_c \approx \frac{GM^2}{4/3\pi R^4}$$

# Le temperatura nel nucleo delle stelle

$$P_c \approx \frac{GM^2}{4/3\pi R^4}$$

Scriviamo l'equazione dei gas perfetti

$$PV = NkT \Rightarrow P = \frac{N}{V}kT = \frac{mN}{mV}kT$$

$$P_c = \frac{\rho}{m}kT_c$$

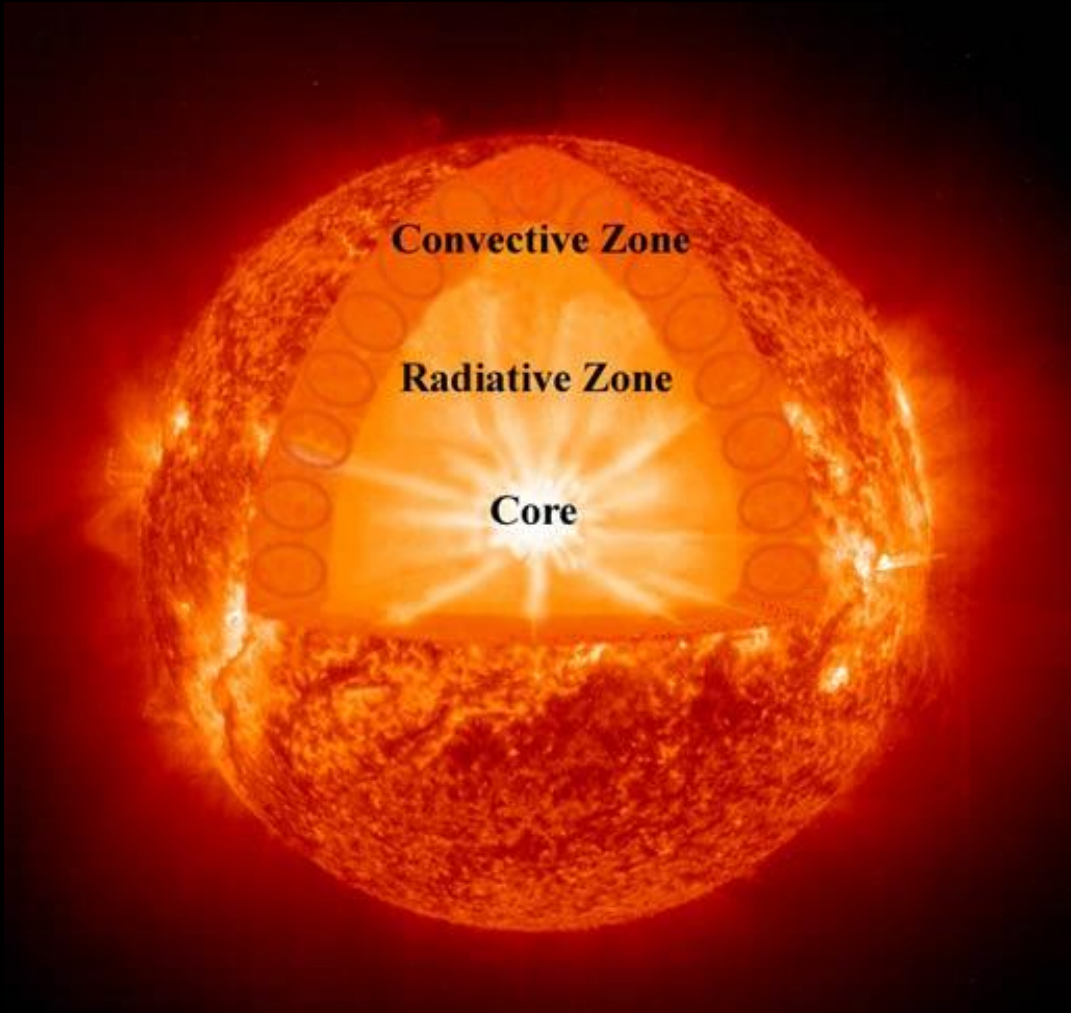
$$P_c = \frac{M}{m \cancel{4/3\pi R^3}} kT_c \approx \frac{GM^2}{\cancel{4/3\pi R^4}}$$

$$T_c = \frac{M G m}{R k}$$

$$T_c \approx 1.5 \times 10^7 K$$

Facendo i conti corretti...viene esattamente lo stesso risultato!

# Reazioni nucleari nel nucleo delle stelle



## Il Sole

Nel nucleo solare (a circa 15 milioni di gradi) nuclei di idrogeno si fondono e formano nuclei di elio. Questa reazione di **fusione nucleare** genera energia

# Reazioni nucleari nel nucleo delle stelle

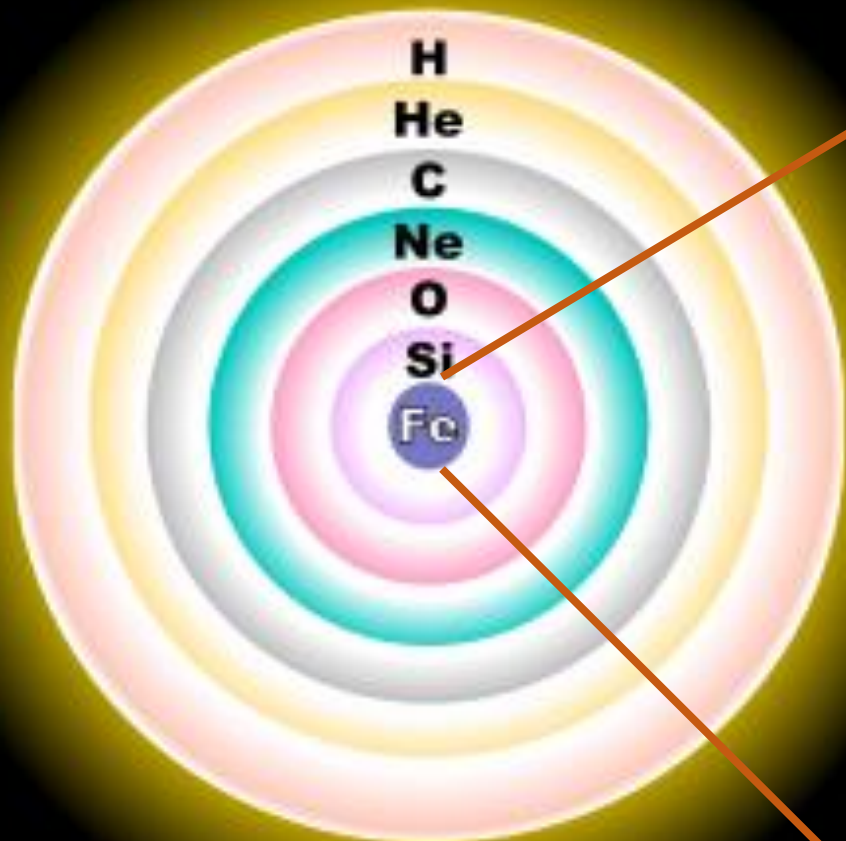


Nelle stelle più massicce del Sole il processo di fusione continua e si formano elementi sempre più pesanti, fino al Fe, oltre il quale le reazioni nucleari si arrestano (dalla fusione del Fe non si genera energia)

La maggior parte delle stelle si spegne lentamente, custodendo nel suo interno tutti gli elementi prodotti nel corso della sua vita

# Collasso del nucleo stellare

Nel nucleo ricco di ferro le reazioni nucleari si arrestano, non si produce più energia e la gravità ha il sopravvento



Nel collasso si libera una grande quantità di energia



# The physics playground

Tutte le forze fondamentali, in condizioni estreme

- Gravità (GR)
- Interazione debole
- Interazione forte
- Forze e.m.

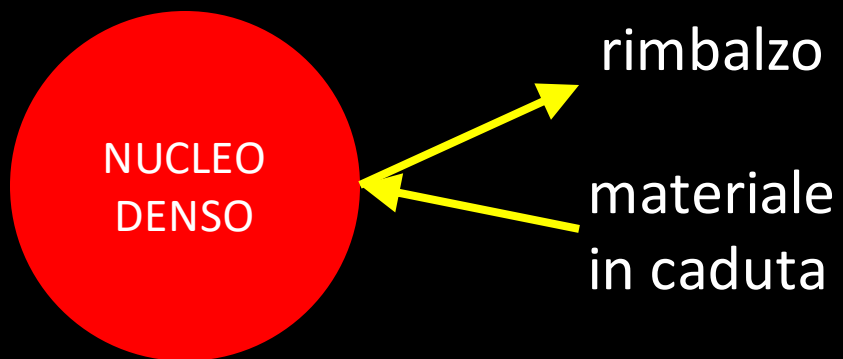
$$\Delta U_g = \frac{3GMN^2}{5R_i} - \frac{3GMN^2}{5R_f}$$

# Energia di una supernova

$10^{53}$  erg

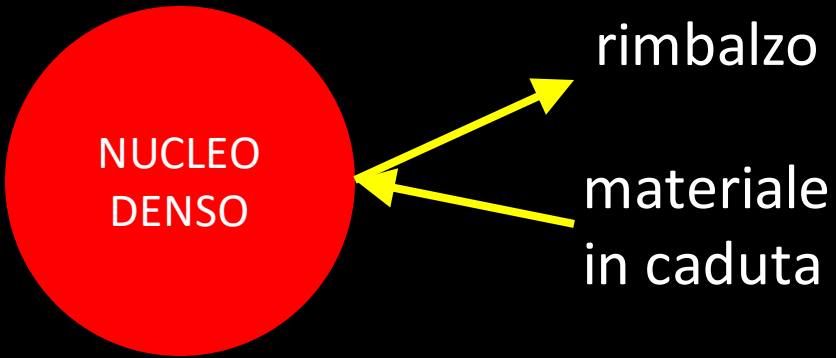
- Il sole irradia  $10^{33}$  erg al secondo: in tutta la sua vita irraderà un'energia 1000 volte inferiore
- La più potente bomba H libera  $2 \times 10^{24}$  erg
- Mille miliardi di bombe H al secondo, per ogni secondo dall'origine dell'universo ad oggi avrebbero liberato la stessa energia che si libera in una supernova in un secondo

# Dal collasso all'esplosione



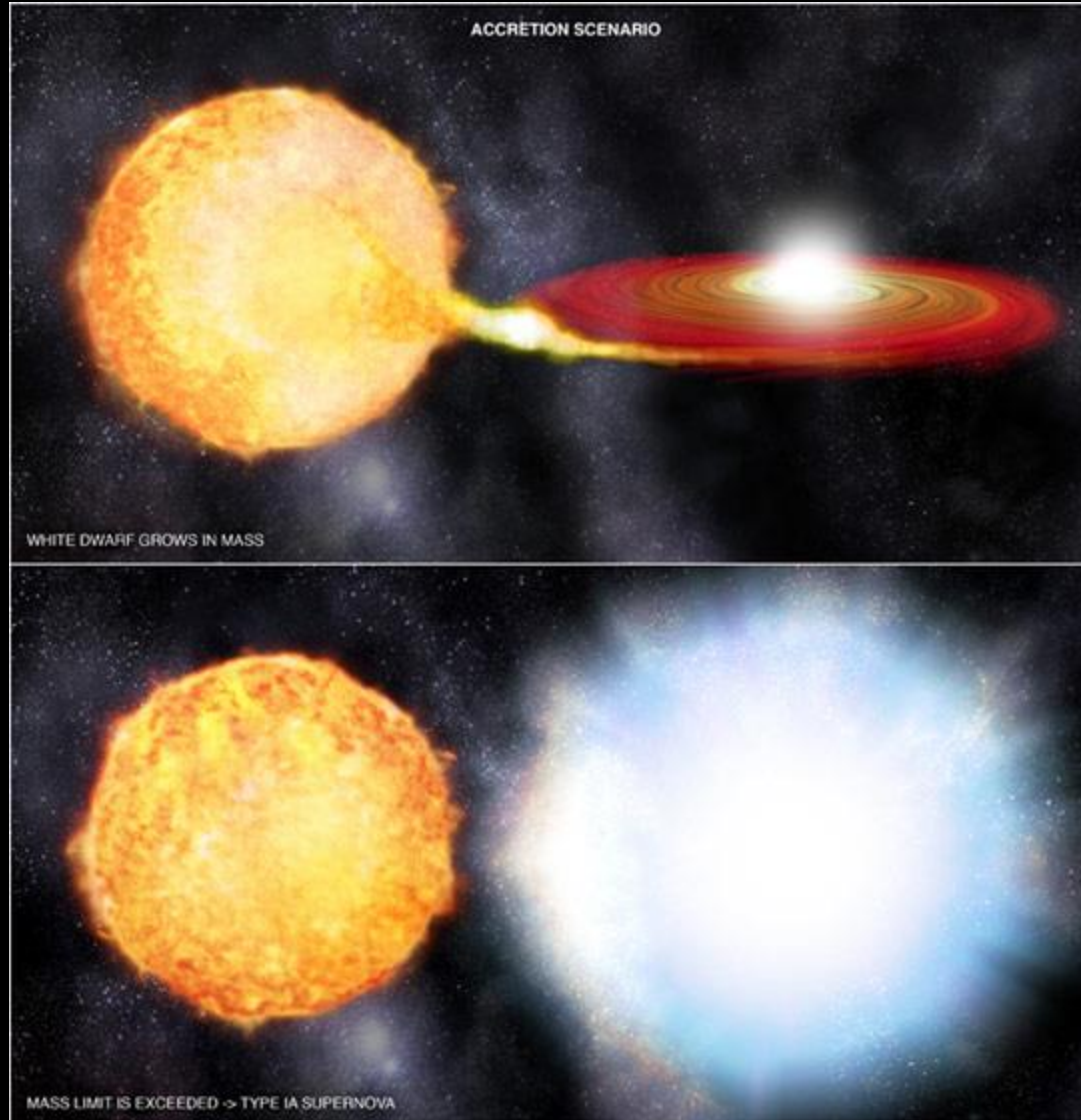
La densità del nucleo raggiunge i 100 miliardi di kg al  $\text{cm}^3$  (un miliardo e mezzo di persone in meno di una zolletta di zucchero...), il materiale in caduta (meno denso) urtandolo...rimbalza!

# Dal collasso all'esplosione



La densità del nucleo raggiunge i 100 miliardi di kg al  $\text{cm}^3$  (un miliardo e mezzo di persone in meno di una zolletta di zucchero...), il materiale in caduta (meno denso) urtandolo...rimbalza!

# Le supernovae termonucleari



Accrescimento di materiale su una nana bianca fino al raggiungimento della massa critica (1.4 masse solari)

Meno frequente (meno del 20% delle supernovae), ma molti esempi recenti (Tycho, Kepler, SN 1006)



# Dal collasso all'esplosione

- Diverse masse solari di frammenti stellari (ejecta)
- Velocità massime degli ejecta fino al 10% della velocità della luce
- Luminosità miliardi di volte maggiore di quella solare
- Emissione di neutrini ed onde gravitazionali
- Formazione di un'onda d'urto supersonica che si propaga nel mezzo ambiente



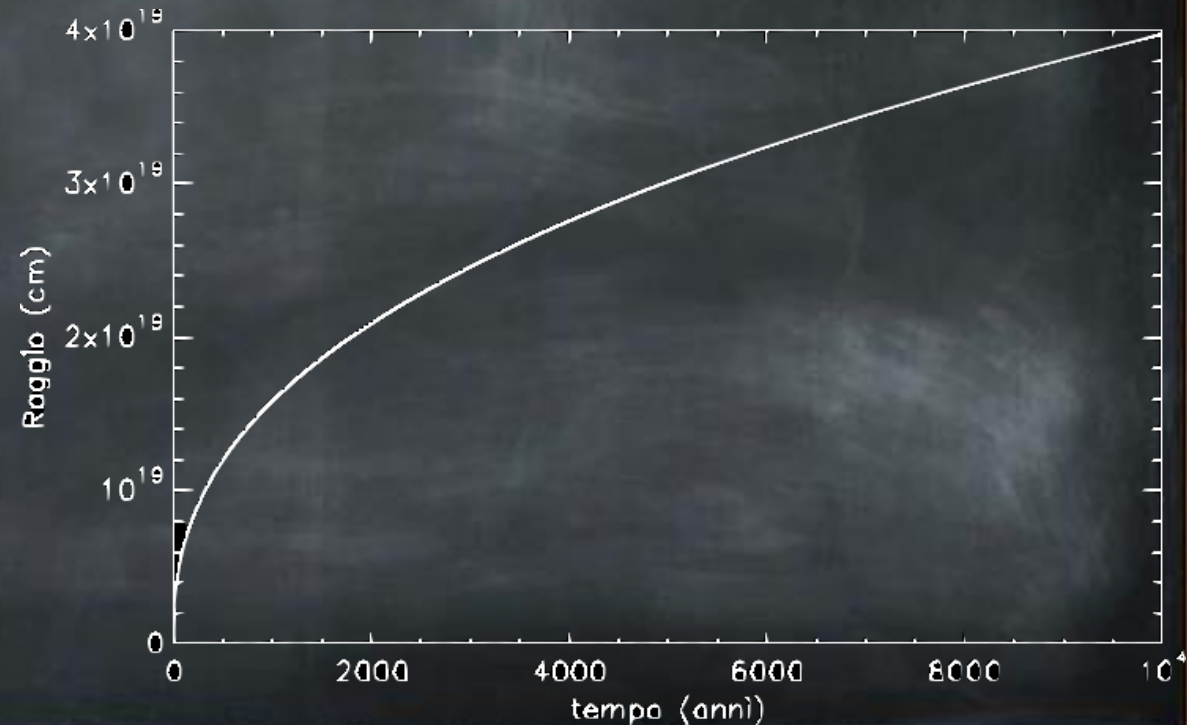
# Evoluzione dell'onda d'urto

$$\frac{\text{Energia esplosione}}{\text{densità ambiente}} = \frac{E}{d} = \text{cost} \quad \text{analisi dimensionale:}$$

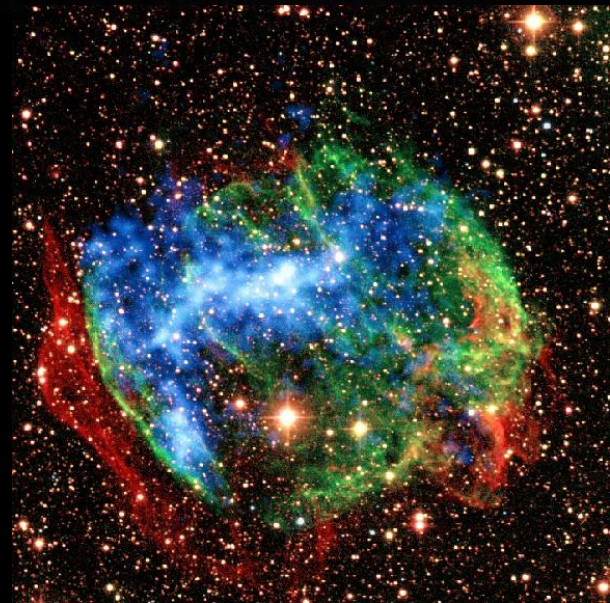
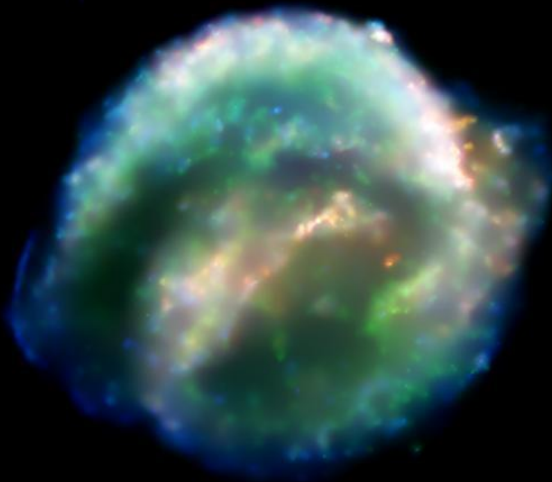
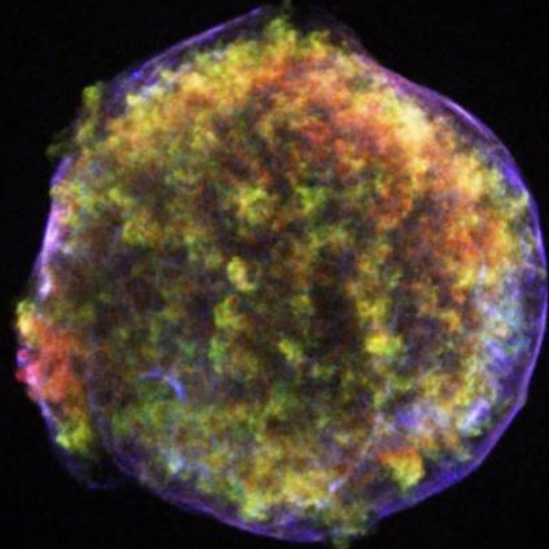
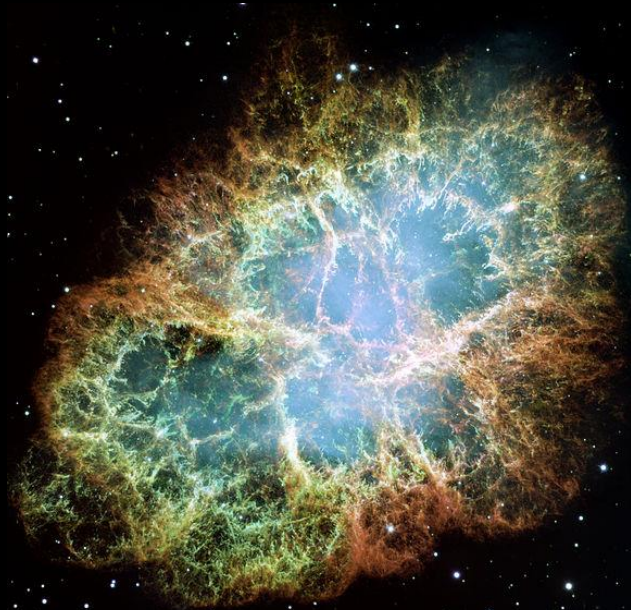
$$\frac{[m \frac{l^2}{t^2}]}{[m/l^3]} = \left[ \frac{l^5}{t^2} \right] = \text{cost}$$

$$\frac{R^5}{t^2} = k \frac{E}{d} = \text{cost} \quad R^5 = k \frac{E}{d} t^2$$

$$R = k \left[ \frac{E^{1/5}}{d^{1/5}} \right] t^{2/5}$$



# I resti di supernova

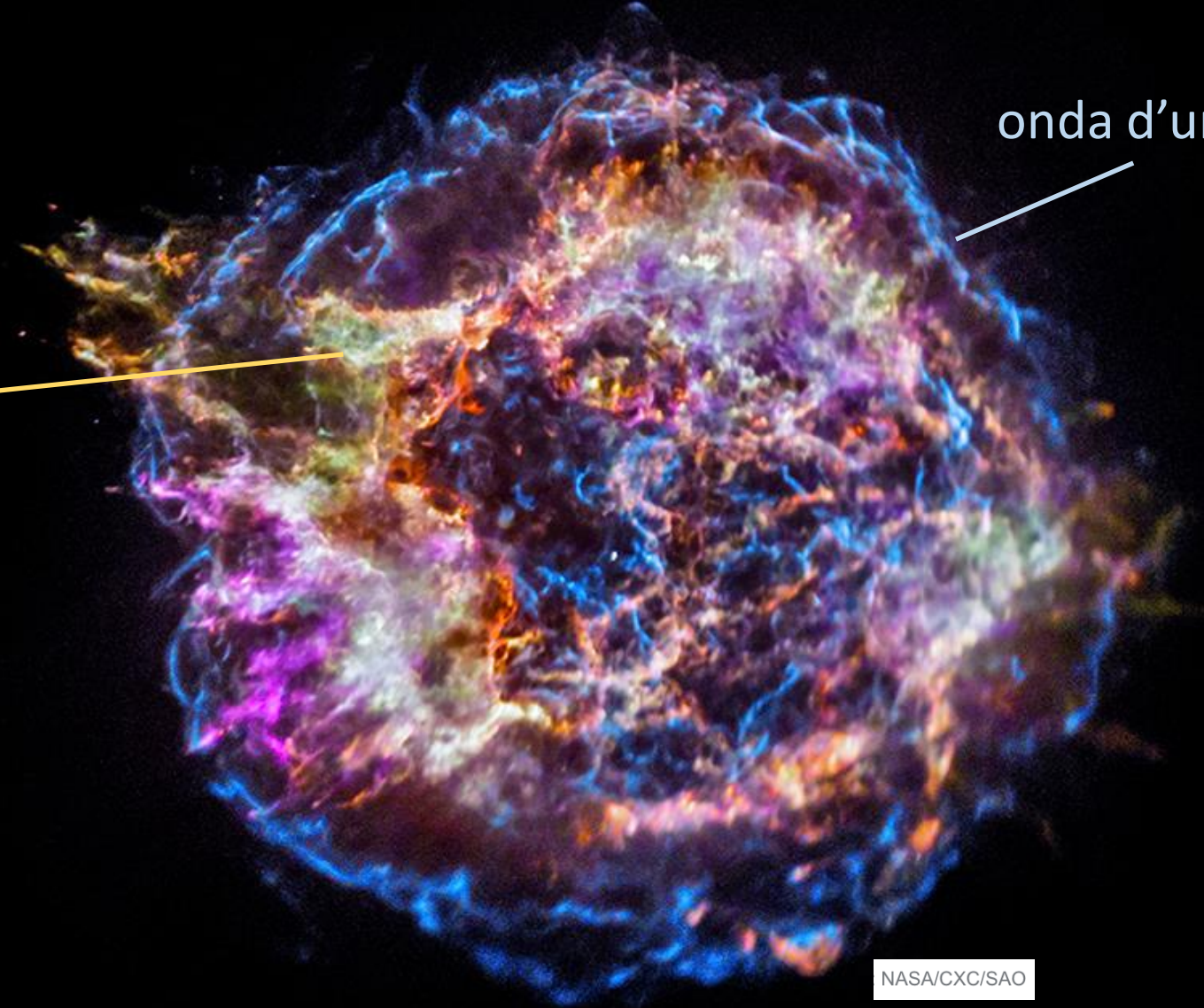
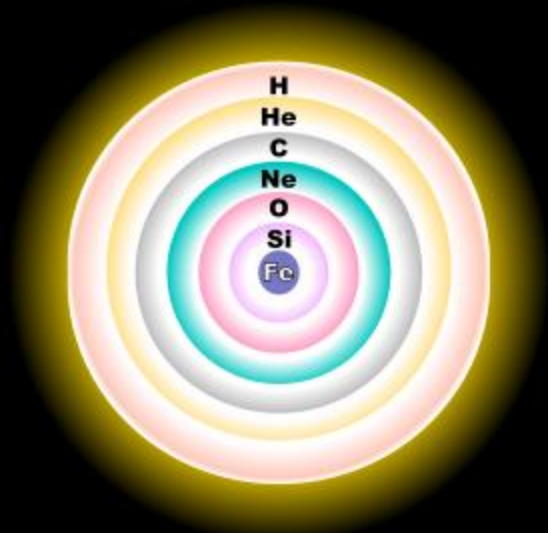




# I resti di supernova – Cassiopeia A

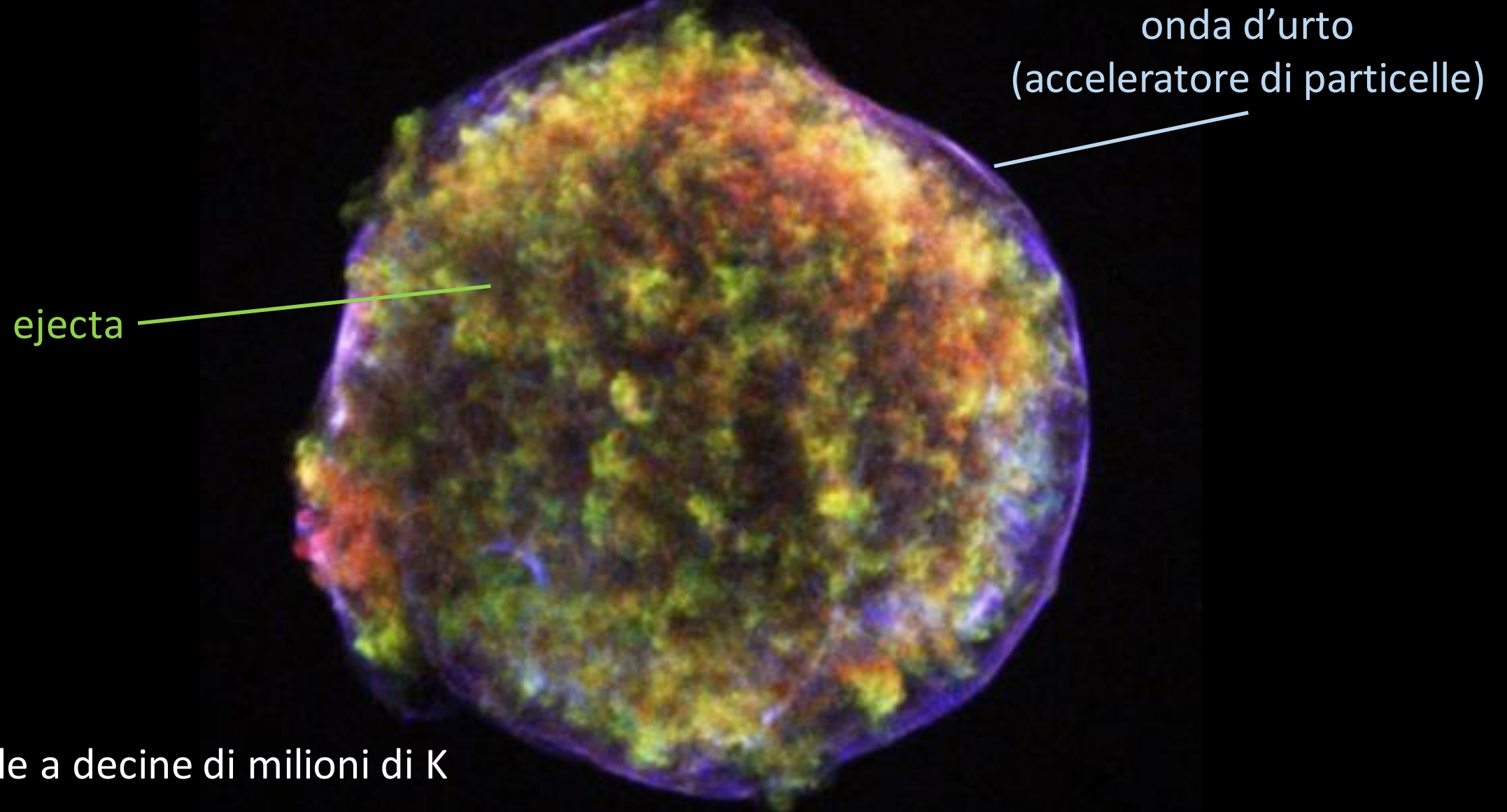
ejecta

onda d'urto



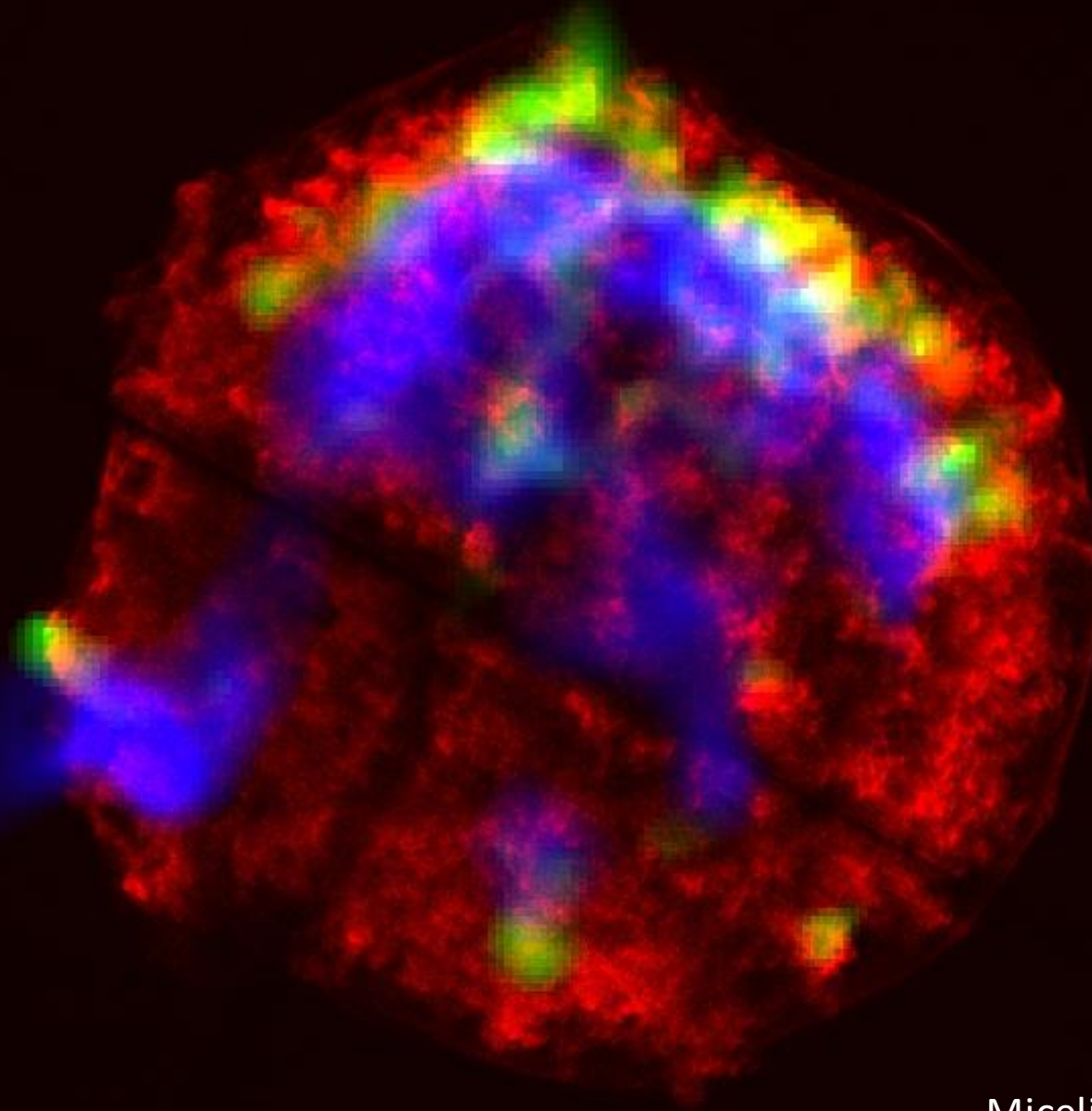
NASA/CXC/SAO

# Il resto di supernova di Tycho



# Il resto di supernova di Tycho

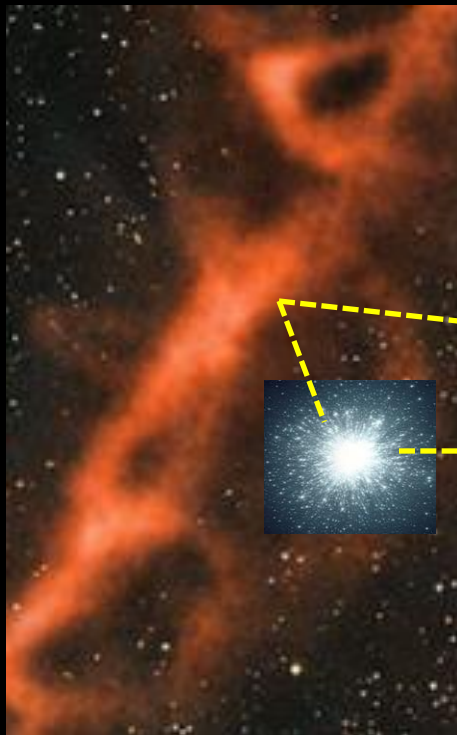
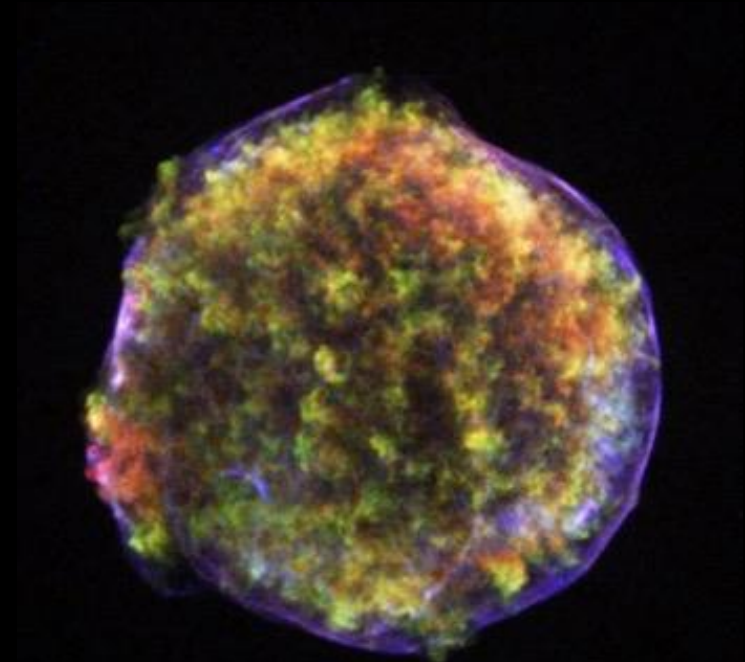
Si  
Ca  
Fe



Miceli et al. 2015

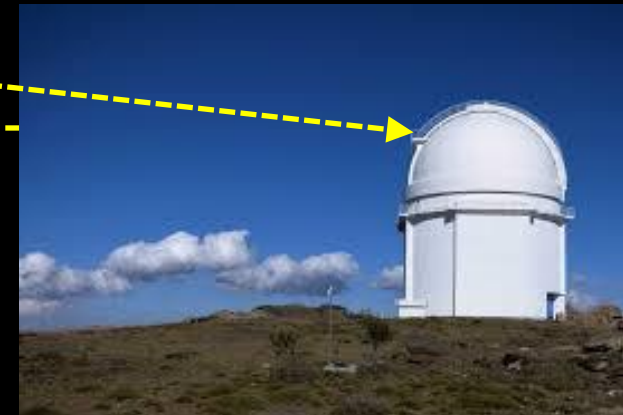
## Il resto della supernova e la supernova

Insieme al resto della supernova di Tycho, possiamo rivedere ciò che Tycho e Shakespeare osservarono nel 1572 grazie all'**eco di luce della supernova**

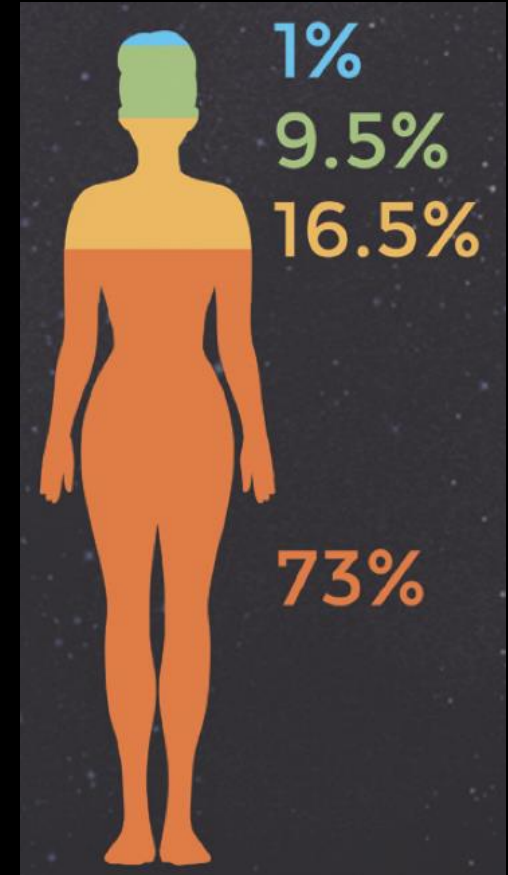
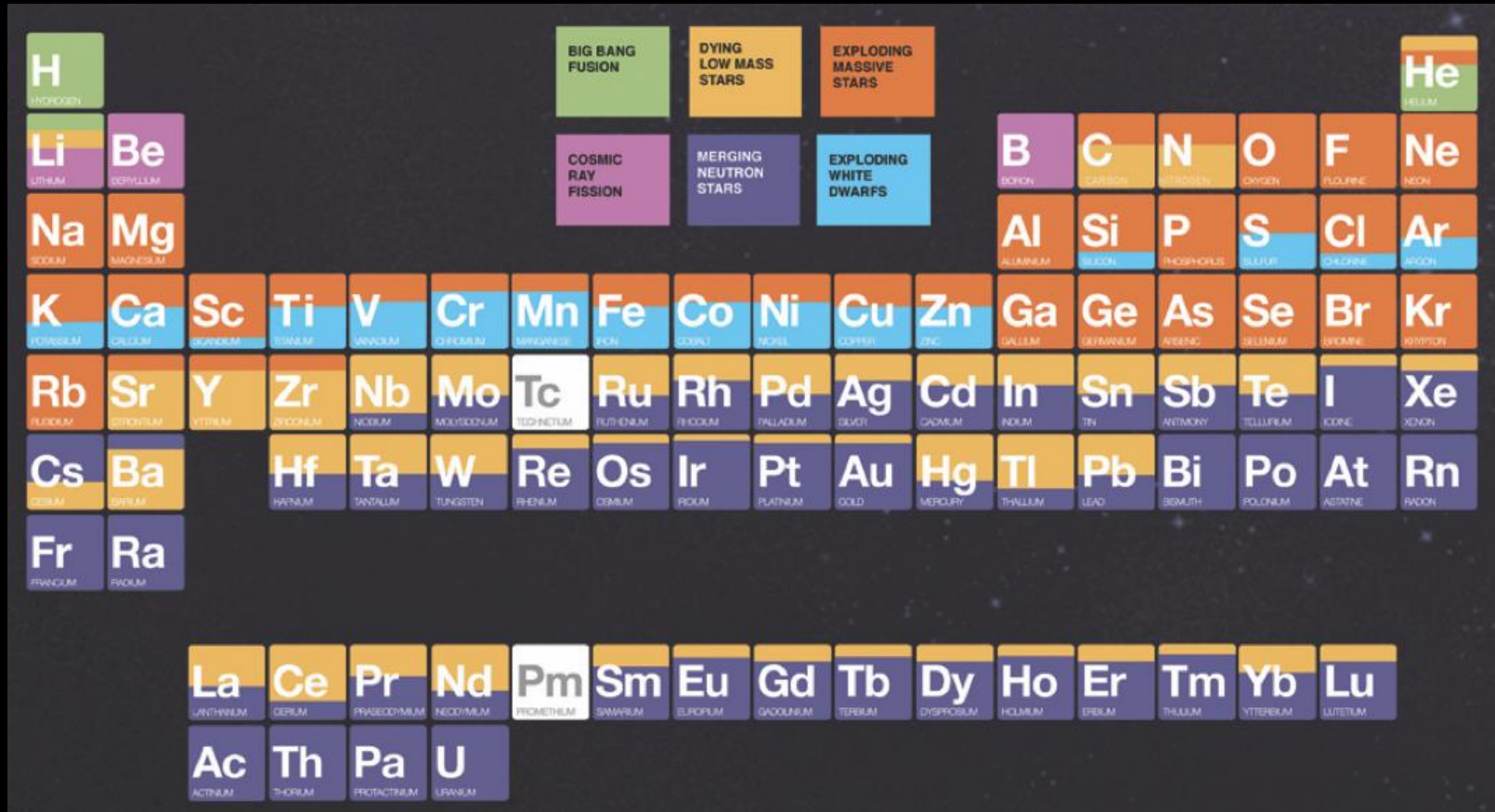


Dopo circa 10230 anni (oggi)

Dopo circa 9800 anni  
(nel 1572)



# I resti di supernova e noi...



Nel nostro corpo ci sono circa  $7 \times 10^{27}$  atomi (7,000,000,000,000,000,000,000,000,000), la maggior parte sono atomi di idrogeno, gli altri sono nati dalla morte delle stelle “L’azoto nel nostro DNA, il calcio nei nostri denti, il ferro nel nostro sangue, il carbonio nella nostra torta di mele sono stati prodotti dentro una stella in esplosione. Siamo fatti di materia stellare” (Carl Sagan)