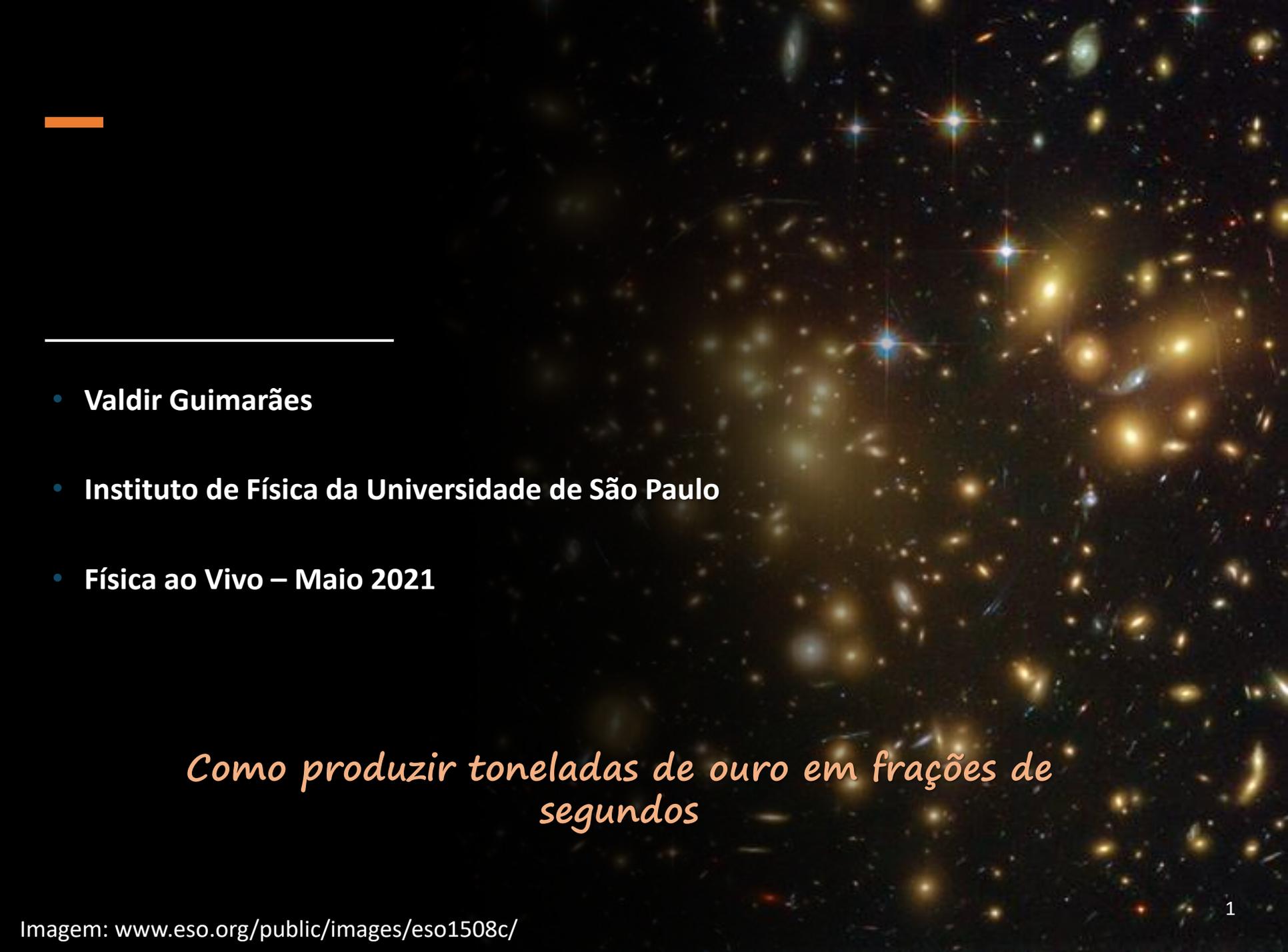


- 
- 
- **Valdir Guimarães**
  - **Instituto de Física da Universidade de São Paulo**
  - **Física ao Vivo – Maio 2021**

*Como produzir toneladas de ouro em frações de segundos*

# Ouro

- ❑ Ouro sempre foi um metal cobiçado pela sua beleza e brilho
- ❑ Estima-se que cerca de 163 mil toneladas de ouro já foram descobertas desde a Pré-História, de acordo com o World Gold Council, conselho formado pelas maiores empresas mineradoras do mundo).
- ❑ As civilizações antigas davam um valor divino a esse metal.
- ❑ Com a confecção de moedas de ouro pelo romanos esse carácter divino se perdeu.
- ❑ Hoje o ouro tem várias outras utilidades;
- ❑ Além de bonito, o ouro é maleável, pouco reativo, com propriedades anticorrosivas etc.
- ❑ Houve uma grande esforço por parte dos alquimistas para transformar metais vis em ouro.
- ❑ Mas de onde vem todo o ouro presente na Terra ?



Wikimedia Commons,

Jóias, fonte: myjewishlearning.com

68.3% Energia Escura (mas não sabemos direito o que é isso)

26.8% Matéria escura fria (mas não sabemos direito o que é isso)

4.9% matéria (núcleos e elétrons)

0.5% visto como estrelas.

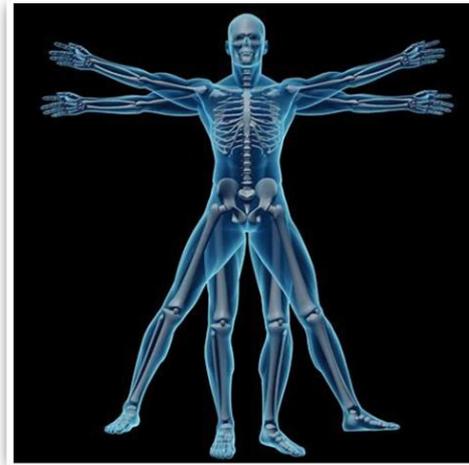


Abordado nos estudos de nucleossíntese

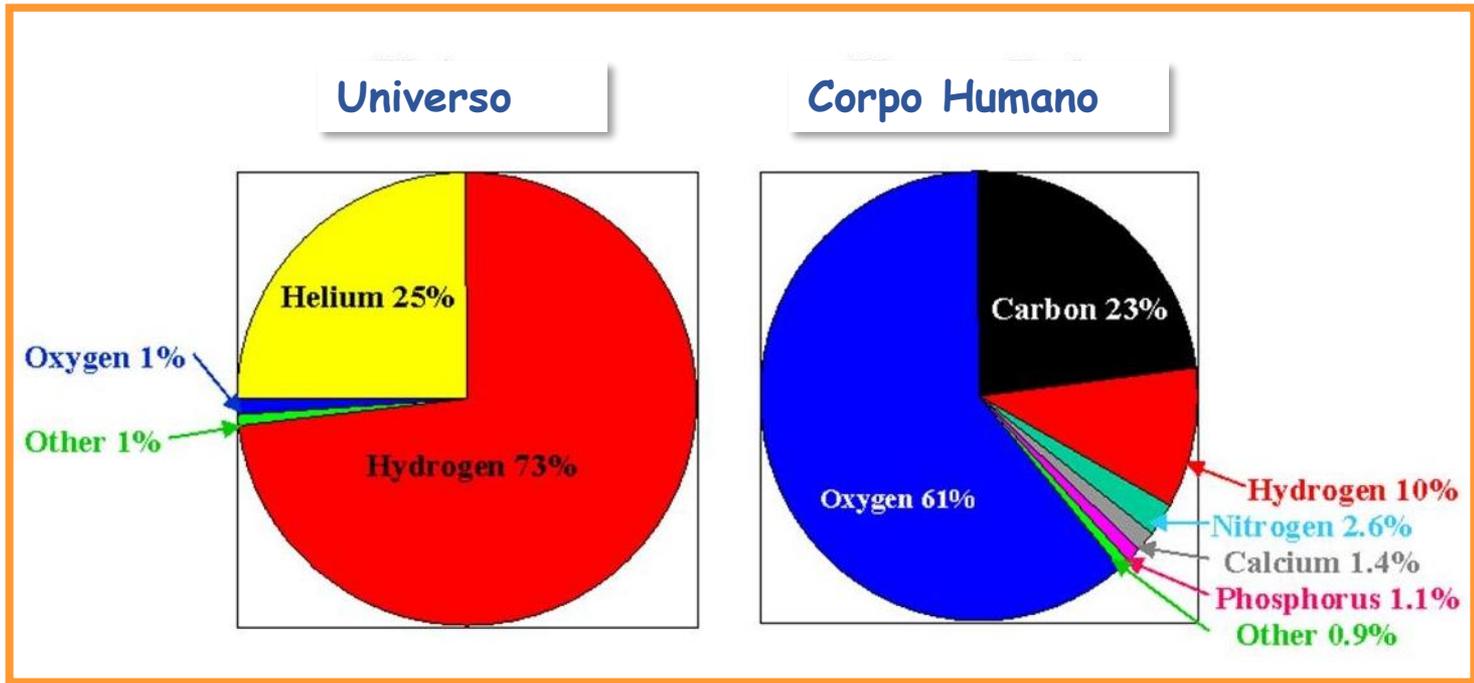
Porque se preocupar com os 5% ????

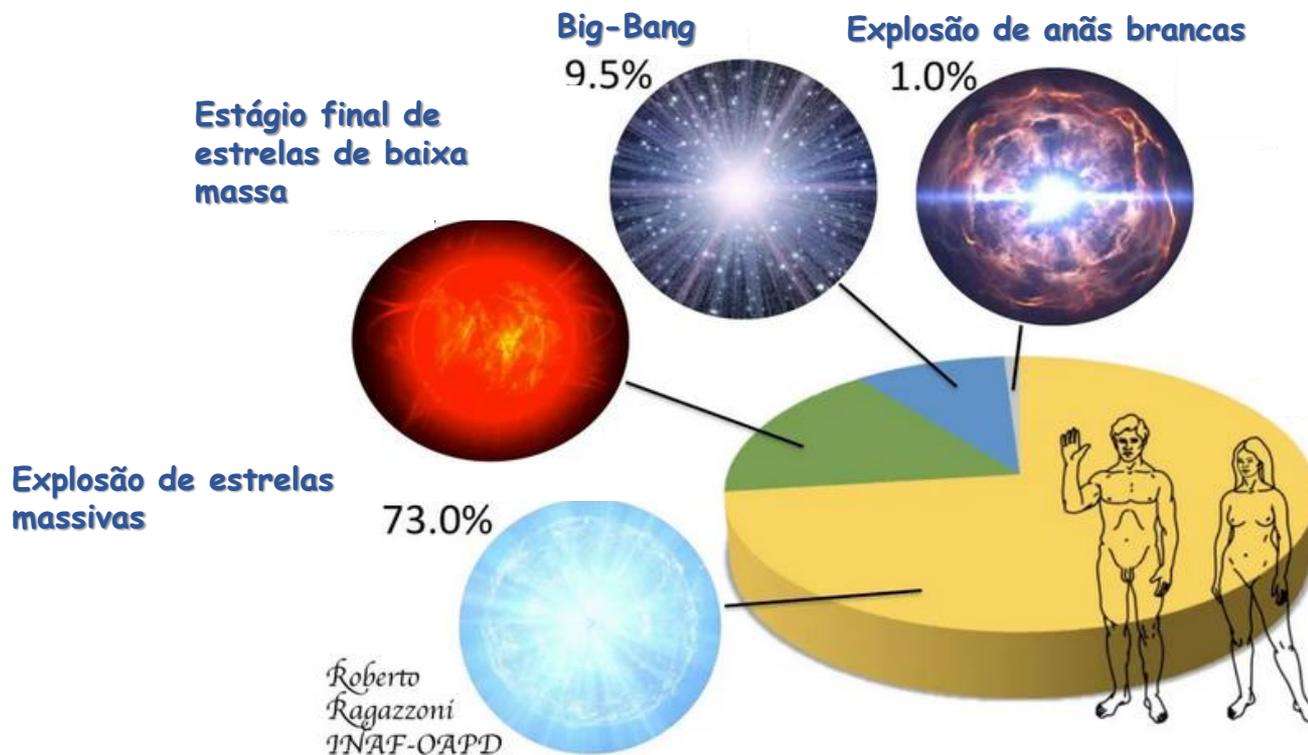


**Porque somos feitos desse material**



Não apenas o Ouro mas de onde vieram e como foram produzidos todos os elementos encontrados na Terra ?





**"Nós somos feitos de poeira estelar" (Carl Segan)**

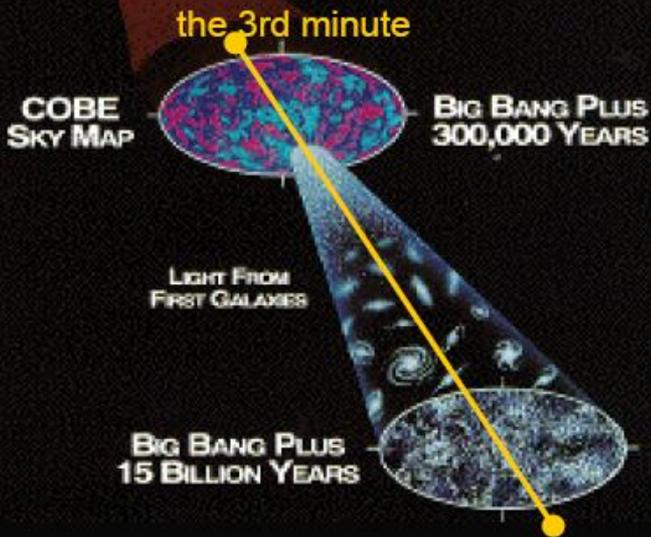
- ❑ Como são formados (síntese) os elementos ?
- ❑ Como é gerada energia do Sol e das estrelas ?
- ❑ Como o Sol e estrelas se formaram e evoluem ?
- ❑ Como se dá a produção dos neutrinos solares ?
- ❑ Como surgem os diferentes entes astrofísicos ? (estrela gigante vermelha, nova, supernova, estrelas de neutrons, buracos negros)
- ❑ Como se dão as explosões de nova, supernova e kilonova ?



**Astrofísica Nuclear**

Céu noturno a olho nu





cataclysmic binaries

Red giant Star

stellar evolution

## Nuclear Astrophysics

Asymptotic Giant Branch

AGB stars

Supernovae

Origin and fate of the elements in our universe  
 Origin of radiation and energy in our universe

Supermassive stars

Origem dos elementos no Universo

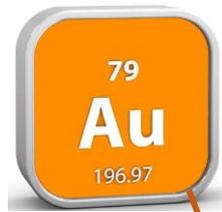
X-ray bursts

# Tabela periódica dos elementos



Henry Moseley descobriu que o número de prótons de um determinado núcleo era sempre o mesmo e com isso reorganizou a tabela periódica.

Periodic Table of the Elements



1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305											13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.798
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [209]	86 Rn Radon [222]
		107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]										
		113 Uut Ununtrium unknown	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Lv Livermorium [289]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown										
		61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967					
		93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]					
		Basic Metal		Semimetal		Nonmetal		Halogen		Noble Gas		Lanthanide		Actinide			

## Superpesados:

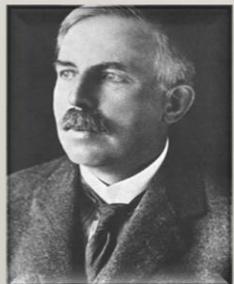
- Z=113 Nh Nihonium
- Z=114 Fl Flerovium
- Z=115 Mc Moscovium
- Z=116 Lv Livermorium
- Z=117 Ts Tennessine
- Z=118 Og Oganesson



Laboratório RIKEN  
Saitama – Japan  
dezembro 2018

<http://archive.jinaweb.org/html/tools/elements3/elements3.html>

## 1911 - Publicação de Rutherford



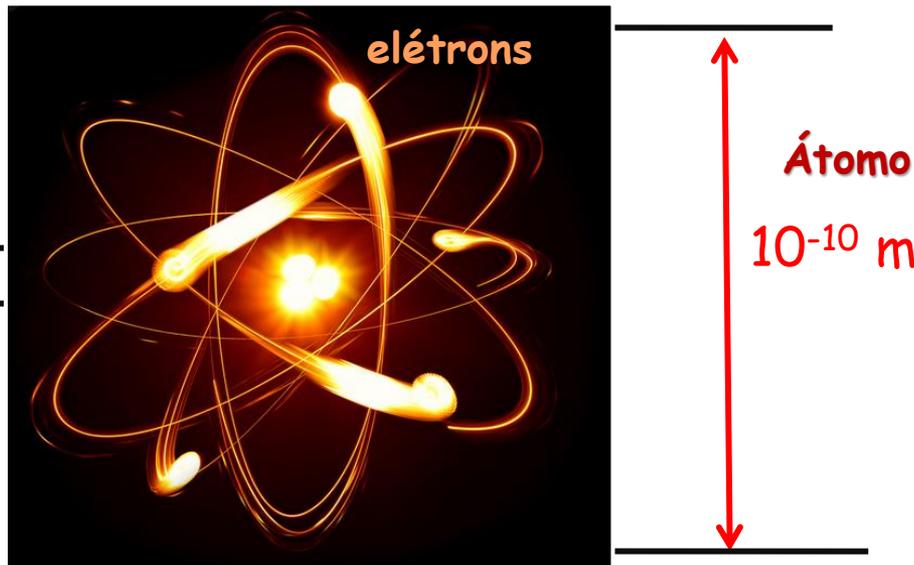
Ernest Rutherford  
1871 - 1937



Nobel 1908

**Núcleo**  
**(protons e neutrons)**

$10^{-15}$  m



<http://www.todayifoundout.com/index.php/2013/12/natural-nuclear-fission-reactor-gabon-west-africa/>

## Isótopos

Mesmo número atômico (protons)  
mas diferente número de neutrons



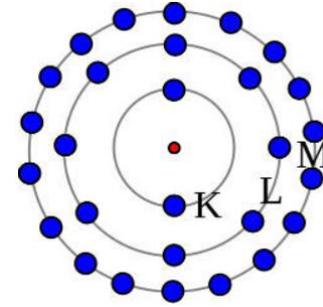
**Z:** no. de prótons (no. atômico)

**N:** no. de nêutrons

**A:** no. de massa  $A=Z+N$

# Bohr e correções ao modelo atômico de Rutherford

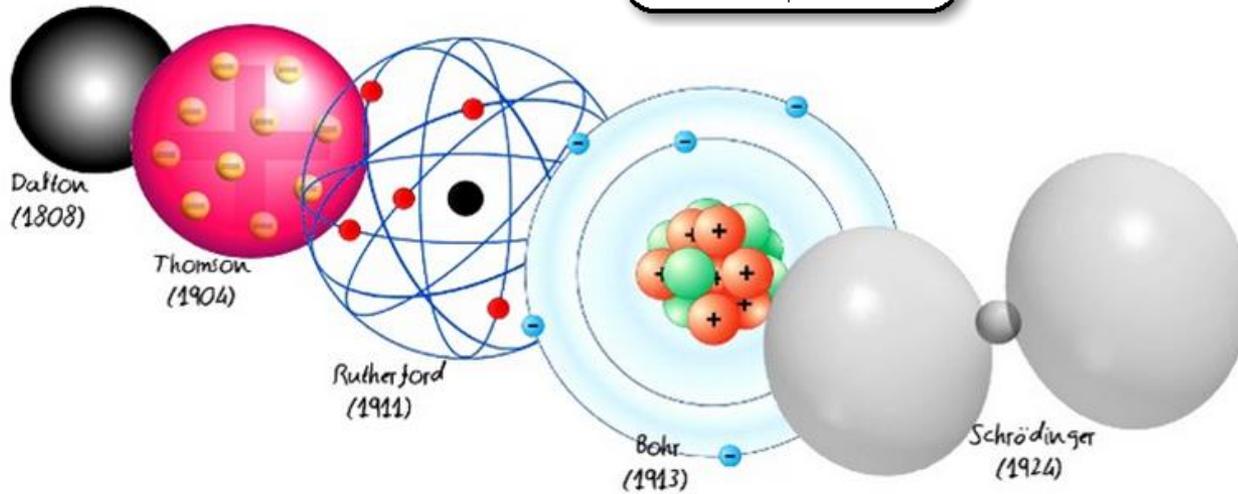
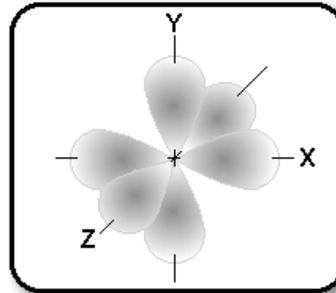
Niels Bohr propôs uma explicação da estabilidade do átomo recorrendo à teoria quântica de Planck.



Niels Bohr  
1885 - 1962



Mais tarde a teoria quântica esclareceu a ideia dos orbitais.



As limitações do modelo de Rutherford em nada tiram seu mérito. A imagem de um núcleo minúsculo rodeado pelos elétrons permanece sendo aceita até hoje.

# Rutherford o Alquimista

1919 -

Em uma de suas experiências Rutherford observou emissão de hidrogênio. Essa experiência convenceu Rutherford de que o Nitrogênio era composto por núcleos de hidrogênio e portanto uma partícula elementar. Denominou essa partícula de próton, do grego Protos (início).

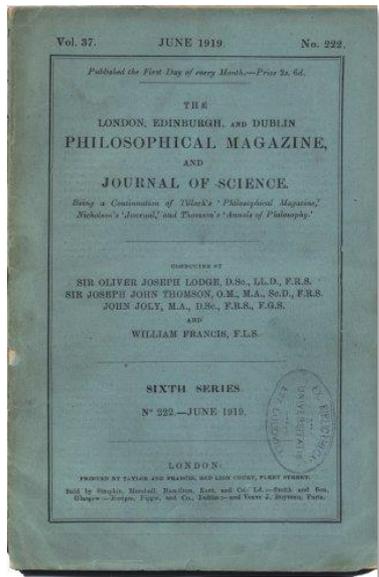


**"Collision of alpha Particles with Light Atoms;  
An Anomalous Effect in Nitrogen"**  
*The Philosophical Magazine*, Vol. 37, No. 222, (1919) p. 537-87

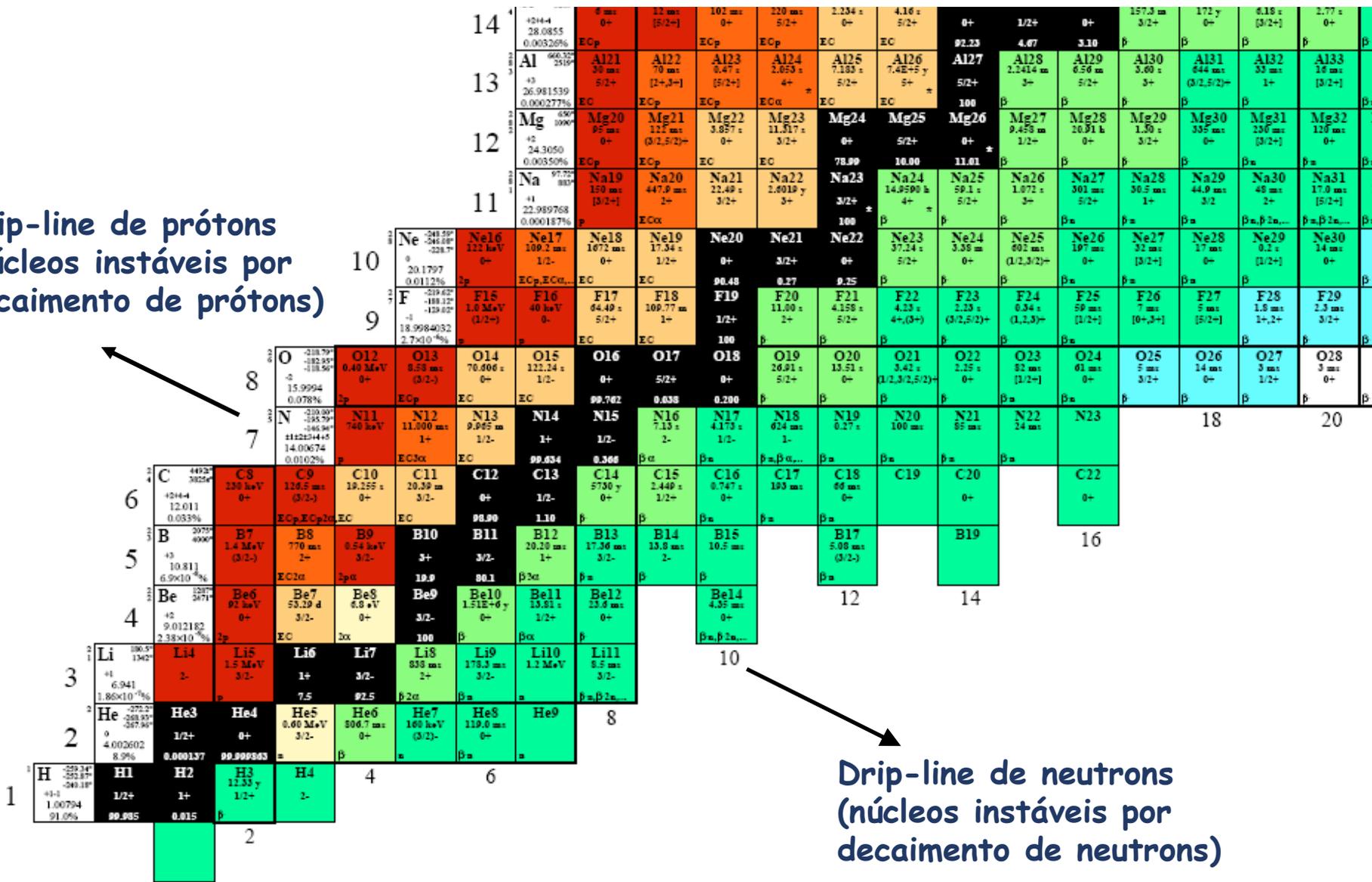
Rutherford compreendeu que havia realizado a **primeira reação nuclear, ou transmutação artificial**, até então as transmutações observadas eram todas de radioatividade natural.

Disse: **toquei o espírito da matéria.**

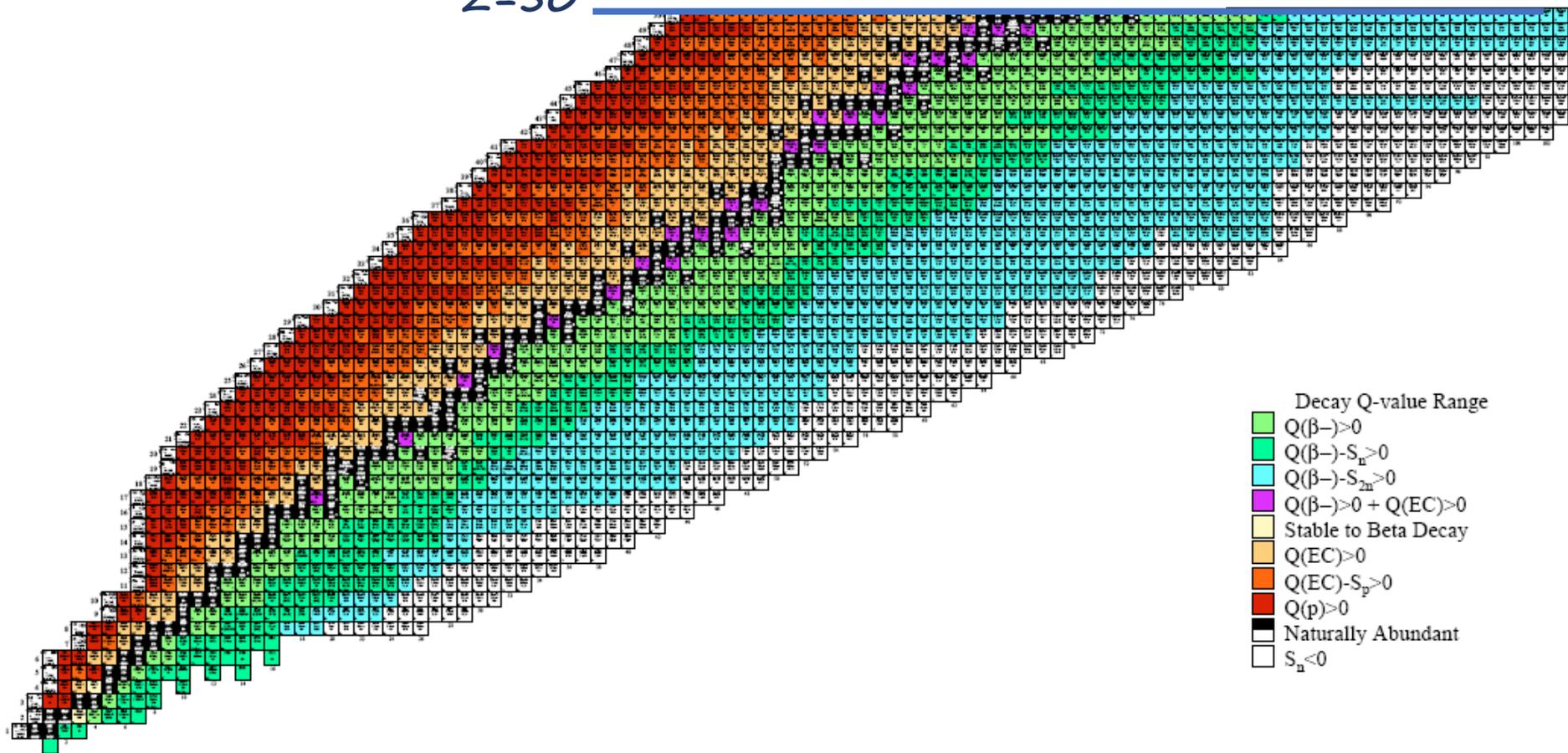
**Ao medir essa reação Rutherford se tornou o primeiro alquimista de verdade**



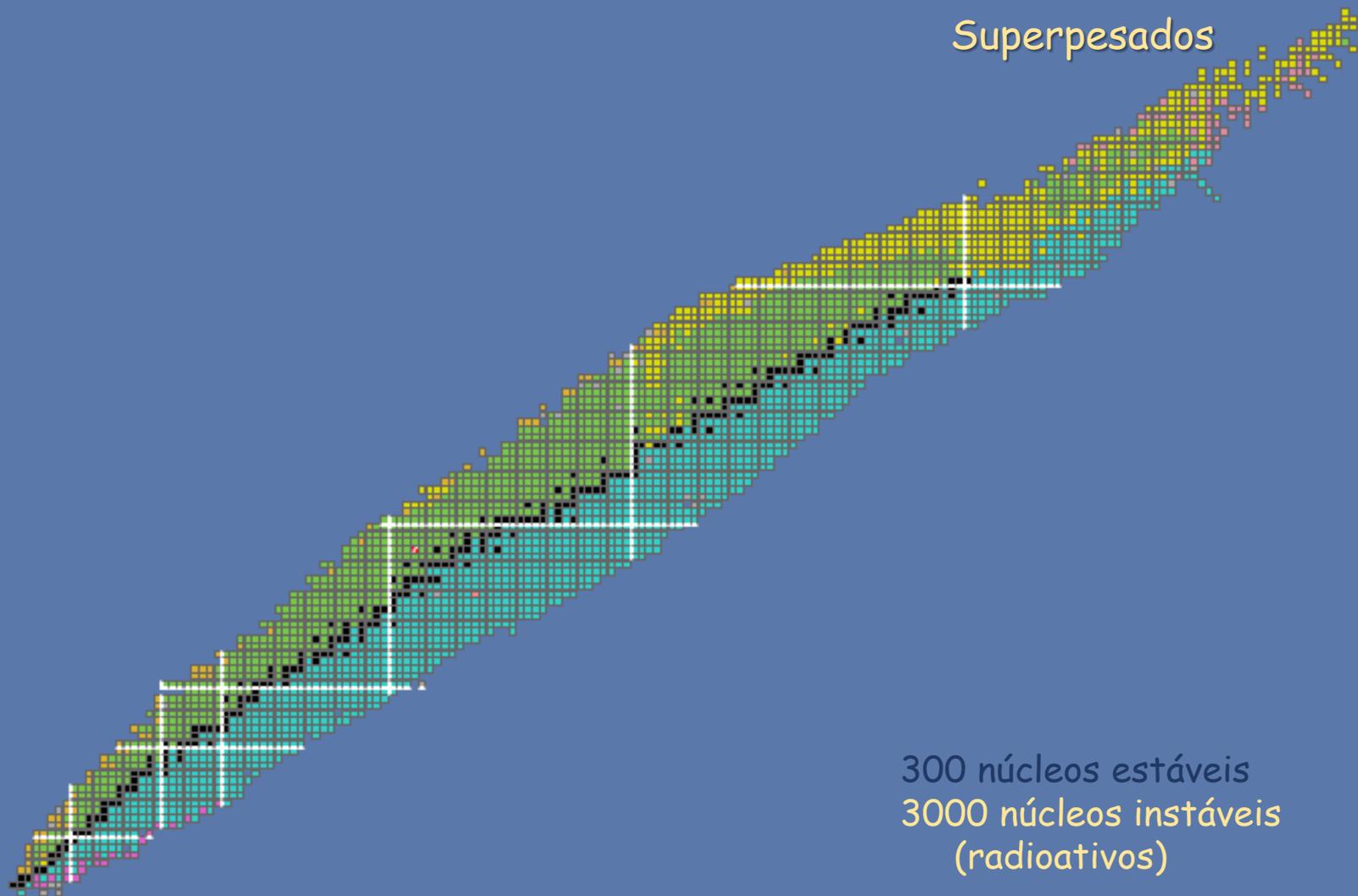
Drip-line de prótons  
(núcleos instáveis por decaimento de prótons)



Z=50



# Carta de núclídeos completa



# Carta de nuclídeos e astrofísica

**s-process:**

captura lenta de neutrons

**r-process:**

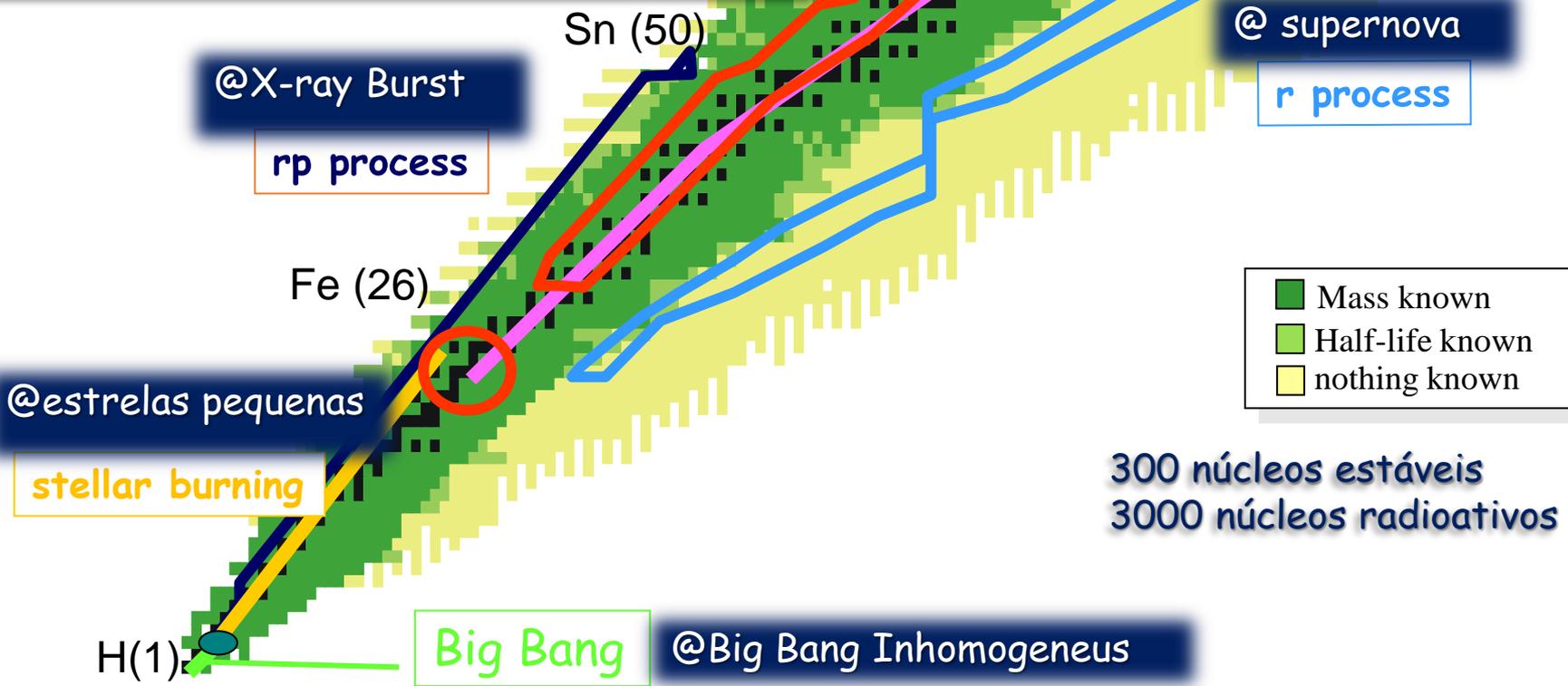
captura rápida de neutrons (explosiva)

**p-process:**

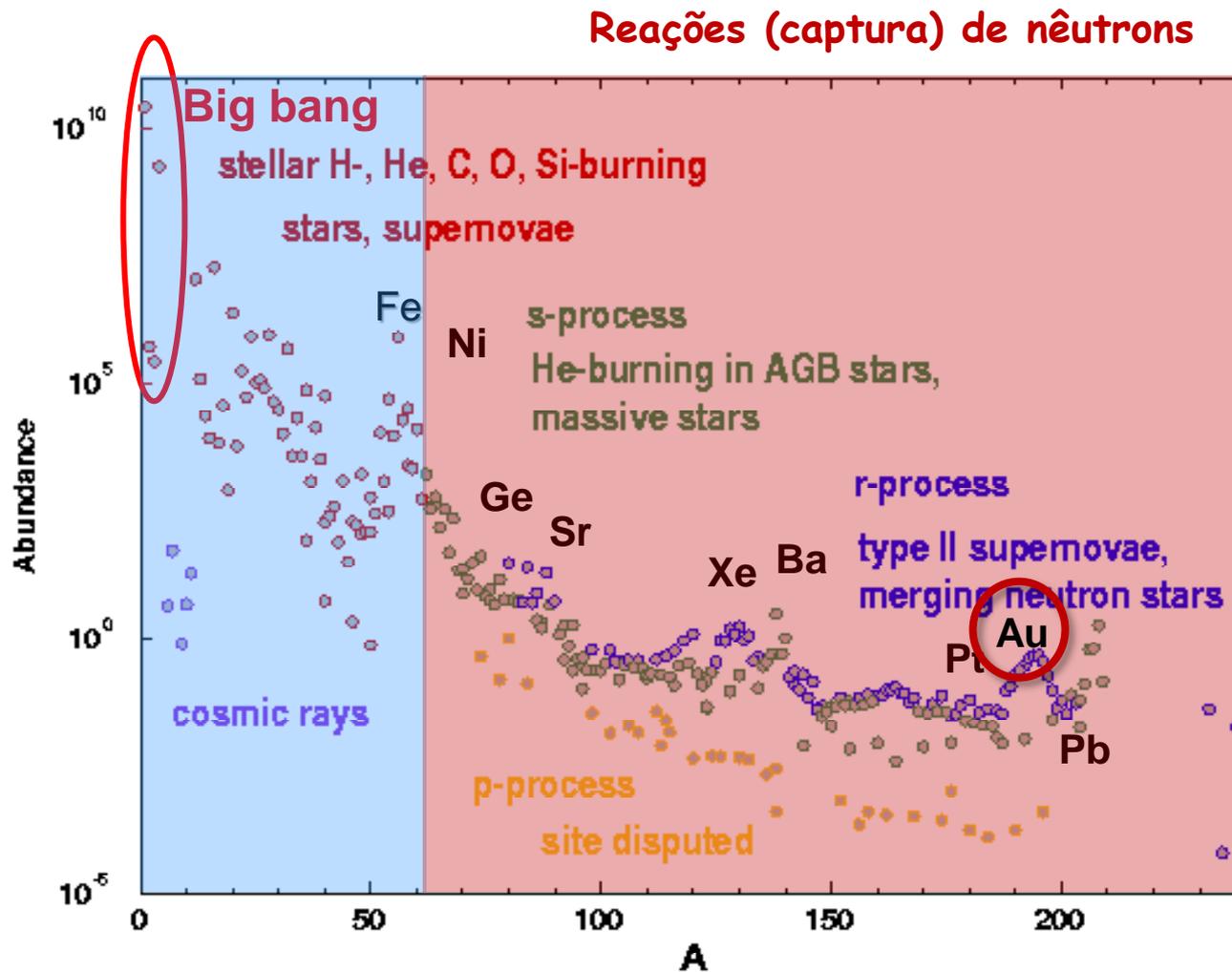
captura lenta de prótons

**rp-process:**

captura rápida de prótons (explosiva)



# Abundância dos elementos



Reações captura de prótons  
(partículas carregadas)

Processo-r  
Explosão de supernova tipo II  
Colisões de estrela de neutrons

A composição química das estrelas muda com reações nucleares e evolução estelar.

Problema: evolução estelar é muito lenta.

Em 5.000 anos de observação as estrelas não mudaram nada.

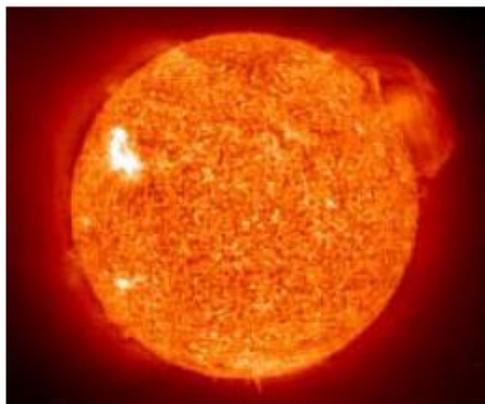
Imaginem alienígenas querendo estudar a evolução humana olhando apenas por dois minutos uma praça cheia de gente, com idades e raças diferentes.



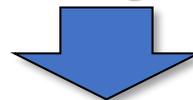
Precisamos de modelos de evolução estelar e variação da composição química.

# O que ocorre dentro das estrelas

Estrelas são sistemas que se autoregulam.



Reações nucleares geram energia e calor.



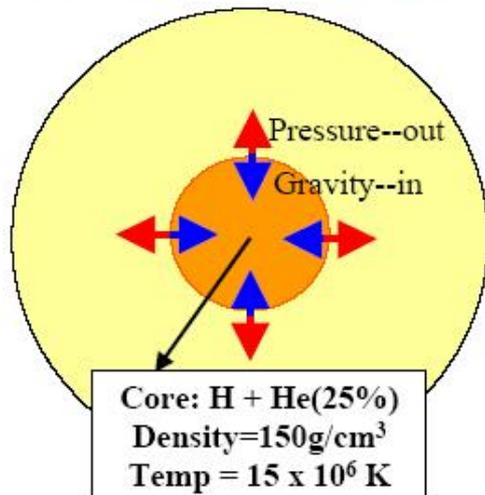
Com isso aumenta a pressão e empurra a matéria para fora.

A gravidade é uma força atrativa que exerce uma força no sentido de manter a matéria da estrela agrupada.

O balanço desses dois processos determina a evolução de uma estrela



Precisamos então entender como a energia é gerada nas estrelas pelas reações nucleares



# Astrofísica é interdisciplinar

Astrofísica  
(hidrodinâmica)

Física Nuclear

Experiências  
(medidas em laboratório)  
(feixes keV-GeV)

Astronomia  
(Observações)



- ☐ Cálculos de network de reações.

- ☐ Modelo de nucleossíntese

- ☐ Modelo de evolução das estrelas

- ☐ Dados de massa

- ☐ Taxa de reações

- ☐ Decaimentos

- ☐ Observações na Terra,

- ☐ Satélites

- ☐ Meteoritos

Modelos estelares



Previsões

Emissão partículas, abundâncias, evolução química, geração energia, luminosidade



Observações

Espectroscópicas, luminosidade, abundâncias em meteoritos

# Contribuição da Física Nuclear para Astrofísica

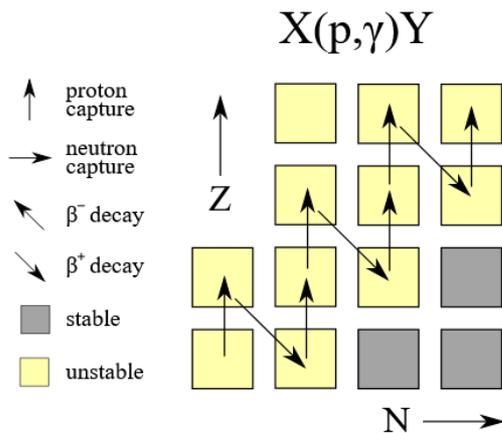
- ❑ Determinar probabilidade da reação de captura em função da energia relativa.
- ❑ Determinar energia, largura e spin das ressonâncias em núcleos.

Taxas de reações

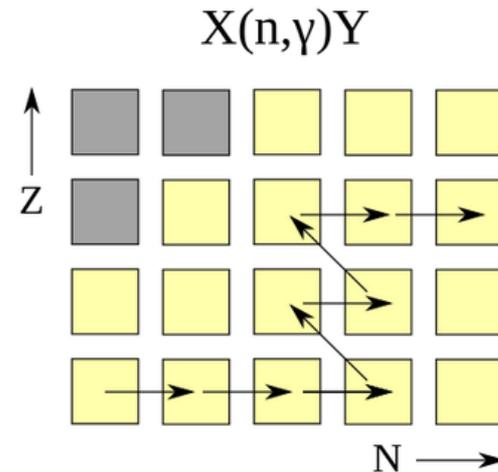
Reação nuclear de captura de nêutrons ou prótons:



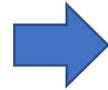
**Captura de prótons**  
Aumenta o número atômico



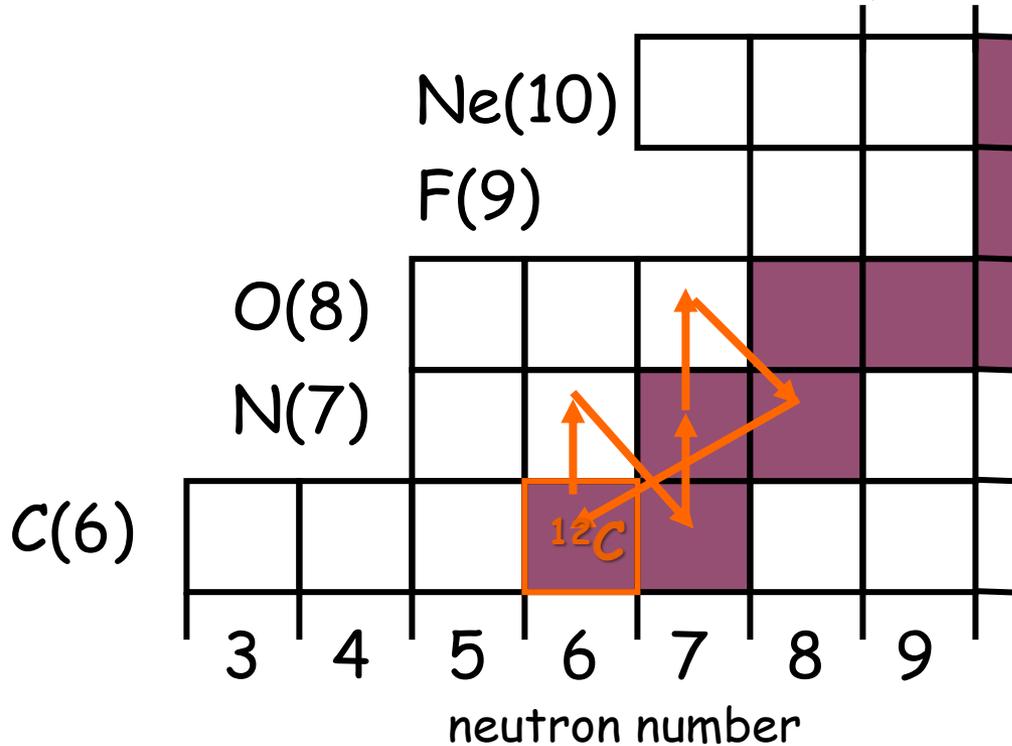
**Captura de nêutrons**  
Aumenta isótopo



Ciclos de reações nas estrelas



Ciclo CNO



Pre requisito existência de C, N e O como catalizadores



Conversão de 4-protons em uma partícula  $\alpha$  ( ${}^4\text{He}$ ) gerando energia



## Network de reações que ocorrem no Sol Ciclo pp-I



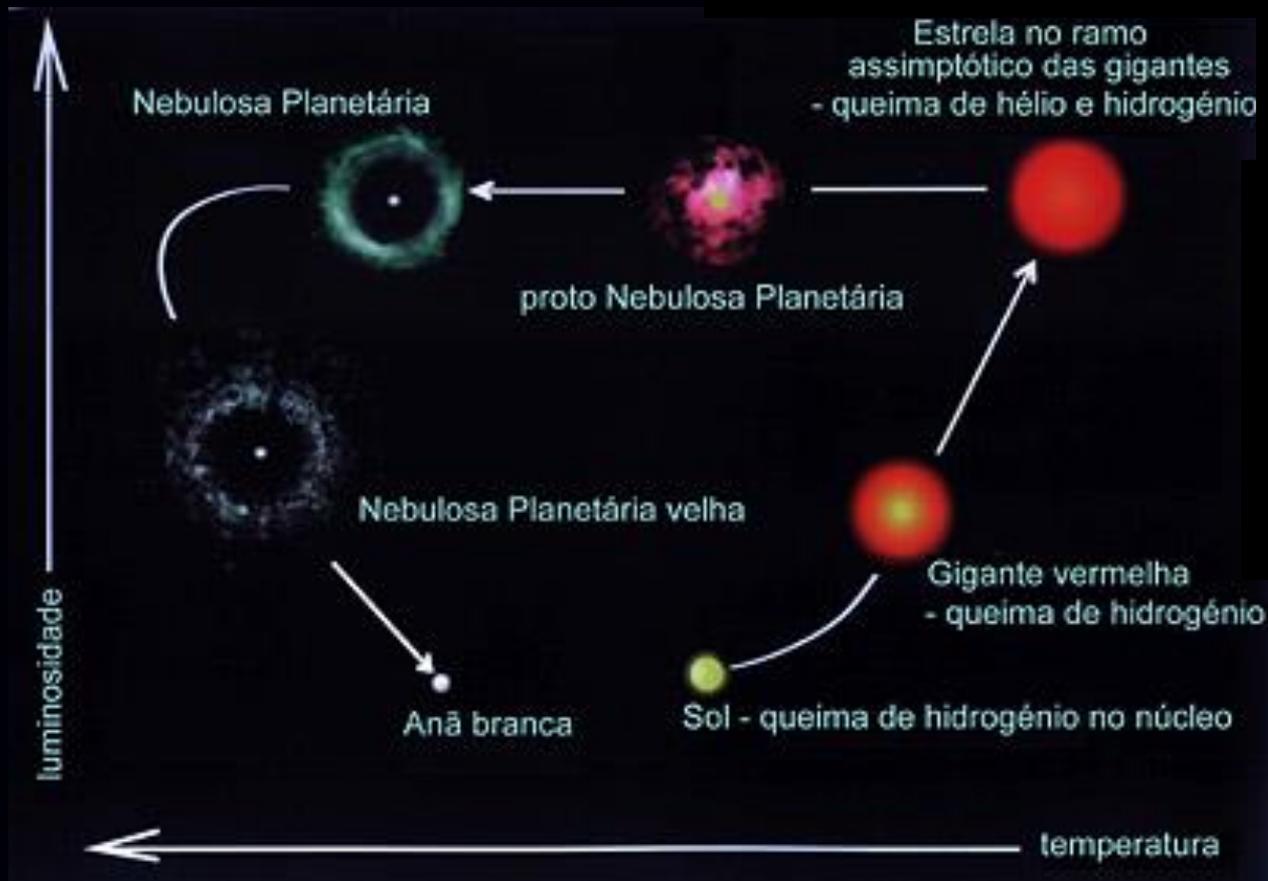
$$\frac{d^1\text{H}}{dt} = -2 \cdot \frac{1}{2} \cdot Y_{1\text{H}} \cdot Y_n \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{1\text{H}(n,\gamma)} + Y_{3\text{He}} \cdot Y_{3\text{He}} \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{3\text{He}({}^3\text{He},2p)}$$

$$\frac{d^2\text{H}}{dt} = -Y_{2\text{H}} \cdot Y_{1\text{H}} \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{2\text{H}(p,\gamma)} + Y_{1\text{H}} \cdot Y_n \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{1\text{H}(n,\gamma)}$$

$$\frac{d^3\text{He}}{dt} = -2 \cdot \frac{1}{2} Y_{3\text{He}} \cdot Y_{3\text{He}} \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{3\text{He}({}^3\text{He},2p)} + Y_{2\text{H}} \cdot Y_{1\text{H}} \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{2\text{H}(p,\gamma)}$$

$$\frac{d^4\text{He}}{dt} = 2 \cdot \frac{1}{2} Y_{3\text{He}} \cdot Y_{3\text{He}} \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{3\text{He}({}^3\text{He},2p)}$$

# Evolução de uma estrela do tamanho do Sol



NGC 3132

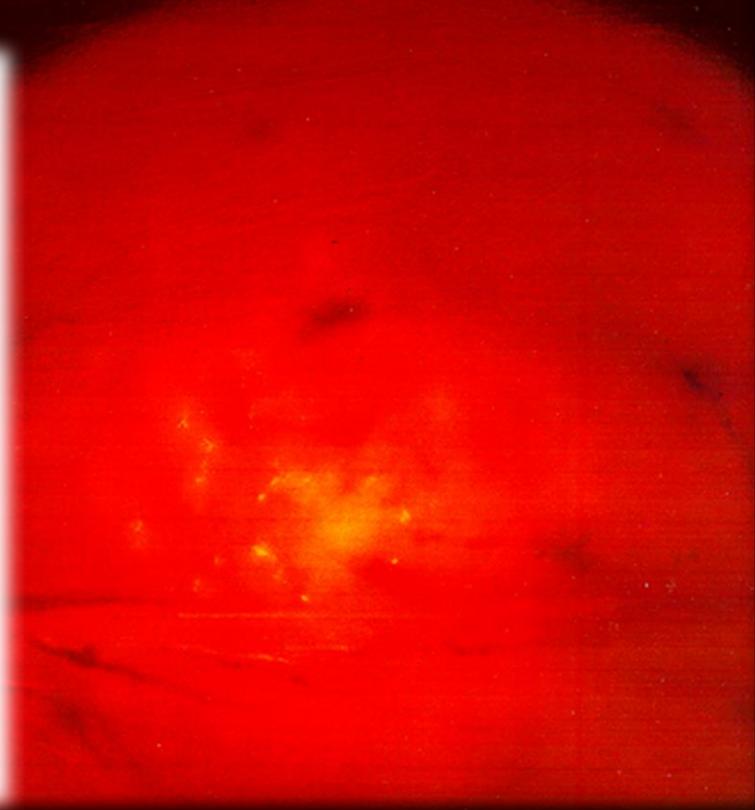
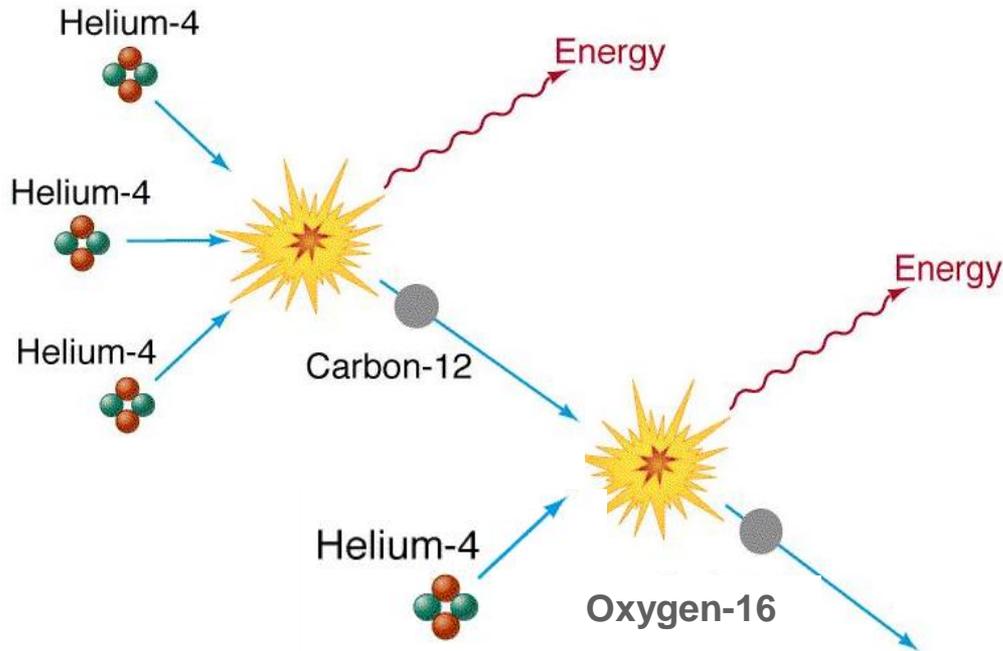


Ring Nebula M57



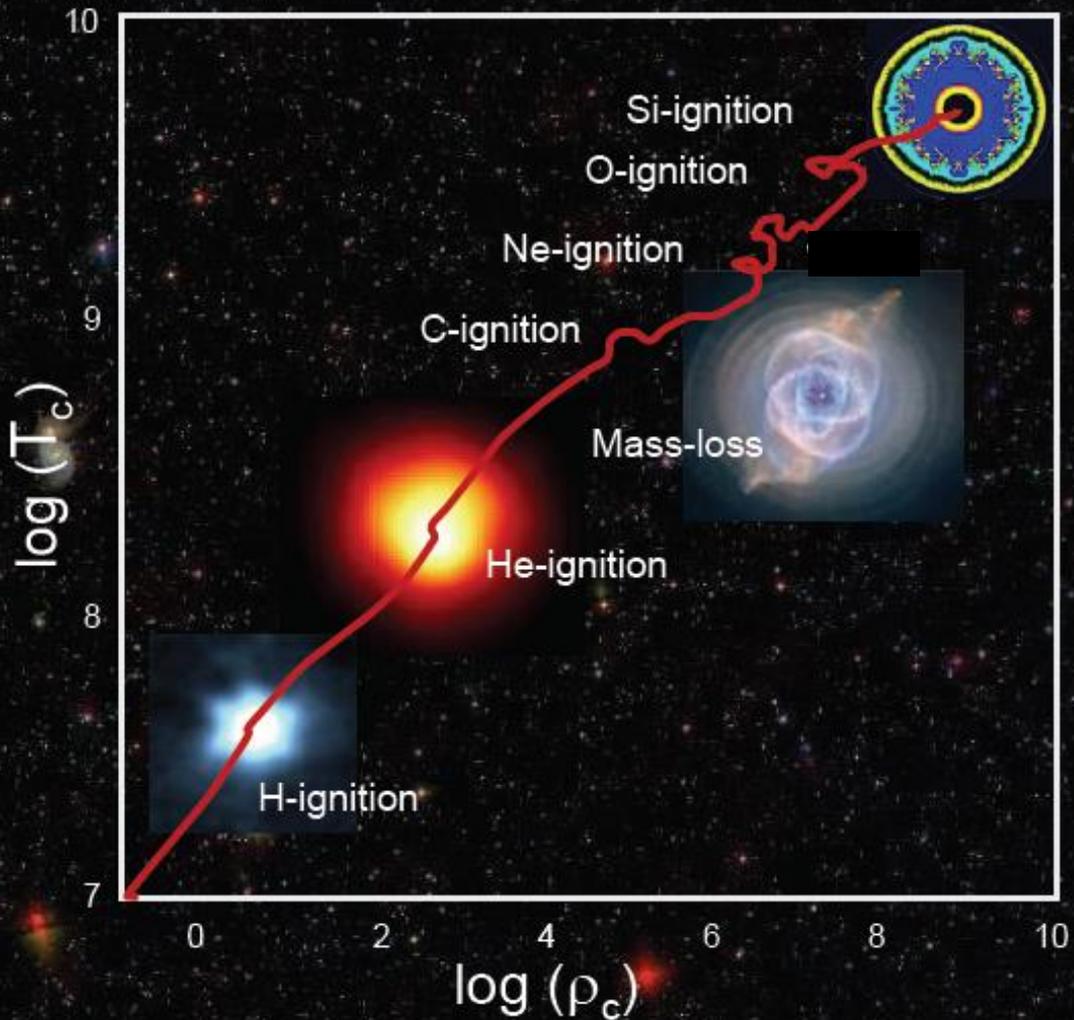
## Queima de Hélio em estrelas - Gigantes Vermelhas

Reação mais importante - Captura tripla de alfa -  $3\alpha \Rightarrow {}^{12}\text{C} + 7.96 \text{ eV}$



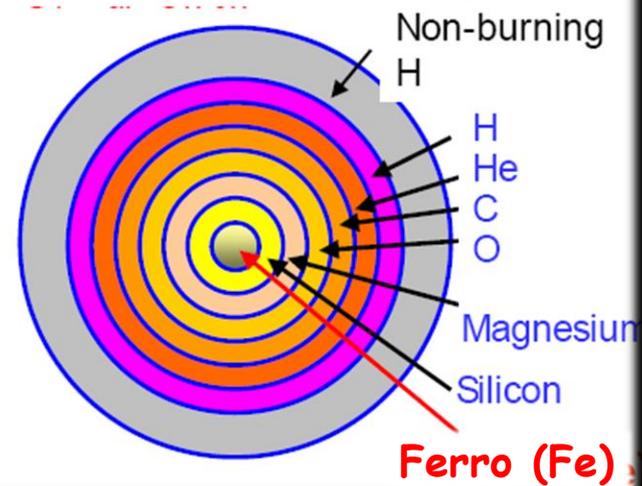
1954 Fred Hoyle (Sir Fred Hoyle) percebeu que para haver carbono no universo era preciso uma ressonância no  ${}^{12}\text{C}$  a uma energia de excitação de  $\sim 7.7 \text{ MeV}$ . Essa ressonância ficou conhecida como Hoyle state.

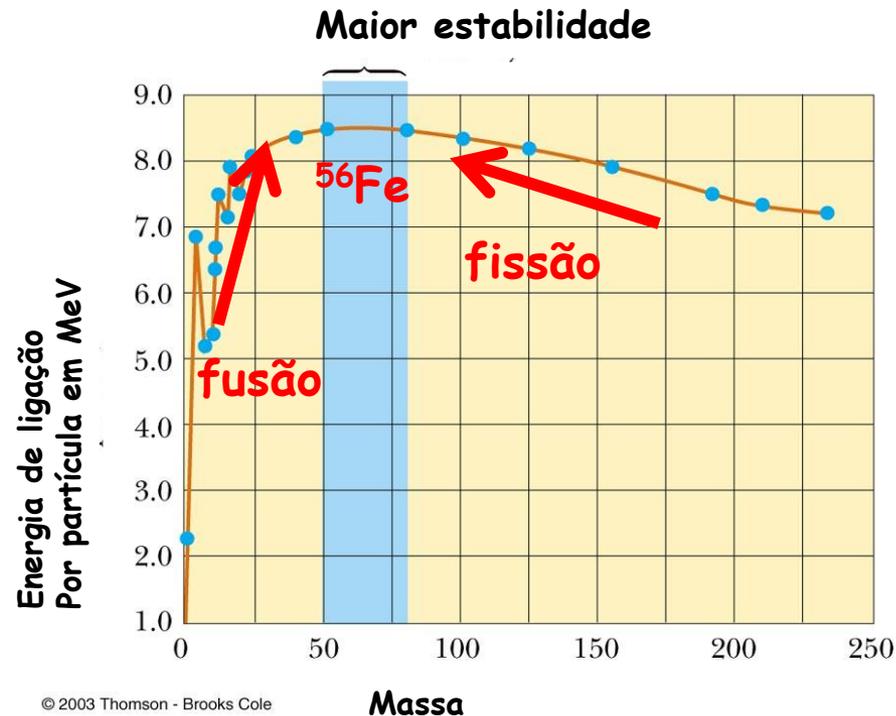
**Esse fato deu origem a Astrofísica Nuclear**



- Queima de hidrogênio
- Queima de Hélio
- Queima de carbono
- Queima de Neonio
- ...

## The Stellar Onion





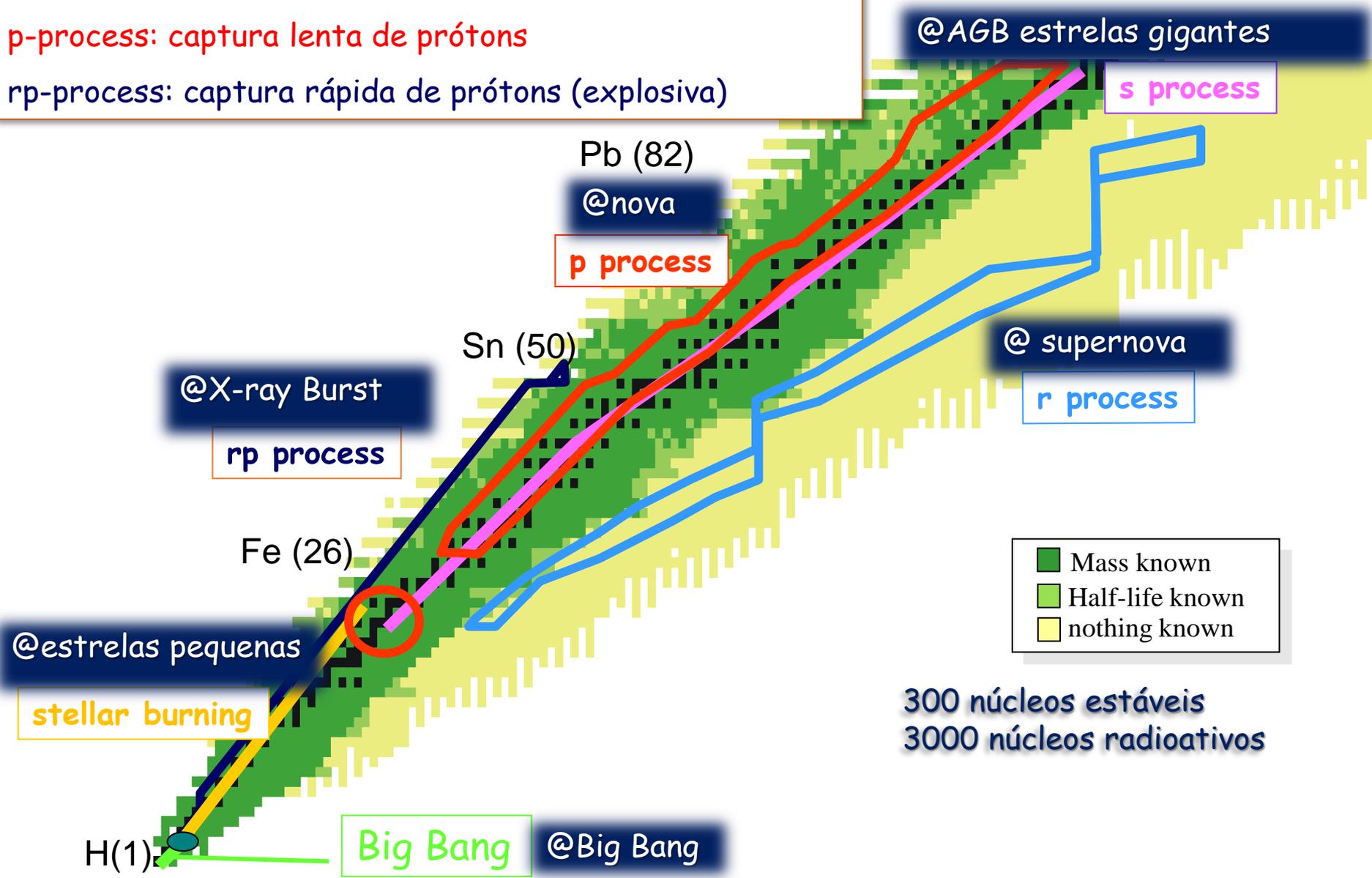
- ❑ Reações com  $Q > 0$  para capturas de  $A < 56$  e  $Q < 0$  para capturas com  $A > 56$
- ❑ Equilíbrio para  $A=56$   $^{56}\text{Fe}$  e  $^{56}\text{Ni}$
- ❑ Iron Peak na distribuição de abundância.

s-process: captura lenta de neutrons

r-process: captura rápida de neutrons (explosiva)

p-process: captura lenta de prótons

rp-process: captura rápida de prótons (explosiva)



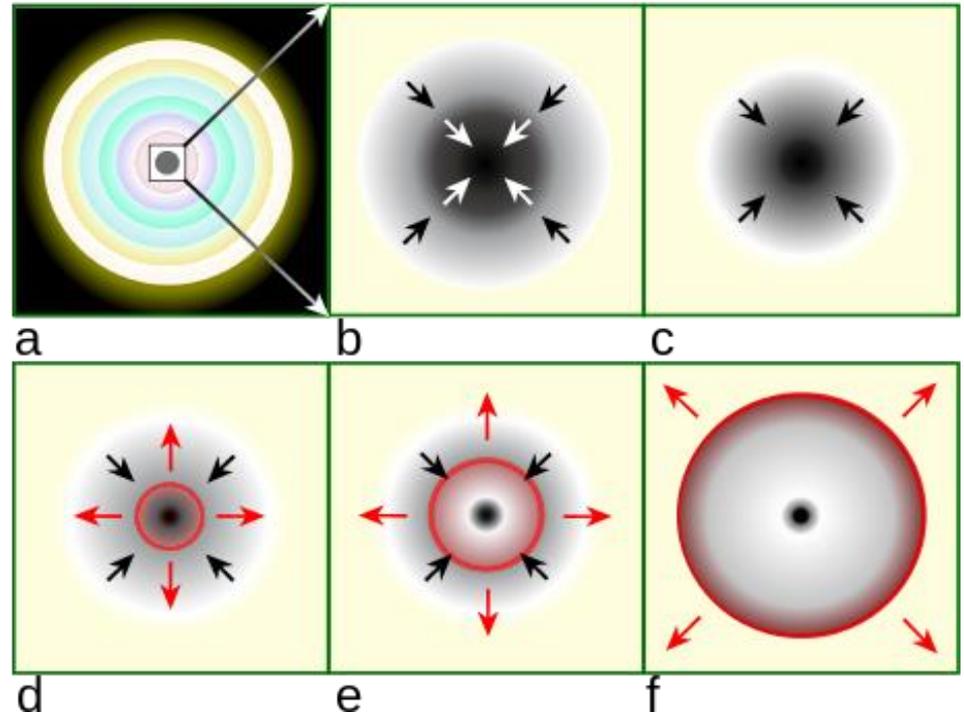
- ❑ Nova
- ❑ Supernova
- ❑ kilonovas



- ❑ Tipo- Ia - Explosão devido a agregção de matéria em sistemas binários.
- ❑ Tipo Ib, Ic e II - Explosão devido ao colapso do caroço de estrelas massivas.

## Mecanismo de explosão de supernova tipo-II

- ❑ Estrela com massa  $M > 8M_{\odot}$  começa a colapsar formando um caroço denso de Ferro.
- ❑ Se a massa desse caroço de Ferro inerte for maior que o limite de massa dado pelo limite de Chandrasekhar, o caroço colapsa
- ❑ O colapso do caroço provoca uma subsequente explosão.

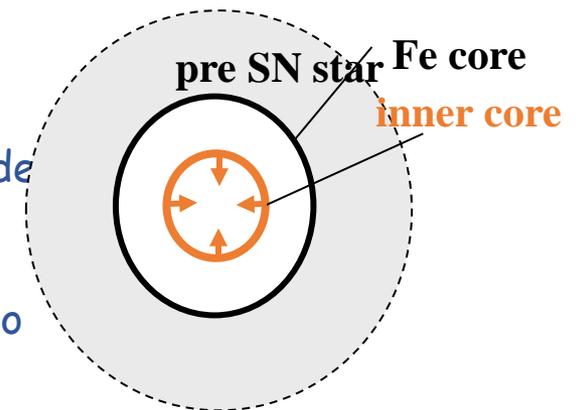
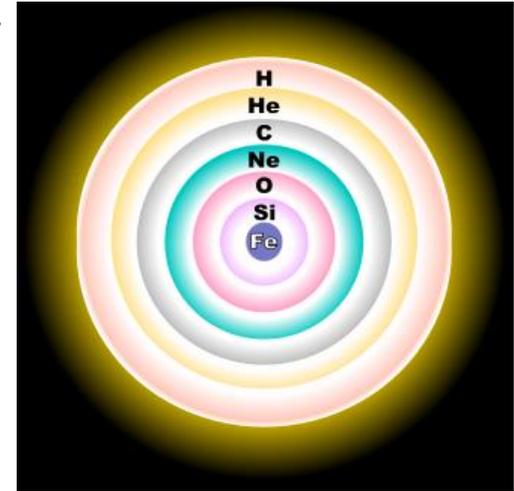


- ❑ A compressão causa uma onda de choque expulsando matéria
- ❑ Onda de choque de matéria (principalmente neutrinos) em vermelho.
- ❑ Processos explosivos (interação com neutrinos).
- ❑ 90% da matéria é expelida.
- ❑ Sobra um remanescente degenerado (estrela de neutrons ou buraco negro).
- ❑ Densidade maior que do núcleo  $10^{14}\text{g/cm}^3$ .

# Estágio final de uma estrela

- ❑ A estrela com massa  $M > 8M_{\odot}$  termina como um caroço denso
- ❑ A massa e composição final do caroço depende da massa inicial e dos estágios de queima anteriores
- ❑ Dependendo da massa esse caroço pode sobreviver ou colapsar
- ❑ Para estrelas massivas podemos chegar a ter um caroço de Ferro inerte (sem reações e sem produção de energia).
- ❑ Se a massa desse caroço de Ferro inerte for maior que o limite de massa dado pelo limite de Chandrasekhar, o caroço colapsa.
- ❑ A queima de Si no envelope externo joga mais Fe no caroço até que o limite de  $1.4M_{\odot}$  (Chandrasekhar limit) é alcançado
- ❑ Esse limite corresponde a uma massa onde o caroço não consegue suportar a quantidade de plasma devido a pressão de degenerência de elétrons e começa a capturar elétrons.
- ❑ A captura de eletrons provoca uma desastibilização do caroço
- ❑ Esse caroço colapsa provocando uma subsequente explosão.

$$M_{ch} = 1.44M_{\odot}$$





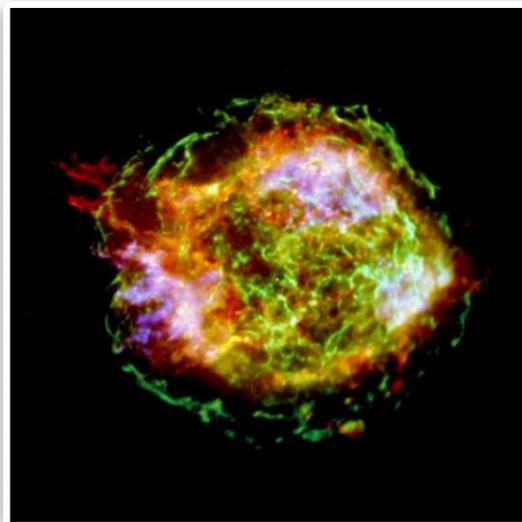
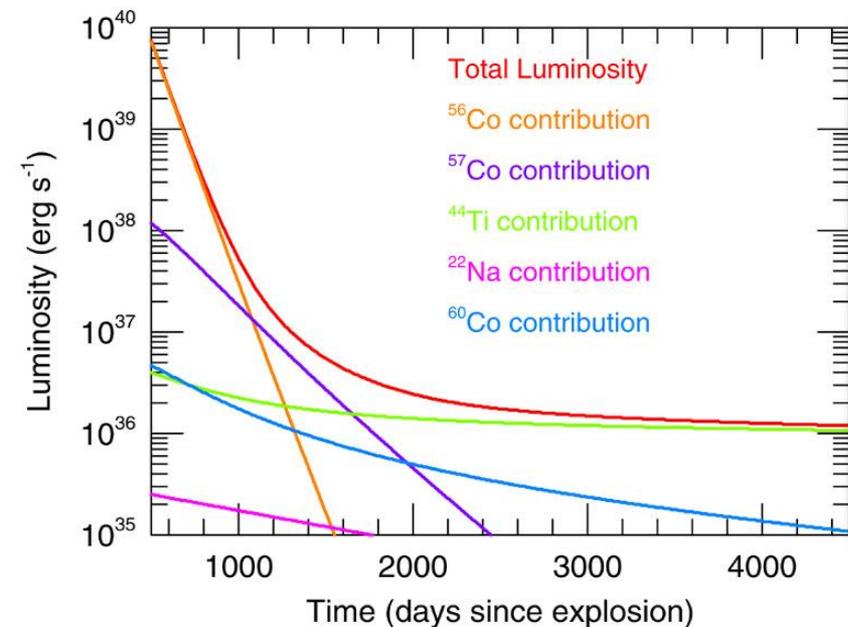
SN 1987A

Tarantula Nebula in LMC (constellation Dorado, southern hemisphere)

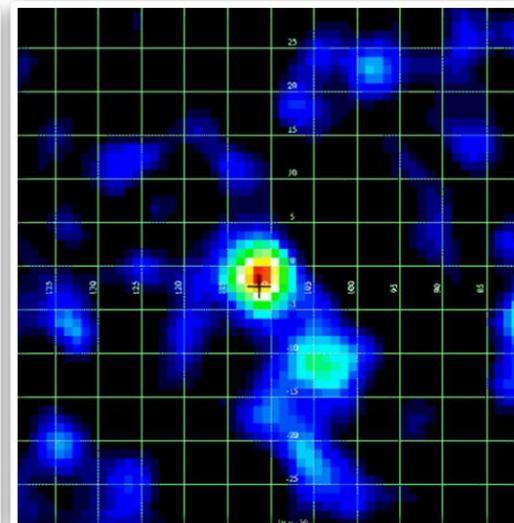
size: ~2000ly (1ly ~ 6 trillion miles), distance: ~180000 ly

- Luminosidade de uma supernova entre  $L_0^9$  a  $L_0^{10}$
- Frequência de 1 a 10 por século por Galaxia

# Curva de luminosidade - Decaimento radioativo

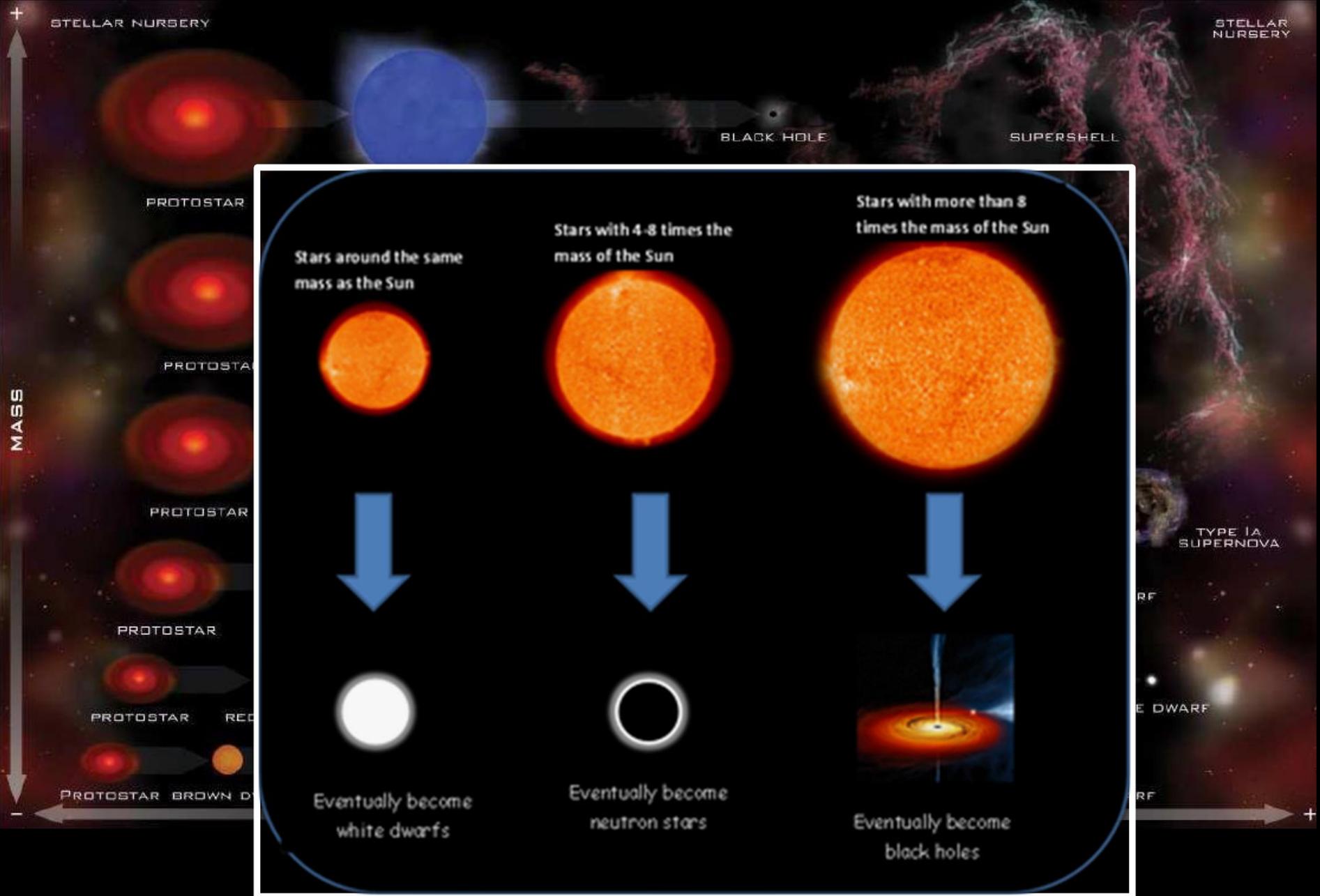


supernova remnant called Cassiopeia A .



Raios gama emitido do <sup>44</sup>Ti da Supernova (Cassiopeia A)

- ❑ <sup>44</sup>Ti vem da queima explosiva do Oxigênio e Silício nas camadas mais internas e intermediária de uma supernova
- ❑ <sup>56</sup>Ni em <sup>56</sup>Fe é o grande responsável pelo brilho após a explosão de uma supernova.



# Estrela de neutrons

- ❑ Massa de uma estrela de nêutrons  $M= 2.2$  a  $2.9$  massa solar mas com raio= $10$  Km
- ❑ As propriedade de matéria em estrelas de neutrons ainda não são bem entendidas.
- ❑ No interior temos nêutrons e estado superfluido e prótons num estado supercondutor.
- ❑ A crosta interna: núcleos pesados, nêutrons livres e elétrons relativísticos e degenerados.
- ❑ Na crosta externa: núcleos pesados e elétrons.

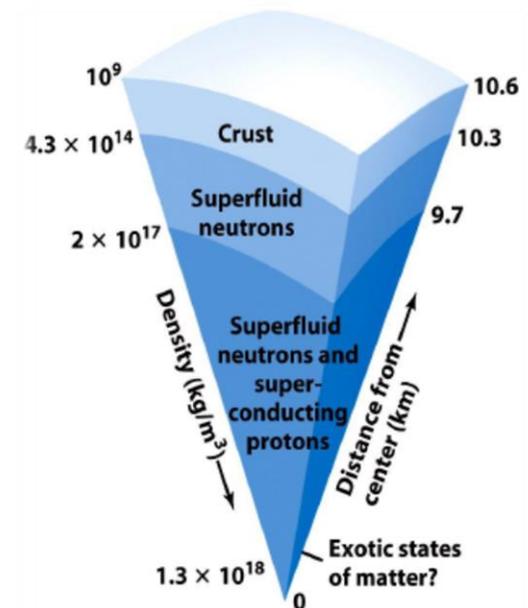
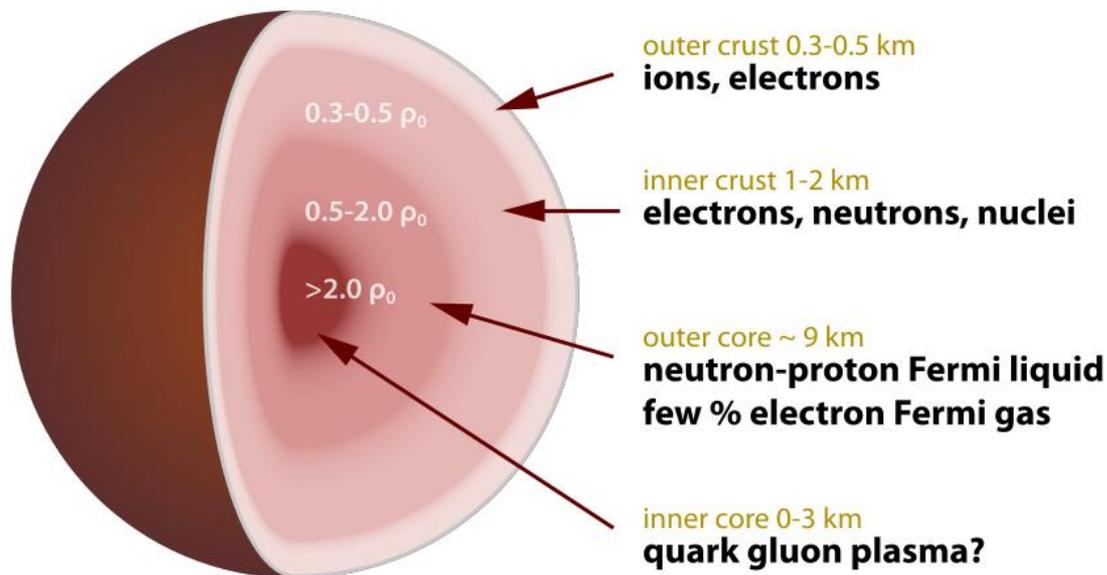
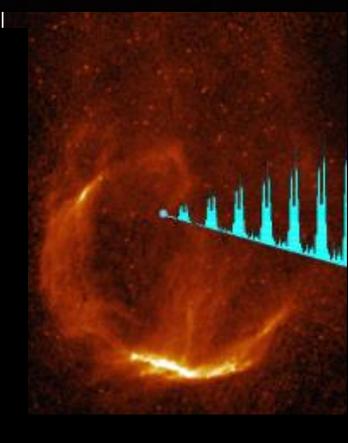
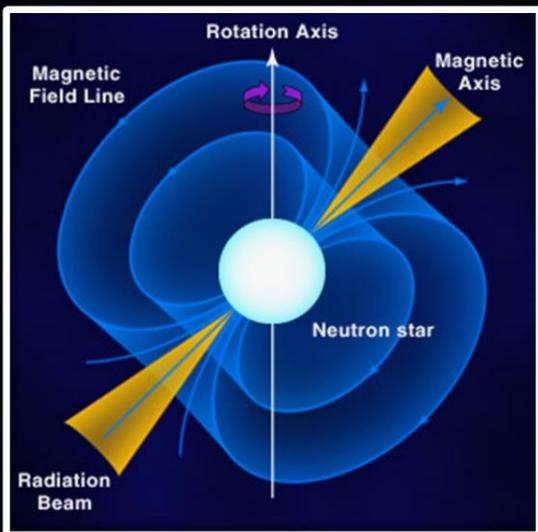
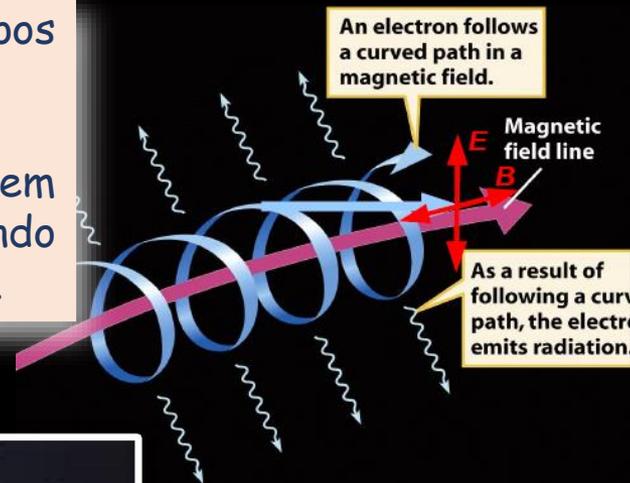


Figure 21-9  
Universe, Eighth Edition  
© 2006 W. H. Freeman and Company

# Estrela de neutrons

Estrelas de neutrons: alta rotação e altíssimos campos magnéticos  $10^8$  Tesla (Terra  $60 \times 10^{-6}$  T Sol  $10^{-4}$  T).

Os elétrons emitidos pela estrela de neutrons fazem caminhos helicoidais em torno das linhas de campo emitindo radiação (na faixa do raio-X) na direção do seu movimento.



Em 1967, uma estudante chamada **Jocelyn Bell** encontrou uma fonte estranha de ondas de rádio na Nebulosa Cygnus piscando a cada 1.33 s. Estrelas que fazem isso são chamadas **PULSAR**.



- ❑ Nova
- ❑ Supernova
- ❑ kilonovas

- ❑ Kilonova é o evento que se origina da colisão de duas estrelas de neutrons.
- ❑ Essa colisão produz short *Gamma-Ray Burst* (GRB): emissão explosiva de ondas de raios gama que dura milisegundos a algumas horas.
- ❑ Depois emissão de raio-X, ultravioleta, optico, infravermelho, radio



Ilustração mostra duas estrelas de nêutrons colidindo (Foto: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet)

EGO - Virgo

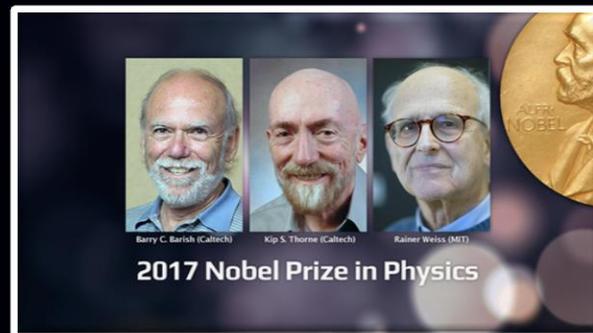
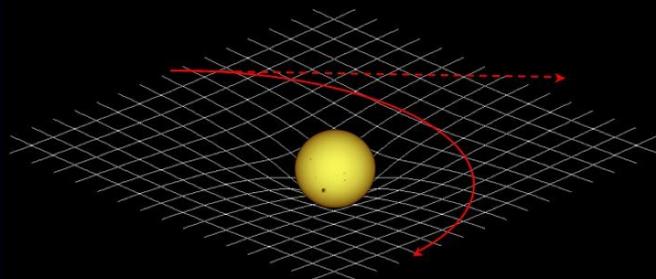


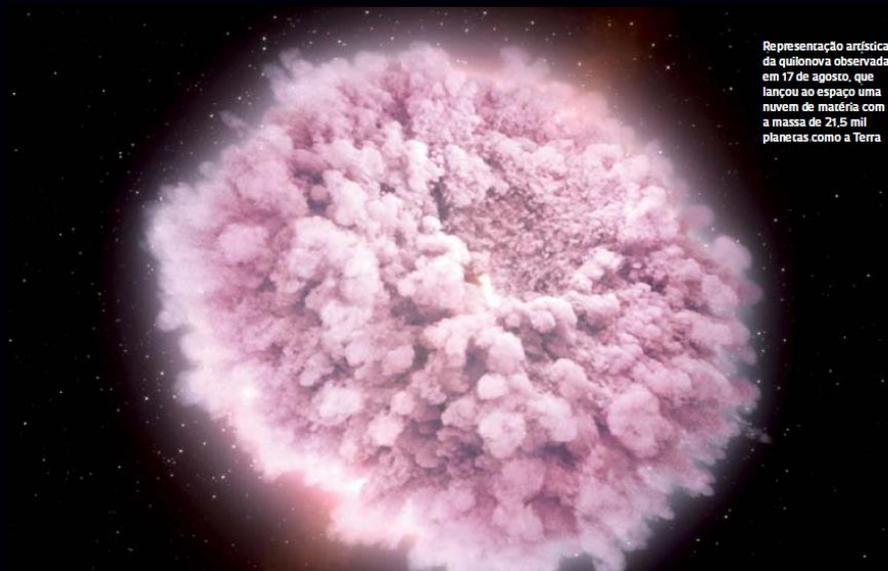
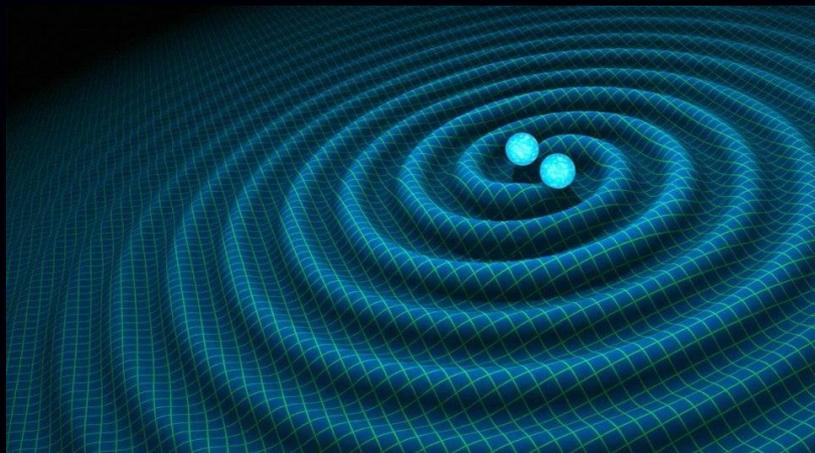
GW170817

FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN  
GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

- ❑ VIRGO: detecção direta de ondas gravitacionais em Pisa na Italia.
- ❑ O LIGO (Laser Interferometer Gravitational -Wave) localizado em duas cidades dos Estados Unidos.
- ❑ Essas ondas gravitacionais seriam perturbações do espaço-tempo viajando com a velocidade da luz - subprodutos da teoria da gravidade geral de Einstein.
- ❑ Ondas gravitacionais só poderiam ser geradas por eventos gigantescos, tais como colisões de estrelas de neutrons ou colisões de buracos negros.
- ❑ Evento ocorreu a 1,3 bilhões de anos-luz da Terra

A detecção das ondas gravitacionais deram o premio  
Novel aos cientistas: Weiss, Barish e Thorne





Representação artística da quilonova observada em 17 de agosto, que lançou ao espaço uma nuvem de matéria com a massa de 21,5 mil planetas como a Terra

- ❑ LIGO e VIRGO foram responsáveis pela primeira detecção de ondas gravitacionais geradas pela colisão de duas estrelas de neutrons.
- ❑ É o maior evento astronomico dos últimos tempos.
- ❑ A dificuldade era localizar onde o evento dessa dimensão ocorreria no espaço através da detecção de ondas gravitacionais.
- ❑ Uma vez determinado a posição vários telescópios foram direcionados e detecção simultanea de Ondas eletromagnética (raio-X, raio-Gamma, infravermelho, optico) foi possível.
- ❑ Kilonova, mais bem medida até agora, gerando uma quantidade enorme de dados.

# Processo-r (captura rápida de nêutrons)

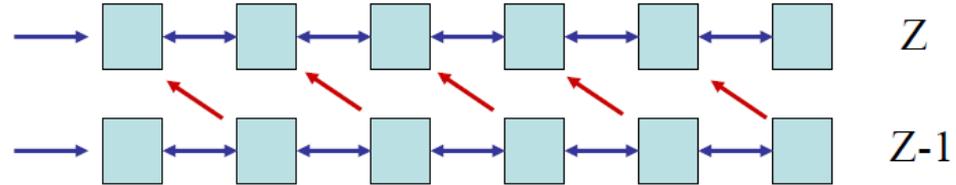
❑ Acredita-se o processo-r (captura rápida de nêutrons) ocorra tanto em explosões de supernova tipo-II como na colisão de estrelas de nêutrons.

❑ Condições para que ocorra o processo-r:

❑ É preciso ter uma boa quantidade de neutrons  $\frac{n_p}{n_p + n_n} \approx 0.4$

❑ Cálculos do processo-r envolve network de várias reações de captura acopladas.

$$\frac{dY_{\frac{A}{Z}X}}{dt} = Y_{\frac{A+1}{Z}X} \cdot \lambda_{\frac{A+1}{Z}X(\gamma,n)} + Y_{\frac{A}{Z-1}X} \cdot \lambda_{\frac{A}{Z-1}X(\beta^-)} + Y_{\frac{A-1}{Z}X} Y_n \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{\frac{A-1}{Z}X(n,\gamma)} - Y_{\frac{A}{Z}X} Y_n \cdot \rho \cdot N_A \langle \sigma v \rangle_{\frac{A}{Z}X(n,\gamma)} - Y_{\frac{A}{Z}X} \cdot \lambda_{\frac{A}{Z}X(\beta^-)} - Y_{\frac{A}{Z}X} \cdot \lambda_{\frac{A}{Z}X(\gamma,n)}$$



❑ Depende da massa e energia de ligação de vários elementos (que ainda não conhecemos).

# Nucleossíntese com o processo-r (captura rápida e explosiva de neutrons)

# JINA

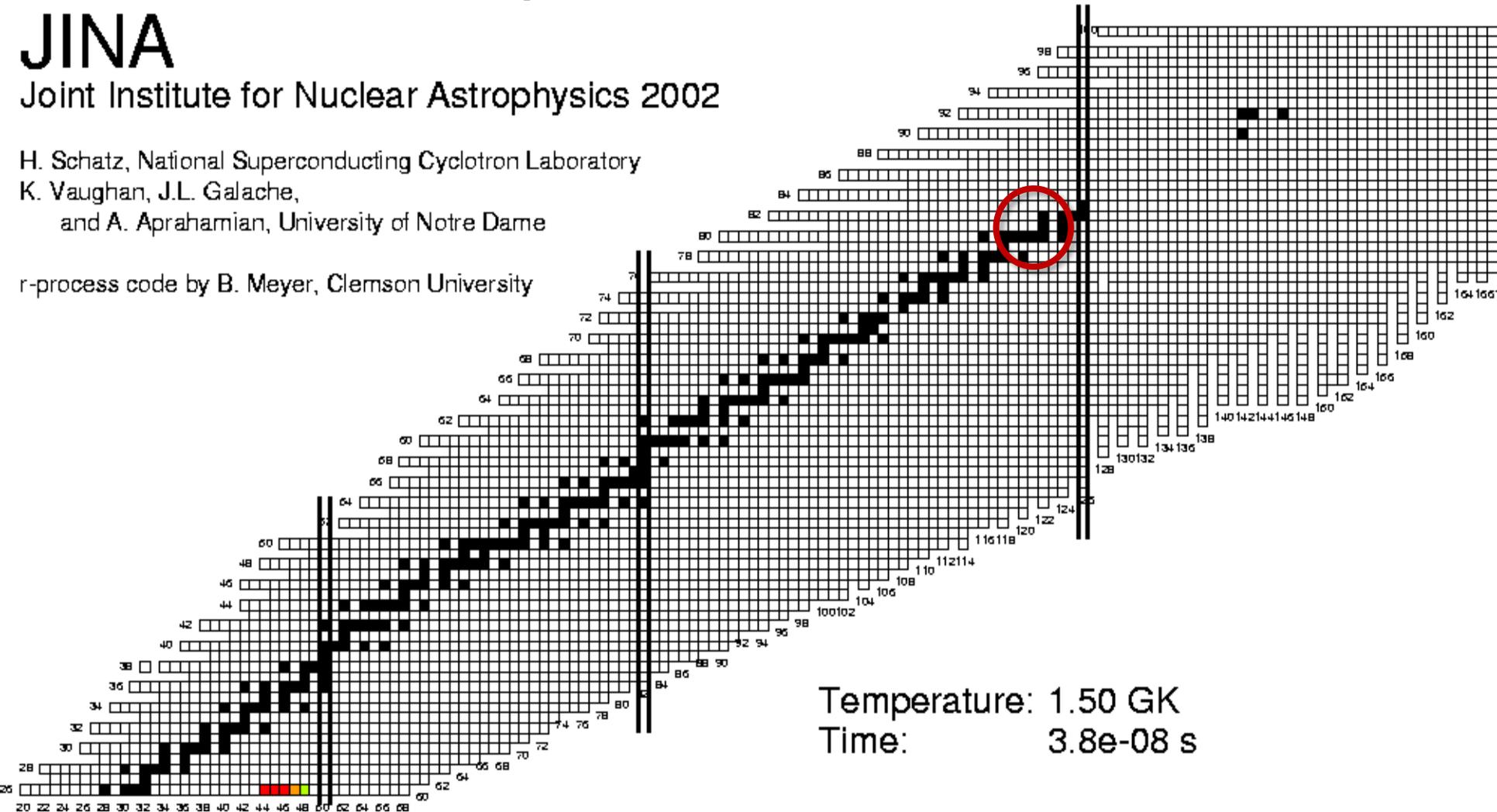
Joint Institute for Nuclear Astrophysics 2002

H. Schatz, National Superconducting Cyclotron Laboratory

K. Vaughan, J.L. Galache,

and A. Aprahamian, University of Notre Dame

r-process code by B. Meyer, Clemson University



Closed shell nuclei have small  $S_n$ , enrichment around  $N=50, 82, 126$

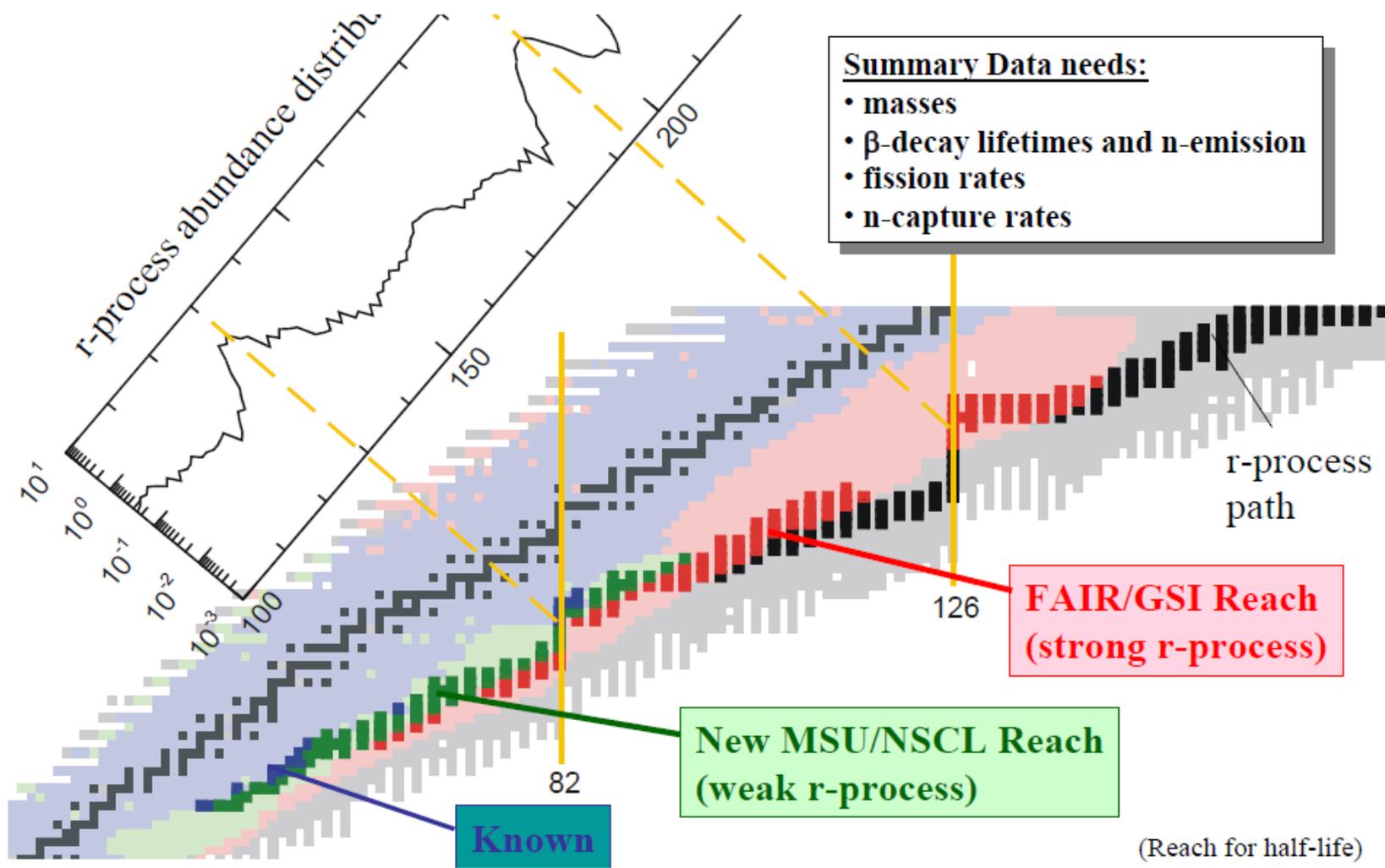
## Produção de Ouro e Urânio

Table 1: Key Properties of GW170817

Property	Value	Reference
Chirp mass, $\mathcal{M}$ (rest frame)	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$	1
First NS mass, $M_1$	$1.36 - 1.60 M_{\odot}$ (90%, low spin prior)	1
Second NS mass, $M_2$	$1.17 - 1.36 M_{\odot}$ (90%, low spin prior)	1
Total binary mass, $M_{\text{tot}} = M_1 + M_2$	$\approx 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$	1
Observer angle relative to binary axis, $\theta_{\text{obs}}$	$11 - 33^{\circ}$ (68.3%)	2
Blue KN ejecta ( $A_{\text{max}} \lesssim 140$ )	$\approx 0.01 - 0.02 M_{\odot}$	e.g., 3,4,5
Red KN ejecta ( $A_{\text{max}} \gtrsim 140$ )	$\approx 0.04 M_{\odot}$	e.g., 3,5,6
Light $r$ -process yield ( $A \lesssim 140$ )	$\approx 0.05 - 0.06 M_{\odot}$	
Heavy $r$ -process yield ( $A \gtrsim 140$ )	$\approx 0.01 M_{\odot}$	
Gold yield	$\sim 100 - 200 M_{\oplus}$	8
Uranium yield	$\sim 30 - 60 M_{\oplus}$	8
Kinetic energy of off-axis GRB jet	$10^{49} - 10^{50}$ erg	e.g., 9, 10, 11, 12
ISM density	$10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$	e.g., 9, 10, 11, 12

(1) [LIGO Scientific Collaboration et al. 2017c](#); (2) depends on Hubble Constant, [LIGO Scientific Collaboration et al. 2017d](#); (3) [Cowperthwaite et al. 2017](#); (4) [Nicholl et al. 2017](#); (5) [Kasen et al. 2017](#); (6) [Chornock et al. 2017](#); (8) assuming heavy  $r$ -process ( $A > 140$ ) yields distributed as solar abundances ([Arnould et al., 2007](#)); (9) [Margutti et al. 2017](#); (10) [Troja et al. 2017](#); (11) [Fong et al. 2017](#); (12) [Hallinan et al. 2017](#)

# Dados necessários (massa, ressonâncias, taxas de reações de captura)



Obrigado

Nasa Astrophysics

<https://www.youtube.com/watch?v=ow9JCXy1QdY>

Georgia Tech

<https://www.youtube.com/watch?v=pLivjAoDrTg>

Caltech

<https://www.youtube.com/watch?v=e7LcmWiclOs>