



Universidade Federal do ABC

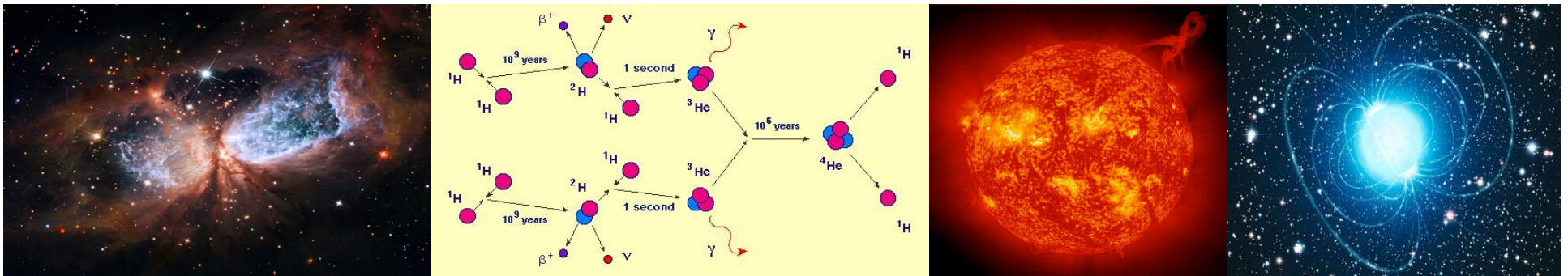
Introdução à Física Estelar

14. Supernovas e Remanescentes

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estelar.html>



Supernovas

Uma Supernova é a **explosão** de uma **estrela** terminando a vida dela.

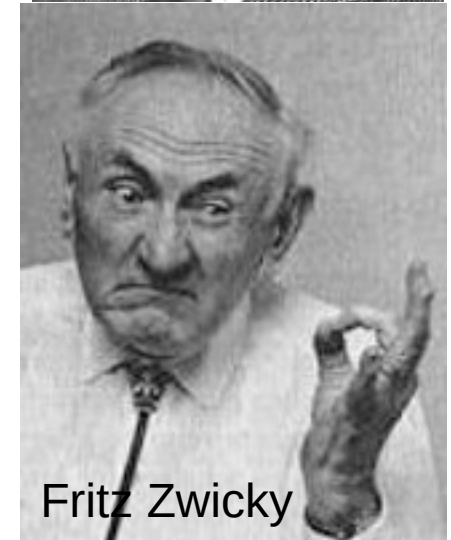
O nome foi inventado pelos astrônomos alemão e suíço Walter Baade e Fritz Zwicky.

Uma Supernova libera da ordem 10^{46} J de **energia**, correspondendo a uma massa de $E/c^2 = 0.06 M_{\odot}$.

Seria necessário queimar $8.6 M_{\odot}$ de hidrogênio para liberar este montante de energia.



Walter Baade



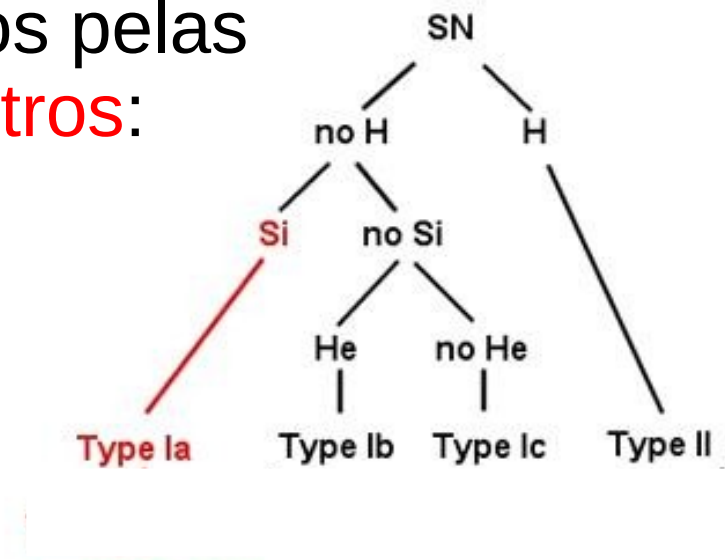
Fritz Zwicky

Supernovas

Classificação Espectral de Supernovas

Supernovas podem ser classificados pelas **linhas** de **absorção** nos seus **espectros**:

- Tipo I: **sem** linhas de **hidrogênio**
 - Ia: contendo uma linha forte de 615 nm de silício ionizado, Si II, e outras linhas de **Si, O, Mg, S, Ca** e **Fe ionizados**...
 - Ib: com linhas **fortes** de **hélio**
 - Ic: **sem** linhas de **hélio**
- Tipo II: com linhas **fortes** de **hidrogênio**
Frequentemente contêm linhas espectrais com perfil **P Cygni** (=> próximo slide), indicativo de expansão rápida

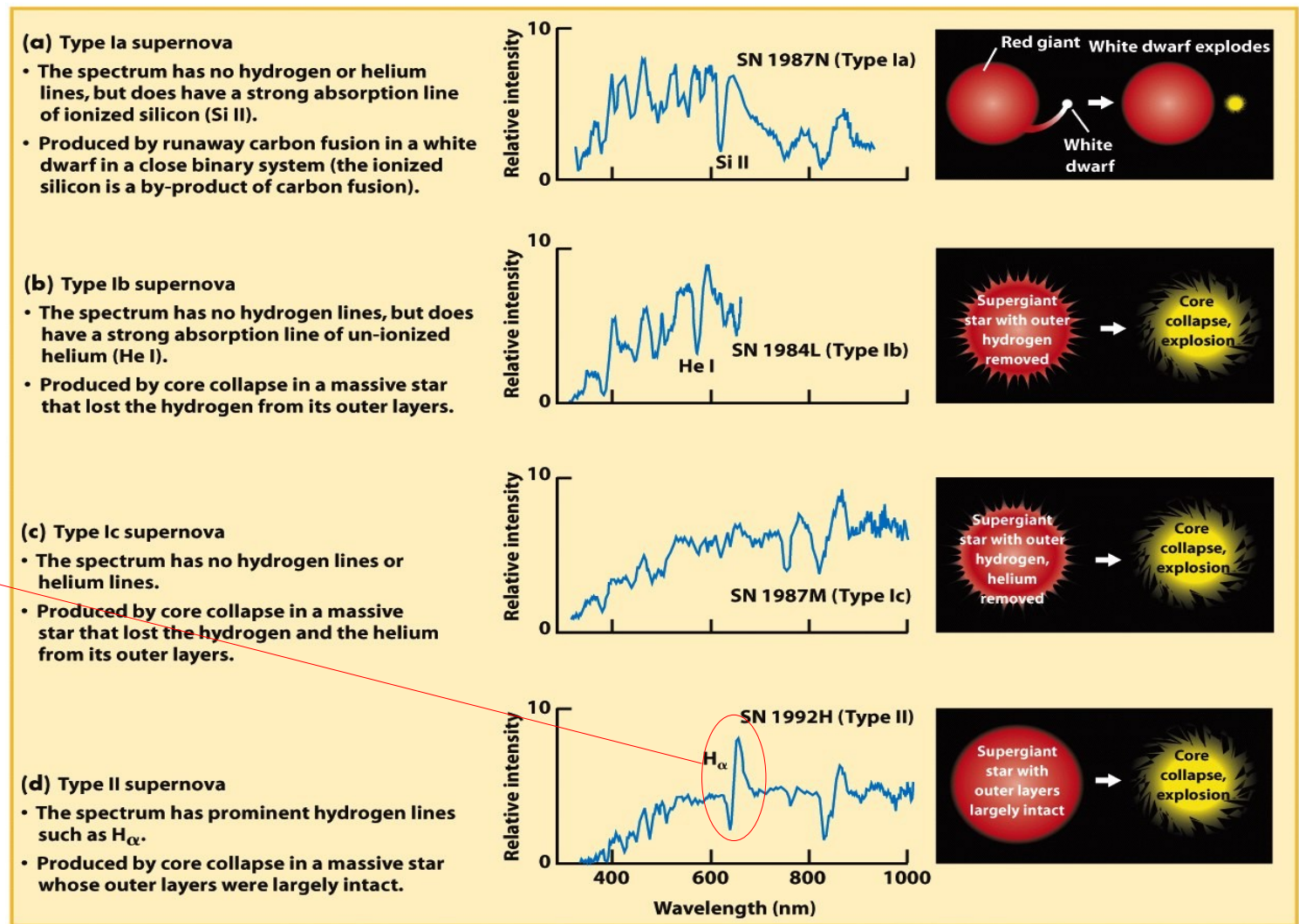


Supernovas

Classificação Espectral de Supernovas

Exemplos de espectros de cada tipo

Perfil P Cygni (emissão forte perto do centro e absorção por gás em alta velocidade rumo observador)



Supernovas

Classificação Espectral de Supernovas

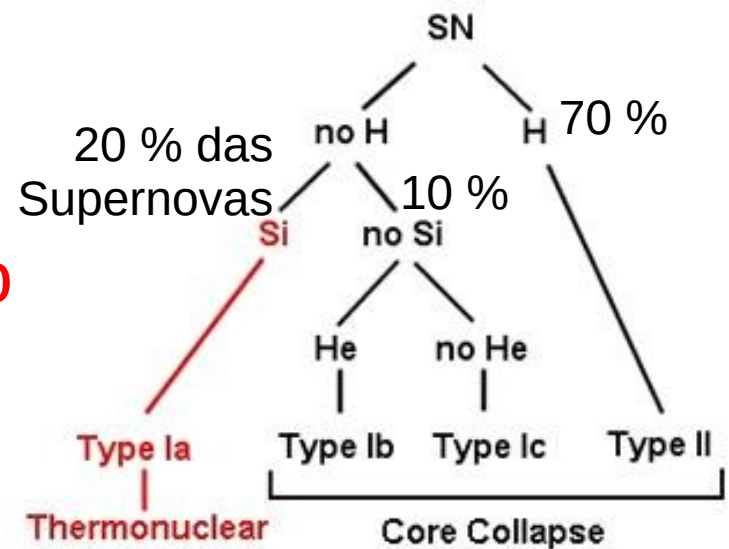
As SN tipo Ib, Ic e II são causadas pelo colapso do caroço de estrelas de alta massa, as dos tipos Ib e Ic perderam o envelope de hidrogênio antes de virarem Supernovas por ventos estelares.

Elas são encontradas em galáxias espirais perto de regiões H II (de formação estelar).

SN Ia são de outra origem (como já sabemos):

A explosão de uma Anã Branca ultrapassando a massa limite para Anãs Brancas.

Elas se encontram em todos os tipos de galáxias.



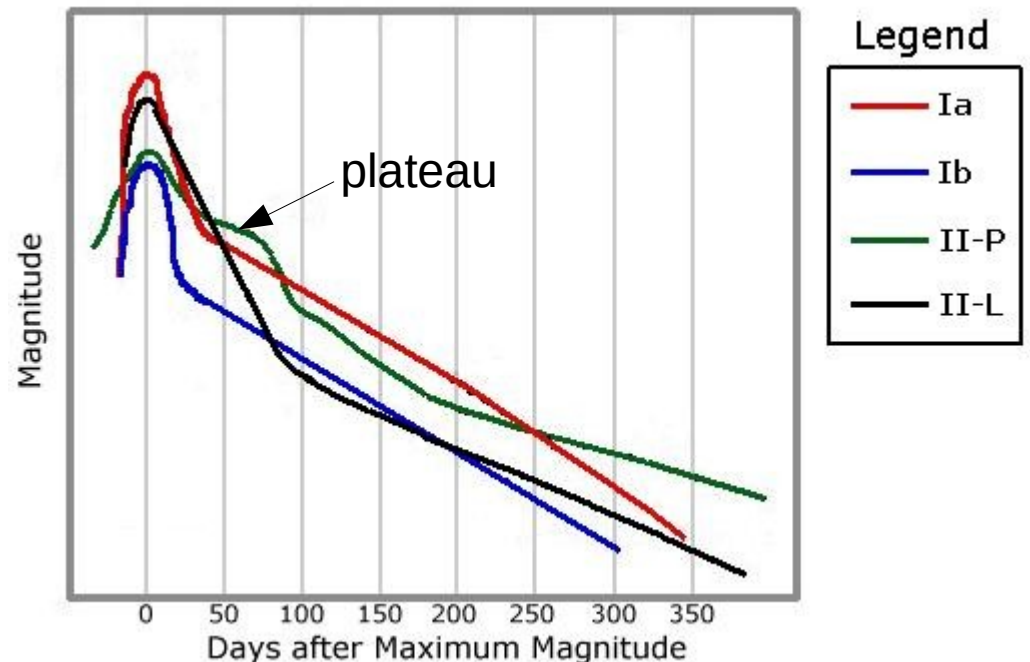
Supernovas

Classificação Espectral de Supernovas

Os tipos de supernovas também diferem nas suas **curvas de luz** (luminosidade em função do tempo).

As tipo II ainda podem ser sub-divididas nos tipos II-P (plateau) ou II-L (linear), dependendo da curva de luz.

As Ia são **especialmente luminosas** e sempre têm a **mesma magnitude absoluta**, o que é útil para determinar as **distâncias** até elas (e até as galáxias onde elas ocorrem).



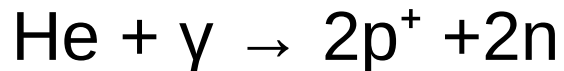
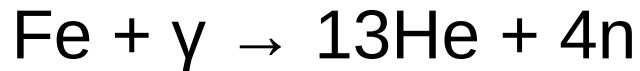
A Morte de uma Estrela de Massa Alta

Colapso do Caroço

Quando a **pressão de degenerescência eletrônica** no **caroço** inerte de **ferro** de um **estrela de alta massa** (\Rightarrow aula Evolução Estelar) **não suporta** mais a sua própria **gravidade**, o que acontece quando a **densidade central** é de $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ kg/m}^3$, e a **temperatura central**, de $\sim 7 \cdot 10^9 \text{ K}$, condições alcançadas em caroços de $1.3 M_{\odot}$ em estrelas de $10 M_{\odot}$, e de $2.5 M_{\odot}$ em estrelas de $50 M_{\odot}$, o **caroço** começa a **colapsar** e se **esquenta** de novo.

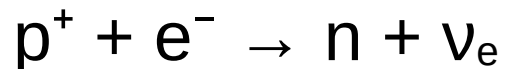
A Morte de uma Estrela de Massa Alta

Chegando em $\sim 10^{10}$ K, o “trabalho” de milhões de anos é desfeito em pouco tempo (no caroço), e o **ferro** primeiro é **fotodesintegrado** em dois passos:



o que **custa energia**, reduzindo a pressão interna e **acelerando o colapso**.

Os **prótons** restantes **capturam** os **elétrons** restantes, que ajudavam com uma componente de pressão:



Resultando em um **colapso** mais **rápido** ainda, do **caroço**, agora feito praticamente só de **nêutrons**.

Vale a pena lembrar que os processos **fotodesintegração** e **captura de elétrons** são **endotérmicos**, isto é, eles consomem energia e só podem acontecer em **ambientes extremos**, como um caroço estelar em colapso.

A Morte de uma Estrela de Massa Alta

Em estrelas a baixo de $25 M_{\odot}$, um novo tipo de pressão **para o colapso** quando a densidade no núcleo atinge $8 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$, a **pressão de degenerescência neutrônica**, similar que a eletrônica.

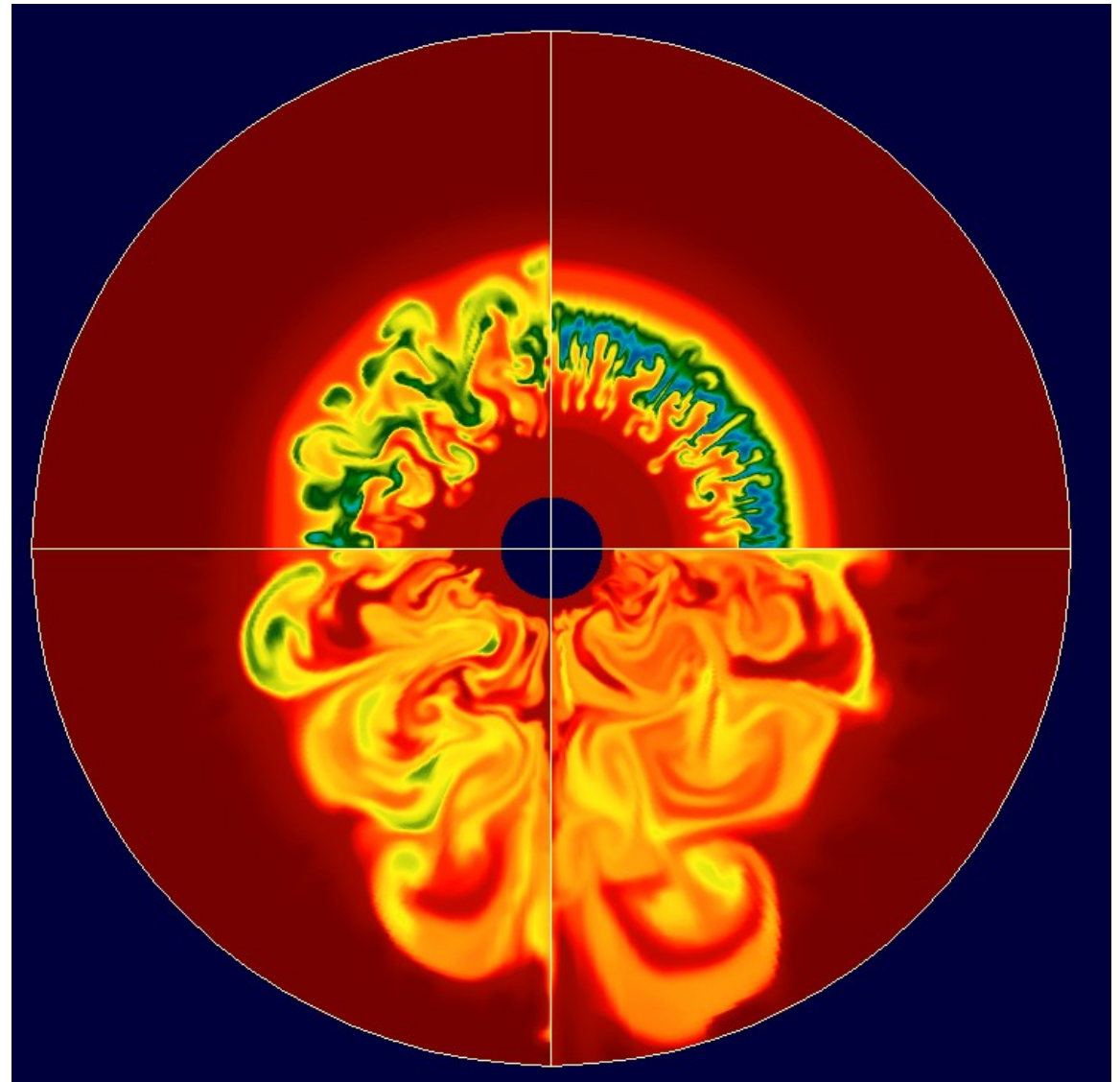
O **caroço** se torna uma **Estrela de Nêutrons** (\Rightarrow aula Estrelas de Nêutrons).

Em estrelas a cima de $25 M_{\odot}$, nada consegue parar o colapso, provavelmente resultando em um **Buraco Negro** (\Rightarrow aula Buracos Negros).

Supernovas de Colapso

As **camadas acima** do **caroço** (as de queima de silício, oxigênio, neônio, carbono, etc.), que estavam **caindo** sobre este, são “**rebatidas**”, gerando uma **onda de choque** para fora.

parte deste material é **fotodesintegrado** no choque, o que **para** o choque dentro de ~10 ms após uns 200-300 km de propagação.

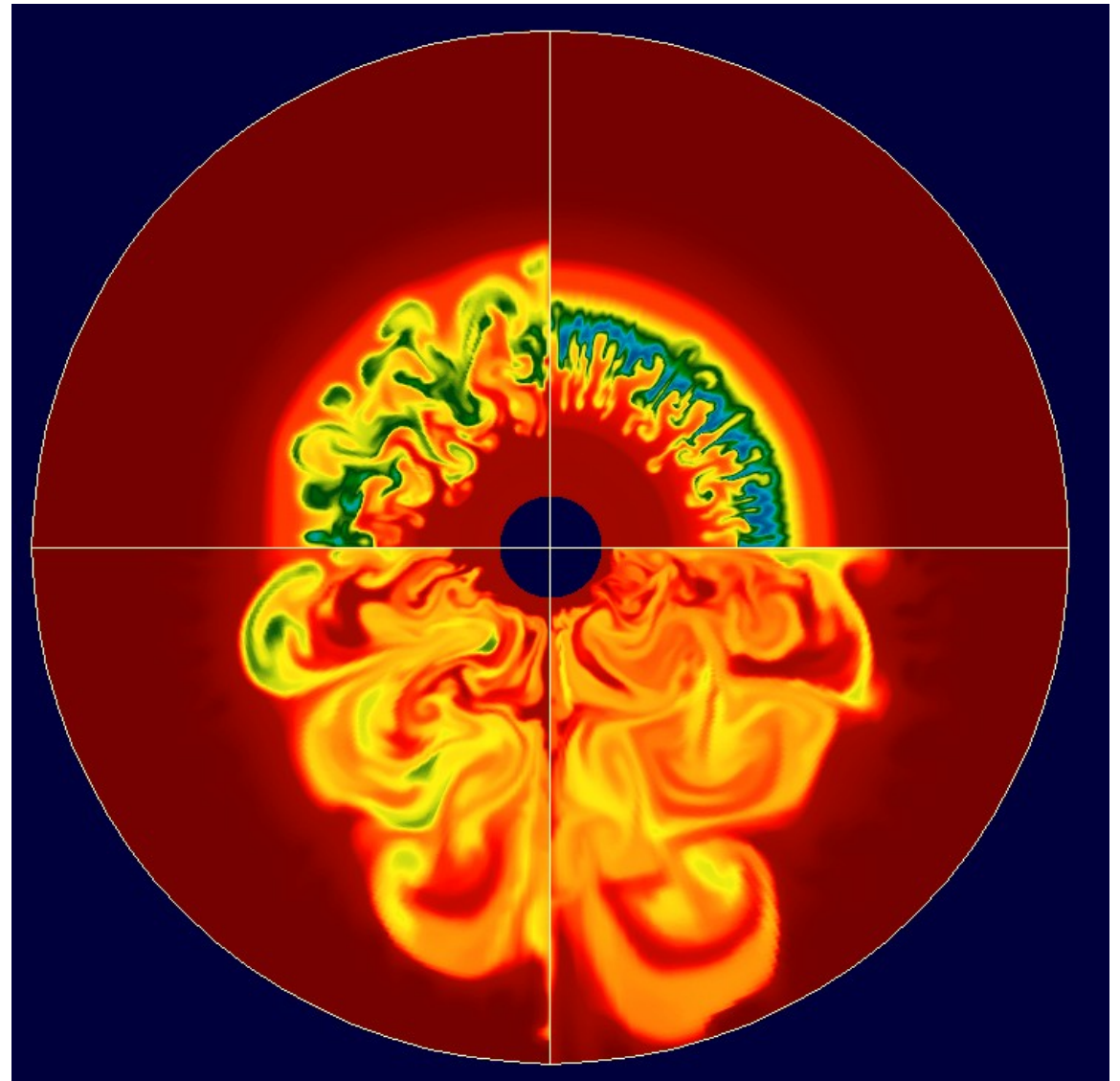


Simulação de uma Supernova (MPA Garching)

Supernovas de Colapso

Mas de trás vem um vento de **neutrinos** gerados na **captura** de **elétrons** no **caroço**, equivalendo a 10^{46} J!

Mesmo com 99 % deles atravessando o envelope sem interagir, o restante **arrasta** o **envelope** numa **explosão** gigantesca, uma **Supernova** tipo **Ib**, **Ic** ou **II**.



Simulação de uma Supernova (MPA Garching)

Supernovas de Colapso

Os 99 % dos **neutrinos** que “passam reto” são tantos, que alguns puderam ser **detectados** numa SN recente (SN 1987A, em breve nesta aula), apesar da natureza “quase indetectável” destas partículas, dando **apoio** ao **cenário descrito**.

Apesar de estarem no caminho certo, os **modelos** enfrentam **complicações** nos detalhes da simulação em 3D (simetria esférica não funciona para este caso), da **convecção**, do **tratamento** correto dos **neutrinos** (dos três tipos), de **ondas sonoras**, da **rotação diferencial** e **campos magnéticos**.

É preciso de uma resolução muito alta, desafiando até os melhores supercomputadores atuais.

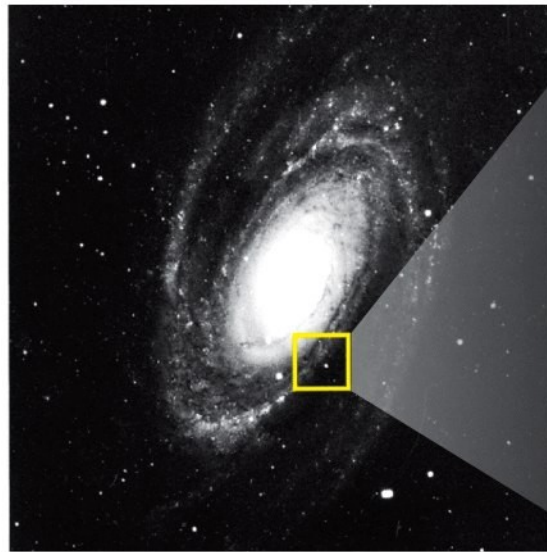
Até agora **nenhuma simulação** conseguiu **explodir** uma **Supernova!**

Supernovas de Colapso

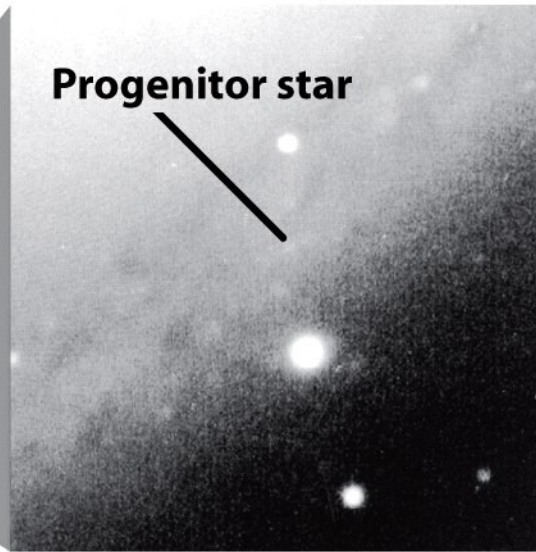
Estas Supernovas **enriquecem** o **meio interestelar** com o **C**, **O**, **Ne**, **Mg** e **Si** das camadas do envelope.

Nestas SNs, as **temperaturas** e **densidades** chegam a ser tão **altas**, que certos **elementos mais pesados do que Fe** podem ser produzidos (pelo processo r , vide aula Interior das Estrelas I), o que explica a **existência** destes elementos no **Universo**.

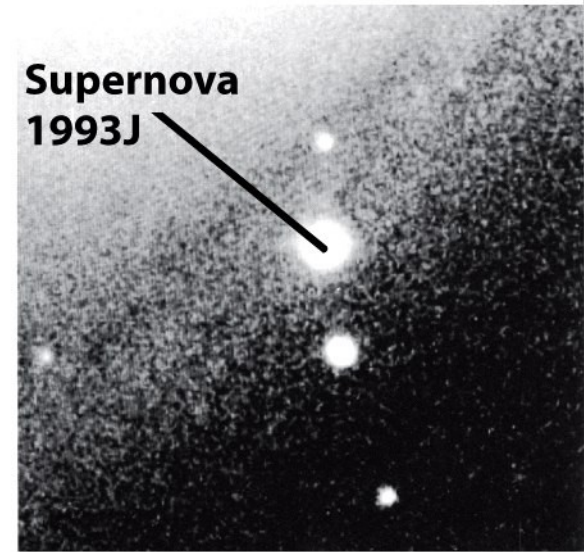
Supernovas de Colapso



(a) Spiral galaxy M81



(b) Before the explosion



(c) After the explosion

- A **Energia** liberada em uma Supernova é de $\sim 10^{46}$ J, daquela:
- ~ 1 % vai pra **energia cinética** do **ejecta**
 - **menos que 0.01 %** é liberada em **fótons**, mesmo assim, uma Supernova pode ter a **luminosidade** de uma **galáxia inteira** por um tempinho ($\sim 10^9 L_{\odot}$, até $M_V \sim -18$).
 - O restante é **neutrinos** (aqueles 99 %).

Supernovas de Colapso

Resumo: um esquema simplificado dos acontecimentos na morte de uma estrela de alta massa.

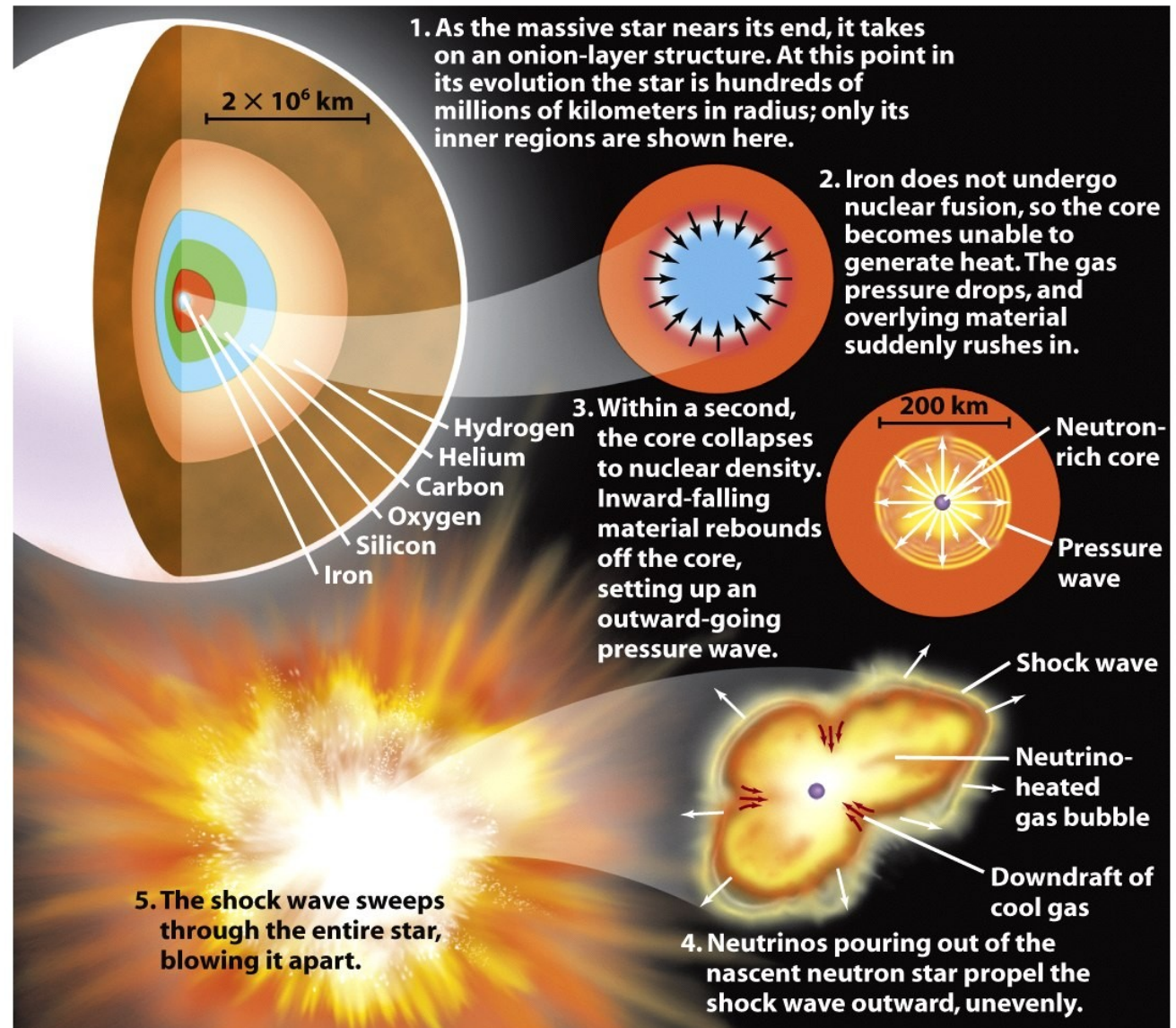


Figure 20-14
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Supernovas Ia

- Se a **massa** de uma Anã Branca alcança a **massa de Chandrasekhar**, por exemplo por acreção de matéria de uma parceira de binária, ela explode numa gigantesca **explosão** chamada **Supernova tipo Ia** (SN Ia), por **mecanismos** ainda **não bem conhecidos**,

mas que envolvem a **reignição** de **fusões nucleares**.
(*Flashes* de hélio numa fina camada de hélio na superfície? Carbono e oxigênio de quase a estrela inteira sendo transformadas em ferro e níquel numa reação de cadeia?)
Por isto, elas são também chamadas de Supernovas **termonucleares**.



Supernovas Ia

A **Luminosidade** de uma **Supernova Ia** é 10 bilhões (10^{10}) vezes aquela do Sol, tão **brilhante** quanto uma **galáxia inteira!**

Por sempre ocorrer da mesma maneira (estrela do mesmo tipo ultrapassando a mesma massa limite), Supernovas Ia têm **sempre a mesma luminosidade** ($M_V \approx M_B = -19.3 \pm 0.03$).

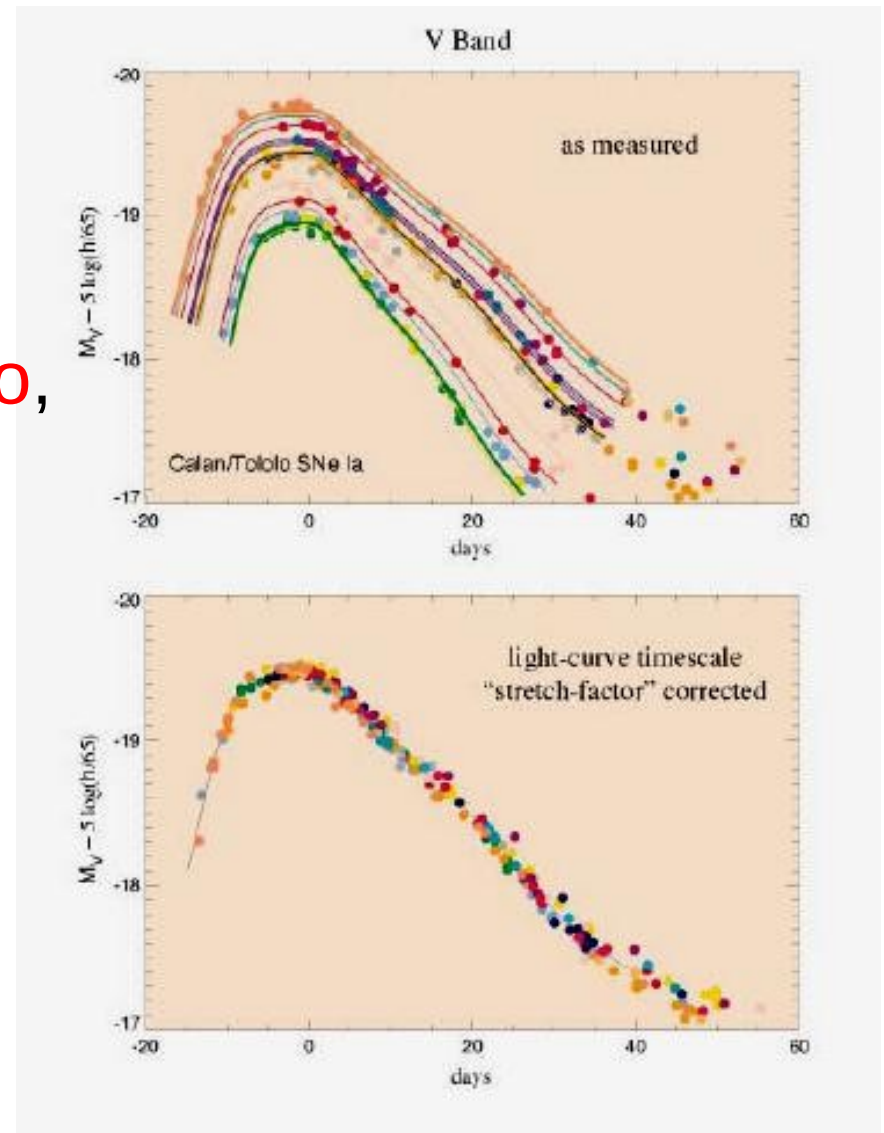
Elas são, então, **velas padrão** e podem ser aproveitados para **medir a distância** até a galáxia onde elas ocorrem.



Supernovas Ia

A **magnitude absoluta** do **pico** pode ser determinada ainda melhor levando em conta a **relação taxa de declínio** da curva de luz - **magnitude** do **pico**, melhorando a utilidade de SN Ia como velas padrão.

Elas tiveram um papel importante na descoberta da **expansão acelerada** do **Universo**, e da **Energia Escura** (=> Noções de Astronomia e Cosmologia, Introdução à Cosmologia).



Supernovas Ia

O que acontece com a **companheira**?

Obviamente, a estrela companheira deve ser fortemente afetada pela Supernova do lado.

- Devem ser **impactadas** de **minutos** a **horas** após a explosão.
- Dependendo da sua natureza, parte do - ou o **envelope** inteiro é **arrancado** e **vaporizado**:
 - **SP e subgigantes**: **perdem** de **10 a 20%** do **envelope** com velocidades de 180 a 320 km/s.
 - **Gigantes Vermelhas**: **quase todo** o **envelope** com $v \sim 10-100$ km/s.
- O que sobra possivelmente leva um **chute** e fica perambulando pelo **espaço interestelar**.

Supernovas Ia

Para muitos remanescentes de SN Ia existe **nenhuma companheira** próxima **associada**. Para outros, a companheira é **controversa**.

Exemplos:

- Há uma estrela tipo G com alta velocidade (~ 130 km/s) próxima ao remanescente da SN observada em 1572 por Tycho Brahe (\Rightarrow daqui a pouco), sujeito de debate, se ela era a companheira da Anã Branca explodida.

- Acredita-se ter visto radiação UV da companheira da SN 2012cg poucos dias após a explosão, devida à onda de choque atingindo-a, tido como primeira possível evidência clara (mas indireta) da companheira de uma SN Ia.



SN 2012cg na sua galáxia, NGC 4424

As Curvas de Luz

Tá, entendemos o pico, mas por que as **curvas de luz** de Supernovas mostram este **declínio lento** depois?

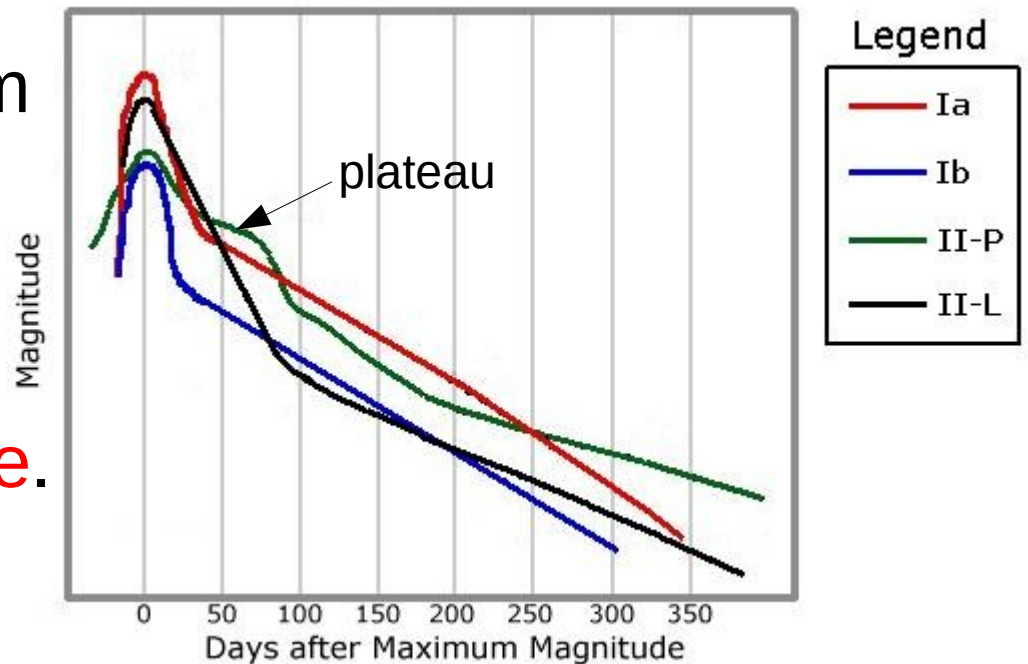
Não esqueçam, que **magnitude** é uma medida **logarítmica** da **luminosidade**.

=> As linhas retas nas curvas de luz significam

declínios exponenciais,

do tipo $\propto e^{-\lambda t}$, onde λ é um parâmetro que determina, quão rapidamente a curva cai.

A fonte desta luz são **decaimentos** de **isótopos radioativos**, produzidos durante a explosão pela **onda de choque**.



As Curvas de Luz

Decaimento radioativo é um **processo estatístico**, o que significa, que a **taxa** de átomos **decaindo**, dN/dt , é **proporcional** ao **número sobrando**, N :

$$dN/dt = -\lambda N,$$

o que caracteriza um **decaimento exponencial** (\Rightarrow IEDO):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot 2^{-t/\tau_{1/2}},$$

onde $\tau_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ é chamado tempo de **meia vida** do isótopo, o tempo que leva para metade do montante inicial decair.

$$\Rightarrow d\log_{10} L/dt = -0.434\lambda, \quad dM_{\text{bol}}/dt = 1.086\lambda.$$

As Curvas de Luz

As reações que ocorrem são:

- $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} + e^+ + \nu_e + \gamma$ com $\tau_{1/2} = 6.1$ dias, seguido por

- $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe} + e^+ + \nu_e + \gamma$ com $\tau_{1/2} = 77$ dias,

que são decaimentos β (ou β^+), já que surgem pósitrons,

e os decaimentos de

- ^{57}Co com $\tau_{1/2} = 271$ dias,

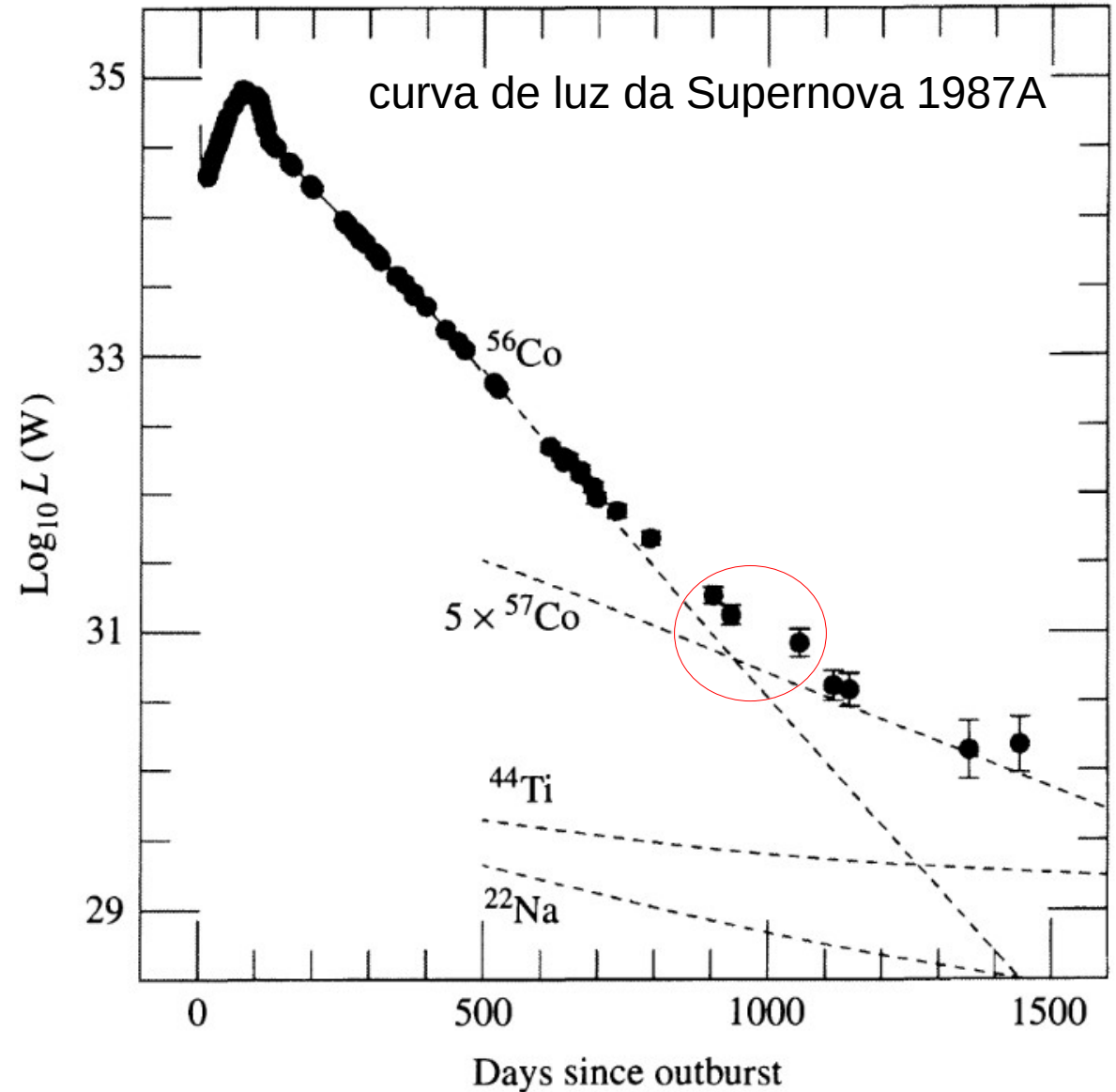
- ^{44}Ti com $\tau_{1/2} = 47$ anos e

- ^{22}Na com $\tau_{1/2} = 2.6$ anos

=> A **taxa** de **declínio** da curva de luz revela o **isótopo dominante**.

As Curvas de Luz

As **quinas** na curva de luz acontecem, quando a **contribuição** de uma **reação** "ultrapassa" a da dominante, assim se tornando a nova contribuição dominante.



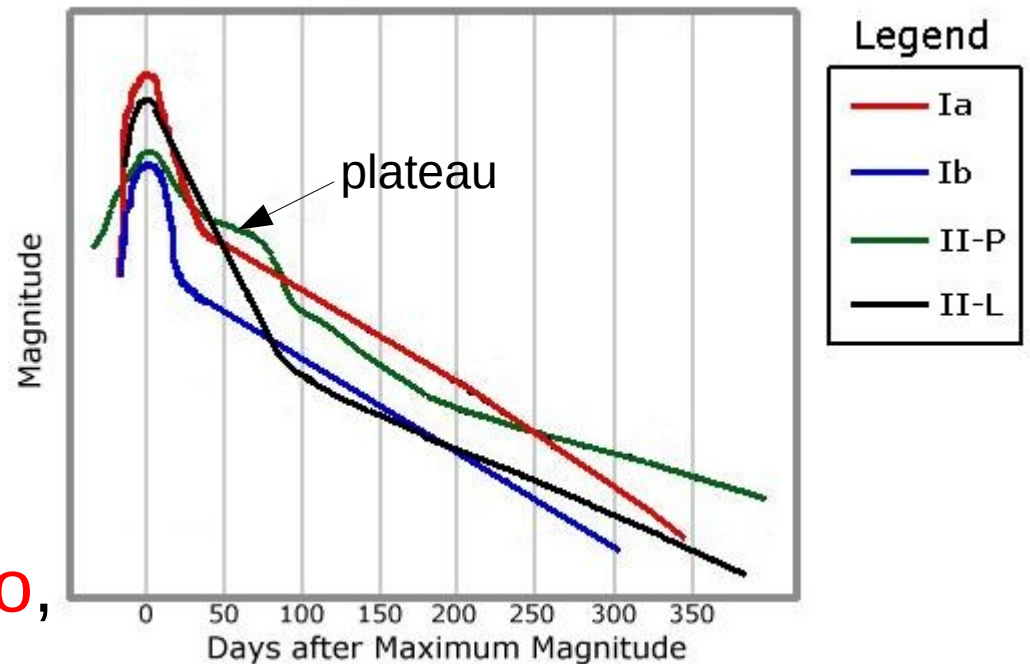
As Curvas de Luz

E o **plateau** nas curvas de luz das SN II-P?

É devido a **energia depositada** pelo **choque** no **envelope** rico em hidrogênio.

O gás, **ionizado** pelo choque, entra numa fase demorada de **recombinação**, liberando energia a uma **temperatura** praticamente **constante** de ~ 5000 K.

A fase pode ser prorrogada por mais energia depositada no envelope pelo decaimento de ^{56}Ni .



Supernovas

Alguns exemplos de Remanescentes de Supernovas



Figure 20-23
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

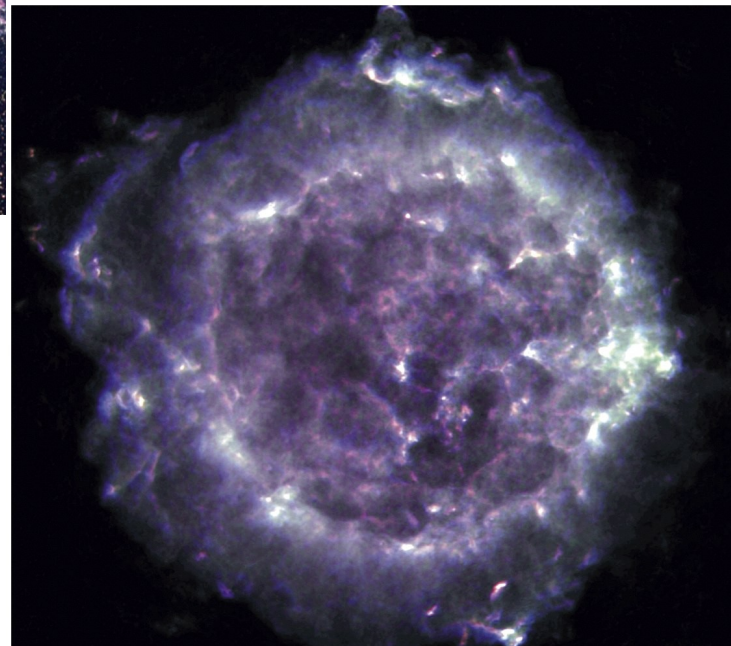
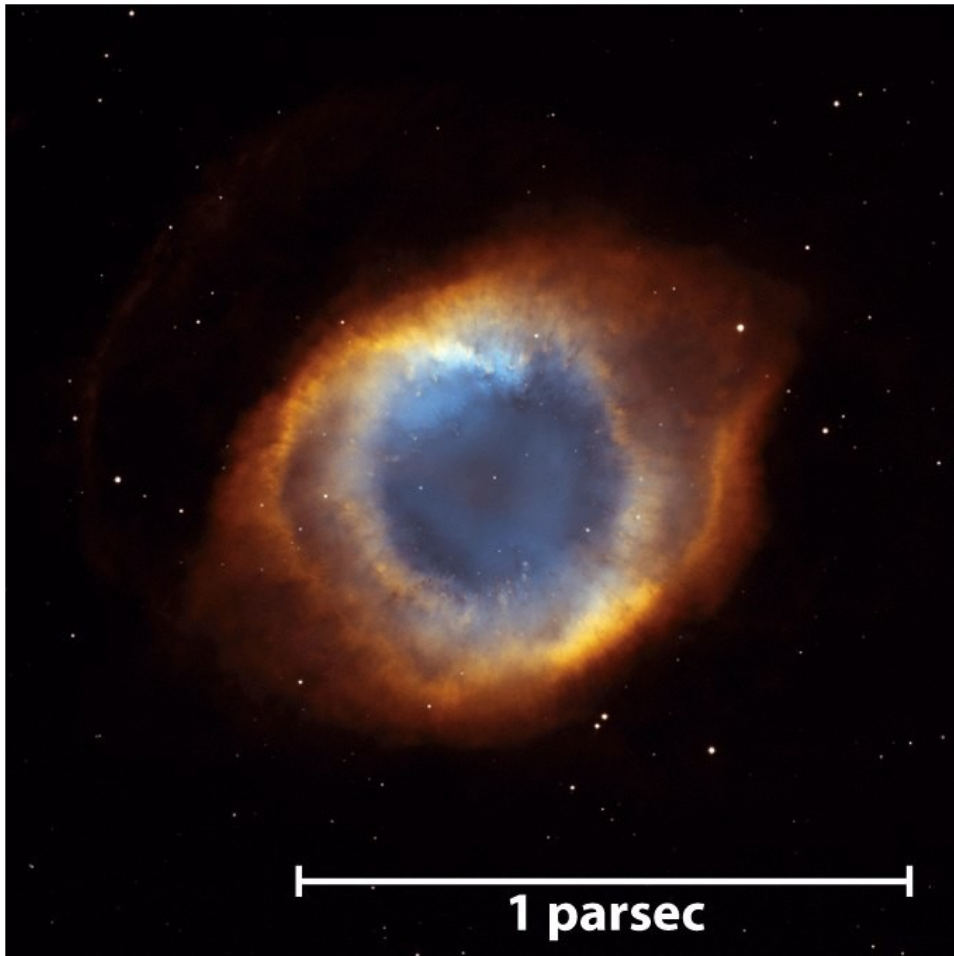


Figure 20-25
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

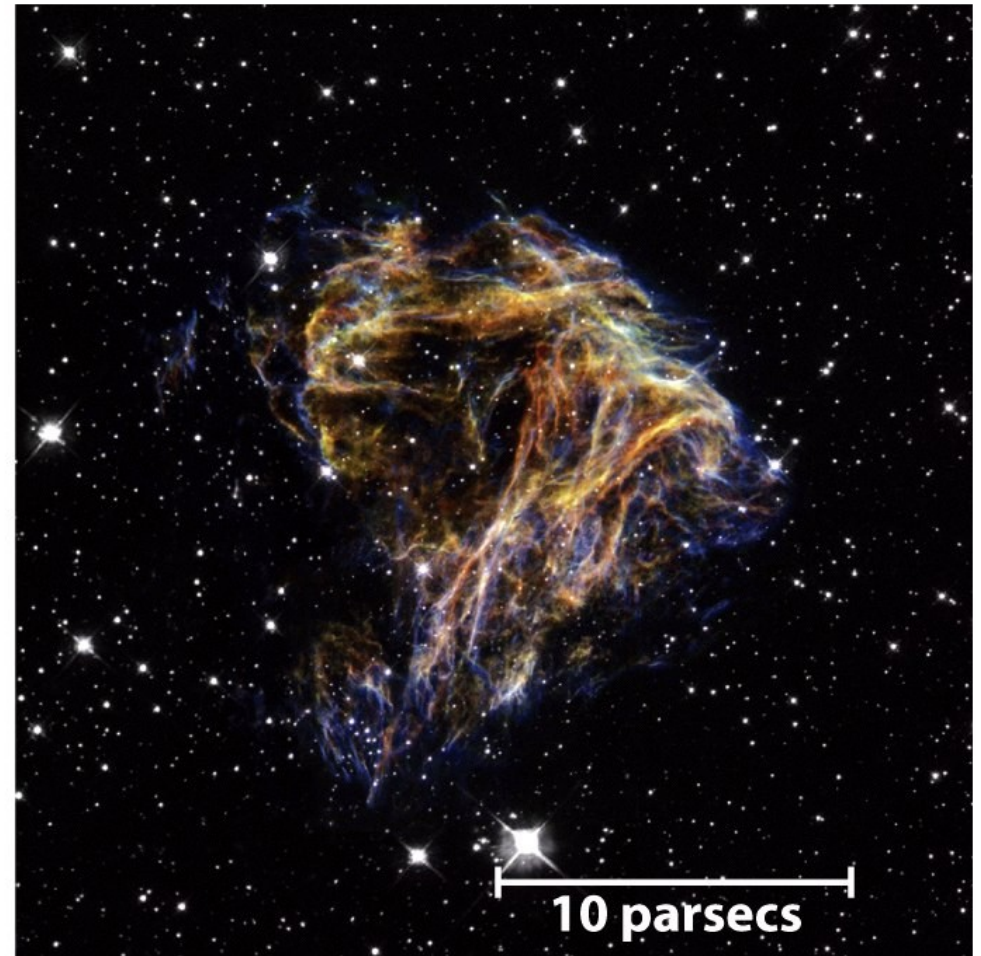
pany

Remanescentes de Supernovas

Em geral, são menos simétricos que Nebulosas Planetárias



(a) A planetary nebula



(b) A supernova remnant

Remanescentes de Supernovas

Pela **velocidade** de **expansão** do remanescente de uma supernova, v_{SNR} , que pode ser **medida** pelo **efeito Doppler**, e pelo **raio angular** dele no **céu**, dá para determinar

- caso o **momento** da **explosão** é **conhecido** (em **Supernovas históricas**, já vamos mencionar algumas): o **raio** R_{SNR} e a **distância**,

- caso a **distância** é **conhecida**: o **raio** e o **momento** da explosão,

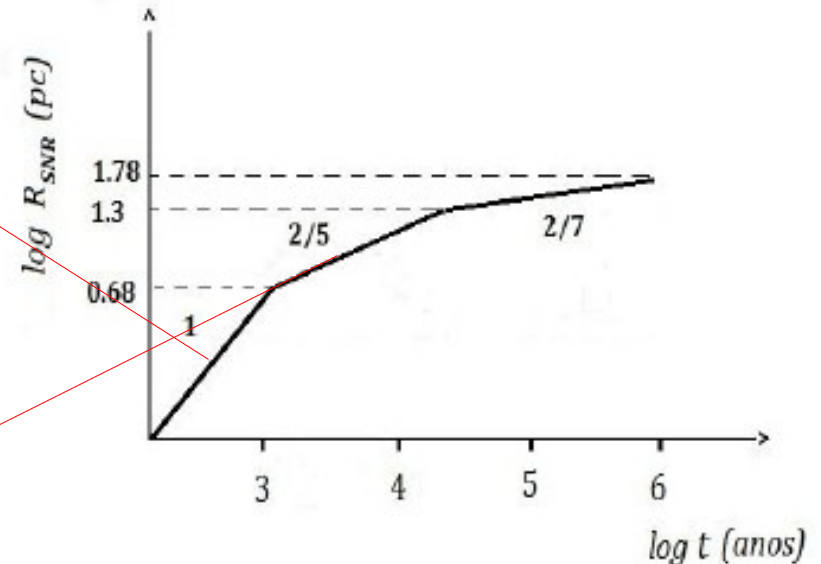
mas tem-que se levar em conta, que a **expansão** ocorre em **diferentes fases**, cujas **duração** e **velocidades** de **expansão** **dependem** da **energia** da **onda** de **choque** causadora da expansão, E_{exp} , a **massa** do **ejecta**, M_{ej} , e da **densidade** do **meio interestelar**, n_{ISM} (ou ρ_{ISM}), por aquele a onda se **propaga**:

Remanescentes de Supernovas

1ª fase: Expansão livre:

$$v_{SNR} = 3.2 \times 10^3 \text{ km/s} \left(\frac{M_{ej}}{10 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{E_{exp}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/2}$$

$$R_{SNR} = 0,32 \text{ pc} \left(\frac{E_{exp}}{10^{44} \text{ J}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{ej}}{10 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{t}{100 \text{ anos}} \right)$$



2ª fase: Fase de Sedov-Taylor:

A **massa arrastada** pelo choque começa a exercer **resistência à expansão**.

$$R_{SNR} = 15 \text{ pc} \left(\frac{E_{exp}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/5} \left(\frac{n_{ISM}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/5} \left(\frac{t}{10^4 \text{ anos}} \right)^{2/5}$$

$$v_{SNR} = 580 \text{ km/s} \left(\frac{E_{exp}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/5} \left(\frac{n_{ISM}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/5} \left(\frac{t}{10^4 \text{ anos}} \right)^{-3/5}$$

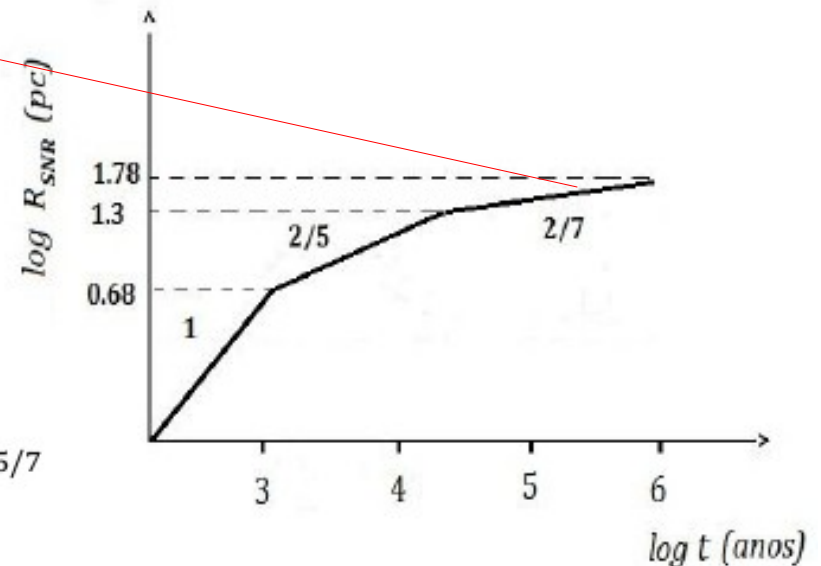
Remanescentes de Supernovas

3ª fase: **Removedor de neve**:

Atomização de C, N e O
(quando $T < 10^6$ K).

$$R_{SNR} = 30 \text{ pc} \left(\frac{E_{exp}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{11/49} \left(\frac{n_{ISM}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-13/49} \left(\frac{t}{10^4 \text{ anos}} \right)^{2/7}$$

$$v_{SNR} = 120 \text{ km/s} \left(\frac{E_{exp}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{-4/49} \left(\frac{n_{ISM}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-13/49} \left(\frac{t}{10^4 \text{ anos}} \right)^{-5/7}$$



Após uns **10^5 anos**, a velocidade da casca fica menor que a do som no meio interestelar ($\sim 10 - 100$ km/s), e o **Remanescente** fica **disperso** no **meio interestelar** (\sim o dobro do tempo que leva para uma Nebulosa Planetária se misturar com o meio).

Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

SN 1006: evento registrado na Europa, China, Japão, Egito e Iraque,

$m_V \sim -9$,
deu pra ler de noite!

O remanescente só foi descoberto em 1965 e ainda é visível com telescópios e continua expandindo, hoje medindo ~ 20 pc.

SN 1006 foi uma SN tipo Ia.



Remanescente da SN 1006 em raio X

Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

SN 1054: evento reportado na China, Japão, Coréia, Arábia e Europa (?).

Visível de dia.

O seu remanescente, a Nebulosa do Caranguejo, tem 3 pc de extensão.

No seu centro vive um pulsar (=> aula Estrelas de Nêutrons)



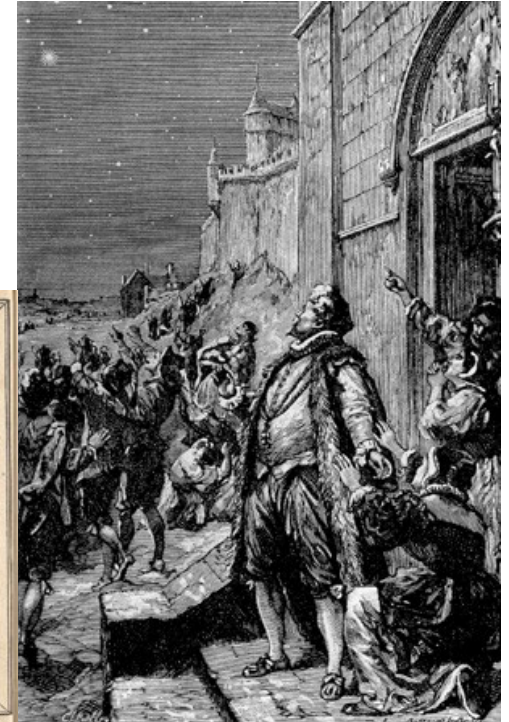
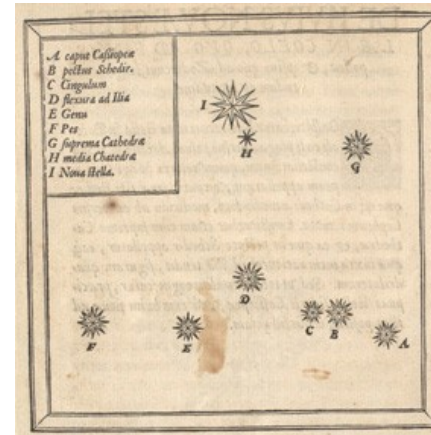
Nebulosa de Caranguejo

Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

A Supernova descoberta por **Tycho Brahe** em 1572 era em **conflito** com a **crença** da época, de que o **céu** era **invariável**.

(tipo Ia)



Remanescente da SN de Tycho em raios X

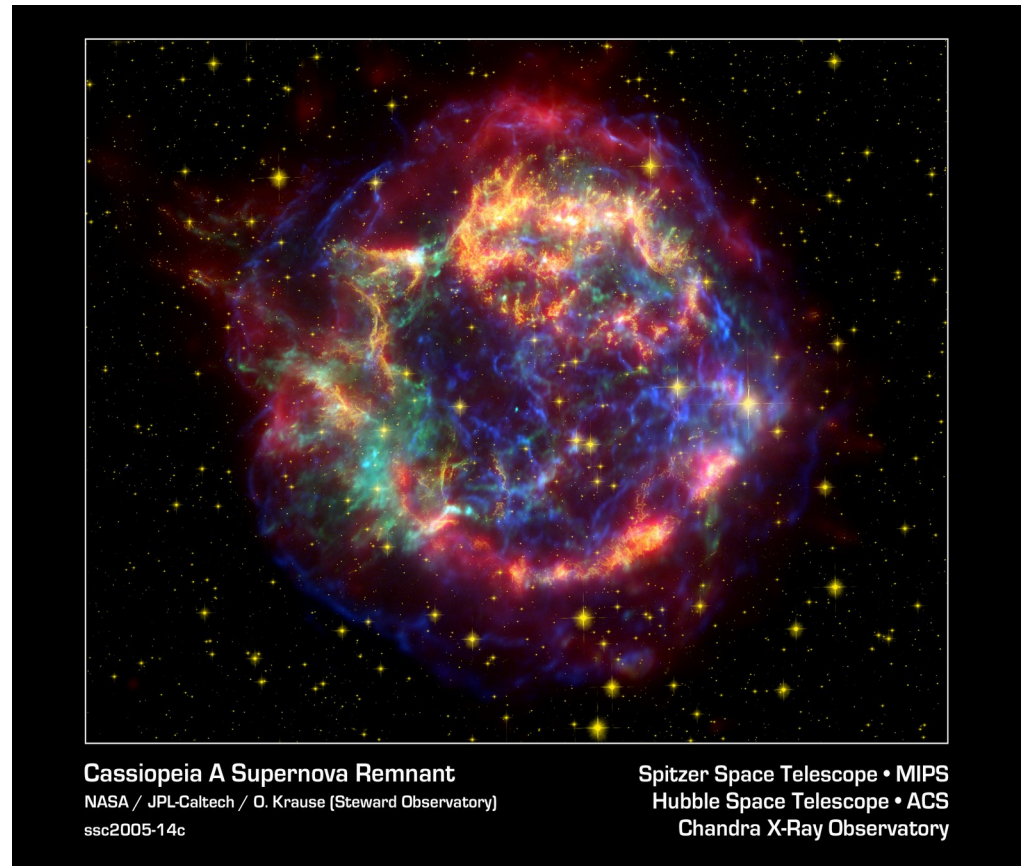
Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

O aluno de Tycho Brahe, **Johannes Kepler**, também descobriu a dele, em 1604.

É a SN mais recente observada na Via Láctea. Dela sobra o remanescente de Cassiopeia, a 13 kpc daqui.

(provável tipo Ia)



Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

SN 1987A:

última supernova visível a olho nu, na Grande Nuvem de Magalhães (vizinha da Via Láctea, a 50 kpc).

A Progenitora era uma supergigante azul com $M = \sim 25 M_{\odot}$.

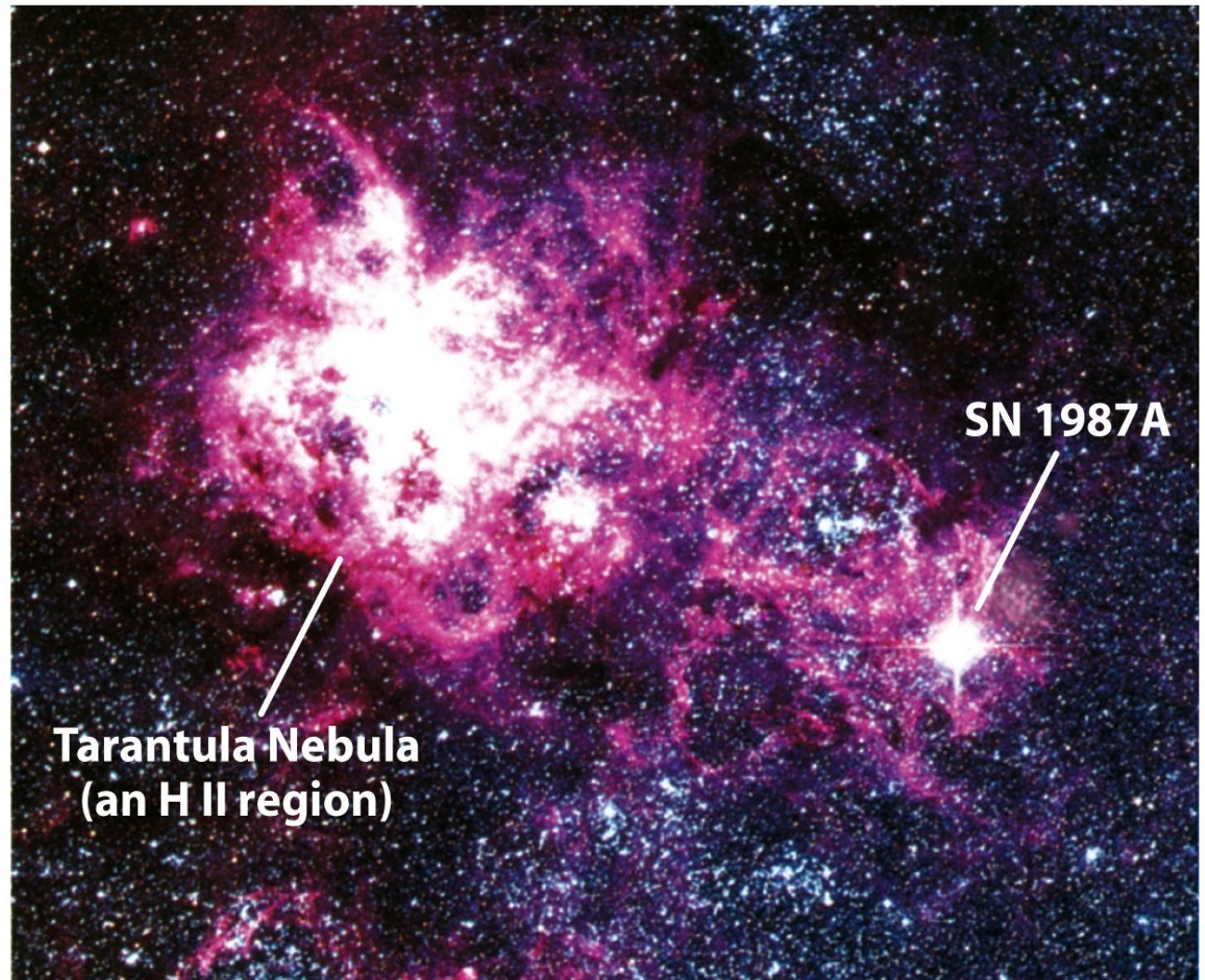


Figure 20-17
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

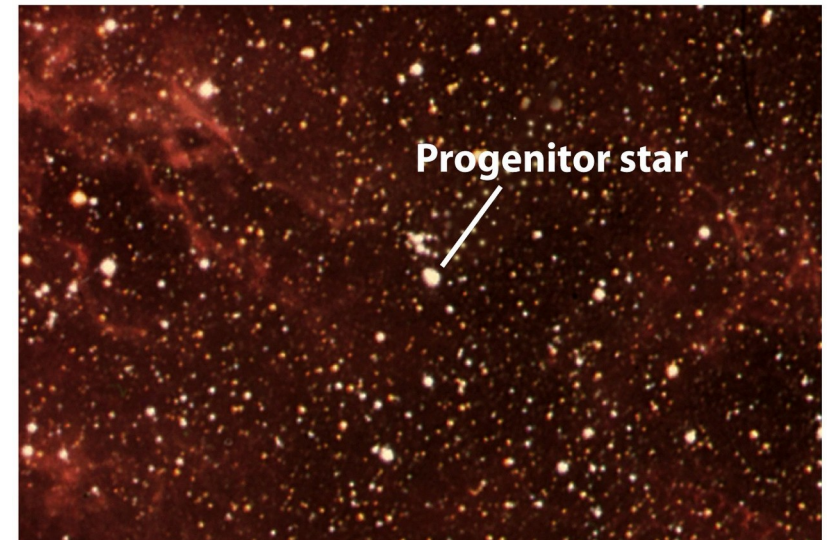
SN 1987A:

É a SN melhor observada até hoje.

Entre outros foram detectados os primeiros **neutrinos** de fonte outra que o Sol.

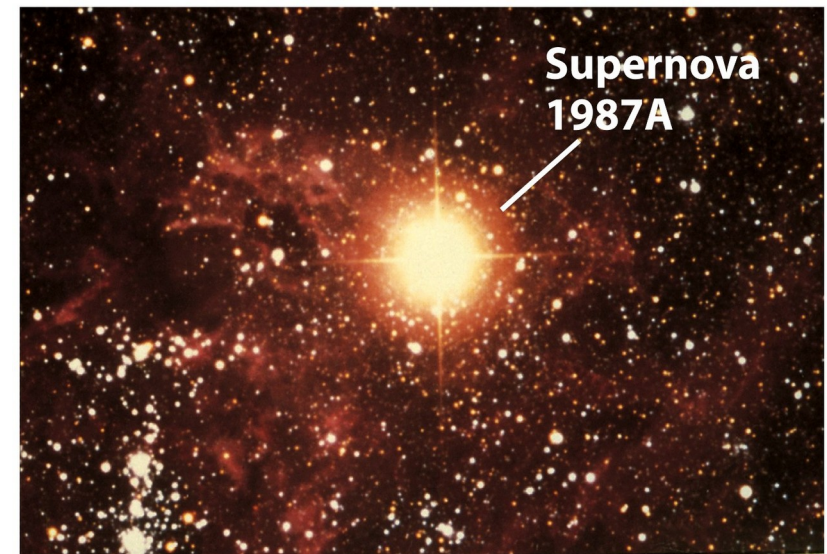
Os neutrinos chegaram ~3 horas antes da luz, dando suporte à teoria.

SN 1987A era uma tipo II-P. Até hoje não foi encontrado seu remanescente.



Before the star exploded

Figure 20-18a
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company



After the star exploded

Figure 20-18b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

Supernovas

Algumas Supernovas Históricas

Algumas propriedades de Supernovas Históricas na Via Láctea

Nome	Ano	Distância (kpc)	longitude	latitude	Tipo
Lupus (SN1006)	1006	2.2	327.57	14.57	Ia
Caranguejo	1054	2.0	184.55	-5.79	II
3C58 (SN1181)	1181	2.6	130.73	3.07	II
Tycho	1572	2.4	120.09	1.42	Ia
Kepler	1604	4.2	4.53	6.82	? (controverso)
Cas A	1680	2.9	111.73	-2.13	Ib



Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

