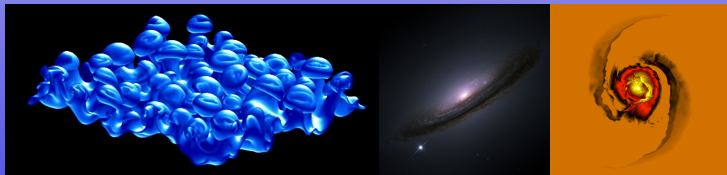


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

26 maja 2015



DB: p160d3a3e3129G1MHV:3LB.plt.0300.vtk
Cycle: 10000 Time: 0.300001

Contour
Var: stof



Max: 17.64
Min: 4.836



user: misiek
Sun Oct 10 14:38:59 2010

Struktura białych karłów i gwiazd neutronowych

Gaz Fermiego dla $T \rightarrow 0$

Aby w sposób nie budzący wątpliwości wyznaczyć równanie stanu (EOS) wychodzimy od potencjału Ω (energii swobodnej Landaua):

$$\Omega(T, V, \mu) = -kT \frac{V}{h^3} g \int_0^{\infty} 4\pi p^2 \ln \left(1 + e^{\frac{\mu-E}{kT}} \right) dp$$

Ponieważ $\Omega = -PV$ powyższa całka daje ciśnienie w dowolnej temperaturze. Wynik wyraża się przez funkcje specjalne: uogólnione całki Fermiego-Diraca.

Jeżeli $T \rightarrow 0$, to rozkład Fermiego-Diraca przyjmuje postać funkcji Heaviside'a (skoku jednostkowego), natomiast wielka funkcja rozdziału upraszcza się do:

$$\ln \left(1 + e^{\frac{\mu-E}{kT}} \right) \simeq \begin{cases} \frac{\mu-E}{kT} & \text{dla } E < \mu \\ 0 & \text{dla } E > \mu \end{cases}$$

Teraz widać, że kT się skraca, a ciśnienie P nie zależy od temperatury.

Ciśnienie P dla $T \rightarrow 0$ wyraża się całką

$$P = \frac{8\pi}{h^3} \int_0^{p_F} p^2 (\mu - E) dp$$

gdzie $E^2 = p^2 + m^2$, $\mu^2 = p_F^2 + m^2$. Całkę da się obliczyć

$$P = \frac{8\pi m^4 c^5}{h^3} f\left(\frac{p_F}{mc}\right) / 24, \quad f(x) = (2x^3 - 3x)\sqrt{x^2 + 1} + 3 \operatorname{arsinh} x$$

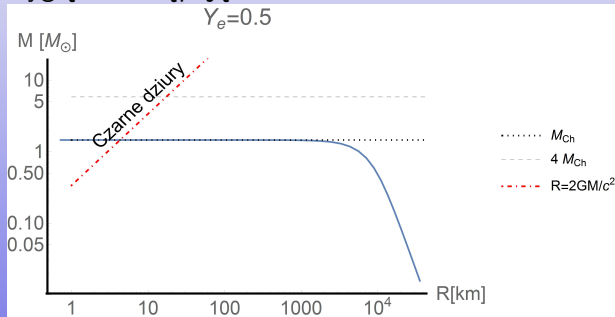
Analogicznie, gęstość energii (wliczając mc^2 !) to

$$\varepsilon = \frac{8\pi m^4 c^5}{h^3} g(x) / 8, \quad g(x) = (2x^3 + x)\sqrt{x^2 + 1} - \operatorname{arsinh} x$$

Gęstość cząstek jest najłatwiejsza do obliczenia:

$$n_e = \frac{8\pi}{h^3} \frac{p_F^3}{3}, \quad n_e = n_B Y_e \simeq \frac{\rho Y_e}{m_p}$$

Równanie stanu zdegenerowanego gazu elektronowego pozwala rozwiązać newtonowskie równania struktury, gdyż pęd Fermiego w trywialny sposób zależy od gęstości. Zależność promień- masa wygląda następująco:

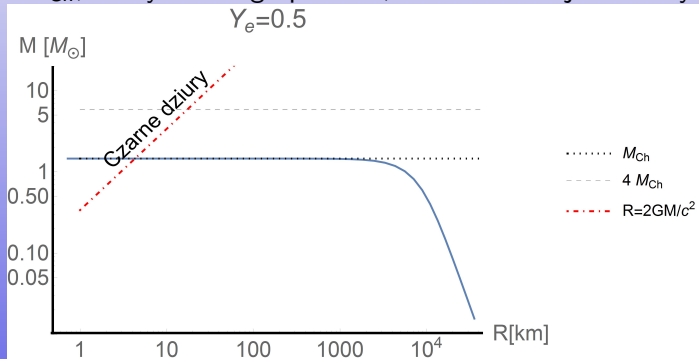


Ponieważ dla $x \rightarrow \infty f(x) \rightarrow 2x^4$, otrzymujemy model politropowy z $n = 3$, dla którego:

$$M_{Ch} = \frac{\sqrt{3\pi}}{2} (-w'_3(z_3) z_3^2) Y_e^2 \frac{m_p^3}{m_p^2} \simeq 1.46 M_\odot (2Y_e)^2$$

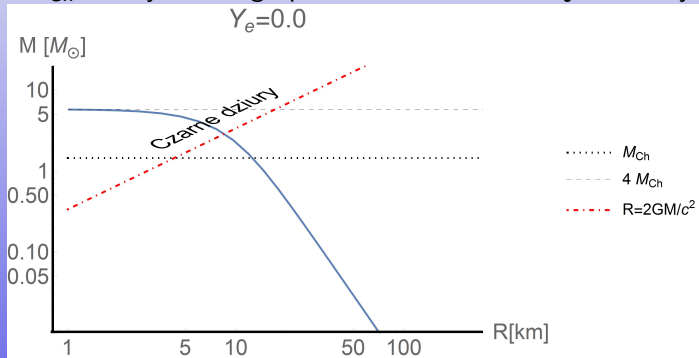
gdzie w nawiasie mamy zero i nachylenie w zerze f. Lane-Emdena, $m_p = \sqrt{\hbar c / G}$ to masa Plancka, a m_p – masa protonu (dokładniej: atomowa jednostka masy).

Ze wzoru na M_{Ch} wynika, iż nie zależy ona od typu fermionów o spinie 1/2 wytwarzających ciśnienie (elektrony, neutrony, neutrino).
 Np: masa graniczna kuli zbudowanej z neutronów to po prostu $4M_{Ch}$, ale tylko z tego powodu, iż neutronów jest 2 razy więcej.



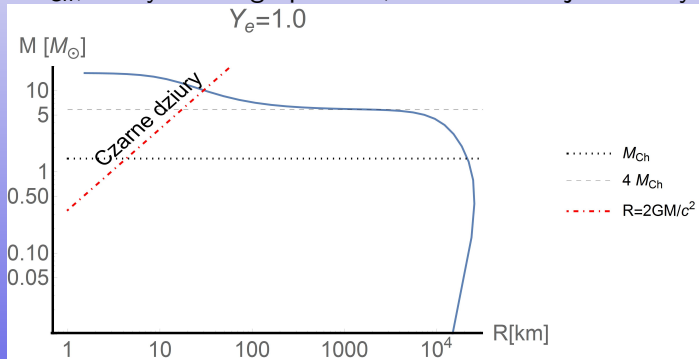
Powyższe wyniki są błędne i stanowią jedynie ilustrację, uzasadniającą użycie Ogólnej Teorii Względności (OTW).

Ze wzoru na M_{Ch} wynika, iż nie zależy ona od typu fermionów o spinie 1/2 wytwarzających ciśnienie (elektrony, neutrony, neutrino). Np: masa graniczna kuli zbudowanej z neutronów to po prostu $4M_{Ch}$, ale tylko z tego powodu, iż neutronów jest 2 razy więcej.



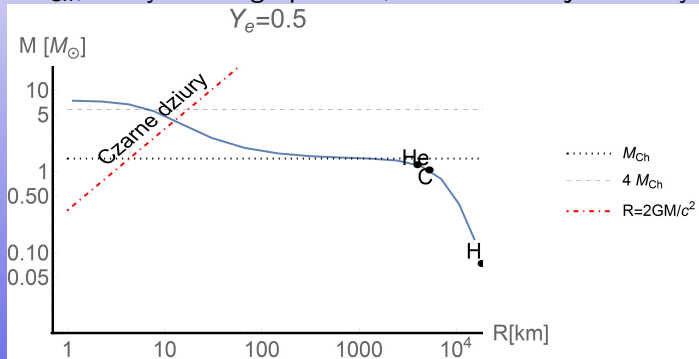
Powyższe wyniki są błędne i stanowią jedynie ilustrację, uzasadniającą użycie Ogólnej Teorii Względności (OTW).

Ze wzoru na M_{Ch} wynika, iż nie zależy ona od typu fermionów o spinie 1/2 wytwarzających ciśnienie (elektrony, neutrony, neutrino).
 Np: masa graniczna kuli zbudowanej z neutronów to po prostu $4M_{Ch}$, ale tylko z tego powodu, iż neutronów jest 2 razy więcej.



Powyższe wyniki są błędne i stanowią jedynie ilustrację, uzasadniającą użycie Ogólnej Teorii Względności (OTW).

Ze wzoru na M_{Ch} wynika, iż nie zależy ona od typu fermionów o spinie 1/2 wytwarzających ciśnienie (elektrony, neutrony, neutrino). Np: masa graniczna kuli zbudowanej z neutronów to po prostu $4M_{Ch}$, ale tylko z tego powodu, iż neutronów jest 2 razy więcej.



Powyższe wyniki są błędne i stanowią jedynie ilustrację, uzasadniającą użycie Ogólnej Teorii Względności (OTW).

Metryka czasoprzestrzeni sferycznie symetrycznej:

$$ds^2 = g_{tt}(r)c^2 dt^2 + g_{rr}(r)dr^2 + R(r)^2 (\sin^2\theta d\phi^2 + d\theta^2)$$

Wybór funkcji $R(r)$ definiuje sposób mierzenia współrzędnej radialnej. Dla $R = r$ wzory na obwód okręgu i pole sfery o środku w centrum są identyczne jak w płaskiej przestrzeni.

Funkcje g_{tt} i g_{rr} muszą zostać wyliczone z równań Einsteina.

Znając z góry wynik, możemy ułatwić sobie życie przeddefiniowaniem

$$g_{tt} = - \left(1 + \frac{2\Phi(r)}{c^2} \right), \quad g_{rr} = \frac{1}{1 - \frac{2Gm(r)}{c^2 r}}.$$

Funkcja Φ to odpowiednik newtonowskiego potencjału grawitacyjnego, natomiast $m(r)$ masy zawartej wewnątrz sfery promieniu r .

Równania Einsteina można zapisać w niewiele mówiącej studentowi formie:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Tensor Einsteina $G_{\mu\nu}$ wyliczamy z metryki $g_{\mu\nu}$, a tensor energii-pędu $T_{\mu\nu}$ płynu to:

$$T_{\mu\nu} = (\varepsilon + P)U_\mu U_\nu + P g_{\mu\nu}.$$

W gwiazdzie materia spoczywa, co daje np: z warunku normalizacji $U^\mu U_\mu = -1$ czteroprędkość U_μ

$$U_\mu = \left\{ \frac{1}{\sqrt{-g_{tt}}}, 0, 0, 0 \right\}.$$

Obliczenie tensora $G_{\mu\nu}$ jest pracochłonne, i można wykonać je np: pakietem **ccgrg**, Copernicus Center General Relativity Package, <http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8848/>

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G(m + 4\pi r^3 P/c^2)(\rho + P/c^2)}{r(r - \frac{2Gm}{c^2})} \quad (1a)$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho, \quad \varepsilon \equiv \rho c^2, \quad \rho \neq m_p n_B \quad (1b)$$

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{G(m + 4\pi r^3 P/c^2)(1 + 2\Phi/c^2)}{r(r - \frac{2Gm}{c^2})} \quad (1c)$$

Dla porównania wersja newtonowska ($c \rightarrow \infty$):

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2} \quad (2a)$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (2b)$$

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{Gm}{r^2} \quad (2c)$$

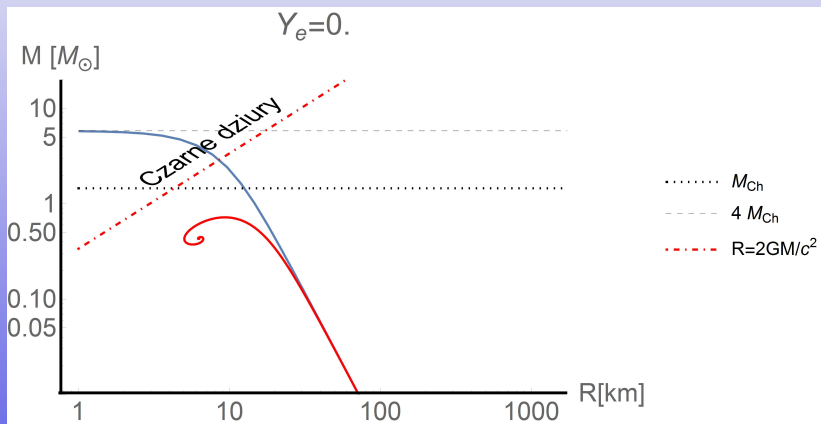
Istotne różnice pomiędzy teorią Newtona i Einsteina

- w przyciąganiu grawitacyjnym bierze udział całkowita energia ε , włączając m.in: masę „spoczynkową” (barionową) i energię kinetyczną
- ciśnienie powoduje dodatkowe przyciąganie
- grawitacja wpływa na geometrię, co istotnie zmienia opis gdy
$$r \sim \frac{2GM}{c^2}$$

OTW **musimy** wziąć pod uwagę dla:

- 1 gwiazd neutronowych
- 2 supernowych implozyjnych
- 3 w kosmologii
- 4 w ewolucji gwiazd o masach $M \sim 100M_{\odot}$ i większych, gdzie ciśnienie promieniowania dominuje
- 5 soczewkowaniu grawitacyjnym
- 6 emisji fal grawitacyjnych
- 7 **czarnych dziur** i procesów zachodzących w ich pobliżu

TOV dla gazu neutronowego



Dla mas obiektów zwartych $M \gg 2M_{\odot}$ nie są znane siły zdolne utrzymać równowagę hydrostatyczną. Musi powstać *czarna dziura*:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dr^2 + r^2 (\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2)$$

Wielkość $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ nazywamy promieniem Schwarzschilda lub grawitacyjnym. Powierzchnia określona jako $r = r_g$ to *horyzont zdarzeń*. W astrofizyce spotykamy je w formie:

- o masach gwiazdowych, kilka-kilkanaście M_{\odot} ; powstają w kolapsie i zderzeniach gwiazd neutronowych
- supermasywne, o masach milionów M_{\odot} i więcej; występują w centrach galaktyk

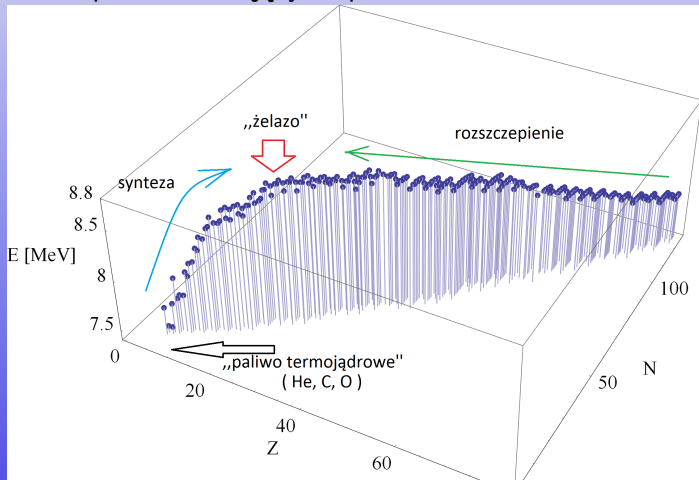
Proces pochłaniania materii przez cz. dz. jest efektywnym mechanizmem konwersji masy w energię, z wydajnością do $\sim 10\%$.

Teoria supernowych termojądrowych (ang. thermonuclear supernova)

Czym jest *supernowa termojądrowa* ?

Upraszczając, SN Ia to po prostu gigantyczna bomba termojądrowa. Aby doszło do wybuchu potrzebujemy:

- 1 materiał wybuchowy w ilości rzędu $1 M_{\odot}$
- 2 zapalnik, działający z opóźnieniem wielu miliardów lat



Teoria supernowych termojądrowych

Supernowe termojądrowe (typ Ia) są odmiennym od implozyjnych zjawiskiem astrofizycznym, przy ich modelowaniu nie natrafiono na fundamentalne trudności. Z powodu zastosowania w kosmologii jako indykatorów odległości, od teorii oczekujemy konkretnych i precyzyjnych informacji.

Pytanie I: co wybucha jako SN typu Ia?

- 1 akreujący biały karzeł w układzie podwójnym ze zwykłą gwiazdą (mechanizm opóźniający: akrecja)
- 2 układ podwójny **dwóch** białych karłów (mechanizm opóźniający: fale grawitacyjne)
- 3 pojedynczy, np: szybko rotujący, biały karzeł lub samozapłon w wyniku niestandardowych procesów fizycznych (mechanizm opóźniający: spowolnienie obrotu, małe prawdopodobieństwo)

Pytanie II: w jaki sposób przebiega wybuch?

- 1 deflagacja (płomień termojądrowy)
- 2 detonacja (zapłon na froncie fali uderzeniowej)

Ewolucja gwiazd podwójnych

Kluczowe fakty wynikające z teorii ewolucji gwiazd pojedynczych:

- w układzie podwójnym, bardziej masywny składnik ewoluuje szybciej
- w związku z powyższym, pierwszy staje się czerwonym olbrzymem i wypełnia powierzchnię Roche'a
- dochodzi do transferu masy, zmian orbity i zmian w rozmiarze strefy Roche'a

Gromadzenie się wodoru na powierzchni białego karła na ogół prowadzi do kwazi-okresowych eksplozji, które obserwujemy jako *gwiazdy nowe*. W wyniku tego, biały karzeł może zyskiwać na masie na masie, co może doprowadzić do osiągnięcia *masy zapłonu*. Masa ta jest na ogół **różna** od masy Chandrasekhara. Dla białych karłów He jest niska ($M=0.7M_{\odot}$), a dla białego karła C/O:

$$M_{CO} = 1.38M_{\odot} < M_{Ch} = 1.45M_{\odot}$$

Masa zapłonu i smouldering

\diamond	$M_{\text{ZAMS}} [M_{\odot}]$	$M_{\text{WD}} [M_{\odot}]$	$M_{\text{expl}} [M_{\odot}]$	M_{Ch}
He	0.08 ... 2.25	0.45	0.7	1.440
C+O	2.25 ... 10	0.6 ... 1.2	1.39	1.412
O+Ne+Mg	8 ... 11.5	1.15... 1.3	1.39	1.405

- dla białych karłów He oraz C/O zapłon zachodzi dla masy bezpiecznie niższej od M_{Ch}
- w przypadku ONeMg sprawa jest dyskusyjna (kolaps czy wybuch?)

Przez ~ 1000 lat przed wybuchem w centrum materia „tli się” (ang: smouldering, simmering), chłodzona neutrinowym rozpadem plazmonu i konwekcją. W momencie gdy tempo produkcji energii staje się zbyt duże pojawia się powierzchnia nieciągłości: **płomień termojądrowy** (ang. flame).

Aby dopasować produkcję pierwiastków do obserwacji wykonano serię obliczeń z różnymi prędkościami spalania v_s . Najlepszy okazał się model W7 Nomoto dla którego:

$$v_s \simeq 0.3c_s$$

gdzie c_s to prędkość dźwięku. Fizyka/chemia zna dwa mechanizmy spalania:

- deflagracja, $v_s \ll c_s$
- detonacja, $v_s \simeq c_s$

W obu przypadkach mamy do czynienia z przemieszczającą się powierzchnią nieciągłości. Różnica polega na produkcji dodatkowej energii za frontem.

Deflagracja

- płomień rozchodzący się poprzez przewodnictwo ciepłe
- prędkość na poziomie $v_s \simeq 0.01c_s$
- gaz rozpręża się w trakcie palenia
- spalanie częściowe
- produkowane wszystkie pierwiastki pomiędzy C/O a Fe

Detonacja

- zapłon na froncie fali uderzeniowej
- naddźwiękowa prędkość czoła fali $v_s \geq c_s$
- materia „nie wie”, że zbliża się fala detonacyjna
- spalanie całkowite
- produkowane głównie Fe

Deflagracja

- płomień rozchodzący się poprzez przewodnictwo ciepłe
- prędkość na poziomie $v_s \simeq 0.01c_s$
- gaz rozpręża się w trakcie palenia
- spalanie częściowe
- produkowane wszystkie pierwiastki pomiędzy C/O a Fe

Detonacja

- zapłon na froncie fali uderzeniowej
- naddźwiękowa prędkość czoła fali $v_s \geq c_s$
- materia „nie wie”, że zbliża się fala detonacyjna
- spalanie całkowite
- produkowane głównie Fe

Deflagracja

- płomień rozchodzący się poprzez przewodnictwo cieplne
- prędkość na poziomie $v_s \simeq 0.01c_s$
- gaz rozpręża się w trakcie palenia
- spalanie częściowe
- produkowane wszystkie pierwiastki pomiędzy C/O a Fe

Detonacja

- zapłon na froncie fali uderzeniowej
- naddźwiękowa prędkość czoła fali $v_s \geq c_s$
- materia „nie wie”, że zbliża się fala detonacyjna
- spalanie całkowite
- produkowane głównie Fe

Deflagracja i detonacja

Deflagracja

- płomień rozchodzący się poprzez przewodnictwo cieplne
- prędkość na poziomie $v_s \simeq 0.01c_s$
- gaz rozpręża się w trakcie palenia
- spalanie częściowe
- produkowane wszystkie pierwiastki pomiędzy C/O a Fe

Detonacja

- zapłon na froncie fali uderzeniowej
- naddźwiękowa prędkość czoła fali $v_s \geq c_s$
- materia „nie wie”, że zbliża się fala detonacyjna
- spalanie całkowite
- produkowane głównie Fe

Deflagracja i detonacja

Deflagracja

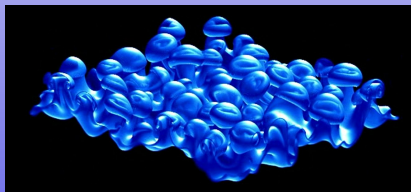
- płomień rozchodzący się poprzez przewodnictwo ciepłe
- prędkość na poziomie $v_s \simeq 0.01c_s$
- gaz rozpręża się w trakcie palenia
- spalanie częściowe
- produkowane wszystkie pierwiastki pomiędzy C/O a Fe

Detonacja

- zapłon na froncie fali uderzeniowej
- naddźwiękowa prędkość czoła fali $v_s \geq c_s$
- materia „nie wie”, że zbliża się fala detonacyjna
- spalanie całkowite
- produkowane głównie Fe

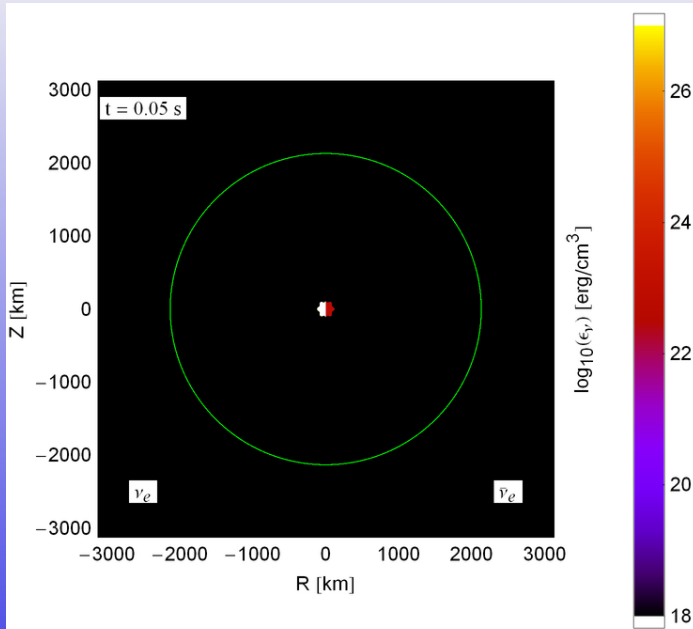
Próby uzgodnienia z fizycznymi procesami spalania

- zwiększenie efektywności spalania przez pofałdowanie płomienia [YouTube]
- zwiększenie liczby punktów zapłonu
- przejście spalania w detonację

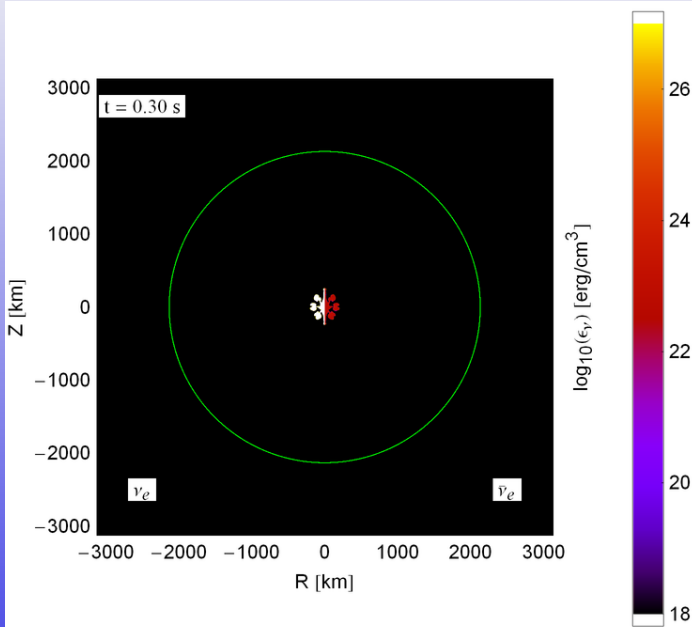


[YouTube]

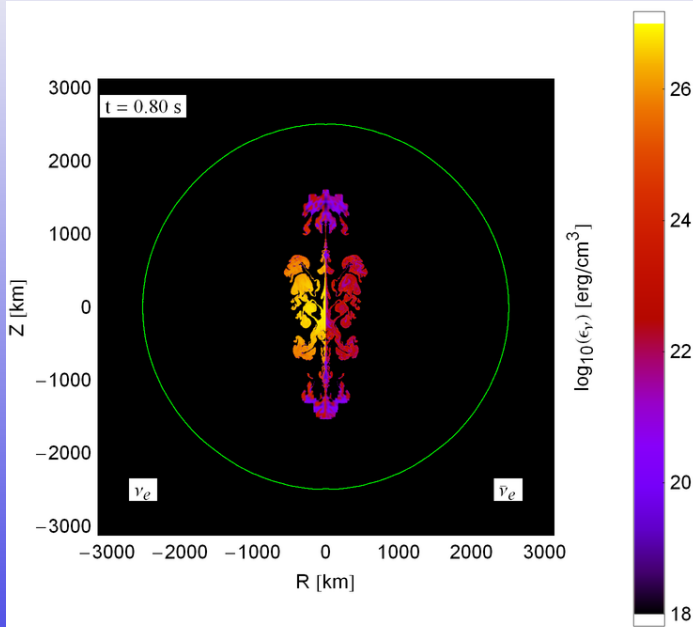
Przykład modelu deflagracji



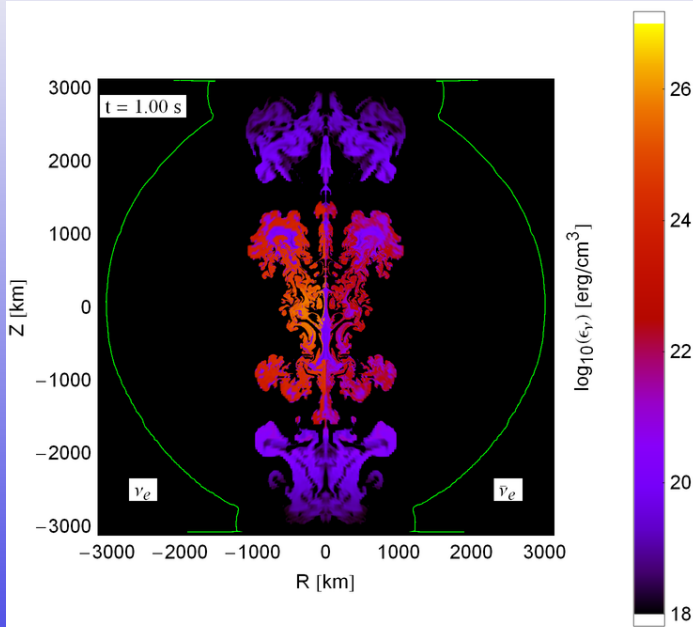
Przykład modelu deflagracji



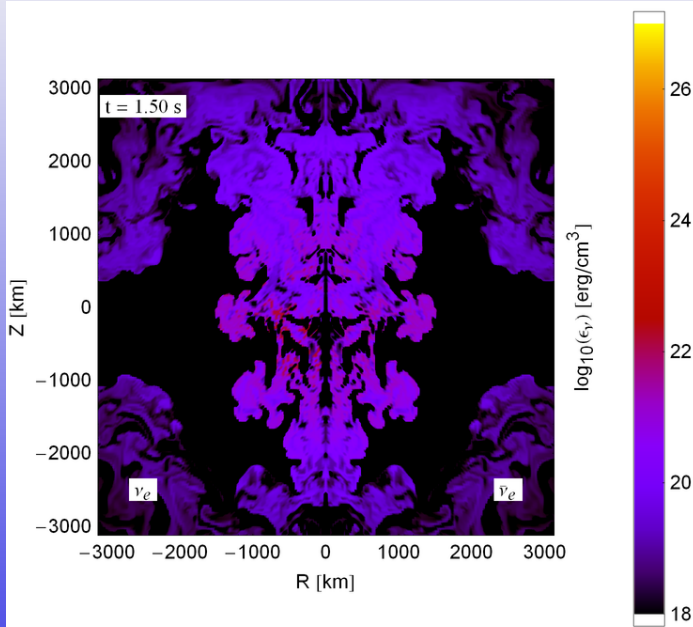
Przykład modelu deflagracji



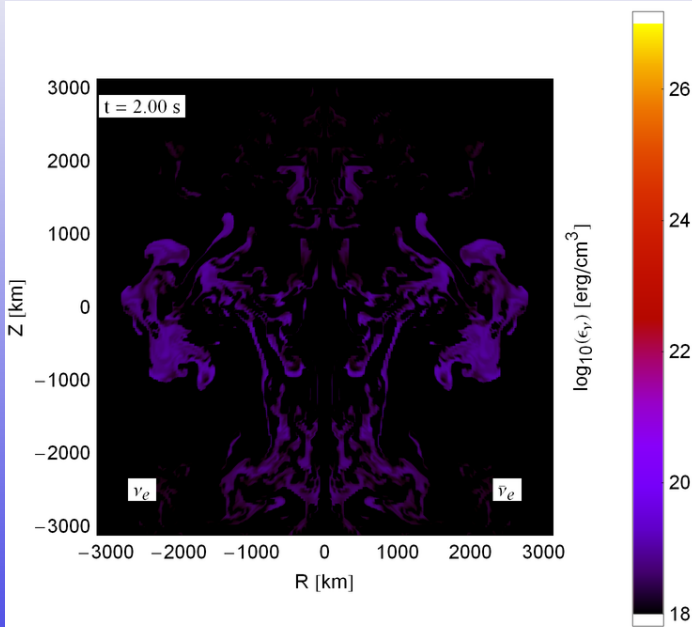
Przykład modelu deflagracji



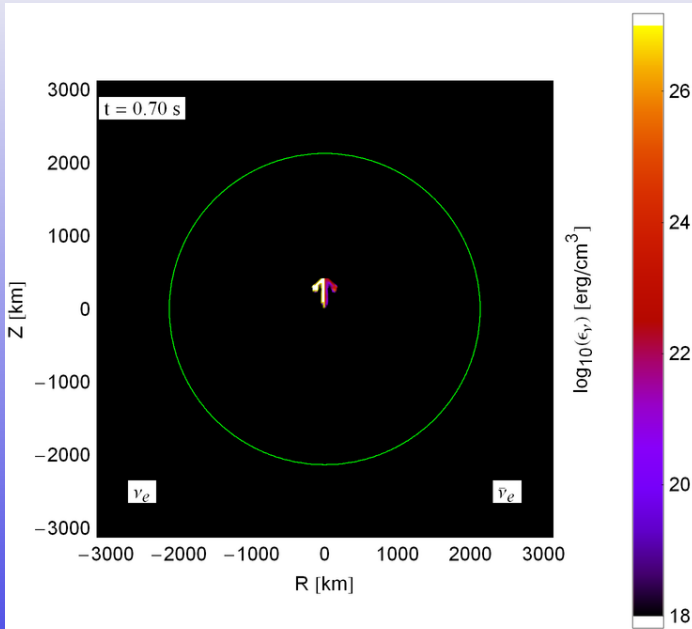
Przykład modelu deflagracji



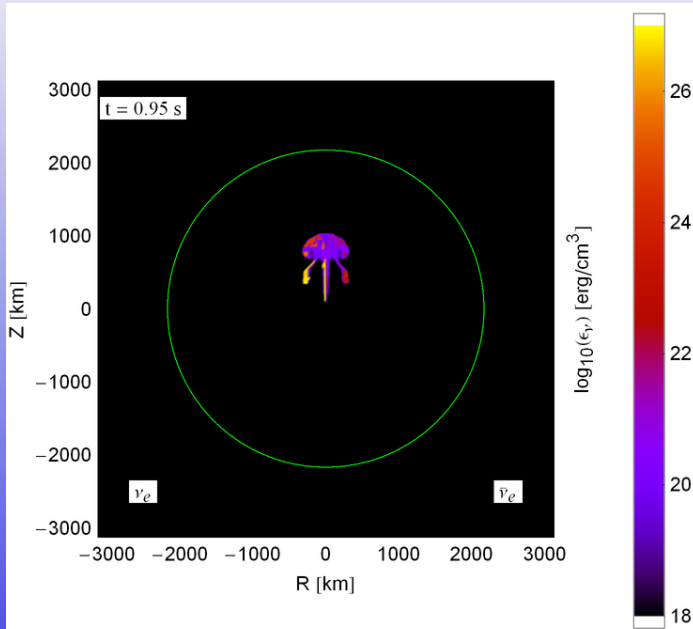
Przykład modelu deflagracji



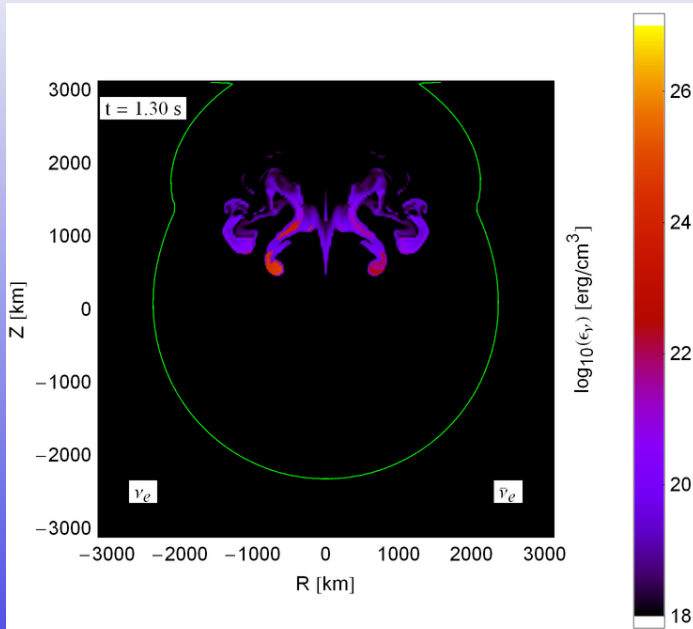
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



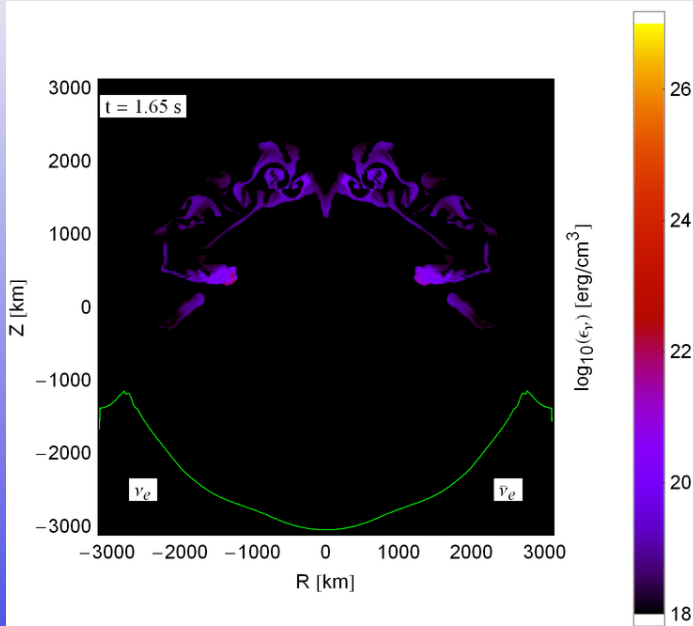
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



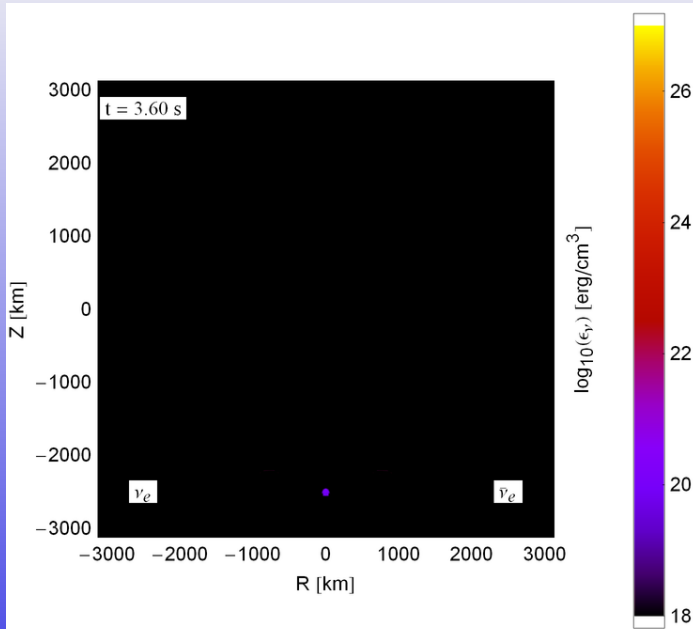
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



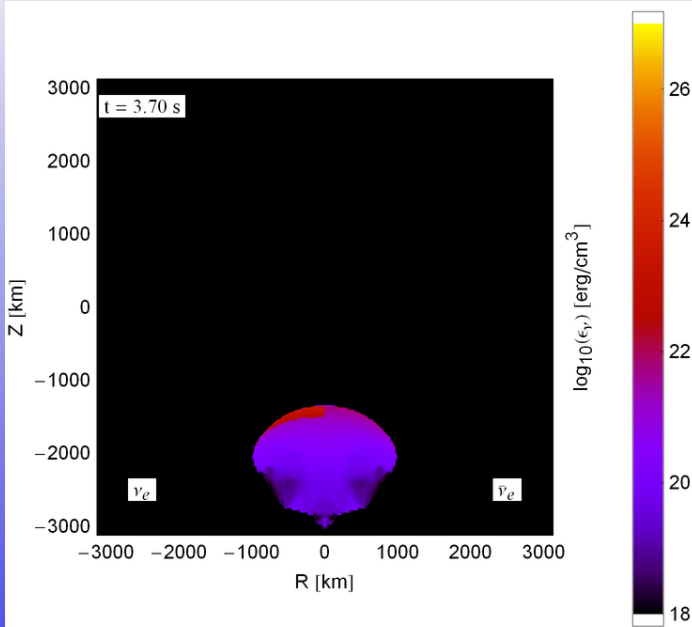
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



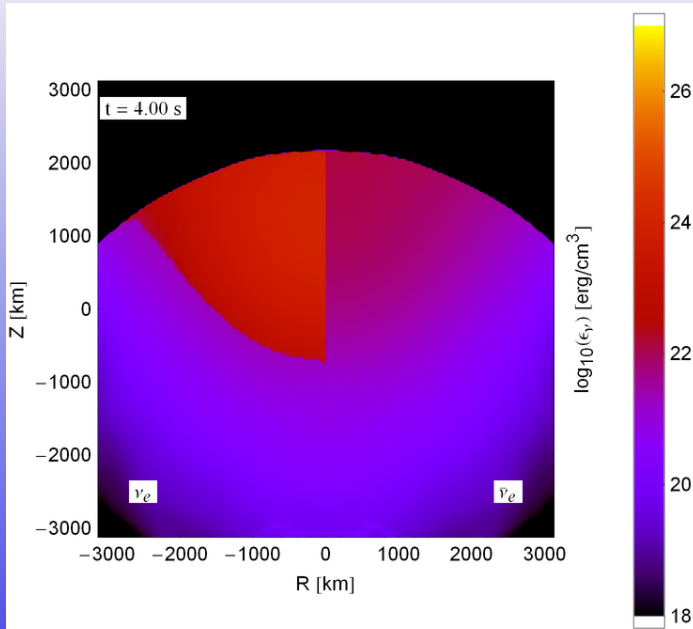
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



Przykład modelu z opóźnioną detonacją



Przykład modelu z opóźnioną detonacją



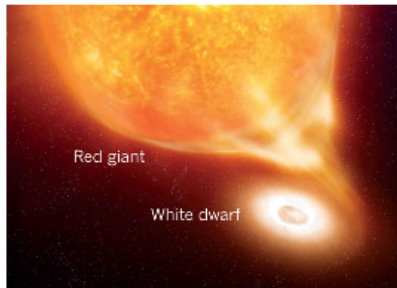
Animacje w czasie rzeczywistym:

- [n7]
- [y12]

Bardziej efektowna wizualizacja: [YouTube]

Obserwacje pobliskich supernowych wykluczyły zarówno istnienie drugiego składnika typu czerwonego olbrzyma, jak i mgławicy po wcześniejszych eksplozjach nowych. Wyniki są konsystentne z eksplozją białego karła w ośrodku międzygwiazdowym. Brak śladów H, a nawet He w widmie.

Supernowa Ia



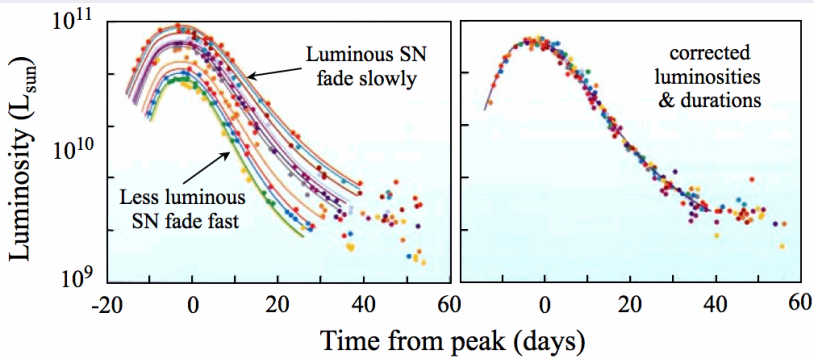
DAWNIEJ



DZISIAJ

SN Ia jako świece standardowe

- 1 w „zerowym” przybliżeniu każda supernowa termojądrowa jest identyczna: masa zapłonu $M \simeq M_{Ch}$ wynika bezpośrednio z praw fizyki (gaz fermionowy, fizyka jądrowa, OTW), skład jest stały: 50% C + 50 % O
- 2 obecnie jest jasne, że rozrzut występuje
- 3 około 85% supernowych to tzw. Branch-normals, reszta to przypadki anomalne
- 4 normalne przypadki wykazują bardzo silną korelację pomiędzy czasem świecenia a jasnością absolutną



- UWAGA 1: obserwowany z dużej odległości czas wybuchu, podlega *kosmologicznej dylatacji czasu*; dla przesunięcia ku czerwieni z wybuch oglądamy w tempie zwolnionym $1 + z$ razy
- UWAGA 2: korelacja jest czysto obserwacyjna; jej fizyczne przyczyny są nieznanne a proponowane wyjaśnienia mają charakter spekulacyjny

Dla gwiazd o masie kilkudziesięciu M_{\odot} i większej, pojawiają się przynajmniej dwa istotne efekty fizyczne:

- 1 ciśnienie promieniowania zaczyna dominować, co powoduje, że musimy uwzględnić OTW
- 2 temperatury zbliżają się do $kT \sim m_e c^2$, co powoduje produkcję stale utrzymującej się pewnej liczby par $e^+ e^-$

Rozkłady Fermiego-Diraca dla elektronów i pozytonów to:

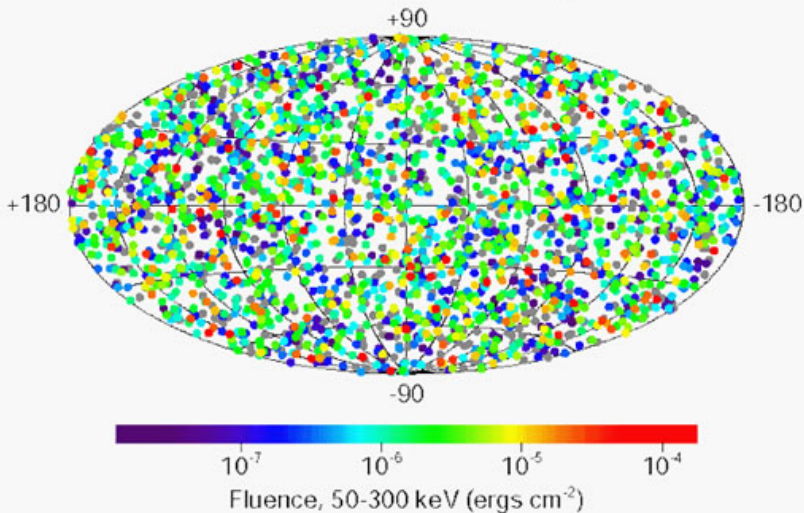
$$e^+ + e^- \leftrightarrow 2\gamma \rightarrow \mu_{e^+} + \mu_{e^-} = 0 \rightarrow f_{e^{\pm}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E \mp \mu}{kT}}}, \quad n_e = n_{e^-} - n_{e^+}$$

W efekcie równanie stanu zmienia się tak, że $n > 3$, co skutkuje kolapsem grawitacyjnym, prawdopodobnie zatrzymanym przez wybuchowe spalanie w jądrze C/O o masie kilkudziesięciu M_{\odot} . Byłby to brakujący czwarty typ supernowej: termojądrowa wewnątrz masywnej otoczki H/He. Potencjalny (ale wątpliwy) przypadek to SN2007bi

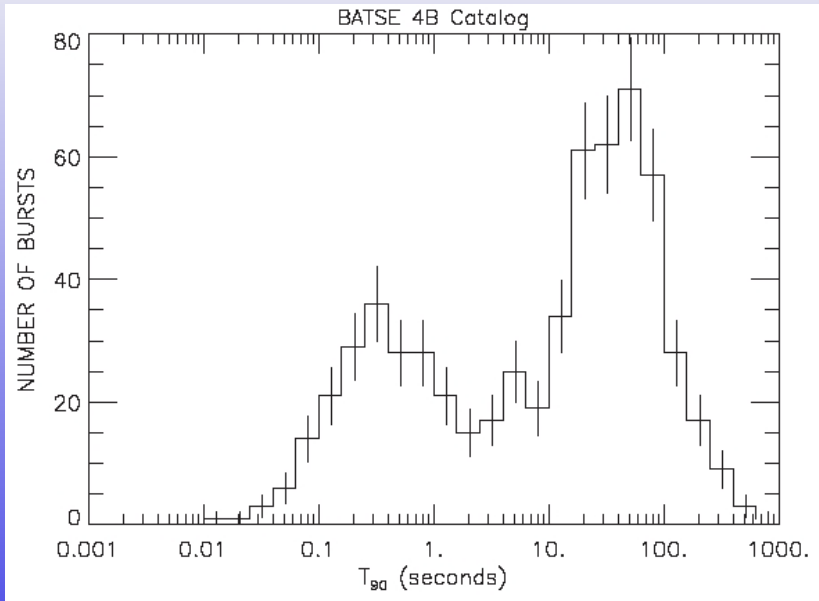
Impulsy promieniowania gamma i rentgenowskiego, pochodzenia kosmicznego, cechowane:

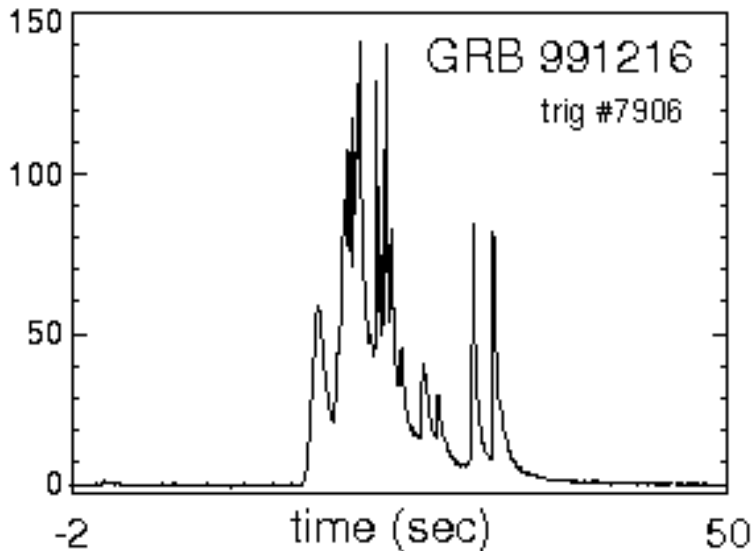
- 1 losowym rozkładem na niebie
- 2 częstością występowania 1/dzień
- 3 dwie klasy: krótkie ($t < 2s$) i długie $t > 2s$ (do kilku minut)
- 4 pojawiają się na odległościach „kosmologicznych”
- 5 przy założeniu izotropowej emisji sumaryczna energia eksplozji to nawet 1000 foe ($100x$ hipernowa, $\sim 1M_{\odot}c^2$!)

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

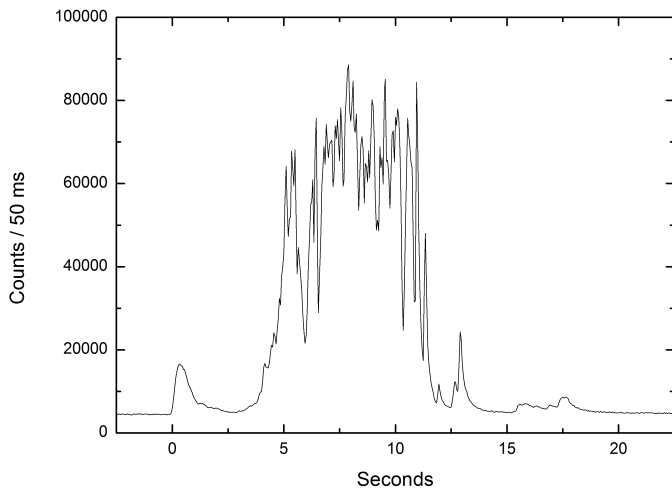


Rozbłyski gamma





Rozbłyski gamma



- proponowany mechanizm to *merger* (złanie się) 2 gwiazd neutronowych (NS+NS) lub układu NS+BH
- układ podwójny zmniejsza rozmiary orbitalne na skutek emisji fal grawitacyjnych (*inspiral*)
- efektem pośrednim jest czarna dziura otoczona dyskiem akrecyjnym
- wzdłuż osi obrotu wytwarzany jest tzw. dżet (*jet*), czyli silnie zogniskowany strumień promieniowania i materii

- krzywa „blasku” ma postać serii krótkich impulsów — ich liczba i cechy wydają się być zupełnie losowe (nie ma 2 identycznych)
- obecnie jest jasne, że występują w galaktykach, w rejonach formowania się gwiazd
- w wielu przypadkach wykryto opóźnioną poświatę optyczną, często wyglądającą jak supernowa
- obecnie twierdzi się, że strumień fotonów γ jest emitowany w stożku o kącie rozwarcia rzędu $4\pi/100$, co redukuje wymaganą energię do poziomu 10 foe, czyli hipernowej
- materia emitującą fotony porusza się z prędkościami bliskimi c , a czynnik Lorentza $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ jest rzędu kilkuset
- pregenitorami są prawdopodobnie gwiazdy Wolfa-Rayeta, czyli pozbawione H a nawet He jądra masywnych gwiazd — są to więc typy Ib/c ale obserwowane wzdłuż osi rotacji

GRB, hipernowe, czarne dziury, cichy kolaps

Wybuch supernowej prowadzący do powstania gwiazdy neutronowej nie jest jedynym możliwym skutkiem kolapsu.

- natychmiast lub z opóźnieniem (poprzez deleptonizację lub akrecję) może powstać czarna dziura
- obecnie jasne jest, że długie rozbłyski gamma (ang: **Gamma Ray Burst**) to także supernowe, obserwowane wzdłuż osi obrotu
- trudno obecnie wykluczyć możliwość, że mechanizm supernowej faktycznie czasem zawodzi, i niektóre masywne gwiazdy po prostu gasną pochłonięte przez czarną dziurę, która powstała w ich centrum

Hipernowe

Wszystkie anomalnie jasne przypadki supernowych i ich modele zbiorczo określa się mianem hipernowych. Zwykle wiąże się je z:

- powstaniem czarnej dziury w centrum
- bardzo szybką rotacją
- polami magnetycznymi
- asymetrią eksplozji obserwowanej pod uprzywilejowanym kątem
- produkcją jet-ów