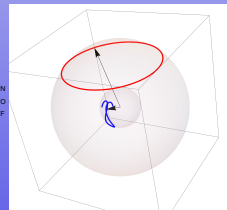
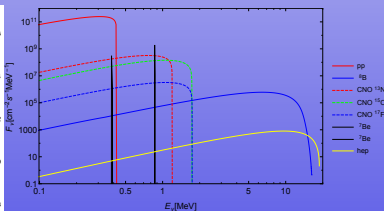
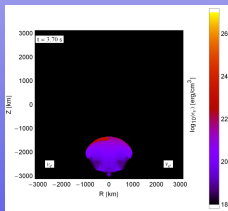


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

5 czerwca 2018

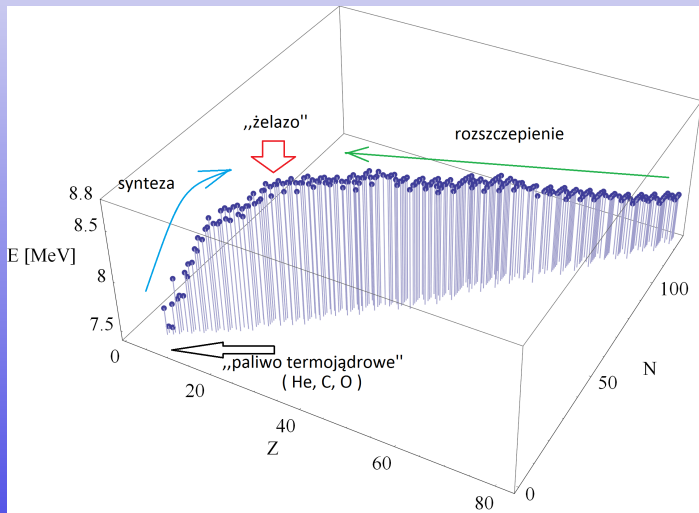


Teoria supernowych termojądrowych (ang. thermonuclear supernova)

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



Supernowe termojądrowe (typ Ia) są odmiennym od implozyjnych zjawiskiem astrofizycznym, przy ich modelowaniu nie natrafiono na fundamentalne trudności. Jednak 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 deflagracja (płomień termojądrowy)
- 2 detonacja (zapłon na froncie fali uderzeniowej)

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:

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

| \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. *thermonuclear 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 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

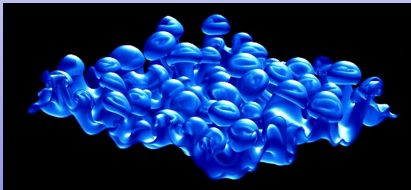
Deflagracja

- 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

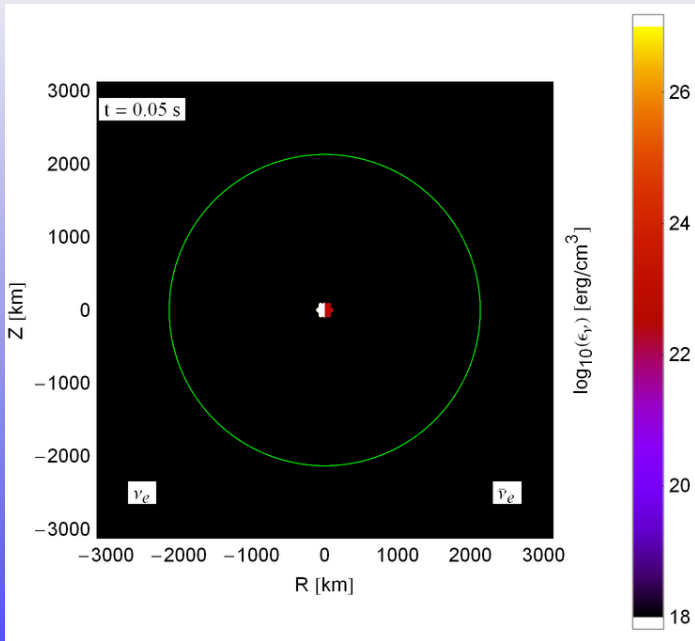
- zwiększenie efektywności spalania przez pofałdowanie płomienia [YouTube]



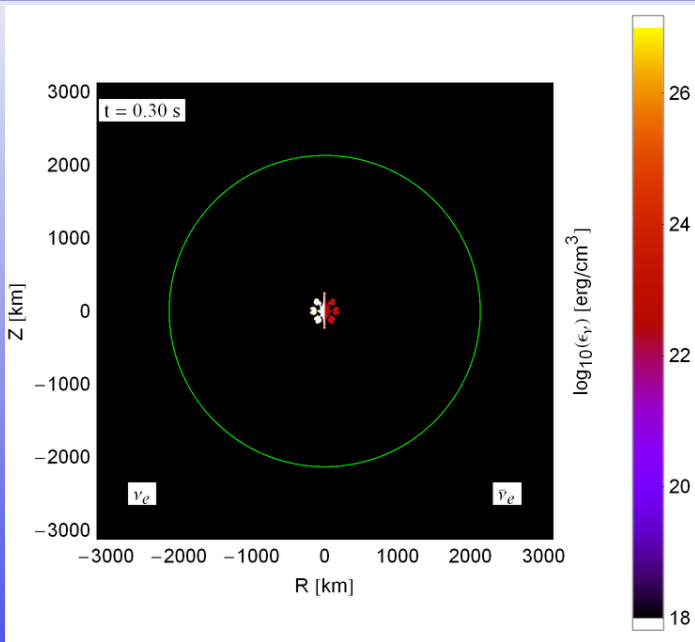
[YouTube]

- zwiększenie liczby punktów zapłonu
- przejście spalania w detonację

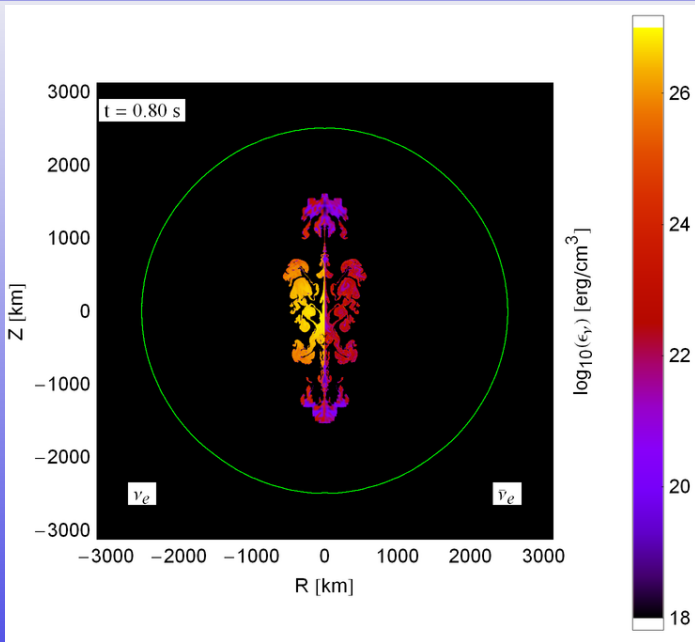
Przykład modelu deflagracji



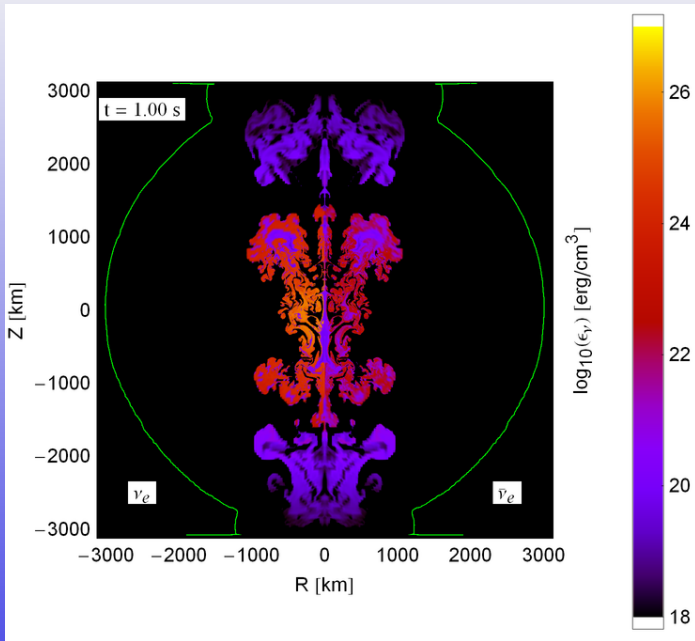
Przykład modelu deflagracji



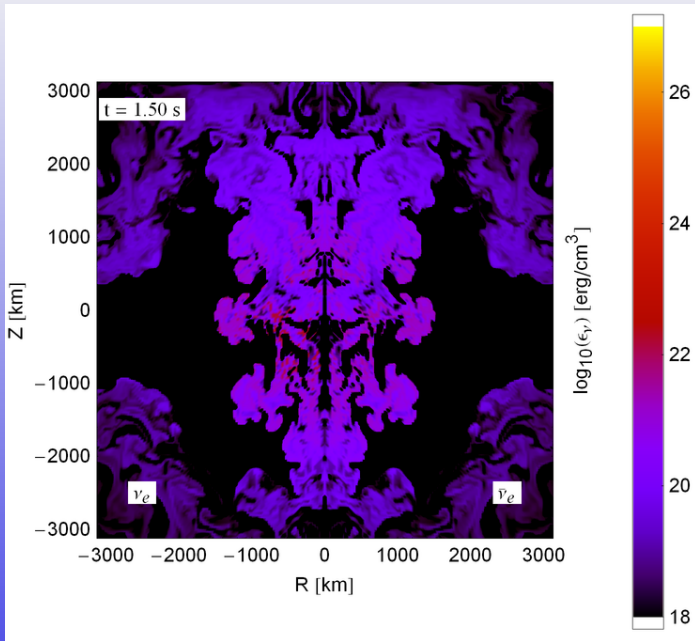
Przykład modelu deflagracji



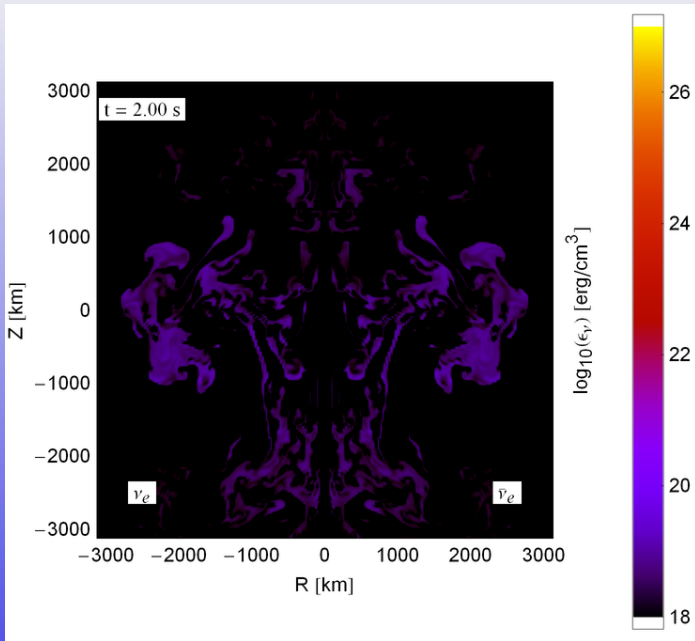
Przykład modelu deflacji



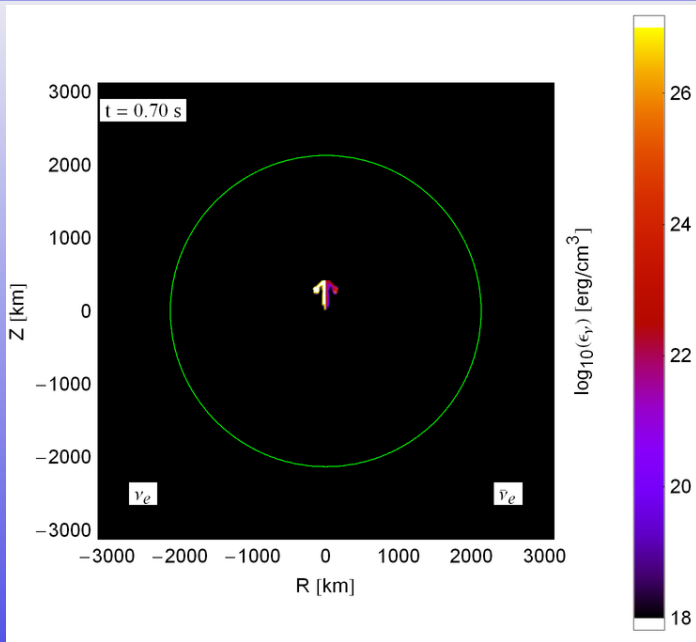
Przykład modelu deflagracji



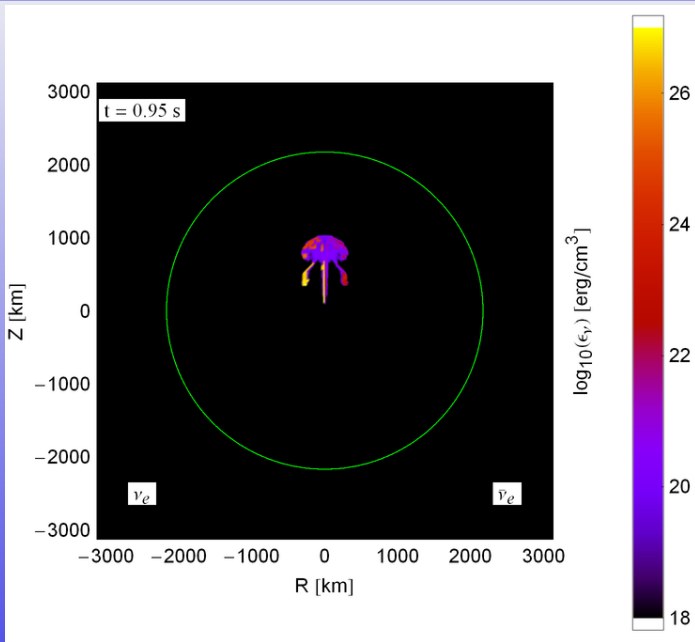
Przykład modelu deflacji



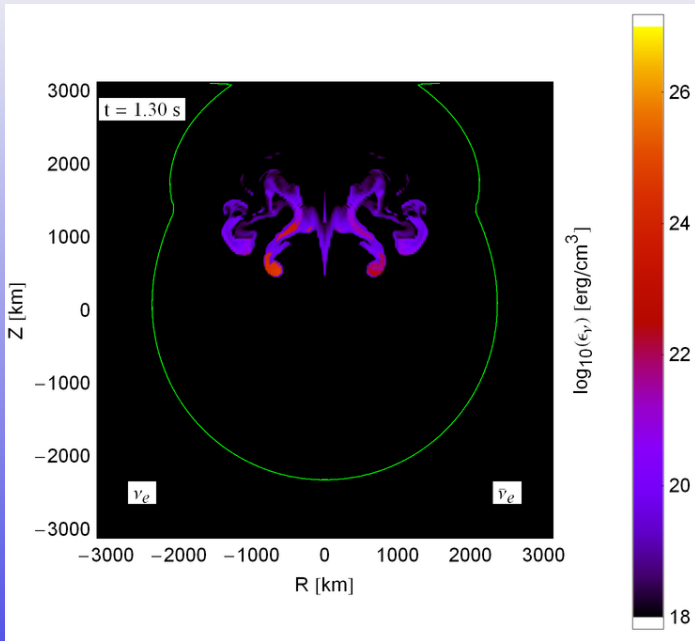
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



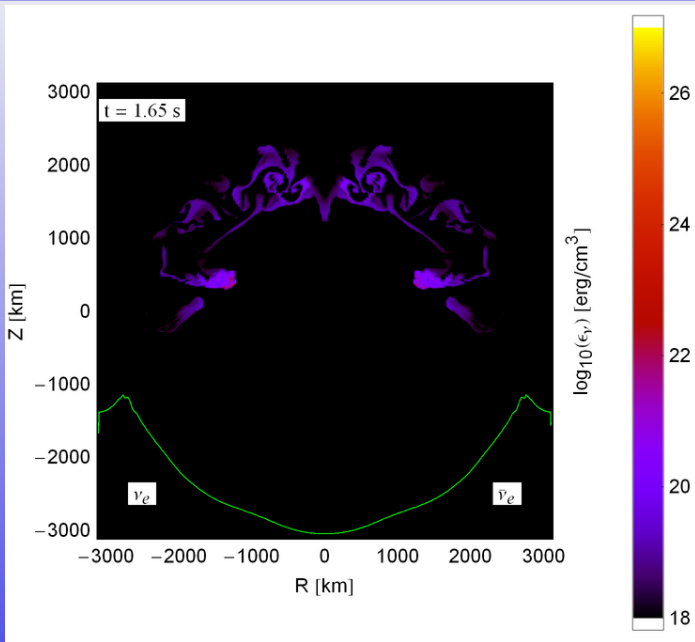
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



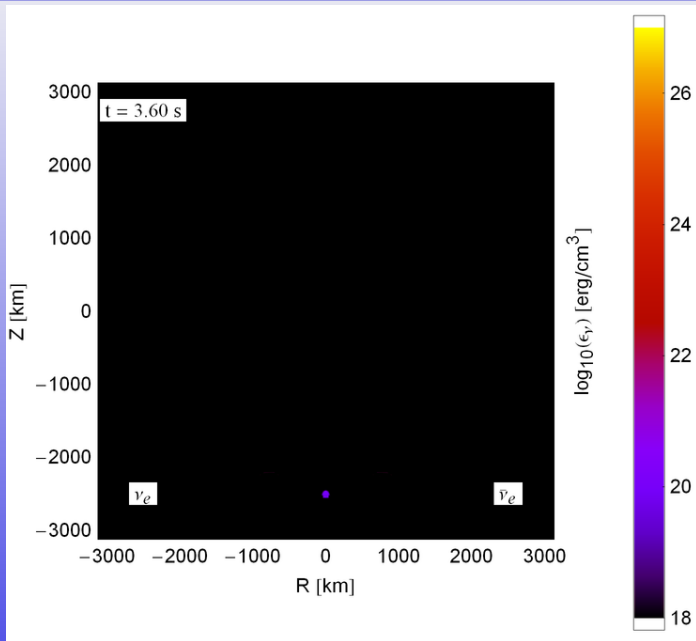
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



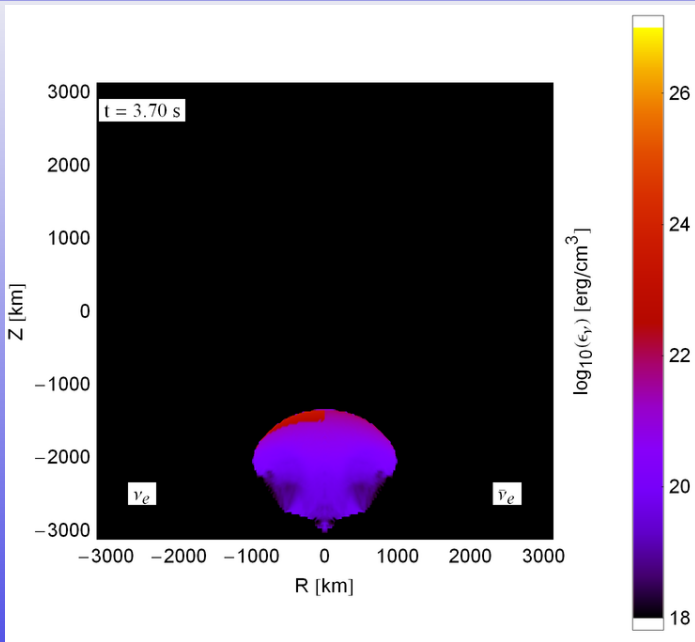
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



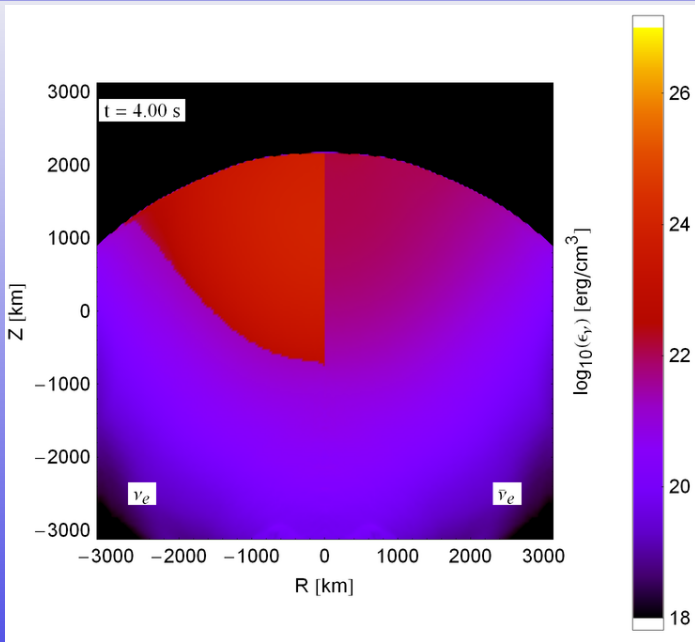
Przykład modelu z opóźnioną detonacją



Przykład modelu z opóźnioną detonacją



Przykład modelu z opóźnioną detonacją



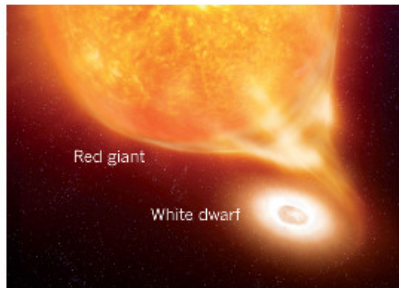
Animacje w czasie rzeczywistym:

- [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

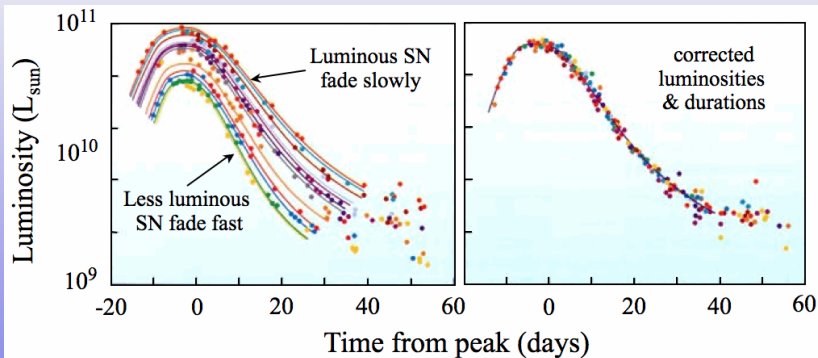


DAWNIEJ



DZISIAJ

- 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



- o 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
- o UWAGA 2: korelacja jest czysto obserwacyjna; jej fizyczne przyczyny są nieznane 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 $e^+ e^-$

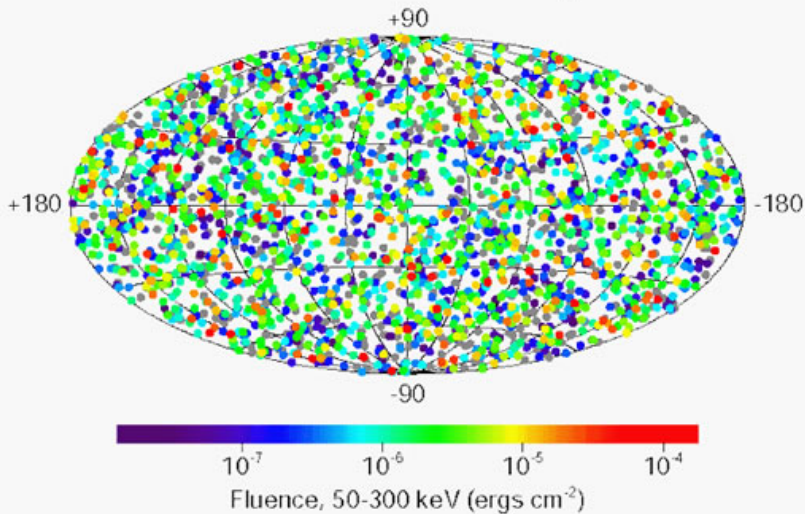
W efekcie równanie stanu zmienia się tak, że $n > 3$, co skutkuje kolapsem grawitacyjnym, prawdopodobnie zatrzymanym przez wybuchowe spalanie w jądrze C/O o masie kilkudziesięciu M_{\odot} . Byłby to brakujący czwarty typ supernowej: termojądrowa wewnątrz masywnej otoczki H/He. Potencjalny (ale wątpliwy)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

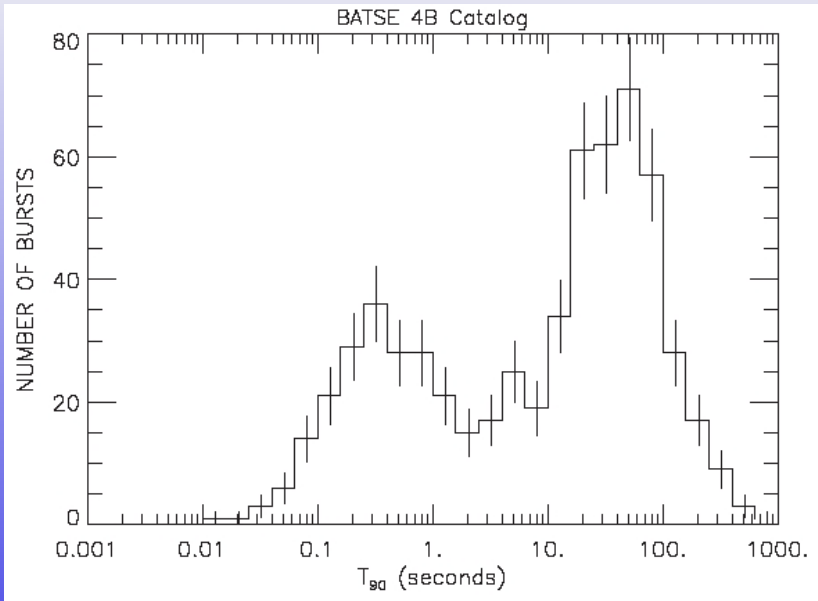
Observacje fal grawitacyjnych sugerują, że jądra He raczej kolapsują do czarnych dziur!

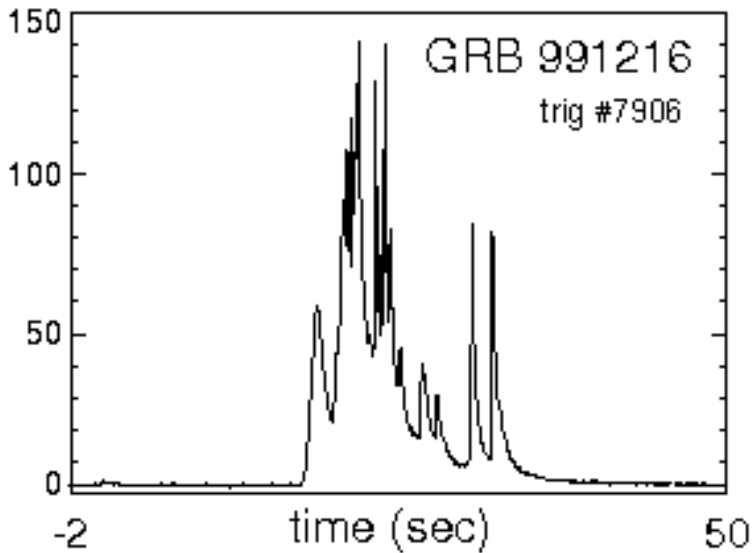
Impulsy promieniowania gamma i rentgenowskiego, pochodzenia kosmicznego, cechowane:

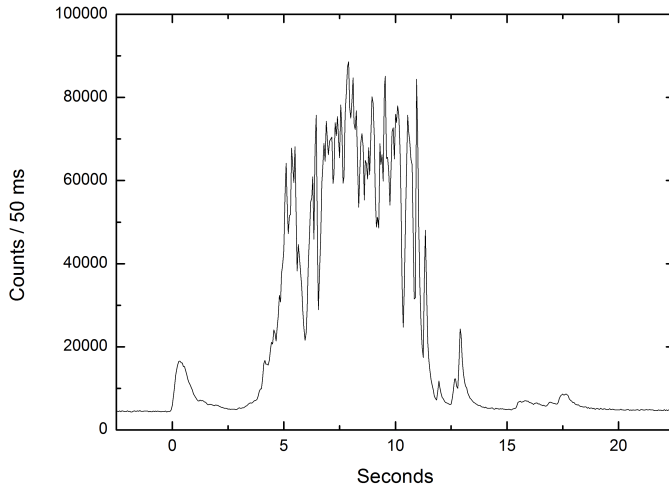
- 1 losowym rozkładem na niebie
- 2 częstością występowania 1/dzień
- 3 dwie klasy: krótkie ($t < 2s$) i długie $t > 2s$ (do kilku minut)
- 4 pojawiają się na odległościach „kosmologicznych”
- 5 przy założeniu izotropowej emisji sumaryczna energia eksplozji to nawet 1000 foe (100x hipernowa, $\sim 1M_{\odot}c^2$!)

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts





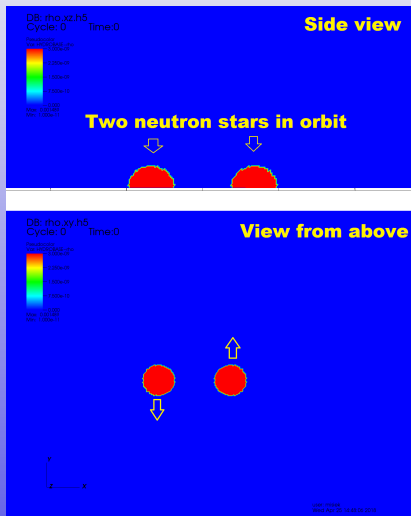




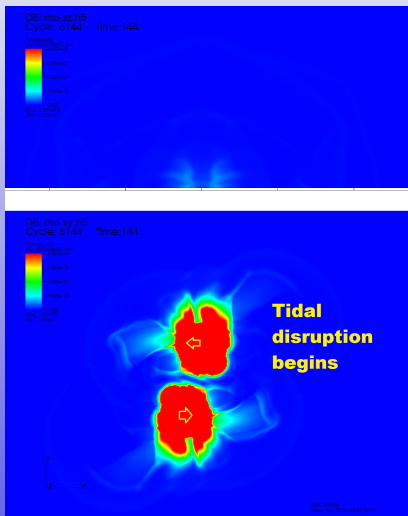
- krzywa „blasku” ma postać serii krótkich impulsów — ich liczba i cechy wydają się być zupełnie losowe (nie ma 2 identycznych)
- obecnie jest jasne, że występują w galaktykach, w rejonach formowania się gwiazd
- w wielu przypadkach wykryto opóźnioną poświatę optyczną, często wyglądającą jak supernowa
- 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

- proponowany mechanizm to *merger* (zlanie 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

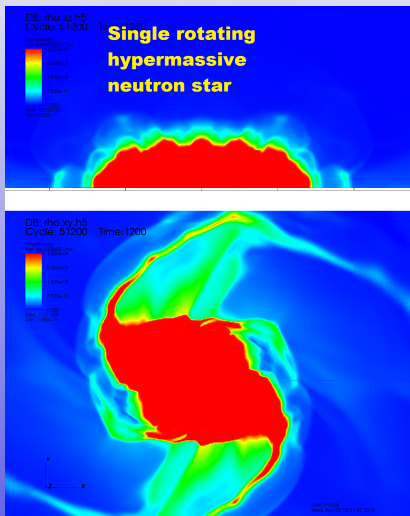
Neutron star mergers (kilonova)



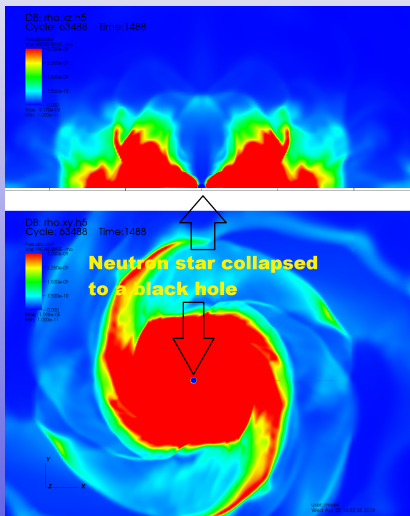
Neutron star mergers (kilonova)



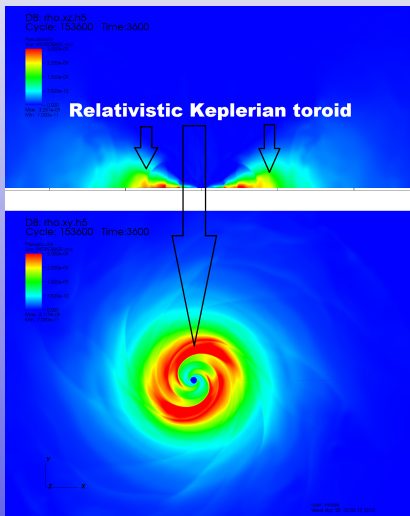
Neutron star mergers (kilonova)



Neutron star mergers (kilonova)



Neutron star mergers (kilonova)



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 w 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

Słońce i Układ Słoneczny

- niewyróżniająca się gwiazda Galaktyki
- ze względu na bliskość kompleksowo przebadana eksperymentalnie i teoretycznie
- stale monitorowana, w niektórych aspektach (np: plamy słoneczne) od kilkuset lat
- występują w niej prawie wszystkie procesy istotne w teorii ewolucji gwiazd
- jest perfekcyjnie sferyczne ($\Delta R/R \simeq 7 \times 10^{-5}$) i bardzo wolno obraca się (raz na miesiąc)

Słońce z dobrym przybliżeniem promieniuje jak ciało doskonale czarne. Widmo energetyczne (energia fotonu $E_\gamma = h\nu$) promieniowania ma postać Plancka:

$$\frac{dL}{d(h\nu)} = L_\odot \frac{15}{(\pi k T_\odot)^4} \frac{(h\nu)^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

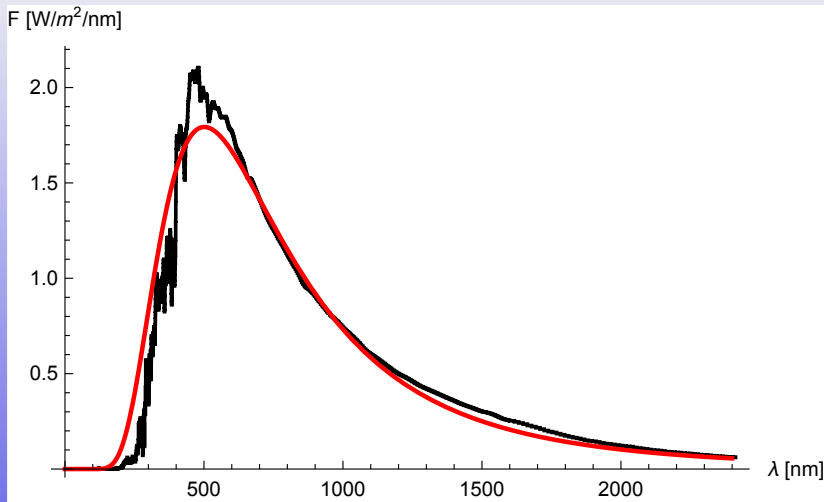
Temperaturę efektywną $T_\odot = T_{\text{eff}}$ definiujemy poprzez całkowitą moc promieniowania, tak aby był spełniony wzór Stefana-Boltzmana $L_\odot = 4\pi R_\odot^2 T_\odot^4$.

Stała słoneczna

Natężenie promieniowania w odległości $d = 1$ AU nazywamy *stałą słoneczną*:

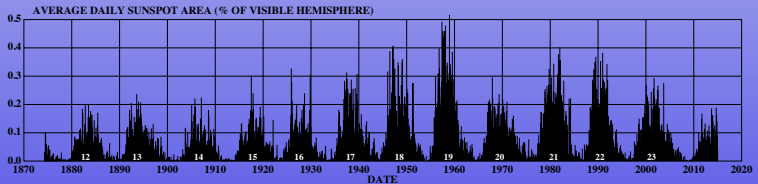
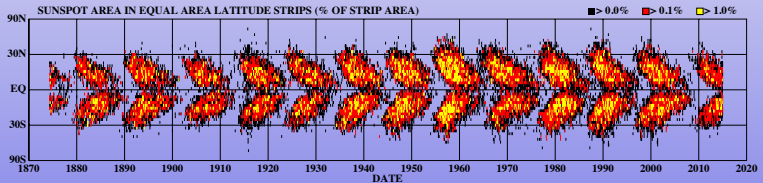
$$\frac{L_\odot}{4\pi d^2} = 1361 \text{ W/m}^2$$

Faktyczna ilość energii na m^2 docierająca do powierzchni Ziemi jest zmienna i prawie 10 razy mniejsza.



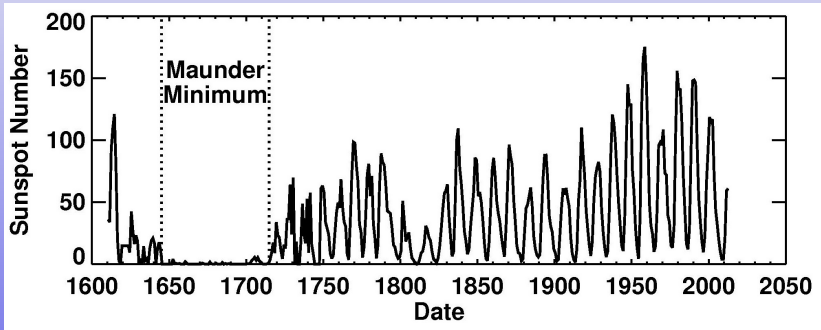
$$\frac{dF}{d\lambda} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} \frac{2\pi hc^2}{\sigma T^4} \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, T = 5877 \text{ K}, d = 1 \text{ AU}, L_{\odot} = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

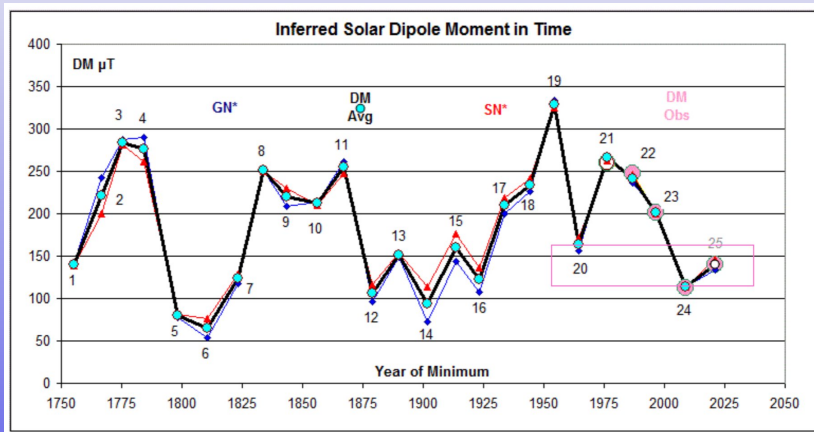


<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/BFLY.PDF>

HATHAWAY NASA/ARC 2015/3



<http://www.leif.org/research/Prediction-of-SC25.pdf>



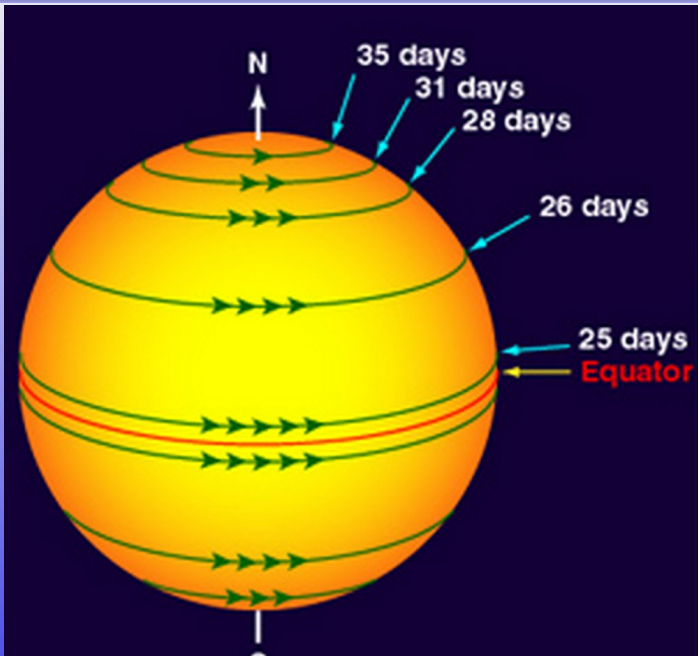
<http://www.leif.org/research/Prediction-of-SC25.pdf>

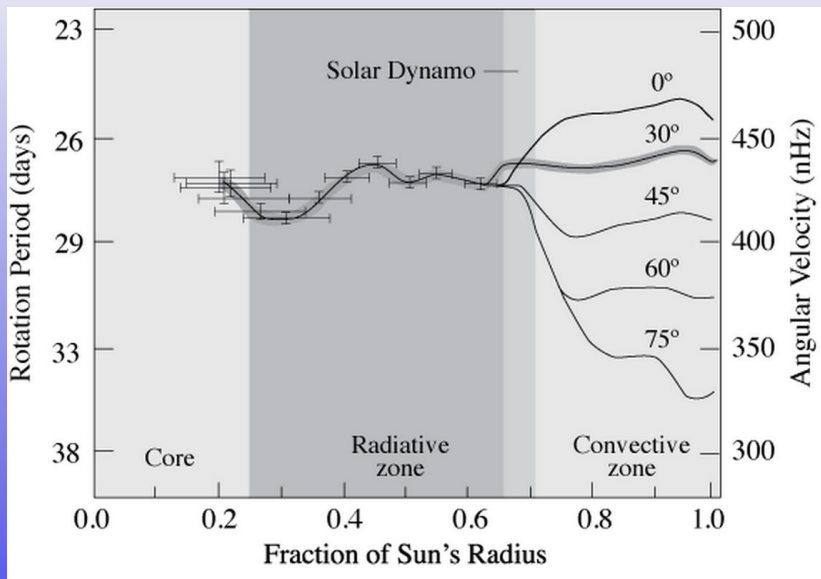
Podstawowe fakty:

- 1 okres obrotu na równiku $T \simeq 25$ dni
- 2 dla porównania: okres orbity tuż nad powierzchnią Słońca

$$2\pi/\sqrt{\frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}^3}} \simeq 2.7 \text{ godziny}$$

- 3 Słońce obraca się ponad 200 razy wolniej niż to możliwe
- 4 rotacja ma charakter różnicowy: obrót na równiku jest szybszy ($T=25$ dni) niż na biegunach ($T>30$ dni)
- 5 rotacja zmienia się z odległością od centrum

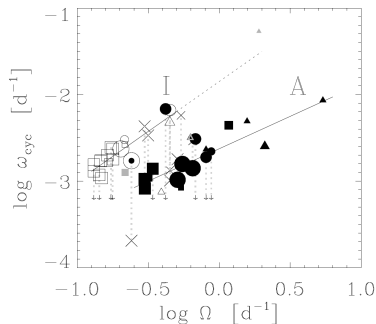
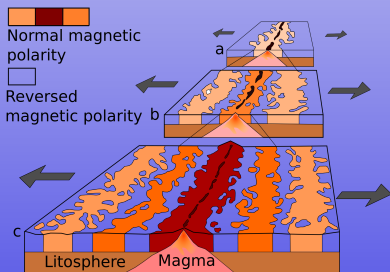




Cykl magnetycznej aktywności Słońca i Ziemi

Pełny cykl aktywności obejmuje dwa maksima aktywności ze zmianą biegunów magnetycznych, po czym pole magnetyczne wraca do pozycji wyjściowej.

- dla Słońca pełny cykl wynosi $2 \times 11 = 22$ lata
- analogiczne zjawisko przebiegunowania pola magnetycznego Ziemi zachodzi w kwaziperiodyczny sposób z czasem od 700 tysięcy do 2 milionów lat. Ostatnie miało miejsce 780 tys. lat temu.
- podobne zjawisko obserwujemy dla innych gwiazd



Obliczenie widma energetycznego neutrin słonecznych wymaga bardzo szczegółowego rozpatrzenia spalania wodoru:

- cykl *ppI*
- cykl *ppII*
- cykl *ppIII*
- cykl CNO

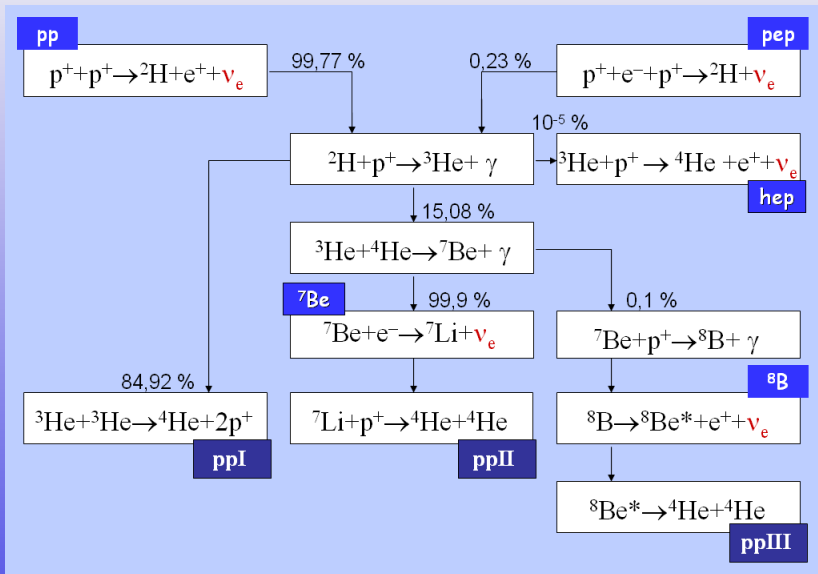
Wszystkie neutrino (w tym *pp* i *hep*) pochodzą z rozpadów β jąder. W Słońcu występują dwa typy takich reakcji, na przykład:

- 1 *ppII*: wychwytywanie elektronu (*neutrino berylowe, pep*)



- 2 *ppIII*: rozpad β^+ (*neutrino borowe, pp, hep, CNO*)

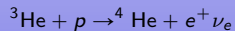




Typy widma neutrinowego ze Słońca

| | ciągłe | liniowe |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| rozpad β^+ | ${}^8\text{B}$, pp , hep , CNO | — |
| wychwyt ϵ^- | — | pep , ${}^7\text{Be}$ |

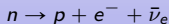
- Reakcja hep jest analogiczna do pp :



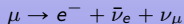
- W cyklu CNO pojawiają się neutrino z rozpadów ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ oraz ${}^{17}\text{F}$.

Funkcyjną postać widma neutrinowego można łatwo zrozumieć analizując rachunek dotyczący prostszych procesów, np:

- rozpad β neutronu:



- rozpad β mionu:



W ogólności prawdopodobieństwo rozpadu β wynosi:

$$\frac{2\pi}{\hbar} \int \langle in|H|out \rangle^2 \delta(E_{in} - E_{out}) dN_e dN_\nu dN_{out}$$

Z rozpadu μ otrzymujemy wartość stałej sprzężenia oddziaływań słabych, stałą Fermiego G_F , natomiast z czasu rozpadu neutronu wartość $\langle in|H|out \rangle^2$ dla procesów z udziałem protonów, neutronów, elektronów i neutrin. Dalej zakładam, że $\langle in|H|out \rangle^2 \propto M^2$ jest znaną wielkością liczbową.

Zakładam, że proton i neutron spoczywa, czyli ilość stanów końcowych protonu wynosi 1. Pozostaje całkowanie po ilości stanów końcowych elektronów $dN_e = d^3 p_e / h^3$ i neutrin $dN_\nu = d^3 p_\nu / h^3$:

$$\int \delta(m_n - m_p - E_e - E_\nu) d^3 p_e d^3 p_\nu.$$

Przechodzimy do układu sferycznego i całkując po wszystkich kierunkach elektronów i neutrin mamy:

$$\int \delta(m_n - m_p - E_e - E_\nu) 4\pi p_e^2 dp_e 4\pi p_\nu^2 dp_\nu.$$

Dla elektronów $E_e^2 - p_e^2 = m_e^2$, dla neutrin $E_\nu = p_\nu$ ($c = 1$). Całkowanie delty Diraca sprowadza się do wyrugowania energii elektronu, bądź neutrina. W teorii rozpadu β na ogół ruguje się E_ν , my robimy odwrotnie:

$$E_e = Q - E_\nu, \quad \text{gdzie: } Q = (m_n - m_p)c^2$$

czyli całkowite tempo rozpadu jest proporcjonalne do:

$$\lambda \propto \int_0^{Q-m_e} \sqrt{(Q - E_\nu)^2 - m_e^2} (Q - E_\nu) E_\nu^2 dE_\nu$$

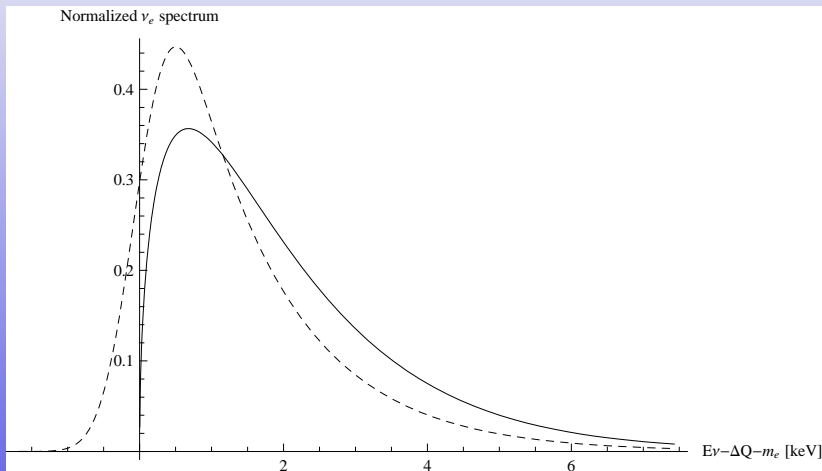
Wynik uogólniony na przypadek, gdy elektrony tworzą gaz Fermiego:
Wychwył elektronu:

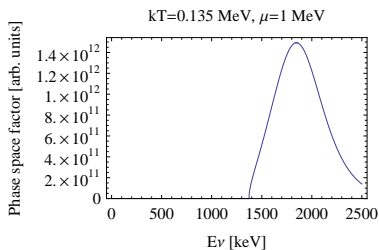
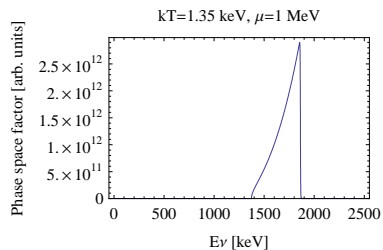
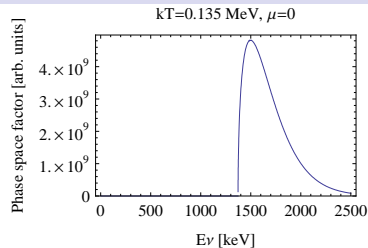
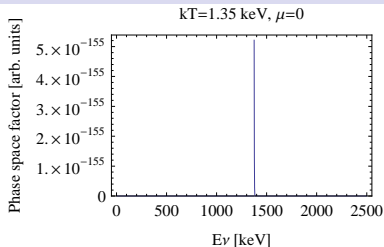
$$\frac{dF_\nu}{d\varepsilon_\nu} \propto \frac{\varepsilon_\nu^2 (\varepsilon_\nu - \Delta Q) \sqrt{(\varepsilon_\nu - \Delta Q)^2 - m_e^2}}{1 + \exp[(\varepsilon_\nu - \Delta Q - \mu)/kT]} \Theta(\varepsilon_\nu - \Delta Q - m_e) \quad (1)$$

Rozpad β^+ :

$$\frac{dF_\nu}{d\varepsilon_\nu} \propto \frac{\varepsilon_\nu^2 (\Delta Q - \varepsilon_\nu) \sqrt{(\varepsilon_\nu - \Delta Q)^2 - m_e^2}}{1 + \exp(\varepsilon_\nu - \Delta Q + \mu)/kT} \Theta(\Delta Q - m_e - \varepsilon_\nu) \quad (2)$$

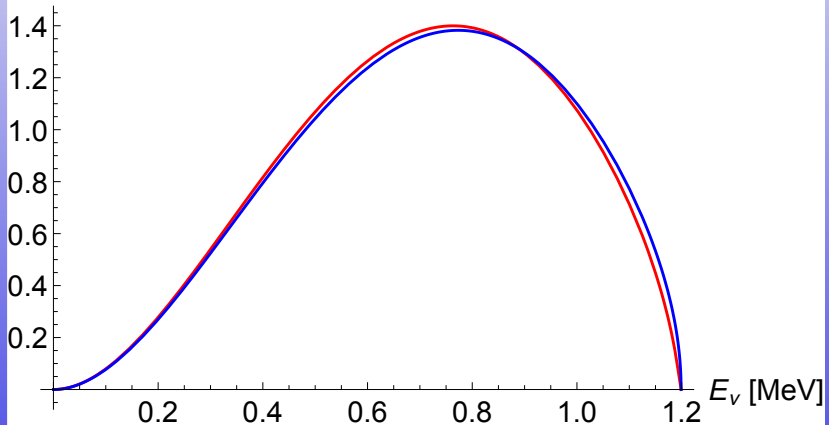
W przypadku Słońca gaz elektronowy jest niezdegenerowany ($\mu = 0$), a jego temperatura znacznie niższa niż różnice mas jąder ($\Delta Q \gg kT$). Powoduje to, że pierwsze widmo wygląda prawie jak δ Diraca, natomiast drugie to prosta funkcja algebraiczna (licznik we wzorze powyżej).



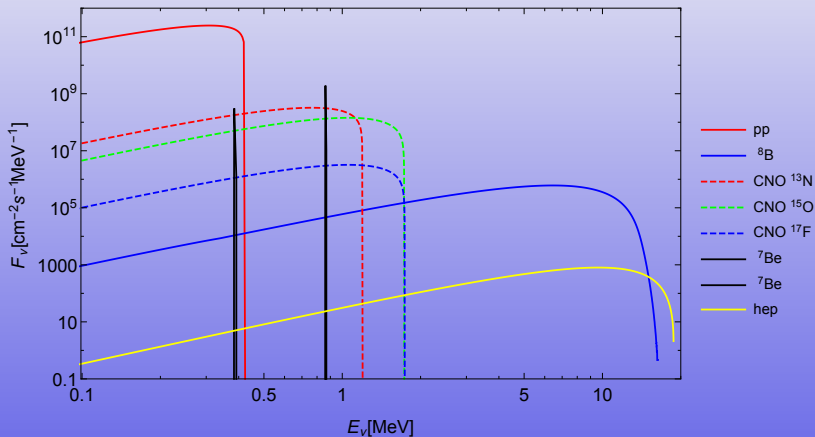


$$\frac{dF_\nu}{d\varepsilon_\nu} \propto \varepsilon_\nu^2 (\Delta Q - \varepsilon_\nu) \sqrt{(\varepsilon_\nu - \Delta Q)^2 - m_e^2}$$

Znormalizowane do 1 widmo ν_e z rozpadu ^{13}N



Kompletne (prawie) widmo neutrin słonecznych



Problemem neutrin słonecznych nazywamy duży (aż do 50%) deficyt neutrin obserwowanych na Ziemi w porównaniu z teorią budowy gwiazdy.

Współczesne wyjaśnienie:

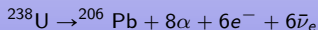
- neutrina są produkowane zgodnie z modelem Słońca i znanymi sieciami reakcji termojądrowych
- neutrina posiadają masę
- produkowane są w stanie kwantowym ν_e , który nie posiada dobrze określonej masy, a propagują się jako stany własne masy, czyli są superpozycją ν_e, ν_μ, ν_τ
- po drodze od centrum stany kwantowe ulegają mieszanii, zarówno w Słońcu (poprzez oddziaływanie z elektronami, tzw. oscylacje w materii), jak i w próżni, a także wewnątrz Ziemi
- część neutrin, które narodziły się jako elektronowe, staje się mionowymi/taonowymi i nie jest wykrywana w niektórych detektorach

Obecnie uważa się, że problem neutrin słonecznych został (prawie) rozwiązany.

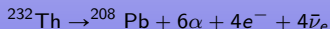
Podobnie jak Słońce emituje neutrina elektronowe ν_e w rozpadach β^+ , Ziemia emituje głównie **antyneutrino** elektronowe $\bar{\nu}_e$ z rozpadów β^- . Strumień ν_e jest mały, ale niezerowy.

Główne źródła:

- 1 szereg uranowy: kaskada rozpadów zaczynająca się od ^{238}U :



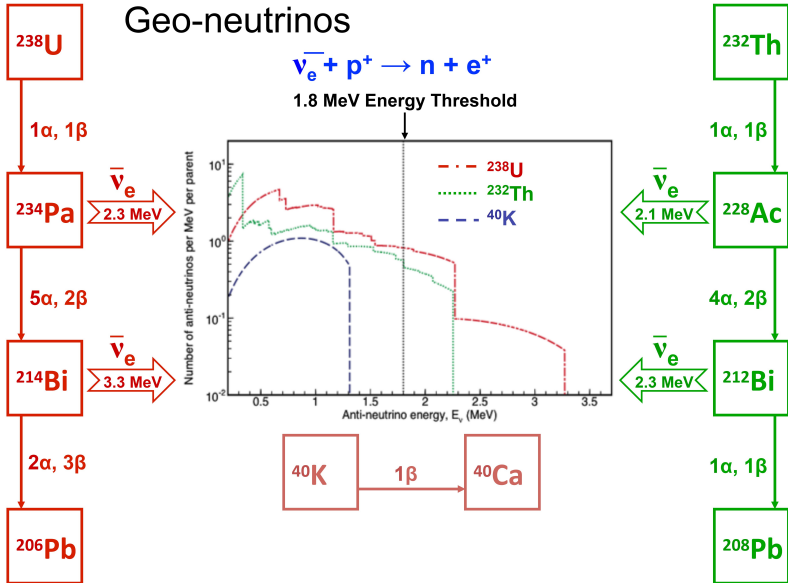
- 2 szereg torowy: kaskada rozpadów zaczynająca się od ^{232}Th



- 3 rozpad potasu ^{40}K :



Geo-neutrinos



Źródło: S. Dye, NOW 2014

Geoneutrino: widmo energetyczne

