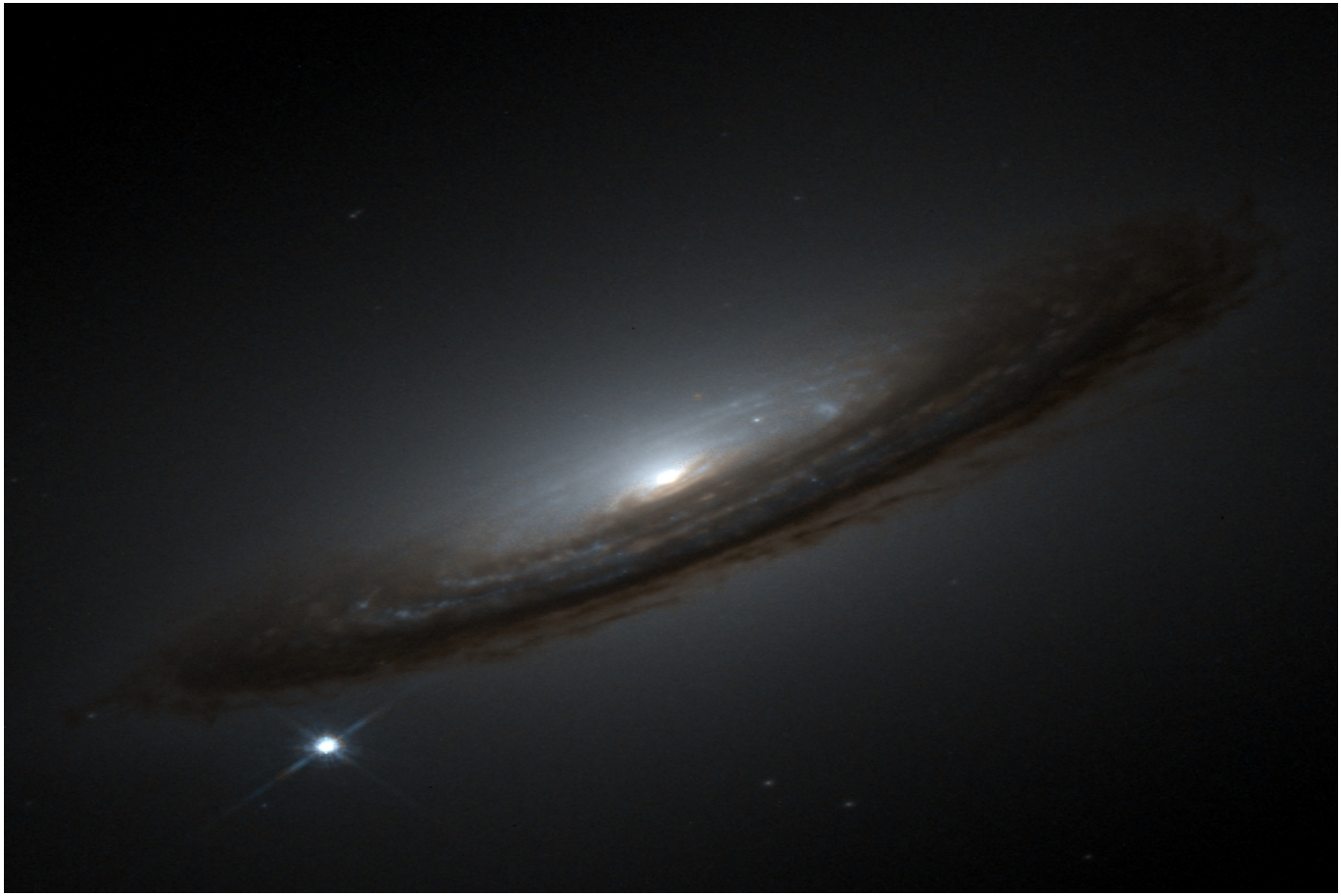


MECHANIZM SUPERNOWEJ Ia (TERMOJĄDROWEJ)

Podstawowy model:

(1) Akreujący biały karzeł w układzie podwójnym

(2) Przekroczenie masy Chandrasekhara

(3) Zapłon reakcji termojądrowych na skutek kolapsu

(4) Gigantyczny wybuch termojądrowy

CZY TO NA PEWNO JEST PRAWDA?

Pytania:

(1) Gdzie jest wodór (hel) z drugiej gwiazdy ?

(2) Czy jest możliwe osiągnięcie M_{Ch}=1.44$M_\odot$ na drodze akrecji?

(3) Inne możliwości zainicjowania syntezy termojądrowej.

(4) Jaki wybuch: spalanie, deflagracja, detonacja, DDT ?

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

1885 — E. Hartwig odkrywa nową S And w mgławicy M 31

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

1885 — E. Hartwig odkrywa nową S And w mgławicy M 31

1934 - 38 — Zwicky rozpoczyna poszukiwania super-nowych w gromadzie galaktyk Virgo – efekt: 12 supernowych

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

1885 — E. Hartwig odkrywa nową S And w mgławicy M 31

1934 - 38 — Zwicky rozpoczyna poszukiwania super-nowych w gromadzie galaktyk Virgo – efekt: 12 supernowych

1939 — Zwicky proponuje kolaps do gwiazdy neutronowej jako mechanizm wybuchu

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

1885 — E. Hartwig odkrywa nową S And w mgławicy M 31

1934 - 38 — Zwicky rozpoczyna poszukiwania super-nowych w gromadzie galaktyk Virgo – efekt: 12 supernowych

1939 — Zwicky proponuje kolaps do gwiazdy neutronowej jako mechanizm wybuchu

1941 — R. Minkowski wprowadza typy **I** i **II**

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

1885 — E. Hartwig odkrywa nową S And w mgławicy M 31

1934 - 38 — Zwicky rozpoczyna poszukiwania super-nowych w gromadzie galaktyk Virgo – efekt: 12 supernowych

1939 — Zwicky proponuje kolaps do gwiazdy neutronowej jako mechanizm wybuchu

1941 — R. Minkowski wprowadza typy **I** i **II**

1960 — F. Hoyle & W. Fowler proponują wybuch termojądrowy jako mechanizm supernowej

HISTORIA BADAŃ NAD SN

-150 — Hipparch odkrywa nową gwiazdę w konstelacji Skorpiona

1572 — Tycho de Brache *De Nova Stella* (1573)

1885 — E. Hartwig odkrywa nową S And w mgławicy M 31

1934 - 38 — Zwicky rozpoczyna poszukiwania super-nowych w gromadzie galaktyk Virgo – efekt: 12 supernowych

1939 — Zwicky proponuje kolaps do gwiazdy neutronowej jako mechanizm wybuchu

1941 — R. Minkowski wprowadza typy **I** i **II**

1960 — F. Hoyle & W. Fowler proponują wybuch termojądrowy jako mechanizm supernowej

1979 — R. Barbon wprowadza typy **II-P** & **II-L**

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1987 — SN 1987 A

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1987 — SN 1987 A

1987 — SN 1987 N prototypem typu **Ic**

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1987 — SN 1987 A

1987 — SN 1987 N prototypem typu **Ic**

1991 — SN 1991 T & SN 1991 bg – wybuchają dwie anomalne supernowe **Ia**

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1987 — SN 1987 A

1987 — SN 1987 N prototypem typu **Ic**

1991 — SN 1991 T & SN 1991 bg – wybuchają dwie anomalne supernowe **Ia**

1993 — SN 1993 J – brakujące ogniwo między typem **Ib/c** a typem **II**: nowy typ **IIb**

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1987 — SN 1987 A

1987 — SN 1987 N prototypem typu **Ic**

1991 — SN 1991 T & SN 1991 bg – wybuchają dwie anomalne supernowe **Ia**

1993 — SN 1993 J – brakujące ogniwo między typem **Ib/c** a typem **II**: nowy typ **IIb**

1993 — Branch-*normals* 85% supernowych **Ia** posiadających cechy **świecy standardowej**: spełniają zależność Phillipsa

1984 — Iben & Tututkov proponują zderzenie 2 białych karłow jako mechanizm supernowej typu **I**

1985 — Tzw. supernowe **Ip** *(peculiar)* zostają zdefiniowane jako osobny typ **Ib**. Pozostałe zostają zaliczone do nowego typu **Ia**

1987 — SN 1987 A

1987 — SN 1987 N prototypem typu **Ic**

1991 — SN 1991 T & SN 1991 bg – wybuchają dwie anomalne supernowe **Ia**

1993 — SN 1993 J – brakujące ogniwo między typem **Ib/c** a typem **II**: nowy typ **IIb**

1993 — Branch-*normals* 85% supernowych **Ia** posiadających cechy **świecy standardowej**: spełniają zależność Phillipsa

1991 - 1995 — nowy typ **IIn**

1997 — A. V. Filippenko *Optical Spectra of Supernovae*: `apel o powstrzymanie się od tworzenia nowych typów supernowych`

1997 — A. V. Filippenko *Optical Spectra of Supernovae*: `apel o powstrzymanie się od tworzenia nowych typów supernowych`

1998 — *Hipernowa* SN 1998 bw & GRB 980425 – dyskusja na temat związku supernowych i rozbłysków gamma.

1997 — A. V. Filippenko *Optical Spectra of Supernovae*: `apel o powstrzymanie się od tworzenia nowych typów supernowych`

1998 — *Hipernowa* SN 1998 bw & GRB 980425 – dyskusja na temat związku supernowych i rozbłysków gamma.

lata 90-te — *Core-Collapse* `(implozyjna?)` supernowa[1]:

$$\boxed{\textbf{Ic} \longrightarrow \textbf{Ib} \longrightarrow \textbf{IIb} \longrightarrow \textbf{II}\text{-L} \longrightarrow \textbf{II}\text{-P}} \qquad (\textbf{IIn})?$$

Thermonuclear `(termojądrowa?)` supernowa: **Ia**

26 listopad 2003 — odkryto **2587** supernowych[2]

[1] `http://th-www.if.uj.edu.pl/acta/vol34/abs/v34p2791.htm`
[2] `http://web.pd.astro.it/supern/snean.txt`

PODSTAWOWE DANE OBSERWACYJNE NA TEMAT SUPERNOWYCH Ia

1. Całkowity brak wodoru (H)
2. Powszechność występowania: wszystkie typy galaktyk, halo, przestrzeń międzygalaktyczna.
3. Jednorodność (dotyczy 85% tzw. Branch-normals):
   `Parametry rozkładu jasności:`
   Średnia: $M_B \simeq M_V \simeq -19.8 \pm 0.03 + 5\log(H_0/75)$,
   H_0 [$\mathrm{km/s\,Mpc^{-1}}$] – stała Hubble'a.
   Rozrzut: $\sigma_{M_{B,V}} = 0.2^{\mathrm{m}} \ldots 0.3^{\mathrm{m}}$
   Zależność Phillipsa: $M_B \propto \Delta m_{15}(B)$

PODSTAWOWE DANE OBSERWACYJNE NA TEMAT SUPERNOWYCH Ia

1. Całkowity brak wodoru (H)
2. Powszechność występowania: wszystkie typy galaktyk, halo, przestrzeń międzygalaktyczna.
3. Jednorodność (dotyczy 85% tzw. Branch-normals):
   `Parametry rozkładu jasności:`
   Średnia: $M_B \simeq M_V \simeq -19.8 \pm 0.03 + 5\log(H_0/75)$,
   H_0 [$\mathrm{km/s\,Mpc^{-1}}$] – stała Hubble'a.
   Rozrzut: $\sigma_{M_{B,V}} = 0.2^{\mathrm{m}} \ldots 0.3^{\mathrm{m}}$
   Zależność Phillipsa: $M_B \propto \Delta m_{15}(B)$
4. Anomalie:
   „Słabe" (częste): SN 1991 bg M =-16.5^{m},
   „Silne" (b. rzadkie): SN 1991 T M =-20.5^{m}

PROGENITOR

`Sugestywne fakty` (M. Livio):

a) Nie ma wodoru!

b) Energia wybuchu jest rzędu $(E_W^{\mathrm{C}/O} - E_W^{\mathrm{F}e}) \times M_{Ch}$!

c) Materia zdegenerowana wybucha „chętniej”!

d) Odstęp czasowy pomiędzy powstaniem gwiazdy a wybuchem *może* być b. długi!

PROGENITOR

`Sugestywne fakty` (M. Livio):

a) Nie ma wodoru!

b) Energia wybuchu jest rzędu $(E_W^{\mathrm{C}/O} - E_W^{\mathrm{F}e}) \times M_{Ch}$!

c) Materia zdegenerowana wybucha „chętniej”!

d) Odstęp czasowy pomiędzy powstaniem gwiazdy a wybuchem *może* być b. długi!

Dlaczego biały karzeł?

PROGENITOR

`Sugestywne fakty` (M. Livio):

a) Nie ma wodoru!

b) Energia wybuchu jest rzędu $(E_W^{\mathrm{C}/O} - E_W^{\mathrm{F}e}) \times M_{Ch}$!

c) Materia zdegenerowana wybucha „chętniej”!

d) Odstęp czasowy pomiędzy powstaniem gwiazdy a wybuchem *może* być b. długi!

Dlaczego biały karzeł?

(i) Warunki (a, b, c) spełnione.

PROGENITOR

`Sugestywne fakty` (M. Livio):

a) Nie ma wodoru!

b) Energia wybuchu jest rzędu $(E_W^{\mathrm{C}/O} - E_W^{\mathrm{F}e}) \times M_{Ch}$!

c) Materia zdegenerowana wybucha „chętniej”!

d) Odstęp czasowy pomiędzy powstaniem gwiazdy a wybuchem *może* być b. długi!

Dlaczego biały karzeł?

(i) Warunki (a, b, c) spełnione.

Dlaczego biały karzeł w układzie podwójnym?

PROGENITOR

`Sugestywne fakty` (M. Livio):

`a)` Nie ma wodoru!

`b)` Energia wybuchu jest rzędu $(E_W^{C/O} - E_W^{Fe}) \times M_{Ch}$!

`c)` Materia zdegenerowana wybucha „chętniej”!

`d)` Odstęp czasowy pomiędzy powstaniem gwiazdy a wybuchem *może* być b. długi!

Dlaczego biały karzeł?

(i) Warunki (`a, b, c`) spełnione.

Dlaczego biały karzeł w układzie podwójnym?

(ii) Powolna akrecja lub/i emisja fal grawitacyjnych pozwalają *w pewnych warunkach* spełnić punkt `d`.

UKŁAD PODWÓJNY

UKŁAD PODWÓJNY

↙ ↘

Biały karzeł + „Zwykła” gwiazda

2 białe karły

UKŁAD PODWÓJNY

↙ ↘

Biały karzeł + „Zwykła” gwiazda

↓

Tempo akrecji [$M_\odot$ / rok]

↙ ↓ ↘

$< 10^{-8}$ → Nova

$10^{-8} \ldots 10^{-7}$ → H burn → He flash

$> 10^{-7}$ → Red Giant

2 białe karły

↓

Emisja fal grawitacyjnych

↓ ↓

$M_1 + M_2 > 1.44 M_\odot$ ↘

$T_{\rm orb} < 12$ h ↙

Nieuniknione konsekwencje

3 RODZAJE BIAŁYCH KARŁÓW

↙ ↓ ↘

He	CO	ONeMg

3 RODZAJE BIAŁYCH KARŁÓW

↙ ↓ ↘

He	CO	ONeMg

Biały karzeł końcowym produktem ewolucji gwiazdy o masie poniżej $9M_\odot$ ($8M_\odot$) [$7.6M_\odot$]

3 RODZAJE BIAŁYCH KARŁÓW

↙ ↓ ↘

He | CO | ONeMg

Biały karzeł końcowym produktem ewolucji gwiazdy o masie poniżej $9M_\odot$ ($8M_\odot$) [$7.6M_\odot$]

$\diamond$	$M_{\mathrm{ZAMS}}\ [M_\odot]$	$M_{\mathrm{WD}}\ [M_\odot]$	$M_{\mathrm{expl}}\ [M_\odot]$
He	$0.08\ldots2.25$	>0.45	0.7
C+O	$2.25\ldots10$	$0.6\ldots1.2$	1.39
O+Ne+(Mg)	$8\ldots11.5$	$1.15\ldots1.3$	M_{Ch}

2 PRZYPADKI STOSUNKU MAS

$M_1 > M_2$

$M_1 \simeq M_2$

Rozpad lżejszego

Roche (RLF)

Dysk akrecyjny

Połączenie (ang. *merger*)

2 PRZYPADKI STOSUNKU MAS

$M_1 > M_2$

$M_1 \simeq M_2$

Rozpad lżejszego

Roche (RLF)

Dysk akrecyjny

Połączenie (ang. *merger*)

9 ($M_1 > M_2$)+ 6 ($M_1 \simeq M_2$) = 15 możliwości (He, CO, ONeMg)

2 PRZYPADKI STOSUNKU MAS

$M_1 > M_2$

$M_1 \simeq M_2$

Rozpad lżejszego

Roche (RLF)

Dysk akrecyjny

Połączenie (ang. *merger*)

9 ($M_1 > M_2$)+ 6 ($M_1 \simeq M_2$) = 15 możliwości (He, CO, ONeMg)

Przez *double-degenerate* rozumie się zwykle przypadek CO + CO z $M_1 > M_2$.

Consider a spherical cow of uniform density

Consider a spherical cow of uniform density

Consider a spherical cow of uniform density

Consider a spherical cow of uniform density

ZAPŁON M_{Ch}

ZAPŁON M_{Ch}

1. Masa akreującego białego karła zbliża się do M_{Ch}

ZAPŁON M_{Ch}

1. Masa akreującego białego karła zbliża się do M_{Ch}
2. Temperatura centralna (T_c) rośnie na skutek kompresji:

$$R_{\mathrm{WD}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{M_{\mathrm{WD}}}}$$

ZAPŁON M_{Ch}

1. Masa akreującego białego karła zbliża się do M_{Ch}
2. Temperatura centralna (T_c) rośnie na skutek kompresji:

$$R_{\mathrm{WD}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{M_{\mathrm{WD}}}}$$

3. Wytworzone ciepło unosi neutrinowy rozpad plazmonu:

$$\gamma \longrightarrow \nu_x + \bar{\nu}_x$$

ZAPŁON M_{Ch}

1. Masa akreującego białego karła zbliża się do M_{Ch}
2. Temperatura centralna (T_c) rośnie na skutek kompresji:

$$R_{\mathrm{WD}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{M_{\mathrm{WD}}}}$$

3. Wytworzone ciepło unosi neutrinowy rozpad plazmonu:

$$\gamma \longrightarrow \nu_x + \bar{\nu}_x$$

4. Gęstość centralna (ρ_c) osiąga $2 \cdot 10^9$ g/cm^3

ZAPŁON M_{Ch}

1. Masa akreującego białego karła zbliża się do M_{Ch}
2. Temperatura centralna (T_c) rośnie na skutek kompresji:

$$R_{\mathrm{WD}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{M_{\mathrm{WD}}}}$$

3. Wytworzone ciepło unosi neutrinowy rozpad plazmonu:

$$\gamma \longrightarrow \nu_x + \bar{\nu}_x$$

4. Gęstość centralna (ρ_c) osiąga $2 \cdot 10^9$ g/cm^3
5. Reakcja (3) zabroniona. Ciepło gromadzi się powodując reakcje jądrowe

6. Pojawia się konwekcja unosząc energię

6. Pojawia się konwekcja unosząc energię
7. Skale czasowe: konwektywna (τ_{konw}) oraz spalania jądrowego (τ_{nucl}) maleją,

6. Pojawia się konwekcja unosząc energię
7. Skale czasowe: konwektywna (τ_{konw}) oraz spalania jądrowego (τ_{nucl}) maleją,
8. Dla $\mathrm{T}_c = 7 \cdot 10^8$ K $\qquad \tau_{\mathrm{konw}} \sim \tau_{\mathrm{nucl}}$

6. Pojawia się konwekcja unosząc energię
7. Skale czasowe: konwektywna (τ_{konw}) oraz spalania jądrowego (τ_{nucl}) maleją,
8. Dla $\mathrm{T}_c = 7 \cdot 10^8$ K $\qquad \tau_{\mathrm{konw}} \sim \tau_{\mathrm{nucl}}$
9. Dla $\mathrm{T}_c = 1.5 \cdot 10^9$ K $\qquad \tau_{\mathrm{konw}} \ll \tau_{\mathrm{nucl}}$

6. Pojawia się konwekcja unosząc energię
7. Skale czasowe: konwektywna (τ_{konw}) oraz spalania jądrowego (τ_{nucl}) maleją,
8. Dla $\mathrm{T}_c = 7 \cdot 10^8$ K $\qquad \tau_{\mathrm{konw}} \sim \tau_{\mathrm{nucl}}$
9. Dla $\mathrm{T}_c = 1.5 \cdot 10^9$ K $\qquad \tau_{\mathrm{konw}} \ll \tau_{\mathrm{nucl}}$
10. Wyprodukowana energia nie może być usunieta z centrum w żaden sposób.

Etapy 6-8 określane są jako „tlenie się” (ang. *smouldering*). Trwa ono ∼1000 lat.

SPALANIE, WYBUCH, DETONACJA

Spalanie – „spokojny” powolny sposób zachodzenia reakcji jądrowych

- Najczęściej wewnątrz *niezdegenerowanych* gwiazd
- Energia unoszona przez konwekcję i promieniowanie

Wybuch – „gwałtowne” spalanie

- Płomień przenosi się przez przewodnictwo cieplne
- Proces spalania jest powolny ($\sim$1% c_s) i częściowy.

DETONACJA – spalanie na skutek przejścia fali uderzeniowej

- Spalanie z prędkością naddzwiękową
- 100% materiału jądrowego zostaje spalone
- Wywoływana przez falę uderzeniową lub DDT

***D**eflagration to **D**etonation **T**ransition* – przejście spalania w detonację

JĄDRA ATOMOWE JAKO MATERIAŁ WYBUCHOWY

$\diamond$	$\frac{E_W}{A}$ [MeV]	$\Delta(\frac{E_W}{A})$ [foe / $M_\odot$]	Charakterystyka
He	7.1	3.4	Detonacja
CO	7.9	1.9	Wybuch, DDT
ONeMg	8.1	1.4	Wybuch, Kolaps
^{56}Fe	8.8	—	—

$$E_{expl} \simeq 2\,\frac{M}{M_\odot}\,\Delta(\frac{E_W}{A}) \quad [\,\mathrm{foe}\,]$$
$$\Delta(\frac{E_W}{A}) = 8.8 - \frac{E_W}{A} \quad [\,\mathrm{MeV}\,]$$

ZAPŁON „NA ZAPAŁKĘ”

ZAPŁON „NA ZAPAŁKĘ”

1. Bierzemy łatwo detonujacy materiał, czyli He

ZAPŁON „NA ZAPAŁKĘ”

1. Bierzemy łatwo detonujacy materiał, czyli He
2. Umieszczamy go na powierzchni białego karła *o dowolnej masie*

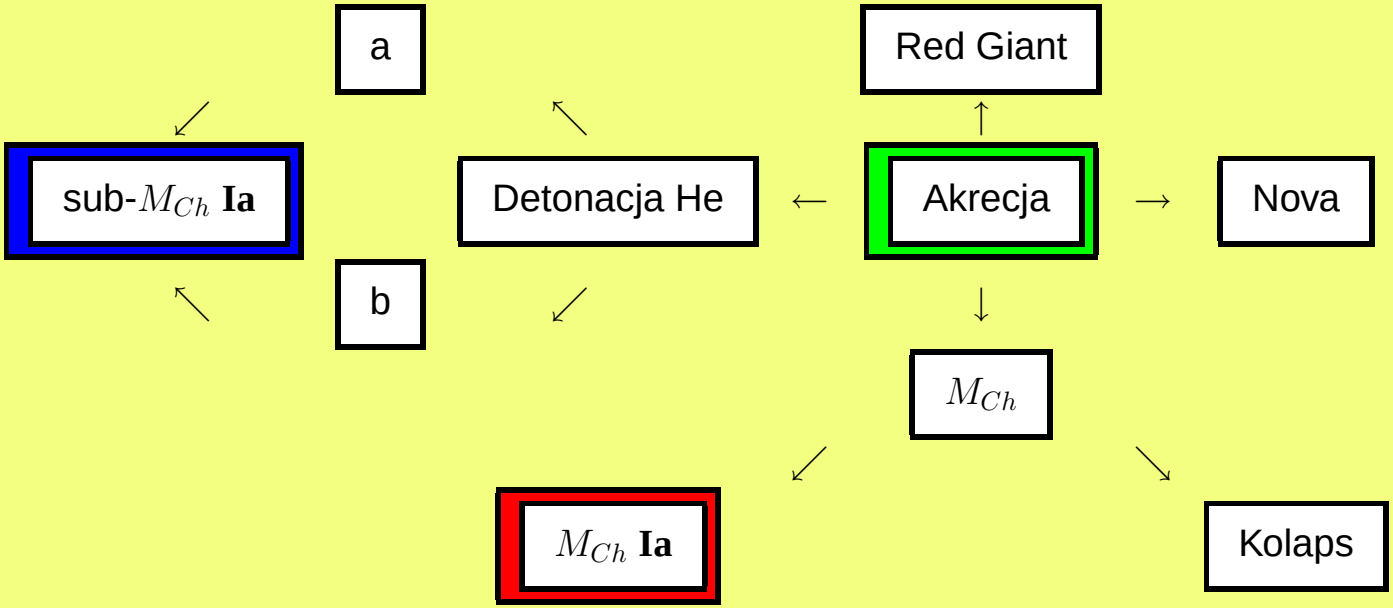
ZAPŁON „NA ZAPAŁKĘ”

1. Bierzemy łatwo detonujacy materiał, czyli He
2. Umieszczamy go na powierzchni białego karła *o dowolnej masie*
3. Hel detonuje i . . .

ZAPŁON „NA ZAPAŁKĘ”

1. Bierzemy łatwo detonujacy materiał, czyli He
2. Umieszczamy go na powierzchni białego karła *o dowolnej masie*
3. Hel detonuje i . . .
   a) `Pobudza detonację bialego karła od powierzchni do środka`
   b) `Wywoluje fale uderzeniową, która zbiega się do centrum i tam powoduje zapłon`

PROGENITOR SUPERNOWEJ Ia



MODEL W7

Progenitor	Biały karzeł 1.38 $M_\odot$ CO
Prędkość spalania	$v_{\mathrm{W7}} \simeq 30\%\ c_s$
Czas spalania	3 sekundy

Bardzo dobra zgodność z obserowaną krzywą blasku i widmem !

MODEL W7

Progenitor	Biały karzeł 1.38 $M_\odot$ CO
Prędkość spalania	$v_{\mathrm{W7}} \simeq 30\%\ c_s$
Czas spalania	3 sekundy

Bardzo dobra zgodność z obserowaną krzywą blasku i widmem !

Prędkość spalania niefizyczna!

$$v_l = 0.1 \ldots 100 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} < v_{\mathrm{W7}} < c_s = 10^4 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$$

MODEL W7

Progenitor	Biały karzeł 1.38 $M_\odot$ CO
Prędkość spalania	$v_{\mathrm{W7}} \simeq 30\%\ c_s$
Czas spalania	3 sekundy

Bardzo dobra zgodność z obserowaną krzywą blasku i widmem !

Prędkość spalania niefizyczna!

$$v_l = 0.1 \ldots 100 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} < v_{\mathrm{W7}} < c_s = 10^4 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$$

1. DDT

MODEL W7

Progenitor	Biały karzeł 1.38 $M_\odot$ CO
Prędkość spalania	$v_{\mathrm{W7}} \simeq 30\%\ c_s$
Czas spalania	3 sekundy

Bardzo dobra zgodność z obserowaną krzywą blasku i widmem !

Prędkość spalania niefizyczna!

$$v_l = 0.1 \ldots 100 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} < v_{\mathrm{W7}} < c_s = 10^4 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$$

1. DDT
2. Zwiększenie powierzchni spalania: turbulencja, konwekcja

MODEL W7

Progenitor	Biały karzeł 1.38 $M_\odot$ CO
Prędkość spalania	$v_{\mathrm{W7}} \simeq 30\%\ c_s$
Czas spalania	3 sekundy

Bardzo dobra zgodność z obserowaną krzywą blasku i widmem !

Prędkość spalania niefizyczna!

$$v_l = 0.1 \ldots 100 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} < v_{\mathrm{W7}} < c_s = 10^4 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$$

1. DDT
2. Zwiększenie powierzchni spalania: turbulencja, konwekcja
3. Zapłon wielopunktowy

MODEL W7

Progenitor	Biały karzeł 1.38 $M_\odot$ CO
Prędkość spalania	$v_{\mathrm{W7}} \simeq 30\%\ c_s$
Czas spalania	3 sekundy

Bardzo dobra zgodność z obserowaną krzywą blasku i widmem !

Prędkość spalania niefizyczna!

$$v_l = 0.1 \ldots 100 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} < v_{\mathrm{W7}} < c_s = 10^4 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$$

1. DDT
2. Zwiększenie powierzchni spalania: turbulencja, konwekcja
3. Zapłon wielopunktowy
4. Inne: rotacja?

SKALE CZASOWE I PRZESTRZENNE

Typowe rozmiary:

Turbulencja (skala Kołmogorowa)	10^{-3} mm
Płomień lamianarny	0.1 mm
Konwekcja (Rayleigha-Taylora)	100 km
Biały karzeł	10000 km

Typowe czasy:

Ewolucja układu podwójnego	miliardy lat
Akrecja	miliony lat
Tlenie się	1000 lat
Supernowa **Ia**	1 rok
Wybuch białego karła	3 sekundy

CIEKAWOSTKI (NIE) NAUKOWE NA TEMAT SN Ia

⊙ **NIE** zaobserwowano supernowej w gromadzie kulistej.

- Supernowe ktore Zwicky obserwowal w latach 30-40 były typu **I**

⊙ Supernowe **Ia** wybuchają częściej niż zwykle w obszarze dżetu z centralnej (galaktycznej) czarnej dziury

- W podręczniku D. Arnetta „Supernovae and Nucleosynthesis” rozdział „Eksplozje termojądrowe” zaczyna się od cytatu[3]:

  „Jak wiadomo, smoków nie ma. Prymitywna ta konstatacja wystarczy może umysłowi prostackiemu, ale nie nauce (...)”

⊙ Gdyby explodował Syriusz B (2.6pc, 0.98$M_\odot$) to miałby w maksimum jasność -23^{m}.

[3] Stanisław Lem, *Cyberiada: WYPRAWA TRZECIA czyli smoki prawdopodobieństwa*

- Zależność Phillipsa $M_{max} = a + b\,\Delta m_{15}^{B}$ podał w 1977 roku Pskowskij

⊙ Wybuch supernowej **Ia** w układzie podwójnym powinien powodować powstanie stożkowatej dziury w wyrzucanej materii [SN1991T]

⊙ Proces hamowania „aerodynamicznego” (ang. *inspiral*) może być przyczyną złączenia sie „białych karłów” [SN2002ic]

- Zanim zaproponowano termojądrowy mechanizm supernowej (Hoyle, Fowler, 1960) były uzywane bomby wodorowe (Ivy Mike, 1953)

⊙ Złączenie białych karłów i następujacy w wyniku tego kolaps dobrze tłumaczy powstanie (z pozostałości dysku akrecyjnego) planet wokół pulsara

- „Dlatego jesteśmy zmuszeni do faworyzowania par białych karłów CO jako dominującego progenitora supernowych Ia” (Branch, Livio i inni, 1995)
- „Chciałbym odnotować, że Pinto (rozmowa na konferencji w Chicago) oświadczył, iż jego modele ELD (sub-M_{Ch}) mogą obejść wszystkie omówione wyżej słabości i są w stanie dać rewelacyjną zgodność z [obserwowaną] krzywą blasku i widmem. Podczas pisania tego artykułu, nie udało mi się niestety znaleźć opublikowanych wyników tych modeli, więc ich nie skomentuję” (Livio, 1999)
- „(...) aby stworzyć wybuch supernowej Ia, Natura, będąc uprzejmą dla nas spośród wszystkich możliwości wybrała tę najprostszą, czyli białego karła C+O o masie Chandrasekhara wybuchającego termojądrowo.” (Hillebrandt, Niemeyer, 2000)

Oto zdj. ze strony tytułowej seminarium na temat supernowej **Ia** S. E. Woosleya

LITERATURA

Prace przeglądowe na temat SN **Ia**:

1. B. Leibundgut, *Type Ia Supernovae* Astronomy&Astrophysics Review, **10**, 179-209, (2000) `DOI: 10.1007/s001590000009`
2. Hillebrandt, Niemeyer, *Type Ia Explosions Models*, `astro-ph/0006305`
3. D. Branch, M. Livio et. al. *In Search of the Progenitors of Type Ia Supernovae*, PASP, **101**, 1019-1029, (1995)
4. M. Livio, *The Progenitors of Type Ia Supernovae*, `astro-ph/9903264`
5. E.I.Sorokina, S.I.Blinnikov, O.S.Bartunov, *Thermonuclear Burning Regimes and the Use of SNe Ia in Cosmology*, `astro-ph/9906494`

Wykłady S. E. Woosleya:

`http://www.ucolick.org/~woosley/ay220/lecture17/lecture17.pdf`

Supernowe ogólnie:

A. V. Filippenko, *Optical Spectra of Supernovae* ARA&A, **35**, 309-355, (1997)

`http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/araa.html`