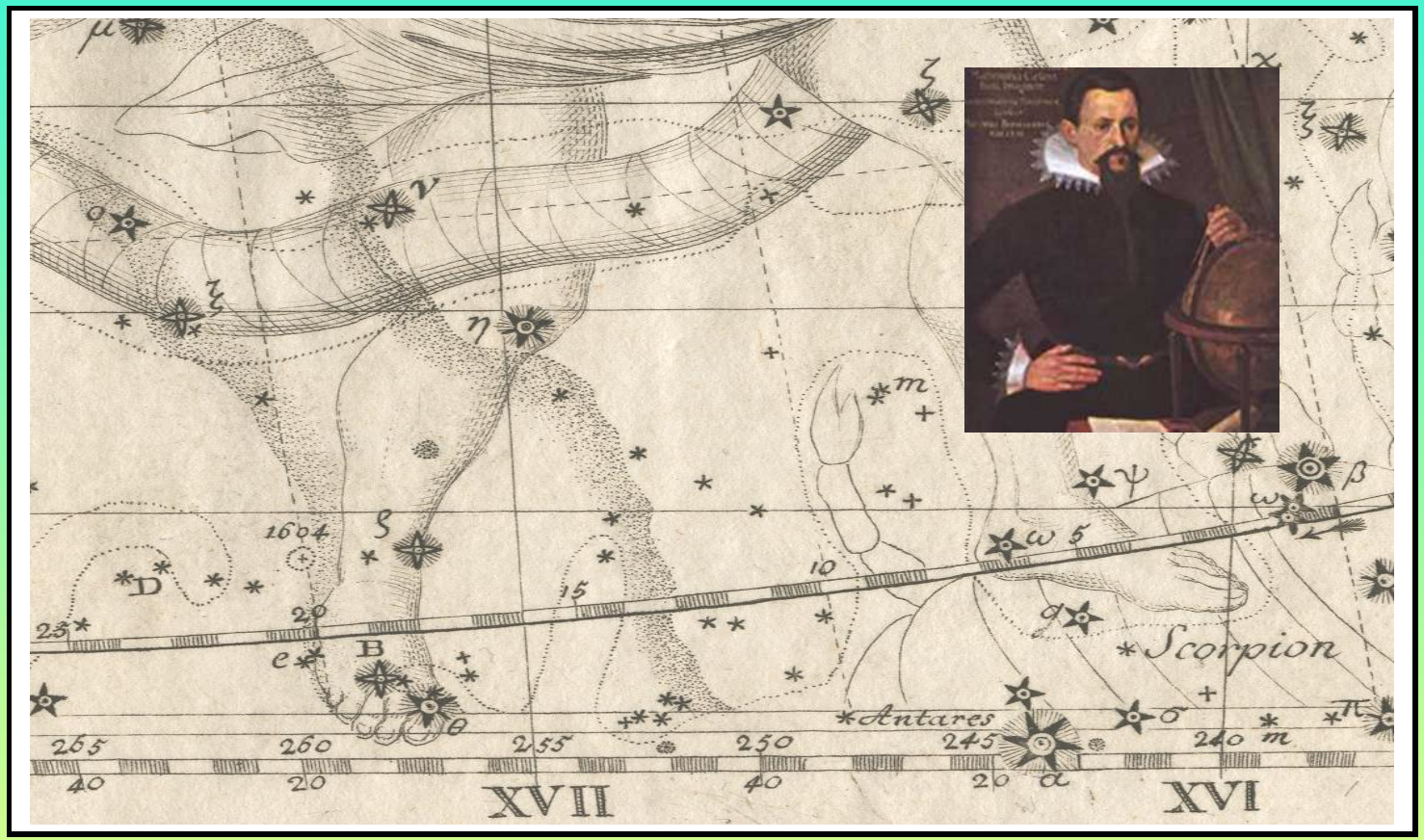
PERSPEKTYWY ASTROFIZYKI

Prywatny punkt widzenia...

Zaczynamy od supernowych, ponieważ:

- POTRZEBNE WSZYSKIE DZIAŁY FIZYKI
- SYMULACJE KOMPUTEROWE (SCIDAC)
- PUNKT PRZECIĘCIA WIELU GAŁĘZI ASTROFIZYKI
- ROZBŁYSKI GAMMA (GRB) TO PRAWDOPODOBNIE TEŻ SUPERNOWE
- NIE TYLKO NAUKOWCY SĄ NIMI ZAINTERESOWANI, NP. IAEA (!)
- **GALAKTYCZNA SUPRNOVA** DOSTARCZY OGROMNY POTOK DANYCH
- MINĘŁA (8 X) PIĘKNA ROCZNICA...

...400 LAT BEZ SUPERNOWEJ!



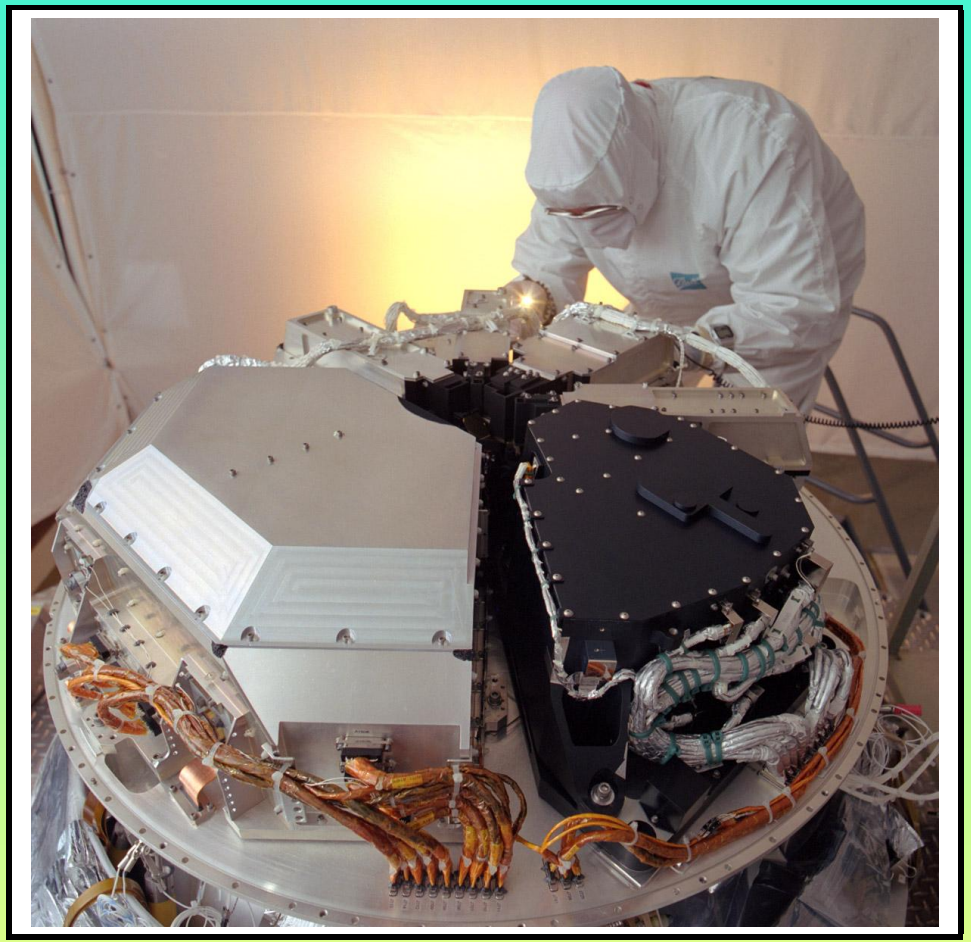
J. Kepler *De Stella nova in pede Serpentarii* (Nowa gwiazda u stóp Wężownika)

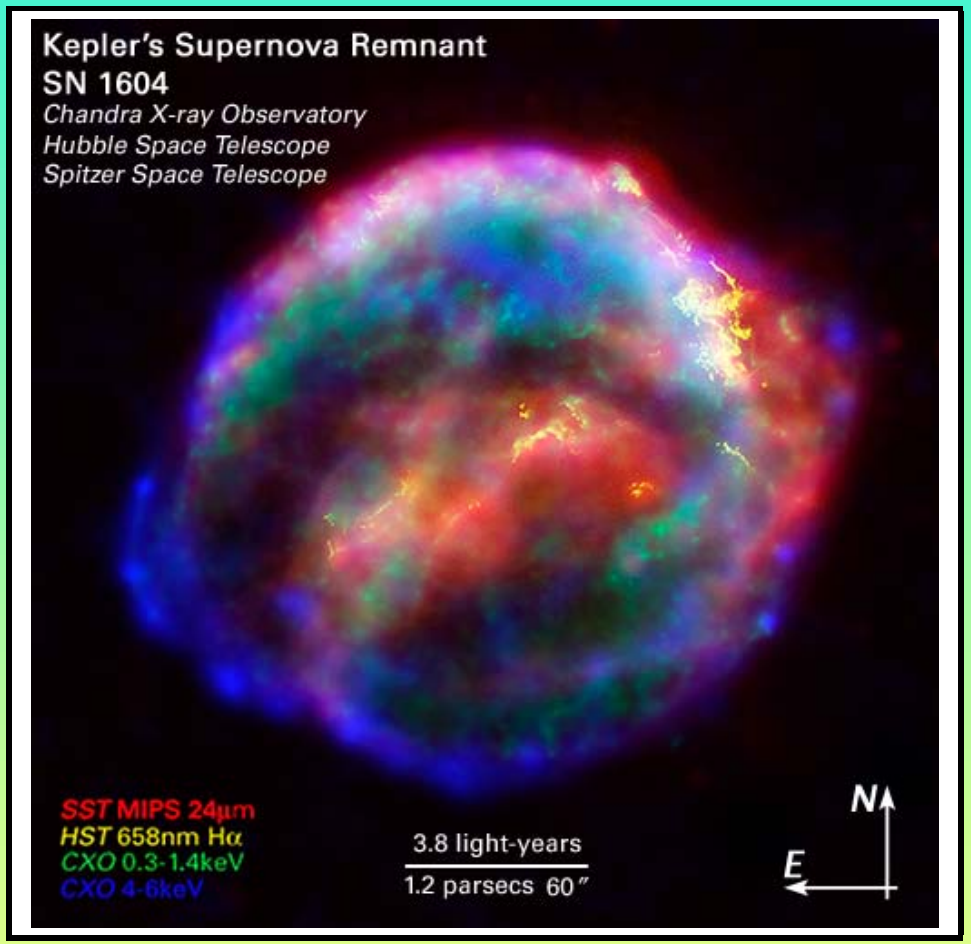
Captain's log, stardate 48022.5: Zgodnie ze wcześniejszymi rozkazami Dowództwa Gwiezdnej Floty (...) ostatecznie dotarliśmy do punktu zwrotnego w pobliżu byłej V843 Oph, obecnie 3C358.

Chandra X-ray Observatory

Launch & Deploy

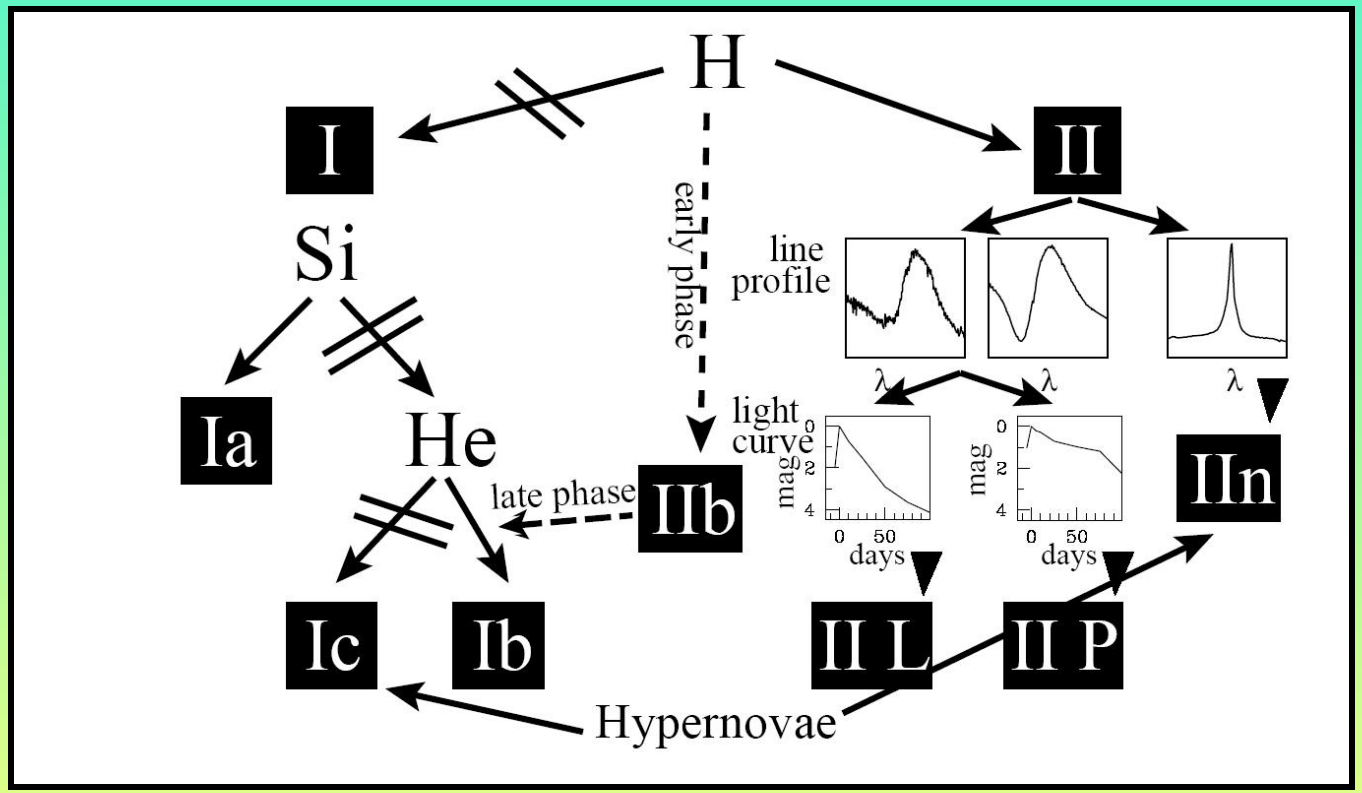
CXC




Kepler's Supernova Remnant
SN 1604
Chandra X-ray Observatory
Hubble Space Telescope
Spitzer Space Telescope
SST MIPS 24μm
HST 658nm Hα
CXO 0.3-1.4keV
CXO 4-6keV
3.8 light-years
1.2 parsecs 60″
N
E

Typ	Ia	Ib → Ic	IIb → II-L(P)
Definicja	Brak linii wodoru		Silne linie wodoru
Występowanie	Wszystkie typy galaktyk	Ramiona spiralne, rejony powstawania gwiazd	
Częstość wzgl. W Galaktyce	30%± 9% ∼1/200 lat	11%± 6% ∼1/500 lat	59%± 28% ∼1/100 lat
Jasność absolutna	-20^m jednorodna	-17^m...-18^m (-19.5^m)	-16^m...-19^m (-20^m)
Widmo w maksimum	Absorbcja Si II na $\lambda 6355$	Brak lub b. słabe Si II	Silna linia Hα
Późne widmo (kilka mieś. po maks.)	emisja [FeII]+[FeIII]	Wzbroniona emisja [OI] + [CaII]	
Pozostałość mgławicowa	Shell (Balmer-dominated)	Shell (Oxygen-rich)	Plerion (Crab-like)
Pozostałość zwarta	Brak	Gwiazda neutronowa lub czarna dziura	
Progenitor	Akreujący biały karzeł w układzie podwójnym	Masywna gwiazda „obdarta” z H/He	Masywna gwiazda
Podstawowe źródło energii	Rozpad ^{56}Ni → 6 dni →^{56}Co → 77 dni →^{56}Fe		
Źródło energii wybuchu	Synteza C/O → Fe	Strumień neutrin	
Mechanizm fizyczny	Wybuch termojądrowy	Kolaps rdzenia	

KLASYFIKACJA SUPERNOWYCH



DWIE KLASY SUPERNOWYCH

,,Termojądrowe''
thermonuclear

Typ: Ia
PROGENITOR: biały karzeł
ŹRÓDŁO ENERGII: synteza C/O → ,,Fe''
PRZYCZYNA EKSPLOZJI: samozapłon, impuls zewnętrzny
CZAS SYNTEZY: 3 sekundy
DOSTĘPNA ENERGIA: $\sim 10^{51}$ erg $\simeq 0.001Mc^2$
ZNACZENIE: świece standardowe, kosmologia

,,Implozyjne''
core-collapse

Typ: Ib/c → IIb → II-L → II-P → IIn
PROGENITOR: masywna gwiazda (M>8-9 $M_\odot$)
ŹRÓDŁO ENERGII: potencjał grawitacyjny
PRZYCZYNA EKSPLOZJI: utrata stabilności grawitacyjnej
CZAS KOLAPSU: 0.1 sekundy
DOSTĘPNA ENERGIA: $\sim 10^{53}$ erg $\simeq 0.1Mc^2$
ZNACZENIE: obserwacje neutrinowe, fale grawitacyjne

SUPERNOWA

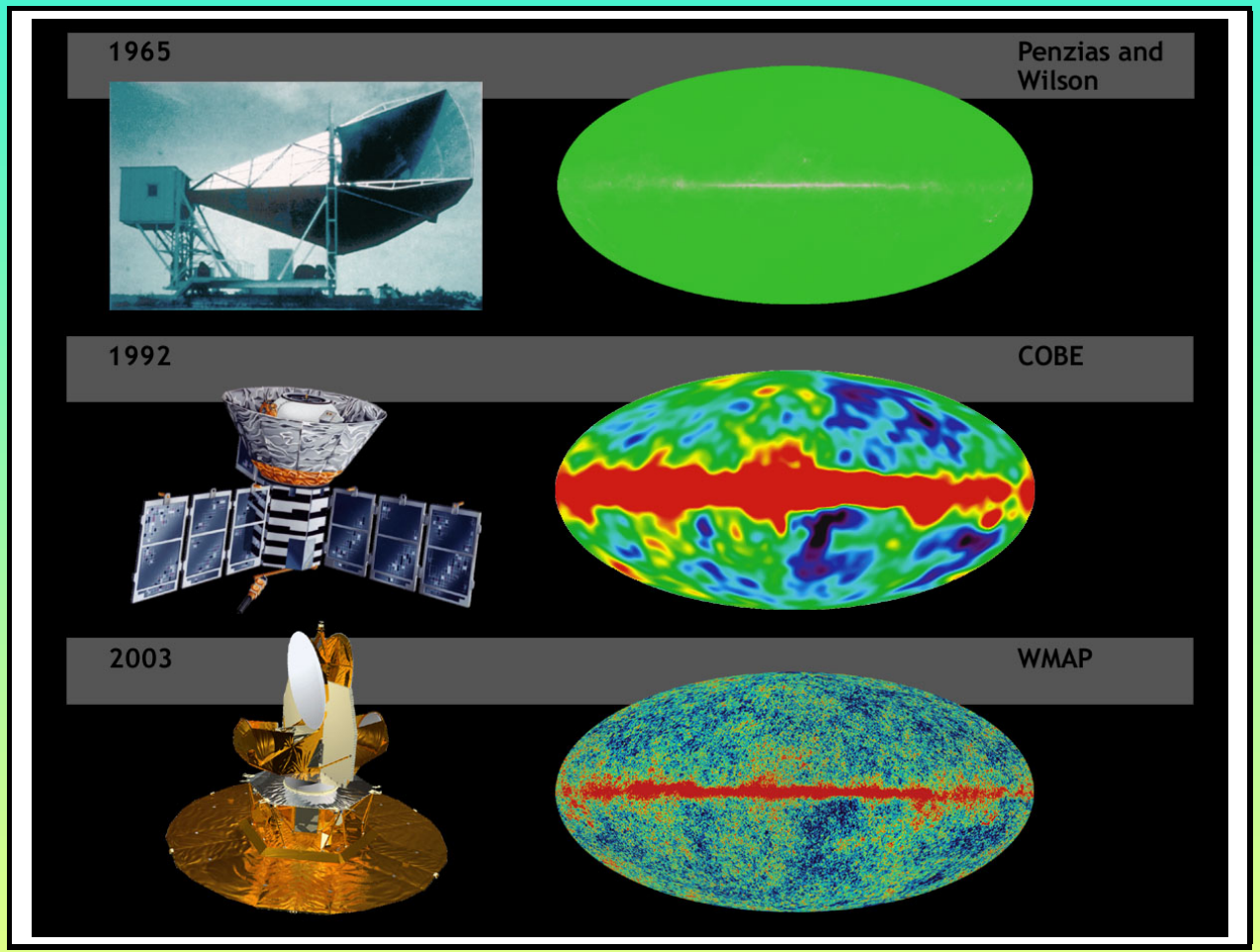
Typ:
Ia

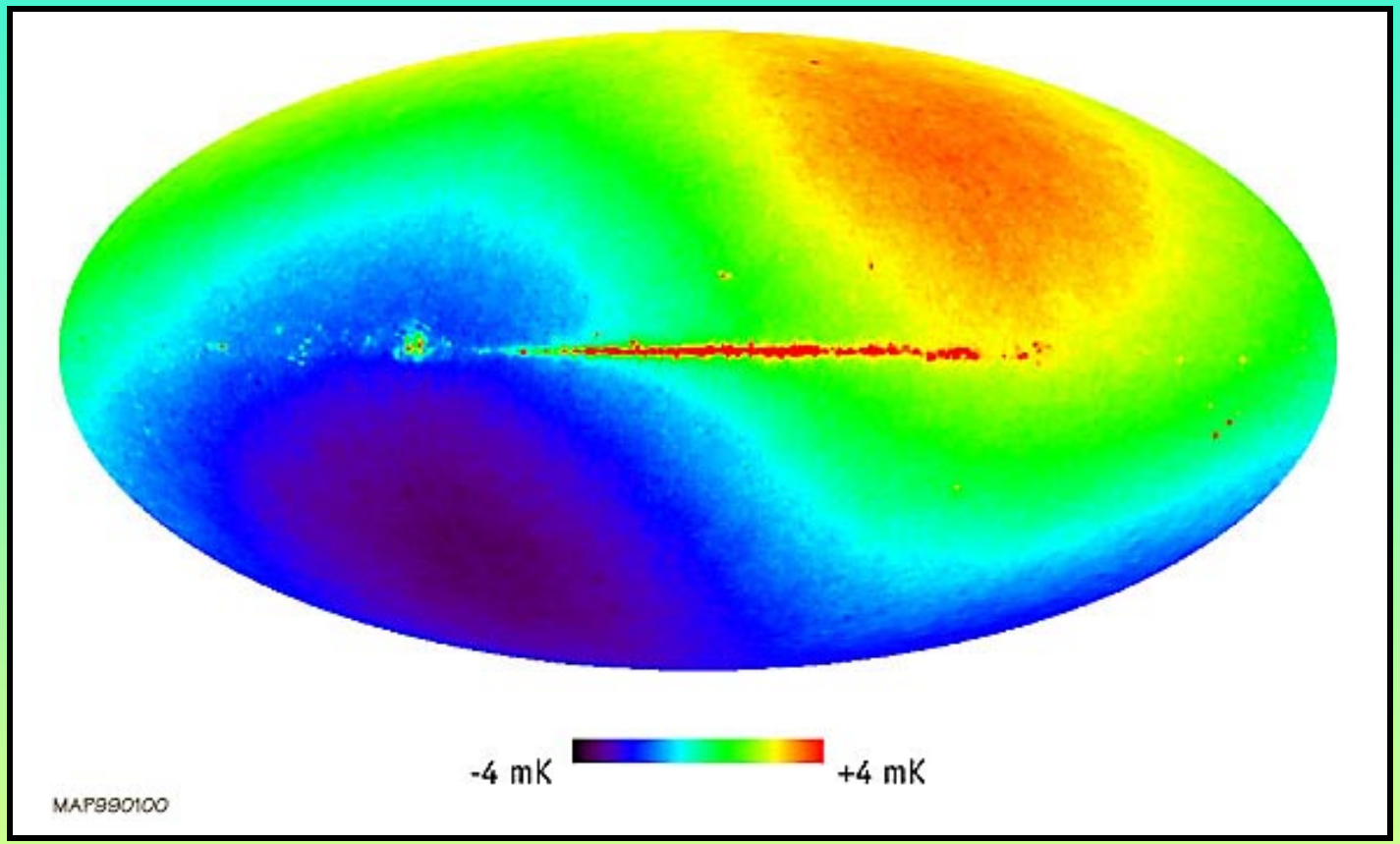
Nr.katalogowy:
SN1994D

Galaktyka:
NGC 4526

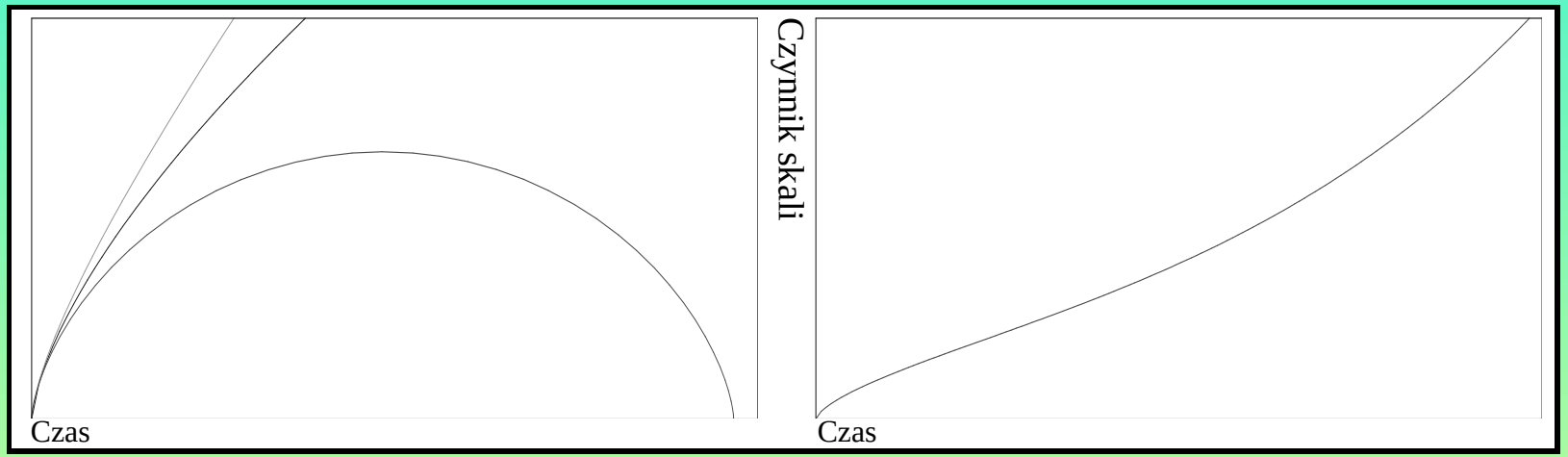
Miejsce wybuchu:
Halo

Jasność absolutna:
-19^m


1965
Penzias and Wilson
1992
COBE
2003
WMAP


-4 mK
+4 mK
MAP990100

SUPERNOWA Ia i KOSMOLOGIA



$$R(\eta) = 1 - \cos\eta,\ t(\eta) = \eta - \sin\eta$$

$$R(t) = \sinh\left(\frac{\sqrt{3\Lambda}}{2}\,t\right)^{2/3}$$

$$R(t) = \frac{\sqrt[3]{36}}{2}\,t^{2/3}$$

$$T_c = \frac{2}{\sqrt{3\Lambda}} = 10.7 \text{ mld lat}$$

$$R(\eta) = \cosh\eta - 1,\ t(\eta) = \sinh\eta - \eta$$

$$T_p = \frac{\ln(2+\sqrt{3})}{\sqrt{3\Lambda}} = 7 \text{ mld lat}$$

$$T < \frac{2}{3H}, \quad \frac{2}{3H} \le T < \frac{1}{H}$$

$$T = \frac{2}{3H}\,\mathrm{artgh}\sqrt{\Omega_\Lambda}/\sqrt{\Omega_\Lambda} = 13.7 \text{ mld lat}$$

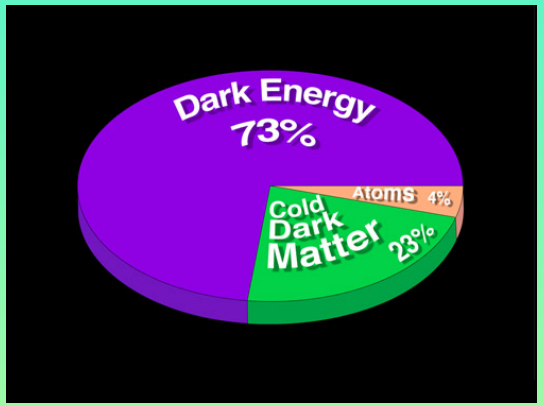
- Nowa fundamentalna stała przyrody Λ
- ,,Antygrawitacja'' istnieje
- Skład Wszechświata:

  Ciemna energia Λ: 73%

  Ciemna materia: 23%

  Ciemna materia barionowa: 4%

  Znana materia barionowa (My): <1%



- W przyszłości Wszechświat będzie się rozszerzał wykładniczo: $R(t) \propto \exp H_\infty t$

  $H_\infty = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}$ - asymptotyczna wartość stałej Hubble'a

  Obecnie stała Hubble'a wynosi $H = 0.84 H_\infty = 71$ km/s/Mpc
- Nowe procesy formowania struktur możliwe?

  Mechanizm ,,pługu śnieżnego"

PROBLEMY TEORII SN IA

- **Jasność maksymalna:** $M_B \simeq M_V \simeq -19.8 \pm 0.03 + 5\log(H_0/75)$

  -Rozrzut: $\sigma_{M_{B,V}} = 0.2^{\mathrm{m}} \ldots 0.3^{\mathrm{m}}$

  -Zależność Phillipsa: $M_B \propto \Delta m_{15}(B)$

- **Anomalie są znane:**

  -„Słabe” (częste): SN 1991 bg M =-16.5^{m}

  -„Silne” (b. rzadkie): SN 1991 T M =-20.5^{m}

- **Fundamentalne problemy teorii wybuchu**

  -Model W7 (Nomoto) zgodny z obserwacjami

  -Nie jest to ani detonacja ani deflagracja

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

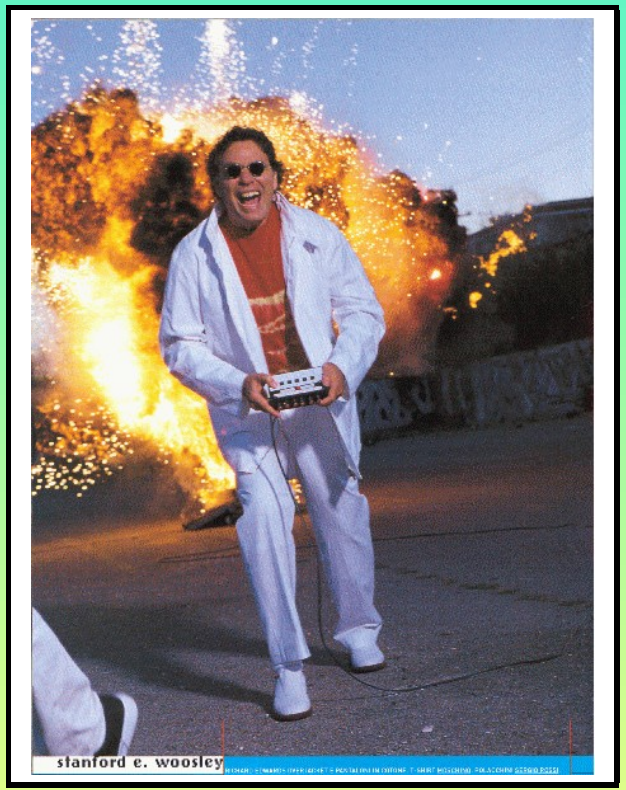
- **Problemy z wyjaśnieniem zależności „szerokość piku-maksimum”**

  - zapłon wielopunktowy? rotacja? inne?

MODELE SFERYCZNIE SYMETRYCZNE NIEWYSTARCZAJĄCE

Rozważmy sferycznie symetryczną krowę o stałej gęstości

EKSPERCI W PRACY NAD ROZWIĄZANIEM PROBLEMÓW

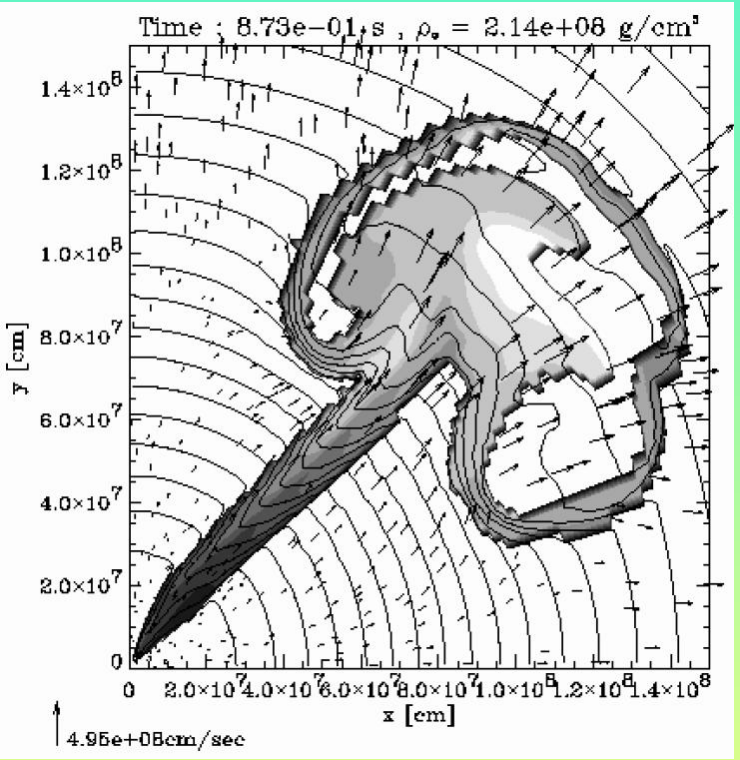


S. E. Woosley:

OTWARTE PYTANIA:

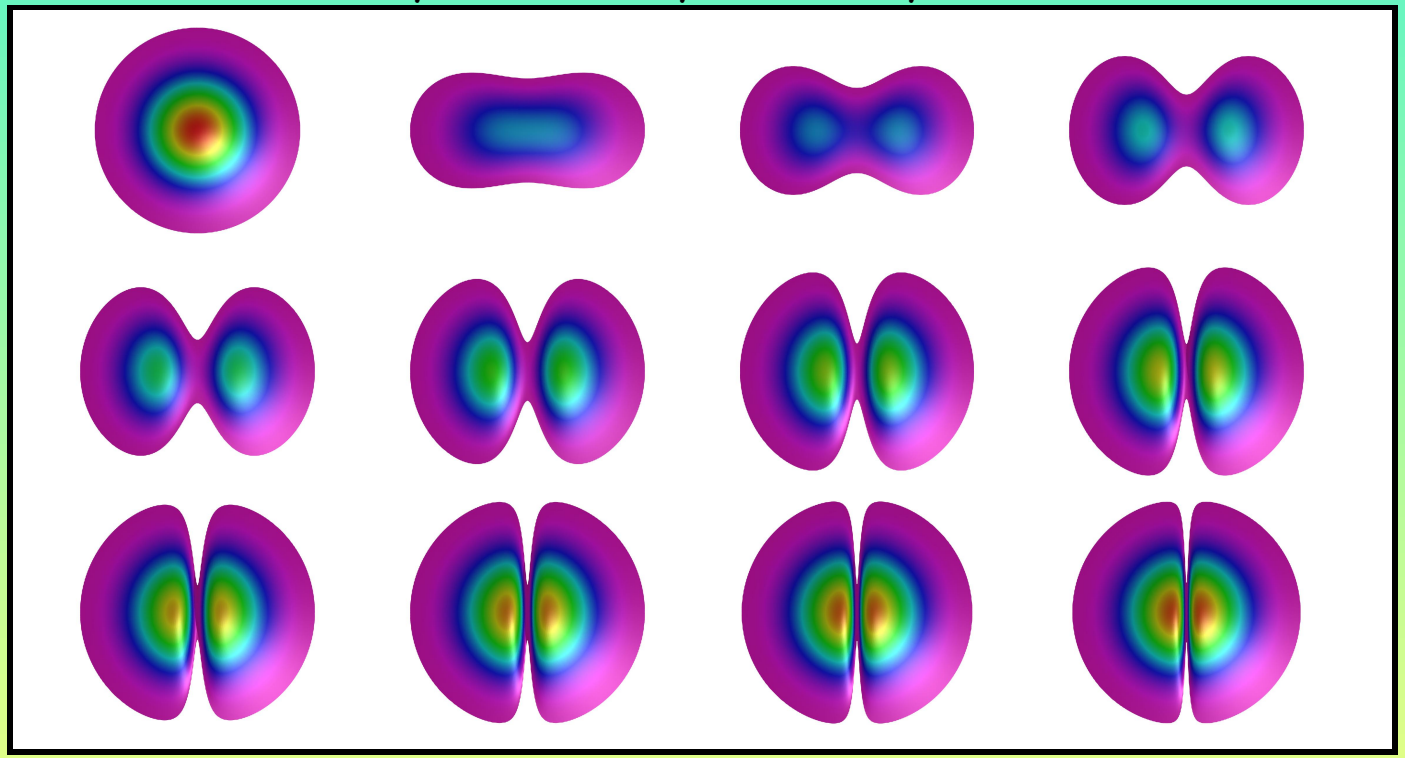
- Wpływ rotacji
  - na zapłon
  - na wybuch

ZAPŁON WIELOPUNKTOWY



ROTACJA BIAŁEGO KARŁA

Drastyczne zmiany struktury możliwe



TOROIDALNY ZAPŁON BIAŁEGO KARŁA

Pierwsza poprawka:

$$h_1 = h_c\, w_{4/3}(\lambda r) - \Phi_c(r) + \Delta C, \quad p = K\, \rho^{4/3}$$

w centrum:

$$w_n(x) \simeq 1 - \frac{1}{6}\, x^2 + \frac{n}{120}\, x^4 + \ldots, \qquad \Phi_c \simeq -\frac{1}{2}\Omega_0^2\, r^2 + \ldots$$

w tym przyliżeniu:

$$h_1(r) = h_c + \left(\Omega_0^2 - \frac{4}{3}\pi G \rho_c\right)\, r^2 + \ldots$$

Jeżeli $\Omega_0^2 > \frac{4}{3}\pi G \rho_c$ **to** $\rho_c < \rho_{max}$! *Gęstość zapłonu białego karła* $\rho_c \simeq 2 \cdot 10^9$ *g/cm*^{3} *daje* $\Omega_0 \sim 25$ *rad/s.*

Heger & Langer 2000:

$\Omega_0(\mathrm{Fe}) > 30$ rad/s

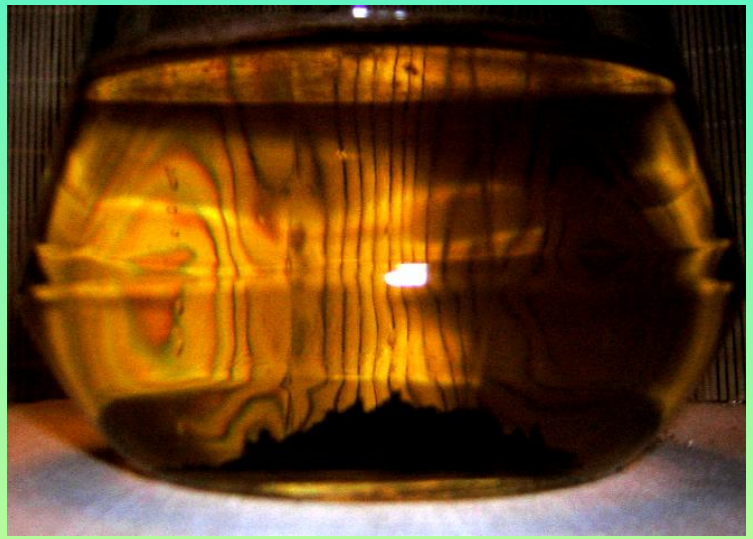
$\Omega_0(\mathrm{He}) \sim 10^{-3}$ rad/s

Zapłon na „rozmaitości” o wymiarze:

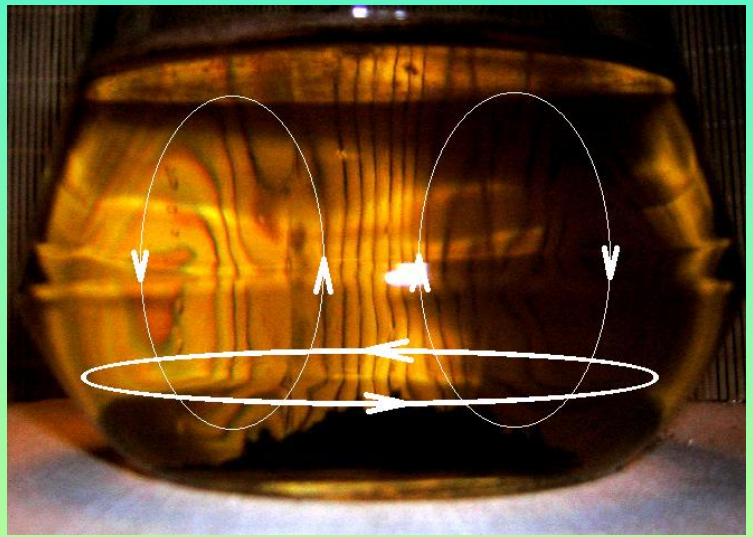
1 (torus)

ZERO (punkty)

Czysta rotacja i prawdziwa rotacja



Czysta rotacja i prawdziwa rotacja



$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla\cdot\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,p + \mathbf{g}, \qquad \mathbf{v} = r\,\Omega(r,z)\,\mathbf{e}_\phi$$

$$\nabla\times\left[\frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,p + (\nabla\times\mathbf{v})\times\mathbf{v}\right] = 0, \quad 2\,r\,\Omega\,\frac{\partial\Omega(r,z)}{\partial z}\,\mathbf{e}_\phi = \nabla\left(\frac{1}{\rho}\right)\times\nabla p$$

Dlaczego nie zaobserwowano supernowej?!

- Tylko **pozagalaktyczne** supernowe (w tym 1987A)
- Tylko **Galaktyczne** (głównie) pozostałości

1. Supernowe wybuchały ale były niewidoczne.

   - Detektory neutrin wiekszosc czasu *offline*

2. ,,Nieudane eksplozje''
3. Ubogi rejon Galaktyki
4. Fluktuacja statystyczna

   -Pech?

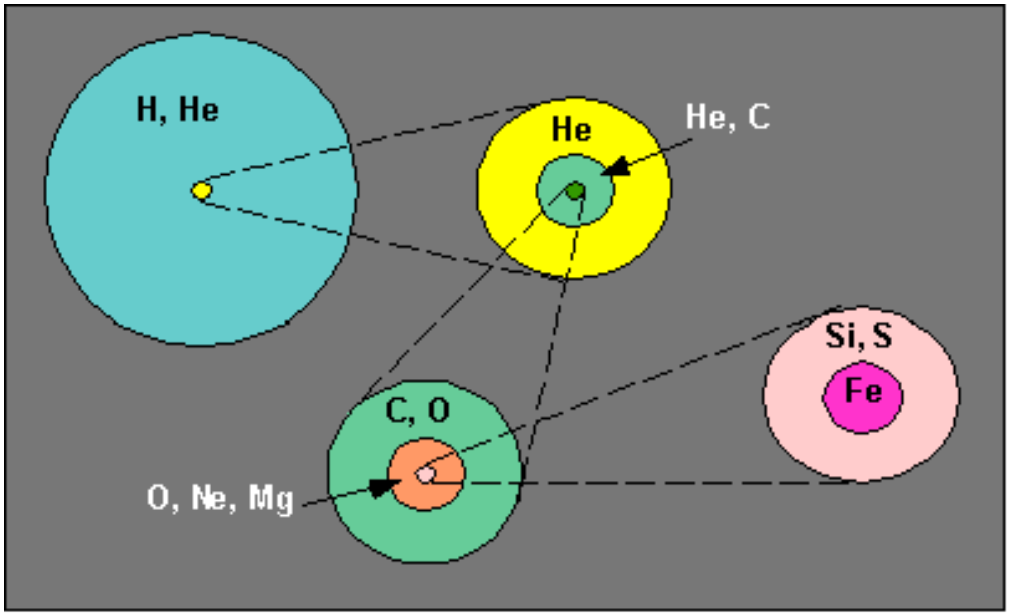
   -Czy szczęście?

5. **CZY MOŻEMY PRZEWIDZIEĆ WYBUCH SUPERNOWEJ?**

EWOLUCJA GWIAZDY 25 $M_\odot$

Spalanie	M zapłonu	$\rho_c\,[g/cm^3]$	Czas	$L/L_\odot$	$L_\nu/L_\odot$
H	$0.08M_\odot$	3.8	7 mln lat	2.0×10^5	$\sim0.02L$
He	$0.7M_\odot$	200	600 tys. lat	2.4×10^5	20
C	$2M_\odot$	10^5	160 lat	3.0×10^5	2.5×10^6
Ne	$1.7M_\odot$	2×10^6	1.5 roku	3.0×10^5	2.0×10^9
O	$1.38M_\odot$	4×10^6	6 mies.	3.0×10^5	5.0×10^9
Si	M_{Ch}	3.2×10^7	33 godz.	3.0×10^5	10^{12}
Shell **Si**	—	3.2×10^8	5.5 godz.	3.0×10^5	?
Core-collapse	M_{Ch}	1.6×10^9	$0.1\ldots0.5$ s	3.0×10^5	$>10^{20}$

STRUKTURA PRE-SUPERNOWEJ



adapted from Woosley and Weaver, 1989

II-P → II-L → IIb → Ib → Ic

GWIAZDA CHŁODZONA NEUTRINOWA *versus* SUPERNOWA IA

Etapy spalania w fazie chłodzonej neutrinowo:

^{12}C (^{16}O)	$\longrightarrow$	^{20}Ne, ^{24}Mg
^{20}Ne (^{16}O, ^{24}Mg)	$\longrightarrow$	^{16}O, ^{24}Mg
^{16}O (^{24}Mg, ^{28}Si)	$\longrightarrow$	^{28}Si
^{28}Si (^{32}S)	$\longrightarrow$	^{56}Ni, ^{56}Fe, ^{54}Fe

Masa jądra 1. . . 2 $M_\odot$, *nieprzypadkowo* jest bliska M_{Ch}=1.44 $M_\odot$

- Energia pochodzi z przegrupowania jąder
- Całkowita energia jest rzędu energii wybuchu supernowej Ia:

$$E = 2M\Delta\left(\frac{E_w}{A}\right) \text{ [foe} \equiv 10^{51} \text{ erg]}$$

- Wzór Hoyle'a: $E = M\ c^2/1000 = 2.6$ foe

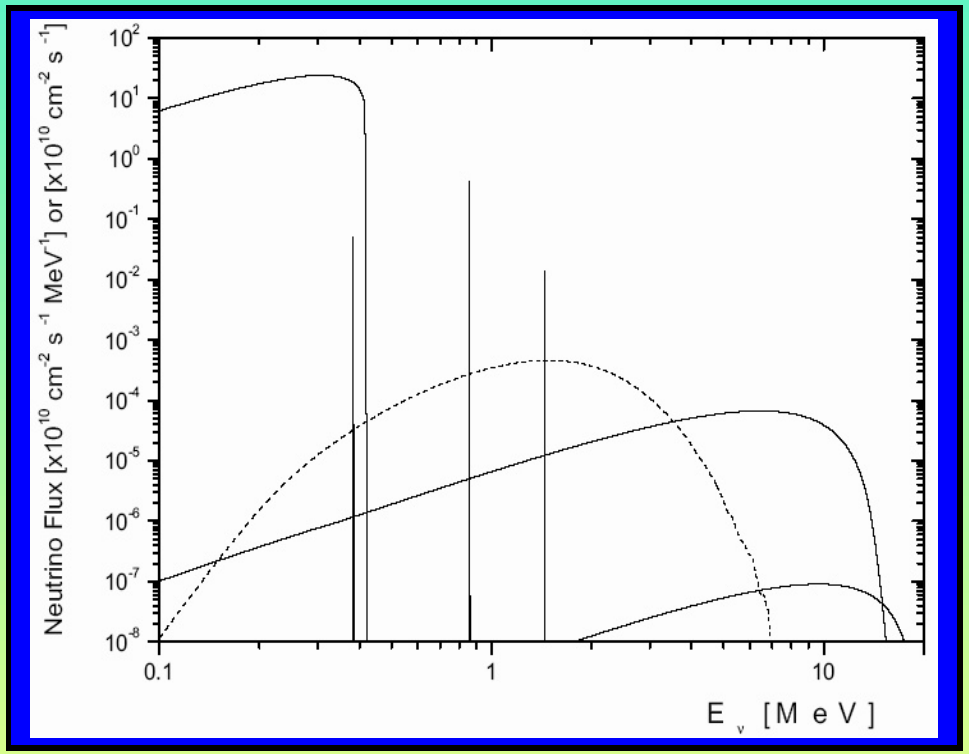
⋆ SN Ia $\longrightarrow$ energia wybuchu (3 s) ⋆ Pre-SN $\longrightarrow$ neutrina (2 dni)

MASA CHANDRASEKHARA

$$M_{Ch} = 1.44\, M_\odot\, (2\, Y_e)^2 \left[1 + \left(\frac{S_e}{\pi Y_e}\right)^2\right] \left[1 - \frac{3}{5}\left(\frac{12}{11}\right)^{1/3} \alpha\, \bar{Z}^{2/3} + \frac{p_{rad}}{p_{mat}}\right]$$

- Y_e – zawartość leptonów (elektronów) na barion (protony+neutrony)
  Dla „typowych” jąder (^{4}He, ^{12}C, ^{16}O) $Y_e = 0.5$
- S_e entropia na elektron wyrażona w jednostkach *stałej Boltzmana* k_B
  Miara wpływu temperatury
- $\alpha \simeq 1/137$ – stała struktury subtelnej
- $\bar{Z}$ – średni ładunek jąder
- p_{rad}, p_{mat} – ciśnienie promieniowania i materii

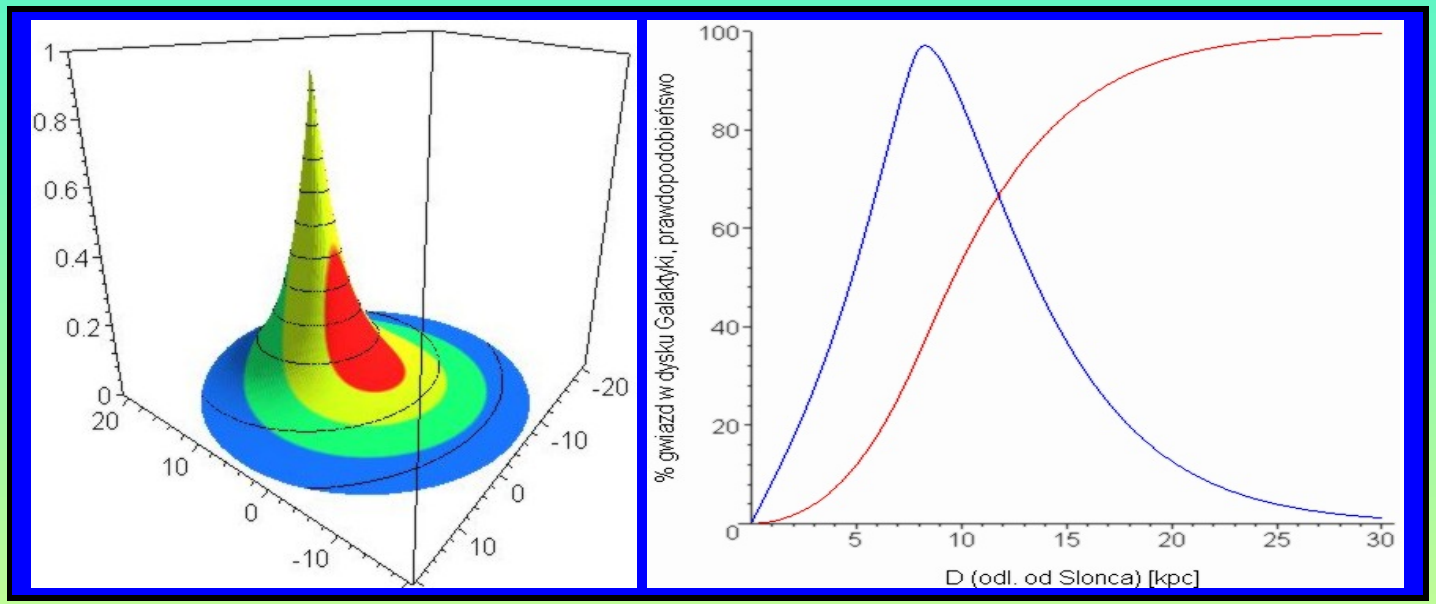
STRUMIEŃ NEUTRIN Z 1KPC



- Neutrina z anihilacji par w gwieździe pre-supernowej można potraktować *na zasadzie luźnej analogii* jako odpowiednik słonecznych neutrin pp.
- Należy się spodziewać, że widmo *(neutrinowe)* gwiazdy pre-supernowej jest w istocie bogatsze.
- Znaczną część strumienia stanowią $\bar{\nu}_e$.

GALAKTYKA SOMBRERO (M 104)

MODEL GALAKTYKI



Bahcall & Soneira, ApJ **238** (1980) L17

Model dysku: $\rho_N(\mathrm{R},\mathrm{Z}) \propto exp\left(-\frac{(\mathrm{R}-8)}{3.5}\right) exp\left(-\frac{|\mathrm{Z}|}{0.1}\right)$, [kpc]

DETEKCJA ANTYNEUTRIN W WIELKIEJ SKALI

Reakcja Reinesa-Cowana (odwrotny rozpad β):

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

1 event/kt H_2O
z 1 kpc dziennie

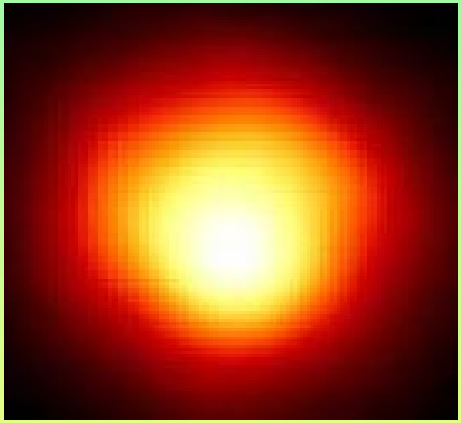
- KAMLAND (1 kt)
- BOREXINO (300 t)
- SNO (1+1.7 kt)
- SUPER KAMIOKANDE (32 kt)
- HYPERK (0.54 Mt)
- UNO (0.44 Mt)
- GADZOOKS! (32 kt)
- „*Gigaton Array*" (1-16 Gt)

HARMONOGRAM GAZDZOOKS!

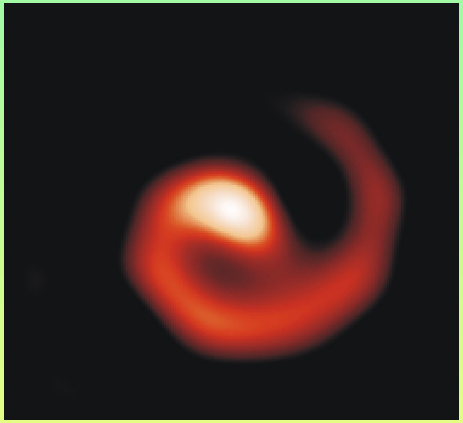
- 2004: U.S. DoE ADRP grant (*M. Vagins, UCI*)
- 2005: Testy **K2K** 1kt:
  Gd - filtrowanie, wpływ soli, osłabienie światła, ...
- 2008: GADZOOKS! **w pełnej skali** 32kt

Neutrina z pre-supernowej: 3σ z 2 kpc !

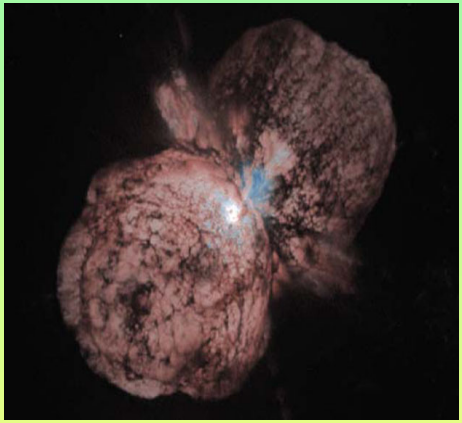
Betelgeuse 130 pc



WR 104 1.5 kpc



Eta Carina 2.7 kpc

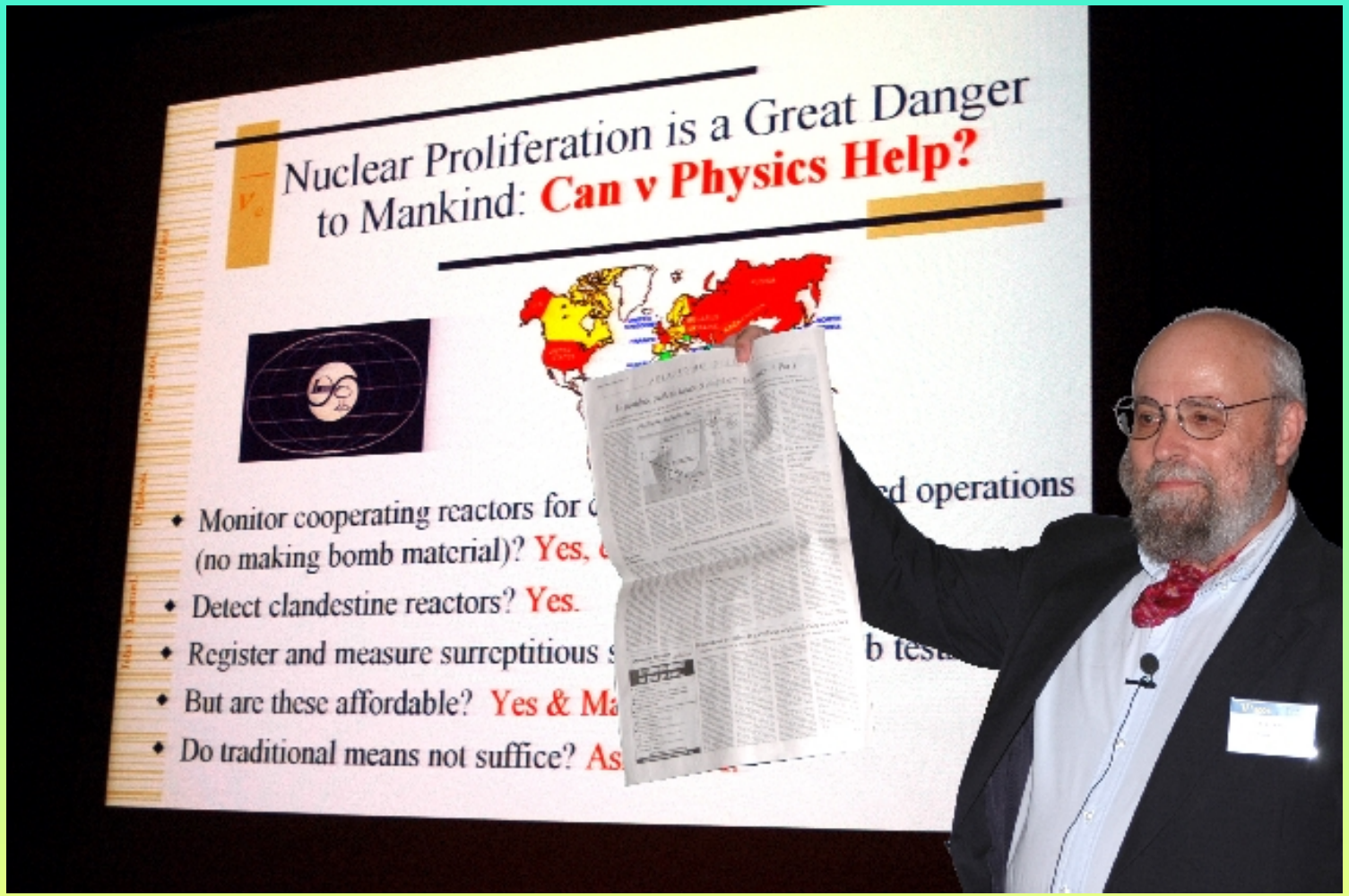


MILITARNE ZNACZENIE ASTROFIZYKI NEUTRINOWEJ

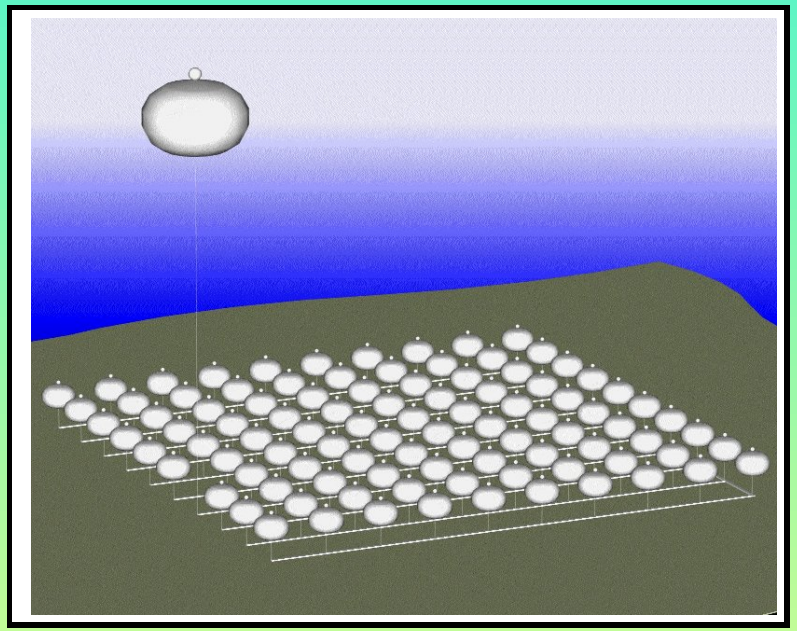
Neutrinos and Arms Control Workshop

5-7 February 2004, University of Hawaii

- Zdalne monitorowanie reaktorów jądrowych
- Wykrywanie nielegalnych reaktorów jądrowych
- Wykrywanie ukrytych prób jądrowych
- Śledzenie atomowych łodzi podwodnych
- Georeaktor i „tomografia" Ziemi
- Przewidywanie wybuchów supernowych
- Neutrino SETI


Nuclear Proliferation is a Great Danger
to Mankind: Can ν Physics Help?
Monitor cooperating reactors for
(no making bomb material)? Yes,
Detect clandestine reactors? Yes.
Register and measure surreptitious
But are these affordable? Yes & Ma
Do traditional means not suffice? As
ed operations
b test

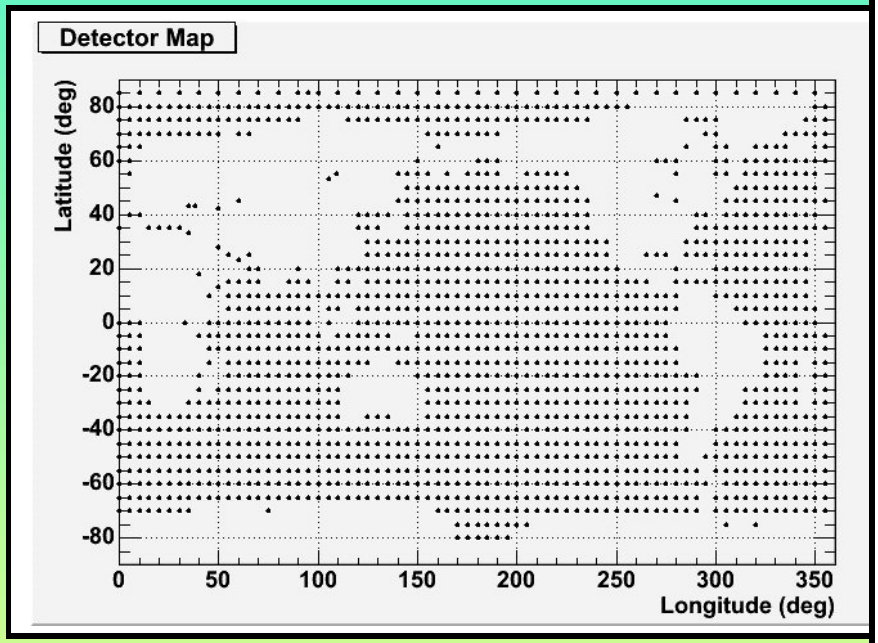
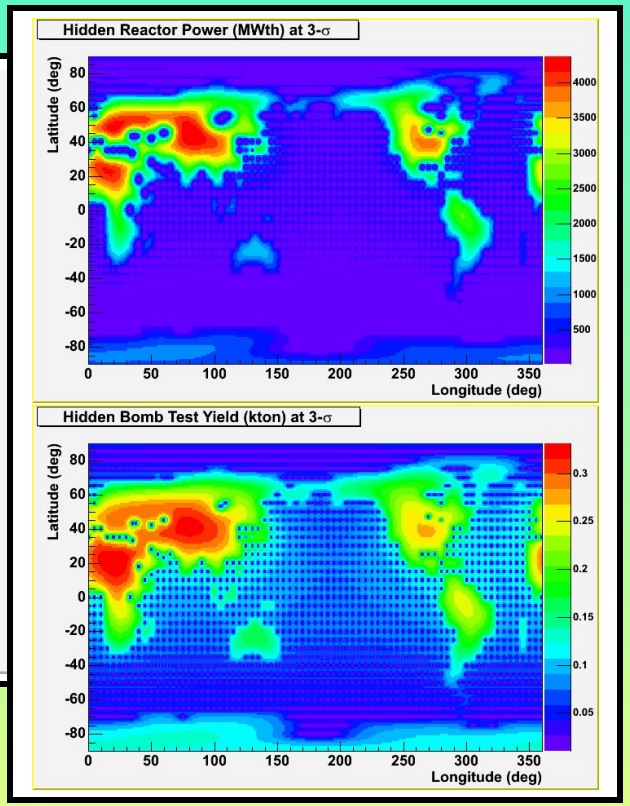
GIGATON ARRAY



- Balony (R=134 metry, 10 Mt) pokryte fotopowielaczami
- Ustawione na dnie oceanu na głębokości ponad 4 km
- Wypełnione roztworem ^{40}KCl
- Zakotwiczone na linach

(*J. G. Learned*, *Univ. Hawaii*, Neutrino 2004)

SIEĆ OGÓLNOŚWIATOWA



1596 detektorów 10 Mt