

# Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład XIII

- Supernowe i błyski gamma
- Fale grawitacyjne
- Detektory LIGO i Virgo

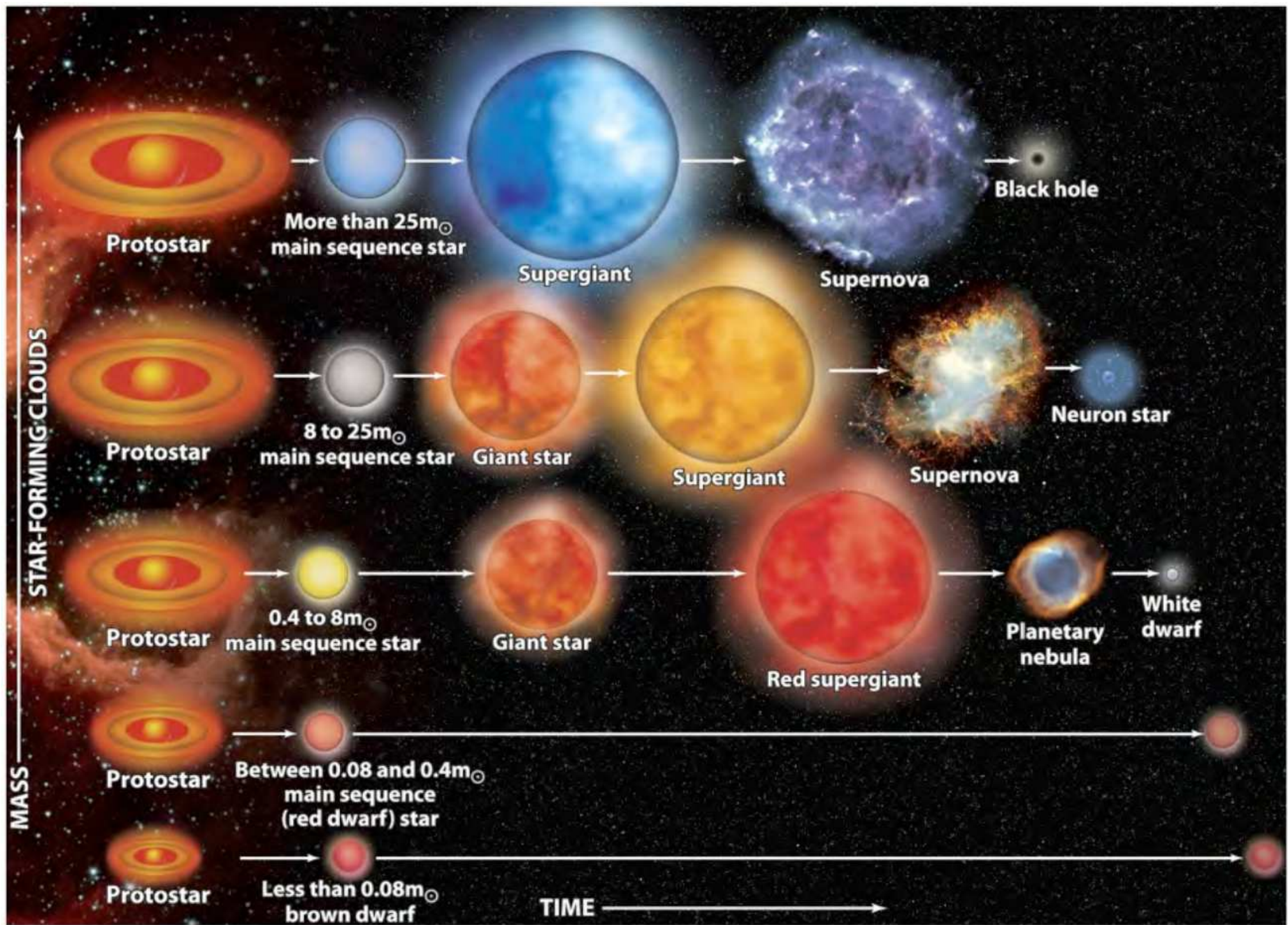
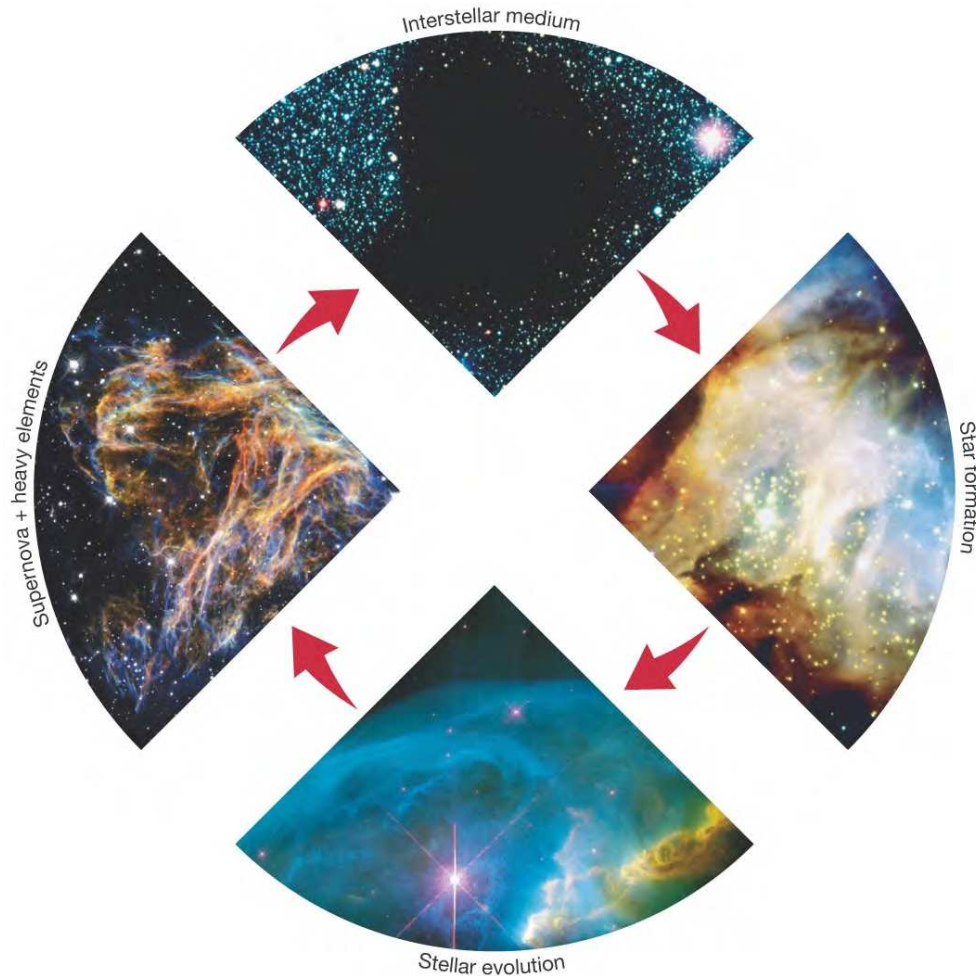


Figure 13-28a  
 A.P. Zamecki  
 Discovering the Universe, Eighth Edition  
 © 2008 W. H. Freeman and Company

# Ewolucja gwiazd

## Cykl rozwojowy



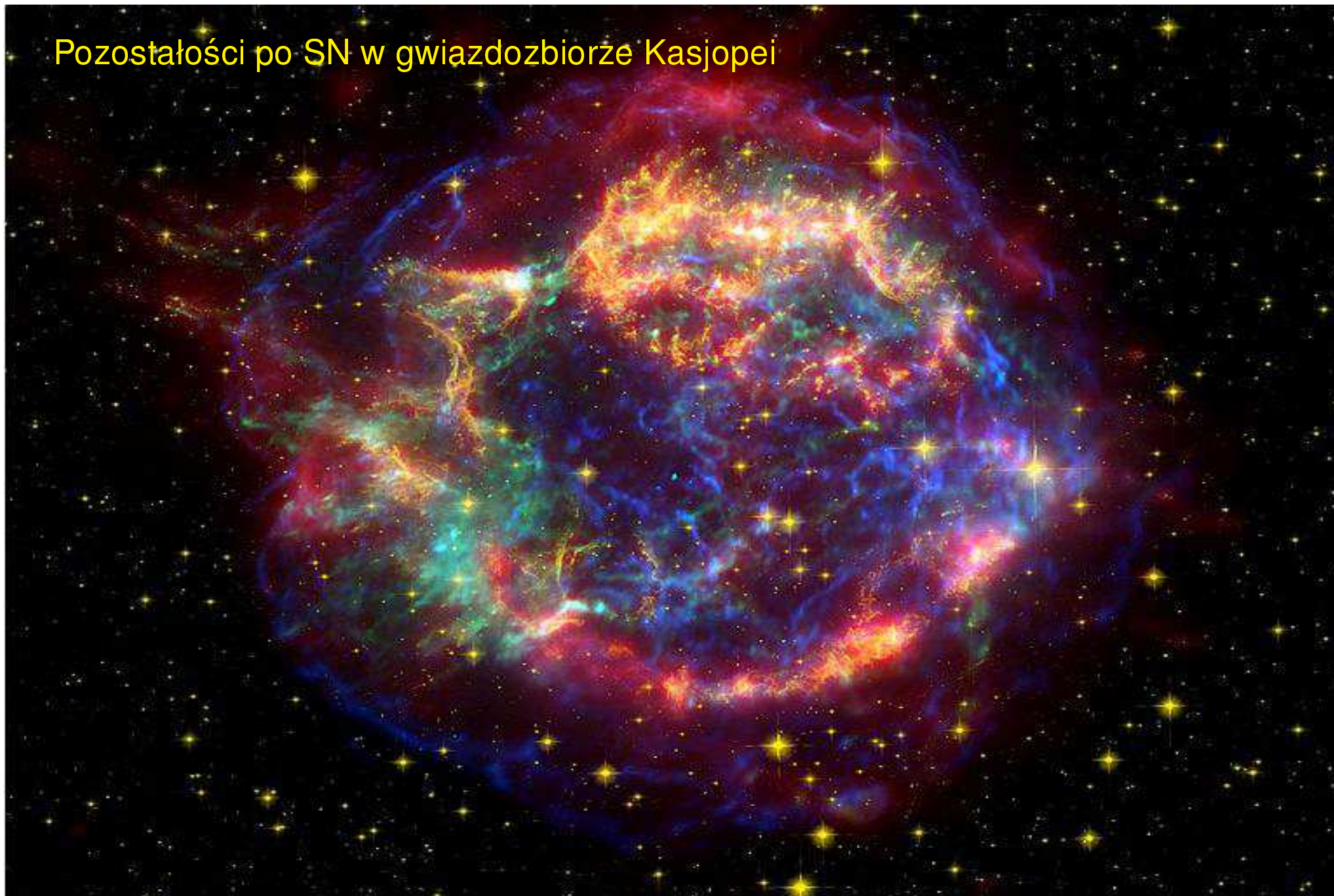
Czas życia masywnych gwiazd jest znacznie krótszy niż czas życia Wszechświata.

$$15M_{\odot} \Rightarrow 15My$$

Gwiazdy te musiały już przejść wiele cykli ewolucji.

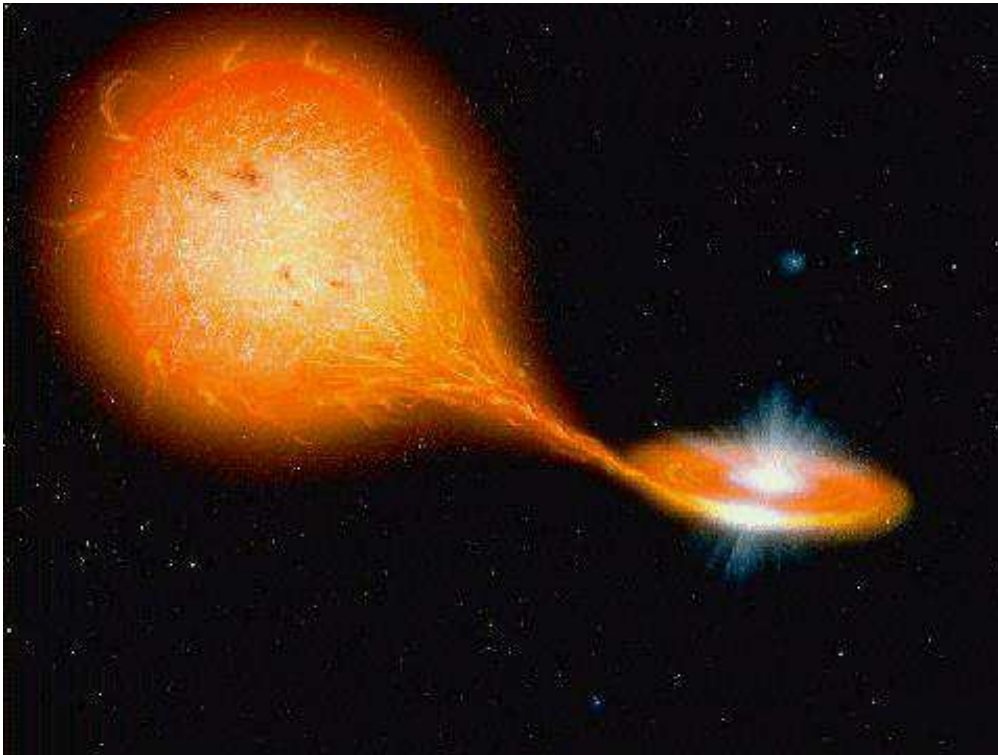
Pozostałości starych gwiazd stają się materiałem budulcowym dla nowych...

## Pozostałości po SN w gwiazdozbiore Kasjopei



# Supernowe

## Supernowe Typ I



Białe karły są stabilne jeśli ich masa nie przekracza ok. 1.5 mas Słońca

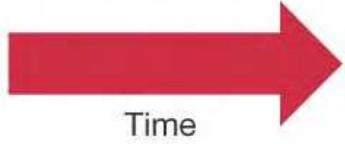
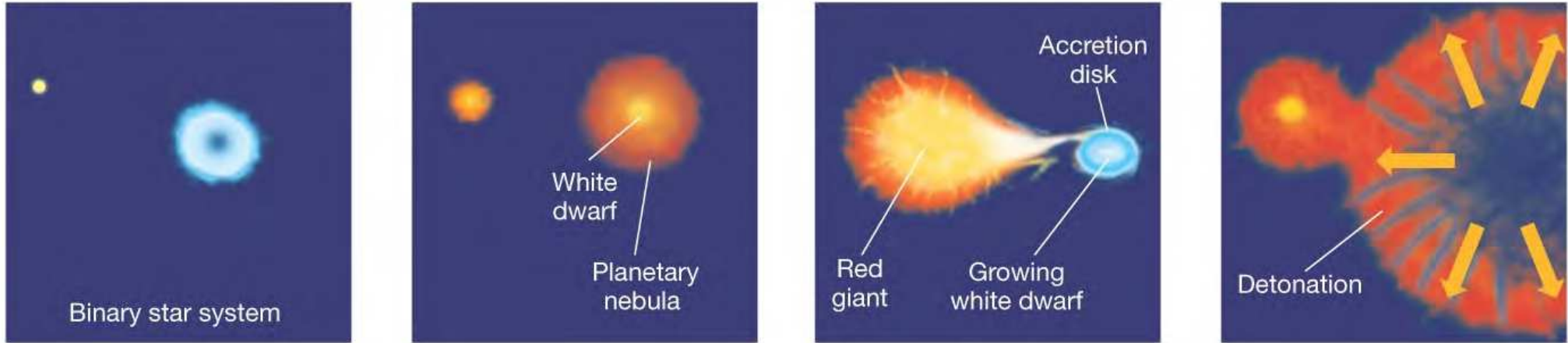
Wtedy ciśnienie degeneracji elektronów równoważy ciśnienie grawitacyjne

Jeśli jednak biały karzeł znajduje się w bliskim układzie podwójnym, jego masa może powoli rosnać...

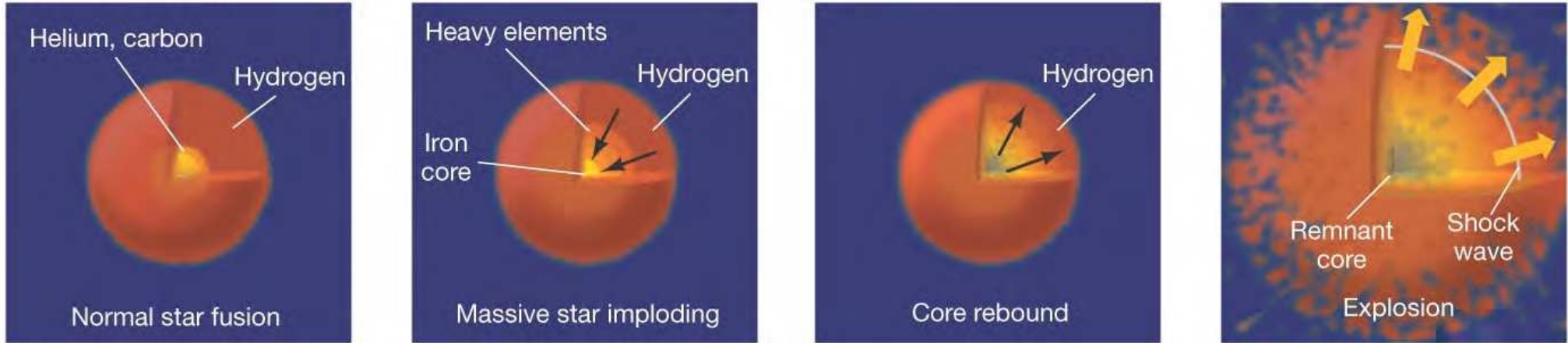
Z chwilą przekroczenia progowej wartości masy następuje zapadnięcie się białego karła, analogiczne do zapadnięcia się jądra w Supernowej typu II.

# Supernowe

(a) Type I Supernova

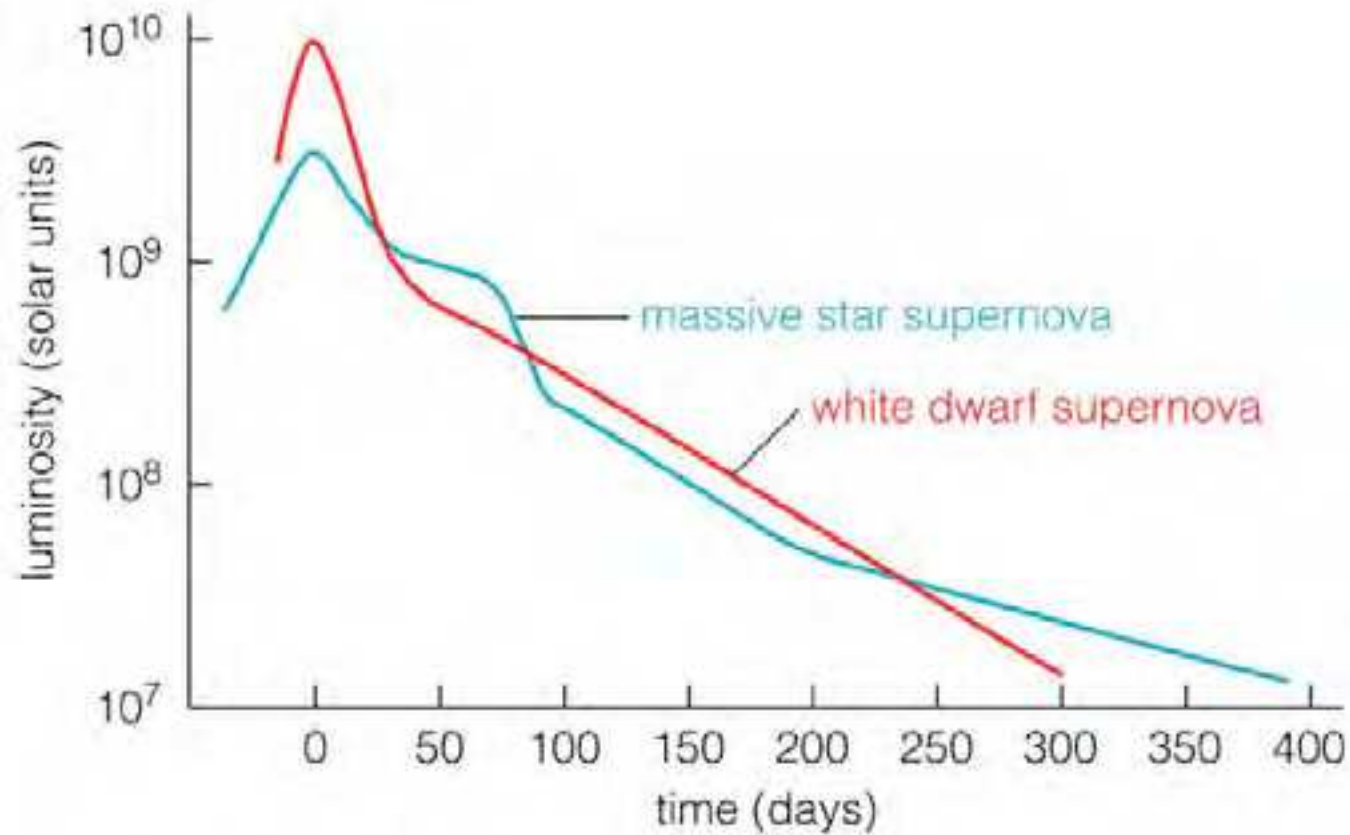


(b) Type II Supernova



# Supernowe

Możemy rozróżnić typy supernowych na podstawie krzywej blasku i widma



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

# Ewolucja gwiazd

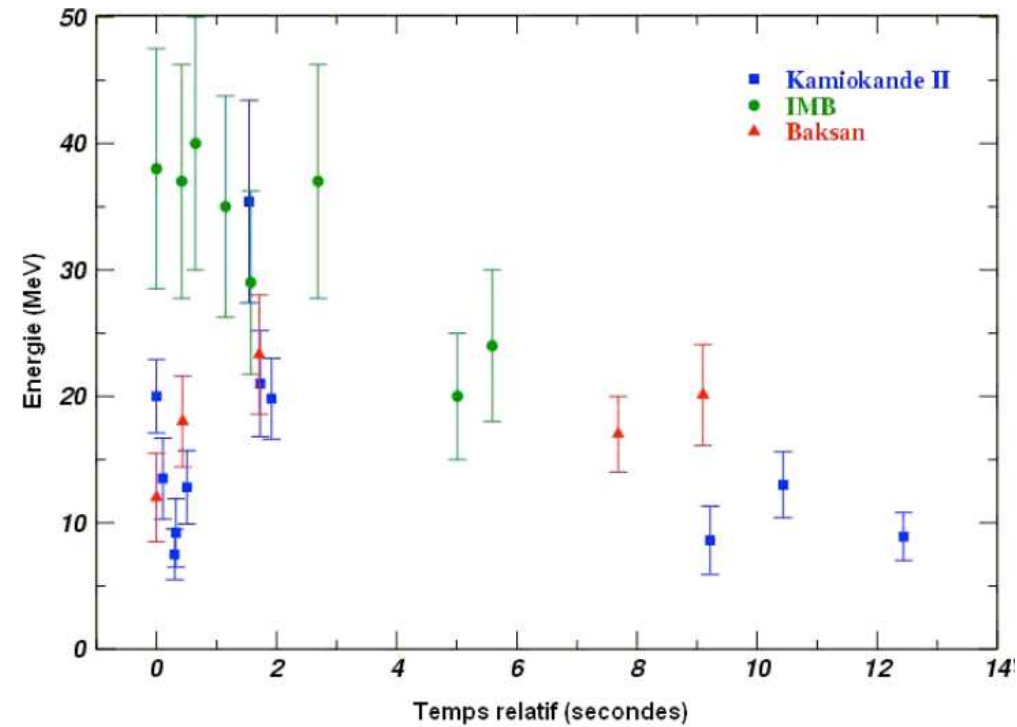
## SN 1987A





# Ewolucja gwiazd

## SN 1987A



Obserwacja “impulsu neutrinowego” na około 3 godziny przed rozbłyskiem optycznym  
24 przypadki w 13 s  $\Rightarrow$  potwierdzenie przewidywań modelu

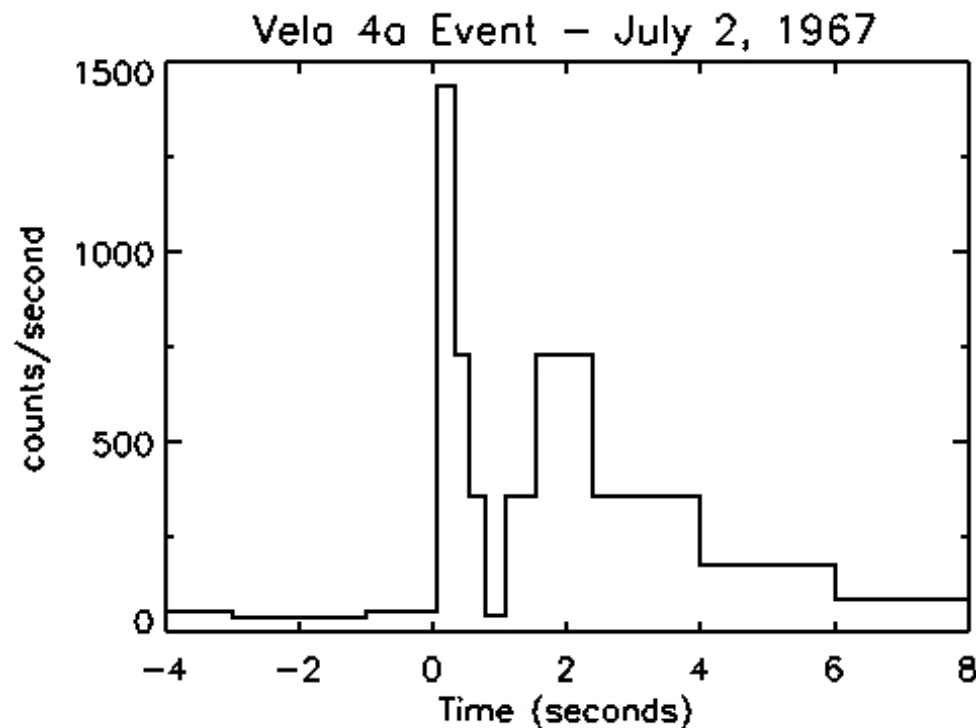
# Błyski gamma

## Gamma Ray Bursts (GRB)

Krótkie (do 1000 s), silne, nie powtarzające się rozbłyski promieniowania  $\gamma$  pochodzące z punktowych źródeł na niebie

Obserwowane w bardzo szerokim zakresie widma, od fal radiowych do fotonów GeV

Odkryte w 1967 roku przez amerykańskie satelity szpiegowskie Vela (publikacja 1973)

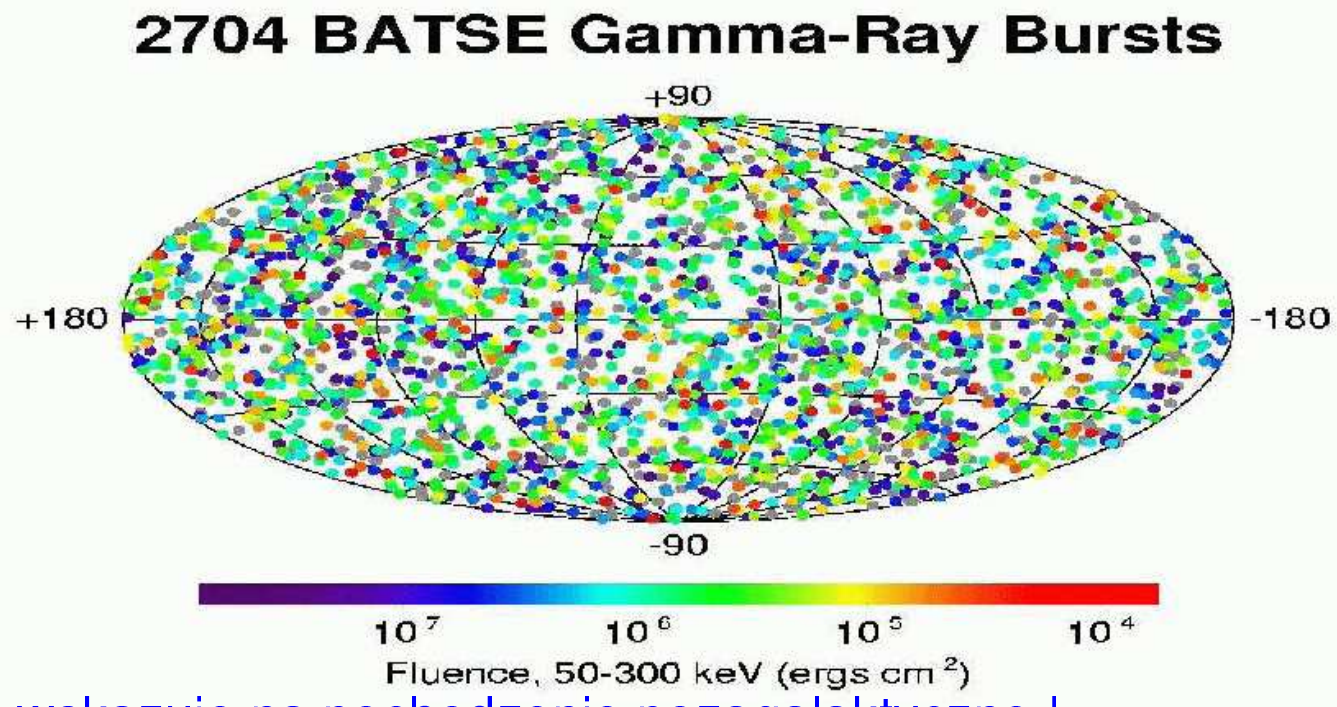


# Błyski gamma

## BATSE

Satelity VELA zarejestrowały 16 błysków (1969-73), nie pochodzących z Ziemi, Słońca, ani planet. Większość astronomów przypuszczała, że pochodzą z naszej Galaktyki...

Przełom w badaniach GRB przyniosła misja satelity CGRO (wystrelony w 1991) z detektorem BATSE (Burst And Transient Source Experiment)

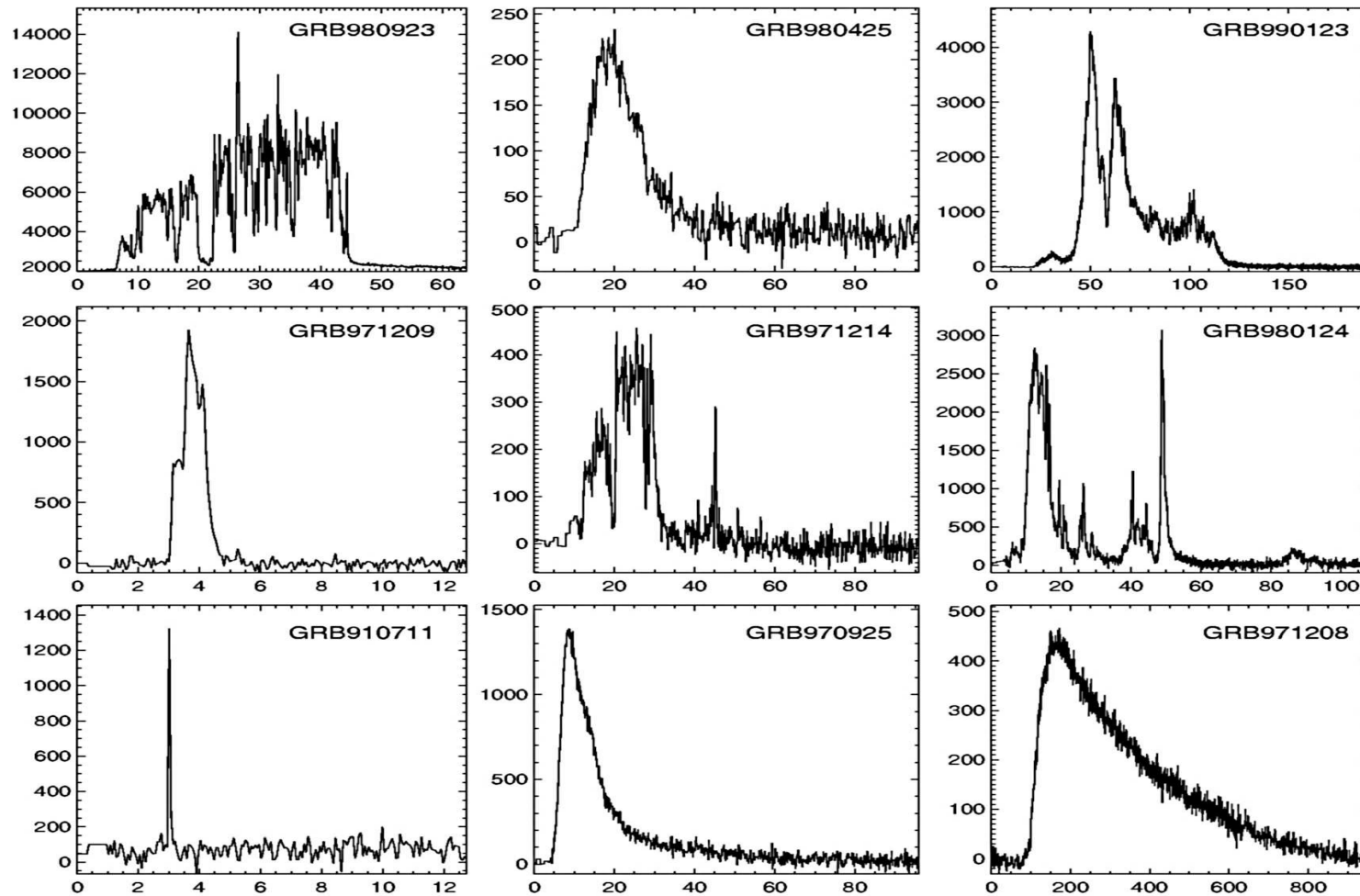


Izotropowy rozkład wskazuje na pochodzenie pozagalaktyczne !

# Błyski gamma

## BATSE

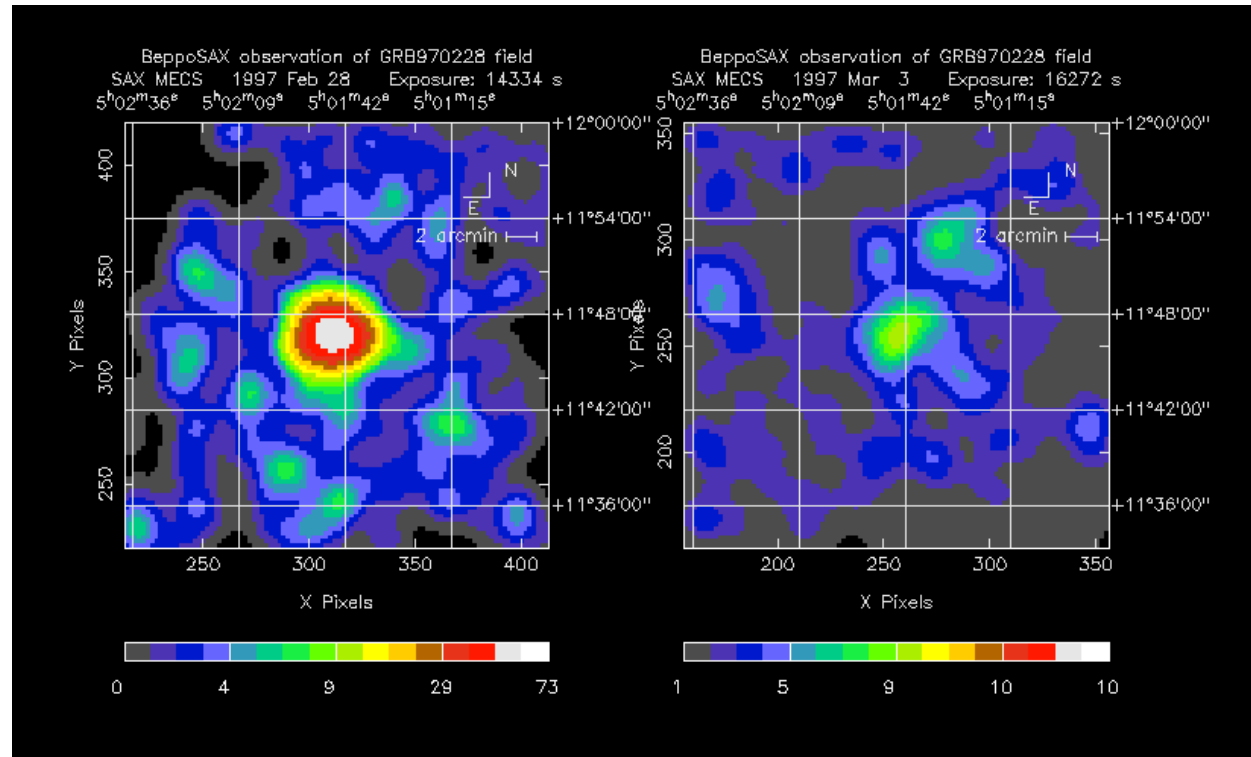
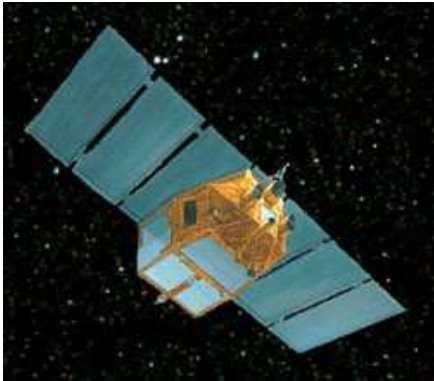
Błyski są bardzo nieregularne, praktycznie nie ma dwóch podobnych



# Błyski gamma

## Poświaty

W 1997 roku włoski satelita BeppoSAX zarejestrował gasnące źródło promieniowania rentgenowskiego w miejscu wykrytego wcześniej GRB970228



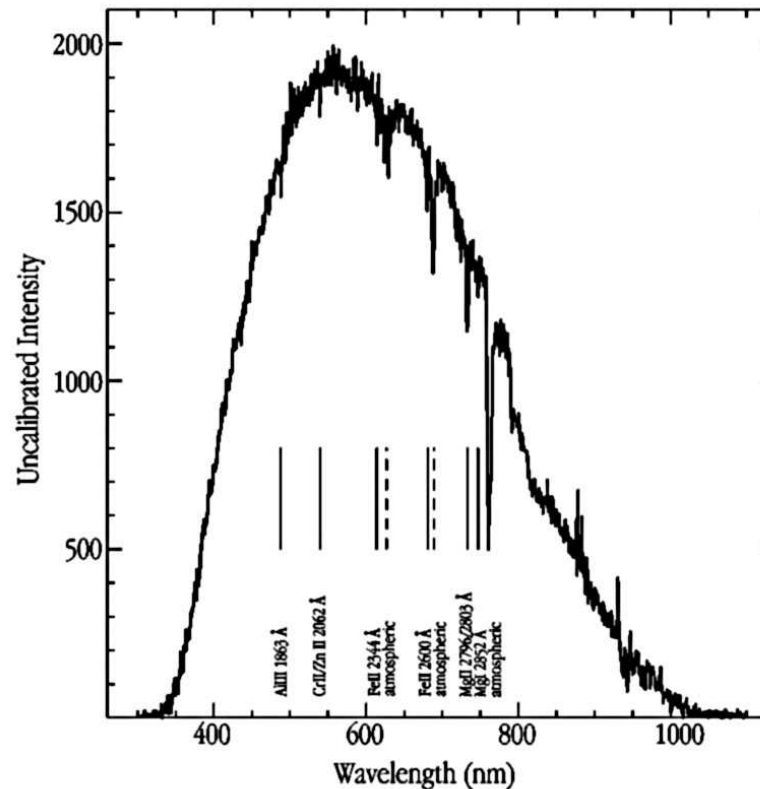
- ⇒ dokładniejsza pozycja umożliwiła nakierowanie dużego teleskopu
- ⇒ pomiar optyczny ⇒ przesunięcie ku czerwieni ⇒ odległość

# Błyski gamma

## Poświaty

Przykład: pomiar widma poświaty optycznej błysku GRB990510 (10 maja 1999)

⇒  $z = 1.619$



Spectrum of GRB 990510 Afterglow  
(VLT/ANTU + FORS1)

ESO PR Photo 22f/99 (18 May 1999)

© European Southern Observatory



# Błyski gamma

## SWIFT



Satelita dedykowany pomiarom błysków GRB

Wystrzelony we wrześniu 2004

Trzy instrumenty:

- Burst Alert Telescope (BAT)  
szerokie pole widzenia, wykrywa ponad 100 błysków rocznie
- X-Ray Telescope (XRT)  
wyznacza pozycję z dokładnością do sekund kątowych
- UV/Optical Telescope (UVOT)  
poszukuje poświat optycznych do  $24^m$

W momencie wykrycia błysku przez BAT, satelita obraca się, aby skierować XRT i UVOT na źródło

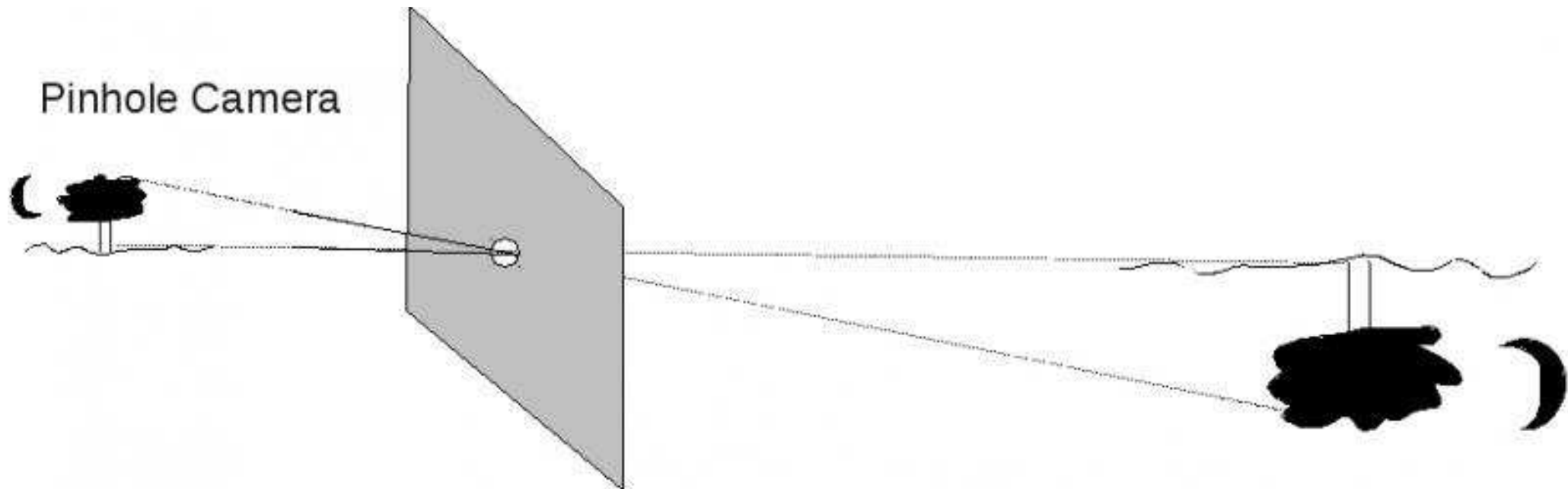
# Błyski gamma

## SWIFT

Jak określić dokładnie pozycję na niebie źródła promieniowania gamma?

Promieniowanie gamma nie daje się ogniskować ani odbijać!...

Możnaby wykorzystać “kamerę otworkową”:



Ale precyzję pozycji uzyskujemy kosztem czułości...



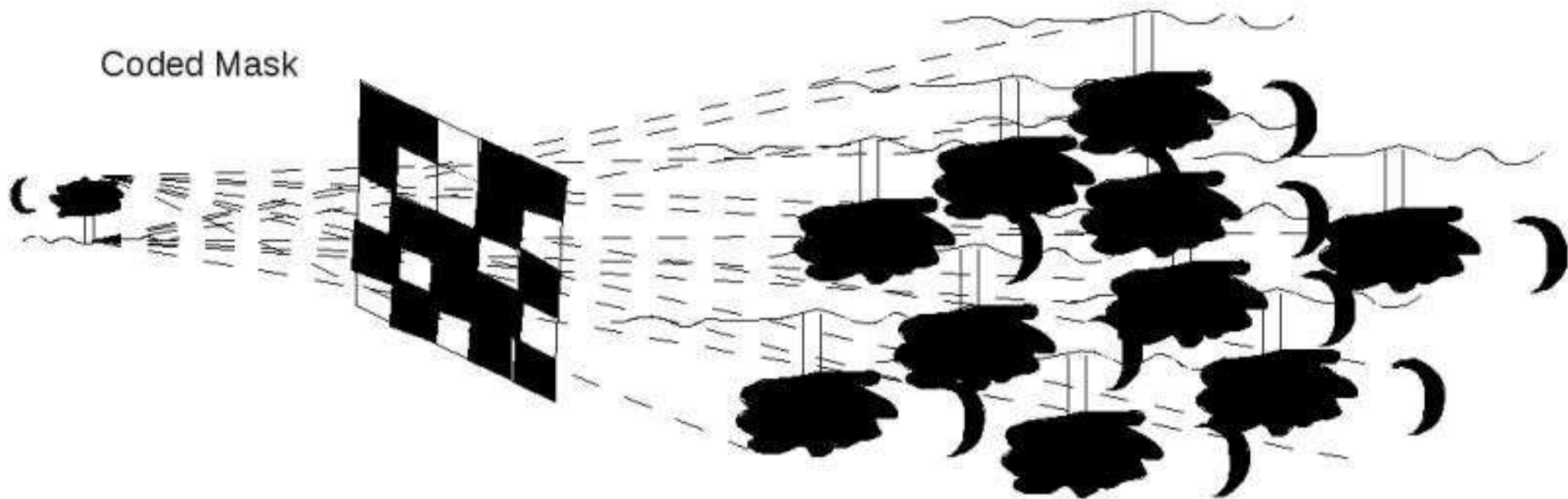
# Błyski gamma

## SWIFT

Jak określić dokładnie pozycję na niebie źródła promieniowania gamma?

Promieniowanie gamma nie daje się ogniskować ani odbijać!...

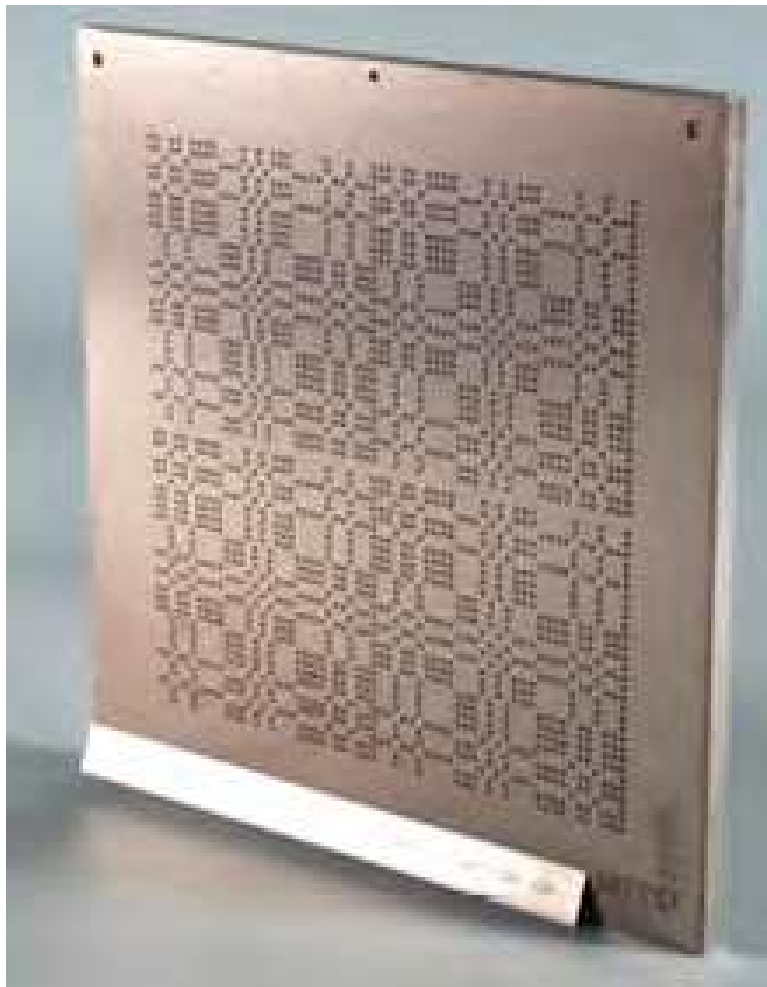
Ale można zrobić wiele otworków  $\Rightarrow$  tzw. maska kodowana:



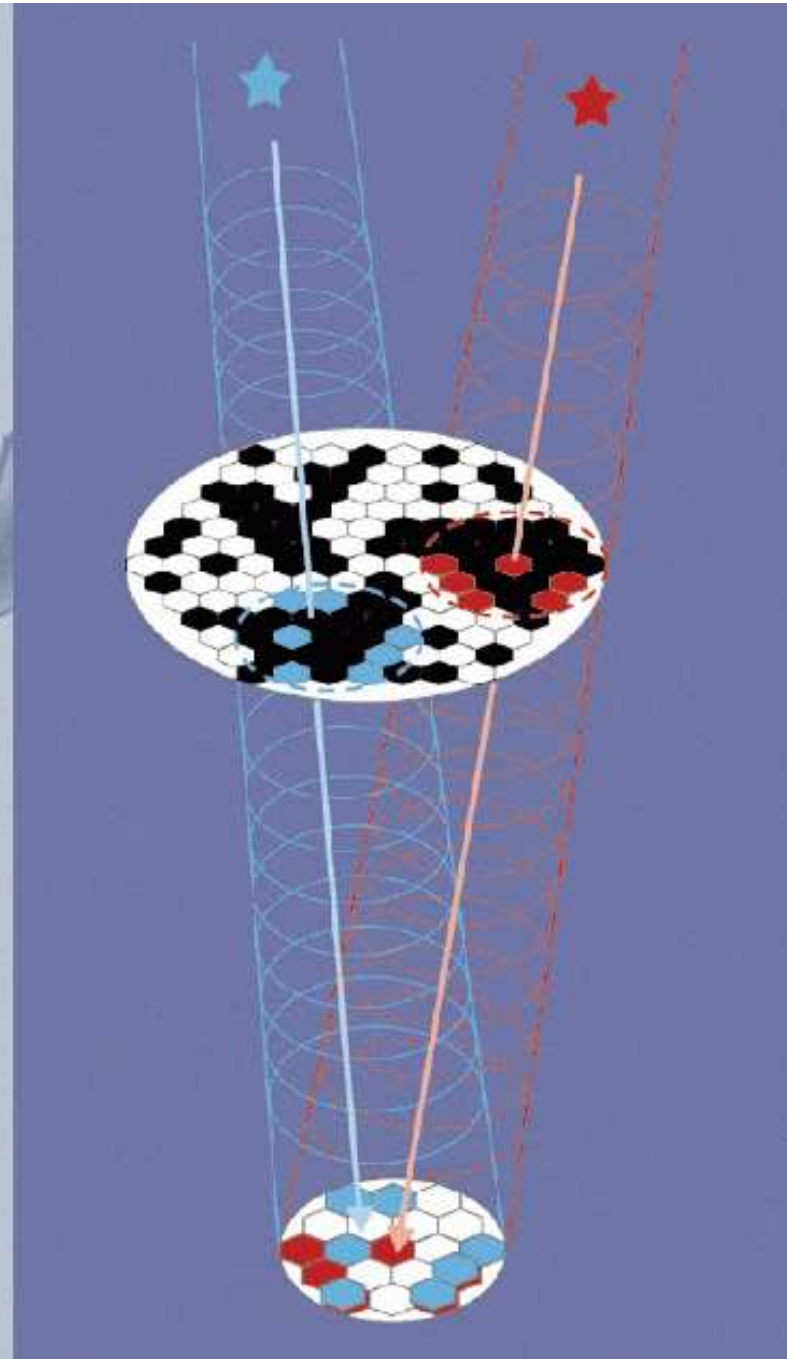
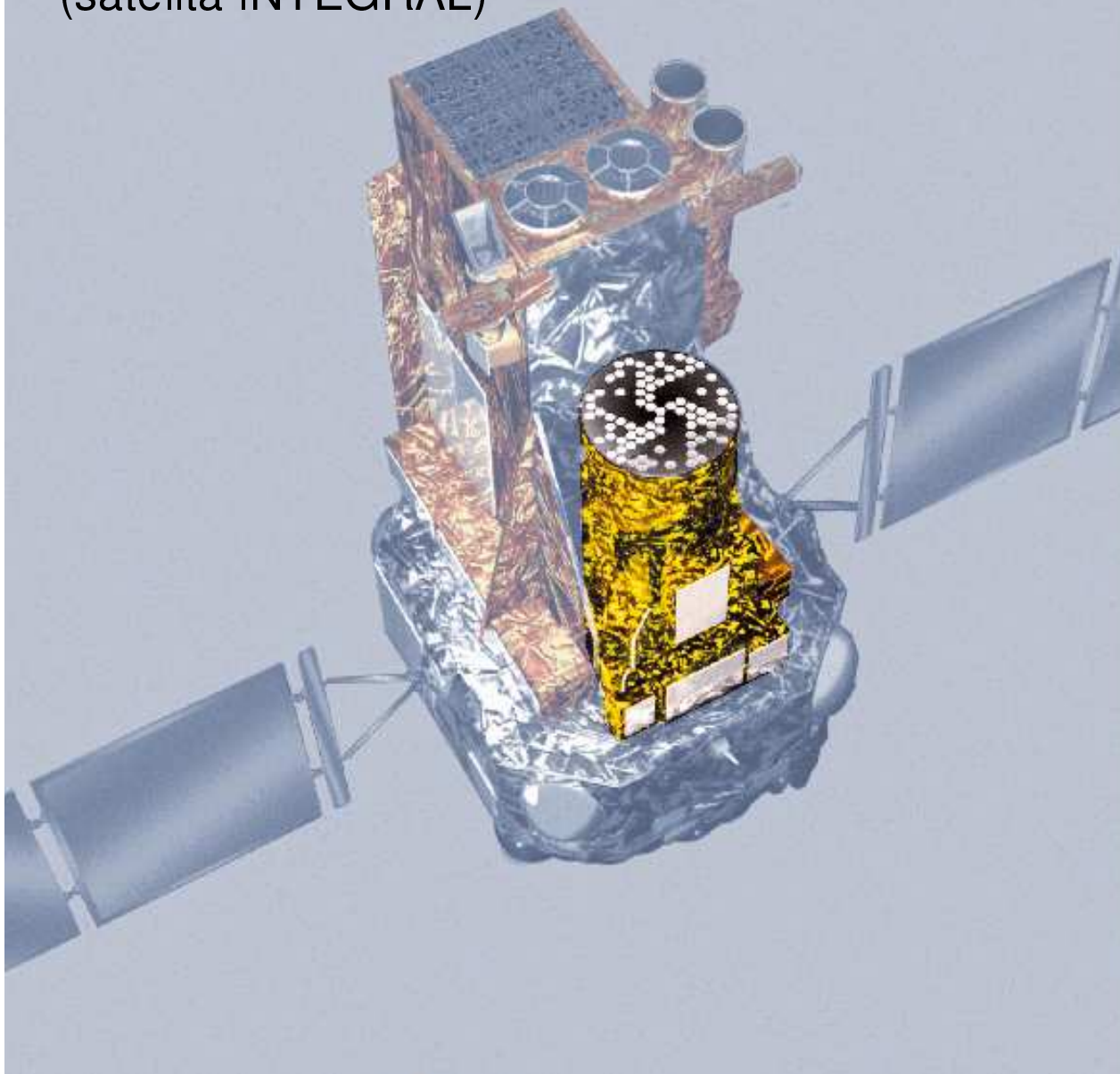
Możemy dokładnie wyznaczyć pozycję przesłaniając jedynie  $\geq 50\%$  apertury

# Błyski gamma

## Maski kodowane

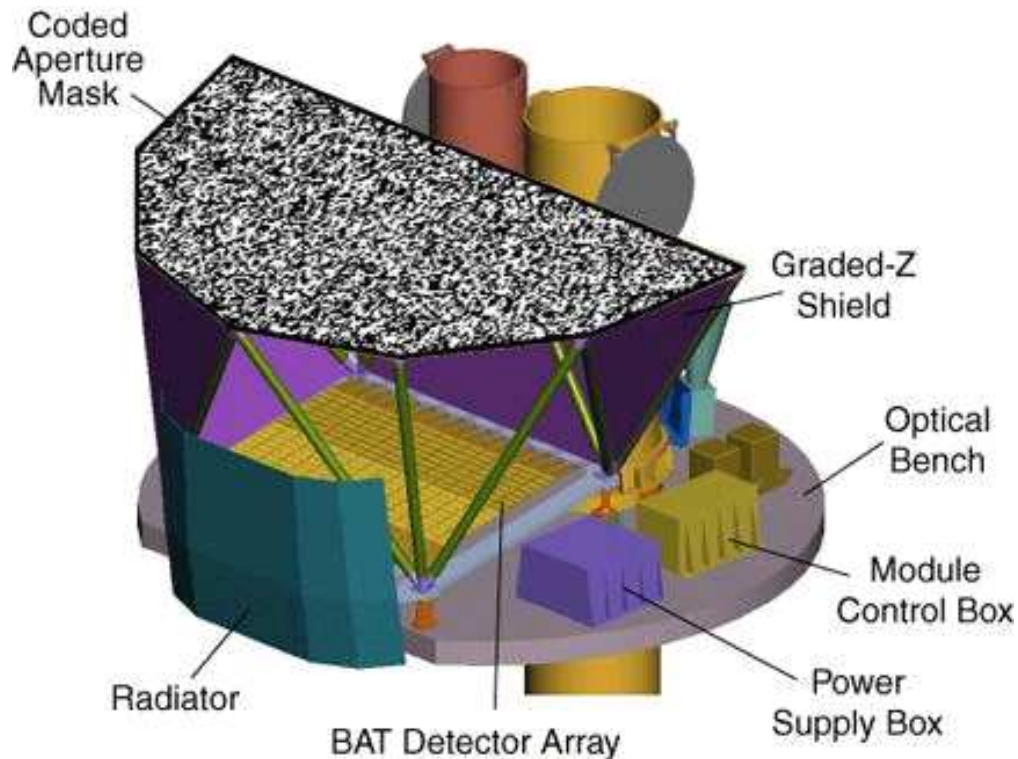


Schemat działania maski kodowanej detektora SPI  
(satelita INTEGRAL)



# Błyski gamma

## SWIFT



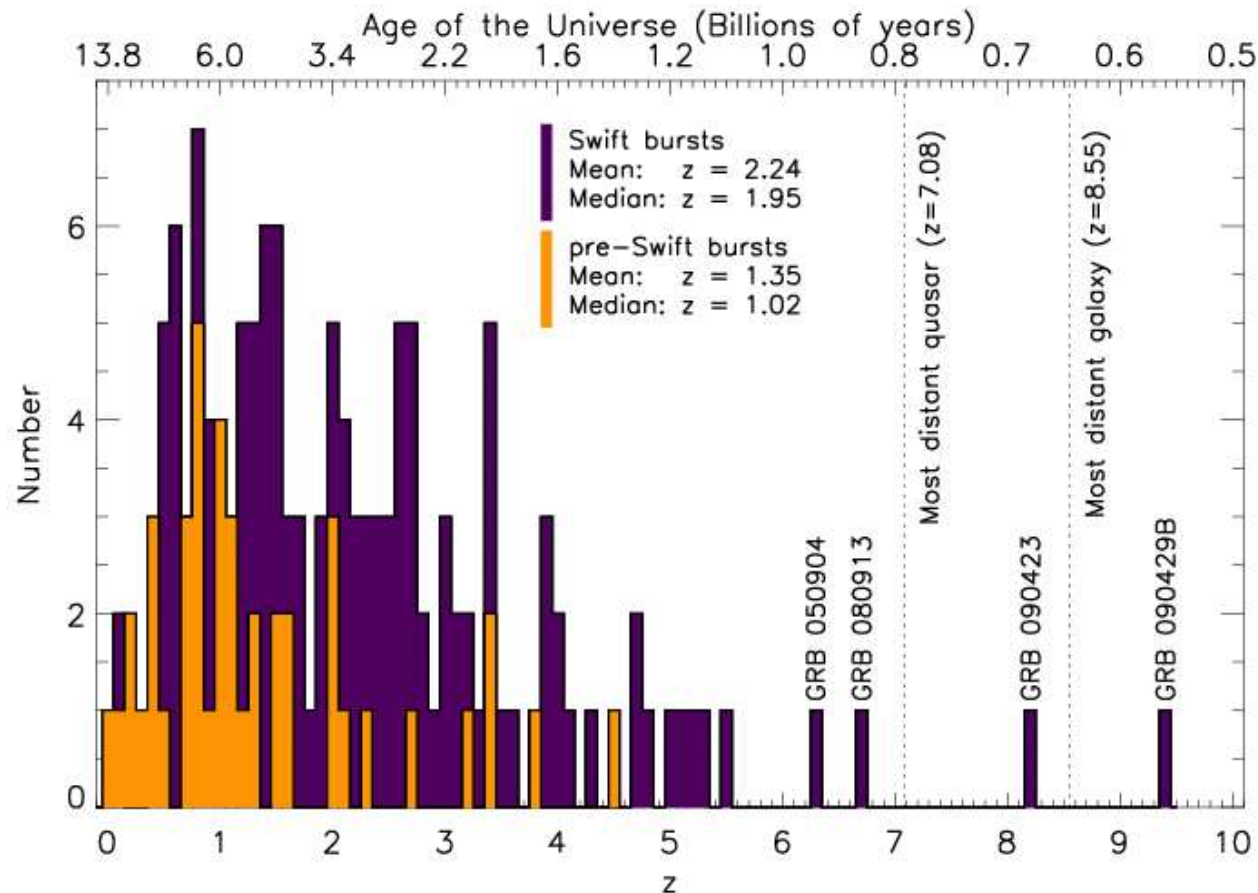
Dzięki wykorzystaniu maski kodowanej detektor BAT umożliwia wyznaczenie pozycji błysku z dokładnością do ułamka stopnia.

Wymaga to zaawansowanej analizy obrazu, ale dedykowane algorytmy robią to w czasie rzeczywistym...

# Błyski gamma

## Przesunięcie ku czerwieni

Duża dokładność wyznaczania pozycji przez SWIFT pozwoliła na wyznaczenie przesunięcia ku czerwieni dla dużej liczby błysków



# Błyski gamma

## Hipotezy

Na podstawie dotychczasowych obserwacji GRB można podzielić na dwie klasy:

- krótkie błyski, o czasie trwania do 2 s, o twardszym widmie
- długie błyski, o czasie trwania powyżej 2s, o miększym widmie

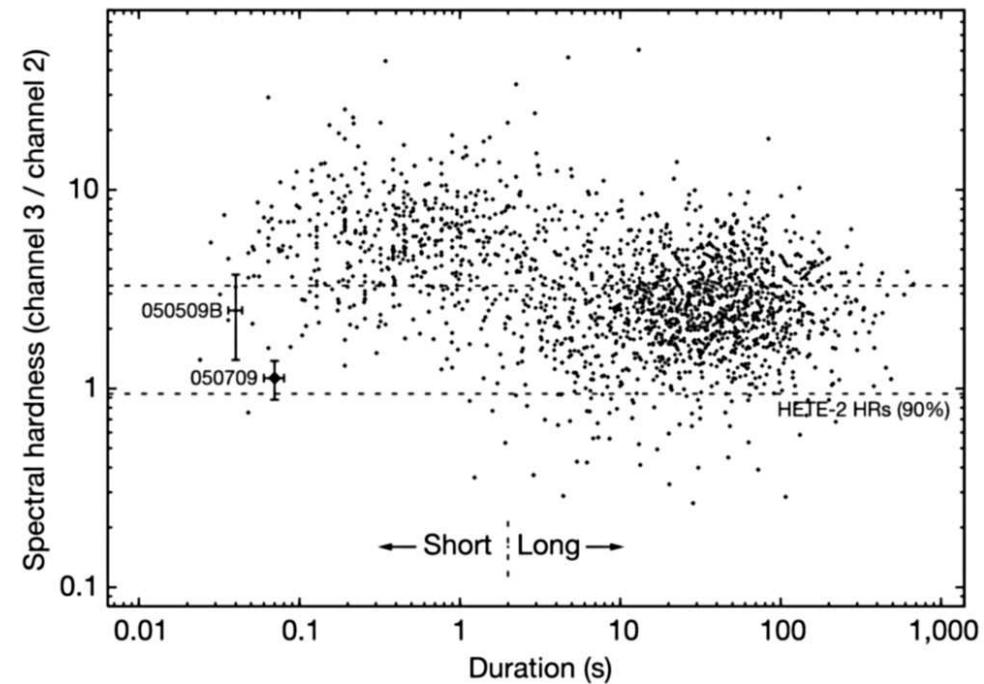
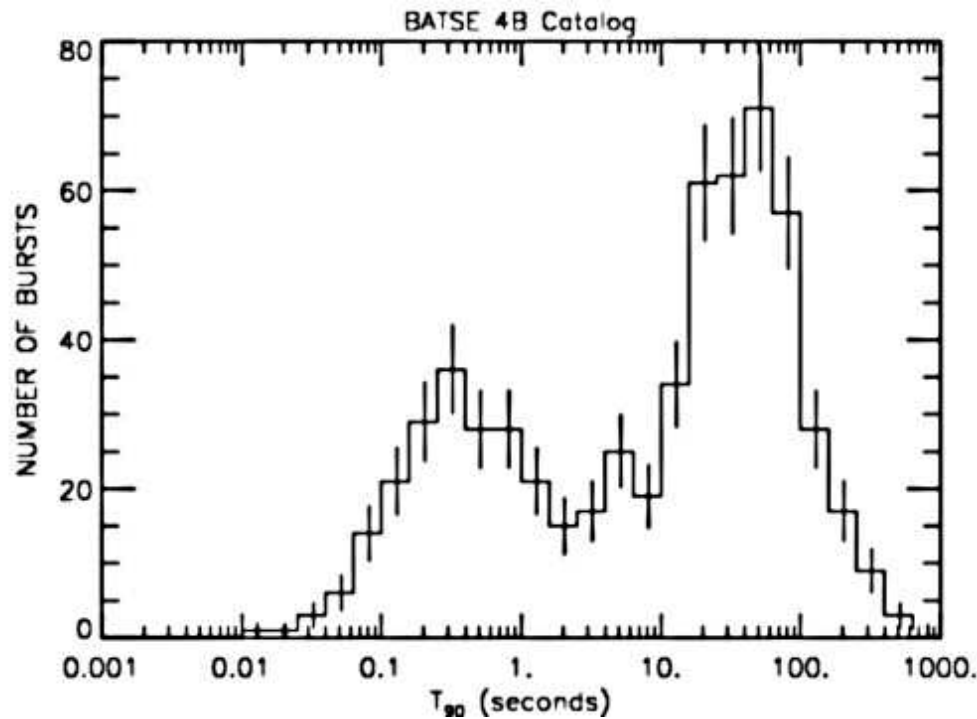


Figure 1 | The classic BATSE duration-spectral hardness diagram<sup>1</sup>.

$T_{90}$  - czas w którym rejestrowano od 5% do 95% zliczeń

Twardość: stosunek zliczeń 100-300 keV do 25-100 keV

# Błyski gamma

## Hipotezy

GRB dochodzą do nas z bardzo dużych odległości (do  $z=9.4$  !)

Mimo to są niesłychanie jasne (gołym okiem dostrzegalny był błysk  $z=6.7$ )

Jeśli przyjąć, że promieniują izotropowo, błysk musiałby wyzwalać energię  $E_{iso}^{\gamma} \sim 10^{48} J$

Dla porównania wybuch Supernowej produkuje  $E^{\gamma} \sim 10^{42} J$

Szybka zmienność oznacza, że promieniować musi mały obszar  $R < 300 - 3000$  km

⇒ muszą to być procesy prowadzące do powstania zwartego obiektu (czarnej dziury?)

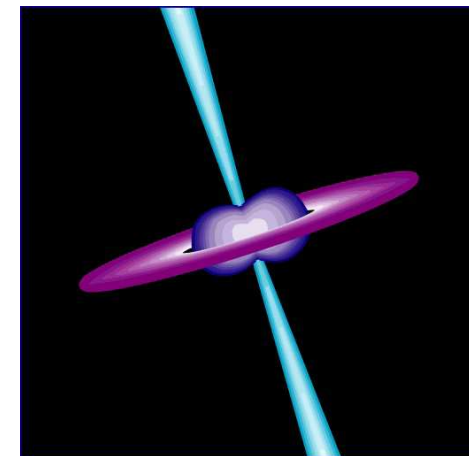
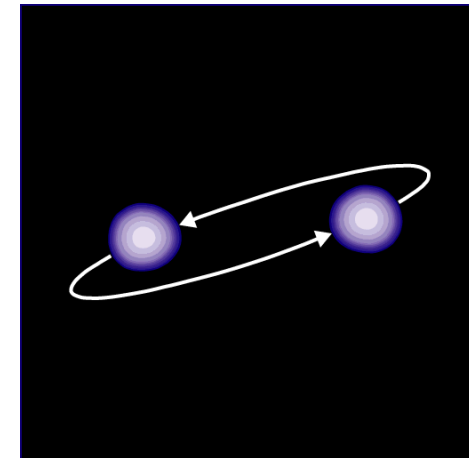
⇒ aby wytłumaczyć bardzo dużą intensywność promieniowania należy przyjąć, że emisja następuje w postaci wąskich strug (jetów)

Złamanie symetrii wynika prawdopodobnie z dużego momentu pędu...

# Błyski gamma

## Hipotezy

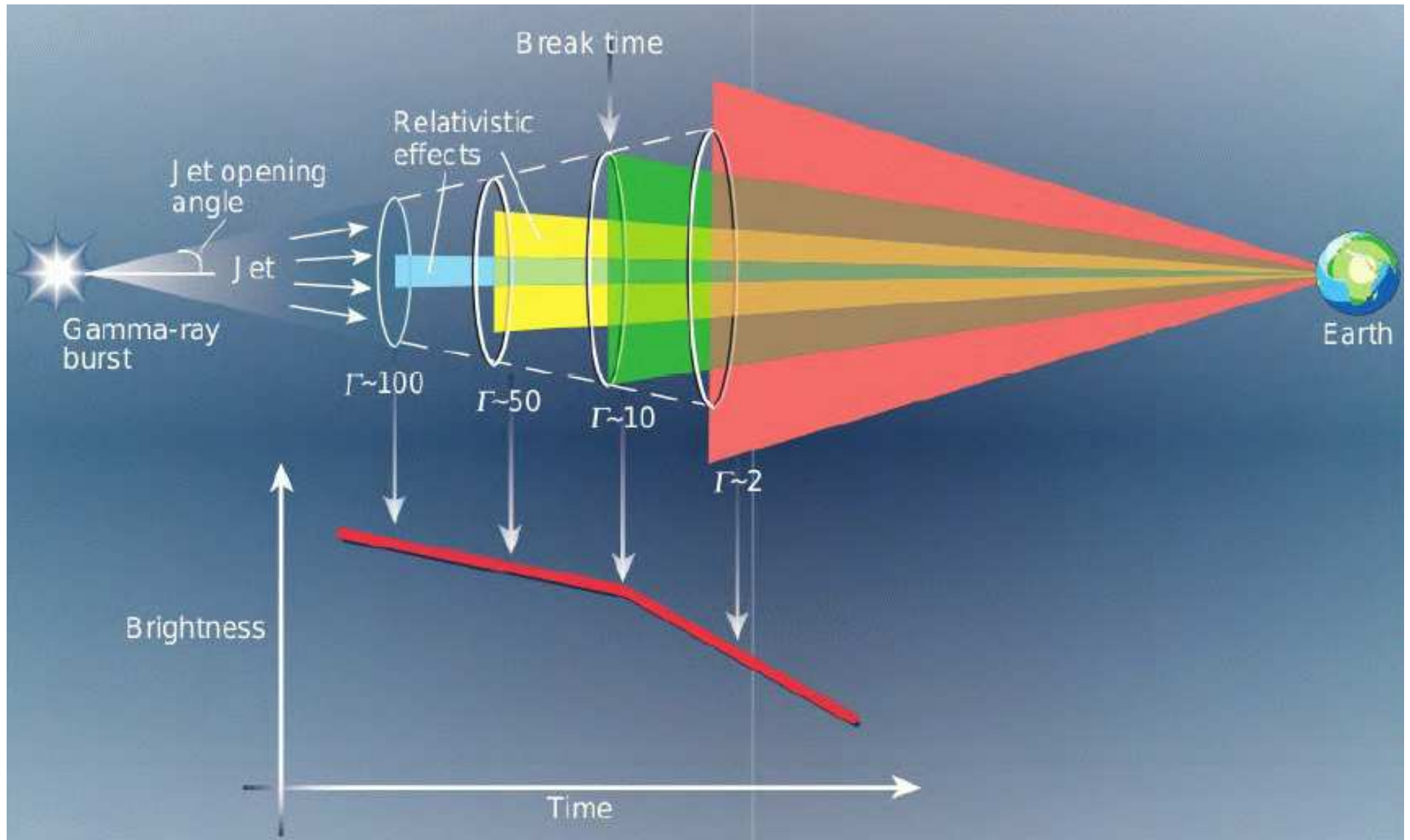
- Krótkie błyski:  
zderzenie dwóch zwartych obiektów:  
gwiazd neutronowych i/lub czarnych dziur
- Długie błyski:  
zapaść bardzo masywnej,  
szybko rotującej gwiazdy  
 $M > 20 M_{\odot}$   
do czarnej dziury (hipernowa)



Ale wciąż możliwe wiele mechanizmów generacji promieniowania...



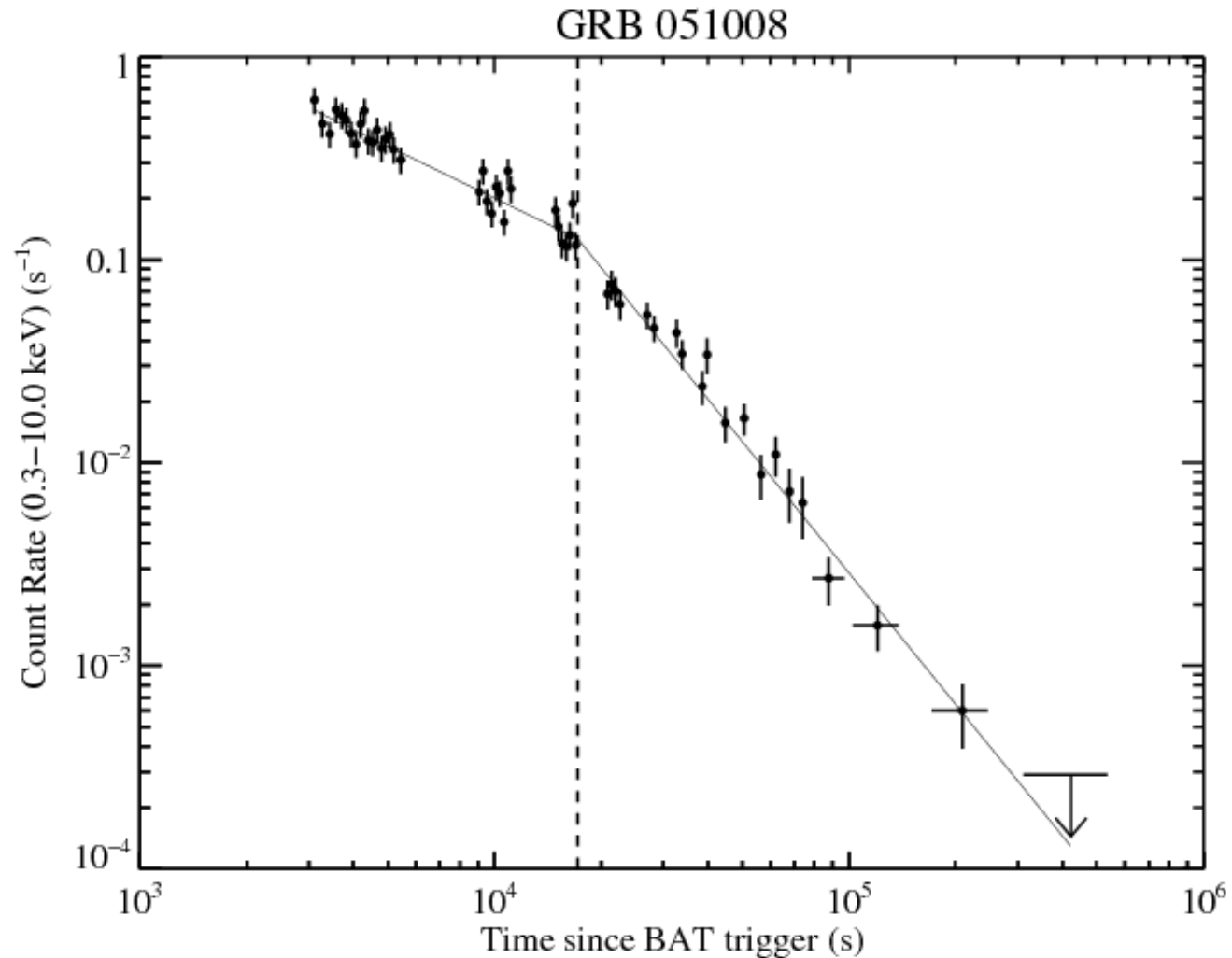
# Błyski gamma



# Błyski gamma

## Jety

Obserwowane załamania na krzywych blasku GRB potwierdzają hipotezę emisji w jetach



# Grawitacja

## Newton

Prawo grawitacji Newtona było proste, eleganckie i uniwersalne. Ale:

- zakładało istnienie absolutnego układu odniesienia
- zakładało uniwersalność czasu
- zakładało, że oddziaływania rozchodzą się z nieskończoną prędkością  
⇒ zmiana źródła powoduje natychmiastową zmianę pola w całej przestrzeni
- wyłącznie opisywało oddziaływanie, nie wnikało w jego naturę...

## Einstein

Grawitacja jest wynikiem/przejawem zakrzywienia czasoprzestrzeni.

- każda masa powoduje deformację czasoprzestrzeni
- poruszające się swobodnie obiekty poruszają się po trajektoriach wyznaczonych przez geometrię przestrzeni

- STW**
- nie istnieje wyróżniony układ odniesienia
  - żadne działanie nie może się rozchodzić szybciej niż z prędkością światła

# Fale grawitacyjne

## Prawo grawitacji Newtona

Potencjał grawitacyjny w punkcie  $\vec{x}$  od niestacjonarnego rozkładu  $\rho(t, \vec{y})$  masy:

$$\phi_N(t, \vec{x}) = -G \int d^3y \frac{\rho(t, \vec{y})}{r} \quad \text{gdzie: } r \equiv |\vec{y} - \vec{x}|$$

Ruch masy (zależność  $\rho$  od czasu) powoduje natychmiastową “adaptację” potencjału, działanie na odległość  $\Rightarrow$  nie ma problemu “rozchodzenia się” oddziaływania

Ale jeśli przyjąć, zgodnie z założeniami STW, że oddziaływanie rozchodzi się z prędkością światła, możemy zapisać:

$$\phi_R(t, \vec{x}) = -G \int d^3y \frac{\rho(t - \frac{r}{c}, \vec{y})}{r} \quad \text{gdzie: } r \equiv |\vec{y} - \vec{x}|$$

Okazuje się, że prowadzi to do równania falowego:

$$\nabla^2 \phi_R - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial t^2} = 4\pi G \rho$$

Tak więc fale grawitacyjne pojawiają się już w ujęciu Newtona...

# Fale grawitacyjne

## Prawo grawitacji Newtona

Zakładając, że źródło znajduje się w początku układu współrzędnych i jest ograniczone do  $|\vec{y}| \leq R$ , oraz, że obserwator znajduje się bardzo dalego ( $|\vec{x}| \gg R$ ) możemy rozwinąć wyrażenie na potencjał w szereg:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{|\vec{x}|} + \frac{2\vec{y} \cdot \vec{n}}{|\vec{x}|^2} + \dots \quad \frac{r}{c} = \frac{|\vec{x}|}{c} - \frac{\vec{y} \cdot \vec{n}}{c} + \dots \quad \text{gdzie: } \vec{n} = \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|}$$
$$\Rightarrow \phi_R(t, \vec{x}) \approx -\frac{GM}{|\vec{x}|} + \frac{G\vec{P} \cdot \vec{n}}{c|\vec{x}|} - \frac{G}{2c^2} \frac{\sum_{ij} \ddot{I}_{ij} n_i n_j}{|\vec{x}|}$$

gdzie  $\ddot{I}_{ij}$  oznacza drugą pochodną po czasie tensora

$$I_{ij} = \int d^3y \rho(t, \vec{y}) y_i y_j$$

Kolejne człony rozwiniętego potencjału odpowiadają: **potencjałowi statycznemu**, **poprawce związanej z ruchem**, **fali** wynikającej z **kwardupolowych deformacji źródła**

# Fale grawitacyjne

## Prawo grawitacji Newtona

Wyprowadzenie dla (Newtonowskiej) fali grawitacyjnej przebiega analogicznie jak dla klasycznego **promieniowania ładunku**. Jednakże prąd elektryczny nie jest zachowany, dlatego w fali elektromagnetycznej dominuje wkład **dipolowy**. Dla masy mamy zasadę zachowania pędu  $\Rightarrow$  najniższy wkład falowy jest kwadrupolowy

Wkład falowy do potencjału wygodnie opisać przez bezwymiarowy parametr:

$$h = \frac{\Delta\phi_R}{c^2} = -\frac{G}{2c^4} \frac{\ddot{I}_{ij}n_in_j}{|\vec{x}|}$$

Straty energii:

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle = -\frac{1}{30} \frac{G}{c^5} \left\langle \dot{I}_{ij}\dot{I}_{ij} + \frac{1}{2}\dot{I}_{jj}\dot{I}_{kk} \right\rangle$$

Są jednak bardzo małe, ze względu na czynnik  $\frac{G}{c^5} \approx 10^{-52} \text{ W}^{-1}$

Jakościowo wyniki te są podobne do przewidywań Ogólnej Teorii Względności...

# Fale grawitacyjne

## Ogólna Teoria Względności

Równanie Einsteina:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$  - tensor Einsteina,  $R_{\mu\nu}$  i  $R$  - tensor i skalar Ricciego,  $T_{\mu\nu}$  - tensor energii-pędu

W przybliżeniu słabych pól grawitacyjnych - słabej deformacji czasoprzestrzeni możemy rozwinąć tensor metryczny:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad \text{gdzie } |h_{\mu\nu}| \ll 1$$

Prowadzi to do równania falowego (w cechowaniu Lorenza):

$$\square^2 \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi T_{\mu\nu}$$

$$\text{gdzie: } \bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu} \eta^{ab} h_{ab}$$

# Fale grawitacyjne

## Ogólna Teoria Względności

W pustej przestrzeni ( $T_{\mu\nu} \equiv 0$ ) otrzymujemy ogólne rozwiązanie w postaci fali płaskiej:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = \Re [A_{\mu\nu} \exp(ik_a x^a)] \quad k_a k^a \equiv 0$$

⇒ fale grawitacyjne rozchodzą się z prędkością światła.

Dodatkowo możemy wykorzystać dowolność cechowania aby narzucić warunki:

$$\begin{aligned} A_{ab} k^b &= 0 && \text{poprzeczna (Transverse)} \\ \eta^{ab} A_{ab} &= 0 && \text{bezśladowa (Traceless)} \end{aligned}$$

Wynika z tego, że tensor  $A_{\mu\nu}$  ma tylko dwie niezależne składowe:

$$h_{\mu\nu}^{TT} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{dla fali w kierunku osi } Z$$

⇒ dwie możliwe polaryzacje fali grawitacyjnej  $h_+$  i  $h_\times$  mogą być zespolone !

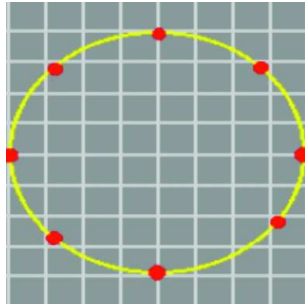


# Fale grawitacyjne

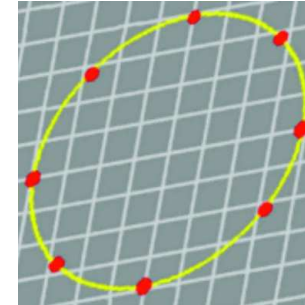
## Polaryzacja

Fala grawitacyjna ma dwie niezależne polaryzacje:

$h_+$  :

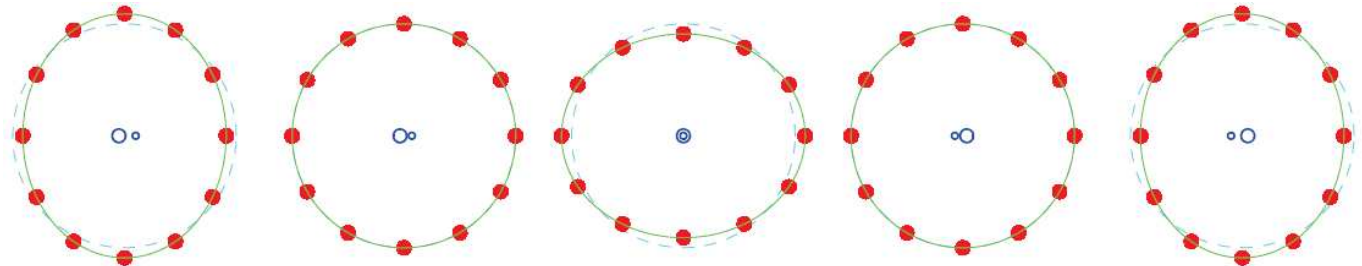


$h_{\times}$  :

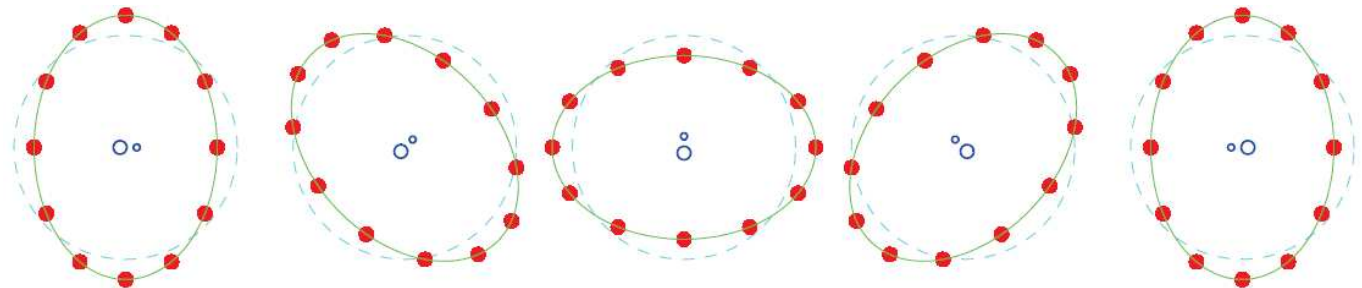


Obie składowe potrzebne do opisu np. promieniowania układu podwójnego

W płaszczyźnie orbity



Prostopadle



# Fale grawitacyjne

## Porównanie

W podejściu klasycznym (Newton+STW) fale grawitacyjne:

- pole skalarne
- fala podłużna

W Ogólnej Teorii Względności:

- pole tensorowe
- fala poprzeczna

W obu przypadkach:

- rozchodzą się z prędkością światła
- wynikają ze zmian momentu kwadrupolowego rozkładu materii
- emisja energii tłumiona przez czynnik  $\frac{G}{c^5}$

# Fale grawitacyjne

## Troche historii

W roku 1916 Einstein pokazał, że w przybliżeniu liniowym Ogólna Teoria Względności prowadzi do **istnienia fal grawitacyjnych**.

W roku 1936, razem z Nathanem Rosenem, uzyskał **wynik przeciwny**, przeczący istnieniu fal grawitacyjnych.

Przewidywane istnienie fal grawitacyjnych miało być wyłącznie wynikiem przybliżenia liniowego, zaś w (pełnej) teorii nieliniowej ich nie było.

**Ku zaskoczeniu Einsteina jego praca została odrzucona przez Physical Review. Okazało się później, że zawierała błąd związany z wyborem układu odniesienia...**

Dysputa ciągnęła się przez kolejne 20 lat. Problemem nie jest samo istnienie fal grawitacyjnych, ale to czy niosą energię i czy są w związku z tym mierzalne...

Do rozstrzygnięcia tego problemu i **udowodnienia, że fale grawitacyjne istnieją** (w OTW) walczywał się prof. Andrzej Trautman

# Fale grawitacyjne

## Własności

Fala grawitacyjna zachowuje się podobnie jak fale elektromagnetyczne

- porusza się z tą samą prędkością
- podlega odchyleniom na skutek zakrzywienia czasoprzestrzeni
- podlega przesunięciu ku czerwieni (np. rozszerzanie się Wszechświata)
- niosą energię, pęd i moment pędu (!)

Jednak fala grawitacyjna w bardzo niewielkim stopniu podlega absorbcji w materii

⇒ dlatego jej wykrycie jest tak trudne

⇒ detektory rezonansowe

Przechodząca fala grawitacyjna deformuje czasoprzestrzeń

⇒ nie powoduje jednak przesunięć spoczywających obiektów, nie wprawia ich w ruch

⇒ deformacja przestrzeni skutkuje jedynie zmianą odległości między obiektami

⇒ pomiary interferometryczne

# Fale grawitacyjne

## Własności

Rozważmy falę o polaryzacji  $h_+$  rozchodzącą się w kierunku osi Z (jak poprzednio)

Niech impuls światła będzie wymieniany między punktami A i B takimi, że

$$\Delta x = l \quad \Delta y = \Delta z = 0$$

Interwał czasoprzestrzenny pomiędzy wysłaniem i odebraniem impulsu:

$$s = c^2(\Delta t)^2 - (1 - h_+)(\Delta x)^2 - (1 + h_+)(\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$$

Ale interwał ten z definicji jest równy zero, więc czas propagacji impulsu

$$\Delta t = \sqrt{1 - h_+} \frac{l}{c} \approx \left(1 - \frac{1}{2}h_+\right) \Delta t_0$$

Fala grawitacyjna moduluje czas propagacji impulsu świetlnego.

**W prostopadłym ramieniu interferometru znak modulacji jest przeciwny!**

Mierzonym efektem fali grawitacyjnej jest modulacja prędkości światła...

# Fale grawitacyjne

## Moc promieniowania

Rozwiązanie na natężenie fali w dużej odległości od źródła w OTW:

$$h_{\mu\nu}^{TT} = \frac{2G}{c^4} \frac{\ddot{I}_{\mu\nu}}{r} \quad \mathcal{I}_{\mu\nu} = I_{\mu\nu} - \frac{1}{3} \delta_{\mu\nu} I_{aa}$$

Straty energii:

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle = -\frac{1}{5} \frac{G}{c^5} \langle \dot{I}_{ij} \dot{I}_{ij} \rangle$$

Jeśli przyjmiemy, że mamy źródło o masie  $M$ , rozmiarze  $R$ , asymetrii  $a$ , które obraca się z okresem  $T$ , trzecia pochodna po czasie momentu kwadrupolowego:

$$\dot{I} \approx \frac{aMR^2}{T^3}$$

Jeśli wyrazić masę obiektu przez jego promień Schwarzschilda  $R_S = \frac{2GM}{c^2}$

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle \approx -\frac{a^2}{4} \frac{c^5}{G} \left( \frac{R_S}{R} \right)^2 \left( \frac{v}{c} \right)^6 \quad \text{gdzie } v = \frac{R}{T}$$

Bardzo duża emisja ( $\frac{c^5}{G} = 3.6 \cdot 10^{52}$  J/s) dla zwartych i relatywistycznych obiektów !

# Fale grawitacyjne

## Moc promieniowania

Obiekt	Odległość	Moc całkowita [W]	Amplituda $h$
500 tonowy wirujący walec o długości 20 m, 5 obr./s	1 m	$10^{-29}$	$2 \cdot 10^{-34}$
Wybuch bomby wodorowej 1Mt, asymetria 10%	10 km	$10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-39}$
Układ Ziemia - Słońce	1 pc	10	$5 \cdot 10^{-28}$
Ciasny układ podwójny gwiazd o masie Słońca, $T \sim 1000$ s	1 kpc	$10^{25}$	$5 \cdot 10^{-23}$
Wybuch supernowej o masie $10M_{\odot}$ , asymetria 3%	10 Mpc	$10^{44}$	$10^{-21}$
Zderzenie dwóch czarnych dziur o masie $10M_{\odot}$	10 Mpc	$10^{50}$	$10^{-20}$

# Fale grawitacyjne

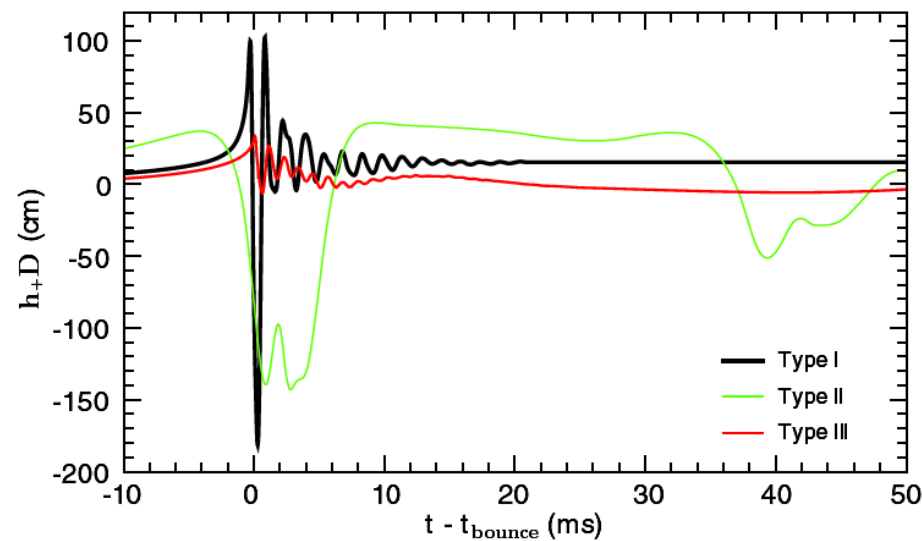
## Rozważane źródła

W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd  $\Rightarrow$  wybuchy (także związane z GRB)

Najsilniejsze. Krótki impuls o bardzo zróżnicowanym profilu...

[Dimmelmeier et al (2002)]





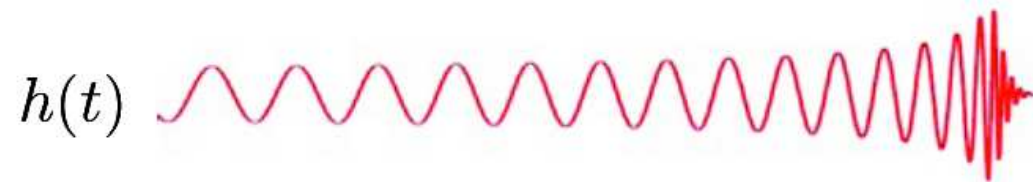
# Fale grawitacyjne

## Rozważane źródła

W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd  $\Rightarrow$  wybuchy (także związane z GRB)
- Zderzenia/złanie się masywnych obiektów

Wciąż silne. Dłuższy impuls, który można modelować...



# Fale grawitacyjne

## Rozważane źródła

W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd  $\Rightarrow$  wybuchy (także związane z GRB)
- Zderzenia/złanie się masywnych obiektów
- Ciągłą emisję wirujących układów

Słabe, ale periodyczne. Możemy analizować długie okresy danych.  
Może być widoczny efekt Dopplera związany z ruchem Ziemi...



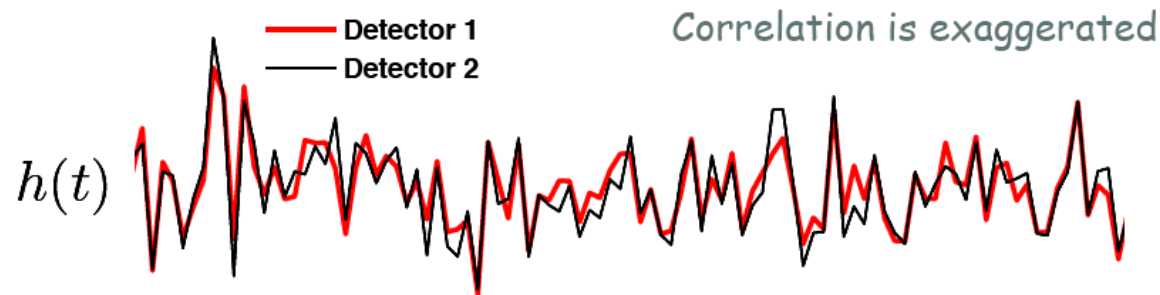
# Fale grawitacyjne

## Rozważane źródła

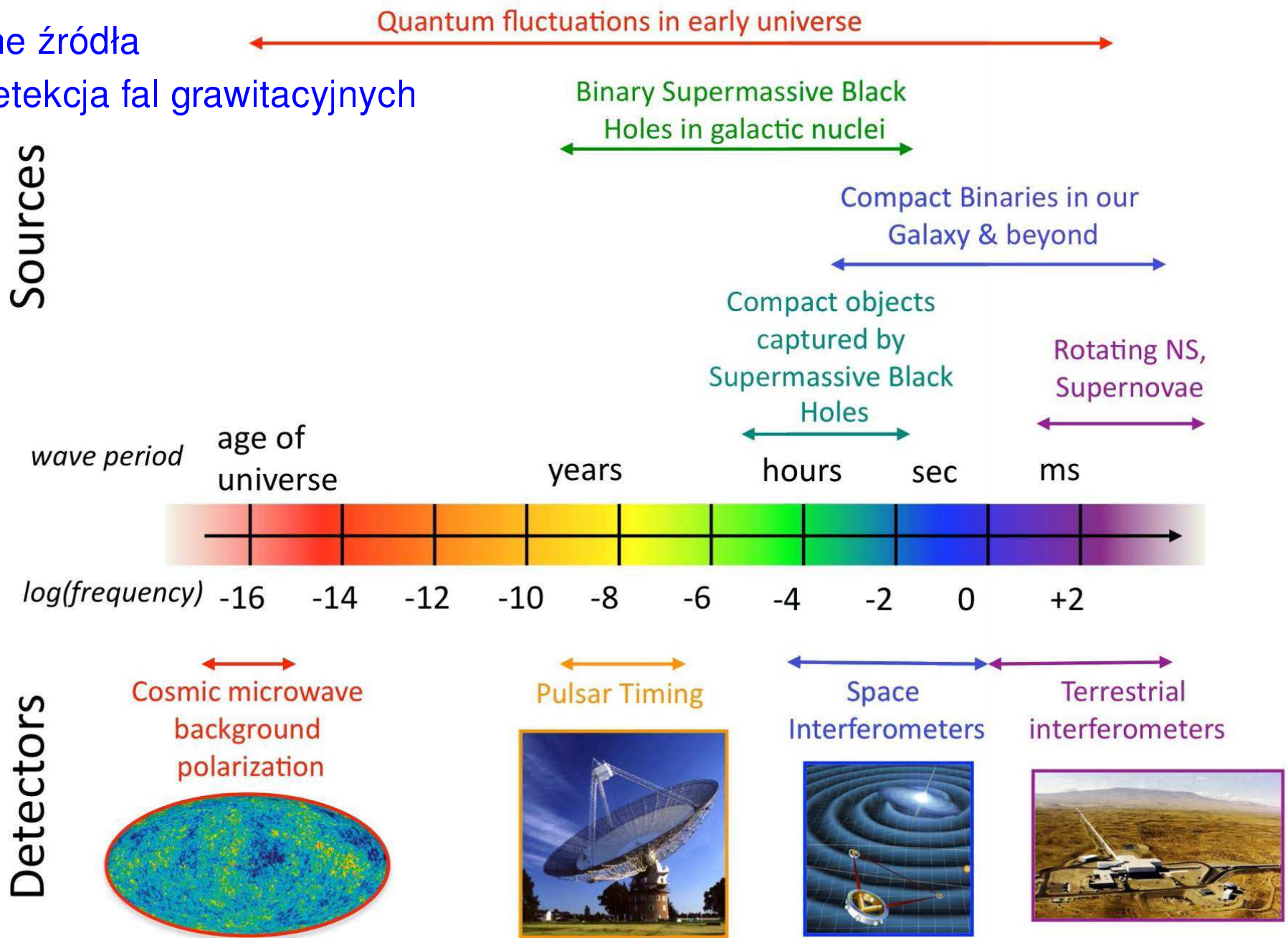
W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd  $\Rightarrow$  wybuchy (także związane z GRB)
- Zderzenia/złanie się masywnych obiektów
- Ciągłą emisję wirujących układów
- Grawitacyjne promieniowanie tła wyemitowane na wczesnych etapach ewolucji Wszechświata

Bardzo słabe, ale może stać się widoczne przez korelację różnych detektorów.



# Potencjalne źródła widmo i detekcja fal grawitacyjnych



# Fale grawitacyjne

## Motywacja badań

### Testy OTW

- potwierdzenie przewidywań dotyczących ich propagacji i polaryzacji
- testy opisu grawitacji w silnie związanych układach podwójnych
- czarne dziury, nieliniowa grawitacja itp.

### Kosmologia

- ewolucja Wszechświata
- ciemna energia - jej natura i równanie stanu
- początki Wszechświata - związek z teorią kwantów

### Astrofizyka

- wgląd w przebieg gwałtownych procesów
- badanie zwartych obiektów (np. gwiazd neutronowych)
- badanie promieniowania tła
- poszukiwanie nowych źródeł

# Fale grawitacyjne

## Pośrednia obserwacja

W 1974 Joseph Taylor i Russell Hulse odkryli pulsar 1913+16.

Zaobserwowali regularne zmiany w okresie pulsacji (59 ms), które zinterpretowali jako wpływ efektu Dopplera

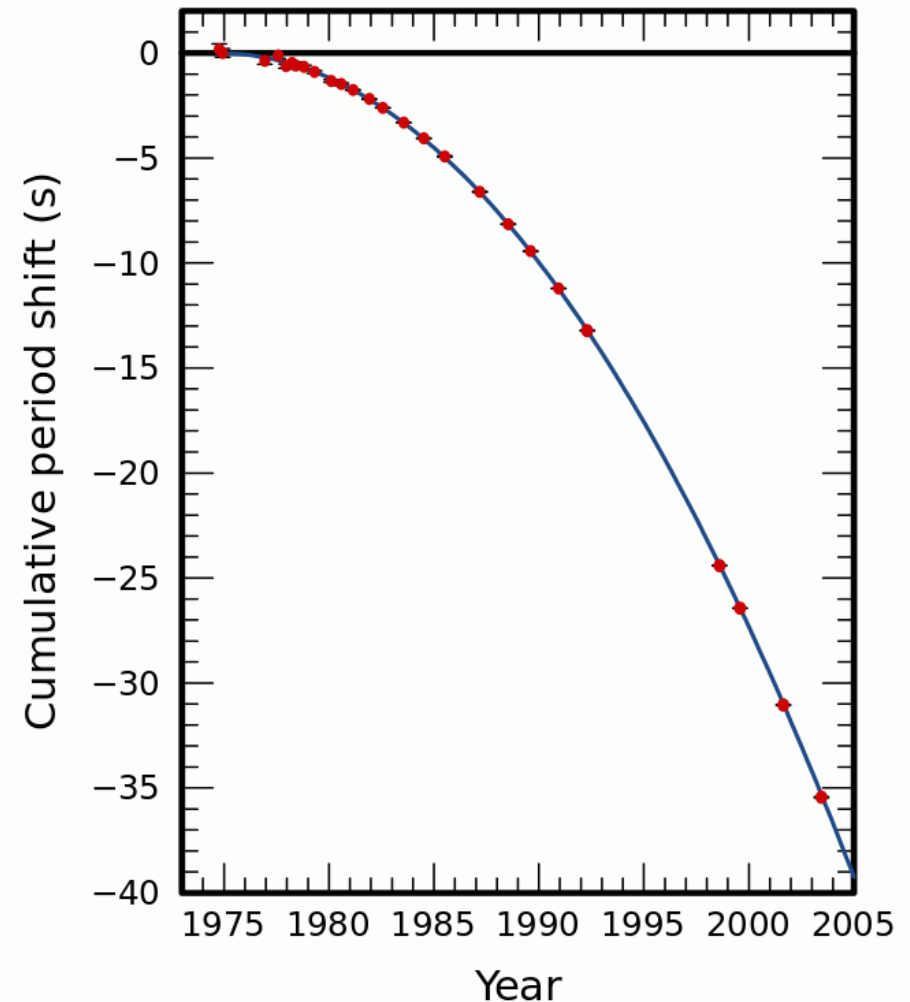
⇒ pulsar krąży w **układzie podwójnym** z drugą gwiazdą neutronową (okres 7.75 h)

Obserwacje w dłuższym okresie czasu wykazały, że okres obiegu zmniejsza się

⇒ układ rotuje coraz szybciej

⇒ efekt strat energii na promieniowanie

Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami OTW ⇒ **Nobel 1993**



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Detektory rezonansowe

Pierwsze próby pomiaru fal grawitacyjnych podjęte zostały w latach 1960' przez Josepha Webera.

Duży walec aluminiowy, izolowany sejsmicznie, w próżni. Powierzchniowe detektory piezoelektryczne do pomiaru drgań.

Oczekiwana czułość:  $h \sim 10^{-16}$

Fala grawitacyjna, pochłaniana przez walec (!), powinna wprawić go w **rezonans**.

Dwa detektory w odległości 1000 km

“Pierwsza” obserwacja (fałszywa) w 1969...



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Detektory rezonansowe

AUGIRA

Legnaro, INFN (Włochy)



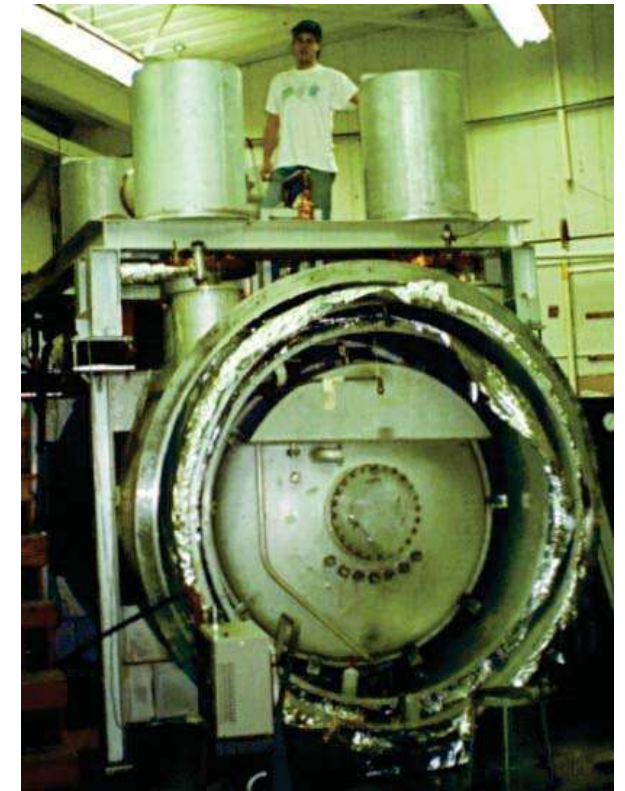
NIOBE

Perth, UWA (Australia)



ALLEGRO

Baton Rouge LSU (USA)



Masy rzędu kilku ton, rozmiary  $\sim 3$  m  $\Rightarrow$  częstotliwości rezonansowe  $f \sim 900$  Hz

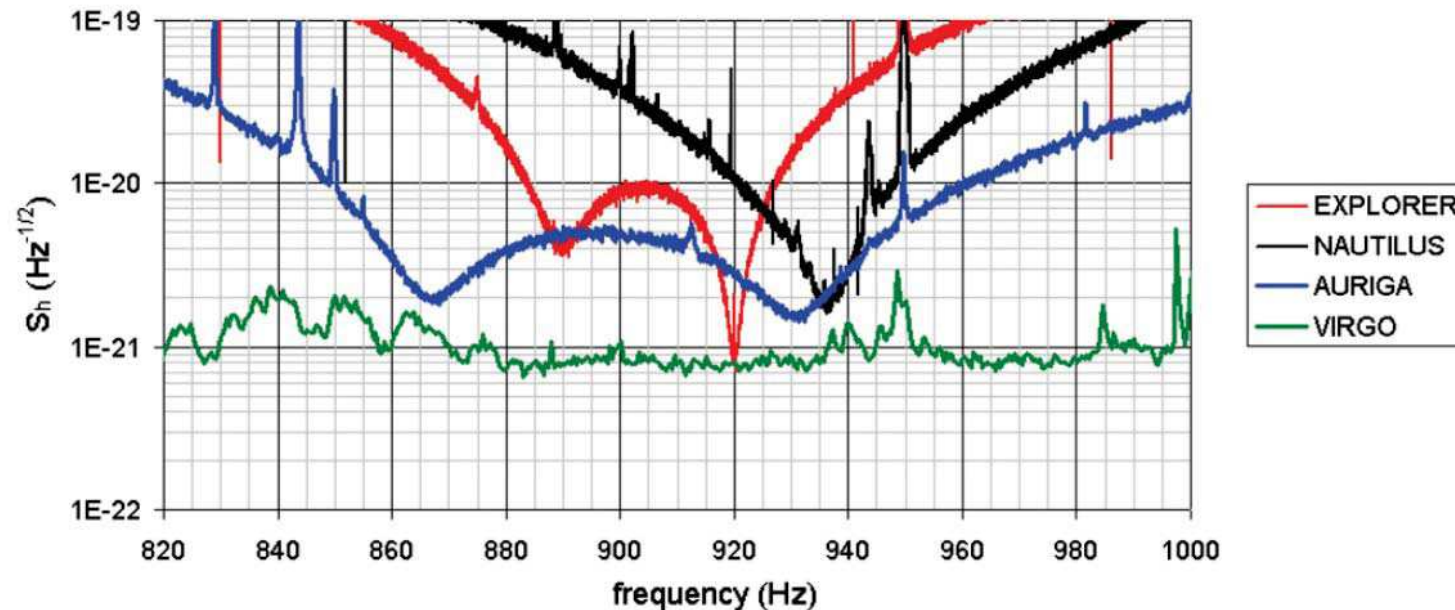


# Detekcja fal grawitacyjnych

## Detektory rezonansowe

Class. Quantum Grav. **25** (2008) 205007

F Acernese *et al*



**Figure 1.** Typical spectral density of calibrated noise for the three resonant bar detectors during 2005 and for the Virgo interferometer in September 2005.

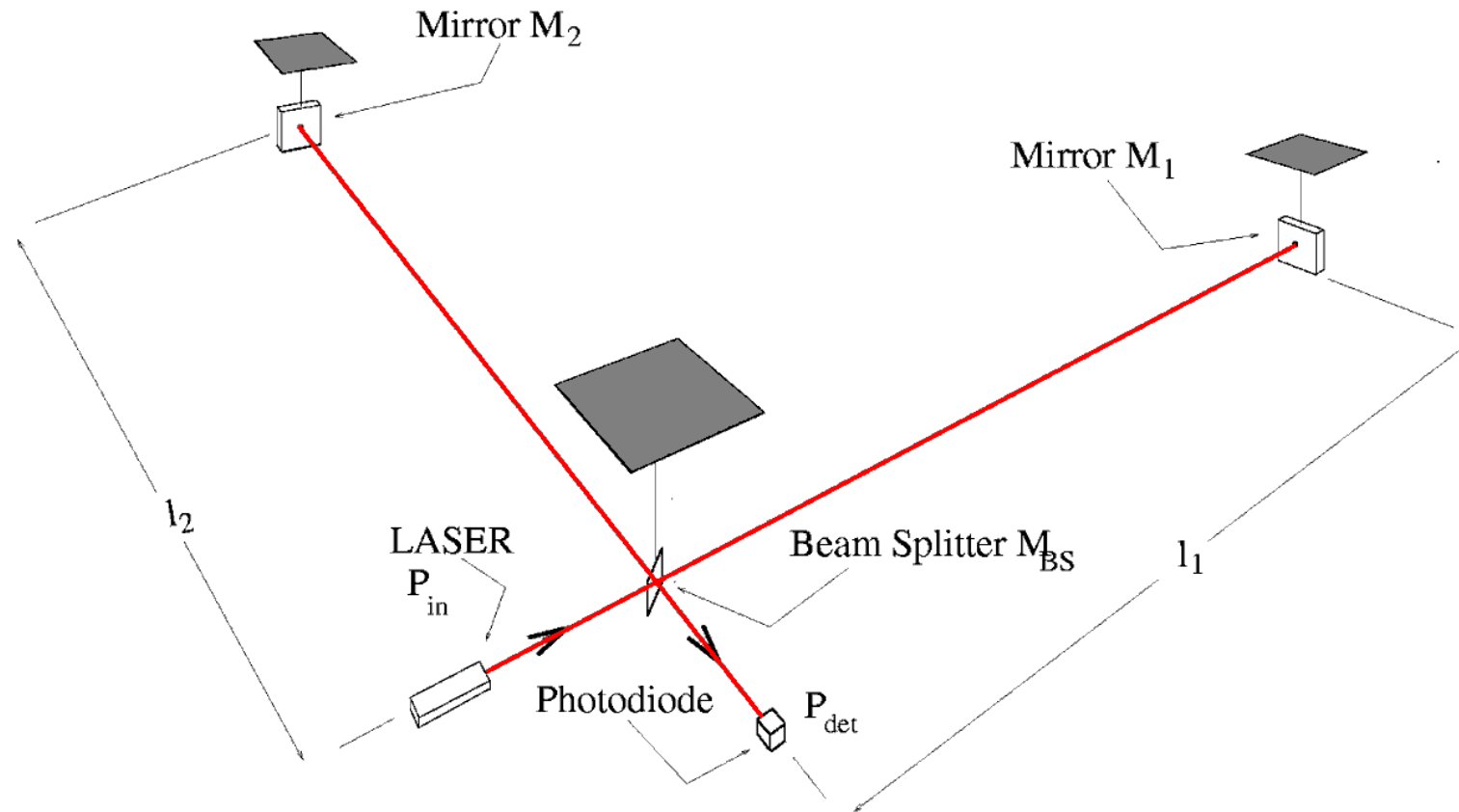
Detektory rezonansowe osiągnęły poziom czułości rzędu  $h \sim 10^{-20}$ , ale nie sprostały konkurencji detektorów interferometrycznych.

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometry

Bardzo prosta idea: powtórzenie doświadczenia Michelson'a-Morley'a

Pomiar różnicy w czasie propagacji światła w prostopadłych ramionach interferometru

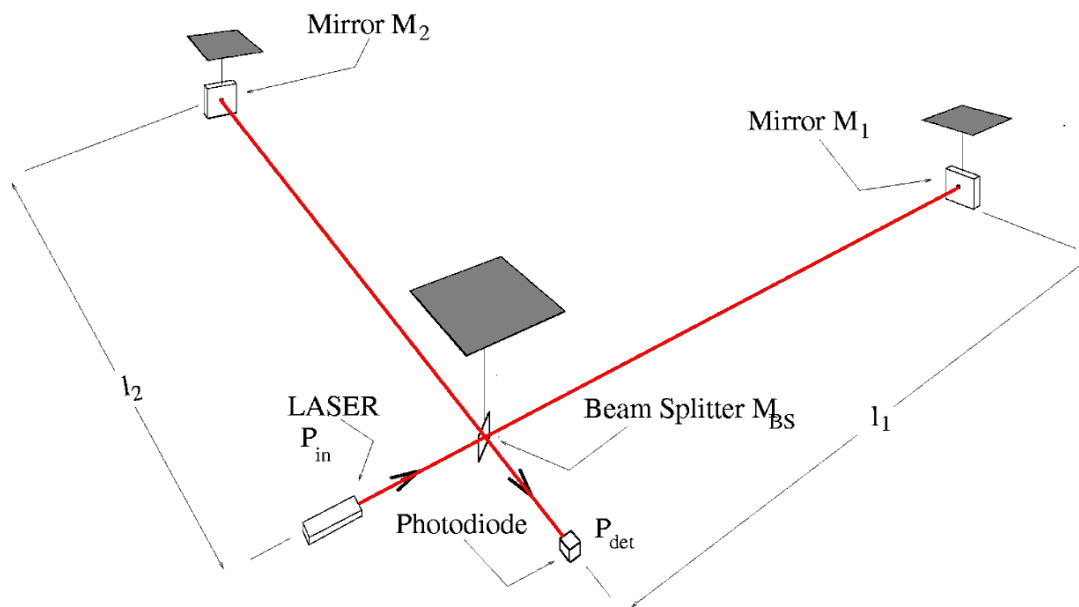


# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometry

Bardzo prosta idea: powtórzenie doświadczenia Michelson'a-Morley'a

Pomiar różnicy w czasie propagacji światła w prostopadłych ramionach interferometru



Sygnal w detektorze:

$$P_{det} = \frac{P_{in}}{2} [1 + C \cos(\Delta\phi)]$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda} + \frac{2\pi(l_2 + l_1)h(t)}{\lambda}$$

Największa czułość w pobliżu punktu wygaszania...

“Kontrast” wnęki:  $C \approx 1$

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometry

Modulacja sygnału mierzonego w detektorze:

$$\delta P_{det} \sim P_{in} L h$$

Fluktuacje poissonowskie mierzonego sygnału (liczby fotonów):

$$\sigma_{P_{det}} \sim \sqrt{\frac{P_{in}}{\Delta t}}$$

gdzie:  $\Delta t$  - czas uśredniania/rozdzielczość czasowa pomiaru

**Fundamentalne ograniczenie** dokładności pomiaru (w idealnym detektorze!):

$$h_{min} \sim \frac{1}{\sqrt{P_{in} L}}$$

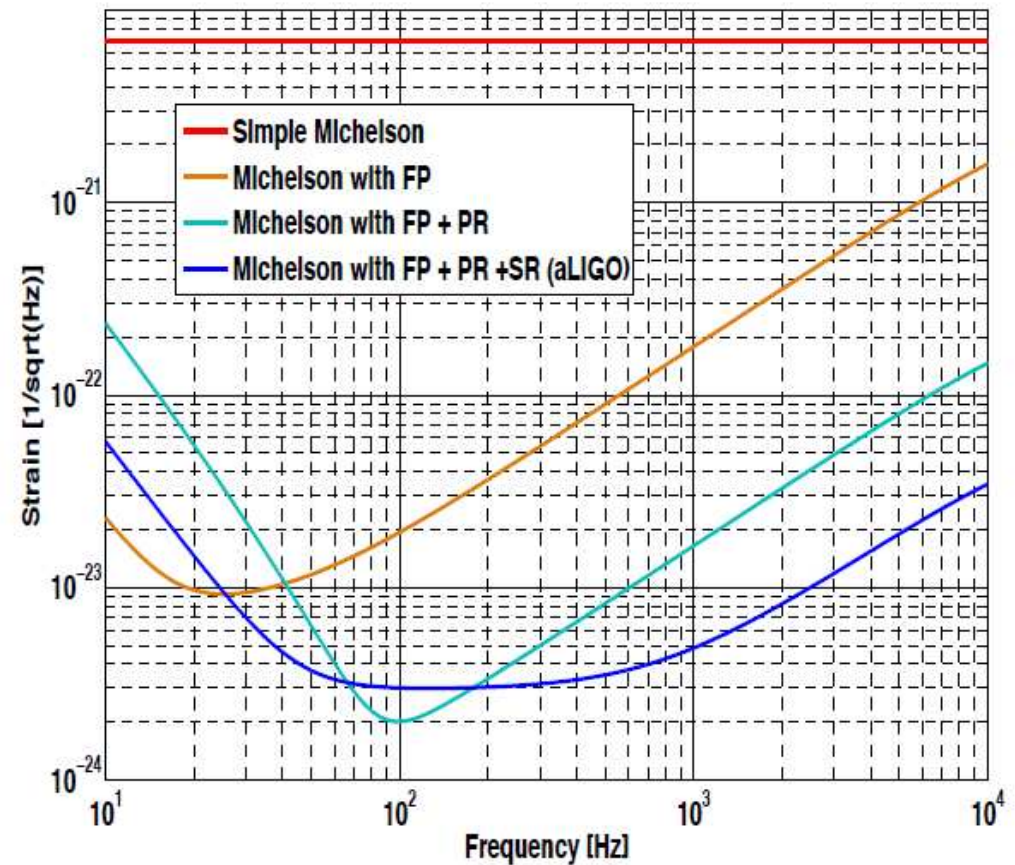
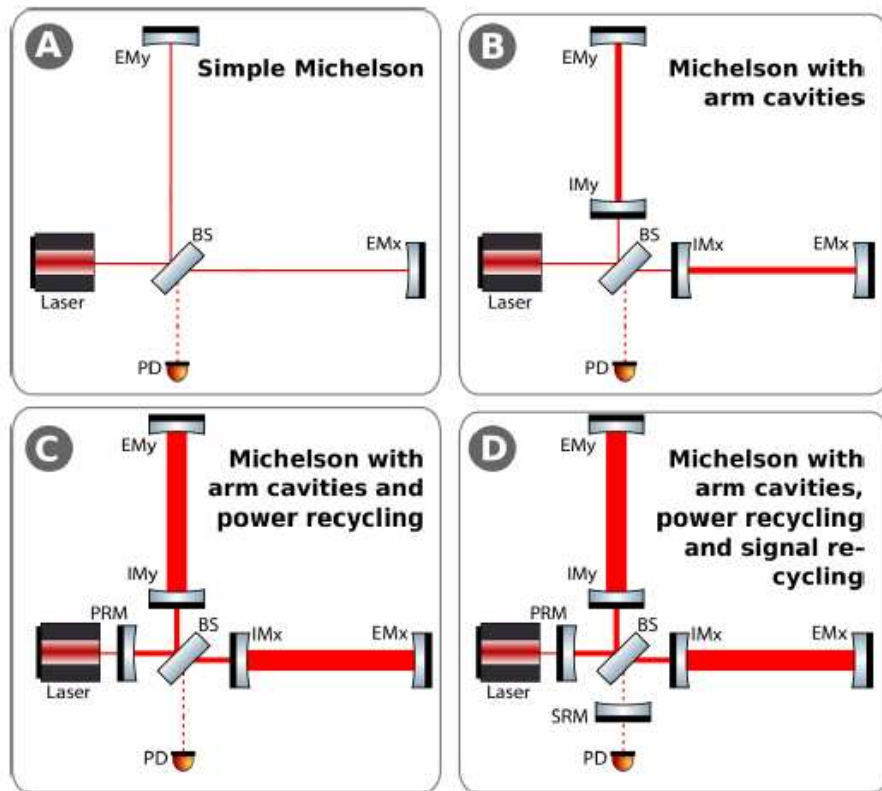
Osiągnięcie czułości  $h \sim 10^{-22}$  wymaga zastosowania laserów dużej mocy ( $\sim 100$  kW) i bardzo długich ramion interferometru ( $\sim 100$  km)...

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometry

Nie da się osiągnąć wymaganych parametrów dla “zwykłego” interferometru.

Trzeba zastosować wnęki rezonansowe ( $L$ ) i wyeliminować straty mocy ( $P_{in}$ )



# VIRGO (Wlochy)



# LIGO Hanford (USA)



# LIGO Livingston (USA)





# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometri

Długie ramiona + wnęki Fabry-Perot  $\Rightarrow$  zwiększenie drogi optycznej

Wnęki Fabry-Perot + duża moc lasera  $\Rightarrow$  zwiększenie poziomu sygnału

$\Rightarrow$  zwiększenie oczekiwanych odchyłeń

Czułość interferometru może być ograniczona przez poziom szumów:

- szum sejsmiczny
- szum Newtonowski
- szum termiczny
- szum lasera
- szum związany z ciśnieniem promieniowania
- szum magnetyczny

Każdy z aspektów wymagał niezwykle starannego podejścia...

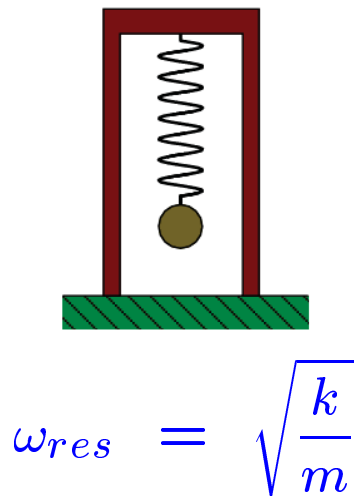
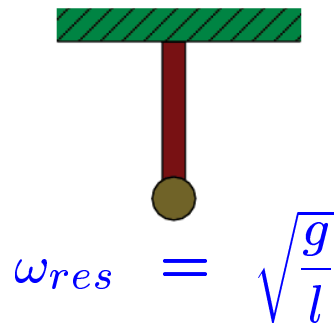
Wszystkie aspekty wzięte pod uwagę przy modernizacji eksperymentów LIGO i VIRGO

# Detekcja fal grawitacyjnych

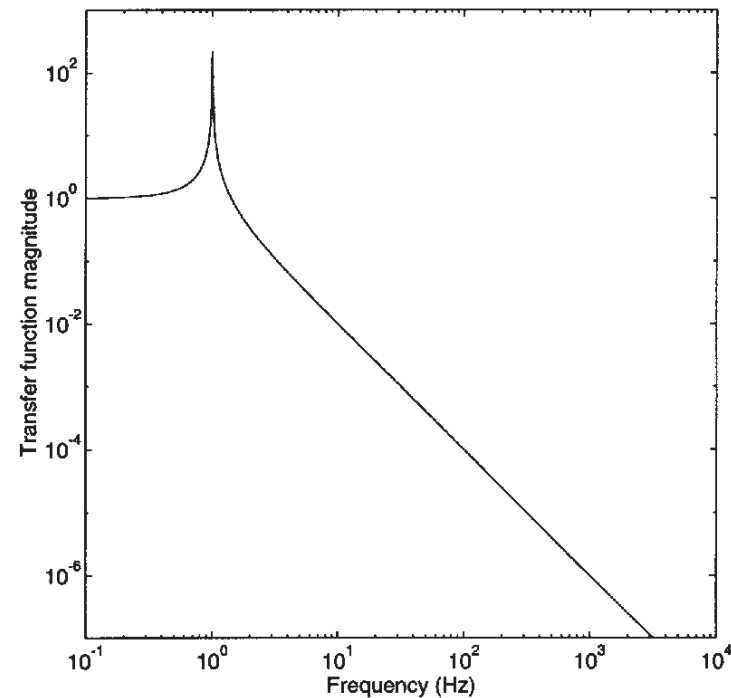
## Szum sejsmiczny

Konieczne jest jak najlepsze odizolowanie elementów wnętrza od drgań sejsmicznych

⇒ mocowanie typu “odwróconego wahadła” o bardzo niskiej częstotliwości własnej



Obliczeni modelowe dla  $f = 1$  Hz



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Szum sejsmiczny

Odwrócone wahadło:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{g}{l}}$$

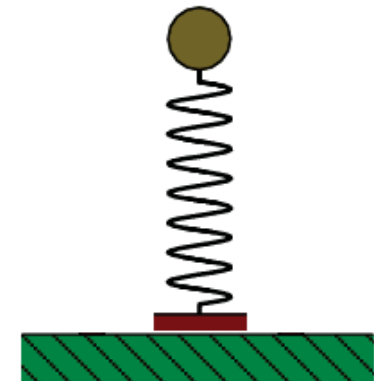
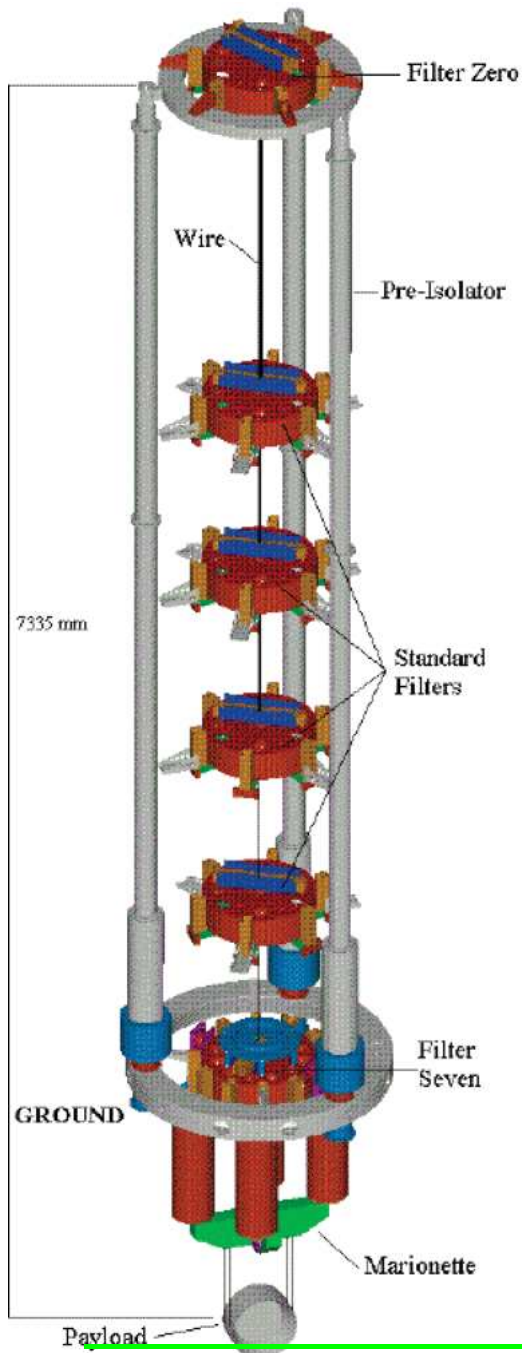
Dla VIRGO:  $l \approx 7$  m

$$\Rightarrow f_{res} \sim 30 \text{ mHz}$$

$\Rightarrow$  zmierzone tłumienie przy 10 Hz:

$$\sim 10^{14}$$

Szumy sejsmiczne są głównym powodem, dla którego nie można zejść poniżej 10 Hz



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Szum Newtonowski

Fluktuacje lokalnego pola grawitacyjnego

## Szum magnetyczny

Fluktuacje lokalnego pola magnetycznego (np. zaburzenia w magnetosferze)

## Szum termiczny

Precyzja którą chcemy uzyskać jest tak duża, że istotne stają się także drgania termiczne: **zawieszania** poszczególnych elementów wnętrza i samych **luster**

Najlepszym rozwiązaniem jest chłodzenie całego zawieszenia i luster.

Niezależnie konieczna jest bardzo dobra stabilizacja temperatury.

Nie jest to oczywiste w przypadku luster, które rozgrzewają się pod wpływem wiązki.

Muszą być wykonane z materiału o jak najniższym pochłanianiu.

Szum termiczny ma istotny wkład w obszarze niskich i średnich częstotliwości

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Szum lasera

Konieczne jest stosowanie bardzo stabilnych laserów

Stabilizacja częstości i dobra separacja modu podstawowego -

dedykowany moduł “czyszczący” (filtr interferometryczny) na wejściu interferometru

Odpowiednie filtry także na wyjściu sygnału, przed fotodetektorem.

## Szum związany z ciśnieniem promieniowania

Fluktuacje ciśnienia wywieranego przez światło na zwierciadła - efekt typu “ruchy Browna”

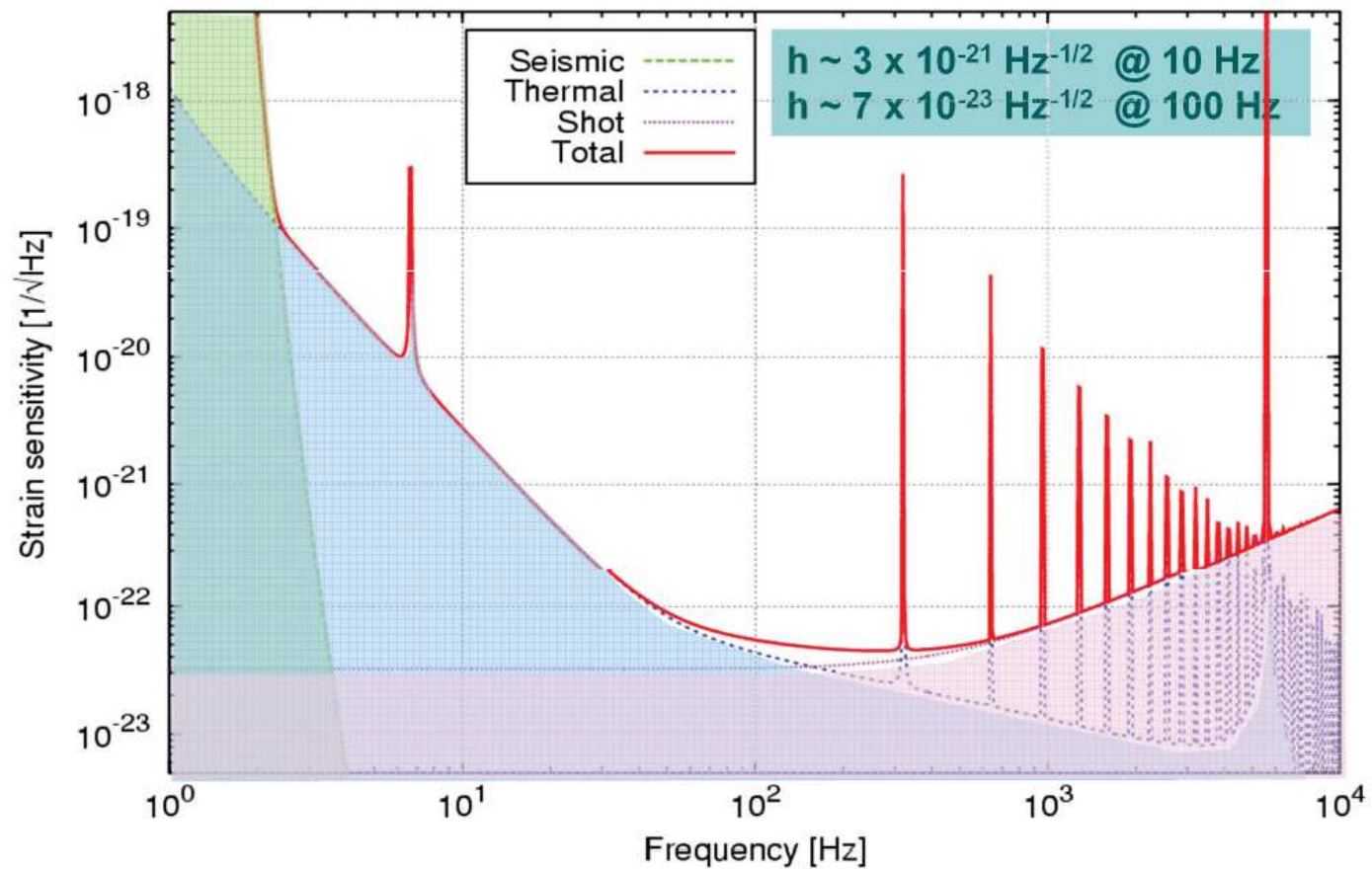
## Ograniczenie kwantowe

Precyzja, którą chcemy uzyskać jest tak duża, że w którymś momencie dochodzimy do ograniczenia wynikającego z zasady nieoznaczoności Heisemberga (dokładności pozycji fotonu na zwierciadle).

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Projekt VIRGO

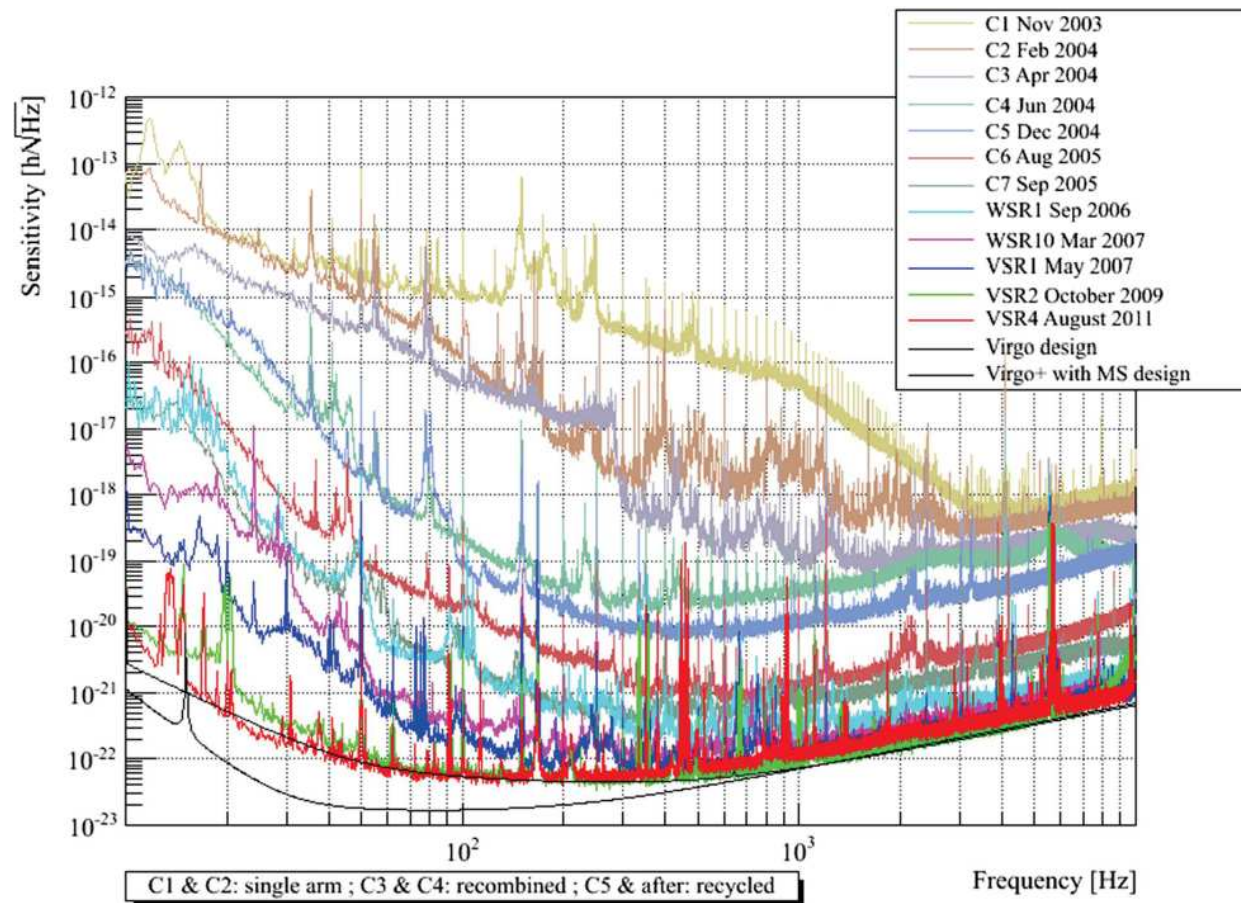
Projektowana dokładność pomiaru



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Projekt VIRGO

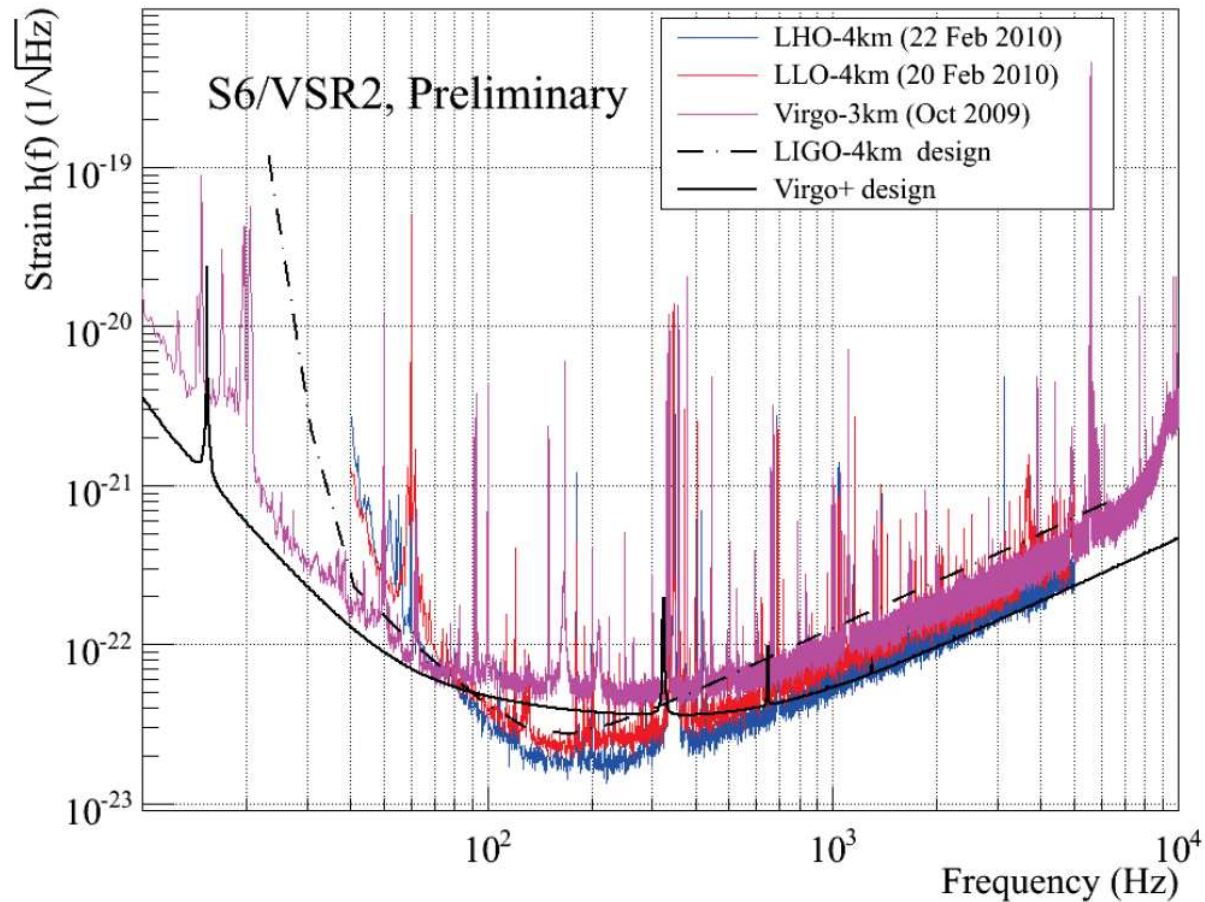
W kolejnych latach działania detektora eliminowano kolejne źródła szumów



# Detekcja fal grawitacyjnych

## LIGO + VIRGO

Uzyskana dokładność pomiaru (poziom szumów) w **pierwszej generacji** eksperymentów



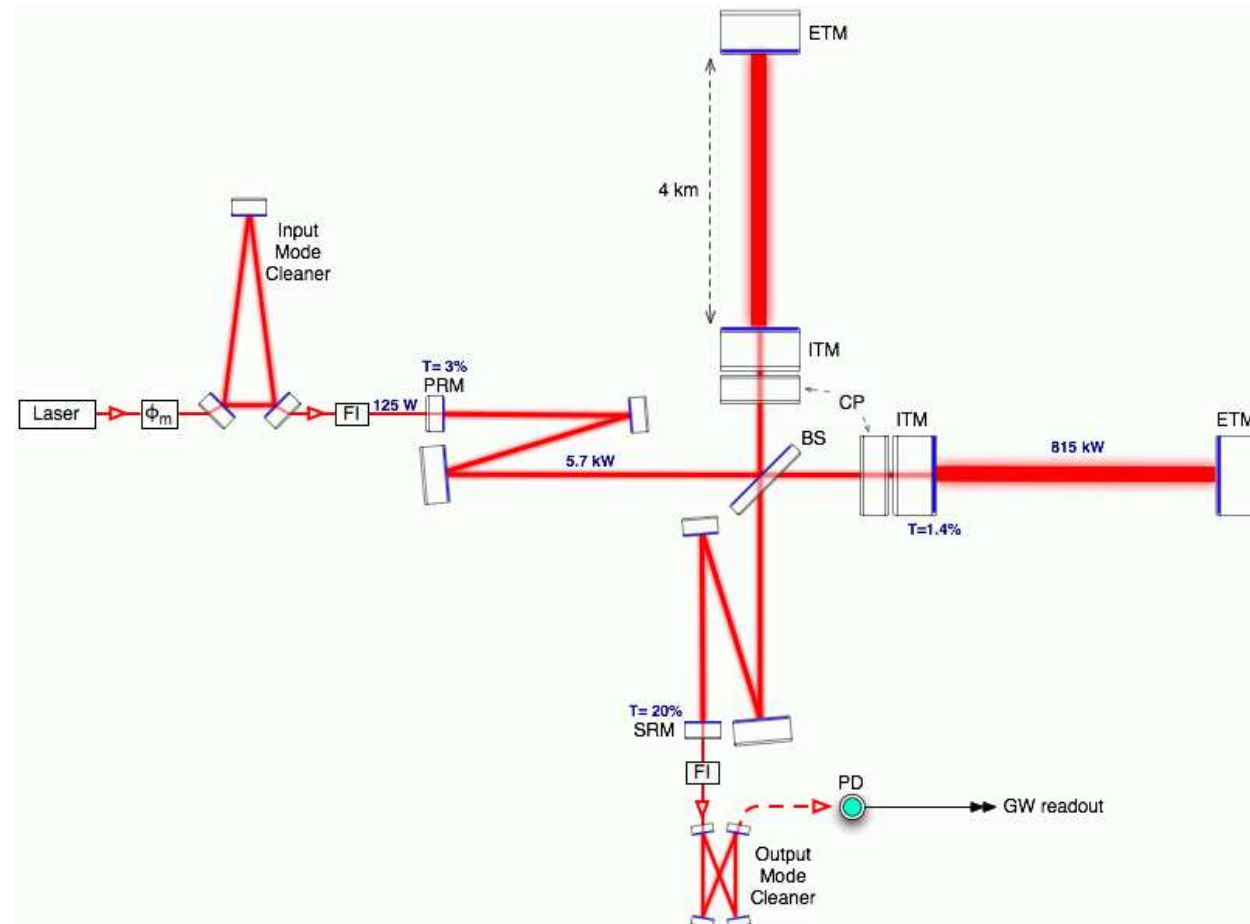


# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO

Modernizacja detektora 2012-2015:

- 20× moc lasera
- signal recycling  
⇒ prawie MW we wnętrzu!
- cięższe “masy testowe”
- nowe powłoki luster
- aktywne tłumienie sejsmiczne
- filtr na wyjściu

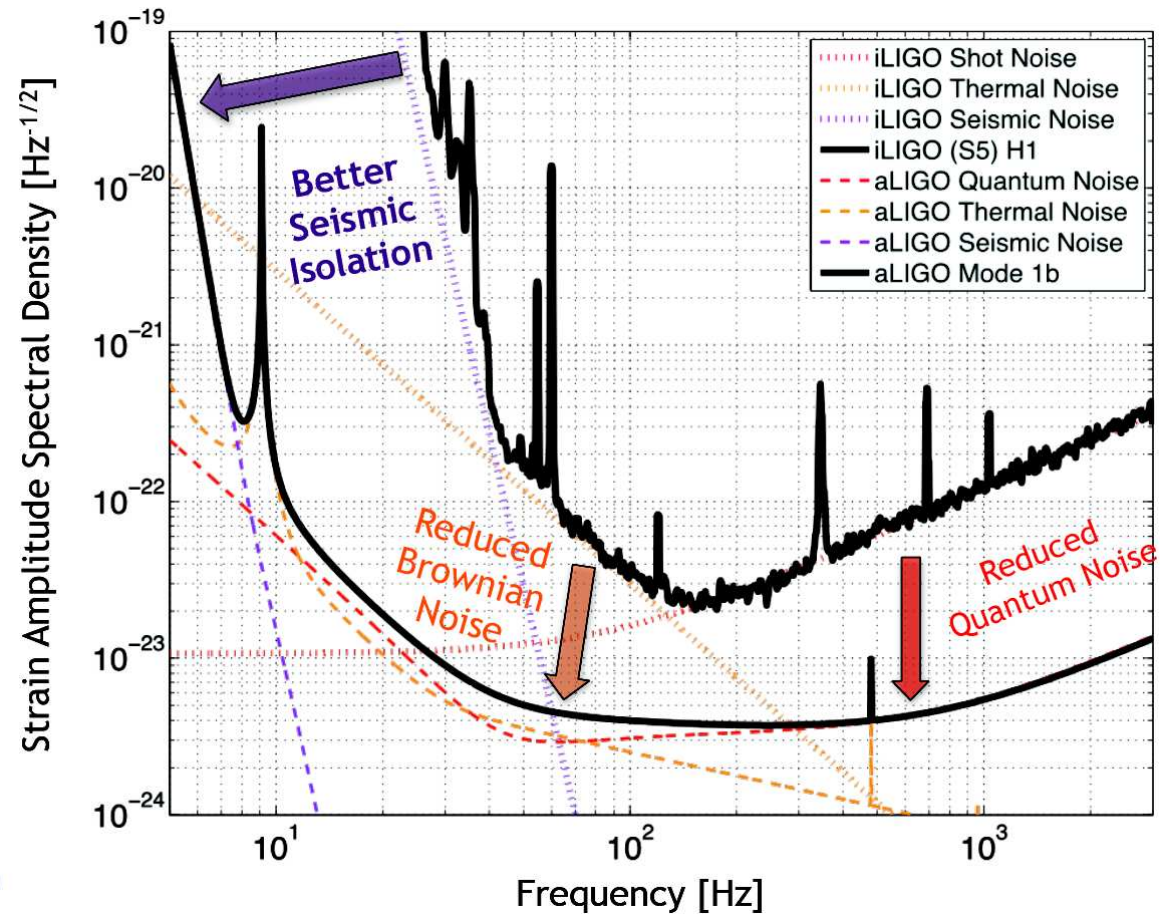


Podobne modernizacje w Virgo

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO

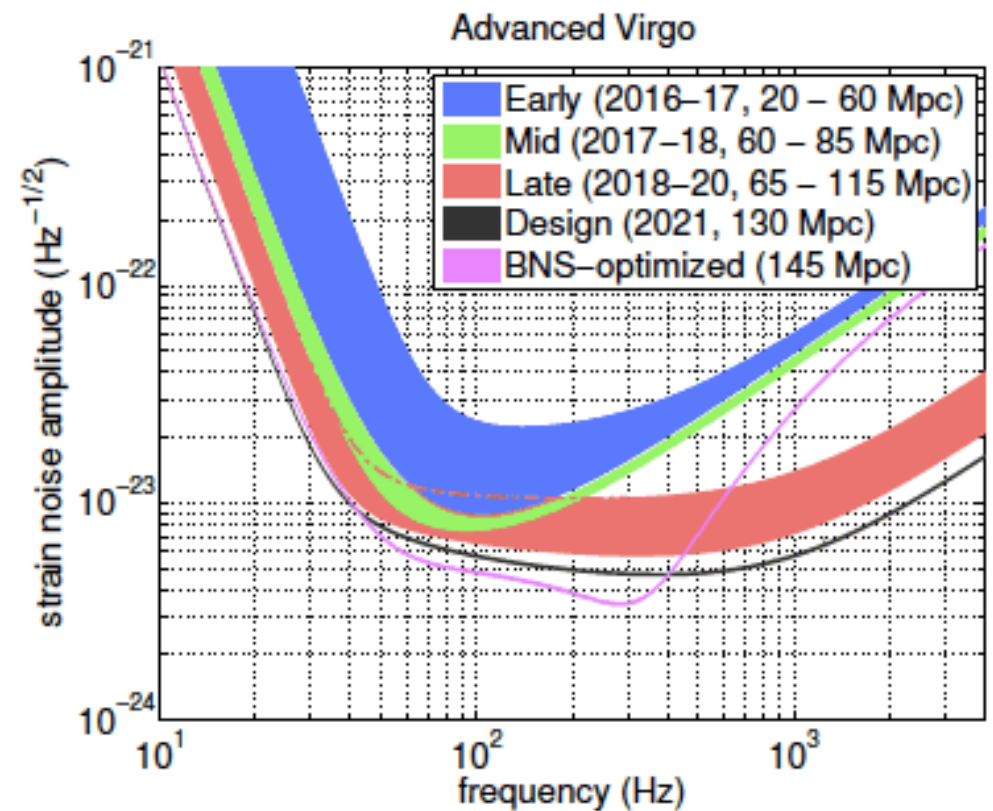
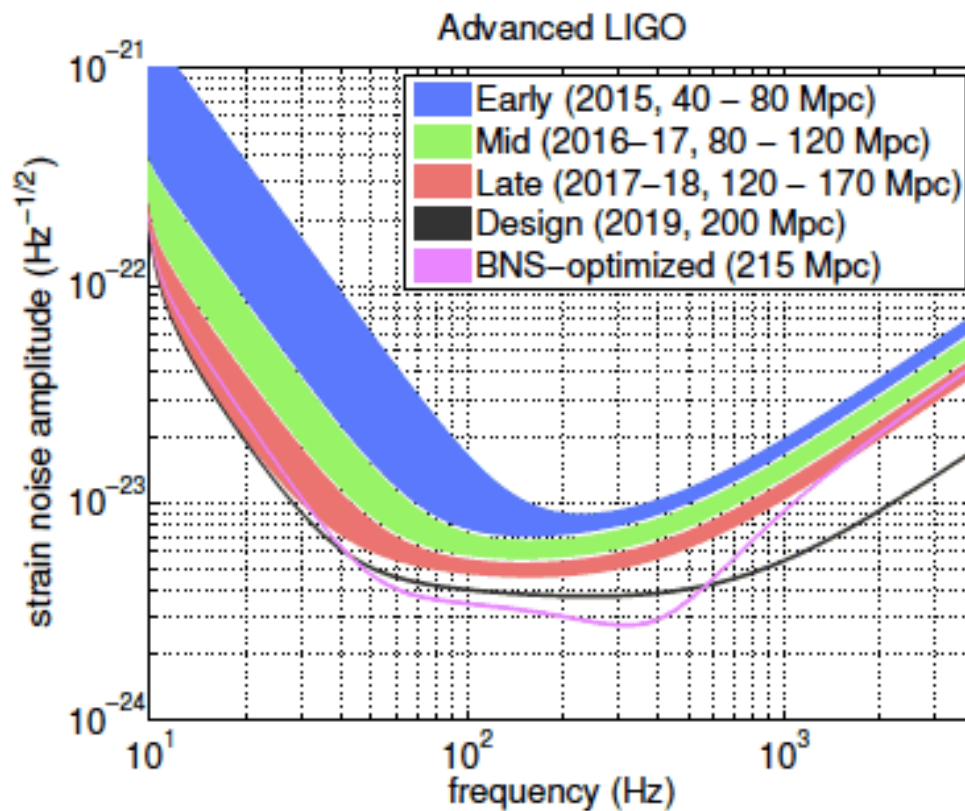
Zwiększenie czułości o rząd wielkości, poszerzenie zakresu częstości



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO i Virgo

Zakładana czułość po modernizacji na kolejnych etapach uruchamiania:



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO

Oczekiwana liczba detekcji fal grawitacyjnych na kolejnych etapach:

