

Zjawiska Przejściowe – Transients

Szymon Kozłowski

Uniwersytet Warszawski

2024



Czym są?

Są to krótkotrwałe zjawiska przejściowe – najczęściej wyjaśnienie obiektu astronomicznego, trwające od ułamków sekundy do tygodni, a nawet lat. Zazwyczaj są to ekstremalne, krótkotrwałe zdarzenia związane z całkowitym lub częściowym zniszczeniem obiektu astronomicznego.

- Supernowe
- Błyski gamma
- Kilonowe
- Rozerwania pływowe gwiazd
- Szybkie błyski radiowe
- AGN

Źródła informacji

- Transient Name Server – <https://www.wis-tns.org/>
- Astronomer's Telegeam (ATel) – <https://astronomerstelegam.org/>
- GCN Circulars
- Wiserep – <https://www.wiserep.org/>

Gwiazdy supernowe - czym są?

Supernowe są to krótkotrwałe zjawiska przejściowe, wybuchowe – transjenty – na końcowych etapach życia gwiazdy. Supernowe są bardzo jasne (absolutnie) i często przyćmiewają nawet własną galaktykę macierzystą.

Supernowe



SN 1994D (Typ Ia, $M = -19.5$ mag) w gal. NGC 4562 ($M = -19.5$ mag)

Supernowe



SN 2011fe (Typ Ia, $M = -19.5$ mag) w gal. M101 ($M = -21.0$ mag)

Supernowe



SN 2024ggi (Typ II, $M \approx -18.0$ mag) w gal. NGC 3621 ($M = -19.8$ mag)

Podział supernowych – widma

- I typu – brak linii wodoru
- Ib – obecne linie helu
- Ic – brak linii helu
- II typu – obecne linie wodoru

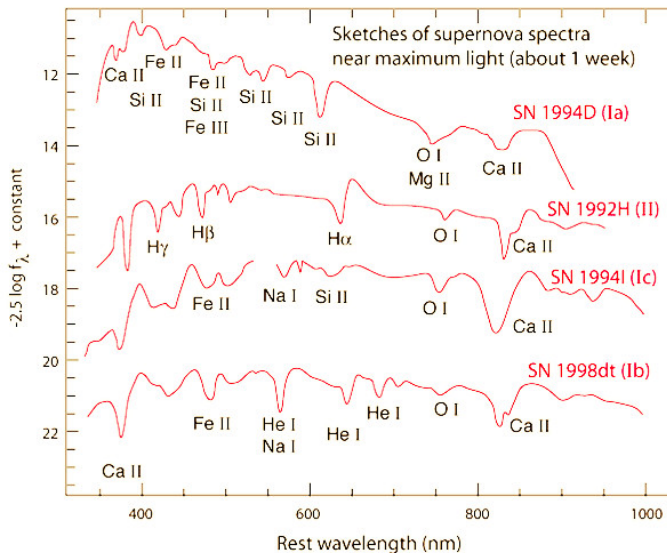
Podział supernowych – fizyka

- typ Ia typ – fuzja jądrowa
- typ Ib, Ic, II – zapadanie jądra gwiazdy

Podział supernowych – kształt

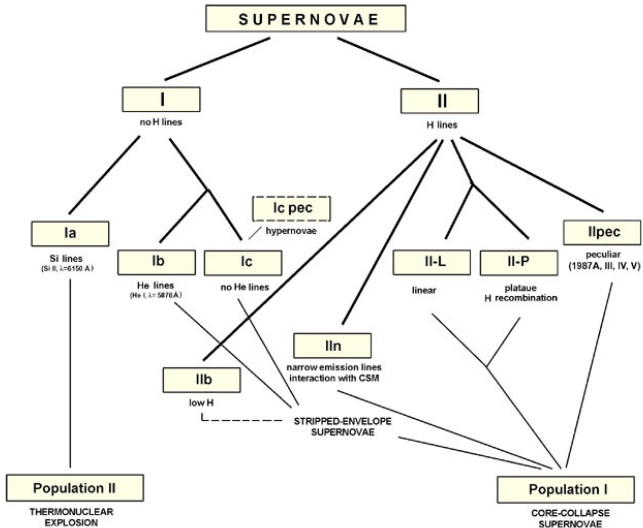
- typ IIL – spadek liniowy
- typ IIP – wypłaszczenie (plateau)

Widma supernowych

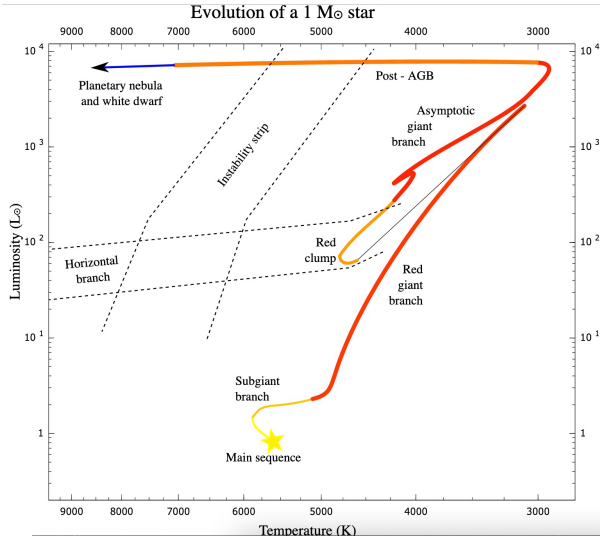


Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.

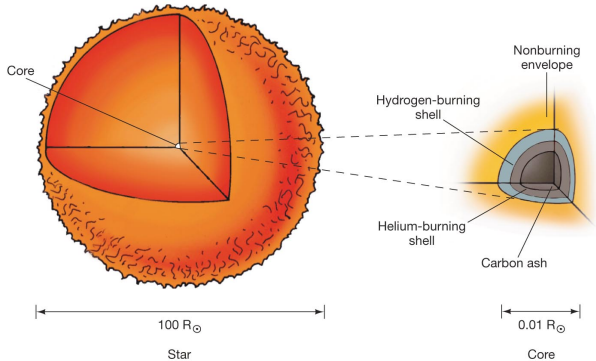
Klasyfikacja supernowych



Ewolucja gwiazdy typu słonecznego ($M < 8M_{\odot}$) - białe karły



Ewolucja gwiazdy typu słonecznego ($M < 8M_{\odot}$) - białe karły



Biały karzeł

Biały karzeł powstaje z gwiazdy o małej masie (poniżej $\sim 8 M_{\odot}$), gdy kończy ona swoje życie.

Jeśli czerwony olbrzym ma niewystarczającą masę aby wytworzyć temperaturę w jądrze wymaganą do zapoczątkowania reakcji termojądrowych z użyciem węgla (około 1 miliard K), w jego centrum zgromadzi się węgiel i tlen. Gdy taka gwiazda odrzuci swoje zewnętrzne warstwy i utworzy mgławicę planetarną, pozostawi po sobie jądro, które jest białym karłem. Białe karły są pozostałościami gwiazd, a ich zapadanie powstrzymywane jest przez ciśnienie zdegenerowanych elektronów.

Supernowe typu Ia

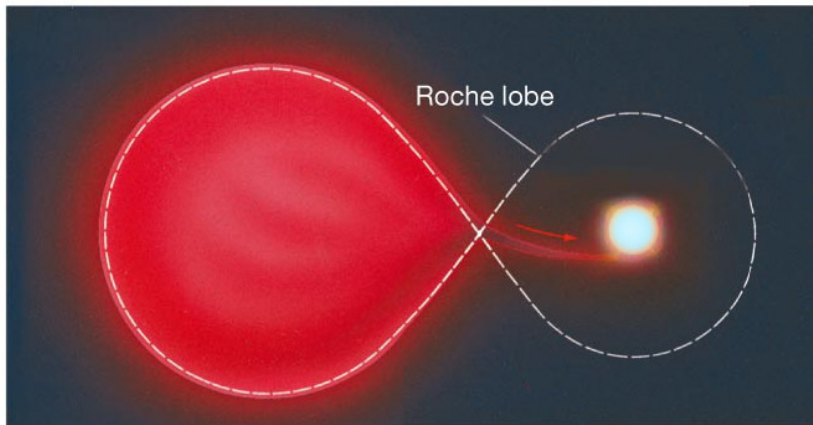
Scenariusze powstawania supernowych Ia

Istnieją dwa możliwe scenariusze stworzenia supernowej typu Ia, znane jako: z jednym obiektem zdegenerowanym (single degenerate scenario) oraz z dwoma obiektami zdegenerowanymi (double degenerate scenario).

W scenariuszu z jednym obiektem zdegenerowanym gwiazda towarzysz białego karła powoli traci masę na rzecz białego karła, aż do jego eksplozji (po przekroczeniu granicy Chandrasekhara; $1,44 M_{\odot}$).

W scenariuszu z dwoma obiektami zdegenerowanymi, układ składa się z dwóch białych karłów, które ostatecznie łączą się, wywołując eksplozję. Obserwacje wskazują, że zdecydowana większość SNe Ia pochodzi ze scenariusza z dwoma obiektami zdegenerowanymi (projekt ASAS-SN).

Supernowe typu Ia – pojedynczy biały karzeł



(single degenerate scenario)

Supernowe typu Ia – pojedynczy biały karzeł



(single degenerate scenario)

Supernowe typu Ia – podwójny biały karzeł



(double degenerate scenario)

Supernowe typu Ia

Wybuch supernowej Ia

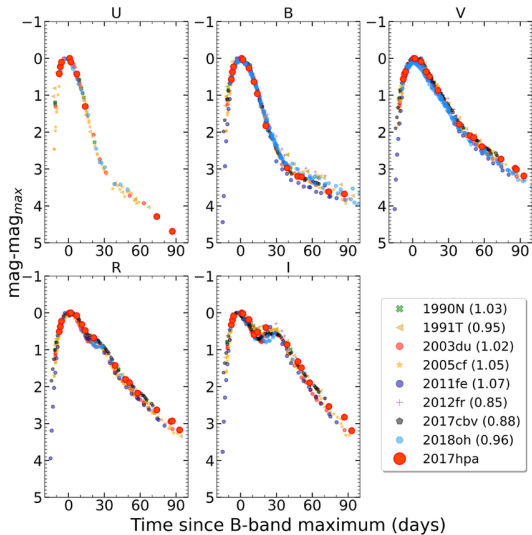
W trakcie wybuchu supernowej Ia dochodzi do wybuchowej reakcji jądrowej w białym karle – reakcja “palenie węgla” ($C + C \rightarrow O, Mg, Ne, \dots$) trwa kilka sekund. Gwiazda zostaje rozerwana. Emisja energii 10^{51} erg.

W maksimum, widma optyczne SN Ia zawierają neutralne i pojedynczo zjonizowane linie Si, Ca, Mg, S i O co wskazuje, że zewnętrzne warstwy wyrzutu składają się głównie z pierwiastków o masie pośredniej.

Wybuch supernowej Ia

Po eksplozji, kiedy zewnętrzne warstwy rozszerzą się do momentu, w którym materia stanie się przezroczysta, w widmie dominuje światło emitowane przez pierwiastki syntetyzowane podczas eksplozji – przede wszystkim izotopy zbliżone do masy żelaza. W wyniku radioaktywnego rozpadu niklu-56 przez kobalt-56 do żelaza-56 powstają fotony o wysokiej energii (gamma), które dominują w energii wytwarzanej przez wyrzut w okresach pośrednich i późnych. Fotony gamma oświetlają wyrzuconą wcześniej materię powodując jej świecenie.

Supernowe typu Ia



SN Ia

Supernowe typu Ia

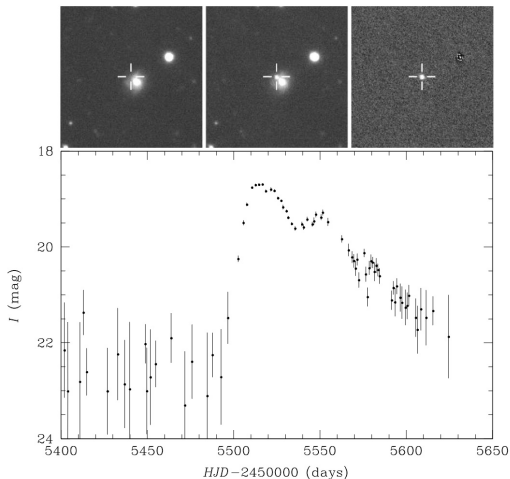
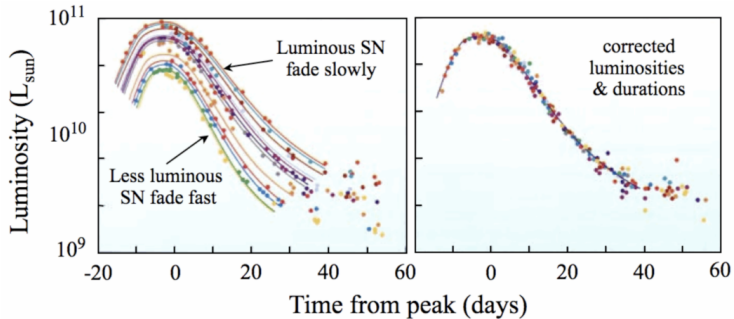


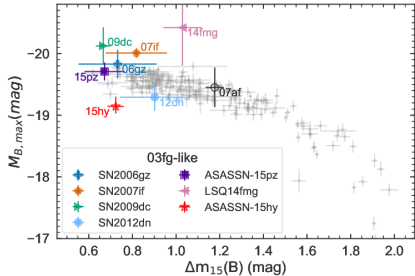
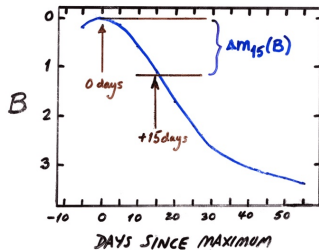
Fig. 4. *Top*: Finding chart for supernova OGLE-2010-SN-060 (MBR104.04.221). The *left image*

SN Ia, OGLE

Supernowe Ia

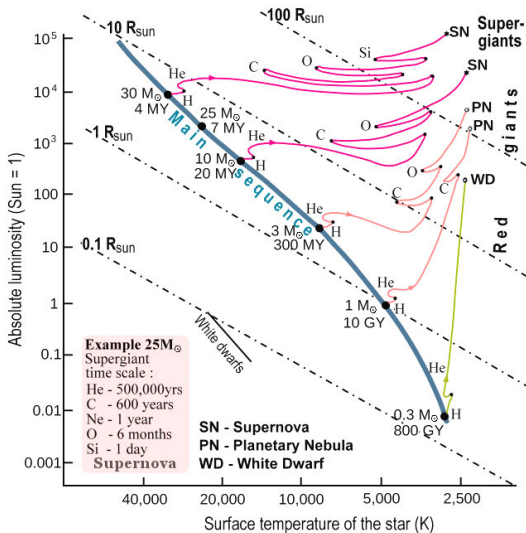


Supernowe Ia

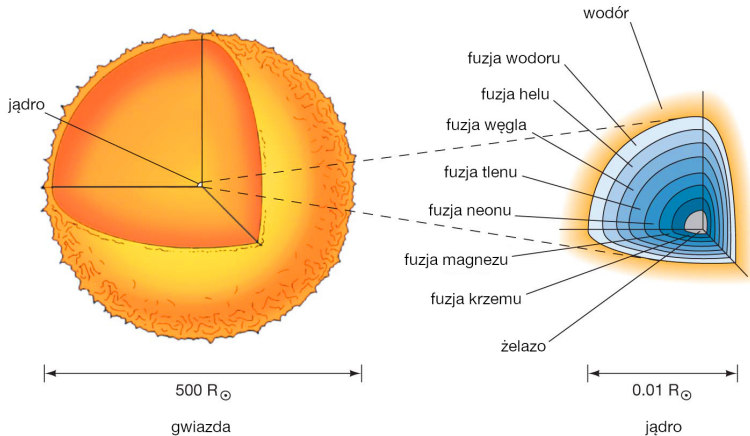


$$M_{\max}(B) = -21.7 + 2.7 \times \Delta m_{15}(B) \quad (1)$$

Masywne gwiazdy → Core-collapse SNe



Supernowe Core-Collapse (CC SNe)



Supernowe Ib, Ic, II - zapadanie jądra (core-collapse)

Scenariusze powstawania supernowych Ib, Ic, II

Masywne gwiazdy (o masie większej niż około $8M_{\odot}$) zakończą swoje życie jako supernowe poprzez zapadnięcie się jądra gwiazdy (core-collapse, CC SNe). Supernowa pojawia się, gdy jądro gwiazdy składa się już głównie z żelaza i nie może już wytwarzać energii w wyniku syntezy jądrowej.

Gdy żelazne jądro osiągnie masę $1.2\text{-}1.4 M_{\odot}$, temperatura i gęstość są tak duże, że zachodzą dwa procesy “pochłaniające energię”.

Foto-dezintegracja

Wysokoenergetyczne fotony rozbijają jądra żelaza na jądra helu, protony i neutrony. W wyniku spadku liczby fotonów zmniejsza się ciśnienie i jądro zapada się.

Supernowe Ib, Ic, II - zapadanie jądra (core-collapse)

Neutronizacja materii

Protony i elektrony łączą się w neutrony i neutrino. Neutrino nie oddziałują z materią, więc unoszą energię na zewnątrz gwiazdy, a to przyspiesza zapadanie jądra.

Scenariusze powstawania supernowych Ib, Ic, II

Zarówno jądro, jak i zewnętrzne warstwy gwiazdy szybko się zapadają z powodu braku wewnętrznego ciśnienia. Następnie jądro zapada się tak długo, aż ciśnienie degeneracji neutronów przejmuje kontrolę nad sytuacją i jądro nie może być dalej ściskane. Gdy zewnętrzne warstwy uderzają w jądro, następnie “odbijają się”, tworząc falę uderzeniową i uwalniając energię, którą postrzegamy jako supernową.

Supernowe Ib, Ic, II - zapadanie jądra (core collapse, CCSNe)

Scenariusze powstawania supernowych Ib, Ic, II

Istnieje kilka odmian supernowych ze scenariusza z zapadającym się jądrem, związanych z właściwościami gwiazdy (zwanej progenitorem). Progenitorzy supernowych typu II zachowują otoczkę wodorową i dlatego w ich widmach widzimy silne linie wodoru. Jednakże typy Ib i Ic nie wykazują linii H (brak otoczki wodorowej w progenitorze). Różnica między Ib i Ic polega na obecności linii helu, których nie widać w przypadku supernowych typu Ic.

Supernowe Ib, Ic, II - zapadanie jądra (core collapse)

Scenariusze powstawania supernowych Ib, Ic, II

W zależności od masy gwiazdy jądro pozostanie w postaci kuli neutronów (gwiazdy neutronowa) lub zostanie jeszcze bardziej ściśnięte przez falę uderzeniową, tworząc czarną dziurę. Badania CCSNe są ważne nie tylko w celu zrozumienia końcowych stadiów masywnych gwiazd, ale także powstawania zwartych obiektów, takich jak gwiazdy neutronowe i czarne dziury.

Jasności absolutne supernowych

SN Type	$\overline{M}_B^a$	σ^b	N
Ia	-19.26 ± 0.20	0.51	171
Ib	-17.54 ± 0.33	0.94	18
Ic	-17.67 ± 0.40	1.04	36
IIb	-17.03 ± 0.45	0.93	15
IIl	-17.98 ± 0.34	0.90	17
IIP	-16.80 ± 0.37	0.97	74
IIIn	-18.62 ± 0.32	1.48	21

Ile supernowych?

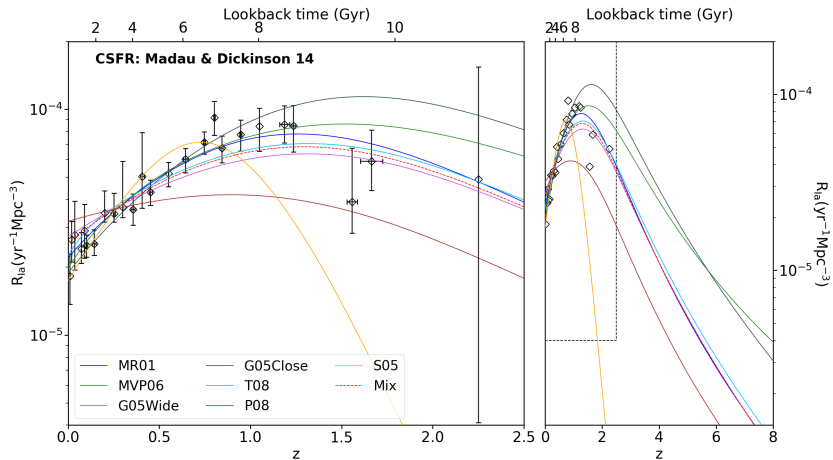
Table 2

Cumulative estimated number of SNe per 100 deg² per year to the limiting peak magnitude I

Peak I [mag]	Total SN Number			Cumulative Detection Efficiency (%)	OGLE-IV SN Number*		
	All SNe	SNe Ia	ccSNe		All SNe	SNe Ia	ccSNe
17.0	1	1	0	100	1	1	0
17.5	3	2	1	100	2	1	1
18.0	6	5	1	100	4	3	1
18.5	14	12	2	100	9	8	1
19.0	31	28	3	83	17	15	2
19.5	78	71	7	58	30	27	3
20.0	224	211	13	38	56	53	3
20.5	589	562	27	21	83	79	4

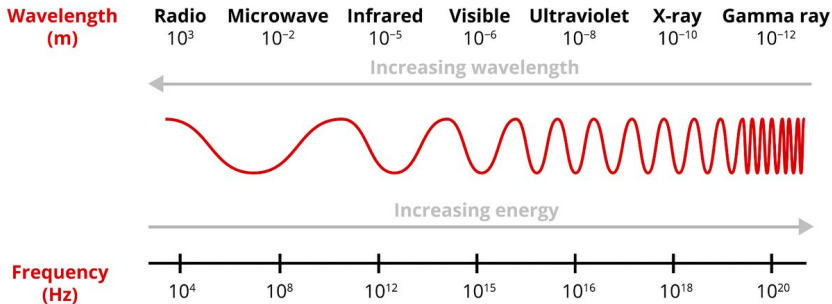
Notes. *The reported SNe numbers are corrected for the OGLE-IV SNe “season length” ($\approx 65\%$ of year).

Ile supernowych?



Błyski promieniowania gamma (GRB)

Electromagnetic spectrum



Błyski promieniowania gamma (GRB)

Lata 1960-te

USA w latach 1963-1965 umieściło na orbicie 12 satelitów Vela, celem obserwacji promieniowania gamma i rentgenowskiego pochodzącego z (zakazanych traktatami) testów wybuchów bomb jądrowych.

Szybko okazało, że wiele błysków promieniowania gamma pochodzi z kosmosu. Do roku 1973 były to informacje tajne.

Błyski promieniowania gamma stały się w tamtym czasie jedną z najważniejszych zagadek do rozwiązania.

Błyski promieniowania gamma (GRB)

BATSE

W 1991 roku NASA wysłała na orbitę satelitę Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) wyposażonego m.in. w instrument BATSE (ang. Burst and Transient Source Experiment) przeszukujący niebo w poszukiwaniu krótkich rozbłysków gamma.

W latach 1991–2000 odnotowano 2700 błysków gamma o długości od 0,25 do 30 sekund, każdy to kilkaset-kilka tysięcy fotonów.

Jaki rozkład na niebie? Czy są to obiekty kosmologiczne czy galaktyczne?

Błyski promieniowania gamma (GRB)

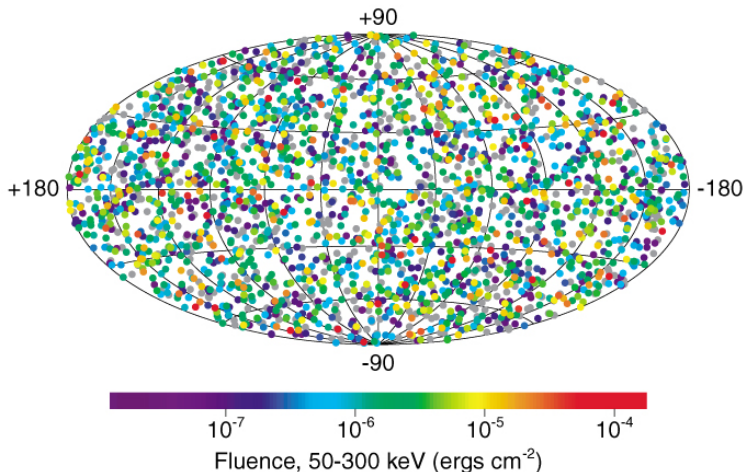
Debata Paczyński-Lamb (lipiec 1995)

Bohdan Paczyński – obiekty kosmologiczne

Donald Lamb – obiekty galaktyczne



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Błyski promieniowania gamma (GRB)

Czym one są?

Lokalizacja GRBs była słabo znana. W 1996 roku wystrzelono satelitę Beppo SAX (działał do 2003 roku), który bardzo szybko po wykryciu GRB mierzył pozycję rentgenowską.

W 1997 roku zlokalizowano poświatę rentgenowską błysku promieniowania gamma z galaktyką na redshifcie $z = 0.835$. Są to zatem obiekty kosmologiczne!

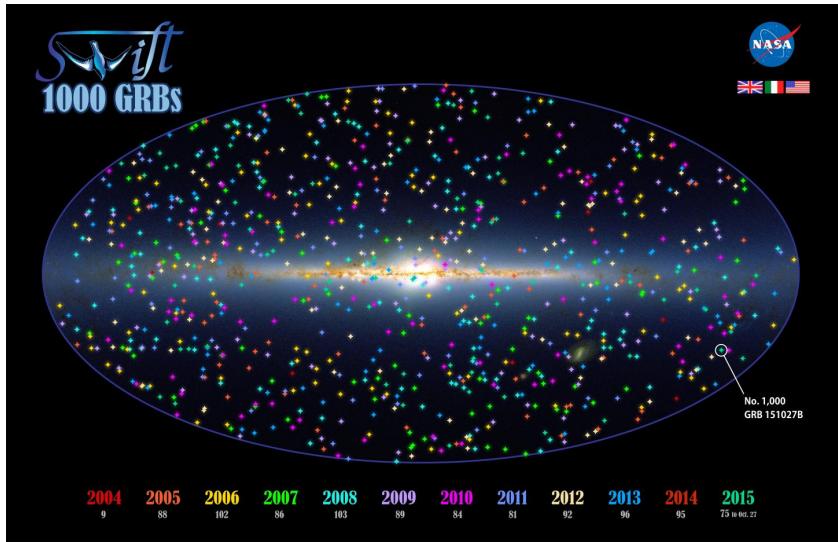
W 1998 roku zidentyfikowano supernową w miejscu błysku gamma.

Błyski promieniowania gamma (GRB)

Czym one są?

Satelita Swift wystrzelony w 2004 roku, obserwujący promieniowanie gamma, rentgenowskie i UV. Po wykryciu błysku gamma satelita namierzał pozycję w X i UV.

Błyski promieniowania gamma (GRB)

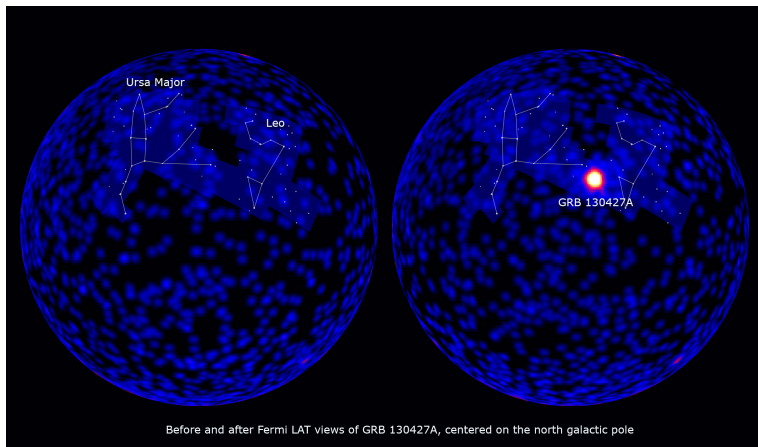


Błyski promieniowania gamma (GRB)

Czym one są?

Satelita Fermi wystrzelony w 2008 roku, obserwujący promieniowanie gamma o najwyższej energii.

Błyski promieniowania gamma (GRB)



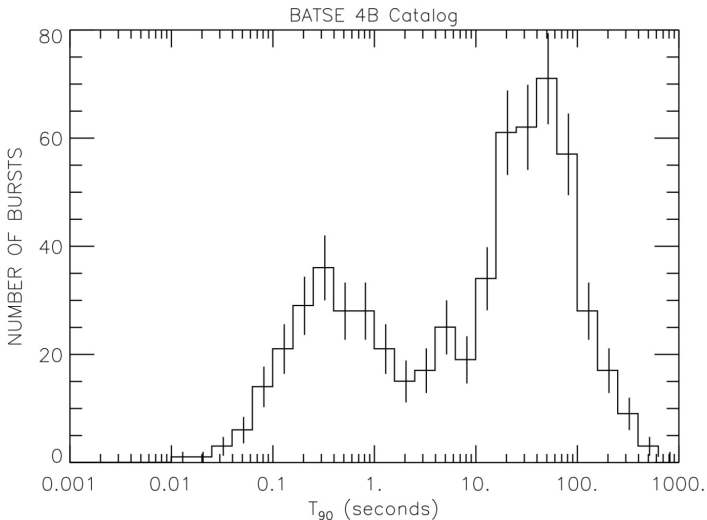
Powiązany z SN Ic ($z = 0.34$).

Błyski promieniowania gamma (GRB)

Czym one są?

- Promieniowanie gamma dociera do nas jako krótkie ($<2\text{s}$) lub długie “impulsy”.
- Szybki follow-up wskazuje na poświatę optyczną i/lub rentgenowską.
- Promieniowanie dociera do nas z odległości kosmologicznych.

Błyski promieniowania gamma (GRB)



Błyski krótkie $t < 2$ s (30% próbki GRBs)

- Są związane z obszarami o niewielkim lub zerowym tempie formowania gwiazd, takimi jak duże galaktyki eliptyczne.
- Wyklucza to powiązanie z masywnymi gwiazdami, potwierdzając, że krótkie zdarzenia fizycznie różnią się od długich.
- Ponadto nie znaleziono żadnego związku z supernowymi.
- Wiodąca hipoteza głosi, że krótkie GRB powstają one w wyniku połączenia podwójnych gwiazd neutronowych lub gwiazdy neutronowej z czarną dziurą (tj. zjawisko kilonowej).

Błyski promieniowania gamma (GRB)

Błyski krótkie $t < 2$ s (30% próbek GRBs)

Najpopularniejszym wyjaśnieniem ich pochodzenia to zderzenie dwóch gwiazd zwartych: pary gwiazd neutronowych lub gwiazdy neutronowej i czarnej dziury. Po takim zderzeniu, powstaje przejściowa struktura, często hipermasywna gwiazda neutronowa, która jest niestabilna i pod wpływem grawitacji tworzy czarną dziurę. Otaczające ją resztki gęstej materii, pozostałej po zderzeniu, tworzą dysk, a proces dyskowej akrecji, z udziałem pola magnetycznego, podobnie jak w przypadku długich błysków, umożliwia uzyskanie energii rotacyjnej z czarnej dziury i wyrzut fali uderzeniowej. Fala ta, w postaci skolimowanej strugi (dżetu) rozchodzi się w ośrodku międzygwiazdowym i emituje wysokoenergetyczne promieniowanie gamma.

Błyski promieniowania gamma (GRB)

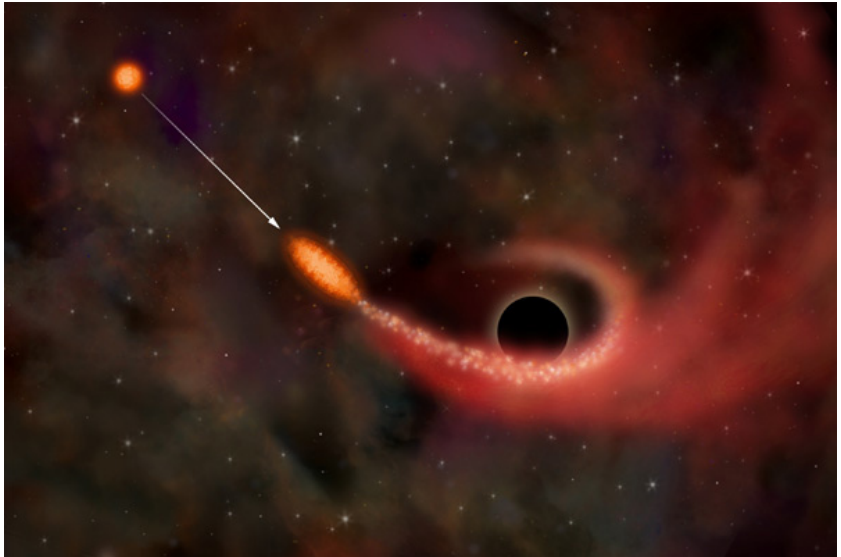


Błyski promieniowania gamma (GRB)

Błyski długie $t > 2$ s (70% próbki GRBs)

- Prawie każdy dobrze zbadany długi rozbłysk gamma został powiązany z galaktyką o dużym tempie formowania gwiazd, a w wielu przypadkach także z supernową core-collapse, co jednoznacznie łączy długie GRB ze śmiercią masywnych gwiazd.
- Hipernowe – wybuchy gwiazd najbardziej masywnych, o masach kilkadziesiąt razy przekraczających $M_{\odot}$. Jądro gwiazdy zapada się bezpośrednio do stadium czarnej dziury. Jeśli gwiazda ta szybko rotuje, to z okolic jej biegunów, wzdłuż osi rotacji, wyrzucane są dwa wysokoenergetyczne strumienie plazmy - dżety. Strumienie te emitują intensywne promieniowanie gamma.

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)



Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

Promień pływowy

Rozerwanie pływowe gwiazdy (TDE) ma miejsce, gdy gwiazda przechodzi “blisko” supermasywnej czarnej dziury (SMBH) i zostaje rozerwana przez siły pływowe. Odległość, przy której siła pływowa SMBH (F_t) równa się sile grawitacji gwiazdy (F_*), nazywana jest promieniem pływowym R_t (t-tidal).

$$F_t = F_* \quad (2)$$

$$\frac{GM_{BH}R_*}{R_t^3} = \frac{GM_*}{R_*^2} \quad (3)$$

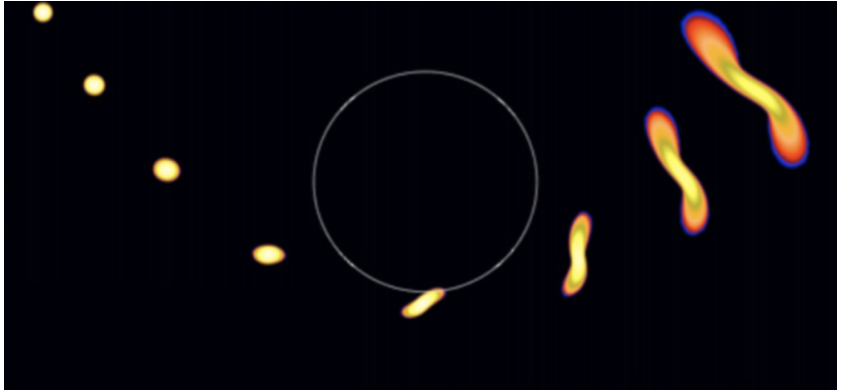
$$R_t = R_* \left(\frac{M_{BH}}{M_*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

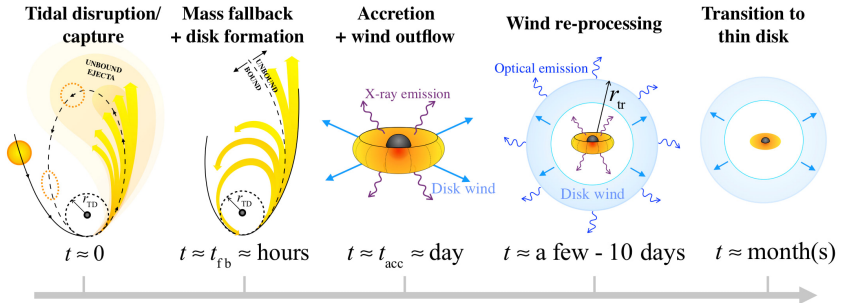
Promień pływowy

Promień pływowy (R_t) zależy od masy M_* i promienia gwiazdy R_* oraz od masy SMBH: $R_t = R_*(M_{BH}/M_*)^{1/3}$. W przypadku gwiazd ciągu głównego zbliżających się do SMBH z masami BH $M_{BH} \approx (10^6 - 10^7) M_\odot$, R_t wynosi tylko kilka promieni grawitacyjnych czarnej dziury. Dlatego ogólna teoria względności (OTW) w naturalny sposób odgrywa rolę ważną rolę w procesach zachodzących w TDE.

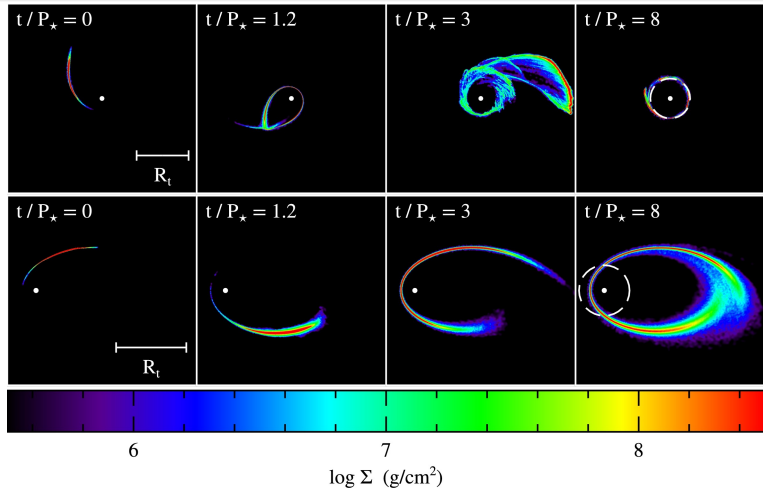
Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)



Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)



Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)



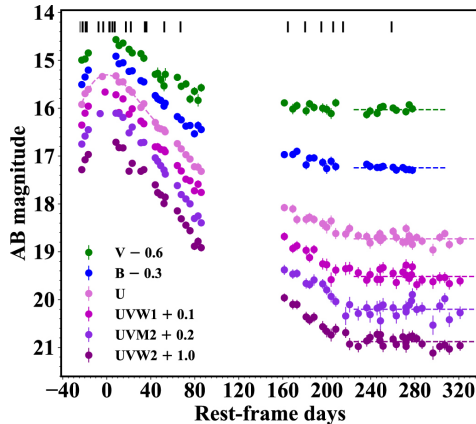
Lodato et al. (2015); góra: efekty relatywistyczne; dół: orbity keplerowskie; czas w jednostkach okresu orbitalnego

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

Użyteczność:

- Mogą się wydarzyć wokół (prawie) dowolnej BH, pozwalając na badanie dystrybucji mas BH.
- W maksimum są bardzo jasnymi obiektami, nawet $L \approx 10^{45}$ erg/s. To czyni je obiektami obserwowanymi z odległości kosmologicznych.
- Pozwalają także na badanie fizyki gwiazd.

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)



Leloudas G. et al. (2019)

Suvi Gezari (2021): $L \propto \dot{M}$; całkowite TDE $\dot{M} \propto t^{-5/3}$ lub częściowe TDE $\dot{M} \propto t^{-9/4}$

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 908:4 (26pp), 2021 February 10

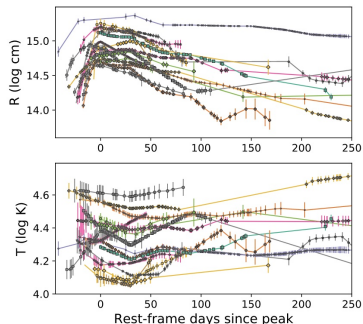
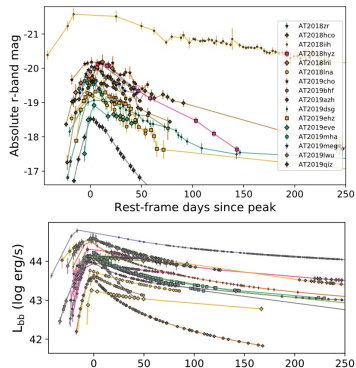


Figure 8. The r -band absolute magnitude, blackbody luminosity, blackbody radius, and rest-frame blackbody temperature for the 17 TDEs in our sample with ZTF and Swift/UVOT observations. We see that all TDEs show a decrease of the blackbody radius after maximum light, and most sources show a small but significant increase of the blackbody temperature.

van Velzen et al. (2021)

(W danej epoce dopasowywany jest Planck (dostajemy T), a następnie $L \propto 4\pi R^2 \sigma T^4$.)

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

10

Sjoert van Velzen et al.

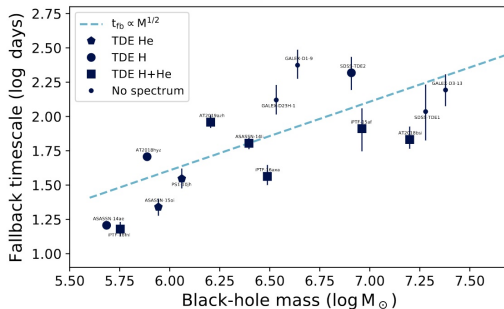


Fig. 3 Black-hole mass versus fallback time. The black-hole mass is estimated from the M - σ relation and the fallback time follows from fitting a $L \propto t^{-5/3}$ power-law decay to the optical-ultraviolet blackbody lightcurve. The dashed line indicates the predicted fallback rate for a star of one solar mass (Stone et al. 2013).

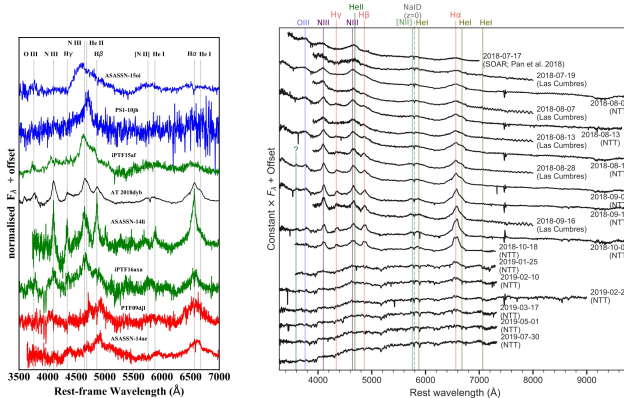
van Velzen et al. (2021)

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

Widma:

- TDE mają bardzo szerokie linie emisyjne ($\text{FWHM} \sim 10\,000 \text{ km/s}$) oraz linie wysoko wzbudzone HeII, czasami NIII i OIII – mechanizm fluorescencji Bowena.
- mają kontinuum, do którego pasuje funkcja Plancka (ciało doskonale czarne).
- Wykrycie linii Bowena wymaga istnienia fotonów EUV/X, co przemawia za akrecją w TDE.

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)



Leloudas G. et al. (2019)

Rozerwanie pływowe gwiazdy – Tidal Disruption Event (TDE)

Częstość

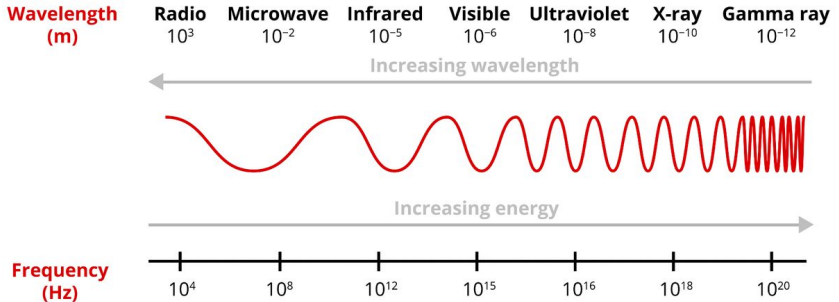
10^{-4} TDE/gal/yr

Praca przeglądowa

Suvi Gezari (2021): <https://arxiv.org/pdf/2104.14580>

Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB)

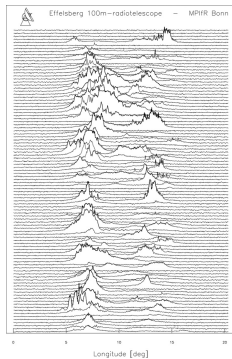
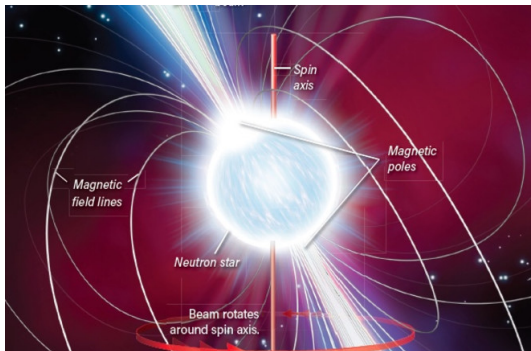
Electromagnetic spectrum



Radioteleskop Parkes (Australii)



Pulsary



Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB)



Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB)

Szybki błysk radiowy – są to przejściowe sygnały radiowe, trwające milisekundy.

Odkrycie

- Pierwszy sygnał FRB został odkryty w 2007 w trakcie analizy archiwalnych danych obserwacyjnych przez zespół pod kierownictwem D. R. Lorimera i znany jest jako “Lorimer burst”.
- Rozpoczęto poszukiwania radioteleskopem Parkes, znaleziono 16 FRB (ale okazało się, że to fake).

Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB)

Właściwości

- Odległości kosmologiczne
- Wyznaczone na podstawie DM (gęstość gazu po drodze)
 $DM \propto 1200 \times z \text{ pc/cm}^3$ dla $z < 2$
- Bardzo jasne
- Częstotliwość występowania – tysiące dziennie na całym niebie, czyli są pospolite, ale ich pochodzenie nie jest znane!

Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB)

Dispersion measure (DM)

Fale radiowe rozchodzące się w pustej przestrzeni docierają w tym samym czasie.

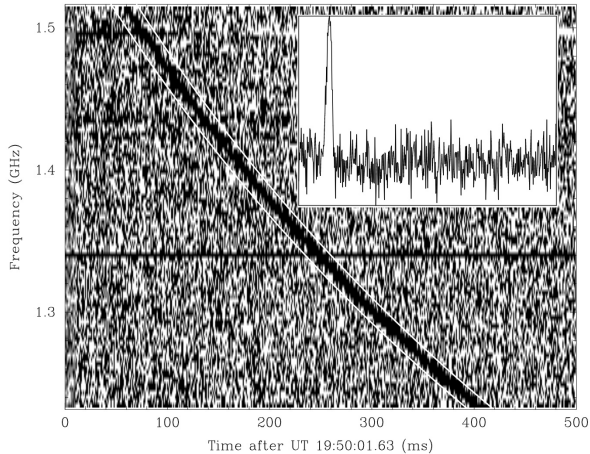
Fale radiowe rozchodzące się w plazmie są opóźnione na niższych częstotliwościach względem wyższych częstotliwości. Zakładając równomierne rozłożenie plazmy we Wszechświecie im dalej jest obiekt, tym większa kolumna plazmy po drodze, tym większe DM.

$$DM \propto \int n_e dl \quad (5)$$

Opóźnienie czasowe sygnałów

$$\Delta t = t_1 - t_2 = DM \left(\frac{1}{\nu_1^2} - \frac{1}{\nu_2^2} \right) \quad (6)$$

Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB))



Błysk Lorimera, $DM = 375 \text{ pc/cm}^3 \rightarrow z = 0.3$
(DM Galaktyki w tym kierunku $25 \text{ pc/cm}^3 \text{ pc}$)

Szybkie błyski radiowe - Fast Radio Bursts (FRB)

Na dzień 15 maja 2024 roku znamy 931 FRBs (źródło: TNS)

Czym mogą być?

- Rozmiar $\sim 1 \text{ ms} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ km} \rightarrow$ gwiazda neutronowa?
- Moc promieniowania $10^{40} - 10^{43} \text{ erg/s}$ – w sumie nie wskazuje na żaden konkretny typ obiektu.
- Brak odnotowanych wspólnych zjawisk GRB/FRB.
- Podejrzenie, że to magnetary (pulsary z gigantycznym polem magnetycznym). Ale mechanizm inny niż omiatająca wiązka (za mało energii), raczej “wybuchowy”.
- Niektóre FRB powtarzają się. Druga, odrębna grupa FRB?
- Kirsten et al. (2024): FRB 20201124A obserwowany przez 2000h (83 doby), znaleziono 46 błysków. Niepowtarzające się FRB najprawdopodobniej są jednak powtarzające, tylko powtórne FRB nie zostały po prostu zaobserwowane.