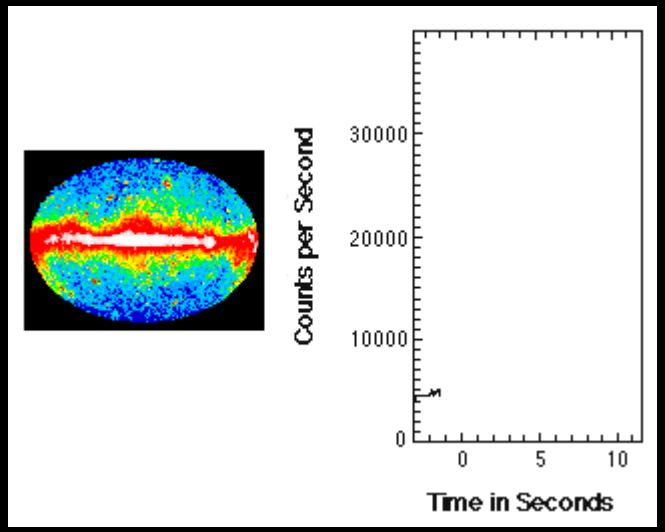
Błyski gamma z kolapsujących masywnych gwiazd

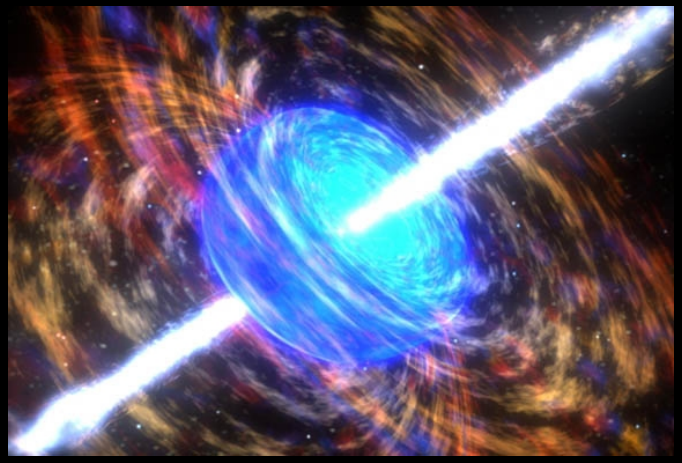
Agnieszka Janiuk

CAMK Warszawa

Skąd się bierze błysk?

- Ogromny strumień enegii, odległości kosmologiczne, szybka zmienność => kolimacja, źródło zwarte
- Emisja w modelu szoku z ośrodkiem: błyskowi gamma powinien towarzyszyć błysk optyczny (ok. 1 sek po eksplozji).
- Weryfikacja obserwacyjna: poświata optyczna dużo później => szok zewnętrzny może odpowiadać za poświatę, ale nie za gamma
- Model szoku wewnętrznego

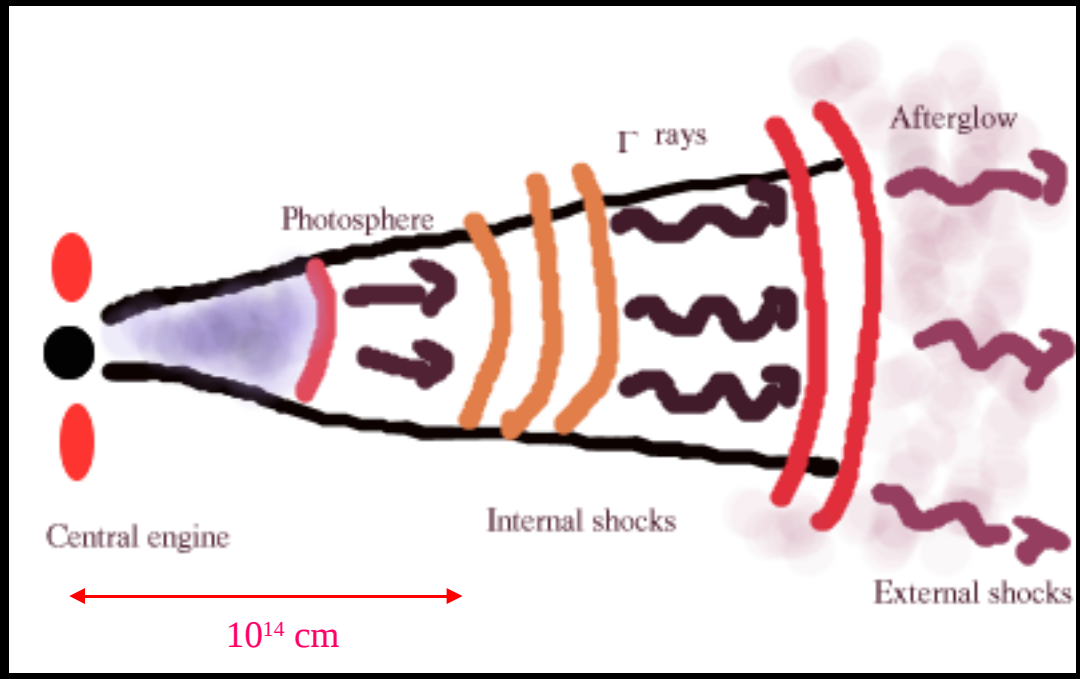


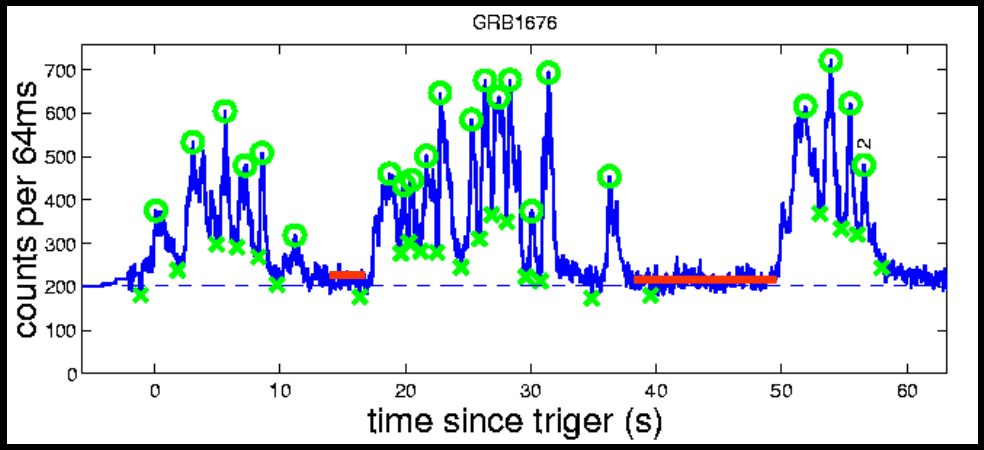


„Centralny silnik”: czarna dziura + dysk akrecyjny (materia z otoczki gwiazdy, zgromadzona w pł. równikowej)

Czas pracy silnika = czas emisji „powłok”w dżecie.

Różne prędkości (Γ>100) => szoki =>promieniowanie gamma („internal shock model”, Sari & Piran 1997)





Aby wyprodukować szoki źródło musi być aktywne i zmienne przez długi czas

Kolapsar: masywna (>20 M_{sun}), rotująca gwiazda, której jądro zapada się podczas eksplozji supernowej, bezpośrednio do czarnej dziury.

Rotacja: mamy wyróżnioną oś i płaszczyznę równika: część materii opada spowrotem i tworzy dysk

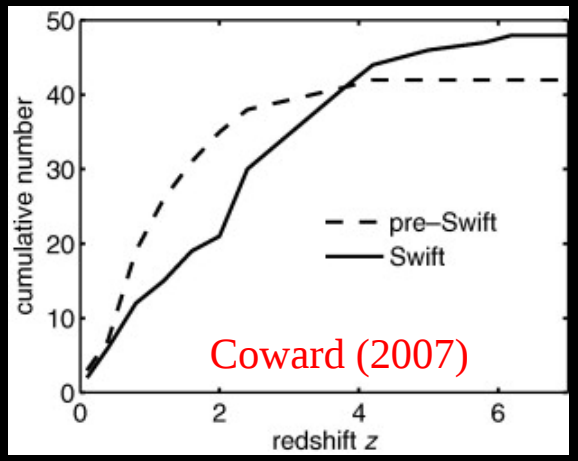
Czas trwania: długi, bo mamy dużą masę gwiazdy

Eta Carinae: kandydatka na hipernową za klikadziesiąt tys. lat

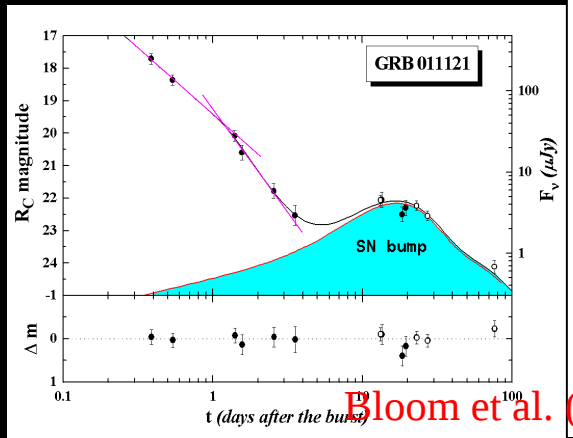
Długie błyski gamma pochodzą z kolapsarów

Przesłanki obserwacyjne:

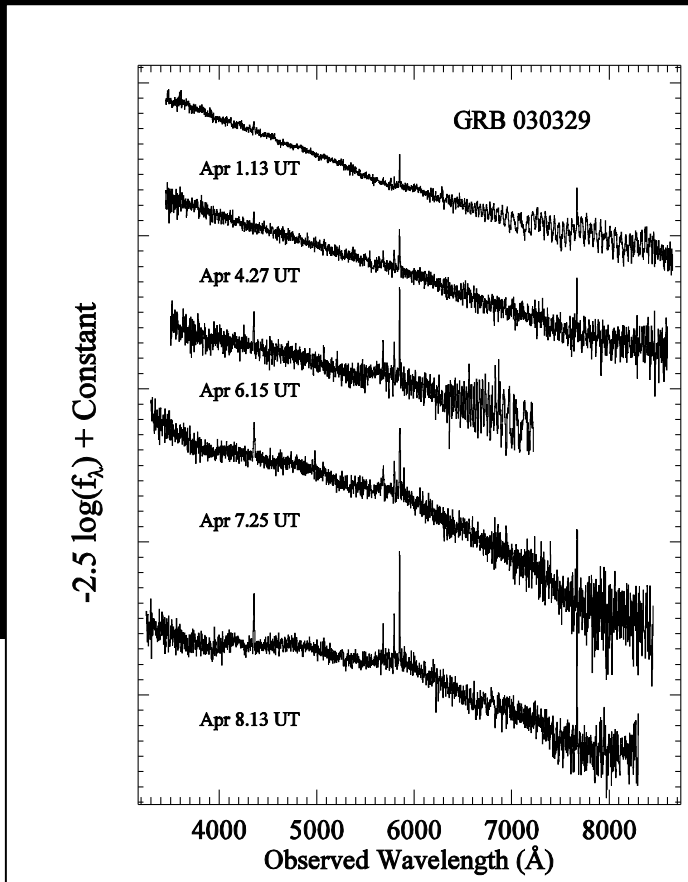
- Błyski rejestrowane są w obszarach silnie gwiazdotwórczych
- „SN bump” w krzywej blasku poświaty
- Widma zawierają linie emisyjne charakterystyczne dla SN
- Rozkład przesunięć ku czerwieni pokrywa się z tempem powstawania gwiazd we Wszechświecie



Coward (2007)

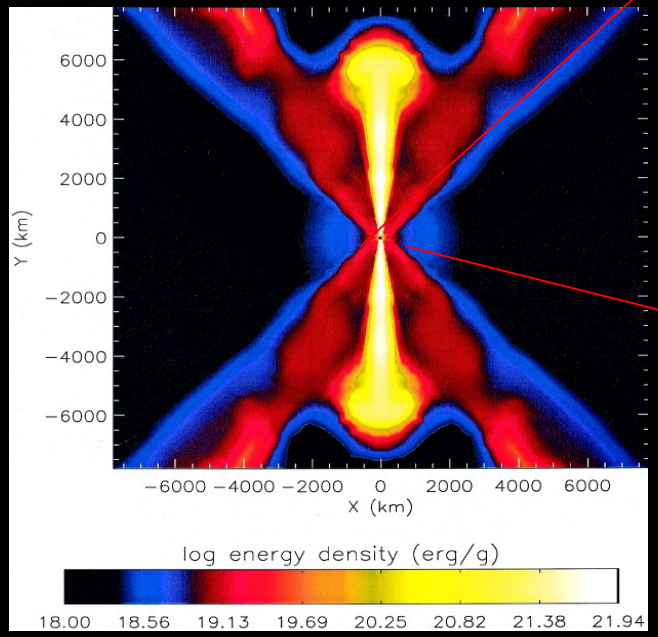


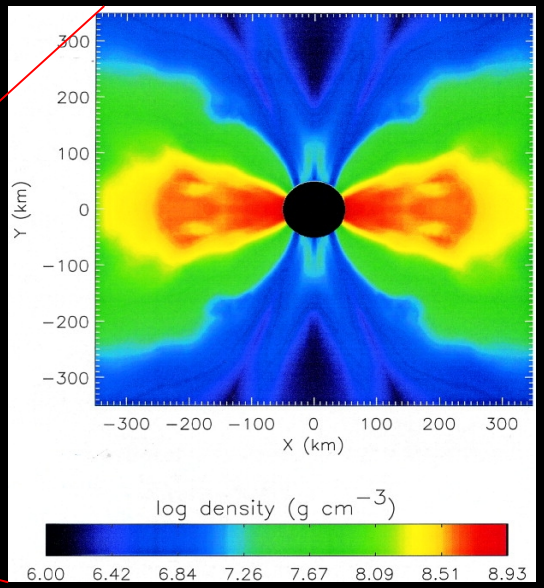
Bloom et al. (1999)



Stanek et al. (2003)

Centralny silnik w kolapsarze





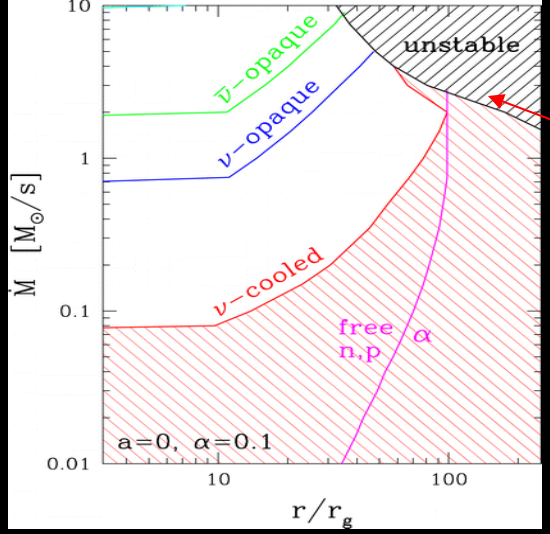
Gruby torus może uformować się podczas kolapsu masywnej, rotującej gwiazdy. Jego istnienie jest warunkiem produkcji dżetu, z którego emitowany jest błysk.

Symulacje numeryczne MacFadyen & Woosley (1999)

Mechanizmy przekazywania energii z torusa do dżetu:

1. neutrina

2. rotacja czarnej dziury



Chen & Beloborodov (2007)

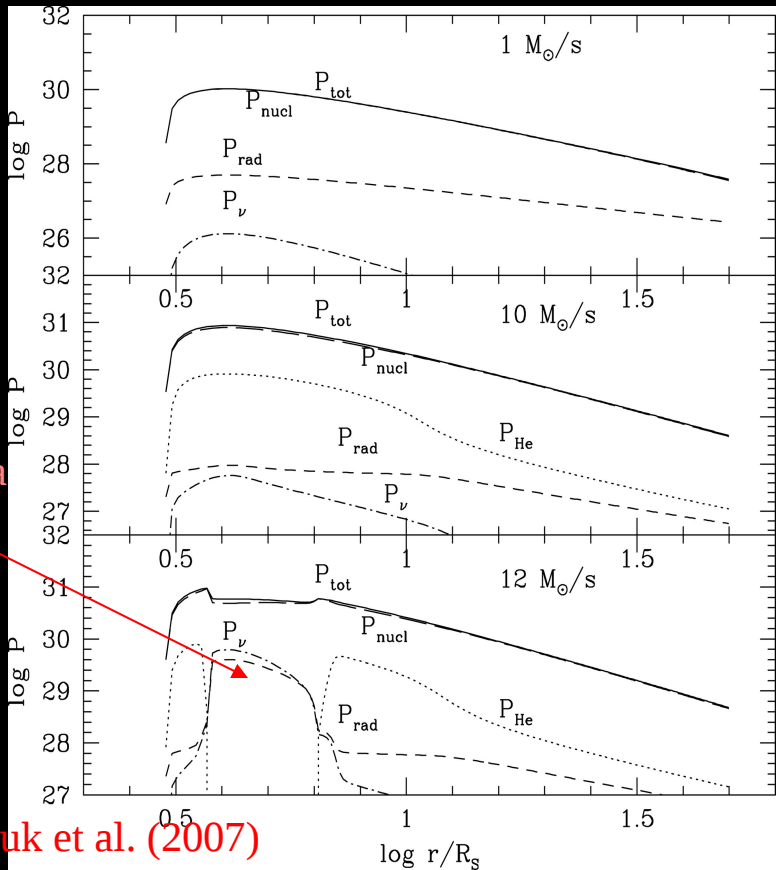
Niestabilność grawitacyjna

Modele jednowymiarowe torusa w "centralnym silniku":

- Temperatury ~ 10^{10}-10^{11} K, gęstości ~10^{9}-10^{12} g cm^{-3};
- Chłodzenie: emisja neutrin w wyniku rekacji beta; adwekcja;
- Nieprzezroczysty dla neutrin
- Możliwe są niestabilności

Popham, Woosley, & Fryer (1999); Di Matteo, Perna, & Narayan (2002); Kohri & Mineshige (2002); Janiuk, Perna, Di Matteo, Czerny (2004); Chen & Beloborodov (2007); Janiuk, Yuan, Perna, Di Matteo (2007)

Niestabilność termiczna



Janiuk et al. (2007)

Siatka modeli stacjonarnych

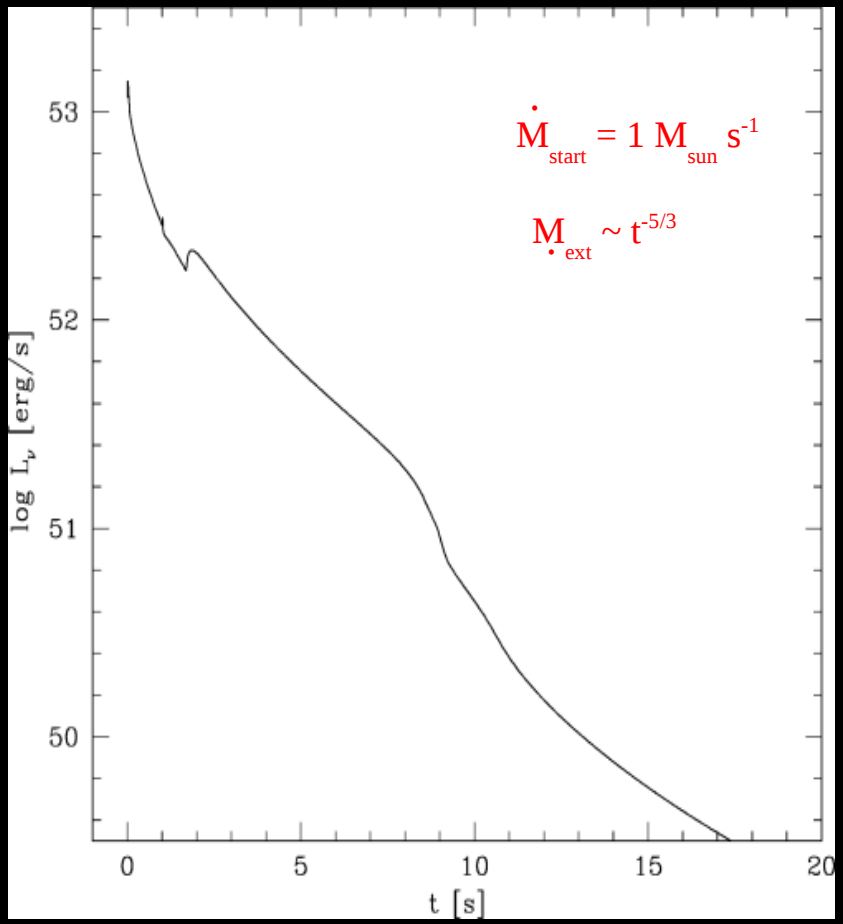
TABLE 2

MODEL LUMINOSITIES

Model				Luminosity (10^{51} ergs s^{-1})						
$\dot{M}$	α	a	M	L_ν	$L_\nu/\dot{M}c^2$	$L_{\nu,\mathrm{ann}}$	$L_{\nu,\mathrm{URCA}}$	L_{photo}	L_{diss}	L_{ent}
0.01.....	0.1	0	3	0.015	8.6E−4	3.4E−3	0.012	0.200	0.859	0.644
0.01.....	0.03	0	3	0.089	5.0E−3	0.012	0.078	0.200	0.738	0.450
0.01.....	0.01	0	3	0.650	0.036	0.012	0.638	0.200	0.724	−0.124
0.01.....	0.1	0.5	3	0.036	2.0E−3	9.9E−3	0.026	0.200	1.24	1.01
0.01.....	0.01	0	10	0.049	2.7E−3	9.3E−3	0.040	0.200	0.431	0.181
0.05.....	0.1	0.5	3	1.65	0.018	0.36	1.34	1.00	6.48	3.86
0.1	0.1	0	3	3.35	0.019	0.39	2.96	2.00	9.18	3.88
0.1	0.03	0	3	6.96	0.039	0.076	6.89	1.99	7.94	−1.01
0.1	0.01	0	3	6.15	0.034	7.7E−3	6.14	2.00	7.44	−0.71
0.1	0.1	0.5	3	8.03	0.045	1.03	7.00	2.00	12.96	3.02
0.1	0.1	0.95	3	46.4	0.26	2.61	43.8	1.99	36.8	−11.5
0.1	0.1	0.95	6	26.2	0.15	7.24	19.0	2.00	31.1	3.20
1.0	0.1	0	3	86.3	0.048	0.66	85.7	19.9	90.9	−14.9
1.0	0.1	0.5	3	142	0.078	1.53	140	19.9	142	−19.6
10.0.....	0.1	0	3	781	0.043	53.3	728	200	836	−135
10.0.....	0.1	0.5	3	1285	0.071	174	1111	200	1263	−211

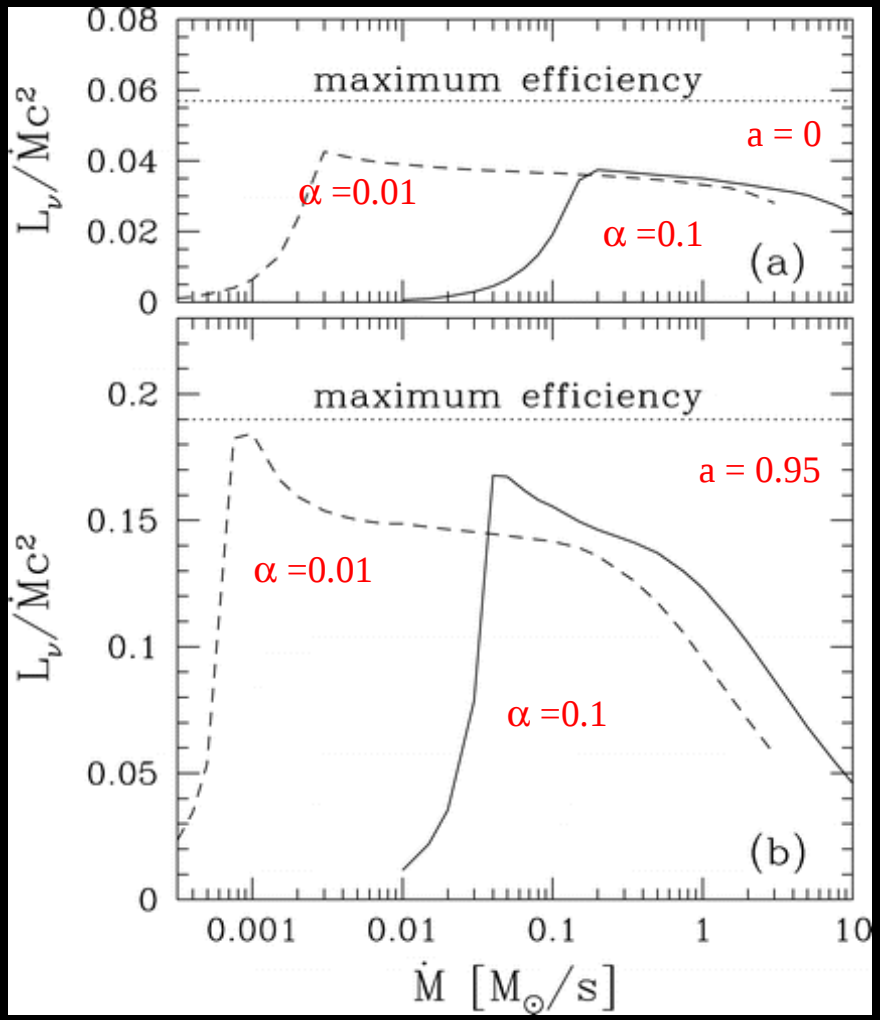
(Popham et al. 1999)

Jasność neutrinowa w funkcji czasu w scenariuszu kolapsara



Janiuk et al. (2004)

Wydajność chłodzenia neutrinowego (dysk stacjonarny)



Chen & Beloborodov (2007)

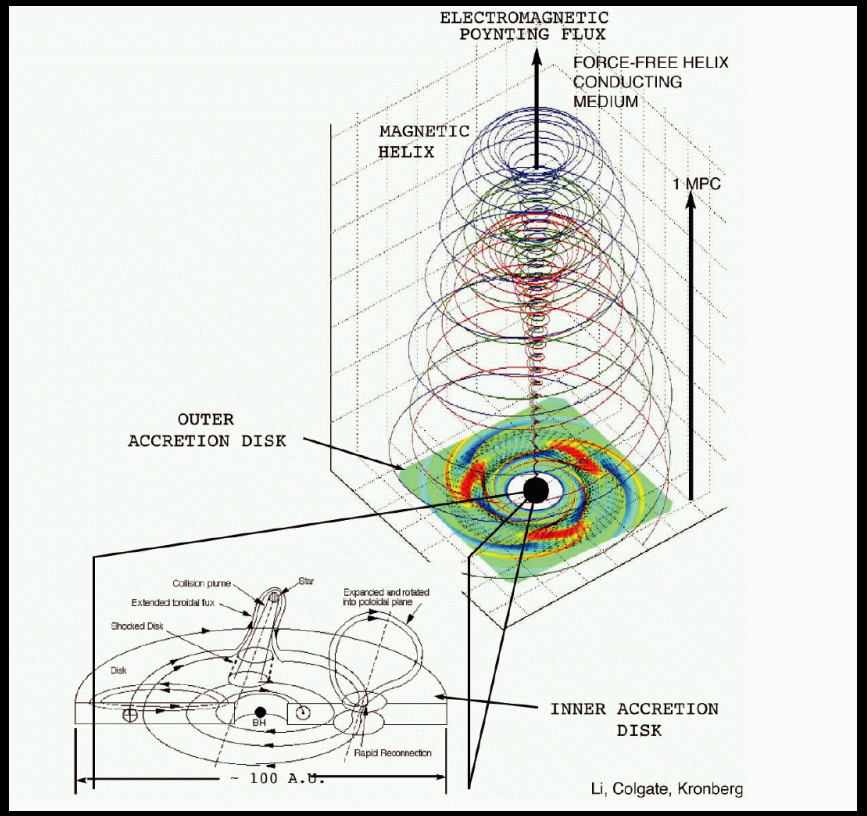
- Źródło pola magnetycznego:

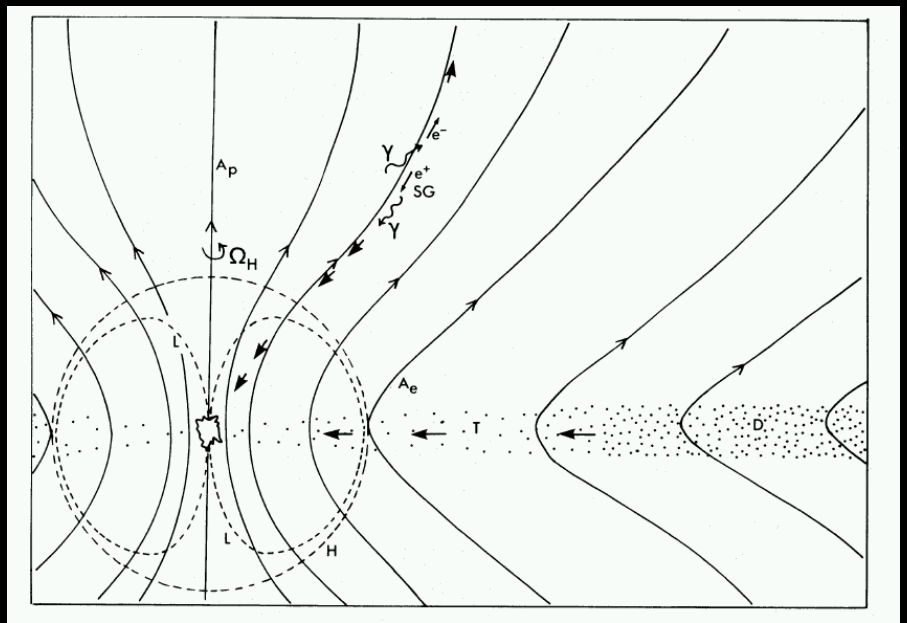
dynamo w dysku akrecyjnym

- Źródło energii dżetu:

I) Dysk akrecyjny

II) Spin czarnej dziury





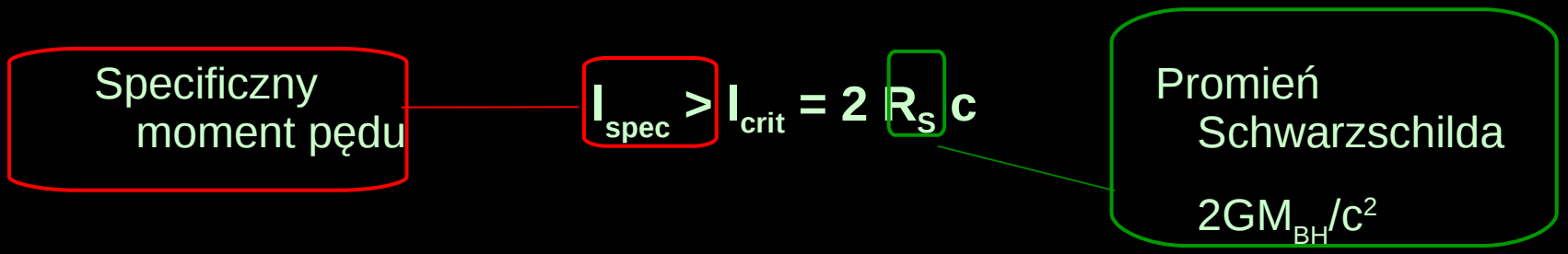
Linie ciągłe: poloidalne pole B

W magnetosferze pojawiają się pary elektron-pozytron

Blandford & Znajek 1977

Warunek istnienia torusa

Rotacja musi powstrzymać materię przed radialnym spadkiem na CD.



ALE: CD rośnie bardzo szybko (tempo akrecji rzędu 0.01-1 Msun/s) =>

GRB jest emitowany tak długo jak $l>l_{crit}$.

$A=Jc/GM^2$

Dla rotującej CD warunek jest taki:

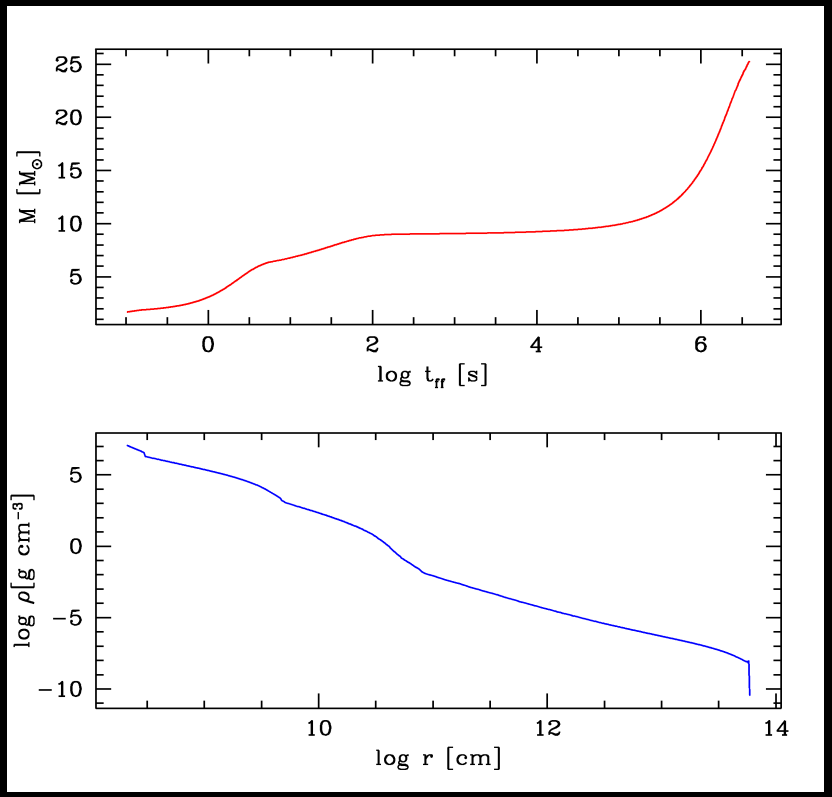
J – moment pędu CD

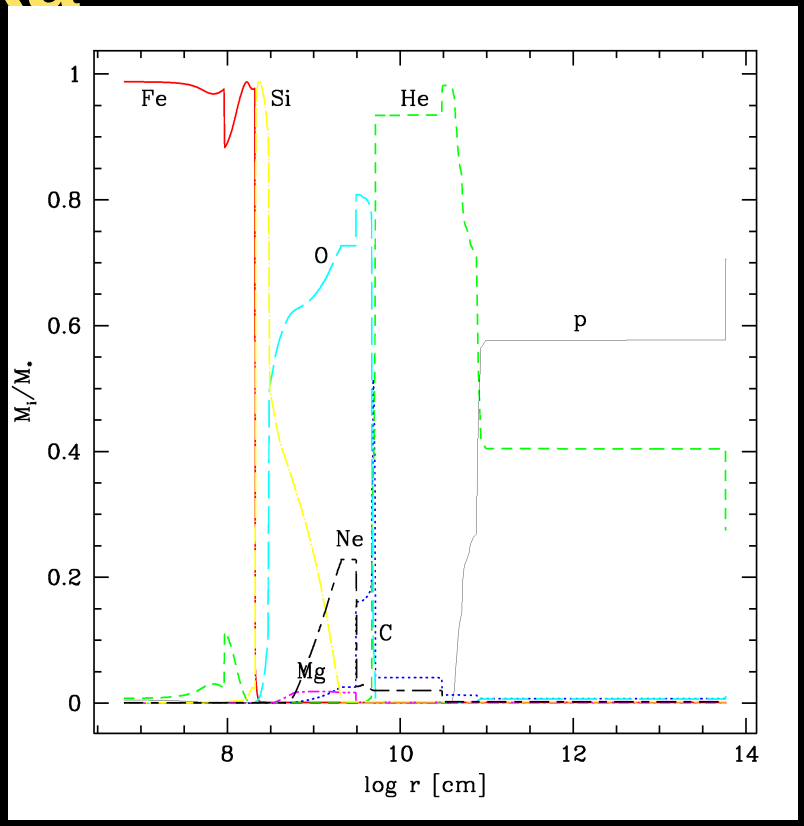
$$l_{crit} = 2GM_{BH}/c\ (2-A+2(1-A)^{1/2})^{1/2}$$

Jak długo może trwać błysk?

Model pre-SN : żelazne jądro + otoczka

Rozkład masy i gęstości w gwieździe pre-SN





Skład chemiczny
(dane z Woosley & Weaver 1995)

Jak rotuje gwiazda?

Rozkład specyficznego momentu pędu w gwieździe pre-SN nieznany.

Można zrobić kilka założeń:

- Zależność od kąta biegunowego (rotacja różniczkowa)
- Zależność od promienia (rotacja sztywna, konieczny limit l_{spec})
- Stały stosunek siły grawitacyjnej do odśrodkowej

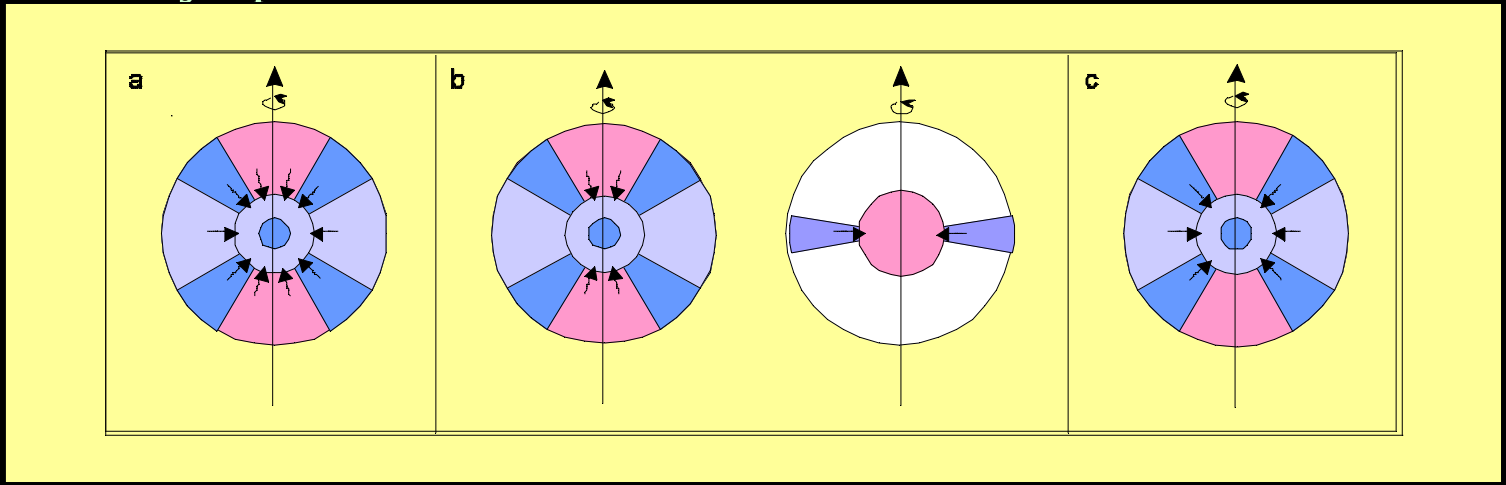
$$l_{spec} = l_0 (1-\cos\theta)$$

$$l_{spec} = l_0 (r/r_{in})\sin^2\theta$$

Jak czarna dziura rośnie podczas akrecji

Ewolucja kolapsara => procedura iteratywna

1. Masa CD = masa jądra żelaznego
2. Akreują kolejne powłoki z otoczki gwiazdy
3. Sprawdzamy warunki zadane przez wzrastającą masę CD i zmienny spin



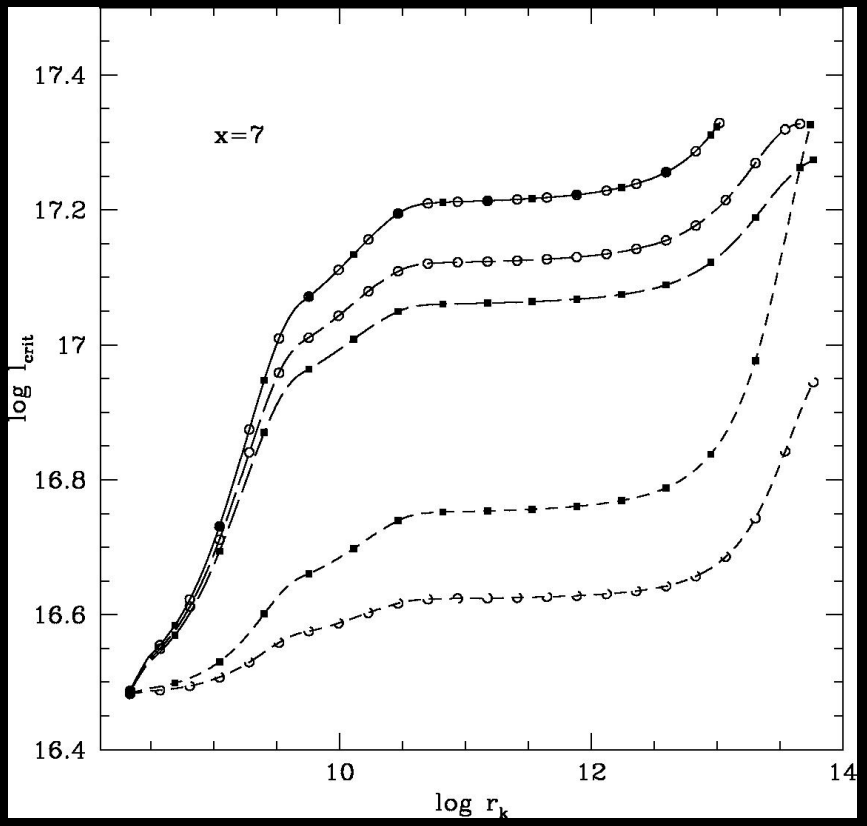
Różne możliwe scenariusze akrecji

(Janiuk & Proga 2008)

Krytyczny moment pędu podczas kolapsu

Większe l_{crit} => mniej materii otoczki może uformować torus

Nie ma torusa => koniec GRB

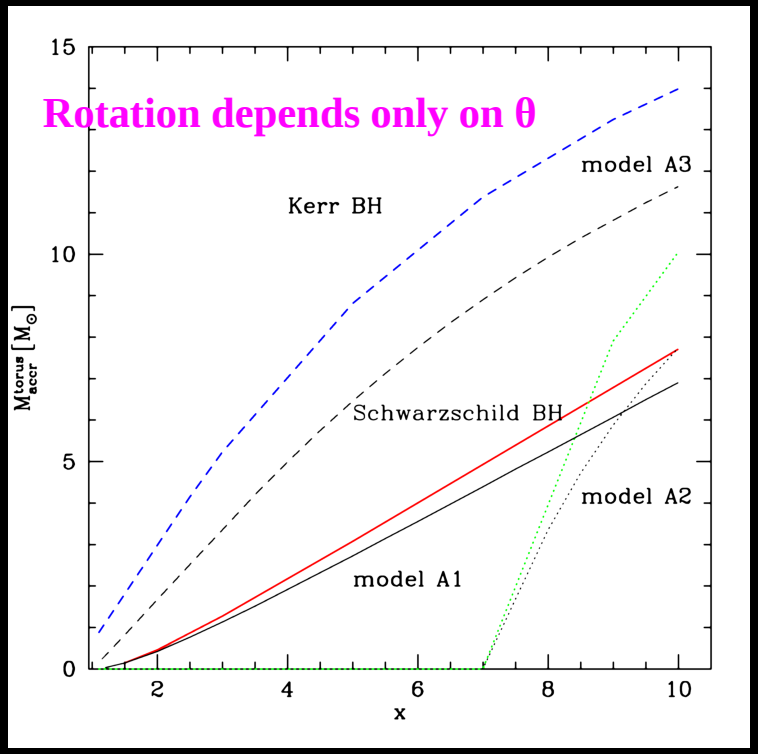


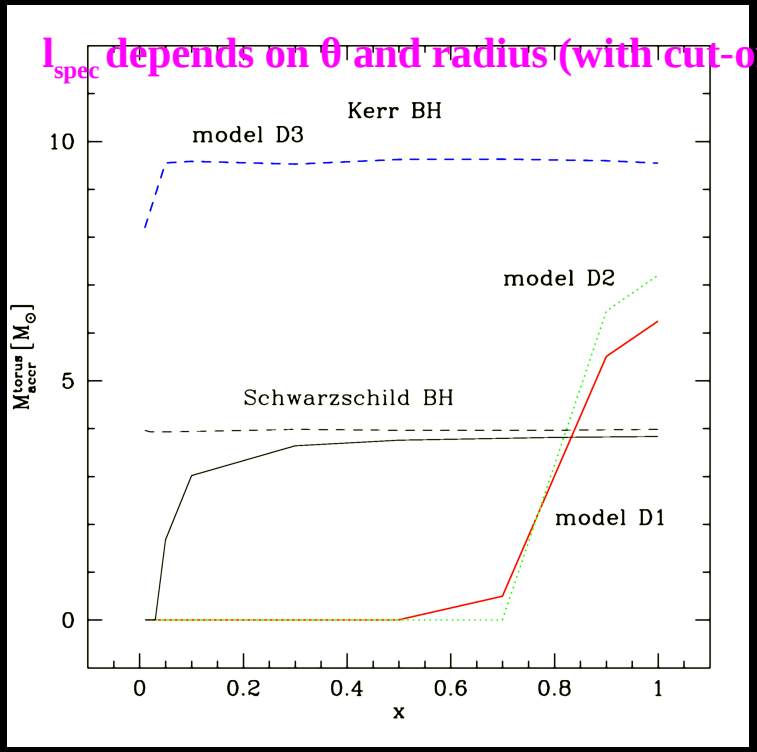
Przypadek CD Schwarzschilda

(Janiuk & Proga, 2008, ApJ, 675, 519)

Jak długo trwa błysk?

Stałe tempo akrecji => Czas trwania błysku gamma proporcjonalny do masy zaakreowanej przez torus



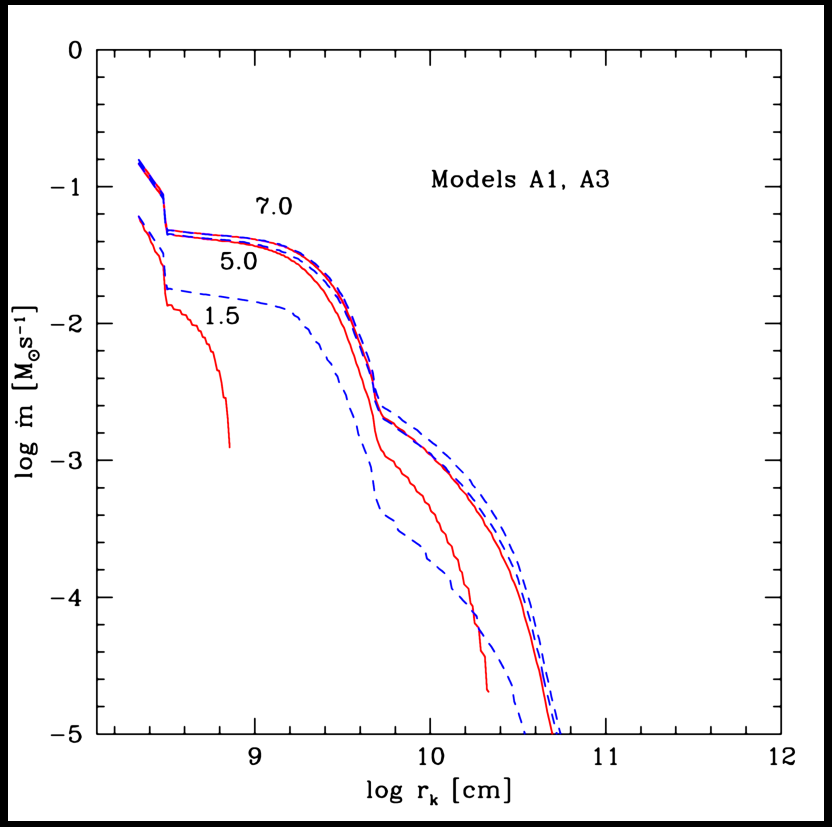


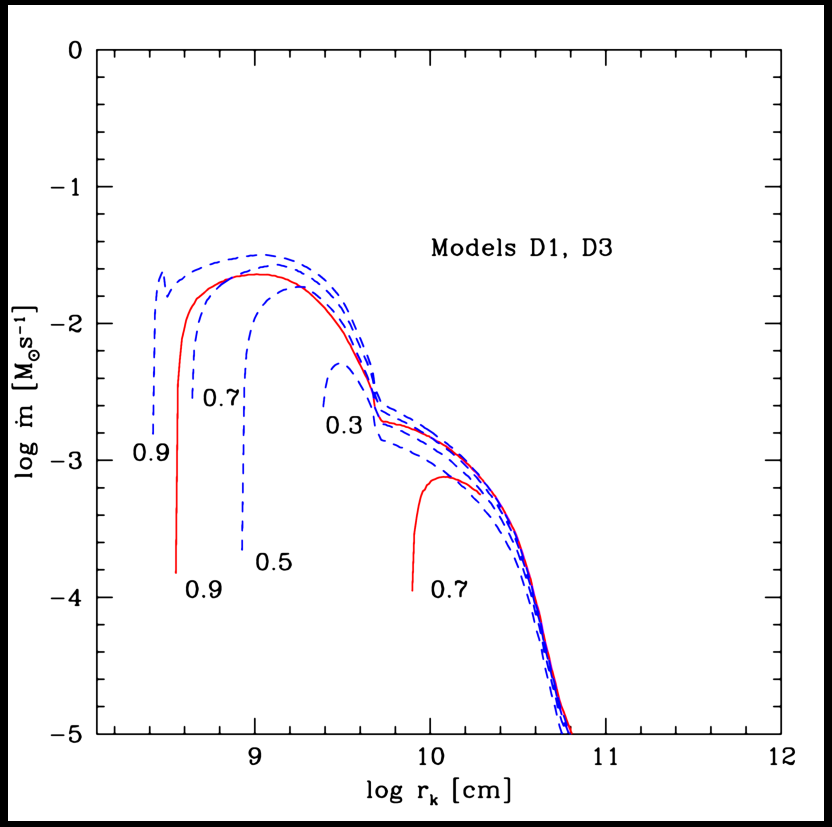
Masa zaakreowana w torusie. Wszędzie jako funkcja początkowej normalizacji l_{spec} dla różnych modeli rotacji i akrecji

2 przypadki: 1) Schwarzschild (Janiuk & Proga 2008)

2) Kerr (Janiuk, Moderski & Proga, 2008)

Ale tempo akrecji nie jest stałe



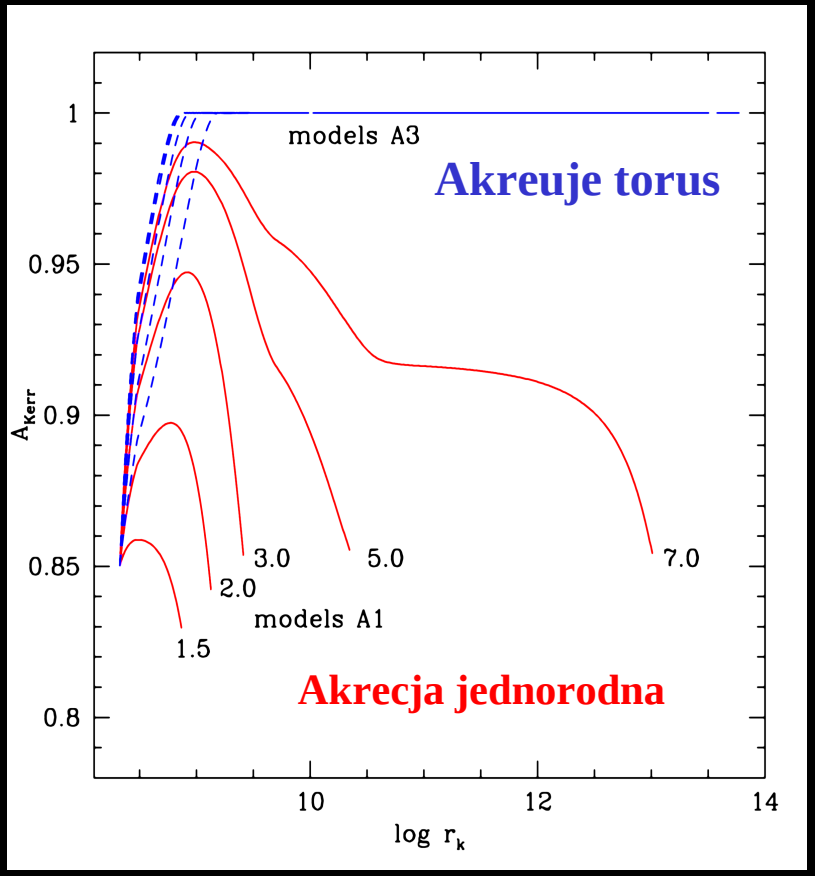


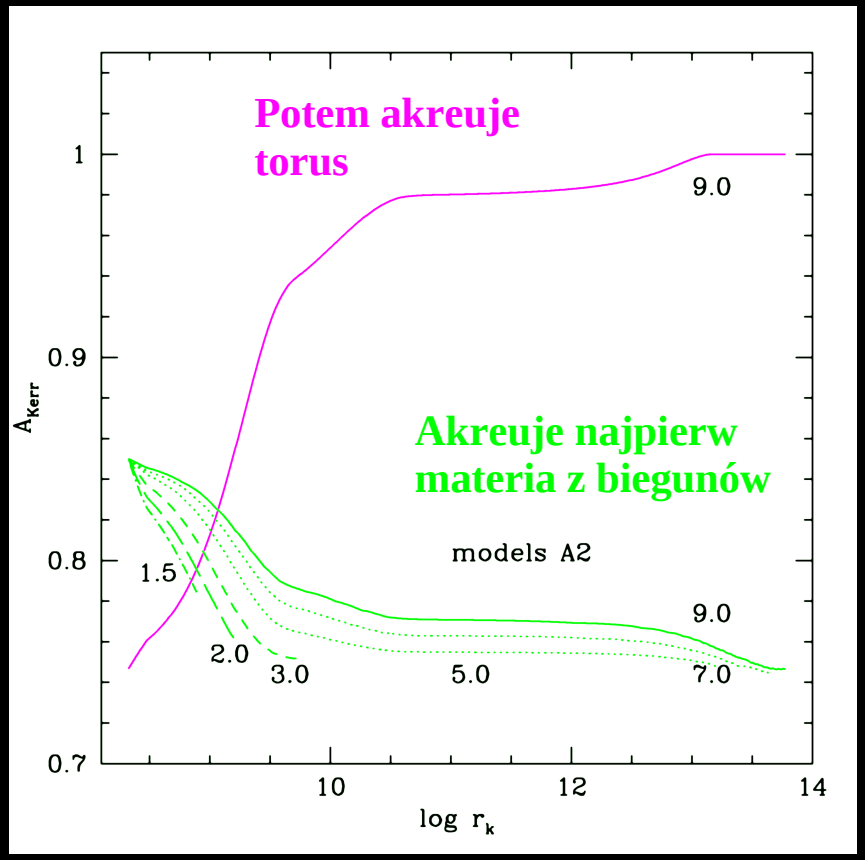
Anihilacja neutrin niewydajna gdy mdot < 0.01 M_{sun}/s

(e.g. Popham et al. 1999; Di Matteo et al. 2002; Janiuk et al. 2004; 2007)

=> koniec GRB

Ewolucja spinu czarnej dziury

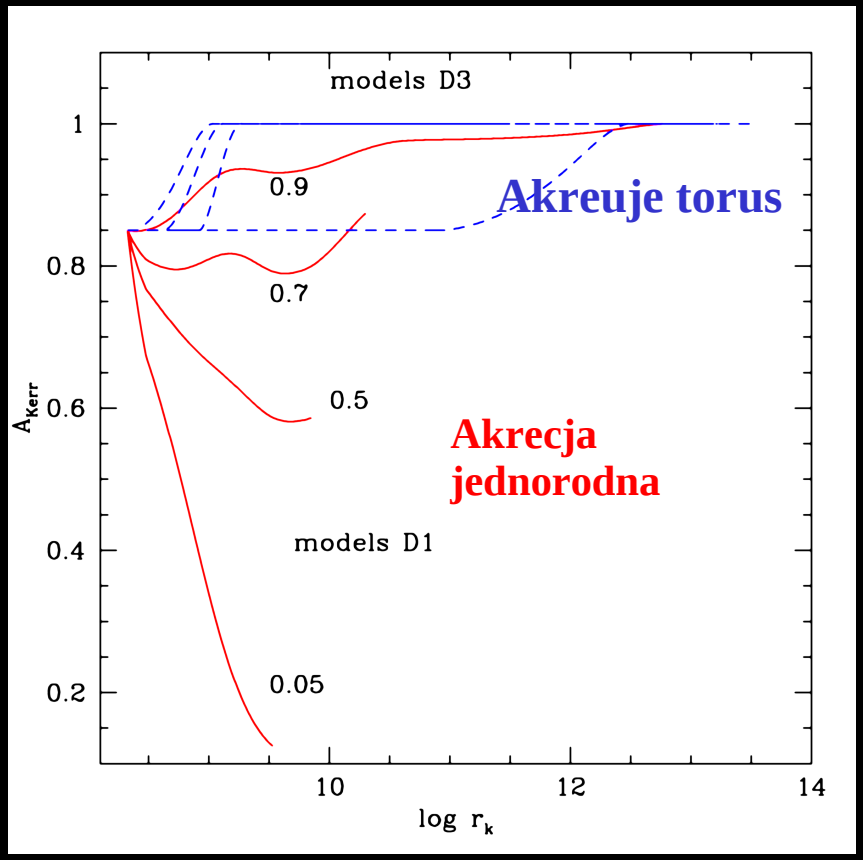


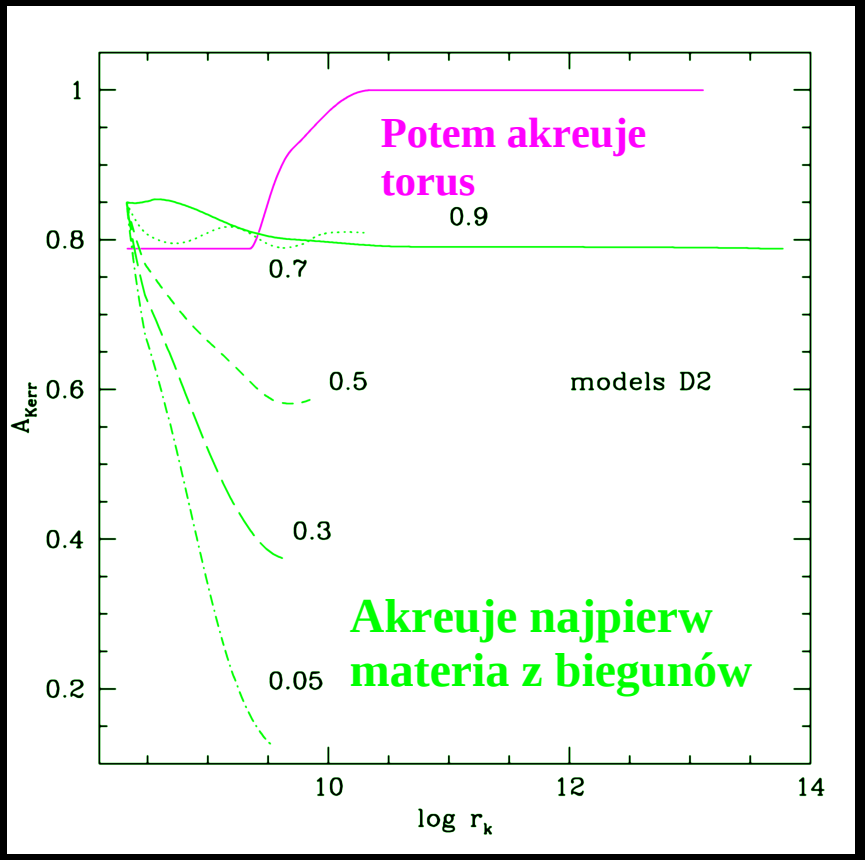


Modele z rotacją różniczkową

Mechanizm B-Z niewydajny gdy A < 0.9 (Blandfor-Znajek 1977; McKinney 2005)

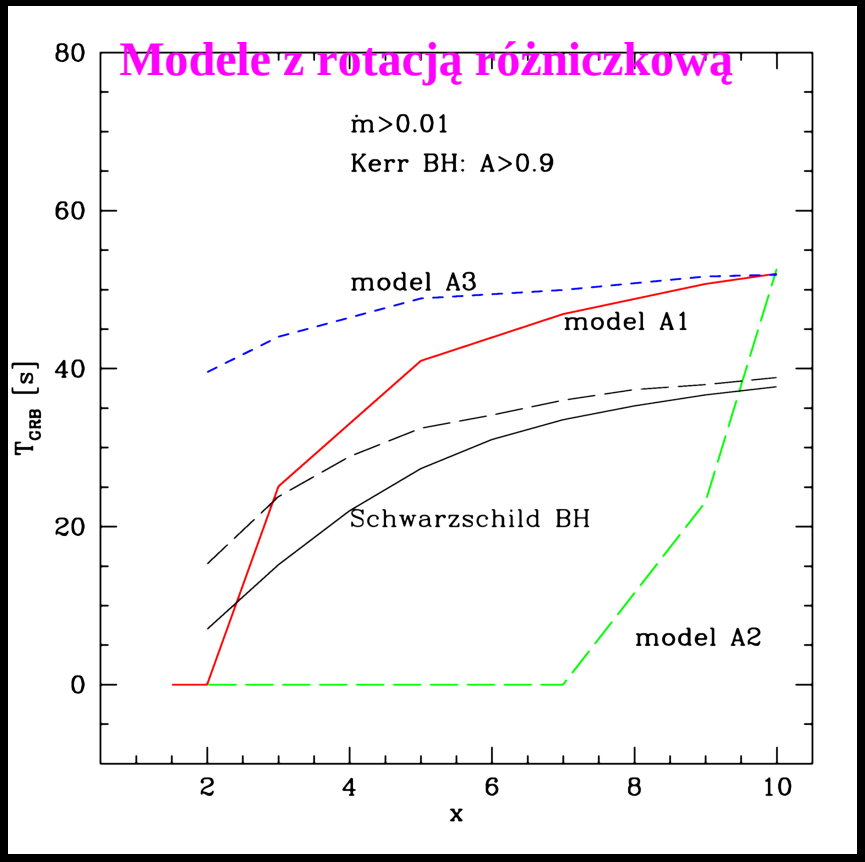
...CD może nawet całkowicie wyhamować

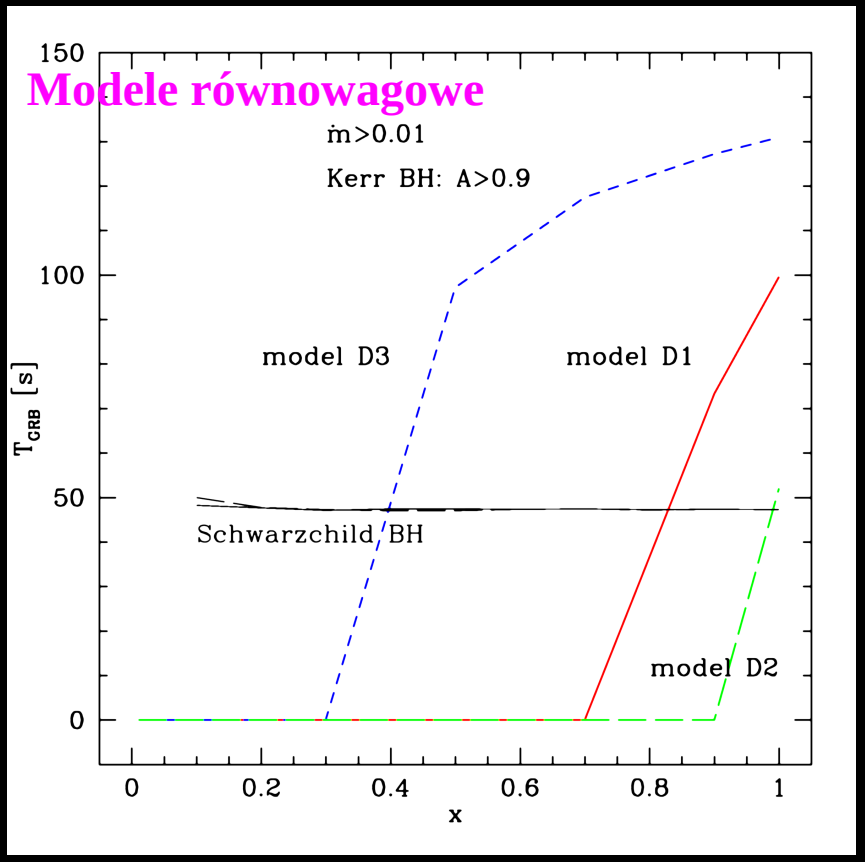




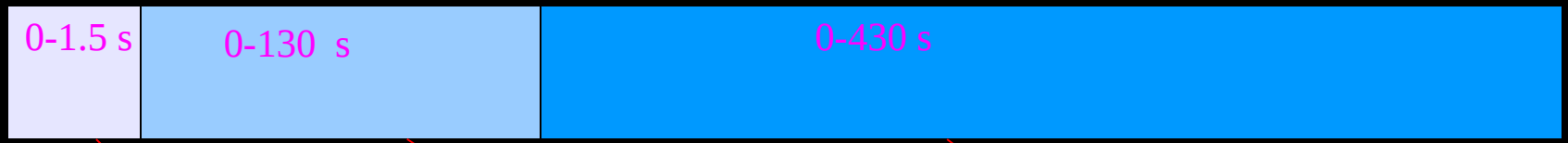
Modele rotacji z równowagą siły grawitacyjnej i odśrodkowej

GRB: Duże tempo akrecji i rotująca CD





Trzy rodzaje dżetu

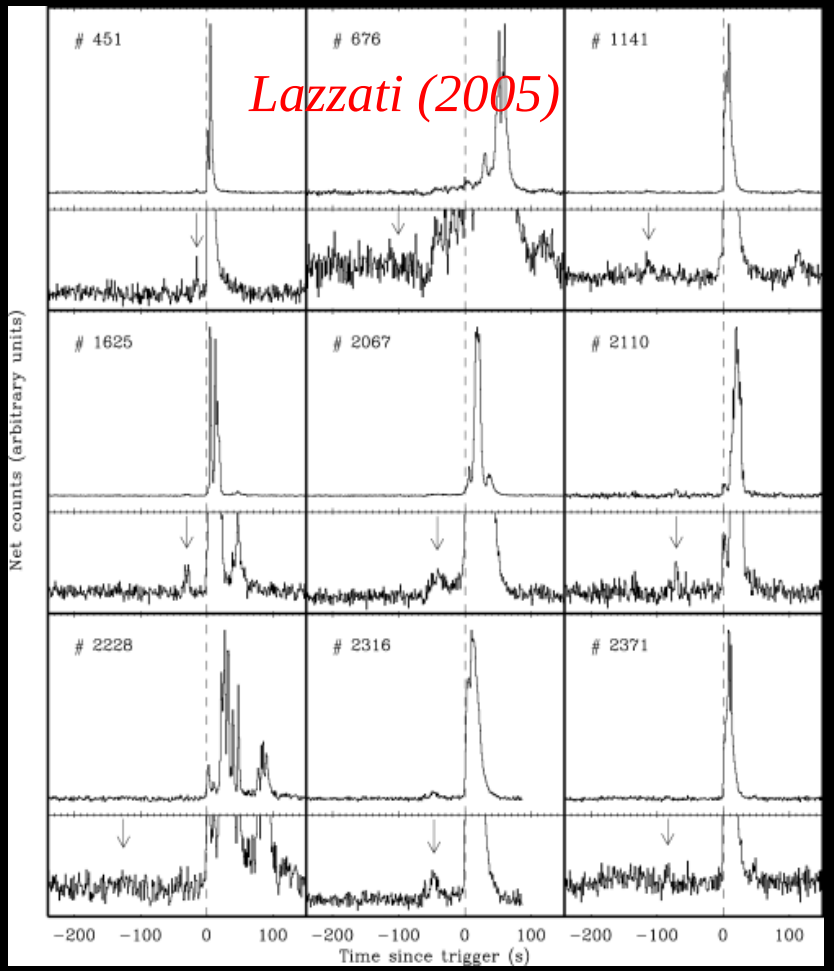


Prekursor,
zasilany przez ν-ν̄
duże ṁ, małe A

Pierwszy dżet,
zasilany przez ν-ν̄
oraz B-Z
duże ṁ, duże A

Drugi dżet, zasilany
przez B-Z
małe ṁ, duże A

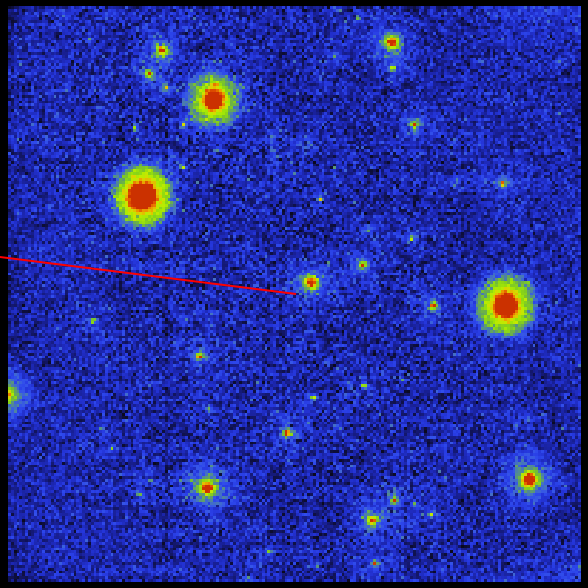
- Prekursory występują w niektórych błyskach: próbka BATSE
- Ok. 20% błysków w próbce Lazzati (2005) ma prekursor
- Odstęp między prekursorem a błyskiem: kilkadziesiąt-200 sek.



Błysk 0803319B

- Najjaśniejszy towarzysz optyczny: $m_v = 5.3$

- Dopasowany do danych empiryczny model 2-składnikowego dżetu, o różnych indeksach widmowych i kątach rozwarcia dżetu: $\theta = 2°$ oraz $\theta = 4°$



Obserwacja "Pi of the sky", http://grb.fuw.edu.pl

(Racusin et al. 2008, Nature; astro-ph/0805.1557)

Podsumowanie

- Czasy trwania długich błysków gamma mogą dać ograniczenia na modele rotacji gwiazd pre-SN.
- Realistyczne modele rotacji dają masę otoczki zaakreowaną poprzez torus nie większą niż 4-15 M_{sun}.
- Jeśli dżet jest zasilany przez *anihilację neutrin* (przypadek CD Schwarzschilda), to warunek na minimalne tempo akrecji daje czas pracy silnika GRB <= 40-100 s.
- Dla dżetów zasilanych przez *neutrina oraz rotację CD*, warunek na *minimalne tempo akrecji oraz spin CD,* daje czas pracy silnika GRB do 50-130 s.
- W modelach CD Kerra, postulujemy obecność 3 rodzajów dżetu: prekursor, pierwszy dżet i drugi dżet, zasilane przez mechanizm 1, 2, lub obydwa. Możliwe, że kąty rozwarcia tych dżetów są różne, co może być źródłem istotnych efektów obserwacyjnych.

Plany na przyszłość

- Modelowanie kolapsu gwiazdy pre-SN z uwzględnionym wpływem rotacji na strukturę wewnętrzną, transportem momentu pędu, konwekcją, niestabilnościami HD *(kod ewolucyjny Yoon & Langer 2005)*;
- W szczególności zbadanie wpływu metaliczności; *współpraca: R. Detmers, N. Langer, S.C Yoon;*

obserwacje SWIFTA pokazują że obfitości pierwiastków są dużo poniżej słonecznych (Campana et al. 2008)

- Modelowanie błysku gamma pochodzącego ze zderzenia się gwiazdy WR z czarną dziurą