

爆発的コンパクト天体現象の理論研究：
何がわかっていて何がわかっていないのか？

諏訪 雄大

(京都大学基礎物理学研究所)

僕と夏の学校

- ss05 (M1): 初参加。多くの友人と出会う。
- ss06 (M2): 引き続き参加。
- ss07 (D1): コンパクトセッション座長。
- ss08 (D2): 引き続き参加。事務局引き継ぎも。
- ss09 (D3): 夏の学校事務局(教頭)として参加。
- ss13 (今年): コンパクトセッション招待講演。

目次

1. コンパクト天体の引き起こす爆発現象
2. 超新星爆発
3. ガンマ線バースト
4. まとめ

コンパクト天体と高エネルギー天体现象

Active galactic nuclei

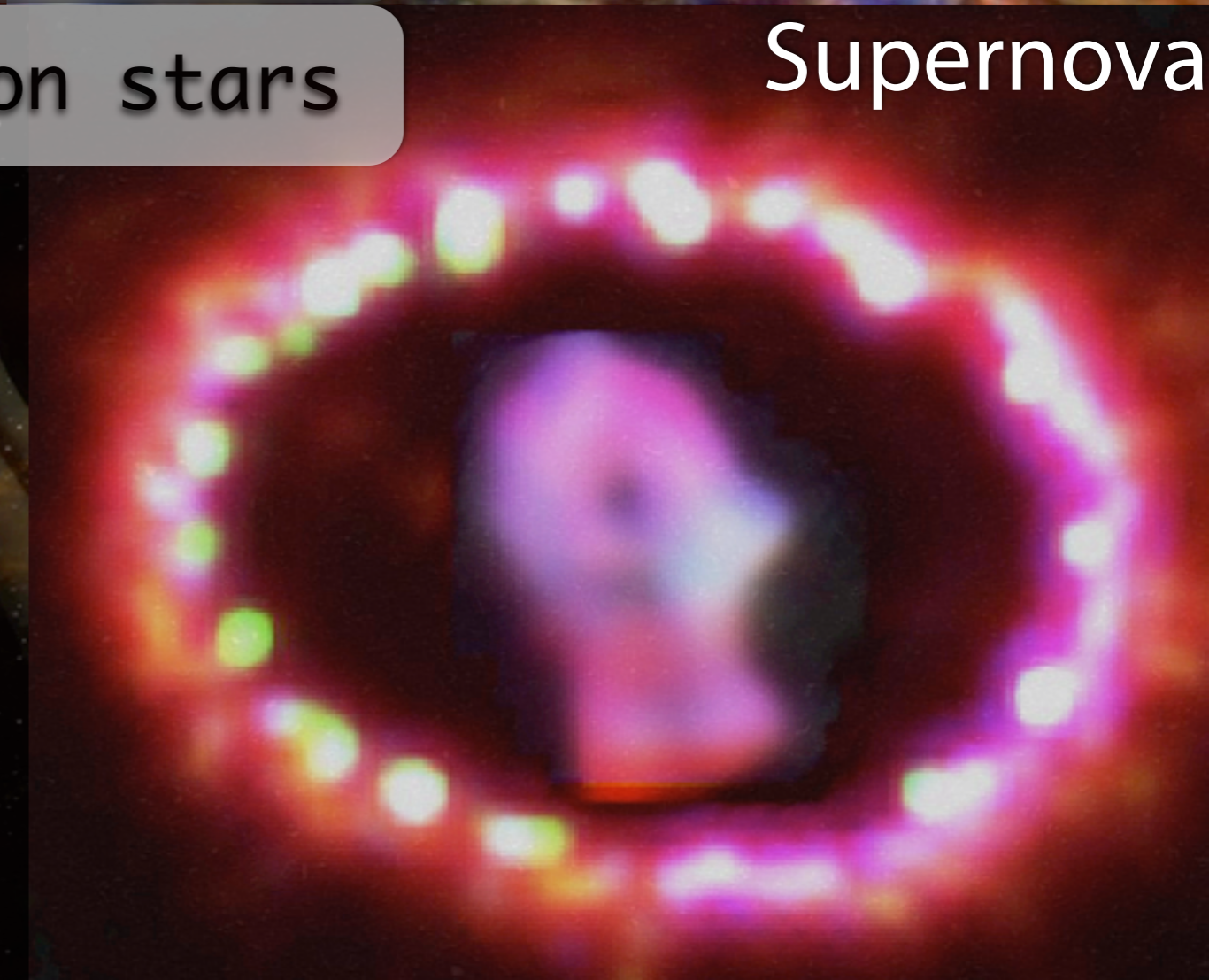
Black holes

Gamma-ray burst

Magnetar

Neutron stars

Supernova



なぜコンパクト天体か？

● エネルギー

- ▶ コンパクト天体は非常に半径が小さい。それゆえ、解放できる重力エネルギーが大きい

$$E \approx \frac{3}{5} \frac{GM_c^2}{R_c} = 1.6 \times 10^{53} \text{ erg} \left(\frac{M_c}{M_\odot} \right)^2 \left(\frac{R_c}{10 \text{ km}} \right)^{-1}$$

● タイムスケール

- ▶ その小ささゆえ、変動のタイムスケールも短い

$$t \approx \frac{R_c}{c} = 3.3 \times 10^{-5} \text{ s} \left(\frac{R_c}{10 \text{ km}} \right)^{-1}$$

短時間で明るさが大きく変動する天体現象を説明するにはコンパクト天体は不可欠

なぜ爆発的現象か？

- 非常に明るい
⇔得られる情報が多い
- 時間スケールが人間のタイムスケール（宇宙で起こっている現象は大抵非常に長いタイムスケールで動いているのに！）
- 遠方まで見通すことができる
⇔昔の宇宙を照らす灯台としての役割

超新星とガンマ線バースト

超新星爆発

ガンマ線バースト

宇宙で最大規模の大爆発

中性子星の形成サイト

ブラックホールの形成サイト(?)

主に可視光で光る

主にガンマ線/X線で光る

熱的ニュートリノが出る

非熱的ニュートリノが出る(?)

ほぼ球形に爆発

ジェット状に爆発

一部の天体は二つの爆発を一緒に起こす

超新星が付随したガンマ線バースト

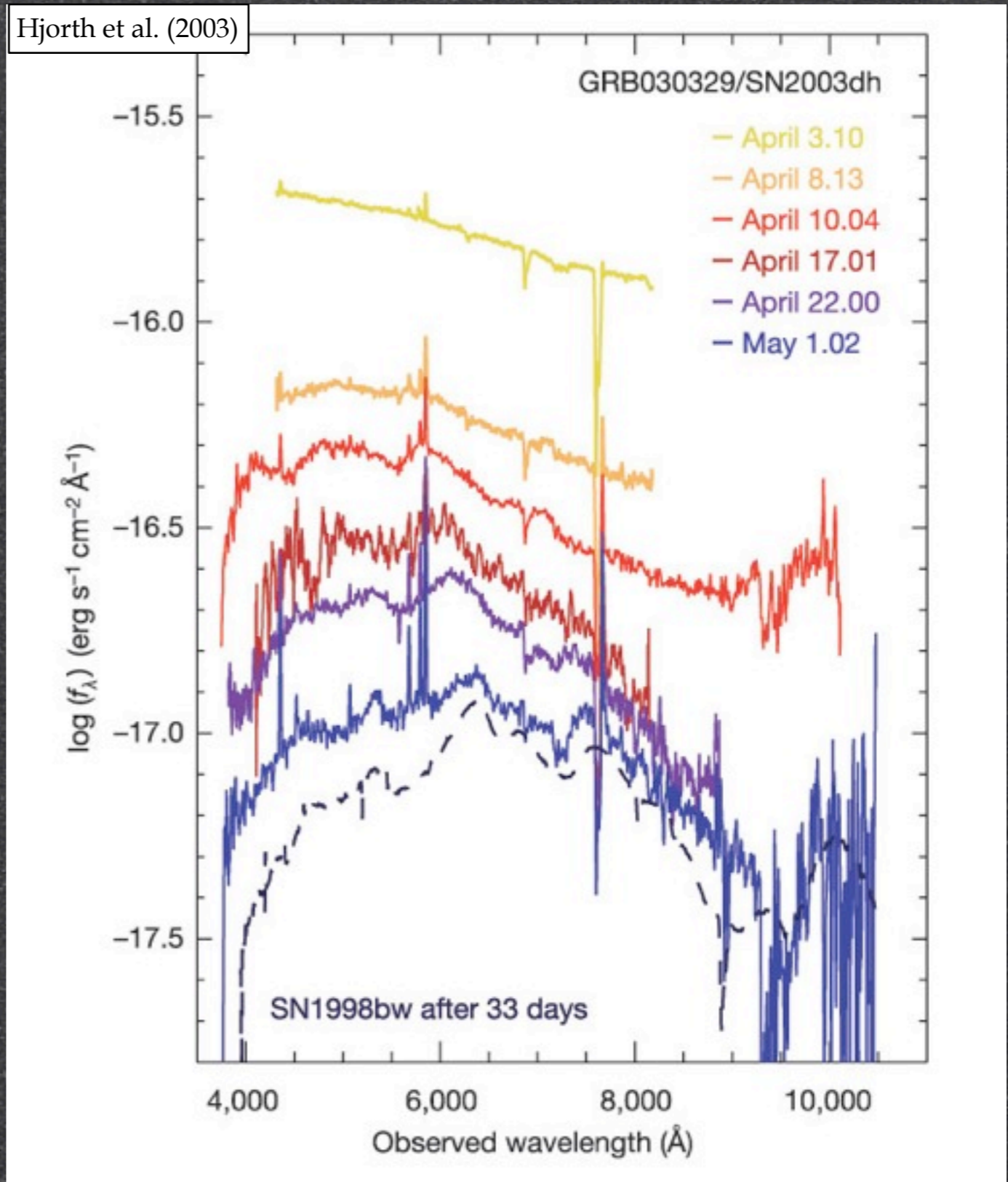
GRB ⇔ SN association

- GRB 980425 / SN 1998bw: ($z=0.0085$)
- GRB 030329 / SN 2003dh: ($z=0.1685$)
- GRB 031203 / SN 2003lw: ($z=0.1055$)
- XRF 060218 / SN 2006aj: ($z=0.0334$)
- XRF 100316D / SN 2010bh: ($z=0.0591$)
- GRB 120422A / SN 2012bz ($z=0.283$)
- GRB 130427A / SN 2013cq ($z=0.34$)

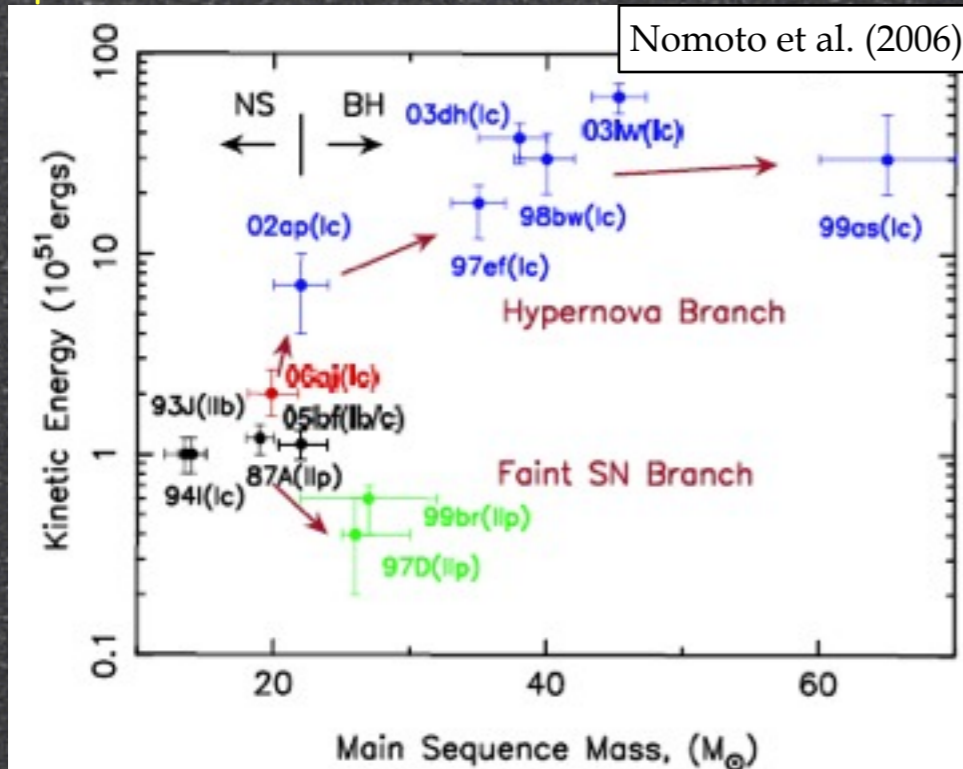
GRBを付随する超新星は爆発エネルギーが通常の超新星よりも大きい極超新星？

$$E_{\text{exp}} \sim 10^{52} \text{ ergs}$$

Hjorth et al. (2003)



Nomoto et al. (2006)



1. 超新星

明るい変動天体



SN2011fe

超新星の種族

超新星

水素なし

水素あり

I型

II型

シリコンあり

シリコンなし

明るさ

w/ narrow emission lines

ヘリウムあり

ヘリウムなし

時間

Ia型

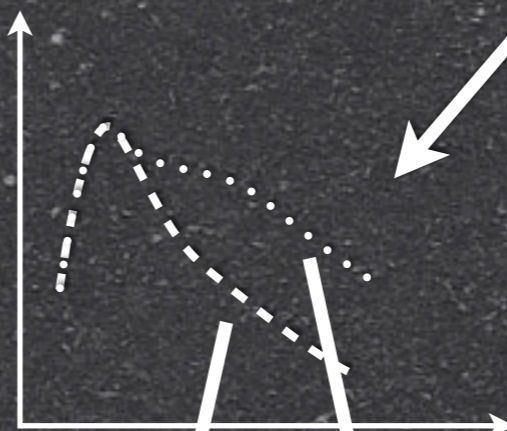
Ib型

Ic型

IIL型

IIP型

IIIn型



超新星の種族

超新星

水素なし

水素あり

I型

II型

シリコンあり

シリコンなし

明るさ

w/ narrow emission lines

ヘリウムあり

ヘリウムなし

時間

Ia型

Ib型

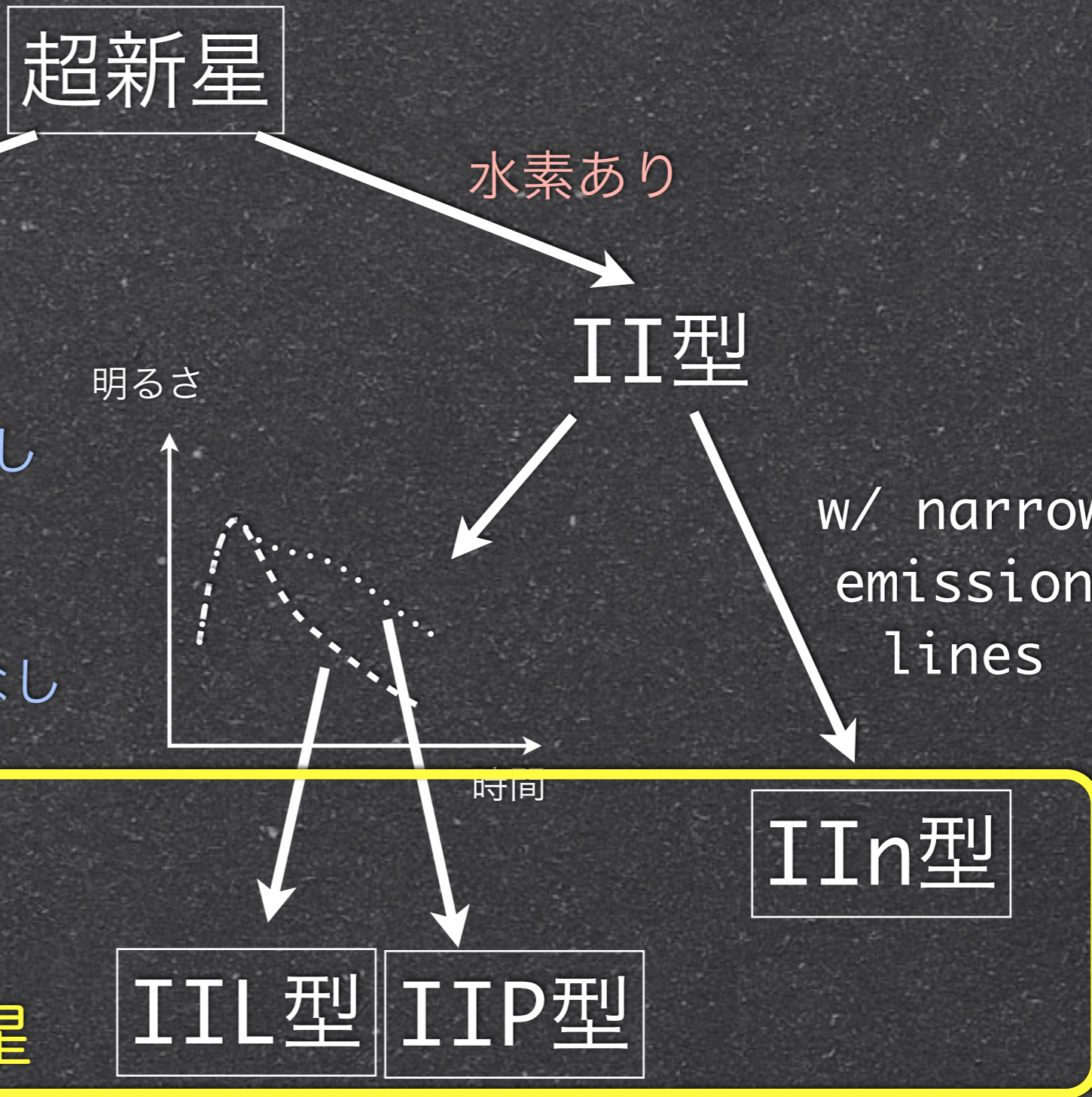
Ic型

IIIn型

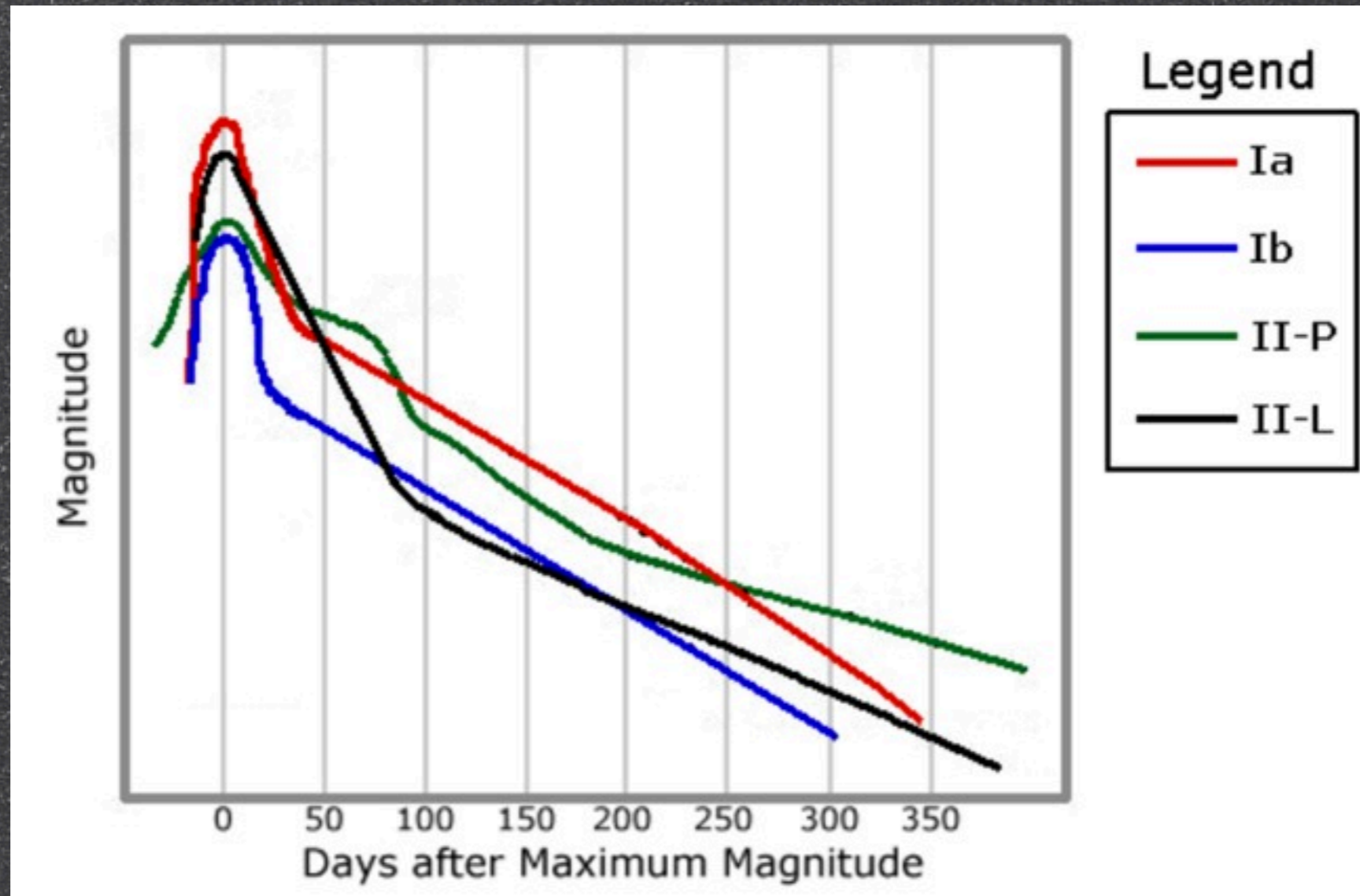
IIL型

IIP型

重力崩壊型超新星



光度曲線



- 超新星がどのように光るかは非常によく分かっている
 - ▶ 吹き飛ばされた外層の質量
 - ▶ 内部で作られた Ni の量

重力崩壊型超新星



- 宇宙で最も激しい爆発の一つ
 - ▶ 爆発エネルギー： 10^{51} erg (TNT火薬 10^{35} トン=地球10兆個分)
 - ▶ 解放される重力エネルギー： 10^{53} erg ($\sim 0.1 M_{\odot} c^2$)
 - ▶ ニュートリノで持ち出されるエネルギー： 10^{53} erg
- 中性子星やブラックホールを形成する
- 全ての既知の相互作用の全てが等しく重要

● 巨視的物理

▶ 重力

重力崩壊

▶ 電磁気力

強磁場中性子星形成

● 微視的物理

▶ 弱い相互作用

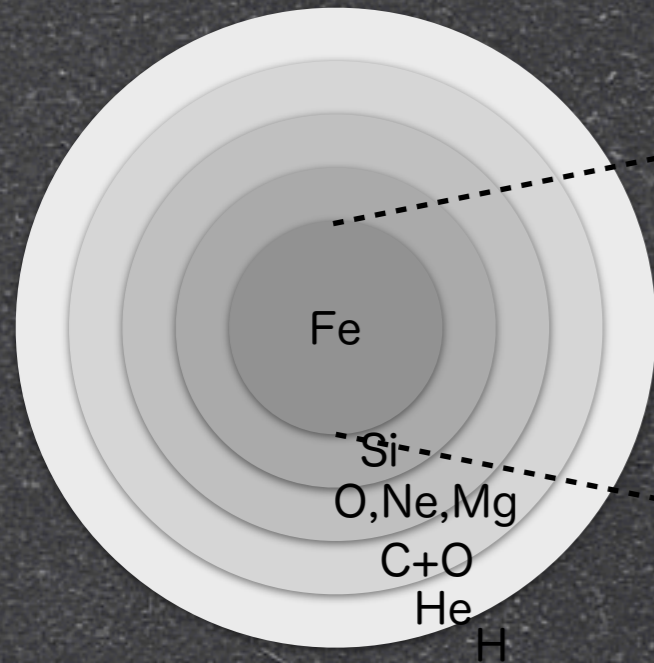
ニュートリノ反応率

▶ 強い相互作用

高密度核物質の情報

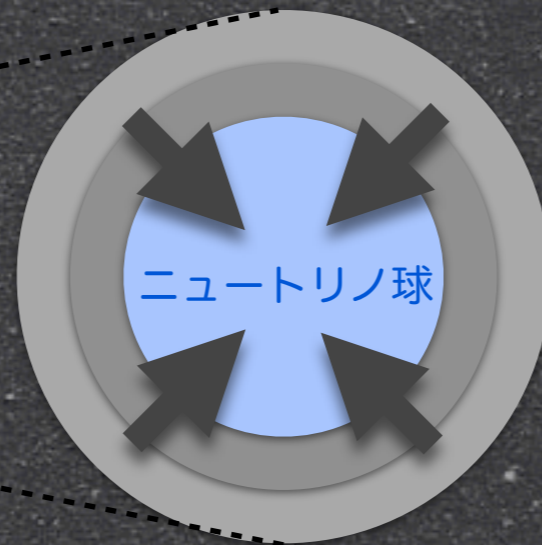
星の進化から超新星爆発へ

星の進化の最終段階



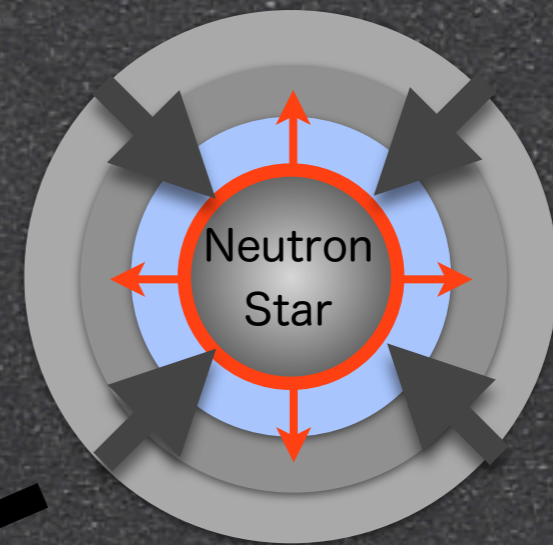
$\rho_c \sim 10^9 \text{ g cm}^{-3}$

ニュートリノ球形成
(ニュートリノトラップ)



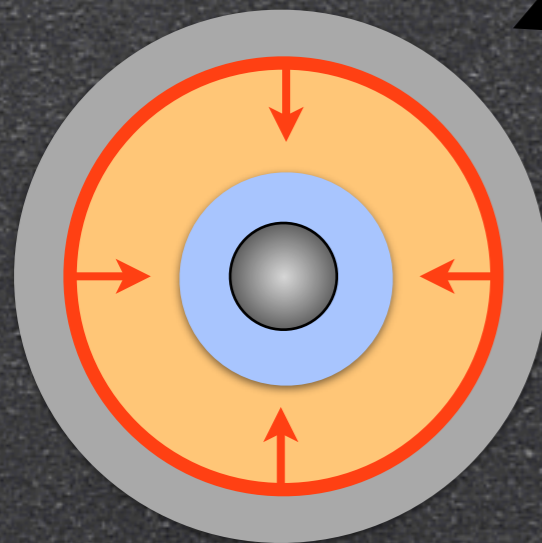
$\rho_c \sim 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$

中性子星形成
(バウンス)

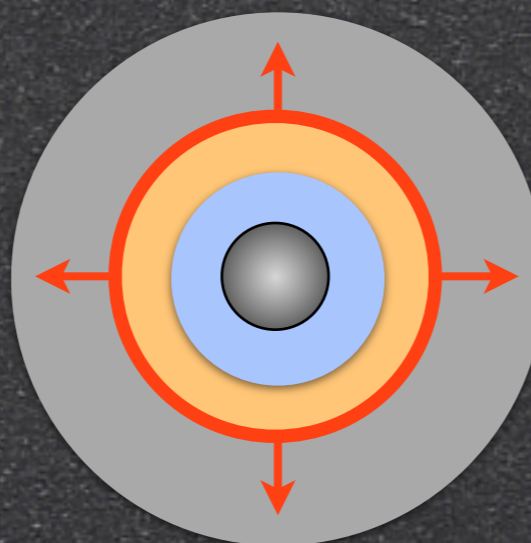


$\rho_c \sim 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$

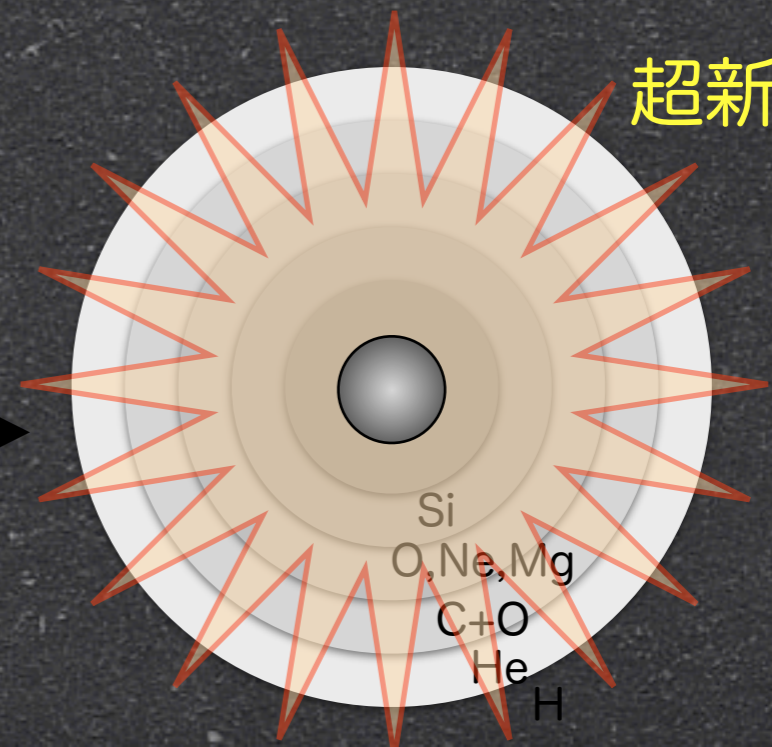
衝撃波の停滞



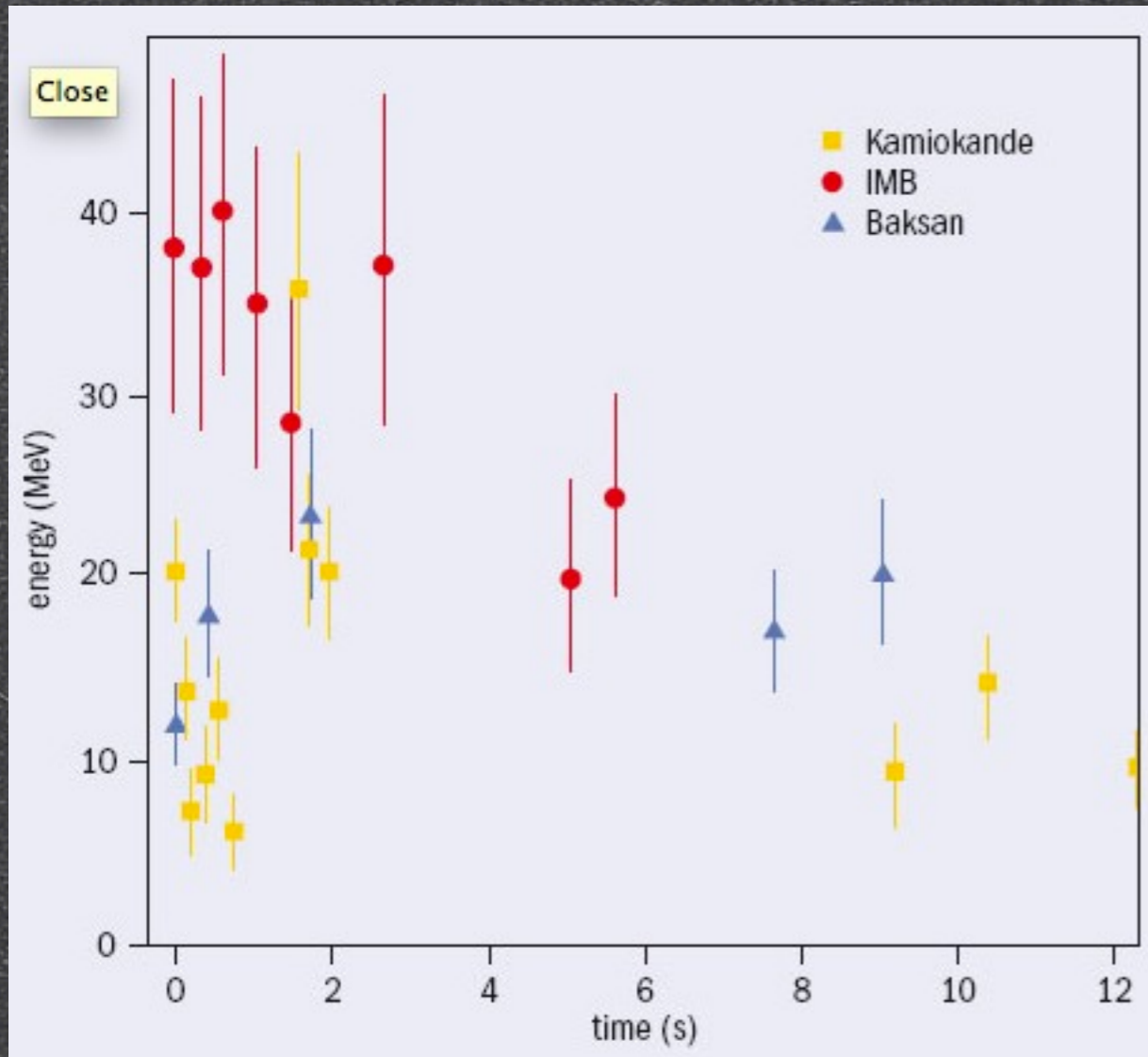
衝撃波の復活



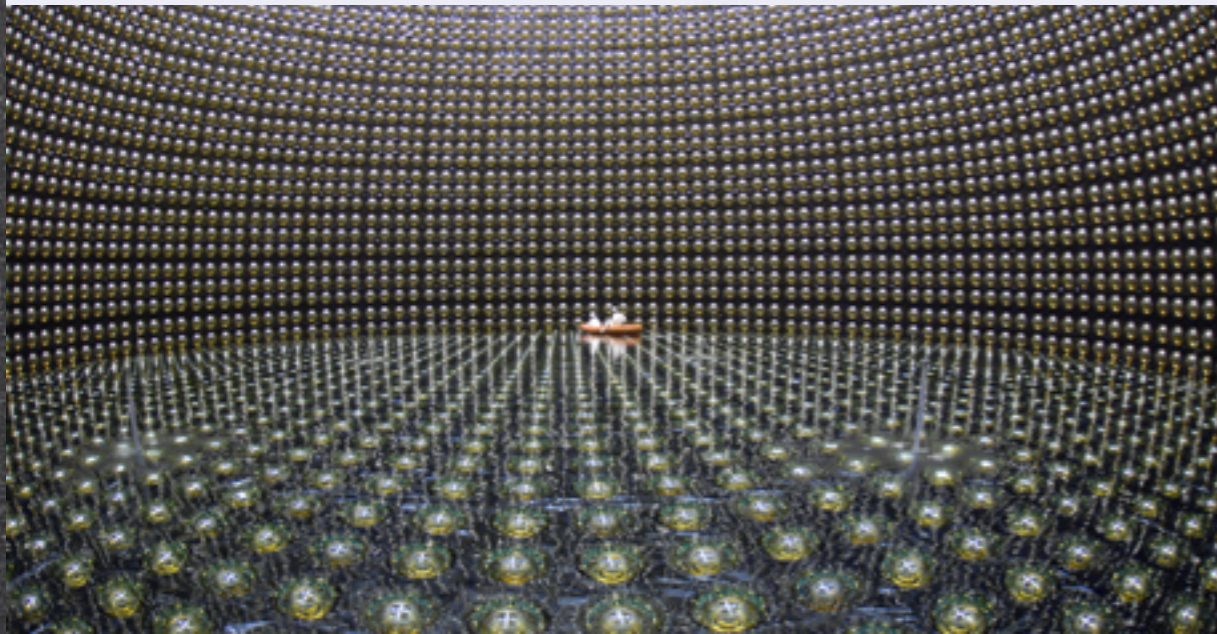
超新星爆発!



超新星ニュートリノ検出と理論モデルの確証

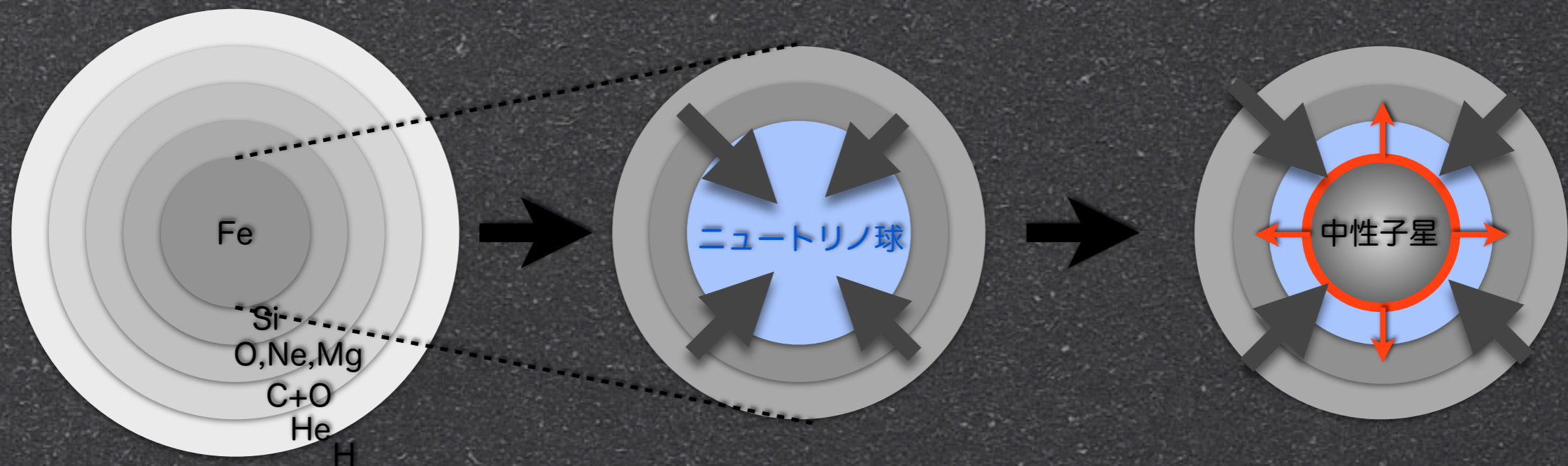


- 超新星からは膨大な量のニュートリノが放出される
- 超新星1987Aから20個程度のニュートリノが検出された。日本のKamiokande、米国のIMB、ロシアのBaksan
- **これが最初の超新星ニュートリノの検出**
- ニュートリノの放出時間はおよそ10秒程度で、爆発理論の正しさが初めて観測的に実証された
- 現在、**Super-Kamiokande** が稼働中。超新星が起こるのを今かと待ち構えている



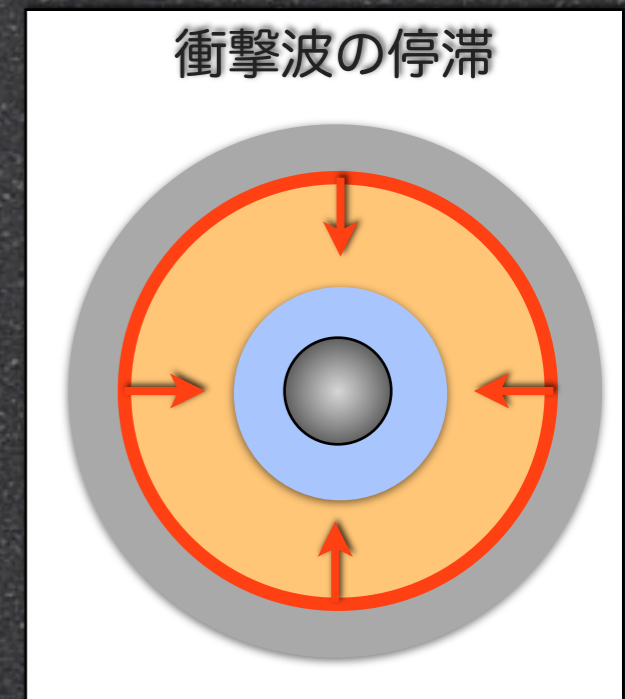
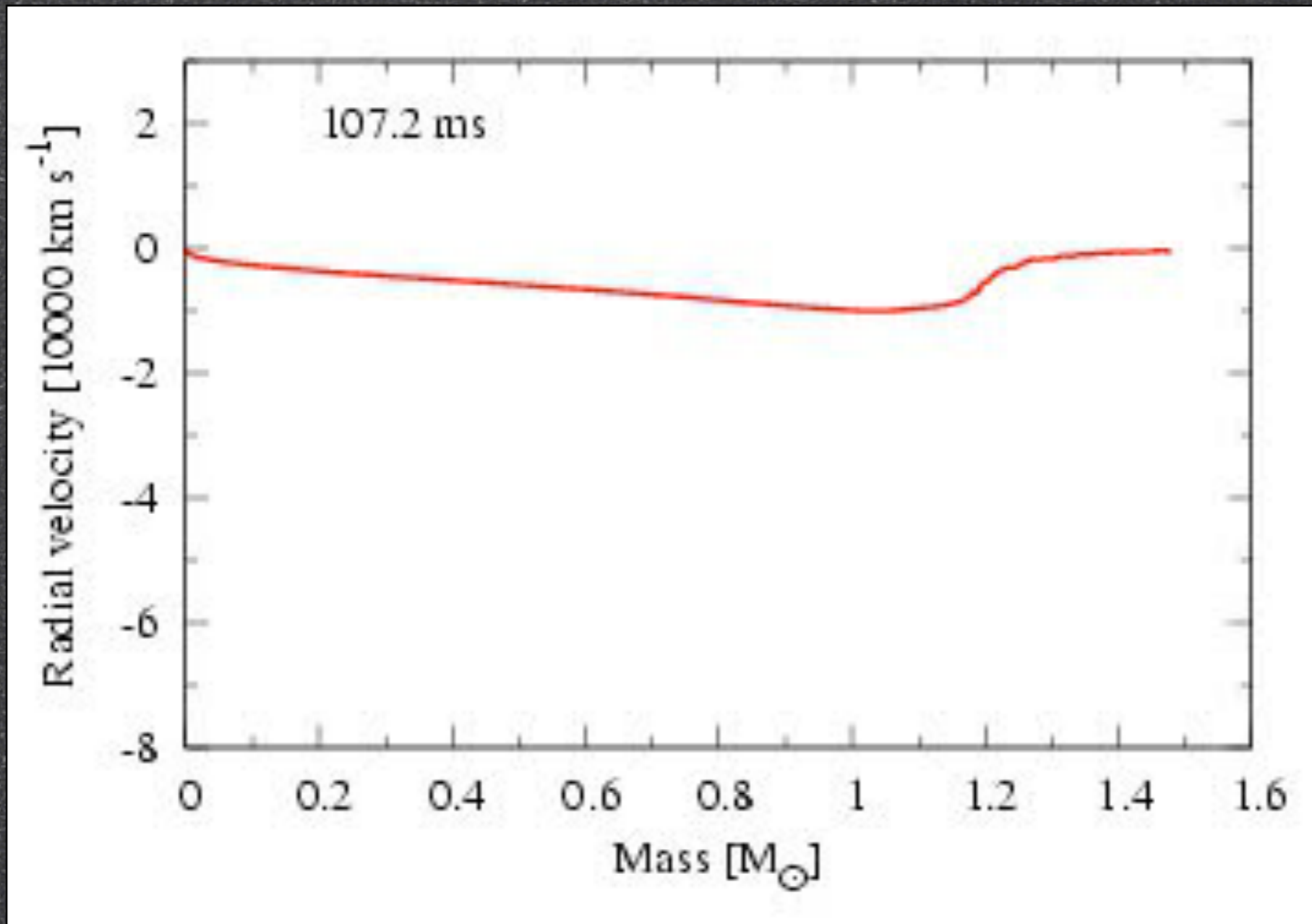
超新星のシナリオ

- 質量が太陽の十倍以上の星は中心に鉄コア形成
- 電子捕獲反応、鉄の光分解反応→鉄コア崩壊
- 核密度を超えると状態方程式が硬くなる→core bounce
- コア表面で衝撃波形成、伝搬→外層を吹き飛ばせばいい（“即時爆発”）



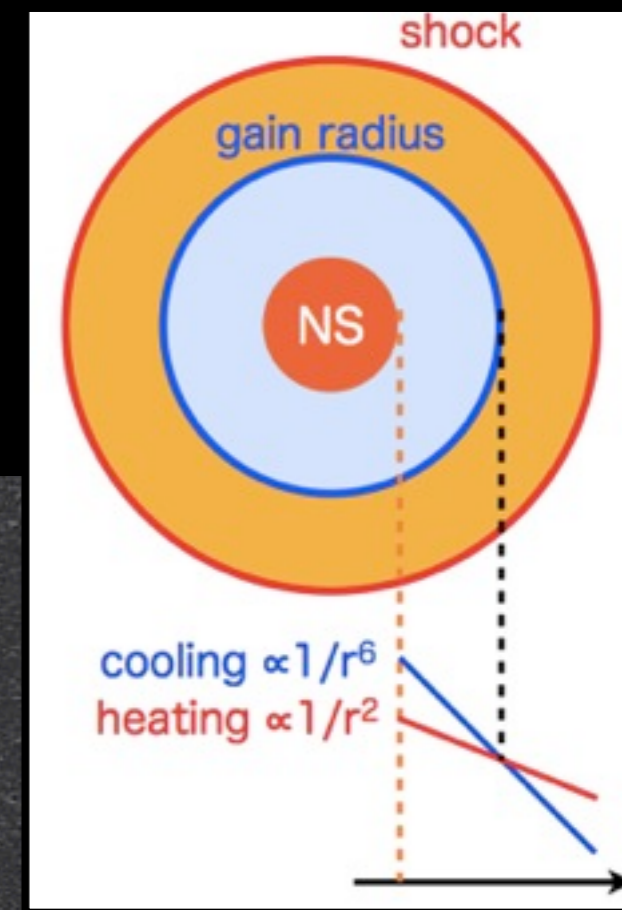
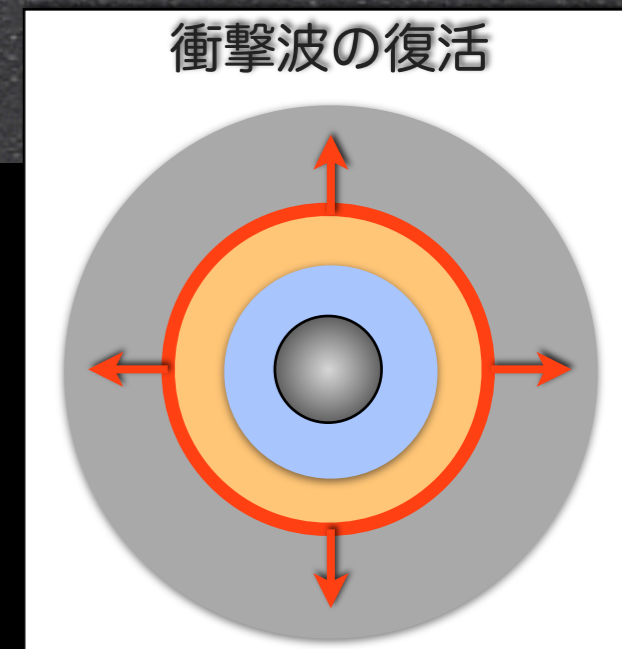
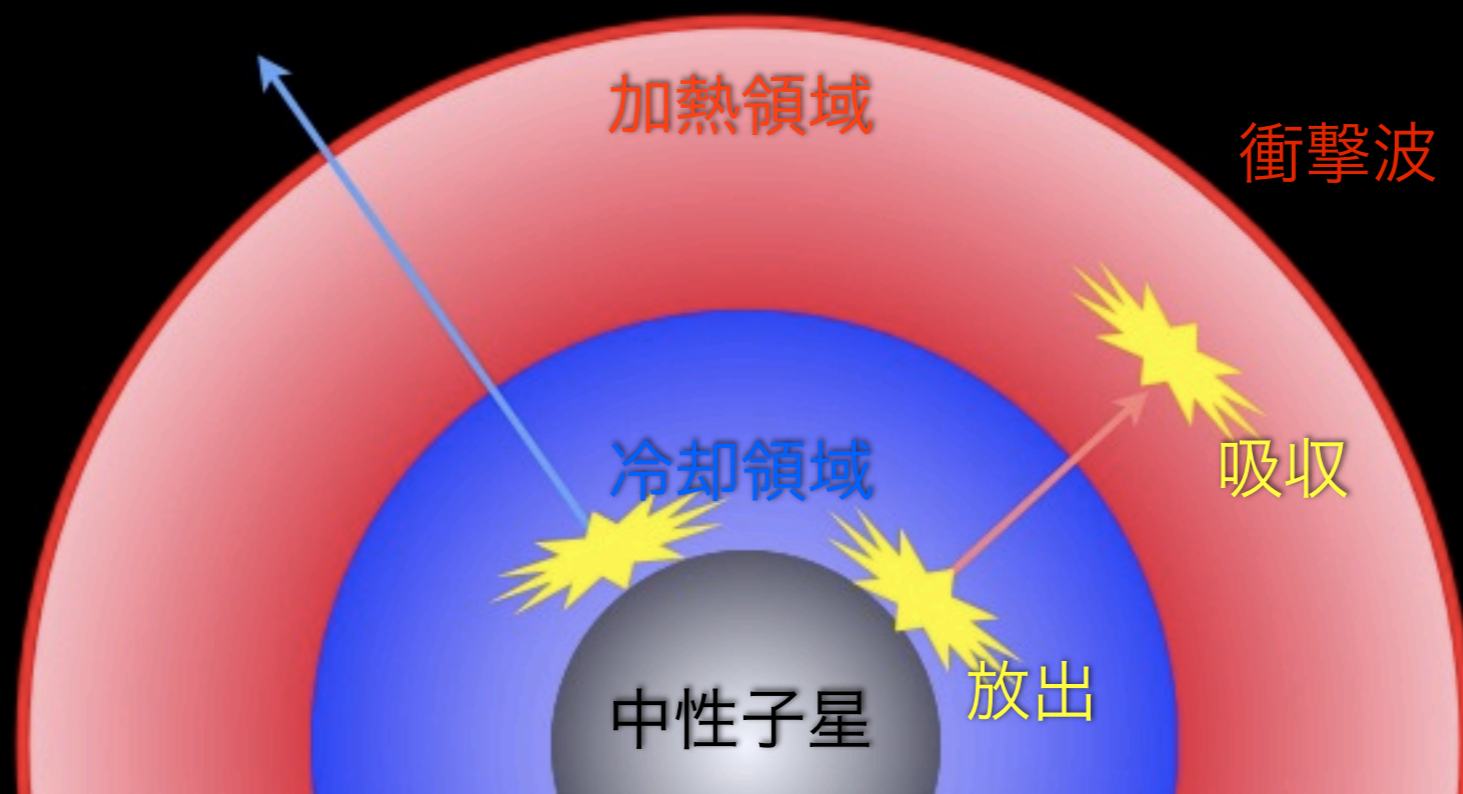
衝撃波の停滞

- しかし、衝撃波は止まってしまふ（鉄の光分解、電子捕獲に寄るニュートリノ放出のため）



ニュートリノ加熱機構

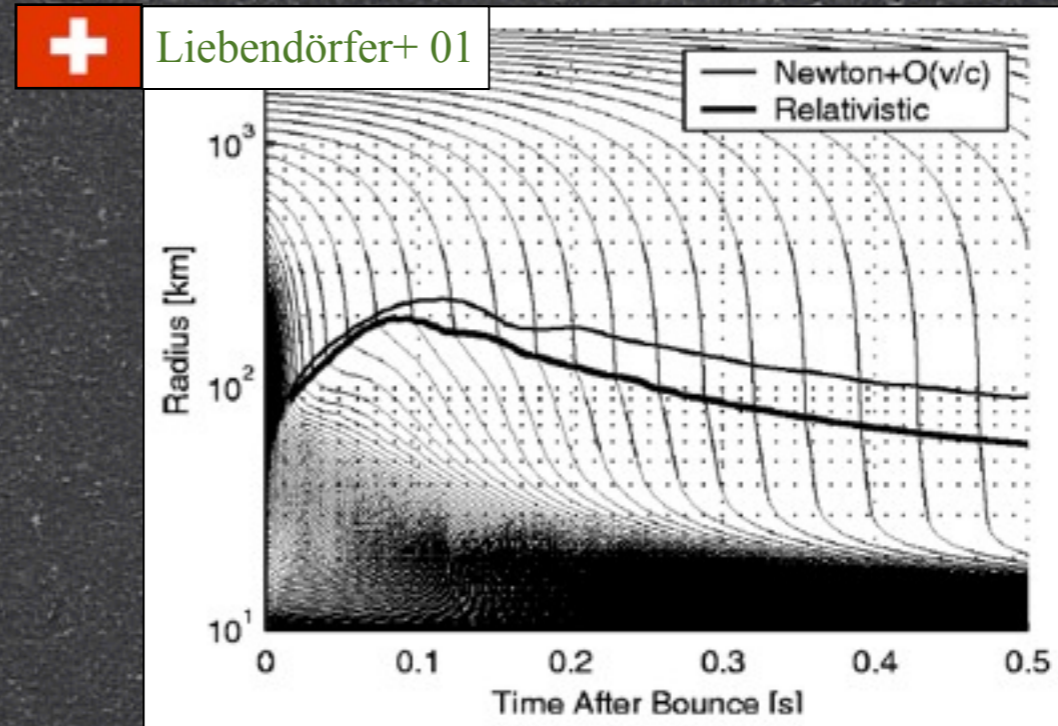
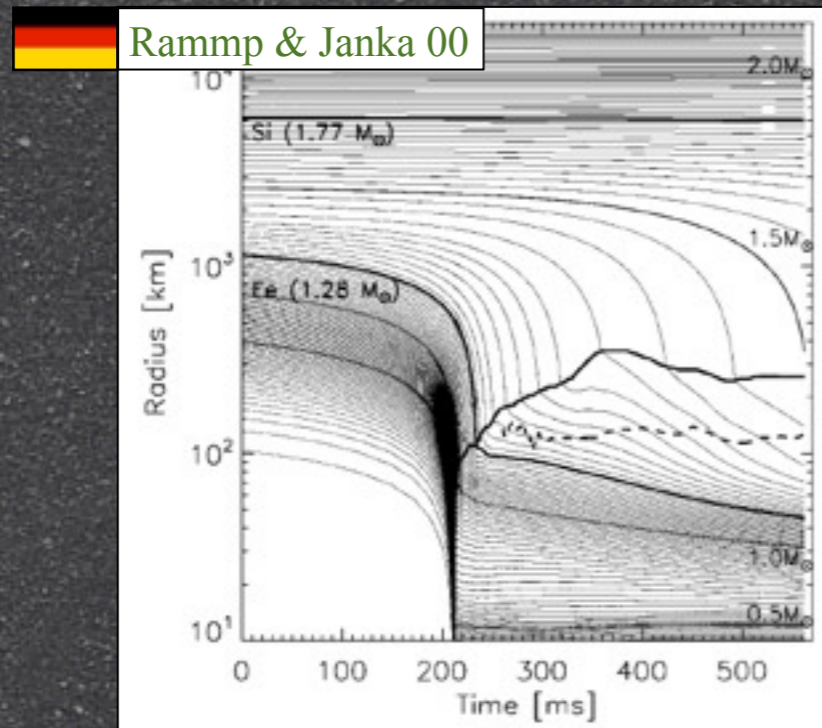
- ニュートリノ冷却 (陽子の電子捕獲→中性子)
- ニュートリノ加熱 (中性子のニュートリノ捕獲→陽子)



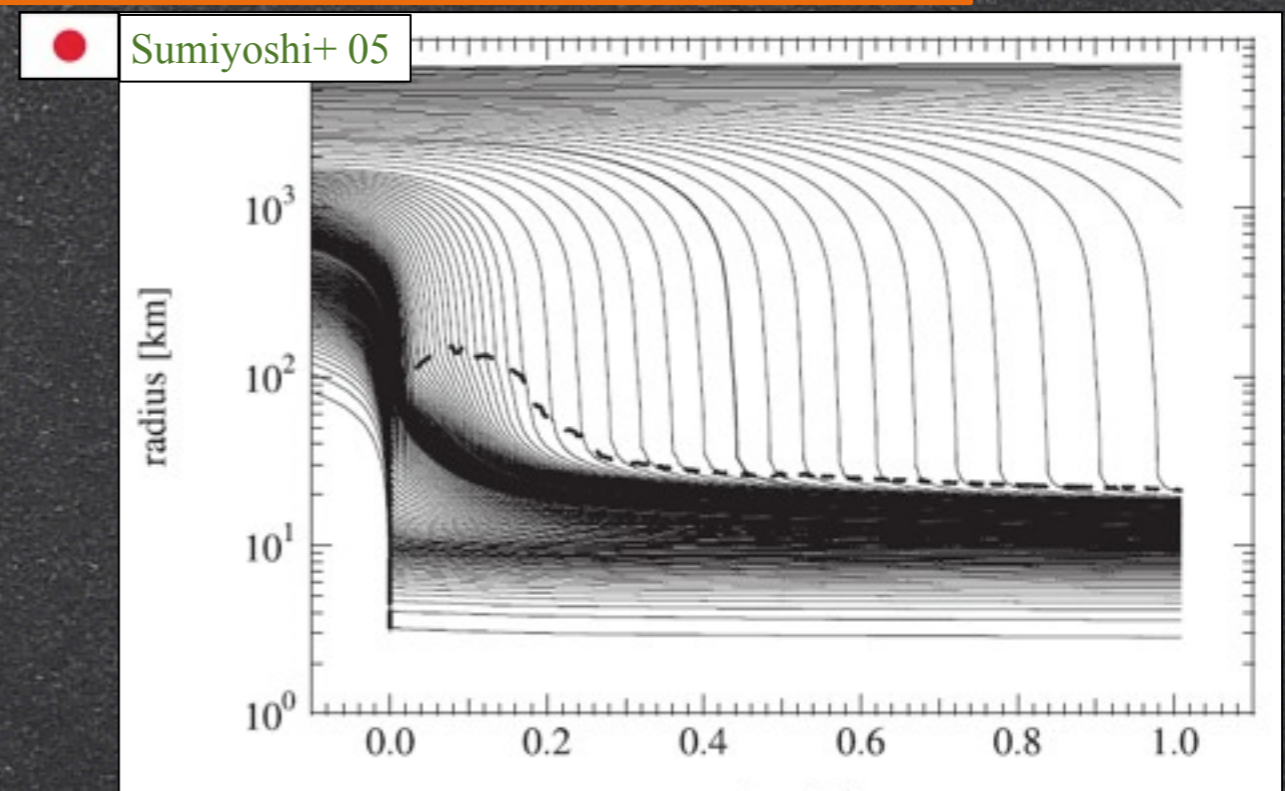
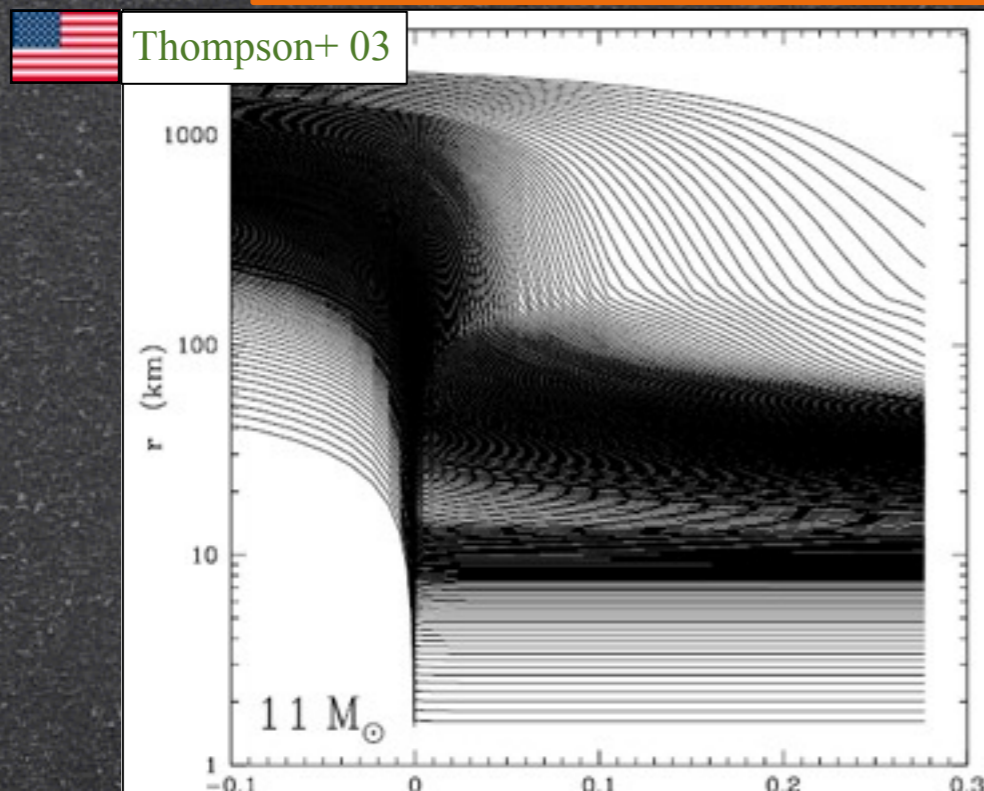
- ニュートリノ加熱による衝撃波復活

→ “遅延爆発”

球対称 1次元シミュレーション

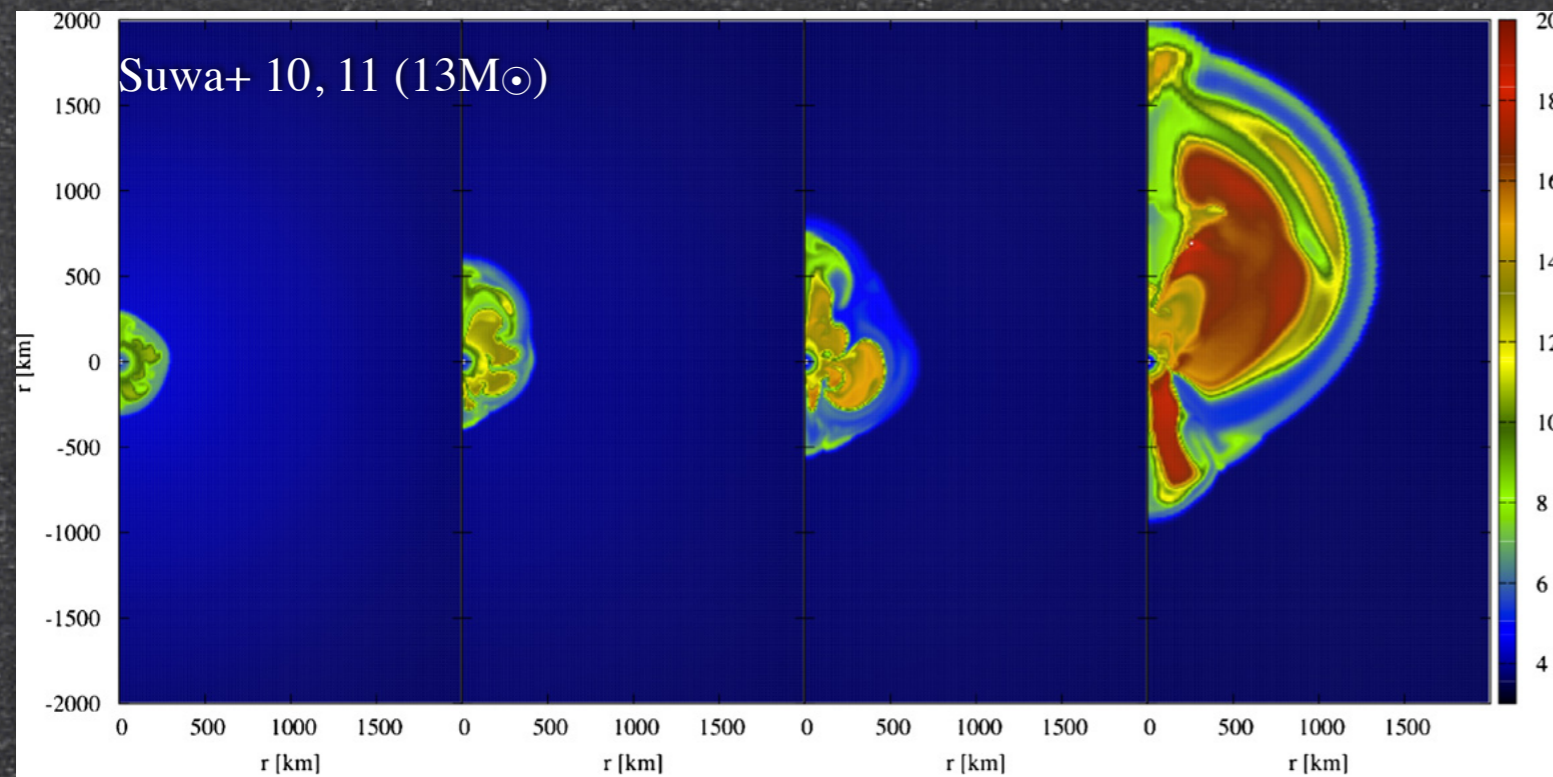
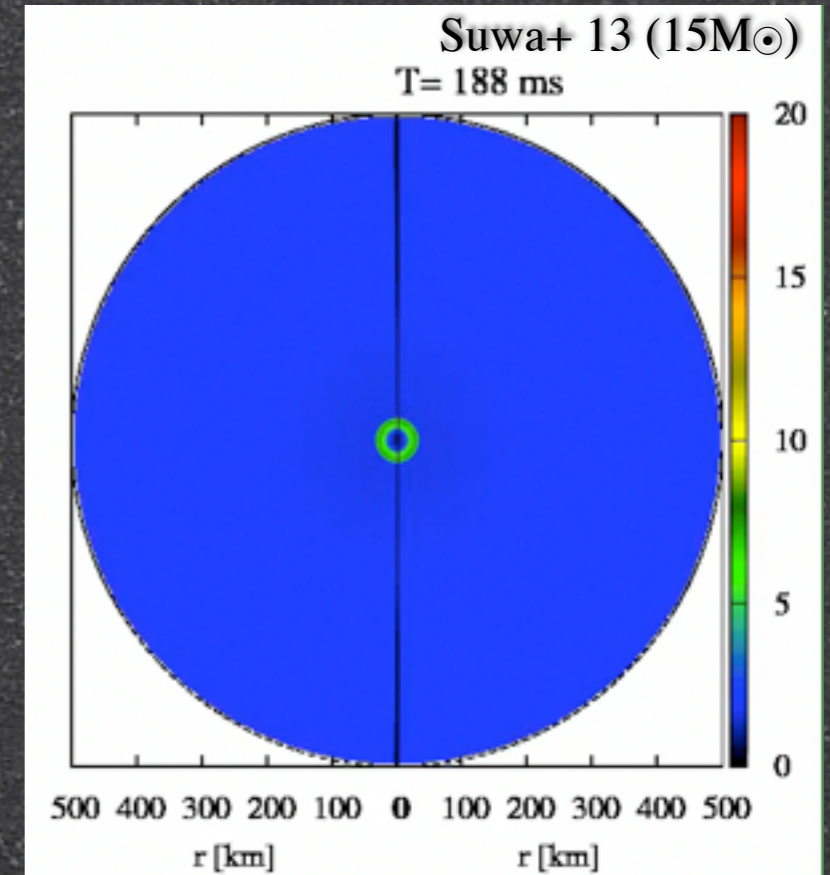
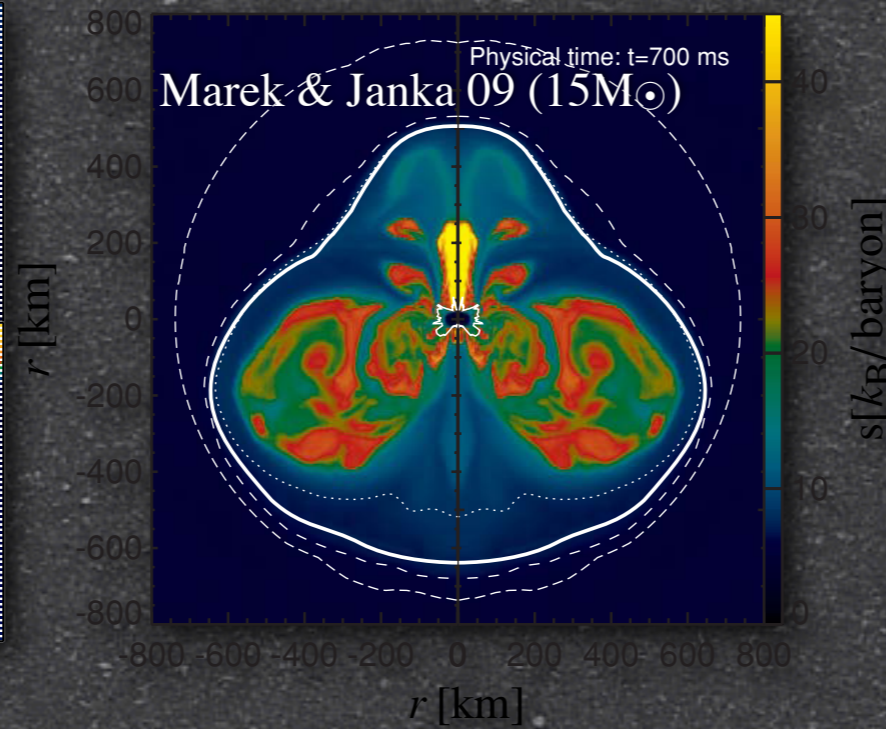
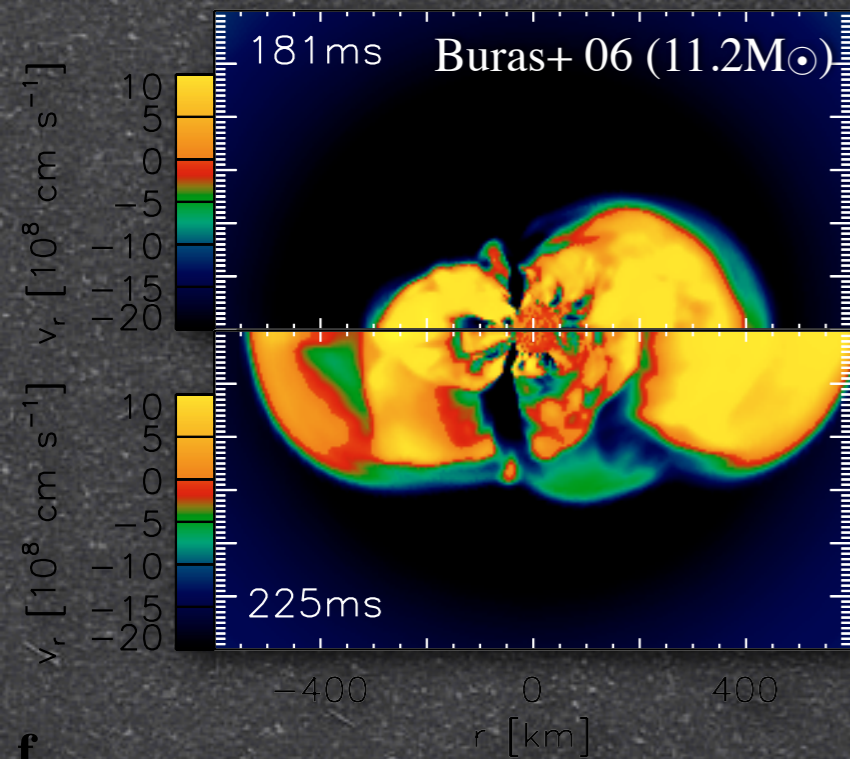


考えうる全ての物理を考慮したシミュレーションを行ったが、超新星爆発を数値シミュレーションで起こすことができなかった…。数値天文学の未解決問題の一つとされ、40年来の謎であった。



シミュレーションの発展と爆発

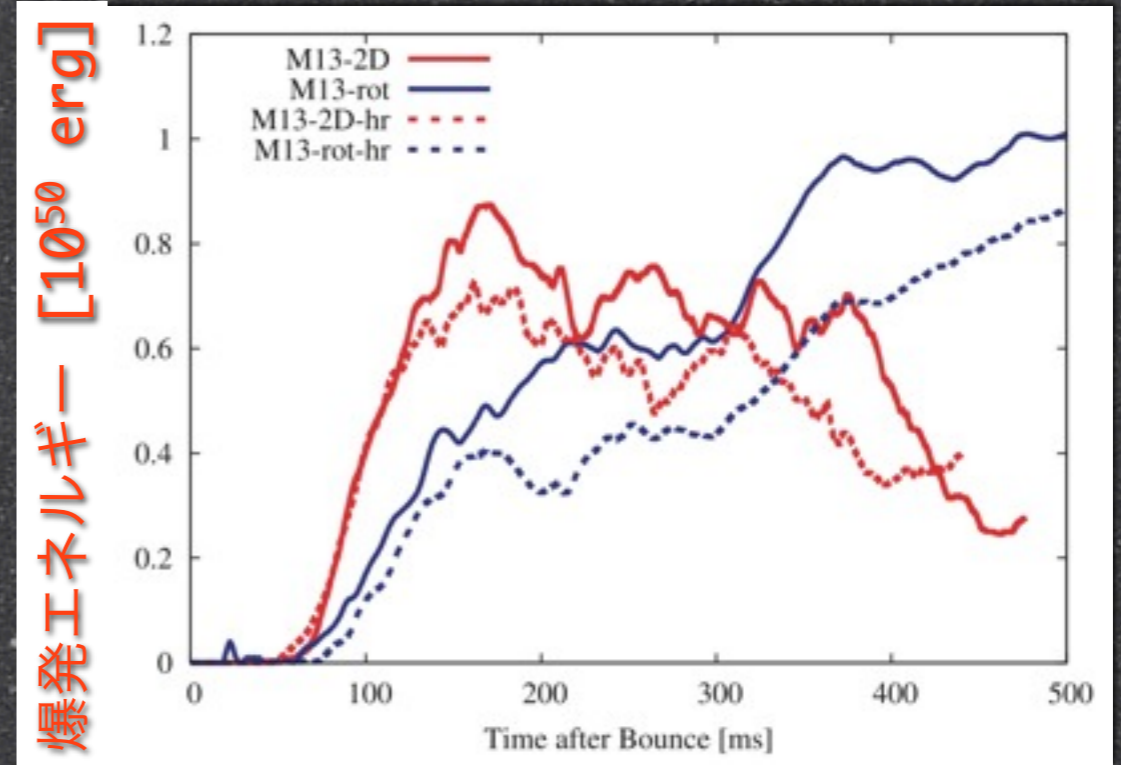
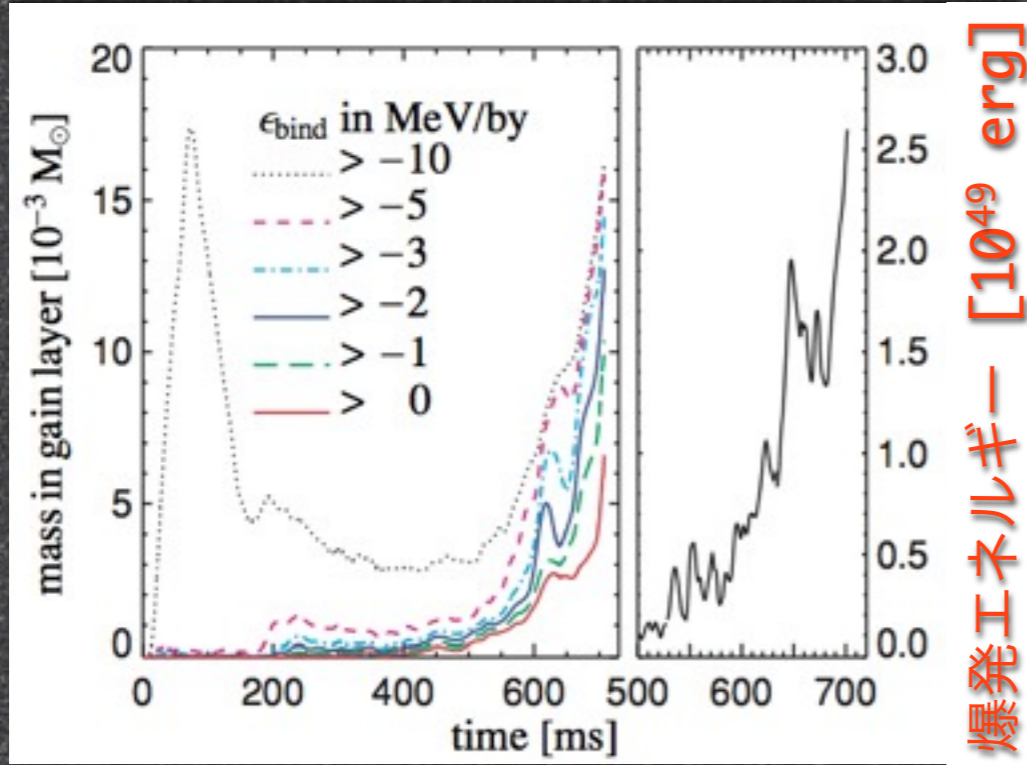
Recently, we have successful exploding models driven by neutrino heating



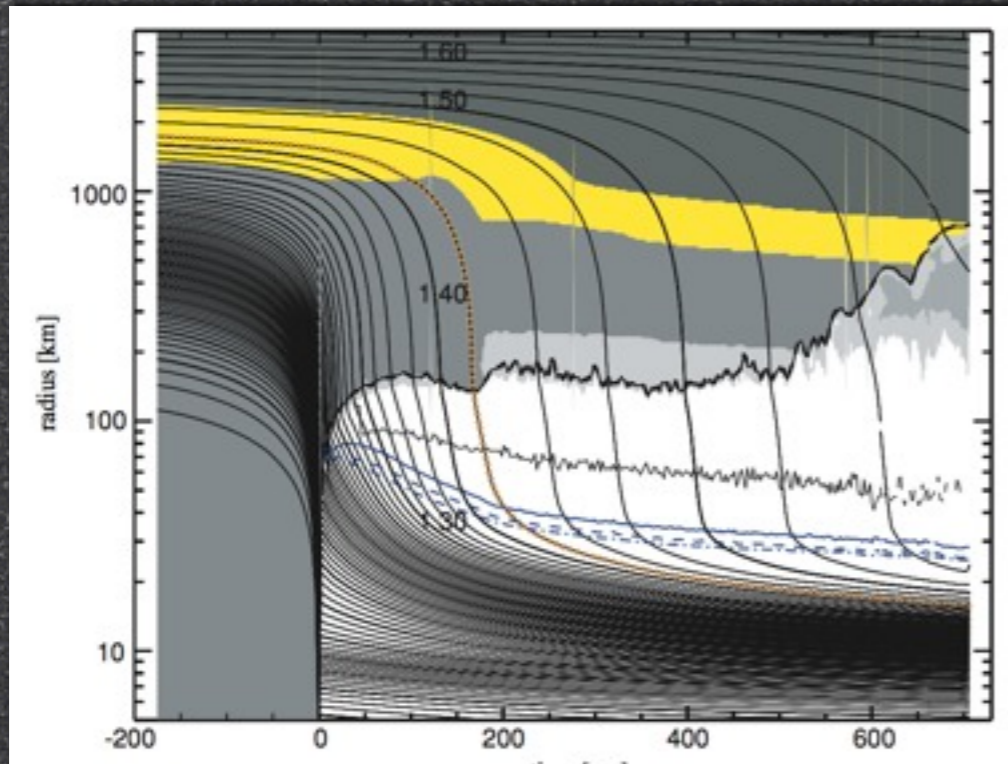
- Neutrino heating is amplified due to multi-D effects such as
 - ▶ Convective motion behind the shock wave
 - ▶ Standing Accretion Shock Instability (SASI)

ニュートリノ駆動型爆発の問題点

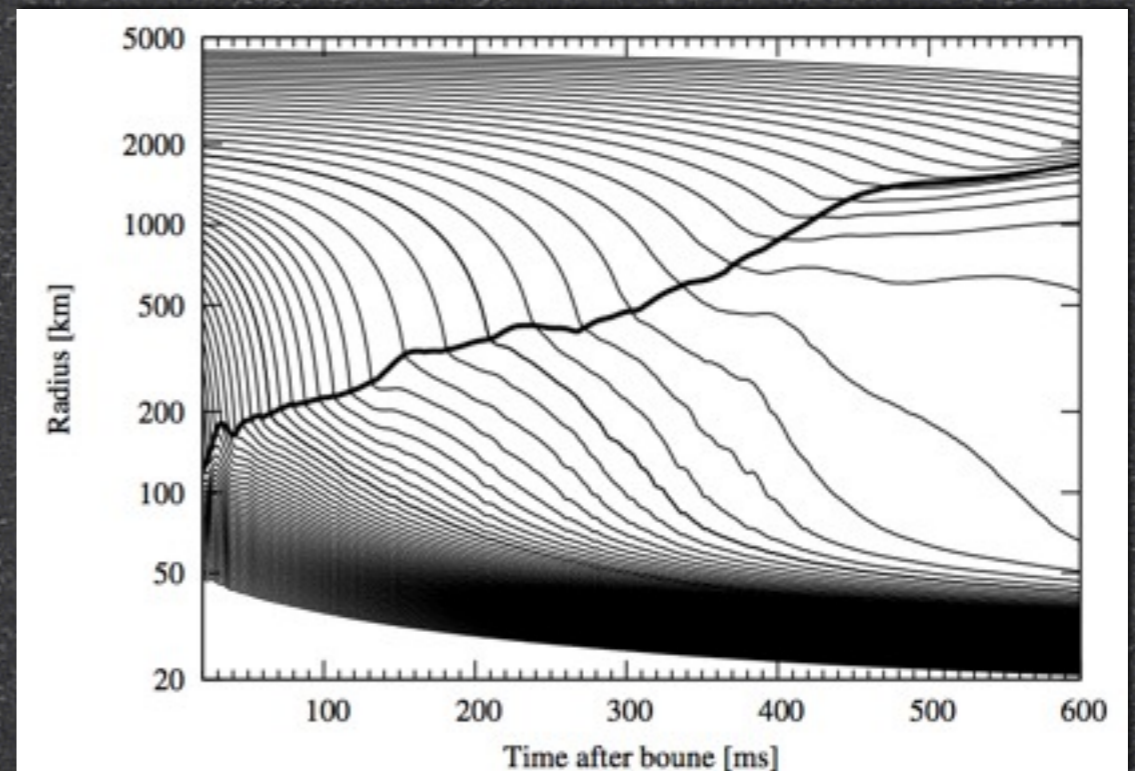
- 爆発エネルギーが小さい ($\sim 10^{49}$ - 10^{50} erg)



- 中性子星を作ることができない (コンパクト天体の質量増加が止まらない)



質量半径の時間発展



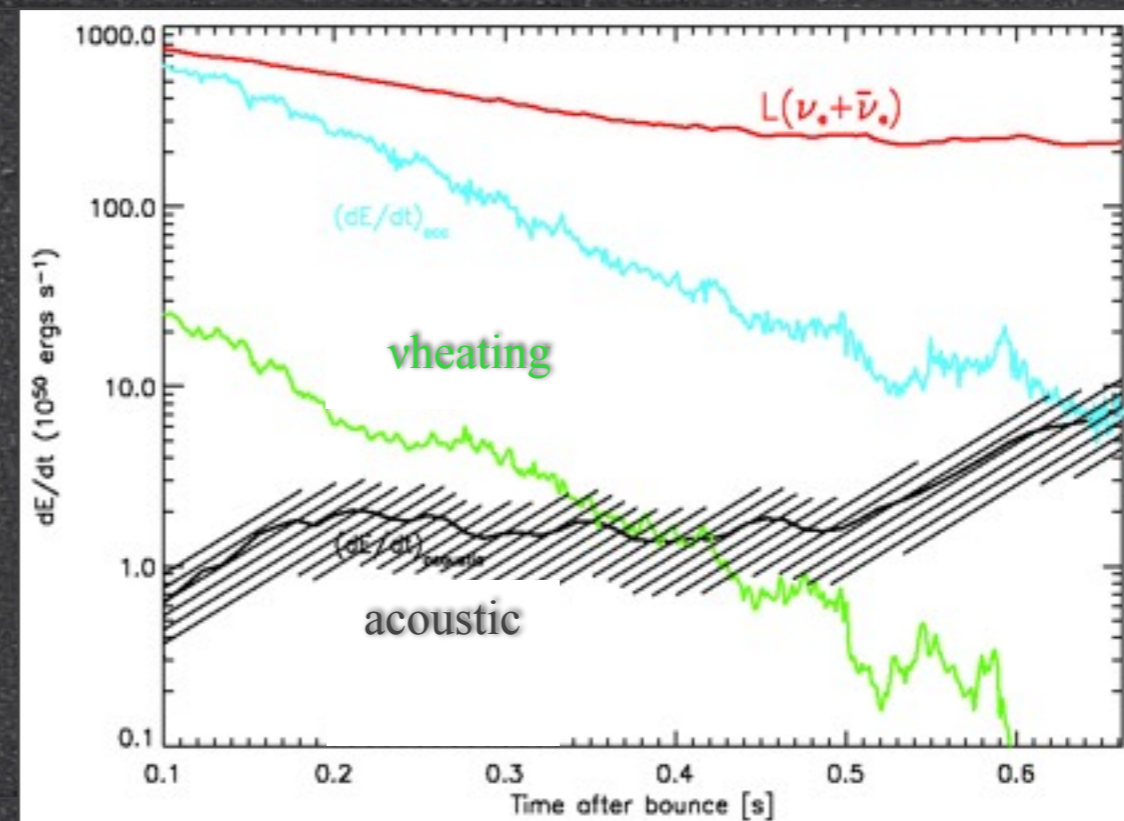
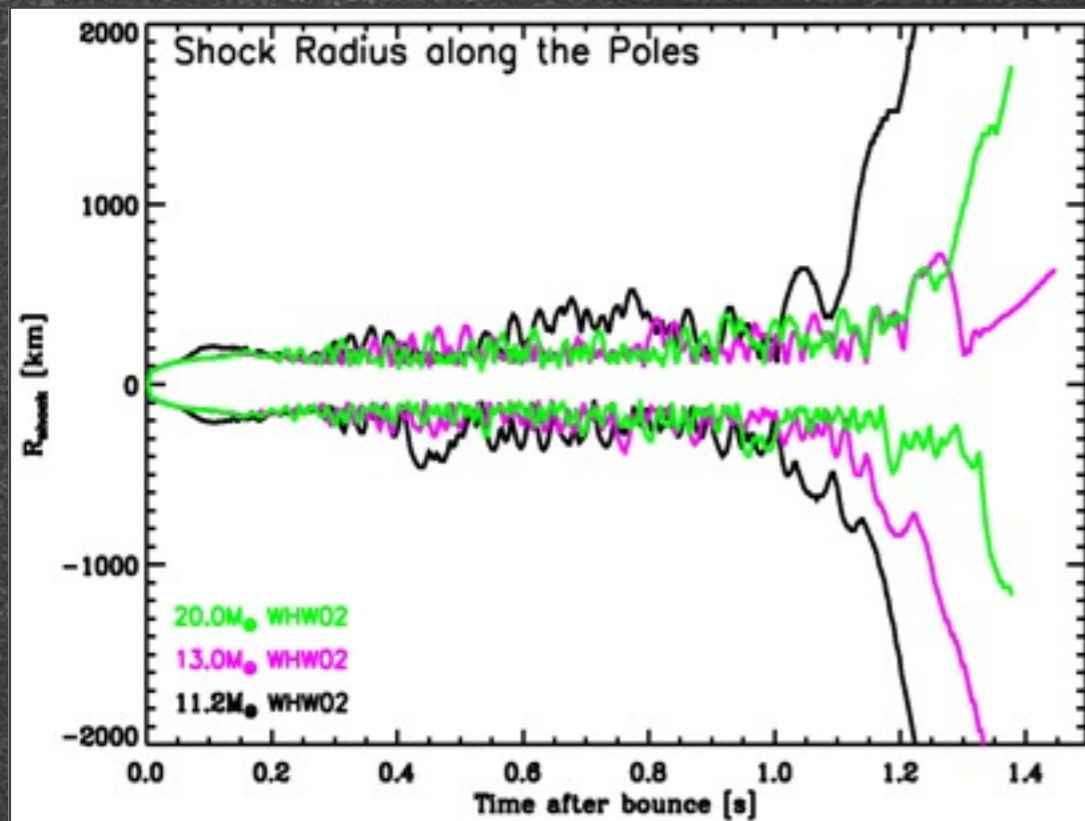
Marek & Janka (2009)

Suwa et al. (2010, 2013)

他のメカニズム：音波爆発

(Burrows+ 06,07)

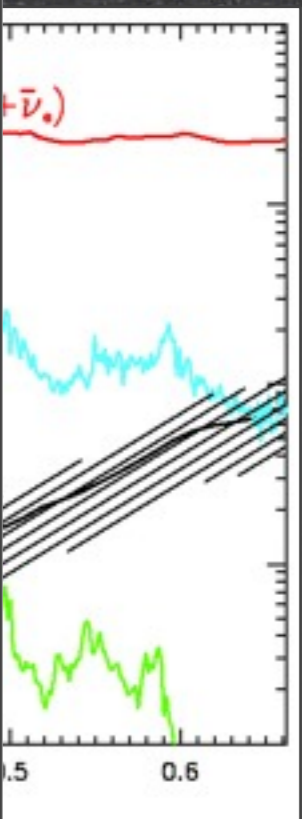
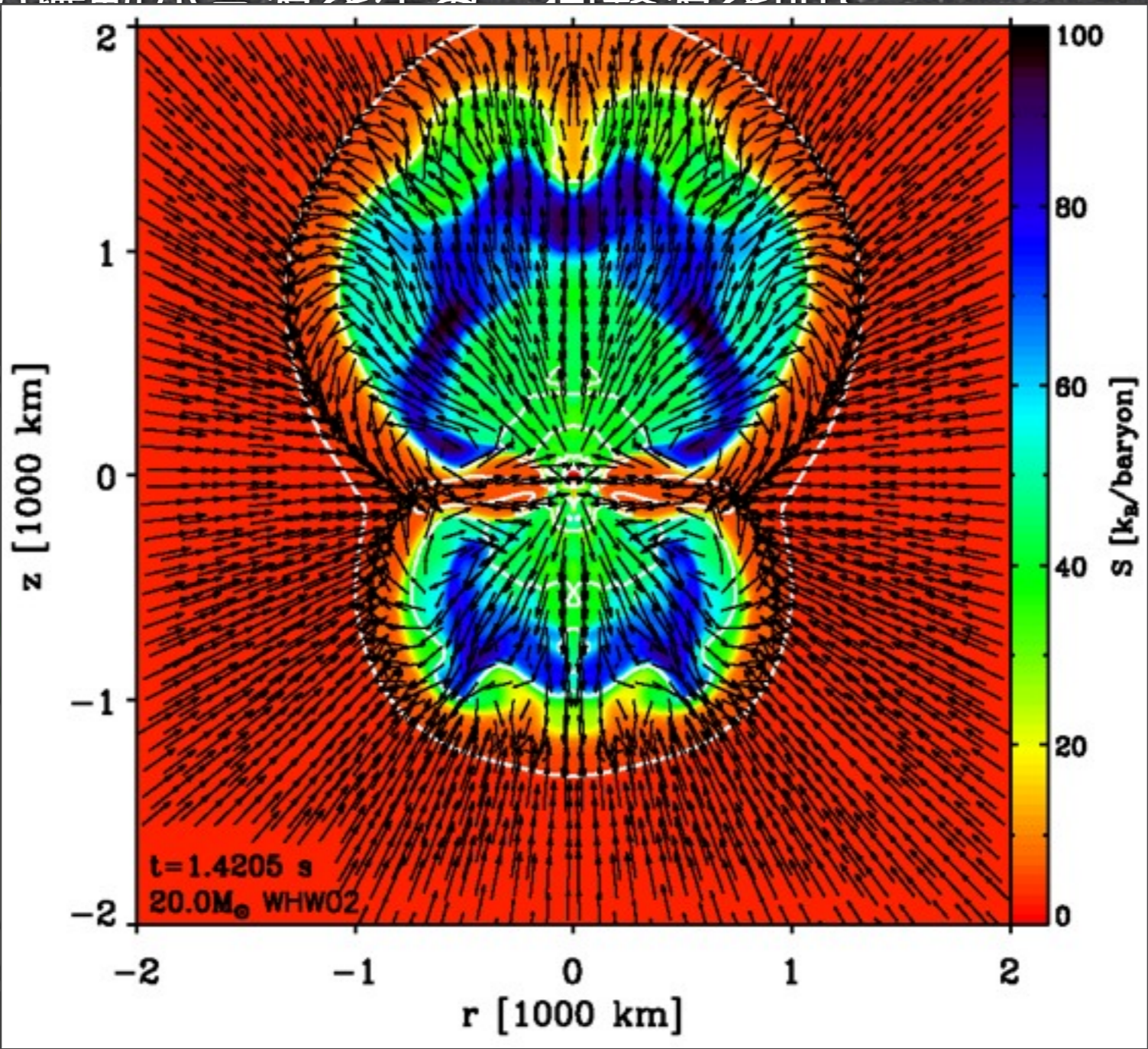
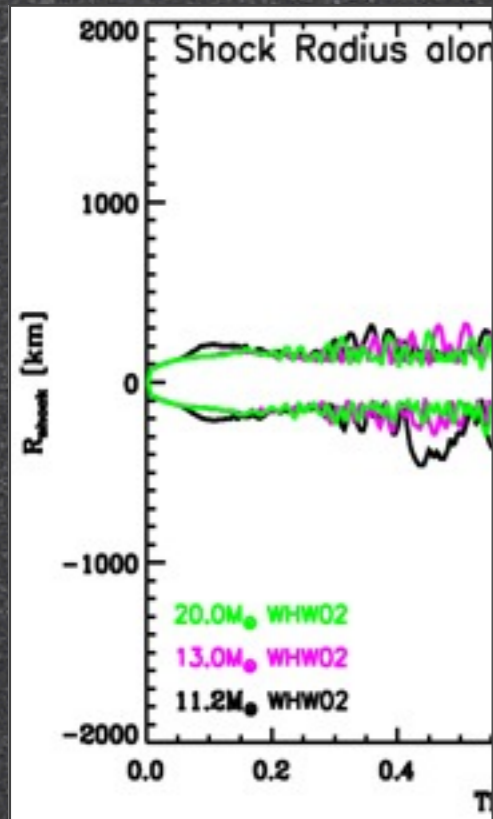
- * SASI がPNSを叩く => PNSを揺らす
- * PNSの振動が音波を生み、衝撃波を叩く
- * 音波によるエネルギー供給がニュートリノを凌駕(?)
- * Shock revival by acoustic power



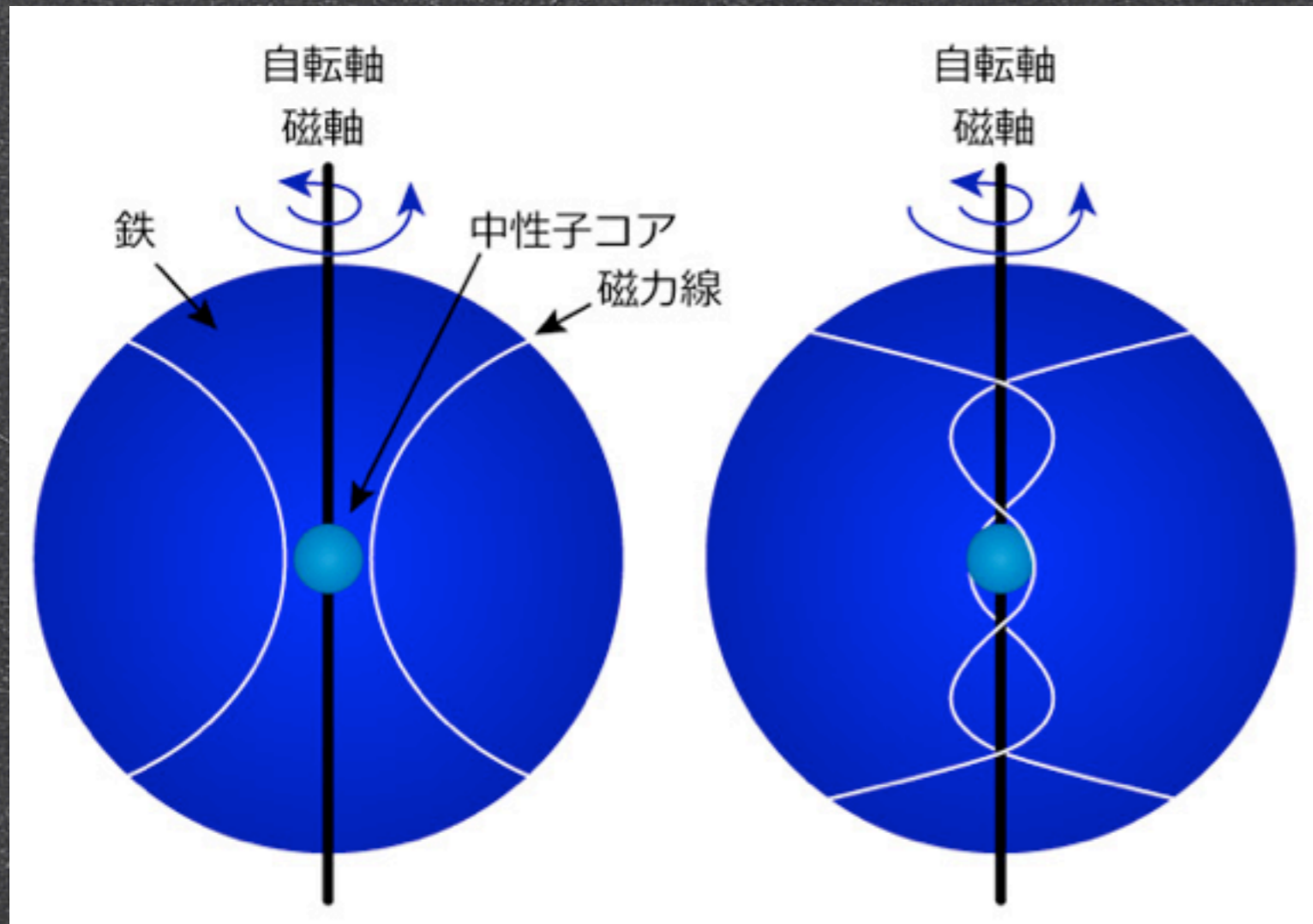
他のメカニズム：音波爆発

(Burrows+ 06,07)

- * SASI がPNSを叩く => PNSを揺らす
- * PNSの振動が音波を生み 衝撃波を叩く
- * 音波は
- * Sho

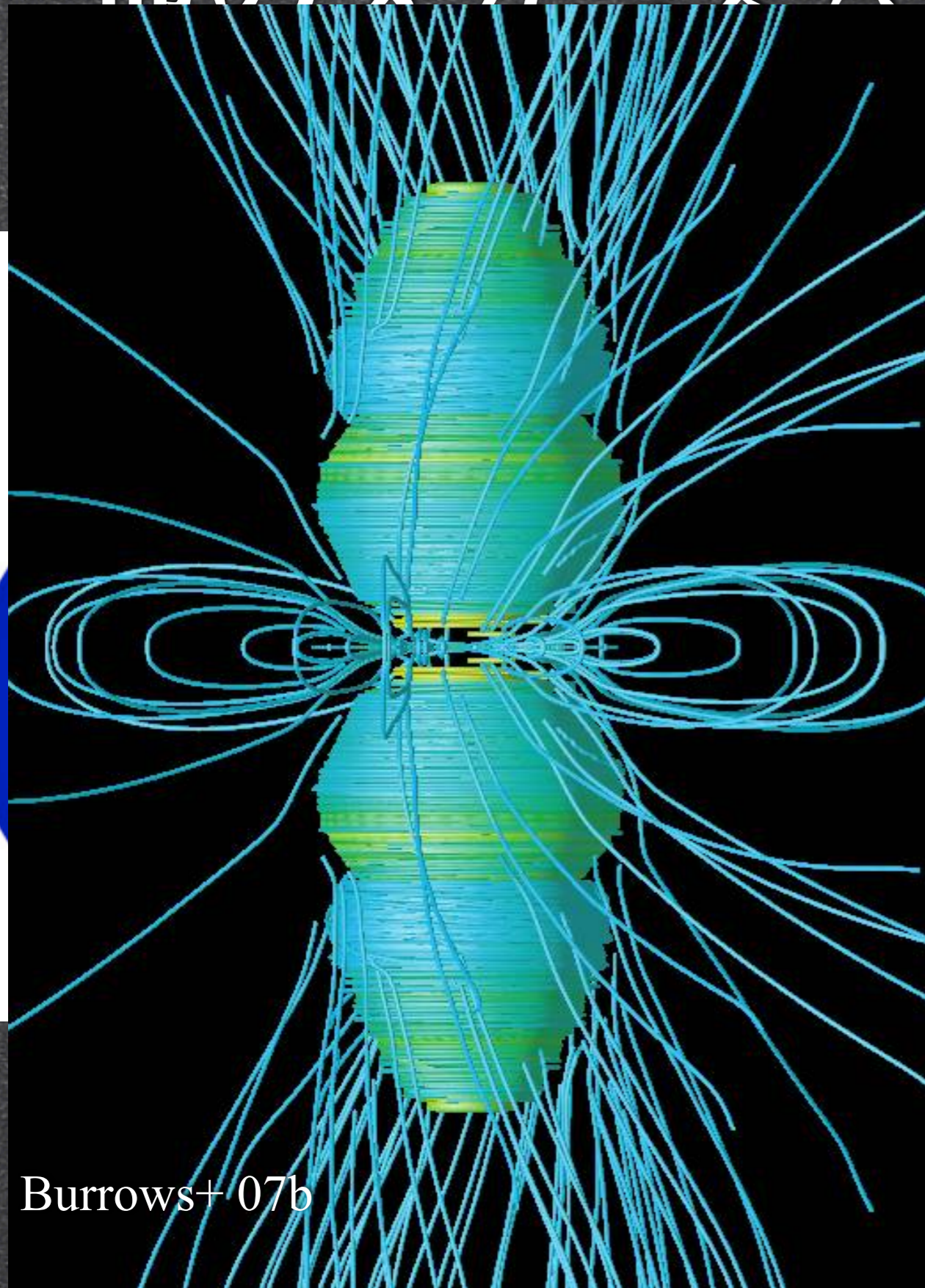


他のメカニズム：磁気駆動爆発



- 星が微分回転していると、それに伴って磁場を巻く
- 巻かれた磁場は極方向に圧力を及ぼす
- 初期条件として、強い回転と強い磁場を持っている場合、回転軸に沿ってアウトフローが形成される

他のメカニズム：磁気駆動爆発



- 星が微分回転していると、それに伴って磁場を巻く
- 巻かれた磁場は極方向に圧力を及ぼす
- 初期条件として、強い回転と強い磁場を持っている場合、回転軸に沿ってアウトフローが形成される

超新星の小まとめ

● 分かっていること

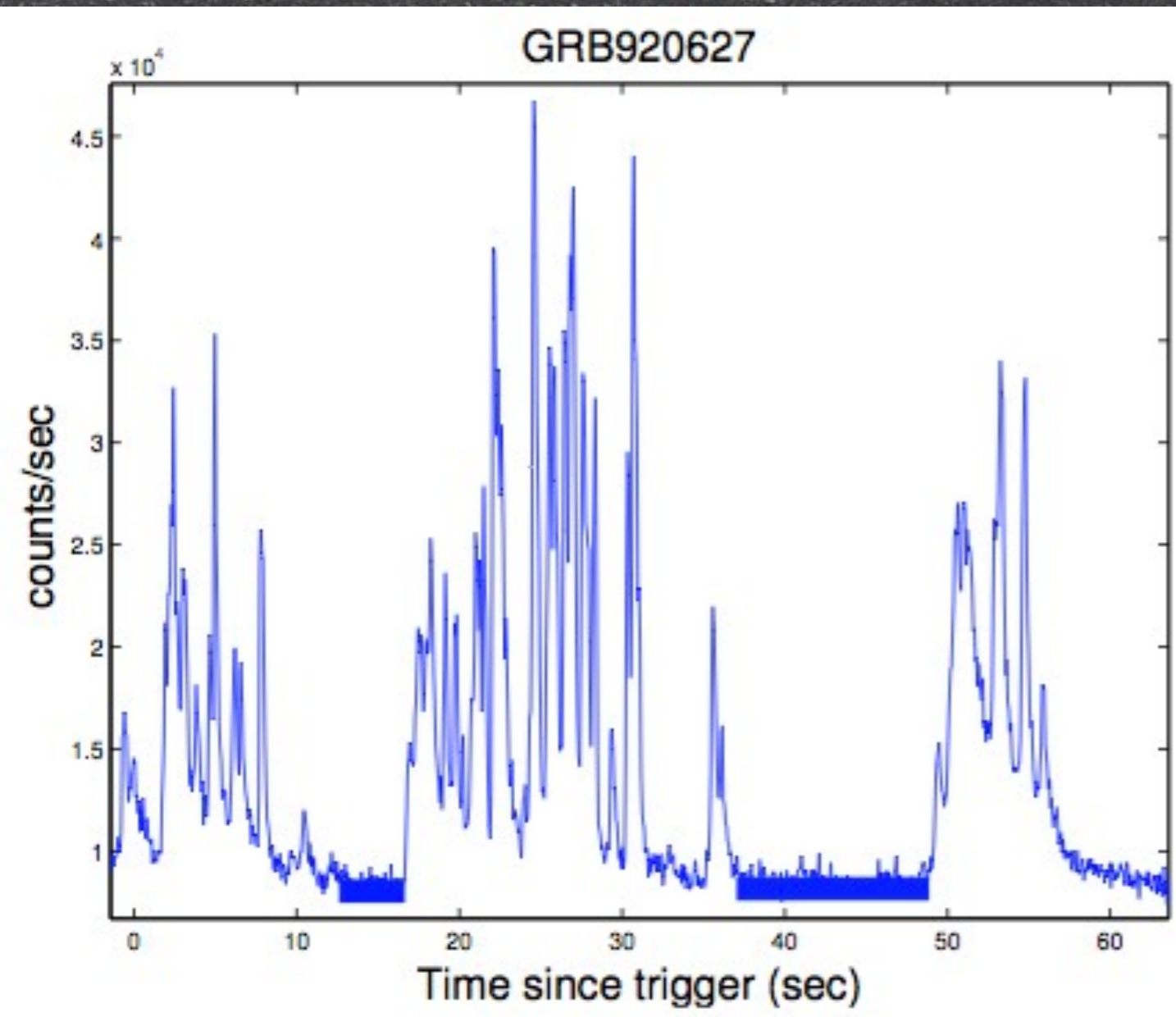
- ▶ 超新星は大質量星の末期の瞬間
- ▶ 超新星は星のコアが中性子星に変貌して重力エネルギーを解放するプロセス (の一部)
- ▶ 光り方

● 分かっていないこと

- ▶ そもそもどうやって爆発している？
- ▶ 爆発メカニズムの候補はあるが、どれも決定打には至らない

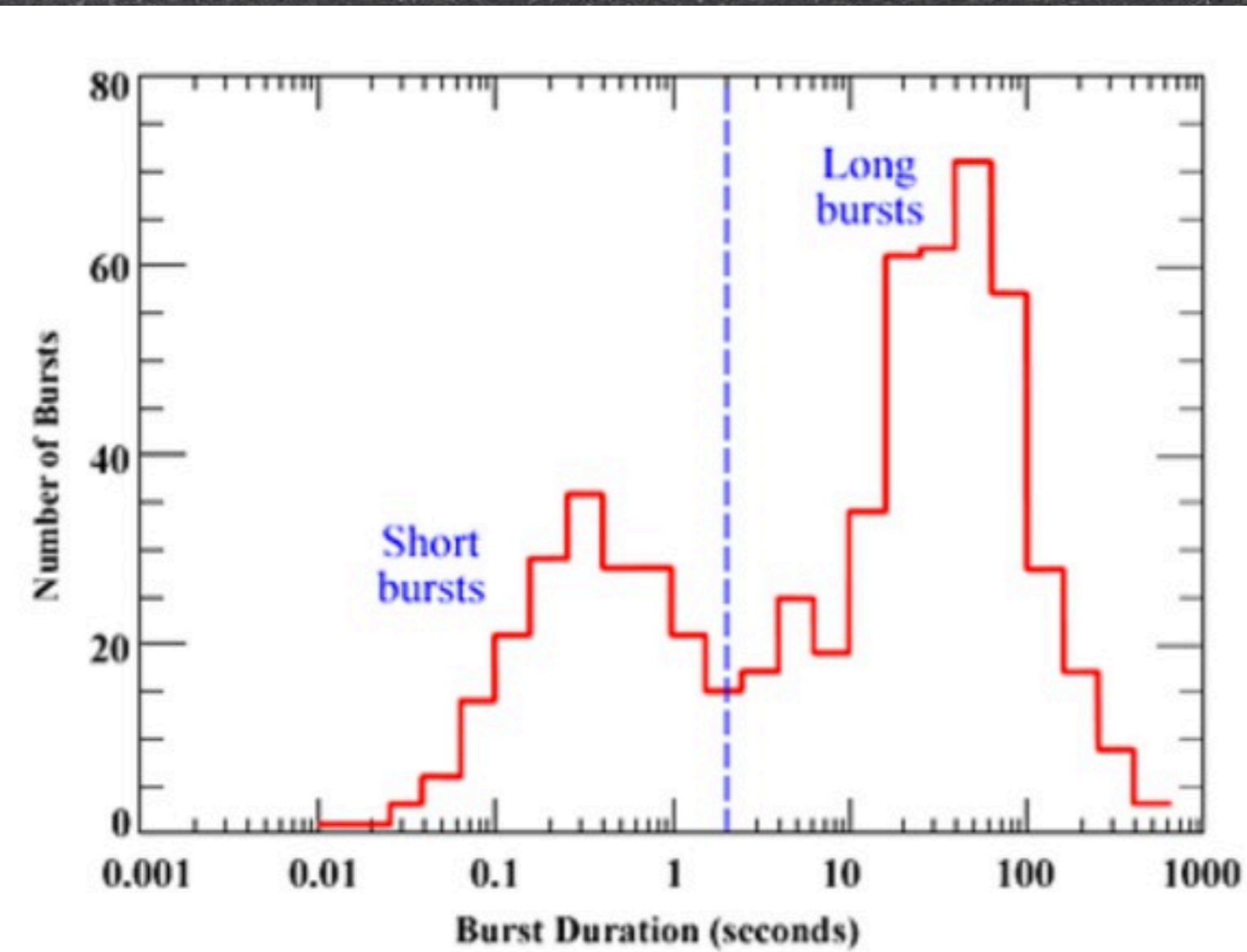
2. ガンマ線バースト

ガンマ線バースト



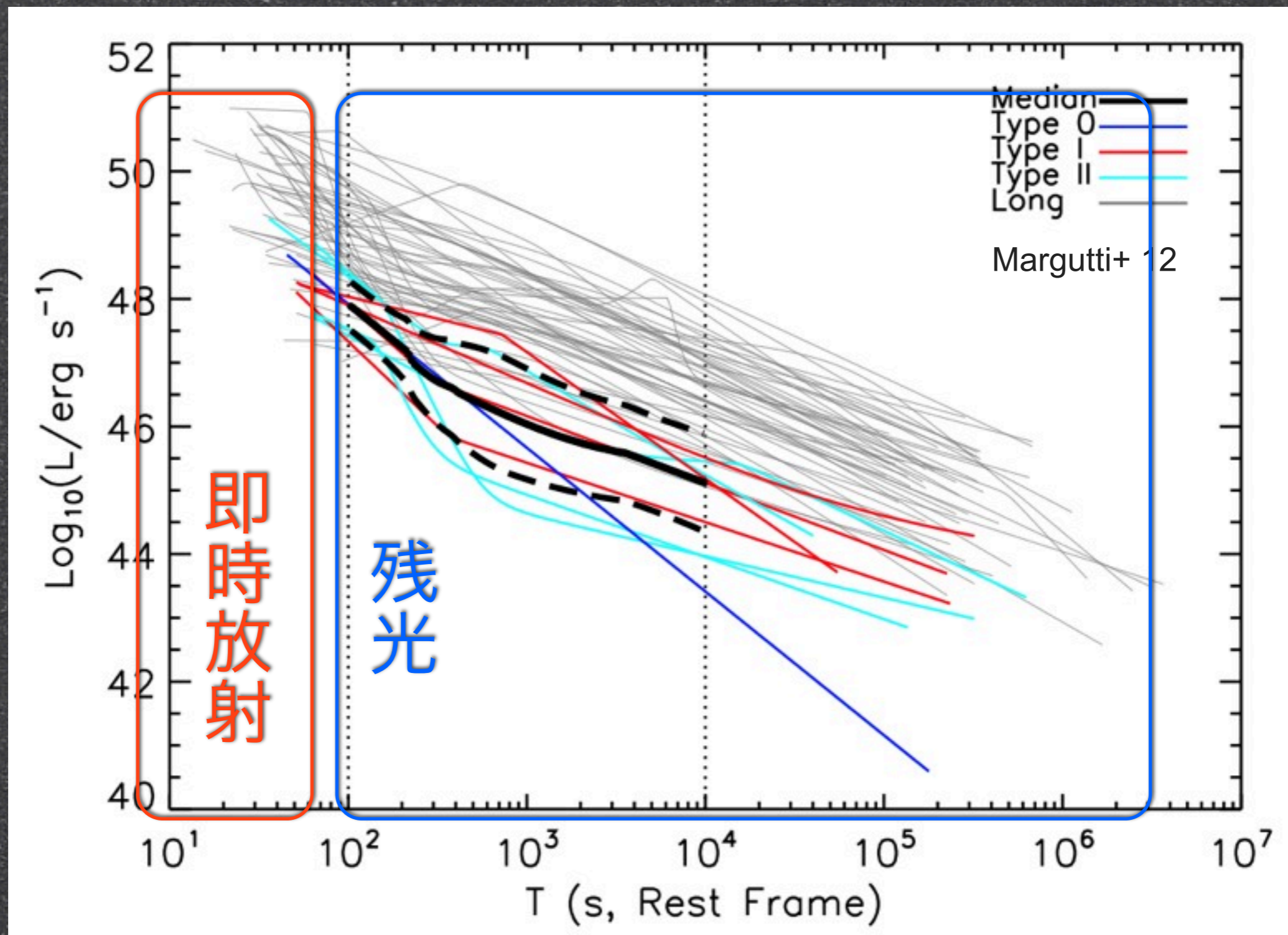
- 主にガンマ線帯域で非常に明るく輝く現象
- 最大光度は 10^{51} erg/s にまで達する宇宙最大の爆発

Long GRB and Short GRB



- 継続時間で二つの種族に分けられる
 - ▶ long GRB ($T > 2s$)
 - ▶ short GRB ($T < 2s$)
- 本講演では、long に注目する

光度曲線



コンパクトネス問題

ガンマ線バーストを作る火の玉は $\gamma \gamma \rightarrow e^+e^-$ の反応に対して
光学的に厚い

$$\tau_{\gamma\gamma} = \frac{f_p \sigma_T F D^2}{(c\delta t)^2 m_e c^2} \sim 10^{15} f_p \left(\frac{F}{10^{-6} \text{erg cm}^{-2}} \right) \left(\frac{D}{3 \text{Gpc}} \right)^2 \left(\frac{\delta t}{10 \text{ms}} \right)^{-2}$$

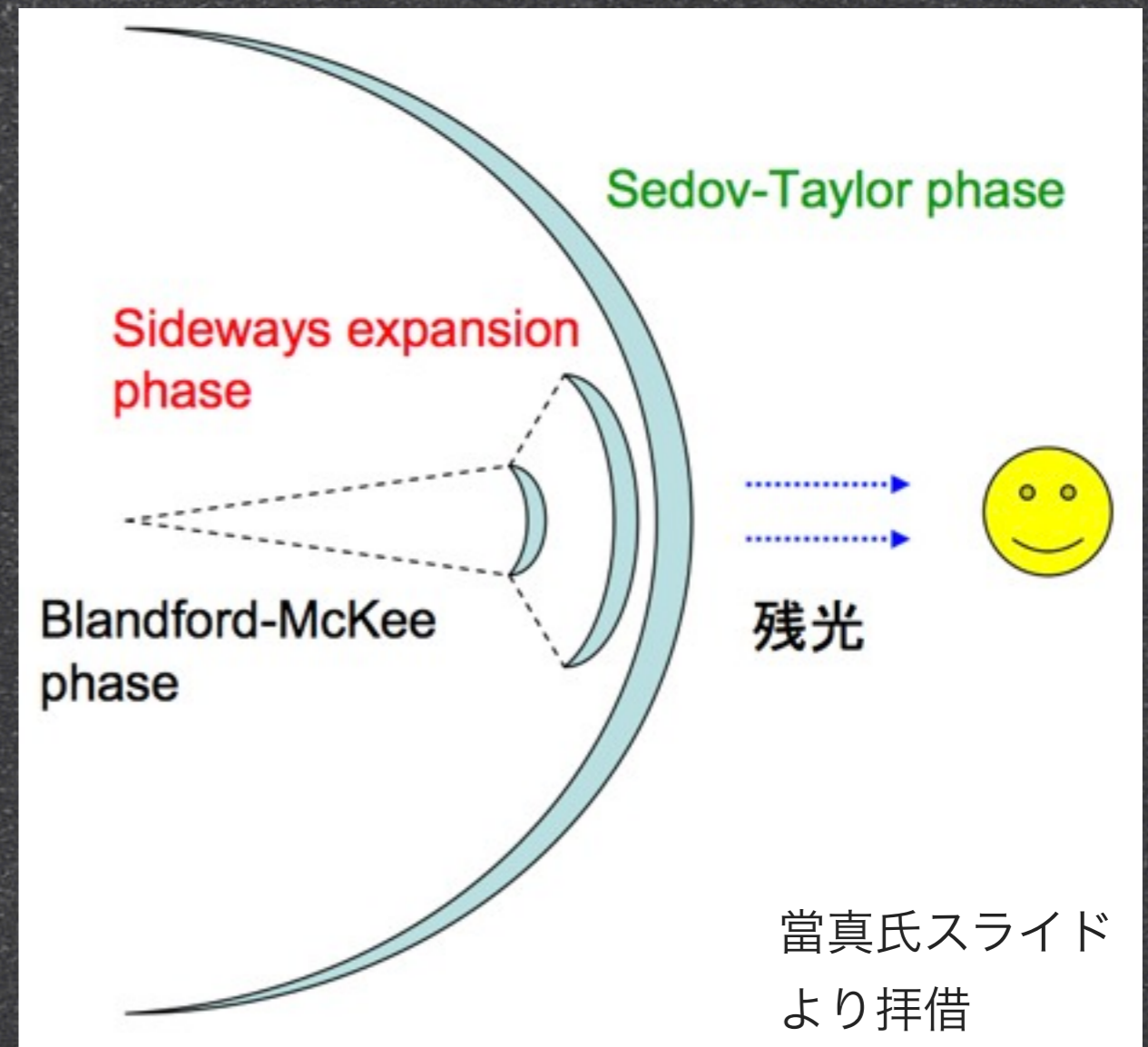
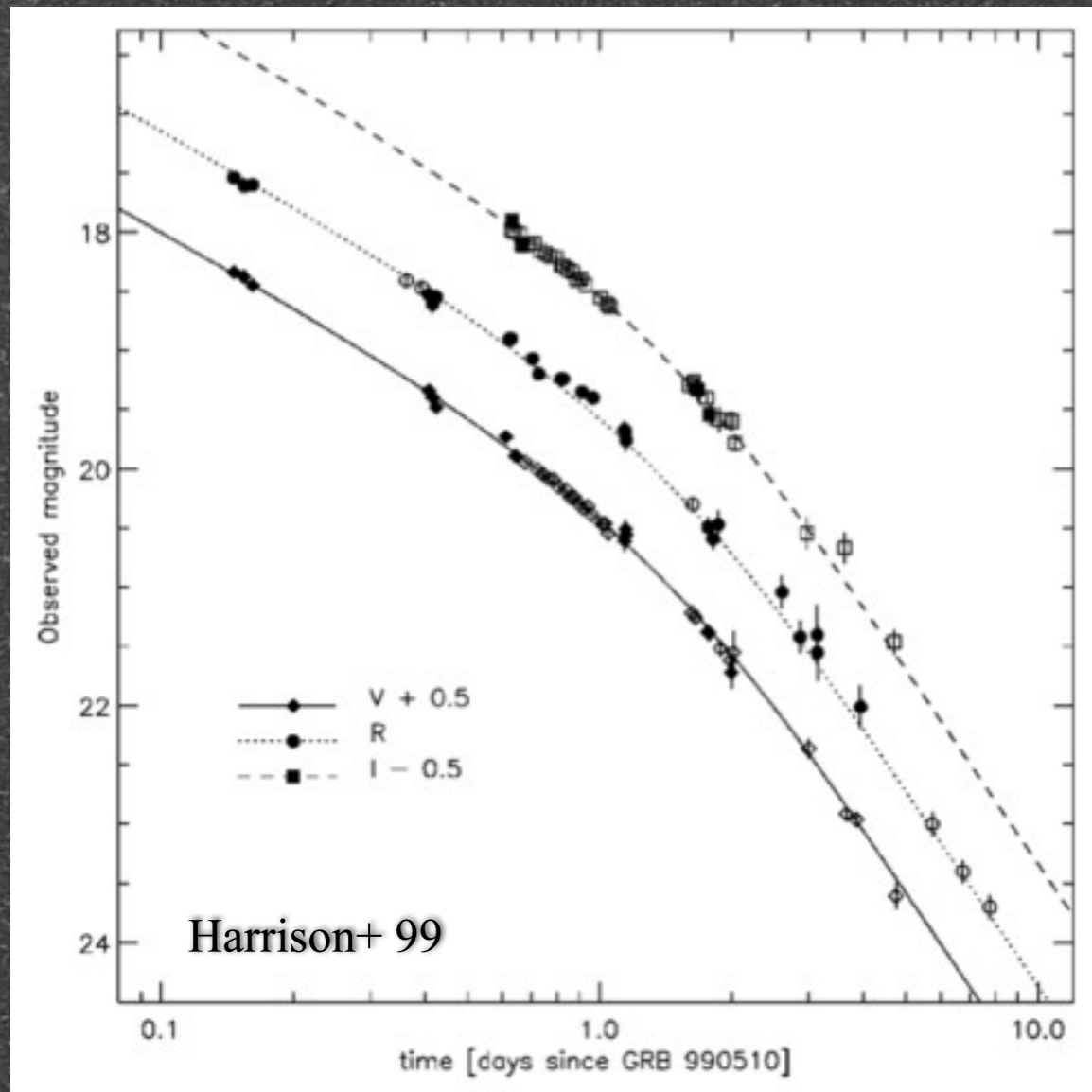
これを回避するには、相対論的フローを考えればよい

- 相対論的ビーミング: $R \sim \Gamma^2 c \delta t$

- 青方偏移: $\tau_{\gamma\gamma} \propto \Gamma^{-(2\beta-2)} \sim \Gamma^{-4}$

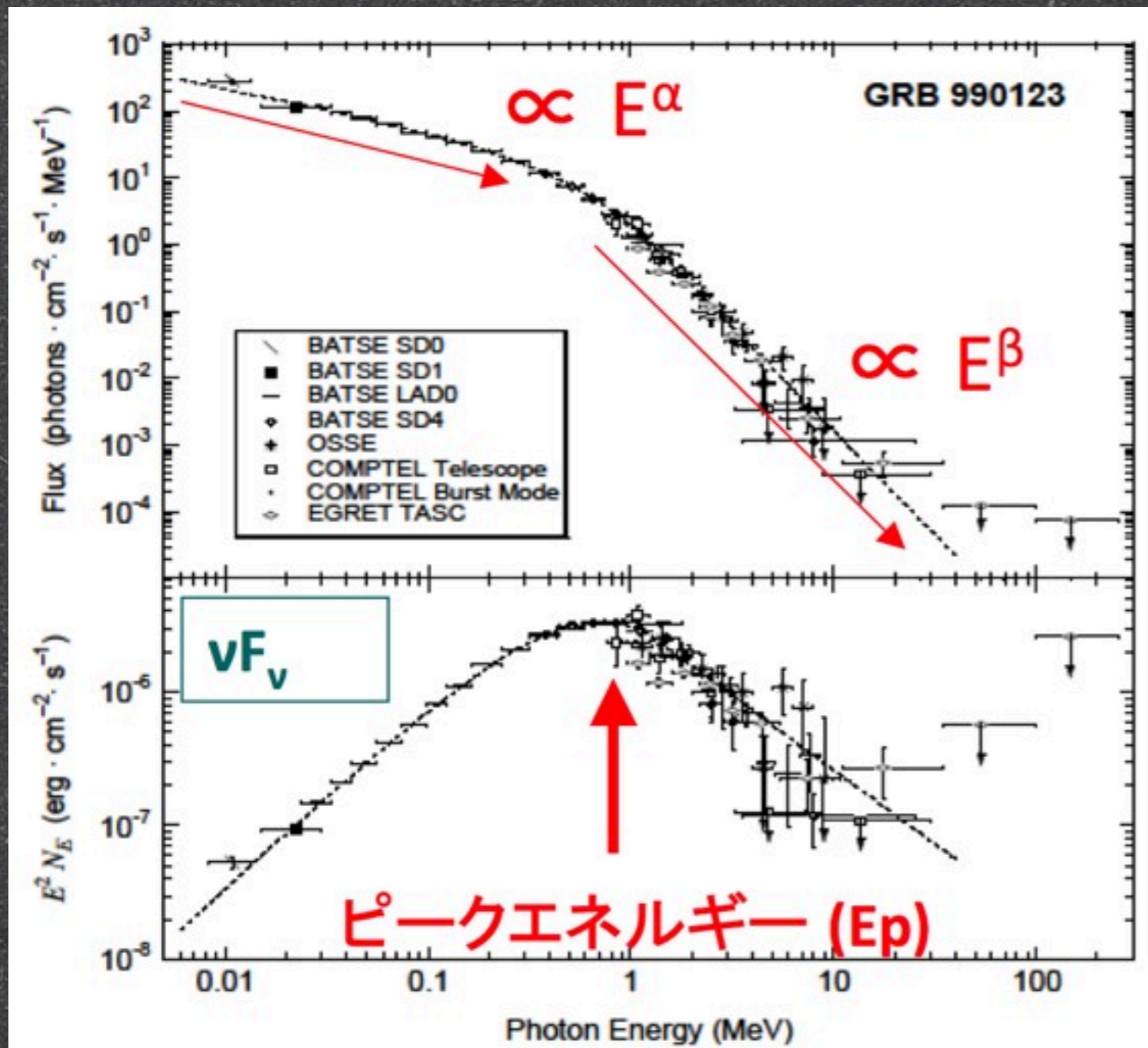
これらの効果により、 $\Gamma > 100$ のジェットを考えれば、観測されている MeV のガンマ線が抜け出すことができる

ジェットブレイク



- 光度曲線の折れ曲がり
- 相対論的ジェット状爆発の証拠
- コンパクトネス問題への解を与える

即時放射機構



● 非熱的スペクトル

▶ Band function

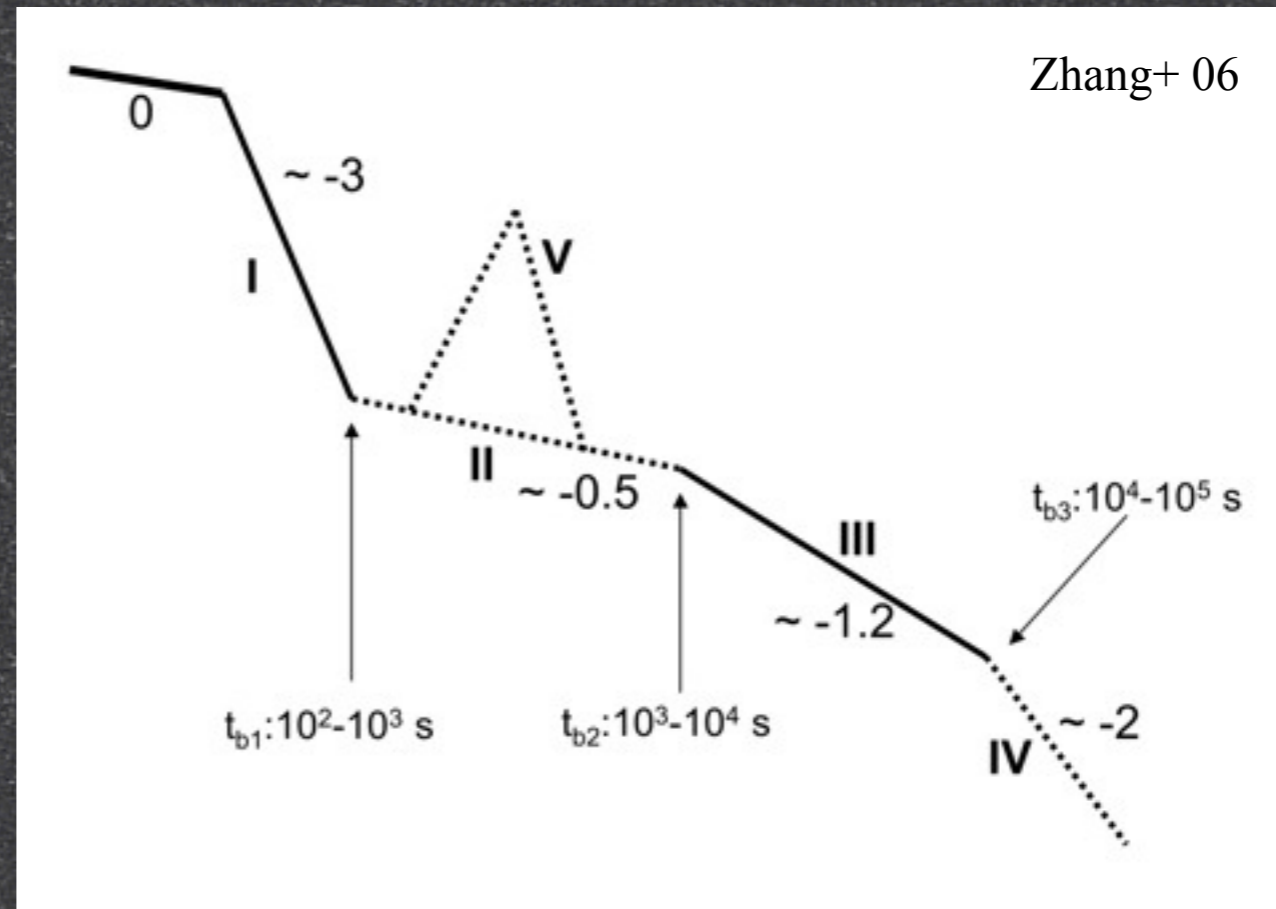
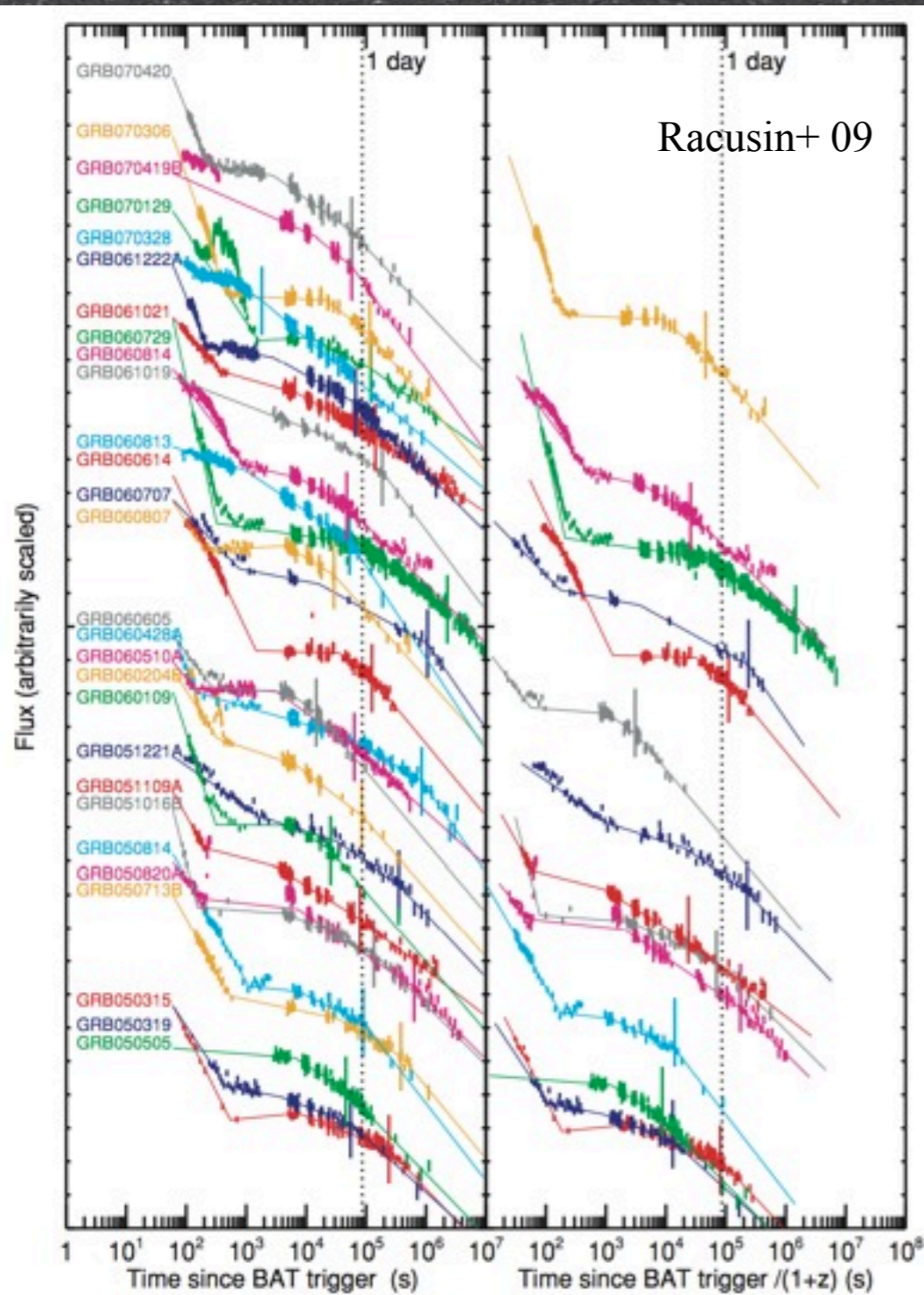
▶ $\alpha \sim -1$; $\beta \sim -2.5$

● どうやって作る？

▶ 内部衝撃波モデル

▶ 光球放射モデル

残光放射機構

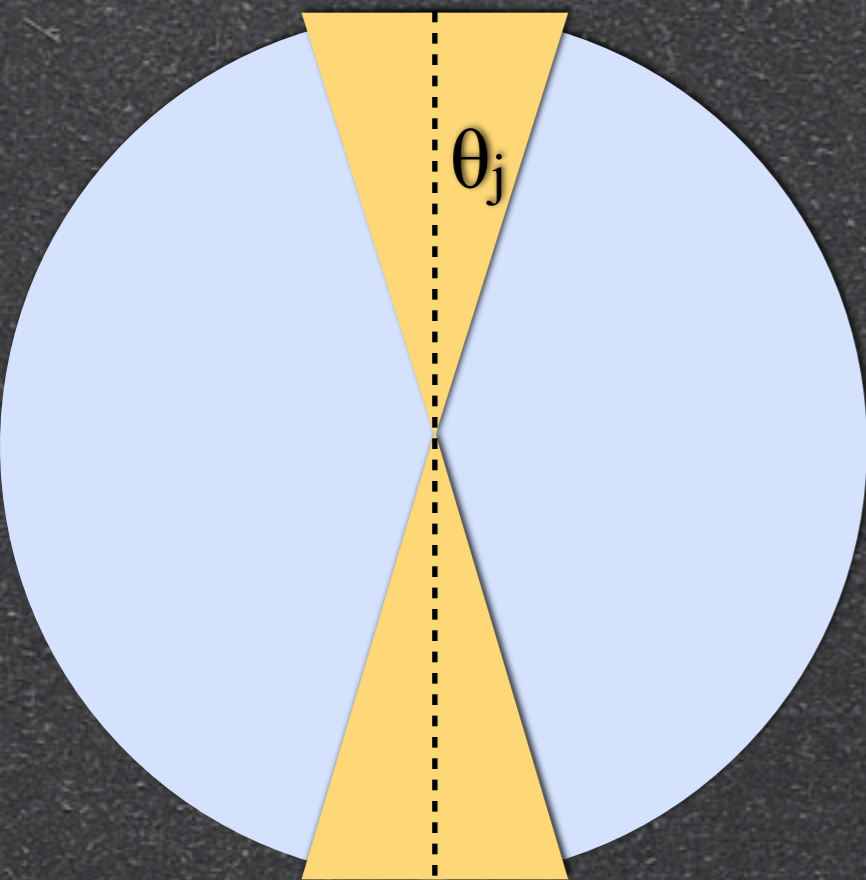


- 外部衝撃波→シンクロトロン放射で後期はよく説明できる
- Swift が打ち上がって (2005年)、初期残光が観測できるようになってから、いくつも謎が発生
 - ▶ steep/shallow decay
 - ▶ X線フレア

バリオンロード問題

相対論的なジェットを作るには、ジェットを形成している物質の質量は小さくなくてはいけない

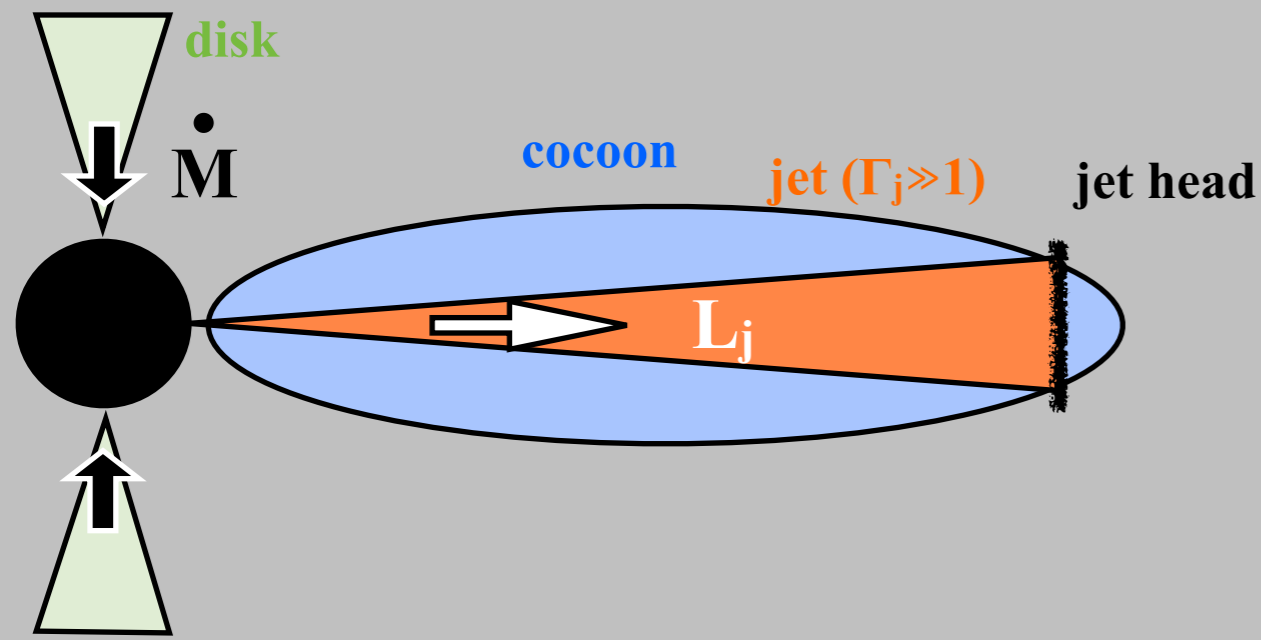
$$M \sim \frac{E_0}{c^2 \Gamma} \sim 5 \times 10^{-6} M_{\odot} \left(\frac{E_0}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{\Gamma}{100} \right)^{-1}$$



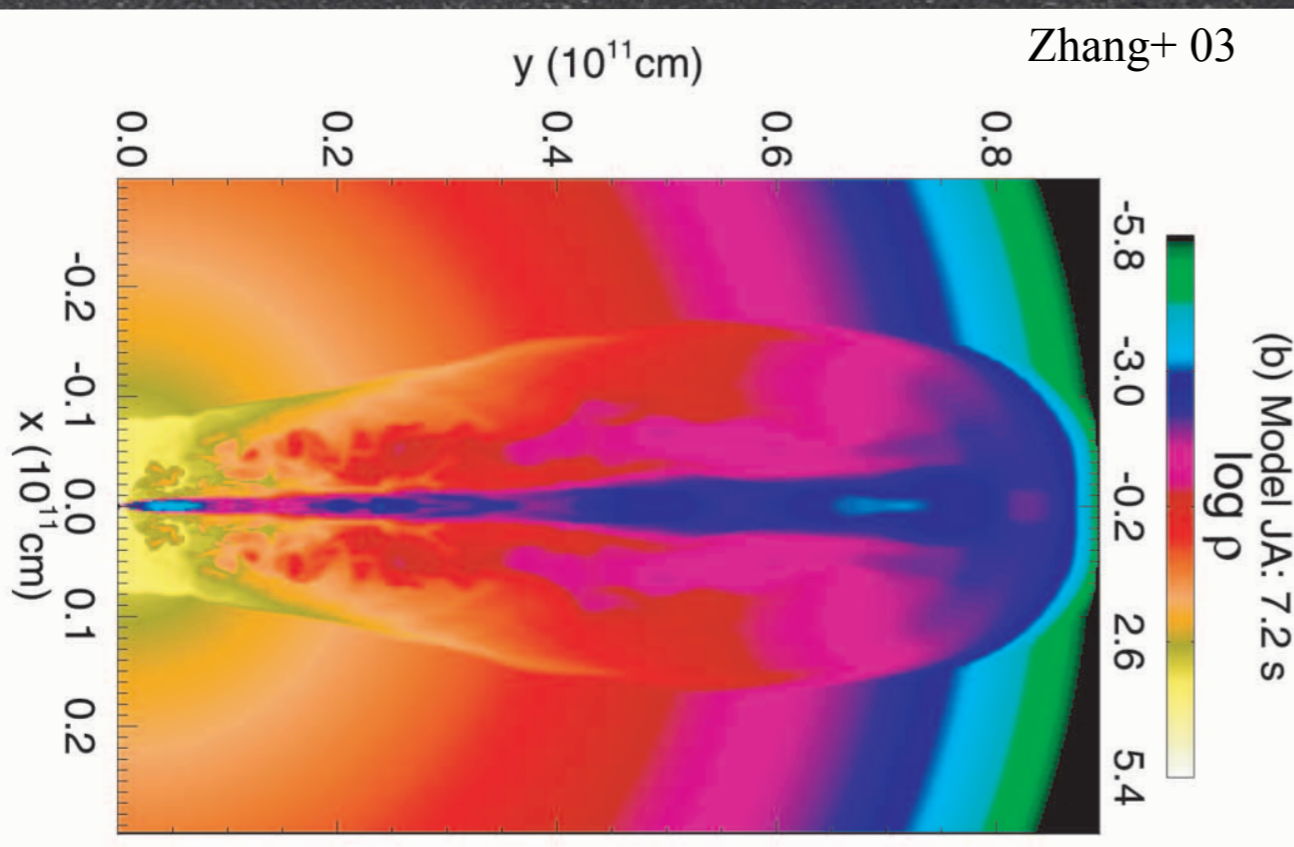
しかし、単純に星の外層を飲み込んでいくと、ジェットの質量はすぐに大きくなってしまふ。

$$M \sim M_* \Delta\Omega \sim 0.3 M_{\odot} \left(\frac{M_*}{10 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\theta_j}{10^\circ} \right)^2$$

コラプサーシナリオ

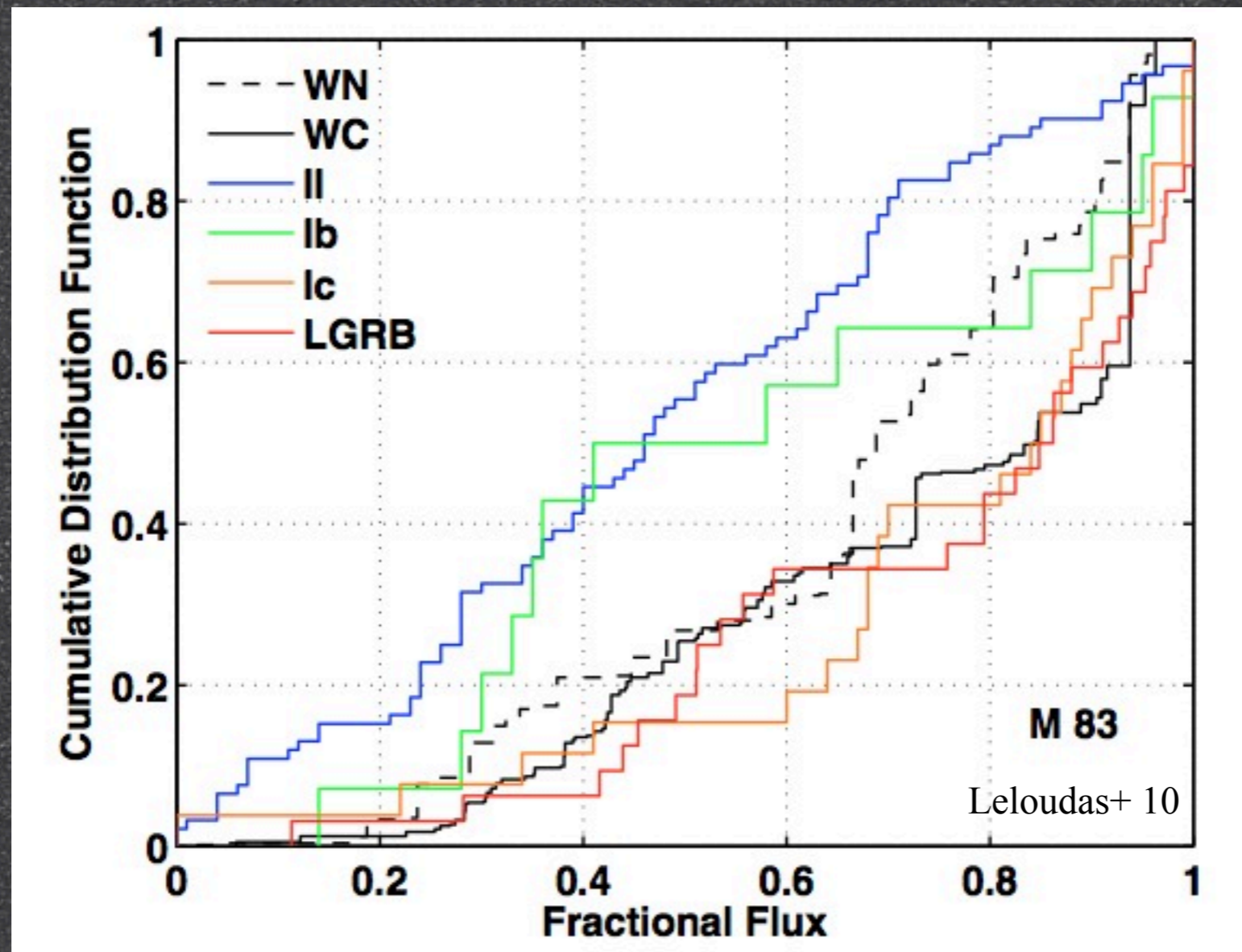


- 大質量星の重力崩壊によって、ブラックホール+降着円盤システムができる
- 降着物質が”何らかのメカニズム”によって絞られた相対論的ジェットとして放出される



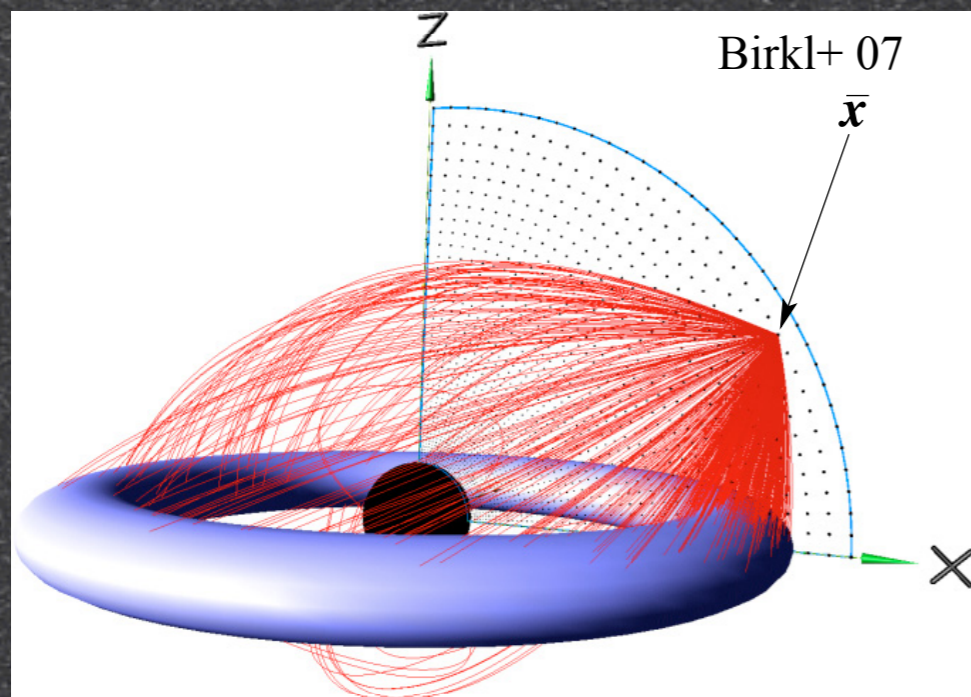
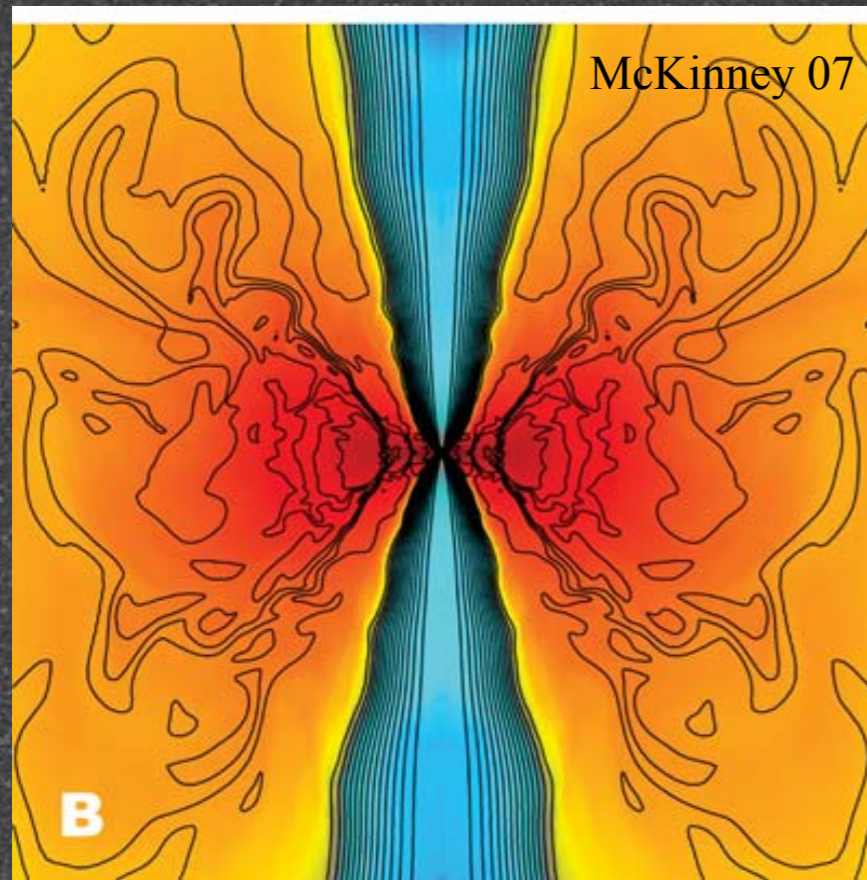
- $\Gamma_h < \theta_j^{-1}$ であれば、ジェット物質が衝撃波を叩いた後に外側に回り込む
 - ▶ コクーン形成
 - ▶ バリオンロード問題の一つの回避法
- ジェットヘッドが星を突き破ることが出来れば、GRB 形成

コラプサーシナリオの検証



- 銀河内の位置は、Ic 型超新星に近い
- 親星としては、Wolf-Rayet 星の分布に近い

ジェット生成



- どうやってジェットを作っている？
- GRB に関連するところで一番よく分からない部分
- 有力なシナリオ
 - ▶ 磁気駆動
 - ▶ ニュートリノ対消滅

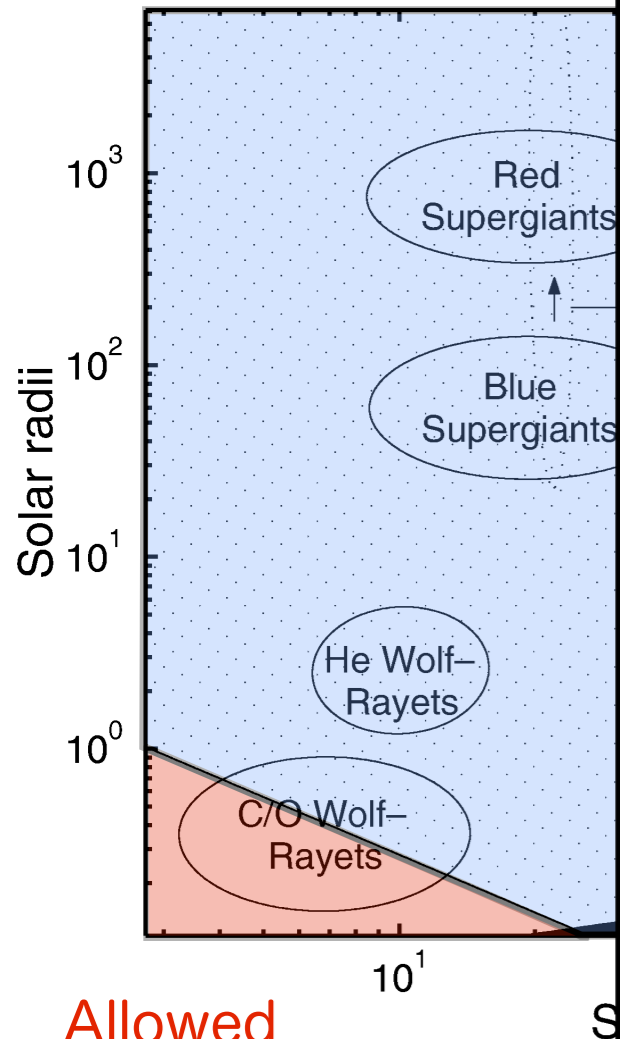
コン14a 伊地知さん

コン15a 杜さんの講演参照

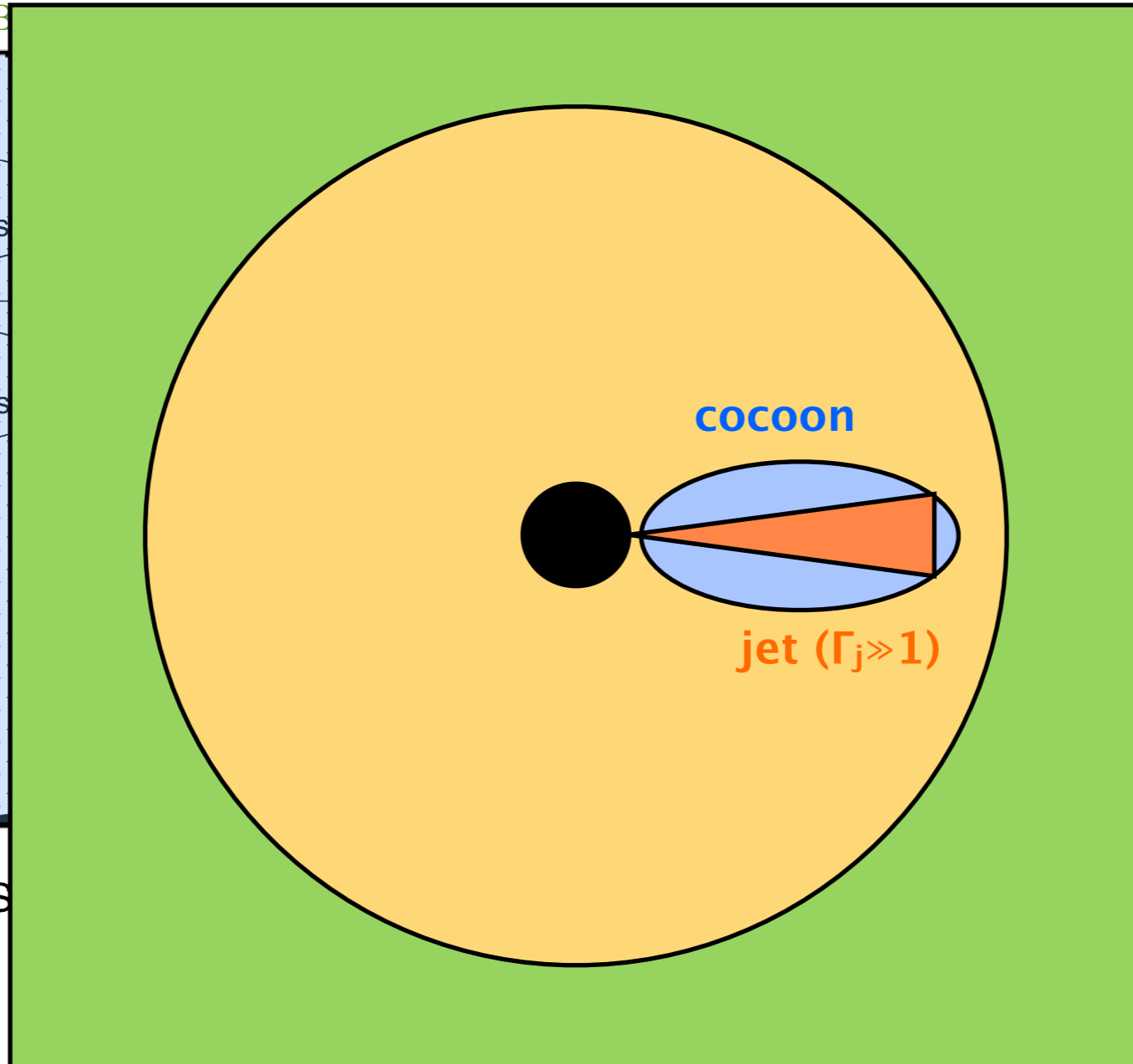
GRB の親星の条件

Matzner 03

based on constraints for GRB



☞ GRB progenitor



“典型的標準”条件

☞ トが典型的な継続時間
で星の外層を突き破る

コンパクトな必要あり

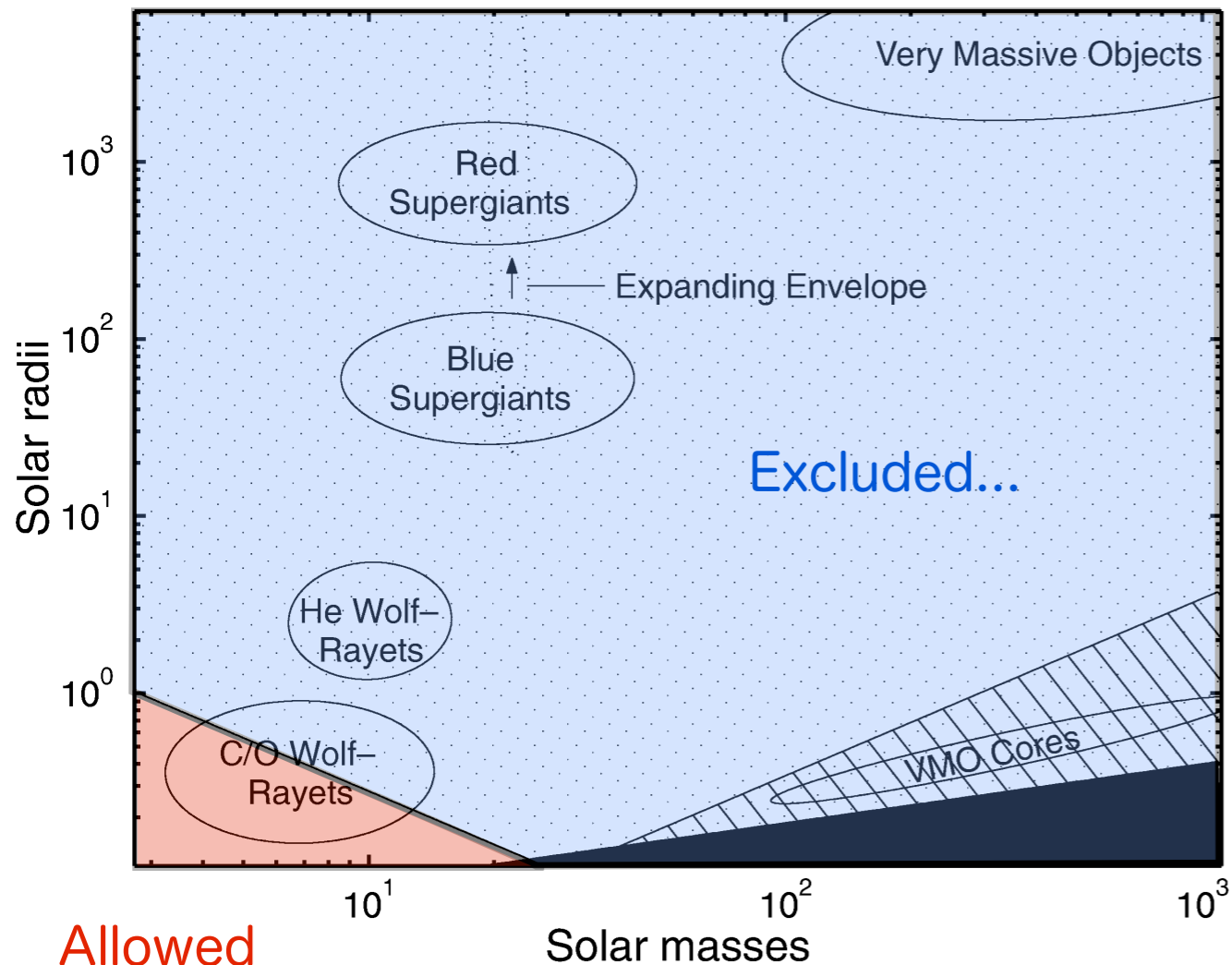
$R \sim 10^{13-14} \text{cm}$)があって

(GRB-SN Ibc 関係と無矛盾)

GRB の親星の条件

Matzner 03

based on constraints for GRB 000418 ($T \sim 30$ s)



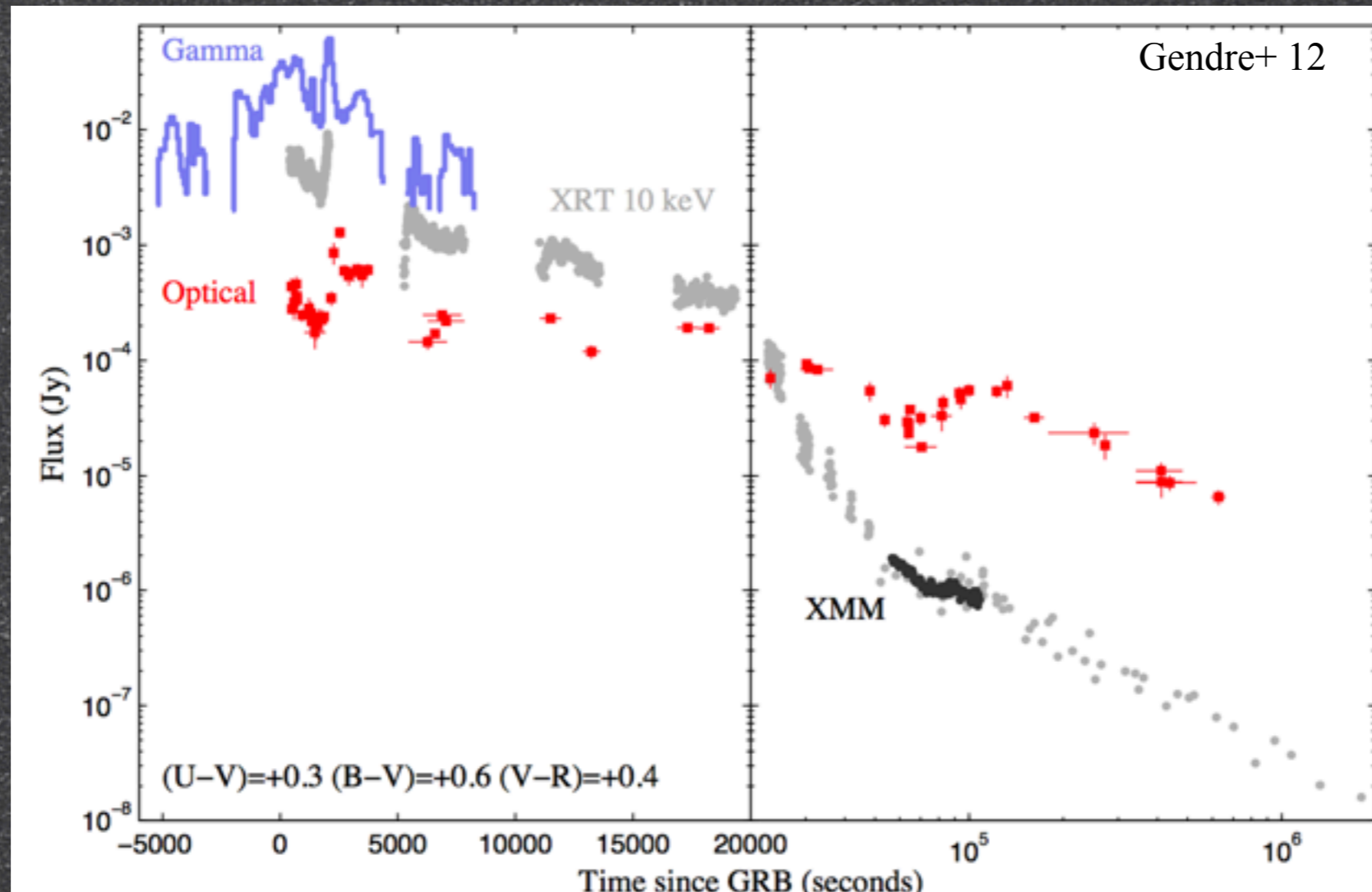
Allowed

☞ GRB progenitor

GRB形成の”古典的標準”条件

- ☛ 相対論的ジェットが典型的な継続時間程度($\sim 0(10)$ 秒)で星の外層を突き破る
- ☞ 星は十分コンパクトな必要あり
- ☞ 水素外層 ($R \sim 10^{13-14}$ cm)があってはならない(GRB-SN Ibc 関係と無矛盾)

最近の話題: Ultra-long GRBs

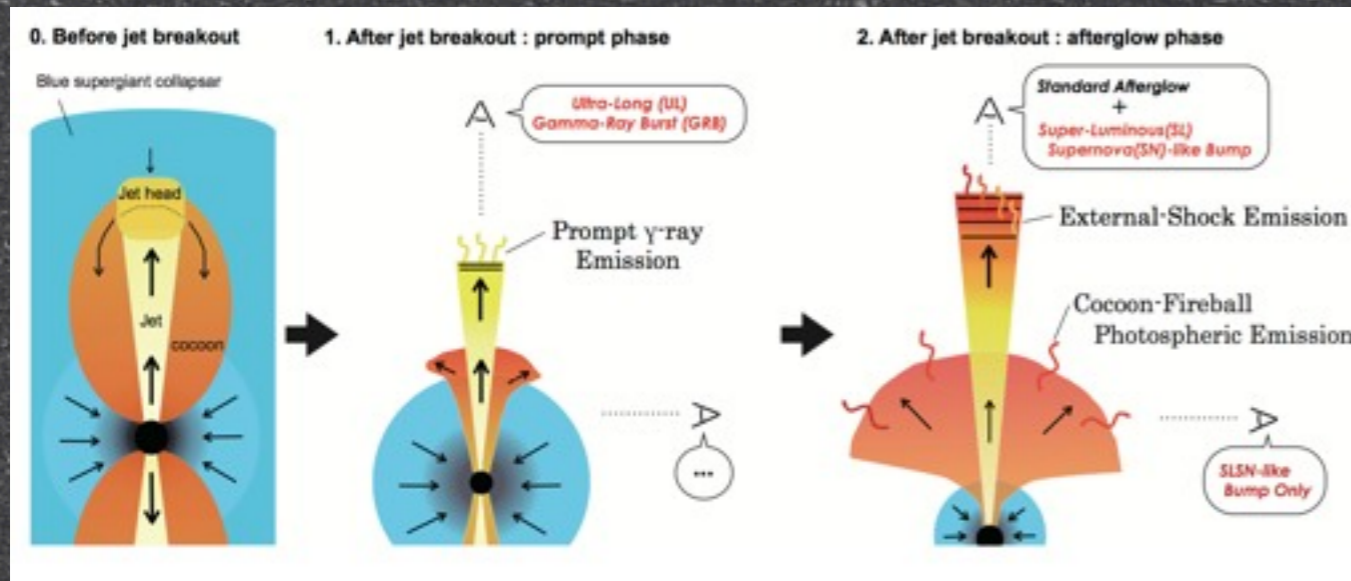


- 最近、duration が $\sim 10^4$ 秒にも及ぶ非常に長いガンマ線バーストが発見された (Ultra-Long GRB; ULGRB)

▶ GRB 101225A, 111209A, 121027A

ULGRBとコラプサーの証拠？

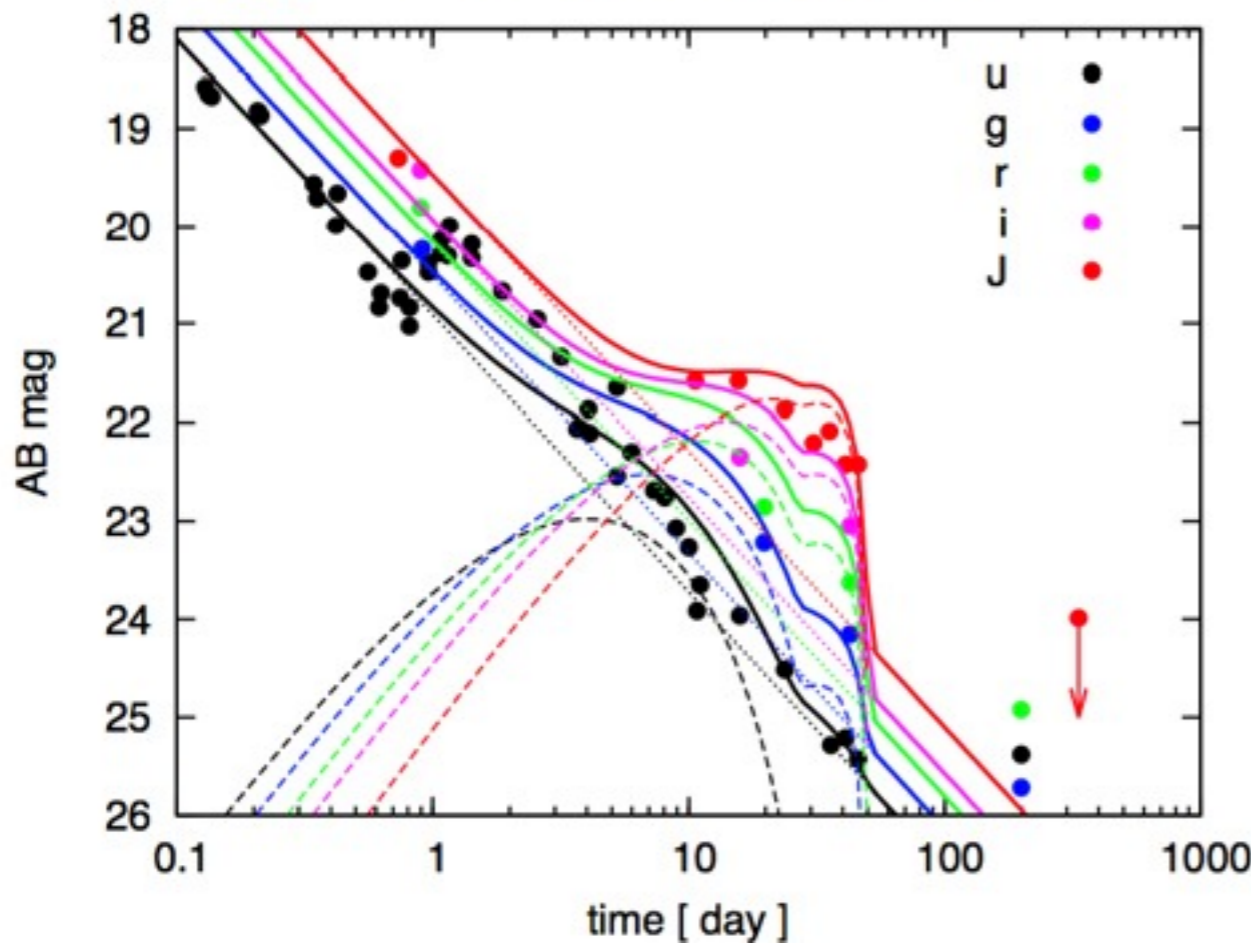
Nakauchi, Kashiyama, YS, & Nakamura, arXiv:1307.5061



即時放射

- ▶ 青色超巨星がGRBを起こしたとすると、エネルギーと継続時間が説明できる

GRB 111209A, UV - Optical - IR



残光

- ▶ 明らかに普通の残光モデルでは説明できない bump がある
- ▶ コラプサーモデルの自然な帰結であるコクーンからの放射で残光が説明可能

ガンマ線バーストの小まとめ

● 分かっていること

- ▶ 長い継続時間のガンマ線バーストは大質量星の死によって引き起こされる
- ▶ 相対論的なジェットによって作られている

● 分かっていないこと

- ▶ どうやってジェットを作る？
- ▶ 天体のどういう個性が GRB の生成を決める？

まとめ

- 超新星と GRB は宇宙で最大規模の大爆発
- エネルギーと時間の二つスケールより、コンパクト天体によって引き起こされていることが分かる
- 両者は同一の天体が起こすことがあることも観測的に明らかにされた
- 大質量星の死
- しかし、いまだどうやって爆発を起こしているのかは未知