

素核宇宙融合レクチャーシリーズ 第13回

# “ロングガンマ線バーストのエンジンとは?”



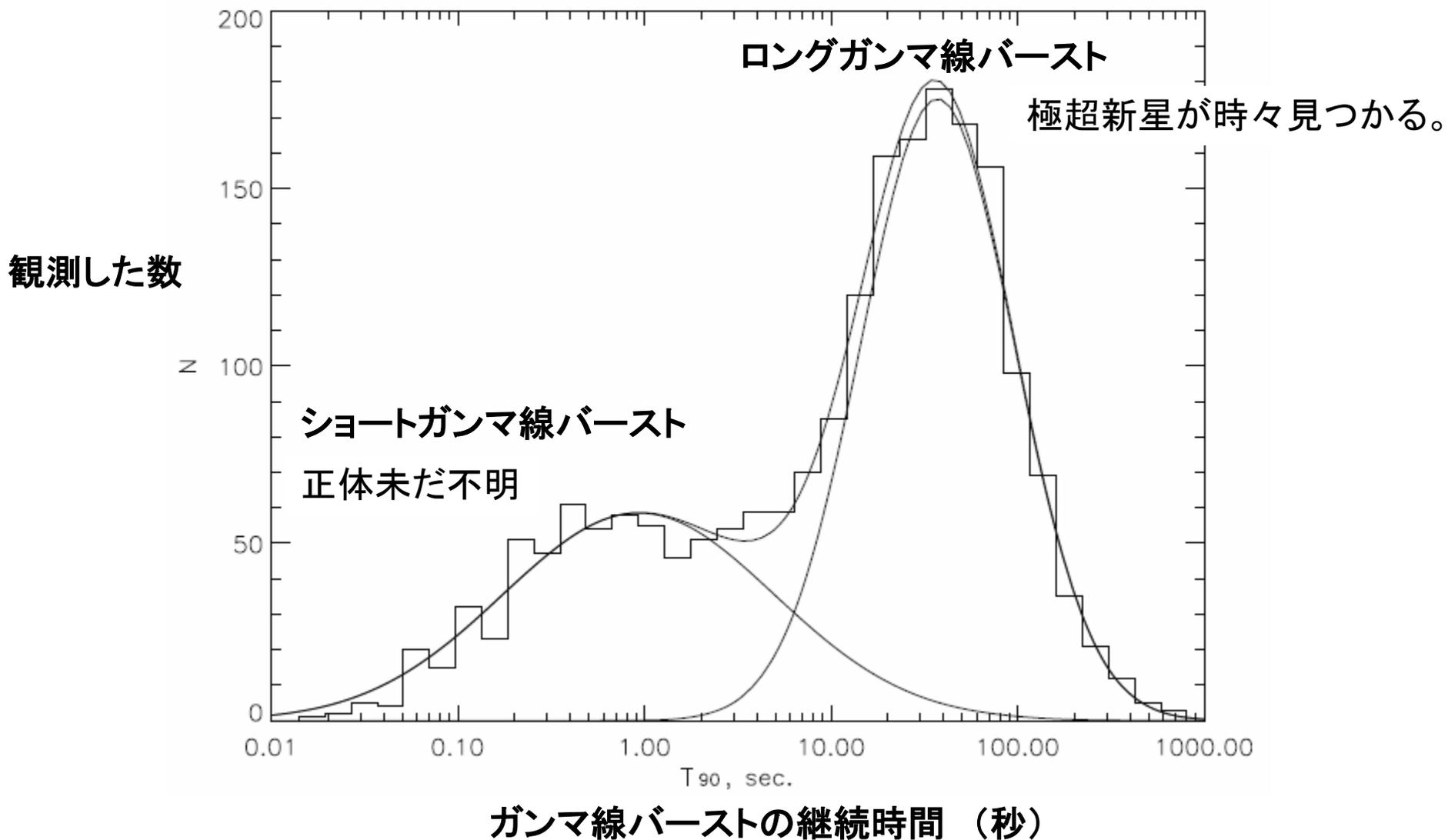
長瀧天体ビッグバン研究室

理化学研究所  
准主任研究員

長瀧 重博

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」  
共催：理化学研究所 iTHESプロジェクト 2014年11月27日-28日、理研和光キャンパス

# ガンマ線バーストの起源は2つ？



# エンジン問題に入る前に: 我々のゴールはガンマ線バーストの完全理解

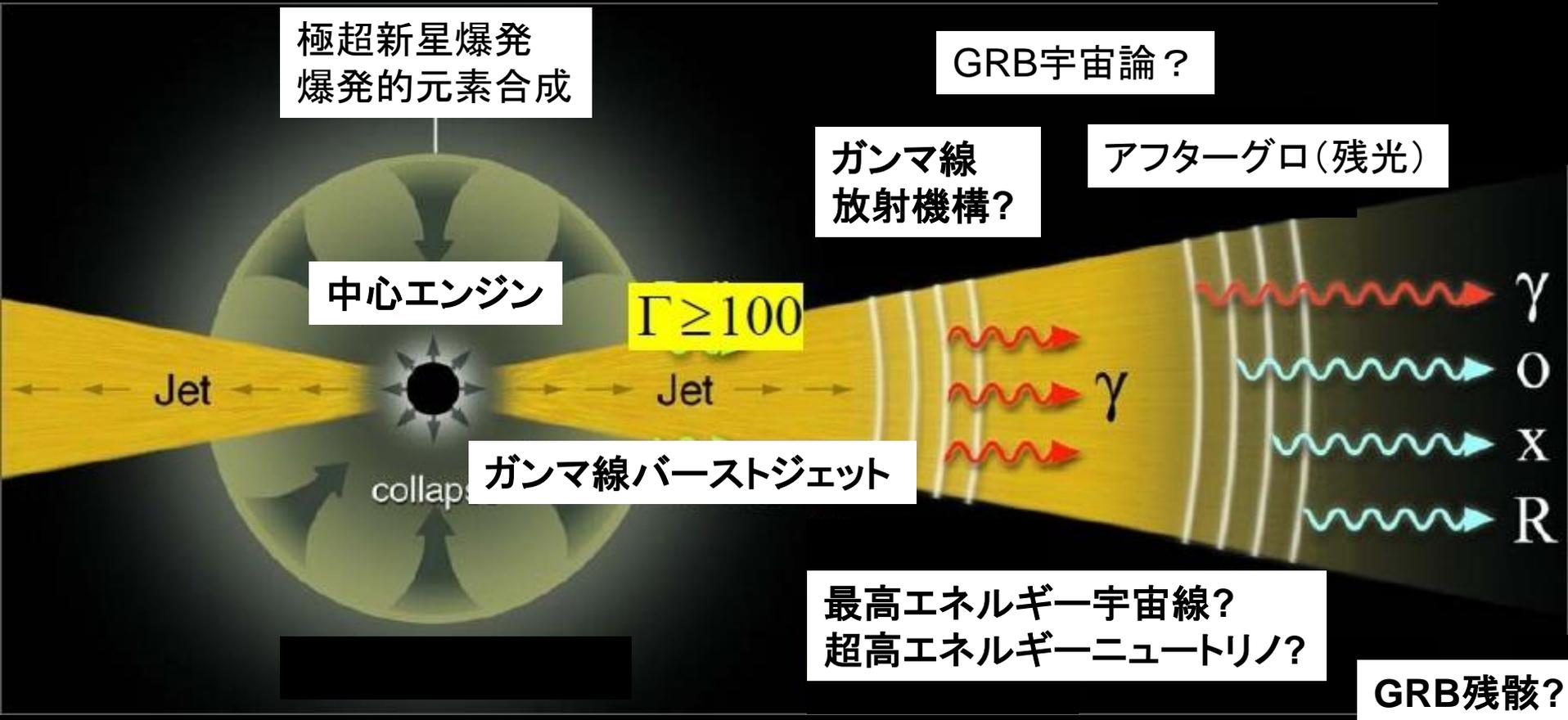


Figure from P. Meszaros: Modified by S.N.

# 何故超新星爆発機構ではだめなのか？

- ガンマ線バースト(ジェット)を説明出来ない(光速の $\sim 0.99999$ 倍の速度)。
- 極超新星を説明出来ない(10倍の爆発エネルギー)。
- 発生頻度からもガンマ線バースト・極超新星は特別。

異なる爆発機構でガンマ線バースト・極超新星になるのだろう。

# ガンマ線バーストの”軽さ”について

$$E = Mc^2\Gamma = 10^{51}\text{erg}$$

Eはガンマ線バースト流体のエネルギー  
Mはガンマ線バースト流体の静止質量

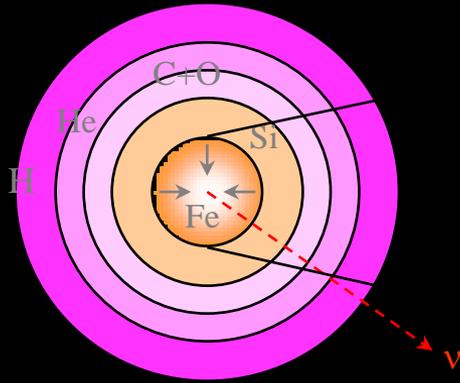
たとえば $\Gamma=500$ なら

M～太陽質量の百万分の一！ << 親星の質量～10倍太陽質量。

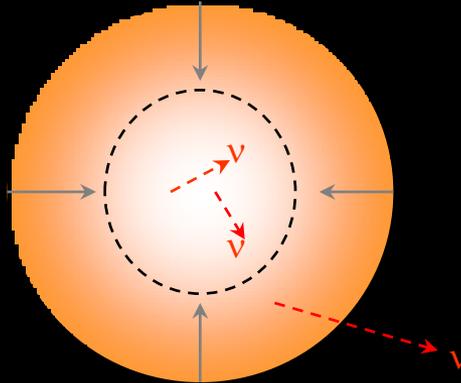
**極度なエネルギー集中が必要！**

# 比較：解明されてきた超新星爆発のメカニズム

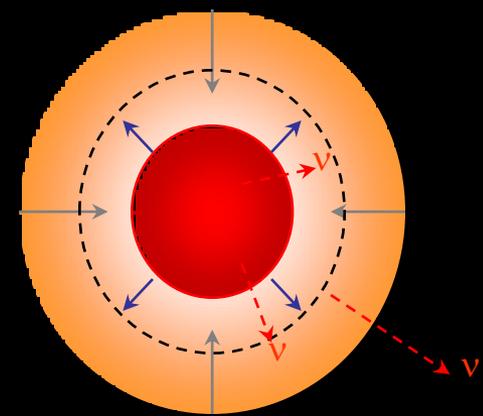
核燃料不足。  
重力により潰れる



密度上昇。  
ニュートリノすら  
閉じ込められる



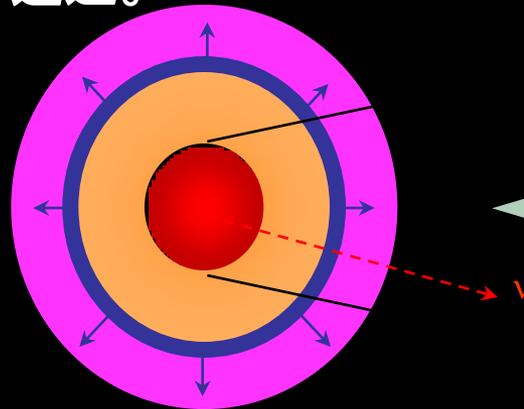
更に密度上昇。  
中性子星形成。  
非常に固くなる。



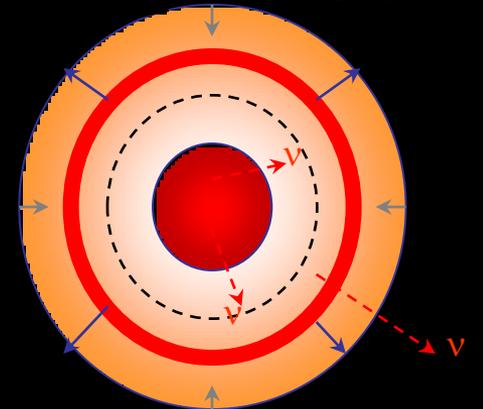
超新星爆発！



爆発波面が星を  
通過。



反跳による爆発波面形成。  
ニュートリノによる加熱。



ガンマ線バーストのエンジンは全く  
解明されていない。

?



# 重力崩壊型超新星の爆発エネルギー を決めている物理

中性子星の自己重力エネルギー:  $\sim 10^{53}$  erg

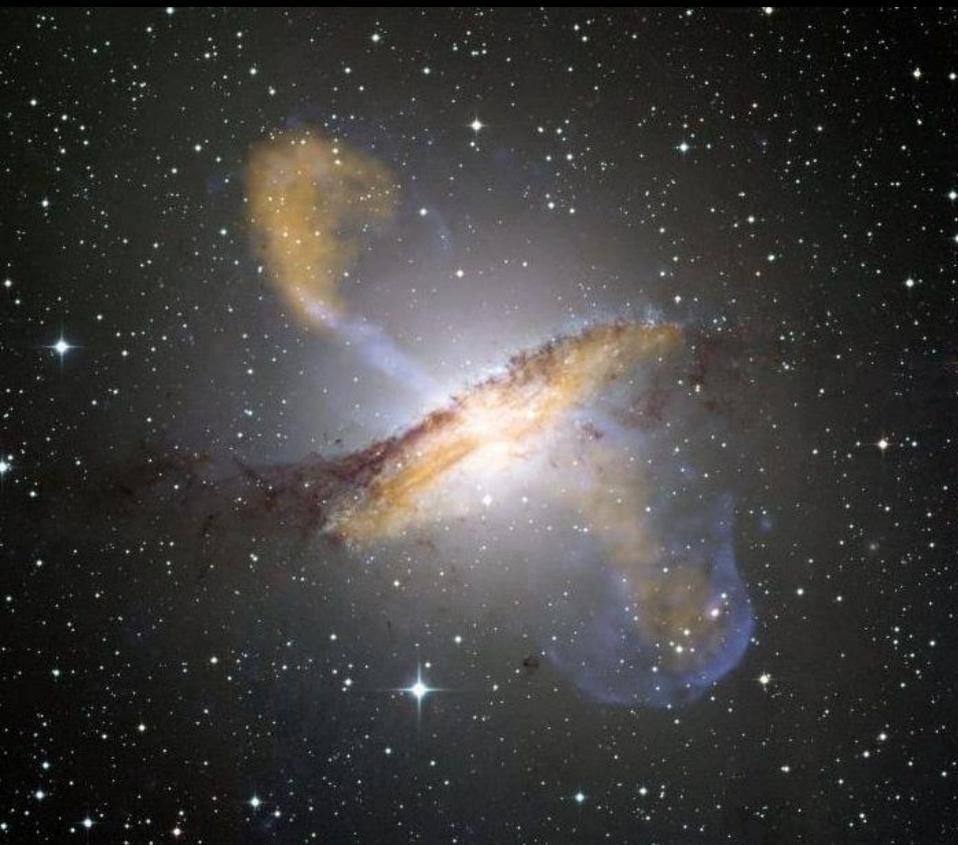
解放されたエネルギーの担い手: ニュートリノ

ニュートリノと物質の相互作用: 弱い相互作用(1%程度)

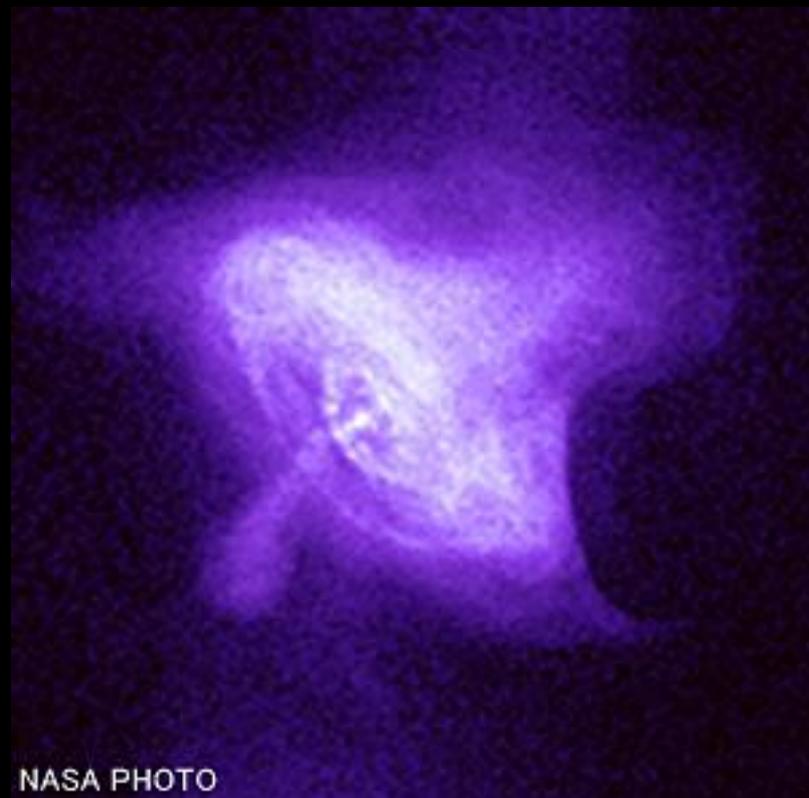
→ 爆発エネルギー  $\sim 10^{53}\text{erg} \times 1\% = \underline{10^{51}\text{erg}}$ .

このいずれか、あるいは全てを根本的に変えないとガンマ線バーストにならない。

# (ジェットを信じれば)きっと回転は本質的



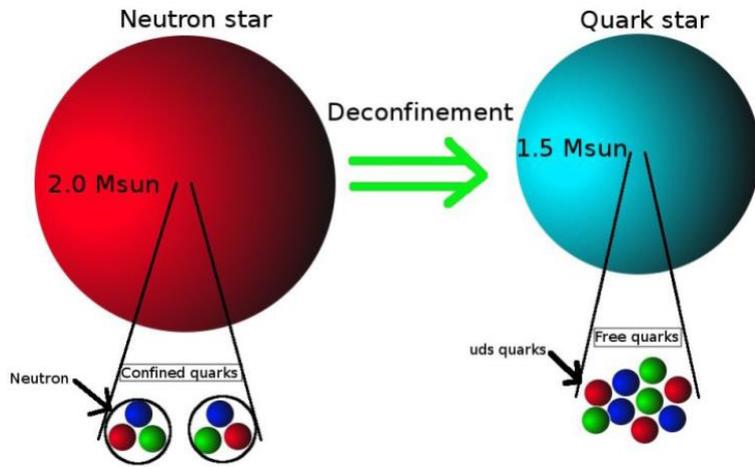
活動銀河核  
ケンタウルスA (NASA)



カニパルサー  
(回転中性子星)

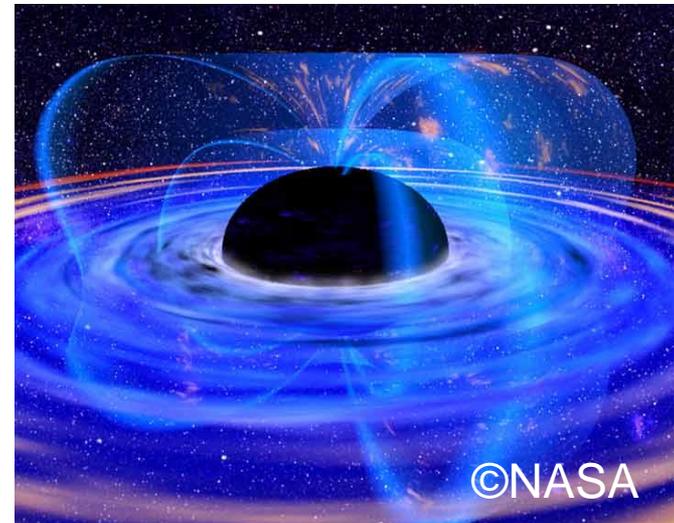
# 有力なアイデア: 1

解放されるエネルギーを大きくする。



中性子星でなくクォーク星

自己重力エネルギー



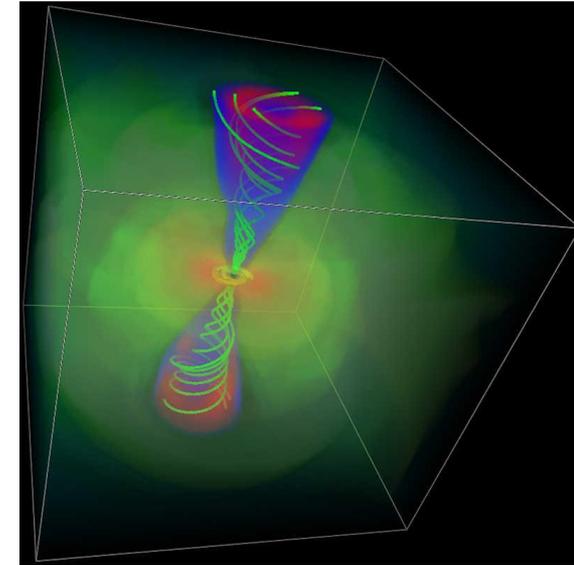
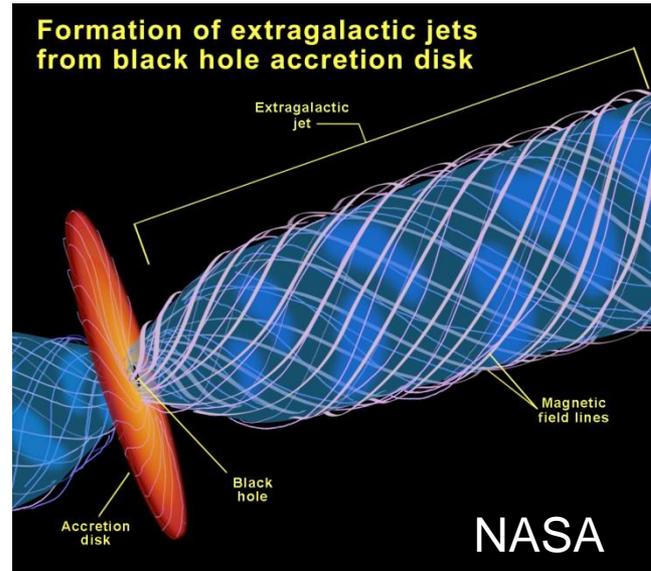
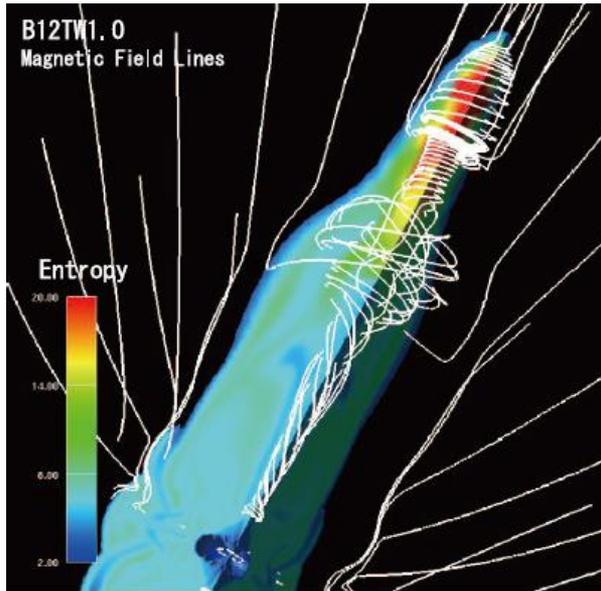
中性子星でなくブラックホール

降着エネルギー(ブラックホールに降り積もる物質が解放する重力エネルギー)

回転エネルギー

# 有力なアイデア:2

エネルギーの担い手:エネルギー効率を高くする → 磁場



中性子星の回転エネルギーを磁場に変換。

Takiwaki+09

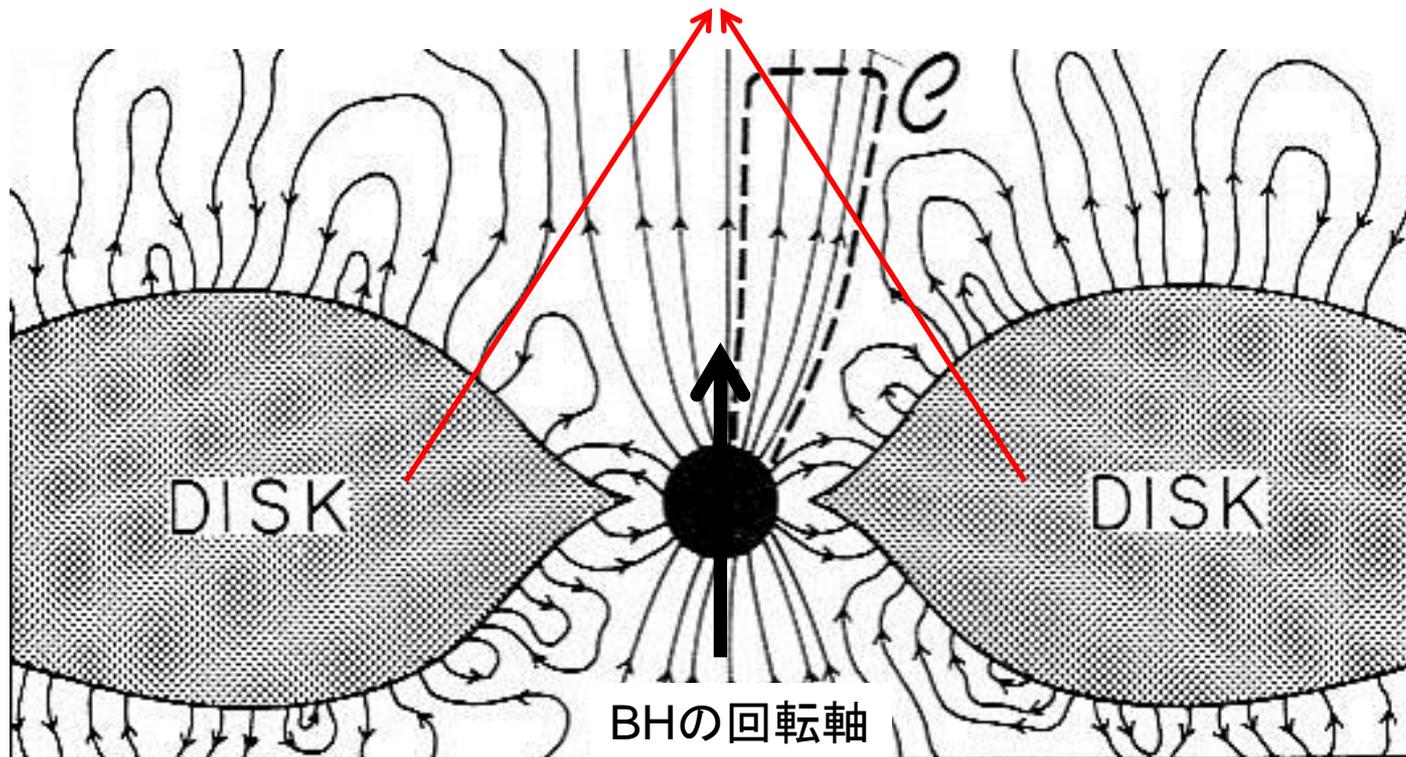
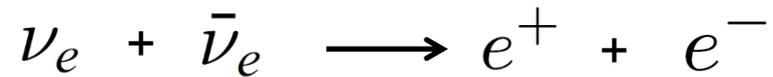
ブラックホールを取り巻く円盤の回転エネルギーを磁場に変換。

ブラックホールの回転エネルギーを電磁場を介して抽出する (Blandford-Znajek効果 1977)。シミュレーションは McKinney & Blandford 09

# 有力なアイデア:3

超新星: ニュートリノと物質の相互作用 (1%)

GRB: ニュートリノとニュートリノの相互作用?



図はThorne & Macdonald 1986より。矢印は磁力線。

# マグネターモデル

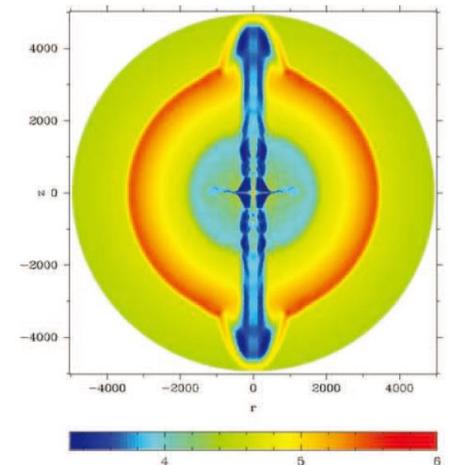
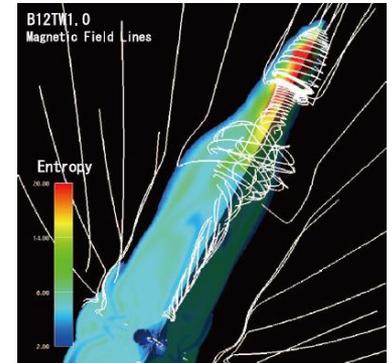
エネルギー源は中性子星の回転エネルギー。

回転エネルギーを剛体球回転近似で評価すると

$$E_{\text{rot}} = 3 \times 10^{52} \left( \frac{M}{2M_{\odot}} \right) \left( \frac{R}{10\text{km}} \right)^2 \left( \frac{1\text{ms}}{T} \right)^2 \text{ erg}$$

$$\begin{aligned} \dot{E} &= 4\pi R^2 \times f \times c \left( \frac{B^2}{8\pi} \right) \\ &= 1.5 \times 10^{51} \left( \frac{f}{0.1} \right) \left( \frac{R}{10\text{km}} \right)^2 \left( \frac{B}{10^{15}\text{G}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1} \end{aligned}$$

$$\longrightarrow E/\dot{E} \sim 10 \text{ sec}$$



- 従って、高速、強磁場中性子星ならば、ガンマ線バースト・極超新星のエネルギー・継続時間を自然に説明出来そうである。

- △ 爆発エネルギーは高々 $10^{53}\text{erg}$ ?  
クォーク星ならより高いエネルギーを出せる?

図: 上 Takiwaki+09  
下 Komissarov & Barkov 07

# コラプサーモデル

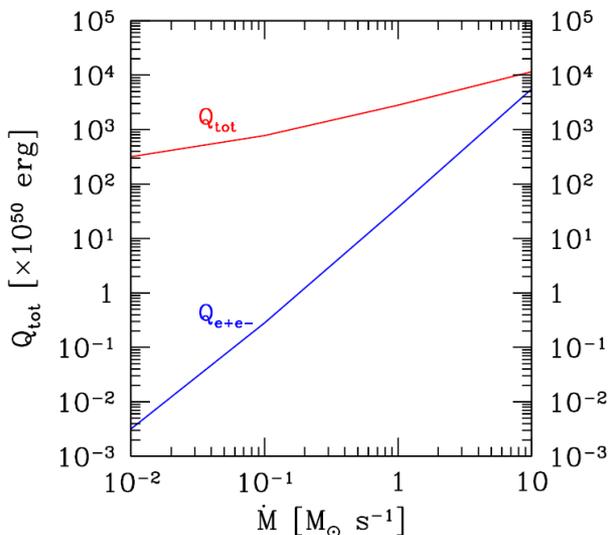
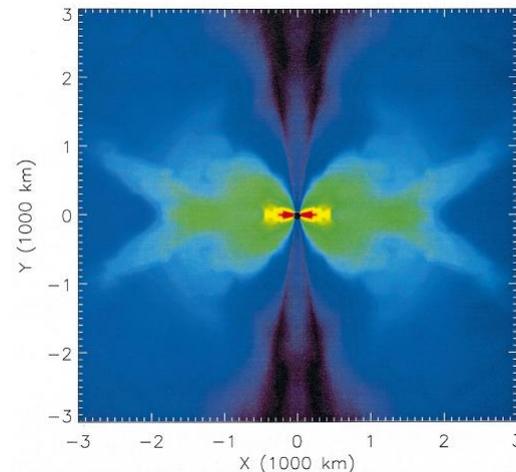
ブラックホール  
形成モデル。

エネルギー源はブラックホールに落ちていく物質の重力ポテンシャルエネルギー。

$$E_{\text{pot}} \sim \frac{GM_{\text{BH}}M_{\text{acc}}}{r_{\text{H}}} \sim \frac{GM_{\text{BH}}M_{\text{acc}}}{\frac{2GM_{\text{BH}}}{c^2}} \sim 0.5M_{\text{acc}}c^2$$

$$\sim 10^{54} \left( \frac{M_{\text{acc}}}{1M_{\odot}} \right) \text{ erg}$$

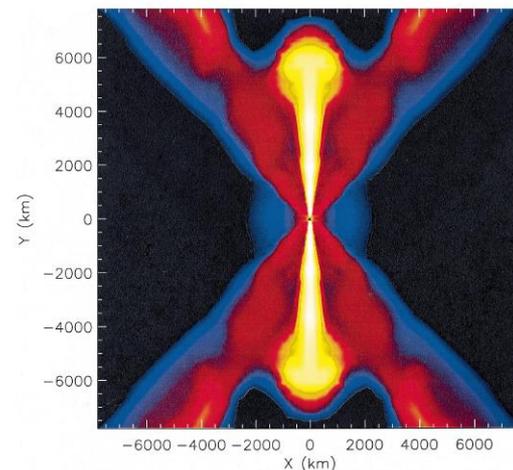
$$\dot{E}_{\nu\bar{\nu}} \simeq 1.1 \times 10^{52} \text{ erg s}^{-1} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\odot}} \right)^{-3/2} \left( \frac{\dot{M}}{M_{\odot}/\text{s}} \right)^{9/4} \quad \text{Zalamea \& Beloborodov 11}$$



ニュートリノ対消滅効率は  
質量降着率に大きく依存する。

GRB・極超新星を実現する条件は  
結構難しいという指摘もある。

S.N., Takahashi, Mizuta, Takiwaki 07



S.N., Kohri, Ando, Sato 03

図はMacFadyen & Woosley 99

# 磁場入りコラプサーモデル

エネルギー源はブラックホール周囲に出来る円盤の回転エネルギー。

回転エネルギーを剛体回転平板近似で評価すると  
(円盤半径にて重力=遠心力を仮定)、

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{4} \frac{GM_{\text{BH}}M_{\text{Disk}}}{R}$$

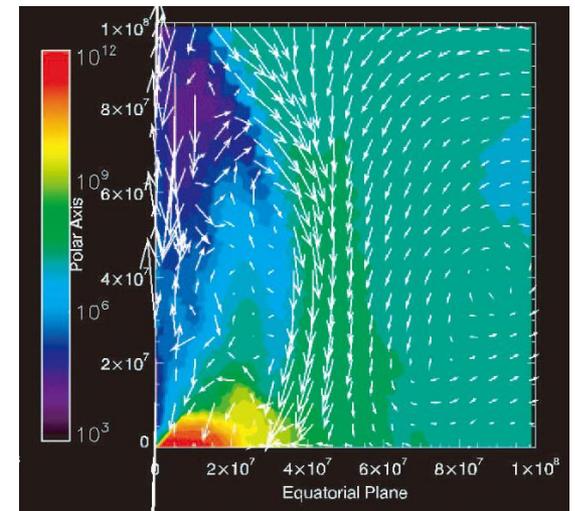
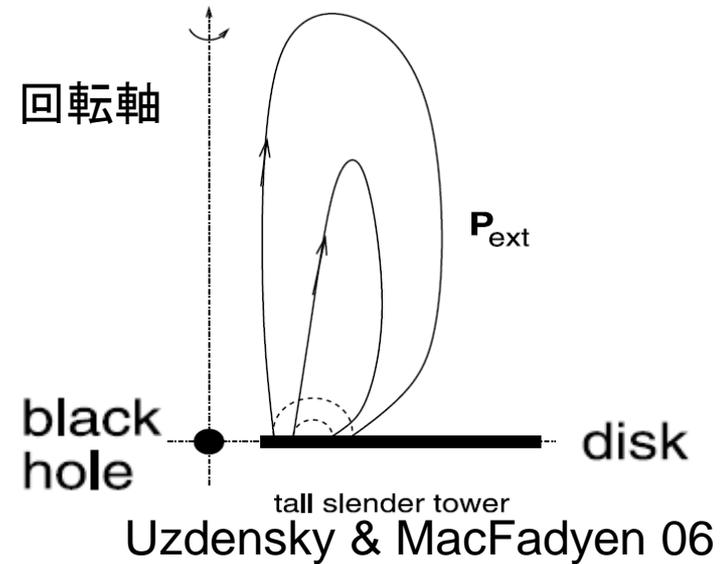
$$\sim 2 \times 10^{52} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{3M_{\odot}} \right) \left( \frac{M_{\text{Disk}}}{1M_{\odot}} \right) \left( \frac{10^7 \text{cm}}{R} \right) \text{ erg}$$

$$\dot{E} = \pi R^2 \times f \times c \left( \frac{B^2}{8\pi} \right)$$

$$\sim 2 \times 10^{51} \left( \frac{f}{0.5} \right) \left( \frac{R}{100\text{km}} \right)^2 \left( \frac{B}{10^{14}\text{G}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1}$$

マグネターに近い状況。但し降着と共に次第に  
磁力線はブラックホールにアンカーされていく。

→ BZ-コラプサーへ。



S.N., Takahashi, Mizuta, Takiwaki 07

# BZ-コラプサーモデル

Blandford-Znajek 1977

エネルギー源はブラックホールの回転エネルギー。

$$E_{\text{rot,MAX}} = 1.6 \times 10^{54} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{3M_{\odot}} \right)$$

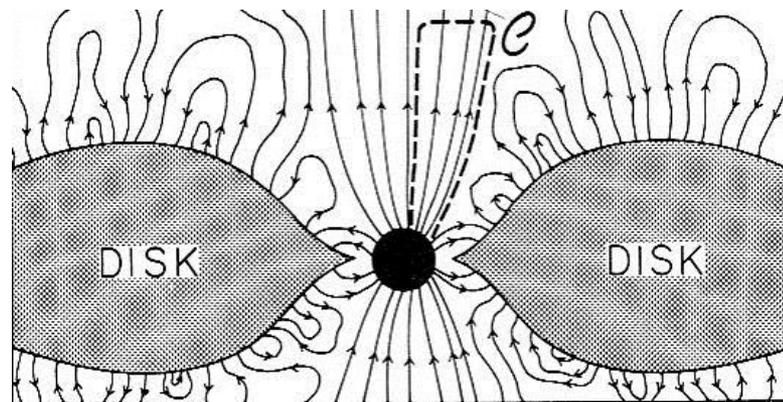
$$\dot{E} \sim 4\pi R^2 \times f \times c \left( \frac{B^2}{8\pi} \right) a^2$$

$$\sim 10^{51} a^2 \left( \frac{f}{0.1} \right) \left( \frac{R}{8\text{km}} \right)^2 \left( \frac{B}{10^{15}\text{G}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1}$$

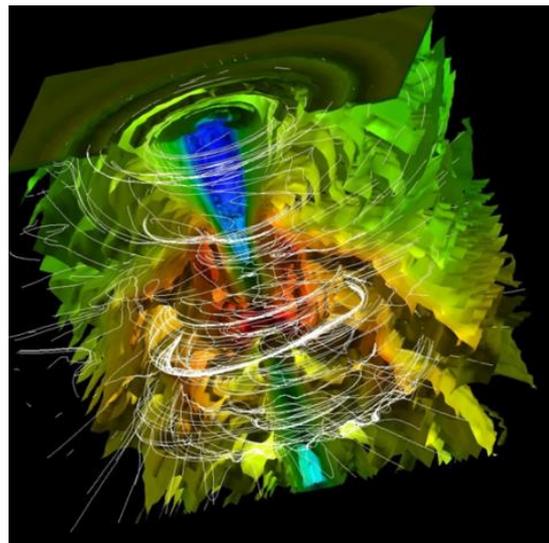
$[0 \leq a \leq 1]$

ブラックホールからPoyinting Fluxの形でエネルギーが湧き出てくる。その結果ブラックホール周囲の電磁場が増幅される。電磁場と結合している流体も影響を受ける。

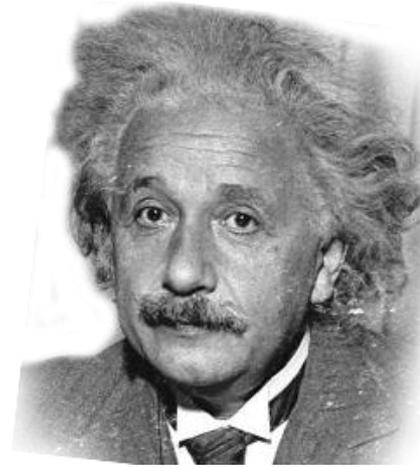
一般相対論的効果



Thorne & Macdonald 1986



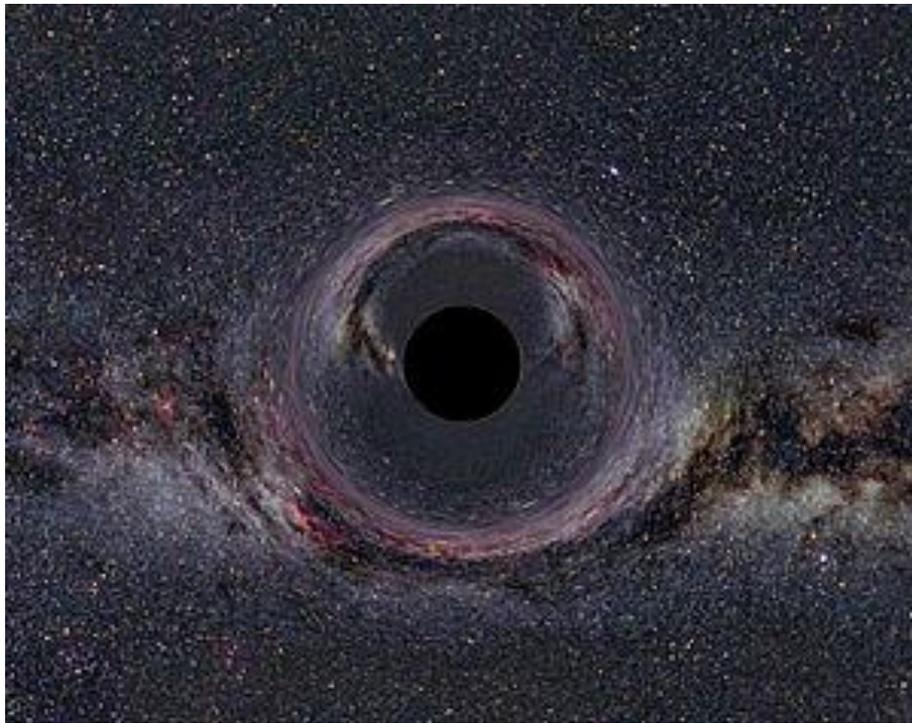
# ブラックホール解の歴史



- アインシュタイン氏が一般相対性理論 (アインシュタイン方程式) を提唱 (1915年)。
- アインシュタイン方程式の解として、ブラックホール解が発見される。
- 回転していないブラックホール解の発見: シュワルツシルト氏、1917年。
- 回転しているブラックホール解の発見: カー氏、1963年。

# イメージ通りのブラックホール

- 地平面に突入すると、どんなものでも脱出することが出来ない。
- すべてを吸い込む天体。



太陽質量の10倍のブラックホールが地球から600km離れた場所にあると想定して、背景の天の川銀河がどのように見えるかを理論的に計算したシミュレーション(Ute Kraus 氏、2004年)。

$$G^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu} \quad \text{アインシュタイン方程式}$$

$$\frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma^{\lambda}_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0$$

自由落下の方程式

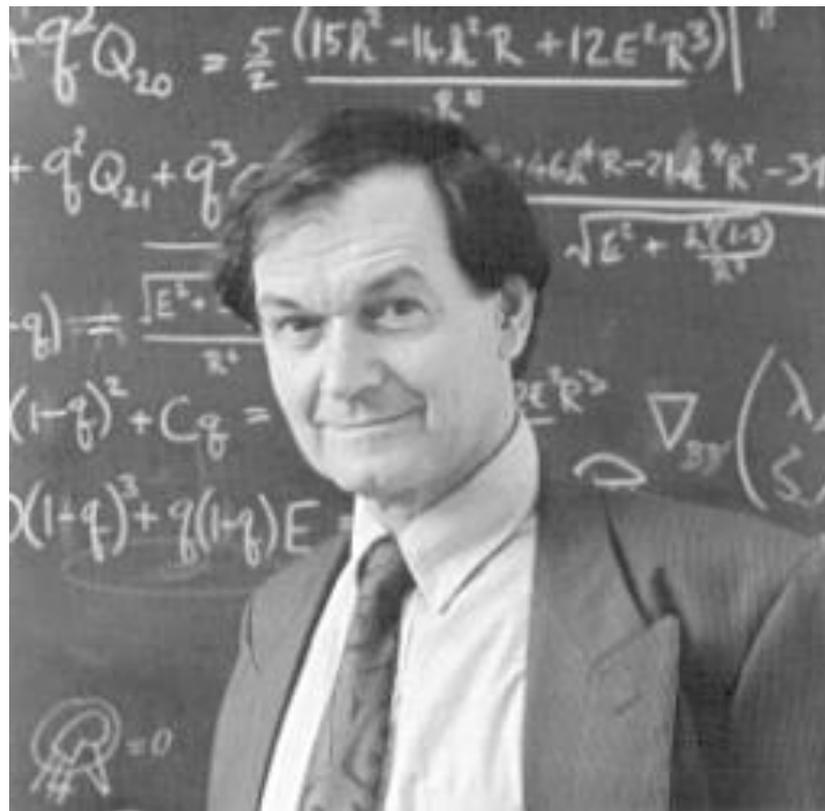
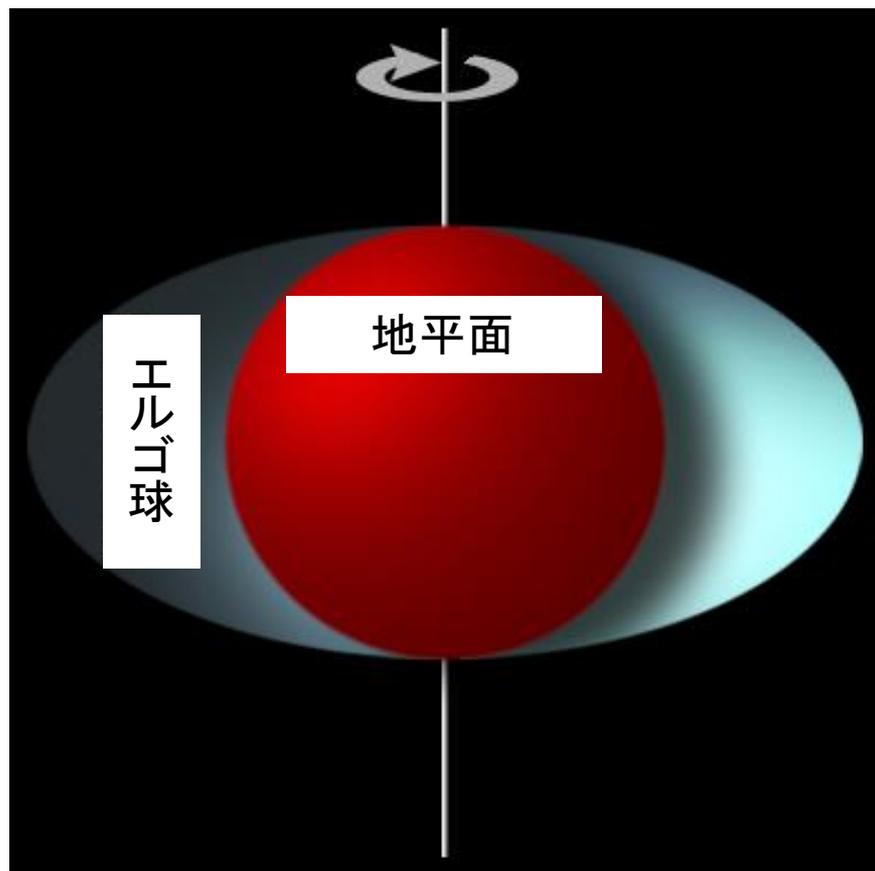
# ブラックホールからエネルギーを取り出せる？

- ブラックホールの重力エネルギーはブラックホールの蒸発機構 (ホーキング氏、1974年) で引き抜ける (量子効果)。効率は良くない (10倍の太陽質量のブラックホールが蒸発するのに $10^{70}$ 年)。
- ブラックホールの回転エネルギーは、効率よく引き抜ける可能性がある (ペンローズ氏、1971年; ブランドフォード・ズナジェック氏、1977年) (古典的効果)。

注: ガンマ線バーストの爆発時間 ~ 1-10秒

# 回転しているブラックホールからエネルギーは 引き出せる: ペンローズ過程

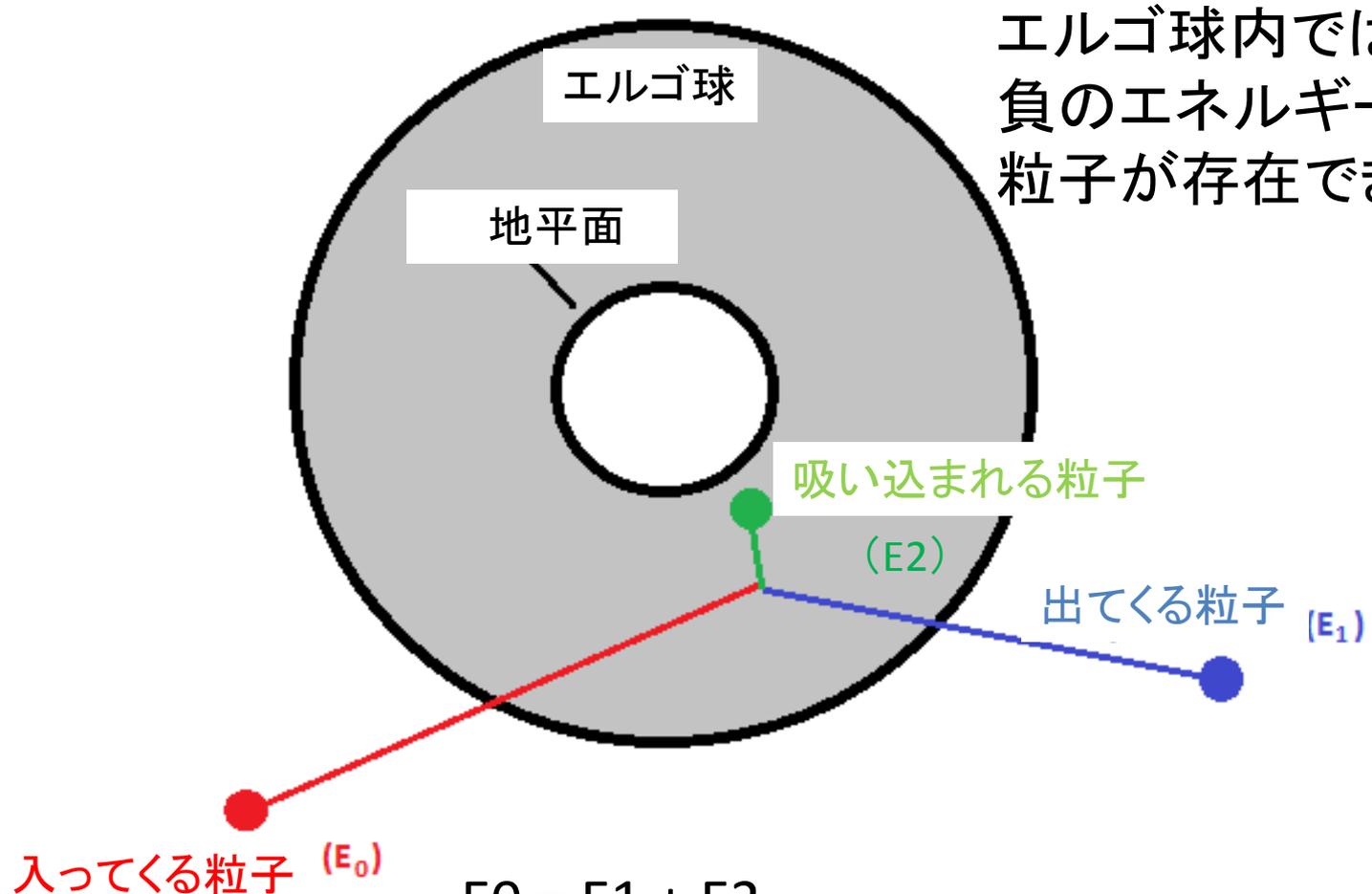
Roger Penrose (1971)



Roger Penrose (1931-)

回転しているブラックホールの概念図 (Wikipediaより)

# ペンローズ過程



エルゴ球内では  
負のエネルギーを持つ  
粒子が存在できる。

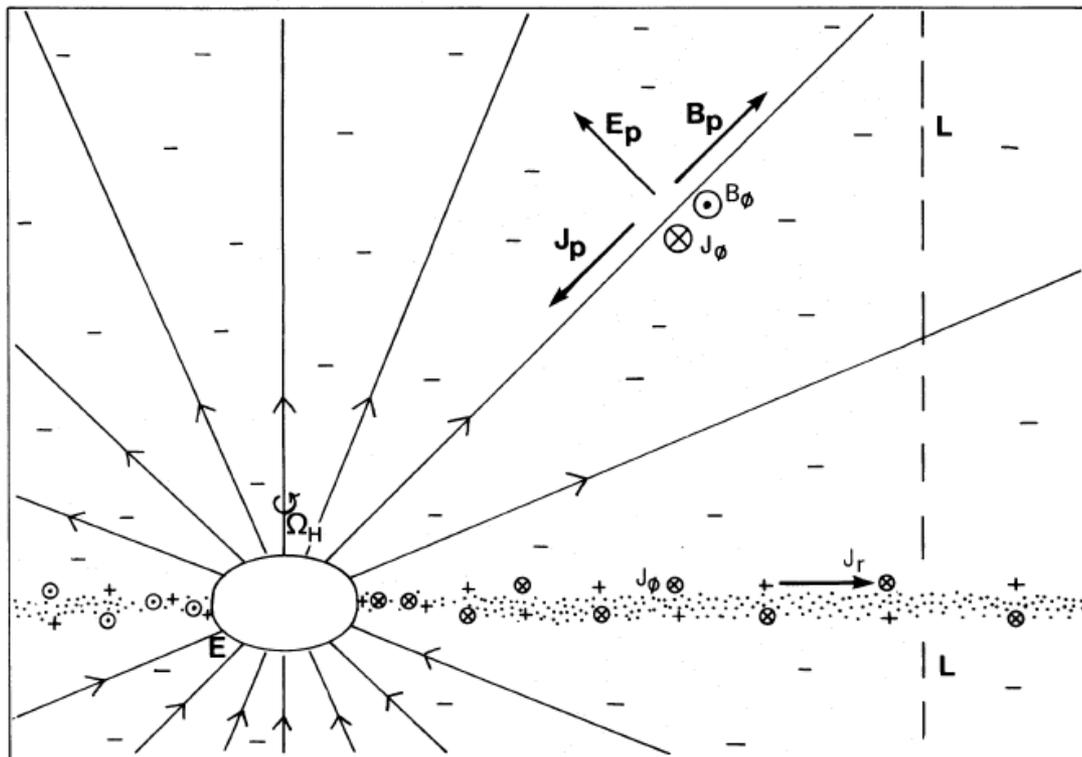
$$E_0 = E_1 + E_2$$

$$E_2 < 0$$

従って、 $E_1 > E_0$  (エネルギー獲得)

# 回転しているブラックホールからエネルギーは 引き出せる: ブランドフォード・ズナジェック過程

Blandford and Znajek (1977)



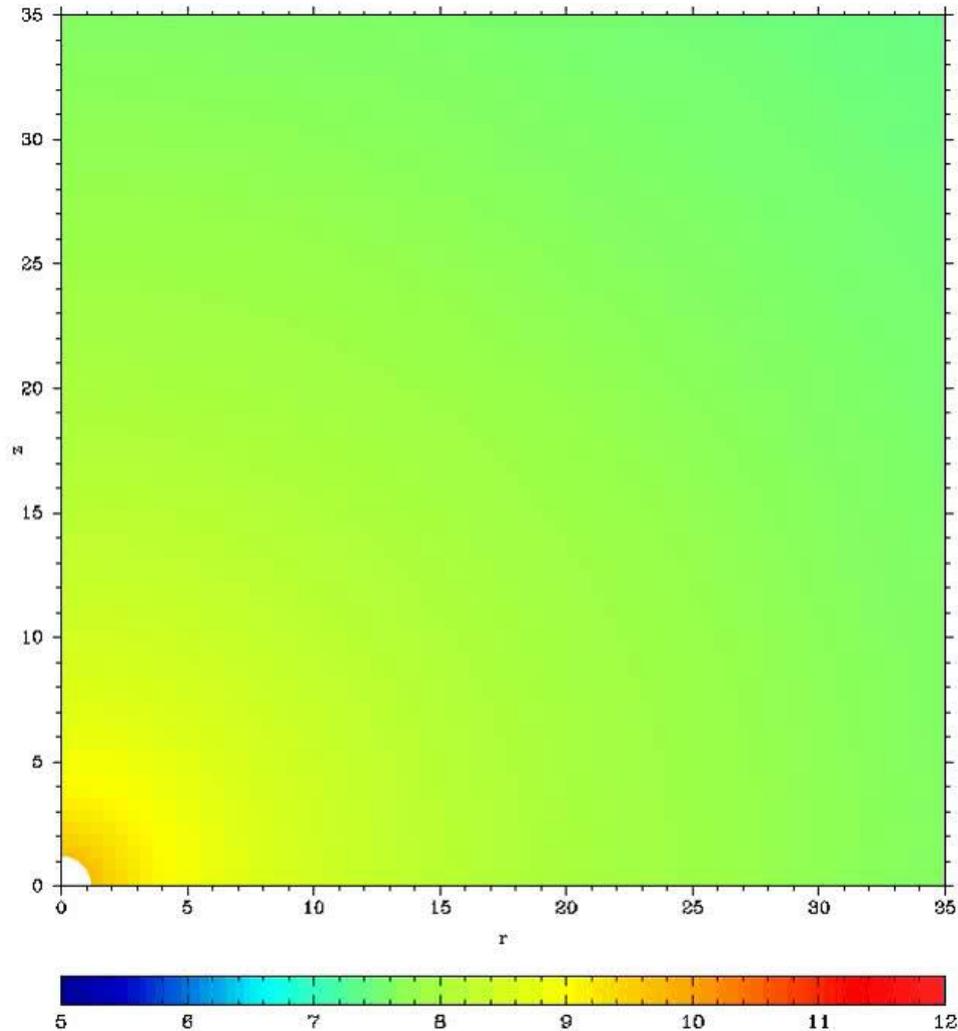
2005年カナダの会議  
左: Roger Blandford氏  
右: 私

ゆっくり回転している電磁場が、それより速く回転しているブラックホールに  
吸い込まれることによりエネルギーの流れとしては外向きになる。  
ブラックホールの回転エネルギーが効率よく引き抜かれる。

# BZ-コラプサーのシミュレーション例

COLLAPSE

t = 85.9



M. Barkov  
(RIKEN)

# モデルのまとめ

- ガンマ線バースト・極超新星の中心エンジンは殆ど理解されていない。
- 回転は全てのシナリオに共通して重要(ジェット形成のため)。
- コンパクト星型モデル: マグネター、クォーク星型マグネター
- ブラックホール型モデル: コラプサー、磁場入りコラプサー、BZ-コラプサー
- ほぼ未開拓で若い分野。様々な新しい可能性(重力波、ニュートリノ、元素合成など)。



ガンマ線バーストのコンピューターグラフィクスNASAのホームページより

完