

マグネターの反跳に関する数値計算

早稲田大学

澤井 秀朋

共同研究者

固武 慶 国立天文台

山田 章一 早稲田大学

理論懇シンポジウム 立教大学
2006年 12月25日

Outline

1. 導入
2. 数値計算のモデル
3. 結果
4. 中エネルギー超新星 2006aj
5. まとめと今後

※時間のない方は赤
枠で囲まれたページ
のみをご覧ください。

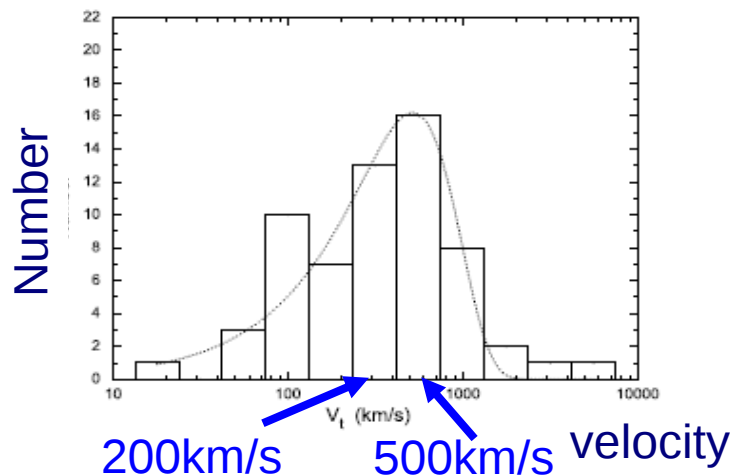
1. 導入

中性子星は一般に
大きな固有速度を持つ

平均的に 200~500 km/s
1000 km/s を超えるものもある



中性子星の固有速度分布



Zou et al. 2005

その由来については非対称な超新星爆発
によるシナリオが有望視されており、多くの
研究例があるが、いまだ論争中である。

一方、マグネターの固有速度については
理論研究、観測ともに乏しいのが現状である。

唯一の数値計算例

Neutrino parity-violation & rotation の効果を考慮した
赤道面对称の数値計算 (Kotake et al. 2005)

Magnetar

Strongly magnetized NS

Typical surface field

$\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ G}$

候補天体: SGR, AXP

Full numerical simulation は例がない！

► Magnetarの固有速度の観測

Proper motion の観測

4U 0142+61 < 1400 (D/10 kpc) km/s (Hulleman et al. 2000)

1E 2259+586 < 2500 (D/3 kpc) km/s (Ogelman & Tepedelenlioglu 2005)

SNRとの association より (Gaensler et al. 2001 & reference their in)

1E 1841-045 < 500 km/s

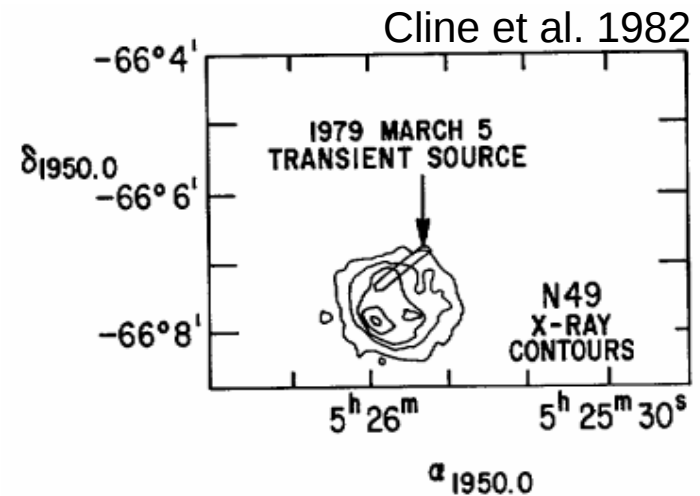
1E 2259+586 < 400 km/s

AX J1845-0258 < 500 km/s

不確定なSN association からの見積もり

→ SGR 0526-66 400-1400 km/s ?

→ SGR 1627-41 800-4000km/s ?



十分な観測があるとは言えない。

理論研究によって、今後の観測を予言することには意義がある。

▶ 磁気流体力学由来の固有運動

磁気回転超新星

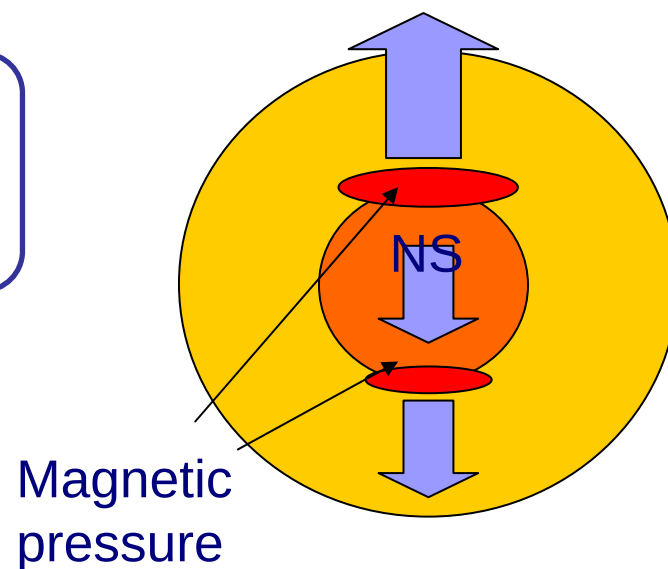
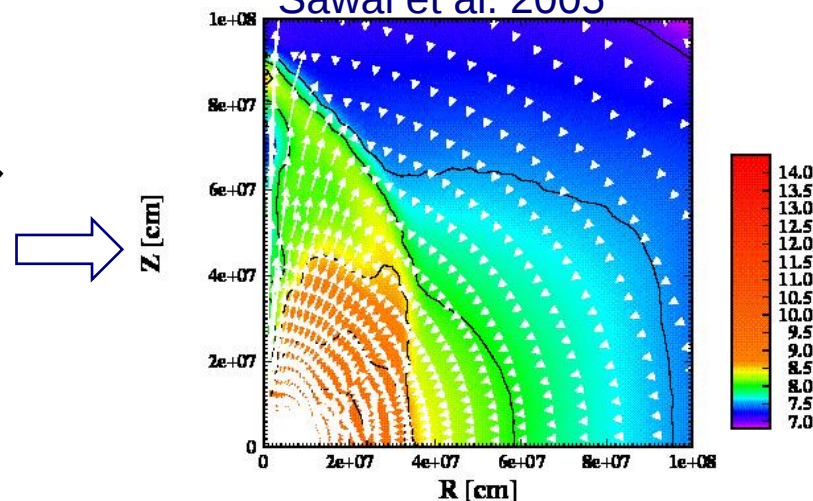
強磁場と高速自転により、磁気ジェットが生成し、非球対称超新星が起こる。

マグネターの固有運動に適用できる 新しいシナリオ

初期において赤道面非対称な強磁場によって非対称ジェットが生成し、マグネターに反跳を与える。

磁気回転超新星の数値計算例

Sawai et al. 2005



2. 数値計算のモデル

▶ 数値コードと方程式

- ZEUS-2D (数値コード)
- 軸対称を仮定し、1/2の子午面を解く (計算領域)
- $15 M_{\text{SUN}}$ の星の $1.5 M_{\text{SUN}}$ のコア (Woosley 1995) (親星)
- 現象論的状态方程式

mesh

$$r \times \theta = 300 \times 60$$

Magnetohydrodynamic (MHD) Eqs.

$$\frac{D \rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Continuity Eq.

$$\rho \frac{D \vec{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}$$

Eq. of Motion

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{e}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \vec{v}$$

Eq. of Energy Conservation

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$$

Induction Eq.

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

Poisson Eq.

磁場と自転

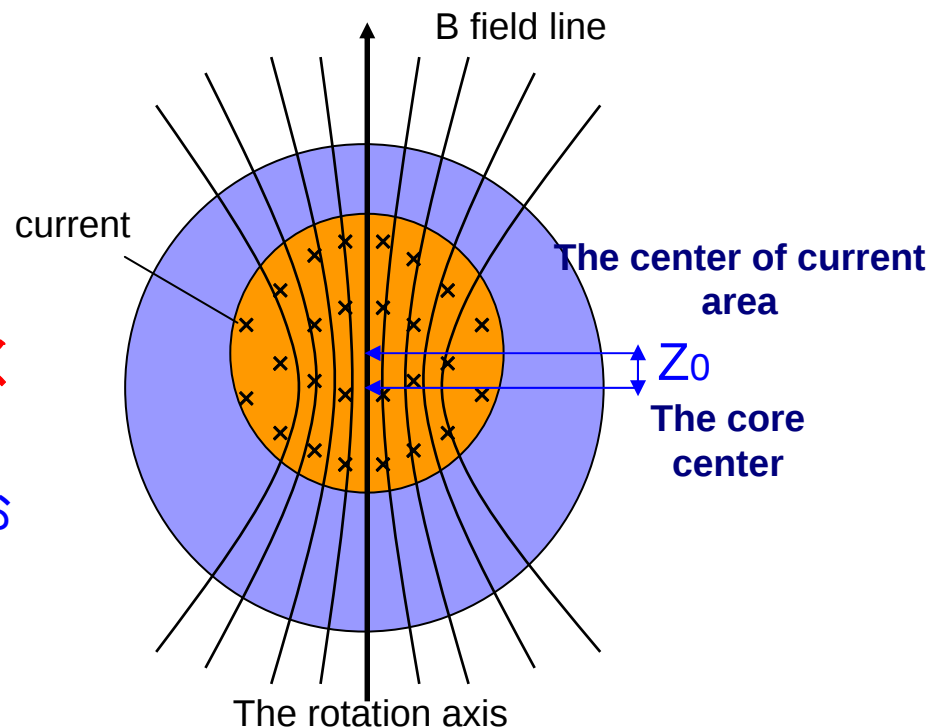
磁場

星の中心からずれた領域に電流を流し、

赤道面非対称な **dipole-like** 磁場を置く

このような非対称磁場は A star や WD におけるランダム化石磁場の進化計算によって支持される。

Braithwaite & Spruit 2003



自転

中心からの距離が近い
ほど速く回る差動回転

$$\Omega = \Omega_0 \frac{r_0^2}{r_0^2 + r^2}$$

r_0 : the distance from the center of the core

Models for computation

1st letter ... Magnetic filed

=> **Strong** or **Moderate**

2nd letter ... Rotation

=> **Rapid** or **Slow**

Number ... displacement z_0

7つのモデルを計算。

Model	MR0	MR3	SR3	SR10	MS3	SS3
Z_0 (km)	0	300	300	1000	300	300
M/W (%)	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0
T/W (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.005	0.005

▶ 強い初期磁場と速い自転の根拠

磁場

Fossil origin hypothesis $\Rightarrow$ 初期強磁場をサポート

Magnetar の磁場は主系列時代の化石磁場に由来する。

θ Orion C で観測されている磁場は中性子星の半径にすると magnetar-class high field となる。 (Ferrario & Wickramasinghe 2005)

cf. Convective dynamo (Thompson & Duncan 1993)

自転

Magnetar の親星が $> 30 - 50 M_{\text{sun}}$ である数々の観測的証拠
(e.g. Muno et al. 2006)

最近の星の進化計算

→ 重い星ほど自転が速い

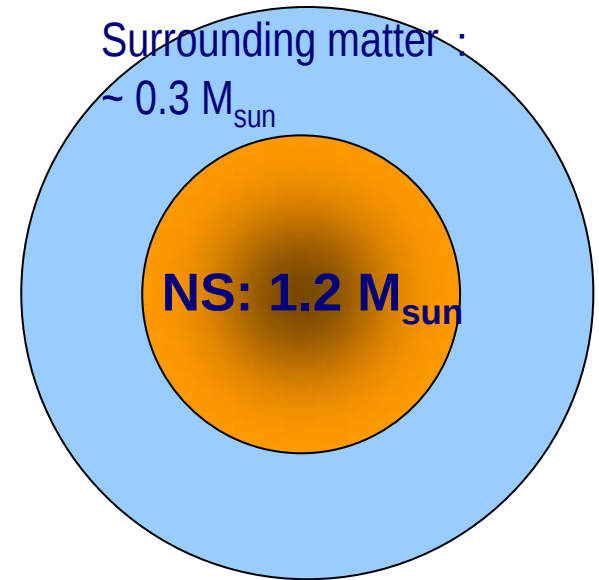
($35 M_{\text{sun}}$ で周期 4.4 ms のパルサー可能) (Heger et al. 2005)

$\Rightarrow$ 高速自転をサポート

(原始)中性子星(or マグネター)とその速度の定義

高密度側から $1.2M_{\text{sun}}$ を含む部分を
(原始)中性子星と呼ぶことにする。

観測されている中性子星の質量 $1.4 M_{\text{sun}}$ より軽いが、
マグネターが prompt explosion で形成されるとすると
質量が軽いことが予想されるので悪くない。



速度の定義

$$v_{\text{NS}} = \int \frac{F(t)}{M_{\text{NS}}} dt$$

$$F(t) = \oint_{S_{\text{NS}}} \left(-P\vec{n} - \frac{B^2}{8\pi} \vec{n} + \frac{\vec{B}}{4\pi} B_n \right) \cdot \vec{n}_z d\vec{S} - \int_{V_{\text{NS}}} \rho \nabla \Phi_{\text{outer}} dV$$

$\vec{n}$: NSの表面に対する単位法線ベクトル, n_z : 自転軸に平行な単位ベクトル,

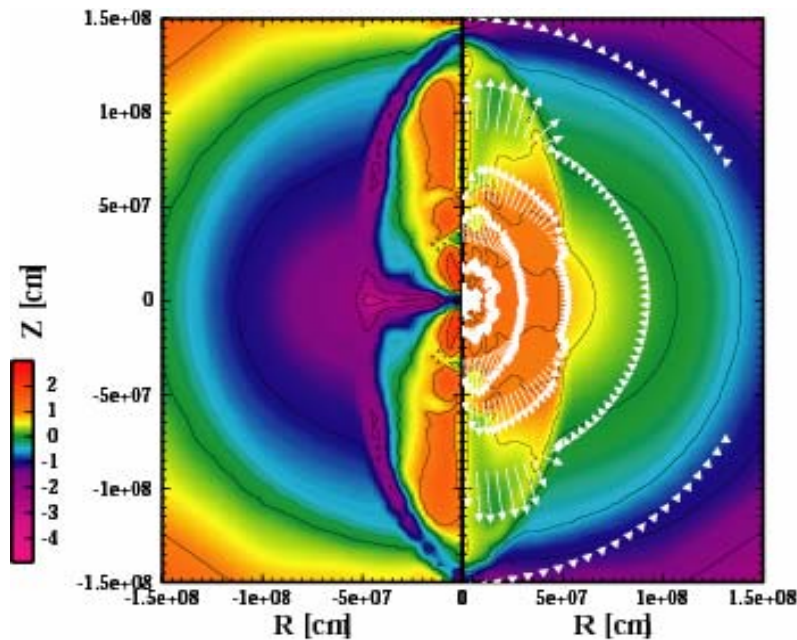
B_n : NS表面に垂直な磁場の成分,

Φ_{outer} : NSの外側の物質分布の寄与でつくられる重力ポテンシャル

3. 結果

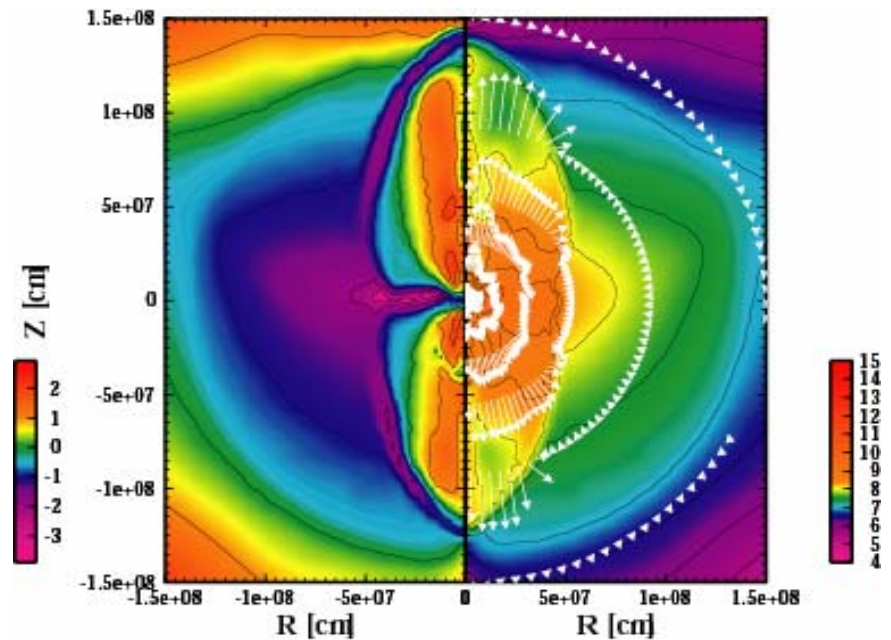
MR0

$$\alpha = 0.97$$



MR3

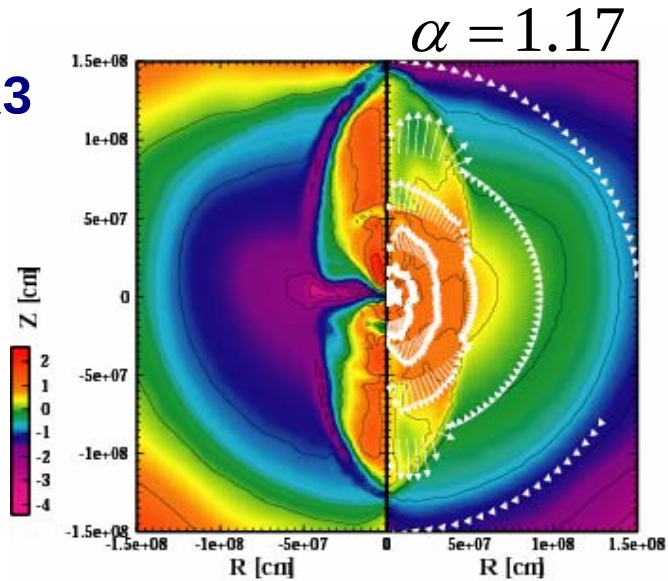
$$\alpha = 1.15$$



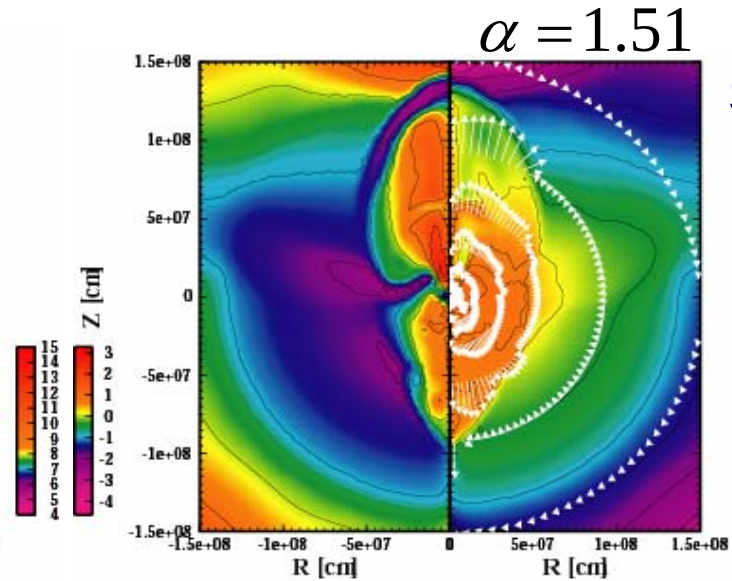
Inverse plasma beta density & velocities

$$\alpha = R_{sh,u} / R_{sh,d}$$

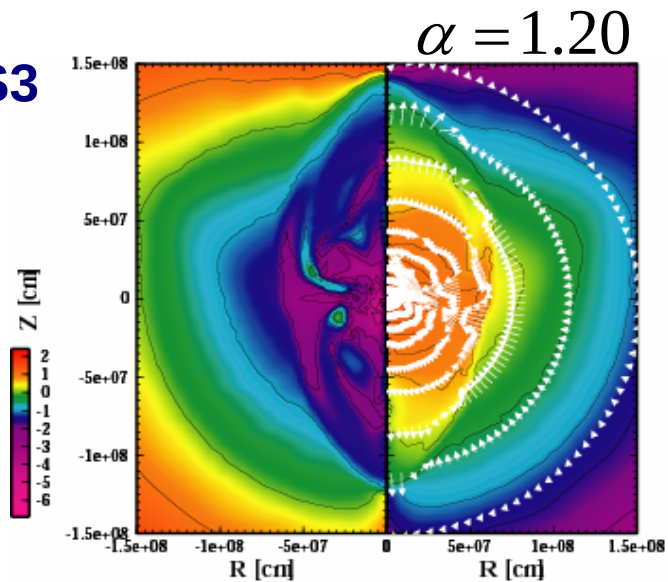
SR3



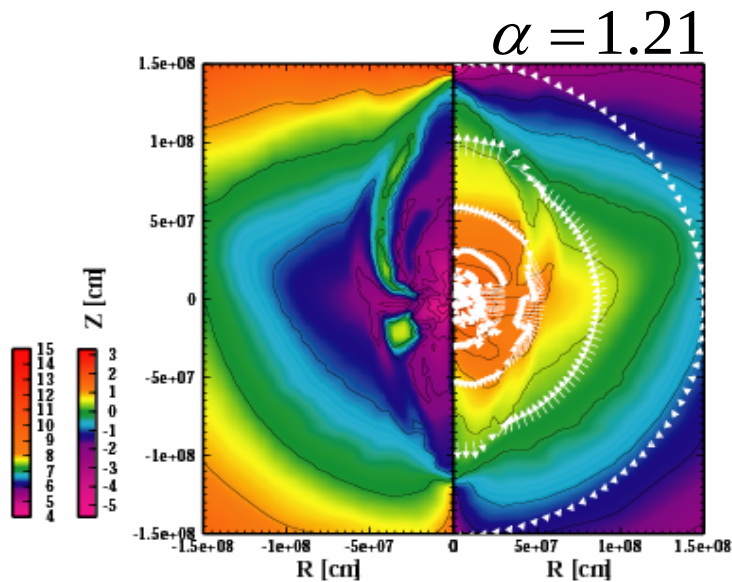
SR10



MS3

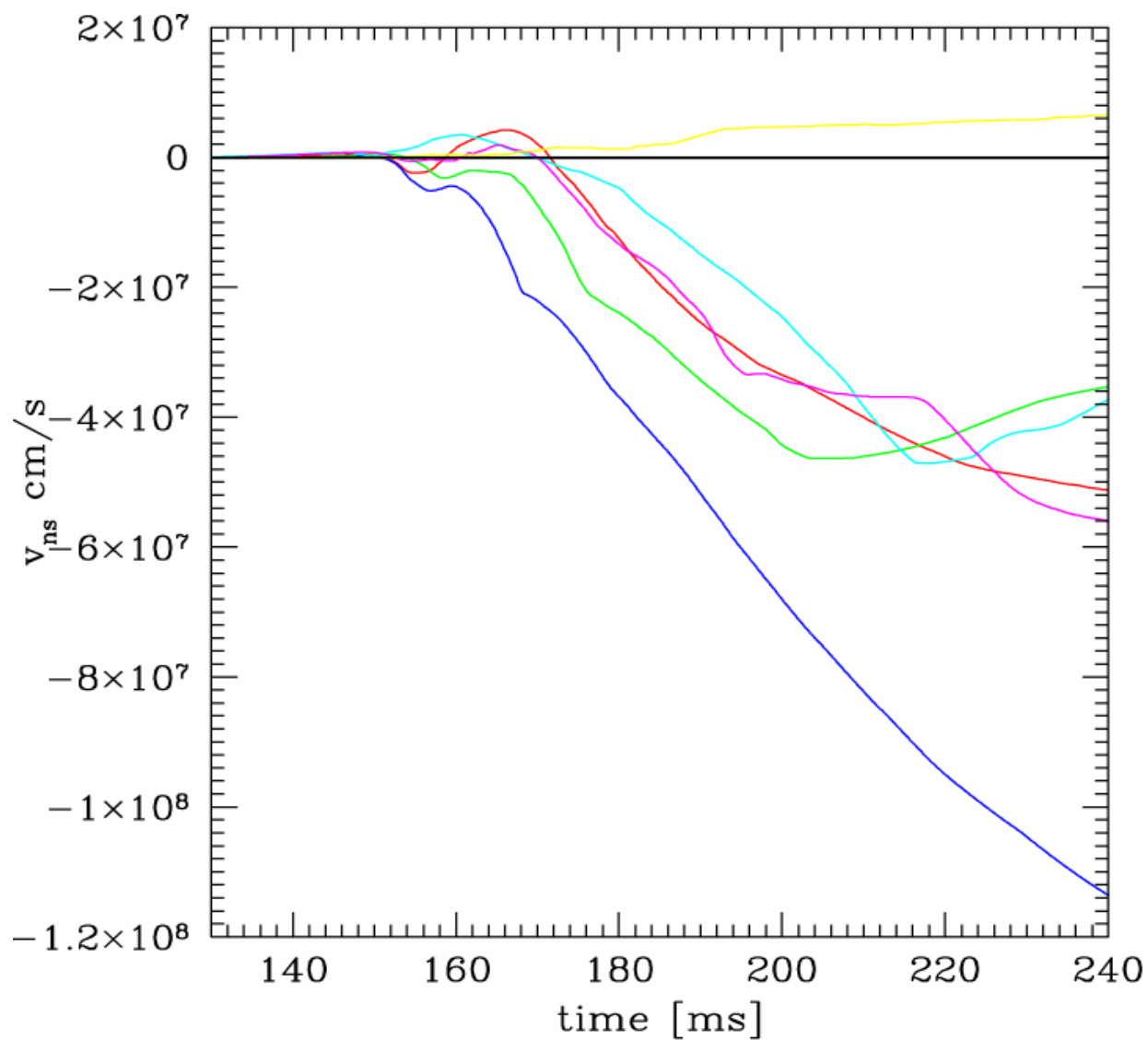


SS3



Inverse plasma beta density & velocities

Time evolution of kick velocity (till nearly 100 ms after bounce)

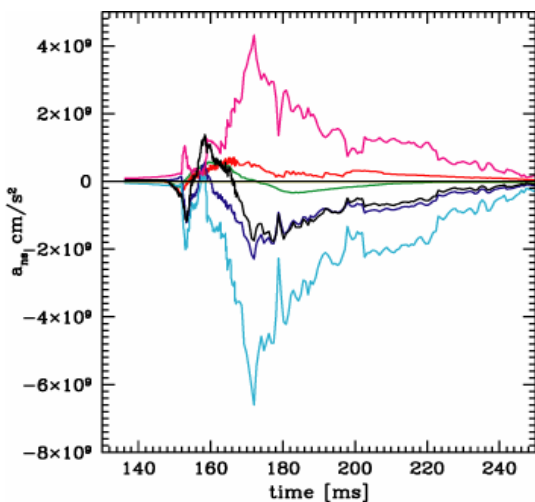


~ 500 – 1000 km s⁻¹
の速度が生み出された。

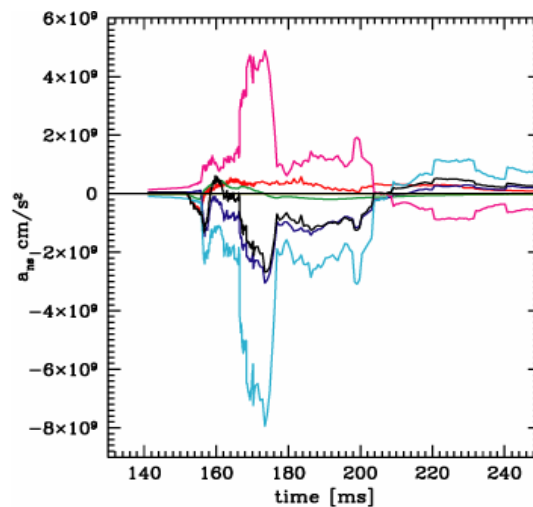
- MR3
- SR3
- SR10
- MS3
- SS3
- MR0

Time evolution of acceleration

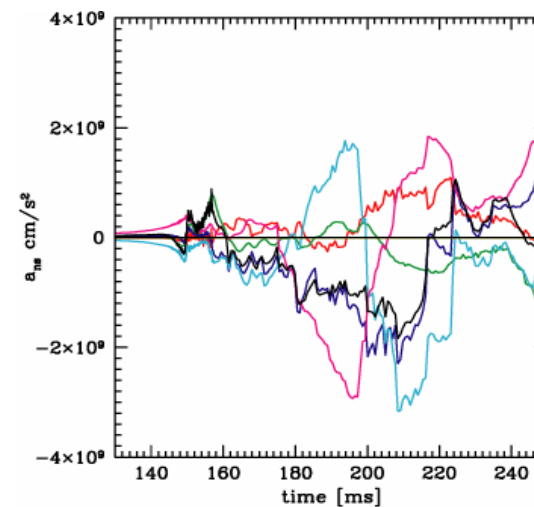
MR3



SR3

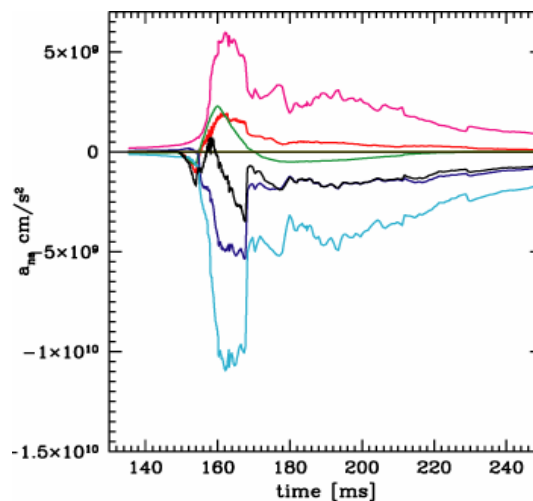


SM3

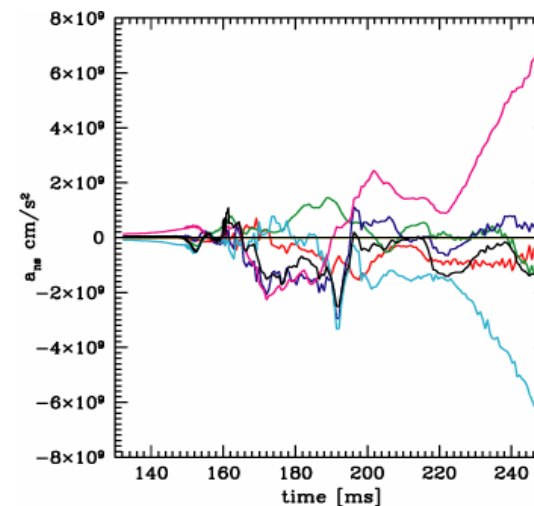


主な加速元は
磁場の圧力。

- Total
- Pressure
- Gravity
- Magnetic field
- Magnetic pressure
- Magnetic tension



SR10



SS3

4. 中エネルギー超新星 2006aj

X線フラッシュ 060218 に伴って起こった超新星 2006aj は極超新星よりも暗いが、通常の Ic がた超新星に比べて2,3倍明るいものであった。(Pian et al. 2006)

残された天体はブラックホールではなく中性子星。
さらに、**マグネターである可能性**。(Pian et al. 2006)

爆発のエネルギー

Model	MR0	MR3	SR3	SR10	MS3	SS3
E_{exp} (10^{51} erg)	4.4	4.1	4.7	4.0	0.38	0.56

cf. 一様磁場モデルでの爆発のエネルギーは $1.6 \times 10^{51} \text{erg}$ (Sawai et al. 2005)

- ◆ 中心集中磁場は爆発のエネルギーを強くする方向に働く。
- ◆ **中心集中磁場は中エネルギー超新星の由来となりうる。**

5. まとめと今後

まとめ

赤道面非対称磁場を初期条件に重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーションを行い、中性子星(マグネター)のキックについて調べた。

- ◆ 非対称強磁場、高速自転の初期条件では、一般的に $300 - 500 \text{ km/s}$ の固有速度が生み出せる。
- ◆ 磁場の非対称性が強いモデルでは $\sim 1000 \text{ km/s}$ に達する速度を生み出すことに成功。

観測の予言

Magnetar も通常のパルサーと同様、その多くが $\sim 500 \text{ km/s}$ の固有速度を持ち、中には $\sim 1000 \text{ km/s}$ を超えるものもあるかもしれない。

不確定要素: 初期磁場の強さ、自転の速さ、磁場の非対称度

- ◆ 中心集中磁場は中エネルギー超新星の起源となりうる。

今後

- ◆ MRI と NS kick
- ◆ Numerical simulation in 3D

5. Various Initial Parameters

磁場の強さ	自転の速さ	磁場の非対称	MHD explosion	MHD kick	ν - B kick
大	大	○	○	○	×
大	大	×	○	×	×
大	小	○	×	×	②
大	小	×	×	×	①
小	大	○	○?	△?	①?
小	大	×	○?	△?	①?

①: Parity violation induced

②: Asymmetric B field & ν

MRI?
Dynamo?

磁場の非対称性は
生み出されるか?

MHD explosion と ν -driven
explosion の timescale の競合

4. Comparison with Observations

Model	MR0	MR3	SR3	SR10	MS3	SS3
E_{exp} (10^{51} erg)	4.4	4.1	4.7	4.0	0.38	0.56
α	0.97	1.15	1.17	1.51	1.20	1.21
$V_{\text{NS,fin}}$ of NS-III (km/s)	~ 50	~ 500	~ 350	~ 1100	~ 350	~ 300

1E 1841-045 $E_{\text{exp},51} \sim 0.5 \pm 0.3$ $v_{\text{NS}} < 500$ km/s

1E 2259+586 $E_{\text{exp},51} \sim 0.7 \pm 0.3$ $v_{\text{NS}} < 400$ km/s

不確定なSN association

SGR 0526-66 $E_{\text{exp},51} \sim 1.3 \pm 0.3$ $v_{\text{NS}} \sim 400\text{-}1400$ km/s ?

► EOS

Simplified phenomenological EOS

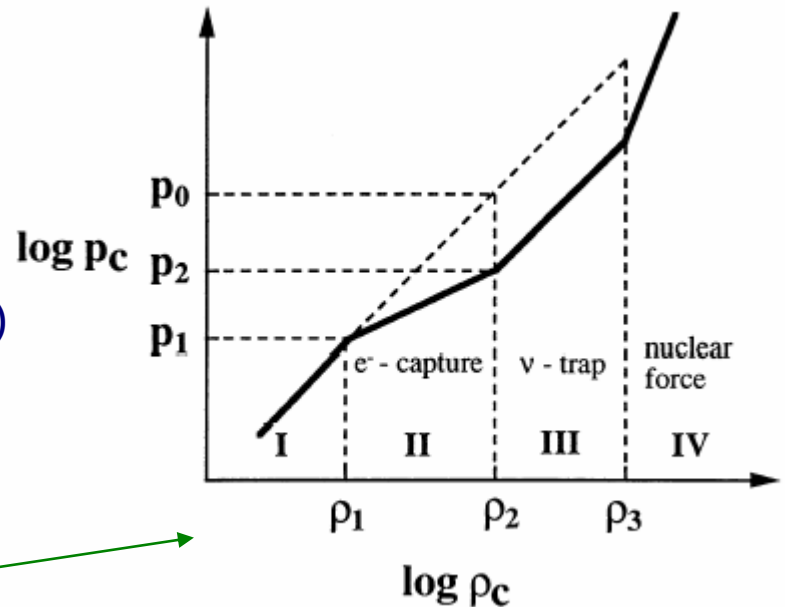
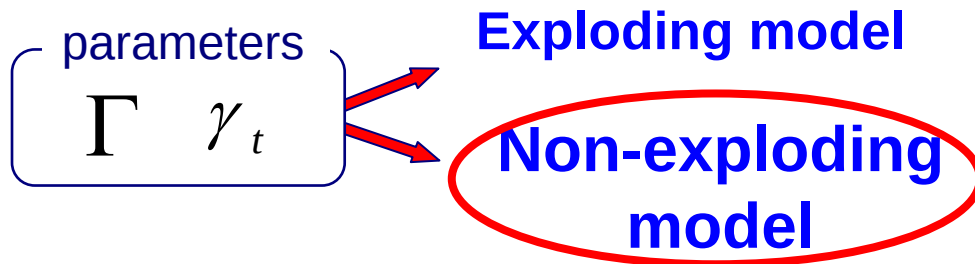
Takahara & Sato (1982)

- simplified microphysics (without ν transport)
- It mimics realistic dynamics appropriately

$$p = p_c(\rho) + p_t(\rho, \varepsilon_t)$$

$$p_c = K\rho^\Gamma \quad \text{Cold part}$$

$$p_t = (\gamma_t - 1)\rho\varepsilon_t \quad \text{Thermal part}$$

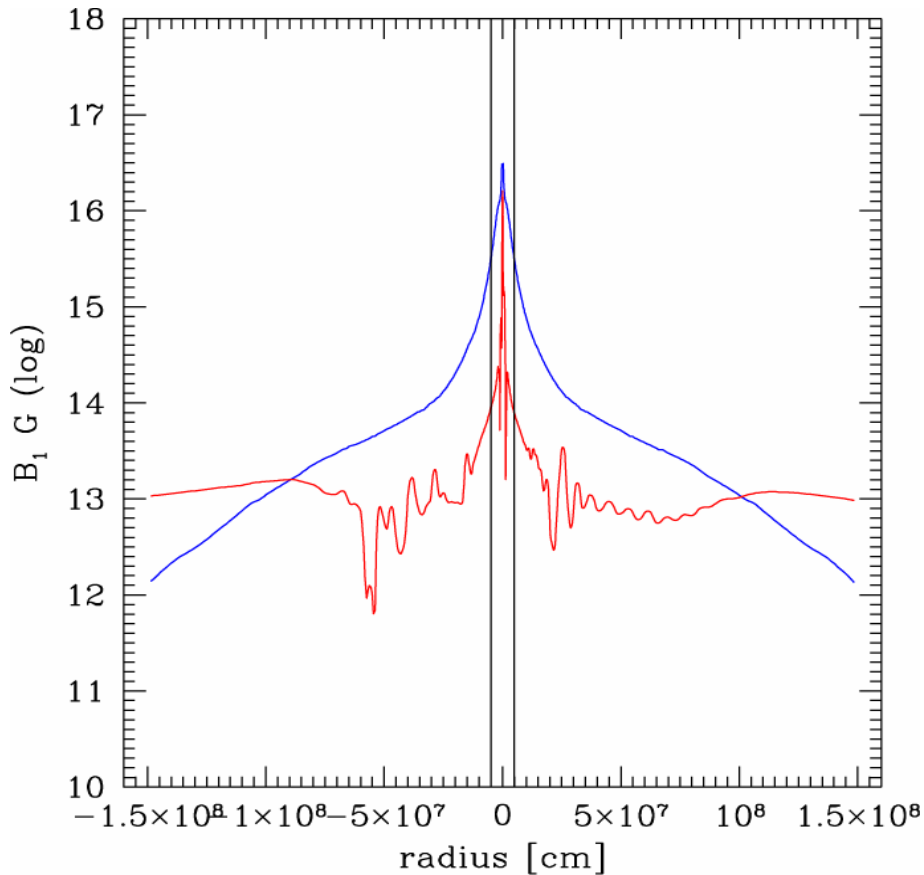


The values of Γ in each regime
Yamada & Sato (1994)

The systematic feature of this EOS was well examined and we can make both exploding and non-exploding models with appreciable parameters, Γ and γ_t .

Here we adopt non-exploding model

Magnetic field strength



---- toroidal field

---- poloidal field

On the surface of PNS

$$B_{pol} \sim 2.5 \times 10^{15} G$$

$$B_{tor} \sim 1.0 \times 10^{14} G$$