

行き先は中性子星

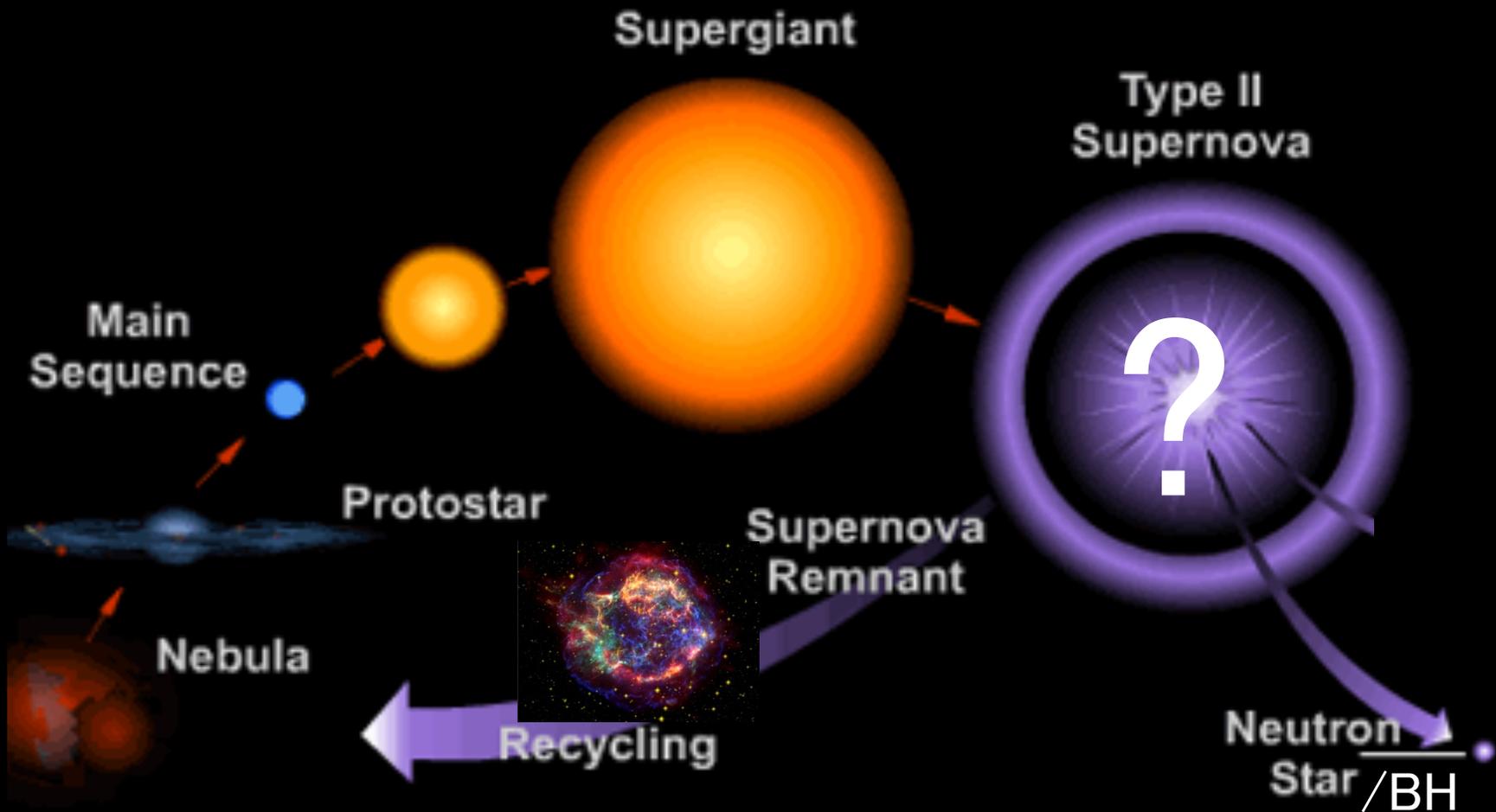
超新星の爆発機構と天体核物理への招待

滝脇知也
(国立天文台理論部)

目次

1. 天体核物理としての超新星爆発
2. なぜ超新星は爆発しないのか？
3. 爆発メカニズム バトルロイヤル
4. マルチメッセンジャー観測への期待
5. まとめ

重力崩壊型超新星: 星の最期



どうやって起こるのか？

天体核物理と超新星爆発の研究

1950

1970

1990

2000

2010

林忠四郎
畑中武夫

佐藤勝彦

山田章一

住吉光介

固武慶

滝脇知也

諏訪雄大



超新星の中で何が起きているのか？多くの研究者が情熱を注いだ。もちろん実際にはもっと多くの方が研究したが、ここでは限られた人だけを紹介。

天体核物理と超新星爆発の研究

1950

林忠四郎
↑
湯川秀樹

核物理を天体応用

巨星の研究

1970

佐藤勝彦
↑
益川敏英
小林誠

ハンスベーテ

場の理論
ニュートリノと原子核の反応

1990

山田章一
第一原理シミュレーション

2000

住吉光介
状態方程式
ニュートリノ反応

2010

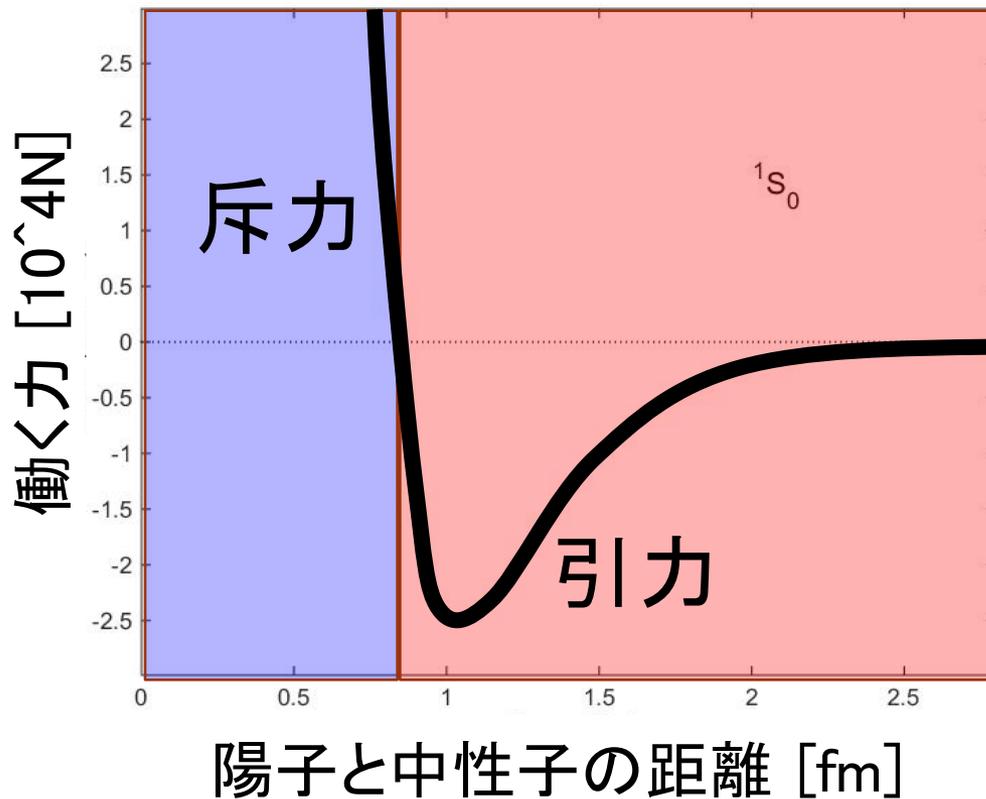
重力波 ニュートリノのマルチメッセンジャー
ニュートリノ輸送の近似シミュレーション
多次元 磁気流体計算
諏訪雄大
滝脇知也
固武慶

ノーベル賞級の学者に動機づけられた伝統的研究。
今が実りの時期

核力の定性的な性質

陽子同士や間、中性子同士間は斥力

陽子と中性子間はある半径まで引力

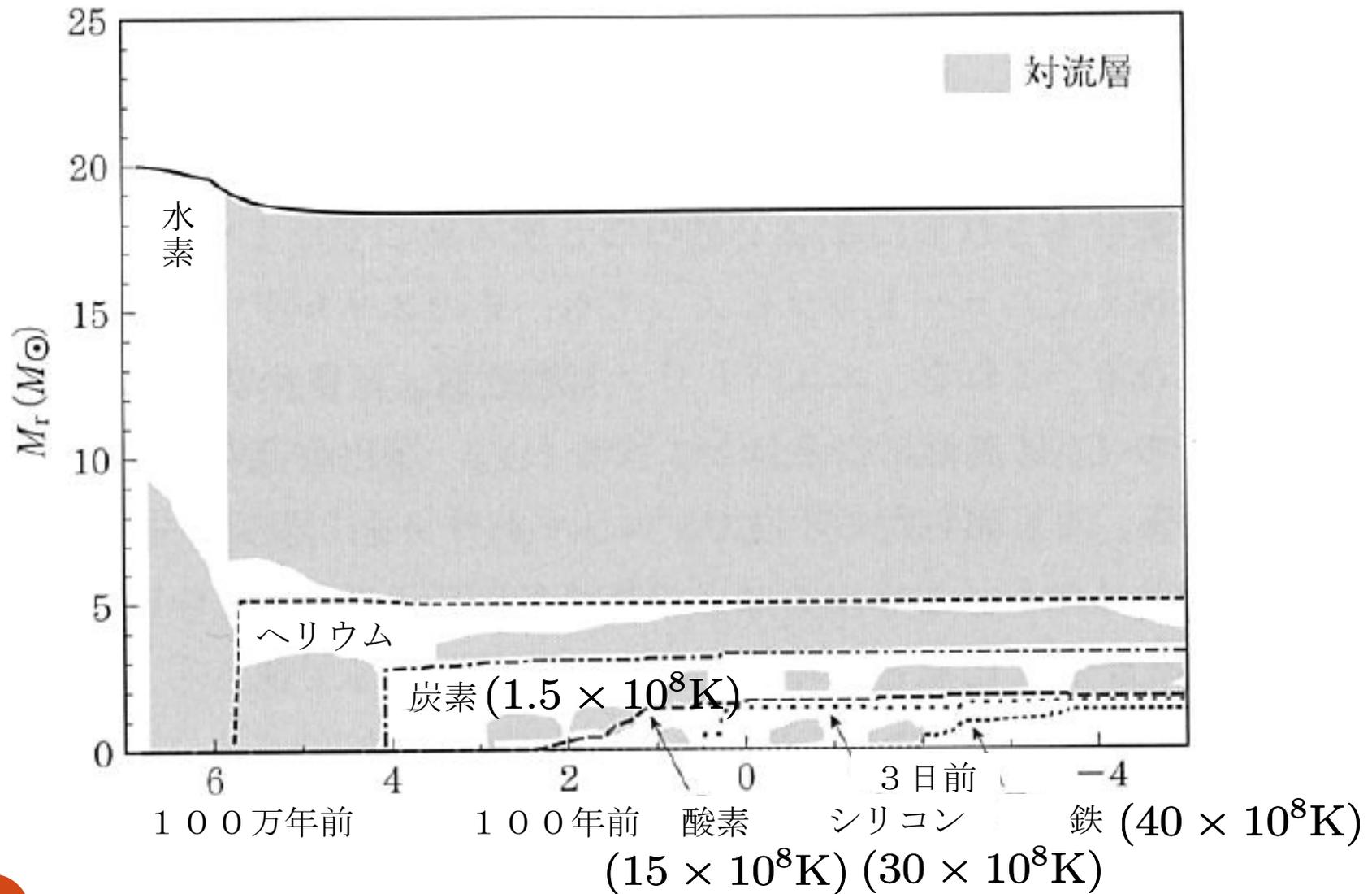


核反応の性質

1. 陽子の数と中性子の数が等しいものは集まったがほうが安定する。ただし陽子が多すぎると不安定に。
2. 陽子同士の電磁気的反発に運動エネルギーが勝つ温度で反応が進行。
3. 高密度では反発する

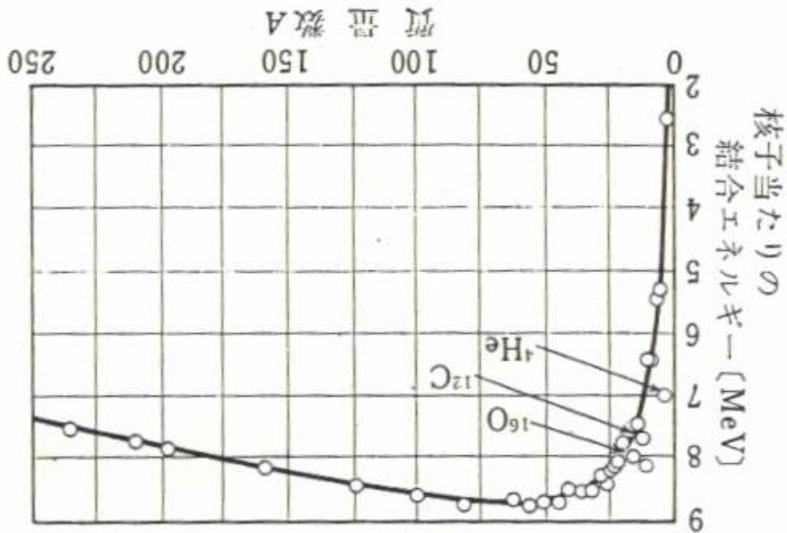
©Wikipedia

星の進化と元素合成

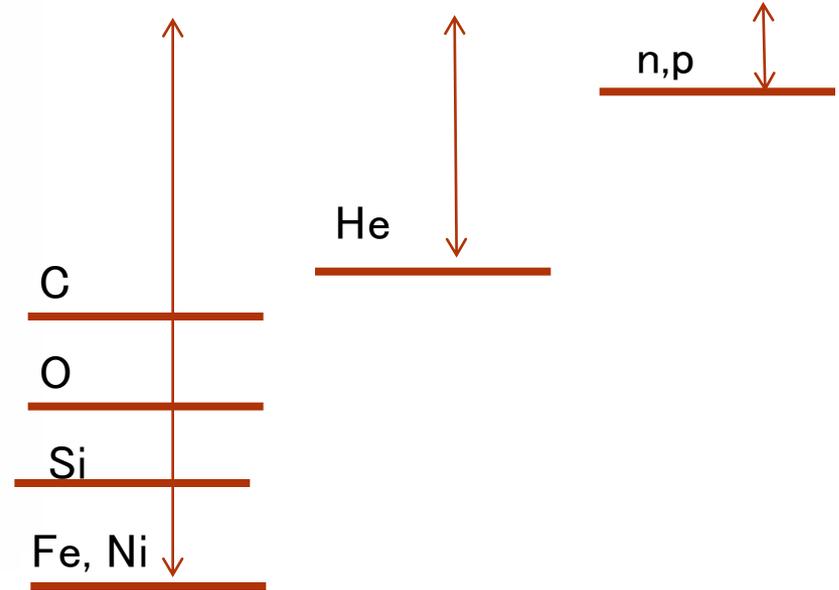


原子核と束縛エネルギー

図 質量数と核子当たり結合エネルギーの関係



←核融合

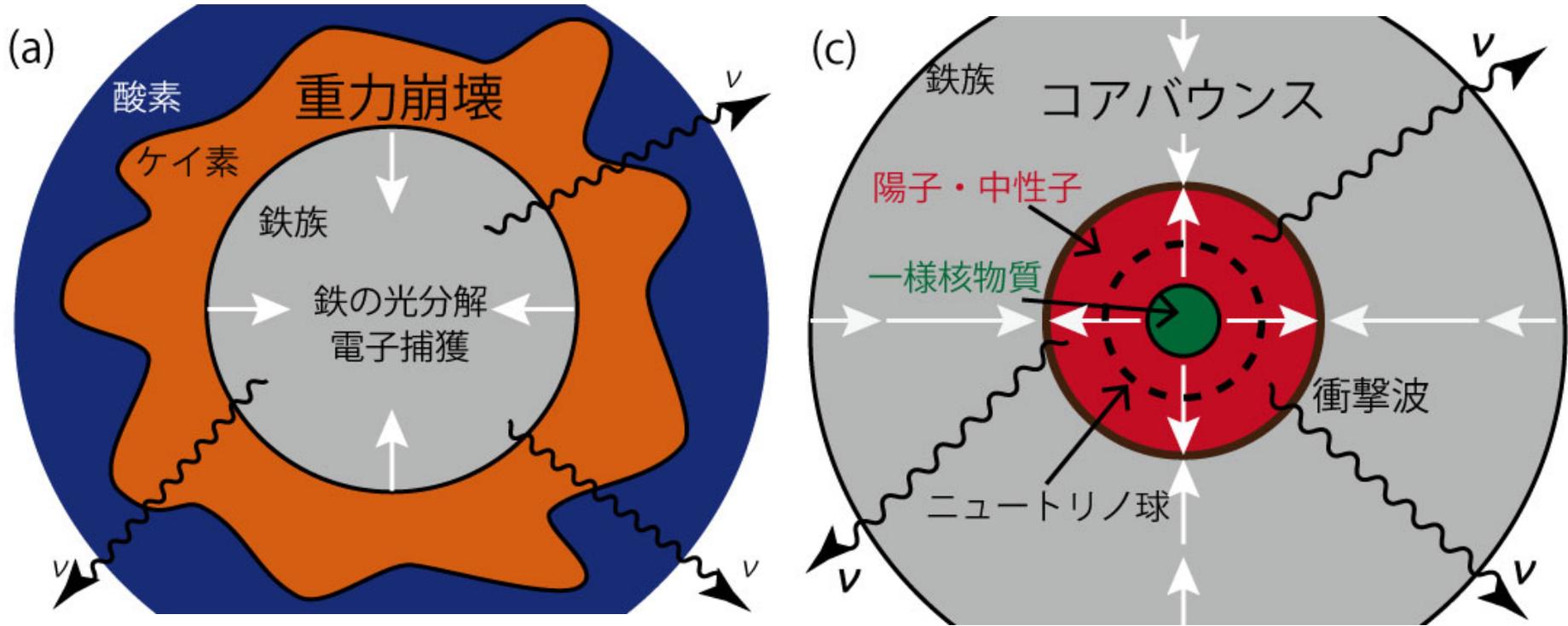


光分解→

核融合：質量数が増加、束縛エネルギー増加
エネルギー解放

光分解：質量数が減少、エネルギー吸収

重力崩壊とコアバウンス



鉄の光分解は吸熱反応なので
重力 > 圧力になってつぶれる。

つぶれすぎると核密度に達して
重力 < 圧力になって反発

中性子星の誕生

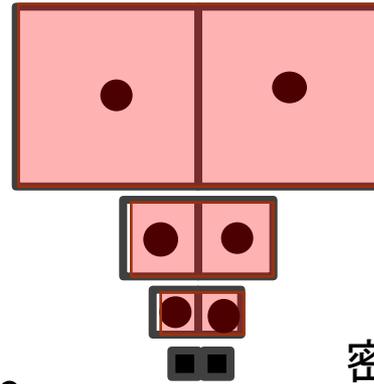
星の中で原子核、電子は
プラズマ状態。

圧力は電子が担う。

原子核の変化は熱のやり取りをする。

電子のエネルギーを増したり奪ったり。

● :原子核
● :電子



密度 ↓ = 質量 / 体積

密度があまりに高くなると原子核どうしがくっつき、圧力として効く。

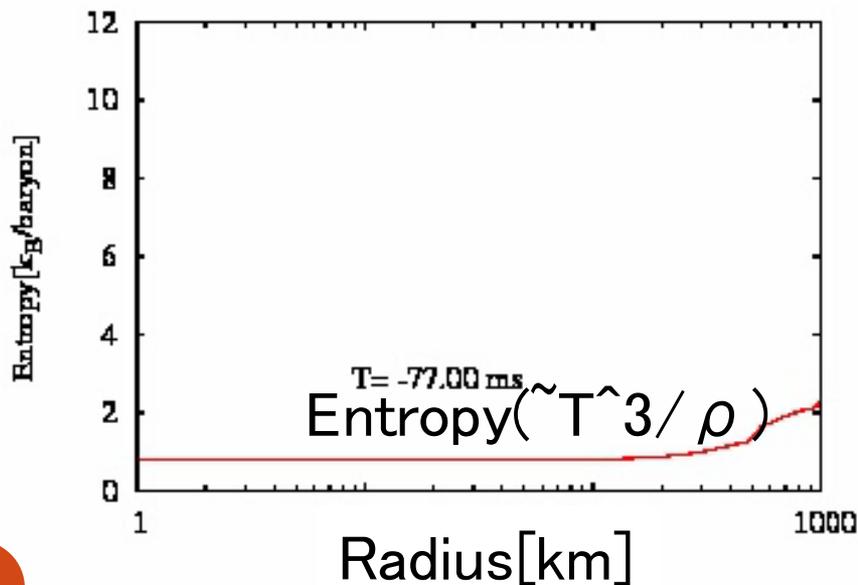
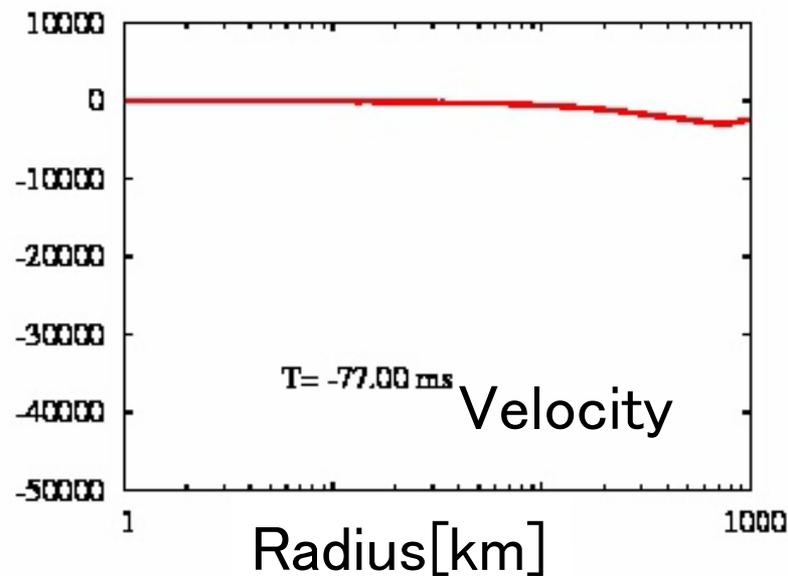
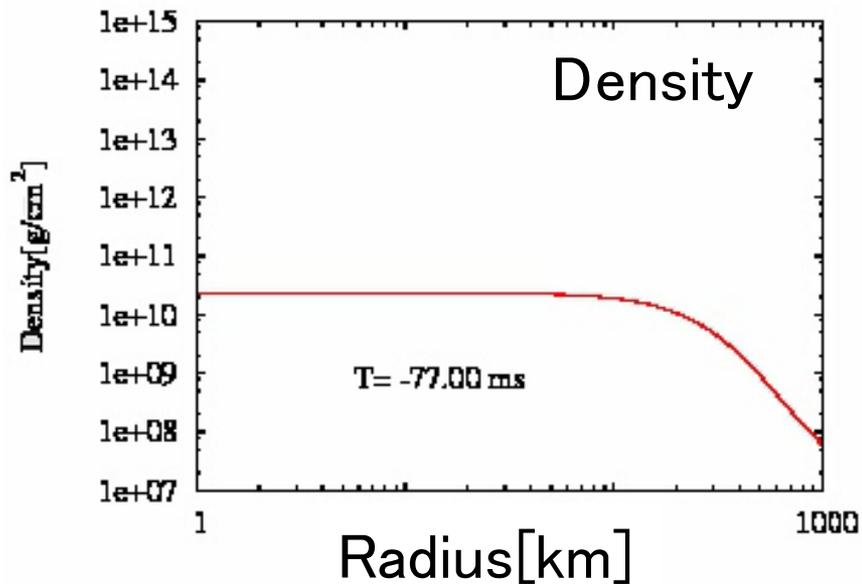
出来たばかりの中性子星は30%が陽子で70%が中性子。
その後、電子捕獲反応でどんどん中性子の割合が増える。

目次

1. 天体核物理としての超新星爆発
2. なぜ超新星は爆発しないのか？
3. 爆発メカニズム バトルロイヤル
4. マルチメッセンジャー観測への期待
5. まとめ

Typical 1D simulation

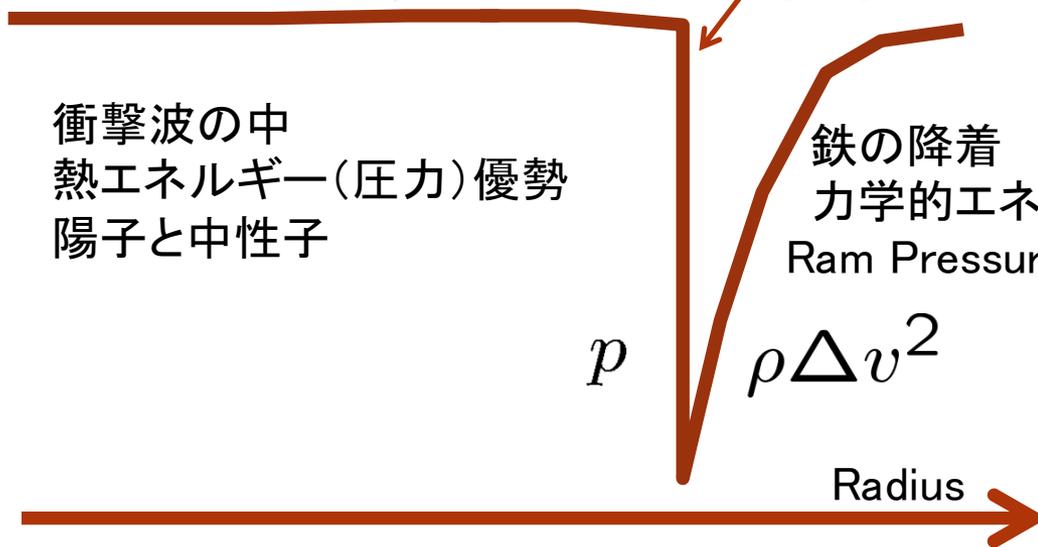
典型的な密度、速度、エントロピー



- (1) 重力崩壊
- (2) 核力によるコアバウンス
- (3) 衝撃波伝搬と停滞

なぜ衝撃波が止まるのか？

Radial Velocity



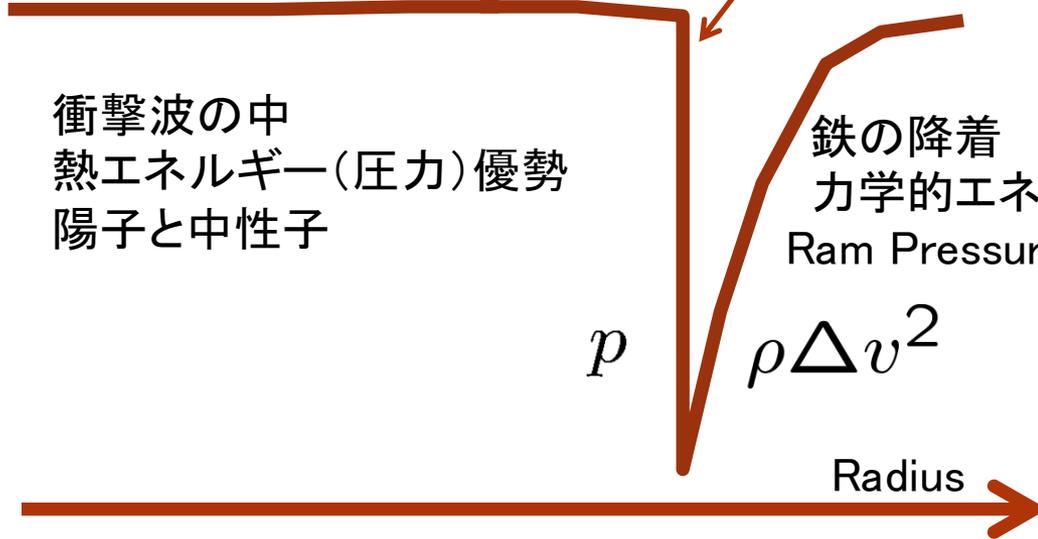
衝撃波の境界で内側の圧力と
外側の力学的圧力が釣り合う。

$$p \sim \rho \Delta v^2$$

外側の力学的圧力は
星の構造に依存

なぜ衝撃波が止まるのか？

Radial Velocity



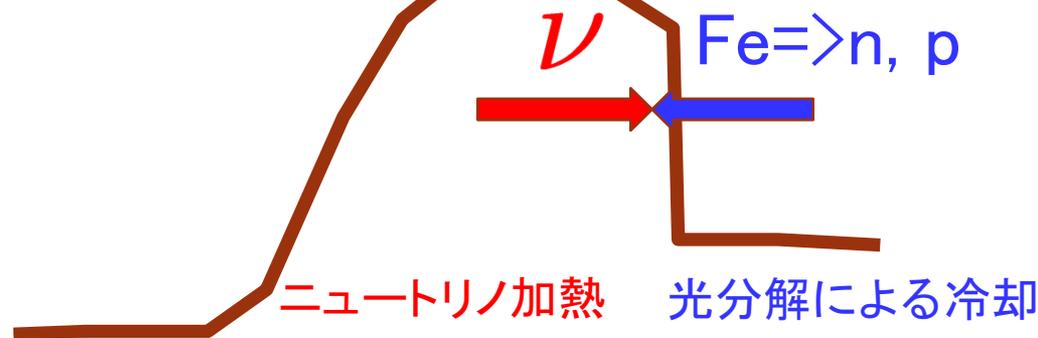
衝撃波の中
熱エネルギー(圧力)優勢
陽子と中性子

衝撃波の境界で内側の圧力と
外側の力学的圧力が釣り合う。

$$p \sim \rho \Delta v^2$$

外側の力学的圧力は
星の構造に依存

Entropy $\sim T^3 / \rho$

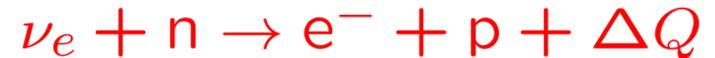


衝撃波中の圧力は以下の2つ
の過程で決まる

(1) 鉄の光分解



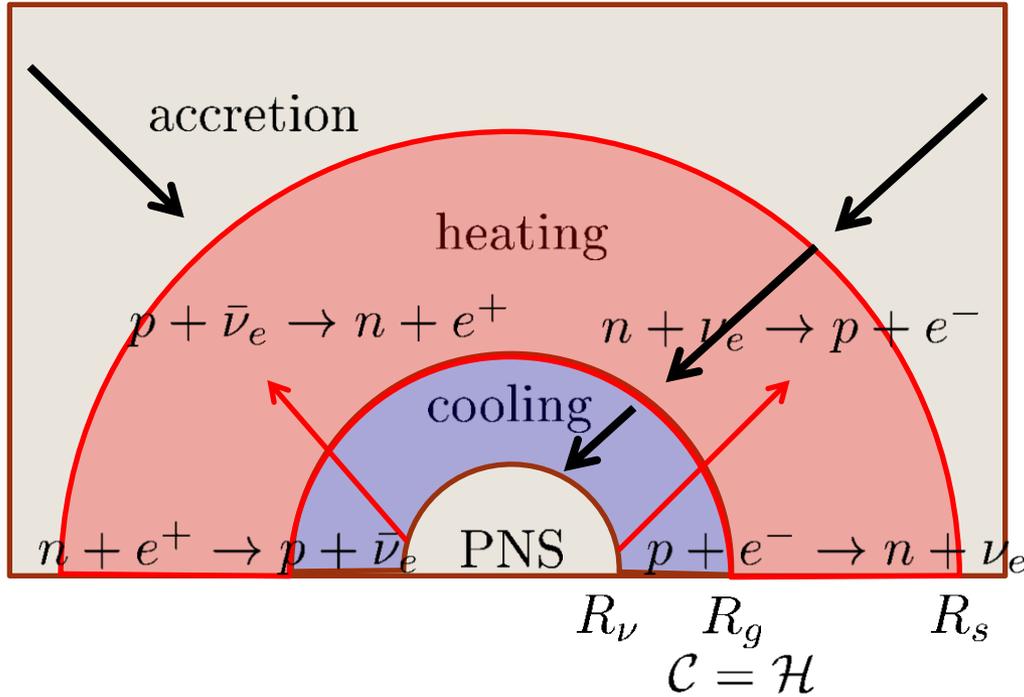
(2) ニュートリノ加熱



(原始中性子星)

なぜニュートリノが加熱に寄与？

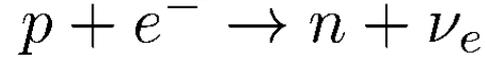
Janka 01



冷却はその場の温度で決まる
 加熱は中心の温度と半径で決まる

半径依存性に直すと $C \propto 1/r^6$
 $\mathcal{H} \propto 1/r^2$

-Cooling term

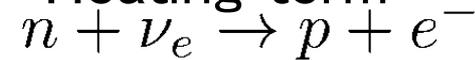


$$Q_\nu^- = (3\alpha^2 + 1) \frac{\pi \sigma_0 c (kT)^6}{(hc)^3 (m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \\ \times [Y_p \mathcal{F}_5(\eta_e) + Y_n \mathcal{F}_5(-\eta_e)]$$

$$\approx 145 \frac{\rho}{m_u} \left(\frac{kT}{2 \text{ MeV}} \right)^6 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho_{\text{proton}} \times \rho_{\text{electron}} (\propto T^3) \times \sigma (\propto T^2) \times \bar{E} (\propto T)$$

-Heating term



$$Q_\nu^+ = \frac{3\alpha^2 + 1}{4} \frac{\sigma_0 \langle \epsilon_{\nu_e}^2 \rangle}{(m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e}}{4\pi r^2 \langle \mu_\nu \rangle} (Y_n + 2Y_p)$$

$$\approx 160 \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e, 52}}{r_7^2 \langle \mu_\nu \rangle} \left(\frac{kT_{\nu_e}}{4 \text{ MeV}} \right)^2 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

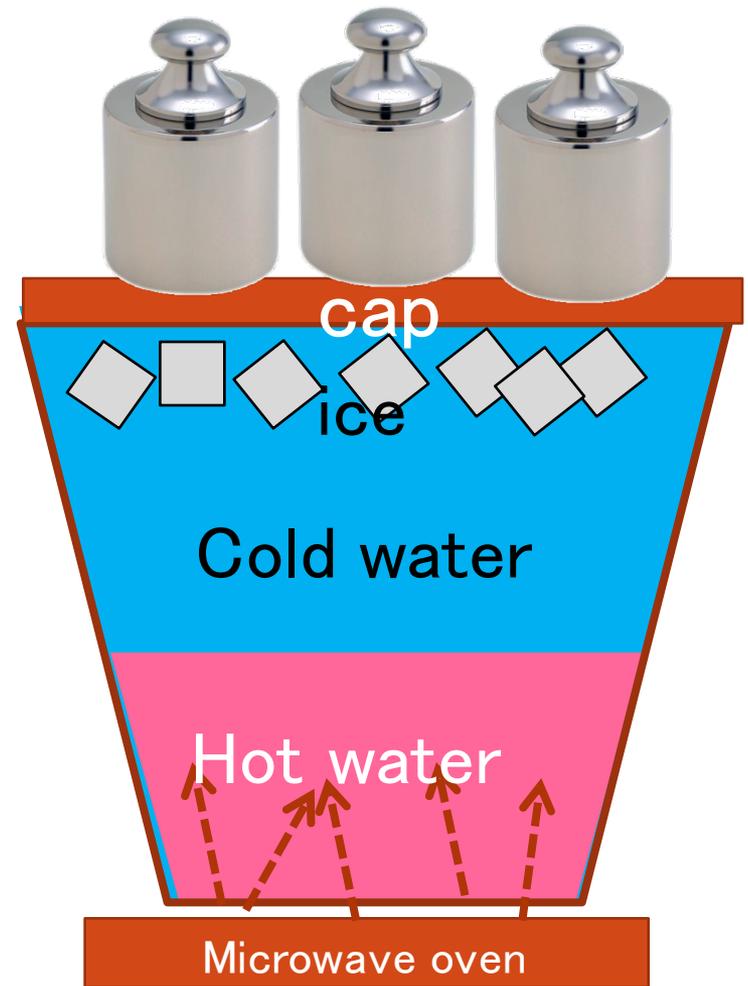
$$\rho_{\text{neutron}} \times \rho_{\text{neutrino}} (\propto T_\nu^3 / r^2) \times \sigma (\propto T_\nu^2) \times \bar{E} (\propto T_\nu)$$

外側で加熱が優位になる。

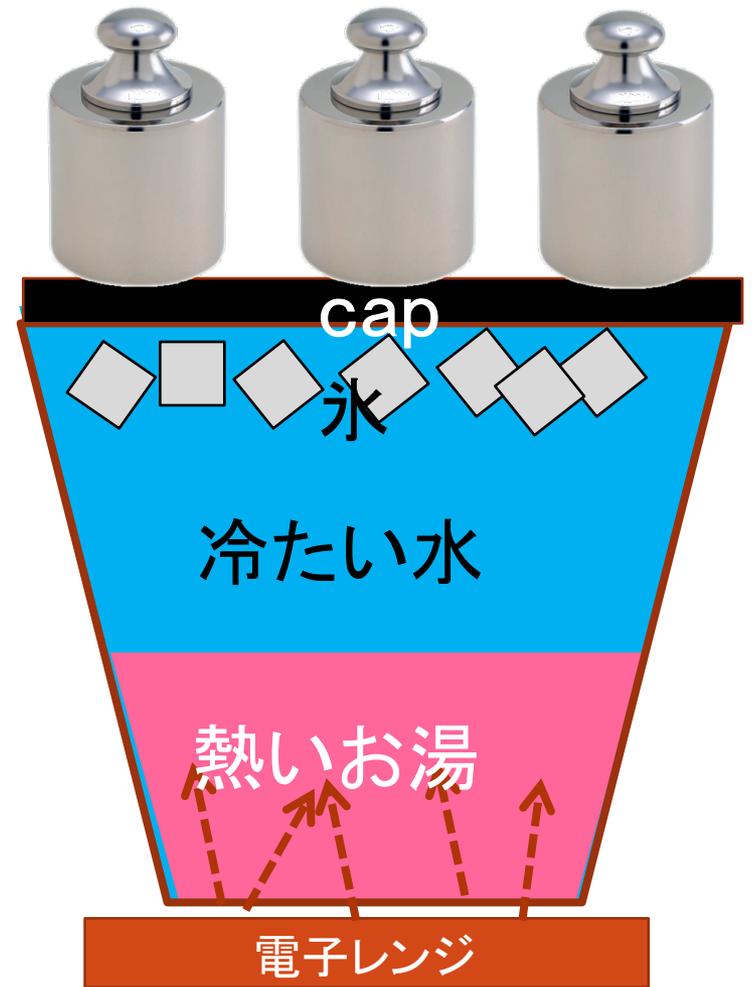
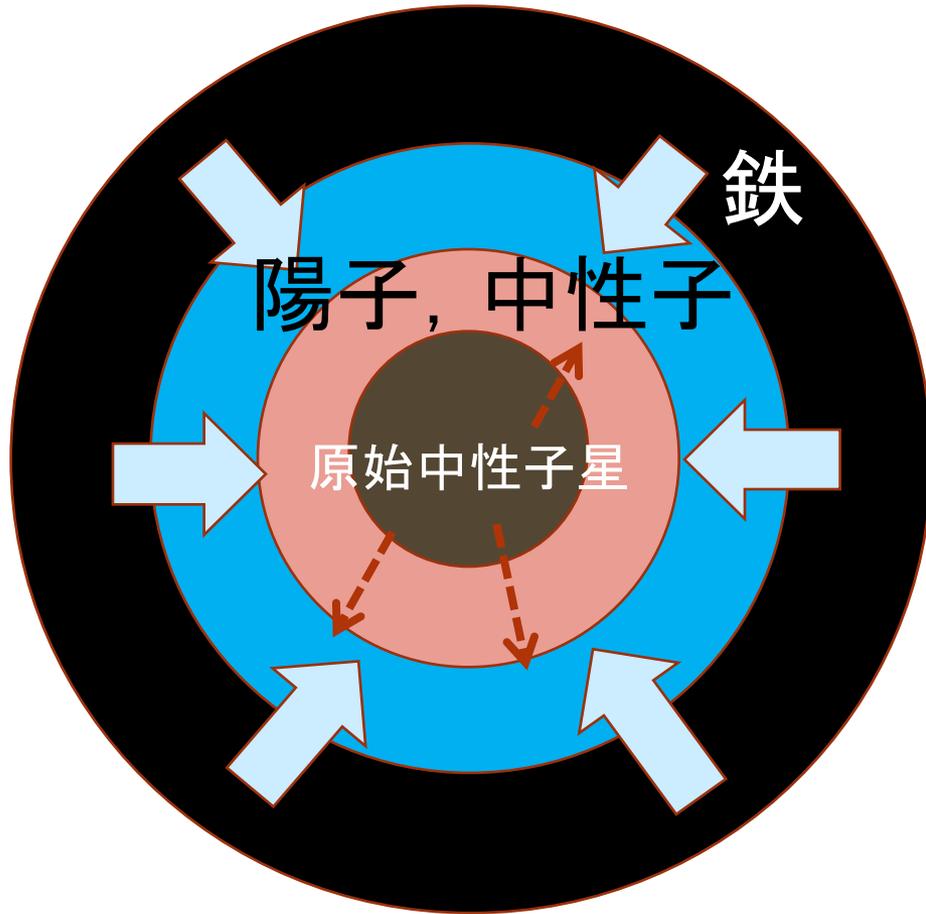
超新星の大問題

自然には爆発している超新星が
シミュレーションでは爆発しない！
1980年代からの大問題。
2000年から2005年の研究で、
(1次元の仮定では)超新星が
爆発しないことが明らかに。

(Liebendoerfer+2001, Rampp+2002,
Thompson+2003 and Sumiyoshi+2005)



イメージ



目次

1. 天体核物理としての超新星爆発
2. なぜ超新星は爆発しないのか？
3. 爆発メカニズム バトルロイヤル
4. マルチメッセンジャー観測への期待
5. まとめ

爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと
対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

ただし基本的には理論研究での
比較であり、観測的証拠はない。

4. 音波

5. 磁気音波

6. 磁気回転

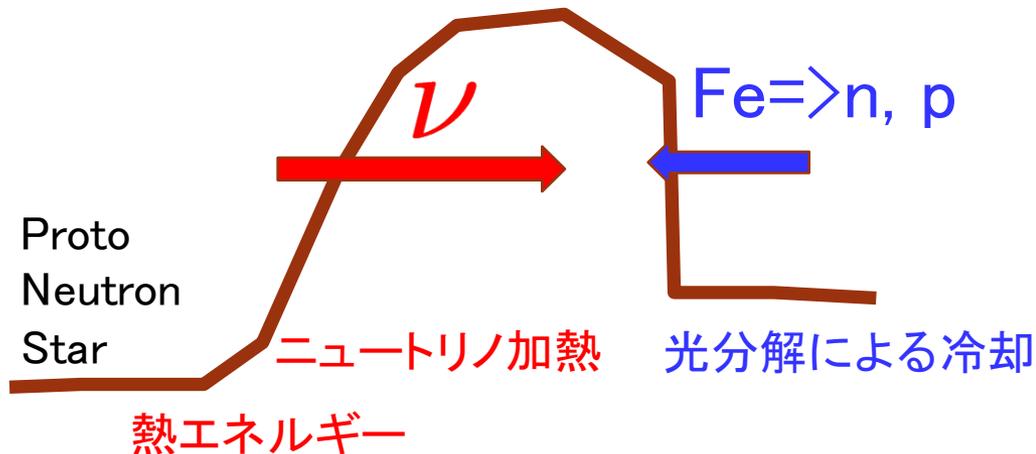
爆発メカニズムとは？

天体現象の爆発メカニズムの解明とは
以下を明らかにすること。

1. 大本のエネルギーは何か？
2. エネルギーの種類はどう変化するか？
位置エネルギー、力学的エネルギー、熱エネルギー、磁場のエネルギー etc
3. エネルギーはどう輸送されるのか？
3の輸送がある場合には流体シミュレーションが必要。
2の種類によっては磁気流体、輻射流体など、凝った手法に。

ニュートリノ加熱メカニズム

1. 大本のエネルギーは何か？
熱エネルギー
2. エネルギーの種類はどう変化するか？
熱エネルギー → ニュートリノエネルギー → 熱エネルギー
3. エネルギーはどう輸送されるのか？
原始中性子星からゲイン領域の底へ



様々な爆発メカニズムのまとめ

メカニズム	エネルギー源	エネルギーの種類や輸送
ニュートリノ加熱	熱エネルギー	ニュートリノによる輸送
対流	熱エネルギー	対流による輸送
回転	熱エネルギー + 回転エネルギー	回転により誘起される対流による輸送
音波	降着のエネルギー	音波
磁気音波	原始中性子の対流	アルフベン波で輸送
磁気回転	回転エネルギー	回転エネルギーを磁気エネルギーに変換

爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと
対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

ただし基本的には理論研究での
比較であり、観測的証拠はない。

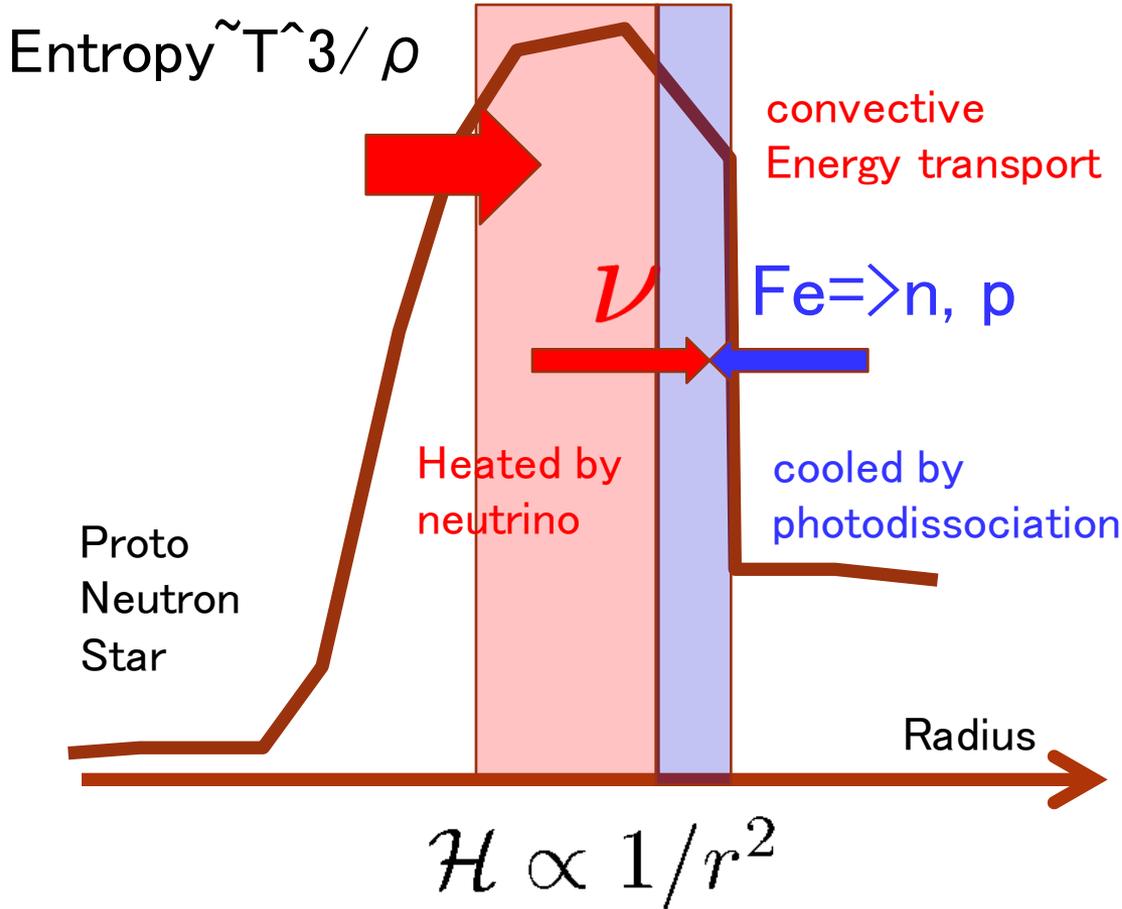
4. 音波

5. 磁気音波

6. 磁気回転

From 1D to 3D

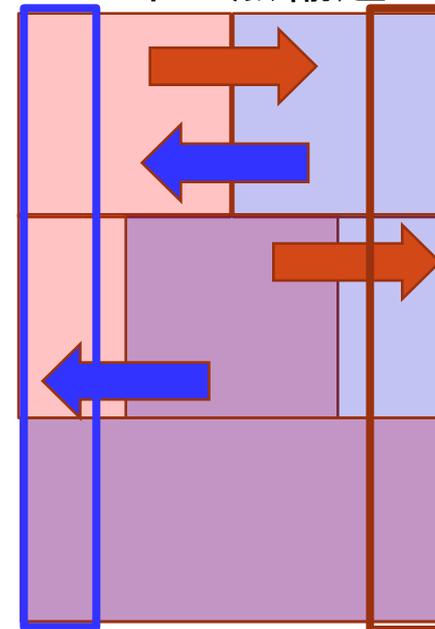
対流による熱輸送



ニュートリノがゲイン領域の底を温める

熱いものが冷たいものの下にいる
=> 対流不安定

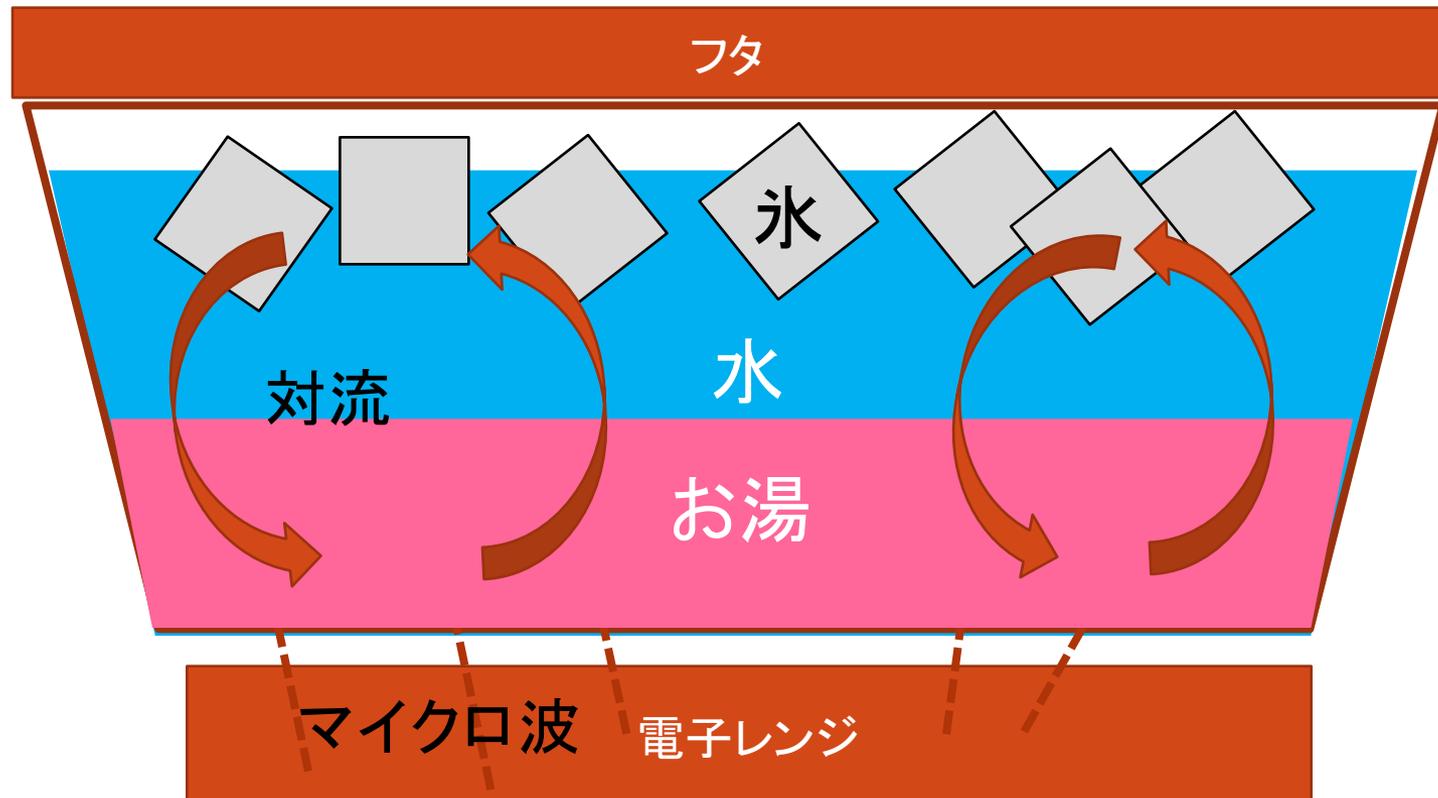
熱いものと冷たいものが混ざる
= 正味の熱輸送



初期より冷たい

初期より熱い！

ニュートリノ加熱爆発のイメージ



(1) 温めてフタを吹き飛ばせば爆発！

(2) 氷が入っていると… (3) かきまぜると…

爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと
対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

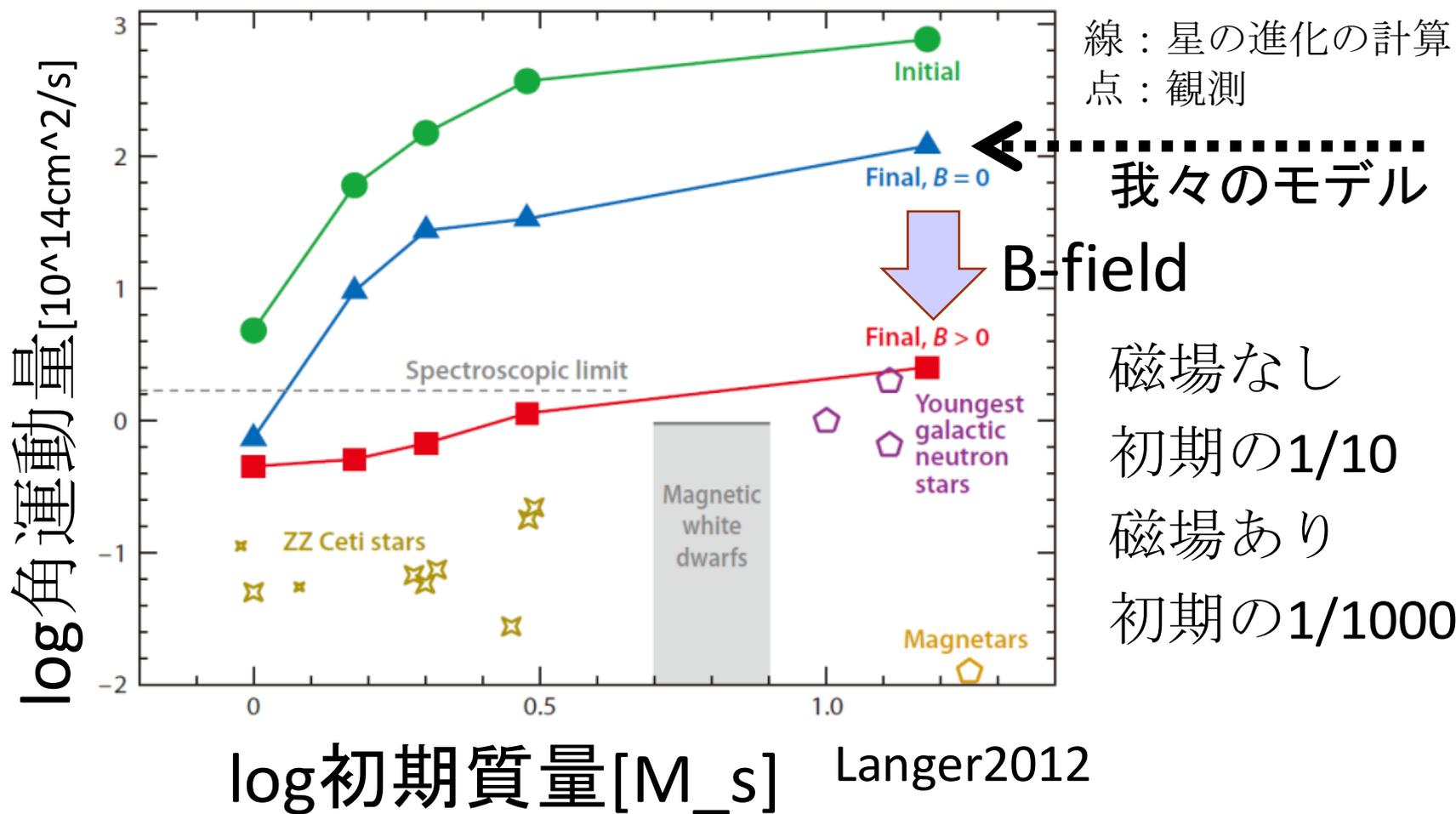
ただし基本的には理論研究での
比較であり、観測的証拠はない。

4. 音波

5. 磁気音波

6. 磁気回転

初期の鉄コアの自転

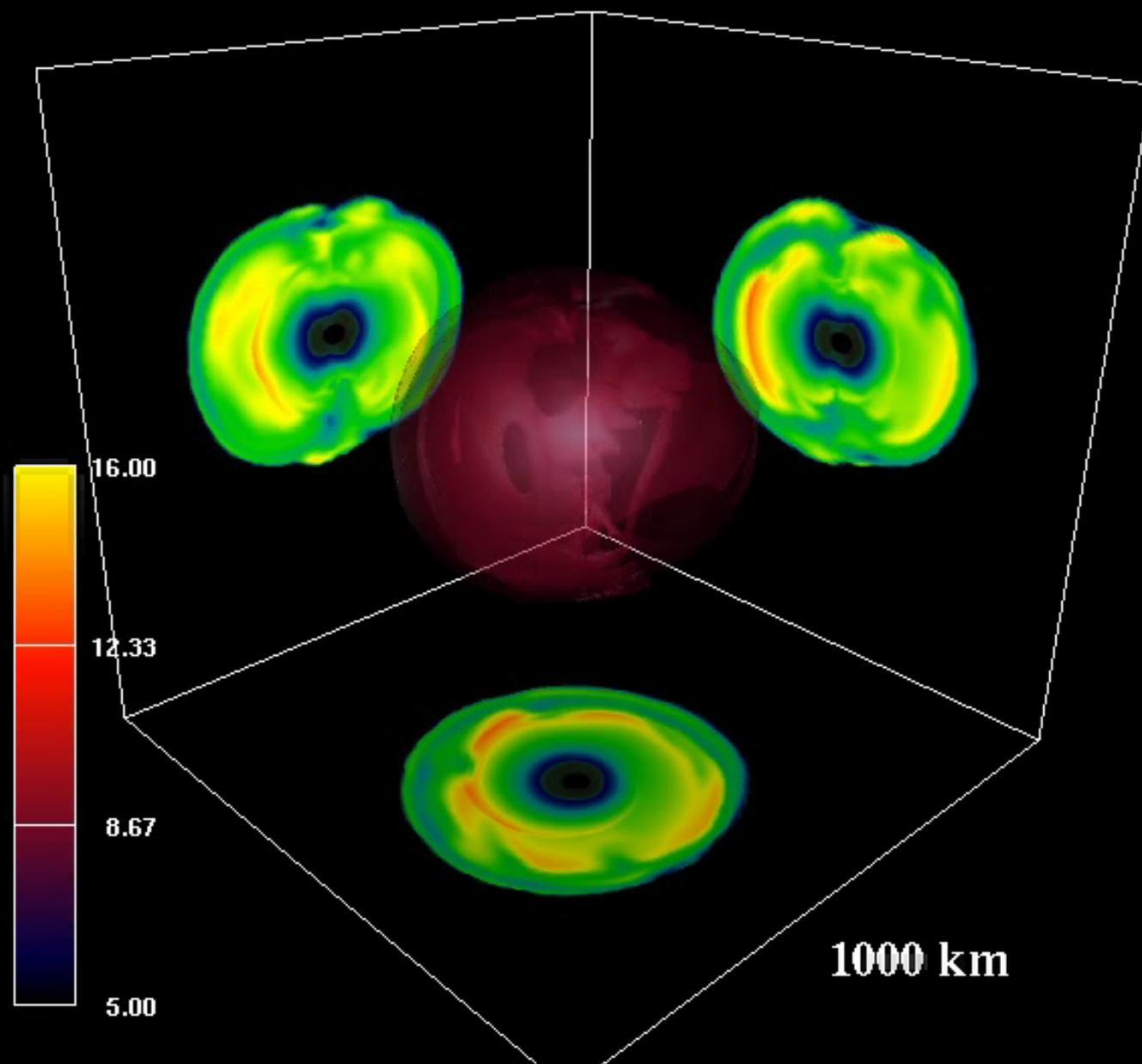


星の進化の磁場の計算は現象論的なことに注意が必要
進化計算を信じれば我々のモデルは最大限自転している場合
に対応。

27.0M_s R2.0

Entropy

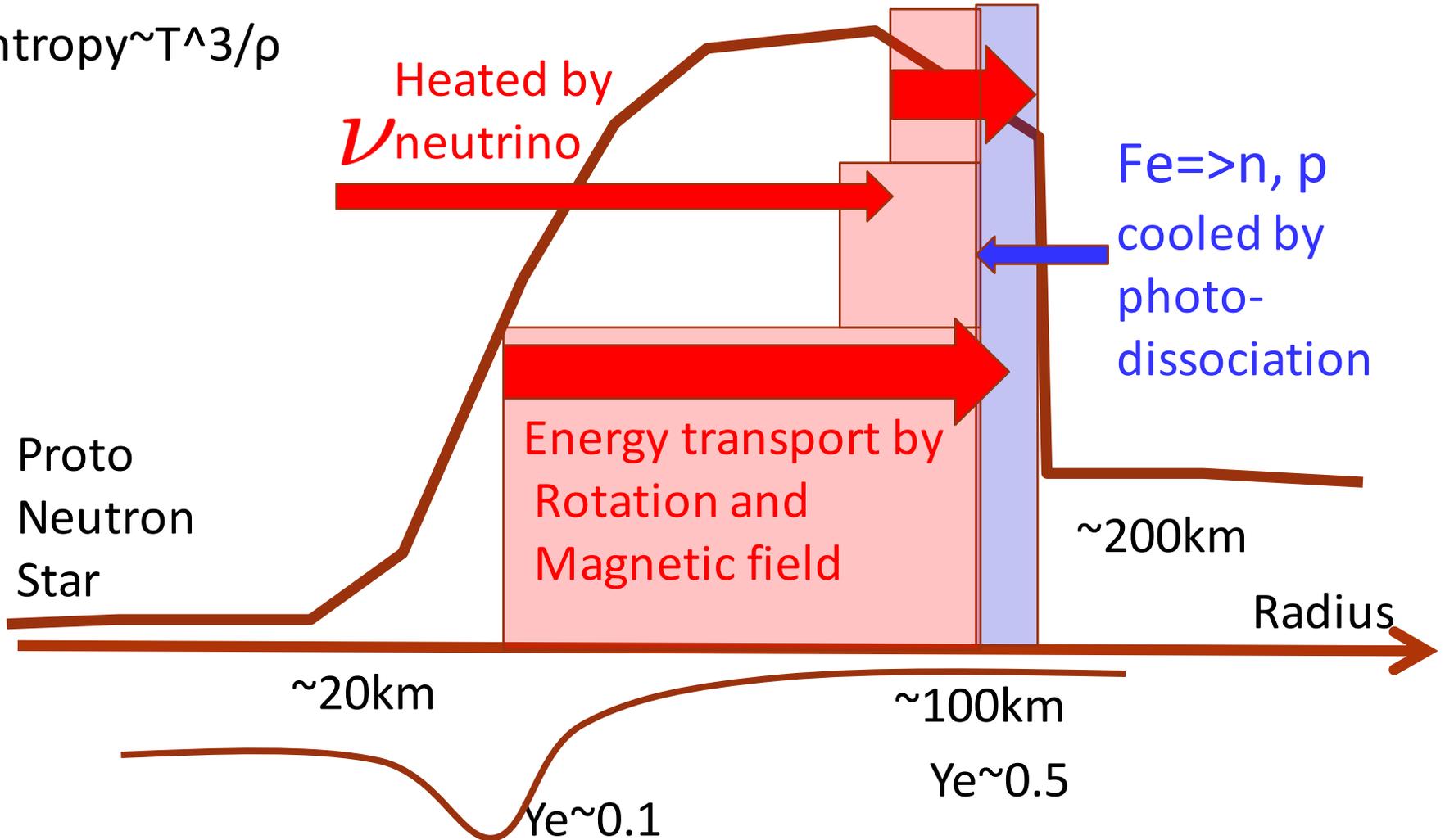
t= 0102 ms



回転による対流的効果

Energy transport by thermal convection

Entropy $\sim T^3/\rho$



爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと

対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

ただし基本的には理論研究での比較であり、観測的証拠はない。

4. 音波

5. 磁気音波

SASI:

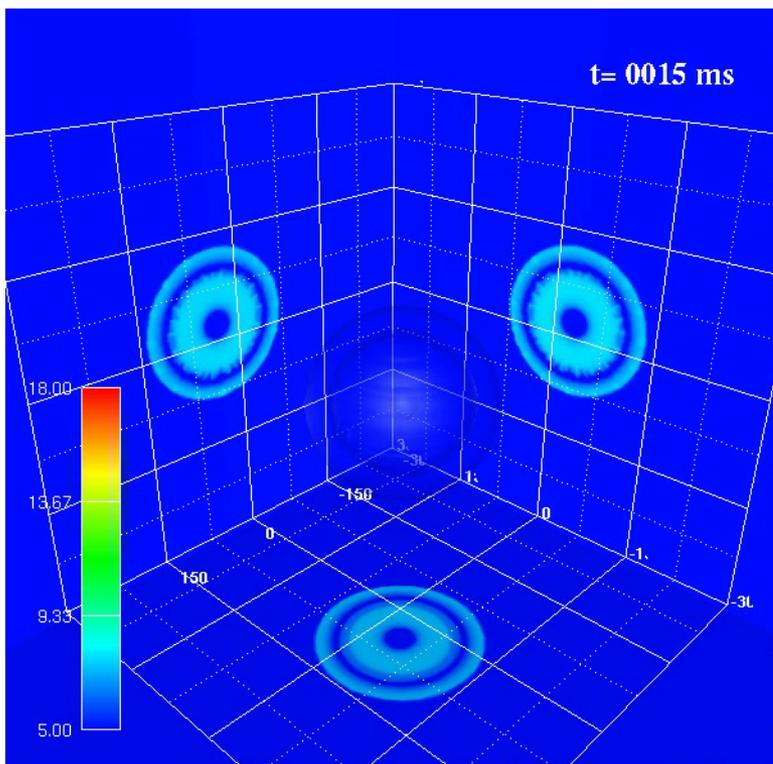
Standing Accretion shock instability

定在降着衝撃波不安定席

6. 磁気回転

SASIによる爆発機構

Standing Accretion Shock Instability



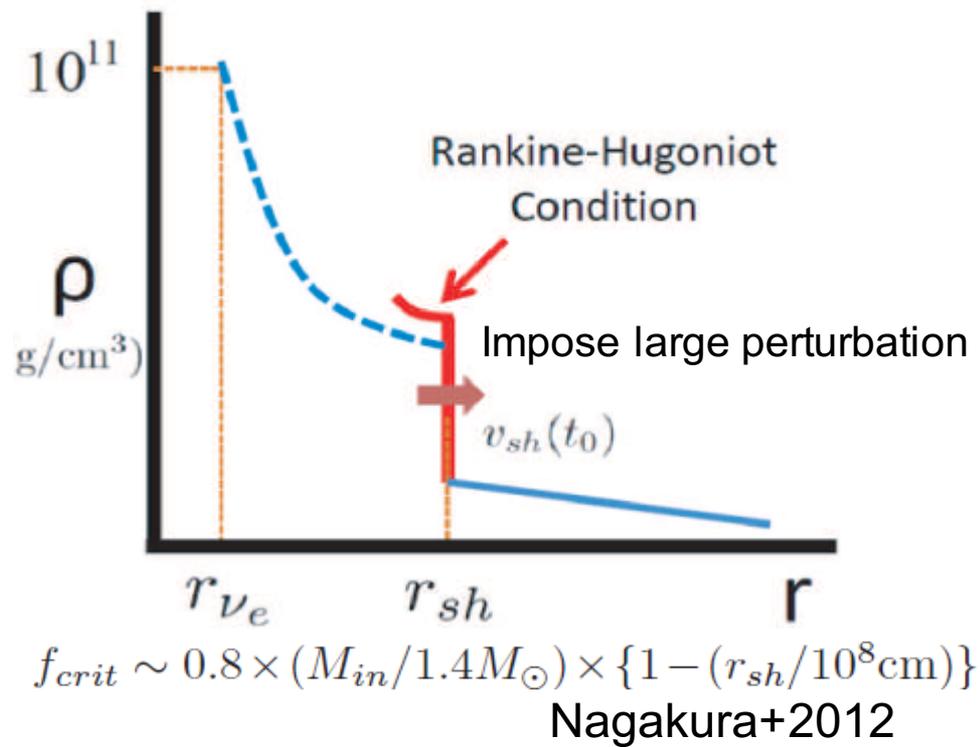
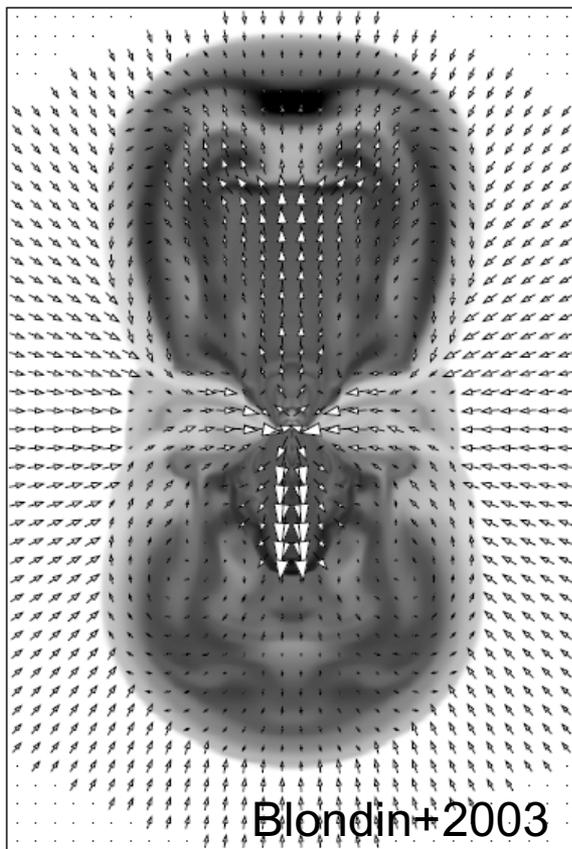
衝撃波と原始中性子星で音波と渦を跳ね返しあって、大きなスケールの振動をつくる。



Foglizzo

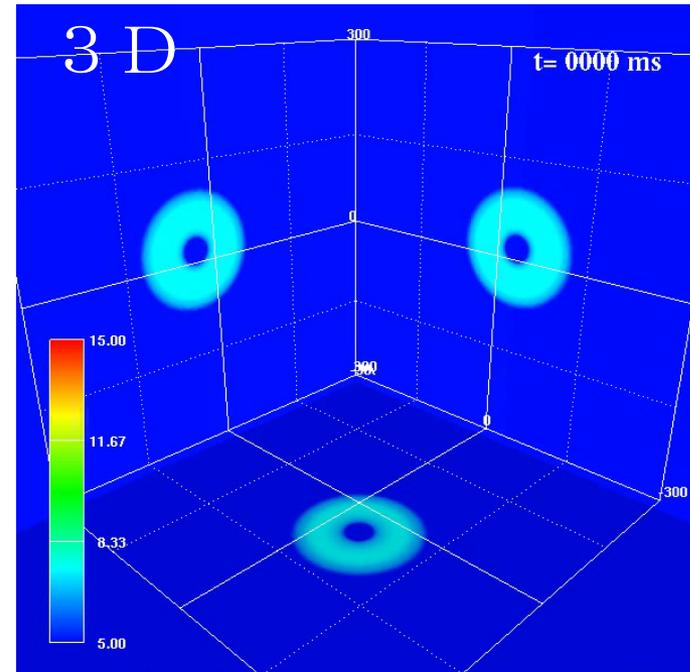
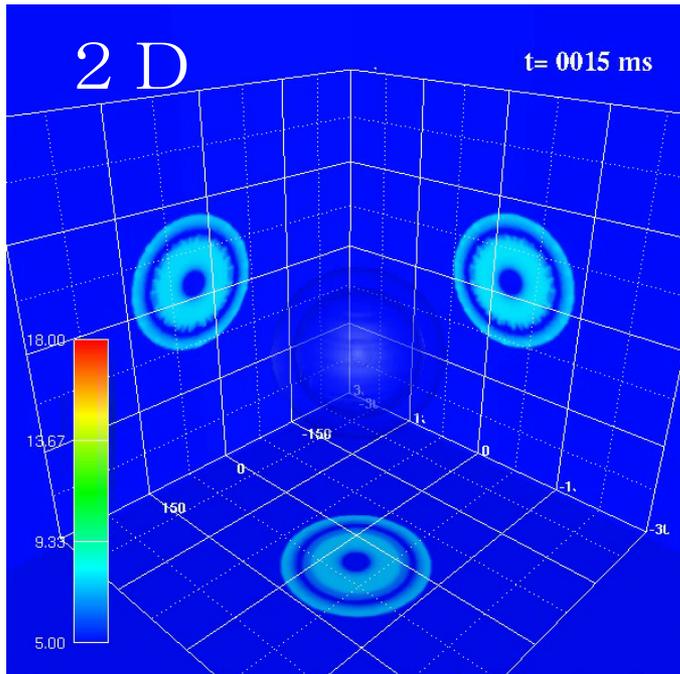
2D Axi-symmetric Takiwaki+2012

SASIはどう爆発に寄与するのか？



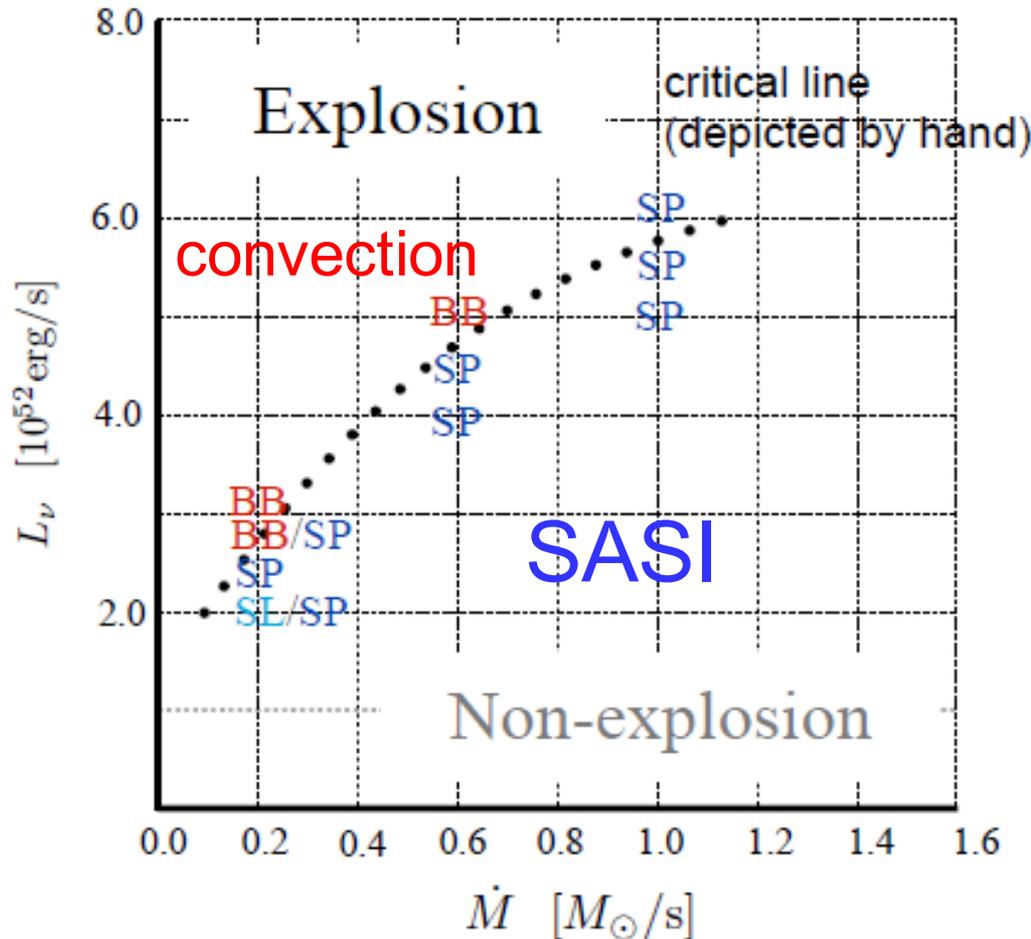
SASIによって衝撃波がゆがみ、一つの方向にエネルギーが集中することによって爆発する。圧力が~70%程度あがると爆発に転じる。

SASI in 2D and 3D



2次元だと非常に有望な説だが、残念ながら3次元だと2次元ほどは強くは起こらない。

SASIはどんなときに起きる？



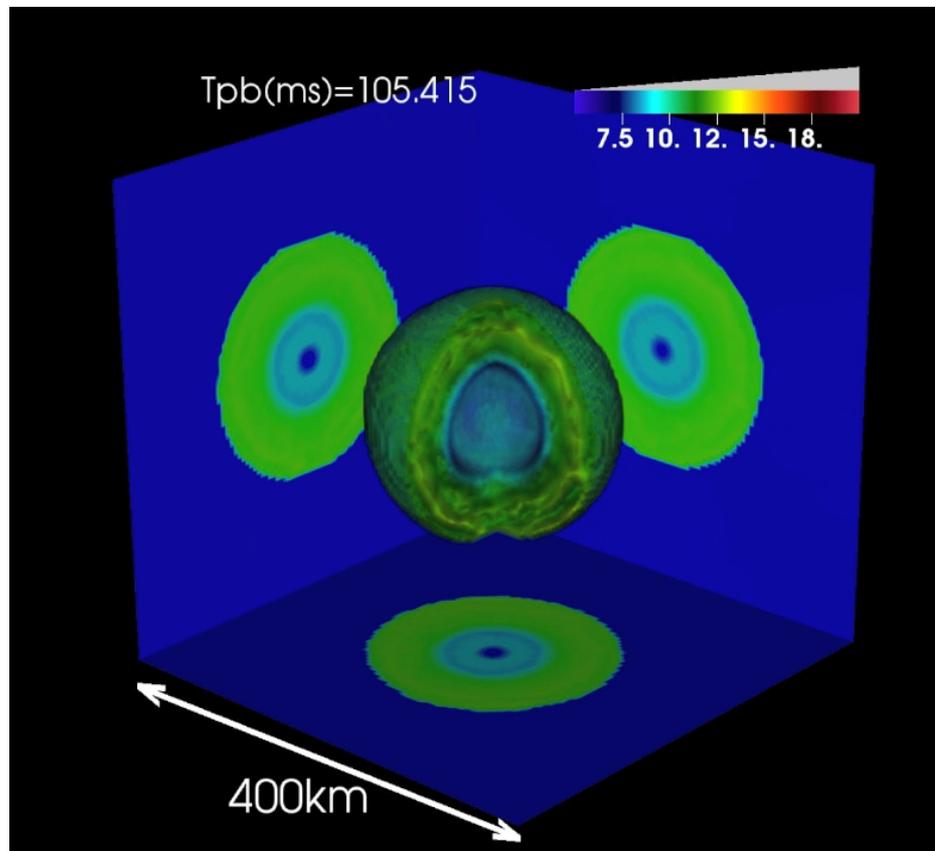
クリティカルカーブ：
質量降着率（ラム圧）
とニュートリノ光度が
つりあう線（定性的）

ν 光度がそれより高
ければ爆発

SASIは爆発しない側
や質量降着率が高い
側で起きやすい。

GR効果でSASI復活？

Kuroda+2016



一般相対性理論の効果で
衝撃波が小さくなると、
SASIが効きやすくなる。

3次元計算でも本当は
効いているのかもしれない。

爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと
対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

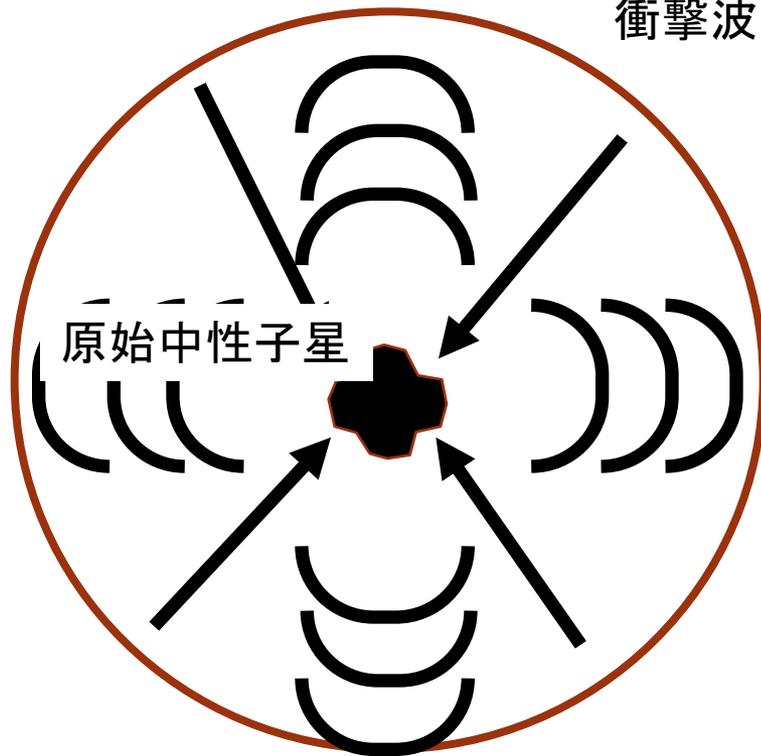
ただし基本的には理論研究での
比較であり、観測的証拠はない。

4. 音波

5. 磁気音波

6. 磁気回転

音波による爆発



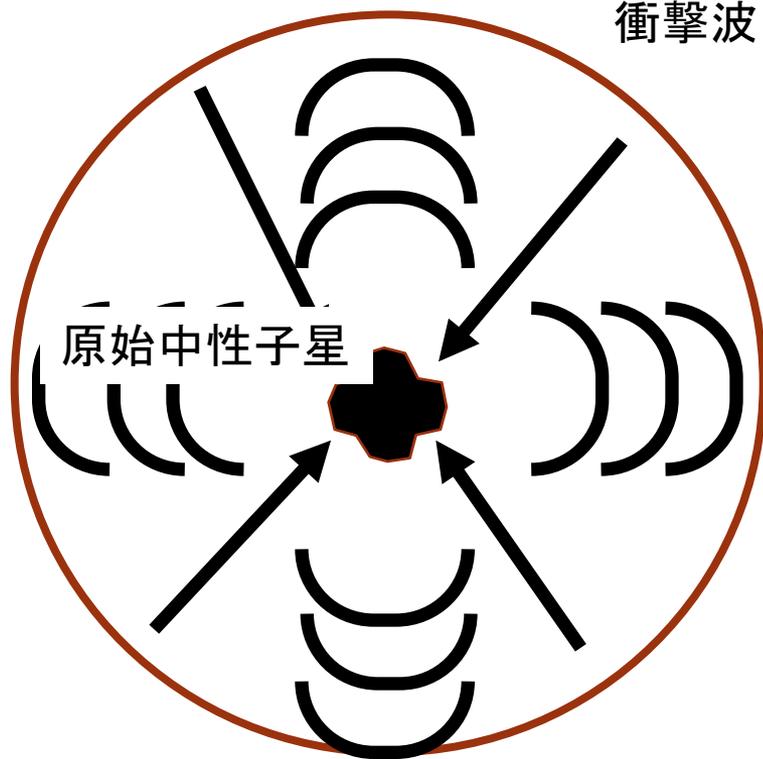
メカニズム:

降着流が中性子星を叩き, その結果中性子星が振動し音波を出す. 音波が衝撃波付近で熱化し, 衝撃波復活を助ける.

Burrowsがシミュレーションを根拠に主張. 定量性などあいまいだった.

Harada+2017で定量的になり、**起** **これば**ニュートリノ加熱を助ける可能性はあり。

音波による爆発



問題点:

降着流は100Hzぐらいのゆれで
中性子星の重力波はkHzぐらい
100HzでたたいてkHzのものを
誘起できるのか?

現象の再現性に欠ける.

爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと
対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

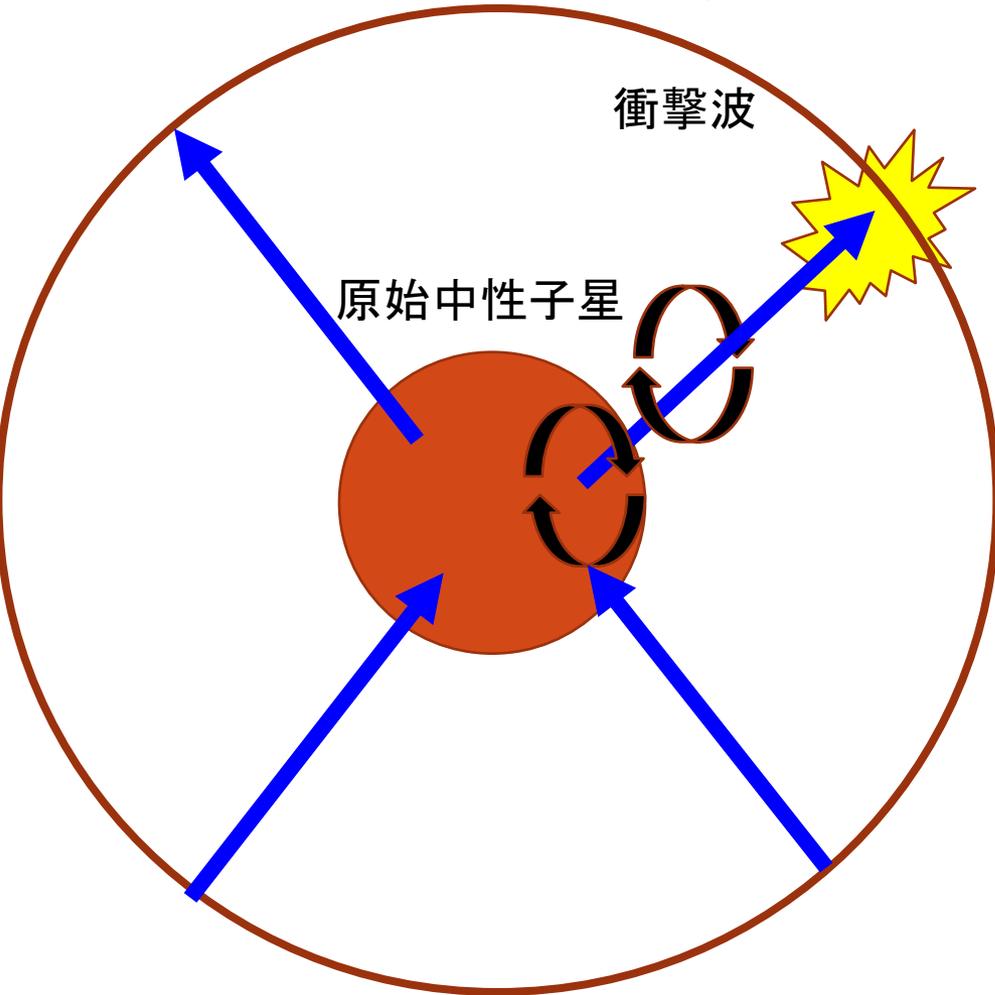
ただし基本的には理論研究での
比較であり、観測的証拠はない。

4. 音波

5. 磁気音波

6. 磁気回転

磁気音波による爆発



メカニズム:

中性子星内で起こる対流が磁力線を伝って外側に伝搬。衝撃波近くで散逸して物質を温める。

1次元シミュレーションを用いて、対流の強さ、磁気音波の散逸率などがパラメータで与えられているため、実際に起こるのかの検証が不十分。

爆発メカニズム バトルロイヤル

1. 対流

先に結論を言うと
対流あるいはSASIが有望

2. 回転

3. SASI

ただし基本的には理論研究での
比較であり、観測的証拠はない。

4. 音波

5. 磁気音波

6. 磁気回転

収縮したときのエネルギー増幅

半径が100分の1になったときの重力エネルギーの増幅

$$\Delta W \sim -10^{51} \frac{G(M/0.7M_{\odot})^2}{(R/10^8\text{cm})} - \left(-10^{53} \frac{G(M/0.7M_{\odot})^2}{(R/10^6\text{cm})} \right) [\text{erg}]$$

$$E_{\text{int}} = \Delta W = 10^{53} \text{erg} \quad \text{熱エネルギーへ転換}$$

$$E_{\text{emit}} = L\tau = 10^{52} \text{erg/s} \times 10\text{s} \quad \text{ニュートリノで放出}$$

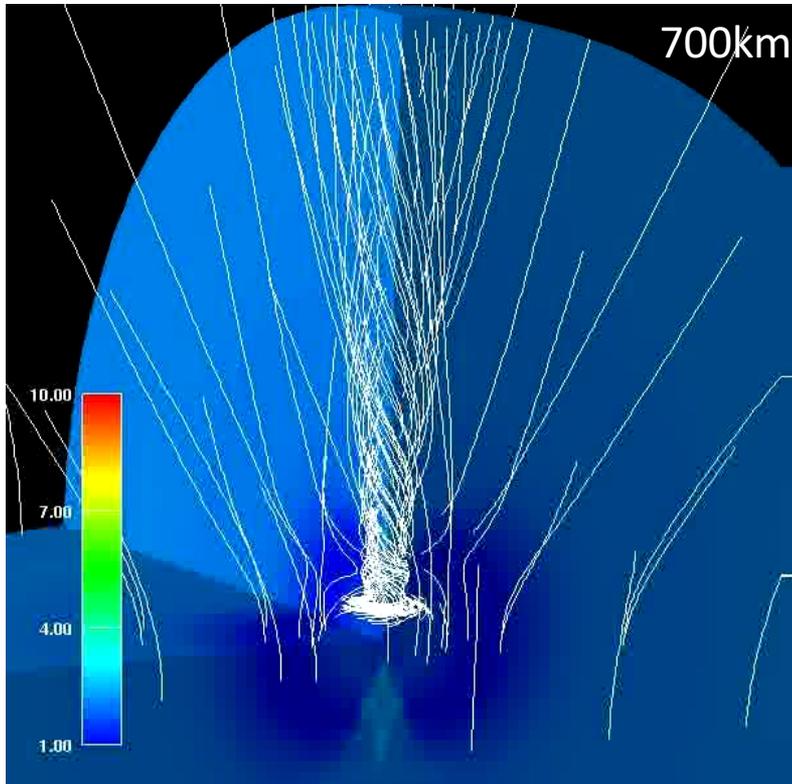
$$E_{\text{exp}} = f E_{\text{emit}} = 1\% \times 10^{53} \text{erg} = 10^{51} \text{erg}$$

$$E_{\text{rot}} \propto R^{-2}, 10^{48} \rightarrow 10^{52} \text{erg}$$

回転している場合に使えるエネルギー

$$E_{\text{mag}} \propto R^{-1}, 10^{47} \rightarrow 10^{49} \text{erg}$$

磁場による爆発

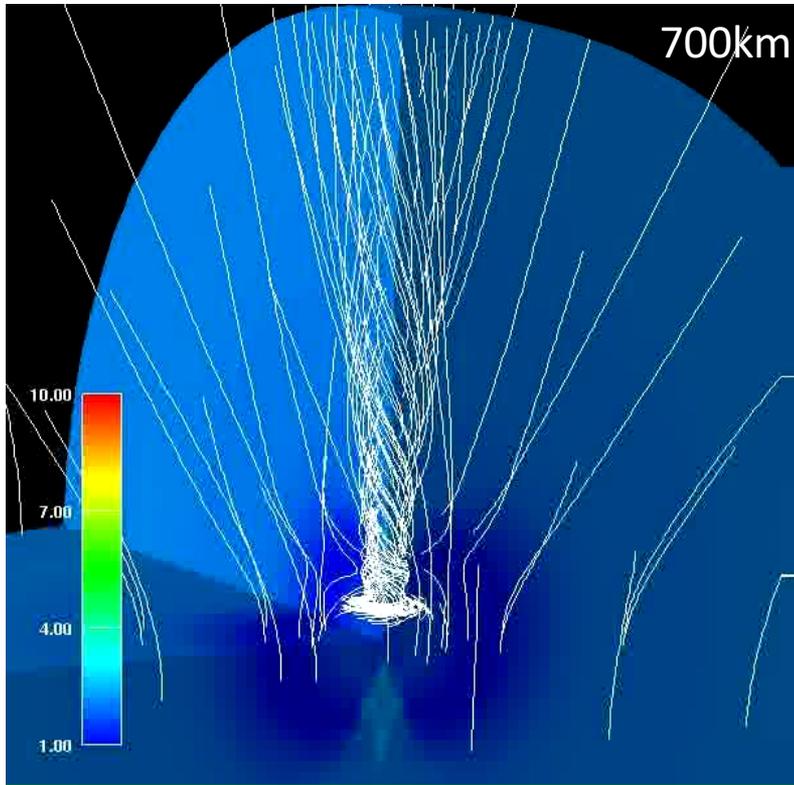


Jet & wound magnetic line
(entropy contour)

メカニズム：
磁場をねじって強力な
バネを極付近に作る。
バネが外側の圧力を跳
ね返して爆発！

$$B_{\phi} = B_r \Omega \tau$$

磁場による爆発



Jet & wind magnetic line
(entropy contour)

問題

強磁場&強回転が必要
(10倍x10倍ぐらい)

太陽金属量では無理か？

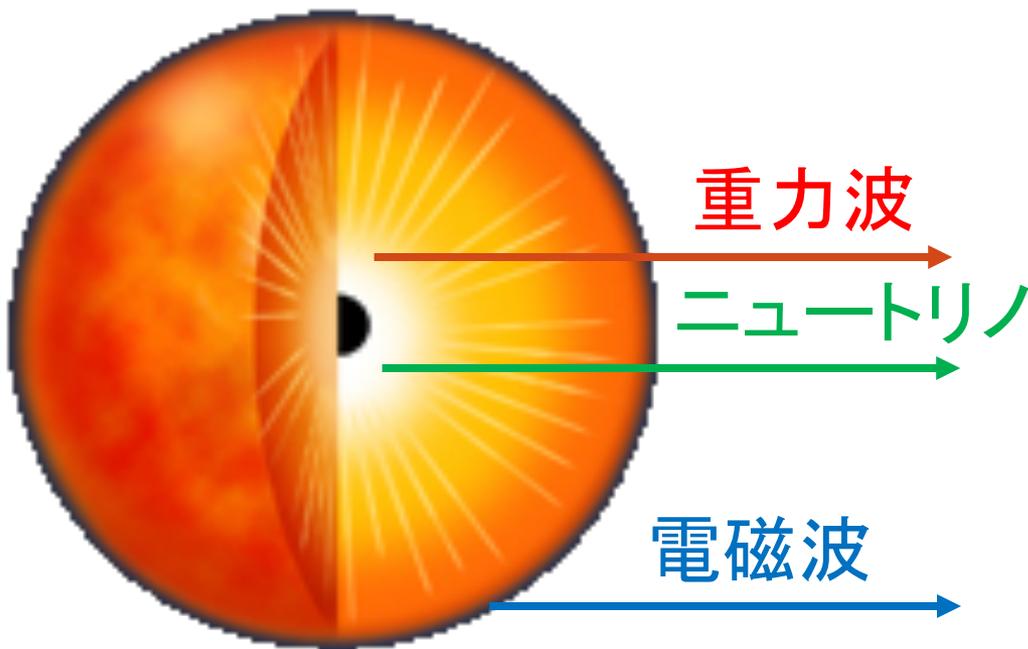
磁場はMRIで作れるかも。

中心の中性子星はマグネターになる。パルサーを作れない。

目次

1. 天体核物理としての超新星爆発
2. なぜ超新星は爆発しないのか？
3. 爆発メカニズム バトルロイヤル
4. マルチメッセンジャー観測への期待
5. まとめ

重力波とニュートリノで星の内部を見る



電磁波では星の表面より外側しか見えない

重力波やニュートリノは星の内側をみることができる。

超新星爆発などは星の内部で起こる

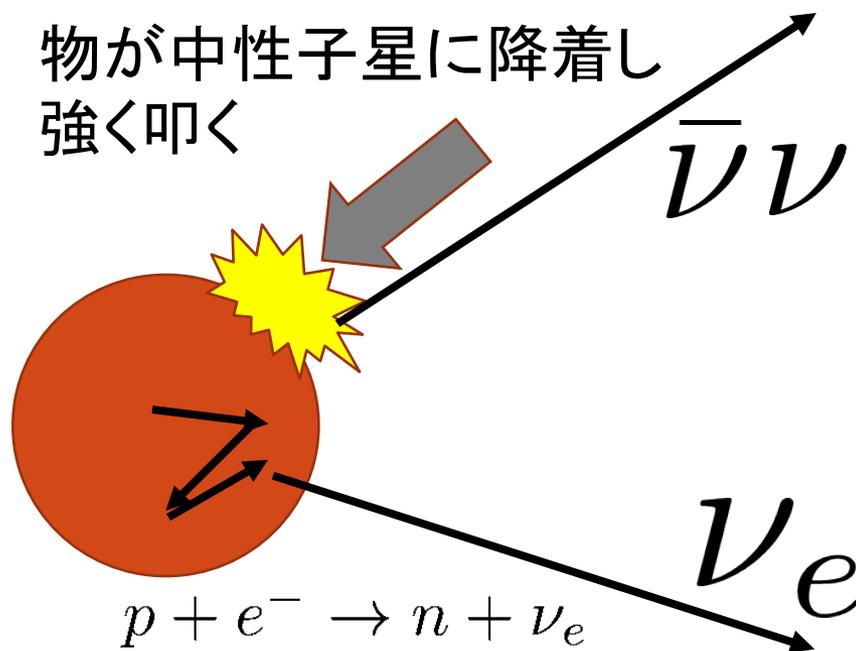
透過性： 重力波 > ニュートリノ > 光

重力波とニュートリノと(もちろん)光で
爆発メカニズムをどこまで理解できるか!?

二種類のニュートリノ放出

ニュートリノの降着成分と拡散成分

物が中性子星に降着し
強く叩く



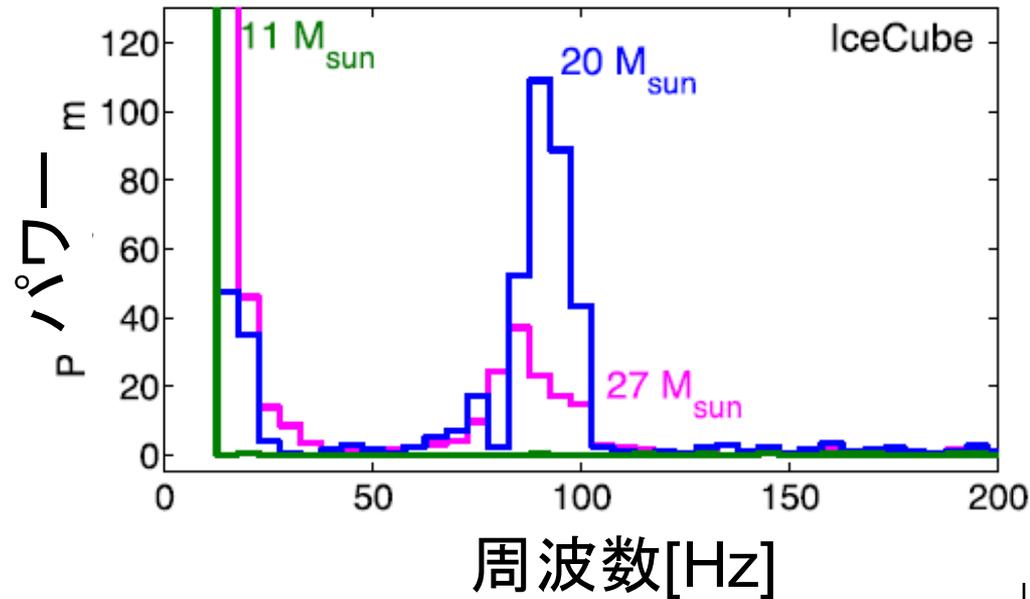
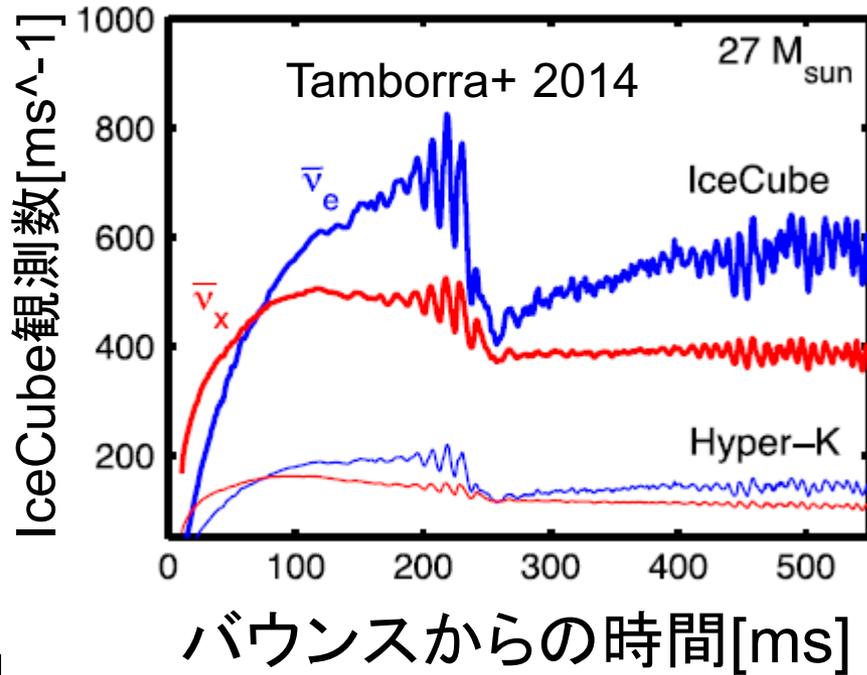
中性子星に貯めこまれた
電子がニュートリノに変化

降着成分は
早いタイムスケールで放出
中性子の回りの物質の運動
を反映。

爆発メカニズムの情報。

拡散成分は
遅いタイムスケールで放出
中性子の物性を反映。

SASIが起きたときのニュートリノ信号



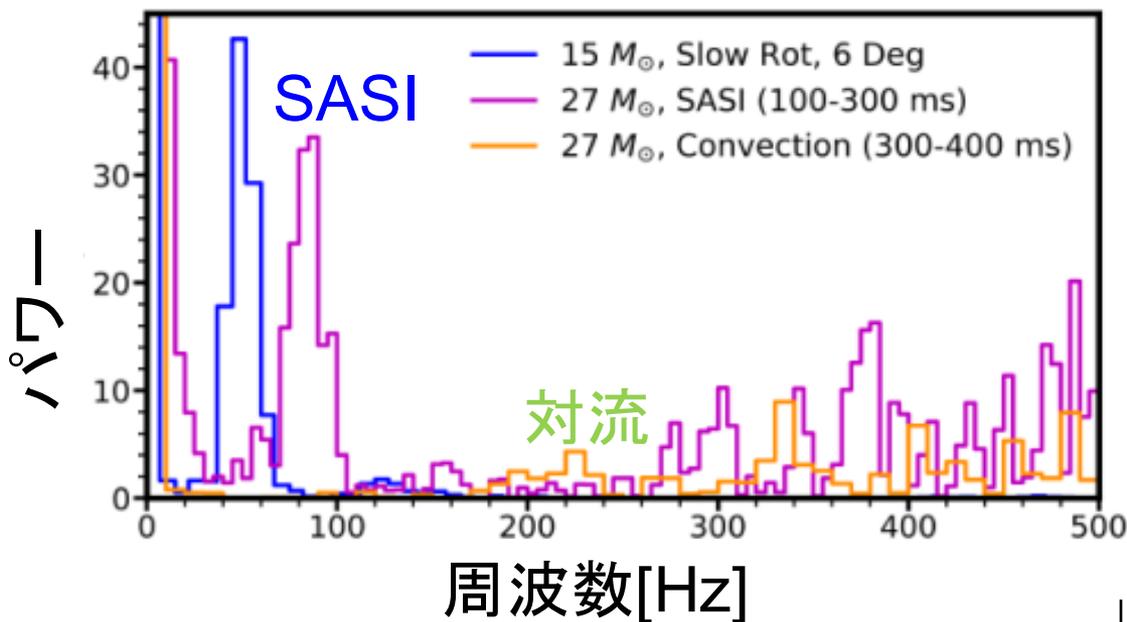
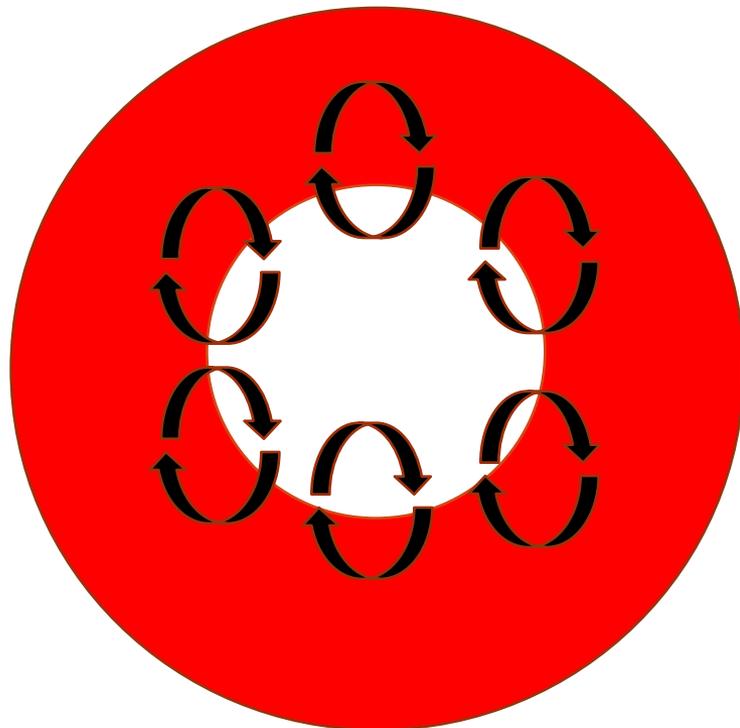
SASIによる揺れがニュートリノ観測に現れる。

周波数空間で見ると特徴がはっきりする。

⇒SASIの証拠

対流とSASIをニュートリノ観測で区別

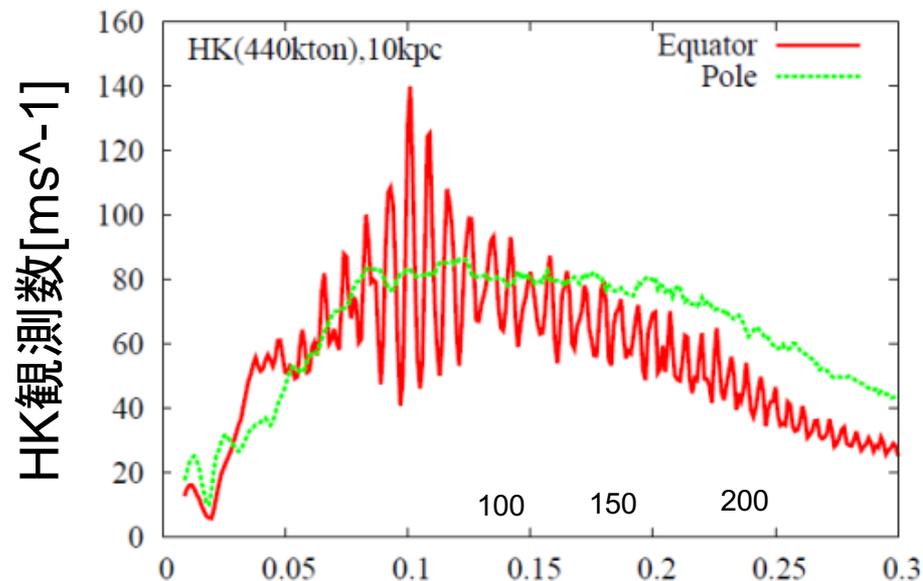
Walk+ 2018



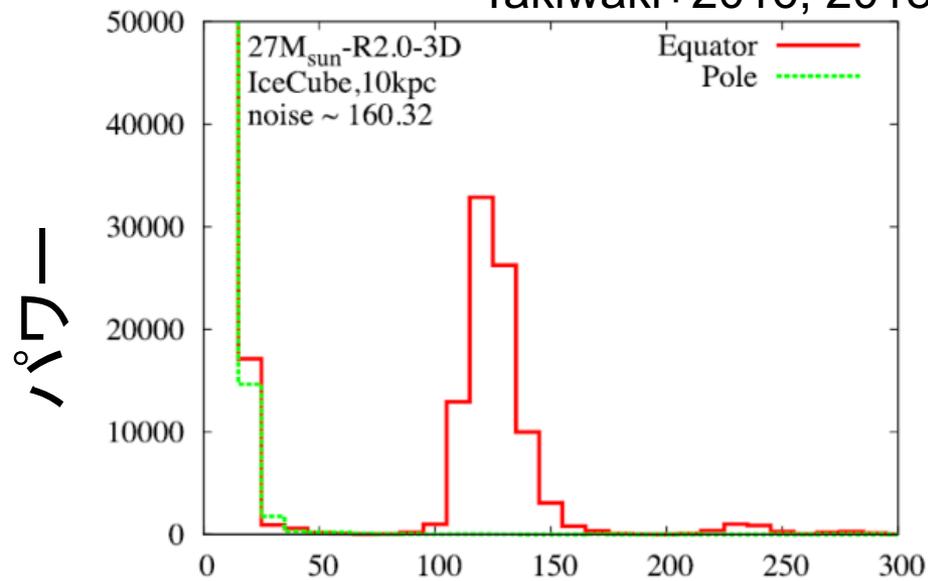
SASIは大きくゆっくり揺れ、
対流は小さく速く揺れるので
ニュートリノ観測から区別可能。

回転の有無をニュートリノから

Takiwaki+2016, 2018



バウンスからの時間[ms]



周波数[Hz]

回転している場合には
回転の周波数に応じたニュートリノシグナルが
はっきりである。(SASIより強い)

重力波

- 爆発メカニズムでも3次元の効果が重要だったが、重力波でも3次元の効果が重要

アインシュタイン方程式

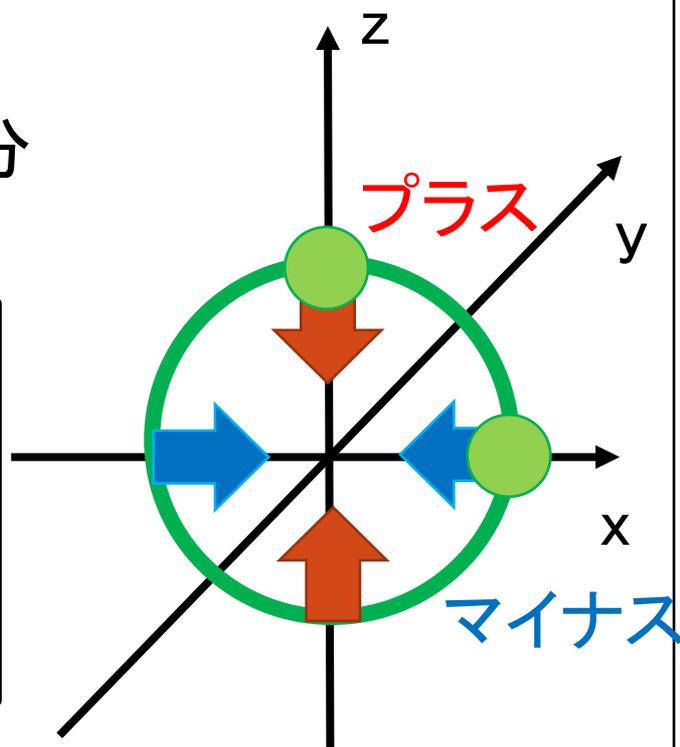
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

近似して積分

四重極公式

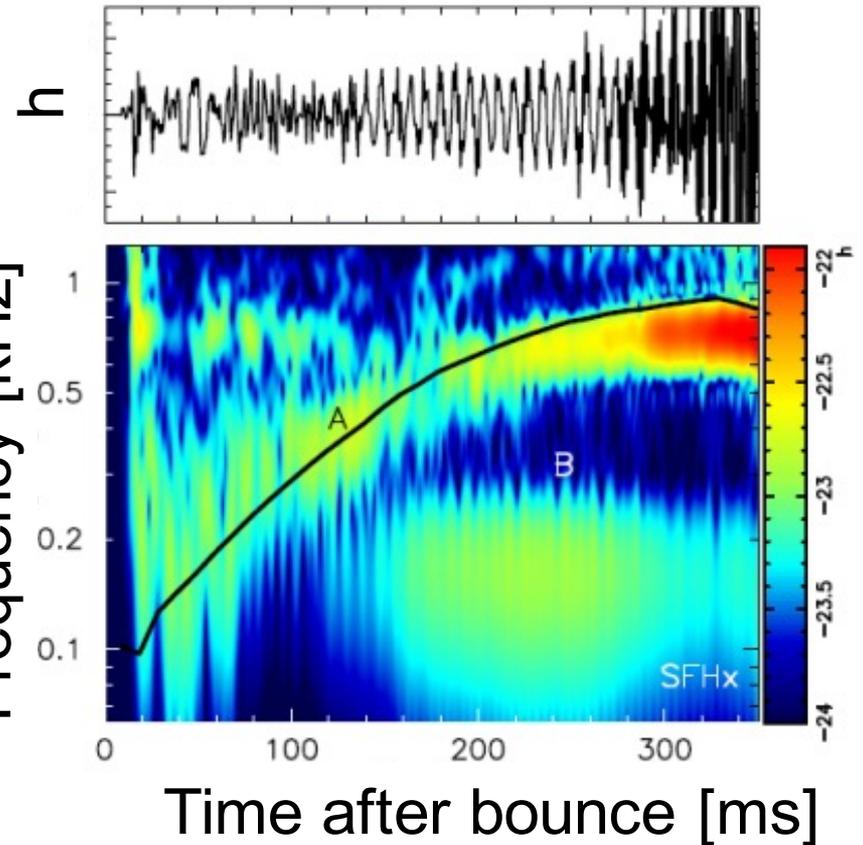
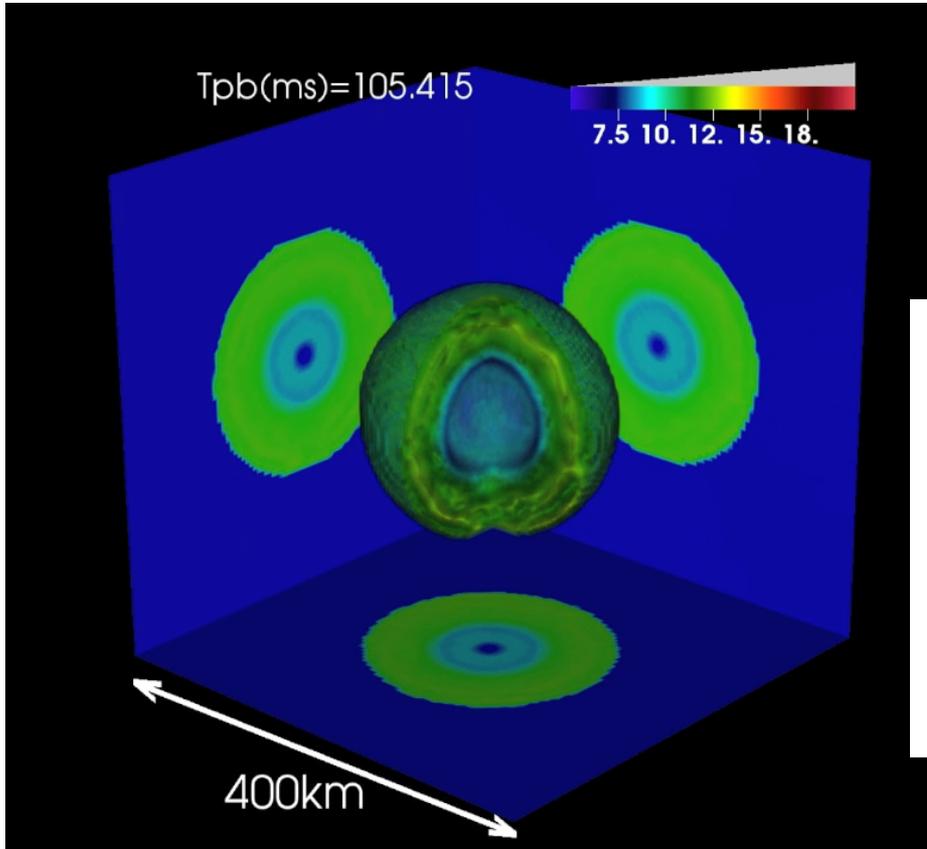
$$h_+ = \int dV (\rho v_z v_z - \rho v_x v_x + \dots)$$

積分 ρ : 密度 v : 速度



SASIからの重力波

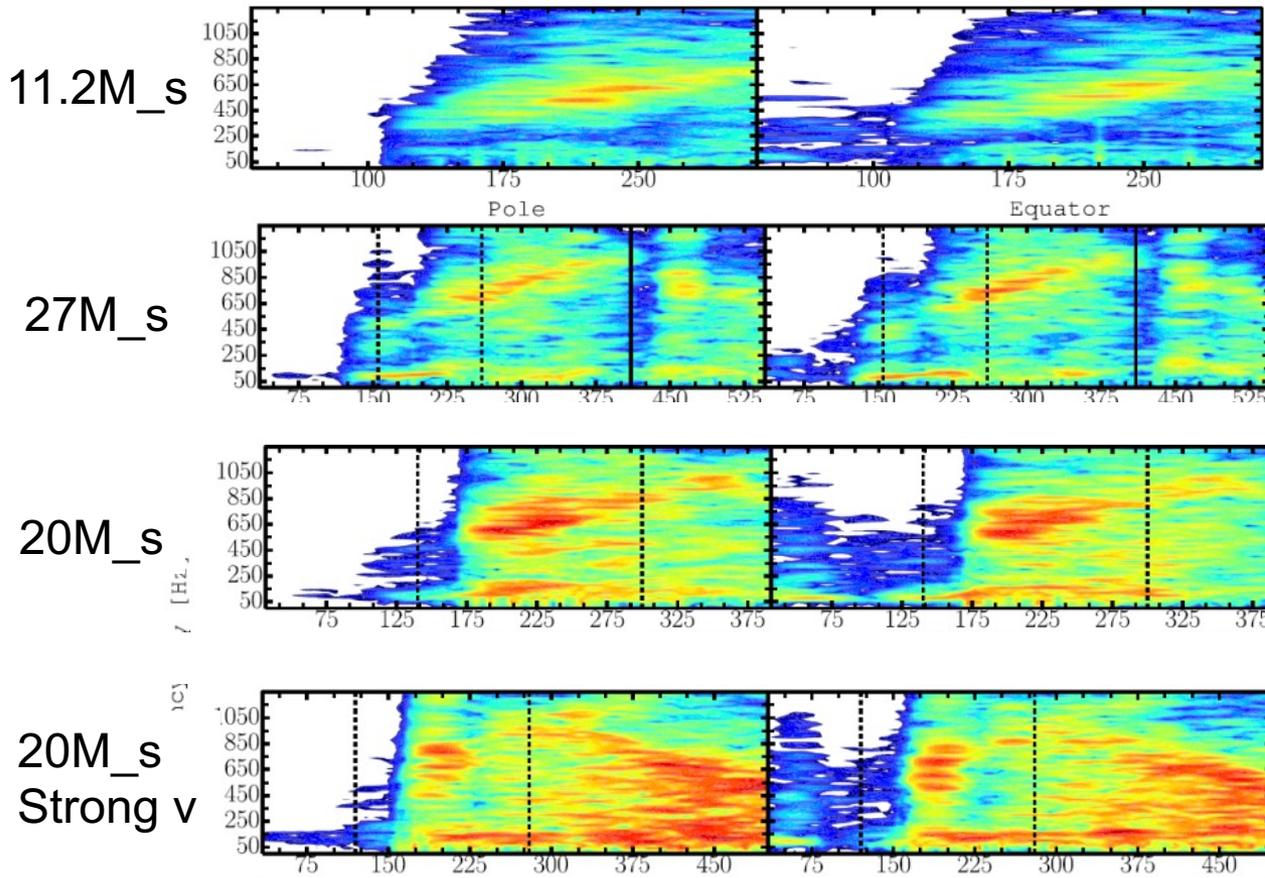
Kuroda+2016



衝撃波の揺れが中心部に伝わり、
振動して重力波が生じる。

重力波

Andressen+2018

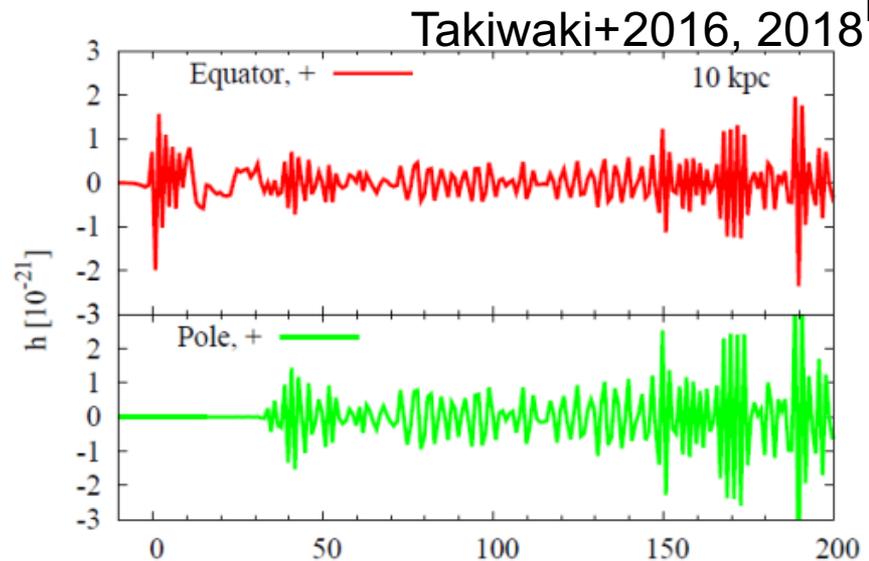
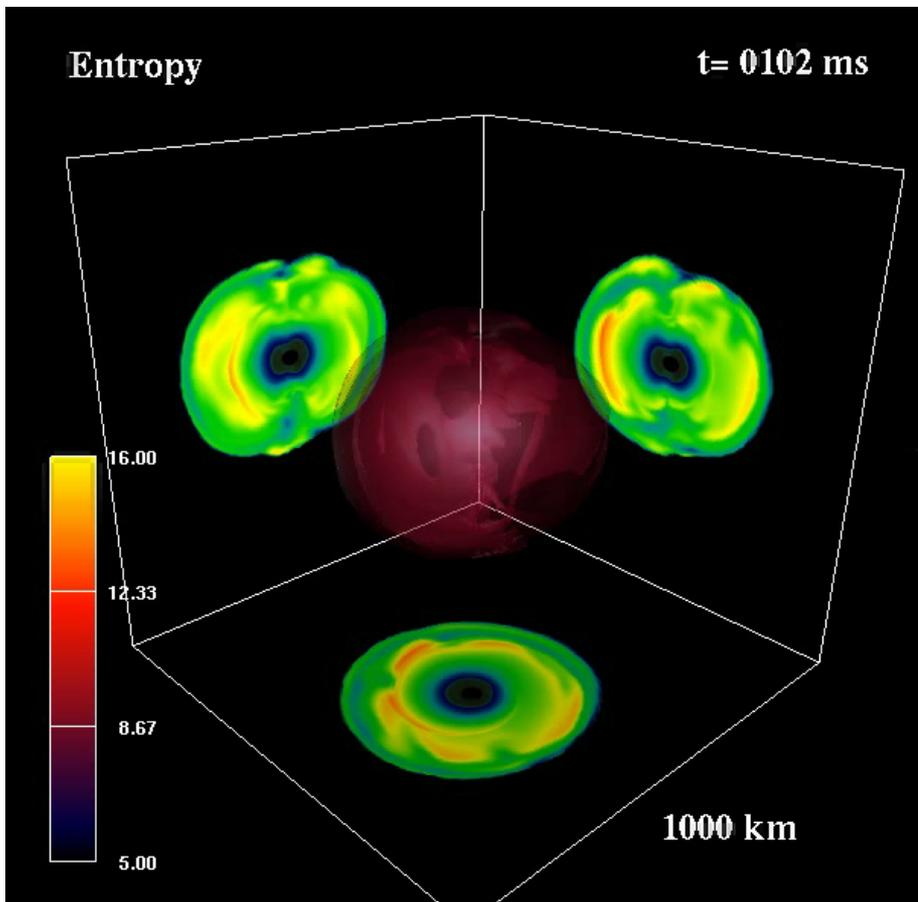


SASIの強さ

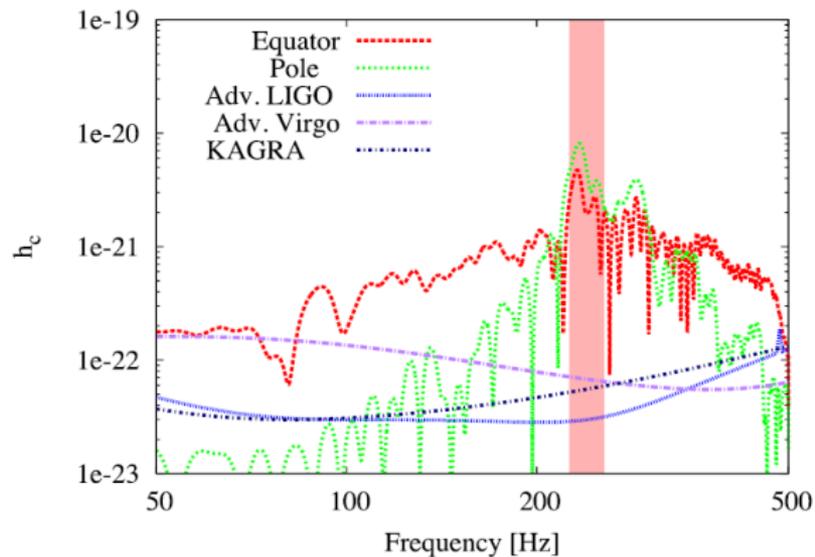
SASIが強いほど重力波も強めに。

ただし、SASIが弱くても見える成分もある。

自転爆発からの重力波



Time after bounce [ms]



回転爆発からも重力波を生じ、
周波数は自転の周波数の2倍に。

目次

1. 天体核物理としての超新星爆発
2. なぜ超新星は爆発しないのか？
3. 爆発メカニズム バトルロイヤル
4. マルチメッセンジャー観測への期待
5. まとめ

まとめ

- 超新星爆発の研究に60年の歴史あり。
ノーベル物理学賞の方々にも助けられ研究が進み、
今実りの時期
- 1次元球対称の仮定ではニュートリノ加熱爆発がうまくいかず、
様々な機構が提案された。
対流 and/or SASIが現状一番もっともらしい。ただし、観測的な証拠は何一つない。
- 堅実派の方へ
3次元モデルは多量の計算資源を要求するので、パラメータ依存性などが調べにくい。また現象が複雑すぎるので**本質を取り出した簡単なモデリング**が求められている。
- ギャンブラーの方へ
もし、我々の銀河で超新星爆発が起こり、 **ν やGWが思った通りのものでなかったらまたモデルが乱立するはず。**
そこに備えるのも一興か。