

大質量星  
超新星爆発  
高密度星

2025年度宇宙物理学 (2025年5月14日)

# 0. 低質量星の進化：太陽 ( $\sim 1M_{\odot}$ )

COコアが形成された後電子の縮退圧で  
支えられる白色矮星になって冷えていく

H

主系列星

水素燃焼でHeが生成

イマココ

He

H

赤色巨星

水素殻燃焼による  
外層膨張

C+O

He

H

白色矮星

C+O

外層の放出

# 1. 大質量星の進化

：ベテルギウス( $\sim 20M_{\odot}$ )

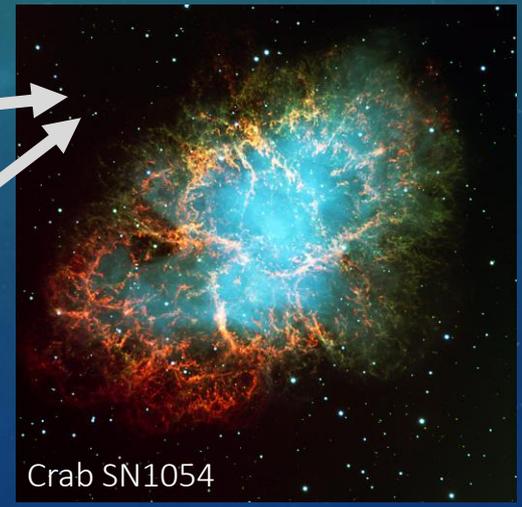


赤色超巨星

中性子星      ブラックホール



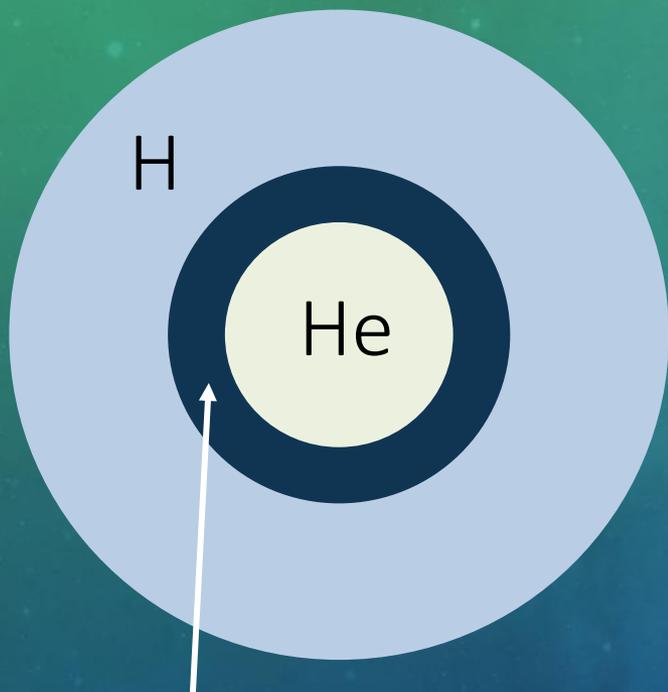
超新星爆発



重力崩壊

# 1.1 赤色超巨星(RSG)

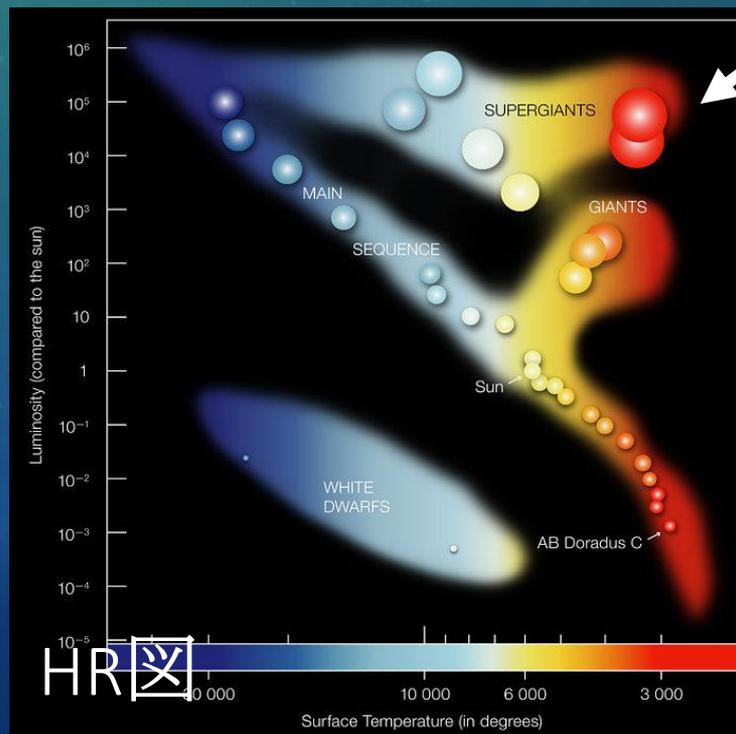
$R \sim 1000 R_{\odot}$



H殻燃焼(shell burning)

コアの圧力 > shellの圧力

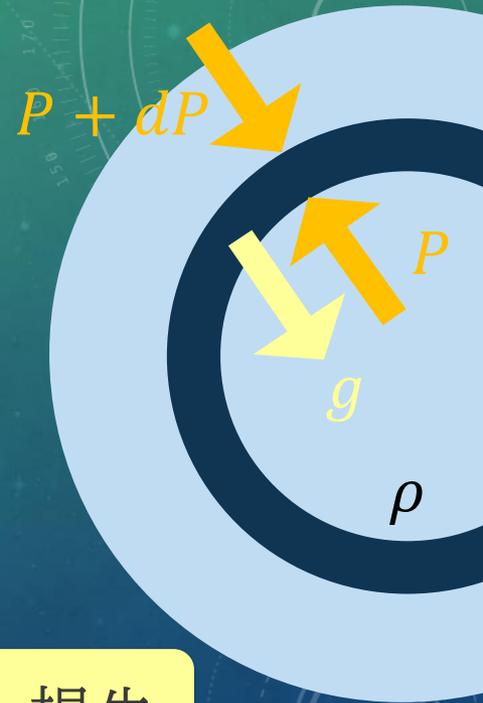
- H燃焼によるHeコア形成
- ➔ H殻燃焼(shell burning)
- ➔ H外層が膨張
- ➔ 赤色超巨星(RSG)



## 1.2 コアのダイナミクス：静水圧平衡

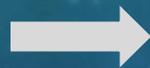
星は静水圧平衡が成り立っている  
静水圧平衡：自己重力 = 圧力勾配

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M(r)\rho}{r^2}$$



✓ 燃焼なし

エネルギー  
損失



重力収縮

温度・密度  
上昇



✓ 燃焼中

エネルギー損失



(密度・温度一定)

燃焼エネルギー

# 1.3 ニュートリノ放出

密度・温度が上昇するとHe燃焼以降ニュートリノ( $\nu$ )がメインのエネルギー損失源

ニュートリノ：弱い相互作用のみ

➔ 中心部から自由に抜け出れる

➔ 重力収縮/密度・温度の上昇 ➔  $\nu$  放出の増加

電子-光子散乱(トムソン散乱)

$$\sigma_{th} \sim 10^{-25} \text{cm}^2$$

ニュートリノ-電子散乱

$$\sigma_{weak} \sim 10^{-44} \text{cm}^2$$

## 主な放出機構

✓ 電子陽電子対消滅  $e^- + e^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$

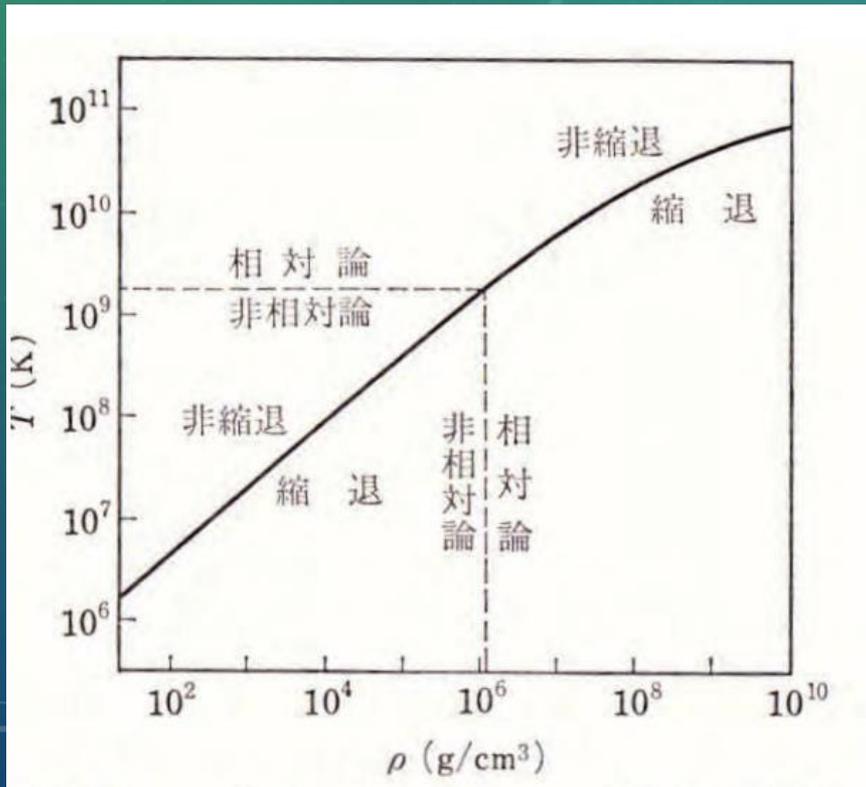
✓  $\beta$ 崩壊  $(Z, A) \rightarrow (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$

✓ 電子捕獲反応  $(Z, A) + e^- \rightarrow (Z - 1, A) + \nu_e$  など

# 1.4 大質量星と低質量星の違い

He燃焼によりCOコアが形成

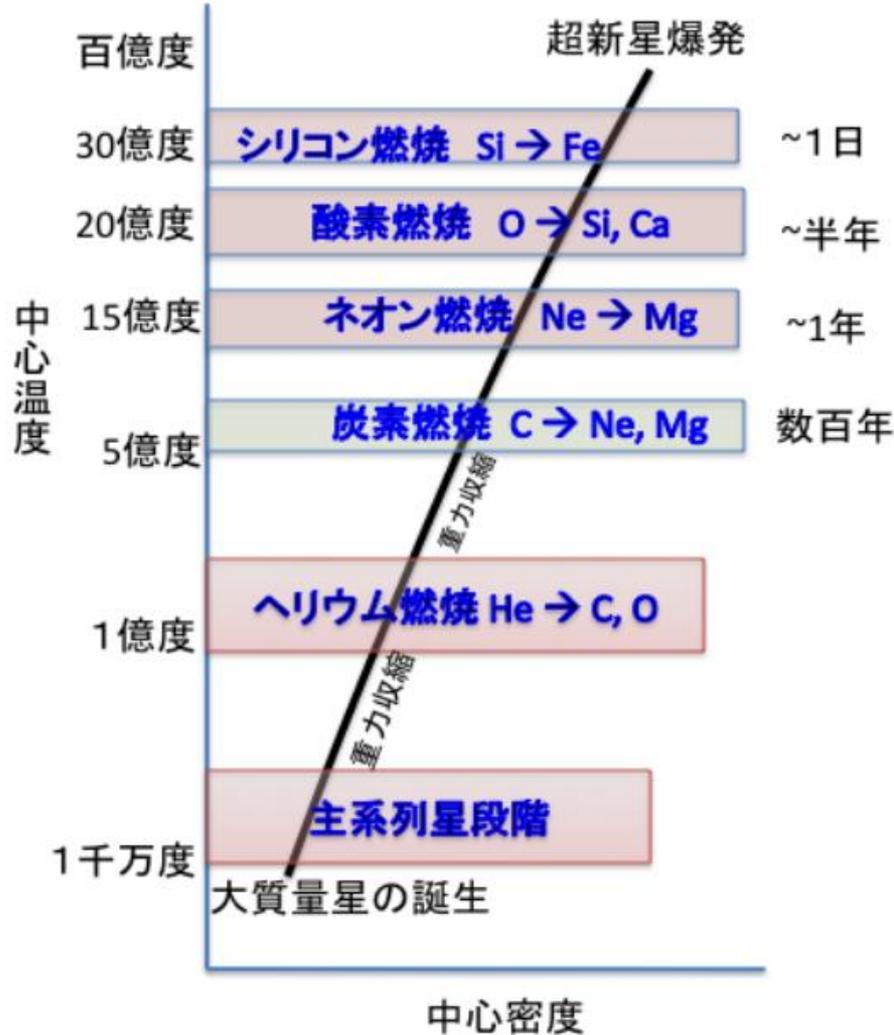
→  $M < 8M_{\odot}$ : 電子縮退コア     $M > 8M_{\odot}$ : 非縮退コア



✓ 縮退コア ( $M_{core} \lesssim M_{ch}$ )  
コアが電子の縮退圧で支えられるため、 $\nu$ が放出してエネルギーを持ち去っても重力収縮する必要がない (温度減少)

✓ 非縮退コア ( $M_{core} \gtrsim M_{ch}$ )  
コアが縮退していないため、重力収縮により温度が上昇し、新しい核融合反応へ

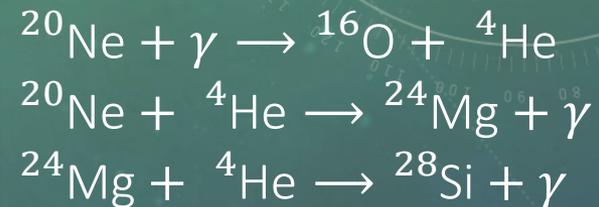
# 1.5 炭素燃焼以降の進化



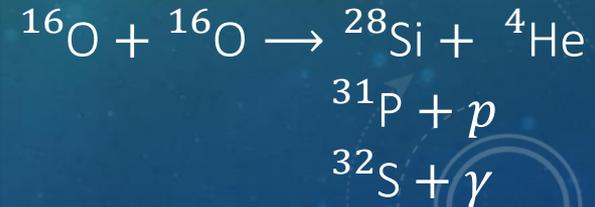
炭素燃焼



ネオン燃焼



酸素燃焼

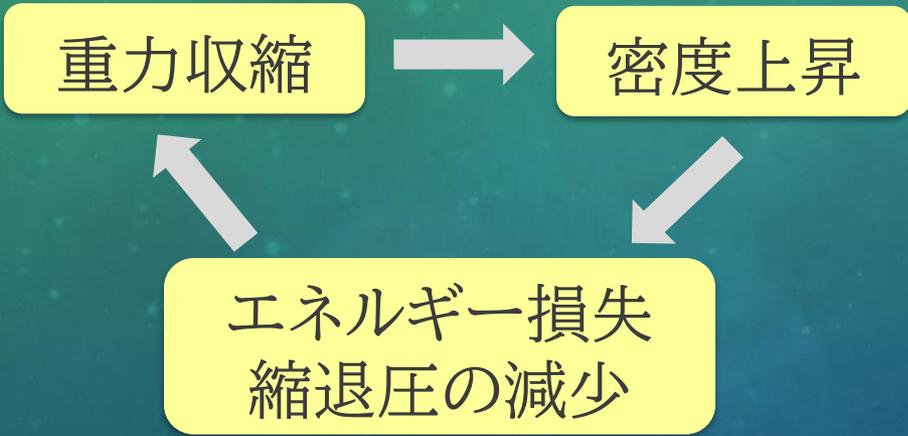


シリコン燃焼



# 1.6 重力崩壊のはじまり

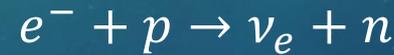
鉄: 核子1個あたりの結合エネルギーが最も大きい原子核  
→ 中心部で核融合反応が終わる



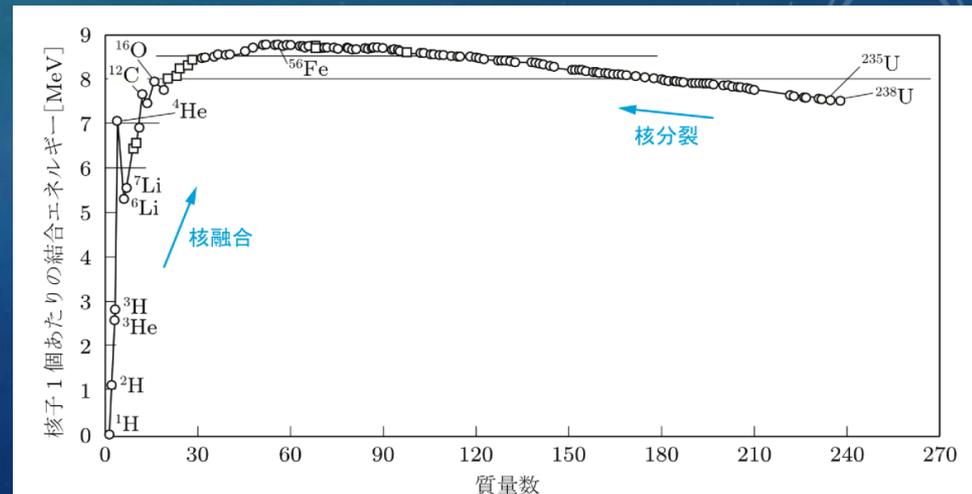
鉄の光分解(吸熱反応)



電子捕獲反応



静水圧平衡を保てなくなる  
→ 重力崩壊

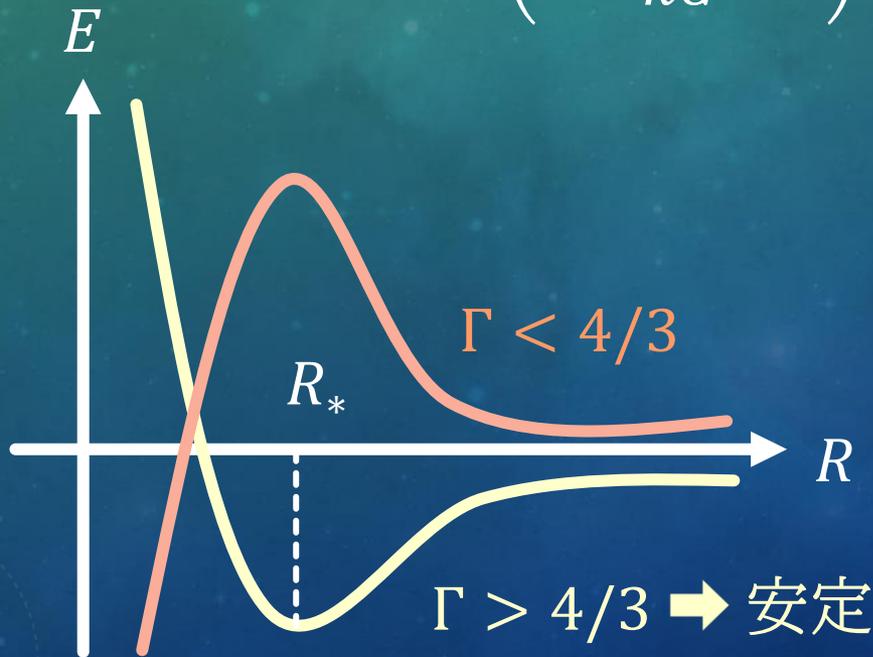


# 1.7 星の安定性 (雑な話)

星のエネルギー = 内部エネルギー + 重力エネルギー  
星のエネルギーの極小値 = 安定点

➡ Mが与えられている状況でRが決まるか？

$$R_* = \left( \frac{(3\Gamma - 3)k'}{kG} \right)^{1/3\Gamma-4} M^{\Gamma-2/3\Gamma-4} \quad (\text{一様球})$$



✓  $\Gamma$ : 断熱指数

相対論的電子の縮退圧:  $\Gamma \sim 4/3$

鉄による圧力:  $\Gamma \sim 5/3$

➡ 光分解によって不安定化

# 1.8 電子捕獲反応

✓密度上昇に伴い電子のフェルミ面が高くなってくると、電子を減らしたほうがエネルギー的に特になる

➡電子捕獲反応により中性子化していく



✓電子捕獲反応が進む条件

$\beta$ 平衡( $\mu_e + \mu_p = \mu_n + \mu_\nu$ )からのずれが重要

➡ $\mu_e > \mu_n - \mu_p$ で電子捕獲反応が起こる

✓自由陽子: $\rho > 3 \times 10^7 \text{g/cm}^3$

原子核: $\rho > 10^9-10^{10} \text{g/cm}^3$

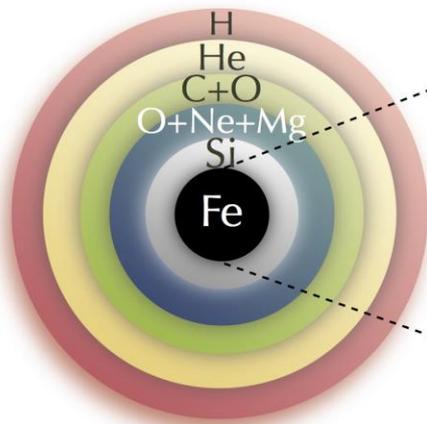
## 2. 超新星爆発



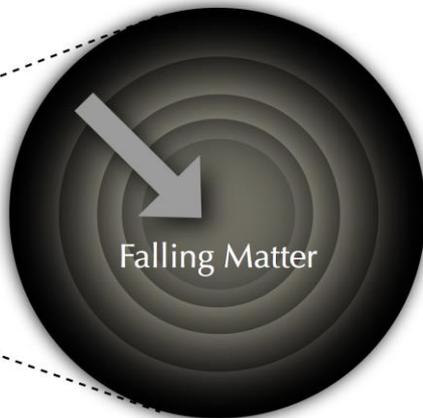
- ✓ 爆発エネルギー： $10^{51}$ erg =  $10^{44}$ J
- ✓ 太陽系近傍では数100年に1回
- ✓ 重力崩壊型超新星爆発・type Ia・磁気駆動型超新星爆発など
- ✓ 恒星の中心部で形成した衝撃波が表面に到達して星を吹っ飛ばす

# 2.0 重力崩壊型超新星のシナリオ

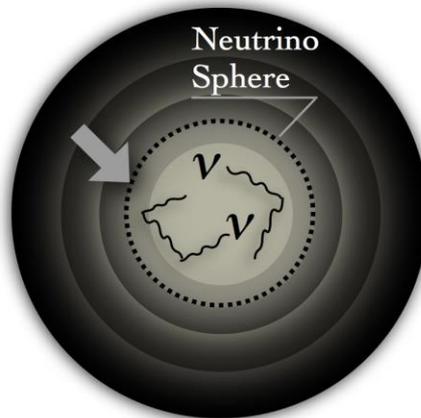
(a) 赤色超巨星



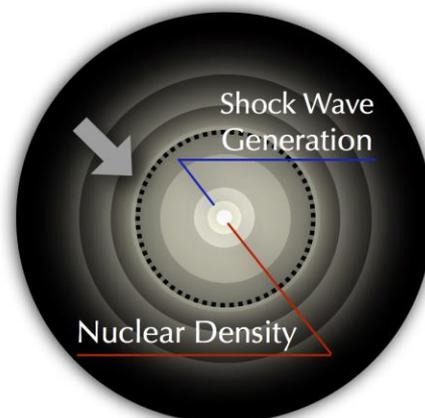
(b) 重力崩壊



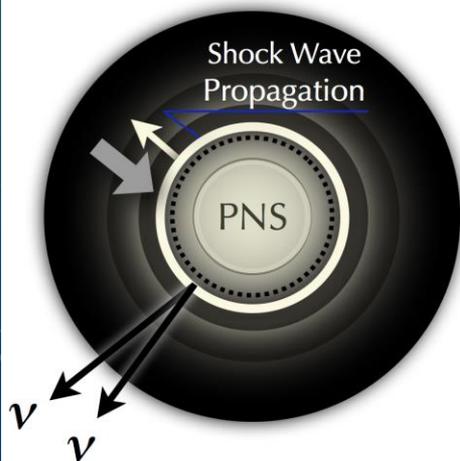
(c) ニュートリノ球



(d) コアバウンス



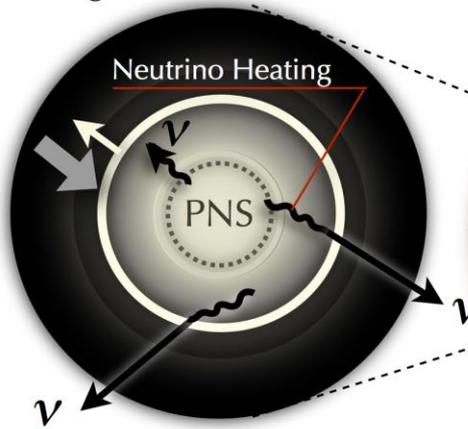
(e) 衝撃波の発生と伝播



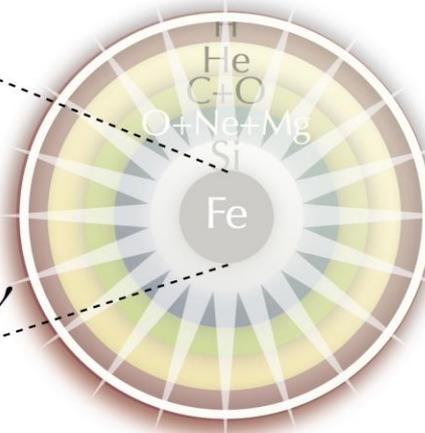
(f) 衝撃波の停滞



(g) 衝撃波の復活



(h) ニュートリノ加熱爆発



## 2.1 重力崩壊 数百ms

✓ニュートリノトラッピングと $\beta$ 平衡 (課題)

電子捕獲反応による $\nu_e$ の放出

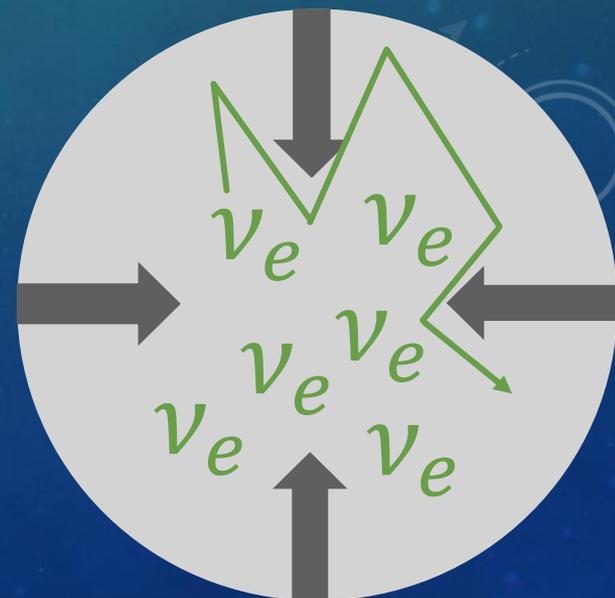
密度上昇によりニュートリノも自由にコアから抜け出せなくなり熱化

$$t_{diff} \sim \frac{3R_{core}^2}{l_{mfp}c} \sim 300\text{ms} > t_{dyn} \sim \sqrt{\frac{1}{G\rho}} \sim 100\text{ms}$$

鉄コア内部



$$\rightarrow \beta\text{平衡 } \mu_e + \mu_p = \mu_n + \mu_\nu$$



## 2.2 衝撃波形成と伝搬 数百ms

### ✓コアバウンス

核力が働く距離まで原子核間距離が近くなると安定化

➡ コアが反跳する

➡ 反跳のエネルギーが外部へ伝搬し、重力崩壊を続けている外層部との間に衝撃波が形成・外側へ伝搬

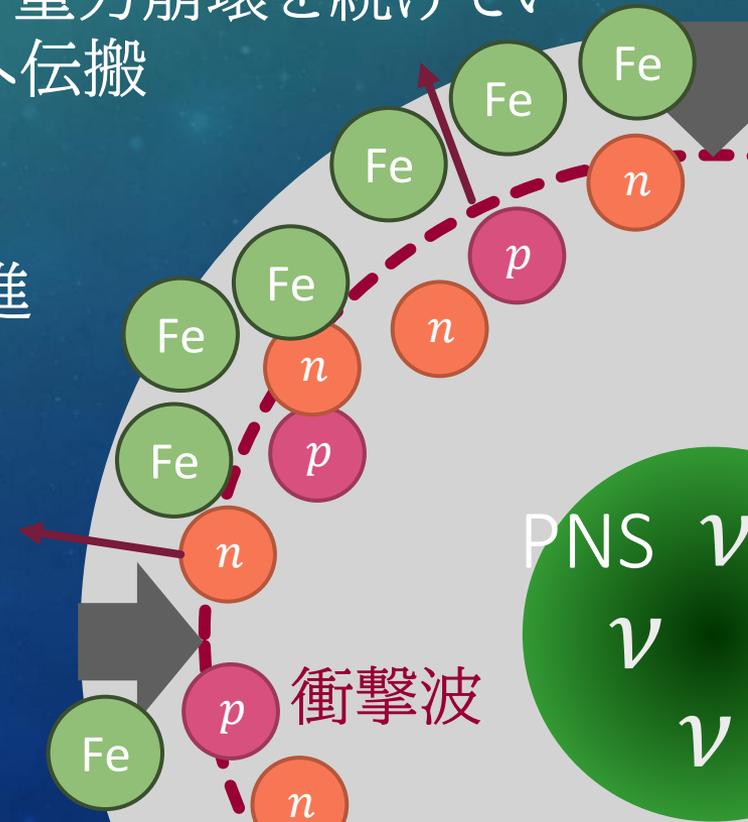
### ✓衝撃波の停滞

衝撃波による圧縮で鉄の光分解の促進

➡ 核子形成に伴うニュートリノ放出

➡ 衝撃波が鉄コアの外層部で停滞

中心に原始中性子星(PNS)を形成



## 2.4 衝撃波の復活

✓ 衝撃波で形成された大量の核子と原始中性子星由来のニュートリノが反応



➡ 衝撃波後方の温め内部エネルギー上昇

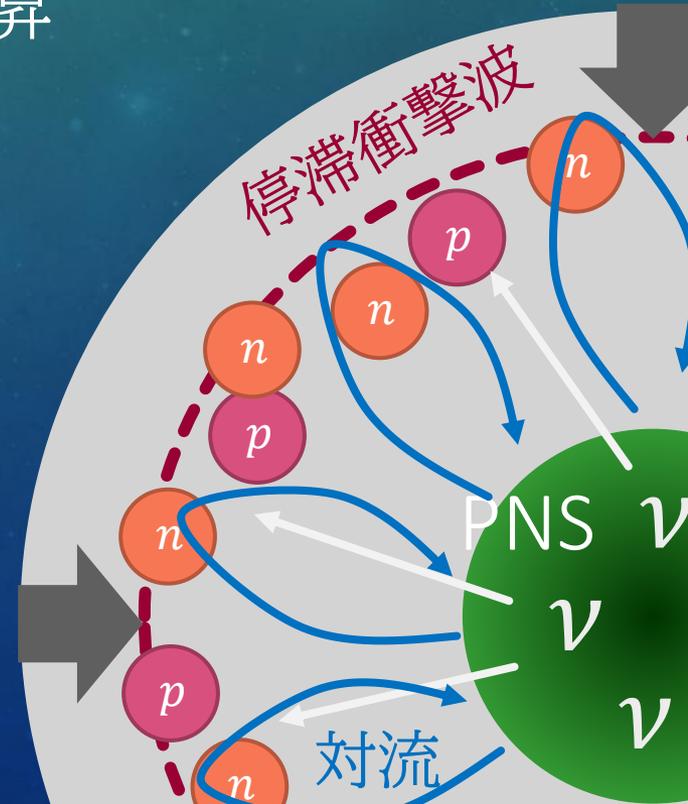
➡ 衝撃波復活へ

(ニュートリノ加熱メカニズム)

✓ 1次元では爆発しない

➡ 多次元効果が重要

ex) 対流・停滞衝撃波不安定・回転・磁場



# おまけ：超新星爆発の数値計算

計算範囲：鉄コアに内部(数百km)

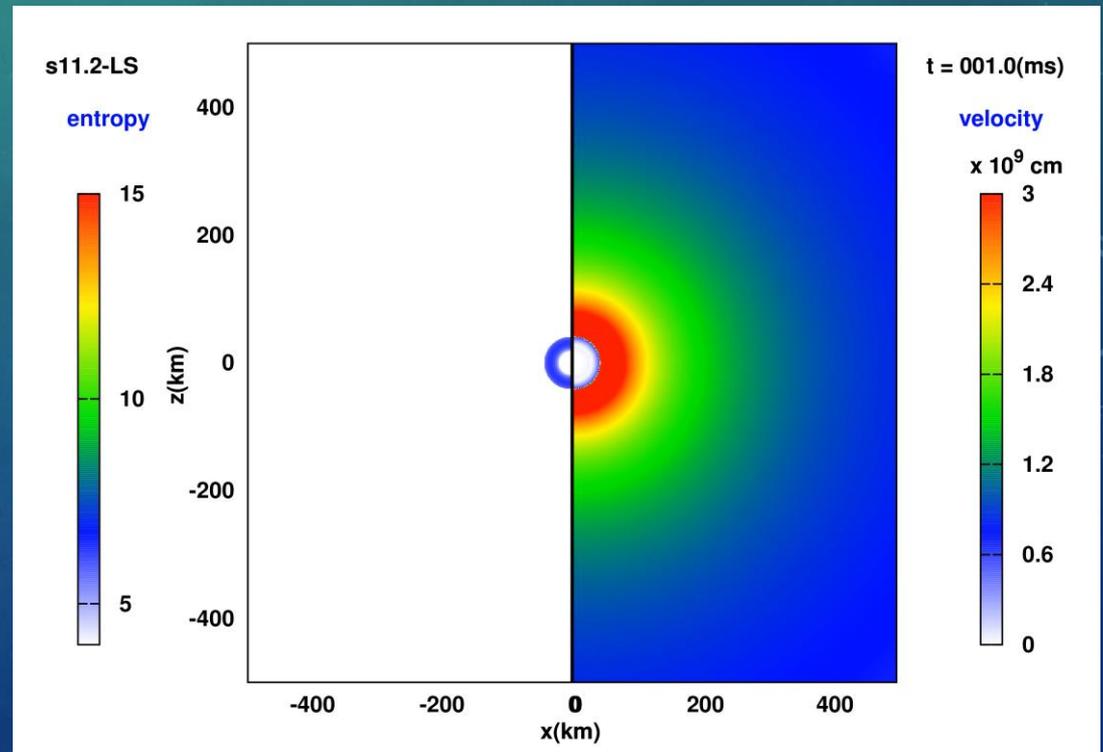
計算秒数：数百ms

登場人物：核子・原子核・ニュートリノ・電子

解く式：流体の式＋ニュートリノの輸送方程式

＋レプトンの式＋重力の式＋状態方程式

多次元計算には  
富岳や京で  
数か月もかかる



## 2.5 原始中性子星の形成と冷却

衝撃波が復活して鉄コアを抜けると、停滞することなく星表面へ到達

➡ 物質降着が停まり、中心部の原始中性子星は他から切り離される

➡ ニュートリノの拡散による冷却で中性子星へ (~1分)

$$t_{diff} = 4s \left( \frac{R_{core}}{10\text{km}} \right)^2 \left( \frac{\varepsilon_\nu}{10\text{MeV}} \right)^2 \left( \frac{\rho}{10^{14}\text{g/cm}^3} \right)$$

## 2.6 爆発エネルギー

鉄のコアの重力崩壊で解放される重力エネルギー

$$E \sim - \left( \frac{GM_{star}^2}{R_{star}} - \frac{GM_{NS}^2}{R_{NS}} \right) \sim 3 \times 10^{53} \text{ erg} \left( \frac{M_{NS}}{M_{\odot}} \right)^2 \left( \frac{R_{NS}}{10 \text{ km}} \right)^{-1}$$



ニュートリノが持ち去るエネルギー:  $\sim 10^{53} \text{ erg}$

衝撃波が星を吹き飛ばすエネルギー(爆発エネルギー):  
 $\sim 10^{51} \text{ erg}$

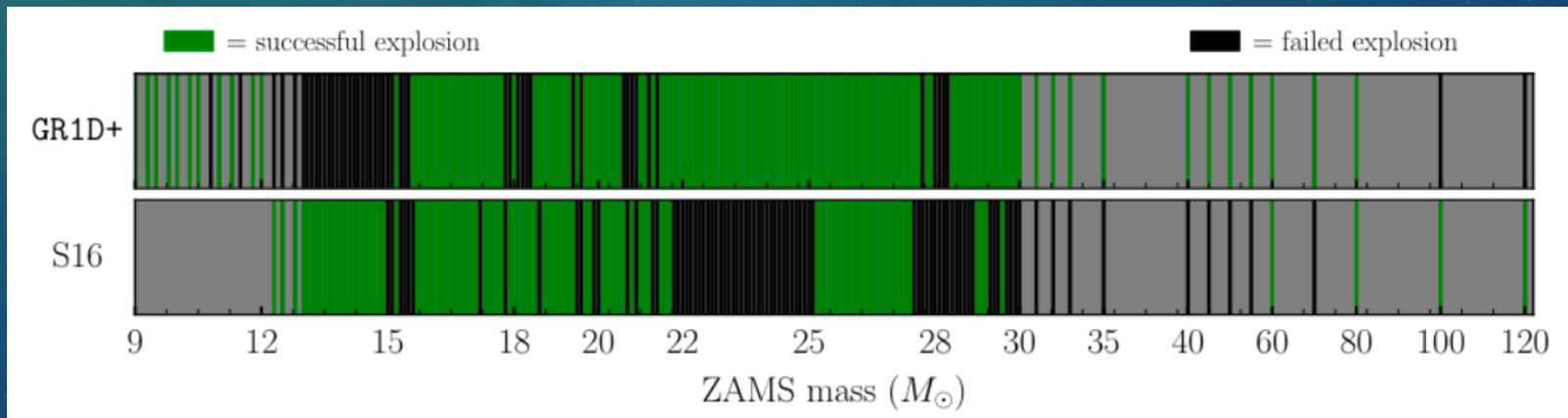
その他 (光子など):  $\sim 10^{49} \text{ erg}$

## 2.7 中性子星orブラックホール

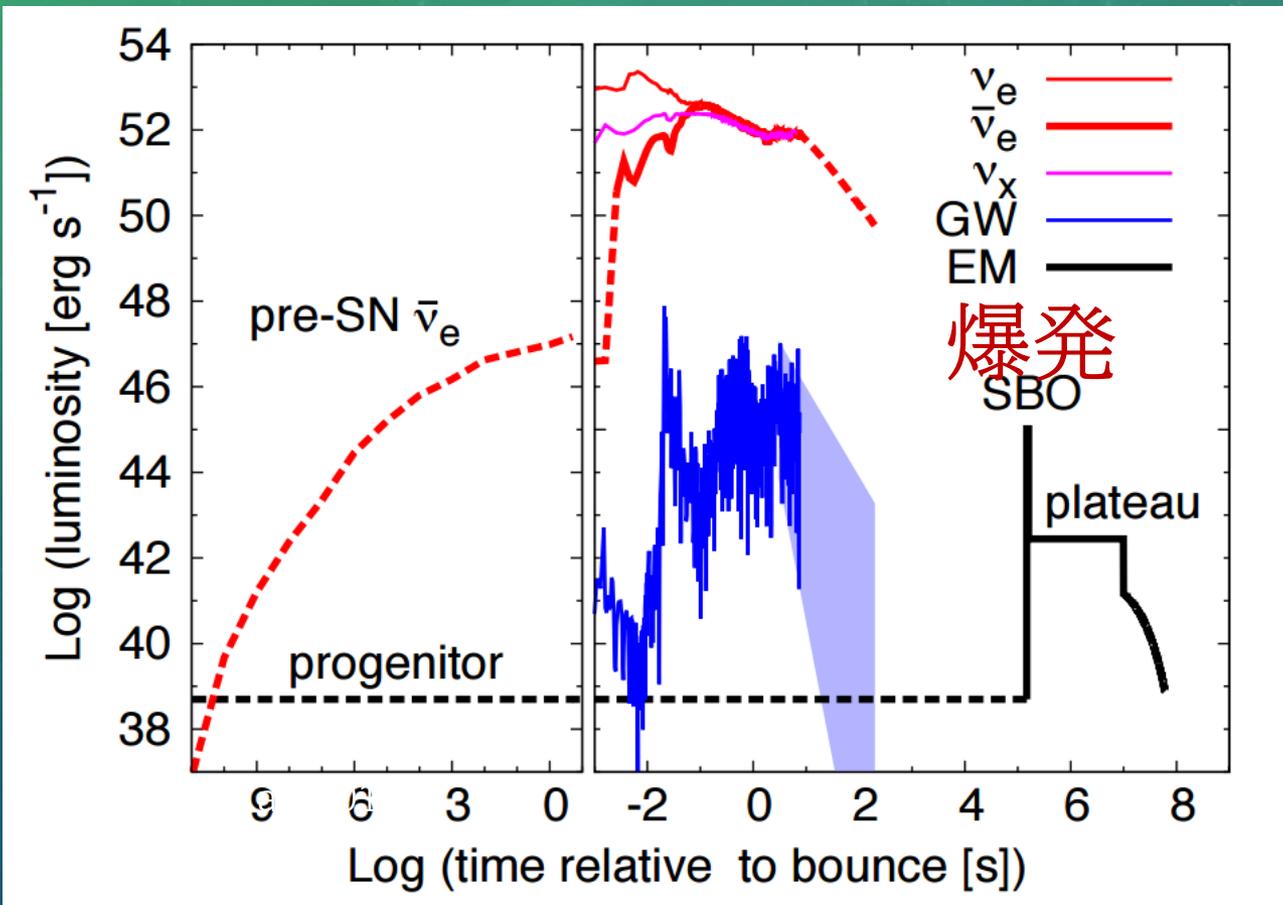
✓ 停滞した衝撃波の復活に成功した場合、中心部のPNSが中性子星へと冷却する

⇔ 衝撃波を復活させられないと降着する物質の圧力によって衝撃波が押し戻されてブラックホールを形成 (failed supernova)

✓ 現在議論の真っただ中

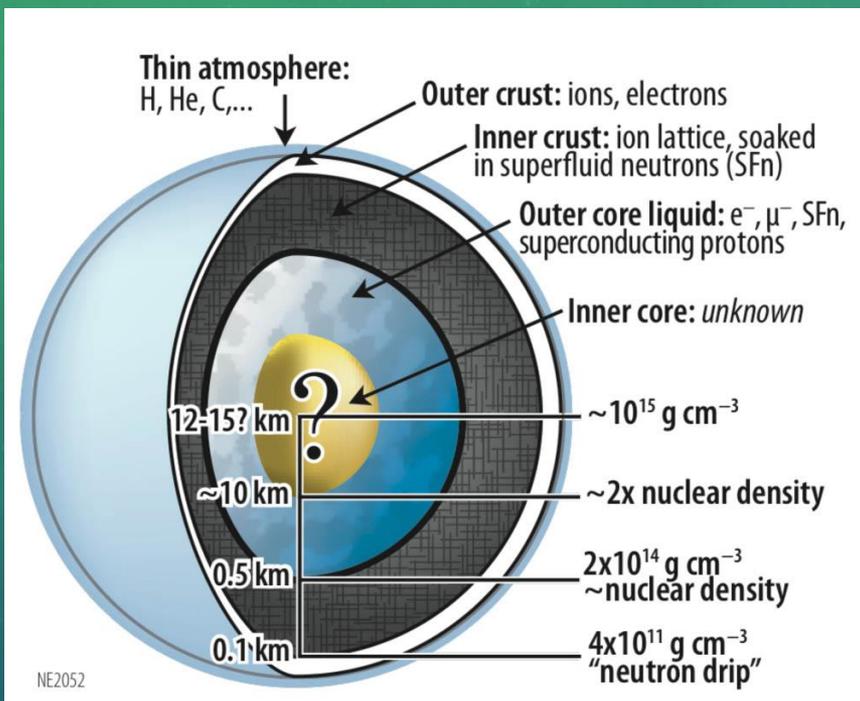


## 2.8 超新星観測

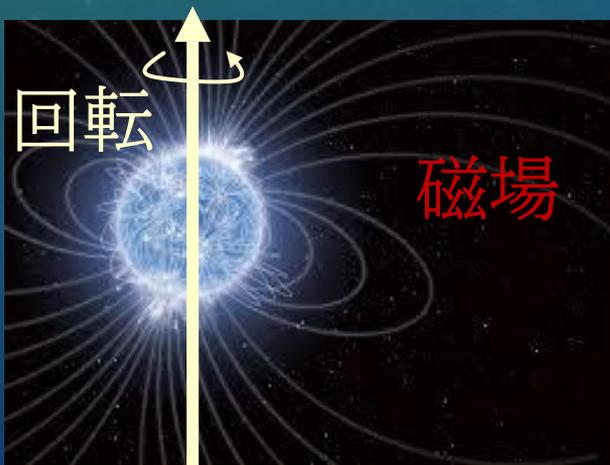


電磁波・ニュートリノ・重力波  
➡ マルチメッセンジャー天文学

# 3. 中性子星



- ✓ 半径:  $\sim 12 \text{ km}$
  - ✓ 質量:  $1-2 M_{\odot}$
  - ✓ 中心密度:  $2-7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$
  - ✓ 温度:  $10^6 \text{ K}$  ( $10^{-5} \text{ MeV}$ )
  - ✓ 中性子のフェルミエネルギー: 数十MeV
- ➔ 温度ゼロで中性子の縮退圧によって支えられている
- ✓ 表面重力:  $10^{12} \text{ m/s}^2$
  - ✓ 磁場:  $10^8 - 10^{15} \text{ G}$
  - ✓ 回転周期:  $0.1-1 \text{ s}$
  - ✓ 様々な素粒子の出現



# 3.1 中性子星の支配方程式

一般相対論を考慮した静水圧平衡の式

= Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) 方程式

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

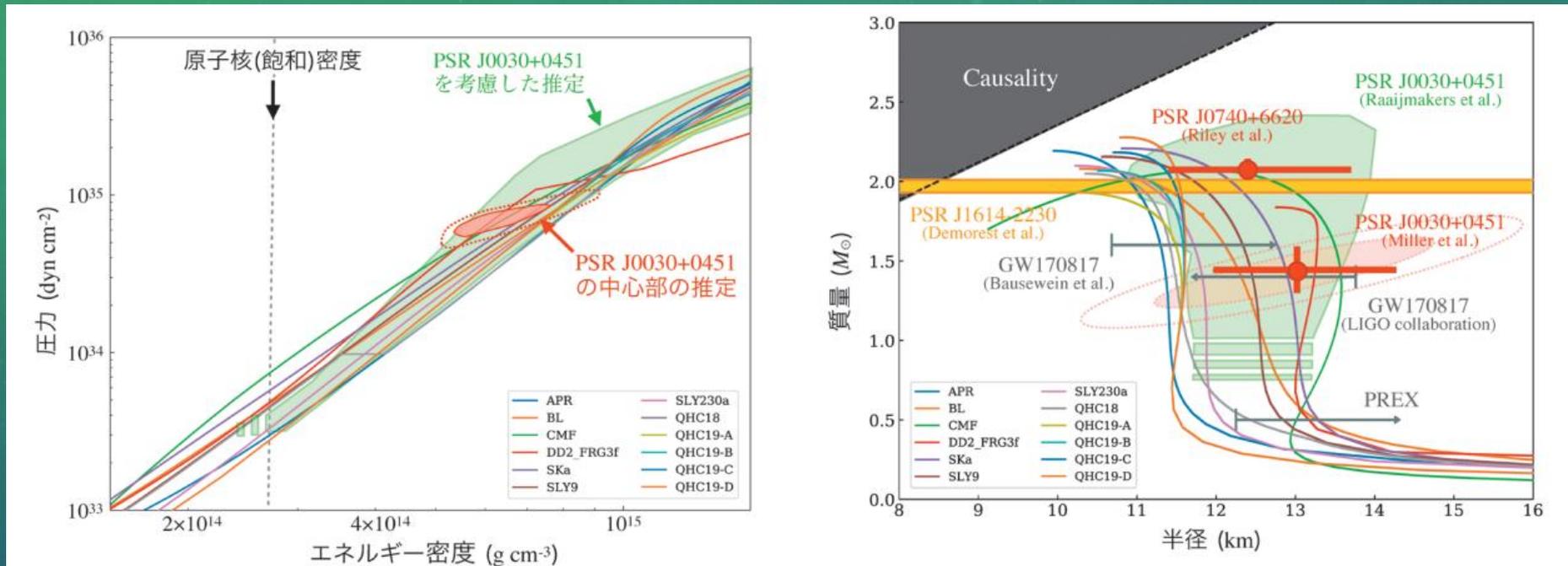
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2$$

+ 状態方程式  $P = P(\epsilon)$

(原子核+核子+レプトン+クォークなど)

恒星進化と同じく質量と半径の関係 → 高密度下の状態方程式への制限

# 3.2 中性子星の半径と質量と状態方程式



状態方程式



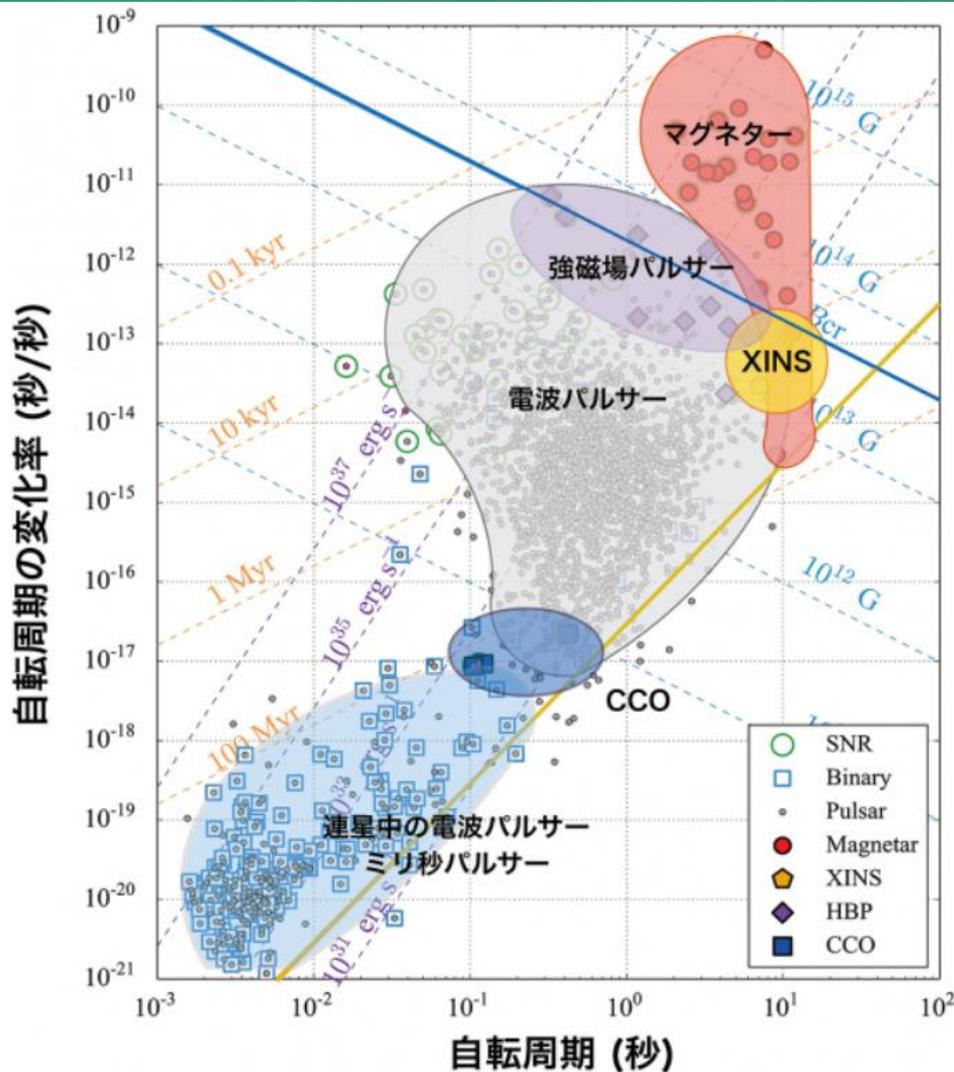
MR関係

- ✓ 質量と半径の関係
- ➔ 高密度下の状態方程式への制限
- ✓ 質量・半径の測定



ex) 軌道運動・シャピロ遅延・黒体放射・重力赤方偏移など

# 3.3 中性子星の年齢と磁場推定



中性子星は形成当初早い回転をしている

➡ 回転エネルギーを電磁波に変えて減らしていく

✓  $P - \dot{P}$  図

左上: 若い中性子星

右上: 強い磁場

# 課題5/16

重力崩壊中のニュートリノに関する以下の典型的な式を導いてみよう

①ニュートリノ-原子核のコヒーレント散乱

$$\sigma_A^{\text{scatt}} \approx \frac{\sigma_0}{16} \left( \frac{E_\nu}{m_e c^2} \right)^2 A^2 \left[ 1 - \frac{Z}{A} + (4 \sin^2 \theta_W - 1) \frac{Z}{A} \right]^2$$

$$\sigma_0 = 1.76 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

$$\sigma(\nu_e N \rightarrow \nu_e N) = 3 \times 10^{-40} \left( \frac{E}{10 \text{ MeV}} \right)^2 \left( \frac{A}{56} \right)^2 \text{ cm}^2$$

$$\sin^2 \theta_W \sim 0.23$$

②ニュートリノの平均自由行程

$$\ell_{\text{mfp}} \sim 10^7 \text{ cm} \left( \frac{\varepsilon_\nu}{10 \text{ MeV}} \right)^2 \left( \frac{\rho}{10^{11} \text{ g/cm}^3} \right)^{-1}$$

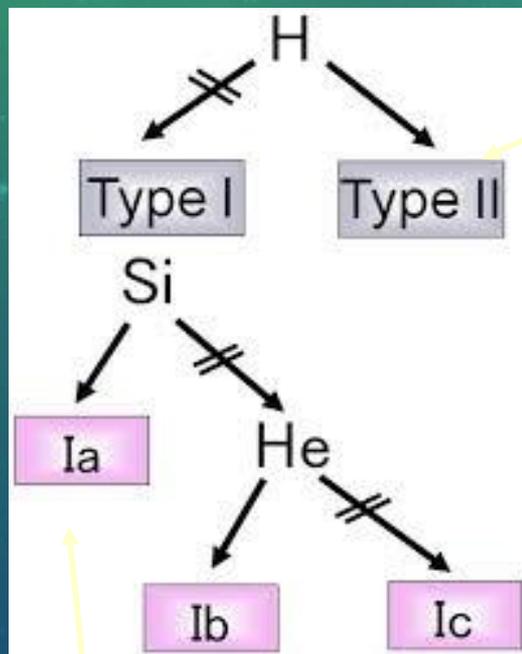
③ニュートリノの拡散時間

$$\tau_{\text{diff}} = 10 \text{ msec} \left( \frac{R_{\text{core}}}{10^7 \text{ cm}} \right)^2 \left( \frac{\varepsilon_\nu}{10 \text{ MeV}} \right)^2 \left( \frac{\rho}{10^{12} \text{ g/cm}^3} \right)$$

ここからはコラム形式で大質量星・  
超新星爆発・中性子星に関する話  
題を紹介します

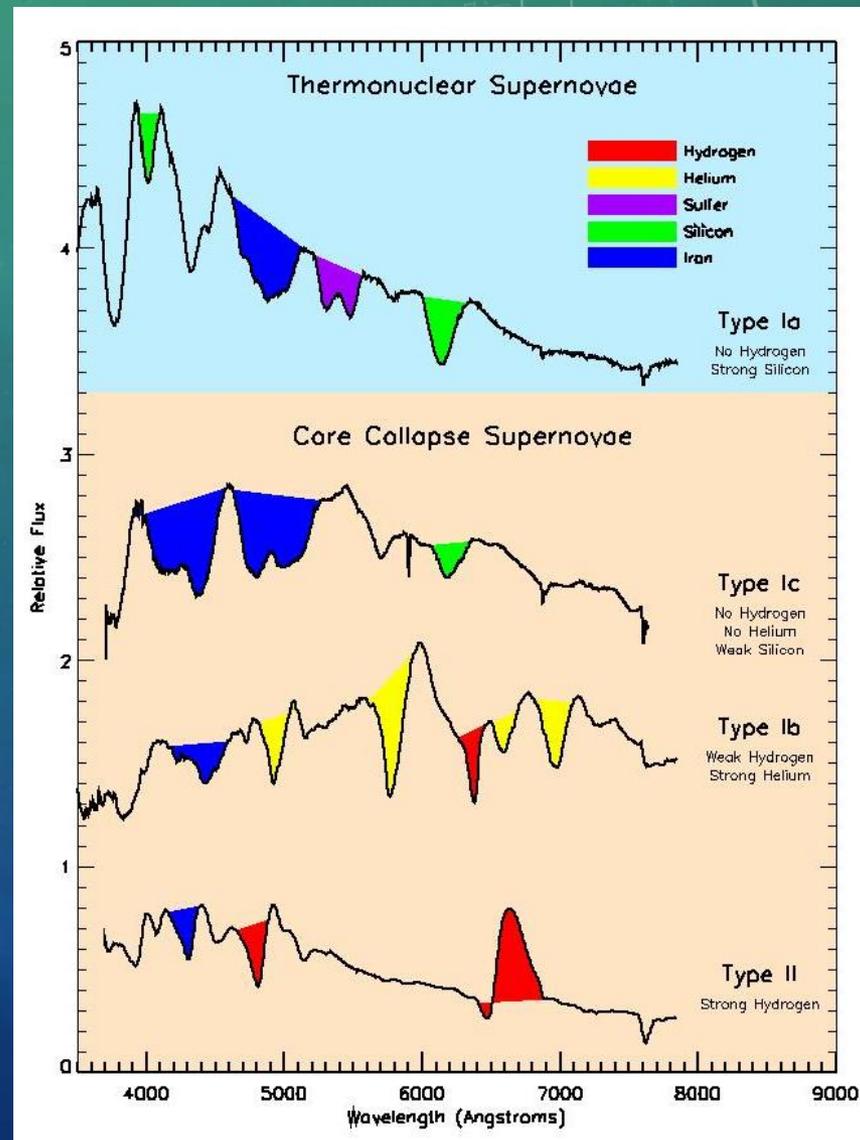
# 2.9 超新星観測:電磁波観測

- ✓現在の最も主流な観測手法
- ✓分類:スペクトルによる分類



単独星  
(重力崩壊)

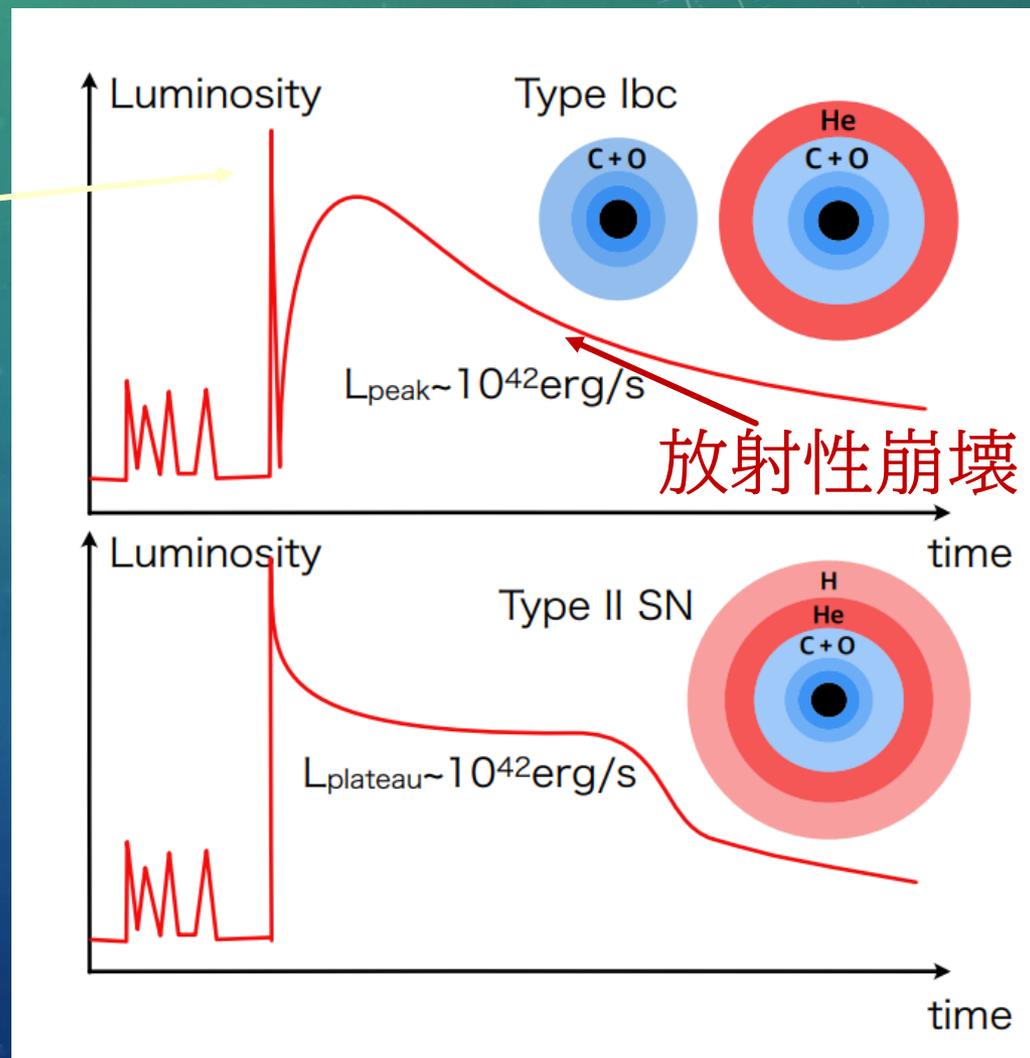
連星系  
(白色矮星合体・重力崩壊)



## 2.9 超新星観測:電磁波観測

- ✓光度曲線
- ✓Ni, Coによる放射性崩壊  
Ni → Co → Fe

ショックブレイクアウト  
(星の表面に衝撃波が到達)



## 2.3 中性子化バースト

### ✓ニュートリノ球

ニュートリノの不透明度が2/3程度になる半径

### ✓中性子化バースト

$\nu_e$ の光度が急激に増加

( $L_{\nu_e} \sim 10^{53}$  erg/s, 10ms)

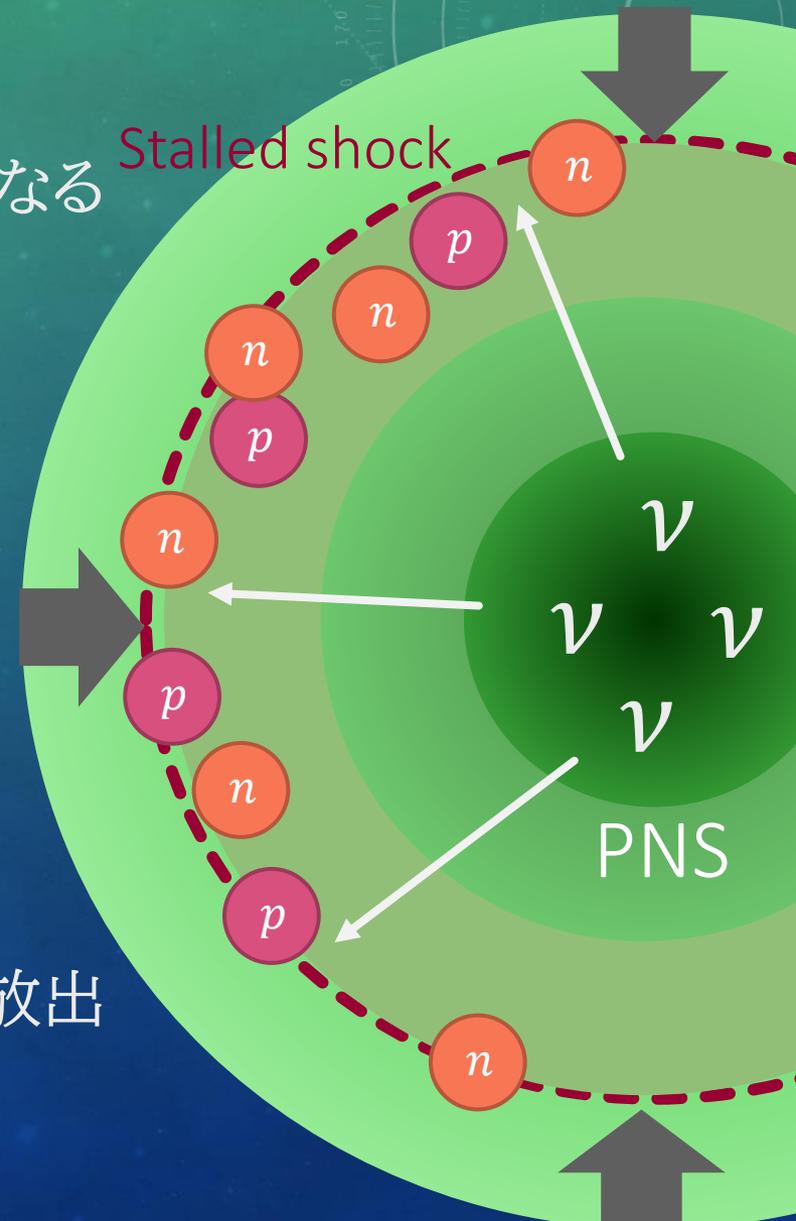
衝撃波がニュートリノ球を通過

➔ 原子核の分解により

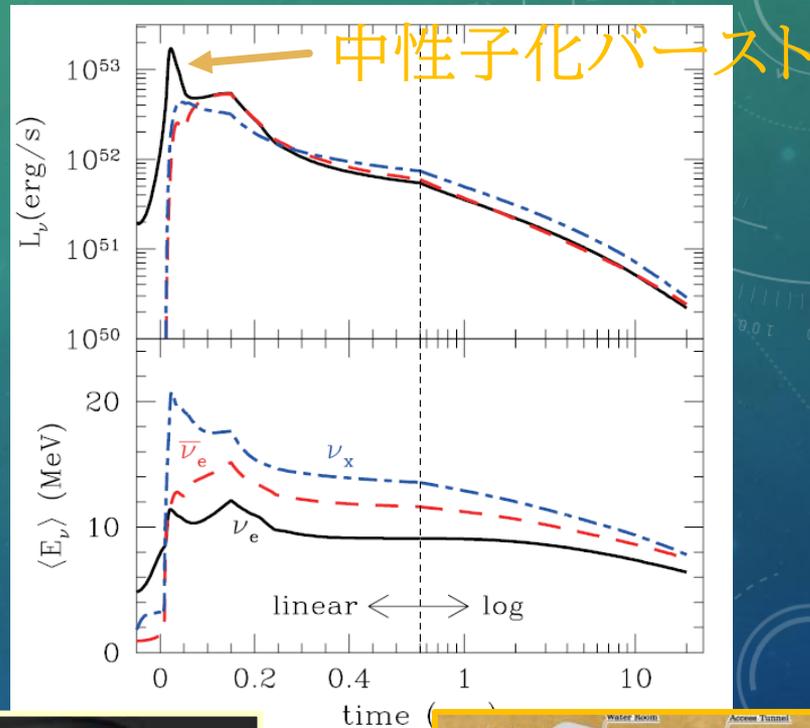
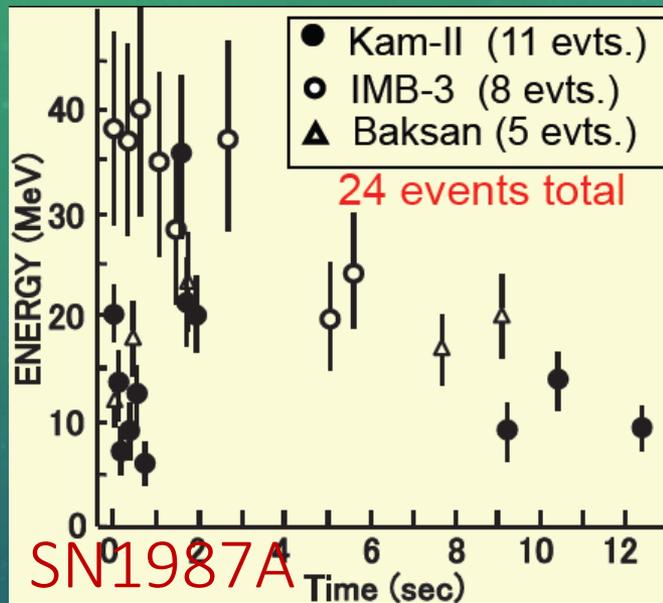
ニュートリノの不透明度が減少

電子捕獲反応によるニュートリノ放出

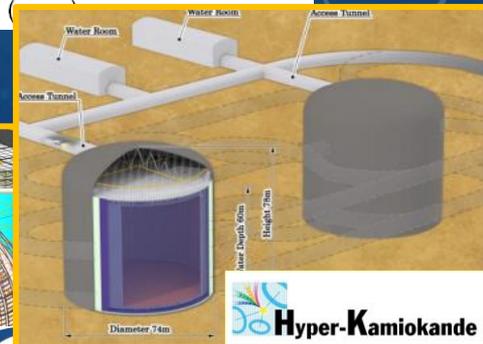
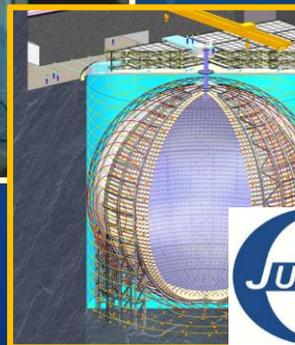
➔ 大量かつ自由に出てこられる



# 2.9 超新星観測: ニュートリノ観測



- ✓ 内部を覗ける
- ✓ 銀河中心で起これば HKでは数万-数十万個のニュートリノが観測できる

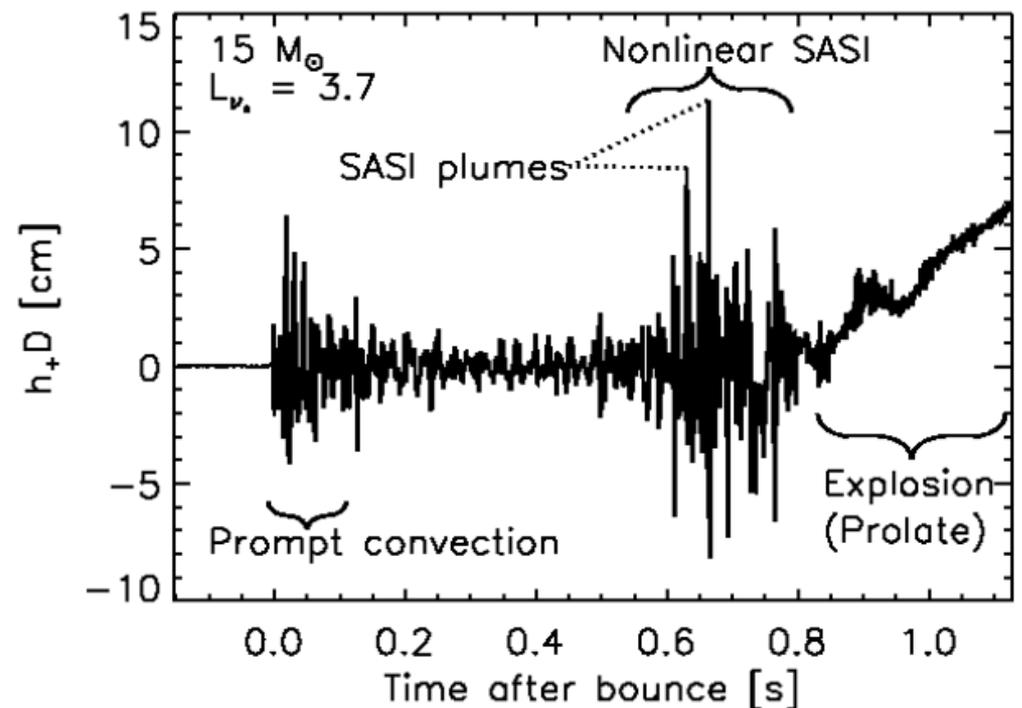


## 2.9 超新星観測: 重力波観測

✓ 重力波 = 時空の揺らぎが波として伝搬したもの  
非球対称な運動が必要

➡ ex) SASI, 対流, 自転している星のコアバウンス

✓ 超新星爆発由来のは検出されていない



## 2.10 超新星爆発と元素合成

### ✓ 原始中性子星における元素合成

内部は中性子過剰になっているので、Feよりも重たい元素が生成されていく

### ✓ 外層における爆発的 element 合成

鉄コアの外側を伝搬していく衝撃波が外層の温度を上昇させて核融合反応を引き起こす

名 称	主な生成元素	燃焼温度
爆発的炭素・ネオン燃焼	O, Mg, Si, Ne	$2 \times 10^9$ K
爆発的酸素燃焼	O, Si, S, Ar, Ca	$3-4 \times 10^9$ K
不完全ケイ素燃焼	Si, S, Fe, Ar, Ca	$4 \times 10^9$ K
完全ケイ素燃焼	Fe, He, Ni, Zn, Co	$5 \times 10^9$ K