どんな極限環境で何が起きるのか?

鉄コアから爆発へ:高温高密度、中性子過剰



Fe core of Pre-supernova star





- 半径 r までに含まれる質量を座標とする。
 - 流体素片ごとの情報を見るのに便利





状態方程式の基礎

- Fermion(電子or核子)のガス - 質量m,運動量p,エネルギー $E = \sqrt{p^2 + m^2}$
- 縮退度が高い:密度が高く、温度が低い T << µ
- 温度T=0: p=0からp=p_Fまで詰まっている
 - Fermi energy $E_{F} = \sqrt{p_{F}^{2} + m^{2}}$ 密度 $n = \frac{2}{(2\pi)^{3}} \int_{0}^{p_{F}} 4\pi p^{2} dp = \frac{1}{3\pi^{2}} p_{F}^{3}$ - エネルギー密度 圧力 $E = \frac{2}{(2\pi)^{3}} \int_{0}^{p_{F}} E \cdot 4\pi p^{2} dp$ $E = \frac{2}{(2\pi)^{3}} \frac{1}{3} \int_{0}^{p_{F}} \frac{p^{2}}{E} \cdot 4\pi p^{2} dp$
- Extreme relativistic: $p \ll m$ $\varepsilon = \frac{1}{4\pi^2} p_F^4$ $P = \frac{1}{12\pi^2} p_F^4$ $P = \frac{1}{3} E \propto n^{\frac{4}{3}}$

cf. non-relativistic: $E=p^2/2m$ $P=\frac{2}{3}E \propto n^{\frac{5}{3}}$

鉄コアを支えているのは縮退圧

- エネルギー・圧力・密度の関係
 - Polytrope $\mathcal{E} = \frac{Kn^{\Gamma}}{\Gamma 1}$ $P = Kn^{\Gamma}$
 - Adiabatic index: $\Gamma = \frac{d \log P}{d \log \rho} \Big|_{s}$

Fermion gas

Extreme relativistic $\Gamma=4/3$

Non-relativistic Γ =5/3

- チャンドラセカール質量 M_{Ch}: 電子縮退圧が支えられる星の上限質量

$$M_{Ch} = 1.457 \left(\frac{Y_L}{0.5}\right)^2 M_{sun}$$
 Y_L Lepton

 Y_L Lepton fraction : n_L lepton number density n_B baryon number density

$$Y_L = \frac{n_L}{n_B}$$



重力崩壊の開始



- もとの鉄のコアは電子縮退圧で
 ぎりぎり支えられている
 - 2つの引き金
 - 電子捕獲反応
 - 電子の圧力が減る
 - ニュートリノ発生
 - 鉄の光分解反応
 - エネルギーを失う
 - 十分に圧力が増えない
 - 電子のFermi energy:

$$\mu_{e} = 11 MeV \left(\frac{\rho Y_{e}}{10^{10} \, g/cm^{3}}\right)^{1/3}$$

重力崩壊の引き金

- 電子捕獲反応
 - 電子のFermi energyが高くなった時 $\mu_e \sim (3\pi^2 n_e)^{1/3} = 11.1 \text{ MeV at } 10^{10} \text{ g/cm}^3$
 - 56 Fe + e⁻ → 56 Mn + v_e Δ M=M_{Mn} - M_{Fe} = 3.7 MeV
 - 電子の圧力が減ると $\rho\uparrow, \mu_e\uparrow, cole 電子捕獲\uparrow$
 - ニュートリノ発生、陽子を中性子へ変換
- 光分解反応
 - 温度が十分高くなった時: T ≥ 5x10⁹ K
 - ⁵⁶Fe + γ → 13 ⁴He + 4n

 $\Delta M = 13M_{He} + 4m_n - M_{Fe} = 124.4 \text{ MeV}(吸熱反応)$

- 原子核の分解にエネルギーが使われる
- 十分に圧力が増えない





- •密度が高いため vが頻繁に散乱
- → 平均自由行程が 短くなる
- 自由に逃げられない
- 拡散時間が長くなる
 - 落下時間が短いと ニュートリノは一緒に 落下(閉込め)



ニュートリノ閉込めの原因

ニュートリノ原子核散乱: σ_{vA} ∝ A² σ_{vN}

$$v \xrightarrow[E_v Z, A]{}$$

coherent: neutrino wave length ~20 fm, E_v ~10MeV

• v-平均自由行程 (
$$\lambda_{v}$$
) vs コア半径 (R_{core})
 $\lambda_{v} = \frac{1}{\sigma_{vA}n_{A}} = 1 \times 10^{7} cm$
 $R_{core} = \left(\frac{3M_{Ch}}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{3}} = 2.7 \times 10^{7} cm$ @ $3 \times 10^{10} g/cm^{3}$
 $\rho > 3 \times 10^{10} g/cm^{3}$ では $\lambda_{v} \le R_{core}$
 $\rightarrow v$ は自由に逃げられない

• 拡散時間 vs ダイナミカル時間(free fall time)

$$\tau_{diffusion} = \frac{3R_{core}^2}{c\lambda_v} = 2 \times 10^{-2} sec \qquad \tau_{dyn} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} = 1 \times 10^{-2} sec \qquad @1 \times 10^{11} g/cm^3$$

$$\rho \ge 10^{11} \text{ g/cm}^3 では \tau_{diffusion} \ge \tau_{dyn}$$
 → $v の 閉じ込め$

- vの閉じ込めにより v も縮退ガスとなる
- そのまま重力崩壊を続けて、物質と一緒に圧縮される



During collapse: $\rho_c = 10^{14} \text{ g/cm}^3$ www.95: 15M_{sun}



- 内部コア
 - 一 亜音速で落下
 - レプトン圧力で支える M_{inner}~0.6M_{sun}
- 外部コア
 超音速で自由落下



コアバウンス:中心部の崩壊が急に止まる

- 核物質密度を越えると above ρ~3x10¹⁴ g/cm³
 - 核力の斥力による反発
 - 圧力の上昇が急激に
- ・ 状態方程式が固くなる
 - Γが大きくなり、安定化 - 中心から崩壊が止まる

Pressure - density $P = Kn^{\Gamma}$ Adiabatic Index $\Gamma = \frac{d\log P}{|P|}$

 $d\log \rho|_{\rm s}$









衝撃波の伝搬:爆発へ向けて

- 衝撃波が外部コアを伝搬
 M_{outer}~0.5-0.8*M_{sun}*
- 衝撃波がFeコアの表面に 達すれば、爆発する
- <u>ただし</u>、
 - 降り積もってくる物質の 圧力を受ける
 - 衝撃波により鉄が溶ける

光分解でエネルギー消費

$$E_{loss} \sim 1.6 \times 10^{51} \left(\frac{M_{outer}}{0.1 M_{solar}} \right) erg$$
 内部コアサイズによる



Sumiyoshi et al. NPA (2004)



- 衝撃波が鉄コアの途中で停まってしまう
 - 外層が降り積もる - 鉄を分解する *エネルギー損失 E*_{loss}~10⁵¹erg 初期エネルギーを使い果たす

Shock wave propagates and stalls WW95: 15M_{sun}



t_{pb}=0, 0.3, 1, 3, 100ms







- ニュートリノの一部が
 陽子・中性子に吸収される
- 衝撃波の後ろを温める
 外向きに押し出す
- ニュートリノ加熱量
- ニュートリノの放出・吸収
- 標的量・加熱時間に依存

→ 衝撃波の復活?

コアバウンス後の様子





・重力による束縛

Janka A&A (2001), Phys. Rep. (2007)

Bethe-Wilson ApJ (1985)

ニュートリノ加熱メカニズム:加熱&冷却領域





長く追っても衝撃波は復活しなかった



Sumiyoshi et al. ApJ (2005)

球対称の範囲では爆発していない 厳密なv輸送+流体計算:第一原理計算



加熱時間と降着時間

- 降着している間に十分に加熱できるか?
- 加熱時間 $t_{heat} \sim \left(\frac{GMm}{r}\right)/Q_v^+$ - 降着時間 $t_{adv} \sim \frac{R_{shock} - R_{gain}}{|v_r|} \sim \frac{r}{|v_r|}$
 - 加熱時間 t_{heat} < 降着時間 t_{adv} ならば良いのだが、、、



多次元的な効果により爆発する例







世界のグループが競争



- 最も重要な効果は何か?
 -流体、ニュートリノ加熱、核物理
- 爆発エネルギーを説明できるか?

加熱時間と降着時間

• 降着している間に十分に加熱できるか?



加熱時間 t_{heat} < 降着時間 t_{adv} ならば良い

