

2次元輻射流体計算の現状

諏訪 雄大

(東大物理→4月から京都大学基礎物理学研究所)

固武慶氏、滝脇知也氏(国立天文台)、佐藤勝彦氏(自然科学研究機構)、 M. Liebenörfer、 S.C. Whitehouse (Basel大学) という方々との共同研究

Contents

1. 超新星の爆発メカニズム

2. シミュレーションの現状

3. 議論など

4. まとめ

Supernova scenario

- 初期質量 ≥ 10M_☉の星:中心に鉄コア形成
- 電子捕獲反応、鉄の光分解反応→鉄コア崩壊
- 核密度を超えると状態方程式が硬くなる→core bounce
- コア表面で衝撃波形成、伝搬→外層を吹き飛ばせればいい("prompt explosion")



Neutrino heating mechanism

- neutrino cooling (electron capture) rate: $Q_{\nu}^{-} \propto T^{6} \propto r^{-6}$
- neutrino heating (neutrino capture) rate: $Q_{\nu}^+ \propto L_{\nu} r^{-2} \propto r^{-2}$

- gain radius: $Q_{\nu}^{-} = Q_{\nu}^{+}$
- heating between gain radius and shock: $L_{\nu,\text{heat}} \sim 3 \times 10^{51} \text{erg s}^{-1} \left(\frac{M}{0.1 M_{\odot}}\right) \left(\frac{L_{\nu}}{10^{53} \text{erg s}^{-1}}\right) \left(\frac{\langle \varepsilon^2 \rangle}{(15 \text{MeV})^2}\right) \left(\frac{r}{200 \text{km}}\right)^{-2}$
- shock revival by neutrino heating

"delayed explosion"





Currently viable mechanisms

• MHD mechanism

Free energy of rotation is converted to magnetic energy; magnetic pressure or dissipative heating via magnetorotational instability (MRI) can drive explosion!

BUT: Requires a lot of rotation energy → very fast initial rotation



Summary of explosion mechanisim

- Neutrino-heating mechanism
 - "standard" scenario
 - only one group (@MPA) obtains explosion
- Acoustic mechanism
 - Impedance mismatch between g-mode and SASI
 - takes longs time (~ 1sec) to be induced
 - only one group (@Arizona) obtains explosion
- MHD mechanism
 - explodes only polar direction
 - the other mechanism is required for whole regime

Neutrino transfer

Boltzmann equation for neutrinos

(Lindquist 1966; Castor 1972; Mezzacappa & Bruenn 1993)

$$\frac{df}{dt} + \mu \frac{\partial f}{\partial r} + \left[\mu \left(\frac{d \ln \rho}{c d t} + \frac{3v}{c r} \right) + \frac{1}{r} \right] (1 - \mu^2) \frac{\partial f}{\partial \mu} \\ + \left[\mu^2 \left(\frac{d \ln \rho}{c d t} + \frac{3v}{c r} \right) - \frac{v}{c r} \right] E \frac{\partial f}{\partial E} \\ = j (1 - f) - \chi f + \frac{E^2}{c (hc)^3} \\ \times \left[(1 - f) \int Rf' d\mu' - f \int R (1 - f') d\mu' \right].$$

- ・ 球対称仮定を用いても、f=f(t,r,µ,E)は4次元積分が必要 (現状、1Dでしか厳密に解くことはできない)
- 2次元流体を背景にして解くには何らかの近似が必要

Current status of 1D



state-of-the-art simulations do not obtain explosion!



2010/5/31

multi-D effects



Theat: ニュートリノ加熱の時間スケール

$$\tau_{adv}: 移流の時間スケール$$

 $\tau_{heat} \sim \frac{GM_{core}m_u}{q^{1}r} \sim 80 \text{ ms} \left(\frac{M_{core}}{1.5M_{\odot}}\right) \left(\frac{L_{\nu}}{10^{53} \text{ erg s}^{-1}}\right)^{-1} \left(\frac{\langle \varepsilon^{2} \rangle}{(15MeV)^{2}}\right)^{-1} \left(\frac{r}{200 \text{ km}}\right)^{\tau_{adv}} \sim \frac{r_{shock} - r_{gain}}{v_{r}} \sim 50 \text{ ms} \left(\frac{r}{100 \text{ km}}\right) \left(\frac{v_{r}}{2 \times 10^{8} \text{ cm s}^{-1}}\right)^{-1}$
爆発に必要な条件
 $\tau_{heat} < \tau_{adv}$
2次元以上で起こること
✓対流
✓停在衝撃波不安定性 (SASI)
どちらも τ_{adv} を伸ばすように働く

SASI

Standing Accretion Shock Instablity

• Non-radial, non-local low-mode (*l*=1,2) instability of flow



SASI-aided SN explosion

- SASI develops and deforms the accretion
 - The convection grow s and leads larger neutrinoheating efficienc
 Explosion!



 $15 M_{\odot}$





我々の計算手法

- Isotropic Diffusion Source Approximation (IDSA)
 - Very new scheme for radiative transfer (<u>Liebendörfer+</u> 09)
 - divide the distribution function into two parts:



Neutrino transfer





ray-by-ray treatment



Simulation Result

Spherically symmetric case (13 M_o)



No explosion is obtained, consistent with previous works.

Simulation Result

Axisymmetric case (13M_o)



The shock wave is largely deformed by SASI and convection in 2D case!

2010/5/31



The efficiency of neutrino heating is much larger in 2D than 1D!



1. vx を入れました (with leakage scheme)

2. 高速化に挑戦中 (cf. IDSA の粗視化)

3. 3次元計算が動いています(電子型vのみ)@天文台

$11.2 M_{\odot} w/leakage$



$13 \,\mathrm{M}_{\odot}\,\mathrm{w}/\,\mathrm{leakage}$



3次元(13 M。)



50 100 150 200 Cussion

1. How about ^t^{ins} [ms] genitor difference?

0



Discussion

1. How about progenitor difference?



The properties of progenitors do not change monotonically so that the numerical simulations with different progenitors should be performed...

25/28

Discussion

2. How about EOS difference?

from H.-Th. Janka's presentation



個人的意見

□爆発の十分条件は??

- ▶ よく議論される時間スケールの話(今回も使いましたが、、、)は実は必要条件でしかない。より robust な条件は何?
- □ 対流の3次元効果はいかほど?
 - ▶ もっと対流について勉強が必要
- □ "chaotic"と言って終わり、ではなくより定量的な予言 をするには何が必要?
- ニュートリノ自己相互作用によるニュートリノ振動の 影響は定量的にはどれほど?
- その他 missing physics には何がある? axion とか?
 (e.g., Schuramm & Wilson 82)

まとめと今後の展望(?)

超新星シミュレーション(incl. v輻射輸送)も (流体)多次元の世界に

今後はシミュレーション結果を用いて、理論構築の段階に進むのが望ましい