

- 宇宙でenergeticな現象の一つ

トータル10⁵³ ergのエネルギーが放出される
 99%のエネルギーがニュートリノとして放出
 大まかな爆発シナリオは解明されつつあるが、詳細な部分で不明瞭な箇所がある

- 親星の初期コンディション(質量、回転等)

- 衝撃波停滞から復活のメカニズム(neutrino driven explosion mechanism?)



- 重力波・ニュートリノ共に中心コアの情報を運んでくる

- 爆発メカニズム解明に向けた鍵となる物理現象

- コアバウンス

- 衝撃波の停滞と復活; <mark>SAS</mark>I、対流、etc..
- Time-domain Multi-Messenger Astronomy
 - Broadband photons (radio to gamma)
 - Multi-energy neutrinos (MeV to PeV)
 - Multi-frequency GWs (Hz to kHz)
 - 物理現象の特徴信号摘出と特徴時間の取得









- 電子捕獲反応

 ${}^{56}Fe + e^- \rightarrow {}^{56}Mn + \nu_e$

ニュートリノが自由に逃げれる程度の密度(10⁹g/cm³)

→ 重力崩壊が進む方向の反応

- 鉄光分解反応

 ${}^{56}Fe + \gamma \to 13^4He + 4n - 124.4MeV$

恒星中心部が中性子リッチになっていく。この反応は吸熱反応 →こちらも重力崩壊が加速する反応

中心コア密度が $\rho > 10^{12}g/cc$ となると、ニュートリノの平均自由行程が短くなり、 自由に抜けられなくなる。→ニュートリノ球を生成する。



2





コアバウンス

コア中心密度が $\rho > 10^{14}g/cc$ を超えると、これ以上収縮でき なくなりコアがバウンスする。その際に衝撃波が生じる。 高密度での状態方程式(Equation of State, EoS)や原始中 性子星(Proto Neutron Star)の初期回転、親星の初期条件 によって、強い重力波が出てくる。



60

Time after bounce [ms]

$$I_{\mu\nu} = \int \rho(\vec{r}) (x_{\mu}x_{\nu} - \frac{1}{3}\delta_{\mu\nu}r^{2})d^{3}x$$
$$\mathcal{L}_{gw} = \int_{r \to \infty} T_{i}^{0gw}n^{i}r^{2}d\Omega$$
$$= \frac{G}{5c^{5}} < \ddot{I}_{\mu\nu}\ddot{I}^{\mu\nu} >$$
$$h_{\mu\nu} \simeq \frac{2G}{rc^{4}}\ddot{I}_{\mu\nu}$$

Mass quadruple moment axis asymmetry









生じた衝撃波が以下の反応をしながら広がっていく。そ の際にどんどんエネルギーを失う。

 $A \to np \ e^- + p \to n + \nu_e$

不透明さの原因である原子を分解していく。

r(shock wave) < r(neutrino sphere):上反応で生成された ν はトラップされている。

r(shock wave) > r(neutrino sphere) : 不透明さが解消されてνがバースト的に放出される ->中性子化バースト

初期の陽電子不足によりanti-νはあまり生成されない。

Luminosity and mean energy estimated by Livermore group (Astrophys. J 295(1985)14)









衝撃波が物質を進むにつれてエネルギーを失い、一度停 滞をする(delayed explosion model)

- PNS周辺では、対生成反応により全フレーバーのニュー トリノが生成される。
- ニュートリノ駆動型モデルでは、このニュートリノのエ

ルギーの一部が衝撃波に与えられ、衝撃波が復活する。

Key of shock revival : heating v.s. mass accretion

 au_{heat} : time scale of neutrino heating au_{adv} : time scale of matter flow

$$\begin{aligned} \tau_{\text{heat}} &\sim \frac{GM_{\text{core}}m_u}{q_\nu r} \sim 80\text{ms}\left(\frac{M_{\text{core}}}{1.5M_\odot}\right) \left(\frac{L_\nu}{10^{53}\text{erg s}^{-1}}\right)^{-1} \left(\frac{\langle\epsilon^2\rangle}{(15\text{MeV})^2}\right)^{-1} \left(\frac{r}{200\text{km}}\right)^{-1} \\ \tau_{\text{adv}} &\sim \frac{r_{\text{shock}} - r_{\text{gain}}}{\nu_r} \sim 50ms \left(\frac{r}{100\text{km}}\right) \left(\frac{\nu_r}{2 \times 10^8 \text{cm s}^{-1}}\right)^{-1} \end{aligned}$$



(neutrino tranni

inal phase of stella

Explosion condition : $\tau_{heat} > \tau_{adv}$

SASI, convection can be introduced by success of multidimensional numerical simulation

5

Both SASI and convection phenomenon makes longer! \rightarrow Next slide





Standing Accretion Shock Instability (SASI)

- 非球対称で、低次(I=1,2)の衝撃波の不安定な成長
- PNS(Proto Neutron Star)付近で降着物質がheat upされニュートリノが放出
- 非球対称なheat upによりニュートリノルミノシティの時間変化(up to 10%?)が期待される









SASIからの特徴的な信号(重力波・ニュートリノ) このページは後ほど詳しく説明





Neutrino : ~100 [Hz] flux fluctuation *How to reconstruct signal??*

Extract ~100 [Hz] from both neutrino and GW signals
Signal correlation???

超新星爆発

超新星爆発数値シミュレーション

- とても複雑ですし、これが本職ではないのですごく簡単に説明
- 一次元シミュレーションでは長らく爆発させることができなかった
- 近年複数次元シミュレーションを実行することにより爆発に成功している
- とても大きな計算コスト(京コンピュータの重要研究の一つ)
- 先ほど紹介した特徴的な信号は手で与えているわけではなく、式に沿ってシ ミュレーションを行うことにより出てくる
- 超新星親星の初期条件、近似、爆発エネルギーなどの問題







2次元数値シミュレーション

Suwa et. al. 2013 progenitor mass:11.2M⊙ Rapid core rotation model

重力波・ニュートリノは中心情報 を運んでくる。それぞれのフェー ズで特徴的な信号が現れることが 期待されている。

ニュートリノ: thermal motion 重力波 : matter motion

Characteristics of prompt convection phase?

Is there signals from shock stall phase?

Characteristics of SASI/convection phase?





Characteristics of prompt convection phase?

今日の話②

Is there signals from shock stall phase?

今日の話③

Characteristics of SASI/convection phase?



Supernova Neutrino



- Observed neutrinos from 1987A Supernova
 - Total 24 events
- Possible to obtain inner information
 - help to understand the explosion mechanism
 - Rough explosion model is probed to be correct
- Various detectors are ready for observing
- All flavor neutrinos are emitted
 - order of tens MeV
 - duration ~20s





Observed neutrino information of 1987A



Luminosity and mean energy estimated by Livermore group (Astrophys. J 295(1985)14)

11

World neutrino detectors







Water Cherenkov / Liquid scintillator / Others

Slide Y.Koshio

SuperKamiokande detector





GADZOOKS! project



Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande Super!

- Dissolve Gadolinium into Super-K
 - Identify Inverse Beta Decay and others
 - First observation of Supernova Relic Neutrino
 - Precise detection of supernova burst neutrino
- For testing facilities and demonstration the characteristics of GADZOOKS! project, EGADS detector was constructed in Kamioka Mine
 - Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems





- 100ton water Cherenkov detector
 - 0.1% Gd loaded
 - 90% neutron tagging
- Expected event rate (livermore model) @0.6s, 10kpc
 - electron neutrino elastic scattering : ~ 500
 - inverse beta decay : ~22000
 - anti-electorn neutrino elastic scattering : ~ 150
- Ready for Supernova observation

IceCube detector



- km long string Water Cherenkov detector at the South Pole

- Sensitive to multi-GeV energy neutrino.
- Can see burst as increase in single PMT count rate
 - Can't identify one by one event
 - Time structure of neutrino luminosity



Detection range for Livermore model



100,000 event may be observe Deep Core

Scintillation detectors





Neutrinos from Betelgeuse







What we want to know?



KAGRA





- Time domain astronomy with multi-messanger
- Help to understand the mechanism from coincident observation
 - Inner core information by GW and Neutrino