

## 超新星物質中のニュートリノ振動

## Neutrino Oscillations in Supernova Ejecta

○清澤佑喜<sup>1</sup> , 岩本弘一<sup>2</sup>\*Yuki Kiyosawa<sup>1</sup>, Koichi Iwamoto<sup>2</sup>

Abstract: Non-zero neutrino masses give rise to conversion among different flavors of neutrinos, so called neutrino oscillations. The oscillation changes the flavor of supernova neutrinos, which are originally produced deep inside the stellar core and then traverse the stellar mantle. Neutrino oscillations in matter cause resonances, which leads to a sharp enhancement of conversion rates at a critical matter density. We explore the resonances that occur in the ejecta of Type Ia supernovae. In particular, the effect of uncertain density distributions in the outermost layers of ejecta is closely investigated.

## 1. 超新星ニュートリノ

超新星は大質量星が進化の末に起こす大爆発である。主系列時に太陽の 4~8 倍程度の質量をもつ星は、核燃焼が暴走して爆発する Ia 型、8~10 倍の星は O-Ne-Mg のコアが、10 倍以上の星は Fe コアが重力崩壊し、超新星爆発を起こす。いずれの場合も、密度の上昇に伴う電子のフェルミエネルギーの増加が、

電子捕獲反応  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$  を促進し、

$e^+ + e^- \rightarrow \nu_i + \bar{\nu}_i$  ( $i = e, \mu, \tau$ ) などの反応も起

こり、大量のニュートリノが放出される。

1987 年に超新星 SN1987A が発見され、超新星を起源とするニュートリノが Kamiokande や IMB で初めて観測された。その後、感度が飛躍的に向上した SuperKamiokande は近傍銀河で 30~100 年に一度程見つかると言われる超新星を待ち続けている。重力崩壊型の超新星は、1~数十 MeV のニュートリノを、Ia 型超新星は数 MeV のニュートリノを主に放出する。総エネルギーは、重力崩壊型で  $\sim 10^{53}$  erg、Ia 型で

$\sim 10^{50}$  erg である。今回はエネルギーが小さい

が、近傍では比較的多く発見されている Ia 型超新星のニュートリノについて星の外層におけるニュートリノ振動の効果を調べるニュートリノ

発生量については Kunugise & Iwamoto (2007) の結果を用いる。超新星物質の外層の密度分布についてはよく分かっていないが星風モデルなどから得られる典型的な密度分布を仮定することにする。

## 2. ニュートリノ振動

ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量を持つ場合に、フレーバー固有状態と質量固有状態が異なってもよいことに起因する現象である。簡単のため 2 種類のニュートリノ  $\nu_e, \nu_\mu$  を考える。フレー

バーの固有状態 ( $\nu_e, \nu_\mu$ ) と質量固有状態 ( $\nu_1, \nu_2$ )

は、ユニタリ変換

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

で結ばれる。 $x$  方向に自由に伝播するニュートリノの質量固有状態の波動関数は

$$\nu_i(t, x) = \nu_i(0, 0) e^{-i(E_i t - p_i x)} \quad (i = 1, 2)$$

と選べる。ここで、 $E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2}$  ( $i = 1, 2$ ) である。時刻  $t = 0$  に電子ニュートリノが発生したとす

1: 日大理工・院(前)・物理, 2: 日大理工・教員・物理

ると、時刻  $t$  にニュートリノの位置を観測し、位置  $x$  に電子ニュートリノが検出される確率は

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e; t, x) = |\langle \nu_e(t) | \nu_e(0) \rangle|^2$$

$$= \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} U \begin{pmatrix} e^{-i(E_1 t - p_1 x)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_2 t - p_2 x)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|^2$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos[(E_1 - E_2)t - (p_1 - p_2)x]]$$

となる。同一の運動量  $p_1 = p_2 = p$  をもつ固有状態を考えれば

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e; t) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos[(E_1 - E_2)t]]$$

となる。この確率は、周期  $\frac{2\pi}{|E_1 - E_2|}$  で振動する。

ニュートリノの質量は非常に小さくほぼ光速で伝播するため、速さ  $c$  の波でこの周期に対応する波長を考え、振動長とよぶ。質量が小さいゆえに、近似的に

$$E_1 - E_2 = \sqrt{p^2 + m_1^2} - \sqrt{p^2 + m_2^2}$$

$$\cong p \left( 1 + \frac{m_1^2}{2p^2} \right) - p \left( 1 + \frac{m_2^2}{2p^2} \right) \approx \frac{\Delta m_{12}^2}{2E}$$

が成り立つ。ここで、 $\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$  は質量の 2

乗の差であり、最後に  $E \approx p$  とした。振動周期よりも十分長い時間にわたって定常的に飛来するニュートリノを観測する場合、時間平均をとることで

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$$

が得られる。

### 3. 物質中でのニュートリノ振動

ニュートリノが物質中を伝播する場合、電子との相互作用により電子ニュートリノのみが

$$V = \sqrt{2} G_F n_e$$

のポテンシャルを感じる。 $G_F$  はフェルミの結合

定数で、 $n_e$  は電子の数密度である。このときの、

ニュートリノの有効質量 (エネルギー固有値) を知

るには、ハミルトニアン

$$H = \frac{1}{2E} \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{pmatrix} + U^{-1} \begin{pmatrix} V & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} U$$

を対角化すればよい。その結果、固有値として

$$\frac{1}{2} \left[ m_1^2 + m_2^2 + A \pm \sqrt{(A - \Delta m^2 \cos 2\theta)^2 + (\Delta m^2 \sin 2\theta)^2} \right]$$

が得られる。ここで、 $A = 2\sqrt{2} G_F n_e E$  である。

これより、 $A = \Delta m_{12}^2 \cos 2\theta$  が成り立つ場合に、

エネルギー固有値の差が最小になることが分かり、共鳴が起こる。

これを MSW (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein) 効果

という [2].  $\nu_e - \nu_\mu$  振動の場合、共鳴は臨界密度

$\rho_{cr} \approx 10^4 \text{ g cm}^{-3}$  で起きることが分かっている。

### 4. 課題と今後の展望

以上、超新星からのニュートリノ放射やニュートリノ振動について見てきた。2種類のニュートリノを考えたが、フレーバーの数を 3 にして、同様の考察を行いたい。

今後は、Kunugise & Iwamoto (2007) [1] の結果を用い、超新星物質や星周物質の密度分布を適当に仮定して、ニュートリノ振動の様子を計算することでニュートリノのフレーバー転換の確率を計算したい。簡単な密度分布の場合に対し、近似的な転換確率が解析的に得られることが分かっている [3]。超新星の外層や星周物質に合うような簡単な密度分布を考え、転換確率が解析的に得られる場合があるかどうか、調べていきたい。

### 5. 参考文献

- [1] T. Kunugise & K. Iwamoto, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 59, L57, 2007; T. Kunugise, PhD Thesis, Nihon University, 2008
- [2] S. P. Mikheyev, A. Yu., Smirnov, Nuovo Cimento C, 9, 17, 1986
- [3] T. K. Kuo, Reviews of Modern Physics, Vol. 61, 937, 1989