

軸対称を破るニュートリノ集団振動と 質量階層性

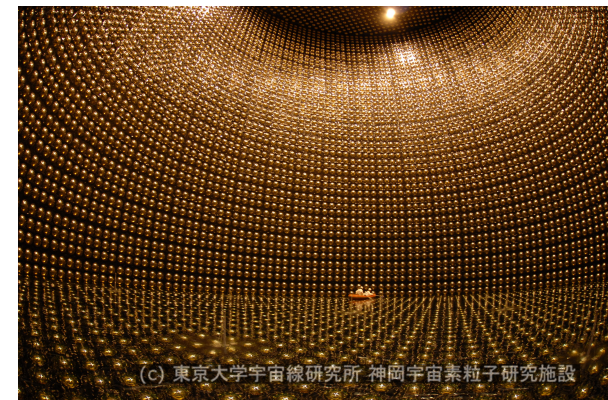
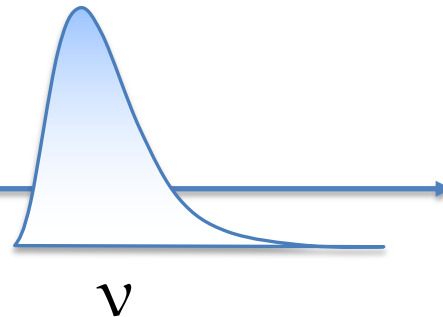
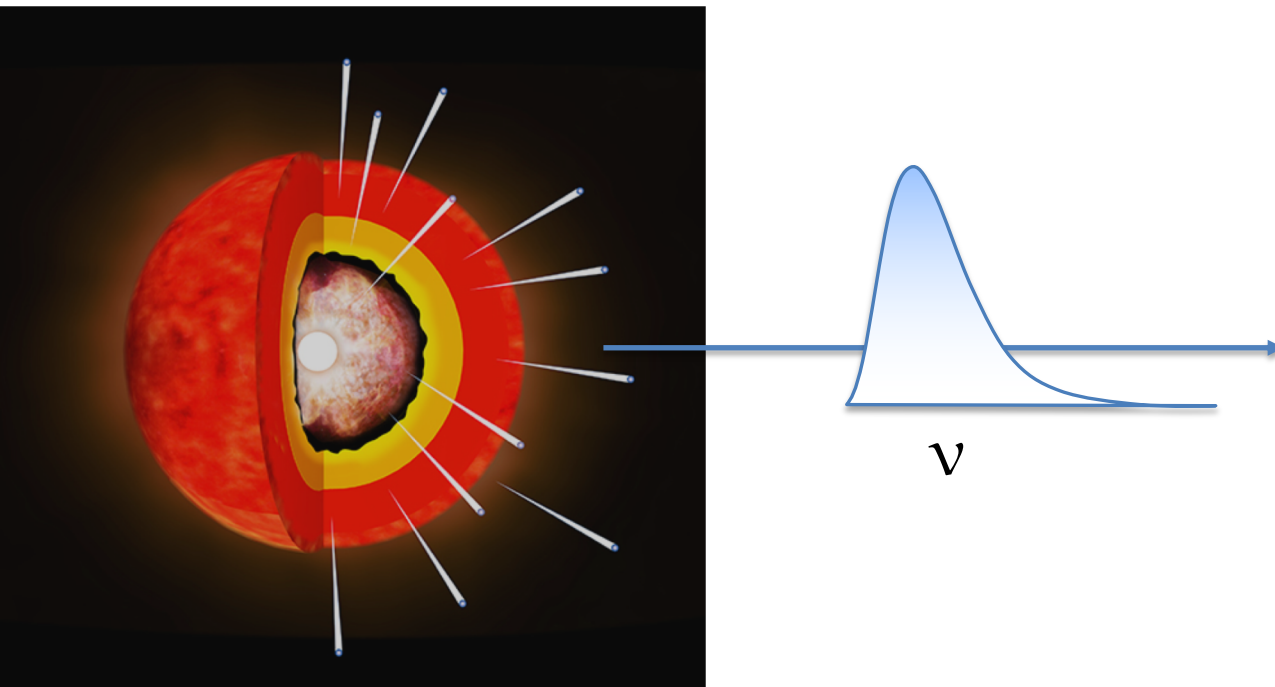
財前 真理 (東大天文 D1)

超新星ニュートリノ

ニュートリノは超新星爆発において重要な関わりを持つ。

- ・爆発メカニズム（ニュートリノ加熱）
- ・状態方程式（原始中性子星の冷却）
- ・元素合成（ニュートリノ反応）

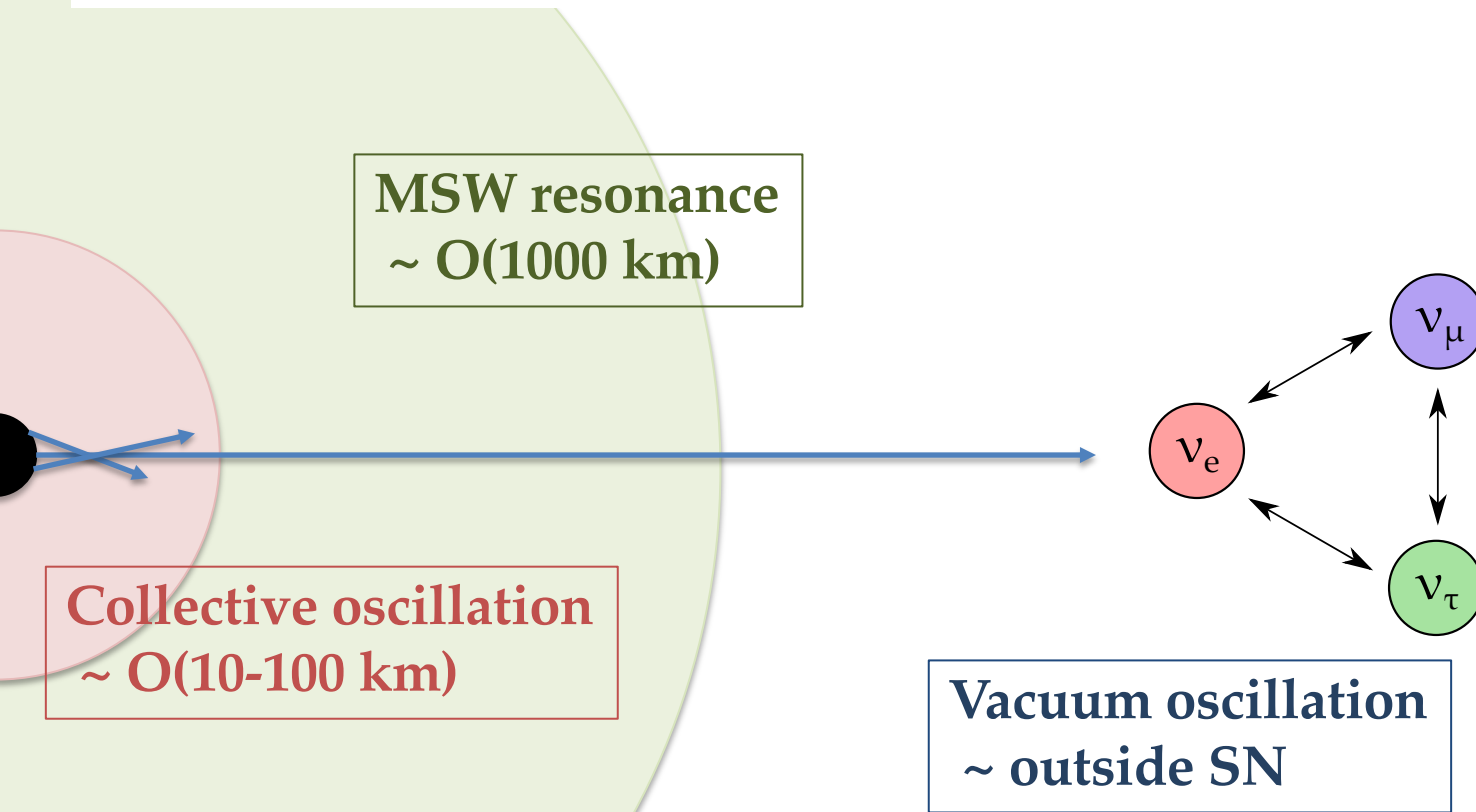
観測からなんとか超新星の情報を引き抜きたい。



Neutrino detector

超新星ニュートリノ

ニュートリノの厄介な点の1つ：ニュートリノ振動
伝搬するだけで勝手にフレーバーが混ぜられる。
地上に届く頃にはニュートリノは元々持っていたフレーバーの情報を失ってしまう。
逆算するにもニュートリノ振動機構が複雑。



超新星でのニュートリノ振動

超新星内部では3種類のニュートリノ振動がある。

$$i(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_i = \left[\underbrace{+U \frac{M^2}{2E_\nu} U^\dagger}_{\text{真空振動}} + \underbrace{\sqrt{2}G_F N_e}_{\text{物質振動}} + \underbrace{\sqrt{2}G_F \int d\Gamma' (1 - \cos \theta_{ik}) (\rho'_{\nu_k} - \vec{\rho}'_{\nu_k})}_{\text{集団振動}}, \rho_i \right]$$

「真空振動」
質量二乗差 & 混合角

「物質振動」
電子密度分布

Phase dispersion
vs.
Phase synchronization

「集団振動」
ニュートリノ自己相互作用 & 運動量空間分布

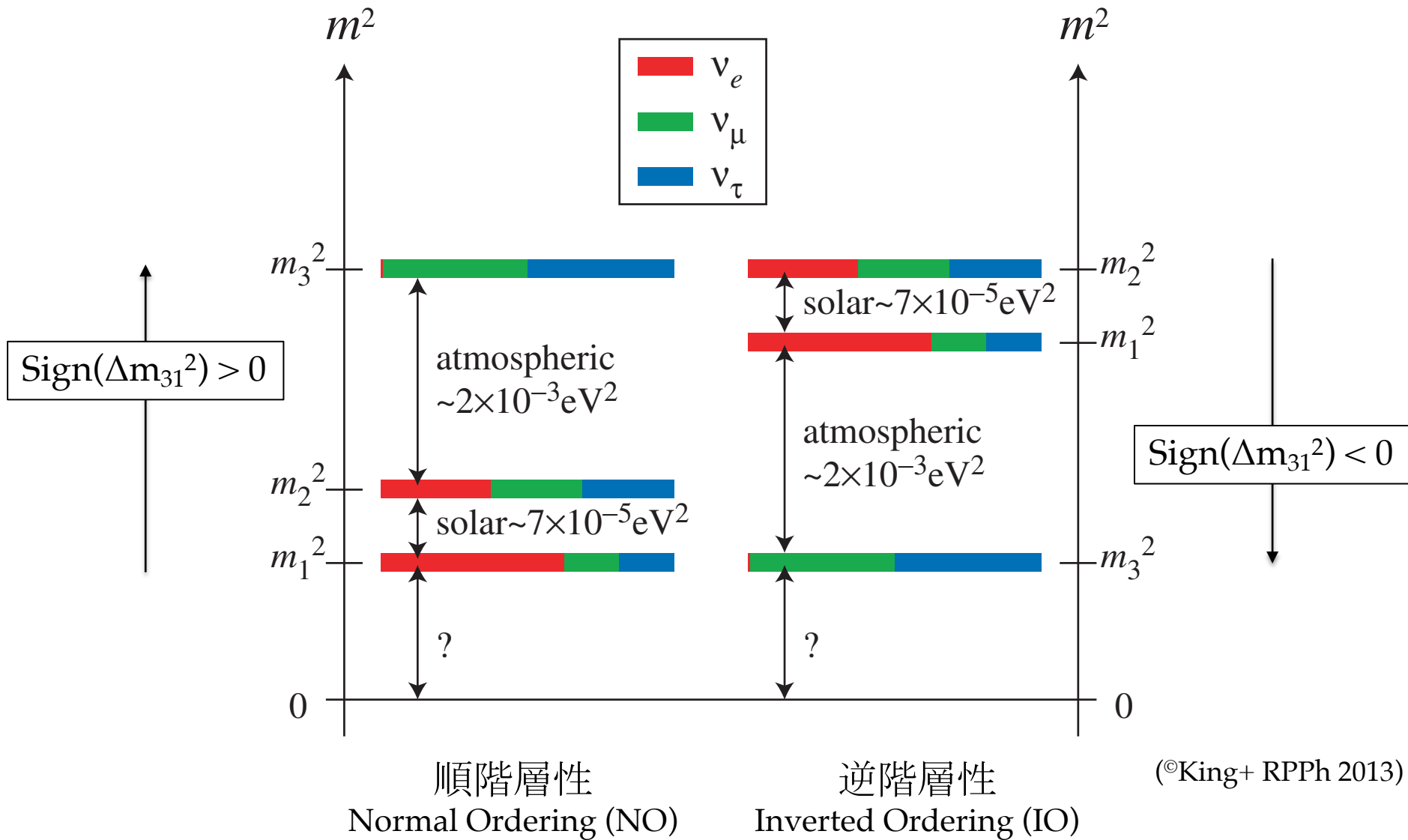
超新星でのニュートリノ振動

$$i(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_i = \left[\underbrace{+U \frac{M^2}{2E_\nu} U^\dagger}_{\text{vacuum}} + \underbrace{\sqrt{2}G_F N_e + \sqrt{2}G_F \int d\Gamma' (1 - \cos \theta_{ik}) (\rho'_{\nu_k} - \bar{\rho}'_{\nu_k})}_{\text{matter}} , \rho_i \right]$$

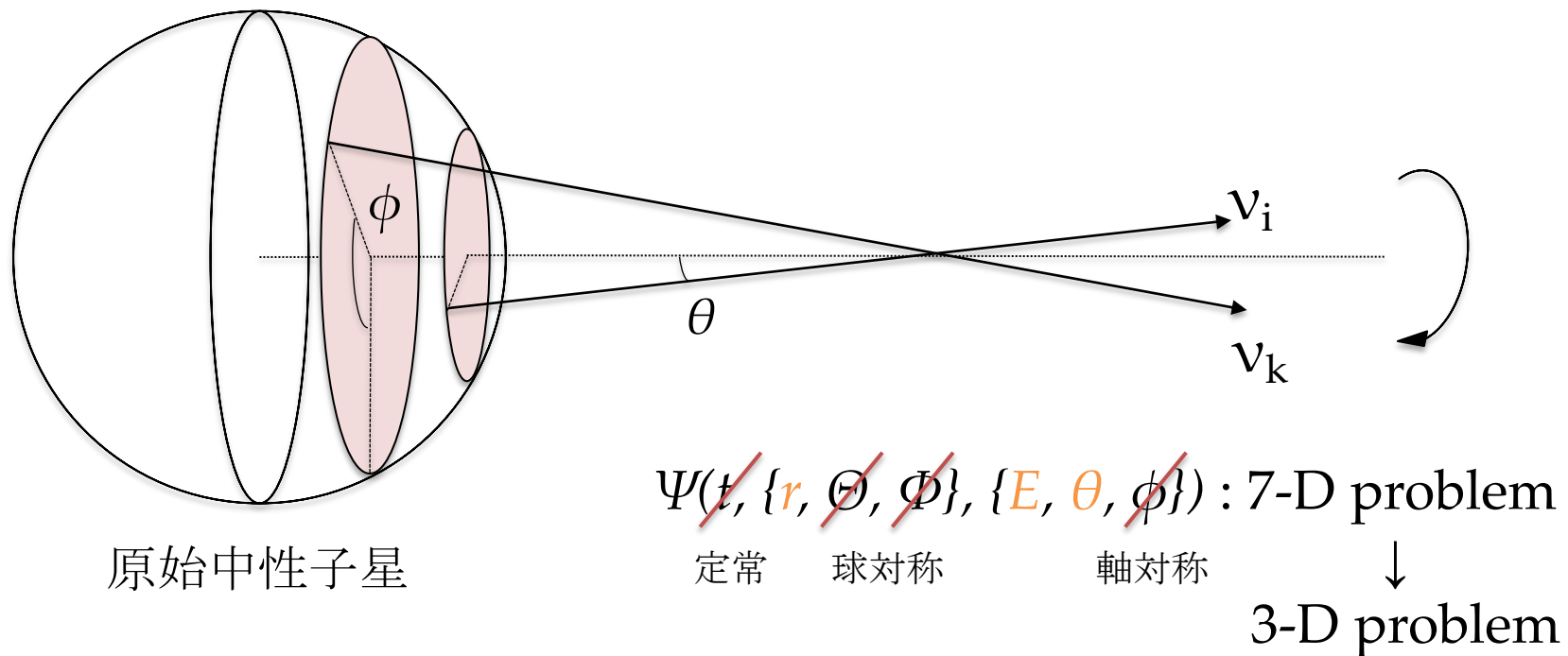
集団振動にも大きく分けて2通り

- **Fast mode** 山田さんのtalk
 - 真空振動の項とは独立に進化していく。
 - (正確には初期摂動として必要)
- **Slow mode** 今回のtalk
 - 真空振動の項を介して進化していく。
 - 質量階層性に依存する。

質量階層性



ニュートリノ集団振動



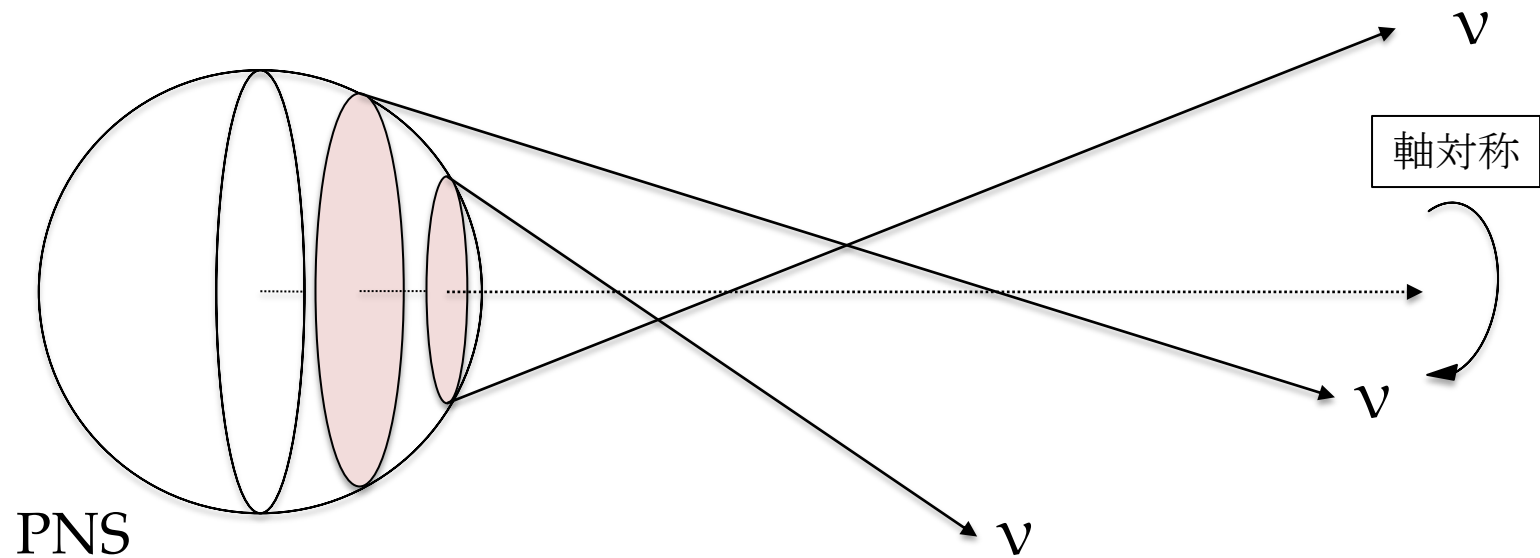
原始中性子星を抜けたニュートリノ同士が相互作用し、これがフレーバー交換を引き起こす。

系としては 時間変化+座標空間+運動量空間の1+3+3次元問題。

数値計算の際には定常と対称性を課して0+1+2次元問題に (Bulbモデル)。

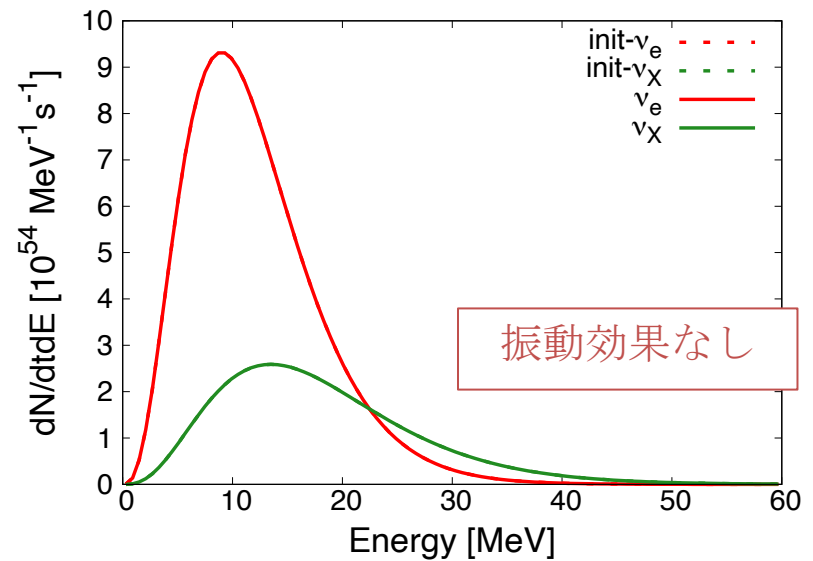
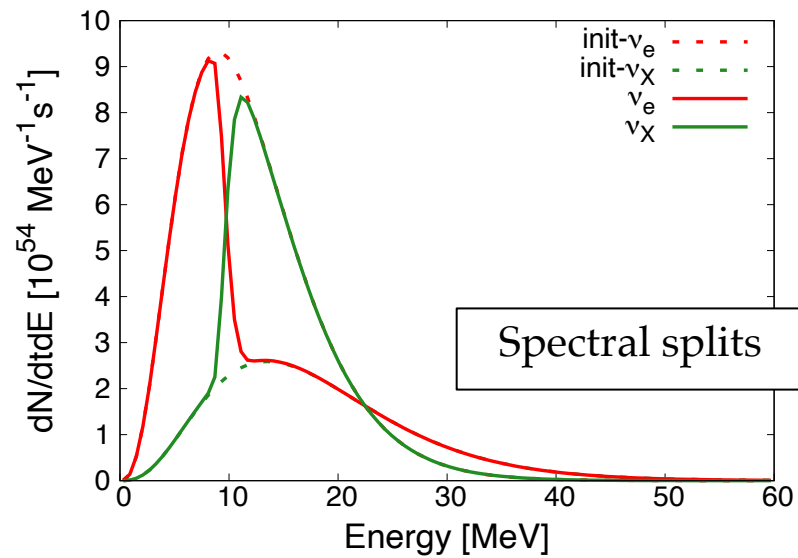
(Duan+ PRD 2006)

1+2次元 Bulbモデル



逆階層性

順階層性



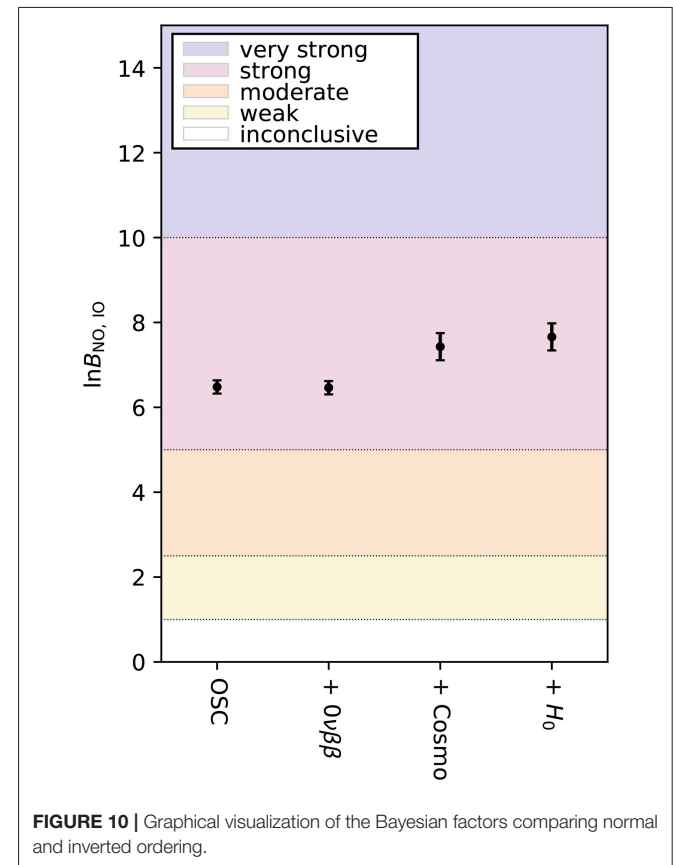
質量階層性

最近のニュートリノ実験等のデータリリースをまとめると、質量階層性はどうにも順階層の可能性が高い？

Global analysis favors NO over IO at 3σ level.

- Long-baseline accelerator
(e.g., K2K, MINOS, T2K, NOvA)
- Solar & atmospheric
(e.g., SK, Borexino, SNO)
- Long/Short-baseline reactor
(e.g., KamLAND, Double Chooz)

(e.g., Capozzi+ 2018, de Salas+ 2018)



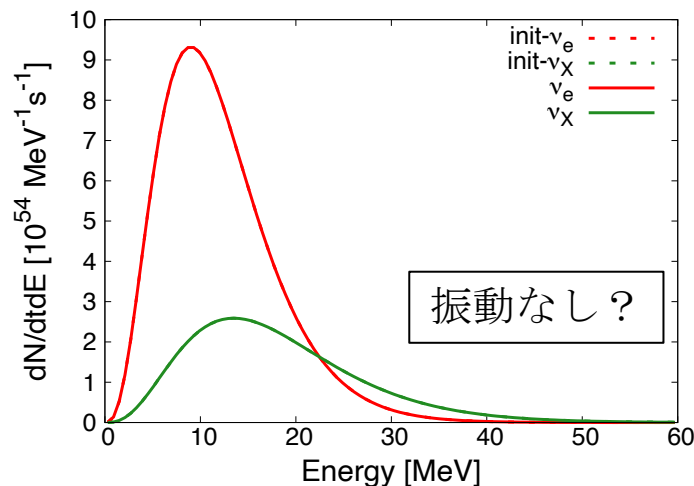
質量階層性

もし順階層性が実際なら、集団振動(slow mode)は一切スペクトルに影響を与えないのか？

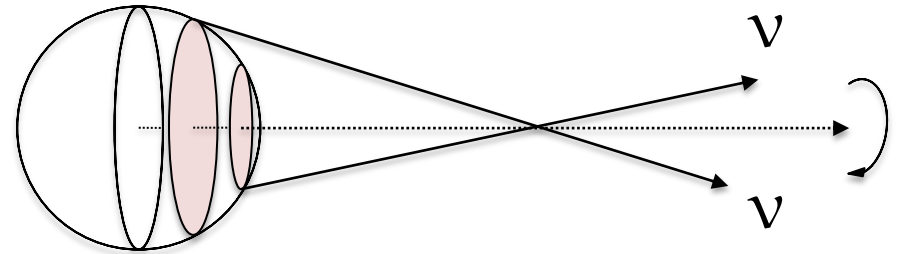
→ そんなことはない。

順階層性においてのみ、非軸対称性(方位角分布)が成長して新しい振動効果を生み出す。

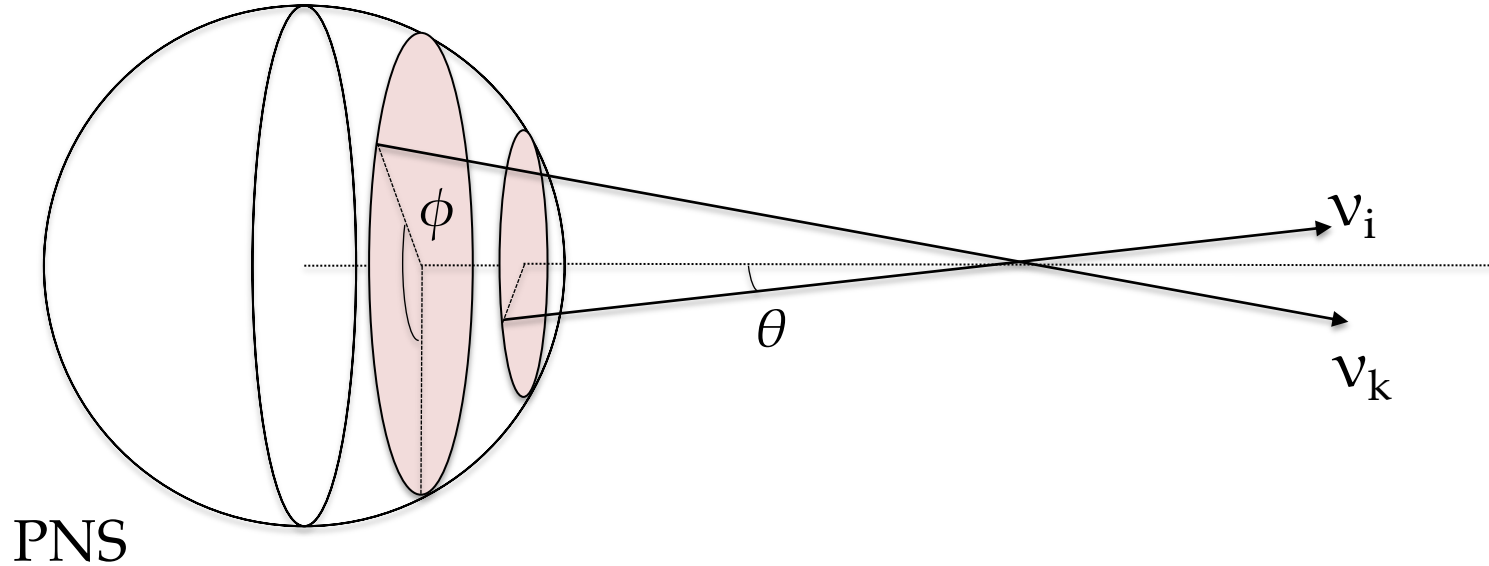
→ Bulbモデルを1+2次元から1+3次元へと拡張する。



(Raffelt+ 2013, Chakraborty+ 2014, 2016)



軸対称の破れ



$$H_{\nu\nu} = \int d\Gamma' (1 - \cos \theta_{\text{int}}) [\rho_{\nu}(E_{\nu}', \theta', \varphi') - \bar{\rho}_{\nu}(E_{\nu}', \theta', \varphi')]$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_{\text{int}} &= \cos \theta \cos \theta' - \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi') \\ &= \cos \theta \cos \theta' \quad (\text{if assuming axial symmetry}) \end{aligned}$$

ニュートリノの軌跡としてちゃんと方位角の分布を考慮に入れる (運動量空間の ϕ を含める)。

テスト数値計算

まずテスト計算として、簡易的な超新星モデルを仮定する。

$$L\nu = 1e51 \text{ erg/s}$$

$$\langle E\nu \rangle \sim 10 \text{ MeV}$$

Pinching parameter $\xi = 3.0$

Density $\sim$ Mixing angle in medium $\sim \Theta = 1e-3$

($\rho_{Ye} \sim 5e5 \text{ g/cm}^3$ 相当, 集団振動が抑制されない).

Neutrino flux:

$$\Phi\nu_{\alpha} \rightarrow (1 + \varepsilon \cos \phi) \Phi\nu_{\alpha} \quad (\varepsilon \sim 10^{-3})$$

わずかな非軸対称性を初期フラックスに与える。理由は後で

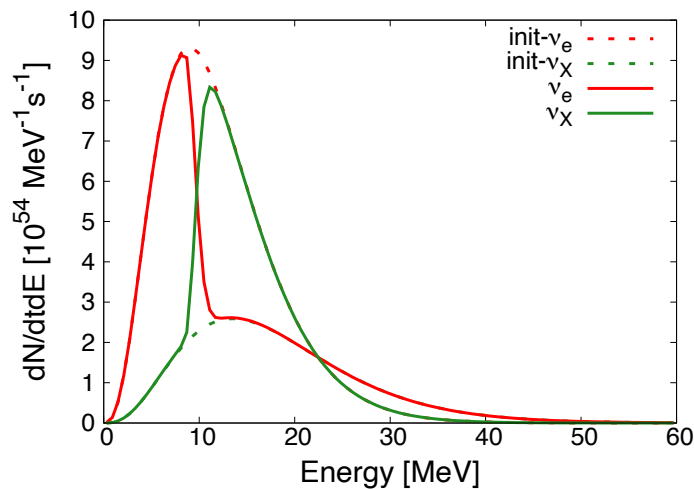
低密度条件であれば、角度分解能を下げてても許される。(O(10³) $\rightarrow$ O(10²))

$$N_{\text{flavor 自由度}} \times N_E \times N_{\theta} \times N_{\phi} = 16 \times 100 \times 128 \times 64 \sim 10^7.$$

動径方向の空間グリッドは可変でだいたい $\Delta r \sim \text{O(cm-m)}$.

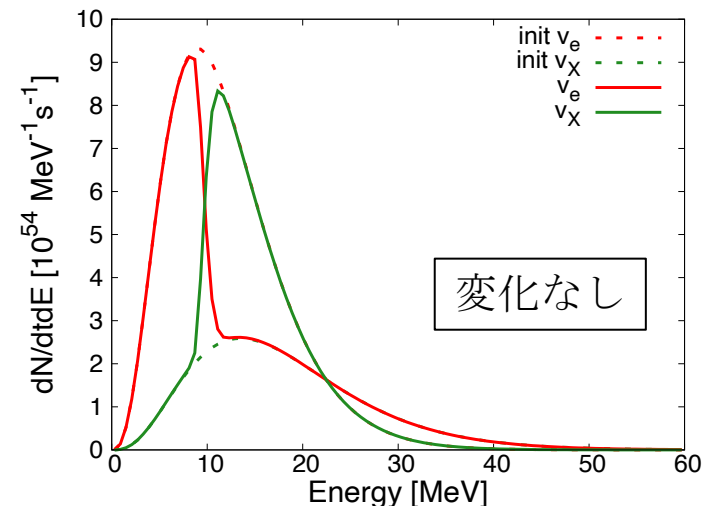
スペクトル比較

軸対称 (1+2D)

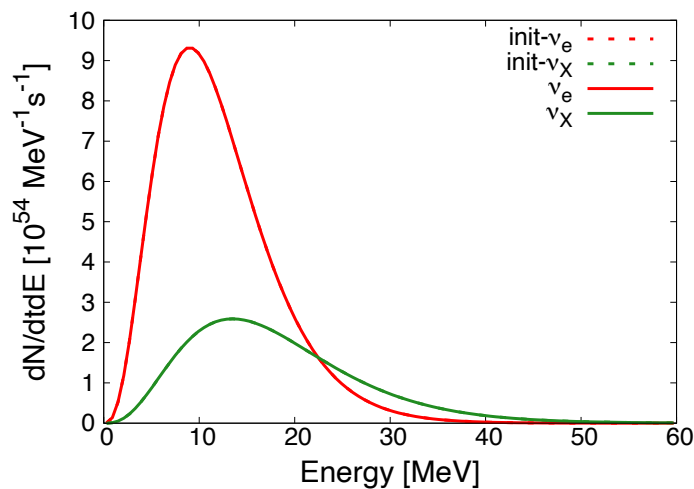


逆階層性
(IO)

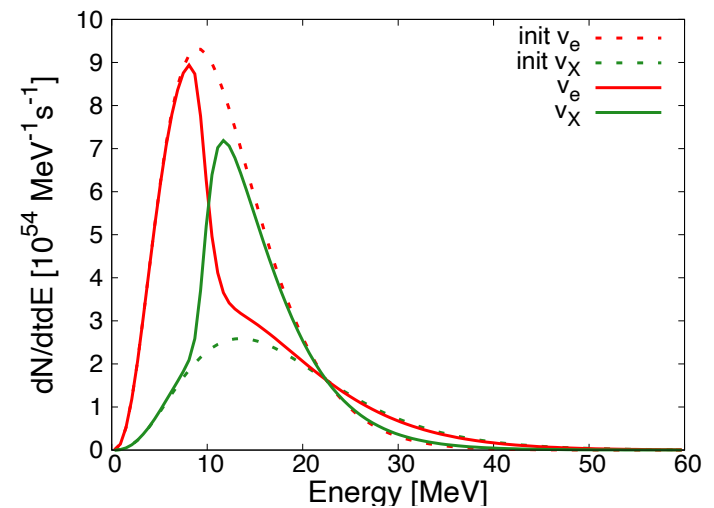
非軸対称 (1+3D)



変化なし



順階層性
(NO)



非軸対称性

初期条件としてわずかな非軸対称性をフラックスに与えていた。

Neutrino flux:

$$\Phi_{\nu_\alpha} \rightarrow (1 + \varepsilon \cos \phi) \Phi_{\nu_\alpha} \quad (\varepsilon \sim 10^{-3})$$

0.1%分の非対称性もあれば当然なのか

・・・というわけでもない。

$\varepsilon \sim 10^{-16}$ としてほぼ軸対称な条件にしてもちゃんと非軸対称性が成長して順階層性でも振動効果を与える。

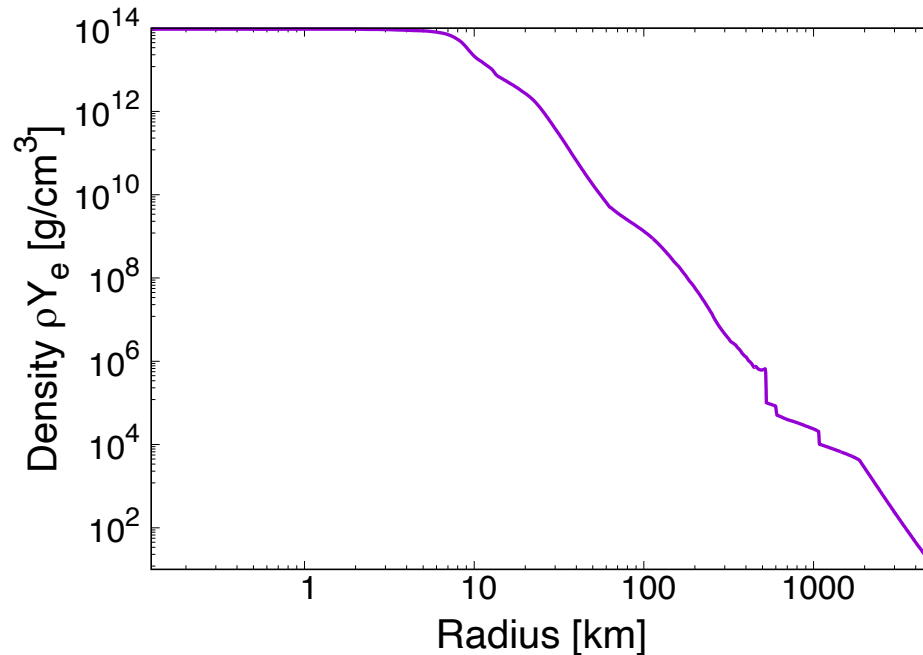
一方で、 $\varepsilon = 0$ として軸対称なものを与えると、

$$H_{\nu\nu} = \int d\Gamma' (1 - \cos \theta_{\text{int}}) [\rho_\nu(E'_\nu, \theta', \varphi') - \bar{\rho}'_\nu(E'_\nu, \theta', \varphi')]$$

のうち ϕ に関する周回積分のところで $\int \frac{d\varphi'}{2\pi} \cos \varphi' \Phi_{\nu_\alpha}$ という項が数値的に0にならない (浮動小数点が原因?)。

これが擬似的な非対称性とみなされてずれに相当する ε を仮定した場合と同様の進化をする。

数値計算



電子捕獲型超新星爆発モデル n8.8

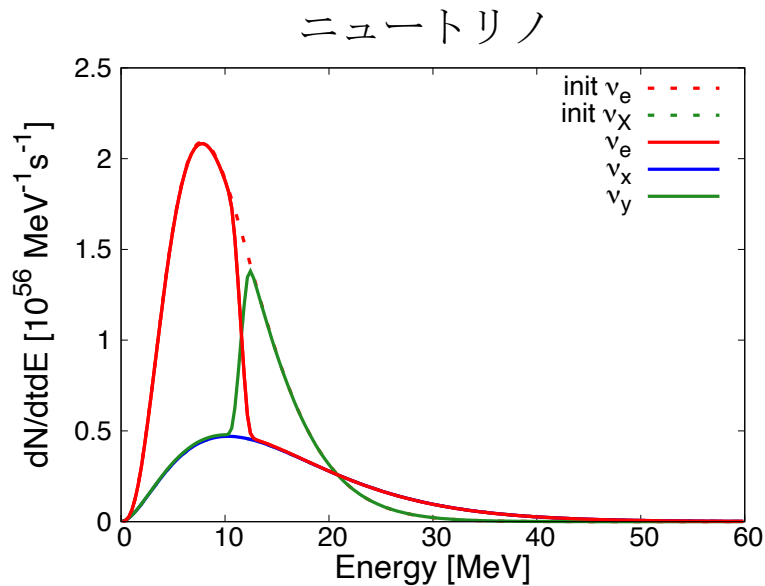
- $t_{pb} = 100$ ms
- 手で非軸対称フラックスを
- 1+2D計算で 3 hr.
 - 1+3Dでも 2 week 程度

実際の超新星モデルなのでちゃんと角度解像度を用意する必要がある。

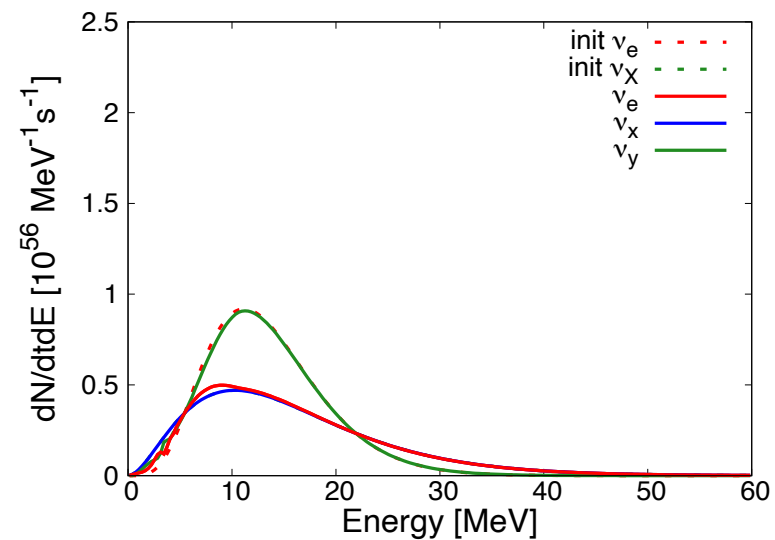
$$N_{\text{flavor 自由度}} \times N_E \times N_\theta \times N_\phi = 16 \times 200 \times 2048 \times 128 \sim 8 \times 10^8.$$

非軸対称性

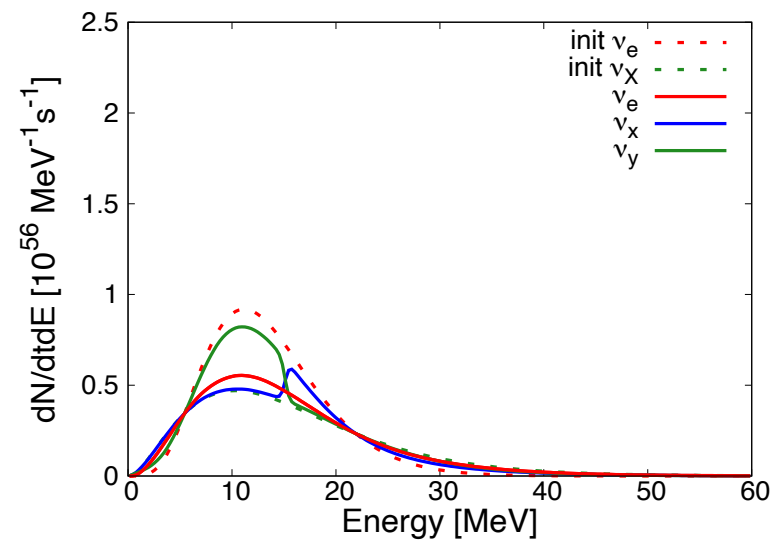
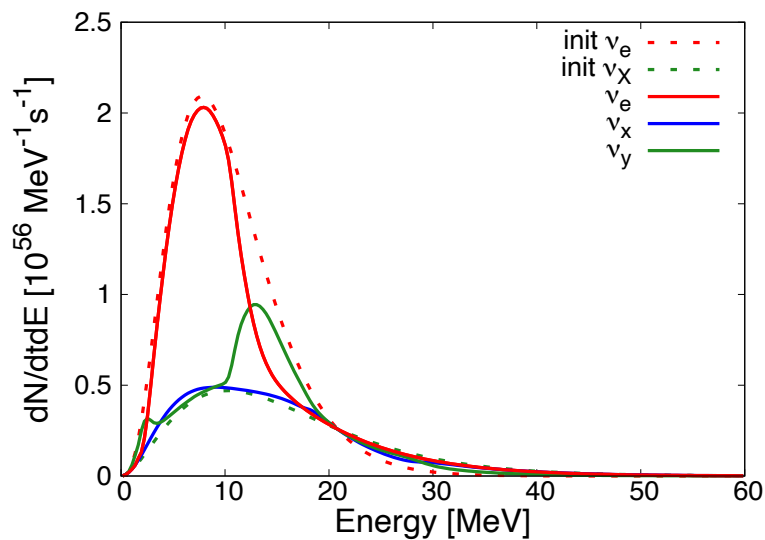
逆階層性
(IO)



反ニュートリノ



順階層性
(NO)



観測とのまとめ

ニュートリノの関わる対象：

- ~~爆発メカニズム (ニュートリノ加熱)~~
(Slow mode はニュートリノ加熱に影響を与えない。)
- 状態方程式 (原始中性子星の冷却)
- 元素合成 (ニュートリノ反応)

逆階層性を扱う上であれば、非軸対称性は上の2つに影響を与えない。

順階層性を扱うのであれば、非軸対称性が新しい振動効果と呼び起こして軸対称計算とは異なるスペクトルを与える。

→観測されるスペクトルやcharged-current反応に影響を及ぼす。

まとめ

- 元来の軸対称を課した集団振動計算では、順階層性において基本振動効果が見られないことが知られている。
- 最近のニュートリノ実験をまとめるとどうも順階層性を好むような結果が出てくる。
- 集団振動に非軸対称性を考慮すると、順階層性でも振動効果が見られる。
- 実際の超新星は完全な球対称・軸対称を持たないので、この効果を考慮する必要がある。
- ただし、逆階層性が正しい場合には影響を及ぼさない。
- スペクトルの形状として変化のシャープ差に違いはあれど、順階層と逆階層である程度似たような形に変化することがわかる。