

ニュートリノ振動を考慮した ニュートリノスペクトルの系統的研究

佐々木 宏和 (東京大学)

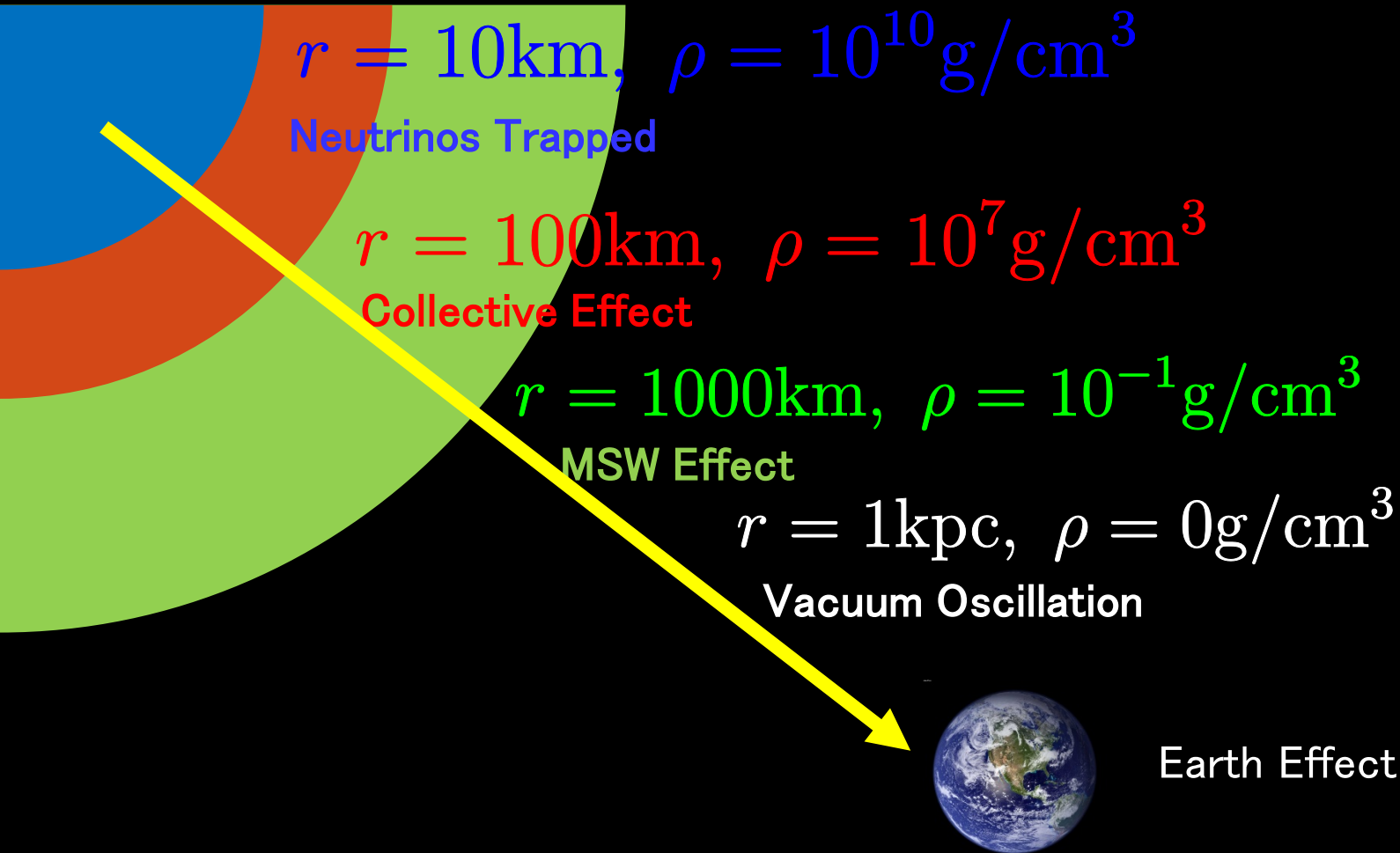
滝脇 知也 (国立天文台)

川越 至桜 (東京大学)

堀内 俊作 (ヴァージニア工科大)

石徹白 晃治 (東北大学)

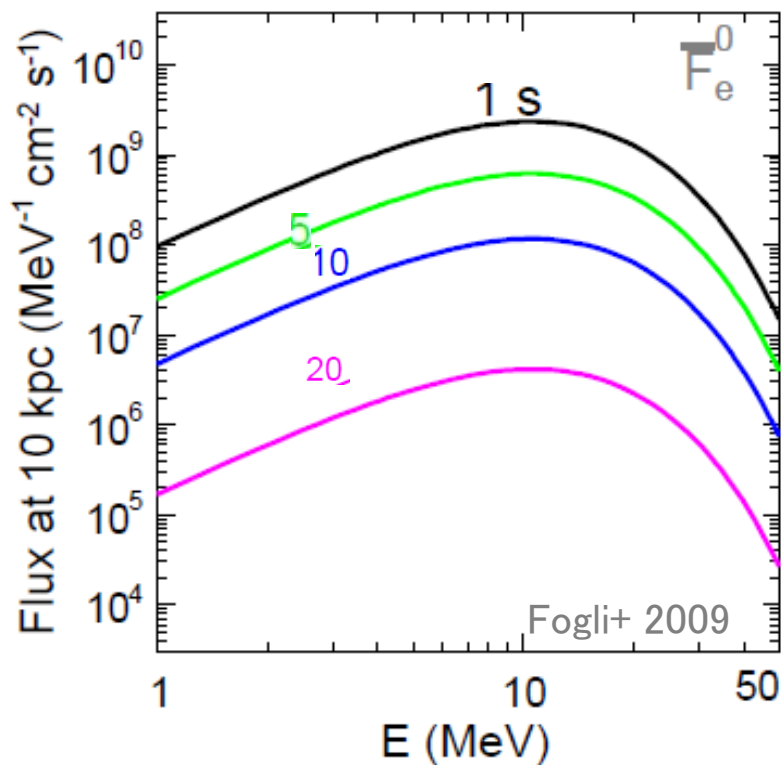
ニュートリノ振動



上記の振動の中でニュートリノ自身の密度の変化による
Collective Neutrino Oscillation(CNO)の効果が特に謎.

公募研究応募時のモチベーション

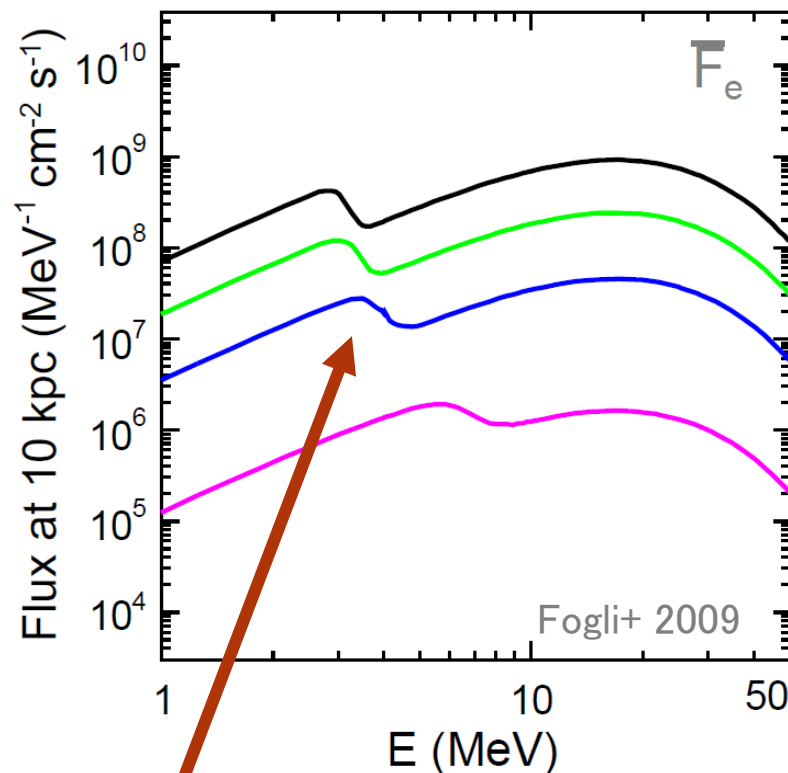
Original Spectrum



$$\langle E_e \rangle = 10 \text{ MeV}, \langle \bar{E}_e \rangle = 15 \text{ MeV}, \langle E_x \rangle = 24 \text{ MeV},$$

$$L(t) = \frac{E_B}{6} \frac{e^{-t/\tau}}{\tau}$$

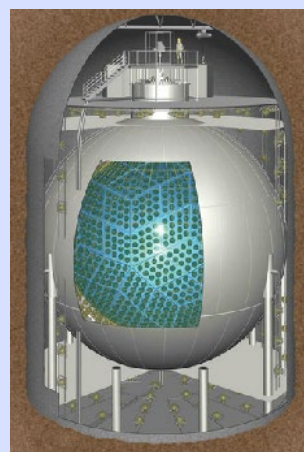
After CNO



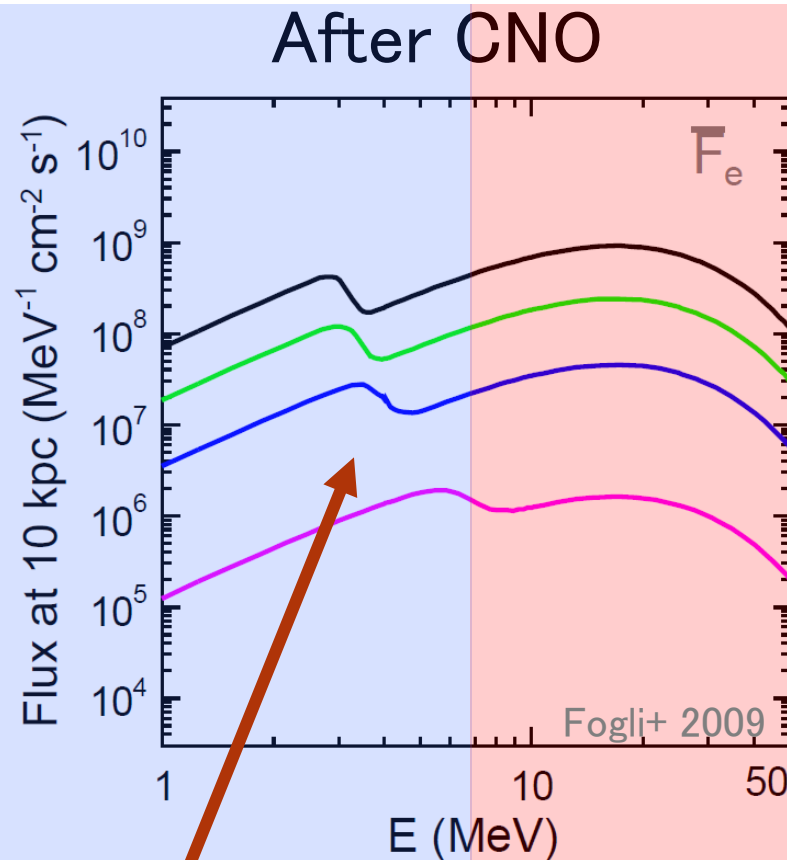
Inverted mass hierarchy, small θ_{13}

Spectral splitと呼ばれる面白い特徴が現れる

公募研究応募時のモチベーション



KamLAND



SK

Spectral splitは
低エネルギー側のKamLANDが得意な領域で現れる
SKとKamLANDの共同観測で探れないか？

Fogli+2009と今の情勢の違い

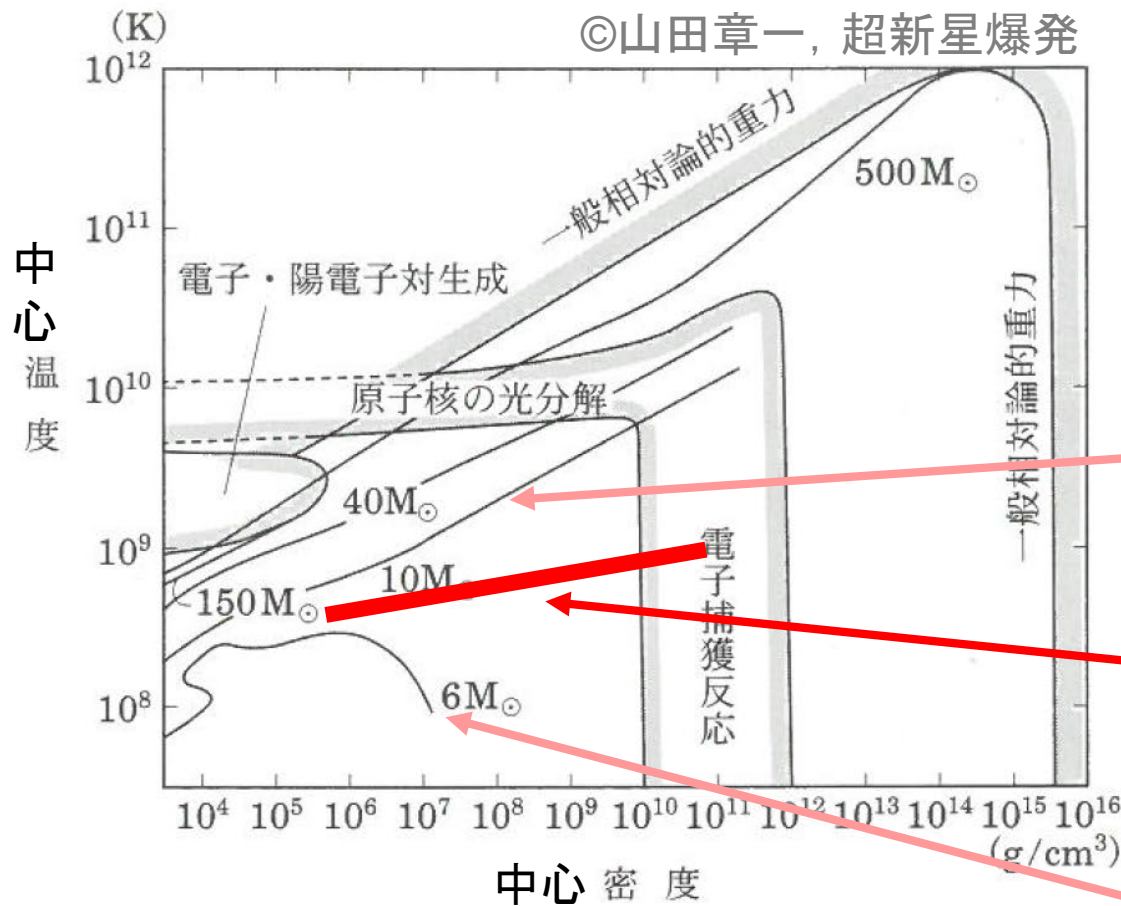
- CNOの研究の主流の手法が**シングルアングル**から**マルチアングル**になった！(次の流行については財前くんのスライドを参照)
- マルチアングルの研究ではほとんどの親星において,**CNOが現れなくなった**(バウンス後500ms以内に).
星の密度が高いため. Matter suppressionと呼ばれる.

CNOを考慮した
ニュートリノスペクトルの系統的研究



特殊なおもしろい親星における
CNOを考慮したニュートリノスペクトルの研究

電子捕獲型超新星爆発



初期は8-10M_☉の星

赤色超巨星と
赤色巨星の中間的な進化.
重力崩壊するメカニズム
が普通の超新星と違う.

赤色超巨星を経て
超新星爆発
中性子星+超新星残骸

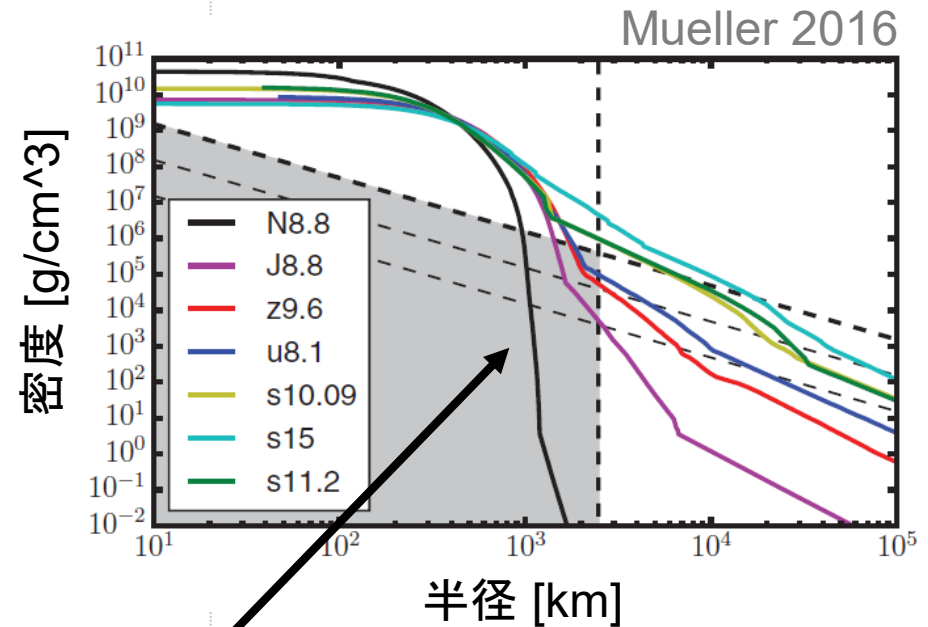
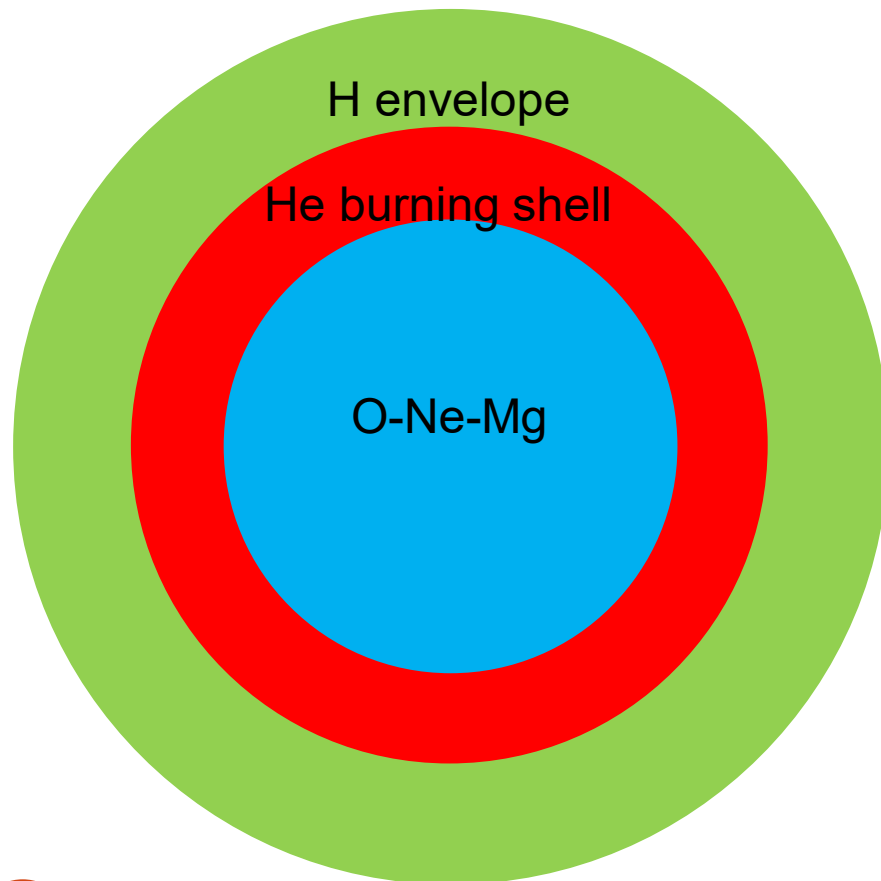
超漸近赤色分岐星を経て
超新星爆発
中性子星+超新星残骸

赤色巨星を経て
白色矮星+惑星状星雲

基本的にコアと外層に分かれ,
外層が吹き飛ぶ

電子捕獲型超新星爆発

He burning shellが外層を飛ばす



普通の重力崩壊型超新星の親星に比べて非常に外層が薄い.
(遠方に薄く広がっている)

Summary of Numerical Methods

- Hydro Simulation
3DnSNe
Spherical coordinate 1D, PLM (Mignone 2014)
HLLC (Toro 2003), van Leer Limiter
Phenomenological General Relativity (Marek+ 2006)
- Neutrino Radiation Simulation
3flavor IDSA
Updated Reaction Set (next page)
- Neutrino oscillation (post process)
Multi angle approximation (Sasaki et al. 2017)

New Reaction Sets

Kotake et al. 2018

$\nu_e n \rightleftharpoons e^- p$ $\bar{\nu}_e p \rightleftharpoons e^+ n$	Martínez-Pinedo et al. (2012)	Bruenn (1985)	Horowitz (2002)
$\nu_e A' \rightleftharpoons e^- A$		Fischer (2016)	Reddy et al. (1999)
$\nu N \rightleftharpoons \nu N$ $\nu A \rightleftharpoons \nu A$ $\nu e^\pm \rightleftharpoons \nu e^\pm$ $e^- e^+ \rightleftharpoons \nu \bar{\nu}$	Horowitz et al. (2017)	Juodagalvis et al. (2010)	Horowitz (2002)
		Bruenn (1985), Horowitz (1997)	
		Bruenn (1985)	
		Bruenn (1985)	
$NN \rightleftharpoons \nu \bar{\nu} NN$	Fischer (2016)	Hannestad & Raffelt (1998)	
$\nu_e + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons \nu_x + \bar{\nu}_x$		Buras et al. (2003); Fischer et al. (2009)	
$\nu_x + \nu_e(\bar{\nu}_e) \rightleftharpoons \nu'_x + \nu'_e(\bar{\nu}'_e)$		Buras et al. (2003); Fischer et al. (2009)	

Horowitz+2002, Recoil & Weakmagnetism

=> 反電子ニュートリノの反応断面積が下がる

Horowitz+2017, Many body effects (RPA&Virial)

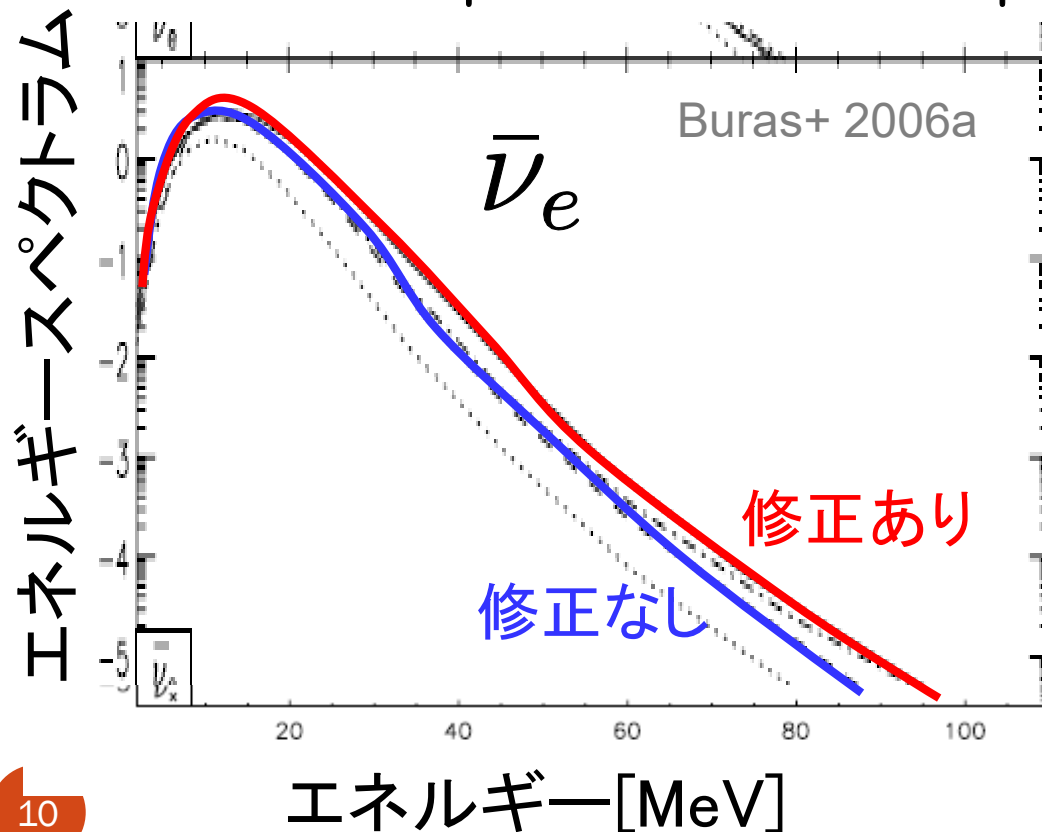
=>核子散乱の反応断面積が下がる

Neutrino Nucleon散乱の断面積

1. Weak magnetism and recoil (Horowitz 2002)

$$\bar{\nu}_e + p \leftrightarrow e^+ + n$$

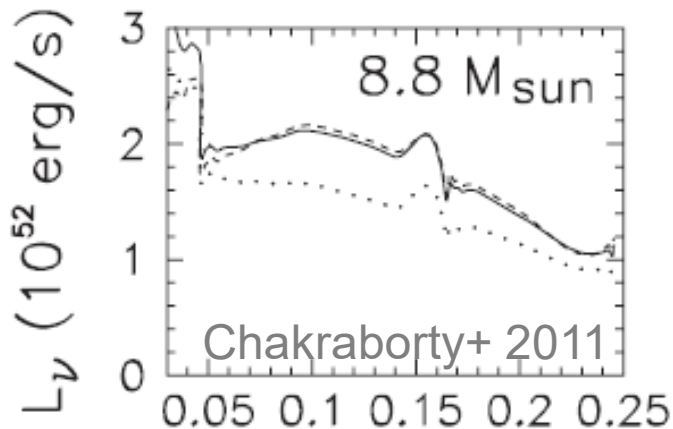
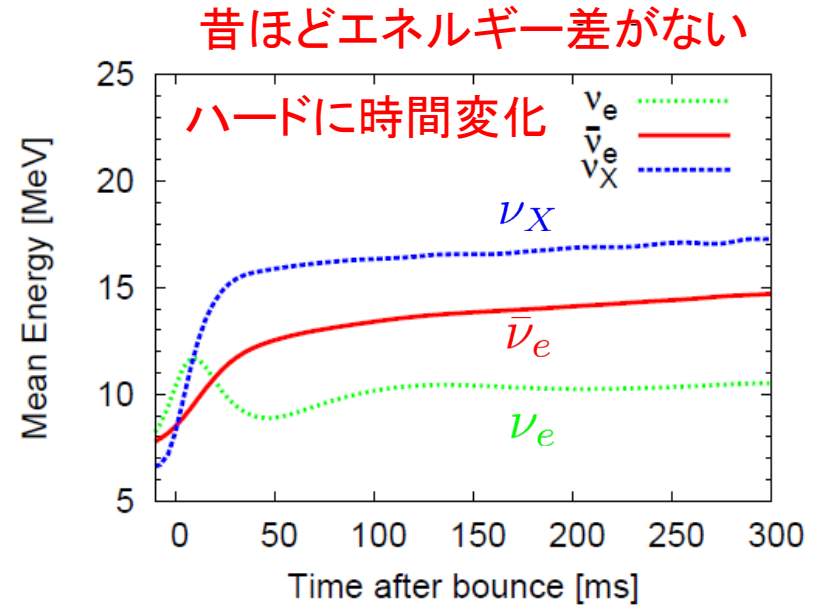
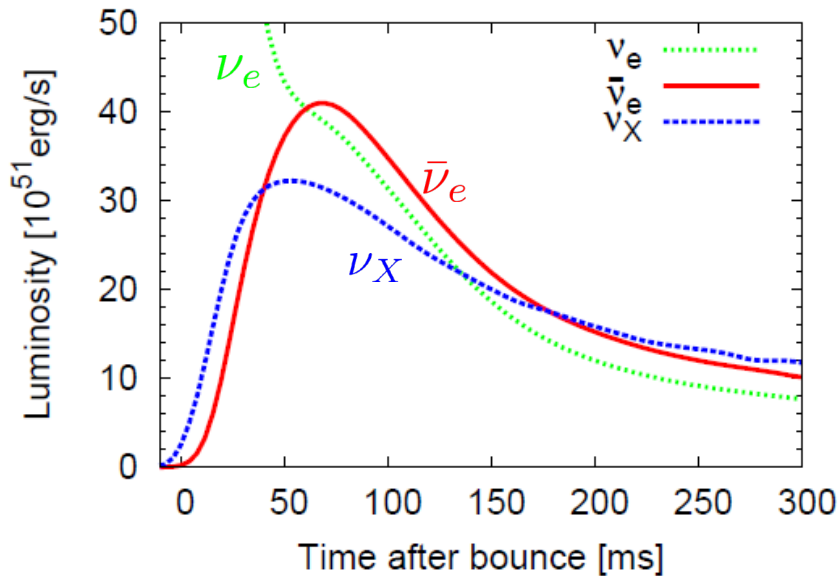
$$\bar{\nu} + N \leftrightarrow \bar{\nu} + N$$



$$\frac{1}{V} \frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{G_F^2 E_\nu^2}{16\pi^2} \left([(g_a + g_a^s)^2 n_n + (g_a - g_a^s)^2 n_p] \right. \\ \left. (3 - \cos \theta) S_A + (1 + \cos \theta) n_n S_V \right) R(E_\nu/m)$$

この効果で
高エネルギーの
反電子ニュートリノが
出てきやすくなる。

ニュートリノ光度とエネルギー

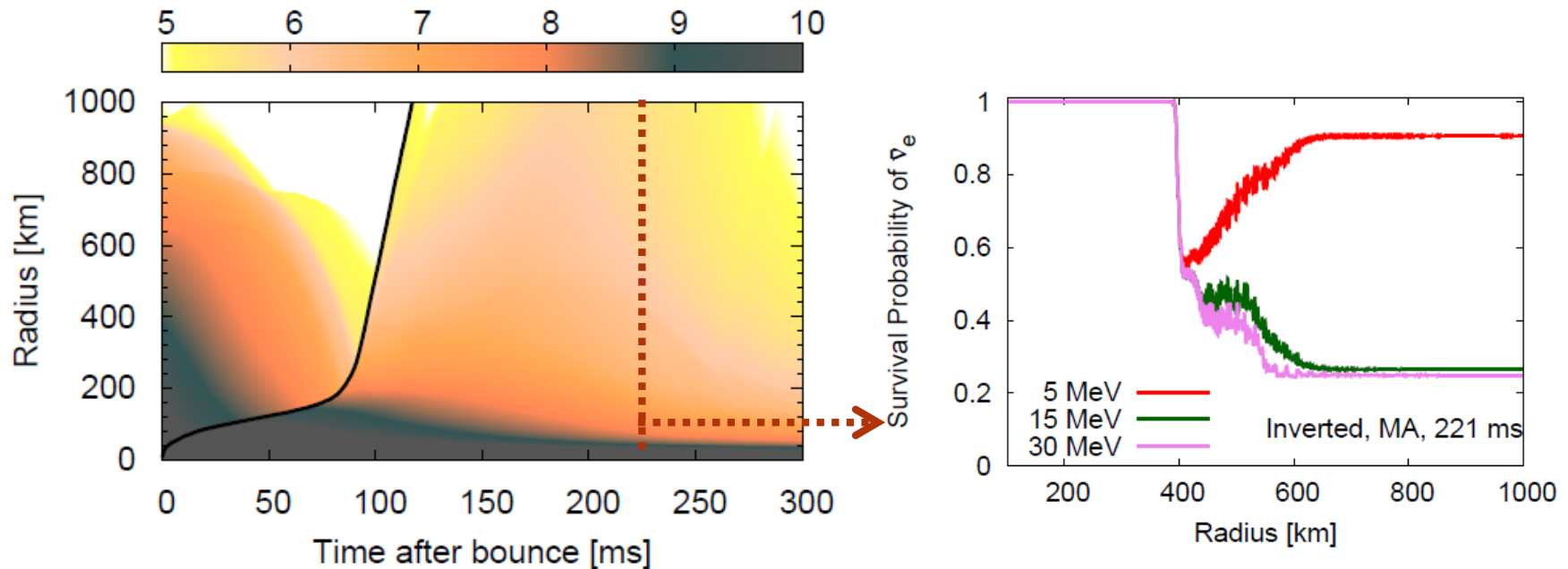


反電子ニュートリノの光度が高いのはweakmagnetismが効いているせいだろう.

全体的に光度が高いのはmany body effectsのせい.

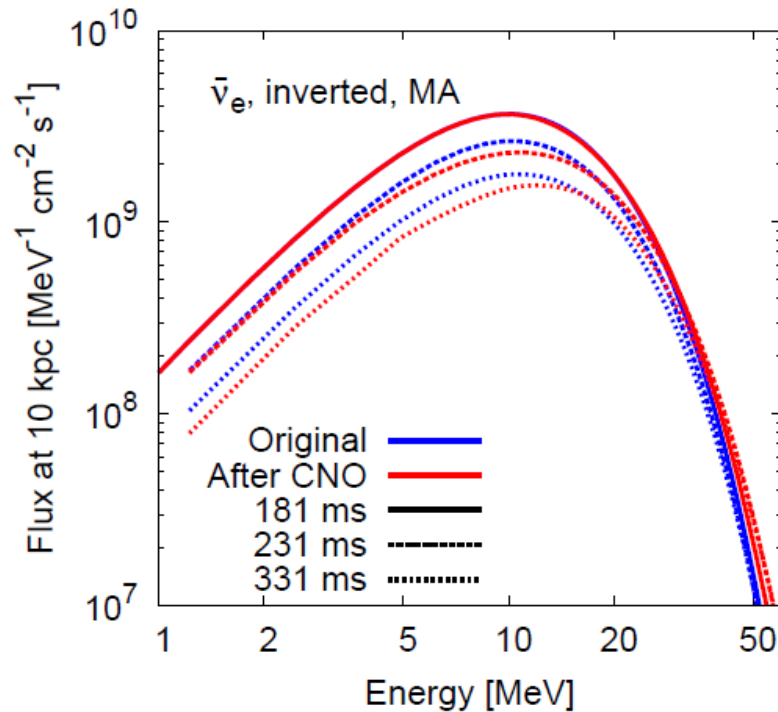
see O'Connor+ 2018 for code comparison

爆発の様子と ν 振動の開始



この親星は1Dでもニュートリノ加熱で爆発する。
密度が減り, 400kmあたりが 10^6 g/cm^3 ぐらいになると
 ν 振動がおき始めた. それ以前は振動なし.

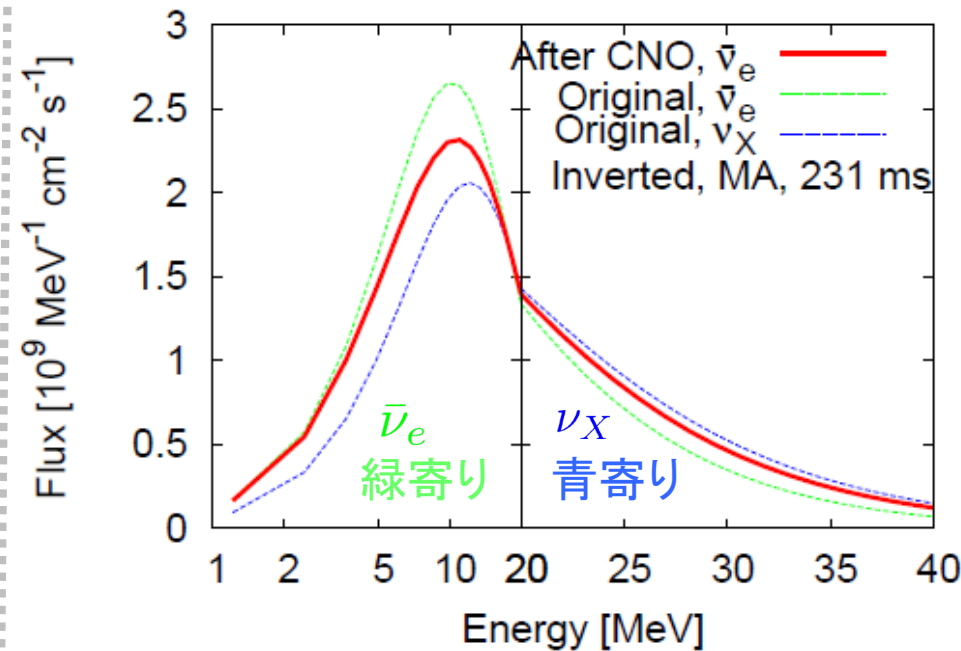
CNO後のニュートリノスペクトル



181ms: CNO起きず

231ms: 高エネルギー側だけCNO

331ms: 全体でCNO

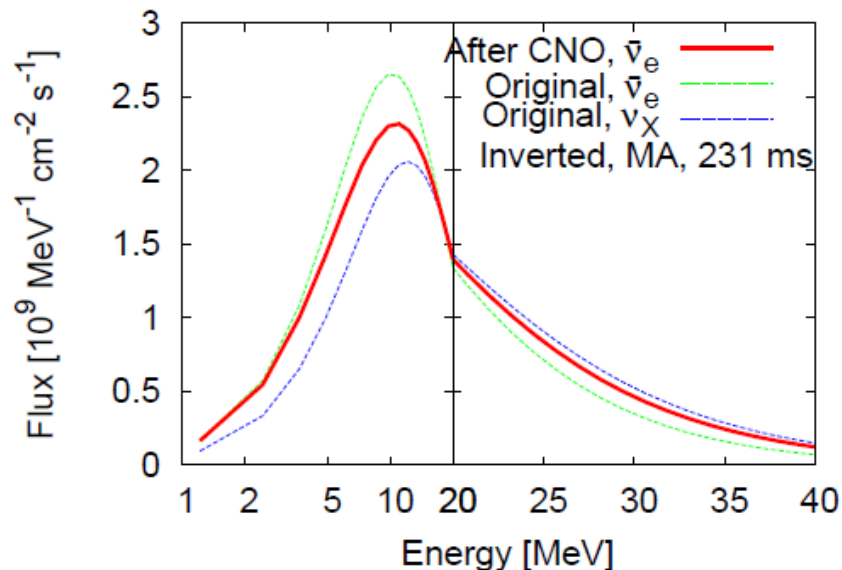


オリジナルの反電子 ν は緑

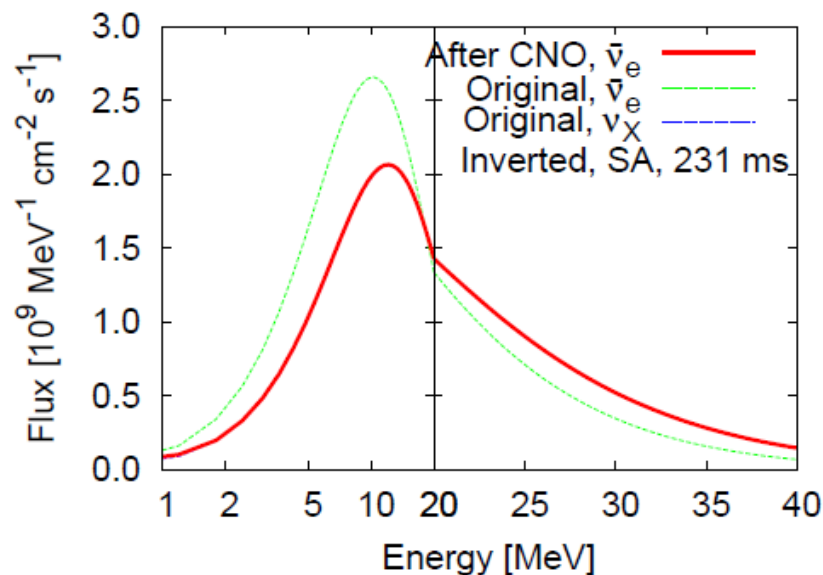
CNOより青と混じって赤に.

231msでは高エネルギー側だけCNO. 時間がたつと全部が青側に

Single vs Multi angle approximation



Multi-angle



Single-angle

この時間では高エネルギー側だけCNOが起きている。

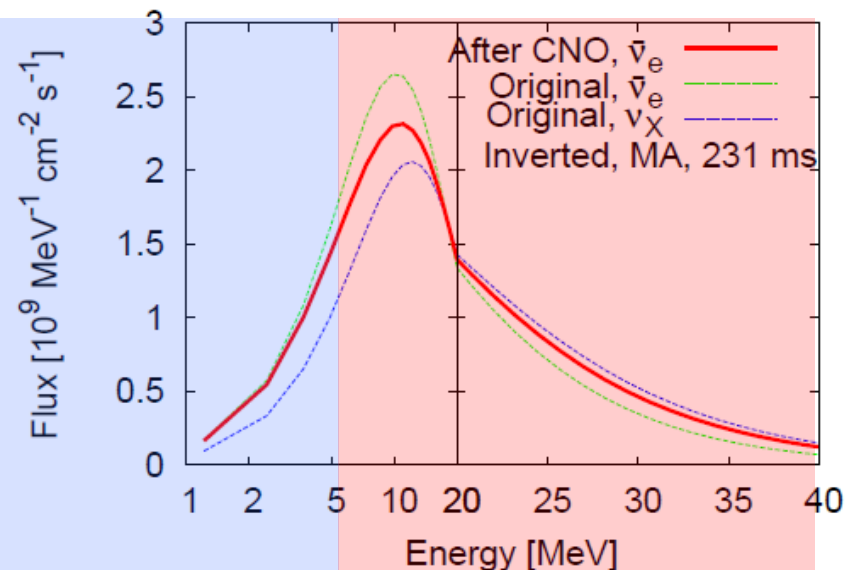
冒頭のFogli+2009に近い状況に一見見える。

しかし, single-angleの計算では全領域でCNOが起きている。

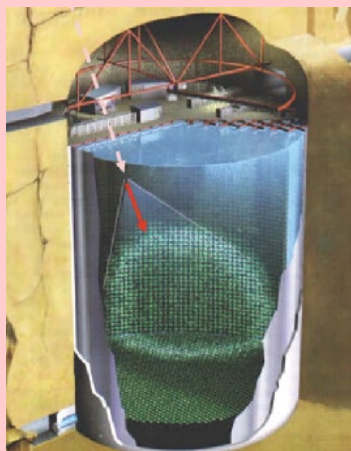
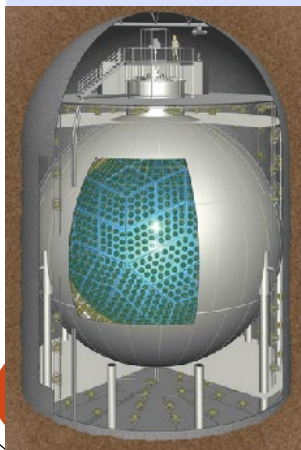
これはマルチアングル独自の現象。

明確なスプリットはせず, 効果が分かりにくい。

薄まったスプリットを検出できるか？



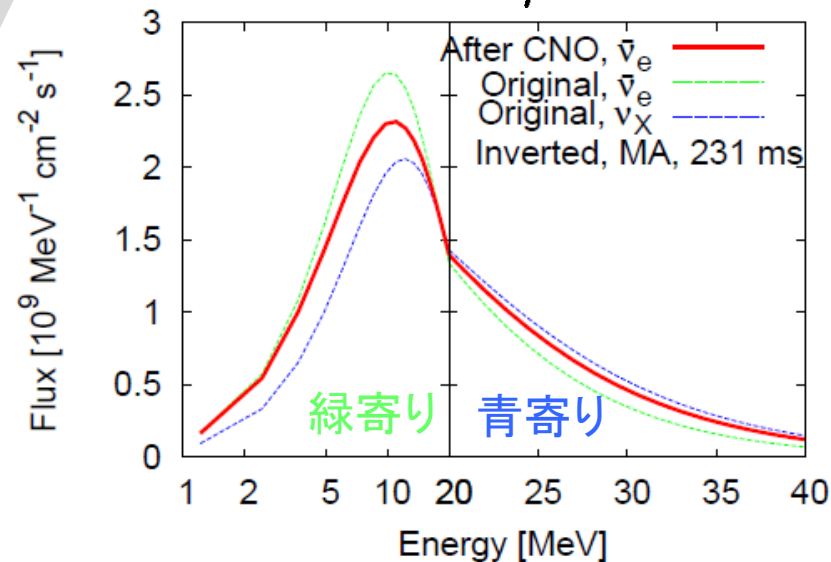
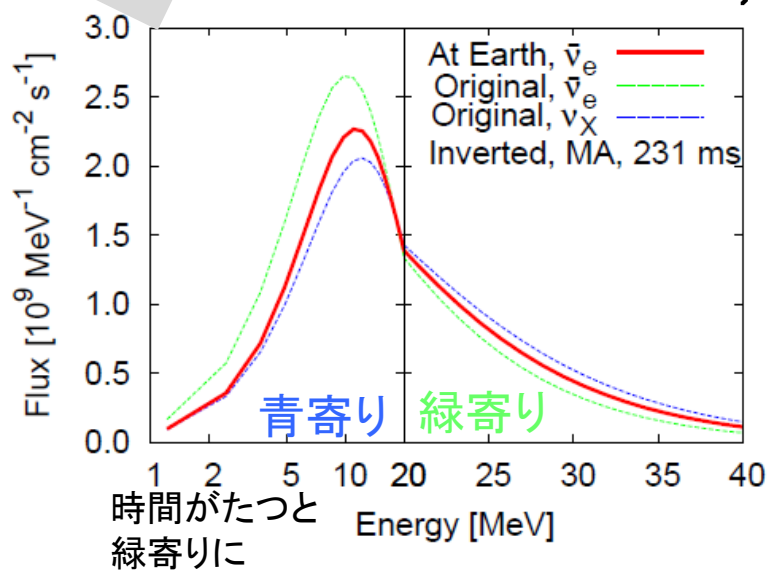
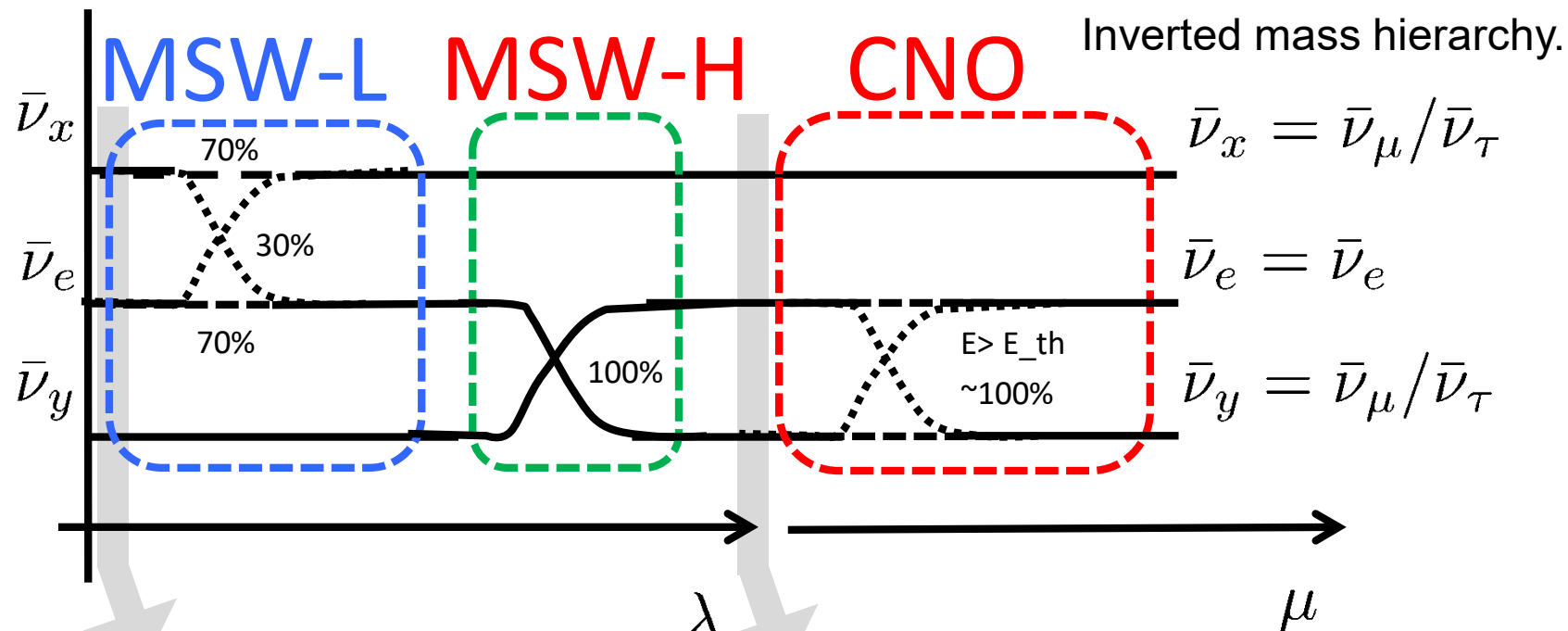
Multi-angle



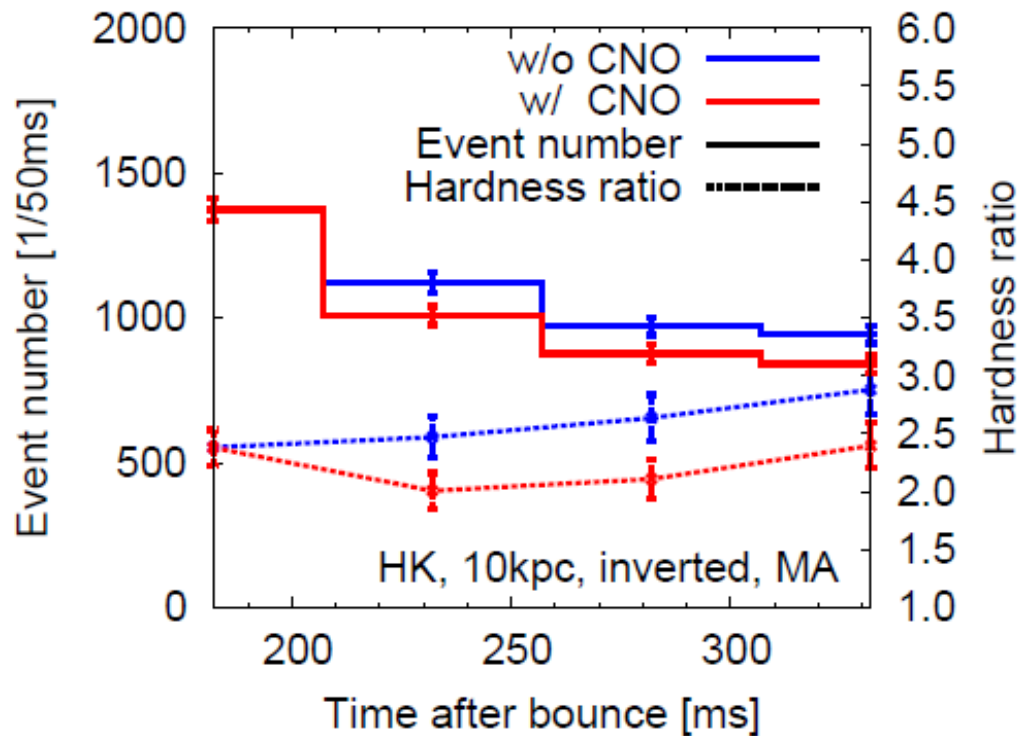
スペクトラムの推定時には
KamLANDとSKや
JUNOとHKが協力すると良
いかもかもしれない.

50ms binの観測数で
平均エネルギーが2MeV違
うのが区別できるとCNOに
よるスペクトラムの変化が
直に分かる.

地球でのニュートリノスペクトル



HKでの観測とHardness ratio



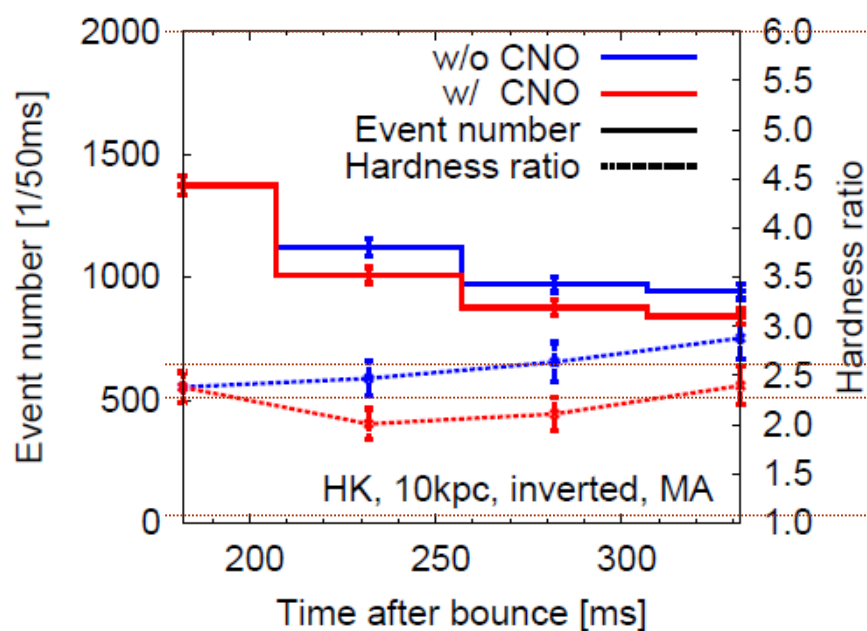
Hardness Ratio

$$R_{H/L} = \frac{N_{20 < E}}{N_{E < 20}}$$

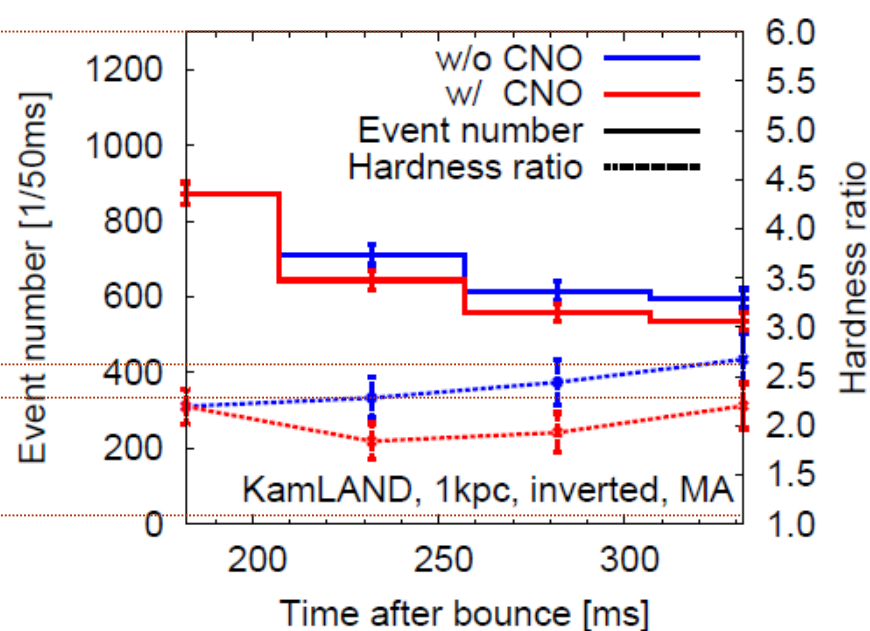
20MeV以上の観測数と
20MeV以下の観測数の比.
(スペクトラムが分かる検出
器ならではの指標)

- CNOがないときはMSW-Hだけ効くので、オリジナルのXタイプのスペクトラムになる.
- CNOがあるとそこにオリジナルの反電子タイプが混ざるのでスペクトラムがソフトになる(hardnessが下がる).

KamLANDでの観測



HK (220kton), 10kpc

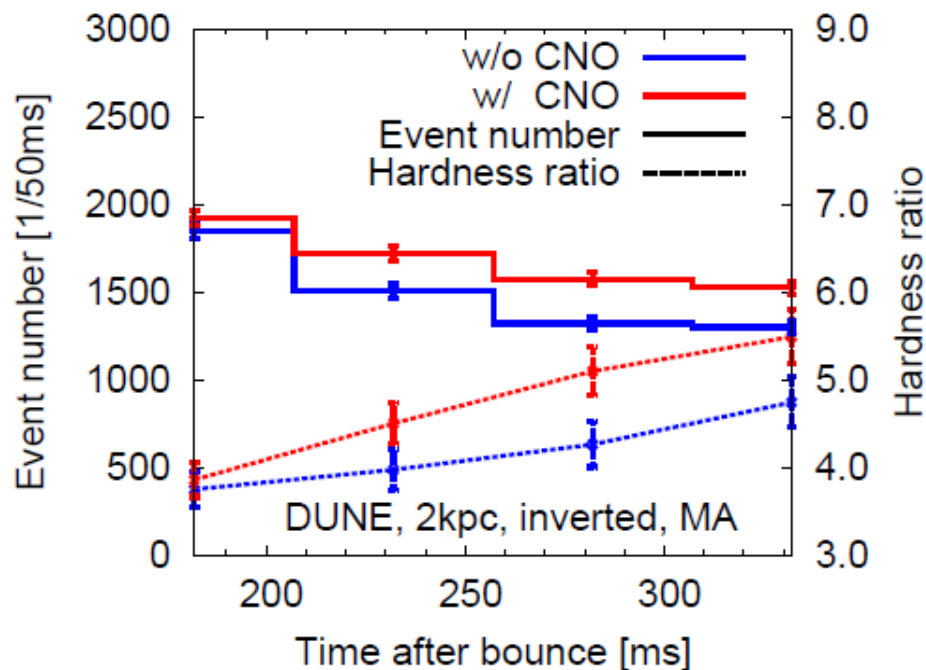


KamLAND, 1kpc

超新星が1kpc以内で起こればKamLANDでも区別できる。
Hardness ratioの値そのものはHKよりやや小さくなる。
これはenergy thresholdの違い。

今回は7MeV(HK), 1.5MeV(KamLAND)と設定してある。

DUNEでの観測

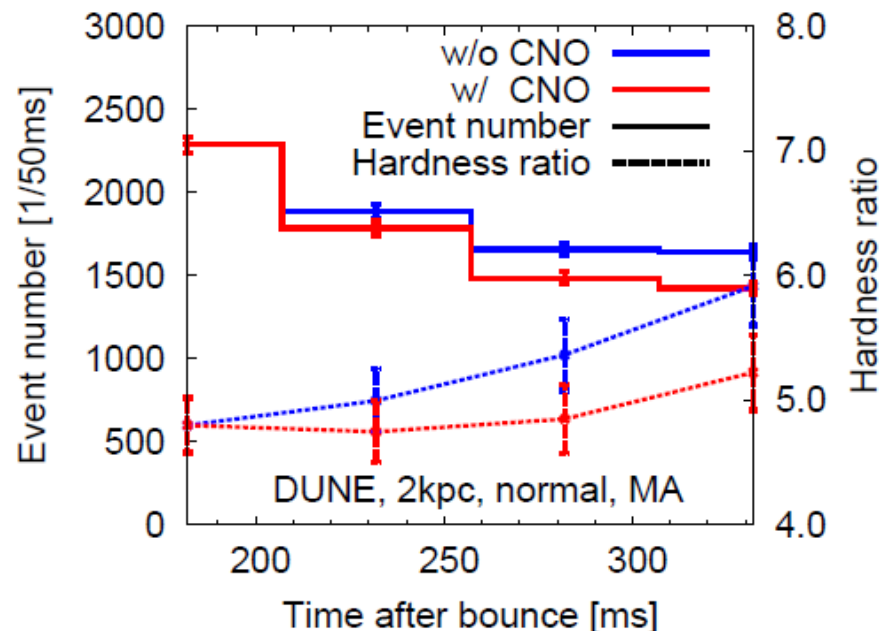
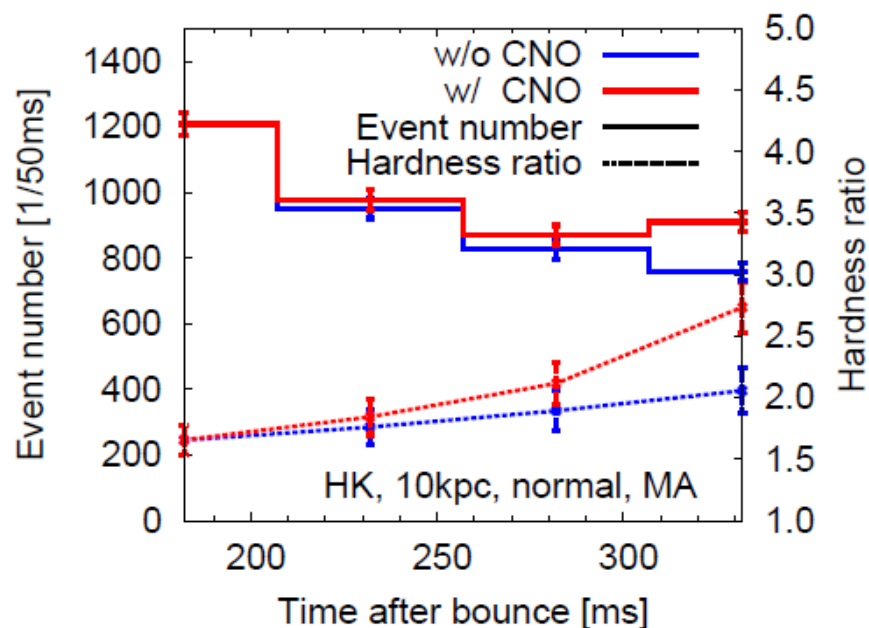


反電子 ν と同じような時期に電子 ν にもCNOが起きている.

w/o CNOでは電子 ν はMSW-Lで30%混じっている.

w/ CNOでは電子 ν の割合がより低くなり, スペクトラムがハードになる.

Normal Hierarchyのときは？



Normal hierarchyの時、反電子 ν はMSW-Lでオリジナルの反電子 ν (の70%)が観測される。CNOがあるときにはXと混ざってハードになる。電子 ν はCNOがないときはMSW-Hの効果でXに変換。CNOがあるときにはMSW-Hの効果打ち消す方向でオリジナルスペクトラムが残るため、ソフトになる。

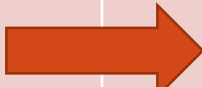
シナリオまとめ

Hierarchy	Inverted	Inverted	Normal	Normal
CNO	Off	On	Off	On
$\bar{\nu}_e$	H MSW-H(0)	S CNO, MSW=H MSW-L(0.7)	S MSW-L(0.7)	H CNO(0)
ν_e	S MSW-L(0.3)	H CNO(≈ 0)	H MSW-H(0)	S CNO, MSW=H MSW-L(0.3)

S: Soft, 元のスペクトラムがいくらか残っている.

H: Hard, 元のスペクトラムがあまり残っていない

CNOの効果を見やすいケースは？

Hierarchy	Inverted	Inverted	Normal	Normal
CNO	Off	On	Off	On
$\bar{\nu}_e$	H MSW-H(0)	 S CNO, MSW=H MSW-L(0.7)	S MSW-L(0.7)	H CNO(0)
ν_e	S MSW-L(0.3)	H CNO(≈ 0)	H MSW-H(0)	 S CNO, MSW=H MSW-L(0.3)

500ms以前ではややハードに時間変化していく.

元がハードでCNOが起きたらソフトになるパターンが
観測的に見つけやすいのではないかな？

まとめ

- 主にaccretion phase($<1\text{s}$)でのCNOの徴候の観測可能性について調べた.
- 多くの親星では密度が高すぎてMulti-angleの近似の下, そもそもCNOが起きなかった.
- 電子捕獲型の超新星爆発では外層が薄く, CNOが起きた.
- Inverted mass hierarchyの場合, 10kpc 以内で起きた超新星をHKで見ればスペクトラムがソフトに変化するCNOの徴候がつかめる. Normal hierarchyでは自然にスペクトルがハードになる傾向と区別が難しいかもしれない.
- Normal mass hierarchyでは 2kpc 以内で起きた超新星をDUNEで観測すればやはりスペクトラムがソフトになる徴候を得る. InvertedではCNOによりスペクトラムがハードになる