

Failed Supernovaにおける ニュートリノ集団振動とその観測性

Phys. Rev. D **98**, 103028 (2018)

arXiv:1811.03320

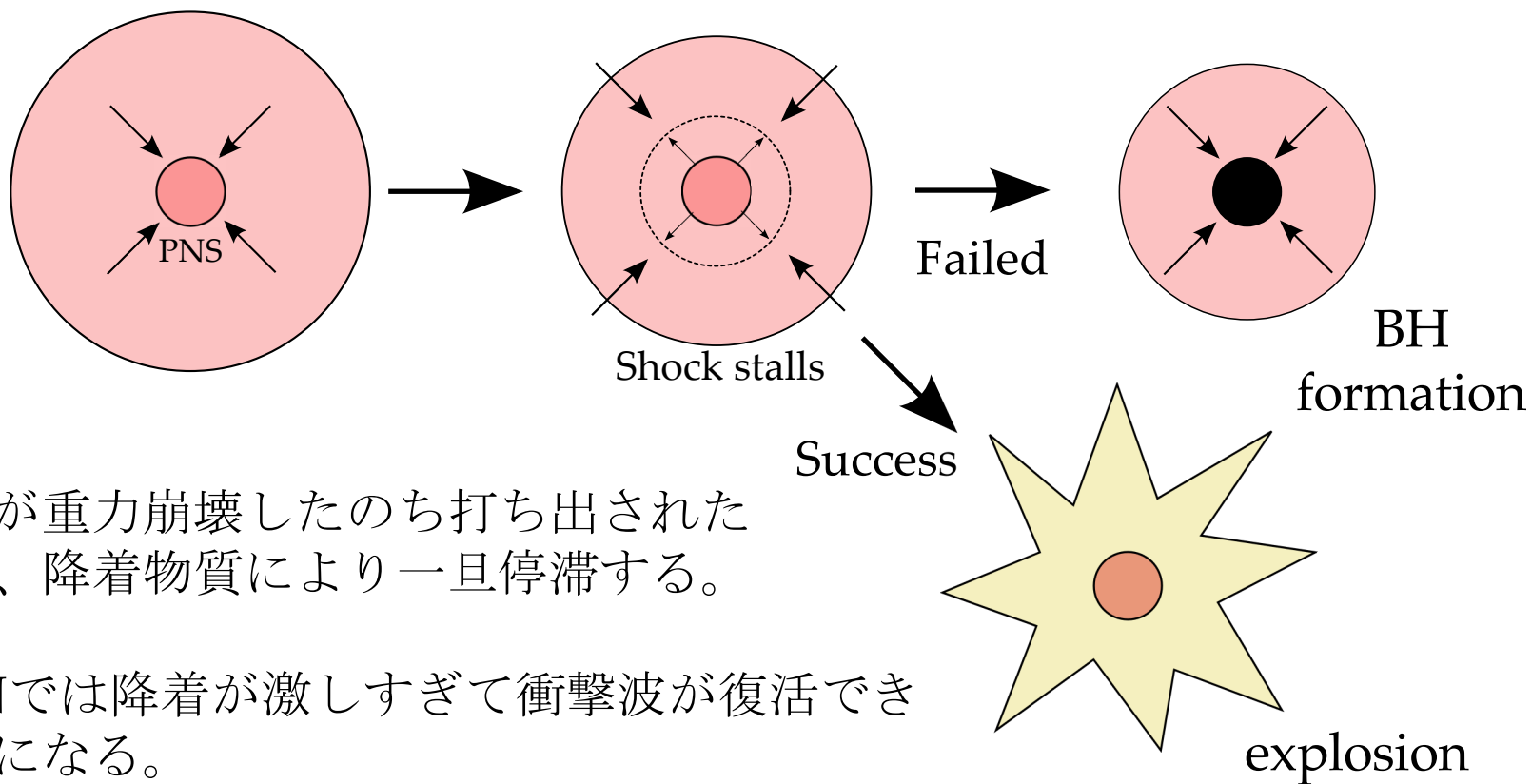
財前 真理 (東大 天文 M2)

吉田 敬¹, 住吉 光介², 梅田 秀之¹

1:東大天文, 2:沼津高専

第5回超新星ニュートリノ研究会@NAOJ, 2018/1/7-8

Failed Supernovaとは



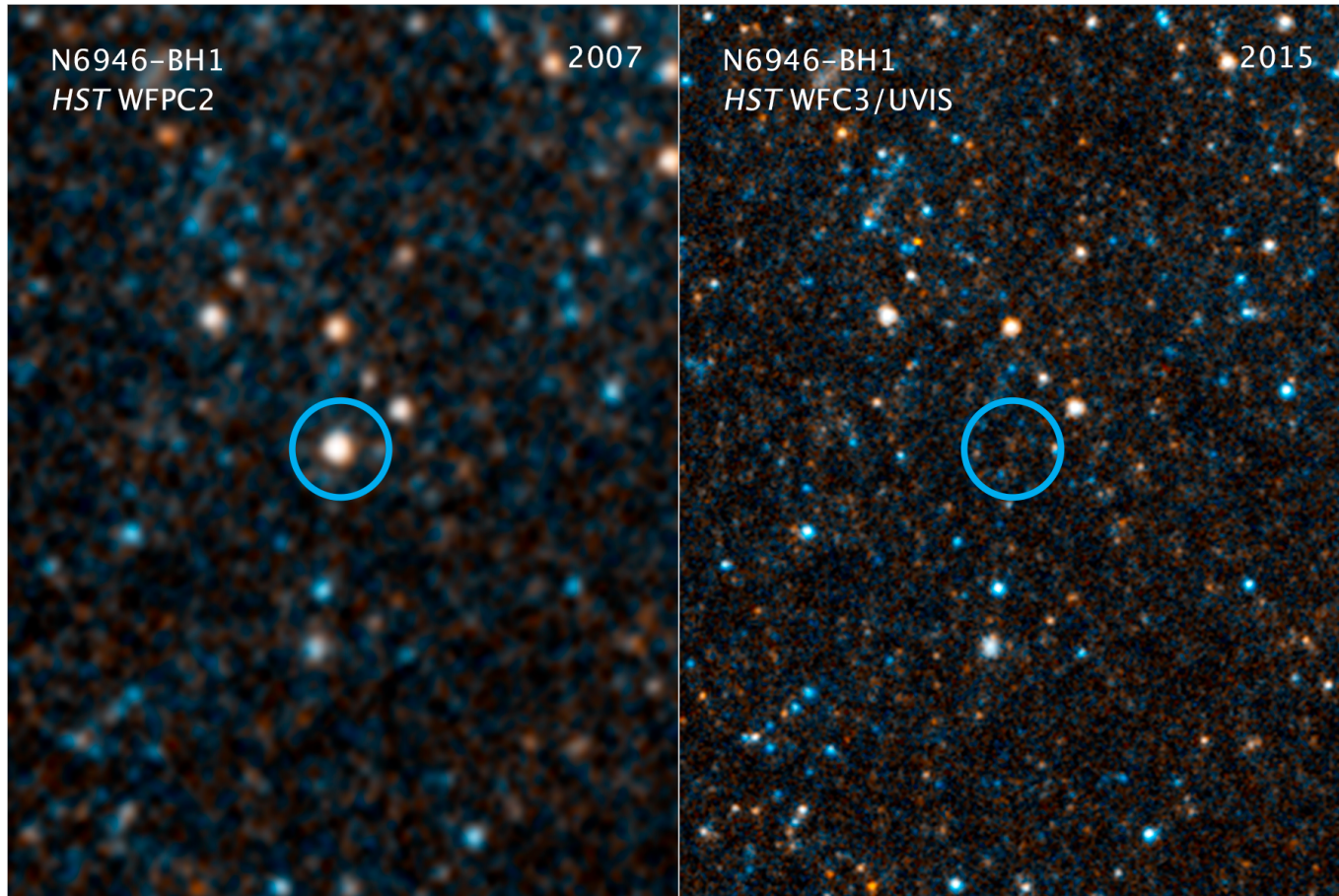
大質量星が重力崩壊したのち打ち出された衝撃波は、降着物質により一旦停滞する。

Failed SNでは降着が激しすぎて衝撃波が復活できないままになる。

そしてそのまま中心にできていた原始中性子星 (PNS) がブラックホール (BH) へと潰れてしまう。

このシナリオで恒星質量ブラックホールの存在を説明できると考えられている。

Failed SNの観測候補？



N6946-BH1

(c) NASA

25M_☉, Red super giant, 6Mpc, Cygnus & Cepheus

LBTによる 7 年のサーベイで、 1 つのfailed SNの候補が見つかった。

Gerke+ 2015, Adams+ 2017

Failed SNとニュートリノ

- ショックブレイクアウトに至らないため電磁波では暗いが、ニュートリノはそれより前の状況で出るため明るく輝く。
- PNSへ質量降着が止まらないので、温度と密度が上昇し続ける。
- それにより通常の超新星爆発よりも高いエネルギーのニュートリノが大量に放出される。
- このニュートリノがfailed SNから情報を引き抜く手段。
- BH形成前の状態方程式 (EOS) を得る手がかりとなる。
 - スペクトルがどれくらい硬いのか、柔らかいのか。
- しかし、超新星内部でニュートリノ振動が起きてスペクトルが混合されるため初期スペクトルそのものを観測することはできない。
- 内部でどういう効果が起きていたか調べなければ、正しい情報までたどり着けない。

ニュートリノ振動 in SNe

- 真空振動 (Vacuum)

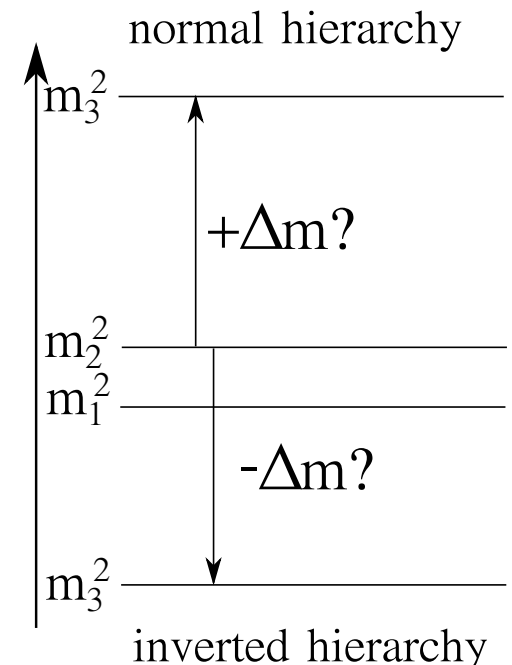
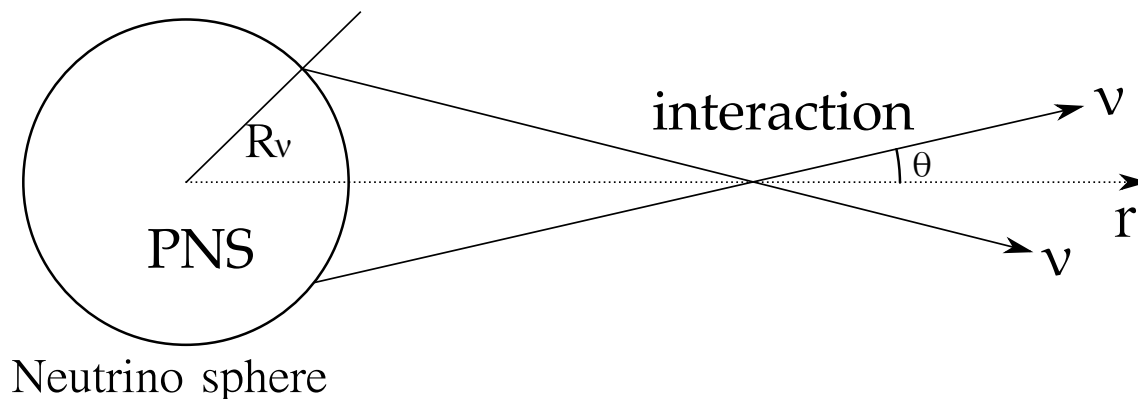
- 質量差により生じる一番基本的な振動。その質量の順番がまだはっきりしておらず、順階層・逆階層のどちらかの質量階層性がまだ不明。

- 物質振動 (MSW)

- 背景電子からポテンシャルを受けて有効質量が変わる。
- 質量階層によって振動効果が変わる。

- 集団振動 (Collective)

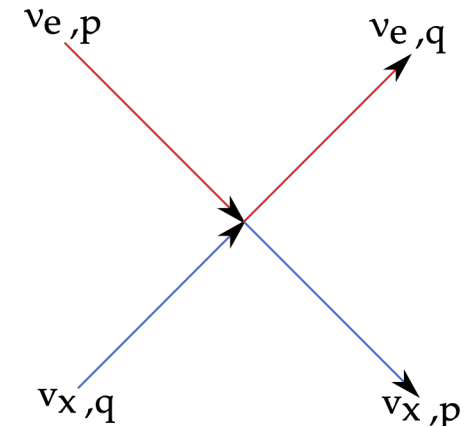
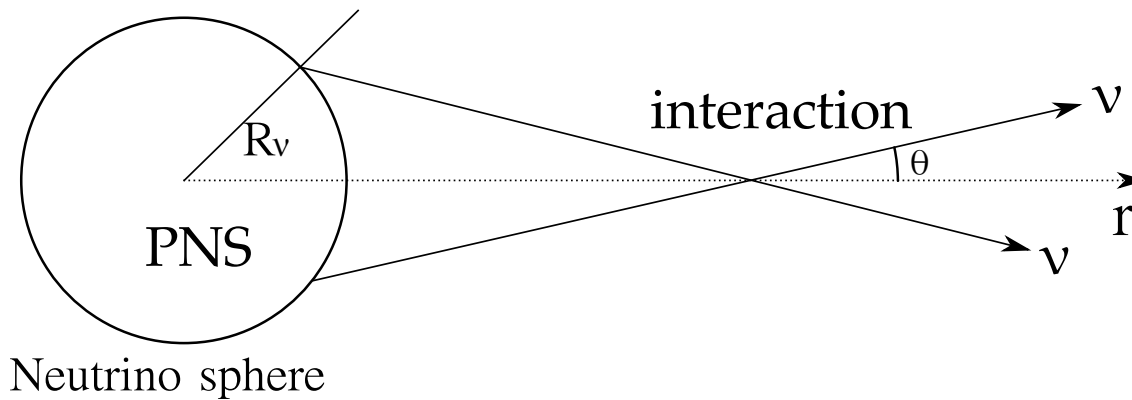
- ニュートリノ同士の相互作用により起きる振動効果。
- これが非線型の複雑な振動効果を与える。
- 質量階層性が大きく影響を与える。



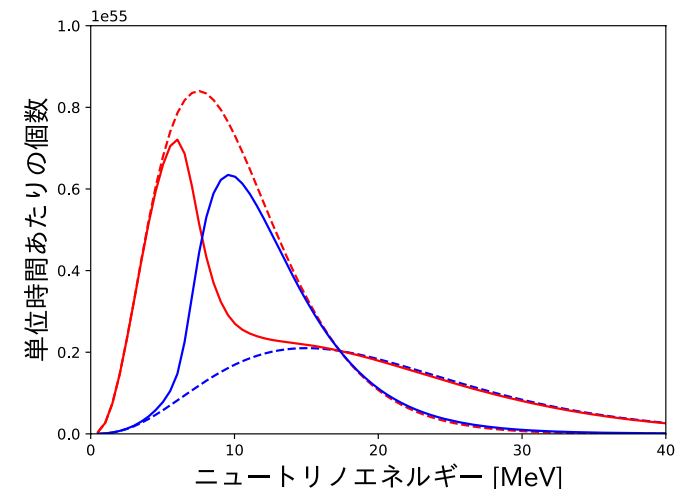
集団振動

- 集団振動 (Collective oscillation)

- ニュートリノ同士の相互作用により起きる非線型な振動効果。
- 超新星内部においてこの効果が重要になる。
- 逆階層性において振動が生じやすい (不安定性が成長しやすい)



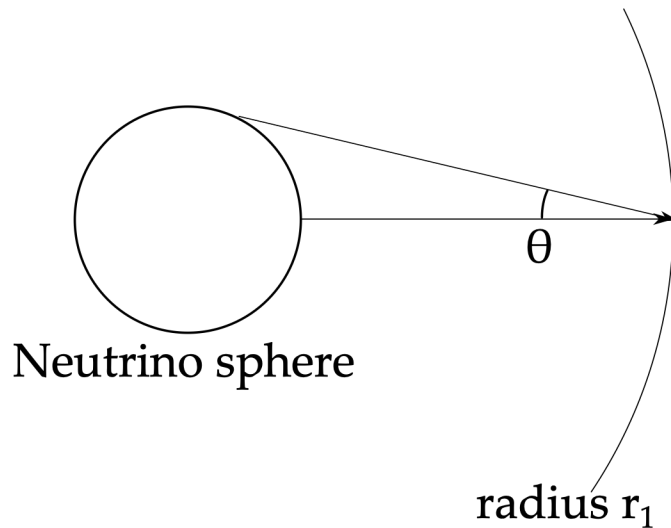
右図のように、スペクトルがスプリットする
ような効果を生み出す。
これが観測スペクトルをより複雑にしてしま
う。



Matter effect vs. self-interaction

- 集団振動 (Collective oscillation)

- ニュートリノ同士の相互作用により起きる非線型な振動効果。
- 超新星内部においてこの効果が重要になる。
- ただし中心付近には高密度電子が存在する。



$$H_{\text{tot}} = \frac{H_{\text{vac}} + H_{\text{MSW}}}{\cos \theta} + H_{\nu\nu}$$

ニュートリノ球からある半径 r_1 まで飛来してくるニュートリノの軌跡を考える。
動径方向に飛ぶ場合に比べて、角度がつくほど飛来距離が伸びる。

これにより周囲の電子から受けるポテンシャルが実質的に増えることになる。
これによりニュートリノ間の位相がずれていく。

集団振動 vs. 物質振動を考えると、
物質振動と集団振動が同程度ないし物質振動の方が強いと位相のずれが無視できなくなり、これにより集団振動が抑制されてしまう。

(Multi-angle matter suppression)

(Esteban-Pretel+ 2008, Chakraborty+ 2011)

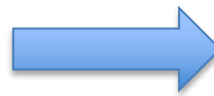
Matter effect vs. self-interaction

- 集団振動 (Collective oscillation)

- ニュートリノ同士の相互作用により起きる非線型な振動効果。
- 超新星内部においてこの効果が重要になる。
- 物質振動との兼ね合いが重要に。

これまで実際に数値計算で行われてきたもの。
ただ多くの近似がなされている。

Single-angle scheme
Multi-angle scheme



対称性を破る不安定性が最近線型解析により見つかりつつある。Hot topic.
ただ数値計算はまだ厳しい。

Multi-Azimuthal-angle instability
Temporal instability
Fast flavor conversion

(Sigl+ 1993, Duan+ 2006, Dasgupta+ 2008)

(Raffelt+ 2013, Dasgupta+ 2015, Sawyer 2016)

これらの新しい不安定性は非常に成長しやすく、超新星のより内側の領域においてmatter suppressionを上回る可能性が示唆されている。(low massならaccretion phaseでも)
思ったよりも複雑な事情になりつつある。

今回はこのうち、Multi-Azimuthal-angle (MAA) instabilityについて考える。

集団振動－質量階層性

集団振動は、質量階層性によってふるまいが大きく変わる。

逆階層性

Bimodal Instability

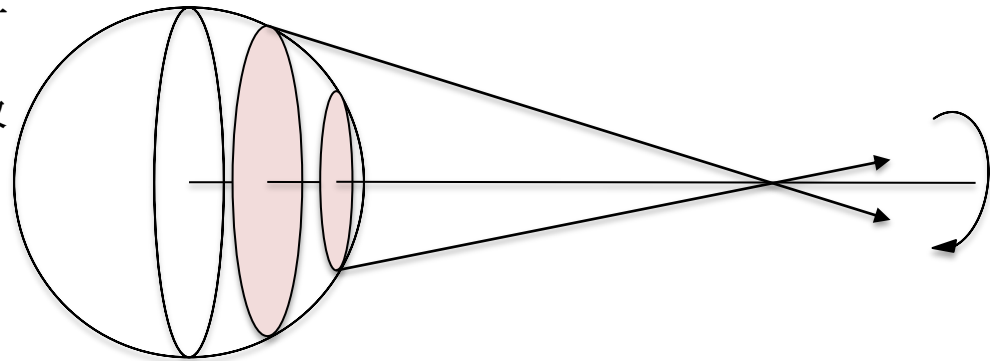
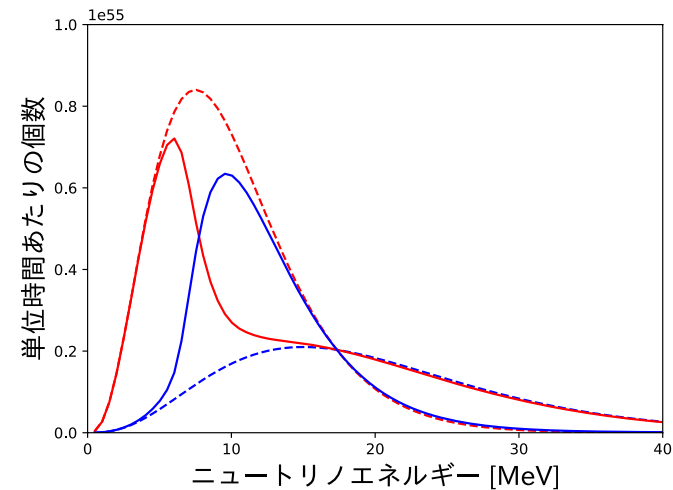
これが今まで集団振動として認識していたもの。

右図のようなスペクトルスプリットを引き起こす。

逆階層性ではMAA instability が効いてこない。

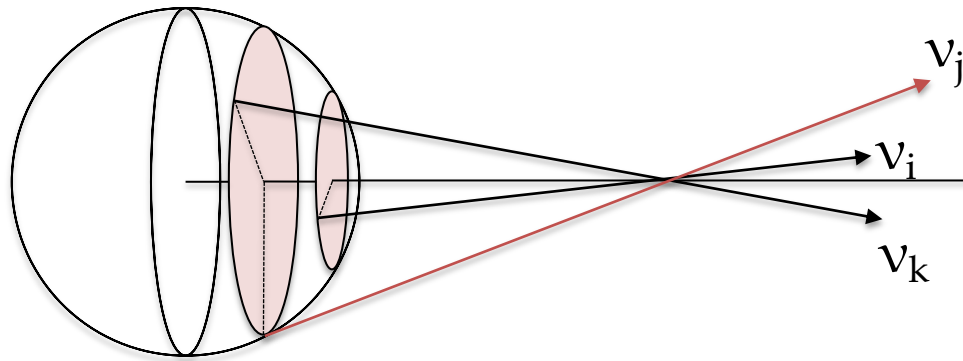
それにより数値計算において軸対称性を許す。

これにより計算時間が現実的になり扱いやすくなる。



集団振動－質量階層性

集団振動は、質量階層性によってふるまいが大きく変わる。



Neutrino sphere

$$H_{\nu\nu,i} = \sqrt{2}G_F \int d\Gamma' (1 - \cos \theta_{ik}) (\rho'_{\nu_k} - \bar{\rho}'_{\nu_k})$$

$$\cos \theta_{ik} = \cos \theta_i \cos \theta_k + \sin \theta_i \sin \theta_k \cos(\varphi_i - \varphi_k)$$

これが軸対称性を破る
 $\mathbf{v_i-v_k}$ と $\mathbf{v_i-v_j}$ の間の角度は違う。

順階層性

Bimodal Instability

順階層性では不安定性が成長しにくく、振動効果が現れにくい。



**Multi-Azimuthal-Angle Instability
(MAA Instability)**

最近発見された効果で、順階層性においてのみ不安定性が成長する。
 Φ 方向の軸対称性を破る不安定性が生じる。

Bimodal よりも強い振動効果を示す。

(Raffelt+ 2013, Chakraborty+ 2014)

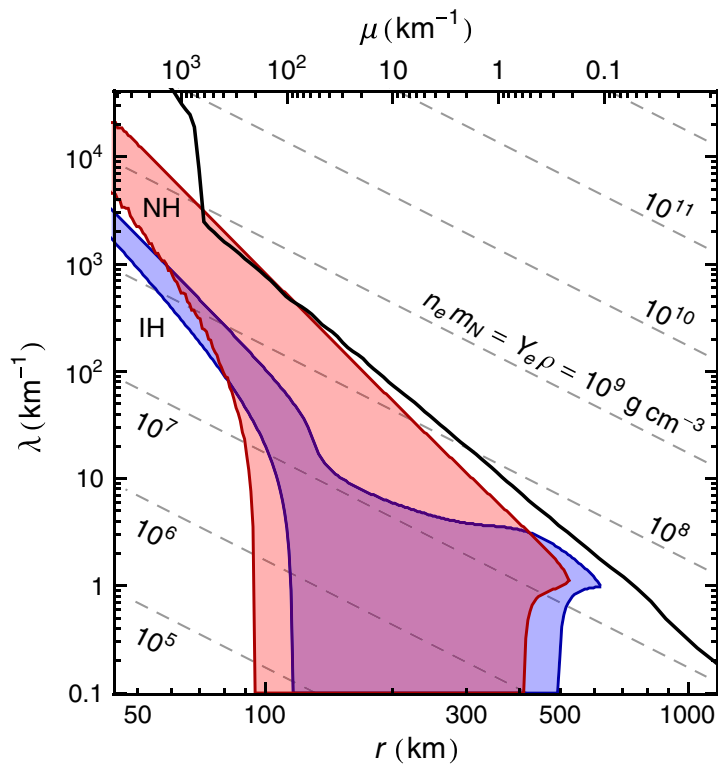
MAA instability

線型解析により存在が判明。

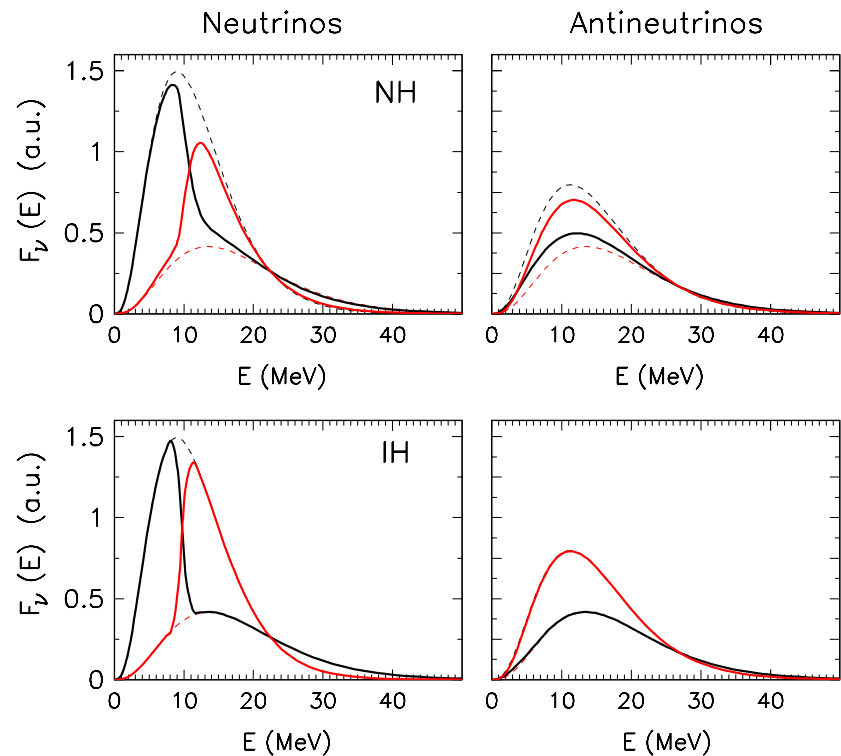
逆階層性でのBimodalよりもこの順階層性でのMAAの方が不安定性が成長しやすい。

特に内側においてその効果が顕著に表れている。

→ 高密度な内側でも十分な振動効果が見られる？



(Raffelt+ 2013)



(Chakraborty+ 2014)

集団振動－質量階層性

2種類の質量階層性でどう計算するか？

逆階層性

Bimodal Instability

軸対称性を課したまま計算してよい。

運動量空間の Φ 成分の解像度を切る必要がないため、数値計算が現実的に可能。1-2週間程度で計算できる。

$$N_{\text{dof}} \times N_E \times N_\theta = O(10^{6-7})$$



直接、数値計算を行う

順階層性

Multi-Azimuthal-Angle Instability
(MAA Instability)

軸対称性を外す必要あり。

運動量空間の Φ 成分の解像度を $O(10^{2-3})$ で追加用意する必要がある。

$$N_{\text{dof}} \times N_E \times N_\theta \times N_\Phi = O(10^9)$$

10億本の連立微分積分方程式は厳しい。



不安定性の線型解析により評価する

集団振動－質量階層性

逆階層性での数値計算

$$i\mathbf{v} \cdot \nabla \rho_\nu = [H_{\text{vac}} + H_{\text{MSW}} + H_{\nu\nu}, \rho_\nu]$$

$$H_{\nu\nu} = \sqrt{2}G_F \int d\Gamma' (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}') (\rho'_\nu - \bar{\rho}'_\nu)$$

3種類の振動効果を加えて密度行列の進化計算を行なって**survival probability**の動径進化を追う。このとき**multi-angle term** $(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}')$ に軸対称性を課すことができる。

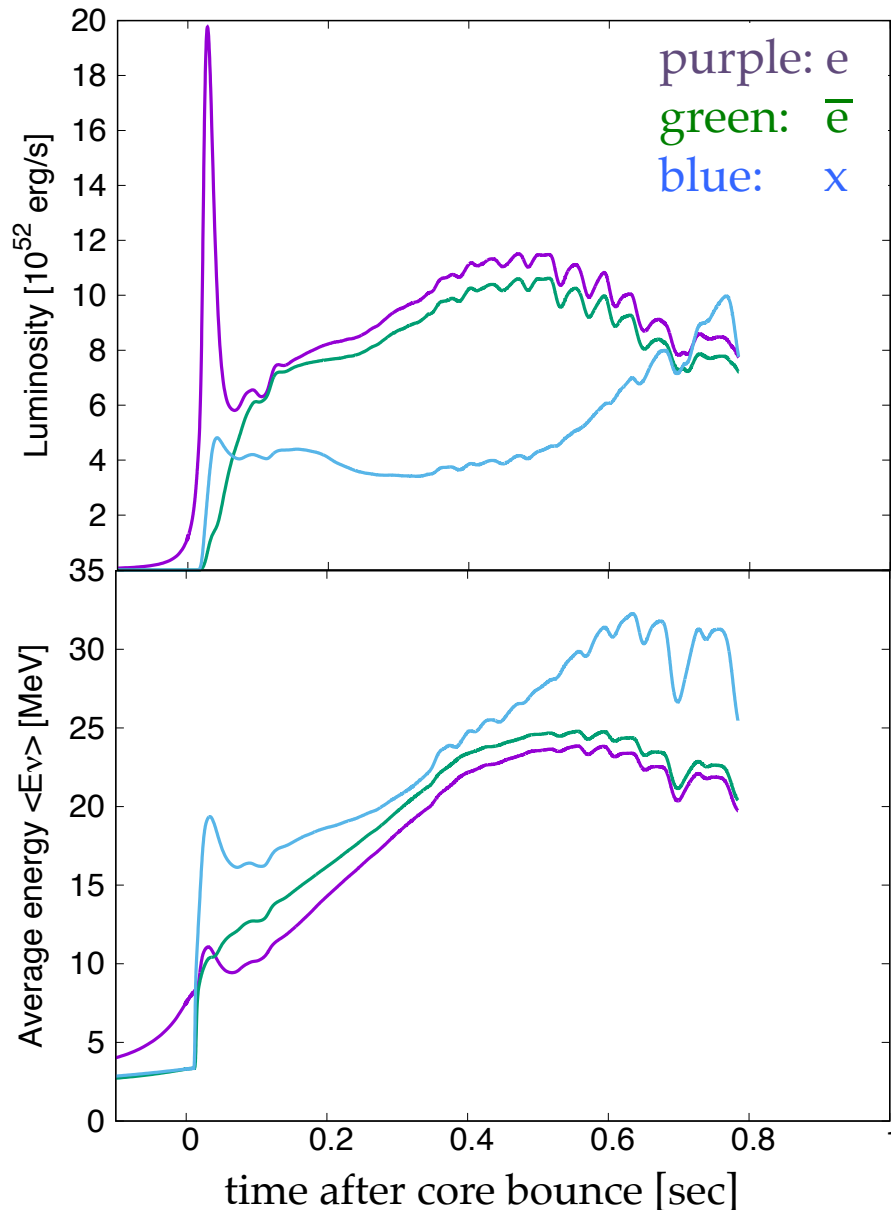
順階層性での線型解析

$$\rho_\nu = \frac{\text{Tr}(\rho)}{2} + \frac{\Phi_{\nu_e} - \Phi_{\nu_x}}{2} g \begin{pmatrix} 1 & S \\ S^* & -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} & i(v_r \partial_r + \mathbf{v}_T \cdot \nabla_T) S \\ &= \left[\omega + \lambda + \mu \int d\Gamma' (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}') g' \right] S - \mu \int d\Gamma' (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}') g' S' \end{aligned}$$

密度行列の非対角項 S が大きくなるとフレーバー変換が生じる。特にここでは動径方向の成長率を発展計算させるで振動が抑制されるかどうか評価する。

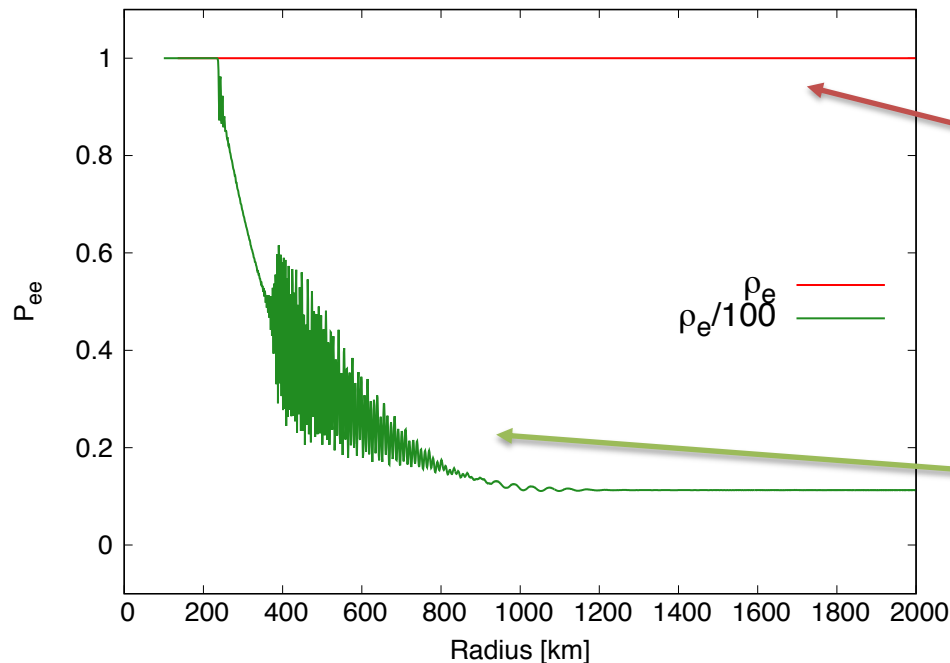
使用したモデル



- 住吉さん(沼津高専)の計算モデル
- $40M_{\odot}$ 、EoS:LS220、1D model
 - Sumiyoshi et al. 2007, 2008
- 上図がニュートリノルミのシティの時間進化。
- 下図が平均エネルギー。
- 時間進化に伴って上昇していつているのがfailed SNeの特徴。
- ~ 800 ms でBHが形成される。
- ニュートリノ密度と電子密度の両方が高い環境で集団振動と物質振動がどう影響を及ぼすか？
- 平均エネルギーがピークとなる600 ms における計算を代表にこの先示す。

計算結果 – 逆階層性

600 ms における10 MeVの電子ニュートリノの生存確率（数値計算）



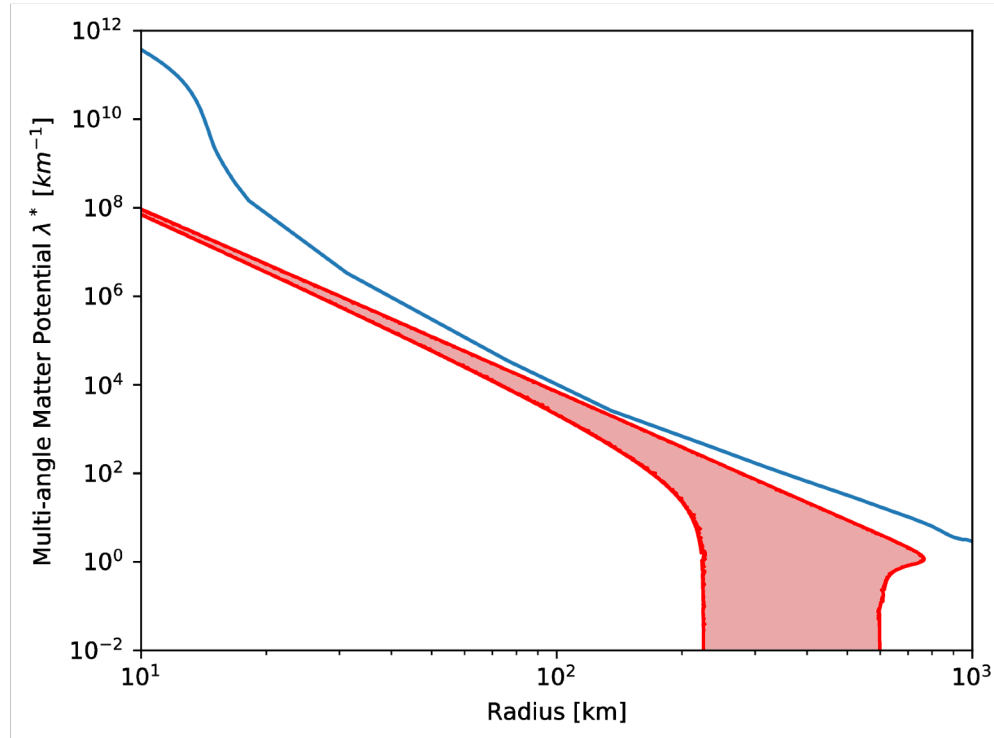
通常密度の計算。
完全に抑制されて振動していない。

密度1/100の計算。
通常密度と違い、電子ニュートリノの数が減少している。

電子密度が大きいと**集団振動を抑え込んでしまう**のがわかる。
この完全に抑制される様子は、600 ms だけでなく全ての時間帯で見られた。

計算結果－順階層性

600 ms でのMAA Instability の不安定領域（線型解析）



赤色の不安定領域と青色の密度分布が交差していれば、不安定性が成長し集団振動を起こす。

順階層性でも密度分布の高さ故に振動が成長しないと考えられる。

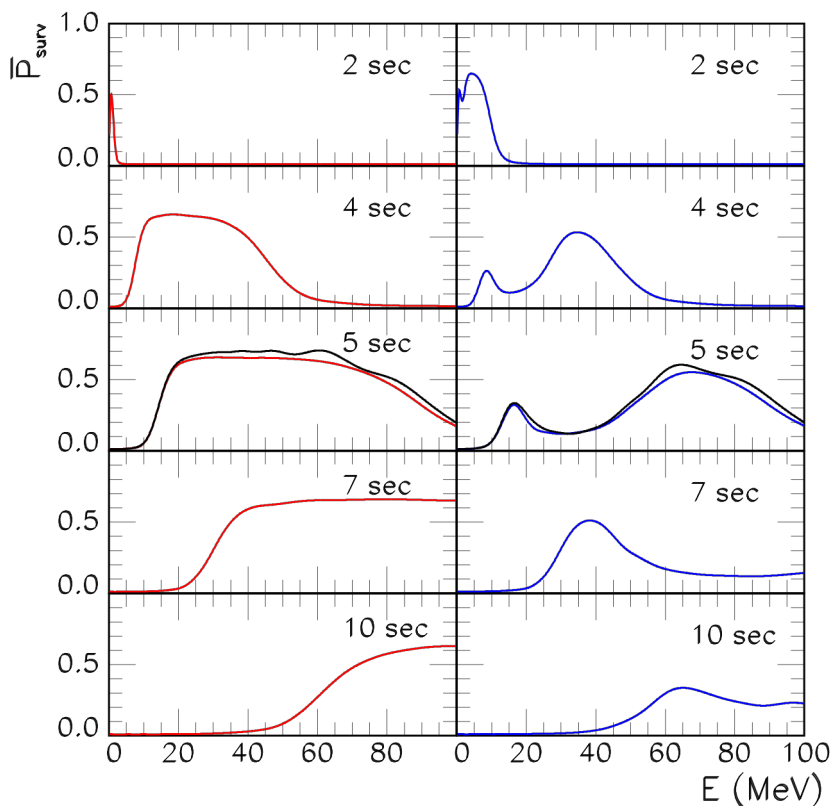
これも全時間帯で同じような結果が得られた。

観測的特徴

Failed SNではニュートリノの質量階層性によらず、
その高密度電子分布により集団振動が完全に抑制される。

残された真空振動・物質振動は線型効果なので、簡単に扱うことができる。

特に物質振動は更に外側でMSW resonance を引き起こす ($\rho \sim 10^3 \text{ g/cc}$)。



衝撃波がこのresonance を通過する場合、
左図のように伝播に応じてsurvival
probability が変化していく。

しかし、failed SNe では衝撃波も中心で押し
込まれてしまっているためこの衝撃波効果
は現れない。

→ シンプルに断熱的な効果を考慮するだけでよい。

(Tomas+ 2004)

観測的特徴

最終的に観測されるニュートリノスペクトルには、集団振動・衝撃波効果のような複雑な効果が現れない。

最もシンプルなMSW resonance によるスペクトル変換を考慮してやるだけでよいことになる。

ただしこれも質量階層性に依存する。

電子・反電子両方観測すればうち片方が非電子型の初期スペクトルそのものになっている。

逆階層性

観測量

スペクトル

$$\nu_e \longleftarrow \nu_e + \nu_{\mu/\tau}$$

$$\bar{\nu}_e \longleftarrow \bar{\nu}_{\mu/\tau}$$

順階層性

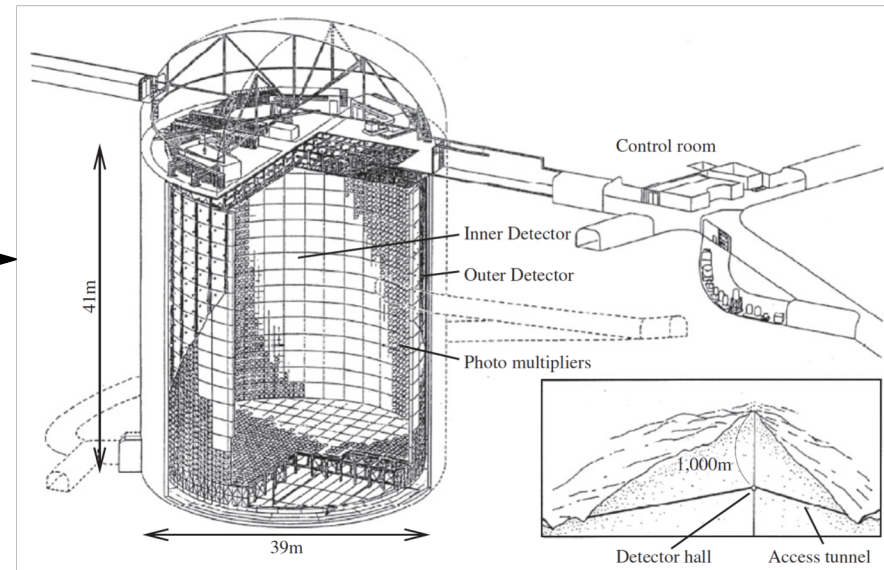
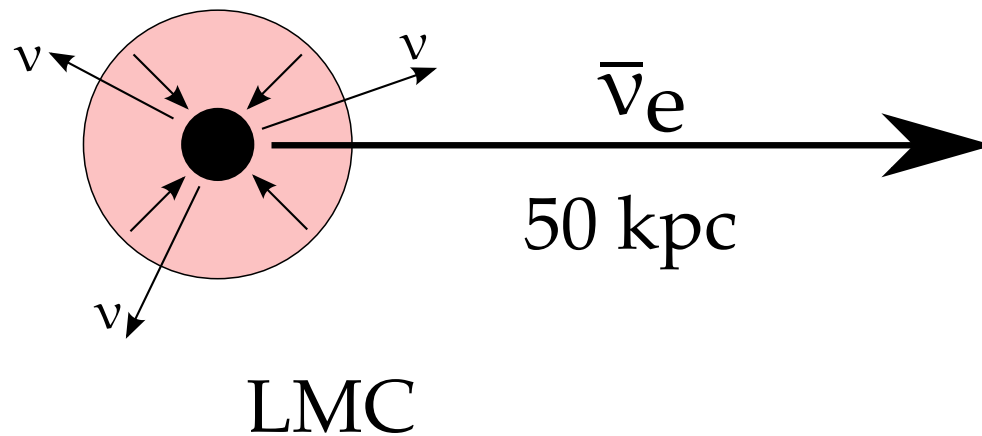
観測量

スペクトル

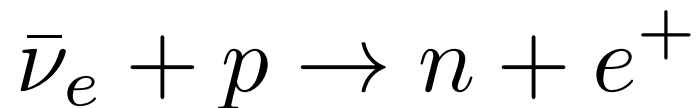
$$\nu_e \longleftarrow \nu_{\mu/\tau}$$

$$\bar{\nu}_e \longleftarrow \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_{\mu/\tau}$$

Super-Kamiokandeで観測見積もり



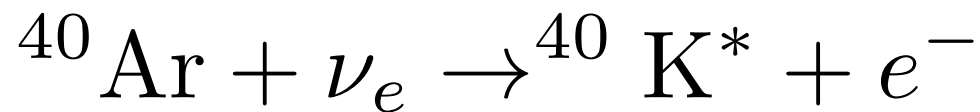
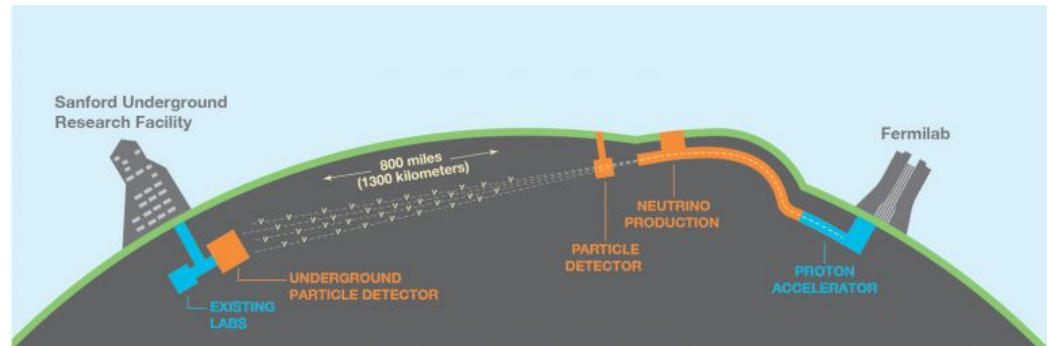
Abe et al. 2011



- SKは、反電子ニュートリノに強い感度をもつ。
- 50 kpc の距離（大マゼラン雲）にfailed SNが出現したとして、検出数を見積もる。

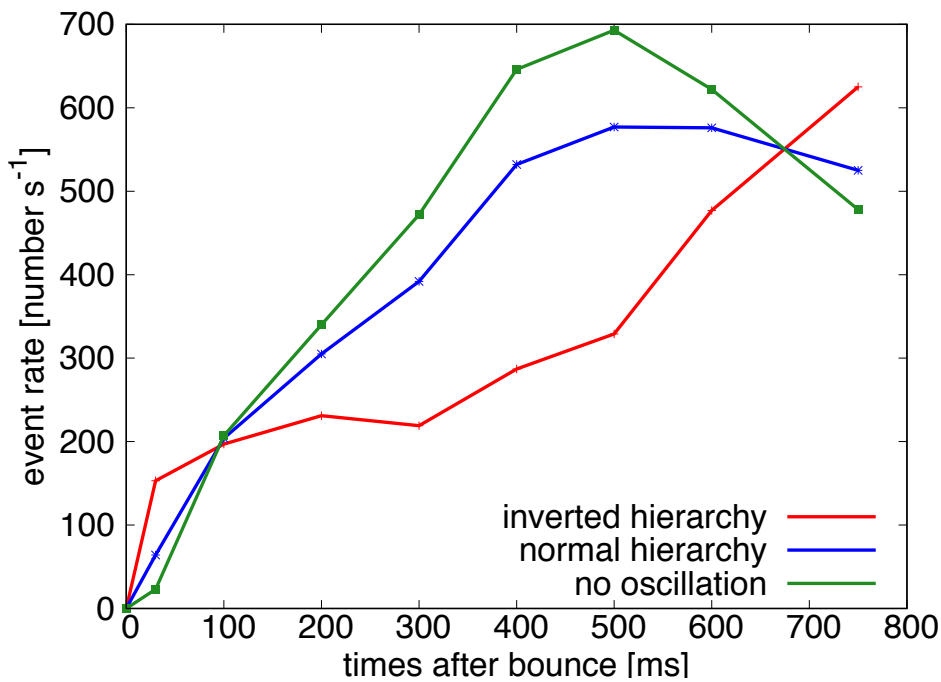
DUNEで観測見積もり

Deep Underground Neutrino Experiment

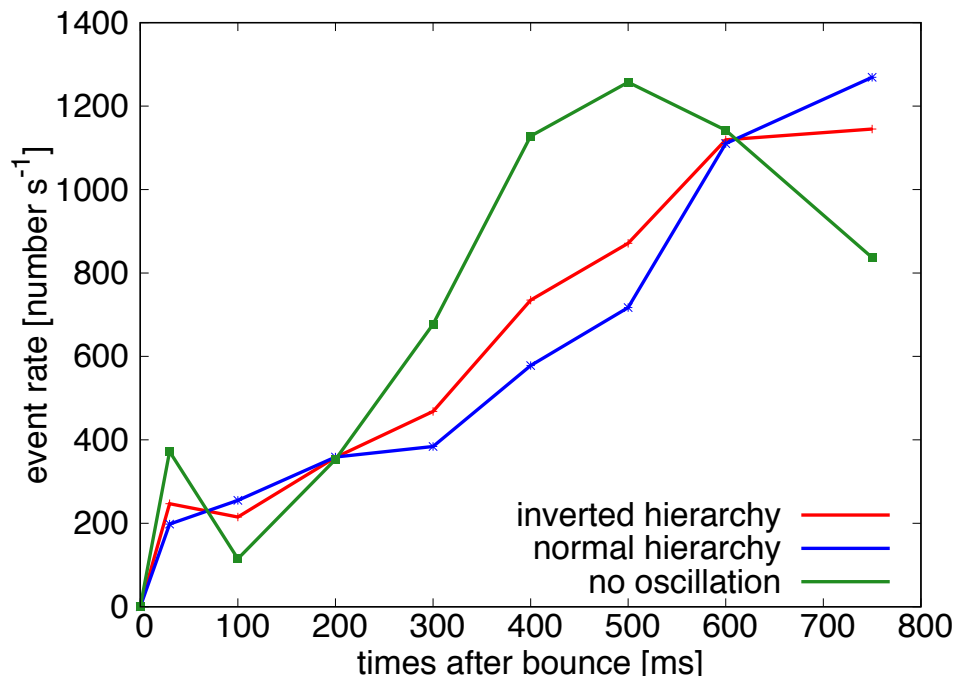


- 2028年にアメリカで完成予定の次世代検出器。
- SKとは違って、電子ニュートリノを検出できる。

Super-K and DUNE



Super-Kamiokande



DUNE

両方とも1秒もせずに、数百個ものニュートリノが検出される。
(SN1987Aでは、11個だった)

逆階層でのSK観測と、順階層でのDUNE観測が同じ振る舞いをしている。

物質振動による共鳴を受けたときに非電子型ニュートリノに
お互い入れ替わっている。

まとめ

- 1次元のfailed SN シミュレーションを用いてニュートリノ振動の計算を行った。
- バウンス後全ての時間帯において、集団振動が物質振動により完全に抑制される結果が得られた。
- これは異なる振動不安定性をもつ逆階層・順階層に依らない性質である。
- この結果は一般的なSNeと比べると特殊な環境下であり、観測において非常に扱いやすい。
- SKとDUNEを組み合わせることで、非電子型ニュートリノの初期スペクトルが得られる。
- 非電子型は熱的過程から生成されるので、EOSの情報に繋がることが期待できる。