

# 角度依存性を考慮した超新星ニュートリノの観測予測

谷貝 麻純 (東京理科大学大学院 理工学研究科 物理学専攻)

## Abstract

質量が  $8M_{\odot}$  より重い星はその一生の最期に重力崩壊型超新星爆発を起こすことが知られている。大まかな爆発メカニズムは分かっているが、詳細な物理を考慮した数値計算では観測に合うような爆発は再現できていない。爆発はコア内部で生じた衝撃波が星の外層に向かって伝播し、星を吹き飛ばすことで引き起こされる。しかし、原子核の光分解や電子捕獲により生じたニュートリノがエネルギーを持ち出してしまったため、衝撃波の勢いは一度弱まってしまふと考えられている。弱まってしまった衝撃波を復活させる要因としていくつかの効果が考えられており、それぞれ衝撃波が復活するまでのタイムスケールに違いがみられると思われる。そこで私の研究では、様々な親星が爆発した時のニュートリノのイベント数の観測予測をし、衝撃波復活の前後でイベントがどのように変化するかを議論した。その際、親星モデルは K.Nakazato et al が作成したものをを用い、超新星爆発は銀河中心で起こったと仮定した。検出器はスーパーカミオカンデを想定した。

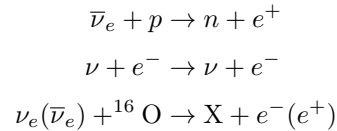
## 1 導入

質量が太陽より約 8 倍以上重い星は恒星進化の終わりに重力崩壊型超新星爆発をすることが知られている。爆発は鉄コアの内部で発生した衝撃波が外層に向かって伝播し、外層を吹き飛ばすことで起きる。超新星爆発が起こる際にはニュートリノが放出される。その過程として、中心に降着した物質が解放する重力エネルギーによるものと原子中性子星が冷却してゆく過程で生成するものがあげられる。しかし、大まかなメカニズムは分かっているが詳細な物理を考慮したシミュレーションでは観測に合うような結果がまだ得られていない。その問題の一つに、衝撃波が鉄コアを抜ける前に原子核の分解などにエネルギーを使い弱まってしまふことが知られている。一度弱まってしまった衝撃波をどのように復活させるのかについて様々な研究がされている。そのメカニズムとして、星の回転、磁場、ニュートリノ加熱、対流、衝撃波の不安定性などが考えられており、それぞれ衝撃波が復活するのにかかる固有のタイムスケールに違いが出るのが予想されている。そこで、本発表では衝撃波の復活前後でニュートリノイベントがどのように変化するかを議論し、将来の衝撃波復活時間の評価に向けた展望を述べる。

## 2 計算設定

超新星ニュートリノフラックスを用い、地球でのイベントを予測した。

超新星ニュートリノフラックスは K.Nakazato et al. が作成したものをを用いた。(1) これは、様々な親星モデルに対し超新星から放出されるニュートリノ数とルミノシティを与えているデータベースである。親星は質量  $M = 13M_{\odot}$ 、 $20M_{\odot}$ 、 $30M_{\odot}$ 、 $50M_{\odot}$ 、金属量  $Z = 0.02$ 、 $0.004$ 、衝撃波復活時間  $t_{rev} = 100$ 、 $200$ 、 $300$  ms の場合について考慮されている。超新星は銀河中心 (10 kpc) で起こったと仮定した。また、質量階層が Inverted hierarchy、Normal hierarchy の場合についてニュートリノ振動を考慮した。イベント数の算出において、検出器はスーパーカミオカンデ (SK) を想定した。SK 内の反応は

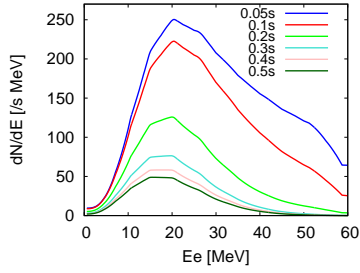


を考慮した。(2)、(3)、(4) 今回は  $M = 13M_{\odot}$ 、 $Z = 0.02$ 、 $t_{rev} = 100$  ms Inverted hierarchy の場合について結果を述べる。

## 3 結果

### 3.1 エネルギー分布

エネルギー分布は以下ようになった。これは衝撃波が発生した瞬間を  $t = 0$  s として、各エネルギーごとのイベント数の時間変化を表したものである。

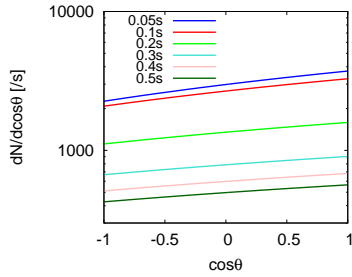


1: イベントのエネルギー分布の時間変化

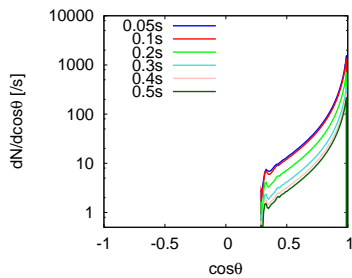
$t = 0.1 \sim t = 0.2$ s にかけて大きくイベントが減っているのが分かる。これは衝撃波が復活したことにより中心部分への質量降着が治まることで解放される重力エネルギーが減少したため、放出されるニュートリノが減少したことによるものだと考えられる。

### 3.2 角度分布

次にイベントの角度分布を示す。角度  $\theta$  は入射粒子に対する散乱粒子の散乱角度である。SK 内のそれぞれの反応毎の角度分布は以下ようになった。

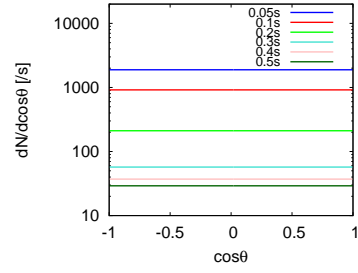


2: inverse beta decay

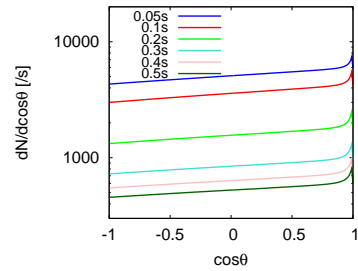


3: electron scattering

図(2~4)を見ると、inverse beta decay と oxygen は等方的であるのに対し electron scattering 図(3)は前方にイベントが集中していることが分かる。ここで、それぞれの反応毎に期待されるイベント数は inverse beta decay : 約 4000、electron scattering : 約 60、oxygen : 約 400 である。electron scattering はイベ



4: oxygen

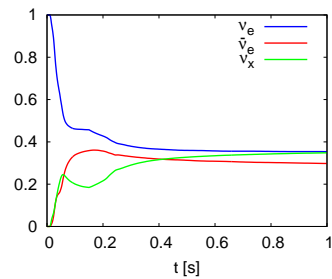


5: all reaction

ント数は少ないが、角度分布には electron scattering によるイベントがの前方集中した成分を見ることが出来る。全反応のイベントを重ねたものが図(5)である。グラフの等方成分は、inverse beta decay、oxygen に

よるものである。また、electron scattering による前方散乱が見えているのが分かる。

一方で  $t = 0.1 \sim t = 0.2$ s にかけて大きくイベントが減っているのが見られる。これはエネルギー分布で述べたのと同様に、衝撃波が復活したことにより中心部分への物質降着が治まったことによるものである。また、時間経過と共に前方散乱が見えにくくなっているが、これは全体のイベントに対し inverse beta decay のイベントの割合が増加するためである。



6: SN neutrino

図6は超新星から放出される各種のニュートリノが全ニュートリノに占める割合を表したものである。ここで、 $\nu_x$  は  $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  を平均化したものである。これを見ると、 $t \sim 0.1$ s 以降で  $\nu_x$  の割合が増加していることが分かる。これは、衝撃波復活前では  $\nu_e$ 、 $\bar{\nu}_e$

が多く放出されるのに対し、衝撃波復活後では原子中性子星の冷却により全種類のニュートリノが放出されるためである。

また、今は質量階層が Inverted hierarchy の場合のニュートリノ振動を考えているので、超新星から出てきた  $\nu_x$  はニュートリノ振動を起こし  $\nu_e$  になって地球に届く。 $\nu_e$  は inverse beta decay の反応を主に起こすので、全イベント数に対する inverse beta decay のイベント数は増加していくことになる。inverse beta decay の角度分布は等方的であるので、全体に対する等方成分が増加するため電子散乱による前方集中の成分は埋もれて見えにくくなる。

また、 $t = 0.05 \sim 0.1$  s にかけて等方成分も前方に傾いているが、これはエネルギーの高いニュートリノがでてくることで inverse beta decay のイベントが前方に傾くためである。

## 4 まとめ

衝撃波の復活前後でイベントのエネルギー分布、角度分布について変化を見ることができた。これらを基に、衝撃波の復活時間を評価できる可能性があると思われる。今回は一つの親星モデルに対して結果を報告したが、他のモデルに対しても同様な結果が得られた。今後の展望としては、統計的誤差も含めて衝撃波の復活時間の評価ができるかについて研究を進めていきたいと考えている。

## Reference

- [1] K.Nakazato et al. APJS 205 2 (2013)
- [2] P.Vogel and J.F.Beacom Phys. Rev. D 60, 053003 (1999)
- [3] S.Ando and K.Sato Progress of Theoretical Physics 107. 5 (2002)
- [4] E.Kolbe and K.Langanke and P.Vogel Phys. Rev. D 66, 013007 (2002)