

スーパーカミオカンデにおける 超新星爆発 ニュートリノ検出 と超新星モデルの検証

素粒子物理学研究室

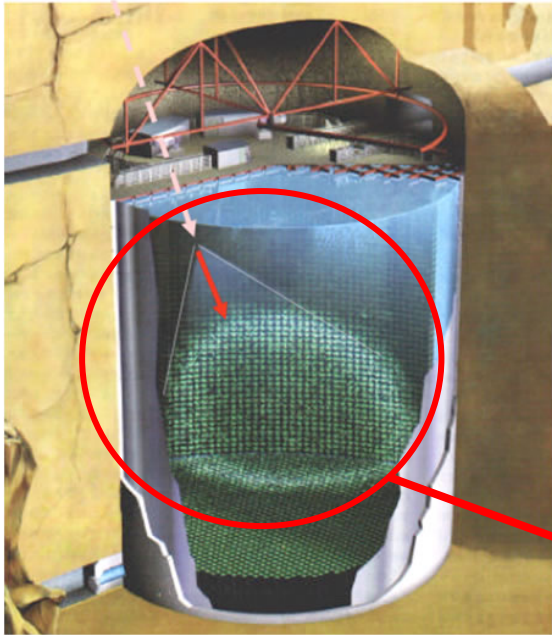
41429216

高平康史

目次

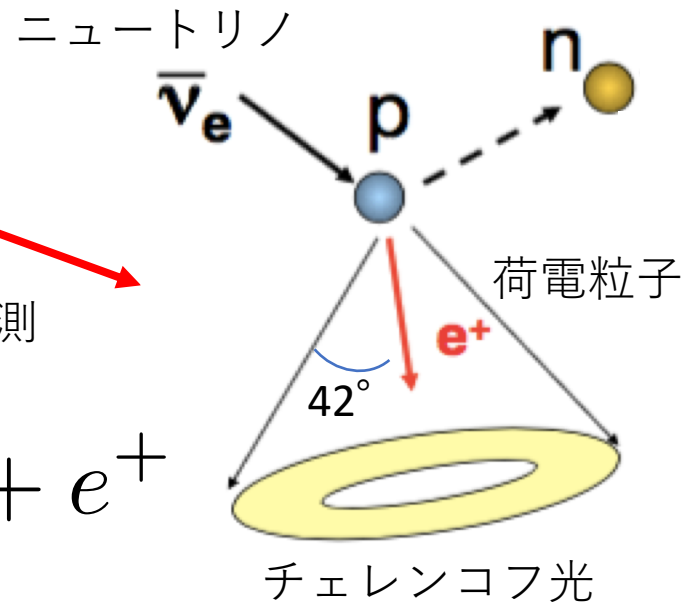
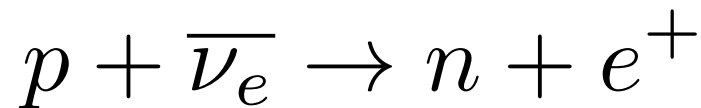
- 検出器スーパーカミオカンデ(SK)について
- 超新星爆発とは
 - 超新星爆発のメカニズム
- SKでの観測数の計算方法
- 計算結果
 - 衝撃波復活時間による比較
 - 親星の質量による比較
- 中性子星の質量によるSKでの観測数への影響
- まとめ

検出器 Super-Kamiokande(SK)



- 5万トンの超純水で満たされた水チェレンコフ検出器
- 光電子増倍管(PMT)によって入射した光を電気信号として取り出すことができる。

超新星爆発で最も多く観測される逆 β 崩壊の例



超新星爆発

大質量(太陽質量の8倍以上)の星の進化の最終段階で引き起こす大爆発のこと。

爆発の全エネルギー($\sim 10^{53}\text{erg} = 10^{46}\text{J}$)の99%をニュートリノの形で持ち出すため、SKの観測が重要となる。

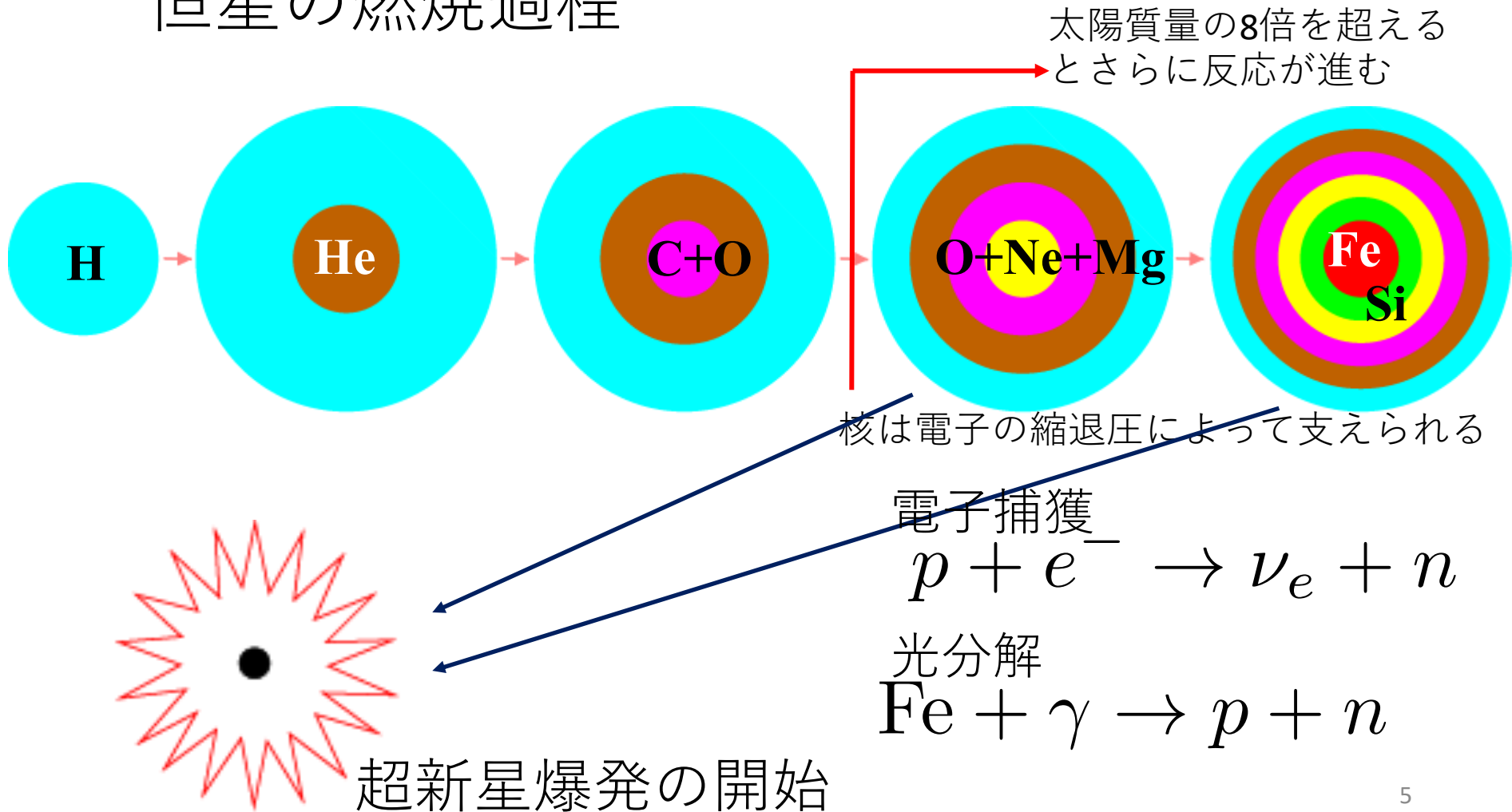


超新星爆発の例

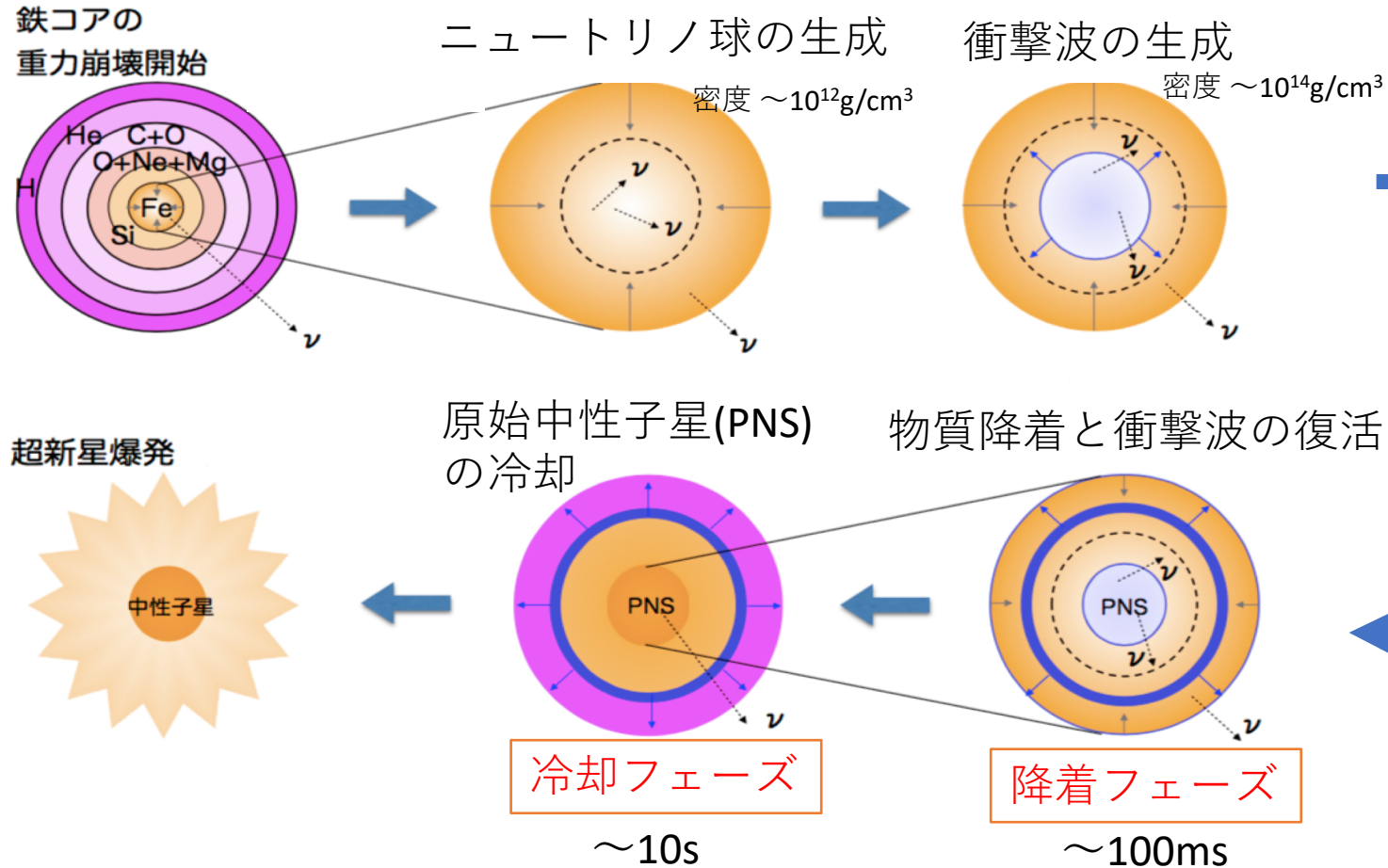
画像は1987年2月23日に起きた爆発。
起きた年と順番から1987Aと呼ばれている。

恒星の進化

恒星の燃焼過程



超新星爆発の爆発過程



ニュートリノの観測数には時間構造があると考えられている。

目的

- 超新星爆発ニュートリノの観測は**100年**に数回しかできない。
- 爆発過程を説明するモデルは多岐にわたる。



予めモデルの違いがSKでの観測数の時間発展にどのような影響を及ぼすかを見積もっておき、観測によるモデル決定をスムーズに行う。

→今回は

- 衝撃波復活時間と親星の質量の影響
 - 中性子星の質量と観測数との関係
- を調べる。

計算方法

観測できる逆ベータ崩壊の反電子ニュートリノの数は次の式で計算する。

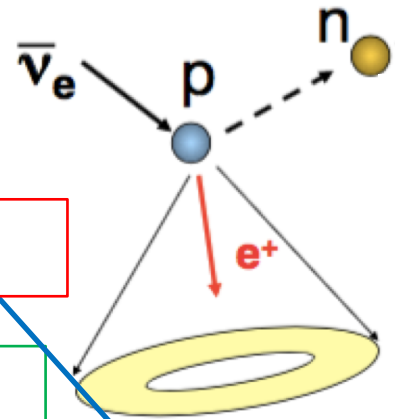
$$N(t) = \sum_{E_{e^+}=thr}^{80} \left(\underbrace{p_{target}}_{\text{陽子数}} \times \underbrace{\frac{\Delta N_{\bar{\nu}_e}(t)}{\Delta E_{\nu}}}_{\text{中里モデル}} \times \underbrace{\frac{1}{4\pi r^2}}_{\text{球状に広がる係数}} \times \sigma(E_{\bar{\nu}_e}) \times Ebin \times Tbin \right)$$

$$p_{target} = 32.48 \times 10^3 \times 10^3 \times 10^3 \div 18 \times 6.02 \times 10^{23} \times 2$$

SKのタンク内に存在する陽子(水素原子核)の数。

中里モデルー物理過程に基づき計算したモデル。
(<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/index.html>)
の数フラックスを使う。

超新星爆発ニュートリノが一様に球状に広がることを表す係数
銀河中心($r=10\text{kpc}$)で計算した。

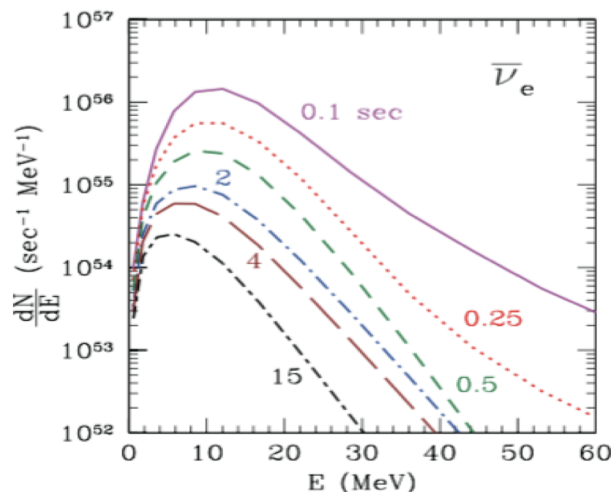


計算方法

観測できる逆ベータ崩壊の反電子ニュートリノの数は次の式で計算する。

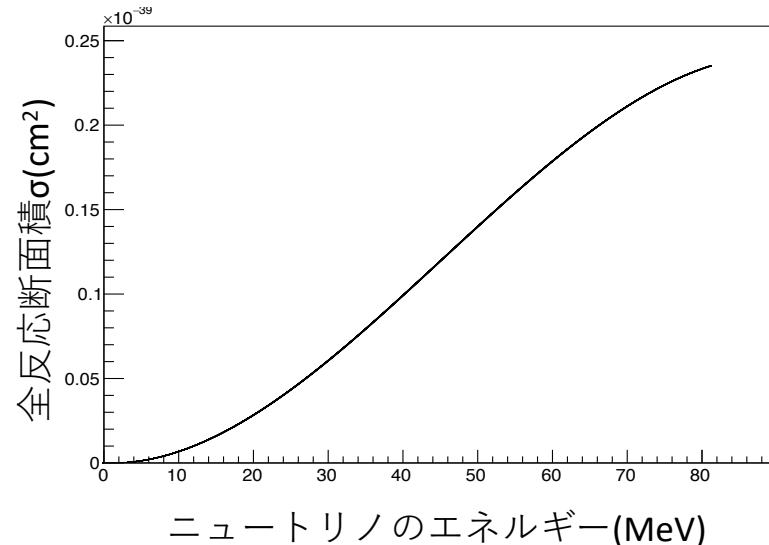
$$N(t) = \sum_{E_{e+}=thr}^{80} \left(p_{target} \times \frac{\Delta N_{\bar{\nu}_e}(t)}{\Delta E_{\nu}} \times \frac{1}{4\pi r^2} \times \sigma(E_{\bar{\nu}_e}) \times Ebin \times Tbin \right)$$

$$\sigma(E_{\bar{\nu}_e}) = \int_{-1}^1 \frac{\sigma_0}{2} [(f^2 + 3g^2) + (f^2 - g^2)v_e^{(1)} \cos \theta] E_e^{(1)} p_e^{(1)} - \frac{\sigma_0 \gamma}{2M} E_e^{(0)} p_e^{(0)} d \cos \theta$$



数フラックス(Nakazato, K., Sumiyoshi, K., Suzuki, H., et al. 2013, ApJS, 205, 2より)

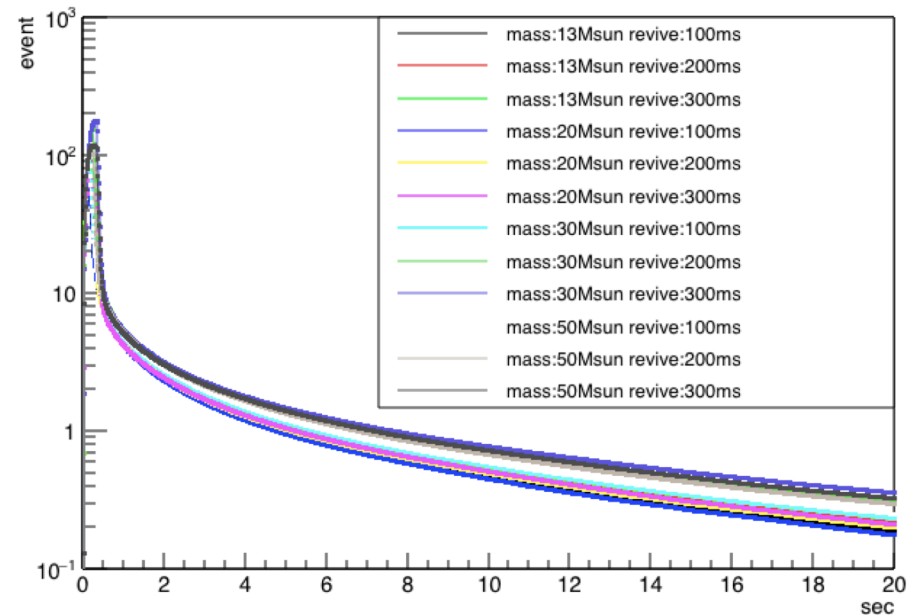
全反応断面積のエネルギー依存



パラメータの数と計算結果

表 1: 初期条件と中性子星の質量の関係

親星の質量 ($M_{\odot}$)	復活時間 (ms)	中性子星の質量 ($M_{\odot}$)
13	100	1.50
13	200	1.59
13	300	1.64
20	100	1.47
20	200	1.54
20	300	1.57
30	100	1.62
30	200	1.83
30	300	1.98
50	100	1.67
50	200	1.79
50	300	1.87

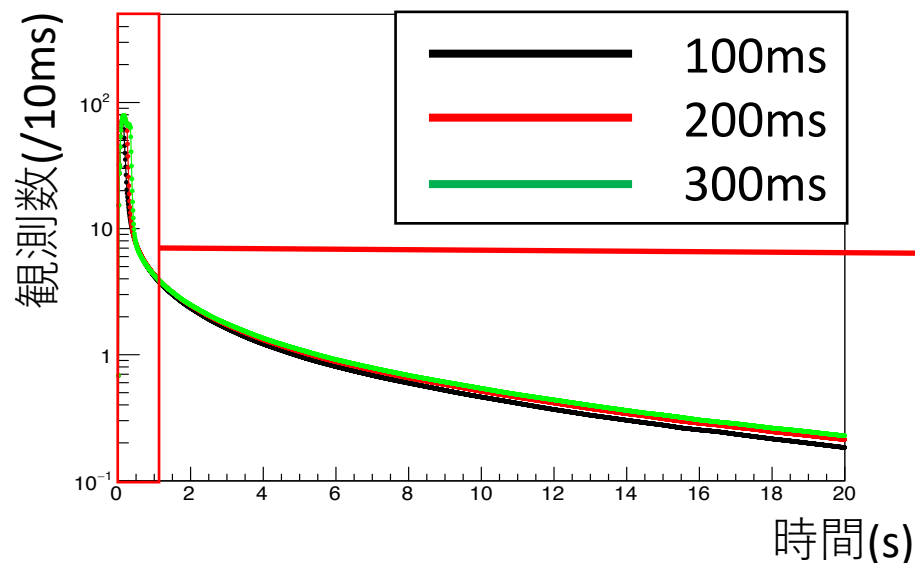


全パラメータの時間発展の計算結果

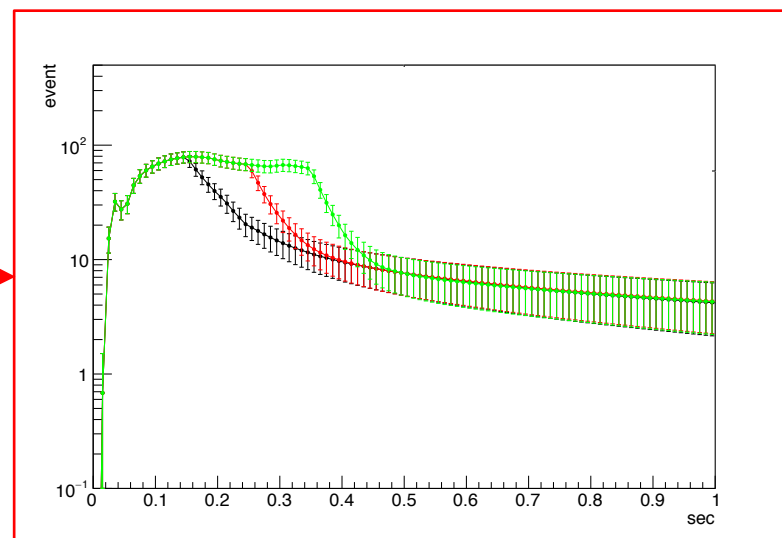
衝撃波復活時間(100,200,300ms)、親星の質量(13,20,30,50Msun)の組み合わせによる12種類の時間発展を計算した。
 →パラメータ毎に比較してSKでの観測数への影響を調べる。

計算結果(衝撃波復活時間の比較)

ニュートリノ観測数の時間発展
(13Msunでの衝撃波復活時間の比較)



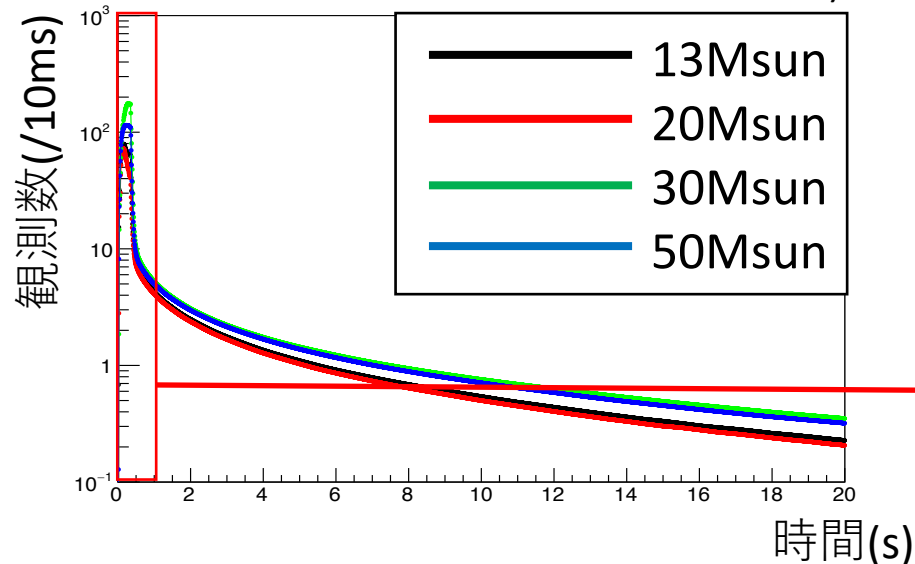
early phase(0~1s, event/10ms)



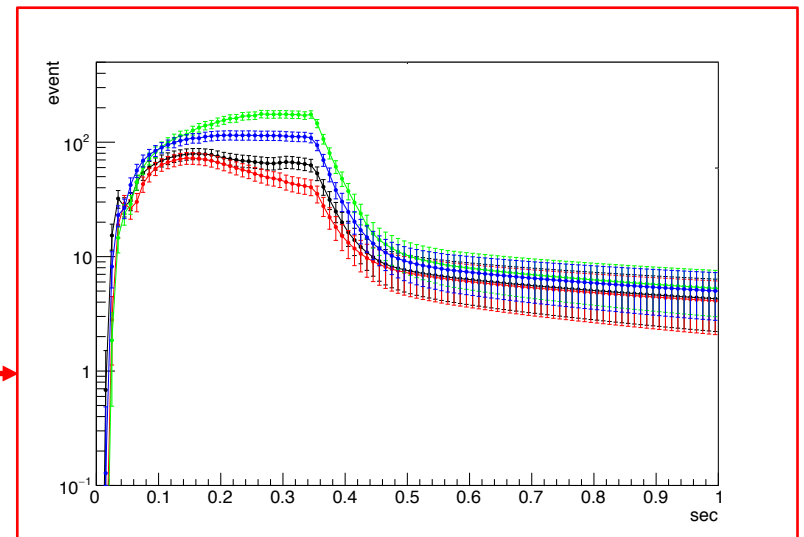
衝撃波が復活するまで物質降着が続くため、復活時間が遅いほどearly phaseの観測数が多くなる。

計算結果(親星の質量の比較)

ニュートリノ観測数の時間発展(衝撃波復活時間300msでの親星の質量の比較)

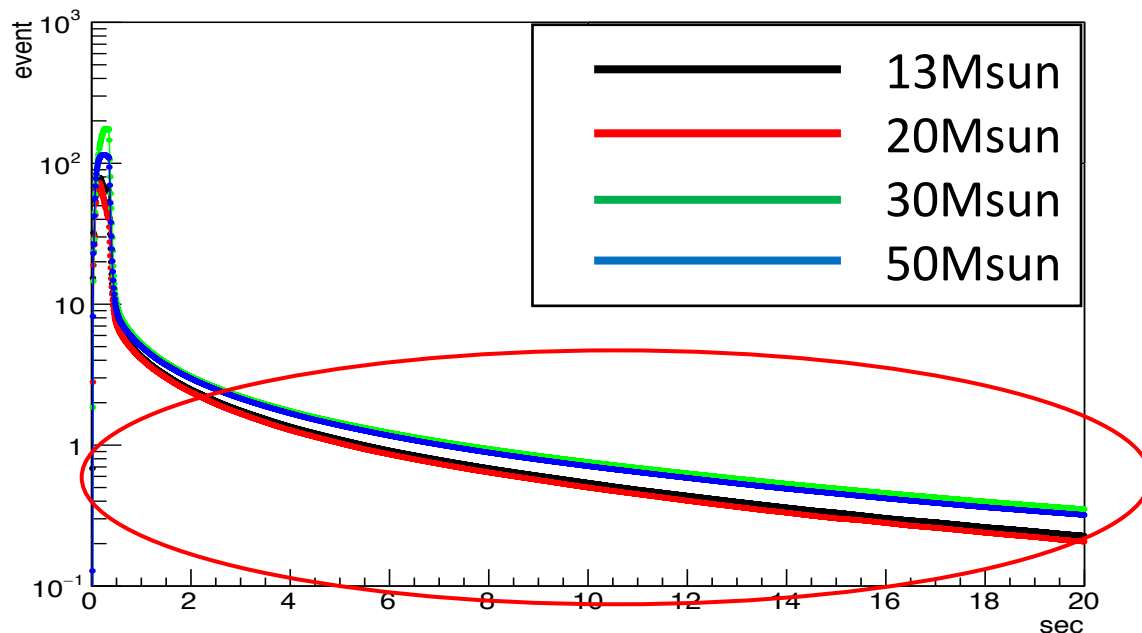


early phase(0~1s)



early phaseでの観測数の差は降着レートの差によるものであると考えられる。基本的には親星の質量に依存するが、内部の対流などの影響で必ずしも親星の質量の大小と対応するわけではない。

中性子星の質量による観測数への影響

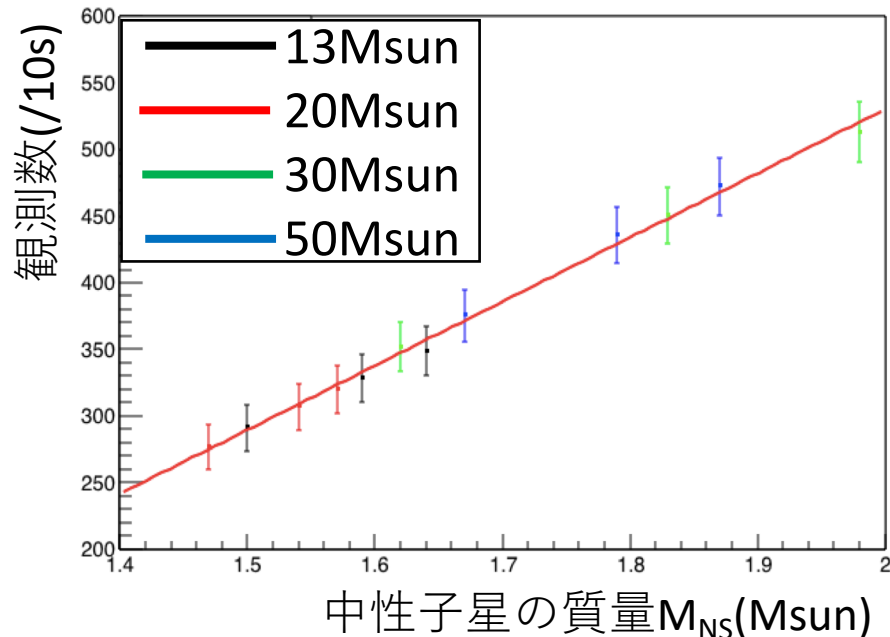


物理過程が複雑なearly phaseを避けるため、late phaseの観測数を見る。

$E_{\nu} \sim GM_{\text{NS}}^2/R_{\text{NS}}$ であるニュートリノは、冷却フェーズが主のlate phaseでは、中性子星の質量と観測数に相関があると考えられる。

中性子星の質量と観測数の相関

中性子星の質量と観測数の関係
(積分範囲:10~20s)



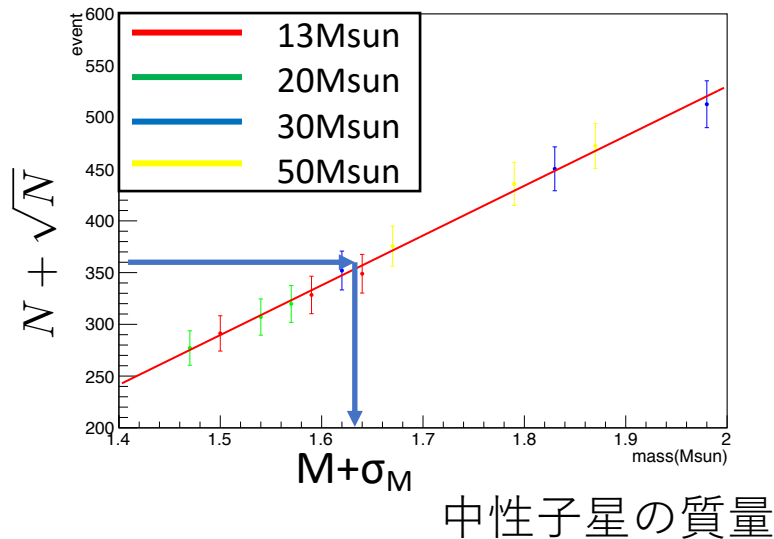
中性子星の質量と観測数の時間積分のグラフを作る。
相関係数と質量の誤差より積分範囲を10s(10~20s)とした。
フィットした関数で中性子星の質量と観測数の関係の1次関数として取り出し、中性子星の質量と観測数の関係式を導いた。

$$M_{NS} = \frac{N_{SK} + 432}{481}$$

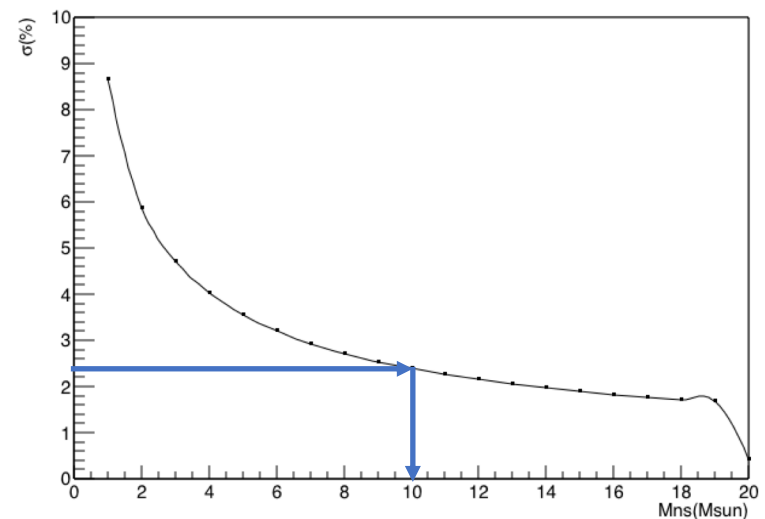
まとめ

- 超新星爆発ニュートリノデータを用いてSKでの逆ベータ崩壊の観測数を見積もった。
- パラメータとして使った衝撃波復活時間、親星の質量が、SKでの観測数の時間発展にどのように影響するかを調べた。
- SKでの観測数から、中性子星の質量を見積もることが可能であることを示した。

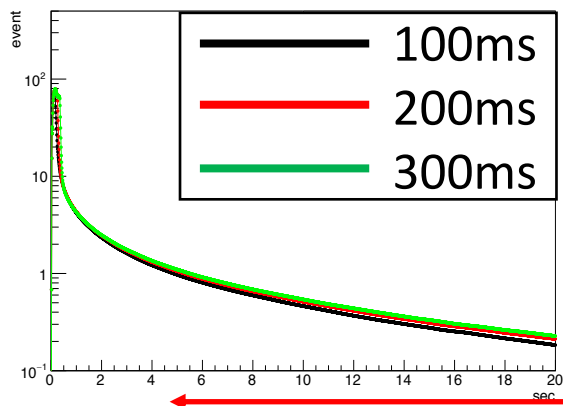
観測数から見積もる質量誤差



今回は質量誤差2.5%未満で積分時間が最小となるように設定したため、積分時間は10～20sとした。



中性子星の質量による観測数への影響

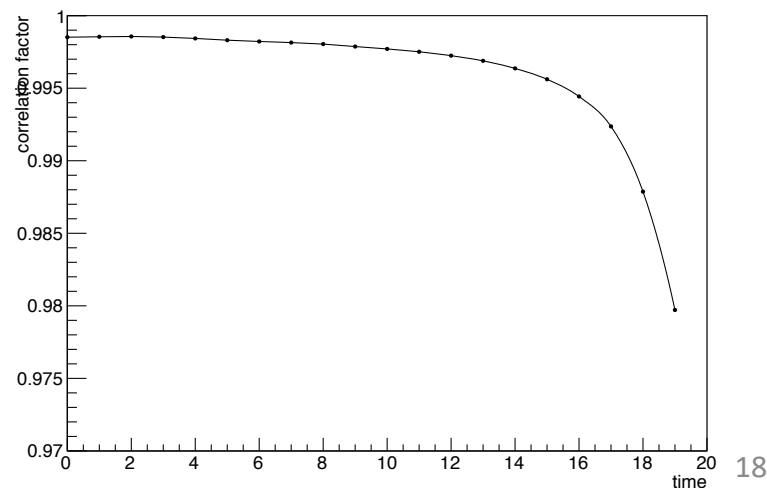


積分時間の定義。t=15sなら5~20sを積分する。

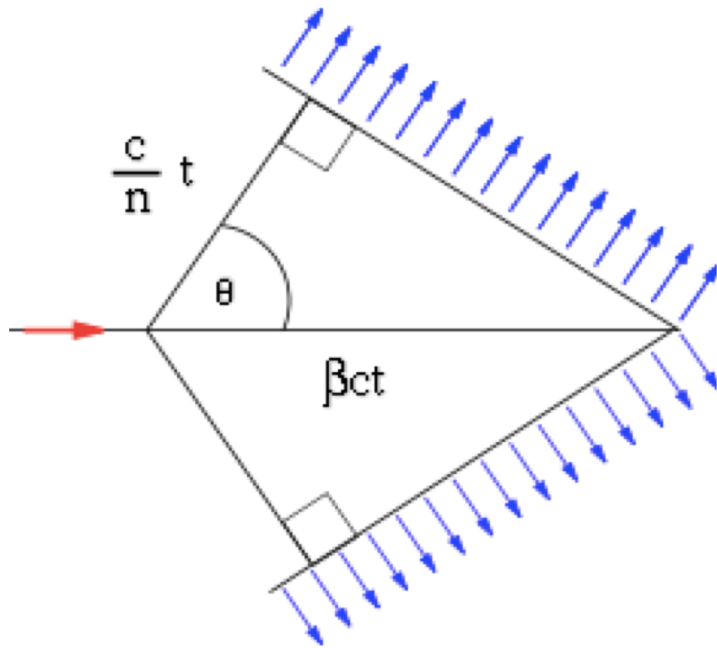
観測数を計算するための積分範囲と相関係数との関係を調べる。積分範囲は、中性子星の影響が強く出ると考えられる冷却フェーズを調べるために用意できた時刻の最後(20s)から戻るように増やしていく。

各積分範囲において1次関数をフィットし、観測数の誤差から質量の誤差を見積もる。
→質量の誤差と合わせて、最適な積分時間を求める。

積分時間と相関係数の関係



チェレンコフ光を出す角度



$$\begin{aligned}\cos \theta &= \frac{ct/n}{\beta ct} \\ &= \frac{1}{n\beta} \quad (\beta = \frac{v}{c})\end{aligned}$$

使用したデータ

九州大学の中里さんが作った

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/index.html>

のサイトのデータを使用させていただいた。

データは以下のようにまとまっており、

$$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_x (\nu_x = (\nu_\mu + \bar{\nu}_\tau + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau)/4)$$

t_0							
E_0	E_1	$\frac{\Delta N_{1,\nu_e}(t_0)}{\Delta E_1}$	$\frac{\Delta N_{1,\bar{\nu}_e}(t_0)}{\Delta E_1}$	$\frac{\Delta N_{1,\nu_x}(t_0)}{\Delta E_1}$	$\frac{\Delta L_{1,\nu_e}(t_0)}{\Delta E_1}$	$\frac{\Delta L_{1,\bar{\nu}_e}(t_0)}{\Delta E_1}$	$\frac{\Delta L_{1,\nu_x}(t_0)}{\Delta E_1}$
E_1	E_2	$\frac{\Delta N_{2,\nu_e}(t_0)}{\Delta E_2}$	$\frac{\Delta N_{2,\bar{\nu}_e}(t_0)}{\Delta E_2}$	$\frac{\Delta N_{2,\nu_x}(t_0)}{\Delta E_2}$	$\frac{\Delta L_{2,\nu_e}(t_0)}{\Delta E_2}$	$\frac{\Delta L_{2,\bar{\nu}_e}(t_0)}{\Delta E_2}$	$\frac{\Delta L_{2,\nu_x}(t_0)}{\Delta E_2}$

理論データの例

中性子星の質量による観測数への影響

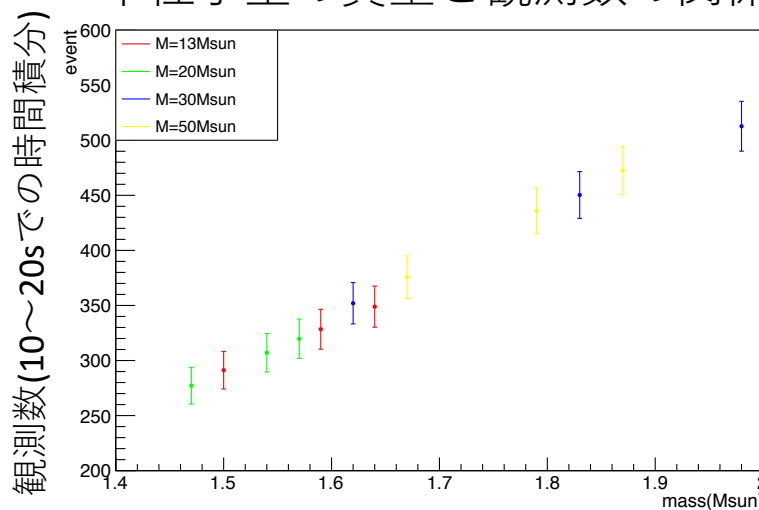
late phaseに表れた影響が中性子星の質量かどうかを確認する。
中性子星の質量は理論によって計算されている値を用いる。(表)

表 1: 初期条件と中性子星の質量の関係

親星の質量 ($M_{\odot}$)	復活時間 (ms)	中性子星の質量 ($M_{\odot}$)
13	100	1.50
13	200	1.59
13	300	1.64
20	100	1.47
20	200	1.54
20	300	1.57
30	100	1.62
30	200	1.83
30	300	1.98
50	100	1.67
50	200	1.79
50	300	1.87

理論計算された中性子星の質量

中性子星の質量と観測数の関係



中性子星の質量

観測数がある時間幅で積分し、中性子星の質量と比較する。(図)
どの程度の相関があるかを積分時間を変えながら、相関係数を計算し調べる。