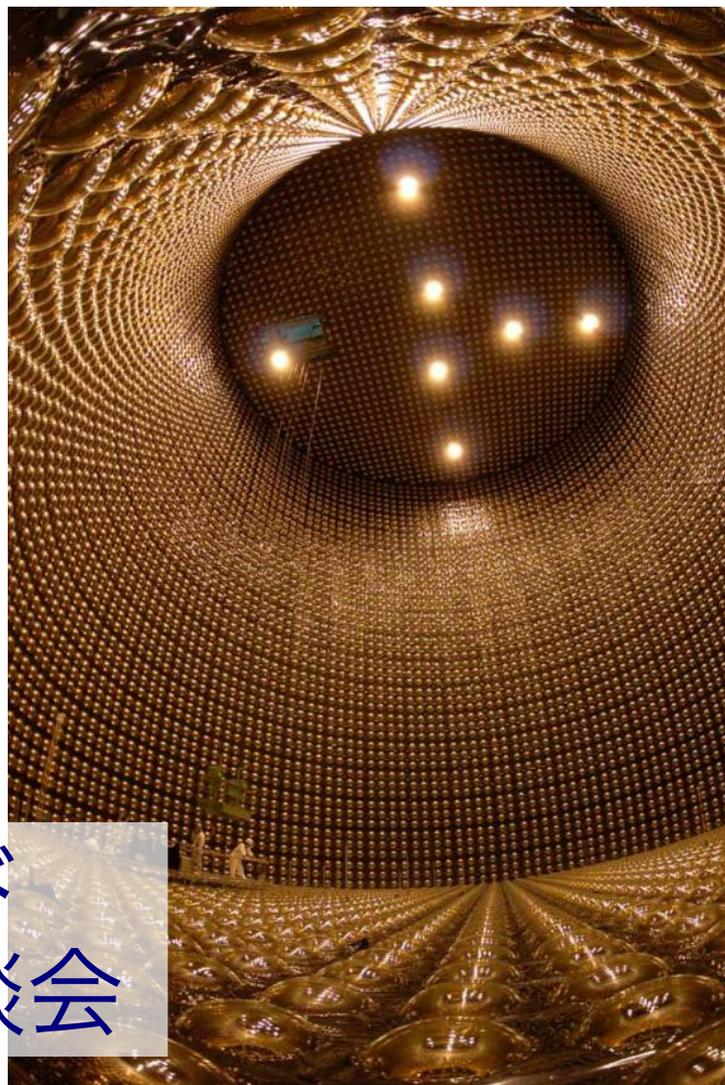


GADZOOKS!

矢野孝臣 (岡山大学) for SK Collaboration

2013年4月23日
富山商工会議所

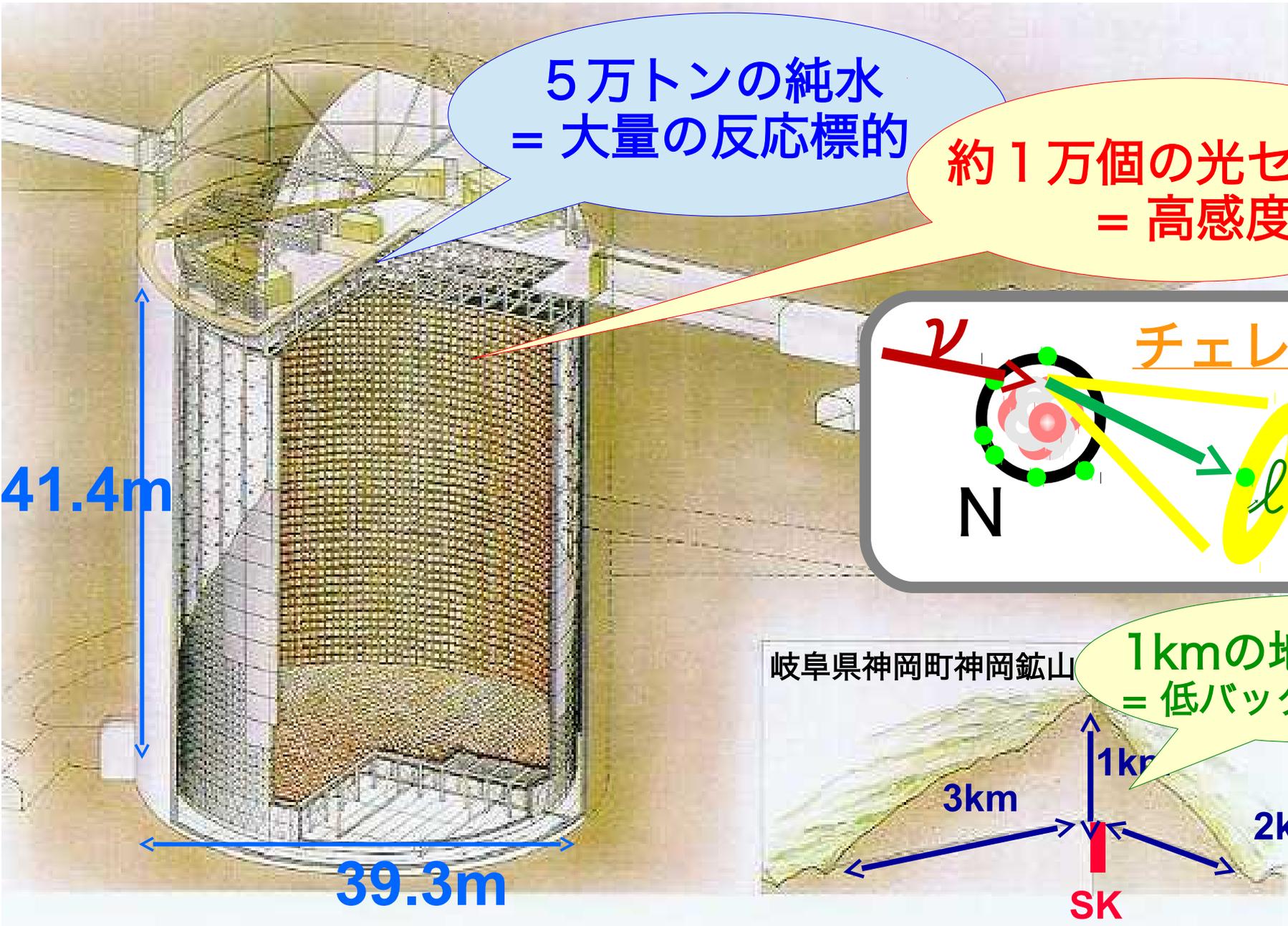
極低バックグラウンド
素粒子原子核研究懇談会



+ Gd

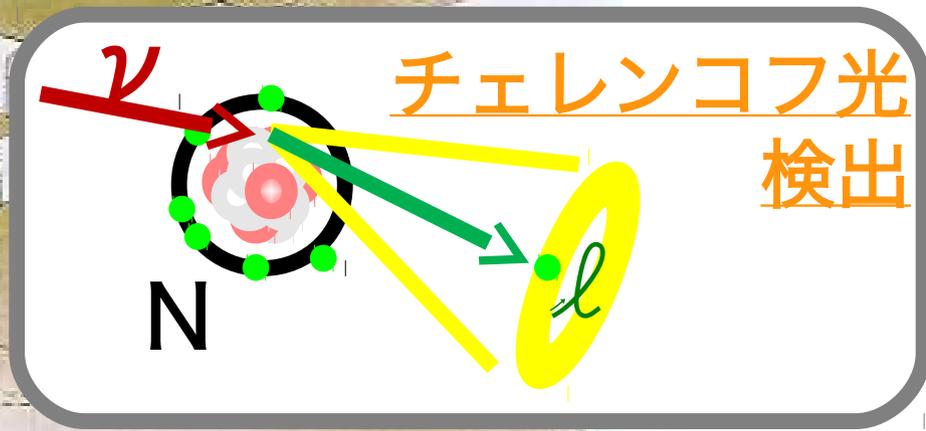
Super Kamiokande

(Nucleon Decay Experiment : 核子崩壊実験)



5万トンの純水
= 大量の反応標的

約1万個の光センサー
= 高感度



1kmの地下に建設
= 低バックグラウンド

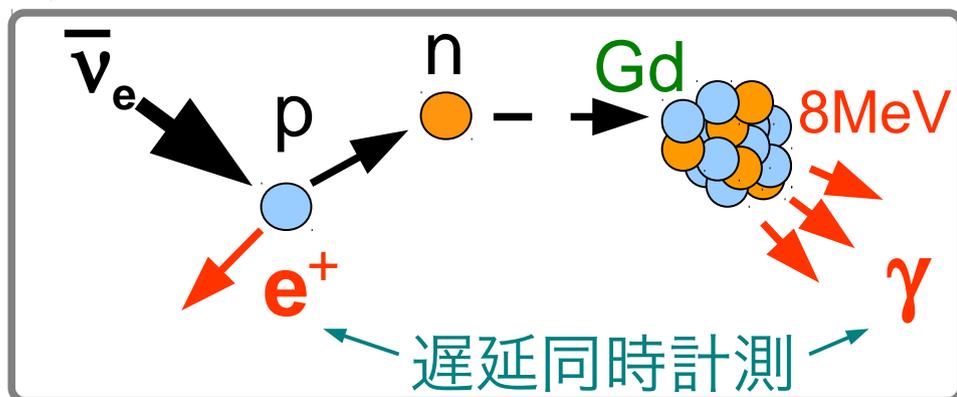
GADZOOKS!

Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!

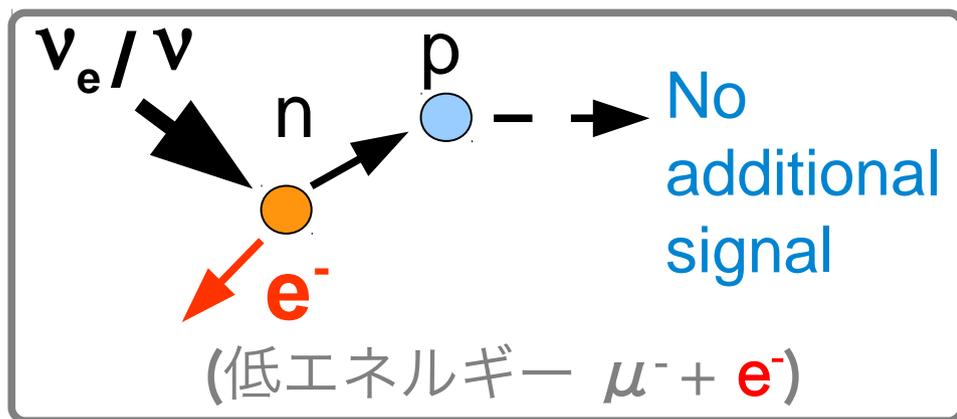
Beacom and Vagins, Phys. Rev. Lett., 93:171101, 2004

0.2%の $Gd_2(SO_4)_3$ を添加し、反ニュートリノ反応からの中性子がGdに捕獲される際のガンマ線(計~8MeV)を同時計測することで、Super-Kに反ニュートリノ反応を同定する能力を付与する。

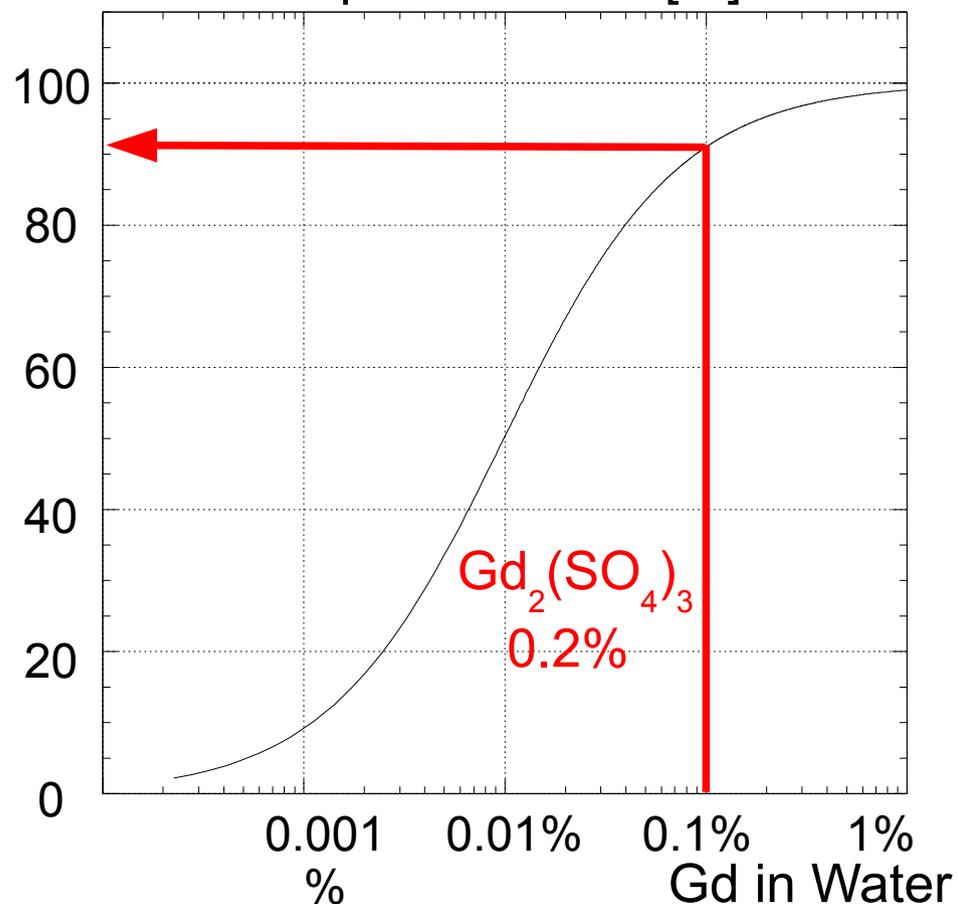
反ニュートリノ



ニュートリノ



Captures on Gd [%]



Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems “EGADS”

GADZOOKS! の原理実証・技術開発

- Gdの添加、除去法
- Gd溶液の純化法
- Gd溶液の透過率
- 構造体への影響
- 中性子BG
- 検出効率

検出媒体である水へGdが与える影響

検出原理の検証

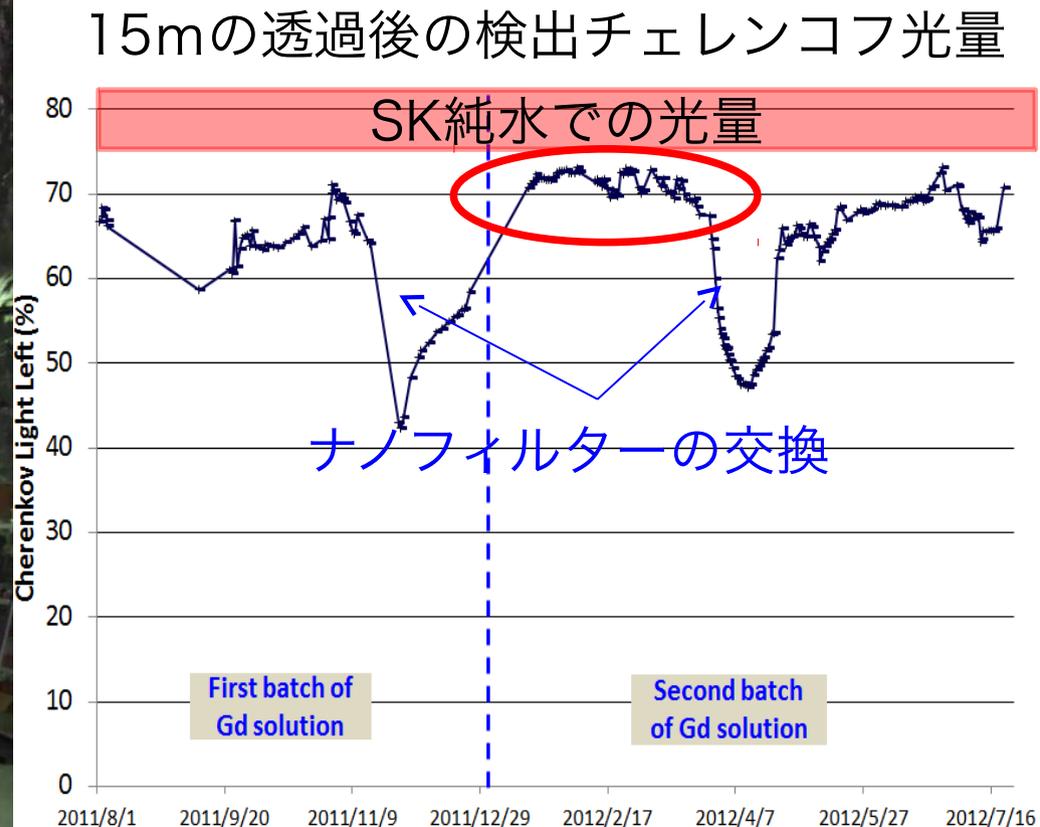
専用の水処理システム

200tのミニスーパーカミオカンデ



~2013年春：Gd溶液純化/循環試験
2013年夏~：光検出器のインストール
2013年秋~：実験開始

EGADS 水循環試験



EGADSの水循環システムを用いて、2011年から試験を行っている。

Gd溶液の透過率はSK純水に近い値を達成した。

15m透過後の検出光量は、SK純水(ベストコンディション)の～86%。

GADZOOKS!による $\bar{\nu}_e$ の物理

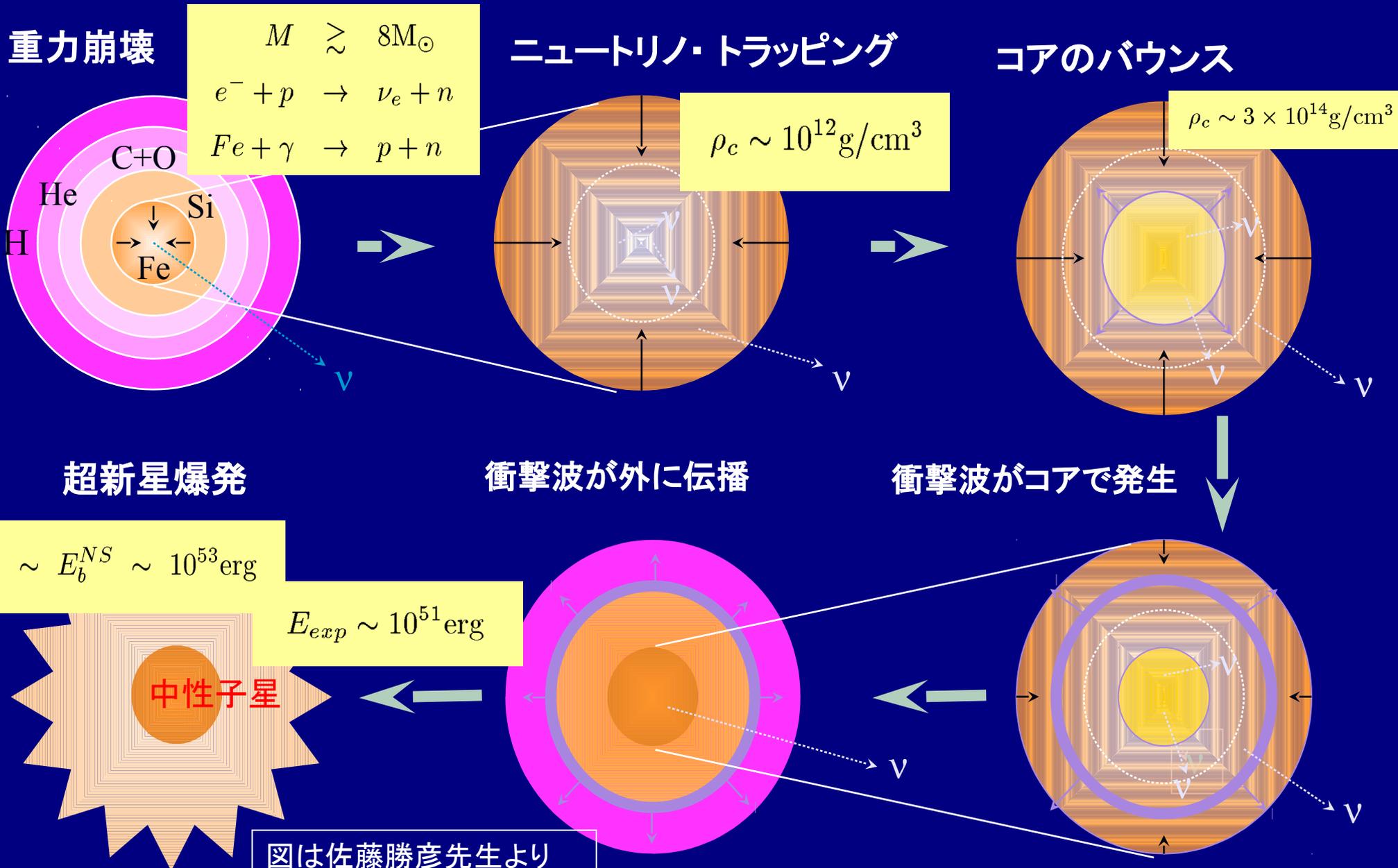
- 超新星背景ニュートリノ (SRN) の観測
 - 未発見のSRNの観測。
- 超新星爆発ニュートリノ
 - 電子散乱事象の選別による方向決定の向上。
 - $\bar{\nu}_e + p$ 反応のみならず、 $\nu + e$ 散乱のスペクトラム測定。
 - Si燃焼過程のニュートリノを捉え、爆発の予知。
- 原子炉ニュートリノ
 - 高統計観測による振動パラメータの精密測定。

また、中性子の同定は以下の物理にも役立つ。

- 陽子崩壊のバックグラウンドの低減
 - 陽子崩壊は中性子を出しにくいですが、大気ニュートリノ反応は中性子を出す。

重力崩壊型超新星の爆発機構

コアを重力崩壊させ、その解放された重力エネルギーで外層を吹き飛ばす。

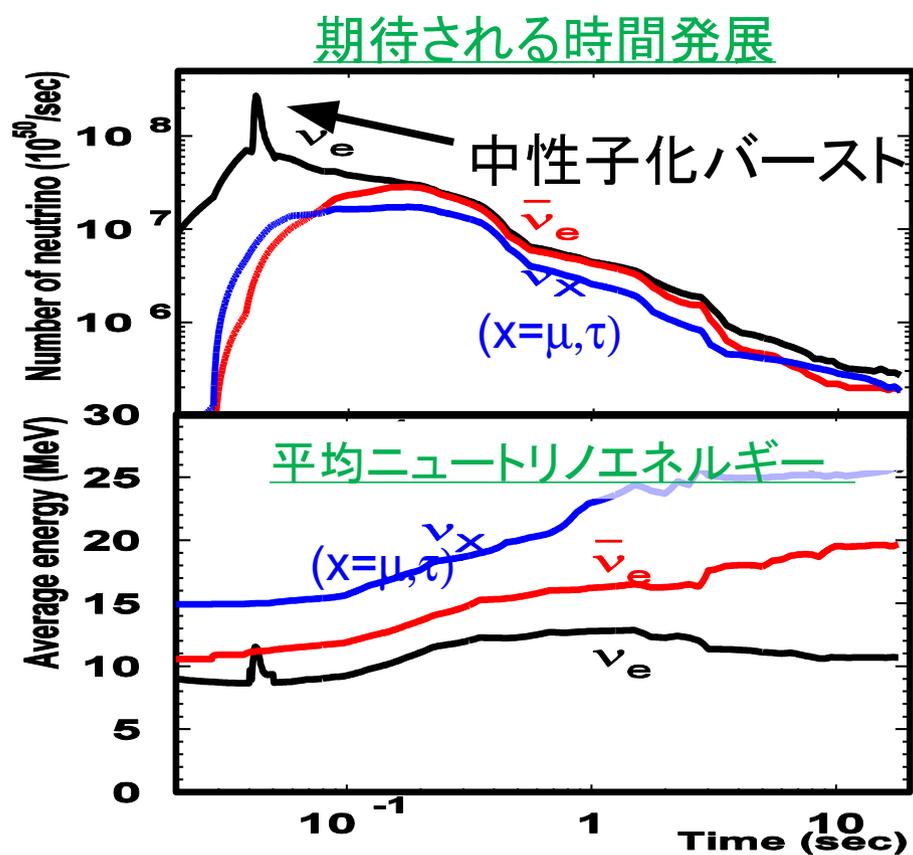


超新星爆発からのニュートリノ放出

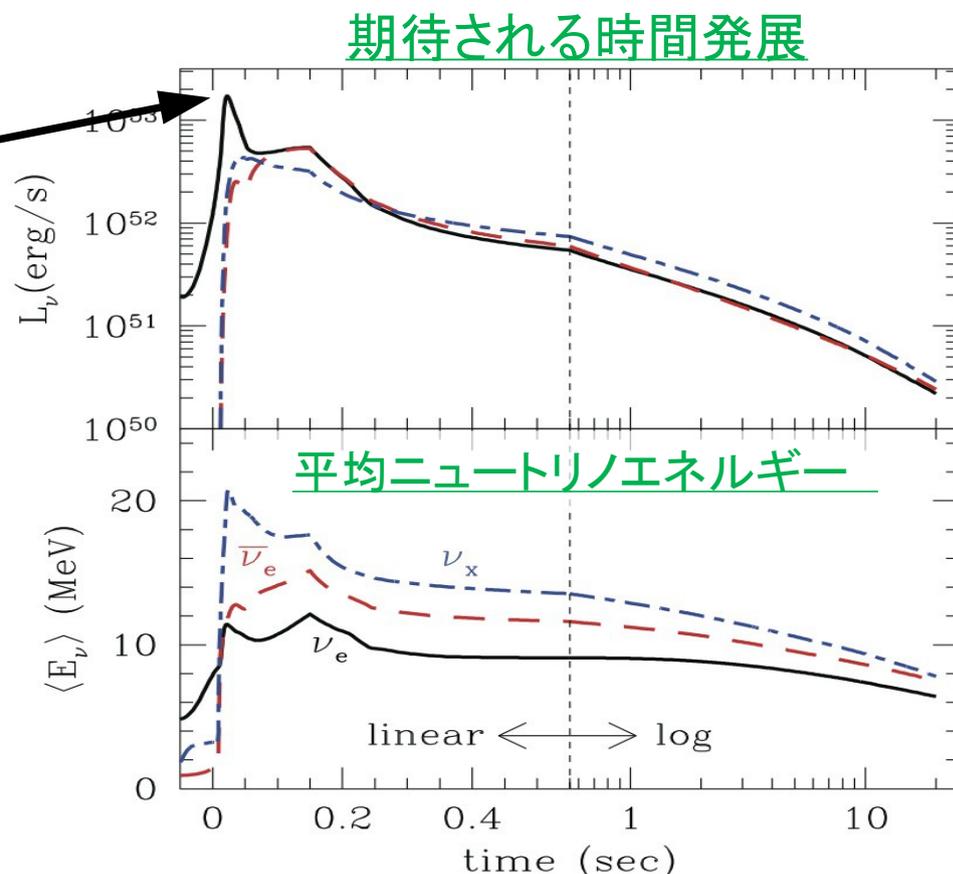
解放される重力エネルギー: $\sim 3 \times 10^{53}$ erg

ニュートリノが99%のエネルギーを輸送する。

爆発の運動エネルギー、光・粒子のエネルギーは1% ($\sim 10^{51}$ erg)程度。



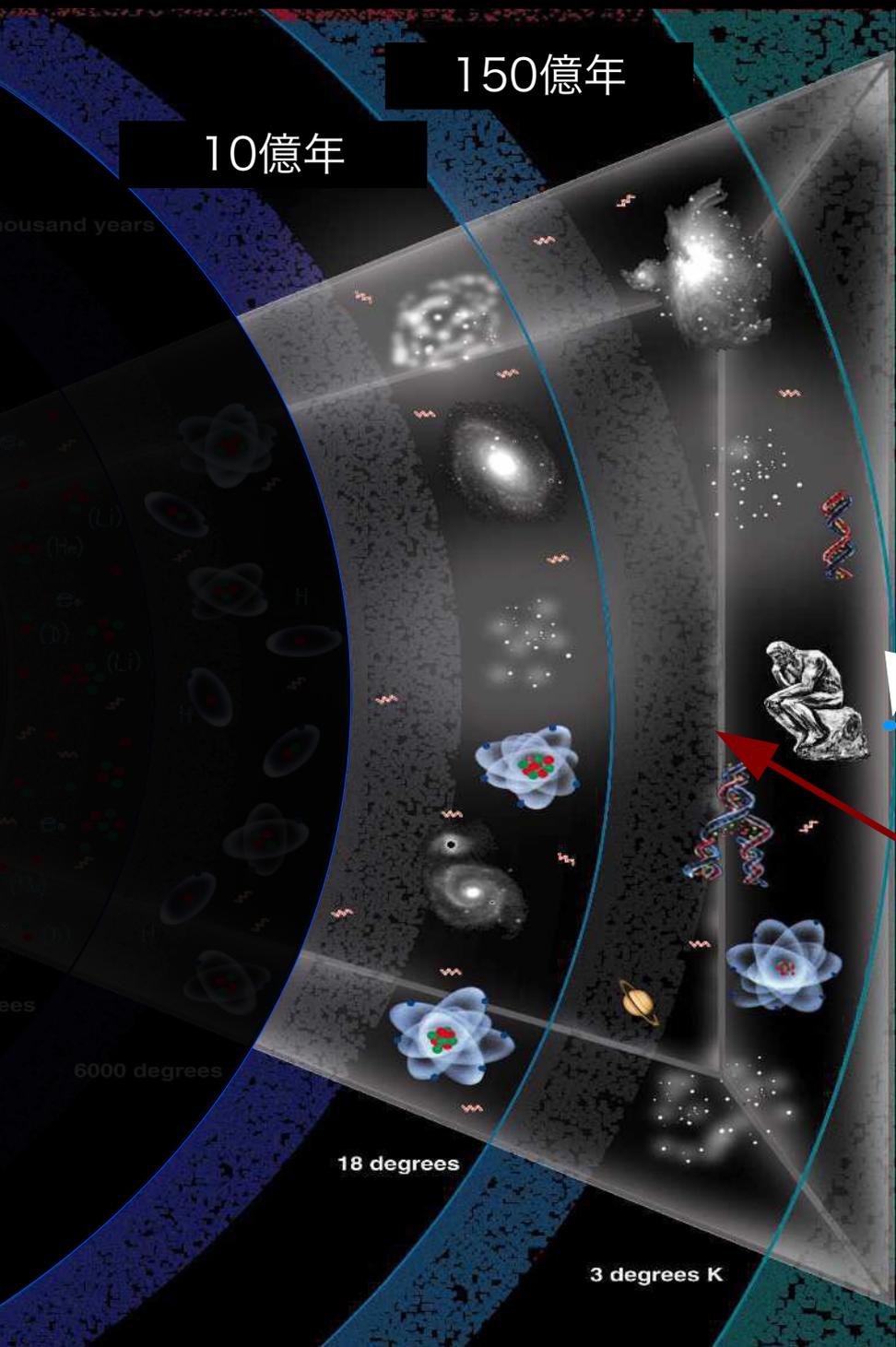
T.Totani, K.Sato, H.E.Dalhed and J.R.Wilson, ApJ.496,216(1998)



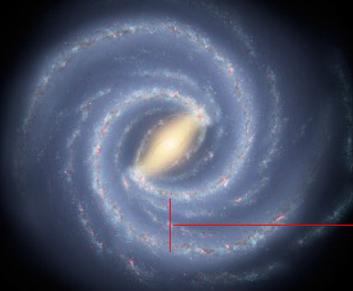
K. Nakazato et.al, Astrophys.J.Supp.205:2 (2013)

超新星爆発のシミュレーションモデルには依然不定性が大きい。
実験からのインプットが必要。

過去の超新星からのニュートリノ



現在で観測できている範囲



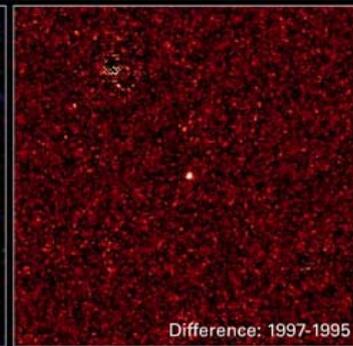
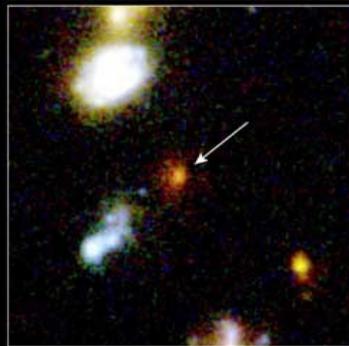
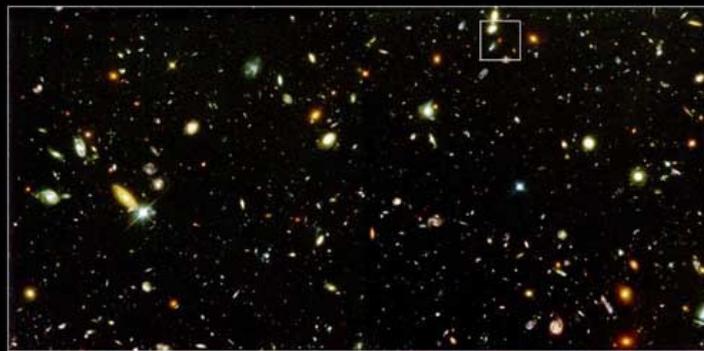
~17万光年



~10万光年

SKで数百万光年

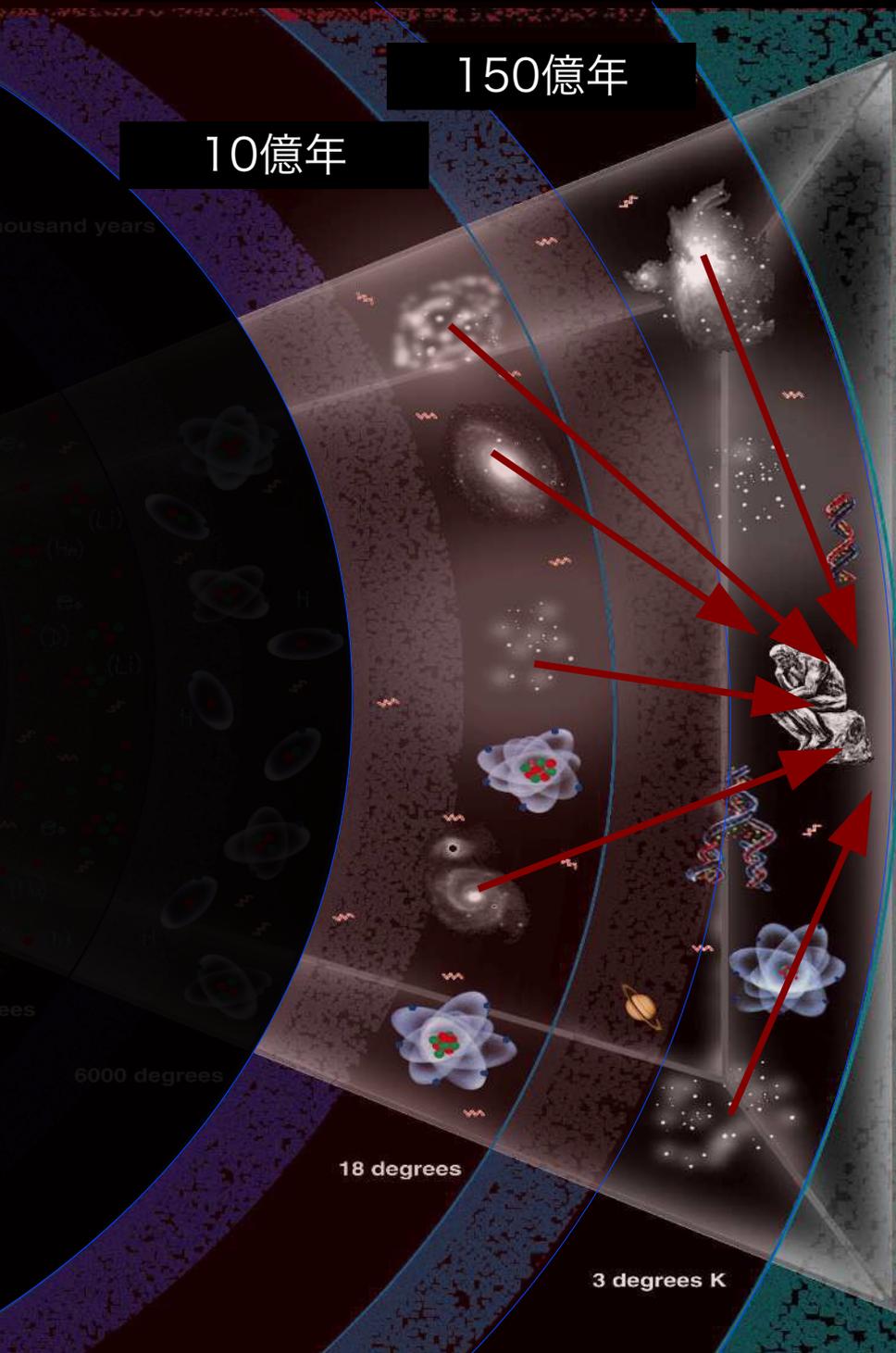
ハッブル望遠鏡で見える一番遠い
超新星：SN1997ff



100億
光年先!

Difference: 1997-1995

過去の超新星からのニュートリノ

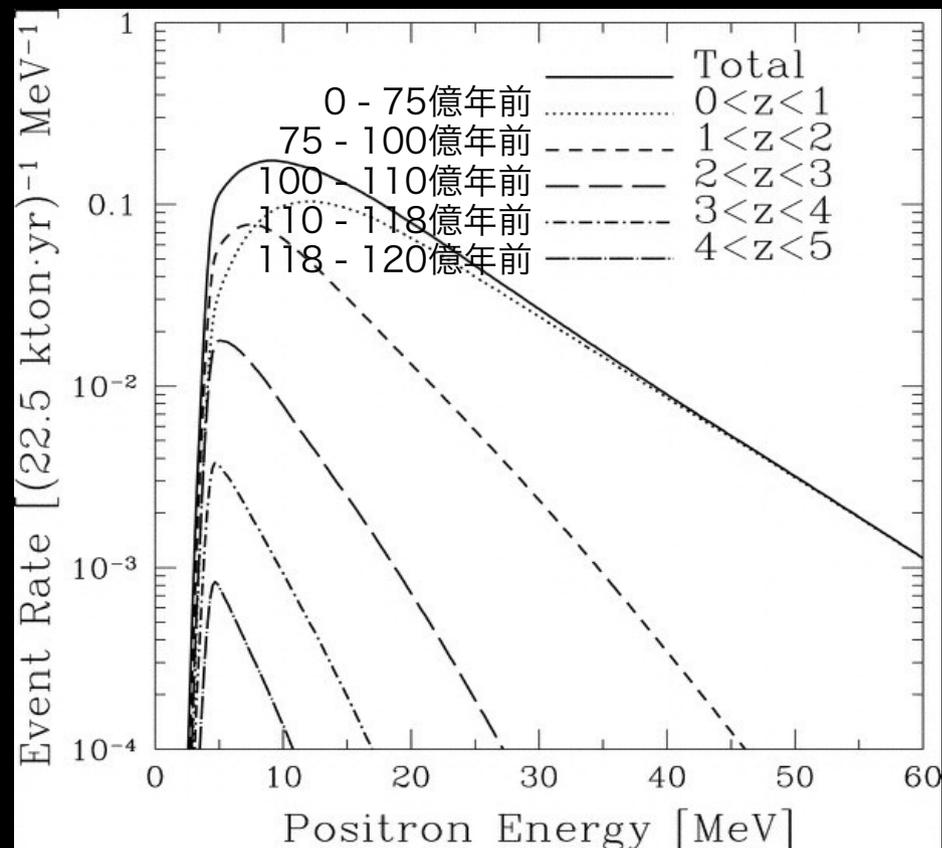


超新星背景ニュートリノ (SRN)

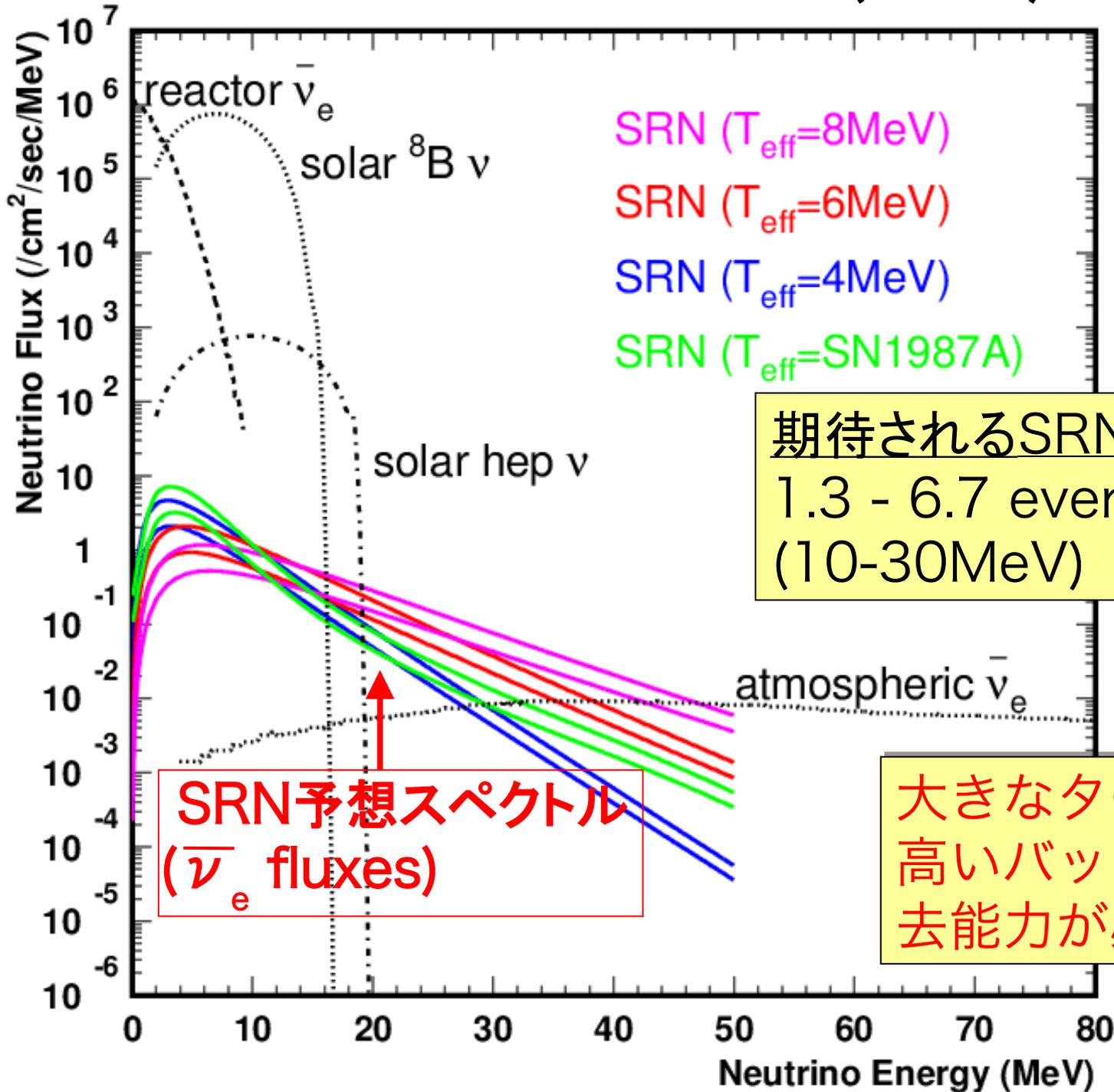
は常に地球に降り注いでいる。

SRNが観測されれば、大質量星形成、超新星による元素合成の歴史を探ることができる。

SKでの予想SRNイベント数



超新星背景ニュートリノ (SRN) のスペクトラム



SRN flux の計算は、Horiuchi et al. PRD, 79, 083013 (2009)

期待されるSRN信号の数

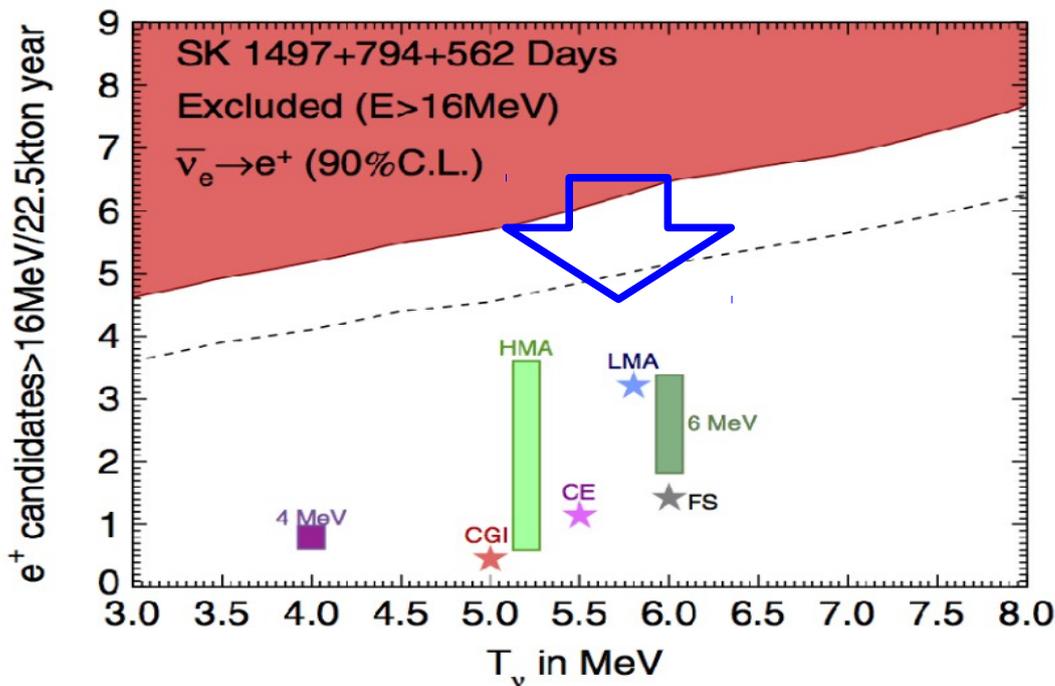
1.3 - 6.7 events/year / 22.5kt
(10-30MeV)

SKの有効体積

SRN予想スペクトル
($\bar{\nu}_e$ fluxes)

大きなターゲット質量と
高いバックグラウンド除
去能力が必要とされる。

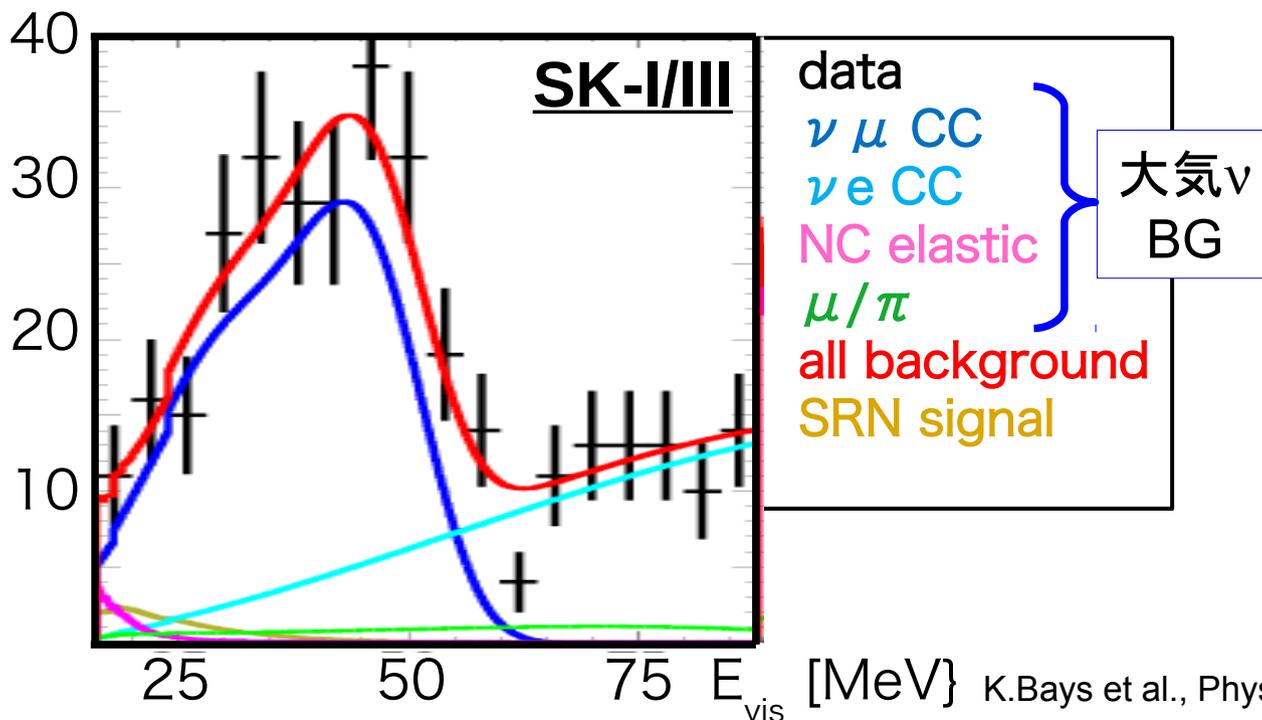
SKでのSRN探索の現状



SK I - III 90% c.l.:
 $< 5.1 \text{ ev / yr / 22.5 ktons}$
 $< 2.7 \text{ /cm}^2/\text{s} (>16 \text{ MeV})$

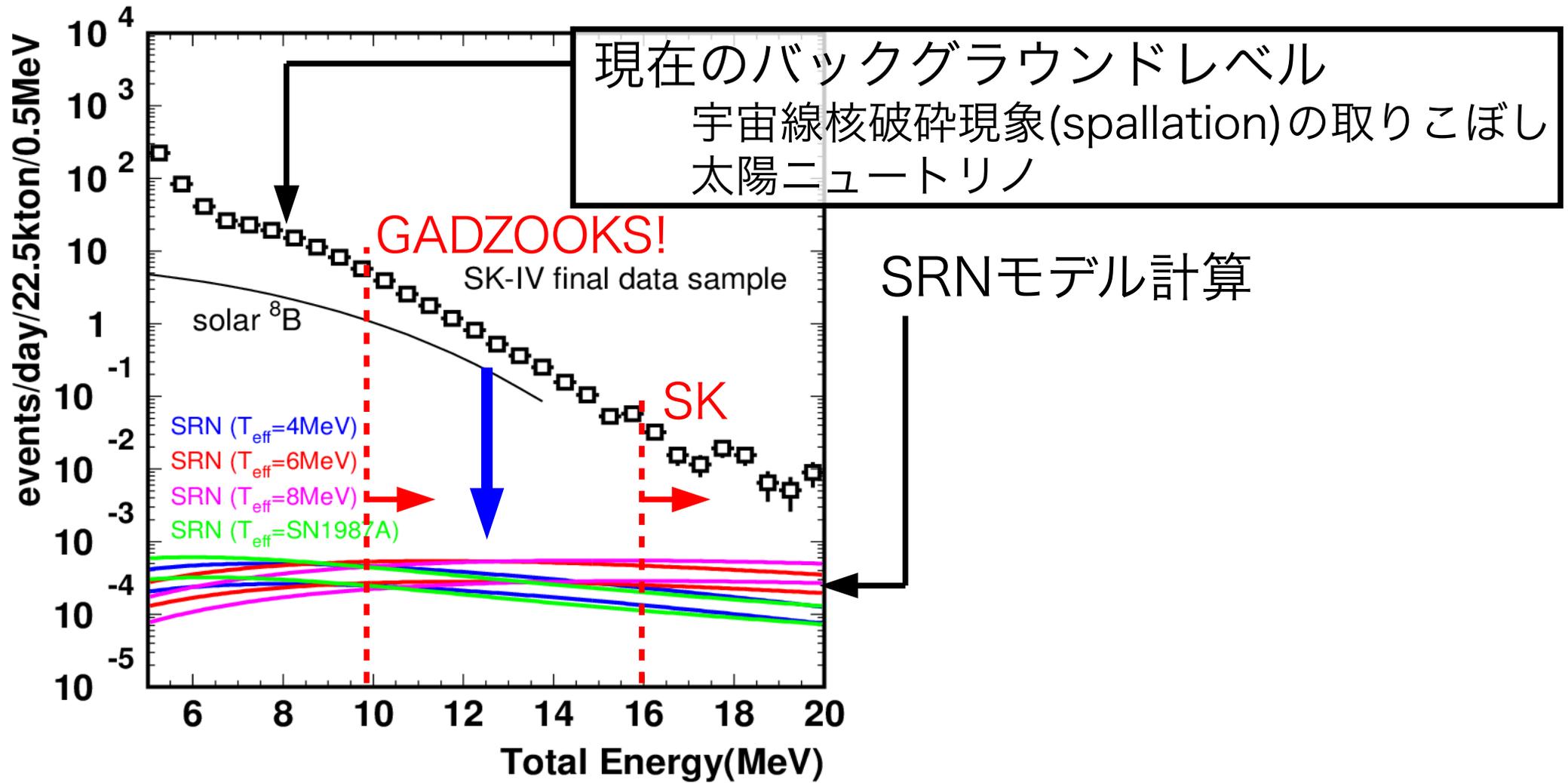
(using LMA model prediction (Ando et.al, 2005))

理論予想まであとfactor 2-4
ぐらいまで迫っている。



しかしながら、現在のSRN探索はほぼバックグラウンドで制限されてしまっている。

SRN測定のパックグラウンド

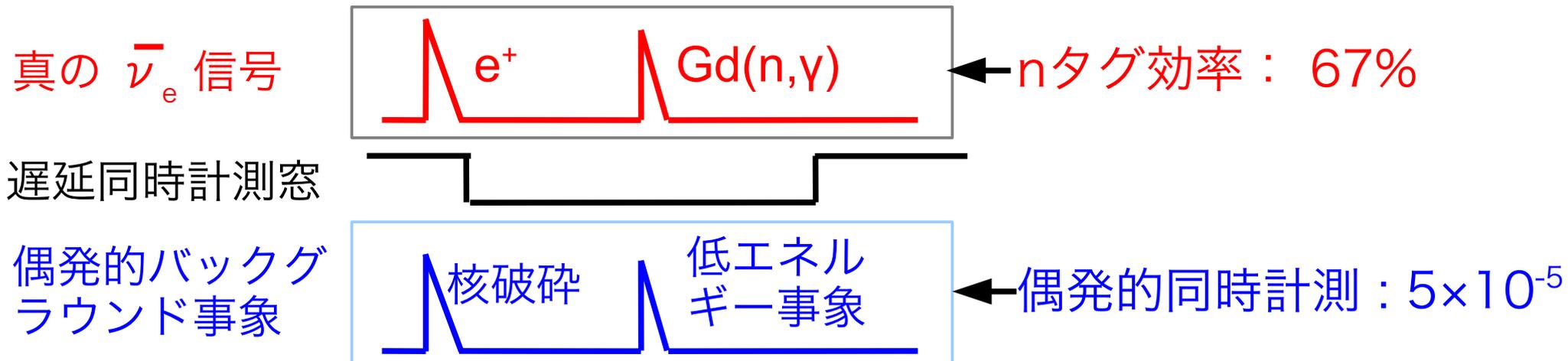


Gdによって中性子をタグすることによって、太陽ニュートリノ(ν_e),
中性子を伴わないSpallation事象を取り除くことができる。
現在のバックグラウンドを $\sim 10^4$ 倍まで減らすことが必要。

中性子タグによるバックグラウンド除去

既存のバックグラウンドと低エネルギー事象(Rn, etc)が偶発的に同時計測されるバックグラウンドが残る。

中性子タグ効率として67%を要求する時、偶発的同時計測の割合は 5×10^{-5} である。



ガドリニウム信号の選択条件

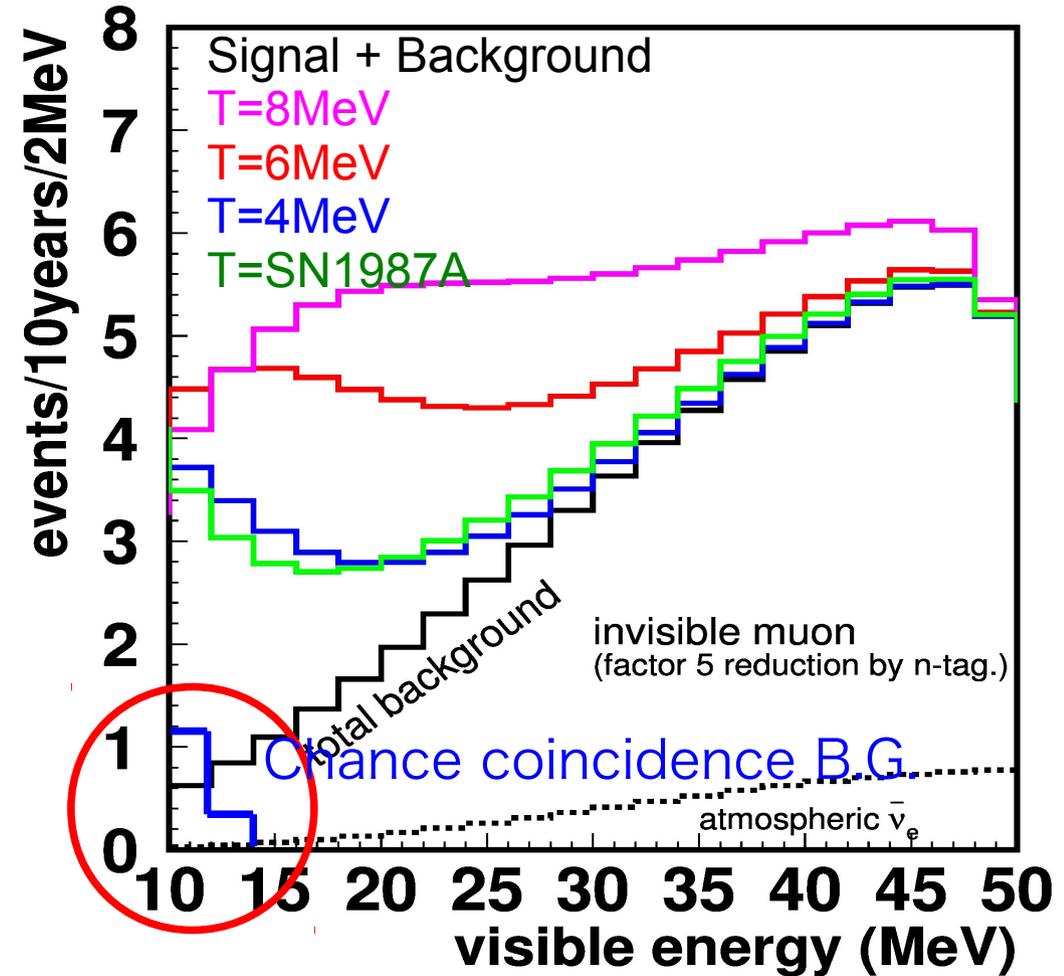
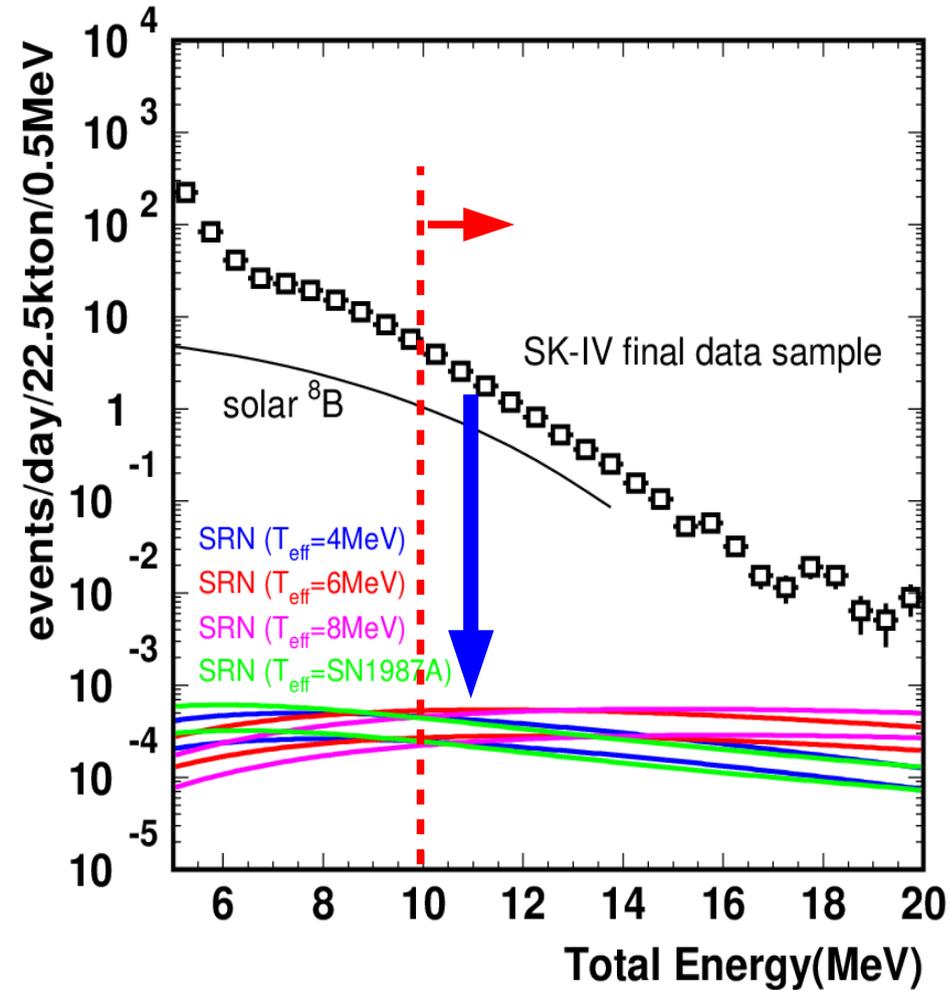
- (1) 再構成点が線源から 2 m 以内
- (2) 遅延信号のエネルギーが 3 MeV 以上
- (3) 先発信号からの時間差が $60 \mu\text{s}$ 以下
- (4) リングパターンカット。

選択効率 : $\sim 74\%$.

捕獲効率 : 90% (0.1% Gd の場合)

中性子タグ効率 : 67%

SRN測定のパックグラウンド

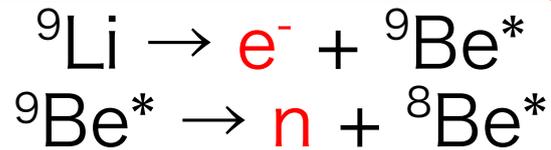


既存の太陽ニュートリノ、SpallationバックグラウンドをSRNの信号レベル以下まで落とすことができる。

他のバックグラウンド

1. 宇宙線の核破砕による ${}^9\text{Li}$

宇宙線核破砕による生成物のうち、 ${}^9\text{Li}$ は β 崩壊と同時に中性子を放出する。



誤検出



2. $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ への放射性混入物 (U/Th)

U/Thの放射性崩壊において、系列核種が γ と n を同時に放出する。

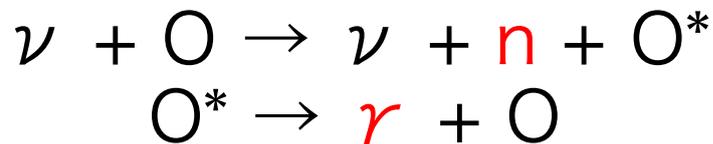


誤検出

SRN信号

3. 大気ニュートリノによるNC反応

大気ニュートリノのNC反応によって、 γ と n が同時に放出される。

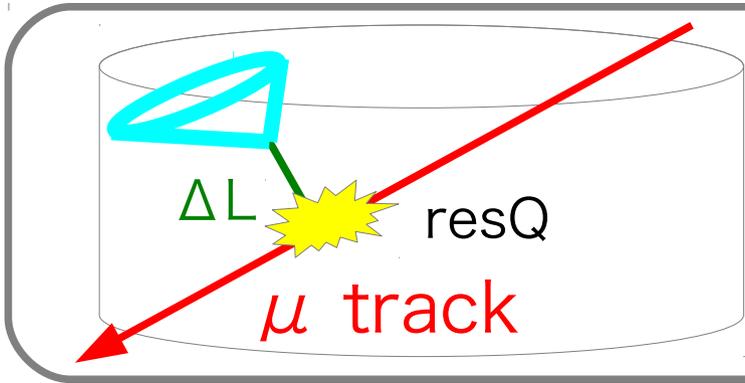


誤検出

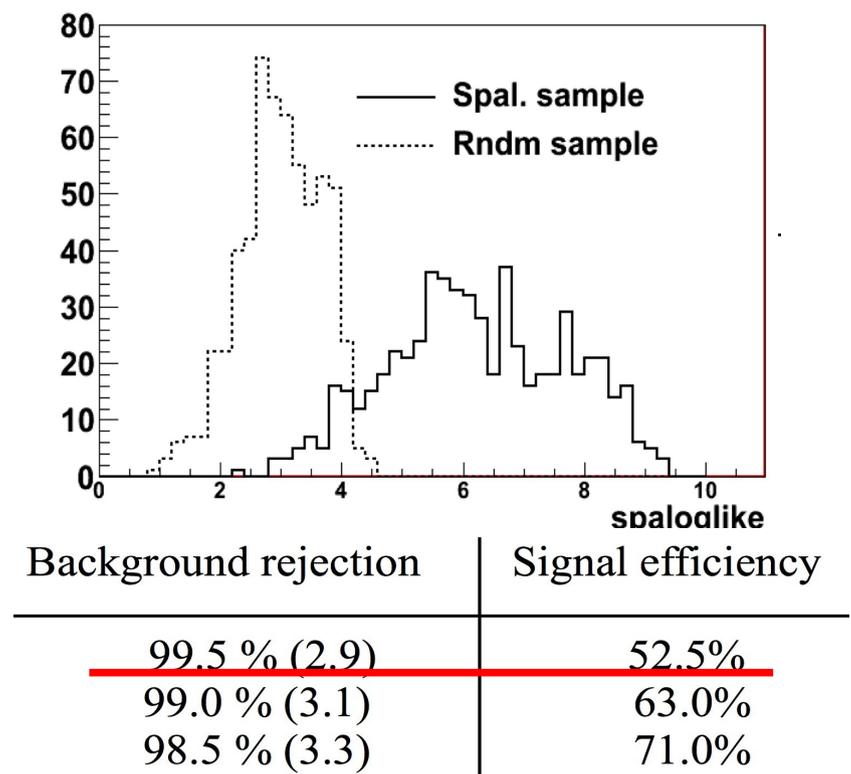
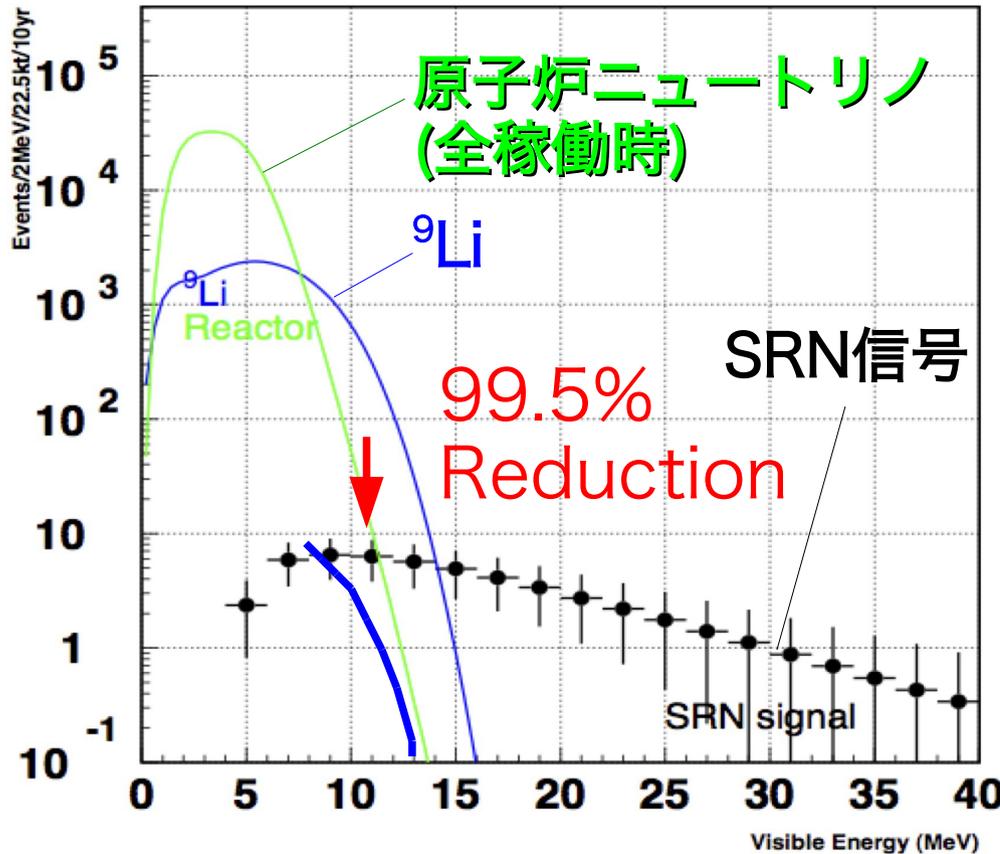
SRN信号

宇宙線による核破砕 ^9Li

核破砕事象に対するLikelihood (= $L(\Delta T) * L(\text{resQ}) * L(\Delta L)$) を用いて ^9Li を選別し、SRN信号以下まで取り除く事ができる。



ミューオンの軌跡からの距離(ΔL)
 破砕事象までの時間(ΔT)
 余剰なエネルギー損失(resQ)



信号の選別はさらに改善可能。

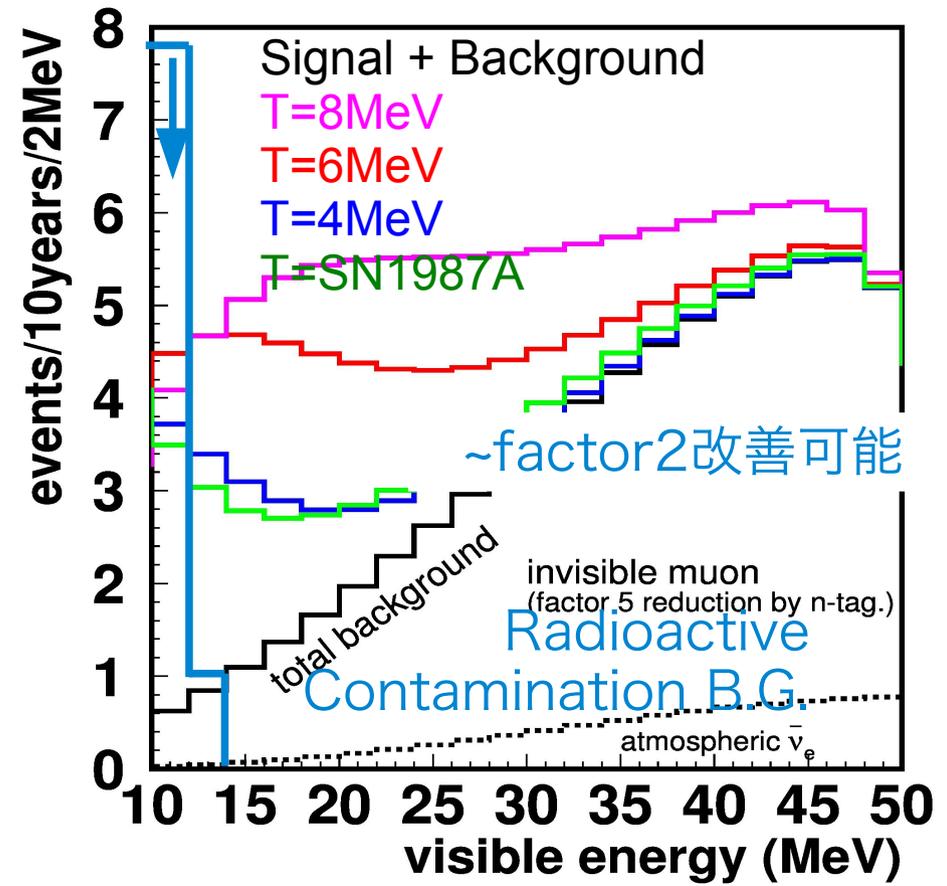
$Gd_2(SO_4)_3$ 中の U/Th

硫酸ガドリニウム粉末中の放射性不純物の崩壊によるバックグラウンド
陰イオン交換樹脂Amberjet4400の使用により**1%以下**に低減し、SRN信
号と同等まで下げることが可能。

^{238}U 、同位体の放射性崩壊

$$X \rightarrow \gamma + n + X' \quad [20\text{MeV} > E_{\gamma} > 10\text{MeV}]$$

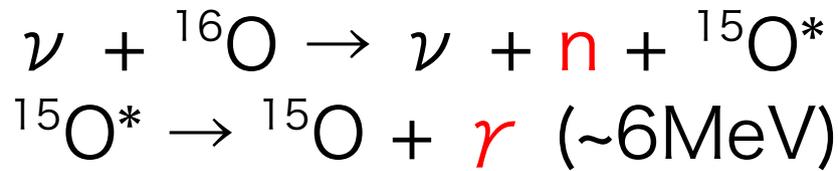
75 ev./y for 1 mBq/kg $\xrightarrow{\times 1\%}$ 0.8 ev./y



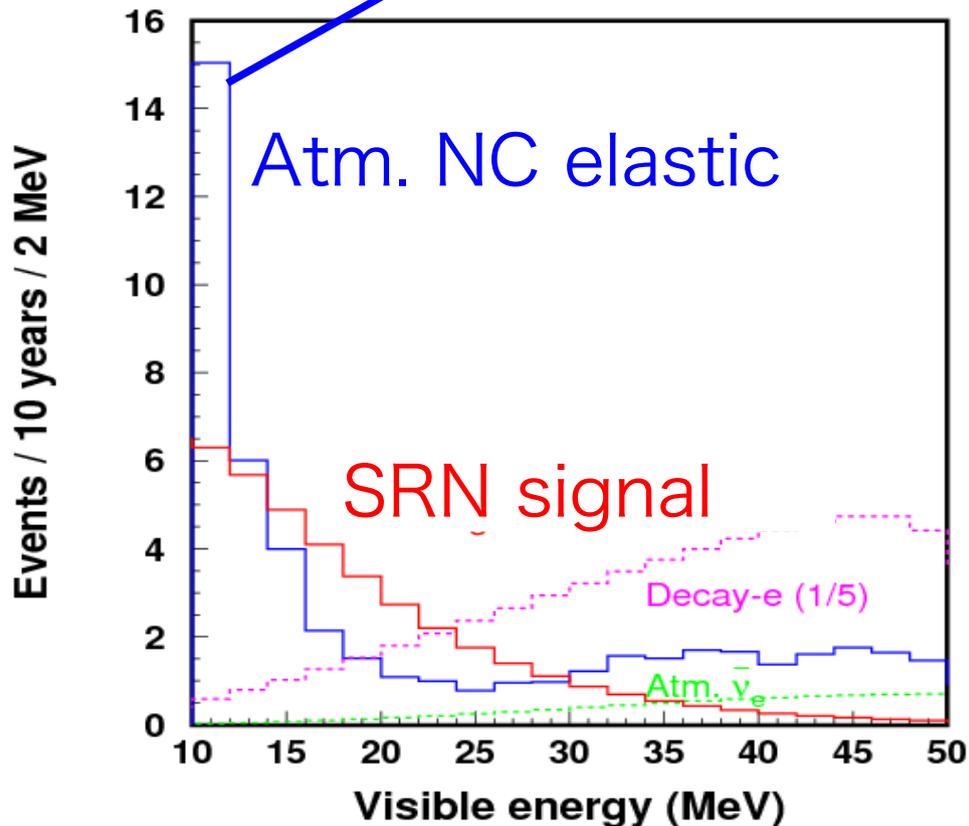
大気ニュートリノNC反応

ニュートリノ反応点と中性子捕獲点の距離、チェレンコフ発光の時間情報を用いてさらなるバックグラウンドの削減を目指す。

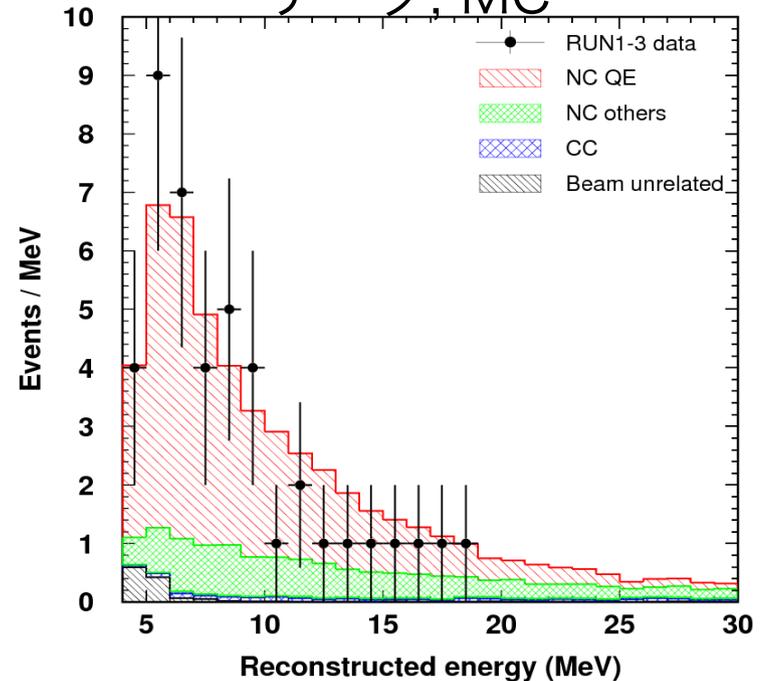
本反応についてはT2Kのビームデータも用いてStudy中。



$$[E_\nu = 0.1 \sim 1 \text{ GeV}]$$



T2Kビームによる γ 事象のエネルギーデータ, MC



GADZOOKS!の実現に向けて

実験の現状にとどまらず、今後の展開、どのように「本実験」として実現してゆくか?

現在200t試験機(EGADS)を用いて技術開発を進めている。今後EGADSでGd技術を実証し、本実験であるGADZOOKS!を実現する。

「本実験」実現に向けての問題点は何か。

Super-Kの構造材、透過率、バックグラウンド、環境等に与える影響が問題になる可能性がある。構造体、透過率、バックグラウンドへの影響については個々の研究でほぼ問題が解決されているが、EGADSを用いた統合試験により、それを確認する。また、環境への影響については、ガドリニウムの漏出を防ぐ複数の手段を検討中。

国際競争力、他の実験に比べての実験の長所

SRN信号は純水22.5ktを用いても年間数イベント程度であり、観測感度からして観測可能な装置は現時点でSKのみ。

まとめ、今後の予定

- SKにGdを溶かすことにより、実りある反電子ニュートリノ物理が展開できる。

= **GADZOOKS!**

- 200トンの試験用タンクを作り開発研究を行っている。
- バックグラウンドについては以下の研究が進められている

1. 既存バックグラウンドの偶発的な同時計測

2. 宇宙線核破砕による ${}^9\text{Li}$

3. $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ への放射性混入物

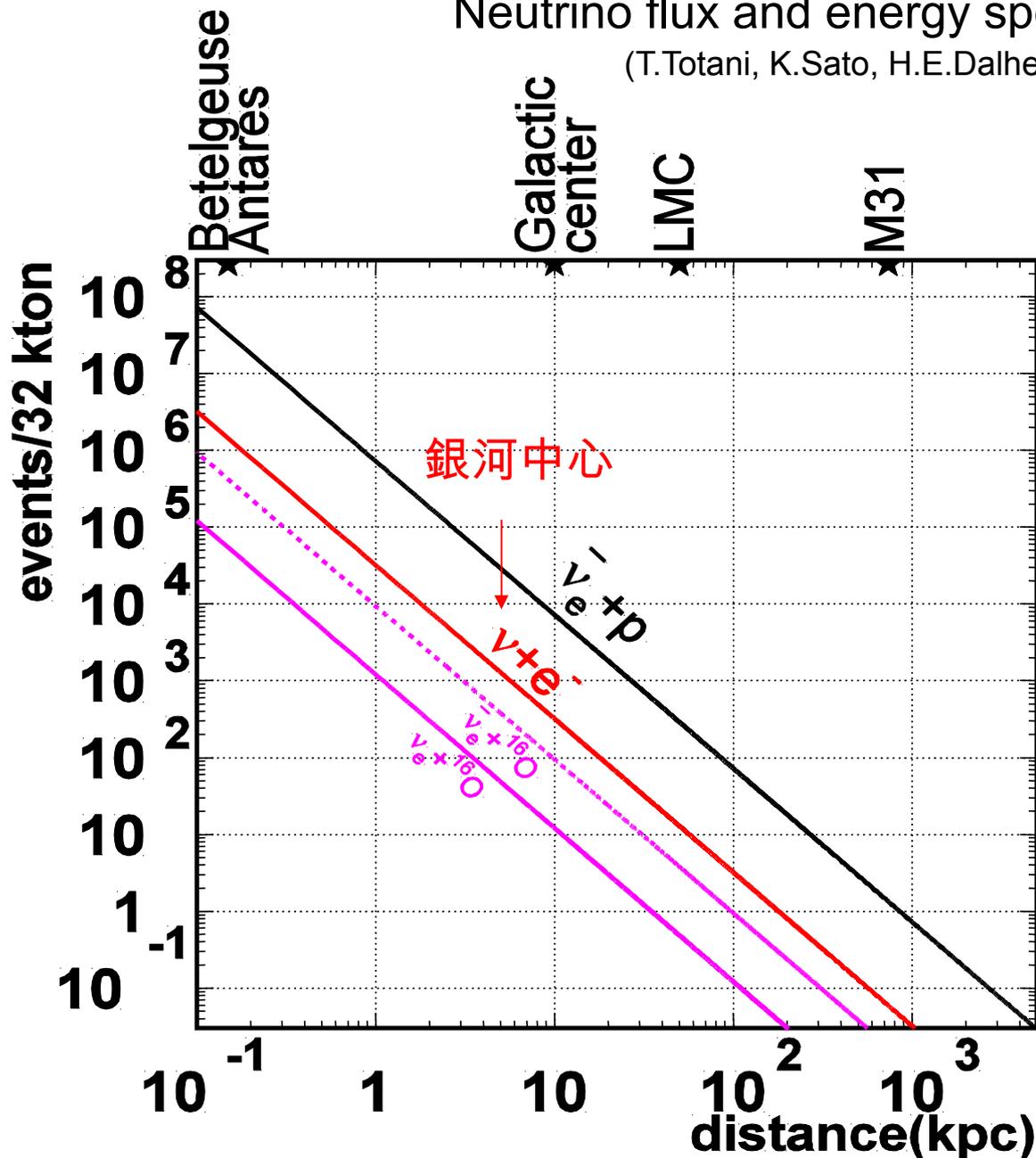
4. 大気ニュートリノNC反応

- 1-3については、既にSRN探索に問題がないレベルまで低減できる見込みがついている。4については、今後低減の研究を進める。
- 2013年に200t試験機EGADSで本手法の試験を開始し、問題がなければSKコラボレーションへの提言を行う。

APPENDIX

スーパーカミオカンデで期待される現象の数

Neutrino flux and energy spectrum from Livermore simulation
(T.Totani, K.Sato, H.E.Dalhed and J.R.Wilson, ApJ.496,216(1998))



~7,300 $\bar{\nu}_e + p$ events
~300 $\nu + e$ events
~100 $\nu_e + {}^{16}\text{O}$ events

for 10 kpc supernova

銀河中心でおきれば、
全部で8000イベント
に近い数が期待される。