

ニュートリノ物理学と関連する物理

物理学特別講義B(東京理科大学)

梶田隆章 (宇宙線研究所) (3回目)

講義の概要

基礎

ニュートリノの質量とニュートリノ振動実験

大気ニュートリノ、加速器ニュートリノ振動実験

太陽ニュートリノ、原子炉ニュートリノ

将来のニュートリノ振動実験

(ほとんど数式は使わないで講義)

前回までの復習

- ニュートリノの質量は標準理論では0と仮定されて来たが、**小さいニュートリノの質量は大統一理論などの大きいエネルギースケールの物理を示唆し、非常に大切。**
- ニュートリノに質量があると**ニュートリノ振動**という現象が起こるはずであり、これを用いてニュートリノの質量を調べる。

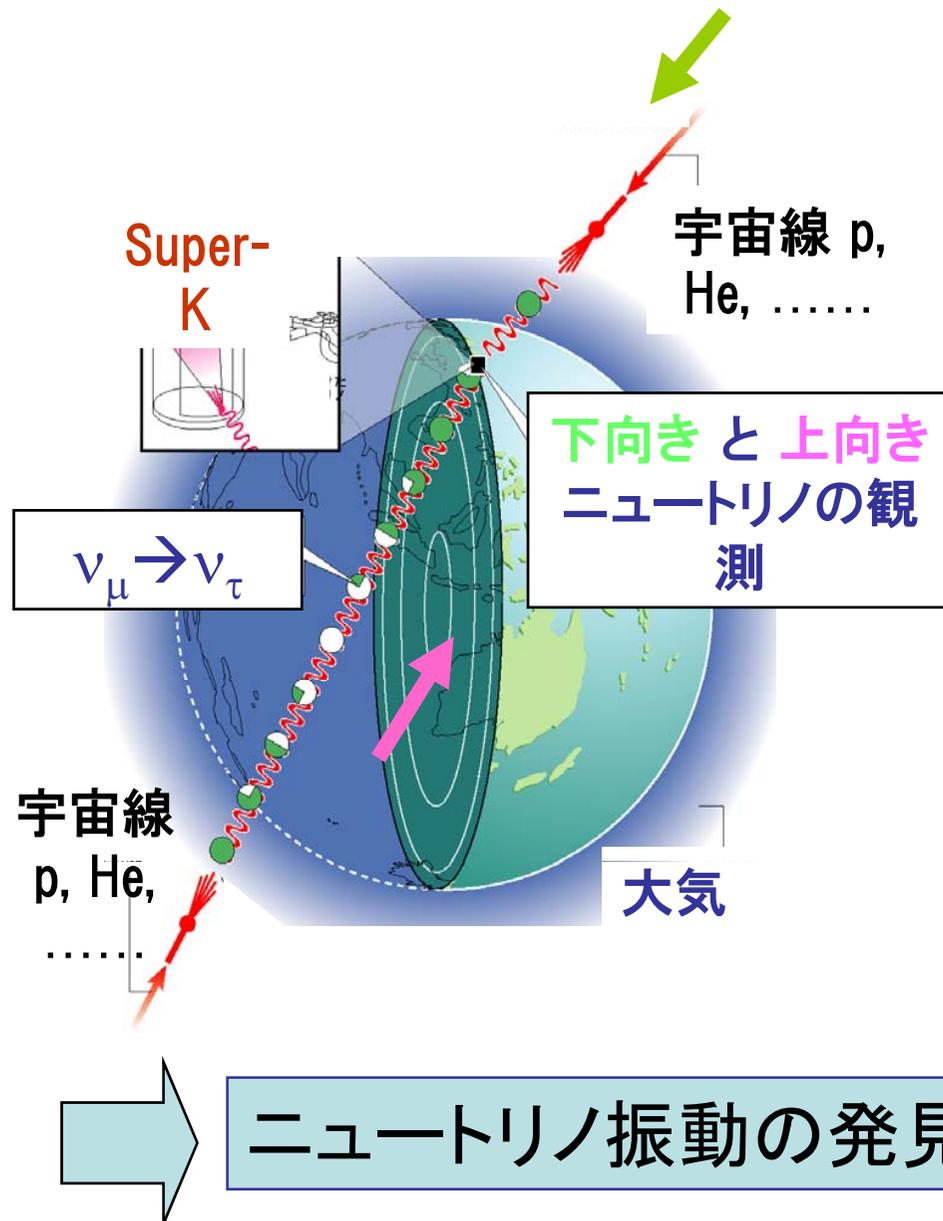
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L_\nu}{E_\nu} \right)$$

$$\text{ここで、 } \Delta m^2 = m_{\nu 1}^2 - m_{\nu 2}^2$$

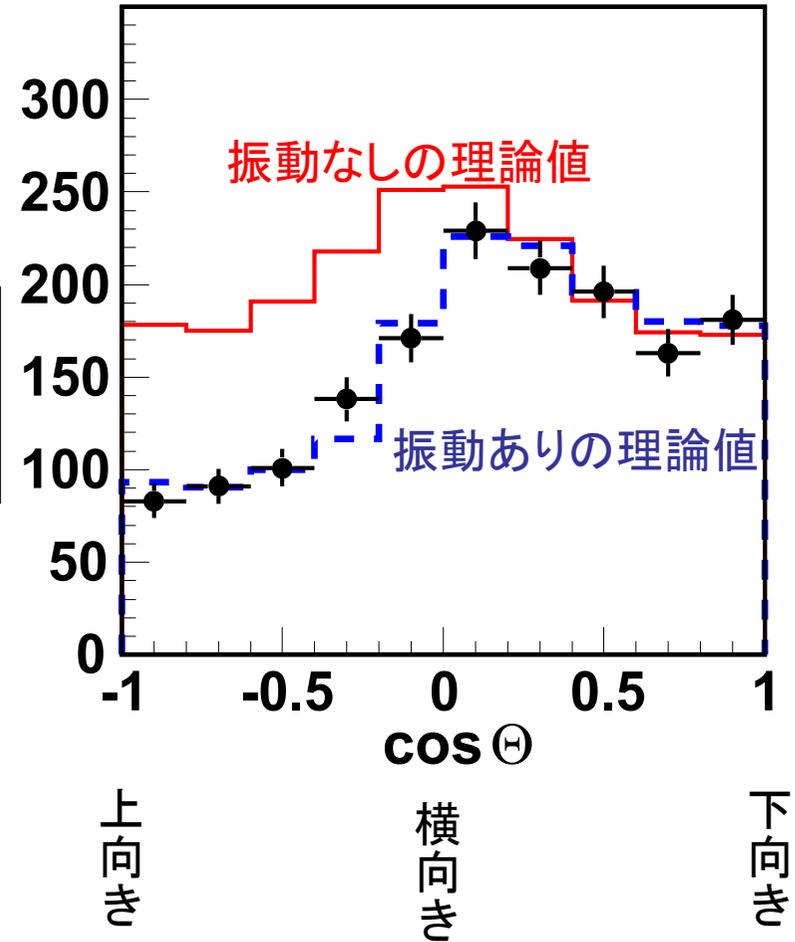
θ : mixing angle

$v_{\mu} \rightarrow v_{\tau}$ 振動

大気ニュートリノの観測とニュートリノ振動の発見

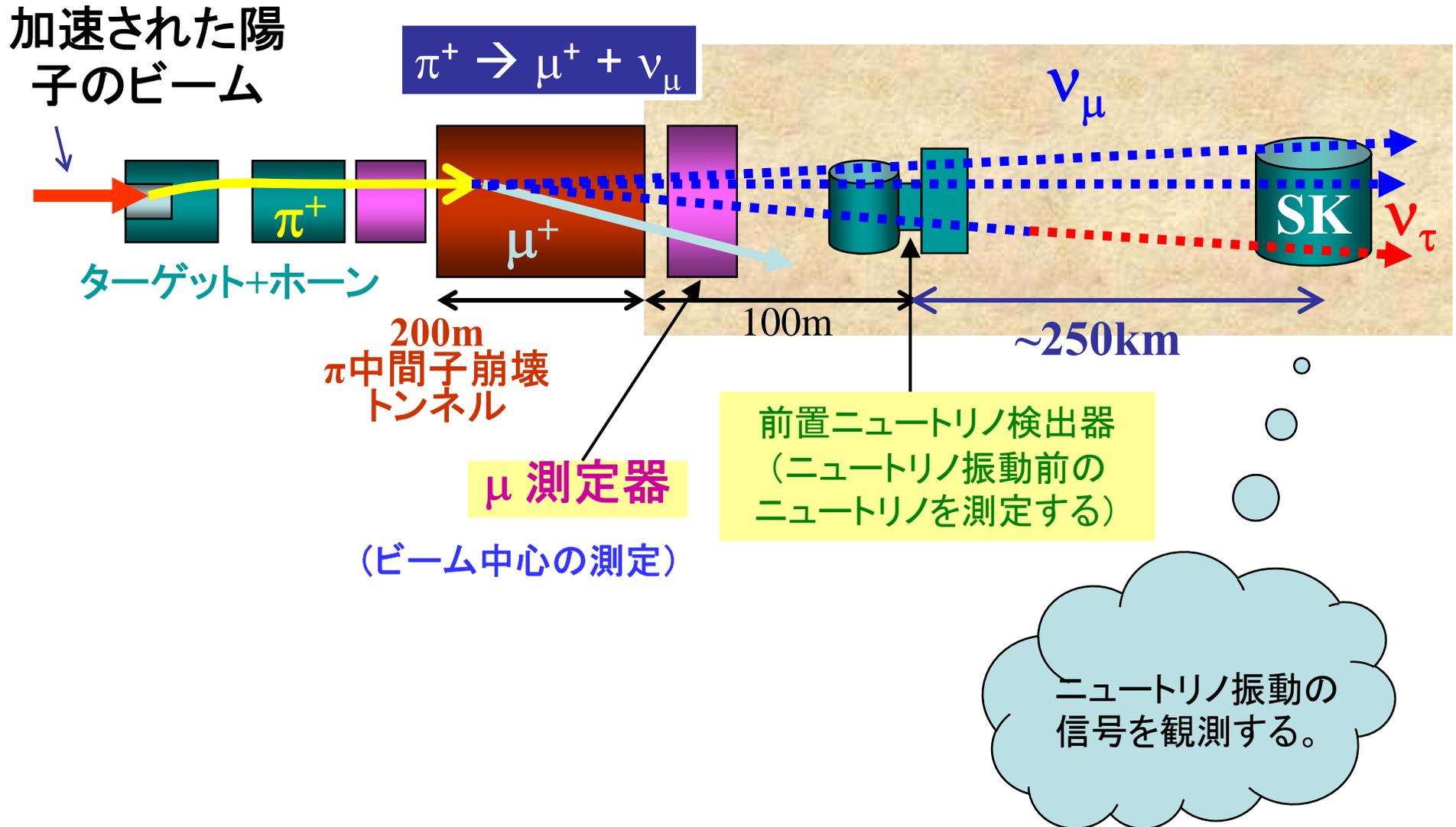


GeV 領域以上のミュオン
ニュートリノ事象



別な見方: ニュートリノは時間を感じる。→ 質量がある。

加速器を用いたニュートリノ振動実験の原理



本日の講義

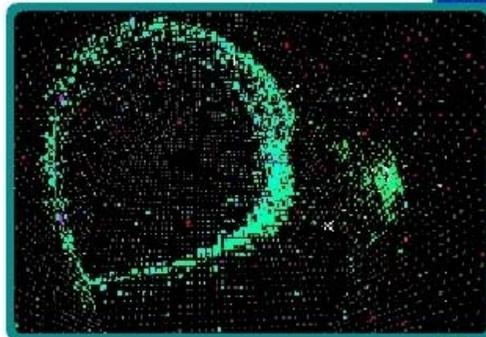
K2K実験 (1999-2004)

ニュートリノをつくる:

高エネルギー加速器研
究機構

KEK

飛行距離:
250km



Super-KAMIOKANDE



ニュートリノを測定する:

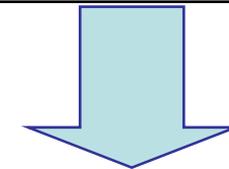
スーパーカミオカンデ

K2K実験での人工的に生成された ニュートリノの観測

スーパーカミオカンデで観測された、つくばから飛来したニュートリノ事象

このようなニュートリノ反応を**108**例観測。

一方、ニュートリノ振動がないとすると **151 ± 11** 例観測されるはず。



やはり一部別なニュートリノになっている！

(スーパーカミオカンデが天然のニュートリノで観測した結果とまさに同じ。)

より大規模な実験 (MINOS実験 @アメリカ)

2005年実験開始

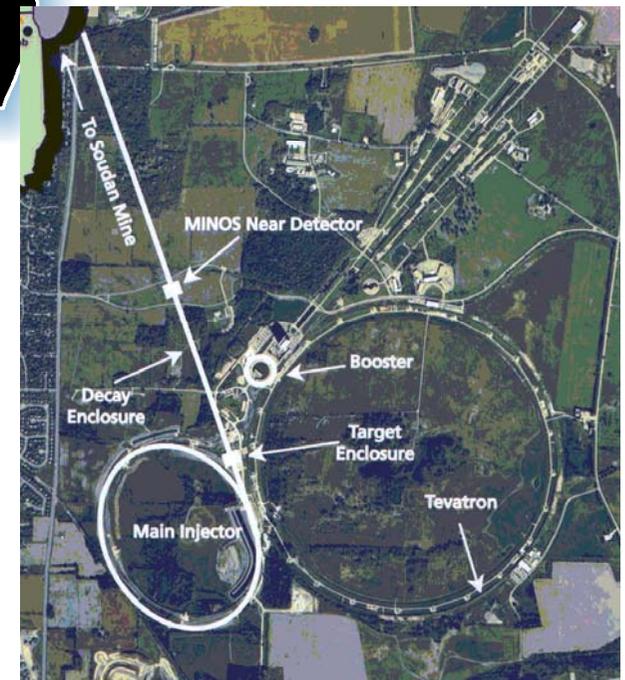


MINOS 測定器
(総重量 5.4 kton)

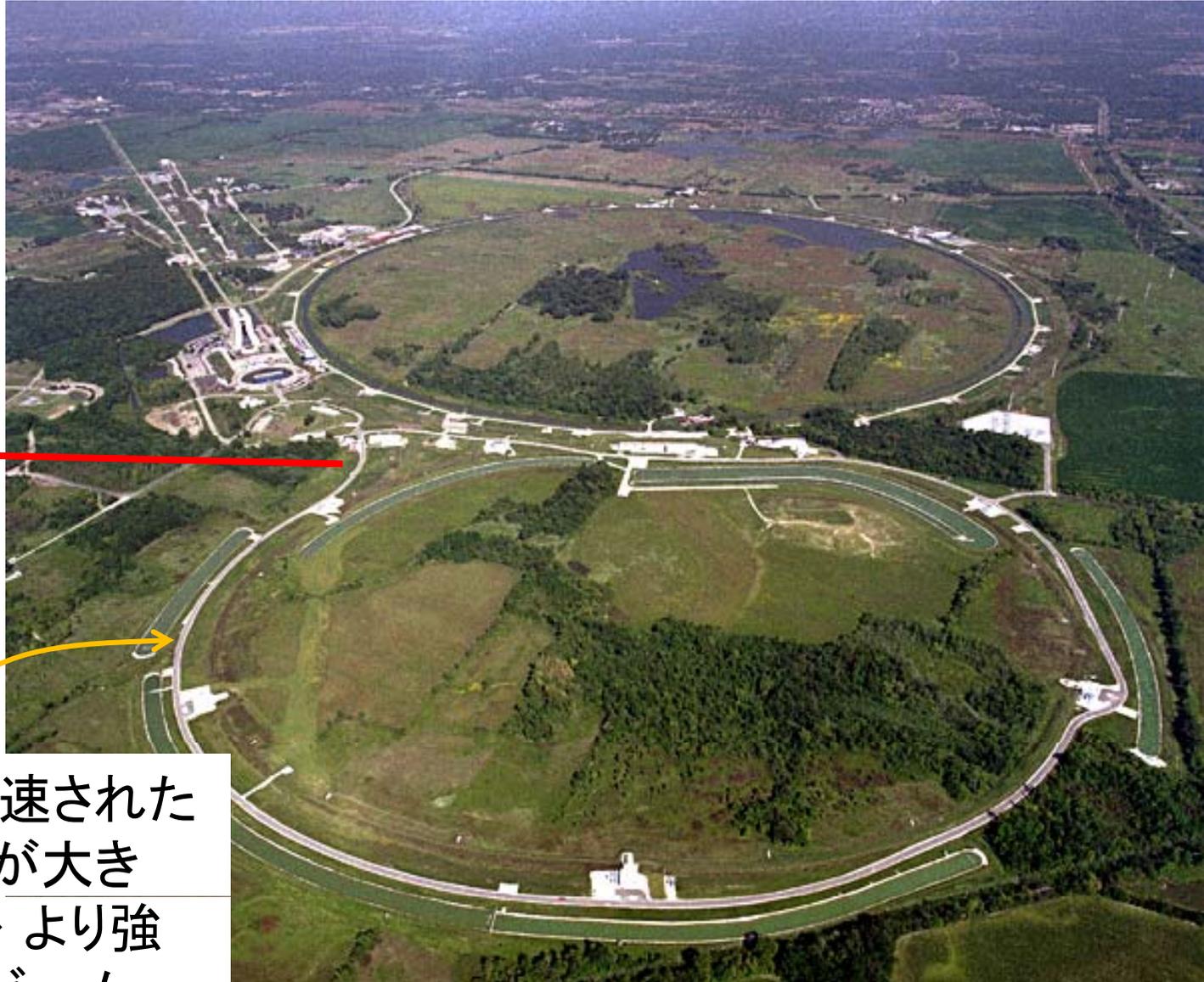
735km



Fermilabと
ニュートリノビームライン



Fermilab



ν_{μ}



より強力な(加速された
ビームの強度が大き
い)加速器 → より強
いニュートリノビーム

MINOS 測定器



前置検出器
(1 kton)

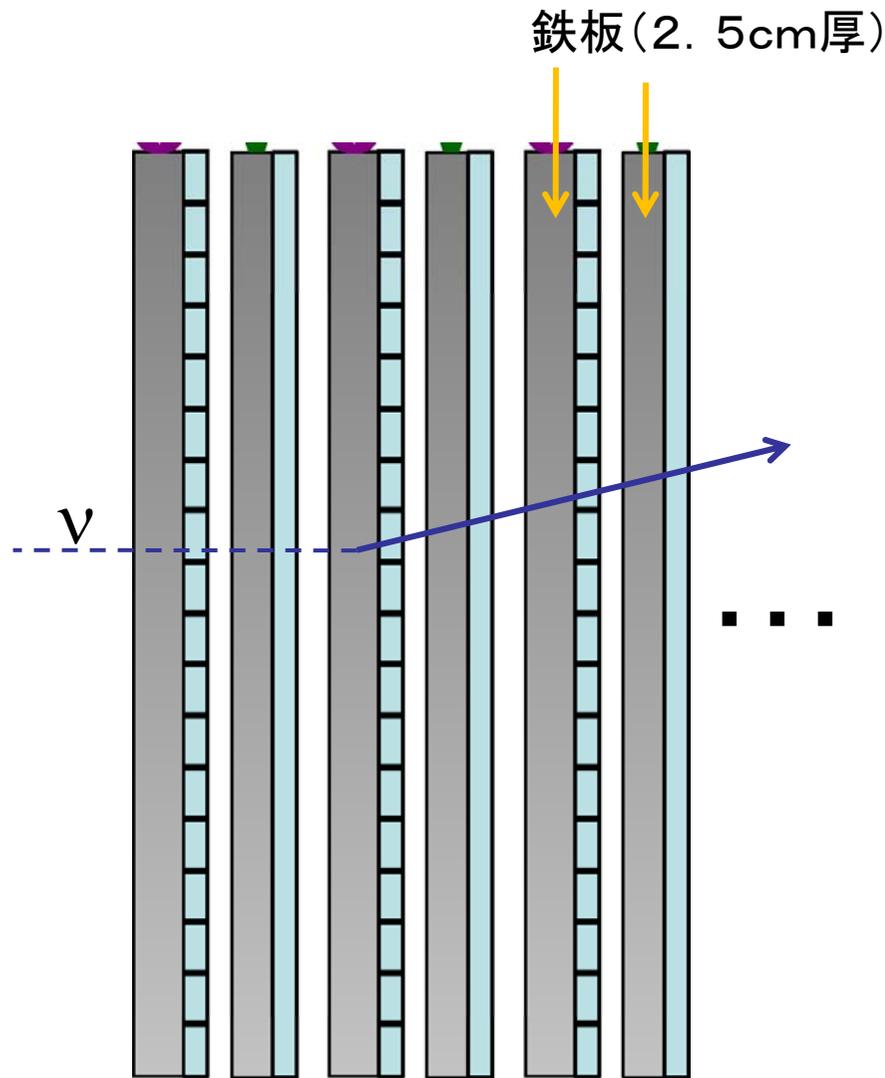
振動前のニュートリノ
を測定



735km先の検出器
(5.4 kton)

振動後のニュートリノ
を測定

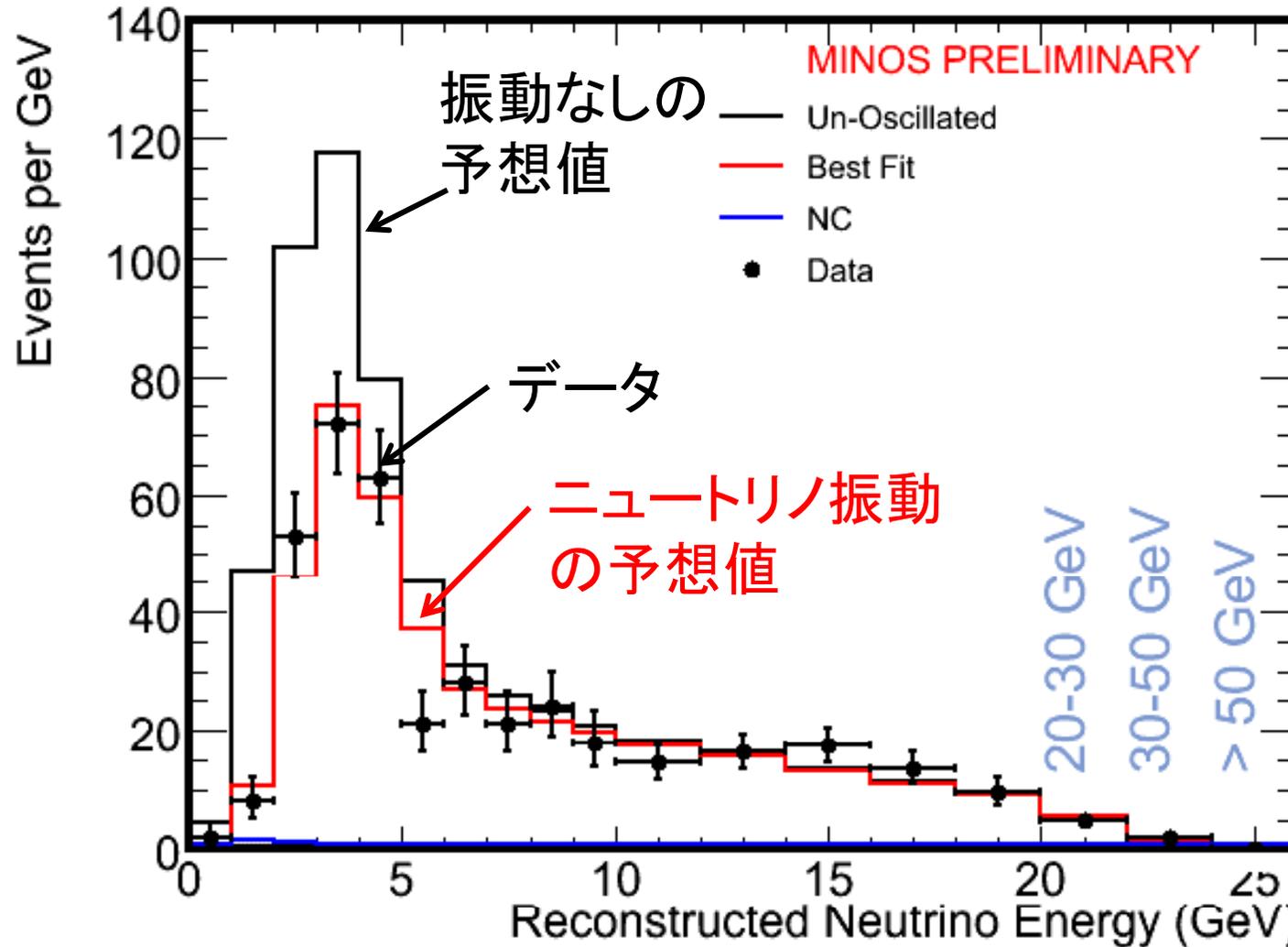
MINOS実験で用いられた測定器技術



粒子が通るとシンチレータが発光し、それを中央の溝に設置した波長変換機能のついた光ファイバーを用い両端の光電子増倍管で読み出す。

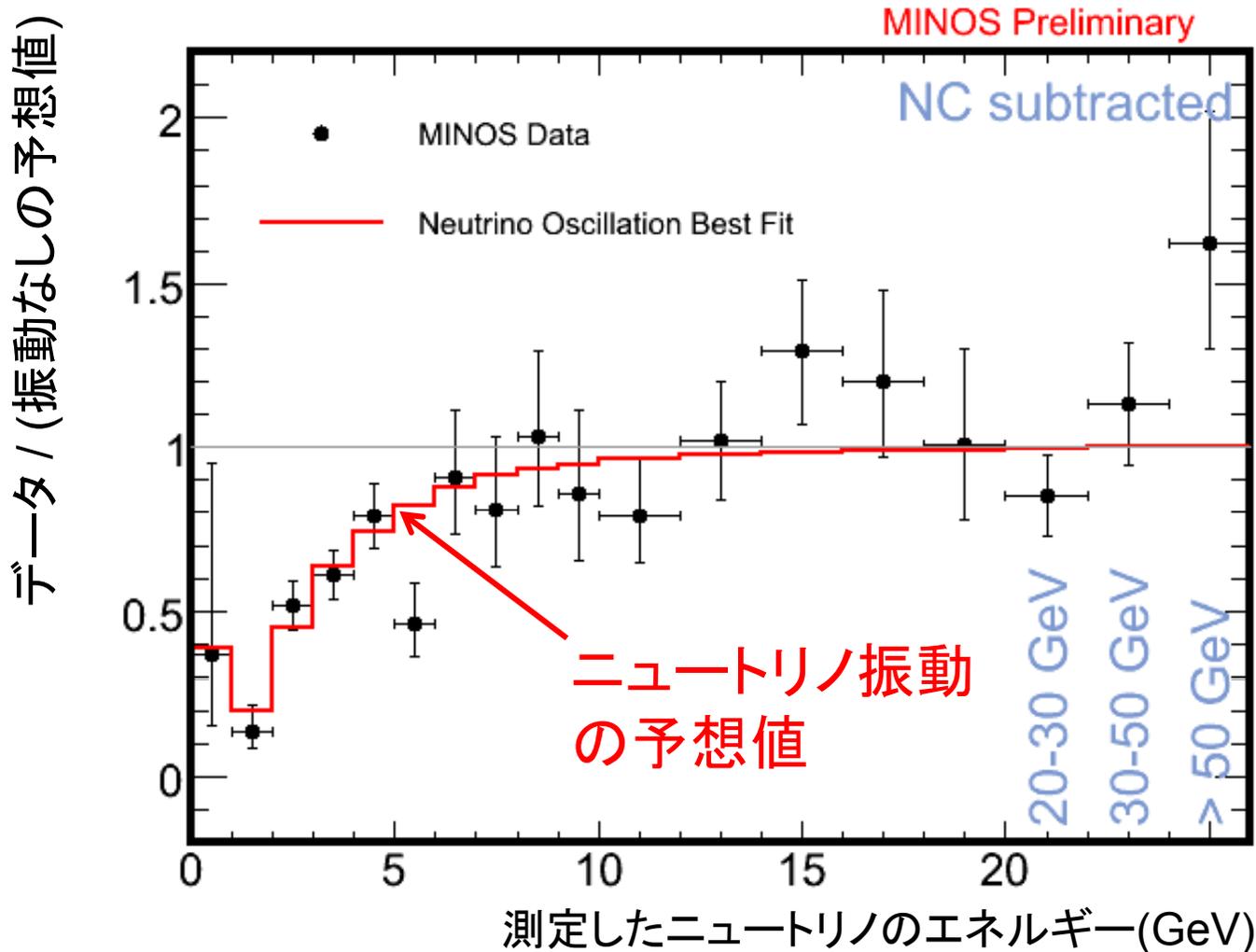
MINOSの結果(2007年)

Oscillation Results for 2.50E20 p.o.t



測定したニュートリノのエネルギー(GeV)

MINOSの結果(2007年)



まさに、ニュートリノの減り方はニュートリノ振動の予言の通り。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right)$$

今までのまとめ

- 宇宙線が大気中で生成する**大気ニュートリノの研究によってニュートリノ振動が発見**された(1998)。
- ニュートリノに非常に小さいが有限な質量の存在。(対応するクォークの質量の 10^{-12} 程度。)
- 加速器を用いたニュートリノ振動実験(K2K、MINOS)により、ニュートリノ振動を再確認した。
- ニュートリノの質量と混合の問題は大統一理論などの標準理論を超えた物理の理解に不可欠であり、今後は次第に加速器を用いた大規模なニュートリノ振動実験に研究の中心が移っていくものと考えられる。(最終回、今後の研究を話します。)

電子ニュートリノ

から

別なニュートリノ

(ミューニュートリノ、タウニュートリノ)

への

ニュートリノ振動

	E_ν	L	Δm^2	主な振動
宇宙線	0.1-100 GeV	15-13000 km	$>10^{-4}eV^2$	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$
加速器	1-10 GeV	$<1000\text{km}$	$>10^{-3}eV^2$	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$
太陽	0.1-20 MeV	$1.5 \cdot 10^8$ km	$>10^{-11}eV^2$	$\nu_e \rightarrow \nu_x$
原子炉	A few MeV	100m – 200km	$>10^{-5}eV^2$	$\nu_e \rightarrow \nu_x$

まず、太陽ニュートリノ実験の話をしばらくして、それから原子炉ニュートリノ実験の話をしてします。

太陽ニュートリノ

太陽中での原子核反応と太陽ニュートリノ強度

原理的には太陽中の核融合反応は;



この反応での放出エネルギー: 27MeV

地上での太陽ニュートリノの強度 (flux) を見積もる

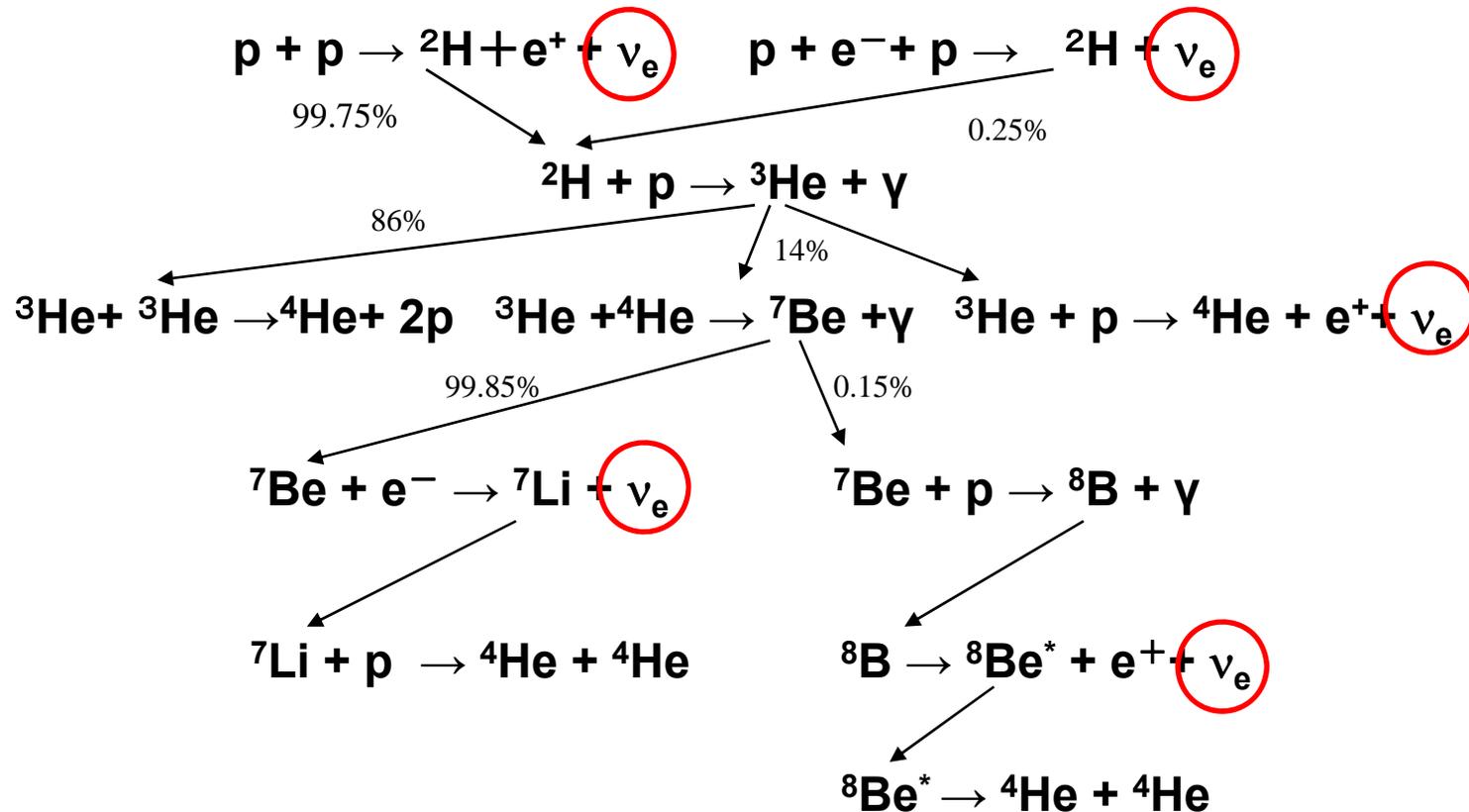
$$flux = \frac{1}{4\pi R^2} \times \frac{L_{sun}}{27MeV} \times 2\nu_e$$

$$(L_{sun} = 3.86 \times 10^{33} \text{ erg / sec})$$

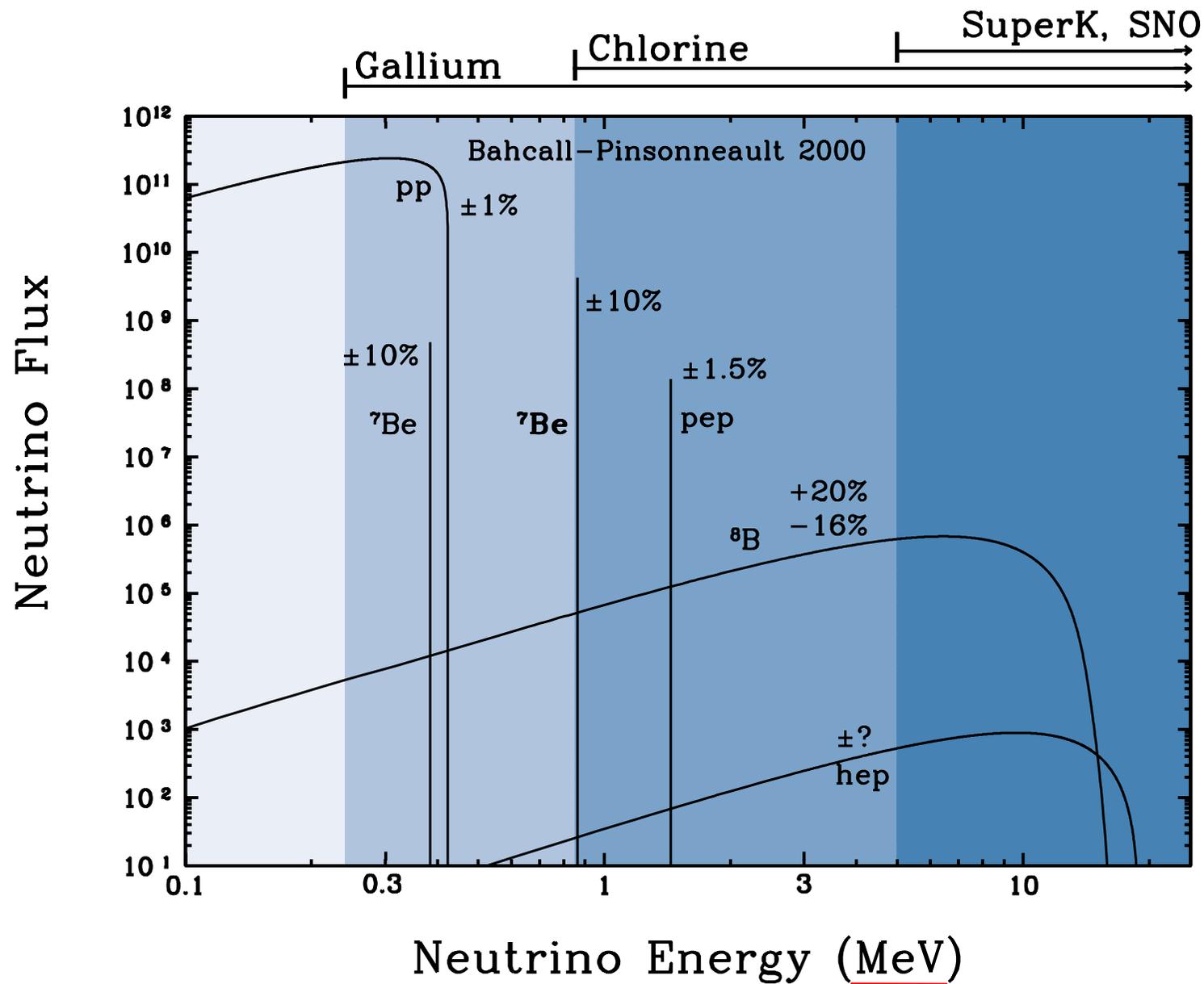
$$= 6 \times 10^{10} \nu_e / cm^2 / sec$$

実際の太陽の核融合反応

(もちろん、実際は4個の陽子が一度に融合してヘリウム(α)になることはない。)



計算された太陽ニュートリノ強度 (flux)



いろいろな太陽ニュートリノ実験

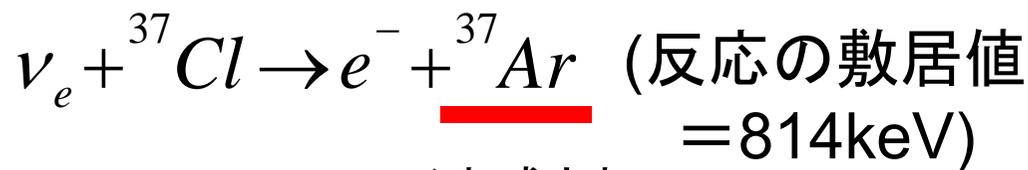
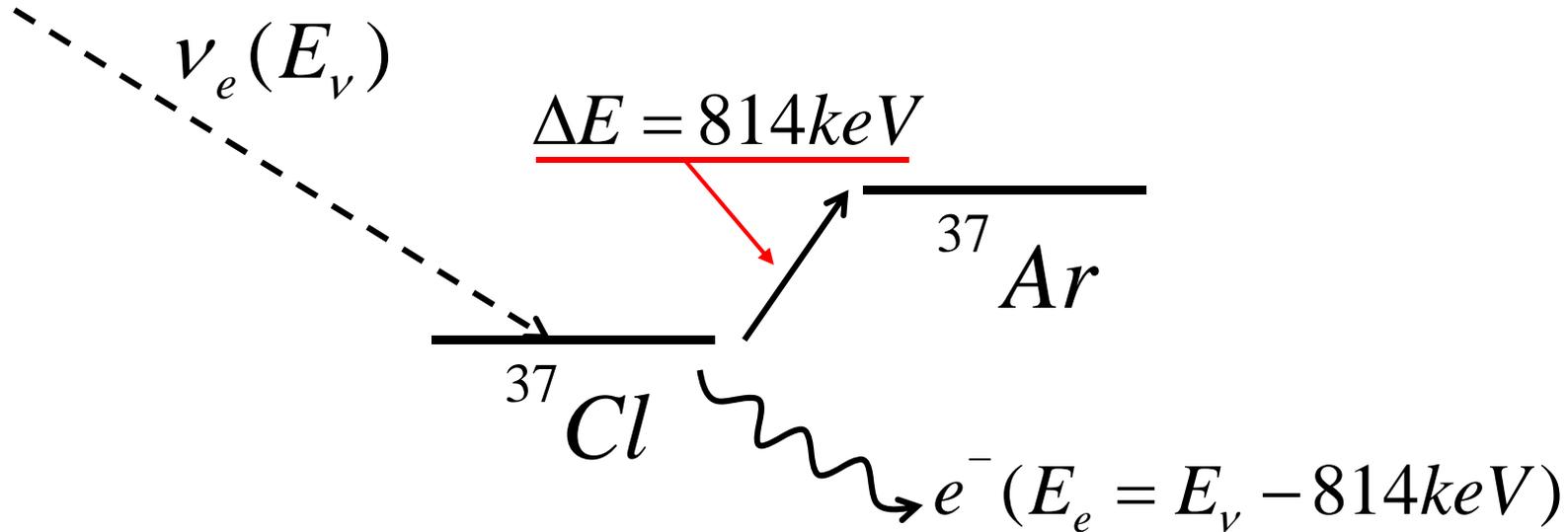
1) 塩素を使った実験: $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$

2) ガリウムを使った実験: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$

3) 水(中の電子)を使った実験: $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

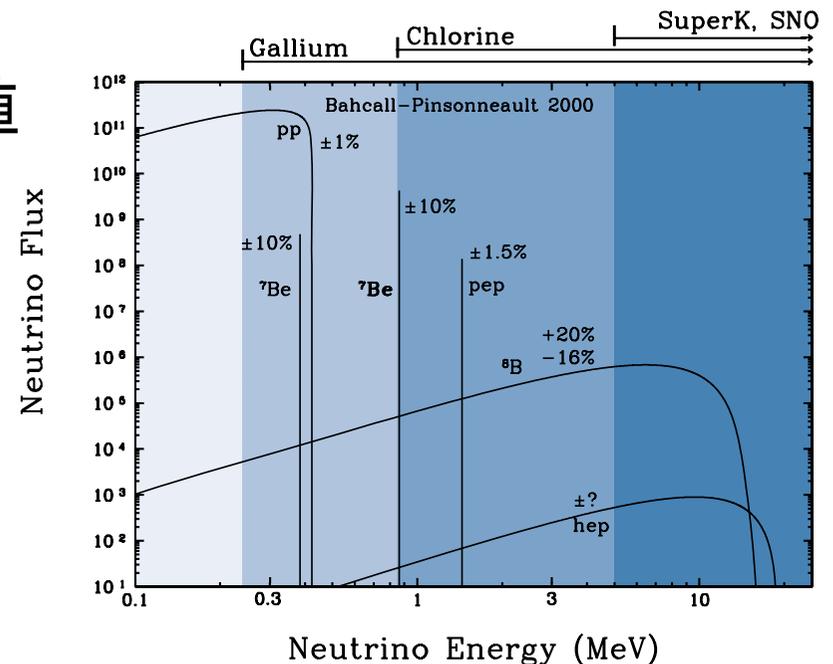
4) 重水を用いた実験: $\nu + D \rightarrow$

塩素(^{37}Cl)を用いた実験



(生成されたArの数を数える)

615トン C_2Cl_4 測定器での予想反応数
 = **1.5** / 日(誤差は約15–20%)。また約8割は ^8B ニュートリノの反応)



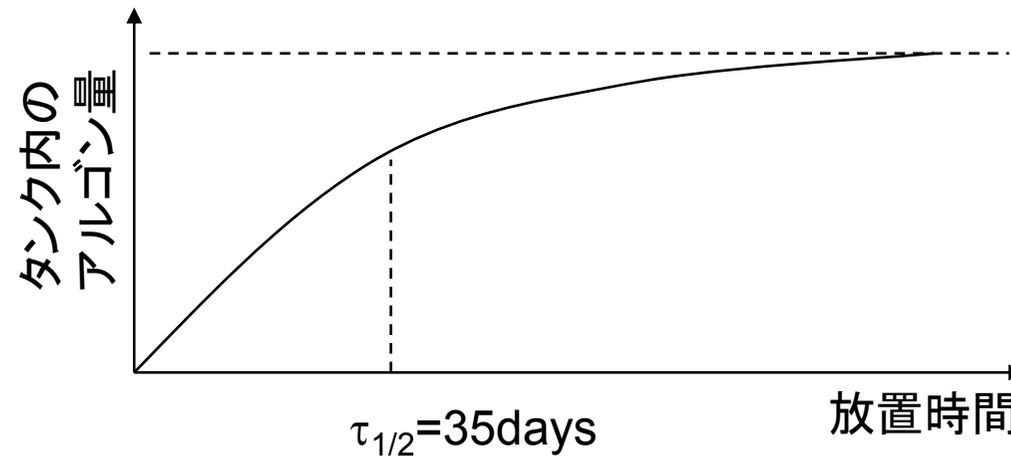
Homestake ^{37}Cl 実験装置



615トン C_2Cl_4

実験の方法

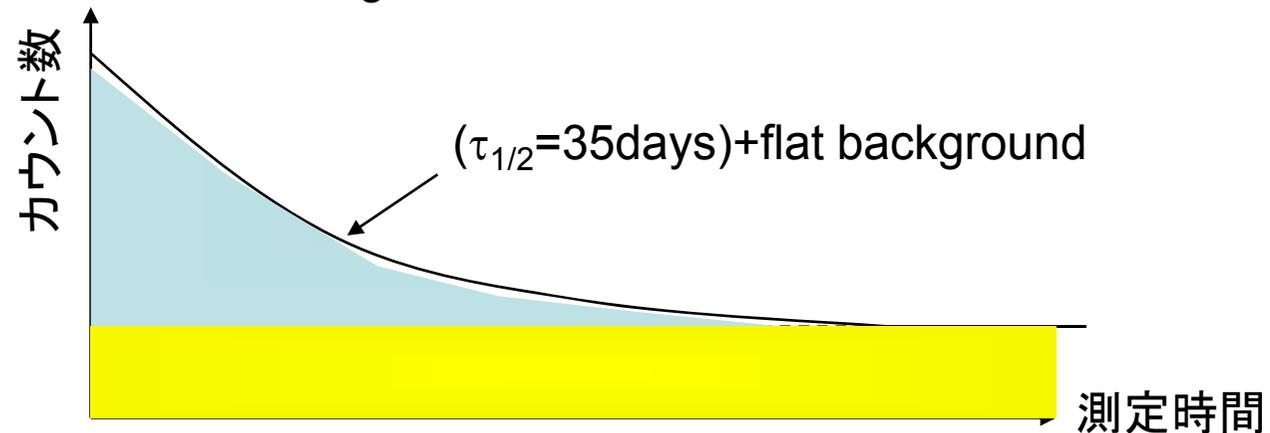
(1) 2-3ヶ月放置。



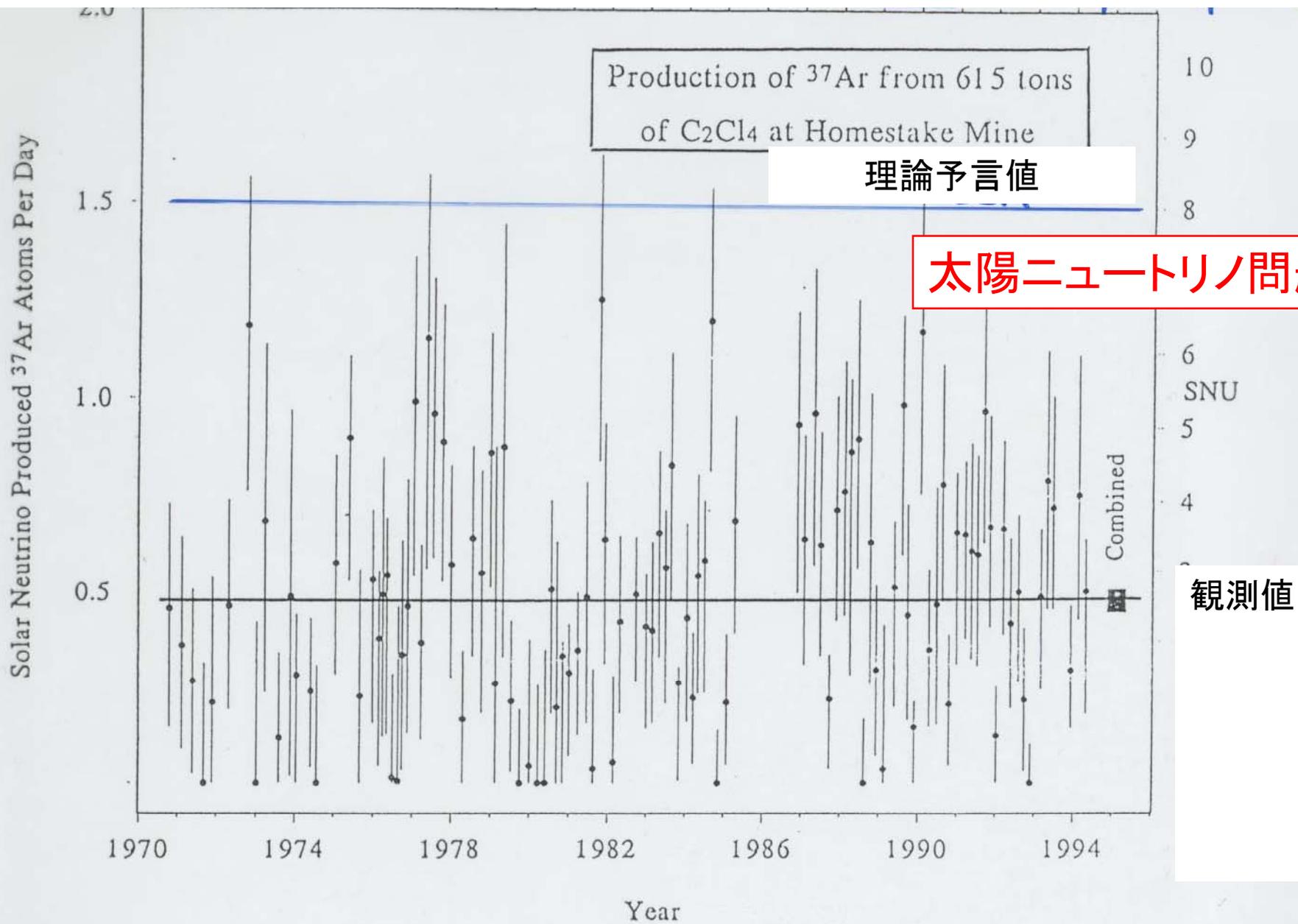
(2) ³⁷Ar を集める。

→ バブリング技術

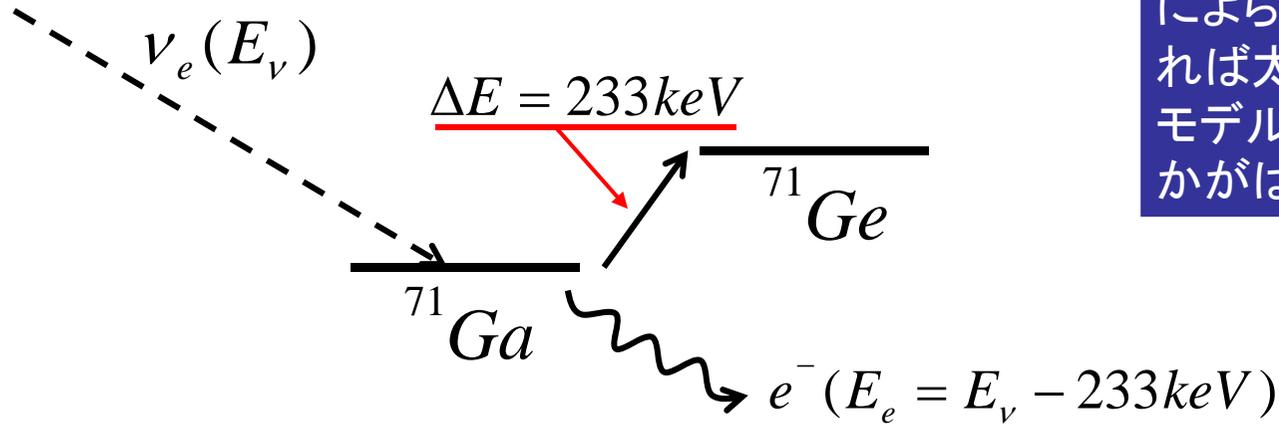
(1) ³⁷Ar の数を数える。



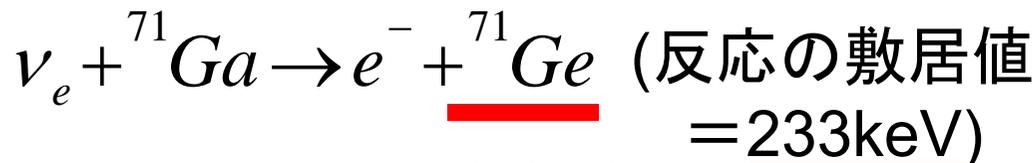
^{37}Cl 実験の結果



ガリウム(^{71}Ga)を用いた実験



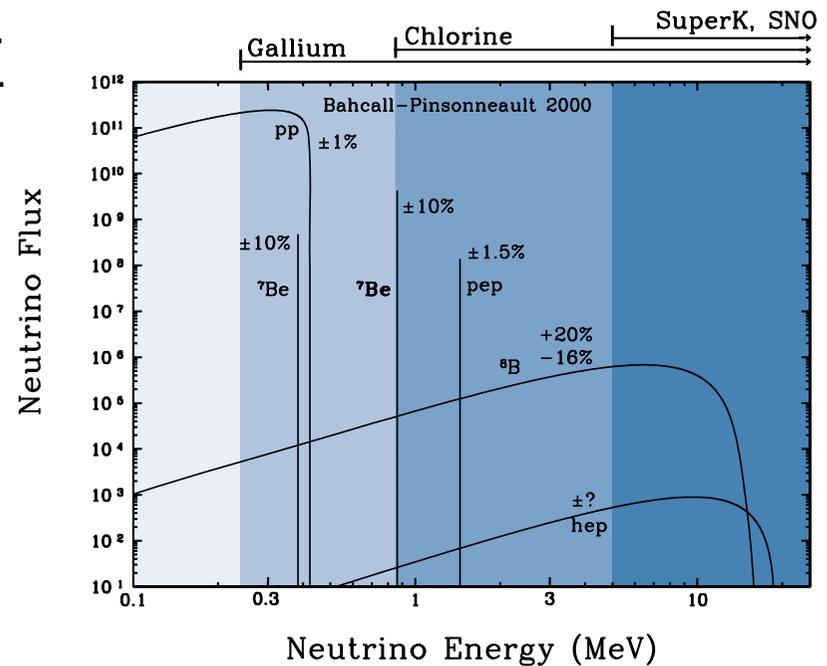
動機: 太陽モデルの計算の詳細によらないppニュートリノを測定すれば太陽ニュートリノ問題が太陽モデルの問題なのかそうでないのかがはっきりする。



(生成されたGeの数を数える)

太陽のエネルギー生成に最も大切なppニュートリノが観測できる。

Cl測定器の約10から20分の1の質量でCl測定器と同様の観測頻度。また5割強はppニュートリノの反応。



ガリウム実験の方法：
塩素実験と原理的にほぼ同じ

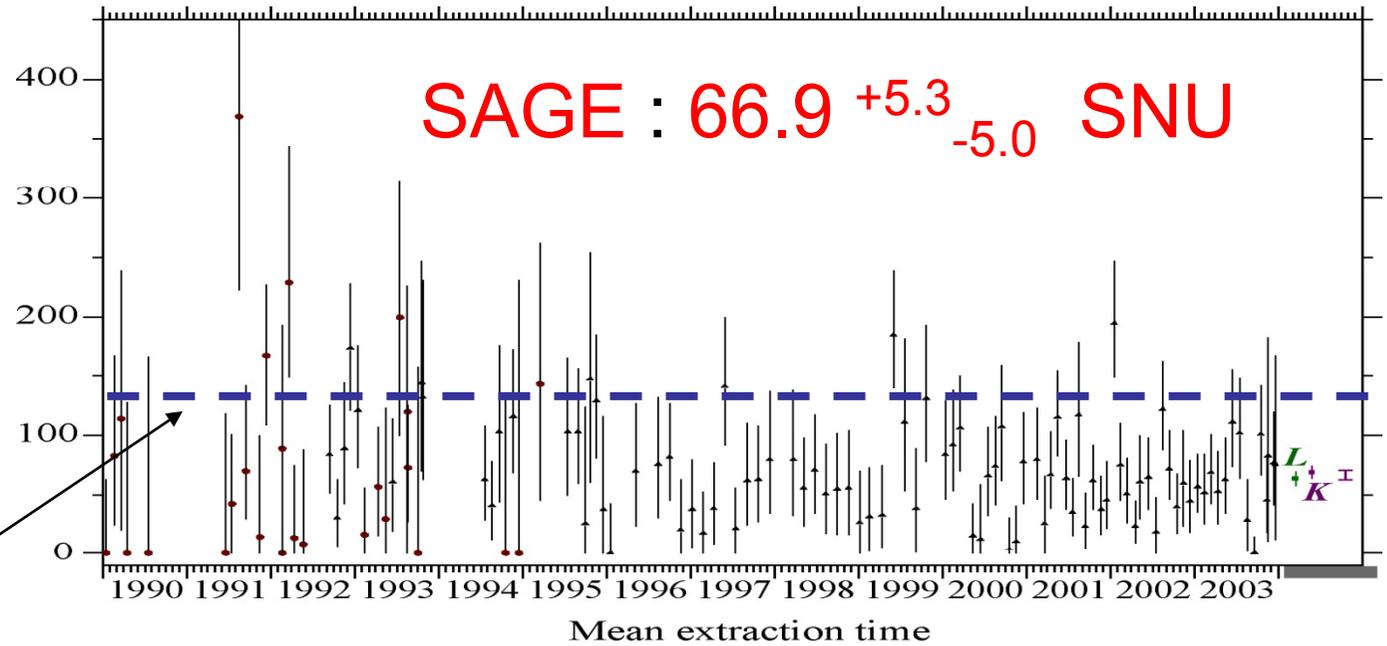
SAGE実験(ロシア) ガリウム約60トン



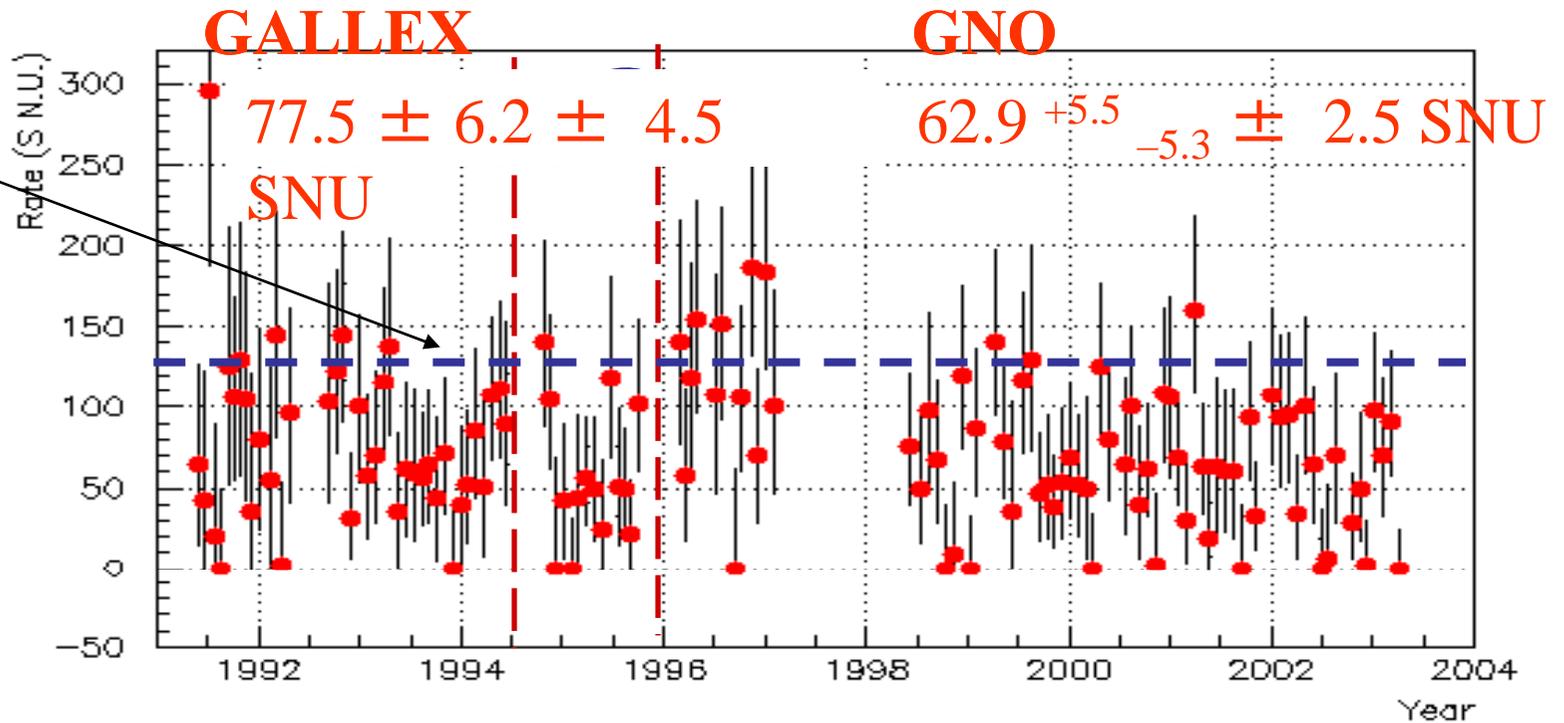
Gallex/GNO実験(ヨーロッパ) ガリウム30トン



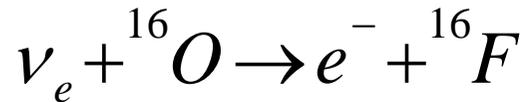
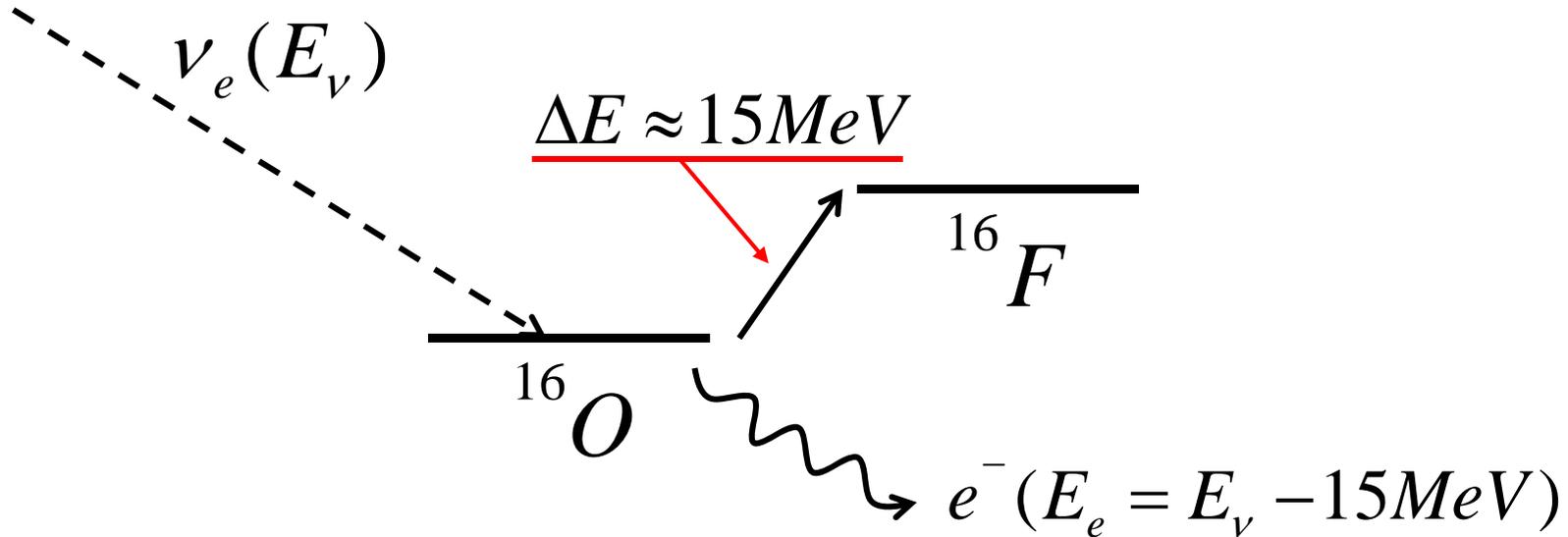
ガリウム実験の結果



太陽理論
の予言値

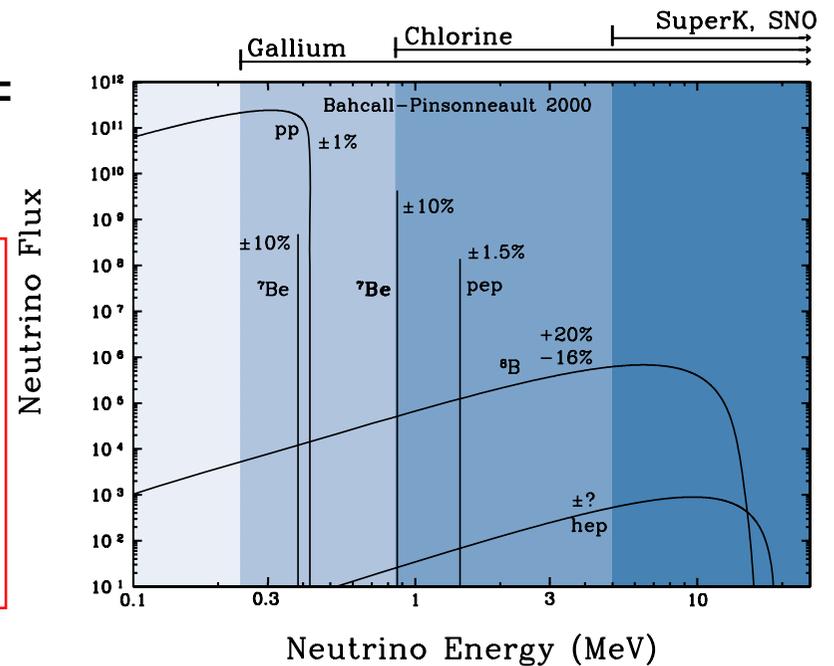


水(^{16}O , H)を用いた実験



(反応の閾値 = 15MeV)

太陽ニュートリノより閾地エネルギーが高いので太陽ニュートリノは反応しない。



$$\nu_e + p \quad ?$$

$\nu_e + p$ 反応がおこったら出てくるのは必ず電子(e^-)。

$$\text{従って: } \nu_e + p \rightarrow e^- + X$$

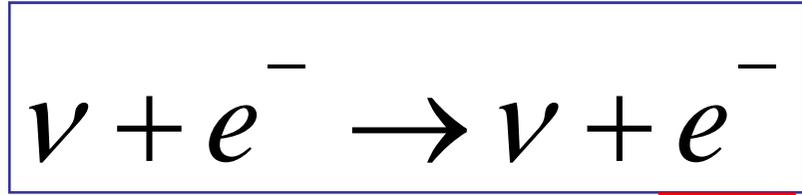
電荷が保存するので、 X の電荷は $2+$ でなければならない。

しかし、電荷 $2+$ で陽子程度の重さの(あるいは陽子より軽い)粒子は存在しない。

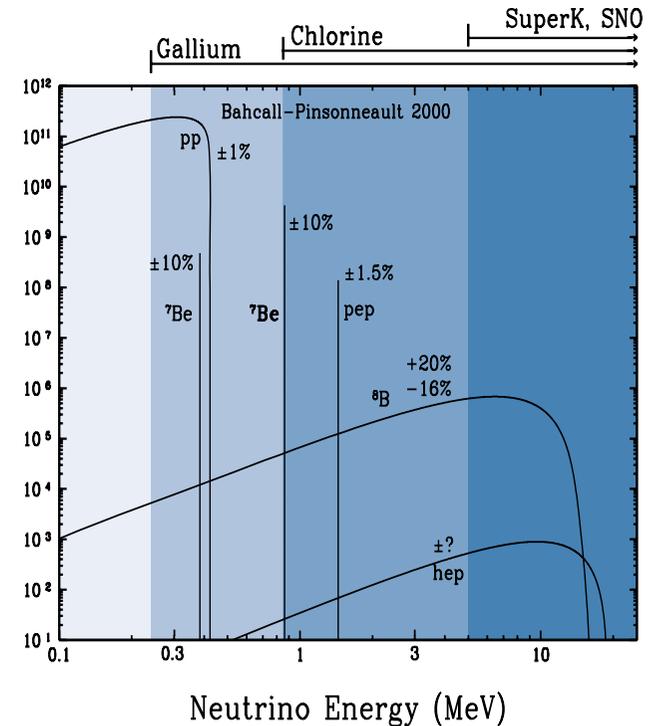
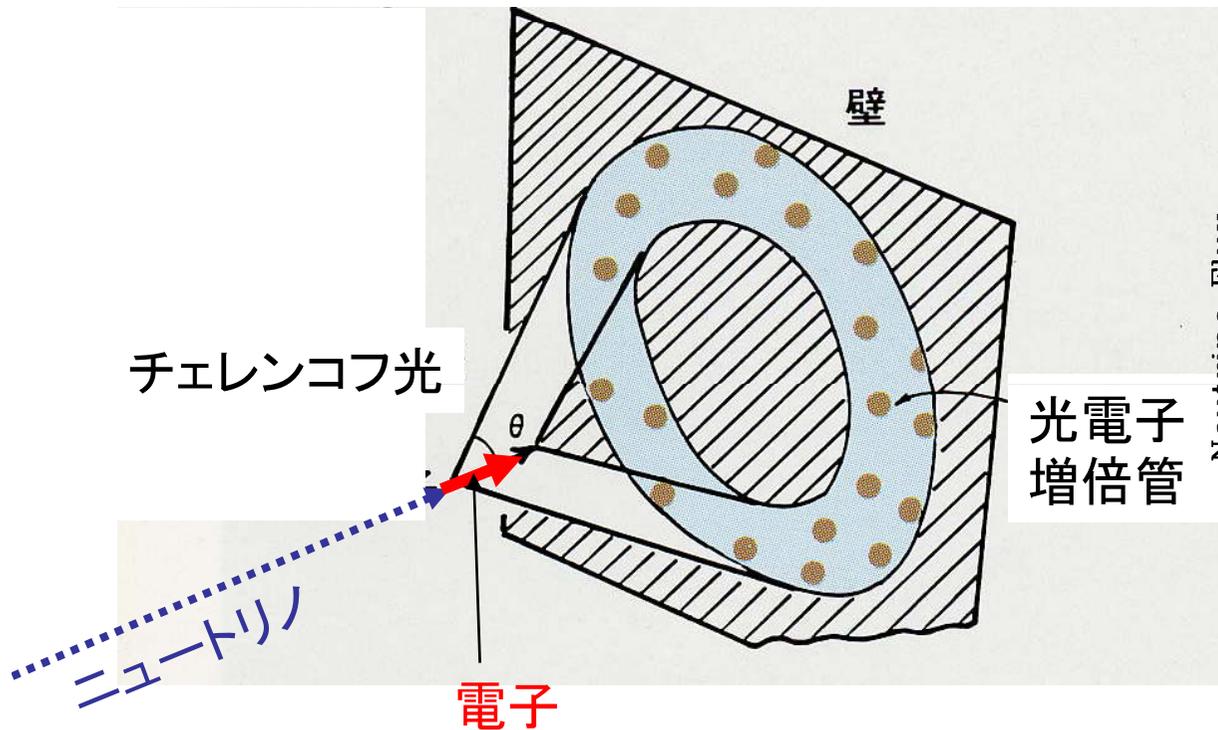
→ この反応はおこらない。

従って、太陽ニュートリノは酸素原子核や陽子とは反応しない。

水チェレンコフ太陽ニュートリノ実験 (カミオカンデとスーパーカミオカンデ)



測定 (電子の放出するチェレンコフ光を観測する)



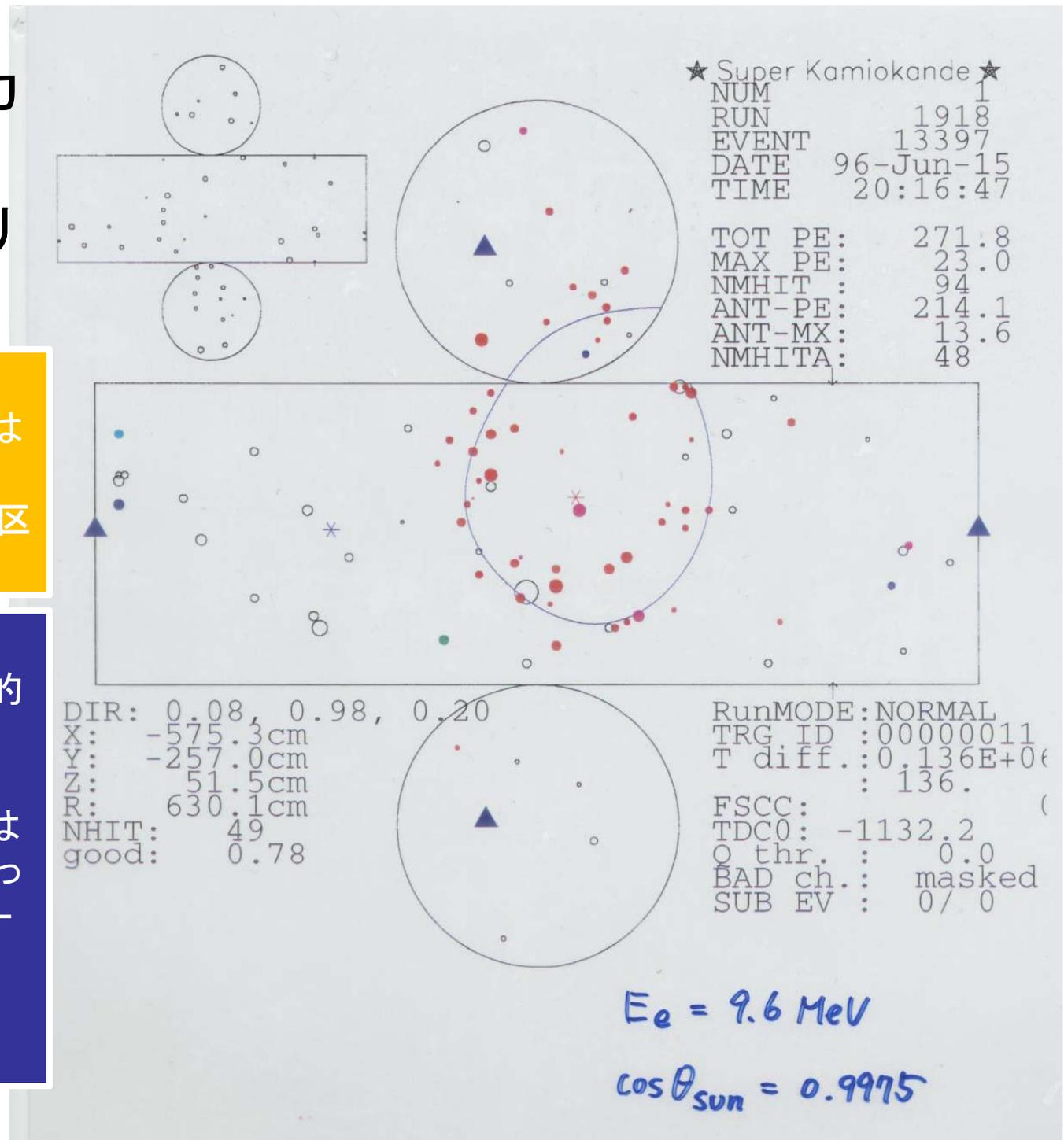
スーパーカミオカンデで観測された太陽ニュートリノの例

よくある質問:

スーパーカミオカンデでは太陽ニュートリノと大気ニュートリノをどのように区別するのでしょうか？

答え:

太陽ニュートリノは基本的に14MeV以下のエネルギーです。一方大気ニュートリノは典型的には1GeVのエネルギー。従ってもし、観測されたニュートリノのエネルギーが約14MeV以下なら太陽ニュートリノ。



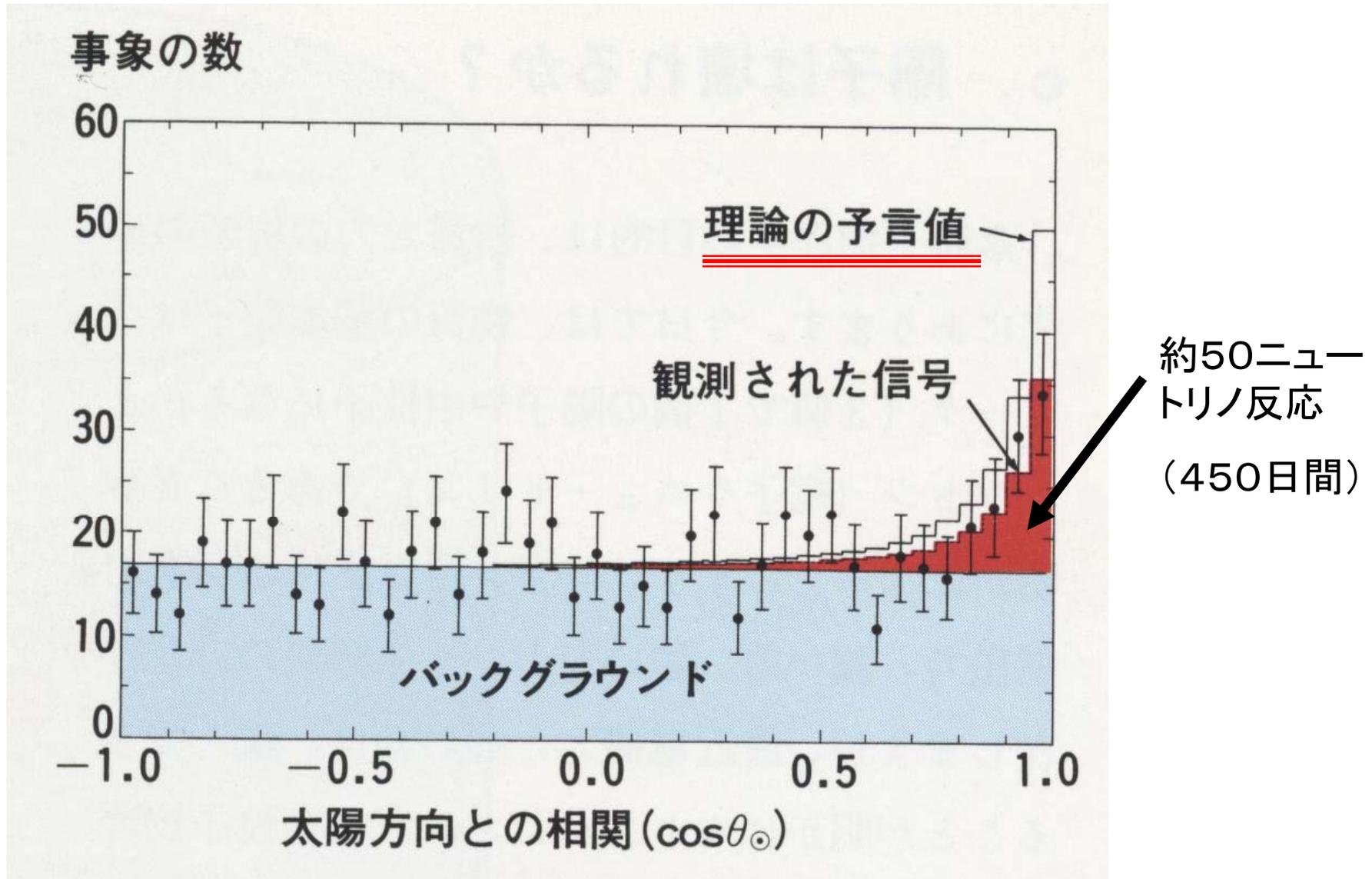
$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ の特徴

- ニュートリノのエネルギー(約10MeV) \gg 電子の静止質量(0.5MeV/c²) \rightarrow 放出される電子の方向は太陽ニュートリノの方向とほぼ同じ方向(太陽の反対方向) (³⁷Clや⁷¹Gaでは方向の情報なし。)
- 電子のエネルギーを測定すれば、ニュートリノのエネルギーを推定できる。(³⁷Clや⁷¹Gaでは各イベントでのエネルギーの情報なし。)
- いつニュートリノ相互作用がおこったか正確に知ることができる。

太陽ニュートリノ実験(カミオカンデなど)の難しさ

- 低いニュートリノ反応数: 1000トンの水で、1日あたり0.2-0.5。
- 一方、太陽ニュートリノ反応の結果出てくる電子のエネルギーは自然界にあるベータ線のエネルギー程度。→ 天然放射性元素を極限まで取り除く。
- 電子のエネルギーが低いのでチェレンコフ光の量が少ない。→ 観測が難しい。

カミオカンデの最初の太陽ニュートリノデータ





The Nobel Prize in Physics 2002

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

The Nobel Prize in Physics 2002

- Press Release
- Advanced Information
- Information for the Public
- Presentation Speech
- Illustrated Presentation

Raymond Davis Jr.

- Nobel Lecture
- Interview
- Nobel Diploma
- Prize Award Photo
- Other Resources

Masatoshi Koshiba

- Nobel Lecture
- Interview
- Nobel Diploma
- Prize Award Photo
- Other Resources

Riccardo Giacconi

- Nobel Lecture
- Banquet Speech
- Interview
- Nobel Diploma
- Prize Award Photo
- Other Resources



Raymond Davis Jr.

🏆 1/4 of the prize
USA



Masatoshi Koshiba

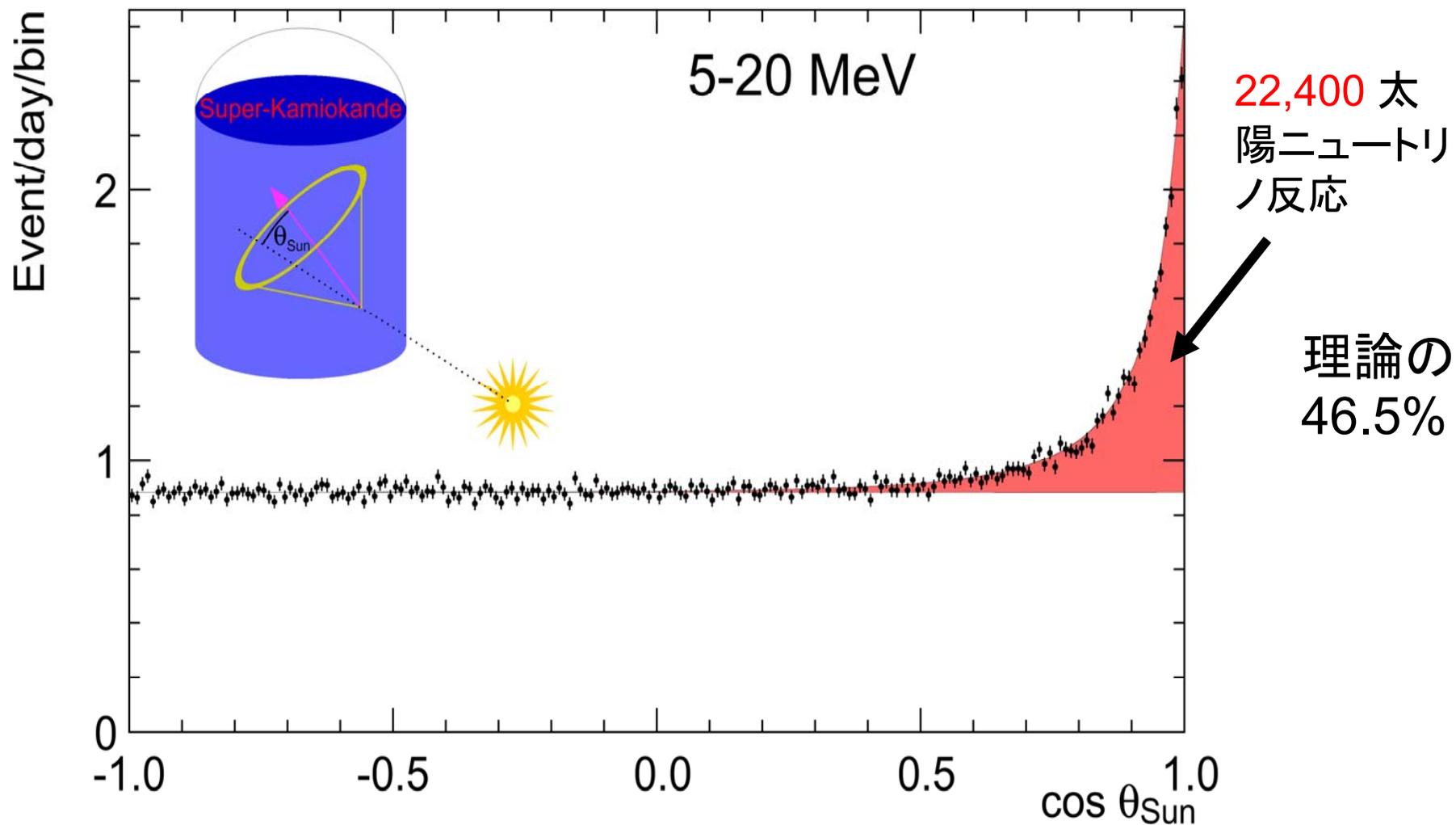
🏆 1/4 of the prize
Japan



Riccardo Giacconi

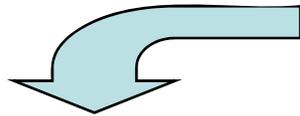
🏆 1/2 of the prize
USA

現在のスーパーカミオカンデ太陽ニュートリノデータ



ここまで話した太陽ニュートリノ実験のまとめ

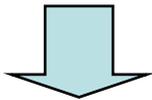
Theoretical Error



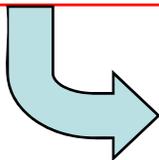
全ての実験結果が理論値より小さい。



ニュートリノ振動で電子ニュートリノが別なニュートリノに転移してしまっているのか？



しかし、太陽理論が間違っている可能性を否定できない。



太陽理論によらないデータが理想的

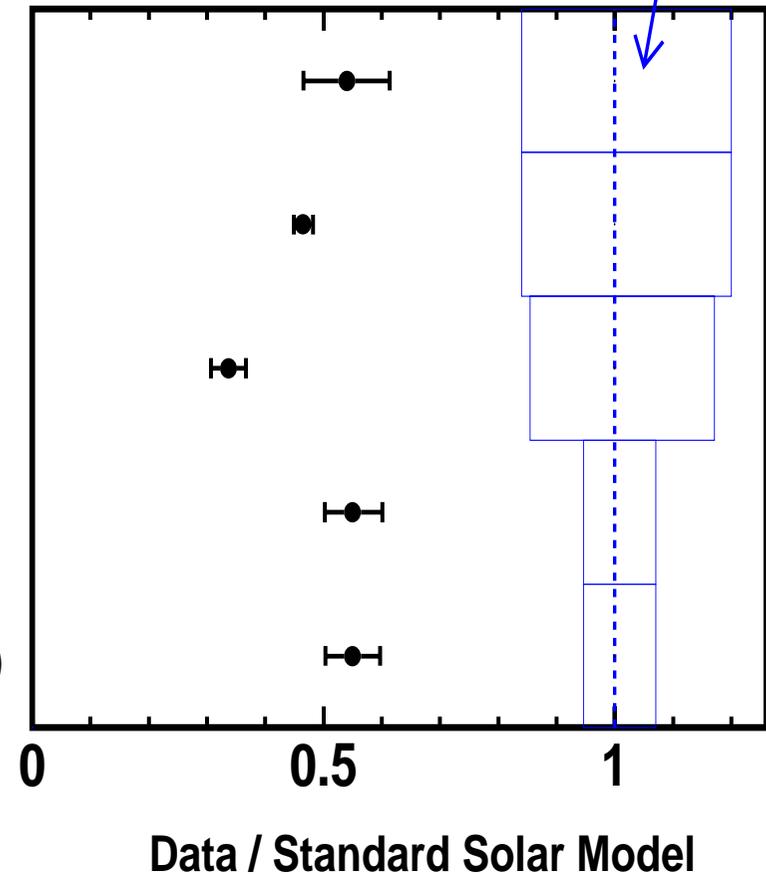
Kamioknade (H_2O)

Super-Kam. (H_2O)

Homestake (^{37}Cl)

SAGE (^{71}Ga)

Gallex + GNO (^{71}Ga)

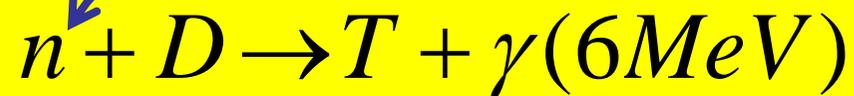


重水(D₂O)を用いた実験



測定 (電子の放出する
チェレンコフ光を観測する)

電子ニュートリノのみ

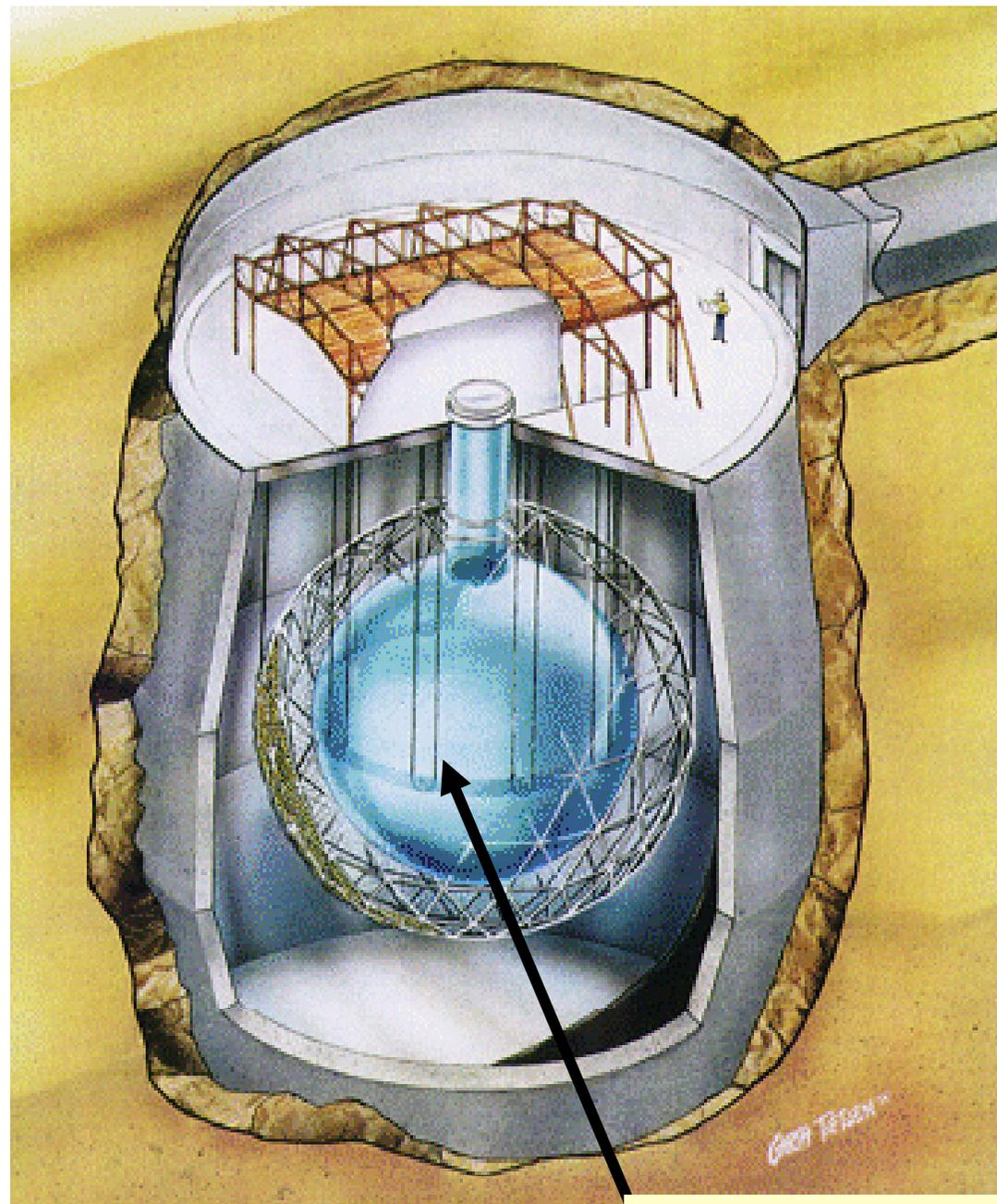


全ての種類の
ニュートリノ

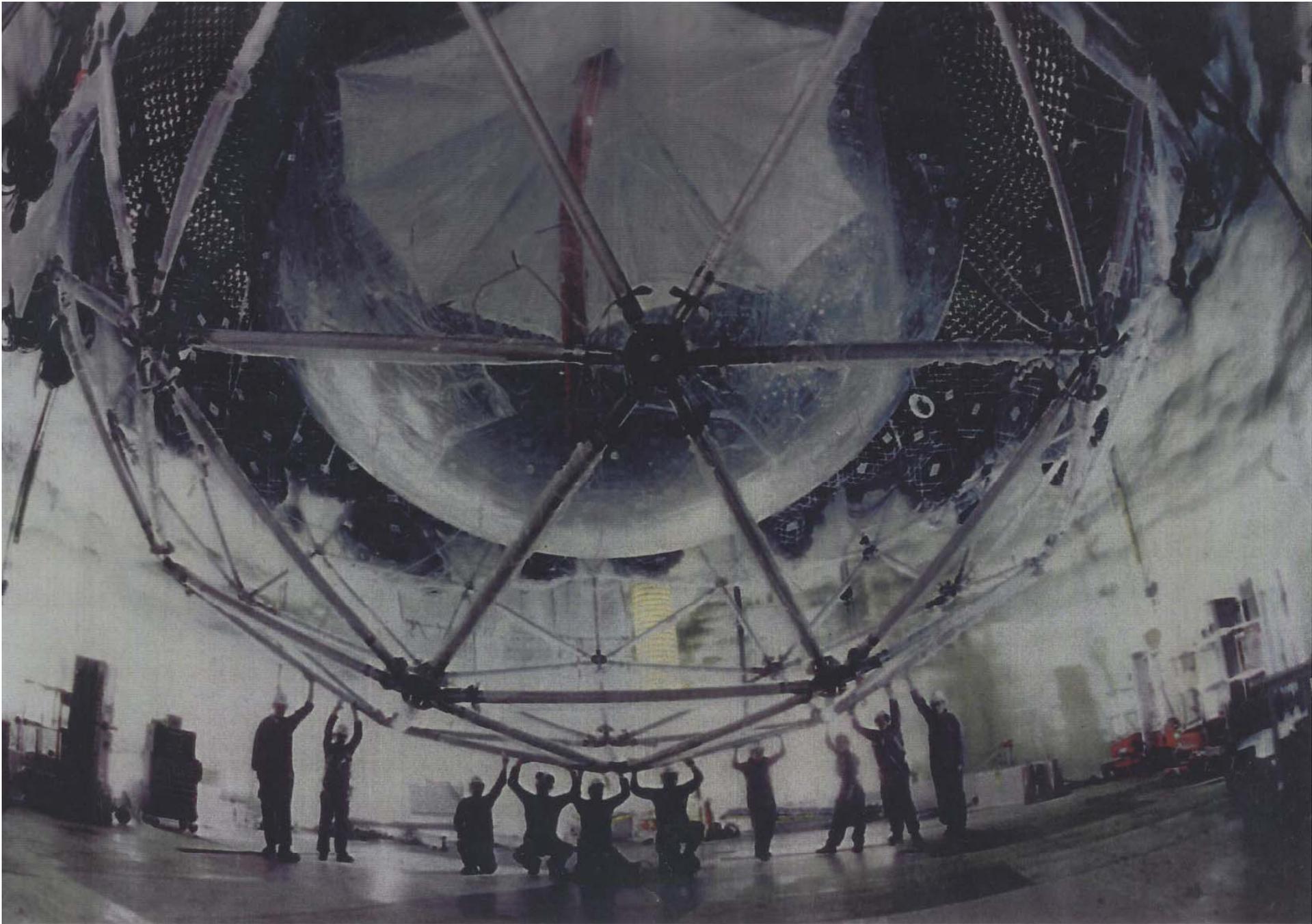
あるいは $n + Cl \rightarrow Cl + \gamma's \quad (\Sigma_{E\gamma} = 8\text{MeV})$

もし、□の反応数が太陽理論の予想通りで、□の反応数が太陽理論の予想値より少なければ、ニュートリノ振動で別な種類のニュートリノになったと結論できる。

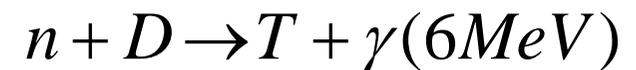
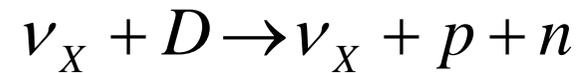
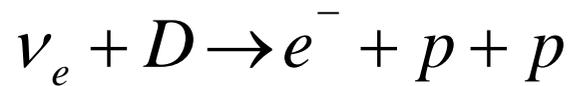
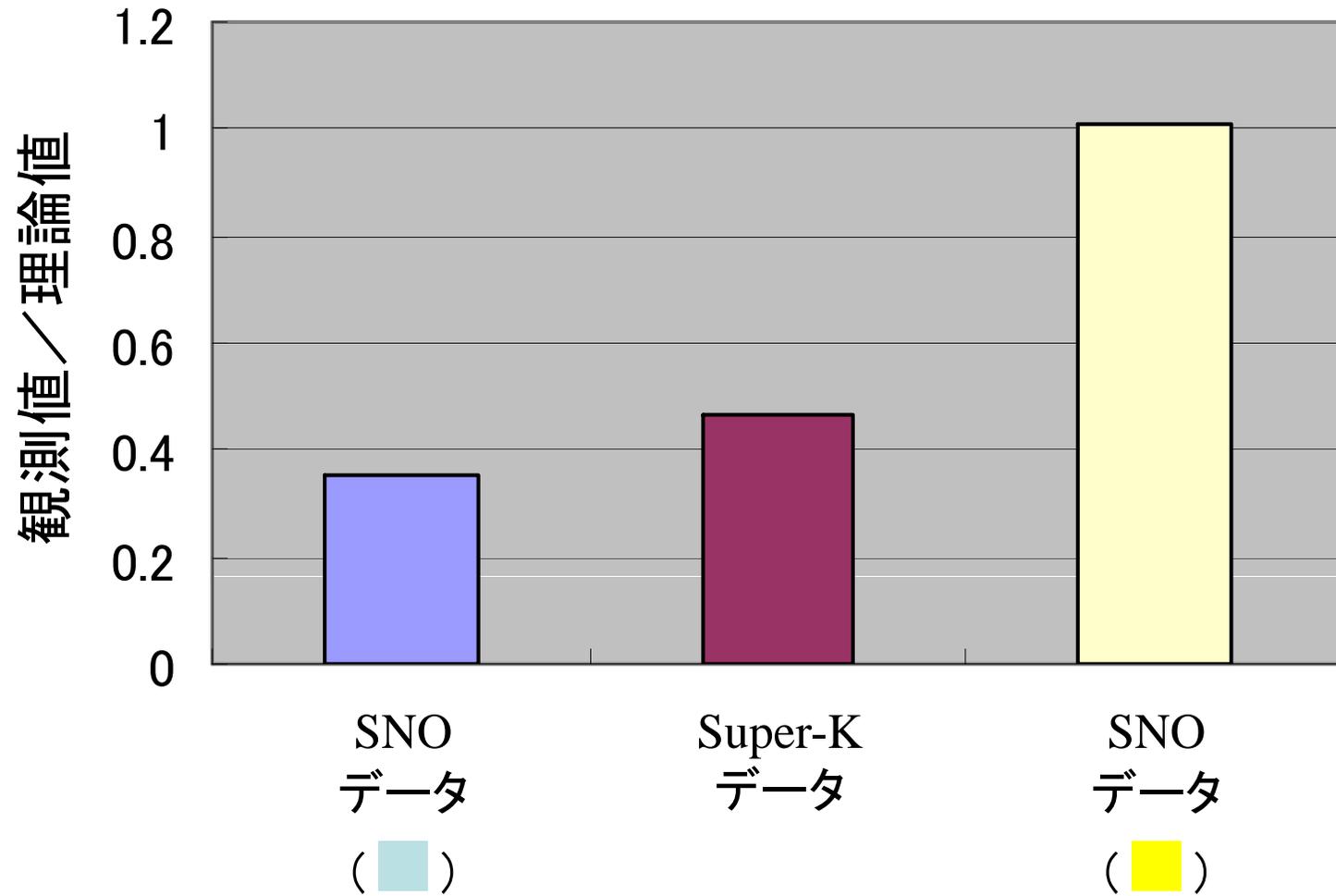
SNO実験 (カナダ)



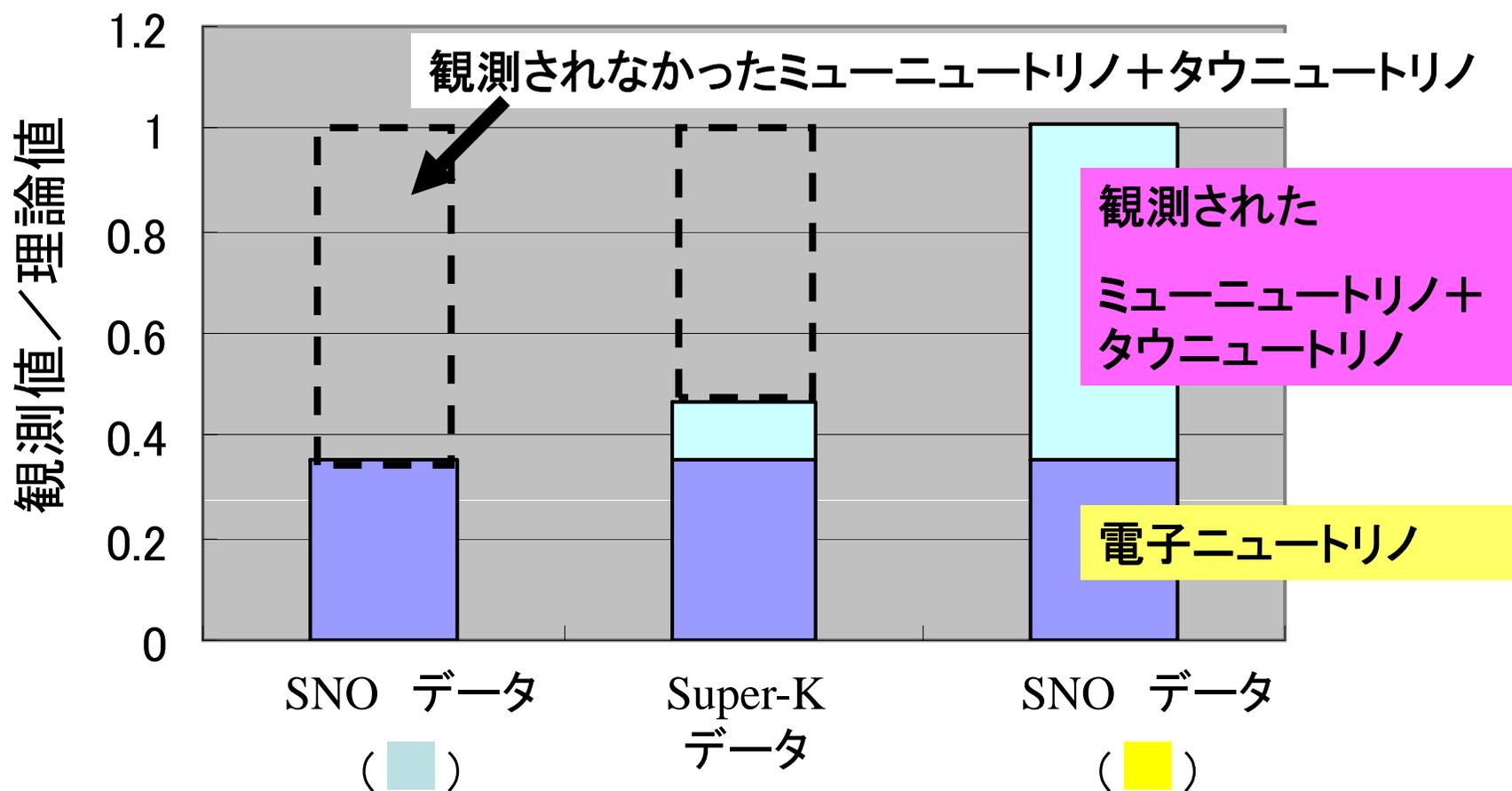
1000トンの重水



SNOの太陽ニュートリノ観測値



太陽ニュートリノ観測値の解釈



太陽で生成されるニュートリノは絶対電子ニュートリノだけなので、ミューニュートリノ+タウニュートリノが観測されたということはニュートリノ振動以外にありえない。→ 太陽ニュートリノ問題がニュートリノ振動によるものだったという間違いようのない証拠！

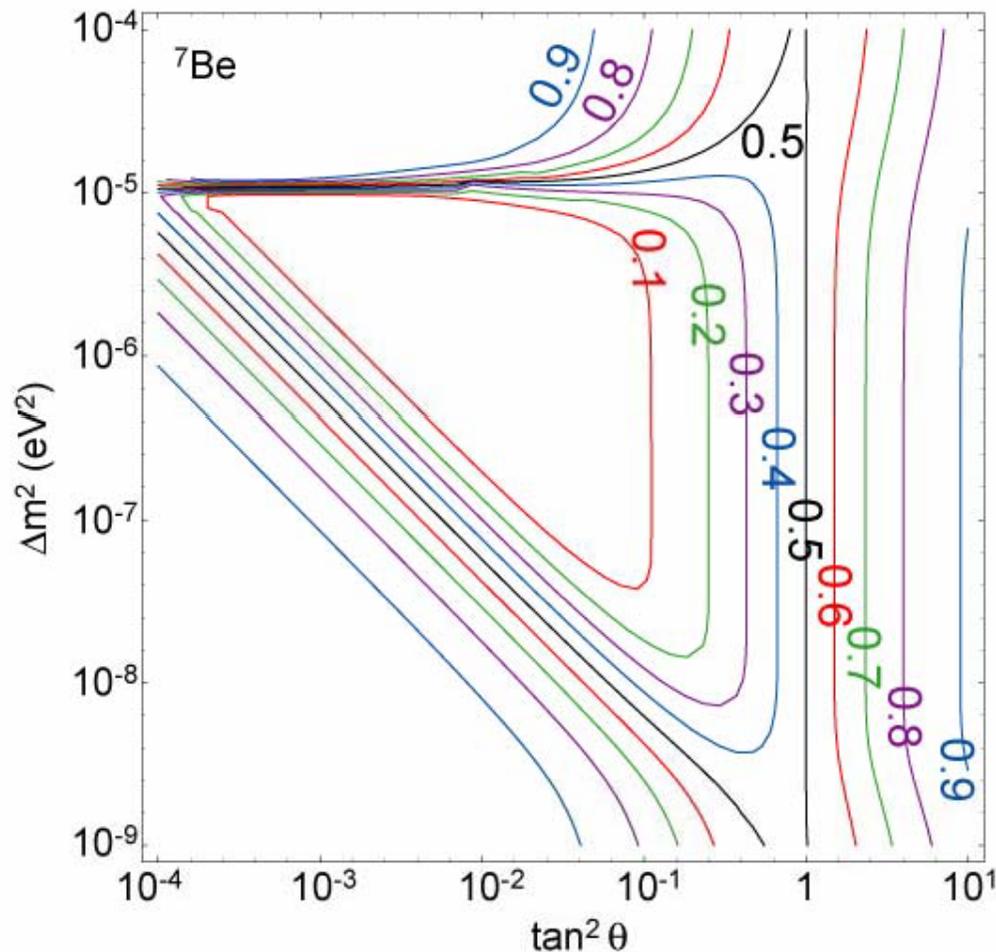
太陽ニュートリノデータによるニュートリノ振動パラメータの決定

注意：電子ニュートリノと他のニュートリノ振動で、ニュートリノが物質中を走る場合には、物質の存在がニュートリノ振動確率を（場合によっては大きく）変えるのでこの効果をきちんと取り入れて調べる必要がある。

本講義では詳細は省略。

物質効果を考慮した、太陽ニュートリノの振動確率

${}^7\text{Be}$ 太陽ニュートリノの残存確率



小さい混合角(θ)でも、
大きい振動確率となり
うる!

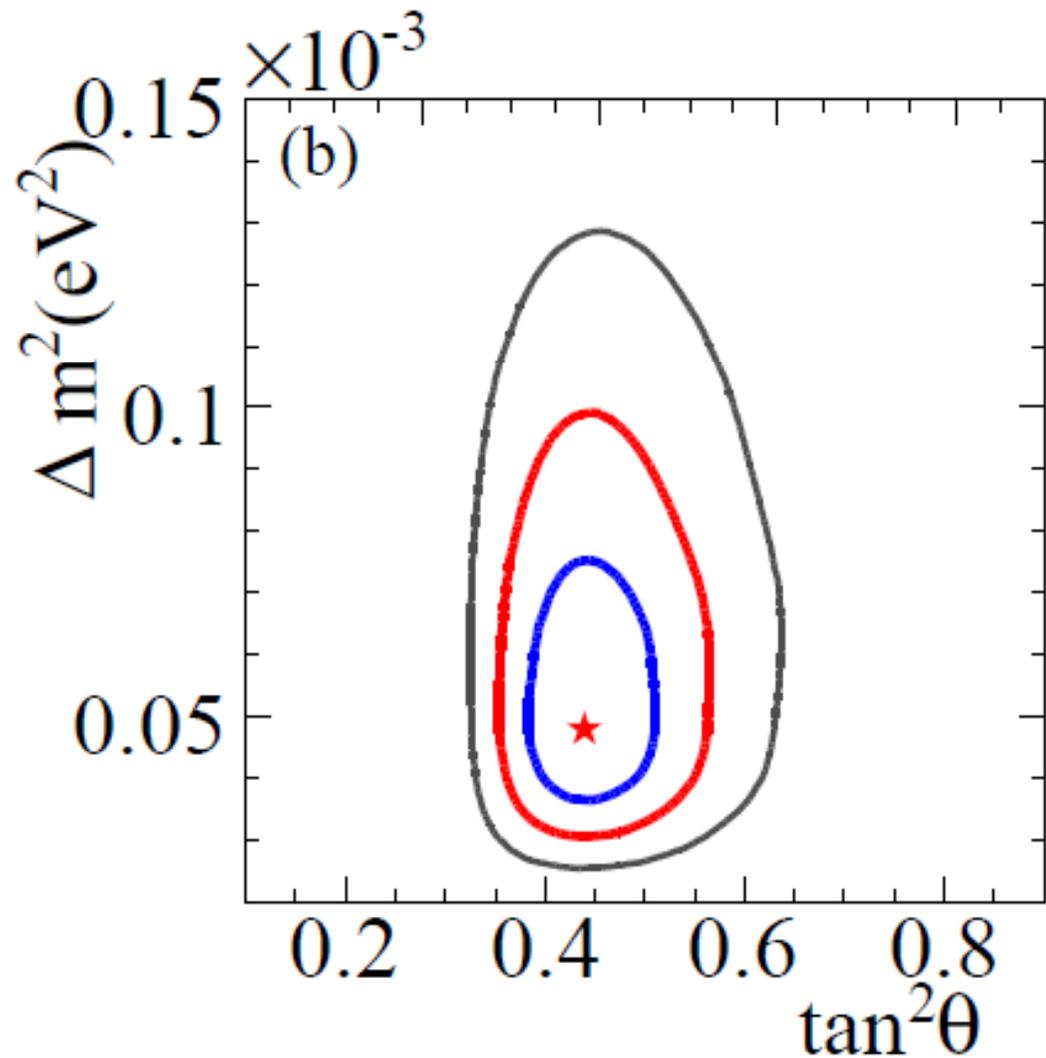


ニュートリノ振動が太
陽ニュートリノ問題を
説明する可能性として
クローズアップされた!

ニュートリノ振動 パラメータ

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L_\nu}{E_\nu} \right)$$

全ての太陽ニュートリノ
実験の結果を用い
て物質効果を考慮し
た解析(2008年)



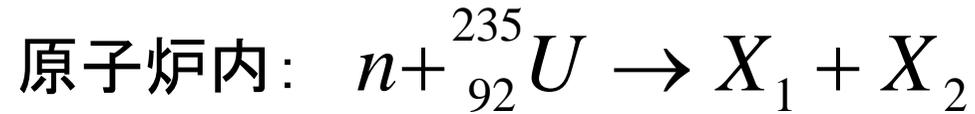
電子ニュートリノと他のニュートリノ間の ニュートリノ振動

- 太陽ニュートリノ実験より、電子ニュートリノと他のニュートリノ間のニュートリノの質量の2乗の差 (Δm^2) は約 10^{-4}eV^2 。(太陽物質の効果を入れた解析)
- ところで、この Δm^2 を使って真空中のニュートリノ振動の式

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L_\nu}{E_\nu} \right)$$

より、5MeV の電子ニュートリノが別な種類のニュートリノに振動する距離を調べると、約100km。(反ニュートリノなので物質のことをほとんど考えなくてよい。)

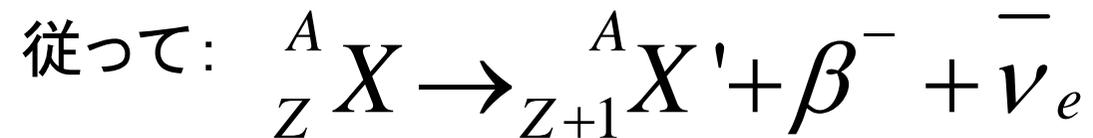
原子炉からのニュートリノ



X_i : このとき、ほぼ常に中性子の数 > 陽子の数

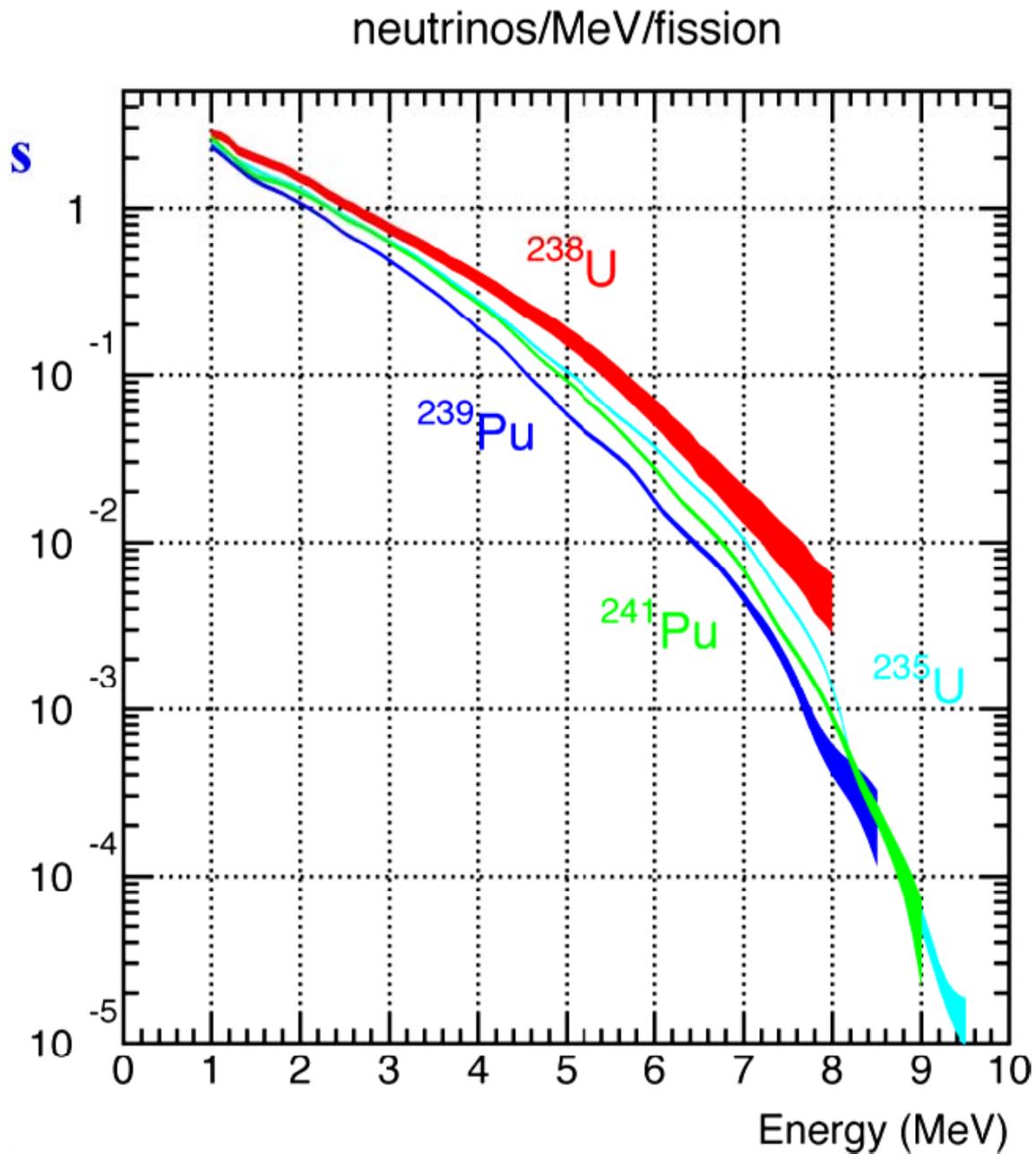
一方、このような軽い原子核では安定なのはおよそ、

中性子の数 = 陽子の数

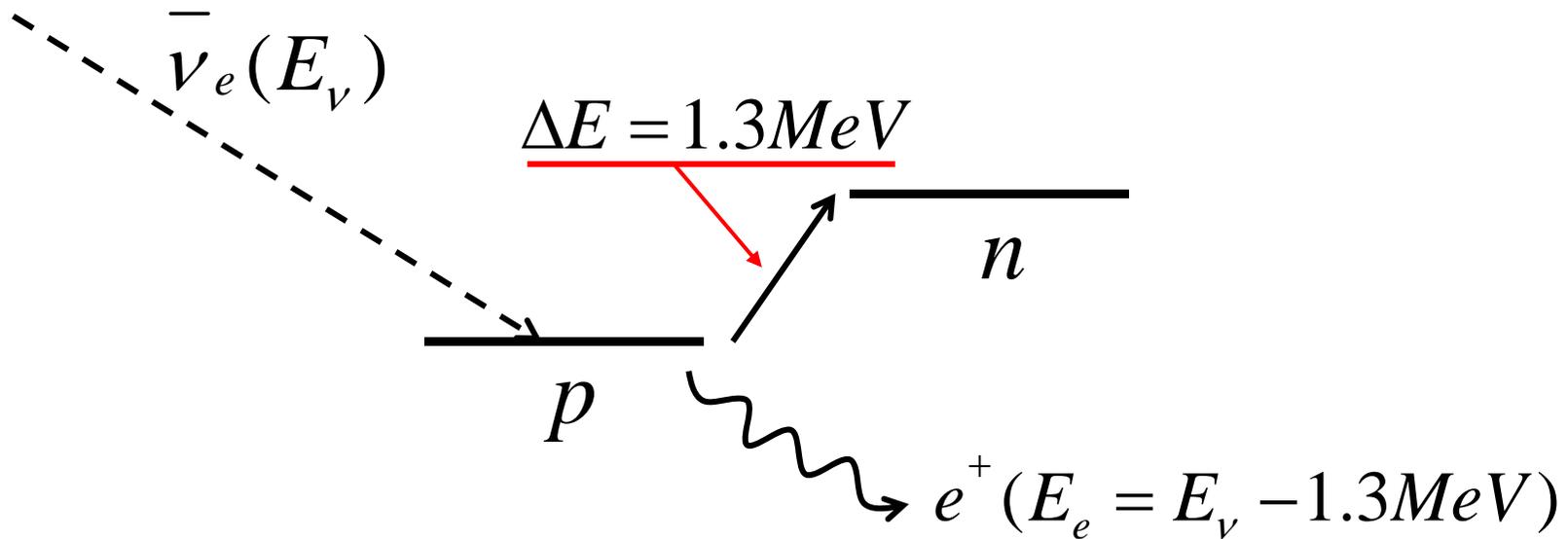
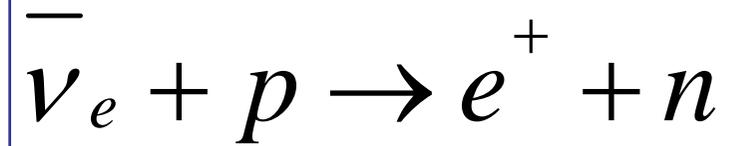


のような崩壊をする。この際、反電子ニュートリノが放出される。

反電子ニュートリノ のスペクトル

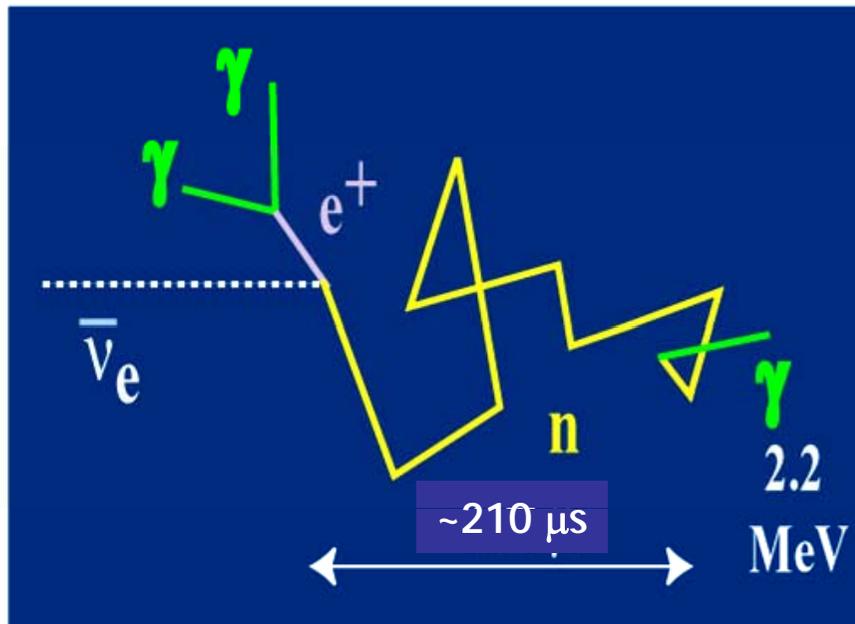
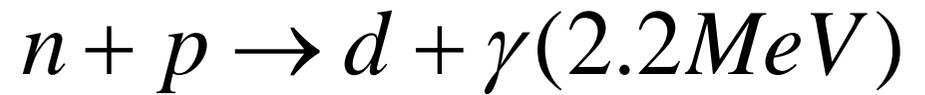
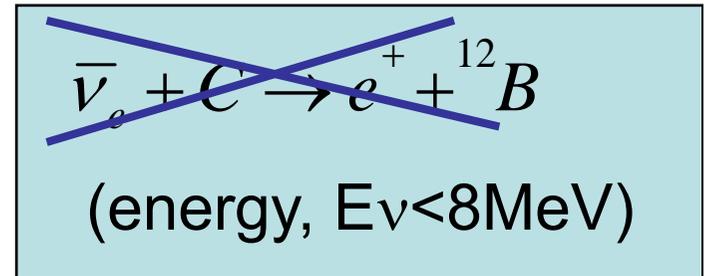
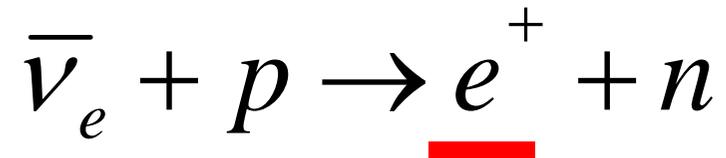


反電子ニュートリノの反応



反応の閾値は約 $E_\nu = 1.3 + 0.5 = 1.8 \text{ MeV}$

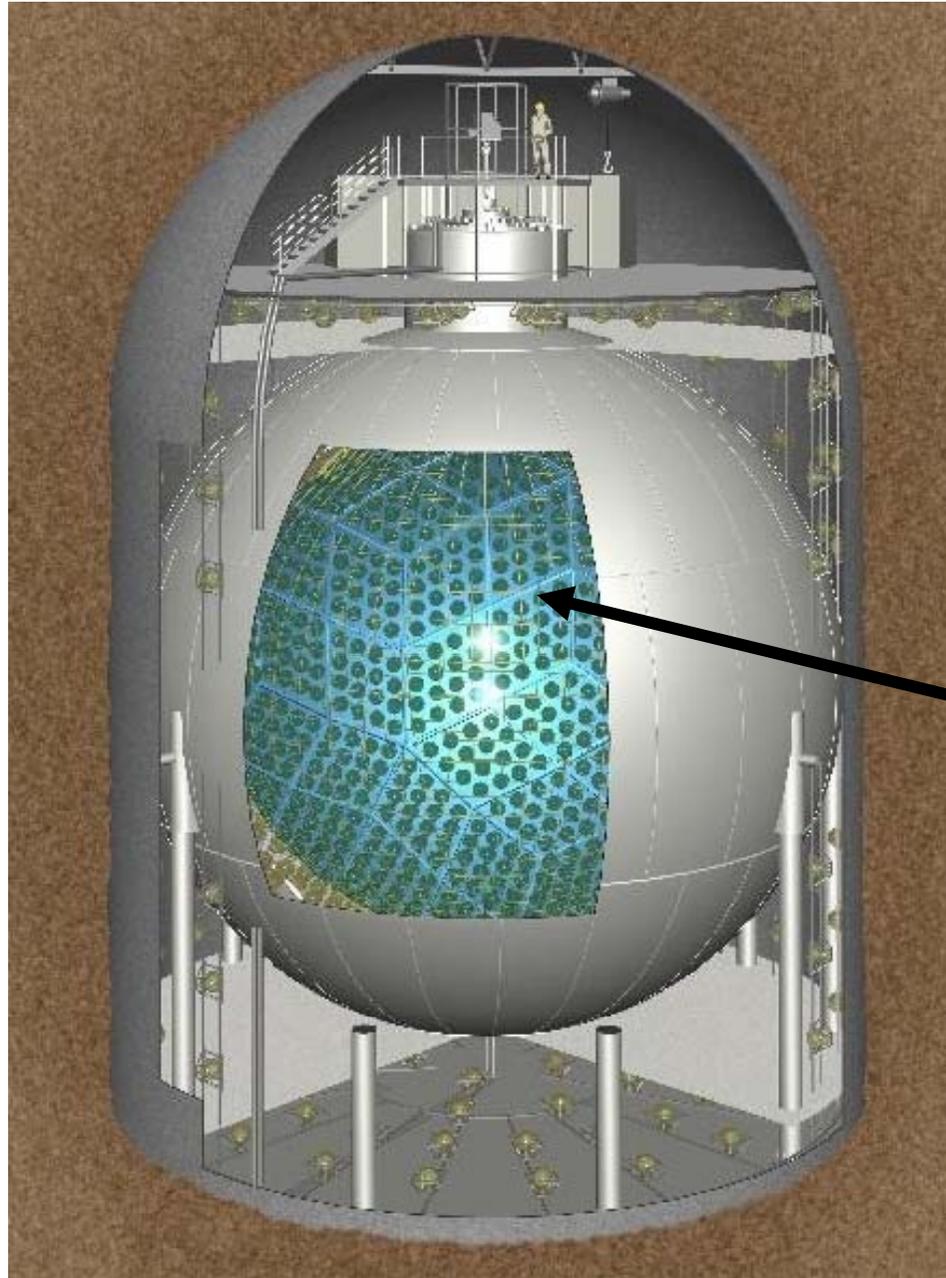
反電子ニュートリノの観測（液体シンチレータ）



e^+ と γ の信号の観測

カムランド 実験

(カミオカンデ跡地に東北大学を中心に建設された高性能ニュートリノ検出器)



1,000トンの
液体シンチ
レーター(発
光物質)

(チェレンコフ
光の50倍程
度の光量、
従って、低エ
ネルギーの
観測がやり
やすい)

3回目ここまで