

宇宙線・宇宙物理領域、素粒子論領域、素粒子実験領域合同シンポジウム
2015年ノーベル物理学賞ニュートリノ振動の発見と将来への展望

太陽ニュートリノ振動発見の歴史

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

太陽ニュートリノ

エネルギー源の考察の歴史

1833 Herschel: 太陽光で地上の生命は維持されている。

既知: 太陽のエネルギー源として**化学反応**では不十分

1840+ Mayer、Waterson、

1854 von Helmholtz **重力崩壊**を提唱

1859 Charles Darwin (種の起源) はウィールド地方 (英) の浸食には3億年かかると試算。

1862 Lord Kelvinが強く反論、重力崩壊に基づいた隕石学的な理論から太陽年齢は2000万年以内。

1896 Henri Becquerelが**自然放射能**を発見。

1903 Curie と Laborde: 放射能による熱生成を確認。

1904 Rutherford: 未知の過程の存在を指摘。

疑問: 1) 太陽には放射性物質がほとんどない。

2) 質量-光度の関係を説明できない。

1905 Einstein 特殊相対論、 $E=mc^2$

1919 Russel: 中心温度 T_c がヒントであると指摘。

1920 Aston: 精密原子質量測定: $m(4H) > m(^4He)$

Eddington: **$p + p$ fusion** を即座に提案 → 太陽は1000億年以上。

疑問: 陽子同士を如何に近づけるのか? 解答: 量子力学

(note: (p,p) 核融合の遅さは長期間の安定燃焼を保証する。 cf. Darwin)

1928 Gamow: 接触する確率を計算。

... Aktinson+Houtermans, Gamow+Teller: 温度と反応率の関係を導出。

1938 von Weizacker **CNO-cycle**を発見 - ^{12}C が触媒

1938 H. Bethe, Crichtfield: **pp-chain** を確立

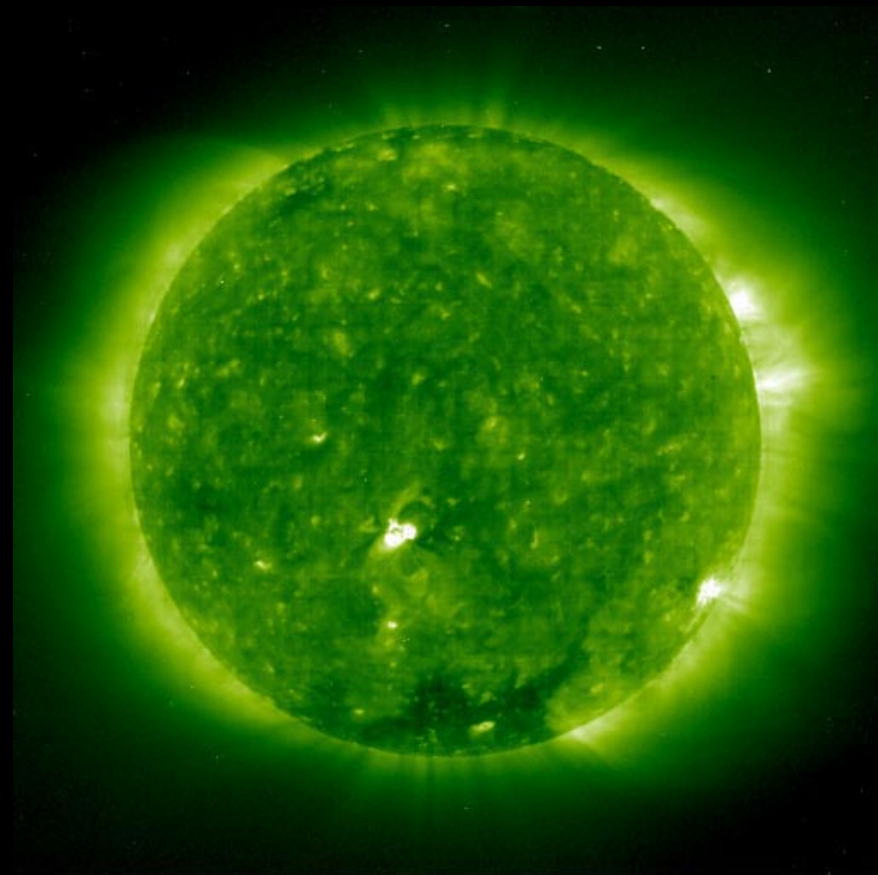
1930 Pauli ニュートリノの導入

1932 Fermi β 崩壊の理論

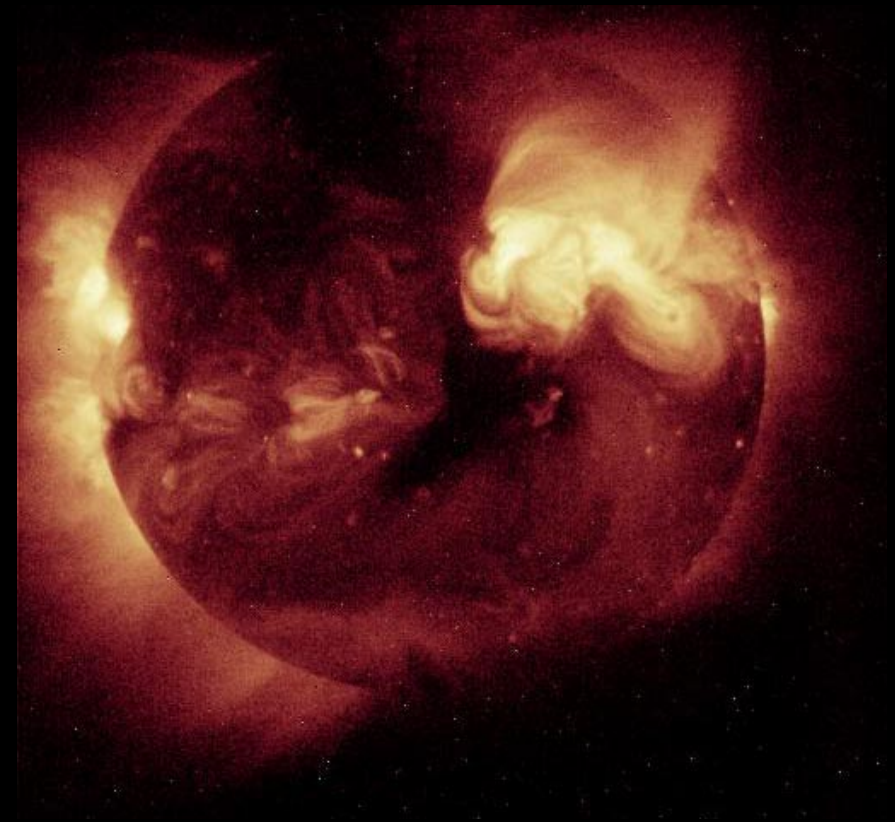
1956 Reines, Cowan ニュートリノの発見



可視光



紫外線

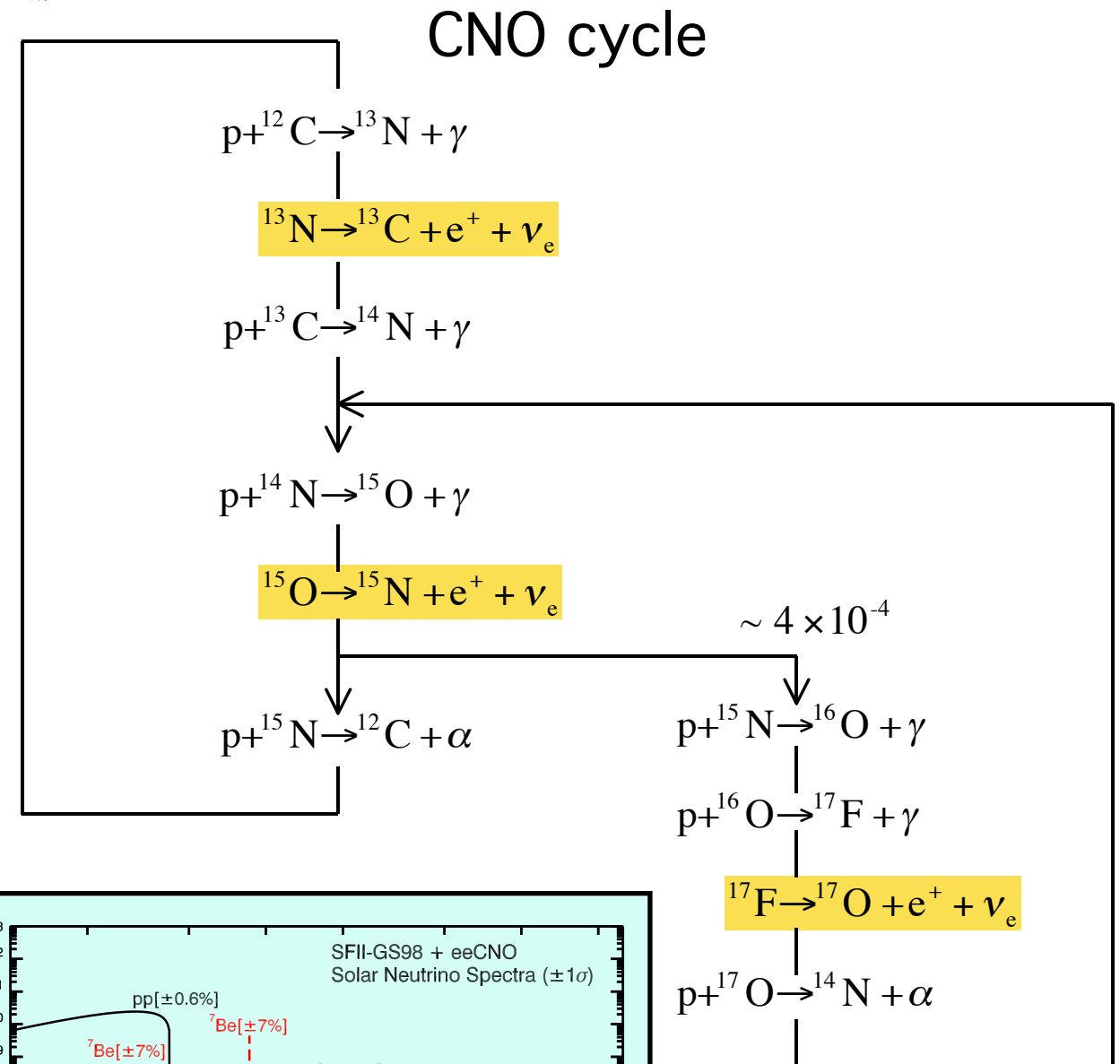
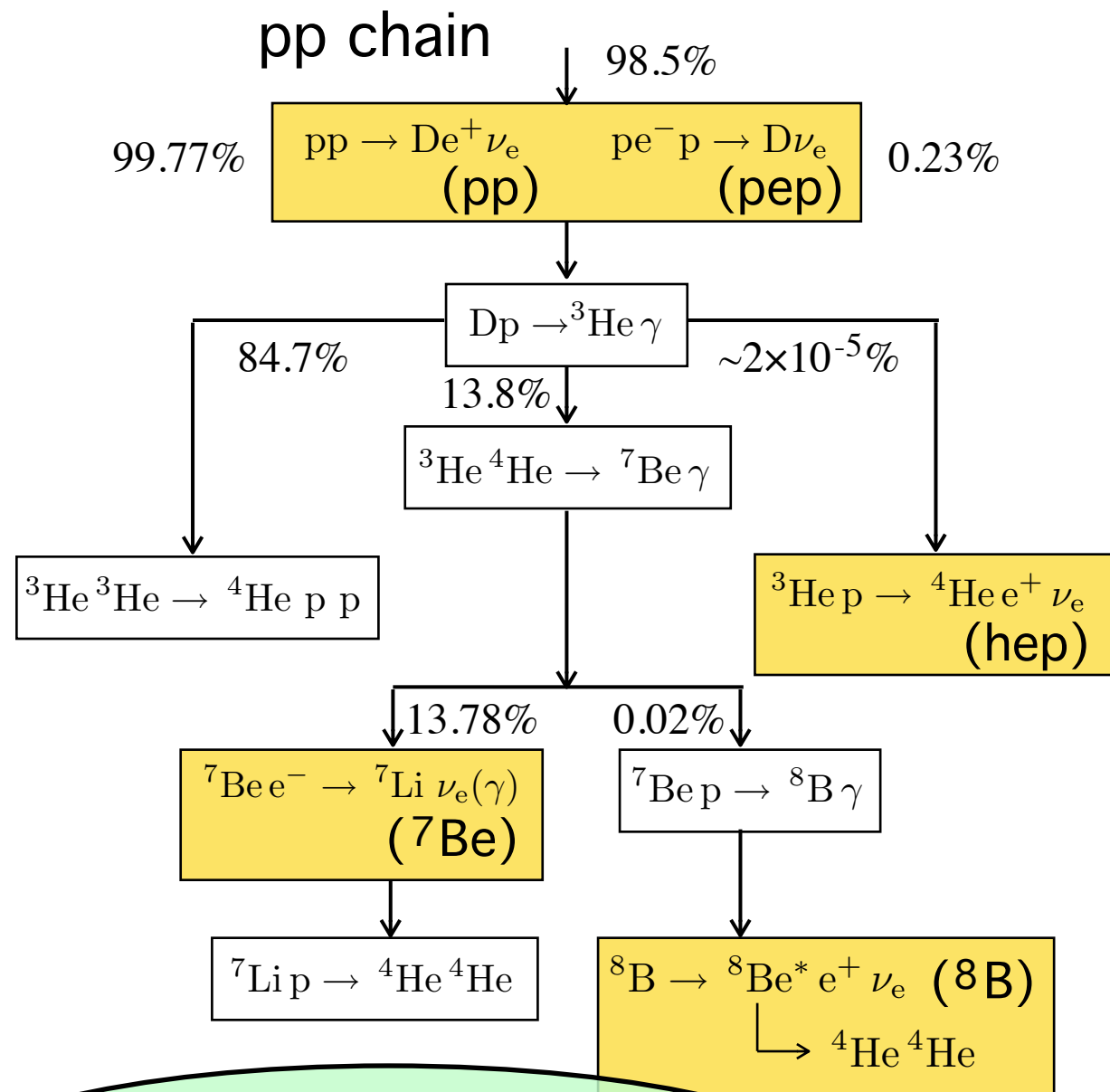
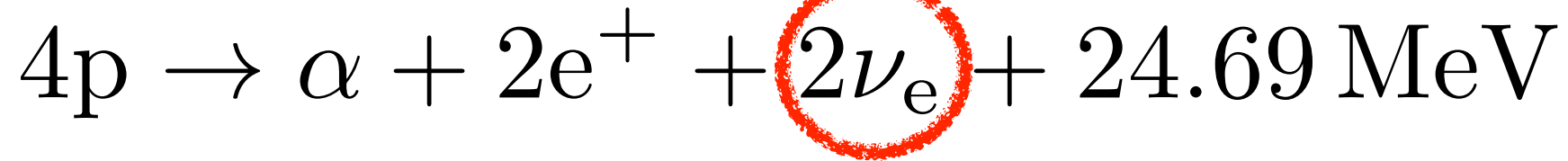


X線

中心のエネルギーが表面に伝わるのは100万年程度
光学的には情報がかき消されている。

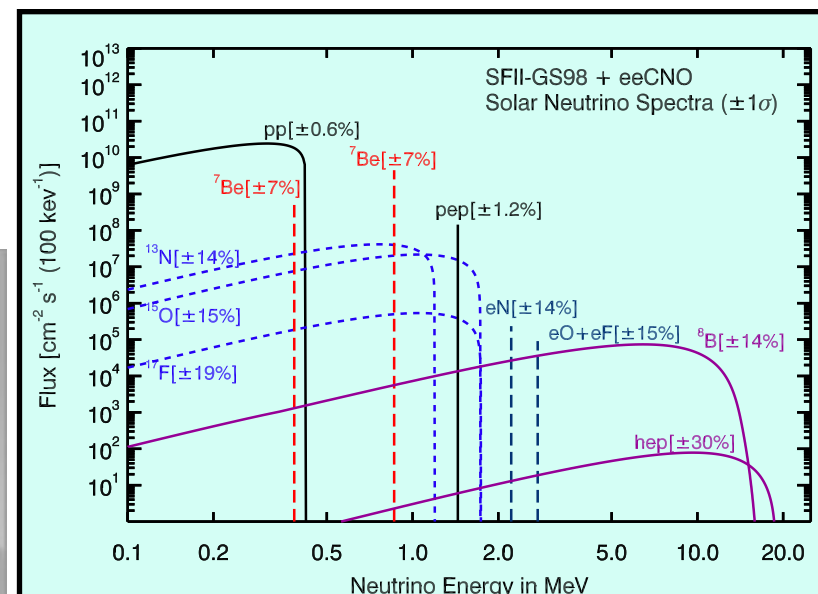
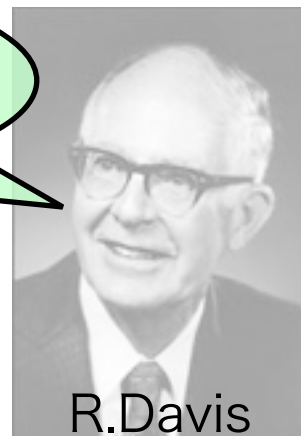
ニュートリノなら 2.3秒+500秒で情報を持ち出す。

Davis's original aim (pp-chain VS CNO-cycle)



Neutrino observation may discriminate these models.

ただし、標準太陽模型との比較が必要



標準太陽模型のやること

仮定: 球対称性、回転無し、磁場無し

初期状態 $1M_{\odot}=1.989\times 10^{33}\text{g}$ の一様な組成から

$t_{\odot}=45.7$ 億年 発展させて、

現在の太陽を再現させる:

$$L_{\odot}=3.842 \times 10^{33}\text{erg s}^{-1}$$

$$R_{\odot}=6.96 \times 10^{10}\text{cm}$$

$$(Z/X)_{\odot}=0.0229(\text{GS98})\rightarrow 0.0180(\text{AGSS09})$$

パラメータ

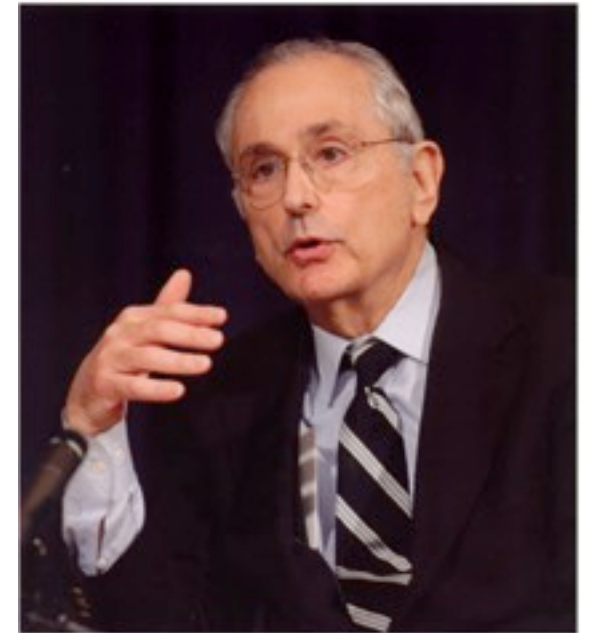
- 対流のさせ方: 1 parameter (α_{MLT}) mixing length theory
- 原始組成: $X+Y+Z=1 \Rightarrow$ 2 free parameters, e.g. X, Z

原子核の反応断面積 (当初は大きな誤差)

光に対する不透明さ

プラズマ状態

等の原子核物理の詳細な情報も必要



John N. Bahcall
(1934-2005)

標準太陽模型の予測できるもの

内部構造: $T(r)$, $\rho(r)$, $X_i(r)$, $n_e(r)$, $n_n(r)$

⇒ これらからニュートリノ生成量を計算できる。

$$\psi(pp) = \frac{1}{2} N_{AV}^2 X^2 \rho \langle \sigma v \rangle \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{d(\text{Flux}_{pp})}{d(R/R_\odot)} = C_{pp} r^2 \rho \psi(pp); \quad \int \frac{d(\text{Flux}_{pp})}{d(R/R_\odot)} d(R/R_\odot) = 1$$

○ 8種類のニュートリノフラックス：総量と発生点分布

現在のところ ^8B , ^7Be , pepが直接観測されている。

○ 原子核熱反応と重力エネルギー（無視できる）から太陽の明るさ（束縛条件）

○ 化学組成の内部での分布 → 電子と中性子の密度分布（ ν の伝搬計算に必要）

Helioseismology に対しては、

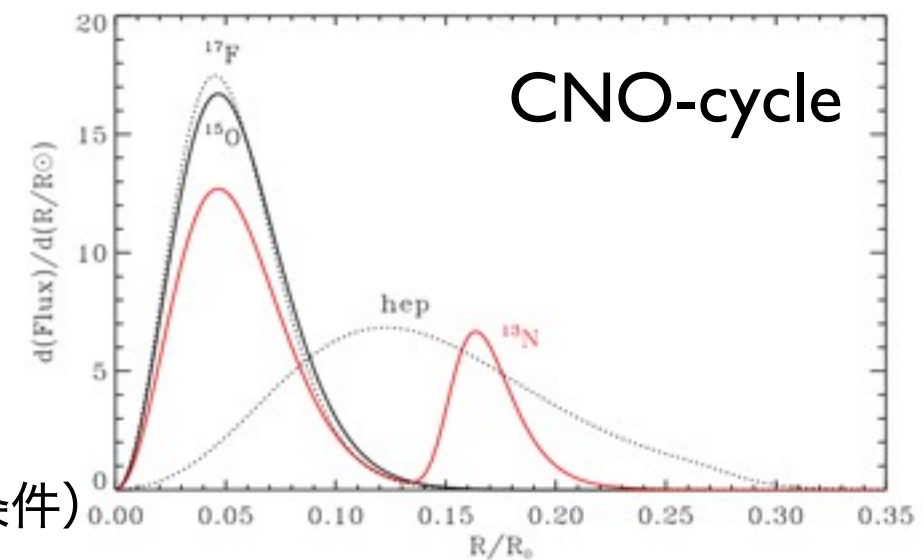
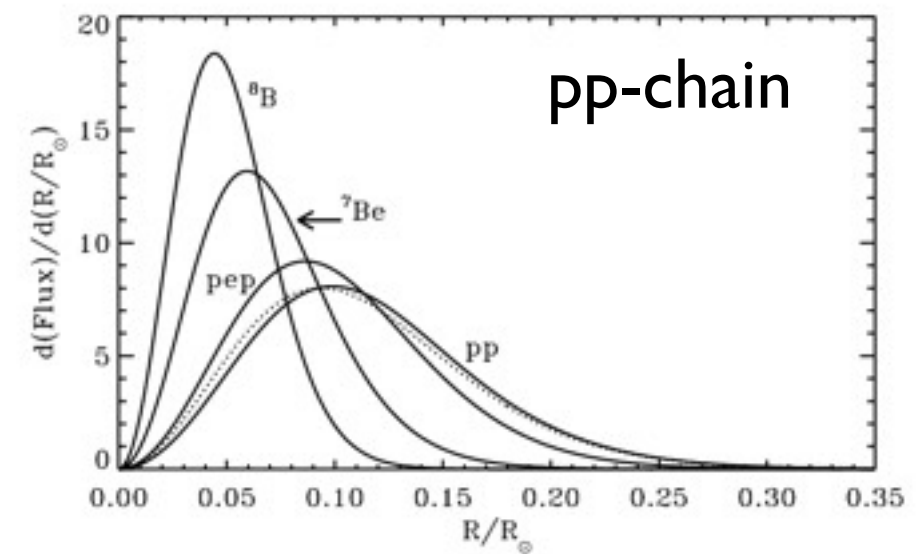
○ sound speed profile $c(r)$

○ 密度分布 $\rho(r)$

○ 対流層の深さ R_{CZ}

○ 表面のヘリウム量 Y_S

モデルの正しさは、**ニュートリノ観測**や磁場観測、振動学などによって独立に検証できる。



ニュートリノフラックス計算の精度

Neutrino Astrophysics (1989)

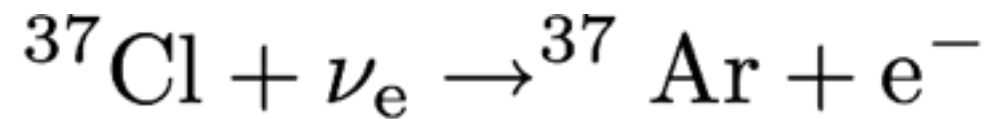
arXiv:1601.07179 (SFII+GS98)

	($\times 10^{10}/\text{cm}^2/\text{sec}$)		($\times 10^{10}/\text{cm}^2/\text{sec}$)
pp	6.0(1 $\pm$ 0.02)	低E 誤差小	5.98(1 $\pm$ 0.006)
pep	0.014(1 $\pm$ 0.05)		0.0144(1 $\pm$ 0.011)
hep	8×10^{-7}		8.04×10^{-7} (1 $\pm$ 0.03)
^7Be	0.47(1 $\pm$ 0.15)		0.500(1 $\pm$ 0.07)
^8B	5.8×10^{-4} (1 $\pm$ 0.37)	高E 誤差大	5.58×10^{-4} (1 $\pm$ 0.14)
^{13}N	0.06(1 $\pm$ 0.50)		0.0296(1 $\pm$ 0.14)
^{15}O	0.05(1 $\pm$ 0.58)		0.0223(1 $\pm$ 0.15)
^{17}F	5.2×10^{-4} (1 $\pm$ 0.46)		5.52×10^{-4} (1 $\pm$ 0.19)

大幅な精度向上は
地下での核融合断面積の測定
が大きい。

太陽ニュートリノの観測

The Pioneer: Chlorine Experiment @ Homestake mine (4200mwe), 1964-1994



敷居値 813 keV

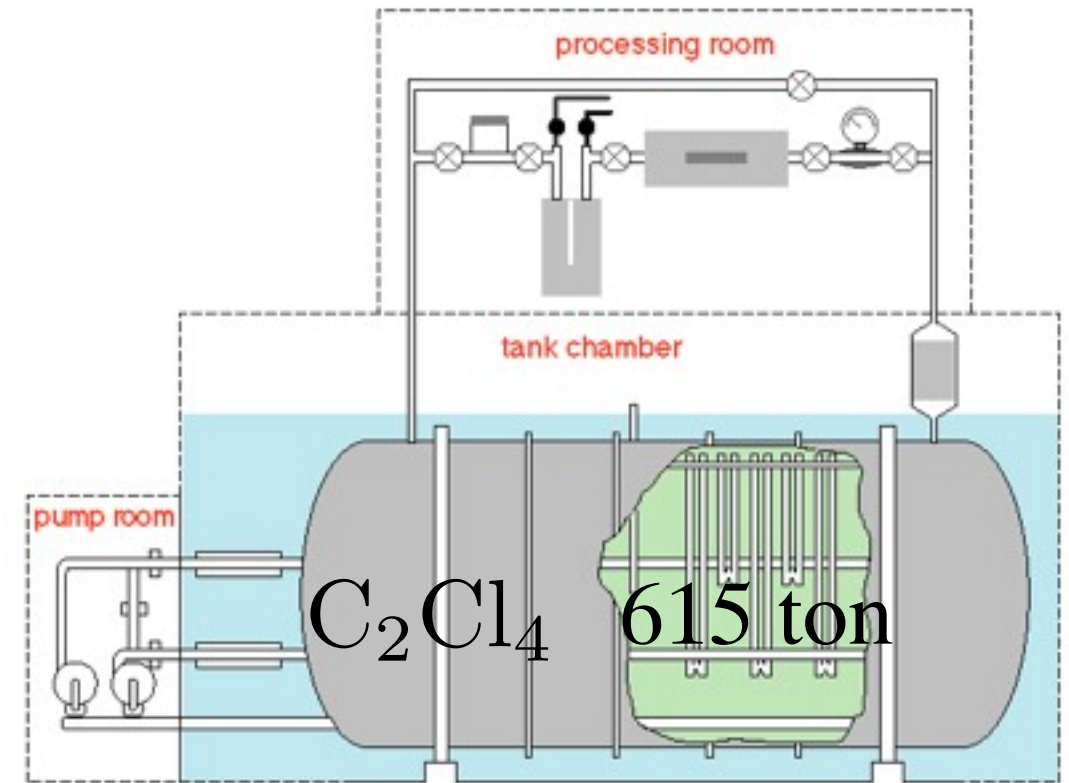
⁸B ~70%

⁷Be ~20%

pep, hep, CNO ~10%

反応断面積も誤差要因

$$\tau = 50.5 \text{ d}$$



³⁷Arをバブリング捕集して比例
計数管で測定（放射化学的測定）

捕集効率(95%!!), 計数効率(42%)が誤差要因、
エネルギー情報無し、時間情報は月単位

最終結果(1970-1994のデータ)

測定結果 2.56 ± 0.23 SNU (10^{-36} captures/atom/sec)

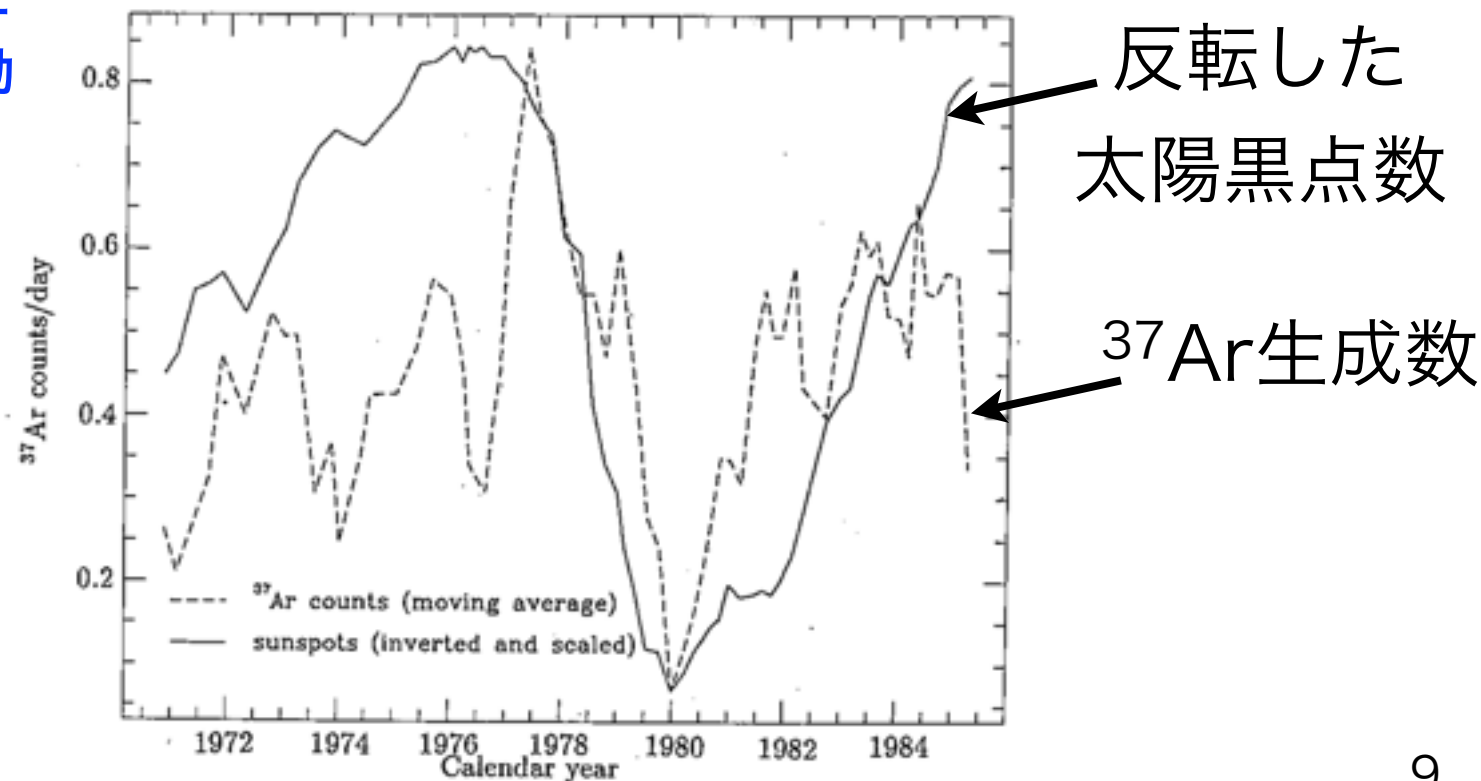
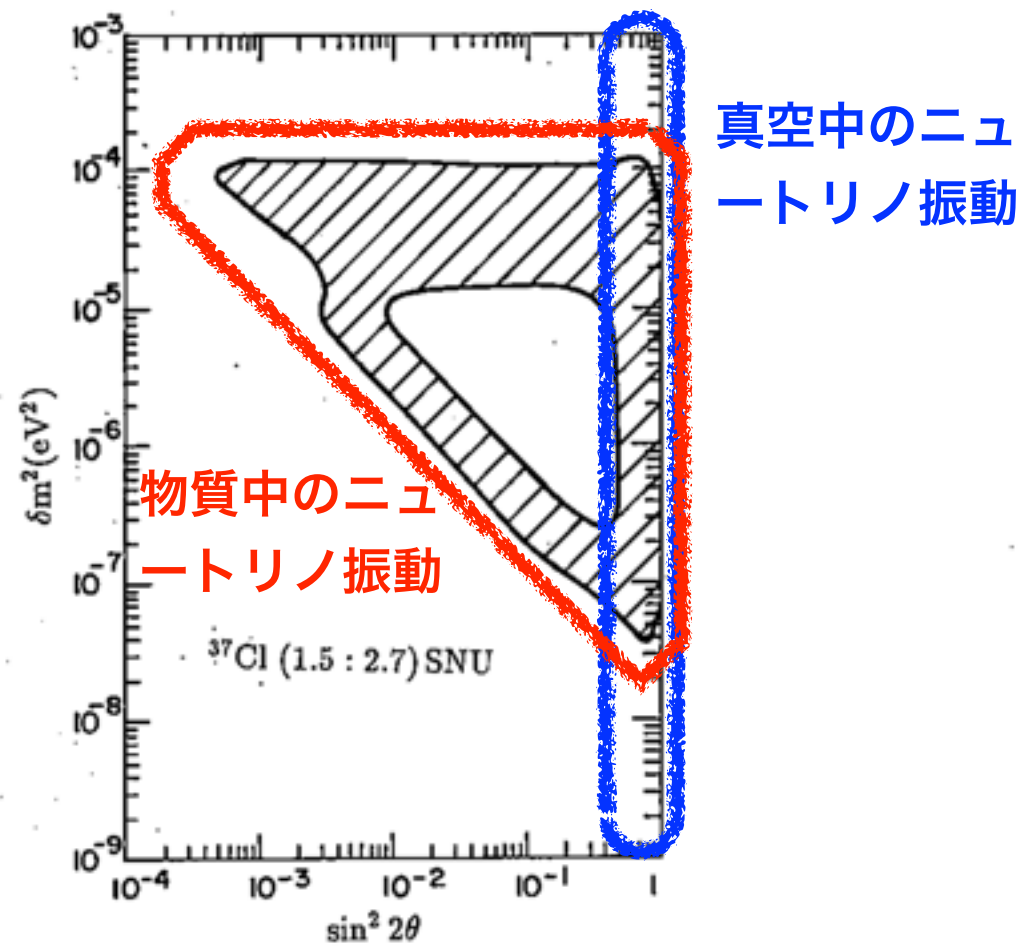
標準模型 8.2 ± 1.8 SNU (BP04) **太陽ニュートリノ問題**

標準太陽模型の問題？

単独では ニュートリノの問題？ 区別できない
観測の問題？

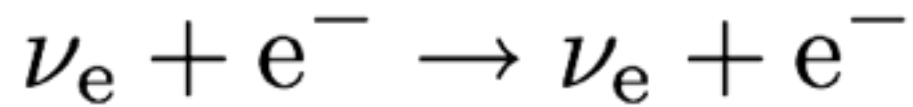
2世代ニュートリノ振動なら

黒点数との反相関!?
磁気モーメントなのか??



カミオカンデ@神岡鉱山(2700mwe)参戦 (1987~1994)

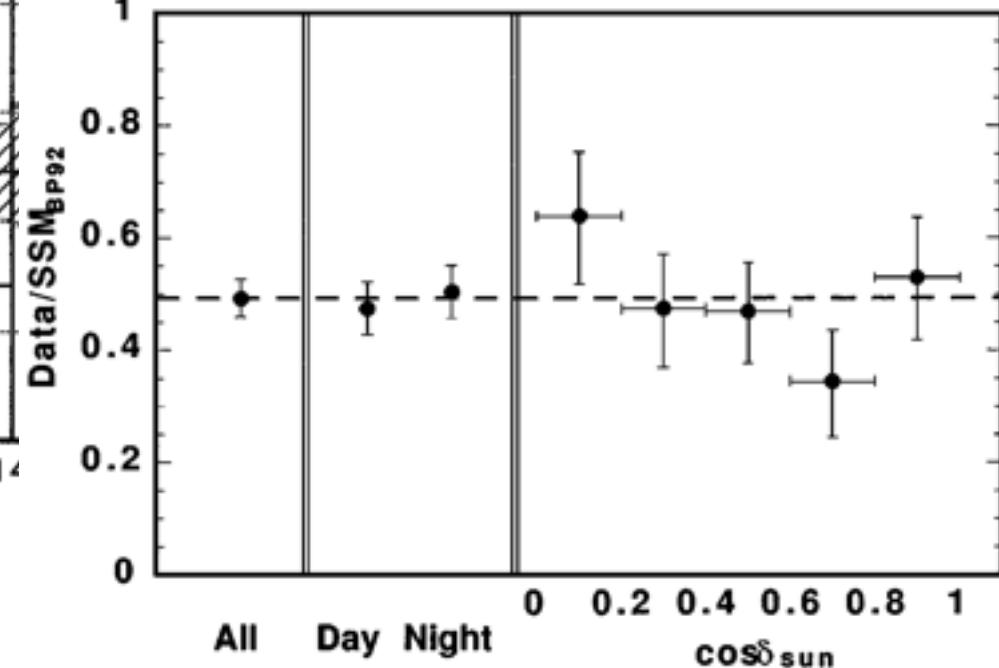
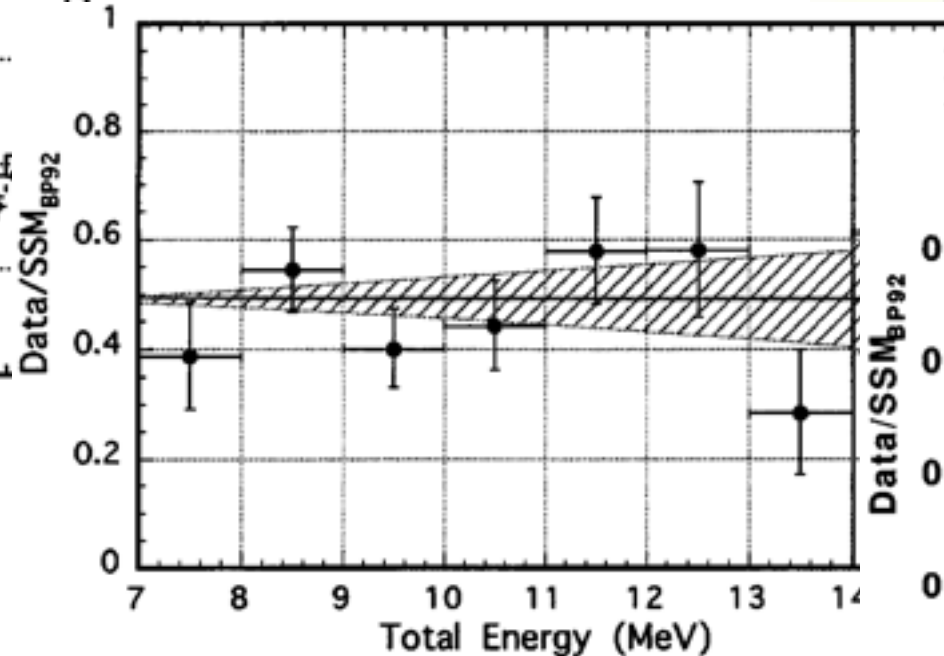
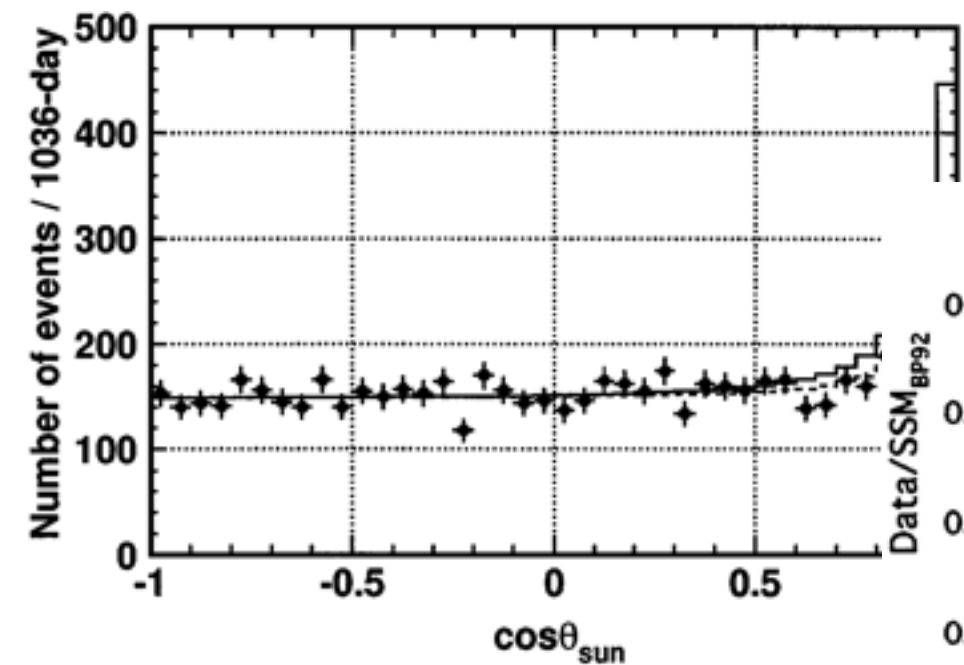
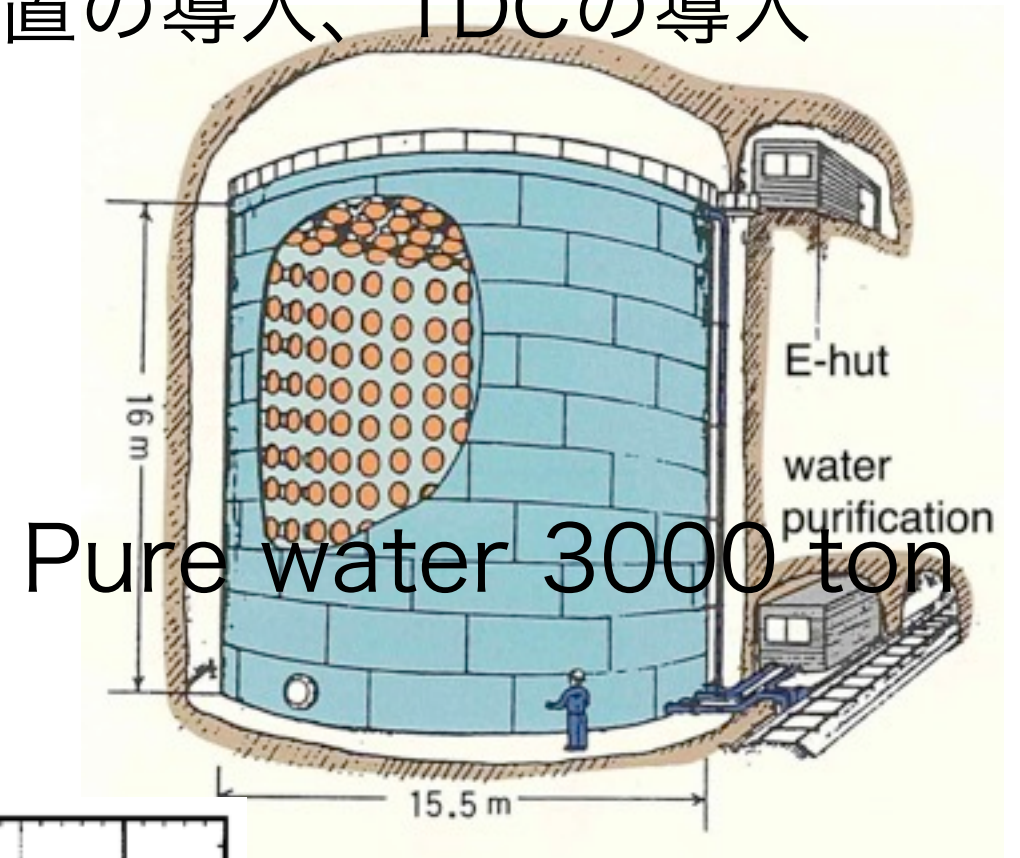
カミオカンデ2 外水槽の設置、純水装置の導入、TDCの導入



反応断面積の精度 ~1%

実時間測定

(方向, エネルギー, 時間)



$$\text{DATA/SSM}_{\text{BP92}} = 0.51 \pm 0.04 \pm 0.06$$

観測の問題では済まなくなかった。。

太陽ニュートリノ問題が確立

2002年ノーベル物理学賞

「ニュートリノ天文学の創出」



Davis



Koshiba



SAGE

@Gran Sasso (3500mwe)

1991-2003

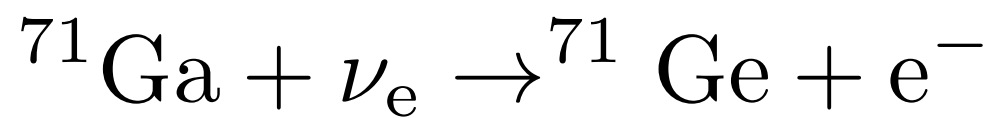
塩化ガリウム塩酸水溶液

ガリウム30トン

@Baksan (4800mwe)

1990~

金属ガリウム50トン



敷居値 233 keV

pp+pep ~60%

${}^7\text{Be}$ ~30%

${}^8\text{B}$, hep, CNO ~10%

$\tau = 16.5 \text{ d}$

${}^{71}\text{Ga} + 10 \text{ keV}, 1 \text{ keV}(\text{Auger } e^-, X)$

${}^{71}\text{Ge}$ をバブリング捕集

して比例計数管で測定

測定結果 $68.1 \pm 3.75 \text{ SNU (combined)}$

標準模型 $127^{+12}_{-10} \text{ SNU (BP04)}$

ニュートリノの問題で決着しそうだが、 ${}^7\text{Be}$ を0にするとなんとか。。。。

ニュートリノ実験からのアプローチ

誤差の小さい低エネルギーを観測したい

Gallex/GNO, SAGE

直接的な証拠が欲しい (季節変動、日夜変動、スペクトル歪み)

Kamiokande → Super-Kamiokande

直接的な証拠が欲しい (フレーバー変換)

SNO

${}^7\text{Be}$ が問題なのか？

Borexino, KamLAND

人工ニュートリノを使えないか？

KamLAND

History of Super-Kamiokande

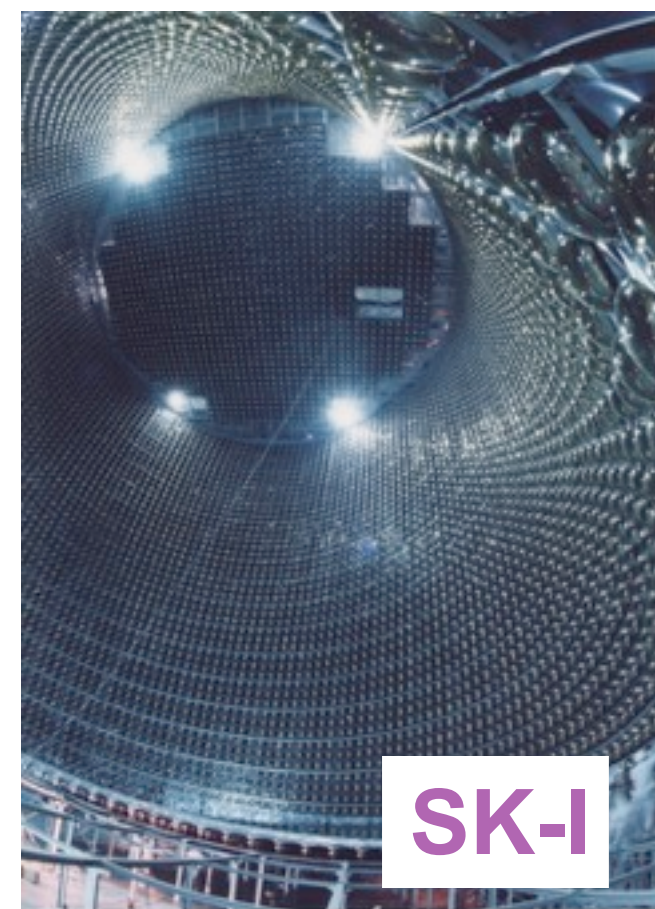
1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

SK-I

SK-II

SK-III

SK-IV



SK-I

**11146 ID PMTs
(40% coverage)**



Acrylic (front)
+ FRP (back)

SK-II

**5182 ID PMTs
(19% coverage)**



SK-III

**11129 ID PMTs
(40% coverage)**



SK-IV

**Electronics
Upgrade**

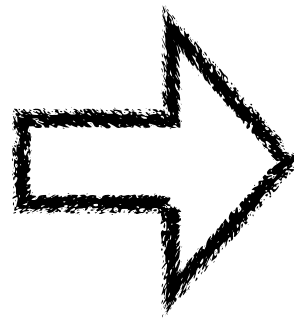
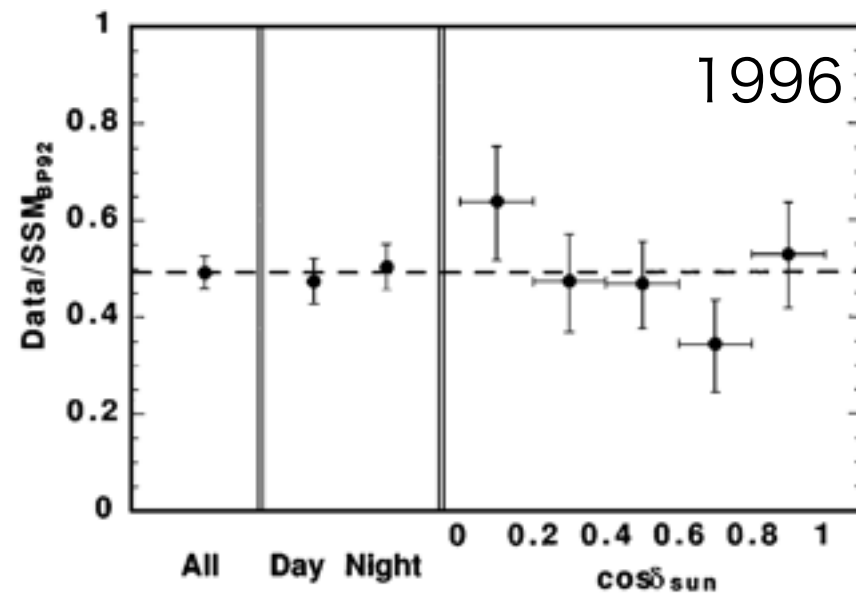
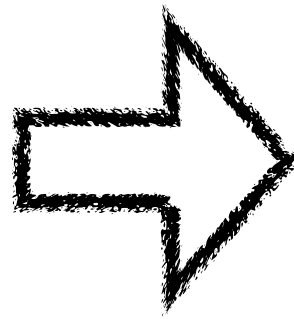
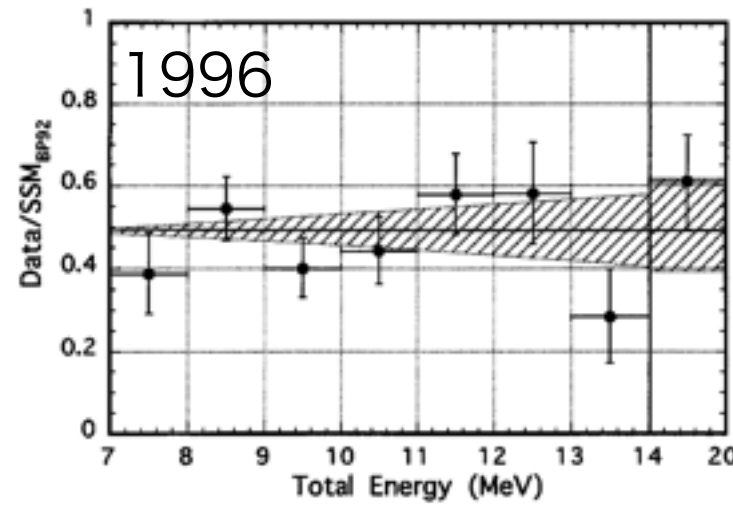
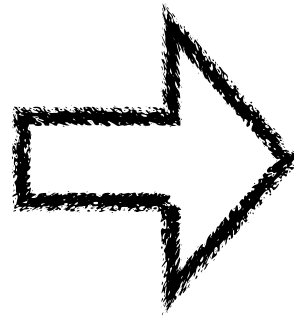
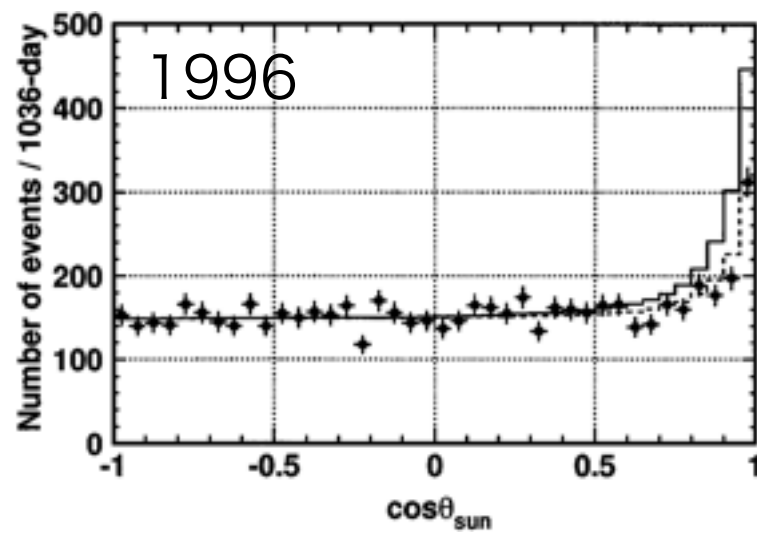
Threshold
(Total) **5.0 MeV**
(Kinetic) **~4.5 MeV**

7.0 MeV
~6.5 MeV

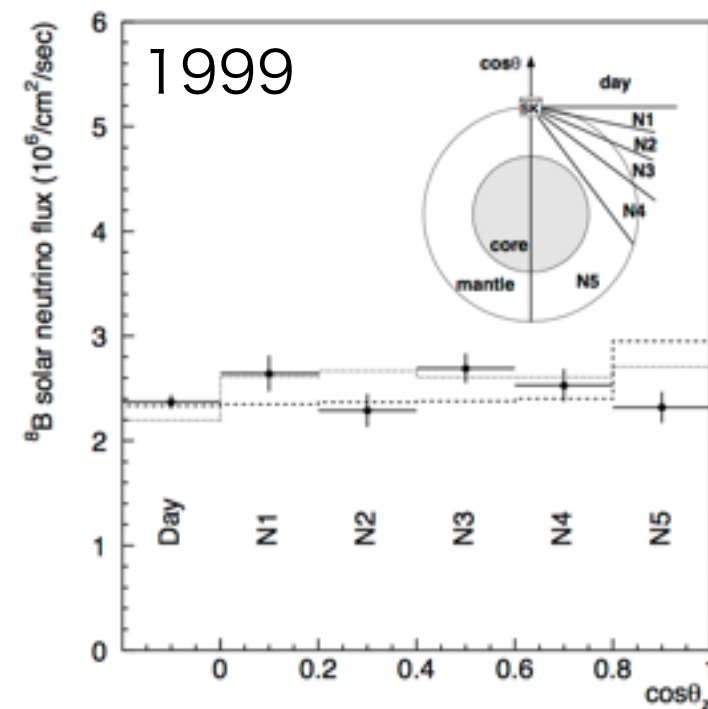
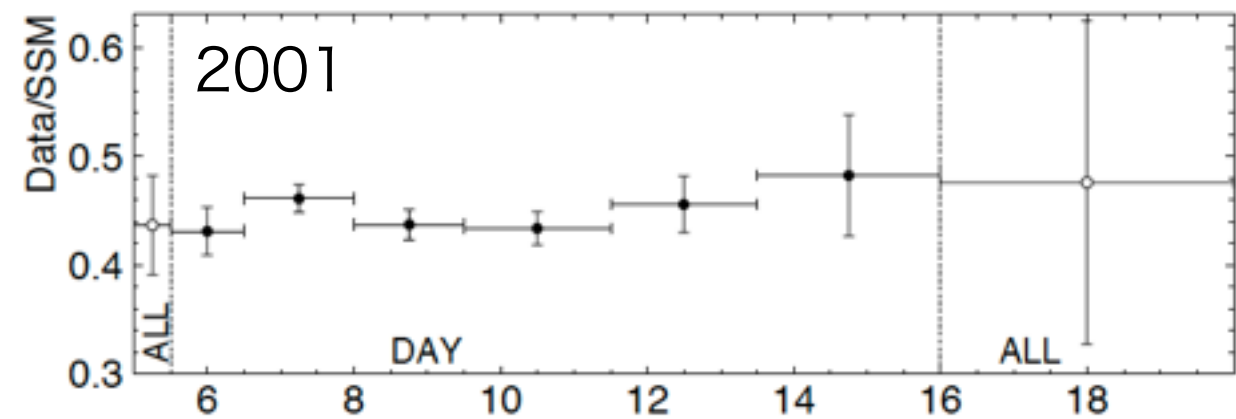
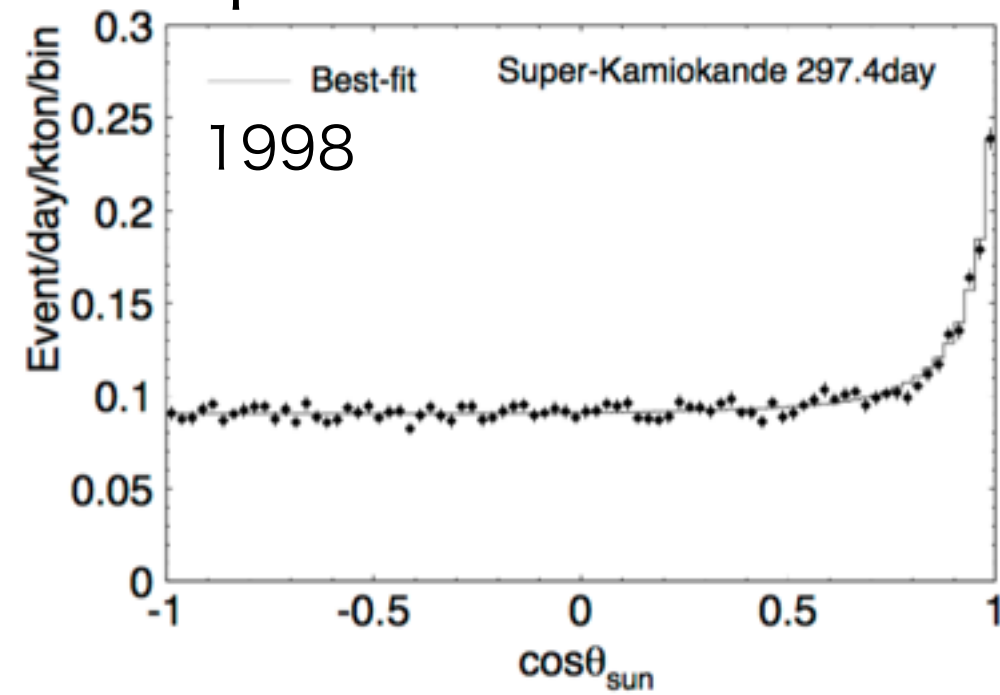
5.0 MeV
~4.5 MeV

4.0 MeV
~3.5 MeV

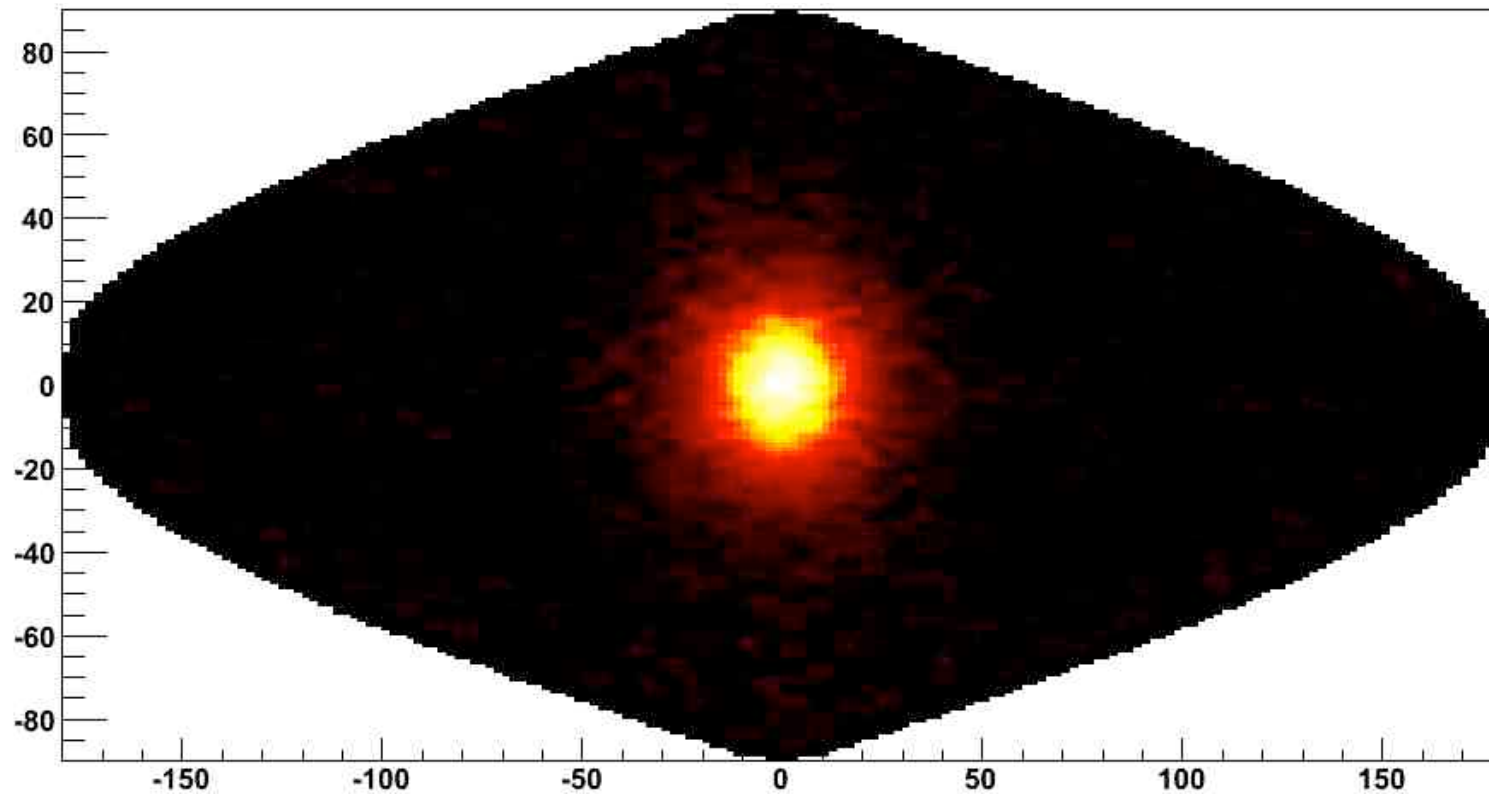
Kamiokande 3



Super-Kamiokande



太陽ニュートリノグラフィ



SKで撮影

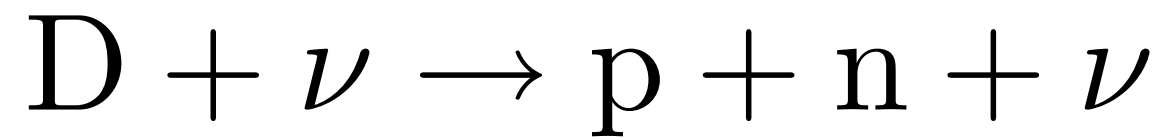
露出時間4500日

本当の大きさ ・

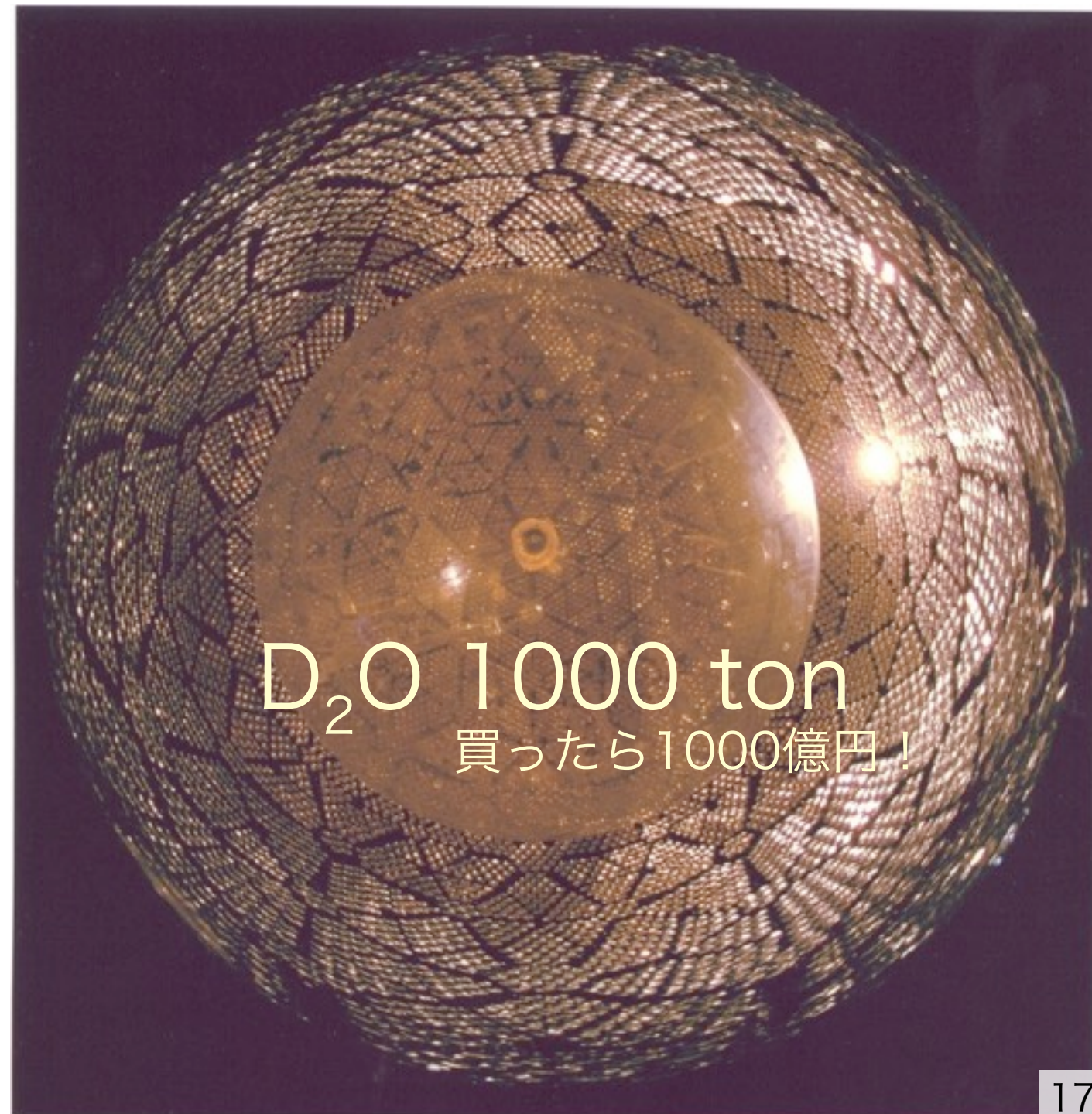
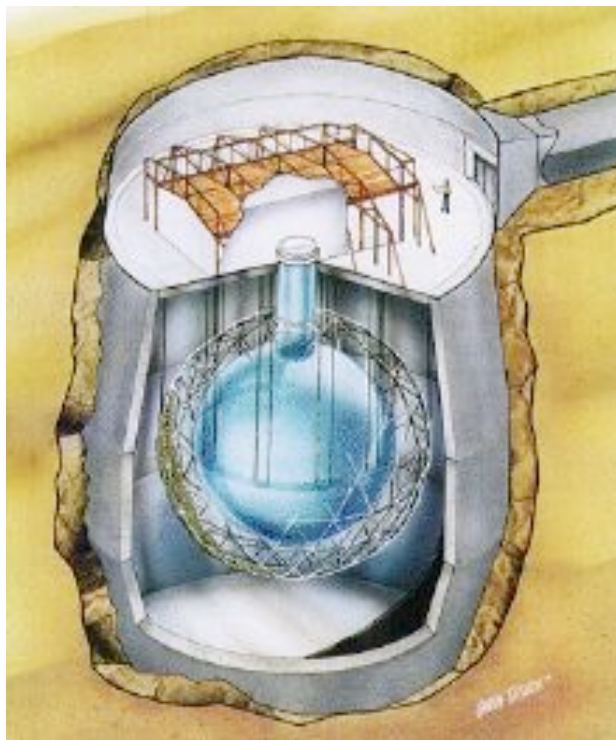
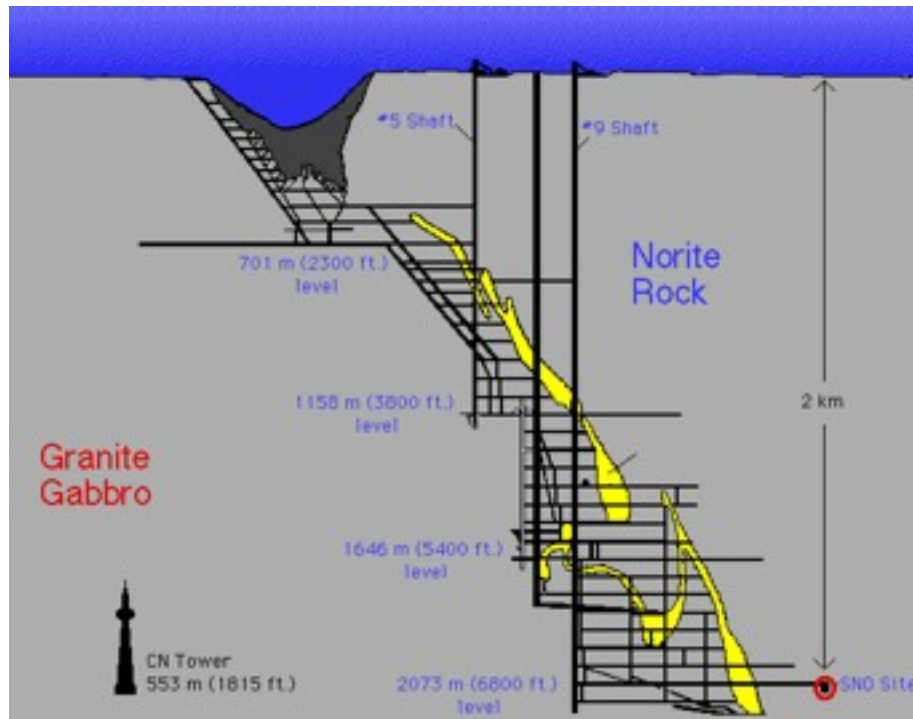
精度は大幅に向上したが、
直接的なニュートリノ振動の証拠はまだみつからない。。

純水の代わりに重水を使ったSNO実験

@Sudbury, Canada (6010mwe)

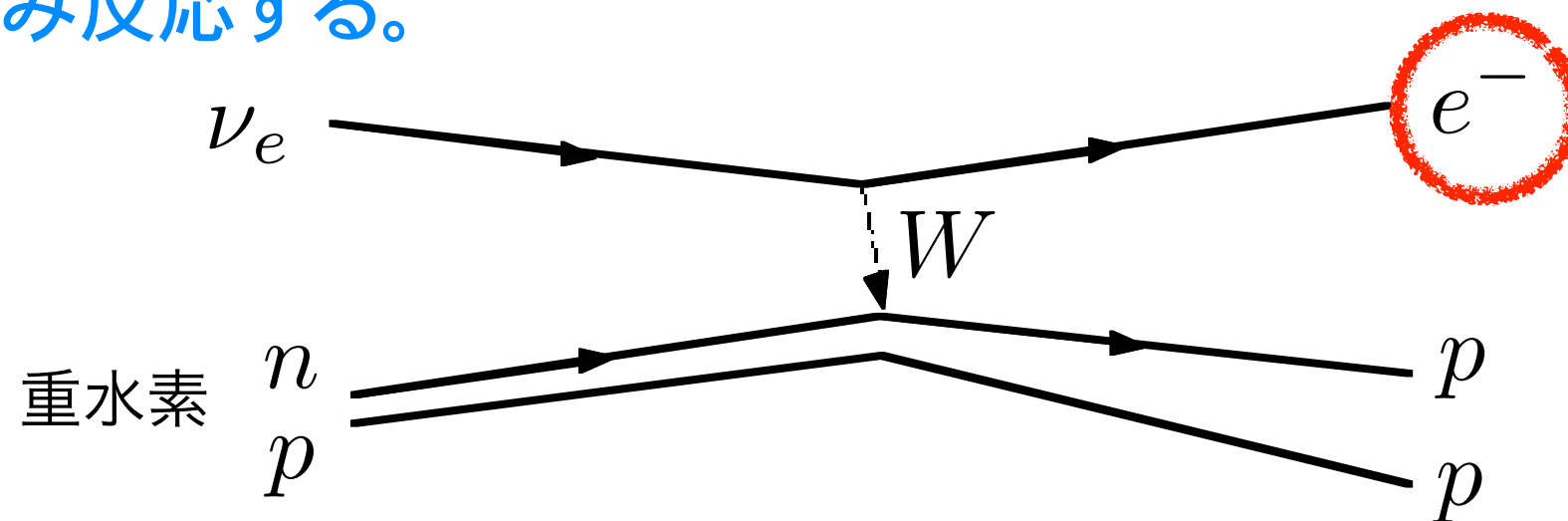


全てのニュートリノに同じ感
度がある中性カレント反応

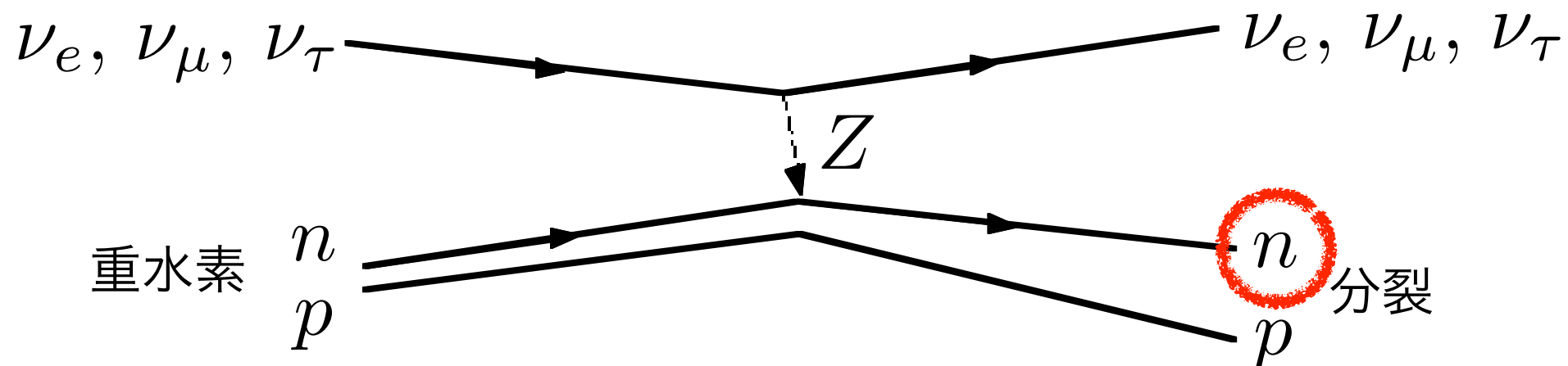


荷電カレント(CC)と中性カレント(NC) SNOの特徴

荷電カレント反応は μ^- , τ^- を作るのにエネルギーが足りないため
 ν_e のみ反応する。



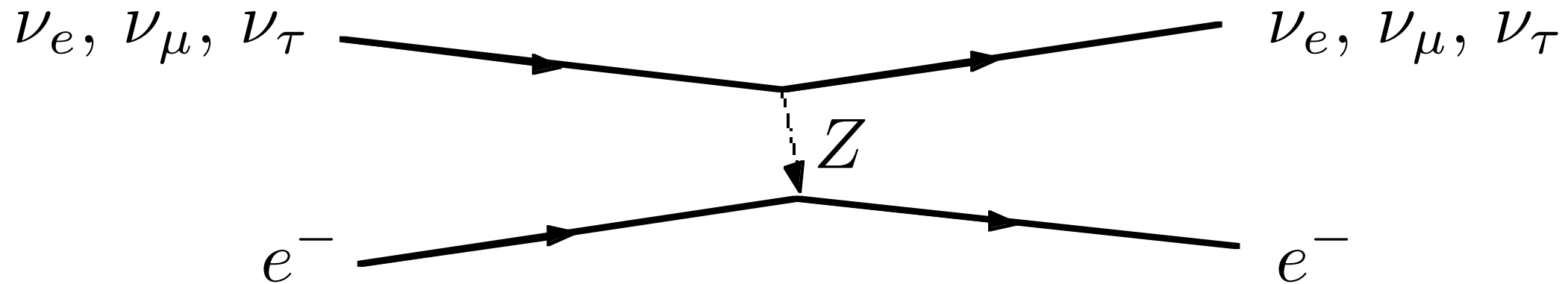
中性カレント反応は全て同じように起きる。



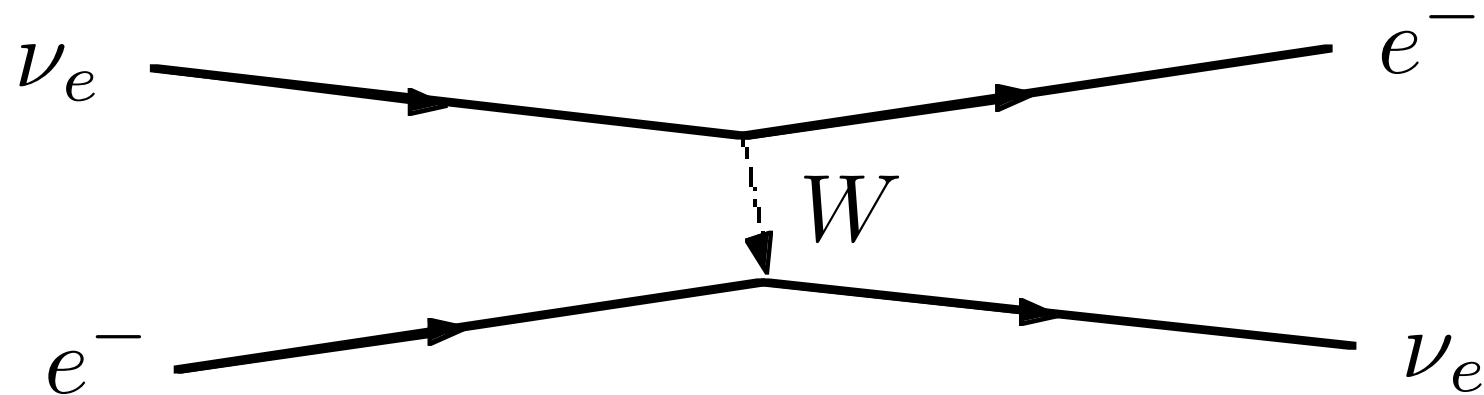
電子散乱 (ES) の場合

Kam, SK, SNO, Borexino, KamLAND

中性カレント反応は同じ。



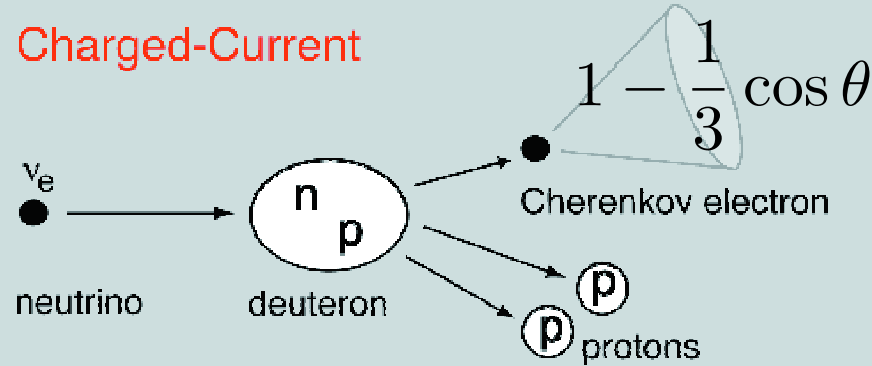
電子ニュートリノだけ荷電カレント反応もできる。



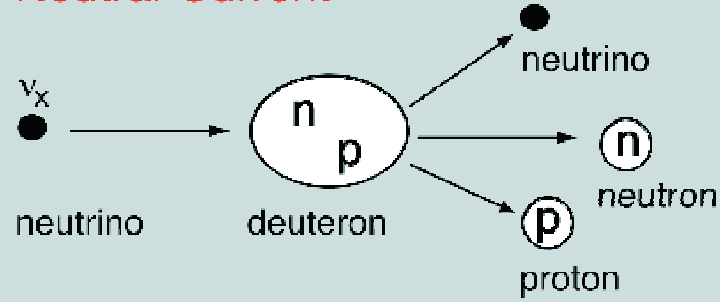
電子ニュートリノは約6倍大きい反応断面積を持つ。

Neutrino reactions in SNO

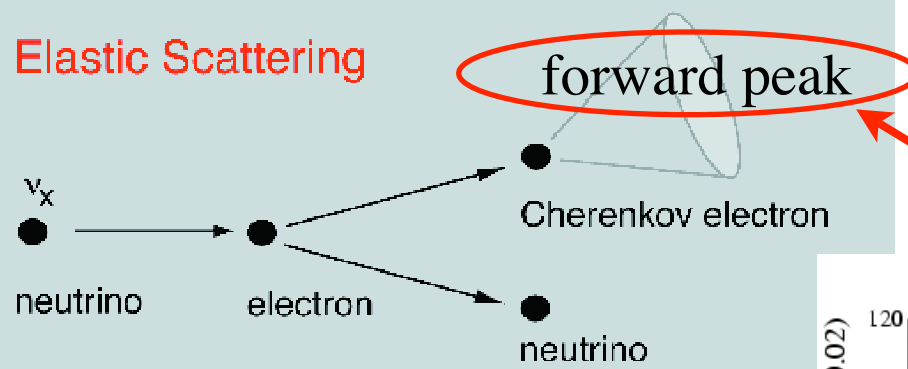
Charged-Current



Neutral-Current



Elastic Scattering



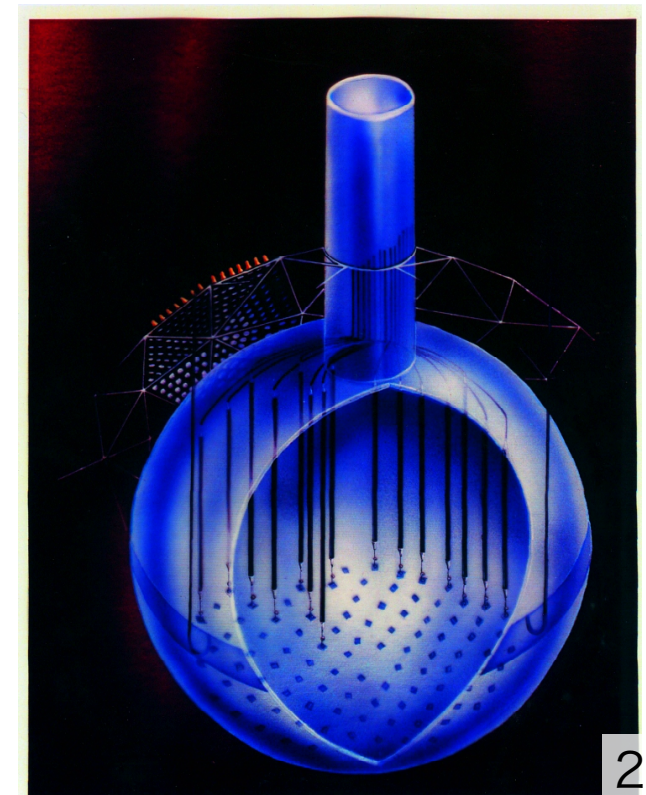
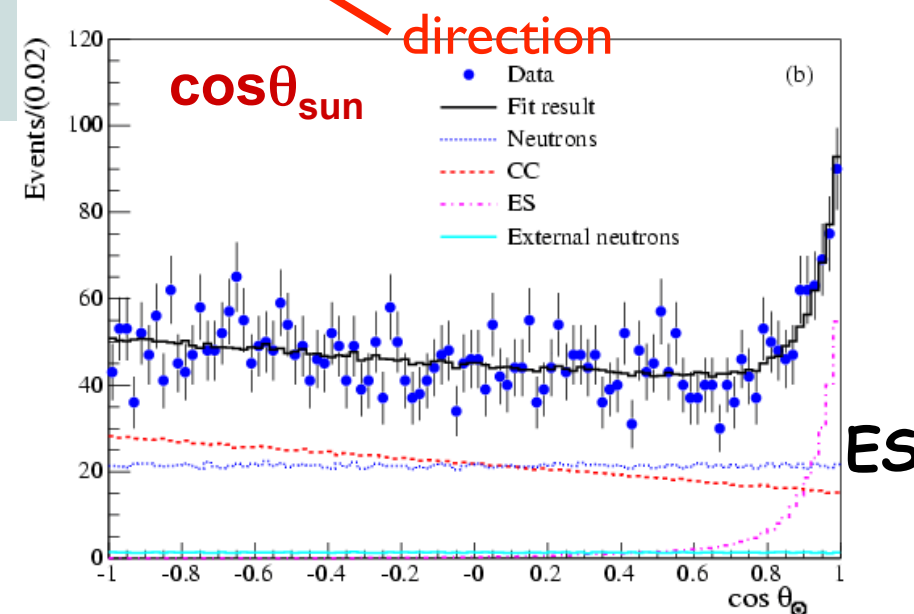
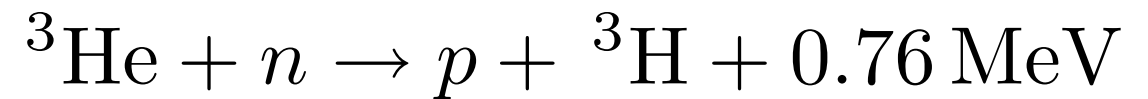
中性カレントの中性子観測は3種類
phase I (pure D2O)

n capture on D $\rightarrow$ 6.25 MeV γ

phase II (+salt)

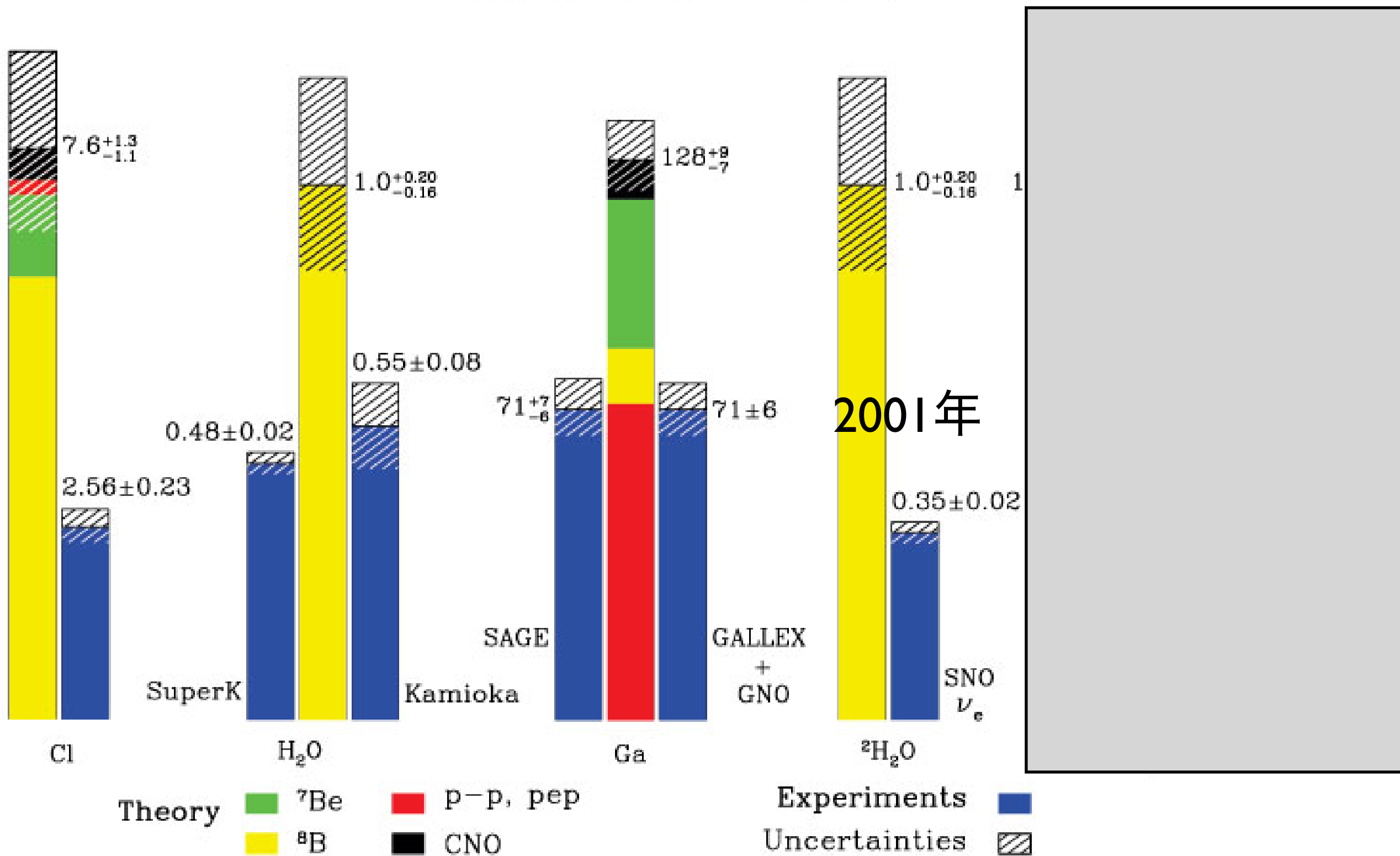
n capture on Cl $\rightarrow$ 8.6 MeV γ s

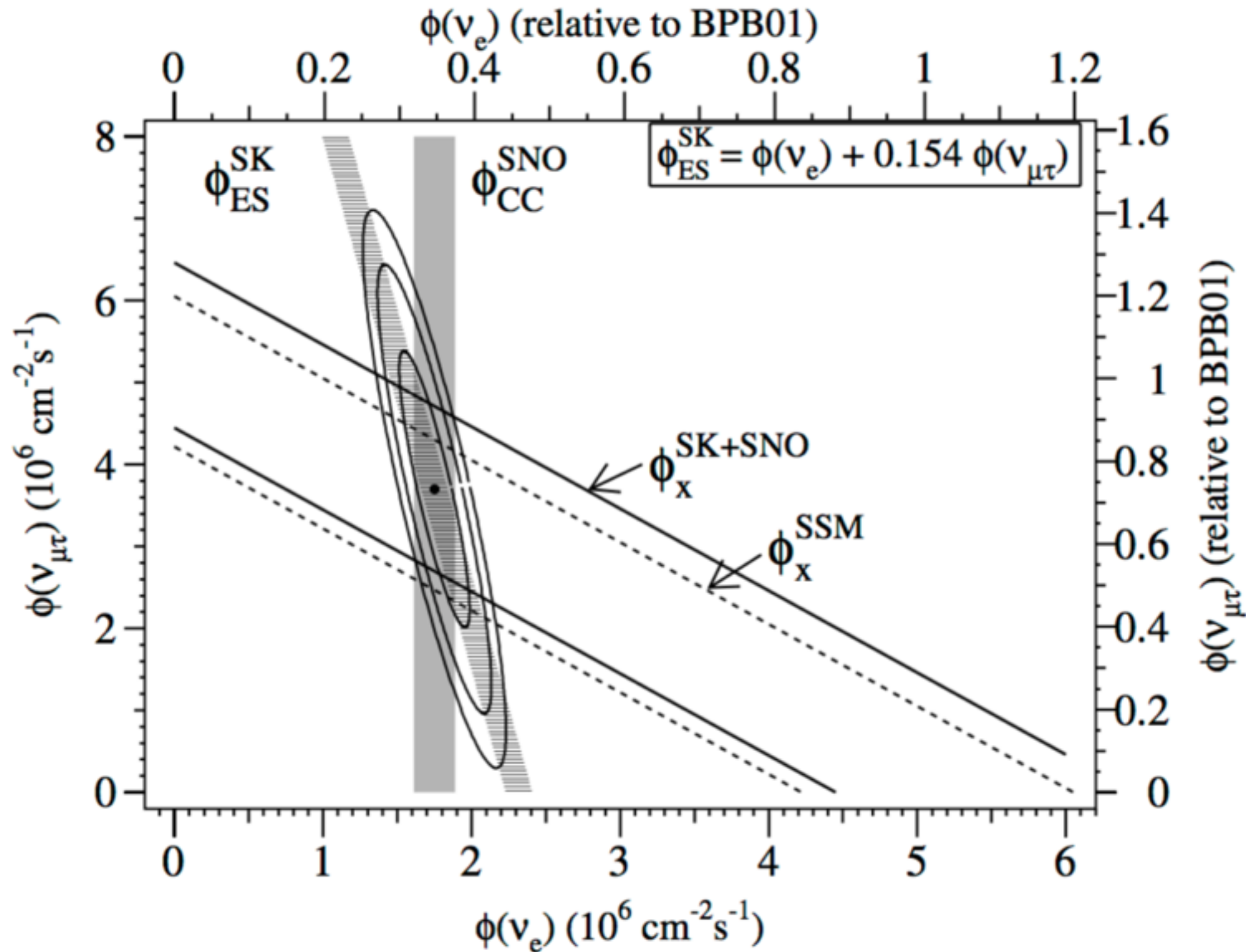
phase III (3He counters)



Total Rates: Standard Model vs. Experiment

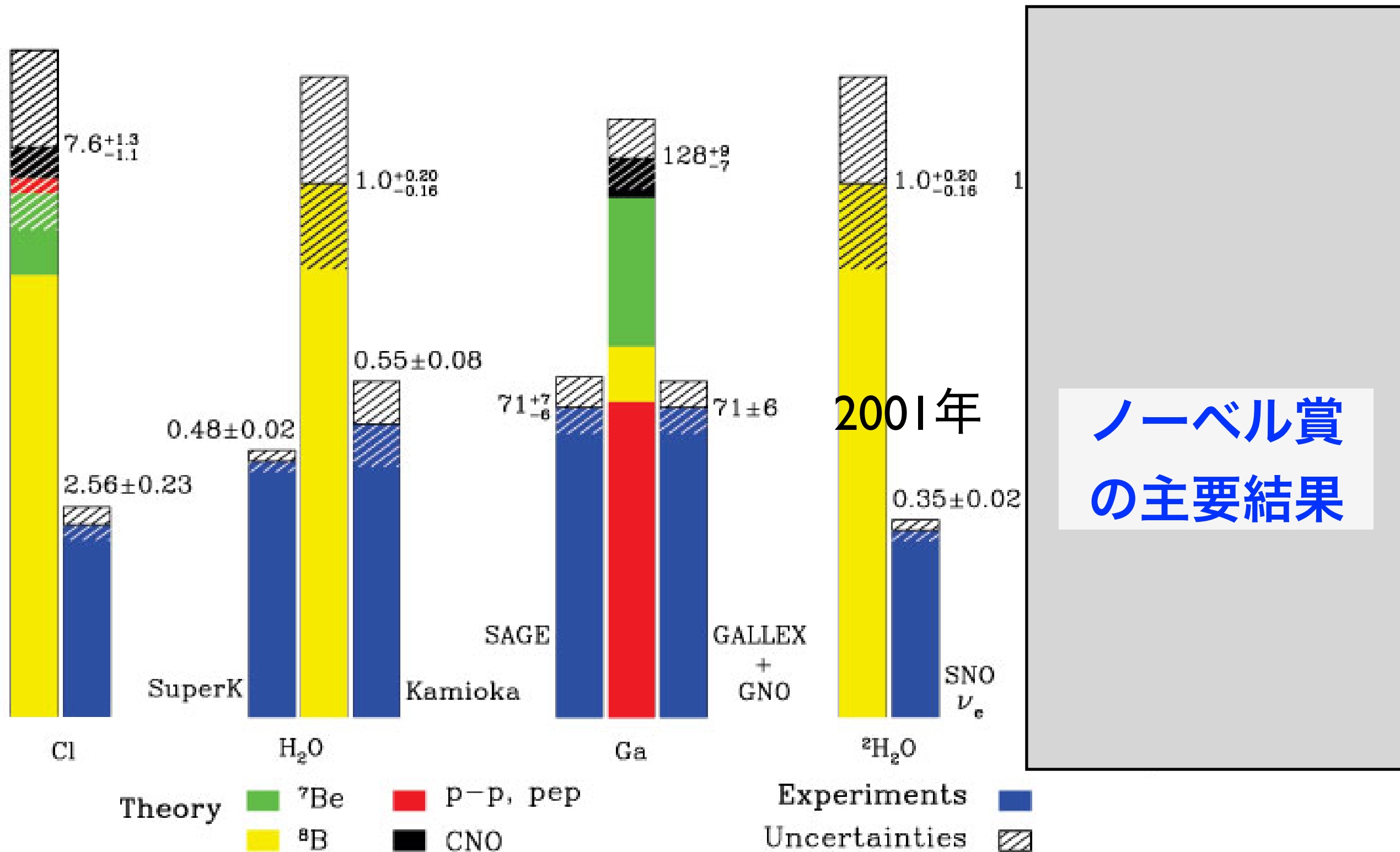
Bahcall-Pinsonneault 2000





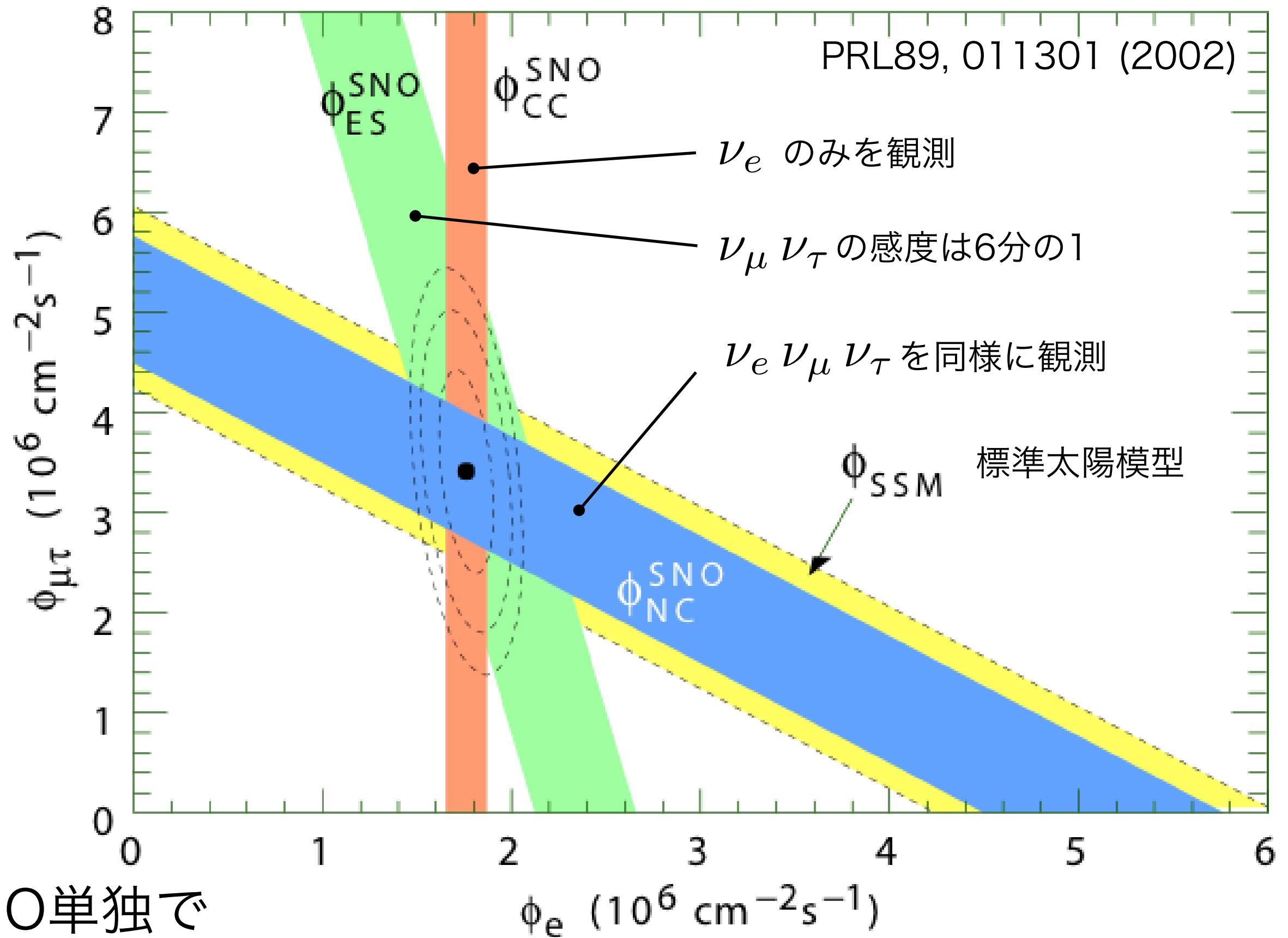
実は、2001年段階でSK ES と SNO CC で
 フレーバー変換の証拠があった。

Total Rates: Standard Model vs. Experiment Bahcall-Pinsonneault 2000



全種類を観測すれば太陽ニュートリノは欠損していない。

PRL89, 011301 (2002)

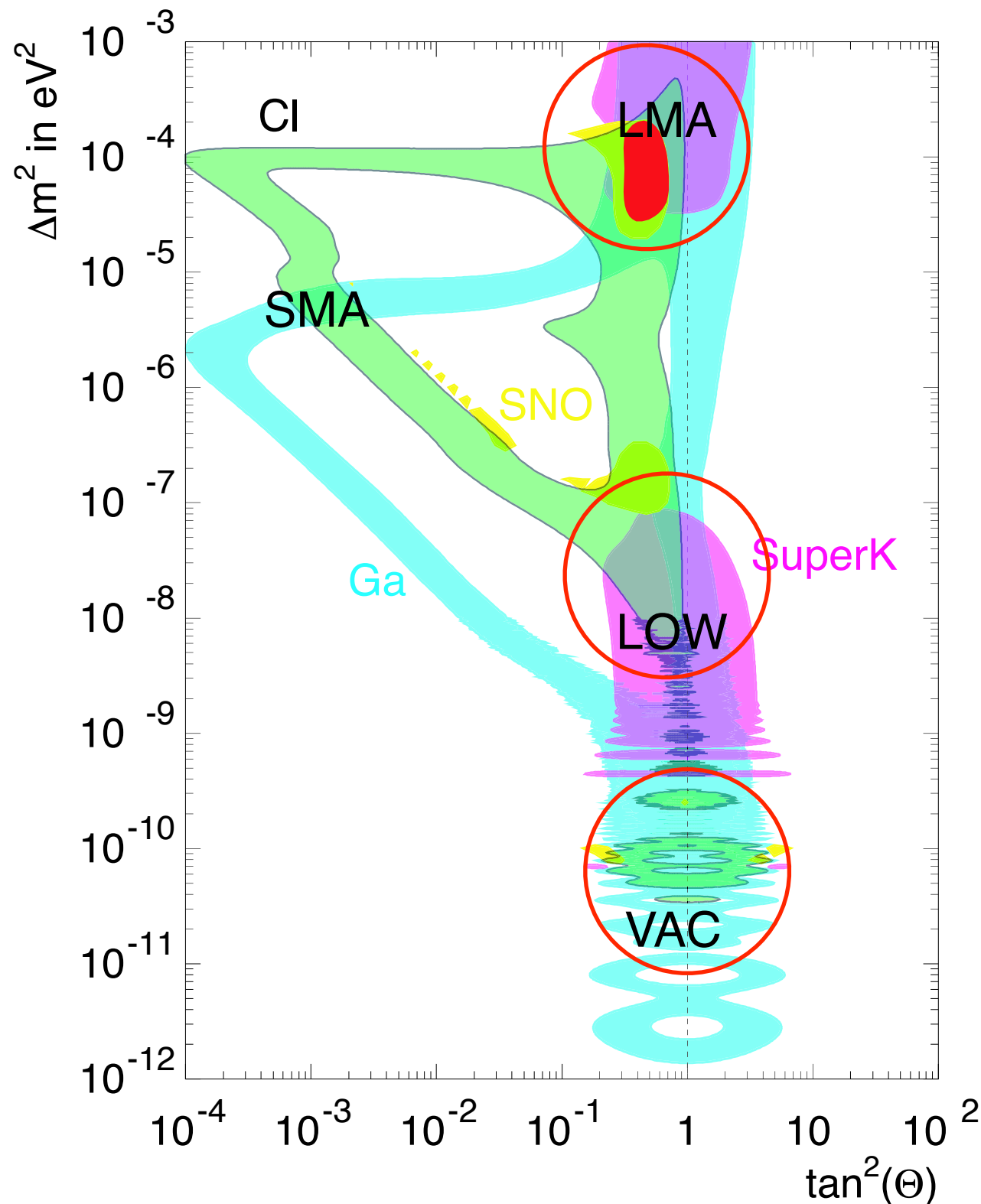


SNO単独で

電子ニュートリノが他のニュートリノに変化している証拠

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41 \pm 0.45^{+0.48}_{-0.45} \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{sec}$$

ニュートリノ振動を仮定すると



LMA 有力

SMA SKが排除

LOW

VAC

他の仮説の可能性も！

RSFP (磁気モーメント)

FCNC (フレーバー変換中性カレント)

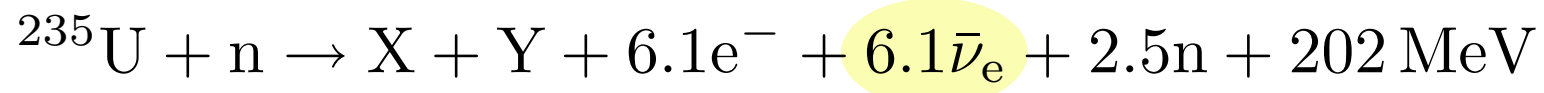
decay (崩壊)

decoherence (デコヒーレンス)

etc.

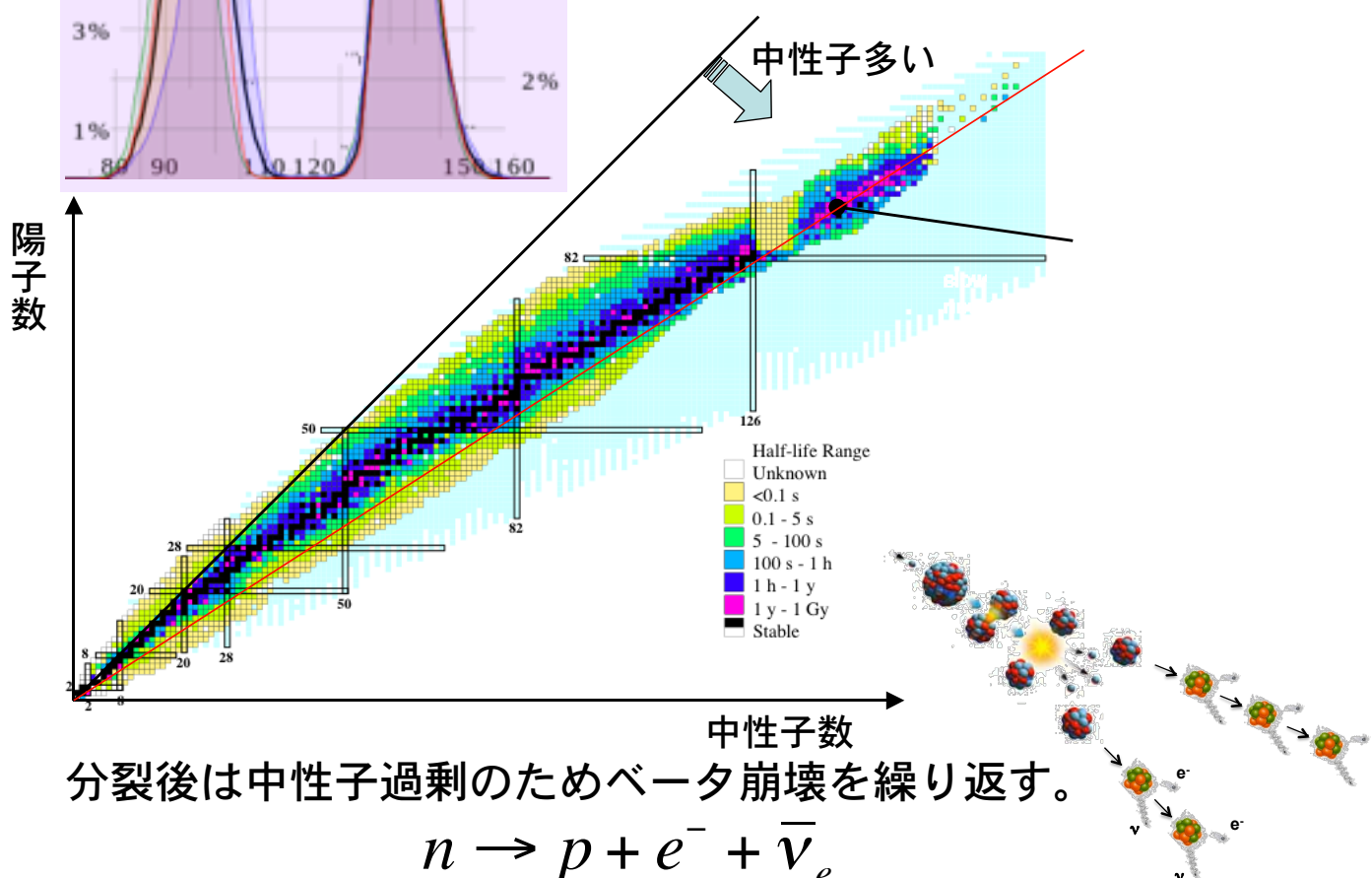
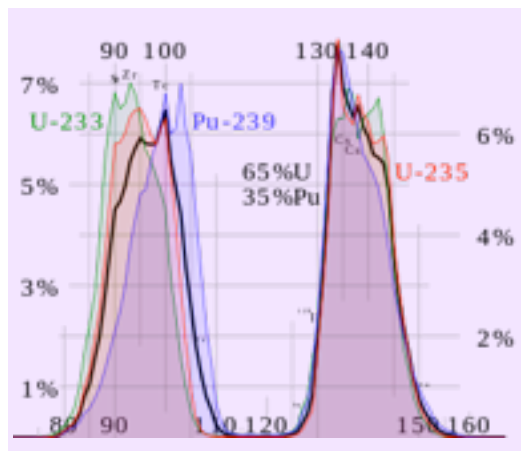
まだ太陽ニュートリノ問題の解は特定できていない！！

長基線原子炉ニュートリノ振動

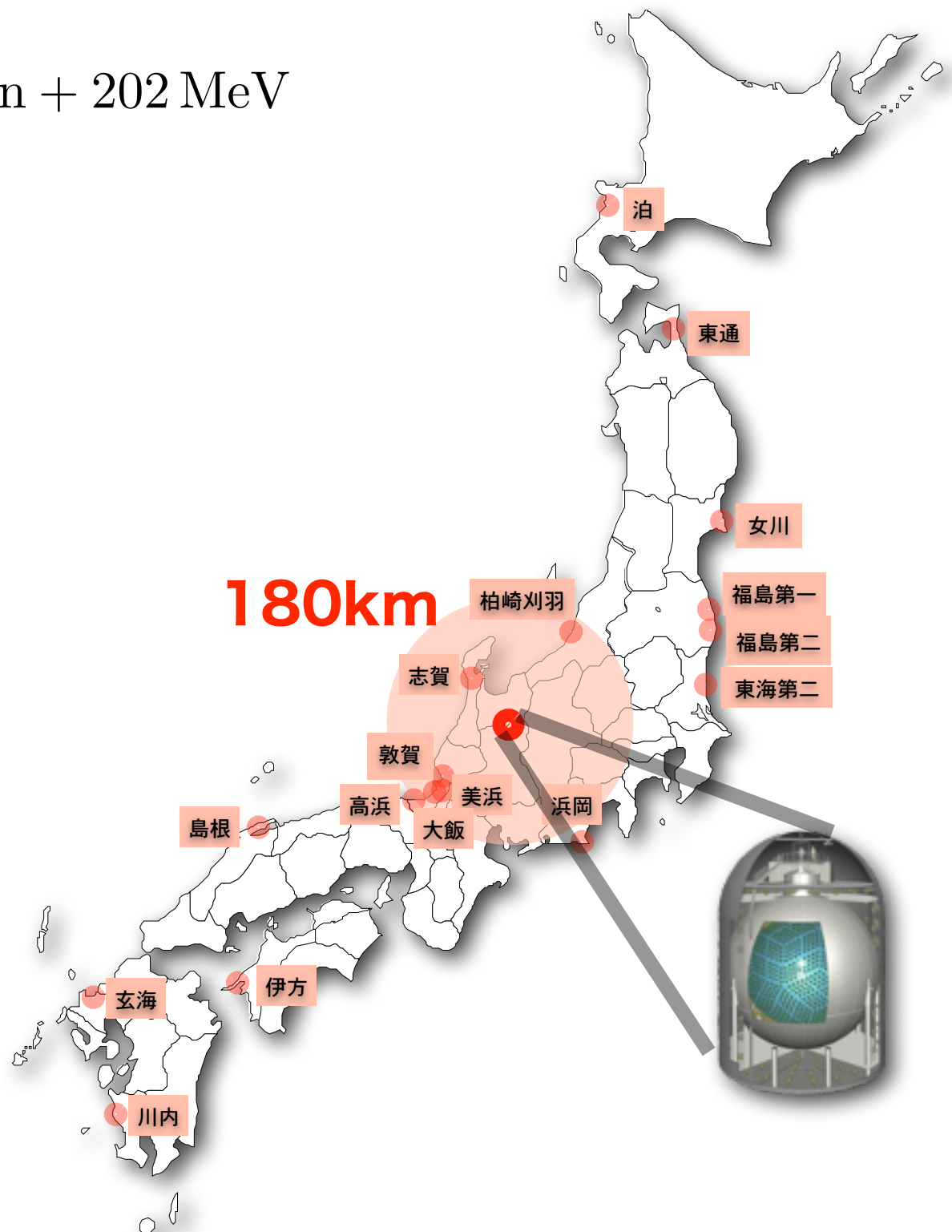
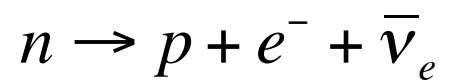


その他 ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}Pu

世界全体で約 1 兆ワット
国内は約 1 5 0 0 億ワット



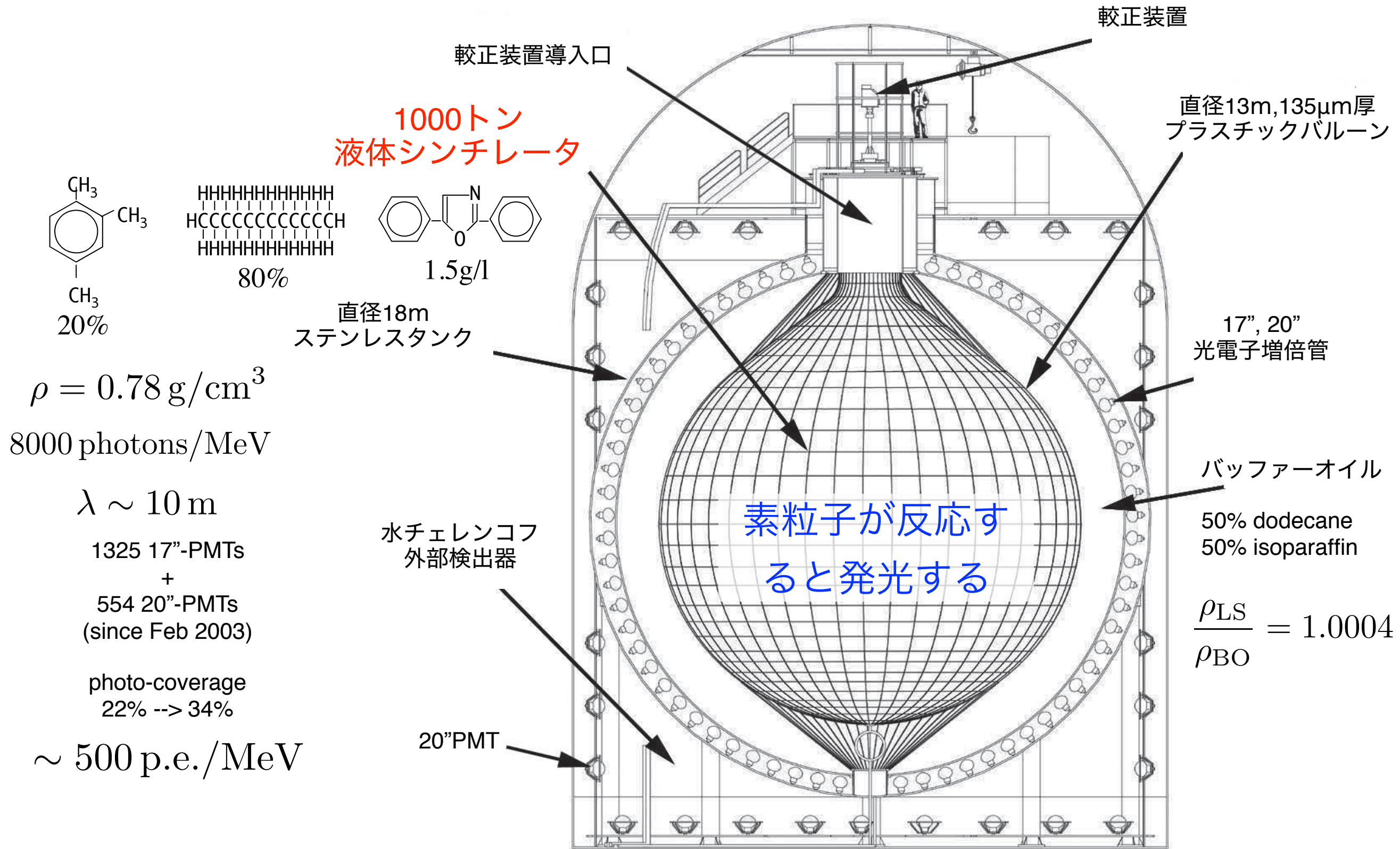
分裂後は中性子過剰のためベータ崩壊を繰り返す。

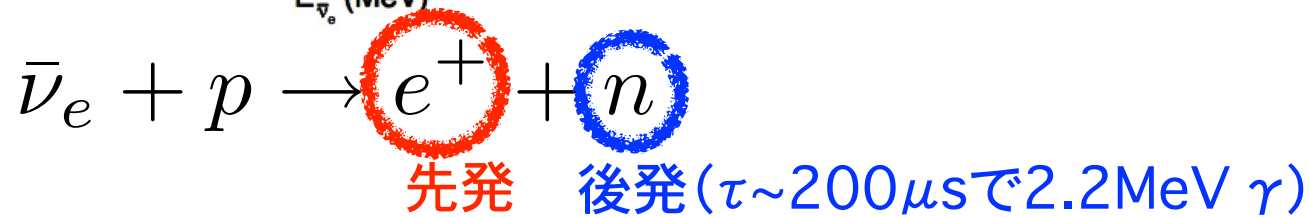
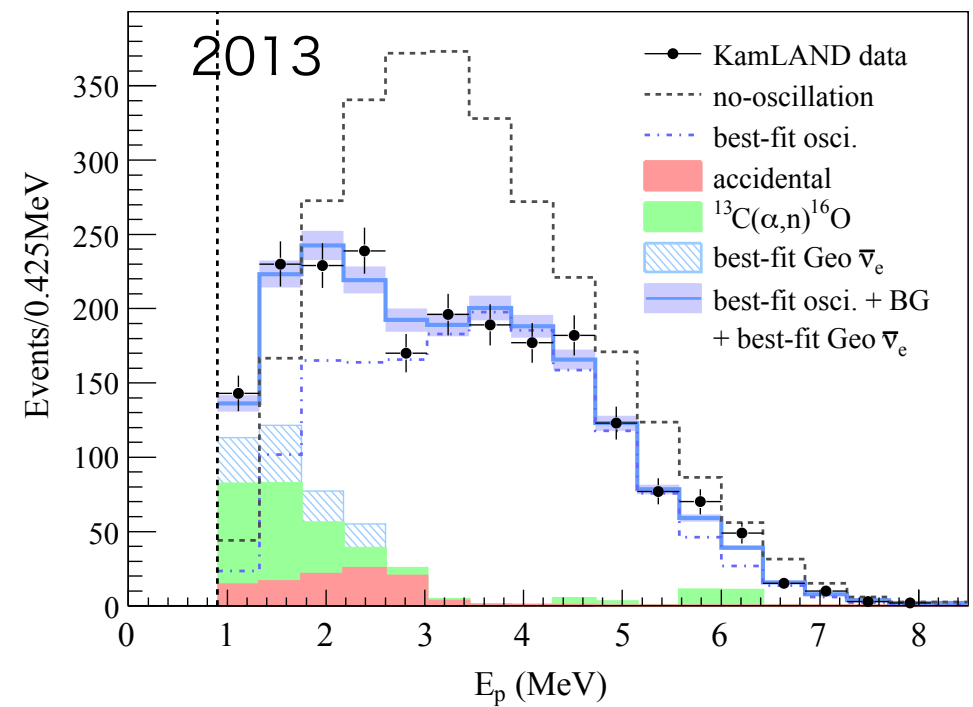
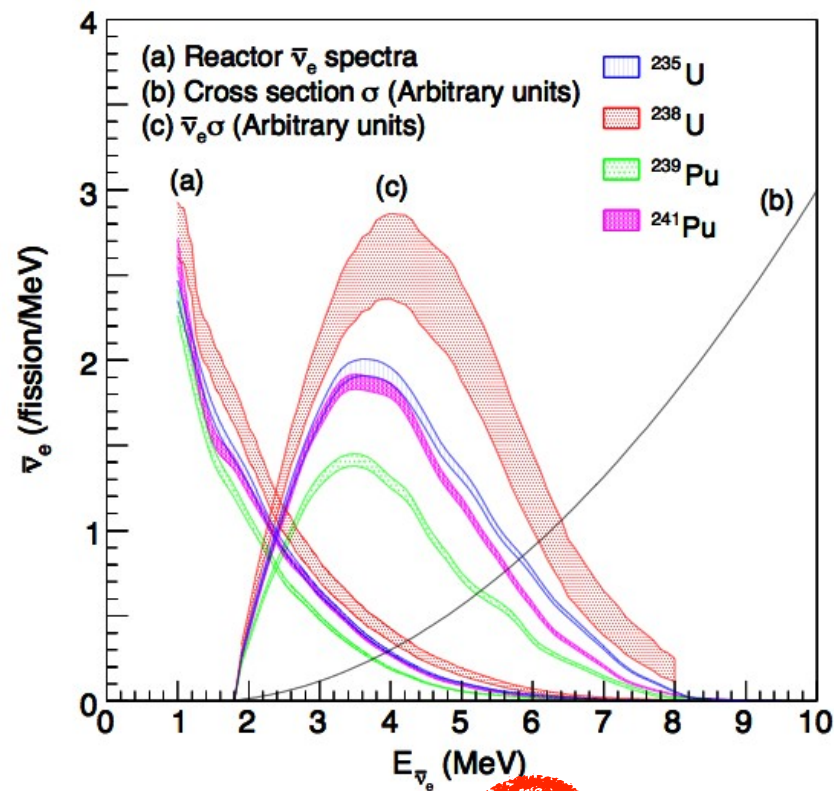


LMAのみに感度

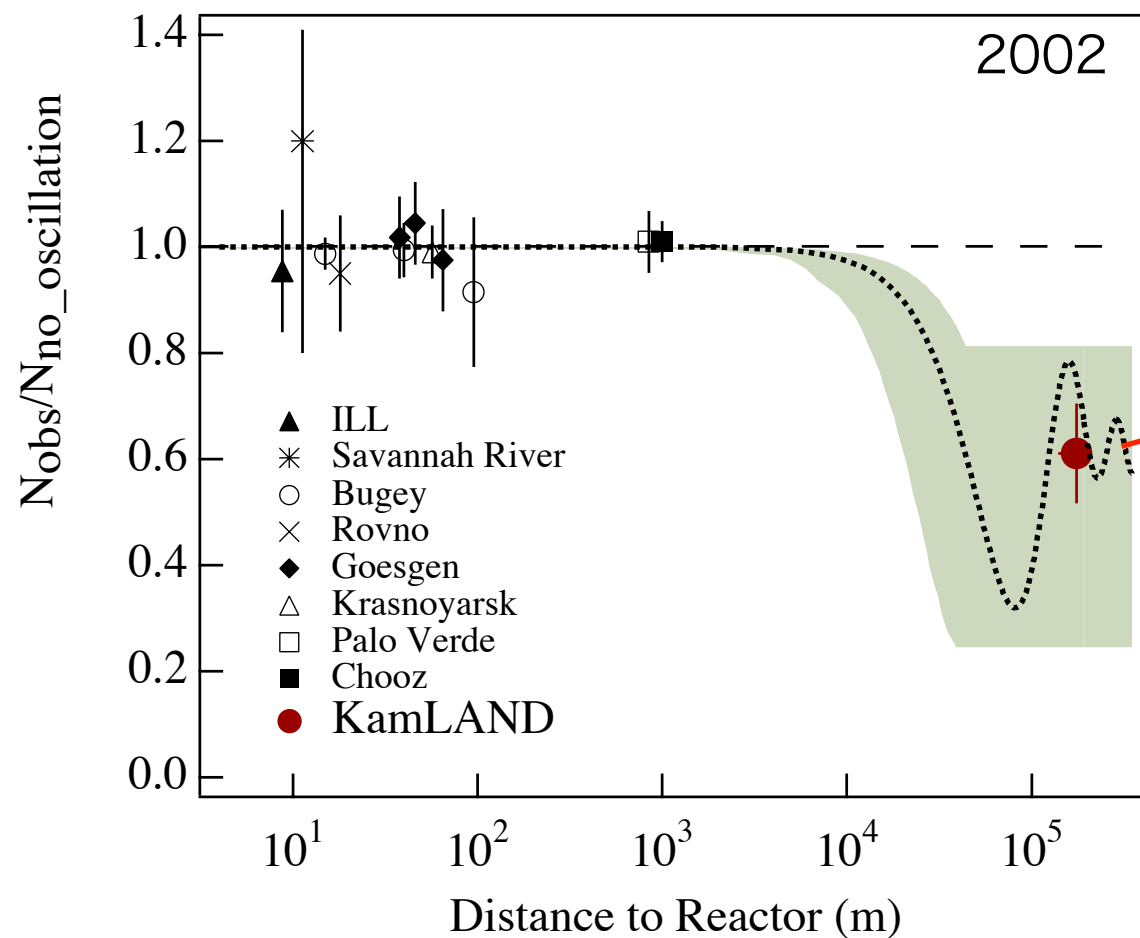
カムランド

Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector





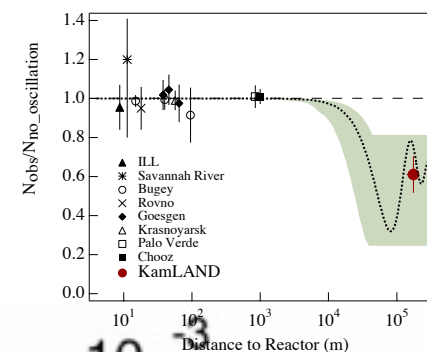
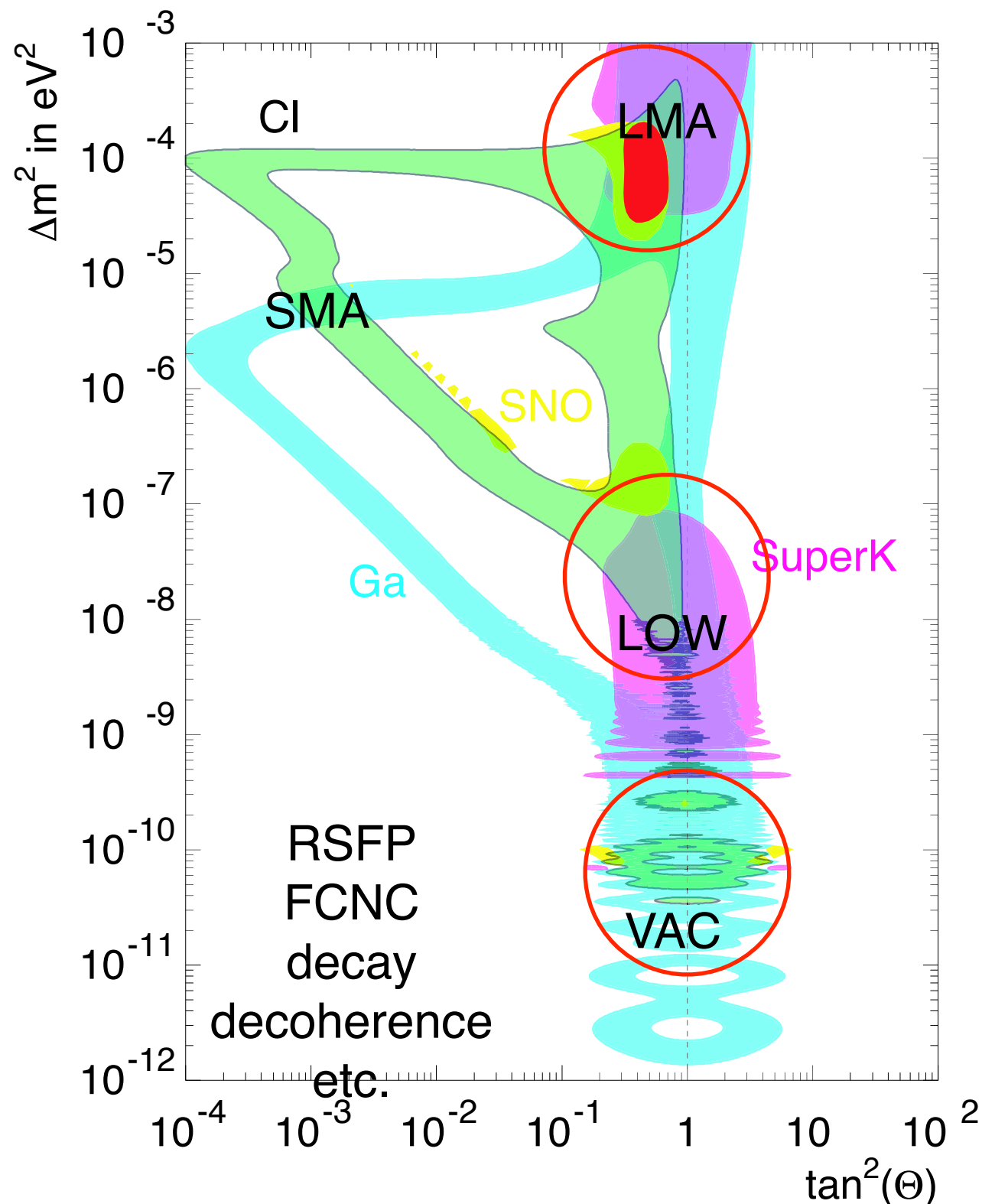
低エネルギーは原子炉 ν
 と地球 ν が競合



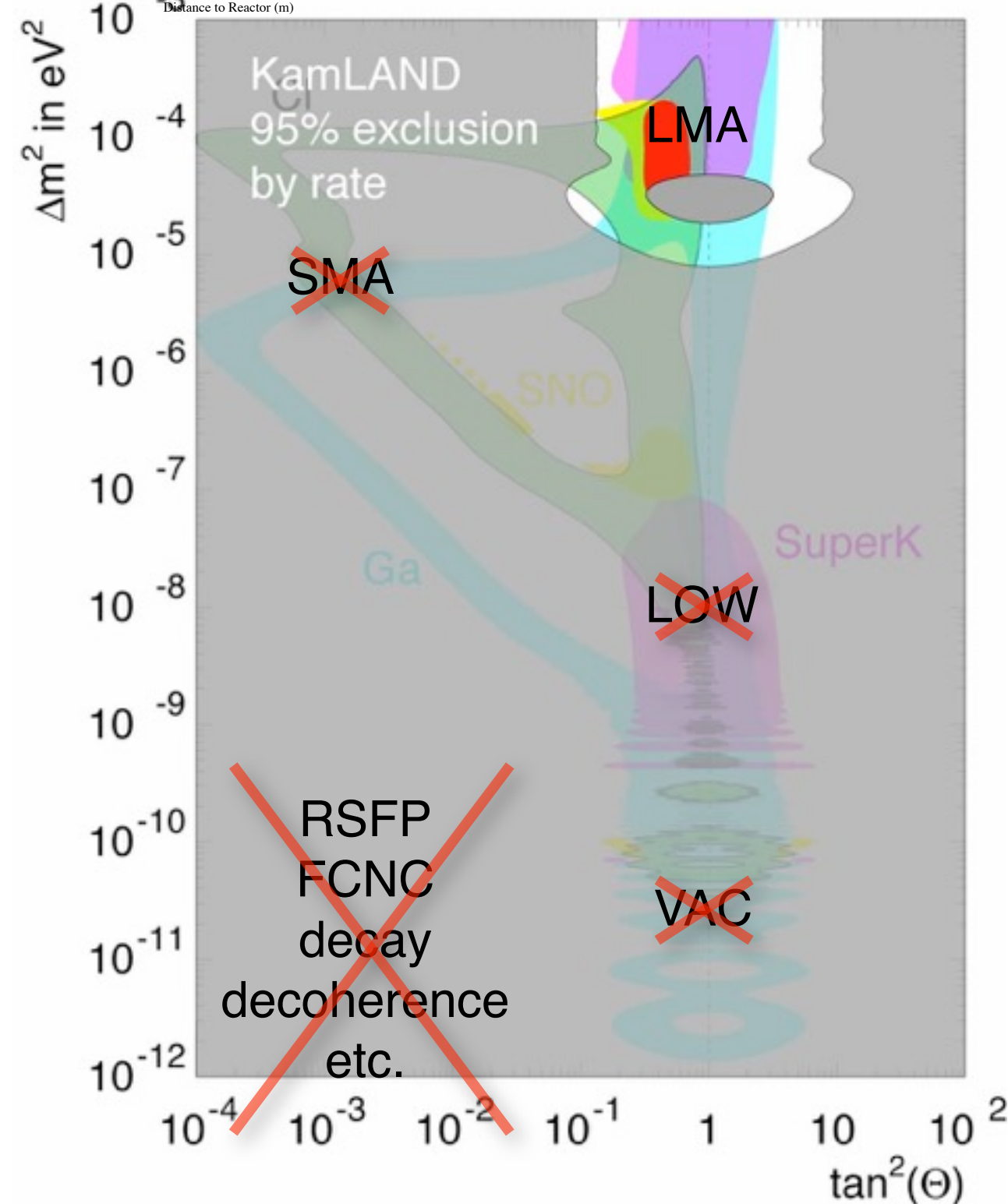
$$0.611 \pm 0.085(\text{stat}) \pm 0.041(\text{syst})$$

PRL90, 021802 (2003)

太陽ニュートリノ問題を説明できる ニュートリノ振動パラメータ



カムランドの結果を付加
すると。。。



原子炉ニュートリノ欠損はLMA以外を全て否定する。
消去法で「太陽ニュートリノ問題の解を特定！」

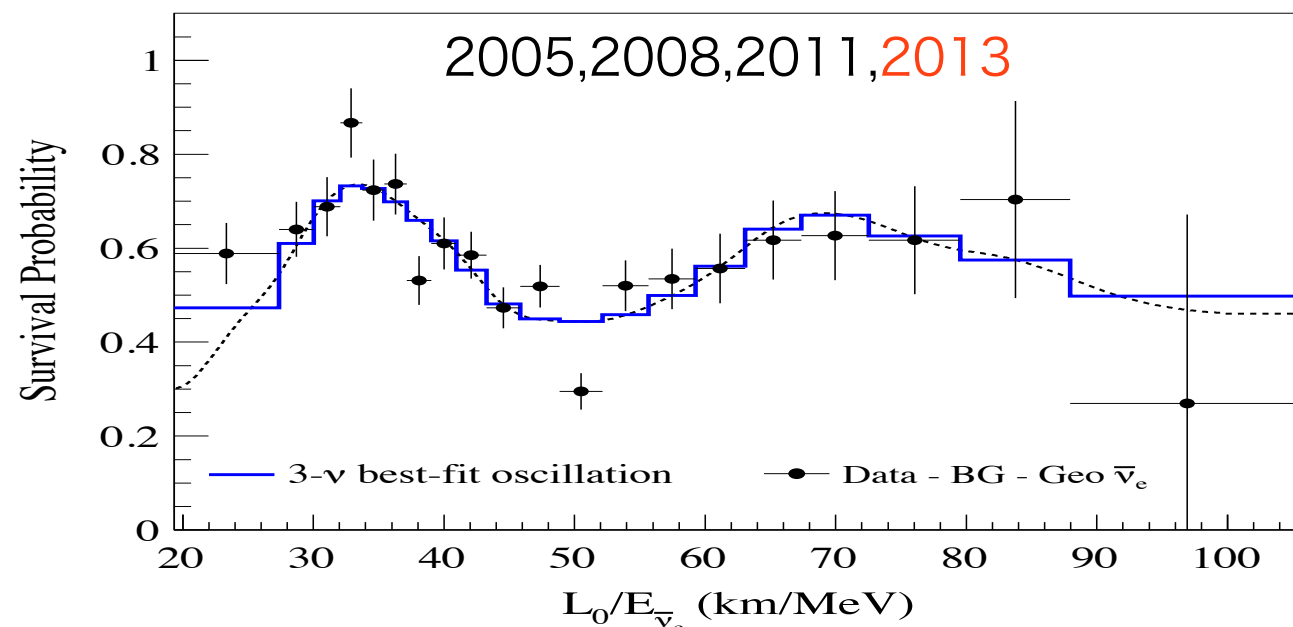
ニュートリノ振動の直接証拠

二世代で単純化したニュートリノ振動

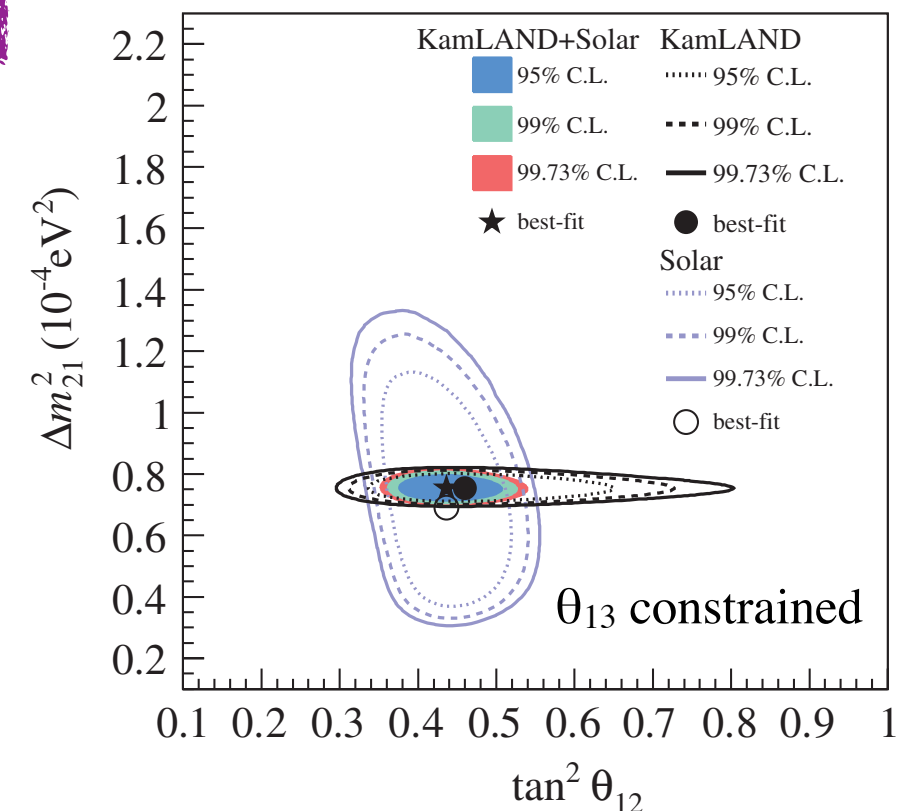
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

周期的な変化を捉えたい。

(有効距離180km ÷ エネルギー) の関数で
生存確率を測定



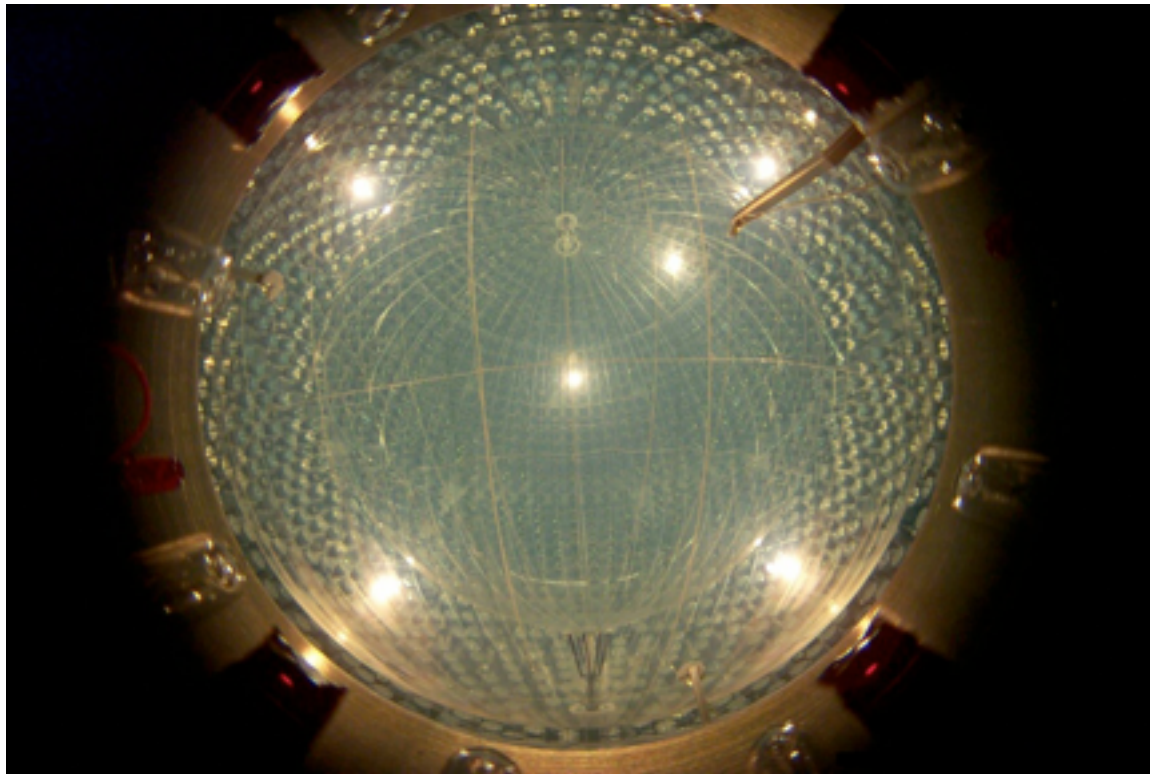
2周期にわたる明確なニュートリノ振動の測定



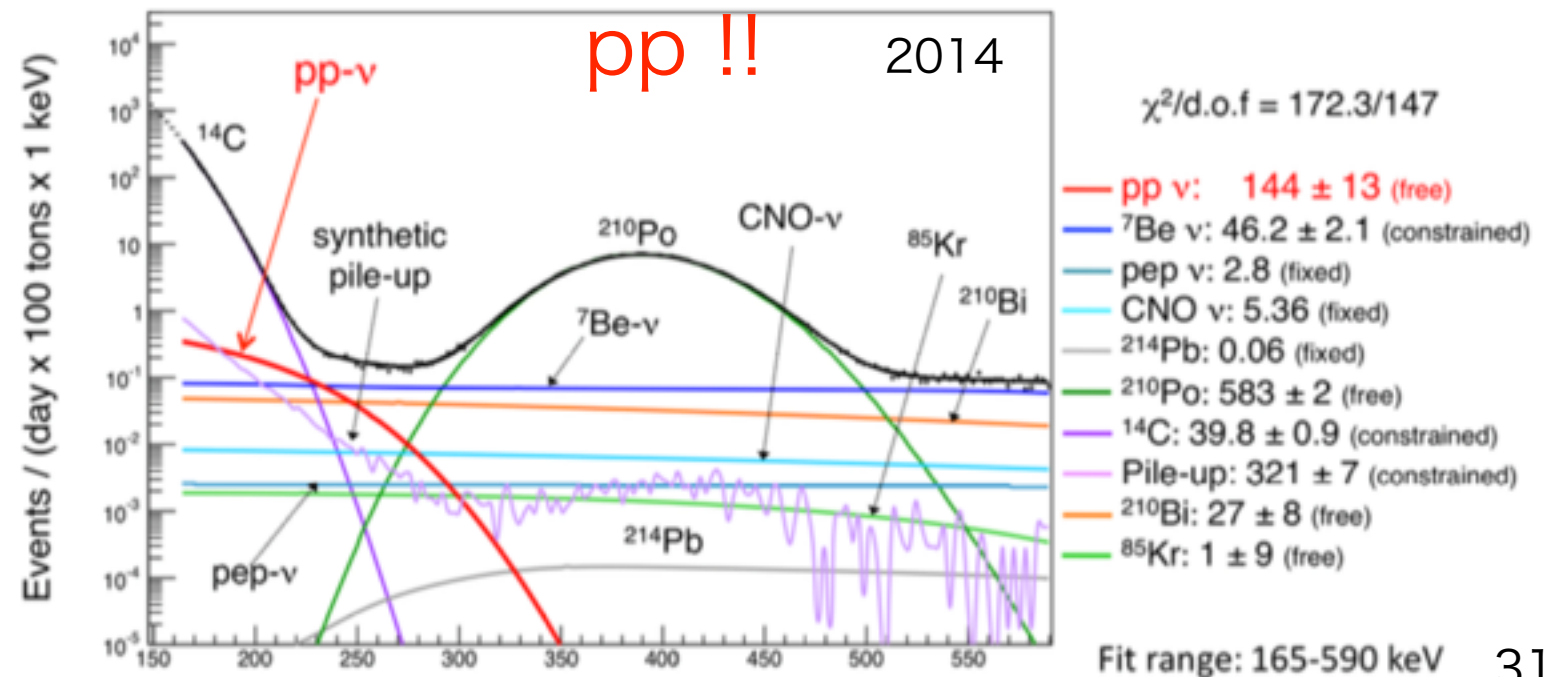
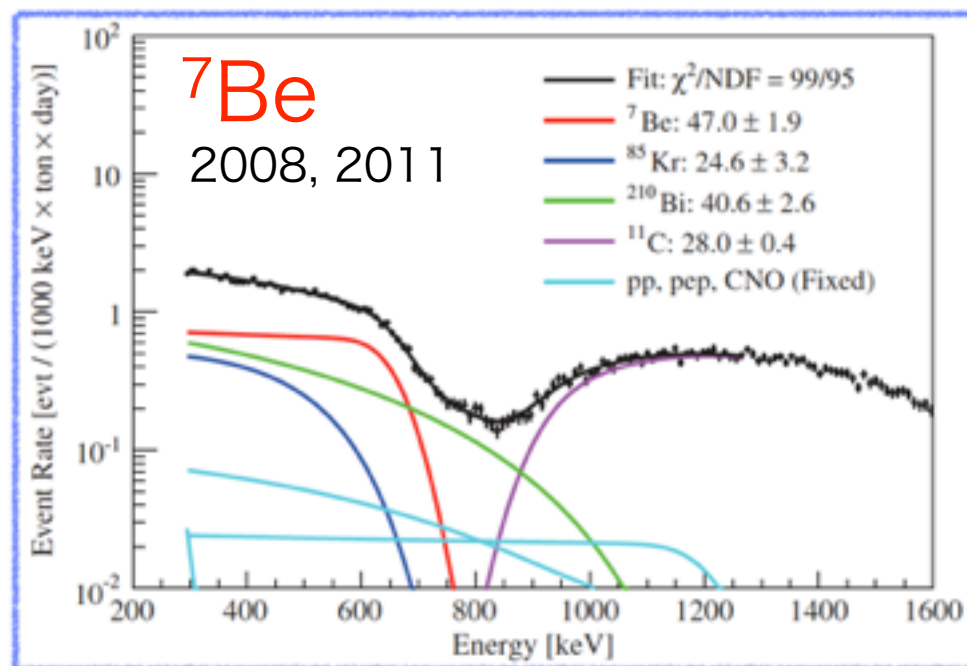
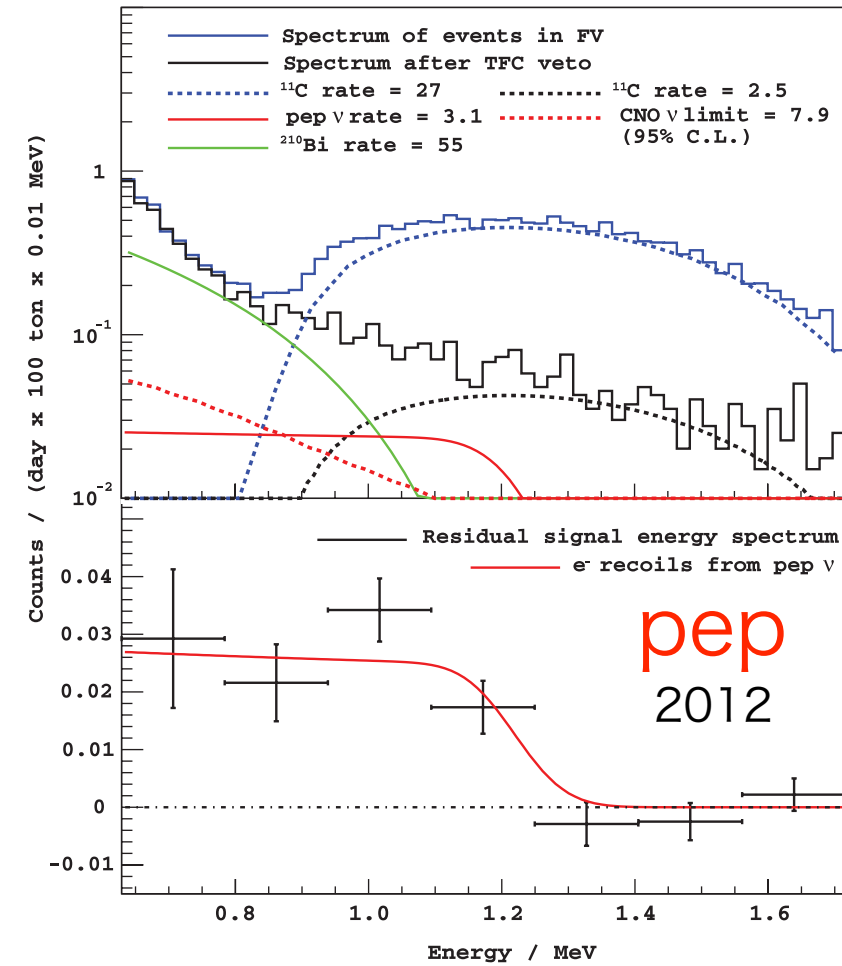
$$\Delta m_{21}^2 = 7.53^{+0.18}_{-0.18} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

2.4% の高精度で決定！

Borexino @Gran Sasso (3800mwe)



300 ton 液体シンチレータ
低エネルギーでの実時間測定が可能

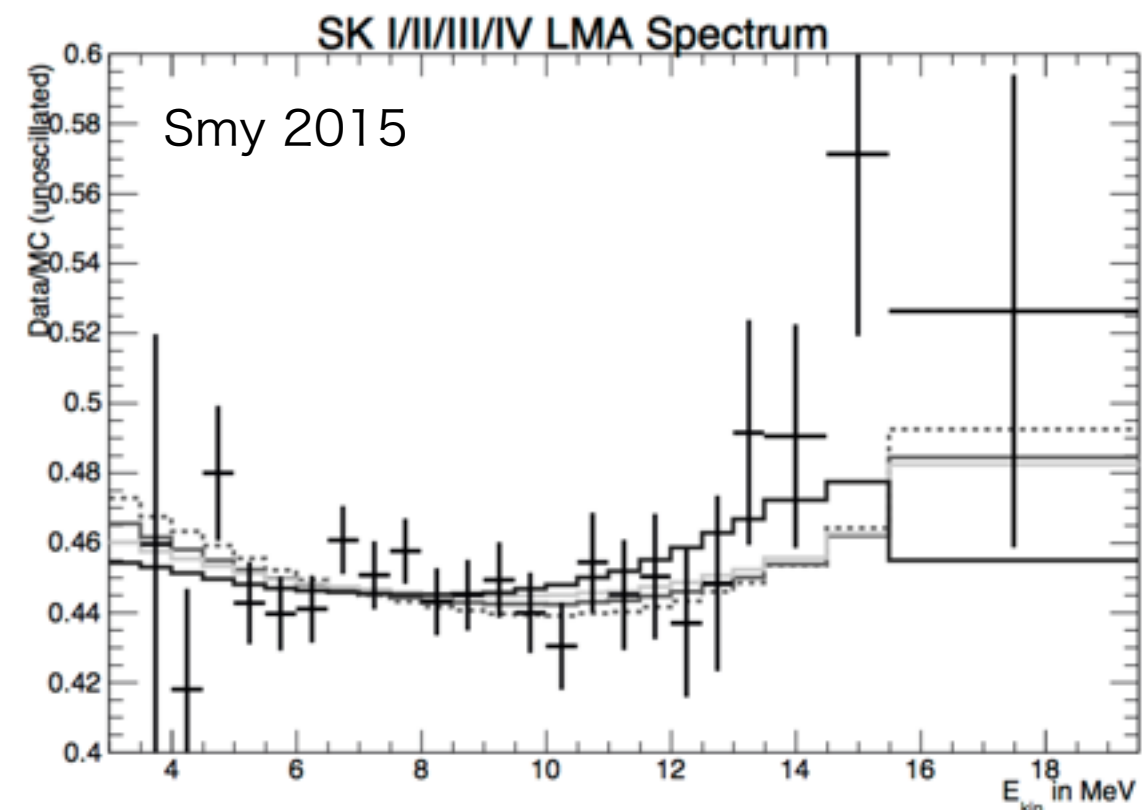


標準太陽模型

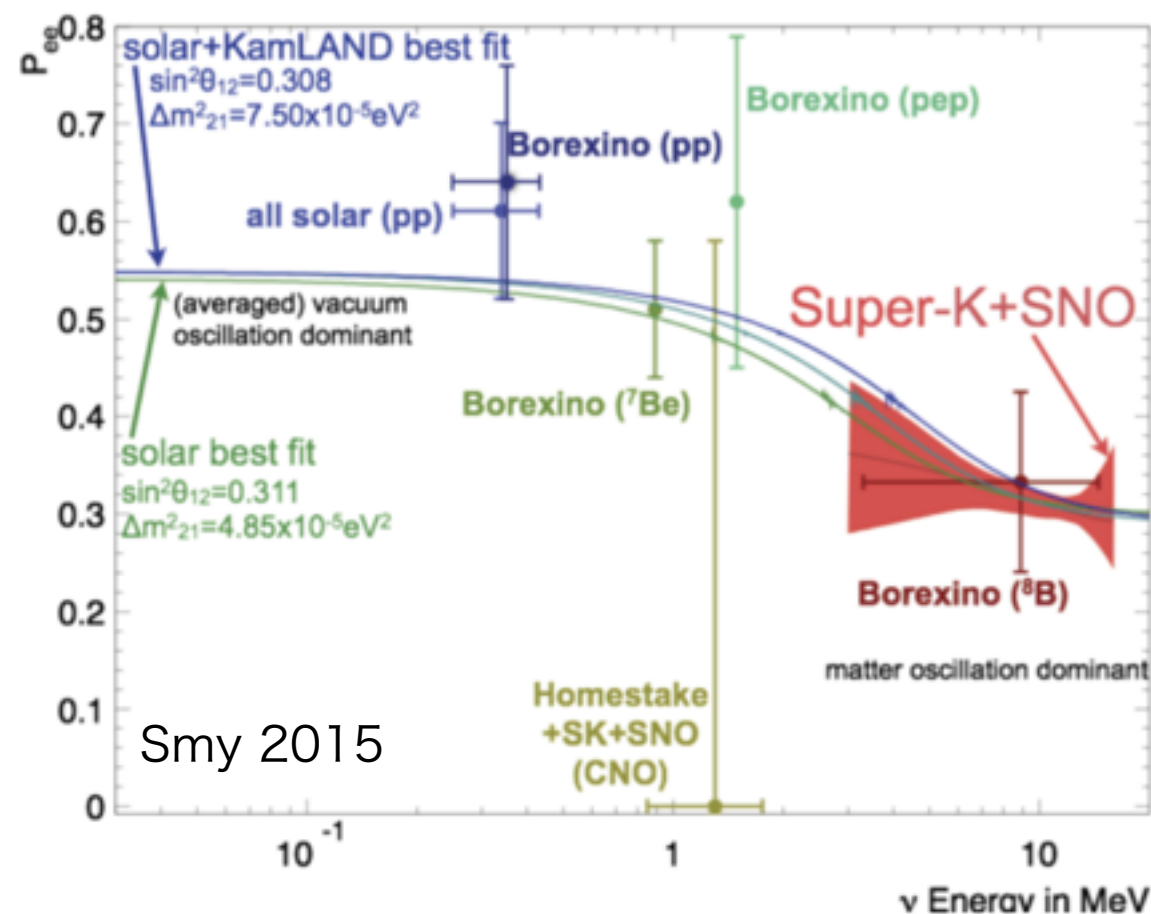
太陽ニュートリノ実験
+ルミノシティ制限

Flux	SFII GS98	Solar
pp	5.98 [0.6%]	6.05 [0.6%]
pep	1.44 [1.1%]	1.46 [1.2%]
hep	8.04 [3%]	18 [45%]
^7Be	5.00 [7%]	4.82 [4.5%]
^8B	5.58 [14%]	5.00 [3%]
^{13}N	2.96 [14%]	≤ 6.7
^{15}O	2.23 [15%]	≤ 3.2
^{17}F	5.52 [19%]	≤ 59

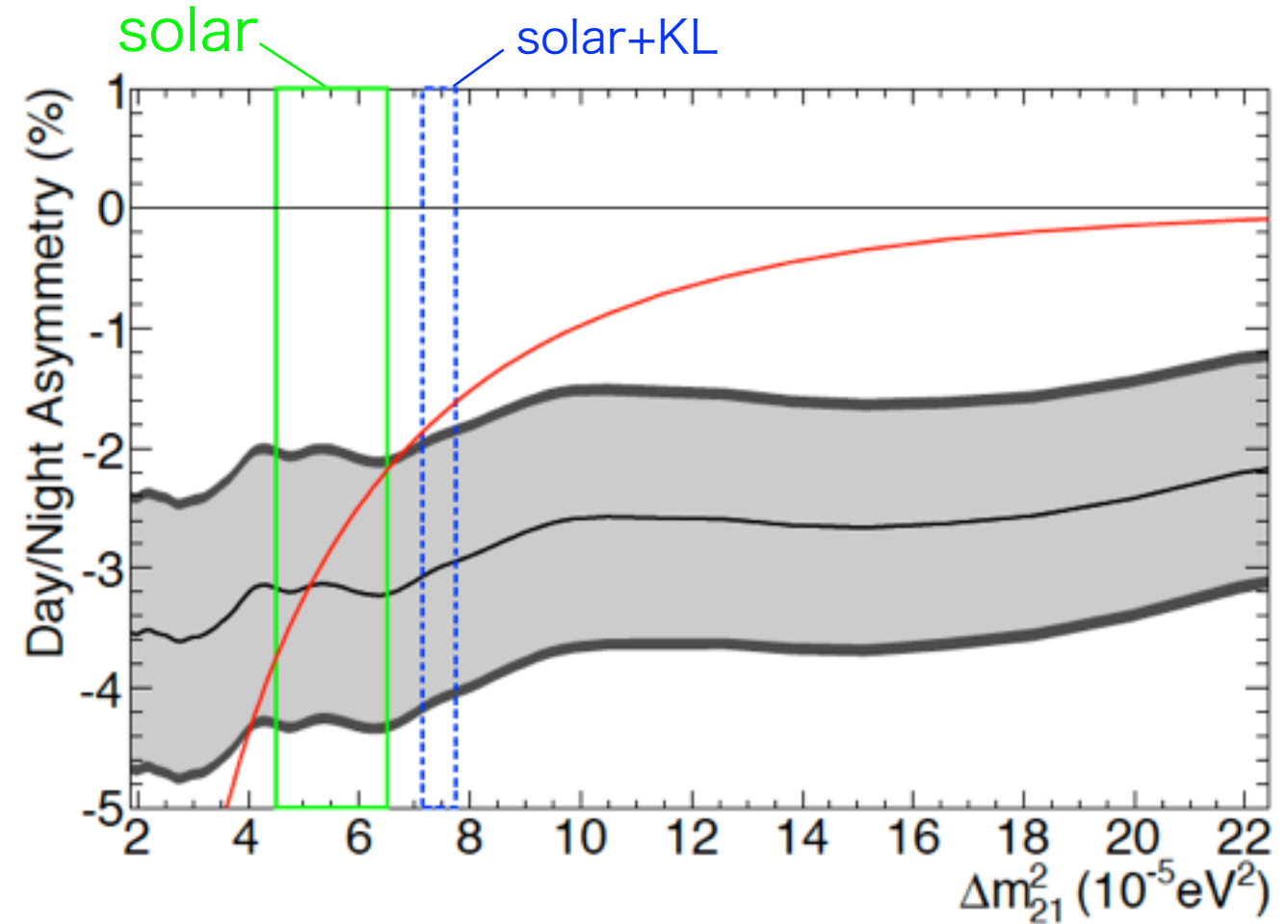
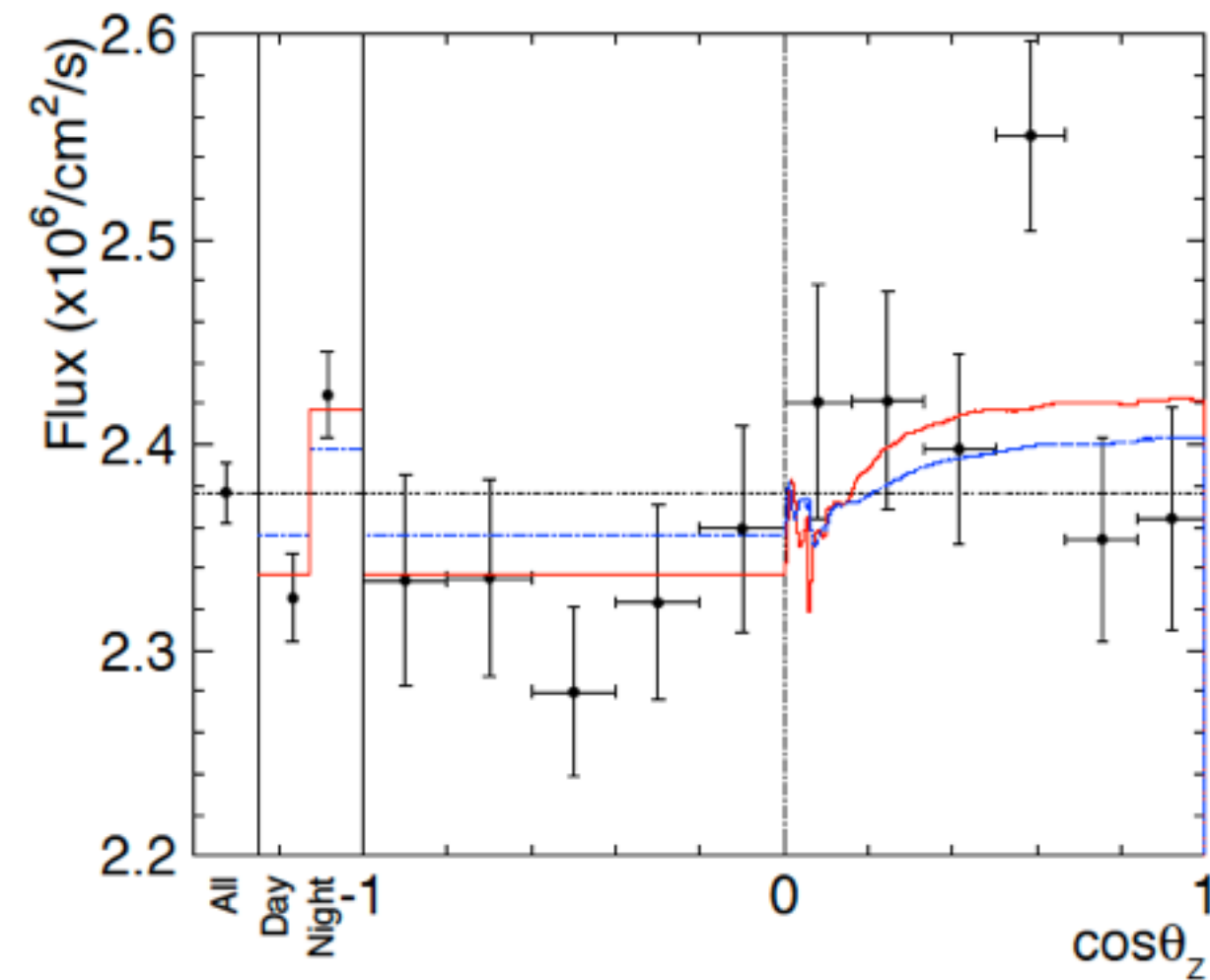
CNO以外は
実時間測定
された。



SKはスペクトルの低敷居値高精度測定



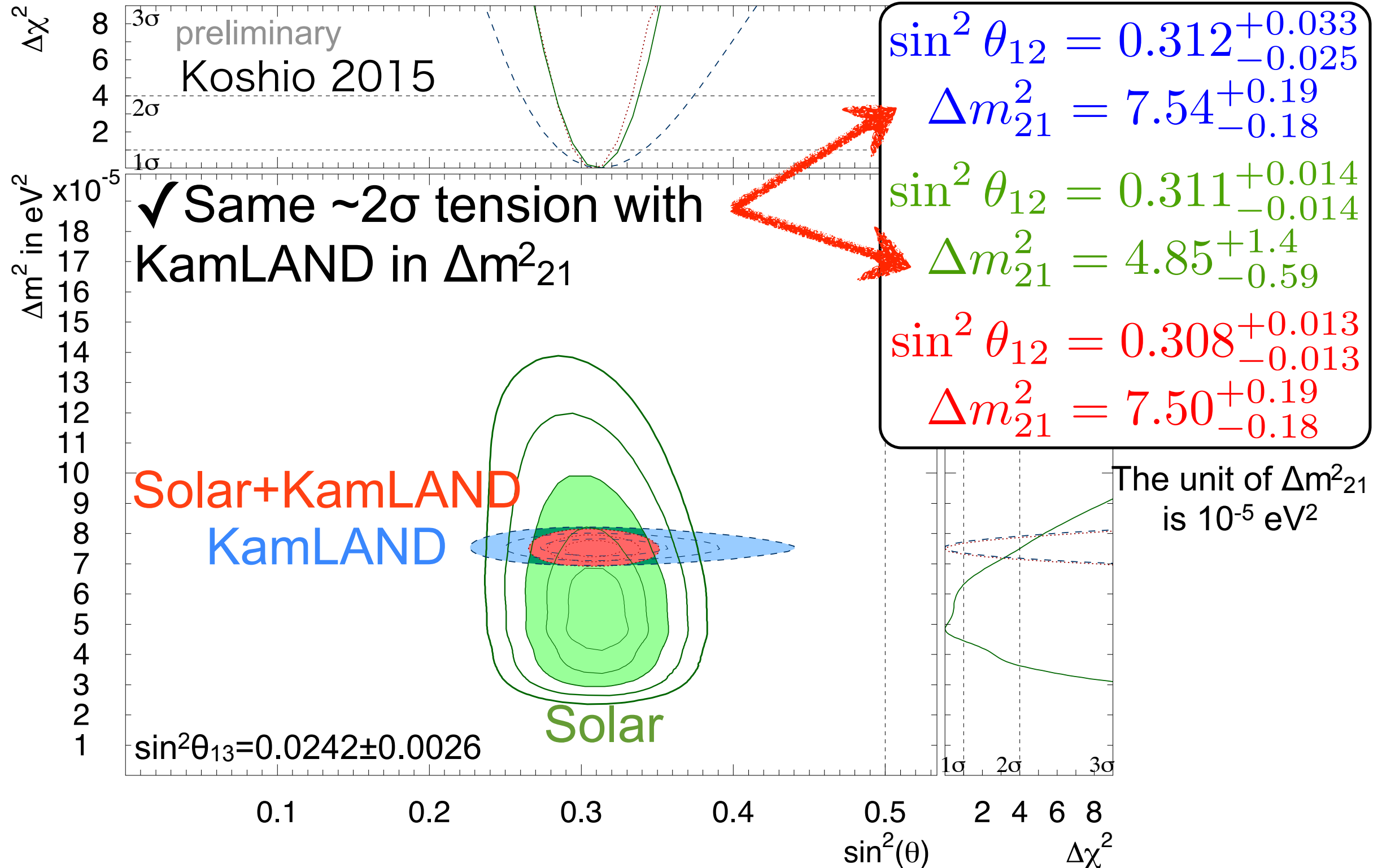
エネルギースペクトル
ではまだ物質効果の検
証ができていない。



$$A_{\text{DN}} = \frac{D - N}{(D + N)/2} = -3.2 \pm 1.1(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst})\%$$

物質効果の直接証拠となる
日夜変動を 2.8σ で観測

Solar all



CPTの破れ！？

まとめ

1968 塩素実験による太陽ニュートリノ問題発見

35年

1987 カミオカンデによる太陽ニュートリノ問題の検証

1994 SAGE, Gallex ガリウム実験による追証

2001 SK ES+ SNO CC フレーバー変換の証拠

2002 SNO NC フレーバー変換の証拠

2003 KL 原子炉ニュートリノ欠損で太陽ニュートリノ問題解決

2005 KL 原子炉ニュートリノ振動

2008 Bx ${}^7\text{Be}$ で追証

ニュートリノ振動を特定

2012 Bx pepで追証

2014 SK 日夜変動で物質効果の直接証拠

2014 Bx ppで追証

太陽ニュートリノ振動を特定

2015 McDonald ノーベル賞

2002 小柴、Davis ノーベル賞

1996 SK 高精度測定開始