

# 宇宙と素粒子

小柴 昌俊

2005－10－17

東大駒場授業

「 $\text{†}$ :このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

# 物質はどのように創られたのか？

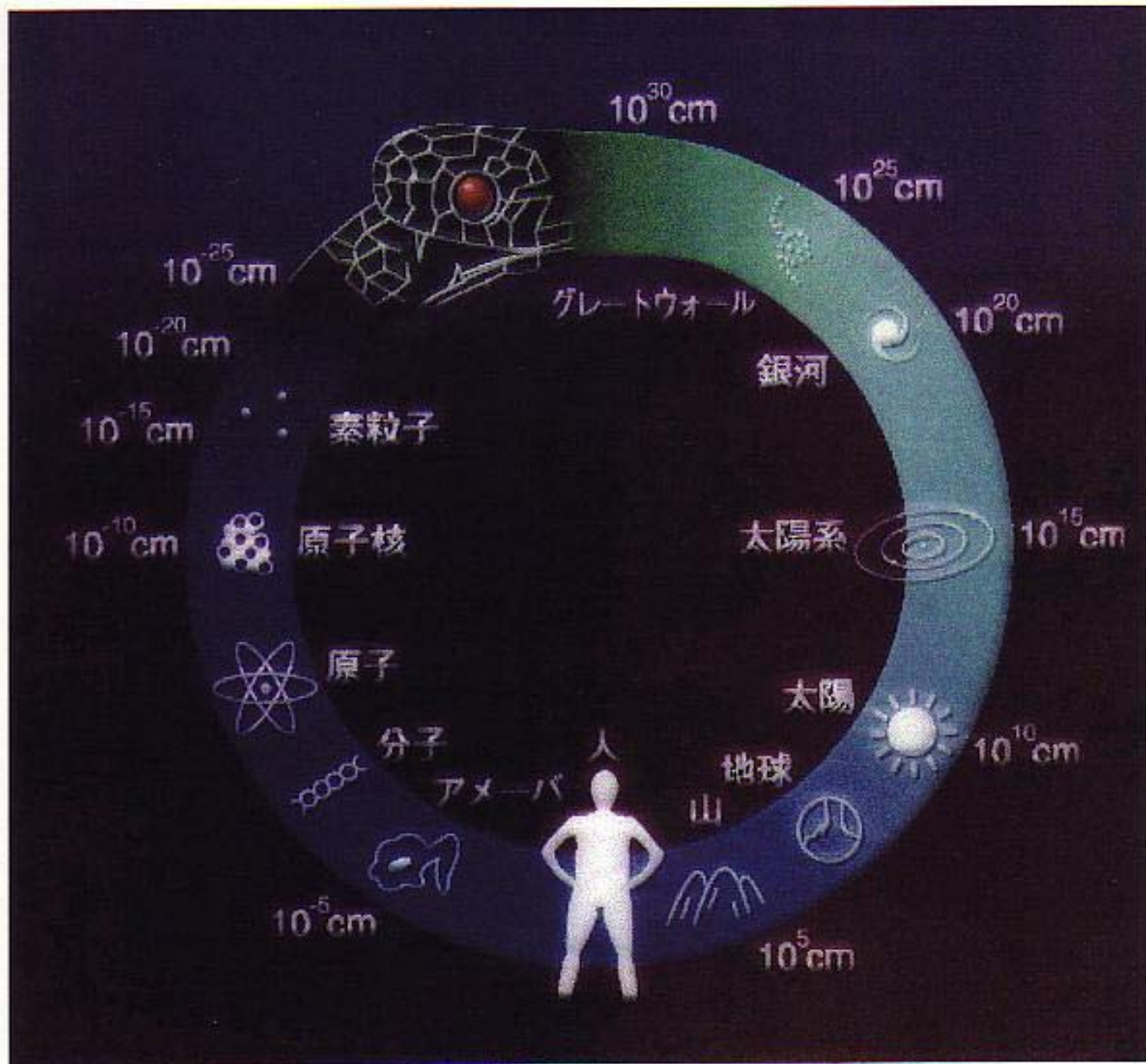
- 神の創造
- 約半世紀前、まず熱い中性子の塊から全てが始まる。 G. Gamov のイーレム。
- 現在、 宇宙誕生の Big Bang に於ける超高温、超高密度の状態で全ての素粒子がその反粒子と対になって生成された。しかしどんなメカニズムで約10億分の1の素粒子が生き残ったのか不明である。

# それから

- 1) 残った素粒子は組み合わさって陽子、中性子になり重陽子、ヘリウムと極微量のリチウムまでできる。
- 2) これ以上重い原子核は星の誕生を待たねば出来ない。大きな星の中心部での高圧、高温によって核融合反応を繰り返し鉄までの元素がつくられる。
- 3) 更に重い元素は星の最後、超新星爆発の際大量に放出された中性子が周りの元素に吸収されてウランウムまでの全ての元素を創りそれらを爆発で宇宙空間に撒き散らす。それ以後に生成した星は全ての元素を含んでいる: 例えば我が太陽及び地球。

高エネルギー素粒子の衝突

顕微鏡



Big-Bang

Hubbleの法則

望遠鏡

佐藤勝彦氏より

# まず簡単に素粒子について何が 解っているのか？

- 素粒子には 3 ファミリーあって 夫々 16  
の成員がある。 次のスライドを見よ。
- これらは皆反粒子を持っているから、素粒子  
の総数は96にもなる。  
(実のところ こんなに沢山の素粒子をどうし  
ていいか解らない。)

$u^L, \bar{u}^L, u^L,$   
 $d^L, \bar{d}^L, d^L,$   
 $e^L$   
 $\nu_e^L$

$c^L, \bar{c}^L, c^L,$   
 $s^L, \bar{s}^L, s^L,$   
 $\mu^L$   
 $\nu_\mu^L$

$t^L, \bar{t}^L, t^L,$   
 $b^L, \bar{b}^L, b^L,$   
 $\tau^L$   
 $\nu_\tau^L$

4つの力を媒介する4種類の粒子。

クォークの色を源にして放出吸収され強い力を媒介する8色のグルーオン、 $g$

電磁力を媒介する光子、 $\gamma$

弱い力を媒介する $Z^0, W^{+-}$

重力を媒介する重力子

$u^R, \bar{u}^R, u^R,$   
 $d^R, \bar{d}^R, d^R,$   
 $e^R$   
 $\nu_e^R$

$c^R, \bar{c}^R, c^R,$   
 $s^R, \bar{s}^R, s^R,$   
 $\mu^R$   
 $\nu_\mu^R$

$t^R, \bar{t}^R, t^R,$   
 $b^R, \bar{b}^R, b^R,$   
 $\tau^R$   
 $\nu_\tau^R$

第一ファミリー  
e-Family

第二ファミリー  
 $\mu$ -Family

第三ファミリー  
 $\tau$ -Family

# 電氣的に中性の素粒子

- 先の図で見たように各ファミリーに2個ずつ、左まきと右まき、のニュートリノがある。
- これらだけが電氣的に中性であって、それゆえ検出が極めて難しい。
- これらは本当に存在しているのか？
- どんな役割をはたしているのか？

# W.Pauli



Introduction of neutrino

W.Pauli, Letter to L.Meitner and her colleagues (letter open to the participants of the conference in Tübingen) (1930).

放射性原子核のベータ崩壊に於いて、壊れているように見えるエネルギー保存則、運動量保存則、角運動量保存則の3つを救うために電氣的に中性で質量が小さく、固有角運動量 $1/2$ の粒子が同時に放出されていると考えるべきだと提案した。 1930年

# Majorana Neutrino



Ettore Majorana

Nuovo Cim. 14 (1937) 171-184.

可能性を指摘

ニュートリノ = 反ニュートリノ

この問題はまだ結論が得られていない。

関与する実験は二重ベータ崩壊実験である。

# Reines and Cowan の検出器

Observation of anti-ne from the nuclear reactor.

F.Reines and C.L.Cowan, Phys. Rev. 92 (1953) 830.

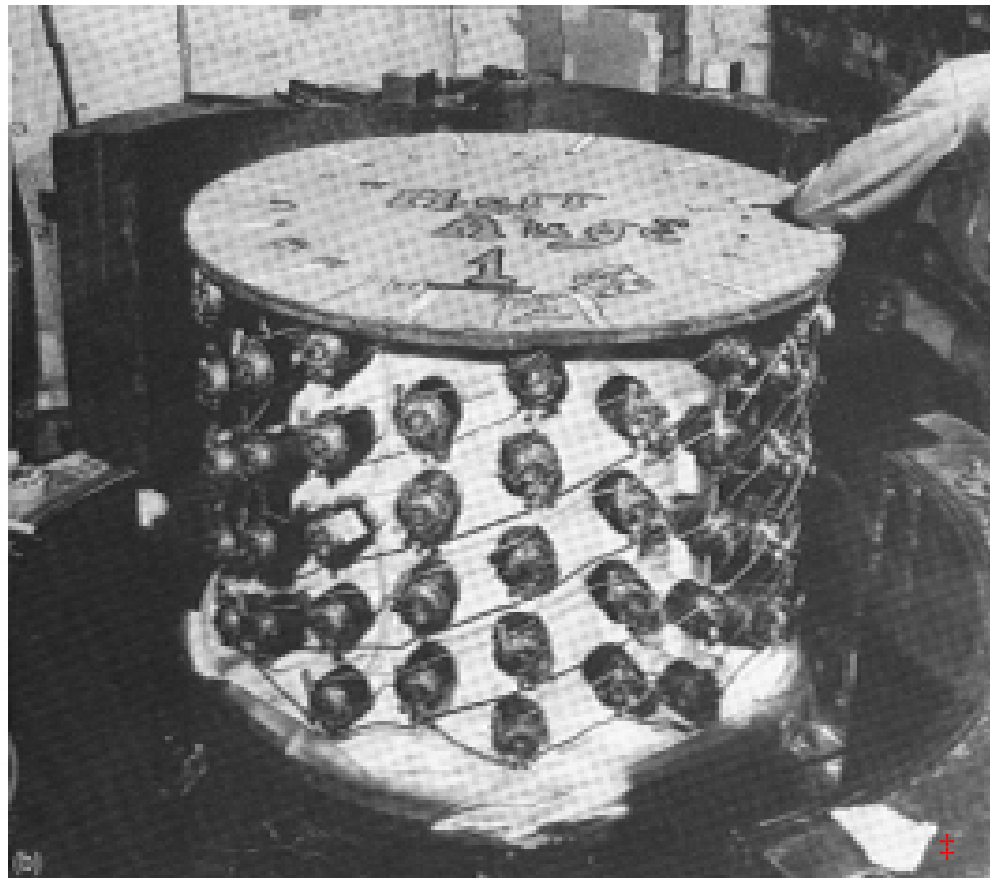
F.Reines and C.L.Cowan, Phys. Rev. 113 (1959) 273.

原子炉からの反電子  
ニュートリノを検出。

3事象



F.Reines and C.L.Cowan, Phys. Rev. 92 (1953) 830.



F.Reines and C.L.Cowan, Phys. Rev. 113 (1959) 273.

# Maki, Nakagawa, Sakata

こんな早い時期にニュートリノ振動の可能性を指摘した。

Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata, Prog. Theo. Phys. 28 (1962) 870.



Source. "© Graduate School of Science, Nagoya University"

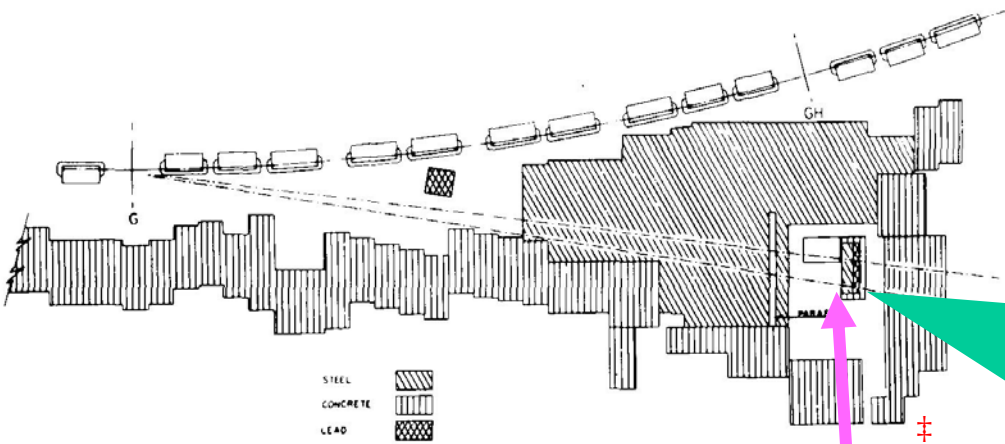
S.Sakata



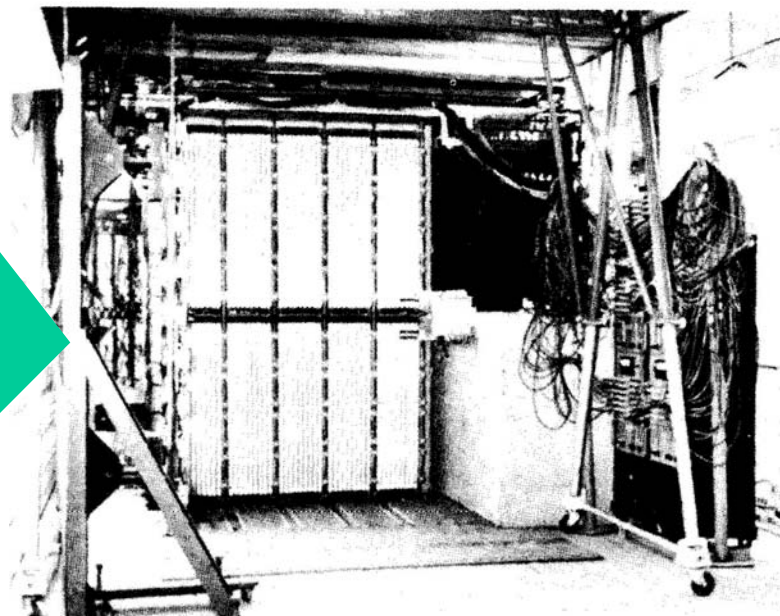
[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg/award\\_s/medal02.html](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg/award_s/medal02.html)

Z.Maki

# ミューオンニュートリノ、 $\nu_\mu$ 、の発見



Neutrino  
detector

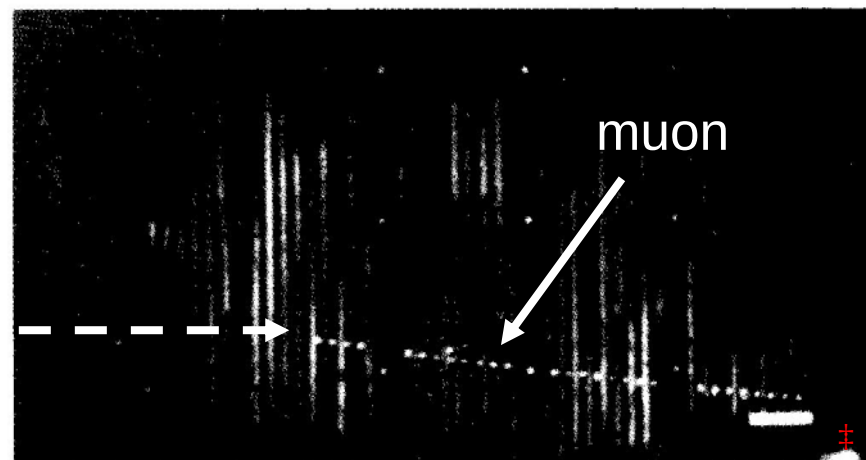


G.Danby et al., Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 36.

Observation of  $\nu_\mu$

G.Danby et al., Phys. Rev. Lett.  
9 (1962) 36.

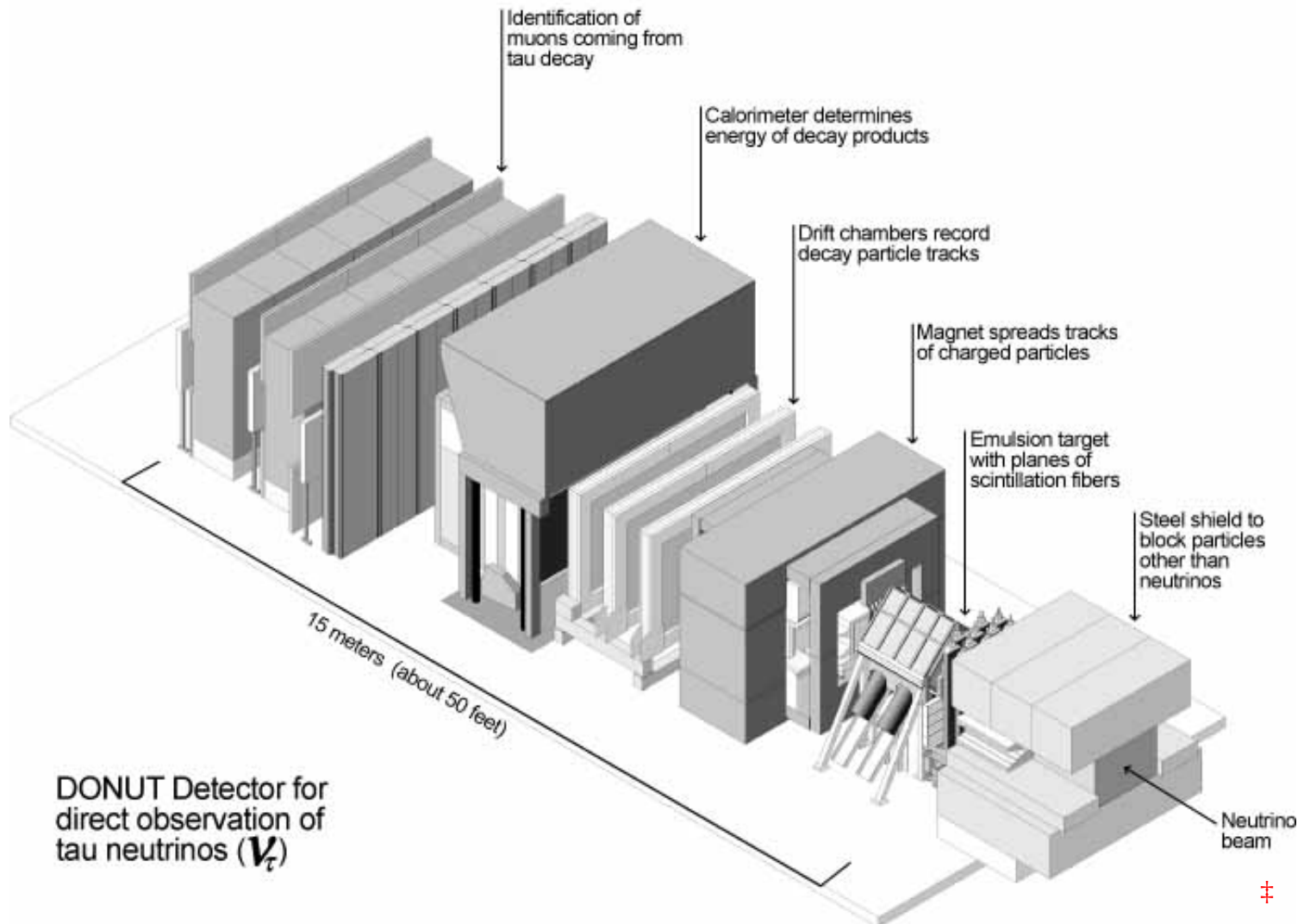
$\nu$



Observed event G.Danby et al., Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 36.

# $\nu_\tau$ の発見 (DONUT collaboration)

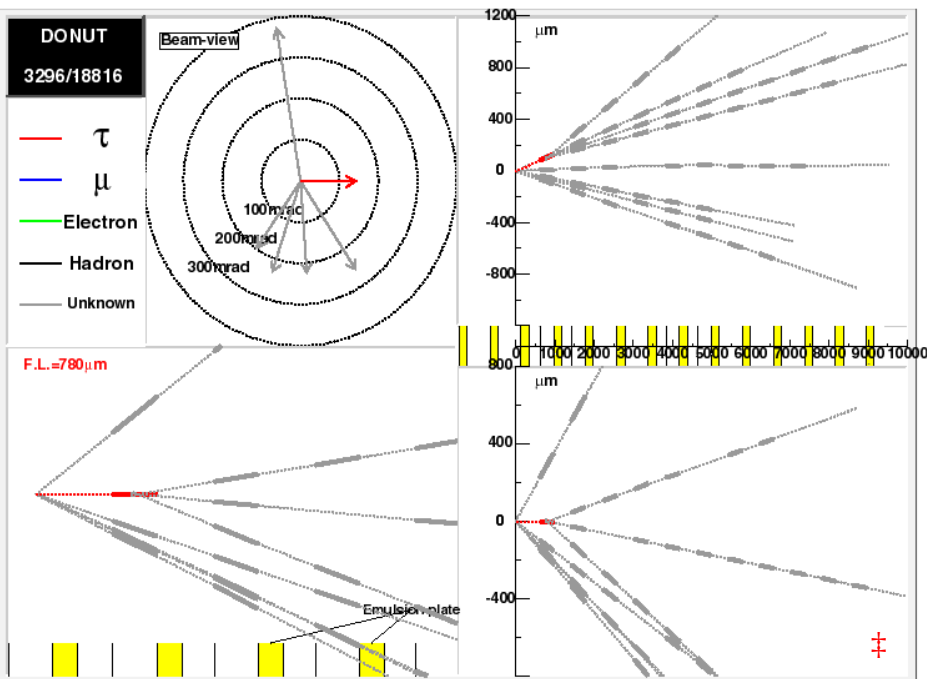
## DONUT Detector



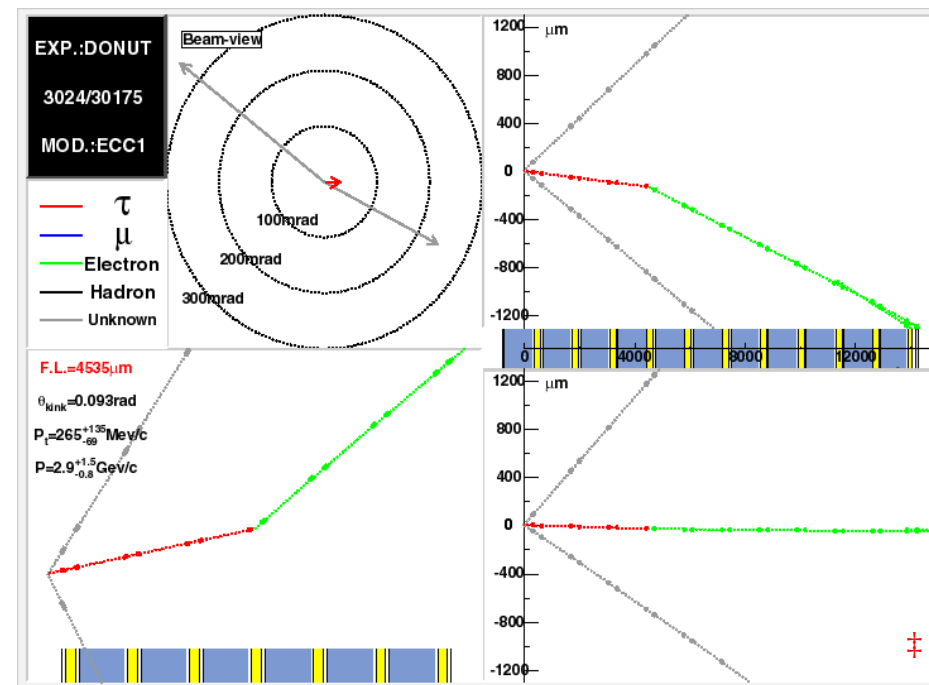
# $\nu_\tau$ の 2事例

Observation of  $\nu_\tau$

K.Kodama et al., Phys. Lett. B 504  
(2001) 218.



Source. "© Fundamental Particle Graduate School of Science, Nagoya University"



Source. "© Graduate School of Science, Nagoya University"

2 examples of  $\nu_\tau$  candidates

# 3種類のニュートリノが存在している

- ・ もっとたくさんあるのでは？ 答えは**否**。  
LEP での  $Z^0$  中間子の崩壊幅の精密測定から  
ニュートリノは3種類だけ。

これらニュートリノはこの宇宙でどんな役割をはたしているのだろうか？

これらニュートリノは宇宙について何を語ってくれるのだろうか？

これらニュートリノはどんな物理的性質を持っているのだろうか？

太陽は 電子ニュートリノ  $\nu_e$  を放出してる

- 太陽の内部で核融合反応、4つのpを $^4\text{He}$ に、が進行している。 だから1つの $^4\text{He}$ につき2個のニュートリノが放出されている。 太陽が毎秒放出しているエネルギーの測定から毎秒何個の $^4\text{He}$ が作られ、ひいては毎秒何個のニュートリノが放出さえているかが判る。

# Homestake 太陽ニュートリノ実験

$^{37}\text{Cl}$  に太陽電子ニュートリノが反応すると電子を放出して  $^{37}\text{Ar}$  になる。

この $^{37}\text{Ar}$ を検出して太陽電子ニュートリノの到来を知る。

到来方向： 不明

エネルギー分布： 不明

到来時刻精度： 約1ヶ月



# R.Davis Jr. at Homestake

## 放射化学的太陽ニュートリノの観測



太陽ニュートリノ欠損

期待値の1/3しか観測  
されなかった。

R.Davis Jr., D.S.Harmer and  
K.C.Hoffman,

Phys. Rev. Lett. 20 (1968) 1205.

B.T.Cleveland et al.,

Astrophys. J. 496 (1998) 505.

# B.Pontecorvo

## Neutrino oscillation hypothesis



B.Pontecorvo,  
Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53 (1967) 1717  
[Sov. Phys. JETP 26 (1968) 984].

R.Davis の実験結果を説明するためにニュートリノ振動の可能性を提唱した。

Бруно Понтекорво

**L.Wolfenstein, A.Yu Smirnov and S.P.Mikheyev**

**電子密度の高い媒体中では  $\nu_e$  振動が 増強される。  
(ニュートリノ質量がゼロでない事が判明した現在このメカニズムは必要ない、)**

**S,P.Mikheyev and A.Yu.Smirnov, Sov. J. Nucl. Phys.42 (1985) 1441.**

**L.Wolfenstein, Phys. Rev.D 17 (1978) 2369.**



[http://www.sns.ias.edu/~jnb/Galleries/Some\\_Solar\\_Neutrino\\_Researchers/image014.htm](http://www.sns.ias.edu/~jnb/Galleries/Some_Solar_Neutrino_Researchers/image014.htm)



# 天体物理学的観測

- 信号の
- 到来時刻 $T$ 、 到来方向 $D$ 、 エネルギー分布 $E$ 、 の全てが判る観測が 太陽ニュートリノに水中の電子と衝突させ、走り出した電子をそれが放出するチェレンコフ光で観測することによって達成された。

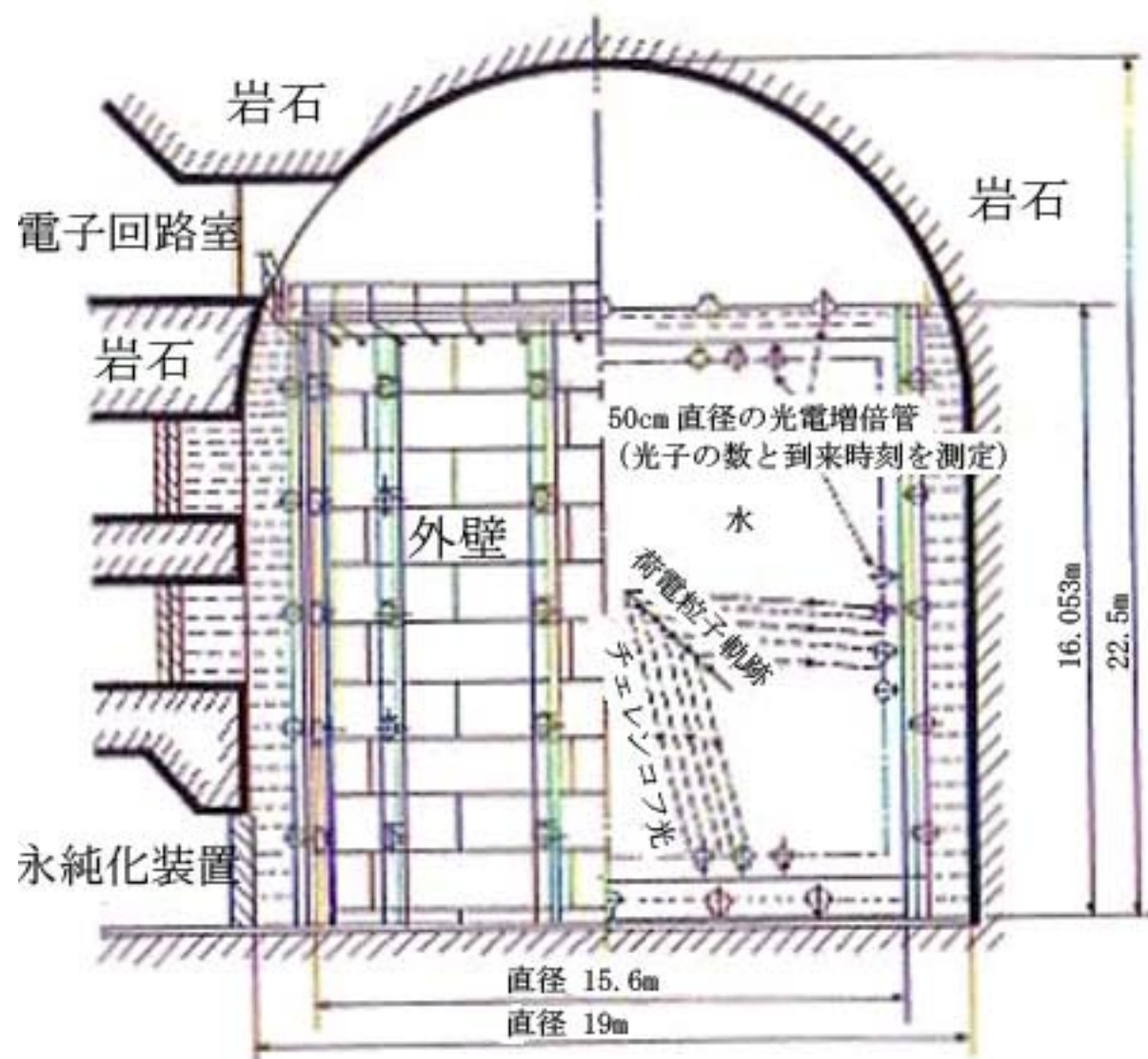
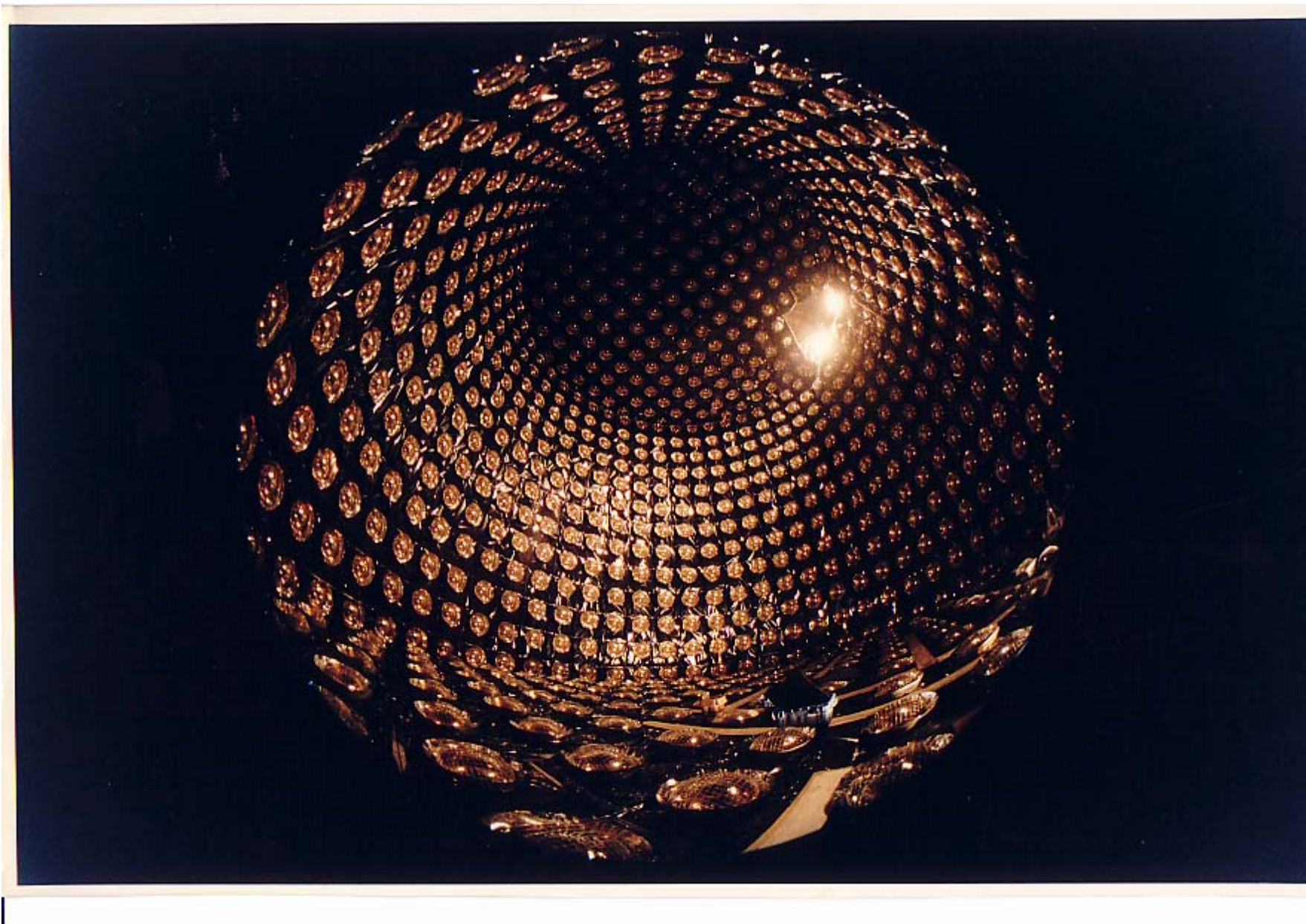


図 1.5 神岡鉱山の地下 1000 メートルに設置されているカミオカンデ装置



カミオカンデの為に浜松ホトニックス社と協同で特別に開発された世界最大の光電増倍管。直径50cm。

この開発が成功したので太陽ニュートリノの天体物理学的観測や超新星ニュートリノの観測が可能になり、更にはニュートリノ振動の発見に繋がった。



# 1987年初期頃のKamiokaNDE検出器の運転状況.

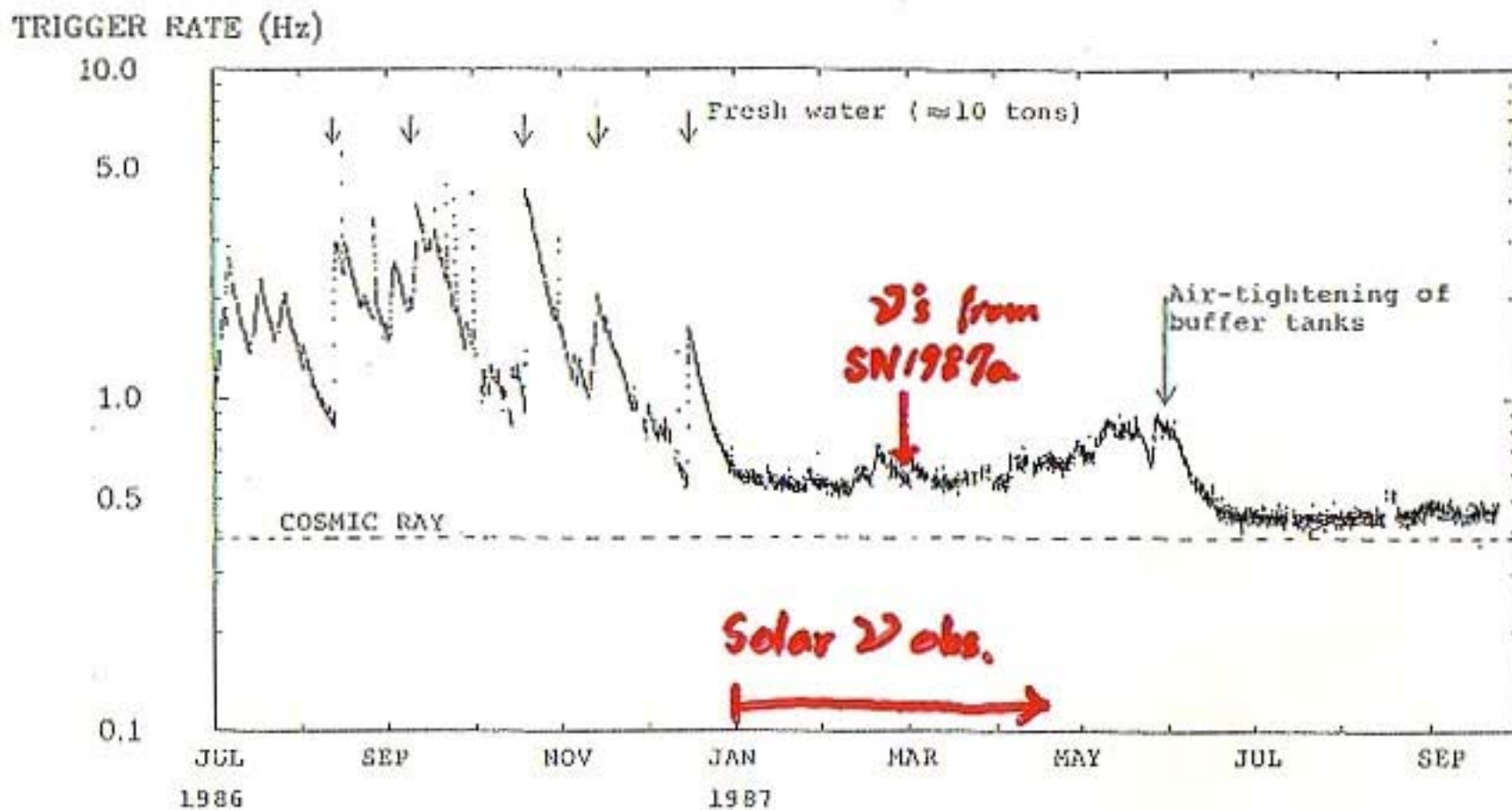


Fig. 3.20. The early performance of the KAM-II detector.

# 大マゼラン星雲で起きた超 新星1987A。

上は爆発前。

下は爆発後。

(Anglo-Australian Observatory)



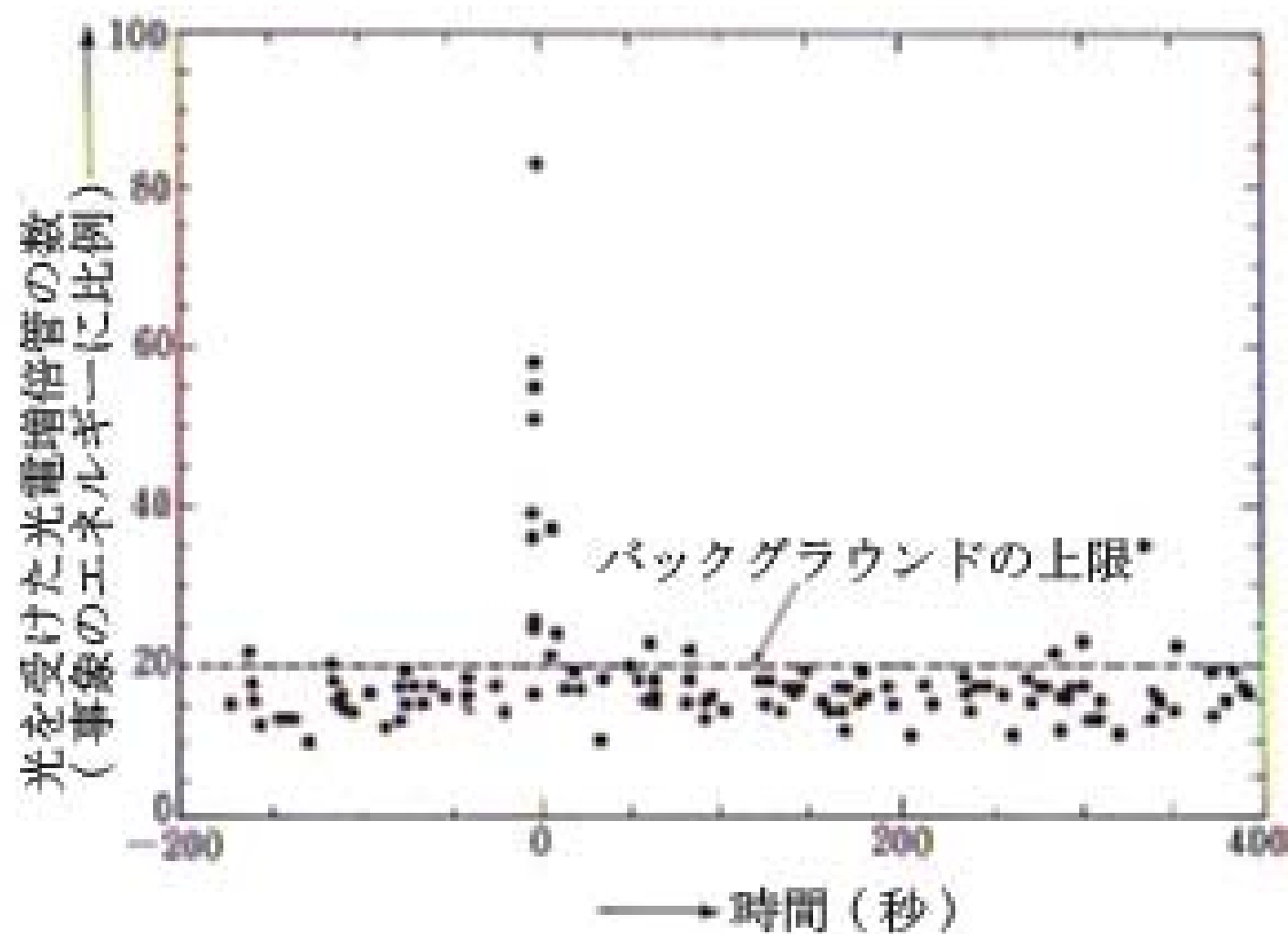
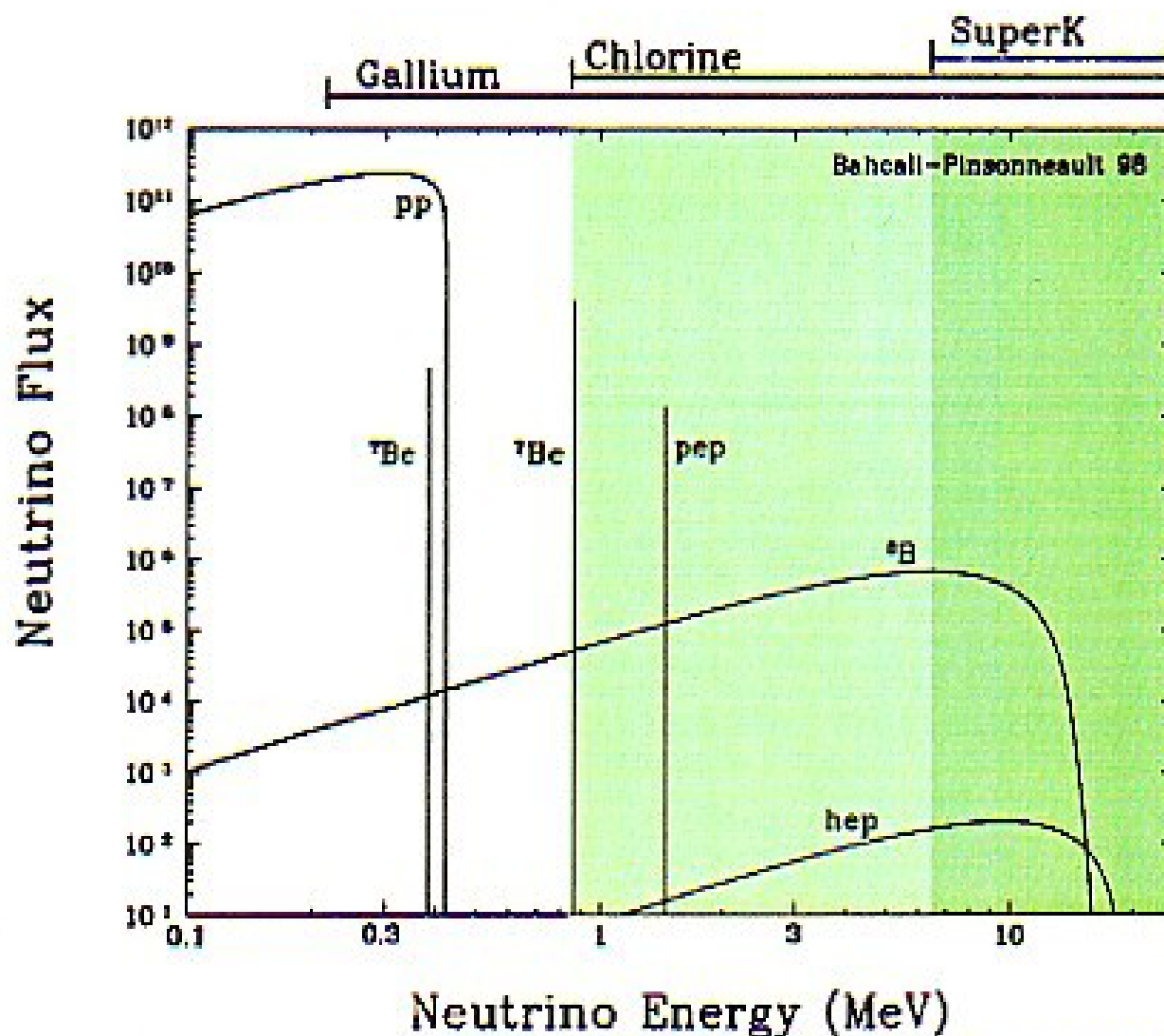
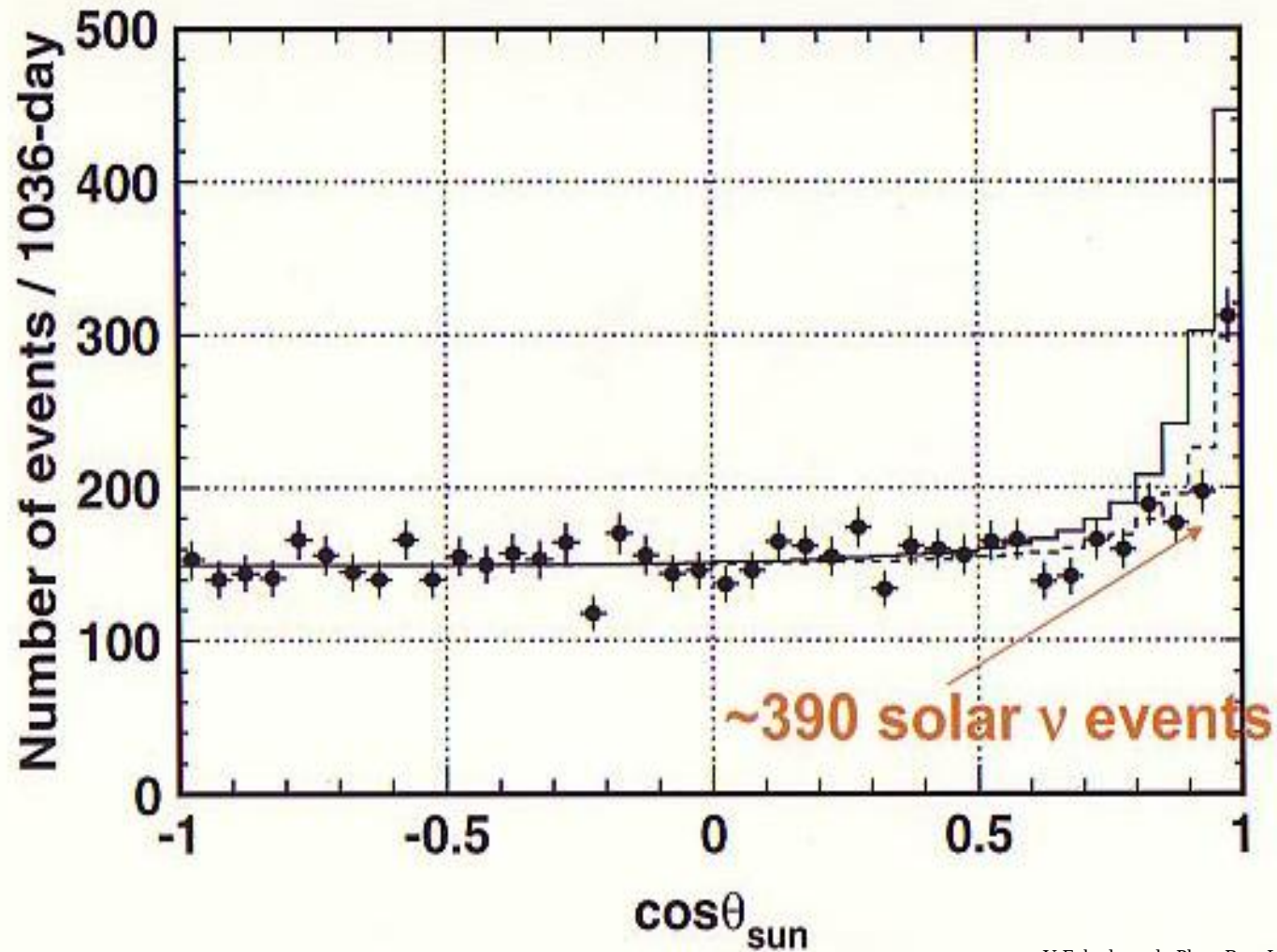


図 1.7 超新星爆発のニュートリノ信号 (1987 年 2 月 23 日)

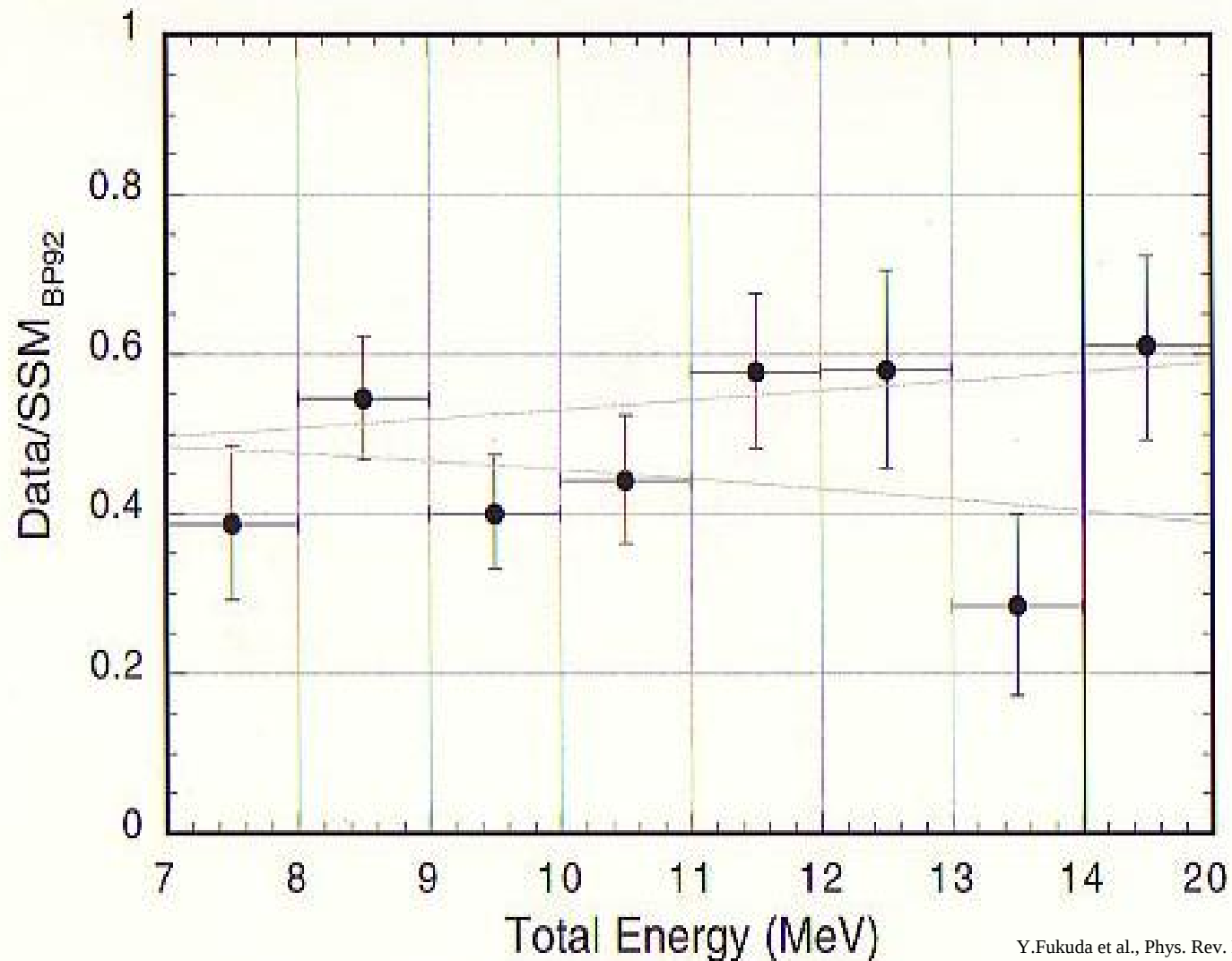
理論から期待される太陽ニュートリノのエネルギー分布。



# カミオカンデの測定による太陽ニュートリノの方向分布



# カミオカンデで測定された太陽ニュートリノのエネルギースペクトル。



素粒子

ニュートリノ

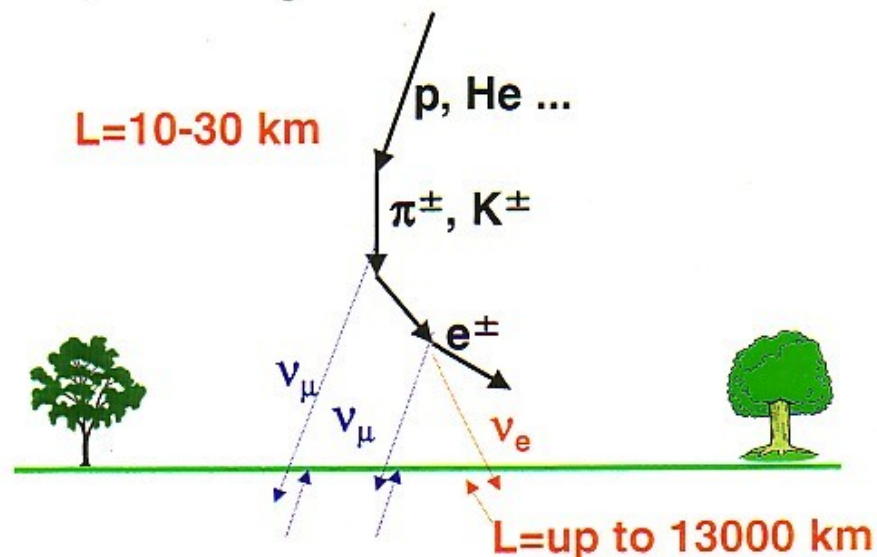
宇宙

1964年東大での最初の講義の初日の黒板

$\nu_\mu/\nu_e$  のフラックス比は  
2より大きくなければなら  
ない

上向きの事象を調べれば  
飛行距離の影響を調べら  
れる。

## Atmospheric neutrinos



$$\frac{\overline{\nu_\mu + \nu_\mu}}{\overline{\nu_e + \nu_e}} = \sim 2 \quad \text{@ low energy } (E_\nu < 1 \text{ GeV})$$

$$\frac{\overline{\nu_\mu + \nu_\mu}}{\overline{\nu_e + \nu_e}} \quad \nearrow \quad \text{@ high energy}$$

Error in flux ~ 25%, double ratio ~ 5%

## Neutrino oscillations :

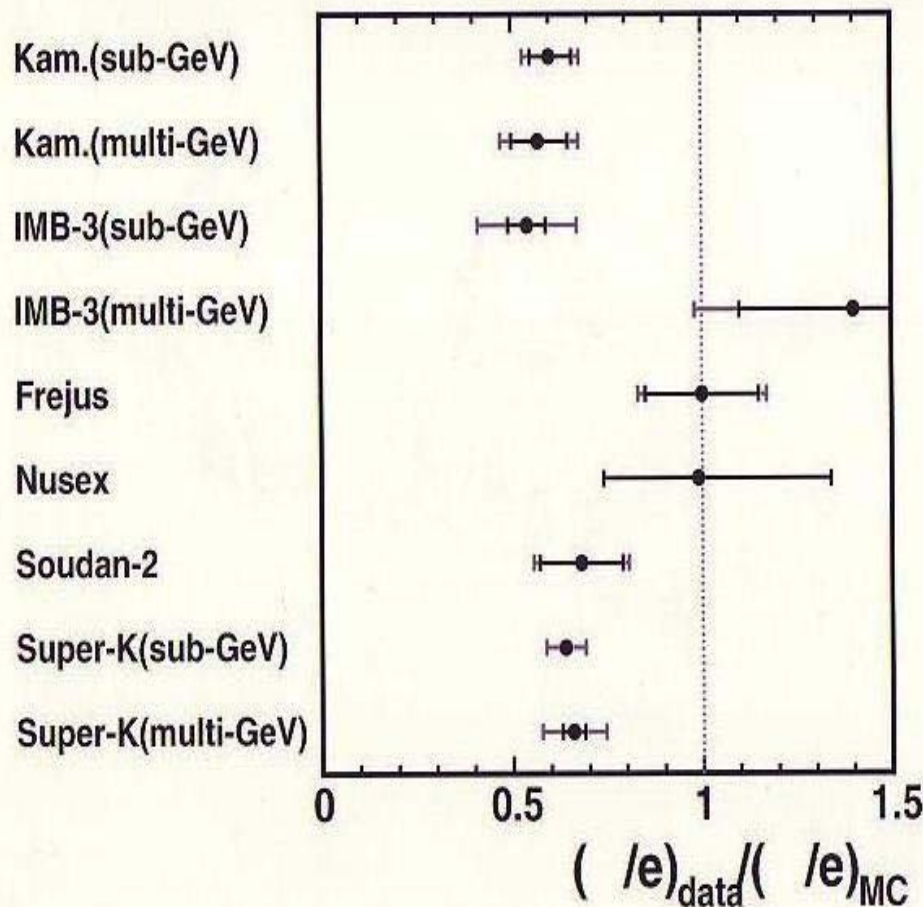
$$\Rightarrow \left( \frac{\overline{\nu_\mu + \nu_\mu}}{\overline{\nu_e + \nu_e}} \right)_{\text{data}} / \left( \frac{\overline{\nu_\mu + \nu_\mu}}{\overline{\nu_e + \nu_e}} \right)_{\text{MC}} \neq 1$$

# 大気ニュートリノ中の ミュー・ニュートリノと 電子ニュートリノの数の比。

$\mu/e$  ratio

Y.Fukuda et al., Phys. Lett. B 335 (1994) 237.

M.Shiozawa, for the SK collab., talk at Neutrino 2002,  
Munich, May 2002



# ニュートリノ振動

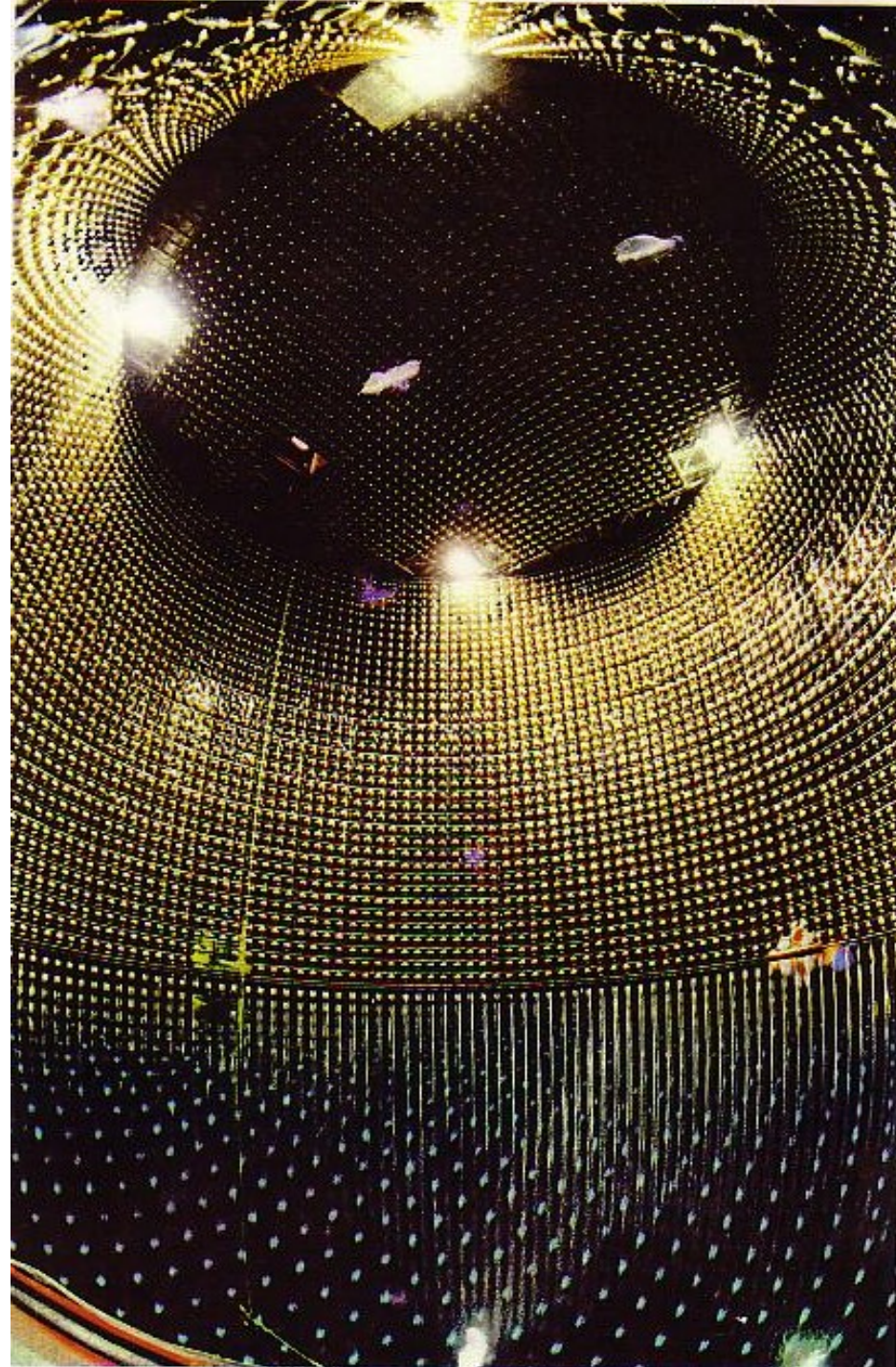
- 大気中の $\nu_\mu$  と  $\nu_e$  の数の比の異常から  
KamiokaNDEは  $\nu_\mu$  が飛行中に  $\nu_e$  に変わっていると結論した。 ニュートリノ振動。

ニュートリノは夫々異なる質量をもっている。

## KamiokaNDE が達成した4つの成果

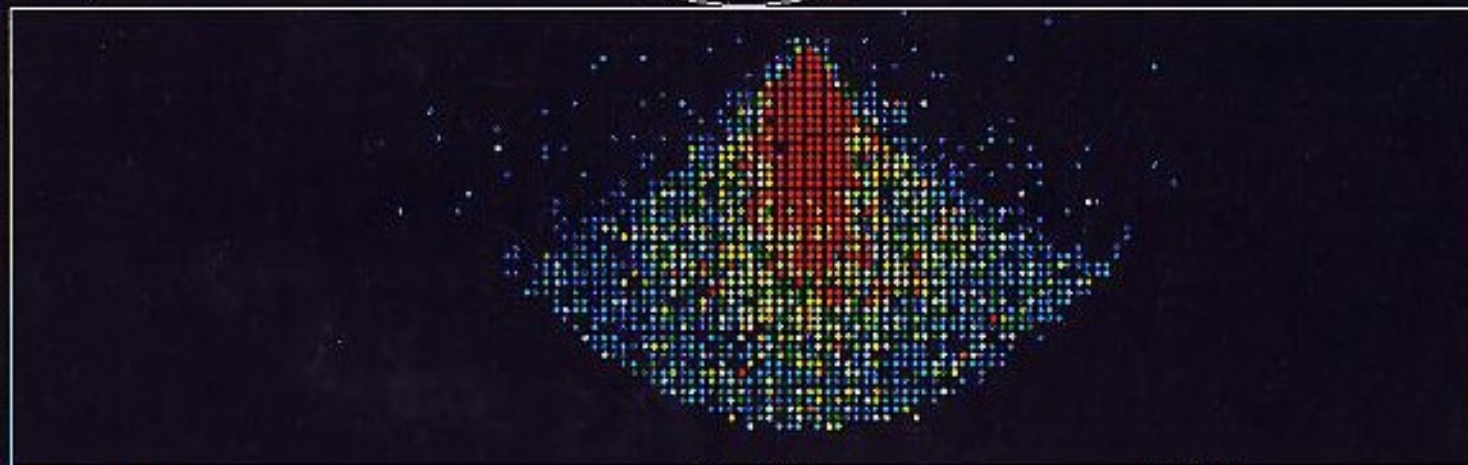
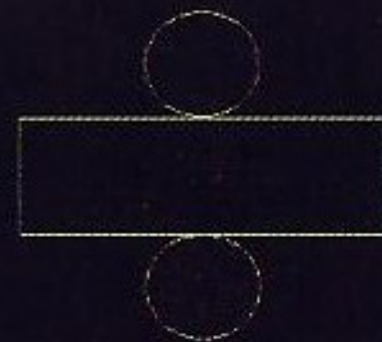
- 1)  $\nu_e$ -e 散乱を用いた太陽ニュートリノの天体物理学的観測, つまり方向**D**, 時刻**T** 及びエネルギー分布**E** をすべて備えた観測が可能である事を実証した。
- 2) 反 $\nu_e$  が陽子p に衝突して陽電子  $e^+$  と中性子nになる反応を利用してII型超新星(1987A)の重力崩壊の際放出される反 $\nu_e$ を人類初めて検出した。
- 3) 大気中で  $\nu_\mu/\nu_e$  の比に異常がある事を発見。これをニュートリノの有限質量によって  $\nu_\mu$  が  $\nu_\tau$  に移り変わったのであろうと結論。
- 4) 陽子崩壊が観測されないことからSU(5) 理論更にはニュートリノの有限質量からSUSYSU(5) も大統一理論の候補から外した。

スーパーカミオカンデの内部。  
魚眼レンズによる。

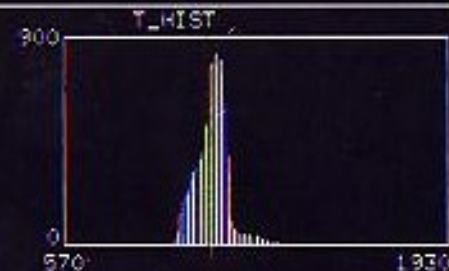
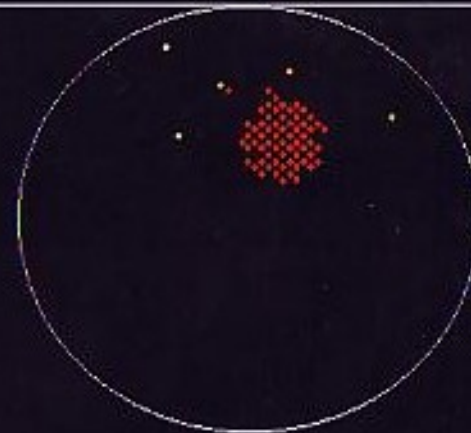


$\mu$  粒子は底に  
着いているのにチェ  
レンコフ光  
はまだ途中

Current: 0 INNER  
Date: 960614 Time: 110148  
Run: 1907 Event: 79  
Prev Event: 161988 microseconds  
TotalPE ID/OD: 84471.6 1683.4  
NumHits ID/OD: 3088 7301  
Trig ID: 0x06

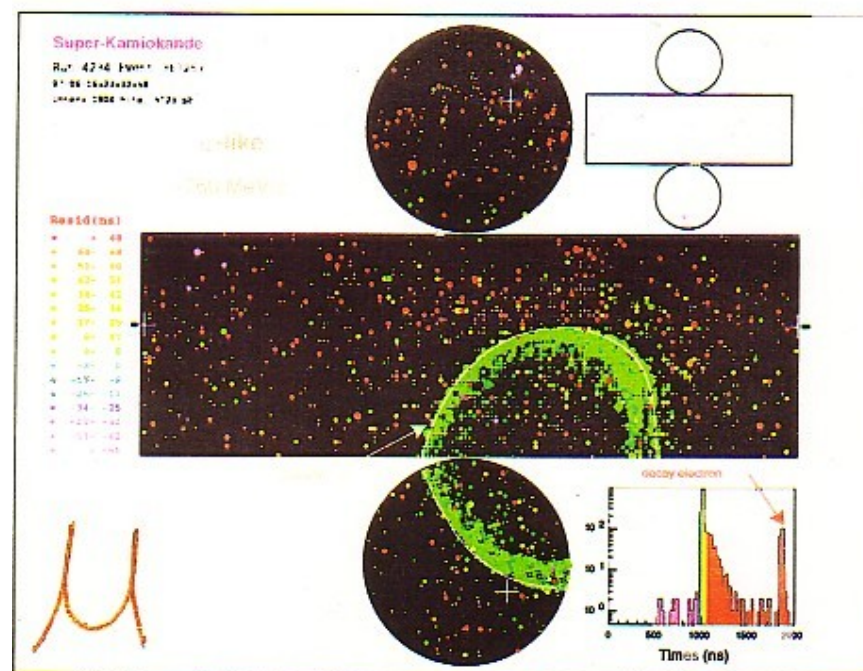
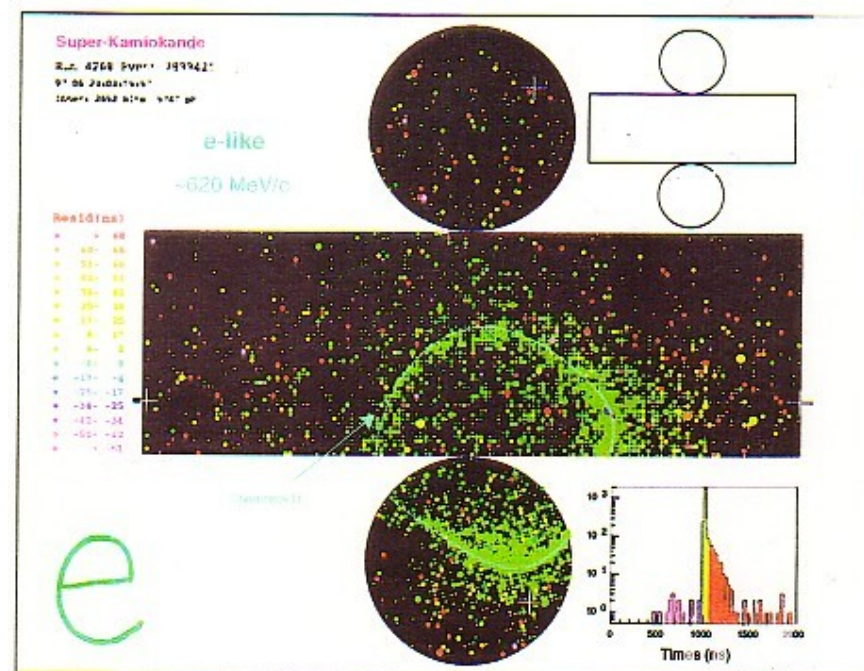


filter: None  
filter: None  
filter: None



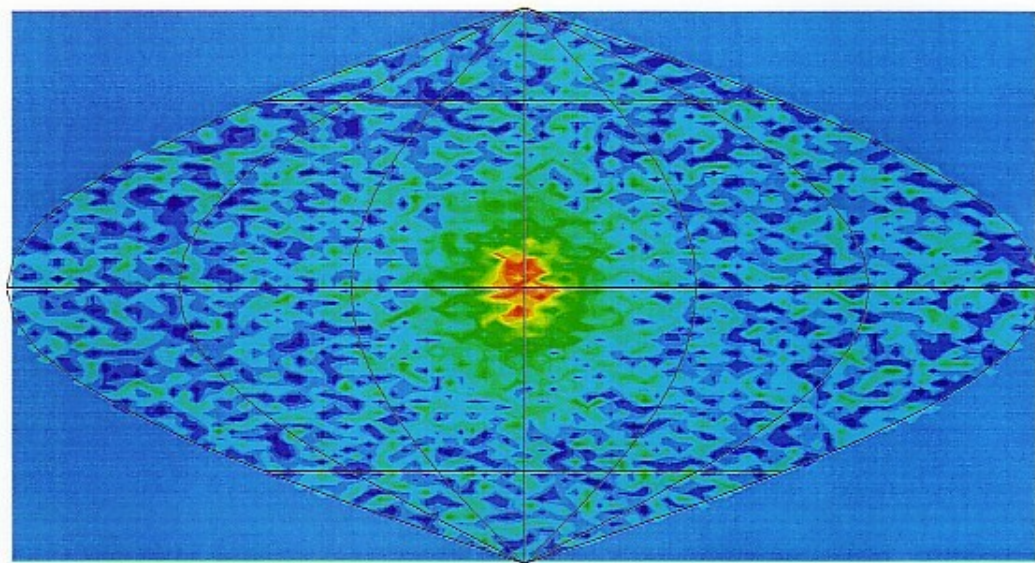
40. 4.7 10.2 33.7 28.4 33.1 37.5 42.6 47.5 52.0 56.8 61.8 66.2 71.1

電子の事象（上）と  
ミュー粒子の事象（下）。

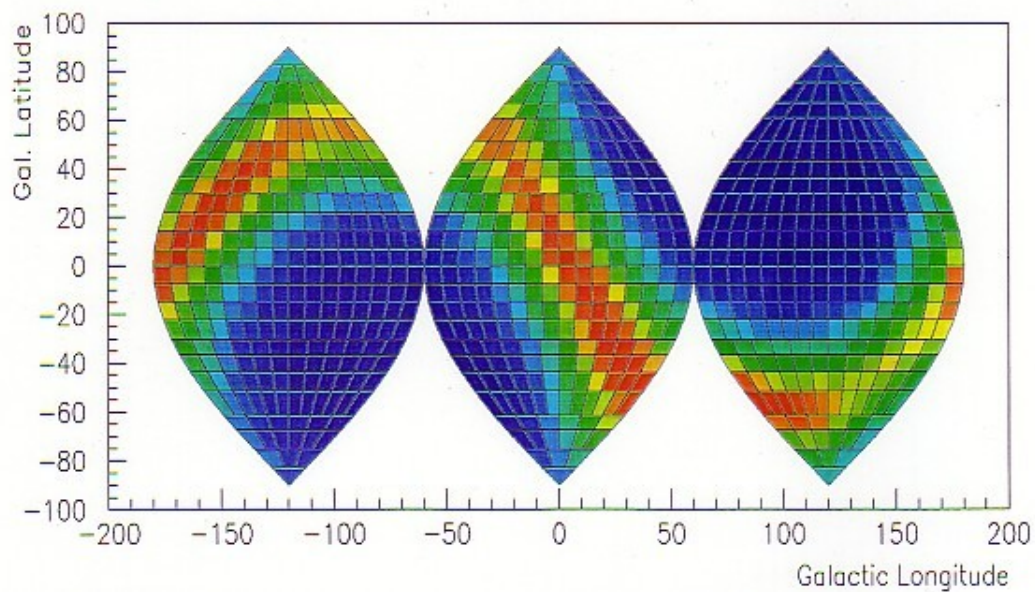


# The Sun by Neutrino graph

太陽のニュートリノ写真。

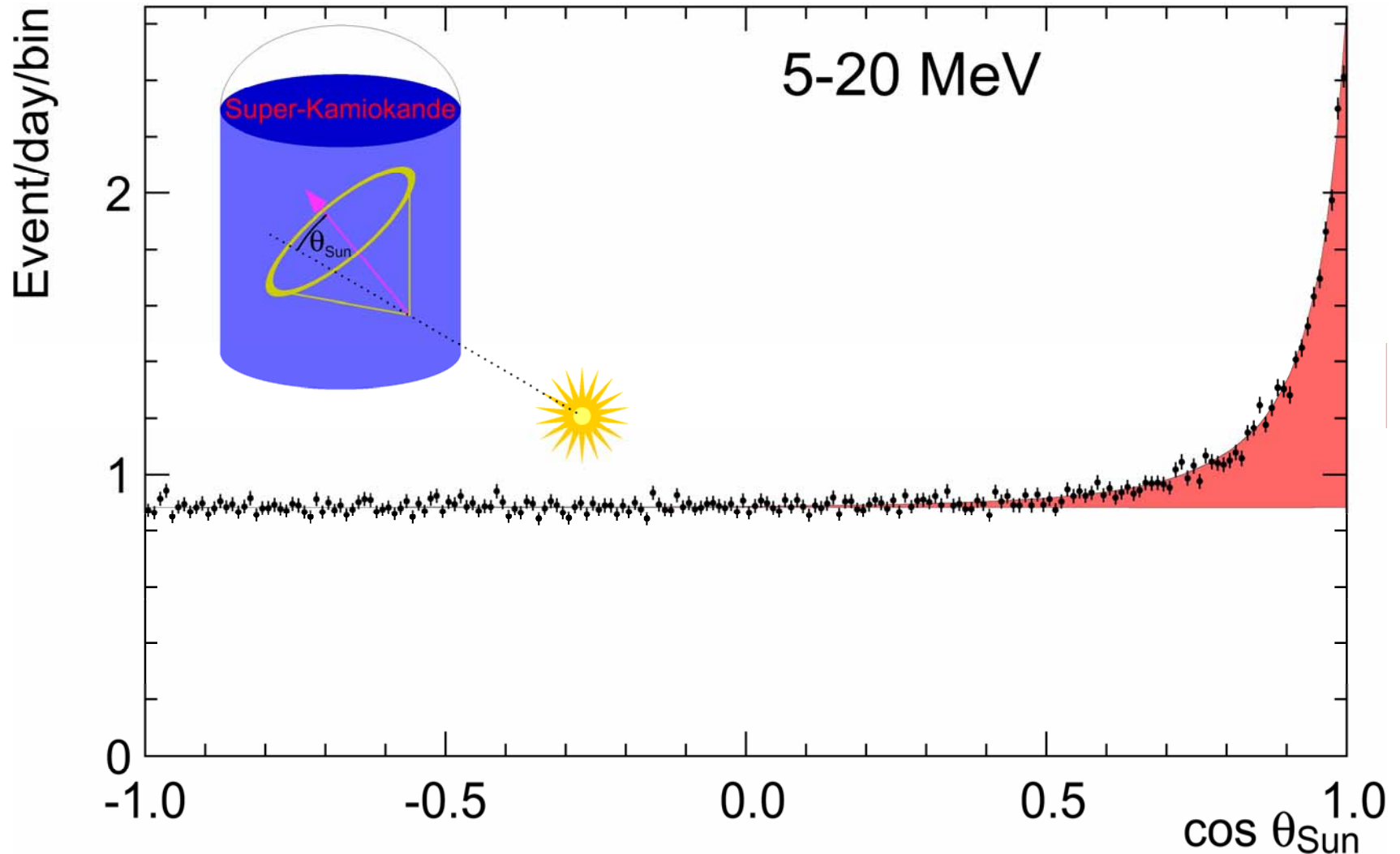


下はニュートリノで見た  
太陽の軌道。



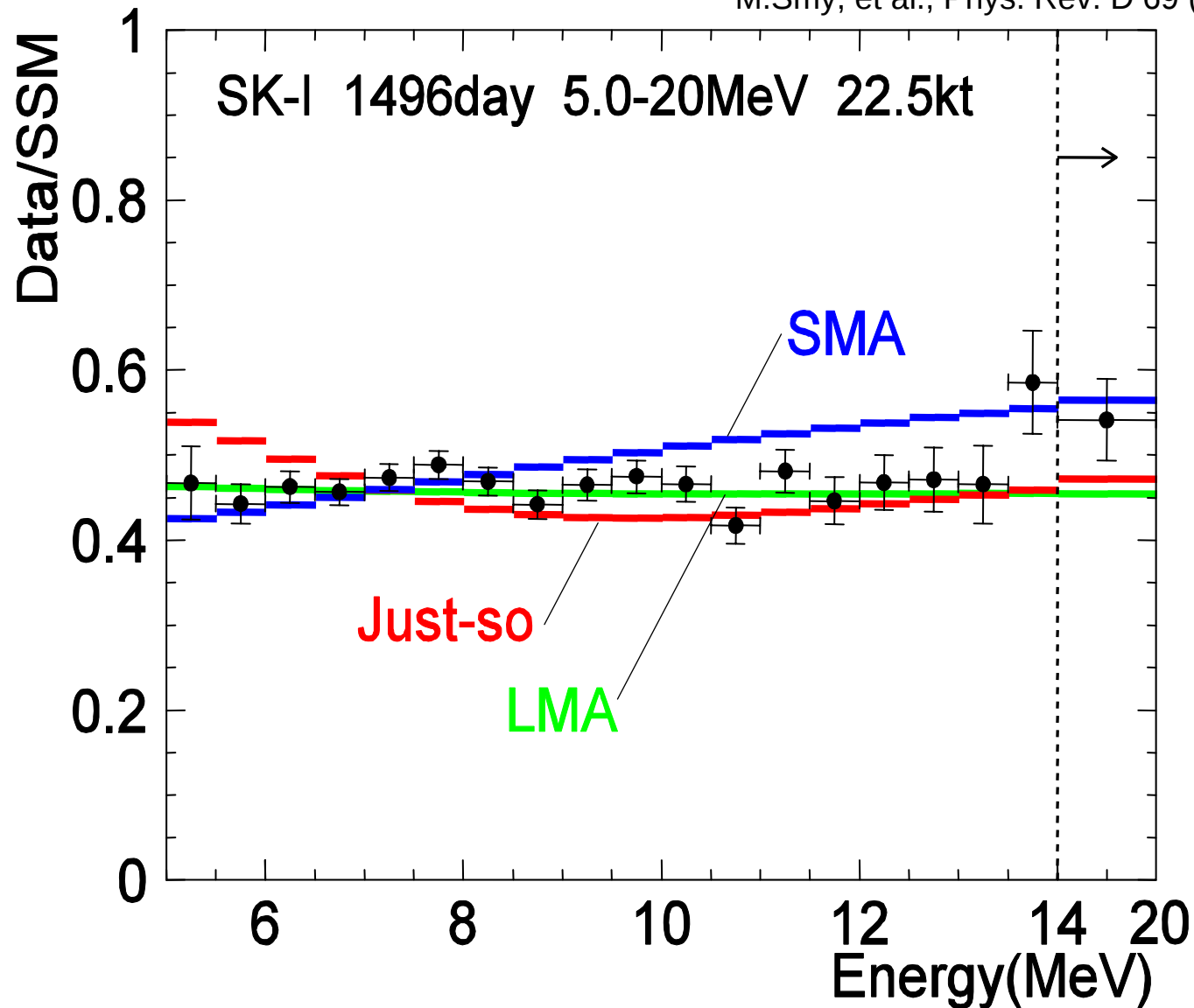
# 太陽方向からの $\nu$ シグナル (5 MeV以上)

S.Fukuda et al., Phys. Lett. B 539 (2002) 179.

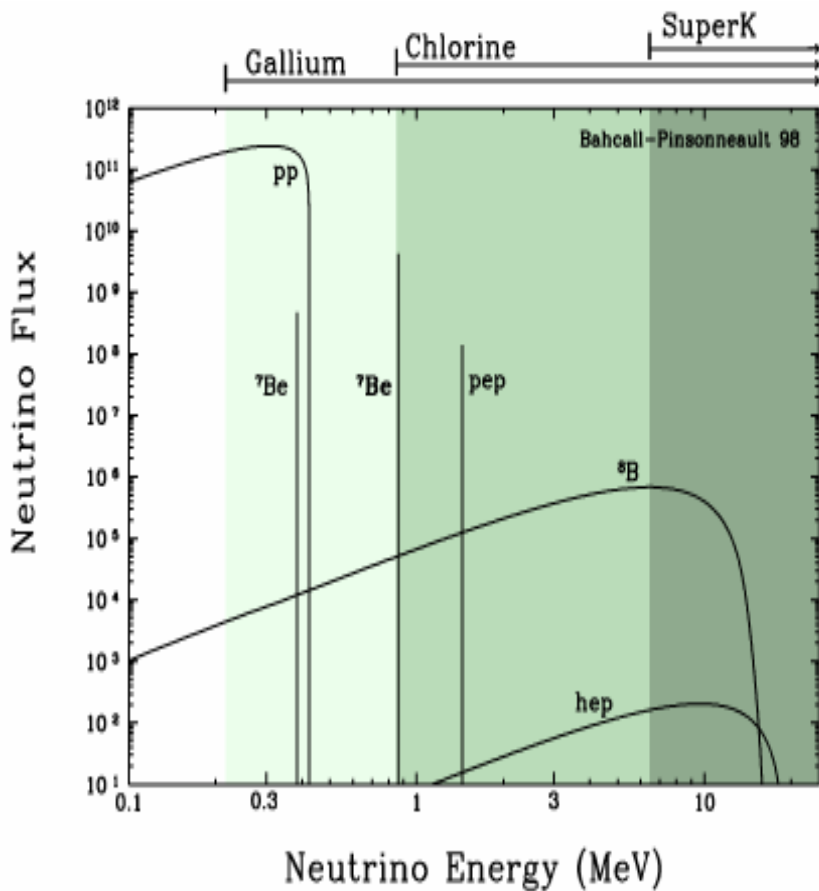


# 観測された電子のエネルギー分布を $B^8$ 崩壊 ニュートリノによるものと比較

M.Smy, et al., Phys. Rev. D 69 (2004) 011104



# 太陽ニュートリノデータのまとめ



## Rate measurements

|              | Target                       | Data / SSM<br>(BP2000.2) |
|--------------|------------------------------|--------------------------|
| ▪ Homestake  | $^{37}\text{Cl}$             | $0.34 \pm 0.03$          |
| ▪ SAGE       | $^{71}\text{Ga}$             | $0.55 \pm 0.05$          |
| ▪ GALLEX+GNO | $^{71}\text{Ga}$             | $0.55 \pm 0.05$          |
| ▪ Super-K    | $e^-$ (water)                | $0.465 \pm 0.016$        |
| ▪ SNO (CC)   | $d$ ( $\text{D}_2\text{O}$ ) | $0.348 \pm 0.020$        |
| ▪ SNO (NC)   | $d$ ( $\text{D}_2\text{O}$ ) | $1.01 \pm 0.13$          |

B.T.Cleveland et al., Astrophys. J 496 (1998) 505

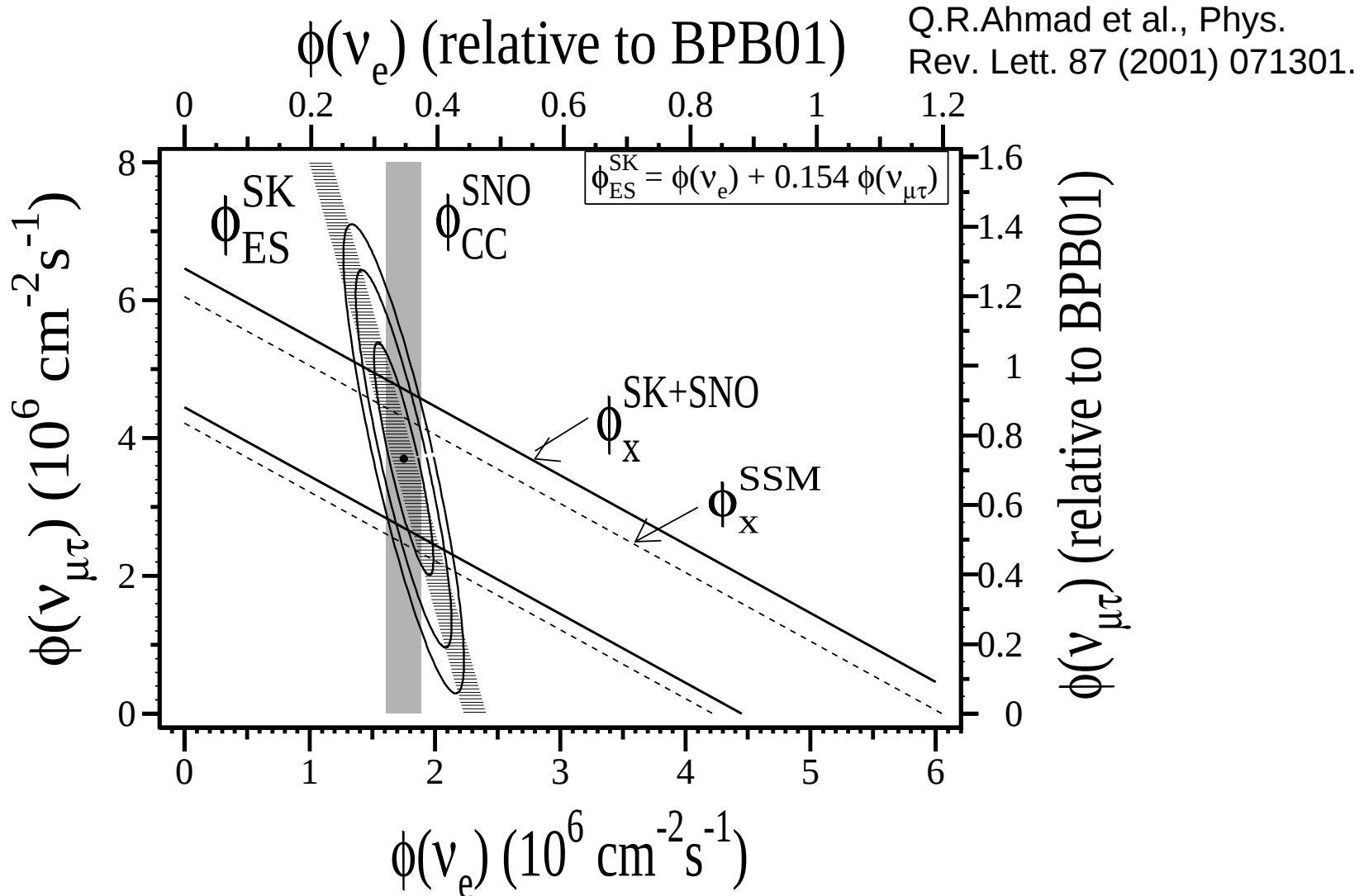
J.N.Abdurashitov et al., Nucl. Phys. Proc. Suppl. (Neutrino 2002) 118 (2003) 39

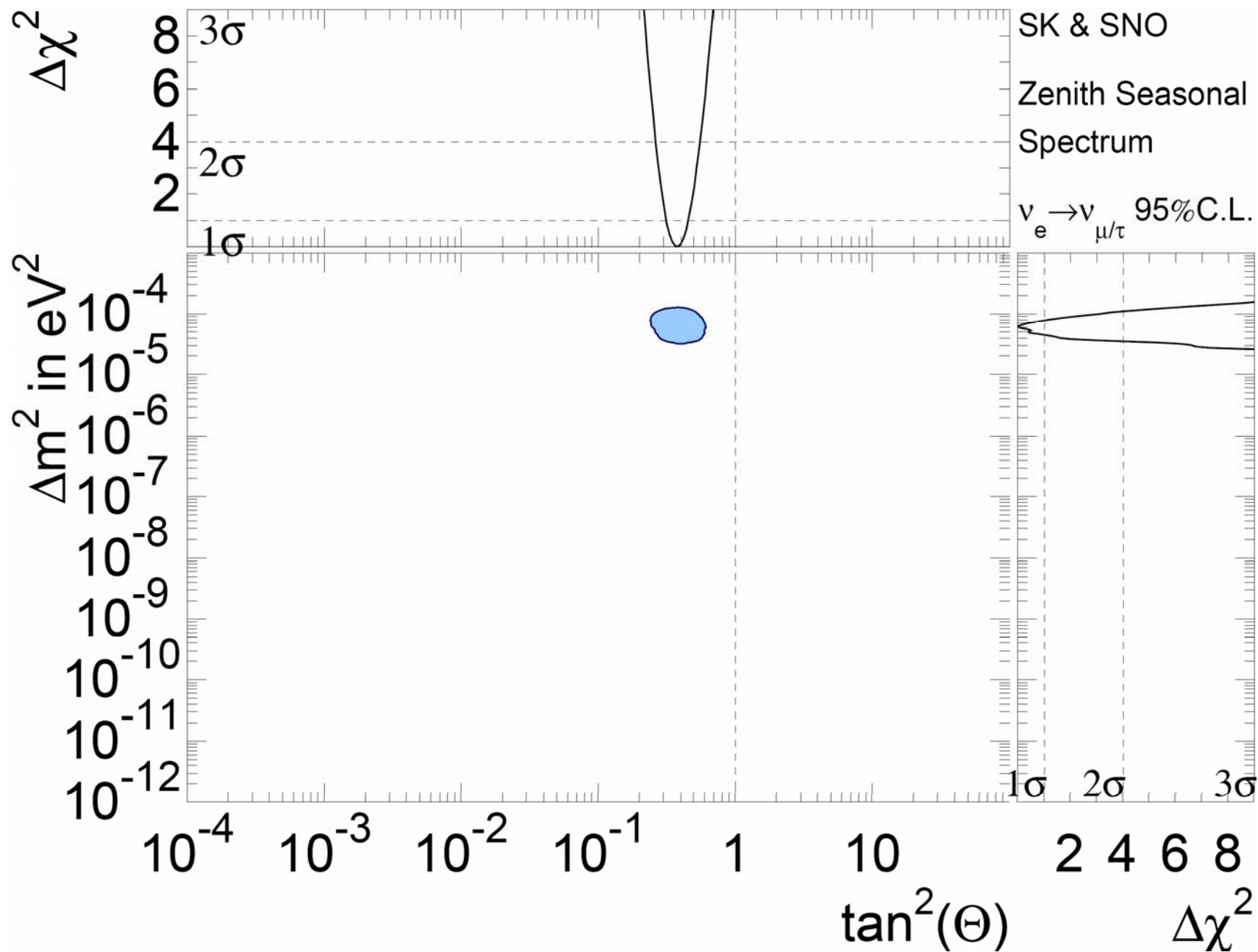
T.A.Kirsten for the GNO collab. Nucl. Phys. Proc. Suppl. (Neutrino 2002) 118 (2003) 33.

S.Fukuda et al., Phys. Lett. B 539 (2002) 179.

Q.R. Ahmad et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 011301

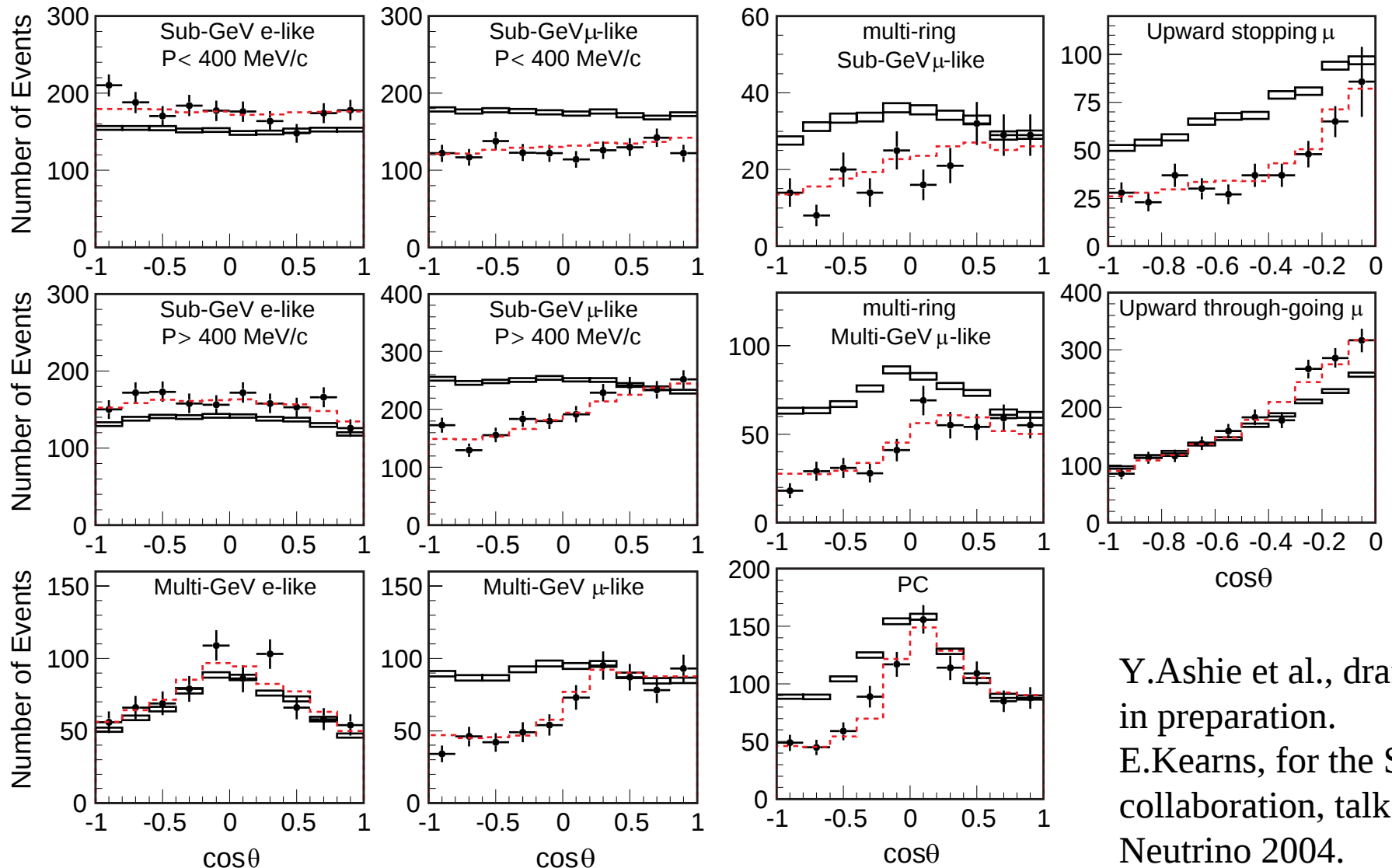
# Super-KamiokaNDE と SNO (2001) によって太陽ニュートリノ欠損が説明





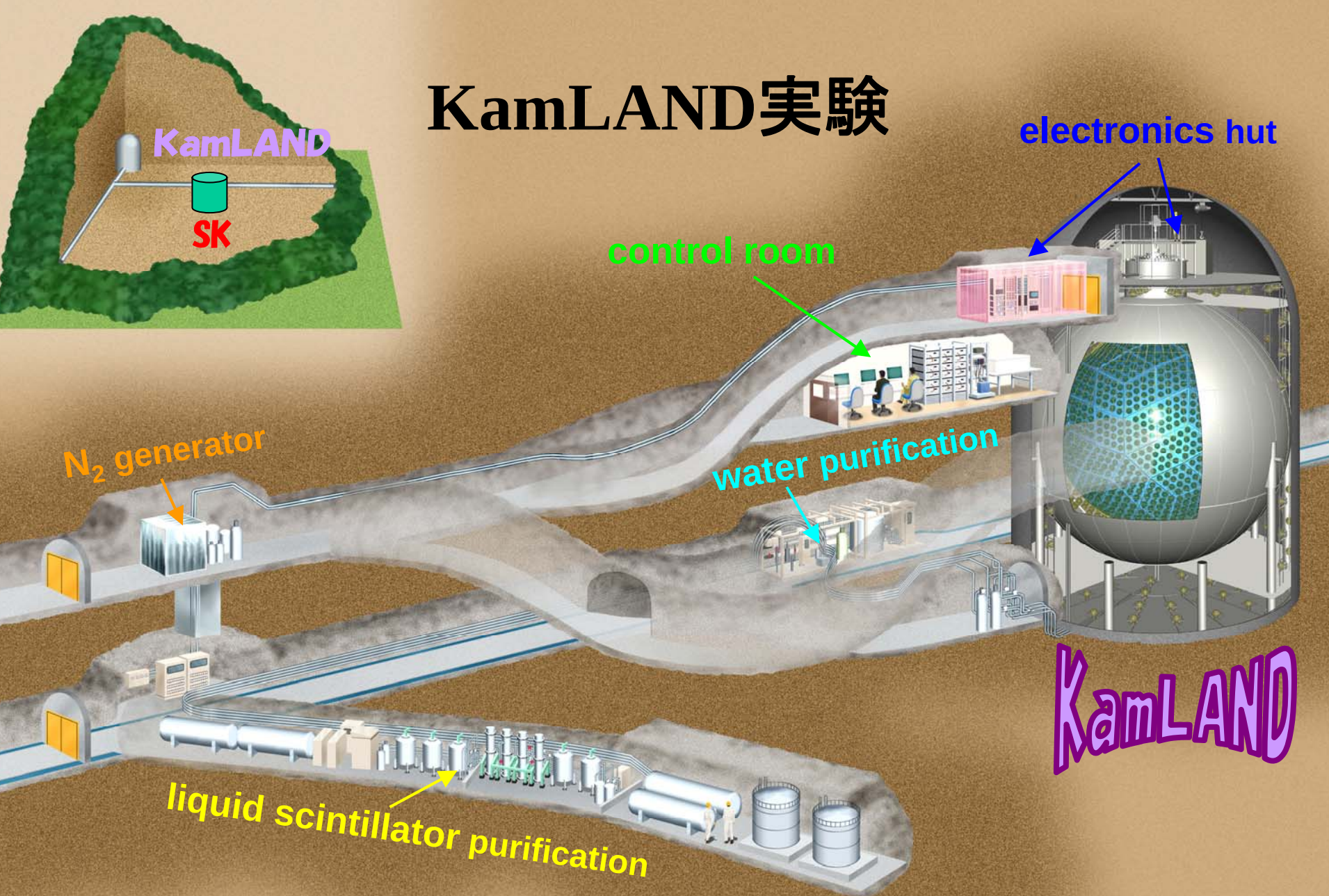
# 天頂角分布から見たニュートリノ振動 (SK)

1489day FC+PC data + 1646day upward going muon data

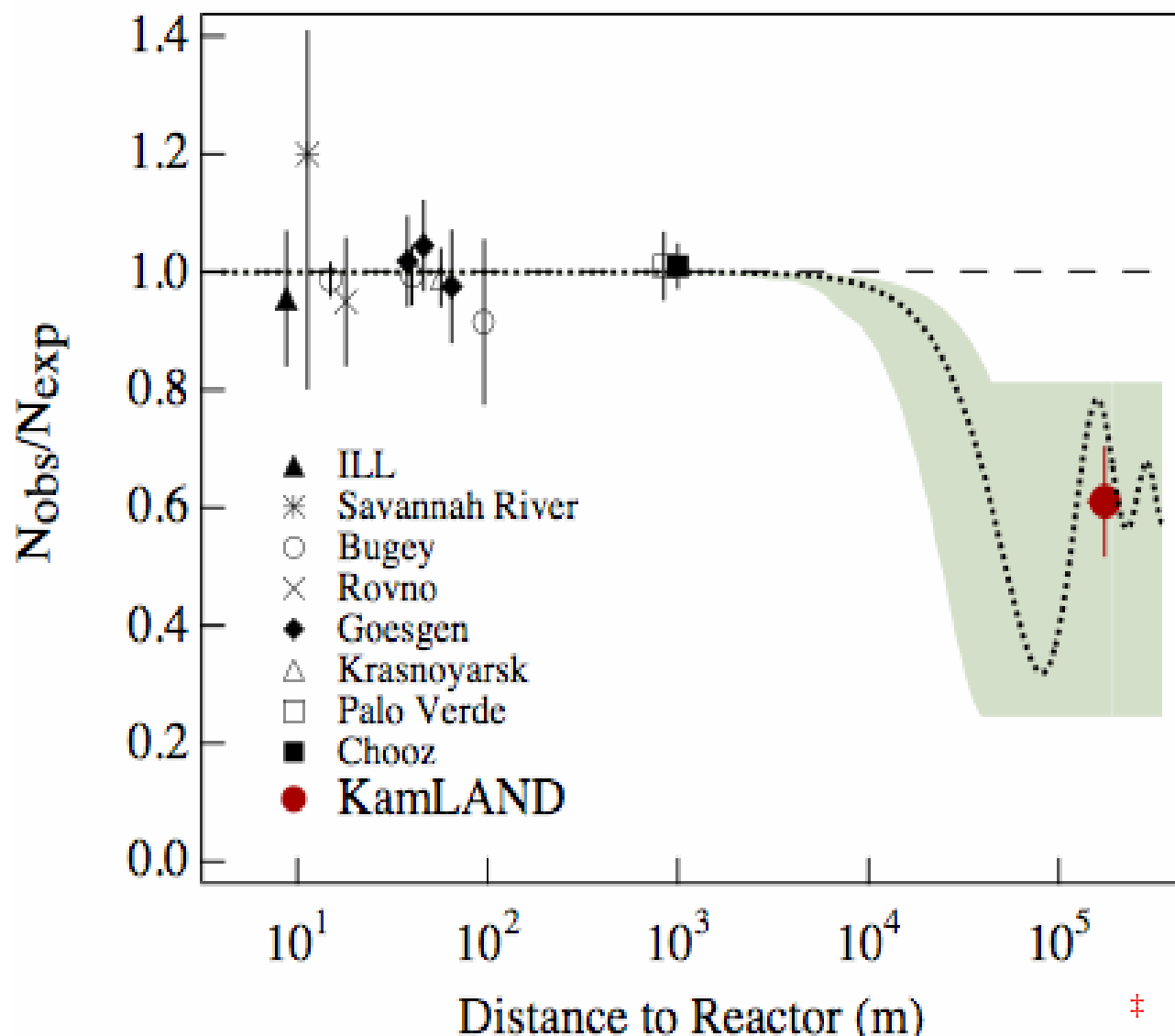


Y.Ashie et al., draft  
in preparation.  
E.Kearns, for the SK  
collaboration, talk at  
Neutrino 2004.

# KamLAND実験



カムランドによる  
原子炉からの  
反電子ニュートリ  
の測定結果。

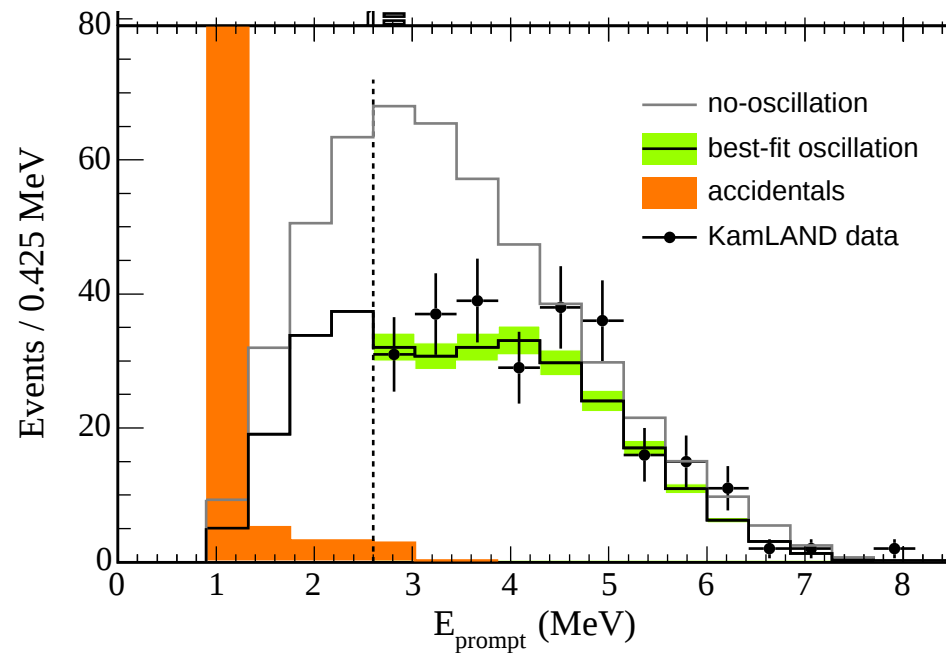


# 新しい KamLAND の結果. (反- $\nu_e$ は $\nu_e$ と同じように振舞う。)

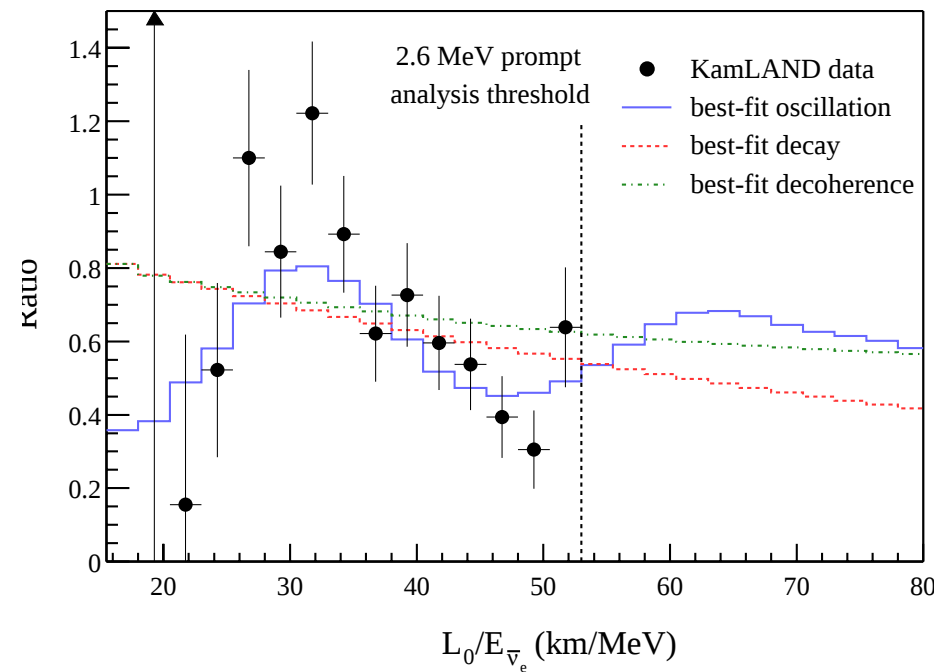
766 ton·year exposure

T.Araki et al., hep-ex/0406035

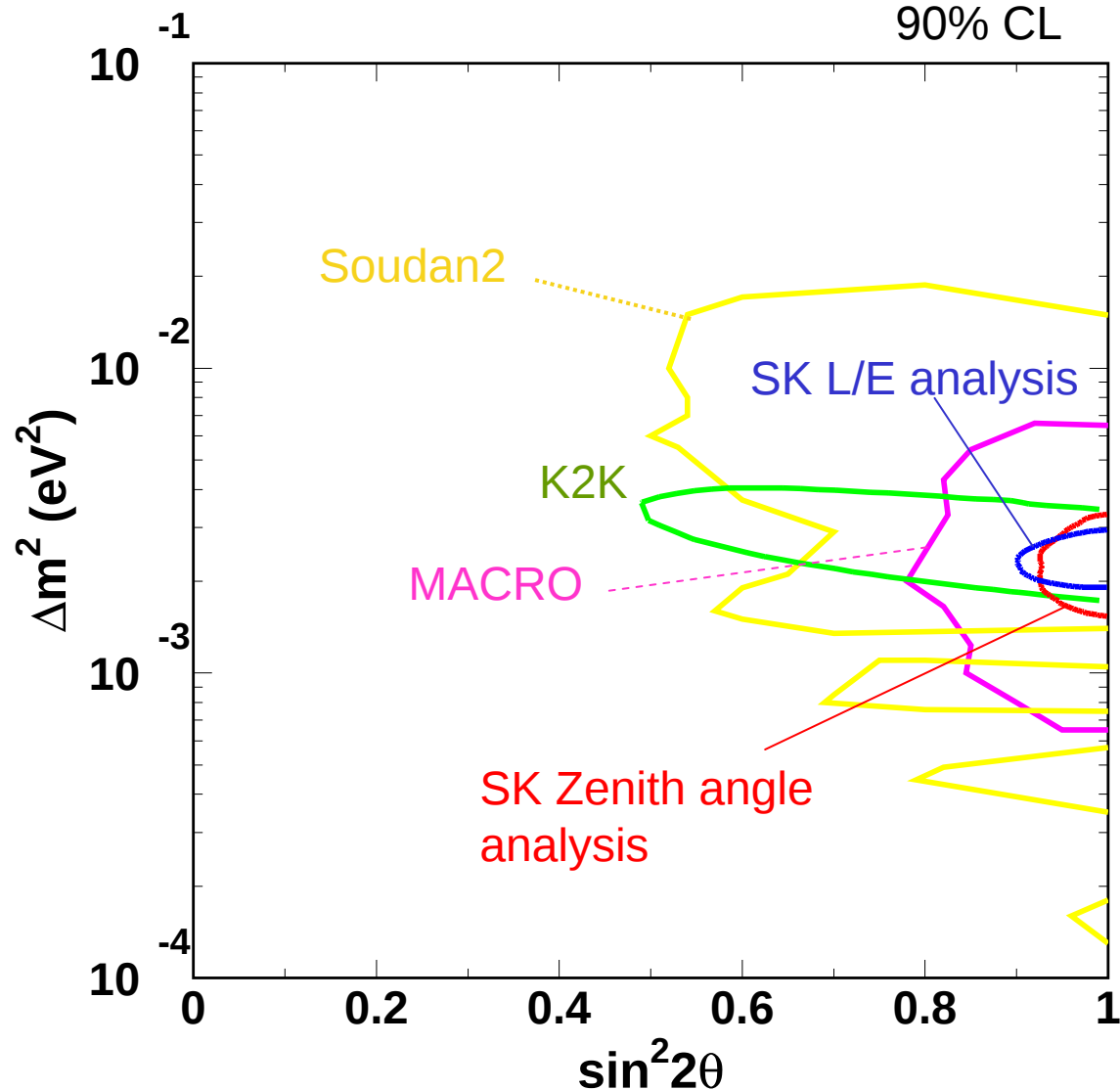
## Energy spectrum



## L/E distribution



# $\nu_\mu$ から $\nu_\tau$ への振動パラメーター許容領域



M.Sanchez et al., Phys. Rev. D  
68 (2003) 113004

M.Ambrosio et al., Phys. Lett. B  
566 (2003) 35.

T.Nakaya (for the K2K  
collaboration), presented at  
Neutrino2004.

Y.Ashie et al., hep-ex/0404034

Y.Ashie et al., draft in  
preparation; E.Kearns, for the  
SK collaboration, talk at  
Neutrino2004.

# さてそれでは

- 3種類のニュートリノの振動パラメーターはただ1つ、1-2混合角を除いて決定された。残った1-3混合角も次加速器ニュートリノ振動実験で決定されるであろう。
- KamLAND 型検出器を用いて地球内部のUやThの反- $\nu_e$ トモグラフィーが可能になるだろう。
- Cosmic Neutrino Background (CNB)を観測してBig-Bang から3秒後の宇宙を観ることは極めて魅力的だが同時に極めて困難な事である。ニュートリノ質量がゼロでないことから極低エネルギーのニュートリノが超伝導金属で全反射することになり観測の方向精度は得られることになったが、これら極低エネルギーニュートリノの検出は至難の業といわねばならない。

# 平成基礎科学財団のこと

- 景気、不景気に関わらず広く国民からの支持を期待する。 **国民一人年に1円**の規模で自分たちの国の基礎科学を支援して頂く。この線で賛助会員として都道府県自治体に入って頂く。
- 老人子供を含まない**知的団体には一人年に10円**の線で賛助会に入って戴く。例 東京大学。
- 基礎科学をやる楽しさを普及する。
- 理科の楽しさを教えた先生を表彰する。
- 皆さんも応援してくださいね。
- ホームページ: **hfbs.or.jp**

御静聴を感謝します。

小柴 昌俊