

平成14年11月19日(火)
「現代物理学」

ニュートリノ物理学

<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/~nakaya/edu>

中家 剛 (高エネルギーグループ)

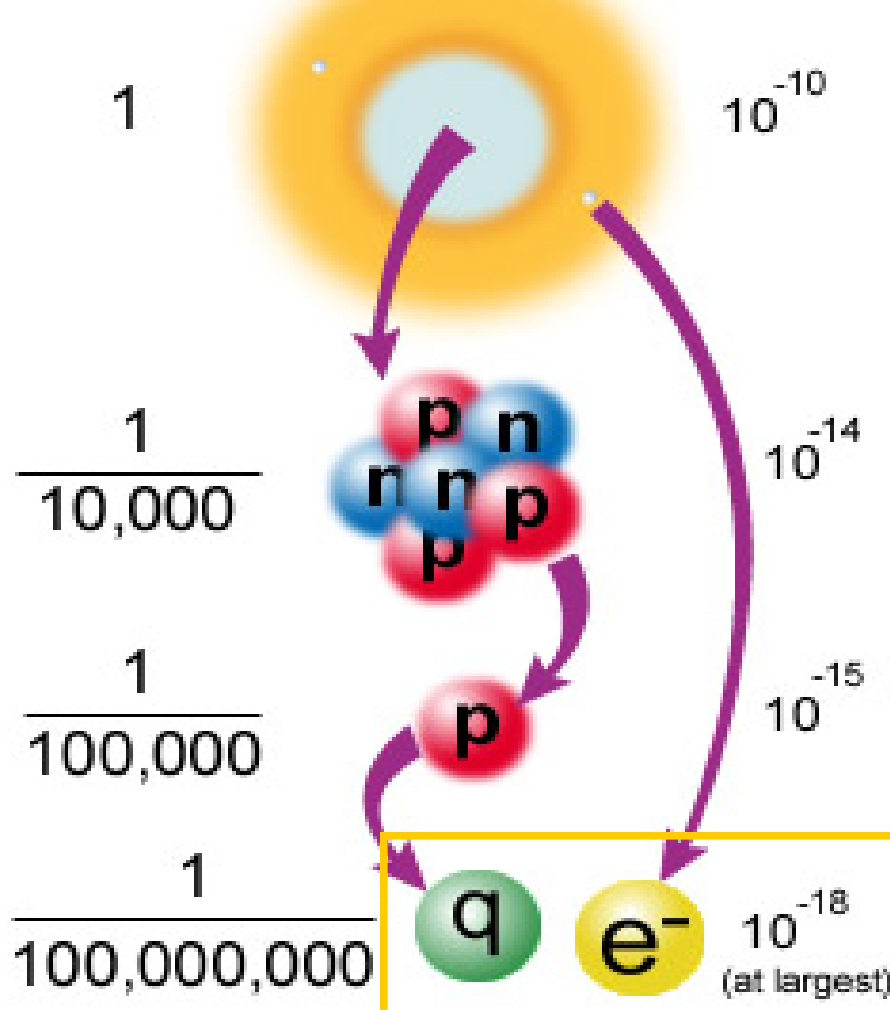
<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/~nakaya/>

1.素粒子物理学とニュートリノ

■素粒子？



size in atoms and in meters



原子

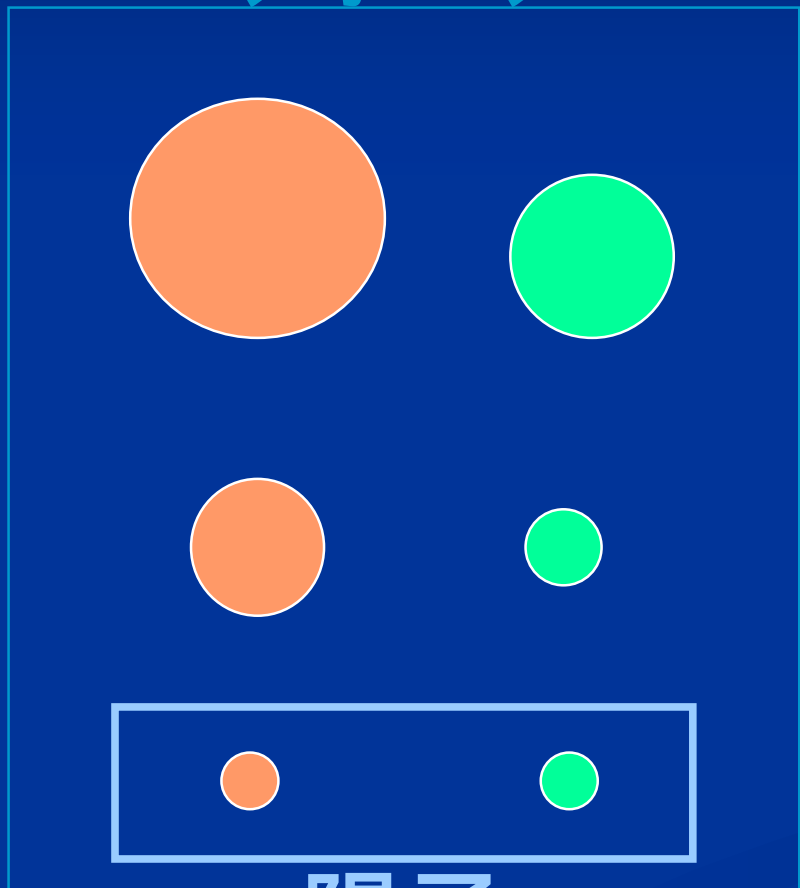
原子核

核子

素粒子

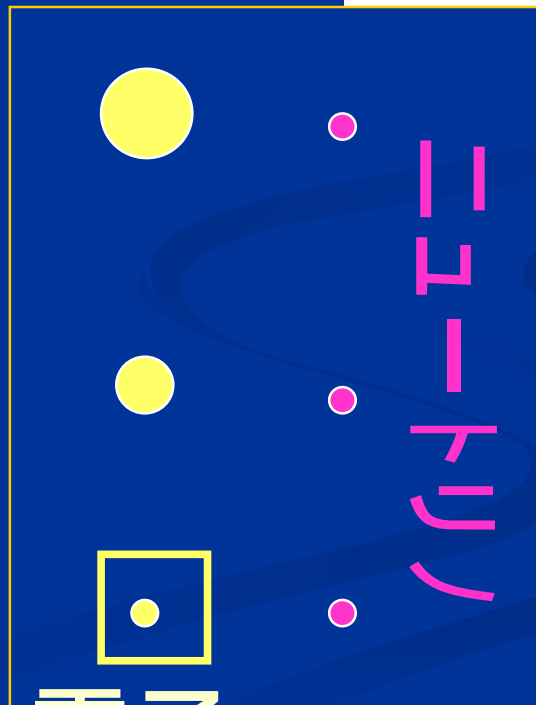
素粒子(クォークとレプトン)

クォーク

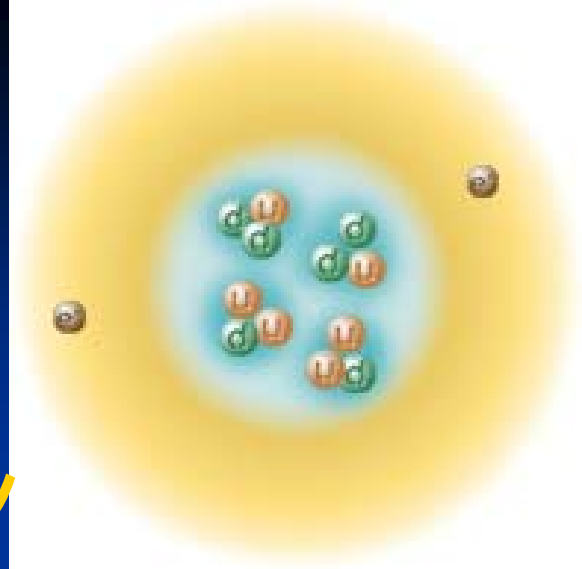


陽子

レプトン



電子



12種類

素粒子と力

強い力



強い力

グルーオンをやりとりし、クォークを結びつけて陽子や中性子をつくり、陽子や中性子をまとめて原子核をつくる力。

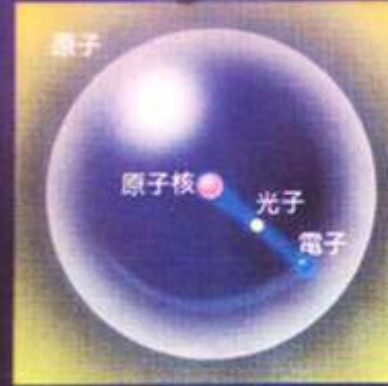
弱い力



弱い力

ウィークボゾンをやりとりし、粒子の変化を引き起こす。たとえば中性子のダウン・クォークがアップになり、陽子に変わる。

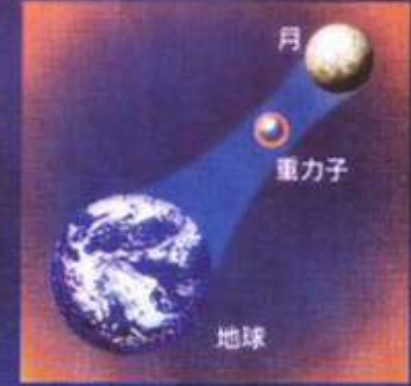
電磁気力



電磁気力

光子をやりとりし、電子と原子核を結びつけて原子をつくり、原子をまとめて物質をつくる力。電気をおびた粒子にはたらく。

重力



重力

重力は「万有引力」のことである。重力子をやりとりして、すべての物質にはたらく。物質をまとめて天体や銀河をつくる。

ニュートン1998年7月号

+ ヒッグス粒子 (粒子の質量の生成)

素粒子とそれらに働く力

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
	-1	e	μ	τ
クォーク	2/3	u	c	t
	-1/3	d	s	b

弱い力

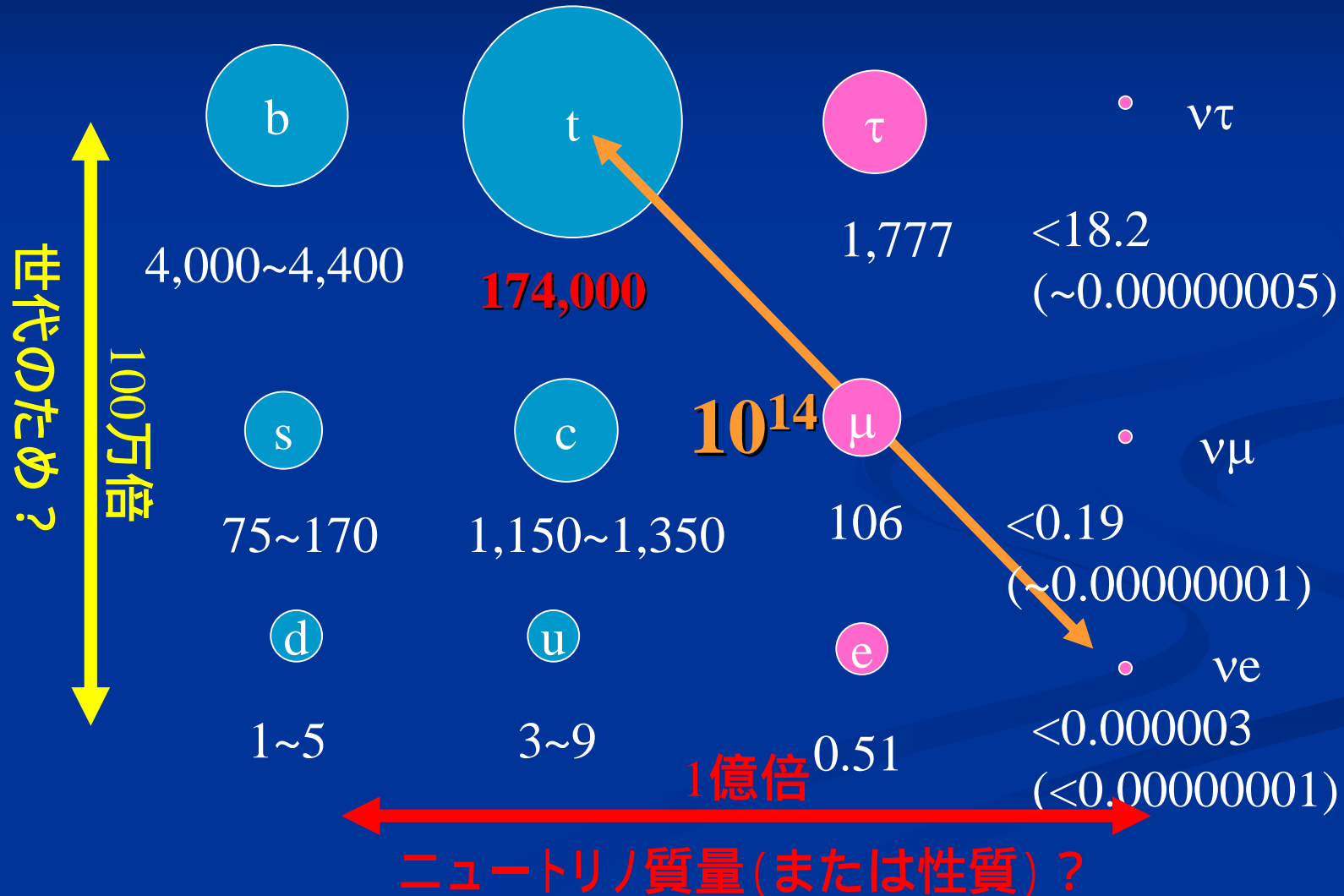
電磁力

強い力

素粒子の質量(MeV) : $m_{\Psi\Psi}$

クォーク

レプトン



ニュートリノ

- 弱い相互作用しかしないので、観測が難しい。
→ 巨大検出器、ハイパワーニュートリノ源
- 質量が非常に軽く、通常の方法では質量を測定できていない。
→ **ニュートリノ振動**、2重 崩壊
- ニュートリノ振動を通して、ニュートリノとクォークの混合の比較が可能。
→ 超高エネルギー (GUTスケール: $>10^{15}\text{eV}$) の物理

1998年のスーパーカミオカンデによるニュートリノ質量の発見から飛躍的に進んでいる学問分野である。

ニュートリノ実験物理学

- ニュートリノ振動実験 (大気ニュートリノ)
- ニュートリノ振動実験 (太陽ニュートリノ)
- (長基線)ニュートリノ振動実験 (加速器)
- (長基線)ニュートリノ振動実験 (原子炉)
- ニュートリノ質量の直接測定
- 2重崩壊の探索 (マヨナラニュートリノ)
- ニュートリノ天文学 (超新星、太陽、...)
- その他

2. 超新星ニュートリノ観測 (特別編)

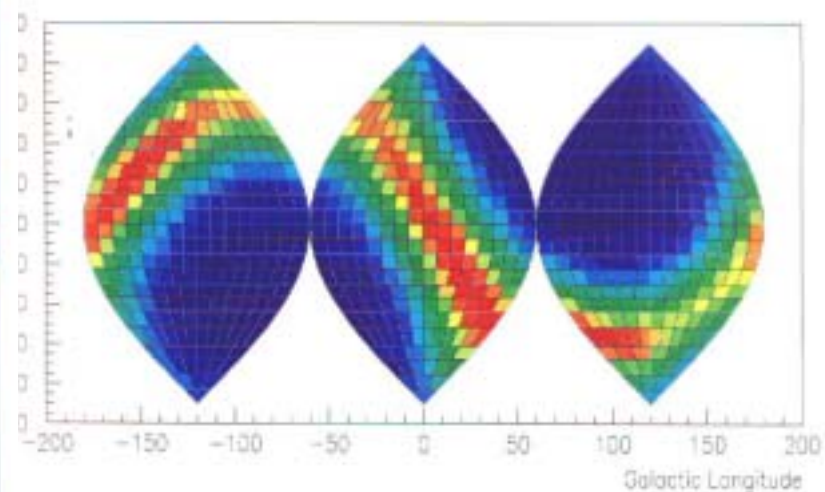
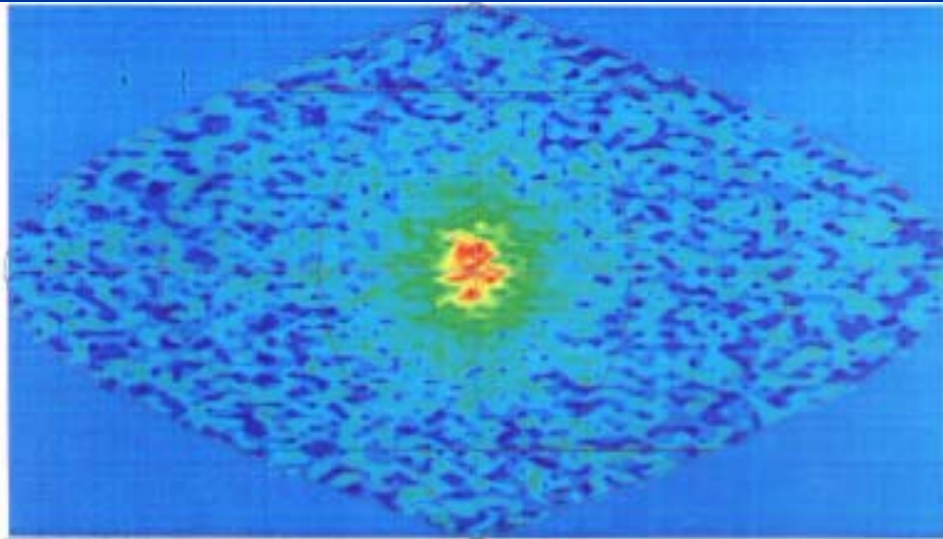
- 2002年ノーベル物理学賞
天体物理学、2つの新しい宇宙観測手法
 - 小柴 昌俊 (ニュートリノ天文学)
 - 超新星ニュートリノの観測
 - Raymond Davis Jr (ニュートリノ天文学)
 - 太陽ニュートリノ観測
 - Riccardo Giacconi (X線天文学)
 - 宇宙X線観測



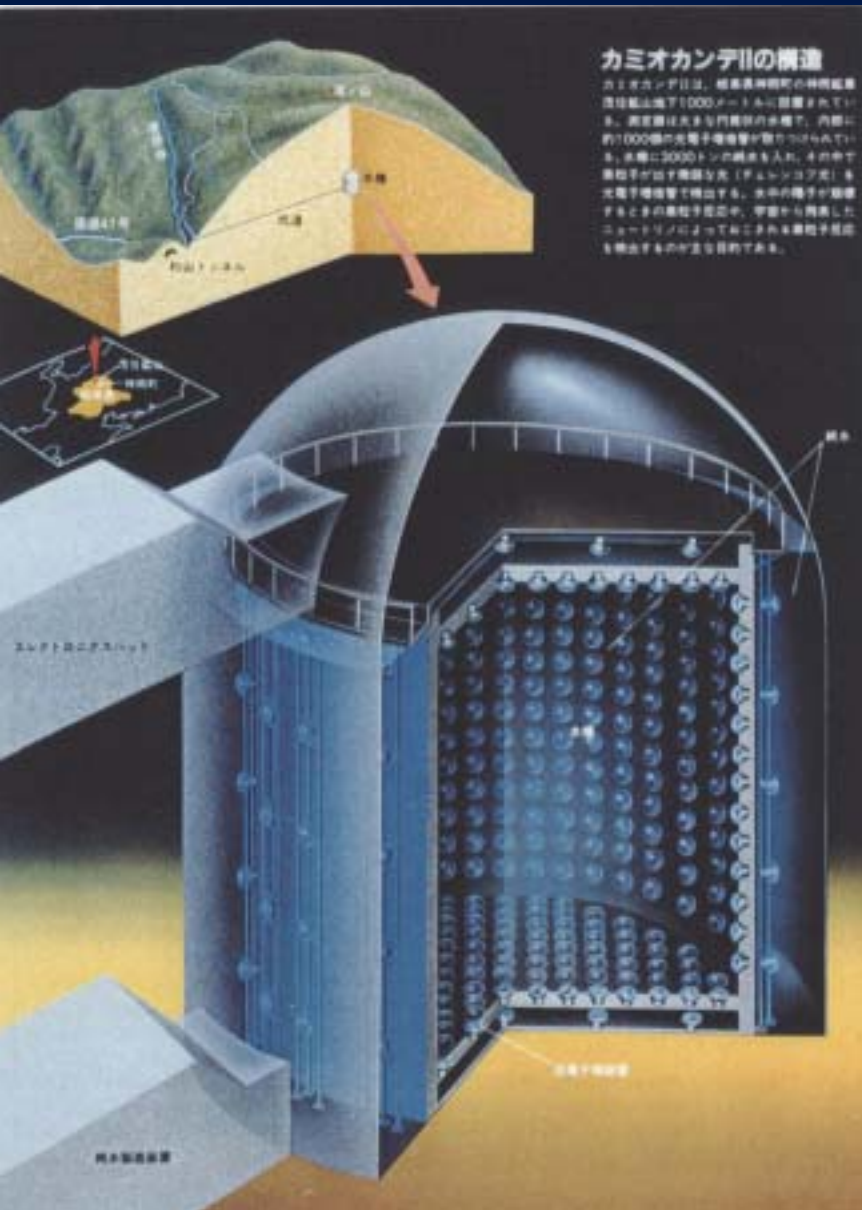
ニュートリノ天文学

- 人類が手にした光(電波、可視光、X線、**γ線**)以外による星の観測手段。
- 全天の観測が**地下から**可能。
- 星の内部の情報がわかる。

ニュートリノで観測した太陽(スーパーカミオカンデ)



カミオカンデ実験装置



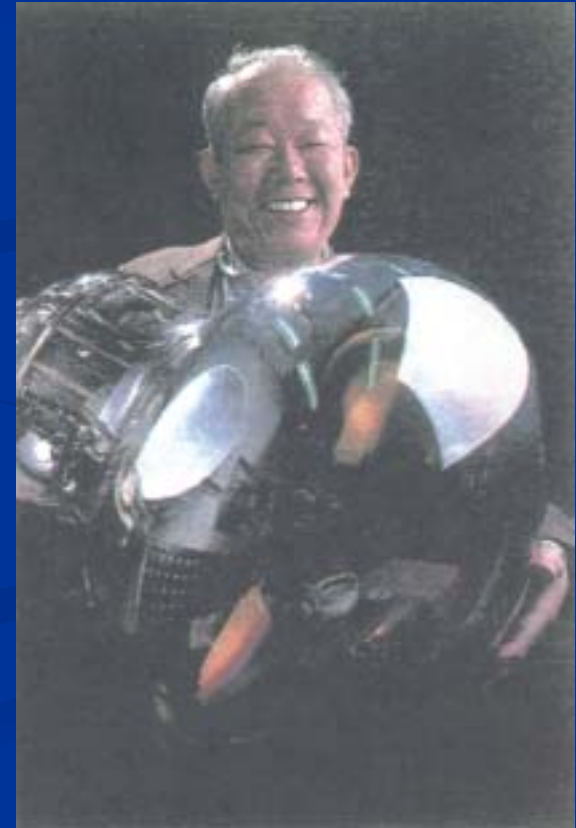
岐阜県神岡町神岡鉱山
地下1000メートルの場所に
3000トン水タンクを建設

1000本の光電子増倍管



カミオカンデの名前の由来

- Kamiokande: Kamioka Nucleon
Decay Experiment
(Nucleon: 陽子と中性子の総称)



カミオカンデの動作原理

■ 超音速 衝撃波

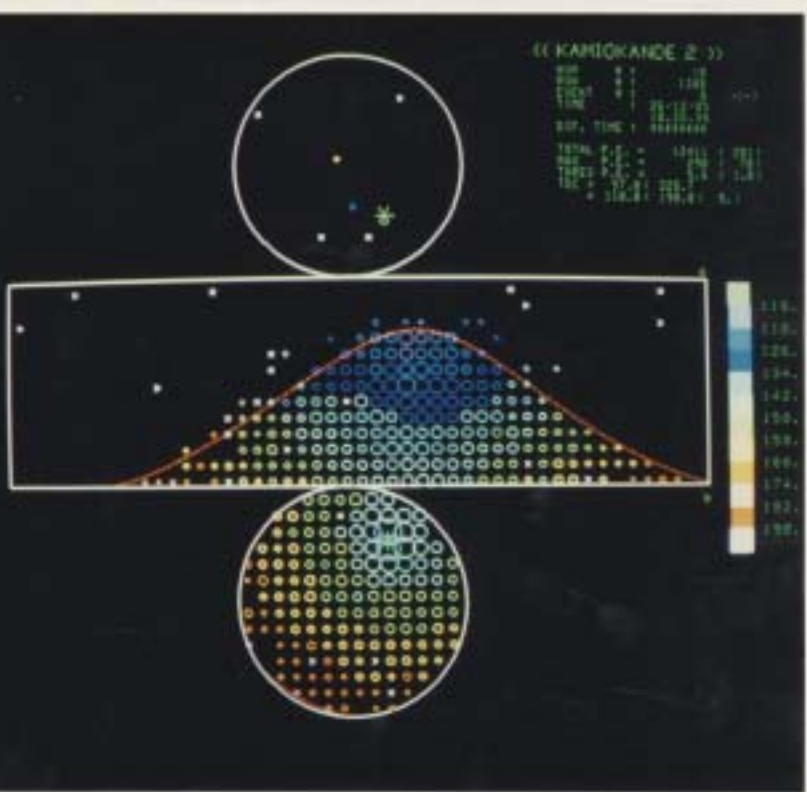
■ 超光速 チェレンコフ光



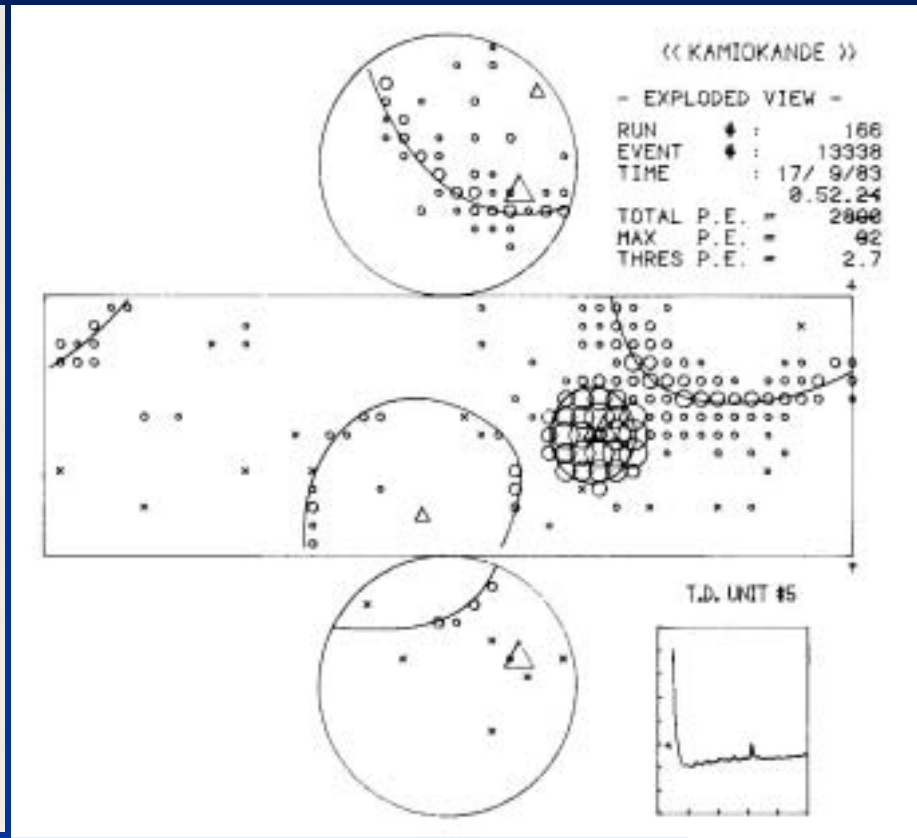
(水中の光速 = $c/n = c/1.33$)

カミオカンデ観測開始(1983年)

宇宙線ミュオンの例



大気ニュートリノ現象の例



しかし、陽子崩壊を示す現象は見つからなかった。

低エネルギー現象にも十分な感度がある。太陽ニュートリノの観測も可能。

大マゼラン星雲での超新星爆発(1987年2月23日)



超新星爆発

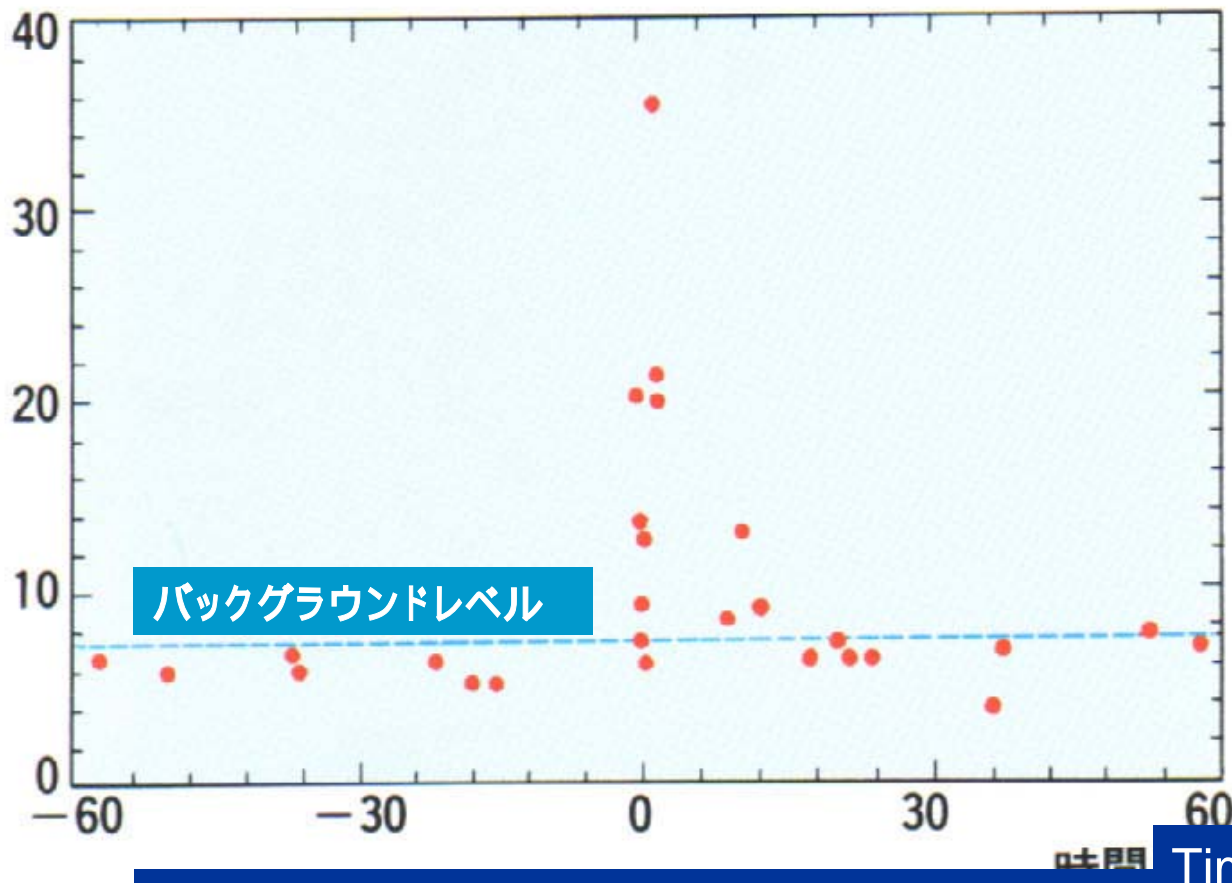
■ 星の最後の過程

- ✧ 重い星(太陽の8倍以上)の中心核が崩落し半径10 kmの中性子星になる過程(Ⅱ型)
- ✧ 放出される位置エネルギー = 3×10^{53} erg
(46億年分の太陽エネルギーのさらに500倍)
- ✧ 99%はニュートリノが持ち出し、1%が星の破壊に使われる
- ✧ ニュートリノの放出時間は10秒程度

■ 頻度は銀河あたり10 - 100年に一度。

カミオカンデが捉えた超新星のデータ

Visible energy (MeV)



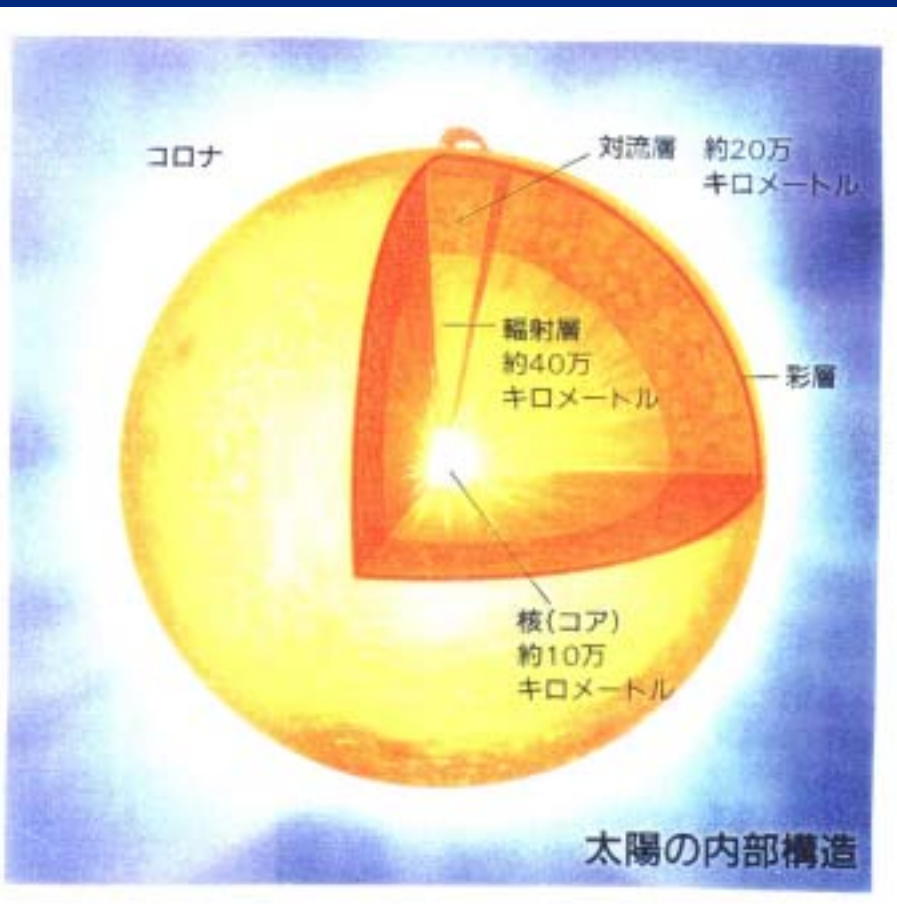
JT: 1987 Feb 23 16:35:35 (± 1 min)

UT: 7:35:35

Time

太陽ニュートリノ

4個の水素 →

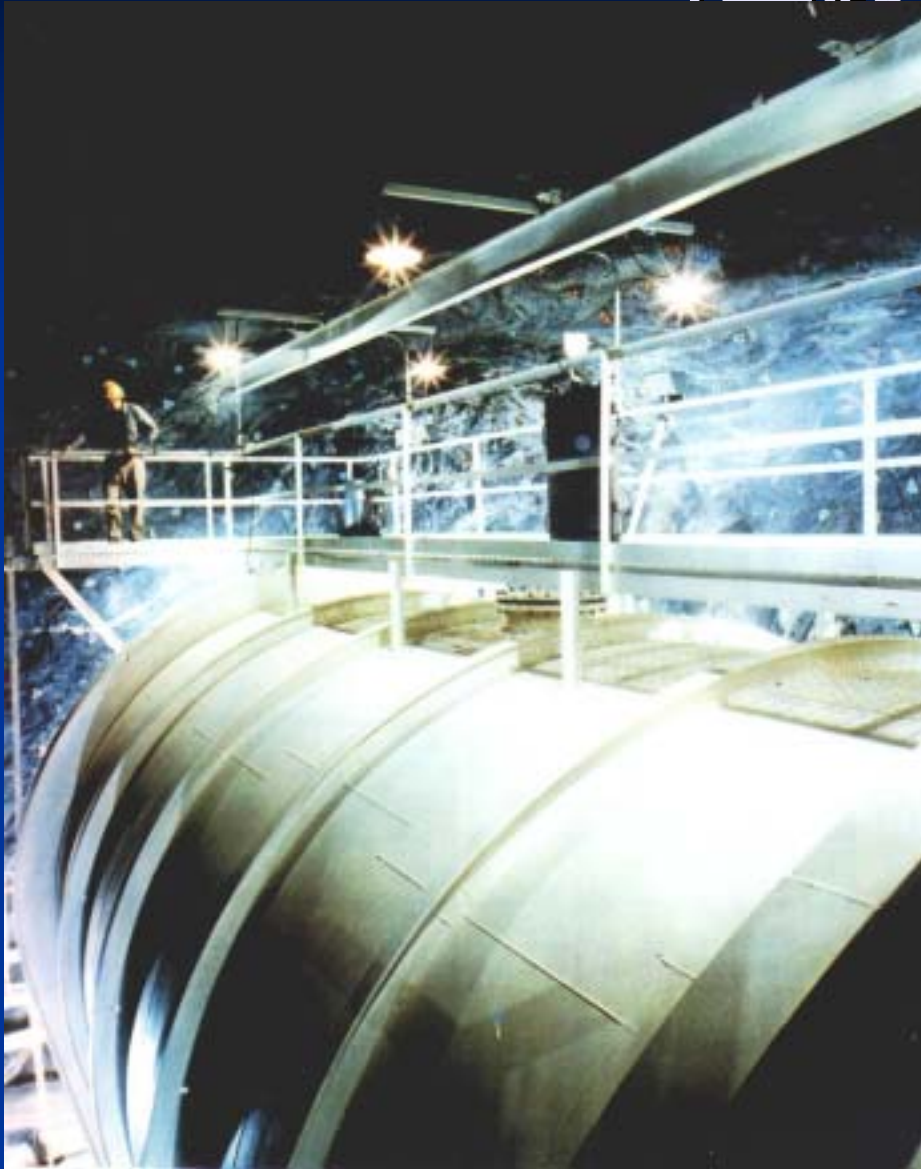


4He (ヘリウム)
+2個の e^+ (陽電子)
+2個の ν_e (電子ニュートリノ)



~660億 ν_e /秒/cm²
太陽ニュートリノの数

世界で初めての太陽ニュートリノ



デービスらによるHomestake実験

615トンの四塩化炭素を入れたタンクの中で、ニュートリノと塩素の反応により生まれるアルゴン原子の数を数えた。

1970頃から行われた実験。

← 同時受賞のデービス博士

観測したニュートリノの数は、予想値の約 $1/3$ であった。

カミオカンデでの太陽ニュートリノ観測

- $\nu + e \rightarrow \nu + e$
- はねとばされた電子 e を観測・測定

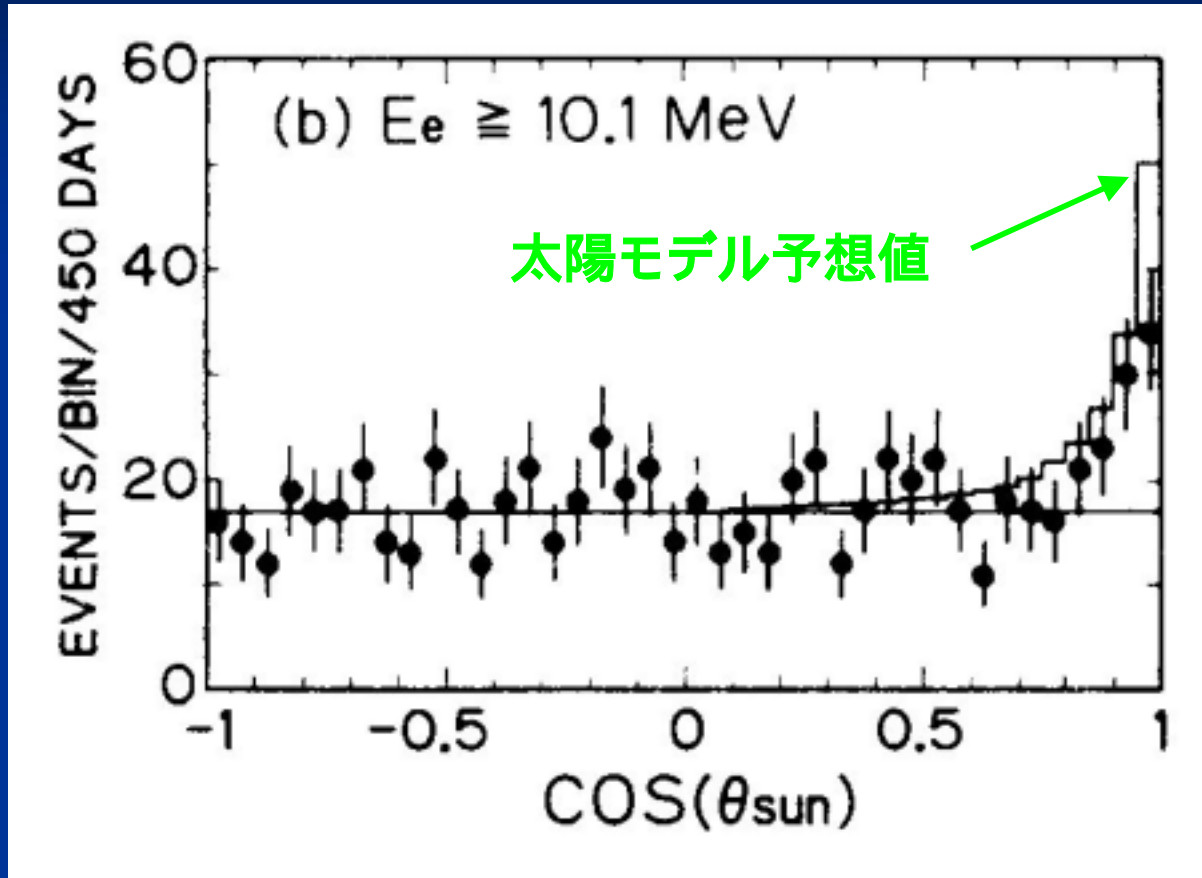
太陽ニュートリノ 

電子 



太陽ニュートリノ方向分布

1987年1月 - 1988年5月まで (450日間) のデータ



捕らえた太陽ニュートリノは50個程度

デービスらの結果を確認し、太陽ニュートリノ強度が理論値の約半分しかないことを示した。

3. ニュートリノ質量

■ 直接測定

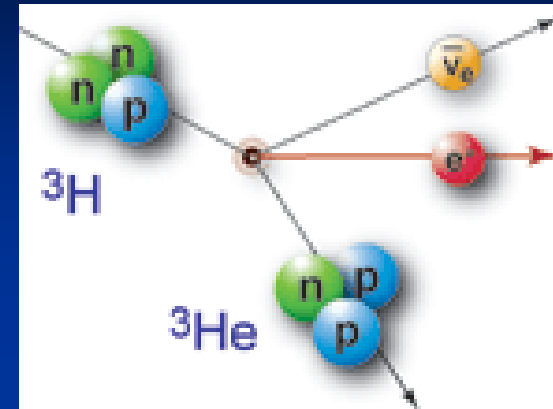
- $m_{\nu e} < 2.2 \text{ eV}$ (Tritium β decay)
- $m_{\nu \mu} < 170 \text{ keV}$ ($\pi \rightarrow \mu \nu$ decay)
- $m_{\nu \tau} < 18.2 \text{ MeV}$ ($\tau \rightarrow \pi \pi \pi \dots \nu$)

■ SN1987Aの観測から

- $m_{\nu e} < 23 \text{ eV}$ (spread of time arrival)

■ $0\nu \beta\beta$ decay (^{76}Ge)

- $\langle m_{\nu} \rangle < 0.5 - 1.5 \text{ eV}$

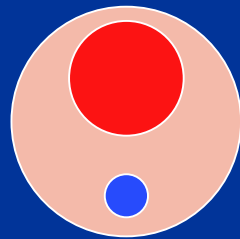


1998年スーパーカミオカンデにおいて有限のニュートリノ質量が発見された。

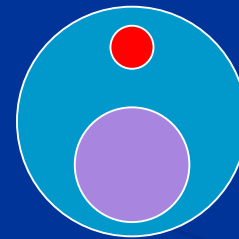
ニュートリノ振動

相互作用の固有状態: 質量の固有状態 ● と ● との混合

(混ざる割合がミューニュートリノとタウニュートリノでは違う。)



ミューニュートリノ



タウニュートリノ

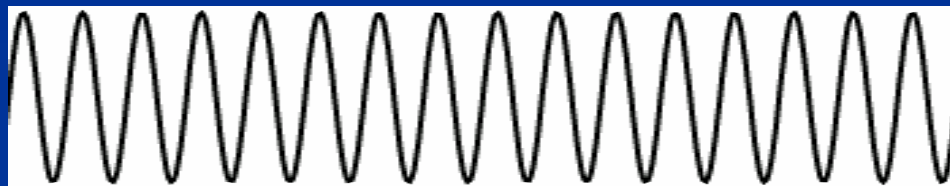
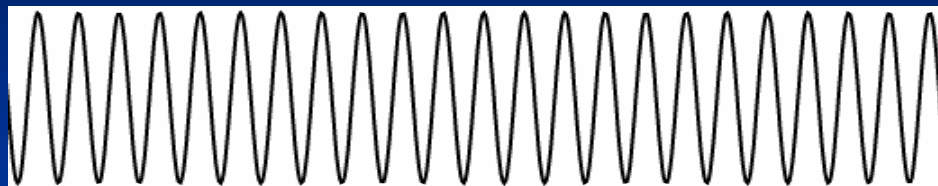
質量の固有状態: それぞれの波長で振動する

$$\psi(t) = e^{-iEt}$$

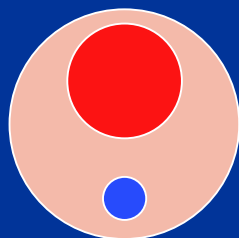
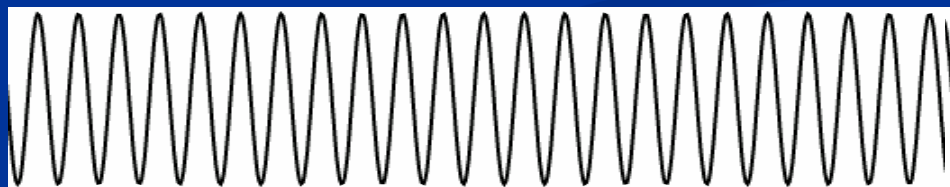
● と ● の質量が 違えば、波長が異なるのである

波の伝播

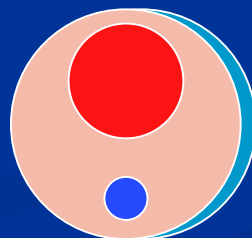
時間



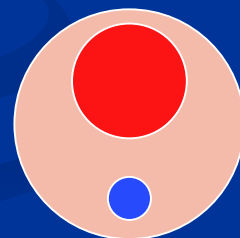
合成した波
(うなり)



ミューニュートリノ



ミューニュートリノ



ミューニュートリノ

Neutrino oscillations

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Weak int. eigenstates \leftarrow Unitary Matrix \leftarrow Mass eigenstates

Two neutrino case

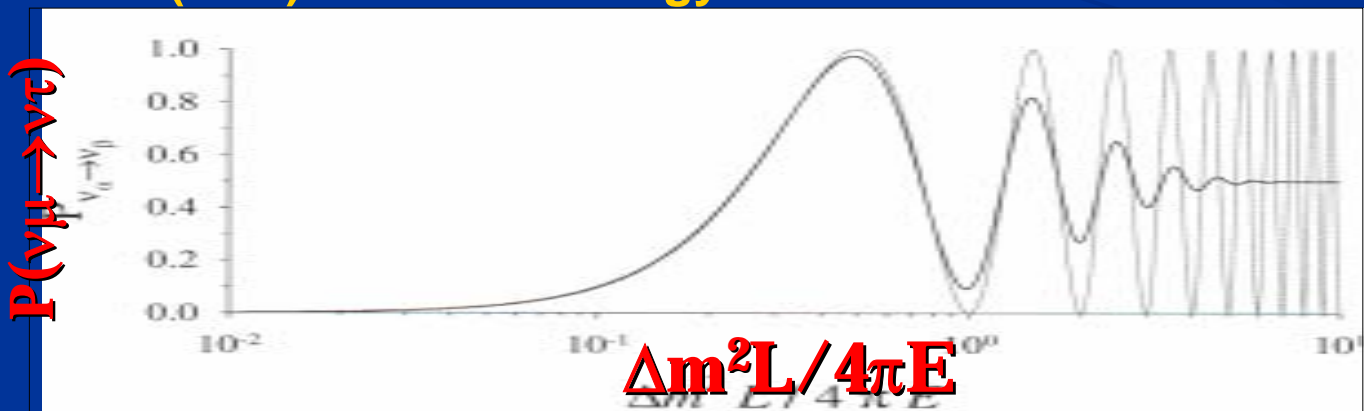
$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

$$\Delta m^2 = m_3^2 - m_2^2 \text{ (eV}^2\text{)}$$

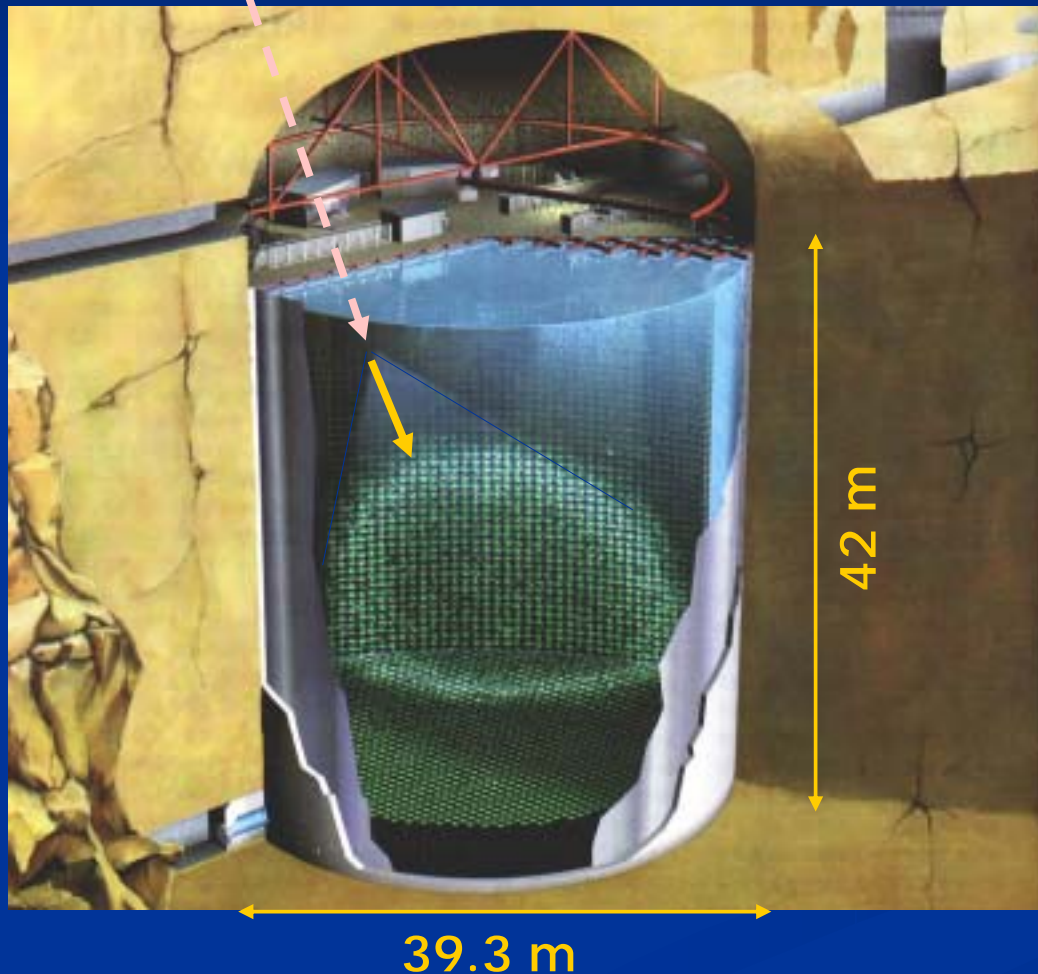
L (km): Distance from source to detector

E (GeV): Neutrino energy



スーパーカミオカンデ

(1996年4月完成)



5万トン水チェレンコフ検
出器

内水槽、外水槽からなる

- 地下1km
- 11,146 50cm径光電子増倍管(内水槽)
- 1,885 20cm径 光電子増倍管(外水槽)

大気ニュートリノ

$L=10-20$ km

1次宇宙線

p(水素の原子核),
He(ヘリウム), ...

π^\pm, K^\pm

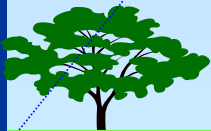
μ^\pm

e^\pm

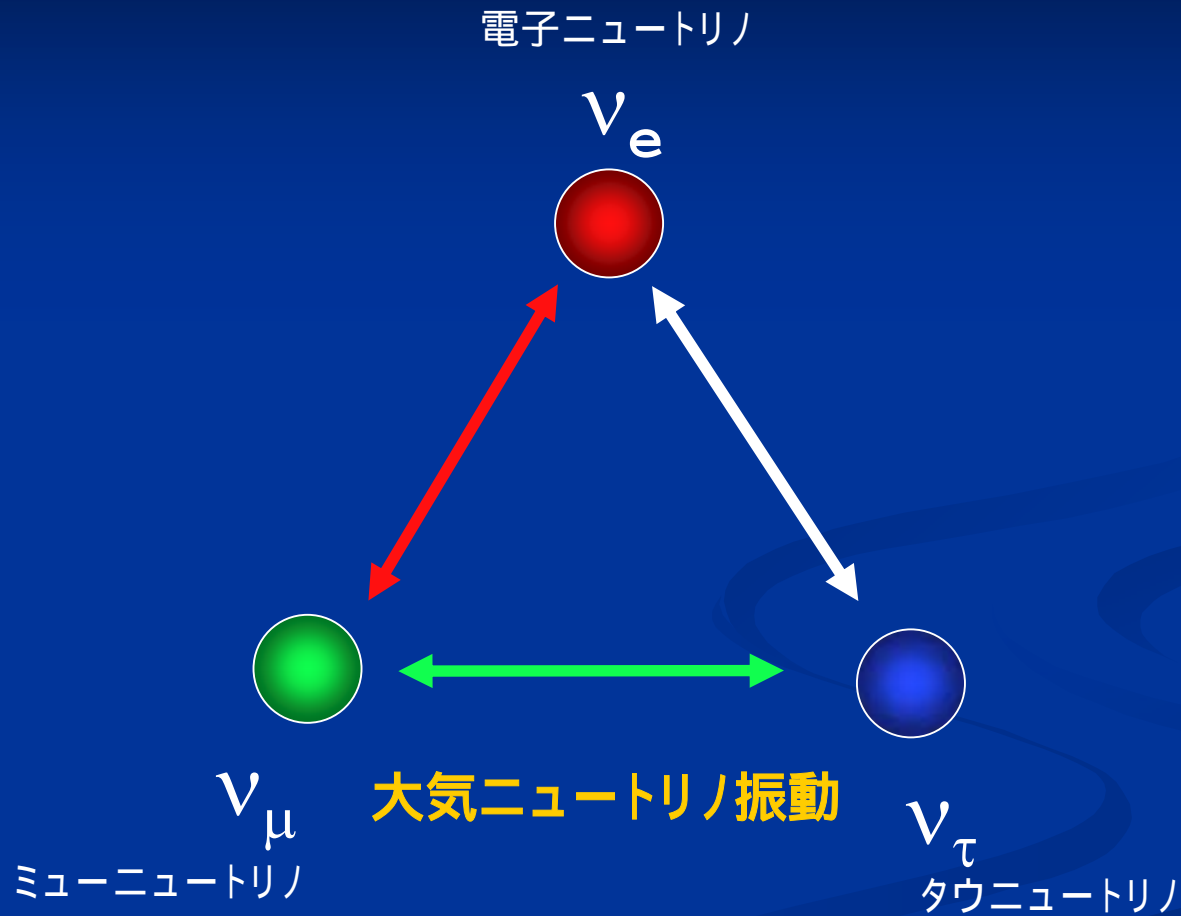
ν_μ

ν_μ

ν_e



大気ニュートリノ振動



ニュートリノ相互作用

レプトン数は保存される

$$\nu_{\mu} + \mathbf{N} \rightarrow \mu^{-} + \mathbf{X}$$

$$\bar{\nu}_{\mu} + \mathbf{N} \rightarrow \mu^{+} + \mathbf{X}$$

$$\nu_{e} + \mathbf{N} \rightarrow e^{-} + \mathbf{X}$$

$$\bar{\nu}_{e} + \mathbf{N} \rightarrow e^{+} + \mathbf{X}$$

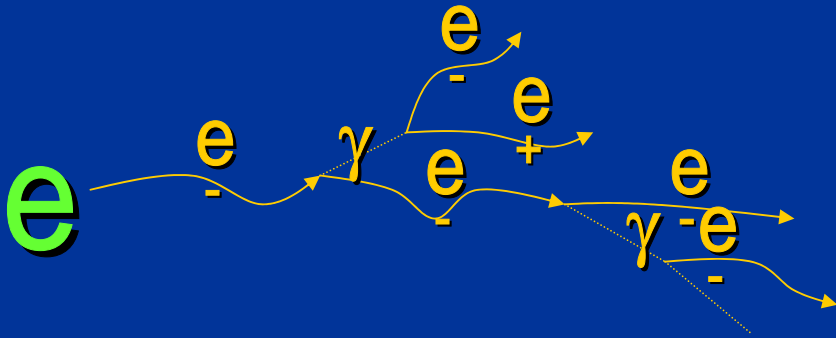
Nはターゲットの核子

Xはパイ中間子、核子等の2次生成物

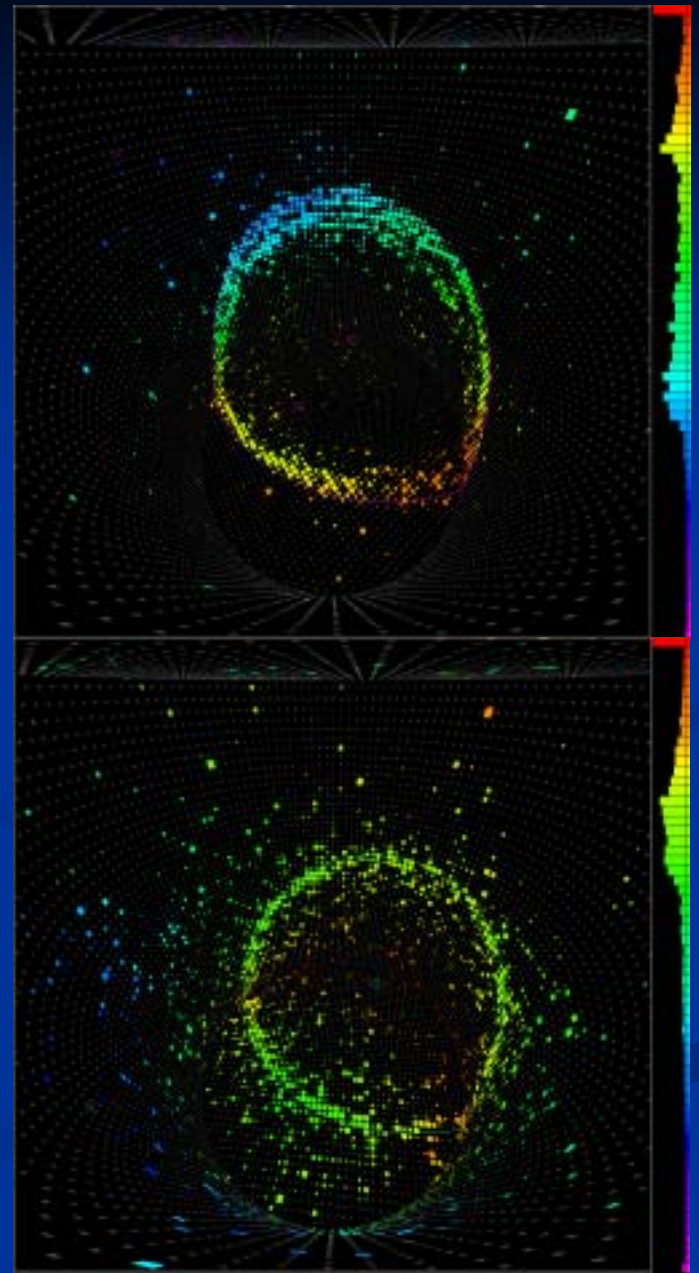
μ と e の識別



素直に走るためパターンが
きれいなリング



電磁シャワーを起こすため
パターンが汚い



電子ニュートリノ、ミューニュートリノの数

(1289日分のデータ)

高エネルギー大気ニュートリノ事象数

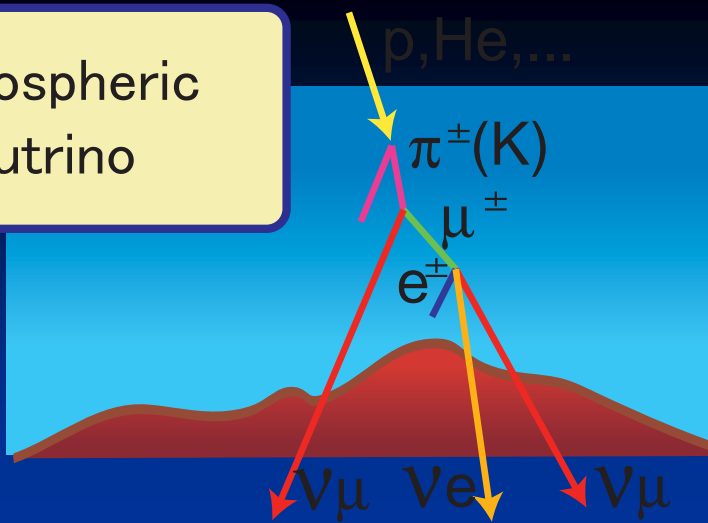
	データ	予想値
電子ニュートリノ	626	612.8
ミューニュートリノ	1312	1903.3

電子ニュートリノの数は合っているが

ミューニュートリノの数は少ない。

$$\frac{(\mu/e)_{\text{データ}}}{(\mu/e)_{\text{予想}}} = 0.675^{+0.034}_{-0.032} \pm 0.080$$

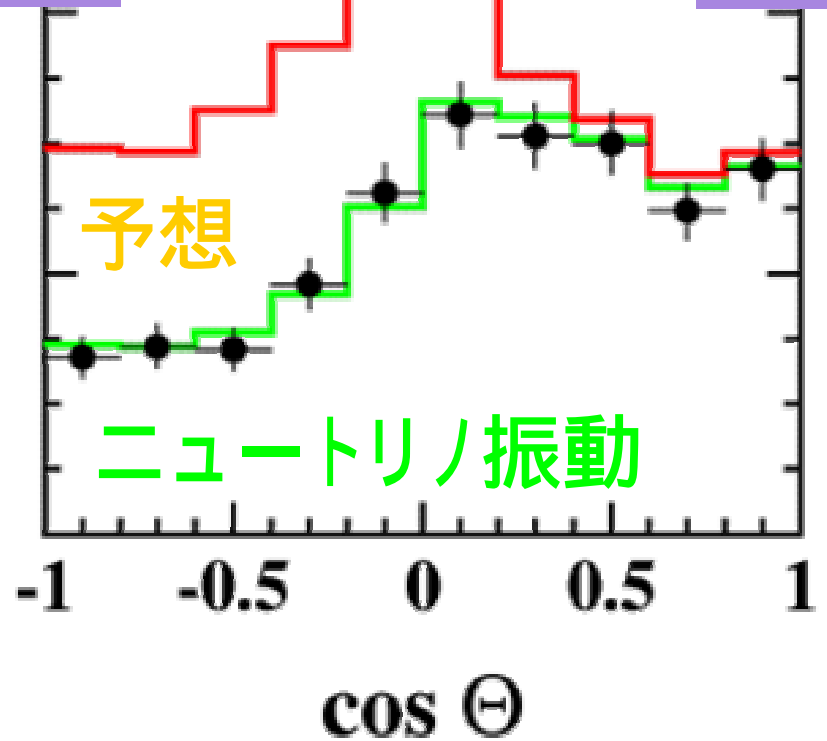
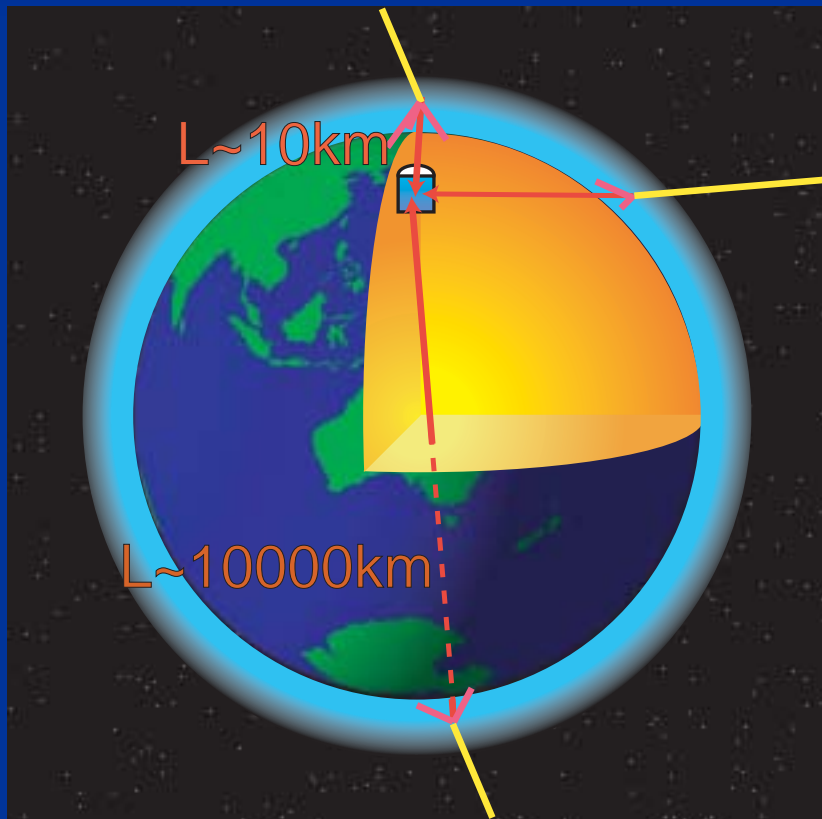
Atmospheric Neutrino



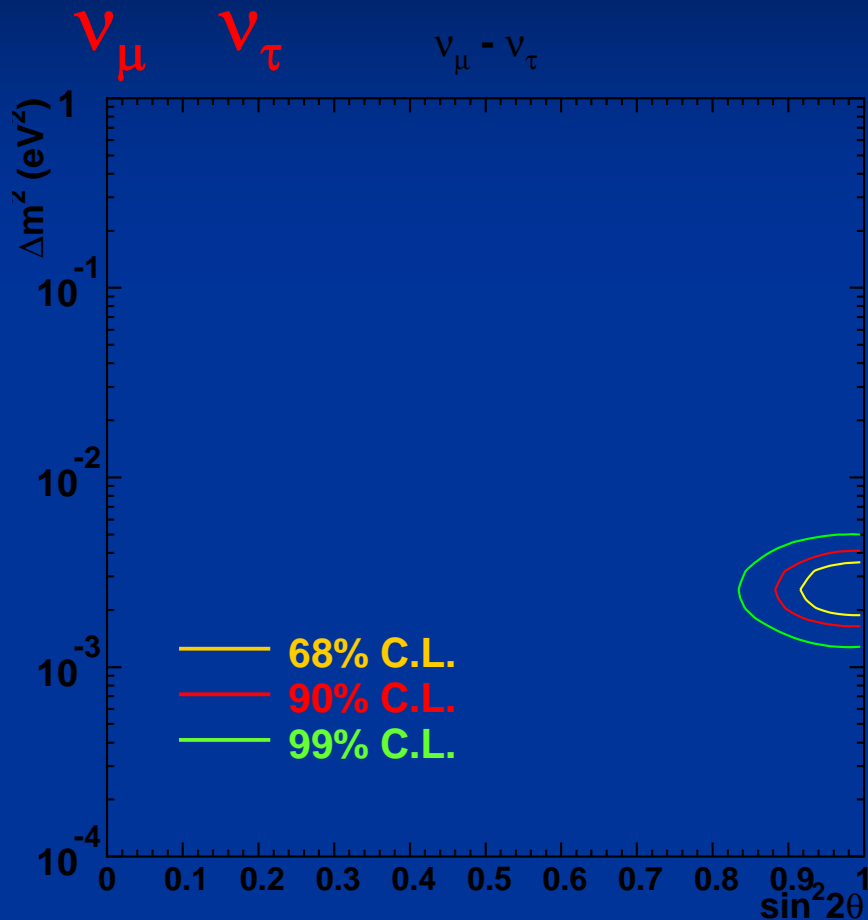
下から

Multi-GeV μ -like +

上から



ニュートリノ振動パラメータの値



パラメータの値は

$$\Delta m^2 = (1.7 \sim 4) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

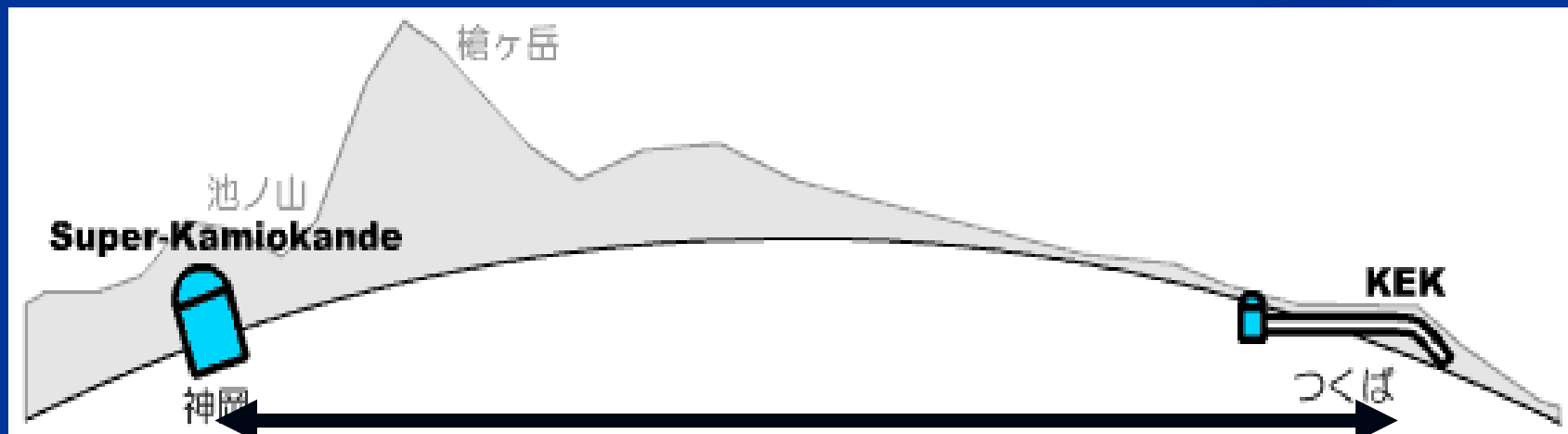
$$\sin^2 2\theta > 0.89$$

(90% C.L.)

4.長基線ニュートリノ振動実験

(人工ニュートリノで大気ニュートリノの結果の
確認→精密測定へ)

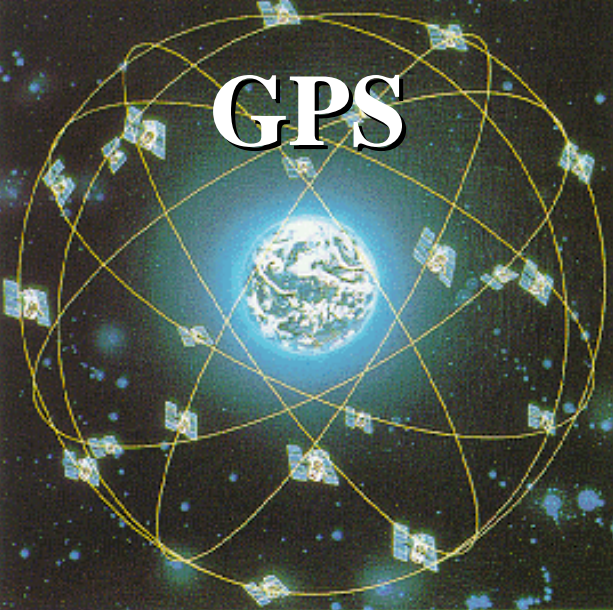
- つくばにある高エネルギー研究所でニュートリノを生成しスーパーカミオカンデへ



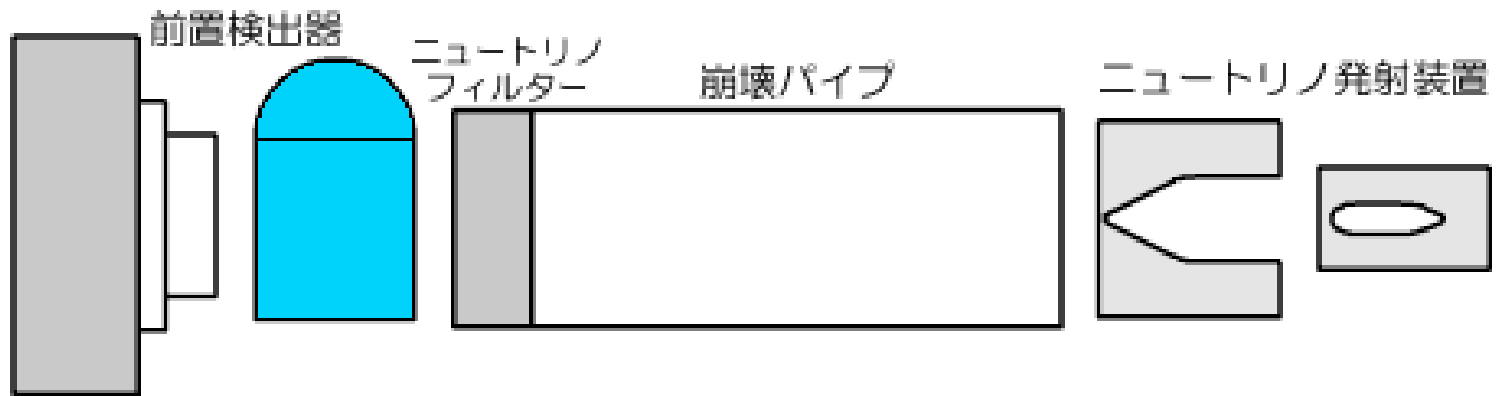
250 km

0.001秒で到達

GPS



人工ニュートリノビームの作り方



高エネルギー研究所で、光速の99.7%に加速された陽子を標的に当てて、大量のニュートリノを発生させ神岡の方向に撃つ。2秒おきに約100億個が100万分の1秒の間に発射される。

前置ニュートリノ検出器

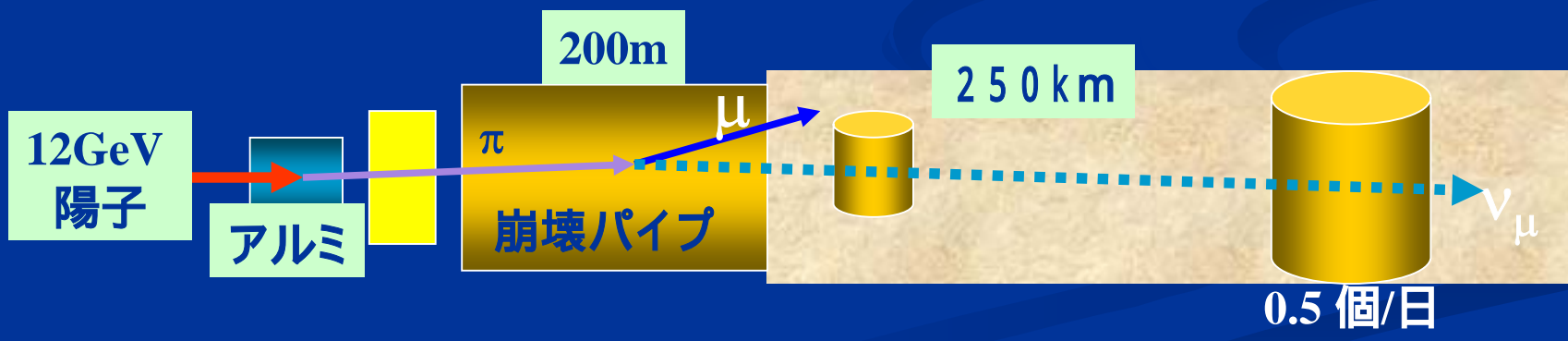
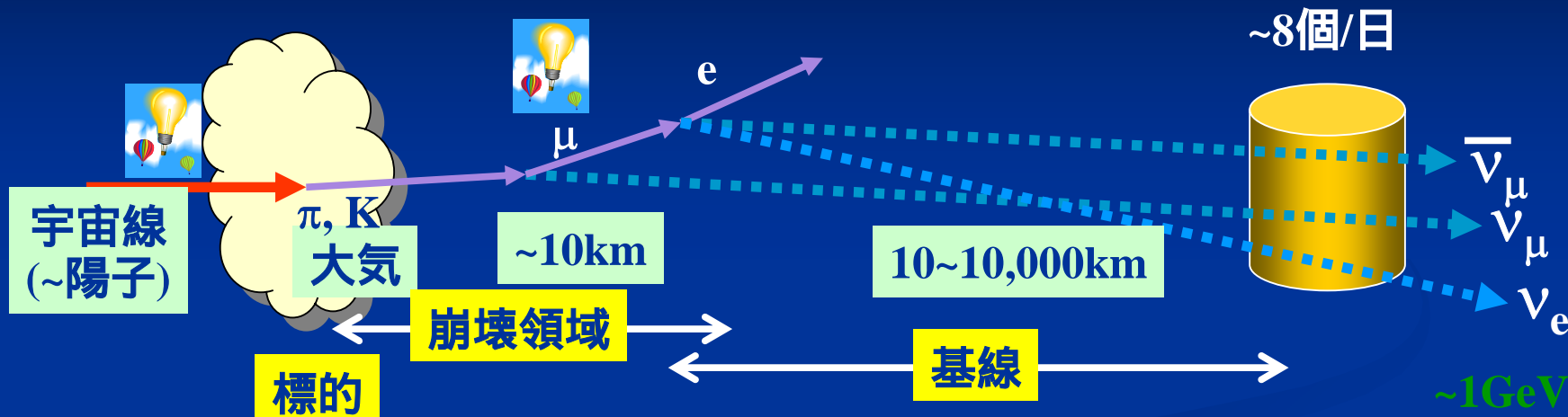
崩壊パイプ

発生装置

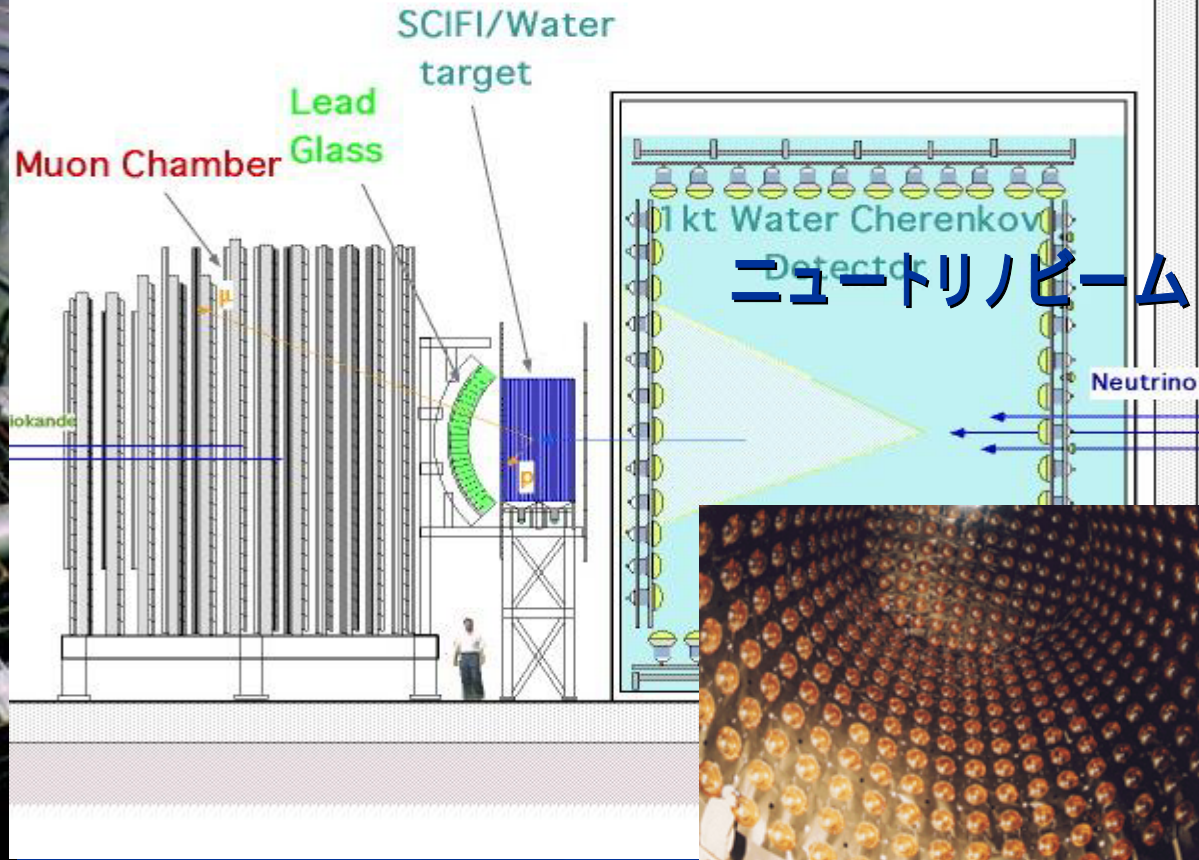
ニュートリノビームライン



大気ニュートリノと人工ニュートリノ



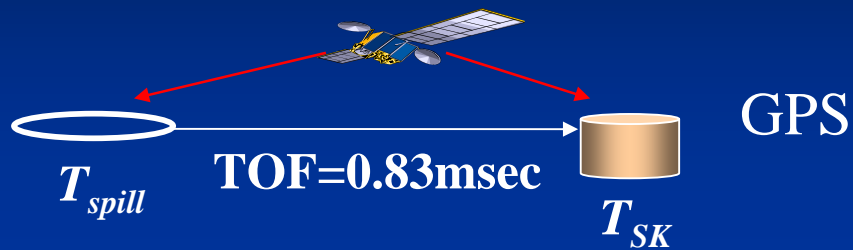
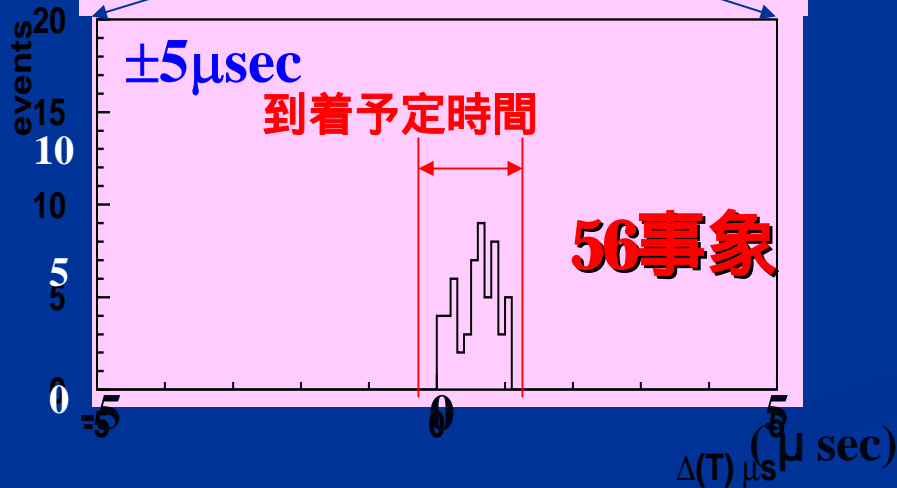
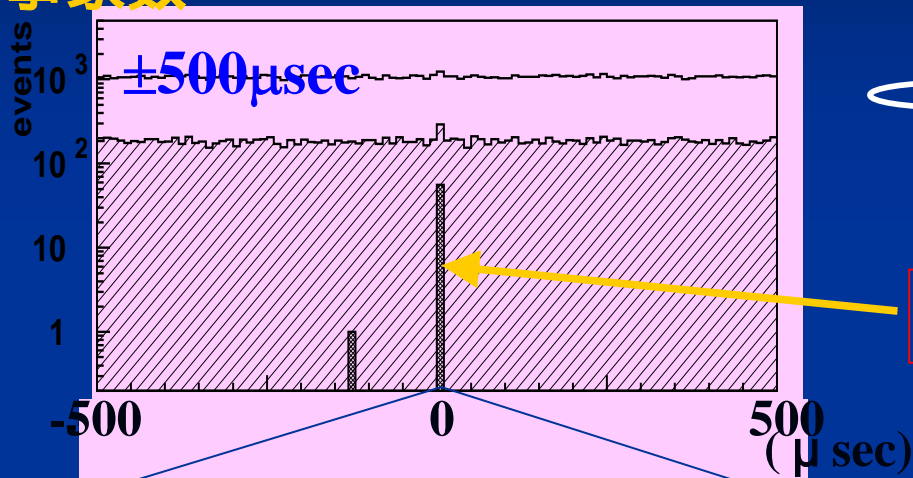
前置ニュートリノ検出器



スーパーカミオカンデでの人工ニュートリノ観測

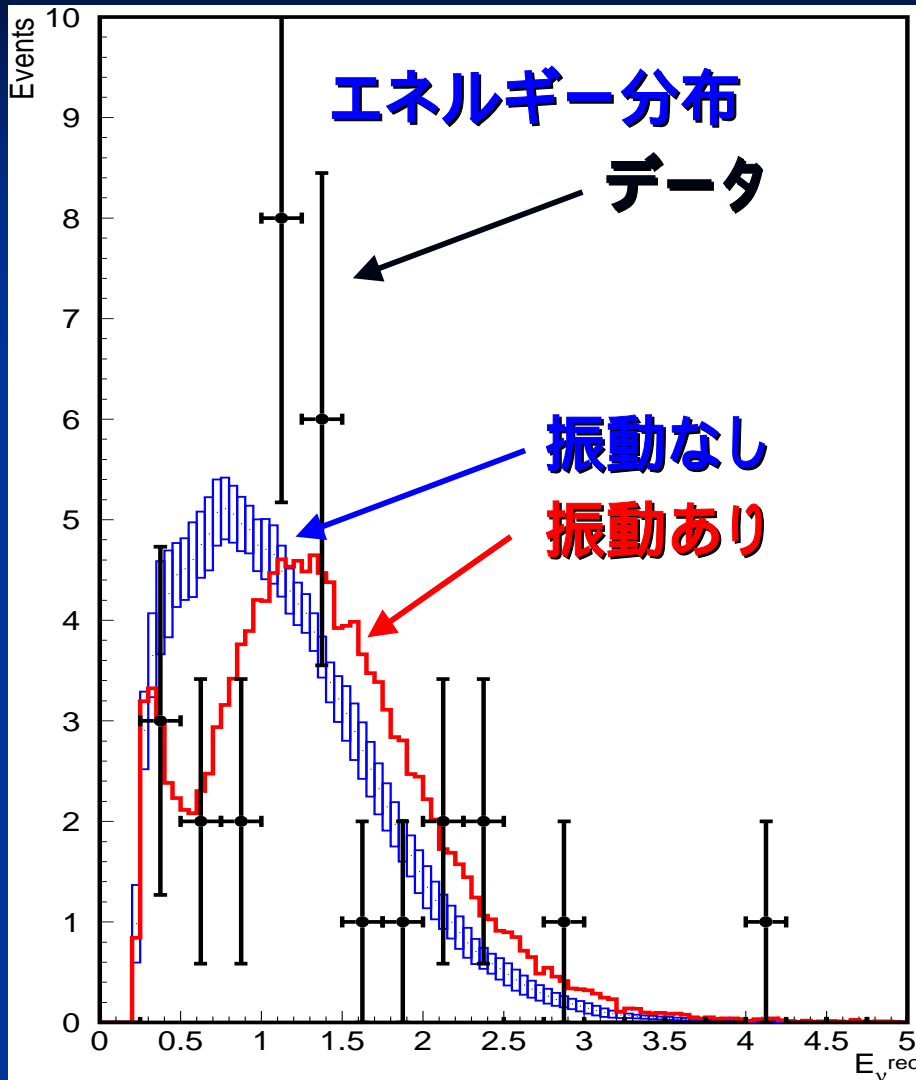
事象数

FC



カット後

K2K実験解析結果



$$(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) \\ = (1.0, 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$$

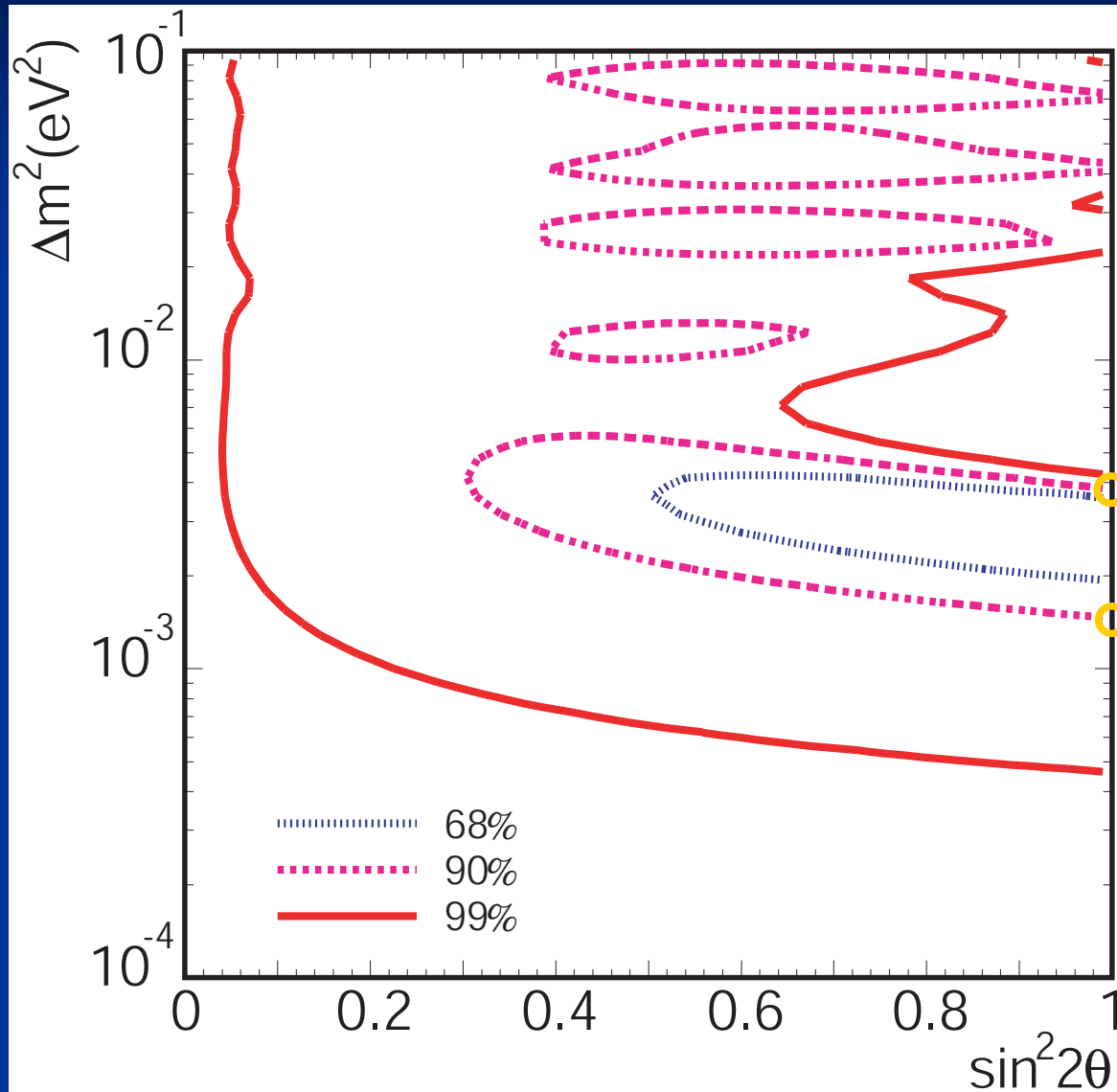
観測値56

予想値: 80(振動なし)
54(振動あり)

ニュートリノエネルギー (GeV)

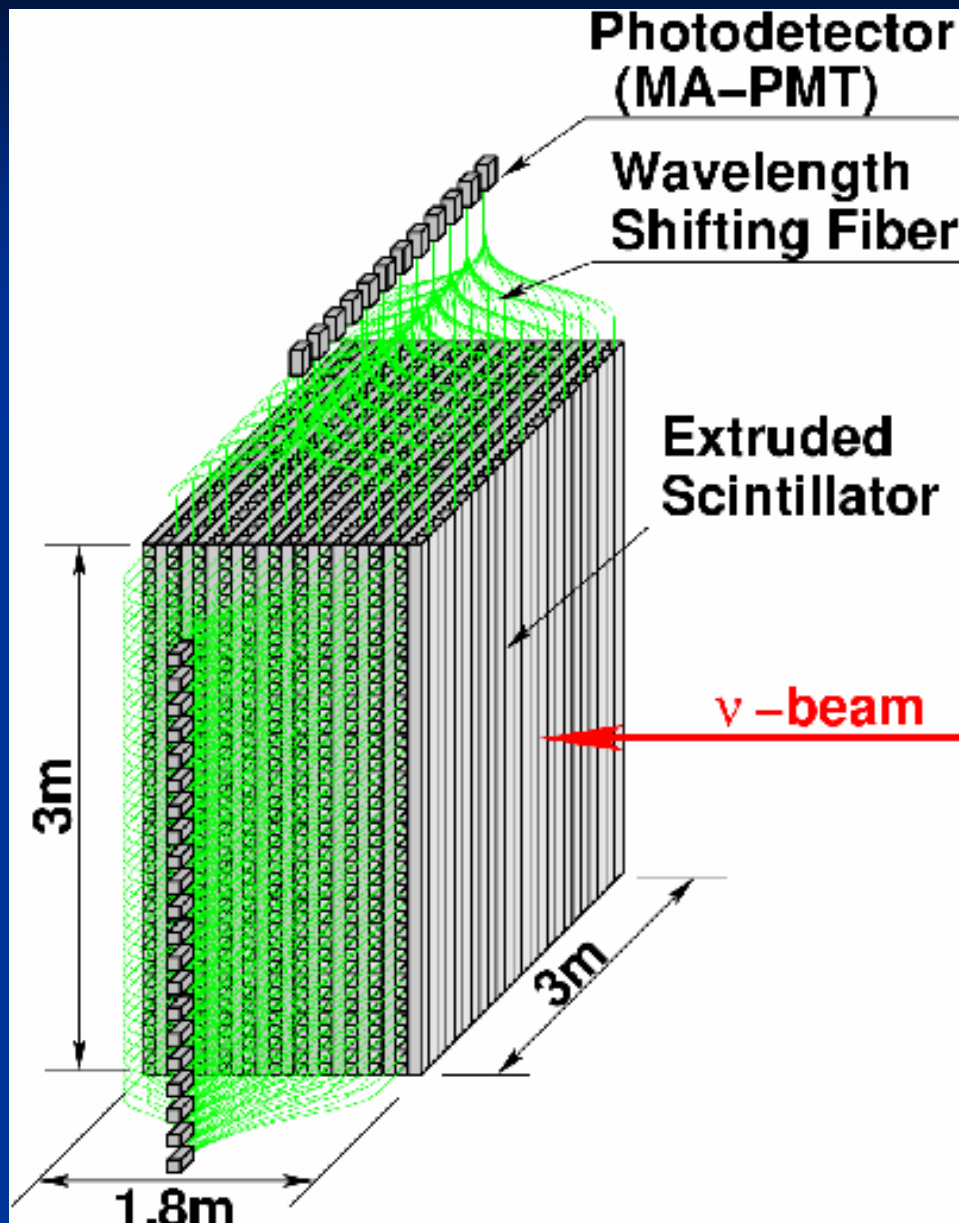
許されるパラメータ領域

(実験は約半分終了)



$\Delta m^2 =$
 $1.5 \sim 3.9 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
@ $\sin^2 2\theta = 1$
@ 90% CL

K2K実験: 新型ニュートリノ前置検出器 (京都、KEK)



2003年 ~ 2005年まで

J-PARC: 大強度陽子加速器

Construction
2001 ~ 2006 (approved)

ν beam-line
under budget request

Transport line
(Super-cond. Mag.)

50GeV PS

3GeV PS

400MeV LINAC

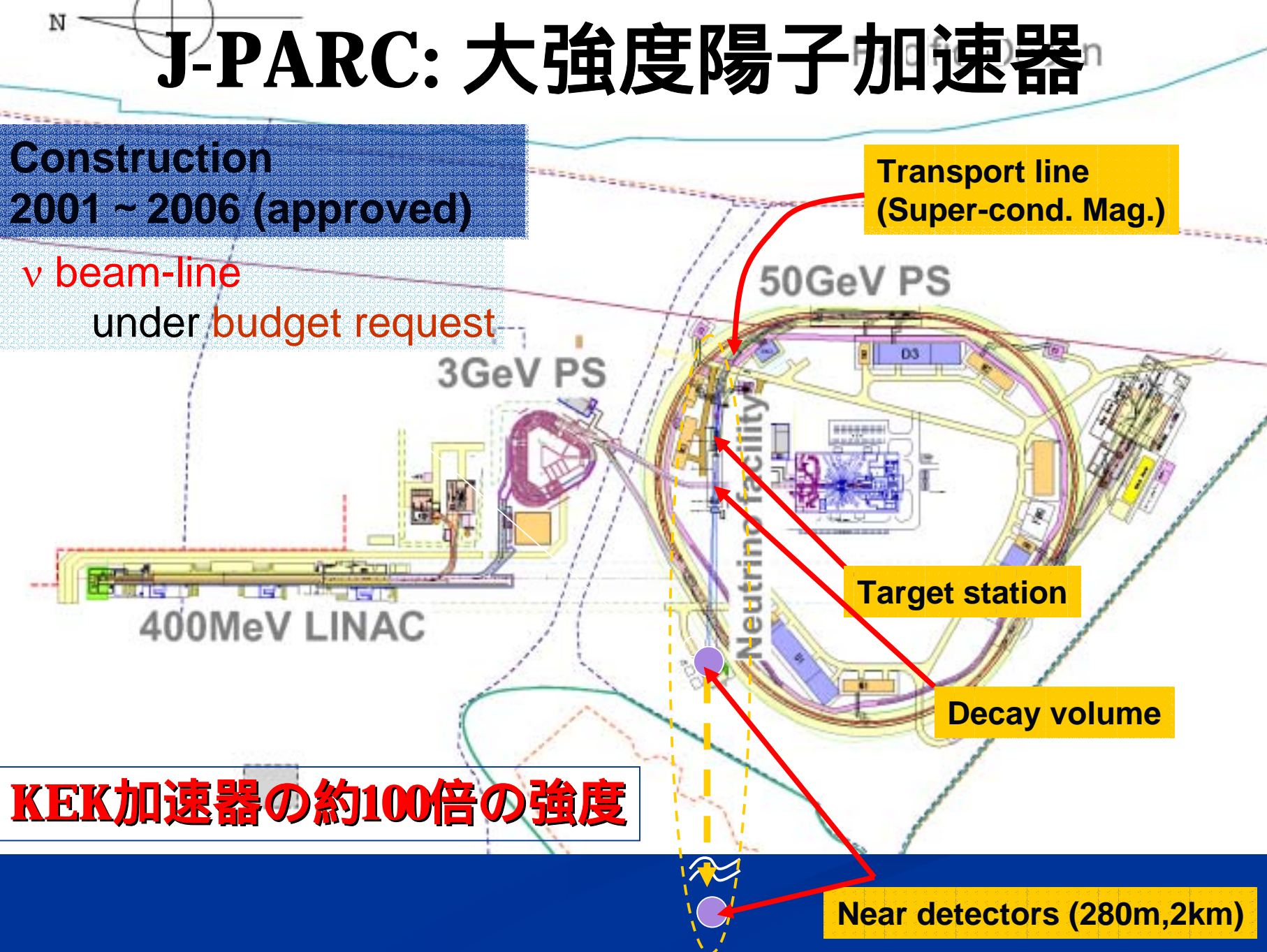
Target station

Decay volume

Neutrino facility

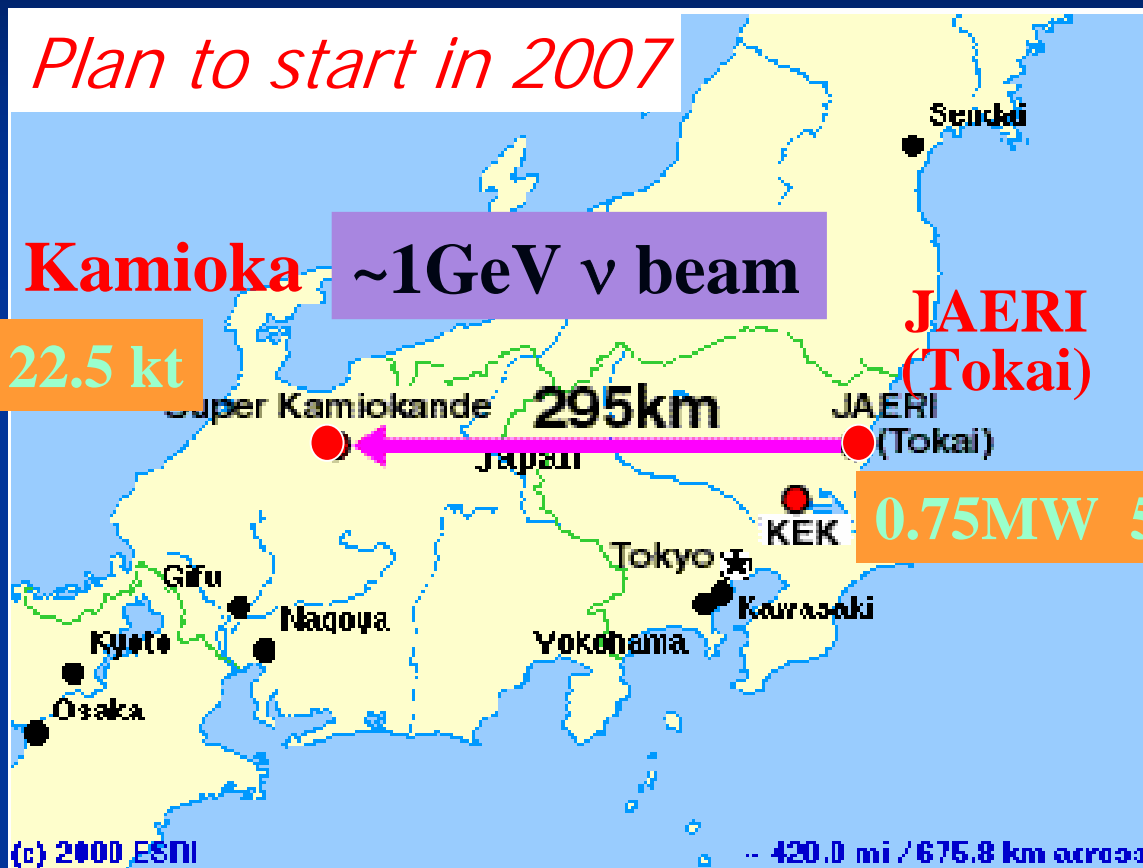
KEK加速器の約100倍の強度

Near detectors (280m, 2km)



JHF-Kamioka ニュートリノ実験

(hep-ex/0106019)



K2K実験の**100倍**の精度。

次世代高感度・高精度ニュートリノ実験(2007年開始予定)

5. まとめ

■ 参考文献

- 長島順清 著、「高エネルギー物理学の発展」、朝倉書房
- 中村 健蔵 著、「ニュートリノで探る宇宙」、培風館(New Cosmos Series)
 - 戸塚洋二 著、「素粒子物理」、岩波書店
 - 渡邊 靖志 著、「素粒子物理入門」、培風館

■ 参考Webページ

- http://ccwww.kek.jp/pdg/cpep/adventure_home.html
- <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/rccn/index.html>
- http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index_j.html
- <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/K2K/>
- <http://neutrino.kek.jp>