

平成15年12月2日(火)
「現代物理学」

ニュートリノ振動、 粒子・反粒子対称性の破れ

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

中家 剛（高エネルギーグループ）

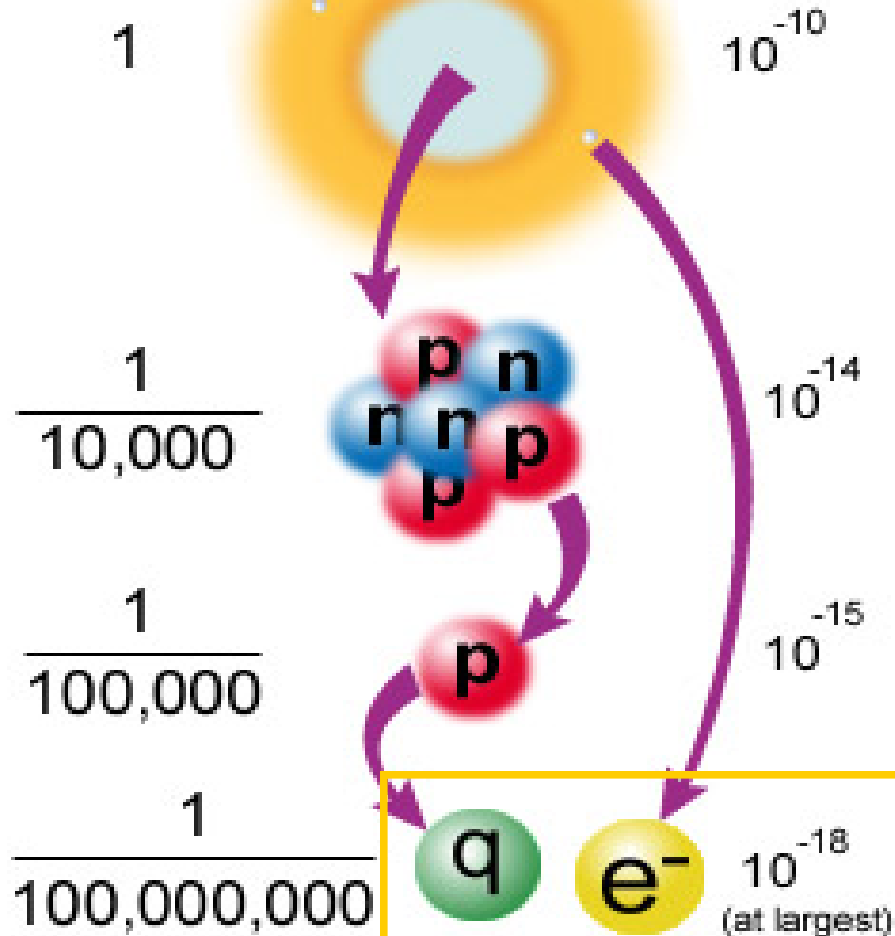
<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/~nakaya/>

1.素粒子物理学紹介

■素粒子？



size in atoms and in meters



原子

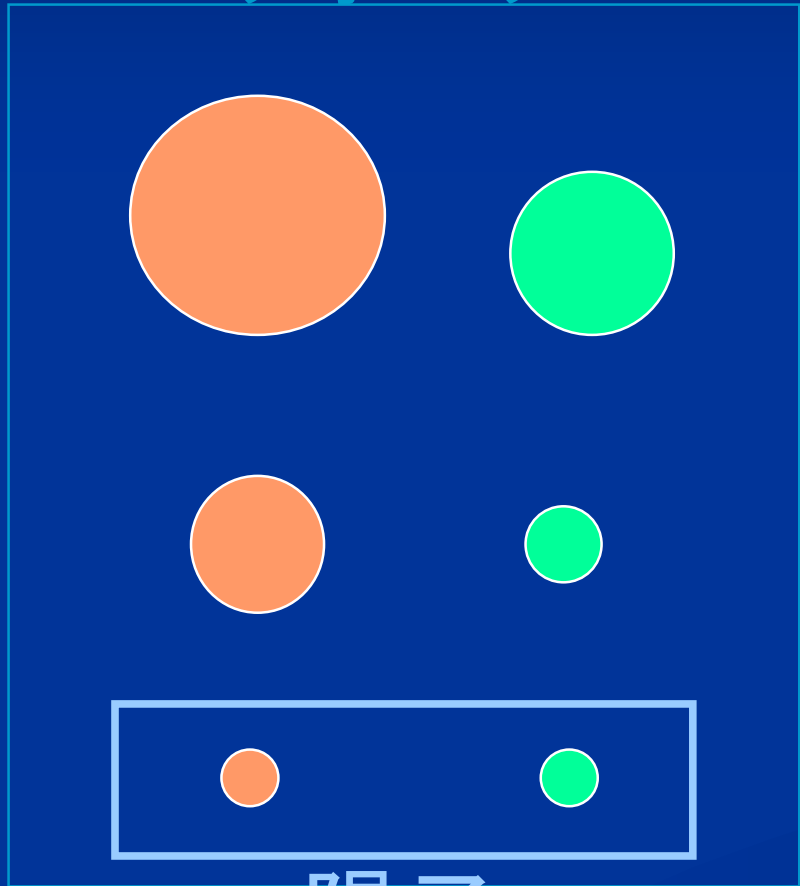
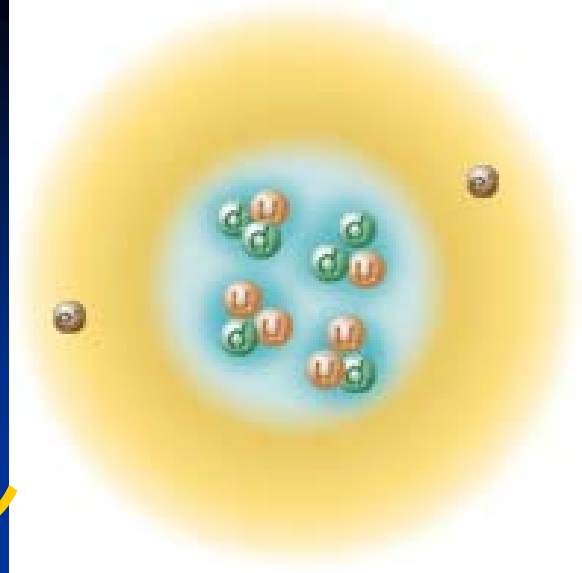
原子核

核子

素粒子

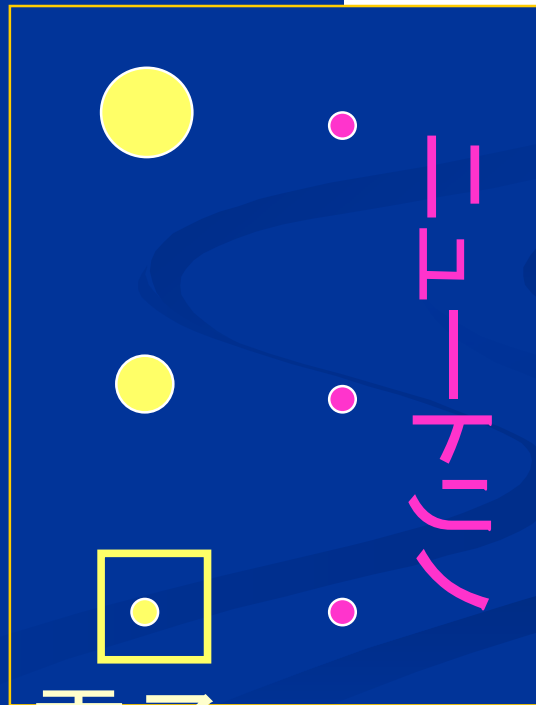
素粒子(クォークとレプトン)

クォーク $\times 2$ (反粒子)



陽子

レプトン



電子

ニュートリノ

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。

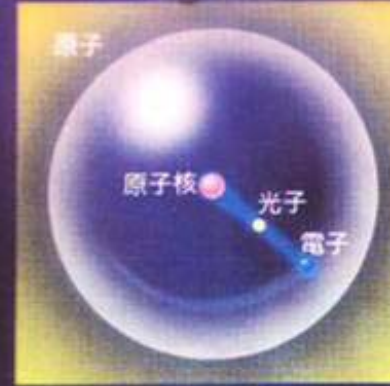
弱い力



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。

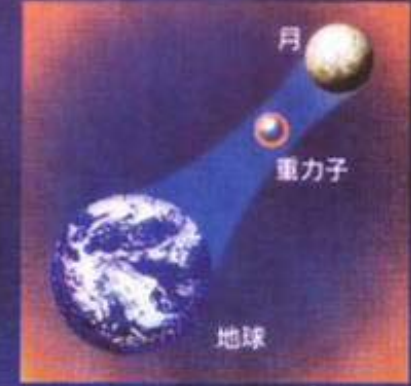
電磁気力



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

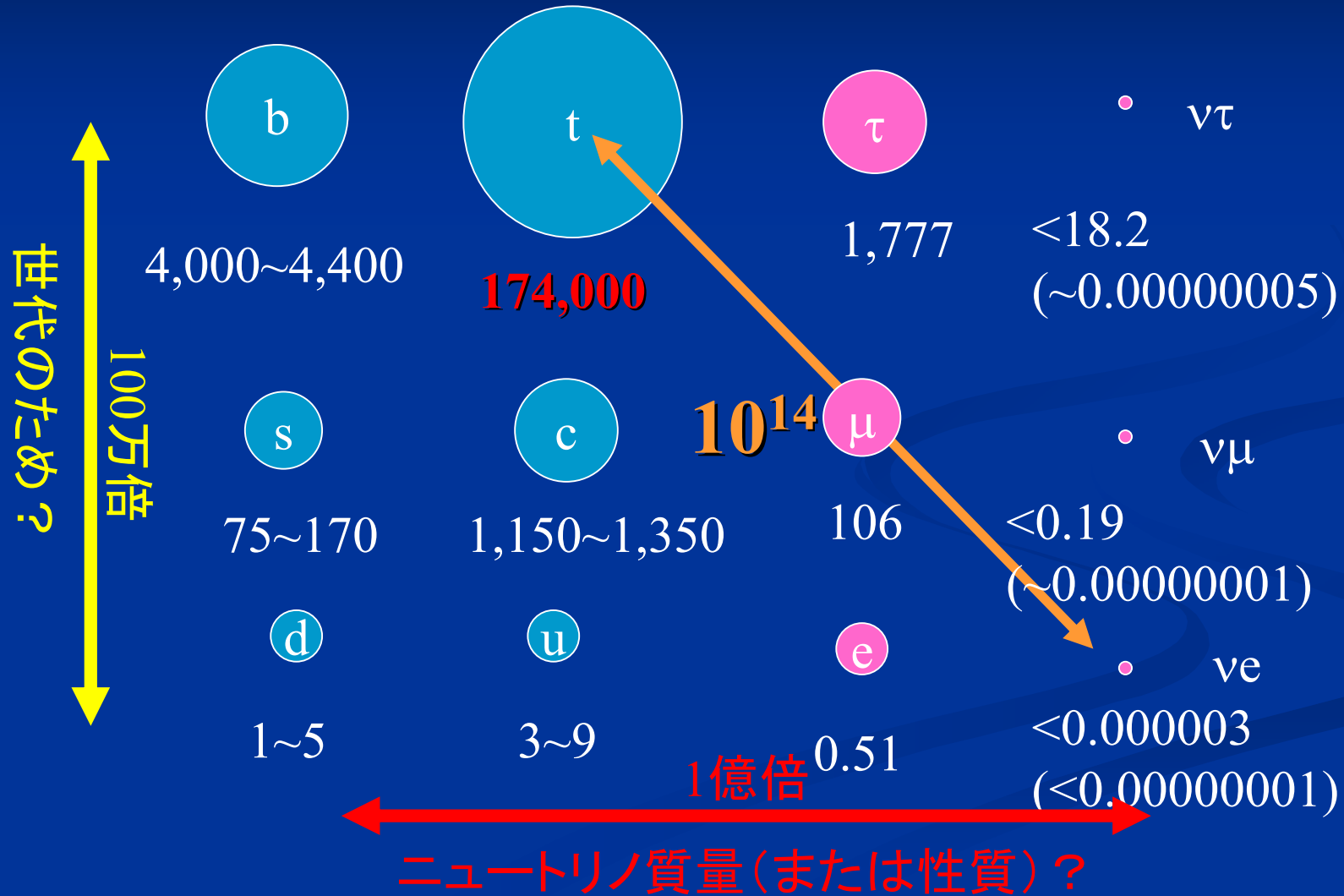
電磁力

強い力

素粒子の質量(MeV): $m_{\Psi\bar{\Psi}}$

クォーク

レプトン



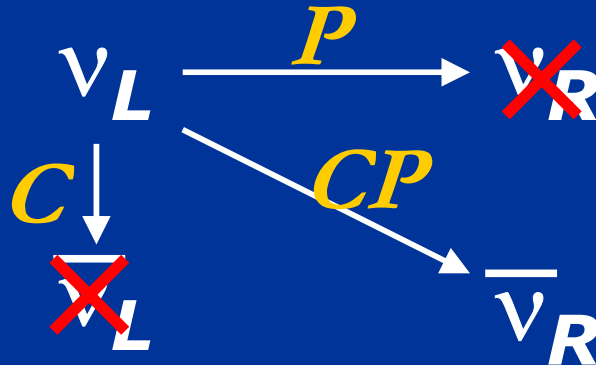
粒子と反粒子

■ 反粒子

- 電荷が逆 (電子(-) \leftrightarrow 陽電子(+))
- 質量と寿命は同じ(CPT定理)

■ C(電荷)P(パリティ)対称性

- 弱い相互作用ではC、P対称性はそれぞれ最大に破れているが、CP対称性はほぼ保存している。

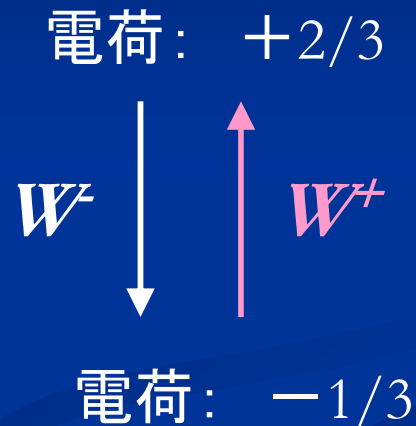
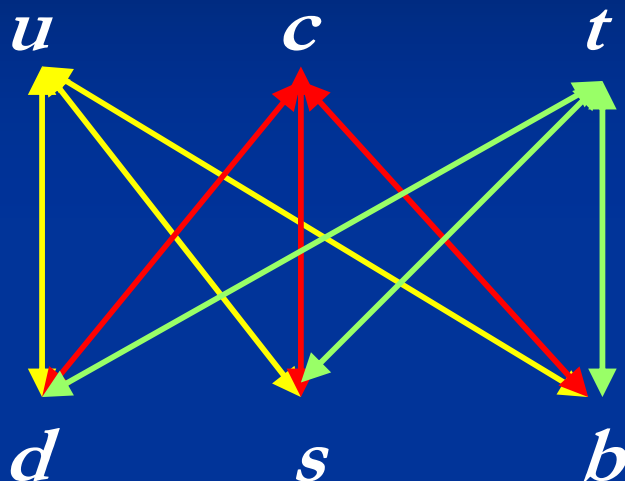


L (left hand、左巻き)
粒子のSpinがその進行方向を向いている。

- **BUT**、CP対称性もわずかながら破れている。

小林・益川理論 (~~CP~~の予言、トップクォークの予言)

小林・益川理論



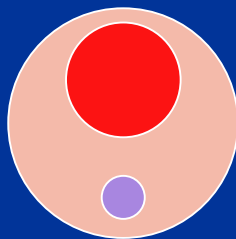
各クォーク間のつながりの係数：小林・益川行列

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

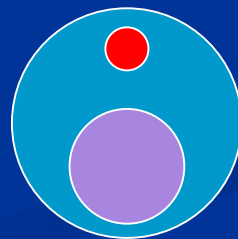
ニュートリノ

- 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 β 崩壊

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

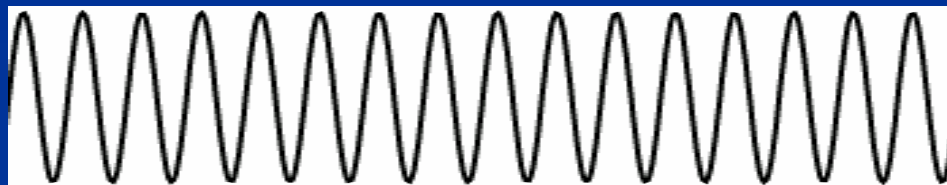
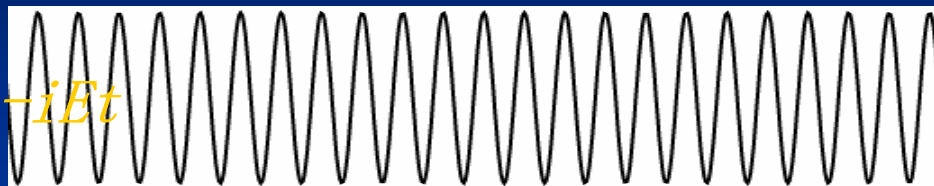


タウニュートリノ

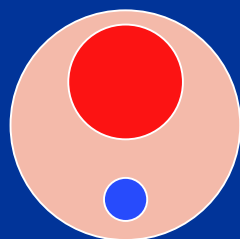
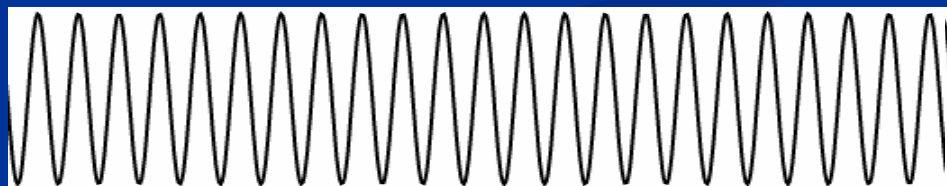
● と ● の質量が 違えば波長も異なるのである

質量の固有状態： ^{波の伝播} それぞれの波長で振動する 時間 →

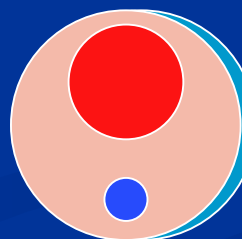
$$\psi(t) = e^{-iEt}$$



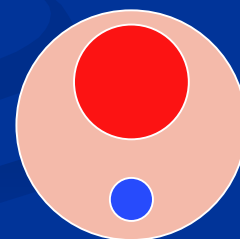
合成した波
(うなり)



ミューニュートリノ



タウニュートリノ



ミューニュートリノ

ニュートリノ振動

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

弱い相互作用の固有状態 \leftarrow 質量の固有状態
 ユニタリー行列(回転行列)

ニュートリノが2種類の場合

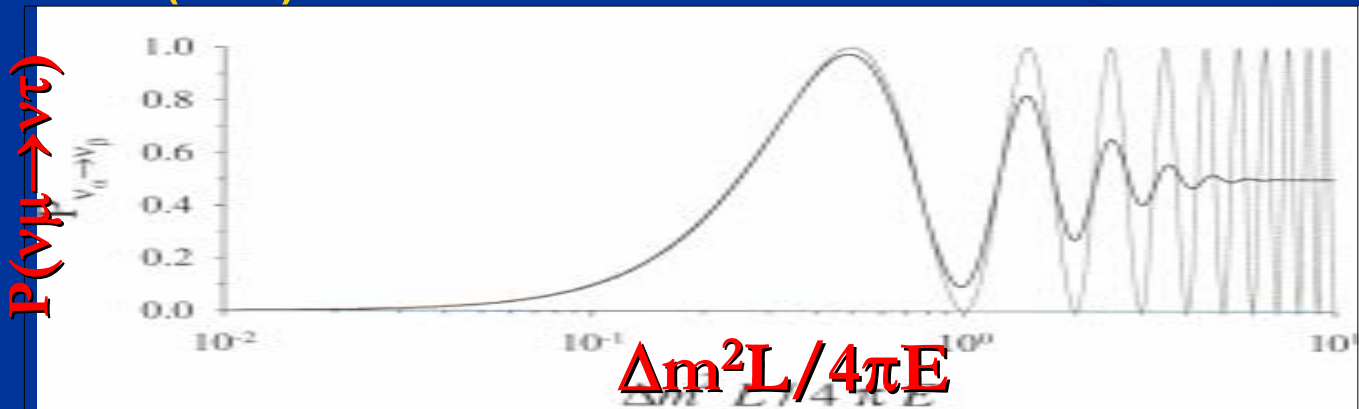
$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

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

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

L (km): 発生点からの距離

E (GeV): ニュートリノのエネルギー



2. 超新星ニュートリノ観測（特別編）

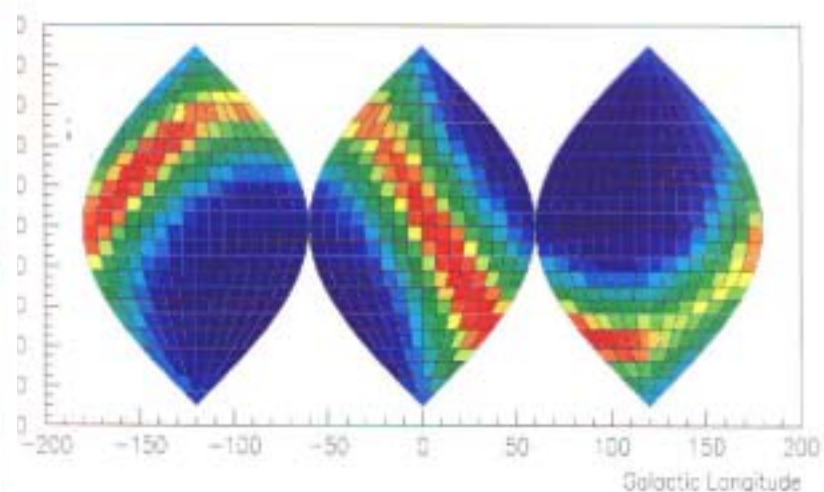
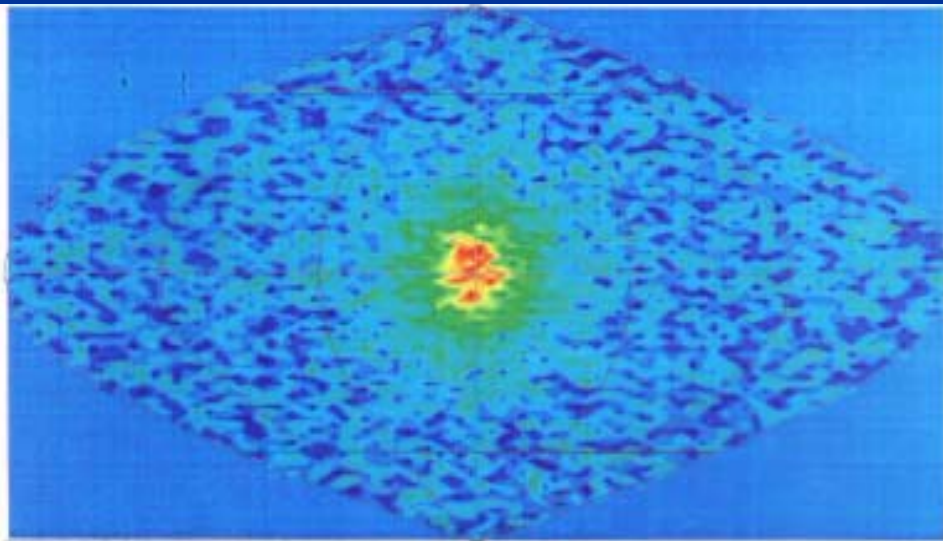
- 2002年ノーベル物理学賞
天体物理学、2つの新しい宇宙観測手法
 - 小柴 昌俊（ニュートリノ天文学）
 - 超新星ニュートリノの観測
 - Raymond Davis Jr（ニュートリノ天文学）
 - 太陽ニュートリノ観測
 - Riccardo Giacconi（X線天文学）
 - 宇宙X線観測



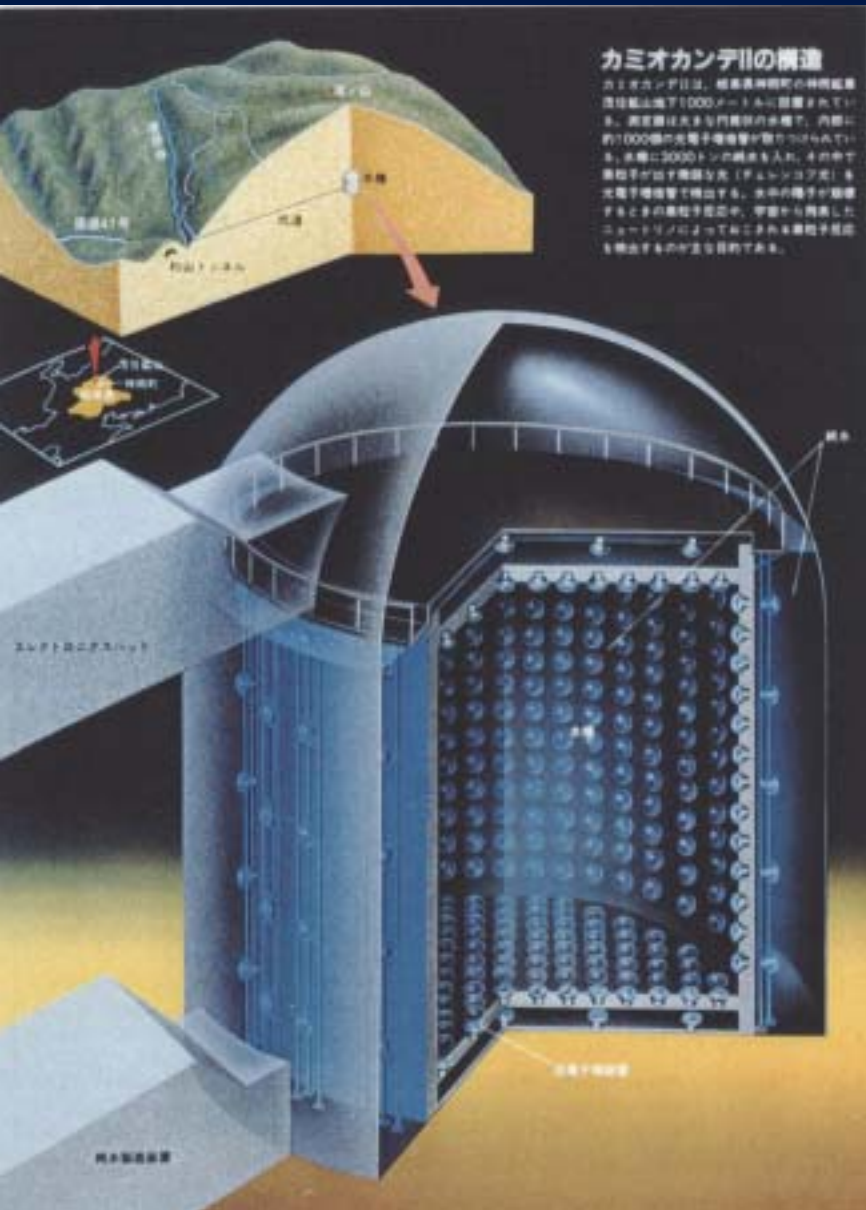
ニュートリノ天文学

- 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



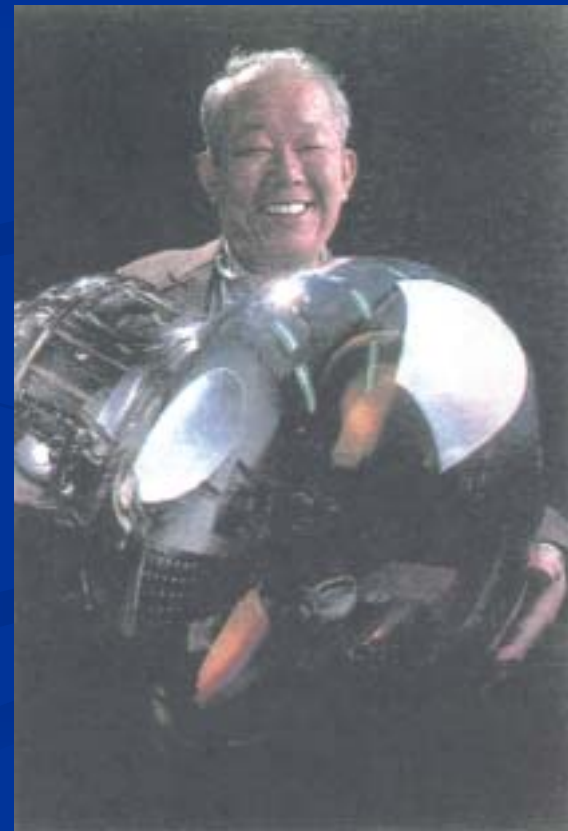
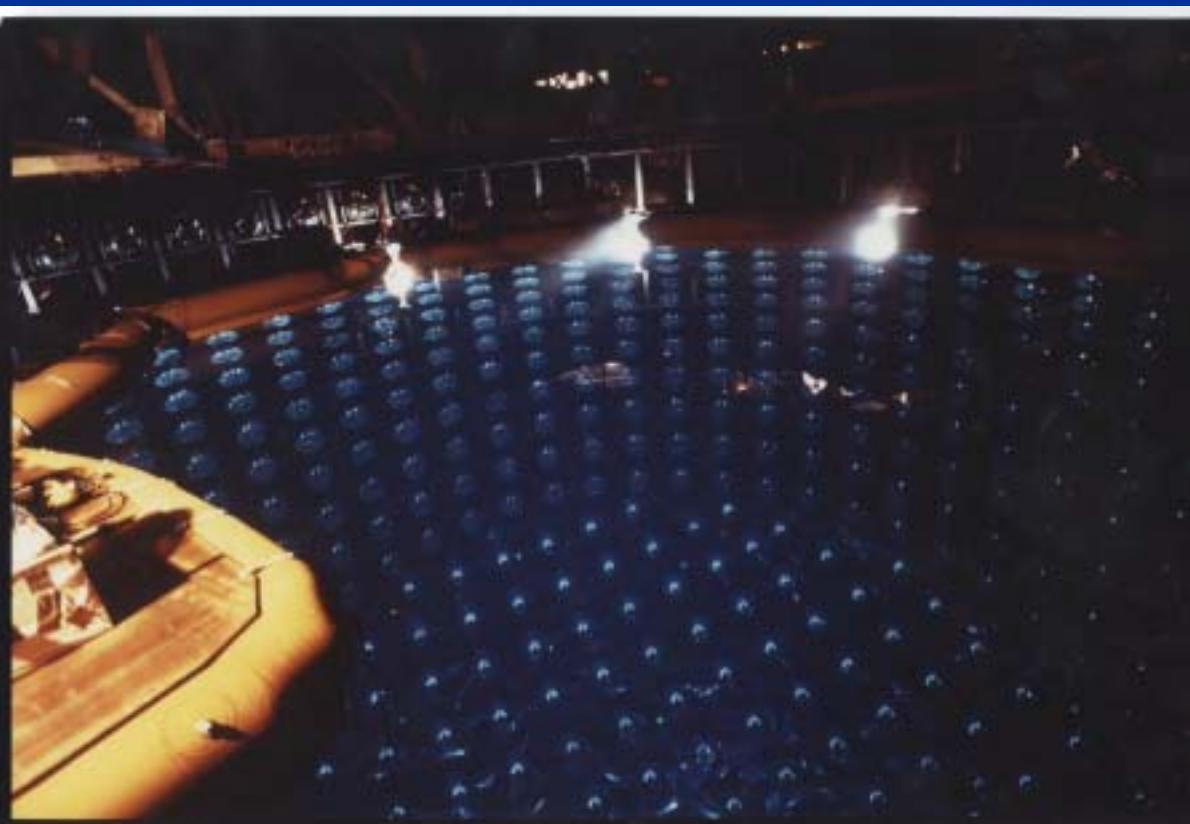
岐阜県神岡町神岡鉱山
地下1000メートルの場所に
3000トン水タンクを建設

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)

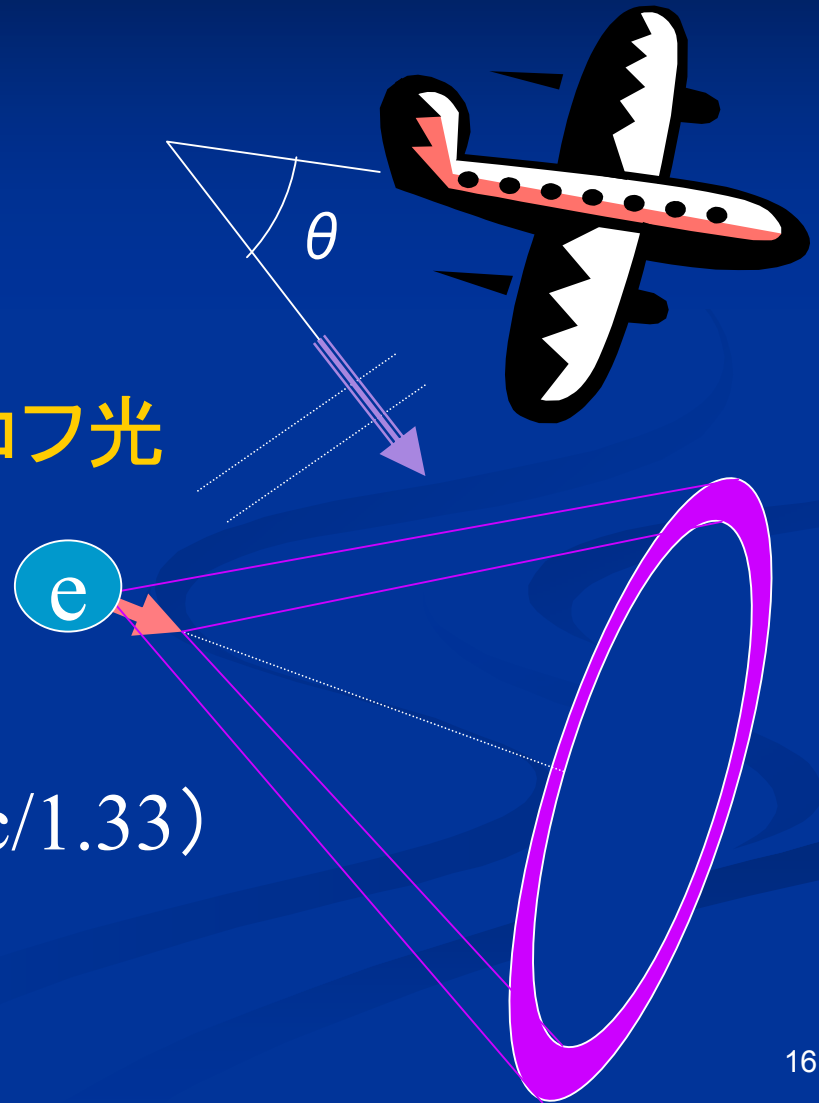


カミオカンデの動作原理

■ 超音速 → 衝撃波

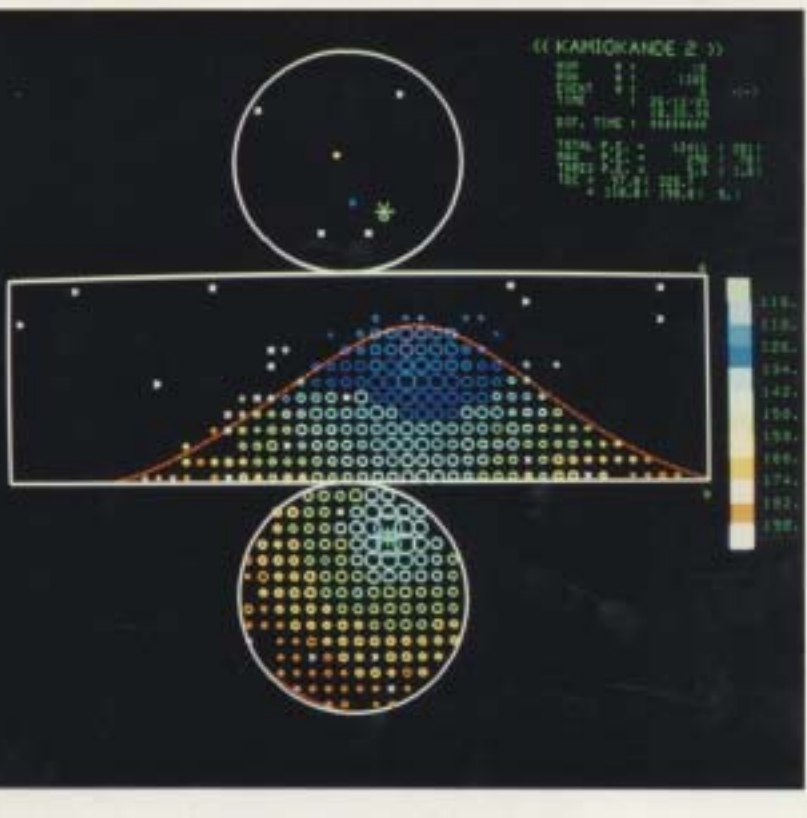
■ 超光速 → チェレンコフ光

(水中の光速 = $c/n = c/1.33$)

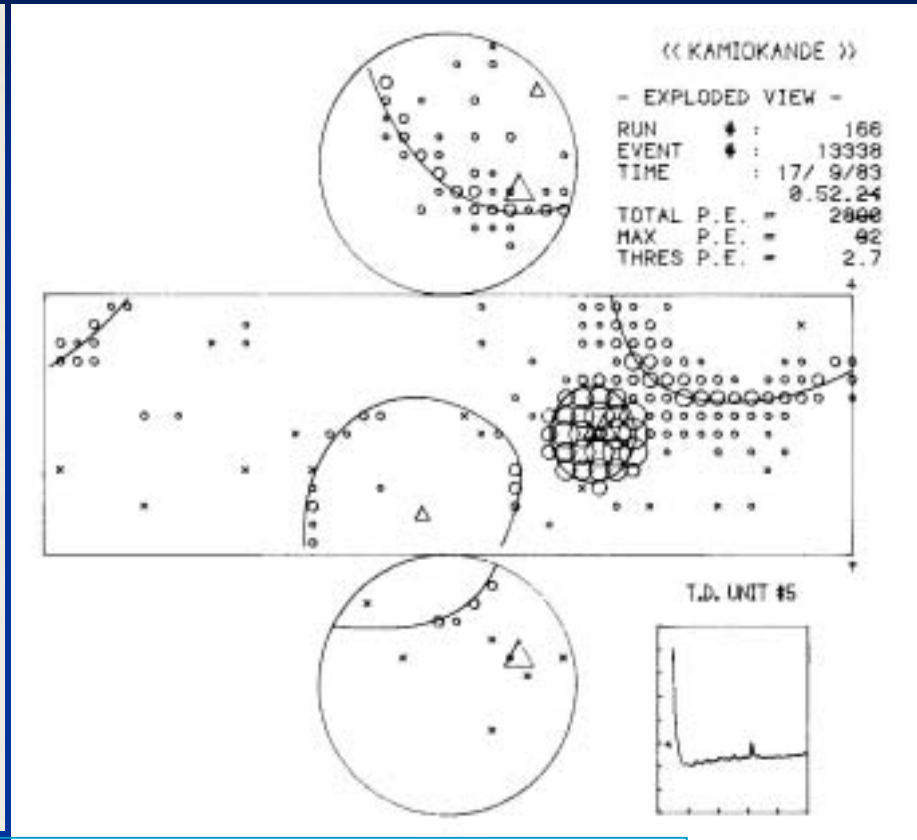


カミオカンデ観測開始(1983年)

宇宙線ミュオンの例



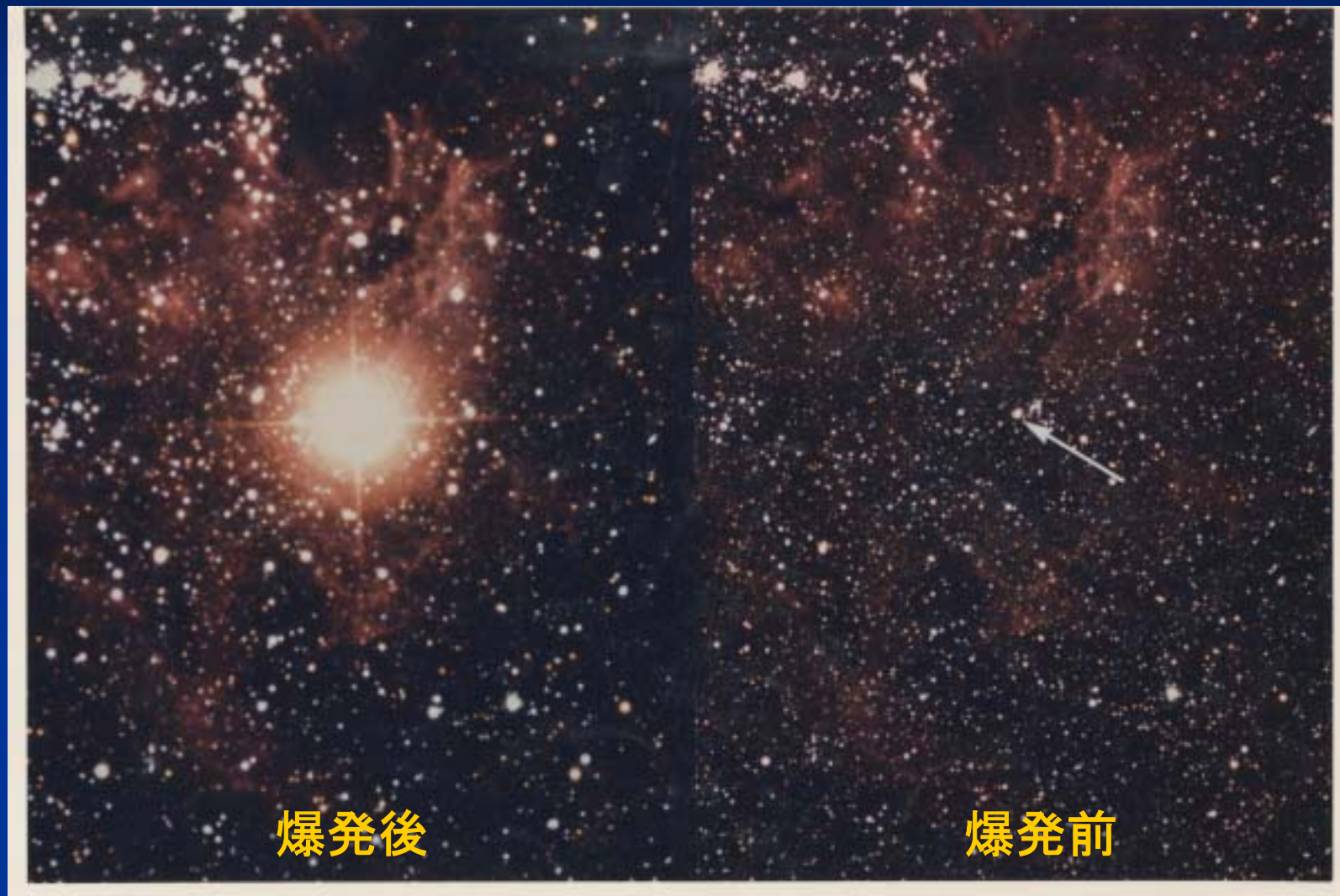
大気ニュートリノ現象の例



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)



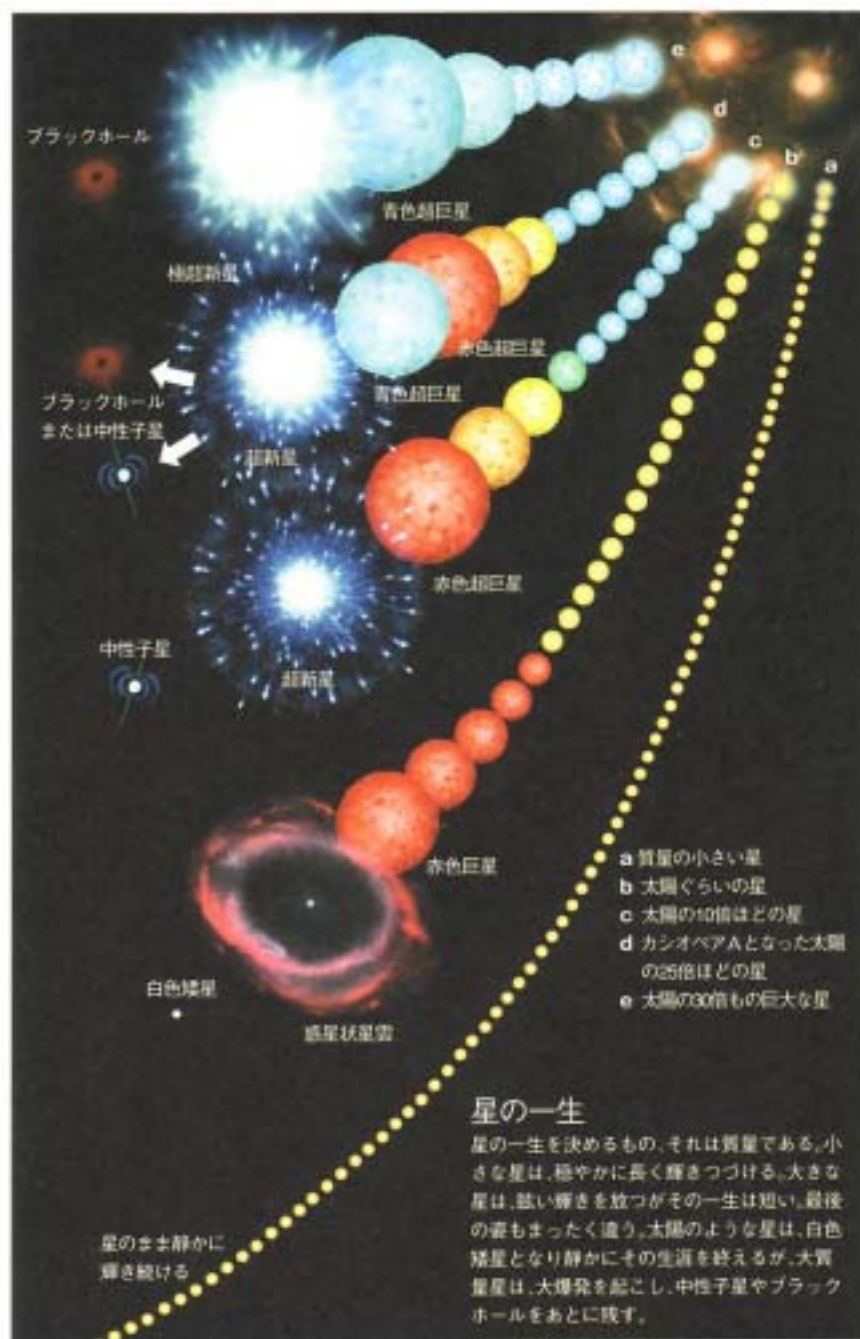
超新星爆発

■ 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10km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。

星の一生

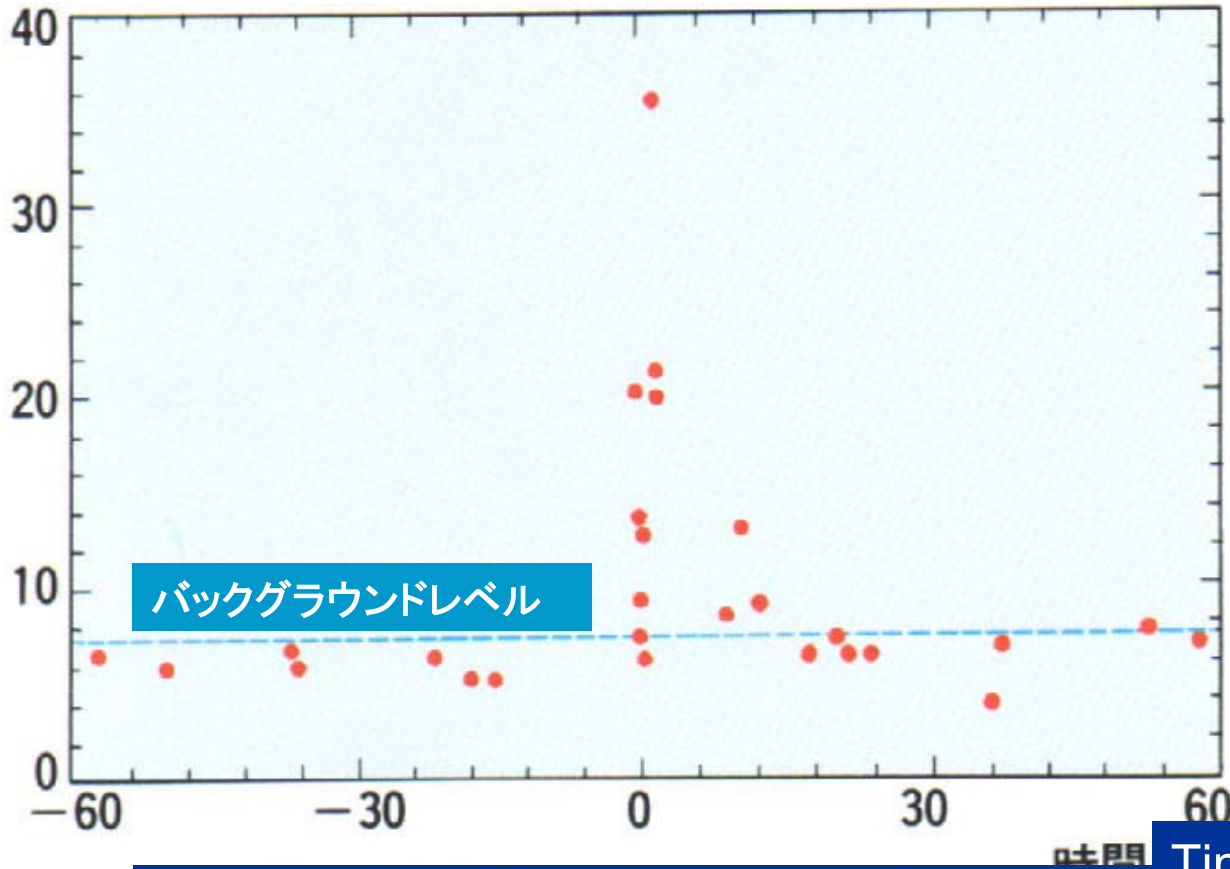
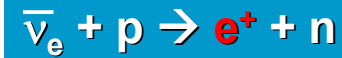


星の一生

星の一生を決めるもの、それは質量である。小さな星は、穏やかに長く輝きつづける。大きな星は、眩い輝きを放つがその一生は短い。最後の姿もまったく違う。太陽のような星は、白色矮星となり静かにその生涯を終えるが、大質量星は、大爆発を記こし、中性子星やブラックホールをおとに残す。

カミオカンデが捉えた超新星のデータ

Visible energy (MeV)



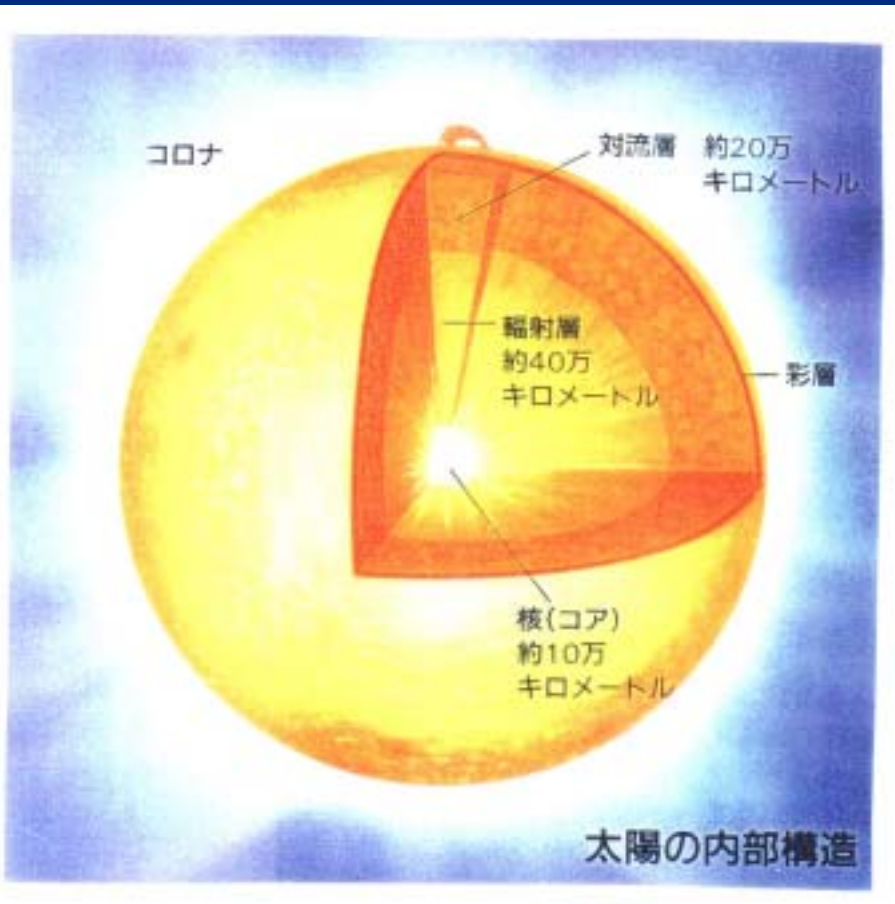
JT: 1987 Feb 23 16:35:35 (± 1 min)

UT: 7:35:35

時間 Time

太陽ニュートリノ

4個の水素 →

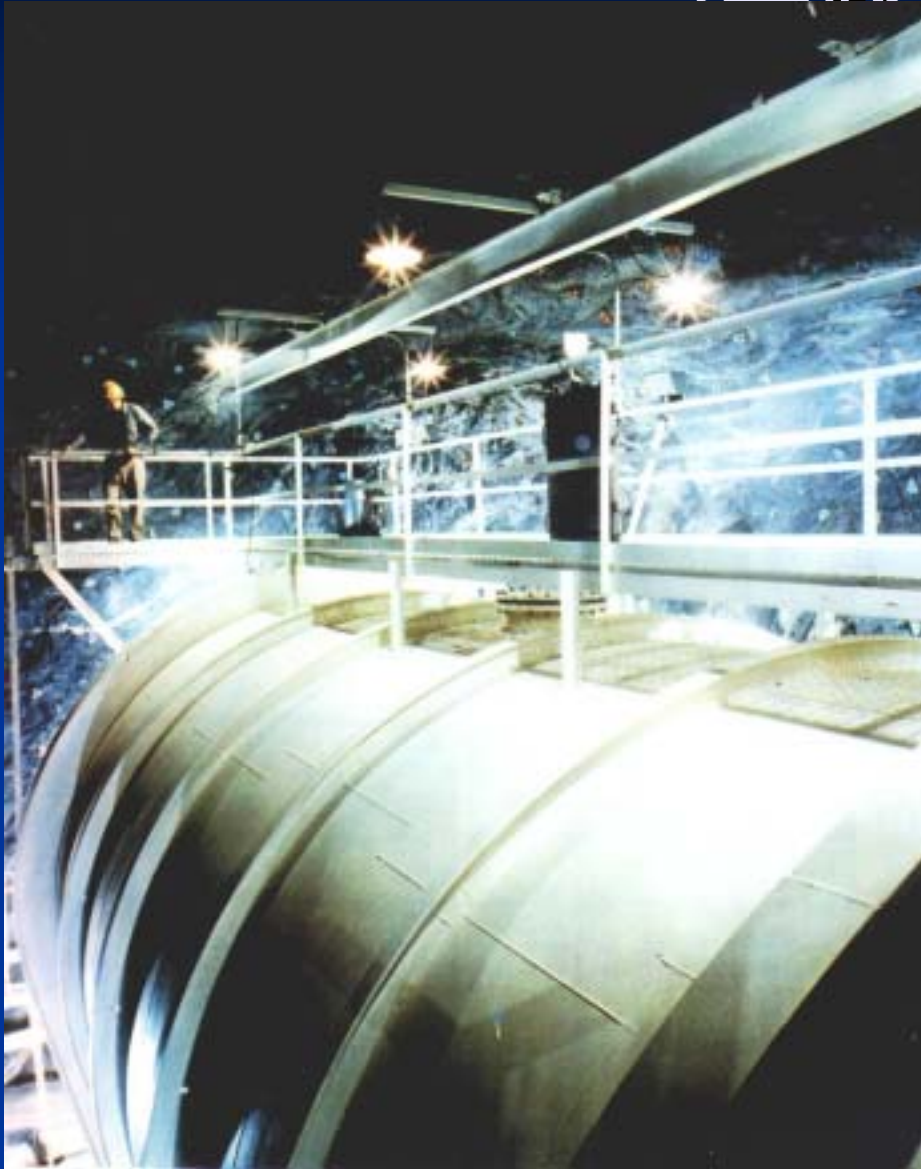


4He (ヘリウム)
+2個の e^+ (陽電子)
+2個の ν_e (電子ニュートリノ)



~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

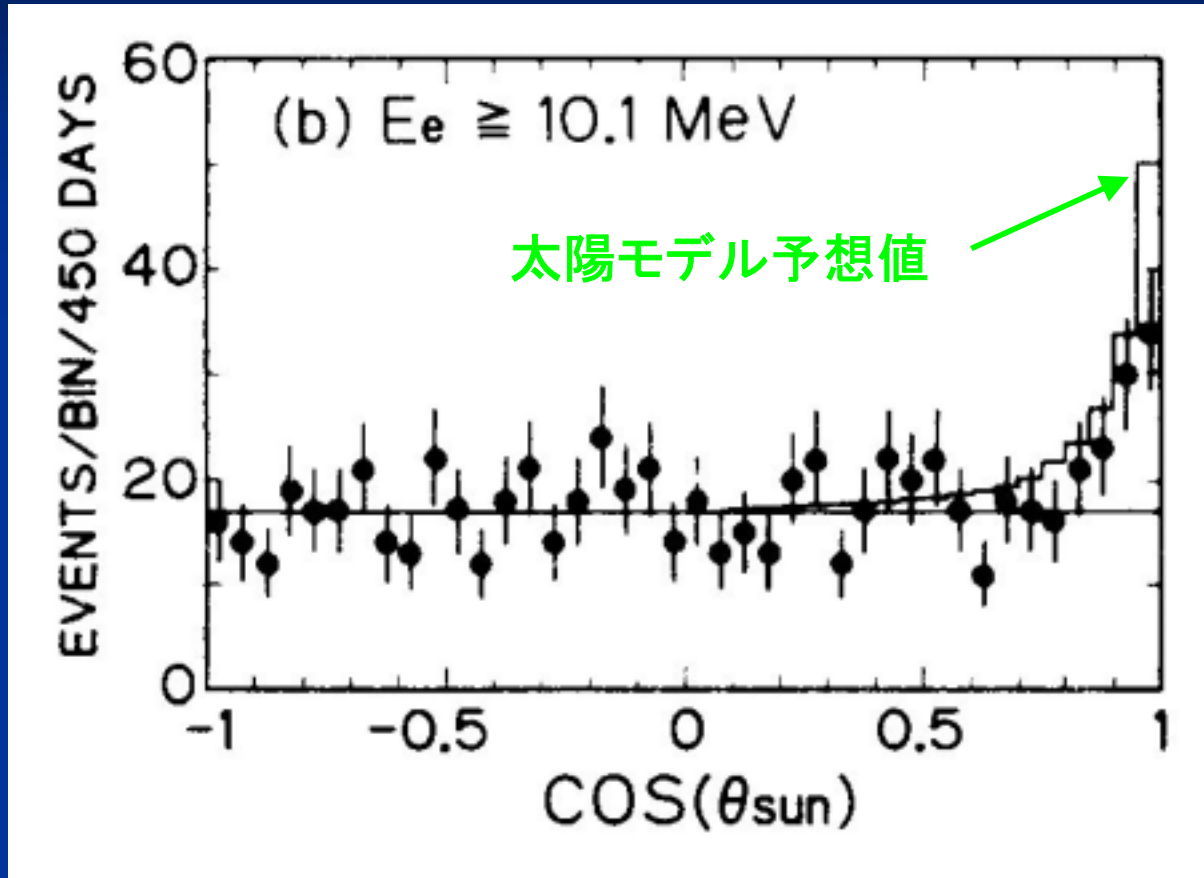
太陽ニュートリノ 

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. ニュートリノ振動実験

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

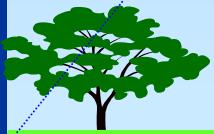
μ^\pm

e^\pm

ν_μ

ν_μ

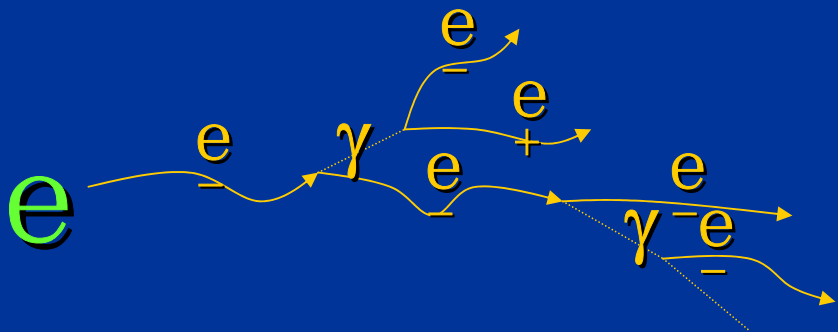
ν_e



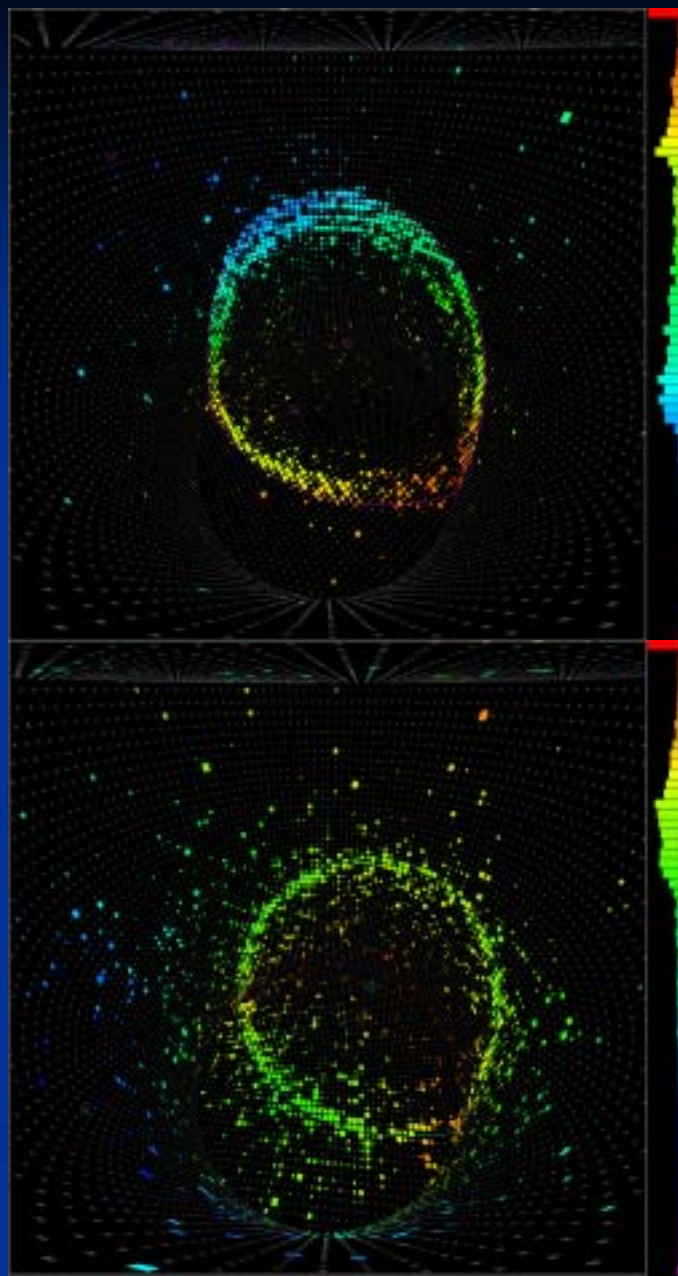
μ と e の識別



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

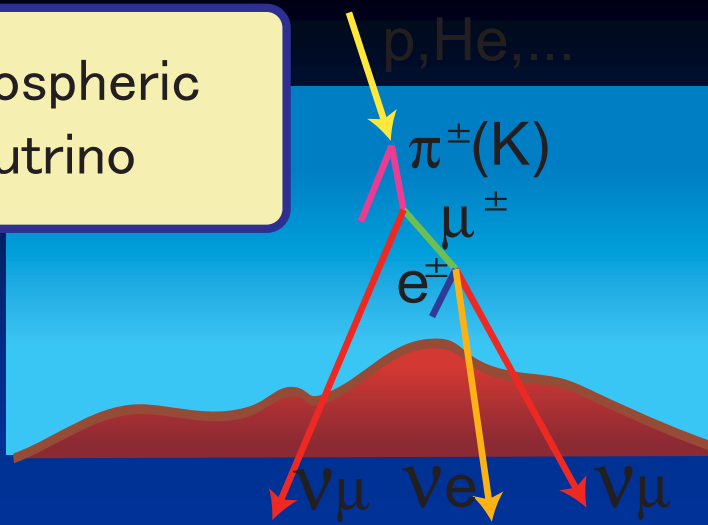
	データ	予想値
電子ニュートリノ	626	612.8
ミューニュートリノ	1312	1903.3

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。

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

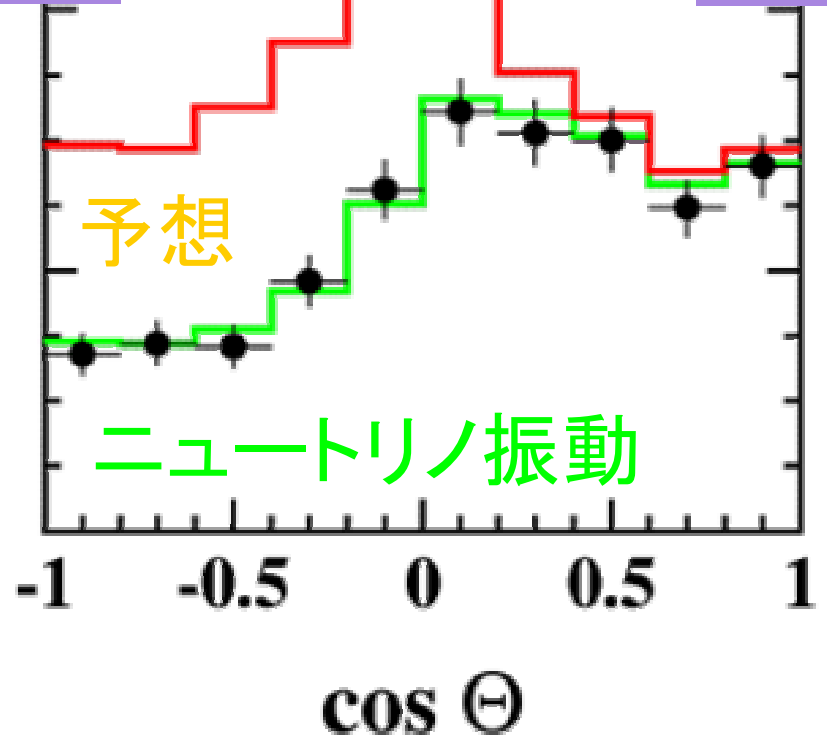
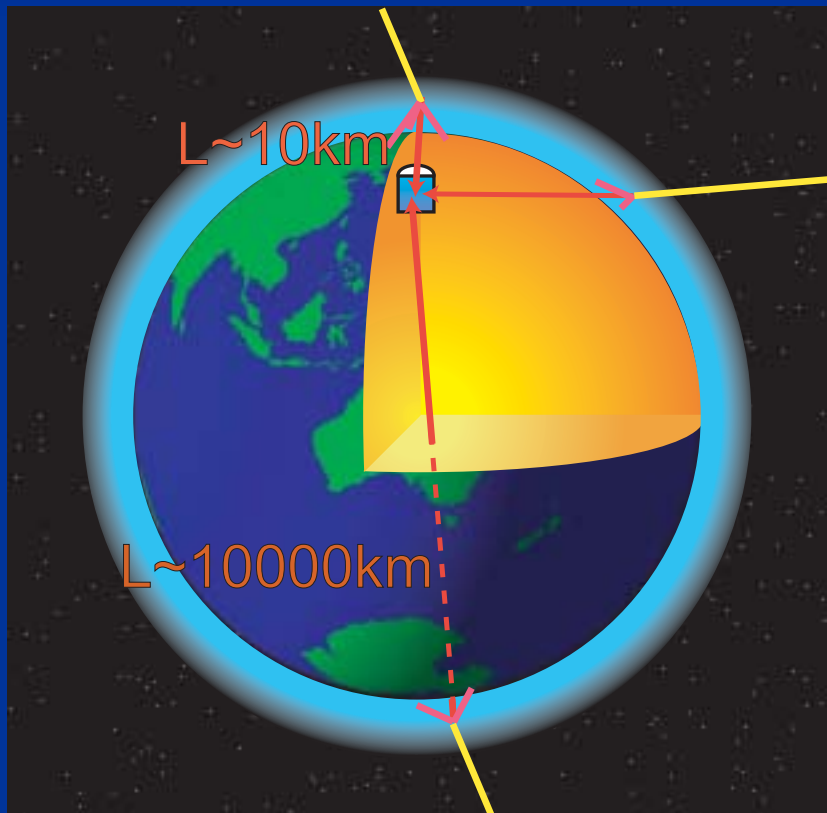
Atmospheric Neutrino



下から

Multi-GeV μ -like +

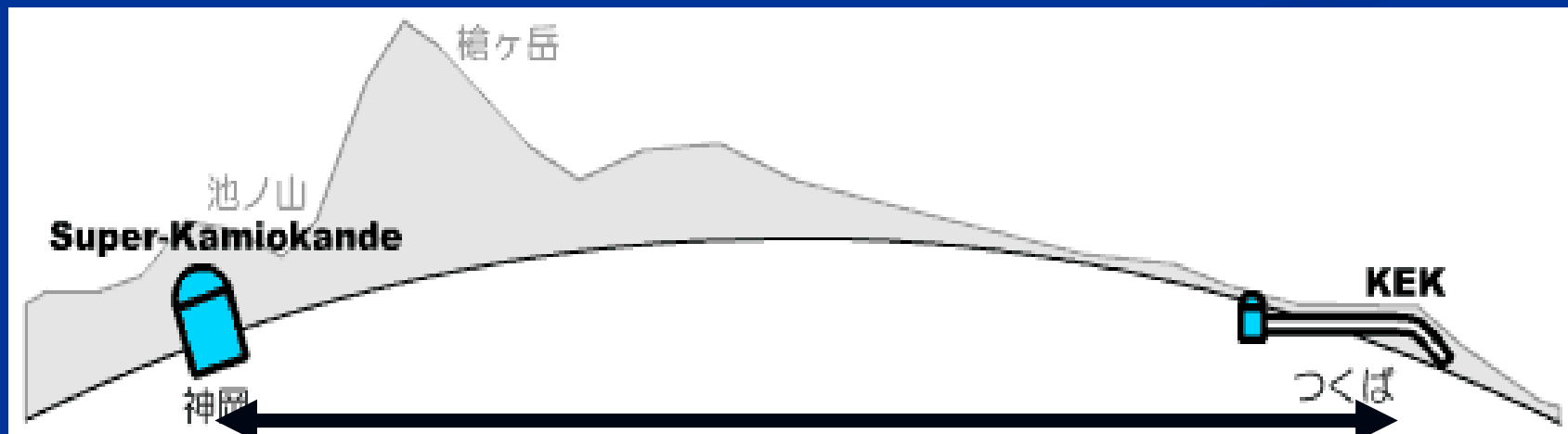
上から



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)

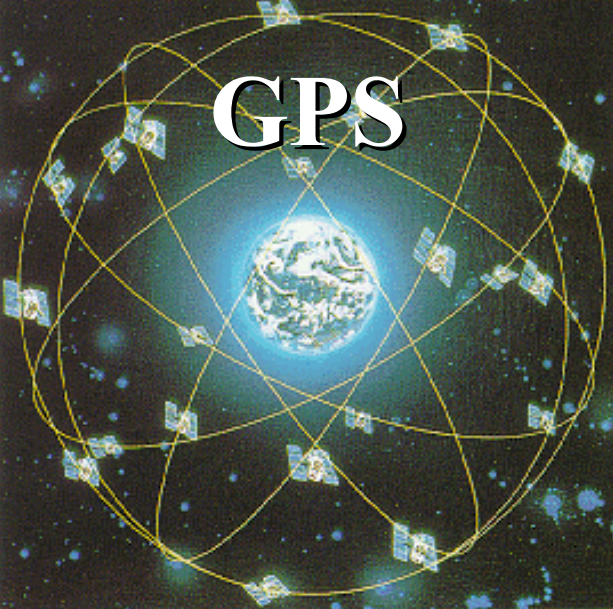
- つくばにある高エネルギー研究所でニュートリノを生成しスーパーカミオカンデへ



250km

0.001秒で到達

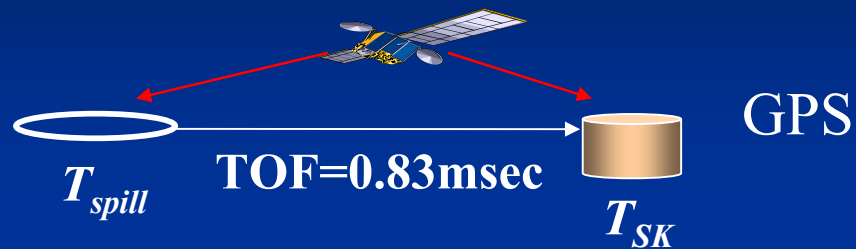
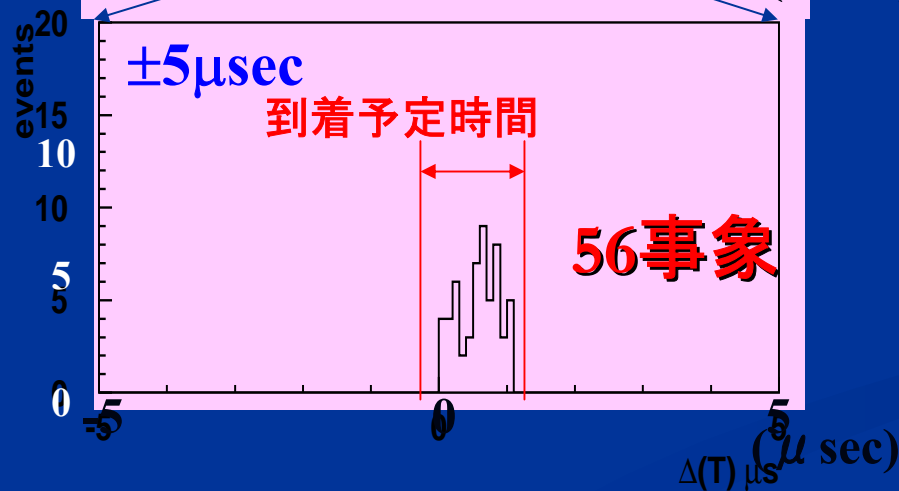
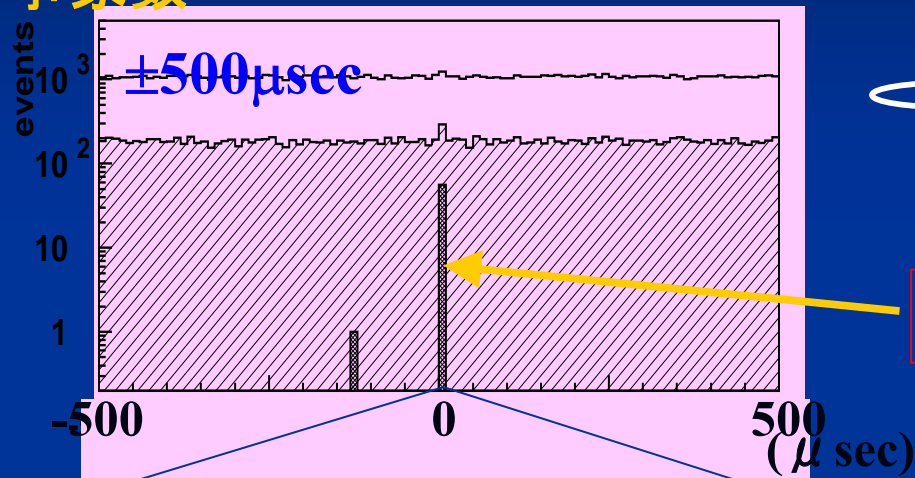
GPS



スーパーカミオカンデでの人工ニュートリノ観測

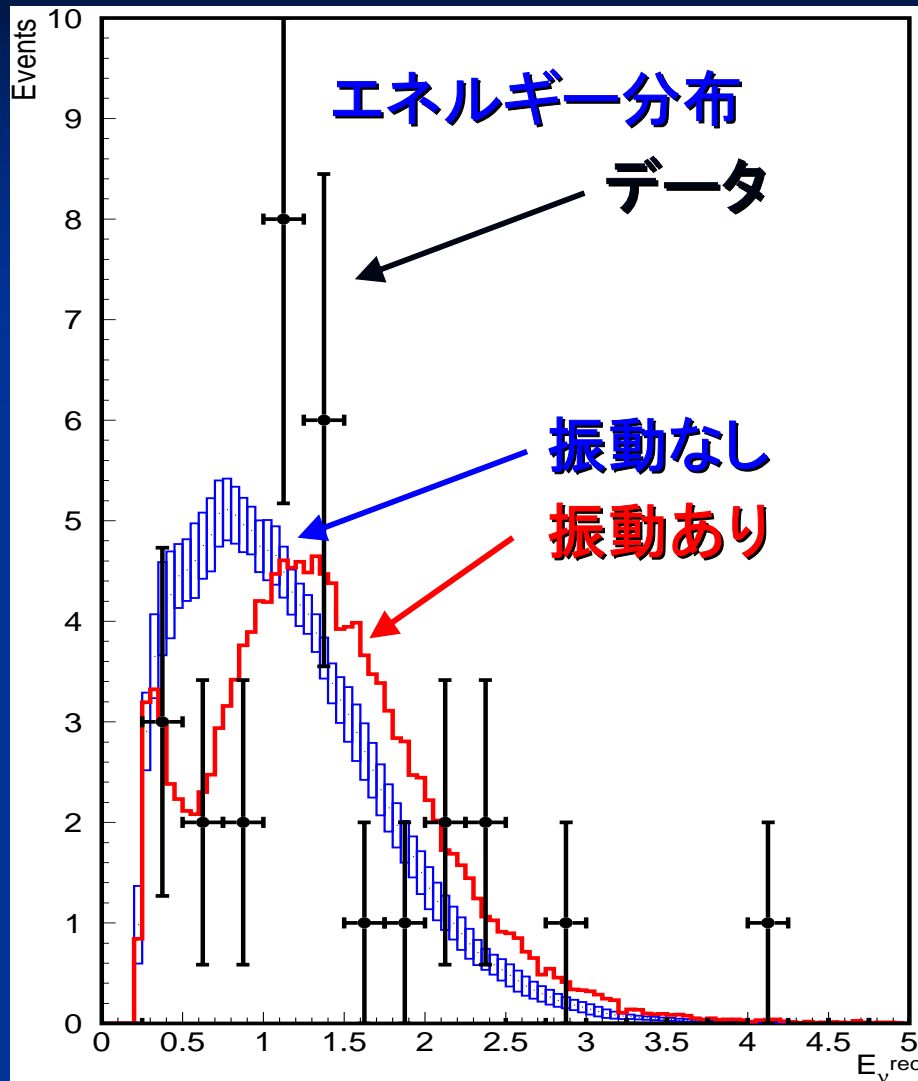
事象数

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

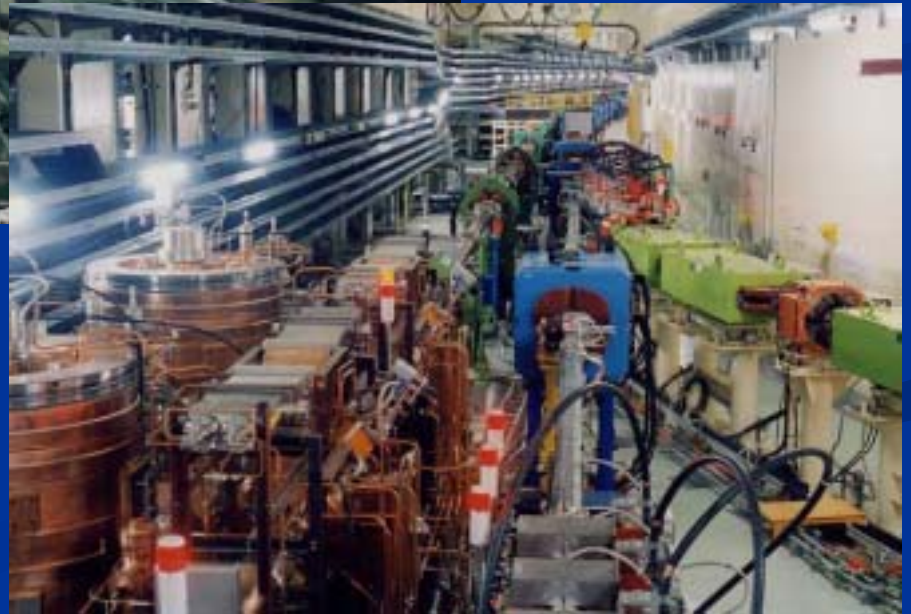
予想値: 80(振動なし)
54(振動あり)

ニュートリノエネルギー (GeV)

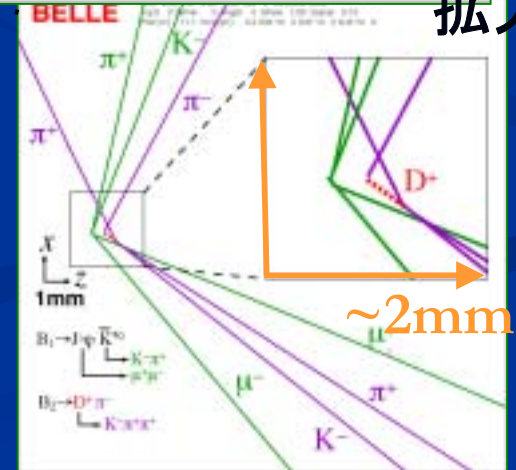
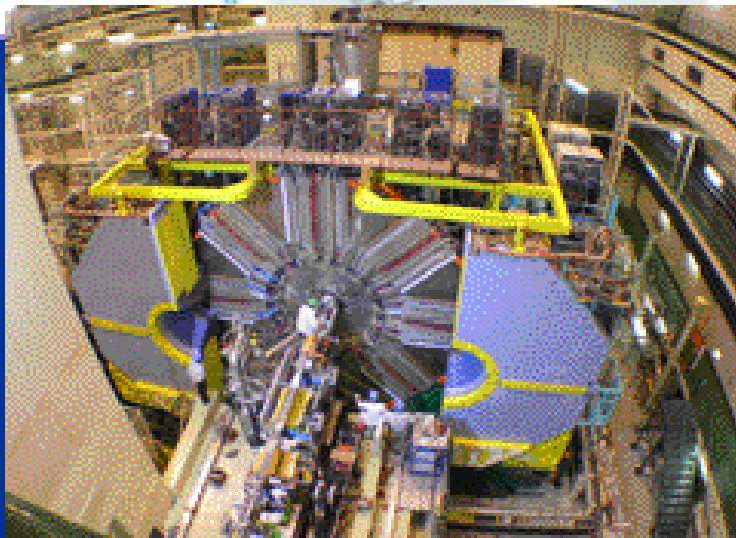
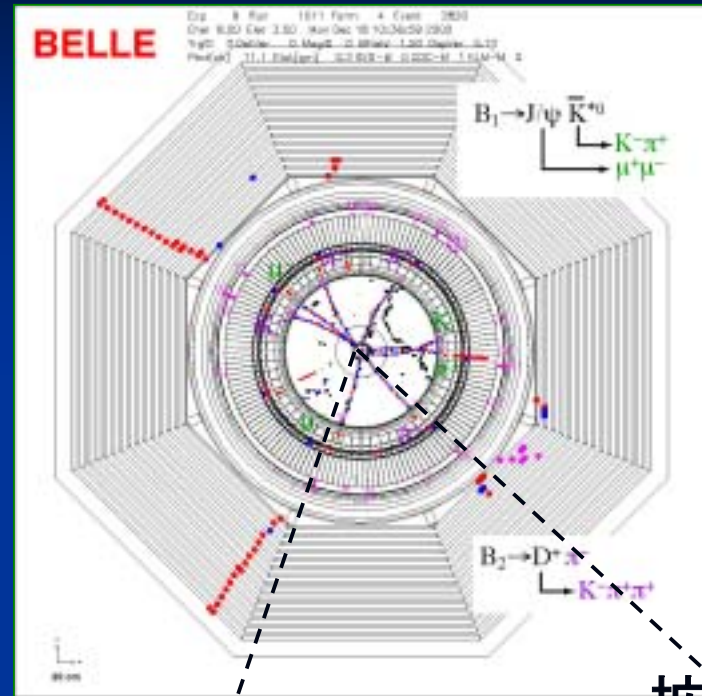
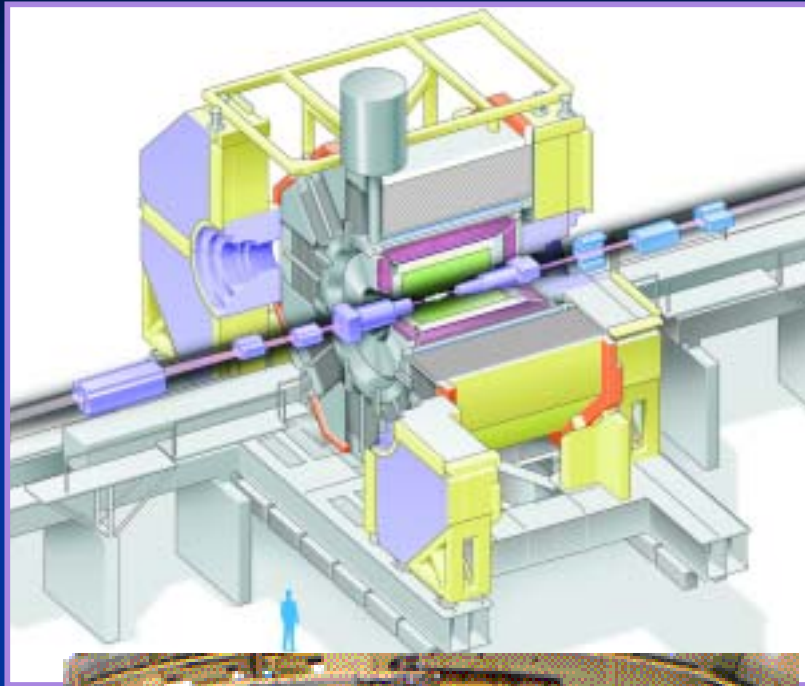
粒子反粒子対称性の破れ

- 我々の宇宙は陽子と電子からできている。
 - ⇒ 反粒子はどこに消えたのか？
 - ビッグバンでは同数できていたが、**粒子と反粒子の間で対称性が破れていた??**
- 粒子・反粒子対称性の破れの研究
 - $K(s\bar{d})$ 中間子や $B(b\bar{d})$ 中間子でCPの破れが観測されている。
 - ⇒ B中間子では2年前に初めて観測された。

世界最高輝度の加速器： **KEKB** B-Factory (B工場)



高性能素粒子検出器 (Belle)



拡大

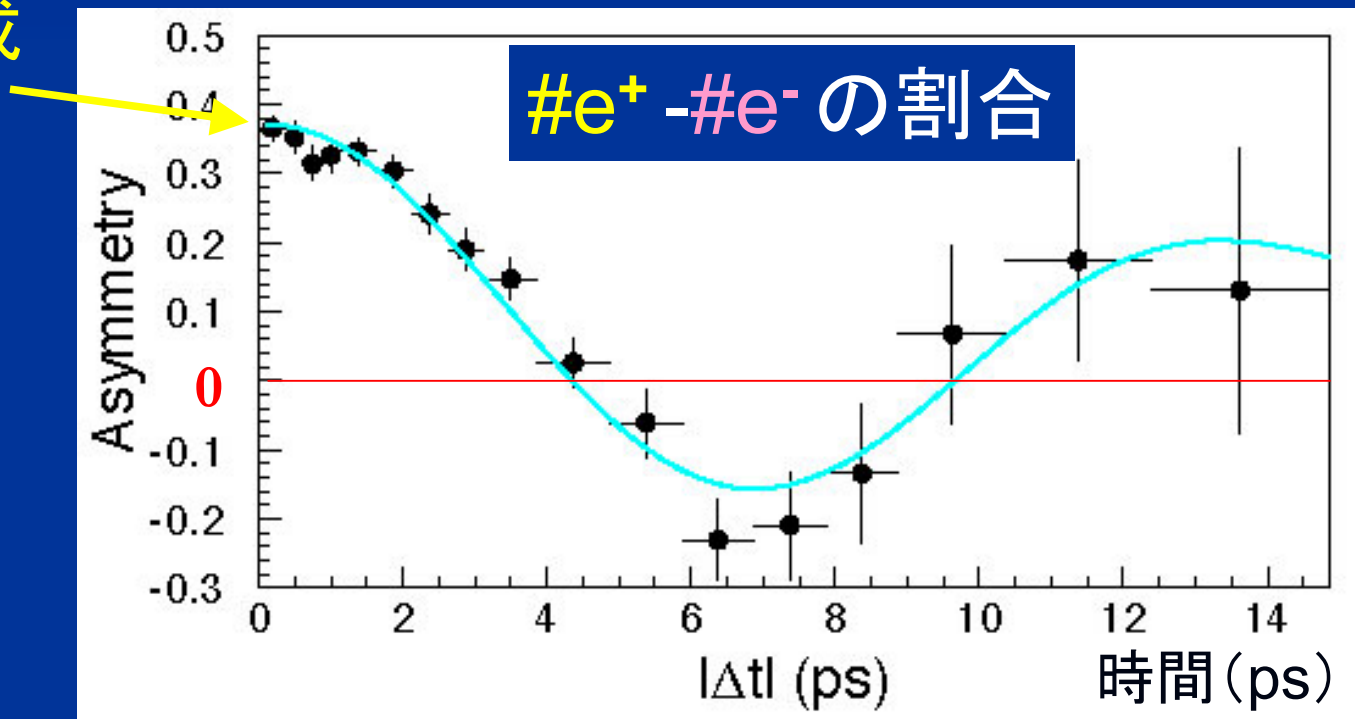
粒子 \leftrightarrow 反粒子 振動

$B^0-\bar{B}^0$ 振動: 粒子と反粒子が時間と共に入れ替わる(振動)。

$B^0 \rightarrow e^+ + X$: 陽電子が出てくる。

$\bar{B}^0 \rightarrow e^- + X$: 電子が出てくる。

B^0 粒子生成

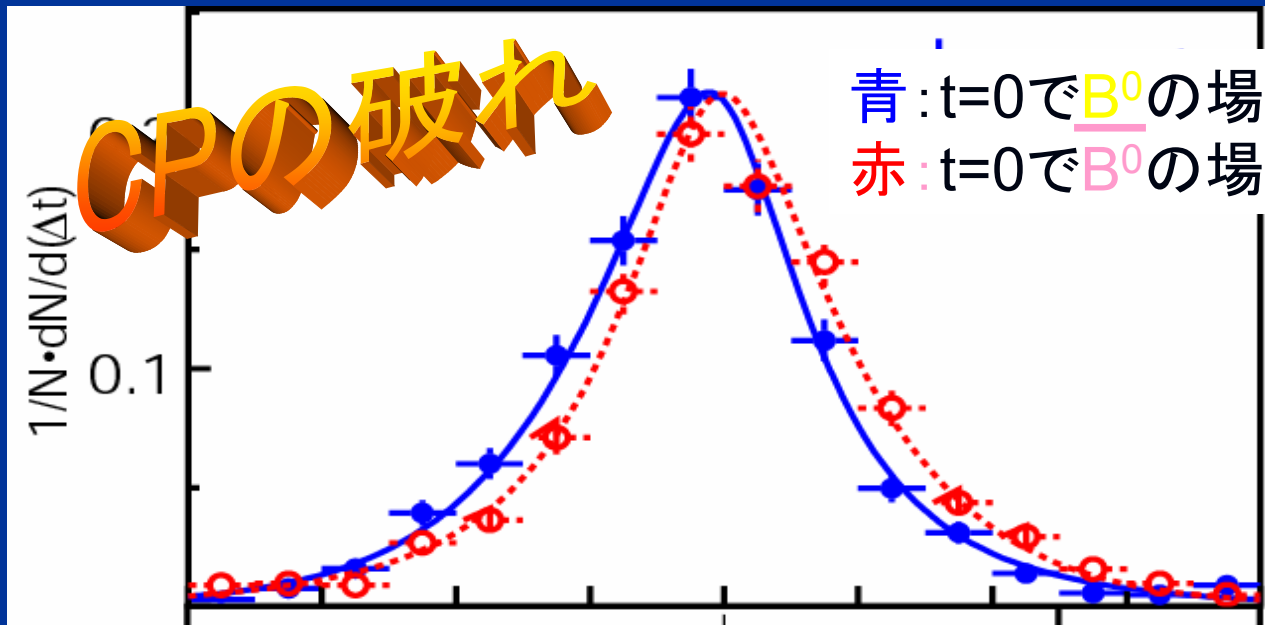


B中間子でのCPの破れの一例



の崩壊時間分布の違い

$$\tau_{B^0} - \tau_{\bar{B}^0}$$



5. まとめ

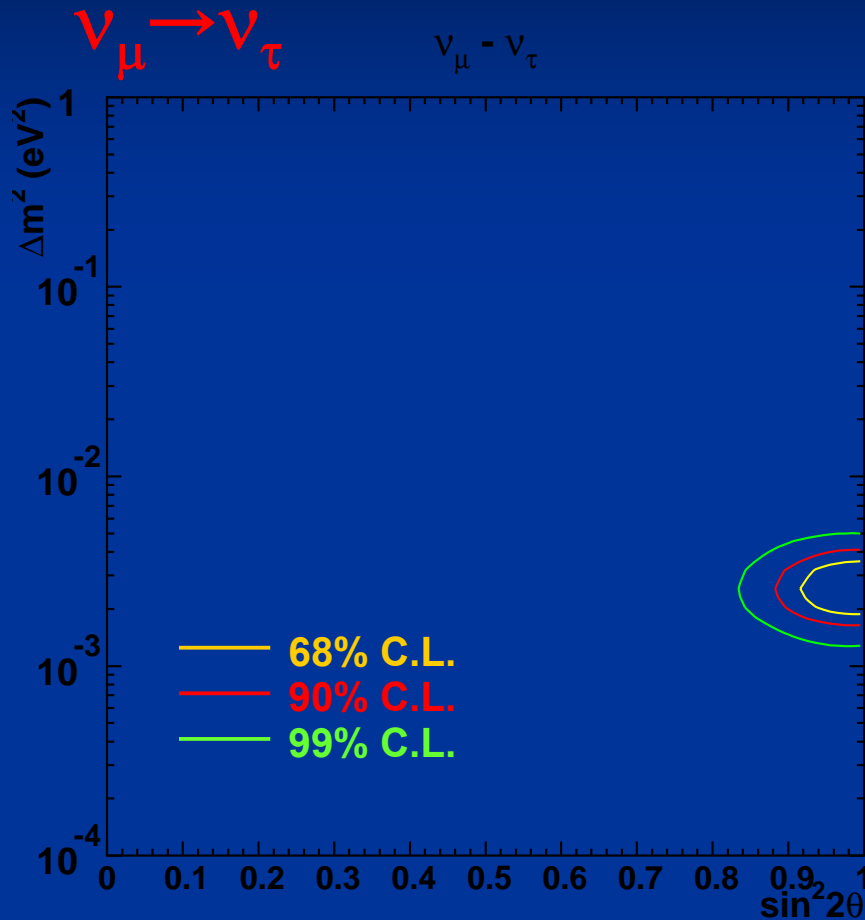
■ 参考文献

- 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>

ニュートリノ振動パラメータの値



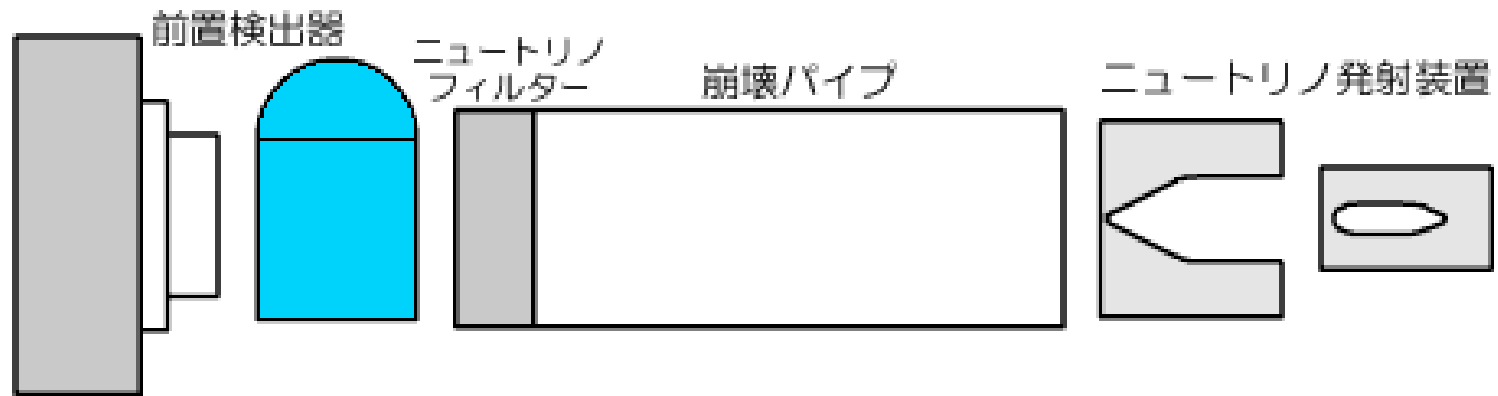
パラメータの値は

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

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

(90% C.L.)

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

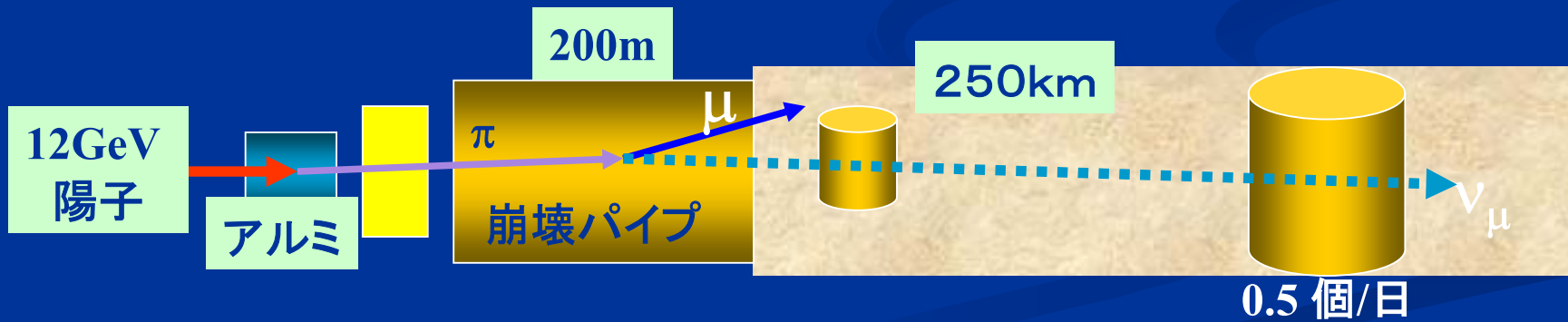
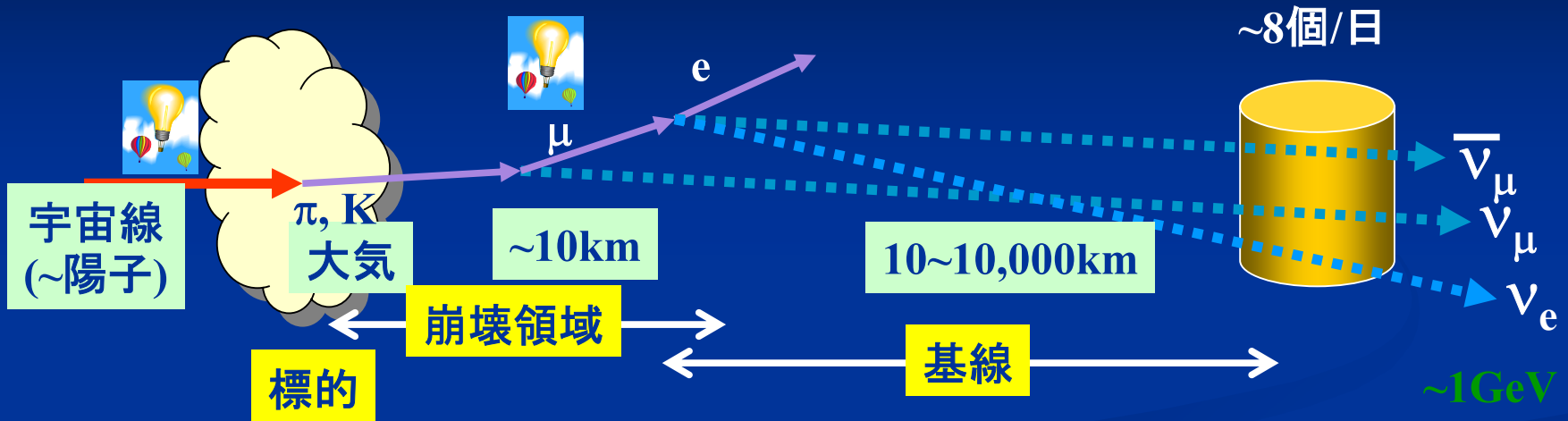
崩壊パイプ

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



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

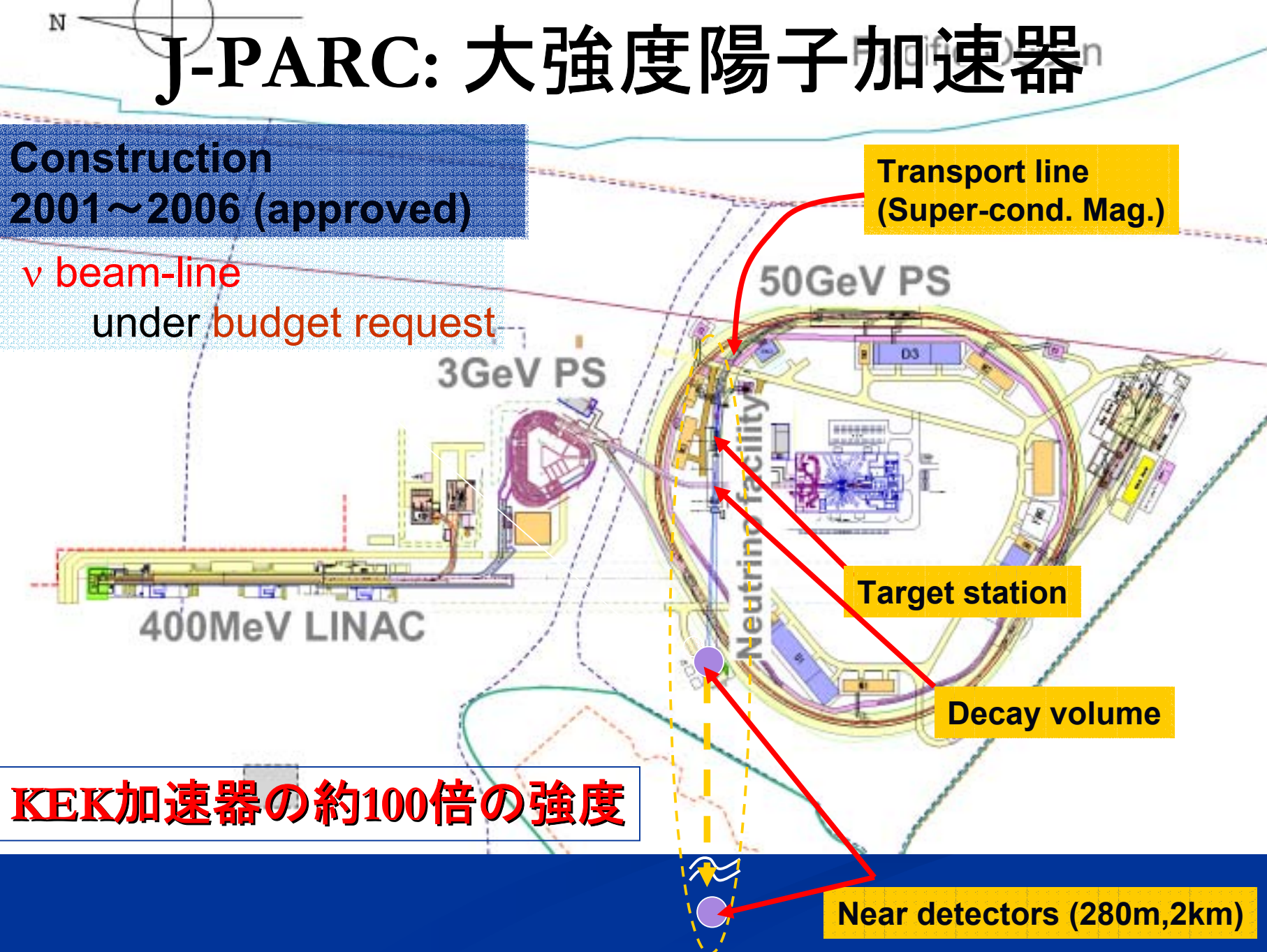
400MeV LINAC

Target station

Decay volume

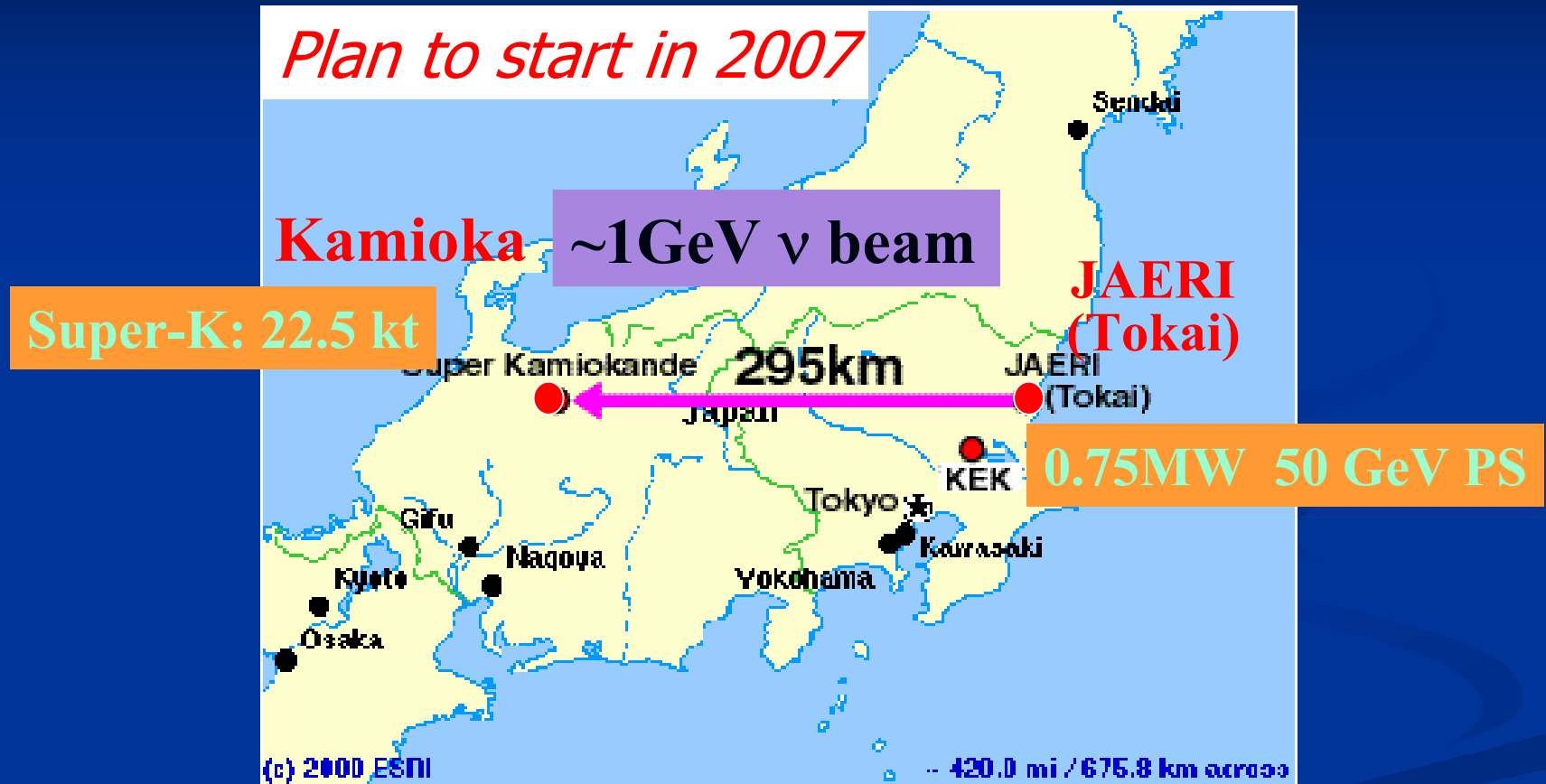
KEK加速器の約100倍の強度

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(2009年開始予定)