

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) (2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)

前回の復習

過去数十年の理論的・実験的研究によって、素粒子(クォークやレプトン)とその相互作用を記述する「素粒子の標準理論」が確立した。(2008年ノーベル物理学賞(南部、小林、益川先生)もこれに関しての理論的貢献。)


しかし、標準理論は完全な理論ではないと考えられている。素粒子間に働く力(電磁力、強い力、弱い力)は統一されるのではないか? また、ニュートリノの質量は0と仮定されてきた。

→ m_ν は seesaw mechanism(柳田、Gellmann Ramond, Slansky, 1979) により、

$$m_\nu = \frac{m_q^2}{m_N}$$

m_q : クォークの質量

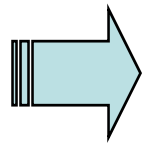
m_N : 重い中性粒子の質量



非常に小さいニュートリノの質量は、背後に巨大なエネルギースケール($\sim m_N$)の物理を示唆。

(大統一理論検証の数少ない実験的方法?)

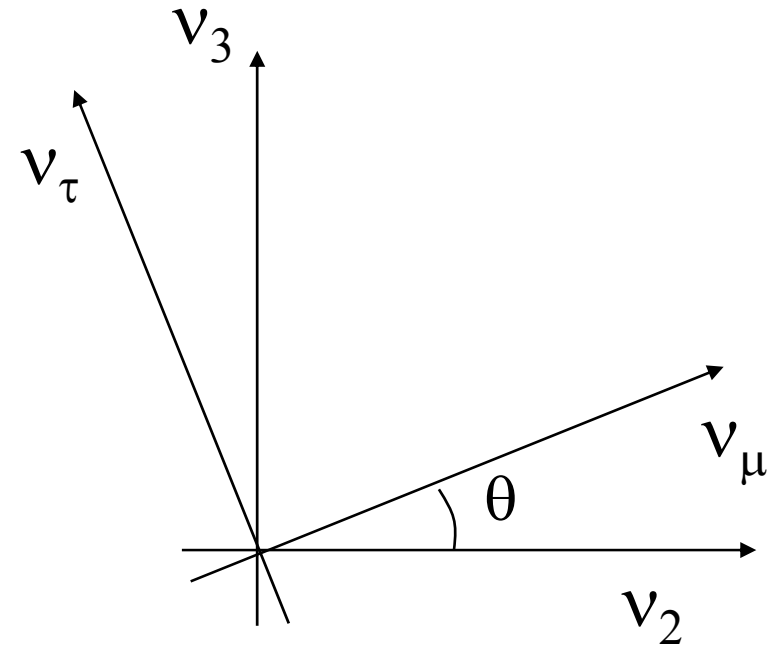
どのような方法でニュートリノの質量を測定するか？



ニュートリノ振動現象を使う。

(牧、中川、坂田,1962)

ミューニュートリノ(ν_μ)やタウニュートリノ(ν_τ)は固有の質量を持っているわけではなく、固有の質量を持った状態を ν_2 , ν_3 とすると、 ν_μ は ν_2 と ν_3 を重ね合わせたものとしてあらわせる。

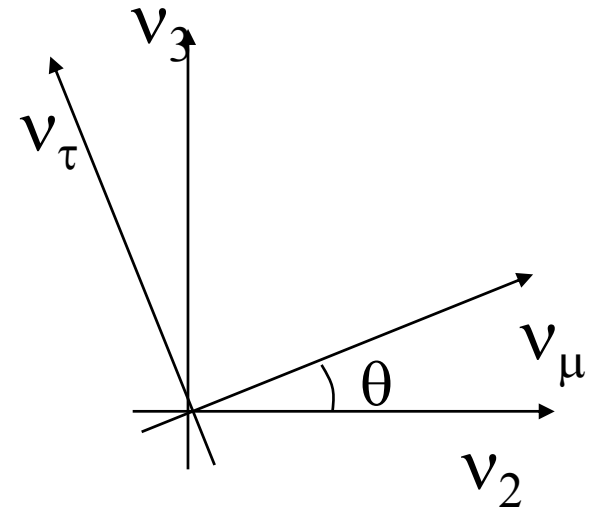


この場合、 ν_μ が真空中を飛ぶとは、 ν_2 と ν_3 の重ね合わさった状態が飛ぶということになる。

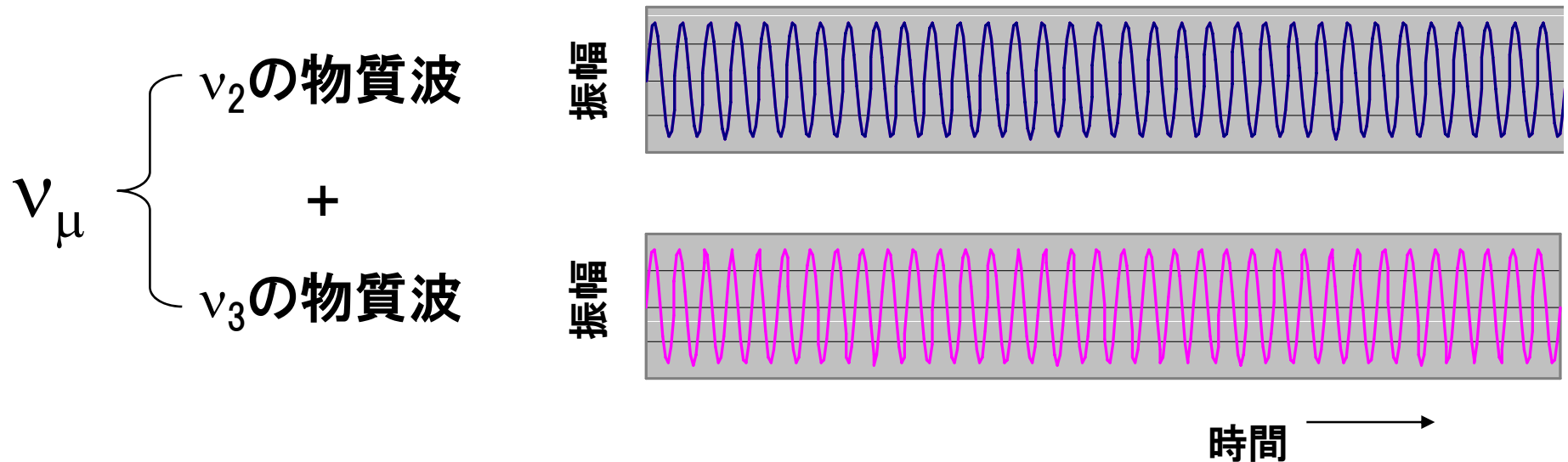
また、素粒子は粒子であると同時に波(物質波)である。

飛行中のニュートリノ

$$v_{\mu} = \cos\theta v_2 + \sin\theta v_3$$



ところで、 v_2 と v_3 はほぼ光速で飛んでいるが、質量が違うので、飛ぶ時の物質波の周波数はわずかに違う。



ニュートリノ振動

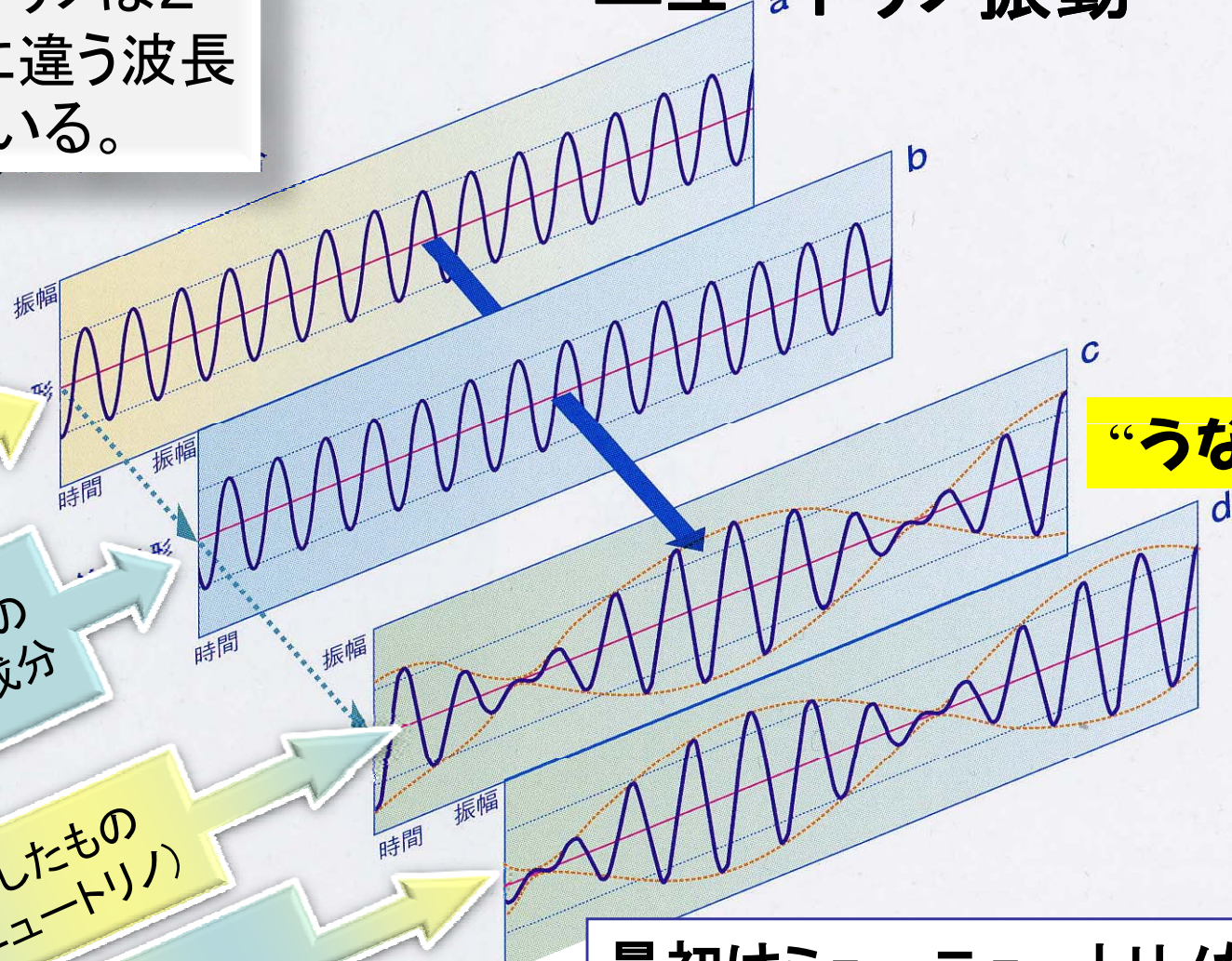
ミューニュートリノは2つのわずかに違う波長成分をもっている。

1つ目の波の成分

2つ目の波の成分

2つを足したもの
(ミューニュートリノ)

残り
(タウニュートリノ)

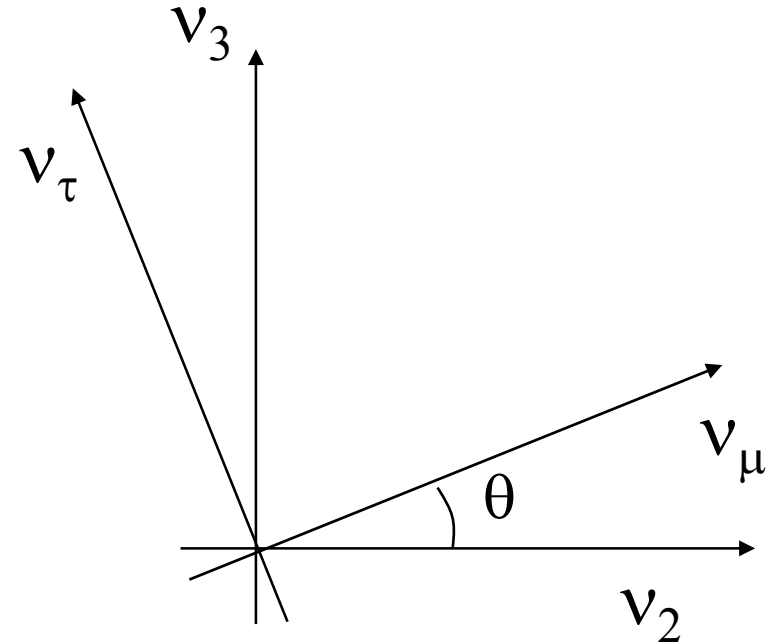


“うなり”

最初はミューニュートリノだったものが時間と共にミューニュートリノが減ったり増えたりする。
→ ニュートリノ振動

ニュートリノ振動の確率

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を考える



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

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = 1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$$

この式を私の講義の中で多く使います。

⇒ ミューニュートリノが飛行距離(L)やエネルギー(E)と共にどのように振動して減るかを調べることで、ニュートリノの質量の2乗の差(Δm^2)と混合角(θ)が測定できる。

ニュートリノ振動実験

ニュートリノ振動実験に用いられるニュートリノ

	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	$1.5 \cdot 10^8 \text{ km}$	$>10^{-11}eV^2$	$\nu_e \rightarrow \nu_x$
原子炉	A few MeV	100m - 200km	$>10^{-5}eV^2$	$\nu_e \rightarrow \nu_x$

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

ニュートリノ振動の発見

(宇宙線(大気)ニュートリノの研究)

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動

宇宙線とは？



Victor Hess (1912)

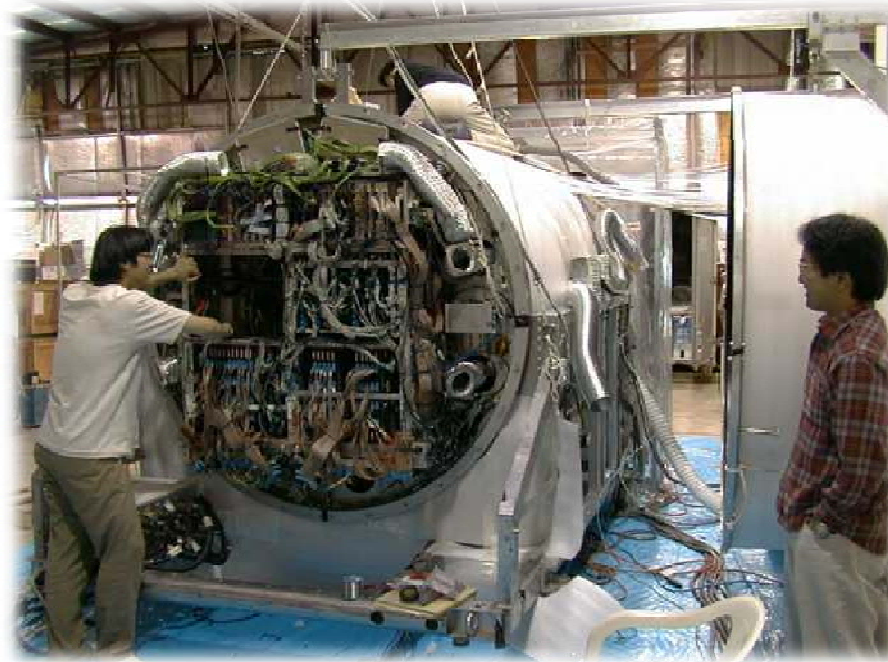
放射線強度を気球に乗って観測
→ 高度が高くなればなるほど強度が強くなる。

→ 宇宙からの放射線(宇宙線)の発見

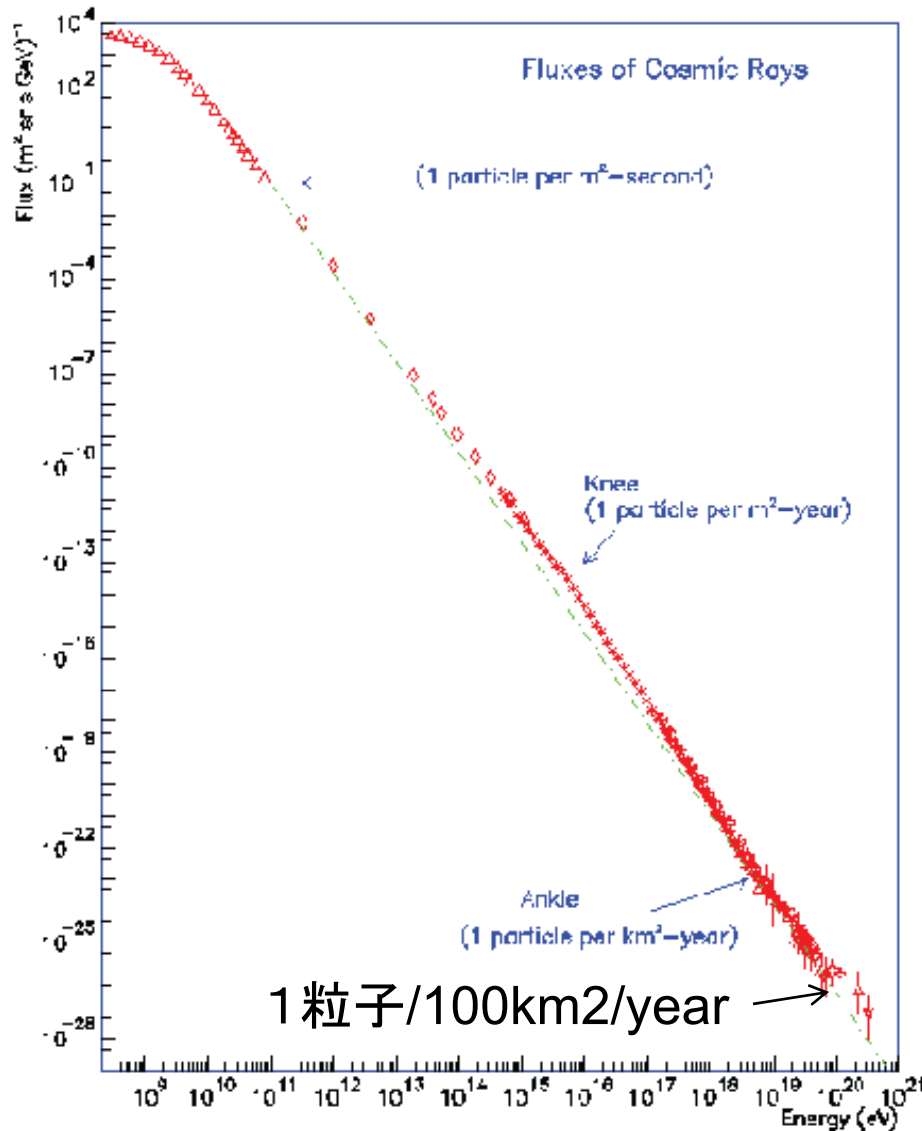
→ 高エネルギー宇宙の発見

(1936年 ノーベル物理学賞受賞)

現代の宇宙線観測方法



観測された宇宙線強度



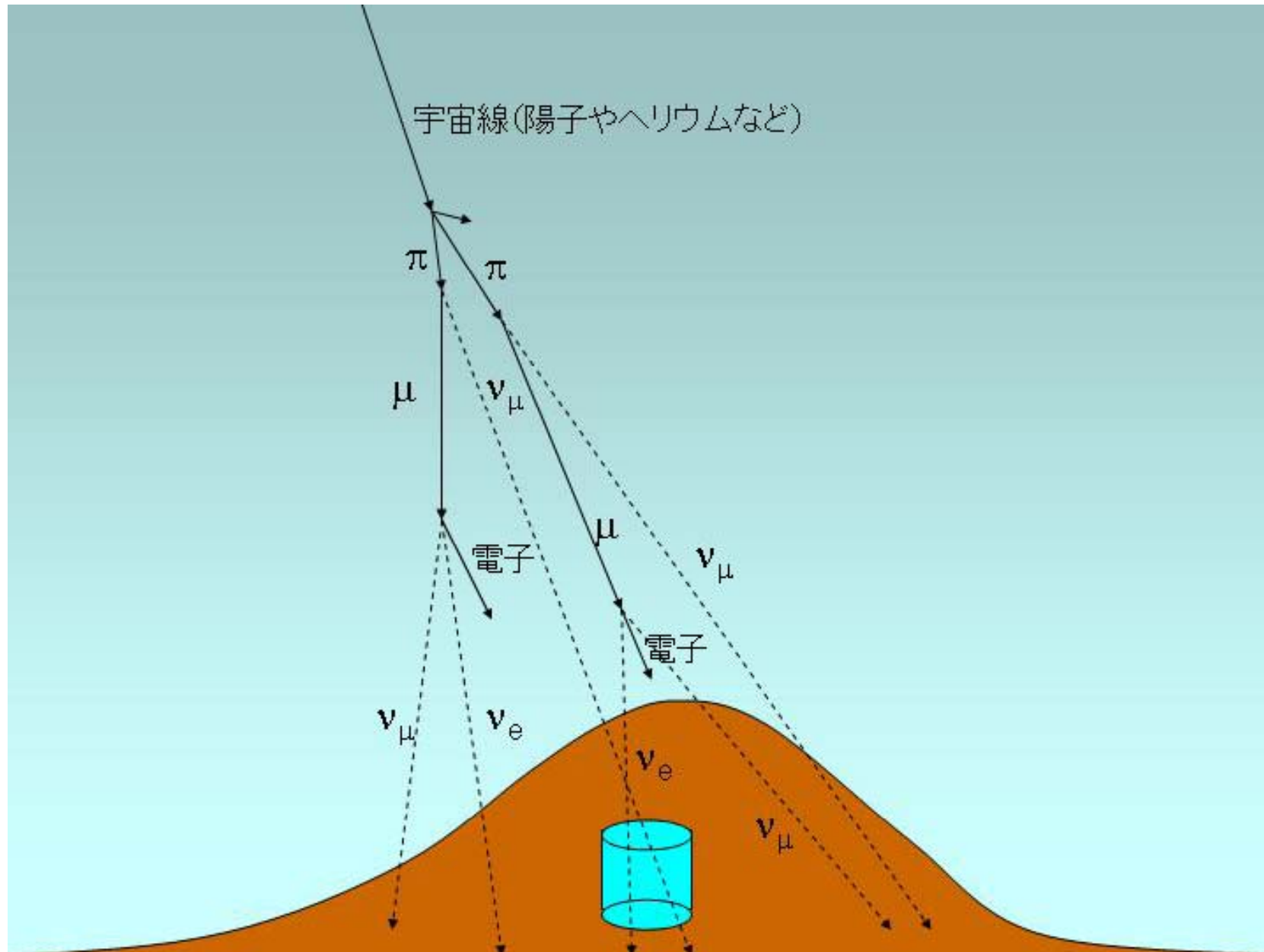
→ エネルギー範囲は10桁以上に広がる。

→ そのフラックスはエネルギーに応じて30桁以上

→ この宇宙線が宇宙のどこで、どのように生成されたかを研究することは、それ自体非常に重要な研究テーマ

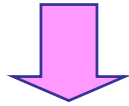
→ しかし、今回の話はこの宇宙線を利用したニュートリノ研究について

大気ニュートリノ



大気ニュートリノの生成

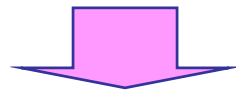
宇宙線(P or He等)が大気に入射する



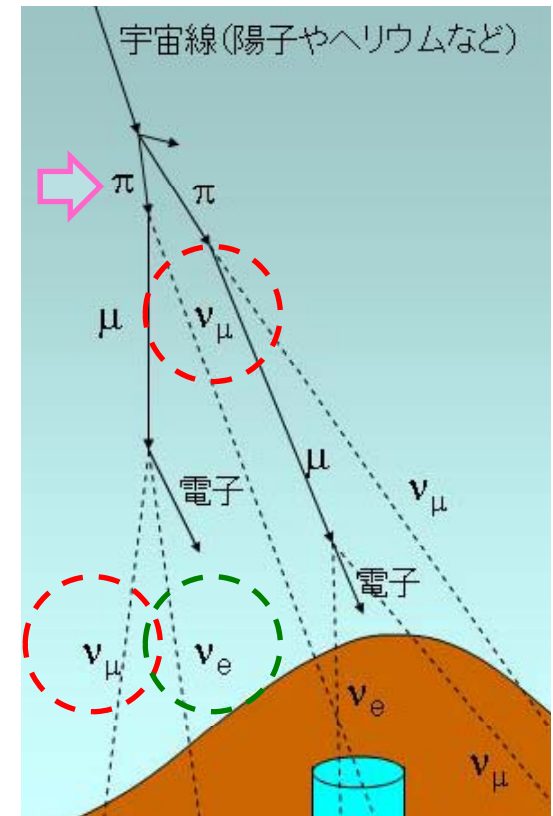
・ (P or He) + (酸素、窒素)原子核 →
 $\pi \pi \dots + X$ (Xはその他いろいろ)

□ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \text{anti-}\nu_\mu$

□ $\mu^+ \rightarrow e^+ + \text{anti-}\nu_\mu + \nu_e$, $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \text{anti-}\nu_e$

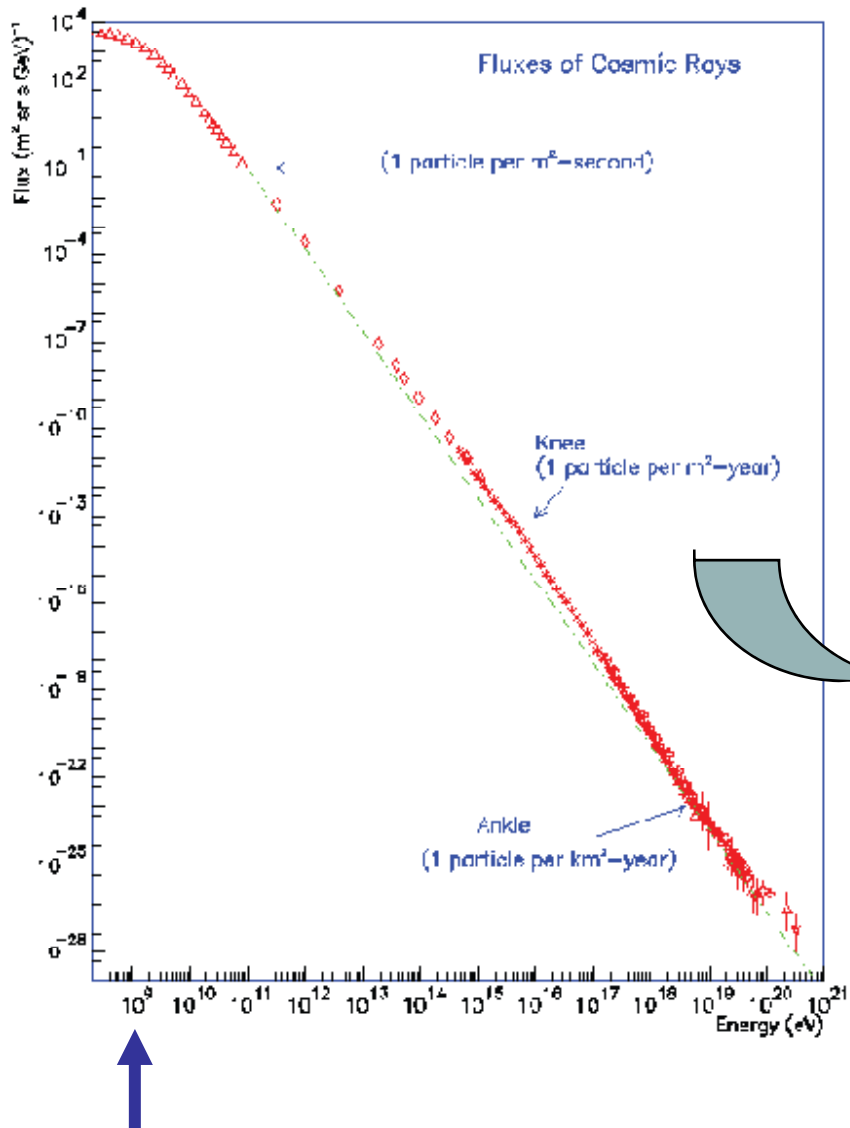


つまり、 π 中間子が1個生成されるたびに**ミューニュートリノが2個**、**電子ニュートリノが1個**生成される。

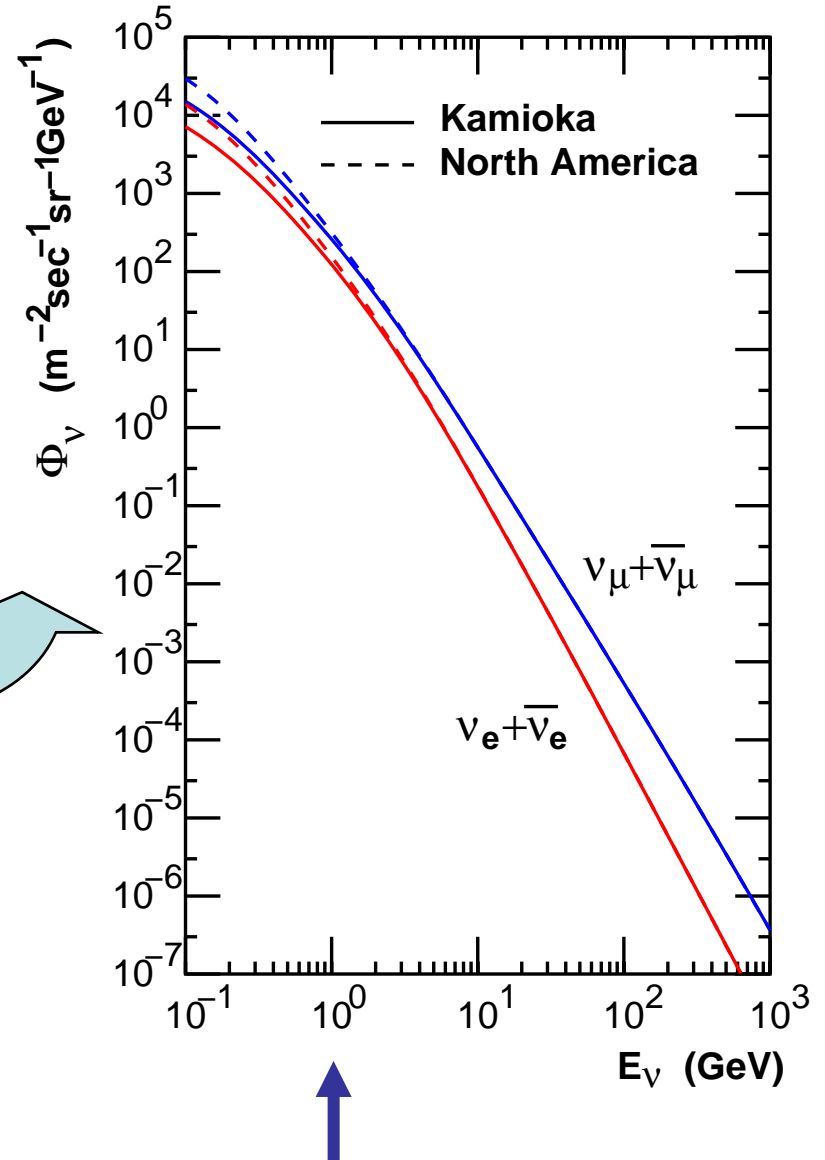


宇宙線と大気ニュートリノ

観測された宇宙線陽子の強度

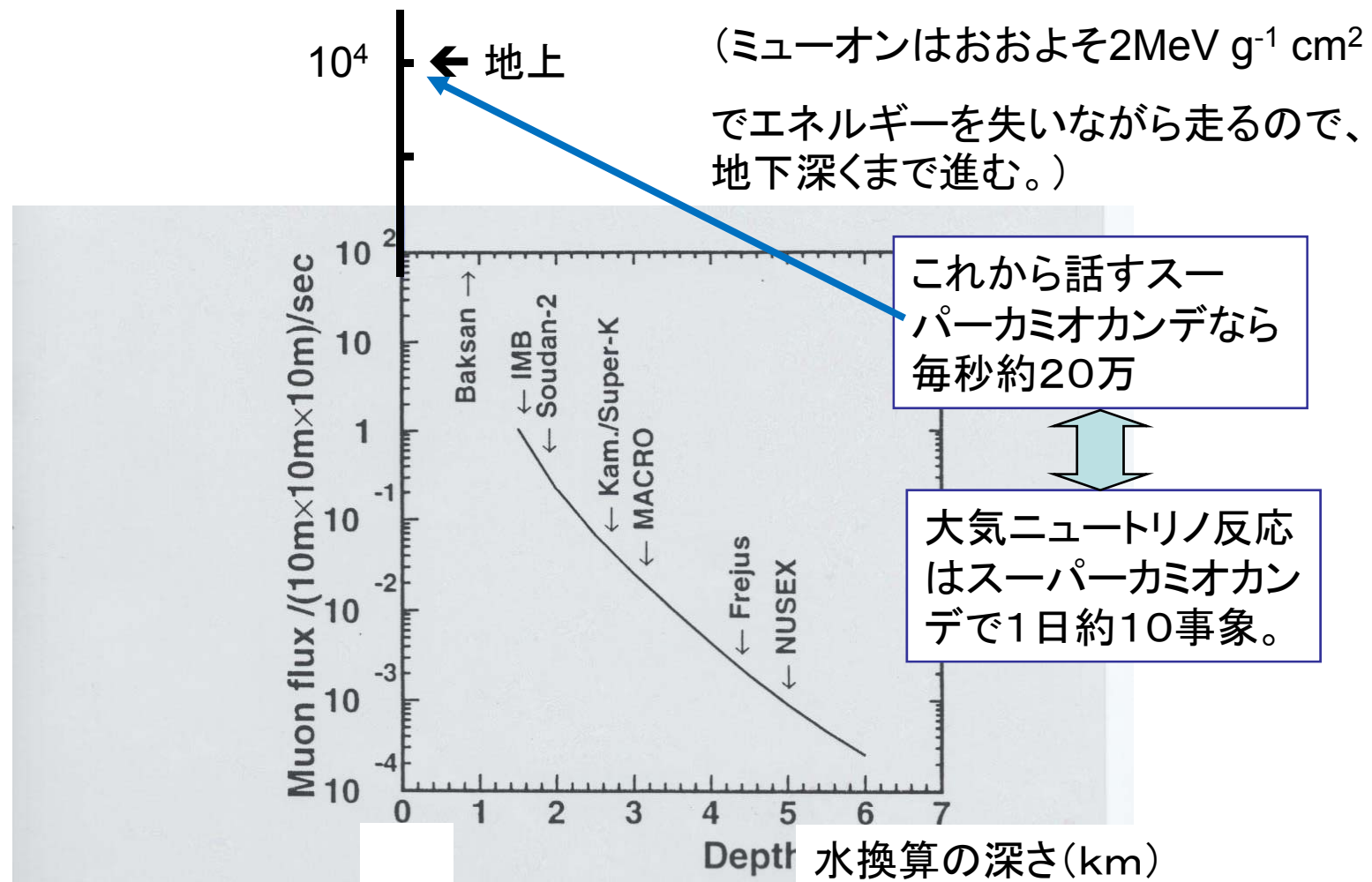


ニュートリノの強度



大気ニュートリノの観測

宇宙線ミューオンのフラックスと強度の関係

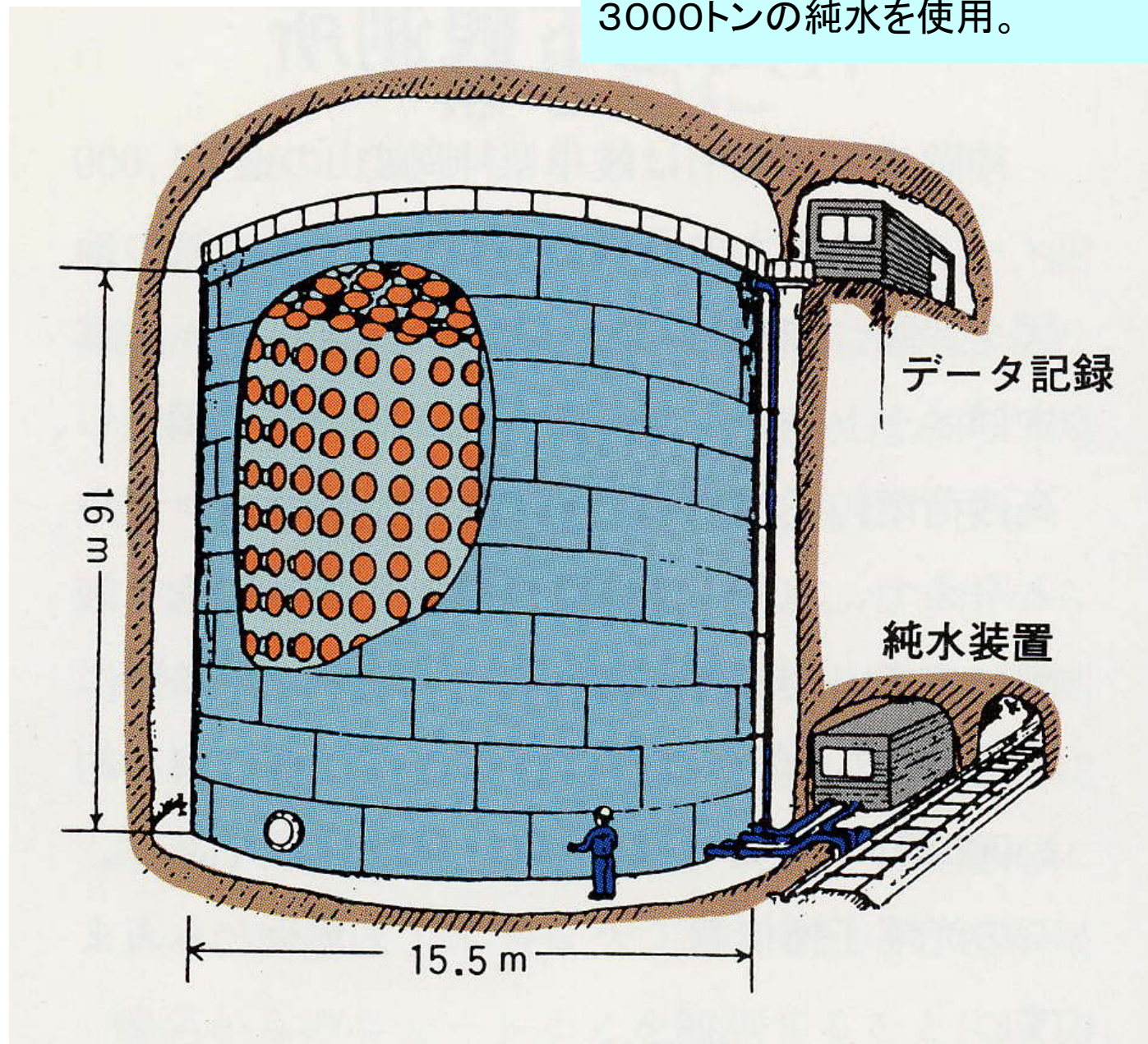


簡単に宇宙線のバックグラウンドを落としたければ地下深くに測定器を設置する。

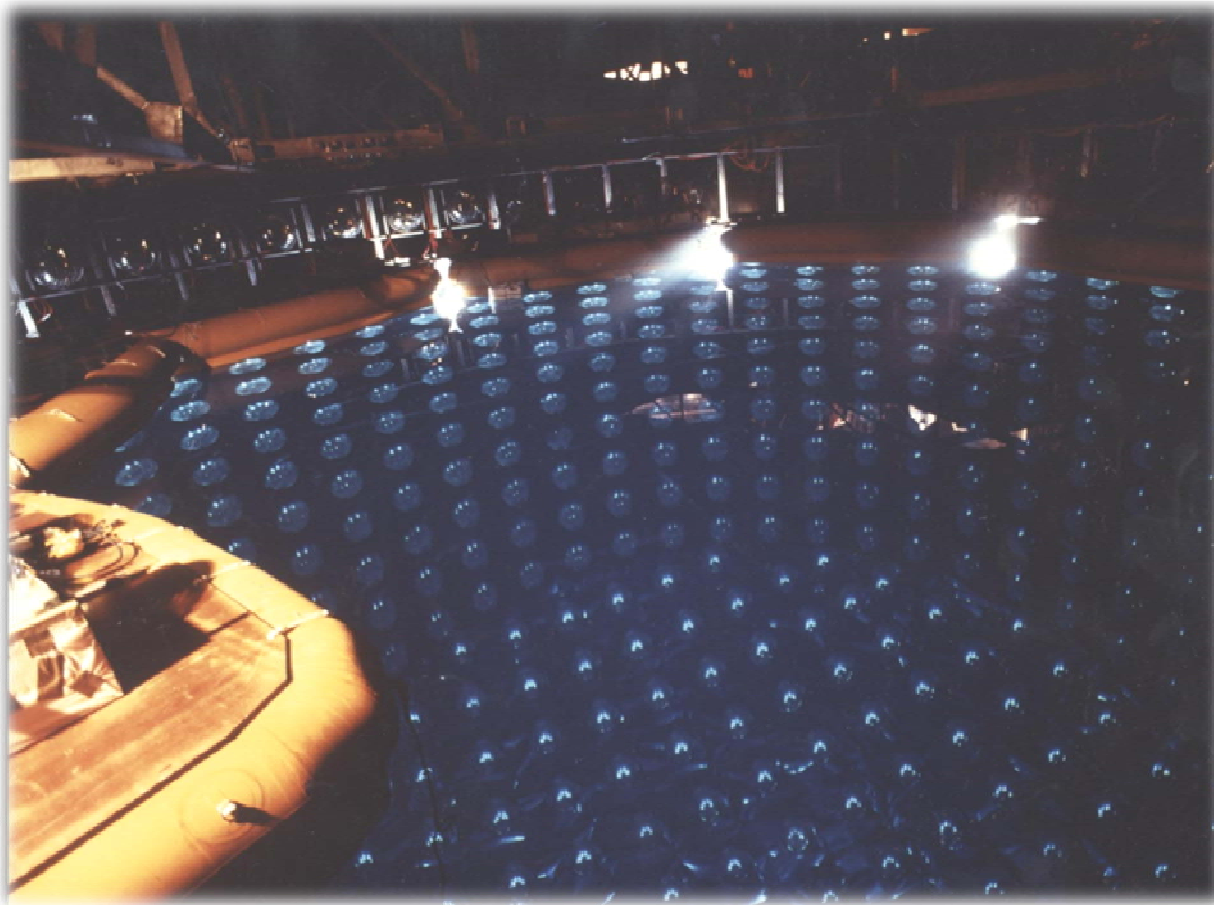
外から測定器に入射する宇宙線と区別するため、ニュートリノ相互作用は測定器の内部でおこったことを要求する。

大気ニュートリノ実験装置 (カミオカンデ)

3000トンの純水を使用。



カミオカンデ



(3000トン 水チェレンコフ測定器.)

(1983年から1996年まで)

3日で1例程度の割合で大気ニュートリノを観測

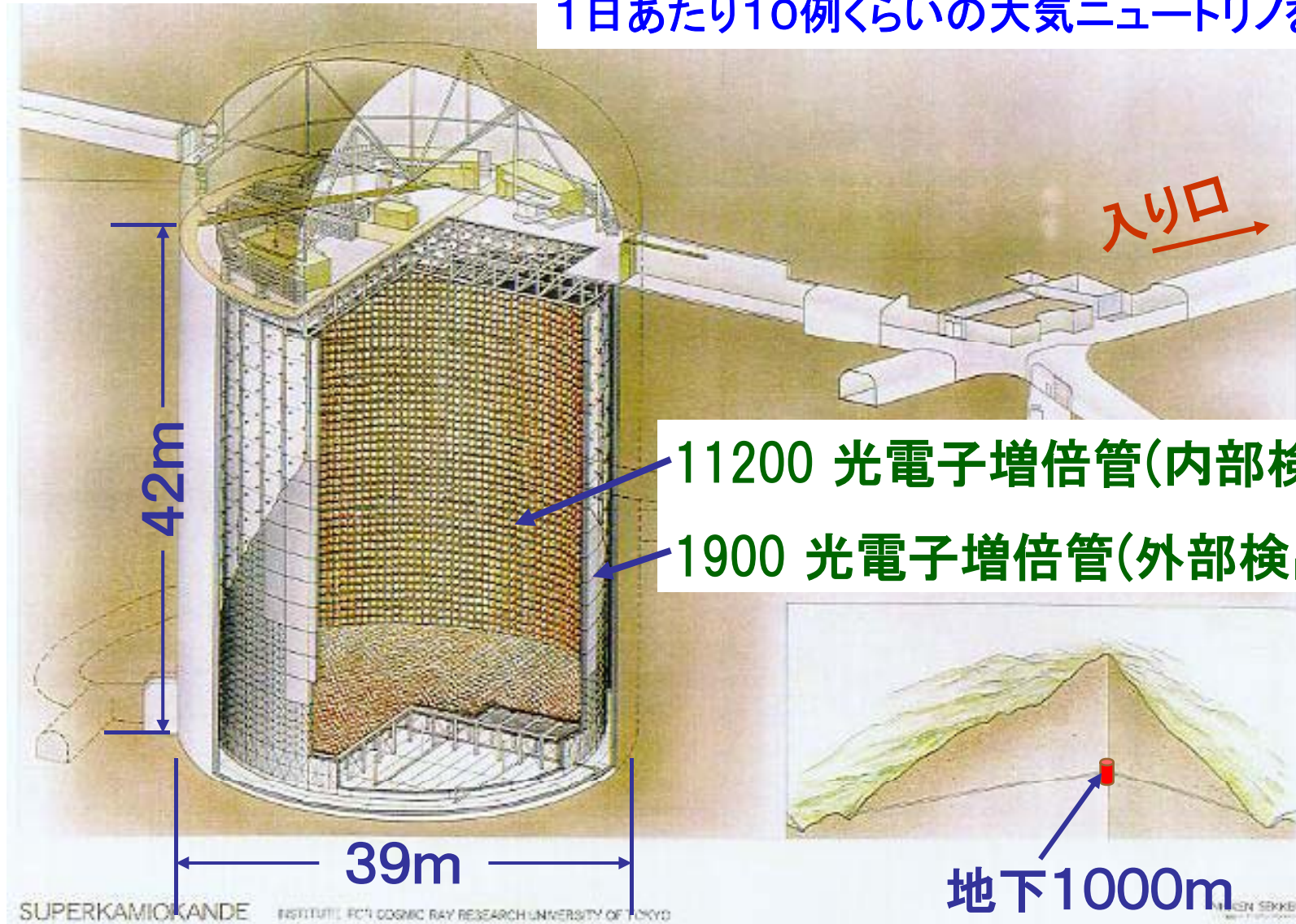
(この装置は小柴昌俊先生のノーベル賞(超新星ニュートリノと太陽ニュートリノの観測)で有名ですが、今日は別な研究の話をしていきます。)



スーパーカミオカンデ

50,000 ton 水チェレンコフ測定器
(有効体積22.5 kton)

1日あたり10例くらいの大気ニュートリノを観測



Super-Kamiokande 空洞(1994年夏)

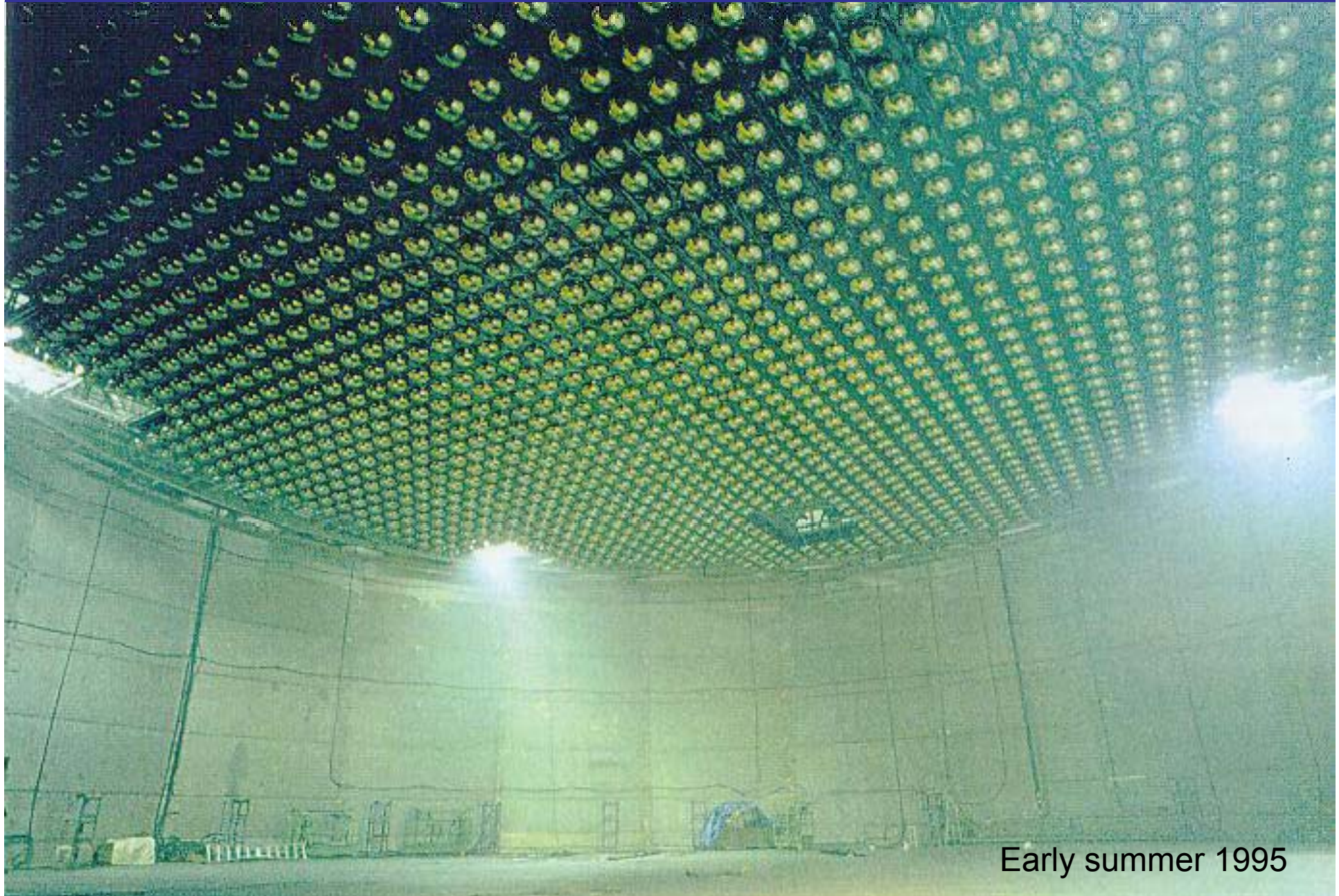


Super-Kamiokande

タンク建設(1994年12月)



Super-Kamiokande 建設



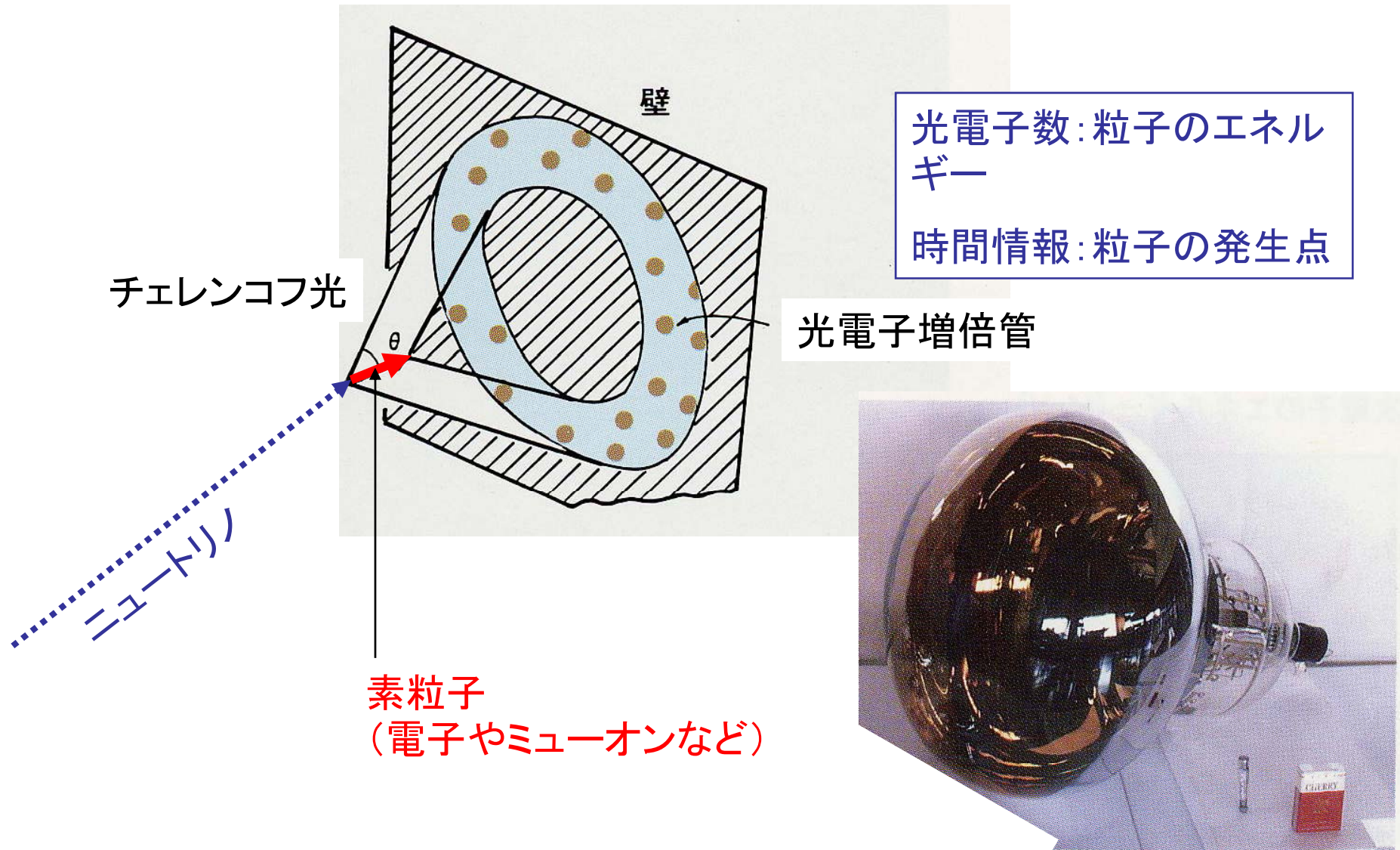
Early summer 1995

注水中の Super-Kamiokande

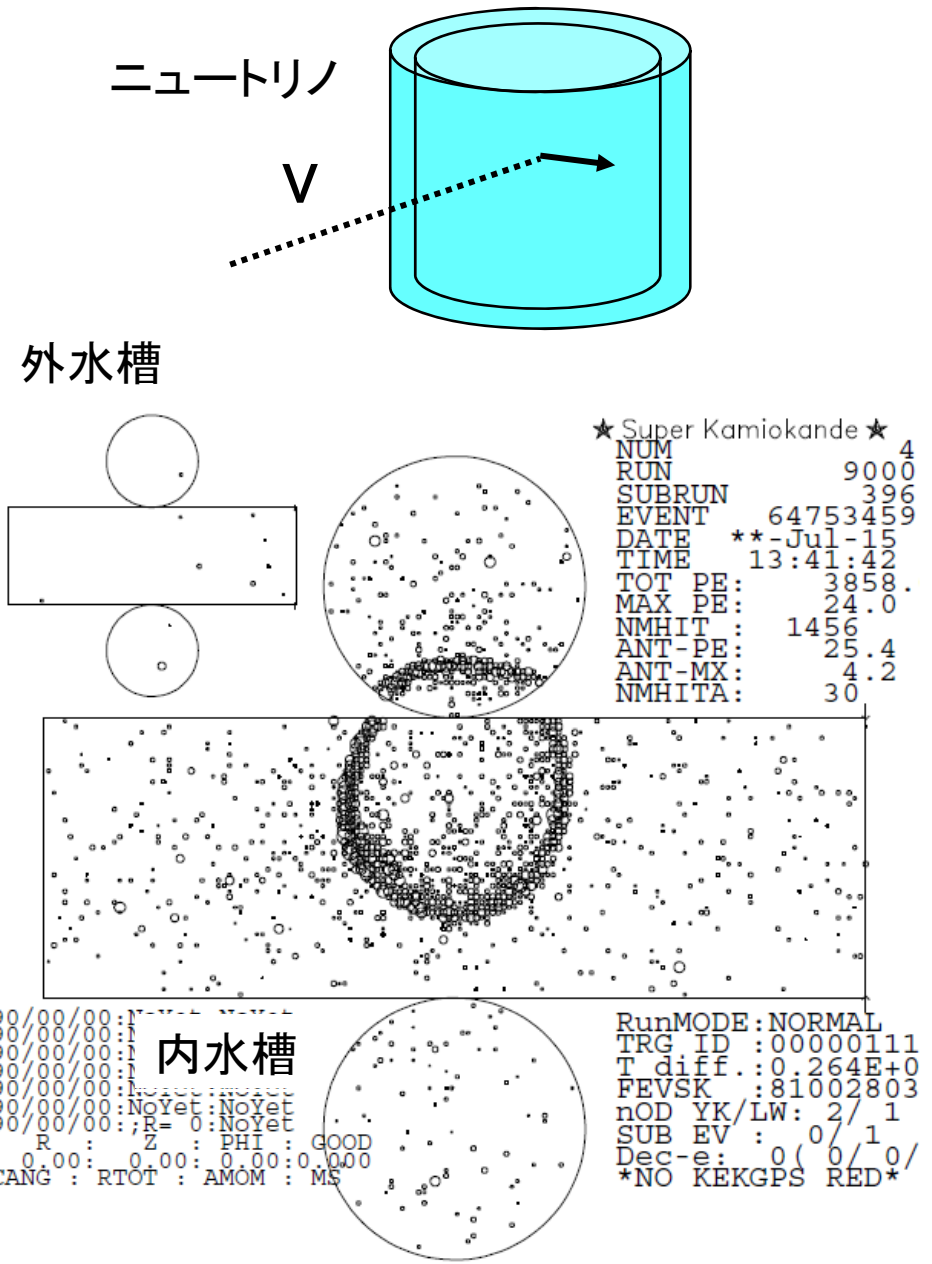
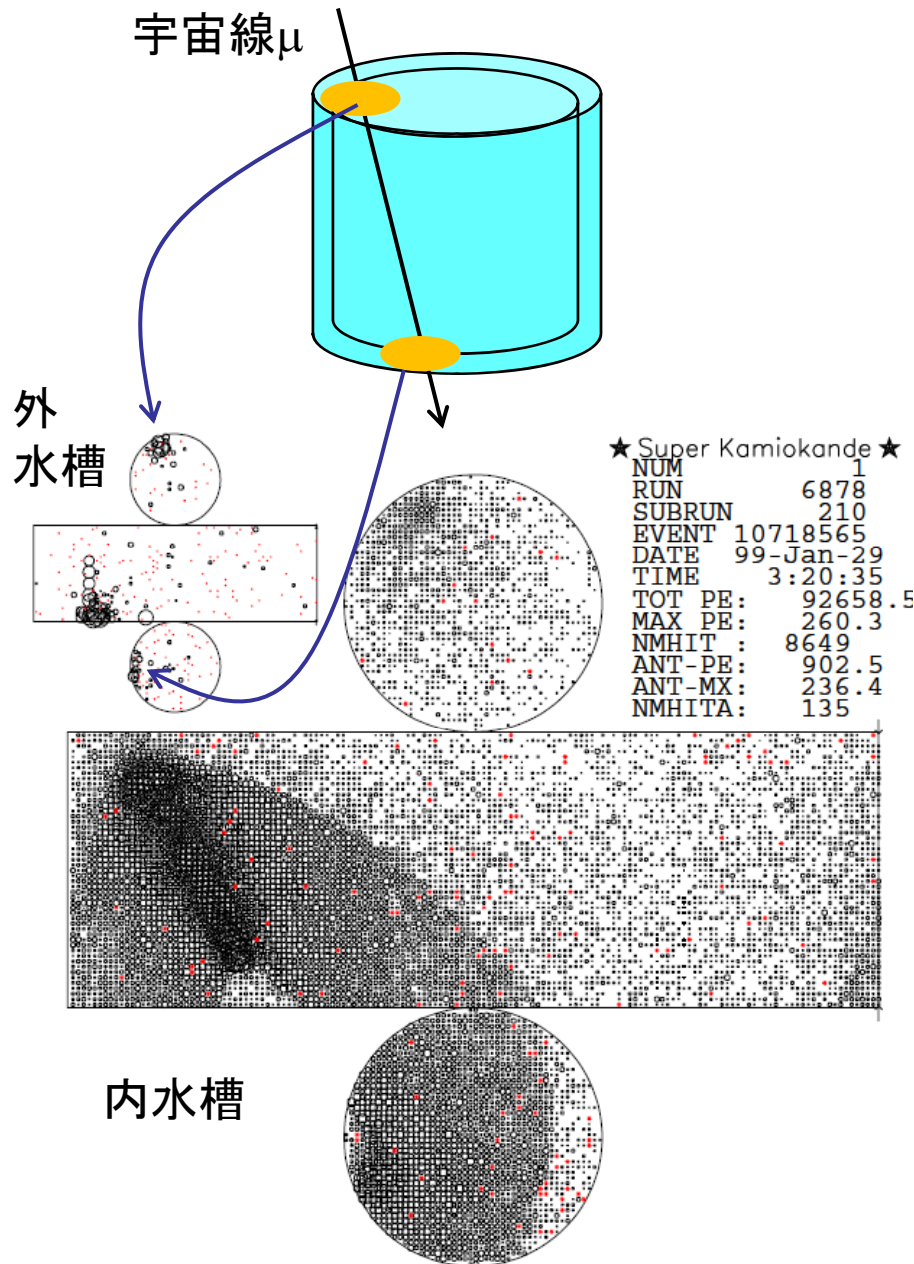


Jan. 1996

カミオカンデやスーパーカミオカンデでのニュートリノの検出方法



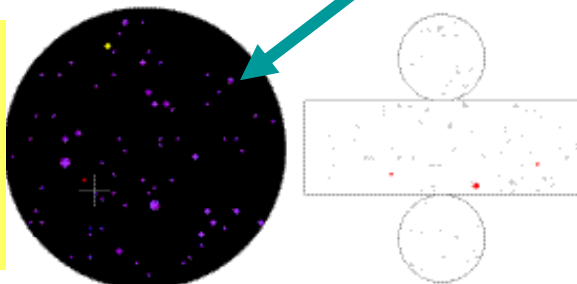
ニュートリノと宇宙線(バックグラウンド)の区別



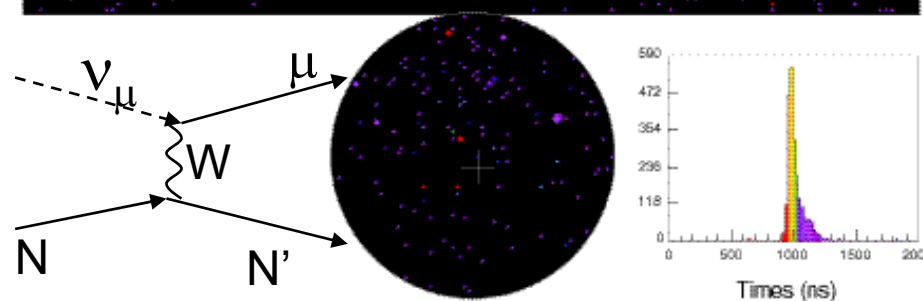
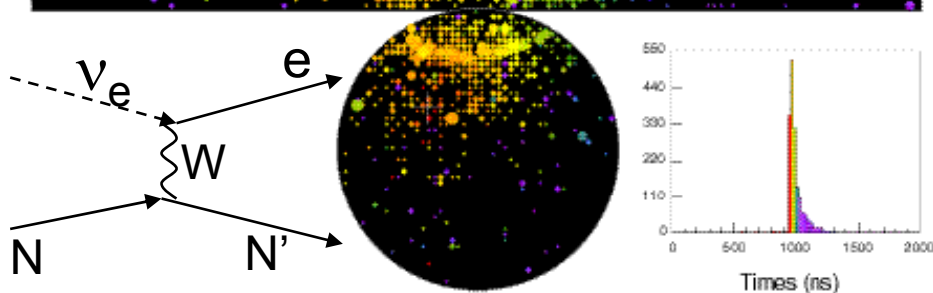
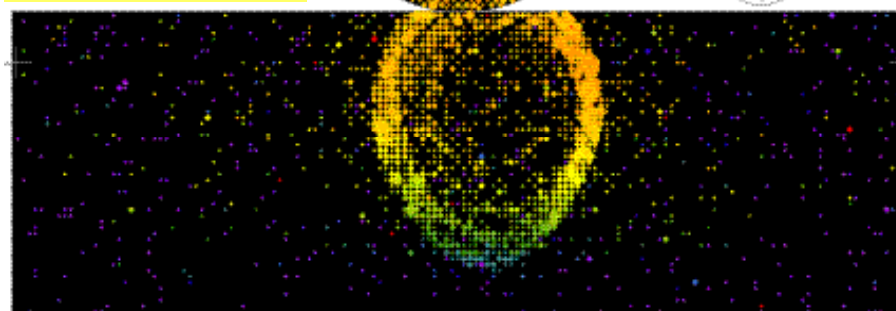
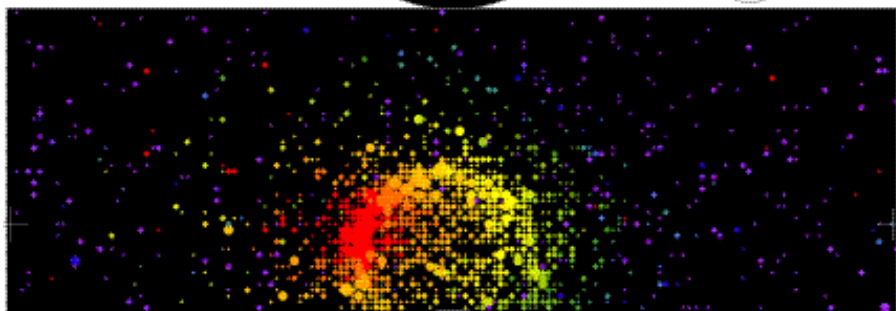
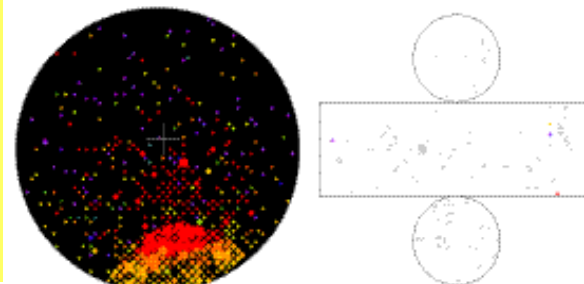
スーパーカミオカンデで観測されるニュートリノ

丸の大きさは光の強さ、色が光りの到達した時間を表す。

電子ニュートリノ事象によるチェレンコフリング



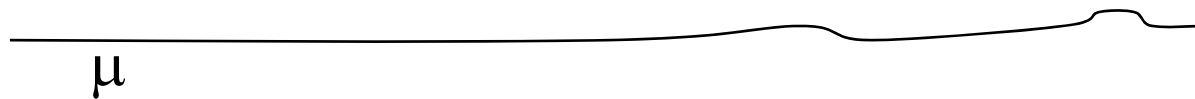
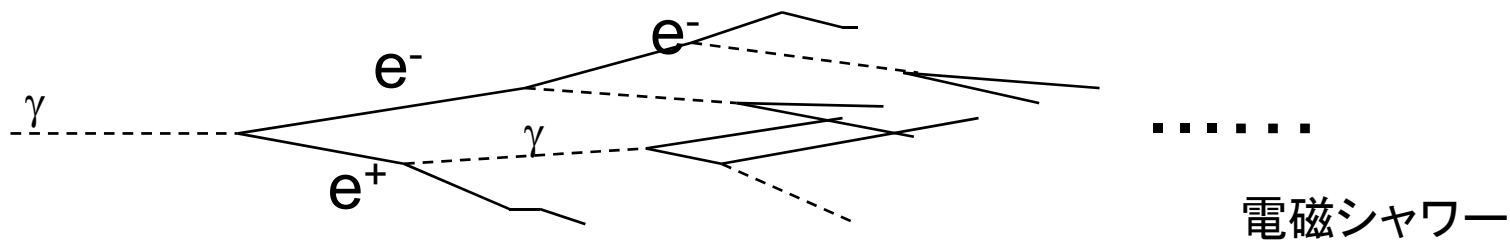
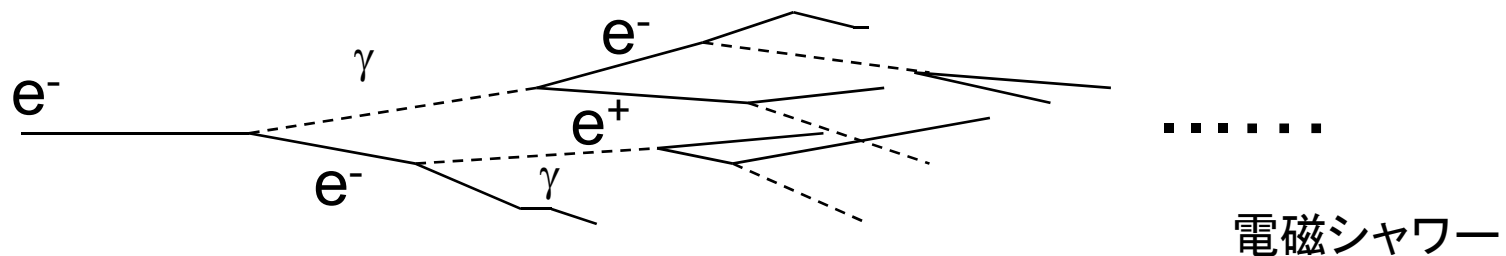
ミューオンニュートリノ事象によるチェレンコフリング



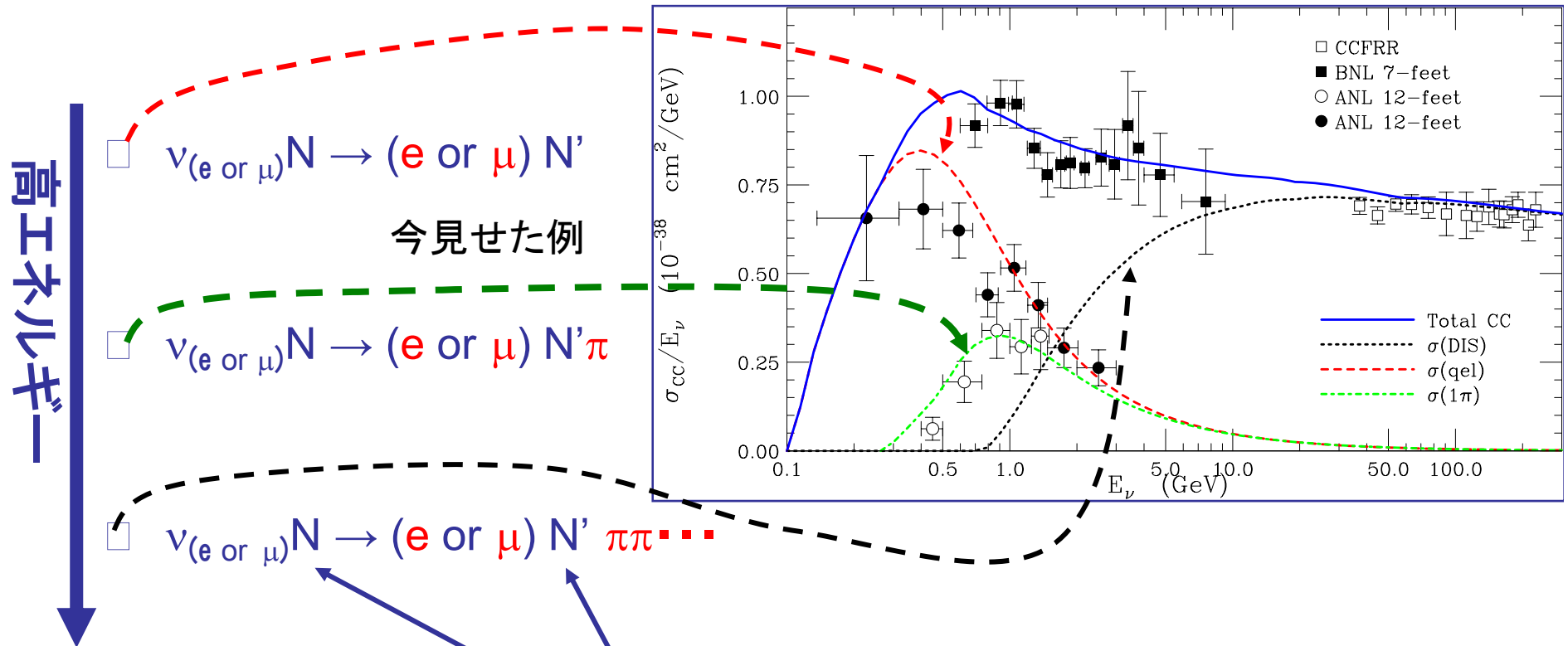
電子は物質中で電磁シャワーを発生して多くの電子、陽電子、光子になる。光子はまた物質中で電子、陽電子対になる。

ミューオンは物質中ではエネルギーを少しづつ失いながら走っていく。

物質中での粒子の進み方(イメージ)



ニュートリノ相互作用



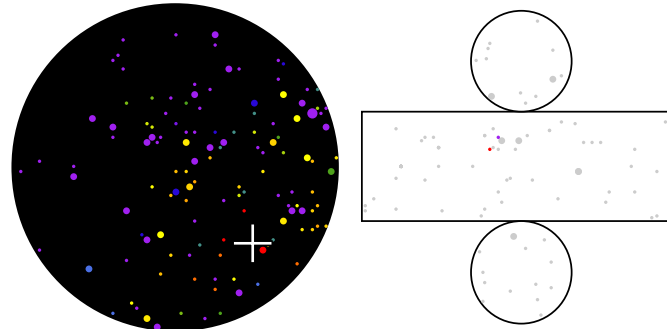
陽子または中性子

赤: スーパーカミオカンデで通常観測される粒子

スーパーカミオカンデで観測される ニュートリノ(2)

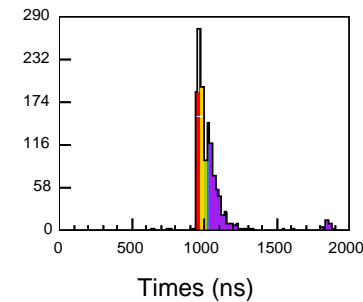
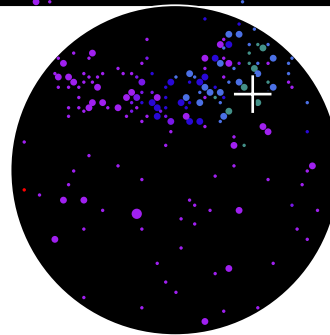
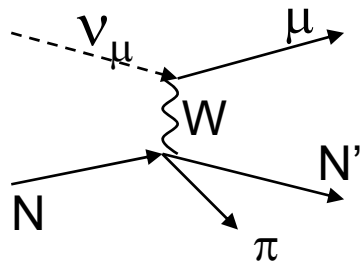
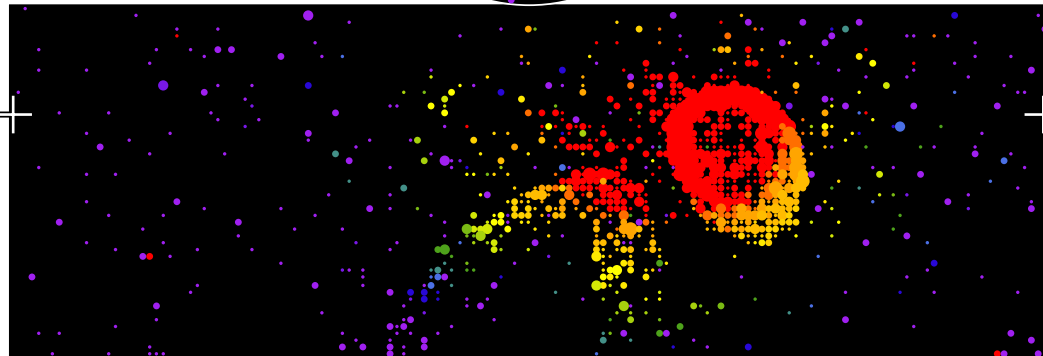
Super-Kamiokande

Run 3066 Event 122701
 96-11-10:01:53:13
 Inner: 1339 hits, 4320 pE
 Outer: 2 hits, 0 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x03
 D wall: 576.3 cm
 Fully-Contained



Time (ns)

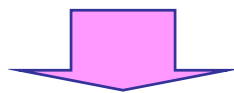
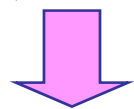
- < 976
- 976- 981
- 981- 986
- 986- 991
- 991- 996
- 996-1001
- 1001-1006
- 1006-1011
- 1011-1016
- 1016-1021
- 1021-1026
- 1026-1031
- 1031-1036
- 1036-1041
- 1041-1046
- >1046



これらの事象は、ミューニュートリノ反応か、電子ニュートリノ反応かわからない場合があるので、ニュートリノ振動解析には、使われたりつかわれなかったりする。

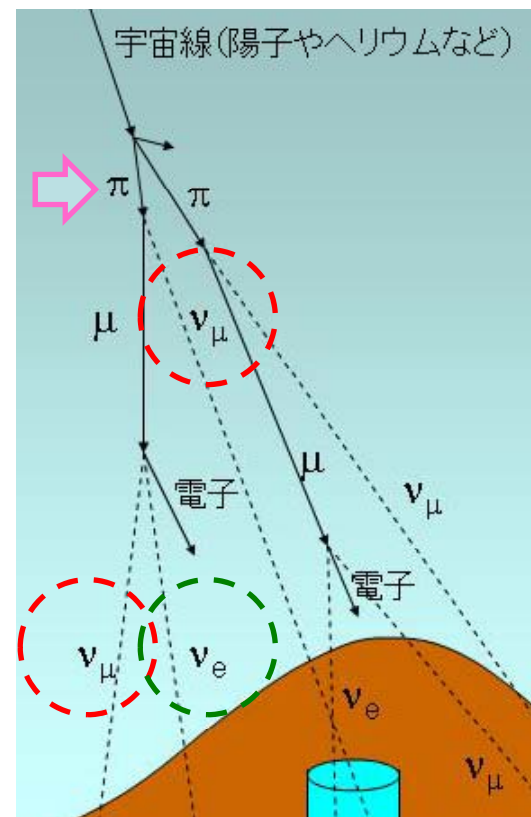
念のためもう一度： 大気ニュートリノの生成

宇宙線(P or He等)が大気に入射する

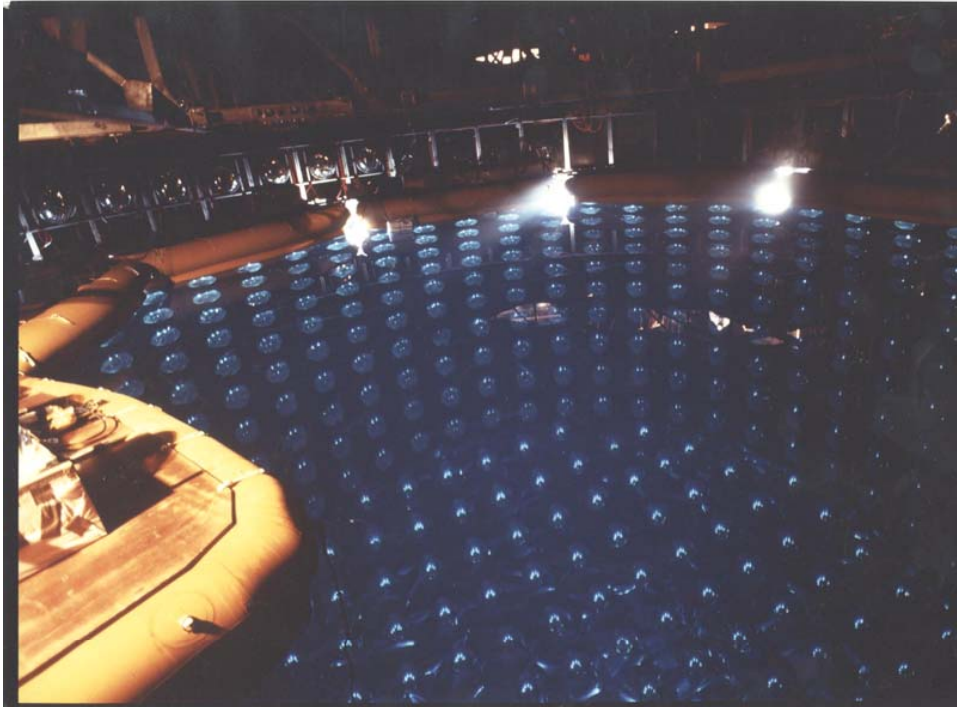


つまり、 π 中間子が1個生成されるたびに**ミューニュートリノが2個**、**電子ニュートリノが1個**生成される。

→ **ミューニュートリノ**と**電子ニュートリノ**の数の比は正確。



最初のヒント (1988年)



カミオカンデ

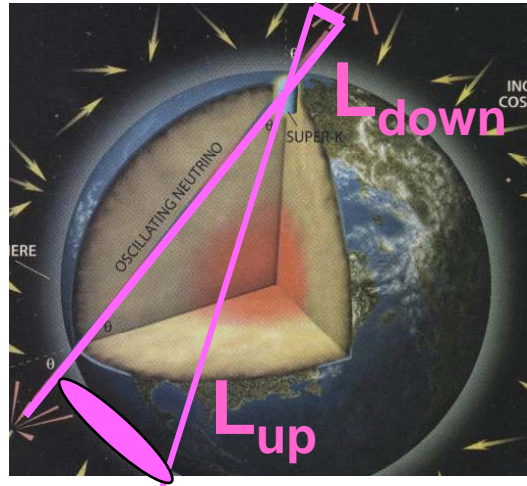
(3000トン 水チェレンコフ測定器.)

	データ	計算値
電子ニュートリノ	93	88.5
ミューニュートリノ	85	144.0

電子ニュートリノ反応の数はほぼ予想通り、しかし、ミューニュートリノ反応の数は明らかに少ない。ミューニュートリノがタウニュートリノにニュートリノ振動して減っているのか？

➡ しかし、数が少なく決定的なことが言えない。

大気ニュートリノ: もう一つの大切な特徴



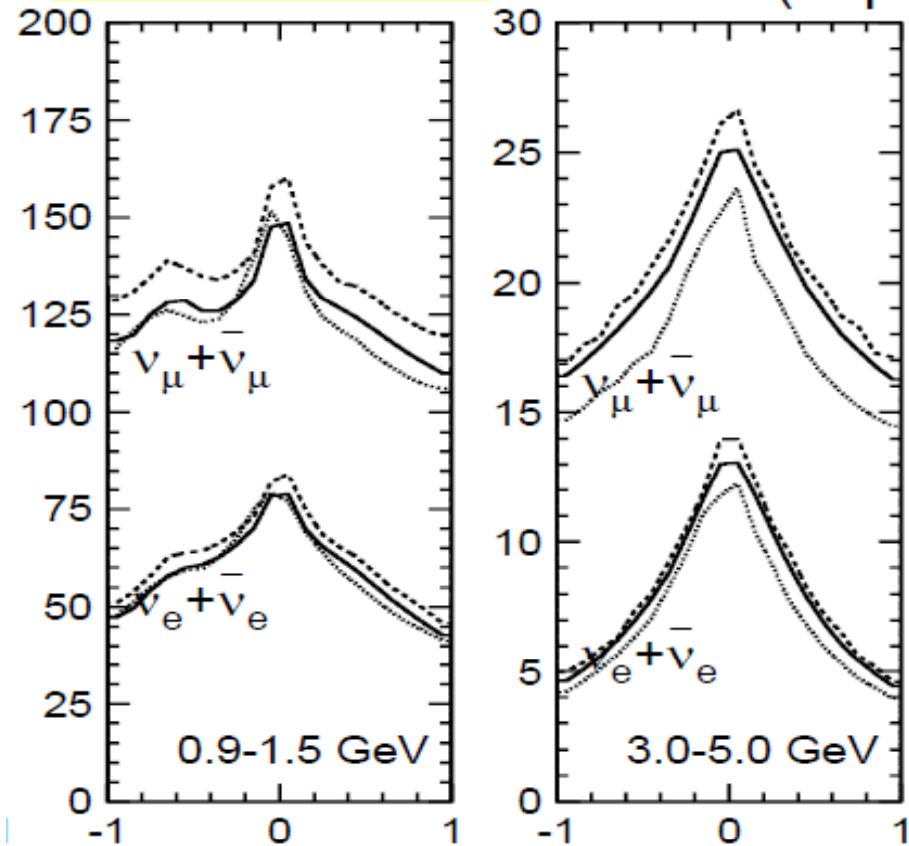
地球上のある点で生成されたニュートリノが測定器に入射する確率は $(1/\text{距離})^2$ 。上の図で言えば $(1/L_{\text{up}})^2$ 、または $(1/L_{\text{down}})^2$ 。

一方、上向きあるいは下向きのニュートリノを生成する表面積は距離の2乗に比例。



この2つの効果が厳密に相殺して、上下対称なフラックスが予想される。

天頂角分布



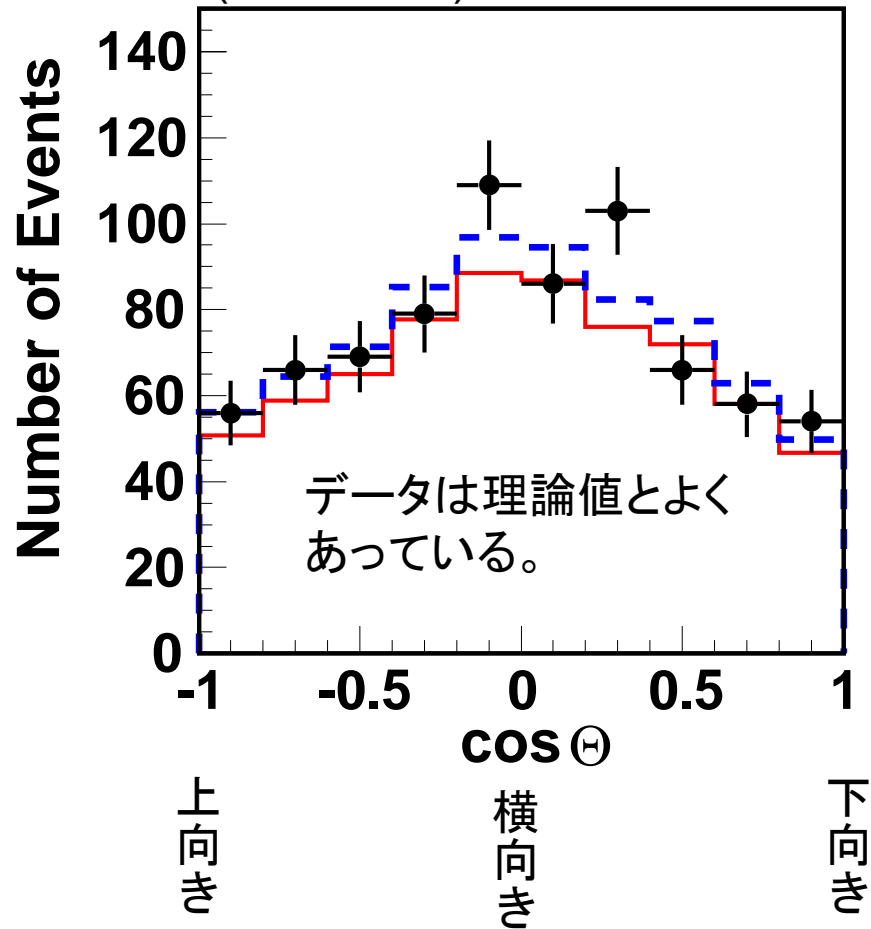
Up-going

Down

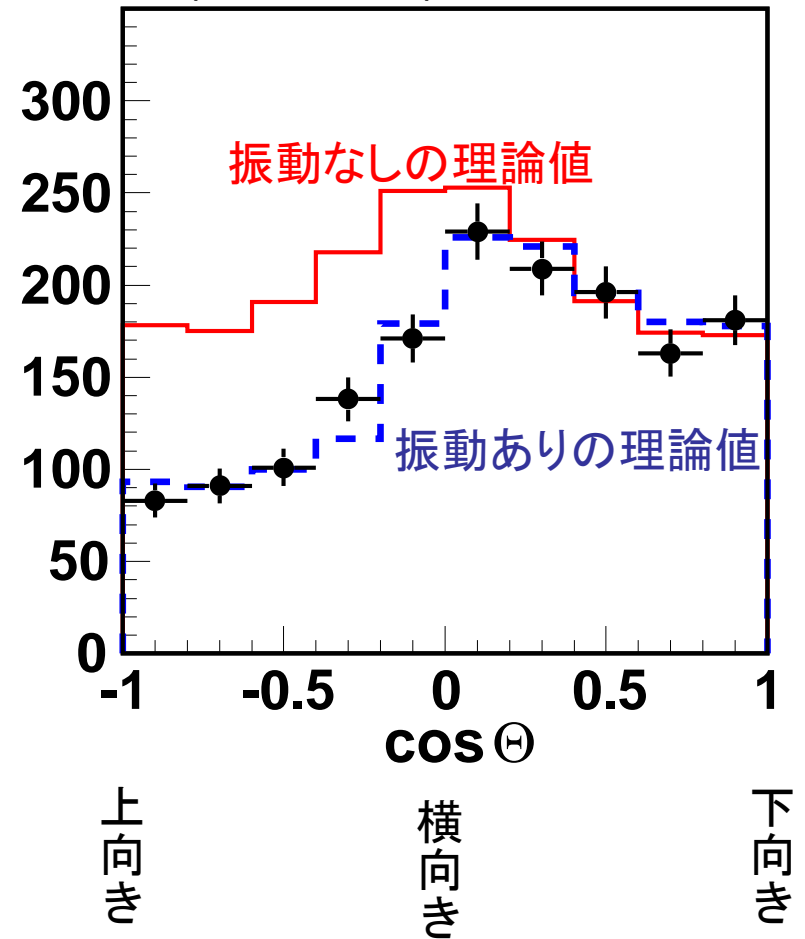
$\cos\theta_{\text{zenith}}$

スーパーカミオカンデのデータ

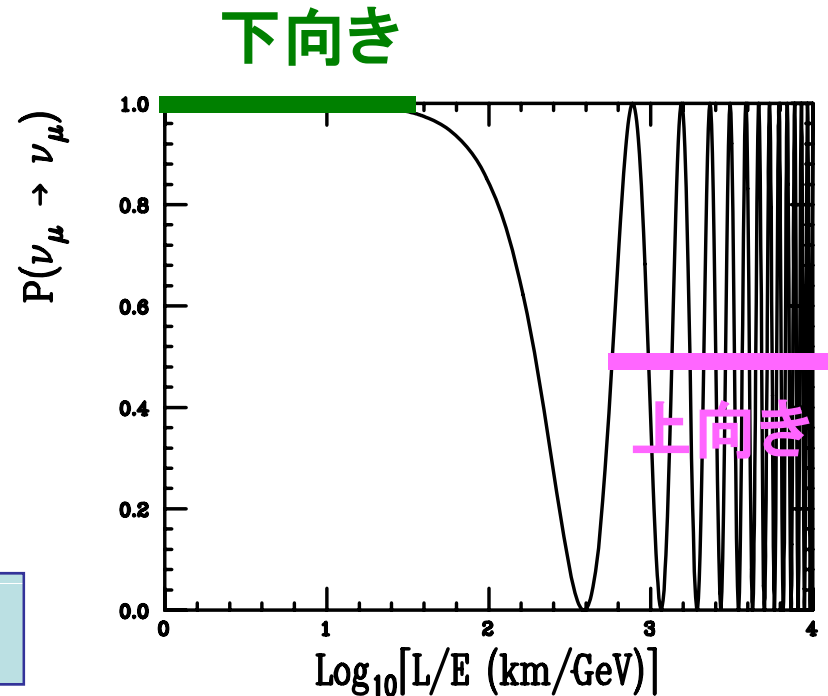
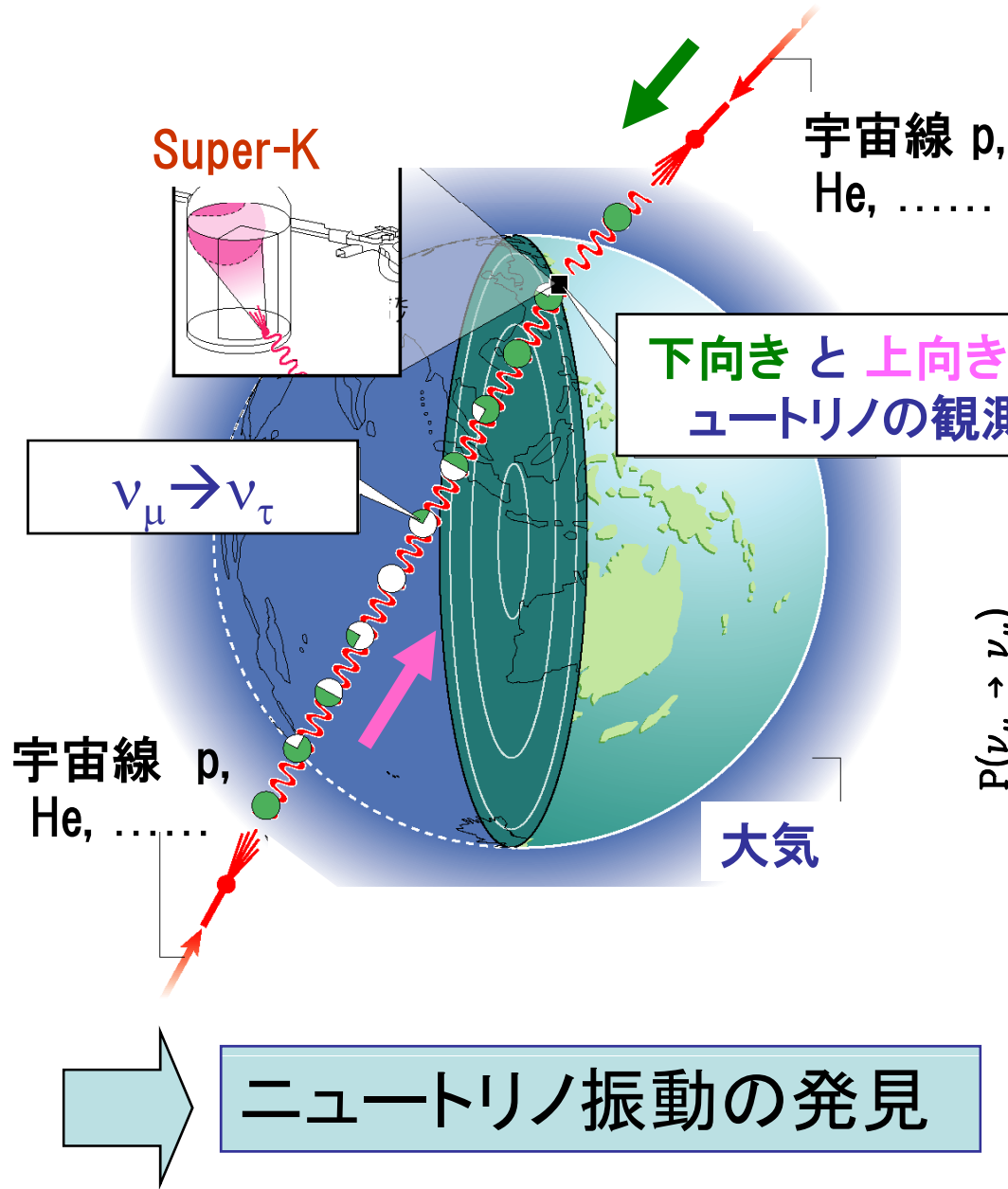
電子ニュートリノ事象
($E > 1.3 \text{ GeV}$)



ミューニュートリノ事象
($E > 1.3 \text{ GeV}$)



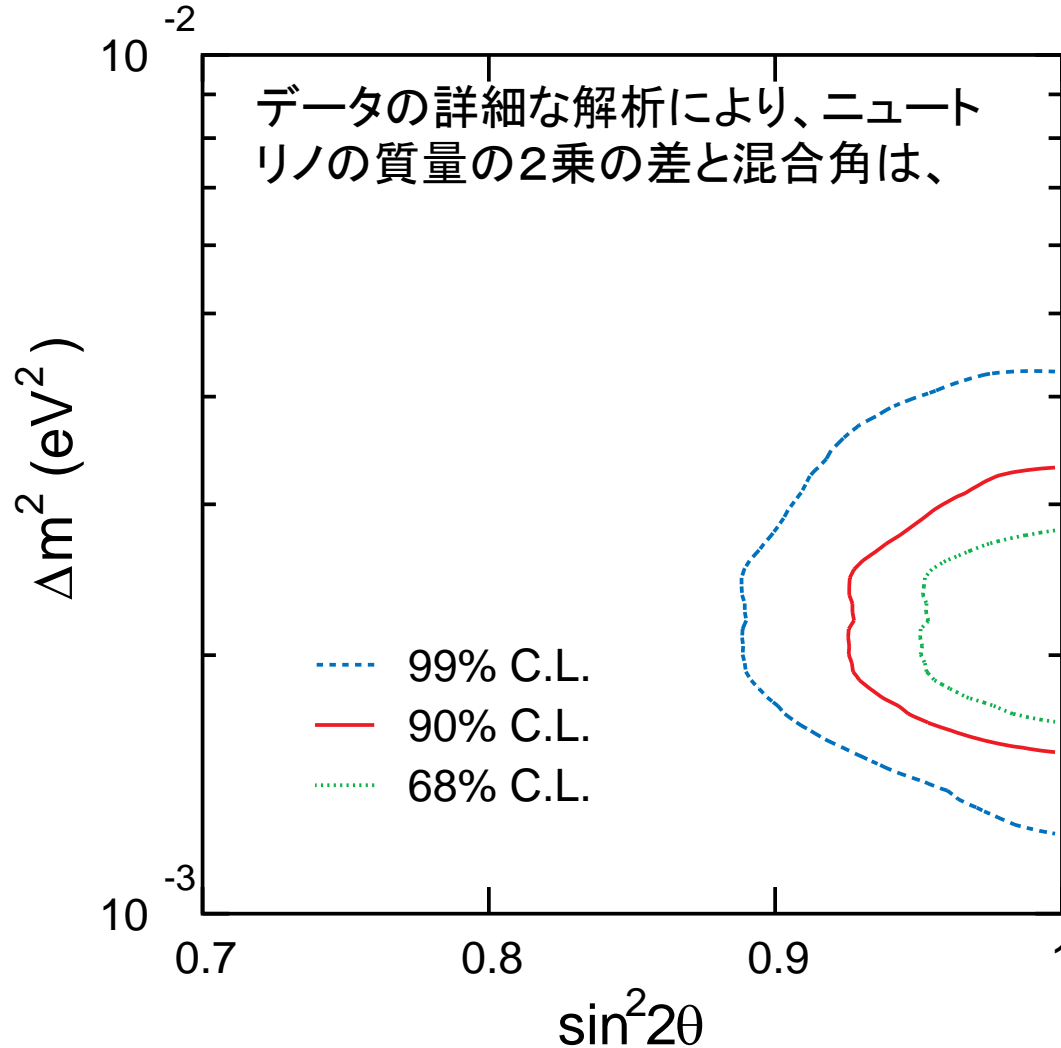
データの解釈 (ニュートリノ振動)



ニュートリノの重さの値について

ミューニュートリノとタウ
ニュートリノ間の振動

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



Δm^2 の中心値は;

$$2.1 \times 10^{-3} eV^2$$

もし、 $m_{\nu_3} \gg m_{\nu_2}$ なら、

$$M_{\nu_3} (\text{一番重いニュートリノ}) = 0.05 \pm 0.01 eV$$

(電子の 1/1000万)

(トップクォークの $1/(3 \times 10^{13})$)

また、混合角は $\sin^2 2\theta = 1$ なので、 $\theta = 45$ 度

がヒット

アルバム好調
芸能 12

会見 15

夕刊

読売新聞

THE YOMIURI SHIMBUN
EVENING EDITION (日刊) 第43865号

6月5日 金曜日
1998年(平成10年)

発行所
読売新聞社
東京都千代田区大手町1-7-1
郵便番号 100-8055
電話(03)3242-1111

©読売新聞社 1998年

しみじみと 心のかよう 贈り物

御菓子司
とらや

東京・赤坂 ☎03(3408)4121

4 版

なぞの素粒子 ニュートリノ

「質量ある」最終結論

理論物理の根幹一新

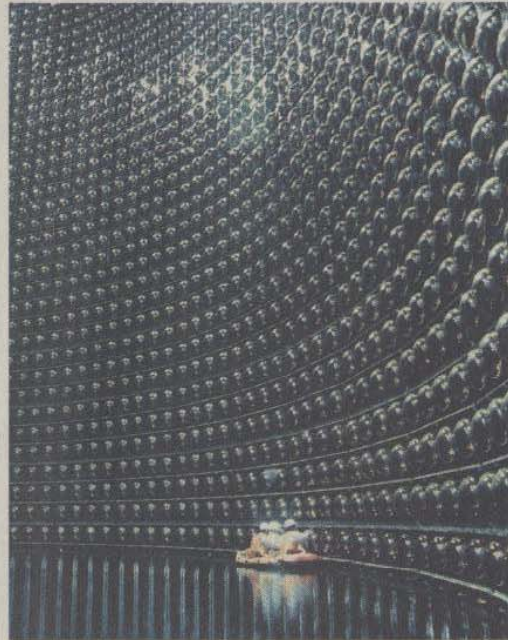
宇宙空間に充滿する基本粒子でありながら、質量(重さ)の有無がわからなかったなぞの素粒子「ニュートリノ」について、東大宇宙線研究所(戸塚洋三所長)の日本共同実験グループは、「質量はある」との最終的な結論をまとめ、五日午前、岐阜県高山市で開催中のニュートリノ国際会議で発表した。質量ゼロを前提としている現在の標準理論の書き換えなど、現代物理学の根幹を揺るがす成果といえる。 (解説・面)

実験グループは一昨年四、鉦山の探掘跡を利用した地 下貯水タンク「スーパーカミオカンデ」(貯水量五万トン)で、ニュートリノを観測を続けてきた。

注目したのは、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーニュートリノが、

「粒子が大気中で生ずる大気ニュートリノ」中の「ミュー型」の種類。

金



ニュートリノの質量を捕らえた観測装置「スーパーカミオカンデ」(東大宇宙線研究所提供)

スーパーカミオカンデ 岐阜県・神岡鉦山の地下約千々に高さ四十一・四メートル、直径三十九・三メートルの円筒をくり抜き、中に汚染物質の極めて少ない五万トンの純粋な水を満たした。東大宇宙線研究所のニュートリノ観測装置。水中に飛び込んだニュートリノが原因となって発生する特殊な光を、壁面を埋め尽くした約一万二千本の光センサー「光電子増倍管」でキャッチする。建設費約百四億円。

日本版ビッグバン するための金融システムと、土地などとして販売できず、資産流動化法など、は、五日の参院本会 自民、民主、公明、

アメリカ クリントン 大統領



June 5, 1998

**REMARKS BY THE PRESIDENT AT MASSACHUSETTS INSTITUTE OF
TECHNOLOGY 1998 COMMENCEMENT**

THE WHITE HOUSE

Office of the Press Secretary
(Lincoln, Massachusetts)

For Immediate Release
1998

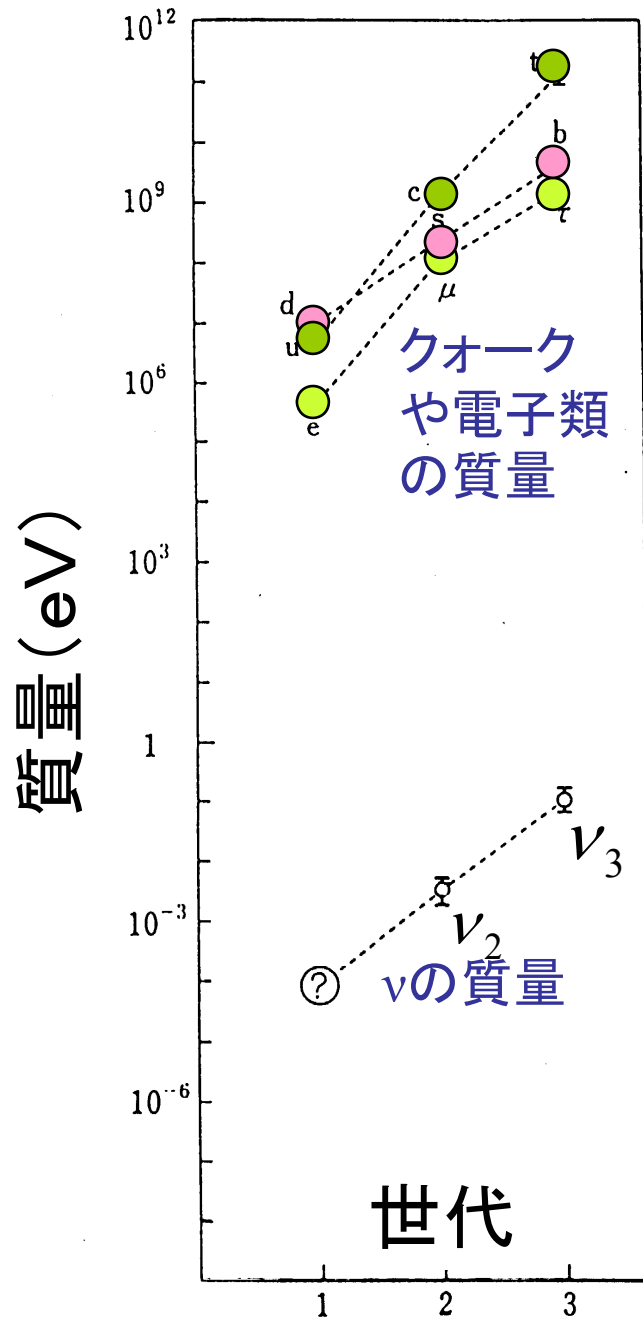
June 5,

.....

First, we must help you to ensure that America continues to lead the revolution in science and technology. Growth is a prerequisite for opportunity, and scientific research is a basic prerequisite for growth. Just yesterday in Japan, physicists announced a discovery that tiny neutrinos have mass. Now, that may not mean much to most Americans, but it may change our most fundamental theories -- from the nature of the smallest subatomic particles to how the universe itself works, and indeed how it expands.

This discovery was made, in Japan, yes, but it had the support of the investment of the U.S. Department of Energy. This discovery calls into question the decision made in

なぜ、そんなにニュートリノの質量が大切なのか？



$$\frac{\text{ニュートリノの質量}}{\text{他の素粒子の質量}} < \frac{1}{10,000,000,000}$$

なぜこんなに小さいのだろう？
ニュートリノの質量は；

$$m_\nu = \frac{m_q^2}{m_N}$$

と表せることが知られている(柳田, 及びGell-Man, Ramond, Slansky, 1979)。ここで、 m_q はクォークの質量、 m_N は未知の重い粒子の質量。

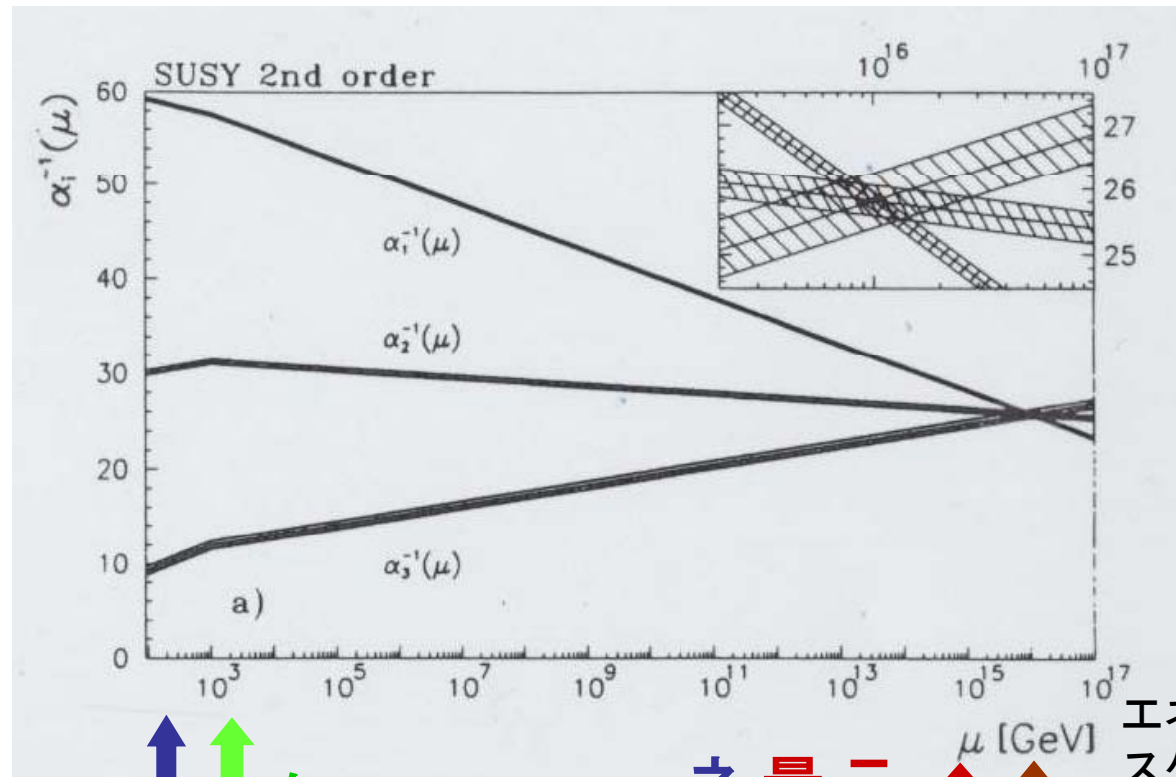
観測されたニュートリノの質量をもちいて、未知の粒子の質量を見積もる。

ニュートリノと大統一理論

力の強さの逆数

電磁力
+
弱い力

強い力



現在の加速器

次世代の加速器

エネルギースケール
ニュートリノの質量が示唆するエネルギースケール

大統一理論

エネルギースケール

加速器を用いたニュートリノ振動実験 によるニュートリノ振動の確認

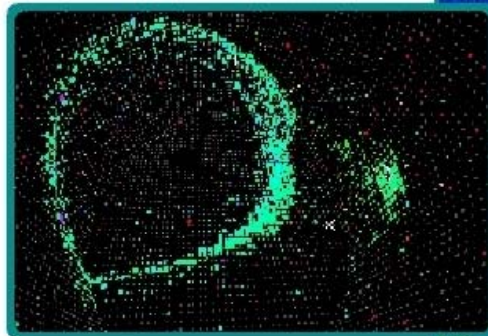
K2K実験 (1999-2004)

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



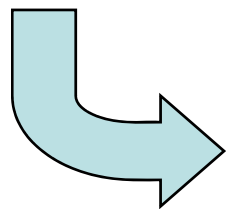
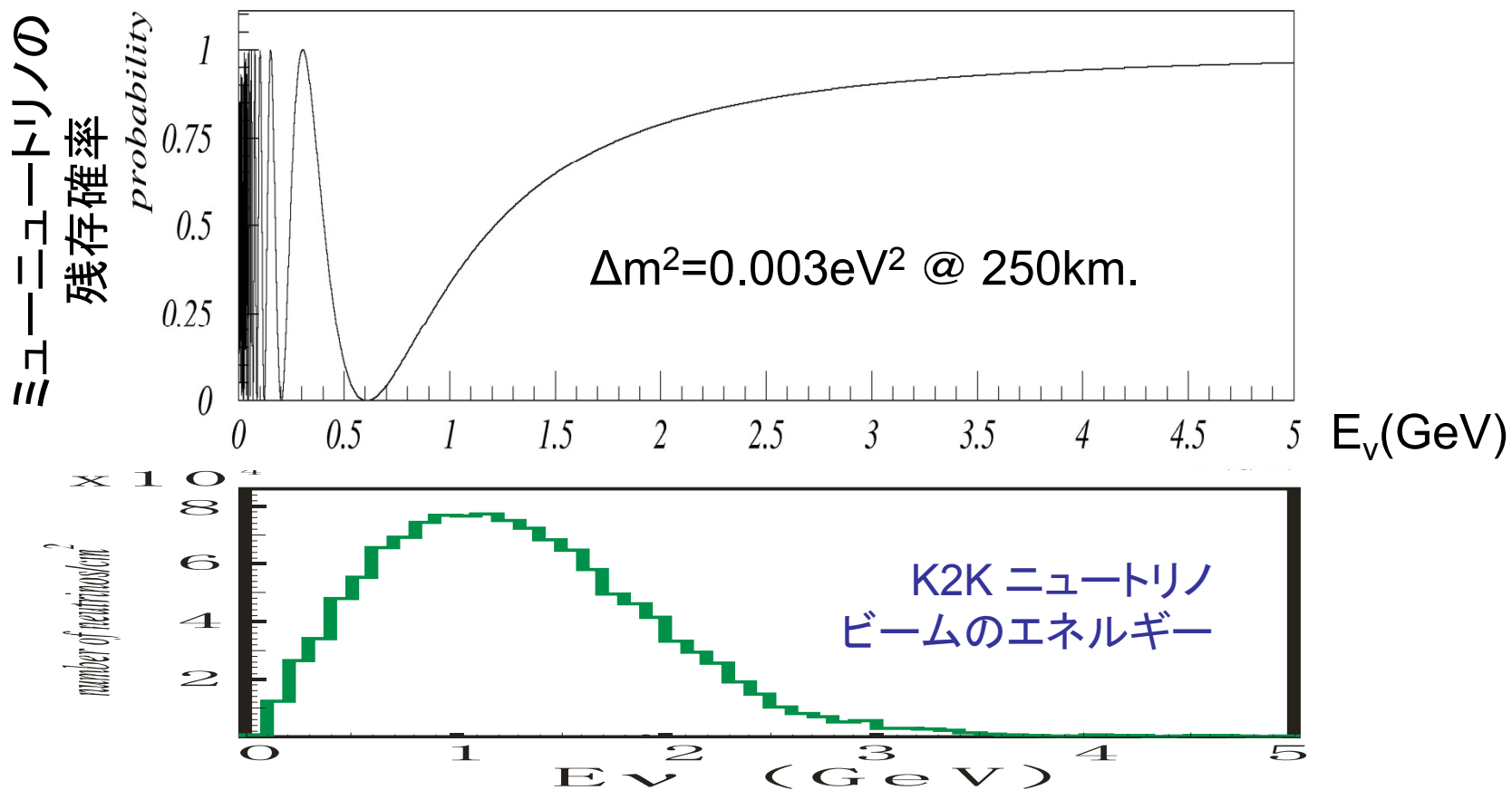
Super-KAMIOKANDE



ニュートリノを測定する:

スーパーカミオカンデ

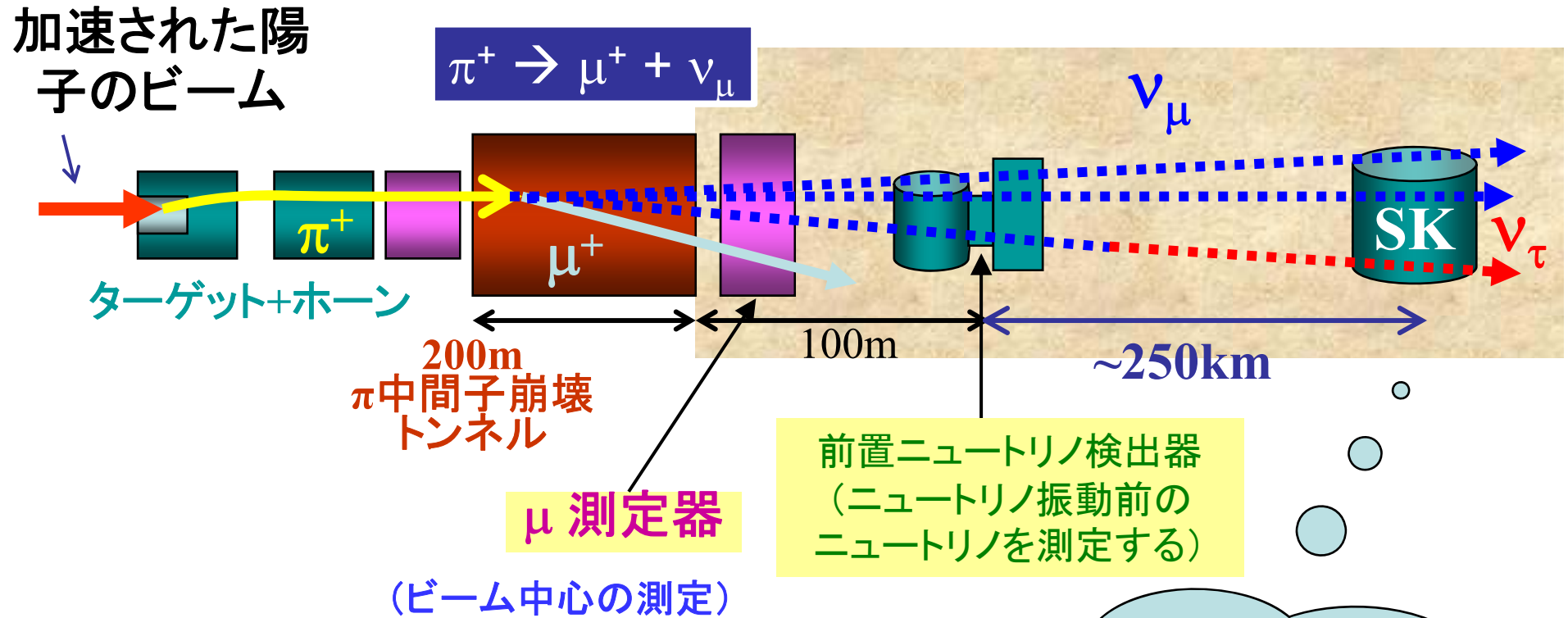
ミューニュートリノの残存確率



ν_μ 事象の欠損

エネルギースペクトルのゆがみ

実験の原理



K2K実験におけるニュートリノ振動の信号を観測する。

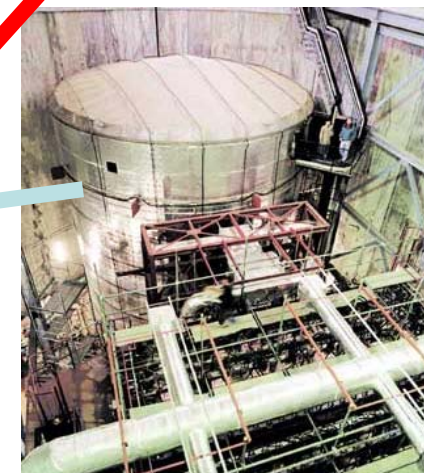
ニュートリノビームの生成

250km先のスーパーカミオカンデへ

高エネルギー加速器研究機構(つくば)



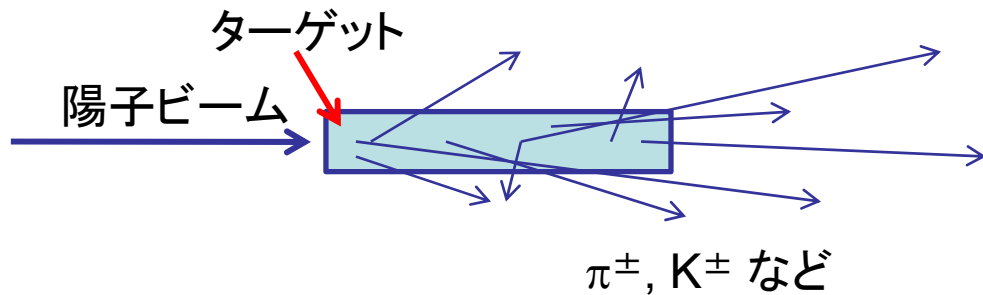
陽子加速器



ニュートリノ生成トンネル

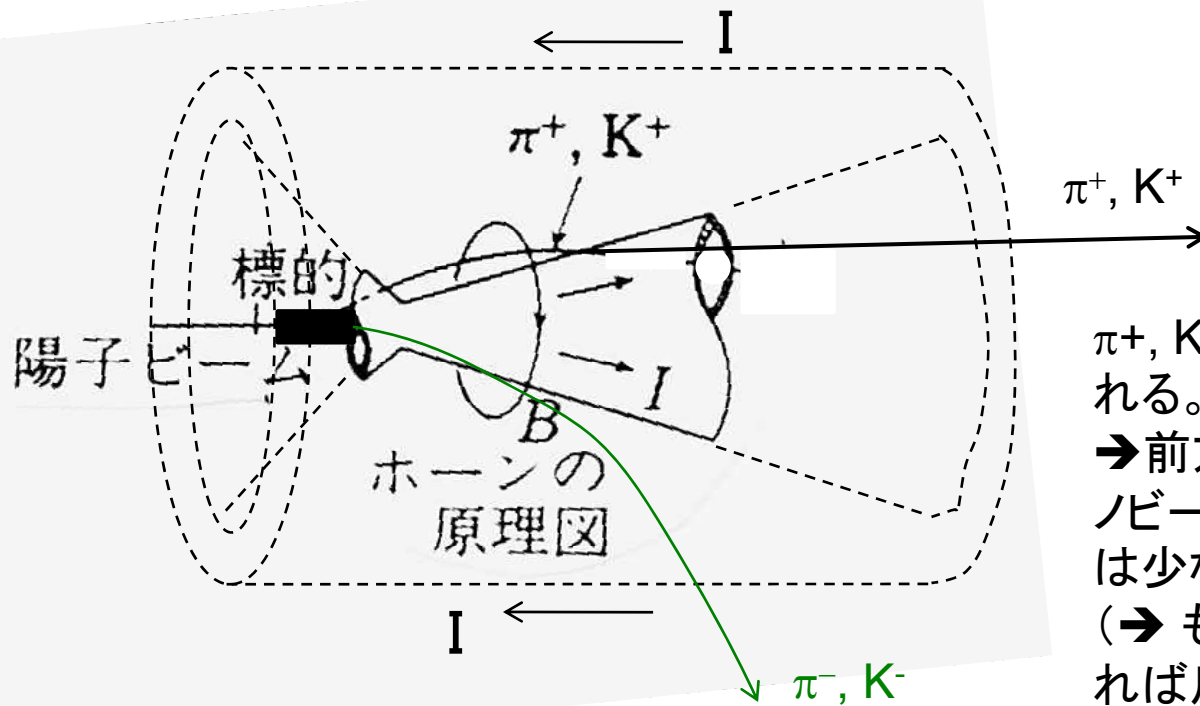


寄り道：(比較的)方向のそろったニュートリノビーム生成の技術



ターゲットから出てくるパイ中間子や、K中間子の方向は全体としては前方方向が多いが、その方向はかなりバラバラ。従って、離れた地点でのニュートリノフラックスは小さい。

そこで、



π^+, K^+ が前方に放出される。
 →前方に強いニュートリノビーム(反ニュートリノは少ない)
 (→もし電流を反転すれば反ニュートリノの強いビームが得られる。)

2回目 ここまで