

平成12年度後期
現代物理学入門Ⅱ

2001年1月31日

7. 最近の話題：ニュートリノ振動

～ニュートリノ物理超入門～

高エネルギー加速器研究機構

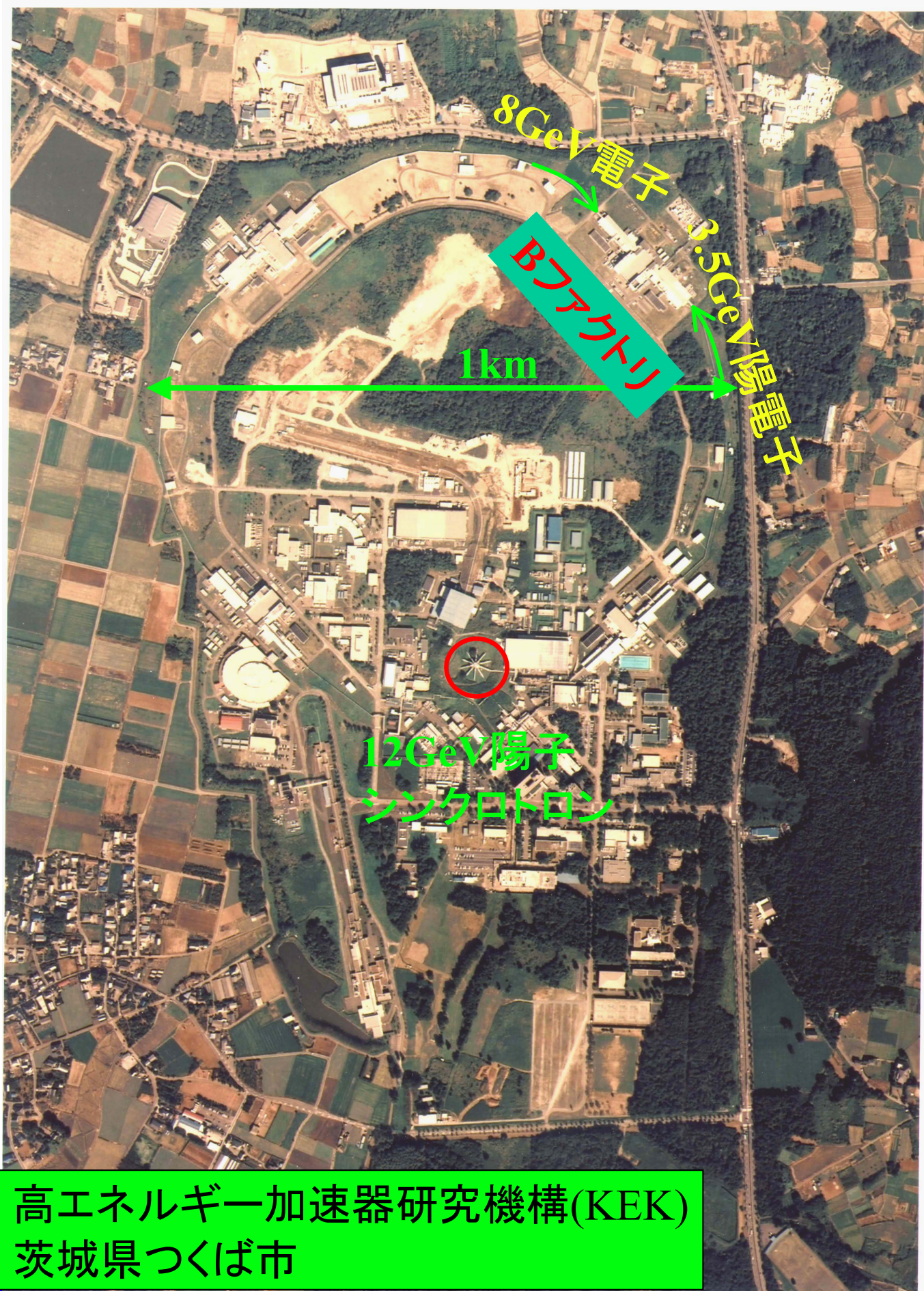
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

素粒子原子核研究所

小林 隆

takashi.kobayashi@kek.jp

(PDF file: <http://neutrino.kek.jp/~kobayashi/hiroshima>)



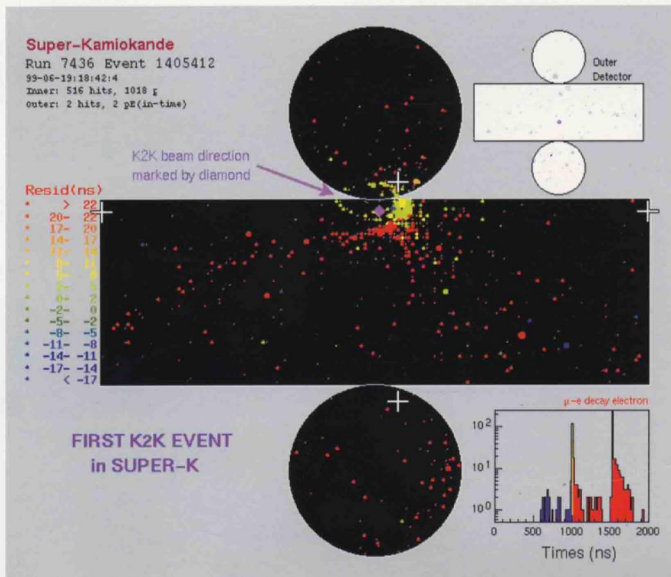
高エネルギー加速器研究機構(KEK)
茨城県つくば市

世界初、長距離飛行人工 ニュートリノの観測に成功！

1999年6月

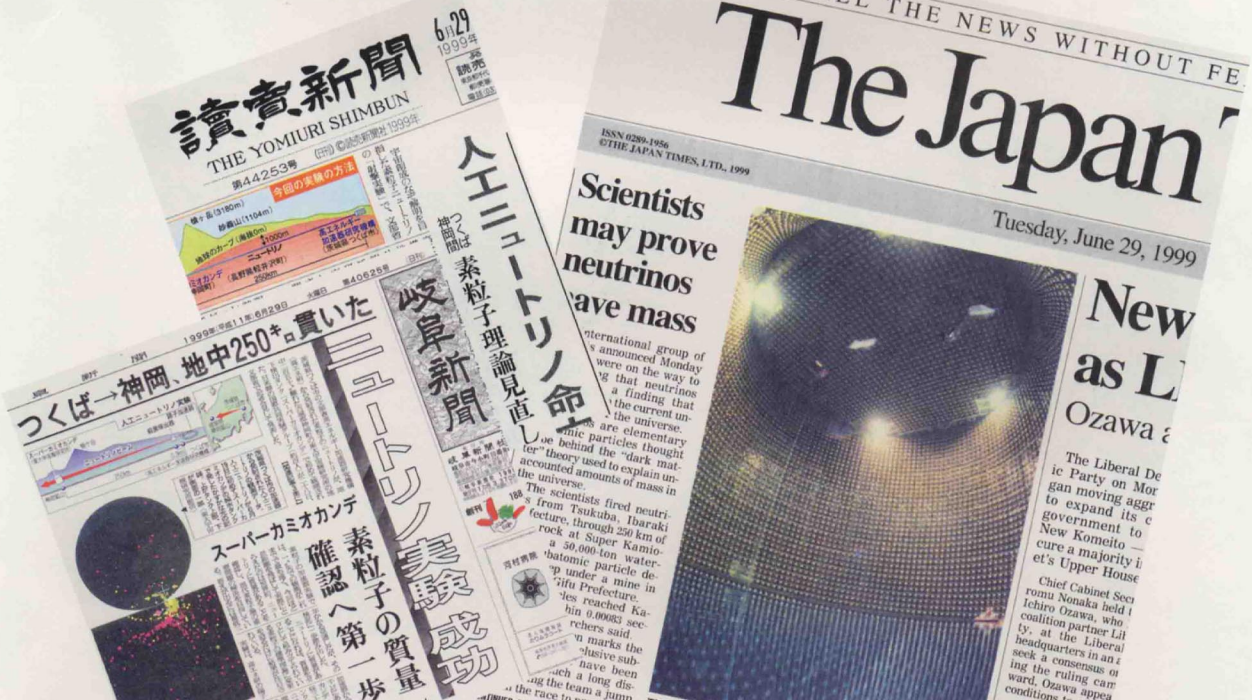
K2K実験では、1999年6月19日（土）18時42分（日本標準時）に、スーパーカミオカンデにおいて最初のニュートリノ事象を観測しました。これは、人工的に発生した素粒子を地中250kmもの長距離を飛行させて観測した、世界最初の実例です。この成果は、内外のメディアに大きくとり上げられました。

スーパーカミオカンデでは、実験全体を通じて、ニュートリノ振動が起きない場合は200事象程度、ニュートリノ振動が起きている場合はそれより少ない事象が観測されると期待されます。



スーパーカミオカンデで検出された最初のニュートリノ事象。

この図は円筒形の検出器の展開図で、各光電子増倍管の色がチェレンコフ光を観測した時間を、大きさが光量を表わします。右上には、外部検出器（検出器の外側の厚さ約2.5mの水の層で、やはり光電子増倍管が取り付けられている）のデータが示されており、ここに信号が無いことから、このニュートリノ反応が検出器内部で起きたことが分かります。+印がニュートリノ反応が起きた位置を、ダイヤ印がそこから見たニュートリノビームの方向を示します。事象の発生時間は、100万分の1秒のニュートリノビームパルスに同期していました。また、この事象で発生した粒子の方向はニュートリノビームから予想される方向とよく一致しており、この事象が間違いなくニュートリノビームによるものであることを示しています。



共同研究機関：

高エネルギー加速器研究機構／東京大学宇宙線研究所／神戸大学／京都大学／新潟大学／岡山大学／大阪大学／東京理科大学／東北大学（日本）／全南大学／東新大学／高麗大学／ソウル国立大学（韓国）／ボストン大学／カリフォルニア大学アーバイン校／ハワイ大学／ニューヨーク州立大学ストーニブルック校／ワシントン大学（米国）／ワルシャワ大学（ポーランド）

目次

1. ニュートリノとは？
2. 自然界のニュートリノ
3. ニュートリノの謎
4. ニュートリノ振動
5. ニュートリノの検出
6. スーパーカミオカンデ
7. 長基線ニュートリノ振動実験「K2K」
8. 将来
9. おまけ
ニュートリノ関係の読み物
関連のWEBページ

ニュートリノ(neutrino: ν)とは？

- 素粒子の一つ
- 三つのタイプ
 - 電子ニュートリノ(ν_e)
 - ミューニュートリノ(ν_μ)
 - タウニュートリノ(ν_τ)
- 特徴
 - 質量が極めて小さい
 - 電荷が0
 - 物質との相互作用が極めて小さい。
(電荷が0なので電磁相互作用なし。)

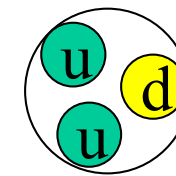
素粒子の標準理論 (過去30年全ての現象を説明)

(standard model)

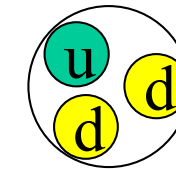
物質構成粒子

レプトン			電荷	相互作用
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$	0	W
			-1	EM, W
クォーク				
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$	+2/3	EM, W, S
			-1/3	EM, W, S
第1世代	第2世代	第3世代		

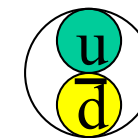
ニュートリノ
は弱い相互
作用だけ!!



陽子



中性子



π中間子

ゲージ粒子(相互作用を媒介)

γ (光子): 電磁相互作用 (ElectroMagnetic interaction)

$W^\pm, Z^0$: 弱い相互作用 (Weak interaction)

(β崩壊、太陽エネルギー)

gluon : 強い相互作用 (Strong interaction)

(原子核を形成)

ヒッグス(Higgs)粒子: 素粒子の質量の起源(未発見)

ニュートリノ特徴1: 質量

極めて軽い!

実験的には上限値のみ

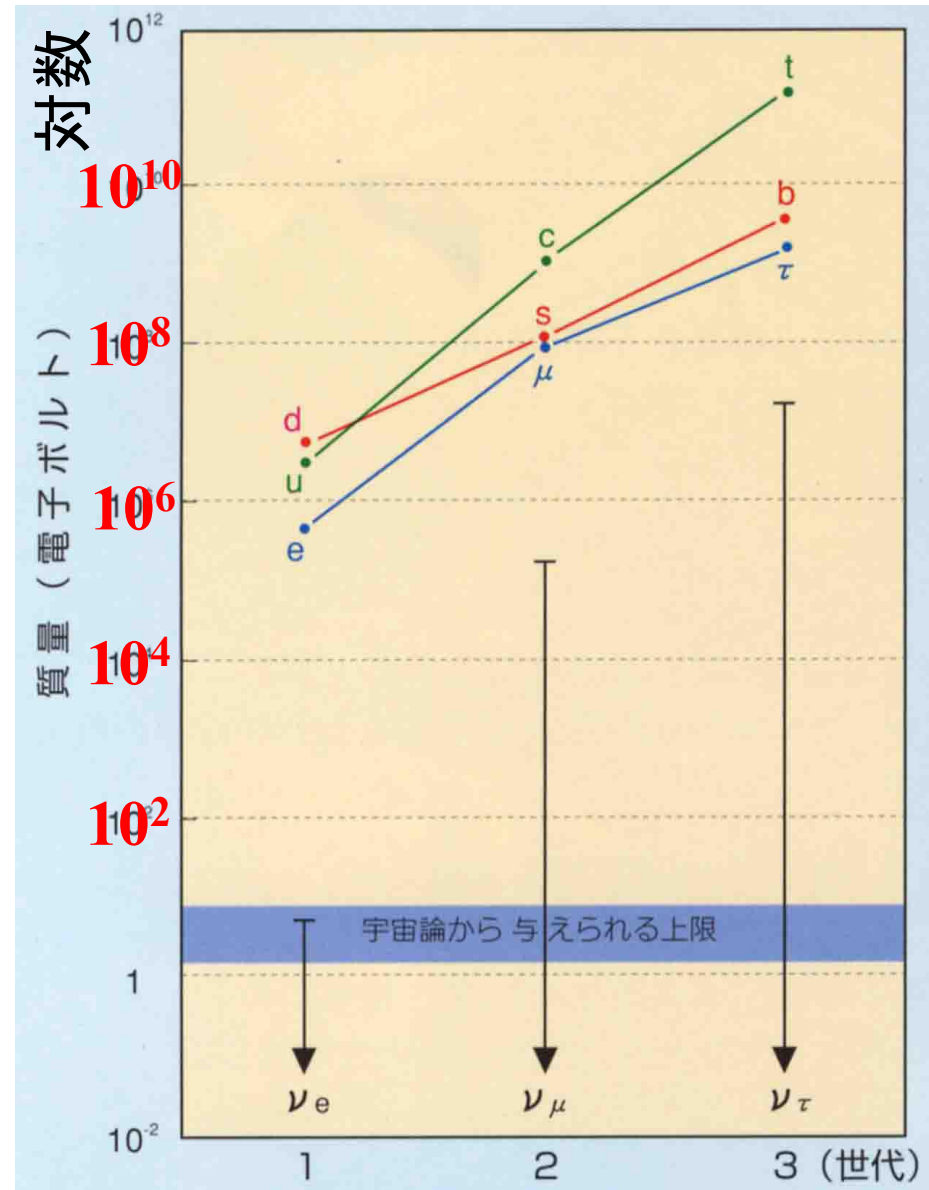
ν_e : **<3eV** (e:511keV)

ν_μ : **<190keV** (μ :106MeV)

ν_τ : **<18.2MeV** (τ :1.8GeV)

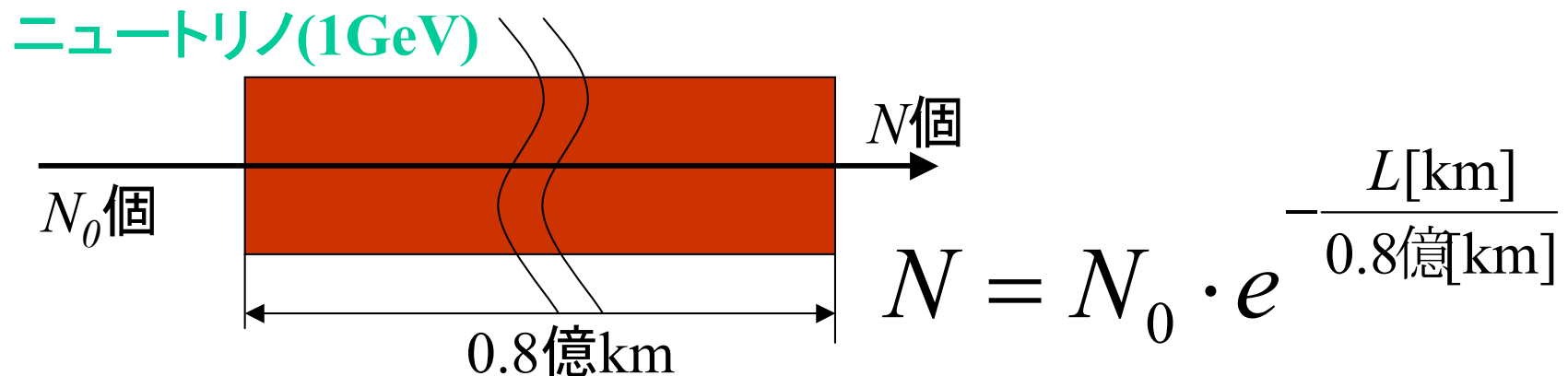
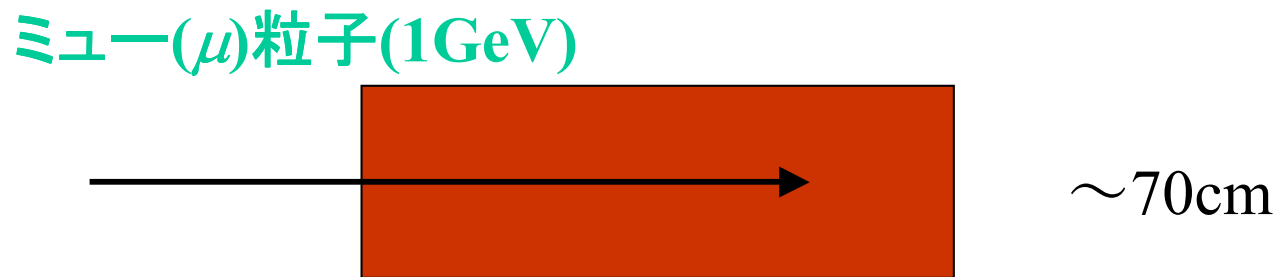
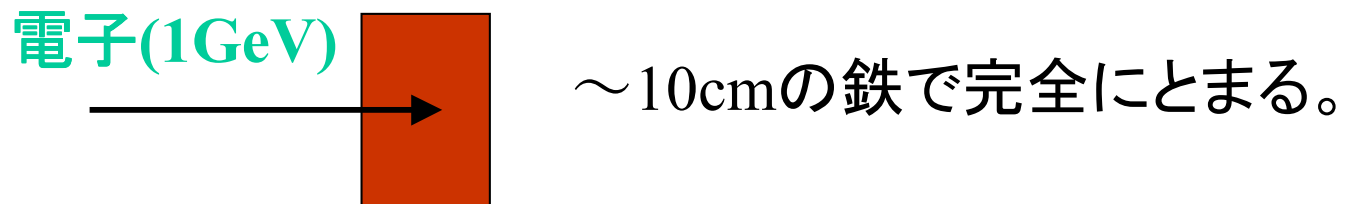
参考:陽子 $\sim 1\text{GeV}$

素粒子の標準理論
では厳密に0と仮定



ニュートリノの特徴2: 相互作用

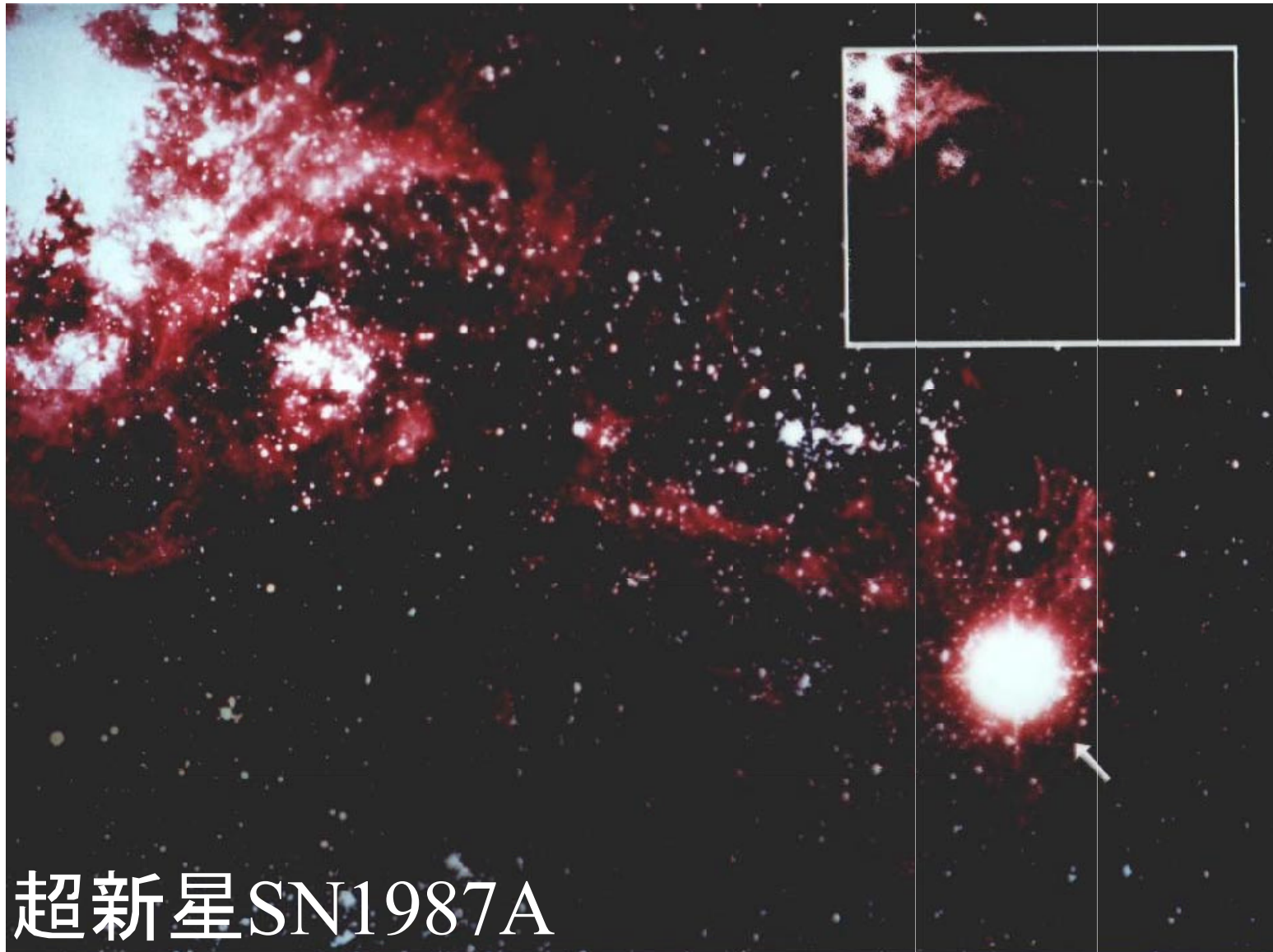
- 物質との反応確率が極めて小さい。→ 検出難しい



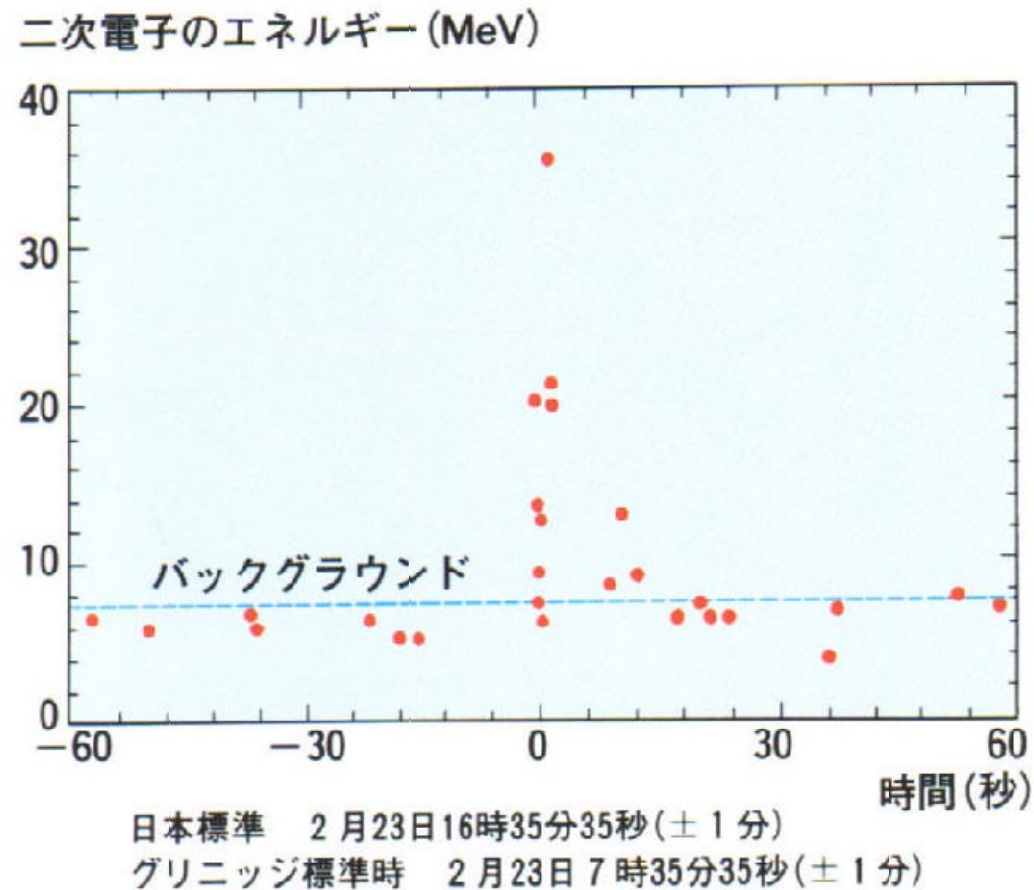
自然界のニュートリノ

- 太陽(からの)ニュートリノ $\sim \text{MeV}$ $\sim 600 \text{億個/cm}^2/\text{秒}$
核融合反応からの ν_e
- 大気(からの)ニュートリノ $\sim \text{GeV}$ $\sim 1 \text{個/cm}^2/\text{秒}$
宇宙線(p, He)と大気分子の衝突で生成される ν_μ, ν_e
- 地球(内部からの)ニュートリノ $\sim \text{MeV}$ $\sim 400 \text{万個/cm}^2/\text{秒}$
U, Puの崩壊でできる反電子ニュートリノ
- 超新星(からの)ニュートリノ $\sim 10 \text{MeV}$ $\sim 15 \text{億個/cm}^2$
電子陽電子対消滅などからの ν_e, ν_μ, ν_τ SN1987A(15万光年)
- 宇宙背景ニュートリノ $\sim \text{meV}$ $\sim 10 \text{兆個/cm}^2/\text{秒}$
宇宙初期に生成されたニュートリノが冷えて(エネルギーが下がって)漂っている。 ν_e, ν_μ, ν_τ

超新星SN1987A(マゼラン星雲内15万光年)



SN1987Aの信号



カミオカンデ検出器で検出された超新星ニュートリノ

ニュートリノ天文学の幕開け

ニュートリノの謎

- 極端に軽い(質量が小さい)

ν_e の質量 電子の約5桁以上軽い！！

- 厳密に0なのか？有限な質量を持つのか？
- どのくらいの質量か？
- なぜ他のレプトン、クォークに比べてそんなに軽いのか？

- もし質量が0でなければ、、、

- 標準理論で説明できない最初の現象！！
- 全ての力(電磁、弱、強)を統一的に記述しようと提唱されている「大統一理論」(Grand Unified Theory:GUT)モデルの多くが有限なニュートリノ質量を予言

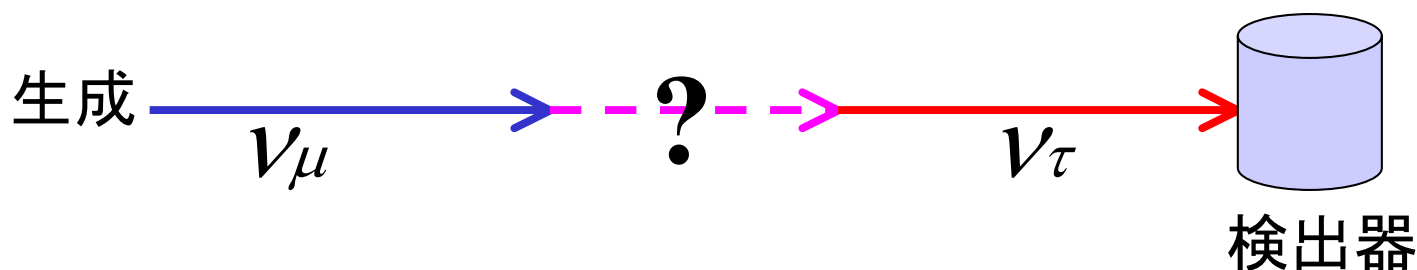
大統一理論の重大なヒント！！

ニュートリノ振動

ニュートリノ質量が0かどうかを調べるほとんど唯一の方法

現象

生成されたときのニュートリノの種類が飛行中に他の種類に変化する。



- 量子力学的効果
- ニュートリノが質量持つときに限り起こる。

ニュートリノ振動(II)

弱い相互作用(行列)の“固有ベクトル” $\begin{matrix} | \nu_\mu \rangle & | \nu_\tau \rangle \end{matrix}$

量子力学
粒子=
固有ベクトル

質量(行列)の“固有ベクトル”
固有値(質量)

$\begin{matrix} | \nu_1 \rangle & | \nu_2 \rangle \\ m_1 & m_2 \end{matrix}$

ニュートリノ混合

$$\begin{pmatrix} | \nu_\mu \rangle \\ | \nu_\tau \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} | \nu_1 \rangle \\ | \nu_2 \rangle \end{pmatrix}$$

$$\Delta m^2 \equiv |m_1^2 - m_2^2|$$

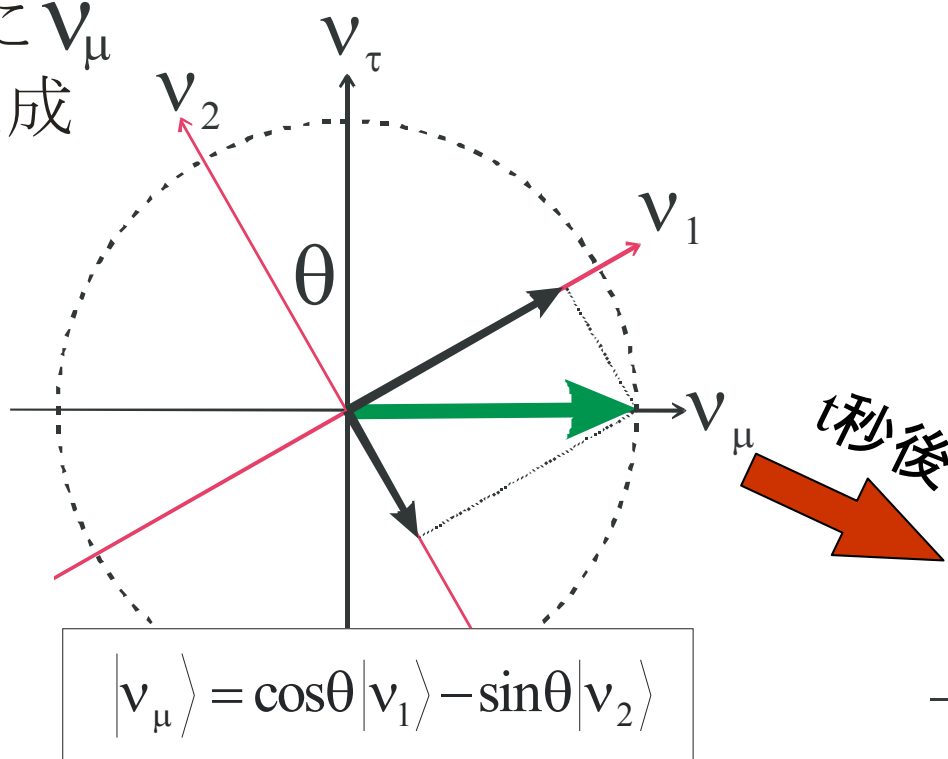
変化の確率

$$p(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right)$$

L : 飛行距離、 E_ν : ニュートリノエネルギー

ニュートリノ振動(III)

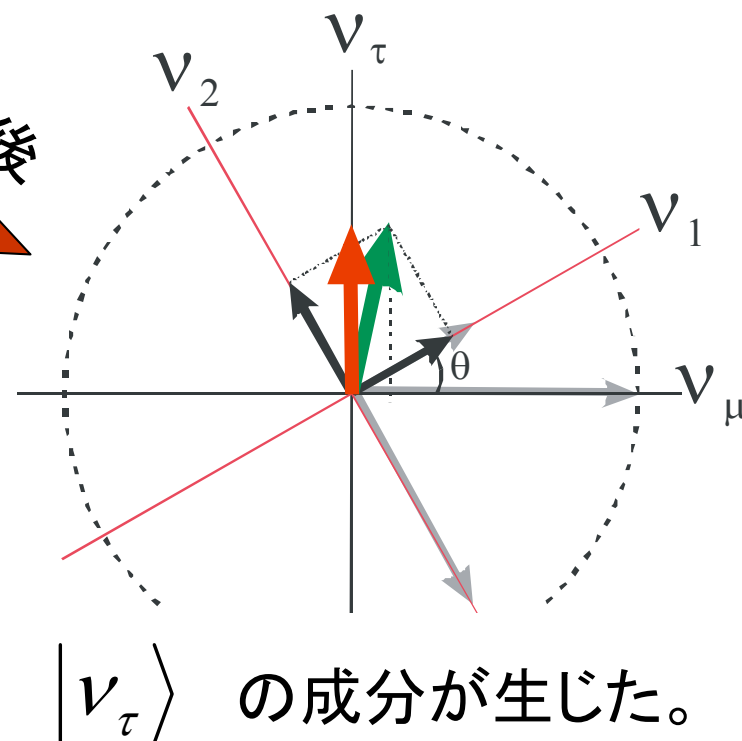
$t=0$ に ν_μ
が生成



ν_1, ν_2 が異なる周期で振動

$$|\nu_1(t)\rangle = \cos(m_1 t) |\nu_1\rangle$$

$$|\nu_2(t)\rangle = \cos(m_2 t) |\nu_2\rangle$$

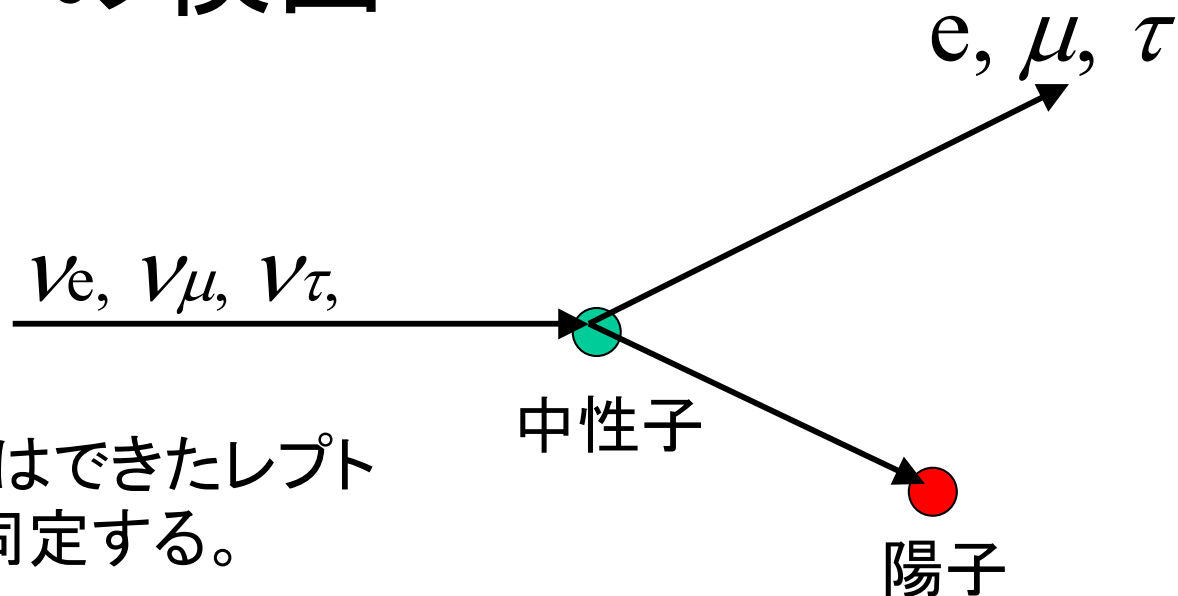


$$\begin{pmatrix} |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix}$$

ニュートリノの検出

代表的な反応

ニュートリノの種類はできたレプトン(e, μ, τ)の種類で同定する。



エネルギー閾値

(エネルギー保存則より)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \updownarrow \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \updownarrow \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \updownarrow \\ \tau \end{pmatrix}$$

$$\nu_\mu \rightarrow \mu : E_\nu > 110 \text{ MeV}$$

$$\nu_\tau \rightarrow \tau : E_\nu > 3.5 \text{ GeV}$$

ex. 1 GeV の ν_τ は上の反応を起こせない。

ニュートリノ検出器

➤ 検出方法

反応で生成された荷電粒子(e , μ , p 等)を検出

➤ 検出器の必要条件

– 大きな質量

- 反応数は中性子などの反応標的の数に比例するので大量の標的が必要。

– 反応で生成される荷電粒子が検出可能

➤ 検出器の型

– 能動標的型(active target)

- ニュートリノ反応の標的が荷電粒子検出器にもなっている。
 - 例: スーパーカミオカンデなどの水チェレンコフ検出器

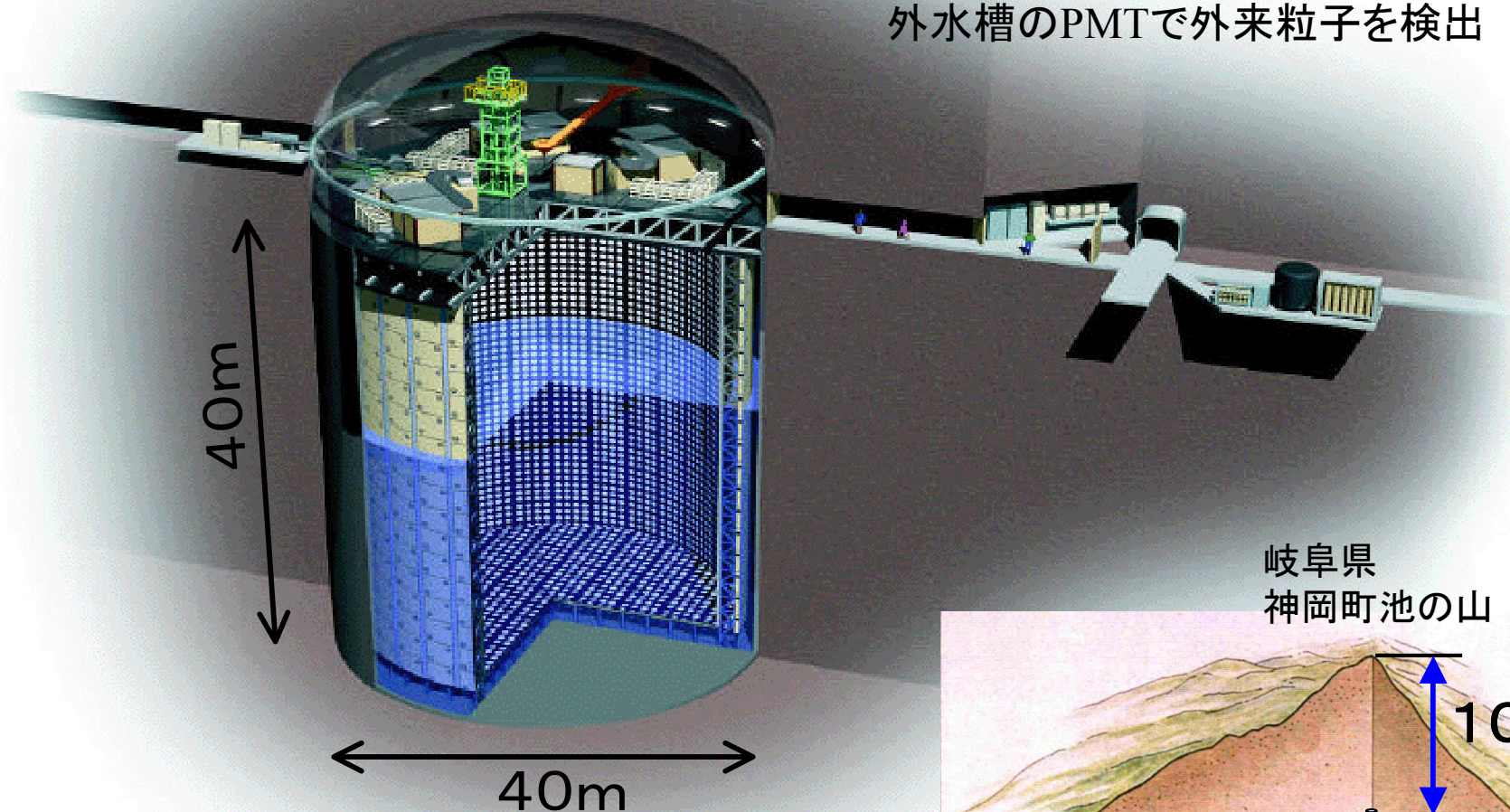
– 機能分離型(separated function)

- 反応標的と荷電粒子検出器が分かれている。
 - 鉄板とシンチレーションカウンターの積層タイプなど。

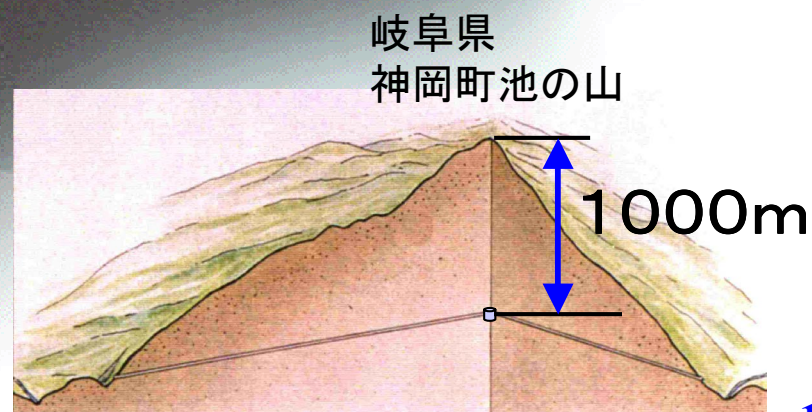
能動標的型検出器(水チェレンコフ検出器)

スーパーカミオカンデ

反応標的:水**50000**トン(超純水)
水槽の内面に**11146**本の
光電子増倍管(photomultiplier tube:PMT)
外水槽のPMTで外来粒子を検出



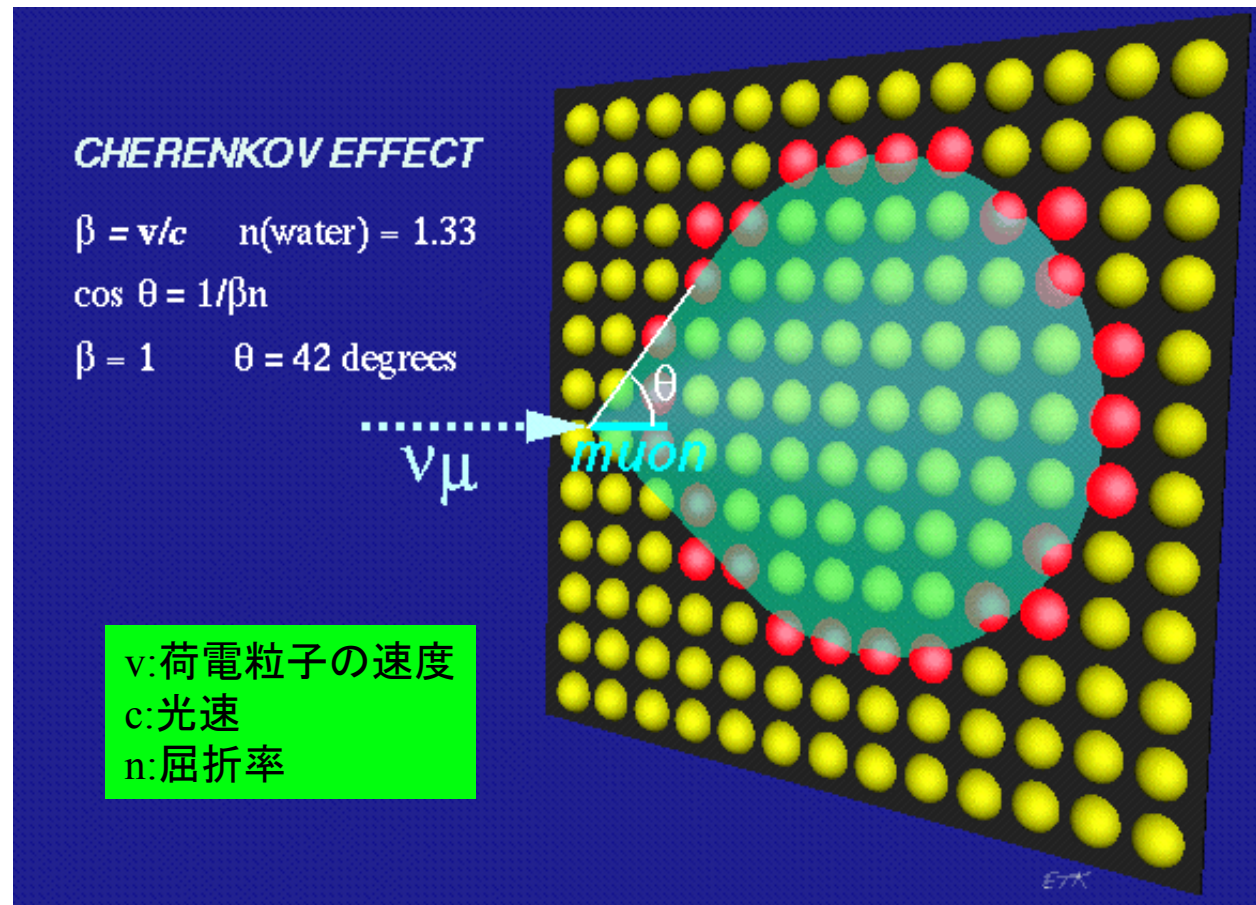
東京大学宇宙線研究所



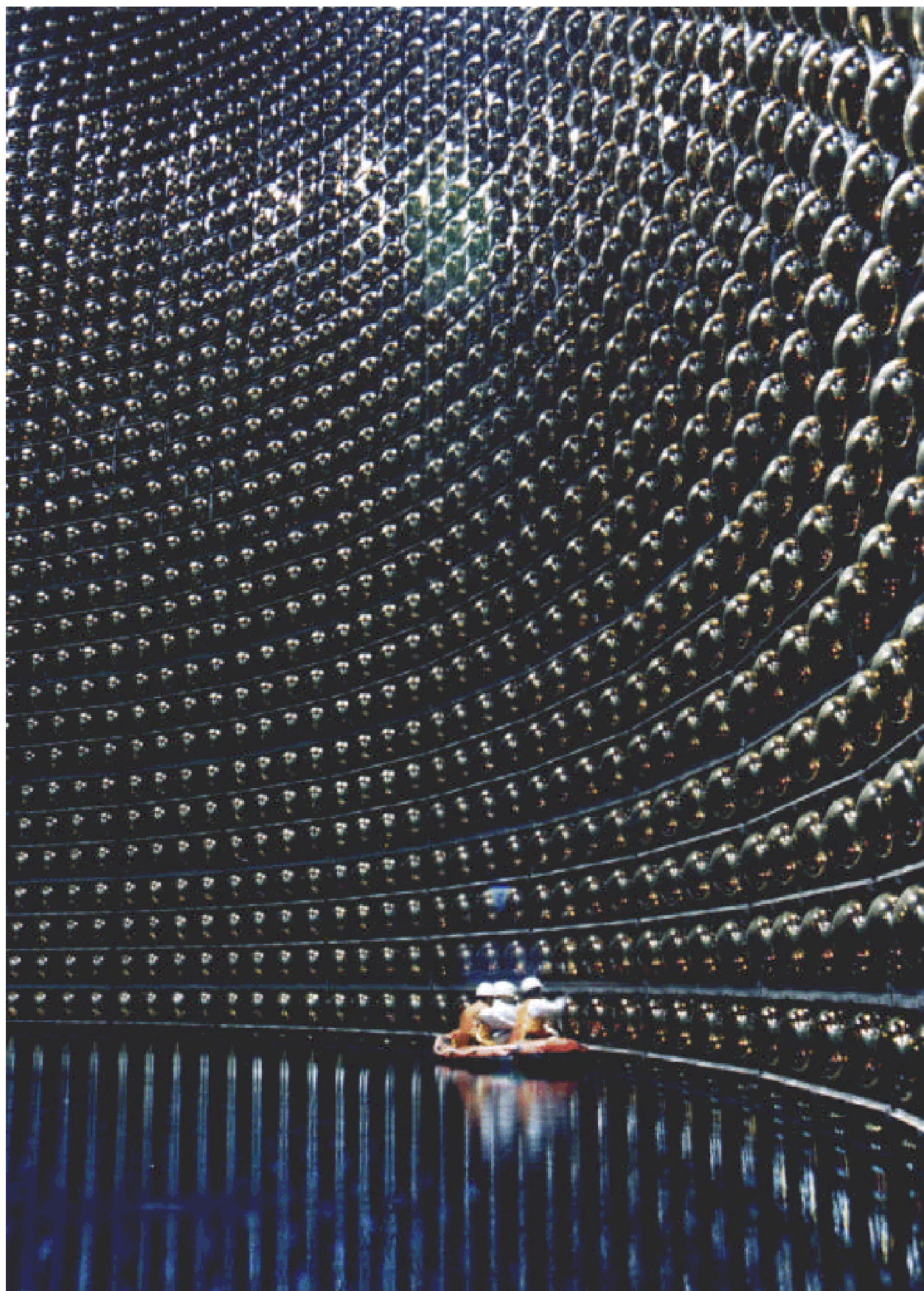
チェレンコフ光

荷電粒子が
媒質中の光速
より速く走るとき
に放射される。

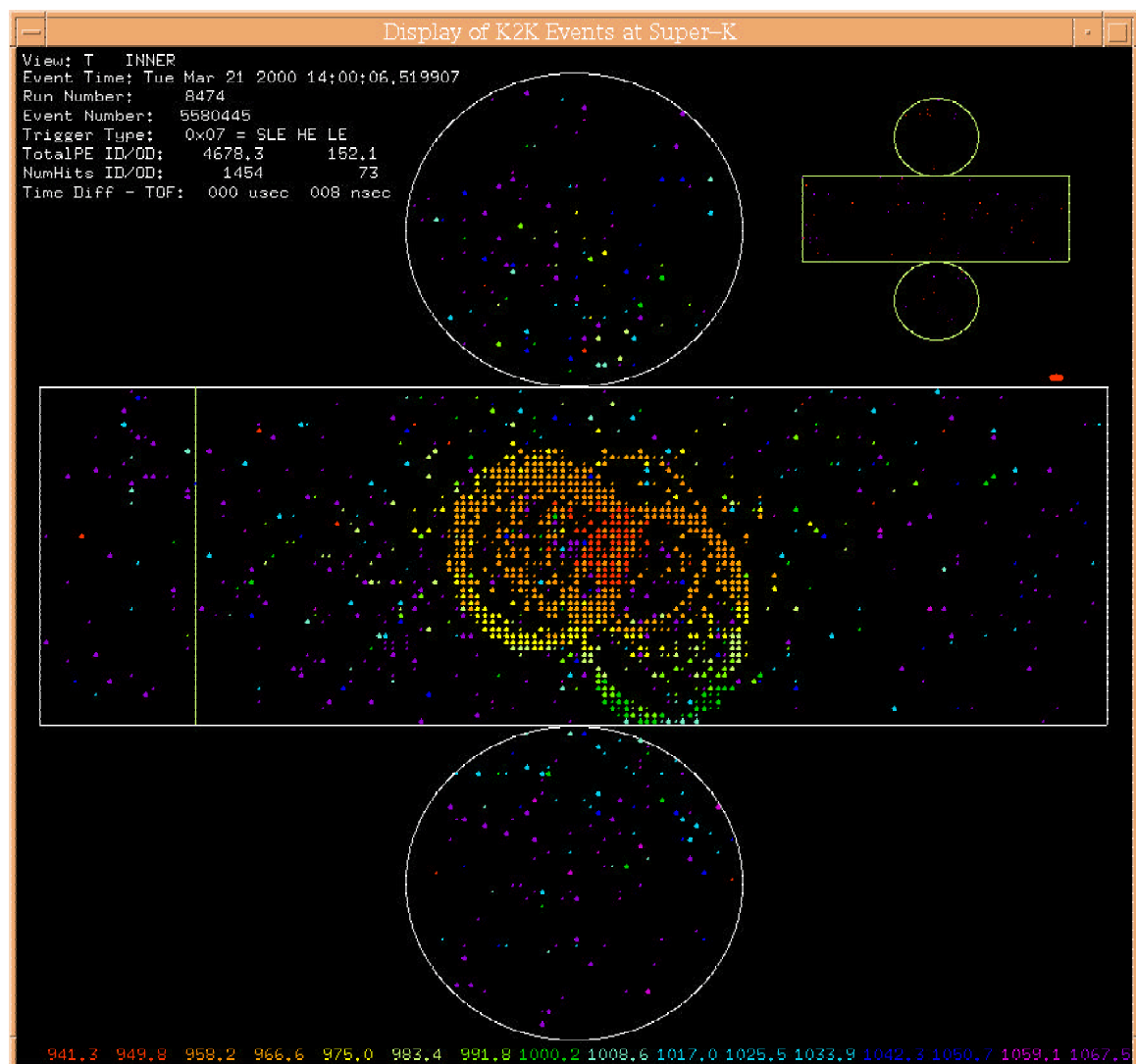
円錐状に放射



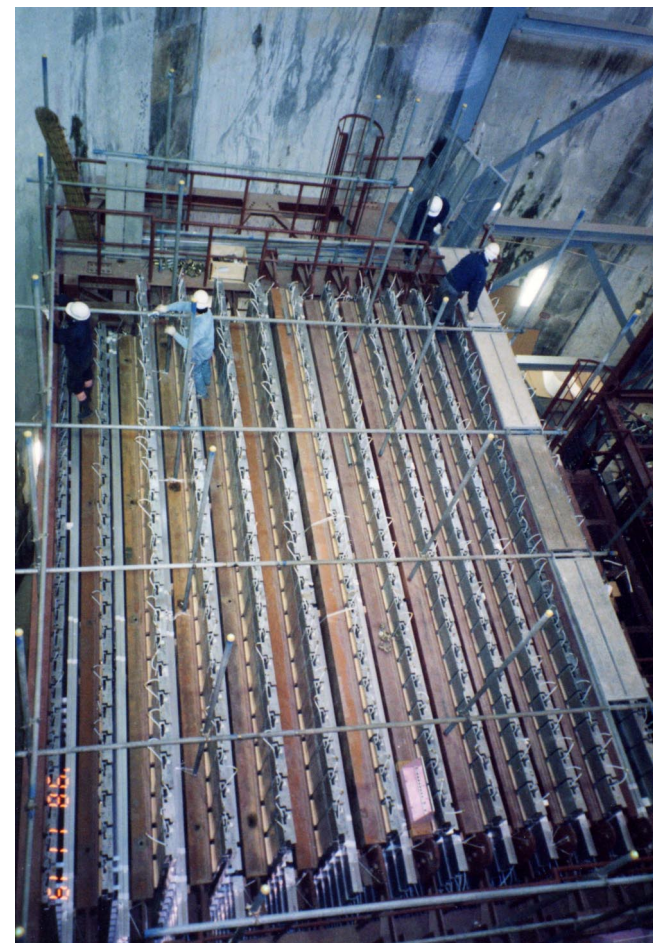
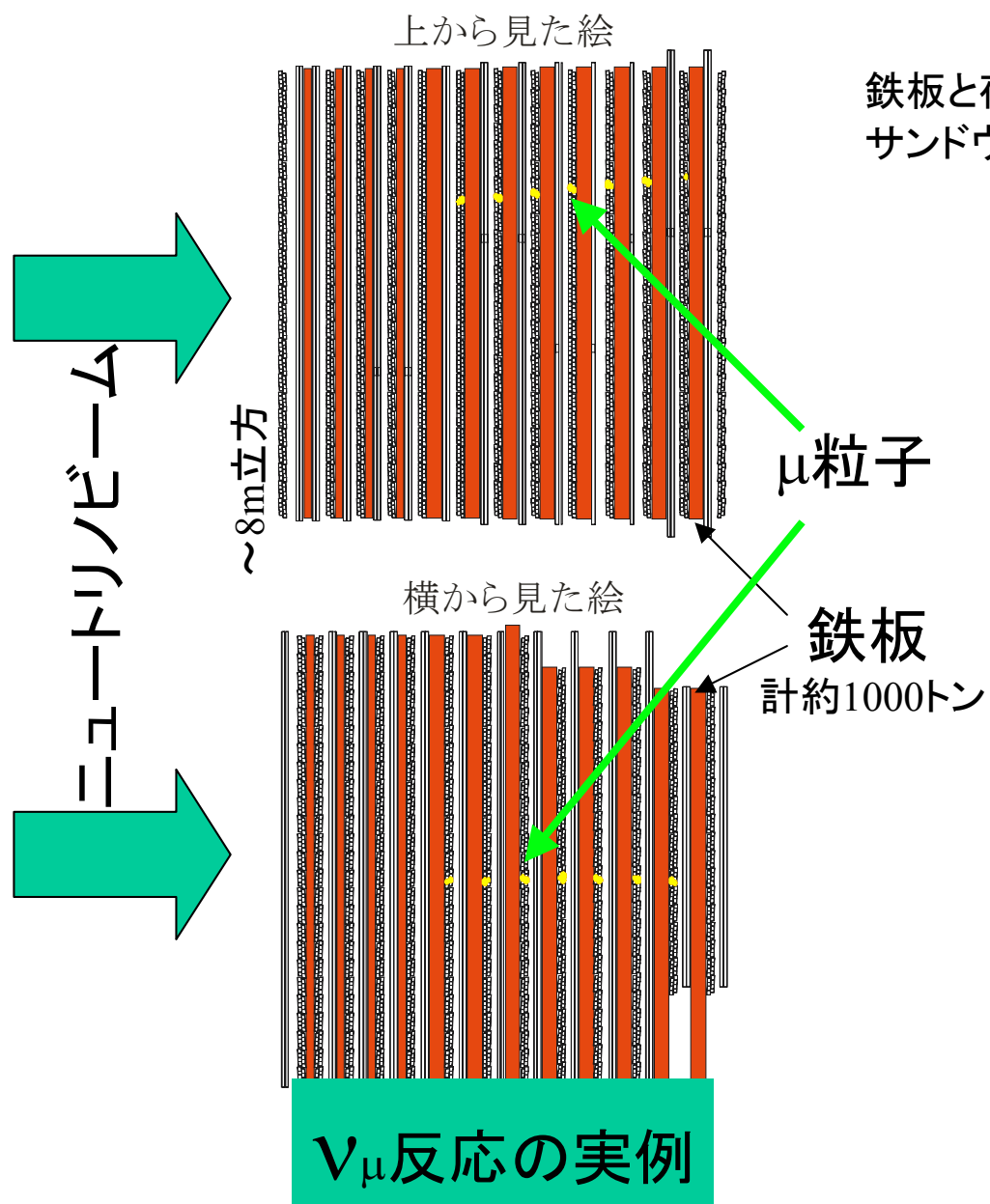
スーパーカミオカンデの内部



ニュートリノ反応の実例



機能分離型検出器(K2Kの前置検出器)

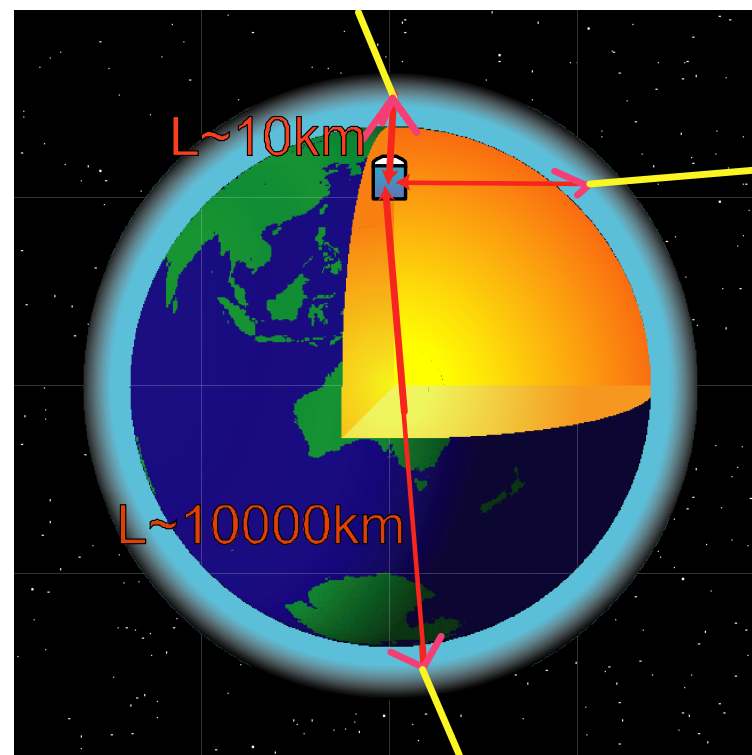
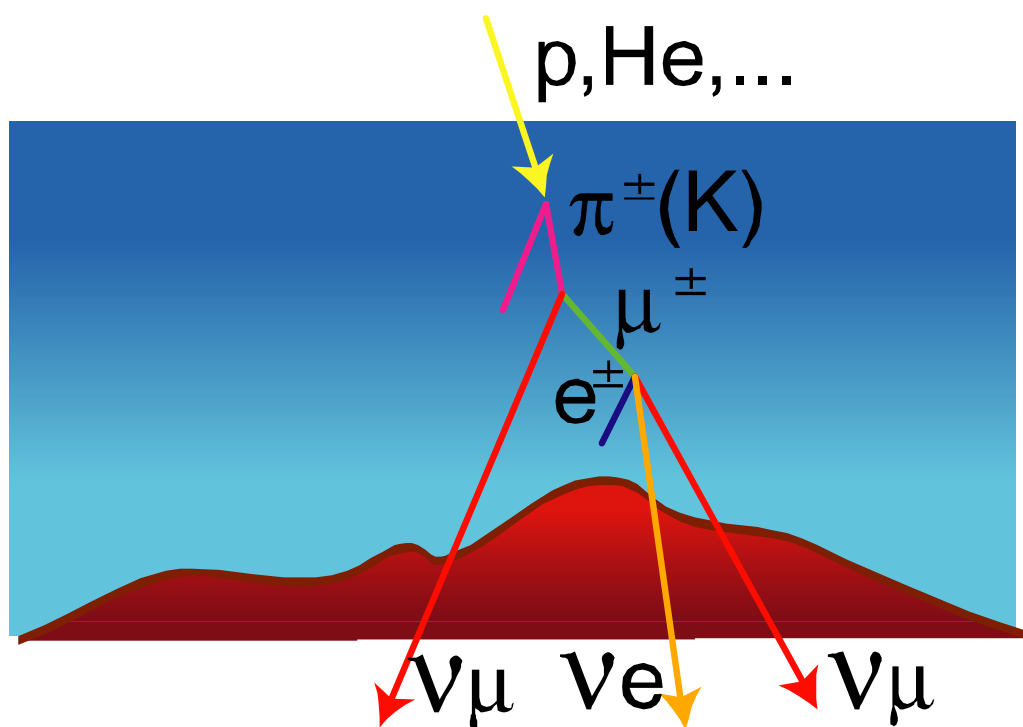


ニュートリノ振動実験

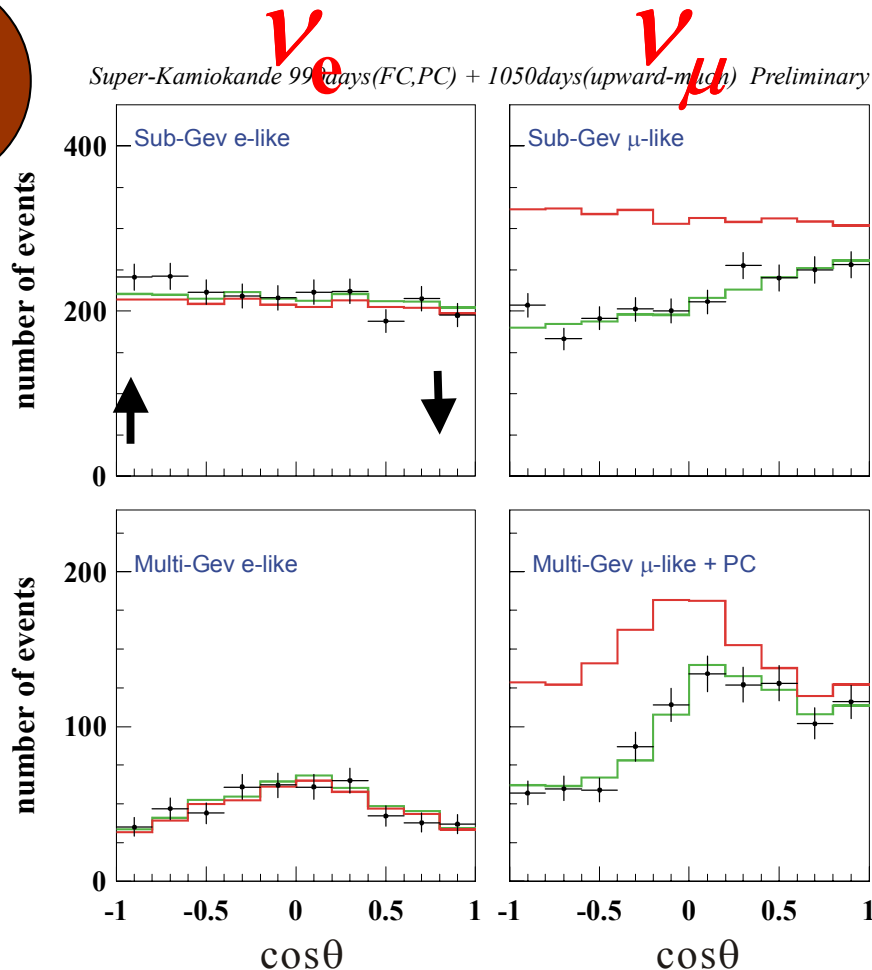
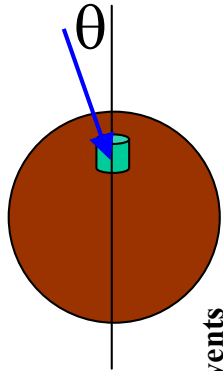
- スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測
- K2K実験

スーパーカミオカンデによる 大気ニュートリノの観測(1996～)

大気ニュートリノ



大気ニュートリノ観測の結果



— 振動なし
— $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動仮定

- 地球距離の飛行
 - 反応の確率=百万分の1
- 電子 $\leftrightarrow$ ミューオン
 - ミューオンニュートリノが減っている
 - 電子ニュートリノは増えていない

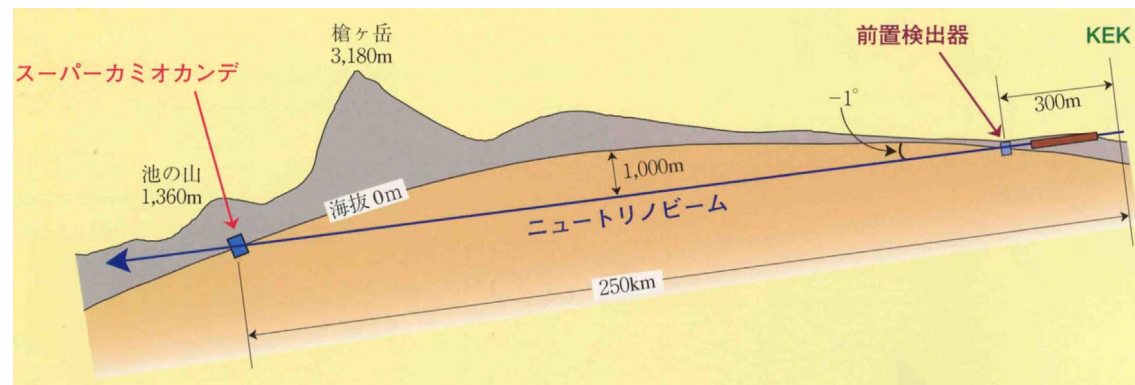
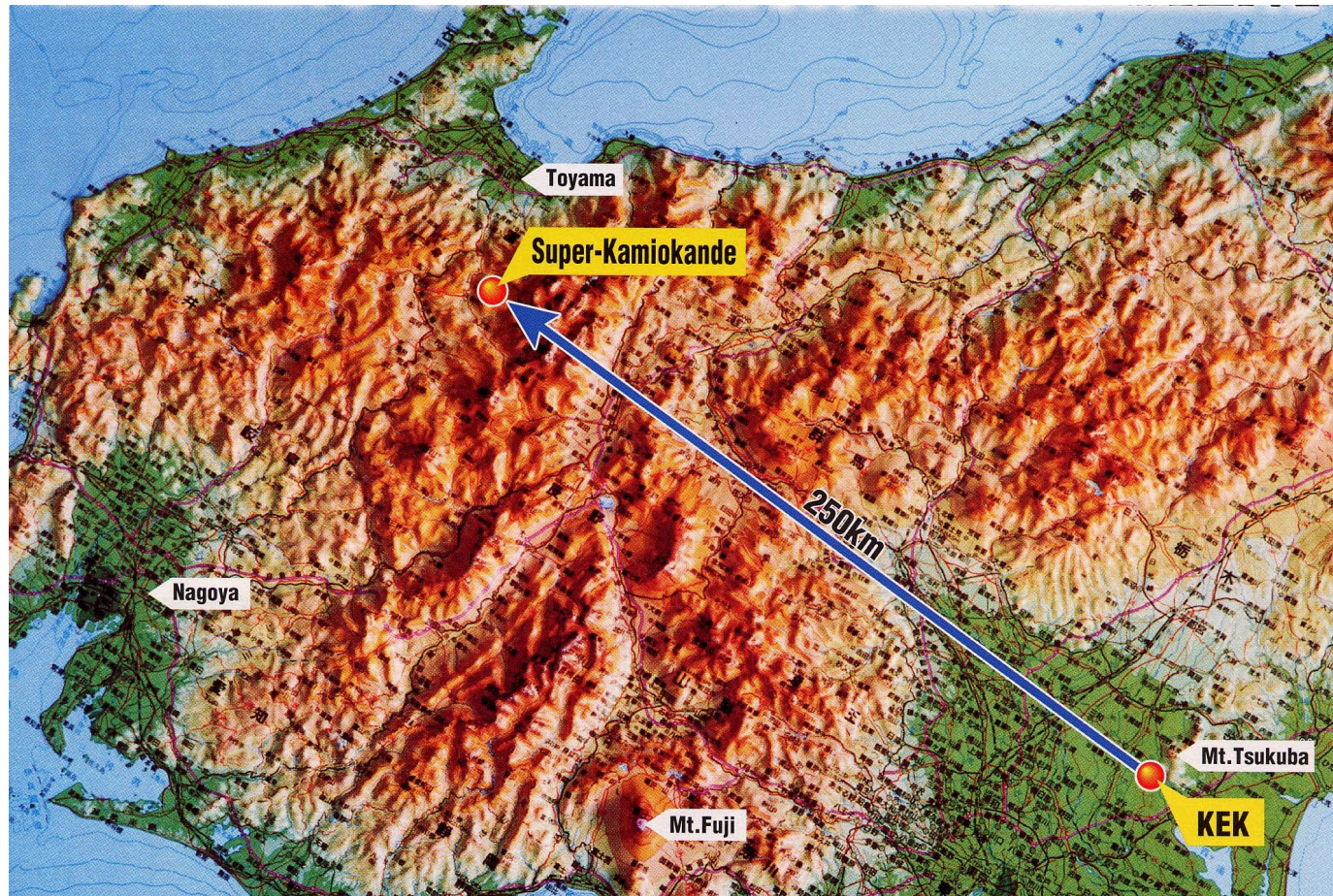
ニュートリノは有限の質量を持つ。(1998)

K2K実験(1999年開始)

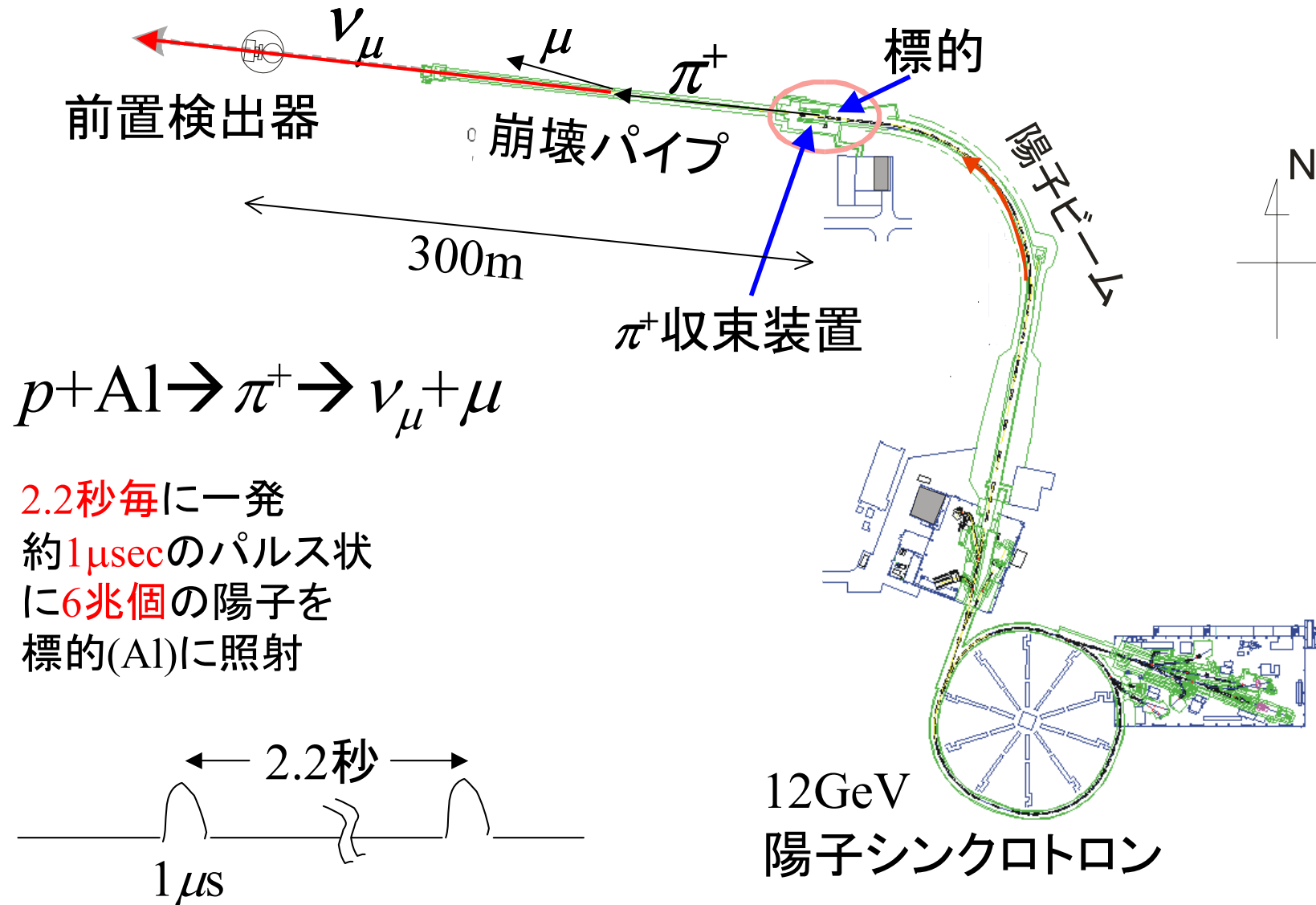
人工ニュートリノを使ってSKの結果を検証

- ① KEKの12GeV陽子シンクロトロンを用いて ν_μ ビーム($\sim 1\text{GeV}$)を生成。
 - ② 250km離れたスーパーカミオカンデ(SK)に向けて撃ち出す。
 - ③ SKでKEKからのニュートリノを検出し、その数、種類、エネルギー分布を測定する。
- もし $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動が起これば、、、
 - 観測される ν_μ 反応が予測より小さくなる。
 - 観測される ν_μ 反応のエネルギー分布が出射時と違う。
 - ($\nu_\tau \rightarrow \tau$ 反応は閾値以下なので起こらない。)

K2K概要



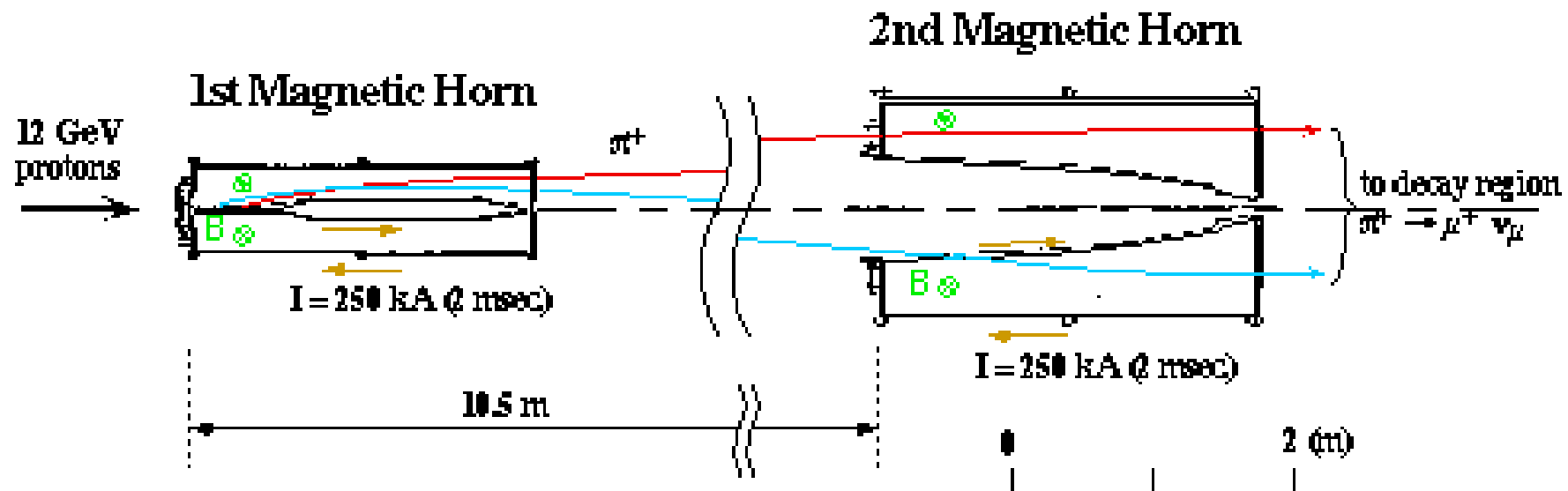
KEKのニュートリノビームライン



荷電粒子収束磁石：電磁ホーン

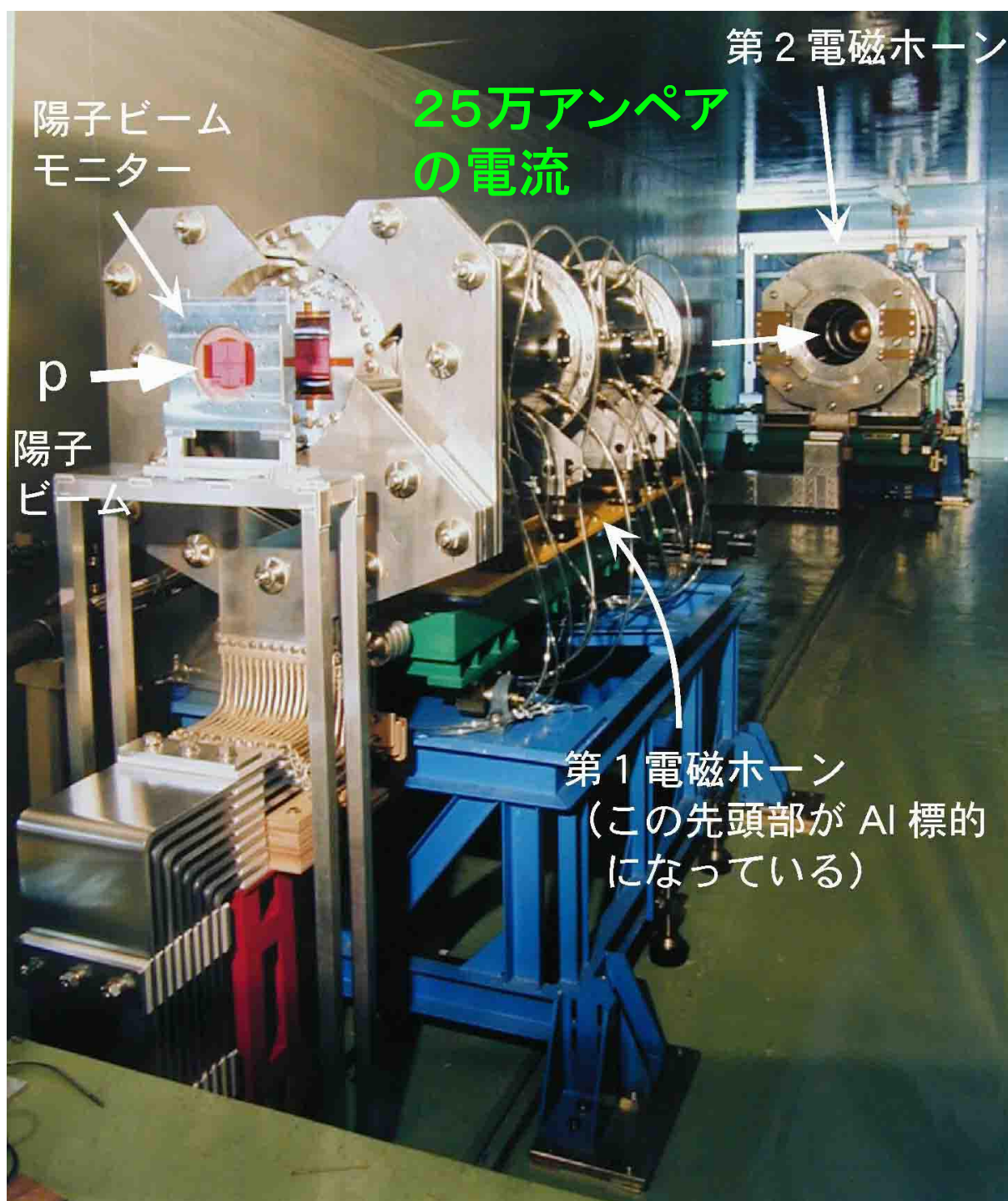
Magnetic Horn system

(for Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment)



25万アンペア, 5T @ r=1cm

π 中間子収束磁石 電磁ホーン



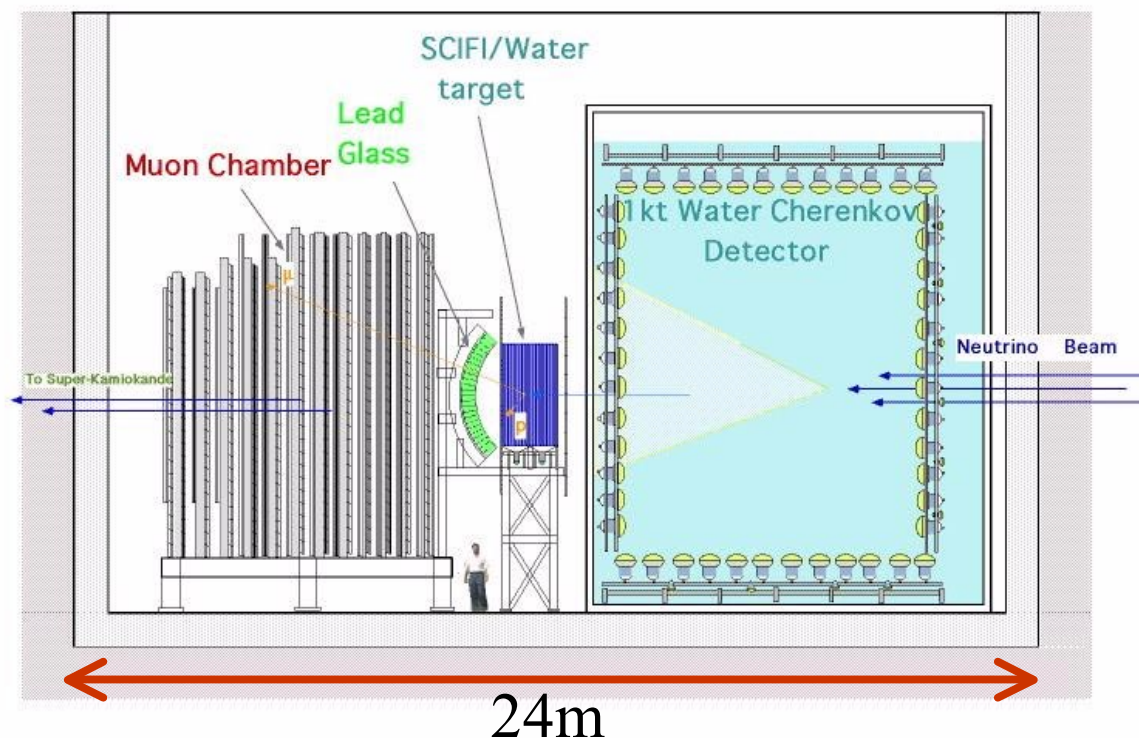
ターゲットステーションに設置された
2 台の電磁ホーン

前置検出器

KEK内@標的から300m

- 生成直後のニュートリノビームの性質を調べる

- ニュートリノの絶対数
- エネルギー分布
- ν_μ 以外のニュートリノの混入率

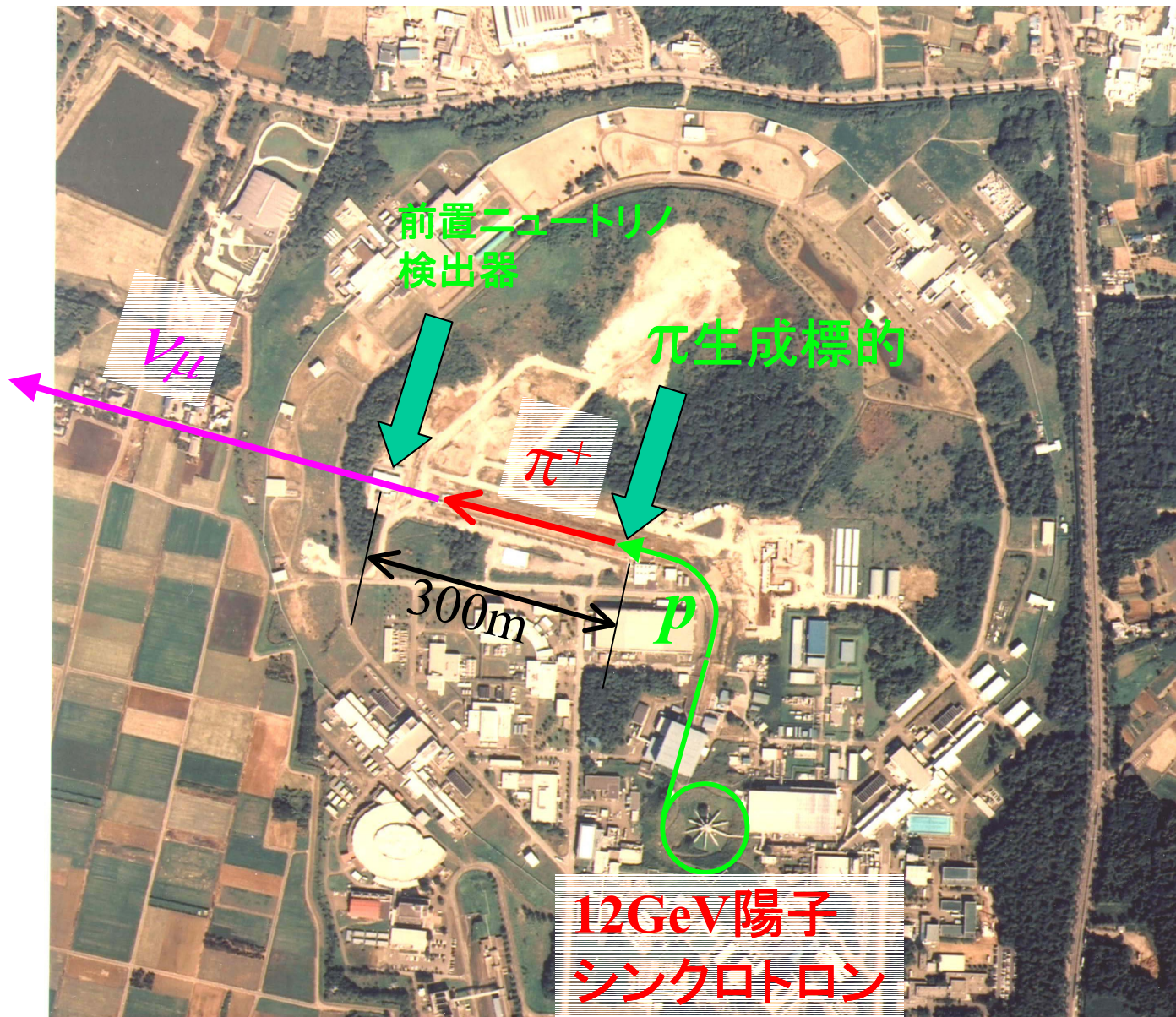


2.2秒に一回、
～900億個の
ニュートリノ(8mx8m)

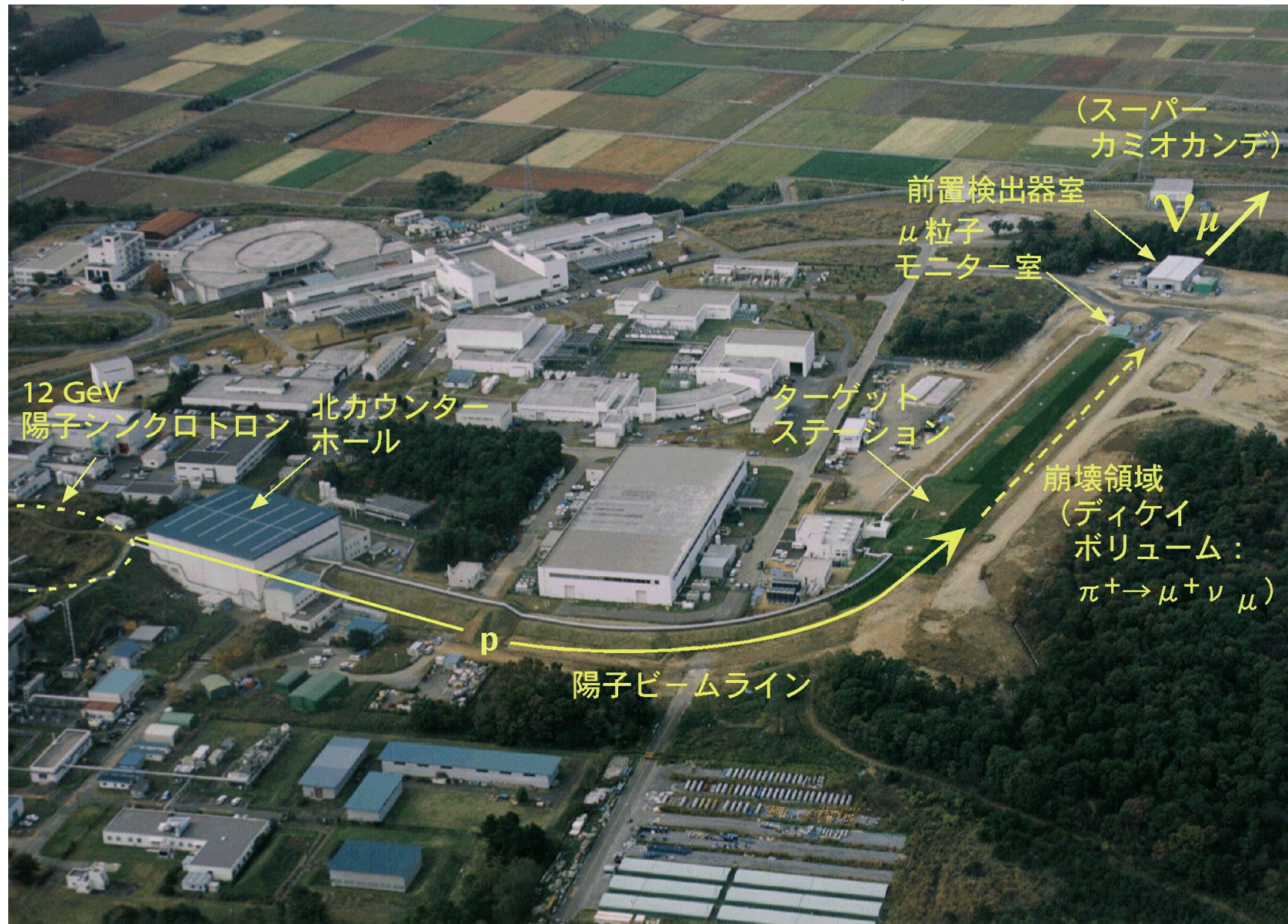
観測される反応
～1/1000ton/2.2秒

KEK内のニュートリノ施設

神岡へ
250km



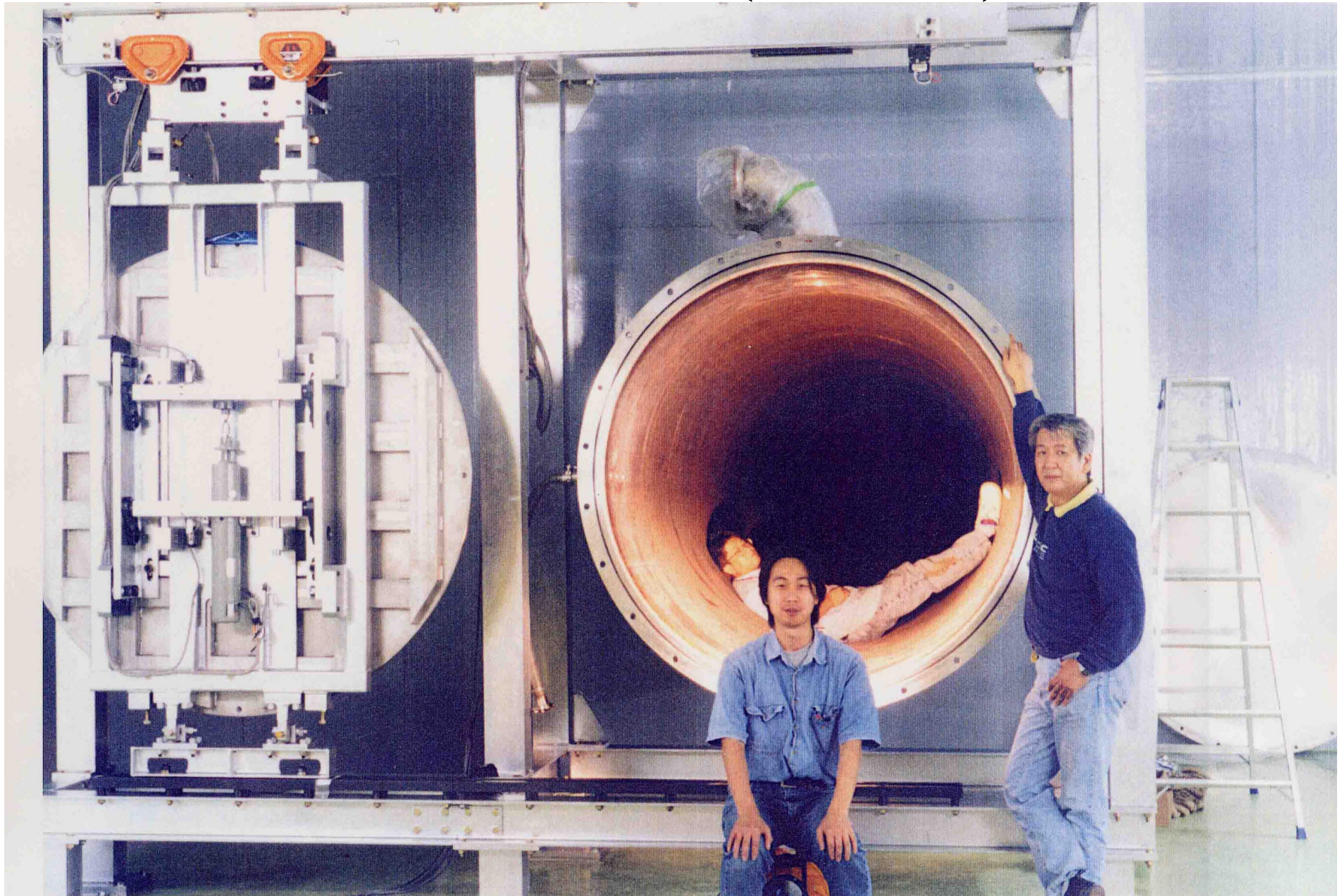
ニュートリノビームライン



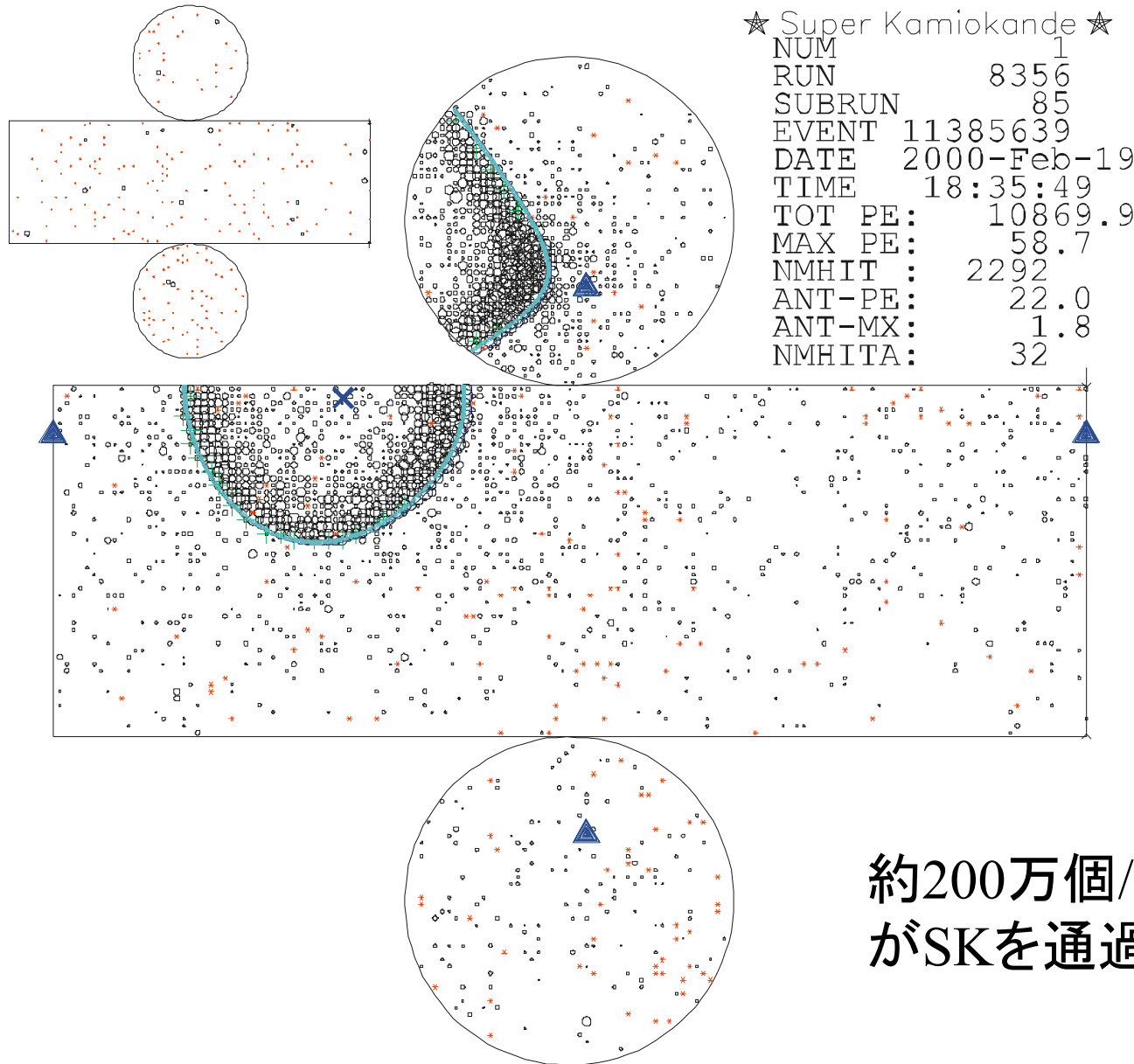
ニュートリノビームライン全景

(平成10年11月19日撮影)

崩壊パイプ(入り口)



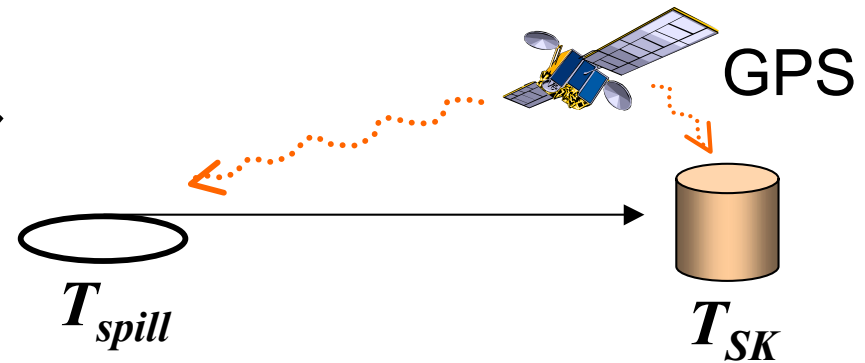
KEKからのニュートリノの反応例



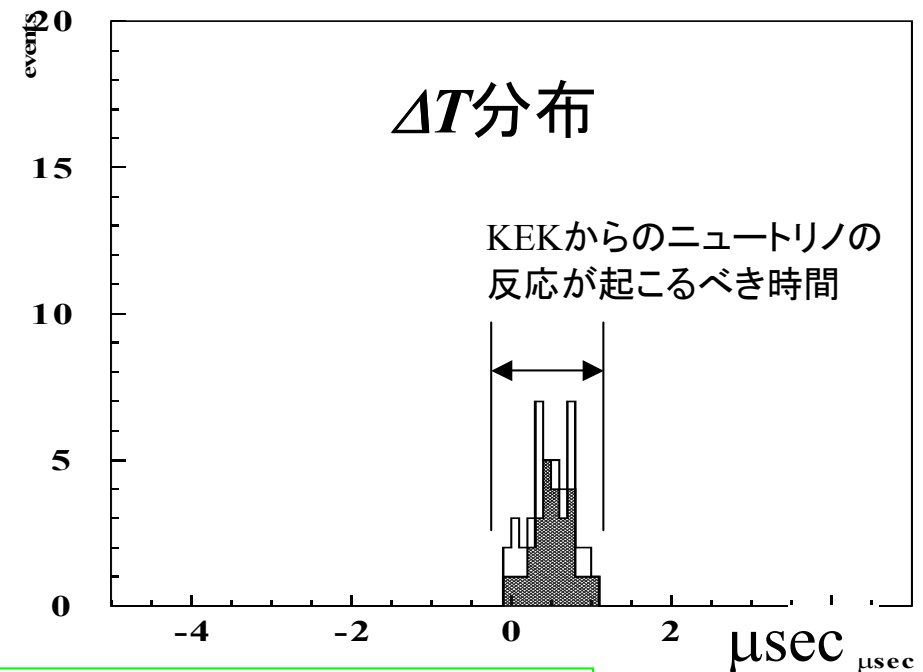
約200万個/2.2秒
がSKを通過する。

KEKからのニュートリノの識別

GPS(global positioning system)を用いて、
ビームを射出した時間
SKで反応を検出した時間
を正確に記録(1000万分の1秒の精度)



T_{Spill} : ビームを射出した時間
 T_{SK} : SKで反応を検出した時間
TOF : KEKからSKまでのニュートリノ
の飛行時間(0.83msec)



$$-0.2 \leq \Delta T \equiv T_{SK} - T_{Spill} - \text{TOF} \leq 1.3 \mu\text{sec}$$

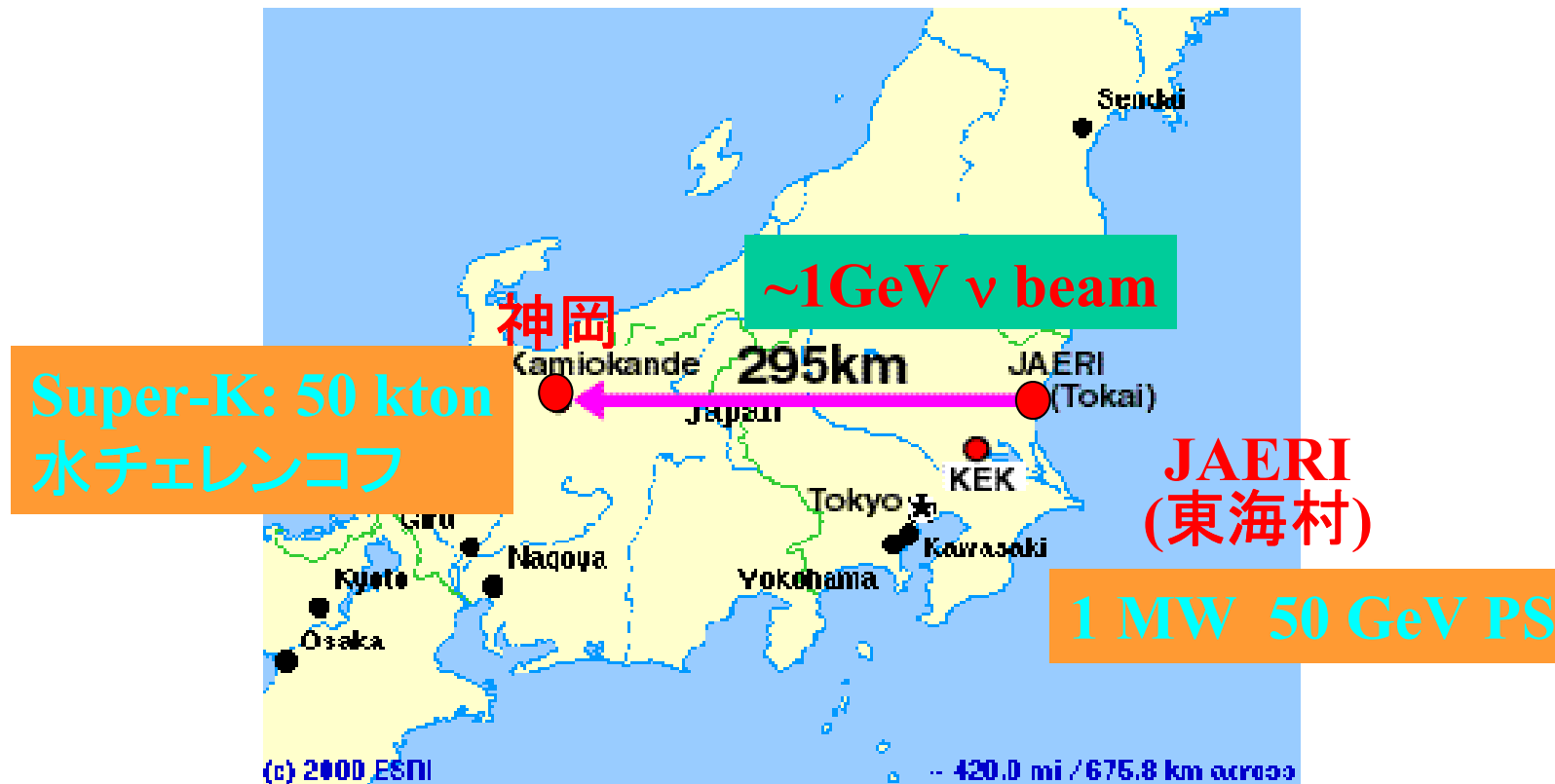
K2Kの中間結果

- ① 約正味6ヶ月測定した。
- ② 最終的な陽子数の23%を照射
- ③ SKで**27個**の反応を検出
- ④ ニュートリノ振動がないとした場合の期待数
約40±5個
- ⑤ 誤差の範囲を超えて少ない。
- ⑥ 後最低4年測定を続ける。

将来

- 加速器を使った長基線ニュートリノ振動実験
 - ヨーロッパ(2005年～)
 - CERN(ジュネーブ)→Gran Sasso(イタリア) 730km
 - アメリカ(2003年～)
 - Fermilab(イリノイ)→Soudan鉱山() 730km
 - 日本(2007年～)
 - 日本原子力研究所(茨城県東海村)→スーパーカミオカンデ 295km

大強度陽子加速器施設JHF(仮称)



茨城県東海村日本原子力研究所に建設予定(2006年完成)

K2Kの約100倍のニュートリノ強度

→大量のニュートリノ反応 in SK

→精度の良い測定

ニュートリノ関係の読み物

- 「謎の粒子ーニュートリノ」,川崎雅裕(丸善)1996
- 「地底から宇宙をさぐる」東大宇宙線研・戸塚洋二(岩波書店)1995
- 「ニュートリノで探る宇宙」KEK・中村健蔵(培風館)1994
- 雑誌パリティ(丸善)
 - 2000年12月号 news「タウニュートリノの直接検出」
 - 2000年9月号news「アルプスを貫通するニュートリノ」
 - 1999年12月「動き出した素粒子実験の新プロジェクト」
 - 1999年9月「K2K長基線ニュートリノ振動実験開始」
 - 1999年4月「ニュートリノ振動と質量」「タウニュートリノ存在の実視」
- 雑誌サイアス(朝日新聞社)
 - 1999年1月号「つくばから神岡へ撃ち込みニュートリノ質量に迫る」京大・西川公一郎
 - 98/7/17号「ニュートリノを追う」
 - 98/7/03号【ニュートリノに質量】世界を駆けめぐった飛騨高山発のニュース

関連WEBページ

- KEK

<http://www.kek.jp>

- スーパーカミオカンデ

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>

- K2K実験

<http://neutrino.kek.jp>

- Neutrino History(英語)

<http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos/aneut.html>