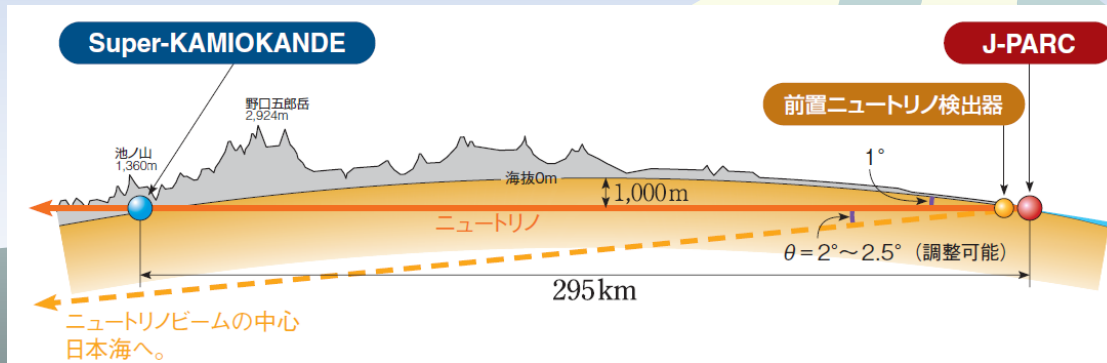


# 祝 梶田さん ノーベル賞受賞

ニュートリノグループが答える  
「梶田さんのノーベル賞って何？  
J-PARCとなんか関係あんの？」



高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 素粒子原子核研究所  
J-PARCセンター 素粒子原子核ディビジョン

小林 隆

発表資料の置き場:

<http://j-parc.jp/pn/j-lunch/>

# ノーベル賞受賞！

The screenshot shows the Nobel Prize website for the 2015 Physics award. The header includes the Nobel Prize logo and navigation links for Home, Nobel Prizes and Laureates, Nomination, Ceremonies, and Alfred Nobel. The main content area features the title 'The Nobel Prize in Physics 2015' and the names of the laureates, Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald. Below the title are two portrait photos of the laureates. The left sidebar contains a menu for 'Nobel Prizes and Laureates' with a dropdown for 'Physics Prizes' and a year selector for '2015'. The sidebar also lists links for 'About the Nobel Prize in Physics 2015', including Summary, Prize Announcement, Press Release, Advanced Information, Popular Information, and Greetings. At the bottom of the sidebar, there are links for 'All Nobel Prizes in Physics' and 'All Nobel Prizes in 2015'.

Nobelprize.org  
The Official Web Site of the Nobel Prize

Home | Nobel Prizes and Laureates | Nomination | Ceremonies | Alfred Nobel

Nobel Prizes and Laureates

Physics Prizes < 2015 >

▼ About the Nobel Prize in Physics 2015

- Summary
- Prize Announcement
- Press Release
- Advanced Information
- Popular Information
- Greetings

▶ Takaaki Kajita

▶ Arthur B. McDonald

All Nobel Prizes in Physics

All Nobel Prizes in 2015

The Nobel Prize in Physics 2015  
Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald

Share this: 1.2K

## The Nobel Prize in Physics 2015




Photo © Takaaki Kajita  
**Takaaki Kajita**  
Prize share: 1/2




Photo: K. MacFarlane.  
Queen's University  
/SNOLAB  
**Arthur B. McDonald**  
Prize share: 1/2

- ◆ “For the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrino have mass”
- ◆ (ニュートリノが質量を持つことを示したニュートリノ振動現象の発見)

# さらに！

SCIENCE

<https://breakthroughprize.org/Laureates/1>

## Breakthrough Prizes Give Top Scientists the Rock Star Treatment

By THE NEW YORK TIMES NOV. 8, 2015 | RELATED ARTICLE



元J-PARC副センター長  
元素核研所長  
西川さん & T2K/K2K実験

前KEK機構長  
鈴木さん & KamLAND

梶田宇宙線研所長  
鈴木洋一郎SK代表  
SK実験

5つのニュートリノ実験！  
3つ日本の実験！

### LAUREATES

[Breakthrough Prize](#) [Special Breakthrough Prize](#) [New Horizons Prize](#) [Physics Frontiers Prize](#)

[2016](#) [2015](#) [2014](#) [2013](#) [2012](#)



[Kam-Biu Luk and the Daya Bay Collaboration](#)



[Yifang Wang and the Daya Bay Collaboration](#)



[Koichiro Nishikawa and the K2K and T2K Collaboration](#)



[Atsuto Suzuki and the KamLAND Collaboration](#)



[Arthur B. McDonald and the SNO Collaboration](#)



[Takaaki Kajita and the Super K Collaboration](#)



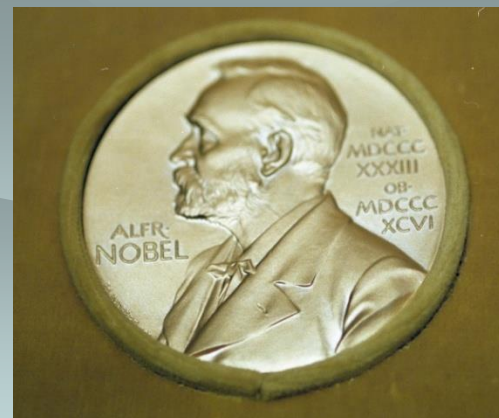
[Yoichiro Suzuki and the Super K Collaboration](#)

# 小柴先生 2002年ノーベル物理学賞

天体物理学に対するパイオニア的貢献、  
特に**宇宙ニュートリノ**の観測に対して



1987年の業績





# 家宝

2014. 12. 5



# 祝2008年ノーベル物理学賞！



## The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: University of Chicago

南部陽一郎先生

1/2 of the prize  
ご冥福をお祈りします  
USA

Enrico Fermi Institute,  
University of Chicago  
Chicago, IL, USA

b. 1921  
(in Tokyo, Japan)



Photo: KEK

小林誠先生

1/4 of the prize  
(元KEK素粒子原子核研究所長)  
Japan

High Energy Accelerator  
Research Organization  
(KEK)  
Tsukuba, Japan

b. 1944



Photo: Kyoto University

益川敏英先生

(元京大基研所長)

Kyoto Sangyo University;  
Yukawa Institute for  
Theoretical Physics  
(YITP), Kyoto University  
Kyoto, Japan

b. 1940



# 家宝

祝賀会にて

三一八一



<http://j-parc.jp/pn/j-lunch/>

## 「J-PARC サイエンスランチ」略して「J-ランチ」

ランチを食べながら、J-PARC で行われているサイエンスを一般の人向けにわかりやすく楽しく解説！

第1回、第2回、第3回

(**で終わるかもしれませんが**)

ニュートリノグループが答える

「梶田さんのノーベル賞って何？ J-PARC となんか関係あんの？」



日時：第1回：11/11(水) 12:10-12:50@J-PARC 研究棟 4F 会議室

第2回：11/17(火) 12:10-12:50@J-PARC 研究棟 2F 大会議室(1回めと同じ内容)

第3回：11/24(火) 12:10-12:50@J-PARC 研究棟 2F 大会議室(1回めと同じ内容)

対象：事務の方など一般の人むけ。J-PARC, JAEA, CROSS, 業務委託, 工事業者の方、誰でも参加自由(もちろん研究者の方も)



# J-Lunch

## 「J-PARCサイエンスランチ」 略して「J-ランチ」とは。

- ランチを食べながら、J-PARCで行われているサイエンスを一般の人向けにわかりやすく楽しく解説！
- 事務の方など一般の人むけ。J-PARC, JAEA, CROSS, 業務委託、工事業者のかた誰でも参加自由
- J-PARC でどんなに楽しい面白い研究がなされているか理解できて、毎日の仕事が楽しくなる！（はず？）
- 研究者は一般の人にわかるように話します。わからなかったら「なに言ってるのかさっぱりわかりませ〜ん。」とどんどん質問してください。
- 職場の周りのひと10人程度集まれば、「こんな話聞きたい！」といったリクエストに応じて出前も可能？
- とはいうものの4回め以降のシリーズ化は未定。

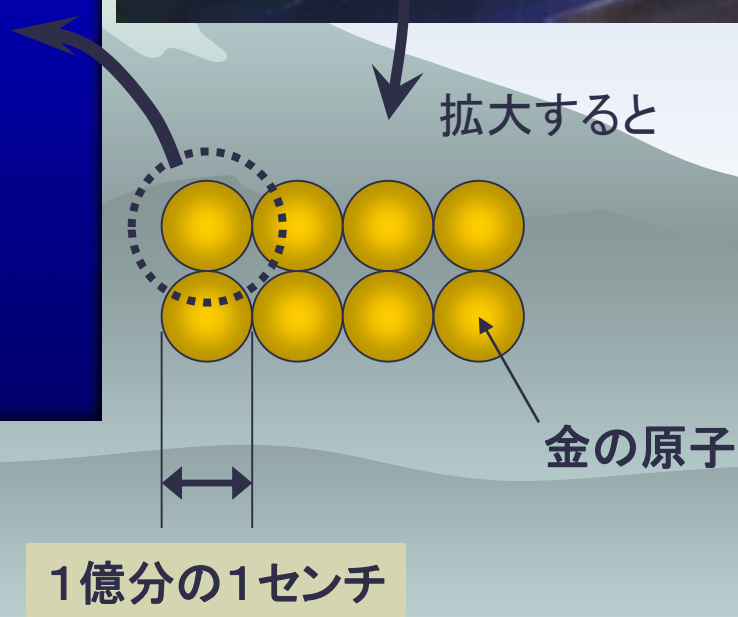
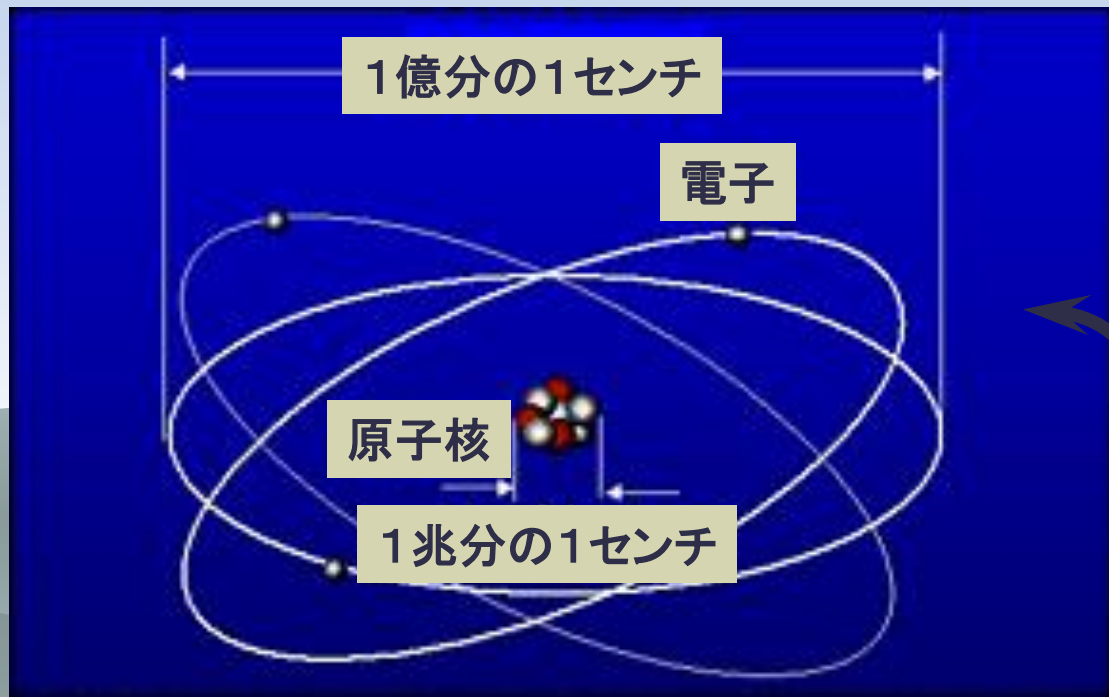
問い合わせ、リクエストなどは [J-Lunch@ml.j-parc.jp](mailto:J-Lunch@ml.j-parc.jp) (作成中) または [takashi.kobayashi@kek.jp](mailto:takashi.kobayashi@kek.jp) まで

## 内容

- ニュートリノってなに？
  - ニュートリノを調べて何が面白いの？なにか腹の足しになるの？
  - 梶田さんの実験結果ってなに？
    - ニュートリノ振動ってなに？
    - なんで振動があると質量があるといえるの？
  - J-PARC ってなんか関係あるの？
  - T2K 実験とスーパーカミオカンデの関係は？
  - T2K 実験の成果とか将来とか
- スーパーカミオカンデの光検出器(実物)展示有り (?)  
音叉をつかったニュートリノ振動の実演あり

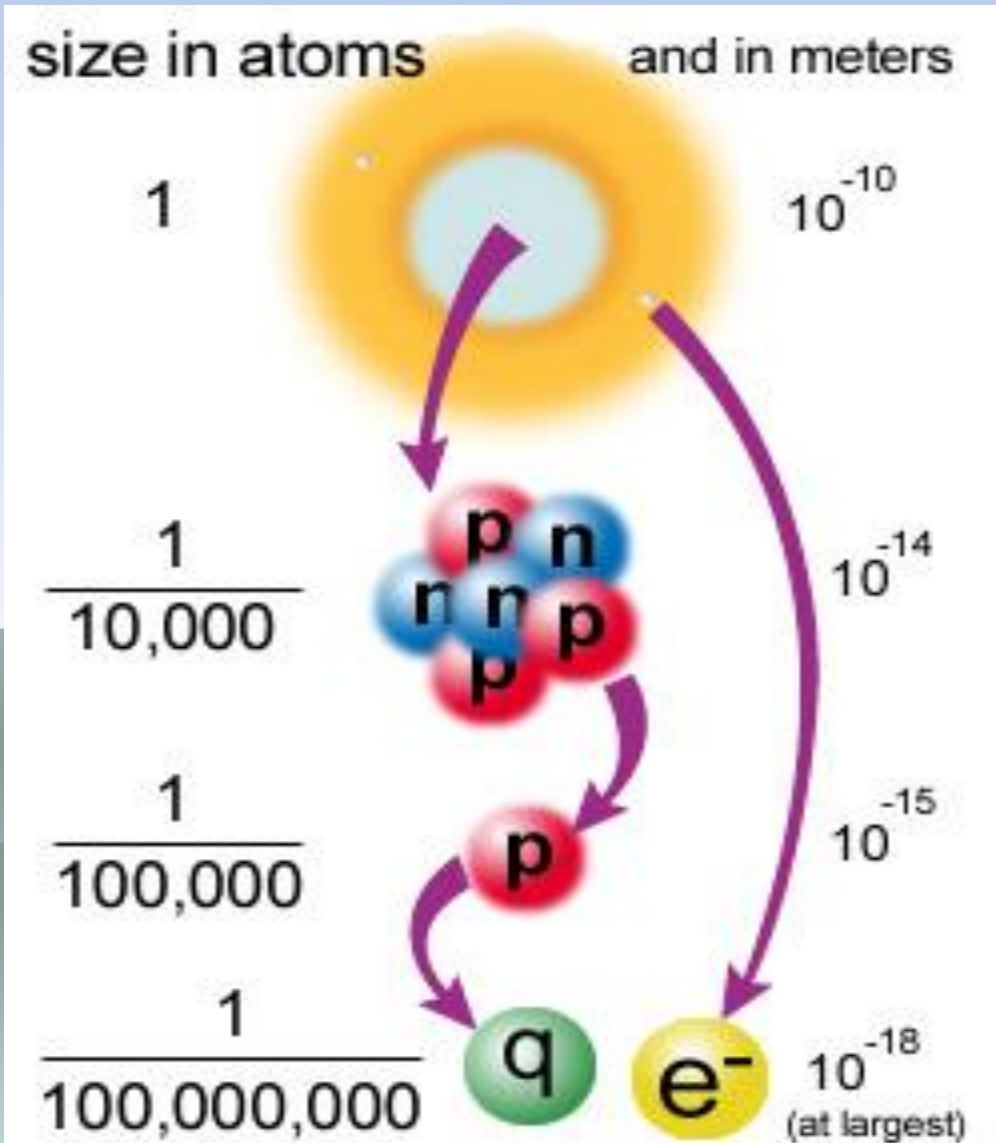
ニュートリノって？

# 物質をばらばらにしていくと





# 素粒子 物質を構成する究極の単位



火？水？土？ = 原子



原子 = 原子核と電子



原子核 = 陽子と中性子



陽子 = 3つのクォーク



クォーク = 素粒子？

永遠にわからないもの？

# ニュートリノとは？

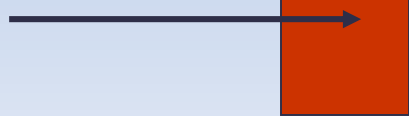
- ◆ 物質を構成する基本粒子「素粒子」の仲間
- ◆ **Neutrino**
  - ❖ 中性Neutrにちっちゃいという意味のino:中性微子
  - ❖ New Trino (新しいトリノ)ではない。
- ◆ なぜか3種類ある(?)
- ◆ 電氣的に中性、
- ◆ ほとんど何ともぶつからず通り抜ける
- ◆ 質量は極めて軽く、存在が予言されて以来70年間ゼロと仮定

レ プ ト ン	$\nu_e$ 電子ニュートリノ	$\nu_\mu$ ミューオンニュートリノ	$\nu_\tau$ タウニュートリノ
	$e$ 電子	$\mu$ ミューオン	$\tau$ タウ

# ニュートリノの特徴

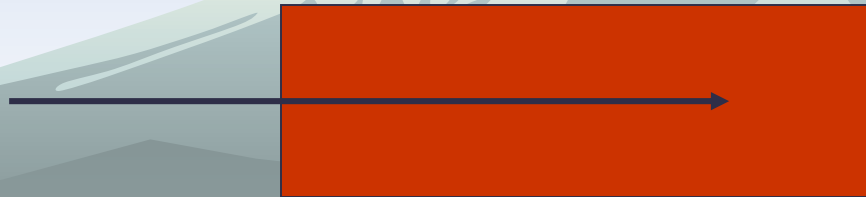
- ◆ 物質とほとんど反応しない → 検出難しい

電子(1GeV)



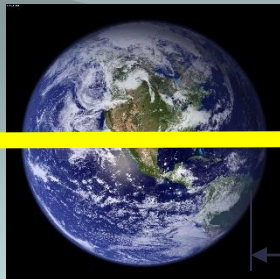
～10cmの鉄で完全にとまる。

ミュー( $\mu$ )粒子(1GeV)



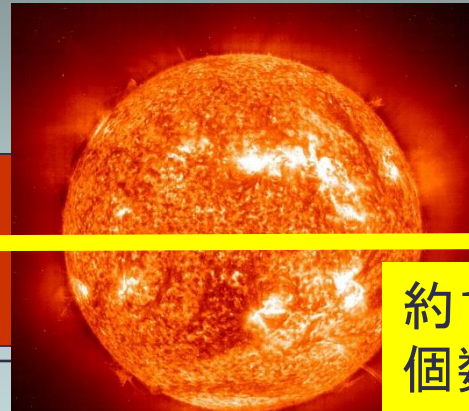
～1m

ニュートリノ(1GeV)



全部鉄で埋める

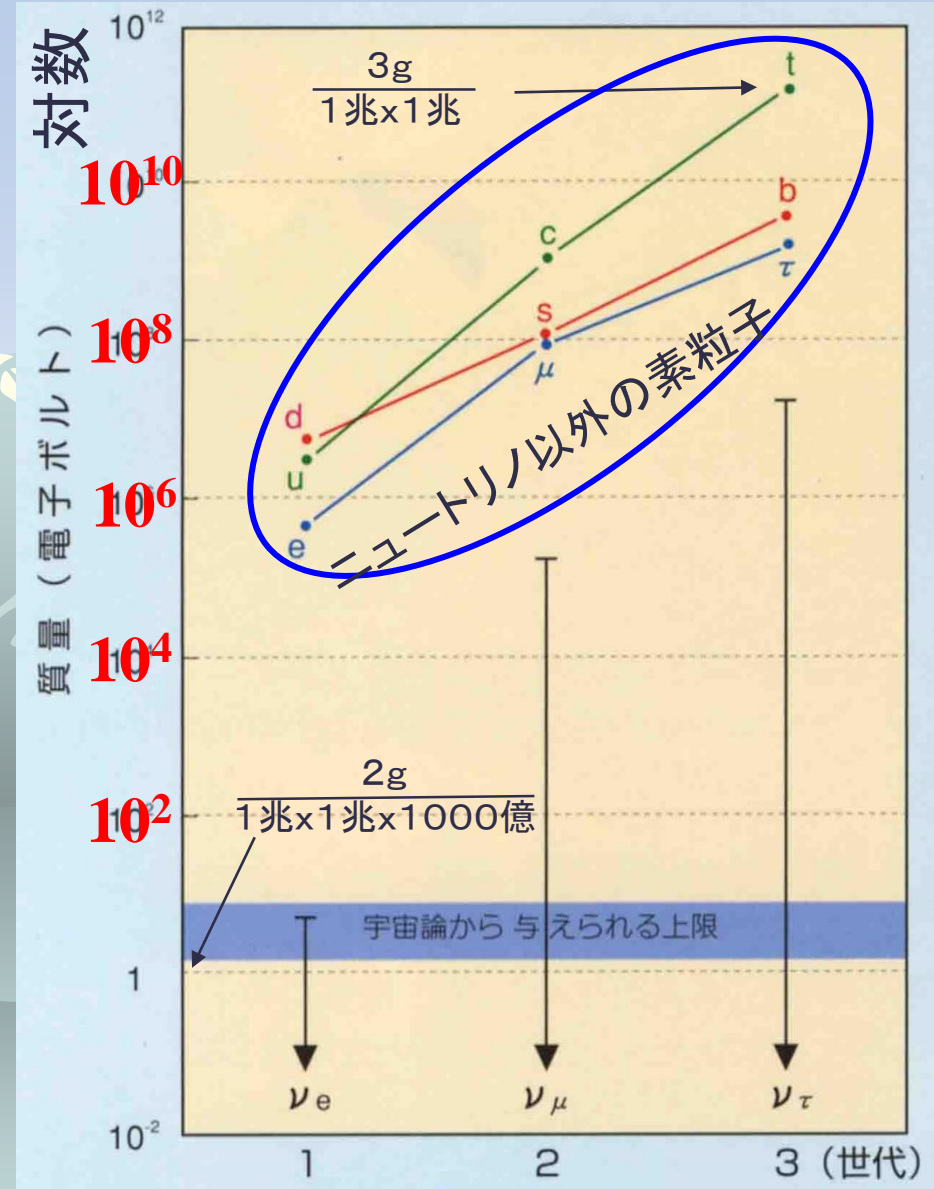
～1億km



約1億kmでようやく  
個数が1/3くらい。

# ニュートリノはなぜかとても軽い。

- ◆ 他の素粒子に比べ何桁も軽い。
- ◆ 本当にどれだけの重さが有るのか分かってない。
- ◆ なぜ軽いのか分かってない。(素粒子物理学の大きな課題)





# 身の回りのニュートリノ

## ◆ バナナ

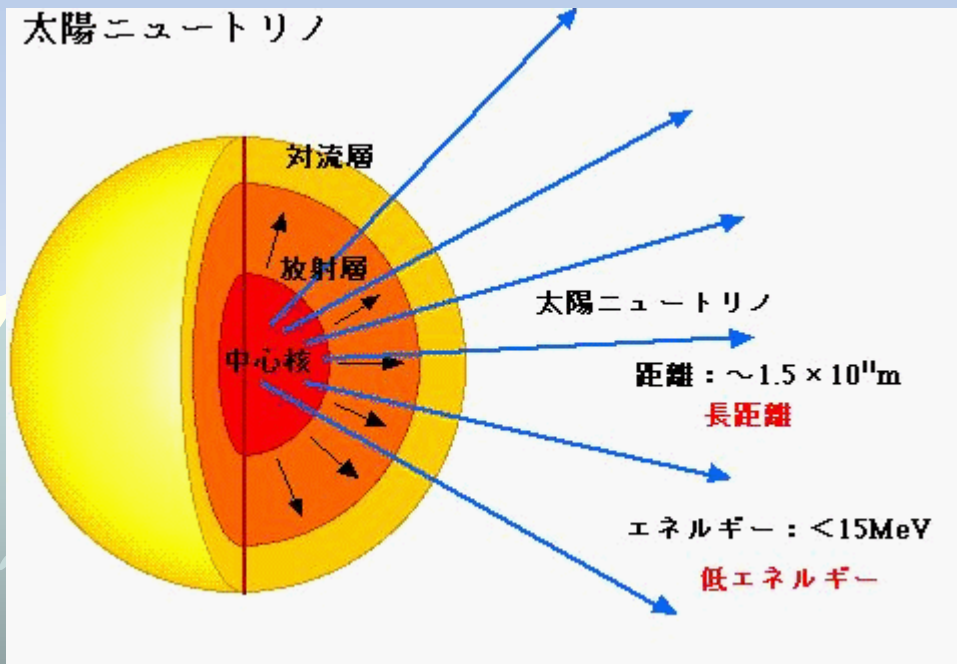
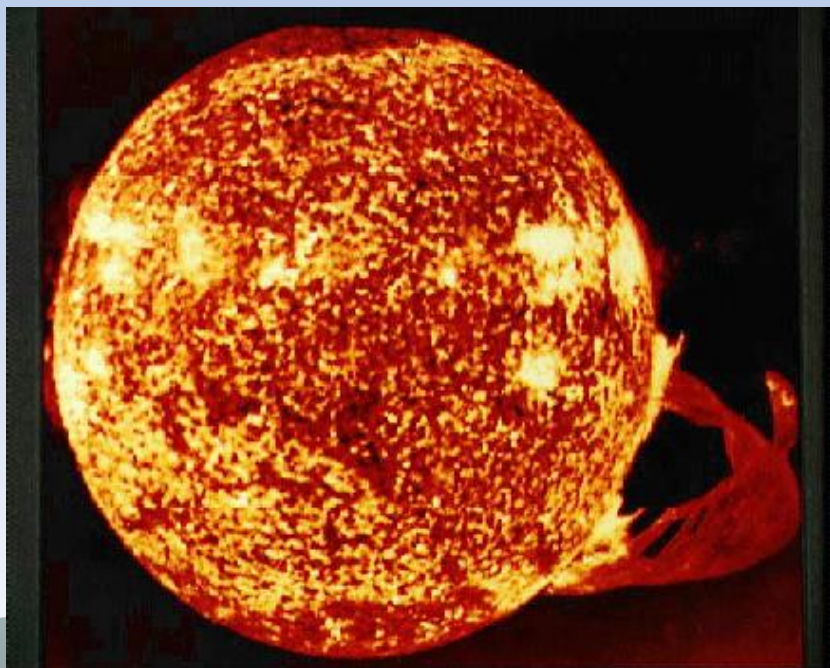
- ❖ カリウム ~0.5g/一本
- ❖ カリウム40の崩壊により **1日に100万個のニュートリノが発生**

## ◆ 人体

- ❖ 体内の放射性物質(カリウムや炭素)の崩壊
- ❖ **1日に4億個くらい発生**



# 自然界のニュートリノ: 太陽ニュートリノ



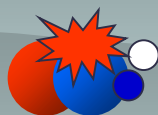
例えば



陽子



陽子



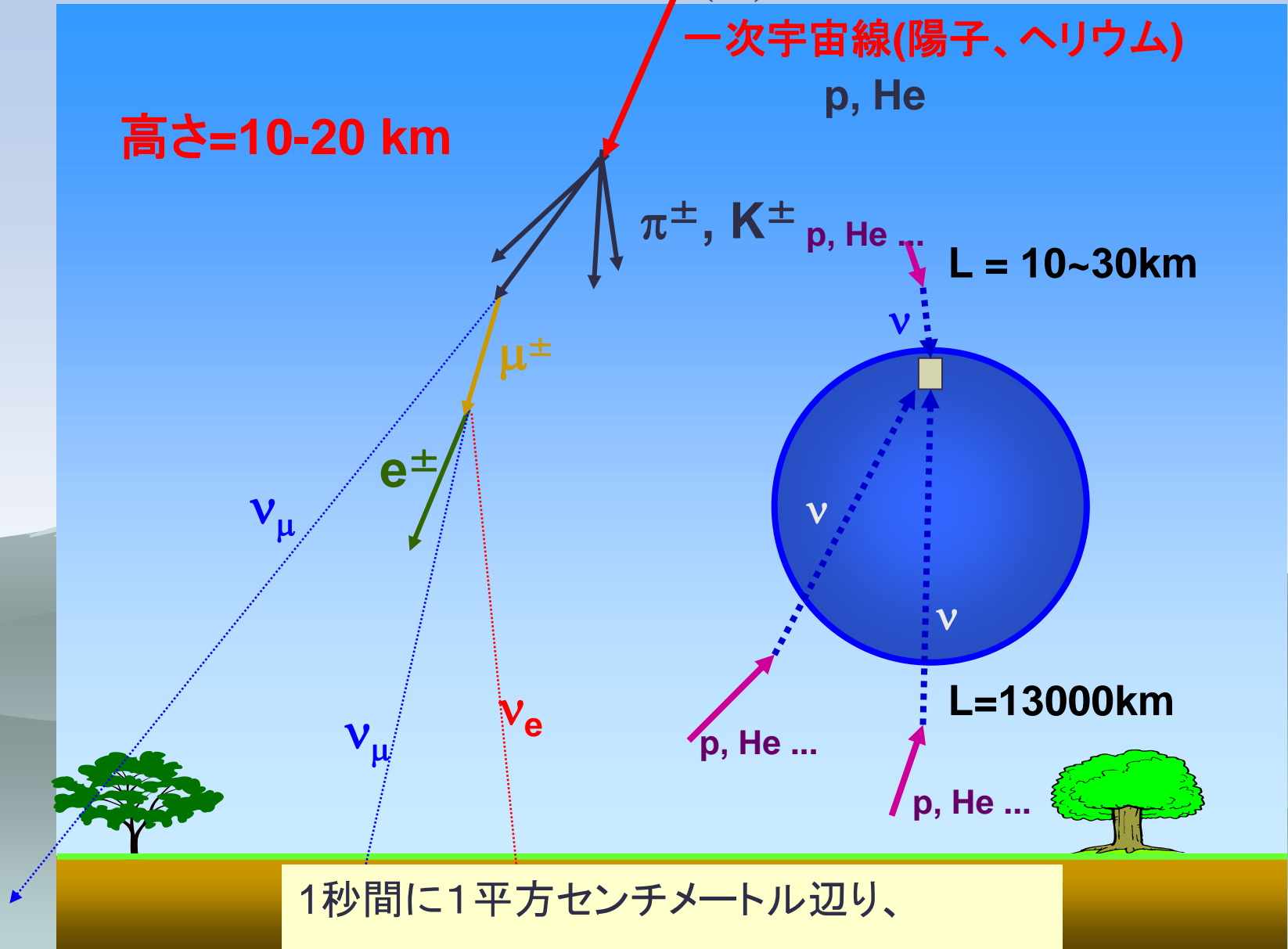
電子ニュートリノ

重陽子(陽子+ 中性子)

(陽)電子

1秒間1平方センチメートルあたり、**600億個**のニュートリノ  
(**人体を1秒に $\sim 100$ 兆個**)

# 自然界のニュートリノ(2): 大気ニュートリノ

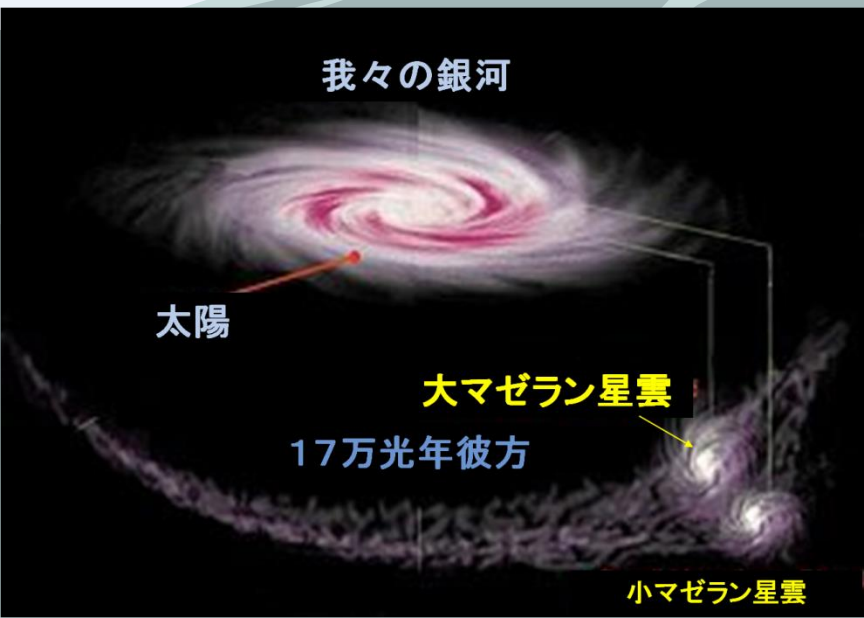


1秒間に1平方センチメートル辺り、  
1個のニュートリノが空から降ってきている。

# 超新星爆発

- ◆ 1987 Feb 23  
10:30(UT)発見
- ◆ 16.4万光年離れた大マゼラン星雲内
- ◆ 質量が太陽の20倍ほどの青色超巨星SN1987Aと命名
- ◆ 爆発で放出されたニュートリノの数 $10^{58}$ 個

SN:Supernova(超新星)



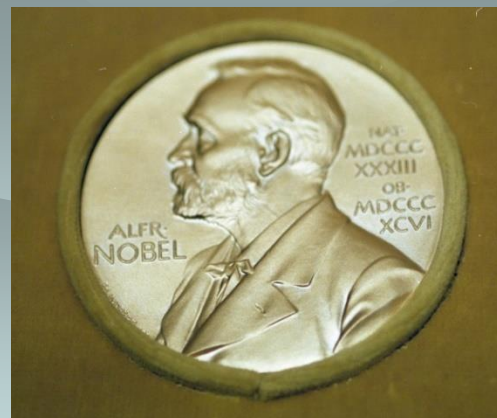


# 小柴先生 2002年ノーベル物理学賞

天体物理学に対するパイオニア的貢献、  
特に**宇宙ニュートリノ**の観測に対して



1987年の業績



ニュートリノ調べて何か面白いの？腹の足しになるの？

# ニュートリノの謎

- ◆ ニュートリノは検出が難しいのでまだまだ性質がわかっていない
  - ❖ 重さがわかってない
  - ❖ なんでそんなに軽いの??
  - ❖ とかとか
- ◆ ニュートリノの性質を解明することにより、大統一理論や物質の起源の謎に重大なヒントが得られる可能性がある！！

# 宇宙になぜ物質があるのか？

- ◆ ニュートリノが宇宙の物質 = **あなた** の存在の鍵を握っている

# 粒子と反粒子、物質と反物質

電子

反電子＝陽電子とよぶ

どこかで、粒子と反粒子の性質の違いがないと宇宙の物質はすべて消えてなくなってしまう！

ニュートリノと反ニュートリノの性質が違うのでは？もしかしたらそれが宇宙に物質が残った原因では？？？

すべての素粒子に反粒子



ロックスター



ロックスターも含めて  
宇宙の物質  
全部なくなってしまう



反ロックスター



ニュートリノ振動って？  
なんで重さと関係あるの？

# ニュートリノ振動とは？

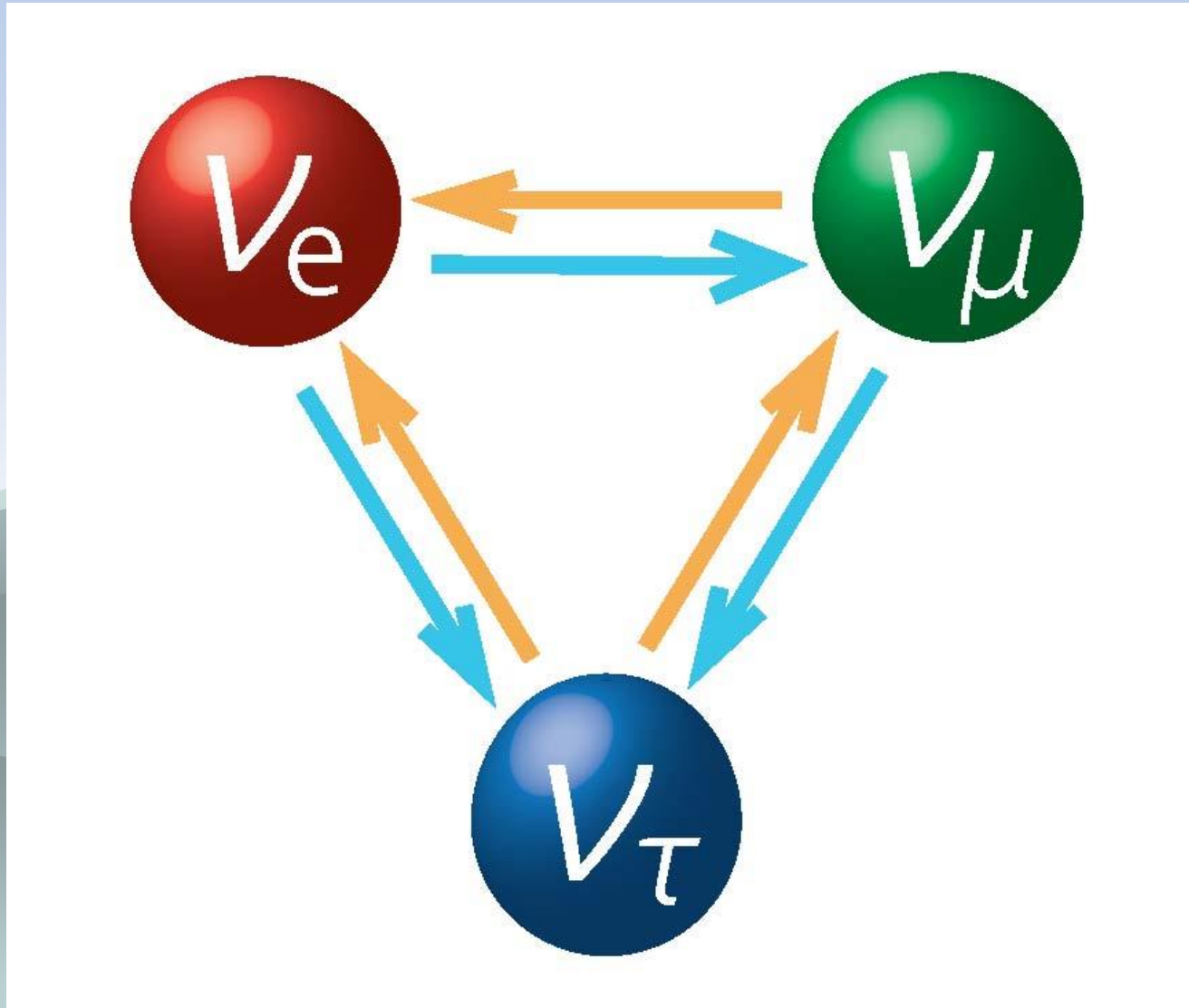
- ◆ ニュートリノが飛んでる間に別のニュートリノに化けること。



ミューニュートリノ

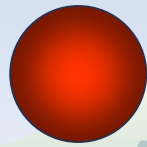
タウニュートリノ

# ニュートリノ振動＝種類の変化

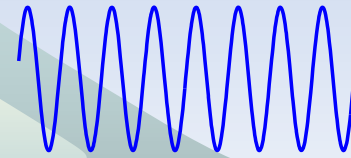


# 量子力学によると、

物質は、粒子の性質と波の性質を両方 持っている！



粒子



波

ニュートリノも、粒子であり、波でもある。

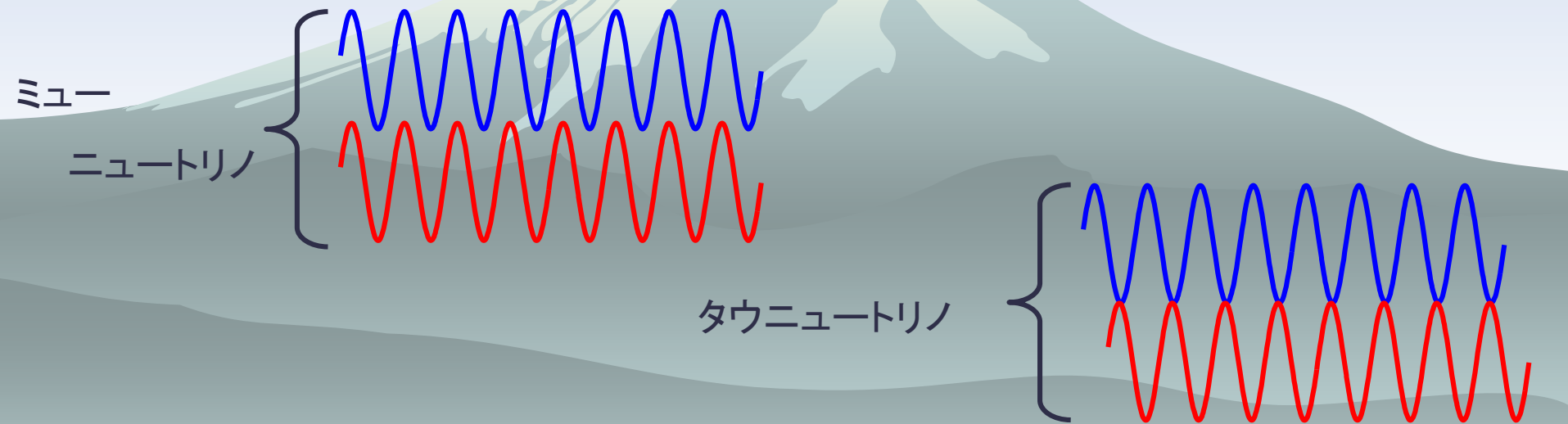
# 量子力学によると、

一つの粒子が、何種類もの質量を持つことが可能。

ミューニュートリノ = 質量 A の波 + 質量 B の波

タウニュートリノ = 質量 A の波 + 質量 B の波

ただし、重なり方が違う



ところで、異なる質量の波は、異なる速さで進む。

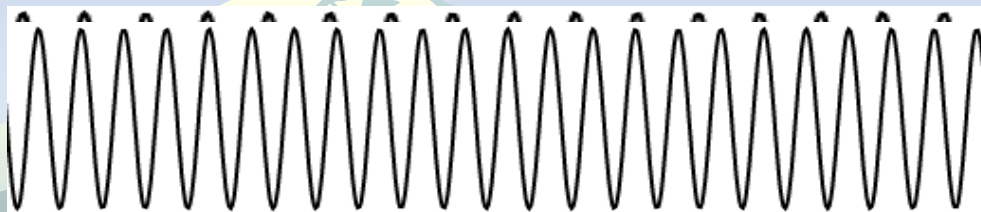
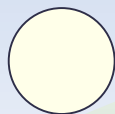
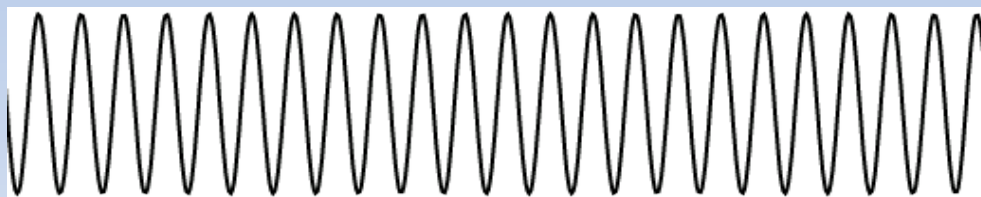


● と ● の質量が 同じなら、「波長」が同じである

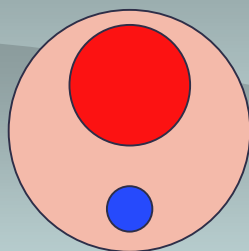
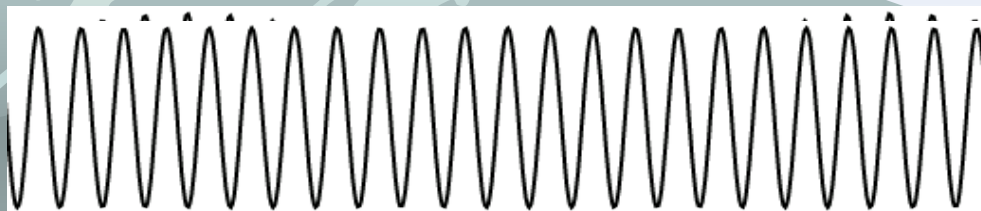
違うと、「波長」が異なる

波の伝播

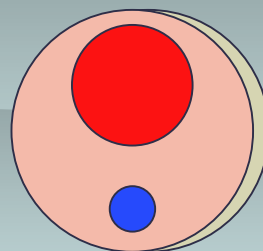
時間



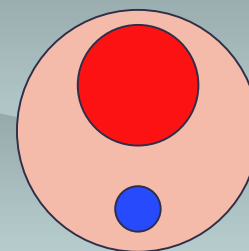
合成した波  
(うなり)



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

# つまり

- ◆ ニュートリノ振動＝種類の変化 の存在



- ◆ 異なる質量をもったニュートリノが混ざり合っている

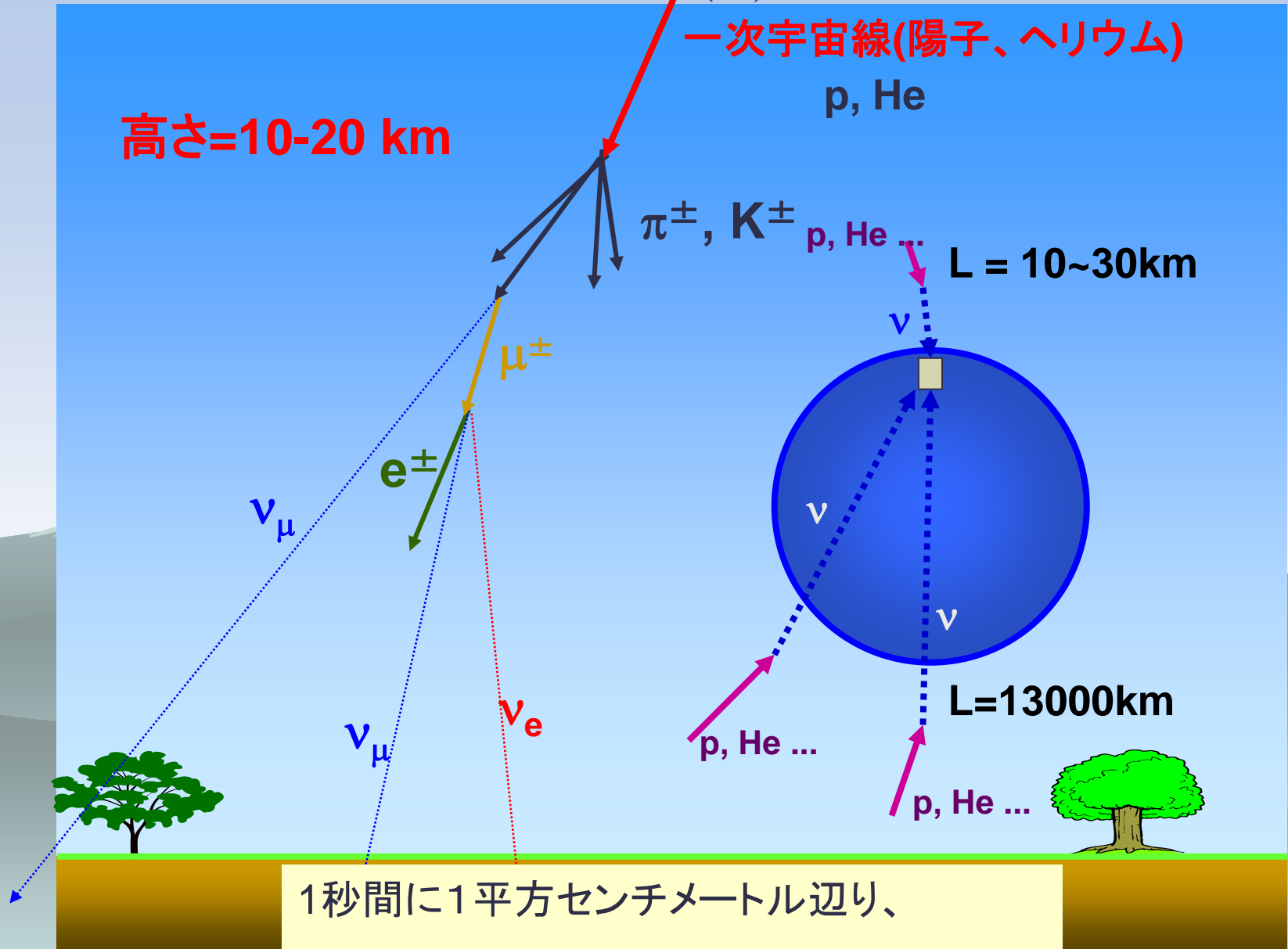


- ◆ (すくなくとも一種類の)ニュートリノは重さが0でない
- ◆ 種類の間で混ざり合いが起こる

# スーパーカミオ カンデによる大 気ニュートリノ の観測

ニュートリノ振動の証拠の発見とニュートリノ質量の質  
量の存在の証明

# 自然界のニュートリノ(2): 大気ニュートリノ



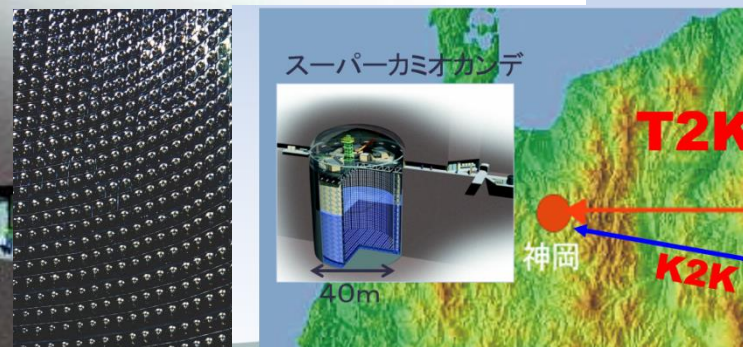
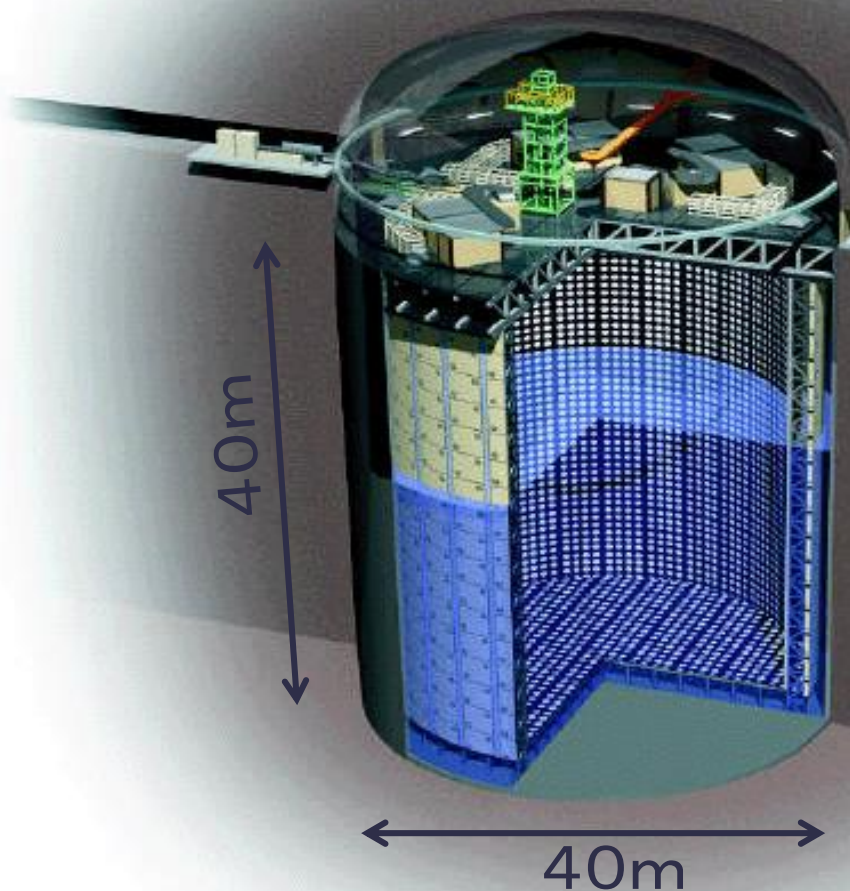
1秒間に1平方センチメートル辺り、  
1個のニュートリノが空から降ってきている。



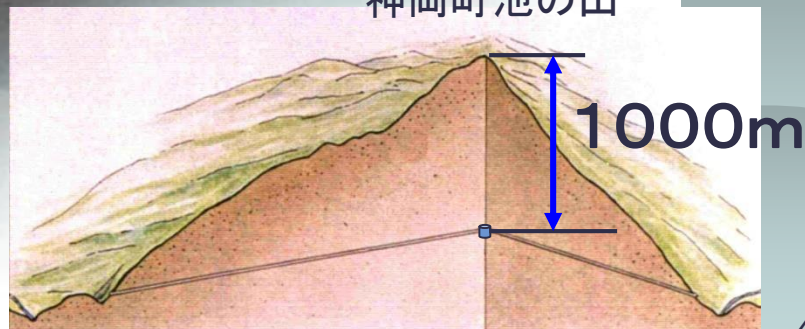
# ニュートリノ検出器: スーパーカミオカンデ

## スーパーカミオカンデ

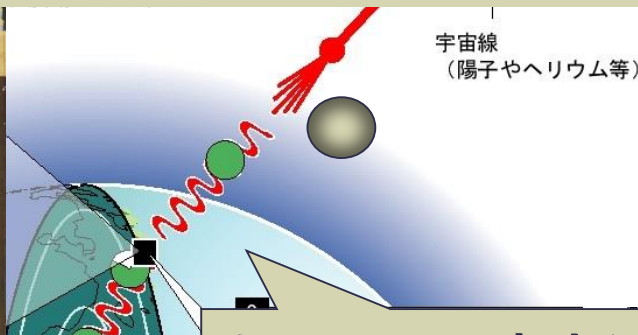
反応標的: 水**50000**トン(超純水)  
水槽の内面に**11146**本の  
光電子増倍管(photomultiplier tube:PMT)  
外水槽のPMTで外来粒子を検出



神岡町池の山



# ニュートリノ振動の発見(1998)



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  振動の証拠

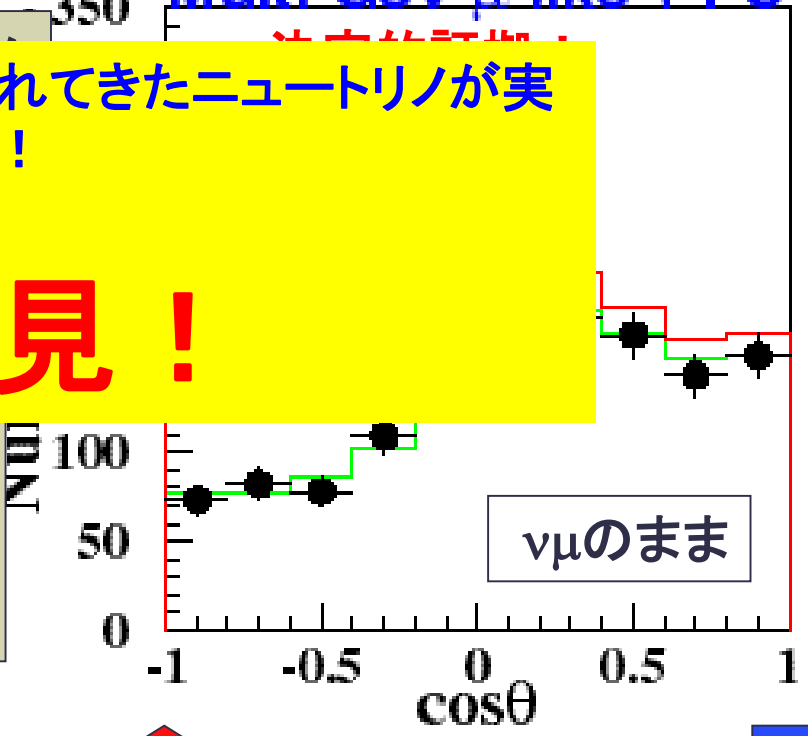
350 Multi-GeV  $\mu$ -like + PC

永い間、重さはないと思われてきたニュートリノが実はそうではないことが判明！

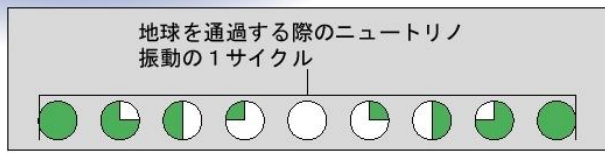
**大発見！**

2 ニュートリノが地球の中を通過する際、振動する。

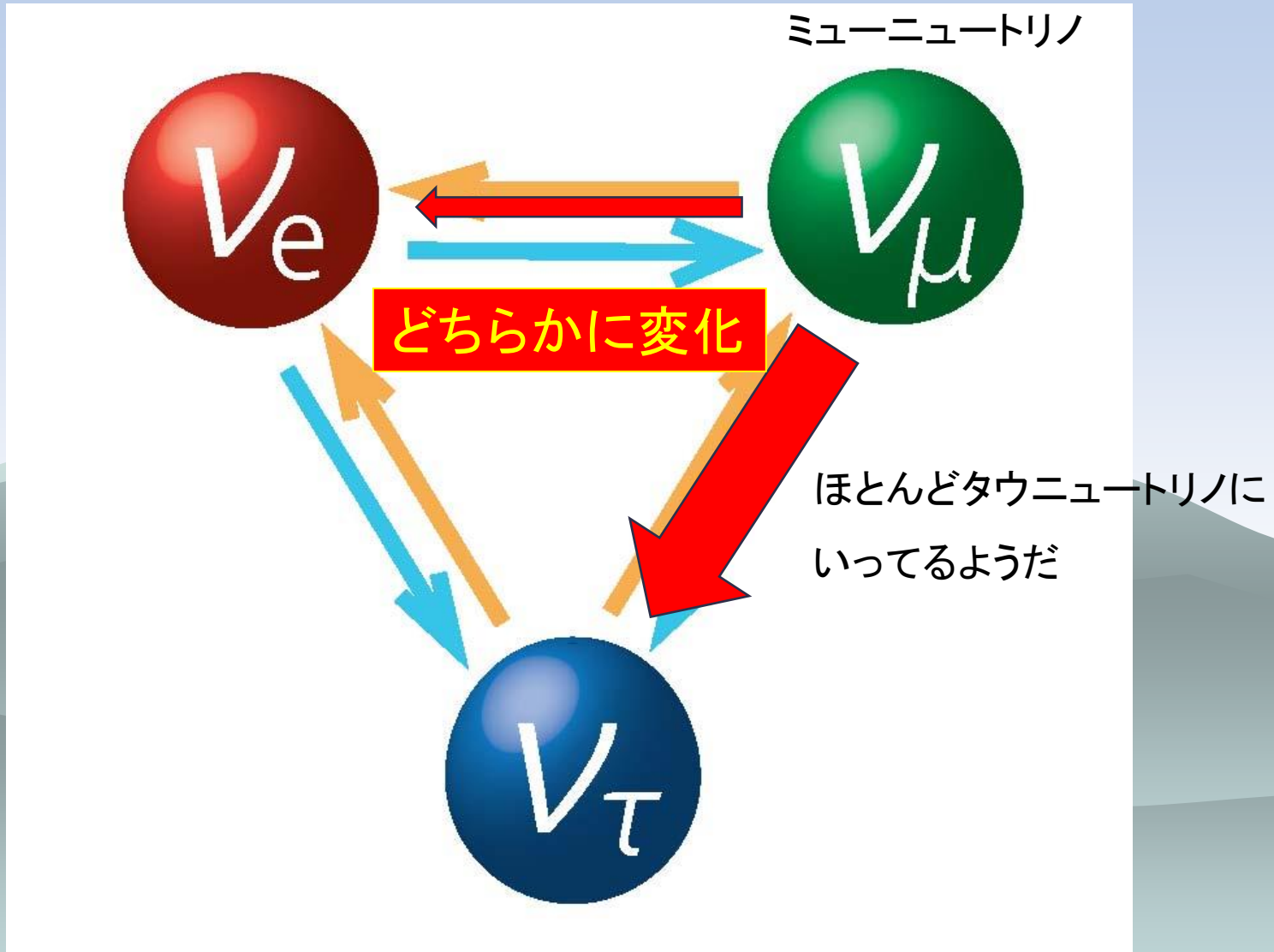
ミューニュートリノがタウニュートリノ変化するので検出されない



1 宇宙線が大気中の原子核と相互作用し、その2次粒子としてニュートリノを生成する。



# ニュートリノ振動＝種類の変化




# ニュートリノ国際会議1998


NEUTRINO'98

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/nu98/>



## NEUTRINO'98

Total  hits since November, 1996

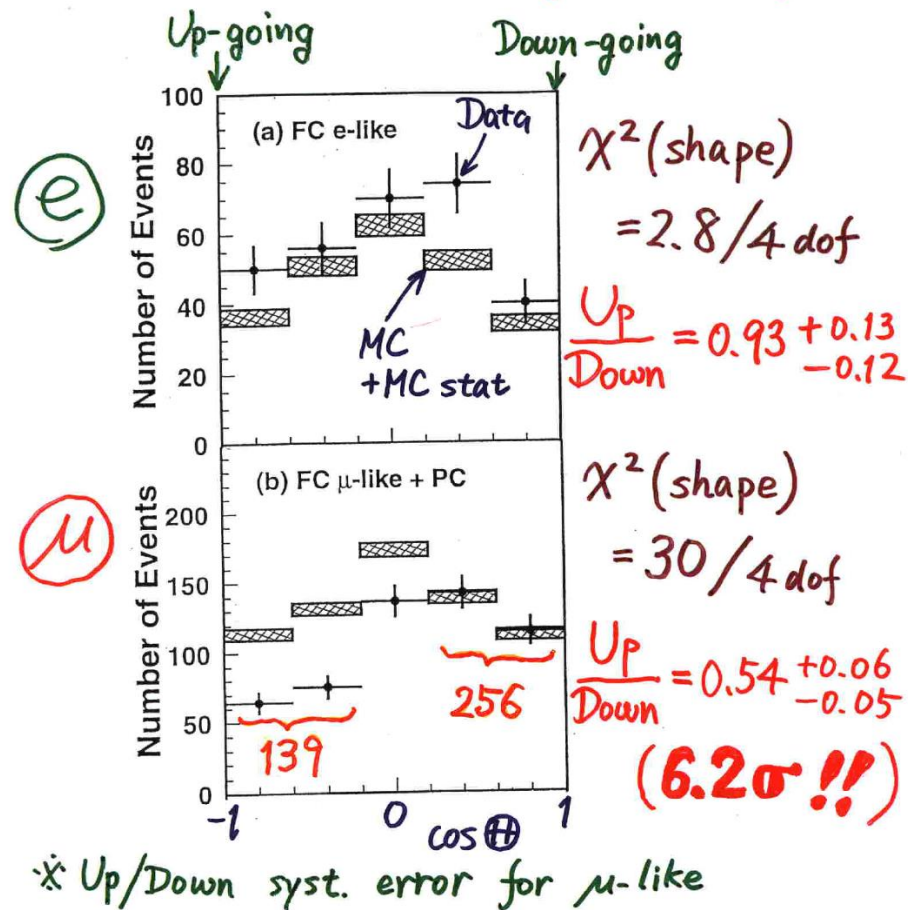
- [Welcome!](#)
- [Transparencies](#)  (under construction)
- Tentative scientific programme (as of May 28) [\[text 7K\]](#)
- [Phone and FAX numbers for the conference \(April 1998\)](#)
- Bulletin #2 (January 1998) [\[text 29K\]](#) [\[PS 290K\]](#) [\[compressed PS 89K\]](#)
- MAP1: Route map to Takayama (see Bulletin2 for details) (January 1998) [\[GIF 11K\]](#)
- MAP2: local map in Takayama (see Bulletin2 for details) (January 1998) [\[GIF 25K\]](#)
- Registration (January 1998) [\[on-line registration\]](#) [\[PS 25K\]](#) [\[compressed PS 17K\]](#)
- Bulletin #1 (October 1997) [\[text 9K\]](#) [\[PS 95K\]](#) [\[compressed PS 30K\]](#)
- [First announcement on-line](#)

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/nu98/>





# Zenith angle dependence (Multi-GeV)



Prediction ( flux calculation .....  $\lesssim 1\%$   
1km rock above SK ..... 1.5% ) 1.8%

Data ( Energy calib. for  $\uparrow\downarrow$  ..... 0.7%  
Non  $\nu$  Background .....  $< 2\%$  ) 2.1%

$\nu 98$ , @ Takayam  
June 1998

Atmospheric neutrino results  
from Super-Kamiokande & Kamiokande

- Evidence for  $\nu_\mu$  oscillations -

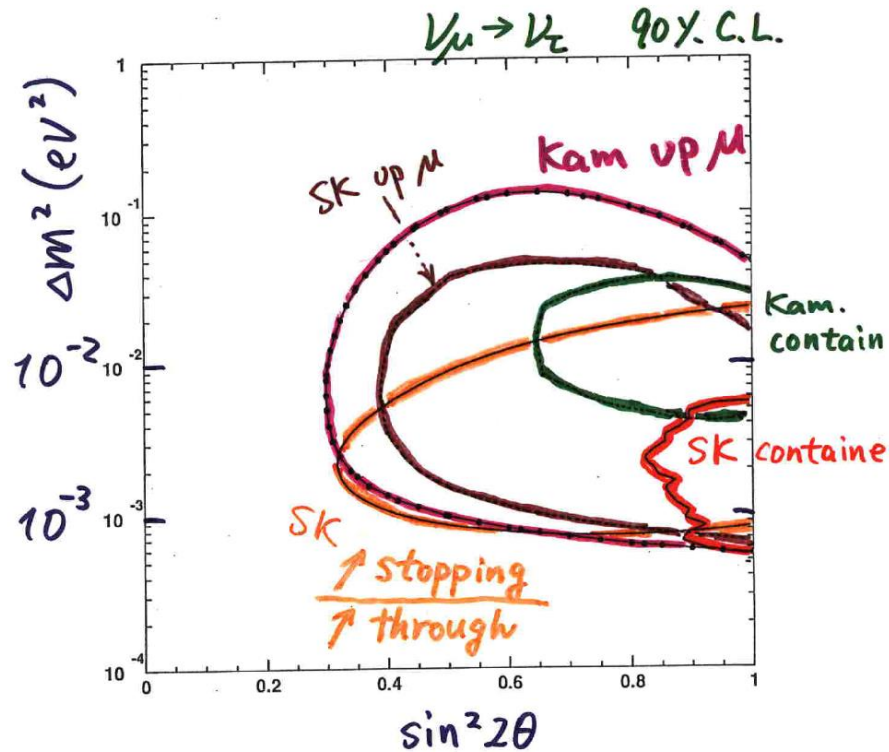
T. Kajita

Kamioka observatory, Univ. of Tokyo

for the { Kamiokande  
Super-Kamiokande } Collaborations

# Summary

## Evidence for $\nu_\mu$ oscillations



- $\begin{cases} \sin^2 2\theta > 0.8 \\ \Delta m^2 \sim 10^{-3} \sim 10^{-2} \end{cases}$

(•  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  or  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  ?)

◆ 鳴りやまぬ満場の拍手

# 論文

大気ニュートリノ解析リーダー

VOLUME 81, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 AUGUST 1998

実験代表者: 故戸塚洋二 KEK元機構長

## Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

Y. Fukuda,<sup>1</sup> T. Hayakawa,<sup>1</sup> E. Ichihara,<sup>1</sup> K. Inoue,<sup>1</sup> K. Ishihara,<sup>1</sup> H. Ishino,<sup>1</sup> Y. Itow,<sup>1</sup> T. Kajita,<sup>1</sup> J. Kameda,<sup>1</sup>  
S. Kasuga,<sup>1</sup> K. Kobayashi,<sup>1</sup> Y. Kobayashi,<sup>1</sup> Y. Koshio,<sup>1</sup> M. Miura,<sup>1</sup> M. Nakahata,<sup>1</sup> S. Nakayama,<sup>1</sup> A. Okada,<sup>1</sup>  
K. Okumura,<sup>1</sup> N. Sakurai,<sup>1</sup> M. Shiozawa,<sup>1</sup> Y. Suzuki,<sup>1</sup> Y. Takeuchi,<sup>1</sup> Y. Totsuka,<sup>1</sup> S. Yamada,<sup>1</sup> M. Earl,<sup>2</sup> A. Habig,<sup>2</sup>  
E. Kearns,<sup>2</sup> M. D. Messier,<sup>2</sup> K. Scholberg,<sup>2</sup> J. L. Stone,<sup>2</sup> L. R. Sulak,<sup>2</sup> C. W. Walter,<sup>2</sup> M. Goldhaber,<sup>3</sup> T. Barszczak,<sup>4</sup>  
D. Casper,<sup>4</sup> W. Gajewski,<sup>4</sup> P. G. Halverson,<sup>4,\*</sup> J. Hsu,<sup>4</sup> W. R. Kropp,<sup>4</sup> L. R. Price,<sup>4</sup> F. Reines,<sup>4</sup> M. Smy,<sup>4</sup> H. W. Sobel,<sup>4</sup>  
M. R. Vagins,<sup>4</sup> K. S. Ganezer,<sup>5</sup> W. E. Keig,<sup>5</sup> R. W. Ellsworth,<sup>6</sup> S. Tasaka,<sup>7</sup> J. W. Flanagan,<sup>8,†</sup> A. Kibayashi,<sup>8</sup>  
J. G. Learned,<sup>8</sup> S. Matsuno,<sup>8</sup> V. J. Stenger,<sup>8</sup> D. Takemori,<sup>8</sup> T. Ishii,<sup>9</sup> J. Kanzaki,<sup>9</sup> T. Kobayashi,<sup>9</sup> S. Mine,<sup>9</sup>  
K. Nakamura,<sup>9</sup> K. Nishikawa,<sup>9</sup> Y. Oyama,<sup>9</sup> A. Sakai,<sup>9</sup> M. Sakuda,<sup>9</sup> O. Sasaki,<sup>9</sup> S. Echigo,<sup>10</sup> M. Kohama,<sup>10</sup>  
A. T. Suzuki,<sup>10</sup> T. J. Haines,<sup>11,4</sup> E. Blaufuss,<sup>12</sup> B. K. Kim,<sup>12</sup> R. Sanford,<sup>12</sup> R. Svoboda,<sup>12</sup> M. L. Chen,<sup>13</sup> Z. Conner,<sup>13,‡</sup>  
J. A. Goodman,<sup>13</sup> G. W. Sullivan,<sup>13</sup> J. Hill,<sup>14</sup> C. K. Jung,<sup>14</sup> K. Martens,<sup>14</sup> C. Mauger,<sup>14</sup> C. McGrew,<sup>14</sup> E. Sharkey,<sup>14</sup>  
B. Viren,<sup>14</sup> C. Yanagisawa,<sup>14</sup> W. Doki,<sup>15</sup> K. Miyano,<sup>15</sup> H. Okazawa,<sup>15</sup> C. Saji,<sup>15</sup> M. Takahata,<sup>15</sup> Y. Nagashima,<sup>16</sup>  
M. Takita,<sup>16</sup> T. Yamaguchi,<sup>16</sup> M. Yoshida,<sup>16</sup> S. B. Kim,<sup>17</sup> M. Etoh,<sup>18</sup> K. Fujita,<sup>18</sup> A. Hasegawa,<sup>18</sup> T. Hasegawa,<sup>18</sup>  
S. Hatakeyama,<sup>18</sup> T. Iwamoto,<sup>18</sup> M. Koga,<sup>18</sup> T. Maruyama,<sup>18</sup> H. Ogawa,<sup>18</sup> J. Shirai,<sup>18</sup> A. Suzuki,<sup>18</sup> F. Tsushima,<sup>18</sup>  
M. Koshiba,<sup>19</sup> M. Nemoto,<sup>20</sup> K. Nishijima,<sup>20</sup> T. Futagami,<sup>21</sup> Y. Hayato,<sup>21,§</sup> Y. Kanaya,<sup>21</sup> K. Kaneyuki,<sup>21</sup>  
Y. Watanabe,<sup>21</sup> D. Kielczewska,<sup>22,4</sup> R. A. Doyle,<sup>23</sup> J. S. George,<sup>23</sup> A. L. Stachyra,<sup>23</sup> L. L. Wai,<sup>23,||</sup>  
R. J. Wilkes,<sup>23</sup> and K. K. Young<sup>23</sup>  
(Super-Kamiokande Collaboration)

引用~4600回！！



# ニュートリノ振動発見！

「竹とんぼ」がヒット

堀内孝雄のアルバム好調  
\* 芸能 12

北沢が帰国会見 15



## 読売新聞

THE YOMIURI SHIMBUN  
EVENING EDITION (8刊) 第43865号 ©読売新聞社 1998年

6月5日 金曜日  
1998年(平成10年)

発行所  
読売新聞社  
東京都千代田区神田1-7-1  
郵便番号 100-8055  
電話:03-3242-1111

しみじみと 心のかまよう 贈り物

読売・司

### とらや

東京・神保町 電話:03(3408)4121

4版

「主将として、W杯のクラウンドに先頭で入っていることは、誇りに思う」と語る時、影りの深い顔立ちが一層引き締まった。

一九八八年一月、筑波大二年の時に二十歳で日本代表入りし、先発デビュー。以来十年間にわたって、センターハ



野茂英雄投手

DF マリノス

## 夢の舞台へ主将

「ドーハの悲劇」も含めて、杯への現実感はずかしく、思っ

W杯予選には三度挑戦。「最かし昨年、は「もう絶対にW杯に行かなくてはならない」と、開になった。地方の

でも勝てるレベルになく、W という優勝感さえあった」と、引退を告げ、加茂

ワルトレイクシティ 移籍するエが四日決まっ

4日、上野原、米大リーグ。メッツ球団は四日、電

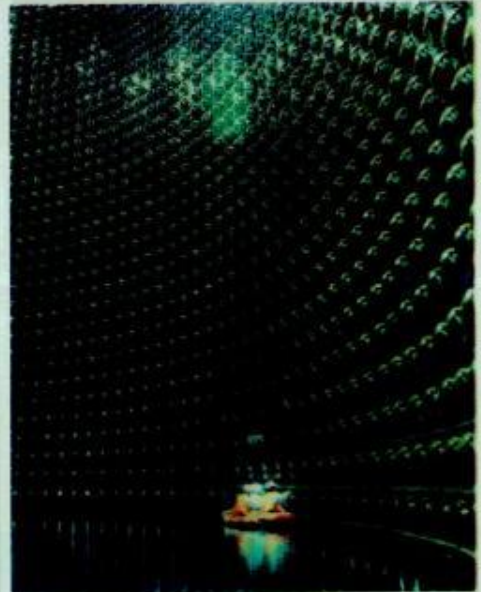
・ナショナルリーグ、ロサンゼルス・ドジャースの野

茂英雄投手(29)が同リーグの投手向土(2)のトレー

ドを発表した。

## 野茂メッツ入り

2対2 トレード



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 観測を続けてきた。

往回したのは、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーニュートリノの

スーパークアミオカンデ 岐阜県・神岡山の地下約

千メートル、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返

り、中にも再物質の極めて少ない、五百メートル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。水中に飛び込むと、ニュートリノは相互作用を発生する特殊な光を、壁面を埋め尽くした約一月一千本の光センサー(光電子増倍管)でキャッチする。感測器約百四十

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。その素粒子「ニュートリノ」について、東大宇宙線研究所(戸塚洋一 所長)の目黒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た。五日前、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た素粒子の質量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。 (解説と図)

実験グループは「昨年四月、鉱山の探査跡を利用した地下「スーパーカミオカンデ」(野水ノ観測を続けてきた。往回したのは、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーニュートリノの

スーパークアミオカンデ 岐阜県・神岡山の地下約千メートル、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返り、中にも再物質の極めて少ない、五百メートル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。水中に飛び込むと、ニュートリノは相互作用を発生する特殊な光を、壁面を埋め尽くした約一月一千本の光センサー(光電子増倍管)でキャッチする。感測器約百四十

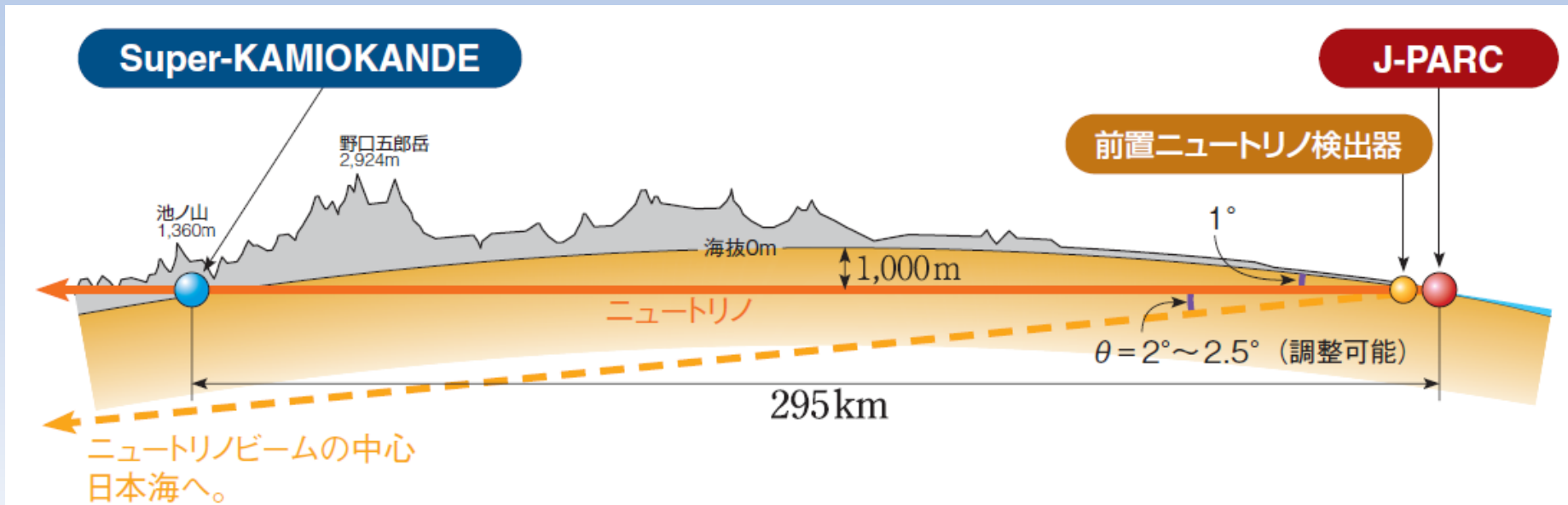
## 理論物理の根幹一新

# 「質量ある」最終結論

## なぞの素粒子 ニュートリノ



# T2K (東海to神岡)長基線ニュートリノ振動実験



- ◆ J-PARCの**世界最大強度ビーム**を用いて、
- ◆ **ニュートリノ振動**現象を詳細にしらべて
- ◆ ニュートリノの謎を解明、
- ◆ ミクロの世界の法則を解き明かす
- ◆ 宇宙の物質はなぜできたのか？という謎に迫る！



高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所ニュートリノグループに所属する多田将理学博士。

高エネルギー加速器研究機構  
**多田将**

高校生にもわかる素粒子物理の最前線

**すごい実験**

この世でもっとも巨大な装置で、この世でもっとも小さな物質をつかまえる——壮大な国家プロジェクト「T2K」が明らかにする、**素粒子ニュートリノの謎。**

類書に挫折した経験のある人にこそ推薦したい！  
ポップな語調と巧みな喩えに「そういうことだったのか」と膝を打つことだろう。  
——池谷裕二  
読売新聞 書評

# すごい実験

検索

# T2K実験の重要目的

- ◆ 未発見のミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動(電子ニュートリノ出現)の発見 ← **最重要!**

スーパーカミオカンデ

電子ニュートリノ出現探索

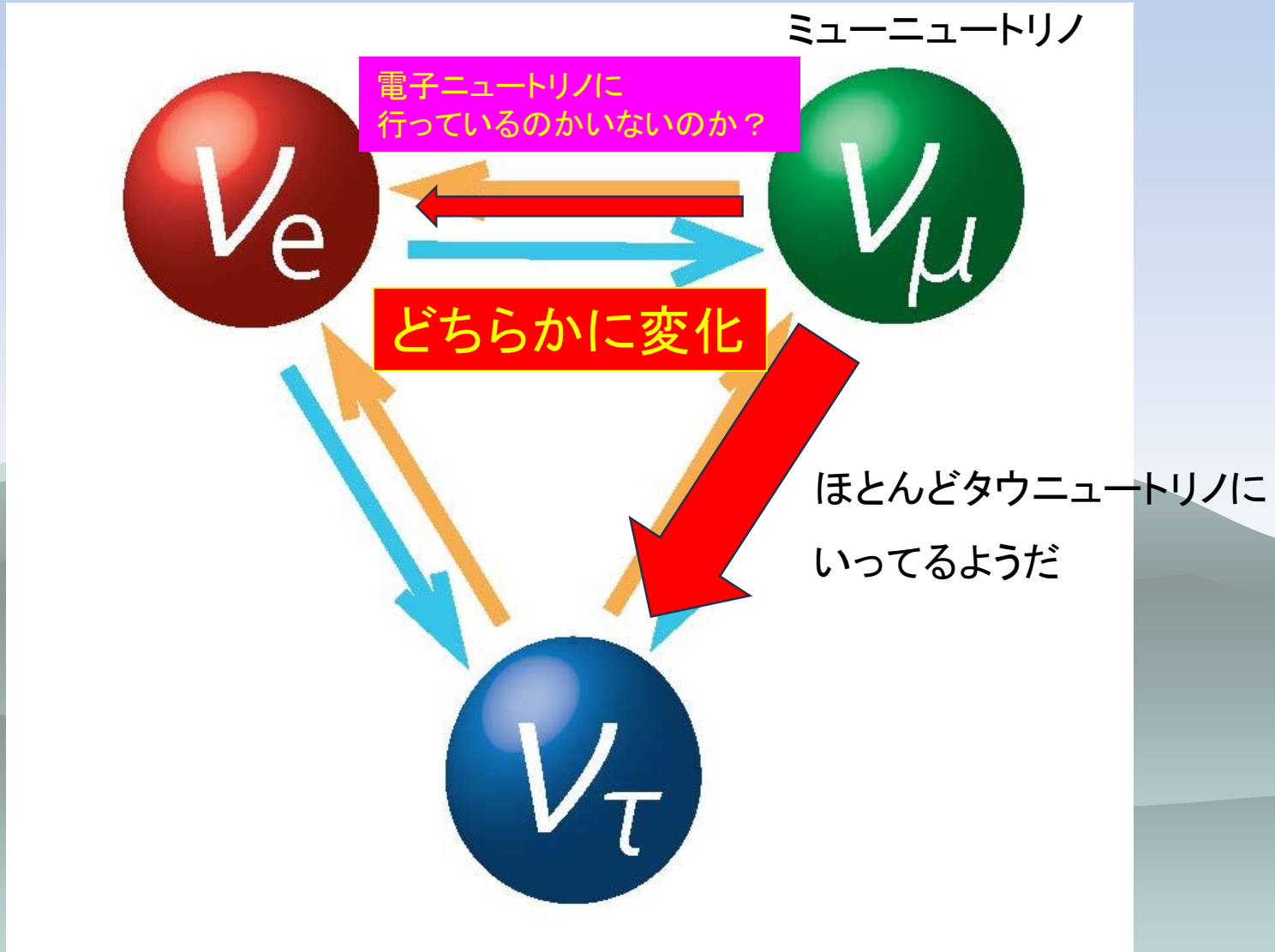


ミューニュートリノ

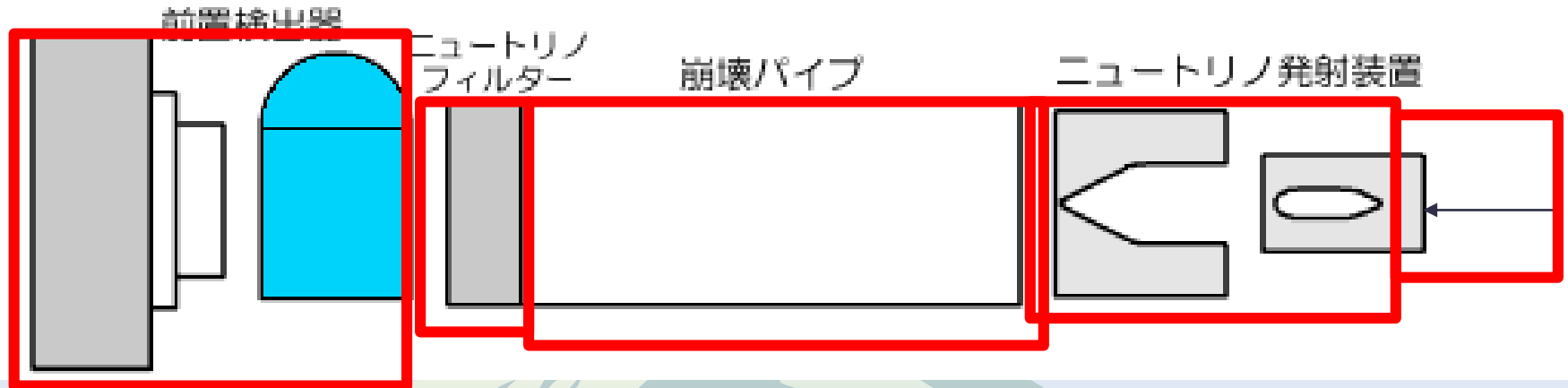
**未発見  
最重要な目的**

電子ニュートリノを探す!

# ニュートリノ振動＝種類の変化



# ニュートリノビームの作り方



- ◆ 陽子を光速の99.98%に加速し標的に当て、大量の $\pi$ 中間子を生成。(3.6秒に1回300兆個の陽子)
- ◆ 強力な磁石で $\pi$ 中間子を磁石で神岡方向に曲げる
- ◆  $\pi$ 中間子が崩壊パイプを飛行中に崩壊しミューニュートリノが生成される。



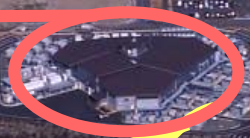
# 大強度陽子加速器施設: J-PARC

J-PARC Facility  
(KEK/JAEA)

South to North  
東海村

181MeV Linac

3 GeV RCS

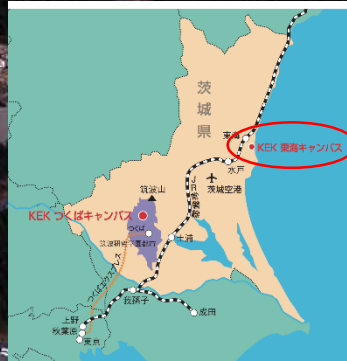


ニュートリノビーム  
(神岡方面)

100兆個の陽子を約1.5秒で  
20万回周回させ光速の  
99.98%まで加速

周長 1.6km  
30GeV MR

- CY2007 Beams
- JFY2008 Beams
- JFY2009 Beams



Bird's eye photo in January of 2008



# ニュートリノ発射装置

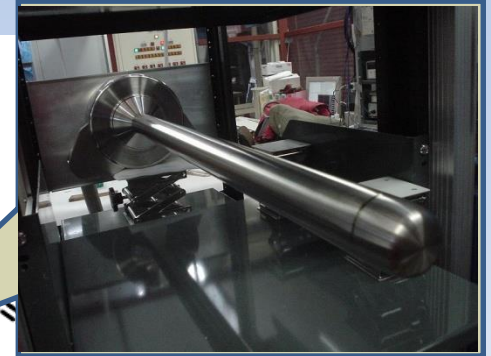
ニュートリノモニター棟



電磁ホーン



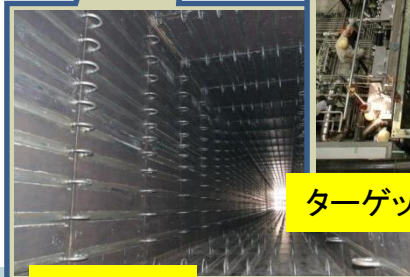
標的(グラフィイト)



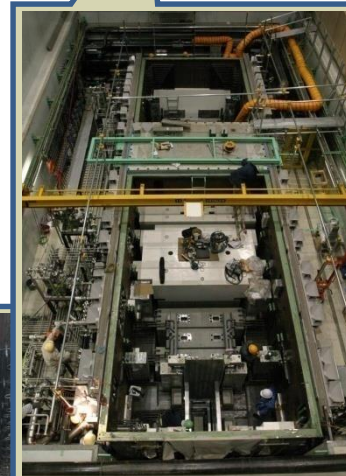
CERNから寄贈されたUA1磁石(1000ton).  
ニュートリノモニター棟内に設置済み



ビームダンプ

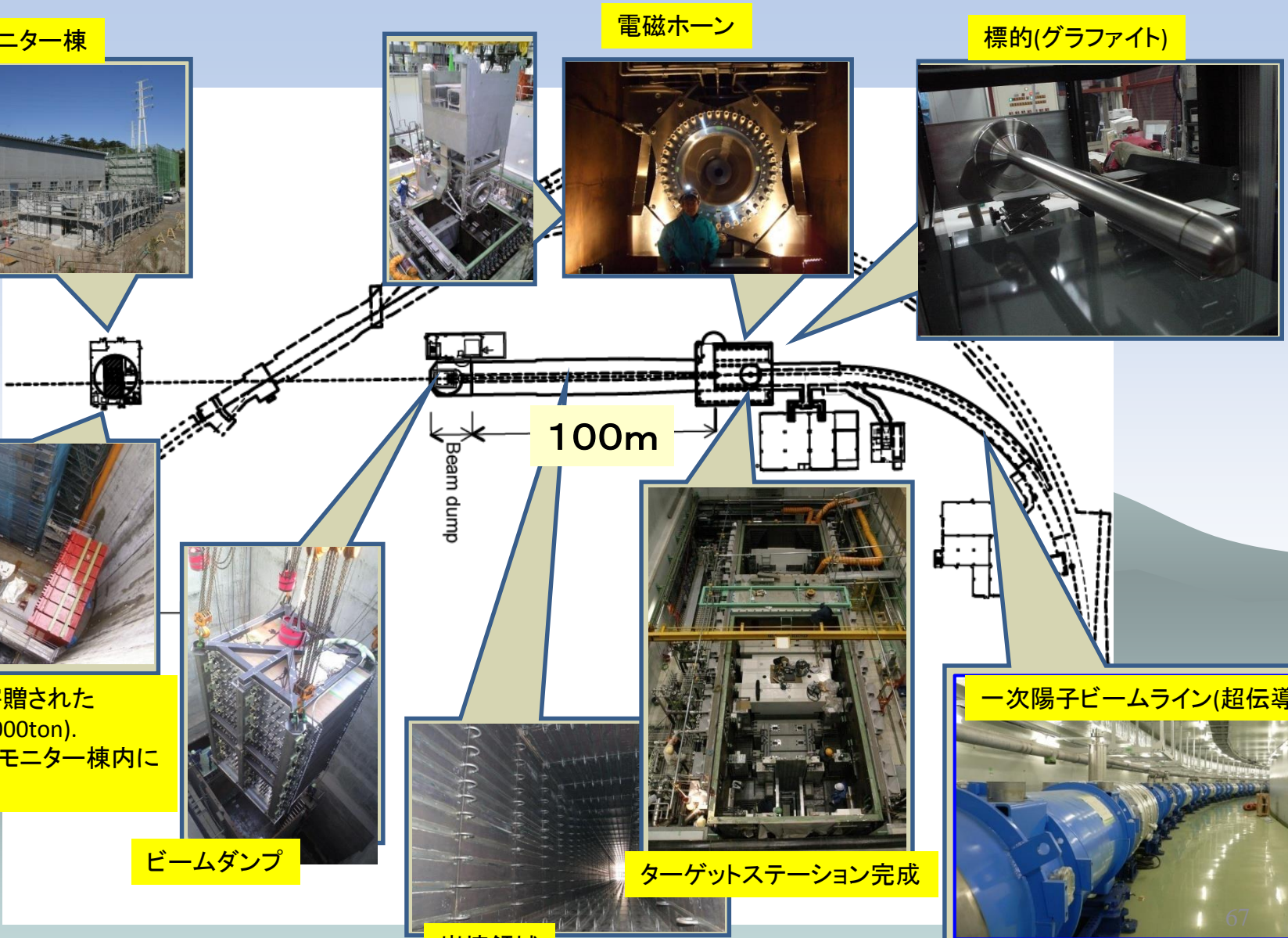


崩壊領域

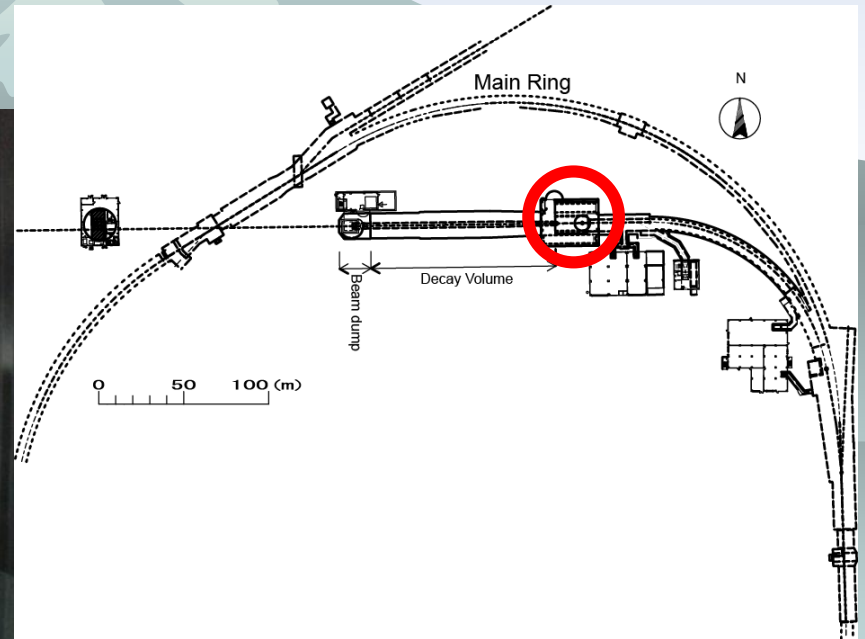
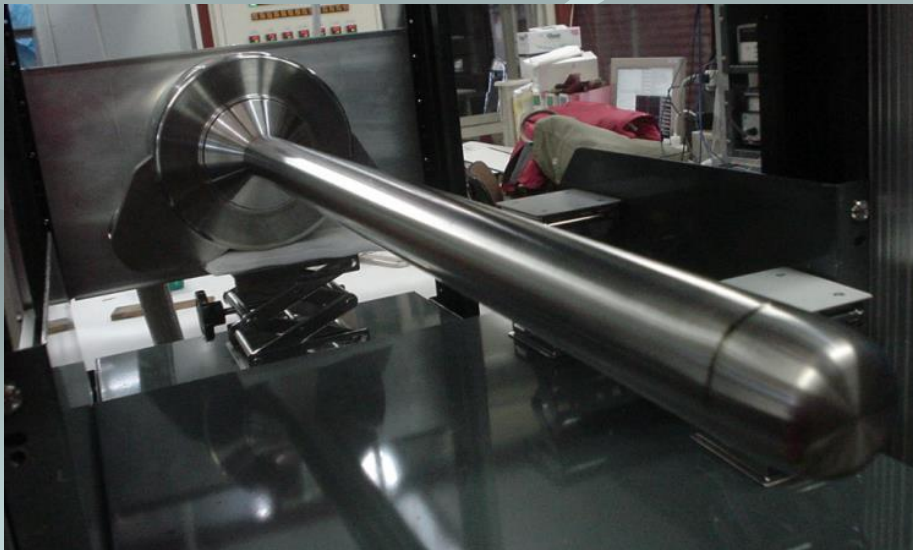
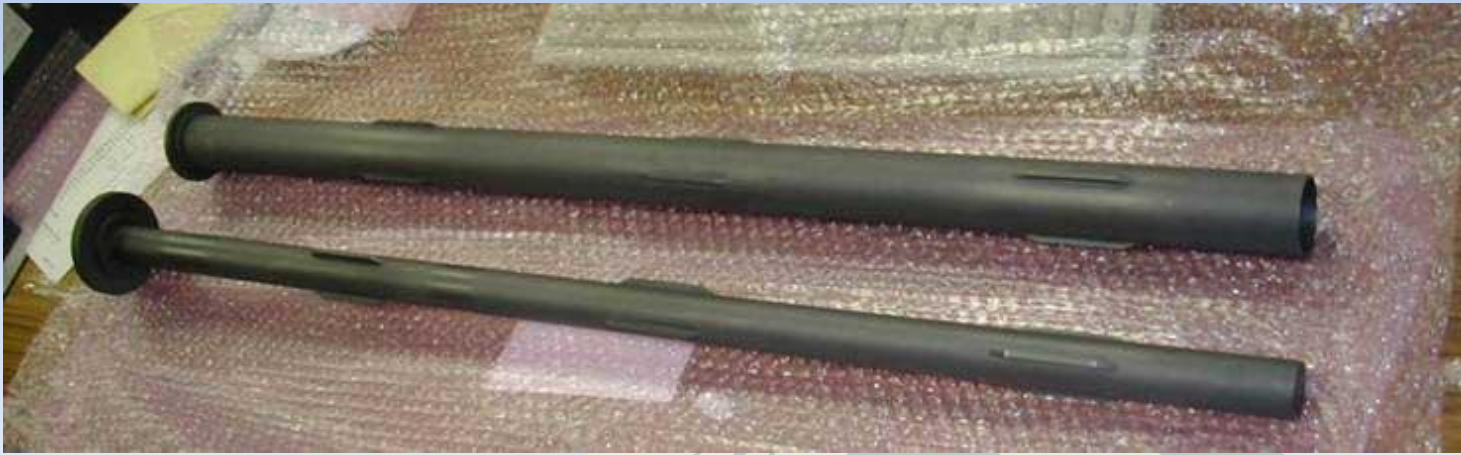


ターゲットステーション完成

一次陽子ビームライン(超伝導)



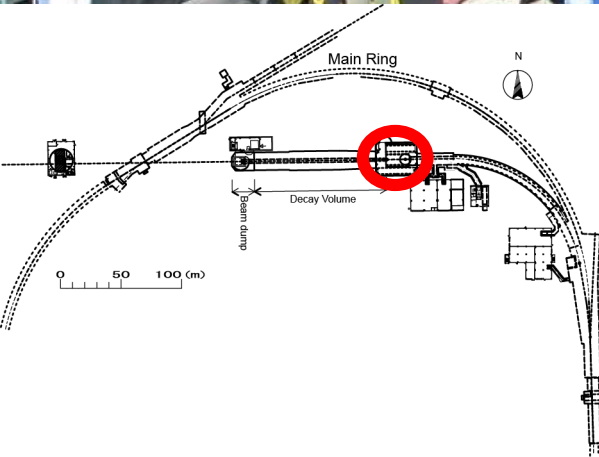
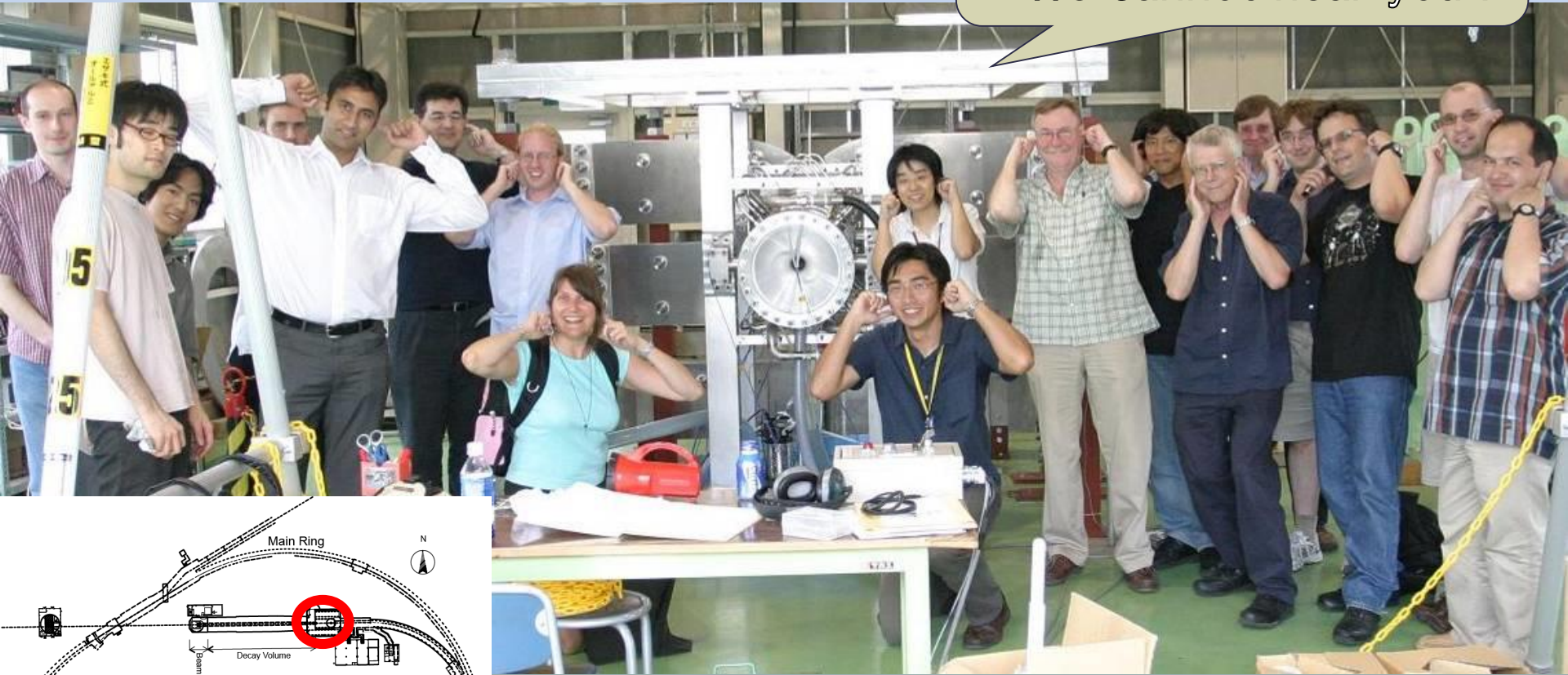
# 標的





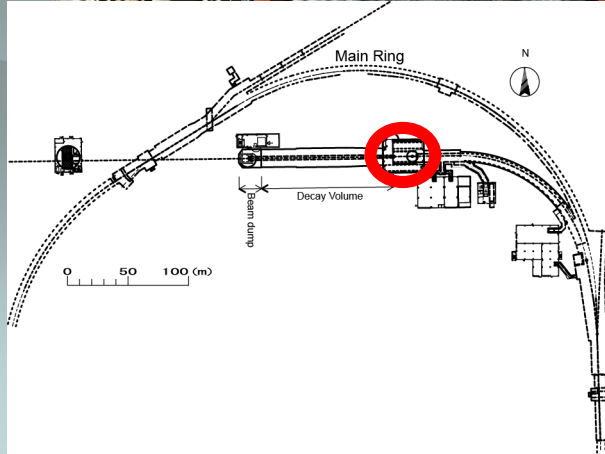
# 1<sup>st</sup> Horn with 320 kA

Haa ?  
We cannot hear you !





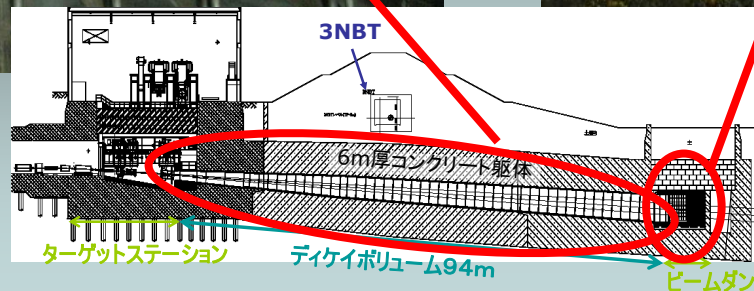
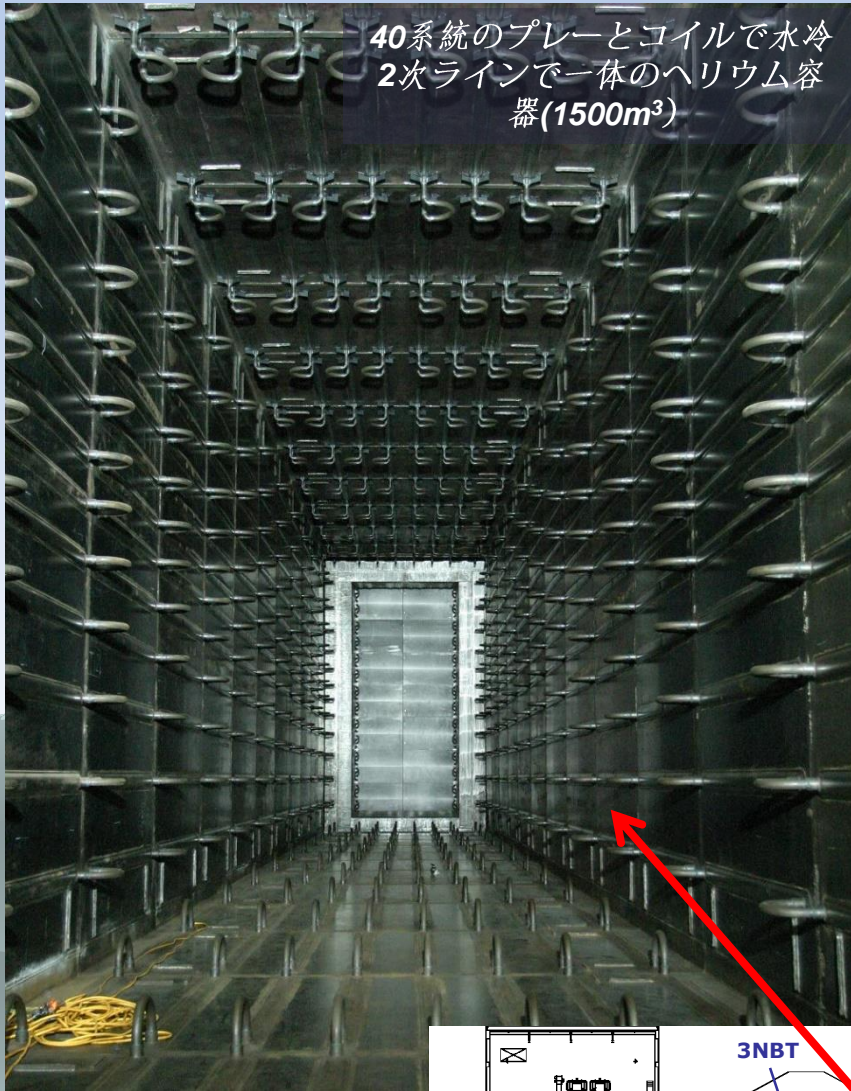
# Helium Vessel Construction



ream DV



# 崩壊領域とビームダンプ

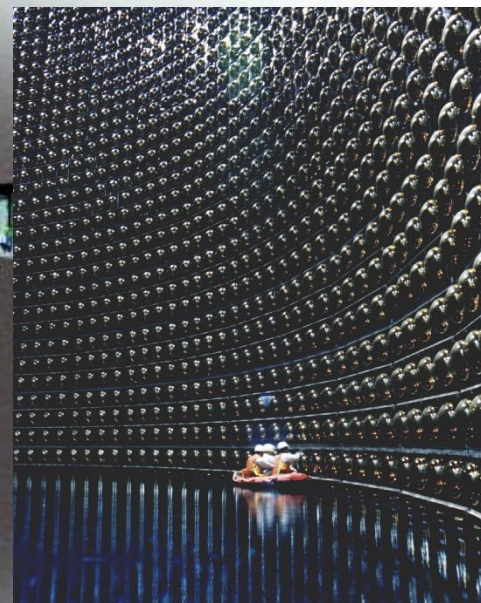
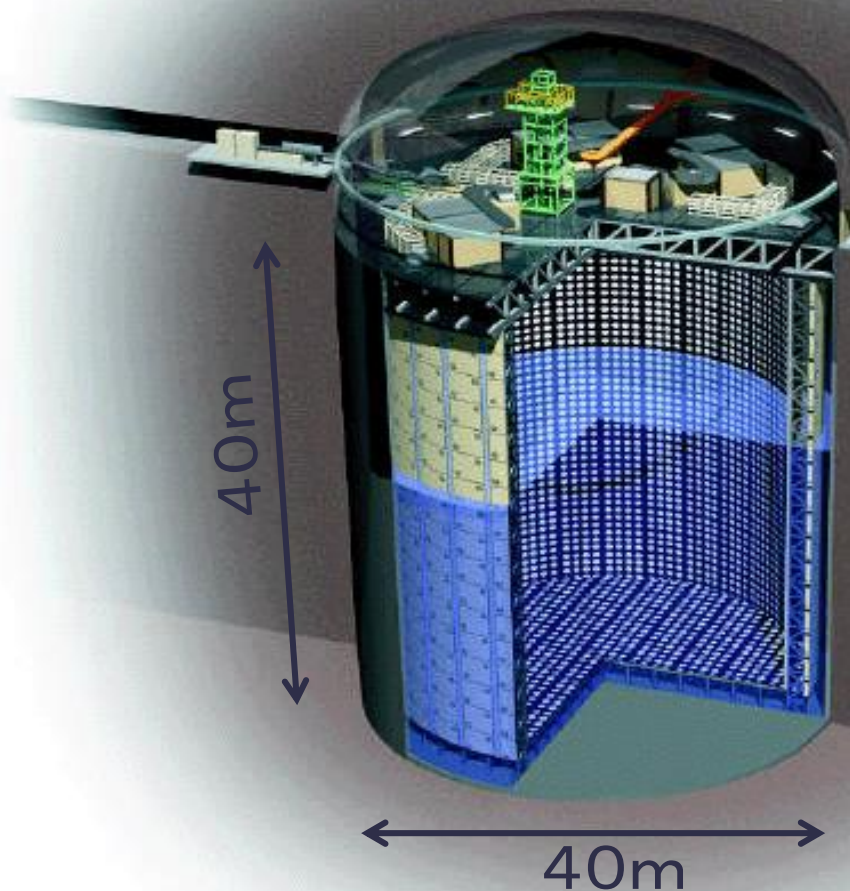




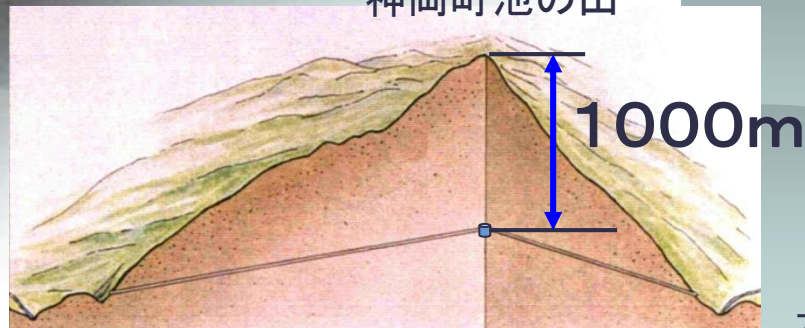
# ニュートリノ検出器: スーパーカミオカンデ

## 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

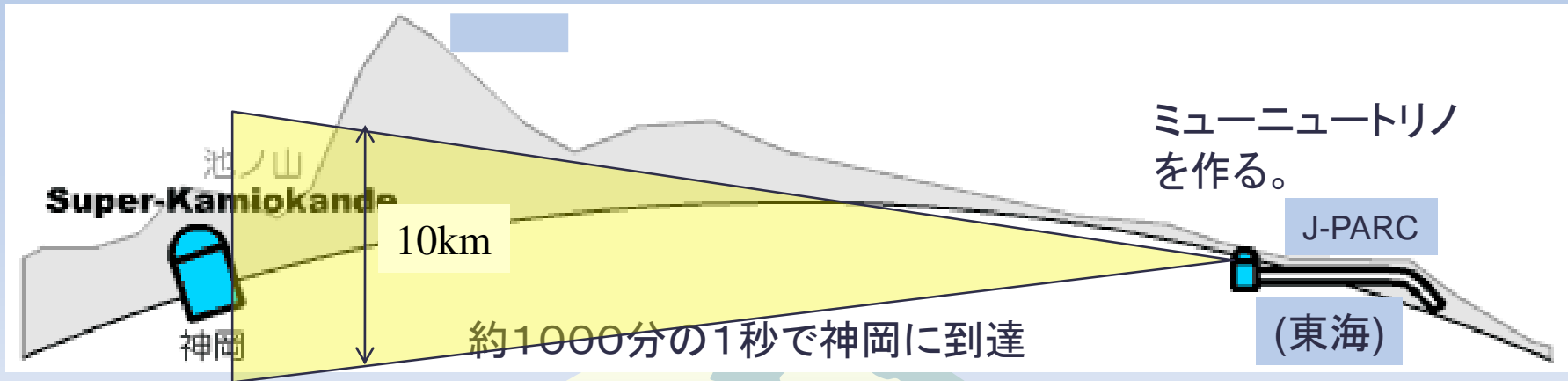


神岡町池の山



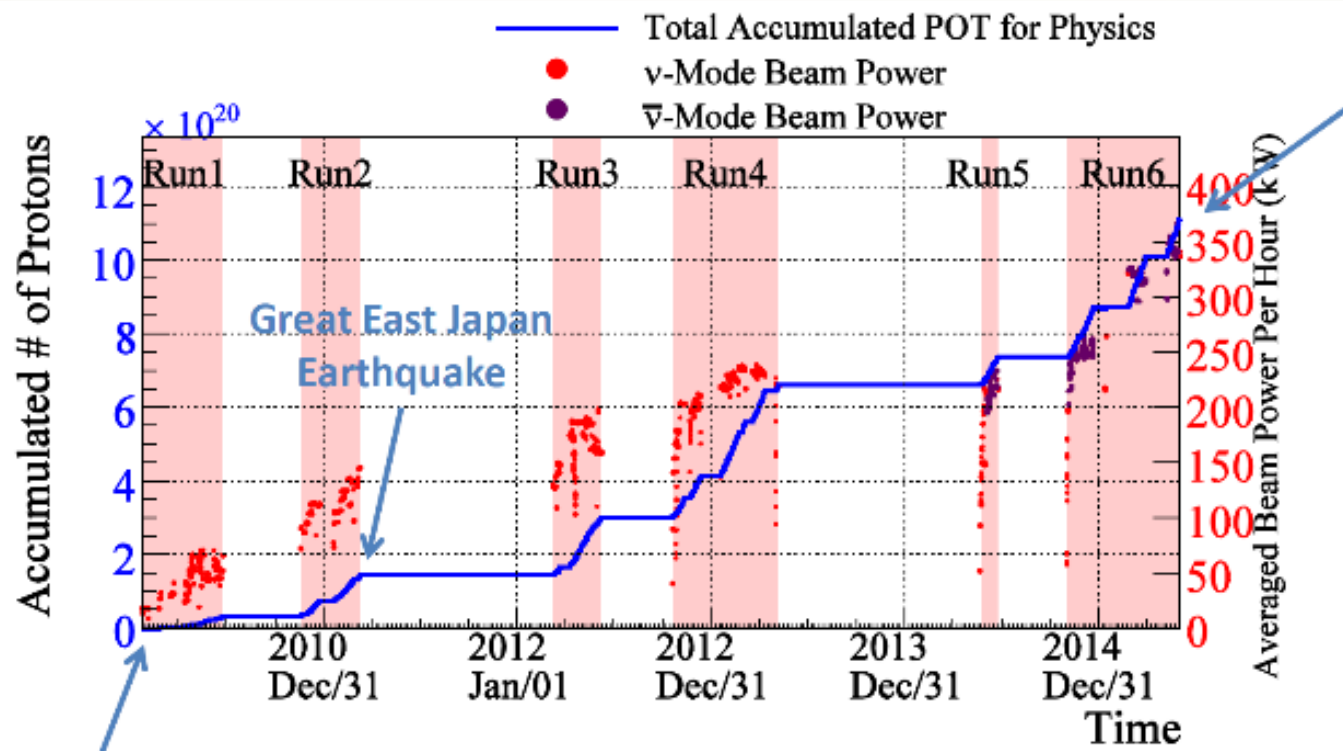


# T2K実験



- ◆ 2. 5秒に1回、1000兆個のミューニュートリノをJ-PARCから発射
- ◆ 1000分の1秒かけて295km地中を走る(途中で無くなるのは200万個に1個の割合)
- ◆ 1日に1兆個のニュートリノがスーパーカミオカンデを通過。
- ◆ そのうち、反応してとらえられるのは1日に数個
- ◆ 反応したニュートリノは元通りミューニュートリノ？はたまた、電子ニュートリノに変わってるか???

# これまでの測定：陽子数



$7.00 \times 10^{20}$  POT in v-mode

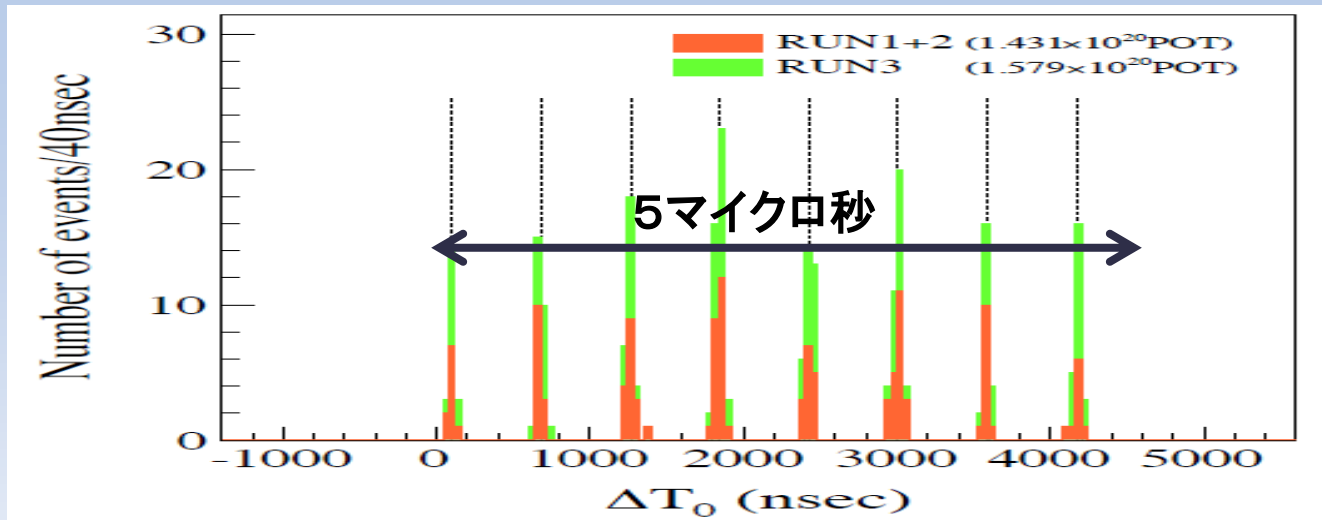
$4.04 \times 10^{20}$  POT in  $\bar{\nu}$ -mode

Total:  
 $11.04 \times 10^{20}$  POT  
(14% of total expected POT)

Beam Start:  
Jan 2010

- ◆ 2010年1月から開始
- ◆ 2015年夏までに $\sim 10^{21}$ 個の陽子
- ◆ 2014年から反ニュートリノビーム開始

# これまでのデータ

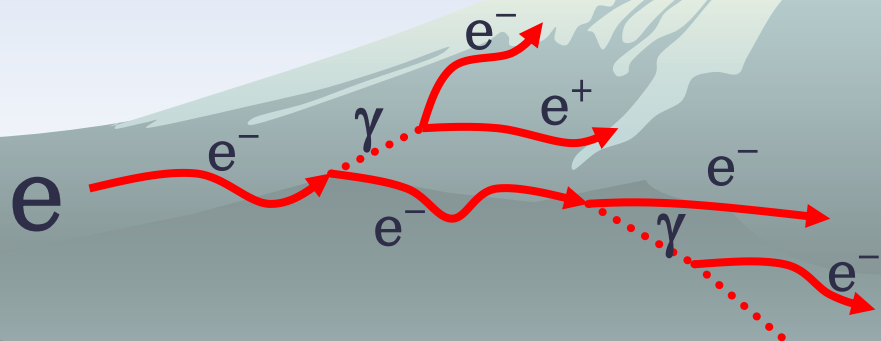


- ◆ 2013年夏までに  $6.6 \times 10^{20}$  個の陽子を標的に照射
  - ❖ だいたい  $10^{21}$  個くらいのニュートリノを作った
  - ❖ スーパーカミオカンデを通過したニュートリノの数はだいたい **100兆個**
- ◆ 検出器内部で起こった反応 **377個** 検出
- ◆ 377個の中に電子ニュートリノの反応は見つかるか!?!?

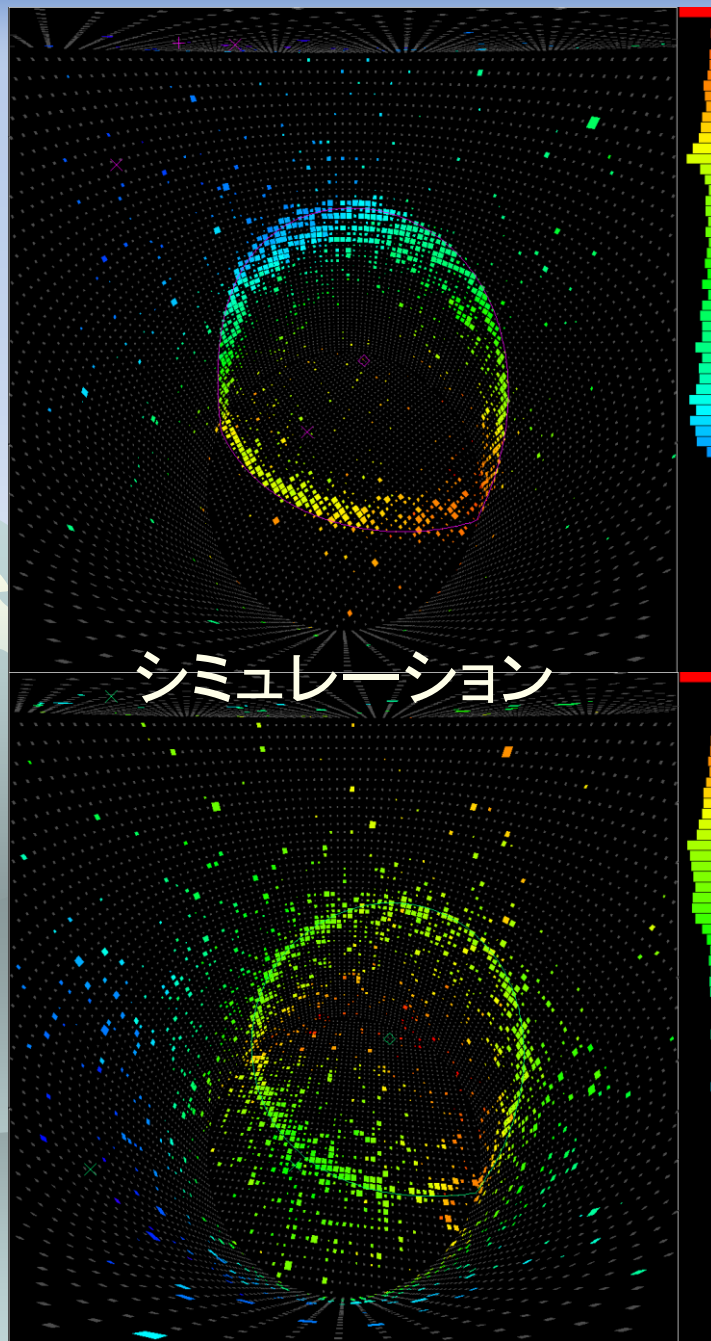
# $\mu$ と $e$ の識別



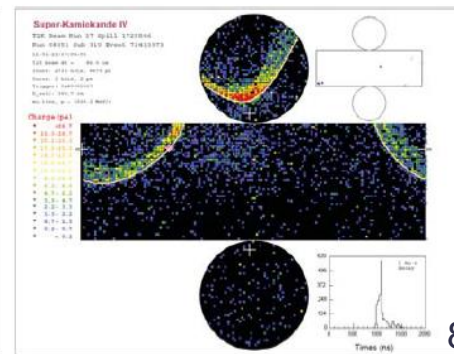
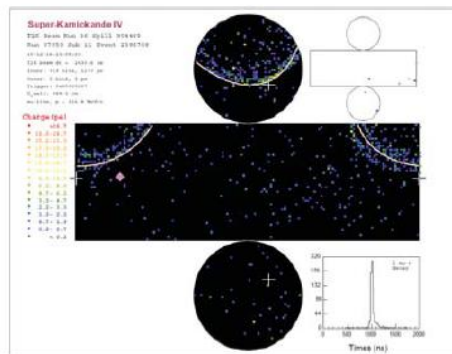
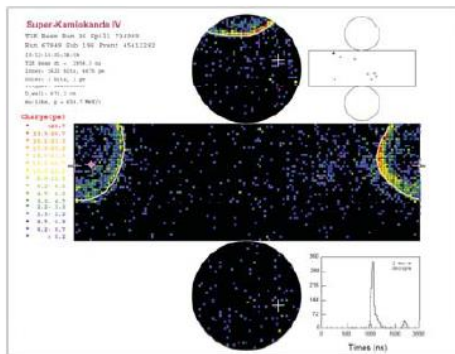
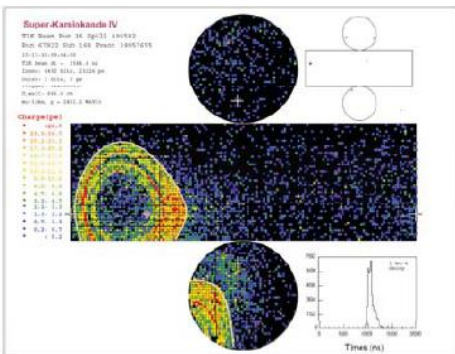
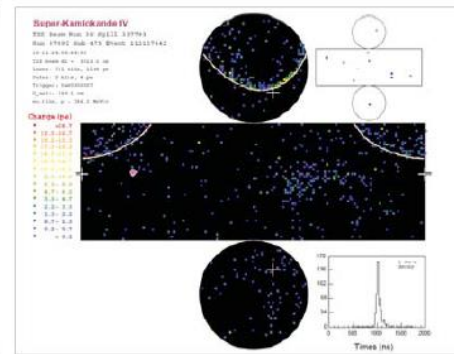
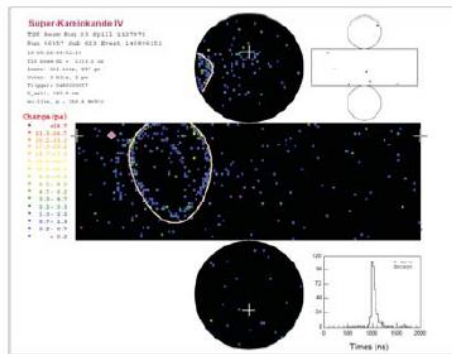
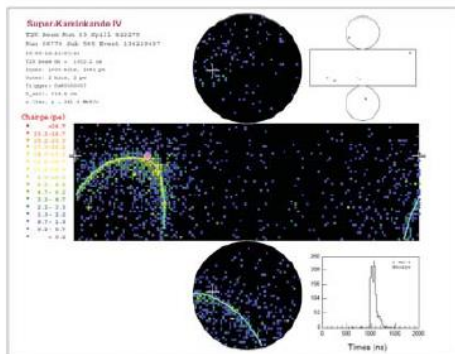
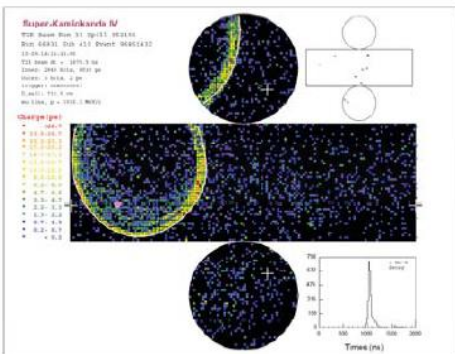
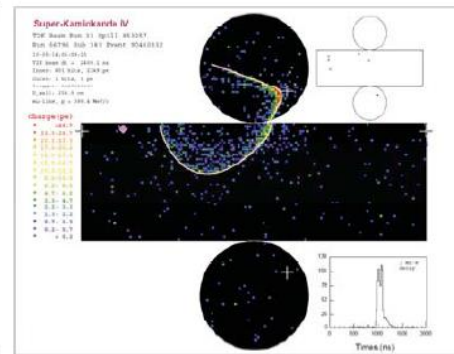
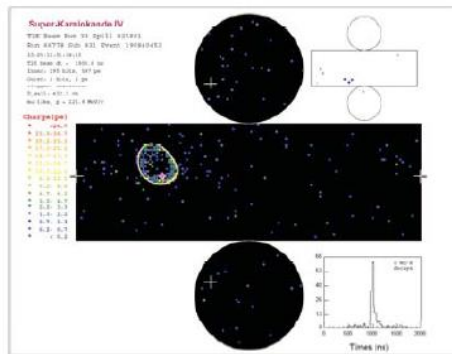
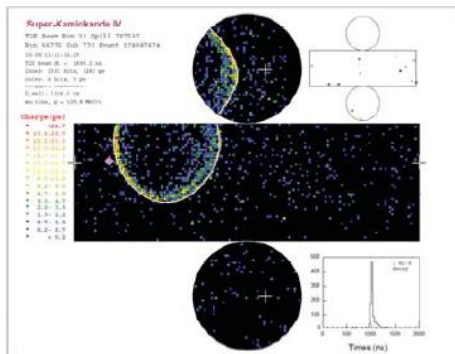
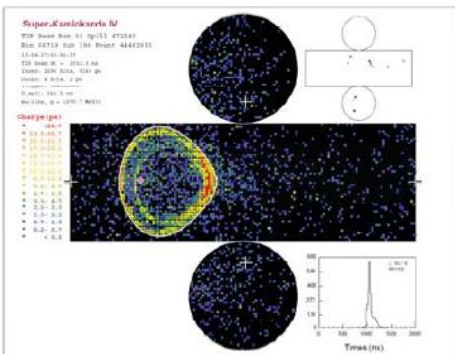
素直に走るためパターンが  
きれいなリング



電磁シャワーを起こすた  
めパターンが汚い



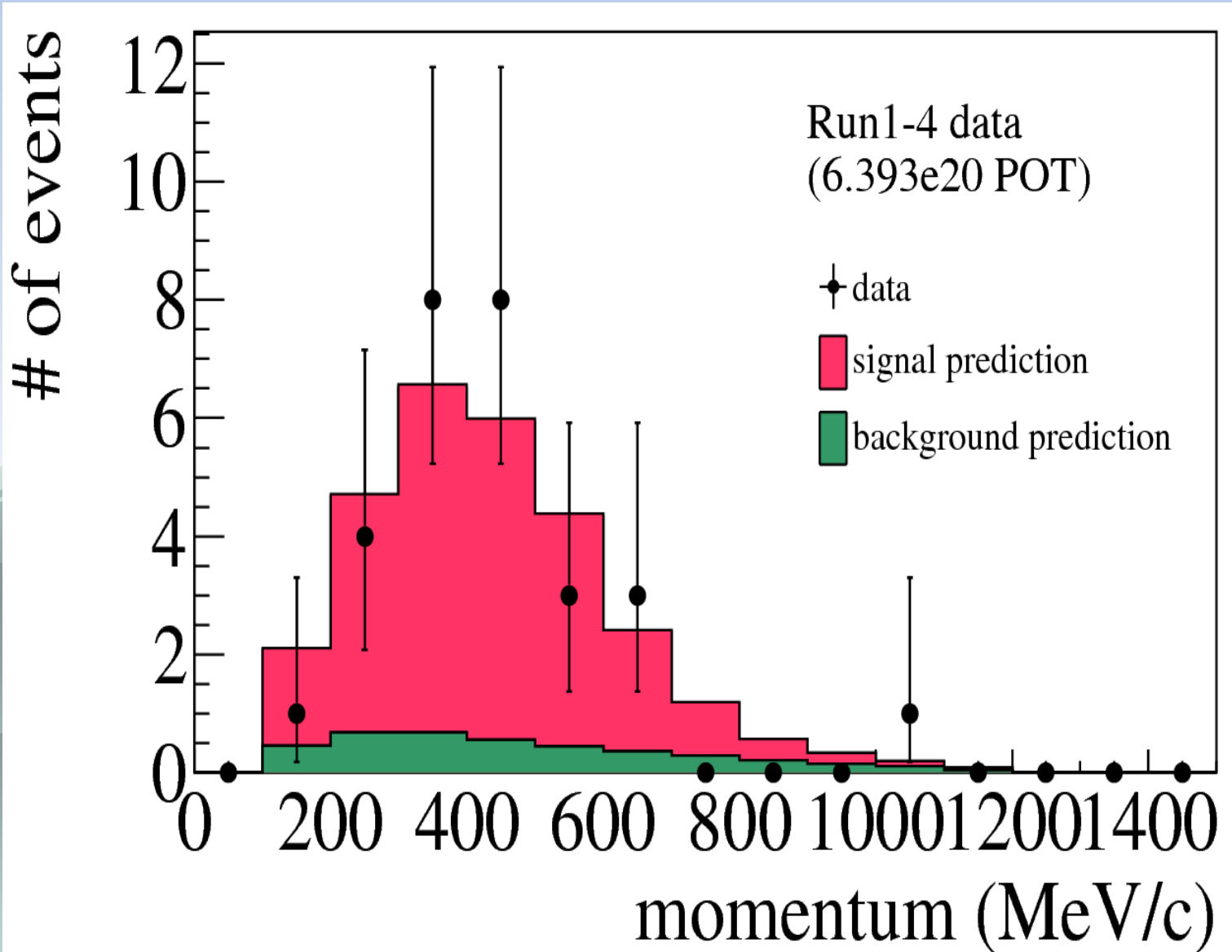
# 実際のデータ:どれが電子ニュートリノ?





# 電子ニュートリノ反応候補**28**個検出！

事象数

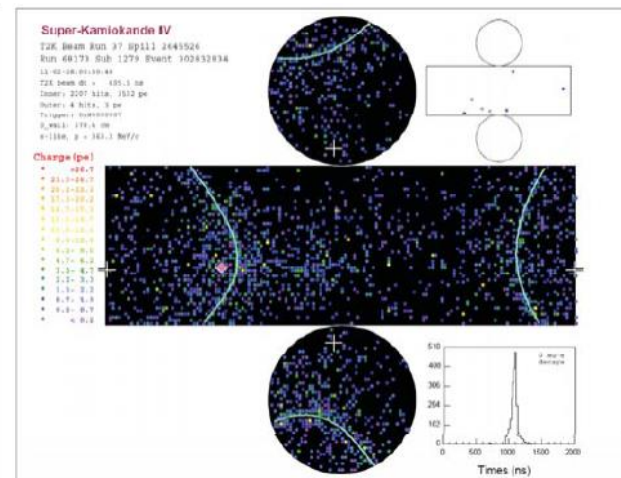
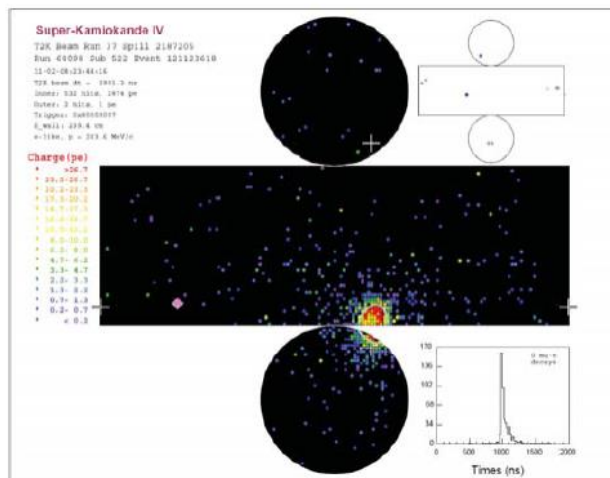
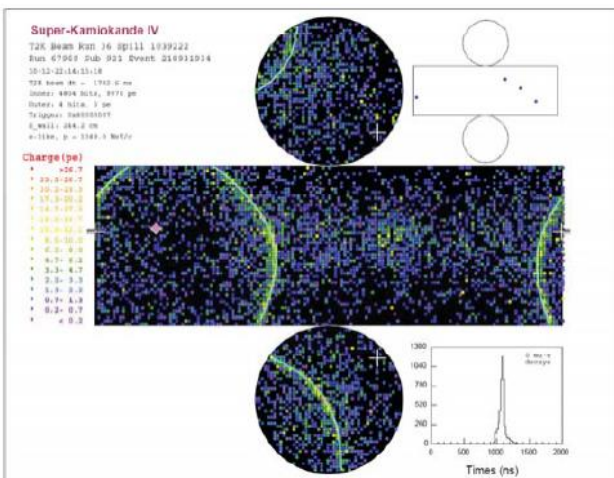
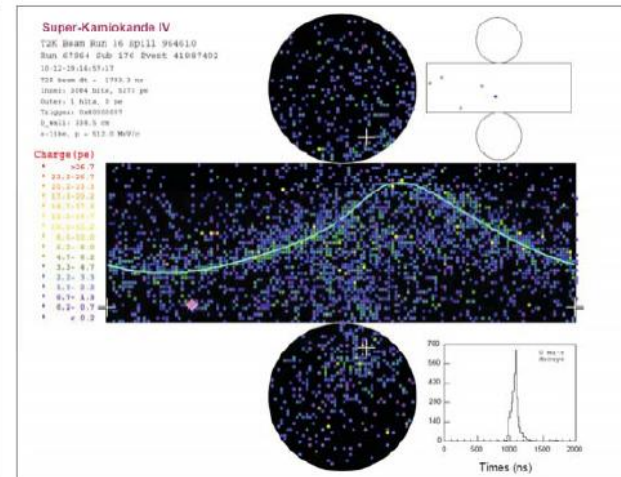
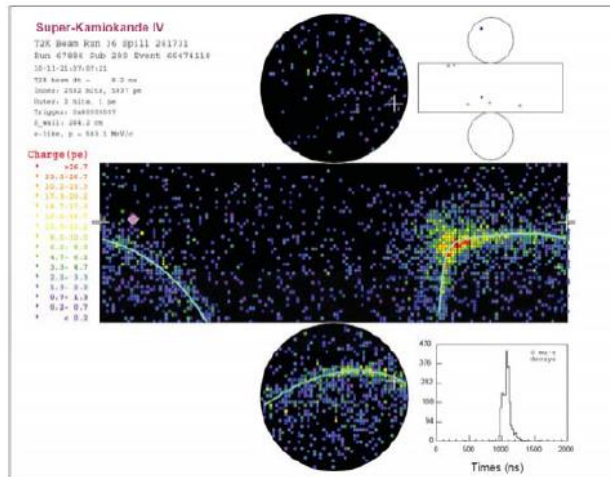
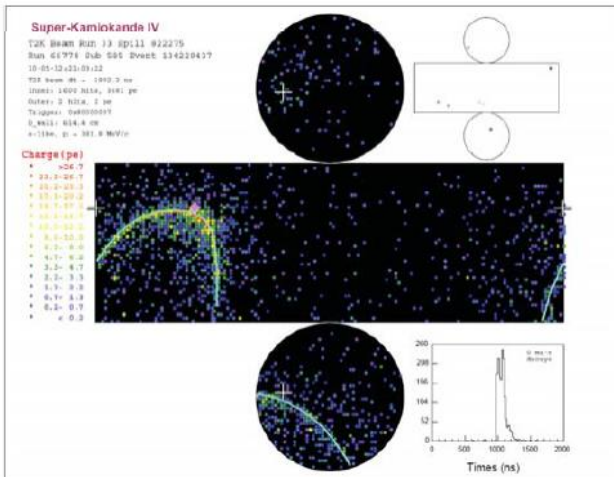






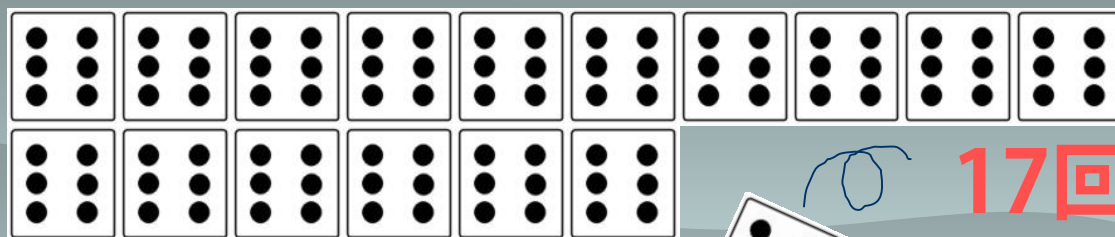


# 電子ニュートリノ反応の候補例



# 電子ニュートリノ出現が起こっている確率

- ◆ 背景事象予想: 4. 6事象
- ◆ 電子ニュートリノ出現が起こっていないにも関わらず、たまたま11事象以上検出してしまいう確率
  - ❖ 約10兆分の1



17回連続で  
6の目



記者発表2013年7月19日

ミュー型ニュートリノ  
から電子型ニュート  
リノへの変化の発  
見！

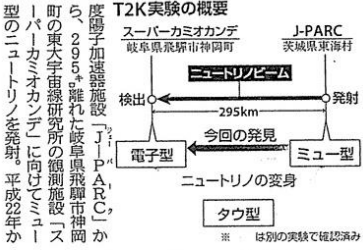
# 宇宙誕生 謎解き

25年 7月 20日 朝夕  
第 版 1 頁

## ニュートリノ「電子型」変身現象を確認

素粒子ニュートリノの性質を注目  
指す高エネルギー加速器研究機構（関  
城東海村）などの「T2K」実験  
チームは19日、3種類あるニュートリ  
ノのうち、「電子型」と呼ばれるタイ  
プが出現する新現象を、世界で初め  
て発見したと発表した。宇宙の成り  
立ちを解明する重要な手がかりにな  
る。

ニュートリノは地球などを通過して  
宇宙を飛び回っている謎の素粒子で  
「電子型」「ミュー型」「タウ型」の  
3種類があり、飛行中に別の種類に  
変身する性質を持つ。電子型への  
変身は観測が最も難しく、これまで未  
だ確認できなかった。



今年自身で53個スーパーパー  
カミオカンデで検出し、77個電子型  
への変身とみられる反応を確認し  
た。これが変身現象ではない理由は1  
兆分の1以下と極めて低く、新現象と  
結論付けられた。

物質の起源を知る手がかり  
バンで誕生した直後、物質と反物質が同数存在していた。両者  
は衝突すると光となり双方が消滅する性質があり、時間と  
ともに徐々に減っていった。た  
だ、反物質がわずかに低めに生  
じた。今後は実験でニュート  
リノの変身の様子を詳しく詳  
しく調べることが、宇宙誕生の  
謎に迫れそうだ。（山下健夫）

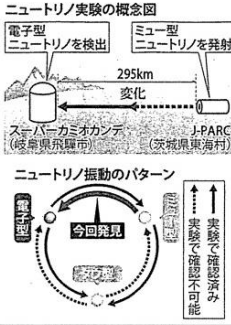
# ニュートリノ変化確認

## 宇宙誕生 解明の鍵

高エネルギー

高エネルギー加速器研究機構（茨城県）や京都大、東京大など11カ国の国際研  
究チームは19日、素粒子の「ニュートリノ」が「ミュー型」から「電子型」に変化す  
る現象を世界で初めて発見したと発表した。この変化は「ニュートリノ振動」と  
呼ばれ、観測が難く未確認だった標準の1通りの変化を実験で確認した。宇宙  
の誕生に決定的な役割を果たしたとみられる物理現象「CP対称性の破れ」を解明  
する重要な手がかりになると期待されている。

ニュートリノは電荷が  
なく、質量も極めて軽  
い。ニュートリノは電  
子型、ミュー型、タウ  
型の3種類があり、互  
いに別の型に変化す  
る性質を持つ。ニュ  
ートリノの振動は、実  
験で確認可能な変化の  
パターンを4通りの中  
に1つだけ見出す。20  
11年に国際チームが  
発見の兆候を捉え、  
10年に中国のチーム  
も間接的な方法で確  
認したと発表する。本  
報はニュートリノの  
変身現象を詳しく、こ  
れまでの未確認現象  
の重要性を解説した。



ニュートリノ振動のパターン  
電子型 ミュー型  
今回発見  
実験で確認可能  
ニュートリノは電  
子型、ミュー型、タウ  
型の3種類があり、互  
いに別の型に変化す  
る性質を持つ。ニュ  
ートリノの振動は、実  
験で確認可能な変化の  
パターンを4通りの中  
に1つだけ見出す。20  
11年に国際チームが  
発見の兆候を捉え、  
10年に中国のチーム  
も間接的な方法で確  
認したと発表する。本  
報はニュートリノの  
変身現象を詳しく、こ  
れまでの未確認現象  
の重要性を解説した。

放射線事故が中止中  
で大規模のニュートリノ  
実験は約2000キロ離れた大  
規模のスーパーカミオカ  
ンデ（岐阜県飛騨市）へ  
向け、平成27年4月

ニュートリノ  
物質を形成する最小単位の素粒子の「クォーク」や「  
レプトン」は地上に存在し、地上にも常に降り注  
いでいるが、他の物質とほとんど反応せず、すり  
抜ける。観測が難しく、1995年に中性子振動  
の観測に成功したが、87年には1兆個のニュ  
ートリノを生み出す時の観測装置で発生したニュ  
ートリノを世界で初めて観測。2002年にノー  
ベル物理学賞を受賞した。当初は質量がゼロと考  
えられていたが、98年、日本海洋博士（故人）らが質量  
があることを確認。後に電子の100万分の1以下  
の微小な質量があると分かった。

物質の起源を知る手がかり  
バンで誕生した直後、物質と反物質が同数存在していた。両者  
は衝突すると光となり双方が消滅する性質があり、時間と  
とともに徐々に減っていった。た  
だ、反物質がわずかに低めに生  
じた。今後は実験でニュート  
リノの変身の様子を詳しく詳  
しく調べることが、宇宙誕生の  
謎に迫れそうだ。（山下健夫）

国際チームは、大規模陽  
子加速器施設「J-PARC

物質を形成する最小単位の素粒子の「クォーク」や「  
レプトン」は地上に存在し、地上にも常に降り注  
いでいるが、他の物質とほとんど反応せず、すり  
抜ける。観測が難しく、1995年に中性子振動  
の観測に成功したが、87年には1兆個のニュ  
ートリノを生み出す時の観測装置で発生したニュ  
ートリノを世界で初めて観測。2002年にノー  
ベル物理学賞を受賞した。当初は質量がゼロと考  
えられていたが、98年、日本海洋博士（故人）らが質量  
があることを確認。後に電子の100万分の1以下  
の微小な質量があると分かった。

物質の起源を知る手がかり  
バンで誕生した直後、物質と反物質が同数存在していた。両者  
は衝突すると光となり双方が消滅する性質があり、時間と  
とともに徐々に減っていった。た  
だ、反物質がわずかに低めに生  
じた。今後は実験でニュート  
リノの変身の様子を詳しく詳  
しく調べることが、宇宙誕生の  
謎に迫れそうだ。（山下健夫）

ニュートリノの性質を注目  
指す高エネルギー加速器研究機構（関  
城東海村）などの「T2K」実験  
チームは19日、3種類あるニュ  
ートリノのうち、「電子型」と呼  
ばれるタイプが出現する新現象  
を、世界で初めて発見したと  
発表した。宇宙の成り立ちを解  
明する重要な手がかりになる。

ニュートリノは地球などを通過して  
宇宙を飛び回っている謎の素粒子で  
「電子型」「ミュー型」「タウ型」の  
3種類があり、飛行中に別の種類に  
変身する性質を持つ。電子型への  
変身は観測が最も難しく、これまで未  
だ確認できなかった。

物質の起源を知る手がかり  
バンで誕生した直後、物質と反物質が同数存在していた。両者  
は衝突すると光となり双方が消滅する性質があり、時間と  
とともに徐々に減っていった。た  
だ、反物質がわずかに低めに生  
じた。今後は実験でニュート  
リノの変身の様子を詳しく詳  
しく調べることが、宇宙誕生の  
謎に迫れそうだ。（山下健夫）

## 翌日のニュース

この仕組みはニュートリノと  
は別の素粒子で多クォークに  
ついては、小林・益川理論によ  
って説明されたが、ニュートリ  
ノの一部も同様の現象が起  
き、宇宙の進化に大きな影響を  
与えたと考えられている。  
T2Kは11カ国約500人の  
国際チームが中心で、大規模陽  
子加速器施設「J-PARC

物質の起源を知る手がかり  
バンで誕生した直後、物質と反物質が同数存在していた。両者  
は衝突すると光となり双方が消滅する性質があり、時間と  
とともに徐々に減っていった。た  
だ、反物質がわずかに低めに生  
じた。今後は実験でニュート  
リノの変身の様子を詳しく詳  
しく調べることが、宇宙誕生の  
謎に迫れそうだ。（山下健夫）



# T2Kの今後

## 宇宙の物質起源の謎解明へ向けた第一歩

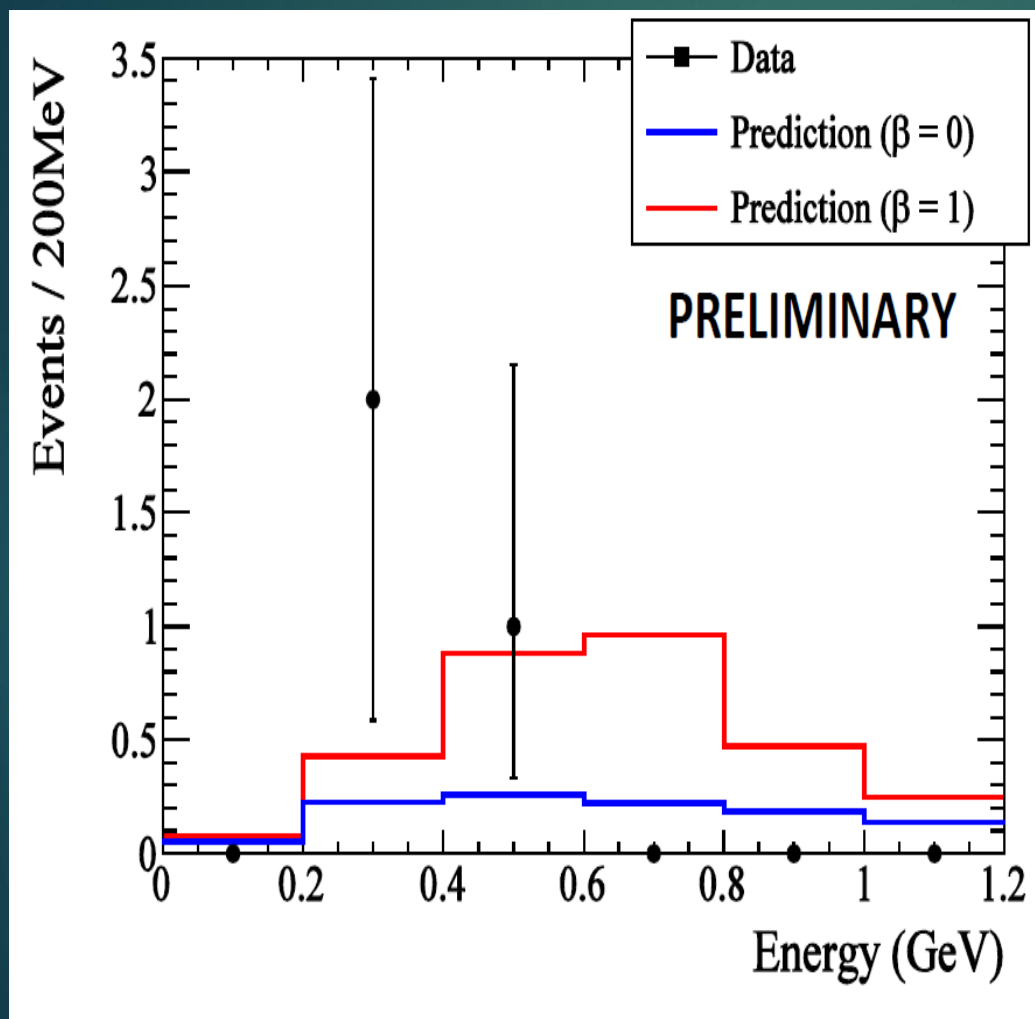


CP対称性の測定

→ 宇宙の物質起源解明の糸口を探る

# 反ミューニュートリノから 反電子ニュートリノへの振動探索開始

92

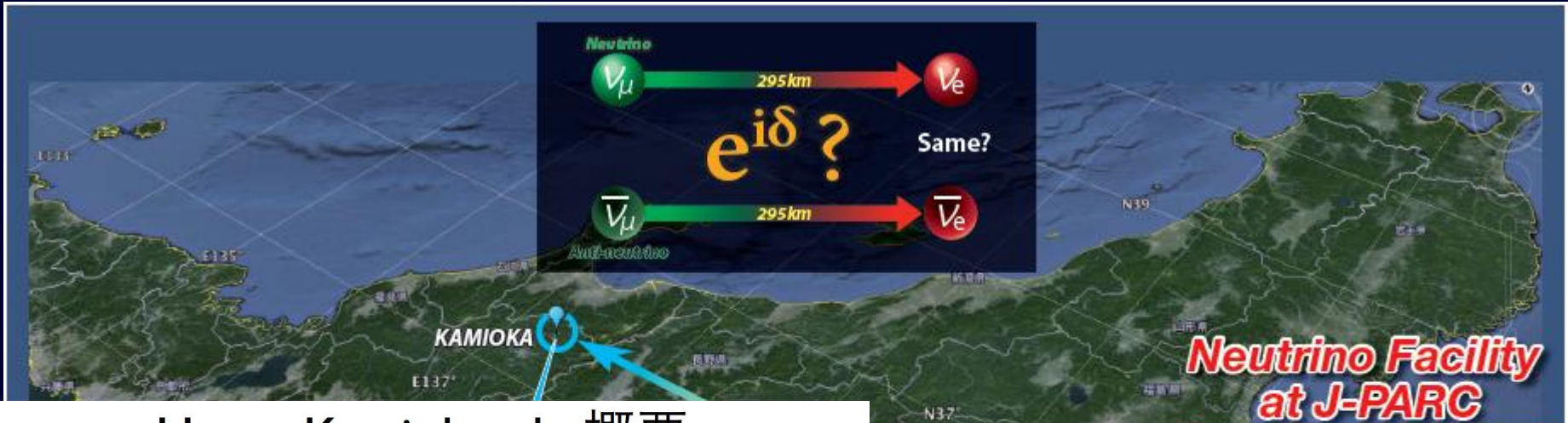


3事象検出！  
背景事象予想～1.7

まだまだたくさんの  
データが必要！

Normal Hierarchy with actual POT ( $0.4 \times 10^{21}$ )			
Expected events (NH)	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = +\pi/2$
Signal $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	1.961	2.636	3.288
Background $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	0.592	0.505	0.389
Background NC	0.349	0.349	0.349
Background other	0.826	0.826	0.826
Total	3.73	4.32	4.85

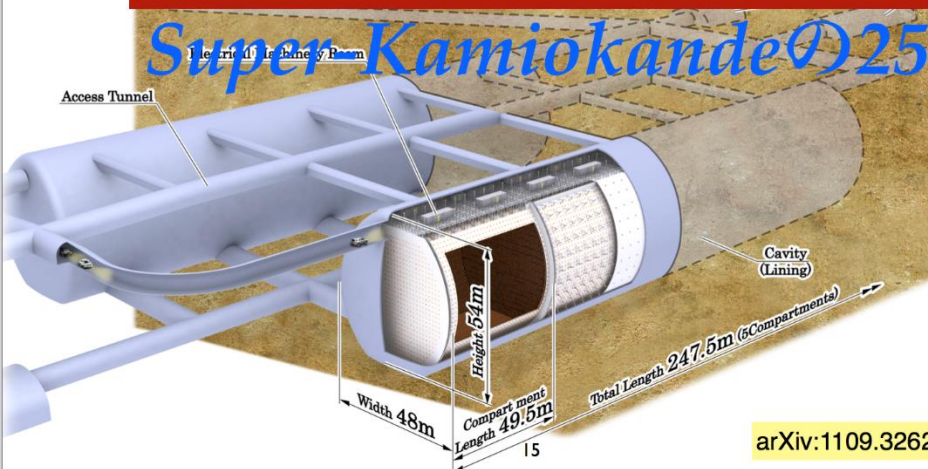
# さらに将来



## Hyper-Kamiokande 概要

全質量： 0.99 メガトン  
 有効質量： 0.56 メガトン (10個の個別領域からなる)  
 光センサー： 99,000 20"φ PMTs (内槽)  
 (20% photo-coverage)  
 25,000 8"φ PMTs (外槽)

Super-Kamiokandeの25倍



- ▶ 100万トンハイパーカミオカンデ計画
- ▶ 大強度化J-PARC
- ▶ CP対称性の破れ発見を目指す
- 宇宙の物質起源の謎



# まとめ1

- ◆素粒子の謎(一部)
  - ❖究極の物質とその法則未解明
  - ❖物質の起源未解明
  - ❖宇宙の果ても終わり未解明
- ◆ニュートリノが謎解明の鍵

# まとめ2

- ◆ 1998年、スーパーカミオカンデが世界に先駆けてニュートリノ振動現象の証拠をとらえた
  - ❖ ニュートリノが0でない質量が初めて分かった！
  - ❖ ニュートリノの種類の間に変化が起こることが分かった！
- ◆ これは、質量を0と仮定する、素粒子の標準理論と矛盾
- ◆ 世界の素粒子物理屋が探し求めてきた標準理論の「ほころび」を初めてとらえた。
- ◆ 標準理論をこえる究極の物質法則を解明する突破口となる可能性
- ◆ → 梶田さんのノーベル賞

# まとめ

## ◆ T2K実験

- ❖ 2010年から実験開始。
- ❖ ミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化(電子ニュートリノ出現)の発見
- ❖ ニュートリノにおけるCP対称性の破れ探索の道が開けた
- ❖ さらに20倍のデータを貯めて、ニュートリノのCP対称性の破れを探索。

## ◆ さらに将来

- ❖ 100万トンハイパーカミオカンデ検出器の実現
- ❖ CP対称性の破れの発見と精密測定
- ❖ 宇宙の物質の存在の謎の鍵？

## ◆ ニュートリノはまだまだエキサイティング！

# The T2K Collaboration



## Canada

TRIUMF  
U. Alberta  
U. B. Columbia  
U. Regina  
U. Toronto  
U. Victoria  
U. Winnipeg  
York U.

## France

CEA Saclay  
IPN Lyon  
LLR E. Poly.  
LPNHE Paris

## Germany

Aachen U.

## Italy

INFN, U. Bari  
INFN, U. Napoli  
INFN, U. Padova  
INFN, U. Roma

## Japan

ICRR Kamioka  
ICRR RCCN  
Kavli IPMU  
KEK  
Kobe U.  
Kyoto U.  
Miyagi U. Edu.  
Osaka City U.  
Okayama U.  
Tokyo Metropolitan U.  
U. Tokyo

## Poland

IFJ PAN, Cracow  
NCBJ, Warsaw  
U. Silesia, Katowice  
U. Warsaw  
Warsaw U. T.  
Wroclaw U.

## Russia

INR

## Spain

IFAE, Barcelona  
IFIC, Valencia

## Switzerland

ETH Zurich  
U. Bern  
U. Geneva

## United Kingdom

Imperial C. London  
Lancaster U.  
Oxford U.  
Queen Mary U. L.  
STFC/Daresbury  
STFC/RAL  
U. Liverpool

U. Sheffield  
U. Warwick

## USA

Boston U.  
Colorado S. U.  
Duke U.  
Louisiana S. U.  
Stony Brook U.  
U. C. Irvine  
U. Colorado  
U. Pittsburgh  
U. Rochester  
U. Washington

**~500 members,  
59 Institutes,  
11 countries**



# T2Kコラボレーションの一部



2014年4月T2K全体会議

最近は150~200程度参加。



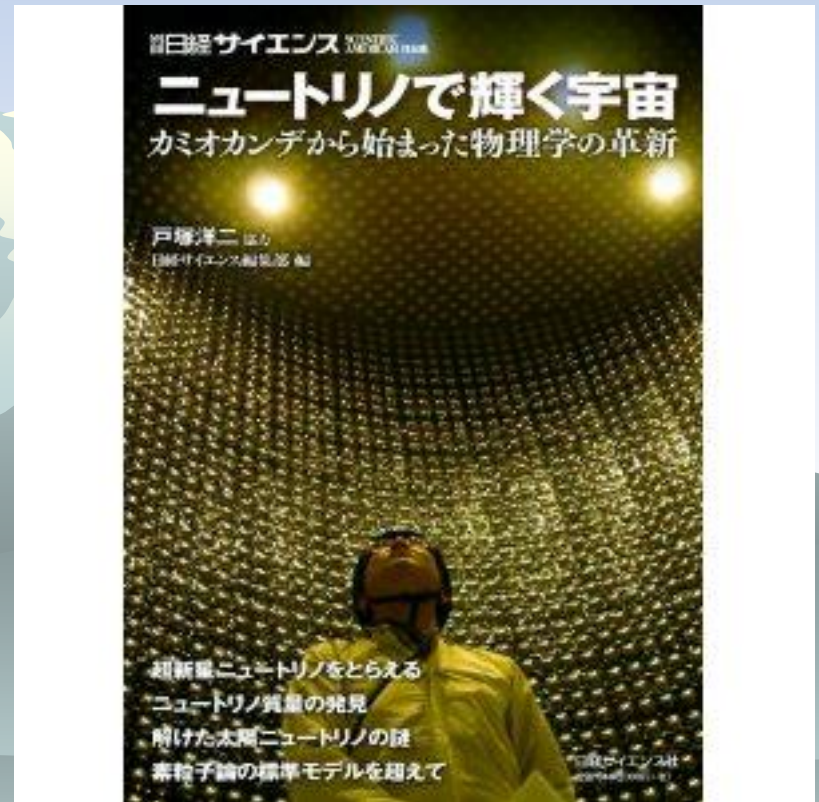
# 参考

加速器がわかる本—小さな素粒子を“見る”  
巨大な装置 (ニュートンムック)

別冊日経サイエンス164 ニュートリノで輝く宇宙  
宇宙(カミオカンデから始まった物理学の革新)



2007/03



2009/2/19

# お勧め

クリックなか見! 検索



## 宇宙は何でできているのか (幻冬舎新書) [新書]

村山 斉 (著)

★★★★☆ (42件のカスタマーレビュー)

価格: ¥ 840 通常配送無料 [詳細](#)

通常2~4週間以内に発送します。在庫状況について

この商品は、[Amazon.co.jp](https://www.amazon.co.jp) が販売、発送します。ギフトラッピングを利用できます。

新品3点 ¥ 840より

中古品6点 ¥ 580より

コレクター商品2点 ¥ 1,000より



**「著者ページ」を今すぐチェック**

著者写真、略歴や著者の作品一覧など、著者情報が満載。使い方は「[著者ストア](#)」へ。著作があれば、あなたも自分の著者ページを持つことができます。詳細は[著者セントラル](#)へ。

› [その他のプロモーション情報を見る](#)

# 参考



## ニュートリノでわかる宇宙・素粒子の謎 (集英社新書) [新書]

鈴木 厚人 (著)

★★★★☆ (3件のカスタマーレビュー)

価格: **¥756** 通常配送無料 [詳細](#)

**在庫あり。** [在庫状況について](#)

この商品は、[Amazon.co.jp](https://www.amazon.co.jp) が販売、発送します。ギフトラッピングを利用できません。

申し訳ありませんが、この郵便番号にはお届けできません

既定の住所を使用 [詳細](#)

[中古品の出品](#): 4¥ 459より

**【まとめ買いで最大30%OFF!】ACME Furnitureオリジナルブッ**



## 図解入門 よくわかる素粒子の基本と仕組み— 高エネルギー物理学と巨大研究プロジェクト (How-nual Visual Guide Book) [単行本]

横山 広美  (著)

★★★★★  (1件のカスタマーレビュー)

**出品者からお求めいただけます。**

**中古品の出品：16¥ 928より**



# 予備スライド



# 加速器からのビームの取り出し

10兆個の陽子の塊

~5 / 100万秒

Accelerator

周長1.6km

パルス磁石

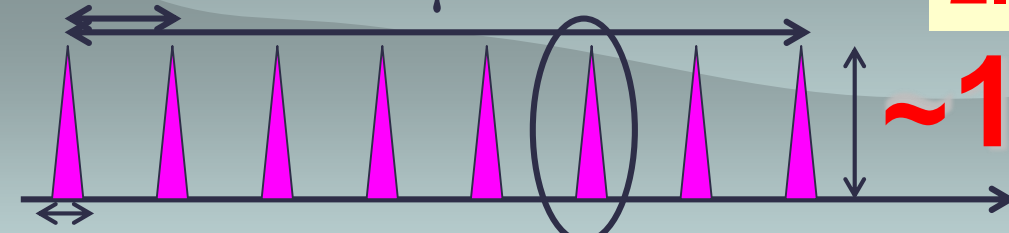
T2K case

581ns

4.2 $\mu$ s

2.6MJ in ~4 $\mu$ s!

~10TW!



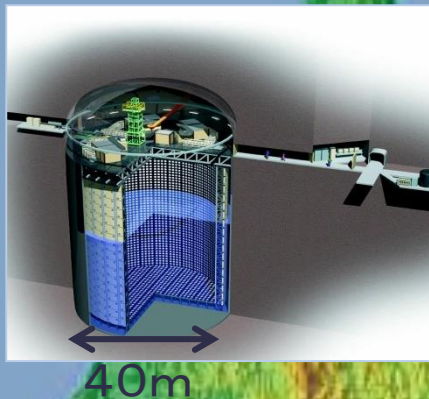
~60ns

330kJ

$3.3 \times 10^{14}$  protons in 8 bunches in ~4 $\mu$ s

# T2K (東海to神岡)長基線ニュートリノ振動実験

スーパーカミオカンデ



**T2K実験(2009~)**

295 km

東海村

J-PARC  
@JAEA

神岡

KEK

**K2K (1999~2004)**

250km

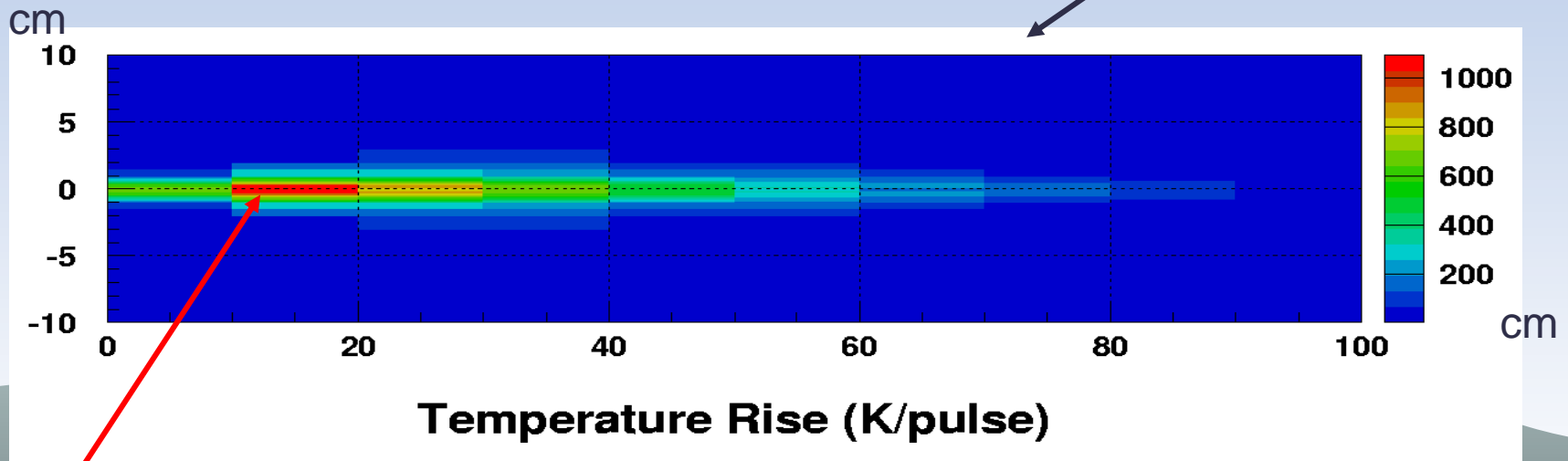
- ◆ J-PARCで生成したニュートリノを295km先の検出器“スーパーカミオカンデ”で検出し、ニュートリノの性質を調べる。
- ◆ K2K実験のおよそ100倍のビーム強度

# J-PARC 大強度ビーム！

約2.5 秒に一回5 $\mu$ s(5/1,000,000秒)の間に約300兆個の陽子  
仮にこのビームを鉄の塊に照射したら、...

残留放射能

> 1000Sv/h



1100°

(cf. melting point 1536°)

✓ 溶ける、...

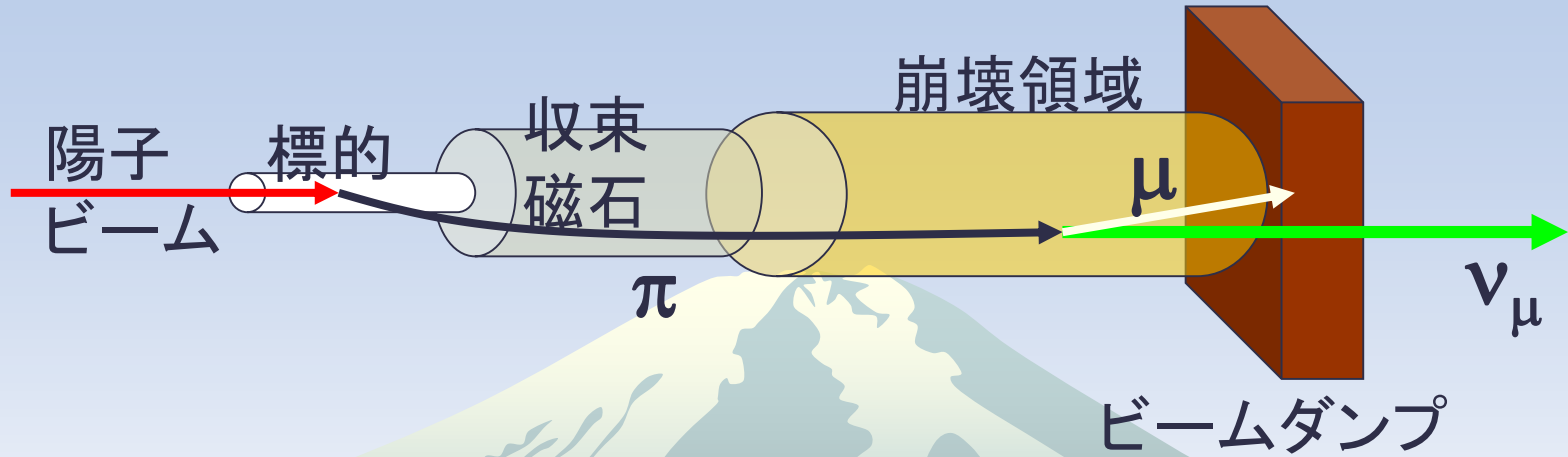
✓ 壊れる、...  $\approx E\alpha\Delta T \approx 3GPa$

(cf. 耐力 ~300 MPa)

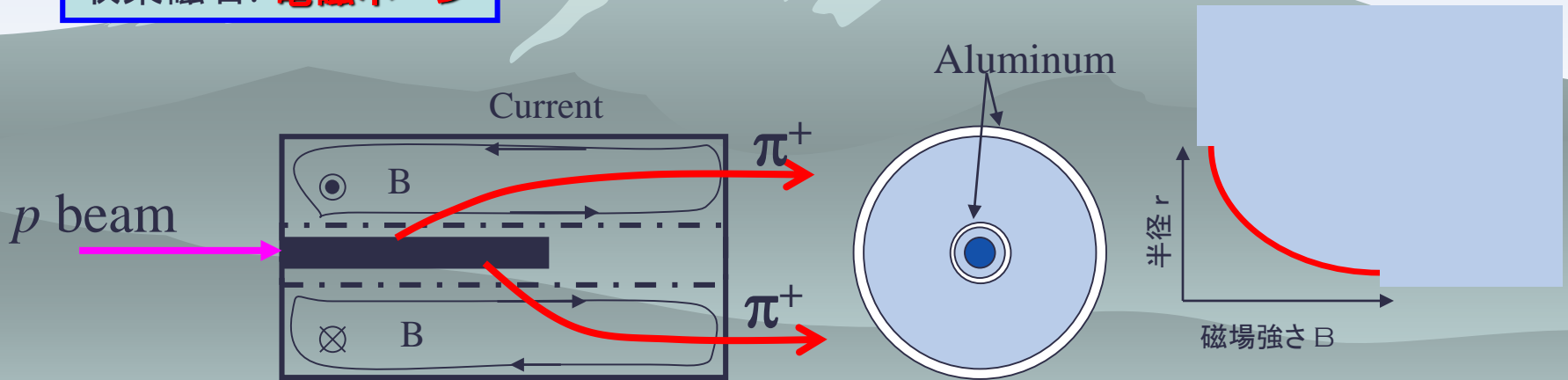
Tiより重いものは壊れる。



# ニュートリノビームの生成法



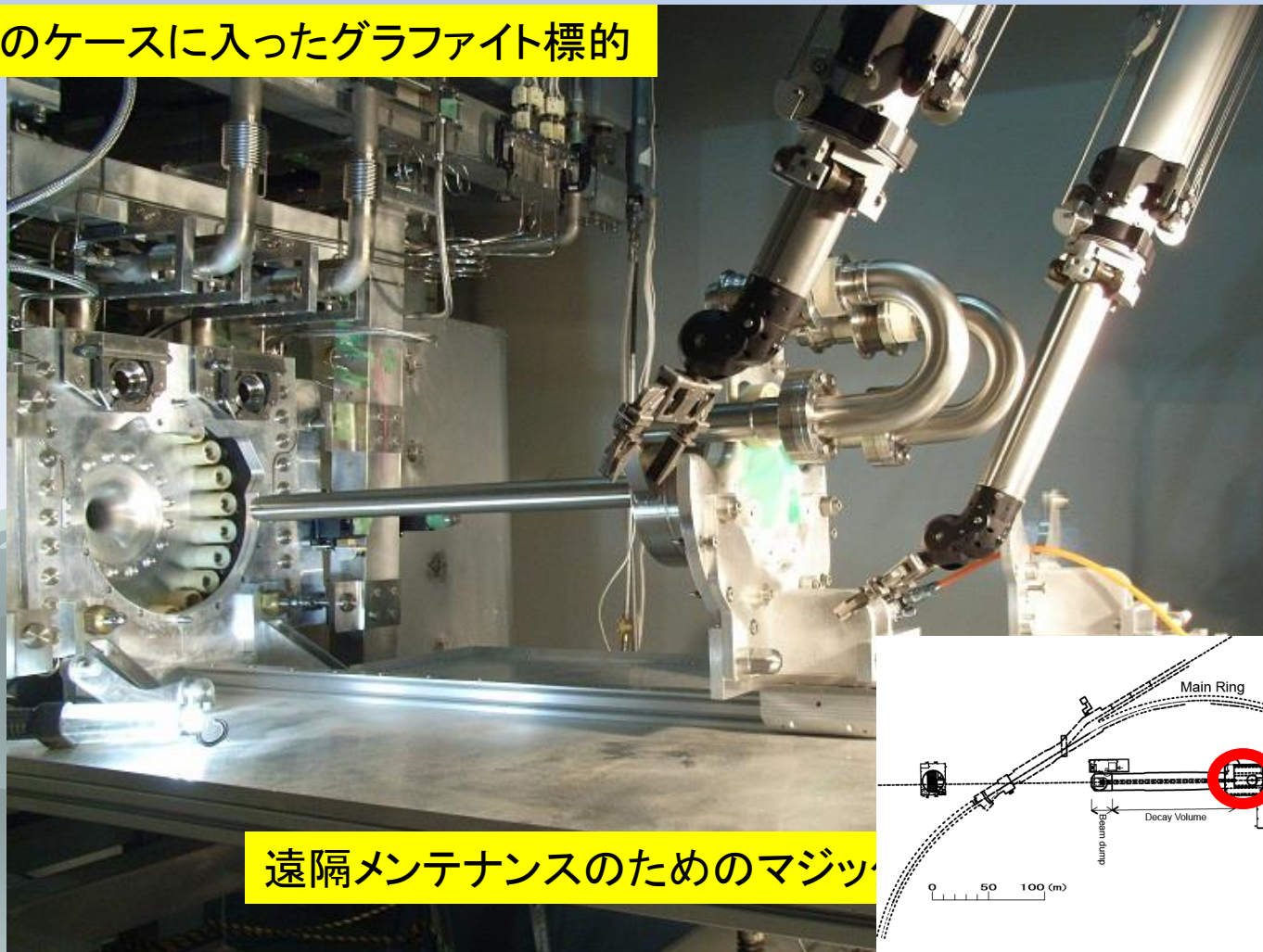
収束磁石: **電磁ホーン**



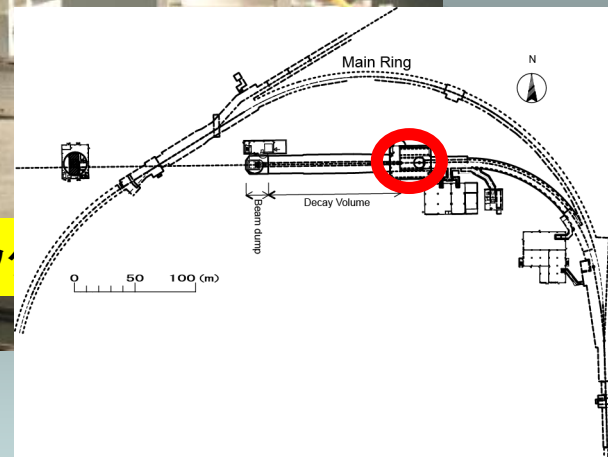
$$B = 4.3 T, r = 15 mm, I = 320 kA$$

# ターゲットと遠隔保守機構

チタンのケースに入ったグラファイト標的



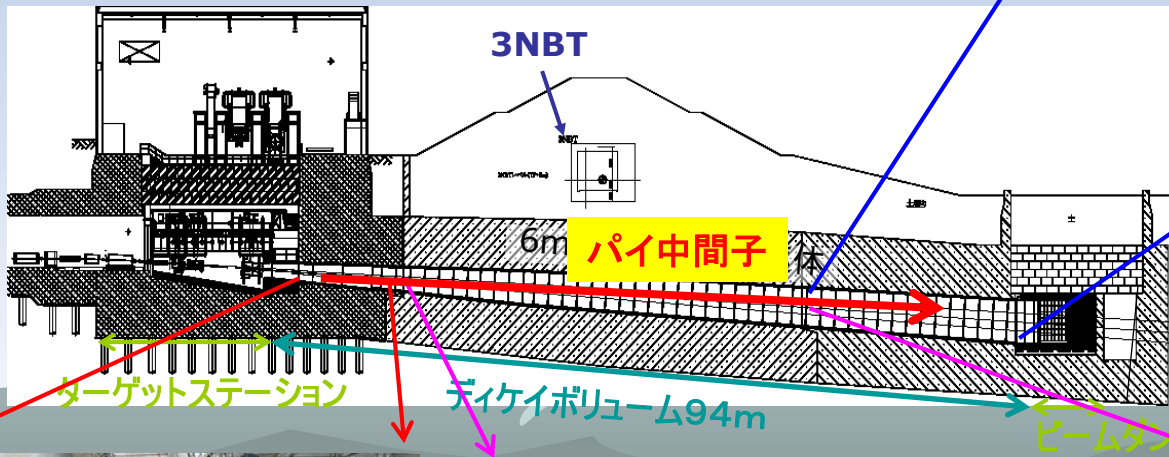
遠隔メンテナンスのためのマジック



# 崩壊領域



Downstream part



Most upstream part



Feb. 2005

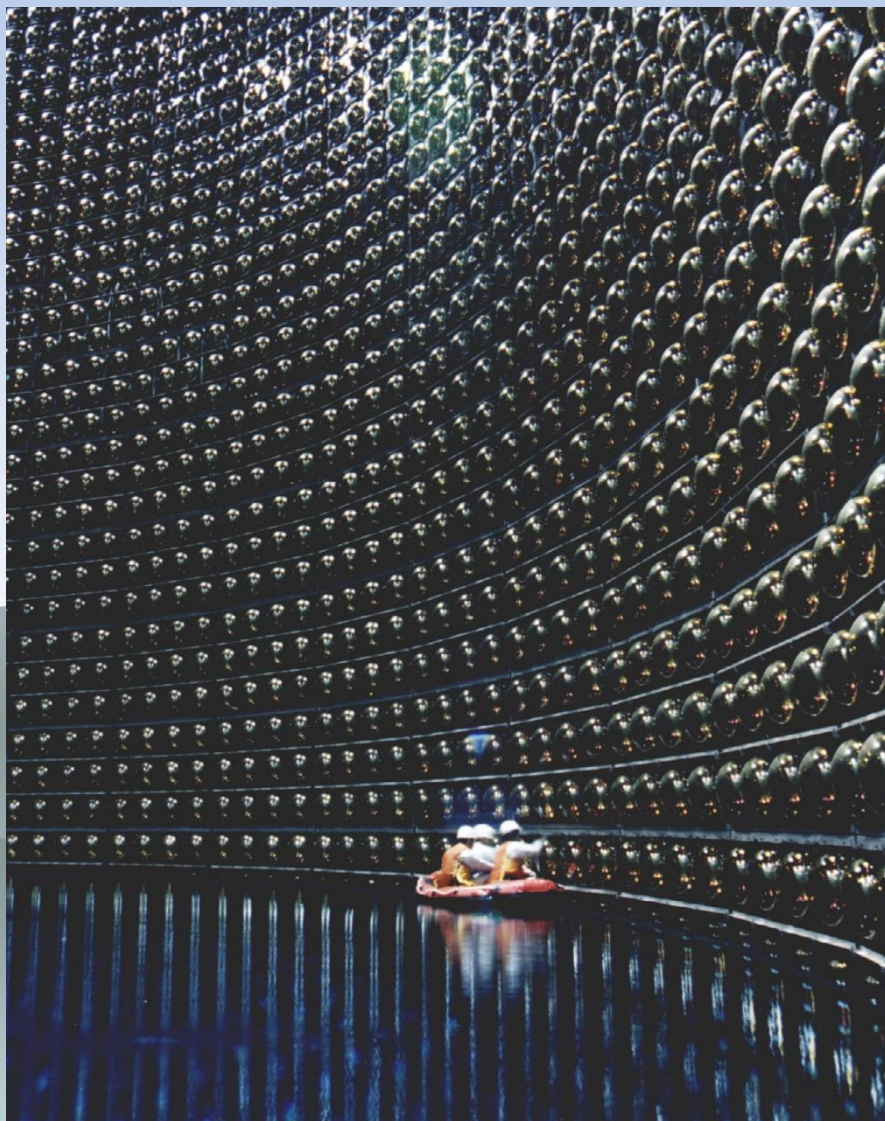


Cooling channels

Middle part (50m-L)



# スーパーカミオカンデと光電子増倍管



小柴(こしば)先生



2002年ノーベル賞



# 宇宙から来たニュートリノとJ-PARCニュートリノ どうやって見分けるの？

- ◆ J-PARCから 1日 ~1個
- ◆ 大気ニュートリノ 1日 約10個

到着時間で区別する





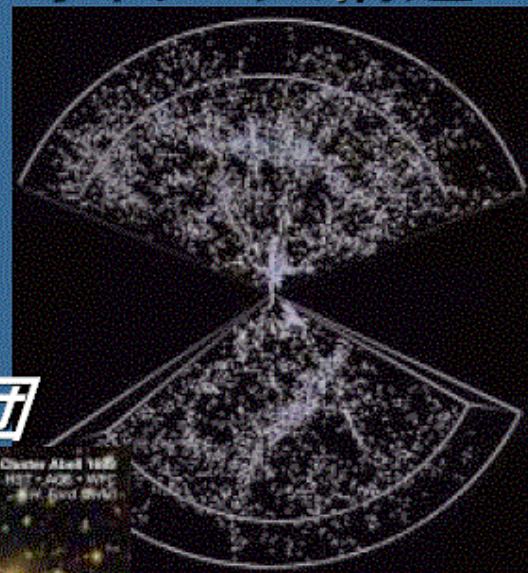
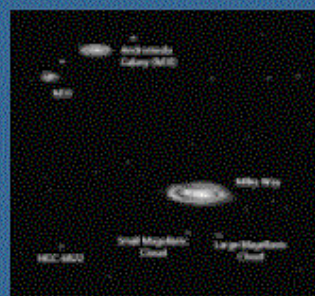
# 宇宙の階層構造

宇宙の大構造

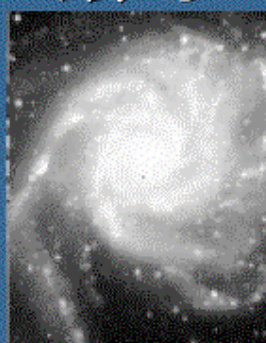
銀河群

矮小銀河

太陽系



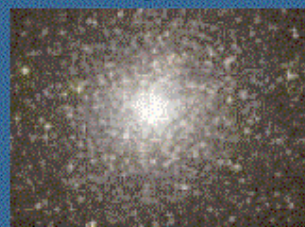
銀河



銀河団



星団



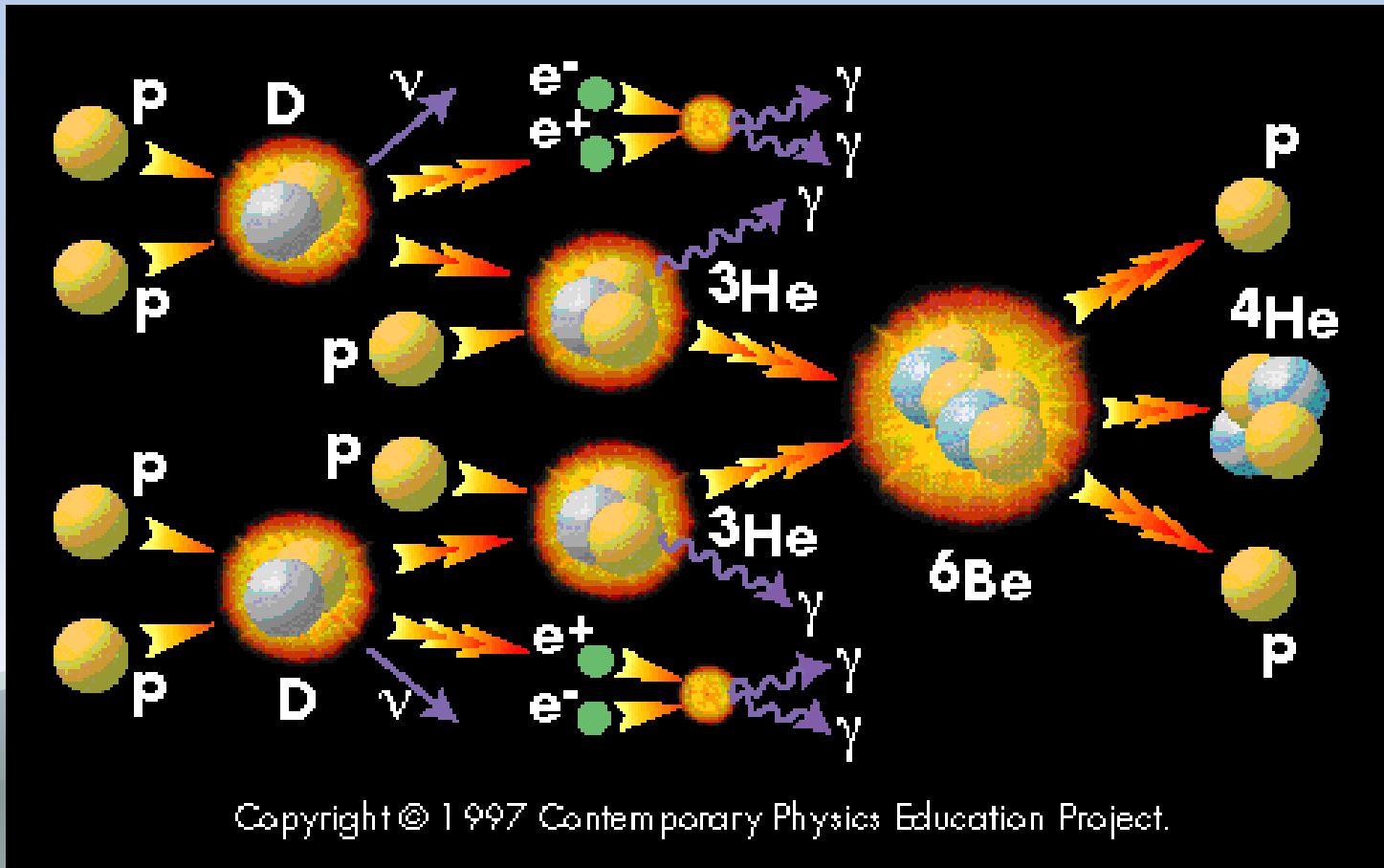
$10^0$   $10^1$   $10^2$   $10^3$   $10^4$   $10^5$   $10^6$   $10^7$   $10^8$

典型的大きさ [パーセク(～3.1光年)]





# 太陽ニュートリノ



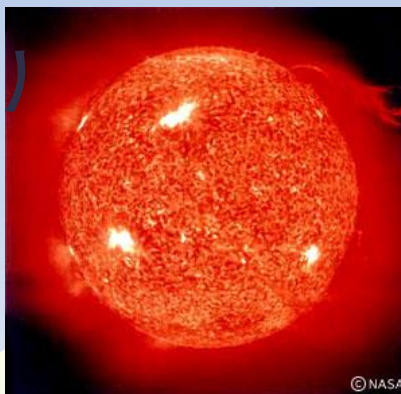
陽子は脱出するのに10000年  
 熱エネルギー(光子)は~1000万年  
 ニュートリノは光の速さ！



# 太陽ニュートリノの謎

ニュートリノが減っているのは間違いないが...

電子ニュートリノ



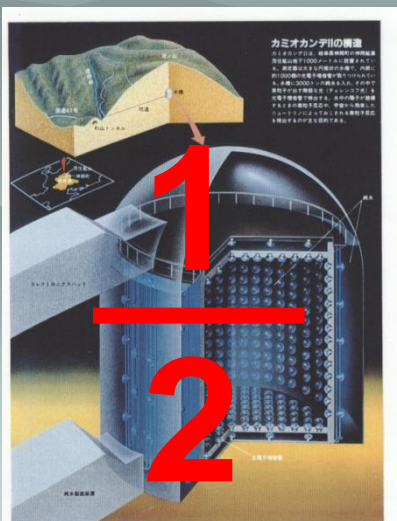
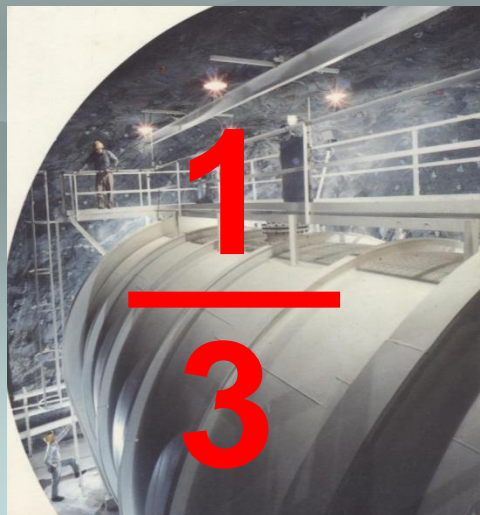
電子ニュートリノ

デービスの実験  
(70年代～)

カミオカンデ実験  
(80年代後半)

ガリウム実験  
(90年代)

スーパーカミオカンデ実験  
(90年代後半)



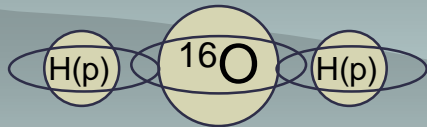
# ニュートリノ振動の証拠: SNO実験(1)

SNO実験(1999~2006)

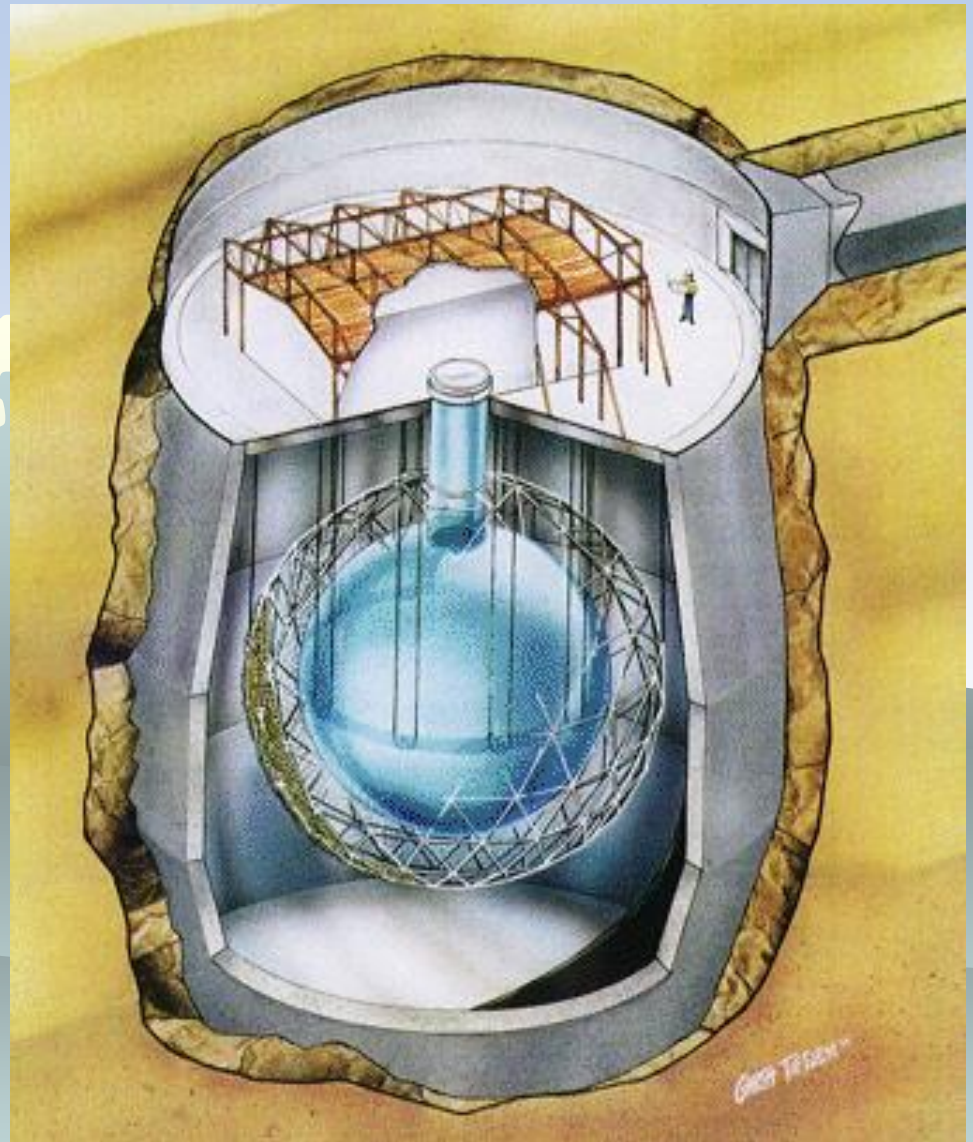
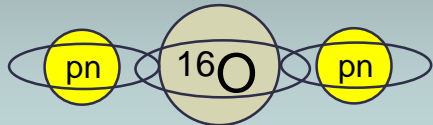
- ◆ カナダオンタリオ
- ◆ 1000ton 水チェレンコフ
- ◆ 重水!  $D_2O$
- ◆ 地下6000mの水相当
- ◆ 9,500本の 20cm-光電子増倍管



普通の水  
( $H_2O$ )



重水  
( $D_2O$ )



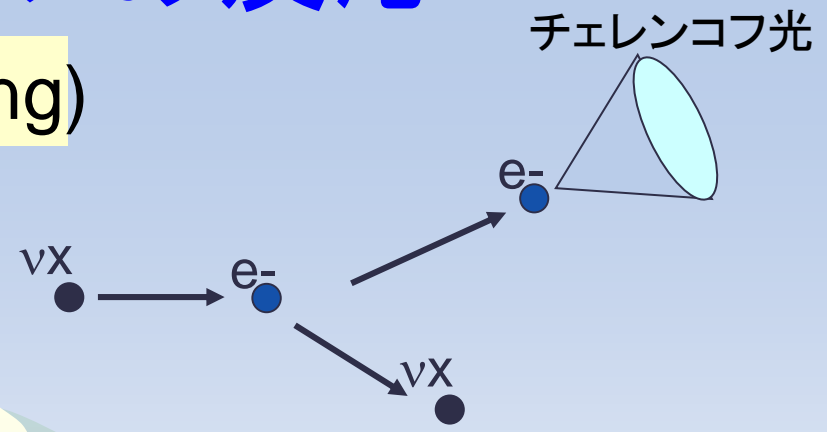
# 重水とニュートリノの反応

ES

## 弾性散乱(Elastic Scattering)



- ・スーパーカミオカンデと同じ反応
- ・反応数  $\propto \nu_e + 0.15(\nu_\mu + \nu_\tau)$

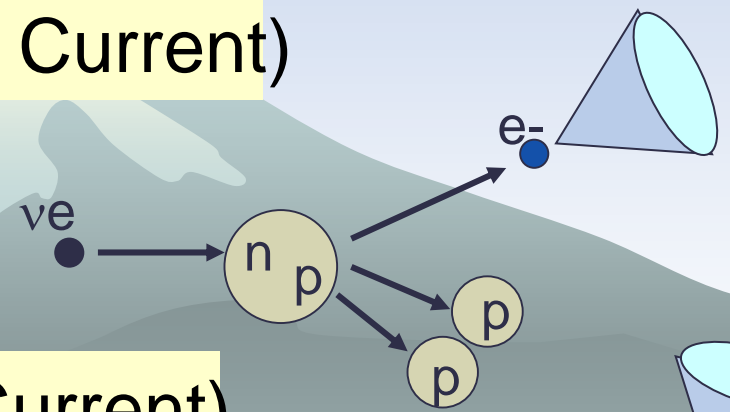


CC

## 荷電カレント反応(Charged Current)



- ・反応数  $\propto \nu_e$  ( $\nu_e$ だけに感度)



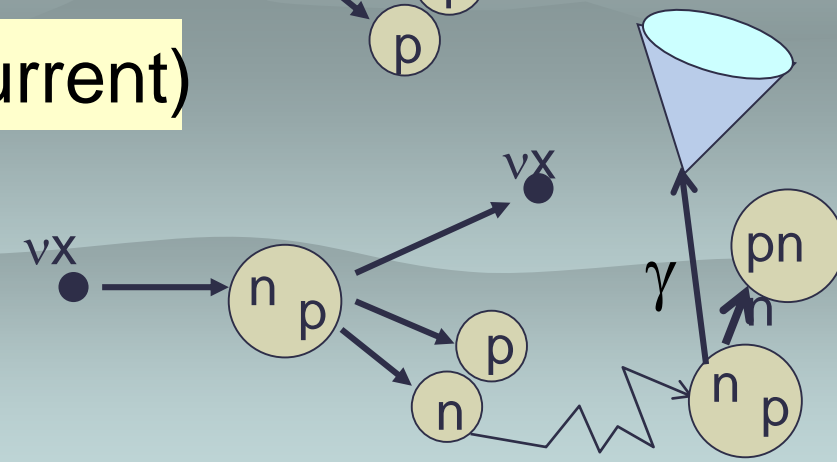
NC

## 中性カレント反応(Neutral Current)



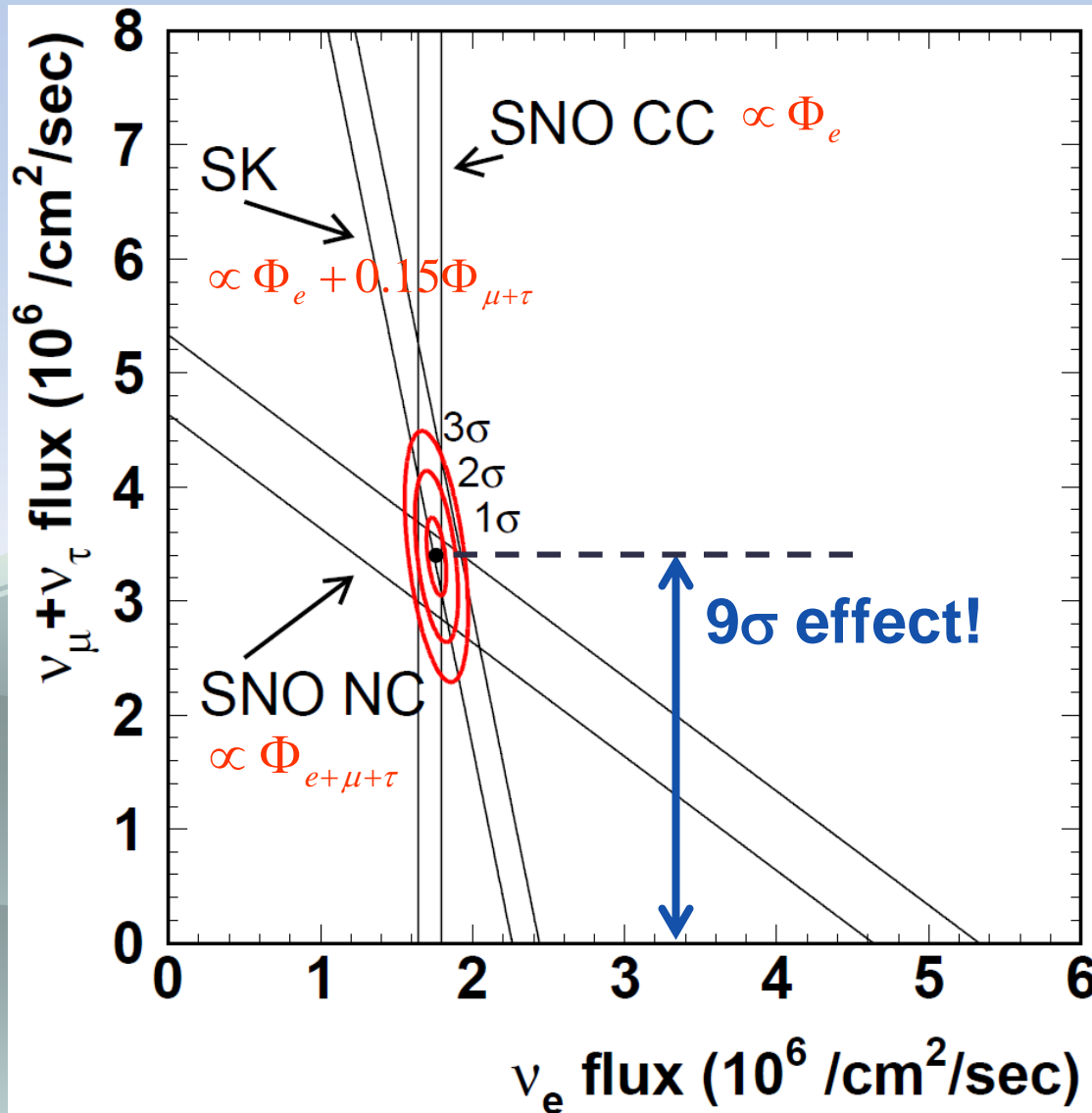
- ・  $n + d \rightarrow t + \gamma$  (6.3 MeV)...  $\rightarrow e^-$

・すべてのニュートリノに感度!!!  
 ・反応数  $\propto (\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau)$



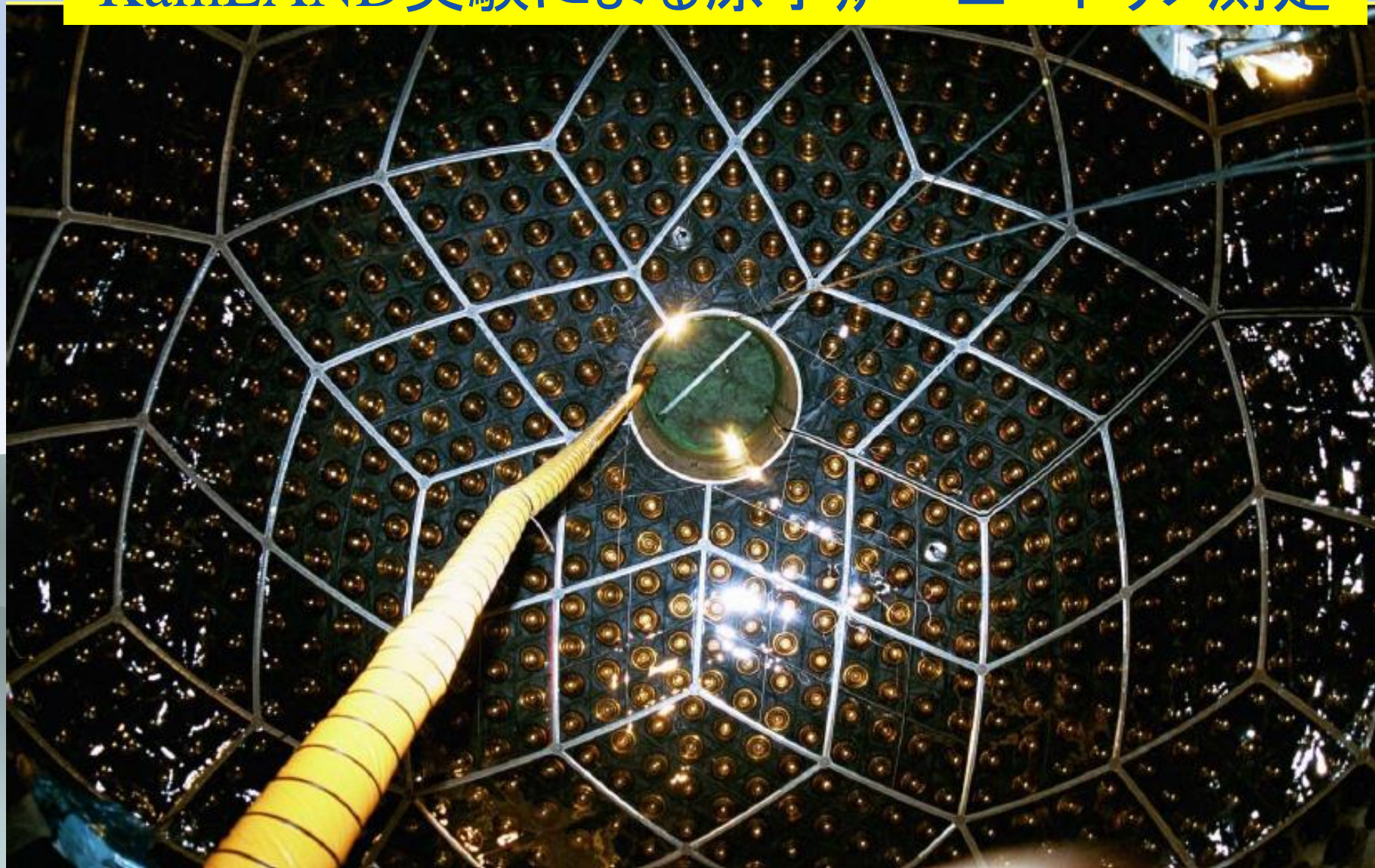


# Evidence of non- $\nu_e$ components

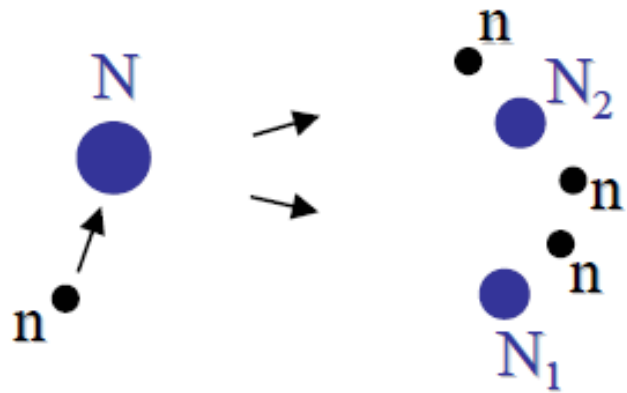


# 最終決定打！！

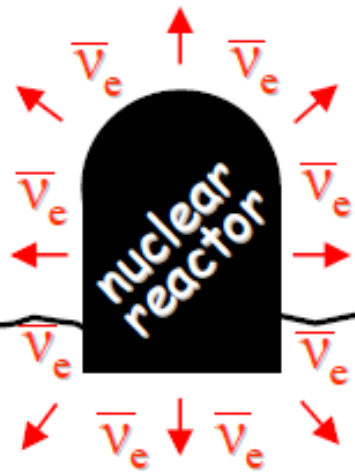
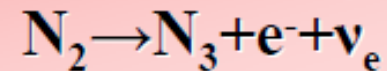
KamLAND実験による原子炉ニュートリノ測定



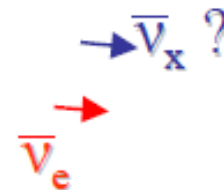
# 原子炉ニュートリノ実験



$N_1$  and  $N_2$  still have too many neutrons and decay



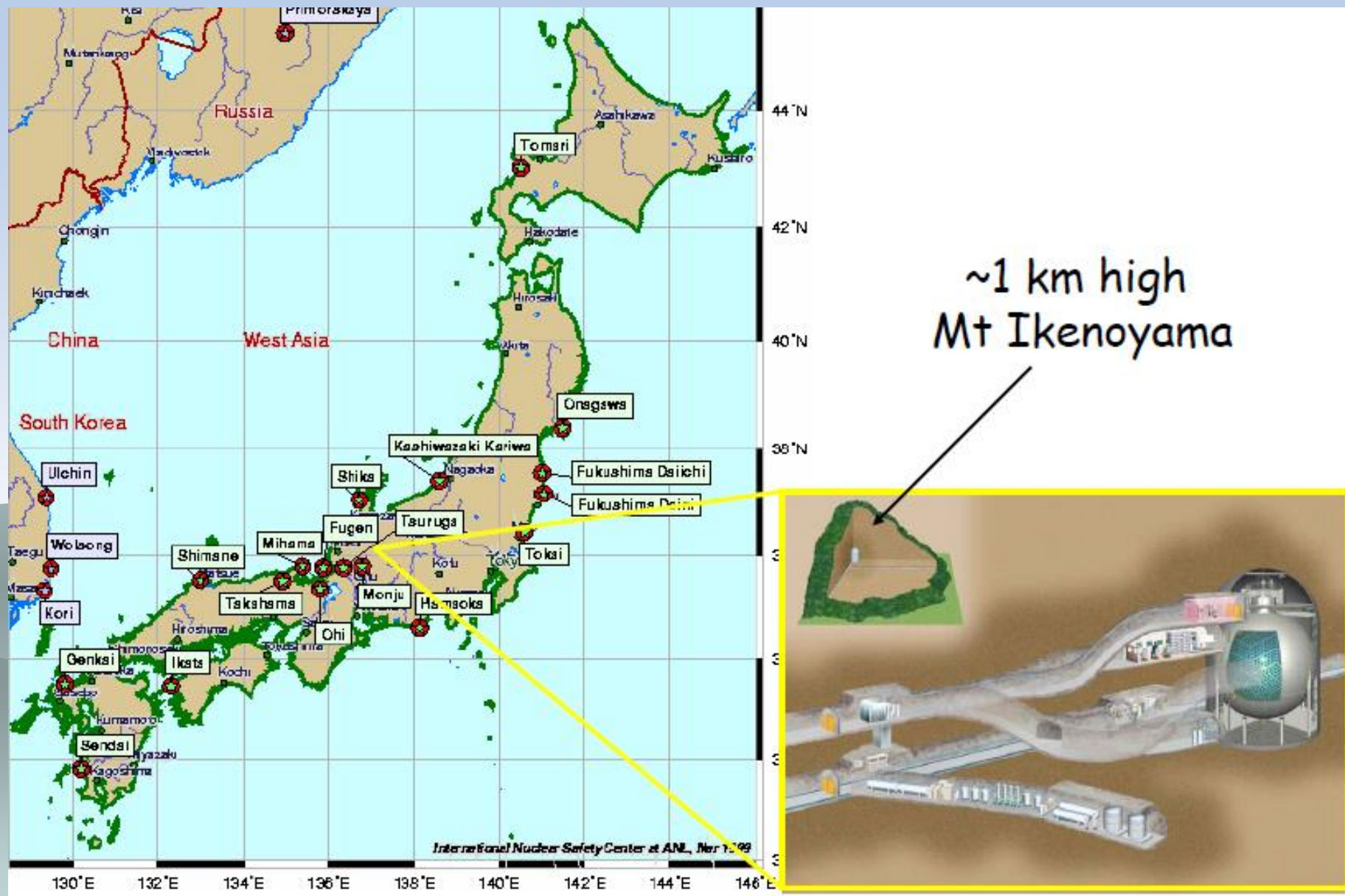
Look for a deficit of  $\bar{\nu}_e$  at a distance  $L$



$L$



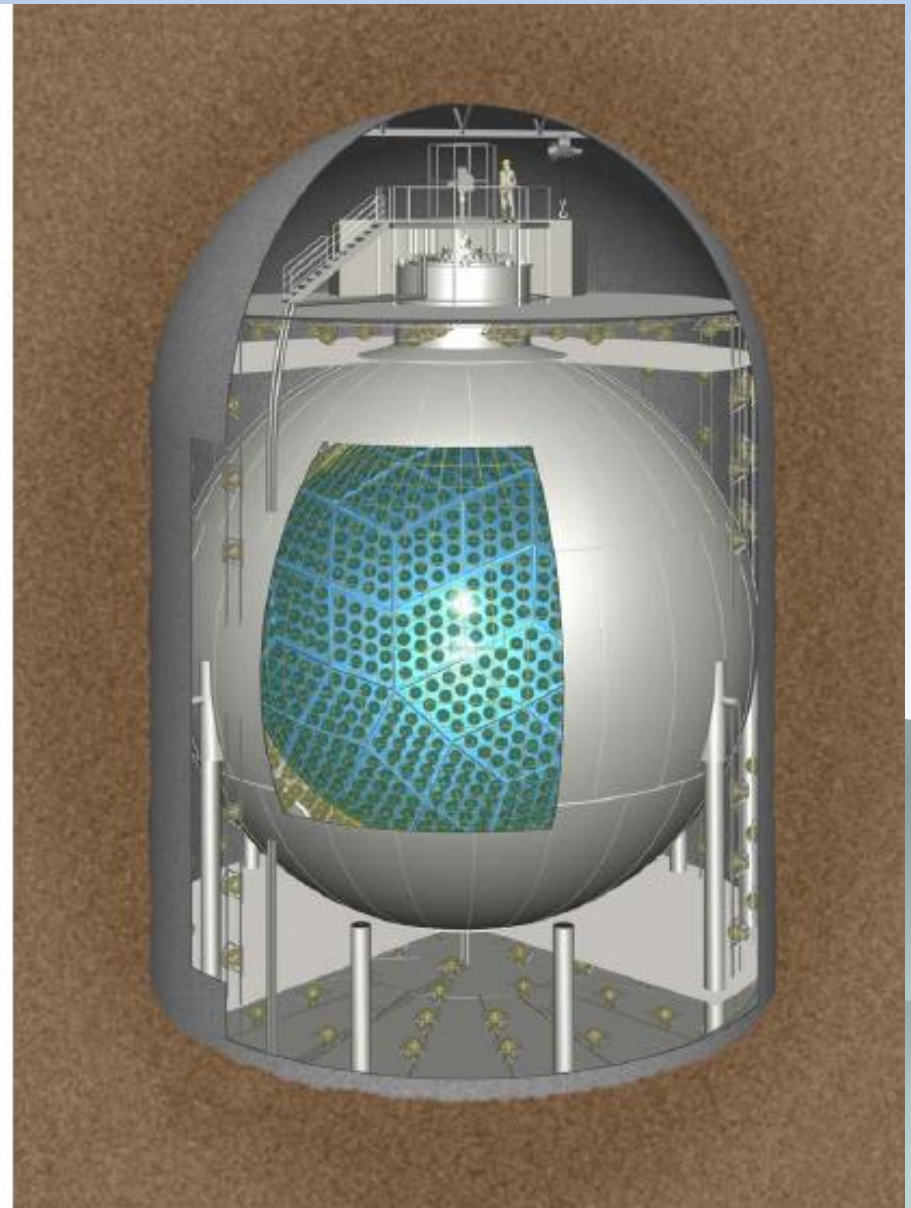
# KamLAND



# KamLAND検出器

## KamLAND: the ultimate reactor neutrino oscillation experiment

- 1 kton liq. Scint. Detector in the Kamioka cavern
- ~1300 17" fast PMTs
- ~700 20" large area PMTs
- 30% photocathode coverage
- H<sub>2</sub>O Cerenkov veto counter
- Multi-hit deadtime-less electronics
- $\Delta m^2$  sensitivity  $7 \cdot 10^{-6} \text{ eV}^2$   
LMA-MSW solution within reach on the earth!



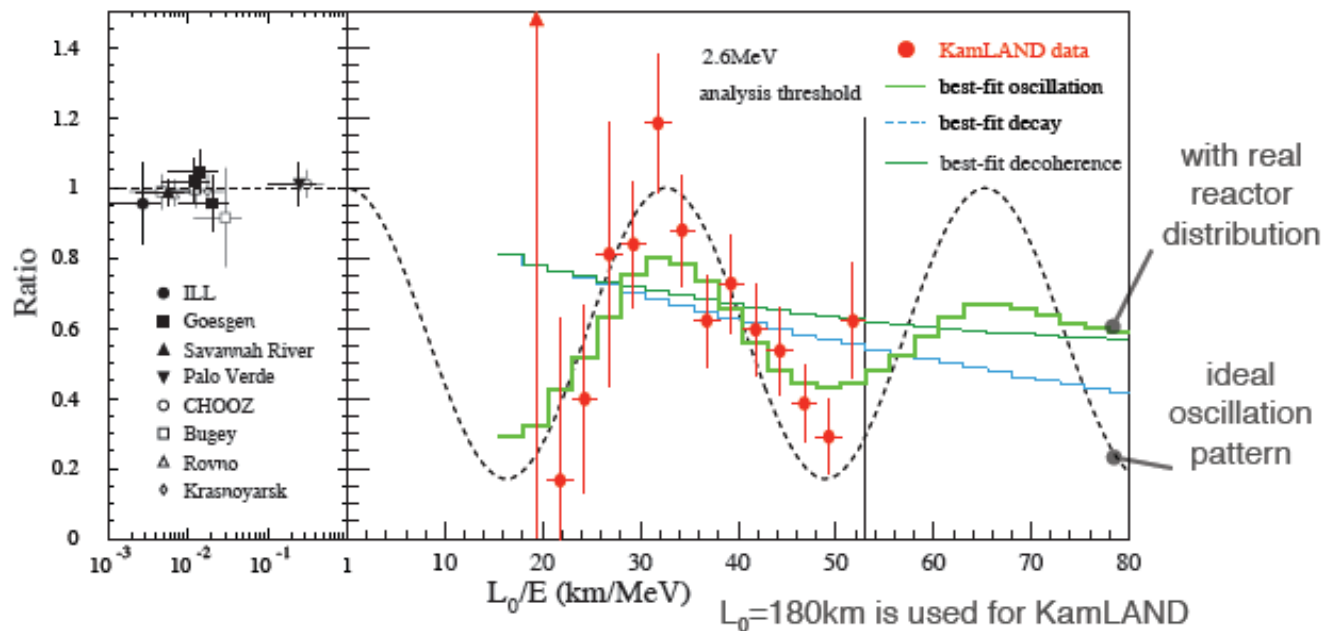
# KamLANDの結果

横軸を $L(\text{km})/E(\text{MeV})$ に。

— oscillation  $P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$

- - - decay  $P_{ee} = \left(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \exp\left(-\frac{m_2 L}{2\tau E}\right)\right)^2$

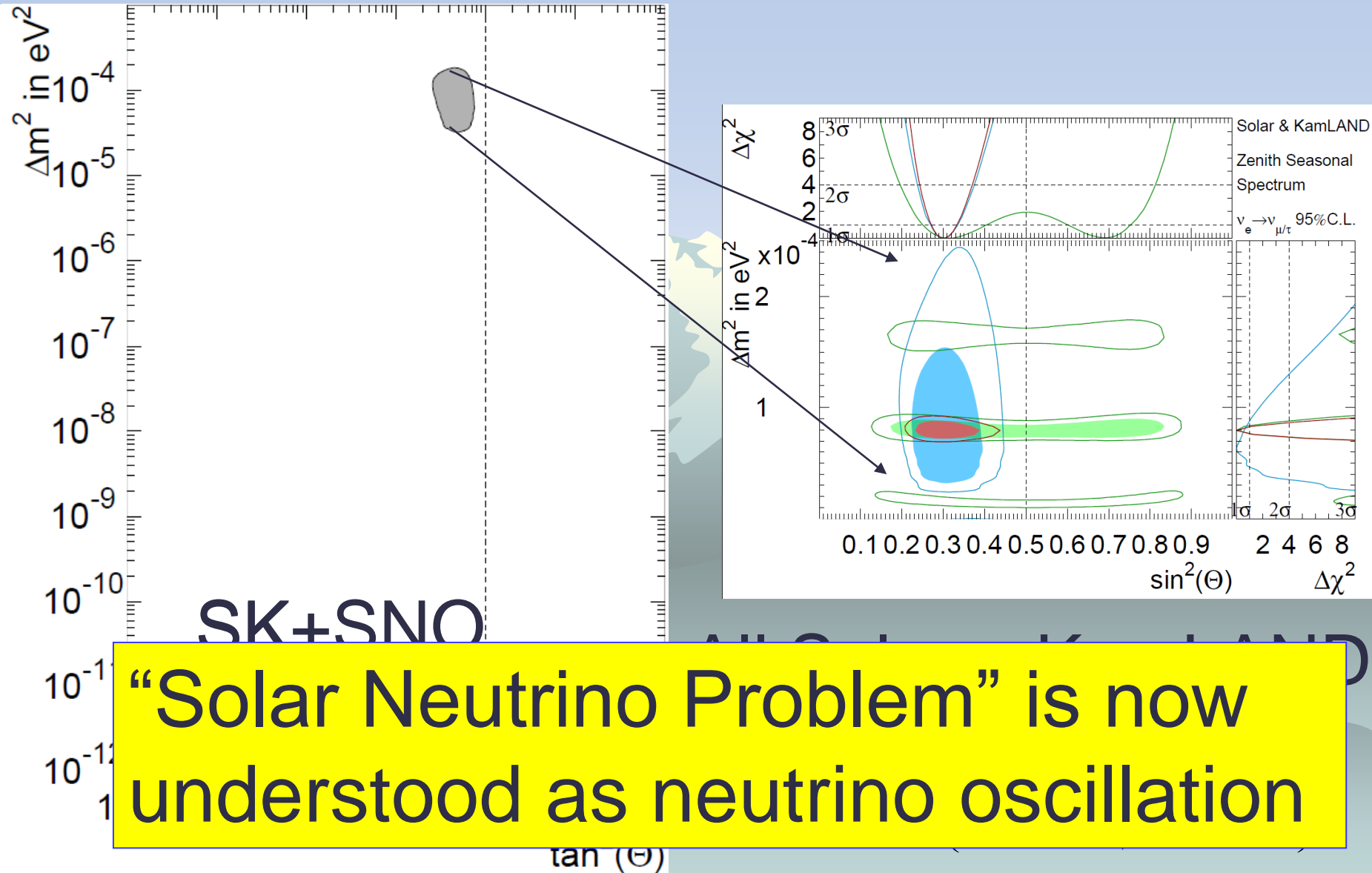
- - - decoherence  $P_{ee} = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta (1 - \exp(-\gamma \frac{L}{E}))$



決定的！



# Constraints on $\Delta m_{12}^2, \theta_{12}$

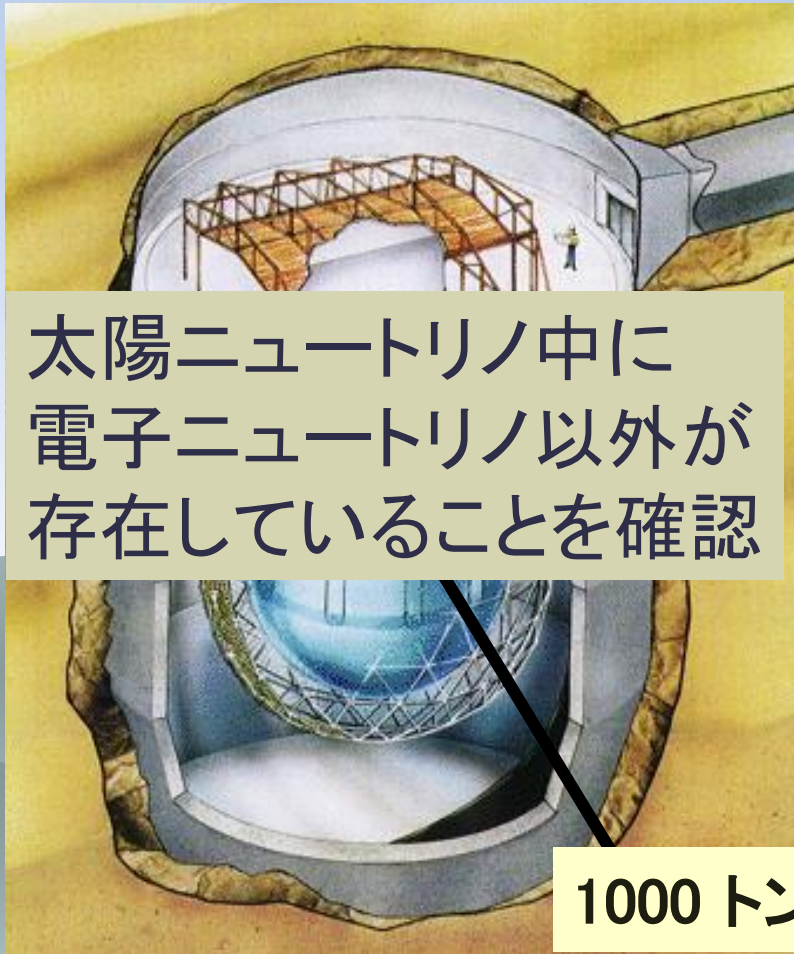


**“Solar Neutrino Problem” is now understood as neutrino oscillation**

# 太陽ニュートリノ問題の解決

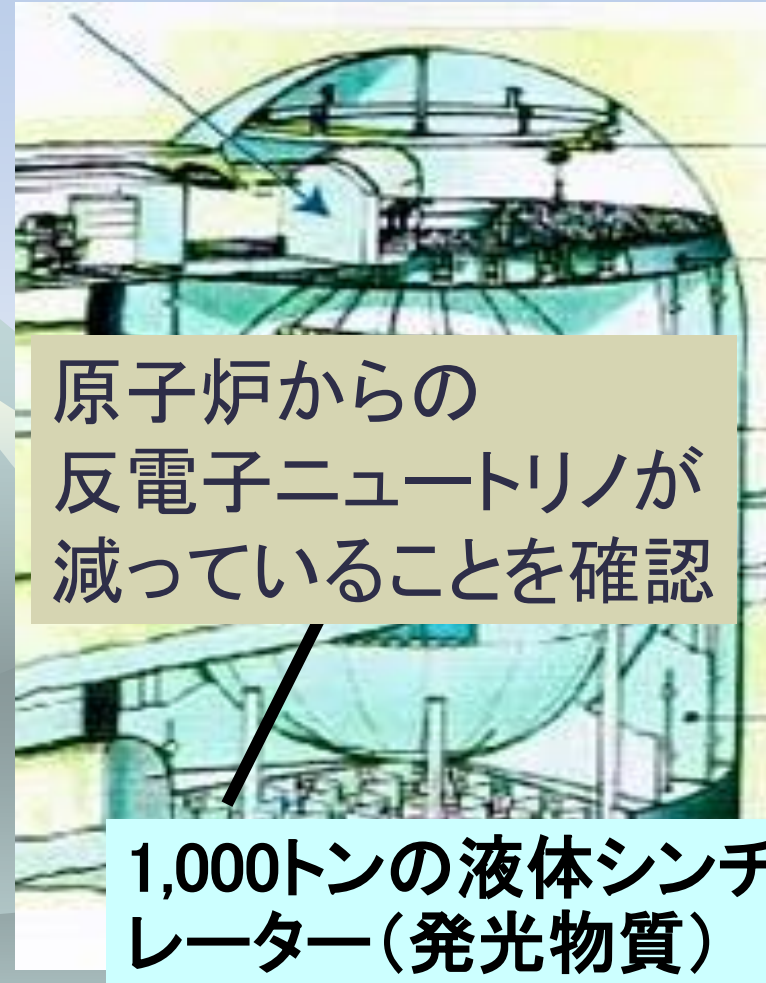
SNO(カナダ 2001年)

カムランド(神岡 2002年)



太陽ニュートリノ中に  
電子ニュートリノ以外が  
存在していることを確認

1000 トンの重水



原子炉からの  
反電子ニュートリノが  
減っていることを確認

1,000トンの液体シンチ  
レーター(発光物質)

太陽ニュートリノの謎 = 電子ニュートリノの振動