

2015年ノーベル物理学賞受賞記念
特別セミナー

広島大学 極限宇宙研究拠点
CORE^U
Core of Research for the Energetic Universe
HIROSHIMA UNIVERSITY

J-PARCニュートリノ実験 の最新結果と 将来の展望

日時：10月9日(金) 14:30-16:00(質疑応答を含む)

場所：広島大学学士会館 2F レセプションホール

講師：小林 隆 氏

(高エネルギー加速器研究機構 教授
本学理学研究科出身)

講演概要

茨城県東海村の大強度陽子加速器J-PARCで大強度ニュートリノビームを生成し、295 km離れた5万トン水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデで検出する、長基線ニュートリノ振動実験T2Kの最新結果と今後の展望、さらに将来計画である100万トンハイパーカミオカンデ検出器をもちいた実験の物理ポテンシャル、展望について紹介する。

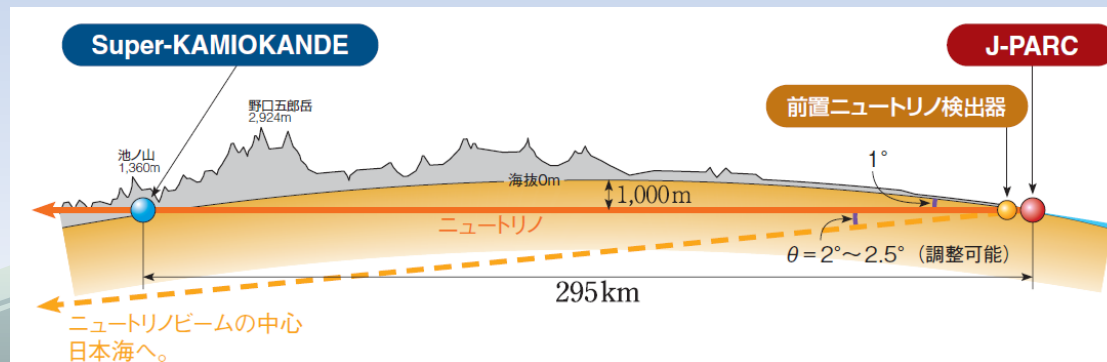
ノーベル賞受賞！

The screenshot shows the Nobelprize.org website. The header includes the logo and navigation links: Home, Nobel Prizes and Laureates, Nomination, Ceremonies, and Alfred Nobel. The main content area is titled "The Nobel Prize in Physics 2015" and features portraits of the laureates, Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald. The text below the portraits states: "The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald 'for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass'".

- ◆ “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)

祝 梶田さん ノーベル賞受賞

ニュートリノで探る極微の世界と宇宙



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:

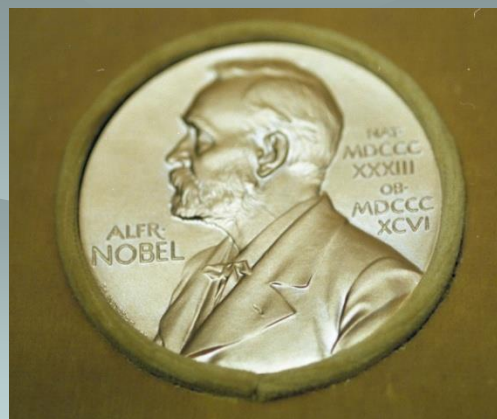
<http://jnusrv01.kek.jp/~kobayasi/hiroshima>

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

Yoichiro Nambu

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

Makoto Kobayashi

1/4 of the prize

Japan

High Energy Accelerator
Research Organization
(KEK)
Tsukuba, Japan

b. 1944



Photo: Kyoto University

益川敏英先生

Toshihide Maskawa

1/4 of the prize

Japan

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

b. 1940

(元KEK素粒子原子核研究所長)

益川敏英先生
(元京大基研所長)

家宝

祝賀会にて

三一八一



今日の目標(メニュー)

- ◆ 素粒子物理学って？
- ◆ 「にゅーとりの」ってなに？
- ◆ 「にゅーとりの振動」ってなに？
- ◆ スーパーカミオカンデの大発見
- ◆ T2Kってどんな実験？なにを調べているの？
- ◆ で、何がどこまでわかったの？
- ◆ これからどうなるの？

高エネルギー加速器研究機構

(Kou Enerugi- Kasouki → KEK: けーいーけーorけっく)

KEK

検索



◆ 「加速器」を使って粒子を加速、素粒子や物質の研究

つくばキャンパス

茨城県つくば市に位置するつくばキャンパスには、加速器を開発・運用する加速器研究施設と、加速器を用いた研究を推進する素粒子原子核研究所と物質構造科学研究所、これらの研究所の活動を技術的に支える共通基盤研究施設が設置されています。

1km x 3km

SuperKEKB 加速器
Belle II 測定器
ATF / STF
cERL
光子ファクトリー
電子陽電子線形加速器
低速陽電子実験施設

電子、陽電子を加速する加速器

東海キャンパス

茨城県東海村に位置する東海キャンパスには、陽子ビームを用いた研究を推進しているJ-PARC、陽子ビームおよびその加速器施設と、それらのビームを用いて実験や解析を行う実験施設が設置されています。

J-PARC

ハドロン実験施設
主リング (MR) シンクロトロン
物質・生命科学実験施設
ニュートリノ実験施設
3GeV シンクロトロン
リニアック

1km

陽子を加速する加速器

ガリレオ

毎週月曜よる9時
Every Monday at 9pm

物語
Story

トピックス
Topics

キャスト&スタッフ
Cast & Staff

相關圖
Chart

インタビュー
Interview

メッセージ
Message

スペシャル
Special

準備中



第1章 あらすじ 04.15 Mon On-Air 30分枠 拡大放送

Story #01 幻惑す -まどわす-



大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構



KEKについて

ニュースルーム

研究施設

KEKトップ > ニュースルーム > ニュース

<https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20130415222000/>

トピックス

テレビドラマ「ガリレオ」の撮影が行われました



注) 白衣を来て実験することはまずありません。現場ではヘルメットと作業着です。

素粒子物理

◆ 知りたいこと

❖ 物質をどこまで小さく分割するとどこまで行くのか？何が残るのか？

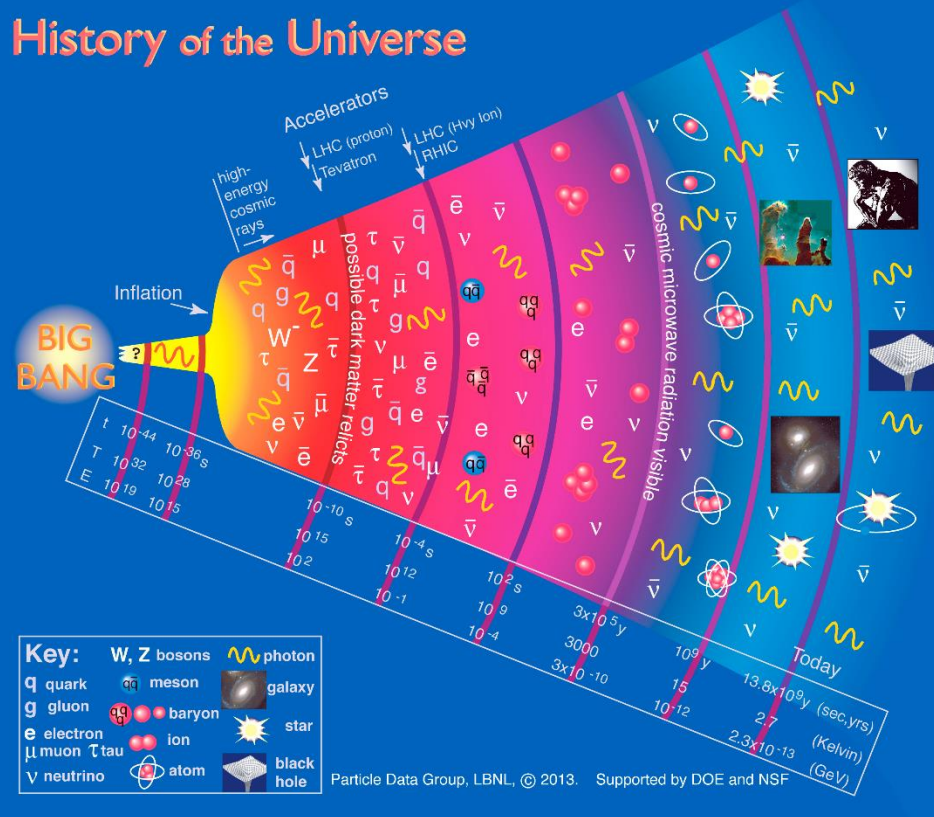
❖ それはどのように結びついているのか？

❖ それはどうして存在するのか？

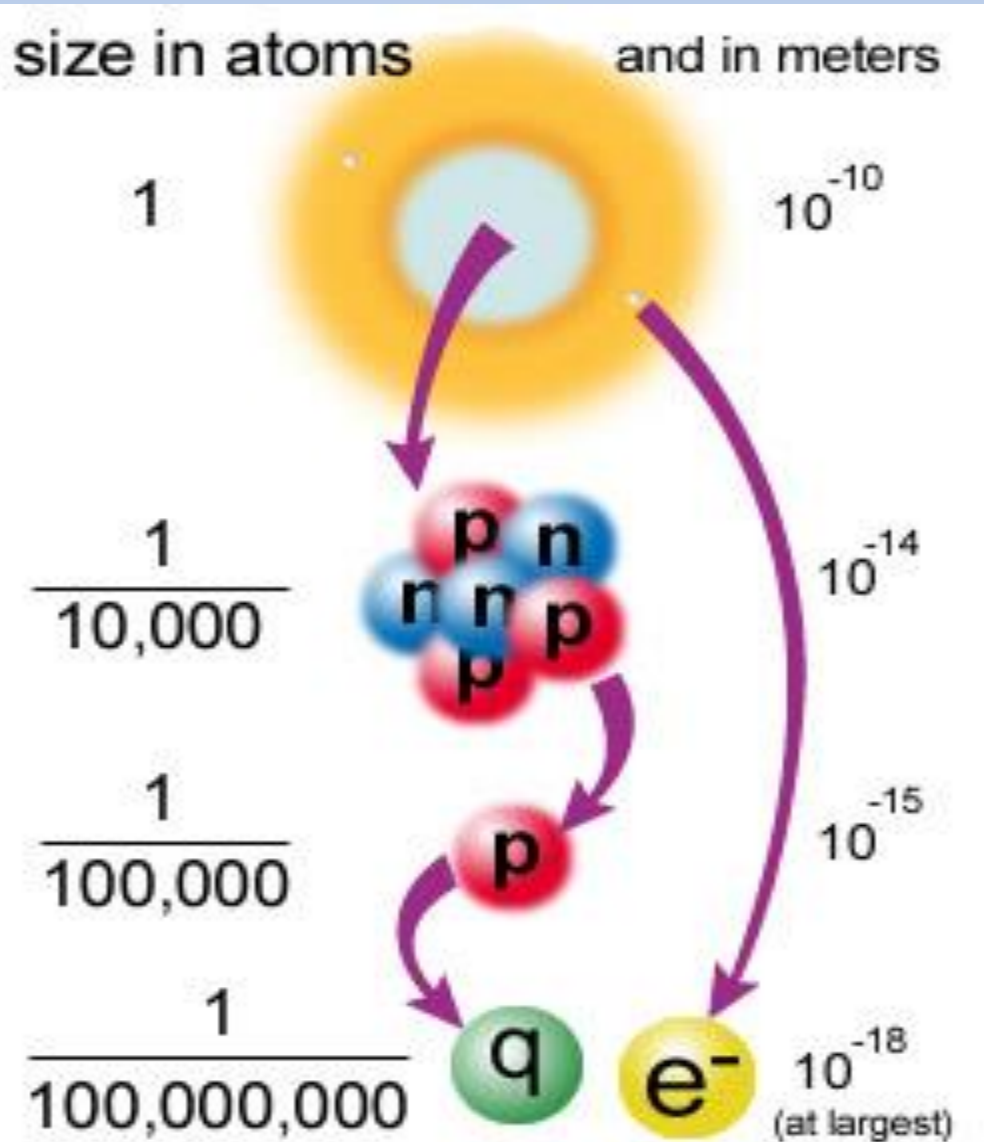
❖ 宇宙はどのように生まれて何からできてきているのか？

◆ →我々は何で、どこから来てなぜここにいるのか？我々の運命やいかに？

History of the Universe



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？

現在の素粒子の世界像(標準理論)

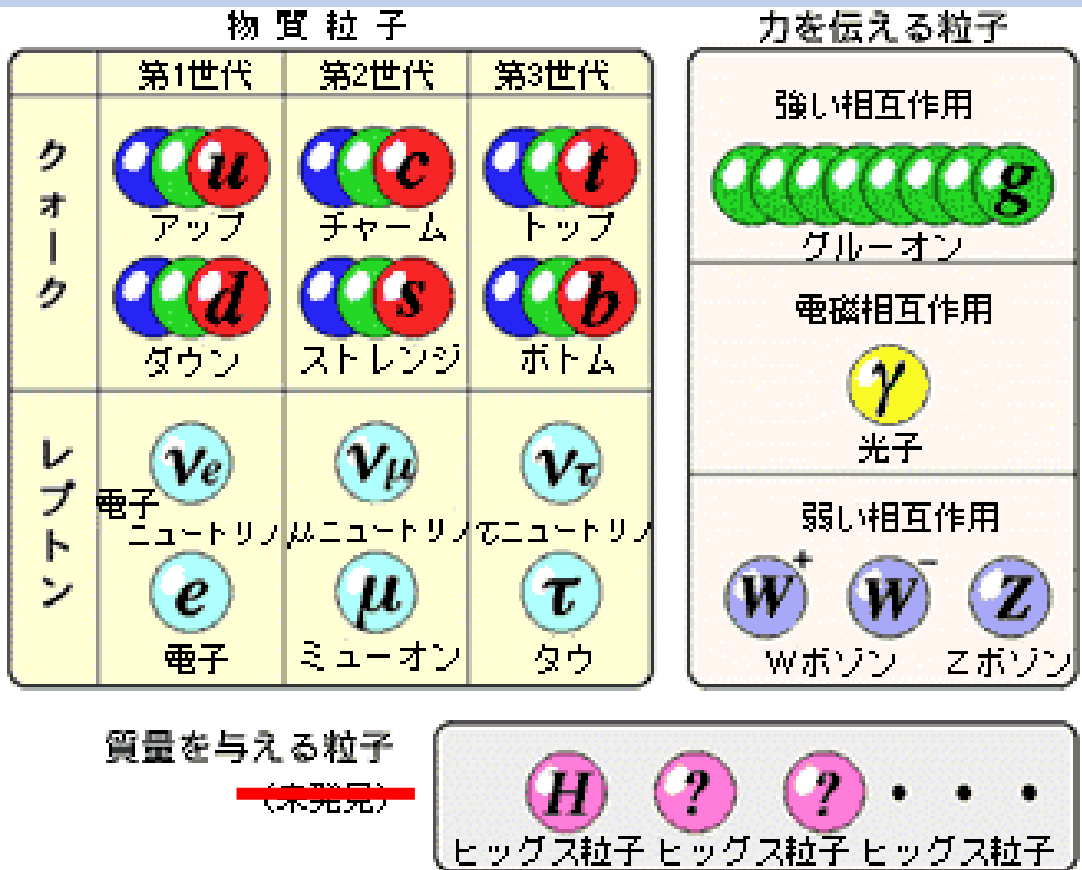


図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

- ◆ 1970年代ごろ完成
- ◆ これまで全ての実験結果を説明！！大成功！
- ◆ しかし、素粒子屋(理論屋、実験屋とも)は不満足
 - ❖ なぜ3世代？
 - ❖ 質量や電荷を説明できない
 - ❖ などなど
- ◆ 標準模型を超える新しい理論
 - ❖ 素粒子屋の長年の夢

素粒子物理学の大目標

力の分岐と統一理論

宇宙が生まれたときには超高エネルギー状態で、力は1種類だけだったと考えられている。その後、宇宙の温度が低下するにつれて、現在の宇宙でみられる4種類の力に分岐した。まず宇宙誕生直後に、重力が分岐した。次に強い力、最後に弱い力と電磁気力が分かれたと考えられている。

力の統一理論は、力の分岐を逆にたどるような形で研究が進んでいる。まず電磁気力と弱い力を合わせた「電弱統一理論」が完成した。強い力を含めた「大統一理論」も研究されている。重力をも含めた「超統一理論」も研究されている。

大統一理論
(Grand Unified Theory: GUT)

未知!

超統一理論
(超ひも理論が有力候補)
大統一理論
電弱統一理論

電弱理論
(Electroweak theory)

強い力:量子色力学
(Quantum Chromo Dynamics)

電磁気学→
量子電磁力学(QED)

確立!

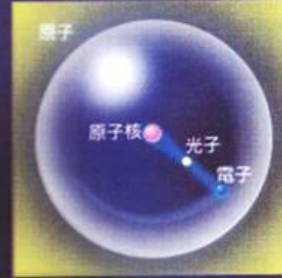
標準模型



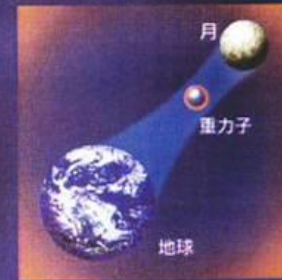
強い力



弱い力



電磁気力









重力

ニュートン1998年7月号

全ての力を記述する一つの統一理論の構築

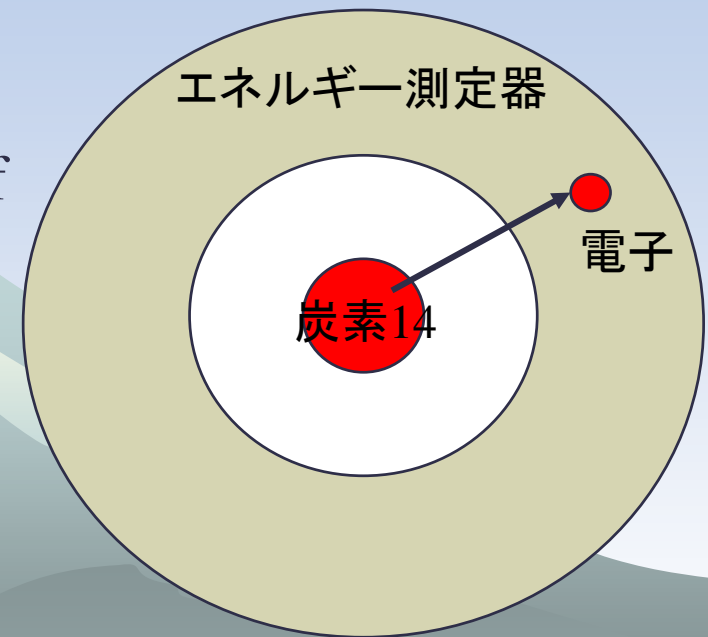
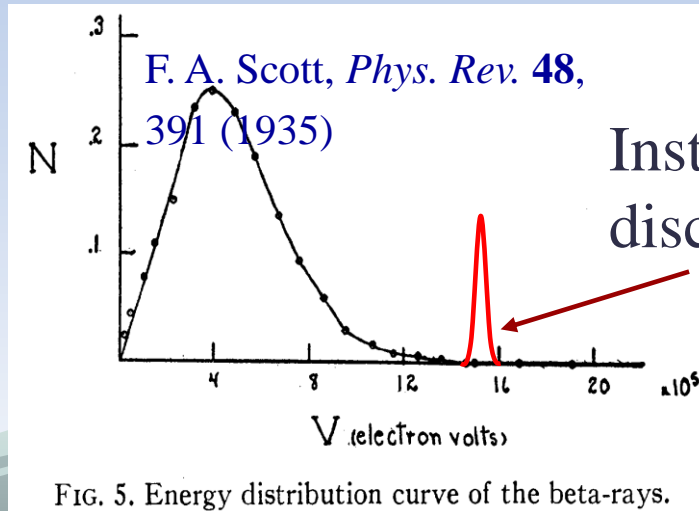
ニュートリノとは？

- ◆ New Trino (新しいトリノ)ではない。
- ◆ **Neutrino**
 - ❖ 中性Neutrにちっちゃいという意味のino:中性微子
- ◆ 物質を構成する基本粒子「素粒子」の仲間
- ◆ なぜか3種類ある(?)
 - ❖ 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)
- ◆ 1930年、パウリが予言、発見は26年後
- ◆ ほとんど何ともぶつからず通り抜ける
- ◆ 電氣的に中性、
- ◆ 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	 電子 ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

全ての始まり: ベータ崩壊

There were problems in the early days of β decay.



And the spins didn't add up... $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^-$
spin 0 spin 1 spin 1/2

ボア: β 崩壊ではエネルギー保存則が破れているのでは???

ベータ崩壊のナゾ

飛び出すエネルギーは
いつも同じはず

電子ニュートリノエネルギー分布

親原子核

電子

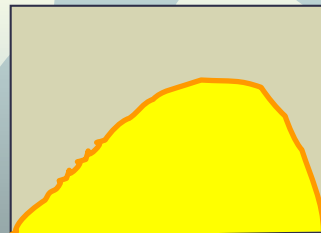
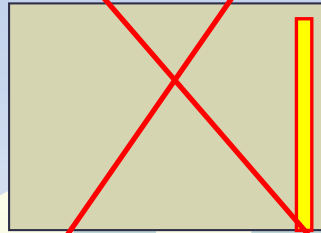
原子核

親原子核

ニュートリノ

電子

原子核



ボーア

エネルギーが保存
していないのかも！

見えない粒子がもう1個
放出されてるんでしょ

パウリ





ヴォルフガング・パウリ

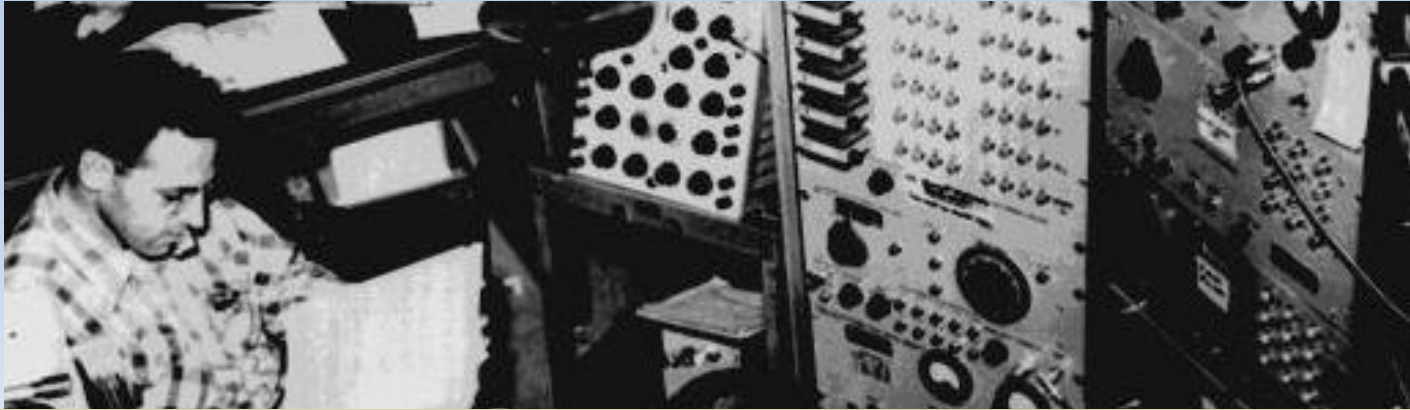
1900~1958(オーストリア→スイス)

1930年頃
ニュートリノを予言



1945:パウリ原理

25年後...ニュートリノの発見



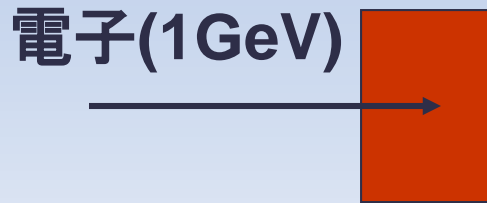
原子炉の核分裂から放出される
ニュートリノを始めて検出に成功！



F.Reines (たぶん右、1995年ノーベル賞)と
C.Cowen

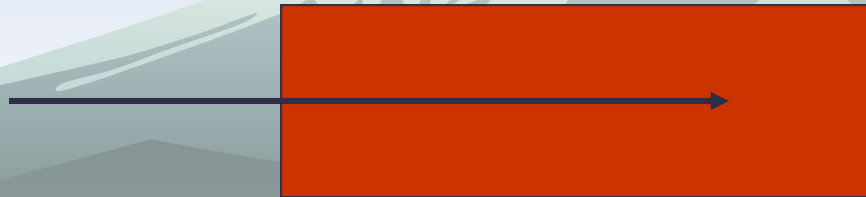
ニュートリノの特徴

- ◆ 物質とほとんど反応しない → 検出難しい



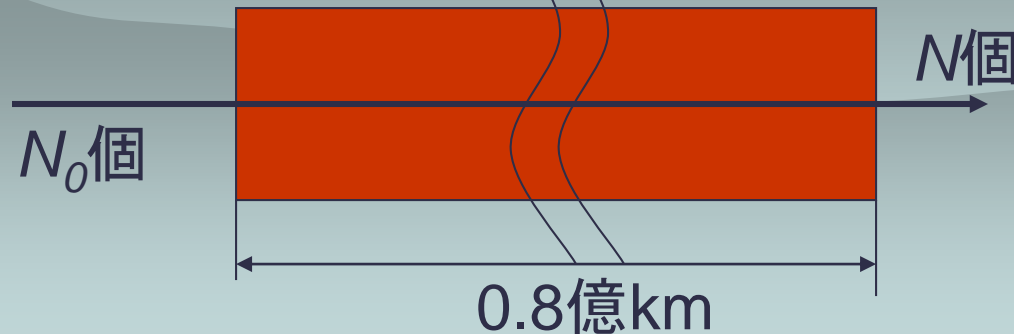
～10cmの鉄で完全にとまる。

ミュー(μ)粒子(1GeV)



～70cm

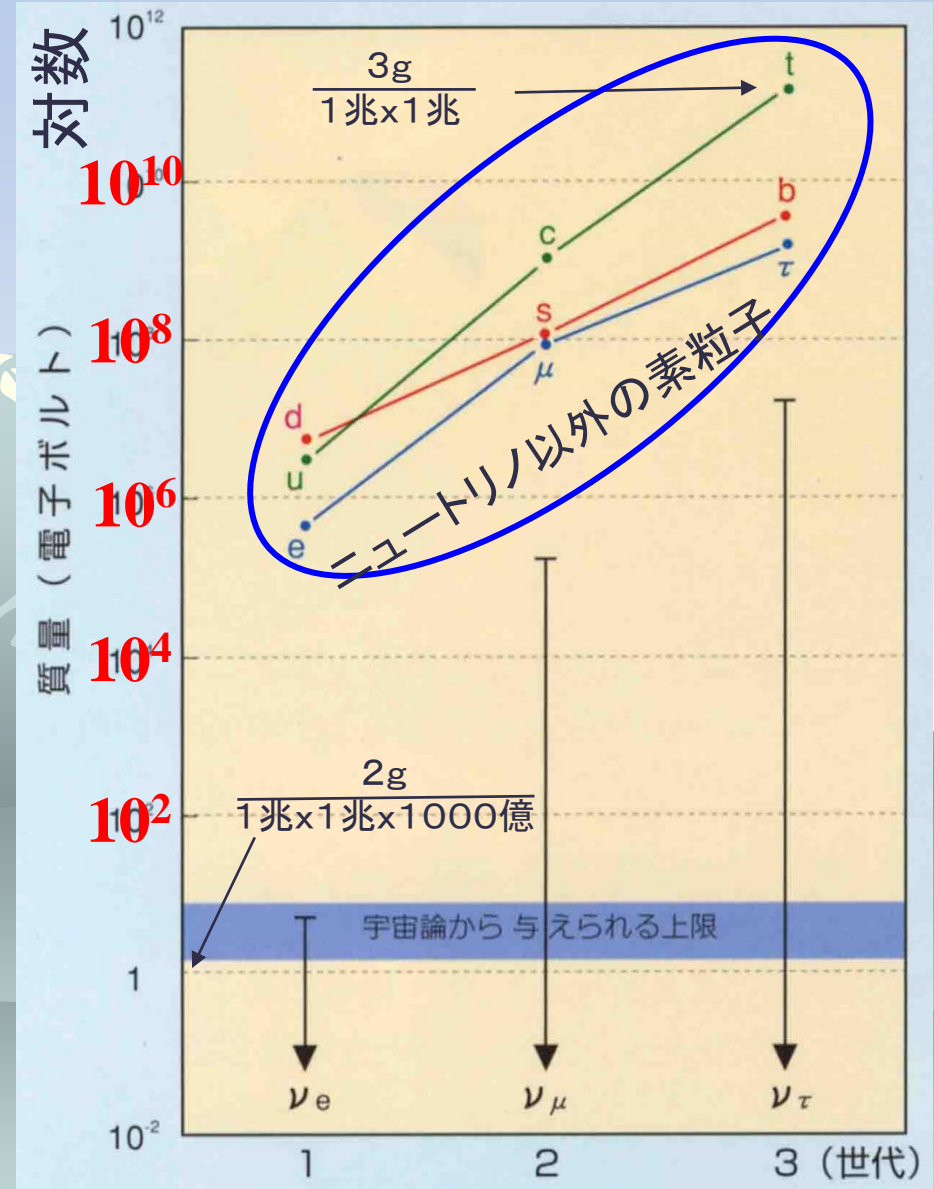
ニュートリノ(1GeV)



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

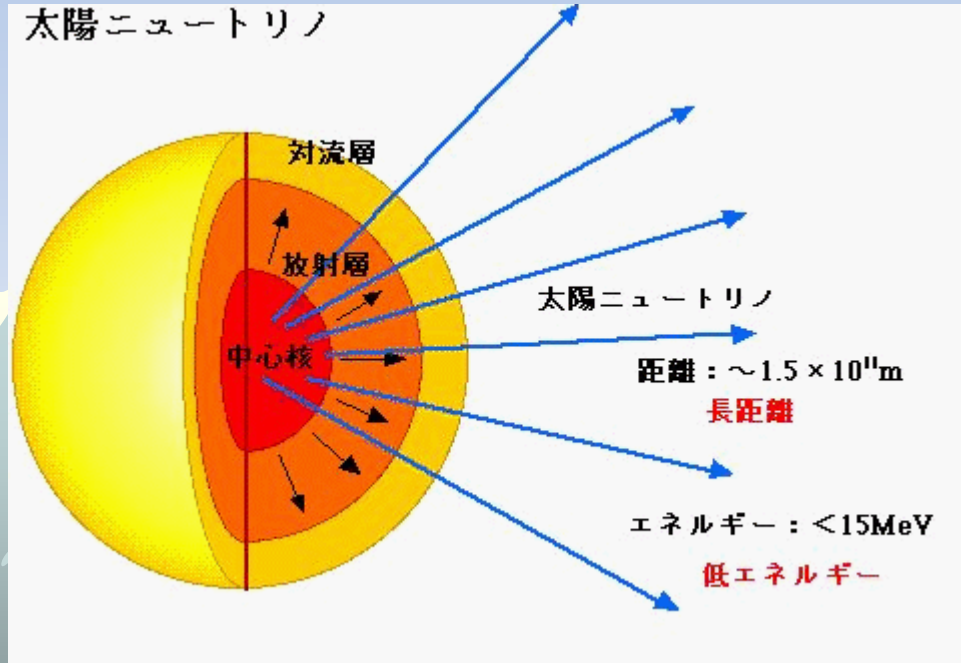
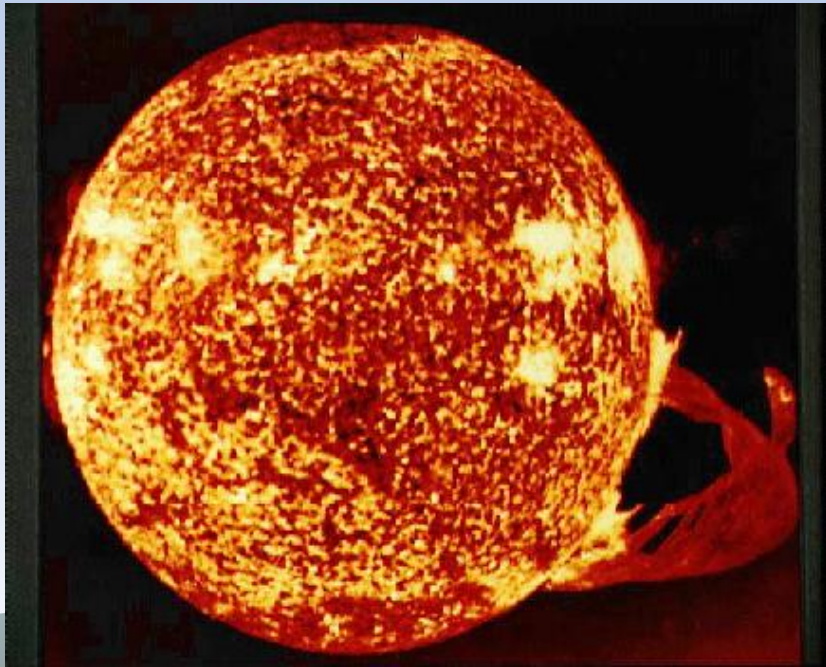
- ❖ カリウム ~0.5g/一本
- ❖ カリウム40の崩壊により **1日に100万個のニュートリノが発生**

◆ 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



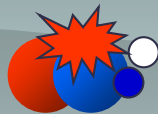
例えば



陽子



陽子



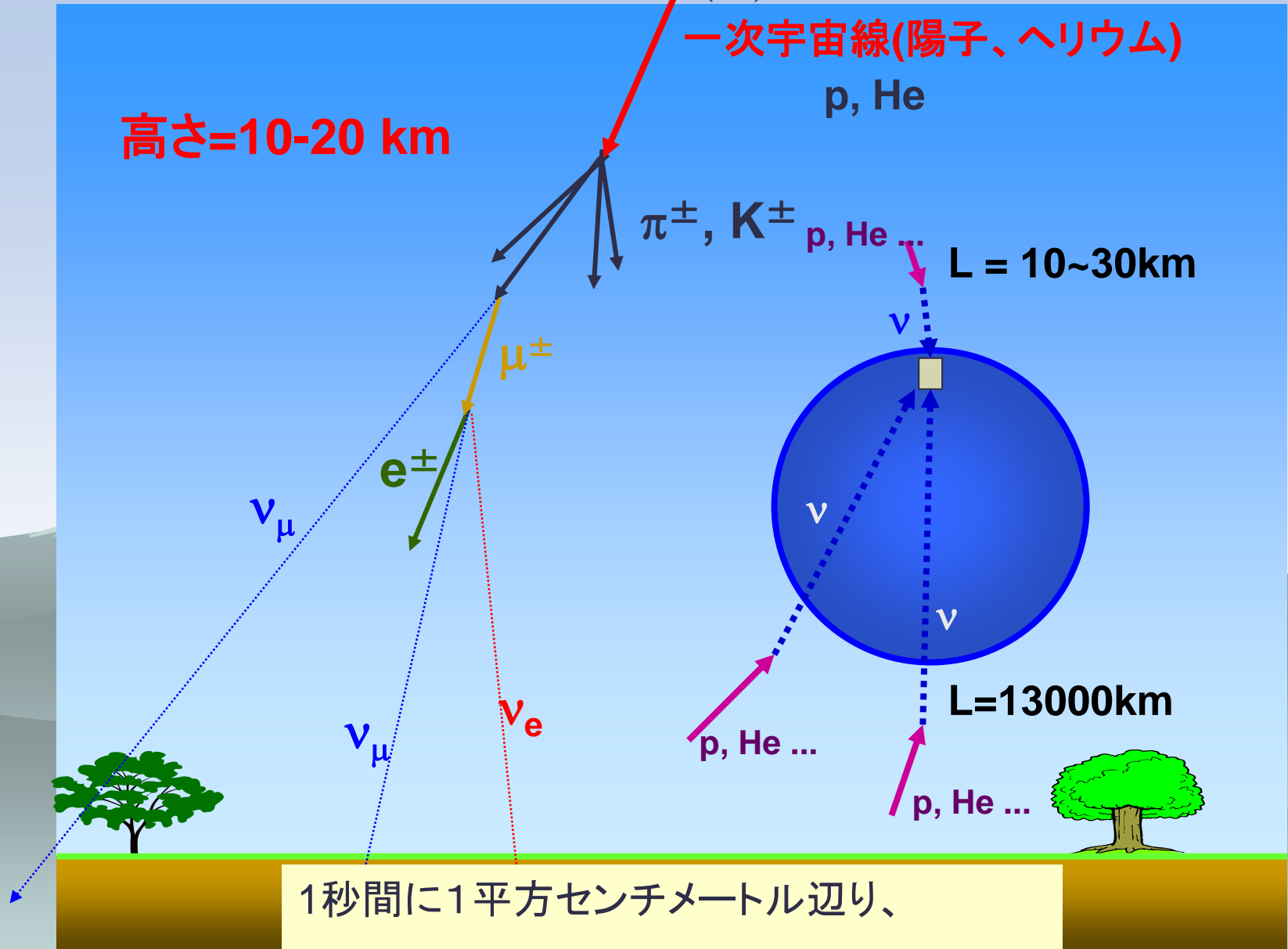
電子ニュートリノ

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 ~ 100 兆個**)

自然界のニュートリノ(2): 大気ニュートリノ

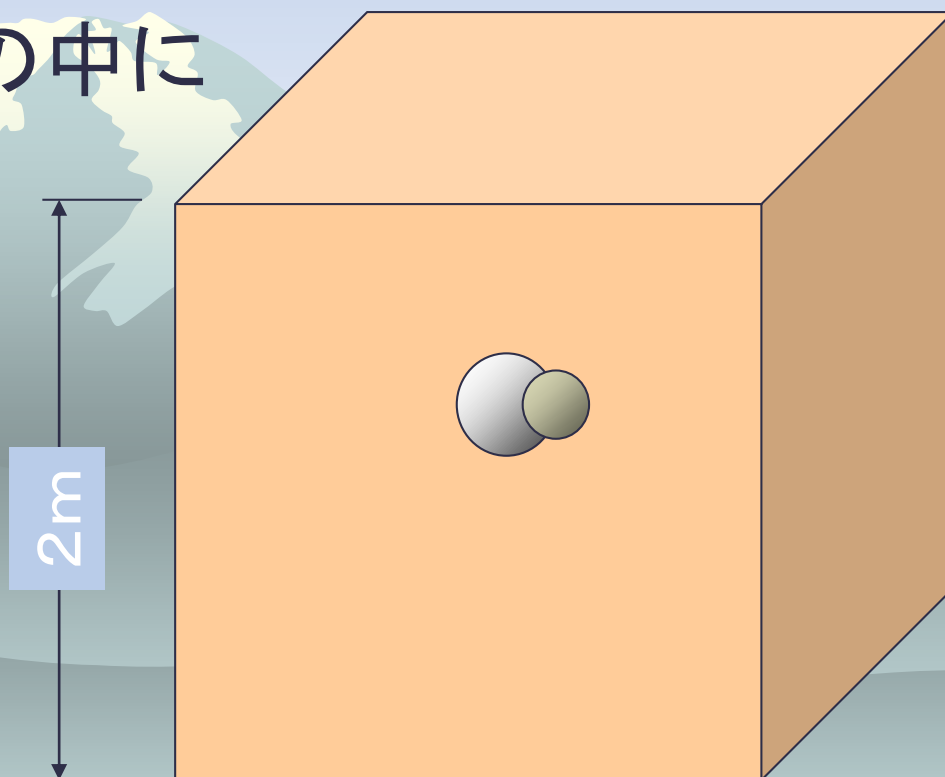


1秒間に1平方センチメートル辺り、
1個のニュートリノが空から降ってきてい

宇宙の中の陽子と電子

宇宙全体で平均してみると

- ◆ 陽子と電子は箱の中に1個ずつ



宇宙の中のニュートリノ

◆ 3種類のニュートリノ

❖ 電子型 ν_e

❖ ミュー型 ν_μ

❖ タウ型 ν_τ

“宇宙背景ニュートリノ”

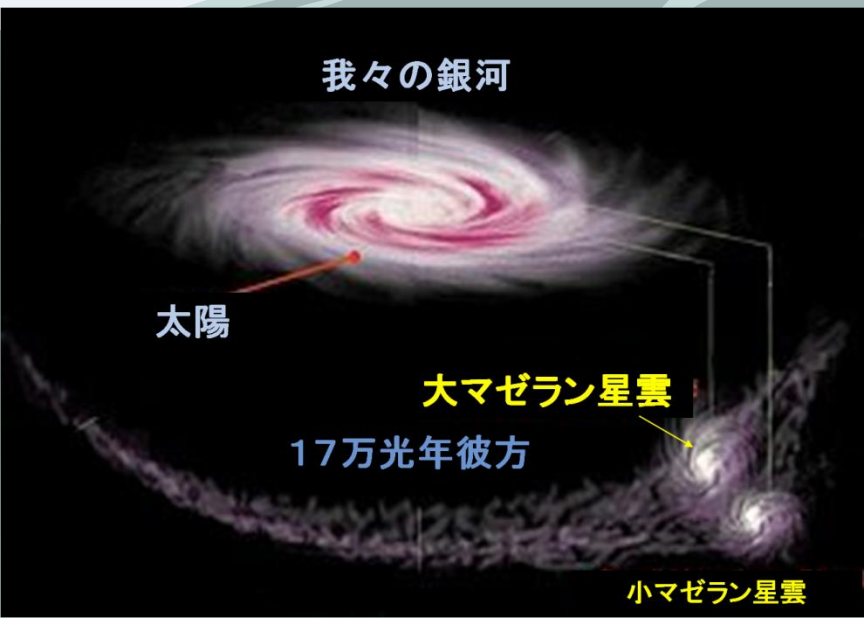
- 宇宙初期からの生き残り
- とてもエネルギーが低く、いまのところ検出方法がない



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

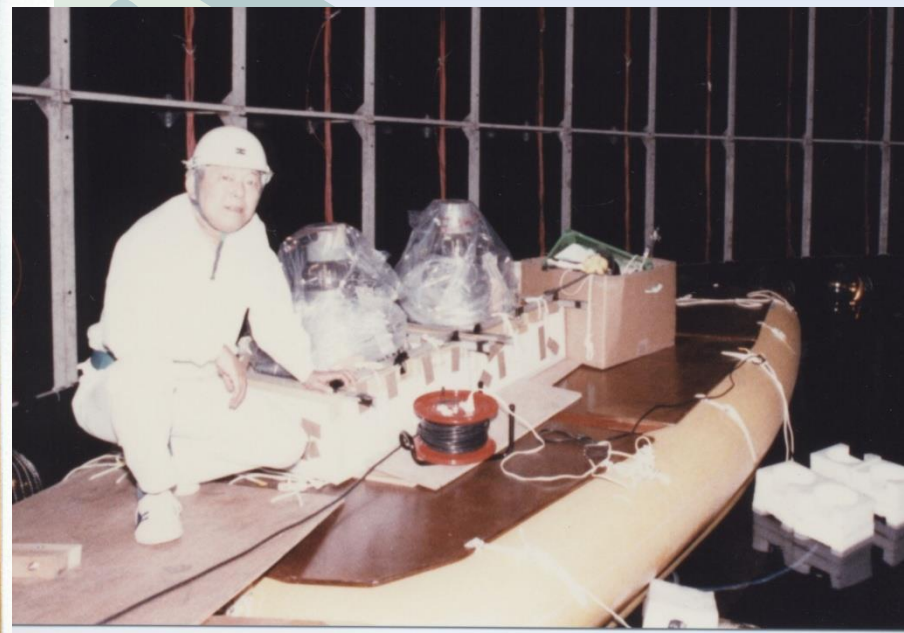
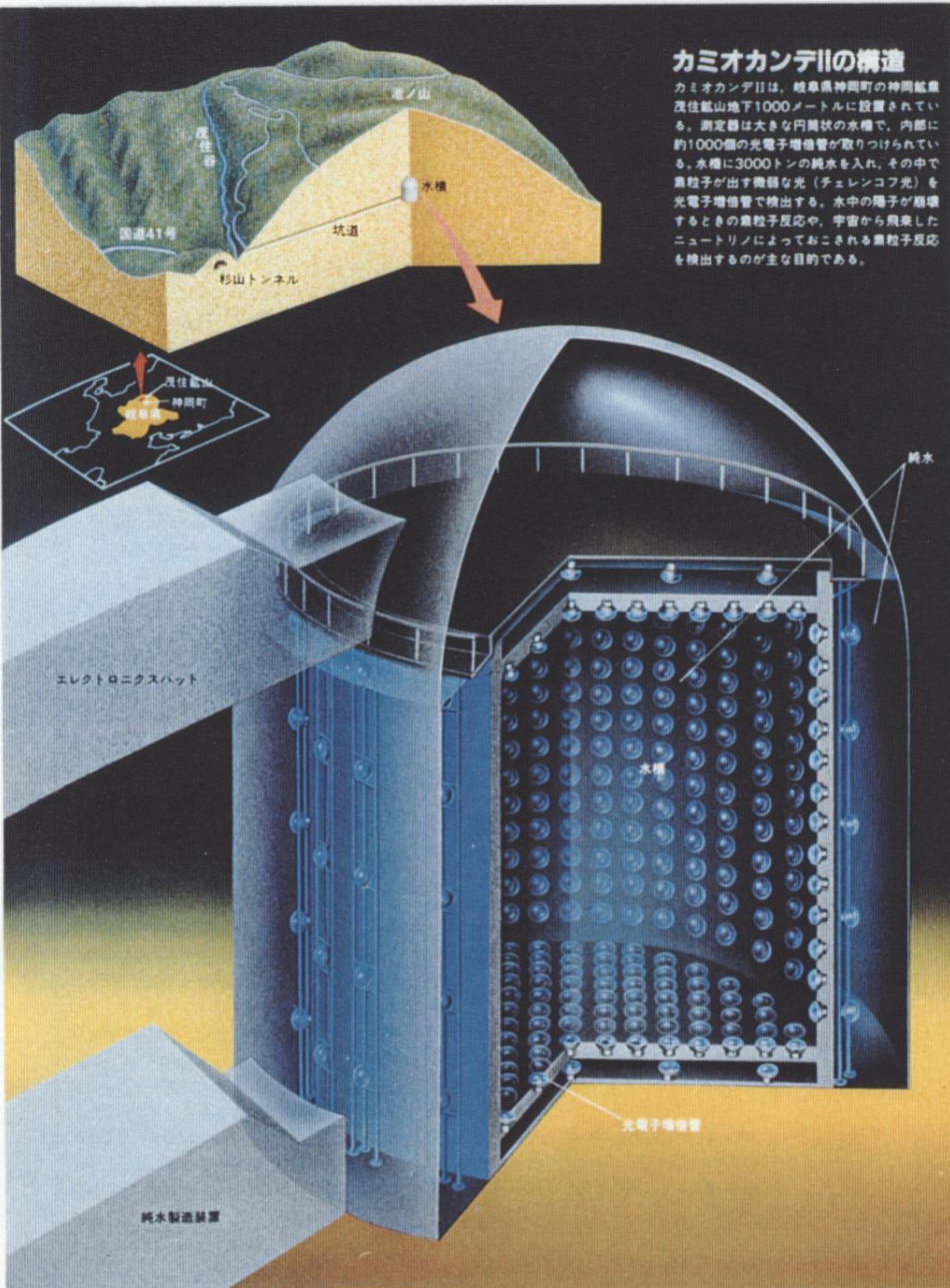
SN:Supernova(超新星)



カミオカンデ実験(1983—1996年)

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20インチ光電子
増倍管



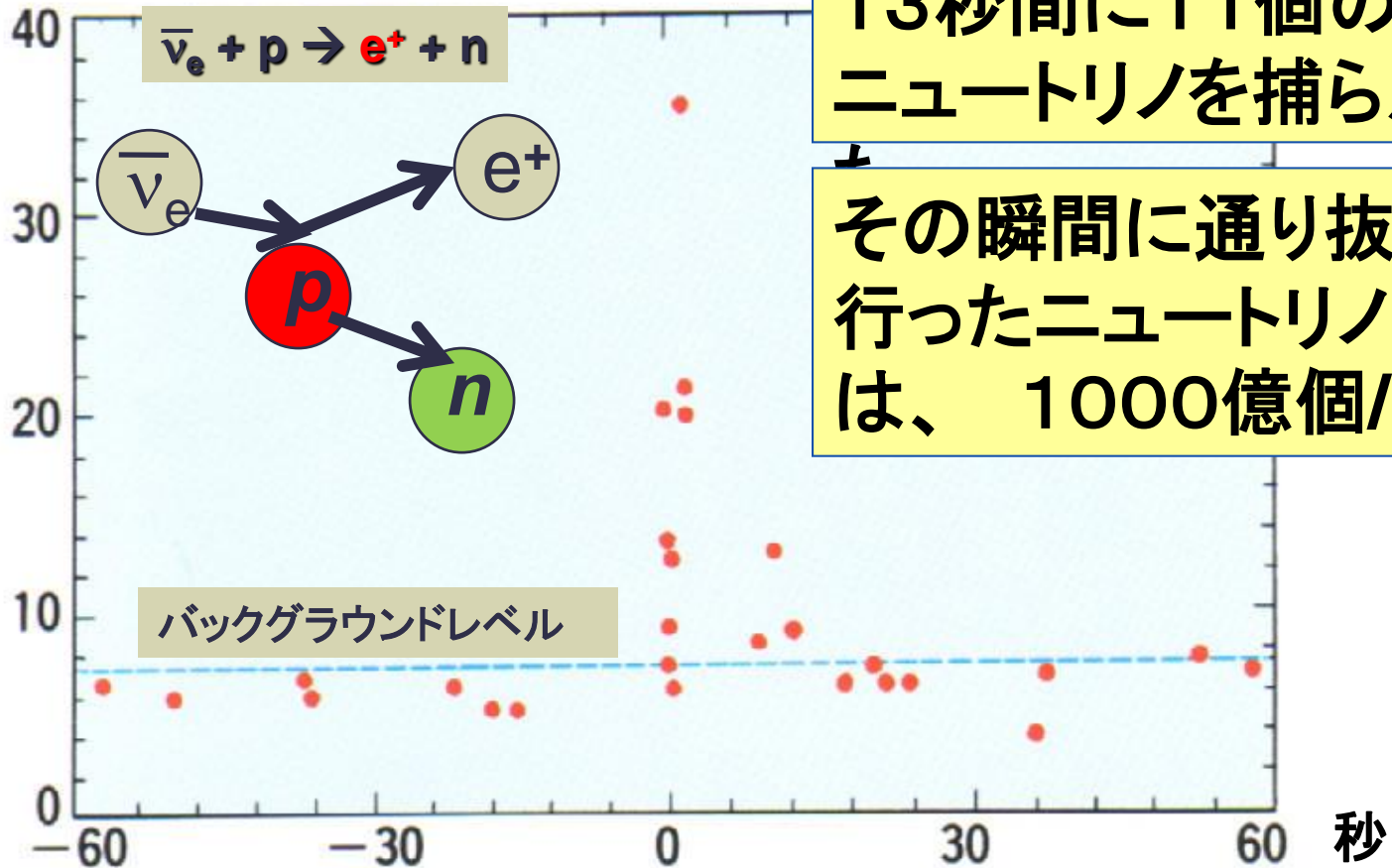
カミオカンデの要：50cm光電子増倍管



超高感度
世界最大
光センサー

カミオカンデが捉えた超新星のデータ

ニュートリノのエネルギー



JT: 1987 Feb 23 16:35:35 (± 1 min)

UT: 7:35:35

Time

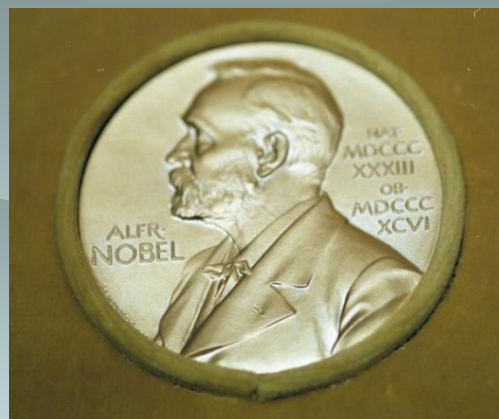
光で観測される3時間前

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??
 - ❖ 3種類のニュートリノ間の関係
 - ❖ ニュートリノと反ニュートリノは同じ法則?
 - ❖ 等等
- ◆ 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！！

宇宙の物質生成の条件

◆ サハロフの3条件

- ❖ バリオン(陽子、中性子)数非保存
- ❖ 粒子と反粒子の性質が異なる(CP対称性の破れ)
- ❖ 宇宙が熱平衡でない時期があった

◆ ニュートリノと反ニュートリノのCP対称性？

◆ 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

ニュートリノ振動とは？

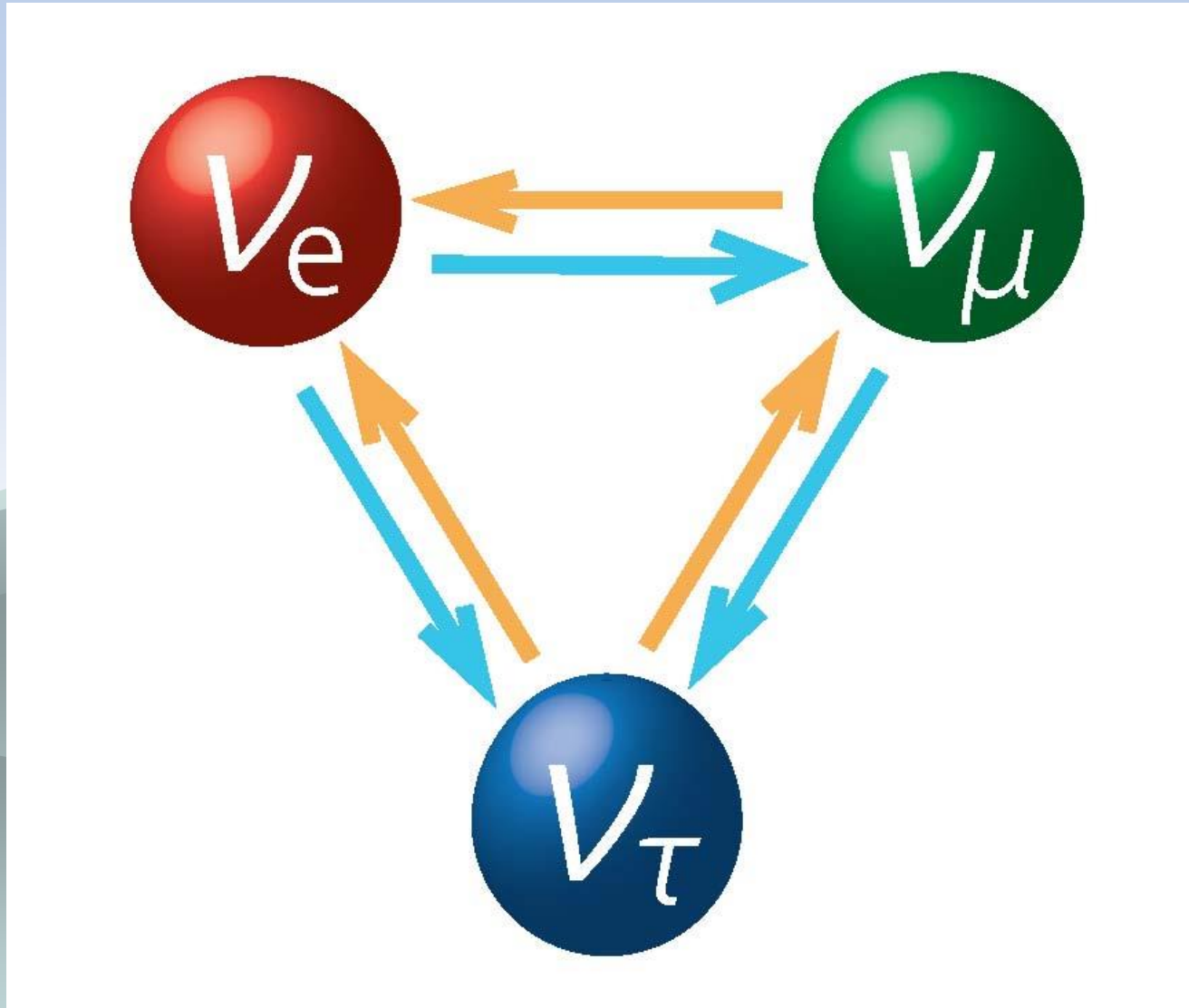
- ◆ ニュートリノが飛んでる間に別のニュートリノに化けること。



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

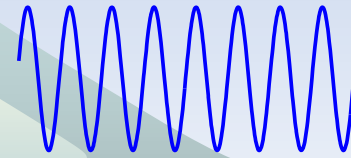


量子力学によると、

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。

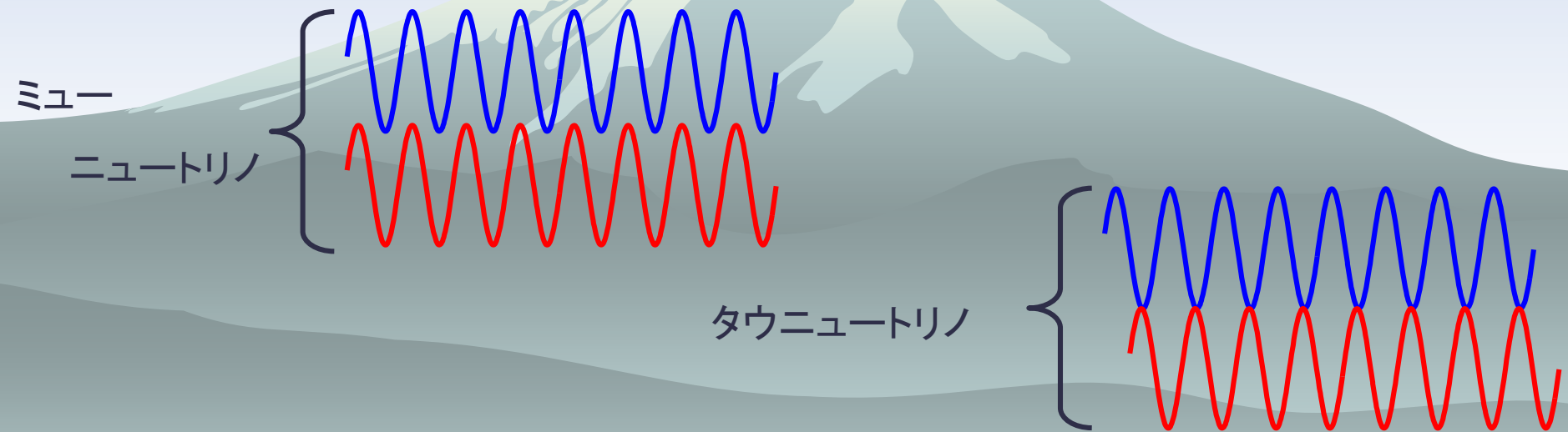
量子力学によると、

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



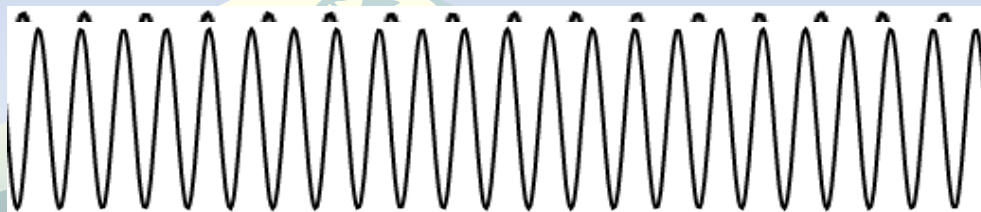
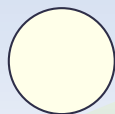
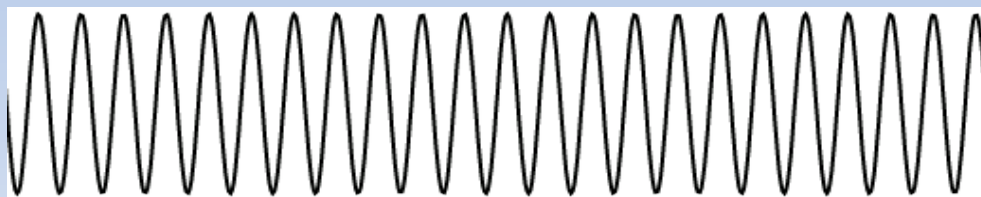
ところで、異なる質量の波は、異なる速さで進む。

● と ○ の質量が 同じなら、「波長」が同じである

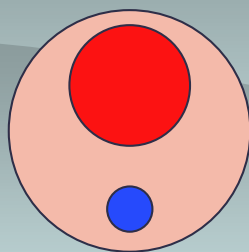
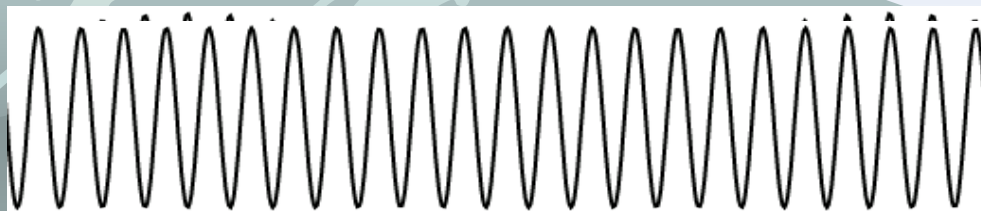
違うと、「波長」が異なる

波の伝播

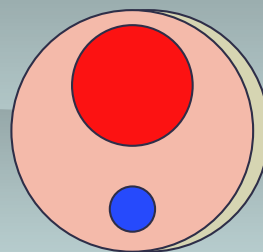
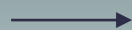
時間



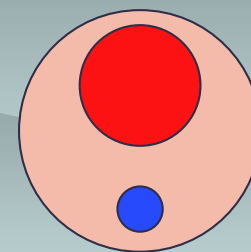
合成した波
(うなり)



ミューニュートリノ



ミューアンニュートリノ



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

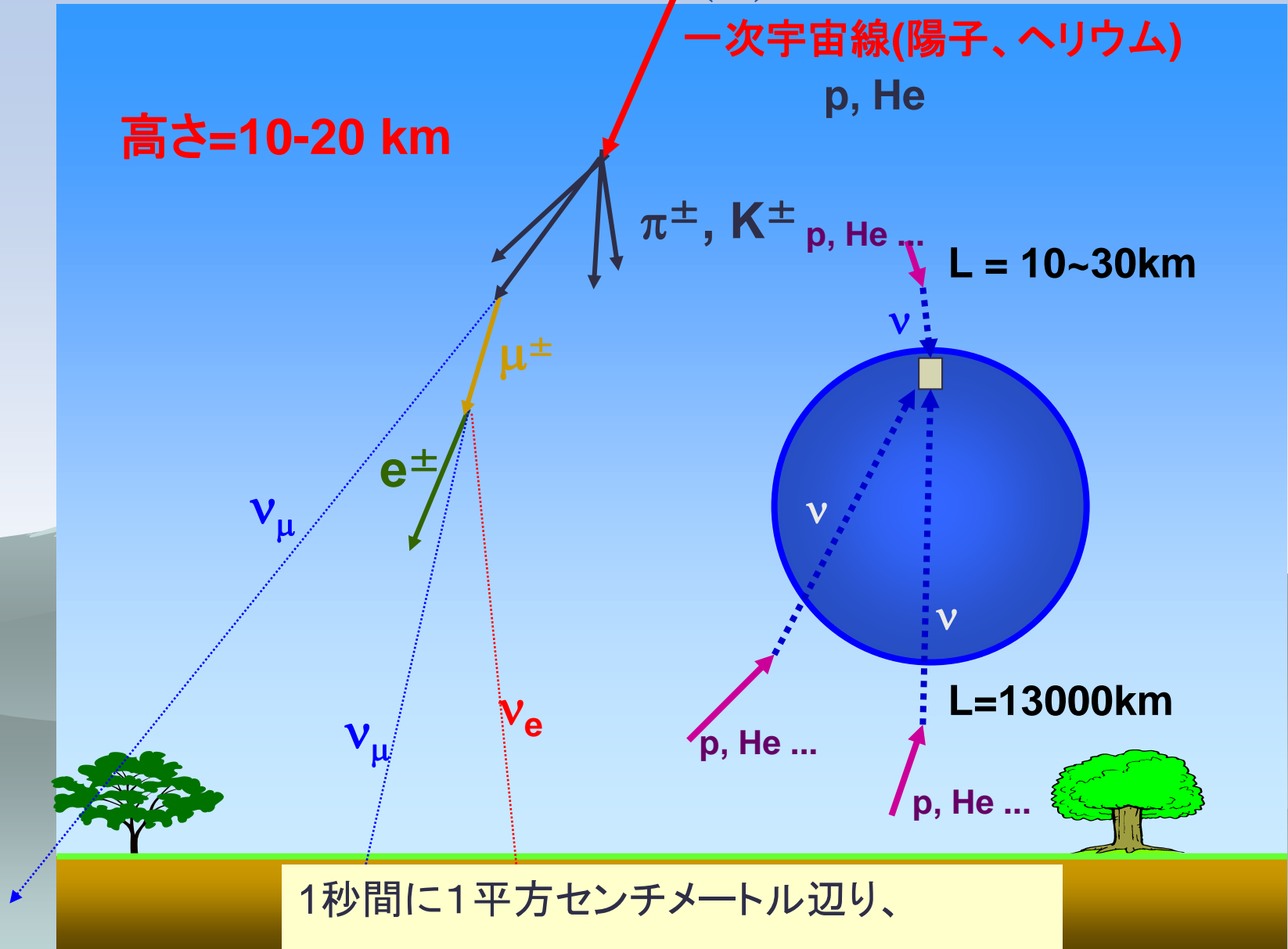


- ◆ (すくなくとも一種類の)ニュートリノは重さが0でない
- ◆ 種類の間で混ざり合いが起こる

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

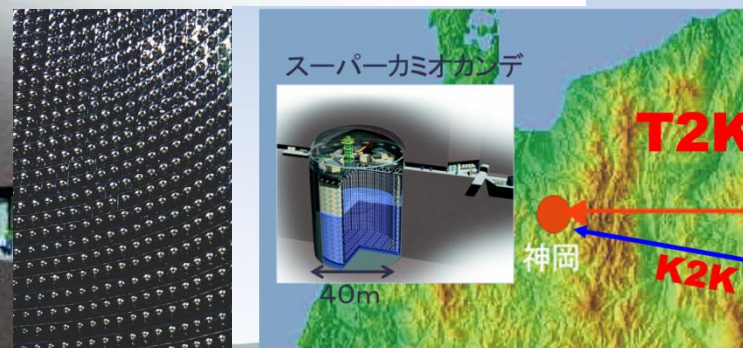
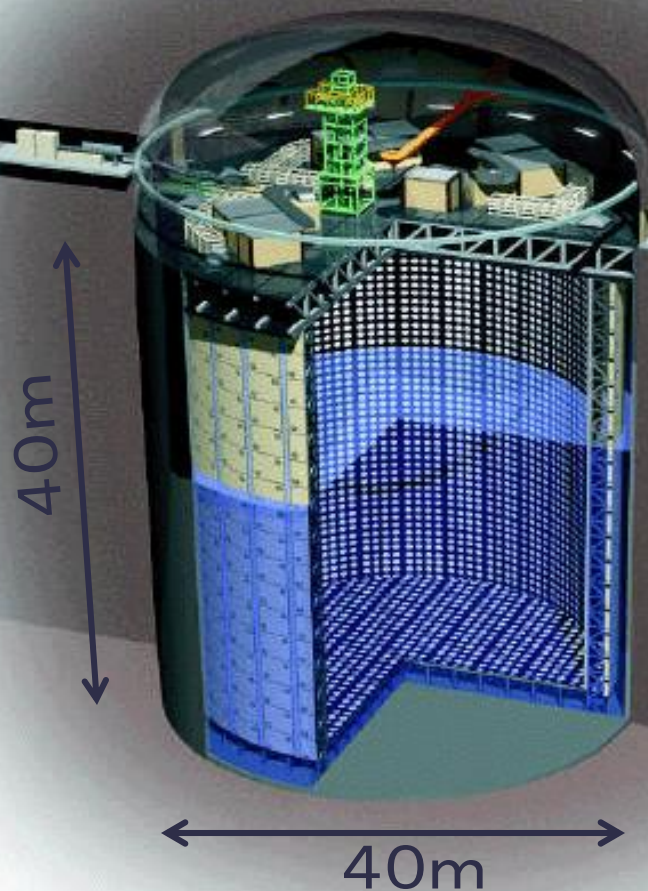


1秒間に1平方センチメートル辺り、
1個のニュートリノが空から降ってきてい

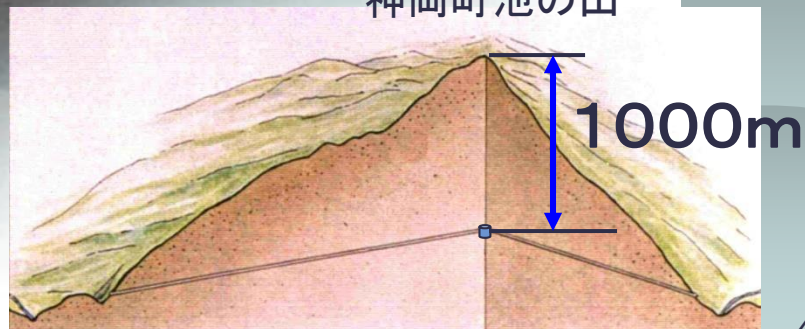
ニュートリノ検出器: スーパーカミオカンデ

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



スーパーカミオカンデの動作原理

光速に近い電気を帯びた粒子は透明な物体の中で光を出す

■ 超音速 → 衝撃波

■ 超光速 → チェレンコフ光



e

(水中の光速 = $c/n = c/1.33$)

微弱な青い光

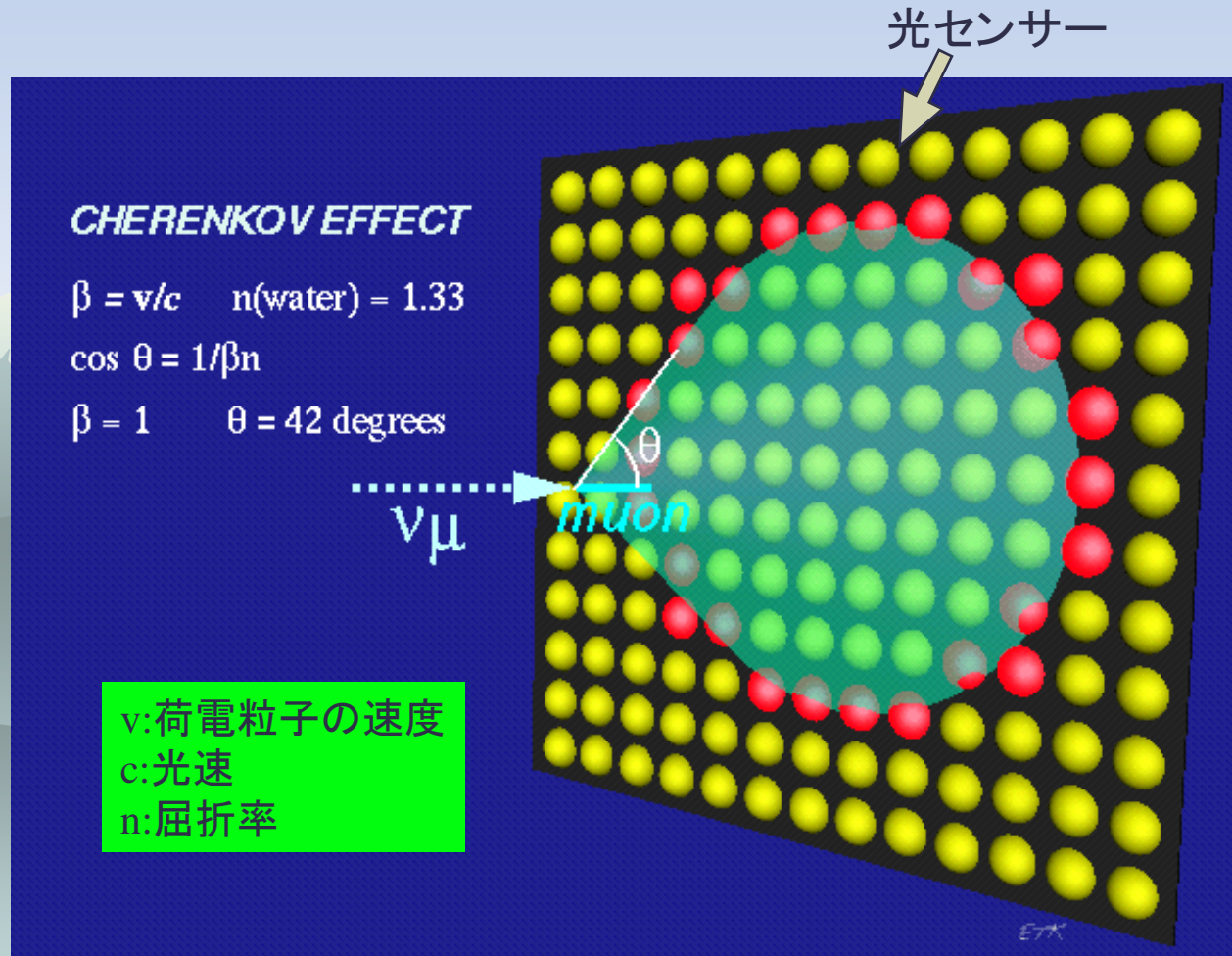
1センチあたり光子約300個

ニュートリノ(反応)のつかまえ方

ニュートリノが水の原子核とぶつかって電気を持った粒子を蹴飛ばす。

水の中の光の早さは普通の光の早さより遅い。電気をもった粒子が水の中の光の速さより早く走ると青い光を出す = チェレンコフ光 これを検出！

円錐状に放射

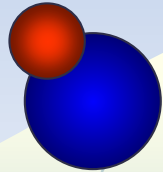


ニュートリノの種類を識別するには？

電子ニュートリノ



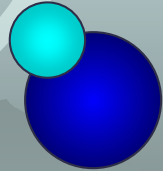
電子



μ ニュートリノ



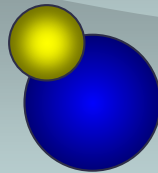
μ 粒子



τ ニュートリノ



τ 粒子

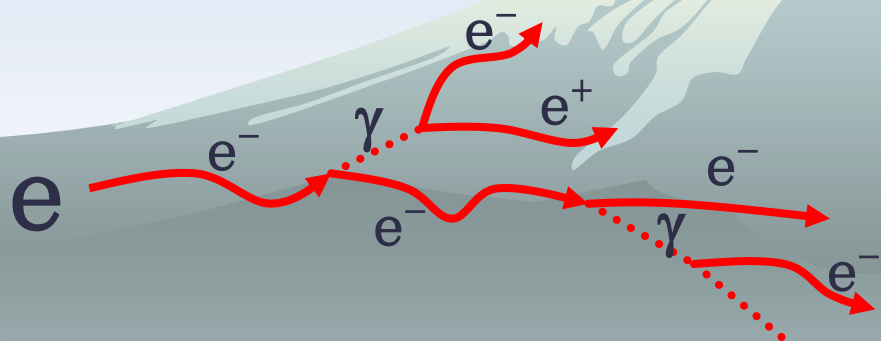


生成された
粒子の種類で
識別

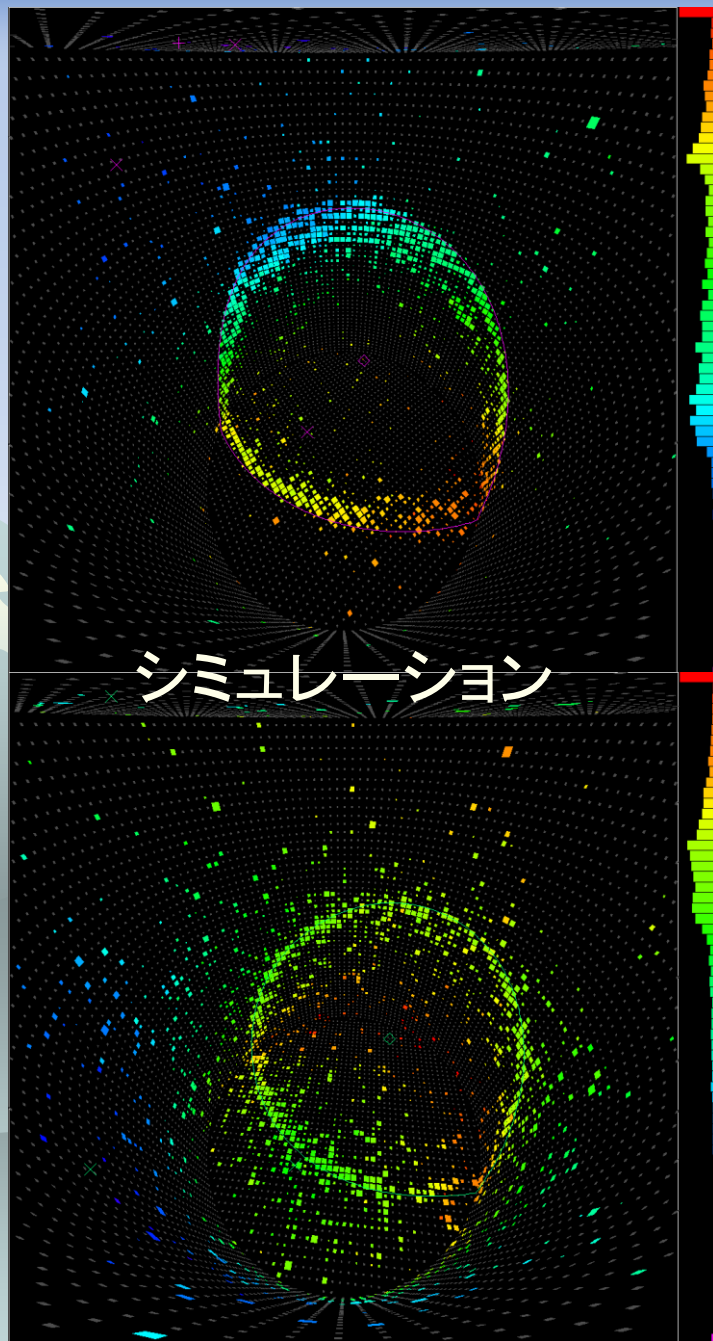
μ と e の識別



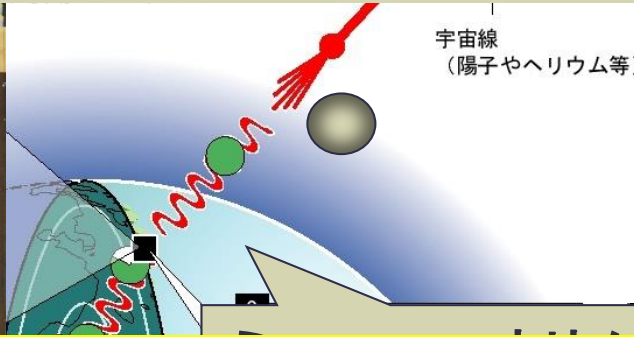
素直に走るためパターンが
きれいなリング



電磁シャワーを起こすた
めパターンが汚い



ニュートリノ振動の発見(1998)



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

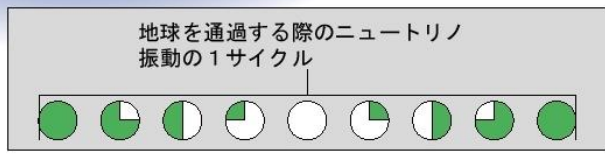
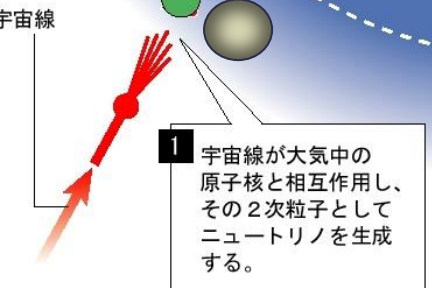
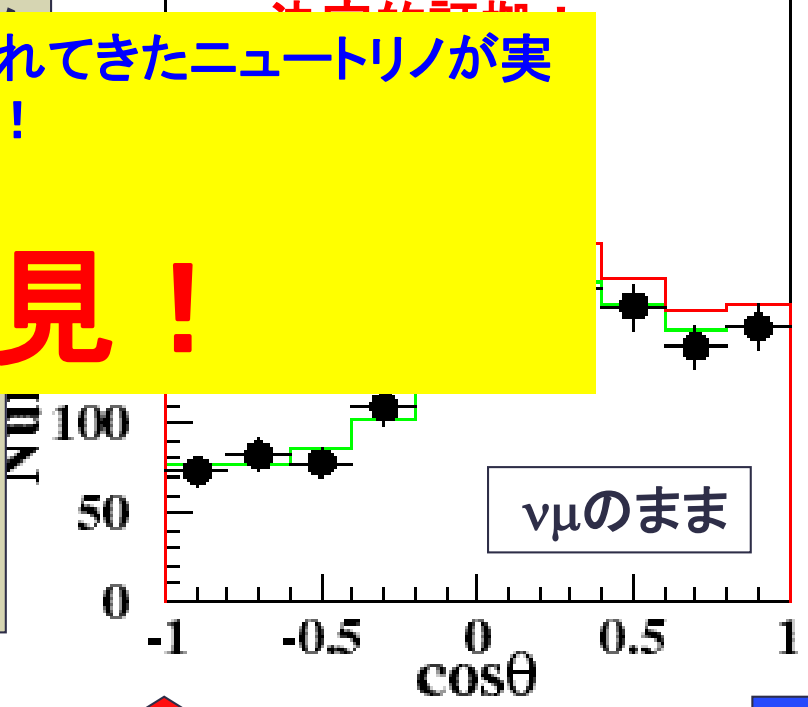
永い間、重さはないと思われてきたニュートリノが実はそうではないことが判明！

大発見！

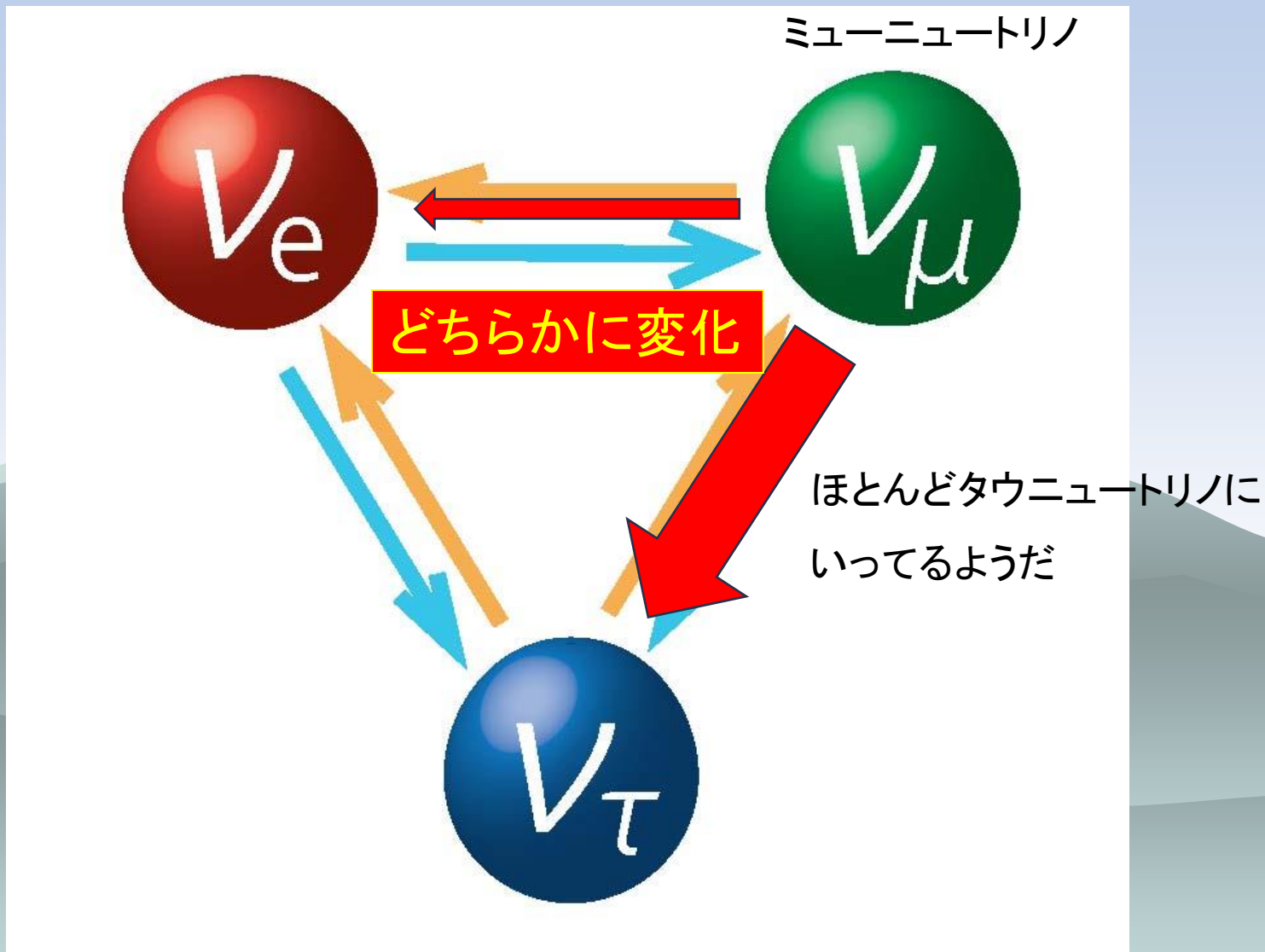
2 ニュートリノが地球の中を通過する際、振動する。

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

350 Multi-GeV μ -like + PC



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

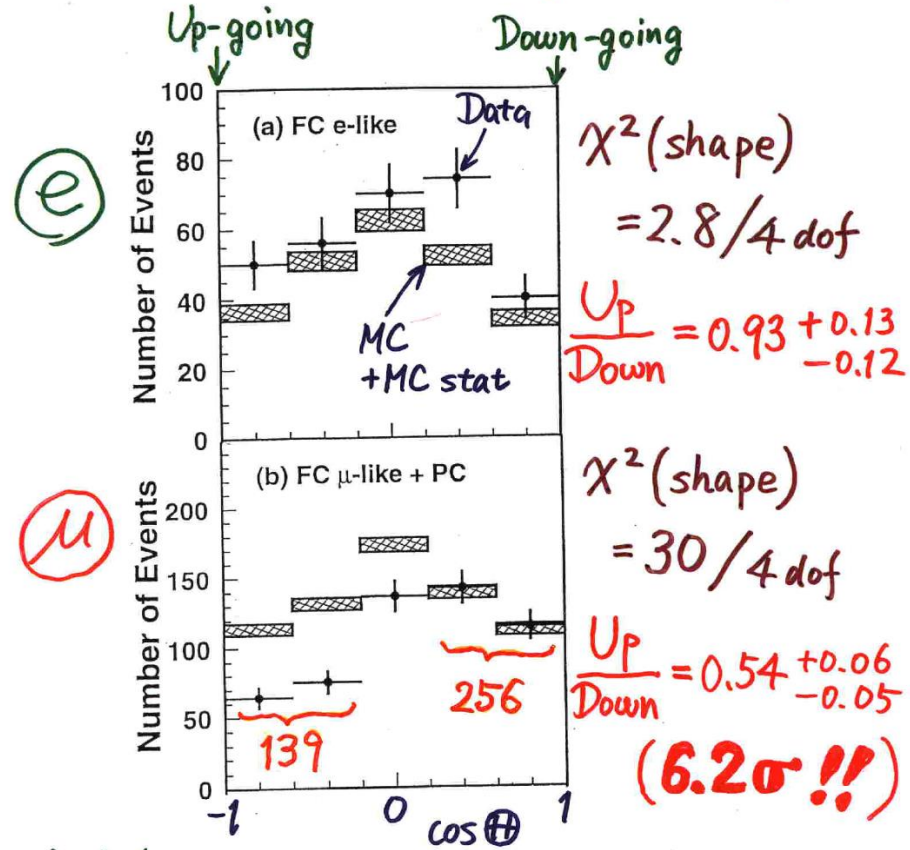
Total  hits since November, 1996

- [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)



ν 98, @ Takayama
June 1998

Atmospheric neutrino results
from Super-Kamiokande & Kamiokande

- Evidence for ν_μ oscillations -

T. Kajita

Kamioka observatory, Univ. of Tokyo

for the { Kamiokande
Super-Kamiokande } Collaborations

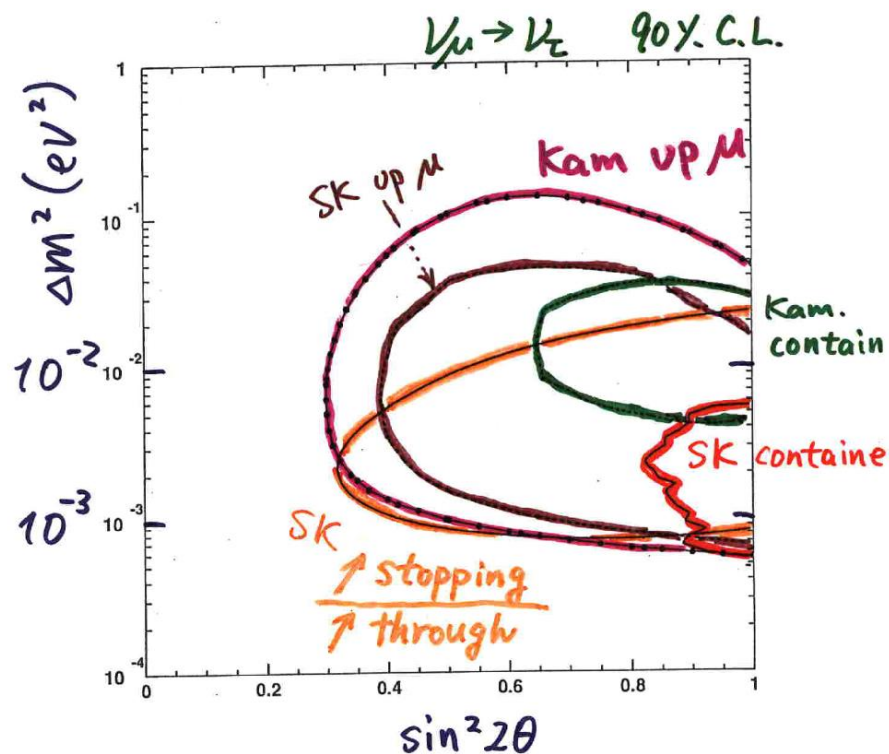
* Up/Down syst. error for μ -like

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

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

Summary

Evidence for ν_μ 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,¹ T. Hayakawa,¹ E. Ichihara,¹ K. Inoue,¹ K. Ishihara,¹ H. Ishino,¹ Y. Itow,¹ T. Kajita,¹ J. Kameda,¹
S. Kasuga,¹ K. Kobayashi,¹ Y. Kobayashi,¹ Y. Koshio,¹ M. Miura,¹ M. Nakahata,¹ S. Nakayama,¹ A. Okada,¹
K. Okumura,¹ N. Sakurai,¹ M. Shiozawa,¹ Y. Suzuki,¹ Y. Takeuchi,¹ Y. Totsuka,¹ S. Yamada,¹ M. Earl,² A. Habig,²
E. Kearns,² M. D. Messier,² K. Scholberg,² J. L. Stone,² L. R. Sulak,² C. W. Walter,² M. Goldhaber,³ T. Barszczak,⁴
D. Casper,⁴ W. Gajewski,⁴ P. G. Halverson,^{4,*} J. Hsu,⁴ W. R. Kropp,⁴ L. R. Price,⁴ F. Reines,⁴ M. Smy,⁴ H. W. Sobel,⁴
M. R. Vagins,⁴ K. S. Ganezer,⁵ W. E. Keig,⁵ R. W. Ellsworth,⁶ S. Tasaka,⁷ J. W. Flanagan,^{8,†} A. Kibayashi,⁸
J. G. Learned,⁸ S. Matsuno,⁸ V. J. Stenger,⁸ D. Takemori,⁸ T. Ishii,⁹ J. Kanzaki,⁹ T. Kobayashi,⁹ S. Mine,⁹
K. Nakamura,⁹ K. Nishikawa,⁹ Y. Oyama,⁹ A. Sakai,⁹ M. Sakuda,⁹ O. Sasaki,⁹ S. Echigo,¹⁰ M. Kohama,¹⁰
A. T. Suzuki,¹⁰ T. J. Haines,^{11,4} E. Blaufuss,¹² B. K. Kim,¹² R. Sanford,¹² R. Svoboda,¹² M. L. Chen,¹³ Z. Conner,^{13,‡}
J. A. Goodman,¹³ G. W. Sullivan,¹³ J. Hill,¹⁴ C. K. Jung,¹⁴ K. Martens,¹⁴ C. Mauger,¹⁴ C. McGrew,¹⁴ E. Sharkey,¹⁴
B. Viren,¹⁴ C. Yanagisawa,¹⁴ W. Doki,¹⁵ K. Miyano,¹⁵ H. Okazawa,¹⁵ C. Saji,¹⁵ M. Takahata,¹⁵ Y. Nagashima,¹⁶
M. Takita,¹⁶ T. Yamaguchi,¹⁶ M. Yoshida,¹⁶ S. B. Kim,¹⁷ M. Etoh,¹⁸ K. Fujita,¹⁸ A. Hasegawa,¹⁸ T. Hasegawa,¹⁸
S. Hatakeyama,¹⁸ T. Iwamoto,¹⁸ M. Koga,¹⁸ T. Maruyama,¹⁸ H. Ogawa,¹⁸ J. Shirai,¹⁸ A. Suzuki,¹⁸ F. Tsushima,¹⁸
M. Koshihara,¹⁹ M. Nemoto,²⁰ K. Nishijima,²⁰ T. Futagami,²¹ Y. Hayato,^{21,§} Y. Kanaya,²¹ K. Kaneyuki,²¹
Y. Watanabe,²¹ D. Kielczewska,^{22,4} R. A. Doyle,²³ J. S. George,²³ A. L. Stachyra,²³ L. L. Wai,^{23,||}
R. J. Wilkes,²³ and K. K. Young²³
(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

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

野茂メッツ入り

2対2ト

ワシントン・メッツに移籍するエゴが四日決まった。メッツ球団は四日、電

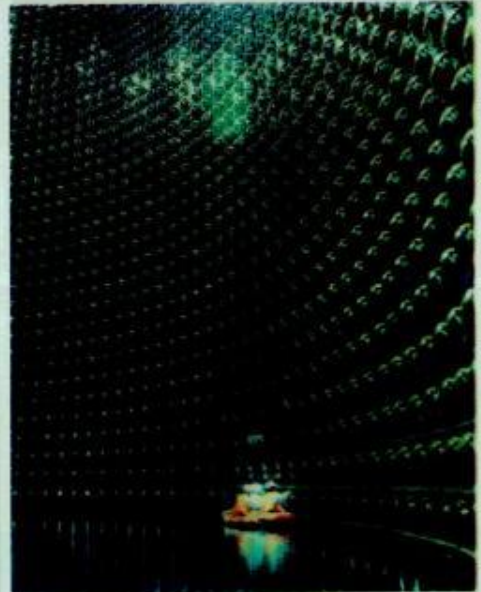
・ナショナルリーグ、ロサンゼルス・ドジャースの野茂英雄投手(29)が同リーグの投手向上二対二のトレードを発表した。

DF マリノス

夢の舞台へ主将

「ドーハの悲劇」も含めて、杯への現実感はある。しかし、思う。W杯予選には三度挑戦。「最

初のころ(八九年)はアジア杯に行かなくてはならない」とも、でも勝てるレベルになく、W という優勝感さえあった」と



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)

宇宙空間に充満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。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、最終的な発表をまとめた。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。実験と理論の両面から、ニュートリノの振動を利用した地中ニュートリノ観測を続けてきた。

観測したのは、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーニュートリノ。スーパーカミオカンデが岐阜県・神岡山の地下約千メートル、高さ四百一十四メートル、直径三千九百三十メートルの円筒をくり返す、中に汚染物質の極めて少ない五千トンの超純な水を満たした、東大宇宙線研究所のニュートリノ観測装置。水中に飛び込むことでニュートリノが相互作用して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。感測器約百四十個、

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

日本のリーダー。残念。ご冥福を。

産経新聞

ニュートリノの質量発見 物理学の戸塚洋二氏が死去

素粒子ニュートリノに質量がある証拠を実験でとらえ、ノーベル物理学賞受賞が期待されていた東京大学特別荣誉教授の戸塚洋二氏が死去した。

2008年07月10日 15時12分 更新



戸塚洋二氏

素粒子ニュートリノに質量がある証拠を実験でとらえ、ノーベル物理学賞受賞が期待されていた東京大学特別荣誉教授で日本学術振興会学術システム研究センター所長の戸塚洋二（とつか・ようじ）氏が10日、多臓器不全のため死去した。66歳。葬儀・告別式は12日午後0時半から東京都港区南青山2の33の20、東京都青山葬儀所で行われる。喪主は妻、裕子（ひろこ）さん。

東大教授時代、岐阜県飛騨市神岡の鉱山の地下約1000メートルに建設したニュートリノ観測装置「カミオカンデ」で、小柴昌俊・東大特別荣誉教授とともに実験に取り組んだ。

8年に始まった後継機のスーパーカミオカンデによる実験では指揮を執り、宇宙から飛来する宇宙線が地球の大気にぶつかって発生する大気ニュートリノの観測から、ニュートリノが飛行中に別のニュートリノに“変身”するニュートリノ振動という現象を発見。ニュートリノに質量があることを突き止めた。

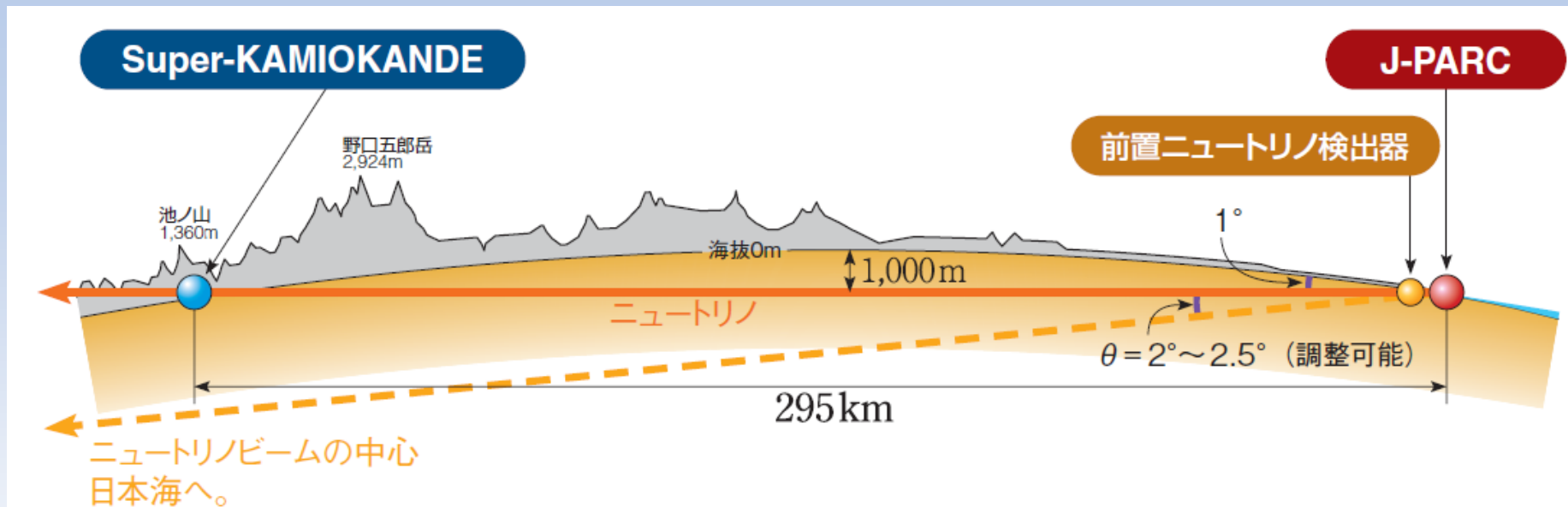
ニュートリノの質量をゼロと仮定した素粒子物理学の「標準理論」に見直しを迫る成果で、ノーベル物理学賞候補に名前が挙がっていた。

昭和40年に東大理学部を卒業し、47年に同大学院博士課程を修了。同大理学部教授、宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究所長、高エネルギー加速器研究機構長などを経て、平成18年に日本学術振興会学術システム研究センター所長。17年に東大から特別荣誉教授の称号を授与された。仁科記念賞（昭和62年）、紫綬褒章（平成13年）、文化功労者（14年）、文化勲章（16年）、米ベンジャミン・フランクリンメダル（19年）などを受けた。



日経サイエンス2008年4～10月号ニュートリノ特集参照(10月は追悼)
文芸春秋8, 9月号など

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

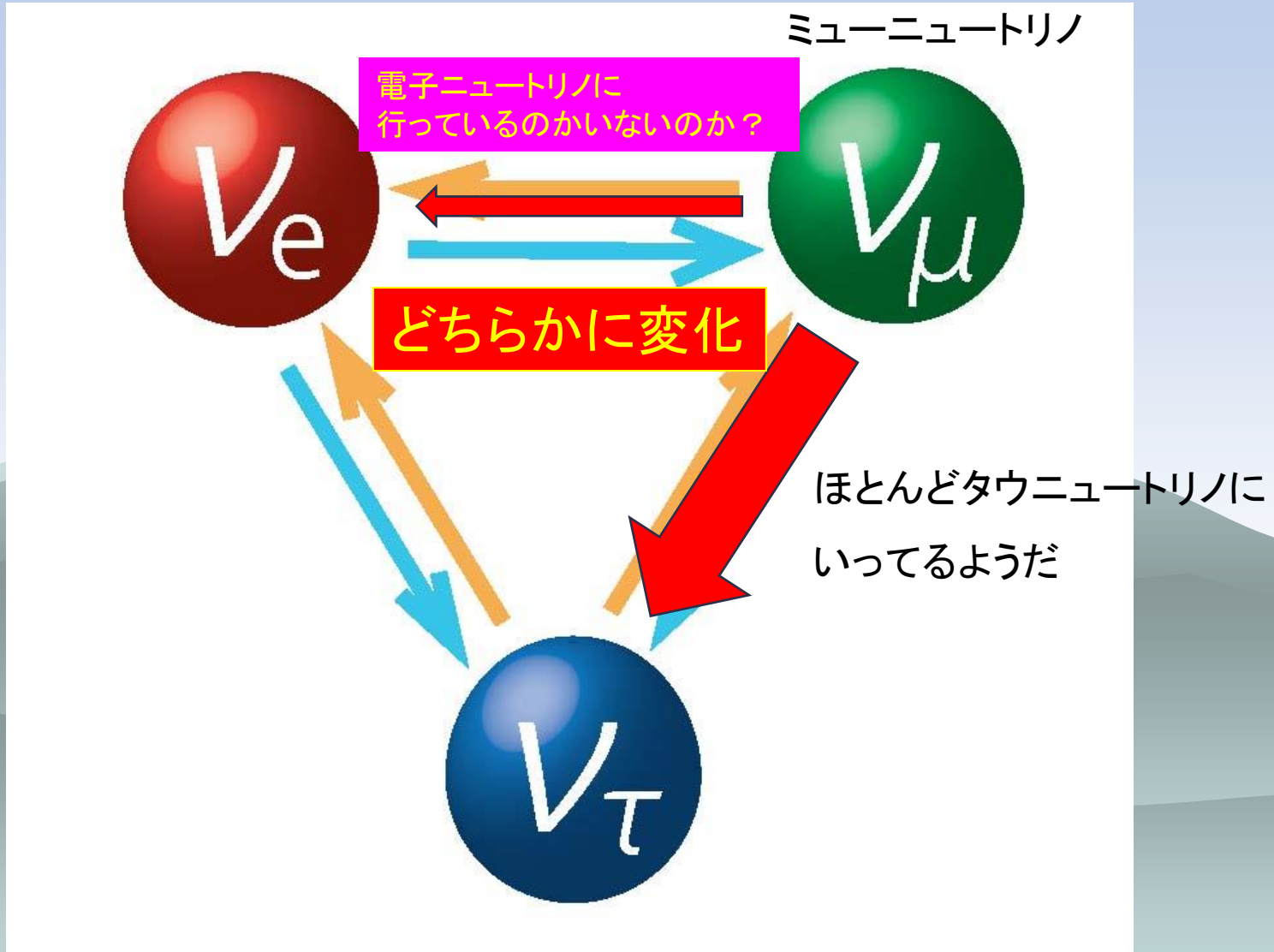


ミューニュートリノ

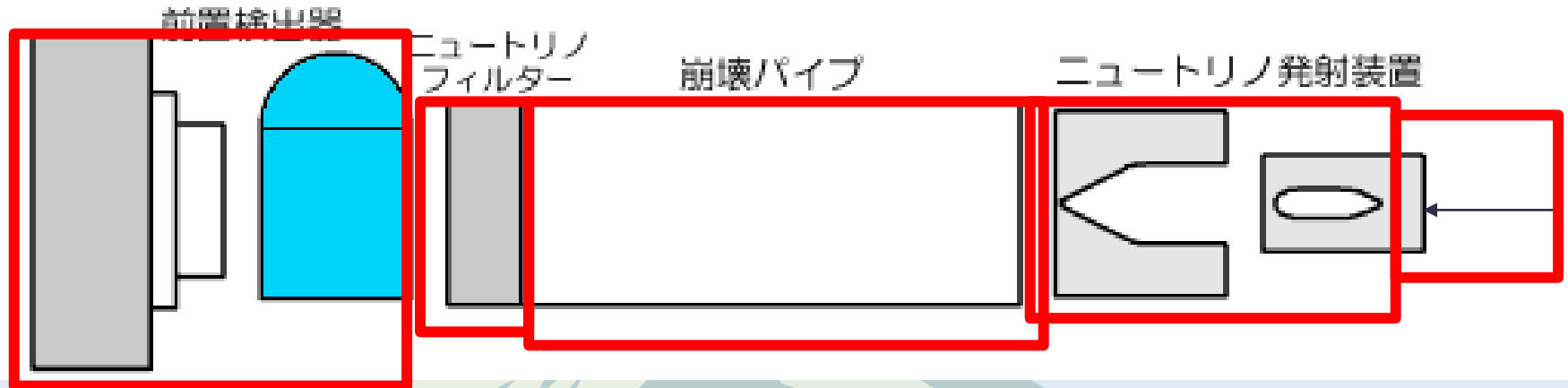
**未発見
最重要な目的**

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 π 中間子を生成。(3.6秒に1回300兆個の陽子)
- ◆ 強力な磁石で π 中間子を磁石で神岡方向に曲げる
- ◆ π 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。

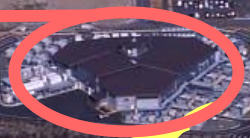
大強度陽子加速器施設: J-PARC

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

30GeV MR
周長 1.6km

- CY2007 Beams
- JFY2008 Beams
- JFY2009 Beams



Bird's eye photo in January of 2008

ニュートリノ発射装置

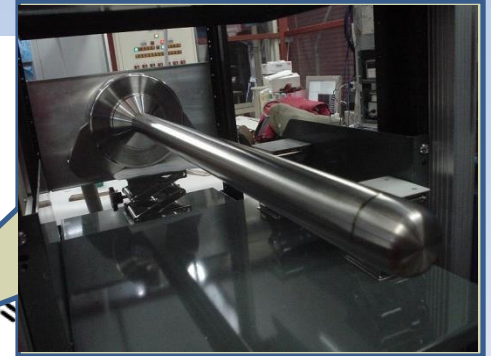
ニュートリノモニター棟



電磁ホーン



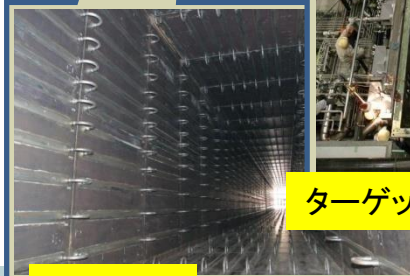
標的(グラフィイト)



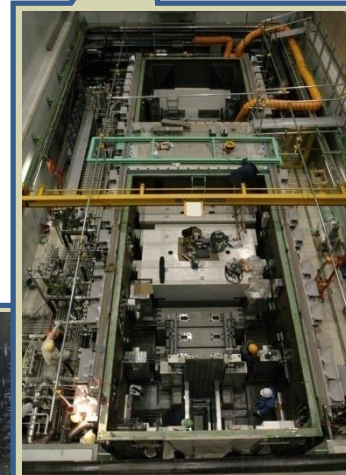
CERNから寄贈されたUA1磁石(1000ton).
ニュートリノモニター棟内に設置済み



ビームダンプ



崩壊領域



ターゲットステーション完成

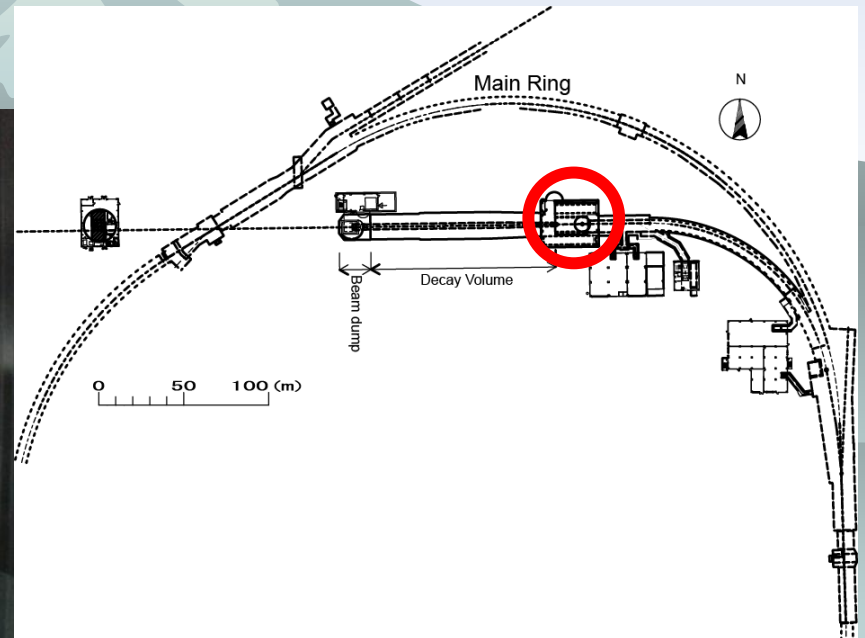
一次陽子ビームライン(超伝導)



100m

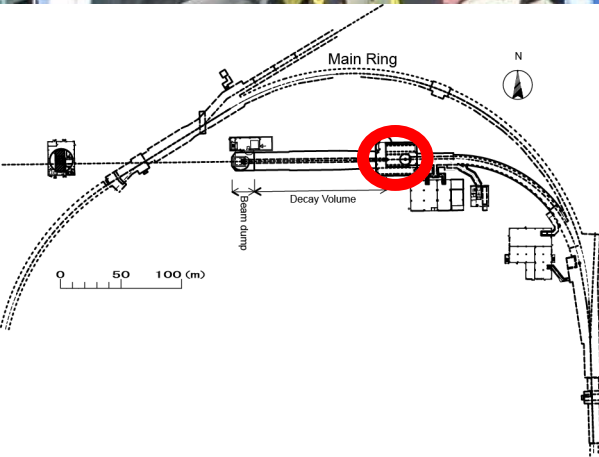
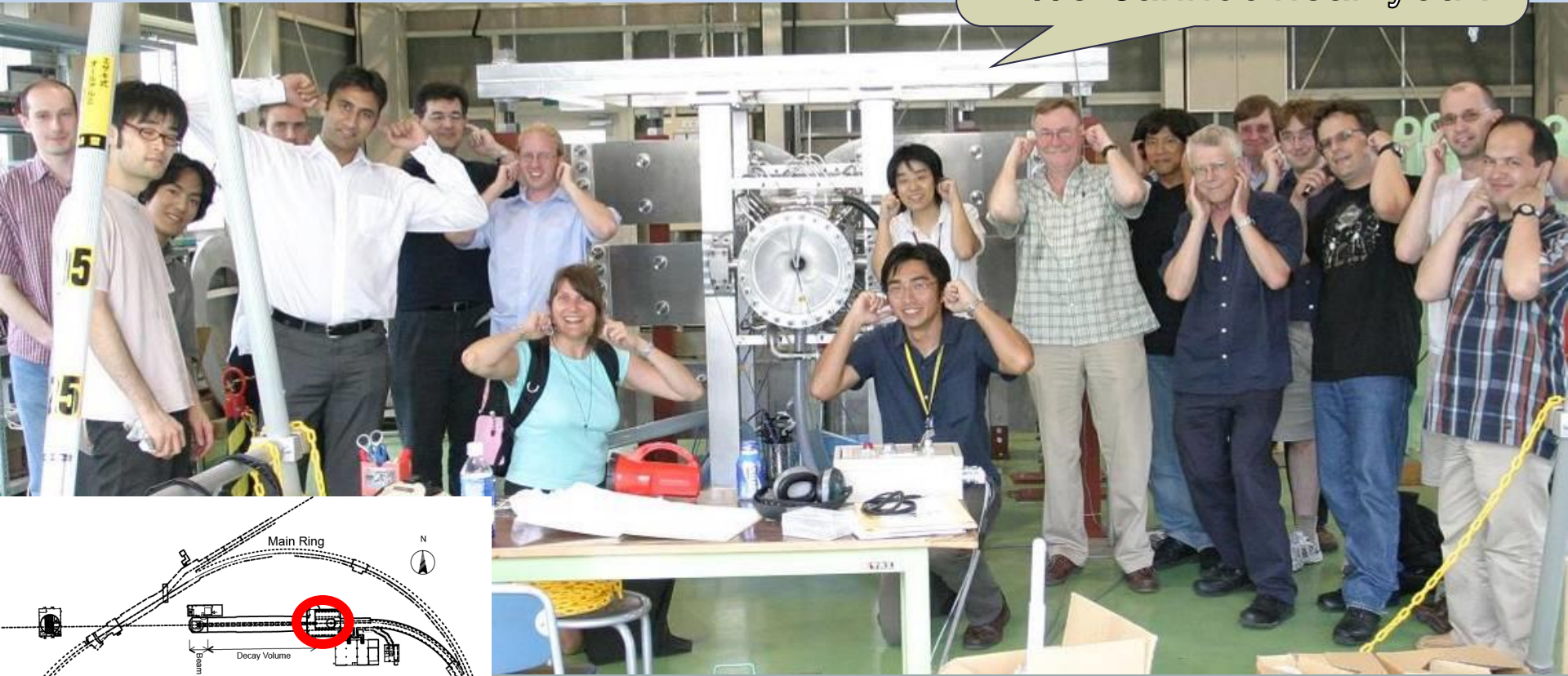
Beam dump

標的

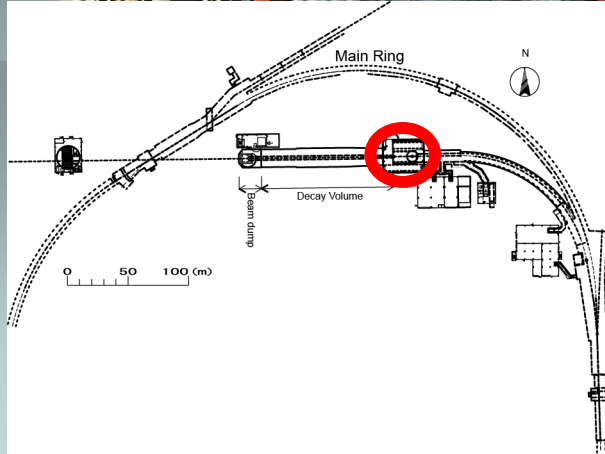


1st Horn with 320 kA

Haa ?
We cannot hear you !

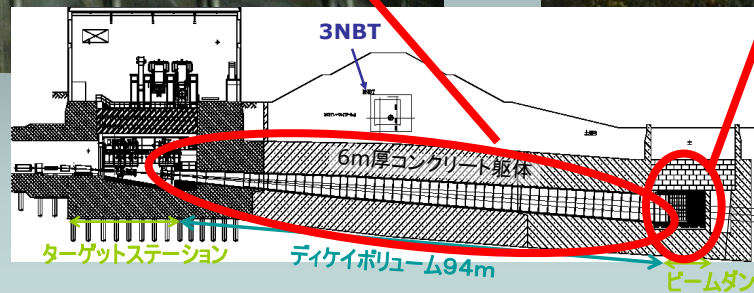
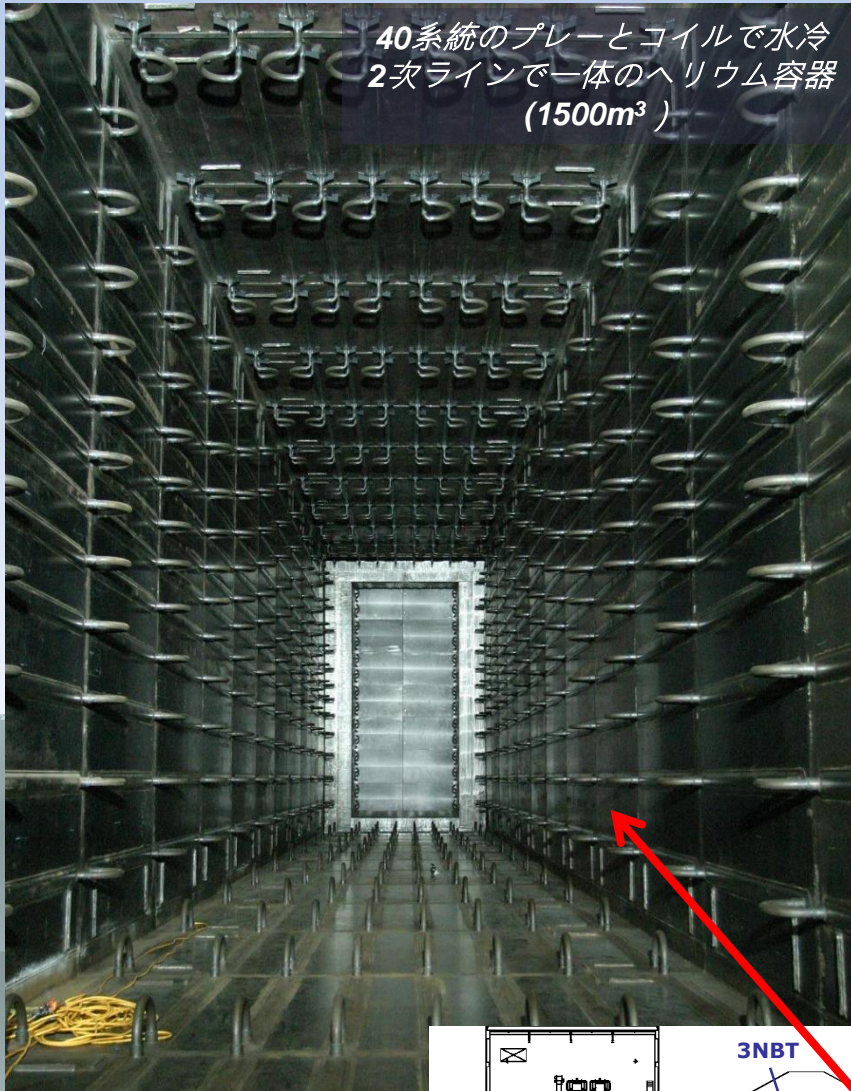


Helium Vessel Construction



ream DV

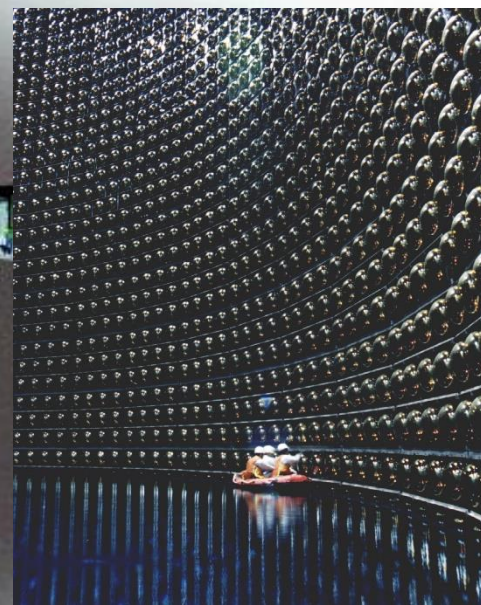
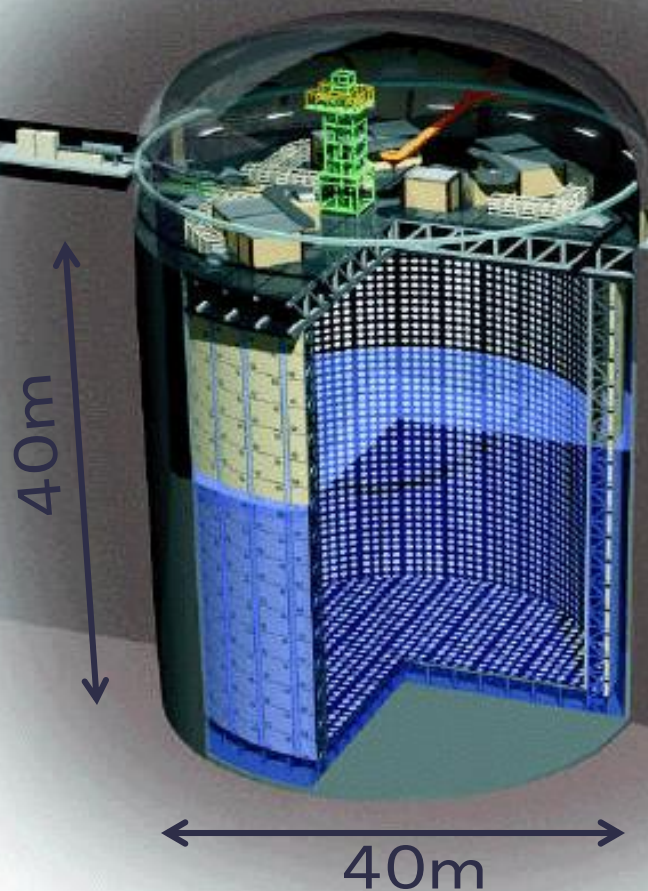
崩壊領域とビームダンプ



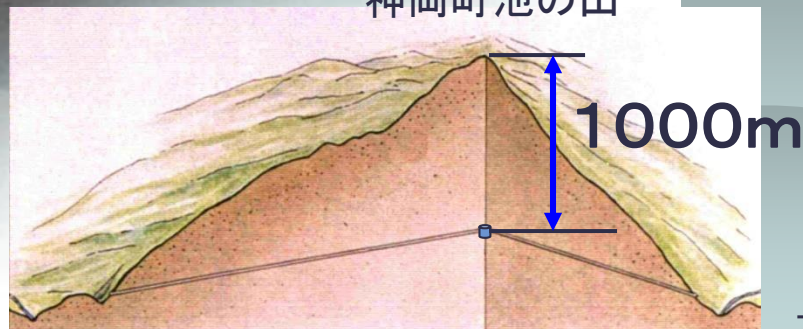
ニュートリノ検出器: スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ

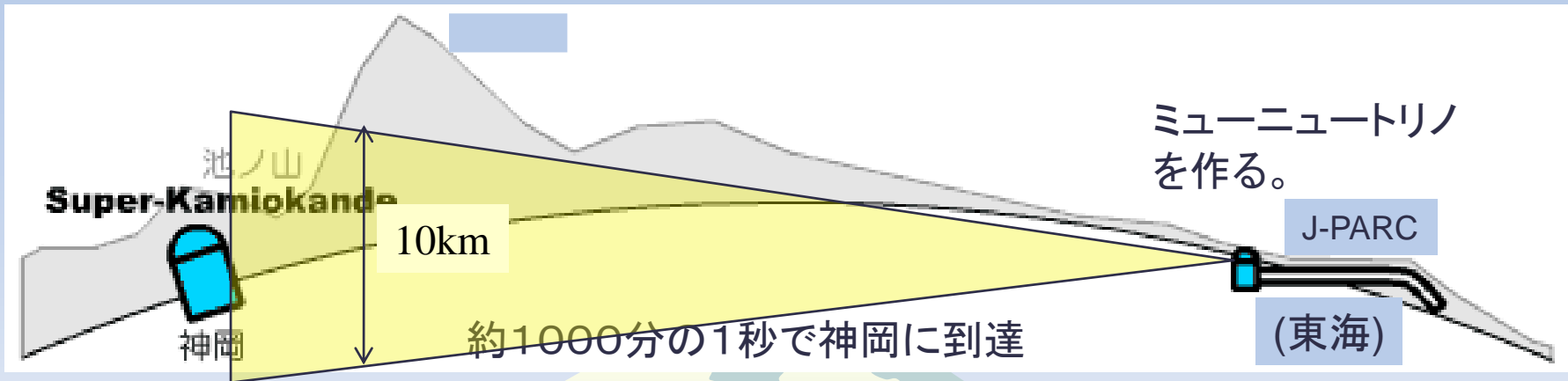
反応標的: 水**50000**トン(超純水)
水槽の内面に**11146**本の
光電子増倍管(photomultiplier tube:PMT)
外水槽のPMTで外来粒子を検出



神岡町池の山

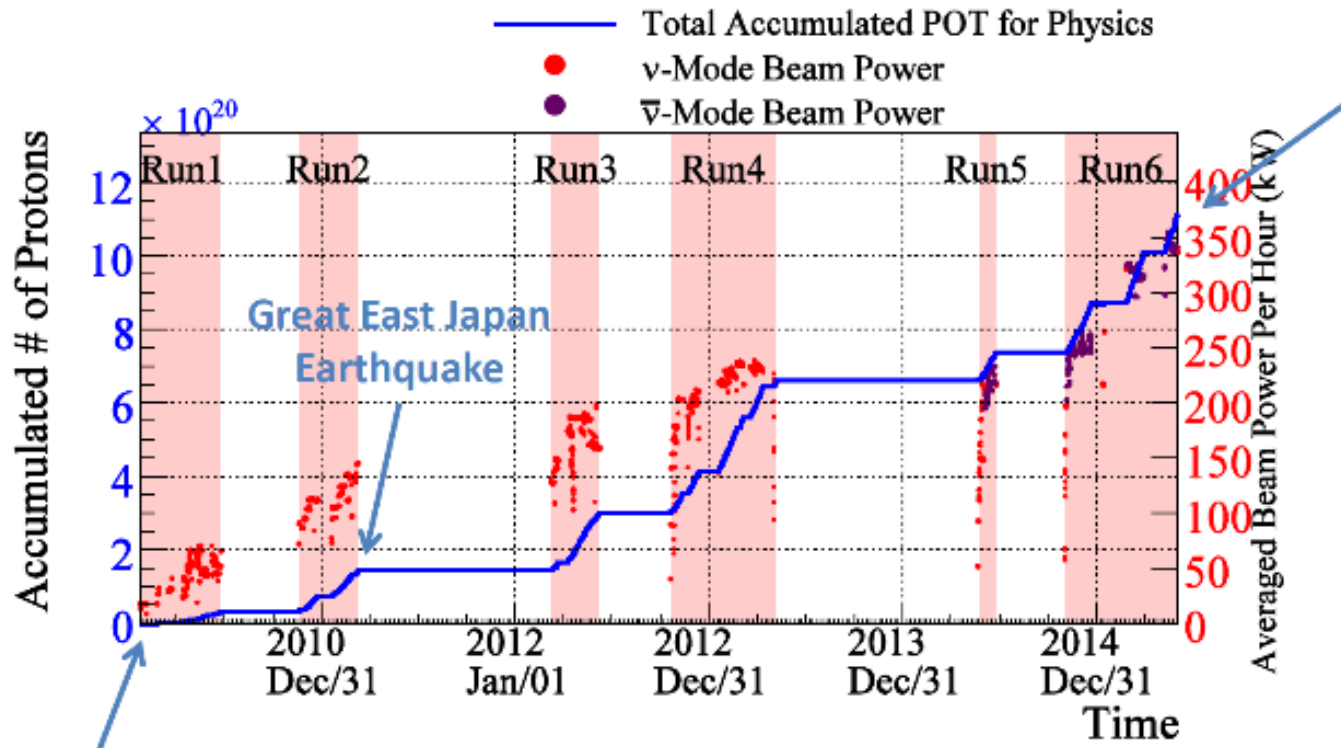


T2K実験



- ◆ 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



7.00×10^{20} POT in v-mode

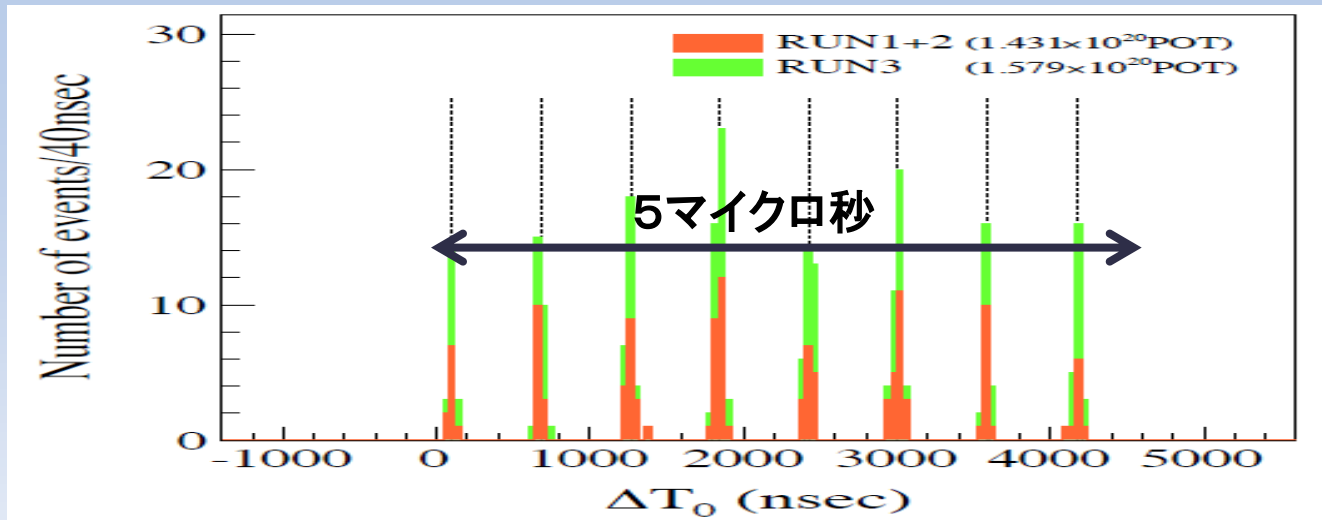
4.04×10^{20} POT in $\bar{\nu}$ -mode

Total:
 11.04×10^{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

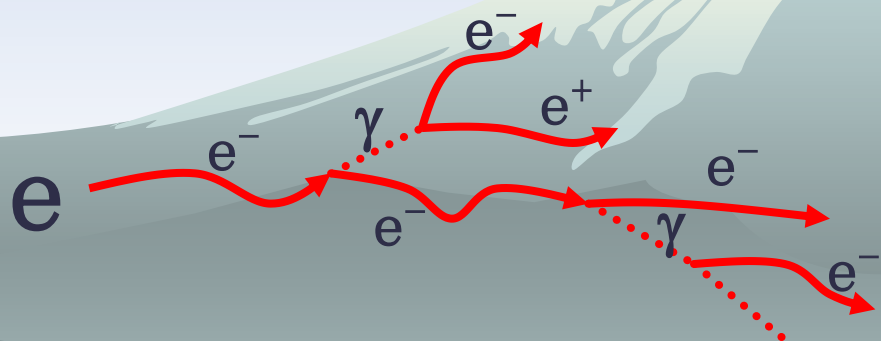


- ◆ 2013年夏までに 6.6×10^{20} 個の陽子を標的に照射
 - ❖ だいたい 10^{21} 個くらいのニュートリノを作った
 - ❖ スーパーカミオカンデを通過したニュートリノの数はだいたい **100兆個**
- ◆ 検出器内部で起こった反応 **377個** 検出
- ◆ 377個の中に電子ニュートリノの反応は見つかるか!?!?

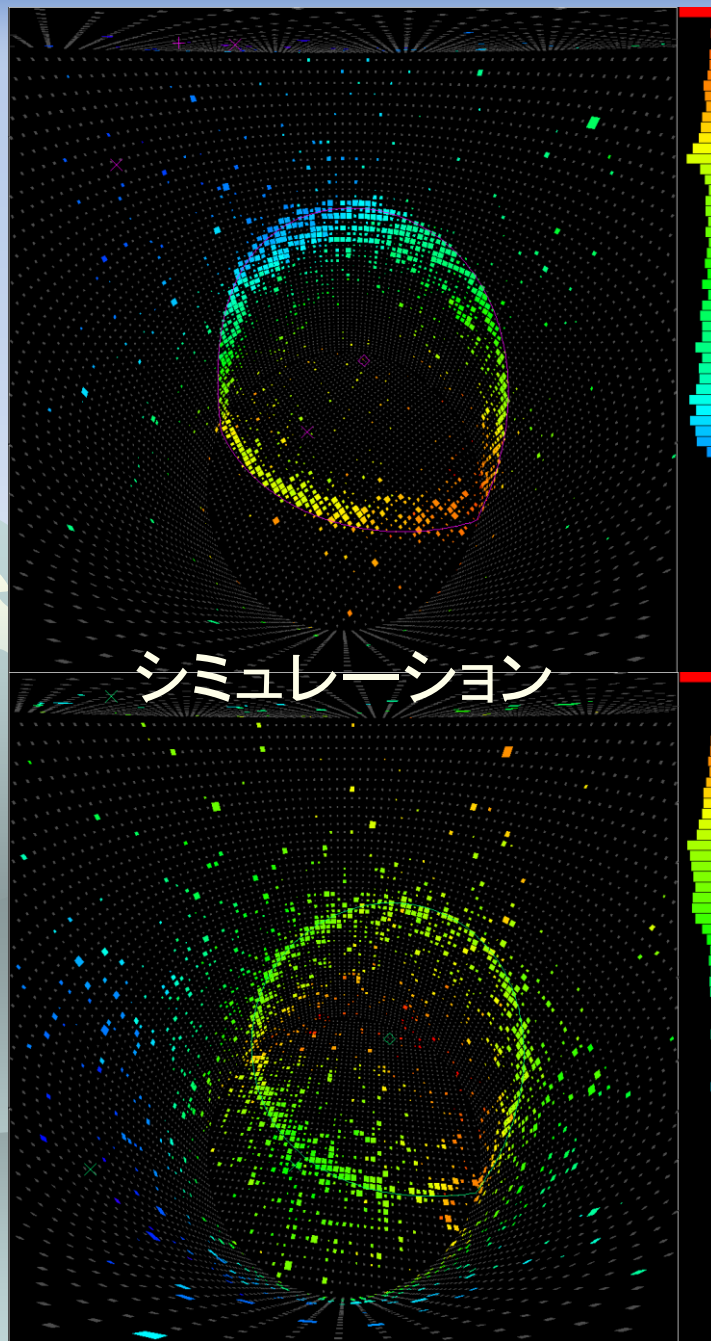
μ と e の識別



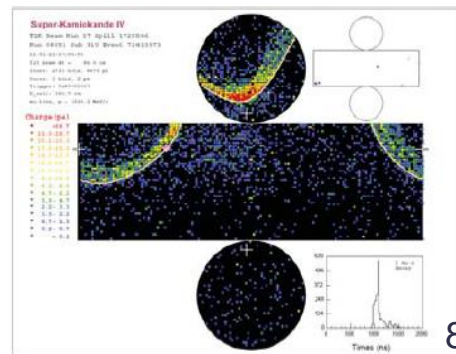
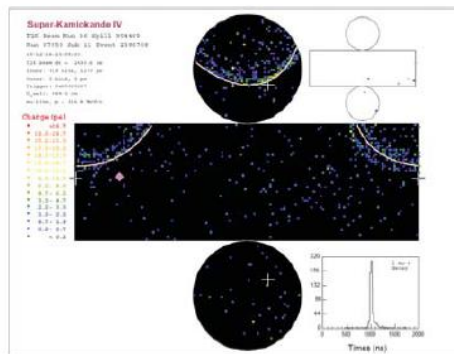
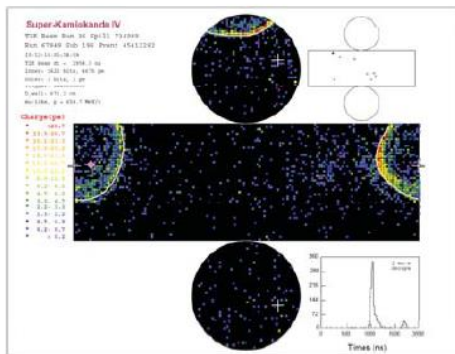
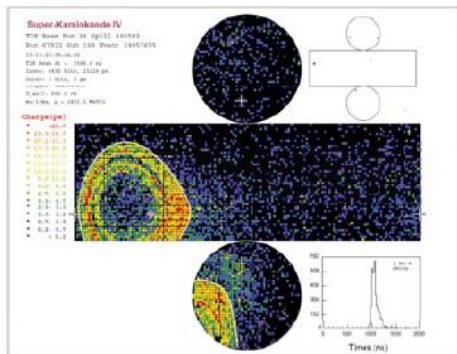
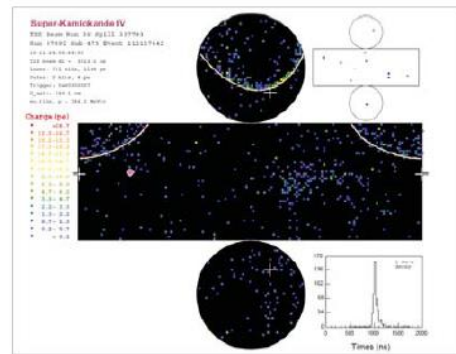
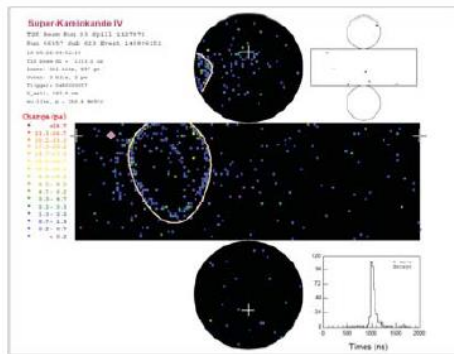
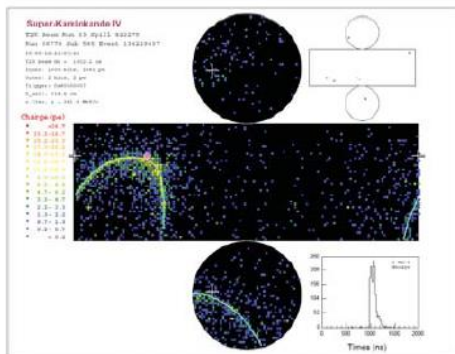
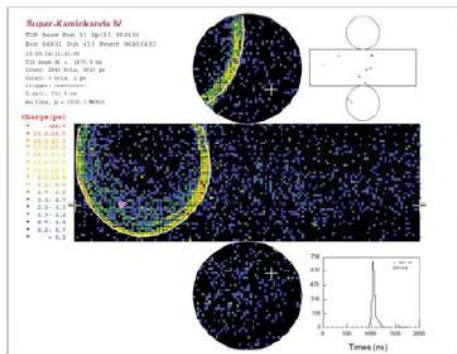
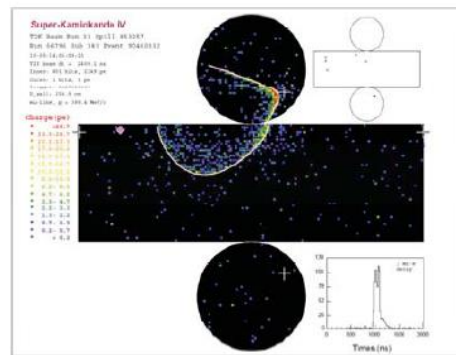
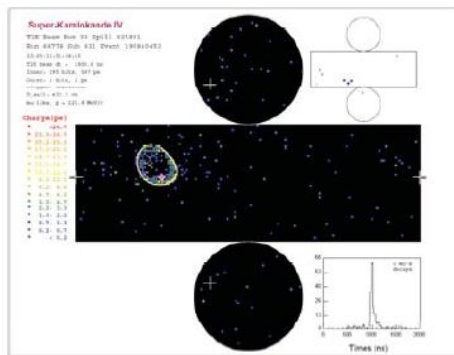
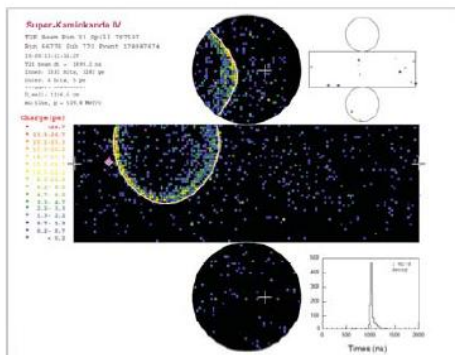
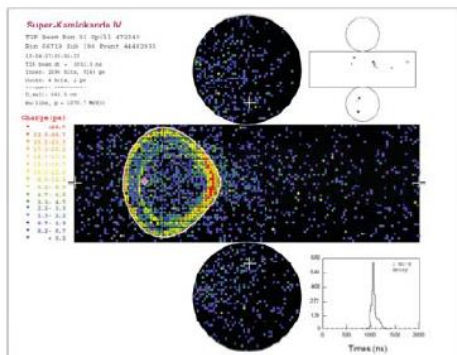
素直に走るためパターンが
きれいなリング



電磁シャワーを起こすた
めパターンが汚い

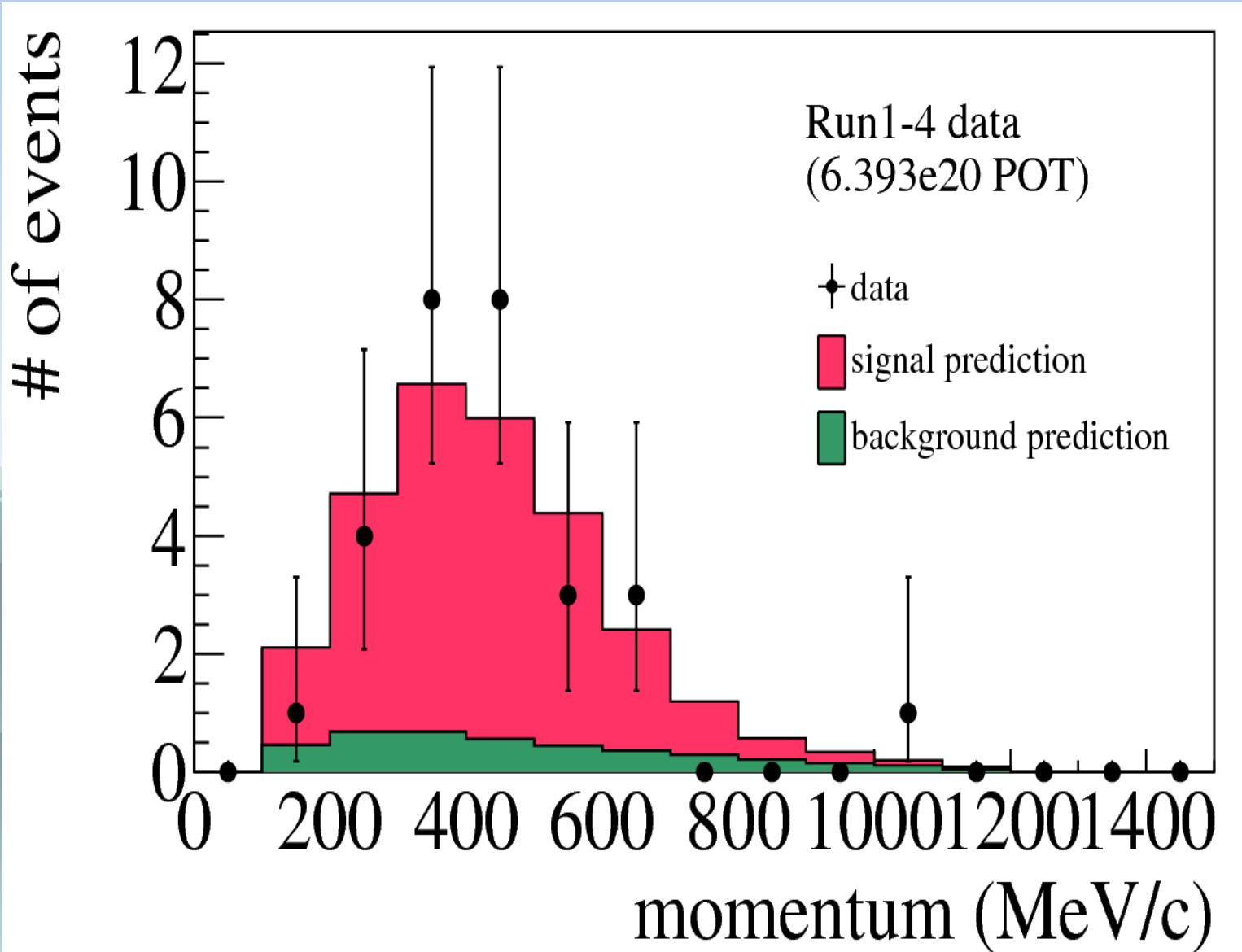


実際のデータ:どれが電子ニュートリノ?

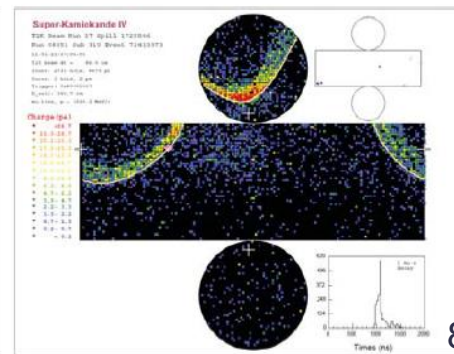
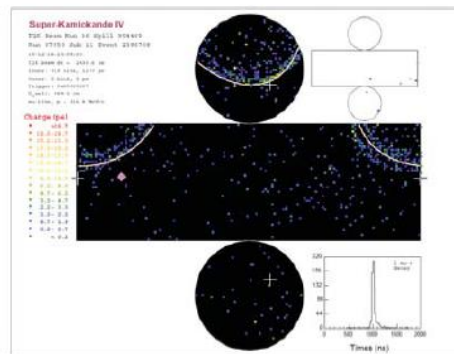
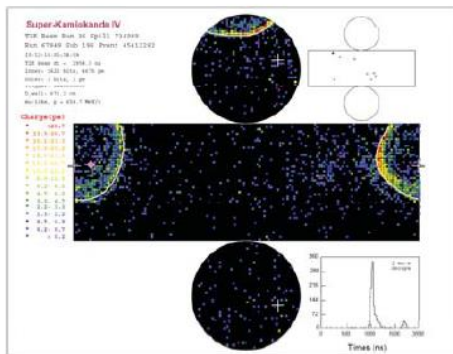
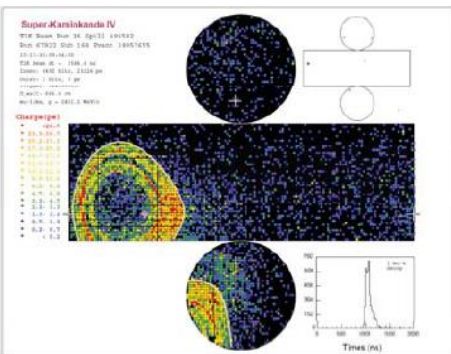
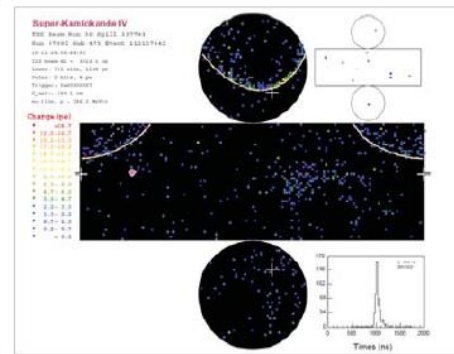
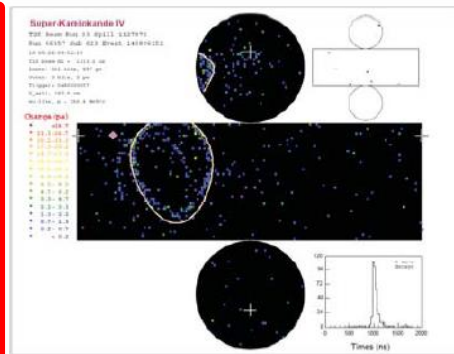
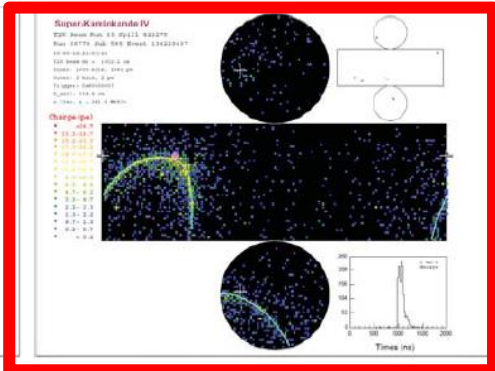
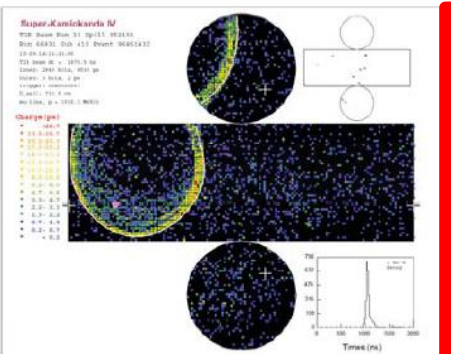
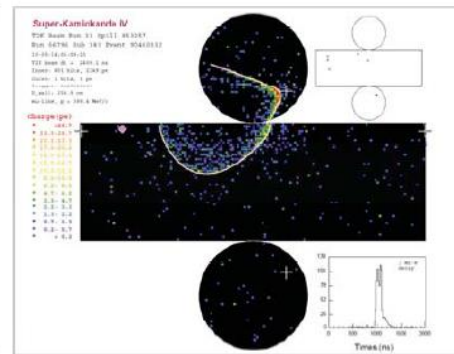
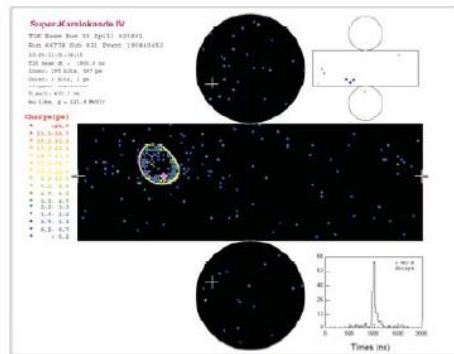
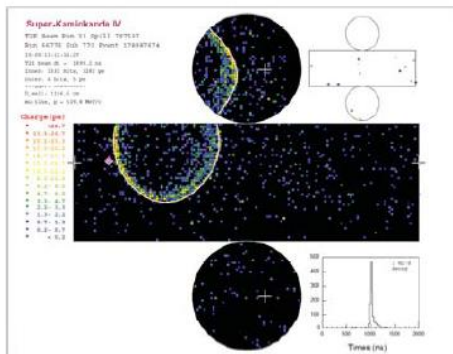
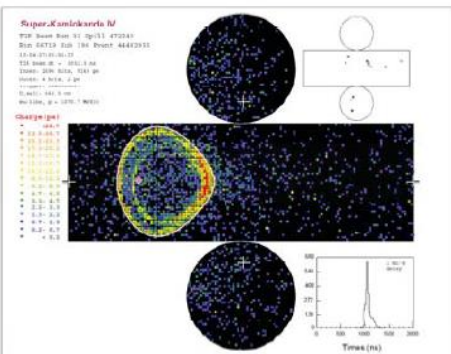


電子ニュートリノ反応候補 **28** 個検出！

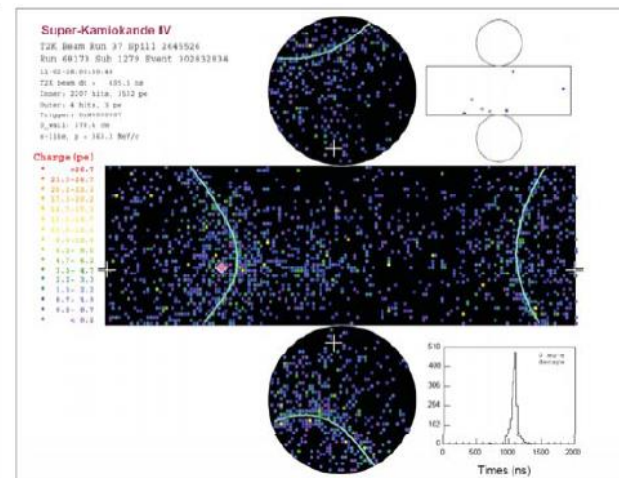
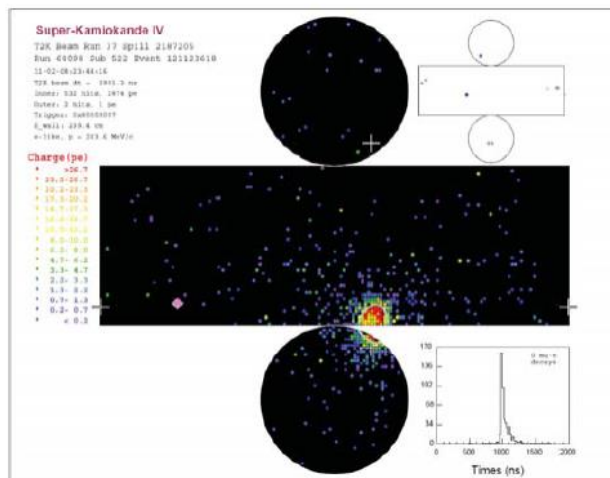
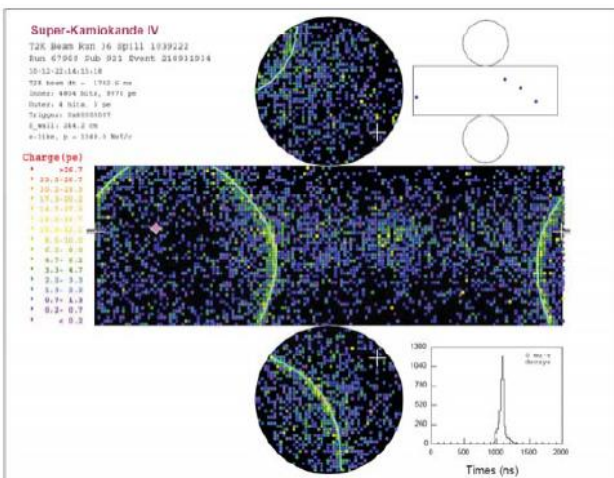
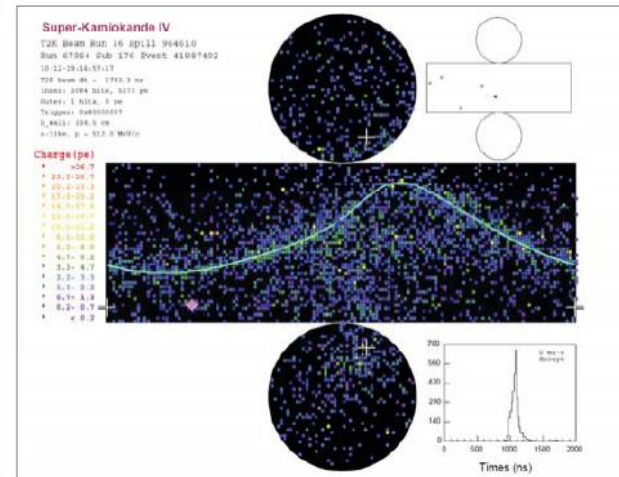
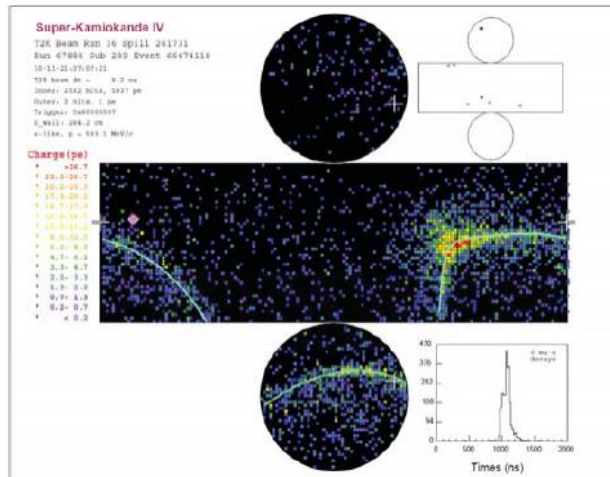
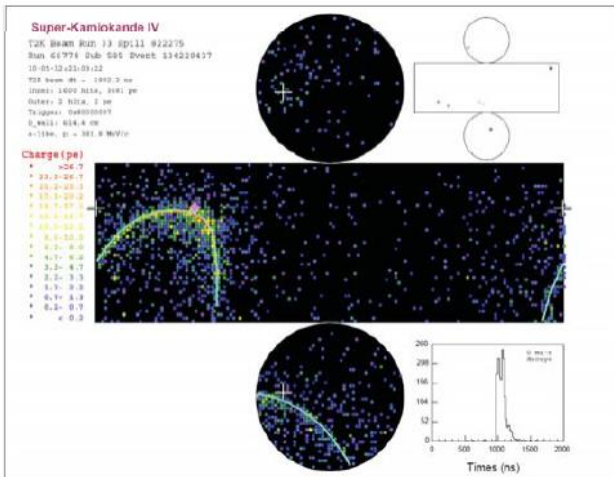
事象数



実際のデータ:どれが電子ニュートリノ?

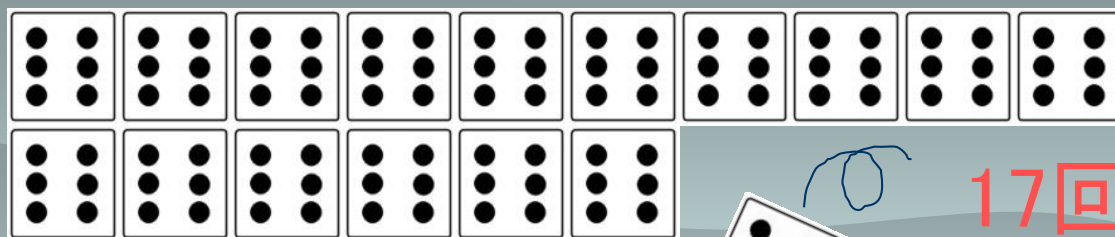


電子ニュートリノ反応の候補例



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！

結果



28個の電子ニュートリノ候補
期待される背景事象数:
個

坂澤 真人

小林 隆

池田 裕一郎

山内 正博

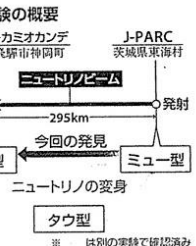
中家 剛

宇宙誕生 謎解き

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解明を目指す高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)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らを貫通して宇宙を飛び回っている謎の素粒子。「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、これまで未確認だった。実験チームは、茨城県東海村の大強



今年4月までには3個のスーパーカミオカンデで検出し、うち2個で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確率は1兆分の1以下と極めて低く、新現象と結論付けた。

宇宙誕生時には、普通の物質と電気的な性質が逆の反物質が同じ数だけ存在したが、現在は普通の物質だけが残っている。その理由は20年に1レベル質を消費した小林誠、益川敏英両氏によって、原子核を構成する素粒子クォークについては解明されたが、ニュートリノについては不明な点があり、今の新現象がその謎を解く手がかりになるとい

物質の起源知る手がかり

バンで誕生した直後、物質と反物質が同数存在していた。両者クドで、その成果は世界の物理は衝撃する光を浴びて双方が発見が注目されてきた。今回の新発見がなければ、宇宙進化の解明に徐々に減っていった。た明が大幅に速やかになるとい。反物質は物質がすべて生き残り、今後の実験でニュートリノの変身の様子を知るに詳しく調べると、宇宙誕生の謎に迫れそう。(草下健夫)

翌日のニュース

電子型ニュートリノが出現する新現象の発見について、実験は別の素粒子であるクォークにチームの小林隆・高エネルギー加速器研究機構は「宇宙の一部で同様の現象が起る可能性があるが、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5000人の宇宙は138億年前にビッグ

ニュートリノ変化確認

宇宙誕生解明の鍵

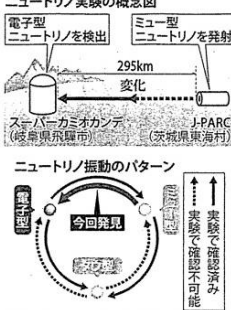
高エネ研

高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)や京都大、東京大などが中心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、観測が最も難しく、これまで未確認だった。この変化は宇宙の成り立ちを解明する重要な手がかりになるといわれている。実験チームは、茨城県東海村の大強

茨城県東海村、5月の放射能事故で停止中の大規模のニュートリノ実験施設「J-PARC」に向けて、スーパーカミオカンデ(岐阜県飛騨市)へ向けて発射した。旧神岡鉱山に掘削されたトンネルを貫く山の手掘り(直井)で、高さ40メートル、幅約2メートルのトンネルが掘削された。約200メートル離れた大規模な実験施設「スーパーカミオカンデ」に向けて、ニュートリノを射出し、到着まで電子型とミュー型に変化した割合を調べ

この仕組みは「ニュートリノ」は別の素粒子であるクォークについては、小林・益川理論によって解明されたが、ニュートリノの一部で同様の現象が起る可能性があるが、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5000人の宇宙は138億年前にビッグ

ニュートリノ振動のパターン。電子型とミュー型の間で変化する。今回発見されたのは、電子型からミュー型への変身。実験で確認可能。実験で確認不可能。



ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。

ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。

ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。ニュートリノは電磁気的相互作用を持たない。

T2Kの発見論文

PRL 107, 041801 (2011)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
22 JULY 2011

Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam

>1000回引用

K. Abe⁴⁹ N. Aberrall¹⁶ Y. Aiima^{18,†} H. Aihara⁴⁸ I. B. Albert¹³ C. Andreopoulos⁴⁷ B. Andrieu³⁷ S. Aoki²⁷

PHYSICAL REVIEW D 88, 032002 (2013)

Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam

K. Abe,⁴⁷ N. Aberrall¹⁴ H. Aihara^{46,*} T. Akiri¹¹ I. B. Albert¹¹ C. Andreopoulos⁴⁵ S. Aoki²⁵ A. Ariga²

T. Ariga,²

F. Bay,¹³ S. V.

F. d. M. B.

D. G. Brook-F.

M. G. Catan

G. Collazuol.

M. Day,⁴⁰ J.

F. Di Lodovico

M. Dziewieck

Y. Fujii,^{16,†} Y. I.

J. J. Gome

P. Hamil

C. Hearty,^{4,‡} J.

J. Holeczek,⁴⁴

T. J. Irvine

R. A. Johnson,⁸

J. Kamed

A. Khotjant

J. Kisiel,⁴⁴ P. K.

K. Koseki,¹⁶

R. Kurjata,⁵³ T.

C. Licciardi,³⁹

M. Macaire,⁶

J. F. Martin

E. Mazzucato

PRL 112, 061802 (2014)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
14 FEBRUARY 2014



Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam

K. Abe,⁴⁶ J. Adam,³² H. Aihara,^{45,23} T. Akiri,⁹ C. Andreopoulos,⁴⁴ S. Aoki,²⁴ A. Ariga,² T. Ariga,² S. Assylbekov,⁸ D. Autiero,²⁹ M. Barbi,³⁹ G. J. Barker,⁵⁴ G. Barr,³⁵ M. Bass,⁸ M. Batkiewicz,¹³ F. Bay,¹¹ S. W. Bentham,²⁶ V. Berardi,¹⁸ B. E. Berger,⁸ S. Berkman,⁴ I. Bertram,²⁶ S. Bhadra,⁵⁸ F. d. M. Blaszczyk,²⁸ A. Blondel,¹² C. Bojecho,⁵¹ S. Bordoni,¹⁵ S. B. Boyd,⁵⁴ D. Brailsford,¹⁷ A. Bravar,¹² C. Bronner,²⁵ N. Buchanan,⁸ R. G. Calland,²⁷ J. Caravaca Rodríguez,¹⁵ S. L. Cartwright,⁴² R. Castillo,¹⁵ M. G. Catanesi,¹⁸ A. Cervera,¹⁶ D. Cherdack,⁸ G. Christodoulou,²⁷ A. Clifton,⁸ J. Coleman,²⁷ S. J. Coleman,⁷ G. Collazuol,²⁰ K. Connolly,⁵⁵ L. Cremonesi,³⁸ A. Dabrowska,¹³ I. Danko,³⁷ R. Das,⁸ S. Davis,⁵⁵ P. de Perio,⁴⁹ G. De Rosa,¹⁹ T. Dealtry,^{44,35} S. R. Dennis,^{54,44} C. Densham,⁴⁴ F. Di Lodovico,³⁸ S. Di Luise,¹¹ O. Drapier,¹⁰ T. Duboyski,³⁸ K. Duffy,³⁵ F. Dufour,¹² J. Dumarchez,³⁶ S. Dytman,³⁷ M. Dziewiecki,⁵³ S. Emery,⁶ A. Ereditato,² L. Escudero,¹⁶ A. J. Finch,²⁶ L. Floetotto,⁴¹ M. Friend,^{14,†} Y. Fujii,^{14,†} Y. Fukuda,³⁰ A. P. Furmanski,⁵⁴ V. Galymov,⁶ A. Gaudin,⁵¹ S. Giffin,³⁹ C. Giganti,³⁶ K. Gilje,³² D. Goeldi,² T. Golan,⁵⁷ J. J. Gomez-Cadenas,¹⁶ M. Gonin,¹⁰ N. Grant,²⁶ D. Gudim,²² D. R. Hadley,⁵⁴ A. Haesler,¹² M. D. Haigh,⁵⁴ P. Hamilton,¹⁷ D. Hansen,³⁷ T. Hara,²⁴ M. Hartz,^{23,50} T. Hasegawa,^{14,†} N. C. Hastings,³⁹ Y. Hayato,⁴⁶ C. Hearty,^{4,‡} R. L. Helmer,⁵⁰ M. Hierholzer,² J. Hignight,³² A. Hillairet,⁵¹ A. Himmel,⁹ T. Hiraki,²⁵ S. Hirota,²⁵ J. Holeczek,⁴³ S. Horikawa,¹¹ K. Huang,²⁵ A. K. Ichikawa,²⁵ K. Ieki,²⁵ M. Ieva,¹⁵ M. Ikeda,⁴⁶ J. Imber,³² J. Insler,²⁸ T. J. Irvine,⁴⁷ T. Ishida,^{14,†} T. Ishii,^{14,†} S. J. Ives,¹⁷ K. Iyogi,⁴⁶ A. Izmaylov,^{16,22} A. Jacob,³⁵ B. Jamieson,⁵⁶ R. A. Johnson,⁷ J. H. Jo,³² P. Jonsson,¹⁷ C. K. Jung,^{32,§} A. C. Kaboth,¹⁷ T. Kajita,^{47,§} H. Kakuno,⁴⁸ J. Kameda,⁴⁶ Y. Kanazawa,⁴⁵ D. Karlen,^{51,50} I. Karpikov,²² E. Kearns,^{3,23,§} M. Khabibullin,²² A. Khotjantsev,²² D. Kielczewska,⁵² T. Kikawa,²⁵ A. Kilinski,³¹ J. Kim,⁴ J. Kisiel,⁴³ P. Kitching,¹ T. Kobayashi,^{14,†} L. Koch,⁴¹ A. Kolaceke,³⁹ A. Konaka,⁵⁰ L. L. Kormos,²⁶ A. Korzenev,¹² K. Koseki,^{14,†} Y. Koshio,^{33,§} I. Kreslo,² W. Kropp,⁵ H. Kubo,²⁵ Y. Kudenko,^{22,||}

T2Kの今後

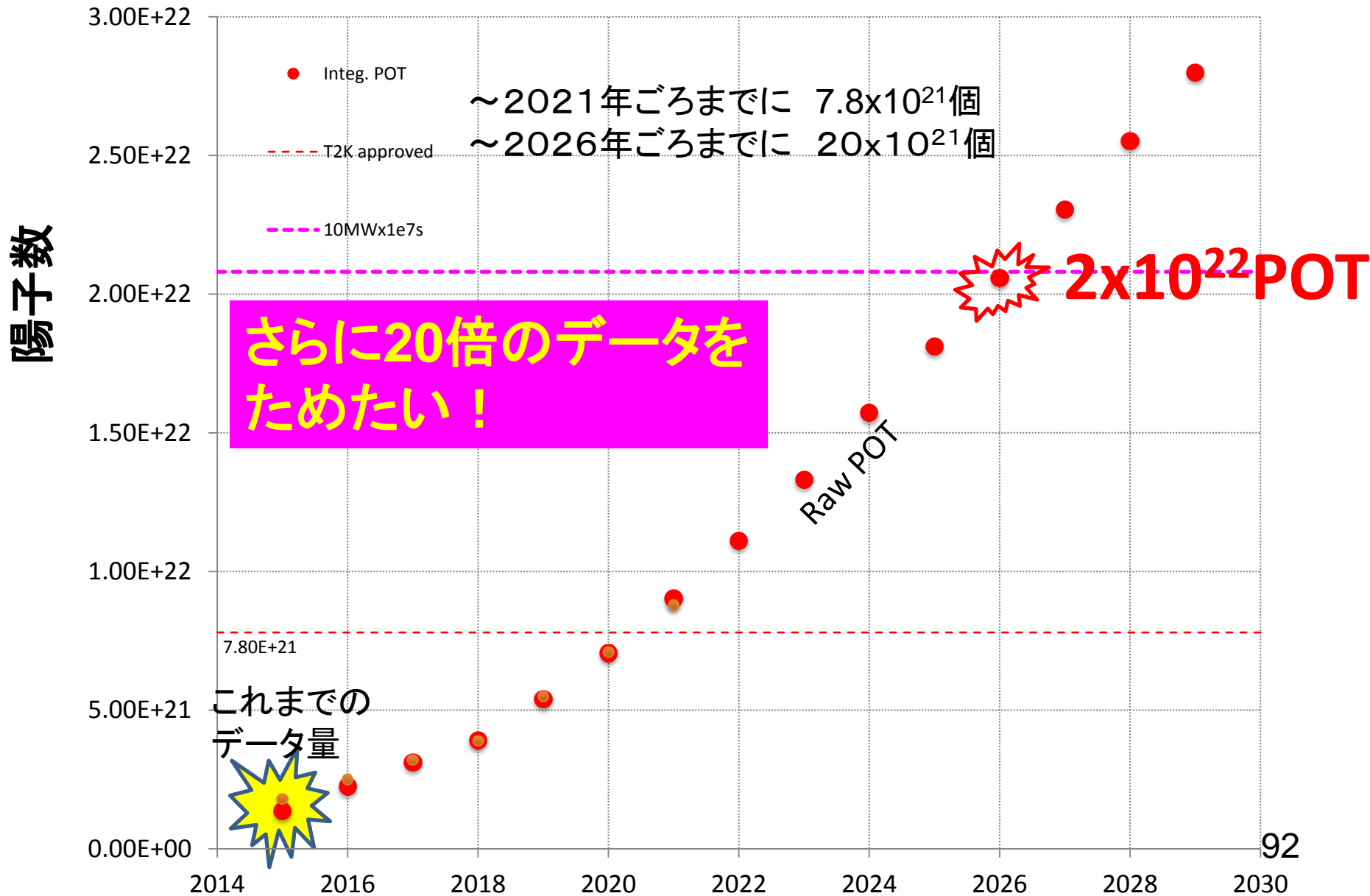
宇宙の物質起源の謎解明へ向けた第一歩



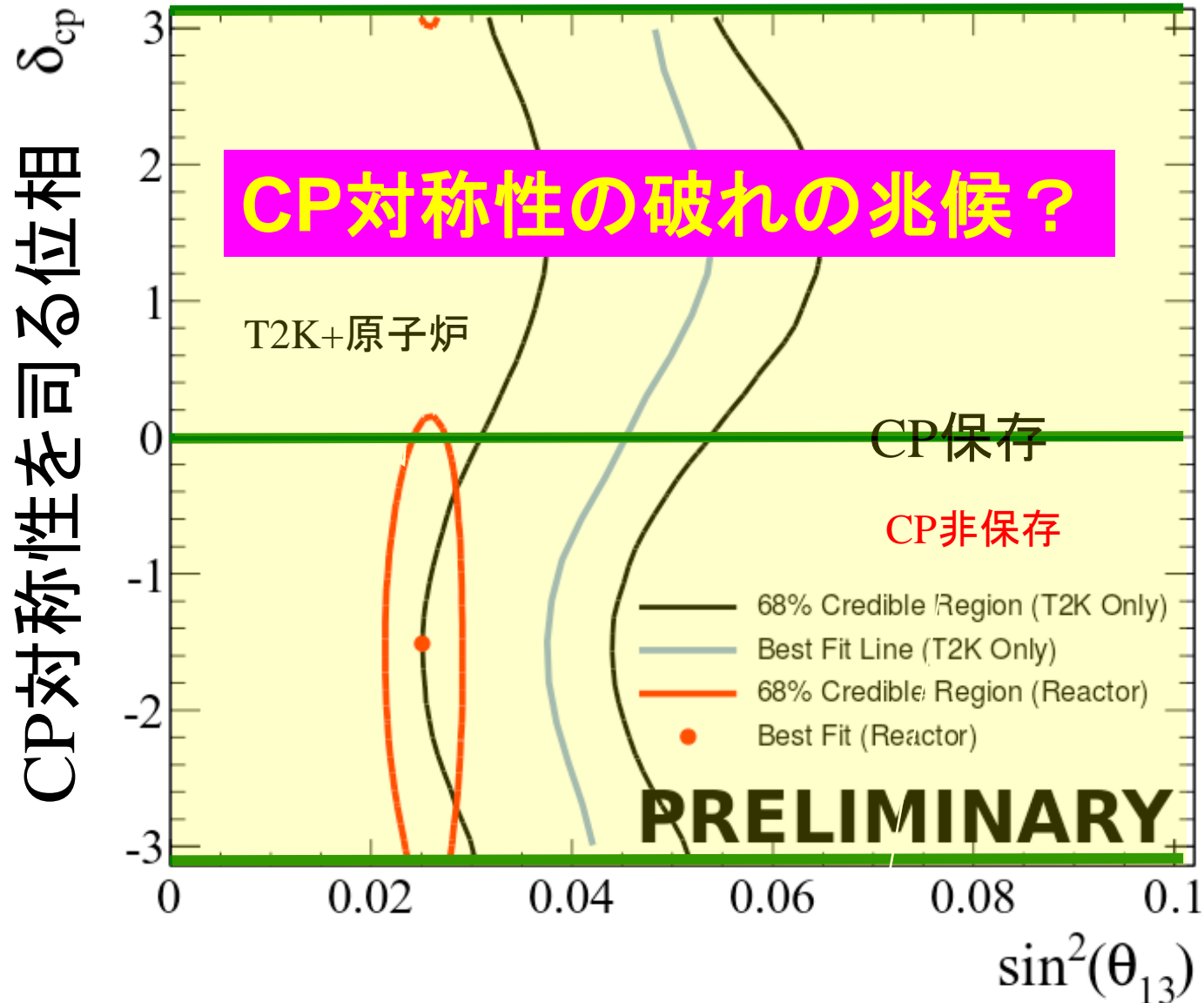
CP対称性の測定

→ 宇宙の物質起源解明の糸口を探る

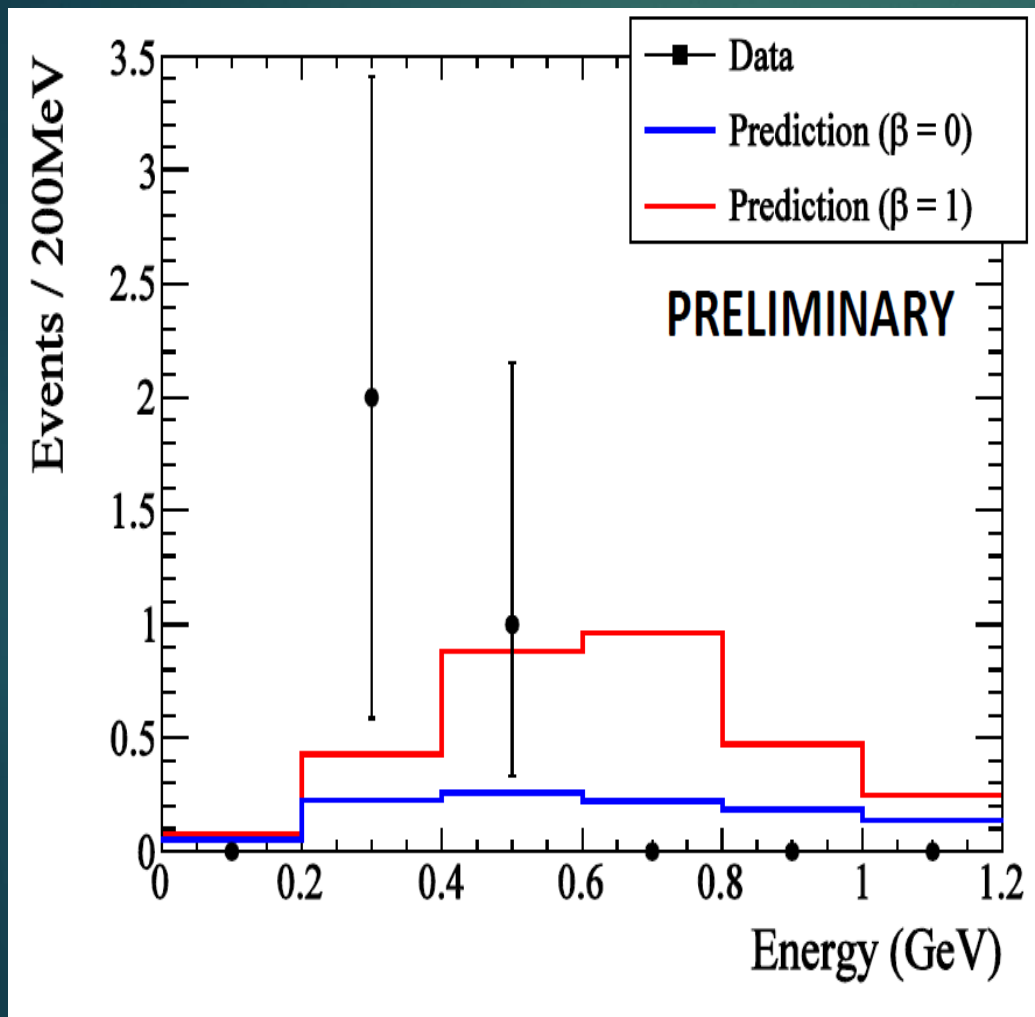
今後の蓄積陽子数の目標



CP対称性に対する世界初の制限



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



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 (0.4×10^{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

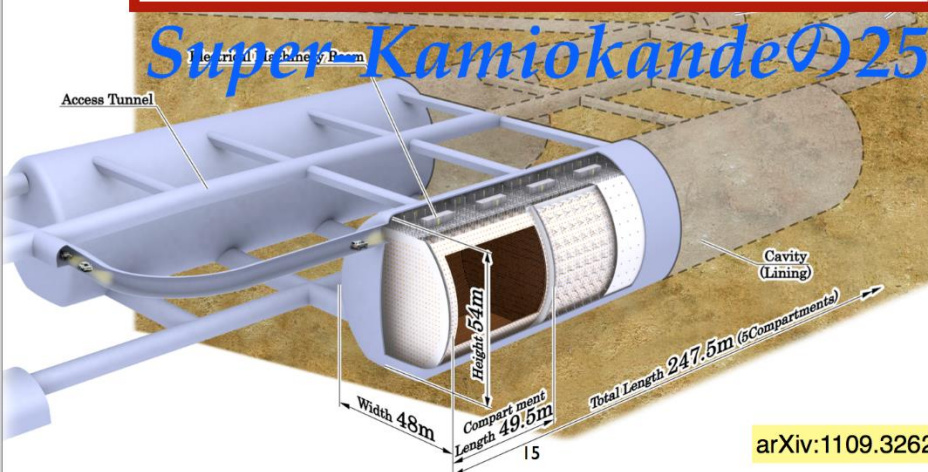
さらに将来



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**



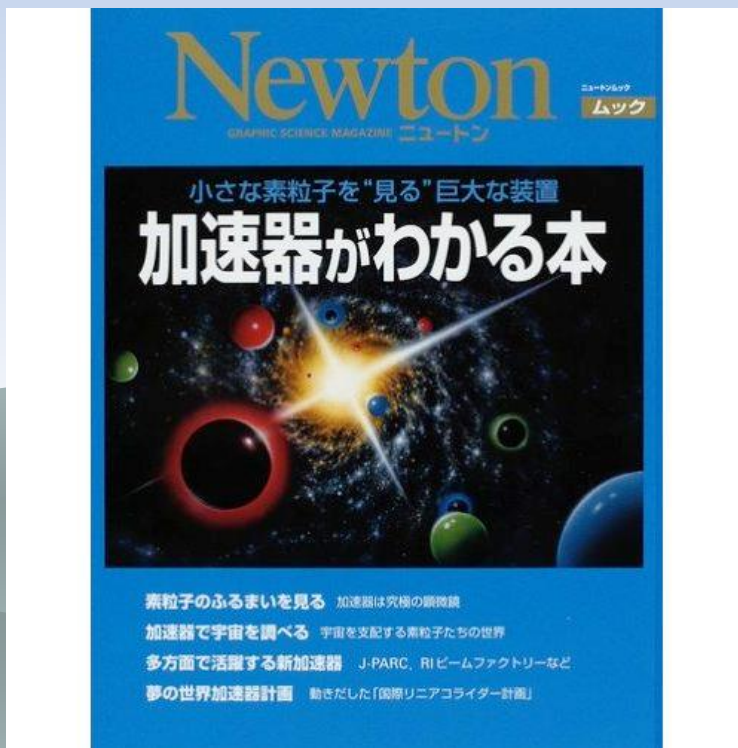
2014年4月T2K全体会議

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](#)

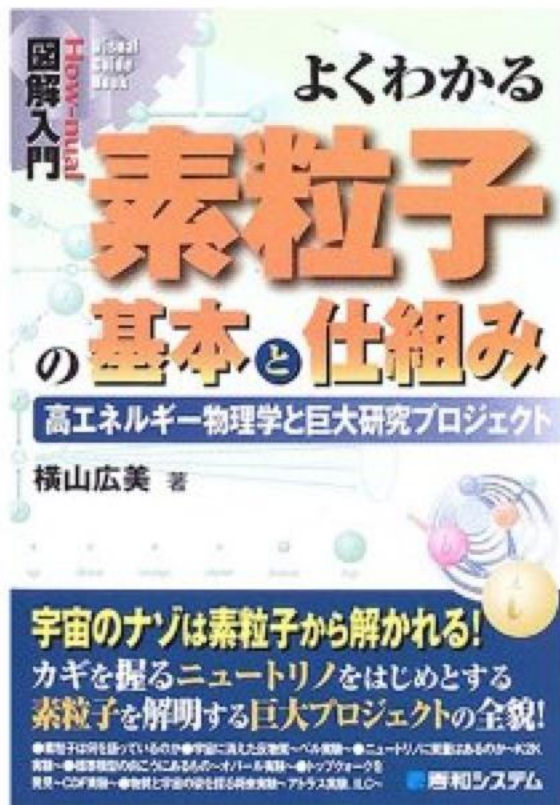
この商品は、[Amazon.co.jp](https://www.amazon.co.jp) が販売、発送します。ギフトラッピングを利用できません。

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

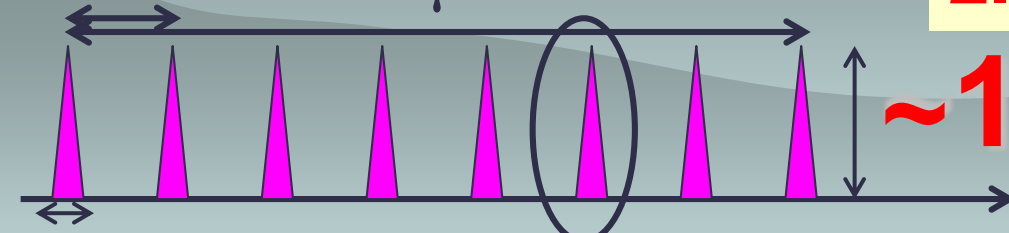
T2K case

581ns

4.2 μ s

2.6MJ in ~4 μ s!

~10TW!



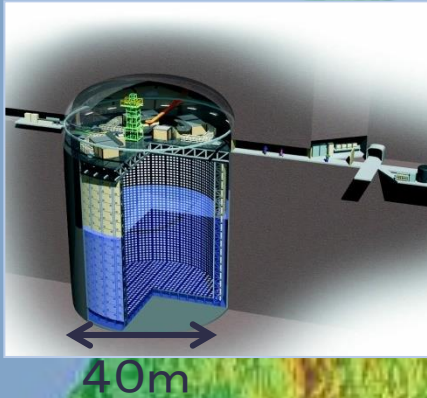
~60ns

330kJ

3.3×10^{14} protons in 8 bunches in ~4 μ 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

K2K (1999~2004)

250km

KEK

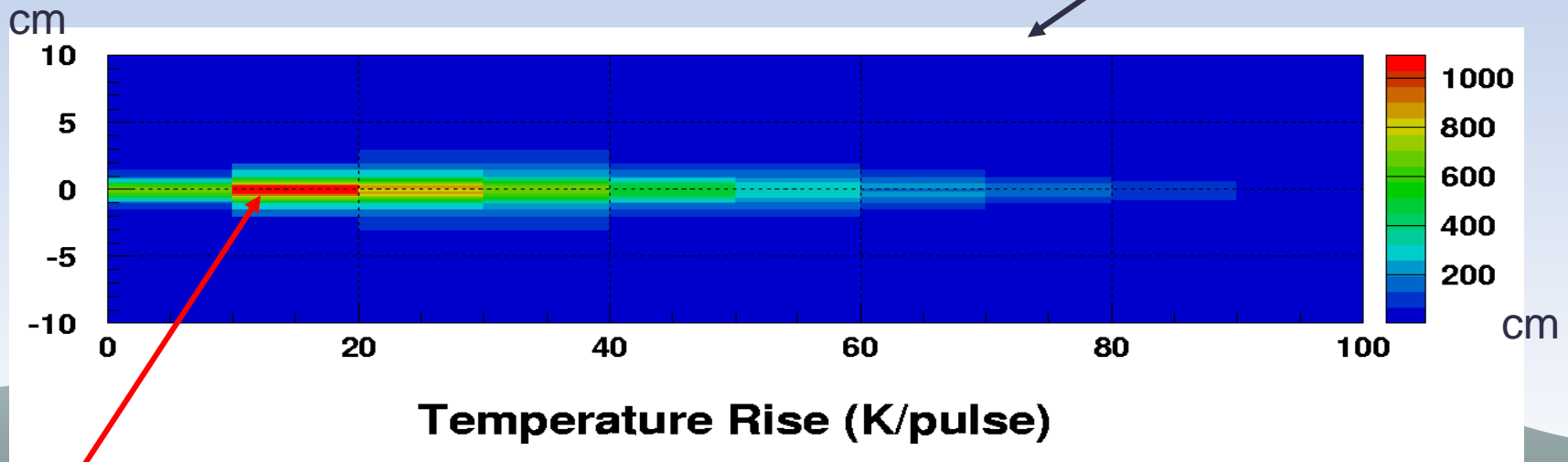
- ◆ J-PARCで生成したニュートリノを295km先の検出器“スーパーカミオカンデ”で検出し、ニュートリノの性質を調べる。
- ◆ K2K実験のおよそ100倍のビーム強度

J-PARC 大強度ビーム！

約2.5 秒に一回5 μ 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°)

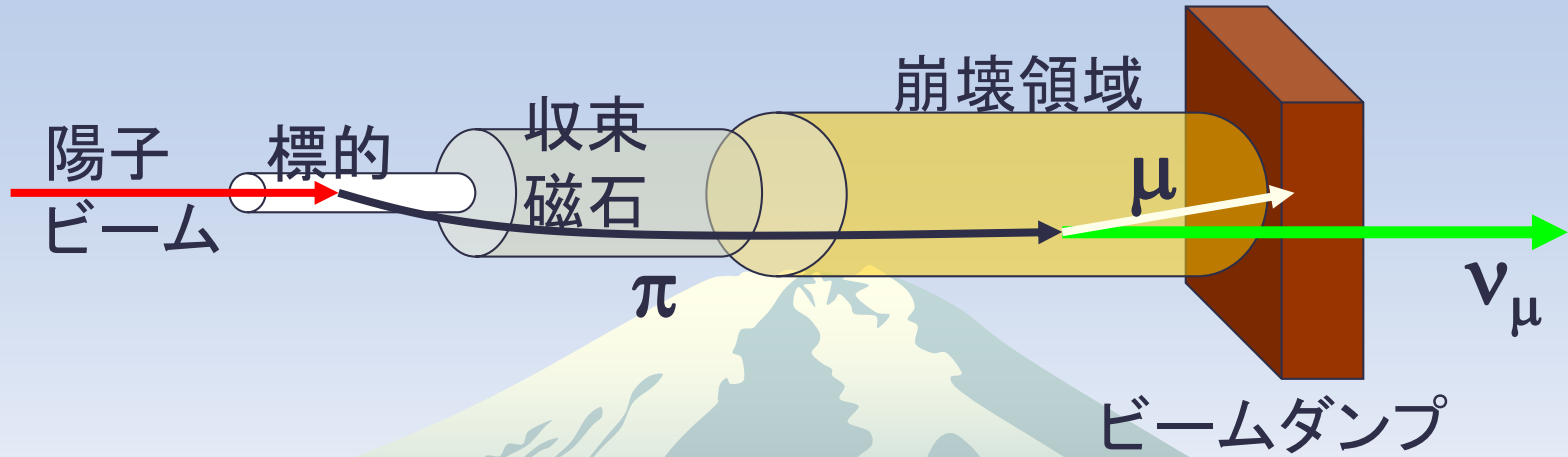
✓ 溶ける、、、

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

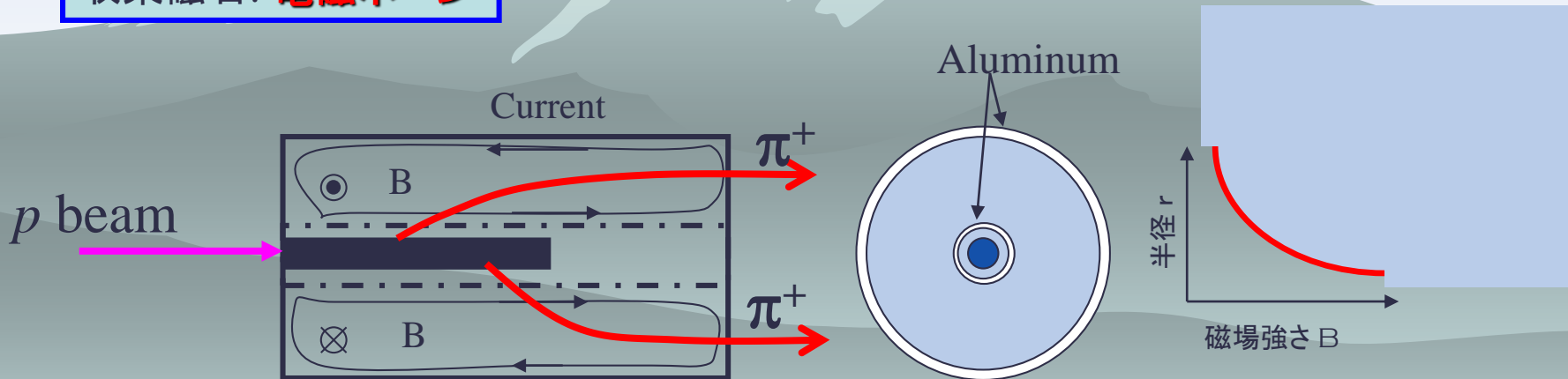
(cf. 耐力 ~300 MPa)

Tiより重いものは壊れる。

ニュートリノビームの生成法



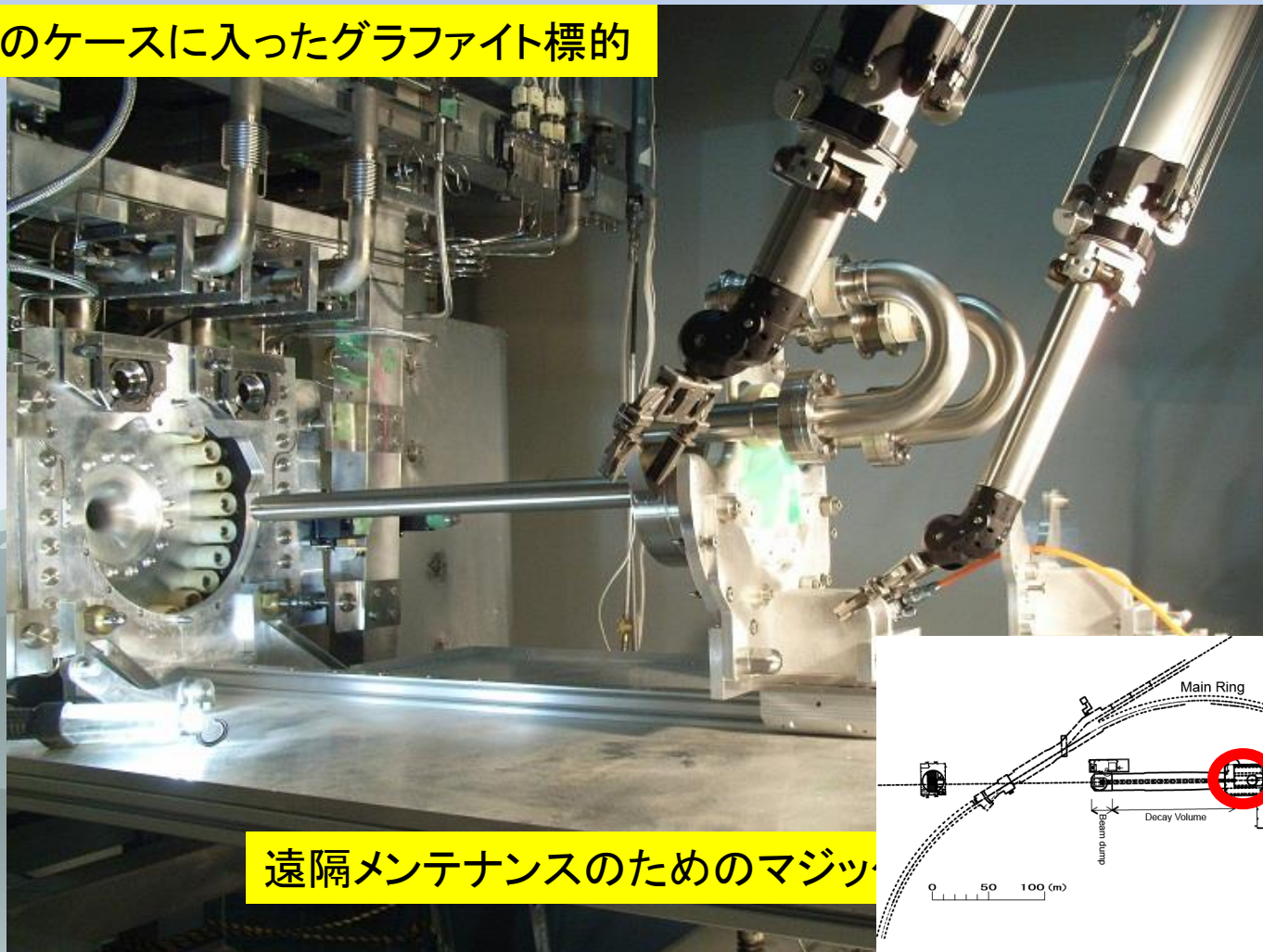
収束磁石: **電磁ホーン**



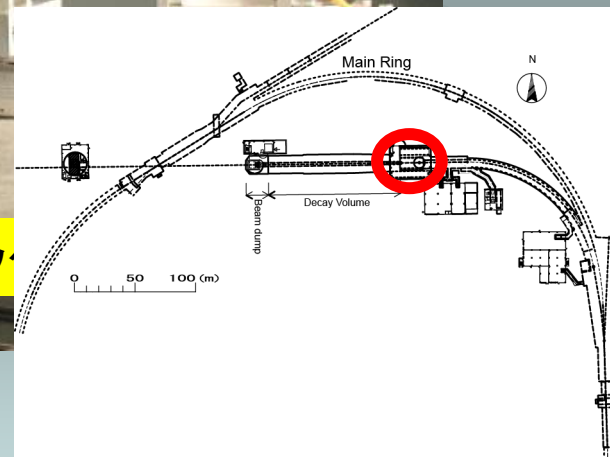
$$B = 4.3 T, r = 15 mm, I = 320 kA$$

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



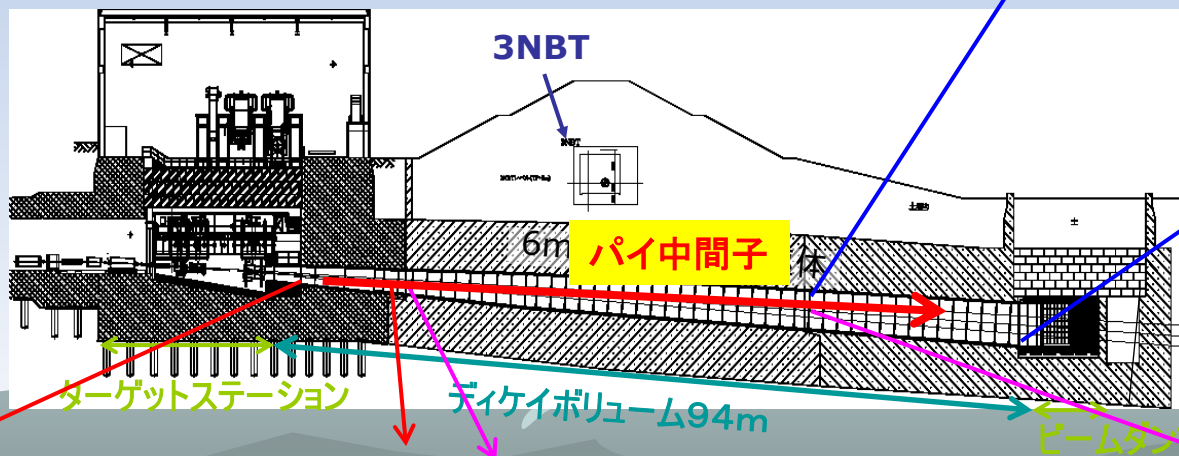
遠隔メンテナンスのためのマジック



崩壊領域



Downstream part



Most upstream part



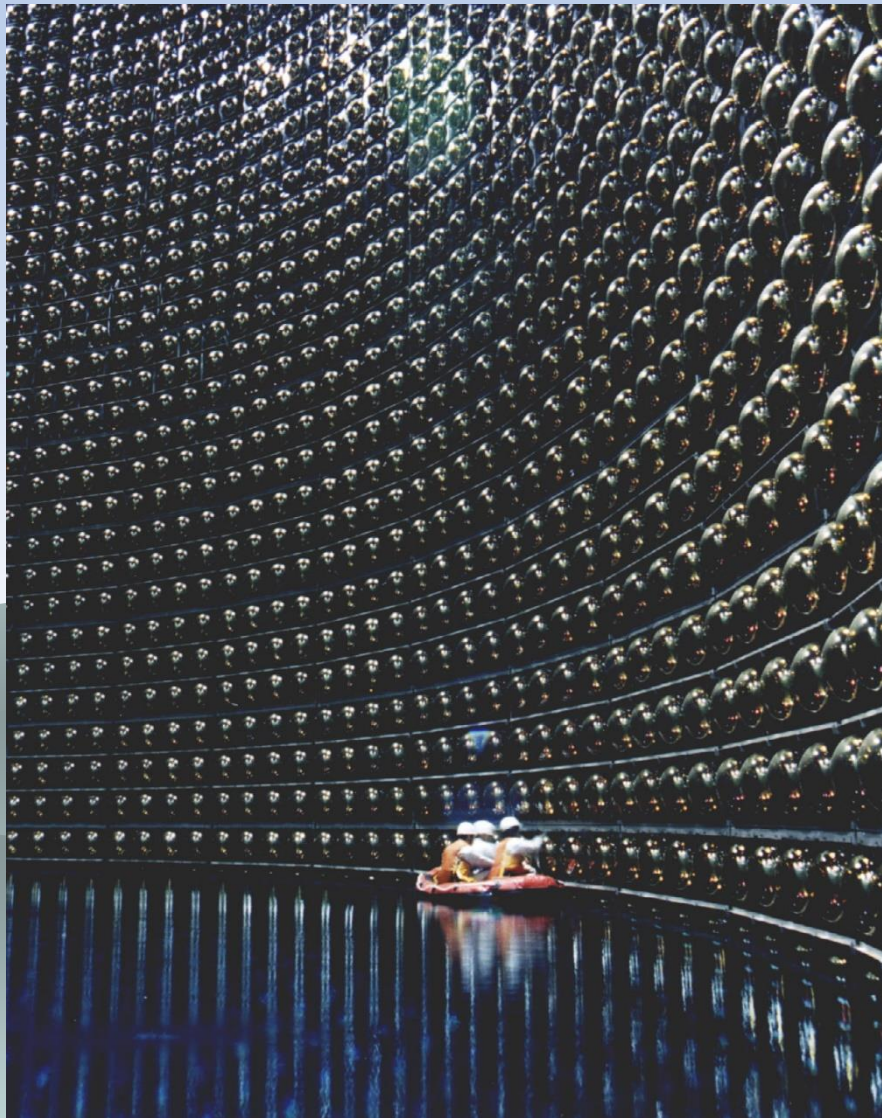
Feb. 2005



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

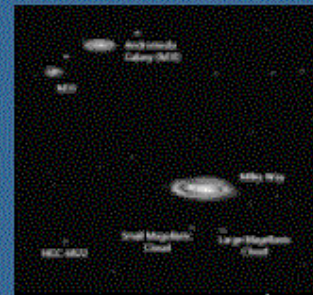
到着時間で区別する



宇宙の階層構造

宇宙の大構造

銀河群



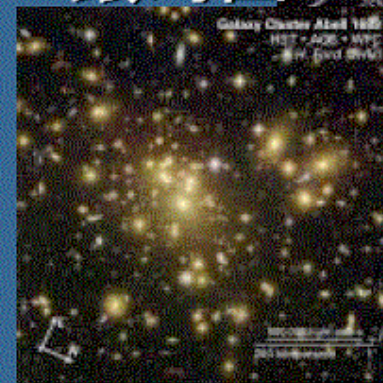
矮小銀河



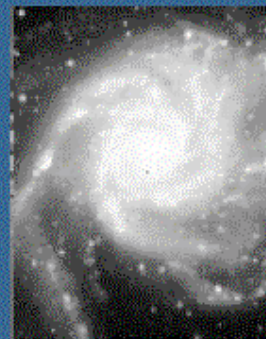
太陽系



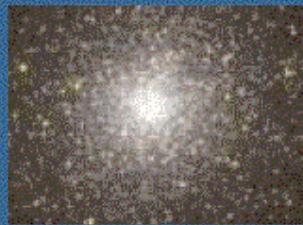
銀河団



銀河



星団

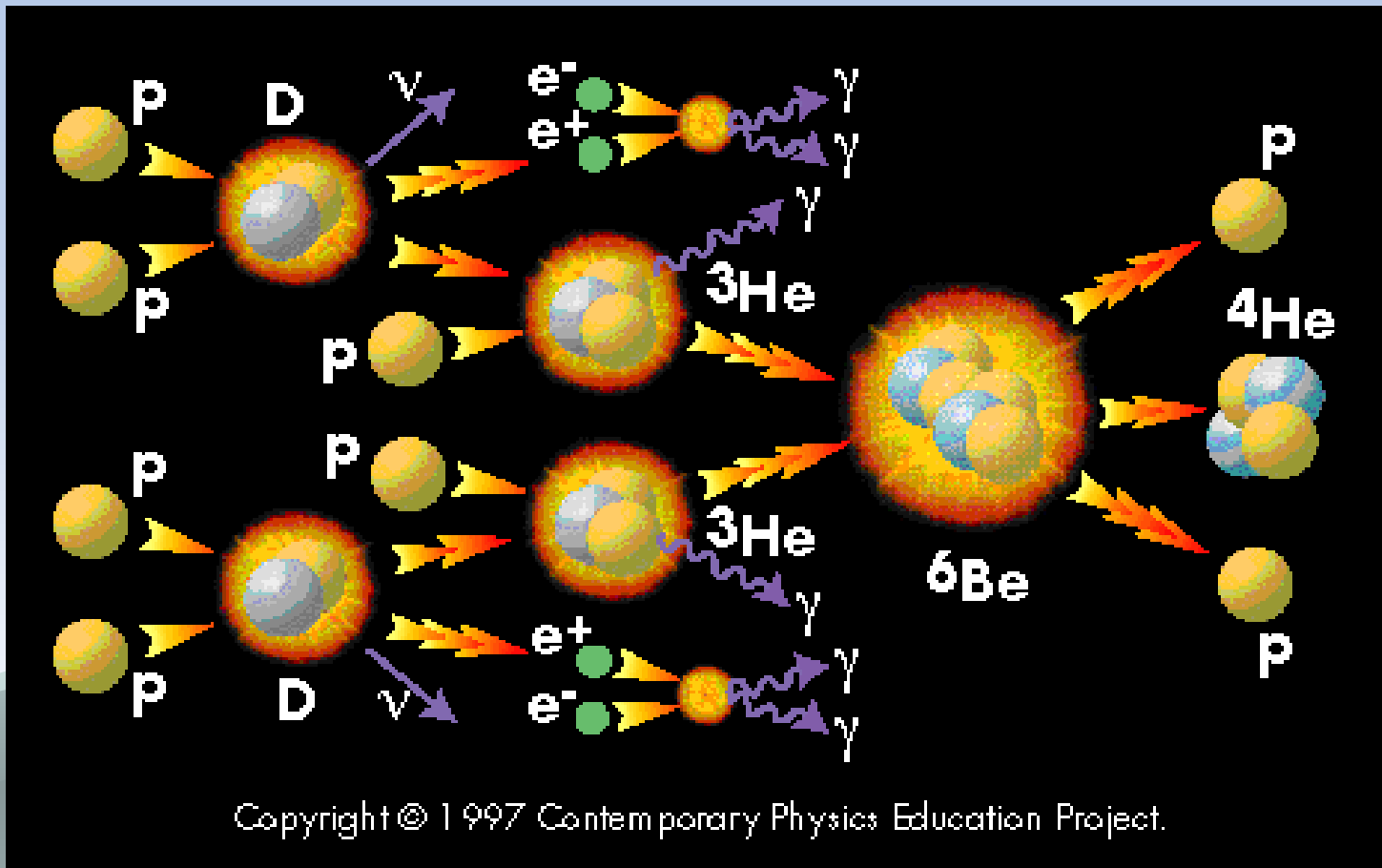


10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8

典型的大きさ [パーセク(〜3.1光年)]



太陽ニュートリノ

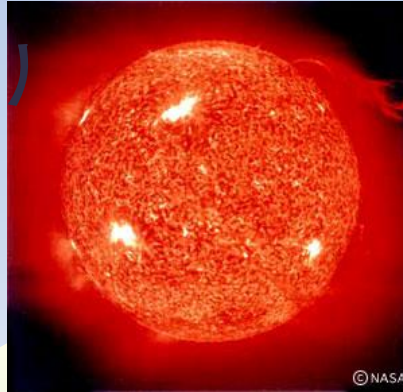


陽子は脱出するのに10000年
 熱エネルギー(光子)は~1000万年
 ニュートリノは光の速さ！

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



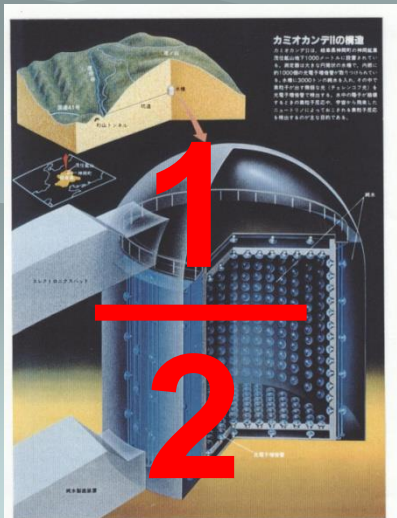
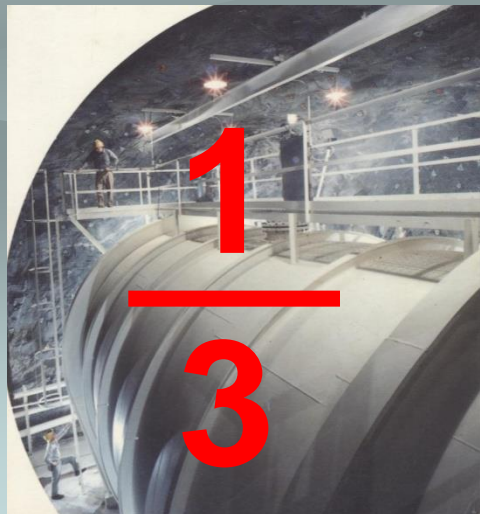
電子ニュートリノ

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)



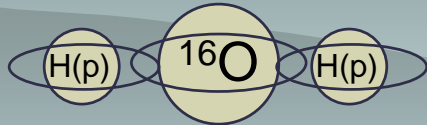
ニュートリノ振動の証拠: SNO実験(1)

SNO実験(1999~2006)

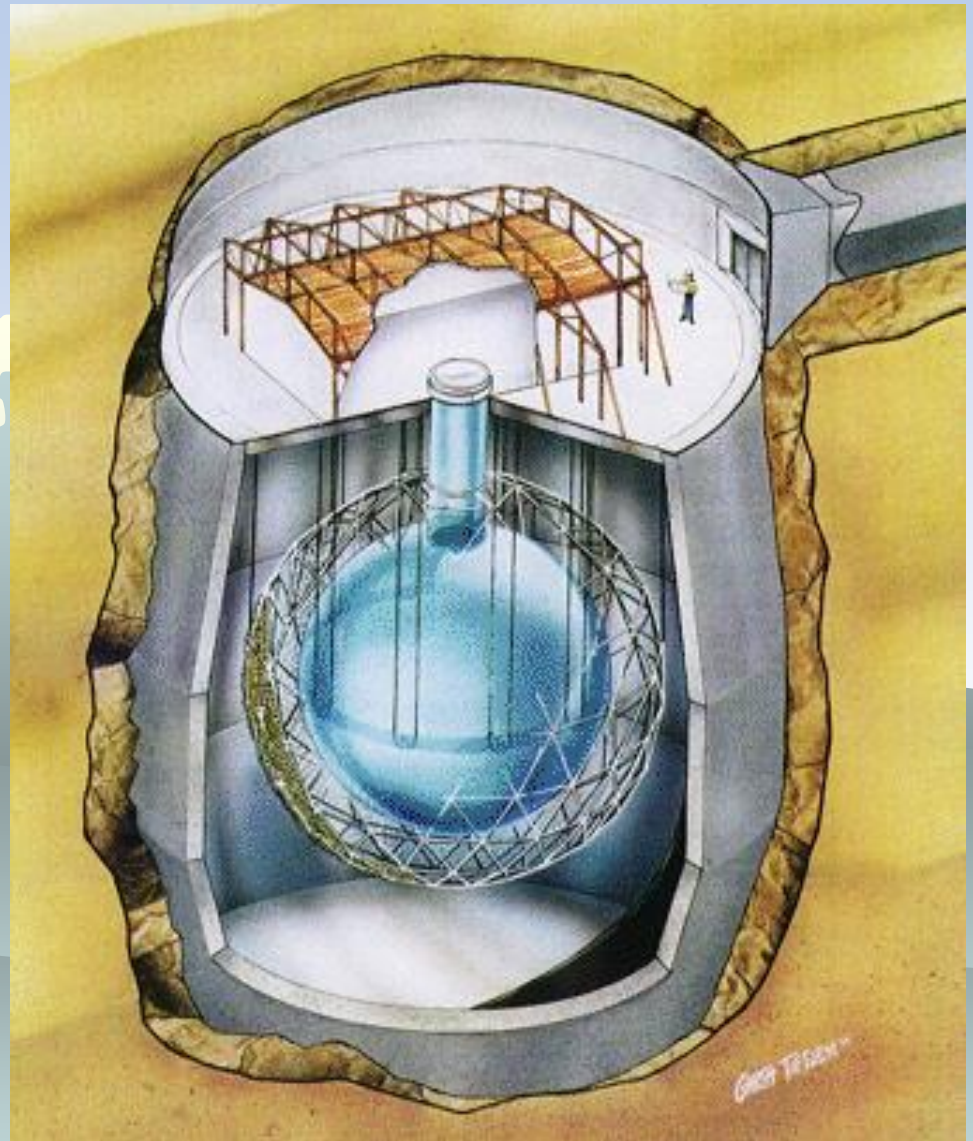
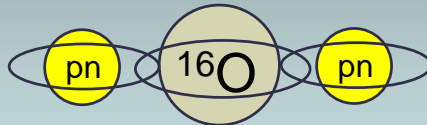
- ◆ カナダオンタリオ
- ◆ 1000ton 水チェレンコフ
- ◆ 重水! D_2O
- ◆ 地下6000mの水相当
- ◆ 9,500本の 20cm-光電子増倍管



普通の水
(H_2O)



重水
(D_2O)



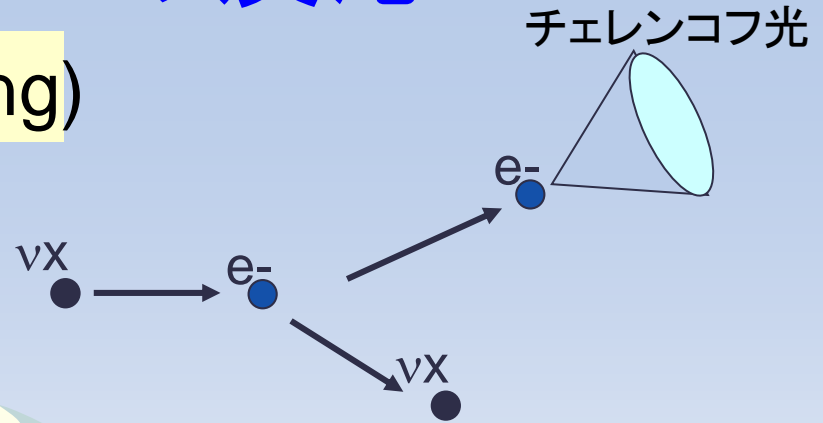
重水とニュートリノの反応

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 $\propto \nu_e + 0.15(\nu_\mu + \nu_\tau)$

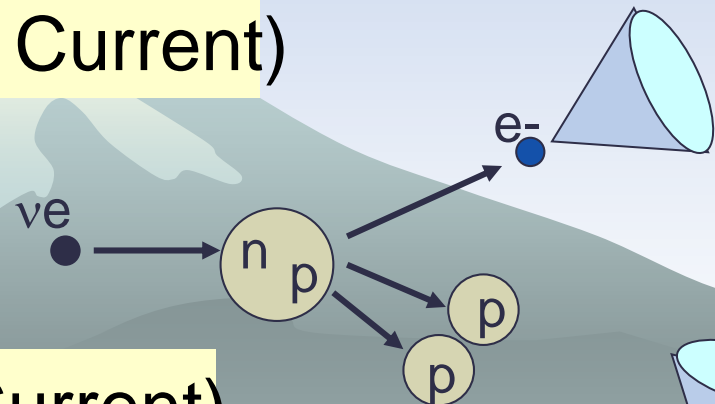


CC

荷電カレント反応(Charged Current)



- ・反応数 $\propto \nu_e$ (ν_e だけに感度)



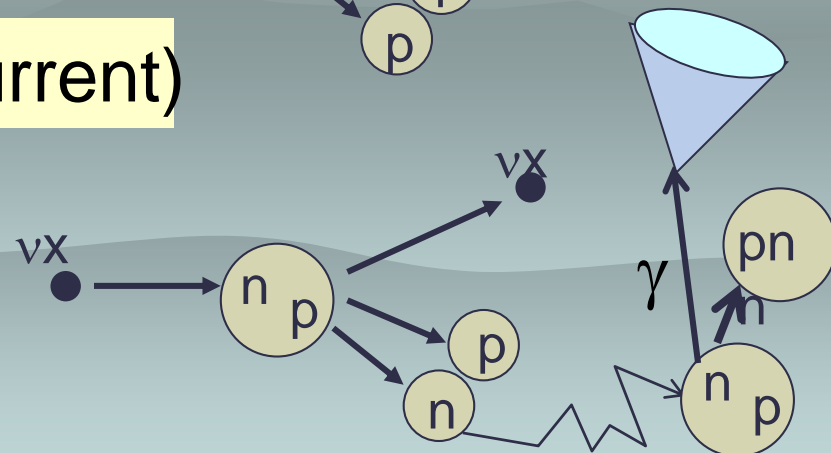
NC

中性カレント反応(Neutral Current)

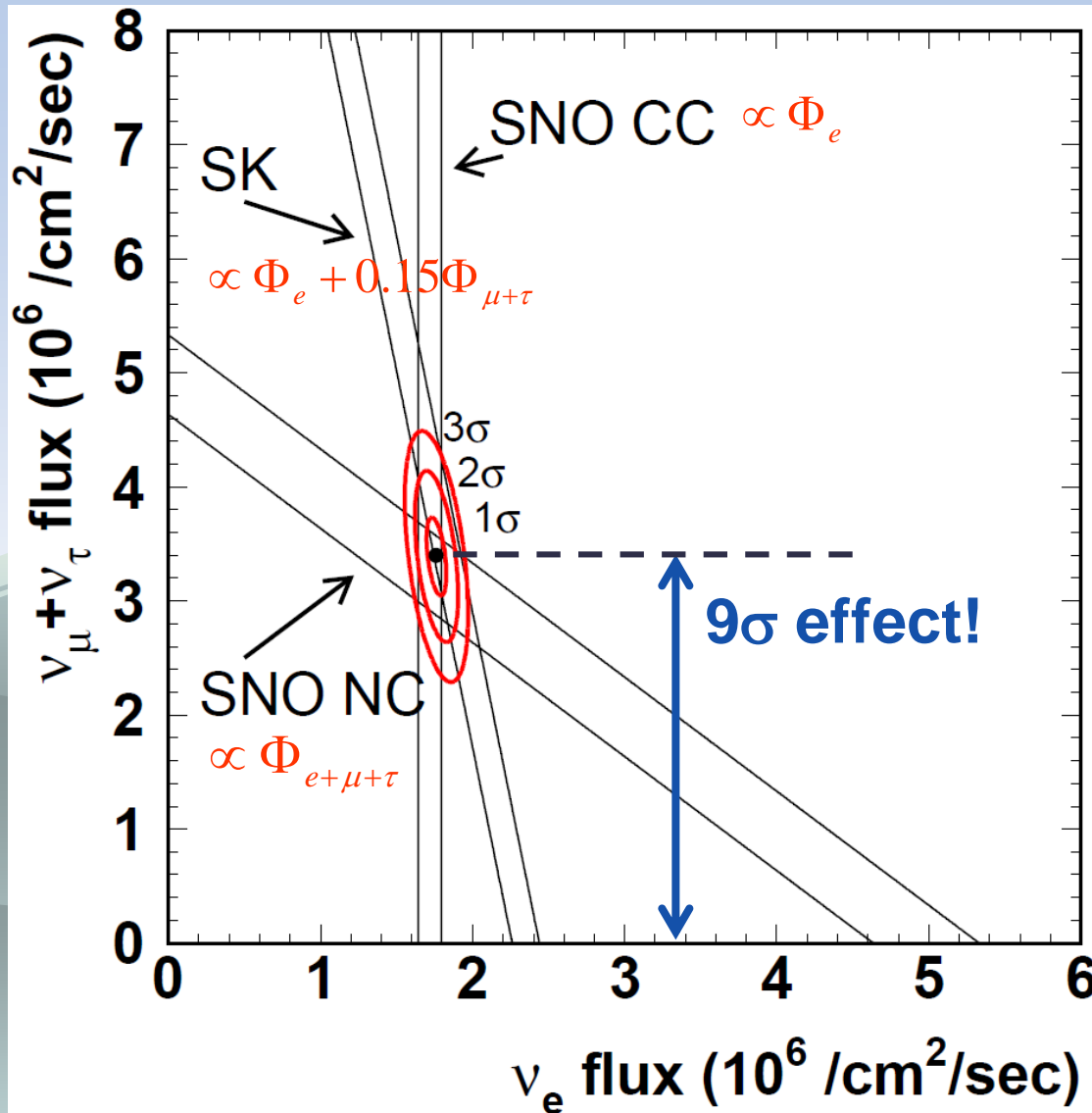


- ・ $n + d \rightarrow t + \gamma$ (6.3 MeV)... $\rightarrow e^-$

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

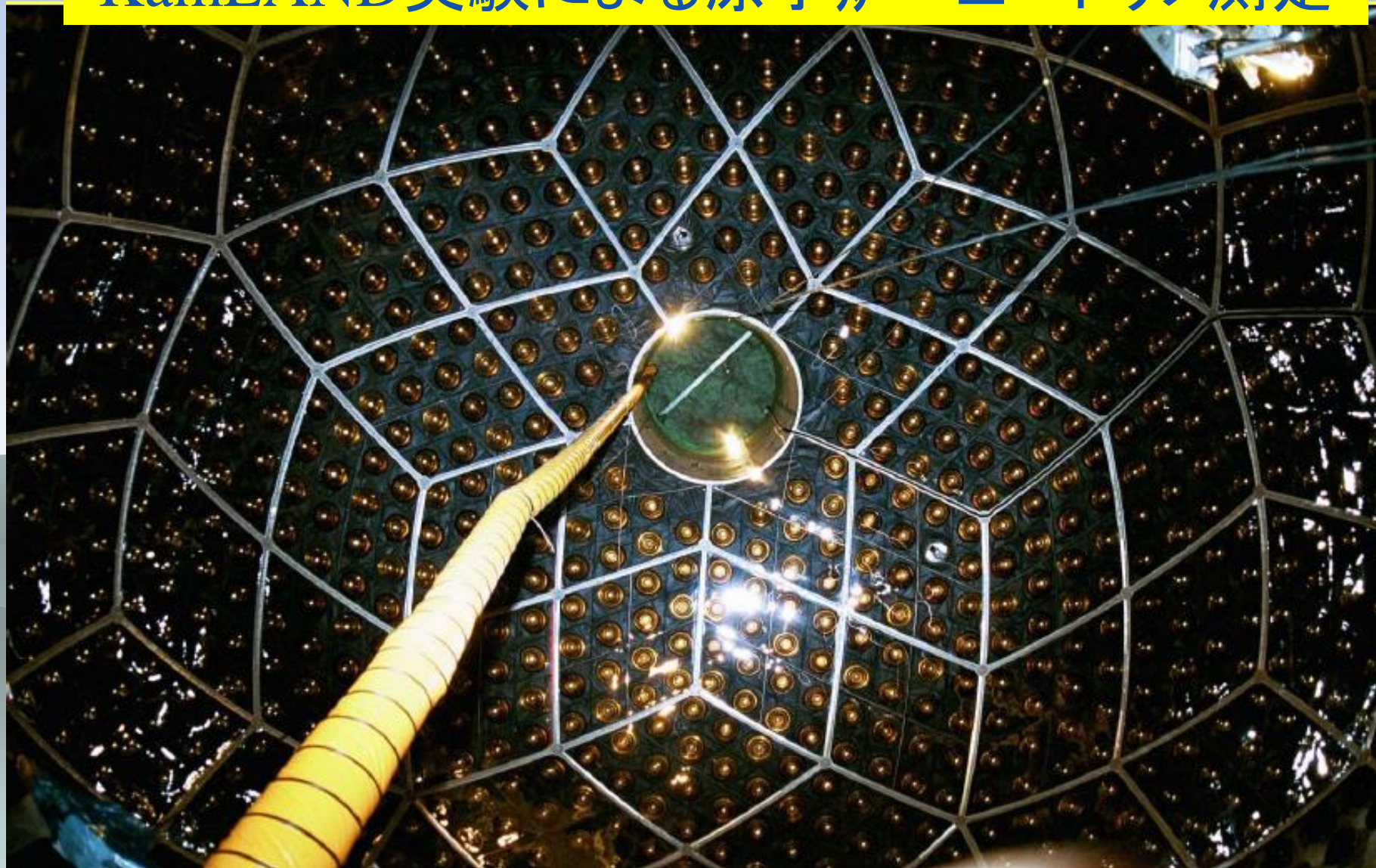


Evidence of non- ν_e components

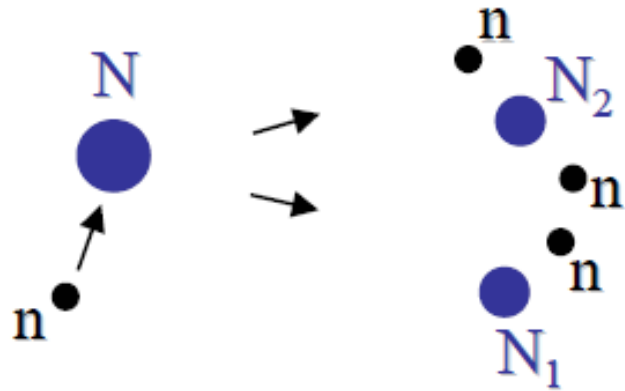


最終決定打！！

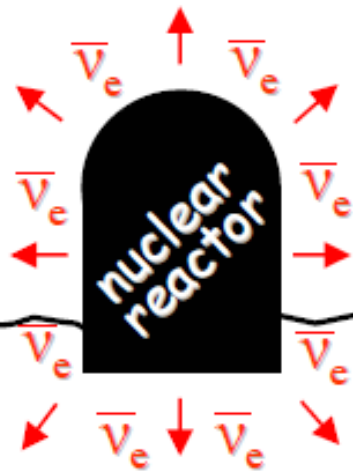
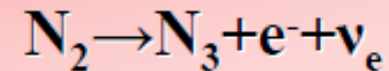
KamLAND実験による原子炉ニュートリノ測定



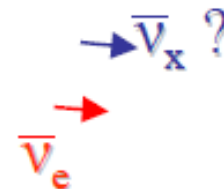
原子炉ニュートリノ実験



N_1 and N_2 still have too many neutrons and decay

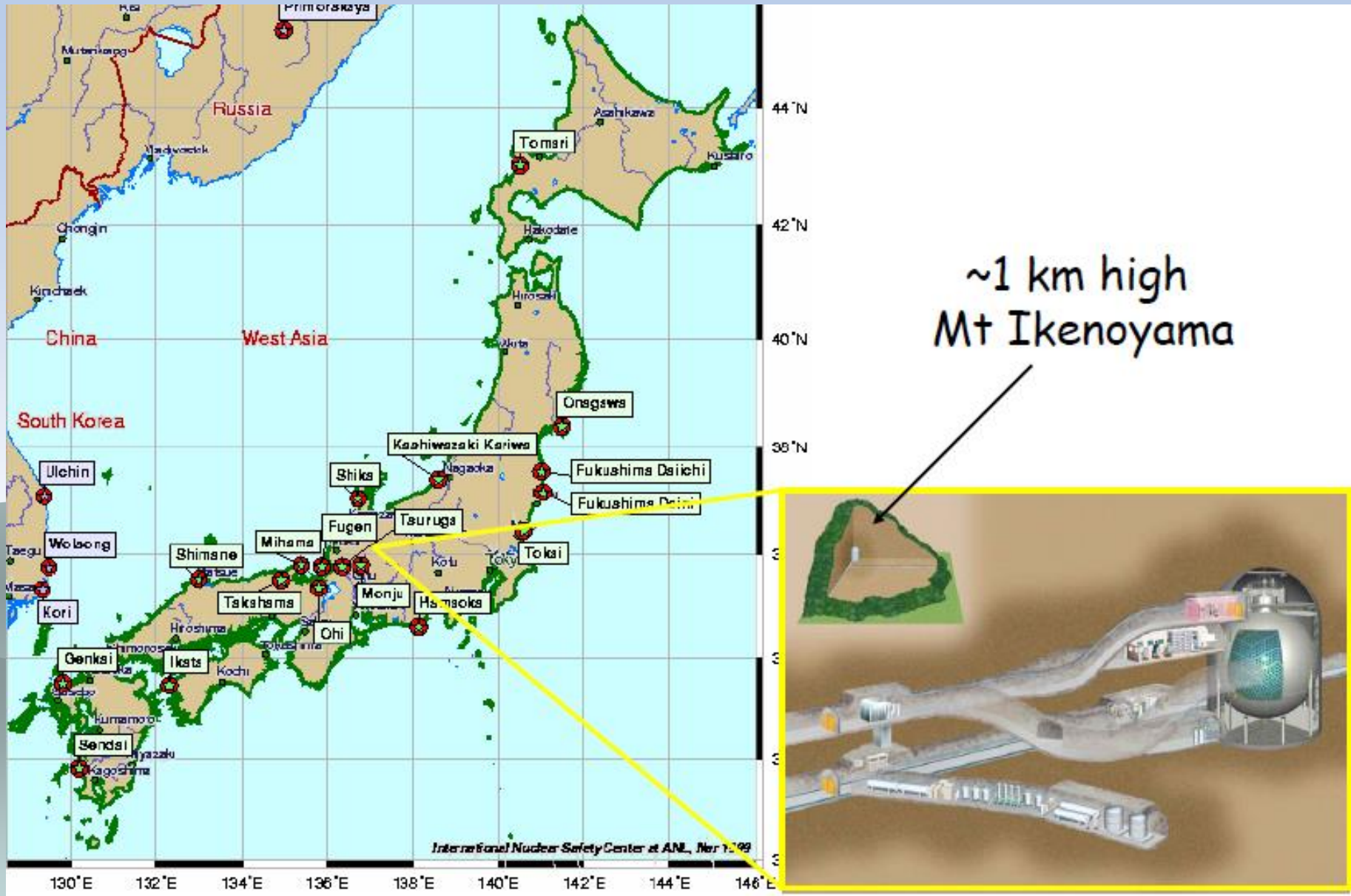


Look for a deficit of $\bar{\nu}_e$ at a distance L



$\bar{\nu}_e$ detector

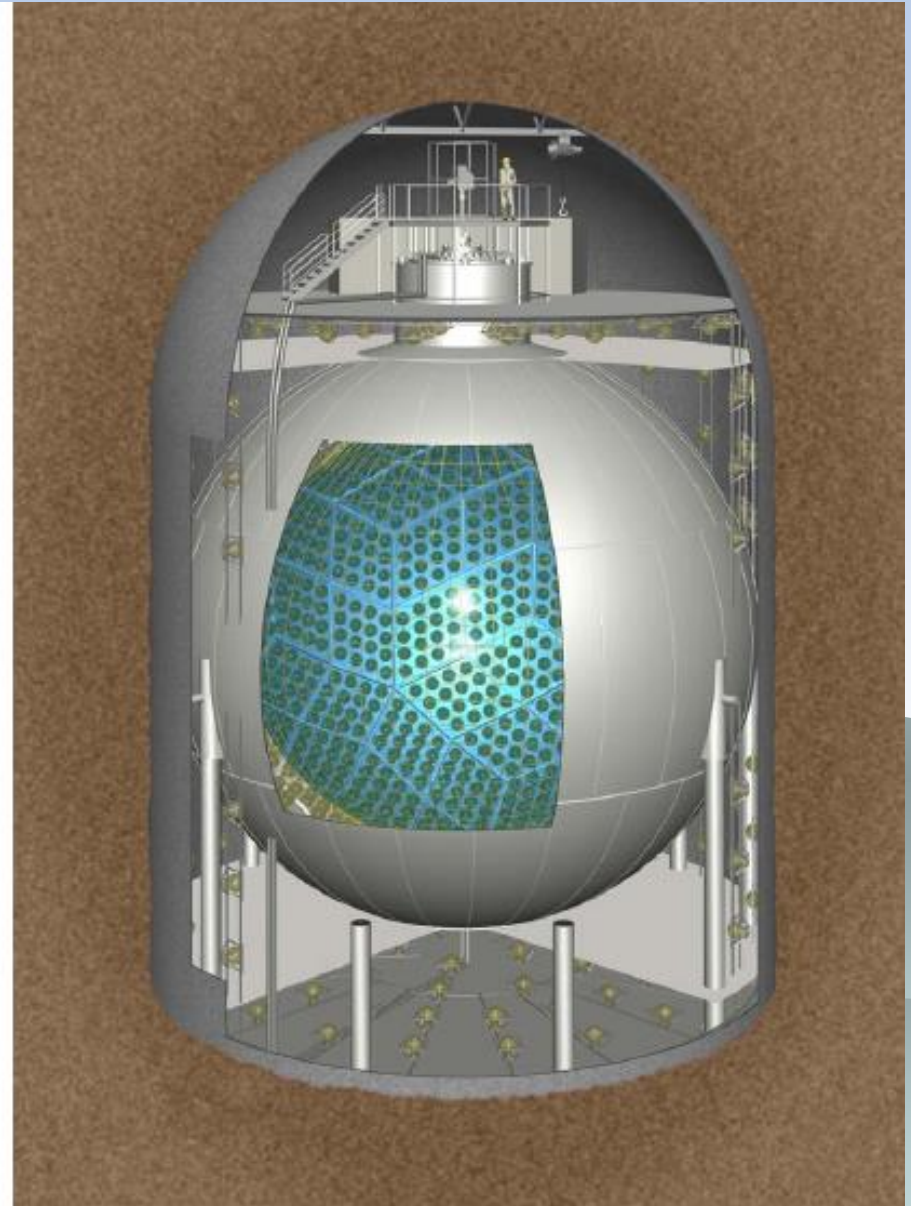
KamLAND



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
- H₂O Cerenkov veto counter
- Multi-hit deadtime-less electronics
- Δm^2 sensitivity $7 \cdot 10^{-6} \text{ eV}^2$
LMA-MSW solution within reach on the earth!



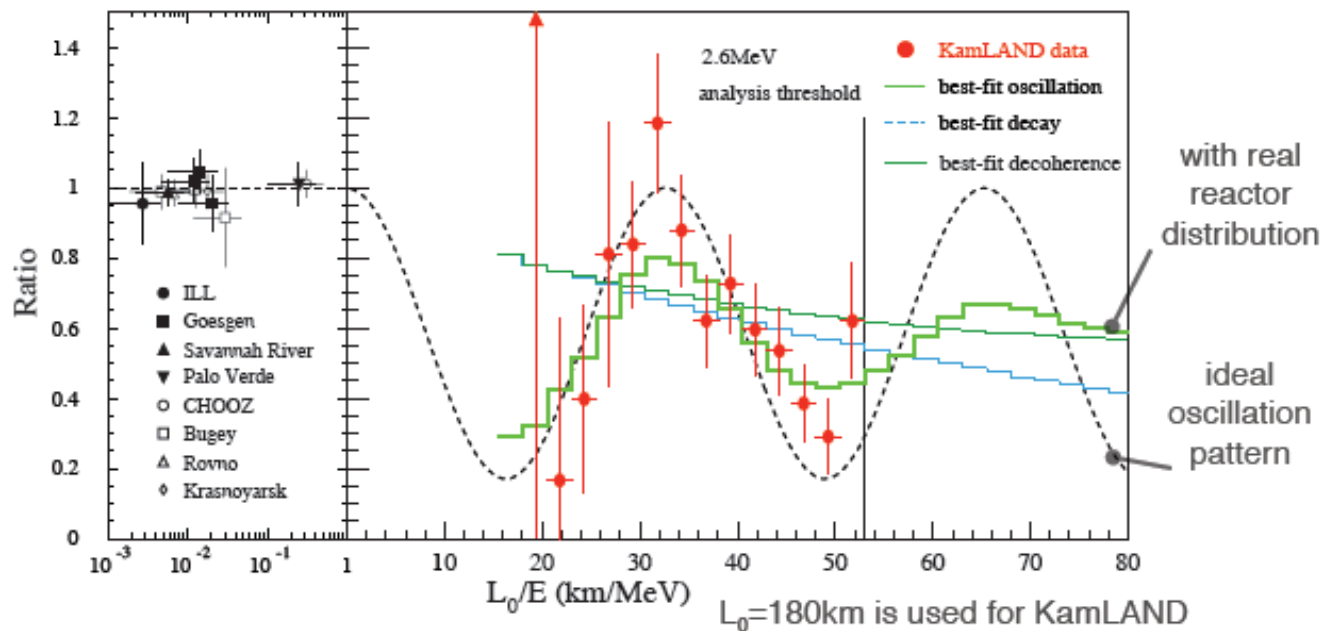
KamLANDの結果

横軸をL(km)/E(MeV)に。

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

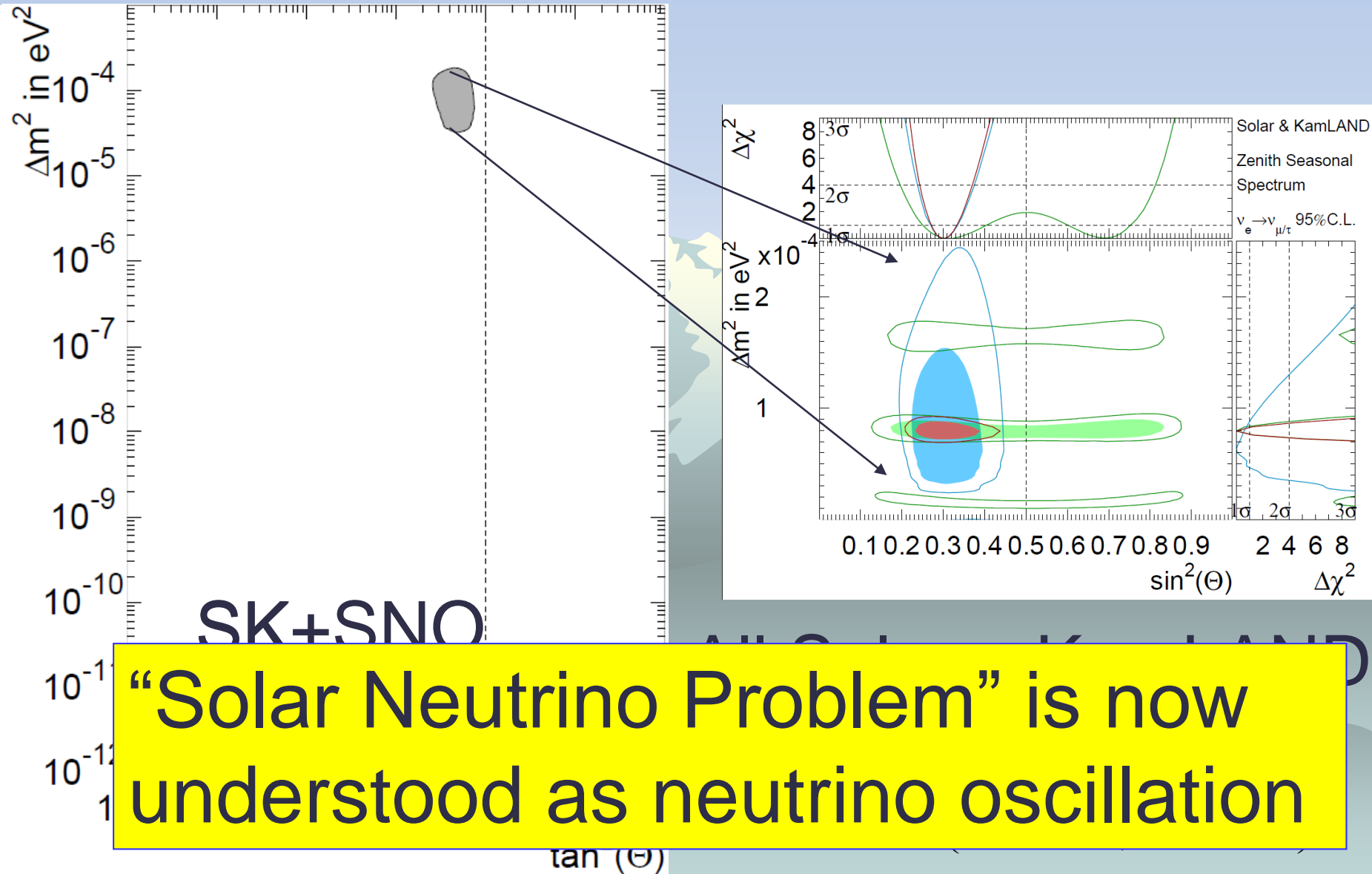
- - - decay $P_{ee} = \left(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \exp\left(-\frac{m_2 L}{2\tau E}\right)\right)^2$

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



決定的！

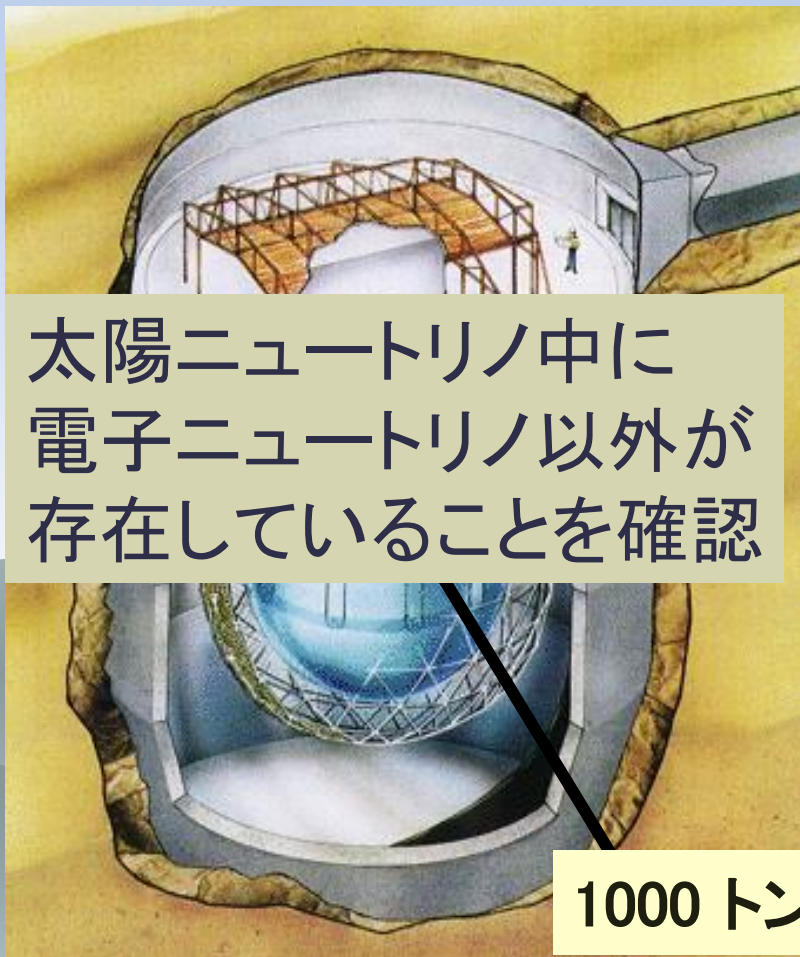
Constraints on $\Delta m_{12}^2, \theta_{12}$



太陽ニュートリノ問題の解決

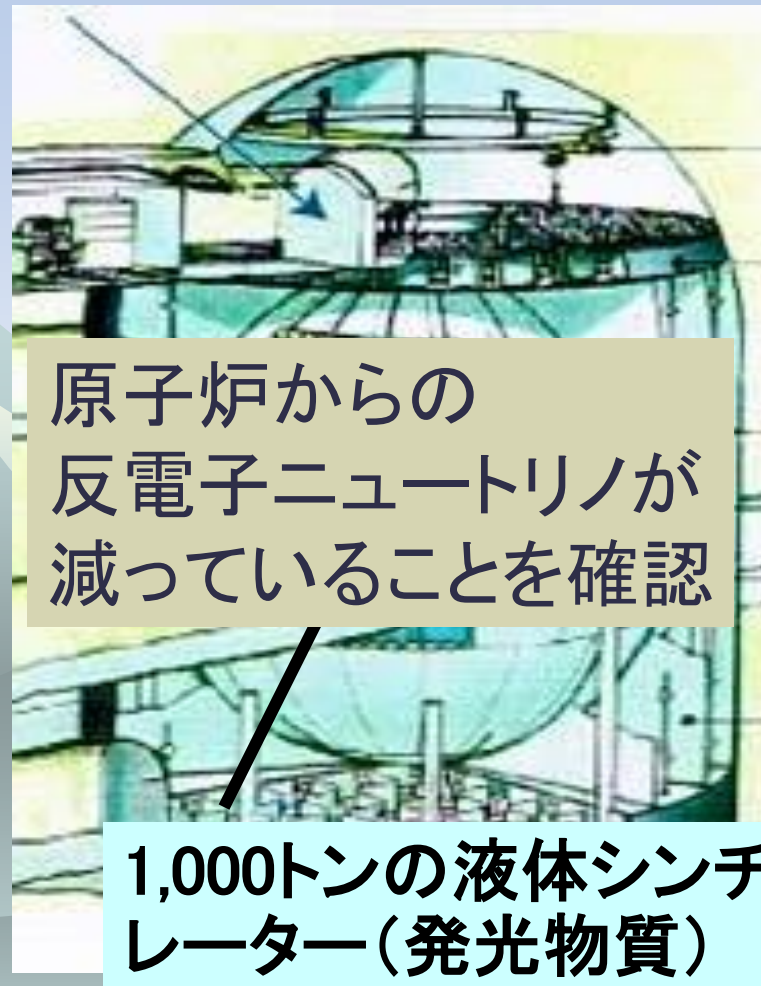
SNO(カナダ 2001年)

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