



「最先端の物理学」 素粒子物理学とニュートリノ

**首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論研究室 安田修**

2016年5月24日@国際基督教大学

このスライドのファイルは以下に置いてあります:

<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/icu2016.pdf>

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by greenery and a paved path. Behind the pond, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. A yellow rectangular box is overlaid on the image, containing the text '(1)素粒子とは'.

(1)素粒子とは

素粒子:それ以上細かくできないもの

結論から言うと、物質中の電子・クォーク・(次項で出て来る)ニュートリノが今の所素粒子と考えられている

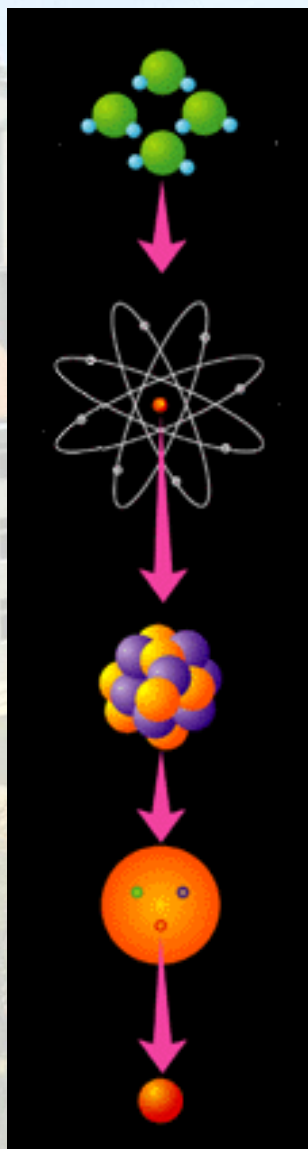
10^{-7} cm

10^{-8} cm

10^{-12} cm

10^{-13} cm

$<10^{-16}$ cm



水の分子(水素・酸素)

酸素原子(原子核・電子)

原子核(陽子・中性子)

核子

核子(uクォーク・dクォーク)

クォーク

ニュートリノ

1933年に理論的に予言された素粒子

nobelprize.org



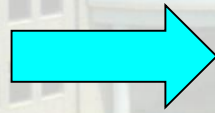
パウリ

中性子→陽子+電子

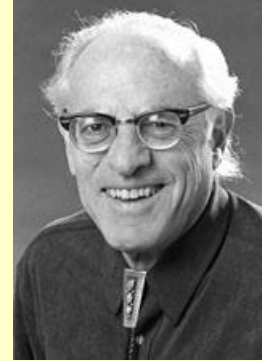
という反応で運動量・エネルギー保存則が成り立つようにするために**ニュートリノ**という中性粒子が導入された:

中性子→陽子+電子+ニュートリノ

ちなみに最初に
ニュートリノが発見されたのは
1955年のこと
である



nobelprize.org



ライネス

www.aps.org



コーワン

1998年まではニュートリノの
質量はゼロと考えられていた

1955年:ニュートリノの発見
(原子炉からのニュートリノの観測)

素粒子のまとめ(1)

- 物質はクォーク・レプトンから構成されている

クォークは複数で束縛し合い、陽子・中性子のような複合粒子を構成する

電子とニュートリノはクォークと性質が異なり、レプトンと呼ばれる

クォーク	 <p>アップ ダウン</p>
レプトン	 <p>電子 ニュートリノ 電子</p>

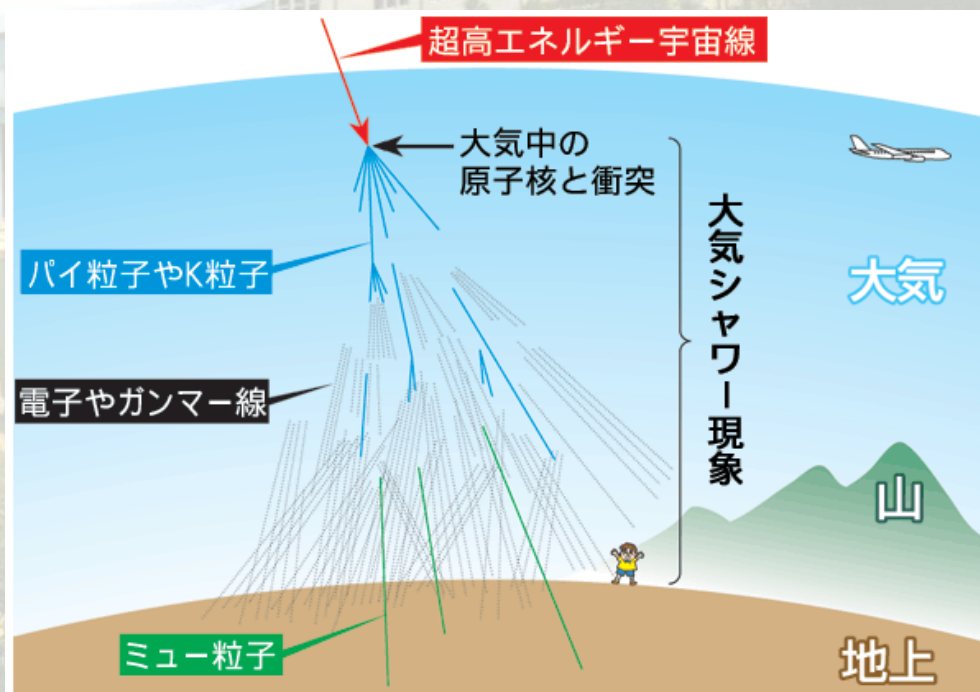
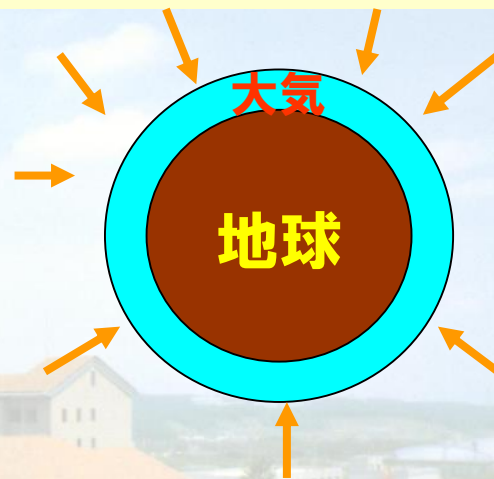
一方、世の中には宇宙線というものが降って来ていることが知られている

1次宇宙線(陽子、ヘリウム原子核)

宇宙線

- 地球には宇宙から1次宇宙線と呼ばれる粒子がつねに降り注いでいる
- それらが大気中の核子と衝突して2次宇宙線と呼ばれる粒子が生成される
- 2次宇宙線の主なものは**ミュー粒子**(電子とほとんど性質が同じで質量が電子の200倍)

ミュー粒子: 第二世代の素粒子



素粒子のまとめ(2)

●結論から言うと、素粒子には**第三世代**までであることが知られている

●ニュートリノの質量は**ゼロ**

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウ	ストレンジ	ボトム
レプトン	電子ニュートリノ	ミューオンニュートリノ	タウニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ

	粒子	質量 [MeV/c ²]
クォーク	u	約3
	d	約6
レプトン	e	0.5
	ν _e	0

	粒子	質量 [MeV/c ²]
クォーク	c	約1,200
	s	約120
レプトン	μ	106
	ν _μ	0

	粒子	質量 [MeV/c ²]
クォーク	t	174,300
	b	約4,000
レプトン	τ	1777
	ν _τ	0

世代と共に質量が増加して行く

E=mc²より、重い粒子を作るには多くのエネルギーが必要
 →特別な工夫がなければ第二・第三世代は作れない

さらに、粒子には一般に**反粒子**と呼ばれるものが存在することが知られている

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子

1930年:ディラック方程式(相対性理論+量子力学)

nobelprize.org



ディラック

陽電子(電子の**反粒子**と呼ばれる粒子)の存在を理論的に予言

1932年:陽電子の発見

霧箱とよばれる測定器で発見

nobelprize.org



アンダーソン

	電荷	質量
電子	-e	0.5
陽電子	+e	0.5

素粒子のまとめ(3)

- 素粒子には**第三世代**までの粒子と反粒子があることが知られている
- 我々の宇宙には**安定的に存在しているのは粒子から構成される物質のみで、反粒子から構成される反物質は安定的に存在していない**

物質-反物質の非対称性は現在も素粒子論・宇宙論の研究課題

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン	電子ニュートリノ	μニュートリノ	τニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ

反物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
反クォーク	反アップ	反チャーム	反トップ
	反ダウン	反ストレンジ	反ボトム
反レプトン	反電子ニュートリノ	反μニュートリノ	反τニュートリノ
	陽電子	ミュープラス	タウプラス

素粒子に働く力

自然界には4つの相互作用(=力)があることが知られている

相互作用	強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
相互作用の大きさ	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}

核力など

粒子の測定に利用

中性子の崩壊など

重力は現在の素粒子の実験エネルギーでは無視できるため議論しない

ニュートリノに働く力

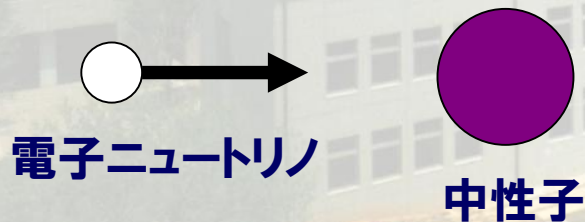
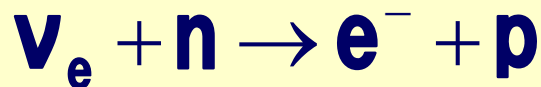
素粒子		強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
クォーク	u	○	○	○	○
	d	○	○	○	○
レプトン	e	×	○	○	○
	ν_e	×	×	○	○

(重力を除くと)ニュートリノは弱い力しか感じない

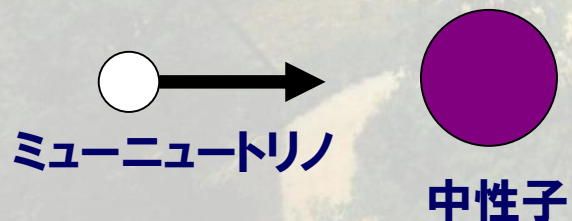
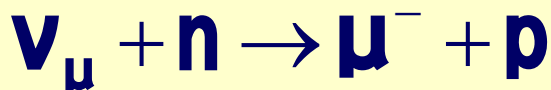
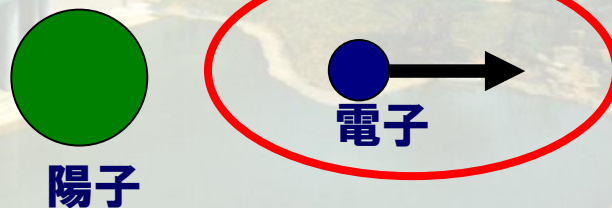
→観測はものすごく難しい

ニュートリノの観測

- ニュートリノは弱い力しか感じないので、弱い力を通してニュートリノと相互作用を起こした荷電粒子を観測する
- 標的の数を増大する(コストの削減→標的:水など経済的な物質)
- 元のニュートリノが電子型かミュー型かは生成される荷電粒子が電子かミューかで推測する



観測可能

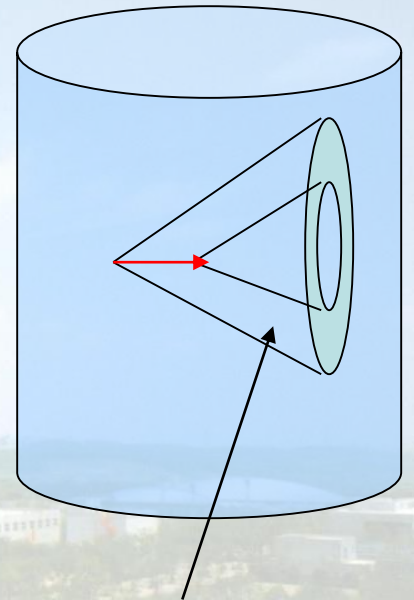


観測可能

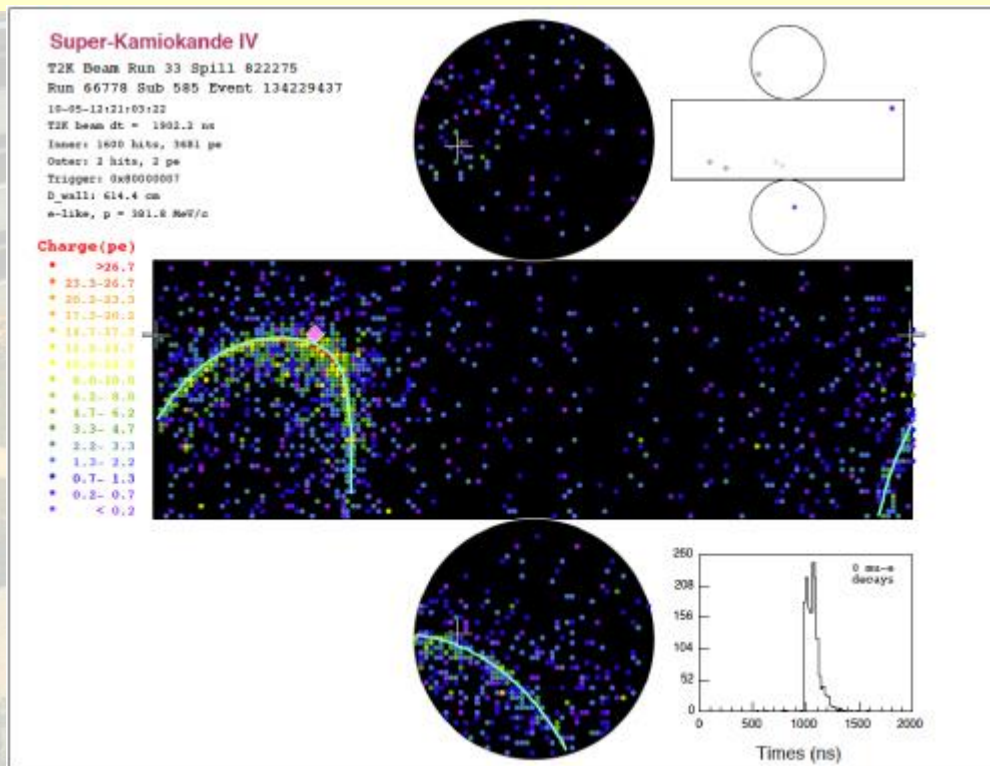


水による荷電粒子の観測の原理

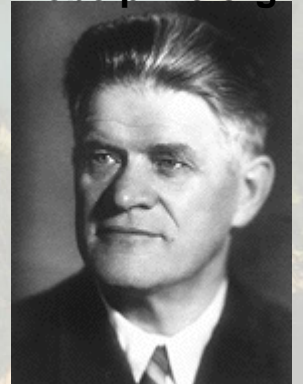
物質中では光の速度は真空中よりも遅くなる→
水中を走る荷電粒子は水中の光速度以上で運動する時に**チェレンコフ光**と呼ばれる光を放つ
(衝撃波の一種)→その光を光電子増倍管で観測する。
←IMB, カミオカンデ、スーパーカミオカンデ、SNO




チェレンコフ光



nobelprize.org



チェレンコフ

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there is a large, irregularly shaped pond with a curved walkway around its edge. Behind the pond, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. The overall scene is bright and clear.

(2)ニュートリノ振動とは

ニュートリノの質量と混合

太陽ニュートリノ欠損、大気ニュートリノ欠損の2つの現象は、**ニュートリノの質量と混合**で説明が出来ることが知られている。

実はずっと以前から、ニュートリノに質量と混合がある場合には、一つの種類のニュートリノから別な種類のニュートリノに変換する可能性が知られていた(**ニュートリノ振動**と呼ばれる現象)：

1957年 ポンテコルボ $\nu \Leftrightarrow \bar{\nu}$

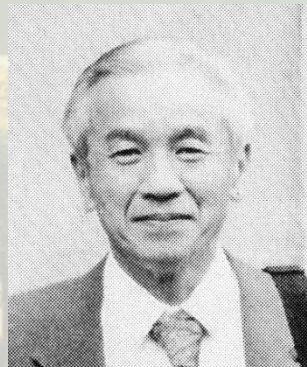
1962年 牧—中川—坂田 $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu$



ポンテコルボ



牧二郎



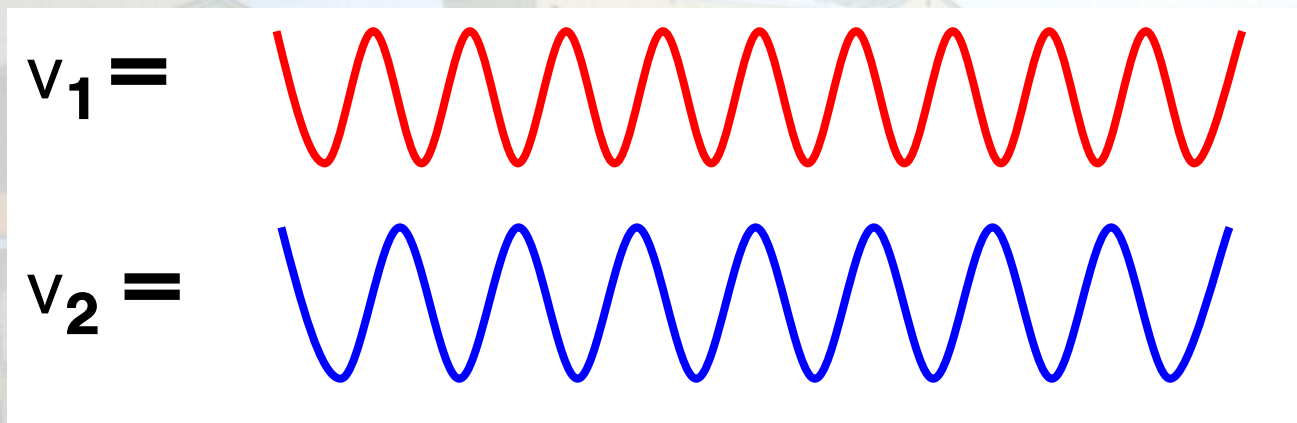
中川昌美



坂田昌一

ニュートリノの種類の変換(2世代の場合)

質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2)の波は波長が微妙に異なる:



種類が違うニュートリノの状態 ν_e, ν_μ は質量の固有状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2)の組み合わせで表せる:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \end{pmatrix}$$

ニュートリノ振動(量子力学的効果)

エネルギーEのニュートリノが距離Lだけ走る間に ν_μ から ν_e に変換される確率は

$$\sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 / \text{eV}^2) (L / \text{km})}{E / \text{GeV}} \right)$$

となり、Lについて**振動的振る舞い**を示す

これが1程度になる時にニュートリノが変換される確率が最大

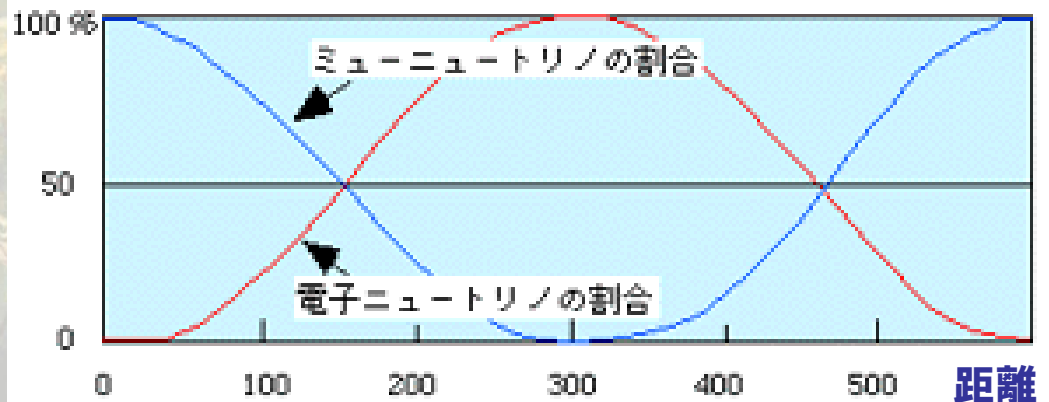
$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ なら $E = 0.6 \text{GeV} \rightarrow L = \text{約} 300 \text{km}$


$\Delta m^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ なら $E = 4 \text{MeV} \rightarrow L = \text{約} 60 \text{km}$

2つの波の差が最大となる距離

$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ は質量二乗差と呼ばれ、質量そのものではない

実験からは、 θ と Δm^2 のみがわかる



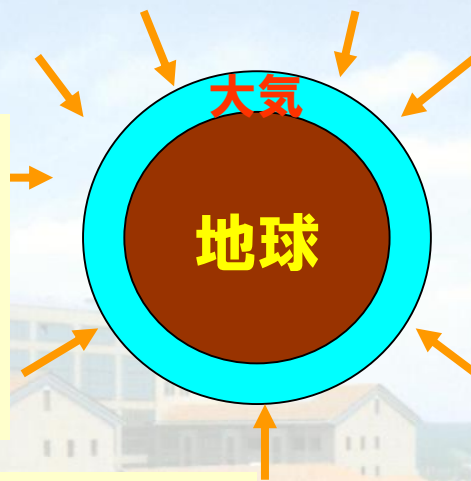
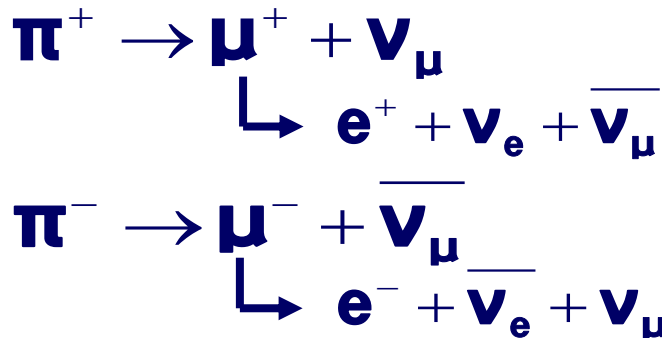
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there is a large, irregularly shaped pond with a curved walkway around its edge. Behind the pond, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. The overall scene is bright and clear.

(3)大気ニュートリノの話

大気ニュートリノ

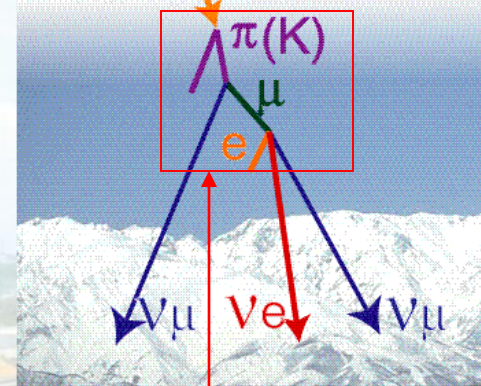
地球には宇宙から1次宇宙線
が つねに降り注いでいる→それ
らが大気中の核子と衝突して
2次宇宙線が生成される

ほとんどの粒子は π^\pm 中間子となる →
 π^\pm はミュー粒子 μ^\pm に崩壊 →
 μ^\pm は(陽)電子・ニュートリノへと崩壊→こ
れらの過程で生成されたニュートリノを**大
気ニュートリノ**と呼ぶ。



1次宇宙線 (陽子、ヘリウム)

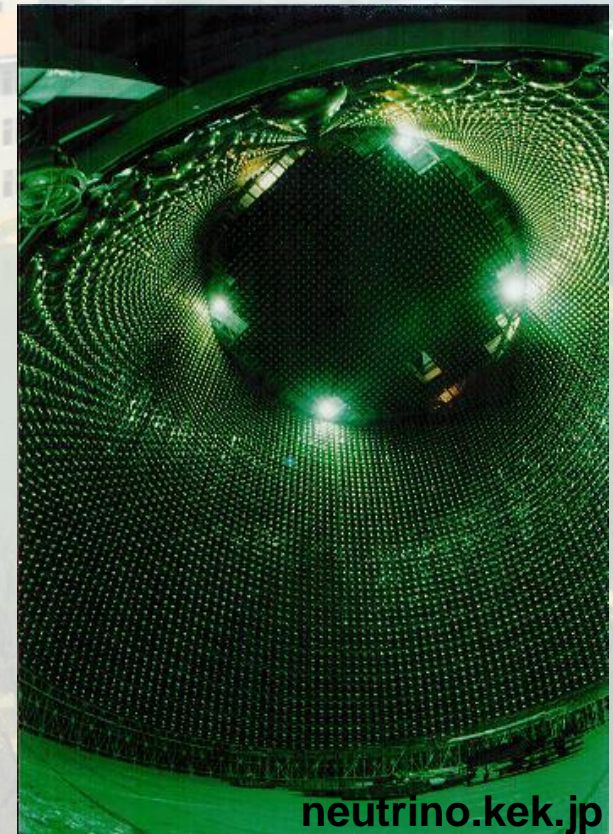
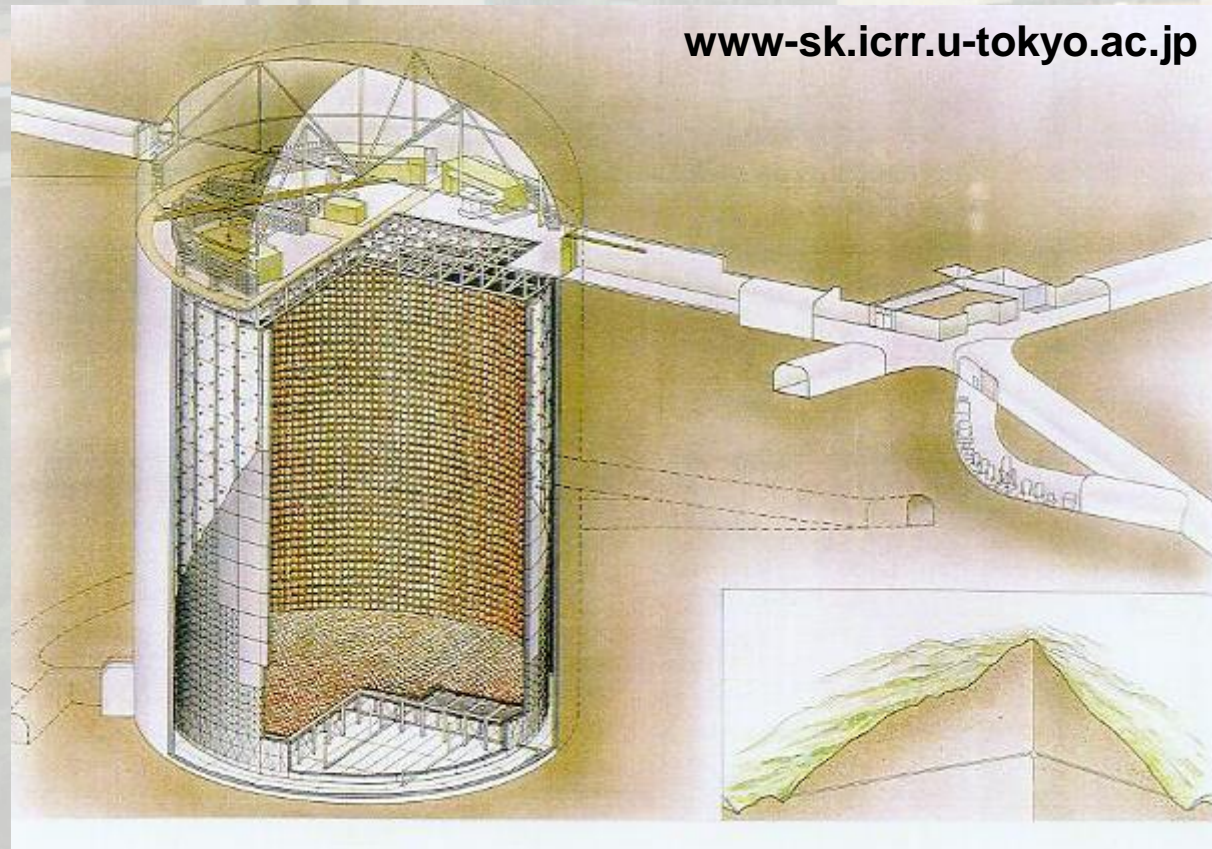
p, He, \dots



2次宇宙線
(μ^\pm, e^\pm)

スーパーカミオカンデ(1995～、岐阜県神岡)

- 水(50kt)による測定器(標的が経済的であるだけでなく、チェレンコフ光による荷電粒子の観測が可能となり、一石二鳥)
- 地下(約1km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)



大気ニュートリノ欠損の観測

粒子と反粒子の違いを無視すれば

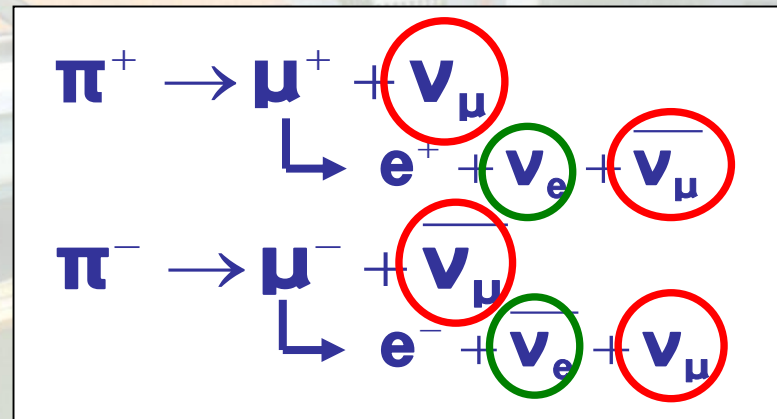
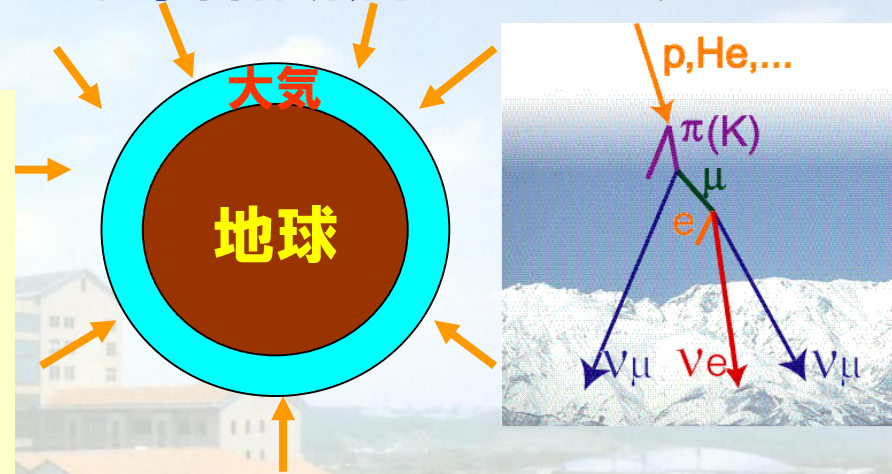
$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 2:1$$

となるはずであるが、観測結果は

$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 1.3:1$$

となって理論と食い違っていることが実験的に示された(スーパーカミオカンデ、1998年)。

1次宇宙線(陽子、ヘリウム)



大気ニュートリノ欠損の原因

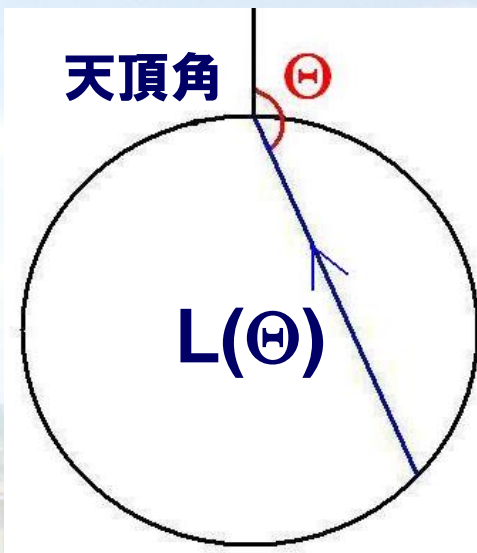
結論から言うと、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の転換で ν_μ の量が減っているのが大気ニュートリノ欠損の原因

$$(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) : (\nu_e + \bar{\nu}_e)$$

の実験値はLとEに依存し、ニュートリノ振動の公式

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

通りになっていることがスーパーカミオカンデにより1998年に実験的に証明された。



www2.kek.jp




戸塚洋二

nobelprize.org



梶田隆章

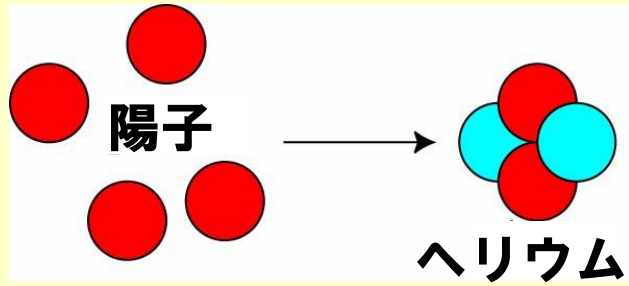
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by greenery and a paved path. Behind the pond, a large, modern building with a curved facade and several columns is visible. In the background, several other multi-story buildings with red-tiled roofs are scattered across a hillside under a blue sky with light clouds.

(4)太陽ニュートリノの話

● 太陽中の反応

弱い相互作用による反応を含む

太陽中では核融合反応



+ 2 陽電子 + 2 電子ニュートリノ

+ 26.7MeV

がっねに起こっていて**エネルギー**が発生している。この反応で発生する**電子ニュートリノ**を**太陽ニュートリノ**と呼ぶ

太陽ニュートリノ欠損の観測



電子ニュートリノ



●太陽ニュートリノは、1970年頃からデイビスが米国サウスダコタ州にあるホームステークで行ってきた実験で観測されていたが、実験値は理論値の約1/2以下であることが長年にわたり知られていた。これを**太陽ニュートリノ問題**と呼ぶ。



デイビス

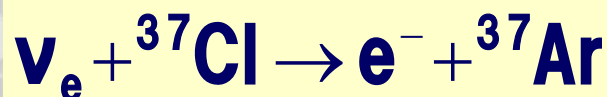
結論から言うと $\nu_e \rightarrow \nu_\mu + \nu_\tau$ の転換により ν_e の量が減っているのが太陽ニュートリノ欠損の原因

2000年頃までの太陽ニュートリノの観測

- 太陽ニュートリノは低エネルギー(<10MeV)なので、ミュー粒子 ($mc^2=106\text{MeV}$)やタウ粒子($mc^2=1777\text{MeV}$)を生成することはできず、 ν_e がどれだけ減ったかしか測定できない。
- 太陽ニュートリノのフラックスの予言値には理論的不定性があり、ニュートリノ振動が原因で減っているのかどうか、本当の所はわからない。

Homestake(米)

1968年

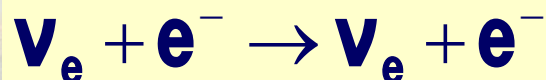


放射化学的測定

$E \geq 0.8\text{MeV}$

Kamiokande (日)

1989年



水チェレンコフ

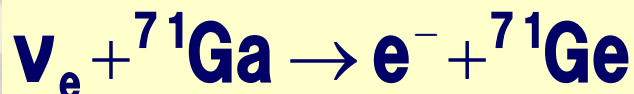
$E > 5\text{MeV}$

Superkamiokande (日)

1998年

GALLEX (伊)

1998年



放射化学的測定

$E \geq 0.2\text{MeV}$

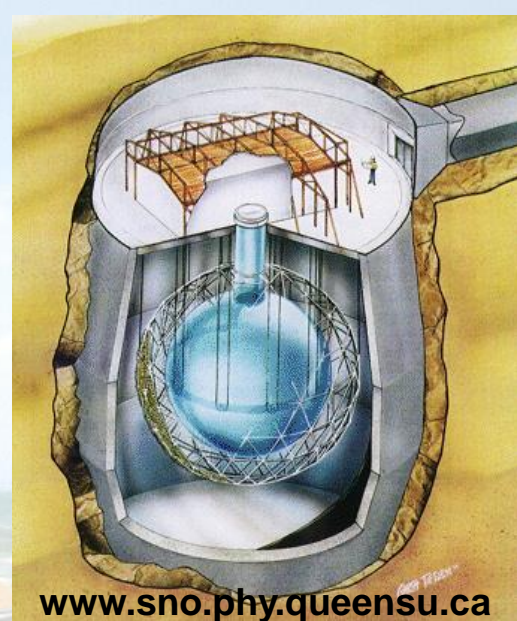
SAGE (露)

1999年

SNO (Sudbury Neutrino Observatory、カナダ オンタリオ州サドベリー市クレイトン鉱山、1999 ～2006)

D_2O , $d = (pn)$, 重陽子

- 重水(1kt)による測定器(カナダには重水炉が複数箇所あり、高価な重水(～100円/g)が豊富→カナダ原子力公社から1ktを無償で借用)
- 地下(約2km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)



nobelprize.org



マクドナルド

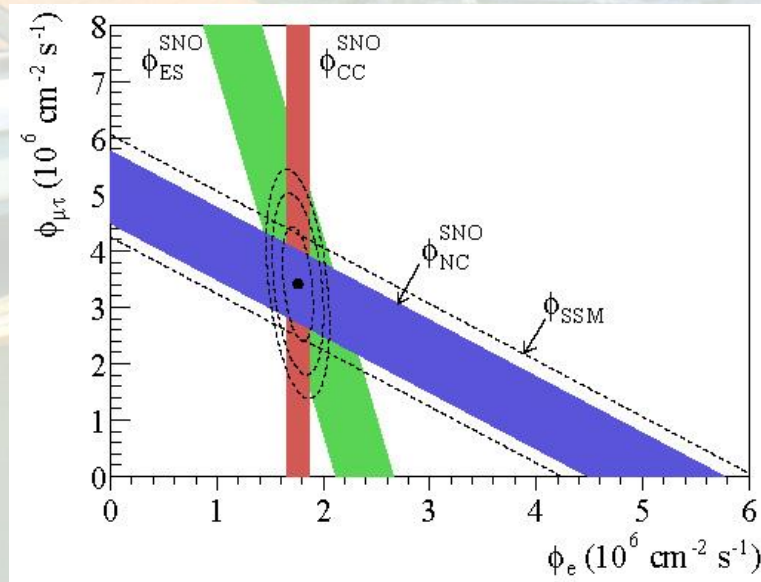
SNOでは次の2つの反応を観測することができる[d=(pn)]:

$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \rightarrow \nu_e$ のみ可能 $\rightarrow \nu_e$ のみのfluxが測定可能

$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \rightarrow \nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ の全部可能 $\rightarrow \nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ のfluxが測定可能
x=e, μ , τ

これら2つの反応を比較した結果、
 $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ は理論値通りで、
 ν_e の量が減っていることが示された(2002年4月19日)

\rightarrow ニュートリノ振動の証拠



2015年ノーベル物理学賞



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

大気v

Share this: 103

Takaaki Kajita - Facts



Photo © Takaaki Kajita

Takaaki Kajita

Born: 1959, Higashimatsuyama, Japan

Affiliation at the time of the award:
University of Tokyo, Kashiwa, Japan

Prize motivation: "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

Prize share: 1/2

nobelprize.org



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

太陽v

Share this: 56

Arthur B. McDonald - Facts



Photo: K. MacFarlane, Queen's University /SNOLAB

Arthur B. McDonald

Born: 1943, Sydney, Canada

Affiliation at the time of the award:
Queen's University, Kingston, Canada

Prize motivation: "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

Prize share: 1/2

nobelprize.org

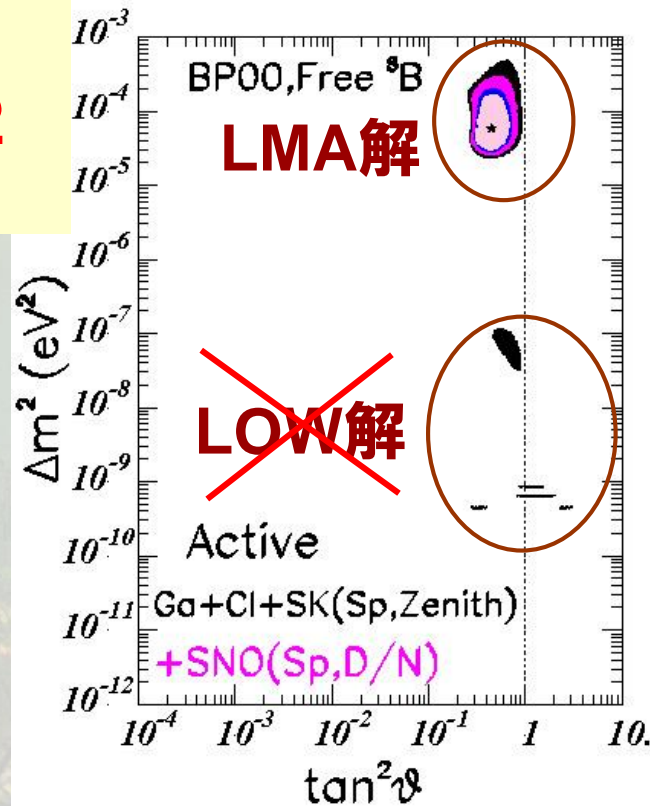
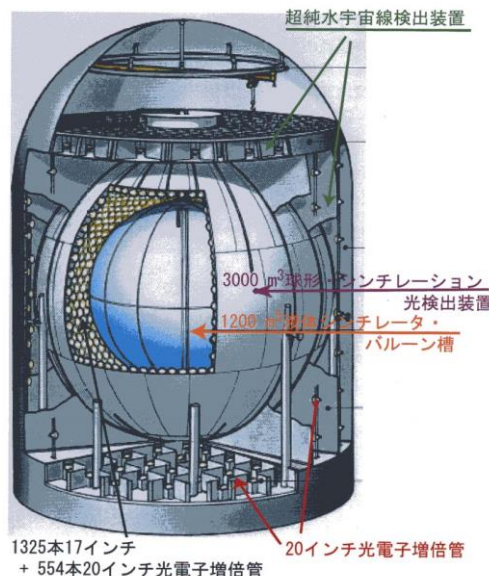
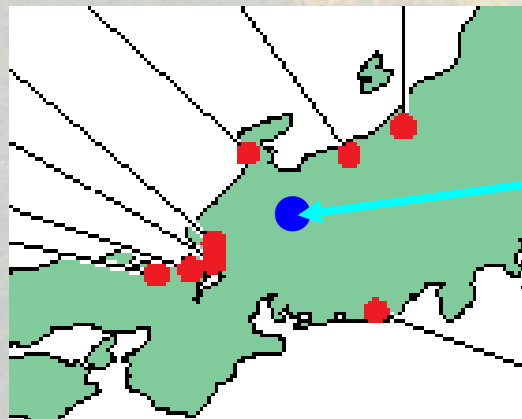
カムランド(原子炉ニュートリノ欠損, 2002 ~)

- 液体シンチレーターによる測定器
- 各地にある原発(平均距離200km)から来る反電子ニュートリノを検出
- 原子炉ニュートリノの欠損を発見(世界初)
- その結果は太陽ニュートリノのLMA解と一致し



鈴木厚人

(SNOが排除できなかったLOW解を排除)、
太陽ニュートリノ問題を最終的に解決(2002年12月6日)



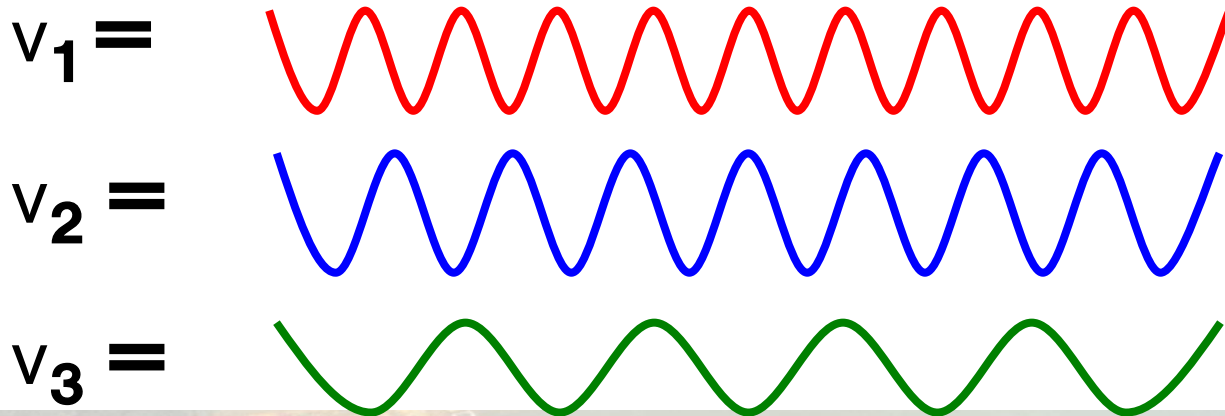
An aerial photograph of a university campus. In the center, there is a large, modern building with a curved facade and a prominent entrance. To the right of the building is a large, irregularly shaped pond. The campus is surrounded by greenery and trees. The sky is blue with some clouds. A yellow rectangular box is overlaid on the image, containing the text.

**(5)その後の発展：三世代
ニュートリノ振動**

ニュートリノの種類の変換(3世代の場合)

実際にはニュートリノには3世代ある→3種類の質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3)が必要

質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3)の波は波長が微妙に異なる:



種類の違うニュートリノの状態 ν_e, ν_μ, ν_τ は質量の固有状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3)の組み合わせで表せる:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3 \\ U_{\mu 1}\nu_1 + U_{\mu 2}\nu_2 + U_{\mu 3}\nu_3 \\ U_{\tau 1}\nu_1 + U_{\tau 2}\nu_2 + U_{\tau 3}\nu_3 \end{pmatrix}$$

3世代ニュートリノの質量と混合

混合行列は牧・中川・坂田行列と呼ばれる(4個の変数を含む)

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{e1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{e2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{e3}\mathbf{v}_3 \\ \mathbf{U}_{\mu1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{\mu2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{\mu3}\mathbf{v}_3 \\ \mathbf{U}_{\tau1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{\tau2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{\tau3}\mathbf{v}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{e1} & \mathbf{U}_{e2} & \mathbf{U}_{e3} \\ \mathbf{U}_{\mu1} & \mathbf{U}_{\mu2} & \mathbf{U}_{\mu3} \\ \mathbf{U}_{\tau1} & \mathbf{U}_{\tau2} & \mathbf{U}_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

→確率は複雑になる

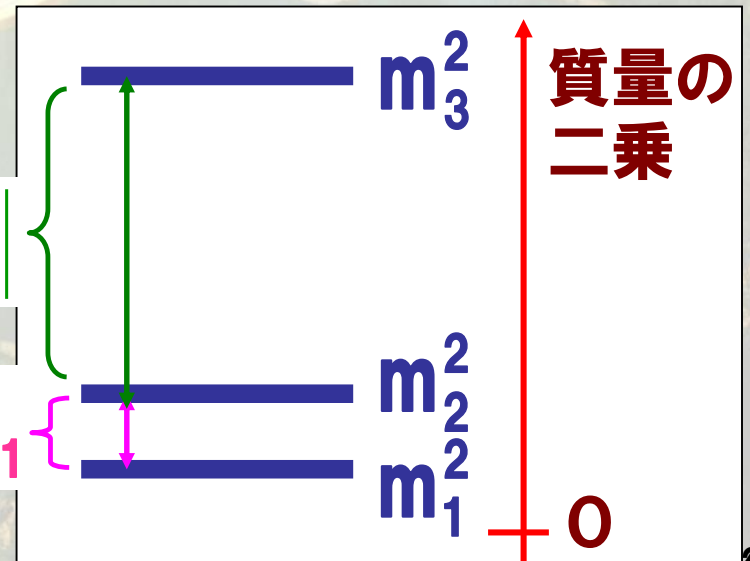
最終的に求めるものは牧・中川・坂田行列のパラメーター4個(θ_{12} ; θ_{23} ; θ_{13} ; δ)と質量の二乗の差2個

θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} : 混合角

δ : CP非保存の位相

$$|\Delta m_{32}^2|$$

$$\Delta m_{21}^2$$



現在までのニュートリノ振動実験のまとめ

● 太陽ニュートリノ・カムランド

$$\Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2; E=4\text{MeV} \rightarrow L=\text{約}100\text{km}$$

⇒ $(\Delta m_{21}^2, \theta_{12})$ が決定されている

● 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ(K2K(日,2003), MINOS(米,2006), OPERA(伊,2010), T2K(日,2011)) ⇒

$$|\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; E=0.6\text{GeV} \rightarrow L=\text{約}300\text{km}$$

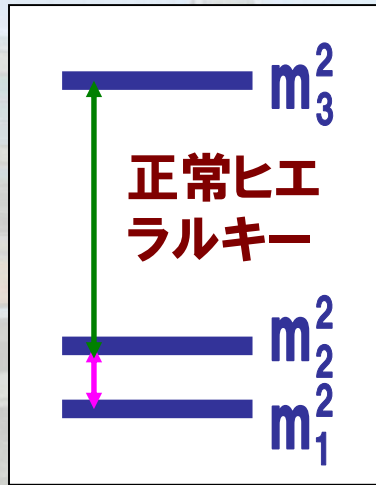
⇒ $(|\Delta m_{32}^2|, \theta_{23})$ が決定されている

● 短基線原子炉ニュートリノ(Double-CHOOZ(仏,2011), Daya Bay(中,2012), Reno(韓,2012))

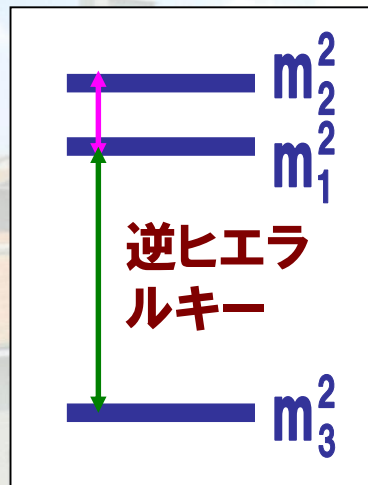
$$|\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; E=4\text{GeV} \rightarrow L=\text{約}2\text{km}$$

⇒ θ_{13} が決定されている

ニュートリノ振動実験の今後の課題



又は



質量のパターンは現在の所、左図のどちらの可能性も残っている

現時点で未定なものは

- CP非保存位相 δ
- 質量パターン

特にニュートリノと反ニュートリノの振動の違いを表すCP非保存位相 δ は、宇宙の物質-反物質の非対称性を説明する物理の鍵を与える

T2HK: 将来計画

● 第二段階 (2025 (?) 年～)

0.75MWのニュートリノビーム⇒ハイパーカミオカンデ



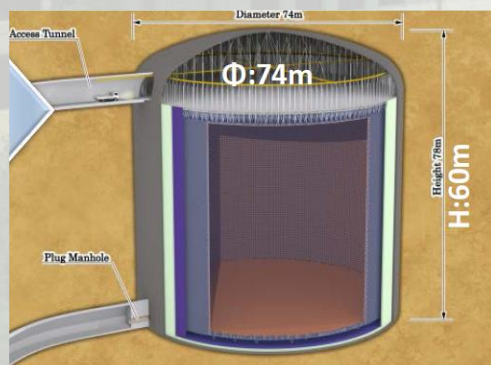
小林隆



中家剛

● T2Kの拡張版(イベント数を5000倍にして精密実験)

● CPの破れ δ を測る



Hyper-kamiokande

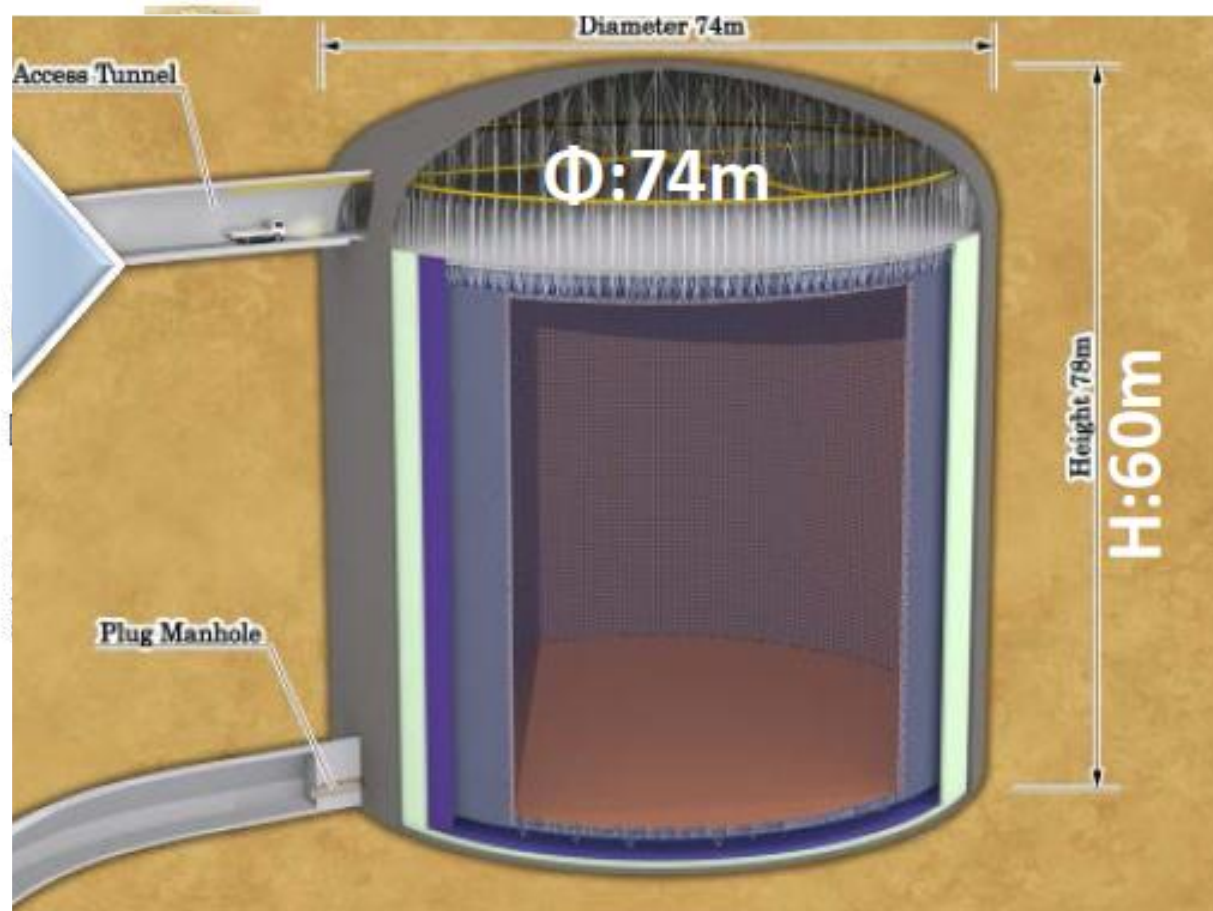
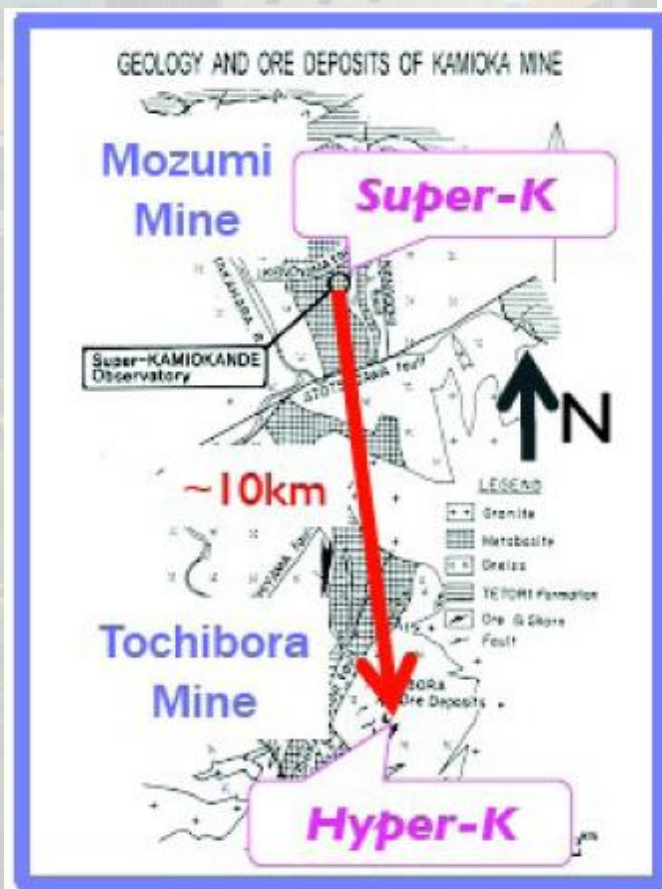


J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)

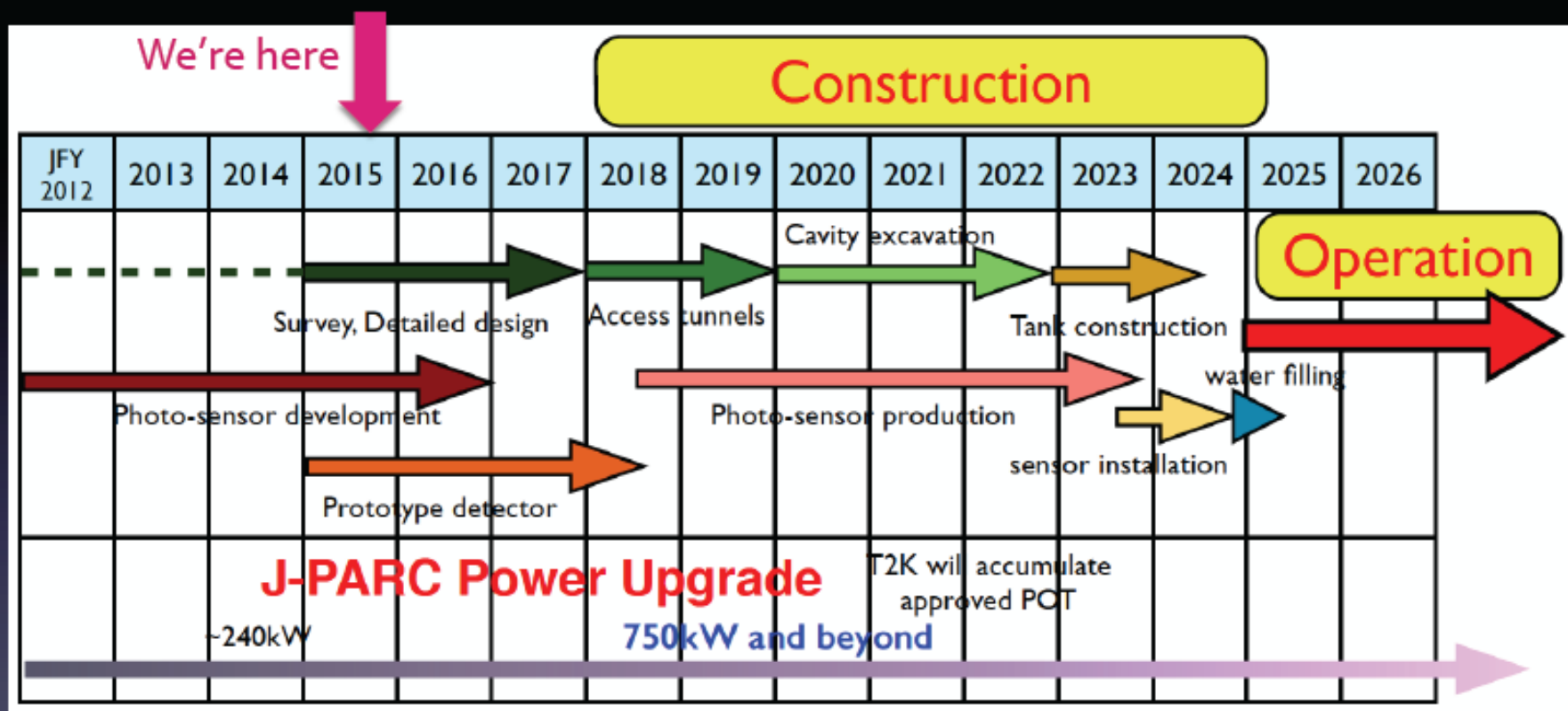


ハイパーカミオカンデ ($H_2O:0.5Mt=SK \times 10$, 2025(?) -)

- ニュートリノ振動の精密測定
- 陽子崩壊のさらなる探求
- 超新星ニュートリノの精密測定 (もし超新星爆発があった場合)



ハイパーカミオカンデの工程予定表



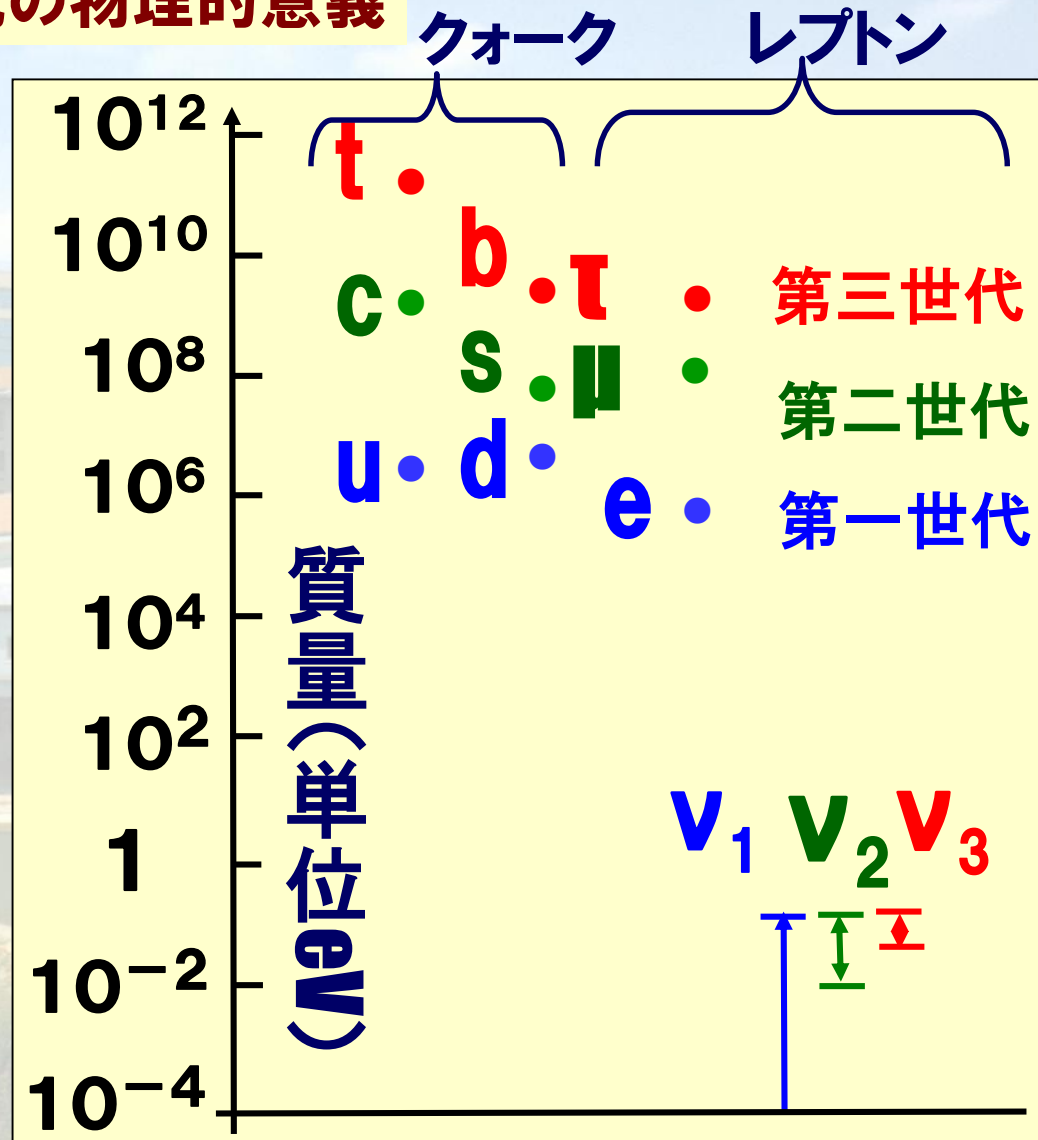
- 2016 Start making the detailed design
- 2018 Start the excavation
- 2025 Start the operation

まとめ:ニュートリノ振動の発見の物理的意義

- ニュートリノの質量は素粒子の標準模型ではゼロと仮定されており、標準模型を超える新物理を探る鍵を与える→新物理のさらなる研究の加速

- ニュートリノ振動の発見からニュートリノに非常に小さい質量があることがわかった→質量階層性の新たな謎

- ニュートリノと反ニュートリノの振動の違いを表すCP非保存位相 δ は、宇宙の物質-反物質の非対称性を説明する物理の鍵を与える→宇宙論へのさらなる応用



レポート課題

- 授業の中で、興味があったトピックスについて、A4レポート用紙半ページ程度で自分の理解したこと・感じたことをまとめてください。

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, dark, irregularly shaped pond is surrounded by a paved walkway and greenery. Behind the pond, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. A semi-transparent yellow rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text "Backup slides" in a bold, dark blue font.

Backup slides

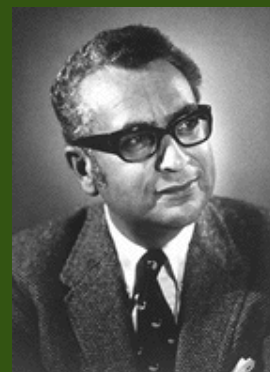
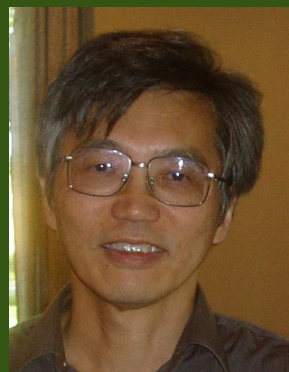
ニュートリノの小さな質量

←ニュートリノが注目される訳

1978~79年
シーソー機構



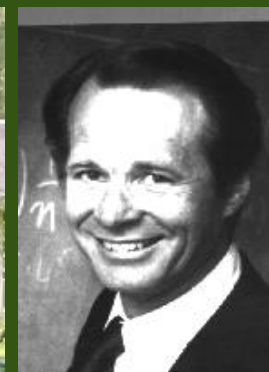
ミンコフスキー 柳田勉



ゲルマン



ラモン



スランスキー

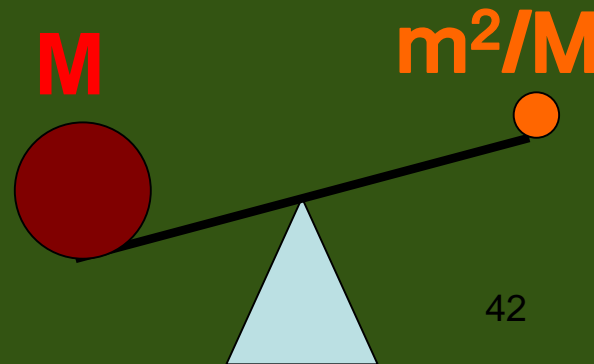
$$\left(\overline{(\nu_L)^c}, \bar{\nu}_R \right) \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} \nu_L \\ (\nu_R)^c \end{pmatrix} + h.c.$$

$$\simeq U \text{diag}(-m^2/M, M) U^{-1}$$

$$U \simeq \begin{pmatrix} 1 & m/M \\ -m/M & 1 \end{pmatrix}$$

$m = 1 \text{ GeV}$ の時に m^2/M がニュートリノの質量 m_ν だと仮定すると、 $m_\nu = m^2/M \leq 0.05 \text{ eV} \rightarrow M > 10^{10} \text{ GeV}$

ニュートリノの小さな質量は高エネルギーにおける物理の兆候か？



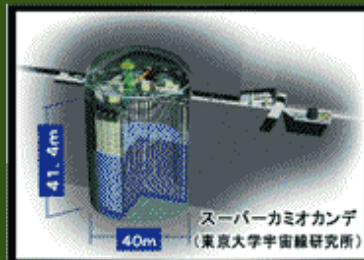
T2K (Tokai To Kamioka; 2009~、加速器ニュートリノ欠損)

● 第一段階 (2009年~)

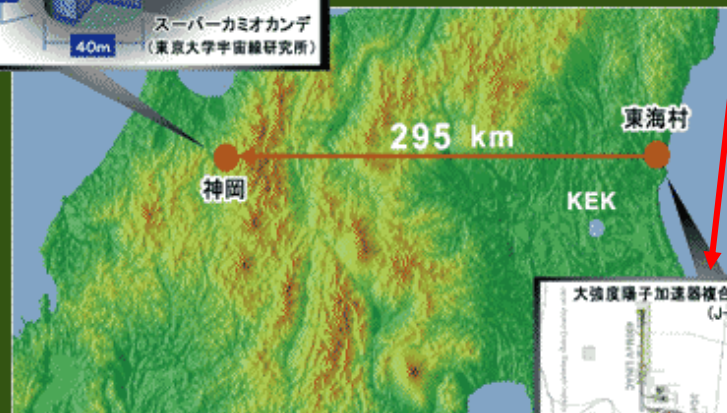
0.24MWのニュートリノビーム (JPARC)
⇒ SK(K2Kの20倍)

● K2Kの拡張版(イベント数を20倍にした精密実験)

● 牧・中川・坂田行列の未知の混合角 θ_{13} の値を測る



大強度陽子加速器複合施設 (JPARC)



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ の発見

結果発表: 2011年6月15日

バックグラウンド1.5イベントが期待される所に6イベントが観測された
→ $\theta_{13}=0$ は99.3%の確率で排除



小林隆



中家剛