



短期集中講座


2014年3月20日@都立科学技術高校

素粒子物理学へのいざない

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

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/ssh20140320.pdf>

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there is a large, irregularly shaped pond with a light-colored path or walkway around its edge. The pond is surrounded by green trees and grass. In the background, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible under a blue sky with scattered white clouds. A semi-transparent yellow rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the title text.

第一部 素粒子の標準模型

1. 素粒子とは

それ以上細かくできないもの

→ 結論から言うと、今の所、物質中の**電子・クォーク**が素粒子と考えられている

10^{-7}cm



水の分子(水素・酸素)

10^{-8}cm



酸素原子(原子核・**電子**)

10^{-12}cm



原子核(陽子・中性子)

核子

10^{-13}cm



陽子(uud) u:**アップクォーク**

中性子(udd) d:**ダウンクォーク**

10^{-16}cm 以下



クォーク

一方、**ニュートリノ**と呼ばれる素粒子も知られている
(ただし日常生活ではなじみがない)

理論:ニュートリノの予言(1933年)

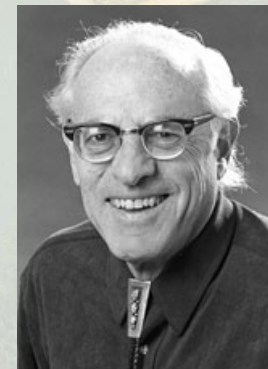
中性子→**陽子**+**電子**+ (**ニュートリノ**)
という反応でエネルギー保存則が成り立つようにするために**ニュートリノ**という**電氣的に中性な粒子**が導入された



パウリ

実験:ニュートリノの発見(1955年)

原子炉の中では
中性子→**陽子**+**電子**+**ニュートリノ**
という反応が起こっており、多量の
ニュートリノが作られている→このニュートリノを検出することに成功



ライネス



コーワン

素粒子を議論する場合の注意点

- 素粒子はほとんどの場合、光速度に近い速度で運動する
→素粒子の運動は**特殊相対論**による議論が必要
- 素粒子は非常に微視的なスケールの物体
→素粒子の運動は**量子力学**による記述が必要

● 特殊相対論 (1904年)

アインシュタインの関係式($E=mc^2$ を、粒子が運動している場合に拡張)

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

m: 粒子の質量

E: 粒子のエネルギー

p: 粒子の運動量

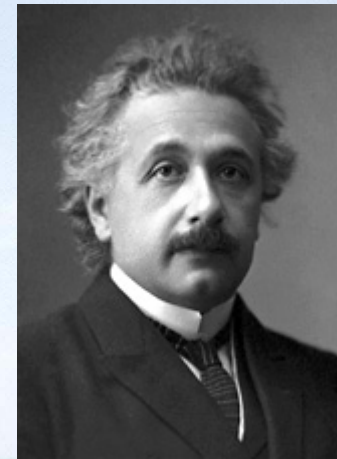
(= 質量 × 速度)

$$(p = mv / \sqrt{1 - v^2/c^2})$$

v: 粒子の速度

c: 光速 $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

(1秒間に地球7
回周半の速さ)



アインシュタイン

●量子力学 (1930年頃)

ハイゼンベルグの不確定性原理

(粒子の位置と運動量は原理的に同時に正確には測定できない)

$$\Delta x \times \Delta p \geq h / (4 \pi)$$

Δx :座標の不確定性

Δp :運動量の不確定性

h :プランク定数= 7×10^{-34} J·s

実際には $\Delta x \rightarrow x$ 、 $\Delta p \rightarrow p$ として
一番良い条件の測定を考えると

$$x \cdot pc \cong hc / (4 \pi) \cong 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{eV}$$

※1eV (電子ボルト) = 1.6×10^{-19} J (ジュール) は
エネルギーの単位(粒子の質量の記述に便利)

1keV (キロ・エレクトロンボルト、ケブ) = 10^3 eV

1MeV (メガ・エレクトロンボルト、メブ) = 10^6 eV

1GeV (ギガ・エレクトロンボルト、ジェブ) = 10^9 eV



ハイゼンベルグ

ミクロな粒子の運動は正確に記述することが原理的に不可能で、ある位置での存在などの確率しか予言できない

微細構造を探求するにはどれだけのエネルギー(=お金)がかかるか？

粒子の拡がり 粒子を探るエネルギー $E \equiv$ 物体の結合エネルギー

テスト粒子

物体(結合状態)

E が結合エネルギーより大きければ物体をバラバラに出来るはず

粒子のエネルギー E

バラバラにするエネルギー E と、探索できる粒子の大きさ x の関係は不確定性原理から求められる

たとえば言えば、時計同士を軽くぶつけると、ちょっと蓋が取れる程度だが思い切りぶつけると、小さな部品までバラバラになる

$x=10^{-7}$ cm \Leftrightarrow $E=100$ eV (分子)

$x=10^{-8}$ cm \Leftrightarrow $E=1$ keV (原子)

$x=10^{-12}$ cm \Leftrightarrow $E=10$ MeV (原子核)

$x=10^{-13}$ cm \Leftrightarrow $E=100$ MeV (核子)

$x < 10^{-16}$ cm \Leftrightarrow $E > 100$ GeV (クォーク)

$$E = \frac{10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{eV}}{x}$$

微細構造を見るにはエネルギーを高くする必要がある

ここまでのまとめ：色々な粒子

	総称	粒子	電荷	質量 [MeV]
複合粒子	核子	陽子(uud)	+e	938
		中性子(udd)	0	940
素粒子	クォーク	u(アップ)	$+\frac{2}{3}e$	約3
		d(ダウン)	$-\frac{1}{3}e$	約6
	レプトン	電子	-e	0.5
		ニュートリノ	0	0

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

電荷の単位:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C (クーロン)}$$

質量の単位(粒子の質量の記述に便利):

$$\text{MeV}/c^2 = 1.783 \times 10^{-30} \text{kg}$$

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子
粒子には一般に**反粒子**が存在

1930年:ディラック方程式(相対性理論+量子力学)



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



アンダーソン

霧箱とよばれる測定器
で発見

	電荷	質量 [MeV]
電子	-e	0.5
陽電子	+e	0.5

素粒子 = クォーク + レプトン + 反クォーク + 反レプトン

粒子

	粒子	電荷	質量 [MeV]
クォーク	アップ	$+2e/3$	約3
	ダウン	$-e/3$	約6
レプトン	電子	$-e$	0.5
	電子ニュートリノ	0	0

反粒子

	粒子	電荷	質量 [MeV]
反クォーク	反アップ	$-2e/3$	約3
	反ダウン	$+e/3$	約6
反レプトン	陽電子	$+e$	0.5
	反電子ニュートリノ	0	0

宇宙線

←実は他にも素粒子がある

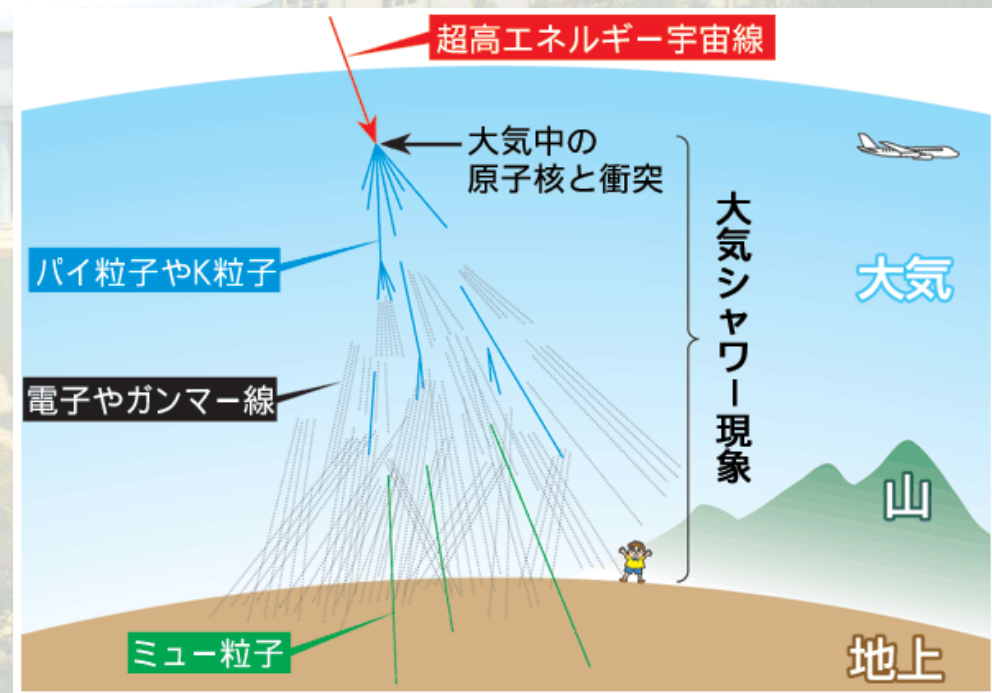
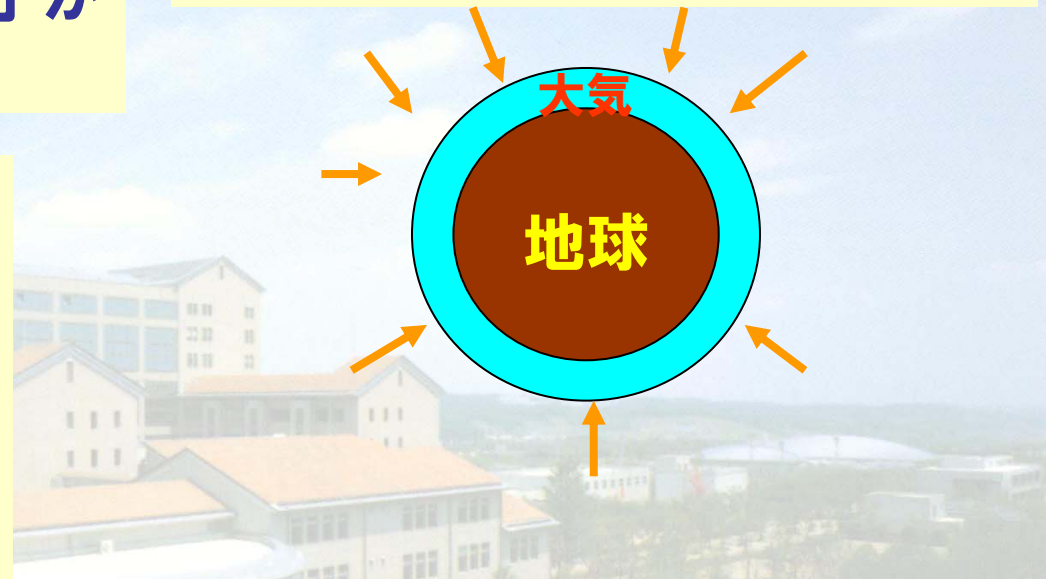
1次宇宙線(陽子、ヘリウム原子核)

●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 = 三世代のクォーク + レプトン

第一世代

	粒子	電荷	質量
クォーク	u (アップ)	$+2e/3$	約3
	d (ダウン)	$-e/3$	約6
レプトン	電子	$-e$	0.5
	電子ニュートリノ	0	0

第二世代

	粒子	電荷	質量
クォーク	c (チャーム)	$+2e/3$	約1,200
	s (ストレンジ)	$-e/3$	約120
レプトン	ミュー	$-e$	106
	ミューニュートリノ	0	0

第三世代

	粒子	電荷	質量
クォーク	t (トップ)	$+2e/3$	174,300
	b (ボトム)	$-e/3$	約4,000
レプトン	タウ	$-e$	1777
	タウニュートリノ	0	0

世代と共に
質量が増加
して行く

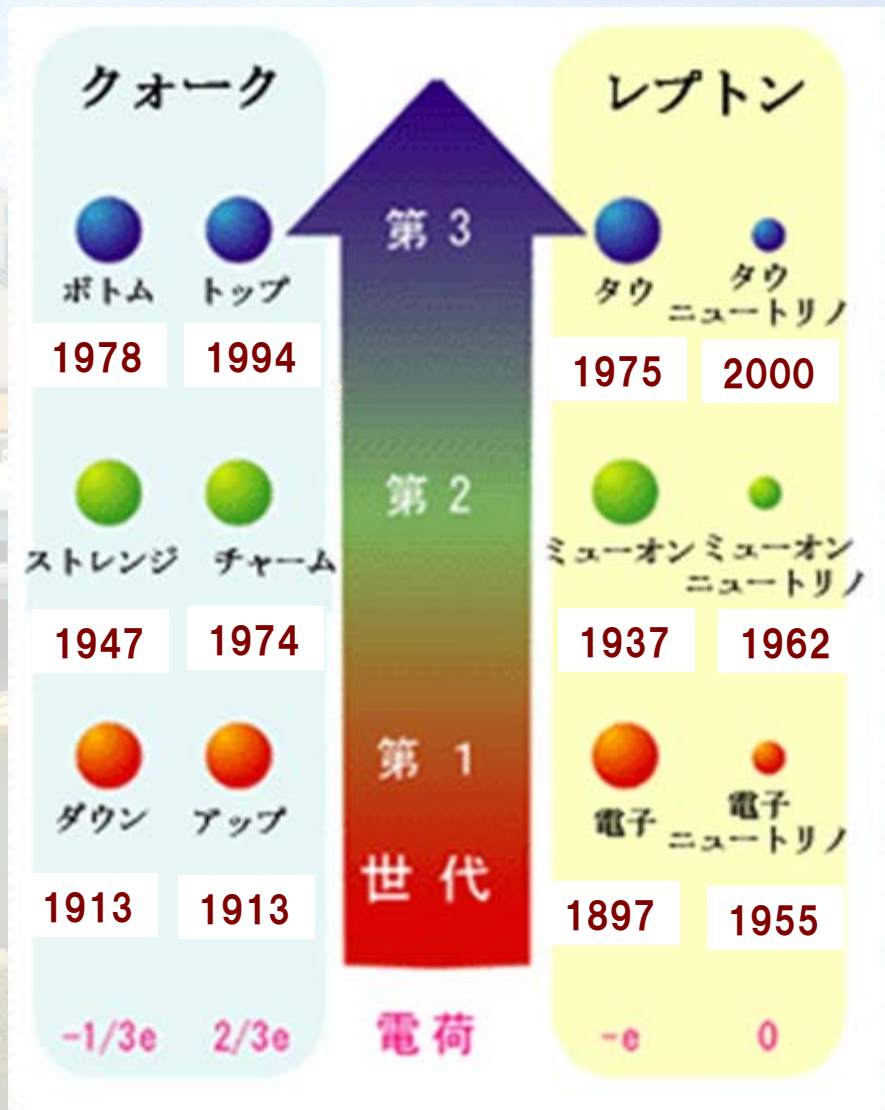
$E=mc^2$ より、
重い粒子を作る
には多くのエネ
ルギーが必要

→特別な工夫が
なければ第二・
第三世代の素
粒子は作れない

実は三代目のクォークは理論的に予言されていた！

1972年：小林-益川理論

CPと呼ばれる対称性の破れを説明したいという動機から、3世代クォークの存在は予言されていた

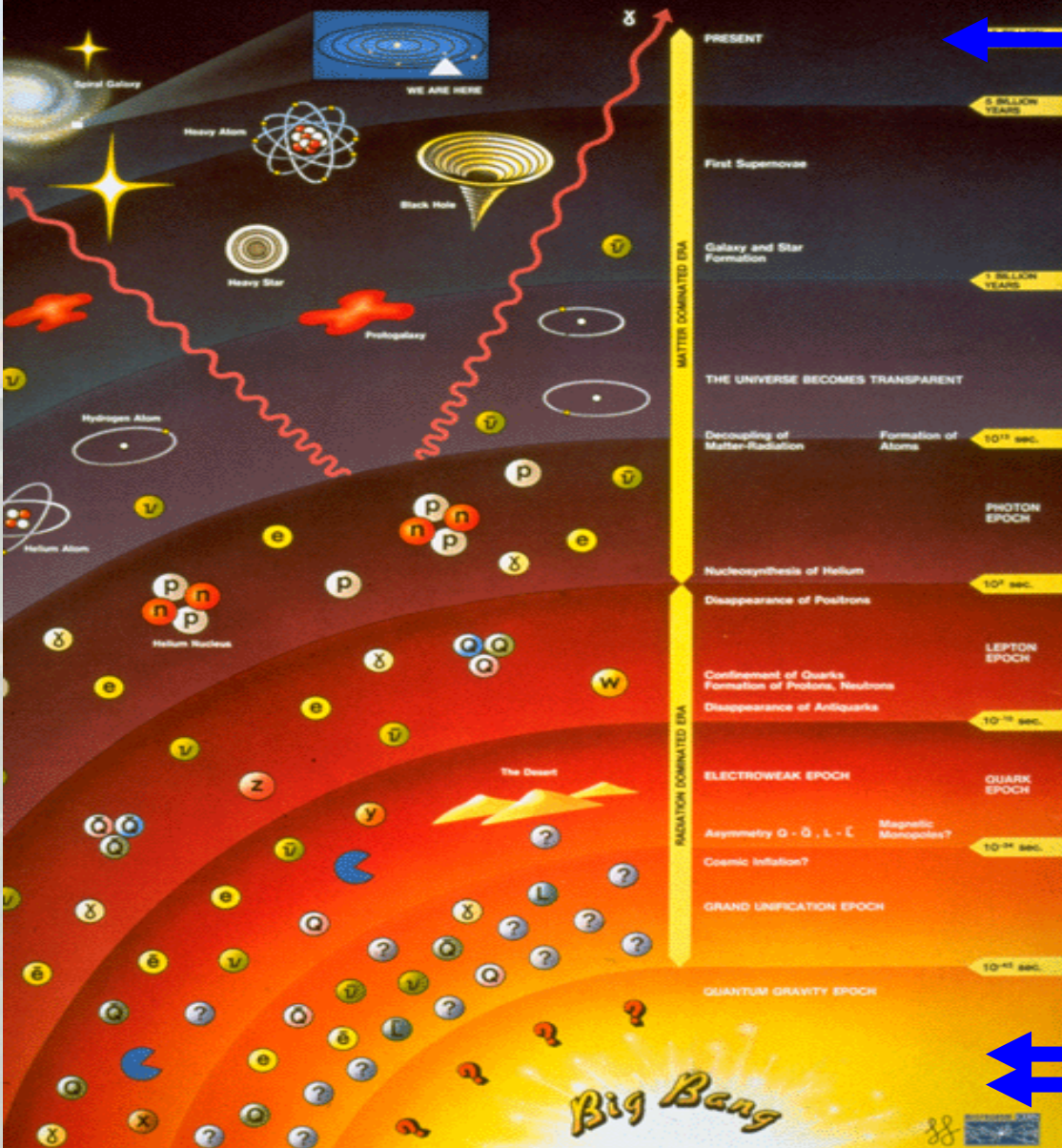


小林誠



益川敏英

History of the Universe



温度 = 3度 (= 摂氏 -270度)
現在の宇宙は**粒子(物質)の世界**であることが知られている

宇宙が膨張し、宇宙の温度が下がる

ある時期に、粒子と反粒子の非対称性が作られたに違いない!

温度 = 10^{32} 度
宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけ創られた
→物質・反物質は同数だけあるはず

宇宙はビッグバンで誕生した

CP対称性の性質

CP対称性の破れがあると

重い粒子 \rightarrow 軽い粒子 $+ \dots$
重い反粒子 \rightarrow 軽い反粒子 $+ \dots$

という崩壊反応の頻度に違いが出る事が知られている

したがって、CP対称性の破れがあると
 \rightarrow 宇宙における物質・反物質の非対称性を宇宙論
+ 素粒子論で説明できるかもしれない！

数学的には、CP対称性の破れを記述するには相
互作用を記述する定数が複素数でなければならない
ことが知られている

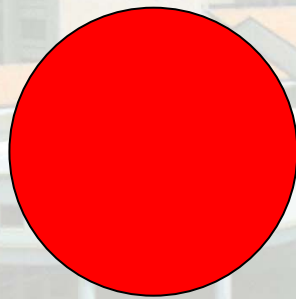
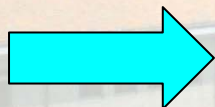
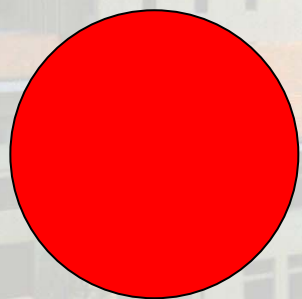
2. 対称性

(注意)

ここでの説明は直観的理解を重んじるため、数学的・物理的にはかなり正確さを欠いたものになっています

対称性とは

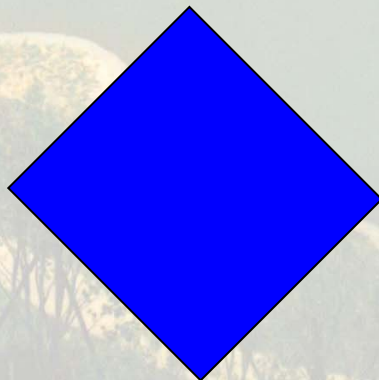
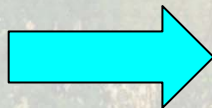
ある操作をしても結果が変わらない性質



45° 回転させても
同じ図形となる



(回転)対称性がある



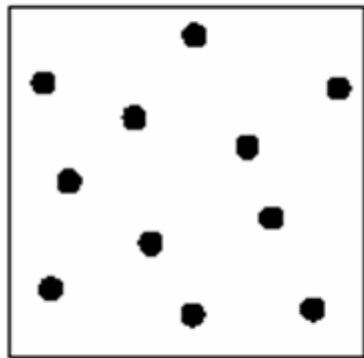
45° 回転させると同
じ図形とならない



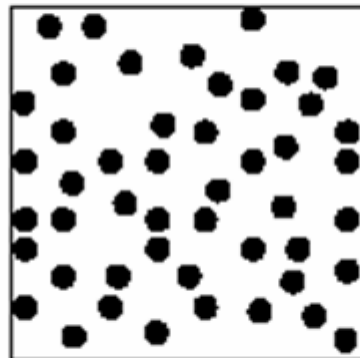
(回転)対称性がない

自然界には条件が変わることにより対称性がなくなっていく例が見つかる(相転移)

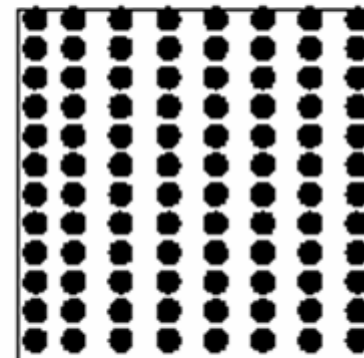
温度を下げてゆくとエネルギー的に有利な状態に落ち着く



気体



液体



固体

(回転)対称性がある

(回転)対称性がない

このような場合、対称性が自発的に(自然に)破れるという



素粒子物理における**真空**

真空とは何もない状態ではなく、
エネルギーの最も低い状態のこと

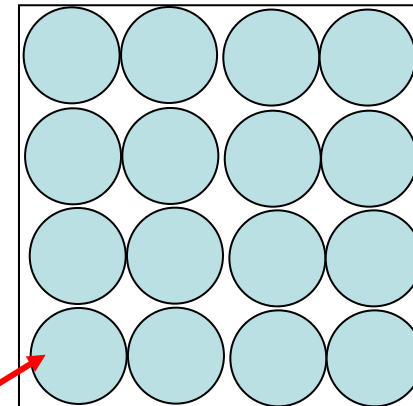
実は素粒子の世界では温度が低くなると、**ヒッグス粒子**と呼ばれる粒子が空間にびっしり詰まった状態の方がエネルギーの低い状態となり、**対称性のない状態の方が好まれる**

宇宙の温度が下ってゆく



ヒッグス粒子のない状態

真空 = **対称性**がある状態



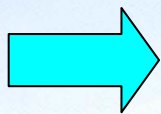
ヒッグス粒子

ヒッグス粒子のびっしり詰まった状態

真空 = **対称性**のない状態

対称性がある状態

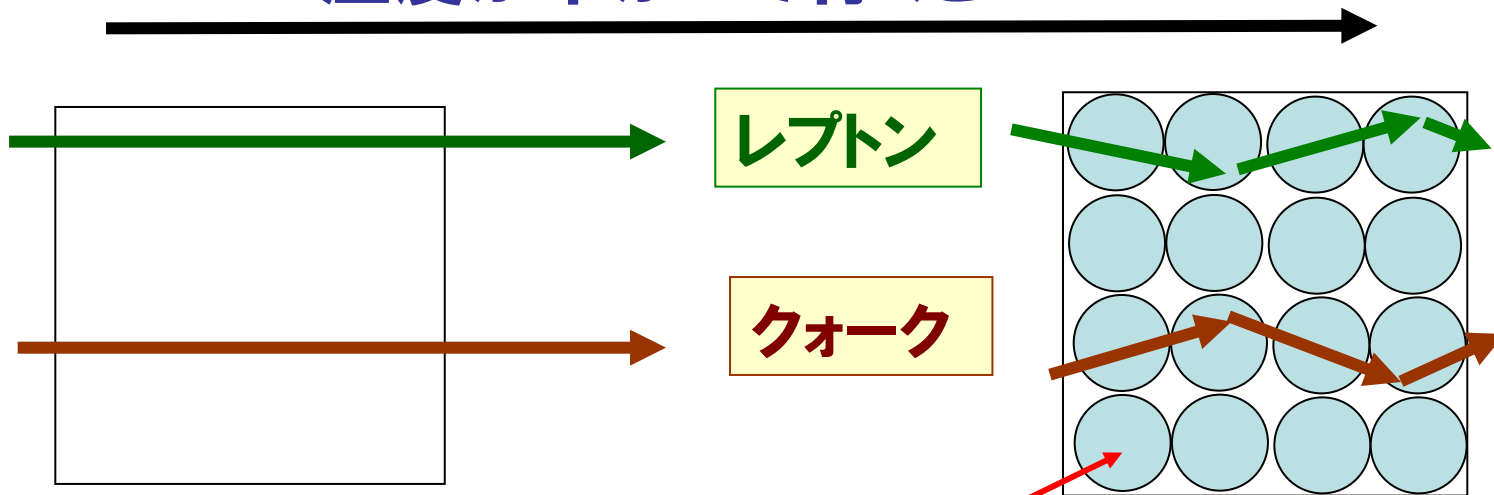
ヒッグス粒子が空間にない場合には、クォーク・レプトンは光速で自由に飛べる



対称性のない状態

ヒッグス粒子が空間にびっしり詰まっていると、クォーク・レプトンはヒッグス粒子とぶつかって光速では飛べなくなる

温度が下がって行くと



ヒッグス粒子のない状態

対称性がある状態

ヒッグス粒子

ヒッグス粒子のびっしり詰まった状態

対称性のない状態

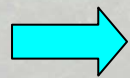
特殊相対論

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{(pc)^2}{(mc^2)^2 + (pc)^2} \leq 1 \quad (\text{pは運動量})$$

- 粒子が光速の速度 c で飛ぶ \Leftrightarrow 粒子の質量 m がゼロ
- 粒子が光速未満の速度 v で飛ぶ \Leftrightarrow 粒子の質量 m はゼロでない

ヒッグス粒子の効果を感じる粒子は光速より遅くしか飛べない
→ヒッグス粒子の効果を感じる粒子には質量が生じる

つまり、宇宙の温度が下がってきて、ヒッグス粒子が空間に詰まった状態になると、クォーク・レプトンに質量が生じる



対称性の自発的破れによる質量の生成

対称性の自発的破れ による質量の生成



南部陽一郎



ゴールドストーン

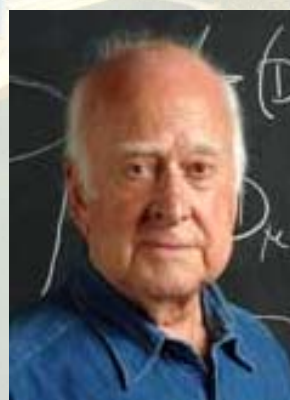
対称性の自発的破れを起こす粒子: ヒッグス粒子(本当はブラウトーアングレールヒッグス粒子と呼ぶべき)



ブラウト



アングレール



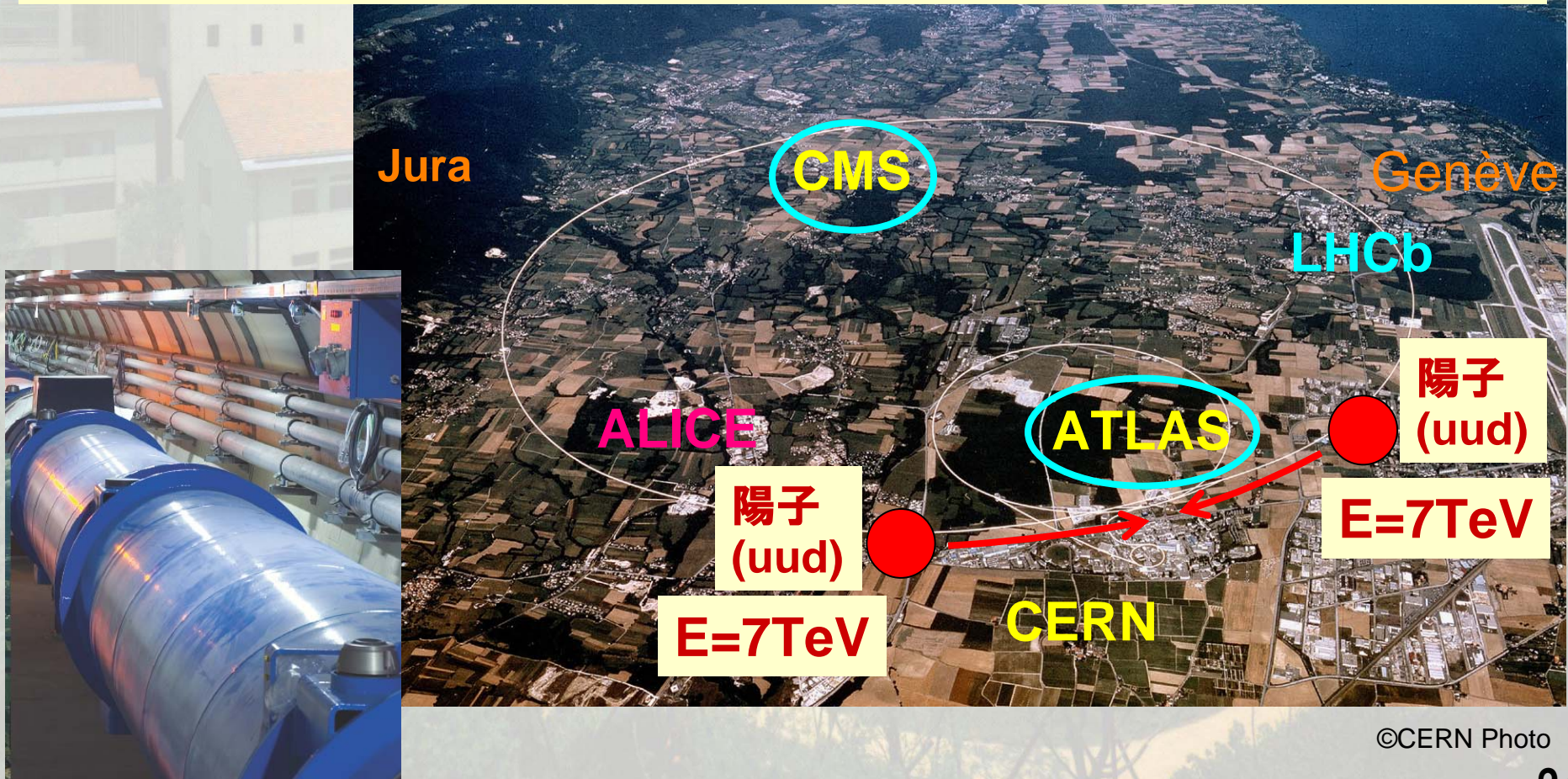
ヒッグス

→ ヒッグス (BEH) 粒子の発見が重要

現在の素粒子論：標準模型と呼ばれる理論で記述される

ヒッグス粒子：標準模型の構成粒子の中で最後に発見された

LHC実験（Large Hadron Collider; スイス・ジュネーブ・CERN; 周長27km; 建設費5000億円）が2008年から稼働しており、ATLASとCMSでヒッグス粒子を探索→2012年7月についてヒッグス粒子を発見



©CERN Photo

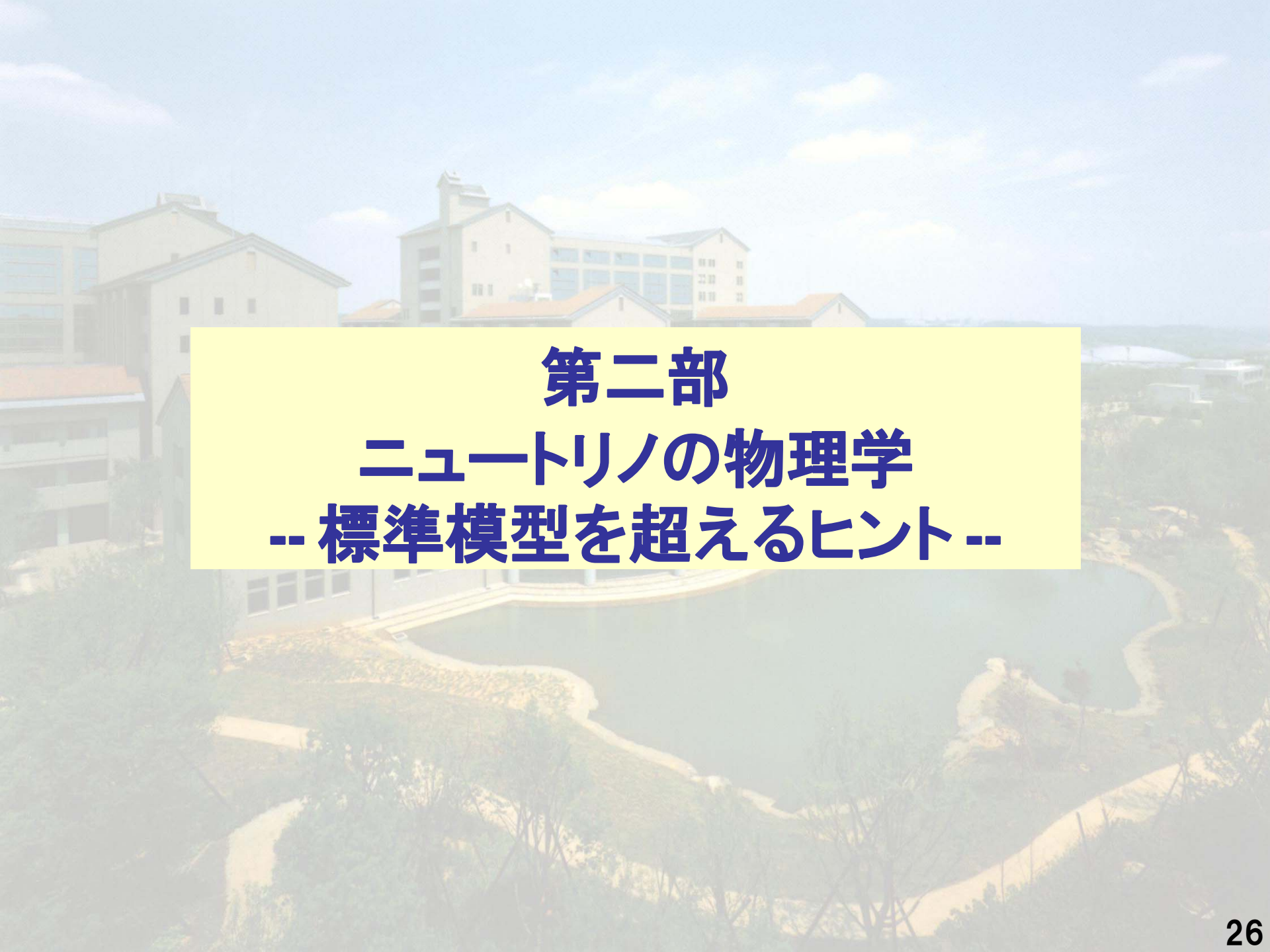
標準模型のまとめ

- 物質は三世代のクォーク・レプトンから構成される
- 対称性の自発的破れがあるために、クォーク・レプトンに質量が生じる

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

質量を与える粒子





第二部
ニュートリノの物理学
-- 標準模型を超えるヒント --

ニュートリノ: 3世代のニュートリノと反ニュートリノがある

	粒子	記号
レプトン	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
反レプトン	反電子ニュートリノ	$\bar{\nu}_e$
	反ミューニュートリノ	$\bar{\nu}_\mu$
	反タウニュートリノ	$\bar{\nu}_\tau$

ニュートリノは中性粒子で相互作用をほとんどしないため、観測は非常に難しい

実は自然で生成されたニュートリノを観測する実験が行われている:

・太陽ニュートリノ ν_e

・大気ニュートリノ $\nu_\mu + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_e$

又、人工的なニュートリノを観測する実験も行われている:

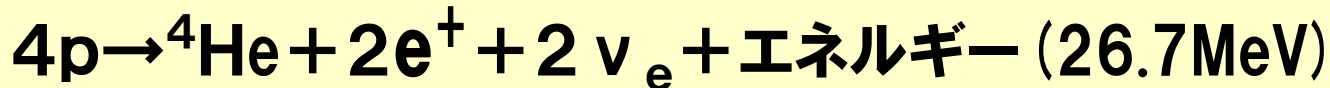
・原子炉ニュートリノ(原発の副産物) $\bar{\nu}_e$

・加速器ニュートリノ(実験のためにわざわざ生成する) ν_μ

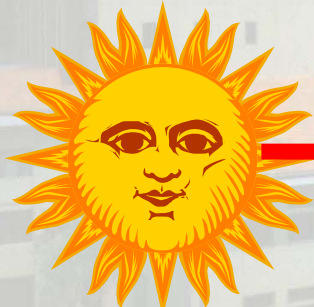
近年、これらの観測から、**標準模型**では説明できないニュートリノの**質量・混合**が発見されている

太陽ニュートリノとその欠損

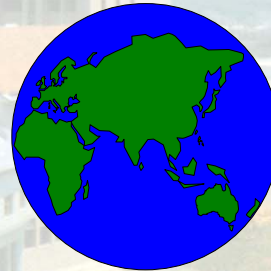
●太陽中では



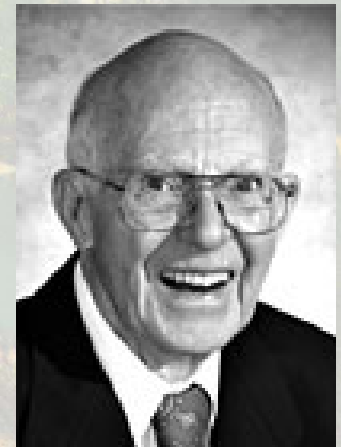
等の核融合反応が起こっており、この ν_e を**太陽ニュートリノ**と呼ぶ。



電子ニュートリノ



●太陽ニュートリノは、1970年代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。

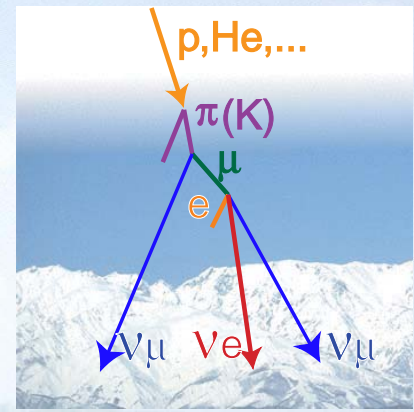
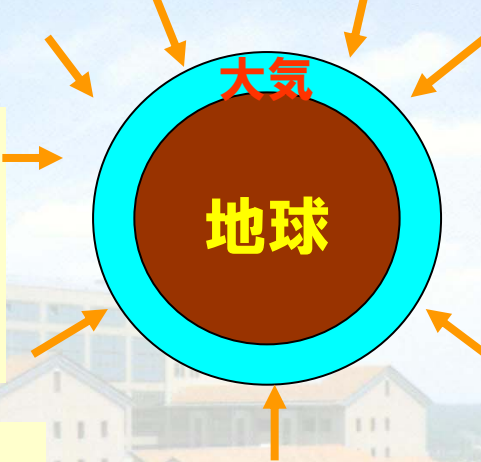


デイビス

結論から言うと、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 、 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の転換現象が起こっていて、 ν_e の量が減っているのが太陽ニュートリノ問題の原因

大気ニュートリノとその欠損

1次宇宙線(陽子、ヘリウム)



●地球には宇宙から1次宇宙線が つねに降り注いでいるが、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 中間子となり、それがミュオン粒子 μ^\pm に崩壊し、さらに電子又は陽電子へと崩壊する。

●粒子と反粒子の違いを無視すれば

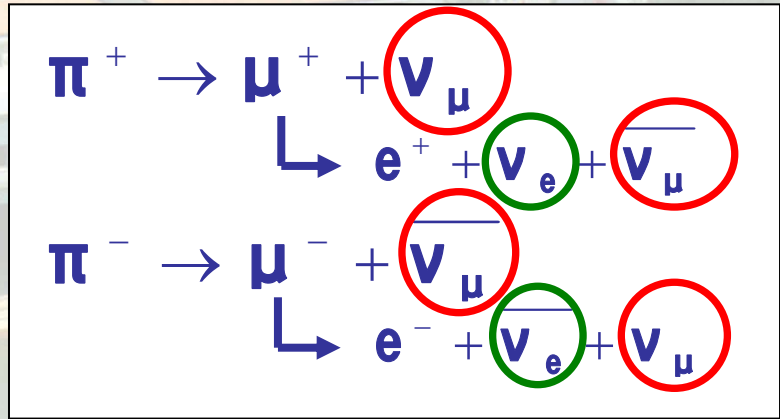
$$(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 2 : 1$$

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。

●大気ニュートリノ異常は1986年のIMB, 1988年のカミオカンデの実験結果で指摘されていた。



結論から言うと、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の転換現象により ν_μ の量が減っているのが大気ニュートリノ問題の原因

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

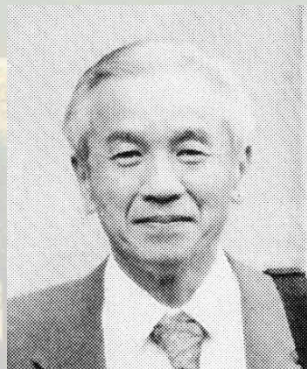
$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$$



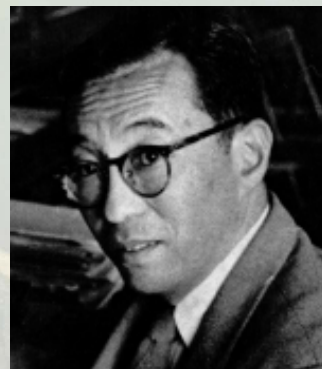
ポンテコルボ



牧二郎



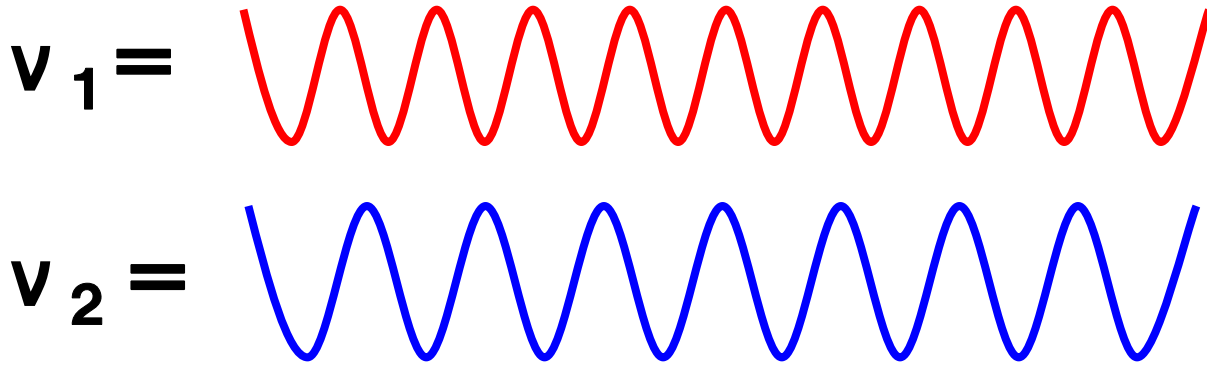
中川昌美



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(その違いはものすごく小さい):



種類が違うニュートリノの状態 ν_e, ν_μ は質量 m_1, m_2 を持つ状態 ν_1, ν_2 の組み合わせで表せることが知られている:

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

θ は混合角と呼ばれる

ニュートリノ振動(量子力学的効果←波の干渉と同じ原理)

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

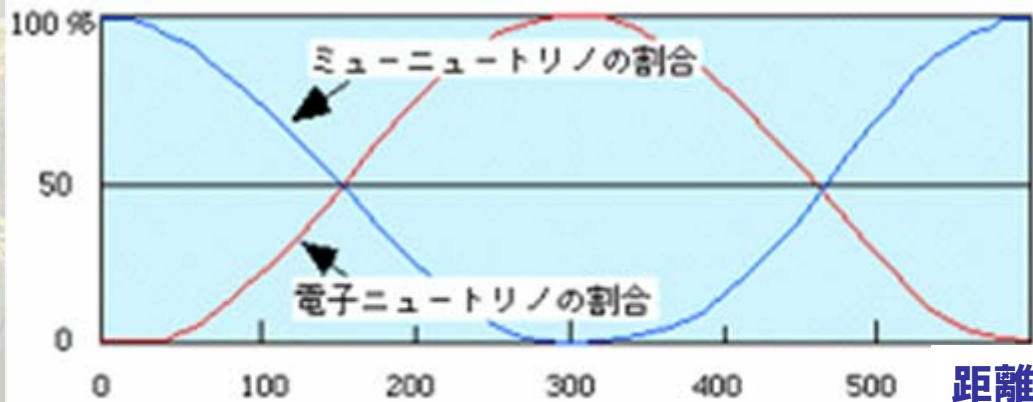
$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ なら $E = 0.6 \text{GeV} \rightarrow L = \text{約} 300 \text{km}$

$\Delta m^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 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はマクロな距離

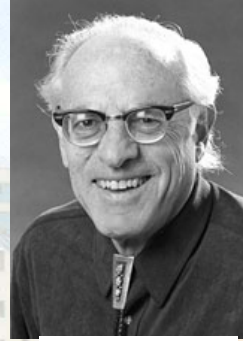
$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ は質量の二乗の差であり、質量そのものではない

実験からは、 θ と Δm^2 のみがわかる



初期のニュートリノの観測実験

IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven、
米オハイオ州、1982～1991)



ライネス



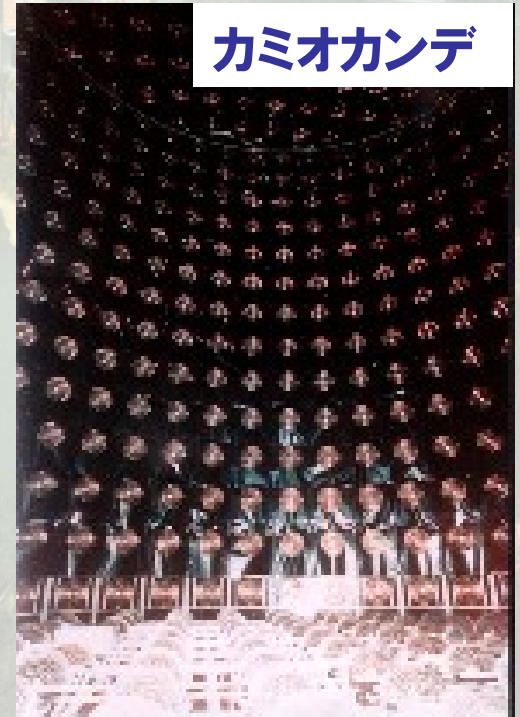
IMB

カミオカンデ (Kamioka Nucleon Decay
Experiment、神岡、1985～1996)



小柴昌俊

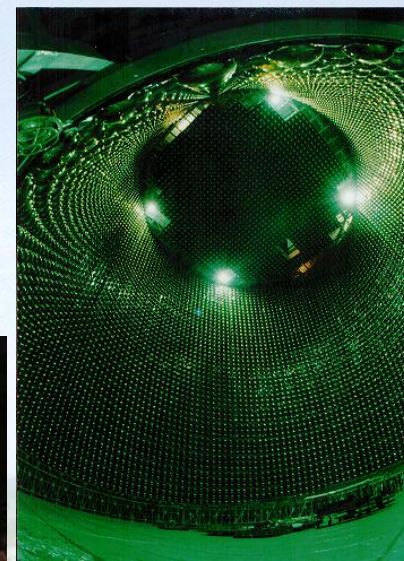
カミオカンデ



- 大量の水(IMB 8kt、Kam 3kt)による測定器
- 地下(IMB 約600m、Kam 約1km)の実験施設
(バックグラウンドを減らすため)

スーパーカミオカンデ(1995～)

- 水(50kt)による測定器
- その前進カミオカンデの拡張施設
- 大気ニュートリノ異常現象の確立
→ニュートリノ質量の発見



戸塚洋二



梶田隆章

- 太陽ニュートリノ欠損解明における重要な貢献



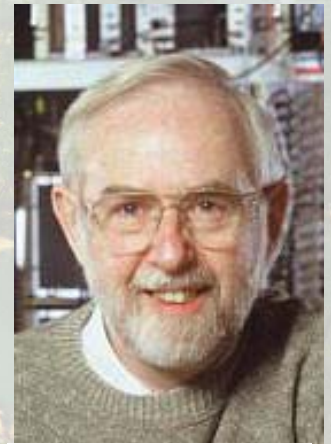
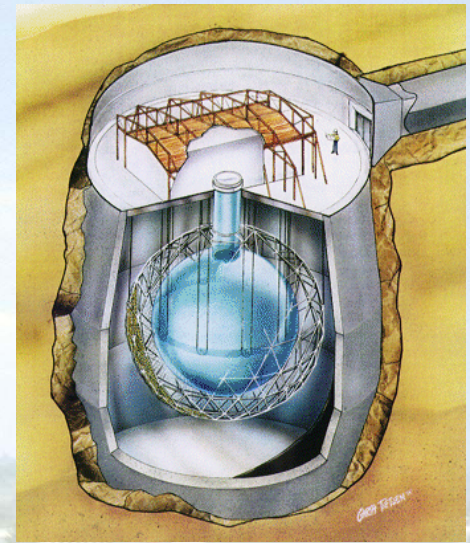
鈴木洋一郎



中畑雅行

SNO (Sudbury Neutrino Observatory, サドベリーニュートリノ天文台、カナダ、1999～2006)

- **重水(1kt)による測定器** → D_2O , $d = (pn)$, 重陽子
- 地下(約2km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)



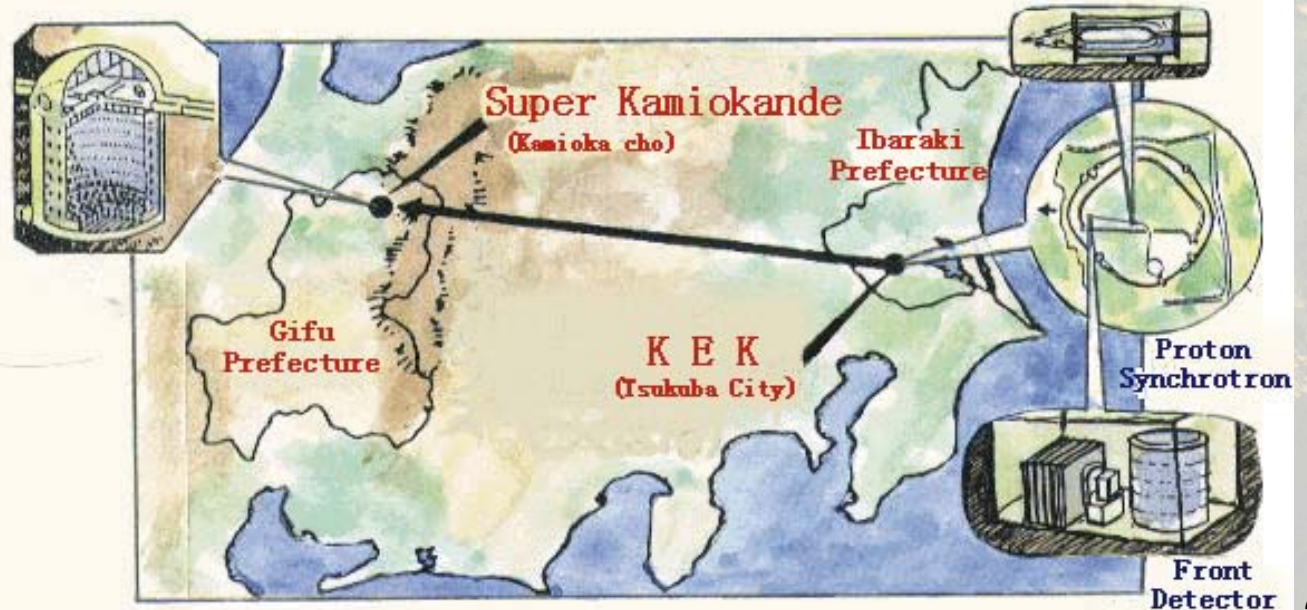
マクドナルド

K2K (KEK To Kamioka; 1999~2004、加速器ニュートリノ欠損)

- 高エネルギー研究機構(筑波)→スーパーカミオカンデ(神岡)
- 人工的なニュートリノ(ν_{μ})が距離250kmでどれだけ別なニュートリノに変換しているかを測定(世界初)
- 大気ニュートリノ欠損がニュートリノ振動によるならば、SKにおける人工ニュートリノ(ν_{μ})の観測量も減っているはず
→その結果はスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの結果と一致



西川公一郎



カムランド(2002年～、原子炉ニュートリノ欠損)

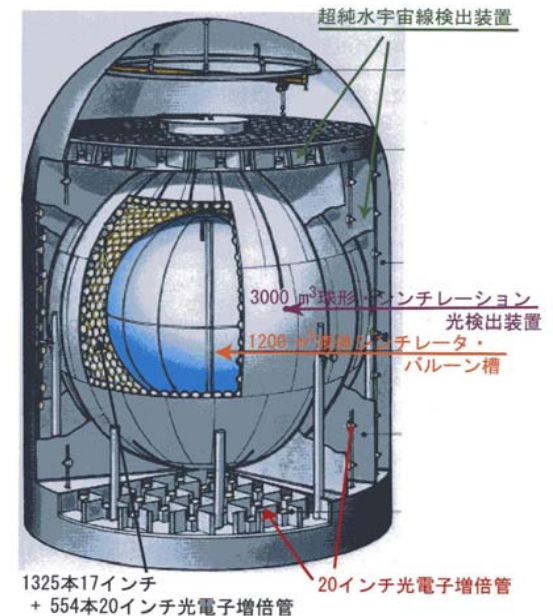
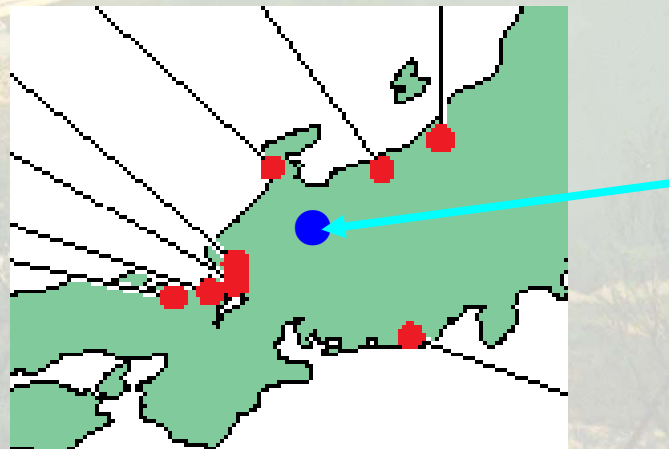
- 液体シンチレーターによる測定器
- 各地の原発(平均距離200km)から来る反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を検出(200km の距離では世界初)



- 太陽ニュートリノ欠損がニュートリノ振動によるならば、カムランドにおける人工ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)の観測量も減っているはず
→ 原子炉ニュートリノの欠損を発見(太陽 ν 欠損の独立な検証)



鈴木厚人

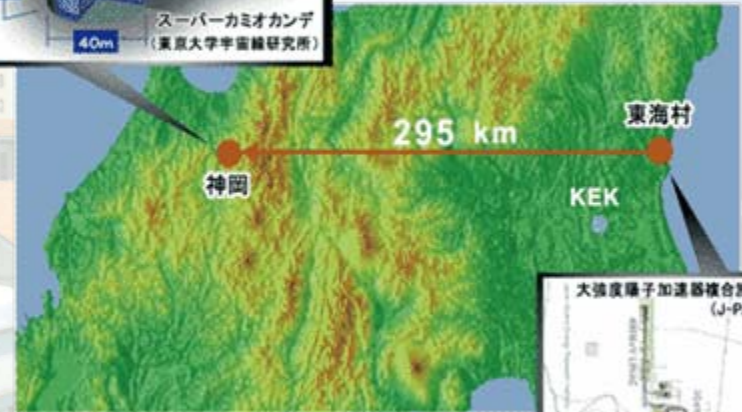


T2K (Tokai To Kamioka; 2009~、加速器ニュートリノ欠損)

● 第一段階 (2009年~)

0.75MWのニュートリノビーム (JPARC)
⇒ SK (K2Kの50倍)

● K2Kの拡張版(イベント数を50倍にして精密実験)



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 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



小林隆

大強度陽子加速器複合施設 (J-Parc)

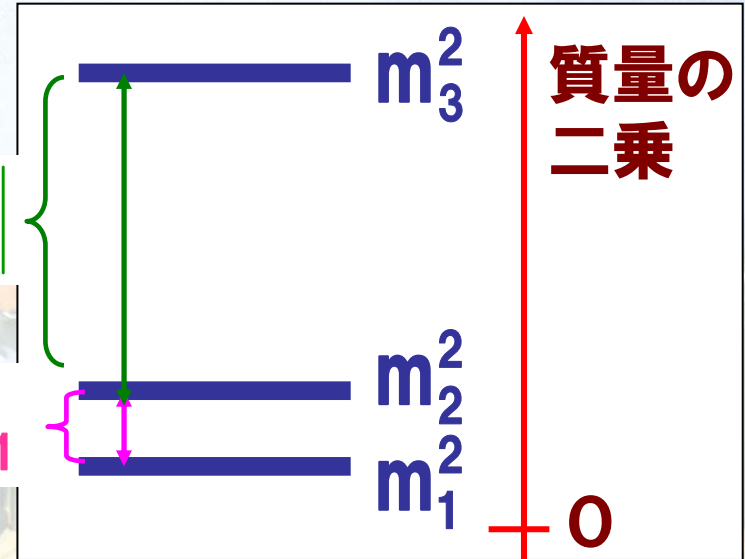
3世代ニュートリノの質量と混合

実際には3種類のニュートリノがある:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3 \\ U_{\mu1}\nu_1 + U_{\mu2}\nu_2 + U_{\mu3}\nu_3 \\ U_{\tau1}\nu_1 + U_{\tau2}\nu_2 + U_{\tau3}\nu_3 \end{pmatrix}$$

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

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



混合角は3個(θ_{12} ; θ_{23} ; θ_{13})
質量の二乗の差は2個

さらに $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の
確率の違いを表すCP非保存の位
相 δ が存在する

現在までのニュートリノ振動実験でわかった事

- 太陽ニュートリノ・長基線原子炉ニュートリノ⇒

$$\Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2; \theta_{12} \doteq 30^\circ$$

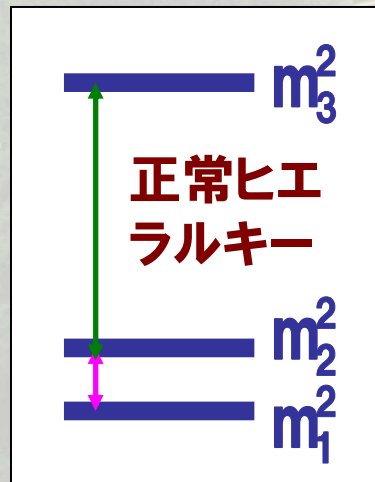
- 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

$$|\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; \theta_{23} \doteq 45^\circ$$

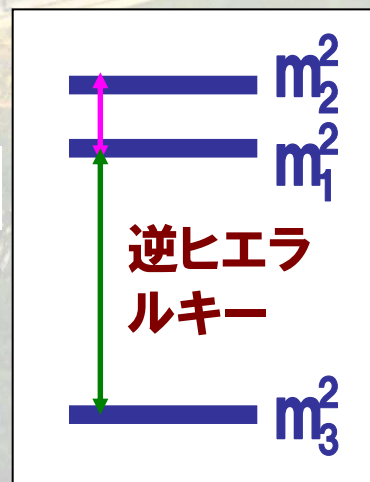
- 短基線原子炉ニュートリノ⇒

$$\theta_{13} \doteq 9^\circ$$

という結果が得られ、ニュートリノに質量・混合があることが確定



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

T2Kの将来計画

●第二段階（?年～）

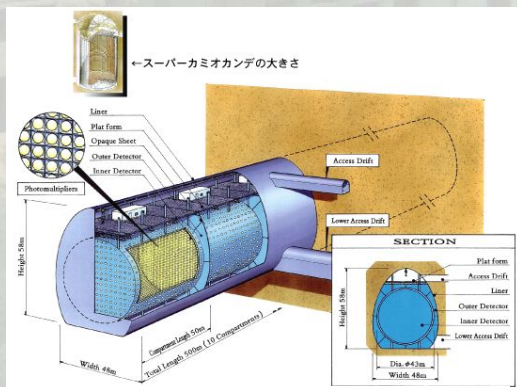
2MWのニュートリノビーム ⇒ ハイパーカミオカンデ
(K2Kの250倍) (SKの20倍)

●K2Kの拡張版(イベント数を5000倍にして精密実験)

●レプトンのCPの破れ δ を測る



小林隆



Hyper-kamiokande



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

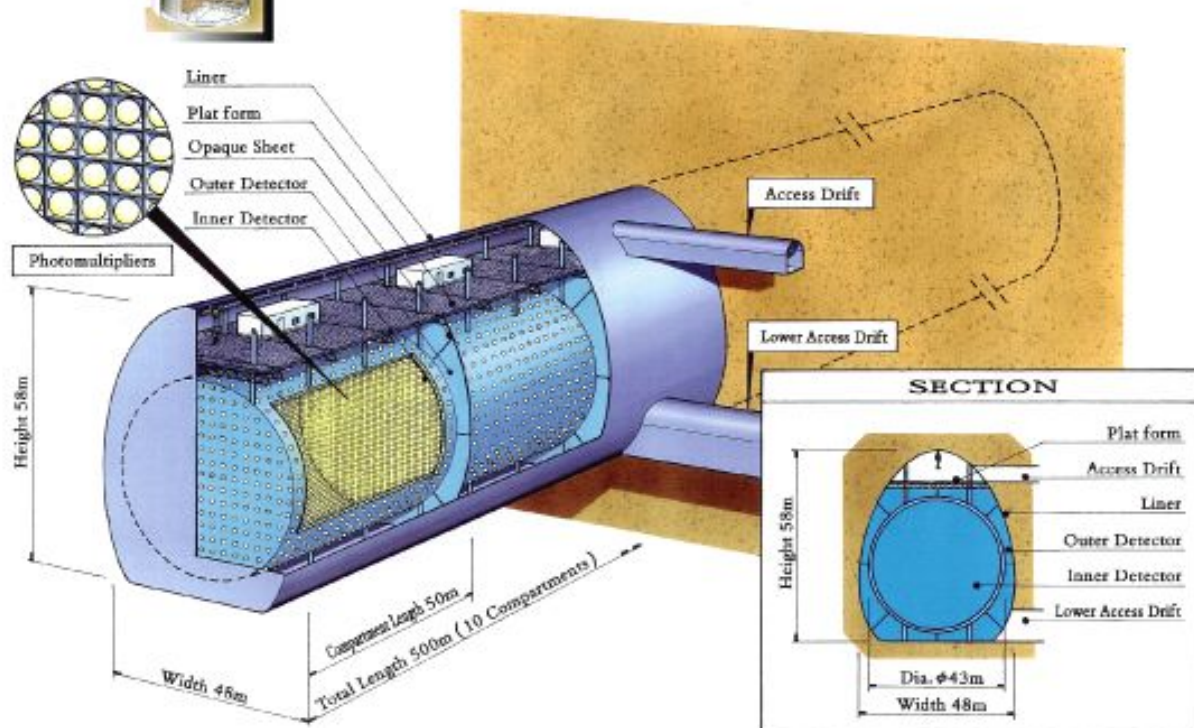
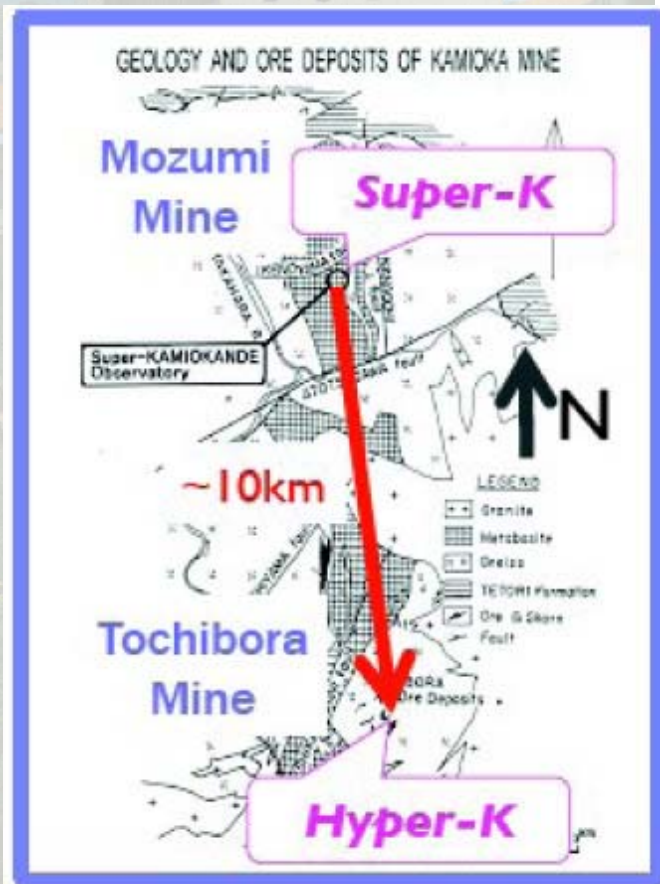


ハイパーカミオカンデ（水1000kt=SKの20倍、？年～）

- ニュートリノ振動の精密測定など



←スーパーカミオカンデの大きさ



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

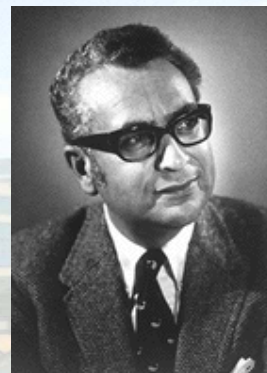
1978~79年
シーソー機構



ミンコフスキー



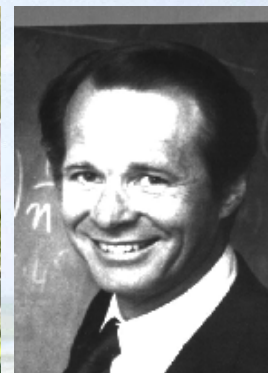
柳田勉



ゲルマン



ラモン



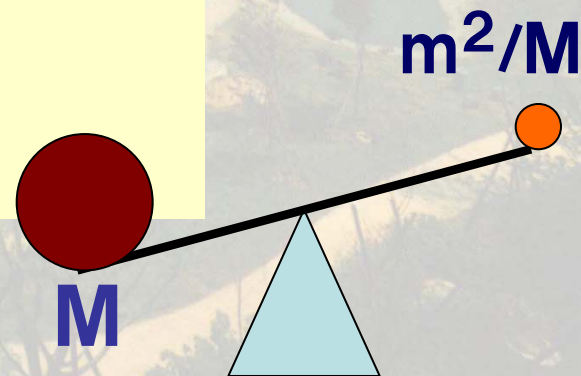
スランスキー

2行2列の行列 $\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}$

の固有値の絶対値は $m \ll M$ の時、 M と m^2/M となる
そこで、 $m = 1 \text{ GeV}$ 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、

$$m_\nu = m^2/M < 1 \text{ eV} \rightarrow M > 10^9 \text{ GeV}$$

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もしれない！



現在の素粒子論研究:

標準理論を越える物理の模索

A) フォーマルな研究→第六回目の講義
(トップダウン的アプローチ)

重力を含んだ統一理論の研究
(超ひも理論)

B) 現象論的研究

(ボトムアップ的アプローチ)

現在・近未来の実験で検証できる
物理を研究

