

首都大学オープンユニバーシティ



2009年6月6日

素粒子物理学へのいざない

第四回

ニュートリノと素粒子物理学

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.metro-u.ac.jp/~yasuda/ou2009-4.pdf>

首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論サブグループ 安田修

標準理論

ある意味で電磁気力と弱い力を統一した理論と言える

電磁気力・弱い力(ワインバーグ・サラム理論):

$SU(2) \times U(1)$ と呼ばれる群のゲージ理論

強い力(量子色力学):

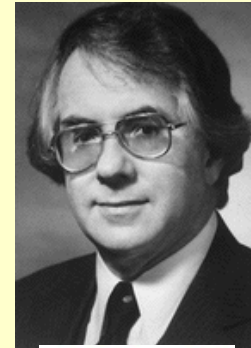
$SU(3)$ と呼ばれる群のゲージ理論

2は2種類(アップ・ダウン)の2

3は3色(赤・緑・青)の3



ジョージアイ



グラショウ

標準理論の拡張

1974年:大統一模型

$SU(5)$ と呼ばれる群のゲージ理論から標準理論の3つの群を出す:

$SU(5) \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

クォーク・レプトン、光子(A)・W・Z・グルーオン(G)はそれぞれ同じ群の表現として変換

$$\begin{pmatrix} d_R \\ d_G \\ d_B \\ e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -\bar{u}_B & -\bar{u}_G & -u_R & -d_R \\ \bar{u}_B & 0 & -\bar{u}_R & -u_G & -d_G \\ \bar{u}_G & \bar{u}_R & 0 & -u_B & -d_B \\ u_R & u_G & u_B & 0 & -e^+ \\ d_R & d_G & d_B & e^+ & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} G_{RR} - A & G_{GR} & G_{BR} & \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 \\ G_{RG} & G_{GG} - A & G_{BG} & \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 \\ G_{RB} & G_{GB} & G_{BB} - A & \bar{X}_3 & \bar{Y}_3 \\ X_1 & X_2 & X_3 & Z + A & W^+ \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & W^- & -Z + A \end{pmatrix}$$

数学的な表式よりも、3、2、1個の別々だったものがまとまっている点が重要

$SU(5)$ 独自のゲージ場(標準理論には不在)

1974年：大統一模型における ゲージ相互作用の結合定数 (大統一模型の理論的予言)

くりこみ理論によると、結合定数は、
想定しているエネルギーに依存して
変化することが知られていた



ジョージアイ

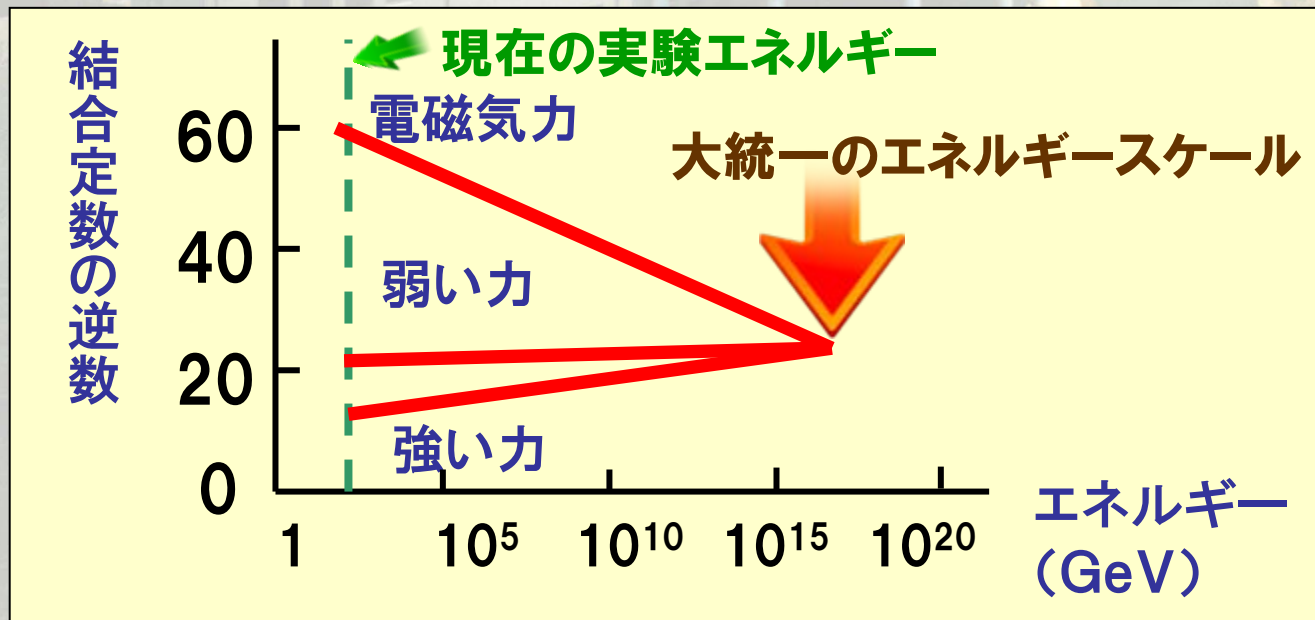


クウィン



ワインバーグ

電磁気力、弱い力、強い力の結合定数は
 10^{15} GeVのあたりで同じ値になる
→力の統一を示唆しているのではないか？



1974年：大統一模型における ゲージ相互作用の結合定数 (大統一模型の理論的予言)

さらに大統一模型は、統一エネルギースケール
の見積りから陽子崩壊の寿命を予言する：



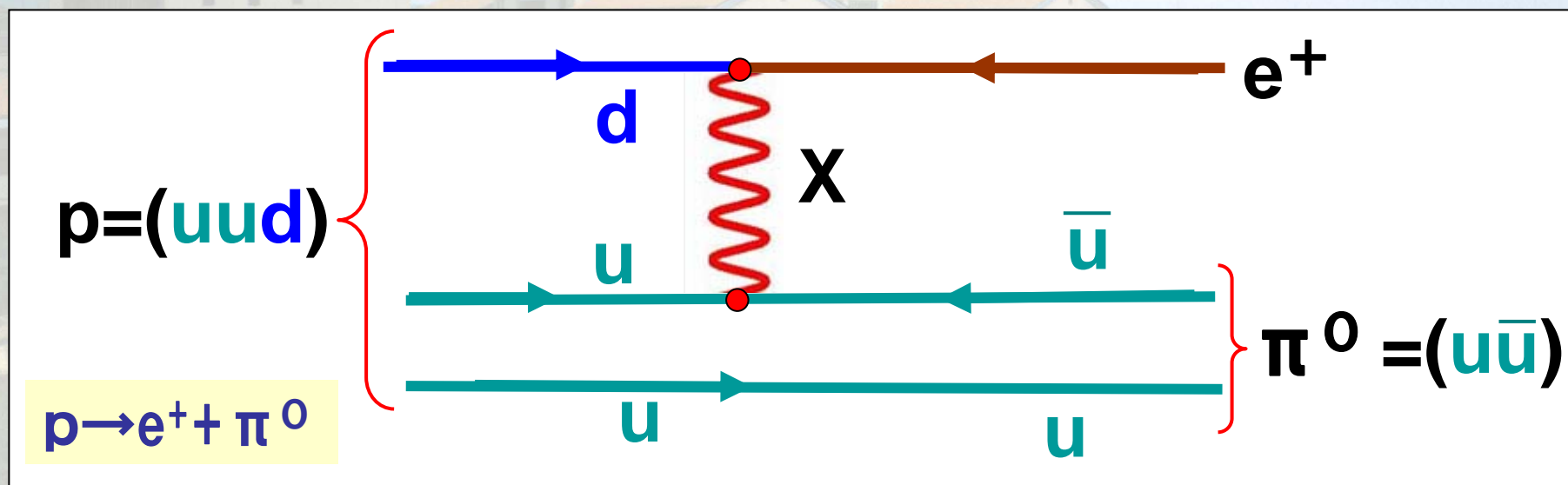
ジョージアイ



クウィン



ワインバーグ



$$\text{陽子の寿命} \approx (\text{Xの質量}/10^{15}\text{GeV})^4 \times 10^{31} \text{ 年}$$

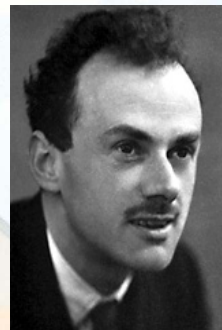
この寿命は一個あたりの崩壊の確率を表すので、ものすごく大量の核子を置いて観測すれば、たまには崩壊する核子が見つかるかもしれない！

単磁極(モノポール) (大統一模型の理論的予言)

電磁気学には、電荷は存在するが、単磁極(モノポール)は存在しない

1931年:量子力学における単磁極の議論

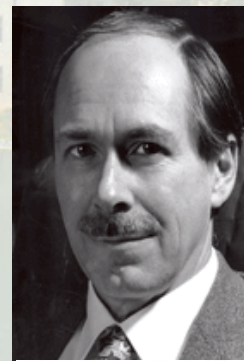
モノポールが存在すれば、(電荷) \times (磁荷)が何かの整数倍になることが示された



ディラック

1974年:ヤン-ミルズ理論(弱い力・強い力の理論)におけるモノポール解の発見

方程式の(古典)解としてモノポール解が存在することが示された



トホーフト



ポリャーコフ

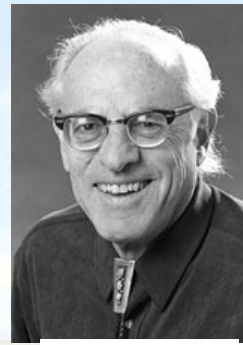
→ 一般に、大統一理論から出発する場合、モノポール解が存在することが言える

→ 我々の自然が、大統一理論で記述されるならば、宇宙初期に生成されたモノポールが発見されるはず

→ しかし、現在までの所、モノポールは実験的に発見されていない

陽子崩壊の探索

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



ライネス



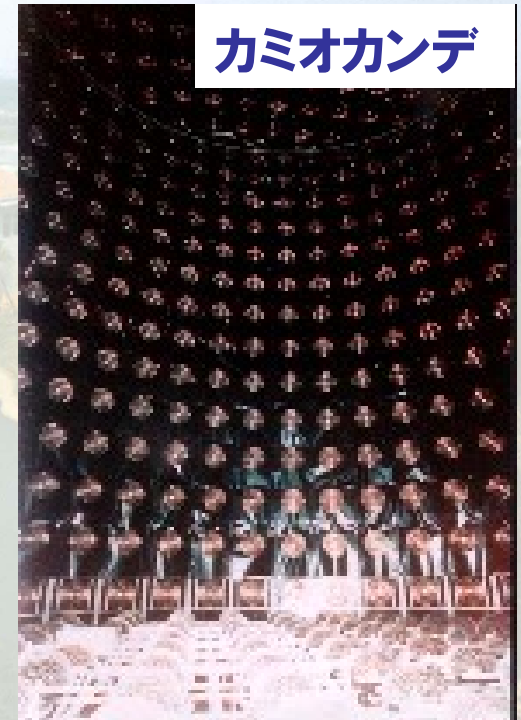
IMB

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

以下Kamと略



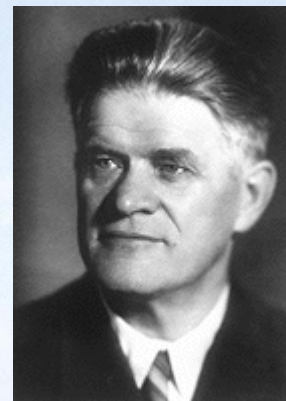
小柴昌俊



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)

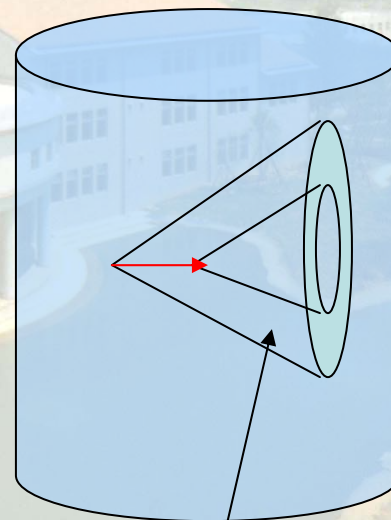
水による荷電粒子の観測の原理



チェレンコフ

● 光速度近くで水中を走る荷電粒子はある速度(あるエネルギー)以上の時にチェレンコフ光と呼ばれる光を放つ。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



チェレンコフ光

IMB・カミオカンデの結果

- 陽子崩壊に関しては否定的な結果が得られた

陽子の寿命 $> 10^{31}$ 年 → 大統一理論全部が死んだ訳ではない
(一番単純なSU(5)モデルは死んだ)

- 副産物1 (IMB・Kam)

超新星ニュートリノの検出の成功 → ニュートリノ天文学の確立

- 副産物2 (IMB・Kam)

大気ニュートリノの観測の成功 → スーパーカミオカンデへ継続

- 副産物3 (Kam)

太陽ニュートリノの観測の成功 → スーパーカミオカンデへ継続

特にカミオカンデは、陽子崩壊は発見しなかったものの、超新星ニュートリノの観測等、予想外の成果をあげ、後継のスーパーカミオカンデへと発展して行った

[注] 星の進化（質量が太陽の8倍以上の時）

中性子星

ブラックホール



星間物質

星間物質が重力による収縮で星が誕生

水素

水素が核融合によりヘリウムを生成（一生の9割）



ヘリウム

核融合により炭素・酸素を生成（一生の1割）

中性子は一つの状態に一個しか入れない性質を持ち、詰め込む力には反作用が生じる

炭素・酸素

IMB・Kamが観測した超新星は地球から16万光年離れた所（1987年2月）

核融合により酸素・ネオン・マグネシウムを生成

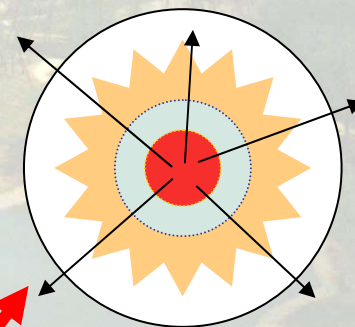
酸素・ネオン・マグネシウム

核融合により鉄を生成

鉄

ケイ素

重力収縮と中性子の縮退圧により衝撃波が出来て超新星爆発→ニュートリノのみが放出



ニュートリノに関する復習

それぞれのレプトン数(電子数、ミュー粒子数、タウ粒子数)の和は反応の前後で不変

※標準理論ではニュートリノの質量は0だったが、最近の実験結果により、微量な質量が存在することが確定している

第一世代

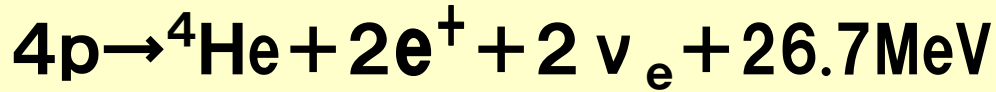
第二世代

第三世代

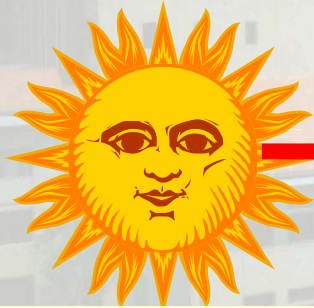
	電荷	質量	電子数	ミュー粒子数	タウ粒子数
e^-	$-e$	0.5	+1	0	0
e^+	$+e$	0.5	-1	0	0
ν_e	0	0	+1	0	0
$\bar{\nu}_e$	0	0	-1	0	0
μ^-	$-e$	106	0	+1	0
μ^+	$+e$	106	0	-1	0
ν_μ	0	0	0	+1	0
$\bar{\nu}_\mu$	0	0	0	-1	0
τ^-	$-e$	1777	0	0	+1
τ^+	$+e$	1777	0	0	-1
ν_τ	0	0	0	0	+1
$\bar{\nu}_\tau$	0	0	0	0	-1

太陽ニュートリノとその欠損

●太陽中では



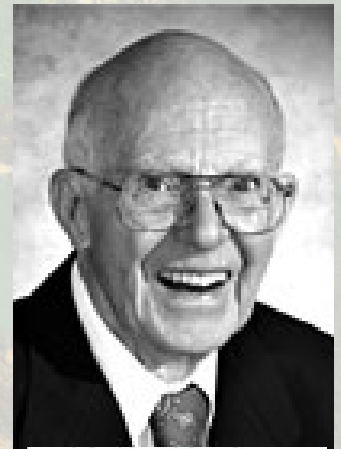
等の核融合反応が起こっており、この ν_e を**太陽ニュートリノ**と呼ぶ。



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。

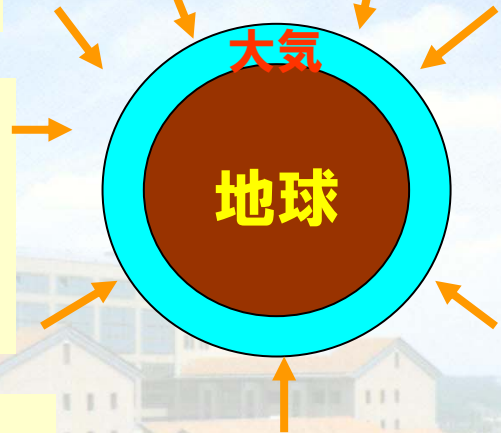
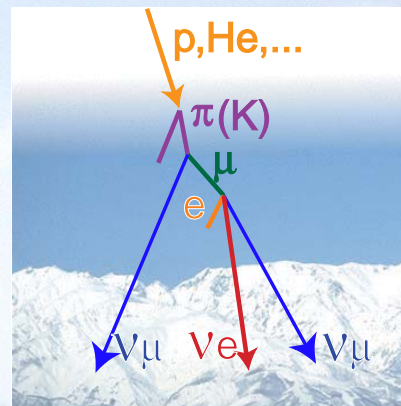


デイビス

結論から言うと、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 、 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の転換により 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、それがミュー粒子 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

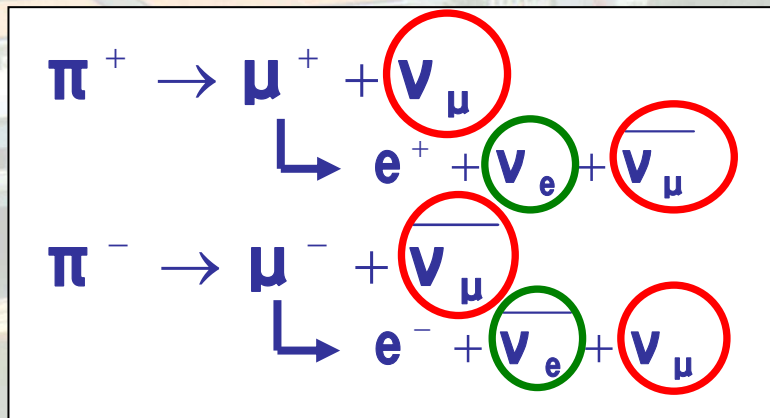
$$(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 2 : 1$$

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、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の転換で 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

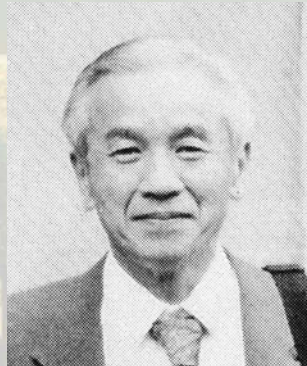
$$\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu$$



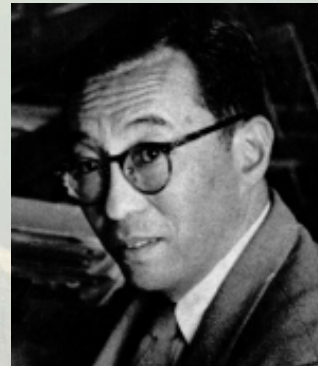
ポンテコルボ



牧二郎



中川昌美



坂田昌一

ニュートリノ振動(量子力学的効果)

2世代の場合、種類の違うニュートリノの状態 ν_e, ν_μ と質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2) が2行2列の行列により

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

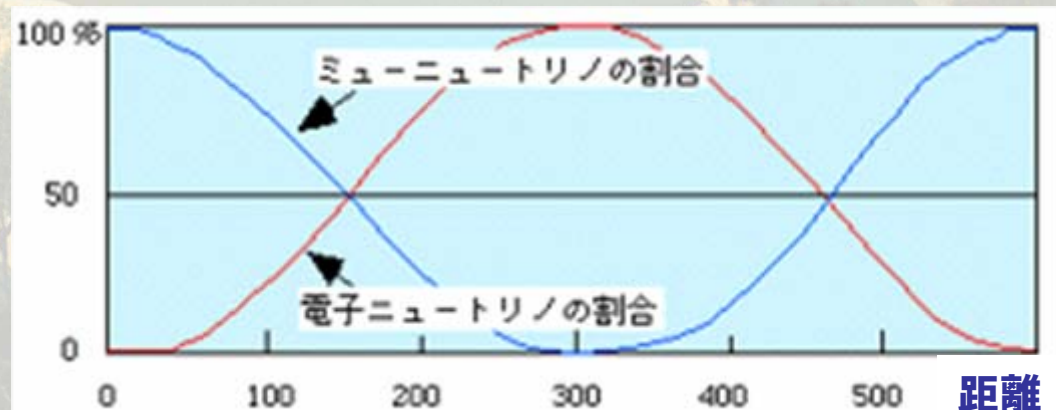
と関係つけられている時、時間 t 、距離 L ($\equiv c t$) だけニュートリノが走る間に ν_μ から ν_e に変換される**確率**は

$$\sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{(\Delta m^2 c^4) (2\pi L/hc)}{4E} \right)$$

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

となり、**振動的**振る舞いを示す(E はエネルギー)。

→実験からは、 θ と Δm^2 のみができる。



ニュートリノの質量と混合

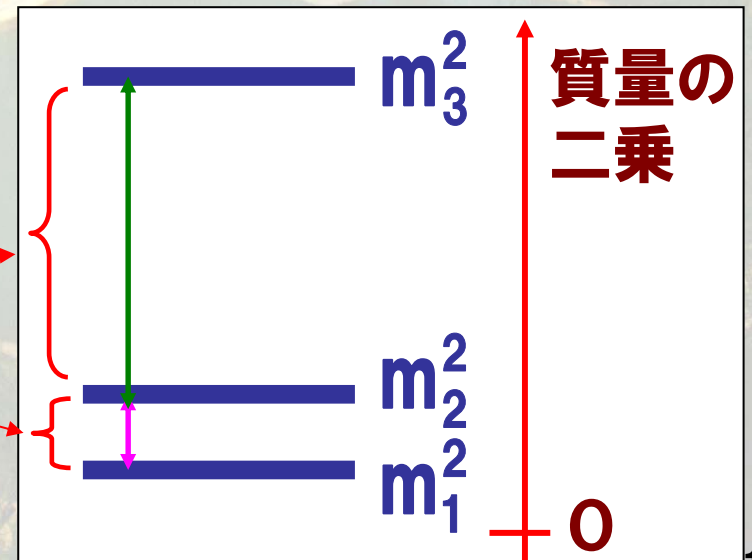
混合行列は**牧・中川・坂田行列**と呼ばれる(4個の変数を含む)

実際にはニュートリノには3世代あるので、クォークのカビーボ・小林・益川混合と同様に

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

のような3状態を導入して議論するので、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個と質量の二乗の差2個



ニュートリノ振動を示唆する実験事実

- 太陽ニュートリノ欠損 Homestake (米), Kam (日), GALLEX (伊), SAGE (露), SK (日), SNO (加)
- 大気ニュートリノ欠損 IMB(米), Kam (日), SK (日), Soudan2(米), MACRO(伊)
- 加速器ニュートリノ欠損 K2K(日), MINOS (米)
- 原子炉ニュートリノ欠損 KamLAND(日)

Kam:カミオカンデ

SK:スーパーカミオカンデ

KamLAND:カムランド

素粒子の感じる力

(重力を除くと)ニュートリノは弱い力しか感じない

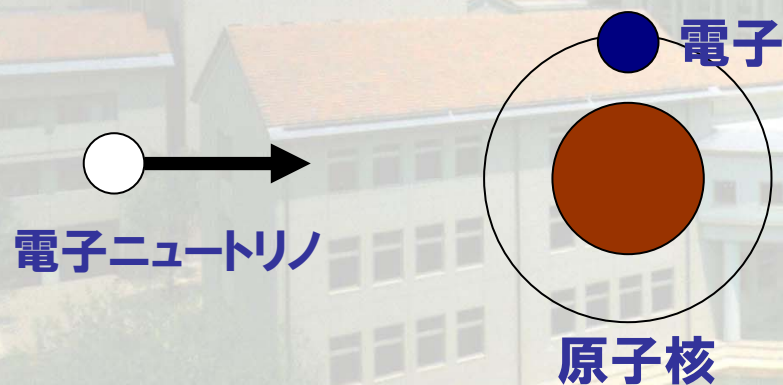
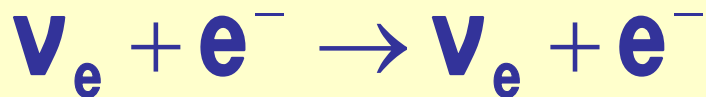
→観測はものすごく難しい

素粒子		強い力	電磁気力	弱い力	重力
クォーク	u	○	○	○	○
	d	○	○	○	○
レプトン	e	×	○	○	○
	ν_e	×	×	○	○

ニュートリノの観測の原理

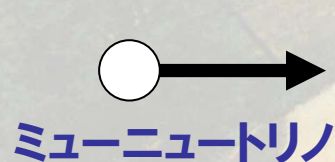
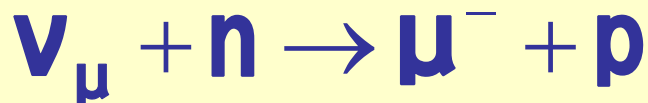
ニュートリノは弱い力しか感じないので、弱い力を通してニュートリノと相互作用を起こした荷電粒子を観測する

太陽 ν



観測可能

大気 ν



観測可能

スーパーカミオカンデ(1995～)

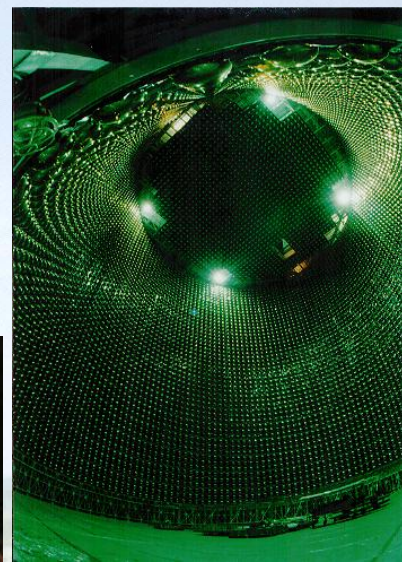
- 水(50kt)による測定器
- その前進カミオカンデの拡張施設
- 大気ニュートリノ異常現象の確立
→ニュートリノ質量の発見



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

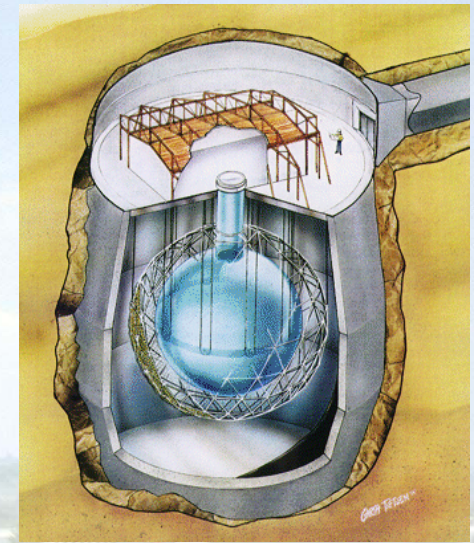


中畑雅行

- 陽子崩壊(陽子の寿命に対する下限値約 10^{34} 年)
→大統一模型に対する、より厳しい制限

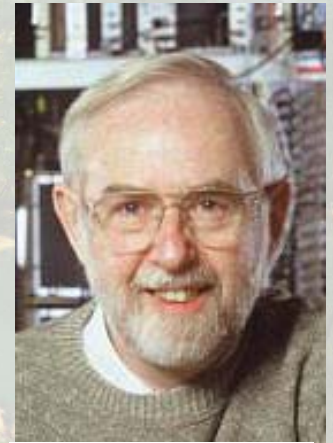
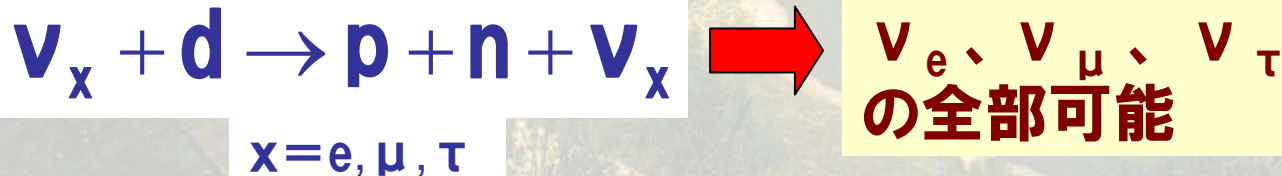
SNO (Sudbury Neutrino Observatory, サドベリーニュートリノ天文台、カナダ、1999～)

- **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)



- 太陽ニュートリノ(ν_e)欠損の直接的証明

SNOでは次の両方の反応を測定できる:



マクドナルド

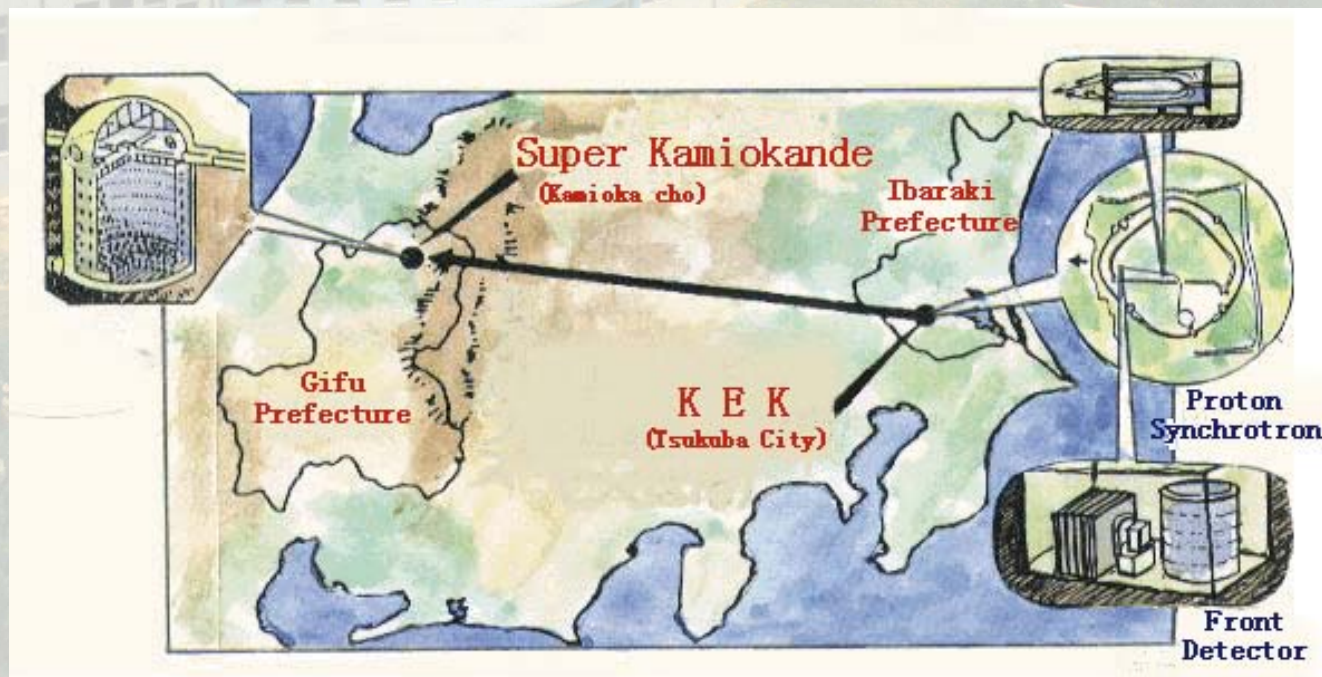
これら2つの反応を比較した結果、 $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ は理論値通りで、 ν_e のみが減っていることが示された

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)

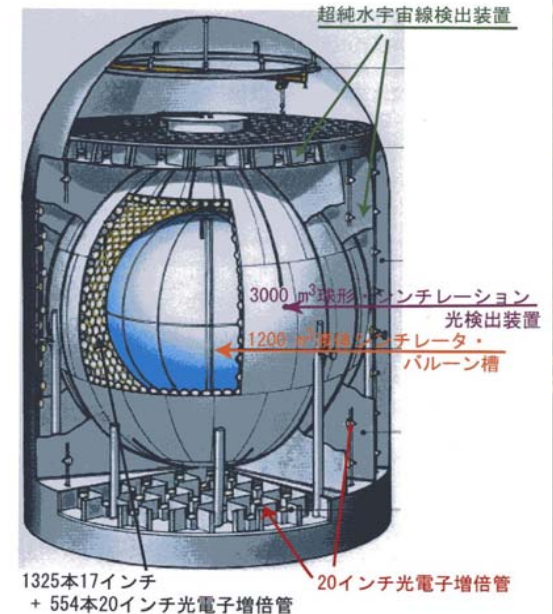
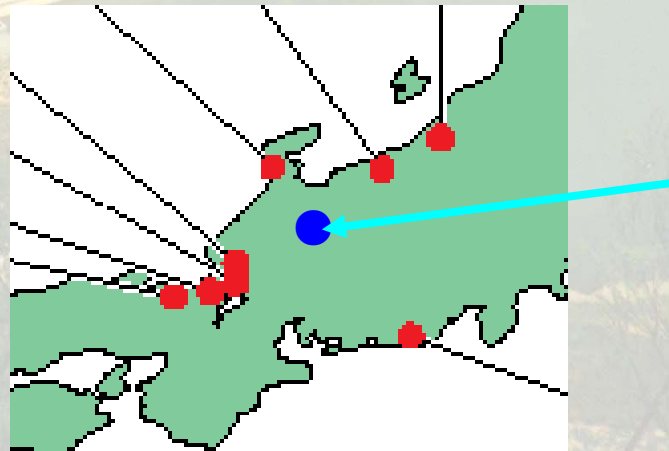
- 液体シンチレーターによる測定器
- 各地の原発(平均距離200km)から来る反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を検出(200kmの距離では世界初)



- 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



液体シンチレーター(ある種の油; $(\text{CH}_2)_n$)による荷電粒子の観測の原理

- 液体シンチレーターの中を荷電粒子が通過すると原子中の電子が一時励起され、また元の状態に落ちる際に光を発する。
←カムランド



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・原子炉ニュートリノ $\Rightarrow \Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$

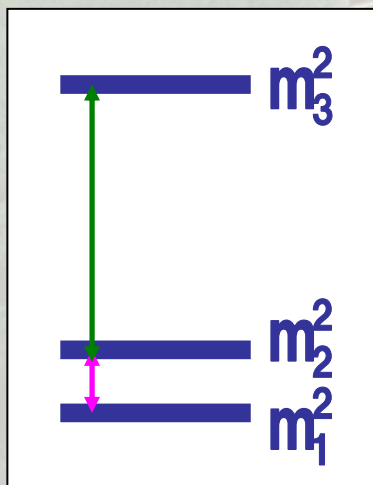
$\theta(\text{太陽}) \cong 30^\circ$

● 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ $\Rightarrow |\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

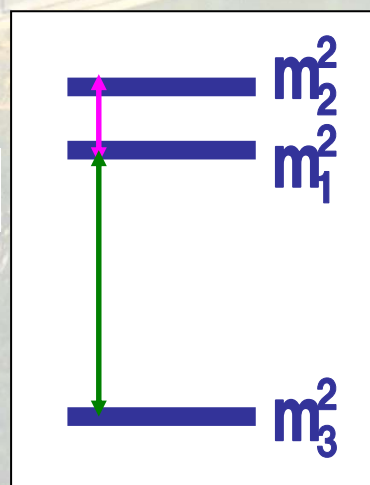
$\theta(\text{大気}) \cong 45^\circ$

という結果が得られ、ニュートリノに質量があることが確定した。

質量のパターンは現在の所、下図のどちらの可能性も残っている
(ニュートリノ振動からは、質量の二乗の差しかわからない)。



又は



仮に m_1 が殆ど0だとしても、
 $m_2 \geq (8 \times 10^{-5} \text{eV}^2)^{1/2}$
 $= 9 \times 10^{-3} \text{eV}$
 $m_3 \geq (3 \times 10^{-3} \text{eV}^2)^{1/2}$
 $= 5 \times 10^{-2} \text{eV}$
は言える (左図の場合)

宇宙論とニュートリノの質量

実は宇宙論からもニュートリノの質量に制限がつくことが知られている

- ニュートリノの質量がある程度大きいと、宇宙の大規模構造形成（銀河の分布）が観測と矛盾する→ $m_1 + m_2 + m_3 < 0.5\text{eV}$
→ ニュートリノの質量が宇宙の膨張に影響を与えることはほとんどない

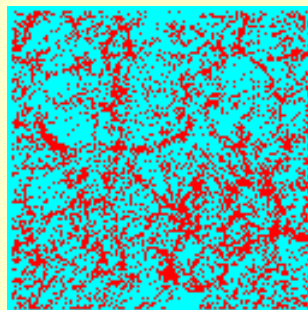
[現在の宇宙論] 宇宙のエネルギー(=質量)の内訳

- 2% 核子
- 30% **コールド**ダークマター
- 70% ダークエネルギー

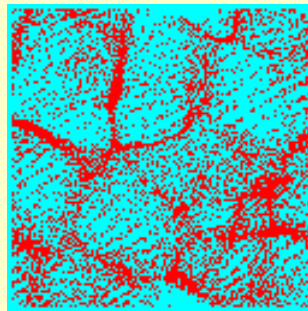
質量の**重い**
未知の粒子
からなる暗
黒物質

未知のエネルギー(宇宙定数)

天文学による銀河の分布の観測



コールドダークマターのみ
(観測と一致)



充滿している
ニュートリノの質量が3eV以上の
場合(観測と矛盾)

将来のニュートリノ実験(開始済の実験を含む)

T2K(Tokai To Kamioka、 J-PARC実験施設の一部)

大強度陽子加速器複合施設

●第一段階 (2009年～)

0.75MWのニュートリノビーム ⇒ スーパーカミオカンデ
(K2Kの50倍)

●K2Kの拡張版(イベント数を50倍にして精密実験)

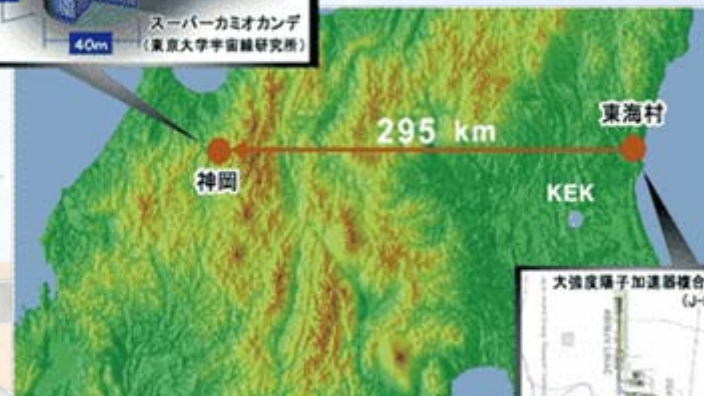
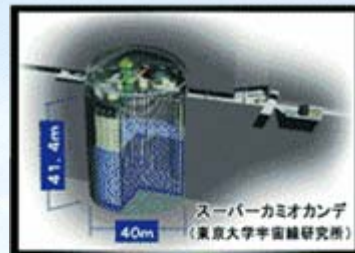
●牧・中川・坂田行列の未知の要素 U_{e3} の絶対値を測る

●第二段階 (?年～)

4MW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)

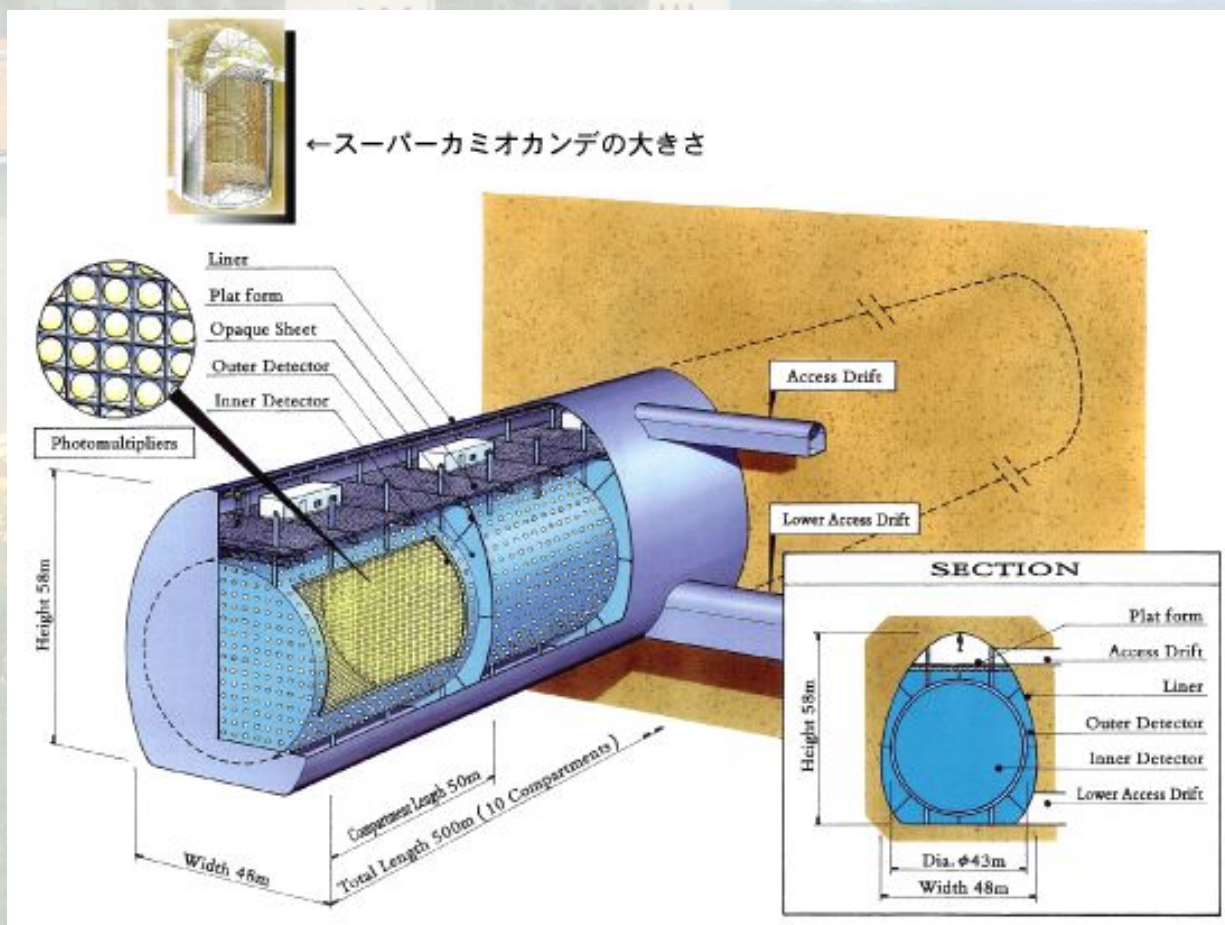
●牧・中川・坂田行列の未知の要素 U_{e3} の虚数部(CPの破れ)を測る



西川公一郎

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
- 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）



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

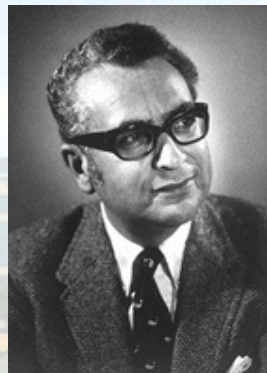
1978~79年
シーソー機構



ミンコフスキー



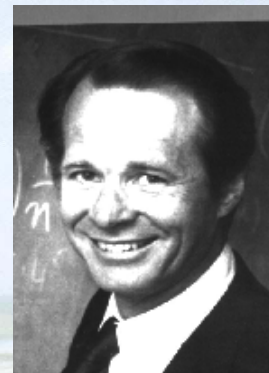
柳田勉



ゲルマン



ラモン



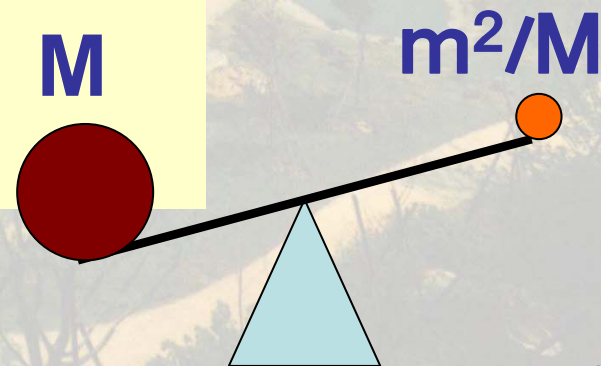
スランスキー

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

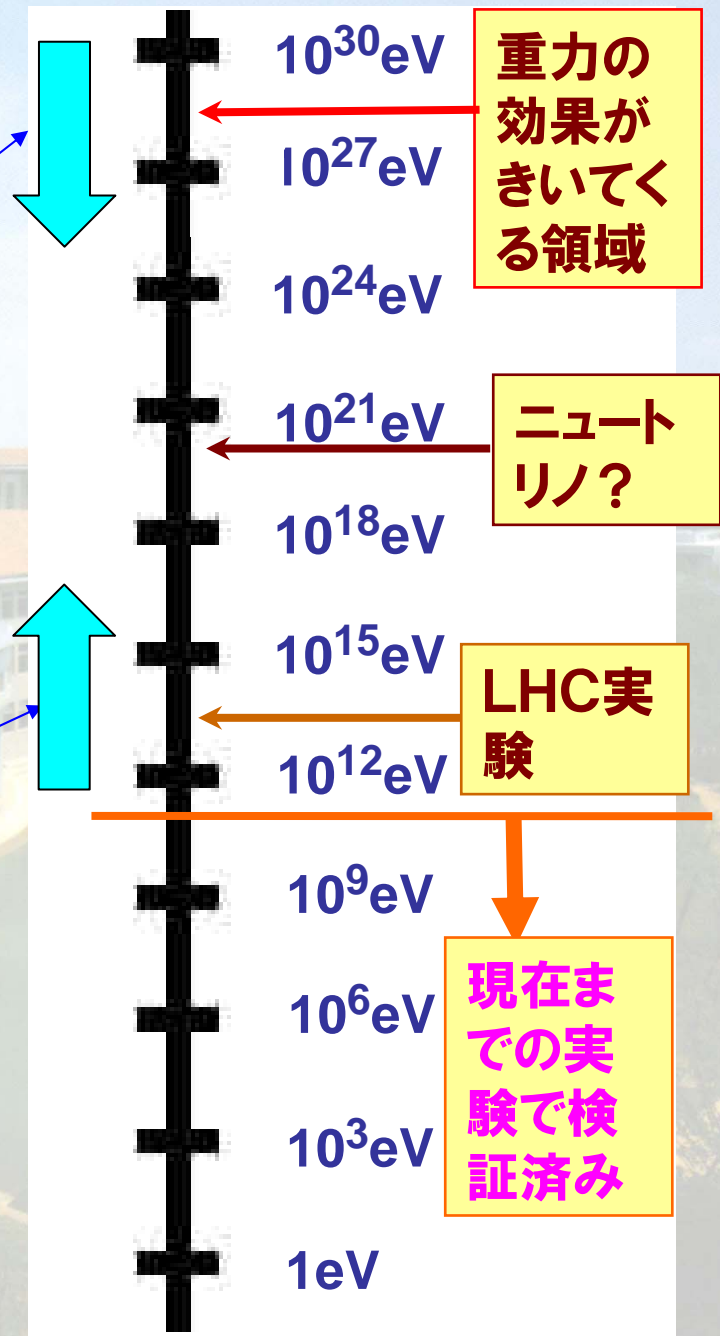
(トップダウン的アプローチ)

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



現在素粒子論の現象論分野で研究されている課題

●もし大統一理論が自然を記述しているならばクォークとレプトンの間に関係があるはず

→カビーボ・小林・益川混合行列と牧・中川・坂田行列の間に関係があるか？

●高いエネルギー(10^{15} GeV)での理論を考える場合、量子力学的補正を入れてもヒッグス粒子の質量が100 GeV程度に保たれるには、ものすごい微調整か、何かの理由が必要

→超対称性と呼ばれる対称性があるのではないか？

→超対称性があるとしたらLHCで新粒子が発見されるはず？

●重力も統一する試みとして、5次元時空から出発するカルーザ・クライン理論というものがある(5次元時空→4次元時空×1次元空間)。その効果がLHCで見えるかも？

素粒子の応用

- エレクトロニクス(e^- = 電子)
- レントゲン(X線 = 光子)
- CT(computer tomography, X線 = 光子による組織の形態観察)
- PET(positron emission tomography,
 e^+ = 陽電子による生体機能の観察)
- 放射線医療(p = 陽子, d = 重陽子を癌細胞内に止めて破壊)
- 原子力発電(中性子による核分裂によるエネルギーで発電)
- ニュートリノによる原子炉非破壊診断
(原子炉からの反電子ニュートリノを測定して内部を診断)
- 地球の物質密度測定
(数千kmの距離だけ離れてニュートリノ振動の確率を測定すると、
確率が通過する地中の密度に依存するので、密度を推定できる)