



素粒子物理学とニュートリノ

第一部 素粒子の標準理論

東京都立大学理学研究科物理学専攻
素粒子理論研究室助手 安田修

素粒子とは？

物質中の電子・クォーク等が素粒子
(今のところ)

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

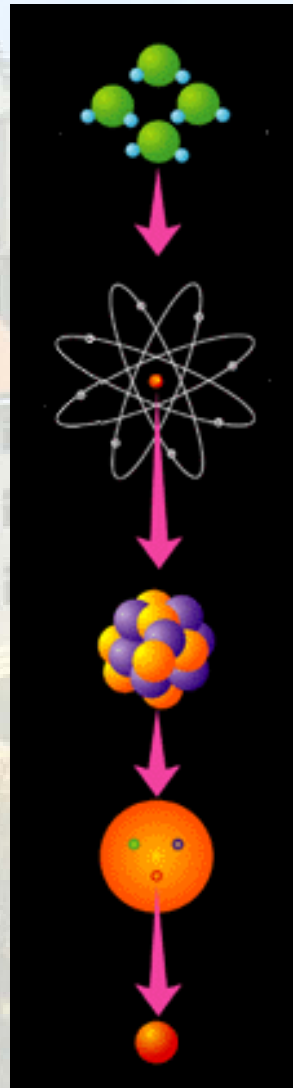
原子核 (陽子・中性子)
核子

10^{-13}cm

核子 (uクォーク・dクォーク)

$<10^{-16}\text{cm}$

クォーク



特殊相対論と量子力学

●特殊相対論 (1904年頃完成) (大学3～4年で学習)

アインシュタインの関係式

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

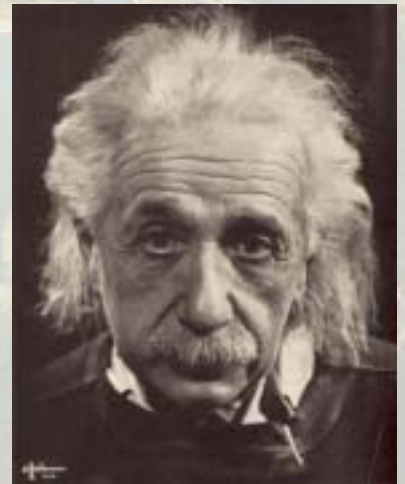
E:粒子のエネルギー, m:粒子の質量,

p:粒子の運動量 ($= mv / \sqrt{1 - v^2/c^2}$),

c:光速 $=3 \times 10^8 \text{m/s}$

特に超相対論的 ($mc \ll p$) の時には

$$E \cong pc$$



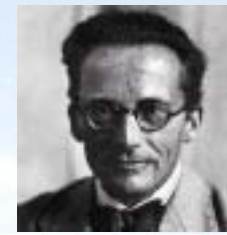
アインシュタイン

●量子力学 (1930年頃完成)

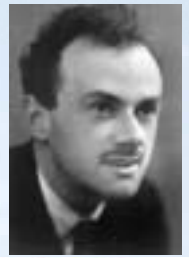
(大学3年で学習)



ボーア



シュレディンガー



ディラック

ハイゼンベルグの不確定性原理

(座標と運動量は原理的に同時に正確には測定できない)

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

Δx :座標の不確定性, Δp :運動量の不確定性

h :プランク定数= $7 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (角運動量の次元)

実際には $\Delta x \rightarrow x$ 、 $\Delta p \rightarrow p$ として最善の測定を考えると

$$x \cdot p \cong h / (4 \pi)$$

さらに両辺に c をかけて ※ $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

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



エネルギーの次元(超相対論的の時には E pc)



ハイゼンベルグ

粒子の広がり **粒子を探るエネルギー** **物体の結合エネルギー**

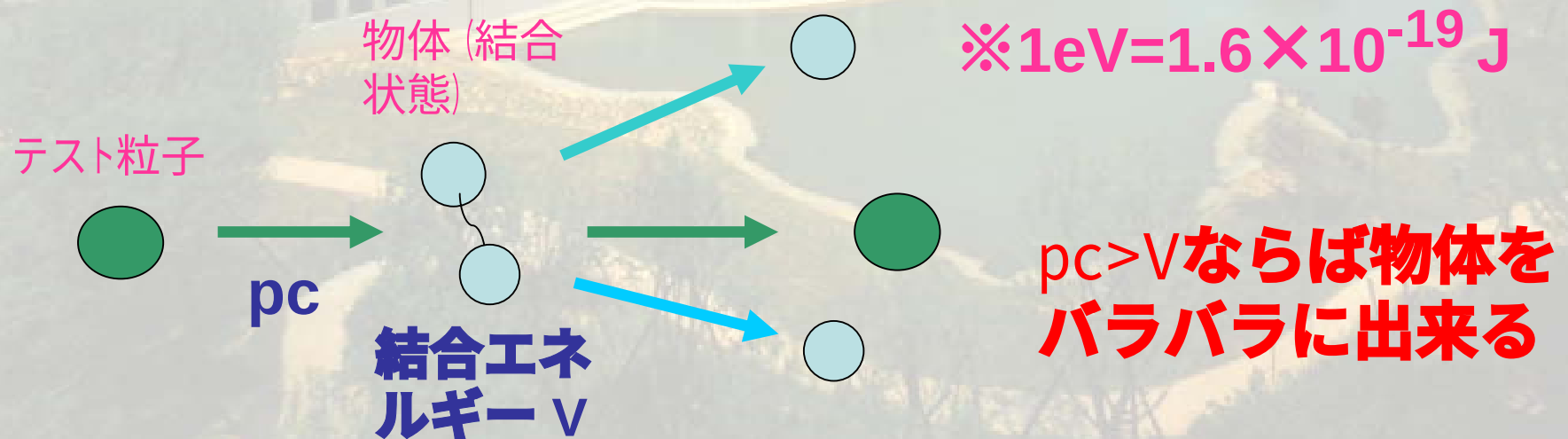
$x=10^{-7}$ cm $\Leftrightarrow$ pc=100eV (分子)

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

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

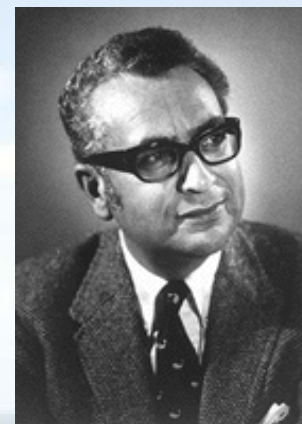
$x=10^{-13}$ cm $\Leftrightarrow$ pc=100MeV (核子)

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



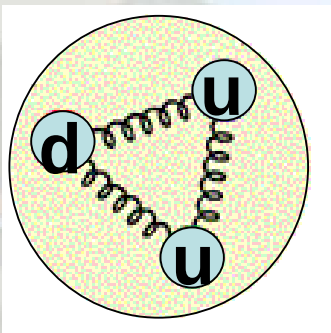
クォークとレプトン

(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

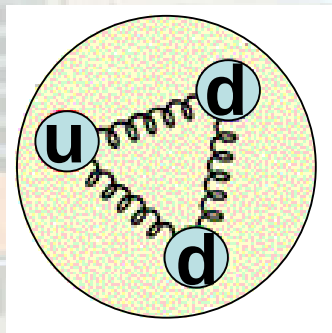


ゲルマン

●クォーク: 3個で核子を構成する素粒子



陽子



中性子

●レプトン: 電子とニュートリノは素粒子



電子



ニュートリノ

次ページで説明



粒子	電荷
陽子	+1
中性子	0
uクォーク	+2/3
dクォーク	-1/3
電子	-1
ニュートリノ	0

ニュートリノ (大学4年～大学院修士課程1年で学習)

ベータ崩壊

中性子→陽子+電子

の反応では一見エネルギー保存則が破れているように見える

実はニュートリノという、観測にかかりにくい粒子が存在して

中性子→陽子+電子+ニュートリノ

によりエネルギー保存則は成り立っている



パウリ

クォークとレプトンの世代

クォークとレプトンには
ほとんど性質の同じコピー
が3世代存在することが知
られている



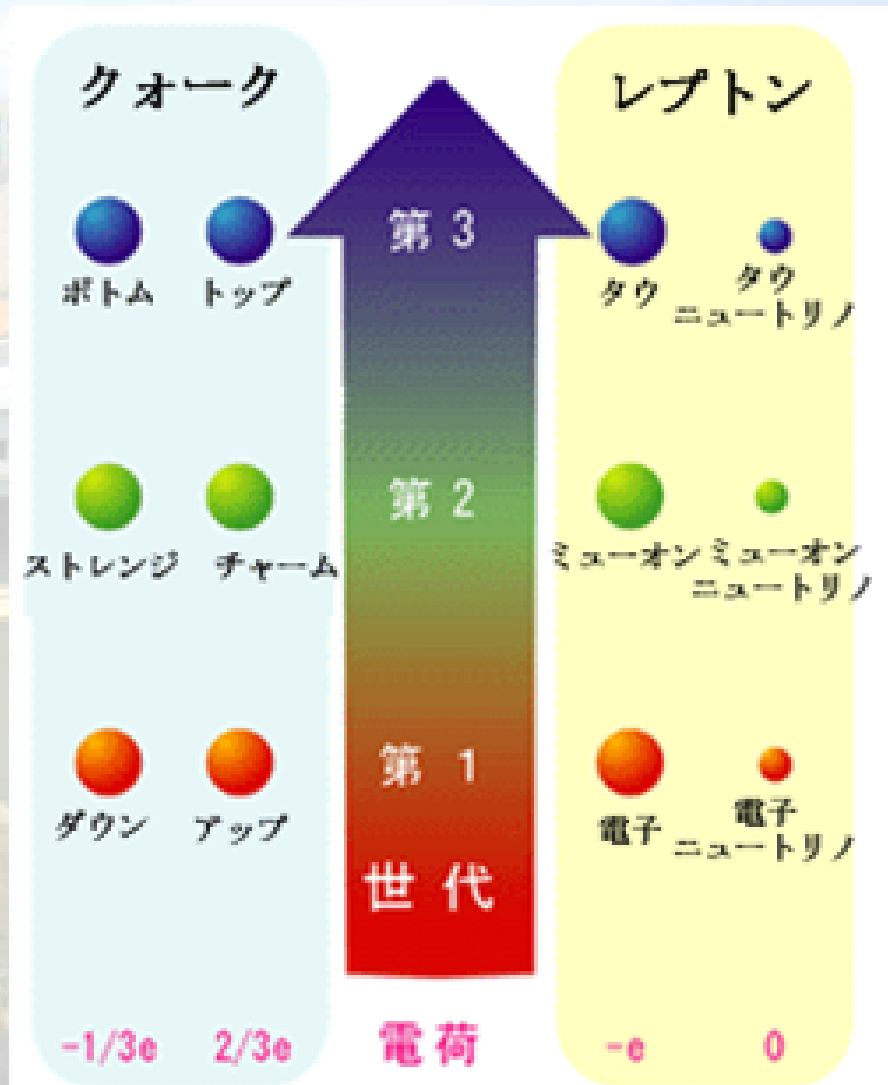
2世代目が実験的に発見さ
れる以前に、ある理論的な
根拠から3世代の存在は予
言されていた



小林誠

益川敏英

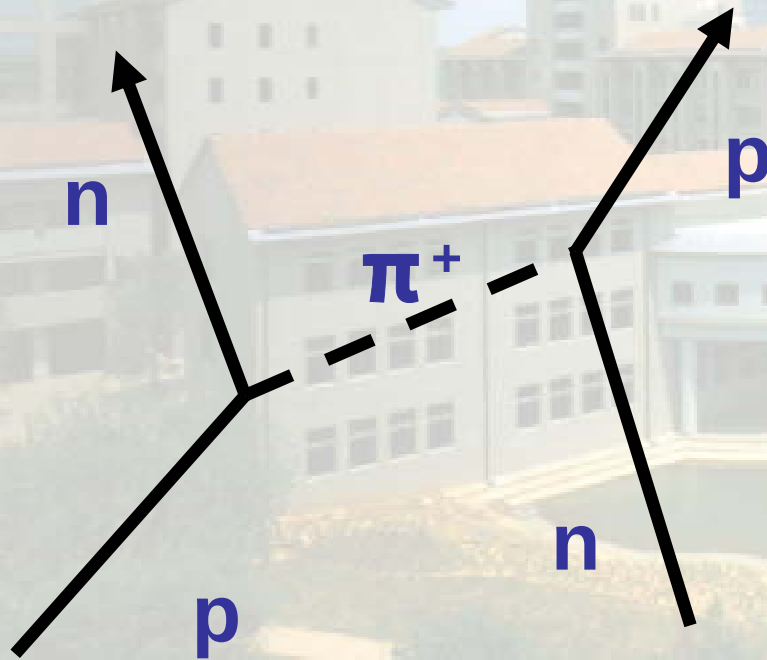
素粒子の質量は世代ご
とに重くなってゆく



素粒子論における力（相互作用）の記述

湯川の中間子論 (大学4年～大学院修士課程1年で学習)

相互作用（核力）は粒子（ π 中間子）を媒介して起こる



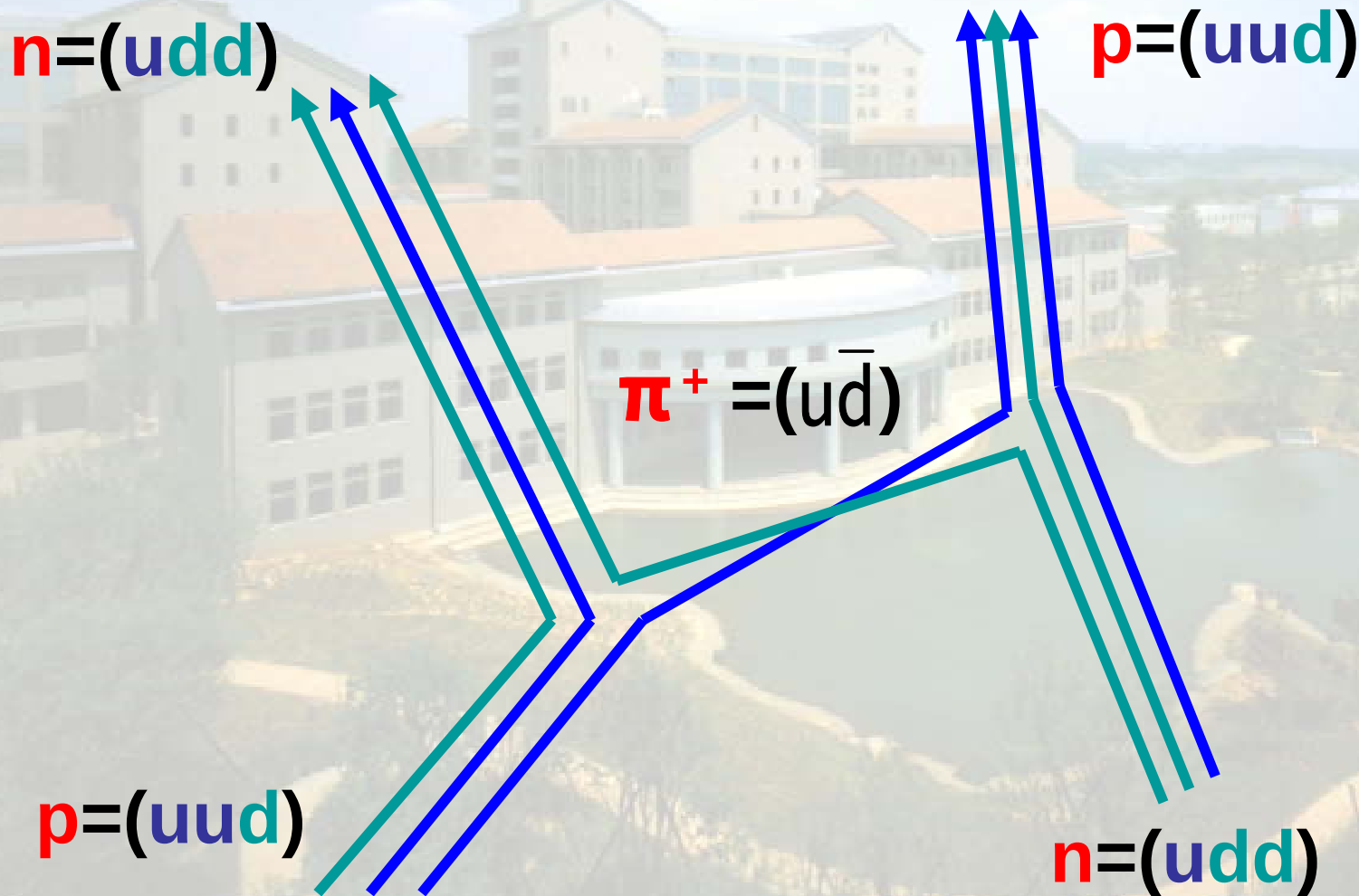
湯川秀樹

湯川ポテンシャル

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-m_\pi cr/h}}{r}$$

力の到達距離は $h/m_\pi c$ 10^{-13}cm ($m_\pi=140\text{MeV}$)

ちなみに核力は現在のクォークの猫像では以下の
ように理解されている:



粒子と反粒子 (大学4年～大学院修士課程1年で学習)

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子

粒子	電荷	反粒子	電荷
電子 e^-	-1	陽電子 e^+	+1
電子ニュートリノ ν_e	0	反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$	0
陽子 $p=(uud)$	+1	反陽子 $\bar{p}=(\bar{u}\bar{u}\bar{d})$	-1
中性子 $n=(udd)$	0	反中性子 $\bar{n}=(\bar{u}\bar{d}\bar{d})$	0
アップクォーク u	+2/3	反アップクォーク $\bar{u}$	-2/3
ダウンクォーク d	-1/3	反ダウンクォーク $\bar{d}$	+1/3

中性子と反中性子、電子ニュートリノと反電子ニュートリノはそれぞれバリオン数、電子レプトン数と呼ばれる量で区別される

自然界の4つの力

(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

力	力の媒介粒子	媒介粒子の質量	力の大きさ
		M	g^2
強い力	グルーオン	0	1
電磁気力	光子	0	10^{-2}
弱い力	W,Zボゾン	約100GeV	10^{-5}
重力	重力子	0	10^{-40}

ポテンシャル

$M \neq 0$ の時 $V(r) = -g^2 \frac{e^{-Mcr/\hbar}}{r}$

$M = 0$ の時 $V(r) = -\frac{g^2}{r}$

重力 (大学4年で学習)

重力＝重力子の交換
例：万有引力



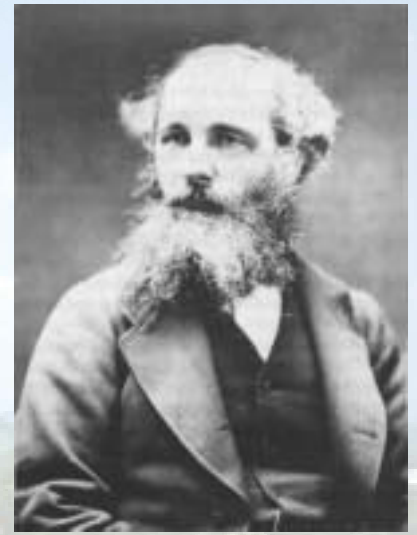
ニュートン



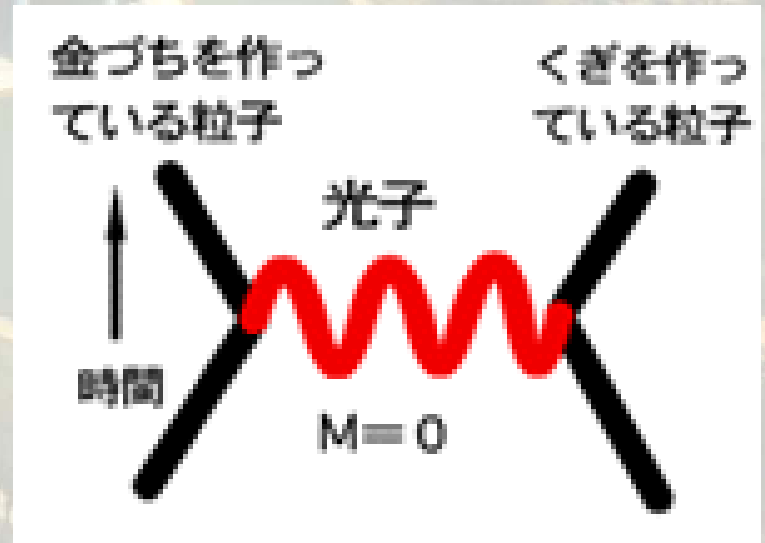
電磁気力 (大学1年で学習)

電磁気力＝光子の交換

例：分子、原子、エレクトロニクス、磁石



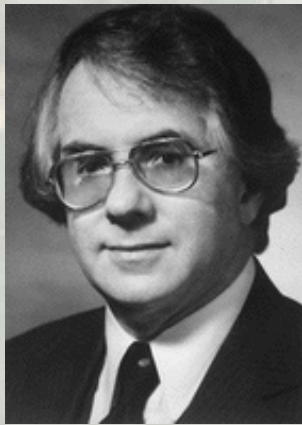
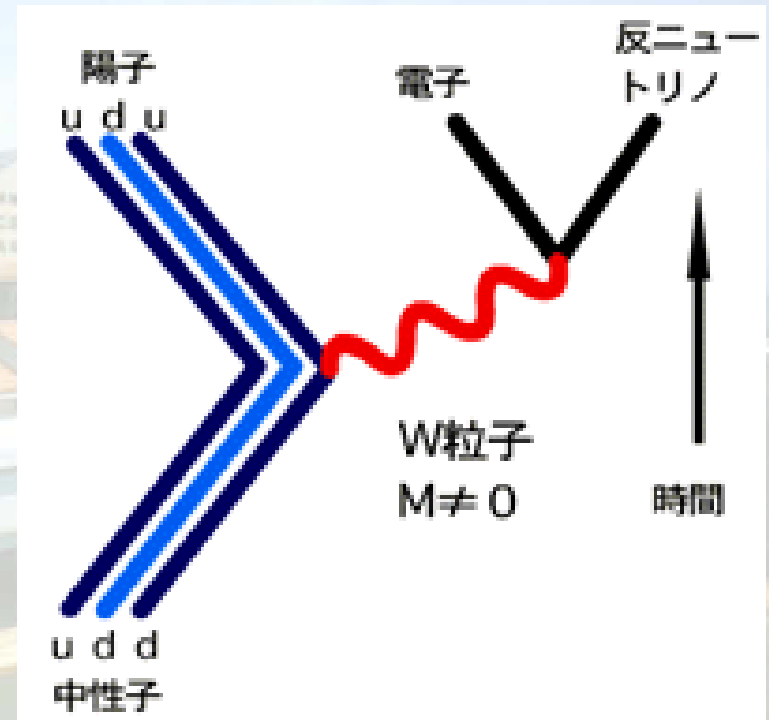
マックスウェル



弱い力 (大学院修士課程1年で学習)

弱い力 = W, Z 粒子の交換

例: ベータ崩壊 (中性子、原子核の崩壊)、地熱



グラショウ



サラム



ワインバーグ

弱い力は電磁気力と
統一的に記述できる
ことが知られている

強い力

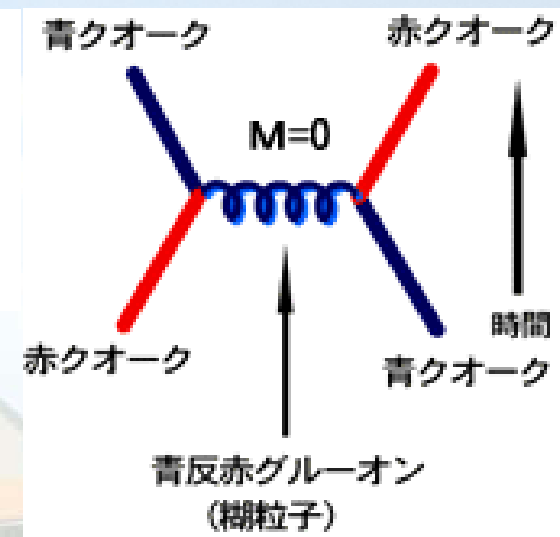
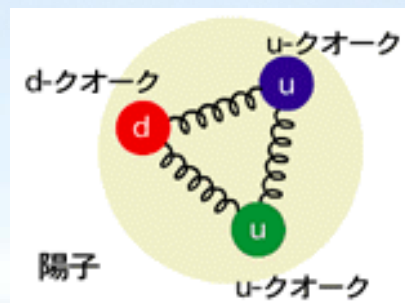
(大学院修士課程1年で学習)

強い力＝グルーオンの交換

例：核力、核融合

グルーオンによる強い力には近距離では g^2 が小さくなる一方、遠距離では g^2 が大きくなる性質がある

🔥 クォークは単独では観測できない



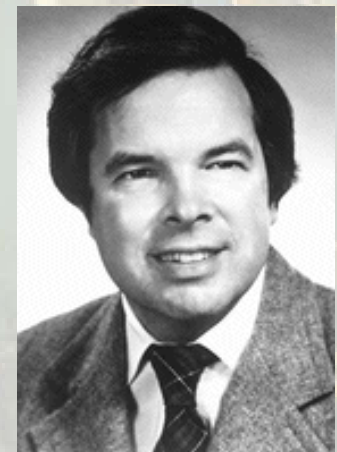
ウィルチェック



グロス



ポリッツァー



ウイルソン

ゲージ理論 (大学院修士課程1年で学習)

ゲージ対称性:

理論に現れる量 $f(x, y, z, t)$ に関して、
時空の位置に依存する位相
 $\theta(x, y, z, t)$ による変換

$$f(x, y, z, t) \rightarrow e^{i\theta(x, y, z, t)} f(x, y, z, t)$$

に対する不変性

理論にゲージ対称性を持たせるにはゲージ場という粒子の自由度が必要となる

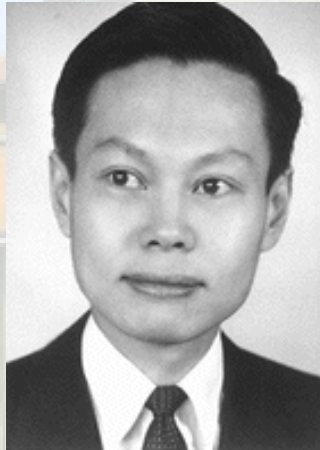
ゲージ場

素粒子論に出てくる4つの力を媒介する粒子はすべてゲージ場であることが知られている:



ワイル

電磁気力 (光子)



ヤン

弱い力 (W,Zボゾン)

強い力 (グルーオン)



ミルズ



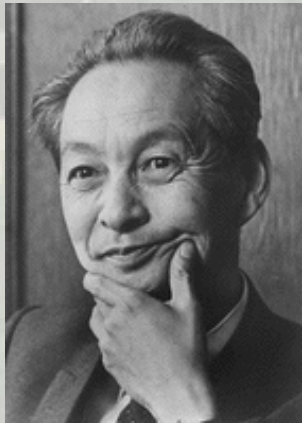
内山龍雄

重力 (重力子)

くりこみ理論 (大学院修士課程1年で学習)

特殊相対論＋量子力学＝場の量子論

場の量子論における量子力学的補正を計算すると一般にその結果は発散してしまうが、ゲージ理論の場合にはくりこみという操作により意味のある答を出すことが出来、その予言は実験結果とも一致することが知られている ➡ 重力に関しては未解決



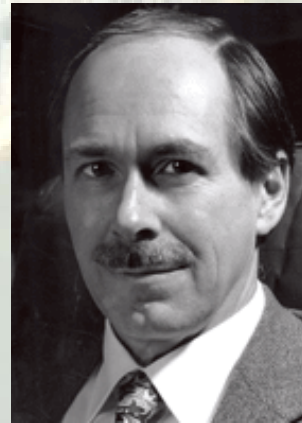
朝永振一郎



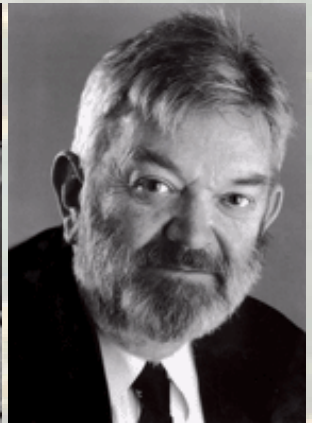
シュウィンガー



ファインマン



トホーフト



ヴェルトマン

電磁気力

弱い力・強い力

対称性の自発的破れ

(大学院修士課程1年で学習)

真空: ポテンシャルの中でエネルギーの一番低い点

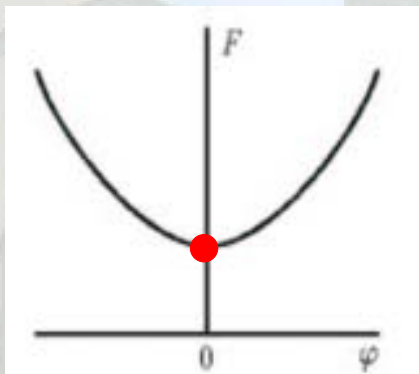


南部陽一郎

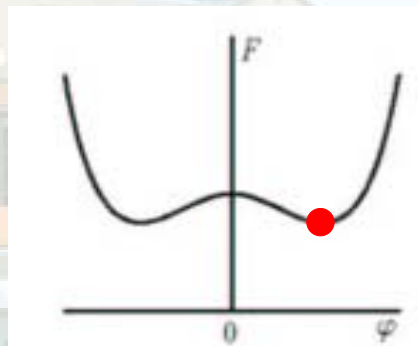


ゴールドストーン

1次元

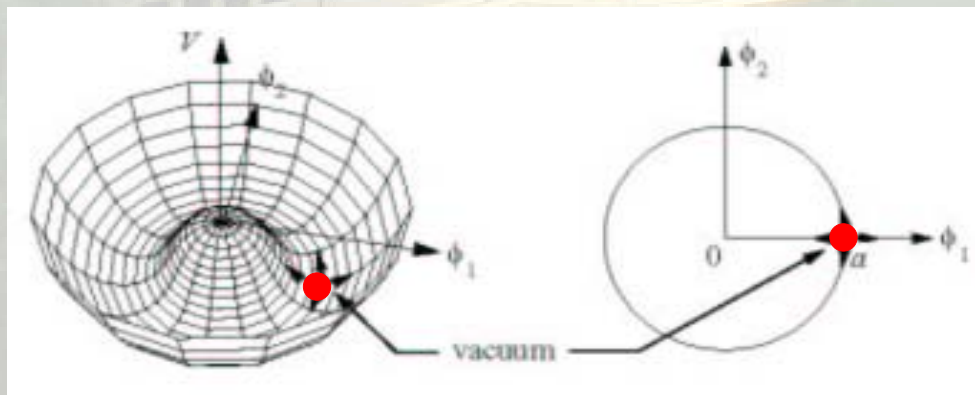


対称性の破れていない真空



対称性の破れている真空

2次元



対称性の破れている真空

標準理論における対称性の自発的破れ

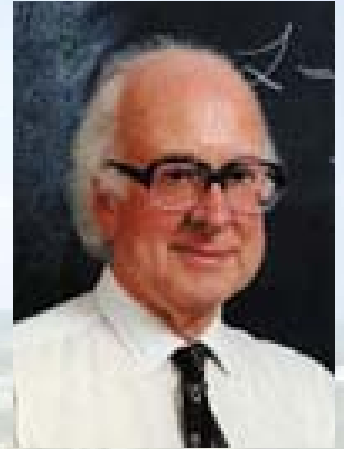
ゲージ理論ではクォーク・レプトン・ゲージ場は
ゲージ不変性のため質量を持ってない



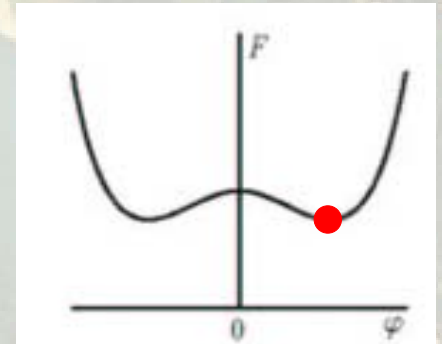
対称性の自発的破れを通してのみクォーク・レプトン・ゲージ場の質量を持たせることが出来る

弱い力を媒介するW,Zボゾンとクォーク・レプトンに質量を持たせるためのポテンシャルの自由度←ヒッグス粒子 ϕ

ヒッグス粒子はまだ発見されておらず、質量も未定



ヒッグス



ヒッグスポテンシャル

標準理論のまとめ

(重力は除いてある)

物質粒子				力を伝える粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	強い相互作用	
クォーク	アップ	チャーム	トップ	グルーオン	
	ダウَن	ストレンジ	ボトム	電磁相互作用 光子	
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	弱い相互作用	
	電子	ミューオン	タウ	Wボゾン Zボゾン	
質量を与える粒子 (未発見)				ヒッグス粒子 ヒッグス粒子 ヒッグス粒子	

標準理論の問題点とその拡張

(大学院修士課程1年以降に学習)

標準理論にはいくつかの定数 (クォーク・レプトンの質量、ゲージ場の結合定数etc.) が入っていて、最終理論とは思われていない

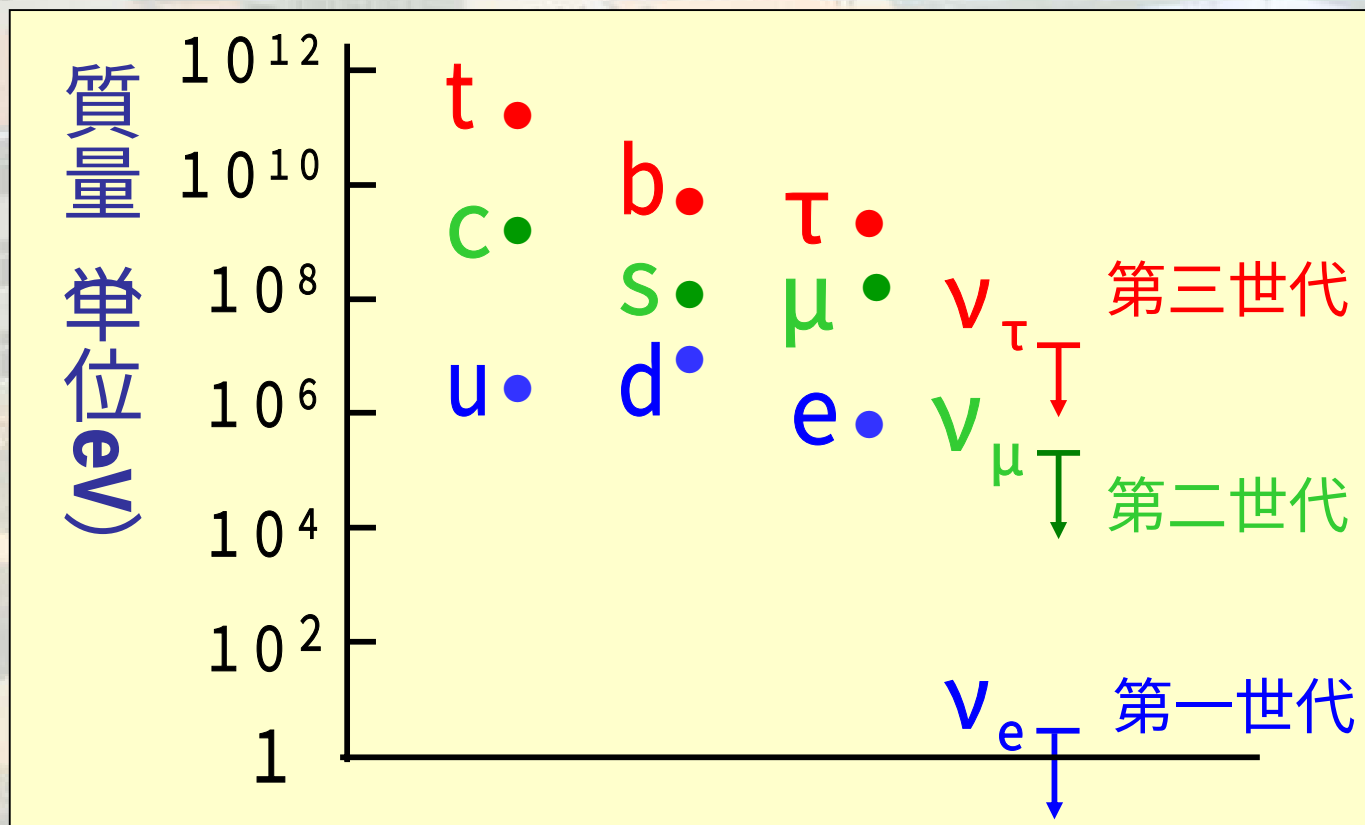


その先に進むには、さらなるミクロの情報 (高エネルギーの情報) が必要

以下に見るように、ニュートリノはまさにそのような情報を提供する

問題点(1):素粒子の質量の階層性

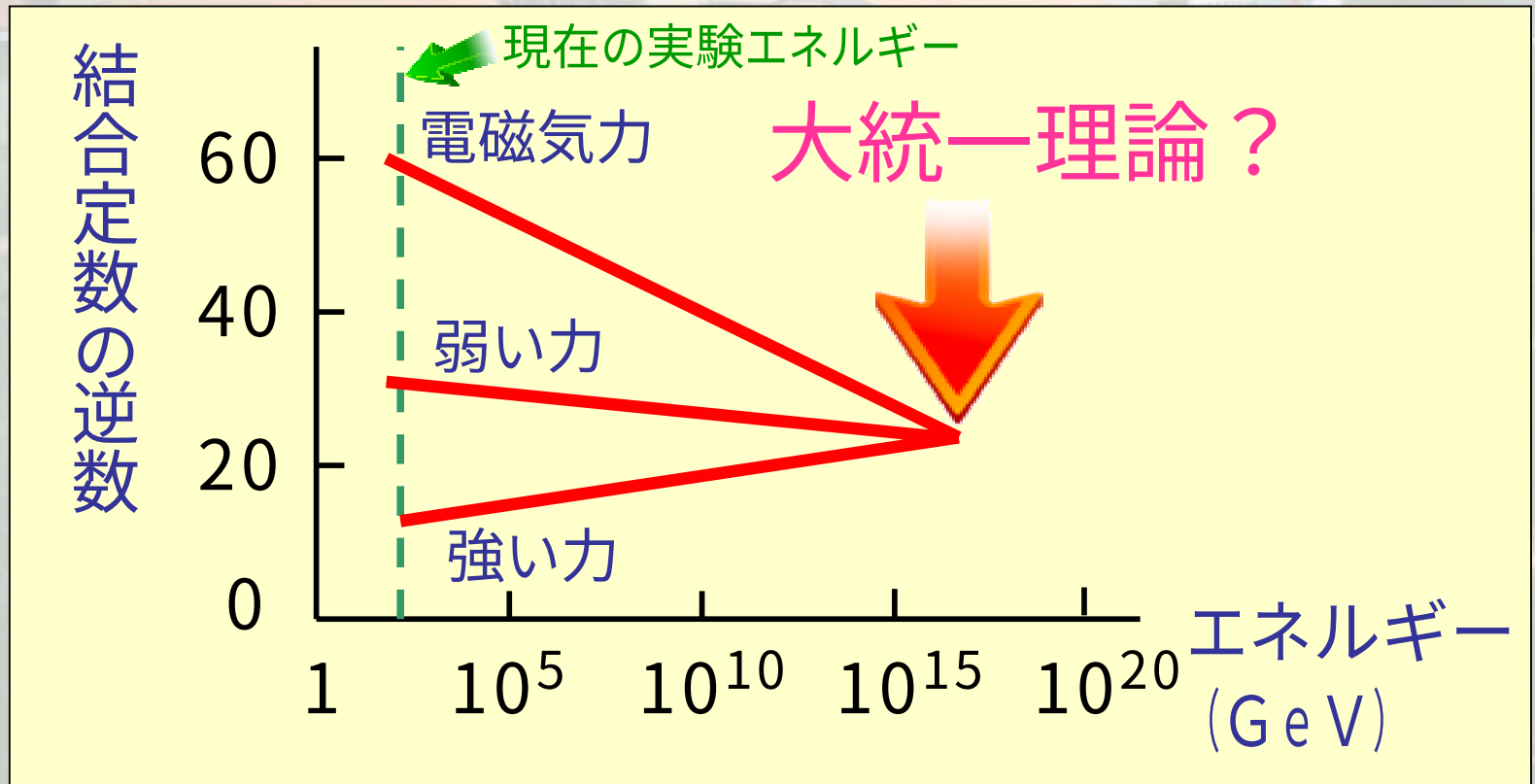
- 世代による質量の違いの起源はわかっていない
- 標準理論ではニュートリノの質量は0
- 実験的にはニュートリノの質量は上限値しかわかっていない→質量は0か？
- もしニュートリノの質量が0でないとすると、なぜ他の粒子の質量に比べてそんなに小さいのか？



問題点 (2) : ゲージ場の結合定数 (力の強さ)

$x \rightarrow \text{小}$ $E = pc \rightarrow \text{大}$ (不確定性原理) の時に3つの力の結合定数が等しくなるように見える→その理由は未解決

大統一理論と呼ばれる仮説があるが、まだ検証されていない→高エネルギーに関する実験データが必要



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

クォークには種類に関する状態と、質量に関する状態にわずかのずれがあり、それは3行3列の行列で表される
(カビーボ・小林・益川混合行列)



カビーボ



小林誠



益川敏英

- レプトンにも混合行列はあるか？
- あるとしたらレプトンの混合行列とクォークの混合行列の関係は？

ニュートリノの小さな質量

シーソー機構

2行2列の行列

$$\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}$$



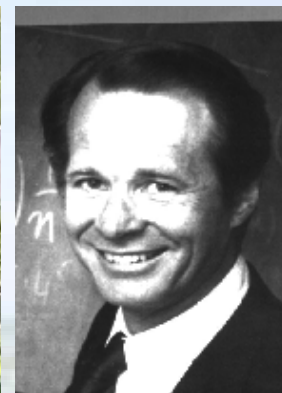
柳田勉



ゲルマン



ラモン

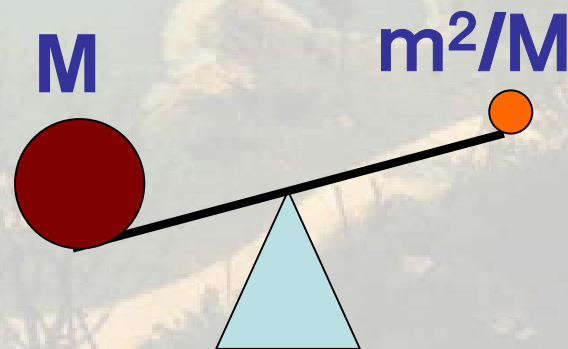


スランスキー

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！





素粒子物理学とニュートリノ

第二部 ニュートリノの物理学

東京都立大学理学研究科物理学専攻
素粒子理論研究室助手 安田修

ニュートリノ振動 (量子力学的効果)

実はずっと以前から、ニュートリノに質量がある場合には、ひと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 (**振動**と呼ばれる理由は次ページ) :

1957年 ポンテコルボ

$$\nu \Leftrightarrow \bar{\nu}$$

1962年 牧一中川一坂田

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



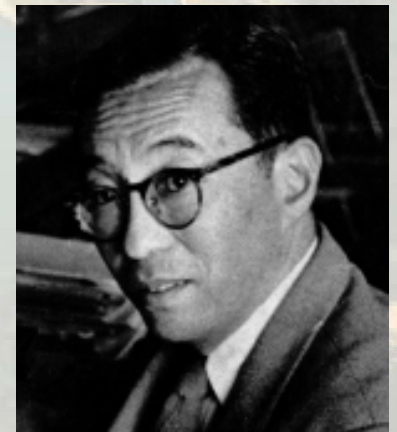
ポンテコルボ



牧二郎



中川昌美



坂田昌一

ニュートリノ振動

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

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

混合行列は牧・中川・坂田行列と呼ばれる

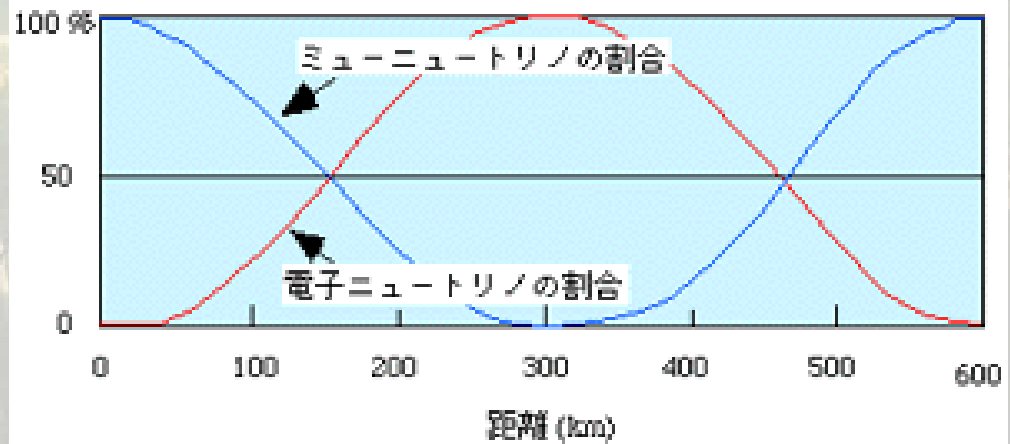
と関係つけられている時、時間 t 、距離 L ($= c t$) だけニュートリノが走る間に ν_μ から ν_e に変換される確率は

$$\sin^2 \left(\frac{(\Delta m^2 c^4) (L / \hbar c)}{4E} \right) = \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 c^4 / \text{eV}^2) (L / \text{km})}{(E / \text{GeV})} \right)$$

となり、振動的振る舞い
を示す。

$$\hbar \equiv h / (2\pi),$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$



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

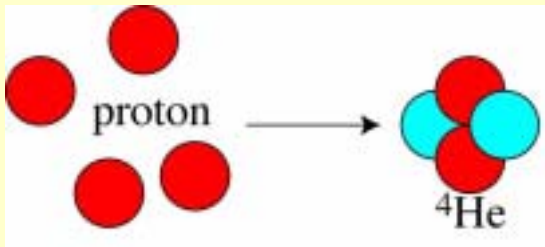
Kam: カミオカンデ

SK: スーパーカミオカンデ

KamLAND: カムランド

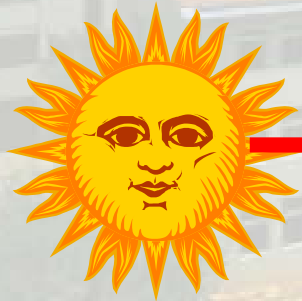
太陽ニュートリノ欠損

- 太陽中では核融合反応

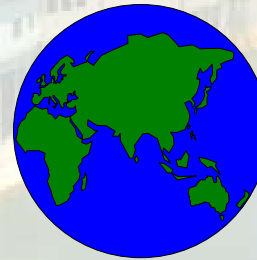


$$+ 2 e^+ + 2 \nu_e + 26.7 \text{ MeV}$$

がつねに起こっていてその ν_e (太陽ニュートリノ) が地球に到達しているが、地上での観測値は理論値の約1/2以下

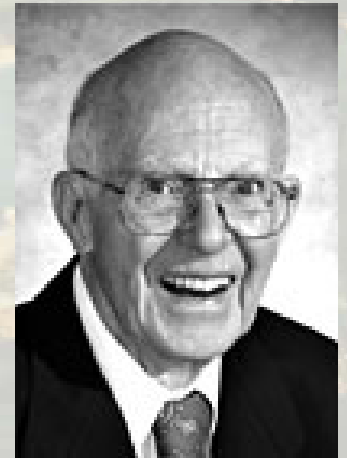


電子ニュートリノ



- 太陽ニュートリノ欠損は、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最初に観測されていた。

- しかしニュートリノ振動という解釈で完全に解決されたのは2002年末のことである。



デイビス

大気ニュートリノ異常

●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 $\pi^\pm$ 中間子となり、それがミューオン $\mu^\pm$ 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

$$(v_\mu + \overline{v}_\mu) : (v_e + \overline{v}_e) = 2 : 1$$

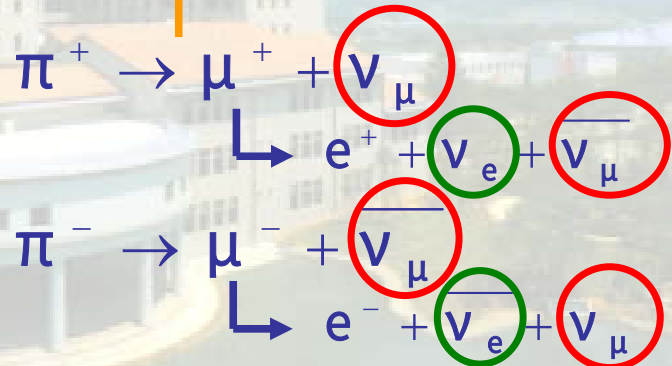
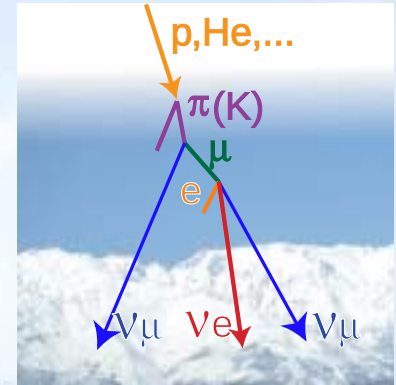
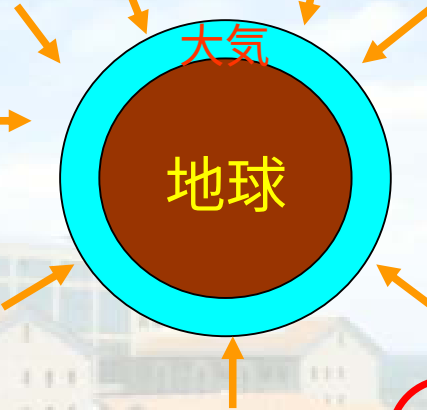
となるはずであるが、観測結果は

$$(v_\mu + \overline{v}_\mu) : (v_e + \overline{v}_e) = 1.3 : 1$$

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1998年のスーパーカミオカンデの発表で確立した。

1次宇宙線 (陽子、ヘリウム)



戸塚洋二



梶田隆章

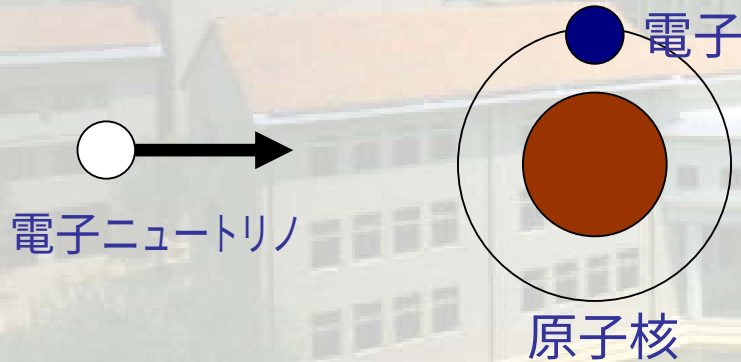
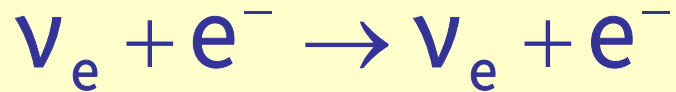
素粒子の感じる力

(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

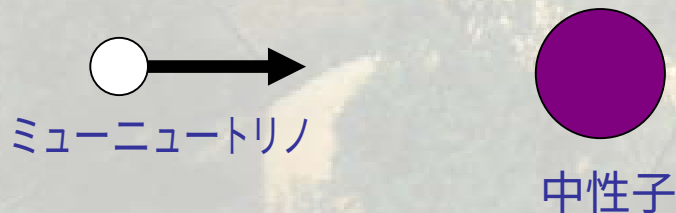
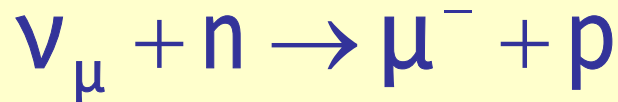
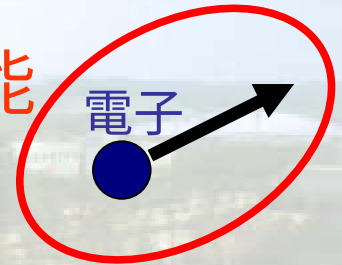
素粒子		強い力	電磁気力	弱い力	重力
クォーク	u	○	○	○	○
	d	○	○	○	○
レプトン	e	×	○	○	○
	ν_e	×	×	○	○

ニュートリノの観測の原理

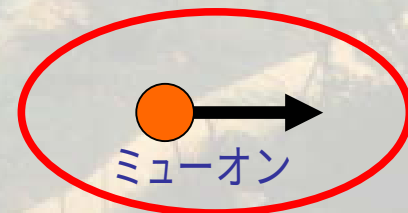
ニュートリノは弱い力しか感じないので、弱い力を通してニュートリノと相互作用を起こした荷電粒子を観測する



観測可能



観測可能

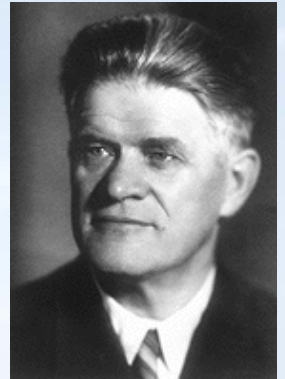


荷電粒子の観測の原理

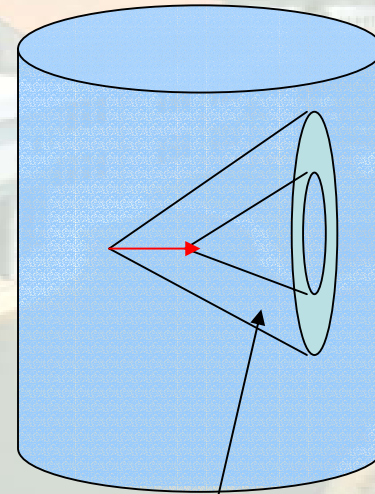
(1) 水中

●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



チェレンコフ光

(2) 液体シンチレーター ($(\text{CH}_2)_n$) の中

●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



スーパーカミオカンデ

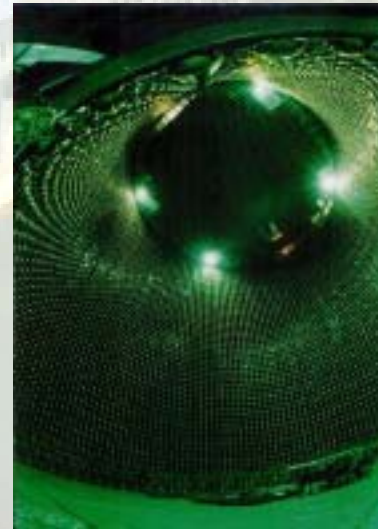
- 水による測定器
- その前進カミオカンデの拡張施設
- 太陽ニュートリノ欠損解決における重要な貢献
- 大気ニュートリノ異常現象の発見



カミオカンデ



小柴昌俊



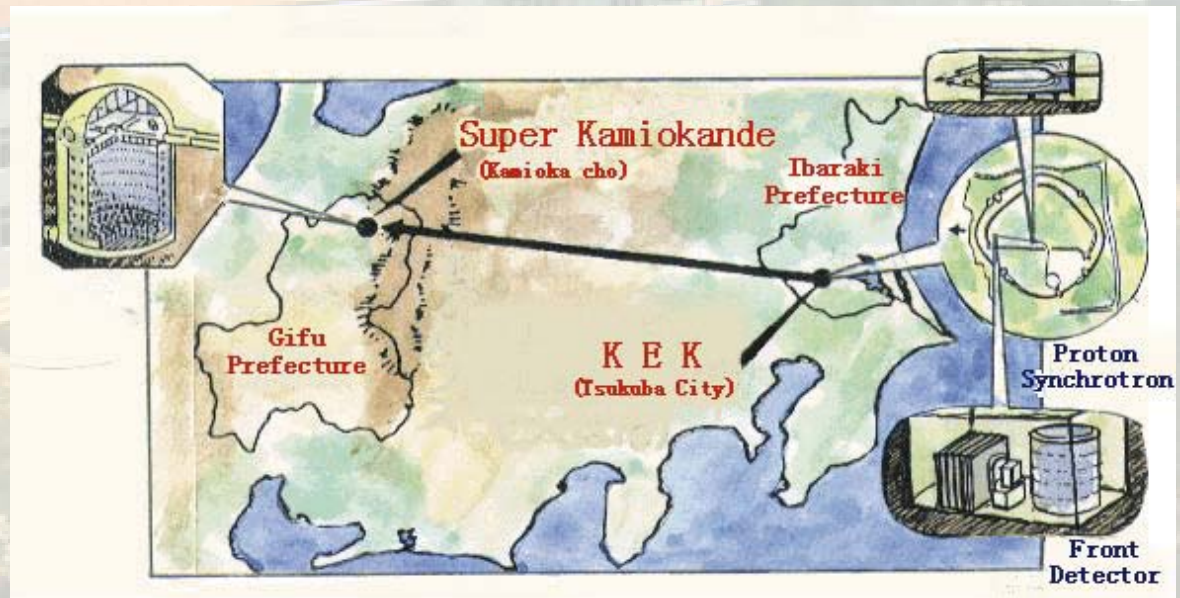
スーパーカミオカンデ

K2K (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250 km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)
- 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 (原子炉ニュートリノ欠損)

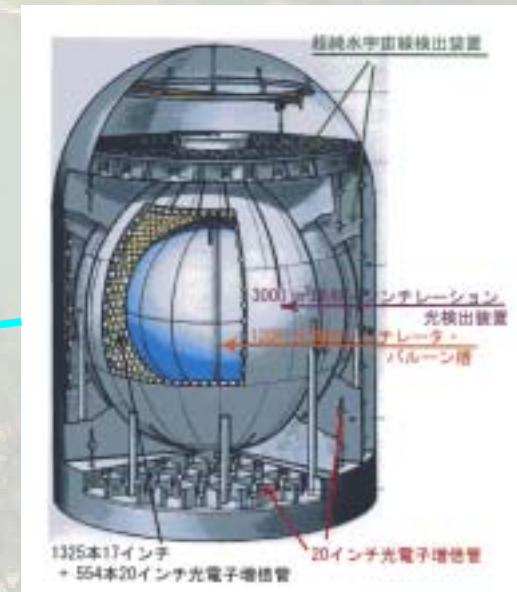
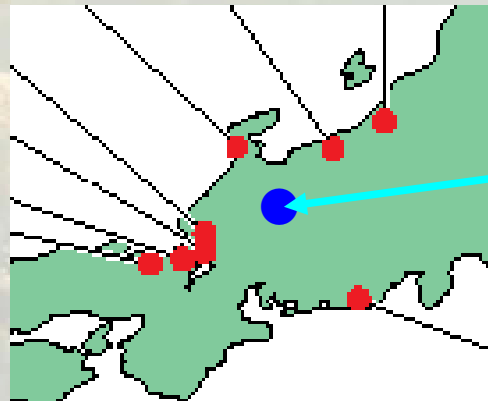
- 液体シンチレーターによる測定器
- 各地にある原発 (平均距離200km) から来る反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を検出



- 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結果と一致 (独立な検証)



鈴木厚人

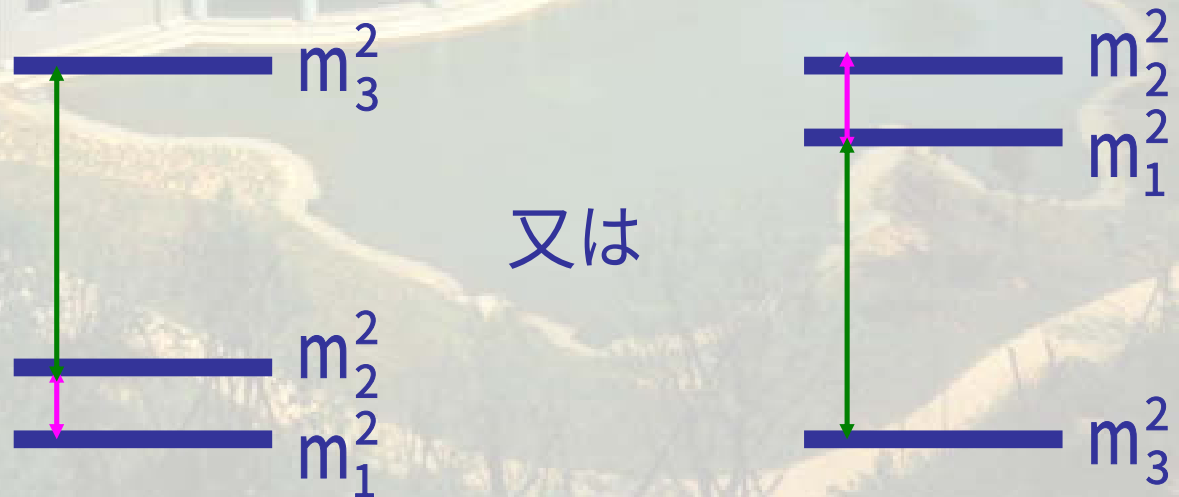


現在までのニュートリノ振動実験のまとめ

- 太陽ニュートリノ・原子炉ニュートリノ $\Rightarrow \Delta m_{21}^2 = 7 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ $\Rightarrow \Delta m_{32}^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

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



宇宙論とニュートリノの質量

● ニュートリノの質量があまりにも大きいと宇宙の膨張が止まってしまう、現在の観測と矛盾する→ $m_1 + m_2 + m_3 < 92 \text{ eV}$

● 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→ $m_1 + m_2 + m_3 < 3 \text{ eV}$

[現在の宇宙論]

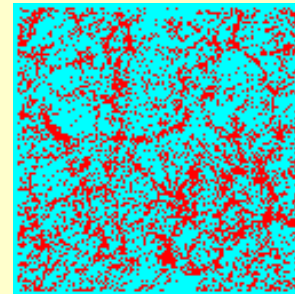
宇宙のエネルギー (= 質量) の内訳

2 %	核子
30 %	コールドダークマター
70 %	真空エネルギー

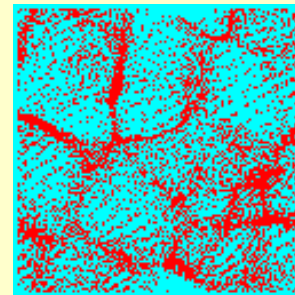
質量の重い
未知の粒子
からなる暗
黒物質

● H^3 のベータ崩壊から ν_e の質量に制限がついている: $m_\nu < 1 \text{ eV}$
→ 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

天文学による銀河の分布の観測



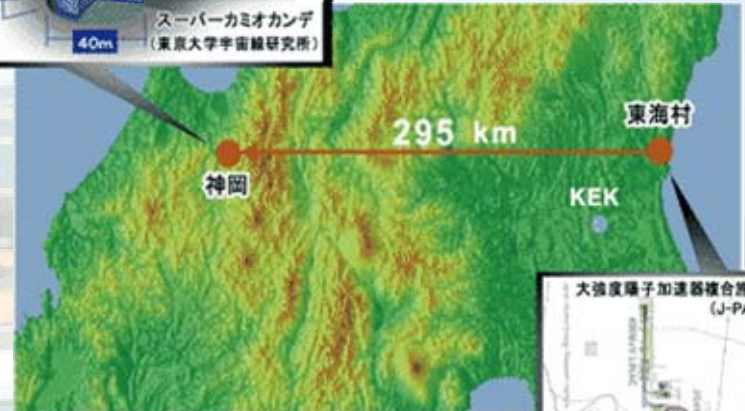
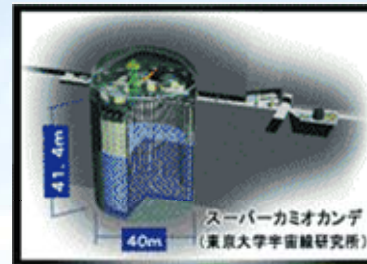
コールドダークマターのみ
(観測と一致)



充滿している
ニュートリノの質量が 3 eV 以上
の場合 (観測と矛盾)

将来のニュートリノ実験

J-PARC計画



- K 2 K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} とその虚数部を測る

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{MNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

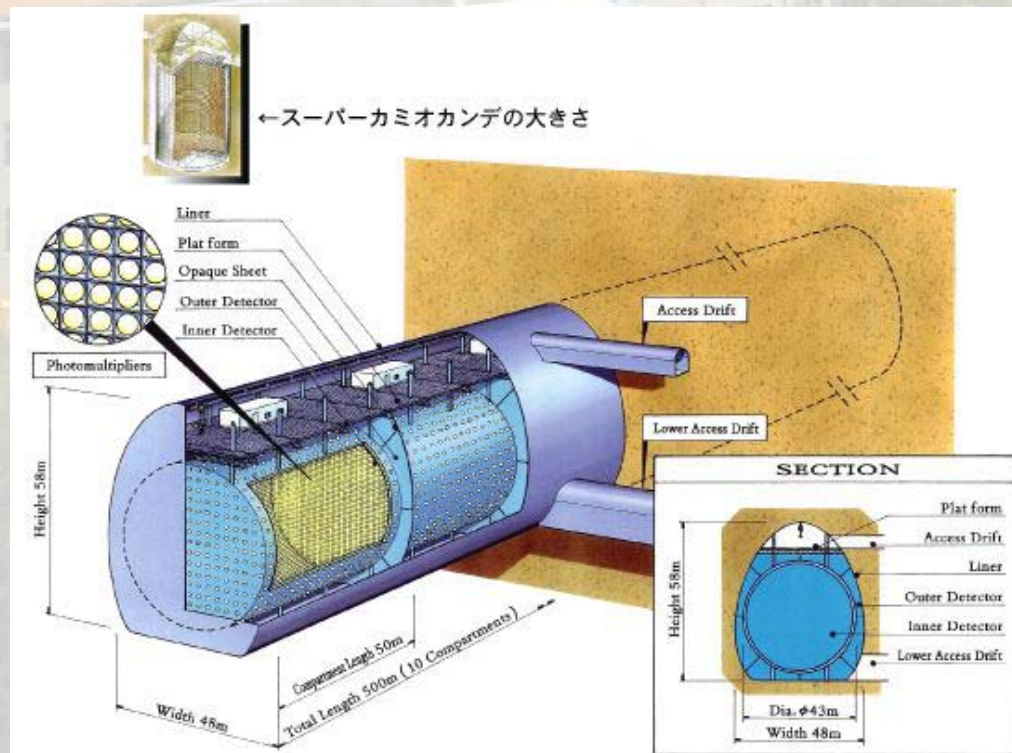
$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$

●第一段階 (2007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)

●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
(スーパーカミオカンデの20倍)



ビデオ「クローズアップ現代」
(2000年10月12日放映)

