現代物理学序論

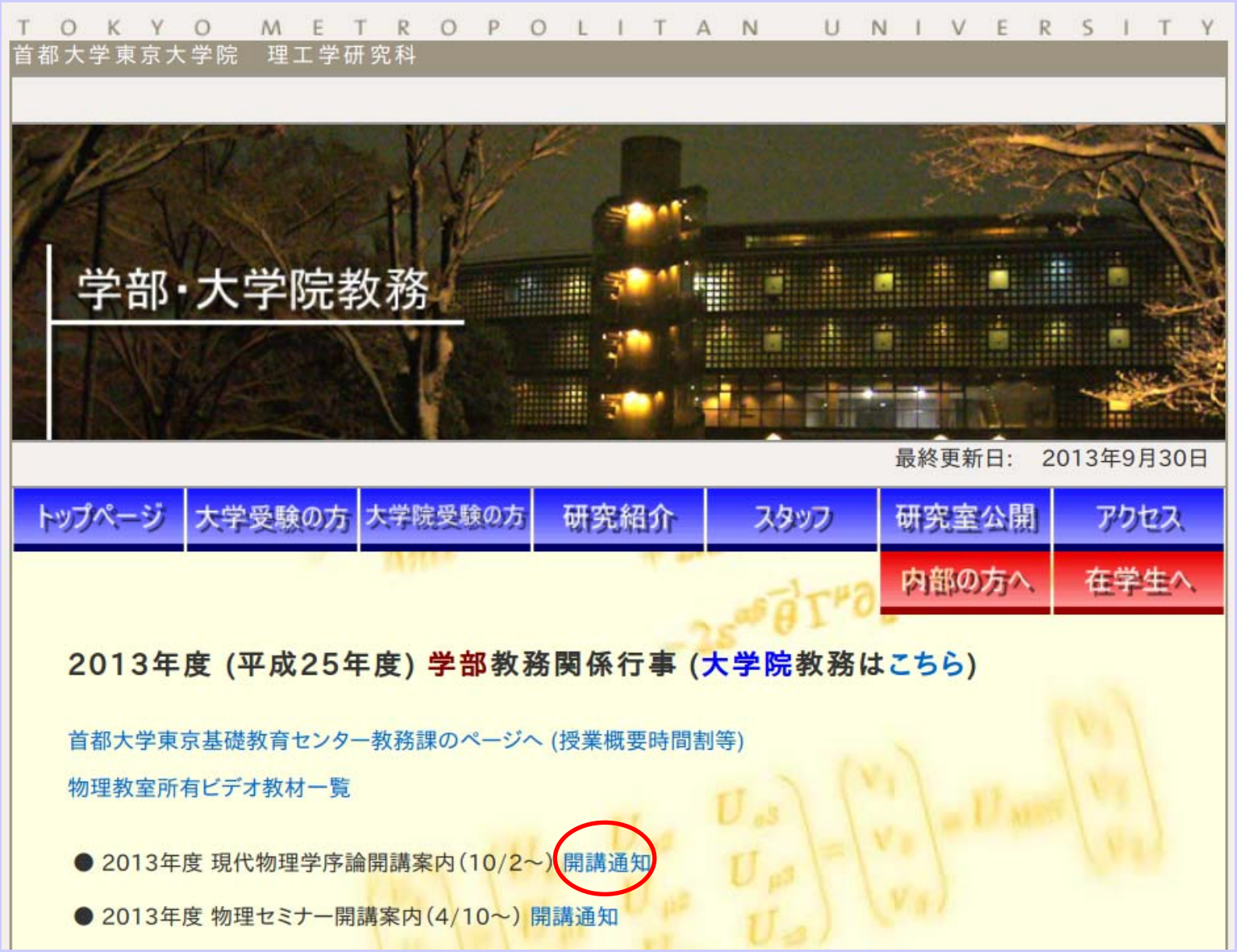
●現代物理学序論の目的：卒研研究室選択のための研究分野・研究内容の紹介を兼ねて、最前線の物理学を紹介

●スケジュール（都合により変更の可能性有→最新版はWebで）

10/02 素粒子理論	安田	素粒子論（標準模型からニュートリノ・弦理論まで）
10/09 量子凝縮系理論	森	量子凝縮した世界の不思議
10/16 ナノ物性I	真庭	ナノサイエンスについて
10/23 原子物理実験	田沼	原子衝突の基礎と応用
11/06 ソフトマター物性	栗田	ソフトマターとそのおもしろさ
11/13 高エネルギー実験	住吉	小林・益川モデルとB－ファクトリー実験
11/20 強相関電子論	堀田	磁性入門
11/27 宇宙物理実験	大橋	X線観測で探る宇宙の進化
12/04 ナノ物性II	柳	ナノカーボン材料の多様な物性
12/11 粒子ビーム物性	門脇	固体における電子のスピンと伝導
12/18 非線形物理	首藤	カオスと非線形物理
12/25 高エネルギー理論	ケトフ	HISTORY of the UNIVERSE（補講日）
01/08 宇宙理論	政井	宇宙の構造と天体の形成−活動−進化
01/15 電子物性	青木	新しい電子状態の発掘、解明、応用
01/22 原子核理論	慈道	ハドロン物理最前線 ～エキゾチックハドロンと原子核中のハドロン～

物理学教室web page http://www.phys.se.tmu.ac.jp/

「在学生へ」→「学部教務」→現代物理学序論「開講通知」



- **成績の評価**
  - 出席（毎回取る）
  - レポート（毎回出題）
    [Web上の記事・他人のレポートをそのままコピーすることは不正行為とみなし、０点とする。]

- **補講**
  12月25日（水）（全部で１５研究室あるため）

現代物理学序論

第１回　素粒子論
ーー標準模型からニュートリノ・弦理論までーー

このスライドは以下の所にあります：
http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/20131002.pdf

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

今日の授業で説明すること

①素粒子の標準模型の紹介

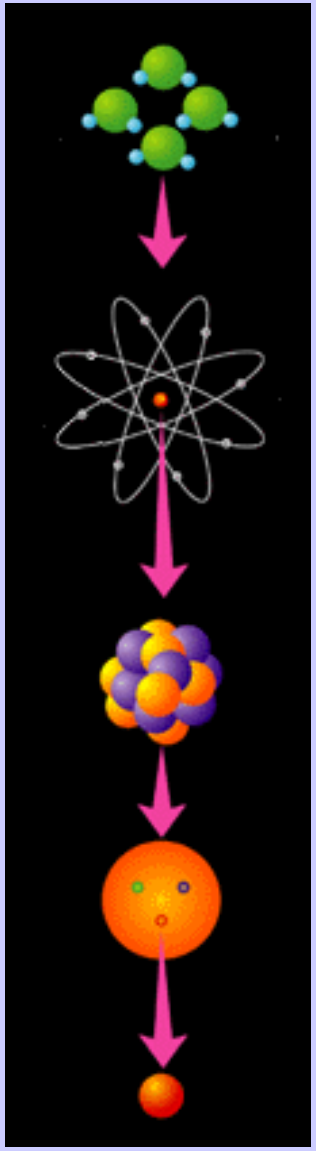
②標準模型を超える物理に関する研究

- ニュートリノの現象論（安田の研究分野）
- 弦理論の現象論（北澤さんの研究分野）

第一部 素粒子の標準模型

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　核子（uクォーク・dクォーク）

$<10^{-16}$cm　クォーク

素粒子の標準模型と呼ばれる理論は以下の問題を記述する:

A)**物質の構成粒子の分類**

B)**素粒子間の相互作用**

現在では
素粒子＝クォーク＋レプトン
という描像が確立している

クォークは強い相互作用をする粒子で、バリオン数を持つ：バリオン数の和は反応の前後で保存

電子は強い相互作用をしない粒子でレプトン数を持つ：レプトン数は反応の前後で保存

電子

	粒子	電荷	質量 [MeV]	バリオン数	レプトン数
クォーク	u	+2e/3	約3？	+1/3	0
	d	-e/3	約6？	+1/3	0
レプトン	e^-	-e	0.5	0	+1
	ν_e	0	0	0	+1

ニュートリノ（次項）

電荷の単位：
e= 1.6×10^{-19}C（クーロン）

質量の単位（粒子の質量の記述に便利）：
MeV/c^2= 10^6eV（電子ボルト）/c^2
=1.6×10^{-13}J（ジュール）/c^2

アインシュタインの式（$E=mc^2$）を使うと
$m=E/c^2$（$c=3\times10^8$m/s は光速度）

1933年：ニュートリノの予言



パウリ

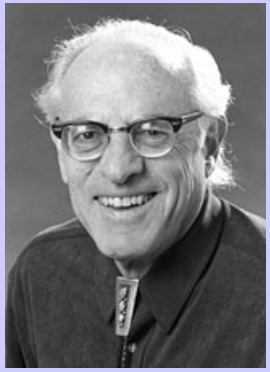
中性子→陽子＋電子
という反応でエネルギー保存則が成り立つようにするために
ニュートリノという中性粒子が導入された:
中性子→陽子＋電子＋（反電子）ニュートリノ

ν_e ： 電子ニュートリノ

$\bar{\nu}_e$ ：反電子ニュートリノ

（注）標準模型ではニュートリノの質量は0

1955年：(反電子) ニュートリノの発見
(原子炉からのニュートリノの観測)



ライネス



コーワン

粒子と反粒子

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(相対論的電子の方程式)



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

一般的に粒子には反粒子が存在

素粒子＝クォーク＋レプトン

粒子
（第一世代）

	粒子	電荷	質量 [MeV]	バリオン数	レプトン数
クォーク	u	+2e/3	約3？	+1/3	0
	d	−e/3	約6？	+1/3	0
レプトン	e^-	−e	0.5	0	+1
	ν_e	0	0	0	+1

反粒子
（第一世代）

	粒子	電荷	質量 [MeV]	バリオン数	レプトン数
反クォーク	$\bar{u}$	−2e/3	約3？	−1/3	0
	$\bar{d}$	+e/3	約6？	−1/3	0
反レプトン	e^+	+e	0.5	0	−1
	$\bar{\nu}_e$	0	0	0	−1

実はクォークとレプトンにこれらのコピーが3つ（3世代）存在することが知られている

3世代のクォーク＋レプトンが全て検出されるには2000年までかかった

クォーク

1974年：cクォークの発見


リヒター


ティン

1977年：bクォークの発見


レーダーマン

1994年：tクォークの発見


ショケット


グラニス


モンゴメリー

第二世代（4番目）

第三世代（5番目）

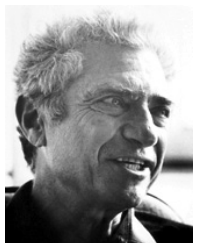
第三世代（6番目）

レプトン

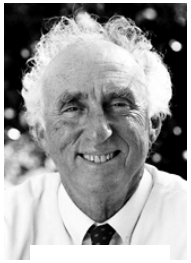
1962年：ミューニュートリノの発見


レーダーマン


シュワルツ


スタインバーガー

1976年：タウ粒子の発見


パール

2000年：タウニュートリノの発見


ランドバーグ


丹羽公雄

現在：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 [MeV]	バリオン数	レプトン数
クォーク	u (アップ)	+2e/3	約3？	+1/3	0
クォーク	d (ダウン)	−e/3	約6？	+1/3	0
レプトン	e^-	−e	0.5	0	+1
レプトン	ν_e	0	0	0	+1

第二世代

	粒子	電荷	質量 [MeV]	バリオン数	レプトン数
クォーク	c (チャーム)	+2e/3	約1,200？	+1/3	0
クォーク	s (ストレンジ)	−e/3	約120？	+1/3	0
レプトン	μ^-	−e	106	0	+1
レプトン	ν_μ	0	0	0	+1

第三世代

	粒子	電荷	質量 [MeV]	バリオン数	レプトン数
クォーク	t (トップ)	+2e/3	174,300	+1/3	0
クォーク	b (ボトム)	−e/3	約4,000？	+1/3	0
レプトン	τ^-	−e	1777	0	+1
レプトン	ν_τ	0	0	0	+1

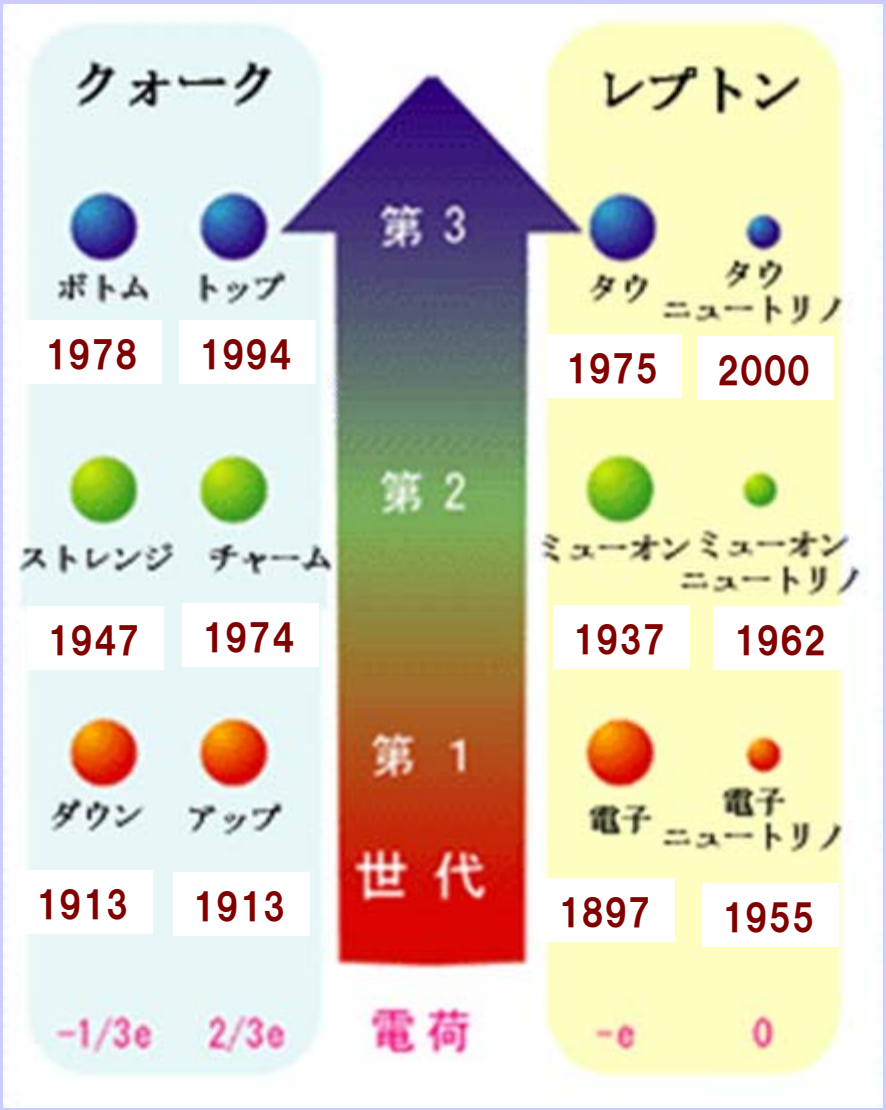
実は三世代のクォークは理論的に予言されていた！

1972年：小林ー益川理論

cクォーク（4番目のクォーク）が実験的に発見される以前に、**CP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



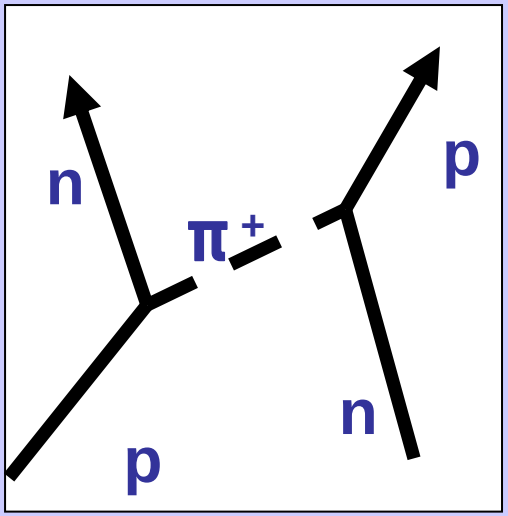
小林誠　　益川敏英



素粒子論における力（＝相互作用）の記述

湯川の中間子論

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

この**湯川の中間子論**は素粒子論における相互作用の基本的な考え方として現在まで引き継がれている

→

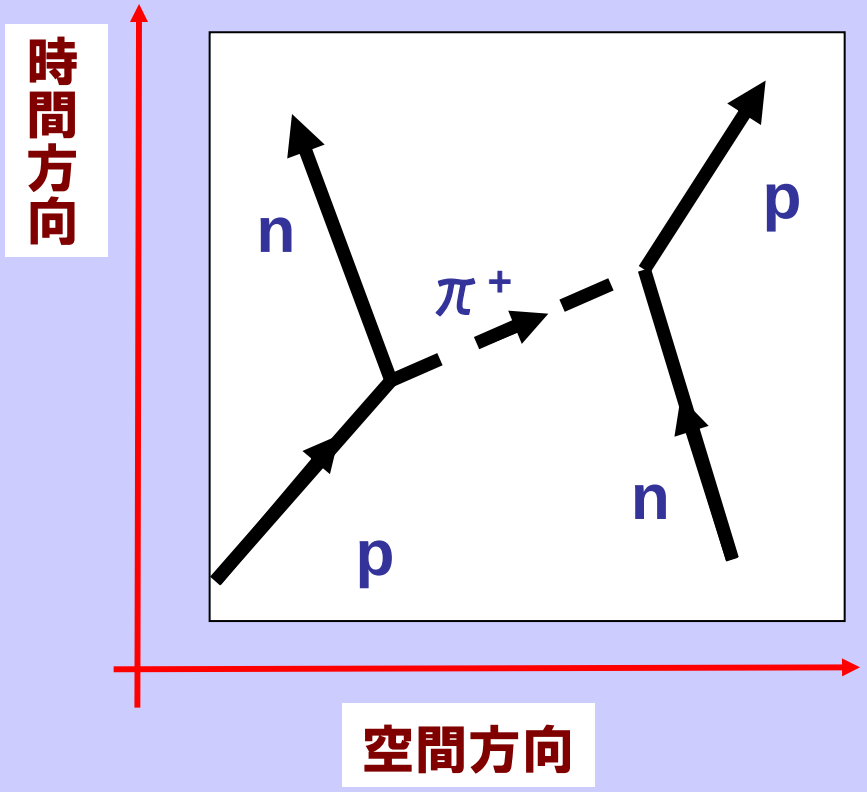
場の量子論と呼ばれる理論は粒子の生成・消滅を記述する

[注] ファインマン図形



ファインマン

- 粒子の反応過程を表す図形
- 本来は数学的に厳密な定式化がされている図形であるが、直観的にもわかりやすい

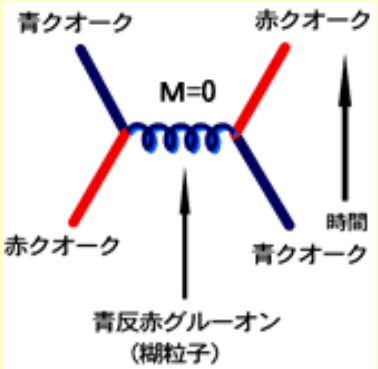


- 左側：p(陽子)がn(中性子)に変換すると同時にπ+中間子を放出する
- 右側：n(中性子)がπ中間子を吸収してp(陽子)に変換される

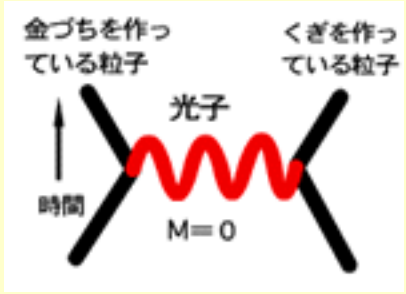
自然界には4つの相互作用(=力)があることが知られている

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
相互作用の媒介粒子	グルーオン	光子	W,Zボゾン	重力子
相互作用の大きさ	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}

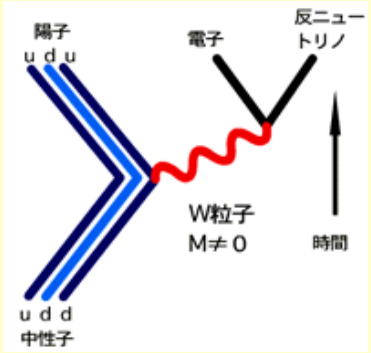
強い力



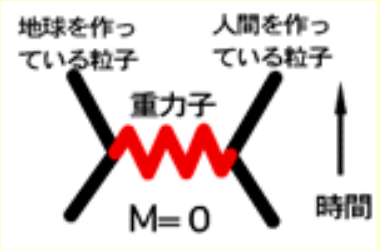
電磁気力



弱い力



重力



標準模型は3つの相互作用(強い相互作用・電磁相互作用・弱い相互作用)を記述する

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標準模型には現れない

素粒子の感じる力

素粒子		電荷	強い力	電磁気力	弱い力	重力
クォーク	u	+2e/3	○	○	○	○
	d	-e/3	○	○	○	○
レプトン	e	-e	×	○	○	○
	ν_e	0	×	×	○	○

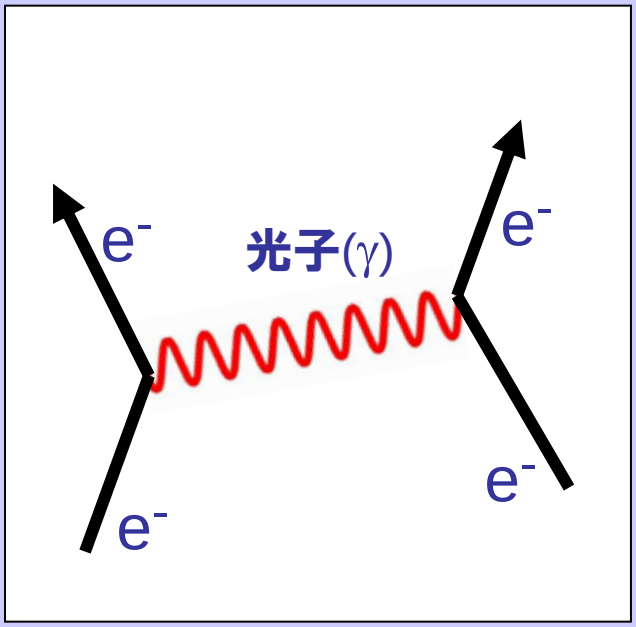
電磁気力

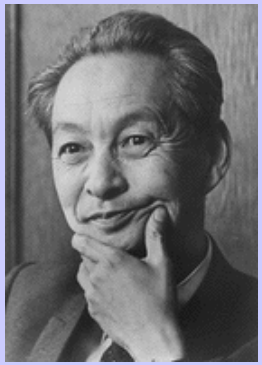
量子電磁気力学 (**Q**uantum **E**lectro**D**ynamics)

電磁気力＝光子の交換

例：分子、原子、エレクトロニクス、磁石

$e^- \rightarrow e^- + \gamma$ **などの反応**





朝永振一郎



シュウィンガー



ファインマン



ダイソン

電荷を持った粒子が光子を放出し、電荷を持った別な粒子がそれを吸収することにより相互作用する

弱い力

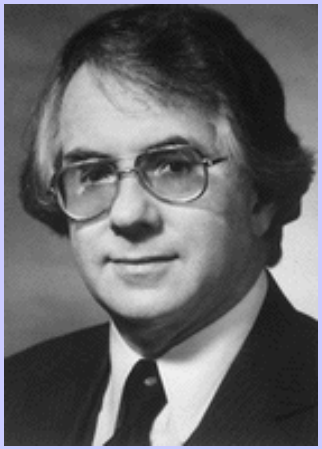
ワインバーグ・サラム理論

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（原子力発電））、地熱

$d \rightarrow u + W^-$, $e^- \rightarrow \nu_e + W^-$

$d \rightarrow d + Z$, $\nu_e \rightarrow \nu_e + Z$ **などの反応の組み合わせ**



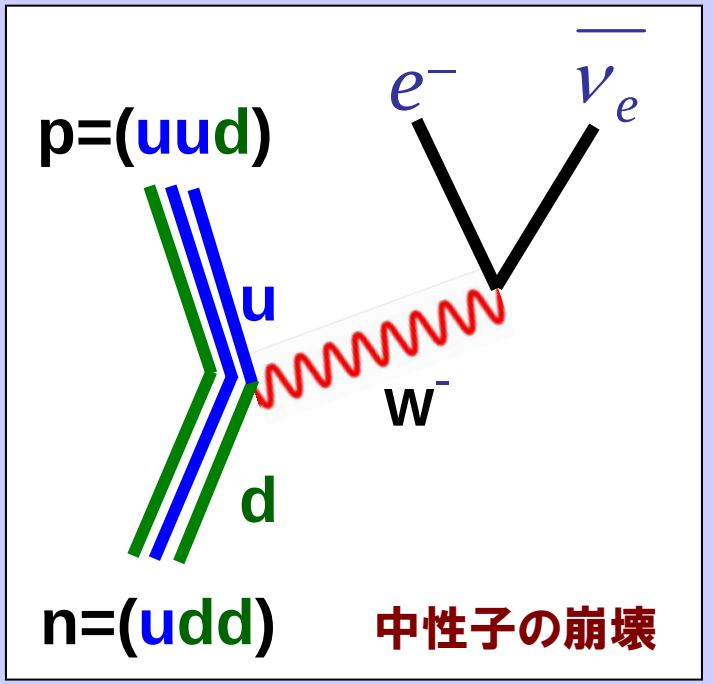
グラショウ

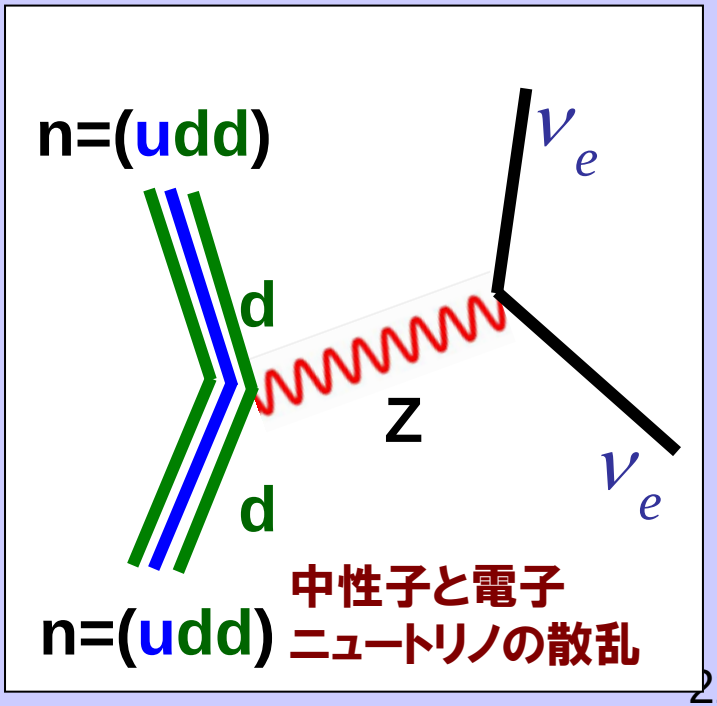


サラム



ワインバーグ



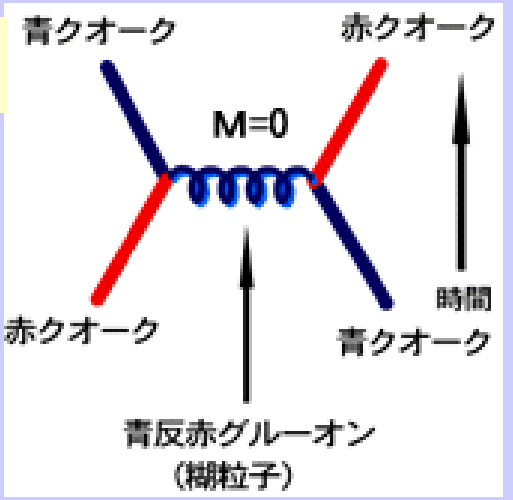


強い力

量子色力学 (Quantum ChromoDynamics)

強い力＝グルーオンの交換
例：核力、核融合

u→u+グルーオン 等の反応の組み合わせ

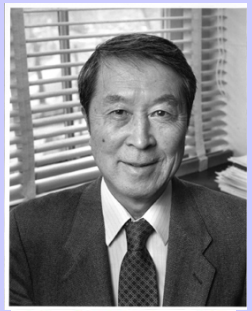


- 強い力はクォークを結合して核子・中間子を作る
- レプトンには強い力は働かない

強い力は電磁気力に似ているが、電荷ではなく、カラーチャージと呼ばれる量(1965年、ハン-南部)を持つ粒子に働く(赤青緑の色を合成して白色になる組み合わせのみが観測可能)



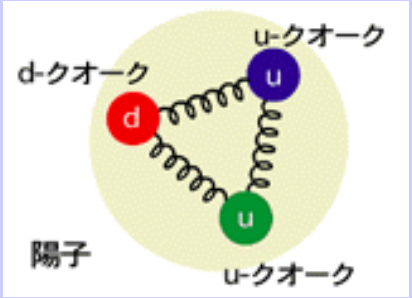
ハン



南部陽一郎

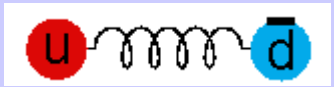
核子

$p=(uud)$



中間子

$\pi^+ = (u\bar{d})$

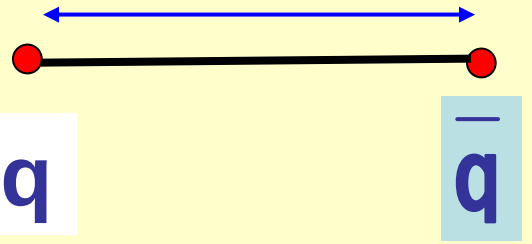


	電磁気力	強い力
力の対象	電荷 (±e)	カラーチャージ(赤青緑)
力の媒介	光子	グルーオン
単独電荷の取り出し可能性	可能	不可能

バリオン (qqq)

中間子 $(q\bar{q})$

クォークと反クォークの距離を大きくすればするほど大きな力が必要となる



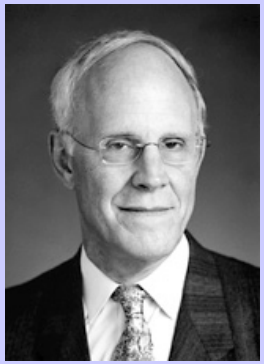
グルーオンによる強い力には近距離では結合定数が小さくなる一方、遠距離では結合定数が大きくなる性質がある

クォークは単独では観測できない

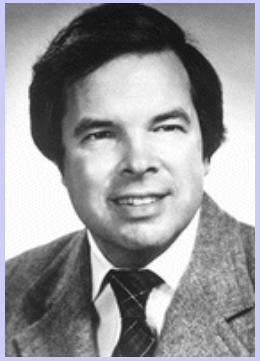
量子色力学は非常に難しい理論で、現在でも完全には理解されていない

しかし計算機によるシミュレーションは可能で、その結果から、現実を正しく記述していると考えられている


ウィルチェク


グロス


ポリッツァー


ウイルソン

ゲージ理論

ゲージ対称性：

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

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

に対する不変性

ゲージ理論：ゲージ対称性を持つ理論

ゲージ場：ゲージ対称性を持たせるのに導入する粒子

$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \theta$ 具体的には

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \partial\theta/\partial t \\ \partial\theta/\partial x \\ \partial\theta/\partial y \\ \partial\theta/\partial z \end{pmatrix}$$

弱い力・強い力を記述するA_μは、一般に行列の値をとる

[注]すべての粒子は粒子としての性格と波としての性格の両方を持っており、その粒子の自由度を**場**と呼ぶ

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



ヤン



ミルズ



内山龍雄

電磁気力（光子）

弱い力（W,Zボゾン）
強い力（グルーオン）

重力（重力子）

なぜこんなにゲージ理論にこだわるかと言うと

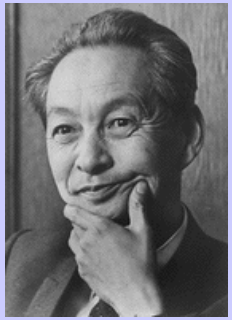
くりこみ理論と呼ばれるものが理論的整合性から要求されるため

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することが知られている

●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（但し重力に関しては未解決）

電磁気力学＋くりこみ理論は成功している→くりこみ理論を他の相互作用にも適用したくなる

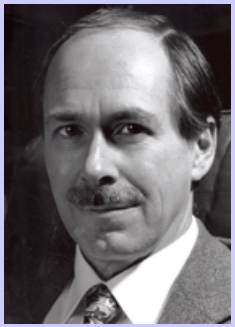

朝永振一郎

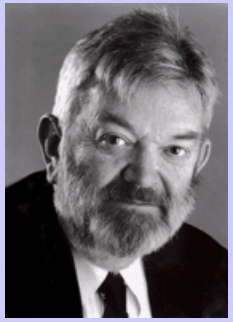

シュウィンガー


ファインマン


ダイソン

電磁気力


トホーフト


ヴェルトマン

弱い力・強い力

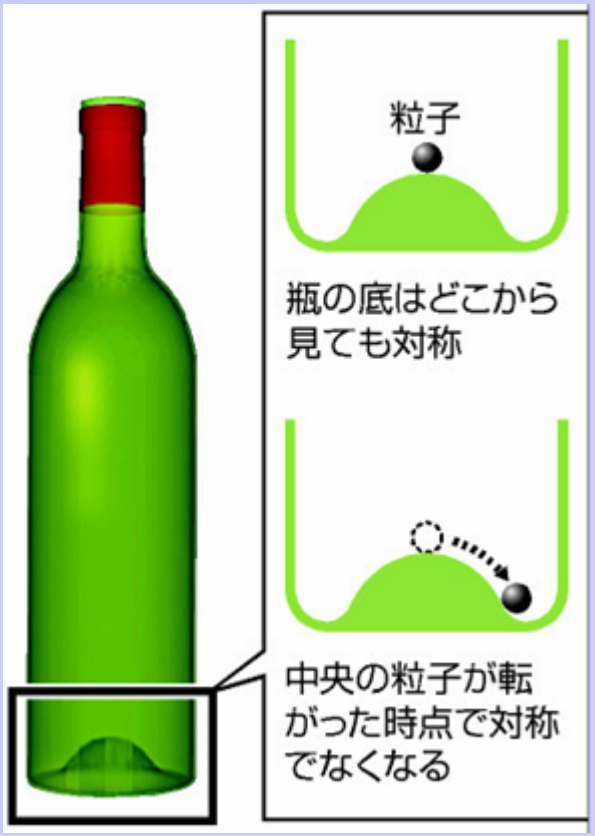
ここで、次の話の準備のためにいきなり脈絡のない話が出てきてしまうが。。。

対称性の自発的破れ

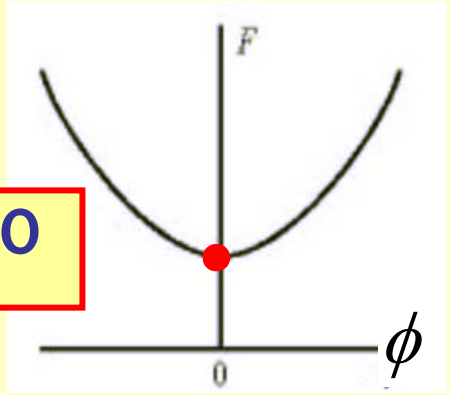
$\langle\phi\rangle$ の値を真空期待値と呼ぶ

真空：ポテンシャルの中でエネルギーの一番低い点

ϕ：対称性を自発的に破るための新たな粒子の自由度



$\langle\phi\rangle = 0$

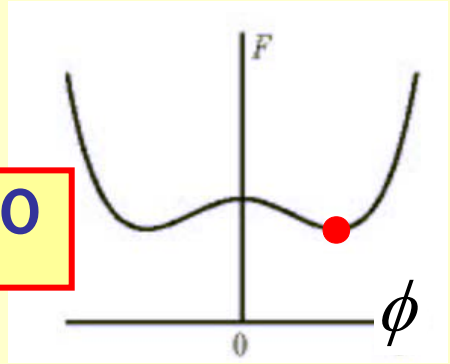


対称性の破れていない真空：
この形のポテンシャルでは対称性は破れない

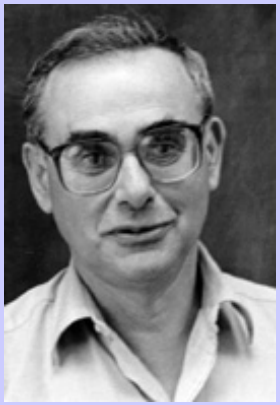


南部陽一郎

$\langle\phi\rangle \neq 0$



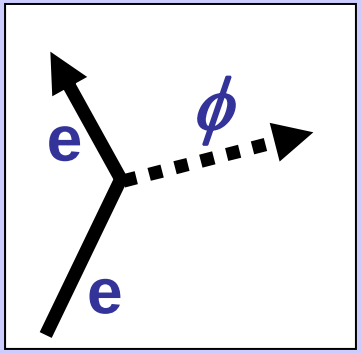
対称性の破れている真空：
この形のポテンシャルでは対称性が破れる

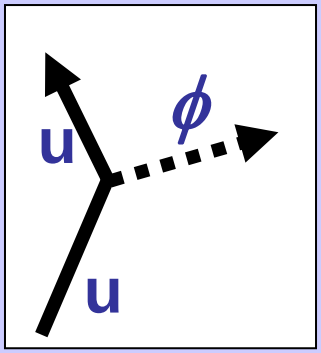


ゴールドストーン

対称性の自発的破れによる質量の生成（直感的説明）

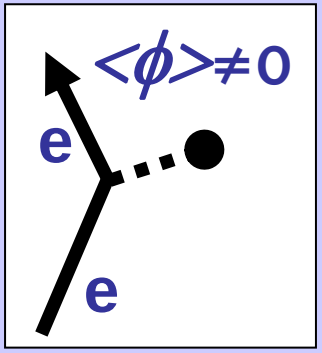
ϕ（新粒子）が存在すると、クォーク・レプトンと新たな粒子の相互作用が生じる

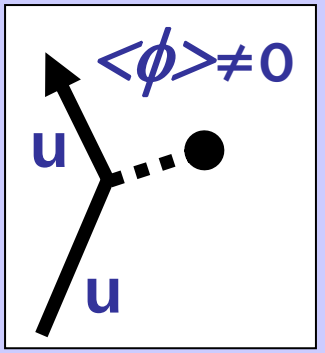




$\langle\phi\rangle$ の値を真空期待値と呼ぶ

$\langle\phi\rangle \neq 0$となった場合、クォーク・レプトンは至る所で$\phi$の効果を感じる（W・Zも同様）

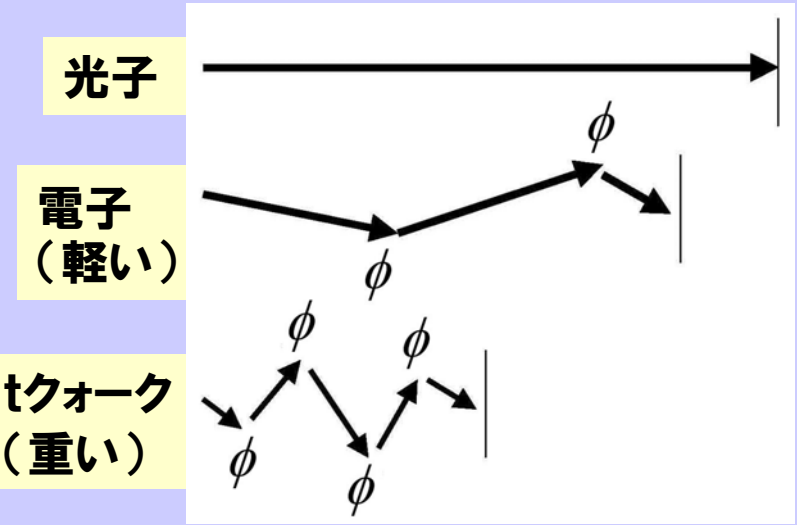




ϕの効果を感じる粒子は光の速度より遅くしか飛べない

→ ϕの効果を感じる粒子には質量が生じる

→ ϕの効果は、結合の強さに比例して大きく現れるので、結合の強さに比例して大きな質量が生じる



なぜ対称性の自発的破れにそんなにこだわるかと言うと

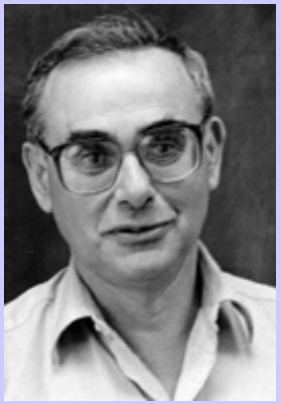
1. 素粒子間の力の理論では、**ゲージ対称性**がないと、**くりこみ**の操作により意味のある答を出せない
2. 弱い力の理論では、**ゲージ対称性**のためにゲージ粒子やクォーク・レプトンの質量は０となってしまう
3. **ゲージ対称性の自発的破れ**の場合には、ゲージ粒子やクォーク・レプトンの質量は元々０でも結果的に質量を出すことができる

⇒ **ゲージ対称性の自発的破れ**に起因する質量の導入により、くりこみの操作もうまく出来、Ｗ・Ｚボゾン・クォーク・レプトンの質量も出すことが出来る

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BEGHHK粒子と呼ぶべき)



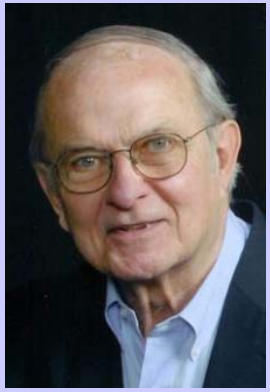
ブラウト



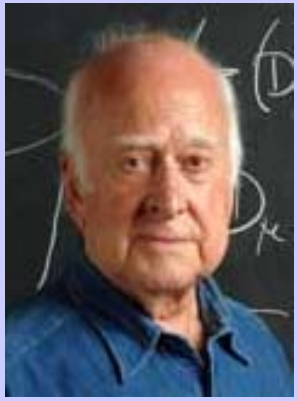
アングレール



グラルニク



ハーゲン



ヒッグス



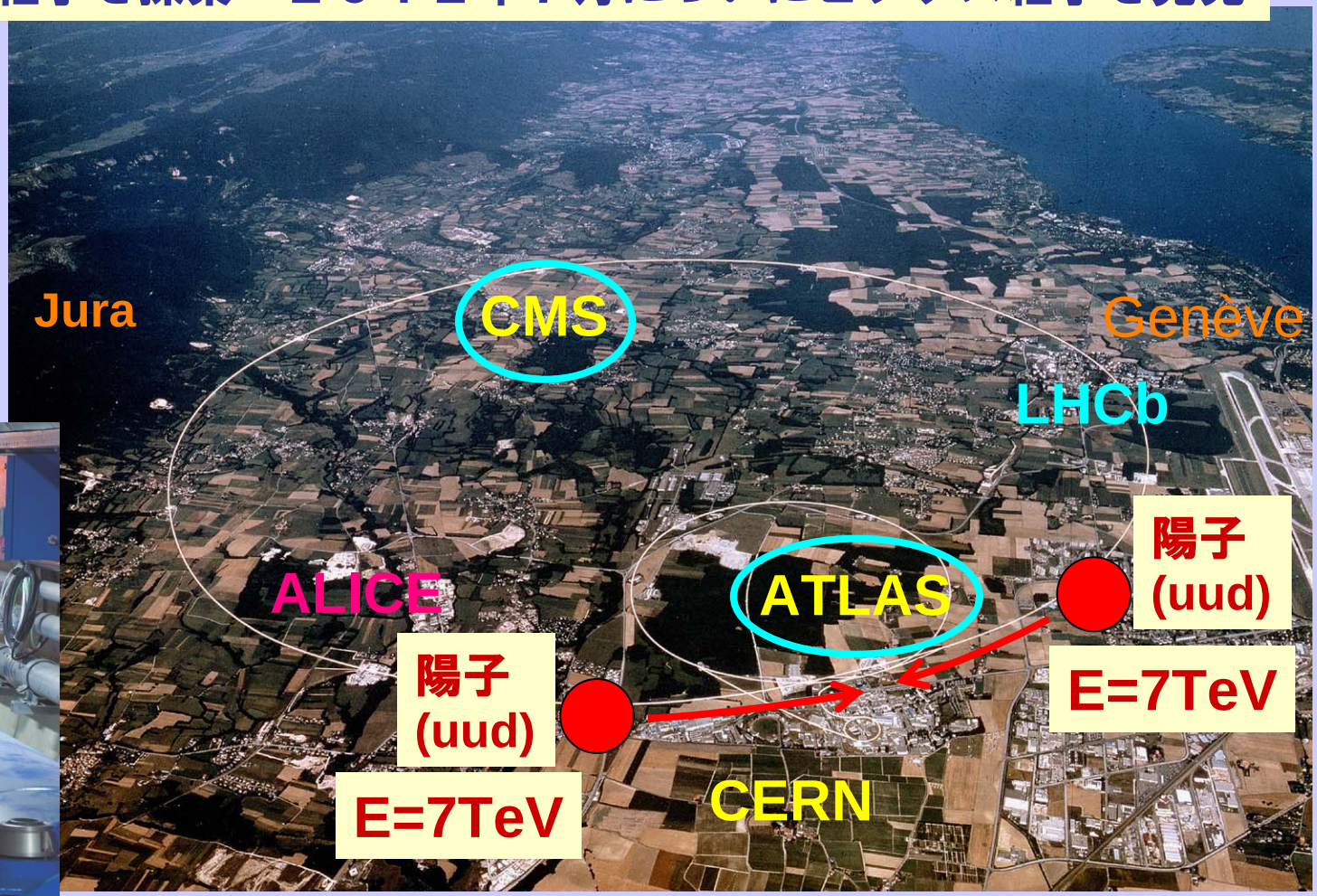
キップル

ヒッグス(BEGHHK)粒子の発見が重要

標準模型で最期に解決された問題:ヒッグス粒子

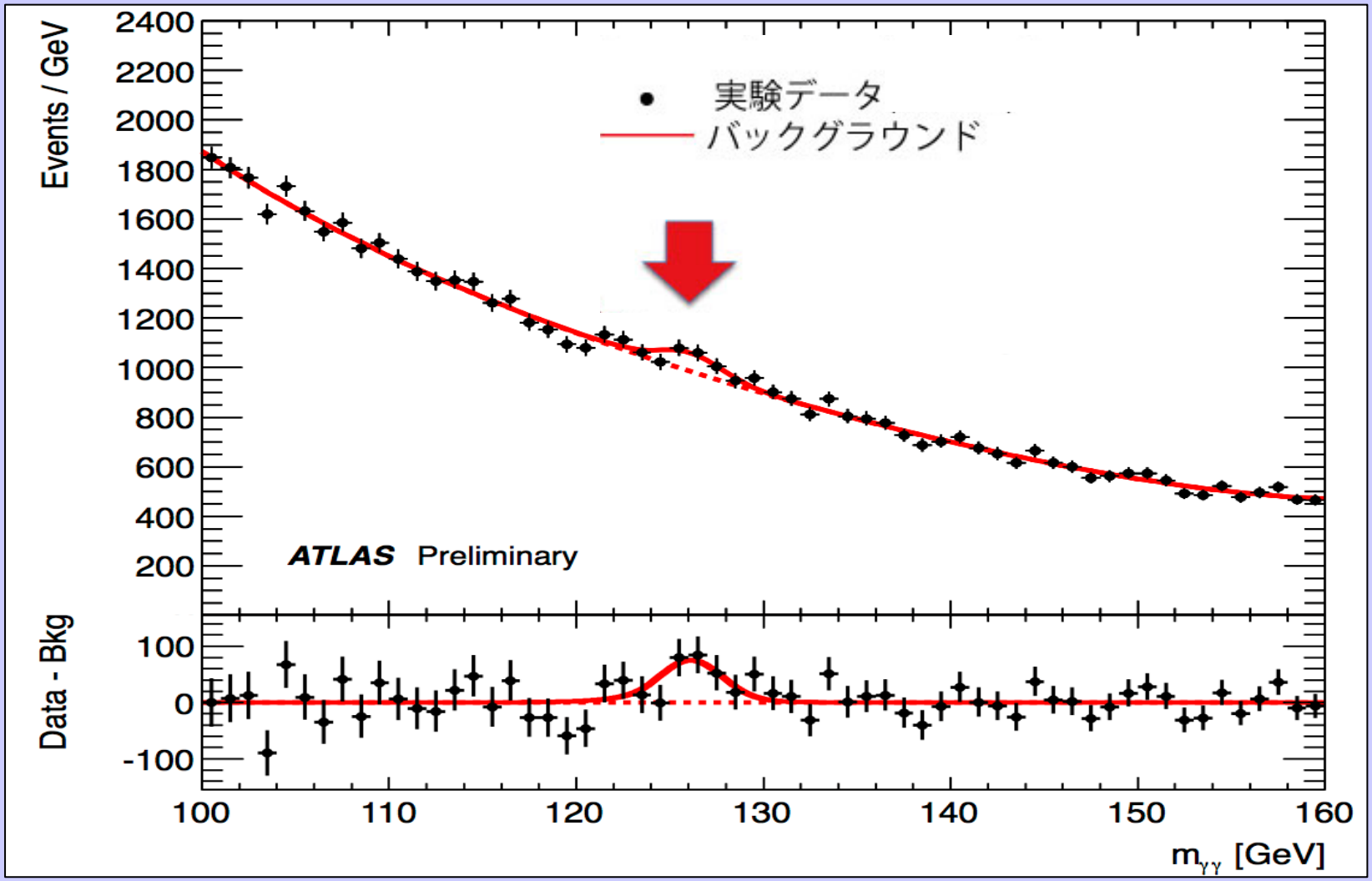
ＬＨＣ実験（Large Hadron Collider;スイス・ジュネーブ・ＣＥＲＮ;周長２７km;建設費５０００億円）が２００８年から稼働しており、ATLASとCMSでヒッグス粒子を探索→２０１２年７月についにヒッグス粒子を発見





©CERN Photo

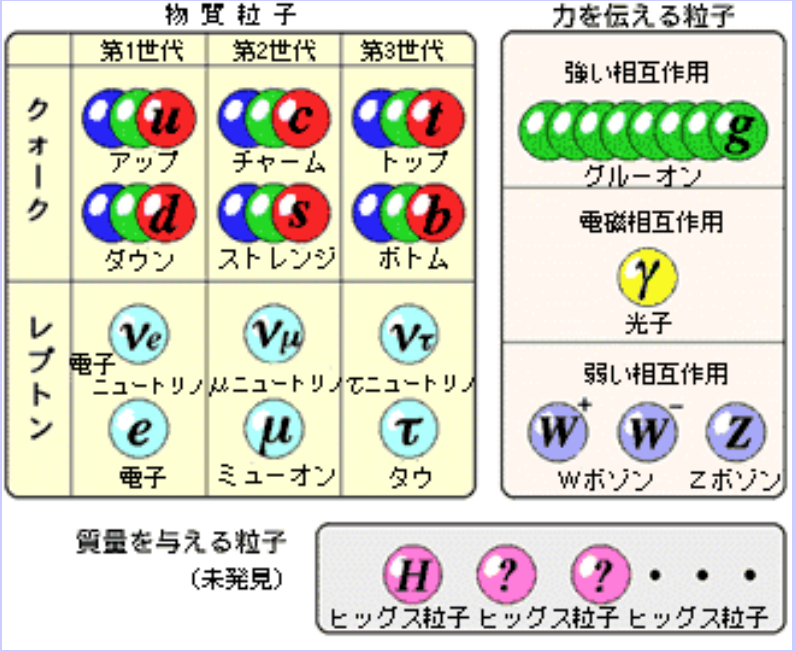
2012 年7月4日、CERNは、物質に質量を与えるヒッグス粒子の発見を発表



ヒッグス粒子の質量は約125GeV

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
- クォーク・レプトンの相互作用はゲージ理論で記述される
- 弱い相互作用には対称性の自発的破れがあるために、クォーク・レプトン・ゲージ粒子に質量が生じる



相互作用	相互作用の媒介粒子	媒介粒子の質量	相互作用の大きさ
強い相互作用	グルーオン	0	1
電磁相互作用	光子	0	10^{-2}
弱い相互作用	W,Zボゾン	約100GeV	10^{-5}

第二部 標準模型を越える物理

現在の素粒子論研究:

標準模型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）

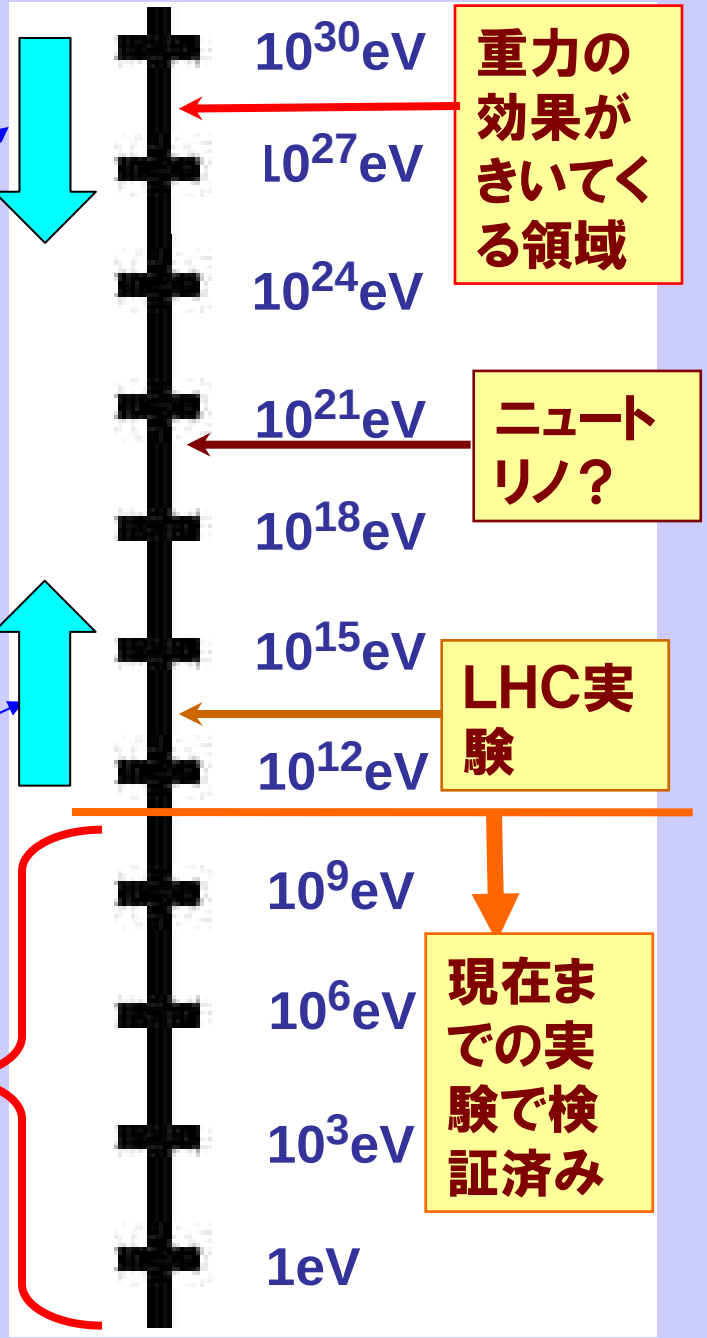
重力を含んだ統一理論の研究
（弦理論）

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

標準模型



1. ニュートリノの現象論

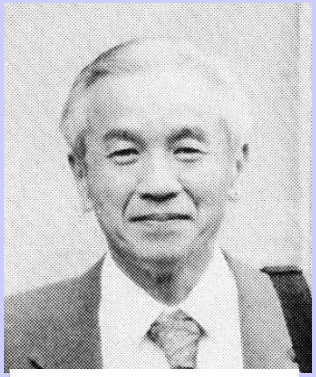
1998年～2002年頃の実験結果から、ニュートリノ振動と呼ばれる現象によりニュートリノには質量があることが判明した

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	牧ー中川ー坂田	$\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu$


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 (2世代のおもちゃ)

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 に変換される現象

運動方程式 $(\hbar = c = 1)$

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\nu_1\\ \nu_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\sqrt{\vec{p}^2+m_1^2} & 0\\ 0 & \sqrt{\vec{p}^2+m_2^2}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_1\\ \nu_2\end{pmatrix}$$

質量固有状態とフレーバー固有状態の混合

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

質量固有状態

フレーバー固有状態

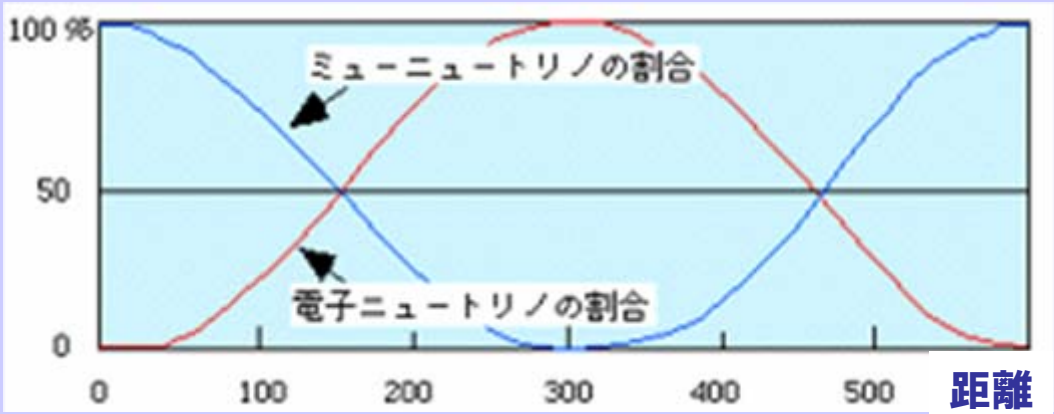
変換確率

$$P(\nu_\mu \to \nu_e; L) = \sin^2 2\theta \, \sin^2(\Delta E L/2)$$

$L=ct=t$

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

$$\Delta E \equiv \sqrt{\vec{p}^2+m_2^2}-\sqrt{\vec{p}^2+m_1^2} \simeq (m_2^2-m_1^2)/2|\vec{p}|$$



となり、Lについて振動的振る舞いを示す

ニュートリノ振動（現実的な3世代の場合）

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

質量固有状態

フレーバー固有状態

$s_{jk}=\sin\theta_{jk}$, $c_{jk}=\cos\theta_{jk}$

（１）混合角：スーパーカミオカンデ等のニュートリノの実験結果から３つのθ_{jk}の値が分かっている：

$\theta_{12}\sim 30^\circ$

$\theta_{23}\sim 45^\circ$

$\theta_{13}\sim 10^\circ$

（注）位相δは未定

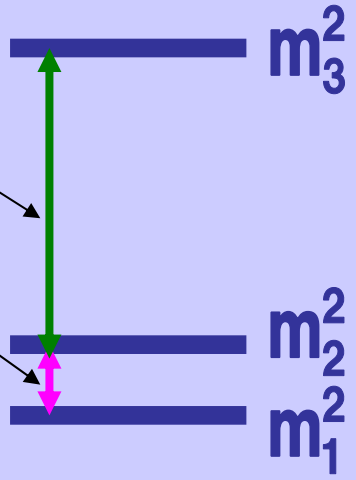
ニュートリノ振動（現実的な3世代の場合）

（２）質量二乗差：スーパーカミオカンデ等のニュートリノの実験結果から２つのΔm^2の値が分かっている：

m_j：ν_jの質量

$$|\Delta m^2_{32}| = 2.5\times10^{-3}\,eV^2$$

$$\Delta m^2_{21} = 8\times10^{-5}\,eV^2$$



これから分かることは、少なくとも
$m_2 \geqq 0.009eV$, $m_3 \geqq 0.05eV$
→これらは電子の質量$0.5MeV=5\times10^5 eV$よりもずっと小さい

（注）標準模型ではニュートリノの質量は0

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

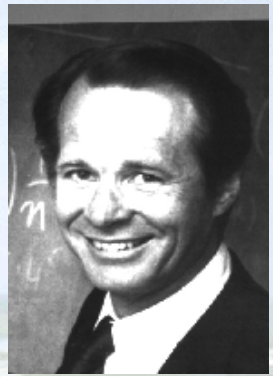
1978～79年
シーソー機構


ミンコフスキー


柳田勉


ゲルマン

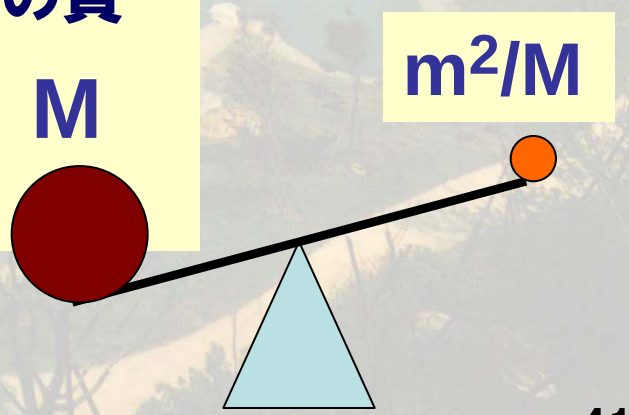

ラモン


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≪Mの時、Mとm^2/Mとなる
そこで、m＝1GeV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、

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



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！

2. 弦理論の現象論

一般相対論と量子論

万有引力定数

$G_N = 6.6 \times 10^{-11}\ m^3 s^{-2} kg^{-1}$

プランク定数

$h = 6.6 \times 10^{-34}\ J \cdot s$

光速度

$c = 3 \times 10^8\ m s^{-1}$

これら3つで質量・長さを持つ次元の量が作れる：

$(hc/G_N)^{1/2} = 10^{19}\ GeV \equiv M_p$：プランク質量

$hc/M_p = 10^{-35}\ m \equiv L_p$： プランク長

$M_p = 10^{19}$ GeVは現在の実験のエネルギースケール100 GeVに比べて17桁も大きいため、重力の効果は完全に無視できる

→しかし、仮想的にプランク質量程度の高エネルギーの実験を考えると、重力の量子補正を考慮する必要が出てくる

重力の量子論

重力の相互作用はL_pという長さの次元を持った量

→通常の場の量子論＋くりこみの手続きは破綻する
（くりこみの手続きでは処理できない無限大が多数現れる）

そこで色々な理論が提唱された：

1. Kaluza-Klein理論

   高い次元の重力理論の量子補正は無限大の性質が変わるかもしれないという期待

2. 弦理論

   点粒子ではなく広がりを持つひもならば無限大の性質が変わるかもしれないという期待

カルーザ-クライン理論（余次元理論）

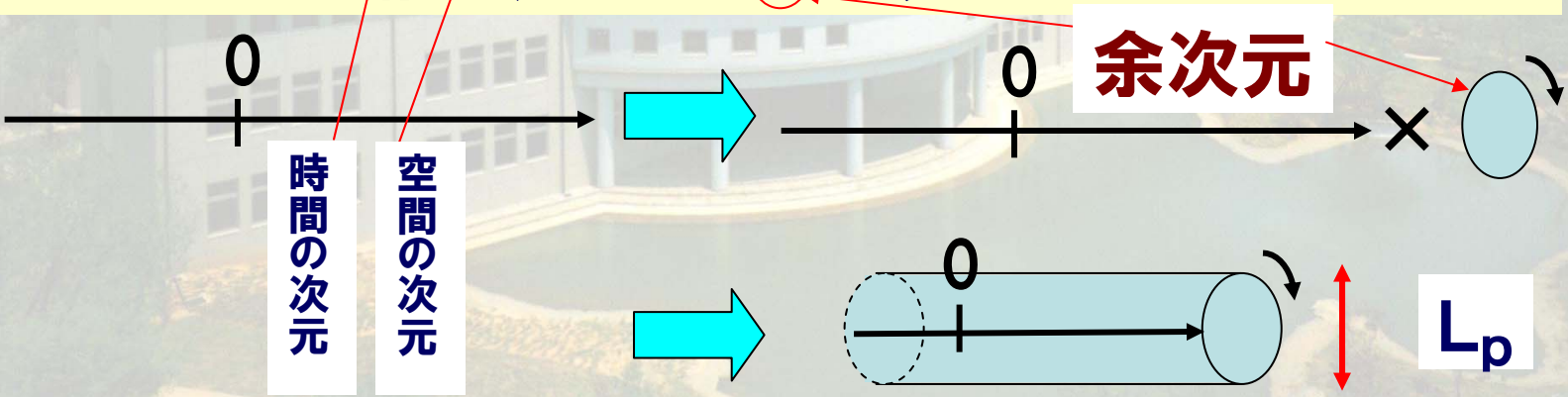


カルーザ　　クライン

重力場と電磁場を統一する目的で
5次元時空の重力理論が考えられた

5次元目の座標はプランク長程度の
半径の円と想定されている

例（おもちゃ）:（1＋1）次元の空間座標は1次元の線、その
Kaluza-Klein理論は（1＋1＋1）次元となる



5次元の重力→4次元の重力＋4次元の電磁場

5次元以上の場合、超対称性があっても量子補正の状況は
悪くなることはあっても改善することはない

Kaluza-Klein理論（５次元時空の場合）

時空＝M_5

→$M_4 \times S^1$（対称性の自発的破れ）

今の場合の余次元：１次元球＝円

ゲージ対称性の群U（１）が出る

５次元の重力子→４次元の重力子＋４次元の光子（対称性の自発的破れ）

余次元からゲージ群が出る場合の特徴

電磁相互作用の結合定数

＝（プランク長）/（余次元の半径）

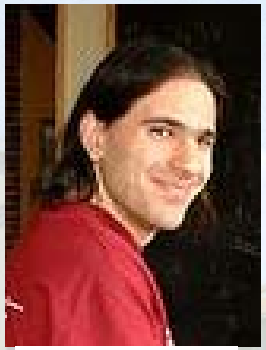
現実的な模型では結合定数＝約1/10

→余次元の半径～プランク長×約10＝10^{-34}m

→余次元の半径はほとんどプランク長とみなしてよい

大きなサイズの余次元理論


アントニ
アディス


アルカニ
ハメド


ディモ
プロス

１９９８


デュバリ


ランドール


サンドラム

１９９９

従来のKaluza-Klein理論では余次元の大きさはプランク長程度と考えられていたが、それより16桁ほど大きい$hc/1\mathrm{TeV}=10^{-19}\mathrm{m}$でも実験と矛盾しない可能性が指摘された

（余次元の半径）$/L_p=M_p/M_W=10^{19}\mathrm{GeV}/\ 10^{2}\mathrm{GeV}$

LHCの実験でも発見できるはずだが、今のところ見つかっていない

弦理論

元々弦理論は、クォークと反クォークの束縛状態を記述するために導入された



1970年代、弦理論が低エネルギーで一般相対論を記述することがわかり、重力を記述するために役に立つ可能性が指摘されていた

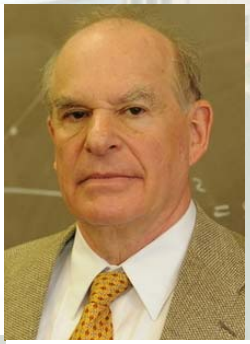


米谷民明

1973



シャーク

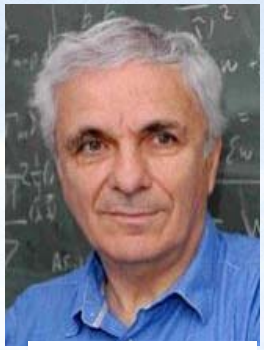


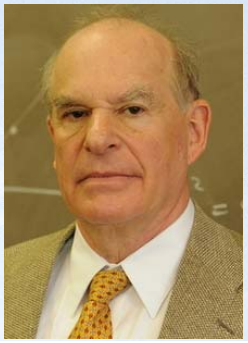
シュワルツ

1974

→多くの人はその後ワインバーグ・サラム理論の流行に惹きつけられ、弦理論の研究を続けた人は少なかった

弦理論の再流行


グリーン


シュワルツ

1984年、弦理論に超対称性と呼ばれる対称性を課した**超弦理論**が、理論の整合性からほとんど一意的に理論が決まり、量子補正に無限大も出ないことが期待できるため、爆発的に流行した


ウィッテン

ゲージ対称性が$E_8 \times E_8$又は$SO(32)$しかない！

究極の理論なのではないか？

弦理論のまとめ

- 弦理論は、整合性のある理論であると考えられるが、その性質を探ることは難しい
- 1990年代になって、$E_8 \times E_8$やSO(32)以外にも色々な群が出る機構(Dブレーンと呼ばれる)が見つかっている

→1984年に流行した動機の一つである一意性は現在では喪失したと考えられている

- 弦理論でも、LHCで探索できるような、サイズの大きい余次元の模型が原理的に可能であるが、現実的な模型を構築することが今後の課題である
- 弦理論を実験的に検証することは原理的にむずかしい

→今後の理論的発展が期待される

レポート問題：

今日の話の中で興味のあったトピックスについて自分なりにまとめよ（A4レポート用紙１枚程度で手書きで提出すること）。
Web上の記事・他人のレポートをそのままコピーしたものは0点とする。

締め切り：
２０１３年１０月９日（水）4限の授業時まで