

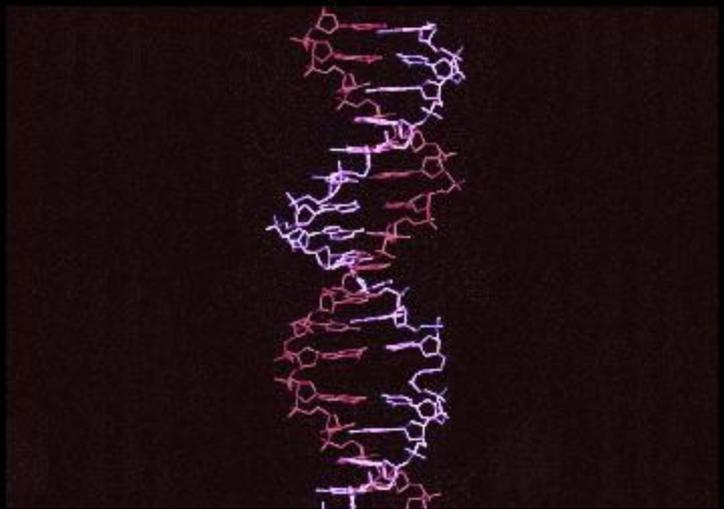
2008年度ノーベル物理学賞受賞

粒子反粒子対称性の破れ

小林・益川理論とは？

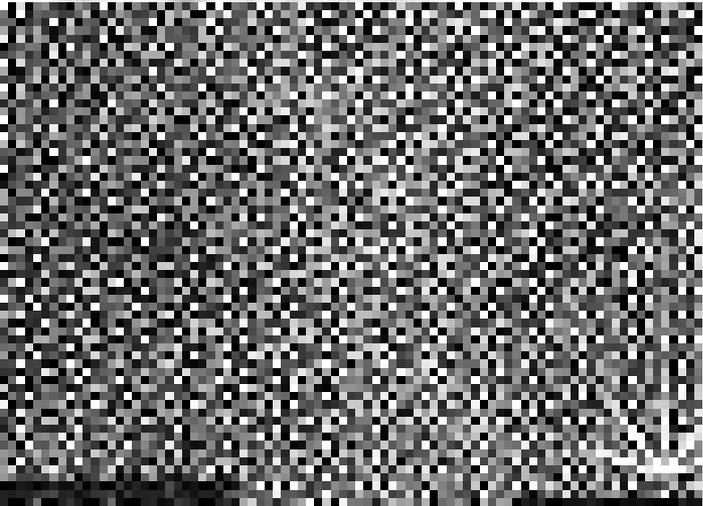
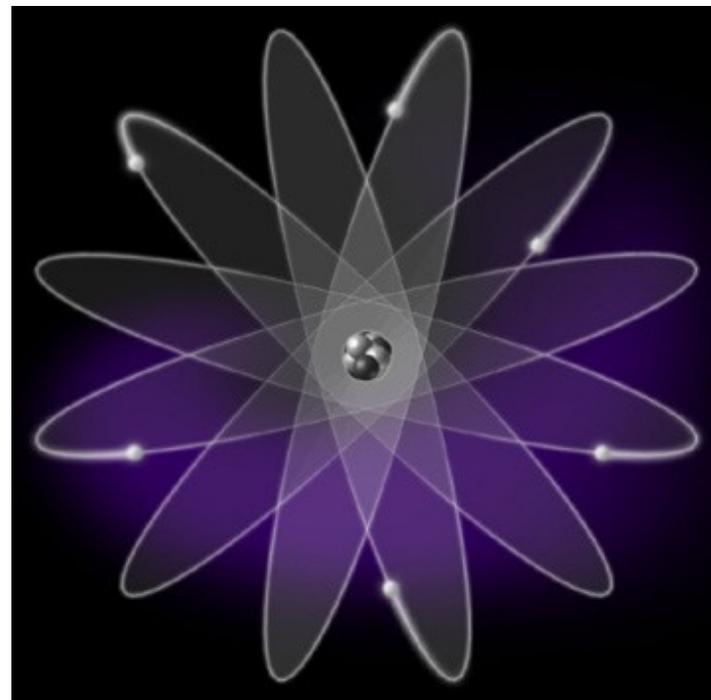
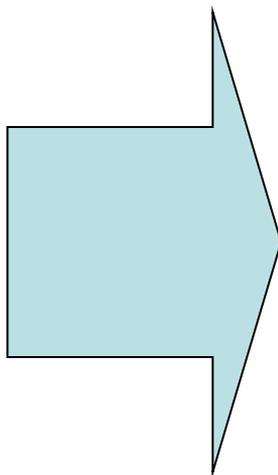
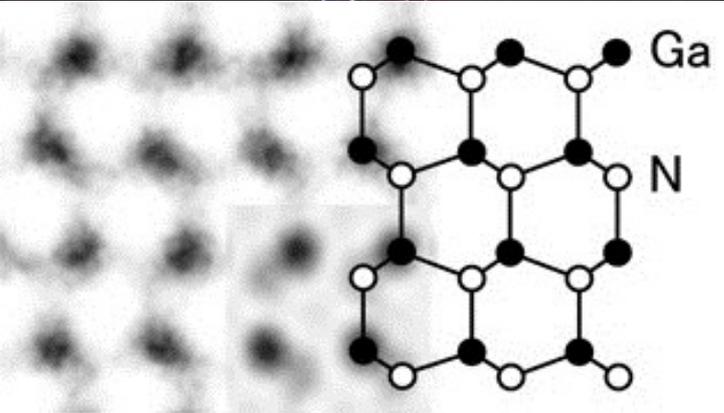


数物科学系
末松大二郎



様々な物質は
原子から構成
される

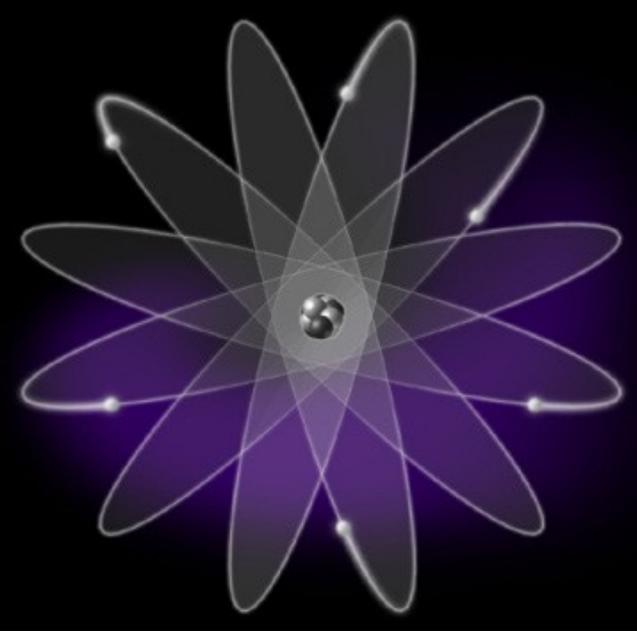
原子の大きさ
1億分の1cm程度



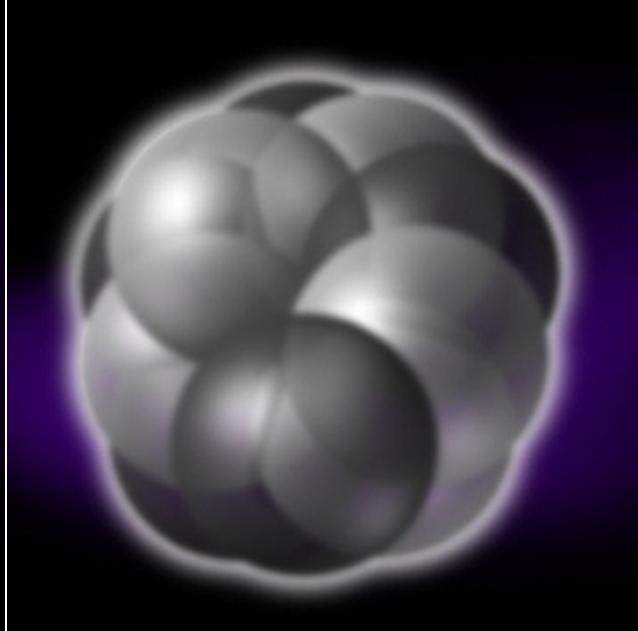
水素原子: 1円玉



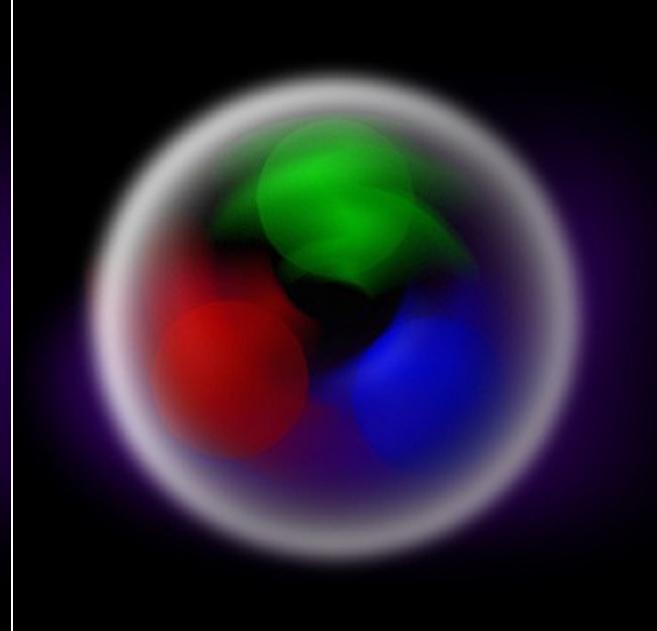
野球のボール: 地球



原子核と電子の束縛
状態としての原子



原子核は核子(陽子と
中性子)から構成



核子は3個のクォーク
の束縛状態

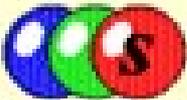


原子核の大きさは、原子の大きさの10万分の1程度
クォークの大きさは、原子核の大きさの10分の1より小さい

宇宙の安定な物質は、 u , d という2種類のクォークと
電子から構成されるが、他にも不安定なクォークと電子の
仲間が存在  素粒子の世界の構成要素

素粒子の標準模型の世界

物質粒子

	第一世代	第二世代	第三世代
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 	ミューニュートリノ 	タウニュートリノ 
	電子 	ミューオン 	タウオン 

世代間の違いは質量

相互作用の媒介粒子 ゲージ粒子

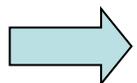
強い相互作用 
電磁相互作用 
弱い相互作用 

質量の起源となる粒子



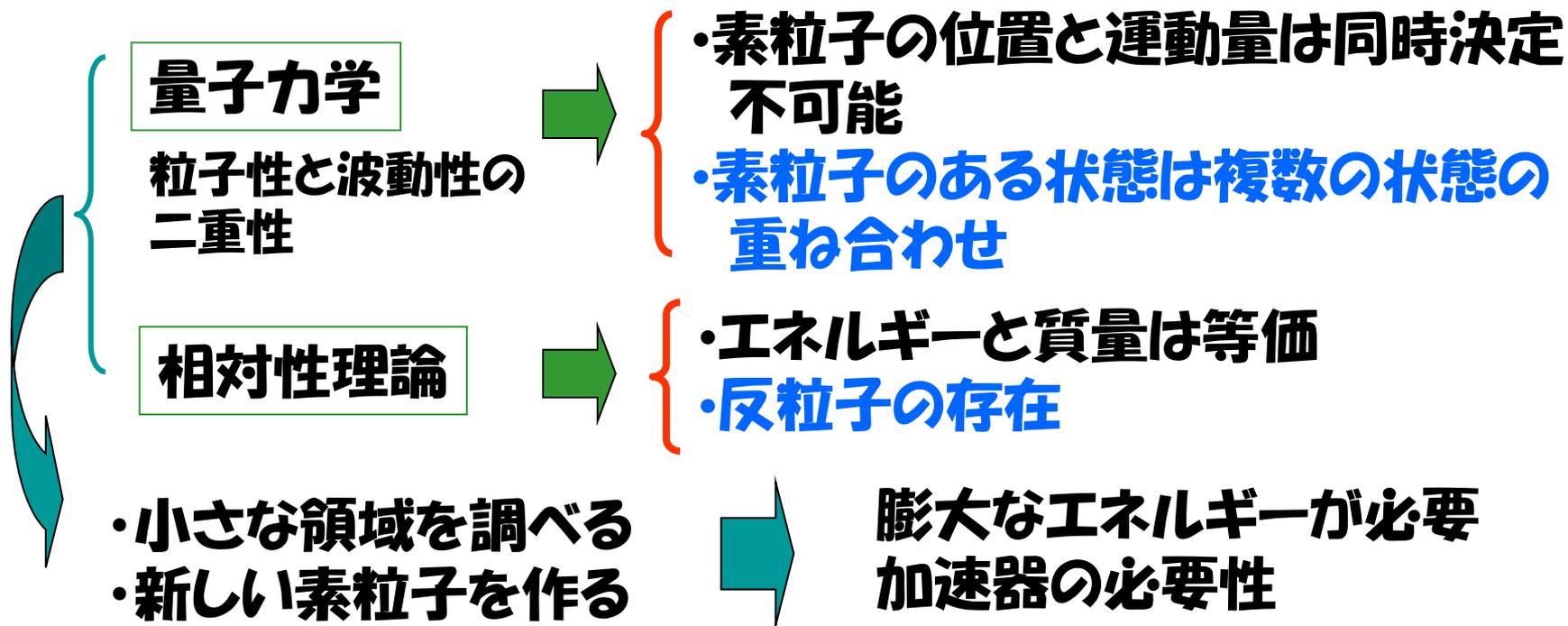
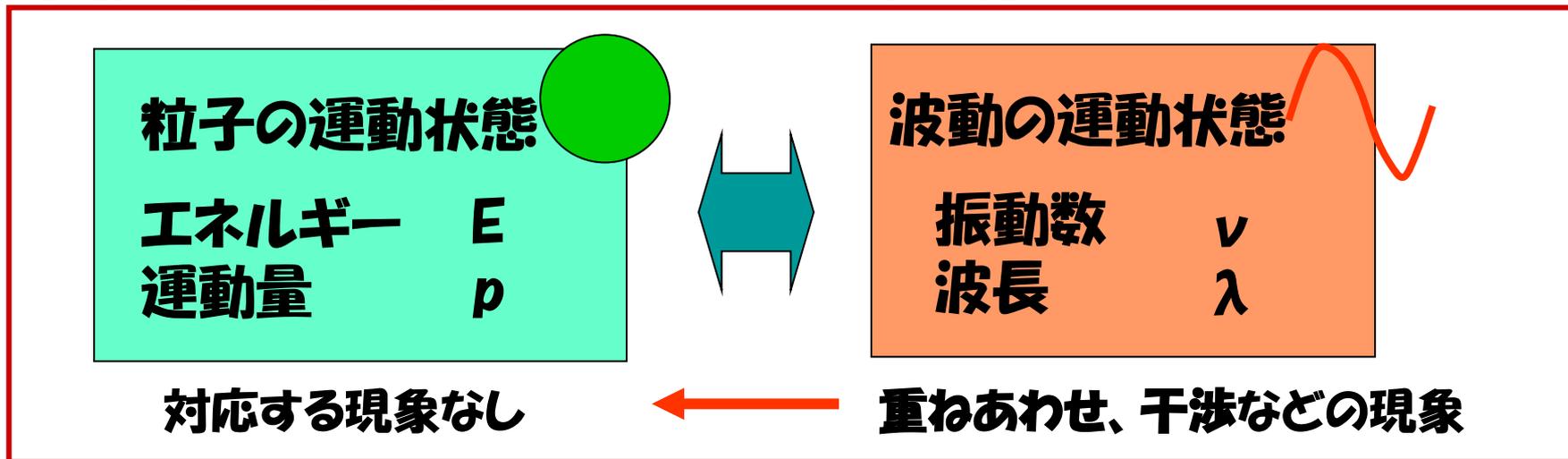
自発的対称性の
破れを引き起こす
(LHC実験)

物質粒子は3世代だという証拠がある

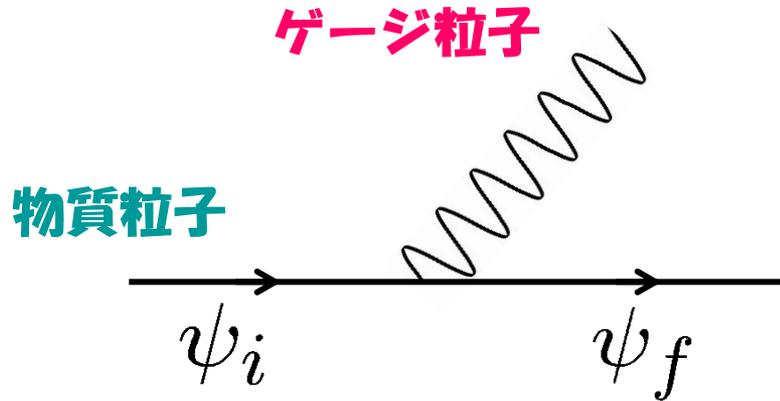


宇宙観測と加速器実験でのニュートリノの数勘定

素粒子の世界はどのような世界か？



素粒子の相互作用と対称性



素粒子の基本的相互作用は
物質粒子がゲージ粒子を
放出・吸収することで起こる。
(ゲージ対称性・ゲージ理論)

強い相互作用・電磁相互作用

物質粒子の種類の変化なし

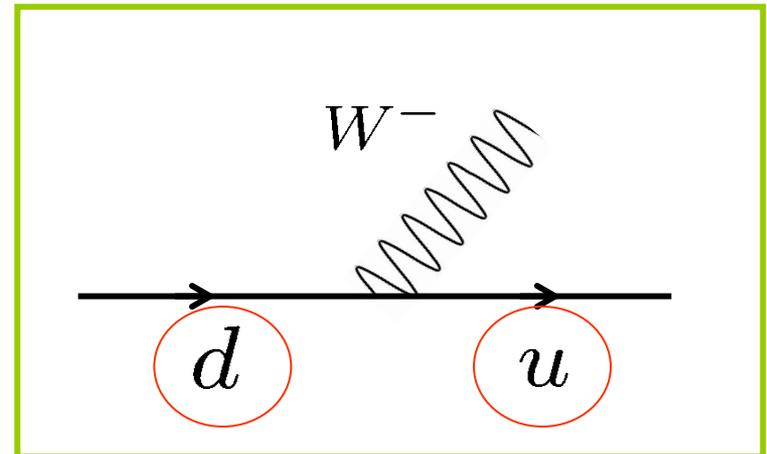
フレーバー

$$\psi_f = \psi_i$$

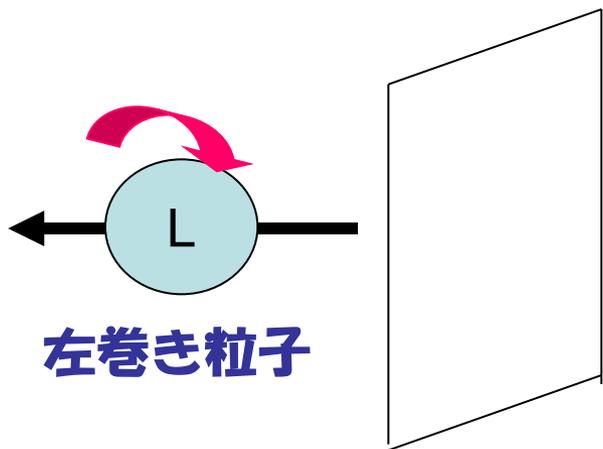
弱い相互作用

物質粒子の種類の変化あり

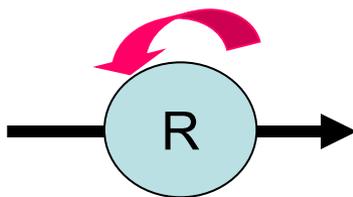
$$\psi_f \neq \psi_i$$



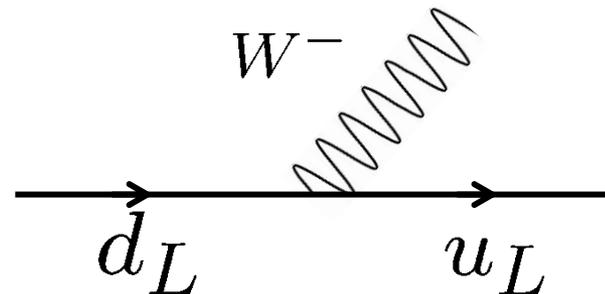
○ パリティ対称性(P) 鏡の外の世界と鏡の中の世界の対称性



左巻き粒子



右巻き粒子



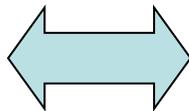
弱い相互作用は、右巻きと左巻きを区別する

パリティの破れ (1956, 7)

○ 荷電共役対称性(C) 粒子・反粒子の入れ替え対称性



L
R



R
L

質量は同じで、電荷が逆符号

- 粒子に対して必ず反粒子が存在する
- 例えば、電子と陽電子、陽子と反陽子
- 右巻きと左巻きの入れ替えも起こる

CP対称性の破れ

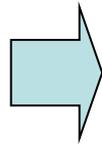
強い相互作用・電磁相互作用ではCもPも保存

弱い相互作用ではCもPも破れている!

標準模型ではCPが粒子反粒子対称性の役割を果たす!

CPは破れているのか?

CP対称性



複素共役をとることを伴う変換

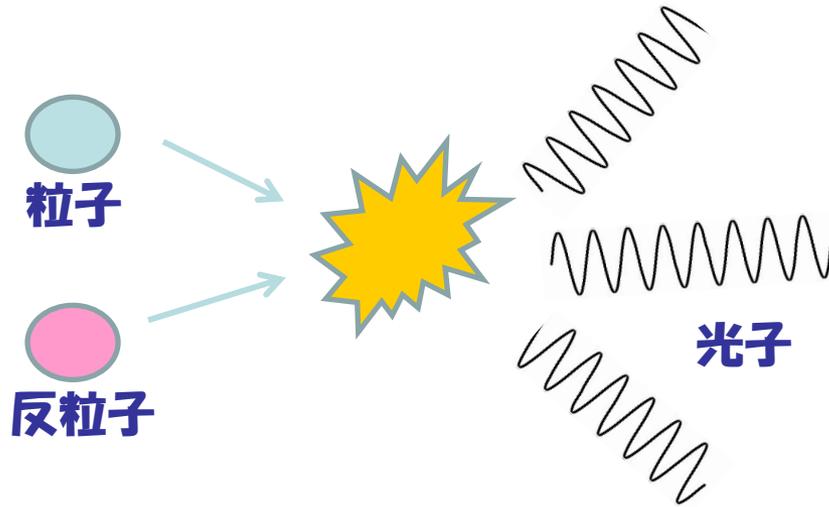
**理論中に含まれる量が複素数を含むかどうか
破れの判断基準となる**

**強い相互作用・電磁相互作用においては複素位相は
完全に除去できる**

弱い相互作用では?

CP対称性の破れの重要性

高温高密度の初期宇宙では、粒子・反粒子が同数存在



現在の粒子だけから構成された宇宙はできない！

現在の宇宙が出来るには陽子と反陽子の個数の間に1億個につき、1個のずれがあればよい。

粒子反粒子対称性 (CP) が破れることが必要な条件

CPの破れは存在するのか、またその起源は??

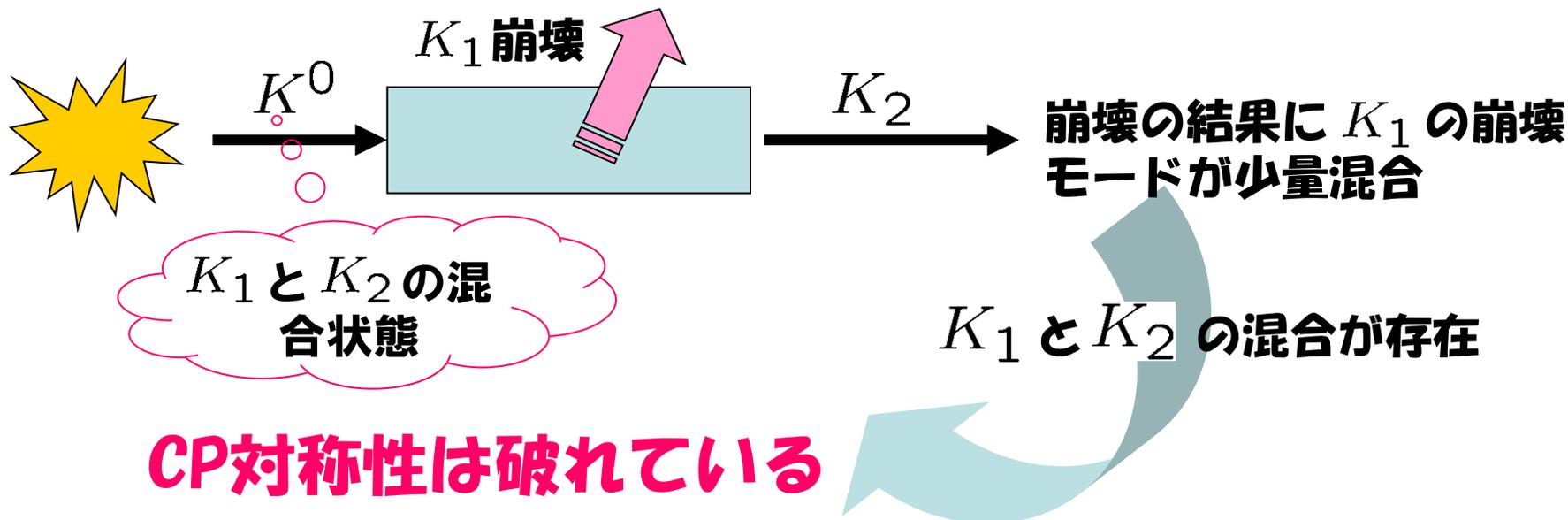
CPの破れの発見：時代的背景

K中間子の崩壊におけるCP対称性の破れの発見（1967）



定まったCPを持つ状態

$$\begin{cases} K_1 \sim K_0 - \overline{K^0} & CP = -1 \\ K_2 \sim K_0 + \overline{K^0} & CP = +1 \end{cases}$$



当時の状況：3クォーク (u d s) の存在が知られていた

— ν_μ の発見 (1962) レプトンは4種類

クォークも4つ? 原・牧 at 名古屋大(1963)

— 宇宙線写真乾板中に4個目の粒子の兆候

丹生 at 名古屋大(1970)

(注 Cクォークの発見は1974)

注目されな
かった

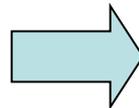
— 弱い相互作用のゲージ理論での記述

Weinberg-Salam 理論 (1967)

'tHooft-Veltmanの繰り込み可能性の証明(1971)

注目度は
それほど
高くな
かった

理論の整合性



ペアで出てくる

フレーバーの変化
とGIM機構(1970)

クォークは3つではなく4つ

小林・益川の試み

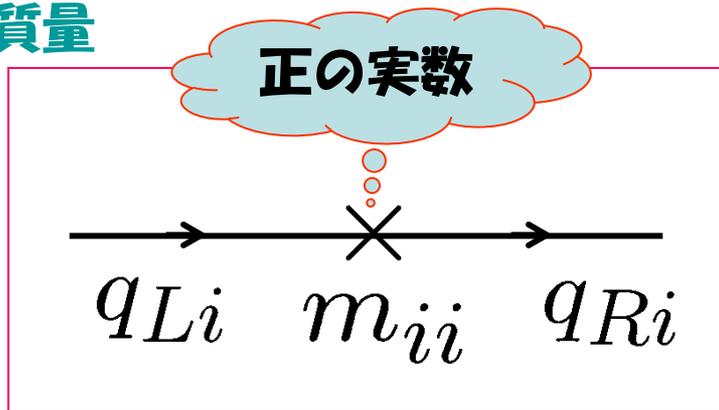
弱い相互作用に関わる部分

複素数因子の存在？

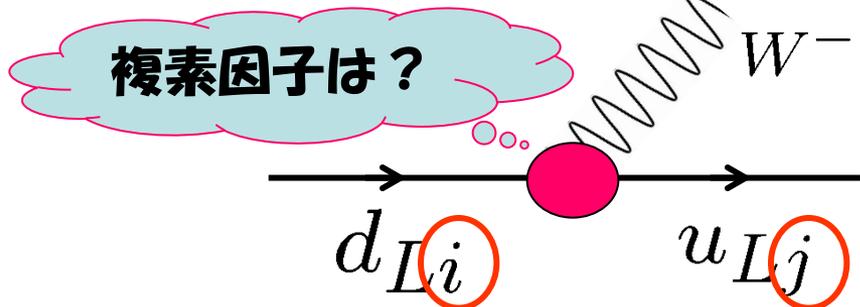
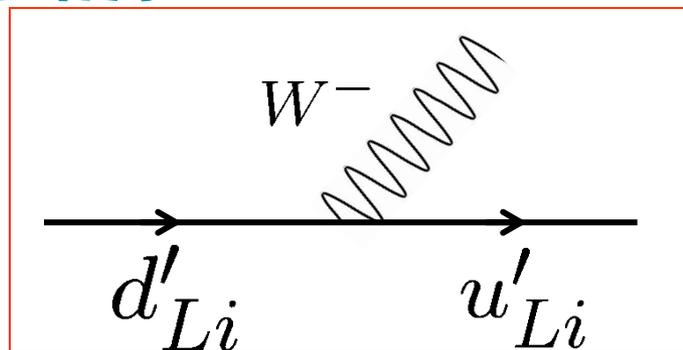
- 定まった質量を持つクォークの状態
(質量の固有状態)
- 相互作用で種類を保つクォークの状態
(フレーバーの固有状態)



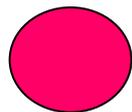
質量



相互作用

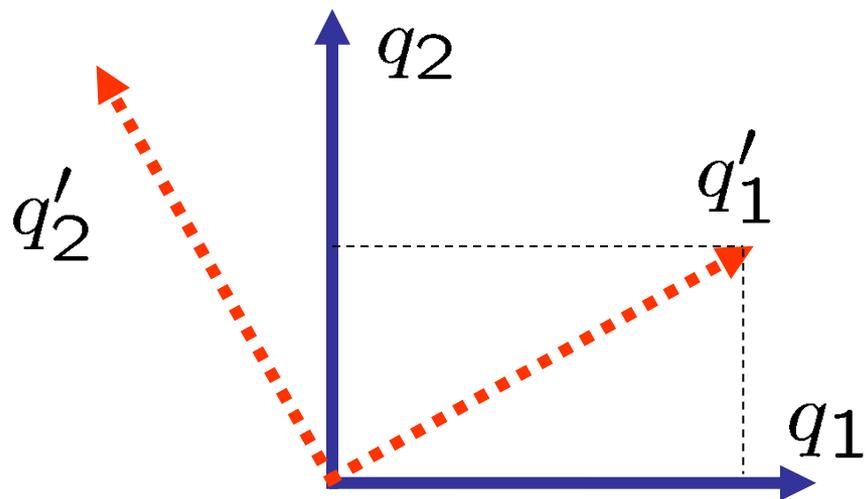


世代間の混合が発生 $\begin{pmatrix} u'_L \\ d'_L \end{pmatrix}_i$



混合部分の構造

4クォークの場合(2世代間の混合)



複素数

$$q'_1 = a q_1 + b q_2$$

$$q'_2 = c q_1 + d q_2$$

フレーバーの
固有状態

質量の固有状態

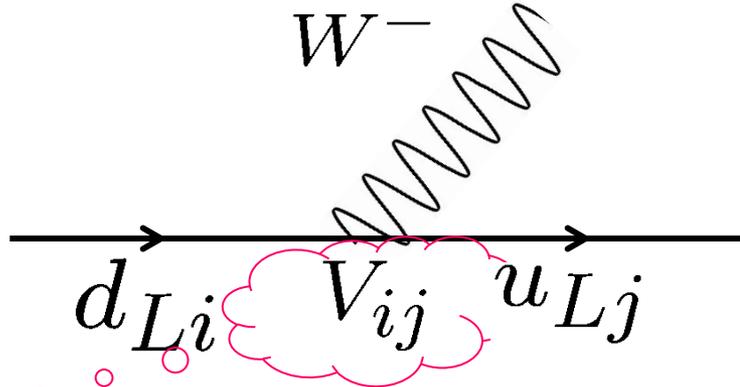
Cabibbo (1963)

複数のクォークがある規則に従い交ざり合っている
 混ぜり合いの重みが**複素数**になるとCP対称性は破れる

4クォークでは必ず実数にできるが、6クォークでは
 できない。CPの破れには少なくとも6クォーク必要

小林・益川の発見(1972)

小林・益川理論



フレーバーが変化する
弱い相互作用の構造を
質量の固有状態で表現

CKM行列：小林・益川が与えたクォーク混合の規則

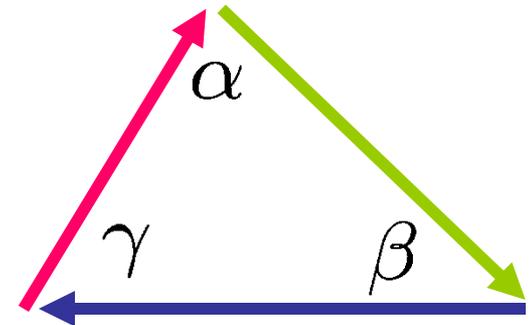
$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3 e^{i\delta} \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$\alpha = \arg(-V_{td}V_{tb}^*/V_{ud}V_{ub}^*)$$

$$\beta = \arg(-V_{cd}V_{cb}^*/V_{td}V_{tb}^*)$$

$$\gamma = \arg(-V_{ud}V_{ub}^*/V_{cd}V_{cb}^*)$$



$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

小林・益川理論の検証

CPの破れの原因は6個のクォークの存在だ！ **これが彼らの主張**

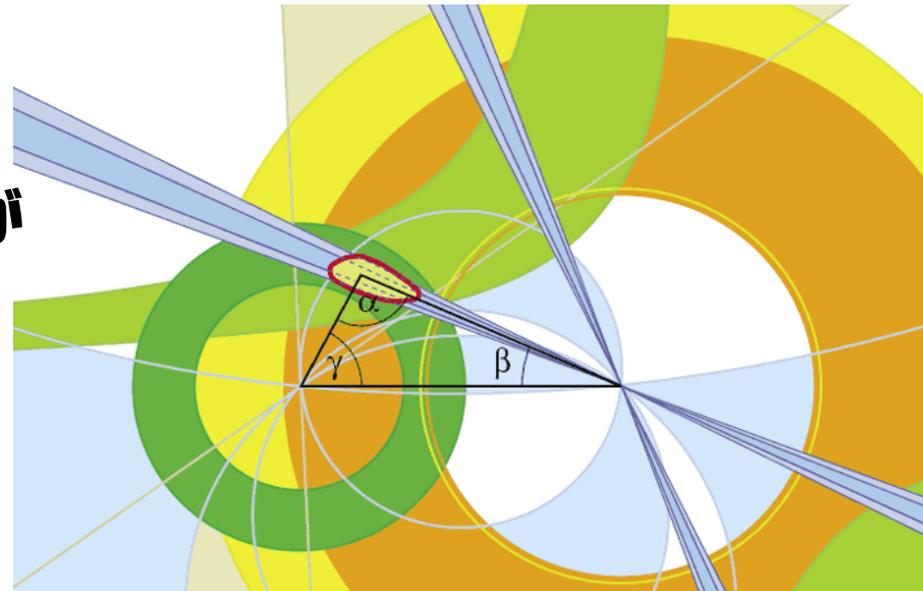
- トップクォークの発見 (CDF @ TEVATRON 1995)
確かに6クォークだったが、理論の整合性から無いと困る
- CPの破れ方、クォークの混合の仕方の検証
(KEK、SLACのBファクトリー 2001, ~2008)

クォークの混合は定まった形で起こる。小林・益川理論ではCPの破れはその混合の特性と

関連して現れる。B中間子の様々な崩壊過程を調べることで、観測されるCPの破れが小林・益川理論によるCPの破れかどうか確認できる

⇒ **確かにそうだった！**

ノーベル賞受賞！

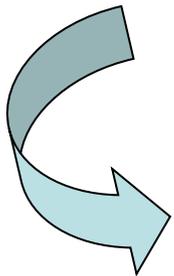


CPの破れの謎は解決したのか？

- **6クォーク存在すれば、複素位相が存在し、CPの破れは実験的にも定量的に確認された。**

小林・益川理論は正しかった！

- **しかし、なぜ、複素数因子が存在するのか、実数ではないのか、その起源は依然として謎のまま**
- **小林・益川のCPの破れでは、粒子ばかしの宇宙が生まれたことは説明できない。効果が小さすぎる。**
- **我々の宇宙を実現するCPの破れはどこに存在するのか？ 大きな謎**



ニュートリノ部分のCP位相か？ T2K実験

2人に関する個人的思い出

- 益川さん 複合模型で世代と質量の階層構造を説明しようとしていた私
修論で作った模型の話をした基研のセミナーで (1983. 3)



いつまで玉ねぎの皮をむくようなことを続けているの?! 階層性には例えば、高次元時空を考えるようなこともあいうる

その後、string(高次元時空)で世代の起源を考えることになった

- 小林さん Stringで世代とCP位相の起源を議論していた私
KEKの志賀高原で開かれたCPのワークショップで (1992. 8)

バリオジェネシスに考えることになげないよとだめなんじゃない。



その後、バリオン数の起源の説明が研究テーマに加わった