

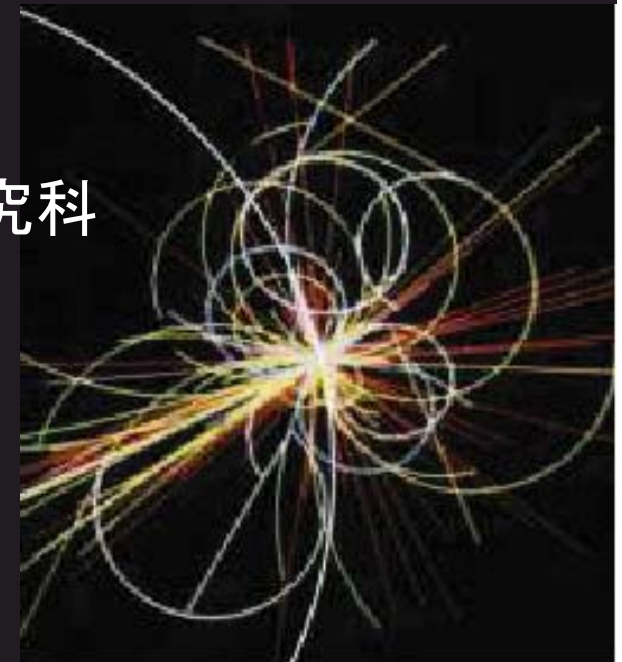
Bファクトリー実験に関する記者懇談会

素粒子物理学の現状

2006年6月29日

名古屋大学 大学院理学研究科

飯嶋 徹

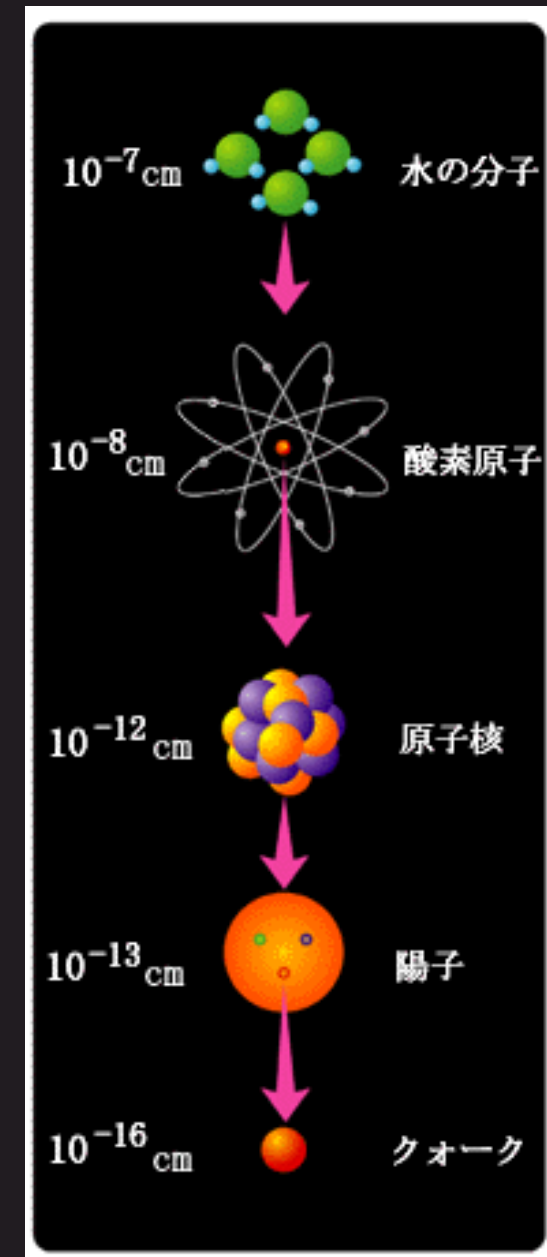


素粒子物理学

- 基本粒子は何か？
- 基本法則は何か？

宇宙 \longleftrightarrow 原子 \longleftrightarrow 基本粒子
百億光年 1億分の1センチ <10兆分の1センチ

➡ 初期宇宙の解明も。



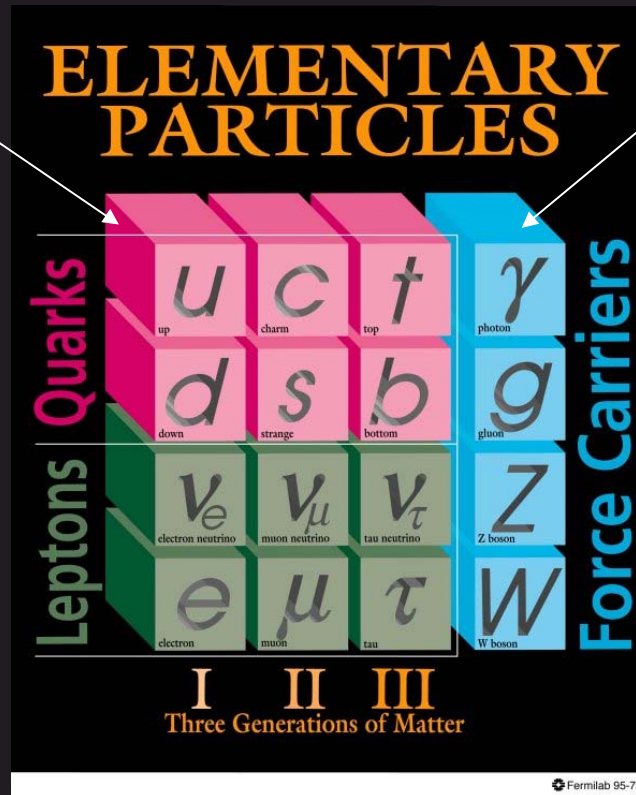
現在の素粒子標準理論

物質構成粒子
(フェルミオン)

クォーク

レプトン

3世代構造



力を媒介する粒子
(ボゾン)

電磁相互作用

強い相互作用

弱い相互作用

反粒子の存在

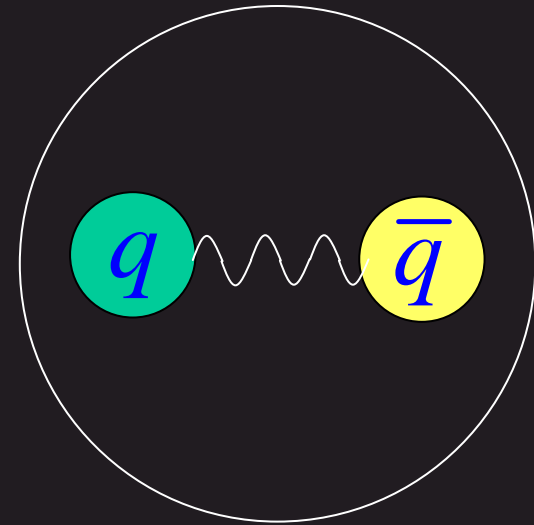
$$q \Leftrightarrow \bar{q}, \quad e^- \Leftrightarrow e^+, \quad \nu_e \Leftrightarrow \bar{\nu}_e, \quad \dots$$

ハドロンのクォーク模型

- メゾン(中間子)

$$\pi^+ = (u\bar{d}), \quad K^+ = (u\bar{s}), \quad D^+ = (c\bar{d})$$

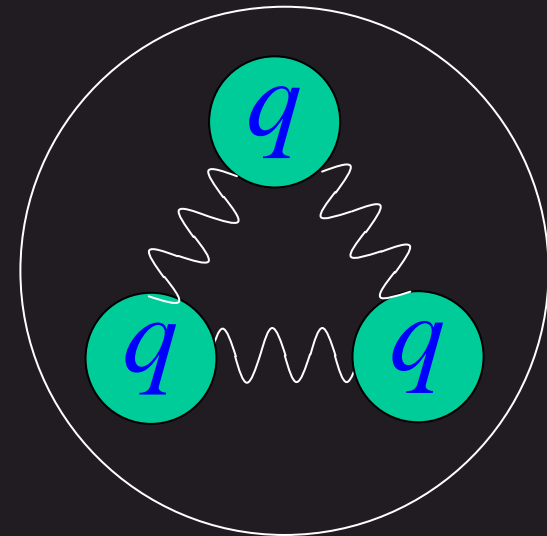
など



- バリオン(重粒子)

$$p = (uud), \quad n = (udd), \quad \Lambda = (uds)$$

など



自然界の力(相互作用)

力の大きさの目安

- 強い力

クォークを結びつけて陽子・中性子を形成
陽子・中性子を結びつけて原子核を形成

1

- 電磁気力

電子と原子核を結びつけて原子を形成

0.01

- 弱い力

原子核の崩壊を引き起こす

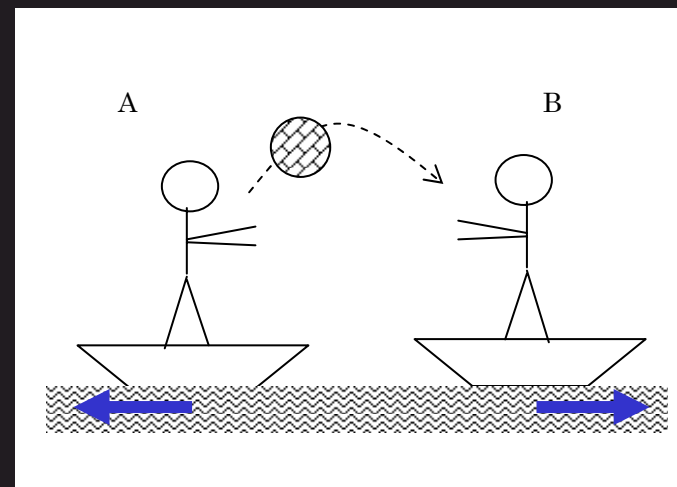
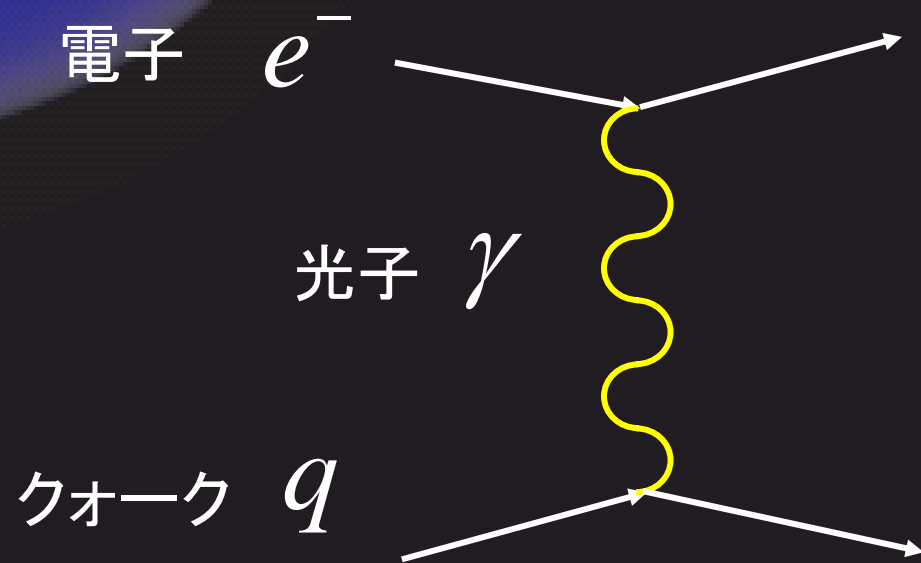
10^{-5}

- 重力

天体と天体を結びつけて銀河を形成

10^{-40}

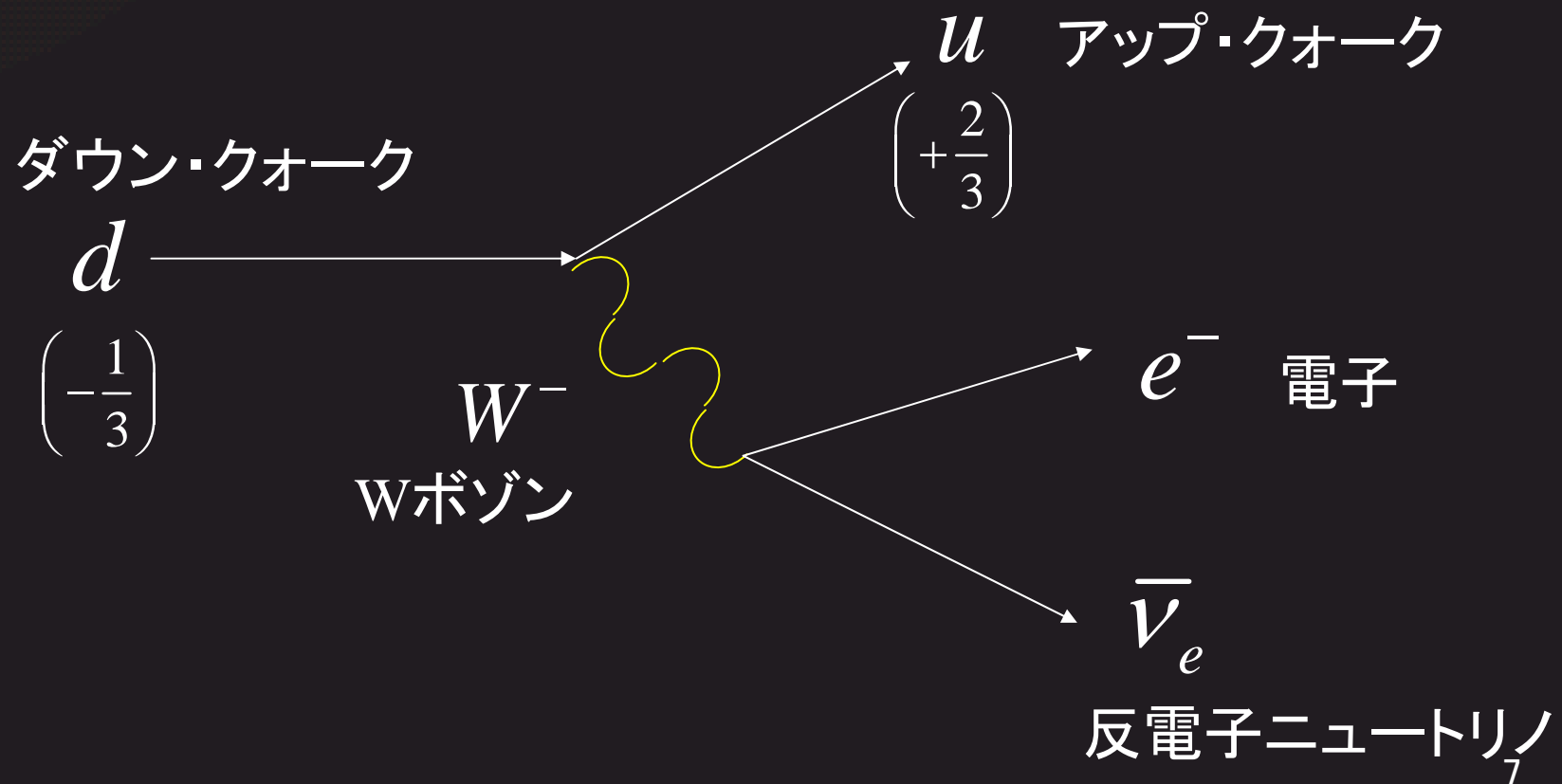
電磁気力と光子



- 力は「ゲージ粒子」の交換で生じる

弱い力

- 弱い力はウィークボゾン W^\pm の交換によって引き起こされ、反応前後でクォークが変化する。

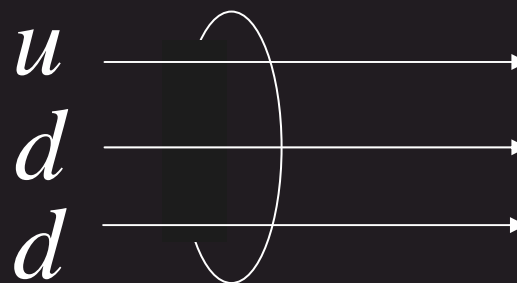


中性子のベータ崩壊



中性子

n

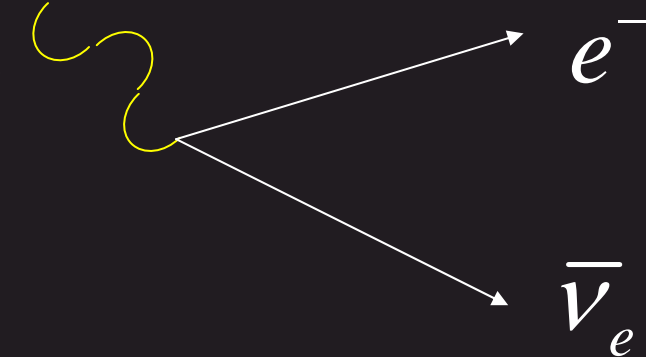


陽子

p

u
 d
 u

W^{+}



反粒子とは？

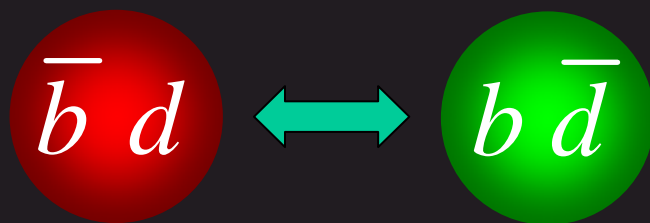
- 全ての素粒子には、質量や寿命などが同じだが、符号の異なる相棒(反粒子)が存在する。

アンダーソンによる陽電子発見(1932)

- 例

電子 e^- \longleftrightarrow e^+ 陽電子

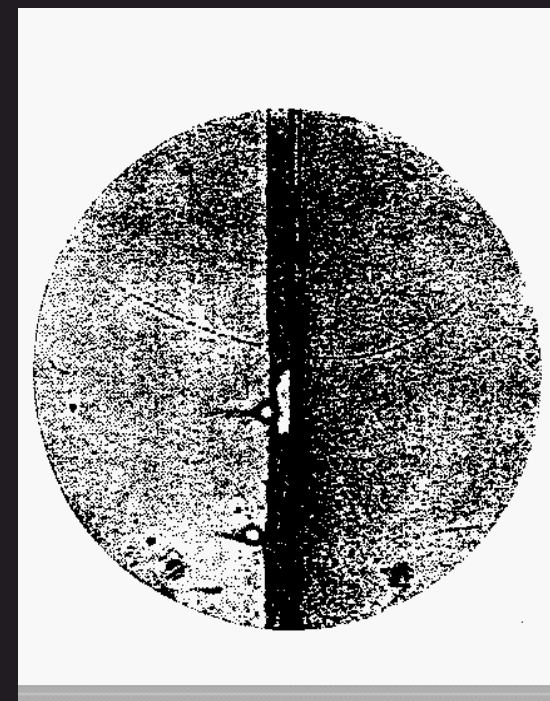
クォーク q \longleftrightarrow \bar{q} 反クォーク



B中間子

反B中間子

Bファクトリーの主役



CP対称性の破れの歴史

- 1964年 K中間子の崩壊で発見
- 1973年 小林－益川理論
 - クォークが6種類あればCP対称性は必然的に破れる。
 - 当時知られていたクォークは3種類→後に全て発見された。
- 1981年 三田らがB中間子崩壊で大きなCPの破れを予言。

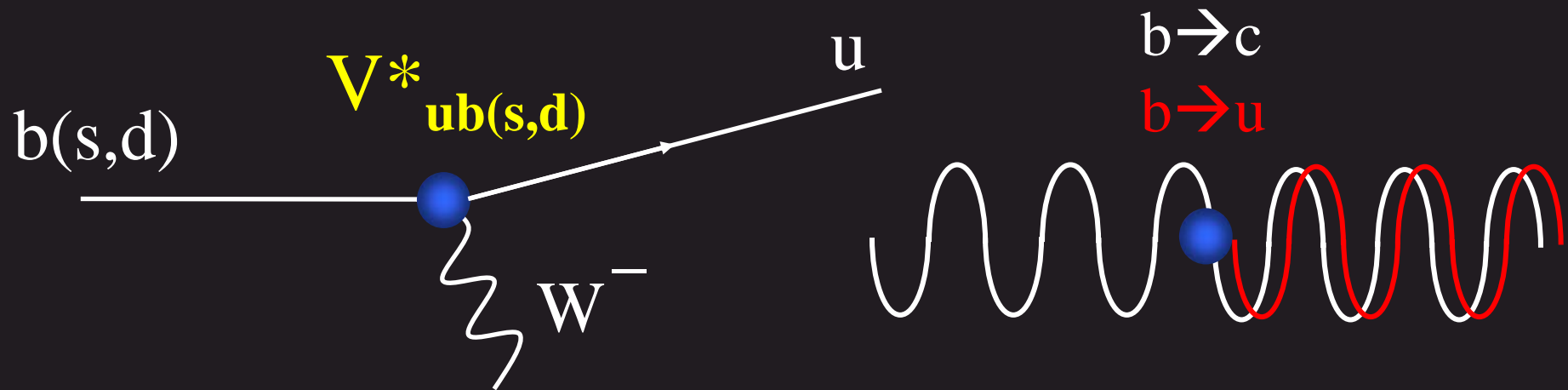
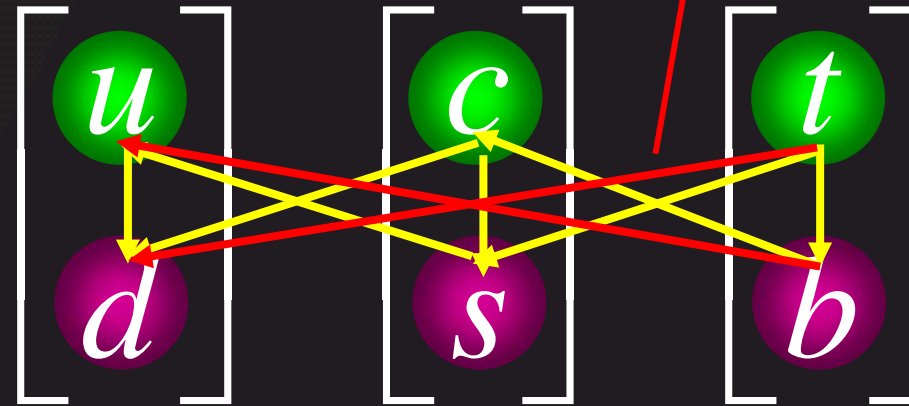
Bにおける大きなCPの破れは、小林-益川理論を含む標準理論の最終課題のひとつ(だった)。



クォークの“壊れ方” CPの破れのもと

$$Q = +\frac{2}{3}$$

$$Q = -\frac{1}{3}$$



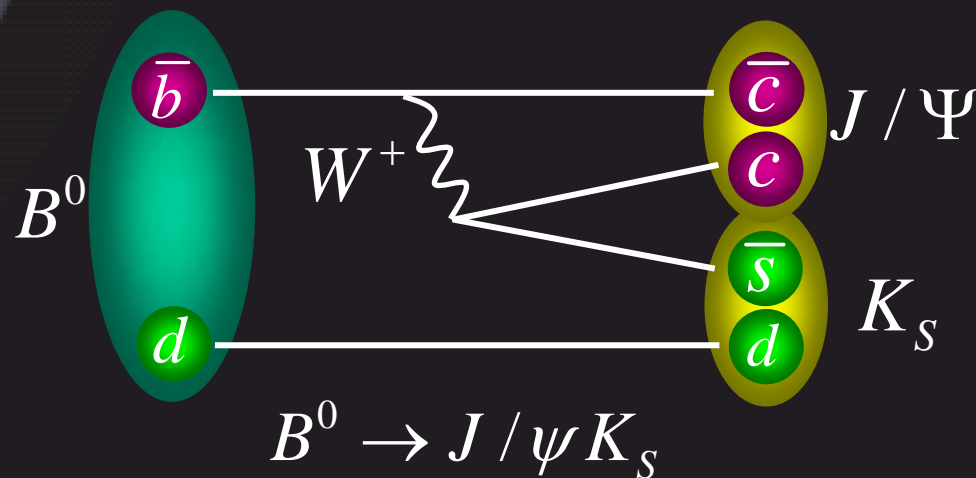
重いクォークから軽いクォークへの変化で波の位相が変化する。

小林-益川理論(1973年)

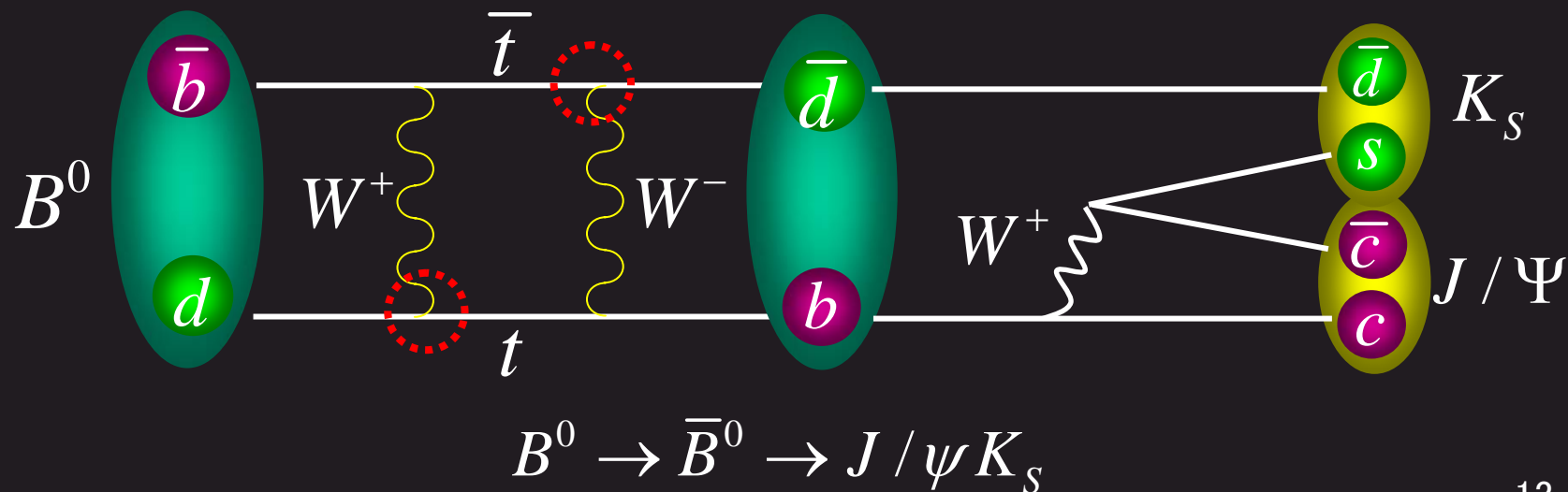
- クォークは6種類あり、3つの世代を構成する。
 - 当時知られていたクォークは3種類。
 - 後の高エネルギー実験で検証済み。
- クォークは世代間で混じりあう(混合)。
- 混合の際に、粒子の位相が変化。これがCPの破れの種になる。

B中間子の崩壊は“二刀流”

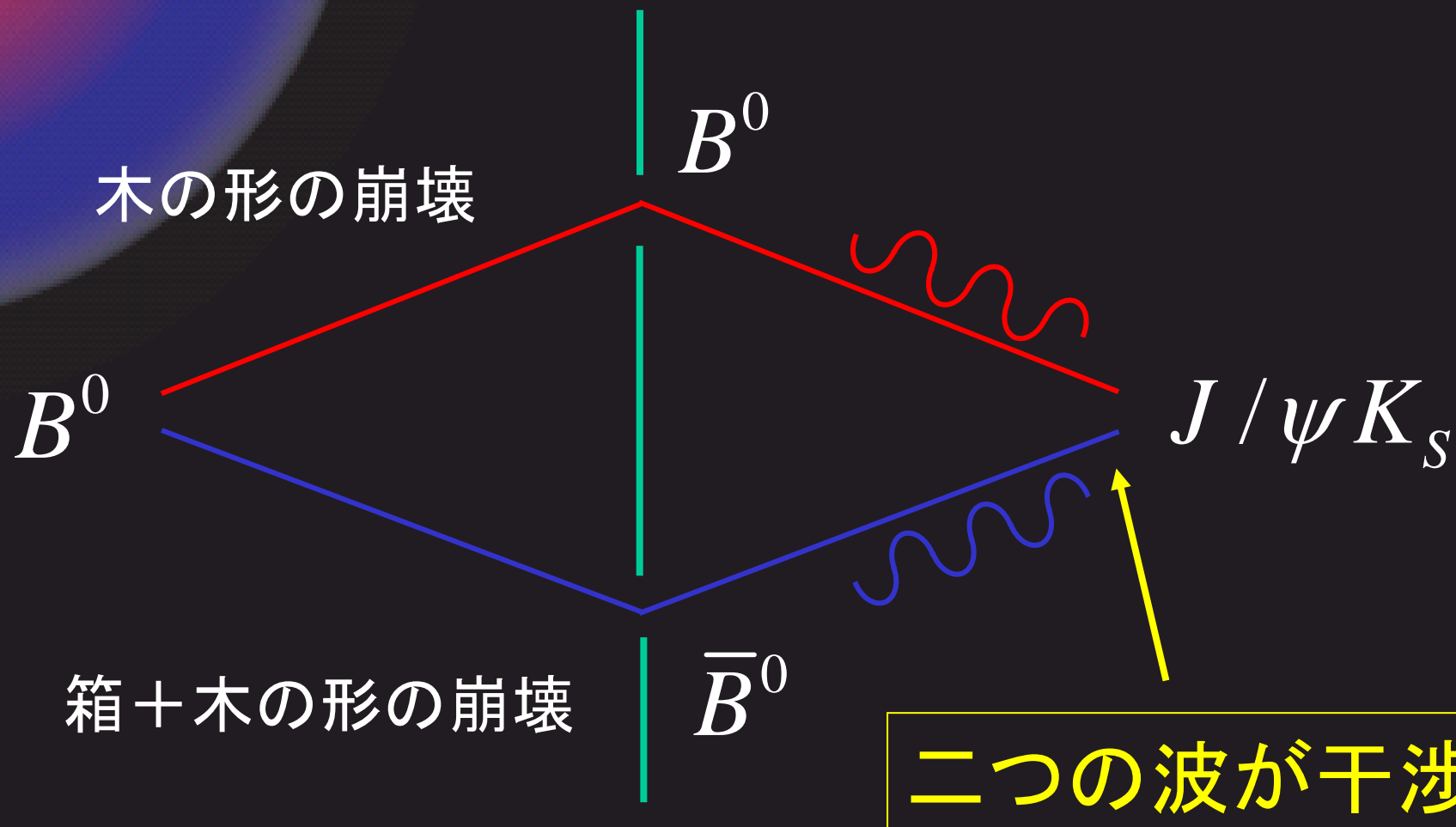
- 木の形



- 箱+木の形



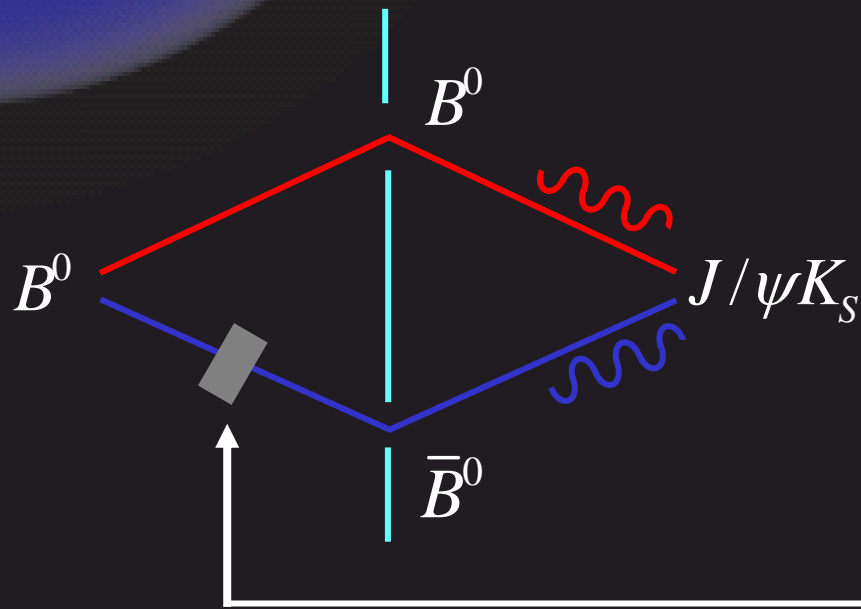
中間子崩壊におけるヤングの実験



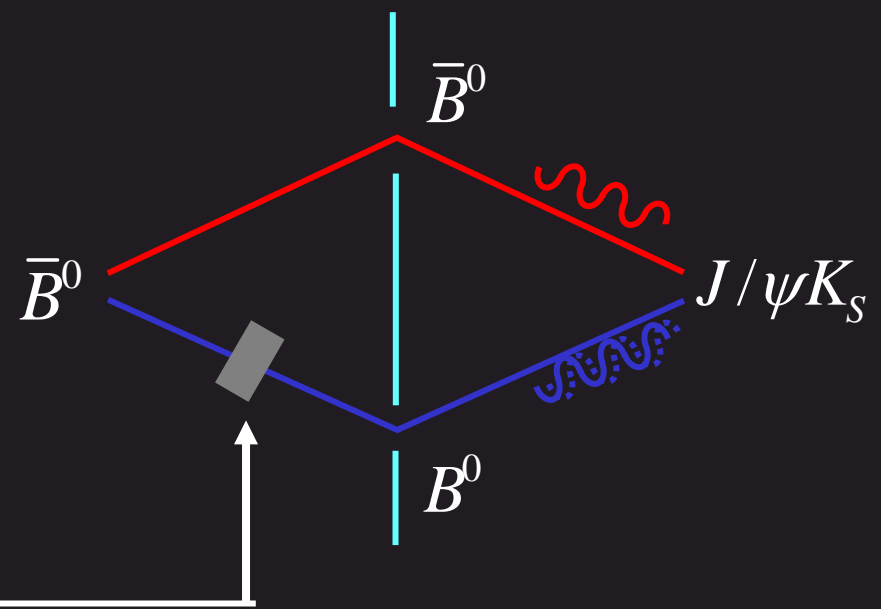
どっちを通ったかはわからない。

B崩壊でのCP対称性の破れ

B中間子の崩壊



反B中間子の崩壊



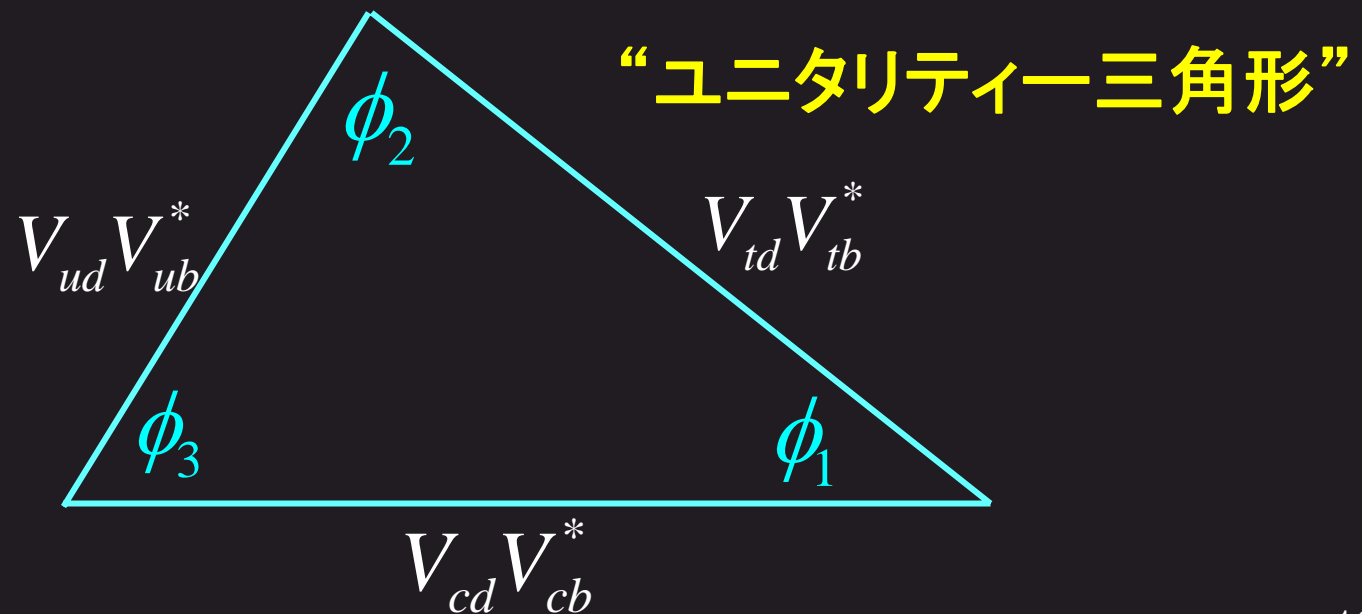
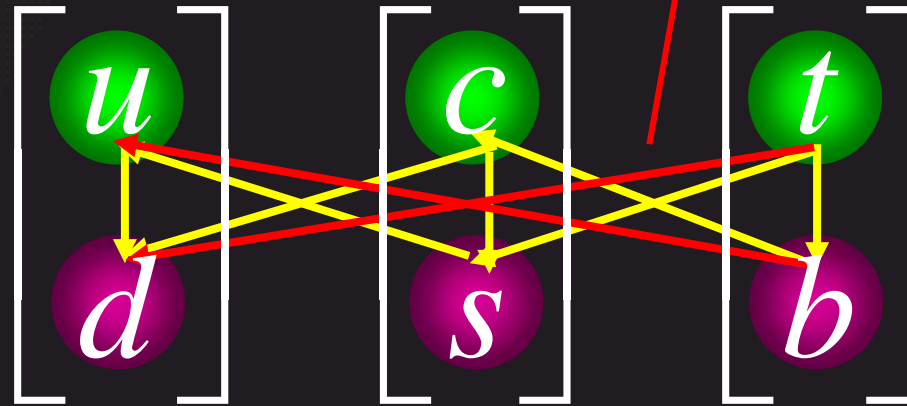
$$B^0 \rightarrow \bar{B}^0 \neq \bar{B}^0 \rightarrow B^0 \quad \text{違う!}$$

- (初期状態が) B^0 と \bar{B}^0 で二つの波の干渉が異なる。

クォークの“壊れ方” CPの破れのもと

$$Q = +\frac{2}{3}$$

$$Q = -\frac{1}{3}$$



小林-益川理論の検証

- クォークの混合率の関係は、“ユニタリティー三角形”で図示できる。
- Bファクトリーでは、この三角形の3辺と3角(位相)のそれぞれを独立に測ることが可能。
- 新しい物理があれば、測定した三角形が閉じない可能性がある。

わかったこと＋深まる謎

- 小林・益川理論の正しさ(クォークの世界の粒子・反粒子非対称の理由)
- 小林・益川だけでは、宇宙の物質優勢を説明できない。非対称が足りない。
- 小林・益川メカニズム以外のCP非対称の源が必要(新しい物理が必要)。
- 今後の研究は新しい物理の証拠探しへ！

今後の素粒子研究

フレーバー物理

クォーク	Bファクトリー
荷電レプトン	JPARC
ニュートリノ	SK

の混合現象

新しい物理
(新粒子)
の探索

ヒッグス粒子 の物理

質量の起源解明
LHC ILC



Figure by
Dr. Hayasaka
(Nagoya Univ.)

標準理論を越えた新しい粒子世界の探索へ！

素粒子と初期宇宙史

宇宙論・宇宙物理

WMAP衛星

ダーク・エネルギー (73%)

ダーク・マター (23%)

物質優勢宇宙

加速器のフロンティア
(エネルギーと強度)

Big Bang!

超弦理論

$10^{32}/10^{19}$

X?

10^{-44} 力の統一

10^{-36}

新しい物理
~1 TeV

10^{-10}

$10^{28}/10^{15}$

超対称性

ヒッグス

H

Z

標準理論

ゲージ理論

$10^{15}/100$

\bar{l}

W

l

クォークルプトン

ν

q

\bar{q}

$\bar{\nu}$

ニュートリノ

CPの破れ

時間(秒)

10^{-5}

$10^{12}/0.1$

QGP (クォーク・グルーオン・プラズマ)

温度/E (K/GeV)

q q q

ハドロン

\bar{q}
q q

\bar{q}
q q q

新しいハドロン状態

原子核

元素合成

p n
n p

バックアップ

対消滅と対生成

十分に高いエネルギー状態
— 高エネルギー加速器
— 初期宇宙

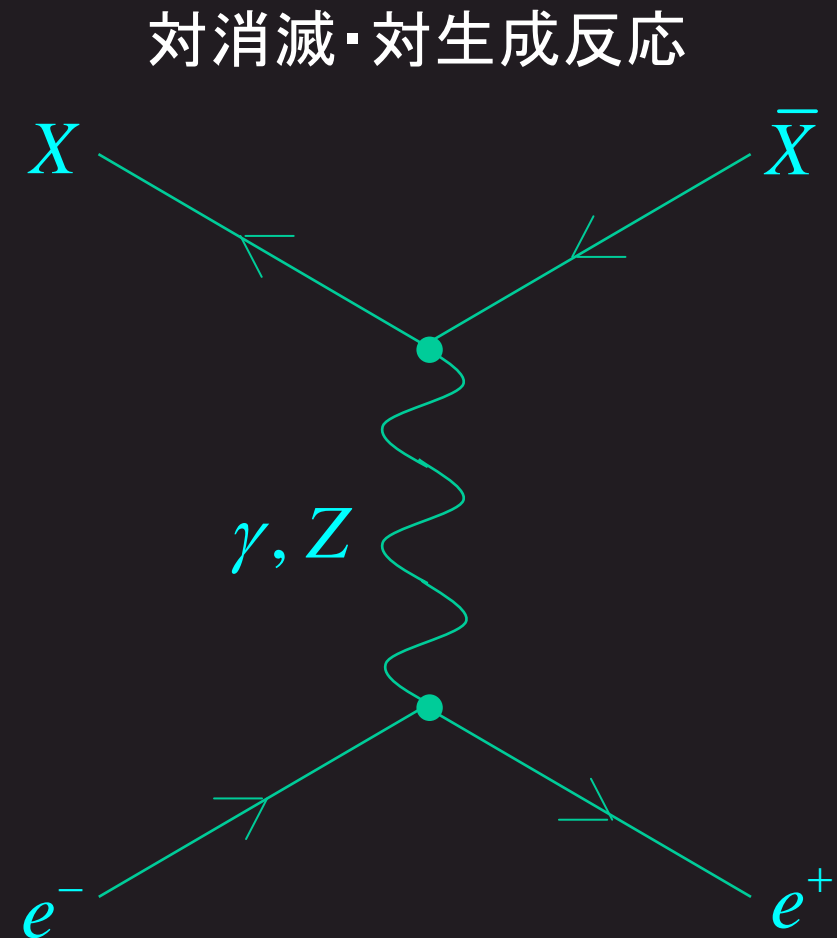
$$E > 2m_X c^2$$

→ 対消滅と対生成

宇宙の温度が下がると

$$E < 2m_X c^2$$

→ 対消滅、崩壊



どうやって反粒子は消えたの? 可能なシナリオ...

$$X \rightarrow q + e$$

$$\bar{X} \rightarrow \bar{q} + \bar{e}$$

X と \bar{X} の崩壊率の非対称度 $\sim O(10^{-10})$

→ 物質優勢の宇宙

10,000,000,001

クォーク

10,000,000,000

反クォーク

どうやって反粒子は消えたの？ 可能なシナリオ...

$$X \rightarrow q + e$$

$$\bar{X} \rightarrow \bar{q} + \bar{e}$$

X と \bar{X} の崩壊率の非対称度 $\sim O(10^{-10})$

→ 物質優勢の宇宙

1

これが我々！

CP (粒子-反粒子) 対称性の破れが鍵をにぎる。

超対称性理論 (SUSY)

クォーク



ゲージ



スクォーク



ゲージノ



レプトン



スレプトン



ヒッグス



ヒグジーノ



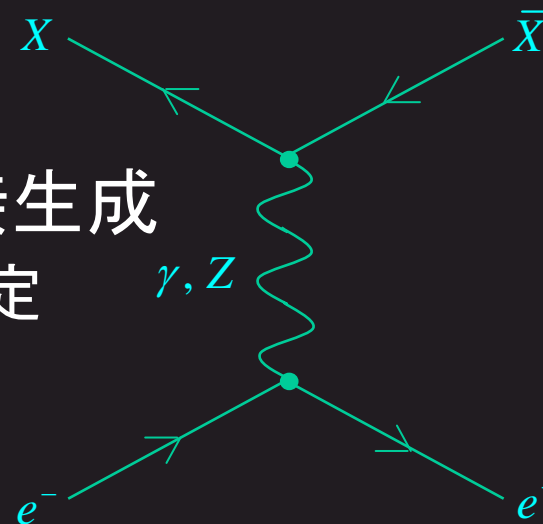
標準理論の粒子(クォーク、レプトン、ゲージ)の兄弟粒子(超対称性パートナー)が存在。質量は数TeV程度?

素粒子探求の可能性

- エネルギーフロンティア

高エネルギー加速器で新粒子を直接生成

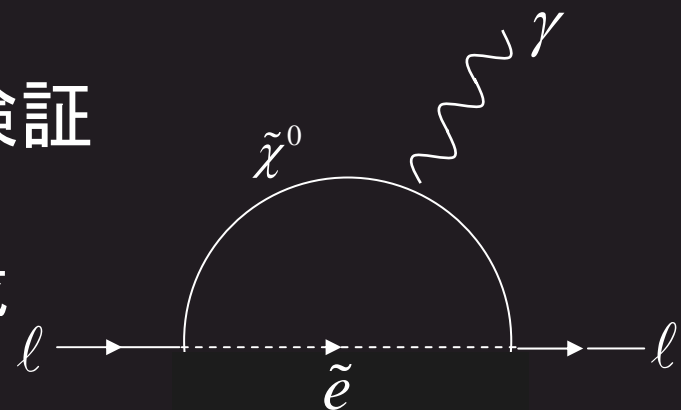
- LHC (CERN) 2007年完成予定
 - リニアコライダー 計画中
- など



- インテンシティーフロンティア

量子効果を使って重い新粒子を検証

- Super-Bファクトリー 計画中
 - JPARC 2008年完成
- など

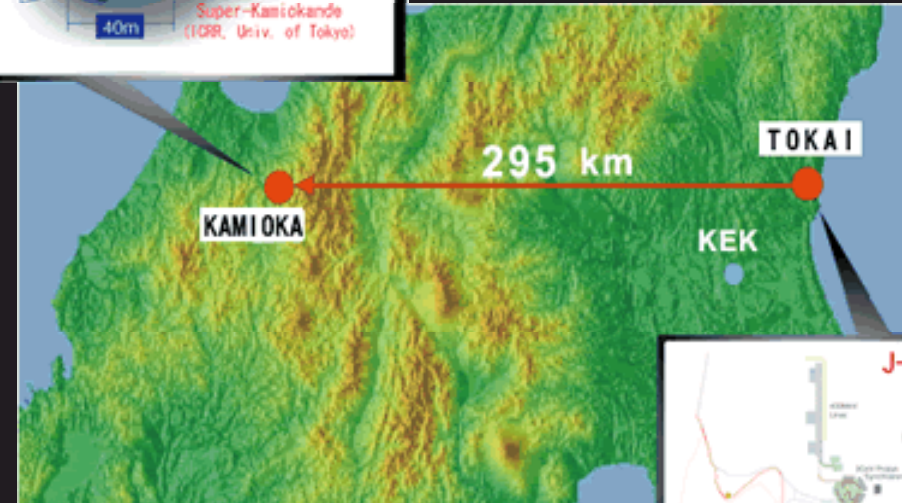
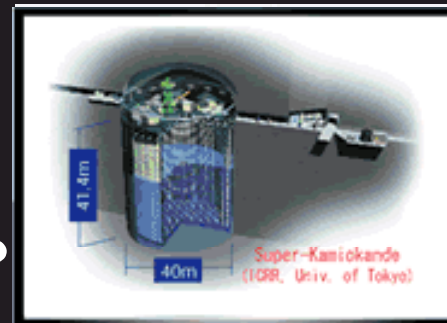


B崩壊、K崩壊、 μ 崩壊、 τ 崩壊、ニュートリノ

ニュートリノ物理

- ニュートリノ振動が発見され、ニュートリノに質量があることは確定。
- 混合率の詳細測定
- CPの破れはあるのか？
- 質量の絶対値は？

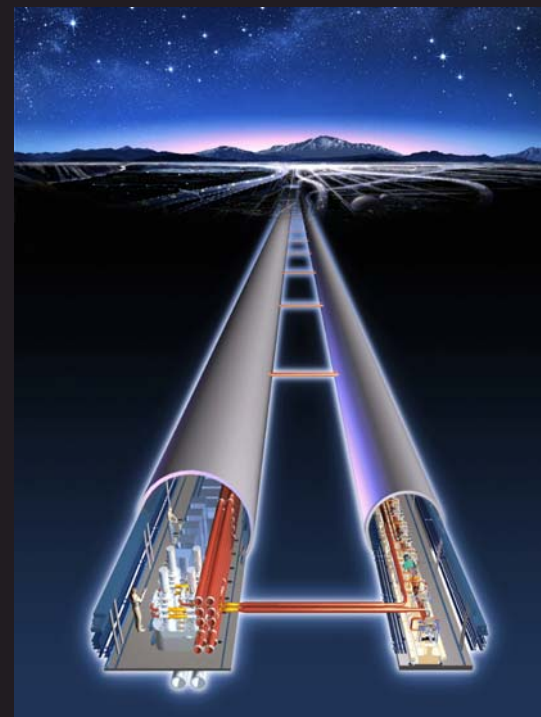
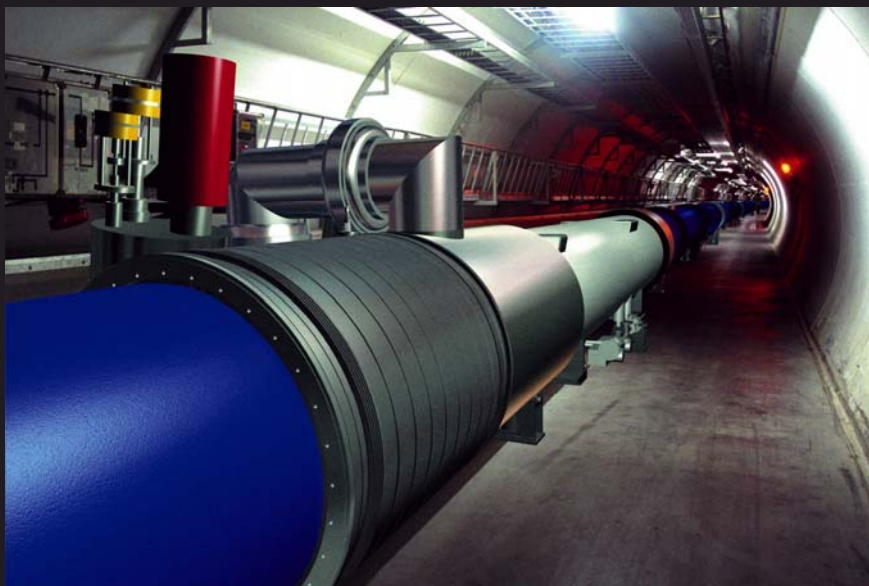
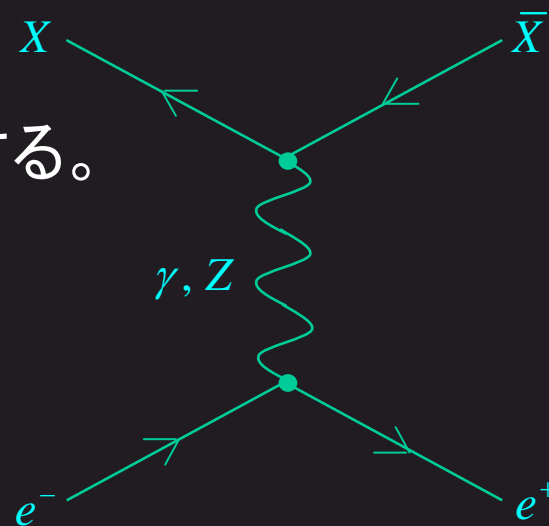
Figure from "Symmetry" magazine



エネルギー フロントニア

高エネルギー加速器で新粒子を直接生成する。

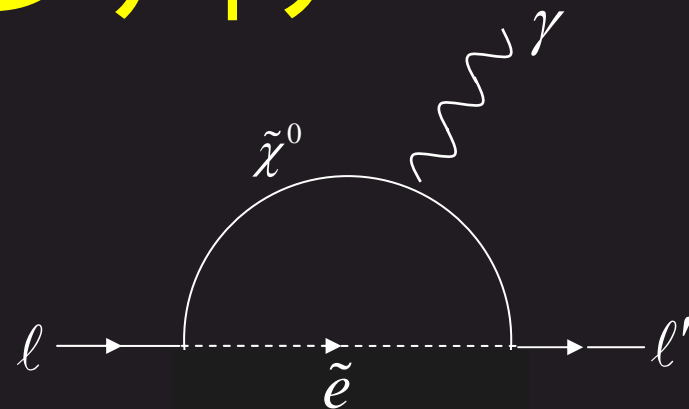
- LHC (CERN) 2007年開始
- 国際リニアコライダー(ILC) 計画中など。



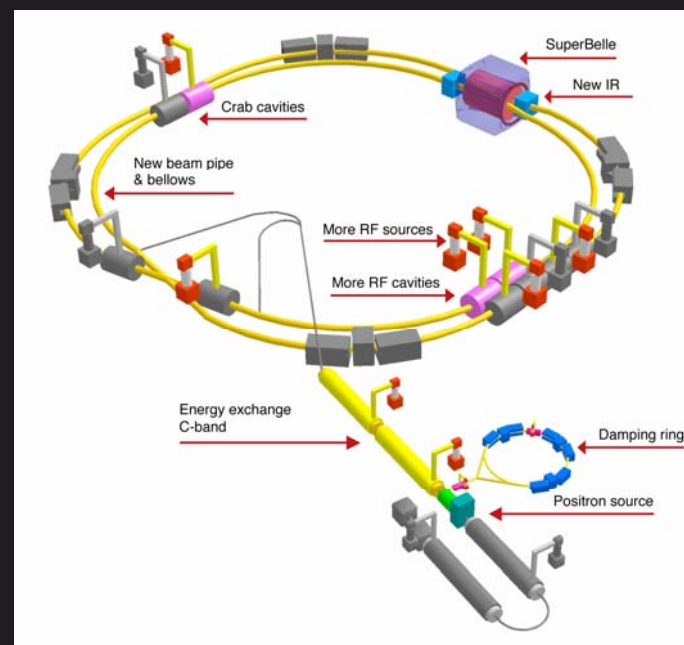
インテンシティー フロントニア

量子効果を使って重い新粒子を検証。

- JPARC 2008年完成
- スーパーBファクトリー 計画中
など



B崩壊、K崩壊、 μ 崩壊、 τ 崩壊、ニュートリノ



LHC (CERN)

- 7 TeV 陽子 × 7 TeV 陽子, 2007年完成予定

