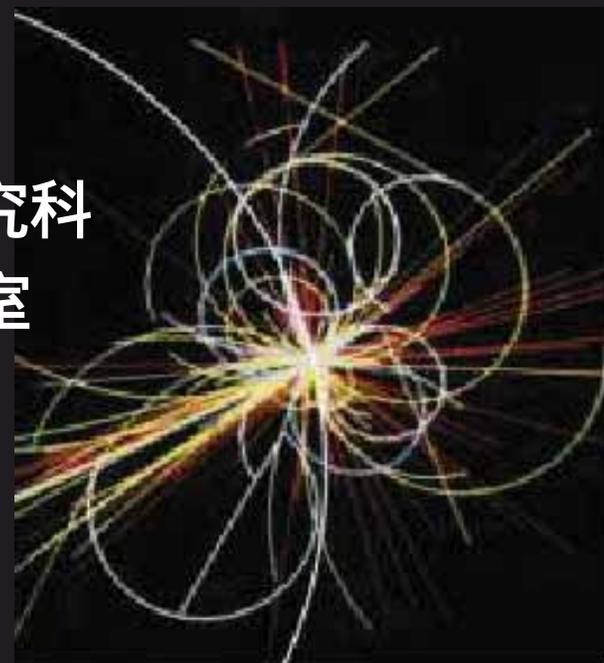


名古屋大学 NHK文化センター提携市民講座
「宇宙と物質の起源：宇宙史の物理学的解読」

第4講 初期宇宙の素粒子反応 実験

2004年6月23日

名古屋大学大学院 理学研究科
高エネルギー物理学研究室
助教授 飯嶋 徹



内容

- 初期宇宙史と素粒子探求
- 消えた反物質の謎を求めて
- Bファクトリ 実験
- 今後の素粒子探求

キーワード CP対称性の破れ

主役 B中間子

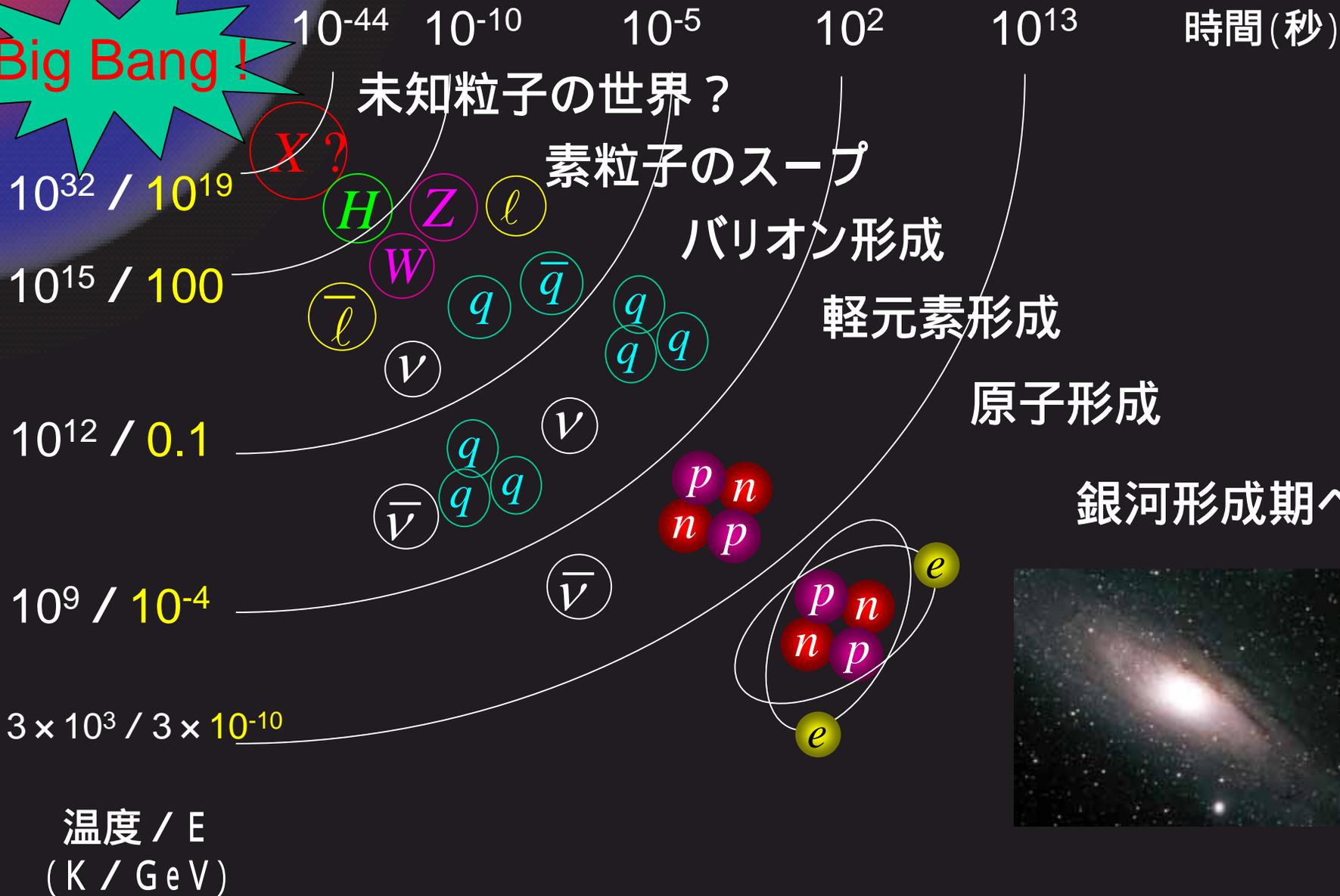




初期宇宙史と 素粒子探求

初期宇宙の発展

Big Bang!

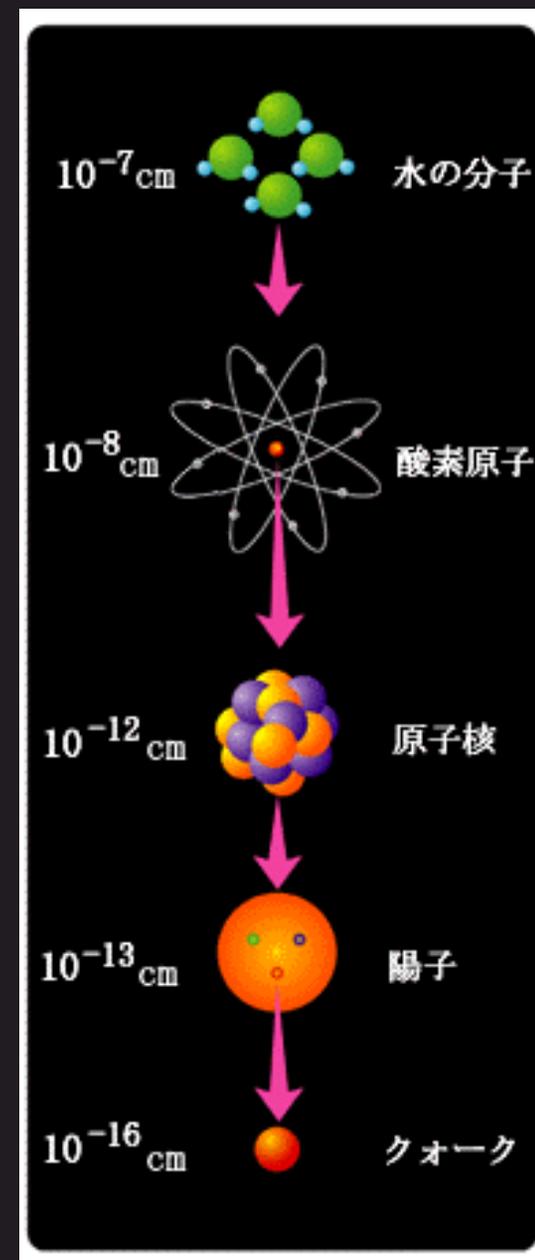


素粒子物理学

- 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

素粒子研究によって初期
宇宙の発展が理解できる。



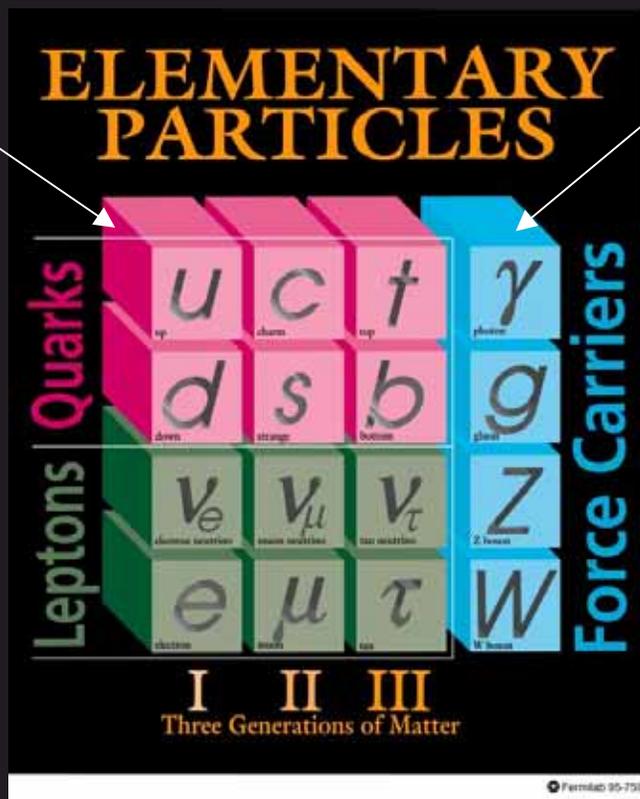
現在の素粒子標準理論

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

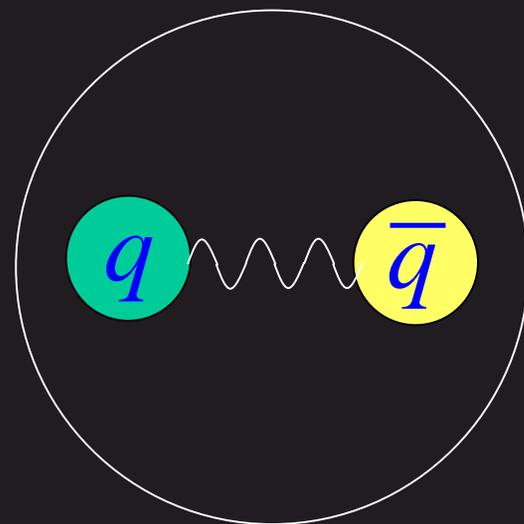
$$q \Leftrightarrow \bar{q}, \quad e^- \Leftrightarrow e^+, \quad \nu_e \Leftrightarrow \bar{\nu}_e, \quad \dots$$

クォーク模型

- メソン (中間子)

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

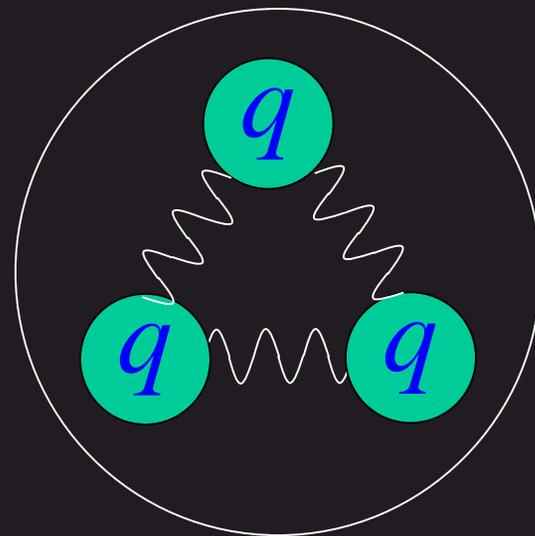
など



- バリオン (重粒子)

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

など



反粒子とは？

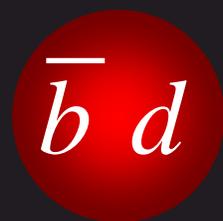
- 全ての素粒子には、質量や寿命などが同じだが、符号の異なる相棒(反粒子)が存在する。

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

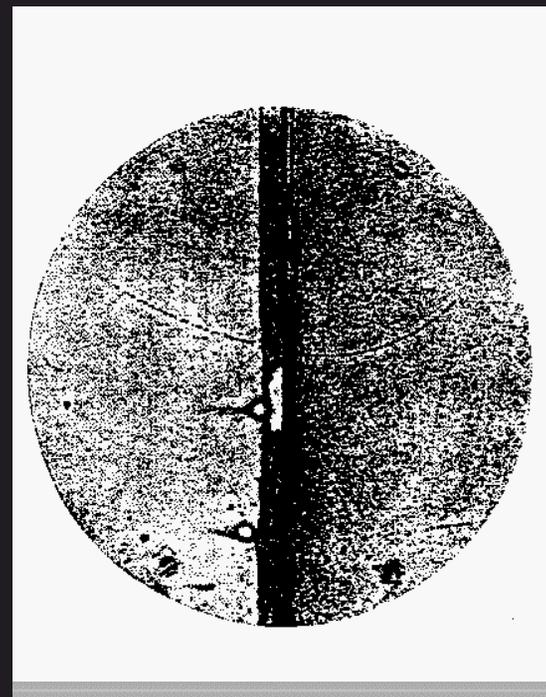


B中間子



反B中間子

本日の主役



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

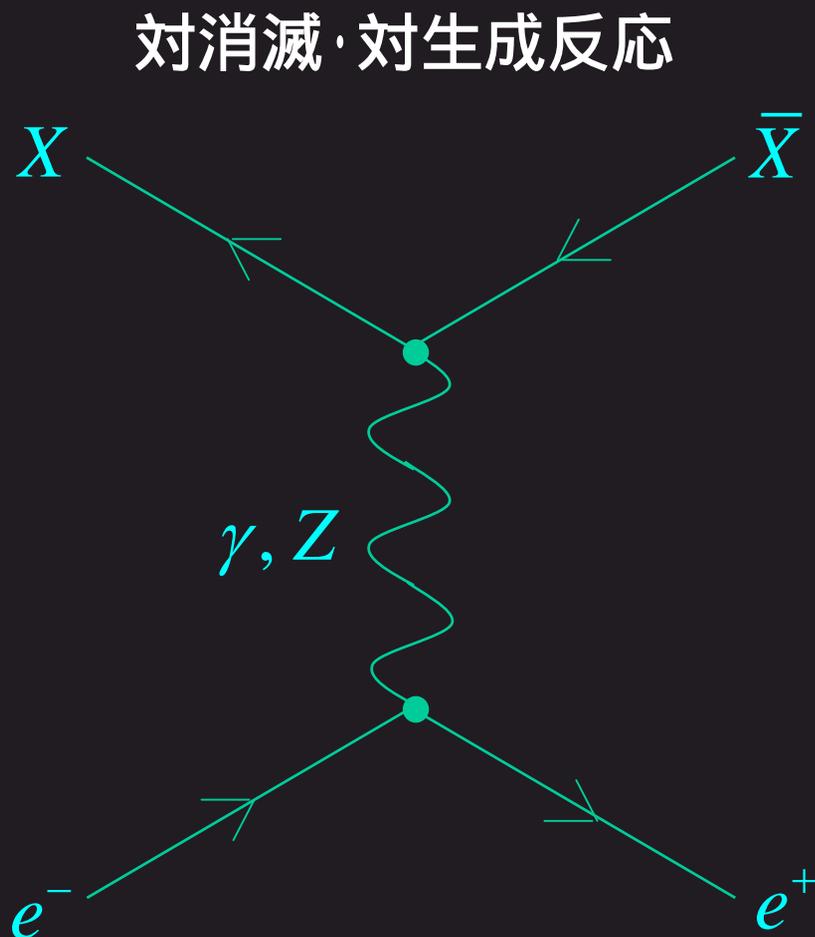
$$E > 2m_X c^2$$

→ 対消滅と対生成

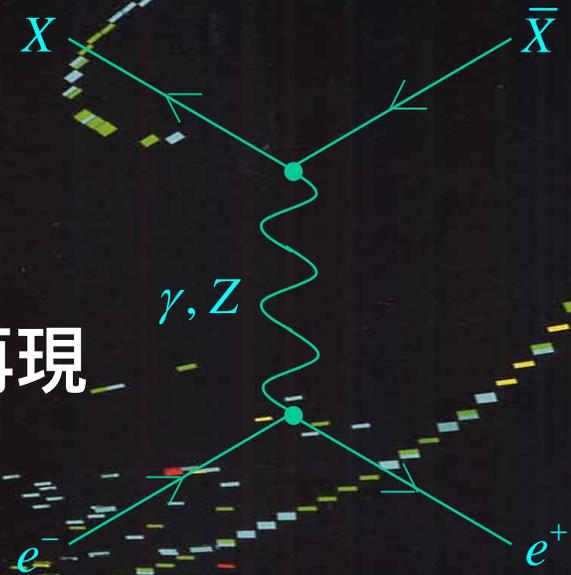
宇宙の温度が下がると

$$E < 2m_X c^2$$

→ 対消滅、崩壊



地上の加速器で高エネルギーの
粒子と反粒子を衝突させる。
➡ 宇宙初期の素粒子世界を再現



THE SCIENCE AHEAD
THE WAY TO
DISCOVERY

消えた反物質の謎

- 我々の宇宙には反物質はみあたらない。

なぜ？

キーワード

CP対称性の破れ

サハロフのシナリオ

初期宇宙で。。。 $X \rightarrow q + e$

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

僅かな違い

$$N = 10^{88} + 10^{80}$$

消滅する相手がいない粒子

+)

$$\bar{N} = 10^{88}$$

光子 10^{88} 10^{80} 粒子

現在の宇宙を構成する粒子

Xと \bar{X} の振る舞いの非対称:

$$\frac{N - \bar{N}}{N + \bar{N}} = \frac{10^{88} + 10^{80} - 10^{88}}{10^{88} + 10^{80} + 10^{88}} = 10^{-8}$$

粒子と反粒子は対等でない。

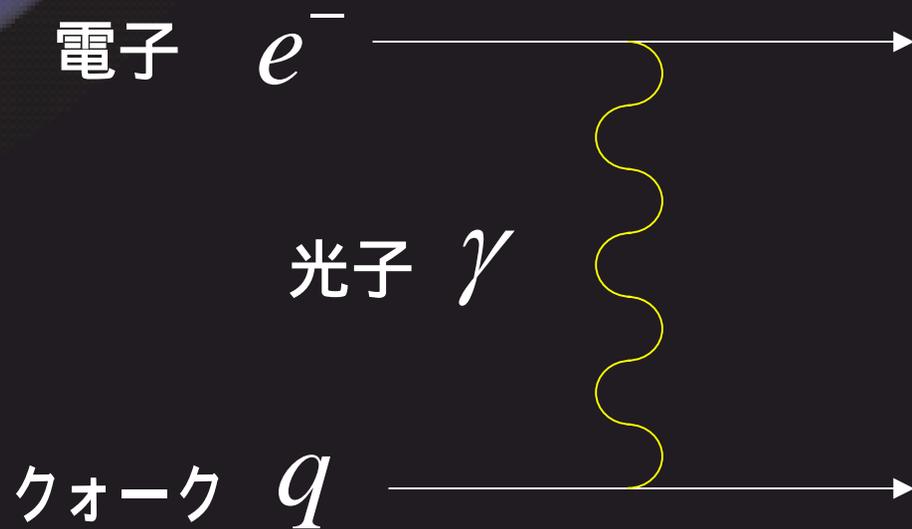
CP対称性の破れの歴史

- 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。



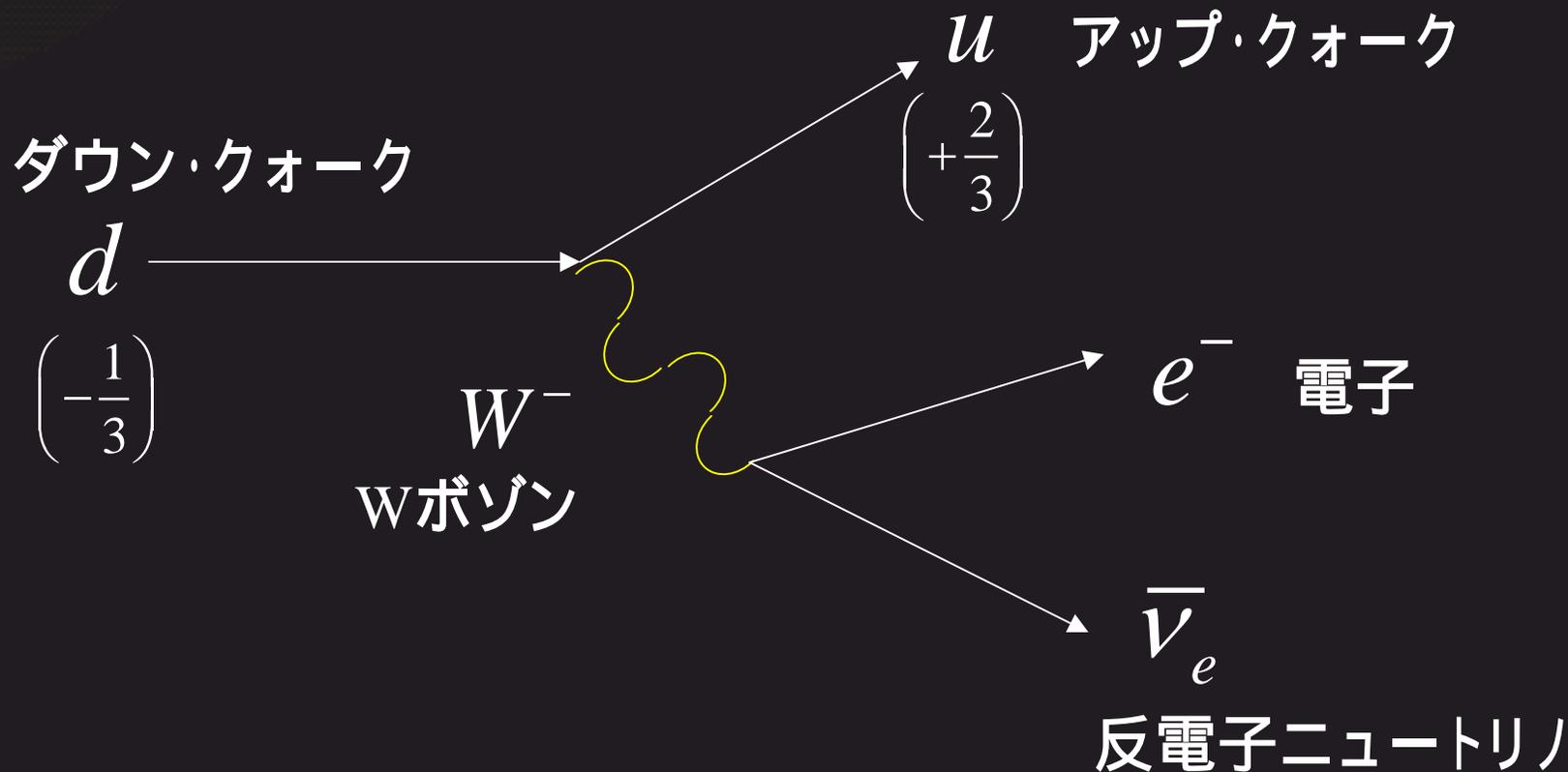
電磁気力と光子



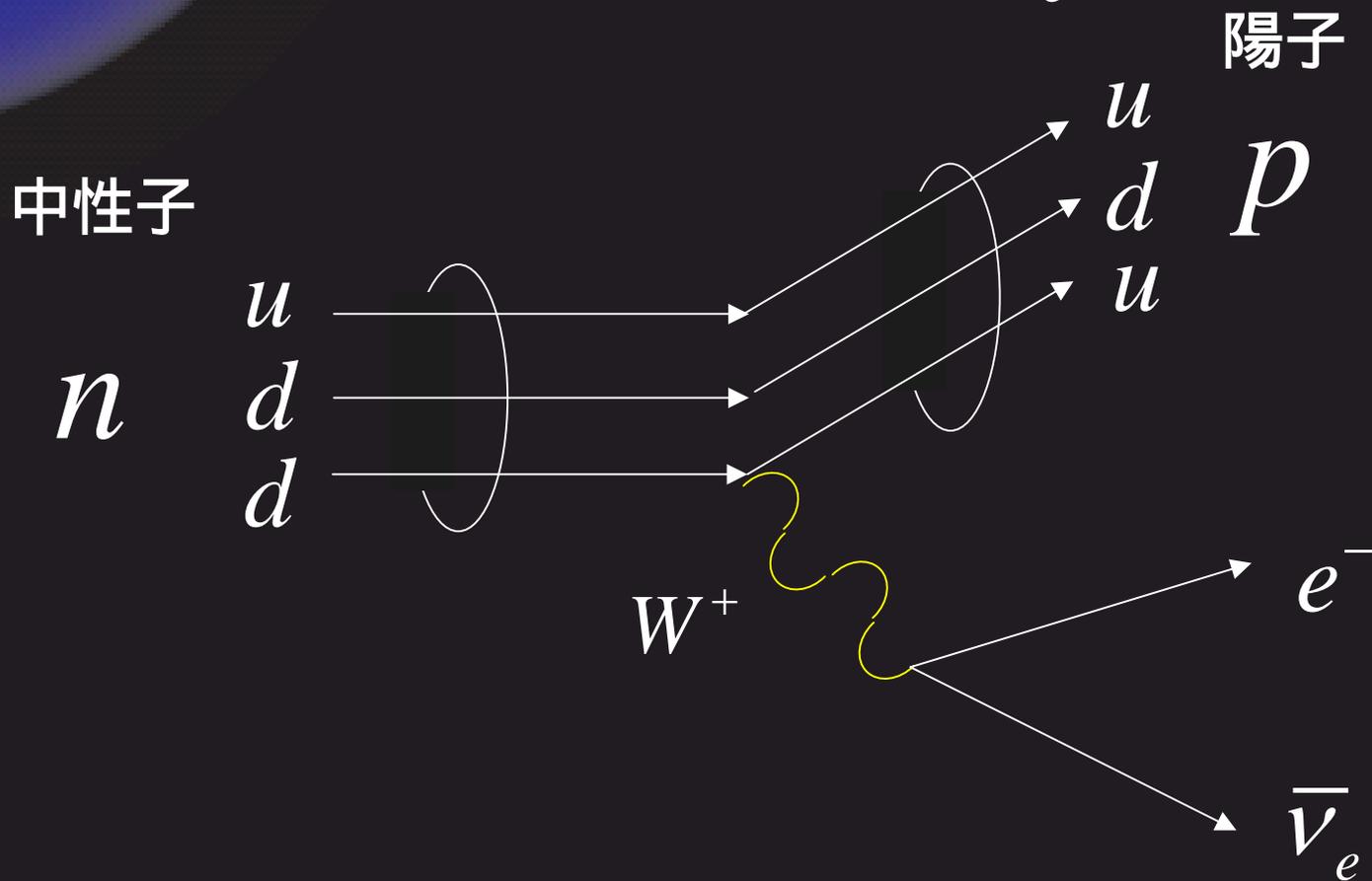
- 力は「ゲージ粒子」の交換で生じる

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。

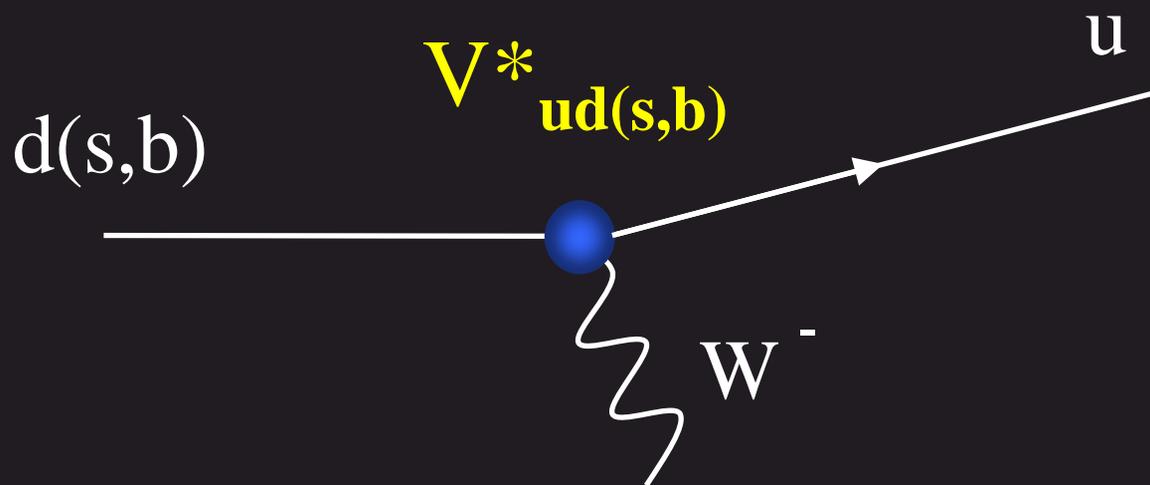
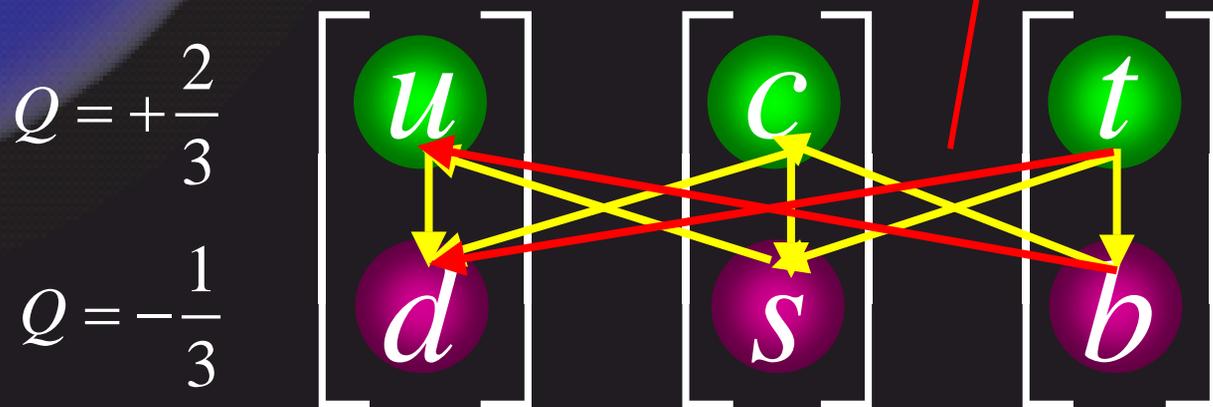


中性子のベータ崩壊

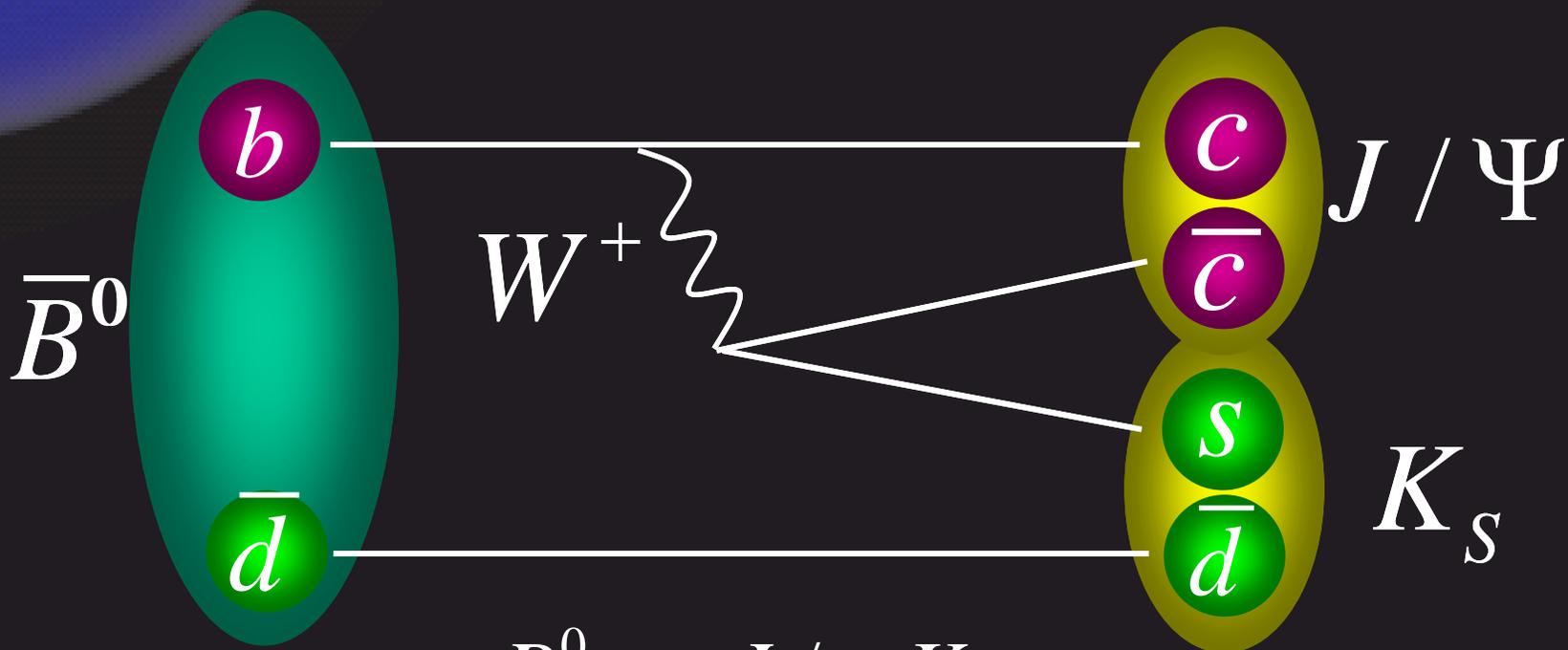


クォークの“壊れ方”

CPの破れのもと



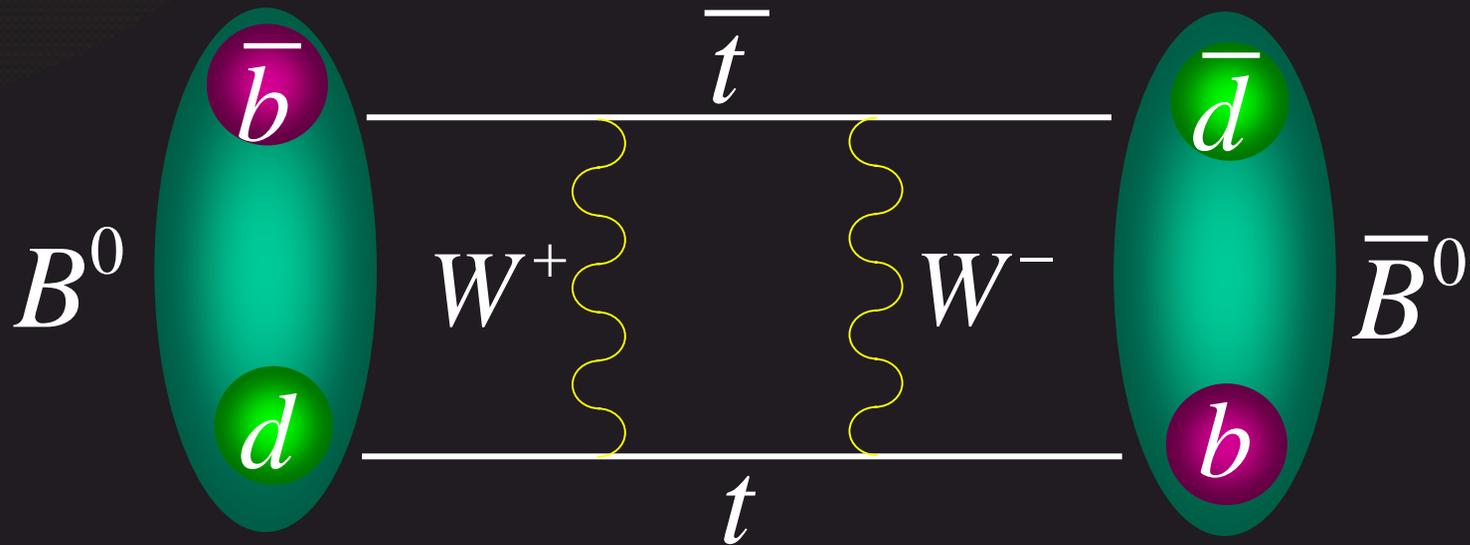
B中間子の崩壊(木の形)



$$B^0 \rightarrow J/\psi K_S$$

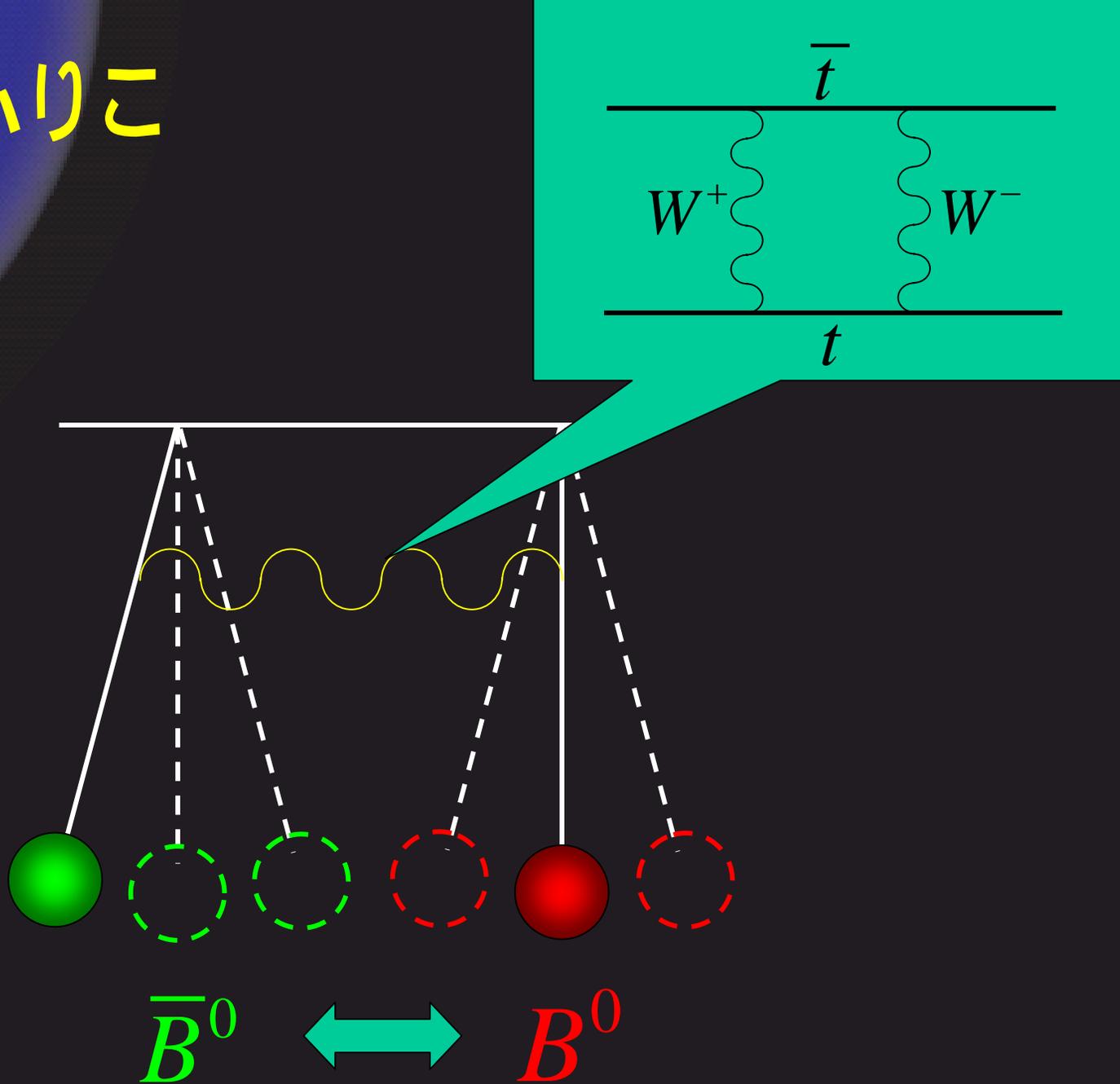
$$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$$

B中間子の振動(箱の形)



素粒子の“変身”

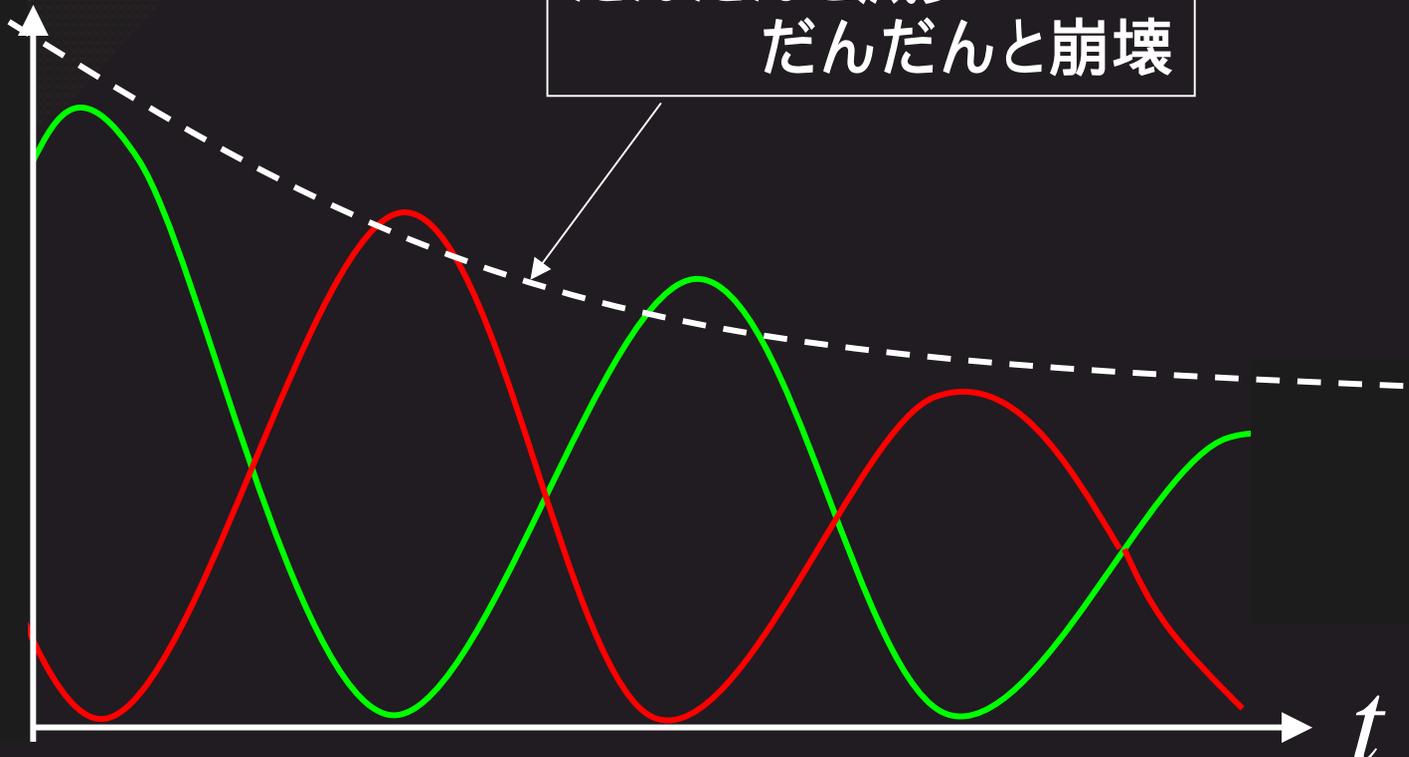
二重ふりこ



B中間子振動の様子

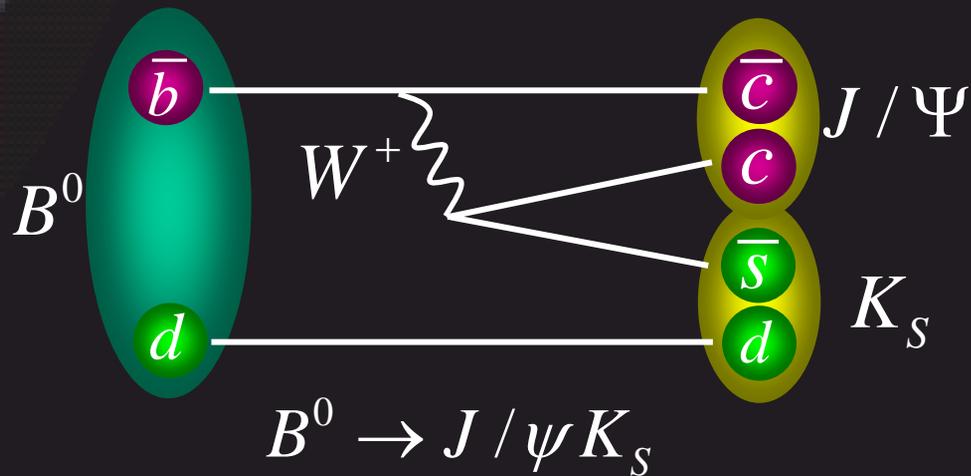
振幅

だんだんと減少
だんだんと崩壊

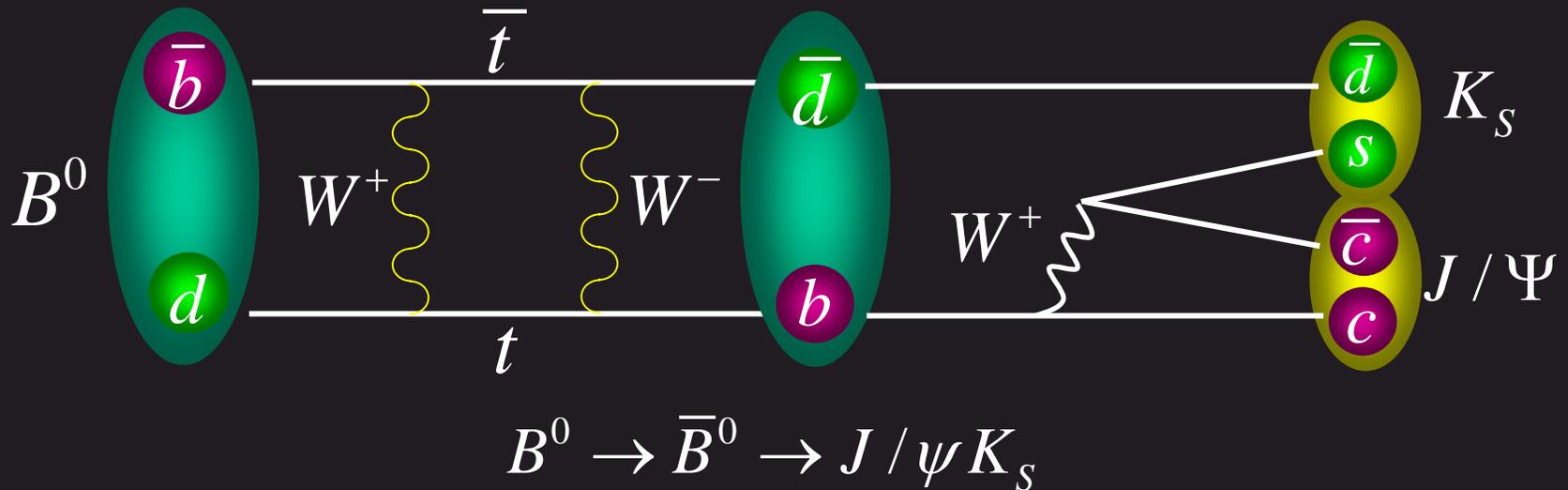


B中間子の崩壊は“二刀流”

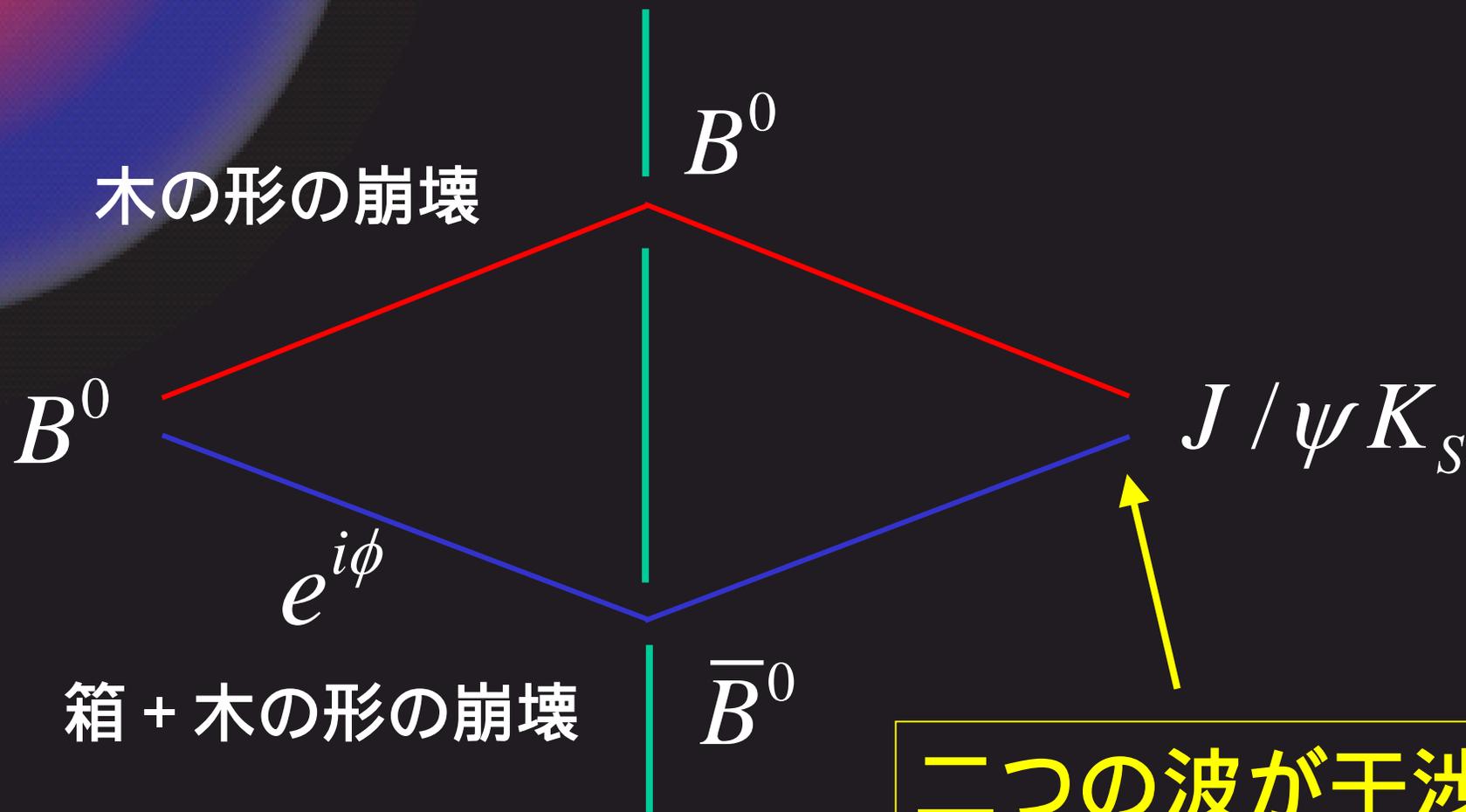
- 木の形



- 箱 + 木の形



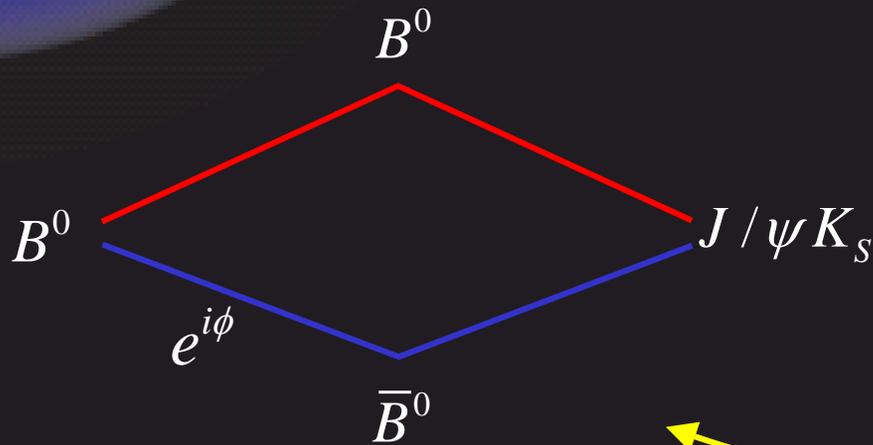
二重スリット



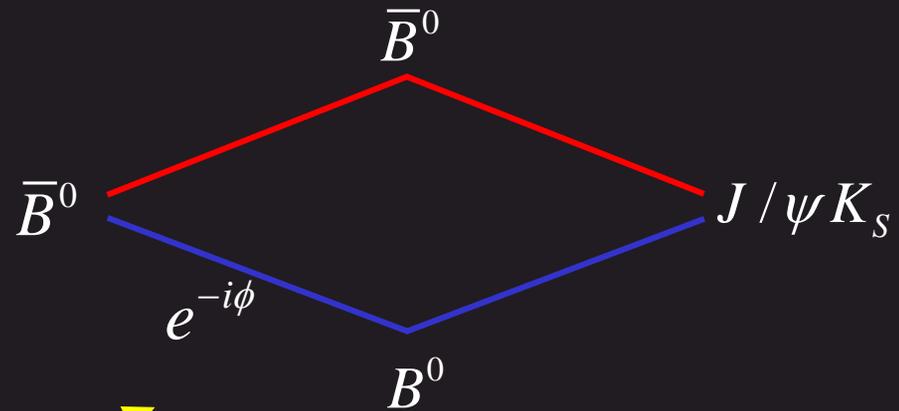
どっちを通ったかはわからない。

B崩壊でのCP対称性の破れ

B中間子の崩壊



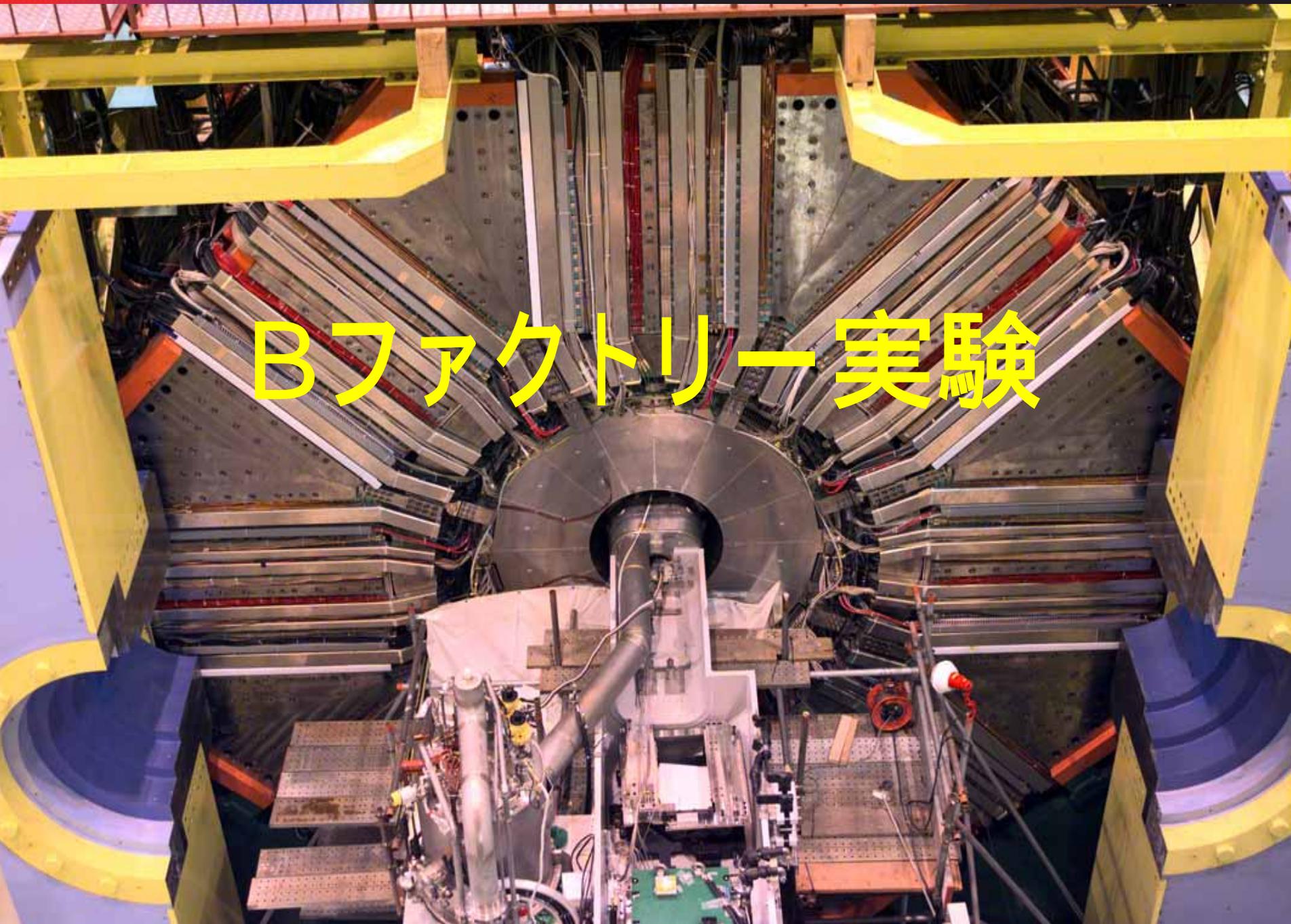
反B中間子の崩壊



違う

- (初期状態が) B^0 と \bar{B}^0 で異なる干渉を示す。

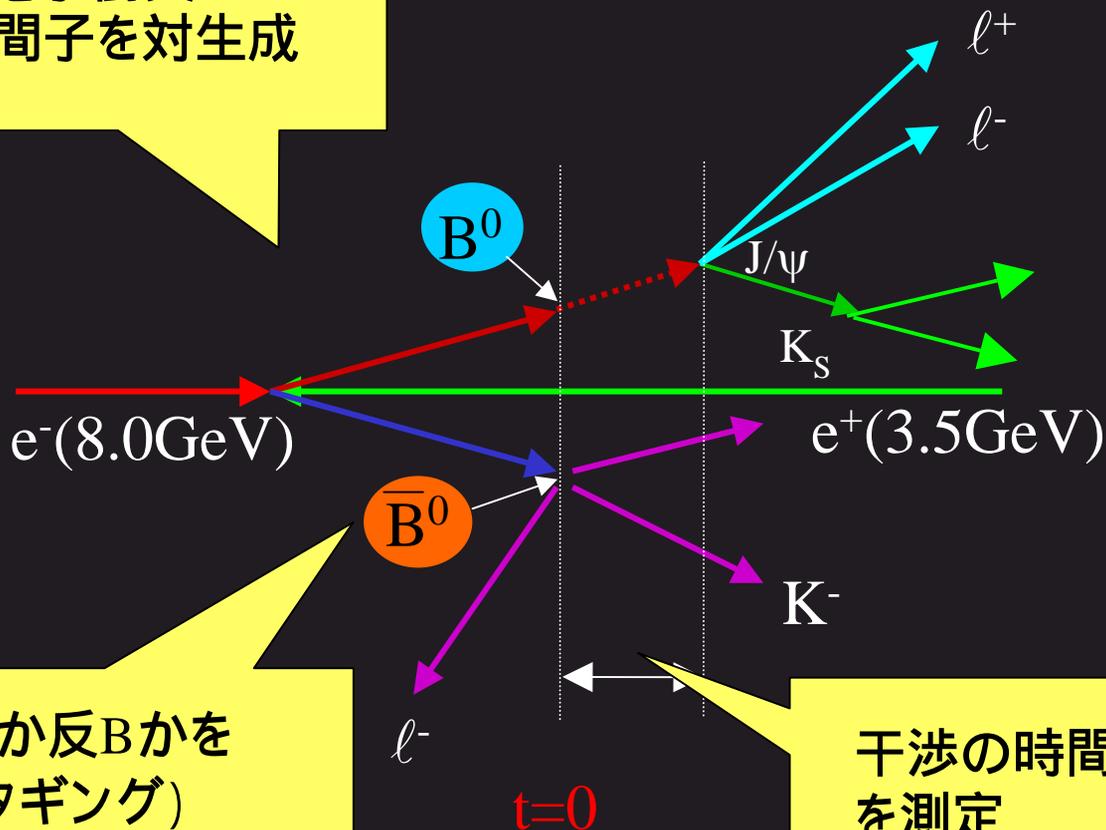
Bファクトリー実験



どんな測定をするか？

電子 - 陽電子衝突で
Bと反B中間子を対生成

Bの二刀流
崩壊を検出



一方がBか反Bかを
決める (タギング)

干渉の時間依存性
を測定

実験のがんばりどころ

- B中間子寿命はわずか1.5ピコ秒しかない！
 - 1ピコ秒 = 0.0000000000001秒

➡ 非対称エネルギー衝突 (8GeV電子 + 3.5GeV陽電子)

- B中間子が前方に勢いよく飛び出す。

➡ 寿命が延びる

- 飛行距離は200マイクロン程度。

最先端の技術を使えば測定可能



加速器の挑戦

- 見たい崩壊 ($B^0 \rightarrow J/\psi K_S$) はめったにおこらない (10万回に1回)。

➡ 高輝度 (ルミノシティ) の電子 - 陽電子衝突を実現

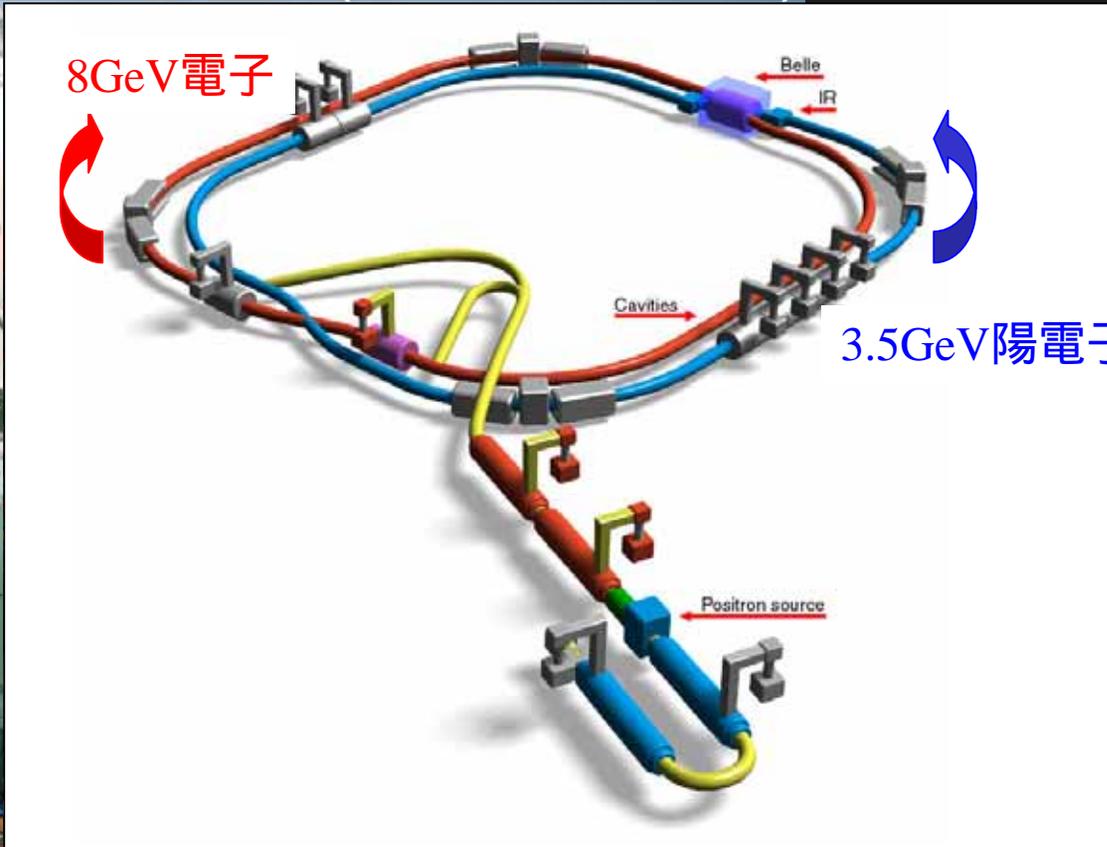
➡ 年間に1億個のB - 反B中間子対を生成

“B中間子工場 (Bファクトリー)”

KEKB加速器は世界最高強度のマシン

KEK B ファクトリー

高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)



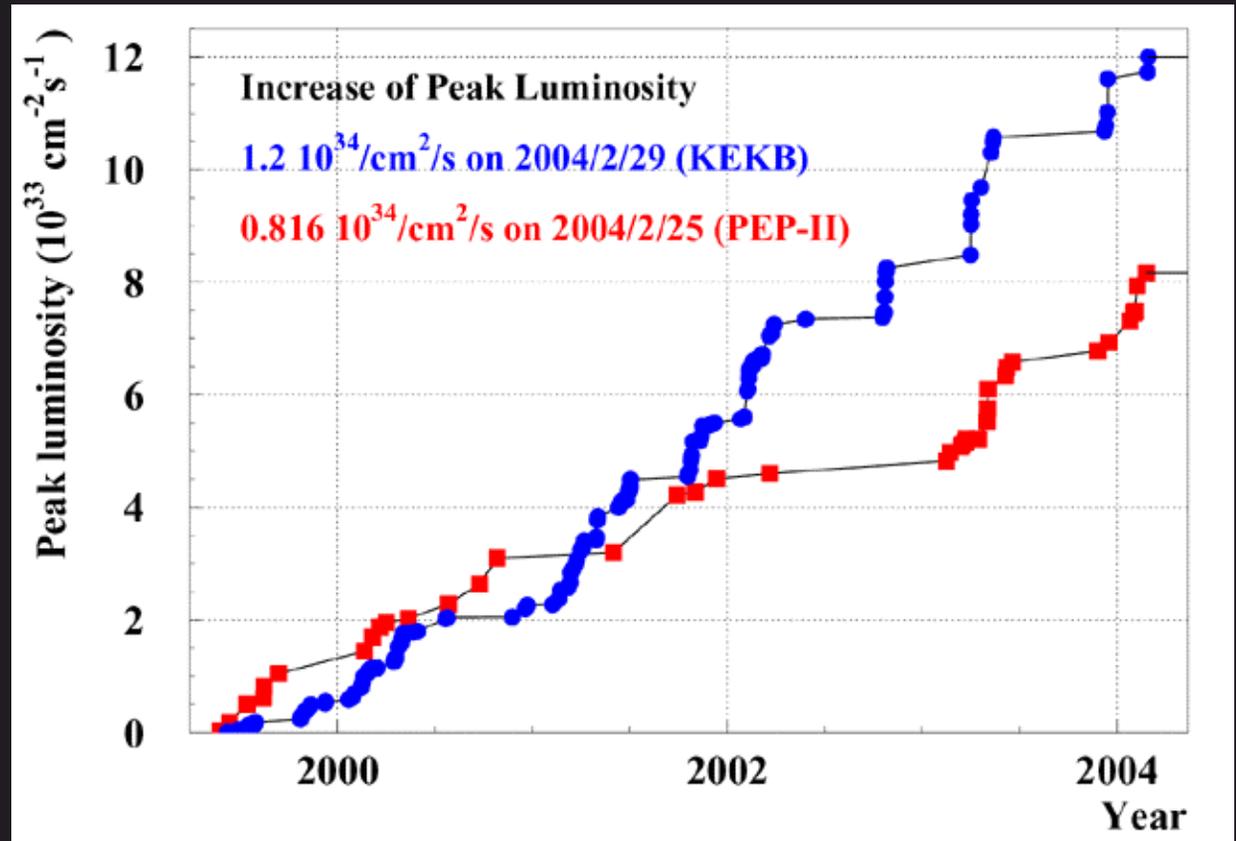
スタンフォードでも同様の加速器 (PEP-II) が稼動中

KEKB加速器の性能

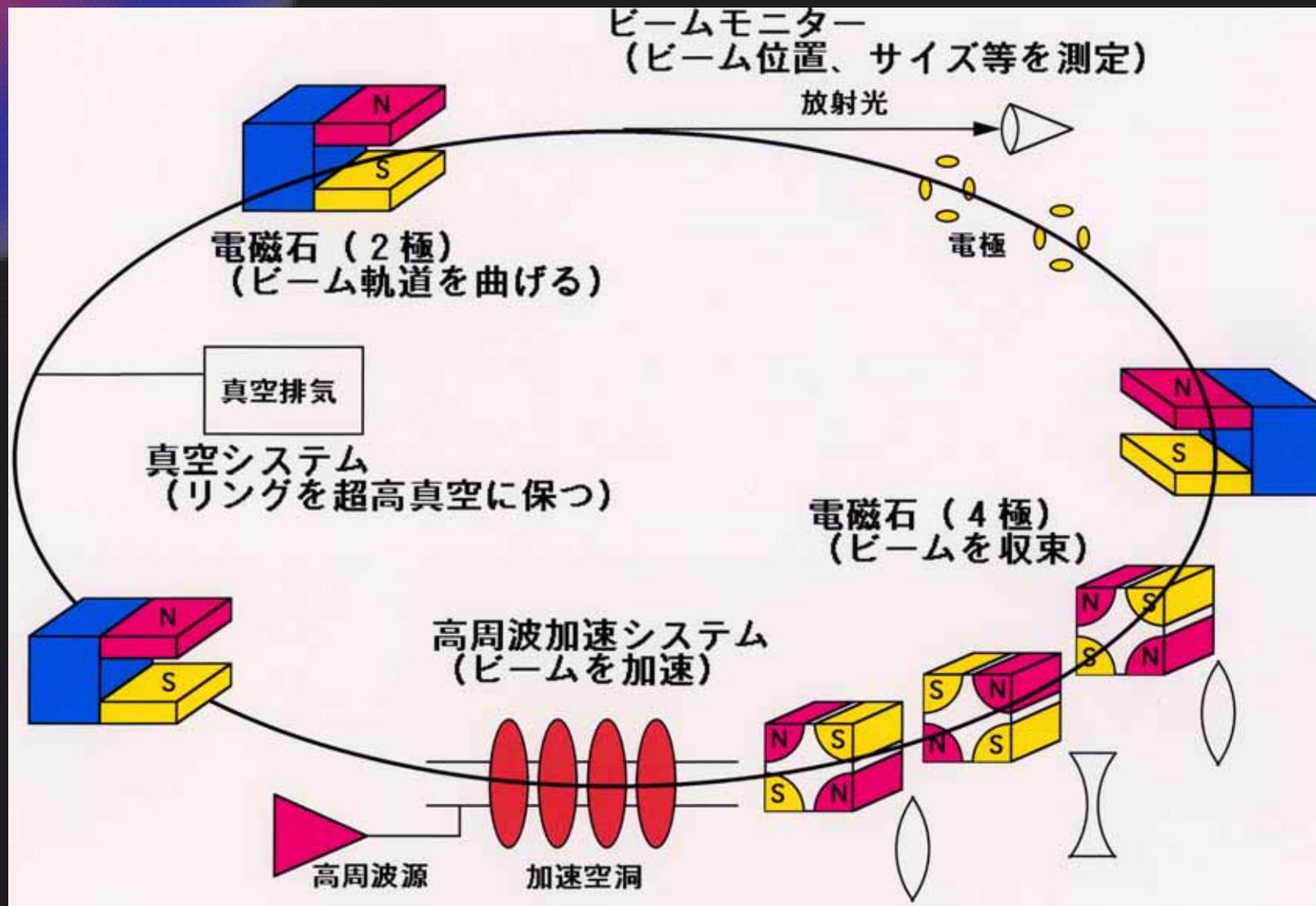
- ピークルミノシティ = $13.9 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
➡ $N(\text{BB}) = 1.5 \times 10^8 / \text{year}$

PEP-II との比較

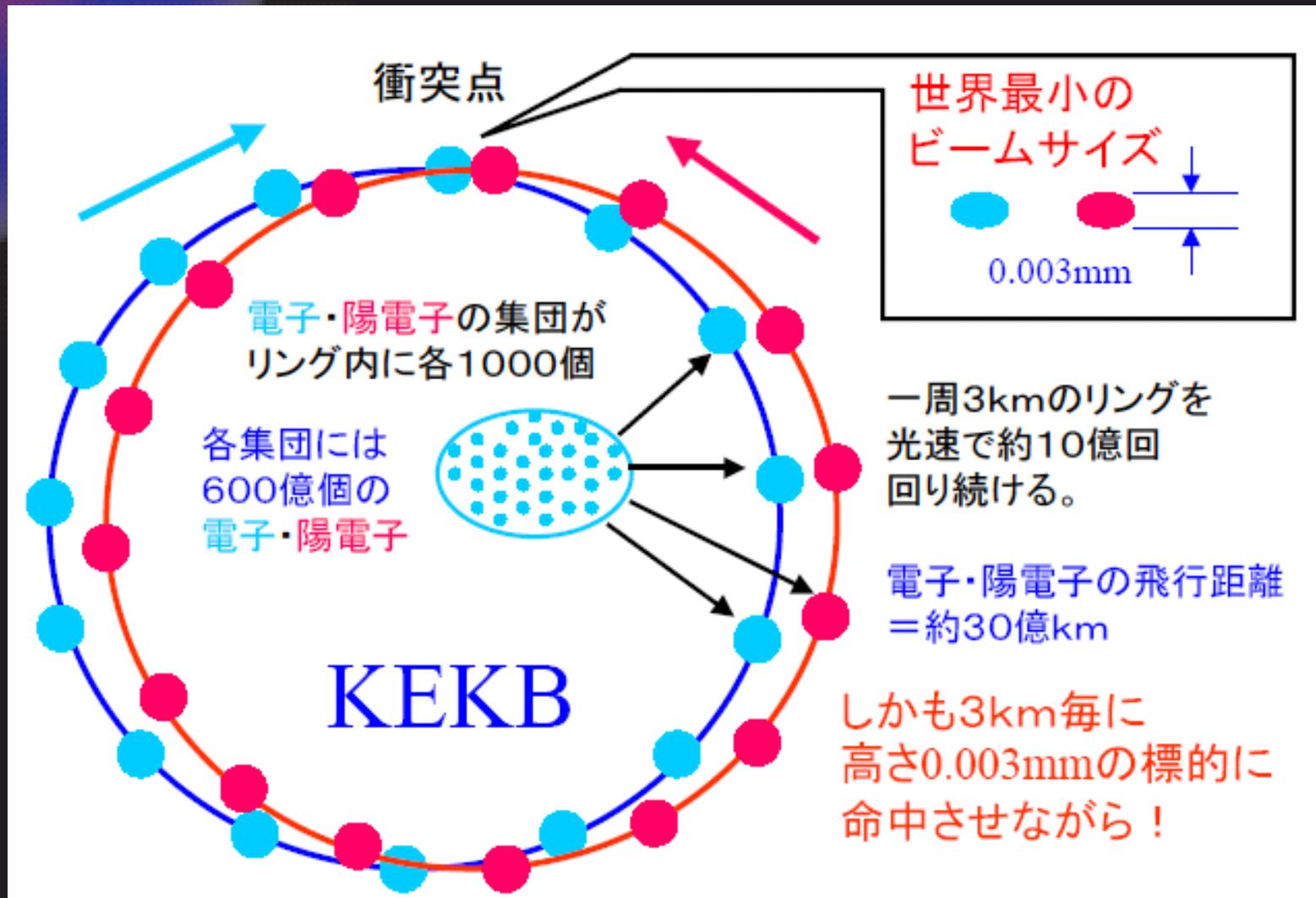
日米の熾烈な競争



加速器のしくみ

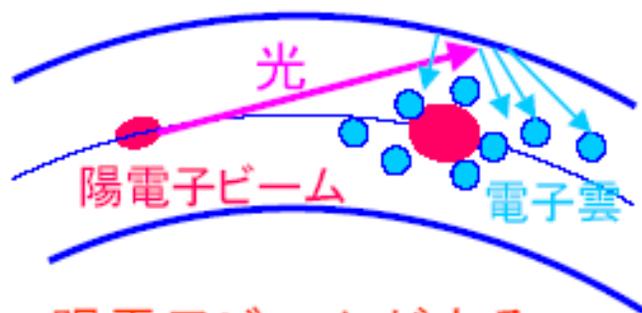


KEKB加速器の概要



“太る”ビームとの闘い

陽電子ビームよ、細くなれ。

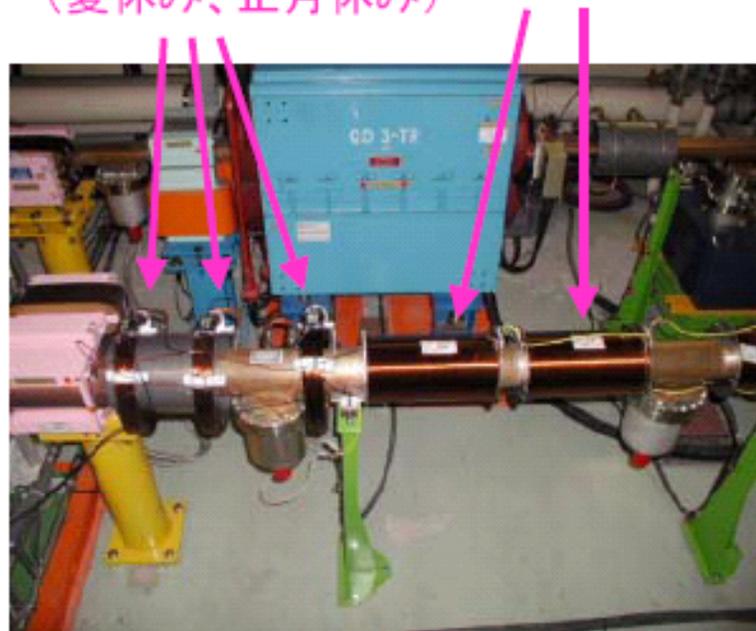


陽電子ビームが太る。
大変困った！

対策：磁場で電子雲を
壁に引き留めよ。

→大きく改善。

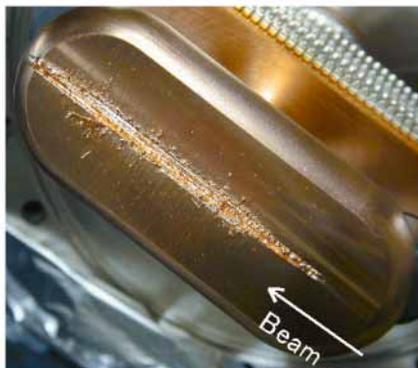
陽電子リング全周に、せっせと
ソレノイドコイルを巻いた。
(夏休み、正月休み)



大電流との闘い

大電流によるトラブル

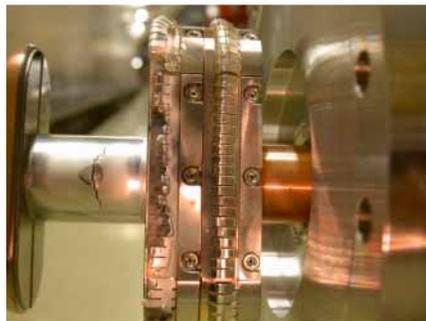
Movable Mask



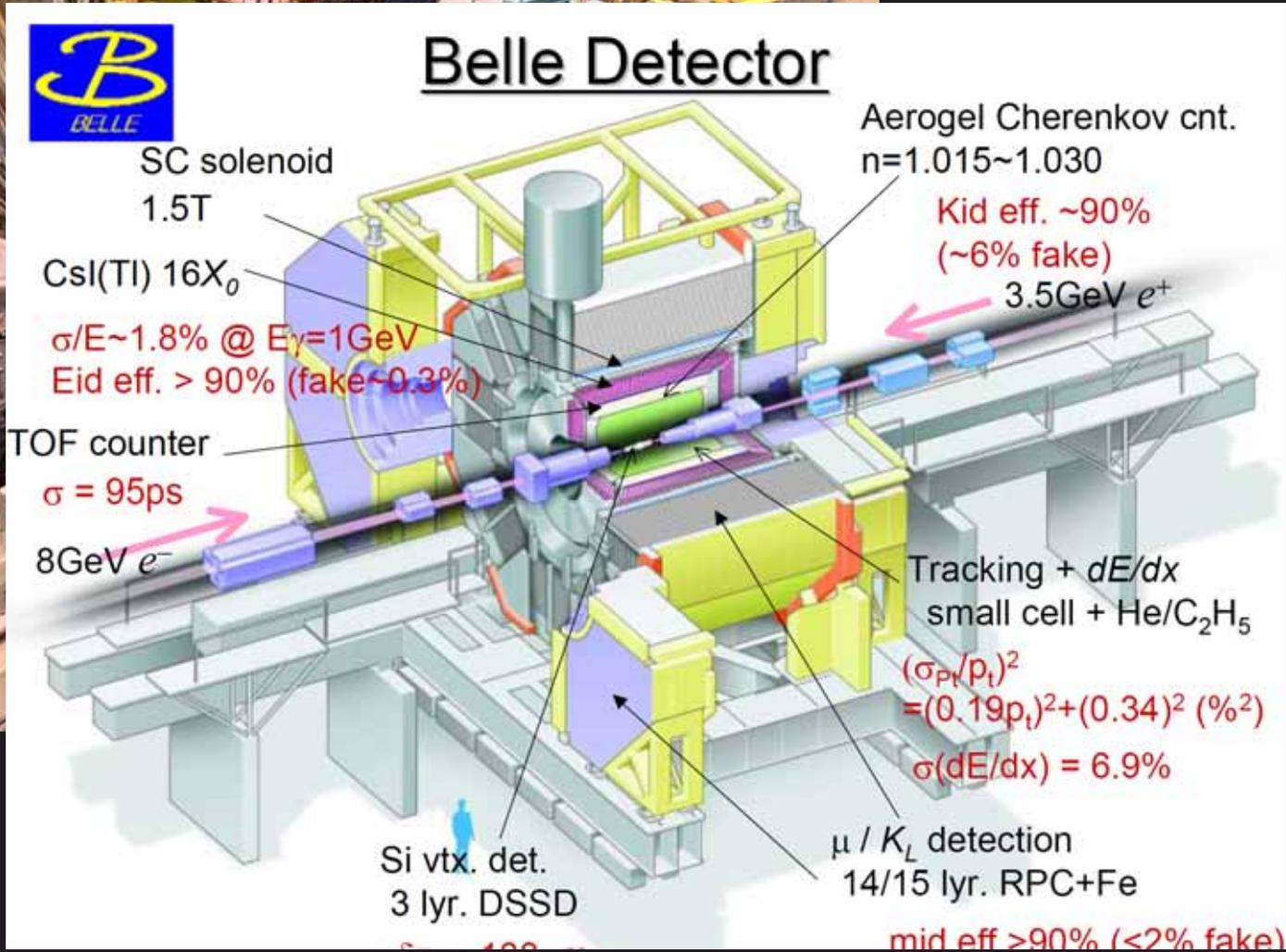
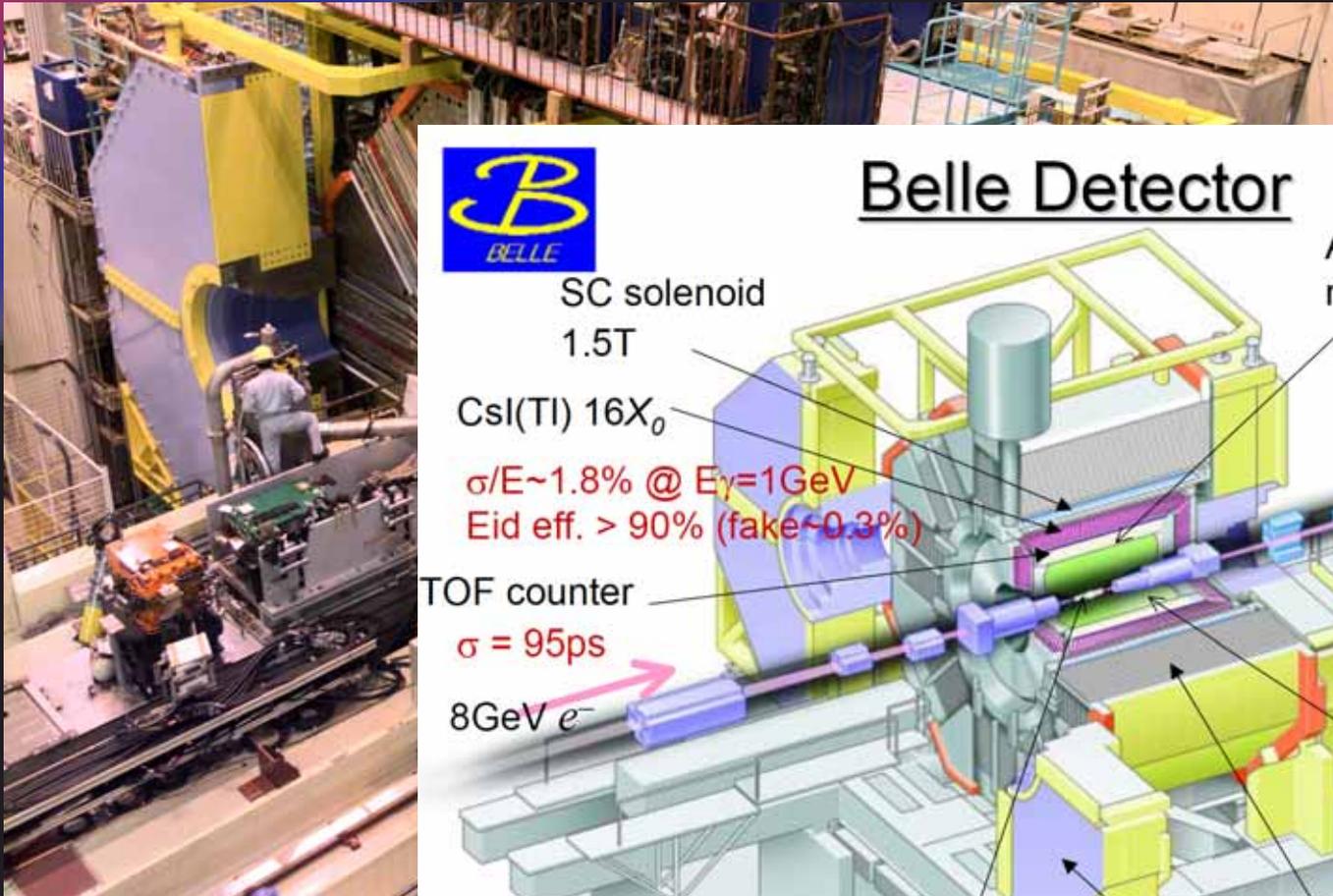
KEKB: Bellows



LER Septum Chamber



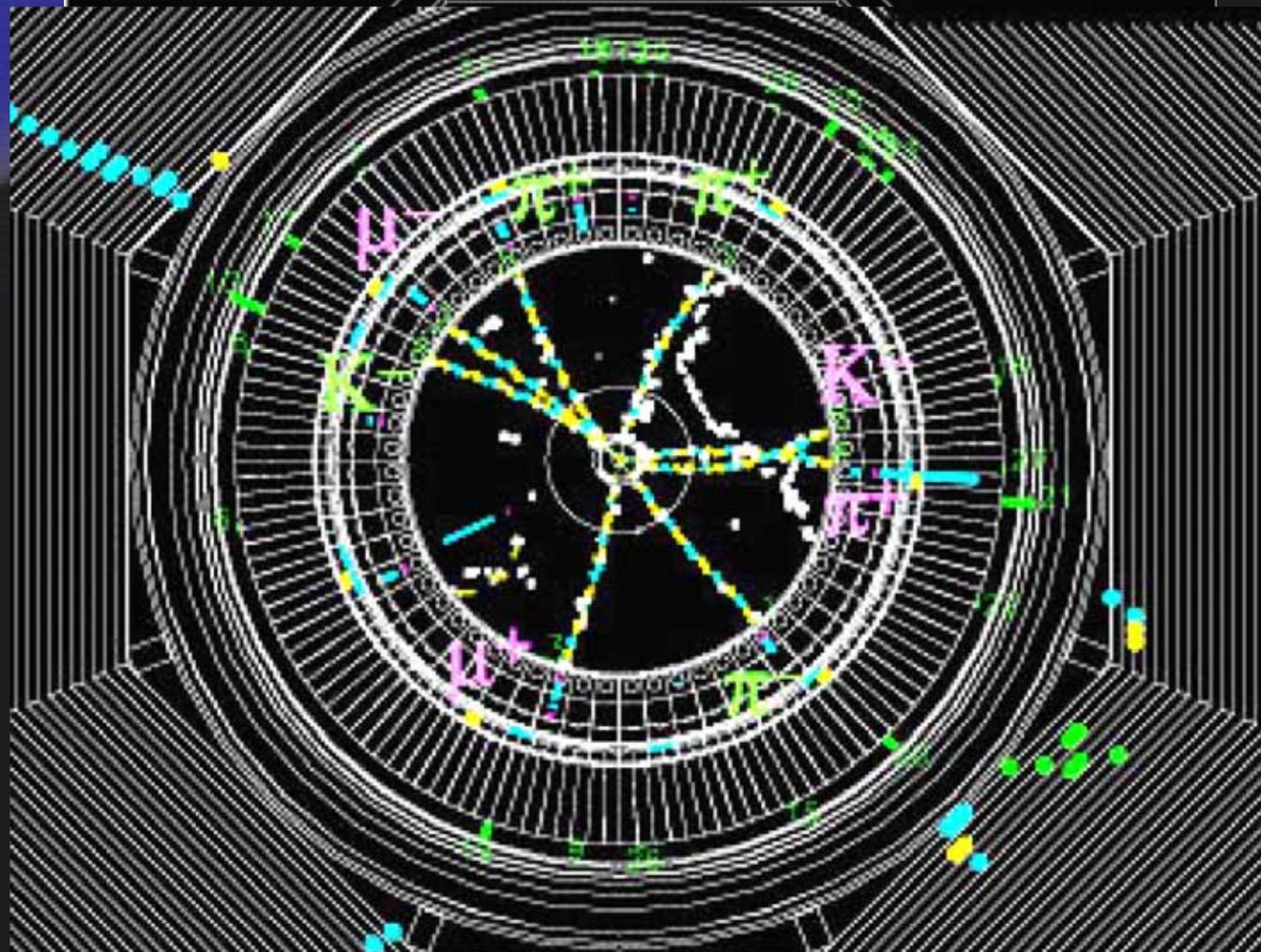
Belle測定器



B中間子崩壊の観測

BELLE

Exp 9 Run 1011 Farm 4 Event 2820
Eher 8.00 Eler 3.50 Mon Dec 18 10z36z59 2000
TrgID 0 DetVer 0 MagID 0 BField 1.50 DspVer 5.10
Prot(cm) 11.1 Etot(gev) 0.2 SVD-M 0 CDC-M 1 KLM-M 0



20 cm

「素粒子をとらえる」とは？

高空を飛ぶ飛行機の機体は見えなくても、**飛行機雲**で飛行機の飛跡は見える。

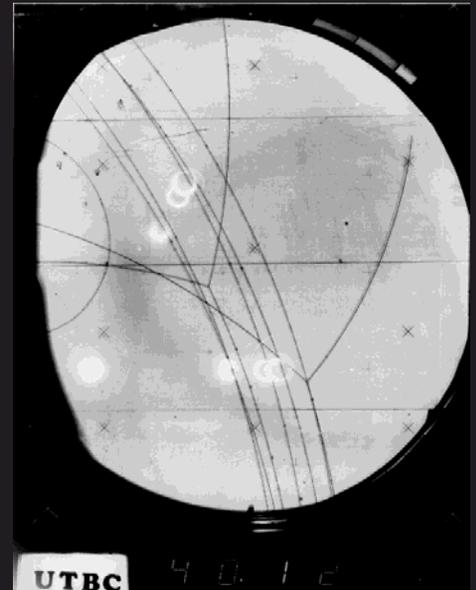


素粒子自身は目に見えなくても、それが**物質との反応**で残した**痕跡**を捉えることで、その運動や位置が観測出来る。

素粒子は様々な形でその痕跡を残す。
イオン化 **蛍光** **チェレンコフ光** など

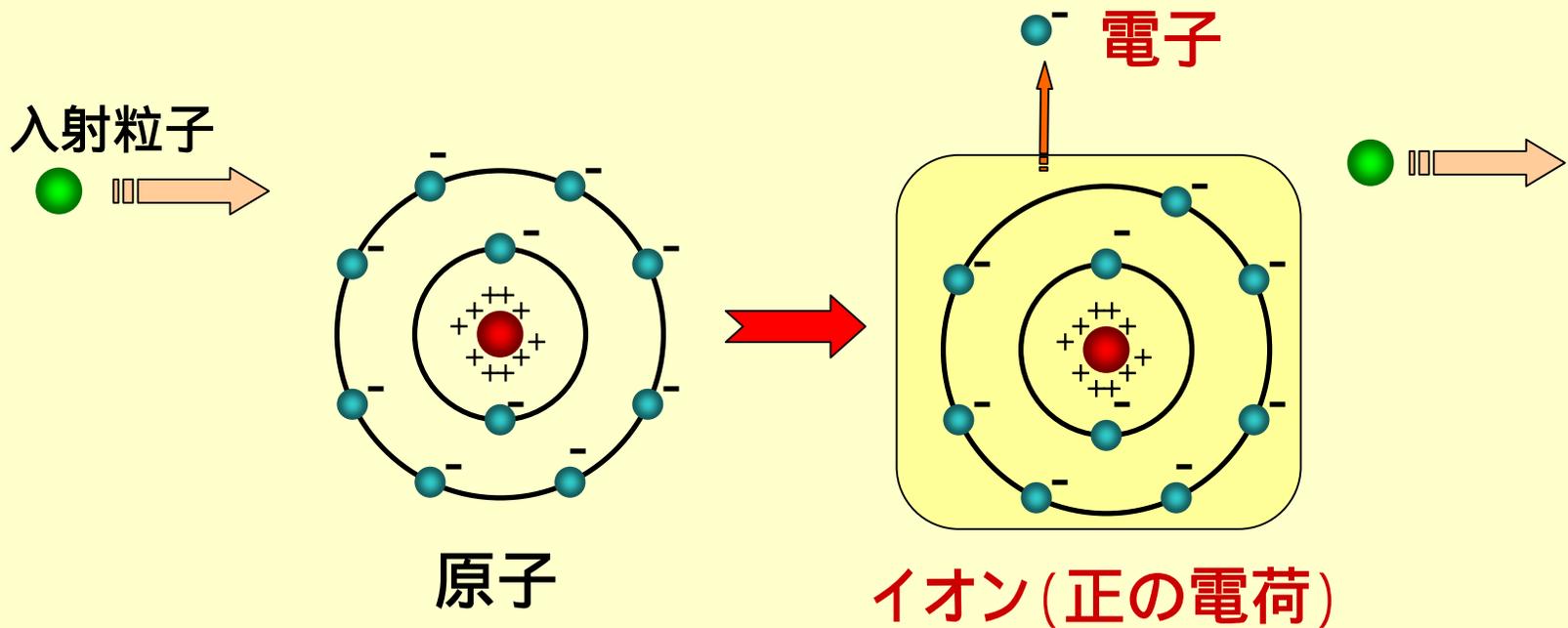
素粒子をとらえる

↳ 素粒子の { 運動(速さや方向)
 { エネルギー
 { 種類
 などを観測する。



原子のイオン化

- 入射してきた荷電粒子(電荷を持つ粒子)によって、原子核の周りを回る電子がはじき飛ばされ、**イオン**と**電子**に分かれる。



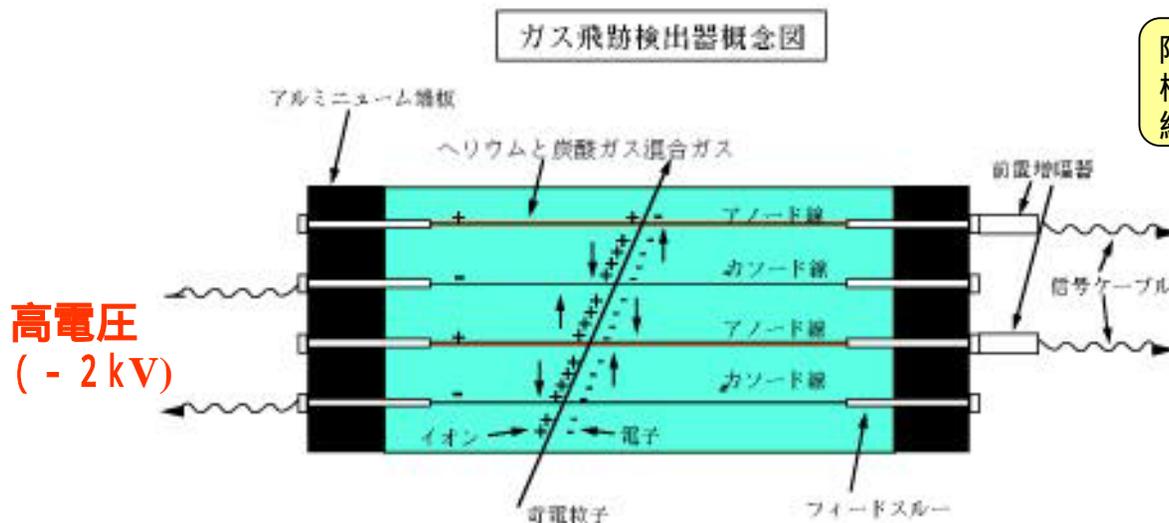
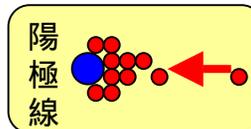
イオン化を利用した飛跡の検出

- イオン化で出来た多数の電子を集めて電気信号を得る。

多線式比例計数箱

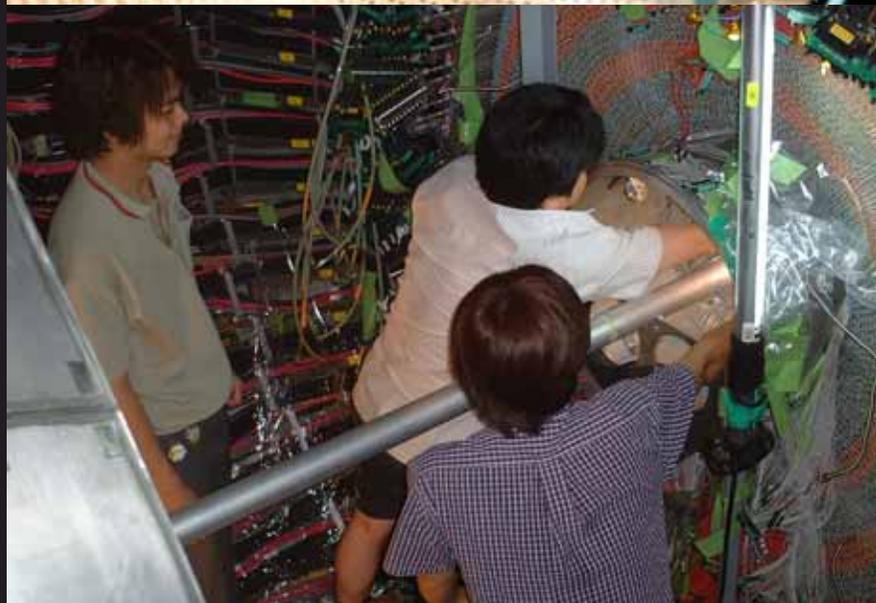
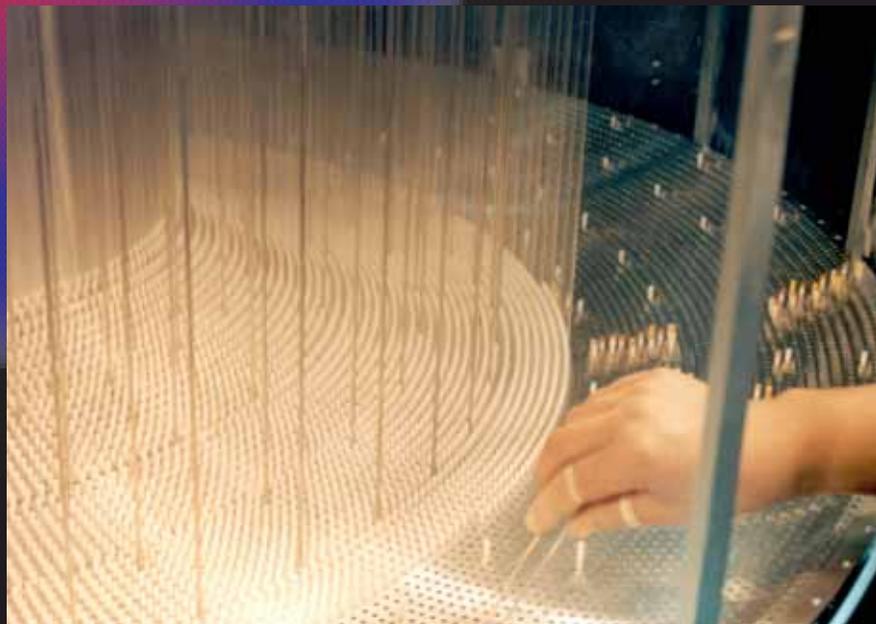
陽極線に電子が引き寄せられる。
電子は陽極線の近くで加速され、次々にイオン化を起こし、
電子を増殖する(約10000倍)。

電子雪崩



100 ~ 150 μm の精度で通過位置
が測定できる

中央飛跡検出器

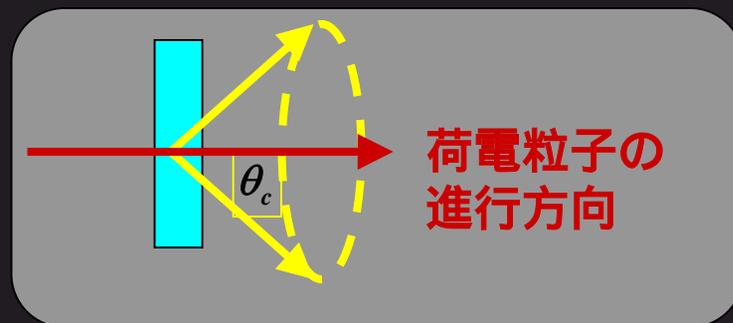


チェレンコフ光

- **チェレンコフ光の放射**
荷電粒子が透明な物質中を、その物質中での光の速さ： c/n (屈折率) より早く進むとき、衝撃波としてチェレンコフ光を放射する。

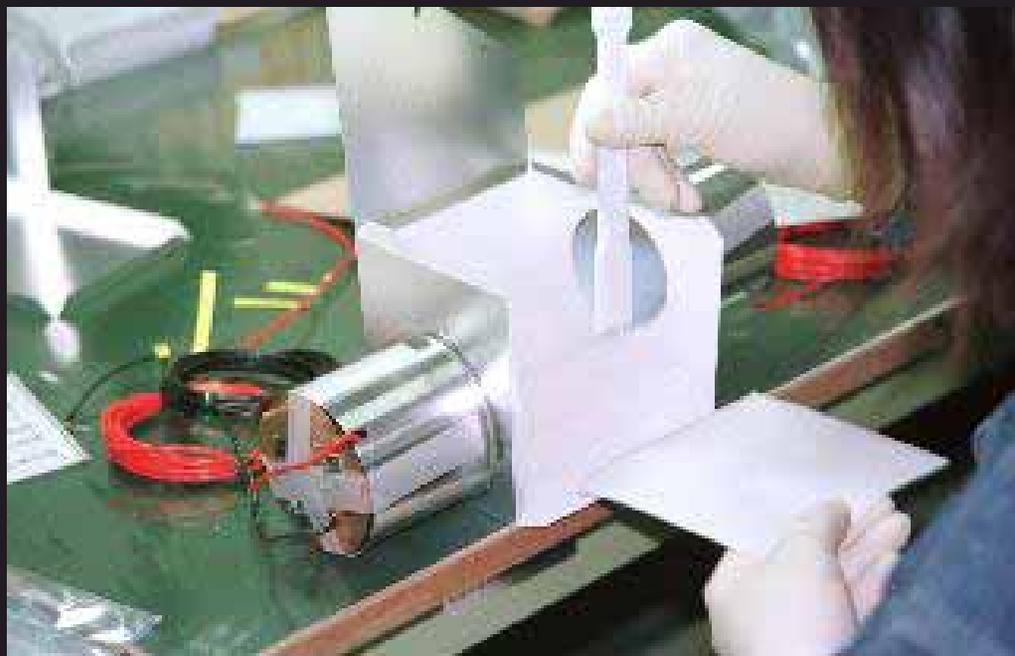
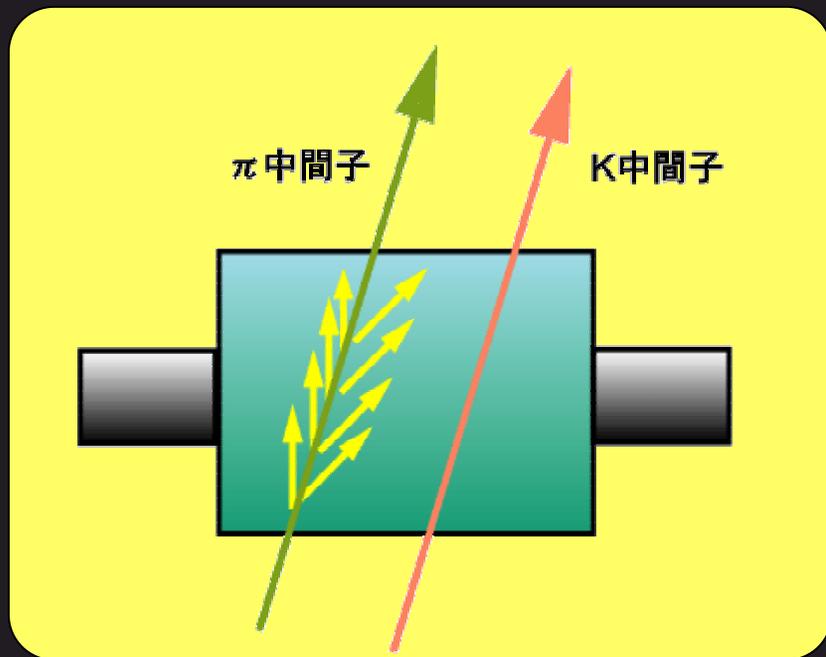


チェレンコフ光はリング状に放射される。



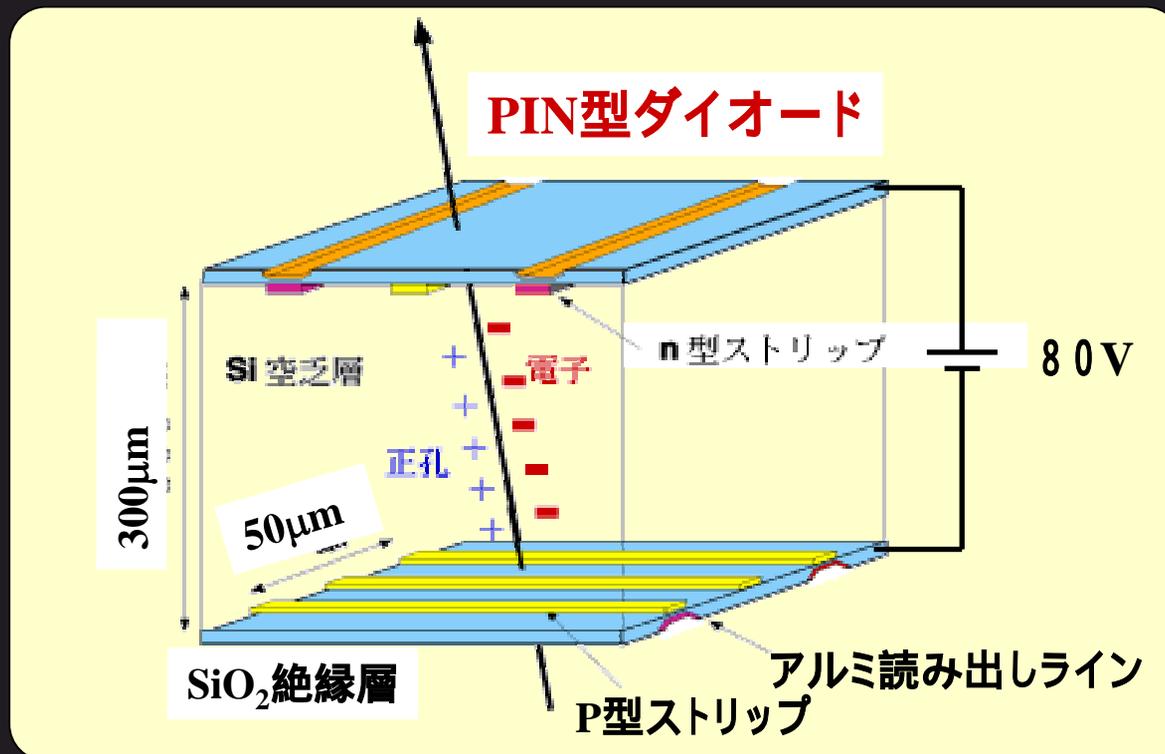
エアロジェル検出器

- 同じ運動量でも質量の違いによって粒子の速度が違う。
 - K中間子の質量は π 中間子の約3倍
- 適当な屈折率の透明物質を使えば、チェレンコフ光発生の有無で粒子の種類がわかる。
- Belleでは、**シリカエアロジェル**という特殊な物質を使う。



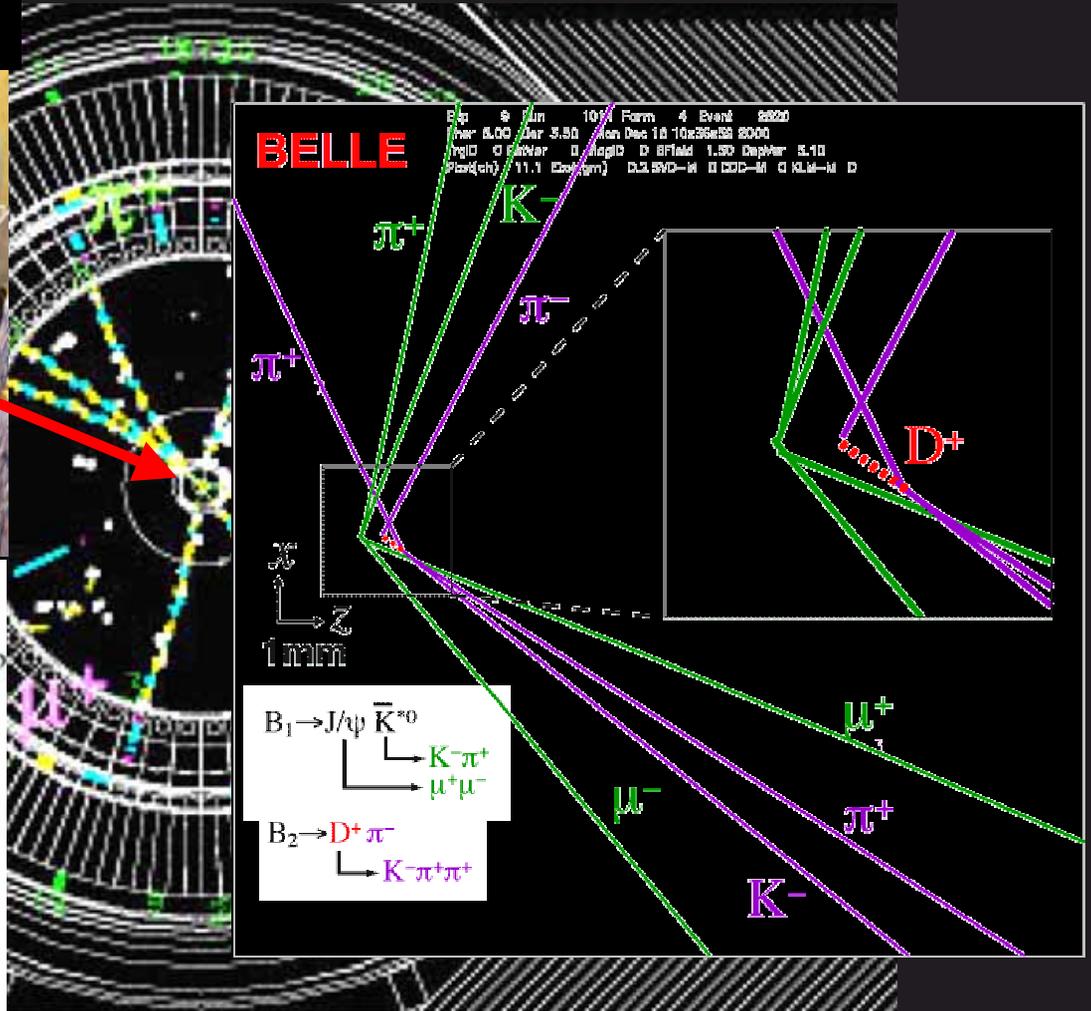
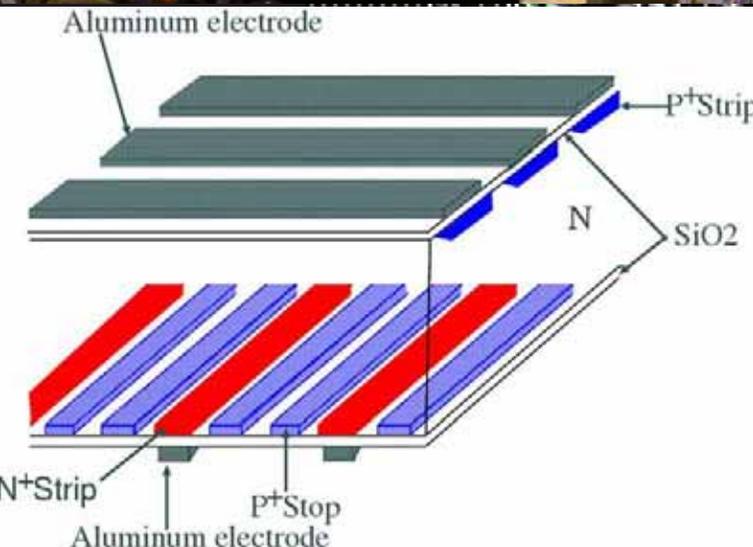
半導体検出器

- ハイテクの半導体技術を使う。
- 荷電粒子の通過位置が
10ミクロン程度の精度で測定できる。



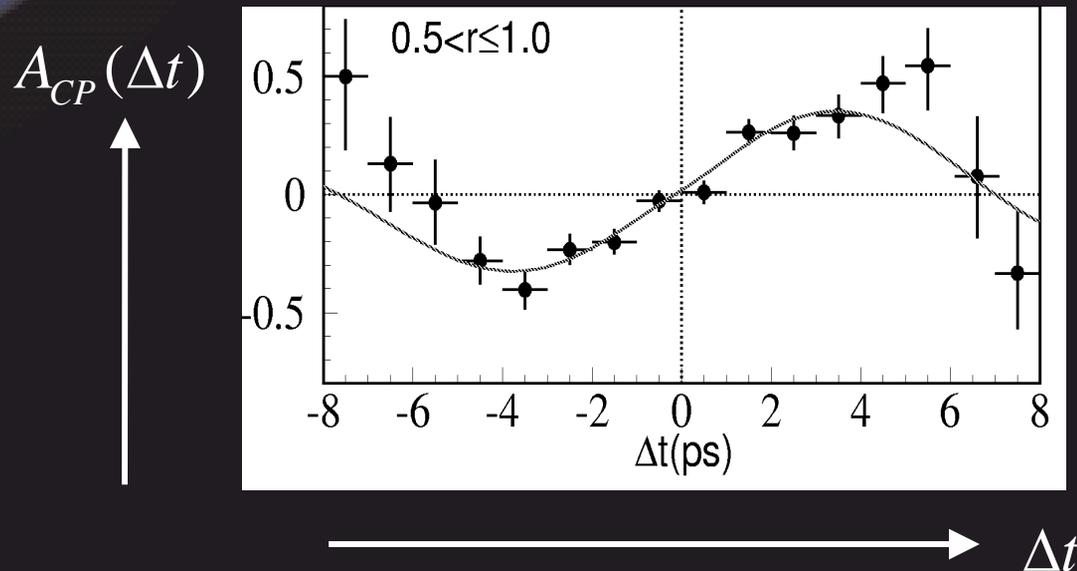
B中間子崩壊点再構成

シリコンバーテックス検出器



実際に測られたCP非対称度

$$A_{CP}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})} = -\xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta m \Delta t$$



2003夏の結果 $\sin 2\phi_1 = 0.731 \pm 0.057 \pm 0.028$

既に精密測定

わかったこと

- 初めてK中間子系以外で観測。

粒子と反粒子は対等でないことを確認(決定版)

- 小林益川理論の予想と一致。

より厳密なテストへ。

- これで、小林益川理論の予言が確認された。
 - クォークは6種類(当時知られていたクォークは3種類)
 - B中間子崩壊での大きなCPの破れ

次は何だ？

深まる謎

- 素粒子の“標準模型”では、物質優勢宇宙の生成が説明できない。
 - CPの破れは持っているが、“足りない”。
 - CPの破れの素は他にもあるかもしれない
 - バリオン数非保存。
- 標準理論のパラメーターは、実験で決めないといけない(不満)。
 - ➡ **新しい物理(新しい素粒子)の探索へ**
ヒッグズ粒子、超対称性(SUSY)粒子

“新しい現象”か？

電子衝突時

「標準理論」外の現象か

大型加速器で観測

「Bファクトリー」と呼ばれる大型加速器で宇宙誕生時のなぞを探る実験を続けている文部科学省高エネルギー加速器研究機構（KEK、茨城県つくば市）などの研究グループが、すべての物理現象の基礎となる「標準理論」では説明できない現象を見つけた可能性が出てきた。未知の粒子の存在も想定される。同グループが12日、米シカゴ近郊で開かれた国際学会で発表した。もっとも確度を高める必要があるが、30年間、揺らぐことなかった標準理論を覆す第一歩となるかもしれない。

Bファクトリーでは、光速近くまで加速した電子と陽電子を衝突させてB中間子と反B中間子をつくり、1兆分の1秒という瞬時に両中間子が崩壊する過程を観測している。

今回、B中間子が陽電子とKショート粒子に壊れる崩壊過程を分析した結果、宇宙誕生のときとなる「CP対称性の破れ」の量が、標準理論で導かれる量と大きく違っていた。統計的にみて「最低限・9%の確率で導く」との結果が出た。物理学では最低でも90・999%の確率でない限り確実と見ない。Bファ

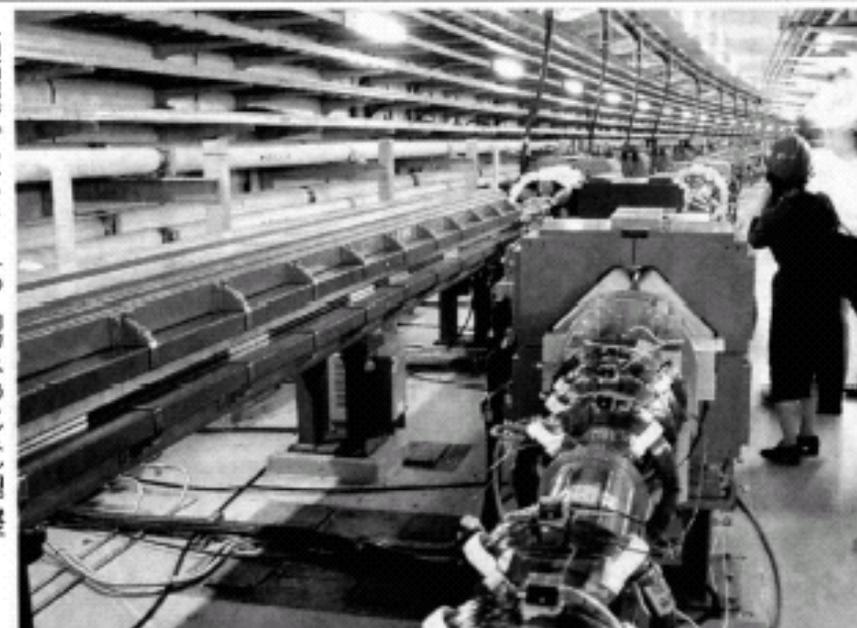
CT対称性の破れ 宇宙誕生時には、マイナスの電子とプラスの陽電子のうちに、粒子と反粒子が同量生じたと考え、両者は出合えば消滅する。しかし、粒子が生き残り、現在宇宙にある物質はすべて粒子でできている。「CP対称性の破れ」によってその理由が説明できる。

キーワード

標準理論 基本粒子クオークと、電子やニュートリノなどの軽粒子で、すべての物質ができていくと考えられる物理理論。小林・益川理論はクオークと軽粒子がそれぞれ8種類ずつ存在するという説で、標準理論の重要な部分を構成する。

クトリーでは今後、実験データの蓄積に余力を

実験共同責任者の山内



大型加速器「Bファクトリー」の1周約3kmのトンネル内。電子の周回リング（左）と陽電子の周回リング（右）が並んでいる。茨城つくば市の文部科学省高エネルギー加速器研究機構。

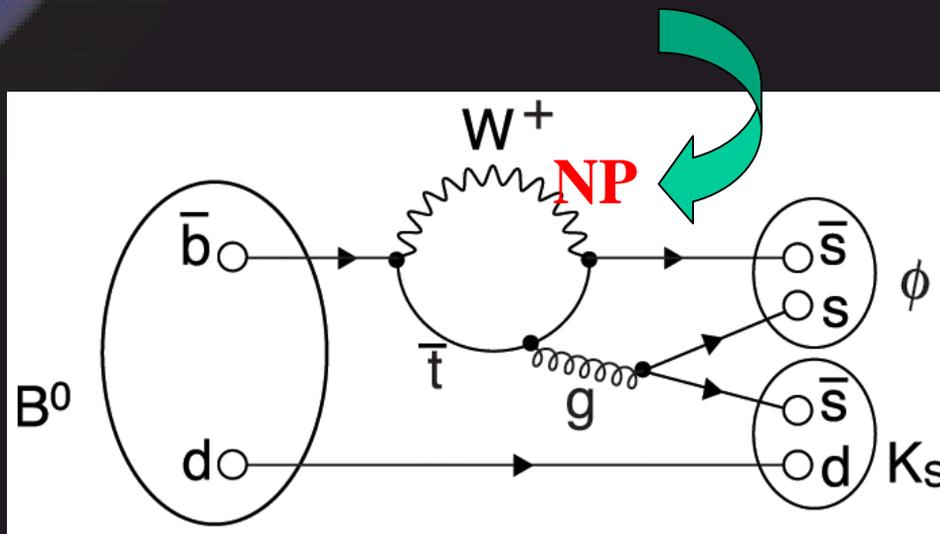
正則KEK教授は「標準理論を超える仮説『超対称性理論』が想定する未知の粒子が関与していることも考えられる」と話す。

研究グループは01年に、別の崩壊過程で「CP対称性の破れ」の存在を確認。これは小林誠・KEK美観子素子核研究

所長と益川敏英・京都大名誉教授が7年に予告した現象で、小林・益川理論の正しさが証明された。この時点では標準理論との矛盾はなかった。データ蓄積待つ Bファクトリーの実験を指揮した三田一郎・名古屋大教授（素粒子理論）の語。米スタンフォード線形加速器センターも同じ実験をしているの現象を説明する理論の検証を始めた。

$B^0 \rightarrow \phi K_S$ 崩壊でのCPの破れ

- B中間子の崩壊には色々な種類があり、特にペンギン崩壊では、重い新粒子が中間状態に入る可能性がある。

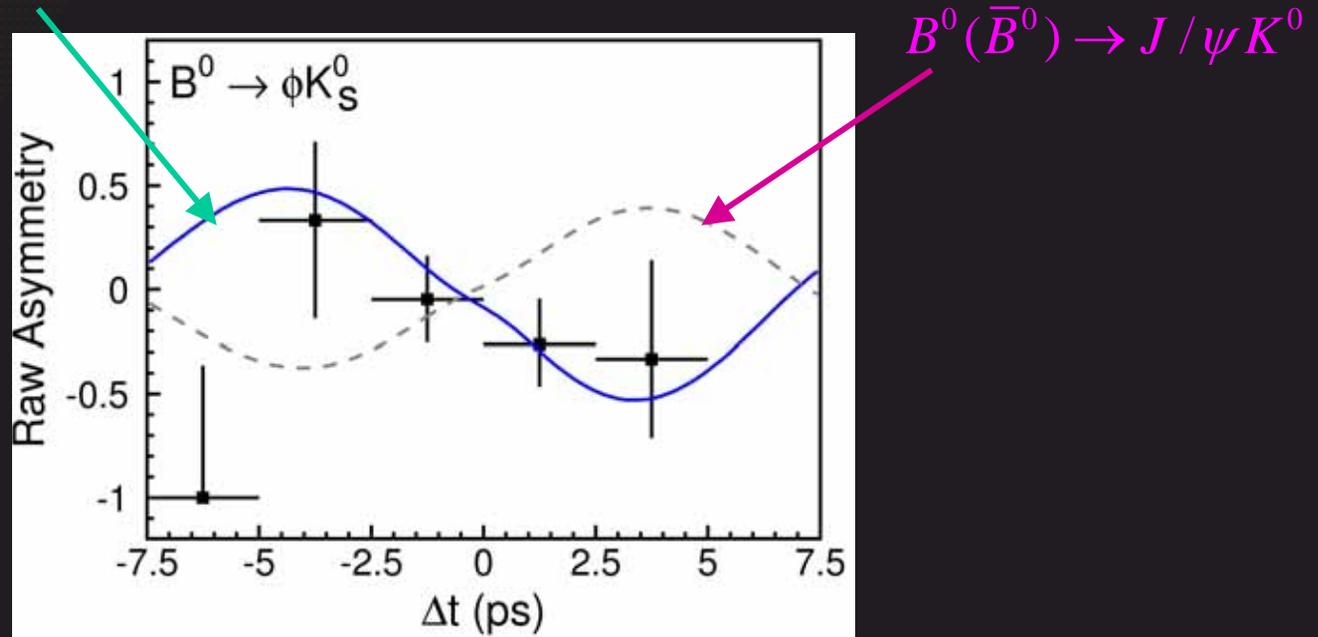


- 標準理論では $CPV(B^0 \rightarrow \phi K_S) = CPV(B^0 \rightarrow J/\psi K_S)$
- 新粒子がCP対称性の破れを引き起こすと
 $CPV(B^0 \rightarrow \phi K_S) \neq CPV(B^0 \rightarrow J/\psi K_S)$

どうなった？

$B^0 \rightarrow \phi K_S$ 崩壊でのCPの破れ(2003年夏)

$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \phi K_S^0$ 崩壊におけるCP非対称度



2003夏の結果 $\sin 2\phi_1 = -0.96 \pm 0.5^{+0.08}_{-0.05}$

統計的なゆらぎによってこのようなズレが生じる確率は0.1%以下

現在更にデータを蓄積中。新しい結果が楽しみ！

素粒子実験の展望

現代素粒子世界

超対称世界

大統一の世界



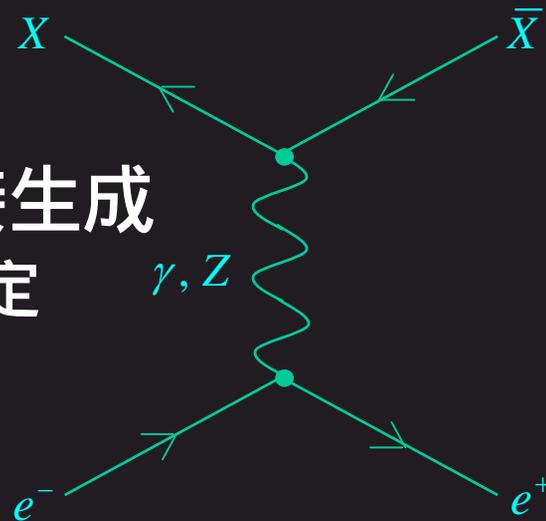
ヒッグス粒子

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

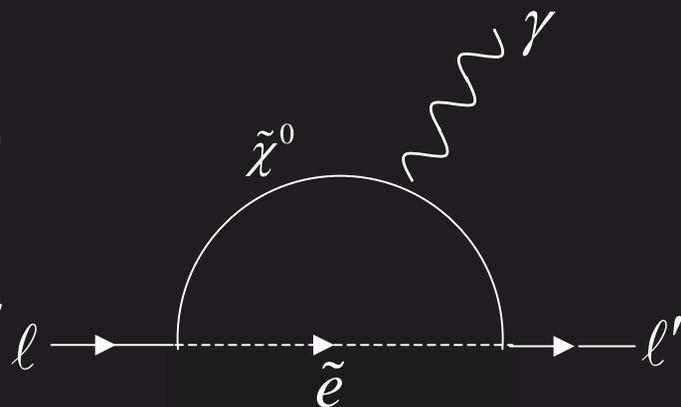
- LHC (CERN) 2007年完成予定
 - リニアコライダー 計画中
- など



• インテンシティーフロンティア

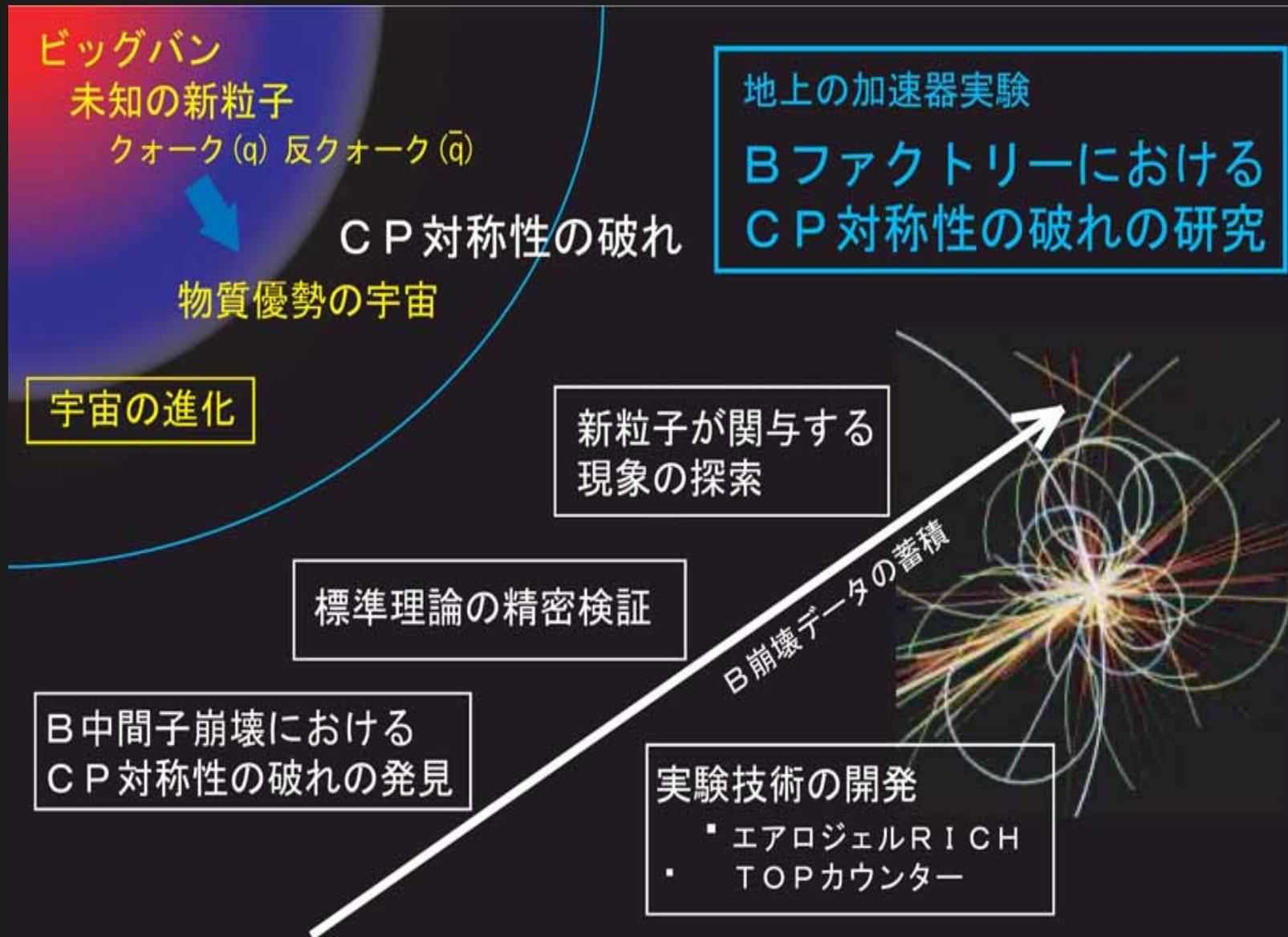
ループを使って重い新粒子を検証

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

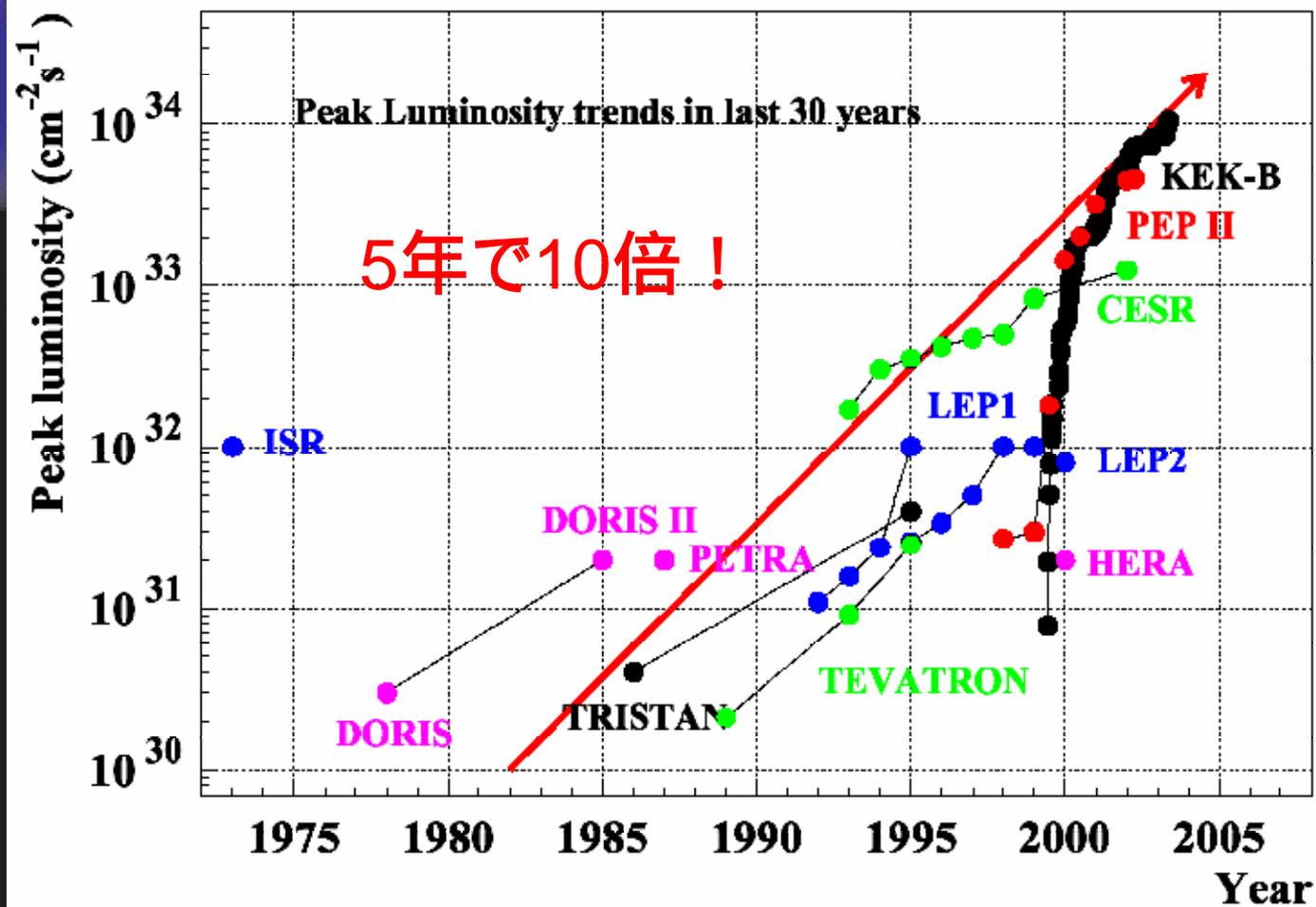


B崩壊、K崩壊、 μ 崩壊、 τ 崩壊、ニュートリノ

Bファクトリー研究



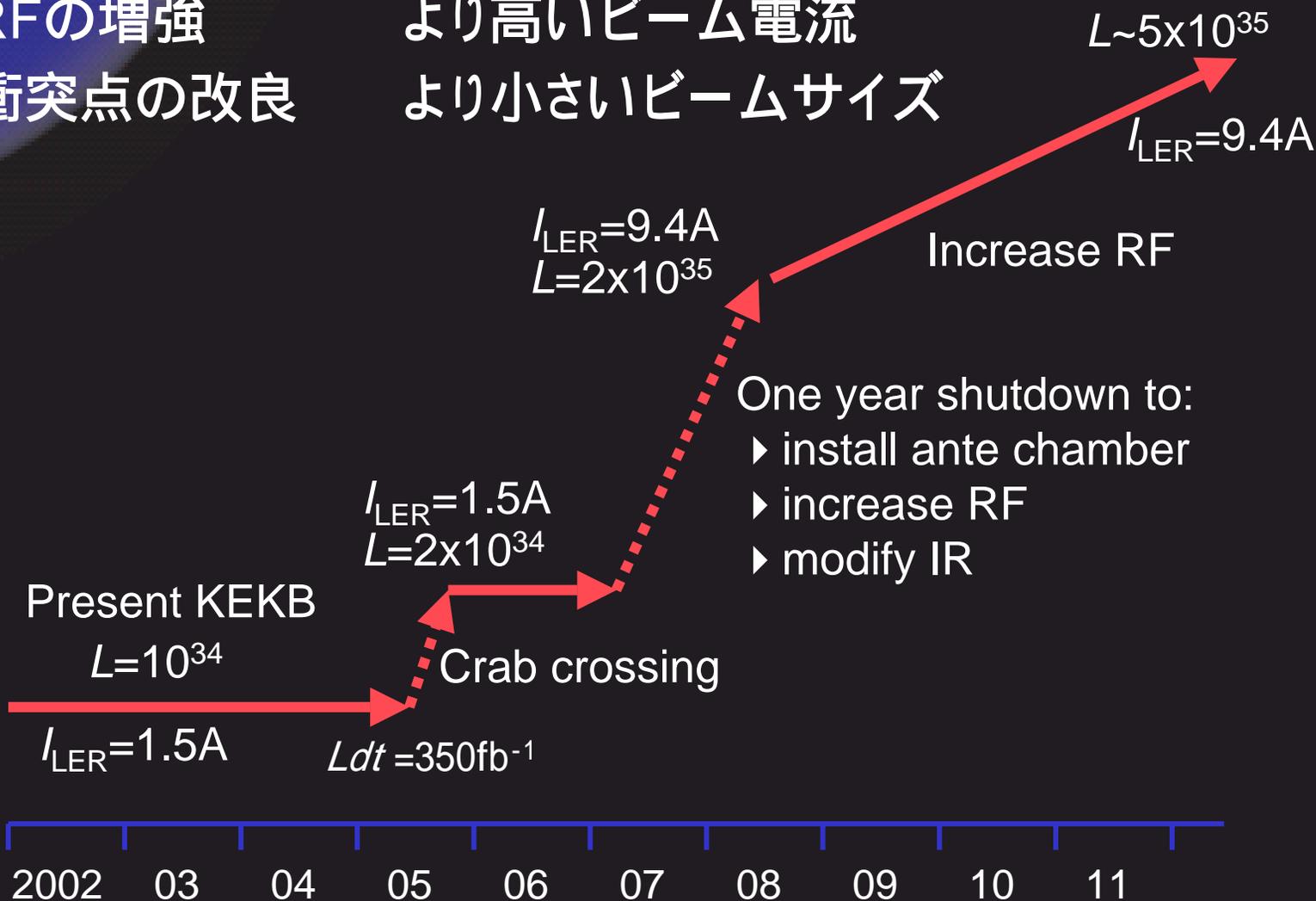
加速器ルミノシティの変遷



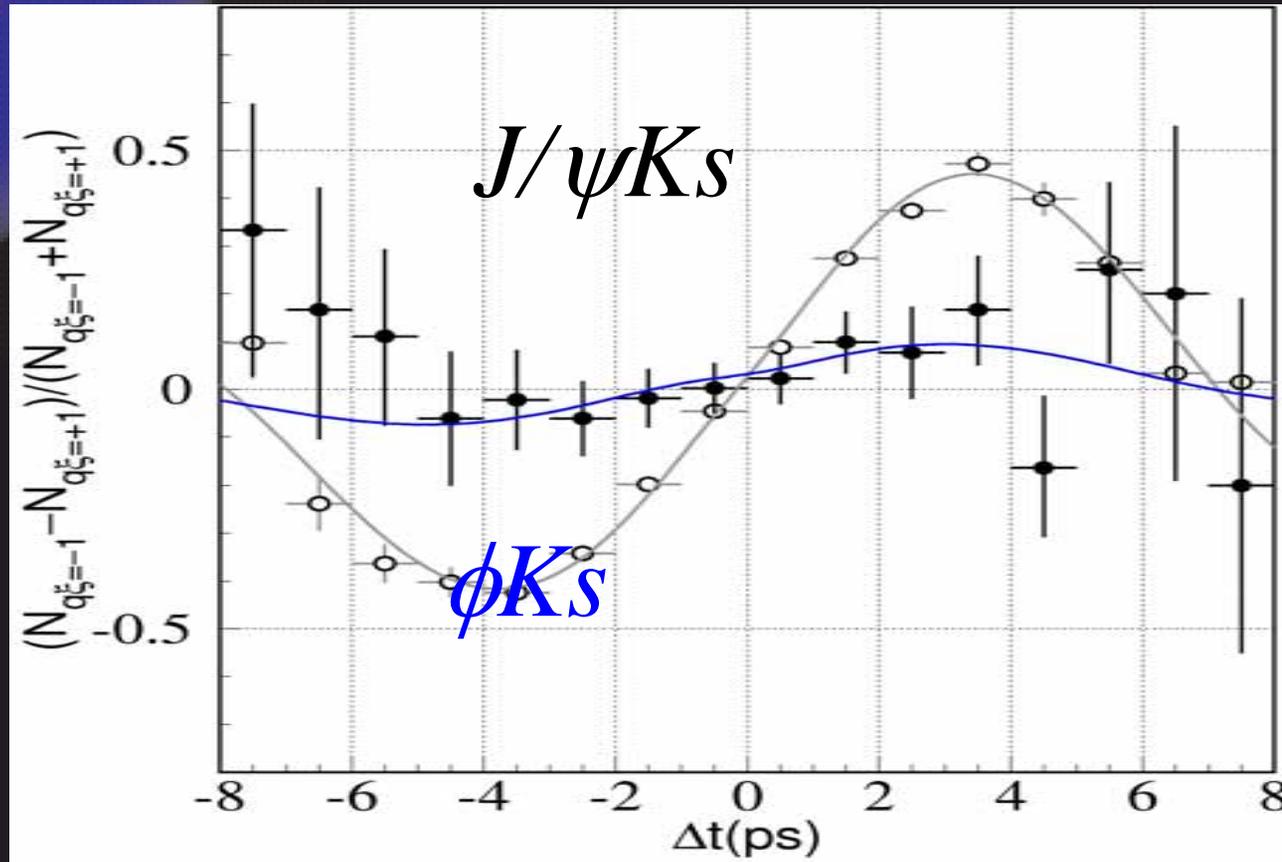
スーパーBファクトリー

目標ルミノシティ = $5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- RFの増強 より高いビーム電流
- 衝突点の改良 より小さいビームサイズ



スーパーBファクトリでは



もし真の値が、現在(昨年8月)のBelleとBaBarの平均値のままで、 5 ab^{-1} のデータがあると、 ϕK_s モードだけで 6.2σ の有意な差が観測できる

LHC (CERN)

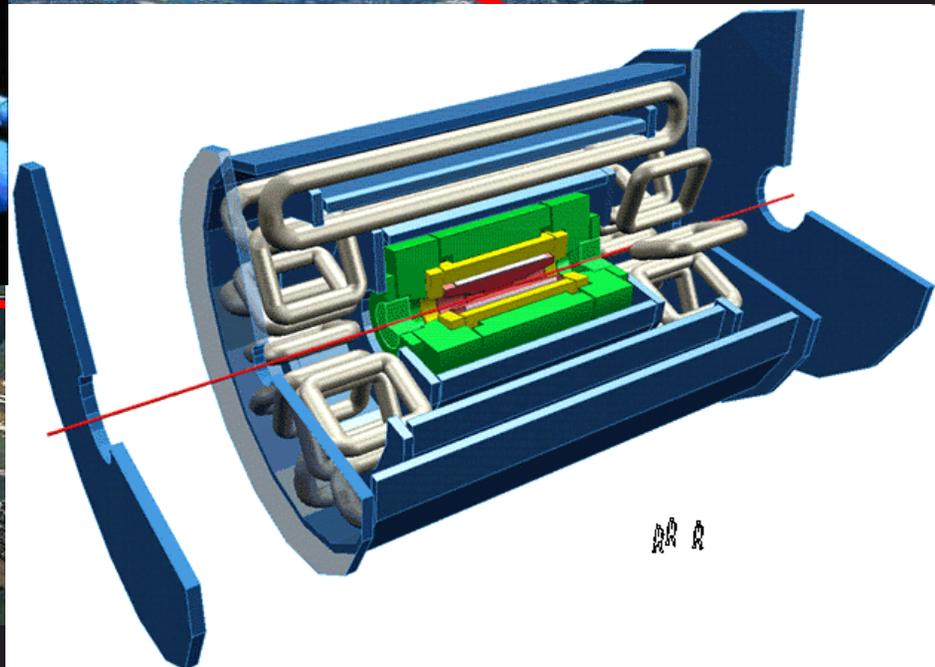
- 7TeV 陽子 × 7TeV 陽子, 2007年完成予定



Jura mountains



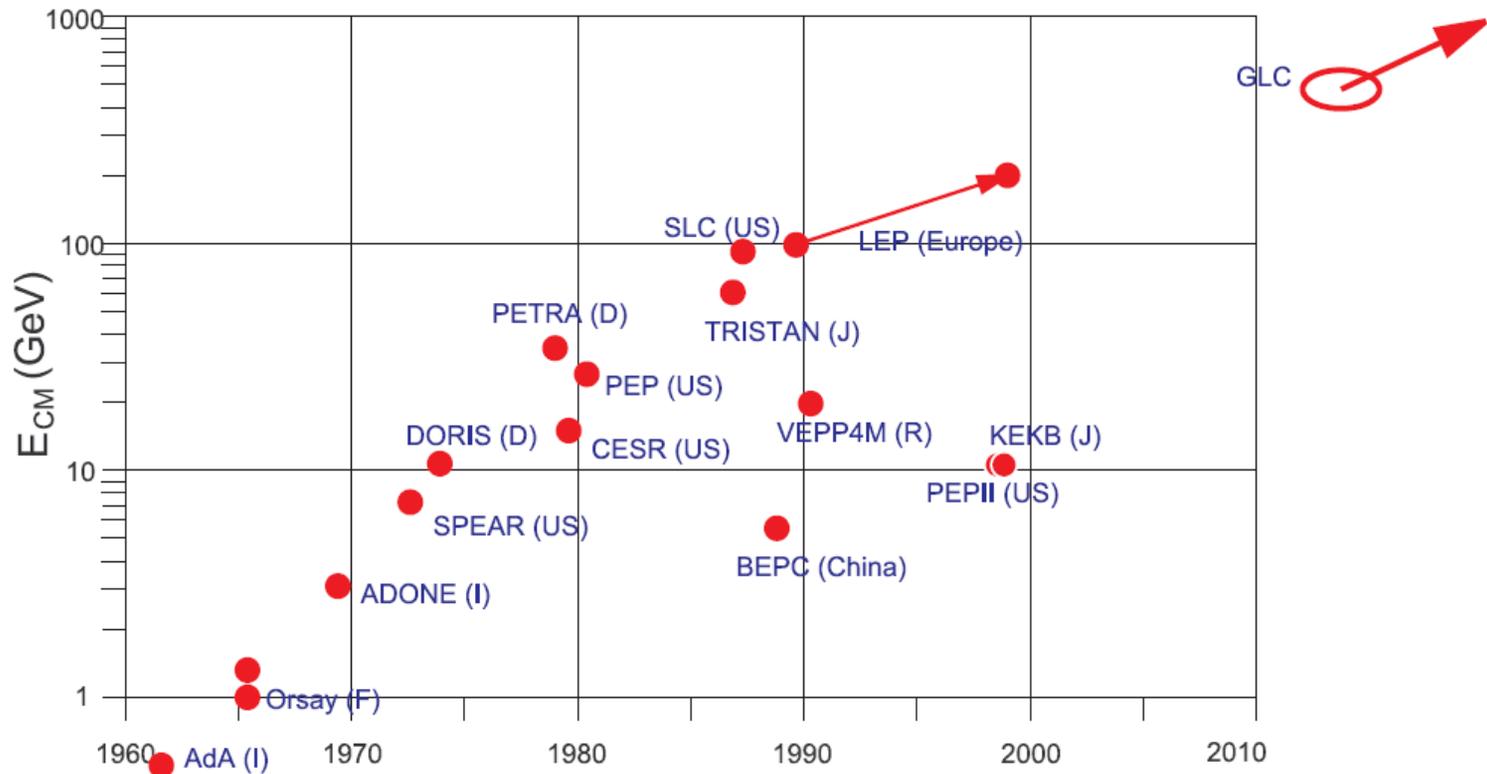
Geneve Airport



RR R

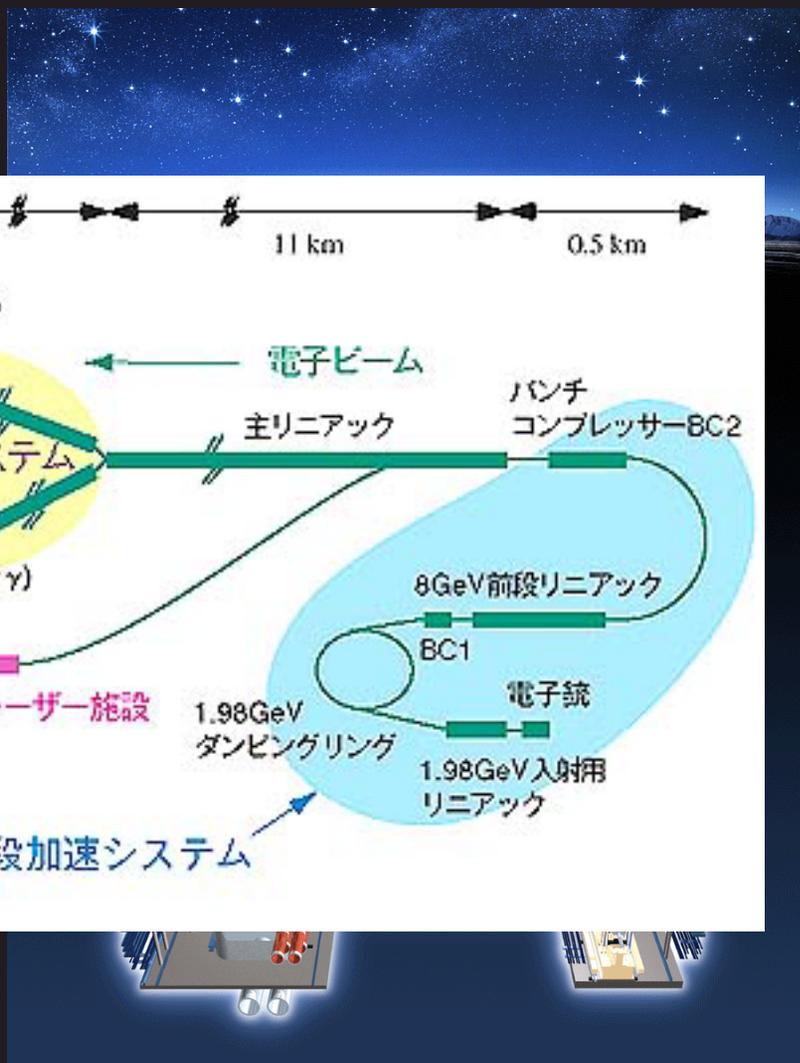
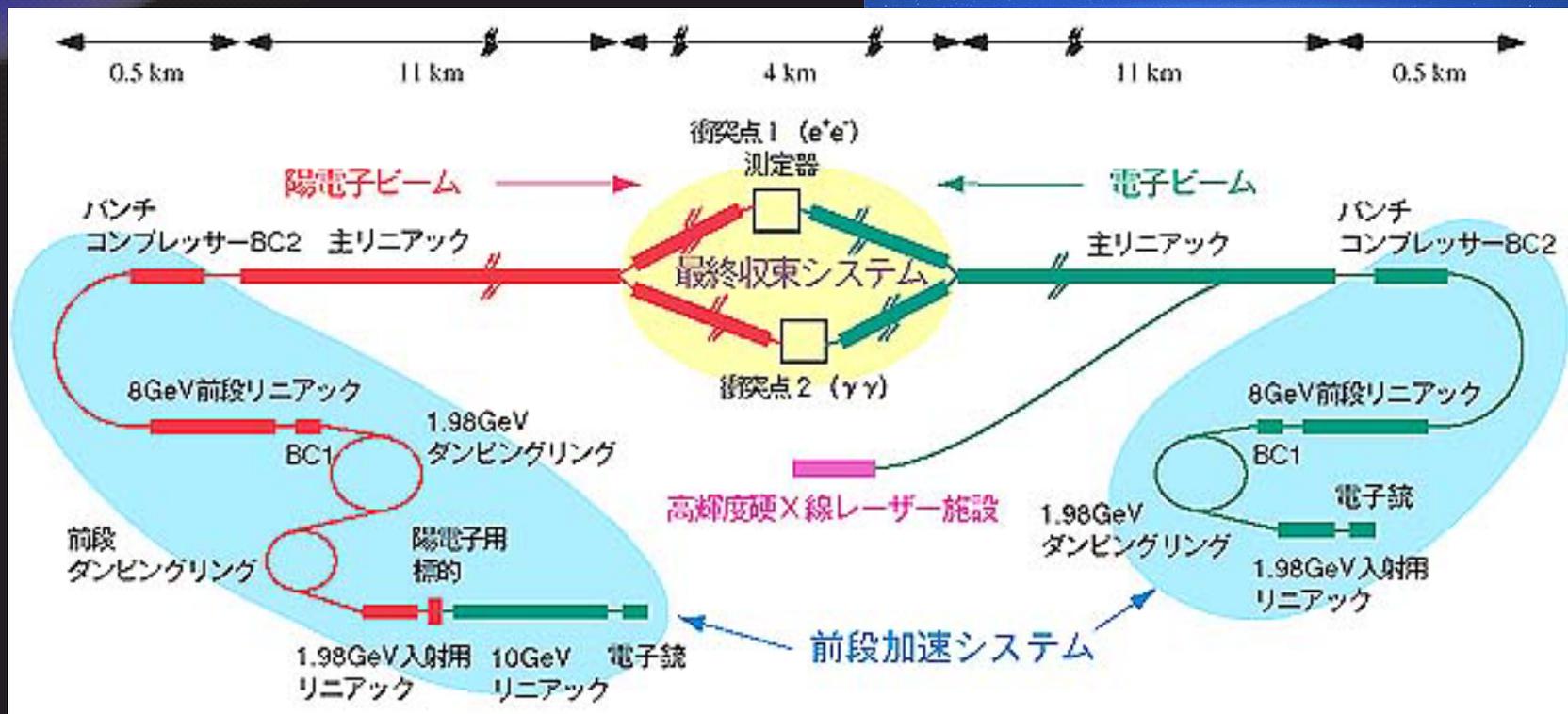
電子・陽電子コライダーの変遷

World e^+e^- Colliders



リニアコライダー

- 電子 - 陽電子線形コライダー 500GeV→TeV



まとめ

- B中間子崩壊におけるCP対称性の破れの発見によって小林益川モデルが確立した。
- Bファクトリー—第2幕の幕開け
 - 標準理論のより厳密な検証
 - 新しい物理の探索 ← 既に兆候か？
- 21世紀の素粒子探求
 - ヒッグズの確認、超対称性粒子といった新粒子を求めて、さらに宇宙初期へアプローチする。

バックアップ

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

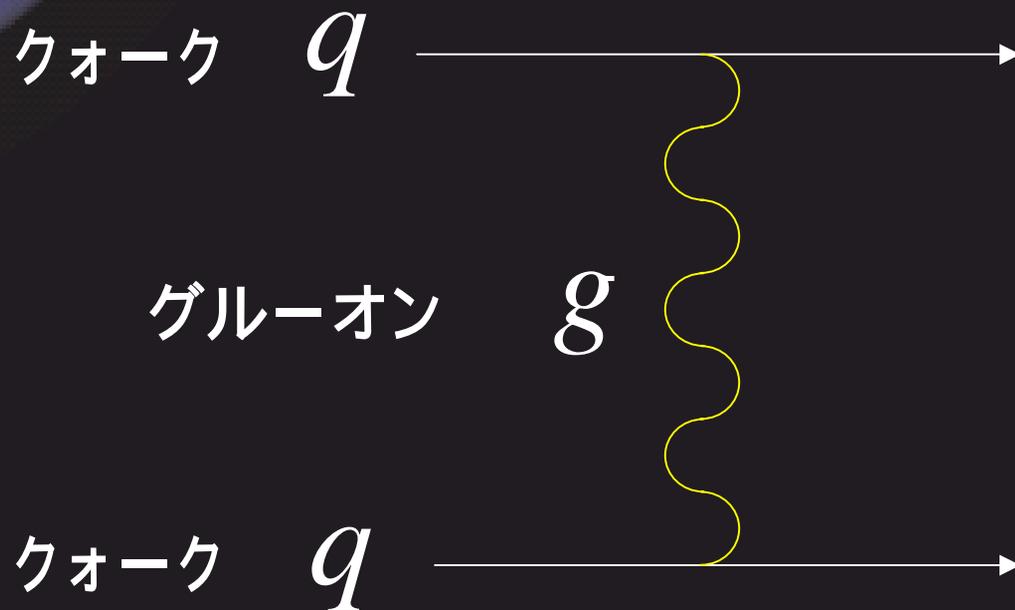
10^{-5}

- 重力

天体と天体を結びつけて銀河を形成

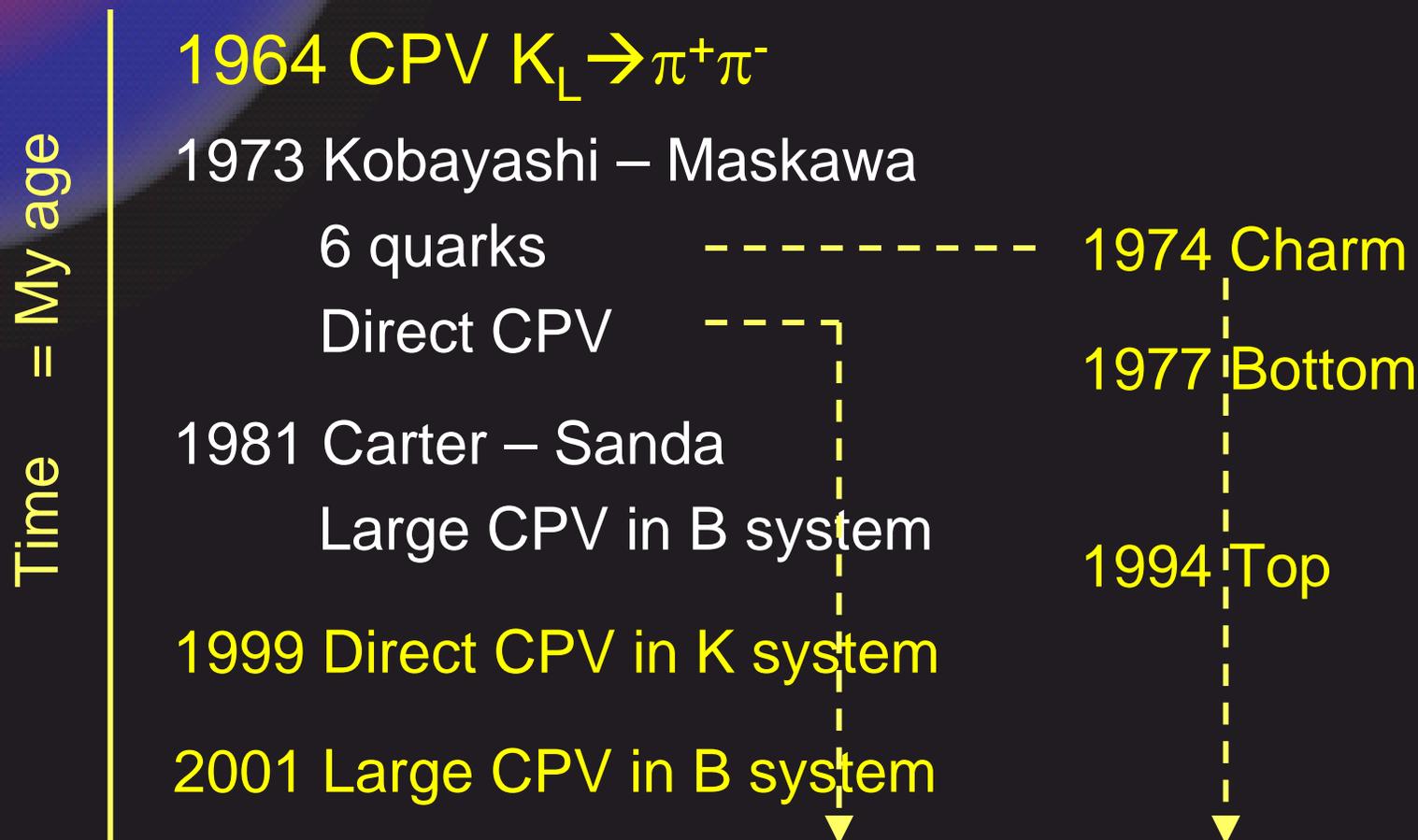
10^{-40}

強い力とグルーオン



素粒子物理でのCPの破れ(歴史)

Predictions and Discoveries



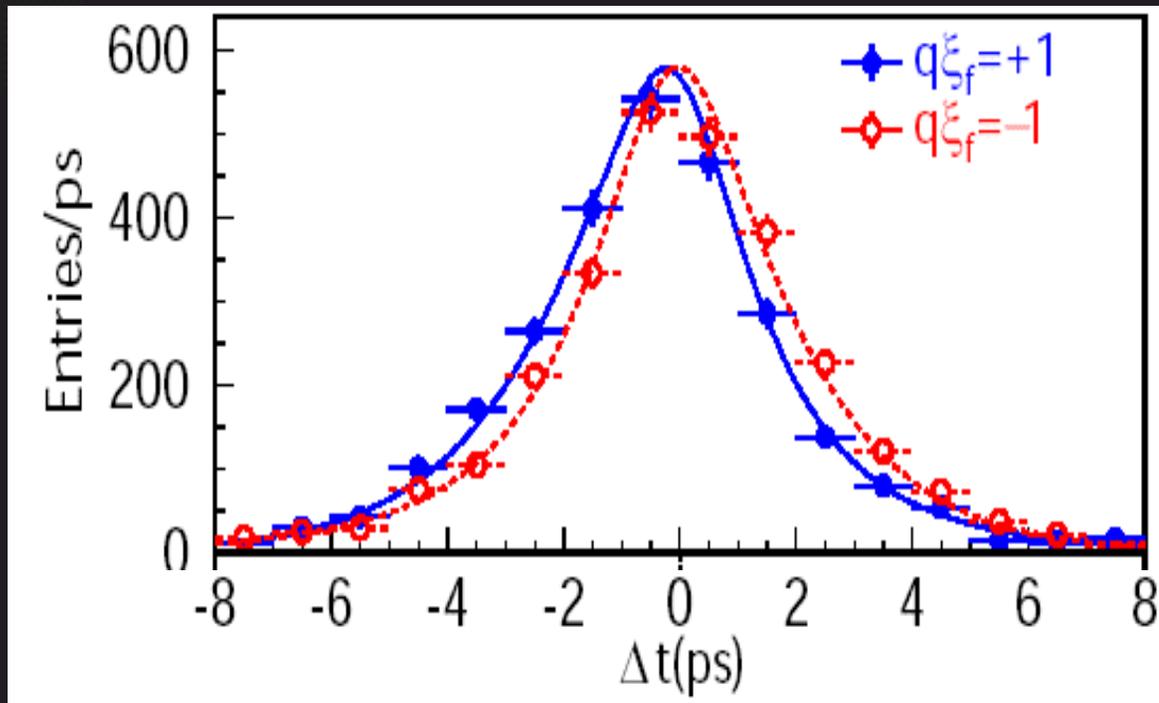
All major predictions of KM now confirmed.



What comes next ?

CP対称性の破れ:観測結果

事象数



崩壊時間(ピコ秒)

素粒子実験のフロンティア

- **Energy** 新粒子の直接探索
 - Tevatron (FNAL), HERA(DESY)
 - LHC(CERN)
 - GLC, CLIC ?
- **Intensity** 新粒子が引き起こす現象の探索
 - KEKB, PEP-II(SLAC) → Super-B ?
 - JPARC(KEK/JAERI) – K, μ , ν
- **Mass** 数で勝負 ex.) 陽子崩壊 → ニュートリノ
 - Super-K → Hyper-K ?

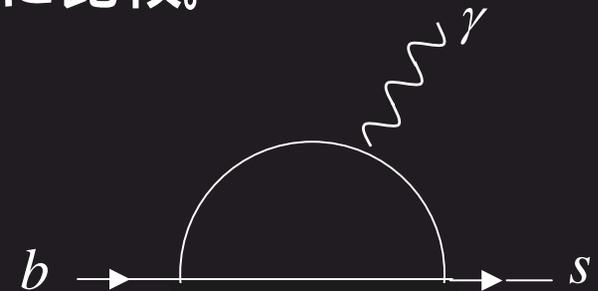
素粒子物理における新しさ ~ 新しい粒子の存在

高輝度Bファクトリーで目指すもの

- CP対称性の破れの測定

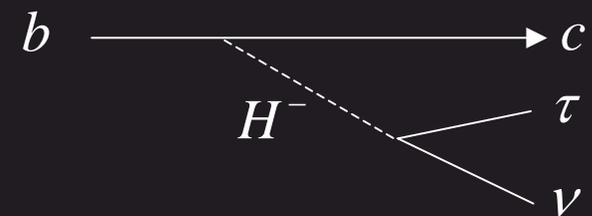
色々な崩壊に現れるCPの破れを精密に比較。

- 標準理論の厳密な検証
- 新しい物理の探索
- 新しい物理のフレーバー構造



- B中間子の稀崩壊探索

- FCNC 崩壊 $b \rightarrow sll, sv\bar{\nu}$ etc.
- タウ崩壊 $b \rightarrow c\tau\nu, \tau\nu$ etc.

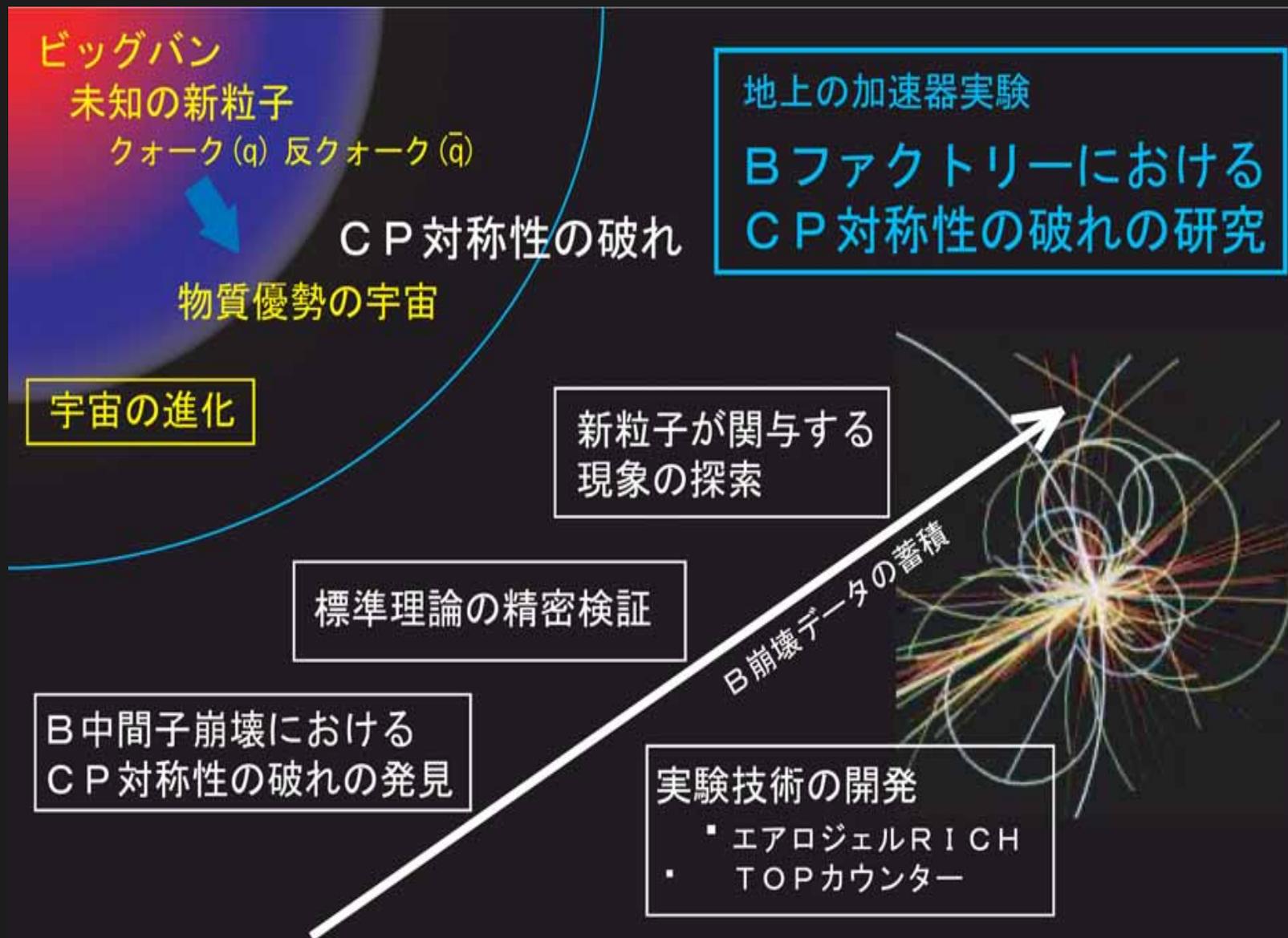


- タウの稀崩壊探索

- LFV

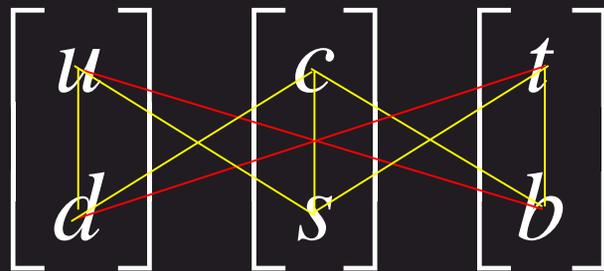
ループ効果を使った
高エネルギー粒子の探索

まとめ

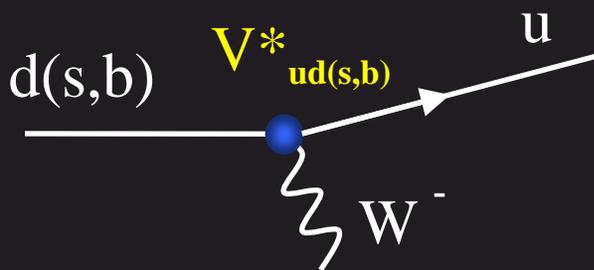


小林-益川モデル

- 3世代6種類のクォークがあれば、弱い相互作用でCPは破れる。
- 小林-益川行列：
 - 弱い相互作用ではクォークは仮想Wを出して、他のクォークに変化
 - 3X3ユニタリー行列には、3つの回転角と一つの複素位相が含まれる



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



弱い相互作用の
固有状態

小林・益川
(KM)行列

質量の固有状態