

CDF実験による B_s 中間子の粒子反粒子振動の初の観測

金 信弘 (筑波大学 物理学系)

for the CDF collaboration

2006年4月12日

於KEK

1. CDF実験の概要
2. B_s 中間子の粒子反粒子振動測定の物理的意義
3. 測定方法
4. 結果と展望

2TeV陽子反陽子衝突実験(CDF実験)
米国フェルミ国立加速器研究所テバトロン加速器



RunI (1992～1996)

重心系エネルギー

$$\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$$

(積分ルミノシティ 110pb^{-1})

RunII (2002～2009)

重心系エネルギー

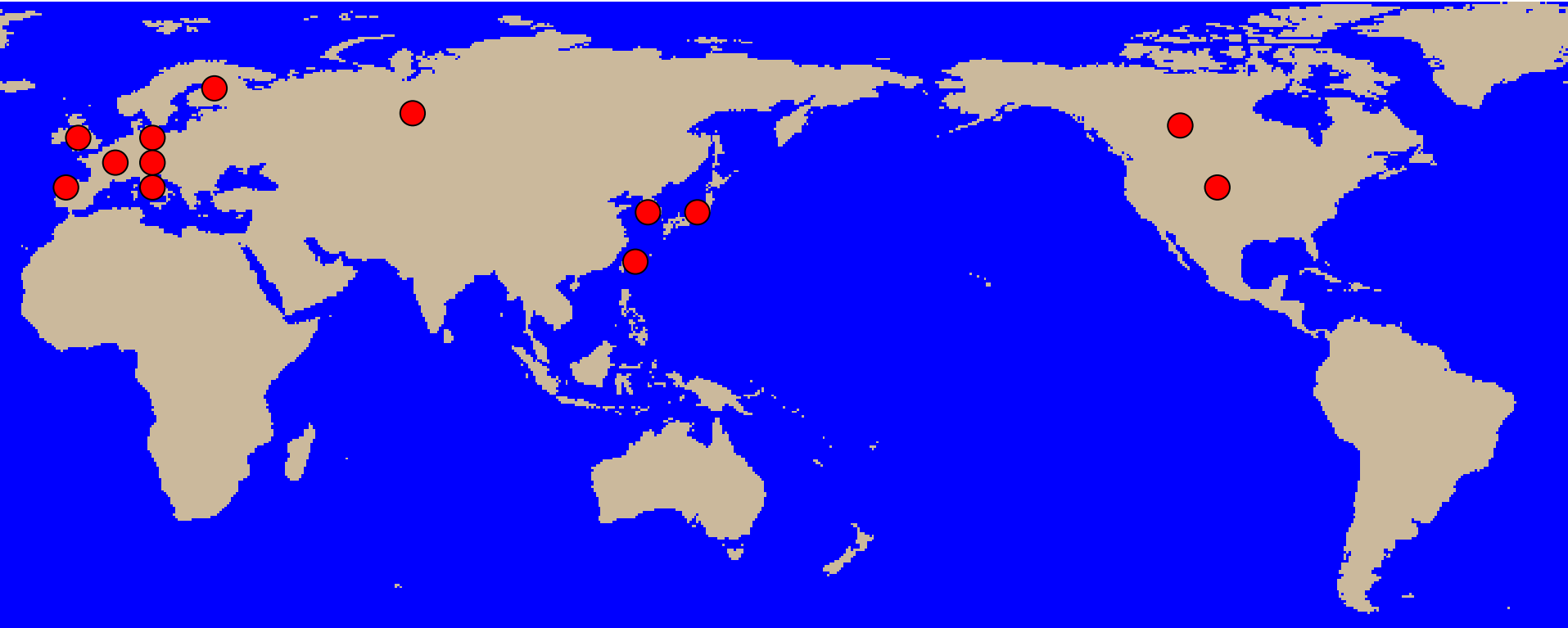
$$\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$$

+ Main Injector

(積分ルミノシティ
 8fb^{-1} の予定: Run I の70倍)

現在 1.2fb^{-1}

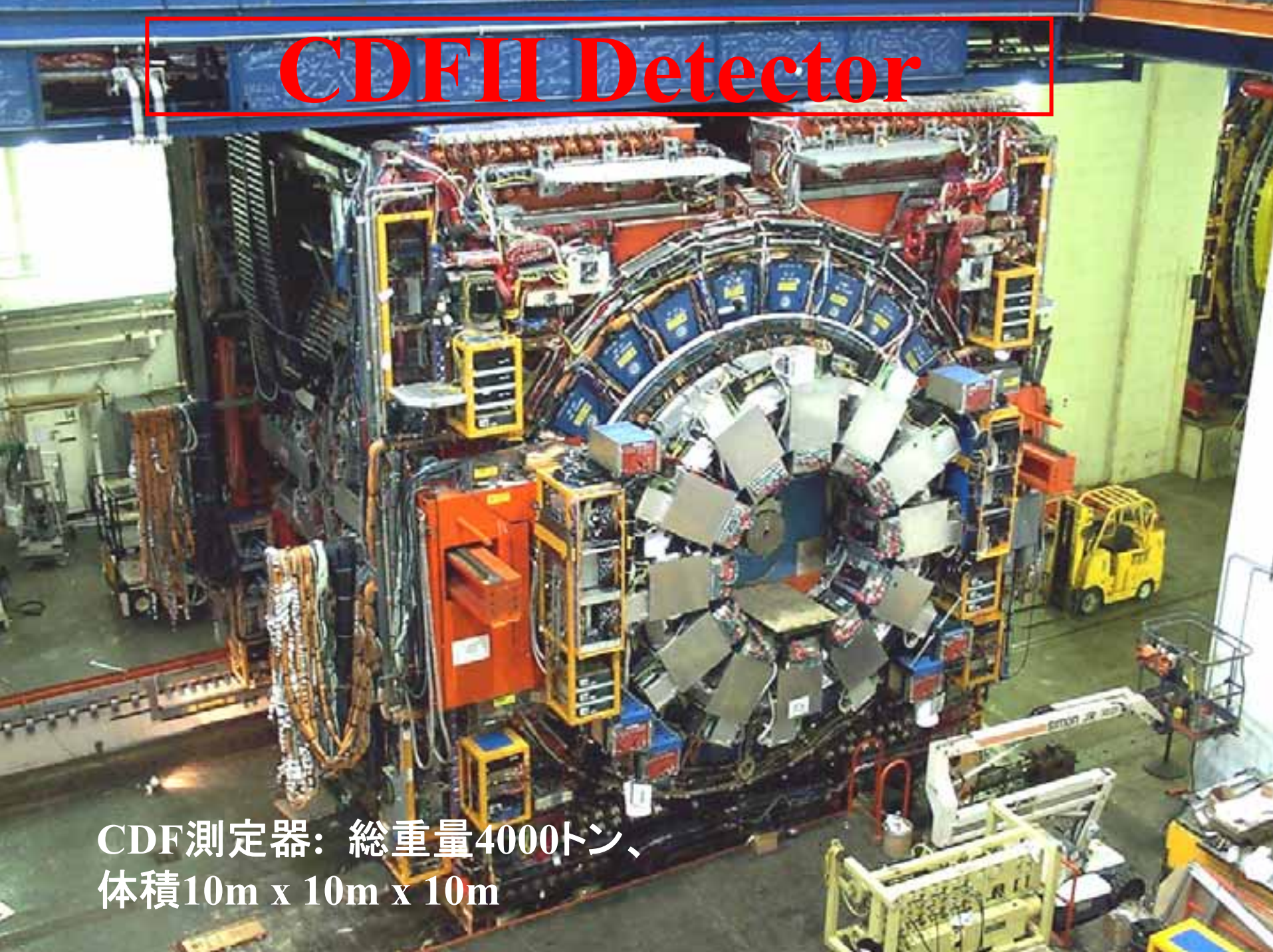
CDF実験グループ



CDF collaboration: ~700名, 61大学・研究所,
参加国: 13カ国 日本, 米国, イタリア, ドイツ, カナダ, スイス, 台湾,
ロシア, 英国, 韓国, スペイン, フランス, フィンランド

CDFII Detector

CDF測定器：総重量4000トン、
体積10m x 10m x 10m





New

Old

Partially
New

Muon System

Central Calor.

Solenoid

Drift Chamber

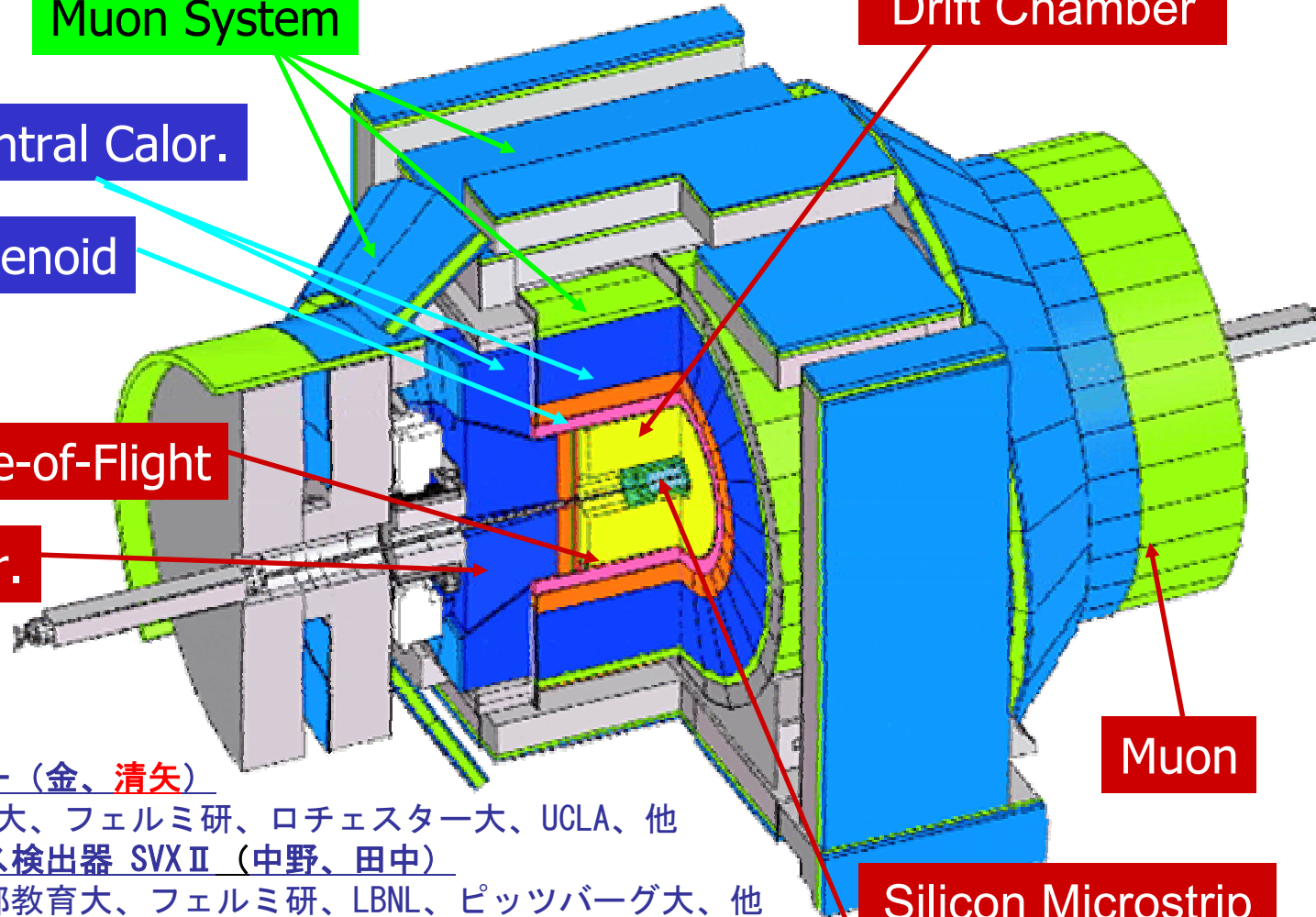
Time-of-Flight

Plug Calor.

Muon

Silicon Microstrip
Tracker

Front End Electronics
Triggers / DAQ (pipeline)
Online & Offline Software



日本グループの分担

○プラグ・カロリメーター (金、清矢)

筑波大、KEK、早稲田大、フェルミ研、ロチェスター大、UCLA、他

○シリコン・バーテックス検出器 SVX II (中野、田中)

広島大、岡山大、京都教育大、フェルミ研、LBNL、ピッツバーグ大、他

○中間部シリコン検出器 ISL (原、奥沢)

筑波大、大阪市大、近畿大、フェルミ研、LBNL、ピサ大、他

○データ収集・モニター装置 DAQ (下島、宮本、有澤)

筑波大、KEK、早稲田大、フェルミ研、MIT、ロチェスター大、他

○TOFカウンター (受川)

筑波大、フェルミ研、ペンシルバニア大、他

○中央プリシャワー検出器 (受川)

筑波大、アルゴンヌ研、他

CDF実験の経過と主要な成果

陽子反陽子衝突実験(米国フェルミ国立加速器研究所)

1981年8月 CDF設計報告書
1985年10月 陽子反陽子初衝突
1987年 テスト実験
1988年6月 物理実験(Run0)
～1989年5月

1992年4月 物理実験(Run1)
～1996年2月

1995年 トップクォーク発見
1998年 **Bc中間子発見**

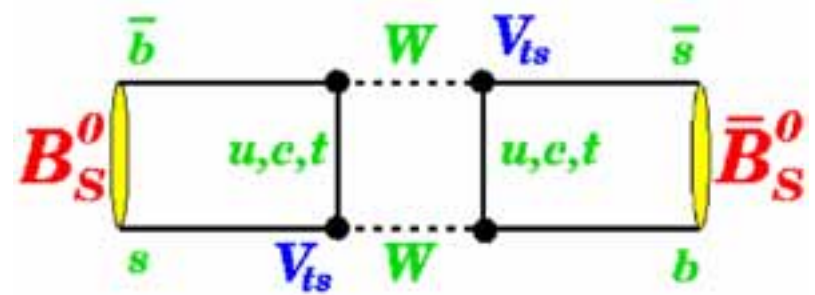
2001年4月～ 物理実験(Run2)再開

**ヒッグス粒子探索、Bs中間子の粒子反粒子振動、
B中間子のCP非保存、
トップクォークの物理、電弱相互作用と強い相互作用、
新粒子・新現象の探索。**



B_s 中間子の粒子反粒子振動

素粒子標準理論では、図のようにクォーク間で2個のWボソンを交換することによって B_s 中間子の粒子反粒子振動が起こる。電荷を持たない中性の粒子では、粒子と反粒子が生成される際の状態と崩壊する際の量子力学的な固有状態が異なることが知られている。この時、固有状態の質量に差があると、質量差 Δm の振動数で粒子反粒子振動が起きる。



素粒子反応で生成した B_s 中間子は崩壊するまでに反 B_s 中間子にある確率で変わる。その確率は崩壊するまでの時間 t について振動を表す以下の関数になる。

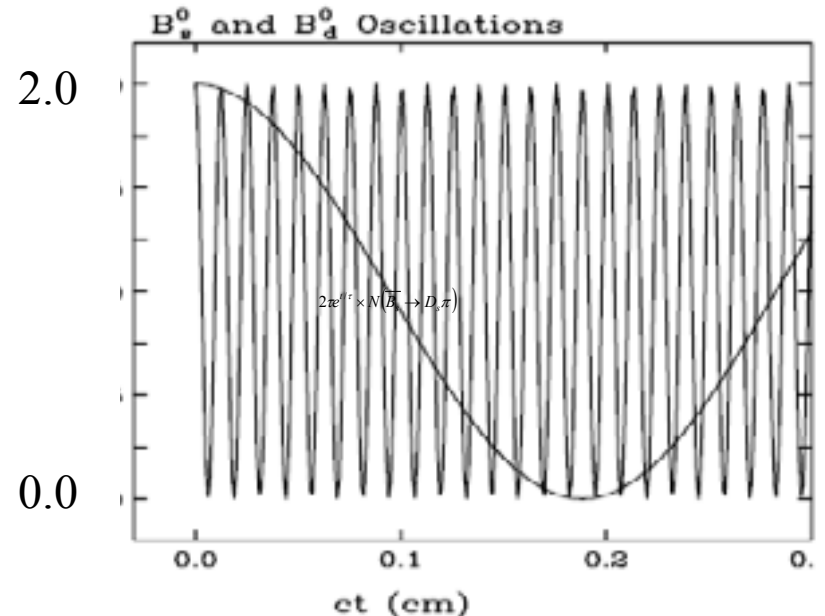
$$-2\tau e^{t/\tau} \times N(\overline{B}_s \rightarrow D_s \pi) \text{ の分布}$$

Oscillations with $\Delta m = 0.5 \text{ ps}^{-1}$ and 15 ps^{-1}

$$\text{Pr ob}(B_s \rightarrow \overline{B}_s) = \frac{1}{2\tau} e^{-t/\tau} (1 - \cos \Delta m t)$$

τ : 寿命

これが B_s 中間子の粒子反粒子振動である。この現象は実験的には、例えば $\overline{B}_s \rightarrow D_s \pi$ 崩壊事象の崩壊時間分布を、生成時には B_s 中間子であったものについて測定すると、右図の様に振動として観測される。

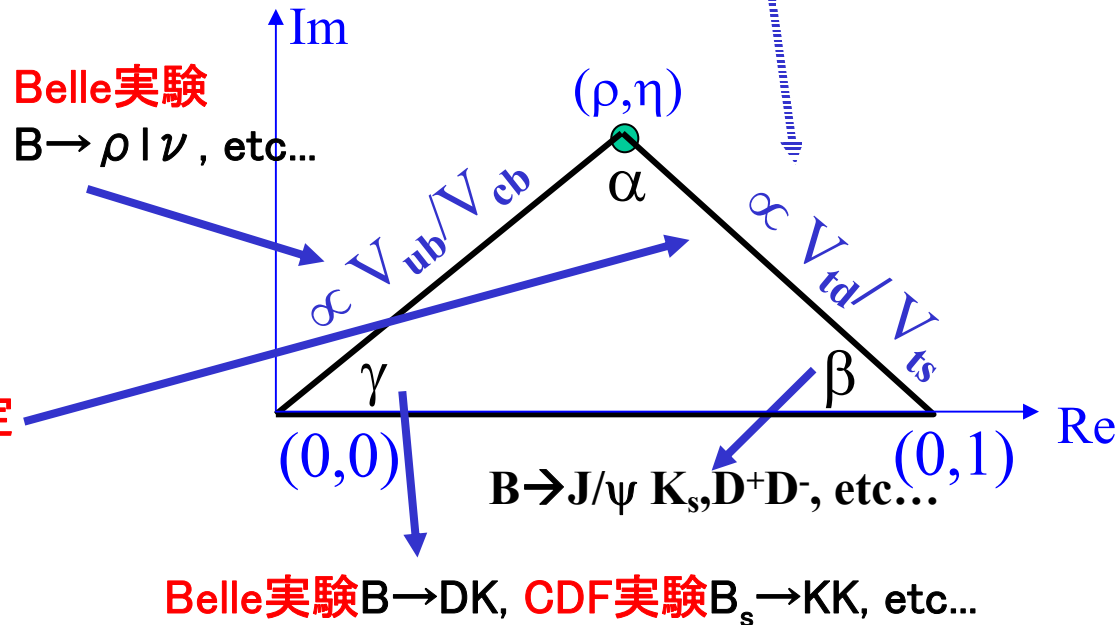
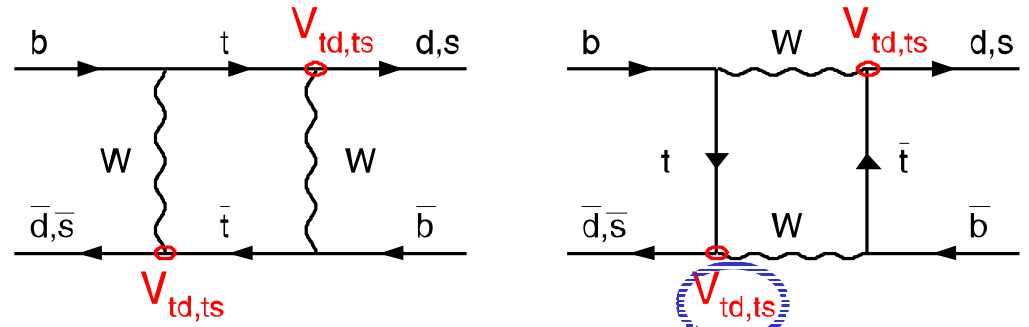


B, B_s 中間子の粒子反粒子振動

粒子反粒子振動の研究はクォーク間の小林益川混合行列の決定に大きな役割をはたす。それによって粒子反粒子対称性の破れの起源の解明に資する。

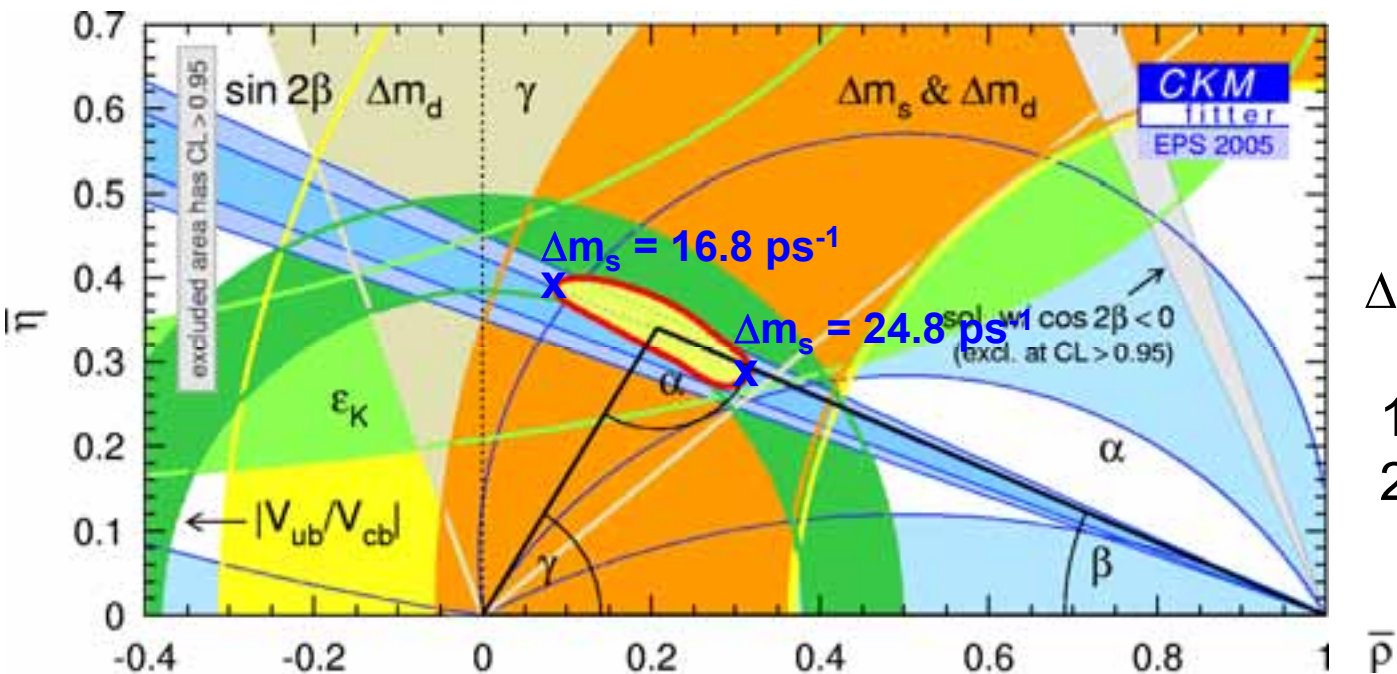
小林益川理論によると、ボトムクォークからダウンクォークへ至る道筋はトップクォーク経由、チャームクォーク 経由、アップクォーク 経由の三通りがあり、それぞれの崩壊の強さの掛け算を辺の長さとした右図の「ユニタリティ三角形」を描くことができる。

B, B_s 中間子の粒子反粒子振動測定はこの一辺を決める。



B_s 中間子の粒子反粒子振動—小林益川理論による予言

Belle実験を始めとする世界各地の実験でこの頂点の角度と辺の長さが精密に測定され、小林益川理論の正確さが立証されてきた。図中の赤い楕円がこれまでの測定から得られた α の頂点の存在範囲(1標準偏差)。今回の B_s 中間子の粒子反粒子振動を精密に測定することで図の α と β の間の辺の長さをこれまでの予測値よりもはるかに高い精度で決定することができる。赤い楕円の左端は $\Delta m_s = 16.8 \text{ ps}^{-1}$ 、右端は 24.8 ps^{-1} (それぞれ1標準偏差)と予言されていた。

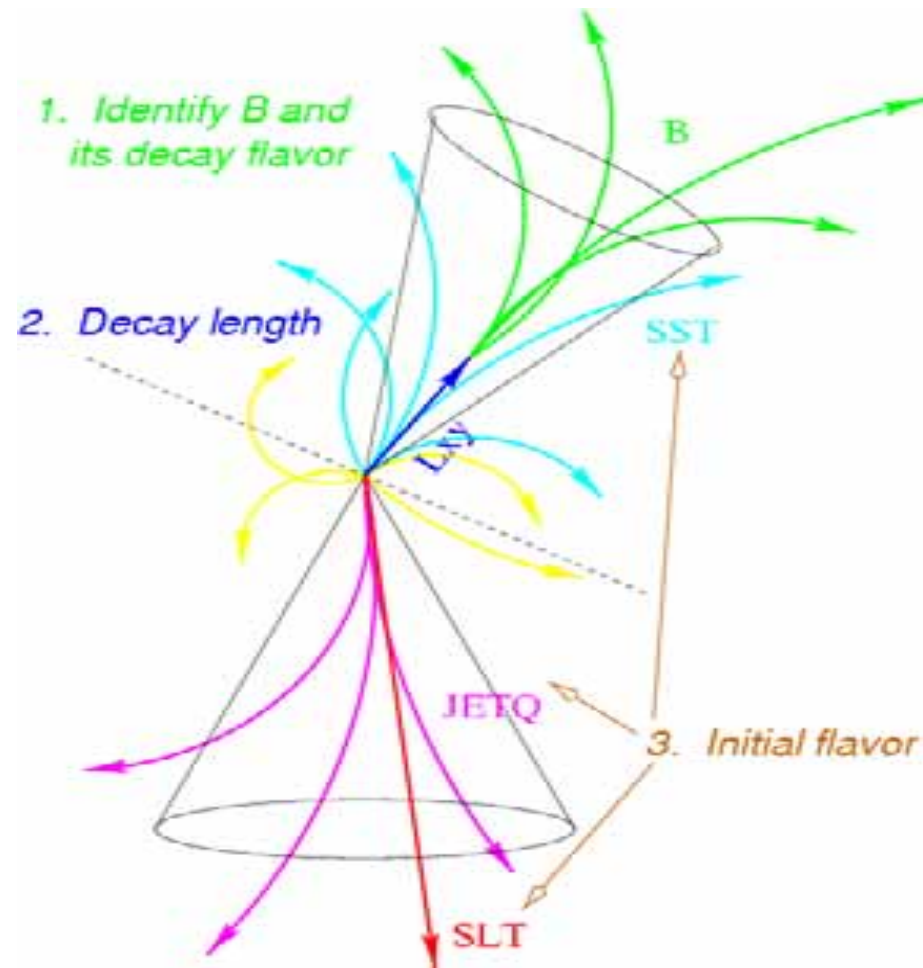


CKM Fit Result:
 $\Delta m_s = 18.3^{+6.5}_{-1.5} \text{ ps}^{-1}$

$1\sigma : [16.8, 24.8] \text{ ps}^{-1}$
 $2\sigma : [15.5, 31.3] \text{ ps}^{-1}$

\leftarrow from Δm_d
 \rightarrow from $\Delta m_d/\Delta m_s$
 \leftarrow Lower limit on Δm_s

B_s 中間子の粒子反粒子振動の測定方法



・ B_s 中間子の再構成

$B_s \rightarrow D_s \ell \nu X$ ($D_s \rightarrow \phi\pi, K^*K, 3\pi$) 53,000個

$B_s \rightarrow D_s \pi(3\pi)$ 3,700個



・ B_s 中間子の崩壊時間の決定

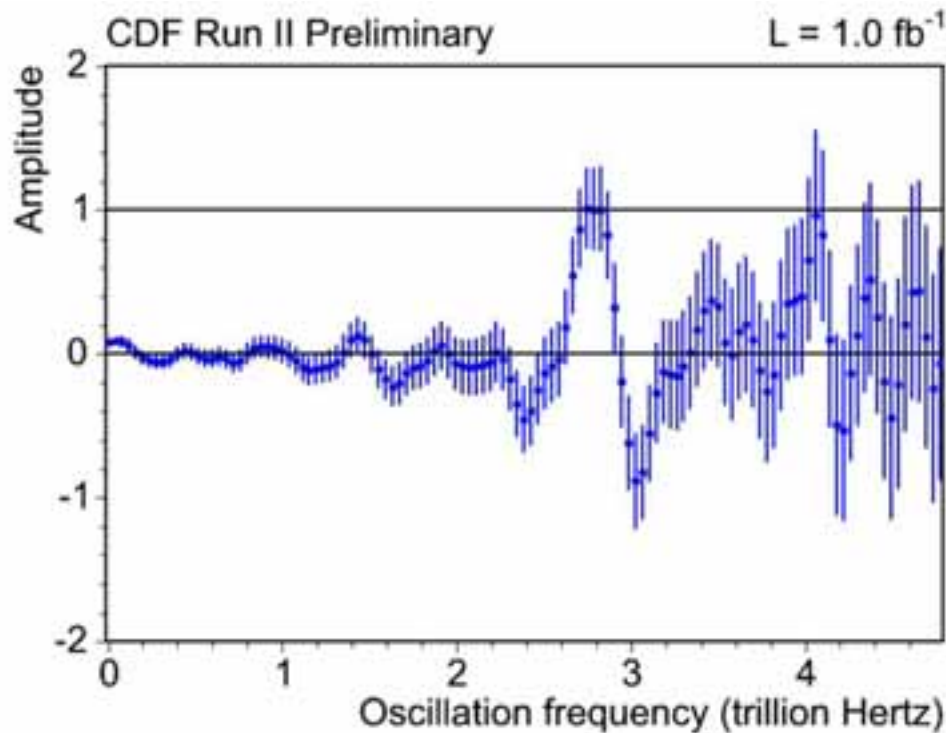


・ B_s 中間子生成時のフレーバー(粒子か反粒子か)を測定



・ B_s 中間子の崩壊時間分布が振動していると仮定して、各振動数に対して振幅を求める。振幅が1ならば振動している。

B_s 中間子の粒子反粒子振動の測定結果



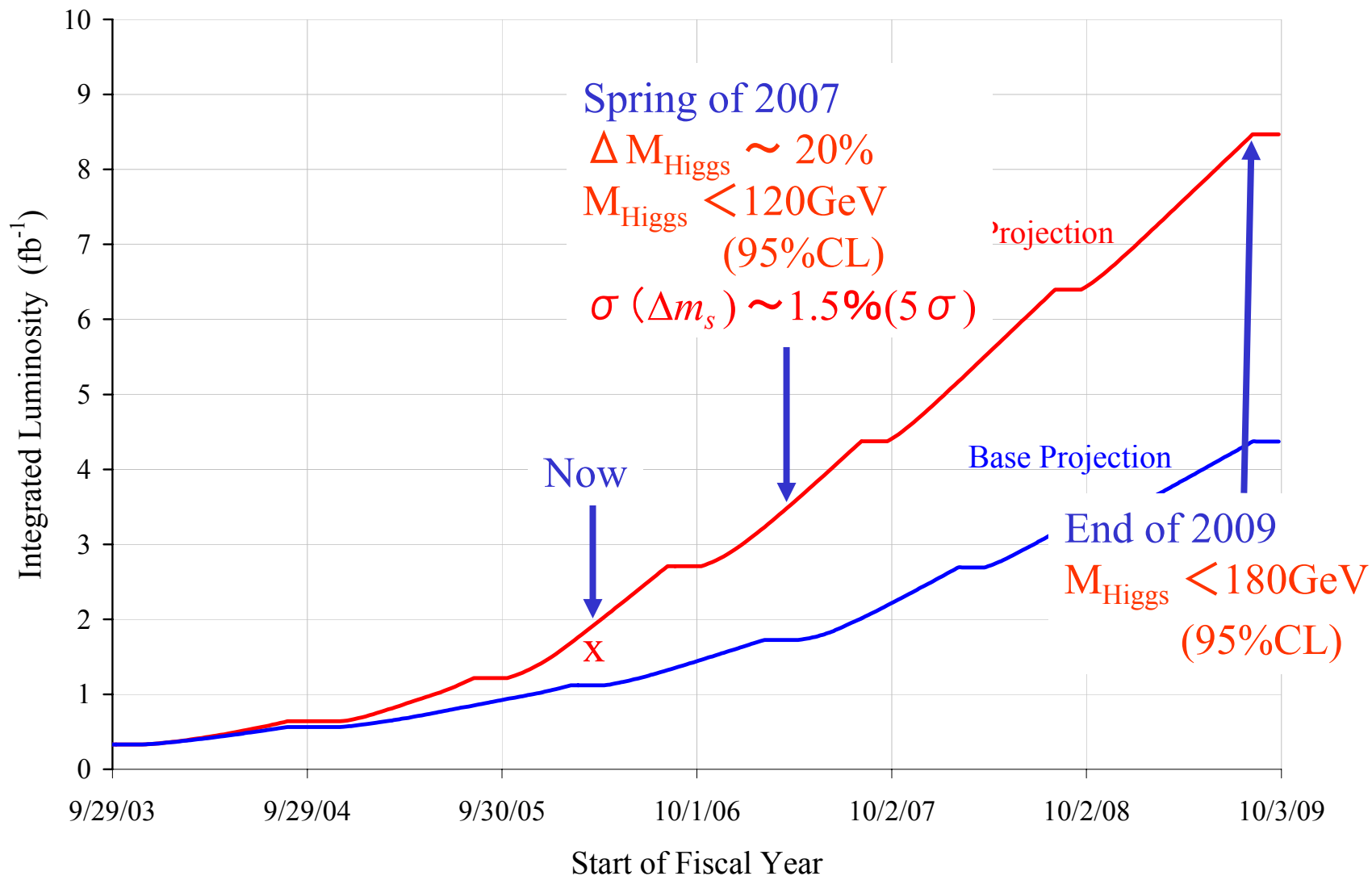
B_s 中間子の粒子反粒子振動の振動数 2.8兆ヘルツ

角振動数 $\Delta m_s = 17.33 + 0.4/-0.2$ (統計誤差) ± 0.07 (系統誤差) 毎ピコ秒

- ・ 小林益川理論の予言値 $\Delta m_s = 18.3 + 6.5/-1.5$ ps⁻¹と矛盾せず、また予言精度よりもはるかに測定精度が高い。この測定から $|V_{td}|/|V_{ts}| = 0.209 + 0.008/-0.007$ (誤差 $\sim 4\%$)。
- ・ 振動がないときに観測に伴う統計的ゆらぎでこのような振動の観測結果になる確率は0.5%にすぎない。言い換えると B_s 中間子の粒子反粒子振動を観測した確率は99.5%である。

Run I Projected Integrated Luminosity

(DOE review on Feb. 24, 2004)



まとめ

○ CDF実験で B_s 中間子の粒子反粒子振動が初めて観測された。

$B_s \rightarrow D_s \pi$ ($D_s \rightarrow \phi\pi, K^*K, 3\pi$) $B_s \rightarrow D_s 3\pi$ ($D_s \rightarrow \phi\pi, K^*K$) 3,700 事象
 $B_s \rightarrow D_s l\nu X$ ($D_s \rightarrow \phi\pi, K^*K, 3\pi$) 53,000事象、を用いた。

B_s 中間子の粒子反粒子振動の振動数 2.7兆ヘルツ

$\Delta m_s = 17.33 +0.4/-0.2$ (統計誤差) ± 0.07 (系統誤差) 毎ピコ秒

小林益川理論の予言値 $\Delta m_s = 18.3 +6.5/-1.5 \text{ ps}^{-1}$ と矛盾せず、また予言精度よりもはるかに測定精度が高い。

この測定から $|V_{td}|/|V_{ts}|=0.209+0.008/-0.007$ (誤差 $\sim 4\%$)が得られた。

振動がないときに観測に伴う統計的ゆらぎでこのような振動の観測結果 になる確率は0.5%にすぎない。言い換えると B_s 中間子の粒子反 粒子振動を観測した確率は99.5%である。

○ テバトロン加速器とCDF実験は今後3年間でデータ量を8倍まで増加していく予定であり、測定精度をさらに向上させることによって、小林益川理論の検証を大いに進展させることが期待される。