

小林・益川理論 その発展・検証について

三田一郎
神奈川大学

今でもK 中間子のCPに気付いていない可能性

- もし $K^0 - \bar{K}^0$ 混合が存在しなかったら
- もし $m_{\pi} = 0$ であつたら
- もし m_c が微調整されていなければ

B 中間子におけるCPの破れが 観測できない可能性

- もし $m_t = 170 \text{ GeV}$ と突拍子もなく大きくなかったら
- もし $\tau_B = 1.5 \text{ ps}$ と突拍子もなく大きくなかったら
- もしKM行列要素が微調整されていなかったら

大自然が用意してくれた
宝物を強調しながら、
B中間子における
CPの破れについて、
歴史的に話す

もし $K^0 - \bar{K}^0$ 混合が存在しなかったら

$$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad \Rightarrow \quad \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \rightarrow K^0 \quad \Rightarrow \quad M_{K\bar{K}}$$

$$\begin{pmatrix} M_K & M_{K\bar{K}} \\ M_{K\bar{K}}^* & M_{\bar{K}} \end{pmatrix} = M_K \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & M_{K\bar{K}} \\ M_{K\bar{K}}^* & 0 \end{pmatrix} \quad M_{K\bar{K}} = 10^{-15} M_K$$

$$\left| K_{1/2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\left| K^0 \right\rangle \pm \left| \bar{K}^0 \right\rangle \right) \quad CP \left| K_{1/2} \right\rangle = \pm \left| K_{1/2} \right\rangle$$

$$C \left| \pi^+ - \pi^- \right\rangle = \left| \pi^- - \pi^+ \right\rangle = (-1)^L \left| \pi^+ - \pi^- \right\rangle$$

$$P \left| \pi^+ - \pi^- \right\rangle = \left| \pi^- - \pi^+ \right\rangle = (-1)^L \left| \pi^+ - \pi^- \right\rangle$$

$$CP \left| \pi^+ - \pi^- \right\rangle = + \left| \pi^+ - \pi^- \right\rangle$$

•もし $m_\pi = 0$ であつたら

$$CP|K_{1,2}\rangle = \pm|K_{1,2}\rangle$$

$$CP|\pi^+ - \pi^-\rangle = +|\pi^+ - \pi^-\rangle$$

$$K_1 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$K_2 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

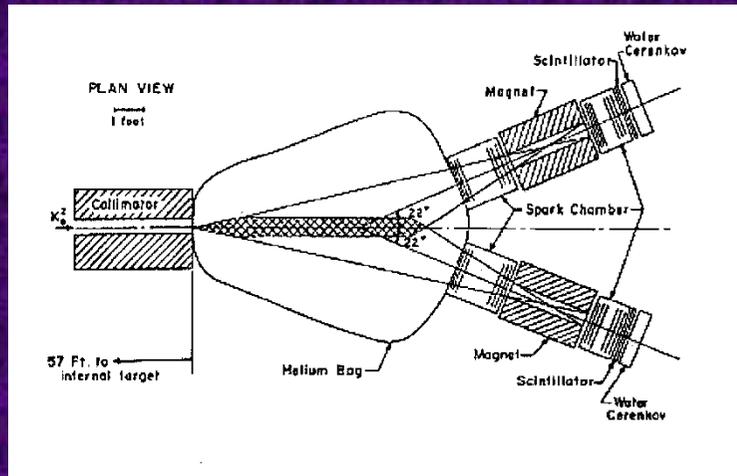
$$K_2 \rightarrow 3\pi$$

$$2m_{\pi^+} + m_{\pi^0} = 415 \text{ MeV}$$

$$m_K = 500 \text{ MeV}$$

$$\tau_{K_2} \approx 600 \tau_{K_1}$$

$$\tau_{K_L} \quad \tau_{K_S}$$



$$\frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} = (2 \times 10^{-3})^2$$

K中間子のCPの破れは小さい

小林・益川理論の誕生の背景

- 坂田模型の故郷であるE研
- E研では基本粒子クォークを信じていた
- クォークを基本粒子とした場の理論を信じていた
- Gell-Mannは信じていなかった
- 場の理論の専門家がいた
- 丹生イベント
- u,d,s,c 4個のクォークの存在

CP 対称性と位相

$$H = ch + c^* h^\dagger$$

h は粒子の相互作用

h^\dagger は反粒子の相互作用

$$CP h CP^\dagger = h^\dagger$$

$$CP H CP^\dagger = ch^\dagger + c^* h$$

c が実数であれば $CP H CP^\dagger = H$

CP 対称性は位相の物理

位相の自由度

電磁気力

$$\vec{F} = e\vec{E} \quad \vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

場の理論

物理量： $|\langle \text{out} : C, D | A, B : \text{in} \rangle|^2$

$\psi_i \rightarrow e^{i\phi_i} \psi_i$ の自由度

Mass term for quarks

$$L_{\text{mass}} = \sum_{i,j=1,2,3} g_{ij}^Y \bar{\Psi}_i \Psi_j \langle H \rangle \quad g_{ij}^Y \text{ は 虚数}$$

2世代のとき質量固有状態で書いたら

$$L_{\text{gauge}} = g (\bar{u}^m, \bar{c}^m)_L \gamma_\mu \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^m \\ s^m \end{pmatrix}_L W^\mu$$

3世代のとき質量固有状態で書いたら

$$L_{\text{gauge}} = g (\bar{u}^m, \bar{c}^m, \bar{t}^m)_L \gamma_\mu \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^m \\ s^m \\ b^m \end{pmatrix}_L W^\mu$$

$\Upsilon(1S)$ の発見 1977年

$b - \bar{b}$



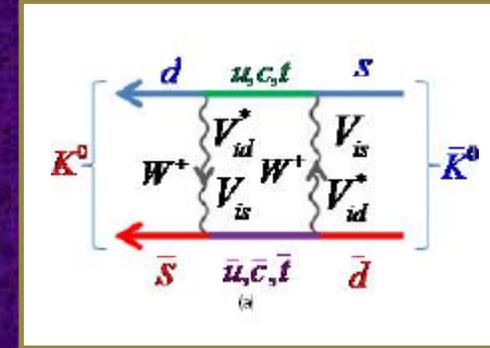
Bの物理は理論がリード

B中間子が発見される前に書かれた論文

- ▣ Pais Treiman 1975
- ▣ Ellis Gaillard Nanopoulos Rudaz 1977
- ▣ Bander Silverman Soni 1979
- ▣ Cater & AIS, Bigi & AIS 1980

- もし m_c が微調整されていなかったら
- もし $m_t = 170 \text{ GeV}$ と突拍子もなく大きくなかったら
- もしKM行列が微調整されていなかったら

なぜK中間子における のCPの破れは小さいか

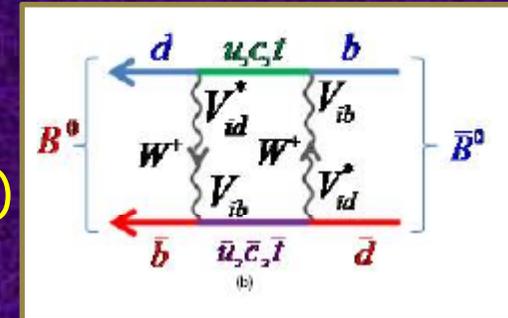


$$M_{K\bar{K}} \propto (V_{cs}V_{cd}^*)^2 E(x_c) + (V_{ts}V_{td}^*)^2 E(x_t) + (V_{cs}V_{cd}^*)(V_{ts}V_{td}^*) E(x_c, x_t)$$

$$E(x_q) \approx \left(\frac{m_q}{M_W} \right)^2$$

稲見-林

第3世代の寄与が小さい



$$M_{B\bar{B}} \propto (V_{cb}V_{cd}^*)^2 E(x_c) + (V_{tb}V_{td}^*)^2 E(x_t) + (V_{cb}V_{cd}^*)(V_{tb}V_{td}^*) E(x_c, x_t)$$

$$\approx |V_{tb}V_{td}^*|^2 e^{2i\phi_1} E(x_t)$$

第3世代の寄与が大きい

当時のドンたち Pais-Treiman の考え

$$\frac{\Gamma(K_L \rightarrow l^+ \nu_l \pi^-) - \Gamma(K_L \rightarrow l^- \bar{\nu}_l \pi^+)}{\Gamma(K_L \rightarrow l^+ \nu_l \pi^-) + \Gamma(K_L \rightarrow l^- \bar{\nu}_l \pi^+)} = \frac{|p_K|^2 - |q_K|^2}{|p_K|^2 + |q_K|^2}$$

$$|K_S\rangle = p_K |K^0\rangle + q_K |\bar{K}^0\rangle$$

$$|K_L\rangle = p_K |K^0\rangle - q_K |\bar{K}^0\rangle$$

Bの物理は
Kの物理の単純な延長

$$\frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow l^+ \bar{X}) - \Gamma(B^0 \rightarrow l^- X)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow l^+ \bar{X}) + \Gamma(B^0 \rightarrow l^- X)} = \frac{|p_B|^2 - |q_B|^2}{|p_B|^2 + |q_B|^2}$$

$$\frac{q}{p} = \sqrt{\frac{M_{B\bar{B}}^*}{M_{B\bar{B}}}} = e^{i2\phi_1} \quad \text{をどうして測る?}$$

位相の観測方法

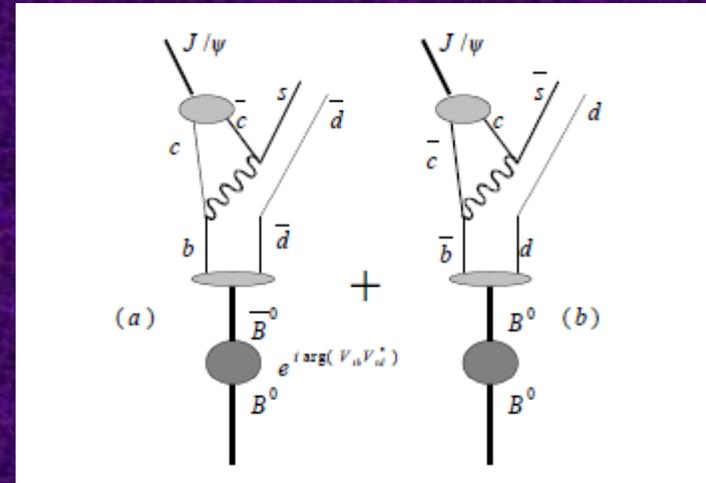
1980

$$|\bar{K}_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_S\rangle - |K_L\rangle)$$

$$|K_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_S\rangle + |K_L\rangle)$$

$$a(t) = \frac{Br(\bar{B}(t) \rightarrow J/\psi K_S) - Br(B(t) \rightarrow J/\psi K_S)}{Br(\bar{B}(t) \rightarrow J/\psi K_S) + Br(B(t) \rightarrow J/\psi K_S)}$$

$$= \text{Im} \left(\frac{q}{p} \bar{\rho}(J/\psi K_S) \right) \sin(\Delta M_B t)$$



$$\frac{q}{p} = \sqrt{\frac{M_{B\bar{B}}^*}{M_{B\bar{B}}}} \quad \bar{\rho} = \frac{A(\bar{B} \rightarrow J/\psi + K_S)}{A(B \rightarrow J/\psi + K_S)}$$

もしBビームがあれば！

大きなCPの破れの預言

当時知っていたこと

KM行列要素 V_{us} はCabibbo角

$$M_{\Upsilon(4S)} = 10 \text{ GeV}$$

$$s_3 + s_2 e^{i\delta} = V_{cb} \quad s_1 s_3 = V_{ub}$$

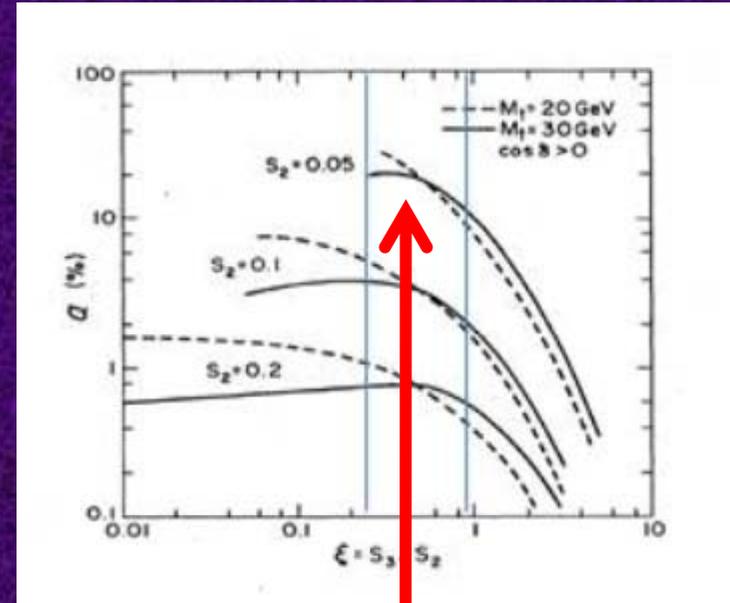
δ はK中間子のCPの破れから

$m_t \leq 30 \text{ GeV}$ が 限度

有名な実験家が流したうわさ

$$s_2 > 0.05$$

常識??



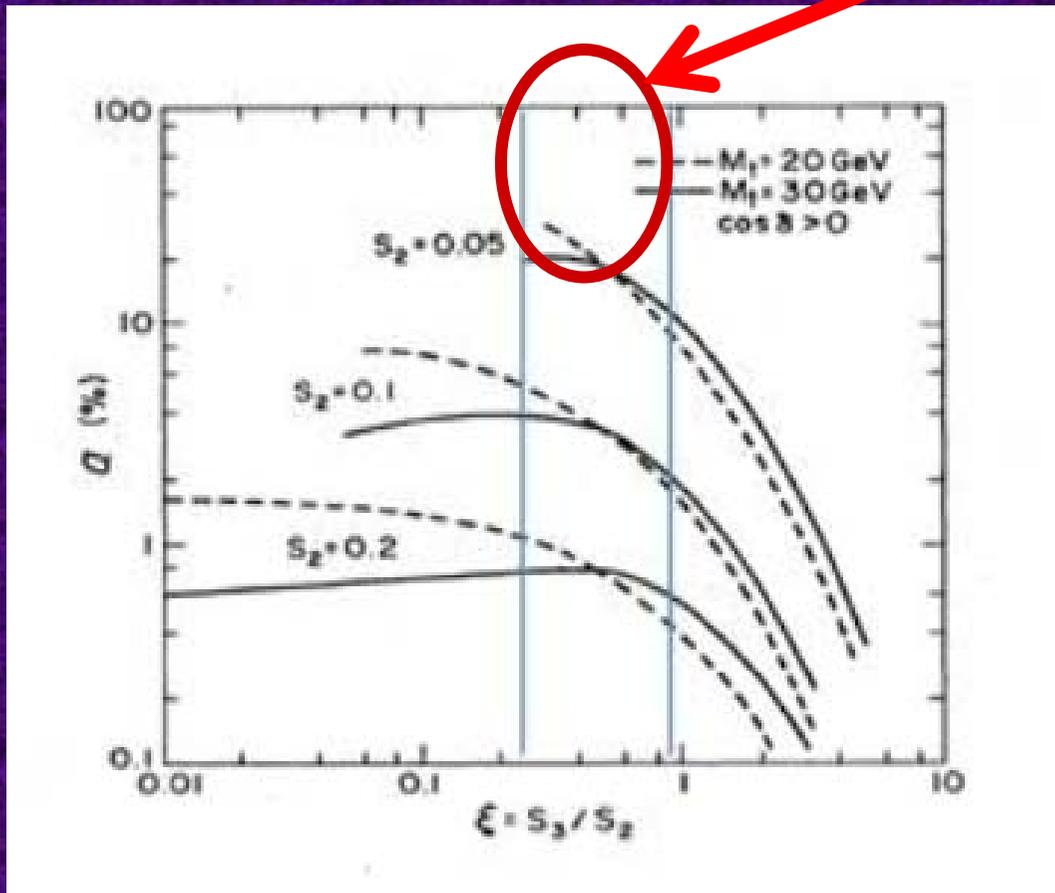
(10-15) %である
可能性を指摘

$$a(t) = \frac{Br(\bar{B}(t) \rightarrow J/\psi K_S) - Br(B(t) \rightarrow J/\psi K_S)}{Br(\bar{B}(t) \rightarrow J/\psi K_S) + Br(B(t) \rightarrow J/\psi K_S)}$$

$$= \text{Im} \left(\frac{q}{p} \bar{\rho}(J/\psi K_S) \right) \sin(\Delta M_B t)$$

•もしKM行列要素が微調整されていなければ
たら

自然はCPの破れを
大きくする
パラメータを選んだ



Carter and AIS
PR D23 (1980)

現在

$$s_3 + s_2 e^{i\delta} = V_{cb}$$

$$s_1 s_3 = V_{ub} \quad s_2 \approx .02$$

$$|V_{cb}| = A\lambda^2$$

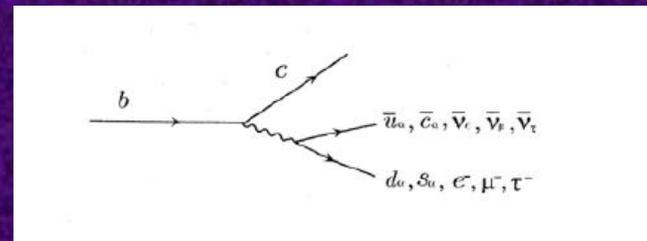
$$|V_{ub}| = A\lambda^3$$

$$\xi \approx 1$$

Bのビームがないので

10^{-12} sec しか生きないビーム

$$e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$$



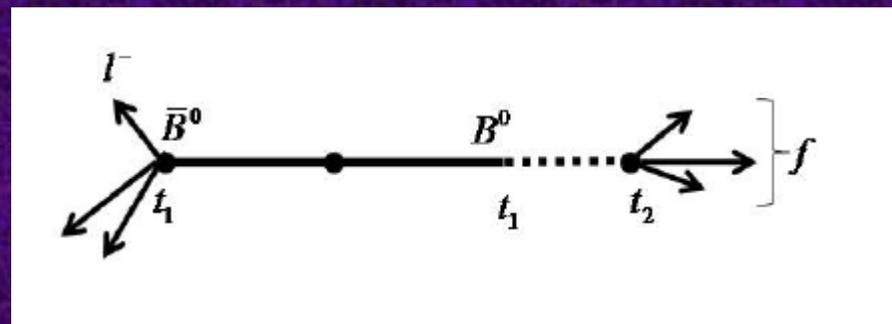
$$e^+e^- \rightarrow \bar{B}(t_1)B(t_2) \rightarrow \psi K_S$$

↙

$$\mu^- + X$$

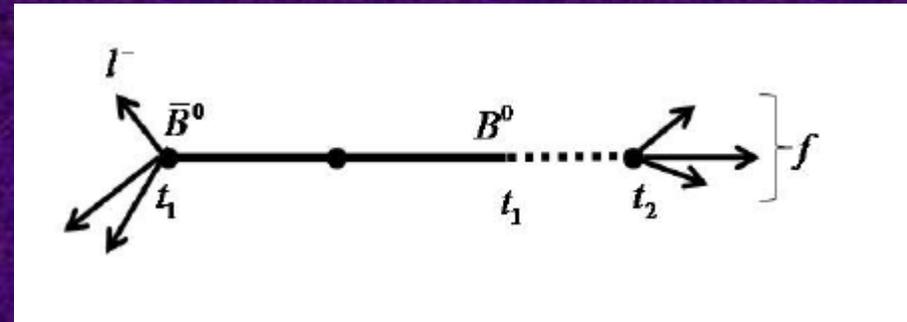
$$\bar{B}^0 \rightarrow \mu^- + X$$

$$B^0 \rightarrow \mu^+ + X$$



大問題

$$asym = \frac{\Gamma_- - \Gamma_+}{\Gamma_- + \Gamma_+} = \text{Im} \left(\frac{q}{p} \rho \right) \sin[\Delta m(t_1 - t_2)]$$

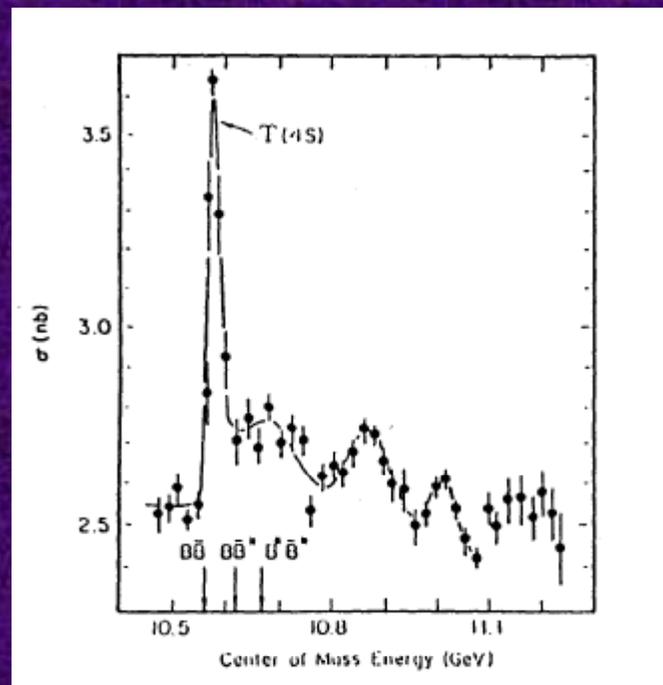


CP非対称性は時間を観測しないと消えてしまう

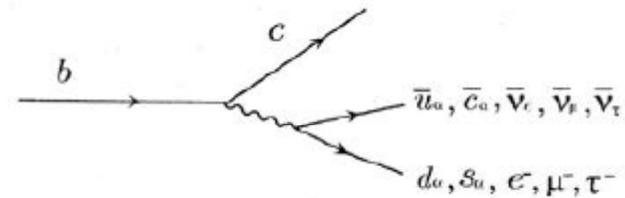
Bの発見 CSER

1980 $\Upsilon(4S)$ の発見

$\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ B 中間子の発見



長寿な B 1983 MAC MARKII



$$\Gamma_\mu = \frac{G_F^2}{192\pi^3} m_\mu^5 \Rightarrow \Gamma_b \sim \frac{G_F^2}{192\pi^3} m_b^5 |V_{bc}|^2 \times (2 \times 3 + 3).$$

$$|V_{cb}| = 1 \Rightarrow \tau_B = 10^{-15} \text{ sec}$$

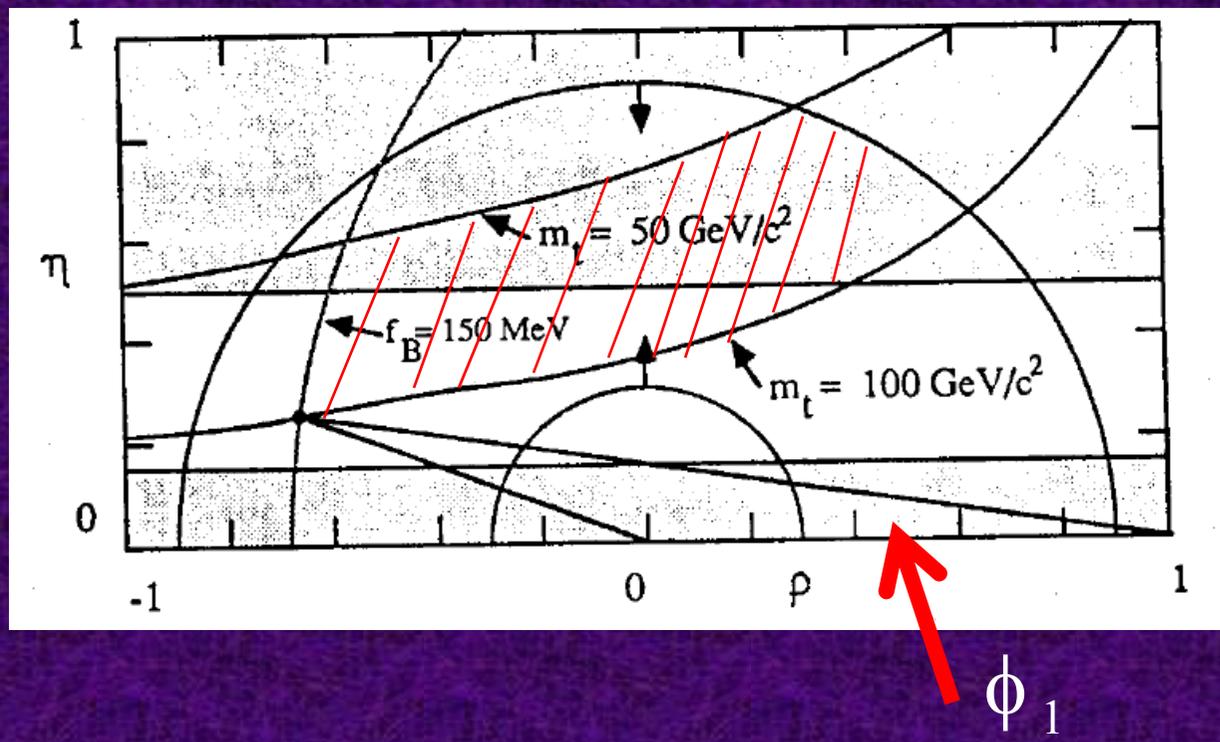
$$\tau_B = 10^{-12} \text{ sec} \Rightarrow |V_{cb}| = \frac{1}{30} \approx \sin^2 \theta_c$$

この発見がなかったら
今日ここでこの話はない

•もし $\tau_B = 1.5 \text{ ps}$ と突拍子もなく大きくなかったら

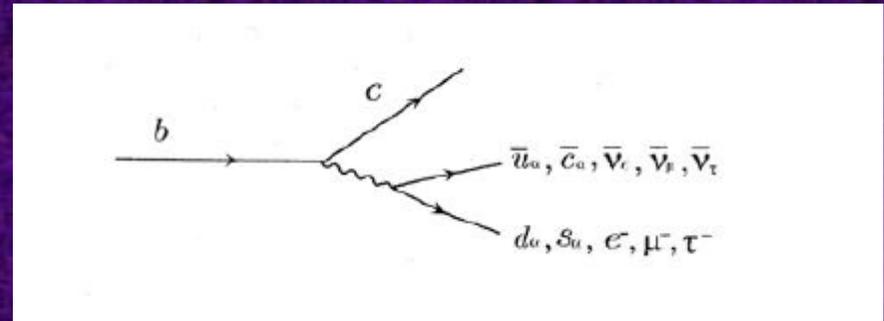
Wolfenstein 表示

$$V = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta + \frac{i}{2}\eta\lambda^2) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 - i\eta A^2\lambda^4 & A\lambda^2(1 + i\eta\lambda^2) \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$



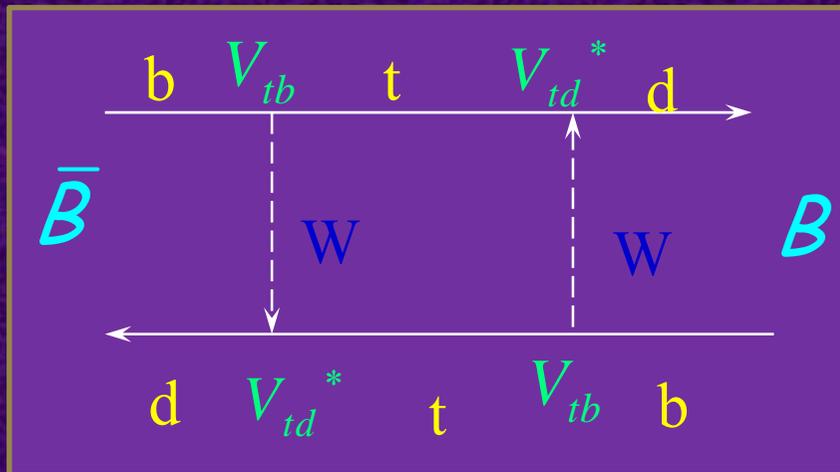
B- \bar{B} 混合の発見 ARGUS 1987

$$\frac{\Gamma(B\bar{B} \rightarrow \mu^\pm \mu^\pm + X)}{\Gamma(B\bar{B} \rightarrow \mu^\pm \mu^\mp + X)} = \frac{x^2}{1+x^2} \quad x \propto \left(\frac{m_t}{M_W}\right)^2$$



$$\bar{B}^0 \rightarrow \mu^- + X$$

$$B^0 \rightarrow \mu^+ + X$$

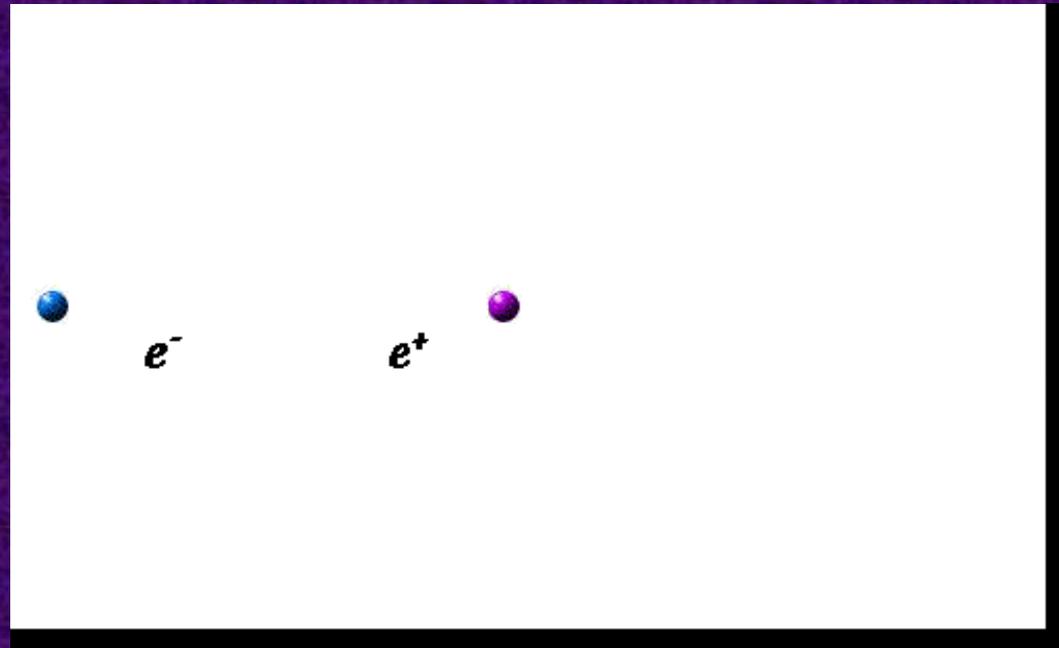


理論家は m_t が 20 GeVを超えることは考えられなかった

なぜ200 GeV
など大胆に行け
なかったのか

混合が発見されて
実験家の目の色が変わる

CSERでは無理



20 μm しか飛跡を残さない

Oddoneの 突拍子もない発想



9GeV+3GeV 200 μ m の飛跡を残す

KEKの専門家：
非対称性加速器
など不可能
ビームが爆発

1994

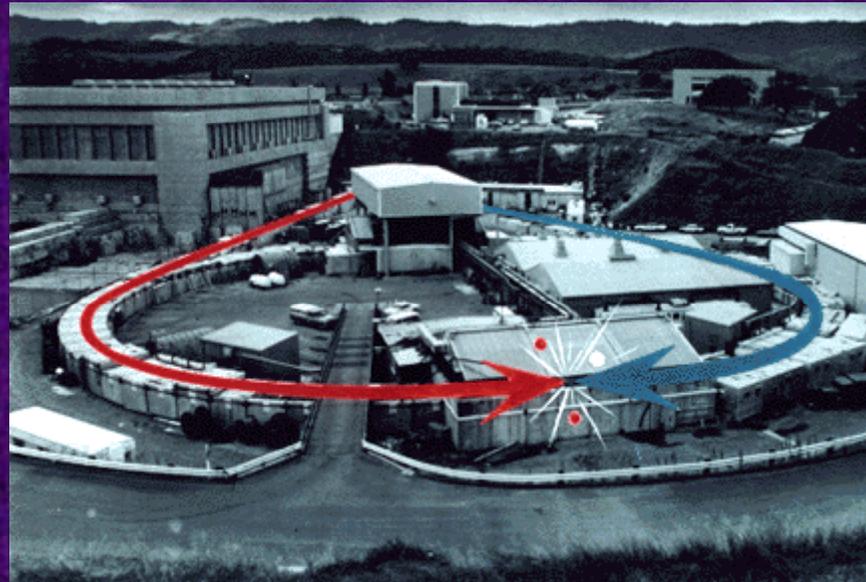
SLACが1月 KEKが4月
マラソンの始まり

KEKのLCPACのメンバーとして

SLACとKEKの
加速器に対する
姿勢の違い

KEK の 競争相手 この加速器でノーベル賞2個

駐車所に加速器



SLACの唯一の目的：
大きなCPの破れの発見

KEKの目的：
物理の発見＋
創造的加速器



ARES空洞
 巨大な蓄積エネルギー
 で大電流を安定に加速
 KEKB独自のアイデア！



大電流ビームを蓄積する



真空システム
 超高真空中でビームを保持
 1兆分の1気圧！



世界の常識を破った
 大きな交差角衝突！

有限交差角衝突
 衝突後の2つのビームを容易に分離
 超伝導最終収束磁石
 常伝導特殊電磁石群

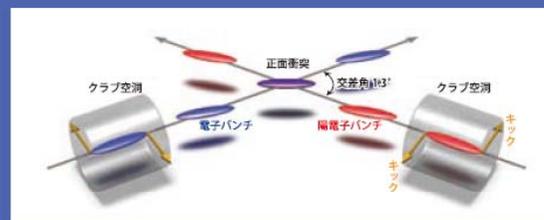
円型加速器としては世界
 最小ビームサイズを達成！

ビームを小さく絞って衝突させる

をリードする日本の超伝導技術！



世界で初めての試み…クラブ空洞とは？



従来の衝突

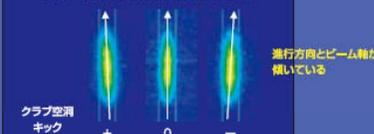
衝突点で軌道に交差角があっても、ビームは正面衝突になる！

さらに高いミノシティに挑戦！



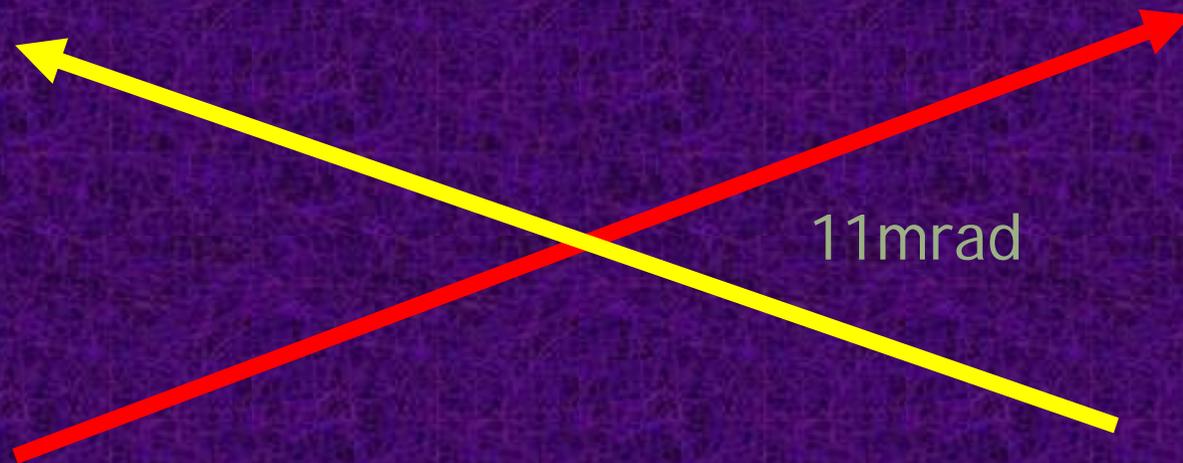
クラブ空洞

ストリークカメラが捉えた電子バンチの様子



クラブ空洞 キック

Doris で失敗に終わった
手法をKEKBに取り入れる？



1年失われれば負け

“有限交差角は大丈夫か”

“シュミレーションによると大丈夫です”

“ではDORISの敗北をシュミレーションできるか”

“分かりません。DORISのパラメーターを知りませんので”

なんで飛行機に乗って
パラメーターの値を聞きに行かないのか

$B \rightarrow \psi K_S$ における

大きなCPの破れの発見

July, 2000 ICHEP Osaka

$$\sin 2\phi_1 = 0.45 \pm 0.44(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst}) \quad \textit{Belle}$$

$$\sin 2\phi_1 = 0.12 \pm 0.37(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst}) \quad \textit{BaBar}$$

July, 2001 Lepton Photon

$$\sin 2\phi_1 = 0.99 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst}) \quad \textit{Belle}$$

$$\sin 2\phi_1 = 0.59 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst}) \quad \textit{Babar}$$

2000年から4倍

わたしが素人の
心配をする必要はなかった

もしSLACの値が 0.99であったなら

2000年

$$\sin 2\phi_1 = 0.99 \pm 0.34(stat) \pm 0.09(syst)$$

$$\sin 2\phi_1 = 0.99 \pm 0.25(stat) \pm 0.09(syst)$$

倍のイベント数
6か月

Lepton Photon を待たずに
発表したのではないか

神はSLACに有利な
サイコロをふらなかつた

小林・益川理論
は証明された。

この理論からの
ずれを発見する。

Kの物理は63年の歴史

まだ面白い発見が豊富にある

ということはBの物理は 2043
年まで続く

$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ は 15%の
非対称性が 1 年間に発見できる値

非対称性は 15%ではなく 75%に近かった

92-94 は CSERが $L=10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

当時可能な強度の1000倍要求した

加速器のプロは有能 物理が必要とするビーム の強度は創れる

2000年に、
この業界の大物のプロが
10**35は夢と言った

加速器はどんどん進化する

$10^{43} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 必要

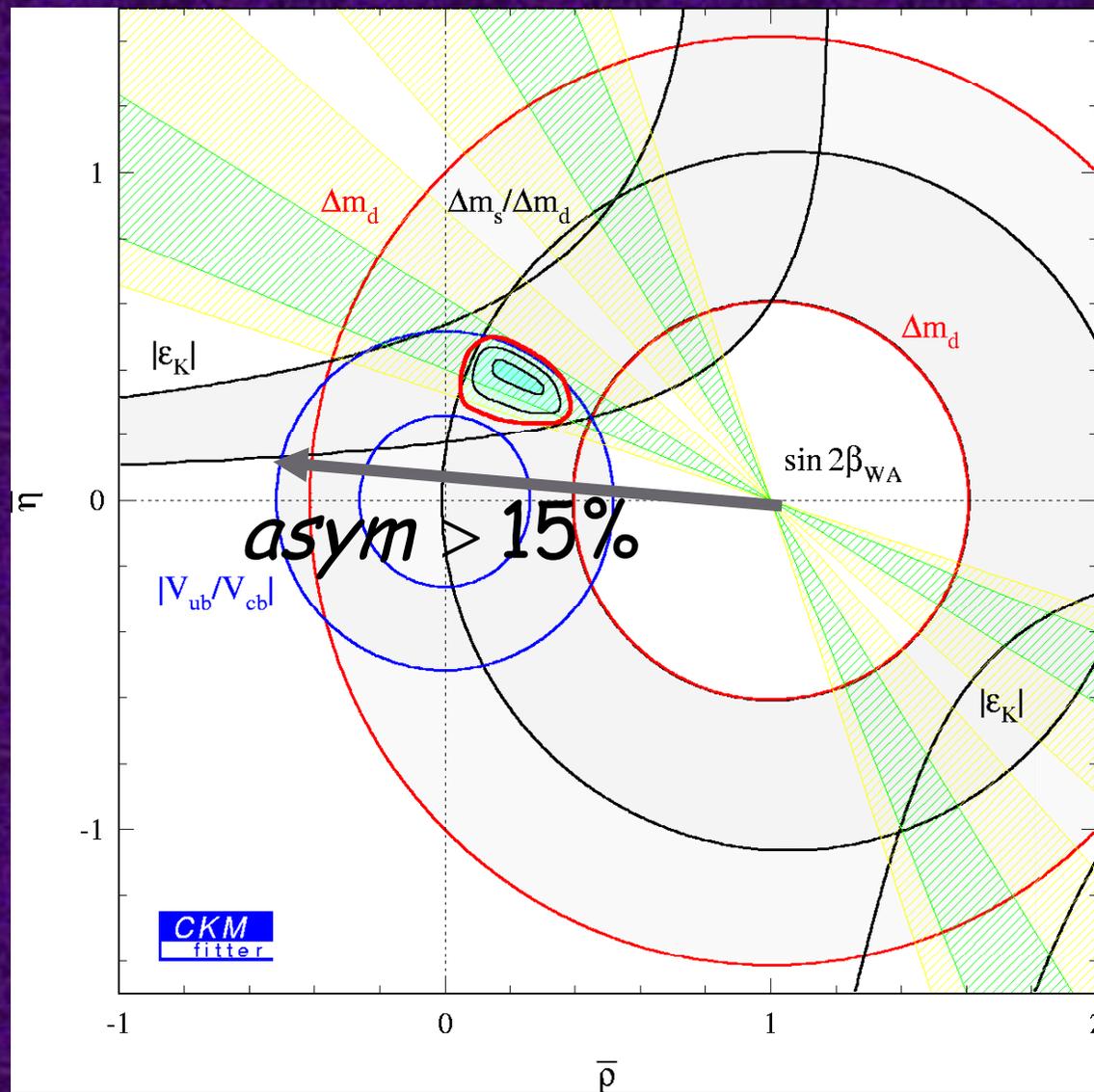
まとめ

1. CPの破れ-大自然からの贈り物
2. 湯川結合定数との関係
3. Flavor physics がなければ標準模型はない
4. Bの物理は今後少なくとも30年間活発に研究される.

1980	$\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$	1946	K^0
+7	$B\bar{B}$ 混合	+9	$K\bar{K}$ 混合
+20	CPV in $B\bar{B} \rightarrow \psi K_S$	+17	CPの破れ
+26	CPV in $B\bar{B} \rightarrow \pi\pi$	+47	$\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$
	$B \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$	+51	$K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$
+20	T violation	+52	T violation
??	CPT	??	CPT

$$asym = \frac{\Gamma_- - \Gamma_+}{\Gamma_- + \Gamma_+} = \text{Im} \left(\frac{q}{p} \rho \right) \sin[\Delta m(t_1 - t_2)]$$

なぜ現在Belleの実験が こんなに面白いのか



1964 の実験は今日の1パルスで出来る

Jim Cronin

B物理学の将来

標準模型からの小さなずれを探す

新しい物理現象が標準模型のバックグラウンドの中で10%をこえることはないであろう。

1%以下の可能性も十分ある。

DORISの敗北も
シュミレーションで理解できた