

XÁC ĐỊNH HỆ SỐ Δm_d TRONG SỰ PHA TRỘN $B_d^0 - \bar{B}_d^0$

Nguyễn Mộng Giao¹, Mai Văn Nhơn², Hoàng Thị Kiều Trang²

¹Phân Viện Vật Lý Tp. HCM, ²Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 27 tháng 11 năm 2003)

TÓM TẮT: Trong Standard Model (SM), sự trộn lẫn các trạng thái $B_q^0 - \bar{B}_q^0$ ($q = d, s$) là một hệ quả của tương tác yếu bậc hai. Bắt đầu từ thời điểm sinh ra meson B_q^0 , $t = 0$, xác suất quan sát được một phân rã B_d^0 hay \bar{B}_d^0 tại thời điểm t được xác định như sau:

$$P(B_d^0 \rightarrow B_d^0) = \Gamma_d e^{-\Gamma_d t} \cos^2\left(\frac{\Delta m_d t}{2}\right)$$

$$P(B_d^0 \rightarrow \bar{B}_d^0) = \Gamma_d e^{-\Gamma_d t} \sin^2\left(\frac{\Delta m_d t}{2}\right)$$

trong đó $\Gamma_d = \frac{\Gamma_d^H + \Gamma_d^L}{2}$, $\Delta\Gamma_d = \Gamma_d^H - \Gamma_d^L$, $\Delta m_d = m_d^H - m_d^L$, với L và H là các ký hiệu tương ứng với các trạng thái vật lý nặng (Heavy) và nhẹ (Light).

Khoảng thời gian dao động của trạng thái sẽ cho một phép đo trực tiếp độ sai biệt khối lượng Δm_d giữa hai trạng thái vật lý này.

Sự dao động độc lập thời gian $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ được đo từ các phân bố tham số va chạm lepton có p_t cao. Kết quả thu được là:

$$\Delta m_d = 0.531^{+0.050}_{-0.046} \text{ (thống kê)} \pm 0.078 \text{ (hệ thống)} \text{ ps}^{-1}$$

Dùng giá trị trung bình $\tau_{B_q^0} = 1.57 \pm 0.050 \text{ ps}$, ta tìm được:

$$x_d = \frac{\Delta m}{\Gamma} = 0.738 \pm 0.101^{+0.140}_{-0.124}$$

1. Giới thiệu

Khám phá của các nhà Vật lý về các hadron mang hạt b đã mở ra một cơ sở phong phú cho việc kiểm nghiệm những mô tả của Standard Model (SM) về tương tác điện từ yếu (EW). Một trong những vấn đề then chốt được nghiên cứu là hiện tượng vi phạm đối xứng CP, dẫn đến các trạng thái pha trộn hạt - phản hạt. Các hiện tượng này tuy đã được phát hiện từ năm 1964 bởi Christenson, Cronin, Fitch và Turlay trong các hệ kaon trung tính nhưng đến nay vẫn là một trong những hiện tượng ít được kiểm chứng thực nghiệm nhất.

Những vi phạm đối xứng CP tuy chỉ xuất hiện ở một tỉ lệ phân rã rất nhỏ bởi tương tác yếu nhưng rất phù hợp với Lagrangian của SM cho bộ 3 thế hệ quark. Có nhiều phương pháp khảo sát sự vi phạm đối xứng CP, ví dụ như qua những phân rã hiếm xác định bởi các meson K hoặc D. Tuy nhiên, hệ hạt B lại cho các kết quả định lượng mang nhiều triển vọng nhất.

Trong vài năm gần đây, vật lý về các hạt B được quan tâm nhiều từ các nhà lý thuyết đến các nhà thực nghiệm. Các detector BaBar (SLAC), BELLE (KEK), HERA-B (DESY), CLEO-III (Cornel), CDF-II và DØ-II (Fermilab) là những detector được sử dụng để nghiên cứu vật lý hạt B, đặc biệt về vi phạm đối xứng CP và sự pha trộn hạt - phản hạt trong SM. Các nghiên cứu này còn có thể mở ra một cánh cửa mới cho các ngành vật lý "ngoài SM".

Trong khuôn khổ của sự pha trộn trạng thái hạt-phản hạt từ phân rã, ta xét đến các phân rã của hạt B_d , từ đó xác định độ chênh lệch khối lượng của các trạng thái nặng và nhẹ qua thông số va chạm lepton.

Bắt đầu từ thời điểm sinh ra B_q^0 ($q = d, s$), $t = 0$, xác suất quan sát được một phân rã B_q^0 tại thời điểm t được biểu diễn như sau:

$$P(B_q^0 \rightarrow B_q^0) = \frac{\Gamma_q}{2} e^{-\Gamma_q t} \left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma_q}{2} t\right) + \cos(\Delta m_q t) \right) \quad (1)$$

trong đó: $\Gamma_q = \frac{\Gamma_q^H + \Gamma_q^L}{2}$, $\Delta\Gamma_q = \Gamma_q^H - \Gamma_q^L$, và $\Delta m_q = m_q^H - m_q^L$, với L và H là các ký hiệu tương ứng của các trạng thái vật lý “nặng” (Heavy) và “nhẹ” (Light) [7].

Đối với các meson B_d^0 , SM dự đoán rằng $\Delta\Gamma_d \ll \Delta m_d$ [1]. Do đó hệ thức trên được đơn giản hóa thành:

$$P(B_d^0 \rightarrow B_d^0) = \Gamma_d e^{-\Gamma_d t} \cos^2\left(\frac{\Delta m_d t}{2}\right) \quad (2)$$

và tương tự:

$$P(B_d^0 \rightarrow \bar{B}_d^0) = \Gamma_d e^{-\Gamma_d t} \sin^2\left(\frac{\Delta m_d t}{2}\right) \quad (3)$$

Khoảng thời gian dao động sẽ cho một phép đo trực tiếp độ sai biệt khối lượng Δm_d của chúng.

2. Phép đo Δm_d từ mẫu hai-lepton

Trong phép đo này, các meson và electron được chọn với $pt > 1 \text{ GeV}/c$. Nếu một số lepton được tìm thấy trên một bán cầu cho trước, thì chỉ lepton có pt lớn nhất được giữ lại. Mỗi lepton được khảo sát lần lượt để thu nhận thông tin về thời gian, và điện tích của nó được so sánh với điện tích của lepton tìm thấy trong bán cầu đối diện để theo dõi sự dao động. Lepton mang thông tin về thời gian phải liên kết với ít nhất hai va chạm trong các lớp khác nhau của Vertex Detector. Do đó, mỗi phân rã Z^0 có hai lepton trên hai bán cầu đối diện nhau sẽ dẫn đến một hoặc hai phép đo thời gian.

Trong số liệu thực tế của RUN I tại Fermilab, mẫu hai-lepton được chọn cho 1073 phép đo thời gian kết hợp với quan hệ cùng dấu, và 2151 phép đo kết hợp với quan hệ trái dấu. 2055 muon và 1169 electron được chọn bên bán cầu đo, và bên phía theo vết chứa 2057 muon, cùng với 1167 electron. Hiệu suất chọn lựa của Vertex Detector là $(88 \pm 1)\%$ đối với muon và $(82 \pm 1)\%$ đối với electron.

Phép mô phỏng mẫu toàn phần, bảng 1, cho thấy thành phần chính là từ các phân rã b bán-lepton trực tiếp. Tỷ lệ của phân rã hạ tầng ($b \rightarrow c \rightarrow \bar{l}$) khoảng 10%, và tỷ lệ các sự kiện hạt c còn lại là nhỏ

Bảng 1: Tỷ lệ thành phần của mẫu mô phỏng bên phía phép đo tham số va chạm

Nguồn gốc lepton	Tỷ lệ tương đối
$b \rightarrow l$	0.794
$b \rightarrow c \rightarrow \bar{l}$	0.096
Các lepton khác trong chuỗi phân rã b	0.030
Các giả lepton trong chuỗi phân rã b	0.027
Các hạt đỉnh sơ cấp trong bán cầu b	0.015
$c \rightarrow \text{lepton } \bar{l}$	0.033
u, d, s \rightarrow lepton	0.005

3. Phép đo thời gian phân rã B dùng tham số va chạm lepton

Phép đo Δm_d được rút ra từ khảo sát phân bố tham số va chạm thu được từ các sự kiện hai-lepton cùng dấu và trái dấu: đỉnh sơ cấp được phục hồi trên mặt phẳng thẳng góc ($R\phi$) cho mỗi sự kiện bằng phép fit đỉnh lạp có chứa thông tin sơ lược về chùm hạt, trong đó tại mỗi bước vết đóng góp lớn vào giá trị χ^2 bị loại bỏ cho đến khi không có phần đóng góp nào lớn hơn 5 đơn vị χ^2 . Tham số va chạm δ của lepton được đo đối với vị trí đỉnh sơ cấp và có dấu thời gian sống âm hoặc dương phụ thuộc vào vị

trí tương đối của đỉnh sơ cấp và phần giao nhau giữa lepton với jet dọc theo phương jet. Giá trị $t\delta = \delta/c$ là biến nhảy với thời gian sẽ được dùng sau này.

Độ chính xác của tham số va chạm được quyết định bởi độ chính xác của việc xác định đỉnh thứ cấp (xấp xỉ $\pm 50\mu\text{m}$ theo chiều ngang và $\pm 20\mu\text{m}$ theo chiều dọc)

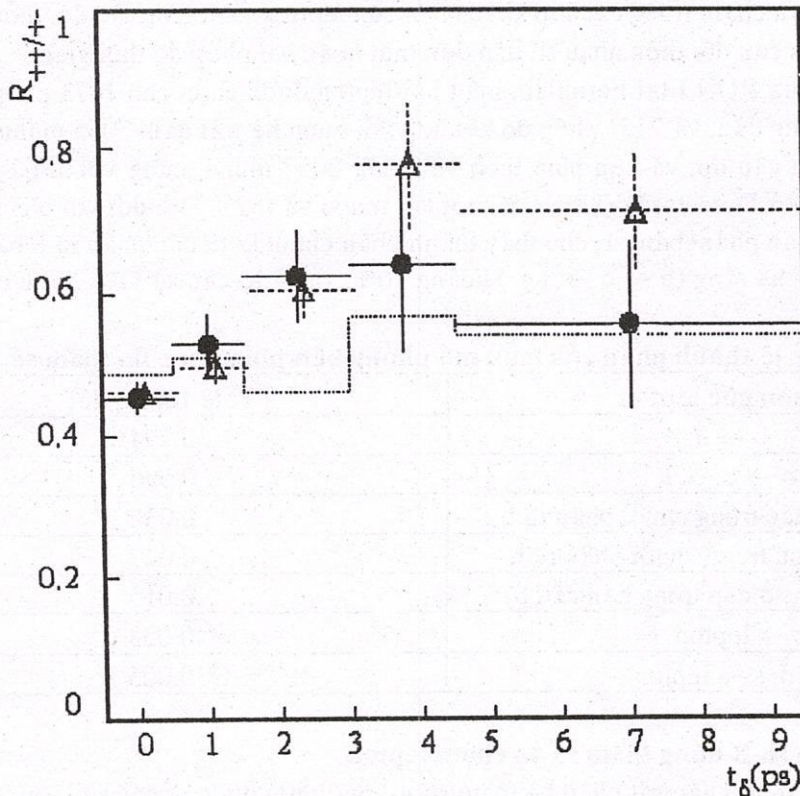
Tương quan giữa $t\delta$ và thời gian thực chính xác bị nhiễu bởi động học phân rã và bởi phân bố năng lượng của meson B. Độ phân giải thời gian chính xác hiệu dụng $(t\delta - tB_{\text{true}})/tB_{\text{true}}$ có bề rộng 70%, và 40% dịch chuyển về phía các giá trị nhỏ hơn do quy trình hồi phục chỉ được thực hiện trên mặt phẳng thẳng góc. Hiệu suất này thực tế đủ để khảo sát dao động B_d^0 chậm.

Các mẫu thực nghiệm và mô phỏng bao gồm các sự kiện với một phép đo $t\delta$ trong một bán cầu đơn, và các sự kiện với các phép đo $t\delta$ trong cả hai bán cầu. Mẫu thực nghiệm chứa 249 sự kiện cùng dấu và 455 sự kiện khác dấu với một phép đo; 412 sự kiện cùng dấu và 848 sự kiện trái dấu với hai phép đo. Khi Δm_d được đặt bằng 0.45 ps^{-1} trong phép mô phỏng, thì mẫu mô phỏng bao gồm 752 sự kiện cùng dấu và 1418 sự kiện trái dấu với một phép đo; 1407 sự kiện cùng dấu và 3032 sự kiện trái dấu với hai phép đo.

4. Phương pháp fit và các kết quả

Phân bố $t\delta$ thu được từ các sự kiện cùng dấu được chia cho phân bố $t\delta$ từ các sự kiện trái dấu, và phân bố kết quả được xem xét như phân bố $R_{++/+-}(t\delta)$ (hình 1).

Các phân bố $R_{++/+-}$ thu được từ thực nghiệm và mô phỏng được so sánh với nhau, dùng phép fit χ^2 chia khoan với Δm_d là tham số tự do duy nhất. Đối với một giá trị Δm_d cho trước, trong phép fit các số liệu mô phỏng đã được điều chỉnh cho phù hợp với các xác suất đã tính.



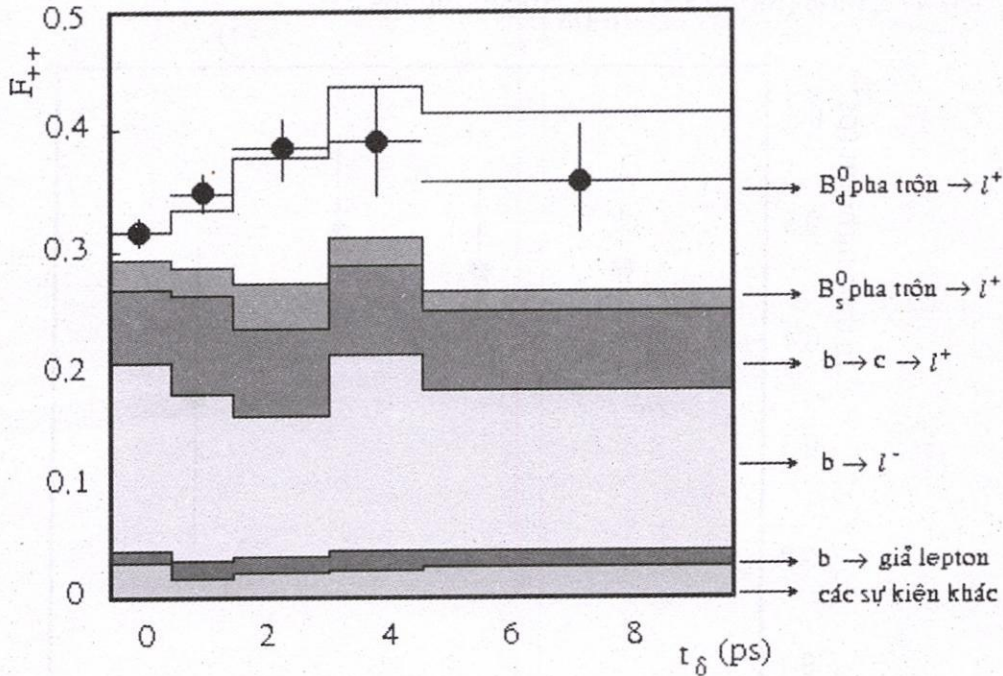
Hình 1: Tỷ số $R_{++/+-}$ của phân bố $t\delta$ thu được từ các sự kiện cùng dấu và trái dấu khi cả hai lepton đều có p_t lớn hơn $1 \text{ GeV}/c$. Chấm tròn ứng với các sự kiện thực nghiệm, tam giác ứng với các sự kiện mô phỏng với $\Delta m_d = 0.47 \text{ ps}^{-1}$. Đường chấm ứng với lý thuyết về sự trộn lẫn độc lập thời gian.

Giá trị Δm_d thu được từ phương pháp này là: $\Delta m_d = 0.47 \pm 0.08 \text{ps}^{-1}$, với χ^2 tương ứng là 7.5 đối với 11 bậc tự do. Kết quả fit cho các thành phần của mẫu cùng dấu được liệt kê trong bảng 2.

Bảng 2: Thành phần của mẫu cùng dấu bên phía phép đo t_δ

Loại sự kiện	Tỉ lệ
$\bar{B}_d^0 \rightarrow B_d^0 \rightarrow \bar{l}$	0.121
$\bar{B}_s^0 \rightarrow B_s^0 \rightarrow \bar{l}$	0.105
$b \rightarrow c \rightarrow \bar{l}$	0.209
\bar{B}^0 không trộn lẫn, $B^\pm, \Lambda_b \rightarrow l$	0.455
$b \rightarrow$ giả l	0.032
Những sự kiện khác	0.078

Hình 2: Biểu diễn tỉ lệ các liên hệ cùng dấu F_{++} ứng với phép đo Δm_d cuối.



Hình 2: Tỉ lệ F_{++} của các liên hệ cùng dấu thu được khi cả hai lepton có p_t lớn hơn 1 GeV/c, với sự đóng góp từ nhiều nguồn khác nhau theo như mô phỏng.

Từ hình 2 ta có thể thấy rằng sự tăng thời gian là gây bởi các sự kiện pha trộn $B_d^0 - \bar{B}_d^0$, đáng điệu của các thành phần khác là phẳng. Số B_d^0 pha trộn và B_s^0 pha trộn trong mẫu cùng dấu là tương đương nhau phù hợp với lý thuyết. Trong các biểu thức này f_d và f_s là các tỉ lệ tương ứng của meson B_d^0 và B_s^0 trong một jet b .

Vì các phân rã hạ tầng giống như các phân rã B^0 pha trộn, nên có một phần đóng góp rất lớn từ các sự kiện $b \rightarrow c \rightarrow l$. Đóng góp từ phân rã trực tiếp $b \rightarrow l$ gần bằng 50% vì sự dao động có thể xảy ra trong bán cầu đối diện. Đóng góp từ các loại sự kiện khác là nhỏ: $b \rightarrow$ giả lepton, chuỗi phân rã $b \rightarrow X \rightarrow l$, các hạt đỉnh sơ cấp trong các sự kiện $b\bar{b}$, và các sự kiện quark nhẹ ($udsc$).

5. Khảo sát sai số hệ thống

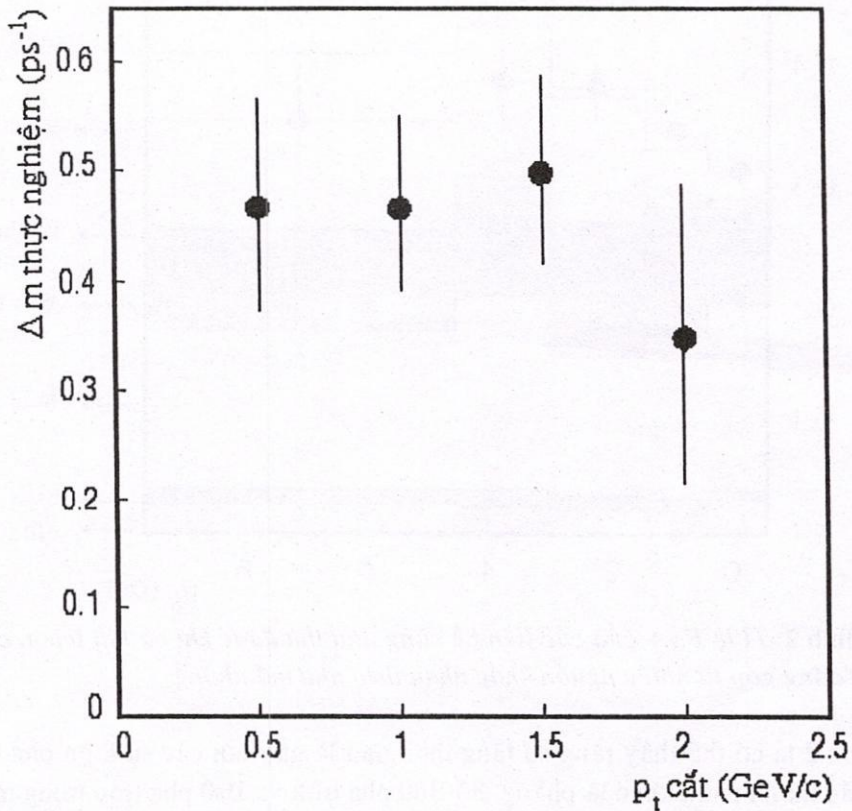
Sai số hệ thống trong giá trị đo trên được tính bằng cách thay đổi các thông số liên quan của phép mô phỏng và thực hiện lại việc fit Δm_d . Các kết quả được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3: Những đóng góp sai số hệ thống trên Δm_d

Tham số	Giá trị trung bình	Sai số	Ảnh hưởng lên Δm_d (ps^{-1})
Thời gian sống B_d	0.57 ps	± 0.05 ps	∓ 0.012
Thời gian sống b toàn phần	1.567 ps	± 0.020 ps	∓ 0.003
f_d	0.392	± 0.022	∓ 0.010
f_s	0.100	± 0.022	∓ 0.045
$\text{Br}(b \rightarrow l)$	0.110	± 0.010	∓ 0.050
$\text{Br}(b \rightarrow c \rightarrow \bar{l})$	0.081	± 0.008	∓ 0.046
Tỉ lệ $c \rightarrow \bar{l}$	0.030	± 0.003	∓ 0.003
Tỉ lệ phong	0.034	± 0.007	∓ 0.015
χ_s	0.50	-0.03	+0.015

Cộng theo phép cầu phương đóng góp từ những sai số hệ thống cho trong bảng 3 ta có kết quả:

$$\Delta m_d = 0.47 \pm 0.08 \text{ (thống kê)} \begin{matrix} +0.09 \\ -0.08 \end{matrix} \text{ (hệ thống)} \text{ps}^{-1} \quad (4)$$



Hình 3: Giá trị Δm_d đo được đối với các cách cắt p_T khác nhau

6. Kết luận

Sự dao động độc lập thời gian $Bd0 - \bar{B}d0$ được đo từ các phân bố tham số va chạm lepton có pt cao cho kết quả:

$$\Delta m_d = 0.47 \pm 0.08 \text{ (thống kê)} \begin{matrix} +0.09 \\ -0.08 \end{matrix} \text{ (hệ thống)} \text{ps}^{-1} \quad (5)$$

tương ứng với:

$$\Delta m_d = \left(3.09 \pm 0.0533 \begin{matrix} +0.0600 \\ -0.0533 \end{matrix} \right) 10^{-4} \text{ eV}/c^2 \quad (6)$$

Dùng giá trị trung bình $\tau_{B_d^0} = 1.57 \pm 0.050$ ps [10] ta được:

$$x_d = \frac{\Delta m}{\Gamma} = 0.738 \pm 0.101 \begin{matrix} +0.140 \\ -0.124 \end{matrix} \quad (7)$$

MEASUREMENT OF ΔM_D ON THE $B_D^0 - \bar{B}_D^0$ MIXING

Nguyen Mong Giao, Mai Van Nhon, Hoang Thi Kieu Trang

ABSTRACT: In the Standard Model (SM), the $B_q^0 - \bar{B}_q^0$ ($q = d, s$) mixing is a consequence of second order weak interactions. Starting with a B_q^0 meson produced at time $t = 0$, the probability to observe a B_q^0 (or \bar{B}_q^0) decaying at the time t can be written:

$$P(B_d^0 \rightarrow B_d^0) = \Gamma_d e^{-\Gamma_d t} \cos^2\left(\frac{\Delta m_d t}{2}\right)$$

$$P(B_d^0 \rightarrow \bar{B}_d^0) = \Gamma_d e^{-\Gamma_d t} \sin^2\left(\frac{\Delta m_d t}{2}\right)$$

where $\Gamma_d = \frac{\Gamma_d^H + \Gamma_d^L}{2}$, $\Delta\Gamma_d = \Gamma_d^H - \Gamma_d^L$, $\Delta m_d = m_d^H - m_d^L$. L and H denote respectively the light and heavy states. The oscillation period gives a direct measurement of the mass difference, Δm_d , between the two physical states.

The time-dependent $B_q - \bar{B}_q^0$ oscillations have been measured from the distributions of high p_t lepton impact parameter gives:

$$\Delta m_d = 0.531 \begin{matrix} +0.050 \\ -0.046 \end{matrix} \text{ (stat.)} \pm 0.078 \text{ (syst.) ps}^{-1}$$

Using the averaged value $\tau_{B_d^0} = 1.57 \pm 0.050$ ps, this gives:

$$x_d = \frac{\Delta m}{\Gamma} = 0.738 \pm 0.101 \begin{matrix} +0.140 \\ -0.124 \end{matrix}$$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] I. Bigi, M. Shifman, and N. Uraltsev, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **47**, 591 (1997) [hep-ph/9703290]
- [2] ARGUS Coll, H. Albrecht et al., Phys. Lett. **B324** (1994) 249
- [3] ALEPH Coll, D. Buskulic et al., Phys. Lett. **B313** (1993) 199
- [4] A. Ali Khan et al., [CP-PACS Collaboration], Phys. Rev. D **64**, 034505 (2001) [hep-lat/0010009]; 054504 (2001) [hep-lat/013020]
- [5] A. Crarnecki, K. Melnikov and N. Uraltsev, Phys. Rev. D **57**, 1769 (1998) [hep-ph/9706311]
- [6] N. Uraltsev, in At The Frontier of Particle Physics; Handbook of QCD, edited by M. Shifman (World Scientific, Singapore, 2001) [hep-ph/0010328]
- [7] The Babar Physics Book: Physics at Asymmetric B Factory, edited by P. F. Harrison and H. R. Quinn [Babar Collaboration], SLAC- R-0504
- [8] K. Ecklund [CLEO Collaboration], Talk at BCP4, Ise-Shima, Japan, February 19-23, 2001, <http://www.ins.cornell.edu/puplic/TALK/2001/>; R. Briere [CLEO Collaboration], Talk at Heavy Flavors 9, Pasadena, California, September 10-13, 2001, <http://3w.hep.caltech.edu/HF9/>
- [9] Lep V_{cb} Working Group, <http://lepvcb.web.cern.ch/LEPVCB/Winter.html>
- [10] S. Komamiya, plenary talk at the ICHEP95 Conference (Brussels, July 22-August 2, 1995)