

論文内容の要旨

論文題目 Study of Time Evolution of B Mesons
at the KEK B Factory

(KEK B ファクトリーを用いた
 B 中間子時間発展の研究)

氏名 戸村 友宣

宇宙がビッグバンによって生まれた直後には粒子と反粒子とが同じだけ存在していたはずである。しかし、現在の宇宙には粒子で構成された物質ばかりが存在し、反粒子で構成された反物質はほとんど観測されていない。宇宙の進化の過程でこのような物質と反物質のアンバランスを生じるためには、電荷共役 (C) とパリティ (P) の対称性が同時に破れていること、つまり CP の非保存が必要となる。 CP の破れは中性 K 中間子の系で 1964 年に観測されたが、当時これを説明できる理論は存在しなかった。1973 年、小林誠と益川敏英はクォークが 3 世代、6 種類以上存在し、それらの間に混合があれば CP 対称性の破れが起こり得ることを示した (KM 理論)。現在クォークは 6 種類が見つかっており、 KM 理論は素粒子物理学の標準理論を形成する重要な骨格となっている。しかしながら、 KM 理論の十分な検証はなされていない。 KM 理論が真に正しいか、 KM 理論が唯一の CP 非対称性の起源なのかが素粒子物理学の中心課題の一つとなっていた。

B ファクトリー実験では、第 3 世代に属する b クォークを含む B 中間子を大量に生成し、その崩壊過程を観測することで KM 理論のパラメータを精密に測定し、標準理論の精密な検証をおこなうことが出来る。本論文では KEK B ファクトリー実験で得られたデータを用い、中性及び荷電 B 中間子の寿命 (τ_{B^0} 及び τ_{B^+})、中性 B 中間子混合の振動周波数 (Δm_d)、そして CP 非保存のパラメータ ($\sin 2\phi_1$) を B 中間子崩壊の時間発展を解析することにより測定した。

KEK B ファクトリーでは KEKB 加速器により 8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を衝突させ、電子ビームの方向 (z 軸方向とする) に boost factor $(\beta\gamma)_T = 0.425$ で Lorentz boost された $\Upsilon(4S)$ 共鳴状態を生成する。 $\Upsilon(4S)$ はおよそ半数が $B^0\bar{B}^0$ に、残りの半数が B^+B^- の B 中間子対に壊れるが、 $\Upsilon(4S)$ の重心系では 2 つの B 中間子はほぼ静止しているので、2 つの B 中間子の崩壊点間の z 軸方向の距離 Δz から 2 つの B 中間子が崩壊するまでの固有時間の差 Δt が $\Delta t \simeq \Delta z / [c(\beta\gamma)_T]$ として計算できる。平均で Δz はおよそ 200 μm 程度であり、時間発展の解析には高い位置分解能を持った測定器が必要である。また、 Δm_d および $\sin 2\phi_1$ の測定には中性 B 中間子の flavor の同定が必要であり、高い精度と効率のためには e^\pm 、 μ^\pm のレプトンの同定、 K 中間子と π 中間子の選別などが重要になって来る。そのため KEK B ファクトリーでは、位置分解能の良いシリコン崩

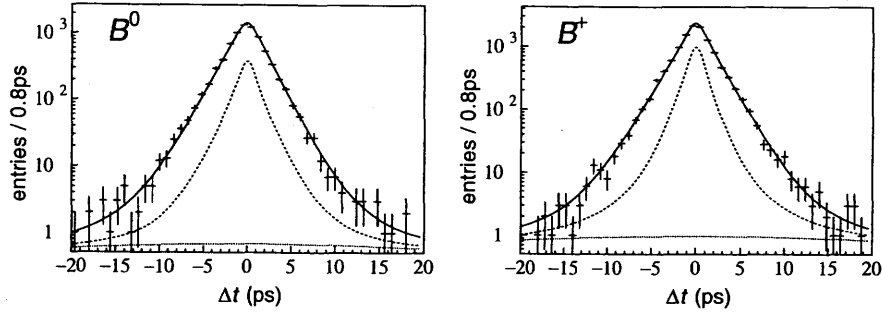


図 1: 中性 B 中間子対 (左)、及び荷電 B 中間子対 (右) の Δt 分布。

壊点検出器 (SVD)、 K/π 粒子識別のためのエネルギー損失 dE/dx を測定できる中央飛跡検出器 (CDC)、Cherenkov 光による識別が可能な aerogel Cherenkov カウンター (ACC)、粒子の飛行時間による識別が可能な飛行時間測定シンチレーションカウンター (TOF)、電子、光子を観測する電磁カロリメーター (ECL)、 K_L^0 粒子、ミュー粒子を観測する K_L^0/μ 検出器 (KLM) から構成される Belle 検出器が設置されている。

寿命の解析には 2000 年 1 月から 2001 年 7 月までに集められた 31.3×10^6 個の $B\bar{B}$ 対のデータを用いた。まず、次の崩壊モードを用いて片方の B 中間子の再構成をおこなった: $B^0 \rightarrow D^-\pi^+$ 、 $D^{*-}\pi^+$ 、 $D^{*-}\rho^+$ 、 $J/\psi K_S^0$ 、 $J/\psi K^{*0}$ 、 $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+$ 、 $J/\psi K^+$ 。特に SVD の情報を用いて崩壊点の位置を精確に求めた。もう一方の B 中間子については、残った荷電粒子の飛跡から崩壊点を求めた。こうして得られた Δt 分布は

$$P(\Delta t) = \frac{1}{2\tau_B} \exp\left(-\frac{|\Delta t|}{\tau_B}\right)$$

の確率密度分布に従うはずである。(ここで τ_B は B^0 または B^+ の寿命。) 実際にはこれに測定器の分解能などから来る resolution 関数 $R(\Delta t)$ やバックグラウンド事象の Δt 分布を考慮に入れる必要がある。特に resolution は測定する寿命と同程度であることから、この測定には $R(\Delta t)$ の精確な理解が要求される。これらを考慮した確率密度関数を用いて unbinned maximum likelihood 法により、 Δt 分布をフィットすることで B 中間子の寿命を決定する。再構成された 7863 個の中性 B 中間子、12047 個の荷電 B 中間子対の Δt 分布、及びフィットの結果を図 1 に示す。得られた中性、荷電 B 中間子の寿命、及びその比は、

$$\begin{aligned}\tau_{B^0} &= 1.554 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst}) \text{ ps} \\ \tau_{B^+} &= 1.695 \pm 0.026(\text{stat}) \pm 0.015(\text{syst}) \text{ ps} \\ \tau_{B^+}/\tau_{B^0} &= 1.091 \pm 0.023(\text{stat}) \pm 0.014(\text{syst})\end{aligned}$$

であった。これは現時点で最も精度の高い測定の一つである。

中性 B 中間子混合の解析にも寿命の解析同様 31.3×10^6 個の $B\bar{B}$ 対のデータを用いた。まず、片方の B 中間子を flavor が特定できる崩壊モード ($B^0 \rightarrow D^-\pi^+$ 、 $D^{*-}\pi^+$ 、 $D^{*-}\rho^+$) を用いて再構成をおこなった。 Δt を寿命の解析と同様にして求め、もう一方の B 中間子の flavor はその崩壊により生じた粒子の運動量、角度分布、粒子識別の情報などを用いて決定する。中性 B 中間子対が異なる flavor の状態 ($B^0\bar{B}^0$) に崩壊する場合、同じ flavor の状態 (B^0B^0 、 $\bar{B}^0\bar{B}^0$) に崩壊する場

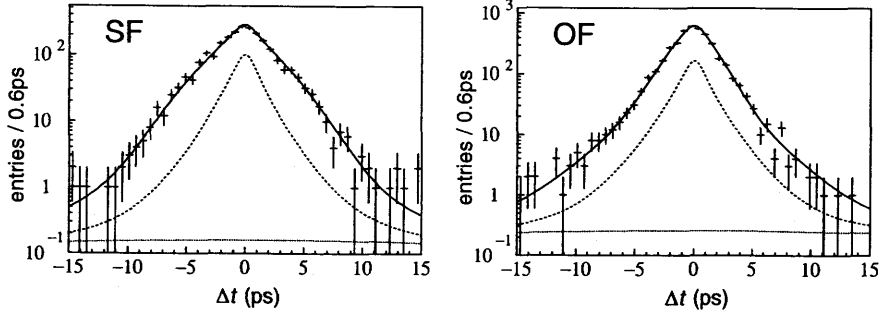


図 2: 同じ flavor(左)、及び異なる flavor(右)に崩壊した中性 B 中間子対の Δt 分布。

合の確率密度分布は、それぞれ

$$P^{\text{OF}}(\Delta t) = \frac{1}{4\tau_{B^0}} \exp\left(-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}\right) [1 + \cos(\Delta m_d \Delta t)]$$

$$P^{\text{SF}}(\Delta t) = \frac{1}{4\tau_{B^0}} \exp\left(-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}\right) [1 - \cos(\Delta m_d \Delta t)].$$

で与えられる。これに寿命の測定で求めた resolution 関数、バックグラウンド事象の Δt 分布、flavor の決定精度を考慮に入れ、再構成された 6660 個の中性 B 中間子対について Δt 分布 (図 2) をフィットした結果、得られた B^0 - \bar{B}^0 振動の周波数は

$$\Delta m_d = 0.528 \pm 0.017(\text{stat}) \pm 0.011(\text{syst}) \text{ ps}^{-1}$$

であった。これも現時点で最も精度の高い測定の一つである。

$\sin 2\phi_1$ の解析には 2000 年 1 月から 2002 年 7 月までに得られた 85×10^6 個の $B\bar{B}$ 対のデータを用いた。この解析には中性 B 中間子の CP 固有状態への崩壊を再構成する必要がある。今回は CP 固有値 $\xi_f = -1$ のモードとして、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$, $\psi(2S)K_S^0$, $\chi_{c1}K_S^0$, $\eta_c K_S^0$ を、 $\xi_f = +1$ のモードとして $B^0 \rightarrow J/\psi K_L^0$ を用いた。また、 $\xi_f = \pm 1$ の混合状態である $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ ($K^{*0} \rightarrow K_S^0 \pi^0$) も用いた。 Δt を寿命の測定と同様に、もう一方の B 中間子の flavor を Δm_d の解析のときと同様に決定した。時刻 t_{CP} に一方の B 中間子が固有値 ξ_f の CP 固有状態に崩壊し、時刻 t_{tag} にもう一方が flavor q ($+1: B^0$, $-1: \bar{B}^0$) の状態に崩壊したときの $\Delta t = t_{CP} - t_{tag}$ の確率密度分布は

$$P(\Delta t) = \frac{1}{4\tau_{B^0}} \exp\left(-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}\right) [1 - q\xi_f \sin(\Delta m_d \Delta t)]$$

で与えられる。この分布関数に寿命の測定で求めた resolution 関数、 Δm_d の測定で見積もった flavor の決定精度、バックグラウンド事象の Δt 分布を考慮して、2958 個の中性 B 中間子の CP 固有状態への崩壊事象の Δt 分布をフィットした結果が図 3 である。得られた CP 対称性の破れのパラメータ $\sin 2\phi_1$ は、

$$\sin 2\phi_1 = 0.719 \pm 0.074(\text{stat}) \pm 0.035(\text{syst})$$

であった。これは現時点で最高精度の測定結果の一つである。

以上の結果とその他の実験及び理論の結果を合わせて KM 理論のパラメータをフィットした結果が図 4 である。ここで $\bar{\rho}$, $\bar{\eta}$ は KM 理論のパラメータである。 $\sin 2\phi_1$ (図中では $\sin 2\beta_{\text{WA}}$) はもともと強い制限を与えている。またその他の結果から来る制限とも非常に良く一致しており、 KM 理論の正しさを実証している。

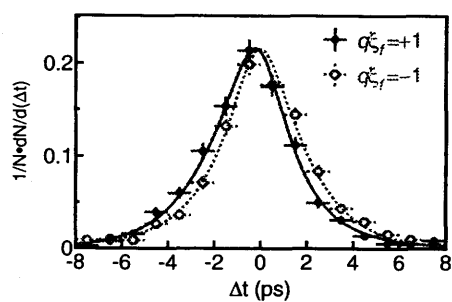


図 3: $q\xi_f = +1$ の時 (黒丸) と $q\xi_f = -1$ の時 (白丸) の Δt 分布。

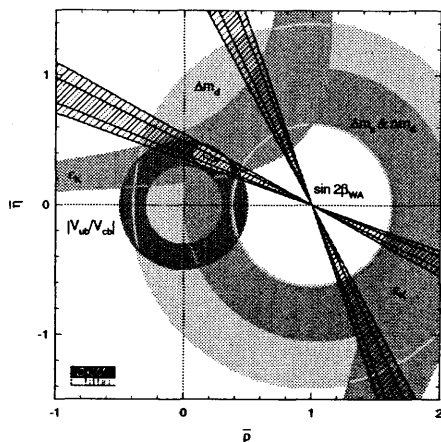


図 4: KM 理論のパラメータのフィット結果。

以上のように、本論文は B 中間子の寿命 τ_{B^0} と τ_{B^+} 、混合の振動周波数 Δm_d 、 CP 非対称のパラメータ $\sin 2\phi_1$ について最も精度の高い測定をおこない、 B ファクトリー実験における時間発展の解析により標準理論の精密な検証が可能であることを示した。また、測定結果は標準理論の予想と高い精度で一致しており、KM 理論が正しいことが実証された。