

# 論文内容の要旨

論文題目 Measurement of Form Factors and Search for  $CP$  violation in the process  $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  at the  $e^+e^-$  Collider BEPC

(BEPC  $e^+e^-$  衝突型加速器を用いた  $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  の構造因子の測定と  $CP$  の破れの探索)

氏名 園田真也

本論文では、 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  イベントを使って、 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  の構造因子の測定と Tensor observable  $T_{33}$  を用いた  $CP$  の破れの検証を行った。

構造因子の測定と  $CP$  の破れの検証には、バックグラウンドの少ないイベントが要求される。本研究では、 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  事象を用いる。 $\Lambda$  は寿命が長い粒子 ( $2.631 \times 10^{-10}$  s) なので、崩壊幅が狭く粒子を特定しやすい。バックグラウンドとなるイベントが少なく、粒子同士の相関を調べるためには  $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  イベントが適している。シグナルイベントの終状態は  $p\pi^-\bar{p}\pi^+$  なので4本の荷電粒子の飛跡が測定される。このような事象を4 prong イベントと定義する。 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  事象で生じる  $\pi^\pm$  の運動量の最小値は  $\sim 0.025$  GeV と小さい。最小値に近い運動量を持っている  $\pi^\pm$  の検出効率は低い。本来測定されるイベントは4本のトラックを持っているが、 $\pi^\pm$  のトラックを測定できないためにトラックが3本になるイベントがある。このようなイベントを3 prong イベントと定義する。統計量を稼ぐために、3 prong イベントもシグナルイベントとみなす。4 prong イベントを  $6738 \pm 84$ 、4 prong イベント中のバックグラウンドを  $252 \pm 12$ 、3 prong イベントで  $\pi^+$  を測定できなかったイベントの数は  $2871 \pm 59$ 、バックグラウンドは  $330 \pm 14$ 、 $\pi^-$  を測定できなかったイベントの数は  $2335 \pm 52$ 、バックグラウンドは  $279 \pm 12$ 、と見積もった。シグナルイベントに対してバックグラウンドの量は十分に少ないため信頼性の高い解析ができる。

$J/\psi$  の崩壊を特徴づけるパラメータは  $F_1$  と  $F_2$  があり構造因子と呼ばれる。 $CP$  の破れの検証では  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  の崩壊によって生成される粒子の運動量間の相関が解析の対象になる。崩壊粒子の運動量の方向は  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  のスピンの方向によって決定される。 $\Lambda(\bar{\Lambda})$  のスピンの方向は構造因子に依存している。崩壊粒子の運動をシミュレーションによって再現するためには構造因子の値が必要になる。これらの値は理論的には決定できないので実験的に求める必要がある。 $F_1$  と  $F_2$  を用いて  $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  の行列要素を記述すると、

$$M(e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}) = \bar{u}_e(q_1)\gamma_\mu u_e(q_2) \times \bar{u}_\Lambda(p_1)[F_1\gamma_\mu + F_2(\gamma_\mu \not{p}_\psi - \not{p}_\psi \gamma_\mu)]u_\Lambda(p_2) \quad (1)$$

となる。行列要素を二乗して電子・陽電子のスピンの方向と  $\Lambda\bar{\Lambda}$  のスピンの方向について平均をとると、

$$\sum_{e^+,e^-} \sum_{\Lambda,\bar{\Lambda}} |M_{e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}}|^2 \propto 1 + \frac{4p_\Lambda^2(1 - 4M^2(\frac{F_2}{F_1})^2)}{4m^2 + M^2 - 16M^2m\frac{F_2}{F_1} + 4M^2(4m^2 + M^2)(\frac{F_2}{F_1})^2} \cos^2\theta \quad (2)$$

と記述される。ここで、 $m$ 、 $M$  はそれぞれ  $\Lambda$ 、 $J/\psi$  の静止質量、 $\theta$  は  $\Lambda$  の polar angle を表す。この式は  $1 + \alpha \cos^2 \theta$  の形になっている。構造因子の比は実験で得られた  $\Lambda$  の polar angle 分布を上式でフィットして求める。図 1 は  $\Lambda$  の polar angle 分布を  $1 + \alpha \cos^2 \theta$  でフィットした図である。さらに、 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  の部分

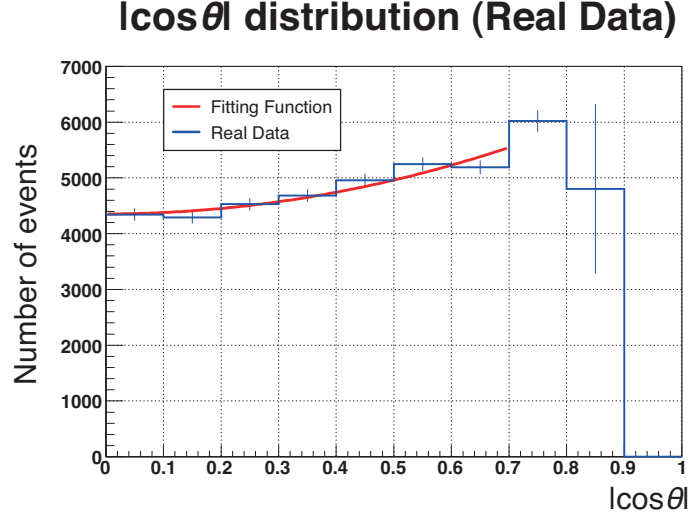


図 1:  $\Lambda$  の角度分布をフィットした図

崩壊幅を使うと、 $F_1$  と  $F_2$  を独立に決定することができる。 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  部分崩壊幅 は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \Gamma(J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}) &= \int \frac{1}{2E} |\mathcal{M}_{J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}}|^2 \frac{d^3 p_1}{(2\pi)^3 2E_1} \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3 2E_2} (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p - p_1 - p_2) \\ &= \frac{p_\Lambda}{32M\pi\sqrt{p_\Lambda^2 + m^2}} \int_{-1}^1 d\cos\theta \left[ 4M^2 F_1^2 (4m^2 + M^2 + 4p_z^2) - 64F_1 F_2 m M^4 + 16F_2^2 M^4 (4m^2 + M^2 - 4p_z^2) \right] \\ &= \frac{2p_\Lambda}{3\pi} \left[ (2m^2 + M^2) F_1^2 - 12F_1 F_2 m M^2 + 2F_2^2 M^2 (8m^2 + M^2) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\Gamma(J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda})$  は  $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  の部分崩壊幅を表す。 $E$  は  $J/\psi$  のエネルギー、 $p$  は  $J/\psi$  の 4 元運動量、 $p_1$  ( $p_2$ ) は  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ ) の 4 元運動量を表す。 $E_1$  ( $E_2$ ) は  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ ) のエネルギーを表す。 $\Lambda$  の角度分布をフィットして求めた構造因子の比と、eq. (3) から、構造因子は

$$\begin{aligned} F_{1,L} &= (9.93_{-0.82}^{+0.86} \pm 0.56) \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1} \\ F_{2,L} &= (4.90_{-1.59}^{+1.69} \pm 1.10) \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-2} \\ F_{1,R} &= (2.23_{-0.04}^{+0.04} \pm 0.02) \times 10^{-2} \text{ GeV}^{-1} \\ F_{2,R} &= (3.26_{-0.11}^{+0.12} \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-2} \end{aligned}$$

と求められた。使用する式が二次式のため構造因子は 2 種類求められる。それぞれ、 $L$  と  $R$  というインデックスをつけて区別した。

宇宙は常物質のバリオンが圧倒的に多く存在しており、反物質はわずかしか存在しない。このバリオン数の非対称性を説明するために、サハロフの三条件が必要である。すなわち、

- バリオン数が保存しないこと

- 宇宙が非平衡状態にあること
- CP 対称性の破れが存在すること

である。本研究では、 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  事象を用いてこの反応が  $CP$  を破ることを検証する。 $C$  変換とは粒子を反粒子に反転する操作で、 $P$  変換はパリティ変換で物理系の鏡像を作る操作を意味する。 $CP$  対称性とは  $C$  変換と  $P$  変換を行ったときに物理系が対称になる、つまり同じ頻度でその事象が発生するということである。強い相互作用と電磁相互作用は  $CP$  変換に対して不変であると考えられているが、弱い相互作用による崩壊では対称性が破れている。 $Z$  ボソンが  $\tau$  レプトンに崩壊する反応は  $CP$ -odd な反応であり、 $J/\psi$  が  $\Lambda \bar{\Lambda}$  対に崩壊する反応と類似している。この反応からの類推で  $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  事象における  $CP$  の破れを検証する。

$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  事象の一般的な行列要素を記述すると、

$$M(e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}) = \bar{u}_e(q_1)\gamma^\mu v_e(q_2) \times \bar{u}_\Lambda(p_1)[\gamma_\mu(a + b\gamma_5) + (p_{1\mu} - p_{2\mu})(c + id\gamma_5)]v_{\bar{\Lambda}}(p_2) \quad (4)$$

と表される。 $a, b, c, d$  は複素数で表されるパラメータである。ここで、 $d$  が  $CP$  の破れの原因となるパラメータである。 $CP$  の破れは  $\Lambda$  の電気双極子モーメントによって起こる。 $CP$  の破れを引き起こす相互作用のラグランジアンは次の式で記述される。

$$L_{c\bar{c}\Lambda} = -\frac{2}{3M}ed_\Lambda(p_1^\mu - p_2^\mu)\bar{c}\gamma_\mu c\bar{\Lambda}i\gamma_5\Lambda \quad (5)$$

ここで、 $p_i$  ( $i = 1, 2$ ) は、 $\Lambda, \bar{\Lambda}$  の運動量、 $e$  は電気素量、 $M$  は  $J/\psi$  の質量、 $c$  ( $\bar{c}$ ) は charm quark の波動関数、 $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ ) は  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ ) の波動関数、 $d_\Lambda$  は  $\Lambda$  の電気双極子モーメントを表す。 $\Lambda$  の電気双極子モーメントは行列要素のパラメータ  $d$  と次の関係式で表される。

$$d = -\frac{2}{3}\frac{g_V}{M^2}ed_\Lambda \quad (6)$$

ここで、 $g_V$  は vector coupling constant を表す。これらの関係式から  $d$  が値を持つことを示すことで  $\Lambda$  の電気双極子モーメントが値を持つことを示せるので、 $CP$  を破る相互作用が存在することが証明できる。 $CP$  の破れに対して敏感な値として次のテンソル量が考えられる。

$$T_{ij} = (\mathbf{q}_- - \mathbf{q}_+)_i(\mathbf{q}_- \times \mathbf{q}_+)_j + (\mathbf{q}_- - \mathbf{q}_+)_j(\mathbf{q}_- \times \mathbf{q}_+)_i \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{q}_\pm$  は崩壊粒子の運動量の空間成分を表している。特に (3, 3) 成分が最も  $CP$  の破れに対して敏感である。 $T_{ij}$  に  $C$  変換と  $P$  変換を行うと、

$$\begin{aligned} T_{ij} &\xrightarrow{P} (-\mathbf{q}_- + \mathbf{q}_+)_i(\mathbf{q}_- \times \mathbf{q}_+)_j + (-\mathbf{q}_- + \mathbf{q}_+)_j(\mathbf{q}_- \times \mathbf{q}_+)_i \\ &\xrightarrow{C} (-\mathbf{q}_+ + \mathbf{q}_-)_i(\mathbf{q}_+ \times \mathbf{q}_-)_j + (-\mathbf{q}_+ + \mathbf{q}_-)_j(\mathbf{q}_+ \times \mathbf{q}_-)_i \\ &= -T_{ij}. \end{aligned}$$

となつて、 $T_{ij}$  は符号が変わる。 $T_{33}$  分布を解析した結果、パラメータ  $d$  の値に 95% CL で制限をつけることができた。

$$\begin{aligned} -9.00 \times 10^{-3} < d_L \text{ GeV}^{-1} < 8.49 \times 10^{-3} & \quad (95\% \text{ CL}), \\ -7.07 \times 10^{-3} < d_R \text{ GeV}^{-1} < 10.7 \times 10^{-3} & \quad (95\% \text{ CL}), \end{aligned}$$

さらに、 $d$  の値から  $\Lambda$  の電気双極子モーメント ( $d_\Lambda$ ) に制限をつけることができた。

$$|d_{\Lambda,L}| < 2.22 \times 10^{-14} \text{ e cm} \quad (95\% \text{ CL}),$$

$$|d_{\Lambda,R}| < 2.64 \times 10^{-14} \text{ e cm} \quad (95\% \text{ CL}),$$

本実験の精度では電気双極子モーメントは見つからなかった。従って、 $CP$  対称性が破れている効果は見えなかった。