

## 論文内容の要旨

論文題目 : Study of  $J/\psi$  Meson Decaying into Baryon-Antibaryon

Final States with the BES-II Detector

(BES-II 検出器を用いた  $J/\psi$  中間子がバリオン-反バリオン

終状態へと崩壊する事象についての研究)

氏名 山村 大樹

本論文では、中国の高能研究所において行われた BES-II 実験での  $J/\psi$  データを用いることで、 $J/\psi$  粒子がバリオン-反バリオン対へと崩壊する事象として、 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}, \Xi^- \bar{\Xi}^+, \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+, \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$  の崩壊分岐比を測定した。 $J/\psi$  粒子の崩壊では、 $c\bar{c}$  対消滅による 3-グルーオンへの崩壊が支配的なプロセスであるが、この各々のグルーオンがクォーク-反クォーク対に分岐し、その後、3つのクォークおよび反クォークが結合することで、バリオン-反バリオンペアが生成される。本研究では、バリオンペアへの崩壊事象として、複数のモードについての崩壊分岐比を測定した。

本論文の構成は、イントロダクション(第1章)、BES-II 検出器の記述(第2章)に続いて、 $J/\psi$  の崩壊分岐比の normalization factor にあたる  $J/\psi$  の生成事象数( $N_{J/\psi}$ )の精密測定(第3章)、そのあとで、バリオン生成プロセスとして、 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}, \Xi^- \bar{\Xi}^+, \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+, \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$  の崩壊分岐比の測定を行い(第4-6章)、最後に、測定結果についての物理的考察および結論を述べた(第7-8章)。以下に、これらの内容の要旨をまとめる。

### (i) $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事象を用いた $N_{J/\psi}$ の決定 (第3章)

BES-II 実験グループでは、4-prong のハドロン事象を用いることで、 $N_{J/\psi}$  の測定を既に行ったが、 $J/\psi$  粒子のハドロン崩壊に関する理論の不定性が大きいことに起因して、 $N_{J/\psi}$  の測定誤差が 4.7% と非常に大きなものになっている( $N_{J/\psi} = (5.77 \pm 0.27) \times 10^7$ )。この不定性は、 $J/\psi$  の崩壊分岐比の測定誤差にそのまま響いてしまうため、より精度のよい  $N_{J/\psi}$  決定を行うべく本研究で考えたのが、 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  事象を用いた測定である。この測定において、 $N_{J/\psi}$  は次式によって決定される：

$$N_{J/\psi} = \frac{N_{\mu\mu} - N_{BG}}{\varepsilon_{trig} \cdot \varepsilon_{\mu\mu} \cdot Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)}$$

$N_{\mu\mu}$ :	セレクションで残ったイベント数
$N_{BG}$ :	残ったバックグラウンド数
$\varepsilon_{\mu\mu}$ :	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$ の selection efficiency
$\varepsilon_{trig}$ :	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$ の trigger efficiency

ここで  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  は、その崩壊分岐比が非常に良い精度で測定されているため ( $Br = (5.94 \pm 0.06)\%$  : PDG value)、 $N_{J/\psi}$  の精密な測定が可能となる。本論文では、2-prong 事象のセレクションを行ったうえで、運動量や TOF、シャワーカウンターの情報に基づいた事象選

扱を行った結果、以下の測定値を得た：

$$N_{J/\psi} = (5.749 \pm 0.005(\text{stat.}) \pm 0.106(\text{sys.})) \times 10^7$$

BES グループと consistent な結果が得られたうえで、その精度については、我々の方が格段によい結果となっているため、本研究でバリオン生成事象の崩壊分岐比を測定するにあたっては、 $N_{J/\psi}$  の値について、我々が得た測定値を用いることにした。

(ii) バリオン生成事象の崩壊分岐比の測定 (第 4-6 章)

◆  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$  の解析

$J/\psi \rightarrow p\bar{p}$  は、TOF, 運動量等の制限によって、他のハドロン対やレプトン対の事象の殆どを除くイベントセレクションを行った。また本モードの解析においては、崩壊分岐比を測定する前に、proton の角度分布の解析を行った。 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$  のような QCD 過程の場合、崩壊後のバリオンの角度分布については、

$$f(\cos\theta) \propto 1 + \alpha \cdot \cos^2\theta$$

の形になることが測定によりわかっているが、崩壊過程における QCD の理解が厳密でないことにより、 $\alpha$  の値は未知数である。そこで本研究では、事象選択後の proton の角度分布の解析を行うことで、 $\alpha$  の値について、 $\alpha = 0.7623 \pm 0.0375$  なる測定結果を得た。これをふまえて、当事象のモンテカルロシミュレーションを行い、その selection efficiency を評価した。 $Br(J/\psi \rightarrow p\bar{p})$  については、以下の測定結果を得た：

$$Br(J/\psi \rightarrow p\bar{p}) = (2.12 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.05(\text{sys.})) \times 10^{-3}$$

◆  $J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+, \Sigma^-\bar{\Sigma}^+, \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$  の解析

$J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+, \Sigma^-\bar{\Sigma}^+, \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$  の各モードについては、以下のような崩壊をするイベントを解析した：

$$J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+ \rightarrow (\Lambda \pi^-)(\bar{\Lambda} \pi^+) \rightarrow (p \pi^- \pi^-)(\bar{p} \pi^+ \pi^+)$$

$$J/\psi \rightarrow \Sigma^-\bar{\Sigma}^+ \rightarrow (\Lambda \pi^-)(\bar{\Lambda} \pi^+) \rightarrow (p \pi^- \pi^-)(\bar{p} \pi^+ \pi^+)$$

$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \rightarrow (\Lambda \pi^+)(\bar{\Lambda} \pi^-) \rightarrow (p \pi^- \pi^+)(\bar{p} \pi^+ \pi^-)$$

ここで上式をみるとわかるように、 $J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+$  と  $J/\psi \rightarrow \Sigma^-\bar{\Sigma}^+$  については、resonance を構成する粒子の組み合わせも含め、全く同一の終状態になっている。したがって、 $\Xi^-\bar{\Xi}^+$  と  $\Sigma^-\bar{\Sigma}^+$  に関しては、同じセレクションのもとで、同時に解析を行った。

これらのプロセスの事象選択に際しては、バックグラウンドをなるべく小さくする方法を模索した。例えば、 $J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+, \Sigma^-\bar{\Sigma}^+$  の解析においては、 $J/\psi \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$  が大きなバックグラウンドの 1 つとなる。そこでこの場合には、“ $p \pi^- \pi^+$ ” と “ $\bar{p} \pi^+ \pi^-$ ” の不変質量について scattering plot をとり、resonance の存在がはっきりと確認できる  $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-$  イベントのみを選択的に排除するなどの工夫を施した。こうした事象選択の結果、本研究では、 $J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+, \Sigma^-\bar{\Sigma}^+, \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$  のどのモードに対しても、バリオンの不変質量分布において、はっきりとしたシグナルピークを観測することができた(図 1, 図 2)。質量スペクトルに対しては、シグナルとバックグラウンドに関して fitting 解析を行い、各シグナル事象のイベント数およびその系統誤差を評価した。各崩壊モードの崩壊分岐比の測定結果は以下のとおりであり、いずれのモードに対しても従来の測定精度を凌ぐ結果が得られた：

$$\begin{aligned}
Br(J/\phi \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+) &= (1.08 \pm 0.03(stat.) \pm 0.05(sys.)) \times 10^{-3} \\
Br(J/\phi \rightarrow \Sigma^{*-} \bar{\Sigma}^{*+}) &= (1.25 \pm 0.14(stat.) \pm 0.09(sys.)) \times 10^{-3} \\
Br(J/\phi \rightarrow \Sigma^{*+} \bar{\Sigma}^{*-}) &= (1.46 \pm 0.16(stat.) \pm 0.10(sys.)) \times 10^{-3}
\end{aligned}$$

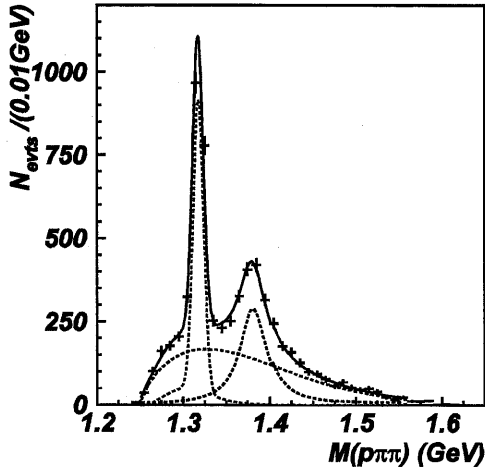


図1:  $J/\phi \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+, \Sigma^{*-} \bar{\Sigma}^{*+}$  の解析において得られた  $M(p\pi^-\pi^+)$  分布 ( $M(p\pi^-\pi^+)$  は、" $p\pi^-\pi^+$ " についての不変質量。) : 本解析では、この分布に対して、(i)  $\Xi^-$  resonance (紫), (ii)  $\Sigma^{*-}$  resonance (赤), (iii) バックグラウンド (青) の3つを足し合わせた関数でのフィッティングを行った。

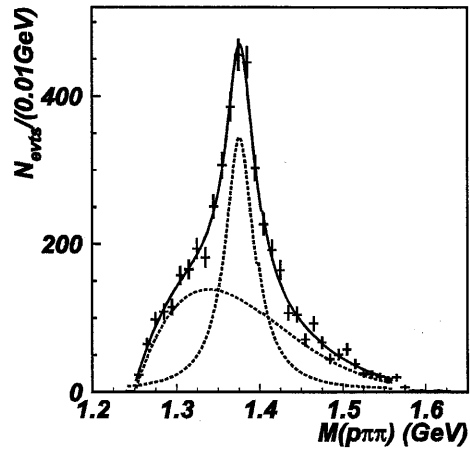


図2:  $J/\phi \rightarrow \Sigma^{*+} \bar{\Sigma}^{*-}$  の解析において得られた  $M(p\pi^-\pi^+)$  分布 ( $M(p\pi^-\pi^+)$  は、" $p\pi^-\pi^+$ " についての不変質量。) 本解析ではこの分布に対して、(i)  $\Sigma^{*+}$  resonance (赤), (ii) バックグラウンド (青) を足し合わせた関数でのフィッティングを行った。

### (iii) 測定結果に対する考察および結論 (第7-8章)

以上の測定結果をまとめると、

$$\begin{aligned}
Br(J/\phi \rightarrow p\bar{p}) &= (2.12 \pm 0.01(stat.) \pm 0.05(sys.)) \times 10^{-3} \\
Br(J/\phi \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+) &= (1.08 \pm 0.03(stat.) \pm 0.05(sys.)) \times 10^{-3} \\
Br(J/\phi \rightarrow \Sigma^{*-} \bar{\Sigma}^{*+}) &= (1.25 \pm 0.14(stat.) \pm 0.09(sys.)) \times 10^{-3} \\
Br(J/\phi \rightarrow \Sigma^{*+} \bar{\Sigma}^{*-}) &= (1.46 \pm 0.16(stat.) \pm 0.10(sys.)) \times 10^{-3}
\end{aligned}$$

統計数が多いこと、及び、 $J/\phi$  の生成事象数の精密測定が行えたことに起因して、どのモードに対しても、従来の精度を凌ぐ測定結果が得られた。なお、 $J/\phi \rightarrow \Sigma^{*-} \bar{\Sigma}^{*+}$  と  $J/\phi \rightarrow \Sigma^{*+} \bar{\Sigma}^{*-}$  に関しては、その崩壊分岐比が大きく異なる場合に、強い相互作用におけるアイソスピン対称性の破れや、 $J/\phi \rightarrow \Sigma^* \bar{\Sigma}^*$  における電磁相互作用の寄与の大きさを議論することができるが、本測定結果では、測定誤差の範囲内で一致する結果が得られた。さらに図3は、各プロセスの崩壊分岐比とバリオン質量の関係を示したものである。ここでは、本研究での測定結果のほかにも、あらゆるモードでの PDG value を載せた。図内の緑の曲線は、 $Br(J/\phi \rightarrow p\bar{p})$  を基準にした phase space の suppression 曲線であり、この図から、 $J/\phi$  粒子のバリオンペア生成事象では、その崩壊分岐比の大まかな構造が、バリオン質量の phase space によって説明できることがわかった。

なお、 $J/\phi$  粒子のバリオンペアへの崩壊プロセスについては、ボルツらの理論研究者により、摂動論の枠組み内での QCD 計算が試みられている。そこで本論文では、崩壊分岐比の

測定結果について、彼らの理論予測との比較も行い、 $J/\psi \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+$  の崩壊分岐比が phase space 曲線をやや下回っている点については、ストレンジクォーク生成に対する suppression によるものと解釈することができた。

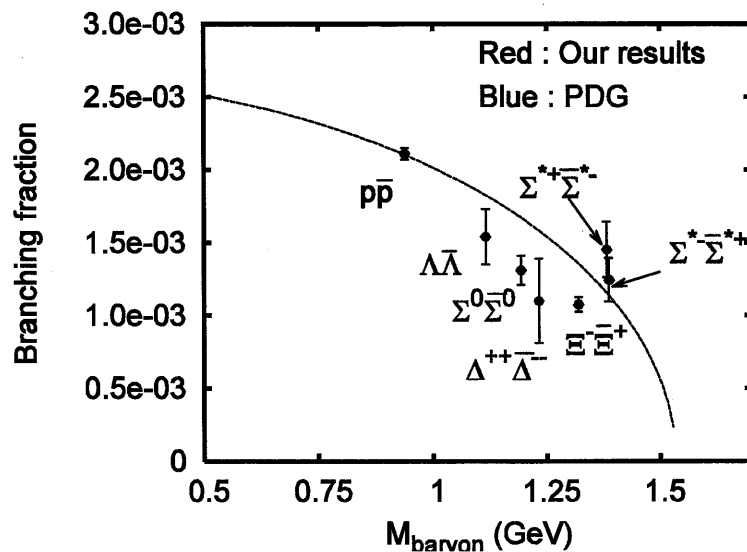


図 3 :  $J/\psi$  粒子がバリオンペアに崩壊する事象についての崩壊分岐比とバリオン質量の関係。我々の測定結果(赤プロット)のほか、あらゆるモードについての PDG value(青プロット)も載せた。緑の曲線は、 $\text{Br}(J/\psi \rightarrow p\bar{p})$  を基準にした phase space の suppression 曲線。