

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540305

研究課題名（和文） ハドロン衝突におけるクォークオニウム生成機構の解明

研究課題名（英文） Investigation of quarkonium production mechanisms in hadron-hadron collisions

研究代表者

受川 史彦（UKEGAWA FUMIHIKO）

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：10312795

研究成果の概要（和文）：

高エネルギーのハドロン・ハドロン衝突における重いクォークオニウム粒子の生成機構の研究を行った。米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・陽子衝突型加速器テバトロンでのCDF実験と、欧州CERN研究所のLHC加速器でのATLAS実験で得られた陽子・反陽子および陽子・陽子衝突事象を解析し、 $J/\psi$ 、 $Upsilon$ などの重いクォークオニウム粒子の生成を測定した。これにより、その生成機構の理解が深まった。

研究成果の概要（英文）：

Production mechanisms of heavy quarkonia in high-energy hadron-hadron collisions have been studied. Data obtained with the CDF experiment at the Tevatron proton-antiproton collider at Fermilab, and the ATLAS experiment at the Large Hadron Collider at CERN, are analyzed to study the production properties of  $J/\psi$  and  $Upsilon$  particles, including cross sections and spin alignment, providing new insight into their production mechanisms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 素粒子（実験）、ハドロン・ハドロン衝突、クォークオニウム生成、 $J/\psi$ 、 $Upsilon$ 

## 1. 研究開始当初の背景

高エネルギーのハドロン・ハドロン衝突における重いクォークオニウム粒子の生成は、多くの謎をはらんでいた。特に、チャーモニウム  $J/\psi$  および  $\psi(2S)$  の直接生成は、米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突実験CDFにおいて、1990年代に理論予言

のおよそ50倍の生成断面積が観測され、"CDF  $J/\psi$  anomaly"と呼ばれていた。

この理論予言と実験値の違いを説明するために、種々の試みがなされた。たとえば、従来の理論であるcolor singlet modelに対し、color octet modelが提唱された。このモデルでは、生成断面積の絶対値を予言することは不

可能であるが、クォークオニウム生成時のスピン偏極について、運動量が高くなるにつれ横偏極に近づく、という予言を与えた。ところが、CDF 実験による偏極度の測定は、これと一致せず、color octet model がクォークオニウム生成の主たる生成機構であることを支持しない。

よって、ハドロン・ハドロン衝突におけるクォークオニウムの生成がどのような過程によるのか、謎であった。

## 2. 研究の目的

前項に述べた 50 倍という理論と実験の不一致は、理論・実験の不定性により説明されるものではなく、新たな生成機構を必要とすることは明らかである。これを解明することが本課題の目的である。具体的には、以下の点に着目して研究を行う。

(1) 生成機構を探る際に重要な物理量である生成断面積、スピン偏極度などを高統計のデータを用いて測定する。また、別種の重いクォークであるボトムクォークのオニウム状態である Upsilon 粒子について同様の測定を行う。

(2) 生成機構のエネルギー依存性を知るため、研究開始当時に本格稼働を始めた欧州 CERN 研究所の陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider に設置された ATLAS 実験のデータを解析し、新しいエネルギー領域でのクォークオニウム生成の測定を行う。

以上を総合して、クォークオニウム生成の新たな機構を探る。

## 3. 研究の方法

米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いて 2011 年 9 月まで遂行された陽子・反陽子衝突実験 CDF と、欧州 CERN 研究所で 2009 年より本格稼働した陽子・陽子衝突実験 ATLAS を用いて行う。

CDF 実験は、重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突反応を観測し、最終的に積分輝度 10 fb<sup>-1</sup> 相当のデータを取得した(図 1)。

ATLAS 実験は重心系エネルギー 7 TeV および 8 TeV の陽子・陽子実験を行い、2012 年末

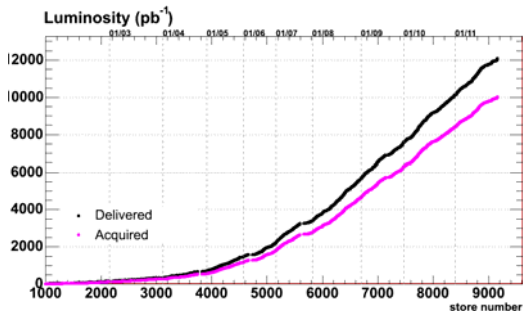


図 1 : CDF 実験での積分輝度の推移。

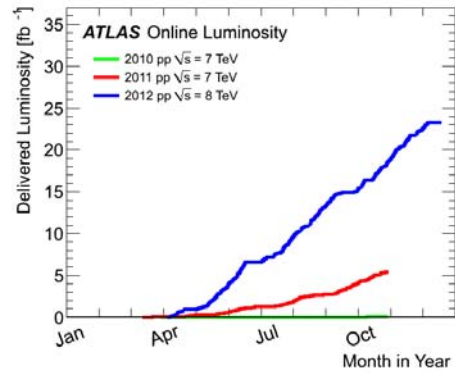


図 2: ATLAS 実験での積分輝度の推移。

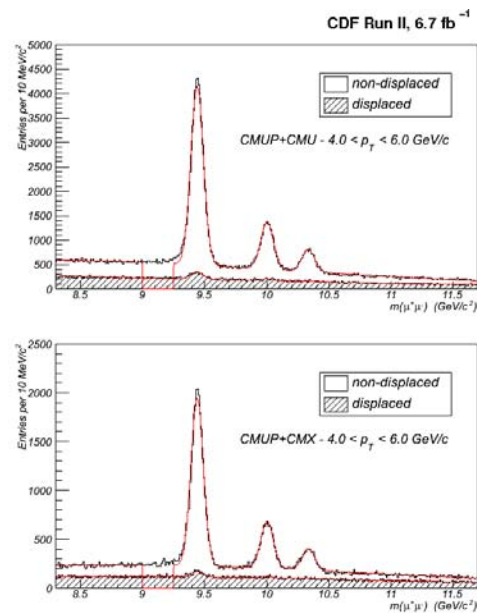


図 3: CDF 実験で再構成された Upsilon 粒子の信号。

には総計 27 fb<sup>-1</sup> 相当のデータを蓄積した(図 2)。

いずれも検出器の較正・理解が進み、高精度の物理測定が可能となっている。本課題の研究においては、重いクォークオニウム粒子の信号は、しばしば荷電レプトン対への崩壊により再構成する。特に、ミュー粒子対への崩壊様式が重要である。これらの実験で得られたデータを解析し研究を行った。

## 4. 研究成果

(1) CDF 実験のデータの解析では、Upsilon 粒子の生成時のスピン偏極度について、角分布の完全な測定が初めてなされた(論文③)。図 3 にその信号を示す。ミュー粒子対への崩壊が用いられた。Upsilon の 1S, 2S, 3S 状態が明確に分離されているのが分る。用いられたデータは 6.7 fb<sup>-1</sup> 相当であり、信号の事象数はおよそ 55 万, 15 万, 7.6 万である。各分布は、Upsilon の静止系における mu<sup>+</sup> の飛

翔方向を実験室系における Upsilon の飛翔方向を軸として定義し、その極角 theta と方位角 phi を用いて

$$\frac{d\Gamma}{d\Omega} \propto 1 + \lambda_\theta \cos^2 \theta + \lambda_\varphi \sin^2 \theta \cos 2\varphi + \lambda_{\theta\varphi} \sin 2\theta \cos \varphi$$

と表される。これまでの測定は、第3項以降を無視したものであったが、今回、3つの角と3つの偏極度パラメータを含む完全な角分布を測定した。

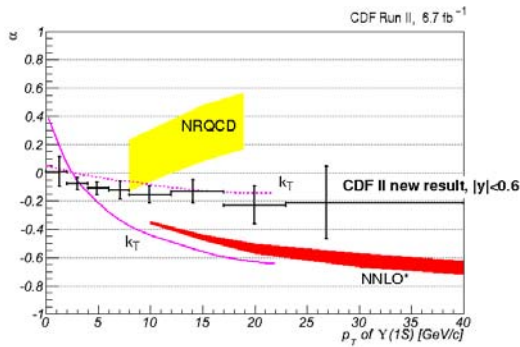


図 4: Upsilon 粒子の偏極度を横運動量の関数として示したものの。

以上のように測定された偏極度  $\lambda_\theta$  の横運動量依存性をいくつかの理論予言とともに図 4 に示す。実験値はおおむね無偏極であり、運動量依存性も弱い。これは CDF 実験の以前の結果と一致するが、D0 実験の結果とは一致しない。また、理論予言は実験結果をよく記述しているとは言い難い。

(2) ATLAS 実験の陽子・陽子衝突実験では、重心系エネルギー 7-8 TeV の領域での素粒子反応が初めて測定された。クォークオニウムについてもいくつかの結果が得られている。J/psi の生成について、 $2.2 \text{ pb}^{-1}$  のデータを用いて生成断面積の測定がなされた (論文⑤)。ミュオン対への崩壊が用いられた。図 5 にその信号の例を示す。ここでは信号の事象数は 6,700 である。この J/psi の信号はその起源として直接生成の他に、より重い粒子の崩壊によるものを含んでいる。特に B 粒子の崩壊の寄与は、J/psi の見かけの寿命を測定することにより、統計的に分離された。その割合は J/psi の横運動量に依存するが、低運動領域 (およそ 10 GeV/c 以下) では、おおむね 10% である。ここで B 粒子の寄与以外の部分を prompt 成分と呼ぶ。Prompt 成分には、直接生成された  $\chi_{c,c}$  や  $\psi(2S)$  の崩壊による寄与も含むが、直接生成の測定に向けての第一歩となる測定である。図 6 に prompt 成分の生成断面積をその横運動量の関数として示す。NLO color singlet model

は、実測値より少なくとも一桁小さく、運動量依存性も再現しない。NNLO\* 予言は一致度を改善するが、まだ不十分である。実験的には、上記の prompt 成分の残された非直接成分の寄与を測定し、真の直接生成 J/psi の生成断面積を測定すること、スピン偏極度の測定を行うことが重要である。

ATLAS 実験での他の測定に、Upsilon 粒子の生成断面積の測定 (論文①, ④)、新しい  $\chi_{b,b}$  状態の観測 (論文②) がある。Upsilon 粒子については、その偏極度の測定が望まれる。

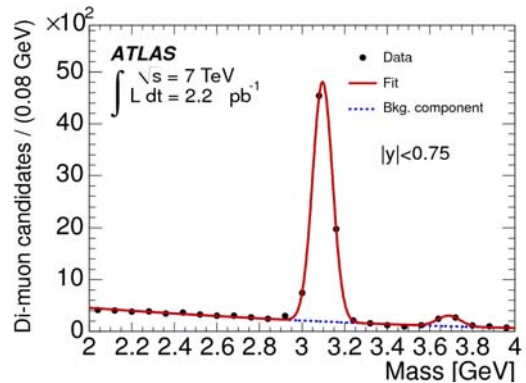


図 5: ATLAS 実験で再構成された J/psi 粒子の信号。

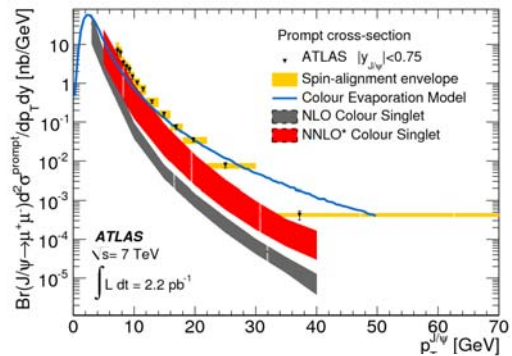


図 6: ATLAS 実験での prompt J/psi 粒子の生成断面積の測定。

(3) 以上により、Tevatron のエネルギー領域で見いだされたクォークオニウム生成の描像は、LHC のエネルギー領域において大きな変更を迫るものではなく、共通の理解が可能であることを示唆する。

(4) 今後の展望として、charm クォーク対の二重生成の探索を行うことが挙げられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① G. Aad, F. Ukegawa et al. (ATLAS Collaboration), “Measurement of Upsilon production in 7 TeV p p collisions at ATLAS”, Phys. Rev. D 87, 052004 (2013). 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.052004
- ② G. Aad, F. Ukegawa et al. (ATLAS Collaboration), “Observation of a new  $\chi_b$  state in radiative transitions to Upsilon(1S) and Upsilon(2S) at ATLAS”, Phys. Rev. Lett. 108, 152001 (2012). 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.152001
- ③ T. Aaltonen, F. Ukegawa et al. (CDF Collaboration), “Measurements of angular distributions of muons from Upsilon meson decays in p p-bar collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV”, Physical Review Letters 108, 151802 (2012). 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.151802
- ④ G. Aad, F. Ukegawa et al. (ATLAS Collaboration), “Measurement of the Upsilon(1S) production cross-section in p p collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV in ATLAS”, Phys. Lett. B 705, 9-27 (2011). 査読有  
DOI: 10.1016/j.physletb.2011.09.092
- ⑤ G. Aad, F. Ukegawa et al. (ATLAS Collaboration), “Measurement of the differential cross-sections of inclusive, prompt and non-prompt J/psi production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV”, Nucl. Phys. B 850, 387-444 (2011). 査読有  
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2011.05.015

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

受川 史彦 (UKEGAWA FUMIHIKO)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：10312795