

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400295

研究課題名(和文)ハドロン衝突における重いクォーク生成の物理

研究課題名(英文) Heavy Quark Production 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

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(ボトムおよびチャーム)の生成についての実験的研究を行った。米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器での陽子・反陽子衝突実験 CDF、および欧州 CERN 研究所の LHC 加速器での陽子・陽子衝突実験 ATLAS で得られた衝突事象を解析し、様々な終状態を用いて運動学的変数の広汎な領域で測定した。これにより、新たなエネルギー領域での重いクォーク生成に関する知見が得られ、素粒子の強い相互作用に関する理解が深まった。

研究成果の概要(英文)：Production of heavy quarks (bottom and charm) in high-energy hadron-hadron collisions are studied experimentally. Proton-antiproton collisions obtained by the CDF experiment at the Fermilab Tevatron collider, and proton-proton collisions by the ATLAS experiment at the LHC collider at CERN, are analyzed to measure the production properties of heavy quarks (bottom and charm) at the highest energies, using various final states in a wide range of kinematic variables. They have extended our knowledge of heavy quark production, providing insights into the strong interaction of elementary particles.

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子(実験) ハドロン・ハドロン衝突 重いクォークの生成 ボトム・クォーク チャーム・クォーク クォークオニウム J/psi B ハドロン

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の生成の実験的研究は、素粒子の強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) の検証として極めて重要である。重いクォークの生成は、その運動量のすべての領域について摂動論的 QCD が適用可能である。理論的には、1980 年代終わりから 1990 年代初めにかけて摂動論の next-to-leading order (NLO) の計算が得られ、最低次 (LO) に対する補正が大きいことが判明した。一方、同じころに米国フェルミ研究所の陽子・反陽子衝突型加速器テバトロン (重心系エネルギー 1.8 TeV) での実験で新たな測定が得られ始め、ボトム・クォークの open flavor 生成では、上記 NLO 理論予言の 2~3 倍の値を示した。また、重いクォークとその反クォークの束縛状態 (クォークオニウム) については、J/psi および psi (2S) の直接生成 (他の重い粒子状態からの崩壊によらない生成) について、理論予言の 50 倍程度の実験値が得られ、大きな謎となった。その後、様々な測定がなされ、また理論的にも進展があったが、open flavor 生成・クォークオニウム生成ともに、この不一致を十分に説明し解消するには到らなかった。2011 年からは欧州 CERN 研究所の LHC 加速器が本格稼働し、重心系エネルギー 7 TeV という未知の領域での素粒子反応を研究することが可能となった。2012 年までに初期データの解析を行いクォークオニウム生成など限られた測定が行われた。

2. 研究の目的

当研究の目的は、ハドロン・ハドロン衝突における重いクォークの生成について、理解を深めることにある。特に、LHC 加速器の稼働に伴い新たなエネルギー領域での測定が得られることとなり、従来の実験結果を含めて統一的に記述することのできる描像を構築することを目標とする。理論の検証には、実験との比較の際に、不定性を可能な限り小さくすることが重要である。このためには、測定における実験に固有の不定性を縮小させるとともに、理論のモデルに対する依存性を軽減するために、実験による測定を運動学的変数の広い範囲で行うなどの工夫が必要である。

3. 研究の方法

研究は、米国フェルミ国立加速器研究所の CDF 実験、および、欧州 CERN 研究所の ATLAS 実験を用いて行った。これらの実験で得られた陽子・(反)陽子衝突事象を解析し、重いクォークの生成に関する様々な測定を行った。特に後者は重心系エネルギー 7 - 8 TeV というこれまで未知であったエネルギー領域での素粒子反応を観測し、重いクォークの生成に関しても新たな知見を与えつつある。高統計のデータを蓄積し、様々な終状態を用いて測定する。理論予言との比較を通じ、QCD

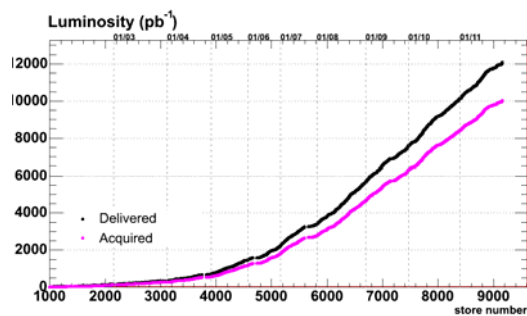


図 1: CDF 実験での積分輝度の推移。

の検証を行う。

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⁻¹ 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 年末には総計 27 fb⁻¹ 相当のデータを蓄積した (図 2)。2015 年からは重心系エネルギーが 13 TeV

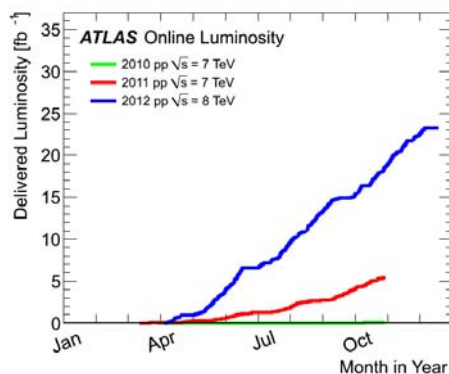


図 2: ATLAS 実験での積分輝度の推移 (2010 - 2012 年)。

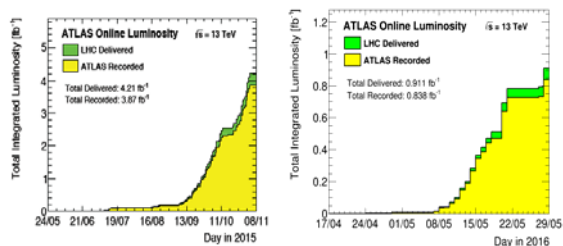


図 3: ATLAS 実験での積分輝度の推移 (2015 - 2016 年)。

へと増加し、現在も運転・データ収集中である (図 3)。

重いクォーク生成の信号は、しばしば荷電レプトン対への崩壊を用いた再構成がなされる。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

これらのデータを用いて様々な測定がなされた。以下に、主なものを記す。

(1) B⁺ 中間子の生成断面積の測定 (ATLAS 実

験)【論文⑦】

B^+ 中間子の生成は、 b クォークのハドロン化によるものが主であり、クォークの open flavor 生成に関する基本的な情報を与える。ATLAS 実験では、 B^+ 中間子を $J/\psi K^+$ への崩壊を用いて再構成し(図4)、重心系エネルギー7 TeV における微分生成断面積を、横運動量および rapidity の関数として測定した。2011 年に得られた積分輝度 2.4 fb^{-1} 相当のデータを用いた。図5に生成断面積の横運動量依存性を示す。低運動領域を除き、理論予言(FONLL)とおおむね一致する結果が得られている。

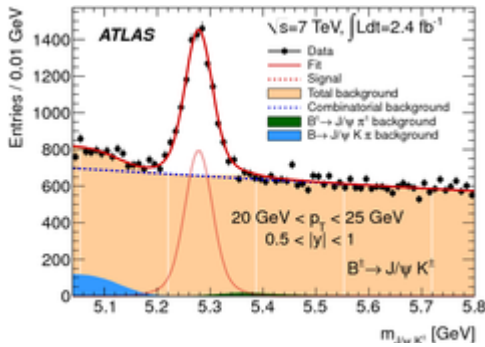


図4: ATLAS 実験で再構成された $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ の信号。

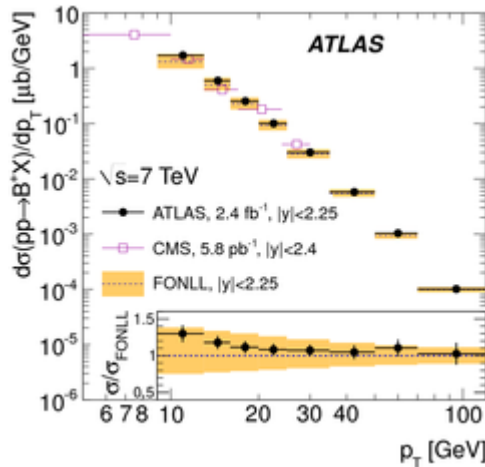


図5: ATLAS 実験での B^+ 中間子の生成断面積の測定。横軸は横運動量。

(2) J/ψ および $\psi(2S)$ 粒子の生成(ATLAS 実験)【論文①】

チャーム・クォークとその反クォークの束縛状態である J/ψ や $\psi(2S)$ 粒子の生成は、CDF 実験での測定値が理論模型 color singlet model の予言の約50倍となるなど、謎が多い。その後、color octet model などの新たな生成機構が提唱されたが、行列要素の絶対値が予言できないことや、生成時のスピン偏極度の予言と実験値の一致度が芳しくないことから、満足のゆく状況にはない。実験的には、

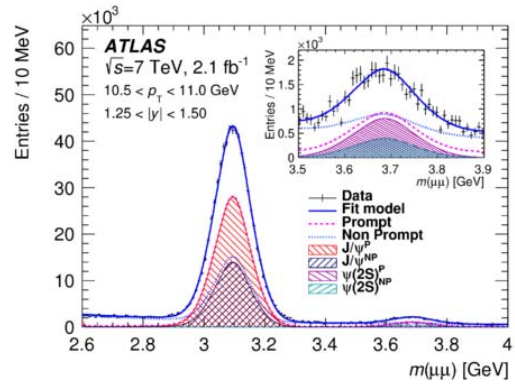


図6: ATLAS 実験で再構成された J/ψ および $\psi(2S)$ 粒子の信号。

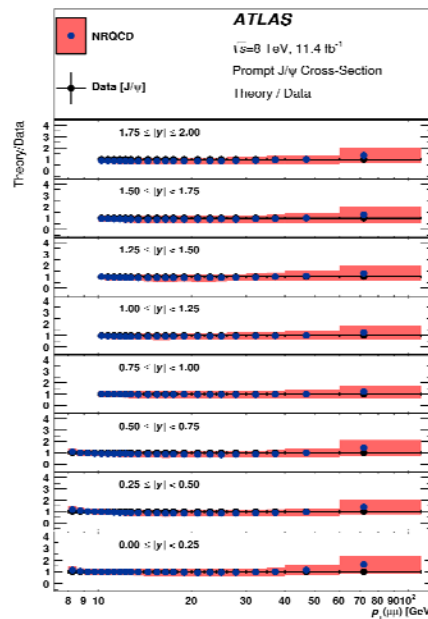


図7: ATLAS 実験での J/ψ 粒子の生成断面積の測定。NRQCD の予言値との比を示す。

より重い粒子状態(B 中間子や χ_c など)の崩壊による寄与を除き、直接生成の断面積を測定することが必要である。LHC 加速器のエネルギー領域での測定は極めて重要であり、今研究ではその測定がなされた。

ATLAS 実験は、2011 年および 2012 年の重心系エネルギー7 および 8 TeV のデータを用いた。 J/ψ および $\psi(2S)$ の信号を図6に示す。 B 粒子崩壊の寄与は見かけの寿命を用いて分離され、その成分を除いた部分(prompt成分)の生成断面積を測定した。得られた実験値と Non-Relativistic QCD の予言値の比を横運動量の関数として図7に示す(J/ψ 粒子のもの)。行列要素はこれまでの実験結果を再現するように調整されたものである。スピン偏極度の測定はなされておらず、無偏極を仮定して検出効率等の補正を行っている。今後、偏極度の測定を合わせて行うことが極めて重要で

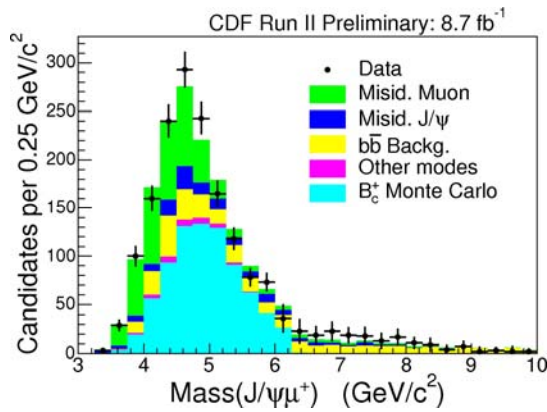


図8：CDF実験での B_c^+ 中間子の信号。

ある。

- (3) B_c^+ 中間子の生成断面積の測定 (CDF 実験) 【論文②】

B_c 中間子は2つの異なる重いクォークから成る粒子で、他にそのような粒子は存在しない。同粒子は1998年にCDF実験により発見され、その後、いくつかの実験でその性質が調べられている。生成機構にはいくつかの可能性が考えられるが、ボトム・クォークの open flavor 生成後のハドロン化の過程で真空中からチャーム・クォーク対が引き出され、ボトム・クォークと束縛されるものが主と考えられる。重いクォークについてこのような確率がどの程度あるのか、興味深い。

CDF 実験では、Run2 実験の全データ(およそ 10 fb^{-1}) を用いて、 B_c^+ 中間子のセミレプトニック崩壊 $B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu X$ を部分再構成した(図8)。 B^+ 中間子(クォーク組成 $b \bar{u}$) の崩壊 $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ との生成断面積の比を、 $0.211 \pm 0.012 \pm 0.021$ と測定した。 B_c^+ 中間子の崩壊分岐比を仮定し、既知の B^+ 中間子の生成断面積を用いると、 B_c^+ 中間子の生成断面積が導出できる。実験値は理論予言値より高めである。

- (4) その他の結果には、チャーム中間子の生成断面積の測定【論文③】、ボトム・クォークのハドロン化の際のストレンジ・クォークの割合の測定【論文④】、 $\psi(2S)$ 粒子の生成断面積の測定【論文⑤】、 χ_c 粒子の生成断面積の測定【論文⑥】などがある。

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 7 件)

- ① G. Aad, F. Ukegawa *et al.* (ATLAS Collaboration),
 “Measurement of the differential cross-sections of prompt and non-prompt production of J/ψ and

$\psi(2S)$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS detector”, Euro. Phys. J. C76, 238 (2016). 査読有

DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4050-8

- ② T. Aaltonen, F. Ukegawa *et al.* (CDF Collaboration),

“Measurement of the B_c^+ production cross section in p anti-p collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV”,

Phys. Rev. D 93, 052001 (2016). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.93.052001

- ③ G. Aad, F. Ukegawa *et al.* (ATLAS Collaboration),

“Measurement of D^{*+} , D^+ , D_s^{*+} meson production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”,

Nucl. Phys. B907, 717 (2016). 査読有

DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2016.04.032

- ④ G. Aad, F. Ukegawa *et al.* (ATLAS Collaboration),

“Determination of the ratio of b-quark fragmentation fractions f_s/f_d in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”,

Phys. Rev. Lett. 115, 262001 (2015). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.262001

- ⑤ G. Aad, F. Ukegawa *et al.* (ATLAS Collaboration),

“Measurement of the production cross section of $\psi(2S) \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-) \pi^+ \pi^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at ATLAS”,

JHEP 079 (2014). 査読有

DOI: 10.1007/JHEP09(2014)079

- ⑥ G. Aad, F. Ukegawa *et al.* (ATLAS Collaboration),

“Measurement of χ_{c1} and χ_{c2} production with $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS”,

JHEP 154 (2014). 査読有

DOI: 10.1007/JHEP07(2014)154

- ⑦ G. Aad, F. Ukegawa *et al.* (ATLAS Collaboration),

“Measurement of the differential cross section of B^+ meson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at ATLAS”,

JHEP 042 (2013). 査読有

DOI: 10.1007/JHEP10(2013)042

6. 研究組織

- (1) 研究代表者

受川 史彦 (UKEGAWA Fumihiko)

筑波大学・数理解物質系・教授

研究者番号：10312795