

**Photoproduction of the J/ψ meson
at HERA at next-to-leading order within
the framework of nonrelativistic QCD**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
des Departments Physik der Universität Hamburg

vorgelegt von
Mathias Butenschön
aus Hamburg

Hamburg
2009

Erstgutachter der Dissertation:	Prof. Dr. B. A. Kniehl
Zweitgutachter der Dissertation:	Prof. Dr. J. Bartels
Erstgutachter der Disputation:	Prof. Dr. B. A. Kniehl
Zweitgutachter der Disputation:	Prof. Dr. G. Kramer
Datum der Disputation:	23. Juni 2009
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr. G. Sigl
Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr. R. Klanner
Dekan der MIN-Fakultät:	Prof. Dr. H. Graener

Abstract

Nonrelativistic QCD (NRQCD) provides a rigorous factorization scheme which describes the production and decay of heavy quarkonia. It has been a desire for 13 years to know the NRQCD NLO predictions for both J/ψ hadroproduction and photoproduction, in order to be able to check the universality of the color octet long distance matrix elements (MEs) by comparing Tevatron and HERA data. In this work we calculate for the first time the NRQCD NLO prediction for direct photoproduction at HERA and compare our result with recent H1 data. Our results show clear evidence that the color octet mechanism of NRQCD is indeed realized in J/ψ photoproduction at HERA. We solved a number of open conceptual problems, probably the most important one being the issue of Coulomb singularities. We found a way to evaluate the virtual corrections without having to deal with them.

Zusammenfassung

Die nichtrelativistische QCD (NRQCD) bildet einen rigorosen Faktorisierungsformalismus zur Beschreibung der Produktions- und Zerfallsraten schwerer Quarkonia. Es besteht seit 13 Jahren der Wunsch, die NRQCD Vorhersagen zur J/ψ Hadroproduktion und Photoproduktion in nächstführender Ordnung (NLO) in α_s zu kennen, um durch den Vergleich von Tevatron- und HERA-Daten die Universalität der Farboctett langreichweitigen Matrixelemente zu testen. In dieser Arbeit berechnen wir zum ersten Mal die NRQCD NLO Vorhersagen zur direkten Photoproduktion bei HERA und vergleichen die Ergebnisse mit aktuellen H1 Daten. Unsere Resultate deuten darauf hin, dass der NRQCD Farboctettmechanismus in der Tat zur J/ψ Photoproduktion bei HERA beiträgt. In unserer Arbeit haben wir eine Reihe offener konzeptioneller Probleme gelöst. Das wichtigste betrifft wohl die Coulomb-Singularitäten. Wir haben einen Weg gefunden, die virtuellen Korrekturen zu berechnen, ohne dass sie in unserer Rechnung auftauchen.

Contents

1. Introduction	6
2. Overview and basic definitions	11
2.1. Our treatment of γ_5	13
3. Born cross section and virtual corrections	15
3.1. Implementation of the analytical calculation	22
3.2. Why do we not have Coulomb singularities?	25
4. Loop corrections to the long distance matrix elements	26
5. Real corrections	31
5.1. The soft region	33
5.1.1. Soft amplitudes in general	33
5.1.2. Soft amplitudes in our heavy quarkonium production	35
5.1.3. Kinematics of the soft region	37
5.1.4. Soft terms #1	38
5.1.5. Soft terms #2	40
5.1.6. Soft terms #3	41
5.2. The hard collinear region	43
5.2.1. Splitting of the initial QCD parton	43
5.2.2. Splitting of the initial photon	47
5.2.3. Splitting of the final state QCD parton	49
5.2.4. Summary of all hard collinear terms	51
5.3. The hard non-collinear region	52
6. Numerical evaluation and results	56
6.1. The hadronic cross sections	56
6.2. Parameters used in our analysis	60
6.2.1. The values of the color octet long distance matrix elements	62
6.3. Final results and conclusions	63
7. Summary and outlook	68

A. Our tensor reduction	70
A.1. Definition of the tensor integrals and tensor decomposition	70
A.2. Tensor reduction of the generalized A functions	72
A.3. Tensor reduction of the generalized B functions	72
A.4. Tensor reduction of the generalized C functions	74
A.5. Tensor reduction of the generalized D functions	76
B. Use of integration-by-parts	80
C. The 14 super master integrals	85
D. The Born squared matrix elements	89
E. Explicit results for the soft #2 terms	96