

Diss. ETH No. 9781

Aspects of B-Mesons: Rare Decays and CP Violation

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Zürich

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
HUBERT SIMMA
Dipl.Phys., Univ. Zürich
born September 6, 1963
Federal Republic of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. C. Schmid, examiner
Prof. Dr. D. Wyler, co-examiner

Zürich 1992



Abstract

Decays of B-mesons offer many opportunities to investigate the standard model of electro-weak interactions and new physics beyond it. In particular, the confirmation of CP violation in the B-system could help to clarify our understanding of this fundamental phenomenon.

In this thesis we investigate non-leptonic decays into charmless final states which will mostly be considered only on the quark level. Although such a simplified treatment allows only inclusive predictions, it provides necessary ingredients for further studies of (exclusive) final states with physical hadrons. Strong interactions will be treated perturbatively throughout. We first calculate the rare decays $b \rightarrow sgg$, $b \rightarrow sg\gamma$ etc., and then study CP-violating rate asymmetries in inclusive and exclusive charged B-decays.

We perform a complete (gauge invariant) calculation of $b \rightarrow sgg$, $b \rightarrow sg\gamma$, and $b \rightarrow s\gamma\gamma$ to one loop in the standard model. The absence of large logarithmic form factors is confirmed, but momentum dependent contributions from intermediate charm quarks are found to be sizable. For the inclusive branching ratios we obtain $BR(b \rightarrow sgg) \approx 10^{-3}$ (symmetric and antisymmetric color configuration), $BR(b \rightarrow sg\gamma) \approx 2 \times 10^{-5}$ and $BR(b \rightarrow s\gamma\gamma) \approx 10^{-7}$. As an application, the rate $B \rightarrow K + \text{glueball}$ is estimated.

We give a detailed discussion of the various form factors of the one-particle irreducible diagrams and derive them in suitable approximations for heavy (i.e. top) and for light internal quarks. While in the former case gauge invariance imposes a number of useful relations (Slavnov-Taylor identities), the four-Fermi approximation is applicable in the latter one.

When the effective Lagrangian for these processes is considered, the top-quark contributions can be expressed in terms of local dimension-six operators. These can be simplified considerably by applying the equations of motion. We demonstrate their validity and clarify the appearance of quark-ghost operators and we show that the absence of logarithms persists for any number of gluons and photons.

As an application of the effective formalism, we outline how to incorporate short-distance QCD corrections to $b \rightarrow sgg$ etc. and we discuss the treatment of the process $b \rightarrow sq\bar{q}\gamma$. While its influence on the inclusive photon spectrum is negligible, its contribution to $B \rightarrow K^*\gamma$ deserves further investigation.

In the second part, we consider CP violating rate asymmetries in charged B-decays. The necessary phases are generated by perturbative (penguin) diagrams. We analyze them systematically to order α_s^2 on the quark level and outline the complete calculation. Infrared problems and the effects of short-distance QCD corrections are investigated. We calculate the rate asymmetries in several hadronic rare decays taking into account all gg intermediate states. In contrast to previous investigations, we find the total asymmetries to lie below 1%, except for $b \rightarrow d+(d\bar{d}, s\bar{s})$ where it is 4%. The asymmetry of differential rates reaches 4% in $b \rightarrow su\bar{u}$ for large momentum transfer. We briefly comment on the decay $B_s \rightarrow gg$.

Since the differential rate asymmetry depends crucially on the momentum transfer q^2 of the gluon in the penguin, the q^2 -distribution is an essential ingredient in predictions for exclusive decays. We use perturbative methods of Brodsky and Lepage [7] to calculate branching ratios and CP-violating rate asymmetries for some exclusive hadronic decays. The decay of the heavy meson is modeled by the decay of the heavy quark and the exchange of a (fast) gluon with the spectator. The resulting rate asymmetries are of the order of 1.5% for $B^- \rightarrow K^- \pi^0$ and 5% for $B^- \rightarrow K^- K^0$. The analysis yields improved values for the branching ratios in $B^- \rightarrow \pi\pi, \pi K, KK, \pi D$ and DD .

Kurzfassung

Zerfälle von B-Mesonen bieten viele Gelegenheiten, um sowohl das Standardmodell der elektro-schwachen Wechselwirkung als auch mögliche 'neue Physik', die darüber hinaus geht, zu studieren. Insbesondere könnte die Beobachtung von CP-Verletzung im B-System helfen, unser Verständnis für dieses Phänomen zu klären.

In der vorliegenden Doktorarbeit untersuchen wir nicht-leptonische Zerfälle in Endzustände ohne 'charm', welche wir meist nur auf der Quark-Ebene betrachten werden. Obwohl solch eine vereinfachte Behandlung nur inklusive Vorhersagen erlaubt, bildet sie eine notwendige Grundlage für das weitere Studium von (exklusiven) Endzuständen mit physikalischen Hadronen. Die starke Wechselwirkung wird durchwegs störungstheoretisch behandelt. Zunächst berechnen wir die seltenen Zerfälle $b \rightarrow sgg$, $sg\gamma$ etc. und studieren dann CP-verletzende Ratenasymmetrien in inklusiven und exklusiven Zerfällen von geladenen B-Mesonen.

Wir führen eine vollständige (eichinvariante) ein-loop Berechnung von $b \rightarrow sgg$, $b \rightarrow sg\gamma$ und $b \rightarrow s\gamma\gamma$ innerhalb des Standardmodells aus. Die Abwesenheit von großen logarithmischen Formfaktoren wird bestätigt. Wir finden jedoch große impulsabhängige Beiträge, welche von internen Charm-Quarks herrühren. Wir erhalten folgende inklusiven Verzweigungsverhältnisse: $BR(b \rightarrow sgg) \approx 10^{-3}$ (symmetrische und antisymmetrische color Konfiguration); $BR(b \rightarrow sg\gamma) \approx 2 \times 10^{-5}$ und $BR(b \rightarrow s\gamma\gamma) \approx 10^{-7}$. Als Anwendung schätzen wir die Rate für $B \rightarrow K + \text{glueball}$ ab.

Wir diskutieren ausführlich die verschiedenen Formfaktoren für die eiteilchen-irreduziblen Diagramme und leiten sie in geeigneten Approximationen für schwere (d.h. Top) und leichte innere Quarks her. Im ersten Fall ergeben sich einige nützliche Beziehungen aus Gründen der Eichinvarianz (Slavnov-Taylor Identitäten) und im zweiten Fall ist die Vier-Fermi-Näherung möglich.

Im Rahmen eines effektiven Lagrange für diese Prozesse können die Beiträge des Top-Quarks durch lokale Operatoren mit Dimension sechs ausgedrückt werden. Diese lassen sich mit Hilfe der Bewegungsgleichungen beträchtlich weitervereinfachen. Wir demonstrieren deren Gültigkeit und klären das Auftreten von Quark-Geist-Operatoren. Wir zeigen ferner, daß bei beliebiger Anzahl von Gluonen und Photonen keine Logarithmen auftreten.

Als Anwendung des effektiven Formalismus skizzieren wir, wie der kurzreichweitige

Anteil der QCD-Korrekturen zu $b \rightarrow sgg$ etc. berücksichtigt werden kann und wir besprechen die Behandlung des Prozesses $b \rightarrow sq\bar{q}\gamma$. Während sein Einfluß auf das inklusive Photonenspektrum vernachlässigbar ist, verdient sein Beitrag zu $B \rightarrow K^*\gamma$ weiter untersucht zu werden.

Im zweiten Teil betrachten wir CP-verletzende Ratenasymmetrien bei Zerfällen von geladenen B-Mesonen. Die notwendigen Phasen werden durch störungstheoretische (Pinguin-) Diagramme erzeugt. Wir analysieren diese systematisch auf der Quark-Ebene bis zur Ordnung α_s^2 und zeigen das Vorgehen für die vollständige Rechnung auf. Wir untersuchen die Infrarot-Divergenzen und den Einfluß von kurzreichweitigen QCD-Korrekturen. Unter Berücksichtigung aller gg Zwischenzustände berechnen wir die Ratenasymmetrien für einige seltene hadronische Zerfälle. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen finden wir, daß die Asymmetrien unter 1% liegen, außer für $b \rightarrow d + (d\bar{d}, s\bar{s})$, wo sie 4% betragen. Die Asymmetrie der differentiellen Rate für $b \rightarrow su\bar{u}$ erreicht 4% bei großem Impulsübertrag. Wir streifen kurz den Zerfall $B_s \rightarrow gg$.

Da die differentielle Ratenasymmetrie wesentlich von q^2 , dem Impulsübertrag des Gluons im Pinguin, abhängt, bildet die q^2 -Verteilung eine entscheidende Annahme bei Vorhersagen für exklusive Zerfälle. Wir verwenden störungstheoretische Methoden von Brodsky und Lepage [7], um Verzweigungsverhältnisse und CP-verletzende Asymmetrien für einige exklusive Zerfälle zu berechnen. Der Zerfall des schweren Mesons wird dabei durch den Zerfall des schweren Quarks und den Austausch eines schnellen Gluons mit dem 'Zuschauer'-Quark modelliert. Es ergeben sich Asymmetrien von der Größenordnung 1.5% für $B^- \rightarrow K^- \pi^0$ und 5% für $B^- \rightarrow K^- K^0$, und wir erhalten verbesserte Werte für die Verzweigungsverhältnisse $B^- \rightarrow \pi\pi, \pi K, KK, \pi D$ und DD .