

The inclusive semileptonic decay $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ in effective field theories

Abstract

The exact determination of the absolute values of the CKM elements V_{ub} and V_{cb} is of central importance for testing the unitarity of the CKM matrix and hence the quark-flavour sector of the Standard Model. The inclusive semileptonic decay $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ provides the most accurate determination of $|V_{cb}|$, where the α_s corrections to the $(\Lambda_{\text{QCD}}/m_b)^2$ terms in the Heavy Quark Expansion represent the major theoretical uncertainties. Values for $|V_{ub}|$ can be extracted both from $\bar{B} \rightarrow \pi \ell \bar{\nu}_\ell$ and $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$. After introducing cuts in phase space to suppress the large background from $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$, data for $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$ are mainly available in the region of phase space where the decay rate is proportional to the hadronic shape function of the B meson.

In this work, a method is developed that allows to evaluate the QCD corrections of order α_s to the decay $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ numerically. This is especially important for the calculation of the α_s corrections to the $(\Lambda_{\text{QCD}}/m_b)^2$ terms, where an analytic treatment does not look feasible due to the complexity of the occurring terms. As infrared divergences are treated in Dimensional Regularization, the formalism is gauge-invariant, so that it is particularly suitable for the calculation of the corrections proportional to the chromomagnetic operator.

By making use of the extension of Soft-Collinear Effective Theory (SCET) to describe massive collinear quarks, which is also presented in this work, the decay $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ is examined in the shape-function region. For this purpose, the power counting $m_c \sim \sqrt{m_b \Lambda_{\text{QCD}}}$ is used for the charm-quark mass and similar cuts in phase space are introduced as for $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$. Decay spectra are calculated to next-to-leading order in the Λ_{QCD}/m_b expansion at tree level. In addition, the α_s corrections to the leading order term in the Λ_{QCD}/m_b expansion are evaluated. A shape-function independent relation between $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ and $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$ is established, that can be used for a determination of $|V_{ub}|$ for a given value of $|V_{cb}|$.

Der inklusive semileptonische Zerfall $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ in effektiven Feldtheorien

Zusammenfassung

Die exakte Bestimmung der Beträge der CKM-Elemente V_{ub} und V_{cb} ist von zentraler Bedeutung, um die Unitarität der CKM-Matrix und somit den Quark-Flavour-Sektor des Standardmodells zu testen. Der inklusive semileptonische Zerfall $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ liefert die genaueste Bestimmung von $|V_{cb}|$, wobei die α_s -Korrekturen zu den $(\Lambda_{\text{QCD}}/m_b)^2$ -Ausdrücken in der Heavy Quark Expansion die größten theoretischen Unsicherheiten darstellen. Werte für $|V_{ub}|$ können sowohl aus $\bar{B} \rightarrow \pi \ell \bar{\nu}_\ell$ als auch aus $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$ gewonnen werden. Nach dem Einführen von Schnitten im Phasenraum zur Unterdrückung des großen Untergrunds aus $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ sind Daten für $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$ vor allem in dem Phasenraumbereich verfügbar, in dem die Zerfallsrate proportional zur hadronischen Shapefunktion des B -Mesons ist.

In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, die es erlaubt, die QCD-Strahlungskorrekturen der Ordnung α_s zum Zerfall $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ numerisch auszuwerten. Dies ist insbesondere wichtig für die Berechnung der α_s -Korrekturen zu den $(\Lambda_{\text{QCD}}/m_b)^2$ -Termen, wo eine analytische Behandlung aufgrund der Komplexität der auftretenden Ausdrücke ausgeschlossen scheint. Da Infrarot-Divergenzen in Dimensionaler Regularisierung behandelt werden, ist der Formalismus eichinvariant, so dass er sich auch zur Berechnung der Korrekturen proportional zum chromomagnetischen Operator eignet.

Unter Verwendung der ebenfalls in dieser Arbeit vorgestellten Erweiterung von Soft-Collinear Effective Theory (SCET) zur Beschreibung massiver kollinearer Quarks wird der Zerfall $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ in der Shapefunktions-Region behandelt. Hierzu wird die Charm-Quark-Masse als $m_c \sim \sqrt{m_b \Lambda_{\text{QCD}}}$ gezählt und ähnliche Schnitte im Phasenraum eingeführt wie bei $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$. Zerfallsspektren werden einerseits in nächstführender Ordnung in der Λ_{QCD}/m_b -Entwicklung auf Baumgraphenniveau sowie andererseits mit α_s -Korrekturen, jedoch in führender Ordnung in der Λ_{QCD}/m_b -Entwicklung, berechnet. Hieraus wird eine von der Shapefunktion unabhängige Beziehung zwischen $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ und $\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}_\ell$ aufgestellt, aus der bei bekanntem $|V_{cb}|$ die Bestimmung von $|V_{ub}|$ erfolgen kann.