دانشکده علوم

پایان نامه دکتری در رشته فیزیک ذرات بنیادی

بررسی انواع واپاشی‌های نیمه‌لپتونی مزون $B_c(B)$ از طریق قانون جمع QCD – سه نقطه

توسط
غلامرضا خسروی

استاد راهنما:
دکتر نادر قهرمانی

دی ماه ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

اظهار نامه

اینجانب غلامرضا خسروی (۸۴۳۲۹۵)، دانشجوی رشته‌ی فیزیک گرایش فیزیک ذرات بنیادی دانشکده علوم اظهار می‌نمایم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم.

کلیه‌ی حقوق این اثر مطابق با آئین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

غلامرضا خسروی

۲۲/۱۰/۸۹

به نام خدا

بررسی انواع واپاشی‌های نیمه‌لپتونی مزون $B_c(B)$ از طریق قانون جمع QCD – سه نقطه

به وسیله‌ی:

غلامرضا خسروی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از

فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه دکتری

در رشته‌ی:

فیزیک ذرات بنیادی

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: ..... عالی .....

دکتر نادر قهرمانی، استاد بخش فیزیک (رئیس کمیته) .....

دکتر محمد حسین دهقانی، استاد بخش فیزیک .....

دکتر نعمت اله ریاضی، استاد بخش فیزیک .....

دکتر سید محمد زبرجد، دانشیار بخش فیزیک .....

دکتر عزیز اله عزیزی، استادیار بخش فیزیک .....

دکتر محمد ابراهیم زمردیان، استاد بخش فیزیک دانشگاه فردوسی مشهد (استاد مدعو) .....

دی ماه ۱۳۸۸

تقدیم به:

پدر، مادر و **همسر مهربانم** سرکار خانم دکتر فاطمه فلاحتی، همچنین دوست و همکار بسیار عزیزم:

دکتر کاظم عزیزی

سپاسگزاری

الهی دانایی ده که در راه نیفتیم و بینایی ده که در چاه نیفتیم.

خداوند را می‌ستایم که حاصل دو سال واندی تلاش و کوشش علمی و پژوهشی‌ام با لطف و عنایت بیکرانش سرانجام به بار نشست. اینک شایسته است از کلیه سروران و عزیزانی که در پیمودن این راه سخت مرا یاری کردند، تشکر نمایم.

لطف بی‌دریغ پدر و مادر دوست‌داشتنیم به همراه تشوق‌های دلگرم کننده و کمک‌های علمی همسر فرزانه‌ام و همکاری خانواده محترمش، فضایی آرام برایم فراهم ساخت تا آسوده خاطر و فارغ‌البال به کارم مشغول باشم. در این فضای مناسب، دکتر کاظم عزیزی و کمک‌های سخاوتمندانه و راهنمایی‌های ارزنده‌اش نقشی ممتاز و بی‌بدیل در پیشرفت کار من داشت. صادقانه اقرار می‌کنم که اگر صبوری، خرد و درایت ایشان نبود، انجام این کار، بسیار دشوار و ناممکن می‌نمود.

واجب است از استاد راهنمای گرانمایه و عزیزم جناب آقای دکتر نادر قهرمانی که با تدبیر و مساعی ایشان مشکلات یکی پس از دیگری مرتفع و هدف مطلوب محقق گشت، صمیمانه تشکر نمایم. وظیفه‌شناسی، مهربانی و تساهل اخلاقی را از صفات برجسته ایشان می‌دانم که مسلما در رشد و شکوفایی علمی من بسیار موثر بود.

از اساتید محترم عضو کمیته دفاع، آقایان دکتر نعمت‌اله ریاضی، دکتر محمدحسین دهقانی، دکتر سید محمد زبرجد و دکتر عزیزاله عزیزی ممنون و سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر محمد ابراهیم زمردیان عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد که به عنوان استاد مدعو در جلسه دفاع حضور داشتند، بسیار ممنونم. از نماینده محترم تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع، جناب آقای دکتر محمدمهدی گلشن کمال تشکر و سپاس را دارم.

در نهایت سلامت، سعادت و موفقیت همه این عزیزان را از درگاه خداوند متعال خواستارم.

چکیده

بررسی انواع واپاشی‌های نیمه‌لپتونی مزون $B_c(B)$ از طریق قانون جمع QCD – سه نقطه

بوسیله‌ی:

غلامرضا خسروی

امروزه مطالعه مزون $B_c(B)$ در کانون توجه فیزیکدانان ذرات بنیادی قرار دارد. مزون B_c با طول عمر طولانی که دارد، تنها از طریق برهم‌کنش ضعیف واپاشی می‌کند. بنابراین مطالعه واپاشی‌های این مزون بستری مناسب برای بررسی موارد فیزیکی مهمی همچون نقض بار الحاقی – پاریته، نقض زمان معکوس و عدم تقارن قطبیدگی در واپاشی‌ها، فراهم می‌کند. همچنین بررسی واپاشی‌های مزون B برای تعیین مقدار دقیق عناصر ماتریس CKM که تنها در برهم‌کنش‌های ضعیف حضور دارند، بسیار مناسب هستند.

تلاشی که در این کار تحقیقی انجام می‌شود، بررسی انواع واپاشی‌های نیمه‌لپتونی و هادرونی مزون $B_c(B)$ می‌باشد. برای این منظور عوامل ساخت گذار واپاشی‌های این مزون، از طریق قانون جمع QCD – سه نقطه که یک روش بسیار توانمند در مطالعات پدیده‌شناسی

مزونی است، تعیین می‌گردند. تحلیل عوامل ساخت گذار و سپس محاسبه نسبت انشعاب و مقایسه با مقدار پیش‌بینی شده توسط سایر روش‌ها و احیانا مقادیر آزمایشگاهی، در مواردی که اندازه‌گیری انجام شده است، از دیگر اهداف این پایان‌نامه می‌باشد.

نتایج این کار تحقیقی می‌تواند شناخت ما را نسبت به محتوای کوارکی مزون‌های شبه‌اسکالر و شبه‌برداری تولید شده از واپاشی‌های B_c و مقدار نسبت انشعاب بعضی از مدهای واپاشی مزون $B_c(B)$ که در این جا مورد بررسی قرار می‌گیرند، افزایش دهد. مقایسه مقدار نسبت انشعاب این مدها با نتایج اندازه‌گیری شده توسط آزمایشگاه در آینده، در ارزیابی اعتبار قانون جمع QCD – سه نقطه و جایگاه آن در علم ذرات بنیادی امروز، بسیار با اهمیت می‌باشد.

فهرست

عنوان **صفحه**

۱ مقدمه ۱

۱–۱ اهمیت بررسی مزون $(B)B_c$ ۲

۱–۲ معرفی عامل ساخت ۵

۱–۳ قانون جمع QCD در یک نگاه ۸

۱–۳–۱ تابع همبستگی ۹

۱–۳–۲ نظریه بسط ضرب عملگر ۱۱

۱–۳–۳ رابطه پاشندگی ۱۳

۱–۳–۴ دو گانگی موضعی کوارک – هادرون ۱۴

۱–۳–۵ قانون کاتکسکی ۱۵

۱–۳–٦ تبدیلات بورل ۱٦

۲ مروری بر نظریه کرومودینامیک کوانتومی ۱۸

۲–۱ مروری بر ذرات بنیادی ۲۰

۲–۲ رنگ: عامل برهم‌کنش‌های قوی ۲۴

۲–۳ آزمایشگاه و اثبات حضور کوارک‌ها ۲۸

۲–۴ تغییر ثابت جفت‌شدگی در QCD ۳۲

۲–۵ تقارن‌های پیمانه‌ای ۳٦

۲–٦ قضیه نئودر: تقارن‌ها و قوانین بقاء ۴۰

۲–۷ ناوردایی پیمانه ای موضعی و QED ۴۱
۲–۸ ناوردایی پیمانه‌ای غیرآبلی و QCD ۴۴

۳ معرفی قانون جمع QCD ۴۸
۳–۱ معرفی ۵۰
۳–۲ نیاز به قانون جمع QCD ۵۲
۳–۳ نظریه پایه‌ای قانون جمع QCD منسوب به شیفمن ۵۴
۳–۳–۱ مفهوم تابع همبستگی QCD ۵۴
۳–۳–۲ قضیه اپتیکی ۵۸
۳–۳–۳ قضیه اپتیکی برای نمودارهای فاینمن ٦۲
۳–۳–۴ قوانین کاتکسکی ۷۰
۳–۳–۵ تابع همبستگی در ناحیه زمان‌گونه ۷۱
۳–۴ رابطه پاشندگی ۷۵
۳–۴–۱ محاسبه رابطه پاشندگی ۷٦
۳–۵ بکارگیری تبدیل بورل ۷۹
۳–۵–۱ ساختار تبدیل بورل ۸۰
۳–٦ چگالش‌های خلاء و بسط ضرب عملگر ۸۳
۳–٦–۱ تحلیل چگالش خلاء و ارتباط با QCD غیراختلالی ۸۵
۳–٦–۲ تحلیلی بر نظریه بسط ضرب عملگر ۸۸
۳–۷ نظریه OPE، ناوردایی پیمانه‌ای و مشکلات مربوطه ۹۳
۳–۷–۱ نمادها ۹۴
۳–۷–۲ روش میدان خارجی ۹۵
۳–۸ محاسبه تابع همبستگی در QCD ۱۰۱
۳–۸–۱ محاسبه قسمت اختلالی ۱۰۱
۳–۸–۲ محاسبه خلاء ها و بسط ضرب عملگر ۱۰٦
۳–۹ درباره چگالش خلاء چه می‌دانیم؟ ۱۱۲
۳–۱۰ استفاده از دوگانگی کوارک – هادرون ۱۱۵

۳–۱۱ قانون جمع QCD در مکانیک کوانتومی ۱۱۷
۳–۱۱–۱ قوانین جمع برای پایین‌ترین حالت نوسانگر هماهنگ ساده . ۱۱۸
۳–۱۱–۲ قانون جمع برای عامل ساخت حالت‌های نوسانی ۱۲۳

۴ قانون جمع QCD – سه نقطه ۱۳۰
۴–۱ تابع همبستگی ۱۳۱
۴–۲ محاسبه قسمت فیزیکی تابع همبستگی ۱۳۳
۴–۳ محاسبه قسمت نظری تابع همبستگی ۱۳۹
۴–۳–۱ محاسبه قسمت اختلالی تابع همبستگی ۱۴۱
۴–۳–۲ بکارگیری قانون کاتکسکی ۱۴۵
۴–۴ محاسبه قسمت غیراختلالی تابع همبستگی ۱۵۷
۴–۴–۱ محاسبه سهم چگالش کوارک – کوارک ۱۵۸
۴–۴–۲ محاسبه سهم چگالش کوارک – گلوان ۱۶۵
۴–۴–۳ محاسبه سهم چگالش گلوان – گلوان ۱۶۸
۴–۵ محاسبه عوامل ساخت ۱۷۵

۵ محاسبات، بحث و نتایج ۱۸۳
۵–۱ تقسیم‌بندی مزون‌ها ۱۸۴
۵–۲ بخش اول: بررسی فرآیندهای نیمه‌لپتونی مزون B_c ۱۸۷
۵–۲–۱ قانون جمع QCD– سه نقطه برای عوامل ساخت گذار $B_c \to D_{(s,d)} l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$ ۱۸۸
۵–۳ کوارک سنگین ۲۰۰
۵–۳–۱ تصویر فیزیکی ۲۰۰
۵–۳–۲ کوارک سنگین و قانون جمع QCD ۲۰۴
۵–۴ بررسی سایر فرآیندها ۲۱۳
۵–۴–۱ محاسبه چگالی طیف اختلالی واپاشی‌های B_c ۲۱۵
۵–۴–۲ محاسبه عوامل ساخت گذارهای مزون B_c ۲۲۰

۵–۴–۳ نتایج عددی، بحث و نمودارها ۲۲۲
۵–۵ بخش دوم: بررسی فرآیندهای نیمه‌لپتونی مزون B ۲۳۲
۵–۵–۱ محاسبه چگالی طیف‌اختلالی و عوامل ساخت واپاشی‌های B ۲۳۲
۵–۵–۲ نتایج عددی، بحث و نمودارها ۲۳۴
۵–۶ بررسی فرآیندهای هادرونی مزون B ۲۳۸
۵–۶–۱ حالت شاخه‌ای و پنگوئن در فرآیندهای کوارک b ۲۳۹
۵–۷ دامنه واپاشی و پهنای واپاشی ۲۴۱
۵–۷–۱ محاسبه دامنه واپاشی ۲۴۴
۵–۷–۲ محاسبه پهنای واپاشی ۲۴۷
۵–۷–۳ مقدار نسبت انشعاب برای هر واپاشی ۲۵۰

پیوست الف ۲۶۴

پیوست ب ۲۷۱

پیوست ج ۲۷۴

پیوست د ۲۸۰

پیوست ه ۲۸۷

پیوست و ۳۳۱

مراجع ۳۳۷

فهرست جدولها

۲–۱ ذرات واسطه دربرهم‌کنش‌های بنیادی در مدل استاندارد. مقادیر عددی از مرجع [۱۲] گرفته شده اند. بار الکتریکی $|e|$ بار یک الکترون یعنی $۱٫۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}$ کولن، می‌باشد. ۲۱

۲–۲ ذرات پایه‌ای در مدل استاندارد. مقادیر عددی از مرجع [۱۲] گرفته شده‌اند. حد بالای جرم نوترینوها با اطمینان ۹۰ % نوشته شده‌اند. ۲۲

۵–۱ مقدار جرم کوارک‌ها بر حسب MeV [۱۲]. ۲۰۷

۵–۲ مقدار عناصر ماتریس CKM [۱۲]. ۲۰۷

۵–۳ پارامترها و ضرایب ویلسون استفاده شده در این تحقیق [۹,۱۲,۷۵]. . . . ۲۰۸

۵–۴ مقدار جرم، ثابت واپاشی f_M و آستانه برانگیختگی $s_۰$ برای مزون‌های استفاده شده در این تحقیق [۱۲,۷۵–۹۱]. ۲۰۸

۵–۵ مقدار عوامل ساخت واپاشی $B_c \to D_{(s,d)} l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$ در $q^۲ = ۰$. ۲۰۹

۵–۶ مقایسه مقدار عوامل ساخت گذار $B_c \to D$ از طریق قانون جمع و نظریه موثر کوارک سنگین به ترتیب در $M_۱^۲ = ۱۵\ GeV^۲$، $M_۲^۲ = ۸\ GeV^۲$ و $T_۱ = ۱٫۶ GeV$، $T_۲ = ۳٫۲ GeV$. ۲۱۰

۵–۷ مقایسه مقدار عوامل ساخت گذار $B_c \to D_s$ از طریق قانون جمع و نظریه موثر کوارک سنگین به ترتیب در $M_۱^۲ = ۱۵\ GeV^۲$، $M_۲^۲ = ۸\ GeV^۲$ و $T_۱ = ۱٫۶ GeV$، $T_۲ = ۳٫۲ GeV$. ۲۱۰

۵–۸ مقدار نسبت انشعاب واپاشی‌های $B_c \to D_{(s,d)} l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$ و مقایسه آن‌ها با پیش‌بینی‌های مدل RCQM. ۲۱۲

۵–۹ جریان جانشین مزون. ۲۱۳

۵–۱۰ مقدار عوامل ساخت واپاشی $B_c \to D^*_{s\circ} l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$ در $q^2 = \circ$. ۲۲۳
۵–۱۱ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی‌های $B_c \to D^*_{s\circ} l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$. ۲۲۳
۵–۱۲ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی‌های $B_c \to D^*_{s\circ} l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$ با در نظر گرفتن اثر فاصله بلند. ۲۲۴
۵–۱۳ مقدار عوامل ساخت واپاشی $B_c \to D_{s1} l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$ در $q^2 = \circ$. ۲۲۵
۵–۱۴ مقدار پارامترهای تابع انطباق برای واپاشی‌های $B_c \to D_{s1} l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$. ۲۲۶
۵–۱۵ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی‌های $B_c \to D_{s1}(۲۴۶۰) l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$. ۲۲۶
۵–۱۶ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی‌های $B_c \to D_{s1}(۲۵۳۶) l^+ l^-/\nu\bar{\nu}$. ۲۲۷
۵–۱۷ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی $B_c \to D^\circ l\nu$، از طریق مدل‌های مختلف. قانون جمع مخروط نوری LCSR [۱۱۶]، قانون جمع – سه نقطه ۳PSR بدون در نظر گرفتن چگالش گلوان –گلوان[۱۱۷]، مدل کوارکی QM [۱۱۸]، مدل پتانسیلی PM [۱۱۹]، معادله بتی – سل پیتر BSE [۱۲۰]، مدل نسبیتی RM [۱۲۱]. ۲۲۷
۵–۱۸ مقدار عوامل ساخت واپاشی $B_c \to D^\circ l\nu$ در $q^2 = \circ$، از طریق مدل‌های مختلف. قانون جمع – سه نقطه ۳PSR با در نظر گرفتن چگالش گلوان –گلوان، نظریه موثر کوارک سنگین HQET، قانون جمع مخروط نوری LCSR، قانون جمع – سه نقطه ۳PSR بدون در نظر گرفتن چگالش گلوان، مدل پتانسیلی PM، مدل کوارکی QM. ۲۲۸
۵–۱۹ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی‌های $B_c \to D^\circ l\nu$ از طریق قانون جمع QCD– سه نقطه ۳PSR با درنظر گرفتن چگالش گلوان – گلوان و نظریه موثر کوارک سنگین HQET. ۲۲۸
۵–۲۰ مقدار عوامل ساخت واپاشی $B_c \to D^{*\circ} l\nu$ در $q^2 = \circ$ از طریق مدل‌های مختلف. قانون جمع – سه نقطه ۳PSR با در نظر گرفتن چگالش گلوان –گلوان، نظریه موثر کوارک سنگین HQET، قانون جمع مخروط نوری LCSR [۱۱۶]، قانون جمع – سه نقطه ۳PSR بدون در نظر گرفتن چگالش گلوان[۱۱۷]، مدل پتانسیلی PM [۱۱۹]، مدل کوارکی QM [۱۱۸]. ۲۲۹
۵–۲۱ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی‌های $B_c \to D^{*\circ} l\nu$ از طریق قانون جمع QCD– سه نقطه ۳PSR با درنظر گرفتن چگالش گلوان – گلوان و نظریه موثر کوارک سنگین HQET. ۲۲۹

۵–۲۲ مقدار نسبت انشعاب برای واپاشی $B_c \to D^{*\circ} l\nu$، از طریق مدل‌های مختلف. قانون جمع مخروط نوری LCSR [۱۱۶]، قانون جمع – سه نقطه ۳PSR بدون در نظر گرفتن چگالش گلوان –گلوان[۱۱۷]، مدل کوارکی QM [۱۱۸]، مدل پتانسیلی PM [۱۱۹]، معادله بتی – سل پیتر BSE [۱۲۰]، مدل نسبیتی RM [۱۲۱]. ۲۳۰

۵–۲۳ : مقدار عوامل ساخت گذارهای نیمه لپتونی $B_c \to D_1$ در $q^2 = 0$. ۲۳۰

۵–۲۴ : مقدار نسبت انشعاب برای گذارهای نیمه لپتونی $B_c \to D_1$. ۲۳۱

۵–۲۵ : دسته‌بندی مزون‌های اسکالر سبک برحسب مقدار ایزواسپین آن‌ها. . . . ۲۳۴

۵–۲۶ مقدار عوامل ساخت گذارهای نیمه‌لپتونی $B_s \to f_0$ و $B_s \to K_0^*$ در $q^2 = 0$. ۲۳۵

۵–۲۷ نتایج نسبت انشعاب برای واپاشی‌های نیمه‌لپتونی $B_s \to f_0 l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$. . . . ۲۳۶

۵–۲۸ نتایج نسبت انشعاب برای واپاشی‌های نیمه‌لپتونی $B_s \to K_0^* l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$. . . . ۲۳۶

۵–۲۹ نتایج نسبت انشعاب برای واپاشی‌های نیمه‌لپتونی $B_s \to f_0(980) l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$ و $B_s \to K_0^*(1430) l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$ با درنظر گرفتن اثر فاصله بلند. ۲۳۷

۵–۳۰ : مقدار عوامل ساخت فرآیند $B \to D_1^\circ l\nu$ در $q^2 = 0$. ۲۳۷

۵–۳۱ : مقدار نسبت انشعاب فرآیند $B \to D_1^\circ l\nu$ همراه با نتیجه آزمایشگاهی آن [۱۲]. ۲۳۸

۵–۳۲ مقدار عوامل ساخت $f_\pm$ به ازاء مقادیر مختلف q^2، از طریق قانون جمع QCD. ۲۵۱

۵–۳۳ مقدار عوامل ساخت $f_{0,1,2,3}$ به ازاء مقادیر مختلف q^2، از طریق قانون جمع QCD. ۲۵۲

۵–۳۴ مقدار نسبت انشعاب واپاشی‌های $B_q \to D_q P$ و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی [۱۲] و روش PQCD [۱۳۵]. ۲۵۳

۵–۳۵ مقدار نسبت انشعاب واپاشی‌های $B_q \to D_q^* P$ و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی [۱۲] و روش PQCD [۱۳۵]. ۲۵۴

۵–۳۶ مقدار نسبت انشعاب واپاشی‌های $B_q \to D_q V$ و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی [۱۲] و روش PQCD [۱۳۵]. ۲۵۵

۵–۳۷ مقدار نسبت انشعاب واپاشی‌های $B_q \to D_q^* V$ و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی [۱۲] و روش PQCD [۱۳۵]. ۲۵۶

فهرست شکلها

۱–۱ نمودار فاینمن واپاشی $B_c \to D^{*\circ} \ell \nu$. ۱۰

۱–۲ نمایش تصویری قانون کاتکسکی. ۱۵

۲–۱ پوشش بار الکتریکی (a) و بار رنگ (b) در نظریه میدان کوانتومی. ۲۶

۲–۲ فتون‌های مجازی با طول موج کوتاه(a). فتون‌های مجازی که بوسیله برخورد الکترون – پوزیترون ایجاد می‌شوند به جفت‌های کوارک – پادکوارک واپاشی می‌کنند(b). ۲۸

۲–۳ مسیرهای ذرات باردار ناشی از یک جت کوارک – پادکوارک. ۳۰

۲–۴ (a) میدان رنگ $q\bar{q}$ متناسب با پتانسیل r، و(b) میدان کولمب e^+e^- متناسب با پتانسیل $\frac{۱}{r}$. ۳۱

۲–۵ تولید جت وقتی یک کوارک و پادکوارک از هم جدا می‌شوند. ۳۱

۲–۶ ثابت واپاشی قوی به عنوان تابعی از انرژی [۱۵]. ۳۵

۲–۷ نمایش تصویری جملات لاگرانژی QCD. ۴۷

۳–۱ ساختارهای نظریه عامل‌سازی برای عامل ساخت پایون. ۵۲

۳–۲ تولید و نابودی کوارک – پادکوارک به وسیله فتون مجازی در برخورد الکترون – الکترون. ۵۵

۳–۳ نمایش تصویری قضیه اپتیکی: قسمت موهومی دامنه پراکندگی رو به جلو، با جمع سهم‌های ناشی از همه ذرات میانی ممکن ایجاد می‌شود. ۶۱

۳–۴ نمودار برخورد و پراکندگی دو الکترون معروف به پراکندگی بابا ۶۳

۳–۵ نمودار تک حلقه برخورد دو ذره با جرم یکسان و اندازه حرکت متفاوت $k_۱$ و $k_۲$ ۶۵

۳–۶ نمایش نمودارهای یک فرآیند دو ذره به دو ذره به سه روش. روش u، روش t و روش s. ۶۵
۳–۷ نمایش پل‌های انتگرال (۳–۲۰) در صفحه مختلط، بر حسب متغیر q°. . . ۶۷
۳–۸ نمایش پل‌های انتگرال (۳–۲۳) در صفحه مختلط، بر حسب متغیر E_q. . . ۶۸
۳–۹ سهم‌های قضیه اپتیکی برای پراکندگی بابا. ۶۹
۳–۱۰ نمایش پربند در صفحه متغیر مختلط $q^{۲} = z$. دایره – ضربدر وضعیت $q^{۲} < ۰$ را نشان می‌دهد که به ناحیه محاسبات QCD مربوط می‌شود. موقعیت آستانه‌های هادرونی در $q^{۲} > ۰$ به وسیله ضربدر نشان داده می‌شوند. . . . ۷۷
۳–۱۱ نمودارهای متناظر با شرکت چگالش گلوان (a, b, c) کوارک (d) کوارک – گلوان (e) و چهار کوارک (f) در تابع همبستگی. ۸۴
۳–۱۲ بسط ضرب عملگر برای نمودار تک حلقه اسکالر. ۸۹
۳–۱۳ بسط ضرب عملگر برای نمودارهای دو حلقه QCD ۹۲
۳–۱۴ جمع نموداری گلوان‌های برخورد کرده با انتشارگر کوارک سخت (پرانرژی). . ۹۶
۳–۱۵ نمودارهای اختلالی تابع همبستگی. نمودار کوارک (a)، تصحیحات QCD اختلالی (b, c, d). خطوط به‌هم‌پیوسته کوارک‌ها را نشان می‌دهند. خط‌چین‌ها گلوان‌ها و خطوط موجی فتون‌ها هستند. ۱۰۱
۳–۱۶ توزیع کوارک مجازی در نمودار حلقه‌ای بعد از تبدیل بورل در $M^{۲} = ۱\ GeV^{۲}$ (خط به‌هم‌پیوسته) و $M^{۲} = ۱۰\ GeV^{۲}$ (خط چین). . . . ۱۰۴
۳–۱۷ نمودار غیر اختلالی چگالش کوارک – کوارک با بعد جرمی $d = ۳$. ۱۰۸
۳–۱۸ نمودار چگالش کوارک – گلوان با بعد جرمی $d = ۵$. ۱۱۱

۴–۱ نمودار فاینمن متناظر با تابع همبستگی رابطه (۴–۱) در پایین‌ترین درجه اختلال. ۱۳۳
۴–۲ نمودار فاینمن تابع همبستگی. ۱۴۴
۴–۳ نمودار فاینمن چگالش کوارک – کوارک روی خط $q_{۳}$. ۱۵۹
۴–۴ نمودارهای فاینمن چگالش کوارک – گلوان. ۱۶۵
۴–۵ نمودارهای فاینمن چگالش گلوان – گلوان. ۱۶۹
۴–۶ نمودار فاینمن چگالش دو گلوانی. ۱۷۰

۵–۱ نمودار حلقه‌ای واپاشی $B_c \to D_{(s,d)} l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$. نمودار الکتروضعیف پنگوئنی و مربعی (چهار وجهی) به ترتیب در قسمت‌های (a) و (b) نشان داده شده‌اند. ۱۸۹

۵–۲ نمودارهای حلقه‌ای برای گذار $B_c \to D_{q'} l^+ l^- / \nu\bar{\nu}$، $q' = s, d$. نمودار حلقه‌ای ساده (a) متناظر با جریان‌های برهم‌کنشی J^V و J^T می‌باشد. نمودارهای (b) متناظر با چگالش کوارک - کوارک با بعد جرمی $d = ۳$ و دو نمودار دیگر متناظر با سهم چگالش کوارک - گلوان با بعد جرمی $d = ۵$ هستند. ۱۹۳

۵–۳ نمودارهای غیراختلالی متناظر با چگالش دو گلوان با بعد جرمی $d = ۴$. از هر نمودار، دو سهم منتج می‌شود. یکی متناظر با جریان برهم‌کنشی J^V و دیگری متناظر با J^T می‌باشد، که جهت صرفه‌جویی یک جا نشان داده شده‌اند. ۱۹۴

۵–۴ وابستگی عوامل ساخت به $M_۱^۲$ و $M_۲^۲$ برای گذار $B_c \to D$. خط راست متناظر با $f_۱$، خط چین متناظر با $f_۲$ و خط نقطه چین متناظر با f_T است. . . ۲۵۷

۵–۵ خط پیوسته وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_c \to D$ را نشان می‌دهد. خط چین وابستگی عوامل ساخت در حد کوارک سنگین را نمایش می‌دهد. ۲۵۷

۵–۶ وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_c \to D_{s۰}^*$. ۲۵۸

۵–۷ وابستگی عدم تقارن لپتون‌های قطبیده طولی به $q^۲$ در واپاشی $B_c \to D_{s۰}^*$. ۲۵۸

۵–۸ وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_c \to D$. ۲۵۹

۵–۹ خط پیوسته وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_c \to D^*$ را نشان می‌دهد. نقطه چین وابستگی عوامل ساخت در حد کوارک سنگین را نمایش می‌دهد. ۲۵۹

۵–۱۰ وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_c \to D_۱(۲۴۲۰, ۲۴۳۰)$. . . ۲۶۰

۵–۱۱ وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_s \to f_۰(۹۸۰)$. ۲۶۱

۵–۱۲ وابستگی عوامل ساخت به $q^۲$ برای گذار $B_s \to K_۰^*(۱۴۳۰)$. ۲۶۲

۵–۱۳ وابستگی عدم تقارن لپتون‌های قطبیده طولی به $q^۲$ در واپاشی $B_s \to f_۰(۹۸۰)$. ۲۶۳

۵–۱۴ وابستگی عدم تقارن لپتون‌های قطبیده طولی به $q^۲$ در واپاشی $B_s \to K_۰^*(۱۴۳۰)$. ۲۶۳

۸–۱۵ نمودارهای چگالش کوارک - کوارک برای تابع همبستگی (۳–۳). ۲۷۵