



دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

((گروه فیزیک))

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

محاسبه ثابت جفت‌شدگی قوی

توسط:

سیده معصومه بهرامی جیرنده

استاد راهنما

دکتر حسین مهربان

استاد مشاور

دکتر مهرداد قمی نژاد

شهریور ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

تحت عنوان

محاسبه ثابت جفت‌شدگی قوی

ارائه شده توسط:

سیده معصومه بهرامی جیرنده

در تاریخ ۲۹ شهریور ۱۳۹۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

- | | |
|----------------------|---------------------|
| دکتر حسین مهربان | ۱- استاد راهنما |
| دکتر مهرداد قمی نژاد | ۲- استاد مشاور |
| دکتر حسین غفارنژاد | ۳- استاد داور داخلی |
| دکتر مجید واعظزاده | ۴- استاد مدعو |

**به جهان خرم از آنم که جهان خرم از اوست
عاشقم بر همه عالم که همه عالم از اوست**

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم

آنها که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه عمر
توانشان رفت تا به توانایی برسم .
مویشان سفید گشت تا رویم سفید بماند.
آنها که فروغ نگاهشان ، گرمی کلامشان و روشنی رویشان ، سرمایه‌های جاودانی من است.
آنها که راستی قامتم در شکست قامتشان تجلی یافت.
در برابر وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی مملو از
عشق و محبت و
خضوع بر دستانشان بوسه می‌زنم

و تنها برادرم و خواهران مهربانم

که بی‌یاری آنان پیمودن این راه برایم بسی دشوار بود.

قدردانی

این بار هم که خداوند مهربان لطف بی‌کران خود را شامل این حقیر کرد تا در وادی دیگری از علم و دانش پای گذاشته و بتوانم این دوره را نیز با موفقیت بگذرانم، سجده شکر و سپاس در پیشگاهش بر خاک می‌سایم. امیدوارم از تمامی امانت‌هایی که خداوند در اختیارم قرار داده به بهترین نحو ممکن و فقط در جهت رضایتش استفاده نمایم، بلکه بتوان شکر آن‌ها را به جای آورد.

بدین وسیله از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهربان که هدایت این پایان نامه را پذیرفتند کمال تشکر و سپاسگزاری را می‌نمایم.

محاسبه ثابت جفت‌شدگی قوی

چکیده

کوارکها و گلوئونها توسط عامل رأس قوی یعنی α_s با هم جفت می‌شوند و رأسهای بنیادی در QCD با ثابت جفت‌شدگی قوی مشخص می‌شوند. بنابراین بررسی ثابت جفت‌شدگی قوی این رئوس، نقش بسیار مهمی در جهت مطالعات دامنه پراکندگی هدفهای پروتونی و نیز هر هادرون دیگر خواهد داشت. همچنین این بررسی، منجر به شناخت ذرات بنیادی جدید و در نتیجه دامنه پراکندگی ناکشسان عمیق (DIS) می‌گردد. به جهت محاسبه ثابت جفت‌شدگی در پراکندگی کوارک - کوارک - گلوئون و نیز مراتب بالاتری از اینگونه پراکندگی‌ها، ابتدا از رسم گرافهای فاینمن آغاز می‌کنیم. در مرحله بعد دامنه پراکندگی را در این گرافها مورد محاسبه قرار می‌دهیم و سپس عوامل رنگ را در این پراکندگی‌ها مشخص می‌نماییم. در بخشی از دامنه، واگرایی ظاهر می‌شود که به جهت رفع واگرایی، از معادله گروه بازبهنجارش کمک می‌گیریم. پس از مقایسه واگرایی با عامل رأس قوی و همچنین ارتباط مقیاس بازبهنجارش به همراه عامل واگرایی با ثابت جفت‌شدگی، به محاسبه مرتبه دوم α_s می‌پردازیم و با استفاده از شبیه‌سازی مرتبه سوم آن را نیز نتیجه می‌گیریم.

واژه های کلیدی : ثابت جفت‌شدگی پویا، آزادی مجانبی، تئوری QCD اختلالی، معادله گروه بازبهنجارش

فهرست مندرجات

۱ برهمکنشهای بین ذرات

- ۱-۱ انواع برهمکنشهای بین ذرات..... ۸
- ۲-۱ برهمکنشهای قوی..... ۹
 - ۱-۲-۱ QCD..... ۹
 - ۲-۲-۱ ذرات شرکت کننده در برهمکنش..... ۱۰
 - ۳-۲-۱ مفهوم عامل رنگ در QCD..... ۱۰
 - ۴-۲-۱ رأسهای بنیادی در QCD..... ۱۲
 - ۵-۲-۱ مفهوم آزادی مجانبی و حبس شدگی در QCD..... ۱۳
- ۳-۱ لاگرانژین سیستم در QCD..... ۱۷
- ۴-۱ قوانین فاینمن در QCD..... ۱۷

۱۹	..... ثابت جفت شدگی در برهمکنشها.
۱۹	..... ۱-۵-۱ ثابت جفت شدگی در برهمکنشهای الکترو دینامیک (α_e).
۲۰	..... ۲-۵-۱ ثابت جفت شدگی برهمکنش قوی (α_s).
۲۱	..... ۳-۵-۱ ثابت جفت شدگی برهمکنش ضعیف (α_w).
۲۱	..... ۴-۵-۱ مقایسه ثابت جفت شدگی در برهمکنشها.
۲۳	..... ۵-۵-۱ اهمیت محاسبه و بررسی ثابت جفت شدگی قوی.

۲ بررسی ثابت جفت شدگی قوی

۲۵	..... ۱-۲ ثابت جفت شدگی قوی.
۲۶	..... ۱-۱-۲ وابستگی α_s به انرژی.
۲۷	..... ۲-۱-۲ پارامتری کردن $\alpha_s(Q^2)$.
۲۸	..... ۳-۱-۲ تعریف Λ و عوامل مؤثر بر آن.
۳۲	..... ۲-۲ QCD اختلالی (تئوری QCD اختلال).
۳۳	..... ۱-۲-۲ بررسی رفتار α_s در عبور از آستانه طعمها.
۳۴	..... ۲-۲-۲ پیش بینی اختلالات کمیت‌های فیزیکی.
۳۵	..... ۳-۲-۲ مفهوم بازبهنجارش.
۳۶	..... ۴-۲-۲ روشهای بازبهنجارش.
۳۷	..... ۵-۲-۲ روش بازبهنجارش استفاده شده.
۳۸	..... ۶-۲-۲ رابطه بین عامل واگرایی و ثابت جفت شدگی.
۳۹	..... ۷-۲-۲ تابع بتا.

۳ محاسبه مرتبه دوم ثابت جفت‌شدگی قوی

- ۱-۳ گرافهای مرتبه دوم ۴۰
- ۱-۱-۳ نمودارهای قطبش خلاصه ۴۱
- ۲-۱-۳ نمودارهای بازبهنجارش جرم (سلف انرژی) ۴۱
- ۳-۱-۳ نمودارهای گشتاور مغناطیسی بی‌هنجار ۴۱
- ۲-۳ رسم گرافهای مرتبه دوم ۴۱
- ۳-۳ محاسبات مربوط به گرافها ۴۲
- ۱-۳-۳ گرافهای قطبش خلاصه ۴۳
- ۲-۳-۳ نمودارهای بازبهنجارش جرم (سلف انرژی) ۶۱
- ۳-۳-۳ نمودارهای گشتاور مغناطیسی بی‌هنجار ۶۵
- ۴-۳ ارتباط عامل واگرایی و ثابت جفت‌شدگی ۷۴
- ۱-۴-۳ تعیین فاکتور واگرایی ۷۵
- ۲-۴-۳ رابطه فاکتور واگرایی و ثابت جفت‌شدگی ۷۶
- ۳-۴-۳ محاسبه ثابت جفت‌شدگی قوی مرتبه اول ۷۷
- ۴-۴-۳ محاسبه ثابت جفت‌شدگی قوی مرتبه دوم ۷۸

۴ محاسبه مرتبه سوم و نتیجه‌گیری برای مراتب بالاتر ثابت

جفت‌شدگی قوی

- ۱-۴ ثابت جفت‌شدگی مرتبه سوم ۸۱
- ۲-۴ رسم گرافهای مرتبه سوم ۸۲
- ۳-۴ محاسبات دامنه پراکندگی و تعیین عامل واگرایی ۸۵
- ۱-۳-۴ محاسبه دامنه پراکندگی و تعیین عامل واگرایی برای گرافی با دو حلقه
کوارکی ۸۵
- ۲-۳-۴ محاسبه دامنه پراکندگی و تعیین عامل واگرایی برای گرافی با دو سلف
انرژی ۸۹
- ۳-۳-۴ محاسبه دامنه پراکندگی و تعیین عامل واگرایی برای گرافی با دو حلقه
گلوئونی ۹۲
- ۴-۴ نتیجه‌گیری ۹۸
- پیوست ۱ ۹۹
- پیوست ۲ ۱۰۱
- پیوست ۳ ۱۰۲
- پیوست ۴ ۱۰۳
- کتاب نامه ۱۰۴

لیست اشکال

- ۱-۱ نمایش رأسهای بنیادی در QCD ۱۳
- ۲-۱ استتار بار q با محیطی دی الکتریک ۱۴
- ۳-۱ نمودار فاینمن برای حلقه‌های قطبش خلأ ۱۵
- ۴-۱ نمودار حلقه‌های گلوئونی ۱۵
- ۵-۱ نمودار α_s بر حسب Q^2 در $\Lambda = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ GeV}/c$ ۲۰
- ۶-۱ مقایسه α_e و α_s بر حسب انرژی ۲۲
- ۷-۱ تحول سه ثابت جفت‌شدگی بنیادی ۲۳
- ۱-۲ نمودار α_s بر طبق معادله (۶-۲) با تقریب چهار حلقه در مقادیر مختلف Q ۳۰
- ۲-۲ نمودار ثابت جفت‌شدگی بر حسب انرژی مربوط به $1\text{و}2\text{و}3$ حلقه ۳۰
- ۳-۲ نسبت درصد α_s مربوط به $1\text{و}2\text{و}3$ حلقه به 4 حلقه در $\Lambda_{\overline{MS}}$ مختلف با $N_f = 5$ ۳۱
- ۴-۲ شکل (الف) مقایسه مقدار تطبیق داده شده (Q^2) α_s در تقریب چهار حلقه‌ای در آستانه کوارکهای c و b (خط کامل) با نتیجه چهار حلقه‌ای تطبیق داده نشده (خط چین) ۳۴
- شکل (ب) اختلاف کسری بین دو منحنی شکل (الف) ۳۴
- ۱-۳ گرافهای مرتبه دوم برهمکنش کوارک - کوارک ۴۲
- ۲-۳ گراف حلقه کوارکی در برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۴۳
- ۳-۳ گراف مربوط به حلقه گلوئونی برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۵۱
- ۴-۳ گراف با حلقه مجازی کوارکی در برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۵۶
- ۵-۳ گراف تک حلقه برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۶۰
- ۶-۳ گراف مربوط به سلف انرژی برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۶۱
- ۷-۳ گراف C_1 مربوط برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۶۴
- ۸-۳ گراف C_2 مربوط برهمکنش مرتبه دوم کوارک - کوارک ۷۰
- ۱-۴ گراف مرتبه سوم برهمکنش کوارک - کوارک با حلقه‌های کوارکی و گلوئونی (دسته اول) ۸۲
- ۲-۴ گراف مرتبه سوم برهمکنش کوارک - کوارک با دو سلف انرژی (دسته دوم) ۸۳
- ۳-۴ گراف مرتبه سوم برهمکنش کوارک - کوارک (دسته سوم) ۸۴
- ۴-۴ گراف مرتبه سوم برهمکنش کوارک - کوارک با دو حلقه کوارکی ۸۵

- ٥-٤ گراف مرتبه سوم برهمکنش کواریک - کواریک با دو سلف انرژی ٨٩
- ٦-٤ گراف مرتبه سوم برهمکنش کواریک - کواریک با دو حلقه گلوئون ٩٣

لیست جداول

- ۱-۱ فهرست نیروها در طبیعت..... ۸
- ۲-۱ فهرست ثابت‌های جفت‌شدگی براساس نیروهای موجود در طبیعت..... ۲۱

فصل ۱

برهمکنشهای بین ذرات

۱-۱ انواع برهمکنشهای بین ذرات

چهار نیروی بنیادی در طبیعت وجود دارند: قوی، الکترومغناطیس، ضعیف و گرانشی. این نیروها در جدول زیر به ترتیب شدت نزولی فهرست بندی شده اند [۱].

جدول ۱-۱: فهرست نیروها در طبیعت

نیرو	شدت	نظریه	واسطه
قوی	10^0	کرومودینامیک ^۱	گلوئون
الکترومغناطیسی	10^{-2}	الکتروودینامیک ^۲	فوتون
ضعیف	10^{-13}	فلیورودینامیک ^۳	W, Z
گرانشی	10^{-42}	گرانش	گراویتون

¹ Quantum Chromodynamics(QCD)

² Quantum Electrodynamics(QED)

³ Weak Interaction(WI)

بنابر نظریه کوانتومی میدانها، تمام برهم‌کنشها بر شالوده مکانیسم مبادله کوانتومها متکی‌اند. هر میدان نیرویی دارای کوانتومهای مربوط به خودش است. مشابه فوتونها که به عنوان حاملهای برهم‌کنش عمل می‌کنند. به این ترتیب تمام نیروها، از طریق یک رشته فرآیند، گسیل، انتشار و جذب چنین کوانتومهایی از یک ذره به ذره دیگر منتقل می‌شوند.

حاملهای برهم‌کنش گرانشی، گراویتونها، کوانتومهای میدان گرانشی هستند. چون برهم‌کنش گرانشی خیلی ضعیف است، و ضعیفترین برهم‌کنشها به حساب می‌آید، آشکارسازی گراویتونها منفرد از حوزه حساسیت ابزارهای ما بسیار دور است؛ ما تنها می‌توانیم آثار جنبی مبادله تعداد خیلی زیادی گراویتون را آشکارسازی کنیم. ولی می‌توانیم خواص گراویتونها را از خواص نیروی گرانشی که با آنها آشناییم، استنتاج کنیم. جرم گراویتونها صفر و اسپین آنها دو است.

حاملهای برهم‌کنش ضعیف عبارتند از بوزونهای باردار W^+ و W^- و بوزون خنثی Z^0 . جرم ذرات W^+ و W^- برابر $81800 \text{ Mev}/c^2$ و جرم ذره Z^0 برابر $92600 \text{ Mev}/c^2$ است. کوتاهی فوق العاده برد نیروی ضعیف، ناشی از جرملهای بسیار سنگین است. اسپین ذرات W^+ و W^- و Z^0 همگی یک است.

حاملهای برهم‌کنش الکترومغناطیس، فوتونها به جرم صفر و اسپین یک هستند.

۱-۲ برهم‌کنشهای قوی^۱

برهم‌کنشهای قوی بسیار کوتاه برد^۲ هستند.

QCD ۱-۲-۱

QCD یا کرومودینامیک کوانتومی، تئوری میدان پیمانه‌ای است که برهم‌کنشهای قوی کوارکهای رنگی و گلوئونها را توصیف می‌کند [۲].

به عبارت ساده‌تر برهم‌کنش کوارکها را از طریق میدان رنگ قوی که کوانتومهای آن گلوئون هستند، توصیف می‌کنند [۳]. زیر بنای آن توسط یانگ میلز^۳ در سال ۱۹۵۴، پیشنهاد شده است.

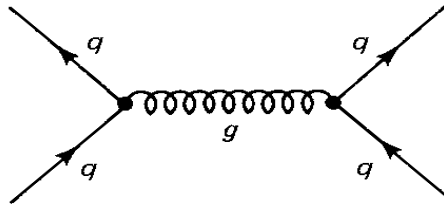
¹ Strong Interaction

² long distance

³ Yang miens

۲-۲-۱ ذرات شرکت کننده در برهمکنش قوی

هریک از این نیروها با مبادله یک ذره رد و بدل می‌شوند. که به این ذرات، ذرات واسطه یا مجازی^۱ گفته می‌شود. در هر نظریه ذرات شرکت کننده و ذرات واسطه متفاوت می‌باشند. ذرات شرکت کننده در برهمکنشهای قوی کوارکها^۲ و ذره واسطه گلوئون^۳ می‌باشد، به عبارتی در برهمکنشهای قوی، نیروی بین دو کوارک با گلوئون رد و بدل می‌شود.



۳-۲-۱ مفهوم عامل رنگ در QCD

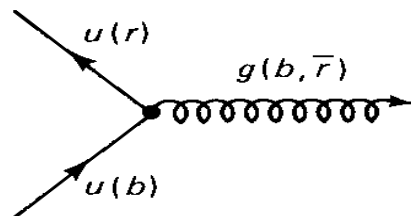
مدل ساده کوارکی را که از سه کوارک (یا سه پادکوارک) توصیف می‌کنند، نقائصی دارد که به محض اینکه توسط فیزیکدانان نظری آرایش دقیق کوارکها را در داخل ذرات شناخته شده و نیروهایی که این کوارکها را در کنار هم نگه می‌دارد، بررسی کردند، خود را نشان می‌دهند. کوارکها ذراتی با اسپین $1/2$ هستند و بنابراین باید از اصل طرد پیروی کنند. این قاعده به مشکل فوری در مورد ذراتی می‌انجامد که مانند Ω از کوارک یکسان ساخته شده‌اند. Ω از سه کوارک S، با اسپینهای موازی ساخته شده است. این کوارکها از قرار معلوم در حالت پایه قرار دارند، زیرا ده‌تایی با اسپین $3/2$ که Ω متعلق به آن است، ده‌تایی با پایین‌ترین انرژی است. اما اشغال حالت مداری و اسپینی واحد توسط سه ذره یکسان مغایر اصل طرد است. فرض شد که این سه کوارک یکسان نباشند، یعنی فرض می‌کنیم که هر یک از آنها عبارتند از کوارکی از یک نوع متفاوت. این گونه‌های متفاوت در یک مشخصه جدید، به نام رنگ با هم اختلاف دارند [۴]. رنگهای مختلف کوارکها عبارتند از قرمز و سبز و آبی. به این ترتیب یک کوارک قرمز U، یک کوارک سبز U و یک کوارک آبی U داریم و به همین ترتیب برای سایر کوارکها. رنگ یکی از خواص بسیار اغفال‌کننده ماده به شمار می‌آید؛ معمولاً در داخل ذرات معمولی پنهان می‌ماند. تمام ذرات معمولی بی‌رنگ‌اند. آنها از چندین کوارک یا آمیزه‌ای مساوی از سه رنگ تشکیل شده‌اند. با همه اینها، رنگ در نظریه مربوط به نیروهایی که کوارکها را در کنار هم نگه می‌دارد، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. این نیرو را نیروی

¹ Virtual

² Quark

³ Gluon

رنگ می‌گویند، زیرا منشأ این نیرو، رنگ است، همانطور که منشأ گرانش جرم است. و منشأ نیروی الکتریکی، بار الکتریکی است. در کرومودینامیک، رنگ نقش بار را دارد. کرومودینامیک بسیار شبیه الکتروودینامیک است. اما تفاوت مهمی نیز وجود دارد. برجسته‌ترین تفاوت آن است که در الکتروودینامیک یک نوع بار الکتریکی وجود دارد که می‌تواند مثبت و یا منفی باشد، به عبارتی برای مشخص کردن بار یک ذره، یک عدد کافی است. ولی در مورد کوارکها، سه نوع رنگ وجود دارد. (سبز و آبی، قرمز) در فرآیند $q \rightarrow q + g$ ، رنگ کوارک (نه طعم کوارک) تغییر می‌کند. مثلاً کوارک بالای آبی به یک کوارک بالای قرمز تبدیل می‌شود. چون رنگ (مثل بار) همیشه پایسته است، باید این اختلاف رنگ را گلوئون حمل کند.



پس گلوئونها دو رنگ و حامل یک واحد رنگ مثبت و یک واحد رنگ منفی هستند، روشن است که تعداد $3 \times 3 = 9$ ، حالت مختلف وجود دارد و می‌توان انتظار داشت که 9 نوع گلوئون وجود داشته باشد. ولی به دلیل زیر تنها 8 نوع گلوئون وجود دارد.

از آنجا که خاصیت نیروی رنگ آن است که بر خلاف تمام نیروها، با افزایش فاصله کاهش نمی‌یابد، بلکه این نیرو با افزایش فاصله ثابت می‌ماند و یا حتی با افزایش فاصله بین کوارکها افزایش می‌یابد. این نحوه برخورد باعث می‌شود که کوارکها در داخل پروتون یا هر هادرون دیگر مقید باشند. و از آنجا که حالت تک‌تایه رنگ مربوط به گلوئون، به انرژی پتانسیل مثبت می‌انجامد و نیروی پتانسیل مثبت، یعنی اینکه بین ذرات نیروی دافعه برقرار است و این در حالی است که بین کوارکها و پادکوارکها باید نیروی جاذبه باشد، زیرا در هادرونها یا پروتونها مقید هستند، پس حالت تک‌تایه^۱ رنگ برای گلوئون مورد قبول نیست و تنها حالت هشت‌تایه^۲ رنگ که پتانسیل منفی، به عبارتی نیروی جاذبه ایجاد می‌کند مورد قبول است.

¹ Singlet

² Octet

از آنجا که کوارکها در سه رنگ و شش طعم وجود دارند . برای مشخص کردن یک حالت کوارکی در QCD یا برهمکنش قوی نه تنها به اسپینور دیراک $u^s(p)$ و اسپین آن نیاز است ، بلکه به یک بردار ستونی متشکل از سه جزء C که رنگ را می‌دهد ، نیاز می‌باشد [۱].

$$c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ برای سبز} , \quad c = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ برای آبی} , \quad c = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ برای قرمز} ,$$

و برای توصیف حالت رنگ گلوئون به بردار هشت جزئی نیاز داریم.

$$|1\rangle = a = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ و } |2\rangle \text{ و } |3\rangle \text{ و } \dots \text{ و } |7\rangle \text{ و } |8\rangle = a = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

اجزای a با شاخص بالای حروف مشخص شده‌اند . (a^α) ، $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ روی حالت‌های مختلف رنگ گلوئونها از یک تا هشت می‌باشد.

۴-۲-۱ رأسهای بنیادی در QCD

چون گلوئونها حامل رنگ هستند، برخلاف فوتونها ، پس مستقیماً با بقیه گلوئونها جفت می‌شوند ، پس علاوه بر رأس بنیادی گلوئون - کوارک - پادکوارک ، رأس بنیادی ، سه گلوئونی و چهارگلوئونی نیز وجود دارد . در شکل (۱-۱) انواع رأسهای بنیادی نشان داده شده است.