بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده : فیزیک

گروه : گروه فیزیک

تبادل مزونی و گلوئونی و طیف جرمی هادرون ها

دانشجو : زهرا قلعه نوی

استاد راهنما :

علی اکبر رجبی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

ماه و سال انتشار :

شهریور ۱۳۹۲

تقدیم به

همسر عزیزم

که در طول تحصیل همواره مشوق و همراه من بود و سختی راه را برایم آسان نمود،

پدر مهربانم

آموزگاری که در طول حیاتش انسان بودن را برایم معنا ساخت،

و مادر عزیزم

مظهر صبر و مهربانی که هرچه دارم از اوست.

تقدیر و تشکر

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که ما را به مسیر علم و دانش هدایت فرمود و به همنشینی رهروان دانش مفتخرمان نمود که اگر هدایت او نبود ما هرگز در این مسیر نبودیم.

وظیفه خود می دانم از استاد راهنمای بزرگوار و گرانقدر خود جناب آقای پروفسور علی اکبر رجبیکه بدون راهنمایی های ایشان هرگز دستیابی به این امر مهم میسر نبود، تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر حسن آبادی که در مواقع لزوم وقت خود را در اختیار من قرار دادند و نیز هیئت محترم داوران که بررسی و داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند کمال تشکر را دارم.

بعلاوه از همسر عزیزم جناب آقای اسداله توکلی نژاد که در مراحل مختلف همراه و مشوق من بودند و دوستان ارجمندم جناب آقای دکتر زرین کمر و دکتر حمزوی و تمامی عزیزانی که به نحوی در انجام این پروژه مرا یاری رساندند تشکر و قدردانی می نمایم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج دراین رساله نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

شهریور ۱۳۹۲

چکیده

تا کنون ارائه مدلی کامل برای بررسی نظری جرم هادرون ها، چه در محدوده نسبیتی و چه در محدوده غیر نسبیتی همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است و اخیراً مدل های مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده اند. در این رساله هادرون ها به صورت سیستم هایی متشکل از کوارک های سازنده تحت یک برهمکنش محدود کننده مؤثر، برهمکنش تبادل گلوئونی و برهمکنش کایرال که توسط بوزون گلدستون مبادله می شود، در نظر گرفته می شوند. سپس با محاسبه انرژی برهمکنش های تبادلی، به بررسی خواص هادرون ها از جمله جرم و گشتاور مغناطیسی و همچنین برهمکنش های نوکلئونی درون هسته ای می پردازیم. نشان می دهیم که چگونه ساختار اسپین- طعمی (اسپین-رنگ) ناشی از برهمکنش تبادل بوزون گلدستون (تبادل گلوئونی) بین کوارک ها، باعث شکافتگی فوق ریز در طیف جرمی هادرون ها می شود.

کلمات کلیدی: کرومودینامیک کوانتومی، مدل کوارکی، تقارن کایرال، تبادل بوزون گلدستون، تبادل گلوئون، طیف جرمی هادرون ها .

لیست مقالات مستخرج از رساله

[۱] Z. Ghalenovi and A. A. Rajabi, "Single Charm and beauty baryon masses in the hypercentral approach", *Eur. Phys. J. Plus* **۱۲۷** ۱٤۱ *(۲۰۱۲).*

[۲] Z. Ghalenovi and A. A. Rajabi, A. Tavakolinezhad, "Masses of Charm and Beauty Baryons in the Constituent Quark Model",*Int. J. Mod. Phys. E*, **۲۱** ٦ *(۲۰۱۲)* ۱۲٥۰۰٥۷.

[۳] Z. Ghalenovi, A.A. Rajabi and A. Tavakolinezhad, "The Heavy baryon masses and Spin-Isospin Dependence", *J. Phys. Conf. Ser.* **۳٤۷** ۰۱۲۰۱٥ *(۲۰۱۲).*

[٤] Z. Ghalenovi et al., "The Ground state heavy meson masses in Cornell potential", *Int. J. Phys. Sci.*, **۷** ۱۰ *(۲۰۱۲).*

[٥]. Z. Ghalenovi, A. A. Rajabi and N. Salehi, "Charmed and bottom baryon masses and chiral dynamics", *Int. J. Pur. Appl. Phys.* ۹ ۱ *(۲۰۱۳).*

[٦] Z. Ghalenovi et al, "Study of Charmed and Bottom Baryons in Variational Approach and Chiral Interactions*", Accepted by Chin. J. Phys. (۲۰۱۳).*

[۷] Z. Ghalenovi, A. A. Rajabi and A. Tavakolinezhad, "Study of two-body systems in the Yukawa potential", ۱٥*th Physical Chemistry Conference, Iran, July* ۲۰۱۲.

۸- زهرا قلعه نوی و علی اکبر رجبی، "محاسبه جرم و گشتاور مغناطیسی دوترون بر اساس مدل کوارکی"، هجدهمین کنفرانسهسته ای ایران، یزد، اسفند ماه ۹۰.

۹- زهرا قلعه نوی و علی اکبر رجبی، "برهمکنش های تبادل مزونی و گلوئونی و طیف جرمی باریونها"، کنفرانس فیزیک ایران، یزد، شهریور ماه ۹۱.

فهرست

فصل اول. مقدمه ۱

فصل دوم. کرومودینامیک کوانتومی ۴

۲-۱ کرومودینامیک کوانتومی ۵

۲-۲ کوارک ۶

۲-۳ گلوئون ۸

۲-۴ ایزواسپین ۱۲

۲-۵ ابربار ۱۶

۲-۶ ثابت جفت شدگی ۱۷

۲-۷ هادرون ها ۱۹

۲-۷-۱ مزون ۲۰

۲-۷-۲ باریون ۲۲

۲-۷-۳ ذرات نامتعارف ۲۳

فصل سوم. تقارن ها ۲۶

۳-۱ نظریه کوانتومی میدان ۲۸
۳-۲ تقارن ها ۳۲
۳-۳ تقارن کایرال ۳۷
۳-۳-۱ اسپینورهای کایرال ۳۹
۳-۳-۲ شکست خودبخودی تقارن کایرال ۴۱
۳-۳-۳ جرم بوزون گلدستون ۴۶
فصل چهارم. برهمکنش های تبادلی ۵۱
۴-۱ برهمکنش محدود کننده ۵۲
۴-۲ برهمکنش تبادل گلوئونی ۵۳
۴-۳ چرا تبادل گلوئونی به تنهایی نمی تواند طیف جرمی هادرون ها را توصیف کند؟ ۵۴
۴-۴ برهمکنش کایرال و تبادل مزونی ۵۵
۴-۵ برهمکنش t Hooft’ ۶۲
۴-۶ برهمکنش نوکلئون-نوکلئون ۶۳
فصل پنجم.محاسبه طیف جرمی هادرو نها بر اساس برهمکنش های تبادلی ۶۸
۵-۱ هامیلتونی سیستم هادرونی ۶۹
۵-۲ ساده سازی برهمکنش تبادلی ۷۱
۵-۳ معادله شرودینگر در مختصات فوق کروی ۷۳
۵-۴ محاسبه طیف جرمی هادرون ها ۷۷

۵-۴-۱ مدل پیشنهادی اول(محاسبه طیف جرمی باریون های سنگین) ۷۹

۵-۴-۲ مدل پیشنهادی دوم (محاسبه طیف جرمی باریون های سنگین) ۸۶

۵-۴-۳ مدل پیشنهادی سوم (محاسبه طیف جرمی باریون های سنگین) ۹۵

۵-۴-۴ مدل پیشنهادی چهارم (محاسبه طیف جرمی باریون های سبک N، Δ و ۸)..... ۱۰۱

۵-۴-۵ مدل پیشنهادی پنجم (محاسبه طیف جرمی باریون های سنگین) ۱۰۶

۵-۴-۶ مدل پیشنهادی ششم (محاسبه طیف جرمی باریون های سنگین) ۱۰۹

فصل ششم. نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۳

پیوست ۱ ۱۱۷

مراجع ۱۲۳

فهرست اشکال

شکل (۲-۱): تبدیل یک کوارک به یک کوارک و یک گلوئون	۹
شکل (۲-۲): برهم کنش کوارک-کوارک بوسیله تبادل یک گلوئون	۱۰
شکل(۲-۳): نمایش پایستگی بار رنگ توسط گلوئون	۱۰
شکل ۲-۴ : رأس های سه گلو ئونی و چهار گلوئونی	۱۲
شکل (۲-۵): نه تایی مزونی	۲۱
شکل (۲-۶): گروه هشت تایی باریونی	۲۲
شکل (۲-۷): گروه ده تایی باریونی	۲۲
شکل (۳-۱): نمایش اسپینورهای راستگرد و چپگرد کایرال	۳۹
شکل(۳-۲): پتانسیل کلاه مکزیکی	۴۲
شکل (۳-۳): مغناطش خالص در یک سیستم فرومغناطیس	۴۳
شکل (۳-۴): پتانسیل های مؤثر	۴۵
شکل (۴-۱): تأثیر ثابت جفت شدگی تبادل مزونی بر طیف جرمی باریونی	۵۹
شکل (۵-۱): نمایش مختصات سه ذره در فضا	۷۴
شکل (۵-۴): تابع موج باریون Σ_c^{++}	۱۱۱

فهرست جداول

جدول ۲-۱: اعداد کوانتومی مربوط به کوارک ها ۷

جدول ۵-۴:جرم کوارک استفاده شده مدلI ۸۳

جدول ۵-۶ و ۵-۷ طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل کوارکc ۸٤

جدول ۵-۸ و ۵-۹ طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل کوارکb ۸۵

جدول ۵-۱۱: جرم کوارک استفاده شده مدلII ۹۱

جدول ۵-۱۲ طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل کوارکc ۹۱

جدول ۵-۱۳ طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل کوارکb ۹۲

جدول ۵-۱۴: گشتاور مغناطیسی باریون های سنگین شامل یک کوارک سنگین ۹۲

جدول ۵-۱۵:پارامترهای استفاده شده مدلIIبرای مزون ها ۹۴

جدول ۵-۱۶: طیف جرمی محاسبه شده برای مزون های سنگین دارای کوارک c ($J = 1^+$) ۹۵

جدول ۵-۱۷: طیف جرمی محاسبه شده برای مزون های سنگین دارای کوارک b ($J = 1^+$) ۹۵

جدول ۵-۱۸ و ۵-۱۹: پارامترهای استفاده شده در مدل III ۹۹

جدول ۵-۲۰: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل یک کوارک*c* ۹۹

جدول ۵-۲۱: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل یک کوارک b ۱۰۰

جدول ۵-۲۲: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل دو و سه کوارک c ۱۰۰

جدول ۵-۲۳: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل دو و سه کوارک b ۱۰۱

جدول ۵-۲۴: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل کوارک های c وb ۱۰۱

جدول ۵-۲۵: پارامترهای مدل کوارکیVI ۱۰۴

جدول ۵-۲۶: طیف جرمی باریون های سبک N، Δ و Λ ۱۰۵

جدول۵-۲۷: پارامترهای مدل کوارکیV ۱۰۷

جدول ۵-۲۸: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل یک کوارک c ۱۰۷

جدول ۵-۲۹: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل یک کوارک b ۱۰۸

جدول ۵-۳۰: گشتاور مغناطیسی باریون های سنگین شامل یک کوارک سنگین با $J^{+} = ۳/۲$ ۱۰۸

جدول ۵- :۳۱ پارامترهای مربوط به برهمکنش تبادلی مدل IV ۱۱۰

جدول ۵-۳۲: طیف جرمی محاسبه شده باریون های شامل یک کوارک سنگین ۱۱۱

جدول ۵-۳۳: طیف جرمی محاسبه شده باریون های سنگین شامل دو و سه کوارکسنگین ۱۱۲

فصل اول

مقدمه

بررسی برهمکنش های قوی بین دو نوکلئون محتوای اساسی فیزیک هسته ای می باشد. تقریبا از سال ۱۹۸۰ تا کنون تلاش های زیادی برای توصیف نیروهای هسته ای بر اساس نظریه برهمکنش های قوی یعنی کرومودینامیک کوانتومی صورت گرفته است و مدل های مختلفی به منظور محاسبه جرم هادرون ها و همچنین بررسی برهمکنش های درون هسته ای پیشنهاد شده اند[۱-۱۶]. در این میان مدل کایرال از اهمیت بالایی برخوردار است و اهمیت این مدل روز به روز در فیزیک هسته ای بیشتر می شود.در این مدل هادرون ها به صورت سیستم هایی متشکل از کوارک ها با برهمکنش های محدود کننده، تبادل تک گلوئونی و یک برهمکنش کایرال که توسط بوزون های گلدستون بین کوارک ها مبادله می شود، بررسی می شوند.

از آنجا که هنوز شواهد تجربی قانع کننده ای مبنی بر کوارک های آزاد مشاهده نشده، ارائه مدلی کامل برای بررسی نظری جرم کوارک ها و برهمکنش های آنها از جذابیت بالایی برخوردار است. اگر جرم کوارک های سازنده هادرون ها بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از جرم کوارک های جاری سازنده در نظر گرفته شوند، این بدان معنی است که تقارن کایرال بطور خودبخود شکسته شده است. به دنبال شکست خود به خودی تقارن کایرال، بوزون های گلدستون در همان زمان آشکار می شوند که به طور مستقیم با کوارک های سازنده کوپل می شوند. بنابراین هادرون به صورت سیستمی متشکل از کوارک های سازنده تحت یک برهمکنش محدود کننده مؤثر و یک برهمکنش کایرال که توسط بوزون گلدستون مبادله می-شود، در نظر گرفته می شود. از آنجاکه برهمکنش کایرال یک برهمکنش اسپین- طعمی (اسپین-ایزواسپین) است در طیف جرمی هادرون ها نقش بسیار مهمی دارد.

برهمکنش های تبادلی در برهمکنش های درون هسته ای نیز حائز اهمیت هستند. در برهمکنش نوکلئون-نوکلئون (درون هسته)، برهمکنش های دور برد، میان برد و کوتاه برد به ترتیب می توانند از

طریق تبادل مزون پایون، مزون سیگما و تبادل گلوئون توصیف شوند. بنابراین بررسی برهمکنش های تبادلی در مطالعه جامع برهمکنش های نوکلئون-نوکلئون ضروری می باشند.

تا کنون مدل های مختلفی به منظور بررسی و مطالعه سیستم های چند ذره ای (چند کوارکی) ارائه شـدهاند[۱۷-۲۳]. در این رسـاله از مدل فوق کروی که مطالعـه سیستـم های سه ذره ای را سـاده تر می سازد، استفاده شده است[۲۴-۳۰].

به طور خلاصه مطالبی که در این رساله جمع آوری و محاسبه شده اند به شرح زیر می باشند:

فصل دوم مروری کوتاه بر کرومودینامیک کوانتومی (QCD) و برهمکنش های قوی دارد. در این فصل به معرفی کوارک، گلوئون، ایزواسپین و هادرون ها خواهیم پرداخت. در فصل سوم با تقارن های سیستم های کوارکی آشنا خواهیم شد و تقارن کایرال و دلایل شکست خودبخودی آن را شرح خواهیم داد. در فصل چهارم برهمکنش های تبادل گلوئونی بین کوارکی و پتانسیل محدود کننده را توصیف و با ذکر دلیل نشان می دهیم که تبادل گلوئونی به تنهایی نمی تواند طیف جرمی هادرون ها را توصیف نماید. در این فصل به بررسی برهمکنش های تبادلی در برهمکنش های بین نوکلئونی نیز خواهیم پرداخت. در فصل پنجم روش های مختلفی را برای حل معادله شرودینگر در سیستم های چند کوارکی در فضای فوق کروی ارائه خواهیم داد وبا ساده سازی برهمکنش های تبادلی،طیف جرمی و گشتاور مغناطیسی هادرون ها را محاسبه نموده و نتایج محاسباتی خود ارائه خواهیم کرد. در پایان فصل نیز پیشنهادات خود را برای ادامه کار بیان خواهیم نمود.

فصل دوم

کرومودینامیک کوانتومی

فیزیک ذرات بنیادی به بررسی این پرسش می پردازد که در بنیادی ترین سطح، ماده از چه ساخته شده است. چون ذرات بنیادی بسیار کوچک اند مجبوریم برای بررسی اندرکنش های بین آنها از روشهای غیر مستقیم،به طور مثال پدیده های پراش و واپاشی، استفاده کنیم. برای مطالعه ذراتی که هم کوچک اند و هم سریع حرکت می کنند، به نظریه ای نیاز داریم که اصول نسبیت وکوانتوم را در بر دارد، یعنی نظریه کوانتومی میدان. از آنجایی که ذرات بنیادی هم بسیار کوچک اند و هم به طور معمول بسیار سریع حرکت می کنند، فیزیک ذرات بنیادی طبیعتاً در قلمرو نظریه کوانتومی میدان قرار می گیرد.

در چند سال گذشته نظریه ای مطرح شد که تمام اندرکنش های شناخته شده ی ذرات بنیادی بجز جاذبه را توصیف می کند. این نظریه یا به طور دقیق تر، مجموعه نظریه های مرتبط با هم که شامل الکترودینامیک کوانتومی، نظریه فرآیند های الکتروضعیف گلاشو –واینبرگ-سلام و کرومودینامیک کوانتومی است، مدل استاندارد نامیده شده است.

۲-۱ کرومودینامیک کوانتومی (QCD)

در طبیعت چهار نوع برهمکنش وجود دارد؛ برهم کنش گرانشی، برهم کنش الکترومغناطیسی، برهم کنش ضعیف و برهم کنش قوی. منشأ برهمکنش های گرانشی جرم ذرات هستند و ذرات واسطه گراویتون نامیده می شود. نیروی الکترو مغناطیسی توسط بار الکتریکی و با واسطه فوتون ایجاد می شود. در الکترودینامیک کوانتومی (QED)در مورد عامل ایجاد نیروی ضعیف نام خاصی وجود ندارد. برخی به آن بار ضعیف می گویند. در هر صورت تمامی کوارک ها و لپتون ها دارای این بار هستند. دو نوع برهمکنش ضعیف وجود دارد: دارای بار (به واسطهWها) و خنثی (با واسطهZ).

نیروی قوی نیز توسط رنگ و با واسطه گلوئون ایجاد می شود. تئوری فیزیکی که نیروهای قوی را توصیف می کند، کرومودینامیک نامیده می شود. در این فصل به مطالعه کرومودینامیک کوانتومی(QCD) و برهمکنش ذرات رنگین (کوارک ها) می پردازیم.

۲-۲ کوارک

در سال ۱۹۶۹ در شتاب دهنده بزرگ دانشگاه استانسفورد در کالیفرنیا از بمباران پروتون توسط الکترون، شواهدی در مورد وجود کوارک ها بدست آمده است.دانشمندان وقتی دریافتند که پروتون ها بسیار بزرگتر از الکترون ها هستند، بر آن شدند آنها را با الکترون بمباران کنند این قدام به نوعی شبیه به آزمایش معروف ارنست رادرفورد بود. در آزمایشات استانفورد نیز زاویه پراکندگی مانند آزمایش رادرفورد، بسیار بزرگ و غیر منتظره مشاهده شد. این به آن معنی بود که در درون پروتون نیز باید ذرات نقطه مانند کوچکی وجود داشته باشد. اما ماری گلمان و جورج زوئیک مستقلاً و پیش از او اظهار نظر کرده بودند که پروتونها از ذرات بنیادی تری تشکیل شده اند. در واقع این گلمان بود که به این ذرات نام کوارک داد .این امر با وجود سه کوارک در داخل پروتون و نوترون سازگاری داشت. بر حسب تصادف در طرح پیشنهادی گلمان نیز سه کوارک وجود داشت که همان سه طعم کوارک یعنی بالا(u)، پائین(d)، وشگفت(s)نام دارند. کوارکu (برای"up") دارای بار $2/3\ e$ و شگفتی صفر است، کوارک d (برای"down") دارای بار $-1/3\ e$ و شگفتی صفر و کوارکsدارای بار $-1/3\ e$ وs=-۱(sبرای"strange") است. به ازای هر کوارک (q) یک پاد کوارک ($\bar{q}$) با بار مخالف و شگفتی مخالف وجود دارد.

اندکی بعد کشفیات دیگری صورت گرفت و معلو م شد که سه کوارک کافی نیست. در ابتدا ذره چارمونیوم (c)و پس از آن دو کوارک دیگر، bو tکشف شد و تعداد کوارک ها به شش رسید. علاوه بر کوارکها، خانواده پاد کوارک ها نیز وجود دارد.جدول (۲-۱) مشخصات مربوط به شش کوارک را نشان می دهد.

همانطور که در ادامه خواهیم گفت باریون ها از سه کوارک تشکیل می شوند، بنابراین برای تمامی کوارک ها عدد باریونی برابر ۱/۳ می باشد. بار الکتریکی و اعداد کوانتومی مربوط به طعم آنتی کوارک ها (S، C، B و T) مختلف العلامت با موارد مربوط به کوارک ها هستند. کوارک ها دارای اسپین ۱/۲و بنابراین جزء دسته فرمیون-ها هستند. طبق رابطه گلمن-نیشیجیما بین اعداد کوانتومی و بار کوارک ها رابطه زیر برقرار است:

$$Q = I_z + \frac{\acute{B}+S+C+B+T}{۲} \qquad (۱-۲)$$

که I_z مؤلفه سوم ایزواسپین و $\acute{B}$ عدد باریونیمربوط به کوارک می باشند.

جدول (۲-۱): اعداد کوانتومی مربوط به کوارک ها

Quark	Q	I	I_z	S	C	B	T	$\acute{B}$
d	-۱/۳	۱/۲	-۱/۲	۰	۰	۰	۰	۱/۳
u	+۲/۳	۱/۲	+۱/۲	۰	۰	۰	۰	۱/۳
s	-۱/۳	۰	۰	-۱	۰	۰	۰	۱/۳
c	+۲/۳	۰	۰	۰	+۱	۰	۰	۱/۳
b	-۱/۳	۰	۰	۰	۰	-۱	۰	۱/۳
t	+۲/۳	۰	۰	۰	۰	۰	+۱	۱/۳