بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فیزیک

گرایش فیزیک هسته‌ای

محاسبه طیف باریون‌ها به کمک گروه‌های تقارنی و با درنظرگرفتن پتانسیل‌های برهم‌کنش فوق کروی کوارک‌های تشکیل دهنده

دانشجو:

نسرین صالحی

استاد راهنما :

پروفسور علی اکبر رجبی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به همسر و خانواده عزیزم

به پاس همه خوبی‌ها و محبت‌هایشان

قدردانی و تشکر

حال که با توفیقات الهی مراحل انجام این رساله میسر گردید، بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد ارجمند و گرامی خود پروفسور علی اکبر رجبی تشکر و قدردانی نمایم. سعه صدر و روحیه ی علمی و پژوهشی ایشان الگوئی جاودانه در زندگی بنده خواهد بود.

همچنین از جناب آقای دکتر مرتضی ایزدی فرد مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه ، جناب آقای دکتر سعید حسامی پیله رود ریاست محترم دانشکده‌ی فیزیک کمال تشکر و سپاس را دارم.

از هیات محترم داوران؛ پروفسور نادر قهرمانی ، پروفسور حسین آفریده، دکتر حسین موحدیان و دکتر محمد رضا پهلوانی به خاطر قبول زحمت داوری و نقد و بررسی رساله اینجانب کمال تشکر و قدرانی را دارم.

دانشجو تأیید می‌نماید که مطالب مندرج دراین رساله نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد 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 می‌باشد.

شهریور ۱۳۹۰

چکیده

در سال‌های اخیر ارائه مدلی کامل برای بررسی نظری جرم باریون‌ها، چه در محدوده‌ی نسبیتی و چه در محدوده‌ی غیرنسبیتی همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. اگرچه مدل‌های ارائه شده کاملاً متفاوت اند ، لکن طیف باریونی معمولاً به خوبی در تمامی این مدل‌ها قابل توصیف است. وجه اشتراک تمامی این مدل‌ها آن است که برهم‌کنش سه کوارک در داخل باریون می‌تواند به دو بخش تقسیم شود: بخش اول شامل پتانسیل برهم‌کنش نگهدارنده است که مستقل از اسپین و طعم کوارک بوده و تحت تقارن SU(6) ناوردا باقی می‌ماند و بخش دوم که باعث شکست تقارن SU(6) می‌گردد. ما در این رساله با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته به مطالعه‌ی شکست تقارن SU(6) در طیف باریون‌ها، به سبب حضور جملات وابسته به اسپین، ایزواسپین و طعم کوارک‌ها پرداخته‌ایم. به منظور محاسبه‌ی بزرگی انرژی میانگین هر چندگانه‌ی SU(6) معادله‌ی شرودینگر (در مدل غیرنسبیتی) و معادله‌ی دیراک را (در مدل نسبیتی) برای پتانسیل نگهدارنده‌ی پیشنهادی خود به طور دقیق حل نمودیم. در این مطالعه ما پتانسیل فوق کروی نگهدارنده را به صورت ترکیبی از پتانسیل کولنی، پتانسیل نگهدارنده خطی و پتانسیل نوسانگر هماهنگ در نظر گرفته‌ایم. ویژگی برجسته‌ی مدل ما این است که پتانسیل نگهدارنده نه تنها در حضور قسمت نگهدارنده با برد بلند، بلکه در حضور پتانسیل کوتاه برد دیگری که یک پتانسیل کولنی است و به باررنگ بستگی دارد مشخص می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات در مدل پیشنهادی ما (ترکیب روش ارائه شده برای حل معادلات شرودینگر و دیراک در حضور پتانسیل نگهدارنده‌ی پیشنهادی و استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته) نشان می‌دهد که جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت، به طور کلی به خوبی بازتولید شده‌اند و به نتایج تجربی بسیار

نزدیک‌اند. همچنین مدل ما نه تنها قادر به توصیف جرم باریون‌ها در حالت پایه و حالت‌های برانگیخته با جرم کمتر از 2 GeV بوده، بلکه در اکثر موارد در توصیف طیف جرمی باریون‌هایی با جرم بیش از 2 GeV و حالت‌های تشدیدی با پاریته منفی نیز موفق است.

کلمات کلیدی: طیف، باریون‌های شگفت و غیر شگفت، معادله شرودینگر، معادله دیراک، پتانسیل فوق کروی، نظریه‌ی گروه‌های تقارنی.

لیست مقالات مستخرج از رساله

1- “ Spectrum of Strange and Nonstrange Baryons by Using Generalized Gürsey Radicati Mass Formula and Hypercentral Potential **”,** *Acta Physica Polonica B* **,** Vol. **42** (2011)**.**

2- “ Calculation of Nonstrange Baryons Spectra Based on Symmetry Groups Theory and Hypercentral Potential ” has been accepted for publication in *Chinese Journal of Physics* **(**6-13-2011**).**

۳- " جرم مزون‌های خانواده ρ و Ψ با استفاده از پتانسیل‌های ایزواسپین، نوسانی، نگهدارنده و بار رنگ"، اولین کنفرانس سالانه فیزیک ذرات بنیادی، دانشگاه یزد، ۶-۷ بهمن ۱۳۸۹.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فصل اول: مقدمه.....۱

۱-۱- مقدمه.....۲

فصل دوم: کوارک‌ها و هادرون‌ها.....۴

۲-۱- نیروهای اصلی و بنیادی در طبیعت.....۵

۲-۲- کوارک‌ها.....۵

۲-۳- طعم و رنگ کوارک‌ها.....۷

۲-۴- مدل کوارکی.....۹

۲-۴-۱- هادرون‌ها.....۱۰

۲-۴-۱-۱- باریون‌ها.....۱۱

۲-۴-۱-۲- مزون‌ها.....۱۳

۲-۴-۲- لپتون‌ها.....۱۴

۲-۴-۳- ذرات واسطه.....۱۵

فصل سوم: ایزواسپین.....۱۶

۳-۱- ایزواسپین..... ۱۷

۳-۲- ابربار..... ۲۰

۳-۳- ایزواسپین و عملگر بار برای هسته‌های چند نوکلئونی..... ۲۱

فصل چهارم: گروه‌های تقارنی..... ۲۲

۴-۱- گروه‌های تقارنی..... ۲۳

۴-۲- مرتبه گروه..... ۲۴

۴-۳- عملگر کازیمیر..... ۲۴

۴-۴- گروه تقارنی SU(2) ۲۵

۴-۵- گروه تقارنی SU(3) ۲۶

۴-۶- جبر لی گروه SU(3) ۲۷

۴-۷- عملگرهای کازیمیر گروه SU(3) ۲۹

۴-۸- گروه تقارنی SU(6) ۲۹

فصل پنجم: روش‌های محاسبه‌ی جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت..... ۳۲

۵-۱- مختصات فوق کروی..... ۳۳

۵-۲- پتانسیل‌های مرکزی بین کوارک‌های تشکیل دهنده‌ی باریون‌ها..... ۳۵

۵-۳- حل معادله‌ی شرودینگر فوق کروی در حضور پتانسیل فوق کولنی.....۳۶

۵-۴- طیف باریون‌ها درحضور پتانسیل کرنل فوق‌کروی و پتانسیل وابسته به برهم‌کنش

اسپین – اسپین.....۴۱

۵-۵- طیف باریون ها درحضور پتانسیل کرنل فوق‌کروی و پتانسیل وابسته به برهم‌کنش

اسپین - اسپین، ایزواسپین - ایزواسپین و اسپین – ایزواسپین.....۴۲

۵-۶- فرمول جرمی گلمن - اوکوبو (GMO).....۴۶

۵-۷- فرمول جرمی گئورسی - رادیکاتی (GR).....۴۸

۵-۸- فرمول جرمی گئورسی - رادیکاتی تعمیم یافته.....۵۰

۵-۹- محاسبه طیف باریون‌ها درحضور پتانسیل کرنل فوق‌کروی و با استفاده از فرمول جرمی

گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته.....۵۱

فصل ششم: محاسبه‌ی جرم باریون‌ها در مدل غیرنسبیتی.....۵۴

۶-۱- مقدمه.....۵۵

۶-۲- پتانسیل برهم‌کنش نگهدارنده.....۵۵

۶-۳- محاسبه‌ی جرم باریون‌ها در مدل غیرنسبیتی با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی

تعمیم یافته در حضور پتانسیل نگهدارنده‌ی فوق‌کروی.....۵۹

۶-۳-۱- حل دقیق معادله‌ی شرودینگر شعاعی برای پتانسیل نگهدارنده.....۵۹

۶-۳-۲- محاسبه‌ی جرم باریون‌های غیرشگفت با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته.....۶۴

۶-۳-۳- محاسبه‌ی جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته.....۷۱

فصل هفتم: محاسبه‌ی جرم باریون‌ها در مدل نسبیتی.....۸۴

۷-۱- معادله دیراک.....۸۵

۷-۲- محاسبه طیف باریون‌ها در مدل نسبیتی با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته و در حضور پتانسیل نگهدارنده‌ی فوق‌کروی.....۸۶

۷-۲-۱- حل دقیق معادله‌ی دیراک برای پتانسیل نگهدارنده.....۸۶

۷-۲-۲- محاسبه‌ی جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته.....۹۲

نتایج و پیشنهادات.....۱۰۳

مراجع.....۱۰۶

ضمیمه(I).....۱۱۰

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: سه تایی بنیادین کوارک - آنتی کوارک در SU(3)..... ۱۰

شکل ۵-۱: مختصات سه ذره در فضا..... ۳۳

شکل ۵-۲: طیف باریون های محاسبه شده با درنظر گرفتن پتانسیل کرنل فوق کروی و جمله وابسته به اسپین [۳۱]..... ۴۲

شکل ۵-۳: طیف باریون های محاسبه شده با درنظر گرفتن پتانسیل کرنل فوق‌کروی و جملات وابسته به اسپین، ایزواسپین و اسپین - ایزواسپین [۳۱]..... ۴۴

شکل ۵-۴: طیف جرمی محاسبه شده برای حالت‌های تشدیدی باریون‌های N ، Δ و Σ[۴۷] و مقادیر تجربی جرم باریون ها [۴۸]..... ۵۲

شکل ۵-۵: طیف جرمی محاسبه شده برای حالت‌های تشدیدی باریون‌های Λ ، Ξ و Ω[۴۷] و مقادیر تجربی جرم باریون ها [۴۸]..... ۵۳

شکل۶-۱: پتانسیل بار رنگ بر حسب فاصله‌ی ذرات به ازاء $\tau = 3.5$..... ۵۶

شکل۶-۲: پتانسیل نگهدارنده‌ی خطی بر حسب فاصله‌ی ذرات به ازاء $\kappa = 0.89$..... ۵۷

شکل ۶-۳: پتانسیل نوسانی بر حسب فاصله‌ی ذرات به ازاء $\eta = 0.1431$..... ۵۸

شکل ۶-۴: پتانسیل کل متشکل از پتانسیل‌های بار رنگ، نگهدارنده‌ی خطی و نوسانی بر حسب فاصله‌ی ذرات به ازاء $\tau = 3.5$، $\kappa = 0.89$ و $\eta = 0.1431$..... ۵۸

شکل۶-۵: مقادیر تجربی طیف جرمی نوکلئون‌ها (مستطیل‌های خاکستری رنگ) [۵۳] و نتایج حاصل از محاسبات ما (+) بر حسب (MeV). ۶۷

شکل۶-۶: مقادیر تجربی طیف جرمی باریون‌های Δ (مستطیل‌های خاکستری رنگ) [۵۳] و نتایج

حاصل از محاسبات ما (+) بر حسب (MeV) ۶۷

شکل۶-۷: طیف تجربی باریون‌های Σ , Δ و N (مستطیل‌های خاکستری رنگ) [۵۳] و نتایج حاصل از محاسبات ما (+) بر حسب (MeV). ۷۴

شکل۶-۸: طیف تجربی باریون‌های Ω , Ξ و Λ (مستطیل خاکستری رنگ) [۵۳] و نتایج حاصل از محاسبات ما (+) بر حسب (MeV) ۷۴

شکل۷-۱: مقادیر تجربی طیف باریون‌های Δ وN (مستطیل‌های خاکستری رنگ) [۵۳] و نتایج حاصل از محاسبات ما (+) در مدل نسبیتی بر حسب (MeV). ۹۴

شکل۷-۲: مقادیر تجربی طیف باریون‌های Λ ، Σ و Ξ (مستطیل‌های خاکستری رنگ) [۵۳] و نتایج حاصل از محاسبات ما (+) در مدل نسبیتی بر حسب (MeV) ۹۴

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱: نیروهای اصلی و بنیادی در طبیعت و مشخصات وابسته به آن‌ها.....۵

جدول۲-۲: مشخصات کوارک‌ها.....۸

جدول۲-۳: باریون‌های با اسپین $\frac{1}{2}$ [۱].....۱۱

جدول۲-۴: باریون‌های با اسپین $\frac{3}{2}$ [۱].....۱۲

جدول۲-۵: ویژگی‌های مزون‌ها با اسپین صفر [۶].....۱۳

جدول۲-۶: ویژگی‌های مزون‌ها با اسپین صفر.....۱۴

جدول۲ -۷: لپتون‌ها و ویژگی‌های آن‌ها[۷].....۱۵

جدول ۴-۱: ثابت های ساختار غیرصفر.....۲۸

جدول ۵-۱: طیف جرمی حالت‌های تشدیدی باریون های غیر شگفت ، با درنظر گرفتن پتانسیل کرنل فوق‌کروی و جملات وابسته به اسپین، ایزواسپین و اسپین - ایزواسپین [۳۱].....۴۴

جدول ۵-۲: پارامترهای وابسته به فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی.....۴۹

جدول ۵-۳: جرم های محاسبه شده و تجربی سه باریون Ξ^0, Δ, Ω^-.....۴۹

جدول ۵-۴: ضرایب پتانسیل و پارامترهای وابسته به رابطه (۵-۴۸) که از برازش با داده های تجربی [۴۸] بدست آمده‌اند ۵۲

جدول ۶-۱: توابع $h(x)$ و $g(x)$ به ازاء پتانسیل‌های نگهدارنده متفاوت[۵۲].....۶۱

جدول ۶-۲: مقادیر پارامترهای مجهول در رابطه‌ی (۵-۴۷) برای محاسبه‌ی جرم باریون‌های غیرشگفت، در مدل غیرنسبیتی و با استفاده از روش global fit ۶۶

جدول ۶-۳: مقادیر وابسته به ضرایب پتانسیل نگهدارنده (رابطه‌ی (۶-۱)) برای محاسبه‌ی جرم

باریون‌های غیرشگفت در مدل غیرنسبیتی.....۶۶

جدول ۶-۴: جرم باریون‌های غیرشگفت (N و Δ) بر حسب (MeV) و در مدل غیرنسبیتی.....۶۸

جدول ۶-۵: درصد خطای نسبی برای جرم باریون‌های غیرشگفت در مدل غیرنسبیتی.....۶۹

جدول ۶-۶: مقادیر پارامترهای مجهول در رابطه‌ی (۵-۴۷) برای محاسبه‌ی جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت، در مدل غیرنسبیتی و با استفاده از روش global fit ۷۲

جدول ۶-۷: مقادیر وابسته به ضرایب پتانسیل نگهدارنده (رابطه‌ی (۶-۱))برای محاسبه‌ی جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت در مدل غیرنسبیتی. ۷۳

جدول ۶-۸: جرم باریون‌های N ، Δ و Σ بر حسب (MeV) و در مدل غیرنسبیتی.....۷۵

جدول ۶-۹: جرم باریون‌های Λ , Ξ و Ω بر حسب (MeV) و در مدل غیرنسبیتی.....۷۷

جدول ۶-۱۰: درصد خطای نسبی برای جرم باریون‌های N ، Δ و Σ در مدل غیرنسبیتی.....۷۸

جدول ۶-۱۱: درصد خطای نسبی برای جرم باریون‌های Λ , Ξ و Ω در مدل غیرنسبیتی.....۸۰

جدول ۷-۱: توابع $K(x)$ و $L(x)$ به ازاء پتانسیل‌های نگهدارنده متفاوت[۵۸].....۹۰

جدول ۷-۲: مقادیر پارامترهای مجهول در رابطه‌ی (۵-۴۷) برای محاسبه‌ی جرم باریون‌های شگفت و غیرشگفت، در مدل نسبیتی و با استفاده از روش global fit ۹۳

جدول ۷-۳: جرم نوکلئون‌ها بر حسب (MeV) و در مدل نسبیتی. ۹۵

جدول ۷-۴: جرم باریون‌های Δ بر حسب (MeV) و در مدل نسبیتی.....۹۶

جدول ۷-۵: جرم باریون‌های Λ بر حسب (MeV) و در مدل نسبیتی ۹۷

جدول ۷-۶: جرم باریون‌های Σ و Ξ بر حسب (MeV) و در مدل نسبیتی.....۹۸

جدول ۷-۷: درصد خطای نسبی برای جرم نوکلئون‌ها در مدل نسبیتی.....۹۹

جدول ۷-۸: درصد خطای نسبی برای جرم باریون‌های Δ در مدل نسبیتی.....۹۹

جدول ۷-۹: درصد خطای نسبی برای جرم باریون‌های Λ در مدل نسبیتی.....۱۰۰

جدول ۷-۱۰: درصد خطای نسبی برای جرم باریون‌های Σ و Ξ در مدل نسبیتی.....۱۰۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تلاشهای زیادی در زمینه‌ی بررسی ویژگی‌های باریون‌ها ، به خصوص جرم آن‌ها صورت گرفته است. از اهداف این پروژه ارائه‌ی مدلی است که به کمک آن بتوان طیف جرمی باریون‌های شگفت و غیرشگفت را به خوبی توصیف کرد. در مدل پیشنهادی ما سعی شده است که با انتخاب پتانسیل‌های برهم‌کنش مناسب (شامل پتانسیل‌های نگهدارنده و غیر نگهدارنده) و استفاده از ویژگی‌های گروه‌های تقارنی جرم باریون‌ها در هر دو مدل نسبیتی و غیرنسبیتی محاسبه شود.

در فصل دوم ابتدا به معرفی کوارک‌ها و خواص آن‌ها از جمله طعم و رنگ آن‌ها پرداخته و سپس مدل کوارکی را معرفی نموده‌ایم. در ادامه به معرفی مقدماتی هادرون‌ها، باریون‌ها، مزون‌ها و توزیع کوارکی آن-ها پرداخته و در انتها لپتون‌ها و ذرات واسطه را معرفی کرده‌ایم.

در فصل سوم به معرفی ایزواسپین، ابربار و عملگر بار برای هسته‌های چند نوکلئونی پرداخته‌ایم. در فصل چهارم با گروه‌های تقارنی $SU(2)$، $SU(3)$ و $SU(6)$ و عملگرهای کازیمیر این گروه‌ها آشنا می‌شویم و پیرامون مرتبه‌ی یک گروه و جبر لی حاکم بر برخی از گروه‌ها مطالبی را ارائه می‌دهیم.

در فصل پنجم مختصات فوق کروی و پتانسیل‌های مرکزی بین کوارک‌های تشکیل دهنده‌ی باریون‌ها را معرفی نموده و حل معادله‌ی شرودینگر در حضور پتانسیل فوق کولنی را ارائه می‌دهیم. در ادامه طیف باریونی که توسط گیانینی و همکارانش درحضور پتانسیل فوق‌کروی و با در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های ناشی از اثرات اسپین و ایزواسپین محاسبه شده است را ارائه داده‌ایم. در انتهای این فصل به معرفی فرمول‌های جرمی که برای محاسبه طیف باریون‌ها توسط گروه‌های مختلف ارائه شده است پرداخته‌ایم و طیف باریونی محاسبه شده توسط گیانینی بر پایه فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی را ارائه داده‌ایم.

در فصل ششم باریون‌ها را به عنوان یک مجموعه‌ی سه جسمی درنظر گرفته و جرم باریون‌ها را در مدل غیرنسبیتی محاسبه نموده‌ایم. بدین منظور ابتدا معادله‌ی شرودینگر شعاعی را در حضور پتانسیل نگهدارنده‌ی پیشنهادی خود به طور دقیق حل کرده و ویژه مقادیر انرژی و ویژه توابع مربوط به باریون را در حالت پایه و برانگیخته بدست آوردیم، سپس با استفاده از فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته جرم باریون‌های شگفت و غیر شگفت را محاسبه نموده و نتایج محاسبات خود را با نتایج تجربی و نتایج حاصل از مدل‌های نظری دیگر مقایسه کرده‌ایم.

در فصل هفتم با استفاده از معادله‌ی دیراک به محاسبه‌ی طیف باریون‌ها در مدل نسبیتی پرداخته‌ایم. برای این هدف ابتدا معادله‌ی دیراک را برای پتانسیل نگهدارنده‌ی پیشنهادی خود به طور تحلیلی حل کرده و ویژه توابع و ویژه مقادیر انرژی را برای یک سیستم سه کوارکی محاسبه کرده‌ایم، سپس بر اساس فرمول جرمی گئورسی – رادیکاتی تعمیم یافته جرم باریون‌های شگفت و غیر شگفت را محاسبه نموده‌ایم و در انتها نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی خود در حالت نسبیتی را با نتایج حاصل از مدل غیرنسبیتی مقایسه کرده‌ایم.