بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

عنوان:

محاسبه سطح مقطع تولید مزون‌های افسون $D^{\pm}$ ، $\overline{D}^{0}$ و D^{0} در برخورد پایون با هسته سرب در انرژی‌های بالا

استاد راهنما:

دکتر فرهاد ذوالفقارپور

توسط:

جواد محمدی

دانشگاه محقق اردبیلی

تابستان ۱۳۹۱

عنوان پایان نامه

محاسبه سطح مقطع تولید مزون‌های افسون $D^{\pm}$ ، $\overline{D}^{0}$ و D^{0} در برخورد پایون با هسته سرب در انرژی‌های بالا

توسط:

جواد محمدی

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته ای

از

دانشگاه محقق اردبیلی

اردبیل-ایران

ارزیابی وتصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه عالی

جناب آقای دکتر فرهاد ذوالفقارپور (استاد راهنماو ریس کمیته).....استادیار

جناب آقای دکتر داریوش رضایی (داورداخلی) .....دانشیار

جناب آقای دکتر حسین قلیزاده (داور خارجی).....استادیار

شهریور- ۱۳۹۱

تقدیم به

عزیزترین الطاف خداوند

وجود نازنین پدر و مادر عزیزم

آنانی که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان، سرمایه های جاودانی من است و به پاس قلب مهربان، فداکاری های بی کران و زحمات بی دریغشان زانوی ادب بر زمین می نهم و بادلی مملو از عشق و محبت بر دستان پر مهرشان بوسه می زنم.

و تقدیم به

خواهر و برادران عزیزم

آنانی که در لحظه های غم و شادی ام، دلگرمی و پشتیبان من بوده اند و همواره شرمسار محبت هایشان هستم.

تقدیر و سپاس

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

بر خود لازم می دانم که از صمیم قلب از زحمات بی شائبه، تلاش های بی وقفه و راهنمایی های ارزشمند استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر فرهاد ذوالفقارپور که همواره با سعه صدر، متانت طبع و دانش علمی بی نظیر خود در تمامی مراحل این پایان نامه مرا راهنمایی کرده اند و در این راه از هیچ مساعدتی دریغ نفرمودند، کمال امتنان و قدردانی را داشته باشم. باد اکه در مسیر زندگیشان لطف بی انتهای الهی همواره یاری گرشان باشد.

همچنین از خانواده عزیزم که طی دوران تحصیلم با بردباری کامل مرا همراهی نمودند، تشکر و سپاسگزاری می نمایم و از ایزد یکتا بهروزی و نیک فرجامی را برایشان آرزومندم.

نام خانوادگی: محمدی **نام**: جواد

عنوان پایان نامه: محاسبه سطح مقطع تولید مزون‌های افسون $D^{\pm}$ ، $\overline{D}^{0}$ و D^{0} در برخورد پایون با هسته سرب در انرژی‌های بالا

استاد راهنما: دکتر فرهاد ذوالفقارپور

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: فیزیک **گرایش**: هسته‌ای **دانشگاه**: محقق اردبیلی
دانشکده: علوم **تاریخ فارغ التحصیلی**: /۶/۱۳۹۱ **تعداد صفحه**:۹۰

کلید واژه‌ها: سطح مقطع، ساختار کوارکی، فرآیند درل یان، برخورد پایون – سرب، مزون‌های افسون D، انرژی‌های بالا

چکیده:

در این پایان نامه ابتدا فرض می‌شود که پایون‌ها دارای ساختار کوارکی بوده و از یک کوارک و پاد کوارک تشکیل یافته‌اند. برای این کار ابتدا توابع توزیع کوارک‌ها و پاد کوارک‌ها را در داخل پایون محاسبه می‌کنیم. همچنین فرض می‌کنیم که پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز از سه کوارک ظرفیت و دریای کوارک و پاد کوارک تشکیل یافته‌اند و توابع توزیع کوارک‌های ظرفیت و دریا را در داخل آنها به دست می‌آوریم. با مشخص شدن توابع توزیع کوارک‌ها و دریای کوارکی در داخل پایون‌ها و پروتون‌ها و نوترون‌ها، می‌توان توابع توزیع کوارکی در داخل هسته سرب را محاسبه نمود و با استفاده از آنها در چارچوب مدل‌های موجود در QCD و فرآیند درل یان، سطح مقطع تولید مزون‌های افسون $D^{\pm}$ ، $\overline{D}^{0}$ و D^{0} تولید شده در برخورد پایون با هسته سرب در انرژی‌های بالا را حساب نمود. برای به دست آوردن نتایج عددی قابل مقایسه از محاسبات این پایان نامه با نتایج تجربی، یک برنامه فرترن نوشته‌ایم. در انتها سطح مقطع تولید مزون‌های فوق به دست آمده از برنامه فرترن، با نتایج تجربی در دسترس مقایسه شده است.

فهرست

مقدمه ۱

فصل اول- مروری بر ذرات بنیادی و نیروهای بنیادی چهارگانه ۴

مقدمه ۴

۱-۱- فیزیک ذرات بنیادی و مدل استاندارد ۴

۱-۲- نیروها و ذرات تبادلی ۶

۱-۳- کوارک‌ها ۹

۱-۴- هادرون‌ها ۱۲

۱-۴-۱- باریون‌ها ۱۳

۱-۴-۲- مزون‌ها ۱۴

۱-۵- لپتون‌ها ۱۴

۱-۶- نظریه کرومودینامیک کوانتومی ۱۷

۱-۷- گلئون‌ها ۱۸

فصل دوم- ساختار نوکلئون‌های آزاد و مدل کوارک پارتون ۲۰

مقدمه ۲۱

۲-۱- پراکندگی الکترون - میون ۲۲

۲-۲- پراکندگی الکترون از یک توزیع بار ۲۵

۲-۳- پراکندگی کشسان الکترون – پروتون ۲۸

۲-۳- پراکندگی ناکشسان الکترون - پروتون ۳۴

۲-۴- متغیر بیورکن و مدل پارتون ۳۸

۲-۵- تابع ساختار پروتون در تقریب LO ۵۱

فصل سوم- تعیین سطح مقطع مزون‌های افسون D تولید شده در برخورد پایون با هسته سرب، بحث و نتیجه‌گیری ۲۱

مقدمه ۶۲
۳-۱- تابع ساختار هسته سرب ۶۲
۳-۲- تابع ساختار پایون ۶۸
۳-۳- تولید مزون‌های افسون D و محاسبه سطح مقطع برهم کنش پایون با هسته سرب ۷۵
۳-۳-۱- کوارک افسون ۷۶
۳-۳-۲- مزون‌های افسون D ۷۶
۳-۳-۳- محاسبه سطح مقطع برهم کنش پایون با هسته سرب ۷۷
۳-۴- بحث و نتیجه گیری ۸۴
پیوست الف – سطح مقطع پراکندگی MOTT ۸۵
پیوست ب – معادله دیراک ۸۷
مراجع ۸۸

فهرست اشکال

شکل ۱-۱- نمودار فاینمن برای تولید لپتون‌ها در واپاشی بتا ۱۷

شکل ۱-۲- برهمکنش‌های موجود برای یک گلئون ۱۹

شکل ۲-۱- فرآیند پراکندگی $e^-\mu^- \longrightarrow e^-\mu^-$ در چارچوب آزمایشگاه ۲۲

شکل ۲-۲- پایین‌ترین مرتبه پراکندگی الکترون از ابر الکترونی ۲۶

شکل ۲-۳- عامل شکل پروتون، اندازه گیری شده در پراکندگی الکترون - پروتون ۲۸

شکل ۲-۴- اولین مرتبه پراکندگی کشسان الکترون –پروتون ۲۹

شکل ۲-۵- عامل شکل الکتریکی پروتون ۳۳

شکل ۲-۶- عامل شکل مغناطیسی نوکلئون‌ها. ۳۴

شکل ۲-۷- اولین مرتبه پراکندگی ناکشسان $e^-p \rightarrow e^-X$ ۳۵

شکل ۲-۸- تابع ساختار $vW_2(x,Q^2)$ برحسب Q^2 در $x = 0.25$ ۴۰

شکل ۲-۹- تابع ساختار $vW_2(x,Q^2)$ برحسب x در Q^2 های مختلف ۴۰

شکل ۲-۱۰- پراکندگی فوتون –پارتون ۴۱

شکل ۲-۱۱- پراکندگی کشسان الکترون –پارتون ۴۱

شکل ۲-۱۲- نسبت $2xF_1(x)/F_2(x)$ ۴۴

شکل ۲-۱۳- تابع ساختار $F_2(x)$ در x های کوچک و نقض مقیاس بندی بیورکن ۴۵

شکل ۲-۱۴- نسبت F_2^{en}/F_2^{ep}، نتایج تجربی مربوط به نسبت تابع ساختار نوترون و پروتون ۴۷

شکل ۲-۱۵- نسبت F_2^{en}/F_2^{ep} رسم شده با استفاده از پارامترهای گروه GRV ۴۸

شکل ۲-۱۶- اختلاف توابع ساختار پروتون و نوترون برحسب x در پراکندگی ناکشسان ژرف ۴۹

شکل ۲-۱۷- تابع ساختار پروتون به ازای فرض‌های متفاوت ساختار درونی آن ۵۰

شکل ۲-۱۸- توابع ساختار کوارکی پروتون، استخراج شده از اطلاعات پراکندگی ناکشسان ژرف ۵۶

شکل ۲-۱۹- نمودار محاسبه شده برای توزیع گلئون‌ها و کوارک‌های درون پروتون ۵۷

شکل ۲-۲۰- تابع ساختار پروتون برحسب x برای Q^2 های مختلف در مرتبه NLO ۵۸

شکل ۲-۲۱- تابع ساختار پروتون برحسب x برای Q^2 های مختلف در مرتبه LO و NLO ۵۹

شکل ۲–۲۲– تابع ساختار پروتون محاسبه شده در این پایان نامه در مرتبه LO ۶۰
شکل ۳–۱– مقایسه تابع ساختار پروتون و نوترون آزاد مدل GRV با تابع ساختار اکولینیچو ۶۶
شکل ۳–۲– تابع ساختار هسته سرب و دوترون بر واحد نوکلئون محاسبه شده در این پایان نامه ۶۷
شکل ۳–۳– نسبت تابع ساختار هسته سرب به نوکلئون، پروتون و نوترون آزاد محاسبه شده ۶۸
شکل ۳–۴– سطح مقطع کل برای برخورد پایون‌های $\pi^{\pm}$ با پروتون ۷۰
شکل ۳–۵– توزیع کوارک‌ها و گلئون‌ها درون پایون در مرتبه NLO ۷۳
شکل ۳–۶– نمودار توزیع کوارک‌ها و گلئون‌های درون پایون در مرتبه NLO ۷۴
شکل ۳–۷– تابع ساختار پایون محاسبه شده در Q^2 های مختلف ۷۵
شکل ۳–۸– تولید D^+ در برخورد $p-p$ ۷۷
شکل ۳–۹– تولید کوارک و پاد کوارک افسون در برخورد پایون با پروتون ۷۸
شکل ۳–۱۰– نمودارهای فاینمن برای سطح مقطع داده شده در رابطه (۳–۲۸) در تقریب LO ۸۰
شکل ۳–۱۱– سطح مقطع رابطه (۳–۲۹) برحسب Δy و p_T^2 ..... ۸۱
شکل ۳–۱۲– سطح مقطع رابطه (۳–۳۰) برحسب Δy و p_T^2 ..... ۸۱
شکل ۳–۱۳– سطح مقطع برخورد پایون با سرب محاسبه شده برحسب x_F در این پایان نامه ۸۲
شکل ۳–۱۴– سطح مقطع برخورد پایون با سرب محاسبه شده در این پایان نامه برحسب p_T ۸۳

فهرست جداول

جدول ۱-۱- نیروهای موجود در طبیعت و ذرات حامل آنها ۶

جدول ۱-۲- نیروها و تقارن‌ها ۷

جدول ۱-۳- بار و جرم تقریبی کوارک‌ها ۱۰

جدول ۱-۴- اعداد کوانتومی کوارک‌ها ۱۱

جدول ۱-۵- بار، عدد لپتونی و جرم تقریبی لپتون‌ها ۱۶

جدول ۲-۱- عامل شکل برخی از توزیع بارهای الکتریکی ۲۷

جدول ۳-۱- مقادیر $(g_{nl}^{p}, g_{nl}^{n}, \mathcal{E}_{nl}(MeV))$ و $(\langle r^2\rangle^{\frac{1}{2}}, \hbar w)$ برای هسته سرب ۶۵

جدول ۳-۲- برخی از مشخصات پایون‌ها ۶۹

جدول ۳-۳- برخی از مشخصات مزون‌های افسون D ۷۷

مقدمه

شاید بتوان گفت فیزیک ذرات بنیادی با کشف الکترون توسط تامسون[1]، در ۱۱۵ سال پیش آغاز شده است. اما در نیمه دوم قرن بیستم پیشرفت‌های عظیمی در درک ما از دنیای درون اتم اتفاق افتاد. از یک سو پیشرفت‌های نظری در مکانیک کوانتومی و به تبع آن درنظریه میدان‌های کوانتومی و از سوی دیگر انجام آزمایش‌های بزرگ به وسیله شتاب‌دهنده‌های عظیم باعث شد که امروزه بتوانیم ادعا کنیم ساختار بخش عظیمی از ماده قابل رویت در جهان را می‌دانیم. نقطه عطف این آزمایشات به سال ۱۹۶۰ برمی‌گردد که آزمایش پراکندگی الکترون‌های پر انرژی از نوکلئون‌ها در شتاب‌دهنده خطی استانفورد[2] انجام شد [۱،۲]. نتایج حاصل از توزیع زاویه‌ای الکترون‌های پراکنده شده نشان می‌داد الکترون‌ها از ذرات بدون ساختار داخلی پراکنده نمی‌شوند و نتایج حاصل تنها با درنظر گرفتن ساختار داخلی برای نوکلئون‌ها قابل بررسی بودند. با بررسی‌های انجام گرفته برای توضیح نتیجه این آزمایش وجود توابع ساختار نه تنها حتمی بوده بلکه فقط تابعی از مقیاس x می‌باشد که اینک به مقیاس بیورکن معروف شده بود که یک سال قبل یعنی در سال ۱۹۶۸ چنین رفتاری توسط بیورکن پیش‌گویی شده بود.

در این میان ریچارد فاینمن[3] اولین کسی بود که راه حل کاملی برای فهم مقیاس بیورکن ارائه نمود [۳]. وی پروتون را تشکیل یافته از سه ذره به نام پارتون[4] (همان کوارک‌ها با اسپین ۱/۲ که گلمن[5] در سال ۱۹۶۴ وجود آنها را پیش گویی کرده بود [۴]) درنظر گرفته بود و سطح مقطع پراکندگی حاصل از پروتون را از جمع ناهمدوس[6] سطع مقطع پراکندگی الکترون از این سه ذره به دست آورد و نشان داد که در انرژی‌های بالا مقیاس بیورکن همان درصد تکانه و انرژی از پروتون است که توسط یک پارتون حمل می‌شود. بنابراین مدل پارتونی به خوبی توانست نتایج تجربی حاصل از پراکندگی الکترون‌ها از نوکلئون‌ها را در بررسی سطح مقطع پراکندگی ناکشسان ژرف[7] تحلیل کند. اما برخلاف انتظار، پارتون‌ها

---

[1] J. J. Thomson
[2] Stanford Linear Accelerator Center
[3] Richard Feynman
[4] Parton
[5] Murray Gell-Mann
[6] Incoherently
[7] Deep Inelastic Scattering

تمام انرژی و تکانه پروتون را حمل نمی‌کردند. با انجام آزمایشات جدید و تئوری‌های قوی مشخص شد که پارتون‌ها در حدود نیمی از تکانه و انرژی پروتون را با خود حمل می‌کنند [۵]. بنابراین در بررسی توابع ساختار بایستی سهم دریای کوارک[۱] و گلئون‌ها[۲] را نیز درنظر گرفت. در مدل پارتونی پراکندگی الکترون‌ها از پارتون‌ها را به صورت پراکندگی الکترون‌ها از ذرات آزاد درنظر می‌گیرند، به عبارتی پارتون‌ها هیچ برهمکنشی با یکدیگر ندارند.

با درنظر گرفتن مطالب بالا می‌توان برای هسته‌های مختلف، توابع ساختاری تعریف نمود و با انجام پراکندگی و تعیین سطح مقطع ذرات نهایی، اطلاعات کامل‌تری از ساختار داخلی این ذرات به دست آورد.

در این پایان نامه، ابتدا در فصل اول به مطالعه ذرات بنیادی و ملزومات آن می‌پردازیم. در فصل دوم با بررسی برخی از پراکندگی‌ها، با توابع ساختار و متغیر بیورکن[۳] آشنا خواهیم شد تا در فصل سوم توابع ساختار سرب و پایون[۴] را با درنظر گرفتن ساختار کوارکی برای آنها محاسبه نماییم. در نهایت سطح مقطع تولید مزون‌های افسون[۵] D در برخورد پایون با سرب را محاسبه خواهیم نمود.

---

[1] Sea Quark
[2] Gluons
[3] Bjorken Variable
[4] Pion
[5] Charm mesons

فصل اول

مروری بر ذرات بنیادی و نیروهای بنیادی چهارگانه

مقدمه

با کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ ثابت شد که هسته‌ها از پروتون‌ها و نوترون‌ها تشکیل شده‌اند، اما خود نوکلئون‌ها از چه چیزی ترکیب یافته‌اند؟ این ذرات، ذرات بنیادی نام دارند یعنی ذراتی که هیچ ساختار داخلی ندارند یا حداقل تاکنون ساختار داخلی برای آنها مشاهده نشده است و دارای حالت برانگیخته نیز نمی‌باشند. این ذرات غیر قابل تجزیه هستند، با فرض اینکه تجزیه بیشتر آنها باعث می‌شود که به ذرات دیگری تبدیل شوند. در واقع تبدیل پروتون و نوترون به یکدیگر در برخی واکنش‌های هسته‌ای و آزمایش‌های پیشرفته‌تری که در شتاب دهنده‌های ذرات بنیادی انجام شد، نشان داد که آنها از ذرات سازنده کوچکتری ساخته شده‌اند. اما الکترون هنوز هم به عنوان یک ذره نقطه‌ای بدون ساختار و یکی از ذرات بنیادی طبیعت شناخته می‌شود. دنیای ذرات بنیادی هم از نظر تنوع ذرات و هم از نوع تأثیرات و تبدیلات متقابل، دنیای غنی محسوب می‌شود. ذرات بنیادی دیده نمی‌شوند و فقط از اثری که می‌گذارند و یا پدیده‌هایی را که سبب می‌شوند، می‌توان به وجودشان آگاهی یافت.

این ذرات توسط نیروهای گرانشی، الکترومغناطیسی و برهمکنش هسته‌ای ضعیف و قوی به هم پیوند یافته‌اند، که در ادامه به توضیح بیشتر آنها می‌پردازیم. همچنین در این فصل مروری بر تقسیم بندی ذرات بنیادی خواهیم داشت.

۱-۱- فیزیک ذرات بنیادی و مدل استاندارد

فیزیک ذرات بنیادی عمدتاً در رابطه با دو موضوع سخن می‌گوید: ذرات تشکیل دهنده مواد و برهمکنش‌های موجود بین این ذرات. هرچند با گذشت زمان دانش فیزیک نسبت به این بخش از فیزیک مرتب درحال تغییر است، اما در قالب نظریه امروزی "مدل استاندارد" پدیده‌ها و جزئیات حاکم بر ذرات و اندرکنش آنها قابل بررسی و حتی قابل پیش‌بینی است [۶]. مدل استاندارد که هر سه نیروی الکترومغناطیس و نیروی قوی و ضعیف را در بر می‌گیرد، یکی از دستاوردهای نظری بزرگ علم قرن بیستم محسوب می‌شود و به دلیل آنکه طیف وسیعی از نتایج آزمایشات تجربی را توصیف می‌کند، گاهی

از آن به عنوان تئوری همه چیز یاد می‌شود.

علاوه بر این مدل استاندارد کالبد نظریه میدان کوانتومی را طراحی می‌کند که ابزاری به دست می‌دهد تا نظریه‌ها را طوری بسازیم که شامل مکانیک کوانتوم و نسبیت خاص نیز باشند.

مدل استاندارد ذرات بنیادی شامل ۶۱ ذره بنیادی می‌باشد که می‌توان آنها را در دو گروه تقسیم‌بندی نمود:

۱- ذراتی که ماده را می‌سازند (شامل ۴۸ ذره).

۲- ذراتی که نیروها را حمل می‌کنند (شامل ۱۲ ذره مشاهده شده و یک ذره پیش‌بینی شده).

ذرات گروه اول جزء فرمیون‌ها (به افتخار فیزیکدان ایتالیایی انریکو فرمی[1]) می‌باشند، یعنی ذراتی که دارای اسپین نیمه صحیح می‌باشند. ذراتی که حامل نیروها هستند، بوزون (به افتخار فیزیکدان هندی ساتیندرانات بوز[2]) محسوب می‌شوند، چرا که دارای اسپین صحیح می‌باشند. چندین بوزون می‌توانند حالت کوانتومی مشابهی را داشته باشند طوریکه بوزون‌هایی با انرژی یکسان مکان مشابهی را در فضا اشغال نمایند. بنابراین بوزون‌ها اغلب ذراتی هستند که حاملین نیرو محسوب می‌شوند. در حالیکه طبق اصل طرد پائولی[3] در یک لحظه معین تنها یک فرمیون می‌تواند یک حالت کوانتومی را اشغال کند. بدین معنی که اگر بیش از یک فرمیون فضای مشابهی را در فضا اشغال کنند، مشخصه هر فرمیون باید از دیگری متفاوت باشد. لذا فرمیون‌ها معمولاً بخش اصلی ماده می‌باشند که شامل دو گروه از ذرات بنیادی هستند: کوارک‌ها (quarks) و لپتون‌ها (leptons).

لازم به ذکر است که در فیزیک ذرات بنیادی، معمولاً ظاهر معادلات را با استفاده از دستگاه واحدهایی که در آن $\hbar = 1$ و $c = 1$ است، ساده سازی می‌کنند. همچنین انرژی‌ها، جرم‌ها و تکانه‌ها، معمولاً برحسب MeV یا GeV بیان می‌شوند. بنابراین از تناسب‌های زیر استفاده می‌شود [۷]:

$$MeV^{-1} = 6.58 \times 10^{-22}\ s$$

$$MeV^{-1} = 197.33\ fm$$

$$GeV^{-1} = 0.38938\ mb \qquad (۱-۱)$$

ما نیز طی این پایان نامه از این قاعده پیروی می‌کنیم.

[1] Enrico Fermi
[2] Satiendranat Bose
[3] Pauli exclusion principle

۱-۲- نیروها و ذرات تبادلی

چهار نوع میدان برهمکنش در طبیعت تشخیص داده شده است و بنابراین نیروهای بنیادی حاکم بر جهان به چهار دسته تقسیم می‌شوند: نیروهای گرانشی، الکترومغناطیسی، برهمکنش هسته‌ای ضعیف و نیروی هسته‌ای قوی. قبلاً اشاره شد که گروهی از ذرات بنیادی را ذرات حامل نیرو تشکیل می‌دهند. این ذرات را ذرات تبادلی یا واسطه می‌نامند که در جدول (۱-۱) به آنها اشاره شده است. ذرات تبادلی جزء بوزون‌ها محسوب می‌شوند و به همین دلیل به آنها بوزون‌های شاخص[1] نیز گفته می‌شود.

جدول ۱-۱- نیروهای موجود در طبیعت و ذرات حامل آنها [۷].

نیروها	مرتبه بزرگی	ذرات تحت تاثیر	ذره تبادلی	اسپین	بار
گرانشی	۱	تمام ذرات جرم‌دار	گراویتون	۲	۰
ضعیف	$۱۰^{۲۵}$	کوارک‌ها - لپتون‌ها	Z و $W^{\pm}$	۱	$\pm$۱،۰
الکترومغناطیسی	$۱۰^{۳۶}$	ذرات باردار	فوتون	۱	۰
قوی	$۱۰^{۳۸}$	کوارک‌ها - گلئون‌ها	گلئون	۱	۰

جهت یک مقایسه نسبی و مفید بین نیروها از تقارن کمک می‌گیریم. مطابق جدول (۱-۲) ترتیب برهمکنش‌ها بر طبق تقارن‌هایشان به همان ترتیب قدرت آنها است، طوریکه برهمکنش‌های قوی دارای بیشترین تقارن‌ها و برهمکنش‌های ضعیف کمترین تقارن‌ها را دارند [۸]. اهمیت تقارن طوری است که می‌تواند ما را به ساختار مدل استاندارد راهنمایی کند. ریاضیات تقارن توسط نظریه گروه بررسی می‌شود. به طور کلی رابطه عمیقی بین تقارن‌ها و فیزیک برقرار است، چنانچه قضیه نودر[2] بیان می‌کند: اصولاً به ازای هر تقارن پیوسته طبیعت یک قانون پایستگی متناظر با آن وجود دارد.

در مقیاس ذرات بنیادی نیروهای گرانشی کم اهمیت است و مدل استاندارد به بررسی نیروهای گرانشی نمی‌پردازد. اما اگر بخواهیم نیروی گرانشی را نیز در مدل استاندارد وارد کنیم در این صورت یک ذره به نام گراویتون[3] لازم داریم که این ذره تاکنون در آزمایشگاه مشاهده نشده است. این ذرات

[1] Gauge Bosons
[2] Noether's Theorem
[3] Graviton

فرضی بیشتر در تئوری‌های کوانتومی به عنوان نتیجه‌ای از نسبیت مطرح می‌شوند. گراویتون ذره‌ای بدون بار و دارای اسپین دو است که با سرعت نور در حالی که بین ذرات ماده مبادله می‌شود، حرکت می‌کند. دلیل بلند برد بودن نیروی گرانشی بدون جرم بودن گراویتون‌ها می‌باشد.

جدول ۱-۲- نیروها و تقارن‌ها [۸].

برهم کنش‌ها	تقارن‌ها و کمیت‌های پایسته						
	فضا-زمان	دوران فضایی	بار الکتریکی	عدد باریونی	شگفتی	مولفه سوم ایزواسپین	ایزواسپین
	E,P	J	Q	B	S	I_3	I
برهم کنش قوی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
الکترومغناطیسی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
برهم کنش ضعیف	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

کوانتوم میدان‌های برهمکنش الکترومغناطیسی بین فرمیون‌های دارای بار الکتریکی، فوتون‌های بدون جرم هستند. فیزیکدانان به وجود دو نوع فوتون اعتقاد دارند، یکی فوتون‌های حقیقی که قابل مشاهده هستند و دیگری فوتون‌های مجازی است که نمی توان آنها را مشاهده کرد. فوتون‌های مجازی نیز با سرعت نور حرکت می‌کنند و نتیجه اصل عدم قطعیت هستند. بسیاری از فیزیکدانان ازجمله فارادی[1] و پلانک[2] اعتقاد داشتند نیروهای گرانشی و الکترومغناطیسی تشابه بسیار زیادی به یکدیگر دارند و احتمالاً رابطه مشابهی نظیر آنچه که بین نیروهای الکتریکی و مغناطیسی وجود دارد، بین گرانش و نیروی

[1] Michael Faraday
[2] Max Karl Ernst Ludwig Planck

الکترومغناطیسی وجود خواهد داشت. آلبرت اینشتین نیز تلاش بسیار کرد که این دو نیرو را در یک نیروی اولیه خلاصه کند اما موفق نشد. البته در زمان اینشتین نیروهای مهم و مطرح همین دو نیروی گرانشی و الکترومغناطیسی بود.

کوانتوم میدان‌های برهمکنش ضعیف بین فرمیون‌ها، بوزون‌های باردار W^+ و W^- و بوزون خنثای Z می‌باشند که در سال ۱۹۸۳ در آزمایشگاه سرن[1] کشف شدند. از آنجایی که این بوزون‌ها جرم حمل می‌کنند، برهم کنش ضعیف کوتاه برد می‌باشد. چون با توجه به اصل عدم قطعیت[2] ذره‌ای به جرم M می‌تواند در زمان $\hbar/Mc^2$ به عنوان بخشی از یک حالت واسطه‌ای وجود داشته باشد و در این مدت ذره نمی‌تواند فاصله‌ای بیشتر از $\hbar c/Mc^2$ طی کند. با درنظر گرفتن $M_{W^\pm} \approx 80GeV$ و $M_Z \approx 91GeV$ برهمکنش ضعیف دارای برد تقریباً $10^{-3}fm$ می‌باشد.

از سال ۱۹۷۰ به بعد دو نیروی الکترومغناطیسی و هسته‌ای ضعیف در قالب یک تئوری واحدی به نام برهمکنش الکتروضعیف[3] بررسی می‌شوند [۷]. اگرچه دو نیروی مذکور در انرژی‌های پایین کاملاً متفاوت رفتار می‌کنند اما امروزه فیزیکدانان موفق شده‌اند نشان دهند که در درجه حرارت‌ها و انرژی‌های بسیار بالا (انرژی‌هایی با گستره ۱۰۰ گیگا الکترون ولت) تفاوت بین نیروی الکترومغناطیسی و نیروی ضعیف از بین می‌رود و امکان دارد که در درجه حرارت‌ها و انرژی‌های خیلی بالاتر تفاوت بین نیروی قوی و نیروی ضعیف و همچنین تفاوت بین لپتون‌ها و کوارک‌ها نیز از بین برود به گونه‌ای که فقط یک ذره اولیه و یک نیروی اولیه وجود داشته باشد.

در صورت پذیرفتن نظریه الکتروضعیف به یک ذره هیگز احتیاج است. چرا که نتیجه منطقی دوگانگی موج – ذره این است که همه میدان‌های کوانتومی دارای یک ذره بنیادی باشند که با میدان درآمیخته است. این ذره که با همه میدان‌ها درآمیخته و موجب کسب جرم توسط سایر ذرات می‌شود، هیگز بوزون[4] نامیده می‌شود. کلمه هیگز اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط پیتر هیگز[5] وارد فیزیک شد. در واقع بوزون هیگز یک ذره بنیادی اولیه فرضی دارای جرم است که وجود آن توسط مدل استاندارد پیش‌بینی شده است. این بوزون، تنها ذره مدل استاندارد است که هنوز به صورت تجربی مشاهده نشده است. مشاهده تجربی این ذره ممکن است بتواند چگونگی جرم دار شدن ماده توسط ذرات بنیادی بدون جرم دیگر را توضیح دهد. به طور خاص، بوزون هیگز احتمالاً می‌تواند دلایلی برای تفاوت‌های بین فوتون که بدون

---

[1] Cern
[2] Uncertainty Principle
[3] Electroweak Interaction
[4] Higgs boson
[5] Peter Ware Higgs

جرم است و بوزون‌های Z و $W^{\pm}$ که نسبتاً پرجرم هستند، ارائه کند. بسیاری از فیزیکدانان اعتقاد دارند بزرگترین چالش فیزیک در قرن بیست و یکم به تحقیقات روی ذرات هیگز مربوط می‌شود.

علاوه بر مطالبی که بیان شد در مورد نیروها و ذرات تبادلی به ویژه گلئون، در ادامه همین فصل نیز به تناوب مطالبی عنوان خواهد شد.

۱-۳- کوارک‌ها

کوارک نخستین بار در سال ۱۹۶۴ توسط مورای گلمن و جورج زویک[1] مطرح شد. در سال ۱۹۶۸ در آزمایش‌های انجام شده در شتاب‌دهنده خطی استانفورد ثابت شد که پروتون از اجزاء کوچکتر نقطه مانندی تشکیل شده است و بنابراین یک ذره بنیادی نیست. در آن زمان فیزیکدان‌ها این ذرات را به عنوان کوارک نمی‌شناختند، بنابراین آنها را پارتون نامیدند. بعدها کوارک‌های بالا و پایین و طعم‌های[2] دیگر کشف شد ولی اکنون واژه پارتون یک واژه کلی برای بیان اجزای سازنده هادرون‌ها به کار می‌رود.

شش نوع مختلف از کوارک‌ها وجود دارد که به طعم شهرت دارند که در سه دسته دوتایی به صورت زیر قرار می‌گیرند:

$$\begin{pmatrix} u \\ \mathrm{d} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathrm{c} \\ \mathrm{s} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathrm{t} \\ \mathrm{b} \end{pmatrix}$$

برای هر یک از طعم‌های کوارک یک پادماده متناظر وجود دارد که به پادکوارک شناخته می‌شوند و فقط در برخی خصوصیات دارای علامت مخالف می‌باشند.

$$\begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{s} \\ \bar{c} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{b} \\ \bar{t} \end{pmatrix}$$

که $\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$ دارای بار ۱/۳+ و $\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$ دارای بار ۲/۳- می‌باشند.

کوارک‌ها تنها ذرات بنیادی برای آزمایش همه چهار برهمکنش اساسی یا نیروهای اساسی در مدل استاندارد می‌باشند، چرا که به دلیل داشتن جرم و بار الکتریکی هم در برهمکنش گرانشی و هم در برهمکنش الکترومغناطیسی شرکت می‌کنند. جدول (۱-۳) جرم و بار این ذرات را نشان می‌دهد. علاوه بر این کوارک‌ها در برهمکنش‌های ضعیف و قوی نیز شرکت می‌کنند.

---

[1] George Zweig
[2] Flavor