دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی‌ارشد فیزیک

عنوان

مطالعه‌ی مدل بازترکیبی پارتون

نگارش

لیلا ضمیری

استاد راهنما

دکتر علی خرمیان

دی ۱۳۹۲

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی‌ارشد فیزیک

تحت عنوان

مطالعه‌ی مدل بازترکیبی پارتون

ارائه شده توسط

لیلا ضمیری

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۱۵. توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت

۱- استاد راهنما — **جناب آقای دکتر علی خرمیان**

۲- داور داخلی — **جناب آقای دکتر مهرداد قمی نژاد**

۳- داور خارجی — **جناب آقای دکتر حسین مهربان**

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به او که آموخت مرا تا بیاموزم

استاد گرانقدرم، جناب آقای دکتر علی خرمیان

و تقدیم با بوسه بر دستان پدر و مادرم که از نگاهشان صلابت،

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی آموختم

و تقدیم به همسرم که اسطوره‌ی زندگیم،

پناه خستگیم

و امید بودنم است.

قدردانی و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین، بر حسب وظیفه و از باب «من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر اللّه عزّ و جلّ» از استاد فرهیخته و شایسته‌ام، جناب آقای دکتر علی خرمیان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از پدر و مادر عزیزم این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی چشم‌داشت برای من بوده‌اند؛ و از همسر عزیزتر از جانم که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم است و اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود و نیز از دوست مهربان و همراهم خانم سعیده رستمی که بی‌هیچ دریغی در برطرف نمودن اشکالات یاریم کردند و همچنین از استادان فرزانه و دلسوز، جناب آقایان دکتر مهرداد قمی نژاد و دکتر حسین مهربان که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

فهرست مطالب

۱ مقدمه‌ای بر علم ذرات بنیادی **۹**

۱–۱ تاریخچه‌ای بر علم ذرات ۱۰

۱–۲ مدل استاندارد ۱۵

۱–۲–۱ کوارک‌ها ۱۵

۱–۲–۲ لپتون‌ها ۱۹

۱–۲–۳ بوزون‌ها (واسطه‌ها) ۲۰

۱–۳ نظریه‌ی کرومودینامیک کوانتومی (QCD) ۲۱

۱–۴ آزادی مجانبی ۲۲

۱–۵ تعریف فرآیند هادرونی‌شدن و نابودی زوج $e^{-}e^{+}$ ۲۳

۱–۶ مفهوم تابع ترکش به زبان ساده ۲۴

۱–۷ برخورد دهنده‌ی یون‌های سنگین نسبیتی ۲۷

۱–۸ برخورد دهنده‌ی هادرونی بزرگ ۲۸

۲ مدل ولون **۲۹**

۲–۱ مدل‌های پدیده شناختی ۲۹

۲–۱–۱ مدل ولون ۳۰

۲-۱-۲ شکل انتگرالی وتوابع توزیع در مدل ولون از داده‌های CTEQ۴LQ . . ۴۴

۲-۲ مدل ولون-بازترکیب (**VRM**) ۵۴

۳ بررسی فرآیند ترکش با استفاده از بازترکیبی ۶۱

۳-۱ مقدمه ۶۱

۳-۲ مدل‌های بررسی فرآیند هادرونی‌شدن ۶۲

۳-۳ بررسی فرآیندهای ترکش با استفاده از مدل ولون-بازترکیبی (**VRM**) ۶۴

۳-۳-۱ مطالعه‌ی فرآیند ترکش پروتون با استفاده از مدل ولون- بازترکیب (VRM)

۶۵

۳-۳-۲ مطالعه‌ی فرآیند ترکش پایون: $\pi^+ \to \pi^-$ با استفاده از مدل ولون-

بازترکیب (VRM) ۷۱

۳-۳-۳ مطالعه‌ی فرآیند ترکش کائون: $K^+ \to \pi^\pm$ با استفاده از مدل ولون-

بازترکیب (VRM) ۷۳

۳-۳-۴ مطالعه‌ی فرآیند ترکش پایون: $\pi^+ \to K^\pm$ با استفاده از مدل ولون-

بازترکیب (VRM). ۷۷

۳-۴ بازترکیب رگبارهای پارتونی در فرآیند ترکش ۸۰

۳-۴-۱ توزیع رگبار پارتونی ۸۱

۳-۵ بازترکیب رگبارهای پارتونی در برخورد یون‌های سنگین ۸۹

۳-۵-۱ مؤلفه‌ی حرارتی ۹۵

۳-۵-۲ مؤلفه‌ی رگباری ۹۶

۳-۵-۳ بازترکیبی رگباری-حرارتی ۹۸

۳-۵-۴ بازترکیبی رگباری-رگباری ۹۸

۳-۵-۵ نتایج حاصل از طیف پایون ۹۹

۳-۶ افت انرژی ۱۰۳

۴ خلاصه و نتیجه‌گیری ۱۰۸

۴-۱ مقدمه ۱۰۸

۴-۲ مقایسه توابع ترکش پایون حاصل از مدل بازترکیبی و توابع ترکش تا مرتبه‌ی NLO ۱۰۹

۴-۲-۱ تعیین ضرایب جدید در بررسی ترکش گلوئون به پایون ۱۱۰

۴-۲-۲ تعیین ضرایب جدید در بررسی ترکش کوارک دریا به پایون ۱۱۰

۴-۲-۳ تعیین ضرایب جدید در بررسی ترکش کوارک ظرفیت به پایون ۱۱۱

کتاب‌نامه ۱۱۴

لیست تصاویر

۱–۱ نابودی زوج e^-e^+ و تشکیل هادرون نهایی. ۲۴

۱–۲ پراکندگی ناکشسان ژرف نوکلئون. ۳۴

۲–۲ برازشی از $F_۲$ برای پروتون و نوترون در $Q^۲ = ۲۲/۵ GeV^۲$. ۴۳

۳–۲ برازشی از داده‌ها برای برهم‌کنش‌های نوترینو در $Q^۲ = ۱۲/۵ GeV^۲$. ۴۳

۴–۲ نسبت نسبت‌های تعریف شده در رابطه‌ی (۲–۷۸). ۵۰

۵–۲ توزیع ولون‌های U و D در دو مقدار Q. ۵۲

۶–۲ توابع توزیع کوارک u از [۲۱]. ۵۲

۷–۲ ممنت توزیع کوارک‌های ظرفیت در یک پایون، $\tilde{q}(n)$، که پارامتر γ برای برازش ممنت توزیعات اندازه‌گیری شده از داده‌های آزمایشگاهی [۲۶] وارد شده است. ۵۹

۱–۳ نمایش تصویری تولید π^- و π^+ از ترکش پروتون در مدل (VRM). فقط حالت‌های $u\bar{d}$ و $d\bar{u}$ نمایش داده شده است. ۶۷

۲–۳ توزیع فراگیر $p \to \pi^+ \& \pi^-$. داده‌ها از [۱۲] در $P_L = ۱۰۰ GeV/c$ و $p_T = ۰/۳ GeV/c$ است. ۷۰

۳–۳ شکل تصویری $\pi^+ \to u\bar{d}$ در مدل (VRM). ۷۱

لیست تصاویر

۴-۳ توزیع فراگیر $\pi^+ \to \pi^-$. داده‌ها از [۳۹] است. نقطه چین از برازش داده‌های آزمایشگاهی و خط یکپارچه از نتایج تئوری از مدل (VRM) می‌باشد. ۷۲

۵-۳ نمایش تصویری (a) و (b) در مدل (VRM). ۷۳

۶-۳ توزیع فراگیر $K^+ \to \pi^\pm$. داده‌ها از [۳۹] در $p_T = ۰/۳\mathrm{GeV/c}$ و $\mathrm{p_L} = ۱۰۰\mathrm{GeV/c}$ است. خط چین از برازش داده‌های آزمایشگاهی و خط یکپارچه از نتایج تئوری از مدل (VRM) می‌باشد. ۷۶

۷-۳ توزیع کسر تکانه‌ی ولون‌ها در کائون: (a) خط یکپارچه بیان کننده‌ی ولون U و (b) خط‌چین بیان کننده‌ی ولون $\bar{S}$. ۷۷

۸-۳ توزیع فراگیر $\pi^+ \to K^\pm$. داده‌ها از [۳۹] در $۱۰۰\mathrm{GeV/c}$ و $p_T = ۰/۳\mathrm{GeV/c}$ است. خط چین از برازش داده‌های آزمایشگاهی و خط یکپارچه از نتایج تئوری از مدل (VRM) می‌باشد. ۷۹

۹-۳ توابع ترکش که در [۴۱] پارامتربندی شده‌اند نمایش داده شده‌اند به‌طوری‌که توابع ترکش به‌دست آمده توسط مدل بازترکیبی با استفاده از خطوط یکپارچه نشان داده شده‌اند و تمامی منحنی‌ها در $\mathrm{Q^۲} = ۱۰۰\mathrm{GeV^۲}$ رسم شده‌اند. ۸۶

۱۰-۳ توزیع‌های رگبار پارتونی به‌دست آمده در مدل بازترکیبی با توجه به پارامترهای جدول ۳-۲. . ۸۸

۱۱-۳ توزیع تکانه‌ی عرضی π° از داده‌های [۵۱] در برخورد $\mathrm{Au-Au}$. خط یکپارچه جمع چهار توزیع مربوط به بازترکیبی پارتون‌هاست: $\mathcal{TT}$ (خط ایجاد شده از خط تیره)، $\mathcal{TS}$ (خط ضربدردار)، $_۱(\mathcal{SS})$ دو رگبار پارتونی از یک جت (خط دایره‌دار)، $_۲(\mathcal{SS})$ دو رگبار پارتونی از دو جت همپوشانی کننده (خط مربع‌دار). ۱۰۱

لیست تصاویر

۳–۱۲ (a) توزیع ولون‌های مختلف در کسر تکانه‌ی متناظر با رابطه‌ی (۳–۷۸) و (b) توزیع p_Tهای متناظر با بازترکیبی $\mathcal{TS}$. ۱۰۲

۳–۱۳ ضریب تعدیل کننده‌ی هسته‌ای، $R_{\rm AA}$، در مقایسه با نتایج محاسبه شده آن برای پایون، $R^{\pi}_{\rm AA}$. ۱۰۶

۴–۱ تابع ترکش گلوئون به پایون در مدل بازترکیب (نقطه چین) در مقاسیه با تابع ترکش در مرتبه NLO با ضرایب جدید (خط یکپارچه). ۱۱۱

۴–۲ تابع ترکش کوارک دریا به پایون در مدل بازترکیب (نقطه چین) در مقاسیه با نابع ترکش در مرتبه NLO با ضرایب جدید (خط یکپارچه). ۱۱۲

۴–۳ تابع ترکش کوارک ظرفیت به پایون در مدل بازترکیب (نقطه چین) در مقاسیه با نابع ترکش در مرتبه NLO با ضرایب جدید (خط یکپارچه). ۱۱۳

لیست جداول

۲–۱ ضرایب در رابطه‌ی (۲–۱۰۱). ۵۷

۳–۱ پارامترها برای معادله‌ی (۳–۵۳)در $Q^2 = 100 GeV^2$. ۸۵

۳–۲ پارامترها در رابطه‌ی (۳–۵۴). ۸۷

چکیده

مطالعه‌ی مدل بازترکیبی پارتون

یکی از مدل‌های پدیده شناختی برای متحد کردن توصیف ساختار هادرون در وصف پراکندگی و در وصف حالت قیدی مدل ولون است که با استفاده از آن می‌توان ساختار هادرون را در دو بخش بیان نمود: اول توابع توزیع پارتون‌ها در ولون و دوم توابع توزیع ولون‌ها در داخل هادرون. همچنین مدل ولون دارای خاصیتی است که می‌تواند احتمال بازترکیبی را بیان کند که توسط تابع بازترکیب امکان‌پذیر است و در مدلی تحت عنوان ولون–بازترکیب معرفی می‌شود. در واقع این مدل توصیف هادرونی‌شدن کوارک‌ها است. فرآیند هادرونی‌شدن در دو سطح قابل بررسی است. ابتدا ساختار هادرون ترکش یافته که با استفاده از توابع ترکش توصیف می‌شود و سپس ذرات تولیدی است که از بازترکیب کوارک‌ها و پادکوارک‌ها تولید می‌شوند که در مدل ولون–بازترکیبی مطالعه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت تمام فرآیندهای هادرونی‌شدن شامل ترکش در غالب بازترکیبی قابل توصیف هستند. همچنین می‌توان با معرفی رگبارهای پارتونی و اندازه‌گیری توزیعات آن‌ها در جت‌ها به بیان فرآیند ترکش در غالب مدل بازترکیبی پرداخت.

در این پایان‌نامه ابتدا به شرح مدل ولون و سپس مدل ولون–بازترکیب پرداخته و در ادامه فرآیند ترکش را با استفاده از این مدل مورد مطالعه و بررسی قرار داد می‌دهیم. در نهایت با بیان کاربرد مدل بازترکیب در فرآیند ترکش و معرفی رگبارهای پارتونی، مقایسه‌ای بین توابع ترکش حاصل از مدل بازترکیب و توابع ترکش تا مرتبه‌ی NLO انجام داده شده است.

کلمات کلیدی: ولون، مدل ولون–بازترکیب، رگبارهای پارتونی، تابع ترکش.

فصل ۱

مقدمه‌ای بر علم ذرات بنیادی

جهان، بزرگ‌ترین مجموعه ممکن است که از ذرات بنیادی شکل یافته است. این ذرات توسط نیروهای گرانشی، الکترومغناطیسی و هسته‌ای به هم پیوند یافته‌اند. سلسله مراتب ساختمانی آن در فضا (از هسته‌های اتم گرفته تا ابر کهکشان‌ها) و سیر تکاملی آن (از گوی آتشین تا اشکال کنونی) توسط ویژگی‌های ذرات بنیادی و برهم‌کنش آن‌ها اداره می‌شود. بنابراین، تشریح ساختمان جهان و تکامل آن بر اساس خواص و برهم‌کنش ذرات بنیادی صورت می‌گیرد. ماده در جهان از ذرات بنیادی تشکیل شده است. اجسام، بدن انسان، ستارگان و ... سیستم‌هایی متشکل از ذرات بنیادی هستند که از نظر تعداد و نحوه جفت و جور شدن با هم تفاوت دارند. بنابراین، وجود ذرات بنیادی باید در تمام پدیده‌های جهان ملموس باشد. فیزیک ذرات بنیادی درک عمیق‌تر و دید بالایی را در مورد ساختمان و تکامل اجسام منفرد مانند اتم‌ها، مولکول‌ها، بلورها، صخره‌ها، سیارات، ستارگان، منظومه‌های ستاره‌ای و کل جهان ارائه می‌دهد.

همان طور که از نام این علم مشخص است شاخه ای از علم بزرگ فیزیک است. این علم به بررسی ذرات ساختاری جهان می‌پردازد و به ما می‌گوید که این ذرات چگونه با هم در کنش و واکنش هستند. این علم تحقیق‌هایی بر روی ذرات زیر اتمی و ساختار آنها نیز دارد که این تحقیقات توسط شتاب دهنده‌های بزرگ صورت می‌گیرد.

۱-۱ تاریخچه‌ای بر علم ذرات

فیزیک ذرات بنیادی[۱] یکی از شاخه‌های علم فیزیک می‌باشد، که به بررسی این که ماده از چه چیزی ساخته شده است می‌پردازد. در این شاخه از فیزیک به بررسی ماده در بنیادی‌ترین حالت ممکن یعنی کوچکترین اجزا تشکیل‌دهنده که به ذرات بنیادی معروف هستند، پرداخته می‌شود. با اضافه شدن مفهوم نیروها بررسی آن‌ها به‌صورت چند ذره دیگر و برهم‌کنش بین ذرات ماده و ذرات حامل نیرو بخش دیگری از فیزیک ذرات بنیادی را می‌سازد. نظریه با قبول اکثریت در این شاخه از فیزیک مدل استاندارد نامیده می‌شود.

ذرات مورد بررسی در این شاخه را می‌توان توسط آشکارسازهای ذرات نشان داد. این ذرات را به‌صورت مستقیم نمی‌توان آزمایش کرد و برای بررسی آزمایشگاهی برروی آن‌ها از اثرات آن‌ها استفاده می‌شود. بسیاری از اثرات پیش‌بینی شده در این نظریات در انرژی‌های بالا رخ می‌هد از این رو به این شاخه فیزیک انرژی‌های بالا[۲] نیز گفته می‌شود. ابتدای فیزیک ذرات را می‌توان به قرن ششم پیش از میلاد و کارهای فیلسوفان اتمیست نسبت داد. بررسی علمی ذرات تشکیل‌دهنده ماده در ۱۸۹۷ و کشف الکترون توسط تامسون شروع می‌شود. او مدل اتمی موسوم به مدل خمیری تامسون را معرفی کرد. با

[۱] Fundamental particle physic

[۲] High energy physic

آزمایش پراکندگی رادرفورد این مدل رد شد و هسته اتم کشف گردید. رادرفورد مدل اتمی خود به نام مدل رادرفورد را معرفی کرد. در ۱۹۱۴ نیلز بور مدل اتمی خود را پیشنهاد کرد. توافق طیف اتم هیدروژن با نظریه بور بسیار جالب بود. در همین دوره هسته هیدروژن را پروتون نامیدند اما قادر به توضیح عدد اتمی عناصر دیگر نشدند. سرانجام با کشف نوترون توسط چادویک در سال ۱۹۳۲ دوره کلاسیک ذرات بنیادی به پایان رسید. دوره‌ی بعدی بین سال‌های ۱۹۳۲ تا ۱۹۴۷ بود که سه مبحث مهم در این دوره مطرح گشتند:

۱- مزون‌ها

سؤالی که پیش می‌آمد این بود که چه چیزی پروتون‌های با بار مثبت را در هسته در کنار هم نگه می‌داشت؟ در ۱۹۳۴ یوکاوا وجود نیروی قوی هسته‌ای را پیش‌بینی نمود. اینشتین قبلاً ذره‌ای را حامل نیروی الکترومغناطیسی توصیف کرده بود این ذره فوتون نام داشت. یوکاوا کشف کرد که این نیروی جدید را هم می‌شود با یک ذره حامل نشان داد. در سال ۱۹۳۷ این ذره در آزمایشگاه کشف شد.

۲- پادذره‌ها

در ۱۹۲۷ هنگامی‌که دیراک معادله شرودینگر را به‌صورت نسبیتی بازنویسی کرد به جواب عجیبی برخورد. به ازای هر جواب مثبت انرژی، یک جواب منفی نیز به‌دست می‌آمد. دیراک این جواب‌ها را با نظریه حبابی توصیف کرد تا این که در دهه چهل میلادی فاینمن تعریف ساده‌تری برای این جواب ارائه داد، این جواب‌ها ذرات پادماده را توصیف می‌کردند. در ۱۹۳۱ پاد ماده الکترون، در ۱۹۵۵ پاد ماده پروتون در آزمایشگاه کشف شدند.

۳- نوترینوها

در ۱۹۳۰ بررسی واپاشی هسته خواص عجیبی را نشان می‌داد. مقداری از انرژی طی واپاشی گم می‌شد. پاولی پیش‌بینی کرد که ذره‌ای دیگر این انرژی را با خود حمل می‌کند. این ذره را نوترینو نامیدند. نوترینو سالها بعد در آزمایشگاه کشف شد.

با این اکتشاف‌ها گمان می‌رفت که تمام ذرات بنیادی یافته شده و مشکل توضیح داده نشده‌ای وجود ندارد. در سال ۱۹۴۷ راچستر و باتلر در اتاقک ابر پدیده‌ای جدید را مشاهده کردند. این یک ذره جدید بود پس از آن موجی از اکتشافات ذرات جدید به راه افتاد. این ذرات نوین را ذرات شگفت نامیدند چون خواص شگفتی داشتند. تعداد زیاد ذره‌ها و این که نمی‌توانستند این ذرات را دسته‌بندی کنند سردرگمی زیادی در فیزیک ذرات بنیادی به وجود آورد. در ۱۹۶۱ موری گلمان روشی برای دسته بندی ذرات کشف شده ارائه کرد. او جدولی که که به نام راه هشتگانه بود را ساخت که توسط آن می‌شد ذرات بنیادی کشف شده را دسته‌بندی کرد. این کار شبیه به جدول تناوبی مندلیف بود. بر اساس این جدول در ۱۹۶۴ گلمان و شوایگ پیشنهاد کردند که در واقع این ذرات کشف شده خود از ذرات ریزتری تشکیل شده‌اند که این ذرات را کوارک[۳] نامیدند. مدل کوارک بسیاری از خواص ذرات را به درستی پیش‌بینی می‌کرد ولی بنیان تجربی برای درستی مدل کوارکی وجود نداشت. در نوامبر ۱۹۷۴ دو تیم پژوهشی به‌صورت همزمان مزون جدیدی به نام مزون سای را کشف کردند. به این رویداد انقلاب نوامبر گفته می‌شود. بحث‌های زیادی در مورد ماهیت این ذره در گرفت ولی سرانجام تنها مدل کوارکی بود که توصیف درستی از این ذرات ارائه داد. این در واقع بر پایه چهارمین کوارکی بود که مدل کوارکی پیشنهاد می‌داد. پس از این کشف مدل کوارکی وجود شش کوارک را پیش‌بینی کرد. در ۱۹۷۸ سرانجام یک توصیف همه‌جانبه از ذرات بنیادی به‌وجود آمد که با این توصیف مدل استاندارد ذرات بنیادی گفته‌می‌شود. مدل استاندارد هنوز هم در فیزیک ذرات کاربرد دارد.

---

[۳] Quark

طبق مدل استاندارد که در فیزیک ذرات بنیادی مطرح شده است، جهان از مجموعه‌ای از فرمیون‌ها تشکیل شده است. ابتدا به معرفی این دسته از ذرات می‌پردازیم.

فرمیون‌ها براساس نام فیزیکدان ایتالیایی انریکو فرمی نام گذاری شده‌اند. به ذرات بنیادی با اسپین نیمه گفته می‌شوند. اصولاً همه ذره‌های اساسی در مکانیک کوانتومی، یا از فرمیون‌ها یا از بوزون‌ها هستند. الکترون‌ها، لپتون‌ها، نیتریون‌ها و حتی کوارک‌ها همگی فرمیون می‌باشند. در مدل استاندارد، دو گونه فرمیون بنیادی وجود دارد: کوارک‌ها و لپتون‌ها. در کل ۲۴ فرمیون متفاوت وجود دارد: ۶ کوارک و ۶ لپتون، که هر کدام با پاد ذره‌ی متناظرش همراه است.

۱۲ کوارک: ۶ ذره (u, d, s, c, b, t) به همراه ۶ پاد ذره‌ی متناظر $(\overline{u}, \overline{d}, \overline{s}, \overline{c}, \overline{b}, \overline{t})$

۱۲ لپتون: ۶ ذره $(\nu_\tau, \nu_\mu, \nu_e, \tau^-, \mu^-, e^-)$ به همراه ۶ پاد ذره‌ی متناظر $(\nu_\tau, \nu_\mu, \nu_e, \tau^+, \mu^+, e^+)$

فرمیون‌های مرکب، مانند پروتون‌ها و نوترون‌ها، بخش اساسی و ضروری ماده‌اند. طبق تعریف، فرمیون‌ها ذراتی هستند که از آمار فرمی–دیراک تبعیت می‌کنند. ذراتی که به وسیله‌ی آمار فرمی–دیراک توصیف می‌شوند، از اصل طرد پاؤلی پیروی می‌کنند. به این معنی که تمایل ندارند در کنار هم قرار بگیرند، یعنی فرمیون‌ها منزوی هستند و هیچ دو فرمیونی نمی‌تواند در یک لحظه‌ی معین، یک حالت کوانتومی را اشغال کنند. این ذرات طبق اصل طرد پائولی هنگامی‌که در یک حالت کوانتومی قرار می‌گیرند همدیگر را دفع می‌کنند و اگر ذره‌ای در یک حالت کوانتومی خاص قرار گیرد مانع از آن می‌شود که ذره دیگری هم بتواند به آن حالت دسترسی یابد. این امر، باعث سختی و استحکام حالت‌هایی می‌شود که شامل فرمیون هستند (هسته، اتم‌ها، مولکول‌ها و ...). بنابراین گاهی اوقات گفته می‌شود که فرمیون‌ها بخش اصلی ماده هستند، در حالی که بوزون‌ها ذراتی هستند که فعل و انفعالات را انتقال می‌دهند (حاملان نیرو) یا بخش اصلی تشعشعات هستند. میدان‌های کوانتومی فرمیون‌ها، که میدان‌های فرمیونیک[۴] نامیده می‌شوند از روابط

[۴] Fermionic fields

تبدیل متعارفی و استاندارد، پیروی می‌کنند.

اصل طرد پاولی درمورد فرمیون‌ها و استحکام ناشی از آن در ماده، به پایداری لایه‌های الکترون و ترکیب اتم‌ها منجر می‌شود و بنابراین ساخت ترکیبات شیمی ممکن می‌شود. تمام ذرات بنیادی دارای یک خصوصیت کوانتوم مکانیکی اند که می‌توان آن را اسپین (چرخش) فرض کرد. فرمیون‌ها (الکترون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها) دارای اسپین‌هایی هستند که مضارب نیمه صحیح‌اند؛ بدین معنا که اگر بخواهیم با استعاره صحبت کنیم باید بگوئیم که لازم است دو دور کامل بچرخند تا به وضعیت ابتدایی خویش بازگردند. بوزون‌ها (مثلاً فوتون‌ها) دارای اسپین‌هایی با مضرب صحیح (۰، ۱، ۲، و غیره) هستند.

در سیستم‌های بزرگ، تفاوت بین آمار بوزونی و فرمیونی تنها در چگالی‌های بالا وقتی در تابع‌های موج، همپوشانی وجود داشته باشد، ظاهر می‌شود. در چگالی‌های پایین، هر دو آمار با تقریب خوبی توسط قاعده آماری ماکسول–بولتزمن که توسط مکانیک کلاسیک بیان می‌شود، جواب می‌دهند. فرمیون‌ها دو دسته‌اند: فرمیون‌های بنیادی و فرمیون‌های مرکب.

فرمیون‌های بنیادی

تمام ذرات بنیادی مشاهده شده یا فرمیون هستند یا بوزون. فرمیون‌های شناخته شده به دوگروه تقسیم می‌شوند: کوارک‌ها و لپتون‌ها. کوارک‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها و سایر باریون‌ها را می‌سازند که فرمیون‌های مرکبند. همچنین مزون‌ها را شامل می‌شوند که بوزون‌های مرکبند. لپتون‌ها، الکترون‌ها و ذرات سنگین (موئون، لپتون‌های ناپایدار و تائون، لپتون‌ها با بار منفی) را شامل می‌شوند.

فرمیون‌های مرکب

ذرات مرکب (مانند هادرون‌ها، هسته‌ها و اتم‌ها) می‌توانند بسته به اجزای اصلی شان، فرمیون یا بوزون باشند. به‌طور دقیق‌تر، به دلیل وابستگی بین اسپین و آمار، اگر ذره‌ای تعداد فردی فرمیون داشته باشد،

خودش فرمیون است و اسپین نیمه صحیح خواهد داشت. برای مثال، یک باریون مانند پروتون و نوترون، شامل سه کوارک فرمیونی است. بنابراین یک فرمیون است، هسته‌ی اتم کربن-۱۳، شامل ۶ پروتون و ۷ نوترون است، بنابراین یک فرمیون است. اتم هلیوم-۳، از دو پروتون، یک نوترون و ۲ الکترون تشکیل شده و بنابراین یک فرمیون است. رفتار فرمیونی یا بوزونی یک ذره (یا سیستم) مرکب، تنها در فواصل طولانی (در مقایسه با اندازه‌ی سیستم) دیده می‌شود. هنگامی ساختار سه بعدی اهمیت می‌یابد که ذره (یا سیستم) مرکب، طبق ساختار تشکیل‌دهنده‌اش رفتار کند. وقتی که فرمیون‌ها درمجاورت با جفتشان مرز ضعیفی داشته باشد، می‌توانند ازخود رفتار بوزونی نشان دهند. این، اساس ابررسانایی و ابرشارگی هلیوم-۳ است.

۱-۲ مدل استاندارد

رده‌بندی ذرات به‌صورتی خاص که اکنون برای توصیف ذرات بنیادی به کار می‌رود را مدل استاندارد گویند. بر اساس مدل استاندارد ماده از ۶۱ ذره تشکیل شده است که این ذرات در سه دسته قرار می‌گیرند که عبارتند از: کوارک ها، لپتون‌ها و بوزون‌ها (واسطه‌ها).

۱-۲-۱ کوارک‌ها

کوارک یک ذره بنیادی و جزء اساسی تشکیل‌دهنده ماده می‌باشد. کوارک‌ها با هم ترکیب می‌شوند تا ذرات مرکبی به نام هادرون[۵] را به وجود آورند، پروتون و نوترون یکی از معروف‌ترین آنها هستند. آنها تنها ذرات بنیادی برای آزمایش همه چهار برهم‌کنش اساسی یا نیروهای اساسی در مدل استاندارد می‌باشند. به

[۵]Hadron