بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده: فیزیک

گرایش فیزیک: ذرات بنیادی

محاسبه فرم فاکتور پروتون به کمک کوارک‌های تشکیل دهنده با پتانسیل مناسب

دانشجو: زهرا شیرزادفر

استاد راهنما:

پروفسور علی‌اکبر رجبی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اسفند ۱۳۸۹

چکیده:

تابع موج نسبیتی مربوط به کوارک‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل اسکالر و برداری به صورت تحلیلی به‌دست آمده است و سپس فرم فاکتورهای الکترومغناطیسی پروتون با توجه به تابع موج محاسبه شده‌اند.

حرکت کوارک‌ها توسط مختصات ژاکوبی ρ و λ توصیف شده‌اند. به منظور توصیف بهتر دینامیک سه کوارک، معرفی کردن مختصات فوق کروی مناسب می‌باشد که با جایگذرای ρ و λ در $x = \sqrt{\rho^2 + \lambda^2}$ به‌دست خواهد آمد که x فوق شعاع است.

در انتها، شعاع باری و گشتاور مغناطیسی پروتون با توجه به فرم فاکتورهای الکترومغناطیسی محاسبه شده‌اند. نتایج تصحیحات قابل ملاحظه‌ای به ویژه برای ممان مغناطیسی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: فرم فاکتور، پروتون، پتانسیل رنگ، پتانسیل فوق مرکزی، دیراک.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱- آشنایی با ذرات بنیادی..... ۲

۱-۲- نیروهای بنیادی..... ۷

۱-۳- الکترودینامیک کوانتومی..... ۹

۱-۴- کرومودینامیک کوانتومی..... ۱۳

فصل دوم: معادله‌ی کلاین-گوردون و معادله‌ی دیراک

۲-۱- معادله‌ی کلاین-گوردون برای یک ذره آزاد بدون اسپین..... ۱۸

۲-۲- جواب معادله‌ی کلاین-گوردون..... ۱۹

۲-۳- برهم‌کنش یک ذره کلاین-گوردون با پتانسل الکترومغناطیسی..... ۲۲

۲-۴- معادله‌ی دیراک..... ۲۶

۲-۵- شکل کواریانت معادله‌ی دیراک و ماتریس‌های γ ی دیراک..... ۲۷

۲-۶- جریان پایسته و مزدوج هرمیتی معادله‌ی دیراک..... ۲۹

۲-۷- اسپینورهای ذره‌ی آزاد..... ۳۰

۲-۸- پاددرات..... ۳۴

۲-۹- الکترون با اسپین ۱/۲ در حضور پتانسیل الکترومغناطیسی..... ۳۷

فصل سوم: ساختار هادرون‌ها

۳-۱- بررسی پراکندگی الکترون از یک توزیع بار- فرم فاکتورها..... ۴۱

۳-۲- پراکندگی الکترون- پروتون. فرم فاکتورهای پروتون..... ۴۵

۳-۳- پراکندگی غیر الاستیک الکترون- پروتون $\left(ep \to eX\right)$..... ۵۱

۳-۴- مقیاس بندی بیورکن..... ۵۸

۳-۵- پارتون‌ها و مقیاس‌بندی بیورکن..... ۶۱

۳-۶- بررسی اجزای داخل پروتون..... ۶۳

فصل چهارم: فرم فاکتورهای الکترومغناطیسی پروتون

۴-۱- مدل‌های نوکلئون..... ۷۵

۴-۲- معرفی پتانسیل پیشنهادی..... ۷۷

۴-۳- محاسبه تابع موج پروتون به کمک کوارک‌های تشکیل دهنده در مختصات فوق کروی..... ۷۸

۴-۴- $\frac{g_A}{g_V}$ برای پروتون..... ۸۴

۴-۵- فرم فاکتورهای الکترو مغناطیسی در مختصات فوق کروی..... ۸۵

۴-۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۸۸

منابع..... ۸۹

چکیده

فهرست اشکال

فصل اول

شکل ۱-۱- جدول ذرات بنیادی.....۶

فصل دوم

شکل ۲-۱- برهم‌کنش یک الکترون بدون اسپین با میدان الکترومغناطیسی A^{μ} ۲۵
شکل ۲-۲- عوامل رأس برای قوانین فاینمن (الف) الکترون با اسپین ۱/۲ (ب) الکترون بدون اسپین.....۳۹

فصل سوم

شکل ۳-۱- پایین‌ترین مرتبه‌ی پراکندگی الکترون از یک توزیع بار.....۴۱
شکل ۳-۲- پایین‌ترین مرتبه‌ی پراکندگی الاستیک الکترون- پروتون.....۴۵
شکل ۳-۳- دستگاه مختصات بریت ۵۰
شکل ۳-۴- فرم فاکتورهای پروتون به عنوان تابعی از q^2.....۵۰
شکل ۳-۵- نمودار پایین‌ترین مرتبه‌ی پراکندگی $ep \to eX$.....۵۱
شکل ۳-۶- سطح مقطع $ep \to eX$ بر حسب جرم W.....۵۲
شکل ۳-۷- (الف) پراکندگی الاستیک $ep \to ep$ با فوتون‌هایی با طول موج بلند اندازه‌ی پروتون را از طریق آنالیز فرم فاکتورهای الاستیک اندازه‌گیری می‌کند. (ب) در پراکندگی غیرالاستیک عمیق یک فوتون با طول موج کوتاه کوارک-های داخل پروتون را تجزیه می‌کند.....۵۸
شکل ۳-۸- تعیین تابع ساختار $\nu\omega_2$ توسط پراکندگی الکترون- پروتون به عنوان تابعی از Q^2 در $\omega = 4$.....۶۱
شکل ۳-۹- یک پروتون متشکل از کوارک‌های ظرفیت، گلوئون‌ها و جفت کوارک- پادکوارک‌های دریا می‌باشد.....۶۴
شکل ۳-۱۰- نسبت F_2^{en} / F_2^{ep} به عنوان تابعی از x در پراکندگی غیرالاستیک عمیق اندازه‌گیری شده است.....۶۸
شکل ۳-۱۱- رسم تابع ساختار مطابق با ترکیب‌بندی‌های فرضی مختلف برای پروتون.....۷۰
شکل ۳-۱۲- تفاوت $F_2^{ep} - F_2^{en}$ به عنوان تابعی از x ، در پراکندگی غیرالاستیک عمیق.....۷۱
شکل ۳-۱۳- (الف) توابع ساختار کوارک با توجه به آنالیز داده‌های پراکندگی غیرالاستیک عمیق. (ب) سهم کوارک-های ظرفیت و دریا را در ساختار پروتون نشان می‌دهد.....۷۲

فهرست جداول

فصل اول

جدول ۱-۱- چهار نیروی بنیادی موجود در طبیعت.....۷

فصل چهارم

جدول ۴-۱- مقایسه‌ی جرم کوارک، شعاع باری و گشتاور مغناطیسی پروتون در مدل پیشنهادی و مدل کیسه‌ای با مقادیر تجربی.....۸۸

فصل اول

مقدمه

- ❖ آشنایی با ذرات بنیادی
- ❖ نیروهای بنیادی
- ❖ الکترودینامیک کوانتومی
- ❖ کرومودینامیک کوانتومی

۱-۱- آشنایی با ذرات بنیادی

ذرات بنیادی به لحاظ نیمه عمرشان و نیز پایداریشان و ظاهر شدن در واکنش‌ها و پدیده‌های میکروسکوپیک و در کل خواص شیمیایی و فیزیکی خودشان در خانواده‌های مختلف دسته بندی و بررسی می‌شوند. عده‌ای از این ذرات که با فراوانی بیشتر در اغلب اوقات ظاهر می‌شوند و پدیده‌های میکروسکوپیک را کنترل می‌کنند، به ذرات بنیادی واقعی معروف هستند.

هیپرون‌ها:

اساساً چهار دسته هیپرون وجود دارد که عبارتند از: هیپرون لاندا، هیپرون سیگما، هیپرون کسی، هیپرون امگا.

تمام هیپرون‌ها به ذرات هسته‌ای تجزیه می‌گردند. هر هیپرون دارای یک ضد ذره با علامت مخالف است. دنیای ذرات هم از نظر تنوع و هم از نظر نوع تأثیرات و تبدیلات متقابل، دنیای غنی محسوب می‌شود.

هادرون‌ها:

تحقیقاتی که با شتاب دهنده‌های بزرگ انجام شده‌اند به‌طور قوی به دانش ذرات بنیادی کمک کرده‌اند. قبل از همه اشاره‌ای به بزرگترین خانواده ذرات، هادرون‌ها، یعنی ذرات شرکت کننده در بر هم‌کنش‌های قوی هسته‌ای اشاره می‌شود. ذراتی را که تحت تأثیر نیروی قوی قرار می‌گیرند، هادرون می‌گویند. هادرون‌ها بر دو نوع‌اند: باریون‌ها و مزون‌ها. باریون‌ها هادرون‌هایی با اسپین نیمه صحیح و مزون‌ها هادرون‌هایی با اسپین صحیح هستند. بیشتر این ذرات در نتیجه اندرکنش‌های قوی هسته‌ای به هادرون‌های دیگر وامی‌پاشند. آن‌ها عمر کوتاهی دارند که در فرآیندهای هسته‌ای معمول چنین زمانی (ثانیه 10^{-23}) را نمی‌توان مستقیماً اندازه گرفت. اما هادرون‌هایی با عمر 10^{-13} تا 10^{-8} ثانیه نیز وجود دارند. برد واپاشی این ذرات با عمر دراز اندرکنش‌های ضعیف ما کم هستند. تعداد خیلی زیادی از هادرون‌ها کشف شده و گروه بندی آن‌ها در رده‌ها و خانواده‌های مختلف، طبیعت بنیادی آن‌ها را

مبهم جلوه می‌دهد. مدل کوارکی ساختار هادرون‌ها، گروه‌بندی هادرون‌ها را در خانواده و طبیعت و ساختار این خانواده‌ها و همچنین دیگر خواص ساده هادرون‌ها را به طور خیلی طبیعی توضیح می‌دهد. اصول بنیادی این مدل را می‌توان به شرح زیر فرمول بندی کرد:

- هادرون‌ها را به معنای درست کلمه نمی‌توان جزء ذرات بنیادی به شمار آورد، آن‌ها ساختار درونی پیچیده‌ای دارند و از ذرات بنیادی‌تری تشکیل شده‌اند. عناصر اصلی ساختار هادرون‌ها کوارک نام دارد.
- نظام هادرونی امکان می‌دهد که اظهار کنیم کلیه باریون‌های شناخته شده از سه کوارک و پاد باریون‌ها از سه پاد کوارک تشکیل شده اند. در حالی که تمام مزون‌ها از یک کوارک و یک پادکوارک تشکیل شده است.

یک ایراد نظری که بر مدل کوارکی وارد بود این است که به نظر می‌رسید این مدل اصل طرد پائولی را نقض می‌کند. در فرمول بندی اولیه‌ی پائولی، اصل طرد اظهار می‌داشت که هیچ دو الکترونی نمی‌توانند یک حالت را اشغال کنند. اصل طرد باید برای کوارک‌ها نیز برقرار باشد، برای مثال فرض می‌شود Δ^{++} از سه کوارک یکسان u در یک حالت تشکیل شده باشد؛ به نظر می‌رسد این مورد با اصل پائولی ناسازگار باشد. در سال ۱۹۶۴، گرینبرگ راهی برای گریز از این معضل پیشنهاد کرد. او اظهار داشت کوارک‌ها نه تنها در سه طعم (u,d,s) ظاهر می‌شوند، بلکه هر یک از آن‌ها می‌توانند هر سه رنگ ((قرمز))، ((آبی)) و ((سبز)) هم داشته باشند. برای ساختن یک باریون به سادگی می‌توان یک کوارک از هر رنگ را در نظر گرفت، پس دیگر uها در Δ^{++} یکسان نیستند (یکی از آن‌ها قرمز، یکی آبی و دیگری سبز است). لازم به ذکر نیست که واژه‌ی رنگ در اینجا هیچ ربطی به معنای لغوی معمول آن ندارد. قرمزی، آبیی و سبزی فقط برچسب‌هایی برای نشان دادن سه ویژگی است که کوارک‌ها علاوه بر بار و شگفتی دارند.

کوارک‌ها:

مدت زیادی این‌طور تصور می‌شد که پروتون‌ها و نوترون‌ها ذرات بنیادی هستند و بنابراین گمان می‌رفت مثل تقسیم الکترون دیگر قابل تقسیم نبوده و دارای یک ساختار داخلی نیستند. امروزه می-دانیم که نوکلئون‌ها یا به عبارت دیگر پروتون‌ها و نوترون‌ها خود از ذرات کوچک‌تری ساخته شده‌اند که کوارک نامیده می‌شوند. طبق مدل استاندارد شش کوارک داریم که همراه با پاد کوارک‌ها، دوازده ذره بنیادی را تشکیل می‌دهند. این کوارک‌ها به ترتیب اکتشاف عبارتند از: بالا[۱]، پایین[۲]، شگفت[۳]، افسون[۴]، ته[۵] و سر[۶]. با این همه فقط دو نوع آن‌ها در تشکیل مواد پایدار معمولی نقش مهمی دارند که عبارت از کوارک u و کوارک d هستند.

لپتون‌ها:

در حال حاضرشش لپتون شناخته شده است که به همراه پاد ذرات آن‌ها دوازده ذره خواهند شد. شش لپتون عبارتند از: الکترون، موئون، تأو، نوترینوی الکترون، نوترینوی موئون و نوترینوی تأو. به نظر می‌رسد لپتون‌ها از چیز دیگری تشکیل نشده باشند. لپتون‌ها ذراتی با اسپین ۱/۲ هستند که نیروی قوی بر آن‌ها اثری ندارد.

فوتون‌ها:

جرم در حال سکون‌شان برابر صفر است و اسپینی برابر یک دارند. فوتون‌ها حاملان نیروی الکترومغناطیسی هستند.

---

[1] Up
[2] Down
[3] Strange
[4] Charm
[5] Bottom
[6] Top

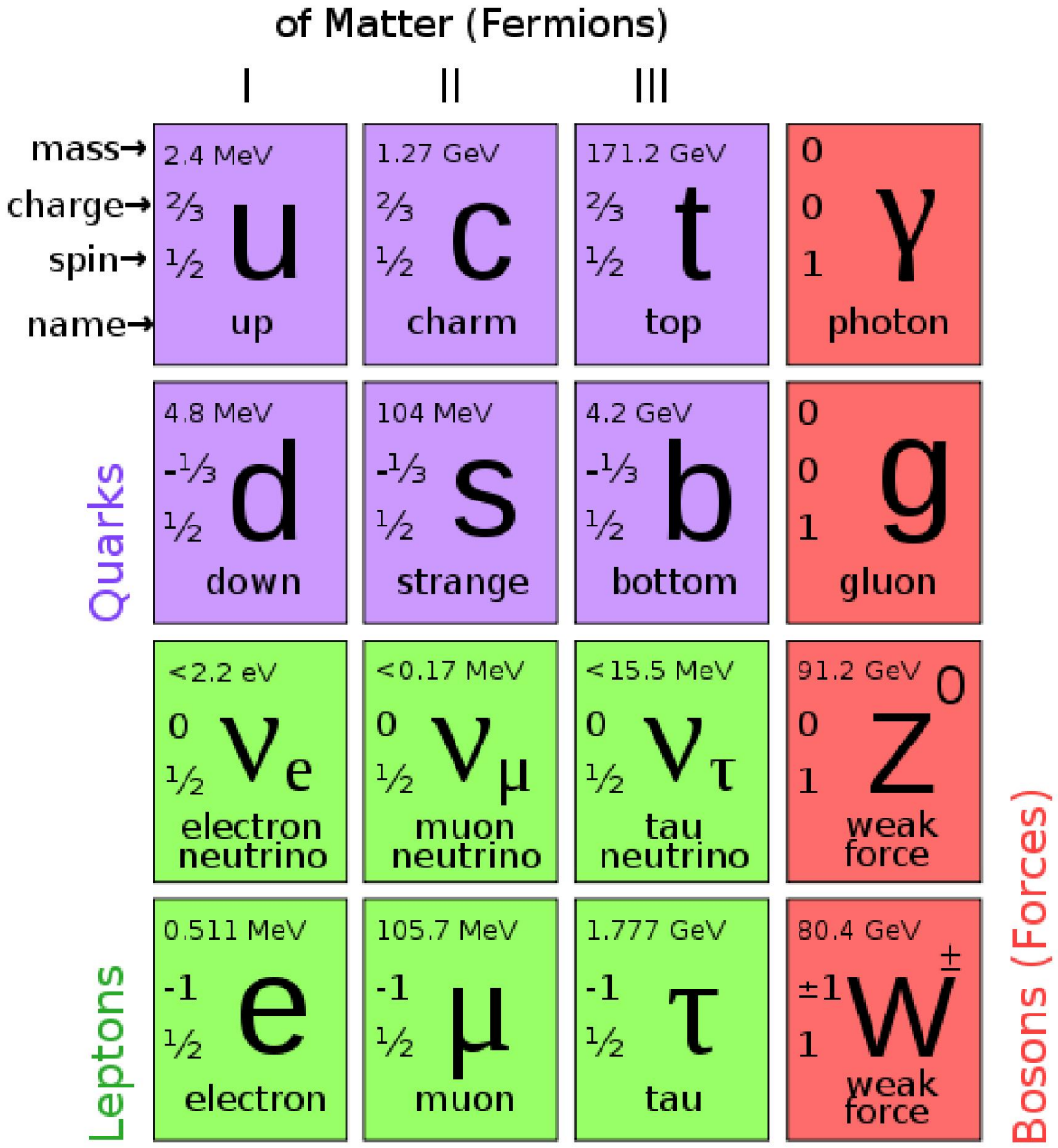
گلوئون‌ها:

گلوئون‌ها جرم در حال سکون‌شان مساوی صفر است و اسپینی مساوی یک دارند. گلوئون‌ها درون هادرون‌ها هستند و در حالت آزاد مشاهده نشده‌اند و حاملان نیروی قوی هستند.

بوزون‌ها:

در فیزیک ذرات، برهم‌کنش‌های ضعیف هسته‌ای نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند. این‌ها تنها اندرکنشی هستند که می‌توانند شخصیت ذرات پایه را عوض کنند و ضمن پیروی از قوانین بقای بارهای لپتونی و باریونی موجب تبدیل‌های متقابل آن‌ها شوند.

- ساز و کار نیروهای برهم‌کنش ضعیف هسته‌ای مدت‌های مدید نظر پژوهش‌گران را به سوی خود جلب کرده بود. فرضیه‌ای مطرح شده بود که مطابق آن این نیروها از تعادل نوع خاصی کوانتوم‌های میدان نیروی برهم‌کنش ضعیف هسته‌ای به نام بوزون‌های میانی ناشی می‌شوند.
- برخلاف گلوئون‌ها، بوزون‌های میانی مثل فوتون‌ها باید در حالت آزاد وجود داشته باشند. نظریه امکان وجود سه تا از این بوزون‌های میانی را پیش‌بینی می‌کند. چند تا از این ذرات (بوزون‌های میانی) سرانجام در سال ۱۹۸۲ کشف شد [۱].



شکل ۱-۱- جدول ذرات بنیادی

۱-۲- نیروهای بنیادی

بین ذرات بنیادی چهار نوع نیرو عمل می‌کنند که آن‌ها را نیروهای بنیادی یا اولیه می‌نامند و عبارتند از: قوی، الکترومغناطیسی، ضعیف و گرانشی. این نیروها در جدول زیر به ترتیب شدت نزولی فهرست بندی شده‌اند.

جدول ۱-۱- چهار نیروی بنیادی موجود در طبیعت

نیرو	شدت	نظریه	واسطه
قوی	10	کرومودینامیک	گلوئون
الکترومغناطیس	10^{-2}	الکترودینامیک	فوتون
ضعیف	10^{-13}	فلیورودینامیک	W و Z
گرانشی	10^{-42}	ژئومترودینامیک	گراویتون

۱- نیروی قوی یا نیروی پر قدرت کوارک:

نیروی قوی که نیروی رنگ نیز نامیده می‌شود. از جدا شدن بیش از حد کوارک‌های داخل هسته از یکدیگر و یا حتی از پرت شدن آن‌ها به خارج جلوگیری می‌کند. نیروی پرقدرت کوارک یا نیروی قوی از طریق ذرات مبادله کننده یا به اصطلاح گلوئون‌ها انتقال می‌یابد. این نیرو مانند چسب، پیوستگی بین کوارک‌ها را تضمین می‌کند. نیروی هسته‌ای که پروتون‌ها و نوترون‌ها را در هسته اتم به هم پیوسته نگاه می‌دارد در واقع نیروی بنیادی نیست بلکه نیرویی است که از نیروی رنگ کوارک‌ها (یعنی قوی‌ترین نیرویی که به آن اشاره می‌شود) به دست می‌آید.

۲- نیروی الکترومغناطیسی:

این نیرو هنگامی که صحبت از بارهای الکتریکی به میان می‌آید ظاهر می‌شود. یک ذره دارای بار الکتریکی مثبت به وسیله‌ی یک ذره مثبت دیگر دفع و به سوی یک ذره دارای بار الکتریکی منفی جذب می‌شود. این نیرو توسط فوتون‌ها یا ذرات نوری مبادله می‌شود. نظریه‌ی فیزیکی که نیروهای

الکترومغناطیسی را توصیف می‌کند، الکترودینامیک نامیده می‌شود. فرمول‌بندی کلاسیک آن را ماکسول بیش از صد سال پیش انجام داده است. نظریه‌ی ماکسول با نسبیت خاص سازگار بود (در واقع الهام بخش اصلی آن بود). نظریه‌ی کوانتومی الکترودینامیک را توموگا، فاینمن و شوئینگر در سال ۱۹۴۰ تکمیل کرده بودند.

۳- نیروی ضعیف:

بسیاری از ذرات نسبت به هیچ یک از دو نیروی یاد شده در بالا یعنی نیروی قوی کوارک و نیروی الکترومغناطیسی واکنش نشان نمی‌دهند، از آن میان ذراتی هستند که فاقد بار الکتریکی و رنگ هستند. برای این‌گونه ذرات یک نیروی بنیادی دیگر وجود دارد که در فاصله‌های خیلی خیلی کم کارگر است و مناسبت نامگذاری نیروی ضعیف به این نام، ضعیف بودن شدت آن در مقایسه با نیروی قوی است. نیروهای ضعیف که مسئول واپاشی هسته‌ای بتازا (و نیز واپاشی پیون، میون و بسیاری از ذرات شگفت دیگر) هستند در فیزیک کلاسیک ناشناخته بود. توصیف نظری آن‌ها از ابتدا با یک فرمول‌بندی کوانتوم نسبیتی صحیح ارائه شده بود. اولین نظریه‌ی نیروهای ضعیف را فرمی در سال ۱۹۹۳ ارائه کرده، لی و یانگ، فاینمن، و گلمان و دیگران در دهه‌ی پنجاه آن را اصلاح کردند و سرانجام گلاشو، واینبرگ و سلام در دهه‌ی شصت آن را به شکل حاضر در آوردند. از نظریه‌ی برهم‌کنش‌های ضعیف گاهی به عنوان نظریه‌ی گلاشو-واینبرگ-سلام[۷] یاد می‌شود. این مدل برهم‌کنش‌های ضعیف و الکترومغناطیسی را تجلی مختلف یک نیروی الکتروضعیف در نظر می‌گیرد و از این جهت چهار نیرو به سه نیرو تقلیل می‌یابد.

۴- گرانش:

نیروی جاذبه‌ای است که میان اجسامی که دارای جرم می‌باشند حکمفرماست. هر جرمی، هر جسم دیگر دارای جرم را با نیرویی که با افزایش فاصله‌ی میان جرم‌ها کاهش می‌یابد، جذب می‌کند.

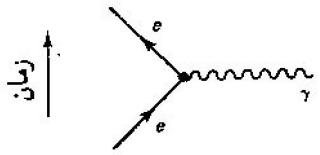
---

[7] GWS

همین نیروی گرانشی است که نیروی بستگی منظومه‌ی خورشیدی و کهکشان‌ها را تأمین می‌کند، و از این‌رو نیروی بسیار مهمی است. این نیرو نسبت به نیروهای بنیادی دیگر در مورد ذرات بنیادی و در فواصل کوتاه بسیار ضعیف است. حامل نیروی گرانشی را گراویتون می‌نامند. ناقلان نیروی بنیادی همگی از ذرات بنیادی به شمار می‌آیند. نیروی گرانشی ضعیف‌ترین نیرو در بین چهار نیروی بنیادین به شمار می‌آید. نظریه‌ی کلاسیک گرانی، قانون گرانش عمومی نیوتن است. تعمیم نسبیتی آن نظریه‌ی نسبیت عام انیشتین است. (بهتر است بگوییم ژئومترودینامیک). هنوز باید روی یک نظریه‌ی کاملاً رضایت بخش کوانتومی برای گرانی کار شود [۲].

۱-۳- الکترودینامیک کوانتومی:

الکترودینامیک کوانتومی[8]، قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و موفق‌ترین نظریه‌ی دینامیک است. بقیه‌ی نظریه‌ها به طور هوشمندانه‌ای از آن ساخته شده‌اند. بنابراین مناسب است که توصیفی از الکترودینامیک کوانتومی بیان شود. همه‌ی پدیده‌های الکترومغناطیسی سرانجام به فرآیند بنیادی زیر تبدیل می‌شوند:



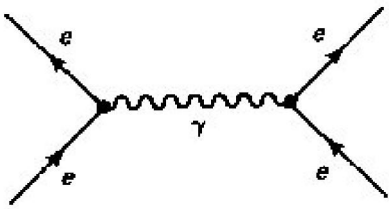
این نمودار بیان می‌کند که ذره‌ی باردار وارد و با جذب یا گسیل فوتون، خارج می‌شود. ذره‌ی باردار الکترون در نظر گرفته شده است که می‌تواند درست همانند کوارک یا هر لپتون دیگر، به جز نوترینو باشد.

[8] Quantum electrodynamics (QED)

لازم به ذکر است که برهم‌کنش‌های ذره‌ای معمولاً به صورت نمودارهای فاینمن[9] نشان داده می‌شود. این نمودارها برای فیزیکدانان انرژی زیاد از این نظر جالب توجه است که محاسبات پیچیده‌شان را آسان می‌کند. به کمک این نمودارها می‌توان فرآیندهای ذره‌ای را در نظر مجسم نمود. قواعد ترسیم نمودار فاینمن به قرار زیر است:

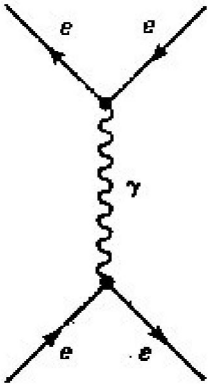
- همه‌ی ذرات ورودی و خروجی به صورت خط‌های مستقیم رسم می‌شوند.
- حامل‌های نیرو به صورت خط‌های موجی، که ذرات را به هم وصل می‌کند، رسم می‌شوند.
- با قرار دادن پیکان روی خط‌های مستقیم، جهت حرکت در طول زمان مشخص می‌شود.

برای توضیح فرآیندهای پیچیده‌تر، دو یا چند رأس ابتدایی به هم وصل می‌شوند. برای مثال حالت زیر در نظر گرفته می‌شود:

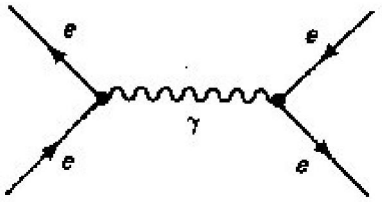


در اینجا دو الکترون وارد و با رد و بدل کردن یک فوتون، خارج می‌شوند. (نیازی نیست معین شود کدام یک فوتون را گسیل و کدام یک آن را جذب کرده است، نمودار شامل هر دو صورت ممکن است). بنابراین نمودار بالا برهم‌کنش بین دو الکترون را بیان می‌کند. در نظریه‌ی کلاسیک این فرآیند را دفع کولنی بارهای همنام (اگر در حالت سکون باشند) می‌نامند. در الکترودینامیک کوانتومی این فرآیند پراکندگی مولر نامیده می‌شود و گفته می‌شود برهم‌کنش با رد و بدل کردن یک فوتون انجام می‌شود. در الکترودینامیک کوانتومی مجاز است که نمودارهای فاینمن حول هر پیکر بندی توپولوژیکی دلخواه چرخانده شود. برای مثال می‌توان نمودار قبل را به صورت زیر چرخاند:

[9] Feynman

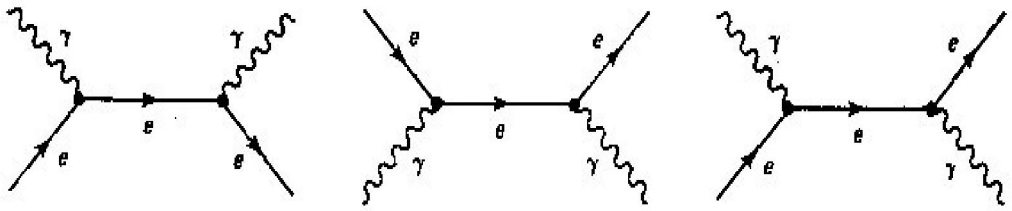


قاعده‌ی بازی آن است که مسیر ذره‌ای را که در زمان به عقب برمی‌گردد، (چنان‌که پیکان نشان می‌دهد) پاد ذره‌ای در نظر گرفت که در جهت زمان حرکت می‌کند (فوتون پاد ذره‌ی خودش است و به همین دلیل روی مسیر فوتون پیکانی قرار نمی‌دهند). پس در فرآیند نشان داده شده یک الکترون و یک پوزیترون نابود می‌شوند و یک فوتون تشکیل می‌شود و سپس دوباره یک جفت الکترون- پوزیترون تولید می‌شود. پس یک الکترون و یک پوزیترون وارد و یک الکترون و یک پوزیترون خارج می‌شود (البته نه همان الکترون و پوزیترون اولیه، اما چون همه‌ی الکترون‌ها یکسان هستند، این موضوع اهمیت زیادی ندارد). این برهم‌کنش جاذبه‌ی کولنی دو بار مخالف را نشان می دهد. در الکترودینامیک این فرآیند را پراکندگی بابا می‌نامند. نمودار کاملاً متفاوت زیر نیز معرف همین فرآیند است:

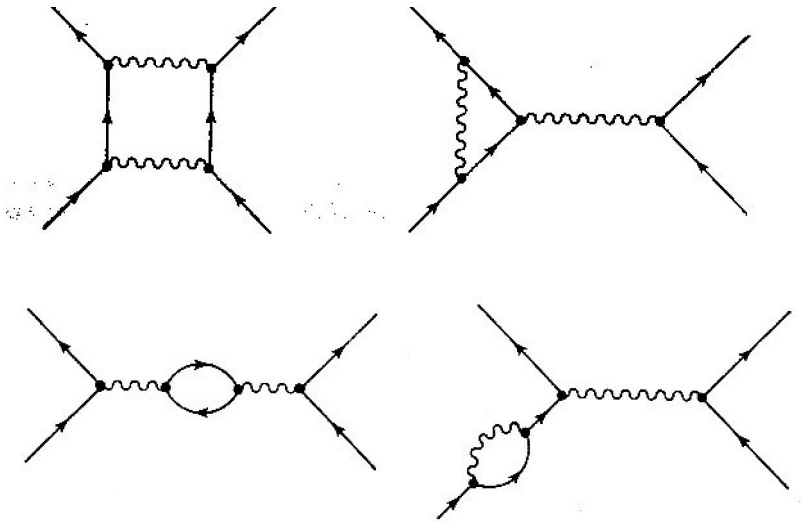


در تحلیل پراکندگی بابا باید هر دو نمودار را در نظر گرفت.

می‌توان نمودارهای متنوع زیر را با استفاده از دو رأس ساخت که به ترتیب از سمت چپ، نابودی زوج ، تولید زوج و پراکندگی کامپتون را توصیف می‌کنند.



اگر از رئوس بیشتری استفاده شود، تنوع نمودارها به‌سرعت افزایش می‌یابد. برای مثال با ترکیب چهار رأس، می‌توان نمودارهای زیر را به‌دست آورد:



در هر نمودار دو الکترون وارد و دو الکترون خارج می‌شوند. این نمودارها دفع بارهای همنام را توصیف می‌کنند (پراکندگی مولر). تا آن‌جا که به مشاهده‌ی فرآیندها مربوط می‌شود ساختار داخلی نمودارها زائد هستند. خطوط داخلی (خطوطی که از داخل نمودار شروع می‌شوند و به داخل نمودار ختم می‌شوند) مبین ذراتی هستند که دیده نمی‌شوند و در واقع بدون تغییر کامل فرآیند نمی‌توان آن-ها را مشاهده کرد. این ذرات را ذرات مجازی می‌نامیم. فقط خطوط خارجی (آن‌هایی که به نمودار وارد یا از آن خارج می‌شوند) نشانگر ذرات واقعی (قابل مشاهده) هستند. خطوط خارجی معرف نوع فرآیند فیزیکی است که رخ می‌دهد. خطوط داخلی سازوکار فرآیند را نشان می‌دهند.

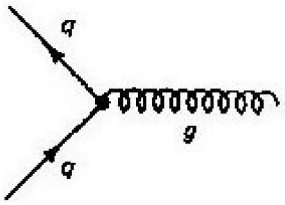
نمودارهای فاینمن کاملاً نمادین هستند، آن‌ها مسیر ذره را نشان نمی‌دهند. بعد قائم زمان و بعد افقی فضاست که متناظر با فاصله‌های فیزیکی نیست. برای مثال، در پراکندگی بابا الکترون و پوزیترون جذب

می‌شود و نه دفع. آن‌چه نمودار نشان می‌دهد این است که در ابتدا یک الکترون و یک پوزیترون وجود دارد، سپس این دو فوتونی مبادله می‌کنند و سرانجام هم‌چنان یک الکترون و یک پوزیترون وجود دارد. هر نمودار فاینمن نماینگر عددی است که می‌توان آن را با استفاده از آن‌چه که قاعده‌های فاینمن نامیده می‌شود، محاسبه کرد. فرض کنید قرار است فرآیند فیزیکی خاصی (مثلاً پراکندگی مولر) تحلیل شود. ابتدا همه‌ی نمودارهای با خطوط خارجی مناسب رسم می‌شود (یکی با دو رأس، دیگری با چهار رأس و غیره). سپس با استفاده از قاعده‌های فاینمن سهم هر نمودار محاسبه و همه با هم جمع می-شوند. جمع کل تمام نمودارهای فاینمن با خطوط خارجی معین، فرآیند واقعی فیزیکی را نشان می‌دهد. البته در اینجا مسئله‌ای که پیش می‌آید آن است که برای یک برهم‌کنش خاص تعداد نا محدودی نمودار فاینمن وجود دارد. خوشبختانه هر رأس در نمودار فاینمن یک ثابت ساختار ریز $\alpha = \left(e^2/\hbar c\right) = 1/137$ را وارد می‌کند و چون این عدد کوچک است، نمودارهای با تعداد رأس بیشتری سهم کمتری در نتیجه‌ی نهایی دارند و بسته به دقت مورد نیاز می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. قاعده‌های فاینمن پایستگی انرژی و تکانه را در هر رأس و در نتیجه در همه‌ی نمودار برقرار می‌کنند. این مسئله باعث می‌شود که رئوس بنیادی در الکترودینامیک کوانتومی به خودی خود فرآیند فیزیکی ممکن را نمایش ندهند [۲].

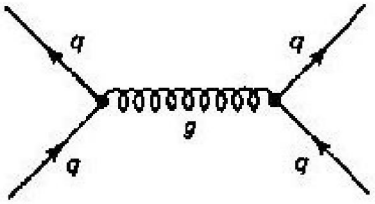
۱-۴- کرومودینامیک کوانتومی:

در کرومودینامیک[10]، رنگ نقش بار را دارد و فرآیند به صورت کوارک ⟵ کوارک + گلوئون است (چون لپتون رنگ ندارد در برهم‌کنش قوی شرکت نمی‌کند).

[10] Quantum chromodynamics (QCD)



مانند قبل برای نشان دادن فرآیندهای پیچیده‌تر، دو رأس بنیادی یا بیشتر با هم ترکیب می‌شود. برای مثال نیروی میان دو کوارک (که در درجه‌ی اول مسئول بستگی آن‌ها به هم و تشکیل باریون‌ها و به طور غیر مستقیم، مسئول نگه داشتن نوترون و پروتون در هسته است) را با نمودار مرتبه‌ی پائین زیر نشان می‌دهند:



و گفته می‌شود نیروی میان دو کوارک با مبادله‌ی گلوئون رد و بدل می‌شود. تا اینجا کرومودینامیک بسیار شبیه الکترودینامیک است. اما تفاوت مهمی نیز وجود دارد، برجسته‌ترین تفاوت آن است که در الکترودینامیک یک نوع بار الکتریکی وجود دارد (که میتواند مثبت یا منفی باشد، یعنی برای مشخص کردن بار یک ذره، یک عدد کافی است) ولی در کرومودینامیک سه نوع رنگ وجود دارد (قرمز، سبز،آبی) و در فرآیند $q \to q + g$ رنگ کوارک (و نه طعم آن) می‌تواند تغییر کند. مثلاً یک 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. در این مثال اختلاف برابر یک واحد آبی منهای یک واحد قرمز است.