دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

عنوان پایان‌نامه :

بررسی همبستگی دو ذره ای در نابودی زوج الکترون – پوزیترون در انرژی مرکز جرم 60 GeV

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک گرایش ذرات بنیادی

استاد راهنما:

دکتر محمد ابراهیم زمردیان

استاد مشاور:

دکترپروین اسلامی

نگارش:

فاطمه خرم آبادی

تابستان ۱۳۸۹

تقدیم به

پدر بزرگوارم

و

مادر عزیزم

سپاس و قدردانی

شکر و سپاس خداوند حکیمی را که در پرتو علم بی منتهایش، حکمت و دانش آموختم. او که همواره در اوج ناامیدی، امید و یاری رسان وقت گرفتاری بود و هر جا گره ای بود گره از کارم گشود و به من توفیق داد تا تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی ارشد به پایان رسانم.

وظیفه خود میدانم تا از زحمات پدر و مادر عزیزم که همواره چراغ هدایت و معلم زندگی ام بوده اند و از هیچ کوششی برای موفقیتم فروگذار نکردند، تشکر کنم.

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد ابراهیم زمردیان به خاطر راهنمایی های ارزنده شان در خلال انجام تحقیقات نهایت تشکر و امتنان را دارم.

از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر جاویدان و جناب آقای دکتر قدسی که زحمت مطالعه این پایان نامه را پذیرفتند و در جلسه دفاع اینجانب حضور یافتند بی نهایت سپاس گذارم.

در پایان از دوستان عزیزم که مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند کمال تشکر را دارم.

فاطمه خرم آبادی

شهریور ۱۳۸۹

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده

مقدمه

فصل اول:

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۱-۱- نیروی گرانش..... ۲

۱-۱-۲- نیروی الکترومغنا طیسی..... ۴

۱-۱-۳- نیروی هسته ای قوی..... ۵

۱-۱-۴- نیروی هسته ای ضعیف..... ۶

۱-۲- مدل استاندارد..... ۷

۱-۳- ذرات بنیادی..... ۹

۱-۴- اختلال QCD و گلوئون..... ۱۲

۱-۵- قوانین بقاء..... ۱۷

۱-۵-۱- قانون بقای عدد لپتونی..... ۱۷

۱-۵-۲- قانون بقای عدد باریونی..... ۱۹

۱-۵-۳- قوانین بقای حاکم بر واپاشی ها..... ۲۰

۱-۵-۴- قوانین بقای تقریبی..... ۲۱

۱-۶- هادرونها..... ۲۳

۱-۶-۱- باریونها..... ۲۳

۱-۶-۲- مزونها..... ۲۶

۱-۶-۳- گلوبالها..... ۲۸

۱-۷- برخورد الکترون و پوزیترون..... ۲۸

۱-۸- فرآیندهای حاصل از نابودی e^+e^-..... ۲۹

۱-۸-۱- فرآیندهای شامل برهمکنش الکترومغناطیسی..... ۲۹

۱-۸-۲- فرآیندهای شامل برهم کنش قوی..... ۳۲

۱-۸-۳- فرآیندهای شامل برهمکنش ضعیف..... ۳۵

۱-۹ فرآیند $e^+e^- \to Xh$..... ۳۶

فصل دوم :

۲-۱ – مقدمه..... ۴۱

۲-۲- تئوری..... ۴۳

۲-۲-۱ – تقریب لگاریتمی پیشرو..... ۴۳

۲-۲-۲- بهنجارش..... ۴۹

۲-۲-۳- جتهای کوارک و گلئون..... ۵۰

۲-۲-۴- دوگانگی پارتون- هادرون موضعی..... ۵۱

۲-۳- برازش NLLA با داده‌ها..... ۵۲

۲-۴- تفسیر نتایج Q_{eff} های بدست آمده از برازشهای متفاوت..... ۶۲

۲-۴-۱- برازش توزیع تکانه..... ۶۲

۲-۴-۲- برازش مکان قله توزیع تکانه..... ۶۴

۲-۵- نتیجه..... ۷۰

فصل سوم :

۳-۱-مقدمه..... ۷۳

۳-۲- رسم منحنی توزیع تکانه پارتون NLLA ۷۳

۳-۳- برازش داده ها برای توزیع ξ (منحنی گاوسی)..... ۷۷

۳-۴- رسم منحنی همبستگی تکانه دو ذره ای..... ۸۰

۳-۵- برازش داده ها برای همبستگی تکانه دو ذره ای..... ۸۲

۳-۶- محاسبه ضرایب همبستگی (C_0 و C_1 و C_2)..... ۸۵

۳-۷- برازش توزیع تکانه مکان قله..... ۹۰

۳-۸- بحث و نتیجه گیری..... ۹۳

پیوست (برنامه های کامپیوتری)..... ۹۵

مراجع..... ۱۰۲

چکیده :

داده های بر هم کنش $e^{-}e^{+}$ در انرژی مرکز جرم $60\ GeV$ مورد بررسی قرار می گیرند. این بررسی طیف انرژی (تکانه) را در مقیاس لگاریتمی برای آزمون اختلالی QCD و همچنین تقریبهایی که برای داده ها بعد از هادرونی شدن لازم است، را شامل می شود. برای این منظور تقریبهای مختلفی برای مدل اختلالی QCD ارائه شده اند. برخی از این تقریبها عبارتند از تقریب فانگ – وبر و تقریب پریز – راموس، نتایج فیزیکی این دو تقریب را با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد. در نهایت کمیتی که مورد اهمیت واقع می شود، قله منحنی توزیع طیف است. سپس همبستگی تکانه دو ذره ای در جتها را اندازه میگیریم و وابستگی این همبستگی را به انرژی جت مورد مطالعه قرار می دهیم، نتایج را با برآوردهای تحلیلی تقریب لگاریتمی پیشرو (NLLA) مقایسه می کنیم. نتایج این تحلیل نشان می دهد که همبستگی های تکانه پارتونی، مرحله هادرونی شدن ترکش جت را حفظ می کند که منجر به اعتبار بیشتر فرضیه دوگانگی پارتون – هادرون موضعی (LPHD) می شود.

مقدمه

دنیای پیرامون ما پر از شگفتی و راز و رمز است و بشر به دلیل فطرت حقیقت جوی خود همواره به دنبال کشف چگونگی و چرایی پدیده‌های اطراف خود بوده است. از جمله چیزهایی که ذهن کنجکاو و جستجوگر آدمی سعی در درک آن داشته است، شناخت سنگ بنای این عالم است. سؤالی که با توجه به پیشرفت‌های فوق‌العاده بشر در عرصه‌های گوناگون علمی هنوز پاسخ روشنی ندارد. پاسخ به این سؤال در حوزه علم فیزیک و به طور خاص‌تر در شاخه ذرات بنیادی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

اما قبل از اثبات وجود کوارک‌ها در سال ۱۸۹۷ ذره‌ای به نام الکترون توسط تامسون کشف شد. ذره‌ای که تا به امروز هیچ ساختاری برای آن تعریف نگردیده است و همچنان عنوان بنیادی بودن را با خود به همراه دارد. چند دهه بعد که وجود پادذرات توسط دیراک به صورت تئوری مطرح گردید. شخصی به نام آندرسون برادر دو قلوی الکترون را درسال ۱۹۳۱ کشف کرد و آن را پوزیترون نامید. شاید در آن زمان کسی تصور نمی‌کرد که با شتاب دادن به این ذره و پاد ذره‌اش در شتابدهنده‌های غول پیکر و برخورد دادن آن‌ها با هم بتوان بسیاری از نظریات QCD که یک تئوری اختلالی و بهترین تئوری برای بررسی بر همکنش‌های قوی است را نشان داد.

در اثر نابودی الکترون و پوزیترون یک جفت ذره و پادذره می‌تواند یک جفت کوارک و پادکوارک باشد. اما کوارک‌ها به دلیل داشتن ویژگی حبس نمی‌توانند به صورت مجزا و مستقل وجود داشته باشند و آنچه که در آشکار سازها دیده می‌شود به شکل خوشه‌هایی از ذرات هادرونی هستند. که به آن‌ها جست‌های هادرونی می‌گویند. البته به دلیل اینکه این پدیده غیر اختلالی است، تئوری اختلالی QCD نمی‌تواند آن‌را توجیه کند. لذا برای توصیف فرآیند هادرونی از مدل‌های پدیده شناسی استفاده می‌شود. اما در این پایان نامه به بررسی همبستگی تکانه دو ذره‌ای در جت‌های تولید شده از نابودی الکترون و پوزیترون می‌پردازیم.

فصل اول به بحث و بررسی پیرامون مقدمه ای بر ذرات بنیادی و نظریه QCD می پـردازیم و همچنـین بـه طور مختصر به نتایج حاصل از فرآیند نابودی الکترون و پوزیترون اشاره می کنیم.

فصل دوم به بررسی همبستگی تکانـه دو ذره ای در جتهـا مـی پـردازیم و از تئوریهـای مختلـف کـه در آن اصلاحات در فرضیه QCD برای وارد کردن تصحیحات غیر اختلالی آمده است برای برازش داده ها استفاده می کنیم. بدین ترتیب می توانیم میزان اعتبار این همبستگی ها را بدست آوریم.

فصل سوم با استفاده از داده هایی که مربوط به برخورد الکترون – پوزیترون در انرژی 60GeV است طیـف توزیع تکانه را رسم کرده و برازش های مختلف بر مبنای تئوریهای گفته شده در فصـل دوم را بـر روی داده های موجود انجام می دهیم. قله منحنـی توزیـع را بـرای داده هـا بدسـت آورده و بـا اسـتفاده از آن توزیـع همبستگی تکانه دو ذره ای را بدست می آوریم. با برازش داده ها ضرایب همبستگی را محاسبه کـرده، آنچـه بدست آوردیم با دستاوردهای دیگران در این انرژی مقایسه می کنیم و به نوعی کار خود را در این مقایسات تست می کنیم.

فصل اول

مقدمه ای بر فیزیک ذرات بنیادی

۱-۱- مقدمه

فهم اینکه تمام پدیده های مشاهده شده در جهان طبیعی را می توان فقط به آثار چهار نیروی اساسی نسبت داد نشان چشم گیری از قدرت وحدت بخش فیزیک است. این نیروها عبارتند از نیروهای آشنای گرانشی، الکترومغناطیسی و نیروهای هسته ای قوی و ضعیف. جالبتر از همه این حقیقت است که پدیده هایی که در جهان اطراف ما رخ می دهند را می توان به دو دسته الکترومغناطیسی و گرانشی نسبت داد زیرا فقط این نیروها آثار چشم گیری در گسترهٔ قابل مشاهده دارند.آثار نیروی هسته ای قوی و ضعیف حد اکثر به فاصله $۱۰^{-۱۵}$ متری خود محدود می شوند. از این نظر قبل از اینکه به بحث در مورد کوارکها و نیروی بین آنها بپردازیم جا دارد که برخی از حقایق کلیدی این نیروها را بطور خلاصه بیان کنیم.

۱-۱-۱- نیروی گرانش

تا آنجا که می دانیم گرانش شناخته شده ترین نیرو در حوزه تجربه بشر است که بر پدیده های متنوعی از سقوط سیب تا فرو ریختن کهکشان مسلط است. منبع این نیرو جرم است و چون چیزی بصورت جرم منفی نداریم، نیروی بین دو جرم همواره جاذبه بوده و همیشه در امتداد خط واصل آنها عمل می کند. این نیرو مستقل از سایر صفات (مانند بار الکتریکی، اسپین، جهت حرکت و...) اجسامی است که عملی بر روی آنها انجام می گیرد.

نیروی گرانشی بطور کلاسیک با فرمول معروف قانون عکس مجذوری نیوتن توصیف می شود و بیان می کند که اندازهٔ نیروی بین دو ذره متناسب با عکس مربع فاصلهٔ بین آنهاست.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (۱-۱)$$

m_1 و m_2 جرم دو ذره، r فاصلهٔ آنها از هم، G ثابت گرانش و F نیروی وارد بر ذرات است.

قدرت این نیرو تحت سلطهٔ ثابت گرانشی (G) است و در مقایسه با سایر نیروها بسیار ضعیف و در جهان ریز، آثار گرانش بصورت عمده قابل چشم پوشی است اما این فقط تمایل به تکامل است که ما را وا می دارد آنرا در متن فیزیک بگنجانیم. صرفاً در مناطق مرموز، مثلاً در مرز یک حفرهٔ سیاه است که آثار نیروی گرانش بر روی ذرات بنیادی اهمیت پیدا می کند.

مکانیسمی که در تصویر کلاسیک موجب پیدایش این نیروها می شود، مربوط به میدان گرانشیی است که از منبع هر جرم تا بی نهایت گسترش دارد. جرم آزمون، مستقیماً با منبع جرم بر همکنش نمی کند (زیرا این مستلزم اثر از دور[1] لحظه ای است واین از نظر فلسفی، مفهوم چندان جذابی نیست)، بلکه با میدان گرانشی بر همکنش می کند. این نیرو در هر نقطهٔ فضا، اطلاعات ذرهٔ مولد خود و اینکه چه پتانسیلی بر جرم آزمون وارد می کند (یعنی چه نیرویی بر آن اعمال می کند) را در بر دارد.

مشخصهٔ دیگر فرمول نیوتن در این است که از ویژگیی که برای مشخص کردن چشمه ها (جرم آنها) استفاده می کند، با ویژگیی که پاسخ آنها را به شتاب ها مشخص می کند، یکسان است. این مورد، با فرمول معروف دیگر نیوتن به شکل زیر بیان می شود:

$$F = ma \qquad (۲-۱)$$

این هم ارزی بین جرم گرانشی و جرم اینرسی، انشتین را به این فکر انداخت که اثر گرانش را با آثار شتاب یکی بداند. این هم ارزی است که نقطه شروع نسبیت عام را مشخص می کند.

1- Action At The Distance

۱-۱-۲- نیروی الکترومغنا طیسی

نیروی الکترو مغناطیس نیرویی است که علیرغم طبیعت نسبتاً پیچیده اش، بیشترین و کاملترین درک را در مورد آن داریم و احتمالاً بازتابی از مشخصه های فیزیکی آن است، یعنی برد بی نهایت دارد، اجازه می دهد که پدیده های ماکروسکوپی آن، مشاهده شود وما را به فرمول بندی QED هدایت می کند.

سرچشمه این نیرو، البته بار الکتریکی است که می تواند مثبت یا منفی باشد وبین دو بار همنام به نیروی دافعه وبین دو بار ناهمنام به نیروی جاذبه بیانجامد. وقتی دو بار در حال سکون باشند، نیروی الکترواستاتیکی بین آنها بوسیله قانون کولمب بیان می شود که شبیه قانون گرانش نیوتن است. بدین معنی که اندازه نیرو، با حاصلضرب اندازهٔ بارهای مورد نظر متناسب است و با مربع فاصلهٔ آنها نسبت عکس دارد:

$$F = K\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad (۳-۱)$$

$Q_۱$ و $Q_۲$ بار ذرات، r فاصلهٔ بین آنها ، K ثابت گذردهی خلاء و F نیروی وارد برآنها است.

پدیده های الکترومغناطیسی در حوزهٔ کلاسیک جملگی توسط معادلات ماکسول بیان می شوند. این معادلات به ما اجازه می دهند که مثلاً میدان الکتریکی حاصل از یک آرایش خاص بارها، یا معادلهٔ موج توصیف کنندهٔ انتشار میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در فضا را محاسبه نماییم.

یک خصوصیت جالب این معادلات، در این است که آنها بدلیل عدم حضور یک کوانتوم بنیادی بار مغناطیسی نا متقارن هستند. می توان یک منبع میدان مغناطیسی را تصور کرد که موجب بوجود آمدن یک نیروی مگنواستاتیک بنیادی می شود. یک چنین میدان مغناطیسی، بر خلاف تمام مغناطیسهای زمینی، که همگی دارای یک جفت قطب شمال – جنوب هستند، بصورت یک

تک قطبی[1] ظاهر می شوند. احتمال تک قطبیهای مغناطیسی واقعاً بنیادی، اخیراً به دنبال ظهورشان در جدیدترین نظریه ها و نکات گزارش شده، دوباره احیاء شده است.

۱-۱-۳- نیروی هسته ای قوی

هنگامی که فیزیکدانان اولین بار ساختار هستهٔ اتم را مطالعه می کردند با معمایی مواجه بودند. آنها می دانستند که هسته ها متشکل از نوکلئون ها (پروتونها و نوترونها) هستند و هستهٔ عناصر سنگین شامل پروتونهای اضافی نیز هست. اما چگونه این همه پروتون با قوانین الکترودینامیک که وجود تعداد زیادی ذره با بار یکسان را در یک فضایی آنچنان کوچک ممنوع می کند، به سازش رسیده اند؟ دافعهٔ الکتریکی میان پروتونها آنچنان بزرگ است که باید هسته را منفجر کند. بنابراین طبق قوانین الکترودینامیک هسته های اتم نباید پایدار باشد. این مسئله فقط یک جواب داشت:

باید در طبیعت نیروی اساسی دیگری وجود داشته باشد که هستهٔ اتم را به هم نگه دارد. این نیرو در واقع وجود دارد و نیروی هسته ای قوی یا بر هم کنش قوی نام دارد. یک بر آورد ساده نشان می دهد این برهمکنش لااقل صد برابر از برهمکنش الکترومغناطیسی قویتر است. این برهمکنش فقط در فواصل کوتاه از مرتبهٔ $۱۰^{-۱۵}$ مترعمل می کند. به محض اینکه نوکلئونها بیشتر از $۱۰^{-۱۵}$ متر از هم فاصله بگیرند، برهمکنش قوی هیچگونه اثری بر آنها ندارد. در این فواصل نیروی غالب بین نوکلئونها نیروی الکترو مغناطیسی خواهد بود. همانگونه که برهمکنش میان اجسام باردار بوسیلهٔ تبادل کوانتوم های میدان الکترومغناطیسی یعنی فوتون صورت می گیرد، برهمکنش قوی حاصل تبادل کوانتوم هایی به نام مزون بین نوکلئونهاست.

1- monopole

۱-۱-۴- نیروی هسته ای ضعیف

یکی از بارزترین خصوصیات نوترون این است که بطور خود به خود با نیمه عمری حدود ۱۸ دقیقه واپاشی می کند و به یک پروتون و یک الکترون و آنتی نوترینوی الکترون تبدیل می شود. این مدت بسیار طولانی تر از هر یک از پدیده هایی است که با نیروی قوی سروکار دارد و دلیلی وجود ندارد که انتظار داشته باشیم نیروی الکترومغناطیسی تاثیری بر نوترونهای بدون بار داشته باشد. بنابراین واضح است که واپاشی نوترون ناشی از یک نیرو با ویژگی های جدیدی در طبیعت است.

نیروی هسته ای ضعیف، مانند همتای قوی خود، فقط در فواصل میکروسکوپی عمل می کند. در واقع این نیرو فقط زمانی خود را آشکار می کند که ذرات در یک نقطه (یعنی پایین تر از هر قدرت قابل تفکیکی که اکنون در دسترس فیزیک است) با هم تلاقی کنند. از این رو توصیف آن فقط با فیزیک کوانتومی میسر خواهد شد و بالاخره اینکه حاملهای بار در این نوع از برهمکنش، بوزونهای Z^0 و$W^{\pm}$ می باشند.

جدول (۱-۱) : قدرت نسبی نیروها که بر حسب واحدهای طبیعی بیان شده است.

نیرو	برد	قدرت	عمل می کند بر روی
گرانش	∞	$G = 6 \times 10^{-29}$ نیوتنی	تمام ذرات
نیروی هسته ای ضعیف	$< 10^{-18}$	$G \approx 1 \times 10^{-5}$ فرمی	لپتونها – هادرونها
الکترومغناطیسی	∞	$\alpha = \frac{1}{137}$	تمام ذرات باردار
نیروی هسته ای قوی	$\approx 10^{-15}$	$g^2=1$	هادرونها

۱-۲- مدل استاندارد

مدل استاندارد [۱] با ذرات بنیادی و برهمکنشهای بین آنها سروکار دارد. QCD[۱] در مقایسه با QED[۲] به صورت یک تئوری پیمانه ای فرمول بندی می شود.این تئوری، برهمکنشهای قوی بین کوارکها را توسط مبادله گلئونها (که بوزونهای پیمانه ای بدون جرم هستند) توصیف می کند. گلئونها بار رنگ حمل می کنند و بنابراین گلئونها می توانند مستقیماً به گلئونهای دیگر بپیوندند. در نتیجه پیوند قوی (α_s) به انرژی بستگی پیدا می کند. برای فواصل بزرگ واگرا و برای فواصل کوتاه کوچک می شود. لذا هرگز نمی توان کوارکها را به صورت آزاد مشاهده کرد.

1- Quantum Chromo Dynamic

2- Quantum Electro Dynamic

برهمکنشهای الکترومغناطیسی و ضعیف در این مدل توسط تئوری گلاشو[1]، واینبرگ[2] و سلام[3] (GWS) بررسی می شود که در دهۀ شصت توسط این افراد به صورتی که امروزه از آن استفاده می گردد ارائه شد. با استفاده از این تئوری واپاشی های هسته ای را می توان به خوبی توصیف کرد. همچنین واپاشی های ضعیف میون و پایون و بسیاری از ذرات دیگر را می توان به طور کامل توجیه کرد. در تئوری الکترو ضعیف چهار ذره واسطه معرفی می شوند سه تا از این ذرات واسطه بوزونهای برداری $W^{\pm}$ و Z^{0} هستند که به برهمکنشهای ضعیف مربوط می شوند. چهارمین ذره واسطه فوتون γ است که در برهمکنشهای الکترومغناطیسی مسئول انتقال نیرو بین ذرات باردار است.

در مدل استاندارد جایی برای برهمکنشهای گرانشی وجود ندارد. زیرا اثرات گرانشی در شرایط فیزیک انرژی بالا بسیار زیادند. در حد کلاسیکی قوانین جامع جاذبه نیوتنی این اثرات گرانشی را به خوبی توصیف می کنند و نتیجه تعمیم نسبیتی آن تئوری نسبیت عام انیشتین است. برای دست یابی به یک تئوری کامل کوانتومی تلاشهای زیادی تا به امروز صورت گرفته است ولی هنوز هیچ تئوری کوانتومی برای گرانش ارائه نشده است[۲].

1- Glashow

2- Weinberg

3- Salam

۱–۳– ذرات بنیادی

ذرات مدل استاندارد شامل لپتونها، کوارکها و بوزونها هستند، که به همراه خصوصیاتشان در جدول (۱-۲) نمایش داده شده اند. همه مواد ترکیبی از فرمیونهای بنیادی با اسپین ۱/۲ هستند. کوارکها حامل کسری از بار الکتریکی و لپتونها مانند الکترون حامل بار الکتریکی کامل هستند. شش کوارک (u,d,s,c,t,b) در سه خانواده قرار می گیرند به گونه ای که اختلاف باری که بین اعضای هر خانواده وجود دارد یک واحد باشد. به موازات این سه خانواده کوارکی سه خانواده لپتونی وجود دارد (e,μ,τ).

جدول (۱-۲) : ذرات بنیادی مدل استاندارد و خصوصیات آنها

(اعداد داخل پرانتز جرم ذرات را برحسب GeV/c^2)

فرمیون اسپین $\frac{1}{2}$							
بار الکتریکی لپتونها	لپتونها			کوارکها			**بار الکتریکی کوارکها**
-1	τ (1.784) tau	μ (0.106) muon	e (5.1×10^{-4}) electron	t (174) top	c (1.5) Charm	u (4×10^{-3}) up	+2/3
0	υ_τ ($< 4 \times 10^{-2}$) Tau neutrino	υ_μ ($< 3 \times 10^{-4}$) Muon neutrino	υ_e ($< 3 \times 10^{-6}$) Electron neutrino	b (5.1) beauty	s (0.15) strang	d (7×10^{-3}) down	-1/3
بوزون اسپین 1							
Strong		Weak				e.m	
gluons		$W^{\pm}, Z^{0}$				γ	

هر خانواده شامل یک ذره باردار منفی و یک نوترینو می باشد. هر کوارک با سه رنگ متفاوت وجود دارد که سبز و آبی و قرمز نامیده می شود. در حالیکه لپتونها هیچ رنگی ندارند. مجموعه کوارکها و لپتونها ۲۴ ذره بنیادی را تشکیل می دهند. به همین تعداد نیز پاد ذراتی با جرم مساوی اما با رنگ مخالف وجود دارد. در ترکیب کوارکی بعضی از باریونها (Δ^{++} که از سه کوارک u با بار $\frac{2}{3}$ ، Ω^- که از سه کوارک S با بار $\frac{1}{3}$ ساخته شده اند) سه کوارک یکسان در یک حالت وجود دارند، که نقض آشکاری از اصل طرد پائولی است (این اصل بیان می کند که حضور دو ذرهٔ یکسان با اسپین نیمه صحیح در یک حالت ممنوع است). این ذرات باید صاحب یک عدد کوانتومی جدید باشند، نام این عدد کوانتومی را رنگ نامیدند، و به آن سه مقدار متفاوت سبز، قرمز و آبی نسبت می دهند[۳]. به این ترتیب سه کوارک همنوع می توانند در یک باریون وجود داشته باشند. نسبت دادن رنگ به کوارکها به معنی این نیست که واقعاً یک کوارک رنگی است. پاد کوارکها حامل پاد رنگ هستند و اگر q و $\bar{q}$ که یک مزون را می سازند، جفت رنگ و پاد رنگ مناسبی باشند، رنگها می توانند یکدیگر را حذف کنند و مزون بی رنگی را بسازند. همانند مزونها، باریونها نیز هیچ رنگ خالصی ندارند. وجود پاد ذرات ویژگی عمومی فرمیونها و بوزونها است. پاد ذرات جرم یکسانی با ذرات دارند، اما دارای بار و گشتاور دو قطبی مغناطیسی متضادی هستند. فرمیونها و پاد فرمیونها فقط می توانند به صورت جفت خلق یا نابود شوند. به طور نظری، حالتهای، ذره – پاد ذره، توسط همیوغ، ذره – پاد ذره، حذف می شوند. اگر به هر فرمیون عدد فرمیونی ۱+ وبه هر پاد فرمیون عدد فرمیونی ۱– نسبت دهیم در فرآیند خلق و نابودی زوجهای فرمیونی، عدد فرمیونی پایسته می ماند. بنابراین همیوغ، ذره – پاد ذره، برای فرمیونها یک پاد ذره با بار و گشتاور دو قطبی مغناطیسی و عدد فرمیونی مخالف را می دهد. اما جرم و اسپین برای فرمیونها و پاد فرمیونها یکسان است. بوزونهای بنیادی حامل چهار نوع نیرو (یا برهمکنش بنیادی مجزا) هستند. نیروهای قوی عامل بر همکنش بین نوکلئون - نوکلئون و نوکلئون - مزون وبه طور کلی کوارک - کوارک و کوارک - پاد کوارک هستند. مزونها حامل بر همکنشهای قوی در