بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

بررسی و مطالعه توابع ساختار و توزیع زاویه‌ای پراکندگی لپتون‌ها از هسته‌های ^{12}C ,^{4}He ,^{40}Ca

استاد راهنما

دکتر فرهاد ذوالفقارپور

توسط

میرحمید موسوی

دانشگاه محقق اردبیلی

دی ۱۳۸۹

دانشکده علوم

گروه فیزیک

بررسی و مطالعه توابع ساختار و توزیع زاویه ای پراکندگی لپتون ها از هسته های ^{12}C ,^{4}He ,^{40}Ca

نگارش:

میرحمید موسوی

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

از

دانشگاه محقق اردبیلی

اردبیل - ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: .....

دکتر فرهاد ذوالفقارپور(استاد راهنما).....استادیار

دکترداریوش رضایی (داور داخلی).....استادیار

دکتر حسین قلی زاده (داور خارجی).....استادیار

دی ماه-۱۳۸۹

تقدیم به:

او و یاد او و به نام او، که پیله حسرت بر من پیچید و در باتلاق های بی رحم زندگی، تنهام نگذاشت.

تقدیر و سپاسگزاری

اکنون که به یاری خداوند انجام این پژوهش به پایان رسید، بر خود لازم می دانم که از خانواده محترم که همواره با پشتیبانی های خود در طول تحصیل مرا یاری کردند، تشکر و قدردانی کنم. از استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر ذوالفقارپور که با راهنمایی های خود مرا در مراحل این پروژه یاری کردند تشکر می کنم. و همچنین از استاد بزرگوار خود جناب آقای دکتر بدری که در این دوره از تحصیل مطالب ارزشمندی را از آنها یاد گرفته ام و همچنین از هیئت داوری که زحمت داوری این پایان نامه را کشیدند نهایت سپاسگزاری را دارم.

از برادران و خواهران خود کمال تشکر را دارم و در تمام مراحل زندگی برای آنها موفقیت و پیروزی را آرزومندم.

از دوستان خود که واقعاً در مراحل پروژه به بنده کمک کردند نهایت سپاسگزاری را می کنم و برای آنها آرزوی موفقیت و خوشبختی دارم.

نام خانوادگی دانشجو: موسوی **نام**: میرحمید

عنوان پایان‌نامه: : بررسی و مطالعه توابع ساختار و توزیع زاویه‌ای پراکندگی لپتون‌ها از هسته‌های ^{12}C، ^{4}He ، ^{40}Ca.

استاد راهنما: دکتر فرهاد ذوالفقارپور

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: فیزیک **گرایش**: هسته‌ای **دانشگاه**: محقق اردبیلی

دانشکده: علوم- گروه فیزیک **تاریخ فارغ التحصیلی**: ۸۹/۱۰/۱۹ **تعداد صفحه**: ۹۵ صفحه

کلید واژه‌ها: تابع ساختار، حرکت فرمی، اثرEMC، فرمولبندی درهمروی، مقیاس بیورکن، سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی.

چکیده:

ما در این تحقیق ابتدا سعی کردیم با در نظر گرفتن اثر حرکت فرمی و انرژی بستگی هسته‌ای، تابع ساختار هسته‌های ^{4}He ، ^{12}C و ^{40}Ca را مورد بررسی قرار دهیم که برای این کار با استفاده از مدل نوسانگر هارمونیک، با در نظر گرفتن پارامتر $\hbar\omega$ مختلف برای پوسته‌های مختلف داخل هسته که با جذر میانگین مربع شعاع هسته در ارتباط است و هم نیز با استفاده از توابع ساختار نوکلئونهای آزاد GRV ، توابع ساختار هسته‌های فوق را محاسبه کردیم که در اینجا محاسباتمان را یک بار با در نظر گرفتن هر دو اثر هسته‌ای انرژی بستگی و حرکت فرمی و بار دیگر با در نظر گرفتن فقط اثر هسته‌ای حرکت فرمی و در غیاب اثر انرژی بستگی انجام داده ایم و بعد برای اینکه ثابت کنیم تابع ساختارهای بدست آمده تابع ساختار هسته‌های مورد بررسی ما را بخوبی بدست می‌دهد نسبت EMC را که نشان‌دهنده اختلاف بین تابع ساختار نوکلئون آزاد و نوکلئون مقید است را محاسبه کرده‌ایم و سپس سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی لپتونها از هسته‌های فوق را حساب نموده که نتایج حاصل توافق خوبی با نتایج تجربی و تئوری موجود نشان می‌دهند از توافق بین نتایج محاسبات ما با نتایج تجربی می‌توان نتیجه گرفت که تابع ساختار و سطح مقطع دیفرانسیل پراکندگی بدست آمده برای هسته فوق با بکار بردن توابع توزیع کوارک‌های ظرفیت گروه GRV تابع ساختار هسته‌های مورد بحث ما را بخوبی بدست می‌دهد.

فهرست مطالب

مقدمه	۱
فصل اول: مروری بر ذرات بنیادی و کوارک‌ها	۴
مقدمه	۴
۱–۱– مدل استاندارد	۴
۱–۲– لپتون‌ها	۶
۱–۳– کوارک‌ها	۶
۱–۴– گلئون‌ها	۸
۱–۵– نظریه کرومودینامیک کوانتومی یا QCD	۹
۱–۶– نظریه رنگ‌ها	۱۰
۱–۷– رنگ‌ها و طعم‌ها	۱۳
۱–۸– رنگ‌ها و بارها	۱۴
۱–۹– آیزواسپین	۱۷
۱–۱۰– کوارک شگفت	۱۸
۱–۱۱– شگفتی یک عدد کوانتومی دیگر	۱۸
فصل دوم: ساختار نوکلئون‌های آزاد و مدل کوارک پارتون	۲۰
مقدمه	۲۰
۲–۱) پراکندگی و سطح مقطع برهمکنش دو ذره با اسپین صفر	۲۱
۲–۲) پراکندگی الکترون و میون دو ذره باردار بدون اسپین	۲۲
۲–۳) پراکندگی و سطح مقطع بر همکنش دو ذره با اسپین ۱/۲	۲۵
۲–۴) پراکندگی کشسان الکترون از پروتون	۲۸

۲-۵) پراکندگی ناکشسان الکترون از پروتون ۳۳

۲-۶) توابع ساختار و مقیاس بیورکن ۳۶

۲-۷) گلئون‌ها، مقیاس بیورکن ۳۹

۲-۸) تابع ساختار پروتون در تقریب LO ۴۲

۲-۹) تابع ساختار پروتون در تقریب NLO ۴۵

فصل سوم: بررسی اثر EMC و توابع ساختار نوکلئون‌های مقید ۵۵

مقدمه ۵۵

۳-۱) اثر EMC ۵۵

۳-۲) فرمولبندی مدل درهم‌روی هسته‌ای برای محاسبه تابع ساختار هسته‌ای ۵۹

۳-۳) محاسبه تابع ساختار هسته‌ای و نسبت EMC ۶۴

۳-۴) استفاده از تابع موج نوسانگر هماهنگ برای محاسبه تابع توزیع تکانه نوکلئون‌ها درون هسته ۶۷

فصل چهار: بررسی نقش انرژی بستگی و حرکت فرمی در اثر EMC و توابع ساختار هسته‌های ^{4}He، ^{12}C و ^{40}Ca و همچنین محاسبه ی سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی ناکشسان ژرف الکترون از هسته‌های فوق ۷۰

مقدمه ۷۰

۴-۱) بررسی تابع ساختار هسته‌های ^{4}He، ^{12}C و ^{40}Ca ۷۰

۴-۲) بررسی نسبت EMC هسته‌های ^{4}He، ^{12}C و ^{40}Ca ۷۸

۴-۳) بررسی سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی ناکشسان ژرف الکترون از هسته‌های ^{4}He، ^{12}C و ^{40}Ca ۸۳

نتایج ۹۲

مراجع ۹۳

مقدمه

تابع ساختار هسته چگونگی توزیع بار در داخل هسته را نشان می‌دهد. یکی از راه‌های شناسایی ساختار داخلی هسته‌ها مطالعه توزیع زاویه‌ای ذرات باردار بدون ساختار داخلی پراکنده شده از هسته‌ها در انرژی‌های بالا است. اهمیت انرژی‌های بالا در این است که ساختار داخلی نوکلئون‌ها نیز در آن مطرح می‌شود در این نوع پراکندگی ناکشسان ژرف[۱] به علت برقراری برهمکنش ضعیف الکترومغناطیسی، فوتون مجازی تبادلی می‌تواند مقدار زیادی تکانه به کوارک داخل نوکلئون انتقال دهد بدون اینکه محیط هسته را بطور شدید برهم بزند [۴۴]. به همین‌خاطر در دهه ۱۹۶۰ آزمایش‌های زیادی[۳۳] به منظور اندازه‌گیری سطح مقطع پراکندگی الکترون از پروتون انجام گرفت ولی اولین اندازه‌گیری سطح مقطع پراکندگی الکترون از پروتون که نشان دهنده‌ی وجود ساختار داخلی برای پروتون‌ها بود توسط تیمی به سرپرستی بوم[۲] [۳۴] در آزمایشگاه شتاب دهنده‌ی خطی دانشگاه استانفورد صورت گرفت که آنها موفق به اندازه‌گیری سطح مقطع پراکندگی الکترون - پروتون با انرژی باریکه‌ای ۷ GeV–۱۷ و با Q^2= 7.4 GeV^2 در زاویه ۶ و ۱۰ درجه پراکندگی شده بودند. مقالات زیادی در توصیف نظری این پدیده منتشر شد که از جمله می توان به مقاله بریدنبچ[۳] و همکاران[۱۷] از انستیتوی تکنولوژی ماساچوست اشاره کرد که در آن نتایج حاصل از پراکندگی فوق مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله تیم آنها دریافته بود برای توضیح نتیجه این آزمایش وجود توابع ساختار نه تنها حتمی بوده بلکه فقط تابعی از مقیاس x می باشد که اینک به مقیاس بیورکن[۴] معروف شده بود که یک سال قبل یعنی در سال ۱۹۶۸ چنین رفتاری توسط بیورکن پیش‌گویی شده بود[۲۶] .در این میان اولین کسی که راه حل کاملی برای فهم مقیاس بیورکن ارائه کرد ریچارد فاینمن از انستیتوی تکنولوژی کالیفرنیا بود[۳] که پروتون را تشکیل یافته از سه ذره بنام پارتون[۵] در نظر گرفته بود و سطح مقطع پراکندگی حاصل از پروتون را از جمع غیره همدوس سطع مقطع پراکندگی الکترون از این سه تا ذره که انتظار می رفت همان کوارک‌ها با اسپین $\frac{1}{2}$ باشند که گلمن[۸] در سال ۱۹۶۴ وجود آنها را پیش‌گویی کرده بود، بدست آورد و نشان داد که در انرژی‌های بالا مقیاس بیورکن همان درصد تکانه و انرژی از پروتون است که توسط یک پارتون حمل می‌شود.

---

۱. Deep Inelastic Scattering ۲. Boom ۳. Breidenbach ٤. Bjorken ٥. Parton

پراکندگی الکترون از این پارتون‌ها، کشسان کامل در نظر گرفته می‌شد و اندازه سطح مقطع آن به اندازه تابع توزیع $q_i(x)$ که همان احتمال یافتن پارتون i با کسر تکانه x در داخل پروتون است، وابستگی داشت و انتظار می‌رفت پارتون‌ها تمام تکانه و انرژی پروتون را حمل کنند اما آزمایش و قوانین جمع نشان می-داد که پارتون‌ها در حدود ۵۰٪ از تکانه و انرژی پروتون را حمل می‌کنند بنابراین سهم کوارک‌های دریا و گلئونها در توابع ساختار نمی‌توانست قابل اغماض باشد و آزمایش‌های بعدی نشان داد در نزدیکی $x=0$ نقش اصلی با گلئون‌ها و کوارک‌های دریا است و پارتون‌های ظرفیت در این ناحیه تقریباً هیچ نقشی را بازی نمی‌کنند. در ضمن اساس این نظریه بر آزاد بودن پارتون‌ها استوار بود یعنی الکترون از پارتونی پراکنده می‌شود که هیچ همبستگی با پارتون‌های دیگر ندارد و بعدها نشان داده شده وقتی که $Q^2\to\infty$ همبستگی یا برهمکنش بین کوارکها از بین می‌رود. همچنین نشان داده شد[۲۷] این رفتار آزاد مجانبی[۱] ناشی از نوع برهمکنش است که بین پارتون‌ها که دیگر به کوارک معروف شده بودند، برقرار است و این برهمکنش بر خلاف برهمکنش بین بارهای الکتریکی با دور شدن کوارک‌ها افزایش می‌یابد و در واقع این برهمکنش مسئول برهمکنش‌های قوی بین هادرون‌ها است.

تا اوایل دهه ۸۰ مطالعه ساختار داخلی هادرون‌ها بر پایه ساختار کوارکی به خوبی پیش می رفت و تقریباً تصویر روشنی از ساختار داخلی هادرون‌ها بخصوص پروتون‌ها بدست آمده بود و سهم هر یک از کوارک‌های ظرفیت، کوارک‌های دریا و گلئون‌ها در توابع ساختار مشخص شده بود. بنابراین انتظار می-رفت خصوصیت نوکلئون‌های مقید بر پایه ساختار کوارک – گلئونی و نیروی حاکم بر آنها قابل فهم و محاسبه باشند. ولی آزمایشی که در سال ۱۹۸۲ و ۸۳ توسط تیمی به سرپرستی آلبرت[۲] [۴۵] در سرن[۳] انجام شد، نتایج تعجب برانگیزی را نشان داد و آن این بود که تابع ساختار نوکلئون‌های آزاد و مقید تفاوت‌هایی داشتند. هر چند فیزیک نهفته در این آزمایش نمی‌توانست با آزمایش پراکندگی الکترون از پروتون که در سال ۱۹۶۹ در آزمایشگاه شتاب دهنده خطی استانفورد صورت گرفت، رقابت کند ولی پایه تحقیقات نظری و تجربی فراوانی شد و چندین دلیل برای آن ارائه گشت که اولین آنها اثر حرکت فرمی بود که سهم عمده‌ای در تابع ساختار هسته‌ها و رفتار آنها در x های نزدیک به یک داشت. در این مدل تابع ساختار هسته از جمع غیر همدوس توابع ساختار نوکلئون‌های تشکیل دهنده‌ی آن به دست می آمد[۵۰و۳] و نشان داده شد که اثر انرژی پیوستگی را می توان در این مدل وارد کرد[۳] که نتایج حاصل بسیار جالب بود (رجوع شود به شکل‌های ۲– ۹ و۱۰). با این حال مسیر طولانی در راه بود چرا که در x های کوچک آنچه به دست می آمد از جمع غیره همدوس توابع ساختار پیروی نمی‌کرد و سطح مقطع حاصل بسیار کمتر از حد انتظار بود و بعد از تحقیقات فراوان مشخص شد که دلیل این اختلاف ناشی از

۱. Asymptotic Freedom ۲. Aubert ۳. Cern

وجود اثر سایه است که نتایج خوبی در توصیف این پدیده در x های کوچک به دست می داد. در ناحیه‌ای که اثر[۱] EMC بزرگتر از یک می شد نیز نشان داده شد که دریای مزونی در این ناحیه سهیم است [۲۱] که نقشی مخالف با اثر سایه بازی می کند. همچنین با توجه به اینکه سهم محتویات غیره نوکلئونی در تابع موج هسته‌ها شناخته شده بود بنابراین انتظار نقش داشتن ذره دلتا در اثر EMC می رفت و سهم آن در توابع ساختار اسپینی هسته‌ها به صورت مفصل مورد بررسی قرارگرفته است[۳۸]. با توجه به اینکه تابع موج هسته بر پایه کوارک‌های تشکیل دهنده‌ی آن باید پادمتقارن باشد انتظار سهم تبادلی کوارکی در این اثر وجود داشت که برای اولین بار توسط جفی[۲] و هدبوی [۴۰] مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که سهم قابل توجه در حدود چند درصد در اثر EMC دارد. در این پایان نامه اثر حرکت فرمی و اثر انرژی بستگی پایه تحقیق ما قرار گرفته تا بتوانیم توابع ساختار و سطح مقطع دیفرانسیل پراکندگی لپتون‌ها از هسته‌های ^{40}Ca, ^{4}He, ^{12}C را مورد بررسی قرار دهیم. برای این منظور ابتدا در فصل اول مروری داریم بر ذرات بنیادی و کوارک‌ها و در فصل دوم تابع ساختار نوکلئون-های آزاد و مقید مورد بررسی قرار می‌دهیم. و سهم هر یک از کوارک‌های ظرفیت، دریا و گلئون‌ها را با استفاده از توابع توزیع گروه GRV [۲۹] بدست می‌آوریم (رجوع شود به شکل‌های ۲-۱۲و ۱۳) و سپس در فصل سوم مروری اجمالی به نقش پدیده‌هایی که در اثر EMC نقش دارند و در بالا به آنها اشاره شد می پردازیم و در فصل چهارم توابع ساختار و نسبت EMC و سطح مقطع دیفرانسیل پراکندگی هسته-های فوق را با در نظر گرفتن اثر حرکت فرمی و انرژی بستگی به دست می‌آوریم و نتایج حاصل را که با نتایج تجربی هم خوانی خوبی دارند را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱. European Muon Collaboration ۲. Jaffe

فصل اول:

مروری بر ذرات بنیادی و کوارک‌ها

مقدمه

در سال ۱۹۳۲ فیزیکدانان چهار ذره‌ی مختلف را به عنوان ذرات تشکیل دهنده‌ی ماده‌ی معمولی و همین طور تابش الکترومغناطیسی می‌شناختند این چهار ذره عبارتند از: الکترون، پروتون، نوترون و فوتون. عموما این ذرات را بنیادی فرض می‌کردند. بنیادی به این معنی که از اجزای کوچکتری تشکیل نشده‌اند. اما امروزه به خوبی معلوم شده است که تعداد این ذرات به اصطلاح بنیادی بیش از صد تا است و نیز می‌دانیم که بیشتر آنها، از جمله پروتون و نوترون، اصلا بنیادی نیستند.

از سال ۱۹۵۰ به بعد تعداد ذرات کشف شده رو به افزایش گذاشت و همه آنها ناپایدار و دارای طول عمر بسیار کوتاه بودند. این ذرات از برخورد ذرات پایدار، مثلا پروتون – پروتون، تولید شده و در کسر بسیار کوچکی از ثانیه مجدداً به یکی از ذرات آشنا تبدیل می‌شوند توصیف تجربی و سیر تاریخی این مطالب از حوصله این پایان نامه خارج است، و ما سعی خواهیم کرد که در این فصل بحث خود را به رده‌بندی کلی این ذرات محدود سازیم.

۱-۱) مدل استاندارد

فیزیک ذرات ترکیبات ماده و واکنش بین آنها را مورد مطالعه قرار می‌دهد. با گذشت زمان آگاهی و شناخت ما نسبت به ذرات تغییر یافته است و این شناخت در قالب نظریه‌های متفاوت ارائه شده‌اند. نظریه‌ی جدید مدل استاندارد نامیده می‌شود و سعی دارد همه پدیده‌های فیزیک ذرات را از نوع، ویژگی-ها و واکنش بین آنها توضیح دهد.

در مدل استاندارد دو نوع ذره ازسه نوع موجود به ترتیب لپتون‌ها و کوارک‌ها با اسپین یک دوم هستند و از رده‌ی فرمیونی محسوب می‌شوند. ذره نوع سوم دارای اسپین ۱ می‌باشد و از رده‌ی بوزن‌ها به حساب

می‌آید و به بوزن‌های پیمانه‌ای معروفند و نقش حاملین نیرو را در این نظریه دارند. در مدل استاندارد همه‌ی این ذرات، بنیادی فرض می‌شوند. یعنی آنها ذراتی هستند که نه ساختار داخلی دارند و نه دارای حالت برانگیخته می‌باشند. مثال مشهور در مورد لپتون‌ها، است که توسط فرآیند الکترومغناطیسی، یکی از چهار نیروی اساسی طبیعت، واکنش می‌کند. مثال دیگر نوترینو است که سبک بوده و از نظر بار خنثی می‌باشد. نوترینو در فرآیند واپاشی بتایی مشاهده شده است. نیروی عامل واکنش بتایی در هسته، واکنش ضیعف نامیده می‌شود. علاوه بر لپتون‌ها ذرات دیگری موسوم به هادرون‌ها (مانند نوترون و پروتون) در طبیعت وجود دارند منتهی از نظر مدل استاندارد بنیادی نیستند. به طور واضح‌تر، هادرون‌ها از کوارک ساخته شده‌اند. کوارک‌ها توسط برهمکنش قو ی در طبیعت شرکت می‌کنند. در مدل استاندارد لپتون‌ها و کوارک‌ها ذرات تشکیل دهنده‌ی ماده می‌باشند، و بوزون‌های پیمانه‌ای (فوتون‌ها، بوزون‌های W و Z و گلئون‌ها بین کوارک‌ها)حاملین نیرو در واکنش بین آنها هستند. همان طور که دیدیم ذرات را می‌توان در دو گروه هادرون‌ها و لپتون‌ها رده بندی کرد. گروه اول شامل ذراتی است که در برهمکنش قوی شرکت می‌کنند، مانند پروتون، نوترون و سه مزون π. بسیاری از هادرون‌ها در پرتوهای کیهانی و در شتاب دهنده‌ها کشف شده‌اند. هادرون‌ها دو نوع اند: مزونها و باریون‌ها. یکی ازویژگی‌های مزون‌ها، مانند مزون‌های π، مزون‌های k این است که به الکترون و پوزیترون، نوترینو و فوتون واپاشی می‌کنند. همه مزون‌ها دارای اسپین صحیح بر حسب واحدهای $\hbar$ هستند. رده ی دوم هادرون‌ها، باریون‌ها هستند که پروتون‌ها، نوترون‌ها و بسیاری ذرات دیگر را شامل می–شوند. هیپرون–ها (ذرات لانداΛ، سیگماΣ و کسی Ξ) و ذرات دلتا Δ فقط معدودی از باریون–ها هستند. همه‌ی این باریون‌ها سنگین‌تر از پروتون هستند(کلمه باریون به یونانی به معنای سنگین است). همه‌ی باریون‌ها به استثنای پروتون در نهایت واپاشیده می‌شوند. پس پروتون تنها ذره‌ای است که مطابق با برهمکنش قوی باقی می‌ماند. سایر ذرات باقیمانده بطور قوی برهمکنش نمی‌کنند. برای مثال، باریون لاندا (با جرم ۱۱۱۶ MeV)در 10^{-10} S به یک نوکلئون و یک پایون (مثلا پروتون و π^-)واپاشیده می‌شود. سپس در مرحله بعد پایون به نوترینو، الکترون و پروتون واپاشیده می‌شود. باریون‌ها در نهایت به پروتون و ذراتی می‌پاشند که نمی‌توانند در برهمکنش‌های قوی شرکت کنند. همه برهمکنش‌های آشنای ذرات بنیادی از قانون بقایی، پیروی می‌کنند که تعداد کل باریون‌ها منهای تعداد کل پاد باریون‌ها در خلال برهمکنش پایسته–اند. این قانون را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: به هر هادرون عددی بنام عدد باریونی B نسبت می دهیم. طبق تعریف، عدد باریونی پروتون و نوترون ۱ و از آن پاد پروتون و پادنوترون ۱– است.در مورد مزون‌ها B=0 است. قانون بقای عدد باریونی بیان می‌کند که مجموع همه‌ی این اعداد، یعنی عدد باریونی کل، در هر برهمکنشی بدون تغییر باقی می‌ماند. برای مثال، در واپاشی نوترون عدد باریونی اولیه عبارت است از ۱+ . عدد باریونی محصولات واپاشی نیز، که با عدد باریونی پروتون داده می‌شود، ۱+ است. اهمیت قانون بقای

عدد باریونی در فیزیک ذرات، هم سنگ قانون بقای بار الکتریکی است. بیان دیگر پایستگی عدد باریونی این است که باید پروتون پایدار باشد. بدون وجود این قانون بقا، پروتون می‌توانست به پوزیترون و پایون خنثی واپاشیده شود. در فیزیک ذرات هیچ قانونی جز بقای عدد باریونی، مانع از این واپاشی نیست. بنابراین پایداری پروتون مستقیما به این قانون بستگی دارد[۲۹].

۱-۲) لپتون‌ها

علاوه بر مزون‌ها و باریون‌ها ذرات دیگری وجود دارند که دارای اسپین یک دوم هستند و در برهمکنش قوی شرکت نمی‌کنند. این ذرات لپتون نامیده می‌شوند. تا حال شش لپتون شناخته شده است که به سه گروه زیر رده بندی می‌شوند:

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ e^-\end{pmatrix} \quad و \quad \begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu^-\end{pmatrix} \quad و \begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau^-\end{pmatrix}$$

که (e^- , μ^-, τ^-) الکترون، میون و تاو نامیده می‌شود و همه‌شان دارای بار Q=-e هست. سه لپتون خنثی یا نوترینو (ν_e, ν_μ, ν_τ) را به ترتیب نوترینوی الکترون، نوترینوی مو و نوترینوی تاو می‌نامند[۱۹] جرم لپتون‌های خنثی کوچک و در حد صفر است. پاد ذره‌ی لپتون‌ها را به ترتیب زیر نشان می دهیم:

$$\begin{pmatrix}e^+\\ \bar{\nu}_e\end{pmatrix} و \begin{pmatrix}\mu^+\\ \bar{\nu}_\mu\end{pmatrix} \quad و \quad \begin{pmatrix}\tau^+\\ \bar{\nu}_\tau\end{pmatrix}$$

لپتون‌های باردار هم در برهمکنش‌های الکترومغناطیسی و هم در برهمکنش‌های ضعیف شرکت می‌کنند، در صورتی که لپتون‌های خنثی (نوترینوها) فقط در برهمکنش‌های ضعیف شرکت می‌کنند.

۱-۳) کوارک‌ها

از مقایسه فراوانی هادرون‌ها با لپتون‌ها معلوم می‌شود که فراوانی هادرون‌ها بیشتر است، به طوری که تاکنون از لپتون‌ها فقط شش تا مشاهده شده است. این وضع مؤید این امر است که لپتون‌ها متفاوت از هادرون‌ها هستند و هادرون‌ها از واحدهای کوچکتر و بنیادی‌تری ساخته شده‌اند. این واحدهای کوچک کوارک نامیده می‌شوند که توسط مورای گلمن و جورج زویک از انستیتوی تکنولوژی کالیفرنیا در سال ۱۹۶۴ به صورت یک فرضیه مطرح شد. و بعدها به صورت مدل کوارکی هادرون‌ها به یک نظریه درست تبدیل شد[۲].

اگر چه کوارک‌ها نقش عمده‌ای در درک هادرون‌ها و برهمکنش‌های آنها بازی می‌کنند، اما ظاهرا مثل پایون‌ها و پروتون‌ها به صورت ذرات مستقل وجود ندارند. دلیل این موضوع چیست؟ آزمایش‌هایی که تاکنون انجام شده است، نشان می‌دهند که اگر کوارک‌ها به صورت ذرات مستقل وجود داشته باشند آنگاه بایستی لااقل ده برابر سنگین‌تر از پروتون‌ها باشند. برای اینکه دو کوارک را از هم جدا کنیم نیروی میان آنها با مربع فاصله‌ی میان آنها افزایش می‌یابد و این نیرو چون با گلئون‌ها سر و کار دارد اندکی قویتر است. ما فقط هنگامی که کوارک‌ها خیلی به هم نزدیکند یعنی در (10^{-13} cm) می‌توانیم محاسبات دقیقی را در QCD انجام دهیم. برای جدا کردن کوارک‌ها تا فواصل ماکروسکوپی انرژی خیلی زیادی لازم است. قدرتمندترین شتاب دهنده‌هایی که امروزه فیزیکدان‌ها بکار می‌برند فقط می‌توانند کوارک‌ها را تا فواصل تقریبا 10^{-11} cm از هم جدا کنند. برای اینکه کوارک‌ها به اندازه یک متر از هم دیگر جدا شوند، باید از شتاب دهنده‌ای که 10^{13} برابر قدرتمندتر است استفاده کنیم. حتئ شتاب دهنده‌ای که قطر آن برابر قطر دایره‌ی استوای زمین باشد نیز نخواهد توانست انرژی لازم برای جدا کردن کوارک‌ها تا فواصل ماکروسکوپی را تولید کند.

کوارک‌ها، مانند الکترون‌ها، ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$ اند و چنین ذراتی عموماً از اصل طرد پائولی پیروی می‌کنند اما یک استثنائ به نام ذره ی Δ^{++} وجود دارد که سعی خواهیم کرد با استفاده از نظریه رنگ برای کوارک‌ها آن را توجیه کنیم.

برای هر کوارک سه رنگ آبی، سبز و سرخ پیش بینی می‌شود و هر رنگ از همان امتیازی بر خوردار است که سایر رنگ‌ها دارند. برای مثال، تعداد کوارک‌های سرخ با کوارک‌های سبز برابر است. ریاضیدانان نام خاصی برای این پیکربندی انتخاب کرده‌اند که تک تایی نامیده می‌شود. به عبارت دیگر، این پیکربندی‌ها تحت گروه رنگ، یعنی گروهی با تمام تبدیلات ریاضی ممکن در فضای رنگ، تک تایی هستند. چون سه رنگ وجود دارد این گروه را SU(3) می‌نامند. کلاً کوارک‌های شناخته شده عبارتند از:

$$\binom{u}{d} \text{ و } \binom{c}{s} \text{و} \binom{t}{b}$$

که به اصطلاح هر کدام از کوارک‌ها را "طعم" نیز می‌نامند بار کوارک‌های t و c و u، $+\frac{2}{3}$ و b و s و d، $-\frac{1}{3}$ می‌باشد، و به ترتیب سر، دلربا، بالا، ته، شگفت و زیر نامیده می‌شوند. در جدول (۱-۱) ویژگی‌های کوارک‌ها همراه با جرم‌های شان نشان داده شده است.B عدد باریونی، S شگفتی، C دلربایی، $\tilde{B}$ قشنگی و T حقیقت برای کوارک‌ها می‌باشد که مقادیر آنها برای پادکوارک‌ها عکس این مقایر می‌باشد.

جدول (۱-۱) بار کوارک ها Q بر حسب e و جرم تقریبی آنها بر حسب GeV/c^2 را نشان می‌دهد.

نام	نما	جرم	Q	B	S	C	$\tilde{B}$	T
پایین	d	$m_d \approx 0.35$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
بالا	u	$m_u \approx 0.35$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
شگفت	s	$m_s \approx 0.5$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
دلربا	c	$m_c \approx 1.5$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	1	0	0
ته	b	$m_b \approx 4.5$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
سر	t	$m_t > 90$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	1

آزمایش‌هایی که در سال ۱۹۶۹ در مرکز شتاب دهنده‌ی خطی استانفورد (SLAC) در کالیفرنیا انجام شد، اطلاعات مفصلی در مورد ساختار کوارکی پروتون بدست داد. فیزیکدانان نه تنها توانستند بار کوارک داخل پروتون را تعیین کنند، بلکه سهم کوارک در تکانه داخل پروتون را که با سرعت حرکت می‌کرد، تعیین کردند. مشارکت نسبی هر کوارک در تکانه کل پروتون را با پارامتر x نشان می‌دهیم. مقدار این پارامتر بین ۰ و ۱ خواهد بود. اگر در پروتون کوارک‌ها بطور ضعیف مقید بودند پارامتر x هر کوارک نزدیک به $\frac{1}{3}$ بود. جالب اینجاست که آزمایش‌های SLAC نه تنها چنین نظری را تائید نکردند. بلکه، پارامتر x از هر پراکندگی به پراکندگی دیگر تغییر می‌کرد. یعنی، هر کوارک حامل مقدار ثابتی از تکانه کل پروتون نیست.

بنا به یکی از قوانین بنیادی فیزیک، تکانه کل یک دستگاه برابر است با مجموع تکانه‌های تک تک اجزای آن. بنابراین، مجموع تکانه‌ی تمام کوارک‌ها باید با تکانه کل پروتون برابر باشد. با آزمودن این قانون در مورد کوارک‌ها، به نتیجه عجیبی می‌رسیم. مجموع تکانه کوارک‌ها در هر پروتون به طور قابل توجهی از تکانه کل پروتون کوچکتر است: تقریباً ۵۰ در صد تکانه پروتون را کوارک‌ها به دست نمی‌دهند.

۱-۴) گلئون‌ها

یک راه برای توضیح اینکه چرا تکانه کوارک‌ها همان تکانه‌ی پروتونی که با سرعت نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کند نیست، این است که وجود ذرات دیگر را فرض کنیم. اگر چنین ذراتی وجود داشته

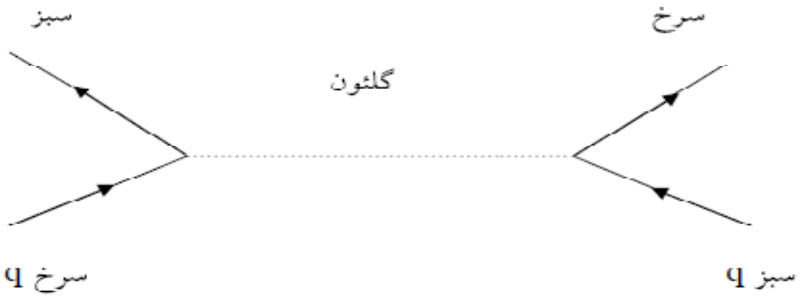
باشند باید در آزمایش‌های SLAC دیده نشده باشند و بایستی از لحاظ بار الکتریکی خنثی باشند، در غیر اینصورت با الکترون‌ها برهمکنش می‌کردند، زیرا در آزمایش‌های پراکندگی الکترون - پروتون فقط ذرات باردار دیده می‌شوند. معلوم شد که فرض وجود ذرات جدید فرض بسیار معقولی است. این ذرات جدید گلئون نام دارند که برای توضیح دینامیک کوارک‌ها در داخل پروتون الزامی است. گلئون‌ها بار الکتریکی ندارند و مستقیماً با الکترون‌ها برهمکنش نمی‌کنند، اما تکانه و انرژی دارند[۲۹و۲].

۱-۵) نظریه‌ی کرومودینامیک کوانتومی یا QCD

همچنان که گفتیم از این نظر که سه الکترون هرگز نمی‌توانند یک حالت مقید تشکیل بدهند اما سه کوارک ظاهراً به راحتی می‌توانند حالت مقید داشته باشند، باید یک اختلاف اساسی میان الکترودینامیک و مدل کوارکی وجود داشته باشد. چه نیرویی این پدیده عجیب را توجیه می‌کند؟ باید نیرویی وجود داشته باشد که با پیوند دادن سه کوارک به هم تشکیل باریون بدهد.

برای لحظه‌ای فرض کنید که نیروهای میان کوارک‌ها شبیه به نیروهای میان الکترون‌ها و پوزیترون‌ها باشد، به این معنی که بتوانیم نیروه‌ای کوارکی را با تبادل کوانتوم‌های مجازی، مثل فوتون‌های مجازی توصیف کنیم. این کوانتوم‌های مجازی را می-توانیم گلئون بنامیم. جفت شدن این گلئون‌ها به کوارک‌ها متناسب با بارهای رنگی کوارک‌ها می‌باشد.

بدین ترتیب، ما یک نوع الکترودینامیک فضای رنگ ساخته‌ایم که در آن باره‌ای رنگی نقش بار الکتریکی را بازی می‌کنند و گلئون‌ها به جای فوتون‌های مجازی می‌نشینند، اما جفت شدن گلئون‌ها به کوارک‌ها از جفت شدن فوتون‌ها به الکترون‌ها پیچیده‌تر است. زیرا هر زمان که فوتون با الکترون برهمکنش می‌کند، الکترون همان الکترون باقی می‌ماند، اما وقتی گلئون با کوارک برهمکنش می‌کند رنگ آن را تغییر می-دهد، برای مثال گلئون کوارک سرخ را به کوارک سبز تبدیل می‌کند (شکل۱-۱).



شکل (۱-۱) برهمکنش گلئون ها و کوارک ها، وقتی که گلئون ها و کوارک ها باهم برهمکنش می کنند رنگ آنها تغییر می کند.

گلئون‌ها را می توان بر حسب خاصیت حمل رنگ آنها مشخص کرد. سه رنگ مختلف امکان نه طریق جفت شدن میان کوارک‌ها و گلئون‌ها را فراهم می‌کنند:

سرخ→ سبز	سبز→سرخ	آبی→ سرخ
سرخ→ آبی	آبی → سبز	سرخ →سبز
سبز→ آبی	سرخ → آبی	سبز →آبی

توجه کنیم که سطر آخر از این نظر که در آنها رنگ‌ها تبدیل نمی‌شوند با سایر حالت‌ها فرق می‌کنند. به خصوص وضعی وجود دارد که نسبت به رنگ کاملاً متفاوت است این وضع عبارت است از:

سبز → سبز + آبی → آبی + سرخ → سرخ

ما این جفت شدن را در نظر نمی‌گیریم زیرا تغییر رنگ تولید نمی‌کند[1].

از این رو، تنها دو روی هم ریختن، مستقل از سه حالت آخر به حساب می‌آید که با شش حالت اول جمعاً هشت جفت شدگی مختلف تشکیل می‌دهد. اکنون فرض می کنیم که برای هر حالت یک گلئون جمعاً هشت گلئون مختلف وجود دارد.

یکی از مهمترین خواص کرومادینامیک کوانتومی این است که گلئون‌ها حامل رنگ‌اند.

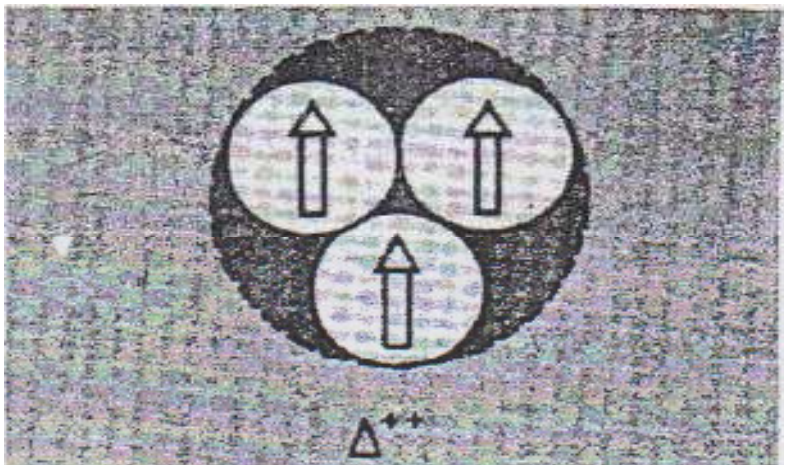
۱-۶) نظریه رنگ‌ها

اگر چه کوارک‌ها نقش عمده‌ای در درک هادرون‌ها و برهمکنش‌های آنها بازی می‌کنند، اما ظاهراً مثل پایون‌ها و پروتون‌ها به صورت ذرات مستقل وجود ندارند. دلیل این موضوع چیست؟ آزمایش‌هایی که در CERN تاکنون انجام شده است نشان می‌دهند که اگر کوارک‌ها به صورت ذرات مستقل وجود داشته باشند آنگاه بایستی لااقل ده برابر سنگین‌تر از پروتون‌ها باشند.

---

[1]- ریاضیدان ها این جفت شدن تحت گروه SU(3) را تک تایی در نظر می گیرند.

ویژگی دیگر نظریه‌ی کوارکی را می توان با استفاده از ذره‌ی Δ^{++} به عنوان یک مثال به بهترین وجه توضیح داد. جرم این ذره ۱۲۳۲MeV و شامل سه کوارک u است. چون اسپین‌های هر سه کوارک هم راستا هستند تکانه زاویه‌ای این ذره $\frac{3}{2}$ است (شکل ۱–۲)



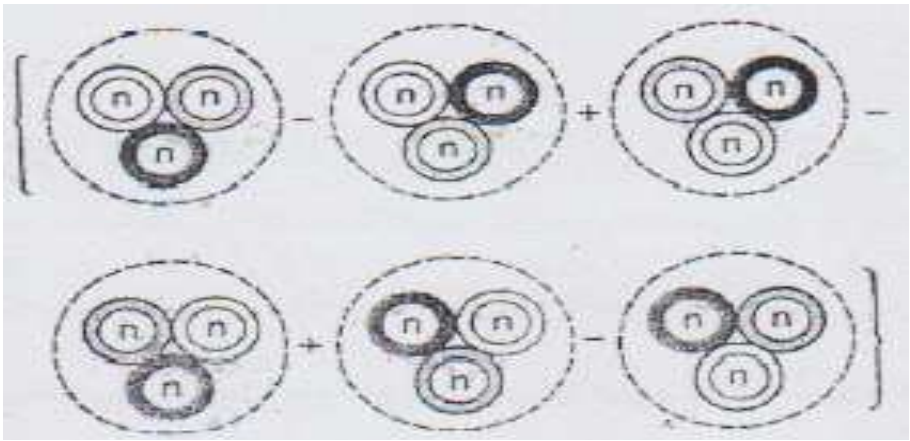
شکل ۱–۲. ذره Δ^{++} شامل سه کورک با اسپین‌های هم راستا است را نشان می‌دهد.

حال سکون باشند (این حالت ساکن را حالت پایه دستگاه می‌نامند). حال فرض کنید که دو کوارک در (شکل ۱–۲) را با یکدیگر عوض کنیم. چون هیچ تغییری در این تعویض ایجاد نمی‌شود، نتیجه می‌گیریم که این پیکربندی Δ^{++} متقارن است. تا اینجا ویژگی که می‌خواستیم توضیح بدهیم به صورت زیر است. کوارک‌ها، مثل الکترون‌ها، ذراتی با اسپین $\frac{1}{2}$ اند و ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$ عموماً از اصل طرد پائولی پیروی می‌کنند. بنا به اصل طرد پائولی دو ذره با اسپین $\frac{1}{2}$ فقط می‌توانند در پیکربندی پاد متقارن باشند. همواره تصور بر این بوده است که کلیه ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$ طبیعتاً از این اصل تبعیت می‌کنند. در نتیجه، پیکربندی Δ^{++} بر خلاف تصور عموم که نسبت به مبادله دو کوارک باید پاد متقارن باشد، متقارن ظاهر می‌شود. این اختلاف بیانگر پارادوکس بزرگی در نظریه کوارکی بود.

راههای زیادی برای توضیح این جنبه‌ی گیج کننده‌ی حالت Δ^{++} مطرح شد. اما هیچ کدام از آنها موفق نبود. راه حل دیگر مستثنی کردن این ویژگی پیکربندی Δ^{++} از اصل طرد پائولی است، یعنی اینکه شاید این اصل در مورد کوارک‌ها صادق نباشد. این درست همان چیزی است که در سال ۱۹۶۵ توسط گرینبرگ[۲۹] فیزیکدان آمریکایی و کمی بعد از او، به صورت دیگری، توسط هان و نامبو[۲۹] مطرح شد.

برای غلبه بر مشکلی که اصل پائولی با آن مواجه است راه ساده‌ای وجود دارد و آن این است که فرض کنیم هر کوارک دارای سه رنگ می‌باشد. از این رو، برای مثال، کوارک u به سه رنگ سرخ و سبز و آبی ظاهر شود. اکنون با استفاده از کوارک u در سه رنگ مختلف، آن طور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، می‌توانیم پیکربندی Δ^{++} را مشخص کنیم. چگونه این موضوع، مشکل اصل طرد پائولی را حل می‌کند؟ اگر هر کوارک سه رنگ داشته باشد، ترتیب رنگ‌ها به گونه‌ای که پیکربندی Δ^{++} نسبت به مبادله کوارک‌ها پاد متقارن باشد، کار ساده است. ما صرفاً باید اطمینان حاصل کنیم که این پیکربندی بر حسب عدد کوانتومی رنگ، پادمتقارن است. برای این کار، پیکربندی Δ^{++} را به صورت برهمنهش شش حالت مختلف (شکل ۱-۳) می‌نویسیم. هر حالت با تعویض جای دو کوارک رنگی به حالت اول به دست می‌آید.

برای مثال، حالت دوم را می‌توان با تعویض کوارک‌های سبز و سرخ و تغییر ندادن جای کوارک آبی از حالت اول به دست آورد. چون علامت شش حالت متناوب است، مجموع آنها نسبت به مبادله هر زوج کوارک، همان طور که اصل طرد ایجاب می‌کند، پاد متقارن خواهد بود. می‌توانیم این ایده را طوری تعمیم بدهیم که همه باریون‌ها، یا به عبارت دیگر، همه پیکربندی‌های کوارکی کلاً نسبت به رنگ، پاد متقارن باشند، برای مثال، می‌توان پیکربندی پروتون را از پیکربندی Δ^{++} شکل (۱-۳) با تعویض یکی از کوارک‌های u یا d و آرایش مجدد اسپین‌ها به گونه‌ای که ذره با اسپین $\frac{1}{2}$ تشکیل شود، به دست آورد[۲۹و۲].



شکل (۱-۳). پیکربندی کوارکی ذره Δ^{++} شامل شش حالت مختلف با علامت متناوب. جمع این حالتها نسبت به مبادله‌ی دو کوارک، پادمتقارن است. (سه رنگ با سه سایه متفاوت نشان داده شده است).