بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران مرکزی
دانشکده علوم پایه ، گروه فیزیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش: ذرات بنیادی و نظریه میدانها

عنوان:

بررسی محبوس شدگی کوارک در گروه پیمانه ای$SU(3)$ با استفاده از تک قطبی مغناطیسی و ورتکس.

استاد راهنما:

دکتر شهنوش رفیع بخش

استاد مشاور:

دکتر محمد رضا تنهایی

دانشجو:

احسان عبادتی

تابستان ۱۳۹۱

ISLAMIC AZAD UNIVERSITY
Central Tehran Branch

Faculty of Science –Department of Physics
"M.Sc" Thesis
On Elementary Particles and Fields Theory

Subject:

An Investigation of the Quark Confinement by the usage of Vortex and Magnetic Monopole in SU(3) Symmetry Group

Advisor:

Dr. Shahnoosh Rafibakhsh

Consulting Advisor:

Dr. Mohammad Reza Tanhayi

By:

Ehsan Ebadati

Summer 2012

با سپاس و قدردانی از استاد فرهیخته

سرکار خانم دکتر رفیع بخش

تقدیم به پدر عزیز

و مادر مهربانم .

فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده:..... ۱

فصل اول: مقدمه:..... ۲

فصل دوم: مفاهیم پایه:..... ۹

۲-۱مقدمه:..... ۹

۲-۲ تفاوت برهمکنش ها در QED و QCD :..... ۱۱

۲-۲-۱ بررسی گروههای تقارنی SU(۲) و SU(۳):..... ۱۴

۲-۳ خلأ کرومودینامیک کوانتومی :..... ۱۶

۲-۴ حلقه ویلسون:..... ۱۸

۲-۵ چند گانگی و مرکز گروه:..... ۲۵

۲-۶ فرم دیفرانسیلی:..... ۲۶

۳-۶ عملگر دوگان هادج:..... ۲۷

فصل سوم : شکست خود به خودی تقارن:..... ۲۹

۳-۱ مقدمه:..... ۲۹

۳-۲ شکست خود به خودی تقارن در گروه U (۱) :..... ۳۰

۳-۲-۱ سازوکار گلدستون:..... ۳۲

۳-۲-۲ سازوکار هیگز:..... ۳۵

فصل چهارم : ابررسانایی:..... ۳۷

۴-۱ مقدمه:..... ۳۷

۴-۲ ابررسانایی نوع یک :..... ۳۸

۴-۳ معادله لندن و طول همدوسی:..... ۴۴

۴-۴ ابر رسانای نوع دوم و کوانتیزه شدن شار مغناطیسی در یک ابررسانا:..... ۴۵

۴-۵ استفاده از مدل ابررسانای دوگان درQCD :..... ۴۸

فصل پنجم: ورتکس ها و تک قطبی های مغناطیسی :..... ۵۱

۵-۱ مقدمه:..... ۵۱

۵-۲ ورتکس ها: ۵۲
۵-۳ تک قطبی مغناطیسی: ۵۵
۵-۴ تک قطبی دیراک: ۵۵
فصل ششم: سهم تک قطبی مغناطیسی در حلقه ویلسون: ۶۱
۶-۱ مقدمه: ۶۱
۶-۲نظریه استوکس غیر آبلی: ۶۳
۶-۳ باز بینی نظریه استوکس غیر آبلی: ۷۱
۶-۴ تک قطبی مغناطیسی و حلقه ویلسون: ۷۶
۶-۴-۱ بررسی جریان مغناطیسی در$D=4$: ۸۳
۶-۵ تک قطبی مغناطیسی و ورتکس: ۸۵
ضمیمه: ۱۰۰
ساخت ترازهای همدوس از میدانهای رنگی: ۱۰۰
فهرست منابع ۱۱۱

فهرست شکل ها و نمودارها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱ ..... ۵
شکل ۲-۱ ..... ۱۷
شکل۳-۱ ..... ۳۱
شکل ۳-۲ ..... ۳۴
شکل ۳-۳ ..... ۳۴
شکل۴-۱ ..... ۴۹
شکل۴-۲ ..... ۴۹
شکل۵-۱ ..... ۵۷
شکل۵-۲ ..... ۵۸
شکل۶-۱ ..... ۶۴
شکل۶-۲ ..... ۷۹
شکل۶-۳ ..... ۸۱

چکیده:

در این پایان نامه ، یک تعریف ناوردای پیمانه ای از ورتکس در نظریه یانگ میلز$SU(۳)$ بدون استفاده از فرآیند تثبیت پیمانه ای ارائه می شود. با استفاده از این تعریف ، تک قطبی های مغناطیسی با بار مغناطیسی کسری در مرز سطح ورتکس ظاهر می شوند که در کنار هم و با استفاده از قضیه استوکس غیر آبلی در فضا – زمان چهار بعدی مسئول محبوس شدگی کوارک هستند . در این تحقیق از روش دیاکنوف-پتروف در قضیه استوکس غیر آبلی استفاده می شود که باعث بوجود آمدن یک شکل آبلی برای عملگر غیر آبلی حلقه ویلسون می گردد و همین امر بوجود آمدن تک قطبی مغناطیسی و سپس ورتکس را تضمین می کند. مدلی که در این پایان نامه از آن استفاده می شود، یک مدل پدیده شناختی است که با استفاده از قضیه استوکس غیر آبلی عملگر حلقه ویلسون را به دو قسمت الکتریکی و مغناطیسی تجزیه می کند و وجود تک قطبی مغناطیسی را از بخش مغناطیسی این عملگر اثبات می کند. این موجودات توپولوژیکی (تک قطبی های مغناطیسی و ورتکس ها) خصوصیت مهم وابستگی پتانسیل خطی بین کوارکها به چندگانگی هر نمایش را بطور صحیح پیش بینی می کنند. در نهایت این مسأله مورد توجه قرار می گیرد که وجود جواب های بدیهی و غیر بدیهی برای عملگر حلقه ویلسون ،مربوط به جهت دار و یا غیر جهت دار بودن سطوح ورتکسی می باشد و این ورتکس های غیر جهت دار هستند که برای بررسی محبوس شدگی مناسب می باشند.

فصل‌اول: مقدمه

در سال ۱۹٦٤ گلمن و زویگ[۱] مدلی ارائه کردند که بیان می داشت تمامی هادرون ها از ذرات بنیادی تری تشکیل شده اند، این اجزا توسط گلمن کوارک[۲] نامگذاری شدند[۱]. بر طبق این نظریه کوارکها دارای سه طعم بالا[۳] با بار ۱/۳ , پایین[٤] با بار ۱/۳- و شگفت[٥] با بار ۱/۳- بودند و همچنین برای هر کوارکq پاد کوارک آن$\bar{q}$ با علامت بار مخالف در نظر گرفته شد. بنابر مدل کوارک، هر باریون[٦] از سه کوارک تشکیل شده است وهر مزون[۷] مرکب از یک جفت کوارک-پادکوارک می باشد. مدل کوارک با اینکه در بسیاری از موارد مدل خوبی می باشد، ولی از نابسامانی عمیقی رنج می برد. به رغم جستجوی گسترده هیچ کوارک مجزایی تاکنون مشاهده نگردیده است. برای مثال اگر طبق این نظریه، پروتون از سه کوارک ساخته شده است، می توان تصور نمود که اگر چیزی را محکم به آن بکوبیم کوارک ها از آن به بیرون می جهند. اما حتی اگر تمامی کوارکها در داخل هادرون ها گیر کرده باشند، باز هم مطالعه آنها نباید دور از دسترس باشد. می توان داخل پروتون را به همان طریقی که رادرفورد[۸] درون اتم را بررسی نمود -با شلیک چیزهای به درون آن- کاوید. آزمایشهایی از این نوع در مرکز شتاب دهنده خطی استنفورد[۹] انجام شدند. همچنین محققین، آزمایش را در اوایل دهه هفتاد با استفاده از باریکه نوترینو[۱۰] در سرن[۱۱] و سپس با استفاده از پروتون ها تکرار کردند.[۲]. نتایج این آزمایشها که

---

[۱] Gell-Mann & Zweig
[۲] Quark
[۳] Up
[٤] Down
[٥] Strange
[٦] Baryon
[۷] Meson
[۸] Rutherford
[۹] SLAC
[۱۰] Neutrino
[۱۱] Cern

به "پراکندگی ناکشسان عمیق"[1] معروف است، به طور شگفت آوری یاد آور نتایج آزمایش رادرفورد می باشد اغلب ذرات مستقیماً عبور می کنند و تعداد کمی از آن ها به عقب باز می گردند. این بدان معناست که بار پروتون در قطعات کوچکی متمرکز شده است درست به مانند نتایج آزمایش رادرفورد که بیانگر این مسأله بود که بار مثبت اتم در هسته آن متمرکز شده است. به هر حال در مورد پروتون، شواهد بر این است که که به جای یک قطعه، سه قطعه در آن وجود دارد. بدیهی است که این امر تأییدیه محکمی بر مدل کوارکی است ولی هنوز قطعی نیست. سرانجام یک ایراد نظری بر مدل کوارکی وارد بود و آن این بود که به نظر می رسید که این مدل، اصل طرد پاولی را نقض کند. این اصل برای ذرات با عدد اسپینی نیمه صحیح بکار می رود و بیان می دارد که هیچ دو ذره با اسپین یکسان نمی توانند در یک حالت قرار گیرند که کوارک ها نیز با توجه به عدد اسپنی نیمه صحیح خود از آن دسته هستند. در سال ۱۹٦٤ گرینبرگ[2] راهی را برای گذر از این معضل بیان داشت و آن این بود که کوارکها نه تنها در سه طعم u,d,s هستند بلکه می توانند هر سه رنگ قرمز، سبز و آبی را داشته باشند. واژه رنگ ربطی به معنی لغوی خود در اینجا ندارد بلکه فقط بیانگر یکی از ویژگیهای کوارک می باشد. به هر حال اصطلاح رنگ دارای یک جنبه زیباست زیرا بیان می دارد که تمامی ذرات موجود در طبیعت بی رنگ هستند. می توان گفت تا سال ۱۹۷٤ بیشتر فیزیکدانان ذرات بنیادی احساس ناراحت کننده ای در مورد مدل کوارک داشتند. آنچه به نوعی این مدل را نجات داد، کشف مزون اپسی Ψ بود. آنچه این ذره را غیر عادی می ساخت تنها وزن سنگین آن نبود، بلکه نیمه عمر نسبتاً زیاد آن بود که این خود منجر به کشف کوارک افسون[3] گردید ولی مسأله بدینجا ختم نگردید و چندی بعد مزون سنگین دیگری و کوارک پنجم آن b[4] ، و در تابستان سال ۱۹۸٤ کوارک t[5] کشف گردیدند. پس اگر پروتون ها، نوترون ها و مزون ها ساختار مرکبی داشته باشند، دلیلی وجود ندارد که معتقد باشیم برهمکنش مابین آنها باید ساده باشد. برای بررسی نیروهای قوی در سطح بنیادی، باید بر همکنش بین کوارک های منزوی را بررسی کرد. در اینجا سؤال این است که ذره واسطه مابین کوارکها چه ذره ای است؟ این واسطه گلوئون[6] نام

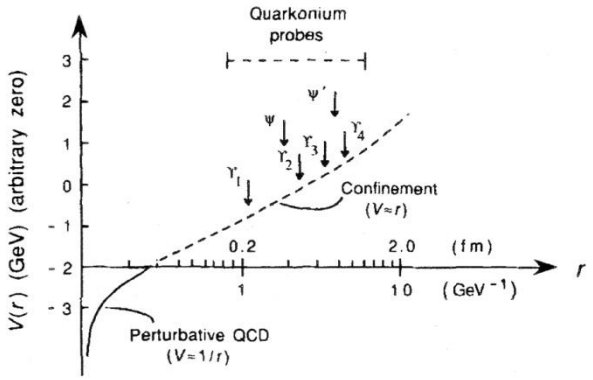
[1] Deep Inelastic Scattering
[2] Greenberg.O
[3] Charm
[4] Bottom
[5] Top
[6] Gluon

دارد و در مدل استاندارد[۱] ۸ نوع از آن وجود دارد و حامل رنگ می باشند. شواهد تجربی غیر مستقیم معتبری دال بر وجود گلوئون ها وجود دارد. آزمایش های پراکندگی ناکشسان ژرف نشان داده اند که تقریباً نصف تکانه یک پروتون توسط موجودی که به لحاظ الکتریکی خنثی می باشد، حمل می شود که گلوئون نامگذاری شده است. بنابراین در کرومودینامیک کوانتومی، رنگ، نقش بار را دارد و در آن گلوئون ها نقش ذرات واسطه را بازی می کنند. تا اینجا کرومودینامیک بسیار شبیه الکترودینامیک است اما تفاوت عمده دیگری وجود دارد و آن وجود سه نوع رنگ در کرومودینامیک می باشد. چون رنگ پایسته است پس باید اختلاف رنگ ما بین کوارکها توسط گلوئون ها حمل شود. یکی از پیروزیهای بزرگ کرودینامیک کشف این مهم است که در این نظریه، عددی که نقش ثابت جفت شدگی را بازی می کند همیشه ثابت نیست ؛ بلکه بستگی به فاصله میان ذرات بر همکنش کننده دارد. در فواصل زیاد این عدد نسبتاً بزرگ و در فواصل کوچک (کمتر از اندازه پروتون)، کوچک می شود این پدیده که از آن به عنوان آزادی مجانبی[۲] یاد می شود، بدین معنی است که در داخل پروتون کوارک ها بدون برهمکنش زیاد، به این طرف و آن طرف می روند.در اینجا می خواهیم به بررسی مختصر مدل کوارکونیوم[۳] از حالت های مقید بپردازیم: در مدل کوارک همه مزون ها دارای حالت مقید دو ذره ای $\bar{q}\ q$ هستند. یک مشکل این مدل این است که در آن برخلاف مدل هیدروژنی (e^+p^-) و پوزیترونیوم (e^+e^-) که در آن ها تمامی نیروهای مؤثر الکترومغناطیسی به خوبی شناخته شده اند، کوارک ها را نیروی قوی به یکدیگر پیوند می دهد. نمی دانیم به جای قانون کولنی از چه پتانسیلی در این محدوده باید استفاده شود یا مشابه قوی مغناطیسی چیست تا جفت شدگی اسپین را بدست آوریم. البته می توان حدس هایی قریب به یقین زد زیرا ساختار کرومودینامیکی شبیه ساختار الکترودینامیک می باشد؛ به جز بعضی جملات غیر خطی که به خاطر آزادی مجانبی احتمالاً سهم چندانی در فواصل کوتاه ندارند، به زبان QCD در رفتار فاصله های کوتاه، تبادل یک گلوئون غالب است، همانطوری که در QED تبادل یک فوتون حاکم می شود. فعلاً نکته اساسی این است که در برد کوتاه انتظار پتانسیل کولنی $\frac{۱}{r}$ در V داریم که به لحاظ کیفی شبیه اتم هیدروژن و پوزیترونیوم است و می توان با استفاده از روش اختلالی به بررسی آن پرداخت.

[۱] Standard Model
[۲] Asymptotic Freedom
[۳] Quarkonium

ولی در فواصل زیاد مجبوریم تا به محبوس شدگی[۱] کوارک ها بپردازیم. در این ناحیه، پتانسیل باید بدون محدودیت، متناسب با فاصله افزایش یابد. سالها گمان مي شد که شکل دقیق تابع V(r) در r بزرگ تا اندازه ای حدسی است، اما شبیه سازي کامپیوتري توسط کرویتز[۲] در سال ۱۹۸۰ به همه گمان ها خاتمه داد[۳]. و ثابت شد که پتانسیل در نواحي دور به صورت خطي است. بدین ترتیب می توان شکل زیر را برای پتانسیل در نظر گرفت:

$$V(r) = -\frac{٤}{٣}\frac{\alpha_s}{r} + \sigma.r \qquad (١-١$$



شکل ۱-۱ [٤]

نمودار بالا پتانسیل بین کوارکها را نشان می دهد. و در فواصل کم، پتانسیل کولني است و با زیاد شدن فاصله دو کوارک از یکدیگر دیگر روش اختلالی نا کارآمد می شود و پتانسیل بصورت خطي است.

که در بالا α_s مشابه کرومودینامیکی ثابت ساختار[۳] ریز، و ٤/٣ عامل رنگ مربوط به آن است و σ مقاومت کشش ریسمان[٤] نامیده مي شود. در ناحیه اي که پتانسیل ها به صورت خطي هستند، نیرویي از جدا شدن کوارك ها از یکدیگر جلوگیري مي کند و تمامي کوارك ها داخل هادرونها محبوس هستند. اما به راستی محبوس شدگی چه معنایی دارد؟

[۱] Confinement
[۲] Creutz
[۳] Structure Constant
[٤] String Tension

از هنگامیکه نظریه وجود کوارک ها مطرح گردید، همواره وجود کوارک آزاد در طبیعت بصورت پرسشی بزرگ به عنوان یکی از دغدغه های علم فیزیک ذرات بنیادی وجود داشته است. همانطور که گفته شد، این نظریه برای محدوده انرژی های بالا (فواصل کم) قابل بررسی می باشد ولی در محدوده انرژی های کم و فواصل زیاد دچار مشکلاتی می شود. و عدم وجود کوارک آزاد يكي از اين مشكلات است. وجود ميدان های كوانتومی مابين كوارك ها باعث بوجود آمدن اين تفكر شده است كه هيچ ذره اي در طبيعت با بار رنگي وجود ندارد و تمامی ذرات موجود در طبيعت بصورت تک تايی های رنگی[۱] می باشند و بنابراين اين مسأله پذيرفتنی است كه در QCD كوارک ها محبوس هستند.

همانطور كه گفته شد، ثابت جفت شدگي در QCD با افزايش فاصله افزايش مي يابد و به همين دليل روش هاي اختلالي كارآمدي خود را در بررسي محبوس شدگي از دست مي دهند. از اين رو براي بررسي اين پديده نياز به يك سري روش جديد داريم كه يكي از آن ها استفاده از مدلهاي پديده شناختي[۲] است. امروزه مدل های پديده شناختي زيادی ارائه شده اند كه خلأ كوانتومی را متشكل از آرايش های ميدانی، می دانند. اين مدل ها با استفاده از موجودات توپولوژيكی كه از آنها می توان به ورتكسهای مركزی[۳] تک قطبيهای مغناطيسی[٤] و همچنين مرون ها[٥] اشاره كرد، كه به توصيف خلأ كرومودينامیك كوانتومي مي پردازند و هر كدام سهمي در پيدا كردن توضيحي براي محبوس شدگي دارند [٥]. در اين پايان نامه محبوس شدگی كوارک ها، با استفاده از مدل تک قطبی های مغناطيسی و ورتكس ها توضيح داده می شود. ورتكس ها موجوداتی توپولوژيک هستند كه شار مغناطيسی كوانتيزه را حمل می كنند و حلقه هايی بسته برای سه بعد و سطوح بسته در چهار بعد را شامل می شوند. تک قطبی های مغناطيسی نيز به عنوان موجوداتی توپولوژيک در نظر گرفته می شوند كه در سه بعد، نقطه و در چهار بعد به شكل حلقه های بسته می باشند، هر كدام از اين موجودات به تنهايی می توانند محبوس شدگی را توضيح دهند اما در بررسی محبوس شدگی با استفاده از تک قطبی های مغناطيسی مشكلاتی وجود دارد. به عنوان مثال هنگاميكه محبوس شدگی به وسيله اين موجودات بررسی می شود،

---

[۱] Color Singlets
[۲] Phenomenological Models
[۳] Centerl Vortices
[٤] Magnetic Monopoles
[٥] Merons

وابستگی کشش ریسمان در فواصل دور به چندگانگی نمایش[۱] از بین می رود [٤]. همچنین در بررسي تك قطبي هاي مغناطيسي از روشي به نام تثبيت پيمانه اي[۲] استفاده مي شود كه به صورت دستي در محاسبات وارد مي شود. در این پایان نامه با استفاده از قضیه استوکس غیر آبلی برای حلقه ای مانند C اثر همزمان ورتکس ها و تک قطبی های مغناطیسی را بر روی حلقه ویلسون[۳] بدون فرآیند تثبیت پیمانه اي بررسی می کنیم. این قضیه برای گروه پیمانه ای SU(۲) به عنوان قضیه استوکس غیر آبلی دیاکونوف- پتروف[٤] شهرت دارد و می توان این نظریه را برای گروههای SU(N) گسترش داد. با استفاده از این قضیه، انتگرال مسیر موجود در حلقه ویلسون- که بر روی مسیری حلقوی گرفته می شود- را به انتگرالی بر روی سطح تبدیل می کنیم. سپس جریان مابین کوارک ها را به دو بخش مغناطیسی و الکتریکی تقسیم می نماییم. نکته جالب توجه این است که در واقع این دو جریان همراه یکدیگر در یک تیوپ شار وجود دارند ولی هرگز با یکدیگر مخلوط نمی شوند. وسهم تک قطبی های مغناطیسی از قسمت مغناطیسی حلقه ویلسون استخراج شود. در فضا- زمان سه بعدی می توان بصورت سر راست یک سهم غیر بدیهی در حلقه ویلسون ایجاد کرد که باعث توضیح صحیح محبوس شدگی می گردد، اما در فضا -زمان چهار بعدی برای ایجاد این سهم با مشکل مواجه می شویم و در این حالت تک قطبی مغناطیسی نمی تواند مسئول محبوس شدگی کوارک باشد. برای رفع مشکل ایجاد شده، به دنبال یافتن سهمی برای ورتکس در قسمت مغناطیسی حلقه ویلسون هستیم؛ بطوریکه بتوانیم با استفاده همزمان از این دو آرایش به مشکل ایجاد شده فائق آییم. از این رو با استفاده از یک پتانسیل پیمانه ای که قدرت میدان تک قطبی را ایجاد می کند، پیکربندی ورتکس ایده آل[٥] را در فضا-زمان چهاربعدی ایجاد می کنیم و مشاهده می کنیم که تک قطبی مغناطیسی بر روی مرز ورتکس غیر جهتی[٦] ظاهر می گردد. در این حالت، سهم مغناطیسی عملگر حلقه ویلسون به صورت حاصلضرب شار ورتکس در عدد پیوند[۷] بین حلقه ویلسون و ورتکس ظاهر می شود.

---

[۱] N-Ality

[۲] Gauge Fixing

[۳] از يكديگر در نظر گرفته شوند . با گذشت R به طور ساده مي توان گفت كه اگر يك سيستم ايستا شامل كوارك و پادكوارك با فاصله زمان اين سيستم يك حلقه به نام حلقه ويلسون تشكيل مي دهد كه از آن مي توان پتانسيل بين جفت كوارك و پادكوارك را محاسبه كرد.

[٤] Diakonov – Petrov

[٥] Ideal Vortex

[٦] Non Oriented Vortex

[۷] Linking Number

برای مشاهده سهم غیر بدیهی که ورتکس یا تک قطبی مغناطیسی به حلقه ویلسون می دهند و منجر به وابستگی صحیح کشش ریسمان مجانبی به چندگانگی می گردد، لازم است که تک قطبی مغناطیسی از شرط کوانتش کسری پیروی کند. در این پایان نامه، ابتدا به شرح بعضی از مفاهیم که نقشی کلیدی را در نظریه محبوس شدگی QCD ایفا می کنند، پرداخته می شود . سپس در فصل سوم به بررسی انواع تقارن در مکانیک کوانتومی می پردازیم و آنها را با توجه به ویژگیهایشان دسته بندی می کنیم و جرمدار شدن فوتون را بررسي نموده تا بتوانیم ابررسانايي را مطالعه کنیم. در فصل چهارم با مفهوم و تعریف ابررسانایی، انواع ابررساناها و کوانتیزه شدن شار مغناطیسی در یک ابررسانا آشنا می شویم، این مفاهیم در نهایت منجر به تعریف ابررسانای دوگان می گردند که به عنوان مدلی مناسب برای حالت خلأ QCD کاربرد دارد. در فصل پنجم با تعریف ورتکس ها تک قطبی آشنا می شویم و به بررسی انواع آن می پردازیم. در فصل ششم ابتدا به بررسی نظریه استوکس غیر آبلی می پردازیم و ساخت ترازهای همدوس از میدان های رنگی در QCD را بررسی می کنیم و در نهایت به بازبینی قضیه استوکس غیر آبلی که منجر به تعریف جریانی الکتریکی- مغناطیسی در عملگر حلقه ویلسون تک قطبی ها می گردد، می پردازیم و در فصل آخر نتیجه گیري ارائه مي گردد.

فصل‌دوم: مفاهیم پایه

۲-۱مقدمه:

در این فصل به بررسی مفاهیم پایه مطرح شده در این پایان نامه می پردازیم. بررسی این مفاهیم از آن جهت مهم می باشد که می توان گفت کلیه نظریه محبوس شدگی کوارک ها بر روی این مفاهیم بنا شده است. در قسمت اول این فصل تفاوت مابین بر همکنش ها در QED[۱] و QCD[۲] مورد بررسی قرار داده شده اند. در این قسمت متوجه می شویم که تفاوت این بر همکنش ها تنها

[۱] Quantum Electro Dynamic
[۲] Quantum Chromo Dynamic

در تغییر ثابت جفت شدگی آنها نمی باشد بلکه بطور کلی ساختار میدانهای کوانتومی در این دو نوع برهمکنش متفاوت می باشد. با توجه به اینکه در QCD میدان ما بین کوارک ها میدانی رنگی در نظر گرفته می شود، بنابراین در برهمکنش های مربوط به آنها علاوه بر پارامترهایی که در QED در نظر گرفته می شوند خواص مربوط به رنگ ها هم لحاظ مي شوند که از نقطه نظر ریاضی این یعنی اینکه QCD باید در گروه غیر آبلي (۳)SU بررسي شود. همچنین با توجه به خواص تقارنی گروه (۳)SU نه حالت رنگی وجود دارند که فقط یکی از آنها بدون رنگ و ۸ ماتریس گلمن[۱] نیز وجود دارند که این ماتریس ها هستند که با خاصیت جابجایی خود منجر به تعریف ثابت ساختار[۲] می شوند که نقش مهمی را در QCD ایفا می کند. از این رو به صورت اجمالی به بررسی گروه های تقارنی (۲)SU و(۳)SU می پردازیم. در ادامه خلأ کرومودینامیك کوانتومی را بررسي مي کنیم و مدلی را مطالعه می کنیم که در آن خلأ به صورت دی الکتریک رنگی در نظر گرفته می شود. این مدل شباهت زیادی با ابررسانای دوگان[۳] دارد و این شباهت ما را به ساخت مدل خود نزدیک تر می سازد. و در آخرین بخش که بخشی مهم در این فصل است به تعریف موجودی به نام حلقه ویلسون[۴] می پردازیم در این قسمت ابتدا با در نظر گرفتن انتشارگر یک ذره منفرد که نقطه ساده ای برای شروع می باشد، بحث خود را شروع و در نهایت با گسترش آن برای سیستم های مزونی ایستا[۵]ی با جرم سنگین، به ساخت اپراتور حلقه ویلسون می پردازیم. در این بخش همچنین به تعریف اصطلاحاتی می پردازیم که بیشتر در فصل آخر مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

[۱] Gell-Mann
[۲] Structure Constant
[۳] Dual Super Conductor
[۴] Wilson Loop
[۵] Static

۲-۲ تفاوت برهمکنش ها در QED و QCD :

در این بخش می خواهیم به بررسی روند برهمکنش ذرات در کرومودینامیک کوانتومی بپردازیم. مي دانیم که الکترودینامیک کوانتومی برهمکنش ذرات باردار را توصیف می کند، واسطه بر همکنش های الکترودینامیکی کوانتومی توسط فوتون ها با ثابت جفت شدگی g_e تعیین می شود. این در حالیست که واسطه بر همکنش های کرومودینامیکی گلوئون ها هستند و شدت نیروی کرومودینامیکی به وسیله ثابت جفت شدگی قوی که با g_s نمایش داده می شود تعیین می گردد. همانگونه که در مقدمه بیان شد، کوارک ها در سه رنگ قرمز، سبز و آبی می باشند، بنابراین برای مشخص کردن یک حالت کوارک نه تنها به اسپینور دیراک -که تکانه و اسپین را به ما می دهد- احتیاج داریم، بلکه به یک بردار ستونی متشکل از سه جزء که رنگ کوارک را به ما می دهد نیز، نیاز داریم. این بردار در محاسباتی که بر اساس نمودار فاینمن می باشند، با C نشان داده می شود[٦]:

$$\text{برای قرمز} \quad c = \begin{pmatrix} ۱ \\ ۰ \\ ۰ \end{pmatrix}$$

$$\text{برای آبی} \quad c = \begin{pmatrix} ۰ \\ ۱ \\ ۰ \end{pmatrix}$$

$$\text{برای سبز} \quad c = \begin{pmatrix} ۰ \\ ۰ \\ ۱ \end{pmatrix}$$

اما در واکنش ما بین کوارک ها، رنگ آنها توسط چه موجوداتی حمل می شود؟ این گلوئون ها هستند که در واکنش کوارک-کوارک حامل اختلاف رنگ هستند. هر گلوئون حامل یک واحد رنگ و یک واحد پاد رنگ است. پس به نظر می رسد که ۹ نوع گلوئون وجود داشته باشد: $r\bar{r}\ , r\bar{b}\ , r\bar{g}\ \ , b\bar{r}\ , b\bar{b}\ , \bar{g}\ , g\bar{r}\ , g\bar{b}, g\bar{g}$. این نظریه ۹ گلوئونی اصولاً امکان پذیر است ، اما دنیایی که این نظریه توصیف می کند با دنیای ما بسیار متفاوت است. برحسب تقارن SU(۳) - که QCD بر اساس آن است- این نه حالت رنگ ، یک حالت هشتایي رنگ:

$$|١\rangle = \frac{r\overline{b} + b\overline{r}}{\sqrt{٢}} \qquad |٢\rangle = \frac{-i(r\overline{b} - b\overline{r})}{\sqrt{٢}}$$

$$|٣\rangle = \frac{r\overline{r} - b\overline{b}}{\sqrt{٢}} \qquad |٤\rangle = \frac{r\overline{g} + g\overline{r}}{\sqrt{٢}}$$

$$|٥\rangle = \frac{-i(r\overline{g} - g\overline{r})}{\sqrt{٢}} \qquad |٦\rangle = \frac{b\overline{g} - g\overline{b}}{\sqrt{٢}}$$

$$|٧\rangle = \frac{-i(b\overline{g} - g\overline{b})}{\sqrt{٢}} \qquad |٨\rangle = \frac{r\overline{r} + b\overline{b} - ٢g\overline{g}}{\sqrt{٦}} \qquad (١-٢$$

و یک تک تایه رنگ[١]:

$$|٩\rangle = \frac{r\overline{r} + b\overline{b} + g\overline{g}}{\sqrt{٣}} \qquad (٢-٢$$

را تشکیل می دهند.

محبوس شدگی ایجاب می کند که تمامی ذرات موجود، تک تایه رنگی باشند و این امر توضیح می دهد که چرا هشتایي گلوئونی هرگز به صورت ذرات آزاد ظاهر نمی شوند. لازم به ذکر است که گلوئون ها همانند فوتون ها ذراتی بدون جرم با اسپین یک می باشند. از آنجایي که در

[١] Color Singlet