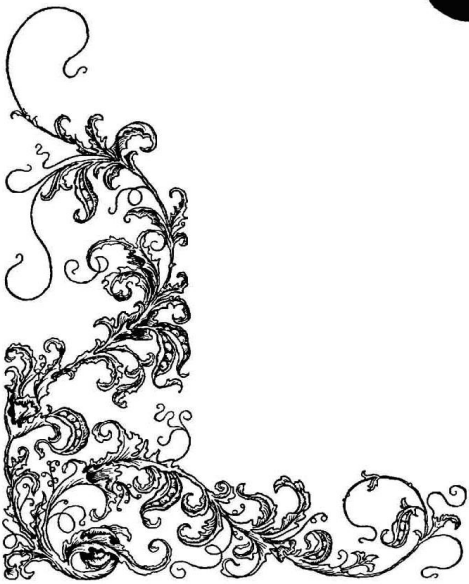


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي يُضَوِّتُ النَّجْمَ  
وَالَّذِي يُنَزِّلُ الْمَطَرَ  
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتِ  
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتِ  
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتِ





دانشکده علوم پایه  
گروه فیزیک هسته‌ای

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش ذرات بنیادی

موضوع:

معادله حالت در مدل شبکه‌ای و کیهانشناسی QCD

اساتید راهنما:

دکتر جعفر صادقی

دکتر سید محمد متولی

نام دانشجو:

عطیه نوروزی پوری

دی ۱۳۹۰

## سپاسگزاری

خداوند متعال را به خاطر رسیدن به آنچه می‌خواستم شاکرم.

از جناب آقای دکتر جعفر صادقی استاد راهنمای خودم تشکر می‌کنم و تمامی نتایج و یافته‌ها را مدیون

همراهی و تلاش صبورانه ایشان می‌دانم. همچنین از جناب آقای دکتر سید محمد متولی استاد راهنمای

دومم که قبول زحمت فرموده و مرا راهنمایی و حمایت نموده کمال تشکر را می‌کنم.

از پدر و مادر فداکارم که بعد از خدا پشت و پناهم بودند و دعای خیر آنها همیشه موجبات پیشرفتم بوده

تشکر می‌کنم.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزتر از جانم

به پاس همه خوبی‌ها و صبوری‌ها

## چکیده:

در این پژوهش تاثیرات خلق ذره را روی تحول پارامترهای کیهانشناسی در دوره QCD از عالم اولیه در چارچوب سیستم های ترمودینامیکی باز بررسی می‌کنیم. هندسه عالم را همگن و همسانگرد با متریک تخت فریدمن-رابرستون-واکر در نظر می‌گیریم. در این مدل نتایج در ناحیه QCD که پلاسمای کوارک-گلوئون غالب است مورد بررسی قرار گرفته است. معادله حالت، دما و چسبندگی این پلازما از محاسبات QCD شبکه‌ای بدست آمده است.

## واژه‌های کلیدی:

خلق ذره، پارامترهای کیهانشناسی، معادله حالت، چسبندگی توده، کرمودینامیک کوانتومی شبکه‌ای.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول- کرمودینامیک کوانتومی QCD

۱	مقدمه.....
۳	۱-۱- کرمودینامیک کوانتومی QCD.....
۵	۱-۲- لاگرانژین QCD.....
۸	۱-۳- تقارن پیمانه‌ای.....
۹	۱-۴- QCD در دما و چگالی محدود.....

### فصل دوم- QCD شبکه‌ای و معادله حالت QCD شبکه‌ای

۱۱	مقدمه.....
۱۱	۲-۱- QCD شبکه‌ای.....
۱۳	۲-۲- کنش پیمانه‌ای.....
۱۳	۲-۲-۱ کنش پیمانه‌ای ویلسون.....
۱۴	۲-۲-۲ کنش‌های تعمیم یافته.....
۱۵	۲-۳- کنش فرمیونی.....
۱۷	۲-۴- تابع پارش.....
۲۰	۲-۵- معادله حالت QCD.....

۶-۲- معادله حالت QCD شبکه‌ای..... ۲۱

۷-۲- پتانسیل کوآرک استاتیک..... ۲۶

۸-۲- تابع بتا ..... ۲۸

۹-۲- اندازه برهم کنش..... ۳۲

۱۰-۲- فشار و چگالی انرژی و آنتروپی..... ۳۵

### فصل سوم- دینامیک سیال نسبیته

مقدمه ..... ۴۰

۱-۳- سیال کامل و قانون‌های پایستگی..... ۴۱

۲-۳- سیال‌های نسبیته اتلافی ..... ۴۴

۱-۲-۳- ویژگی‌های اساسی ترمودینامیک برگشت ناپذیر..... ۴۵

۲-۲-۳- ترمودینامیک برگشت ناپذیر استاندارد..... ۴۷

۳-۲-۳- ترمودینامیک علی..... ۵۰

۴-۳- چسبندگی توده علی در کیهانشناسی..... ۵۳

۵-۳- خلق ذره..... ۵۴

۶-۳- ترمودینامیک خلق ذره ..... ۵۶

۷-۳- سیال کیهانی در حضور چسبندگی توده و خلق ذره..... ۵۸

## فصل چهارم - تعیین تحول پارامترهای کیهانشناسی در دوره QCD عالم اولیه

مقدمه ..... ۶۱

۴-۱- معادلات اساسی ..... ۶۱

۴-۲- محاسبه معادله تحولی پارامتر هابل در ناحیه QCD ..... ۶۴

۴-۳- حل معادله تحولی پارامتر هابل ..... ۶۶

۴-۴- محاسبه وابستگی زمانی ضریب مقیاس عالم ..... ۷۱

## فصل پنجم - خلاصه و نتیجه‌گیری

خلاصه و نتیجه‌گیری ..... ۷۵

مراجع ..... ۷۹



## فهرست شکلها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲- نمایش گرافیکی میدان فرمیونی  $\psi(x)$  تعریف شده روی مکان‌های شبکه، پیوندهای متصل کننده مکان‌های شبکه‌ای مجاور  $U_{\mu}(x)$  و حلقه‌های پیمانه‌ای بسته به عنوان پلاکویت  $P_{\mu\nu}$ ..... ۱۴
- شکل ۲-۲- تابع  $R_p$  شبکه‌ای بدست آمده از برازش  $\hat{T}_0$  رابطه (۲-۵۷)..... ۳۱
- شکل ۳-۲- تابع  $R_p R_m$  بدست آمده از برازش  $\hat{m}_i \hat{T}_0$  رابطه (۲-۵۹)..... ۳۱
- شکل ۴-۲- اندازه برهم‌کنش  $\varepsilon - 3p$  در واحدهای  $T^4$  در مقابل دما که از محاسبات روی شبکه با  $N_{\tau} = 6$  بدست آمده است..... ۳۴
- شکل ۵-۲- سه برابر فشار به عنوان تابعی از دما که از محاسبات روی شبکه با  $N_{\tau} = 6$  بدست آمده است..... ۳۵
- شکل ۶-۲- چگالی انرژی به عنوان تابعی از دما که از محاسبات روی شبکه با  $N_{\tau} = 6$  بدست آمده است..... ۳۶
- شکل ۷-۲- چگالی آنتروپی به عنوان تابعی از دما که محاسبات روی شبکه با  $N_{\tau} = 6$  بدست آمده است..... ۳۶
- شکل ۱-۴- تحول زمانی پارامتر هابل برای سیال چسبنده و غیر چسبنده در حضور خلق ذره در ناحیه QCD..... ۷۱
- شکل ۲-۴- تحول زمانی ضریب مقیاس عالم برای سیال چسبنده و غیر چسبنده در حضور خلق ذره در ناحیه QCD..... ۷۳

## فهرست جدولها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲- پارامتر  $\frac{V_0}{\mu}$  در اندازه‌های مختلف  $\beta$  و مقیاس شبکه  $a^{-1}$  محاسبه شده با استفاده از  $r_0 = 0.469 \text{ fm}$  ..... ۲۷

جدول ۲-۲- پارامترهای برازش  $r_0$  رابطه (۲-۵۷) و پارامترهای برازش  $m_1 r_0$  رابطه (۲-۵۹) ..... ۲۹

جدول ۳-۲- اندازه‌های چشم‌داشتی چگالی کنش پیمانه‌ای  $\langle S_G \rangle$ ، اندازه‌های چشم‌داشتی چگالیده‌های کوآرک

سبک  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle_1$  و اندازه‌های چشم‌داشتی چگالیده‌های کوآرک شگفت  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle_2$  که روی شبکه دمای صفر با  $N_\tau = 32$

محاسبه شدند..... ۳۳

جدول ۴-۲- اندازه‌های چشم‌داشتی چگالی کنش پیمانه‌ای  $\langle S_G \rangle$ ، اندازه‌های چشم‌داشتی چگالیده‌های کوآرک

سبک  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle_1$  و اندازه‌های چشم‌داشتی چگالیده‌های کوآرک شگفت  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle_2$  که روی شبکه دمای محدود با  $N_\tau = 6$

محاسبه شدند..... ۳۴

جدول ۵-۲- دما در واحدهای  $(100 \text{ MeV})$ ، چگالی انرژی، فشار و اندازه برهم کنش در واحدهای  $(100 \text{ MeV})^4$

چگالی آنتروپی در واحدهای  $(100 \text{ MeV})^3$  که از محاسبات روی شبکه با  $N_\tau = 6$  بدست آمدند..... ۳۷

## لیست علائم و اختصارات

QCD	کرمودینامیک کوانتومی (Quantum Chromo dynamic)
QGP	پلاسمای کوارک-گلوئون (Quark-Gluon Plasma)
LCP	خط فیزیک ثابت (Line of constant physics)
FRW	فریدمن-رابرتسون-واکر (Friedmann-Robertson-Walker)
IOF	چارچوب ارتونرمال لحظه‌ای (Instantaneous Orthonormal Frame)

اولین نیرویی که انسان‌ها با آن آشنا شده‌اند نیروی گرانش است. به نظر می‌رسد که نیروی گرانش نیروی بسیار قوی‌ای است اما در مقایسه با نیروی بین ذراتی از قبیل الکترون و پروتون نیروی گرانش نیروی بسیار ضعیفی است. سه نیروی دیگر طبیعت که اثر آنها اغلب در حوزه جهان‌های ریز (میکروسکوپی) دیده می‌شود عبارت‌اند از: الکترومغناطیسی، برهم کنش ضعیف و برهم کنش قوی. چگونگی عملکرد این سه نیرو توسط نظریه مدل استاندارد توضیح داده می‌شود [۱]. این نظریه، نظریه بسیار قوی است برای اینکه می‌تواند نظریه نسبیت خاص انیشتین و مکانیک کوانتومی را یکجا دربرگیرد. مدل استاندارد یک تئوری میدان کوانتومی است و می‌تواند توضیحی برای کوارک‌ها، لپتون‌ها و ذراتی که نیرو را حمل می‌کند ارائه کند. در مدل استاندارد کوارک‌ها و لپتون‌ها از طریق سه نیرو یعنی برهم‌کنش قوی، ضعیف و الکترومغناطیسی با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند. نیروی قوی پروتون‌ها و نوترون‌ها را در درون هسته (و کوارک‌ها را در درون هادرون‌ها) در کنار هم نگه می‌دارد. منشا نیروی الکترومغناطیسی بار الکتریکی بوده و ذره واسطه آن فوتون است. نیروی هسته‌ای ضعیف شدت کمتری دارد و عامل واپاشی هسته‌های ناپایدار است.

الکترون‌ها که سازنده پوشش بیرونی اتم‌ها هستند در دسته لپتون‌ها قرار دارند. تا جایی که می‌دانیم الکترون‌ها خود از ساختارهای ریزتری تشکیل نشده‌اند.

در سال ۱۹۶۴ گل‌مان<sup>۱</sup> و زوینگ<sup>۲</sup> مستقل از یکدیگر پیشنهاد کردند که در واقع هادرون‌ها از اجزای بنیادی‌تری تشکیل شده‌اند [۲]. گل‌مان این اجزا را کوارک نامید. کوارک‌ها دارای شش نوع طعم<sup>۳</sup> هستند که عبارتند از:  $u, d, s, c, b, t$ ، که سه کوارک  $u, d, s$  و کوارک‌های سبکتر  $c, b, t$  و کوارک‌های سنگین‌تر

---

<sup>۱</sup> Murray Gell Mann

<sup>۲</sup> Zweig

<sup>۳</sup> Flavor

هستند. آشکار سازی هادرون‌های با کوارک سنگین دشوار است زیرا برای آشکار سازی آنها به انرژی‌های بالا و در نتیجه شتابگرهای بزرگ احتیاج داریم.

بنا بر مدل کوارکی:

۱- هر باریون از سه کوارک تشکیل شده است.

۲- هر مزون از یک کوارک و یک پاد کوارک تشکیل شده است.

مدل کوارکی دو ایراد اساسی داشت:

۱: عدم مشاهده کوارک تنها: تاکنون یک کوارک تنها مشاهده نشده است. افرادی که به این مدل اعتقاد داشتند کوشیدند با وارد کردن مفهوم محبوس شدگی<sup>۱</sup> کوارک‌ها، ناامیدیشان از مشاهده کوارک تنها را پنهان کنند.

۲: نقض اصل طرد پائولی: اصل طرد پائولی بیان می‌کند که هیچ دو ذره‌ای با اسپین نیمه صحیح نمی‌توانند در حالت مشترک قرار بگیرند. اصل طرد پائولی باید برای کوارک‌ها نیز برقرار باشد، زیرا کوارک‌ها دارای اسپین  $\frac{1}{2}$  هستند. برای مثال  $\Delta^{++}$  از سه کوارک یکسان  $u$  در یک حالت تشکیل شده است.

در سال ۱۹۶۴ گرینبرگ<sup>۲</sup> راهی برای گریز از این معضل پیشنهاد کرد [۳]. او بیان کرد کوارک‌ها علاوه بر طعم و بار الکتریکی دارای سه درجه آزادی کوانتومی رنگ (قرمز، آبی، سبز) می‌باشند. بنابراین به هر کوارک یک درجه آزادی رنگ نیز نسبت داده می‌شود. فرضیه رنگ همانند یک تردستی به نظر می‌رسد و بسیاری در ابتدا آن را آخرین چاره مدل کوارک می‌دانستند. منظورکردن رنگ یکی از اساسی‌ترین ایده‌های عصر ما بوده است. قرمز آبی یا سبز بودن سه اسم است. و برای نامیدن سه ویژگی به کار رفته که کوارک‌ها

---

<sup>۱</sup> Confinement

<sup>۲</sup> Greenberg

علاوه بر بارالکتریکی و طعم، آنها را دارا هستند. امروزه برای همگان محبوس بودن کوارک در داخل هادرون‌ها قطعی شده است. برای هر کوارک یک پاد کوارک نیز وجود دارد مانند پوزیترون که پاد ذره الکترون است. پادکوارک‌ها دارای بار رنگی پاد قرمز، پاد آبی یا پاد سبز هستند. تنها جمع کوارک‌ها به صورت دوتایی و سه تایی می‌تواند وجود داشته باشد. جمع کوارک‌هایی که در طبیعت می‌توانند وجود داشته باشند باید دارای بار رنگی خنثی باشند همانطور که تشکیل مولکول‌های خنثی (از نظر الکتریکی) به خاطر جاذبه الکتریکی بین اجزای مثبت و منفی آن است.

نیروی بین پروتون‌ها و نوترون‌ها در هسته اتم به خاطر نیروی باررنگی کوارک‌های تشکیل دهنده آنها به وجود می‌آید. نیروی بین کوارک‌ها توسط ذرات حاملی به اسم گلوئون‌ها حمل می‌شود. این ذرات مانند فوتون بدون جرم هستند ولی برخلاف فوتون‌ها دارای بار رنگی هستند. آنها نه تنها با کوارک‌ها بلکه با خودشان نیز برهم‌کنش می‌کنند. طبق این خاصیت هنگامی که کوارک‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند برهم‌کنش بار رنگی میان آنها کاهش می‌یابد. کوارک‌ها در انرژی‌های پایین همیشه در دل ذرات که از دو یا سه کوارک ساخته شده‌اند محبوس هستند. آنها در انرژی‌های پایین همیشه بصورت ترکیب شده با کوارک‌های دیگر دیده می‌شوند.

## ۱-۱ کرمودینامیک کوانتومی<sup>۱</sup> (QCD)

از سال ۱۹۷۲ کرمودینامیک کوانتومی (QCD) به عنوان نظریه بنیادی فیزیک هادرون‌ها مطرح شده است. این نظریه خواص و ساختار هادرون‌ها را بر حسب رفتار کوارک‌ها و گلوئون‌های سازنده‌ی آنها توصیف می‌کند. نظریه QCD با تمام طعم‌ها بطور یکسان برخورد می‌کند و آنچه در این نظریه مهم است، عدد کوانتومی رنگ می‌باشد. کرمودینامیک کوانتومی نام داده شده به نظریه برهم‌کنش قوی است. یا QCD

---

<sup>۱</sup> Quantum Chromo dynamic

نظریه حاکم بر برهم‌کنش‌های قوی است. ایده نظریه بنیادی QCD این است که بار رنگ کوارک‌ها منشا نیروی قوی است. همانطور که بار الکتریکی منشا نیروی الکترومغناطیسی است. امروزه نظریه QCD بسیاری از پدیده‌هایی را که در شتابدهنده‌های انرژی بالا اتفاق می‌افتد را توضیح می‌دهد. QCD نظریه‌ای است که با گروه پیمانه‌ای  $SU(N_c)$  توضیح داده می‌شود که  $N_c$  نشان دهنده تعداد درجات آزادی رنگ می‌باشد. در نظریه QCD کوارک‌ها دارای سه درجه آزادی کوانتومی رنگ هستند که نمایش پایه گروه  $SU(3)$  رنگی، آنها را توصیف می‌کند. در این نظریه به بررسی نیروی قوی، که به علت رنگ کوارک بوجود آمده است و باعث نگه داشتن کوارک‌ها در داخل هادرون‌ها شده است و همچنین به بررسی علت محبوس شدگی کوارک‌ها، پرداخته می‌شود.

با استفاده از شواهد آزمایشگاهی، محبوس شدگی بصورت عدم وجود بار نیمه صحیح بیان می‌شود و چون بار نیمه صحیح تاکنون مشاهده نشده است، در نتیجه کوارک محبوس است. اما کوارک‌ها به علت داشتن بار رنگی در داخل هادرون محبوس هستند، نه به دلیل اینکه بار الکتریکی آنها نیمه صحیح است.

از دیگر ویژگی‌های QCD آزادی مجانبی<sup>۱</sup> آن در انرژی‌های بالا (فواصلی کمتر از یک فرمی) می‌باشد. در این ناحیه کوارک‌ها همانند ذرات آزاد رفتار می‌کنند و تقریباً هیچ برهم‌کنشی بین آنها وجود ندارد. در این ناحیه اندازه‌ی بار رنگی و ثابت جفت شدگی<sup>۲</sup> که به عنوان احتمال گسیل یا جذب گلئون در این نظریه است کم می‌شود و می‌توان از روش‌های اختلالی برای توصیف QCD بهره گرفت. اما در انرژی‌های پایین یعنی در فواصل دور (فواصلی بزرگتر از یک فرمی) اندازه بار رنگی و ثابت جفت شدگی زیاد می‌شود و در اینصورت از روش‌های غیر اختلالی برای بررسی QCD استفاده می‌شود [۴].

---

<sup>۱</sup> Asymtotic freedom  
<sup>۲</sup> Coupling constant

## ۲-۱ لاگرانژین QCD

دینامیک کوارک‌ها و گلوئون‌ها توسط لاگرانژین QCD قابل توصیف است. شش طعم کوارک با بار رنگی به نمایش اساسی گروه پیمان‌های  $SU(3)$  وابسته هستند. به تعداد مولدهای گروه پیمان‌های  $SU(3)$  که برابر با هشت می باشد گلوئون وجود دارد. گلوئون‌ها بوزون‌ها با اسپین 1، دارای بار رنگی و بدون طعم و جرم و بارالکتریکی هستند. کوارک‌ها فرمیون‌ها با اسپین  $\frac{1}{2}$  جرم‌دار و دارای بار رنگی و بار الکتریکی می‌باشند و توسط میدان‌های دیراک در نمایش اساسی  $SU(3)$  نشان داده می‌شوند. لاگرانژین QCD بصورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$L_{QCD} = L_F + L_G \quad (1-1)$$

که  $L_F$  بخش فرمیونی لاگرانژین و  $L_G$  بخش پیمان‌های لاگرانژین می‌باشد.  $L_F$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_F(x) = \sum_{f \in u, d, s, c, b, t} [\bar{\psi}_\alpha^f(x) (D_{\alpha\beta} - m_f) \psi_\beta^f(x)] \quad (2-1)$$

$\psi_\alpha^f(x)$  یک اسپینور دیراک<sup>۱</sup> چهار مولفه‌ای می‌باشد. اندیس  $\alpha$  و  $\beta$  مقادیر ۱، ۲، ۳، که نمایشگر سه رنگ برای کوارک می‌باشد را می‌پذیرند. اندیس  $f$ ، نمایشگر شش طعم کوارک  $u, d, s, c, b$  و  $t$  می‌باشد. بصورت  $\bar{\psi}_\alpha^f(x) = \psi^t(x) \gamma^0$  و  $m_f$  جرم فرمیون می‌باشد.

$D_{\alpha\beta}$  در رابطه (۲-۱) مشتق هموردا می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شود:

---

<sup>۱</sup> Dirac spinor



$$D_{\alpha\beta} = i\gamma^\mu \left( \partial_\mu - gA_\mu^a \frac{\lambda_{\alpha\beta}^a}{2} \right) ; \partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} ; \mu = 0,1,2,3 \quad (3-1)$$

در رابطه بالا  $g$  ثابت جفت شدگی پیمانه‌ای می‌باشد.  $\gamma^\mu$  ماتریس‌های گاما هستند که از قانون  $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$  تبعیت می‌کنند و بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\gamma^\mu = \begin{pmatrix} 0 & -\sigma^i \\ \sigma^i & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

$\sigma^i$  ماتریس‌های پائولی می‌باشند.  $A_\mu^a(x)$  در رابطه (3-1)، میدان‌های گلتونی هستند.  $\lambda_{\alpha\beta}^a$  در رابطه (1-1)  $\sigma^i$ ، یک مجموعه از ماتریس‌های  $3 \times 3$  بدون رد<sup>۱</sup> در فضای رنگ با  $a \in 1, \dots, 8$  می‌باشند که بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

---

<sup>۱</sup> Traceless

$$\lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

(۵-۱)

مولدهای  $SU(3)$  برحسب این ماتریس‌ها بصورت  $t^a = \frac{\lambda^a}{2}$  ساخته می‌شوند. این ماتریس‌ها از رابطه زیر تبعیت می‌کنند:

$$tr(\lambda_a \lambda_b) = 2\delta_{ab} \quad (۶-۱)$$

$$[\lambda_a, \lambda_b] = 2if^{abc} \lambda_c \quad (۷-۱)$$

$f^{abc}$  ثابت ساختار  $SU(3)$  می‌باشد. از آنجایی که هر شاخص از ۱ تا ۸ جابجا می‌شود  $۸ \times ۸ \times ۸ = ۵۱۲$  ثابت ساختار وجود دارد اما بیشتر آنها صفر هستند و فقط ثابت‌های ساختار زیر باقی می‌مانند:

$$f^{123} = 1 \quad (۸-۱)$$

$$f^{147} = f^{246} = f^{527} = f^{345} = f^{516} = f^{637} = \frac{1}{2} \quad (۹-۱)$$

$$f^{458} = f^{678} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (۱۰-۱)$$

بخش پیمانه‌ای لاگرانژین QCD،  $L_G$ ، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_G(x) = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a(x) F_a^{\mu\nu}(x) \quad (11-1)$$

$F_{\mu\nu}^a(x)$  تانسور قدرت میدان گلوونی می‌باشد که برابر است با:

$$F_{\mu\nu}^a(x) = \partial_\mu A_\nu^a(x) - \partial_\nu A_\mu^a(x) - g f^{abc} A_\mu^b(x) A_\nu^c(x) \quad (12-1)$$

### ۳-۱ تقارن پیمانه‌ای

اگر یک سیستم تحت یک تبدیل ناوردای همانند تقارنی در سیستم وجود دارد. لاگرانژین QCD تحت تبدیل پیمانه‌ای محلی<sup>۱</sup> زیر ناوردای است:

$$\psi(x) \rightarrow U(\theta)\psi(x)$$

$$A_\mu^a(x) \rightarrow U(\theta)A_\mu^a(x)t^a U^{-1}(\theta) - \frac{i}{g}(\partial_\mu U(\theta))U^{-1}(\theta)$$

$$U(\theta) = e^{-i\theta^a(x)t^a} \in SU(3) \quad (13-1)$$

### ۴-۱ QCD در دما و چگالی محدود

قبل از اینکه QCD به عنوان تئوری برای توصیف برهم‌کنش‌های قوی در نظر گرفته شود، تفکر مهمی روی ذات ماده خیلی گرم و خیلی چگال وجود داشت. این عقیده منجر به پیدایش گاز هادرون<sup>۲</sup> گشت. اما این

---

<sup>۱</sup> Local gauge symmetry

<sup>۲</sup> Hagedorn gas

مسئله بعد کشف آزادی مجانبی بود که فهمیده شد که در دماهای بالا ماده باید یک گاز برهم‌کنش‌کننده ضعیف از کوارک‌ها و گلوئون‌ها یا یک پلازما کوارک-گلوئون<sup>۱</sup> (QGP) باشد [۶].

QCD چگالی بالا تنها از جهت نظری مورد توجه قرار نگرفت بلکه از نظر آزمایشگاهی نیز مورد توجه قرار گرفت بعد از اینکه مشخص شد که QGP می‌تواند در برخورد دهنده‌های یون سنگین خلق شود. ضمناً پی برده شد که QCD باید یک گذار فازی از فاز پلاسمای کوارک-گلوئون به یک فاز هادرون غالب هنگامیکه چگالی انرژی کاهش یافته است، داشته باشد [۷].

QCD شبکه‌ای به عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای بررسی QCD در دمای محدود داده شده است. در QCD شبکه‌ای با جرم‌های کوارک تقریباً فیزیکی، گذار فاز از پلازما کوارک-گلوئون به هادرون غالب برای زمان کوتاهی در دمای  $T_c \approx 200 \text{ MeV}$  بنا شده است [۸]. QCD شبکه‌ای بطور کامل در فصل دوم توضیح داده می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Quark gluon plasma