بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده علوم پایه

بسمه تعالی

تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیأت داوران نسخه نهایی پایان نامه **آقای کمیل بابایی** رشته **ذرات بنیادی و نظریه میدانها** تحت عنوان **"کاربرد تناظر "سیال/گرانش" در دینامیک پلاسمای کوارک- گلوئون شکل گرفته در برخوردهای سنگین نسبیتی"** را از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آن را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد و برگزاری جلسه دفاعیه در تاریخ **۱۳۹۲/۴/۱۸** مورد تأیید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبهٔ علمی	امضاء
۱ – استاد راهنما	دکتر شاهرخ پرویزی	استادیار	
۲ – استاد ناظر داخلی	دکتر امیرحسین عباسی	دانشیار	
۳ – استاد ناظر داخلی	دکتر علی ایمان پور	دانشیار	
۴ – استاد ناظر خارجی	دکتر داوود کمانی	دانشیار	
۵ – نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی ایمان پور	دانشیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادي و معنوي در مورد نتایج پژوهشهاي علمي دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب کمیل بایرامی دانشجوی رشته مهندسی عمران ورودی سال تحصیلی ۸۹
مقطع کارشناسی ارشد دانشکده علوم پایه متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: کمیل بایرامی
تاریخ: ۹۲/۶/۲۷

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته فیزیک است

که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی ~~سرکار~~ ~~خانم~~/جناب آقای دکتر شاهرخ پروین ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر ——

و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر —— از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ٤: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ٥: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ٤ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ٦: اینجانب کمیل بابائی دانشجوی رشته فیزیک مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: کمیل بابائی

تاریخ و امضا: ۹۲/٦/۲۷

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده علوم پایه

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک

کاربرد تناظر "سیال/گرانش" در دینامیک پلاسمای کوارک-گلوئون شکل گرفته در برخوردهای یونی سنگین نسبیتی

کمیل بابائی

استاد راهنما:

دکتر شاهرخ پرویزی

تابستان ۱۳۹۲

تقدیم به پدر و مادر عزیز و مهربانم

که از نگاهشان صلابت، از رفتارشان محبت، و از صبرشان ایستادگی را آموختم

تقدیم به همسرم

تنها همسفرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر اللّه عزّ و جلّ " : ازپدر و مادر عزیزم...این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از استاد با کمالات و شایسته جناب آقای دکتر شاهرخ پرویزی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند و بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ و از اساتید فرزانه و دلسوز جناب آقایان دکتر علی ایمانپور ، دکتر امیرحسین عباسی ، و دکتر داوود کمانی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید .

چکیده

با وجود توصیف کوارک ها و گلوئون ها با استفاده از QCD، بسیاری از سوال های بنیادی در QCD بدون پاسخ باقی مانده اند. این امر اساساً ناشی از مشکلات حل مسائل نظریه در انرژی های پایین است که در آن اندرکنش ها بصورت قوی می باشند. در این رساله، سعی می نماییم برخی پیامدهای مربوط به پلاسمای کوارک-گلوئون (QGP) و برخوردهای یونی سنگین را برشماریم. پیشرفت های اخیر در توصیف هیدرودینامیکی نظریه های میدان همدیس بصورت قوی جفت شده را با استفاده حدی از تناظر AdS/CFT که به عنوان تناظر سیال/گرانش شناخته می شود و می تواند در مطالعه دینامیک بلادرنگ یک سیستم پلاسمایی بصورت قوی جفت شده بکار رود را بحث می نماییم. شرح می دهیم که چگونه دوگان های هندسی دینامیک سیالات بر حسب بسط مشتقی مرزی بنا نهاده شده و از آن برای استخراج ضرایب انتقال هیدرودینامیکی بهره می جوییم. همچنین کاربرد این تکنیک ها در انبساط خیز-ناوردای یک سیستم پلاسمایی با تاکید بر رژیم ویژه زمان بزرگ تناظر AdS/CFT که در آن دینامیک هیدرودینامیکی غالب می گردد، را نشان خواهیم داد.

کلید واژه: تناظر AdS/CFT، تناظر سیال/گرانش، پلاسمای کوارک-گلوئون، هیدرودینامیک نسبیتی، پلاسمای خیز-ناوردا.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... د

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- برخوردهای یونی سنگین نسبیتی ۳

۱-۳- طرح کلی پایان نامه ۷

فصل ۲- پلاسمای کوارک-گلوئون ۸

۲-۱- مقدمه کلی ۸

۲-۲- کرومودینامیک کوانتومی (QCD) ۱۲

۲-۲-۱- پلاسمای کوارک-گلوئون کیهانی ۱۵

۲-۳- برخوردهای یونی سنگین ۱۹

۲-۳-۱- شرکت کننده ها و ناظرها ۱۹

۲-۳-۲- تصویر بیورکن ۲۰

۲-۳-۳- تصویر لاندائو ۲۳

۲-۴- دینامیک سیالات و برخوردهای یون های سنگین ۲۴

فصل۳- دینامیک سیالات نسبیتی ۲۸

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- مبانی دینامیک سیالات ۲۹

۳-۲-۱- معادلات نویر-استوکس ۳۱

۳-۳- سیالات نسبیتی ۳۲

۳-۳-۱- سیالات کامل ۳۶

۳-۳-۱-۱- تانسور انرژی-تکانه (تنش) ۳۸

۳-۳-۲- مدل سازی اتلاف ۴۰

۳-۳-۲-۱- ویسکوزیته و جریان گرما ۴۰

۳-۳-۲-۲- سیال های اتلاف گر ۴۱

۳-۳-۲-۳- علیّت در سیالات ویسکوز نسبیتی ۴۷

۳-۴- سیالات همدیس ۵۰

۳-۴-۱- تبدیل وایل تانسور تنش ۵۱

۳-۴-۲- فرمولبندی هموردای وایل دینامیک سیالات همدیس ۵۴

۳-۴-۳- سیالات غیرخطی ۵۷

۳-۴-۴- تانسور تنش همدیس غیرخطی ۵۸

فصل۴- اصل هولوگرافی و تناظرها ۶۱

۴-۱- مقدمه ۶۱

۴-۱-۱- اصل هولوگرافی ۶۱

۴-۱-۲- آنتروپی سیاه چاله ۶۱

۴-۲- تناظر AdS/CFT ۶۳

۴-۲-۱- درجات آزادی موثر در کوپل شدگی قوی ۶۴

۴-۲-۲- چرا پلاسمای N=4 SYM را بررسی می نماییم؟ ۶۶

۴-۲-۳- بنا نهادن AdS/CFT برای مطالعه دینامیک بلادرنگ پلاسما ۶۷

۴-۲-۴- دیکشنری $\langle \mathbf{T_{\mu\nu}} \rangle \rightarrow$ گرانش ۶۹

۴-۲-۵- دیکشنری گرانشی $\rightarrow \langle \mathbf{T_{\mu\nu}} \rangle$ ۷۰

۴-۲-۶- مثال تحلیلی دقیق ۷۲

۴-۲-۶-۱- پلاسمای همسان ساکن ۷۲

۴-۲-۶-۲- سیستم های مختصات گوناگون ۷۴

۴-۳- تناظر سیال/گرانش ۷۶

۴-۳-۱- بخش حجمی (گرانش در $\boldsymbol{Ads_{d+1}}$) ۷۶

۴-۳-۲- سیاه چاله های شوارتزشیلد در $\boldsymbol{Ads_{d+1}}$ ۷۸

۴-۳-۳- نظم و انتخاب چارت مختصاتی ۸۰

۴-۳-۴- بسط اختلالی در گرانش ۸۳

۴-۳-۵- معادلات قیدی ۸۵

۴-۳-۶- معادلات دینامیکی ۸۶

۴-۳-۷- جزئیات بسط اختلالی بلند-طول موج ۸۷

۴-۳-۸- تحلیل گرانشی: متریک های دوگان با سیالات ۸۹

۴-۳-۸-۱- دوگان گرانشی سیال ویسکوز غیرخطی ۸۹

۴-۳-۸-۲- شکل هموردای وایل متریک سیال ۹۱

۴-۳-۸-۳- تانسور تنش مرزی ۹۳

۴-۴-۲- جهانشمولی ضرایب انتقال ۹۴

فصل۵- کاربردهای تناظر سیال/گرانش ۹۵

۵-۱- شارش خیز- ناوردا ۹۵

۵-۲- رفتار ویژه- زمان بزرگ ۹۷

۵-۲-۱- تحلیل AdS/CFT ۹۸

۵-۲-۲- هندسه سیال کامل ۱۰۲

۵-۲-۳- دینامیک پلاسمایی آنسوی سیال کامل ۱۰۳

۵-۲-۴- بازگشت به هیدرودینامیک ۱۰۵

۵-۲-۵- دینامیک پلاسما فراسوی هیدرودینامیک ۱۰۷

فصل۶- نتیجه گیری ۱۰۹
۶-۱- موضوعاتی که در بحث شامل نگردیده‌اند ۱۱۰

ضمیمه أ - فضای پاد-دوسیته ۱۱۲

فهرست مراجع ۱۱۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ : پلاسمای کوارک-گلوئون ۴
شکل ۱-۲ : شکل گیری QGP حین فشرده سازی ماده ۱۳
شکل ۲-۲ : نمودار فاز QCD ۱۴
شکل ۲-۳ : سیستم مختصات عام ALICE ۱۷
شکل ۲-۴ : نمایش برخورد یونی سنگین ۱۸
شکل ۲-۵ : تکامل فضا-زمانی یک برخورد یونی سنگین ۲۲
شکل ۲-۶ : نمایش ساده یک برخورد در تصویر شفاف یورکن ۲۲
شکل ۲-۷ : نمایش ساده یک برخورد در تصویر ایست لاندائو ۲۳
شکل ۳-۱ : عنصر سیال ۳۴
شکل ۳-۲ : مسیر عنصر سیال در فضا-زمان ۳۴
شکل ۴-۱ : دیاگرام پنروز سیاه شامه یکنواخت ۸۲
شکل ۵-۱ : تفاوت میان استفاده از مختصات ففرمن- گراهام و ادینگتون-فینکلشتین ۱۰۲

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

بکار بردن تکنیک های نظریه میدان به فهم فیزیک یون سنگین کمک می کند. این امر یک زمینه مطالعاتی هیجان انگیز است زیرا نظریه ریسمان را در تماس نزدیک با داده های تجربی غنی قرار می دهد. هدف آن اثبات یا عدم اثبات این نیست که نظریه ریسمان یک نظریه "همه چیز" است. نظریه ریسمان کوششی چند دهه ای است برای توصیف پدیده های فیزیکی بر حسب ریسمان ها. گسترده ترین جنبه تاکید شده نظریه ریسمان این ایده است که تمام اجزاء سازنده بنیادی ماده می توانند حالت های نوسانی متفاوت یک شیئی یکسان باشند: یعنی ریسمان. با شروع از این ایده بعلاوه مکانیک کوانتومی می توان گرانش را همانگونه که توسط نسبیت عام توصیف شده و همچنین الکترو مغناطیس توصیف شده توسط معادلات ماکسول را بدست آورد. می توان همچنین جلوتر رفت و توصیف های شبه-واقعی مدل استاندارد فیزیک ذرات را بدست آورد.

یک جریان قوی در توسعه نظریه ریسمان از اواخر ۱۹۹۰، دوگانی "پیمانه/گرانش" بوده است، که مطابق آن یک نظریه پیمانه ای یک توصیف گرانشی دوگان را در یک فضا-زمان خمیده با انحناء منفی می پذیرد و اغلب تناظر AdS/CFT نامیده می شود. با استفاده از تناظر AdS/CFT، می توان محاسبات در نظریه های گرانشی را به پدیده های فیزیکی در نظریه های پیمانه ای ارتباط داد. یکی از جالب ترین نظریه های پیمانه ای کرومودینامیک کوانتومی (QCD) است که بخشی از مدل استاندارد است و توصیف کننده اندرکنش قوی میان کوارک ها و گلوئون های درون پارتون می باشد.

در این رساله سعی می نماییم اصل هولوگرافی و دوگانی های مشتق شده از آن بویژه تناظر سیال/گرانش که خود حدی از تکنیک تناظر AdS/CFT (بصورت عام تر پیمانه/گرانش) می باشد را مورد مطالعه قرار داده و توصیف هیدرودینامیکی نظریه های میدان همدیس بصورت قوی جفت شده را با استفاده از تناظر AdS/CFT و به صورت خاص جنبه های تناظر "سیال/گرانش" بعنوان نگاشتی میان یک رده از سیستم های دینامیک در فضای AdS و جریان های سیال دلخواه در نظریه میدان اندرکنشی

قوی را مورد بازبینی قرار دهیم. همچنین کاربردهای این تناظر در دینامیک پلاسمای کوارک-گلوئون (QGP) که حالتی جالب از ماده در برخوردهای یونی سنگین می باشد[1] و تقریبا همانند یک سیال ایده آل رفتار می کند را جستجو می نماییم. تکنیک تناظر AdS/CFT می تواند برای مطالعه دینامیک بلادرنگ[2] یک سیستم پلاسمای جفت شده قوی مورد استفاده واقع شود. این روش ها بر اساس حل معادلات گرانشی اینشتین در سمت "ریسمان/گرانش" تناظر AdS/CFT می باشند. در یک دمای بالای مناسب و در یک حد بلند-برد ویژه (که آنرا رژیم بلند-طول موج می نامیم) از معادلات اینشتین با یک ثابت کیهانی منفی در (d+1)-بعد، معادلات اینشتین به معادلات دینامیکی سیال در d-بعد کاهش می یابند (تعمیم نسبیتی معادلات معروف نویر-استوکس).

هر نظریه میدان کوانتومی اندرکنشی، بصورت موضعی در چگالی های انرژی به اندازه کافی بالا به تعادل می رسد و یک توصیف موثر برحسب دینامیک سیالات را می پذیرد. متغییرهای چنین توصیفی، چگالی های موضعی تمام بارهای پایسته، بعلاوه سرعت های موضعی سیال هستند. معادلات دینامیک سیالات در حقیقت پایستگی موضعی جریان های بار متناظر و تانسور انرژی-تکانه تکمیل شده توسط معادلات حالت که این جریان ها را بعنوان توابعی از متغییرهای مکانیکی سیال بیان می کنند، هستند. از آنجاییکه دینامیک سیالات یک نظریه موثر بلند-طول موج است، این اجزاء سازنده معمولا بر حسب یک بسط مشتقی مشخص می گردند. در هر مرتبه معیینی، ترمودینامیک بعلاوه تقارن ها شکل این بسط را تا یک تعداد متناهی از ضرایب نامعلوم معین می کند. آنگاه این ضرایب ممکن است یا از طریق اندازه گیری ها و یا از طریق محاسبات میکروسکوپی بدست آیند. در اینجا، شرح می دهیم که چگونه دوگان های هندسی دینامیک سیالات در یک بسط مشتقی مرزی بنا نهاده می شوند و از این ساختار برای استخراج ضرایب انتقال هیدرودینامیکی استفاده می نماییم. سرانجام، این تکنیک ها را با کاربردهایشان در بسط خیز ناوردای یک سیستم پلاسمایی نشان می دهیم.

---

[1] اکنون عقیده بر این است که برخوردهای یونی سنگین یک حالت از پلاسمای کوارک-گلوئون بصورت قوی جفت شده را تولید می نماید.

[2] Real-time

۱-۲- برخوردهای یونی سنگین نسبیتی

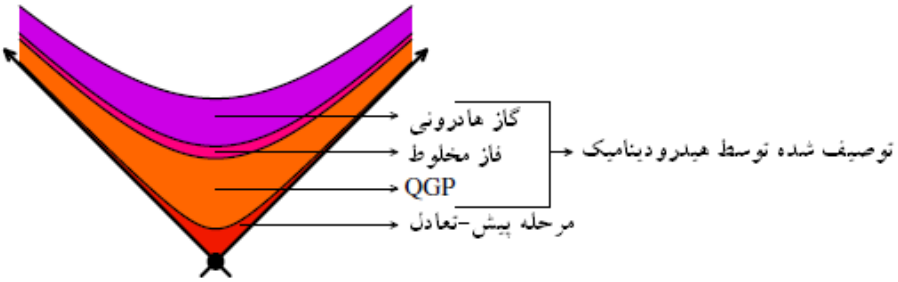
برخوردهای یونی سنگین نوعی از آزمایشها در محدوده ای میان فیزیک هسته ای و فیزیک انرژی های بالا است که هسته های اتمی ای که الکترون هایشان را از دست داده اند تا آنجا که ممکن است به شدت برخورد می دهند. از سال ۲۰۰۹ تجهیزات پیشرو در این نوع آزمایش برخورد دهنده یونی سنگین نسبیتی (RHIC) در آزمایشگاه ملی بروکهاون (BNL) و همچنین اخیرا در LHC می باشد. برخوردهای یونی سنگین در LHC وRHIC، ماده QCD با چگالی انرژی بسیار عظیم تولید می کند، و این اجازه را به ما می دهد که به ناحیه نمودار فاز QCD با درجات آزادی پارتونی دست یابیم (پلاسمای کوارک-گلوئون). این حالت منحصر به فرد ماده مشابه محیط با حرارت در حد ترلیون درجه، که جهان اولیه را در زمان کوتاهی پس از انفجار بزرگ پر کرده بود، می باشد. اتلاف انرژی پارتون های سریع که این ماده اندرکنشی قوی را طی می کنند یکی از جالبترین مشاهده پذیرها برای کاوش طبیعت پلاسمای کوارک-گلوئون[1] است. دیگر مشاهده پذیرها شامل نرخ تولید دایلپتون و فوتون، زمان مسافت آزاد میانگین اجزاء سازنده پلاسما، و تاثیر نیروی کشش ناهمسان بر روی جریان بیضی وار می باشند.

زمانی که یون های سنگین، نظیر هسته های طلا، به اندازه کافی سخت به هم برخورد داده شوند، کوارک ها و گلوئون های درون آنها منفک[2] می شوند. عقیده بر آن است که پلاسمای کوارک-گلوئون منتجه قبل از اینکه به اطراف پخش شود به تعادل حرارتی می رسد[3]. چیزی که آزمایش های یونی سنگین مشاهده می کنند خرده ریزه هایی است که از چنین برخوردی بیرون می آیند. با کار بسیار زیاد، آزمایشگرها می توانند ویژگی های پلاسمای کوارک-گلوئون را استنباط کنند. به نظر می رسد که ویژگی هایی داشته باشد که تشریح آنها با استفاده از ابزار استاندارد نظریه میدان کوانتومی دشوار است. برای مثال، در مقایسه با انتظارات بدست آمده از QCD اختلالی، به نظر می رسد که گرانروی کوچک است، و زمان رسیدن به تعادل حرارتی کوتاه است، بعنوان مثال دیگر، به نظر می رسد کوارک های سنگین

[1] QGP
[2] deconfined
[3] Thermalize

متحرک در میان QGP با سرعت بیشتر از چیزی که در ابتدای امر از طریق QCD اختلالی پیش بینی می شد، انرژی از دست می دهند.

ثابت جفت شدگی قوی میدان ها، محاسبات نظری اختلالی میدان را غیرقابل اعتمادتر می سازد. دوگانی بعنوان ابزاری قدرتمند برای مطالعه دینامیک میدان های پیمانه ای با ثابت جفت شدگی قوی می تواند بکار گرفته شود. بسیاری از ویژگی های جدید میدان های پیمانه ای بصورت قوی جفت شده در مطالعات از طریق دوگانی آشکار شده اند.



شکل ۱,۱: سوپ پلاسمای کوارک-گلوئون تولید شده در آزمایشگاه ملی بروکهاون به دمایی رسیده که به اندازه انفجار بزرگ داغ است، و پروتون ها و نوترون ها در آن ذوب می گردند.

در طی چندین سال اخیر یک روش جدید برای مدل سازی QGP اندرکنشی قوی ارائه و توسعه داده شده است. این روش بر اساس دوگانی میان نظریه پیمانه ای حداکثر ابرمتقارن (N=4) در چهار بعد و نظریه ریسمان نوع IIB در فضای پاد-دوسیته می باشد، و این تناظر AdS/CFT اولین بار توسط مالدسنا در سال ۱۹۹۷ فرمولبندی شد. در این چهارچوب، مقادیر مرز(همدیس) میدان های ابرگرانشی پنج-بعدی چشمه هایی را برای عملگرهای ناوردای پیمانه ای نظریه پیمانه ای چهار-بعدی مهیا می سازند، که از اینرو می توانند بعنوان موجوداتی که بر روی مرز همدیس AdS زندگی می کنند ، و بنابراین هولوگرافی پاد-دوسیته و نظریه های پیمانه ای هولوگرافیکی در نظر گرفته شوند. همانگونه که در ابتدای امر توسط ادوارد ویتن[1] مشاهده گردید، این تناظر می تواند به دمای متناهی تعمیم داده شود،

[1] E. Witten

که گذار فاز عدم محبوسیت[1] در نظریه پیمانه ای به گذار فاز صفحه-هاوکینگ شکل گیری سیاه چاله در فضای پاد-دوسیته پنج-بعدی نگاشت می گردد. این خط مشی بصورت عظیمی به نظریه های پیمانه ای تعمیم یافته که در نمایش های بنیادین شامل ماده می باشند، که نسخه های دوگان آنها دربردارنده حل های D-شامه پرکننده فضا-زمانی در چینش ابرگرانشی اند و اینکه دوگانی را به نظریه های پیمانه ای غیرهمدیس که قسمتی (یا تمام) ابرتقارن $\mathcal{N} = 4$ شکسته می شود تعمیم می دهد.

یکی از جنبه های مطرح خط مشی هولوگرافیکی محاسبه گرانروی برشی بوده، که در هر نظریه پیمانه ای هولوگرافیکی مقدار جهانی را بخود می گیرد. از لحاظ عددی این مقدار بسیار کوچک است، بسیار کوچکتر از نتایج QCD اختلالی و بر خلاف مورد اخیر بوضوح سازگار با داده های تجربی بدست آمده در RHIC می باشد. در حقیقت حدس زده می شود که مقدار فوق بیانگر یک کران پایین کوانتومی جهانی برای گرانروی ویژه هر مایعی در طبیعت باشد!

در اینکه QCD توصیفی صحیح از QGP مهیا می سازد شکی نیست. اما حل QCD سخت است. روش های اختلالی، بر اساس نمودارهای فاینمن، تنها برای فرایندهای "سخت" (بدان معنا که مقدار بسیار زیادی تکانه میان ذرات درگیر مبادله می شود) قابل اعتمادند. روش های شبکه ای[2] که اساساً QCD را توسط رایانه های پرقدرت حل می کنند، برای توصیف فرایندهای بلادرنگ در یک محیط حرارتی بصورت خوب وفق داده نشده اند. تقریب های هیدرودینامیکی در بسیاری از شرایط کار می کنند، اما کاملا واضح نیست که چرا درست هستند، بعلاوه اینکه در توصیف های هیدرودینامیکی پارامترهای آزاد وجود دارند.

تناظر AdS/CFT، دیدی جایگزین برای دینامیک پیمانه ای بصورت قوی جفت شده ارائه می دهند که می تواند برای فهم چیزی که در برخوردهای یونی سنگین نسبیتی رخ می دهد مفید باشد. چیزی که تناظر AdS/CFT می تواند انجام دهد آن است که سوالات درباره حالت های حرارتی نظریه های پیمانه

[1] deconfinement
[2] Lattice

ای را بر حسب سیاه چاله ها در یک فضا-زمان با انحنای منفی مجددا مطرح نماید. QGP از لحاظ حرارتی به تعادل رسیده و بصورت قوی جفت شده است و بنابراین می تواند توصیفی بر حسب سیاه چاله را بپذیرد. اخطار بزرگ آن است که نظریه های پیمانه ای که می توان بسهولت توسط AdS/CFT آنها را فهمید QCD نیستند، بلکه خویشاوندهای ابرتقارنی آن هستند. بنابراین، هنگامی که در این زمینه کار می کنیم باید همواره از خود بپرسیم که تا چه اندازه از ویژگی های نظریه های پیمانه ای بصورت قوی جفت شده را بایستی انتظار داشته باشیم که جهانی باشند. در غیاب یک جواب قانع کننده به این سوال، مفیدترین پاسخ این است که با ابزارهای محاسباتی که دردست داریم، بهترین کاری که می توانیم را انجام داده و با دقت ترین مقایسه ها را میان نظریه گرانش و پلاسمای کوارک-گلوئون جهان واقعی انجام دهیم.

تاریخچه ای غنی از مطالعات هیدرودینامیکی پلاسمای غیرآبلی با استفاده از روش های هولوگرافیکی مهیا شده توسط تناظر AdS/CFT وجود دارد. هورویتز و هابنی [۱] اولین کسانی بودند که فرایند ترمالیزاسیون در نظریه های میدان را با مد های شبه-نرمال سیاه چاله ای مرتبط ساختند. در نتیجه، کار بدوی پولیکاسترو، سان و استارینتز [۲] بررسی دینامیک سیالات خطی شده از گرانش خطی شده در پس زمینه های سیاه چاله ای AdS مجانبی را شروع کرد. کاوش هیدرودینامیک خطی شده در زمینه های متفاوت متعددی در طول سالها در مقالات بسیاری انجام گرفت که بازبینی خوبی از آنها در مرجع [۳] یافت می شود.

انگیزه برای خود تناظر سیال/گرانش توسط مطالعات و کوشش برای بنا نهادن دوگان هولوگرافیک به اصطلاح جریان یورکن[1] (که عقیده بر آن است مرتبط با درک ناحیه مرکزی برخوردهای یونی سنگین بصورت هیدرودینامیکی می باشد)، برخواسته است. در همان زمان بررسی های رژیم دینامیک سیالات سیاه چاله ای ایستا[2] در فضا-زمان های AdS مجانبی راه را برای فهم واضح رژیم هیدرودینامیکی در مفهوم گرانشی آسان نمود.

[1] Bjorken flow
[2] stationary

تناظر سیال/گرانش ابتدا در مرجع [۴] تحت محتوی دوگان های گرانشی نظریه های میدان ابرهمدیس چهار بعدی که دوگان هولوگرافیک آنها توسط $\mathrm{AdS}_5 \times X^5$ داده می شود، بحث گردید. یک نمونه خاص $\mathcal{N} = 4$ SYM است که $X^5 = \mathrm{S}^5$.

۱-۳- طرح کلی پایان نامه

در فصل اول مروری کوتاه بر برخوردهای یونی سنگین، تناظر و دوگانی داشته و بطور مختصر تناظر سیال/گرانش را معرفی می نماییم. سپس در فصل دوم پلاسمای کوارک-گلوئون شکل گرفته در برخوردهای یونی سنگین را معرفی نموده و ویژگی های آنرا بر می شماریم و توضیح می دهیم که کدامیک از آنها قابل بررسی توسط تناظر AdS/CFT و بویژه تناظر سیال/گرانش بعنوان حالت خاصی از تناظر AdS/CFT می باشند. در فصل سوم دینامیک سیالات نسبیتی را بعنوان رژیم مورد بحث در سمت میدان تناظر مرور نموده و جنبه های متعدد ناوردایی همدیس سیالات را بحث می نماییم و فرمولبندی هموردای وایل را که بسیار مفید است بازبینی می نماییم. آنگاه در فصل چهارم اصل هولوگرافی و تناظر AdS/CFT را بعنوان یک نمونه به واقعیت پیوسته از آن بازبینی نموده و رویه پایه برای بنا نهادن حل های گرانشی دوگان با دینامیک سیالات را بررسی می نماییم. در فصل پنجم بطور خاص تناظر سیال/گرانش را برای بررسی پلاسمای خیز-ناوردا بکار گرفته و همچنین در پایان بسط ویژه زمان های بزرگ تناظر AdS/CFT را برای بررسی خواص پلاسمای کمی دور از حالت تعادل معرفی می نماییم. در فصل ششم نتیجه گیری نموده و مواردی را که در بحث شامل نگردیده اند را به منظور کامل بودن بحث معرفی می نماییم.

فصل ۲ : پلاسمای کوارک-گلوئون

۲-۱- مقدمه کلی

برنامه آزمایشهای برخوردهای یونی سنگین فعلی در RHIC و آزمایشات نظیر آن در LHC دریچه ای جالب را به سوی ویژگی های ماده QCD در دماهای بالا می گشاید. جایی که در آن در پوشش یک فاز جدید ظاهر می گردد، پلاسمای کوارک-گلوئون در دماهای بالای مجانبی یک گاز آزاد از کوارک ها و گلوئون ها بوده، اما در انرژی های در دسترس آزمایشگاهی گواه هایی قوی وجود دارند که پلاسمای کوارک-گلوئون اساساً یک سیستم جفت شده قوی می باشد [۵].

پلاسمای کوارک-گلوئون (QGP) یا سوپ کوارک یک فاز ممکن از کرومودینامیک کوانتومی (QCD) یا حالتی از ماده است که در دما و/یا چگالی بشدت بالا موجود است و در آن ذرات بنیادی سازنده هادرون ها و ماده دارای اندرکنش قوی نیستند. این فاز متشکل از کوارک ها و گلوئون های آزاد مجانبی است. در QCD کلاسیک کوارک ها مولفه های فرمیونی مزون ها و باریون ها بوده در حالیکه گلوئون ها مولفه های بوزونی چنین ذراتی در نظر گرفته می شوند. گلوئون ها حاملین نیرو (یا بوزون های نیروی رنگی QCD) می باشند، در حالیکه کوارک ها خودشان همتاهای ماده فرمیونی اند. بر خلاف هادرون‌ها که کوارک ها درون آن محبوس‌اند، در QGP مزون‌های و باریون‌ها هویت خود را از دست داده و درون یک سیال از کوارک‌ها و گلوئون‌ها حل می‌گردند. کوارک ها در QGP آزاد (دارای عدم محبوسیت) هستند و در مقایسه با جرم هادرون متناظر، یک جرم کل بزرگتری را می‌سازند. عقیده بر این است که QGP در حین ۲۰ تا ۳۰ میکروثانیه بعد از اینکه جهان در انفجار بزرگ موجود شد، وجود داشته است.

آزمایشها در ابر سینکروترون پروتون سرن (SPS) برای اولین بار در سال دهه های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ سعی بر ساختن QGP نمود: نتایج سرن را بر آن داشت که گواه غیر مستقیم مبنی بر وجود یک حالت جدید ماده را در سال ۲۰۰۰ اعلام نماید. آزمایشهای سال ۲۰۰۱ در RHIC آمریکا و در برخورد دهنده LHC در سرن دنباله این کوشش توسط برخورد دادن یون های طلا تا حد نسبیتی شتابدار شده به