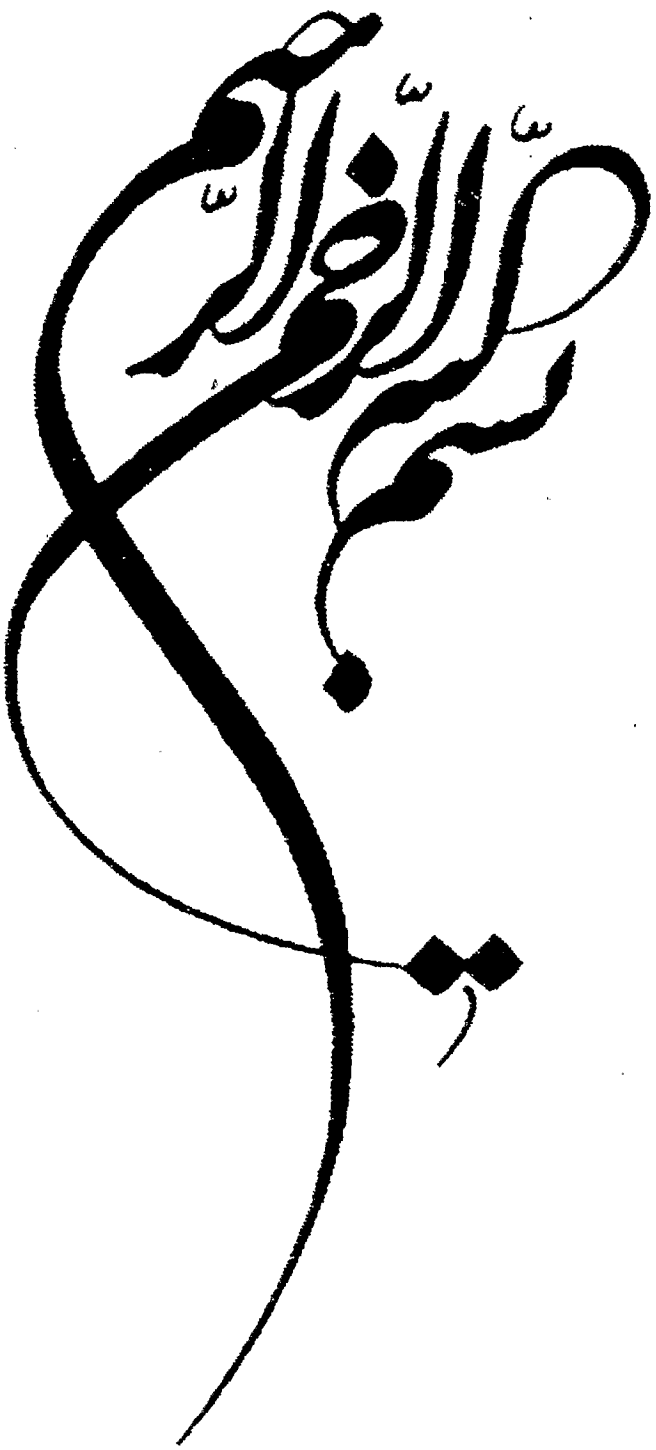


۱۱۳۳۲۲

۸۷/۱/۱۰۸۳۷۱
۵۸-۱۵۶

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی در رشته فیزیک نظری

گرانش و کیهان شناسی درابعاد اضافی بزرگ

نگارش:

ملیحه حیدری فرد

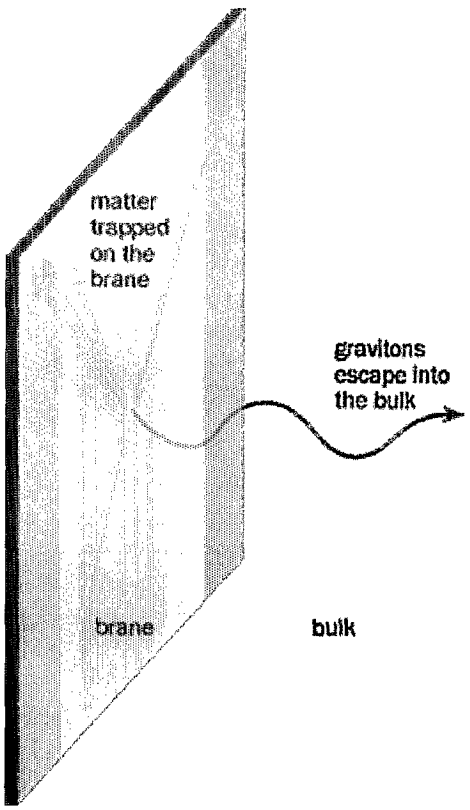
۱۳۸۸ /۱۲/۳۱

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا سپنجی

آبان ۱۳۸۷

۱۱۳۳۲۲


matter
trapped
on the
brane
gravitons
escape into
the bulk
brane
bulk

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

بسمه تعالی

دانشگاه شهید بهشتی

« صورتجلسه دفاع از رساله دکترا »

****

جلسه ارزیابی رساله خانم ملیحه حیدری فرد فرزند غلامعلی دارای شناسنامه شماره ۱۱۹۷صادره از قم متولد ۱۳۵۶دانشجوی دوره دکترای رشته فیزیک باعنوان:

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

گرانش و کیهان شناسی در ابعاد اضافی بزرگ

****

به راهنمایی آقای دکترحمید رضا سپنجی طبق دعوت قبلی درتاریخ ۱۳۸۷/۸/۲۰ تشکیل گردید وبراساس رای هیات داوران وباعنایت به ماده ۲۱، ۲۳،۲۲ ، تبصره های مربوطه مندرج درآیین نامه دوره دکترای مورخ ۱۳۷۲/۱۲/۸، رساله مزبور با نمره ..۱۹٫۶.. ودرجه ..عالی.....مورد تصویب قرارگرفت .

اعضای هیات داوران :

	نام ونام خانوادگی	درجه دانشگاهی	امضاء
۱-استاد راهنما :	آقای دکتر حمیدرضا سپنجی	استاد	
۲-استاد مشاور:	----------		
۳-داورداخل دانشگاه:	آقای دکترسیامک سادات گوشه	دانشیار	
۴-داورخارج از دانشگاه:	آقای دکترحسام الدین ارفعی	استاد	
۵-داورخارج ازدانشگاه:	آقای دکتر محمد نوری زنوز	دانشیار	
۶-داور داخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی:	آقای دکترمهرداد فرهودی	دانشیار	

ناظر تحصیلات تکمیلی

۱۳۸۸ /۱۲/۲۴

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

آن بزرگ آموزگاران زندگی

و آن شیفتگان علم و ادب

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار مهربان رساله حاضر به پایان رسیده است بر خود لازم می‌دانم از استاد عزیزم دکتر حمیدرضا سپنجی که در طول مدت تحصیلم همواره از مهربانی، شکیبایی و راهنمایی‌های ارزندهٔ ایشان بهره‌مند بودم صمیمانه تشکر و سپاسگزاری کنم. بی شک اگر تشویق‌ها و پشتیبانی‌های بی دریغ ایشان نبود، این رساله به اتمام نمی رسید. آنچه از لحاظ علمی و اخلاقی آموختم هرگز از یاد نخواهم برد.

از اساتید محترم گروه فیزیک دانشگاه شهید بهشتی خصوصاً از اساتید ارجمند، دکتر مهرداد فرهودی که نخستین بار گرانش را در کلاس درس ایشان آموختم، دکتر شهرام جلالزاده و دکتر حبیب الله رزمی که هیچ گاه در راهنمایی اینجانب از وقت گرانقدر خود دریغ نکردند بی نهایت سپاسگزارم.

چکیده

نظریه‌هایی با ابعاد اضافه بزرگ، راه حل‌ها و دیدگاه‌های متفاوتی برای تعدادی از مسائل کیهان‌شناسی، گرانش و اختر فیزیک ارائه می‌دهند. در این رساله عمومی‌ترین سناریوی مدل‌های جهان شامه‌ای تحقیق می‌شود. سه شرط اساسی در این سناریو عبارت است از: فرضیه محبوس شدن ماده به شامه، وجود گرانش در فضای توده و نشاندگی شامه در فضای توده با ابعاد و نشانگان دلخواه.

با در نظر گرفتن یک شامه ناهمسانگرد با هندسه بیانکی نوع اول و پنجم، معادلات فریدمن منتجه روی شامه با یک جمله اضافی تصحیح می‌شود که می‌تواند به عنوان ماده x در نظر گرفته شده، یک توضیح هندسی برای انبساط شتابدار جهان مهیّا کند. سپس با در نظر گرفتن جمله گاوس — بنت در فضای توده مدل هندسی خود را تعمیم می‌دهیم. کاربردهای کیهان‌شناسی و سن جهان در مدل هندسی حاضر بررسی می‌شود.

در پایان دو حل جالب متقارن کروی خلأ به دست می‌آوریم. یکی از این حل‌ها مشابه با حل سیاهچاله دسیتر در حضور یک ثابت کیهان‌شناسی مثبت و حل دیگر یک توضیح هندسیِ بر مسأله سرعت چرخش کهکشان‌ها بدون نیاز به ماده تاریک و نظریه‌های تصحیح شده جدید فراهم می‌کند. ما همچنین حل‌های داخلی معادله اپنهایمر — اسنایدر — ولکوف را به دست آورده، نشان می‌دهیم که ناحیهٔ بیرونی یک ستارهٔ در حال فرو ریزش می‌تواند ایستا باشد.

فهرست مندرجات

۱ مقدمه ۴

۲ مروری بر مدل‌های جهان شامه‌ای ۱۰

۱.۲ جهان شامه‌ای ADD ۱۱

۲.۲ جهان شامه‌ای RS I ۱۲

۳.۲ جهان شامه‌ای RS II ۱۳

۴.۲ جهان شامه‌ای DGP ۱۵

۵.۲ جهان شامه‌ای SMS ۱۶

۳ مدل ۲۱

۴ کیهان‌شناسی مدل ۲۷

۱.۴ مقدمه ۲۷

۲.۴ جهان شامه‌ای بیانکی نوع یک و پنج ۳۰

۳.۴ انرژی تاریک و نقش انحنای عرضی ۳۵

۴.۴ جهان شامه‌ای فریدمن — رابرتسون — واکر ۴۱

۵.۴ سن جهان ۴۲

۵ جهان شامه‌ای با جمله گاوس بنت با در نظر گرفتن پتانسیل محبوس کننده ۴۷

۱.۵ مقدمه ۴۷

۲.۵ ملاحظات هندسی ۵۰

۳.۵ معادلات میدان مؤثر ۵۳

۴.۵ معادلات فریدمن تصحیح شده ۵۹

۵.۵ کاربردهای کیهان‌شناسی ۶۲

۶.۵ سن جهان ۶۴

۶ حل‌های متقارن کروی در جهان‌های شامه‌ای ۶۸

۱.۶ مقدمه ۶۸

۲.٦ معادلات میدان روی شامه ۷۲

۳.٦ حل‌های خلأ روی شامه ۷۵

۴.٦ معادلات میدان و شرط اتصال ۸۰

۵.٦ حل‌های داخلی با چگالی یکنواخت ۸۲

٦.٦ فرو ریزش گرانشی روی شامه ۸۹

۷ نتیجه‌گیری ۹۲

فصل ۱

مقدمه

تلاش برای متّحد کردن برهم کنش‌های ذرات بنیادی باعث ظهور نظریه ابعاد اضافه[۱] گردید. بعد از اتحاد الکتریسیته و مغناطیس توسط ماکسول[۲] در اواخر قرن نوزدهم کاوش برای متحد کردن الکترومغناطیس با گرانش آغاز شد. بعد از تلاش‌های اولیه [۱] و بعد از ظهور نظریهٔ نسبیت عام اینشتین[۳] ، کالوزا[۴] نظریهٔ واحدی بر پایه کنش میدان اینشتین پنج بعدی پیشنهاد کرد [۲]. پنج سال بعد اسکار کلاین[۵] به طور مستقل نظریهٔ مشابهی ارائه نمود [۳]. سپس نظریه‌های ابعاد اضافه با پیدایش نظریه‌های چهار بعدی موفق‌تر، که با ظهور مدل استاندارد[۶] فیزیک ذرات به اوج خود رسیدند، کنار رفته و به فراموشی سپرده شد [۴، ۵]. مدل استاندارد که یکی از موفقیت‌های بزرگ در تاریخ علم است نظریه‌ای است که برهم کنش‌های الکترومغناطیس، ضعیف و قوی و ذرات بنیادی تمام مواد شناخته شده در جهان را متحد می‌سازد و از لحاظ

---

[۱] extra dimensions
[۲] Maxwell
[۳] Einsteins
[۴] Kaluza
[۵] Klein
[۶] Standard Model

تجربی با دقت حیرت انگیزی اثبات شده است [٦]. اگر چه مدل استاندارد ذرات بنیادی کامل نمی‌باشد و واضح ترین مشکل آن است که این مدل نظریه گرانش را در بر نمی‌گیرد. مشکلات دیگر عبارتند از: مسألهٔ سلسله مراتب[۷]، (چرا این اختلاف زیاد بین مقیاس انرژی پلانک و مقیاس انرژی الکتروضعیف دیده می شود؟) تعدادی از پارامترهای مدل با دست وارد می‌شوند، جرم نوترینو[۸] نمی‌تواند در این نظریه لحاظ شود و مسائل کیهان‌شناسی نظیر مبدأ و طبیعت انرژی تاریک،[۹] مادهٔ تاریک[۱۰] و نظریه تورم[۱۱] در این مدل توضیح داده نمی‌شود.

ابرتقارن[۱۲] [۷] تعمیمی از مدل استاندارد است که به نظر می رسد تعدادی از مسائل ذکر شده در بالا را اصلاح می‌کند. با وجود این ابرتقارن یک تقارن خوب از جهان حاضر نمی‌باشد و خود دارای مشکلاتی است. بنابراین ابرتقارن به عنوان یک تقارن موضعی[۱۳] با گرانش جفت شده نظریه‌ای که به دست می آید ابرگرانش[۱۴] نامیده می‌شود. اگر چه ابرگرانش نظریهٔ گرانش را دربر می‌گیرد هنوز با نظریه میدان کوانتومی سازگار نمی‌باشد چرا که یک نظریه قابل بازبهنجارش[۱۵] نیست. مسائل دیگری نظیر مبدأ و طبیعت تورم و انرژی تاریک (مسأله ثابت کیهان‌شناسی)[۱٦] این که چرا جهان نظریه اتحاد بزرگ ابرتقارن را در مقابل سایر نظریه‌هااستفاده می‌کند و چرا فضا — زمان چهار بعدی است در این نظریه همچنان حل نشده باقی می‌ماند. در بیست سال گذشته نظریه ریسمان[۱۷] به عنوان چارچوب اصلی در پاسخ به چنین سؤالاتی ظهور

---

[۷] hierarchy problem
[۸] neutrino
[۹] dark energy
[۱۰] dark matter
[۱۱] inflation
[۱۲] supersymmetry
[۱۳] local
[۱۴] supergravity
[۱۵] non-renormalizable
[۱٦] cosmological constant problem
[۱۷] string theory

کرده است. نظریه ریسمان [۸] از مفهوم ذرات به عنوان نقاط ریاضی صرف نظر می‌کند و ذرات را به عنوان اجسام گسترده در نظر می‌گیرد. ابرتقارن یکی از اجزای نظریه ریسمان (ابرریسمان)[۱۸] است و بنابراین امید آن است که موفقیت‌های آشکاری در مدل ابرریسمان یافت شود. برای این که نظریه ابر ریسمان نظریه‌ای خودسازگار باشد این نظریه تعداد ابعاد فضا — زمان را پیشگویی می‌کند (ابر ریسمان در ۱۰ بُعد فرمول بندی شده است در حالی که ریسمان بوزونی در ۲٦ بعد وجود دارد). اگر چه نیاز است که تعدادی از مشکلات این نظریه مورد بررسی قرار گیرد تا نظریه ریسمان نظریه‌ای سازگار با طبیعت باشد. در نیمهٔ سال ۱۹۹۰ با استفاده از دوگانی‌ها[۱۹]، شامه‌ها[۲۰] و نظریه M[۲۱] به تعدادی از این مشکلات پرداخته شد. به عنوان مثال یک نظریه جالب توسط هراوا[۲۲] و ویتن[۲۳] [۹، ۱۰، ۱۱] پیشنهاد شد که نشان دادند در جفت شدگی قوی $E_8 \times E_8$ ریسمان ترکیبی[۲۴] با یک نظریه یازده بعدی که روی یک اُربیفلد[۲۵] $R^{10} \times S^1/Z_2$ فرمول بندی شده مرتبط می‌شود. بنابراین حدس زده می‌شود که یک تئوری کوانتومی اساسی یازده بعدی نظریه M وجود دارد که نه تنها فرمول بندی ابرریسمان پنج بعدی بلکه ابرگرانش یازده بعدی را در بر می‌گیرد.

در سال‌های اخیر نظریه‌های جهان شامه‌ای[۲٦] مطرح شده است که جهان چهار بعدی به عنوان یک ابر سطح (شامه) در یک فضا زمان با بعد بالاتر (توده) غوطه ور شده است به طوری که ذرات مدل استاندارد محبوس به شامه هستند حال آن که گرانش می‌تواند در فضای توده نیز منتشر شود[۱۲، ۱۳، ۱۴]. از دیدگاه نظریه

---

[۱۸] super string
[۱۹] dualities
[۲۰] branes
[۲۱] M theory
[۲۲] Horava
[۲۳] Witten
[۲۴] heterotic string
[۲۵] orbifold
[۲٦] brane-worlds

ریسمان، مدل‌های جهان شامه‌ای از مدل پیشنهاد شده توسط هراوا و ویتن، نظریه M، که نظریه مؤثر انرژی پایین متناظر با حد جفت شدگی $E_8 \times E_8$ نظریه ریسمان ترکیبی در فضای $AdS_5 \times S^5$ می باشد به دست می‌آید. این مدل به یک توده یازده بعدی با ابرگرانش یازده بعدی مربوط می شود که بعد یازدهم با تقارن مدارگونه Z_2 فشرده شده است. تقارن Z_2 در کیهان‌شناسی جهان شامه‌ای با یک توده AdS_5 (مدل راندال ساندروم[۲۷] نوع دوم) که شامه به عنوان یک مرز غوطه ور در فضای توده در نظر گرفته می‌شود به کار می‌رود. در این حالت انحنای عرضی[۲۸] مرز زمینه به طور کامل با تانسور انرژی — تکانه ماده محبوس بر شامه (شرط IDL)[۲۹] داده می‌شود.

شرط پرش اسرائیل معادلات فریدمن استاندارد را با یک جمله اضافی، متناسب با مجذور چگالی انرژی سیال کامل مقید شده به شامه، تصحیح می‌کند. در ابتدا جمله اضافی معادلات فریدمن متناسب با مجذور چگالی انرژی به عنوان یک حل مناسب در انبساط شتاب دار جهان در نظر گرفته شد. اگر چه به زودی نشان داده شد که جمله توان دوم ناسازگار با هسته‌زایی[۳۰] مدل استاندارد کیهان‌شناسی می‌باشد و برای سازگار بودن قیدهای اضافی را می‌طلبد [۱۸، ۱۷، ۱۶]. نواحی تورمی با انرژی بالا به علت حضور جمله توان دوم در معادلات فریدمن مقید می‌شوند که قیدهای به دست آمده از مقایسه با داده های اخیر از آزمایشهای $WMAP$ در آمده است [۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۹]. همچنین امواج گرانشی[۳۱] تولید شده از هندسه توده ممکن است اختلالات برداری روی شامه ایجاد کند که مدهای آن با داده های به دست آمده از همان آزمایش‌ها سازگار نمی‌باشد [۲۳]. این قیدهای مشاهداتی پیشنهاد می‌کند که کیهان‌شناسی جهان شامه‌ای با درَ نظر گرفتن تقارن Z_2 و یا شرط پرش اسرائیل باید به نوعی اصلاح

---

[۲۷] Randall-Sundrum
[۲۸] extrinsic curvature
[۲۹] Israel-Darmois-Lanczos
[۳۰] nucleosynthesis
[۳۱] gravitational wave

شود. روشی که در مقالات به ندرت استفاده می‌شود استفاده از شرایط پرش اسرائیل بدون در نظر گرفتن تقارن Z_2 می‌باشد[۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۶].

بنابراین کاربرد شرط پرش اسرائیل در کیهان‌شناسی جهان شامه‌ای با در نظر گرفتن تقارن Z_2 یا بدون آن مورد بحث و مناظره وسیع است. یکی از این مسائل با این حقیقت مرتبط می‌باشد که شرط پرش اسرائیل که انحنای عرضی را بر حسب ماده محبوس شده به شامه بیان می‌کند قیدهای تورمی ذکر شده در بالا را تولید می‌کند. بنابراین ممکن است بپرسیم که آیا این مشکل از خود شرط پرش اسرائیل است یا این که یک مسألهٔ ذاتی از انحنای عرضی و خواص نشاندگی آن است؟ اگر شرط پرش اسرائیل کنار گذاشته شود آیا ما توافق‌هایی را با داده های تورمی به دست می‌آوریم؟ اگر چنین باشد آیا از این داده می‌توانیم شرط پرش اسرائیل متفاوتی روی انحنای عرضی استنباط کنیم؟ آیا شرط پرش اسرائیل یک اصل مستقل است؟ و سر انجام آیا تقارن Z_2 سازگار با لازمه نشاندگی ساختار جهان شامه‌ای است؟

سناریوی جهان شامه‌ای تحت شرایطی عام تر ولی هنوز سازگار با نظریه جهان شامه‌ای به طور وسیع در دهه گذشته مطالعه و مجموعه وسیعی از حل‌ها بنابر مشاهدات اخیر یافت شده است [۳۳]. در این مقاله مایا و همکارانش معادلات مؤثر روی شامه را بدون استفاده از شرط پرش اسرائیل و تقارن Z_2 به دست آورده و در نهایت معادلات فریدمن تصحیح شده را به دست می‌آورند. این معادلات با جمله‌های هندسی که بر حسب انحنای عرضی تعریف می‌شوند تصحیح و منجر به تفسیر هندسی انرژی تاریک می‌شود [۳۴]. همچنین استدلال‌هایی در مورد یکتا بودن شرط پرش وجود دارد. در واقع فرم‌های دیگری از شرط پرش وجود دارد به طوری که شرایط گوناگون منجر به نتایج فیزیکی گوناگون می‌شود [۳۱]. به علاوه در حالی که بیش از یک بعد اضافی داشته باشیم شرط پرش اسرائیل دیگر وجود ندارد. دلیل این امر این است که در این حالت شامه مرز جدا کننده دو ناحیه متفاوت از فضای توده نخواهد بود. با توجه به این مطالب یک مدل جالب در [۳۵] معرفی شده است

که ذرات به یک ابر سطح چهار بعدی از طریق کنش یک پتانسیل محبوس کننده مقید شده‌اند. دینامیک ذرات محبوس به شامه با وجود یک پتانسیل تحدیدی در [۳۶] مطالعه شده است. در حد کلاسیک، تحدید ذرات باعث می‌شود که وجود ابعاد اضافه برای ذره آزمون نامحسوس و غیر قابل اندازه گیری باشد در حالی که در حالت کوانتومی کوانتش سیستم باعث می‌شود که جرم ذره آزمون کوانتیزه شود و اثرات ابعاد اضافه خود را به شکل میدان‌های پیمانه‌ای و نوعی پتانسیل که تابع انحنای خارجی است در معادلات میدان نشان دهند.

در این رساله ما مسأله انرژی تاریک و ماده تاریک را مدل جهان شامه‌ای بدون در نظر گرفتن تقارن آینه‌ای و شرط پرش بررسی می‌کنیم. مدل ما بر سه اصل اساسی بنا شده است: در نظر گرفتن کنش اینشتین هیلبرت برای فضای توده، فرضیه محبوس شدن ماده به شامه و نشاندگی شامه در فضای توده.

فصل ۲

مروری بر مدل‌های جهان شامه‌ای

همان طور که در مقدمه اشاره کردیم مدل‌های جهان شامه‌ای برگرفته از نظریهٔ ریسمان هراوا[۱] و ویتن[۲] [۹] هستند. ویژگی این مدل‌ها آن است که ذرات مدل استاندارد محبوس بر شامه هستند حال این که گرانش می تواند در ابعاد اضافه در فضای توده منتشر شود. این به این معنی است که گرانش اساساً یک برهم کنش ابعاد بالا است و ما فقط گرانش چهار بعدیِ مؤثر روی شامه را درک می کنیم و قادر به مشاهدهٔ ابعاد فشردهٔ مقیاس پلانک[۳] نیستیم چرا که برای این منظور به مقیاس انرژی پلانک نیاز داریم. در این فصل مدل های جهان شامه‌ای را مرور کرده، به توصیف سه روش متفاوت برای به دست آوردن گرانش چهار بعدی روی شامه می‌پردازیم.

---

[۱] Horava
[۲] witten
[۳] Planck

۱.۲ جهان شامه‌ای ADD

در مدل ارکانی — حامد، دیمپلوس و دوالی[۴] (ADD) [۱۲]، ضعیف بودن گرانش در مقیاس های بزرگتر از یک میلیمتر (قانون گرانش نیوتن[۵] تنها روی مقیاس های بزرگتر از یک دهم میلیمتر آزمایش می شود و زیر این مقیاس ممکن است انحراف از قانون نیوتنی وجود داشته باشد [۳۷]) وابسته به وجود ابعاد اضافه فشردهٔ $n \geq ۲$ می باشد. این مدل دارای دستاوردهایی است ازآن جمله مکانیسمی برای توضیح مسأله سلسله مراتب[۶] ارائه می دهد [۳۸]. در مدل ADD در مقیاس های طول کوچکتر از مقیاس ابعاد اضافه $(r < L)$، پتانسیل گرانشی $۴ + n$ بعدی را داریم

$$V \sim r^{-(۱+n)}. \qquad (۱)$$

در حالی که در مقیاس های بزرگتر از L پتانسیل به صورت پتانسیل چهار بعدی رفتار می‌کند

$$V \sim L^{-n} r^{-۱}, \qquad (۲)$$

که n تعداد ابعاد اضافه را نشان می‌دهد. مقیاس پلانک مشاهده شده به صورت حاصل ضرب مقیاس پلانک بنیادی در حجم ابعاد اضافی تعریف می‌شود[۱۵]

$$M_{Planck}^{۲} \sim M_{۴+n}^{۲+n} L^{n}. \qquad (۳)$$

بنابراین در مدل ADD به علت وجود ابعاد اضافی، مقیاس پلانک بنیادی از مقیاس پلانک مشاهده شده کوچکتر می‌باشد.

---

[۴] Arkani-Dimpoulos-Dvali

[۵] Newton

[۶] hierarchy problem

۲.۲ جهان شامه‌ای RS I

مدل راندال — ساندروم[۷] نوع اول شامل دو شامهٔ مینکوفسکی[۸] است که در یک توده پنج بعدی آنتی — دسیتر[۹] قرار گرفته‌اند [۱۳]، (شکل ۱). متریک توده در سیستم مختصاتی گاوسی به صورت زیر تعریف می‌شود

$$ds^2 = a^2(y)\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu + dy^2, \qquad (۴)$$

به طوری که $\eta_{\mu\nu}$ متریک فضای مینکوفسکی و $a(y)$ فاکتور پیچش می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$a(y) = e^{-|y|/\ell}, \qquad (۵)$$

که ℓ مقیاس انحنای آنتی — دسیتر AdS فضای توده و بعد اضافه نیز فشرده می‌باشد. برای اینکه فضای توده فشرده باشد ما از تقارن Z_2 کمک می‌گیریم به طوری که

$$y \leftrightarrow -y, \quad L+y \leftrightarrow L-y, \qquad (۶)$$

که L فاصله جدا کننده دو شامه است. می توان نشان داد که شرط هندسه مینکوفسکی برای شامه‌ها ایجاب می‌کند که شامه ها دارای تنش مساوی و مخالف باشند. شامه با تنش مثبت، در $y=0$، شامه TeV یا شامه پنهان[۱۰] و شامه با تنش منفی، در $y=L$، شامه پلانک یا شامه آشکار[۱۱] نامیده می‌شود. تنش های شامه‌ها را به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$\lambda_{y=0} = -\lambda_{y=L} = \frac{6}{\kappa_5^2 \ell} \equiv \lambda, \qquad (۷)$$

---

[۷] Randall-Sundrum
[۸] Minkowski
[۹] Anti-de Sitter
[۱۰] hidden brane
[۱۱] visible brane

که $\kappa_5^2 = 8\pi G_5 = M_5^{-3}$ است. ما برای حل کردن مسأله سلسله مراتب روی شامه با تنش منفی زندگی می کنیم. شامه پنهان مقیاس انرژی بنیادی M_5 را دارد. سپس در نتیجهٔ تنیده بودن فضای توده مقیاس انرژی بنیادی، روی شامه آشکار M_{Planck} می باشد یعنی

$$M_{Planck} = M_5^3 \ell [1 - e^{-2L/\ell}]. \qquad (۸)$$

۳.۲ جهان شامه‌ای RS II

مدل راندال — ساندروم نوع دوم [۱۴] شامل یک شامه با تنش مثبت می‌باشد که در $y = 0$ قرار گرفته است، (شکل ۲). در این مدل بعد اضافه نامتناهی می‌باشد. با توجه به اینکه مدل تنها دارای یک شامه می‌باشد بنابراین هیچ مکانیسمی برای حل مسأله سلسله مراتب ارائه نمی‌دهد [۳۹]. در حد انرژی های پایین وابسته به پیچش فضای توده، گرانش در اطراف شامه مقید شده است. در حد انرژی های بالا، فاکتور پیچش برای مقید کردن گرانش در اطراف شامه کافی نمی‌باشد و ناظر روی شامه گرانش پنج بعدی را احساس می‌کند. انرژ ی بنیادی و مقیاس پلانک به صورت زیر مرتبط می‌شوند

$$M_{Planck}^2 = M_5^3 \ell, \qquad (۹)$$

یعنی شامه دوم به بی نهایت فرستاده شده است ($L = \infty$). در مدل راندال — ساندروم در حد انرژی‌های بالا ناظر روی شامه گرانش پنج بعدی را احساس می‌کند. اختلاف بین گرانش پنج بعدی و چهار بعدی با پتانسیل تصحیح شده زیر داده می‌شود