به نامِ خداوندِ جانُ خرد
کزین برتر اندیشه بر نگذرد

١٥١ ٨٦٤

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

جواب‌های فضازمان متقارن کروی در گرانش تصحیح یافته

پایان‌نامهٔ دکتری

رضا صفاری خمیرانی

۱۳۸۷ /۵/۲۸

استاد راهنما: دکتر سهراب راهوار

استاد مشاور: استاد محمد رضا خواجه‌پور

خرداد ۱۳۸۷

۱۰۱۸۶۴

تقدیم به

مهندس عزیز و فداکارم، سلماز

و دختر دل‌بندم، تینین

قدردانی و تشکر

در ابتدا لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر ثبوتی و دکتر خواجه‌پور به‌خاطر همه‌ی تلاش‌های ـ شان در جهت بنیان‌گذاری و هدایت این دانش‌گاه ارزش‌مند که محیطی مناسب برای تفکر و تحقیق است، تشکر نمایم.

هم‌چنین از استاد راه‌نمای پایان‌نامه ام آقای دکتر راهوار، به‌خاطر منش ـ بزرگ‌وارانه و صمیمی ـ شان، تشکر می‌نمایم. رفتار ایشان الگوی ارزش‌مندی برای من و سایر دانشجویان ایشان در آینده خواهد بود. در طول مدت کوتاهی که افتخار شاگردی ـ ایشان را داشتم، هم‌واره بدون هیچ محدودیتی شنونده و هدایت کننده‌ی جریان فکری ام، چه در زمینه‌ی موضوع این پایان‌نامه و چه غیر از آن، بودند.

مجدداً از آقای دکتر خواجه‌پور به‌خاطر پذیرش زحمت مشاوره‌ی این پایان‌نامه، تشکر می‌نمایم. وجود ایشان باعث اعتماد به نفس بیش‌تر در ادامه‌ی مسیر بود.

از هیأت داوران این پایان‌نامه، آقایان دکتر نصیری، دکتر سپنجی، دکتر نوری و دکتر میری به‌خاطر زحمت خواندن این پایان‌نامه متشکرم.

از پدر و مادرم که هم‌واره در طول دوران تحصیل مشوق من بودند و با دعاهای شان مرا به سوی آینده بدرقه می‌کردند، دست‌بوس و سپاس‌گذارم.

از خانواده‌ی همسرم نیز که در طول دوران تحصیل هم‌واره با آغوش ـ باز پذیرای ما بودند کمال تشکر را دارم.

خاطرات بودن در کنار دوستان هم‌دانش‌گاهی ام به‌خصوص آقایان دکتر مهدوی‌فر، دکتر صفری، دکتر ندایی و دکتر محمدخانی، هرگز از یاد ام نخواهد رفت.

نمی‌دانم چگونه می‌توانم از همسر عزیزم تشکر کنم. او که در حین کار و فعالیت دانش‌گاهی مسئولیت نگه‌داری از دختر دل‌بندمان را عهده‌دار بود و هست و خواهد بود. تنها جمله‌ای که در حق ـ فداکاری‌ها زحمات اش می‌توانم بگویم این است که، بی‌نهایت سپاس‌گذارم.

چکیده

این پایان‌نامه بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نظریه‌های گرانشی که به‌عنوان تصحیح یا تعمیم نسبیت عام شناخته می‌شوند، نوشته شده است. انگیزه‌ی تفکر در این نظریه‌ها ریشه در کیهان‌شناسی و اخترفیزیک دارد که در آن‌ها مسائلی چون انرژی تاریک و ماده‌ی تاریک مطرح است. اصول اولیه و تعابیر هندسی ای که یک نظریه‌ی گرانش از آن سرچشمه می‌گیرد، به‌شکل مفید آورده شده است. بررسی این اصول و تعابیر موجب روشن شدن فرضیات بنیادی نسبیت عام و درنتیجه پیش‌نهادهای ممکن برای تصحیح آن می‌شود. تعدادی از تصحیحات ممکن با تأکید بر نظریه‌های اسکالر ـ تانسوری، نظریه‌های متریکی $f(R)$ و نظریه‌های پالاتینی $f(R)$ به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفته است. ویژگی‌های این نظریه‌ها به‌خصوص هم‌ارزی دینامیکی آن‌ها تا حد امکان بیان شده است. هم‌چنین پدیده‌شناسی حوزه‌های مربوط به منظومه‌ی خورشیدی، کهکشانی و کیهانی این نظریه‌ها مطالعه شده است. در پایان با تکیه بر داده‌های رصدی کاوش‌گرهای پاینیر ـ ده و یازده، داده‌های مربوط به منحنی سرعت ستارگان به دور ـ مرکز ـ کهکشان‌های مارپیچی و داده‌های مربوط به فاصله‌ی درخشندگی ابرنواخترهای نوع Ia در انتقال به سرخ‌های مختلف، نشان داده شده است که این نظریه‌ها توانایی حل مشکلات موجود در مقیاس‌های مختلف کیهانی را دارند.

فهرست

چکیده . . . . . پنج

مقدمه . . . . . ده

۱ آیا نظریه‌ی نسبیت عام نظریه‌ی سازگار گرانش است؟

۱.۱ مقدمه ۱

۱.۲ سردرگمی‌های کیهان‌شناختی و اخترفیزیکی ۴

۱.۲.۱ مختصری از کیهان‌شناسی ۴

۱.۲.۲ نخستین دلیل برای شتاب ۷

۱.۲.۳ مشاهدات کیهان‌شناسی و اخترفیزیکی ۱۱

۱.۲.۴ ثابت کیهان‌شناسی و مشکلات مربوط به آن ۲۴

۱.۲.۵ میدان‌های اسکالر به‌عنوان میدان‌های ماده در کیهان‌شناسی ۲۸

۱.۲.۶ مشکل انرژی تاریک ۳۰

۱.۲.۷ مشکل ماده‌ی تاریک ۳۳

۱.۲.۸ جمع بندی ۳۴

۲ اساس نظریه‌ی گرانش

۲.۱ چارچوب دیکی و نظریه ی متریکی ۳۶
۲.۲ توصیف هندسی فضازمان ۴۲
۲.۳ نسبیت عام از میان فرضیات اش ۴۴
۲.۴ کاهش فرضیات ۴۹
۲.۴.۱ رویکرد پالاتینی ۴۹
۲.۴.۲ معادلات میدان مرتبه‌ی بالاتر ۵۲
۲.۴.۳ میدان‌های اضافی که در گرانش دخالت می‌کنند ۵۳

۳ کنش‌های تصحیح یافته و معادلات میدان گرانشی

۳.۱ مقدمه ۵۶
۳.۲ نظریه‌ی گرانش اسکالر ـ تانسوری ۵۷
۳.۲.۱ نظریه‌ی گرانش برنز ـ دیکی ۵۷
۳.۲.۲ کنش و معادلات میدان ۵۸
۳.۳ گرانش $f(R)$ در رویکرد متریک ۶۱
۳.۳.۱ کنش ۶۱
۳.۳.۲ معادلات میدان ۶۲

۳.۴ گرانش $f(R)$ در رویکرد پالاتینی ۶۴
۳.۴.۱ کنش ۶۴
۳.۴.۲ معادلات میدان ۶۵
۳.۵ هم‌ارزی نظریه‌ها ۶۸
۳.۶ گرانش $f(R)$ و نظریه‌ی برنز ـ دیکی ۷۰
۳.۶.۱ بازتعریف متغیرها ۷۰
۳.۶.۲ ناورداهای خمش مرتبه‌های بالاتر ۷۲
۳.۷ پس چرا گرانش $f(R)$؟ ۷۳

۴ تقریب میدان ضعیف در گرانش تصحیح یافته

۴.۱ مقدمه ۷۵
۴.۲ تقریب نیوتنی در گرانش $f(R)$ ۷۶
۴.۲.۱ گرانش $f(R)$ در رویکرد متریک ۷۶
۴.۲.۲ گرانش $f(R)$ در رویکرد پالاتینی ۸۱
۴.۳ حل معادلات میدان تصحیح یافته در فضازمان ایستا در تقارن کروی ۸۶
۴.۳.۱ اسکالر خمش ریچی در تقارن کروی ۸۷
۴.۳.۲ حل معادلات میدان در تقارن کروی با پیش‌نهاد تابع $F(r)$ ۹۰
۴.۳.۳ مقیاس منظومه‌ی خورشیدی $(r \ll d)$ ۹۲
۴.۳.۴ مقیاس کهکشانی $(r > d)$ ۹۵

۴.۳.۵ شرط سازگاری جواب‌ها ۱۰۱
۴.۳.۶ پیش‌نهاد یک کنش عام ۱۰۴
۴.۳.۷ جمع بندی ۱۰۵

۵ کیهان‌شناسی در گرانش تصحیح یافته

۵.۱ مقدمه ۱۰۶
۵.۲ گرانش $f(R)$ در کیهان‌شناسی ۱۰۷
۵.۲.۱ معادلات فریدمن تعمیم یافته در رویکرد متریک ۱۰۷
۵.۲.۲ جمله‌ی $1/R$ و کیهان‌شناسی دیرزمان ۱۰۸
۵.۲.۳ مدل‌های کلی‌تر و قیدهای کیهان‌شناسی ۱۱۰
۵.۲.۴ معادلات فریدمن تعمیم یافته در رویکرد پالاتینی ۱۱۲
۵.۳ تاریخ‌چه‌ی انبساط کیهان با استفاده از ابرنواخترهای نوع Ia ۱۱۳
۵.۴ بررسی مدل پیش‌نهادی با استفاده از داده‌های ابرنواخترهای نوع Ia ۱۲۳
۵.۴.۱ جمع بندی ۱۲۵
مراجع ۱۲۷

مقدمه

حدود ـ یک قرن از معرفی ـ نسبیت ـ عام، موفقیت‌های ـ بی‌نظیر ـ آن در توصیف ـ گرانش و به تبع ـ آن مدلی از کیهان که به مدل ـ استاندارد ـ کیهان‌شناسی معروف است، می‌گذرد. مدل ـ استاندارد ـ کیهان‌شناسی که بر اساس ـ نسبیت ـ عام پایه گذاری شده، با تکیه بر یک سری فرض‌های ـ اولیه توانسته است تصویر ـ کاملی از کیهان ارائه دهد.

نظریه‌ی ـ انفجار ـ بزرگ و پیش‌بینی‌های ـ آن در تولید ـ عناصر ـ سبک، طیف ـ توانی ـ حاصل از تابش ـ پس‌زمینه‌ی ـ ریزموج ـ کیهانی و مدل‌های ـ تشکیل ـ ساختار، مدل ـ استاندارد ـ کیهان‌شناسی را بسیار مورد ـ توجه ـ کیهان‌شناسان قرار داده است. اما نتایج ـ به‌دست آمده از مشاهدات ـ کیهانی در ده سال ـ گذشته واقعیاتی را آشکار نمود که موجب ـ خدشه‌دار شدن ـ مدل ـ استاندارد ـ کیهان‌شناسی شد. این مشاهدات که همان داده‌های ـ مربوط به ابرنواخترهای ـ نوع ـ Ia در انتقال به سرخ‌های ـ متفاوت است، به‌خوبی زمینه‌ی ـ ایجاد ـ تردید در خوش‌باوری نسبت به درک و شناخت ـ کامل ـ کیهان را به وجود آورده است. این نوع ابرنواخترها کم‌سوتر از آن‌چه باید دیده شوند، مشاهده می‌شوند. برای ـ توجیه ـ این پدیده یا باید فرض کنیم کیهان باز است یا این‌که انبساط ـ کیهان شتاب‌دار است. از طرفی مشاهدات ـ دقیق ـ مربوط به تابش ـ پس‌زمینه‌ی ـ ریزموج ـ کیهانی نشان می‌دهند که هندسه‌ی ـ کیهان تخت است. در این صورت احتمالاً انبساط ـ کیهان، شتاب‌دار است. پذیرفتن ـ این فرض نقطه‌ی ـ آغاز ـ پرسش ـ مهمی‌ست و آن این است که، عامل ـ ایجاد ـ انبساط ـ تند شونده چیست؟ آن‌چه بر اهمیت ـ موضوع می‌افزاید این است که این عامل هرچه هست حدود ـ هفتاد درصد ـ چگالی ـ کل ـ عالم را تشکیل می‌دهد. ساده‌ترین پاسخ به این پرسش، ثابت ـ کیهان‌شناسی‌ست. به میان کشیدن ـ ثابت ـ کیهان‌شناسی در پاسخ به این پرسش، مشکلات ـ دیگری از قبیل ـ تنظیم ـ ظریف، مرتبه‌ی ـ مقداری و منشأ ـ ثابت ـ کیهان‌شناسی را به وجود می‌آورد که باعث ـ مطرح شدن ـ ایده‌ی ـ وجود ـ شکل ـ نوینی از انرژی با ویژگی‌های ـ نامتعارف به نام انرژی ـ تاریک می‌شود. این ره‌یافت توانست در مدت زمان ـ کوتاهی موفقیت‌های ـ چشم‌گیری به‌دست آورد. اما پرسش‌های ـ اساسی ـ بسیاری مربوط به آن، هنوز باقی‌ست. مهم‌ترین ـ آن‌ها مربوط به منشأ ـ میدان ـ اسکالری‌ست که نقش ـ انرژی ـ تاریک را ایفا می‌کند.

از سوی ِ دیگر مشاهدات ِ مربوط به مقیاس‌های ِ کوچک‌تر مانند ِ خوشه‌های ِ کهکشانی، کهکشان و منظومه‌ی ِ خورشیدی، مبین ِ وجود ِ رفتارهای ِ ناشناخته‌ای هست اند. در خوشه‌های ِ کهکشانی جرم ِ محاسبه شده از دینامیک ِ اجزای ِ خوشه بسیار بیش‌تر است از جرم ِ قابل ِ مشاهده‌ی ِ آن‌ها. این فزونی در بعضی از خوشه‌ها به مقدار ِ شگفت آوری در حدود ِ چندصد برابر می‌رسد. در کهکشان‌های ِ مارپیچی هم تغییرات ِ سرعت ِ حرکت ِ دایره‌ای ِ ستارگان ِ داخل ِ کهکشان نسبت به فاصله از مرکز ِ آن، با مکانیک ِ نیوتنی و رابطه‌ی ِ سرعت ِ کپلری سازگاری ندارد. مطابق ِ نظریه‌ی ِ گرانش ِ موجود، ثابت ماندن ِ اندازه‌ی ِ این سرعت باید به‌دلیل ِ وجود ِ جرم ِ عظیمی باشد که گاهی مقدار ِ آن به ده برابر ِ جرم ِ قابل ِ مشاهده‌ی ِ کهکشان نیز می‌رسد. همین دو مورد دلیل ِ کافی برای ِ قوت گرفتن ِ این ایده را فراهم نمود که جرم ِ قابل ِ مشاهده‌ی ِ عالم تنها چیزی کم‌تر از ده درصد ِ جرم کل ِ عالم است. آن‌چه را که به‌نظر وجود دارد اما تاکنون هم مشاهده نشده است، ماده‌ی ِ تاریک نامیدند. با به میان آمدن ِ این نوع ِ نامتعارف از ماده پرسش ِ مشابهی مطرح شد و آن این بود که منشأ ِ ماده‌ی ِ تاریک چیست؟ پاسخ‌های ِ زیادی در این رابطه مطرح شده اما برای ِ رسیدن به جواب ِ قطعی هنوز راه ِ درازی در پیش است.

مورد ِ مشاهده شده در منظومه‌ی ِ خورشیدی نیز به وجود ِ یک ناسازگاری با نظریه‌ی ِ گرانش شهادت می‌دهد. داستان از این قرار است که داده‌های ِ دریافت شده از اکثر ِ کاوش‌گرهای ِ فرستاده شده به سمت ِ خارج از منظومه‌ی ِ خورشیدی، به‌ویژه کاوش‌گرهای ِ پاینیر ِ ۱۰ و ۱۱ بر وجود ِ یک شتاب ِ ثابت ِ خورشیدگرا دلالت می‌کنند که به آن شتاب ِ ناهنجار ِ پاینیر نیز می‌گویند. کوشش‌های ِ فراوانی انجام شده است تا توجیهی طبیعی، سخت‌افزاری و یا نرم‌افزاری در رد ِ وجود ِ این شتاب ارائه کنند، که همگی با شکست مواجه شده است. آن‌چه به‌تازگی دیده می‌شود، مطرح شدن ِ ایده‌ی ِ وجود ِ ماده‌ی ِ تاریک درون ِ منظومه‌ی ِ خورشیدی‌ست.

به غیر از پاسخ‌ها یی که در توجیه ِ تناقضات ِ گفته شده ارائه شد، فرضیات ِ دیگری نیز به‌شکل ِ موازی در جریان بوده است که بررسی ِ آن‌ها در زمان‌های ِ مختلف بسته به انگیزه‌ی ِ ارائه کنندگان یا توجه ِ مخاطبین با شدت و ضعف مواجه شده است. از جمله می‌توان به نظریه‌های ِ جای‌گزین ِ گرانش اشاره نمود که موضوع ِ اصلی ِ این پایان‌نامه نیز می‌باشد. در این رهیافت آن‌چه مرسوم است تغییر ِ بخش ِ گرانشی ِ کنش است. این کار به گونه‌ای انجام می‌شود که جواب ِ معادلات ِ میدان در گرانش ِ تصحیح یافته با نتایج ِ مشاهداتی سازگار باشد. در این پایان‌نامه با تأکید بر لزوم ِ سازگاری ِ متریک ِ به‌دست آمده از حل ِ معادلات ِ میدان در گرانش ِ تصحیح یافته با دینامیک ِ مشاهداتی، سعی شده است تا از روش ِ نزدیک به حل ِ معکوس و ارائه‌ی ِ مدل ِ پیش‌نهادی

کنشی به‌دست آید که در همه‌ی مقیاس‌های مختلف به‌خوبی کار کند. درنتیجه با اعمال این کنش ضمن برآورده نمودن آزمون‌های منظومه‌ی خورشیدی و کهکشانی در رد ماده‌ی تاریک، مسئله‌ی انبساط تند شونده‌ی عالم و عدم نیاز به انرژی تاریک در مقیاس کیهانی نیز بررسی می‌شود. محور اصلی این پایان‌نامه بر پنج فصل استوار است که به‌شکل زیر مرتب شده اند:

در فصل اول به‌طور مفصل به بررسی مشکلات موجود و عدم سازگاری مشاهدات با نظریه می‌پردازیم. به‌گونه‌ای که تا حد امکان راه حل‌های ارائه شده و مشکلات پی‌آمد آن‌ها نیز مطرح می‌شود. در فصل دوم بیش‌تر به اساس نظری نسبیت عام و آشنایی با روندهای مختلف معرفی نظریه به عنوان نظریه‌ی جامع گرانش می‌پردازیم. در فصل سوم سازُ کار نظریه‌ی گرانش $f(R)$ در دو رویکرد متریک و پالاتینی تا حد امکان مطالعه می‌شود. در فصل چهارم ضمن بررسی مطالعات انجام شده روی گرانش تصحیح یافته در تقریب میدان ضعیف، به معرفی مدل پیش‌نهادی می‌پردازیم. با استفاده از این مدل، متریک و دینامیک مورد تأیید آزمون‌های منظومه‌ی خورشیدی و کهکشانی را به‌دست آورده، کنش سازگار با آن دو مقیاس را معرفی می‌نماییم. در فصل پنجم نیز به مطالعه‌ی کیهان‌شناسی در گرانش تصحیح یافته و چگونگی سازگاری کنش عام پیش‌نهاد شده با داده‌های ابرنواختری می‌پردازیم.

مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه بر اساس سه مقاله‌ی داوری شده‌ی زیر تدوین شده است که عبارت اند از:

1. " $f(R)$ **Gravity: From the Pioneer Anomaly to Cosmic Acceleration** "
   R. Saffari and S. Rahvar
   Phys. Rev. D **77**, 104028 (2008) [arXiv: 0708.1482 [astro-ph]];

2. " **Consistency Condition of Spherically Symmetric Solutions in** $f(R)$ **Gravity** "
   R. Saffari and S. Rahvar
   accepted for publication in Mod. Phys. Lett. A (2008) [arXiv: 0710.5635 [astro-ph]];

3. " **Spherically Symmetric Solutions in** $f(R)$ **Gravity Theories** "
   R. Saffari and S. Rahvar
   accepted for publication in Proceedings of the 13th Russian Gravitational Conference,
   International Conference on Gravitation, Cosmology and Astrophysics, Which will be held on June 23-28, 2008, PFUR, Moscow, Russia.

فصل اول

آیا نظریه‌ی نسبیت عام نظریه‌ی سازگار گرانش است؟

۱.۱ مقدمه

گرانش یک اندرکنش بنیادی‌ست که بارها در زندگی روزمره آزموده می‌شود و بدون هیچ دانش ویژه ای قابل درک است، اما هنوز به‌عنوان معمایی‌ترین بخش فیزیک باقی مانده است.

گالیله[۱] با ساختن ساده‌ترین ابزار آزمایشی مناسب، اندرکنش گرانشی را در معرض تحقیقات تجربی قرار داد. او اولین کسی بود که در پایان قرن شانزدهم میلادی، با معرفی آونگ و سطوح شیب‌دار به مطالعه‌ی گرانش زمینی پرداخت. به‌نظر می‌رسد گرانش نقش مهمی در پیش‌رفت ایده‌های گالیله درباره‌ی لزوم آزمایش در پژوهش، بازی می‌کرد. این ایده‌ها به‌نوبه‌ی خود تأثیر به‌سزا یی در تفکر علمی نوین داشت. هرچند که در سال ۱۶۶۵ نیوتن[۲] با معرفی قانون مشهور « نیروی گرانشی عکس مجذوری » گرانش

[۱] Galilei

[۲] Newton

زمینی و گرانش ـ سماوی را با یک نظریه‌ی ـ واحد به هم پیوند داد. نظریه‌ی ـ نیوتن پیش‌بینی‌های ـ دقیقی برای ـ پدیده‌های ـ گوناگون در مقیاس‌های ـ مختلف داشت که شامل ـ آزمایش‌های ـ زمینی و حرکت ـ مداری می‌شد.

بدیهی‌ست که سهم ـ نیوتن در گرانش، جدا از سهم ـ گران‌بهای ـ وی در تمام ـ فیزیک، منحصر به‌بیان ـ « قانون ـ عکس ـ مجذور » نمی‌شود. توجه ـ بیش‌تر به مبانی ـ مفهومی ـ نظریه‌ی ـ گرانشی ـ نیوتن، دو ایده‌ی ـ کلیدی را آشکار می‌کند: ۱) ایده‌ی ـ فضای ـ مطلق، با این تصویر که فضا پهنه ای صلب با ساختار ـ تأثیر ناپذیر است و پدیده‌های ـ فیزیکی در آن اتفاق می‌افتند. ۲) ایده ای که بعدها اصل ـ هم‌ارزی ـ ضعیف نامیده شد و به زبان نظریه‌ی ـ نیوتنی یعنی این‌که جرم ـ لختی همان جرم ـ گرانشی‌ست.

این پرسش که نظریه‌ی ـ نیوتن یا هر نظریه‌ی ـ فیزیکی ـ دیگر درست است یا نادرست، پرسش ـ درستی نیست؛ زیرا هر نظریه‌ی ـ سازگار، ظاهراً درست است. پرسش ـ مناسب می‌تواند این باشد که این نظریه در توصیف ـ جهان ـ فیزیکی چقدر قدرت‌مند است، یا به‌تر از آن، بزرگی ـ آن بخش از جهان ـ فیزیکی که توسط ـ این نظریه به‌طور ـ کامل توصیف می‌شود چقدر است. هم‌چنین می‌توان پرسید که یک‌تایی ـ نظریه در توصیف ـ پدیده‌های ـ مرتبط چگونه است. اگرچه پرسش‌های ـ فوق دیر یا زود مطرح شدند، اما تا بیست سال بعد از معرفی ـ گرانش ـ نیوتنی، همه‌ی ـ جوانب ـ مرتبط با گرانش که تا آن زمان کشف شده بود، به‌درستی توسط ـ آن توصیف می‌شد.

در سال ـ ۱۸۵۵ لو وریه[۳] یک پیش‌روی ـ اضافه به اندازه‌ی ـ ۳۵ ثانیه‌ی ـ قوسی در هر قرن در نقطه‌ی ـ حضیض ـ مدار ـ سیاره‌ی ـ تیر مشاهده کرد و پس از آن یعنی در سال ـ ۱۸۸۲، نیوکام[۴] این پیش‌روی را بسیار دقیق‌تر از وی برابر ـ ۴۳ ثانیه‌ی ـ قوسی در هر قرن اندازه گیری کرد. این حقیقت ـ تجربی به‌وسیله‌ی ـ نظریه‌ی ـ نیوتن پیش‌بینی نشده بود. باید به این نکته اشاره کرد که در ابتدا لو وریه تلاش کرد تا با فرض وجود ـ یک سیاره‌ی ـ دیگر در داخل ـ مدار ـ تیر که نادیده مانده، این پیش روی را در قالب ـ گرانش ـ نیوتنی توصیف کند. ظاهراً او تحت ـ تأثیر ـ این واقعیت که کژدیسی ـ مشاهده شده‌ی ـ مدار ـ سیاره‌ی ـ اُرانوس در سال ـ ۱۸۴۶ باعث ـ کشف ـ نپتون و درنتیجه پیش بینی ـ درست ـ مکان و تکانه‌اش شد، قرار گرفته بود. اگرچه این درونی‌ترین سیاره هیچ گاه پیدا نشد.

---

[۳] Le Verrier

[۴] Newcomb

از سوی دیگر، در سال ۱۸۹۳ ماخ[۵] آن‌چه را که بعدها توسط آینشتاین[۶] « اصل ماخ » نام گرفت، بیان نمود. این جزء اولین حمله‌های جدی به ایده‌ی فضای مطلق نیوتن بود. ایده‌ی ماخ در فرمول‌نویسی اولیه نسبتاً مبهم مطرح شده بود و در اصل بعدها توسط آینشتاین از میان جملات « ... لختی از نوعی اندرکنش بین اجسام سرچشمه می‌گیرد ... » به مسیر اصلی فیزیک آورده شد. بدیهی‌ست که این گفته در تناقض با ایده‌های نیوتن است که مطابق آن هم‌واره لختی وابسته به چارچوب مطلق فضاست. بعدها بیان روشن‌تری از اصل ماخ که ذاتاً از آن متفاوت بود توسط دیکی[۷] مطرح شد: « ثابت گرانشی باید تابعی از توزیع جرم در عالم باشد ». این ایده برخلاف ایده‌ی ثابت گرانشی جهانی و غیر قابل تغییر نیوتن بود. با مطرح شدن این ایده، اصول موضوعه‌ی بنیادی نیوتن مورد تجدید نظر قرار گرفت.

در سال ۱۹۰۵ نسبیت خاص توسط آینشتاین معرفی شد و گرانش نیوتنی با یک چالش جدی روبه‌رو شد. نظریه‌ی جدید آینشتاین که یک سری از پدیده‌های مرتبط با فیزیک ناگرانشی را توصیف می‌کرد، نشان داد که با گرانش نیوتنی ناسازگار است. حرکت نسبی و همه‌ی مفاهیم پیوند یافته به آن به ماورای ایده‌های گالیله و نیوتن رفت و به‌نظر می‌رسید که نسبیت خاص باید به طریقی برای توصیف حرکت در چارچوب‌های نالخت تعمیم یابد. در سال ۱۹۰۷، آینشتاین هم‌ارزی بین گرانش و لختی را معرفی کرد و با موفقیت آن را برای پیش‌گویی انتقال به سرخ گرانشی به‌کار برد. سرانجام در سال ۱۹۱۵، او نظریه‌ی نسبیت عام را که تعمیم یافته‌ی نسبیت خاص و دربر گیرنده‌ی گرانش بود، به پایان رساند. جالب توجه است که نظریه کاملاً با نتایج آزمایشی پیش‌روی مدار سیاره‌ی تیر و خمیدگی گرانشی نور توسط خورشید که در طول خورشید گرفتگی سال ۱۹۱۹ توسط اِدینگتُن[۸] اندازه گیری شد، مطابقت داشت.

نسبیت عام که گرانش نیوتنی را برانداخت، تاکنون پابرجاست و نظریه‌ی پذیرفته شده‌ی پدیده‌ی گرانش است. در این میان گرانش نیوتنی جاذبه‌ی خود را برای فیزیک‌پیشه‌ها از دست نداد و هنوز برای بسیاری از کاربردهای مرتبط با گرانش کافی‌ست. البته به این نکته پی برده شد که در مقایسه با نسبیت عام از اعتبار

---

[۵] Mach

[۶] Einstein

[۷] Dicke

[۸] Eddington

محدودی برخوردار است، اما در حدی از شدت‌ِ میدان‌ِ گرانشی و سرعت، به‌ناچار نسبیت‌ِ عام به گرانش‌ِ نیوتنی کاهش می‌یابد. اگرچه به‌واسطه‌ی‌ِ نسبیت‌ِ عام، معادلات‌ِ گرانش‌ِ نیوتن تعمیم یافت و برخی از اصول‌ِ موضوعه‌ی‌ِ آن مانند‌ِ چارچوب‌های‌ِ مطلق طرد شد، اما بعضی از گوشه‌های‌ِ آن مانند‌ِ اصل‌ِ هم‌ارزی هنوز در بنیادهای‌ِ نسبیت‌ِ عام جای دارد.

این مرور‌ِ مختصر، گذشته از جذابیت‌های‌ِ تاریخی‌اش، بسیار کاربردی طرح ریزی شده است. نسبیت‌ِ عام مشرف به رویارو یی با پرسش‌ها یی‌ست که گرانش‌ِ نیوتنی با آن‌ها مواجه شد. بسیاری نیز معتقدند که هم‌اکنون با این مشکلات مواجه است. در بخش‌ها یی که پیش‌ِ روست، حقایق‌ِ تجربی و مشکلات‌ِ نظری یی که این موارد را بیان می‌کنند، معرفی می‌شود. جالب‌ِ توجه است که شباهت‌های‌ِ فوق‌العاده ای با مشکلات‌ِ مرتبط با گرانش‌ِ نیوتنی وجود دارد. این مشکلات در توصیف‌ِ مشاهدات‌ِ به‌خصوص، ناسازگاری با نظریه‌های‌ِ دیگر و عدم وجود‌ِ یک‌تایی به‌چشم می‌آیند. پرسش‌ِ عنوان‌ِ این بخش به همین دلیل است.

۱.۲ سردرگمی‌های کیهان‌شناختی و اخترفیزیکی

۱.۲.۱ مختصری از کیهان‌شناسی

مقیاس‌ِ کیهانی، مقیاسی‌ست که مهم‌ترین کاربردهای‌ِ گرانش در آن به‌چشم می‌آید. اگر فرض کنیم که سایر‌ِ اندرکنش‌ها کوتاه‌برد هست اند، انتظار داریم گرانش تنها نیروی‌ِ حکم‌ران‌ِ تحولات‌ِ کیهانی باشد. در کیهان‌شناسی کل‌ِ کیهان به‌صورت‌ِ یک‌جا توصیف می‌شود. برای‌ِ توصیف‌ِ کمّی از کل‌ِ کیهان ابتدا ماده و هندسه‌ی‌ِ کیهان را به‌شکل‌ِ ایده‌آل یعنی هم‌گن و هم‌سان‌گرد در نظر می‌گیریم. ماده‌ی‌ِ تشکیل دهنده‌ی‌ِ کیهان با دو پارامتر‌ِ چگالی‌ِ یک‌نواخت‌ِ ρ و فشار‌ِ یک‌نواخت‌ِ p توصیف می‌شود. در توصیف‌ِ هندسه‌ی‌ِ کیهان نیز به‌شکل‌ِ ایده‌آل فرض می‌شود مقدار‌ِ خمش‌ِ فضا در همه‌جای‌ِ آن ثابت است. حال با اعمال‌ِ این فرض‌ها در

معادلات‌ِ گرانش، به‌مرور ـ مختصر ـ معادلات‌ِ دینامیک‌ِ کیهان که معادلات‌ِ فریدمن[۹] نیز نامیده می‌شوند، می‌پردازیم. برای‌ِ توضیحات‌ِ بیش‌تر در موضوع هم‌گنی و هم‌سان‌گردی‌ِ کیهان و کاربردهای‌ِ متریکی‌ِ آن خواننده را به مطالعه‌ی‌ِ کتاب‌های‌ِ مرجع مثل‌ِ [۱] دعوت می‌نماییم. در این بخش، با این فرض که خواننده بر پایه‌های‌ِ نسبیت‌ِ عام آگاه است به سراغ‌ِ توصیف‌ِ معادلات‌ِ دینامیک‌ِ کیهان می‌رویم.

معادلات‌ِ آینشتاین این‌گونه است

$$G_{\mu\nu} = 8\,\pi\,G\,T_{\mu\nu}, \qquad (۱.۱)$$

که در آن

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\,R\,g_{\mu\nu} \qquad (۱.۲)$$

تانسور ـ آینشتاین و $R_{\mu\nu}$ و R به‌ترتیب تانسور ـ ریچی[۱۰] و اسکالر ـ ریچی‌ِ متریک‌ِ $g_{\mu\nu}$ می‌باشند. G ثابت‌ِ گرانشی و $T_{\mu\nu}$ تانسور ـ انرژی ـ تکانه‌ی‌ِ ماده می‌باشد. با فرض‌ِ هم‌گنی و هم‌سان‌گردی، متریک به‌شکل‌ِ زیر در می‌آید

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2\sin^2(\theta)d\phi^2\right], \qquad (۱.۳)$$

که به متریک‌ِ FLRW[۱۱] معروف است. در متریک‌ِ فوق، $a(t)$ فاکتور ـ مقیاس و k ثابتی است که کیهان به‌ازای‌ِ $k=-1$، بسته، $k=0$، تخت و $k=+1$، باز می‌باشد. با قرار دادن‌ِ این متریک در معادله‌ی‌ِ (۱.۱) و با توصیف‌ِ شاره‌ی‌ِ کامل به‌صورت‌ِ

$$T^{\mu\nu} = (\rho + p)u^\mu u^\nu + p\,g^{\mu\nu}, \qquad (۱.۴)$$

که در آن u^μ چهار ـ سرعت‌ِ ناظر ـ همراه‌ِ شاره و ρ و p چگالی‌ِ انرژی و فشار ـ شاره می‌باشند، معادلات‌ِ زیر به‌دست می‌آیند

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\,\pi\,G\,\rho}{3} - \frac{k}{a^2}, \qquad (۱.۵)$$

---

[۹] Friedmann

[۱۰] Ricci

[۱۱] Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p), \qquad (۱.۶)$$

که در آن‌ها نقطه‌های ـ بالای ـ کمیت‌ها معرف ـ مشتق نسبت به زمان ـ مختصاتی، t می‌باشد. معادله‌ی ـ (۱.۵) فرم ـ انتگرالی ـ معادله‌ی ـ (۱.۶) است.

معادلات ـ (۱.۵) و (۱.۶) را معادلات ـ فریدمن می‌گویند. با تحمیل ـ هم‌گنی و هم‌سان‌گردی به‌عنوان مشخصات ـ غیر ـ قابل ـ تغییر ـ کیهان نسبت به زمان، تنها مشخصه‌ی ـ کیهان که قابل ـ تغییر باقی می‌ماند اندازه‌ی ـ آن است. بنابراین معادلات ـ فریدمن معادلات ـ فاکتور ـ مقیاس، $a(t)$ است که تحول ـ اندازه‌ی ـ هر طول ـ مقیاس از کیهان را اندازه می‌گیرد. معادله‌ی ـ (۱.۵) معادله یی برای ـ $\dot{a}$ است، که درباره‌ی ـ سرعت ـ انبساط یا انقباض ـ کیهان صحبت می‌کند، درحالی که معادله‌ی ـ (۱.۶) معادله یی برای ـ $\ddot{a}$ است، که درباره‌ی ـ شتاب ـ انبساط یا انقباض ـ کیهان صحبت می‌کند. مطابق ـ نظریه‌ی ـ انفجار ـ بزرگ، انبساط ـ کیهان با یک سرعت ـ اولیه آغاز می‌شود. با چشم پوشی از جمله‌ی ـ k در معادله‌ی ـ (۱.۵)، این معادله بر این نکته دلالت می‌کند که، با وجود ـ ماده، کیهان تا ابد منبسط می‌شود. اما با در نظر گرفتن ـ جمله‌ی ـ k مقدار ـ خمش ـ فضایی با توجه به مقدار ـ k قابل ـ اندازه گیری‌ست. اگر $k = 0$ بخش ـ فضایی ـ متریک ـ (۱.۳) به متریک ـ تخت ـ مختصات ـ کروی کاهش می‌یابد. بنابر این کیهان از نظر ـ فضایی تخت است و معادله‌ی ـ (۱.۵) بیان می‌کند که باید بی‌کران باشد. با صفر شدن ـ ρ انبساط متوقف می‌شود. از سوی ـ دیگر، اگر $k = 1$، به‌ازای ـ مقدار ـ متناهی از چگالی، انبساط متوقف می‌شود. بنابراین در یک زمان ـ مشخص انبساط کیهان متوقف شده، در خود می‌رمبد. سرانجام می‌توان دید که برای ـ $k = -1$ حتی اگر به‌کلی از ماده چشم پوشی شود، جمله‌ی ـ k به‌تنهایی تداوم ـ انبساط ـ کیهان را تأمین می‌کند و انبساط هیچ گاه متوقف نمی‌شود.

آن چنان که از معادله‌ی ـ (۱.۶) مشخص است، جمله‌ی ـ k یا به‌عبارتی، خمش ـ فضایی، نقشی در شتاب ـ انبساط یا انقباض ـ کیهان ندارد. معادله‌ی ـ (۱.۶) بیان می‌کند که گرانش هم‌واره یک نیروی ـ جاذبه است. مشابه ـ نیوتنی ـ معادله‌ی ـ (۱.۶) به‌شکل ـ زیر است

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\rho, \qquad (۱.۷)$$

که در آن ρ چگالی ـ ماده است. علامت ـ منفی ـ سمت ـ راست و مثبت بودن ـ چگالی بر این نکته تأکید می‌کنند که

گرانش هم‌واره انبساط را کند می‌کند.

وجود ِ جمله‌ی ِ فشار در معادله‌ی ِ (۱.٦) بیان‌گر ِ این واقعیت است که در نسبیت ِ عام، ماده تنها عامل ِ گرانش نیست، بلکه انرژی و فشار نیز در گرانش مؤثر اند. برای ِ آن‌چه ماده‌ی ِ معمولی نامیده می‌شود (شامل ِ تابش، غبار، شاره‌ی ِ کامل و ...) فشار مثبت فرض می‌شود. به‌بیان ِ دقیق‌تر می‌توان انتظار داشت که ماده در یکی از چهار شرط ِ انرژی صدق کند [۲]:

۱) شرط ِ انرژی ِ پوچ: $\rho + p \geq 0$،

۲) شرط ِ انرژی ِ ضعیف: $\rho \geq 0$ و $\rho + p \geq 0$،

۳) شرط ِ انرژی ِ قوی: $\rho + p \geq 0$ و $\rho + 3p \geq 0$،

۴) شرط ِ انرژی ِ چیره: $\rho \geq |p|$.

چهار شرط ِ فوق در این‌جا بر حسب ِ جملات ِ تانسور ِ انرژی ـ تکانه‌ی ِ شاره‌ی ِ کامل آمده است، اما شکل ِ کلی ِ آن در [۲] وجود دارد. بنابر این مثبت بودن ِ فشار یا درست بودن ِ شرط ِ انرژی ِ قوی، متضمن آن است که گرانش هم‌واره به‌شکل ِ نیروی ِ جاذبه رفتار کند.

بدون ِ هیچ تلاشی در حل ِ معادلات ِ فریدمن، به این جمع بندی می‌رسیم که، اگر فرض کنیم مطابق ِ نظریه‌ی ِ انفجار ِ بزرگ کیهان در حال ِ انبساط باشد، بنابر نسبیت ِ عام و با در نظر گرفتن ِ ماده‌ی ِ معمولی، این انبساط باید کند شود. آیا این آن چیزی‌ست که در واقعیت اتفاق می‌افتد؟

۱.۲.۲ نخستین دلیل برای شتاب

معادلات ِ فریدمن با استفاده از دو فرض ِ اساسی ِ هم‌گنی و هم‌سان‌گردی ِ کیهان به‌دست آمده است. آن‌گونه که امروزه کیهان به‌نظر می‌رسد، هر دوی ِ این فرضیات منطقی اند. اما پرسش این است که چرا کیهان این‌گونه به‌نظر می‌رسد و چگونه بعد از سیر ِ تکامل به‌شکل ِ امروزی رسیده است. مهم‌تر این‌که آیا توصیف ِ کیهان

توسط ـ مدل ـ انفجار ـ بزرگ با معادلات ـ فریدمن سازگار است و علاوه بر تطابق با یک تصویر کلی از کیهان، با تصویر ـ دقیق امروزی از کیهان تطابق دارد.

در ابتدا باید ببینیم معنی ـ « جهان » چیست. با توجه به کران‌دار بودن ـ سرعت ـ نور و مدل ـ انفجار ـ بزرگ همه‌ی ـ محدوده‌های ـ فضازمانی دست یافتنی نیست اند. با دانستن ـ سن ـ جهان می‌توان دورترین فواصلی را که ممکن است اطلاعات‌اش به ما برسد، محاسبه کرد. این، همان « افق ـ ذره » است که اندازه‌اش با زمان تغییر می‌کند. منظور ـ ما از جهان آن بخش از کیهان است که به‌صورت ـ عِلّی به ما متصل است. این بخش درون ـ افق ـ ذره‌ی ـ ما واقع شده است. درباره‌ی ـ آن بخش از کیهان که خارج از این محدوده قرار گرفته و برای ـ ما دست یافتنی نیست و یا حداقل این‌که مستقیماً بر ما اثر نمی‌گذارد چه می‌توان گفت. می‌توان دو ناحیه فرض کرد که به‌صورت ـ عِلی با ما یا با ناظری دیگر در ارتباط باشند، اما با هم‌دیگر در ارتباط ـ عِلی نباشند. آن‌ها بدون ـ این‌که در افق ـ ذره‌ی ـ هم‌دیگر قرار گرفته باشند، در افق ـ ذره ما قرار دارند. بدیهی‌ست تنها مناطقی که در ارتباط ـ عِلی هست اند، می‌توانند هم‌گن باشند، زیرا زمان ـ کافی برای ـ اندرکنش داشته اند.

تصویری که ما امروزه از جهان مشاهده می‌کنیم مبین ـ هم‌گنی و هم‌سان‌گردی ـ آن در مقیاس‌ها یی فراتر از آن‌چه سن ـ جهان و عِلیت نشان می‌دهند، است. این مسئله نخستین بار در اواخر ـ ۱۹۶۰ مطرح شد و به‌عنوان ـ مسئله‌ی ـ افق معروف شد [۱] و [۳]. می‌توان با این جواب که سن ـ جهان آن قدر زیاد هست که هم‌گنی در همه‌ی ـ نواحی ـ آن وجود داشته باشد، این مسئله را حل کرد؛ اما در این صورت باید پرسید که ساز ُکار ـ تکامل ـ جهان چگونه بوده است که سن ـ آن این قدر زیاد است؟ در هر صورت مطابق ـ مدل‌های ـ کیهان‌شناسی ـ موجود به‌نظر می‌رسد هم‌گنی ـ جهان از جمله شرایط ـ اولیه‌ی ـ آفرینش ـ جهان است.

مسئله‌ی ـ دیگری که به‌طور ـ هم‌زمان مطرح شد، مسئله‌ی ـ تخت بودن ـ جهان است. برای ـ بیان ـ دقیق‌تر به معادله‌ی ـ (۱.۵) بازمی‌گردیم. پارامتر ـ هابل[۱۲] H، به‌صورت ـ $H = \dot{a}/a$ تعریف می‌شود و برای ـ تعریف ـ چگالی ـ بحرانی از آن استفاده می‌کنیم

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}, \qquad (۱.۸)$$

[۱۲] Hubble