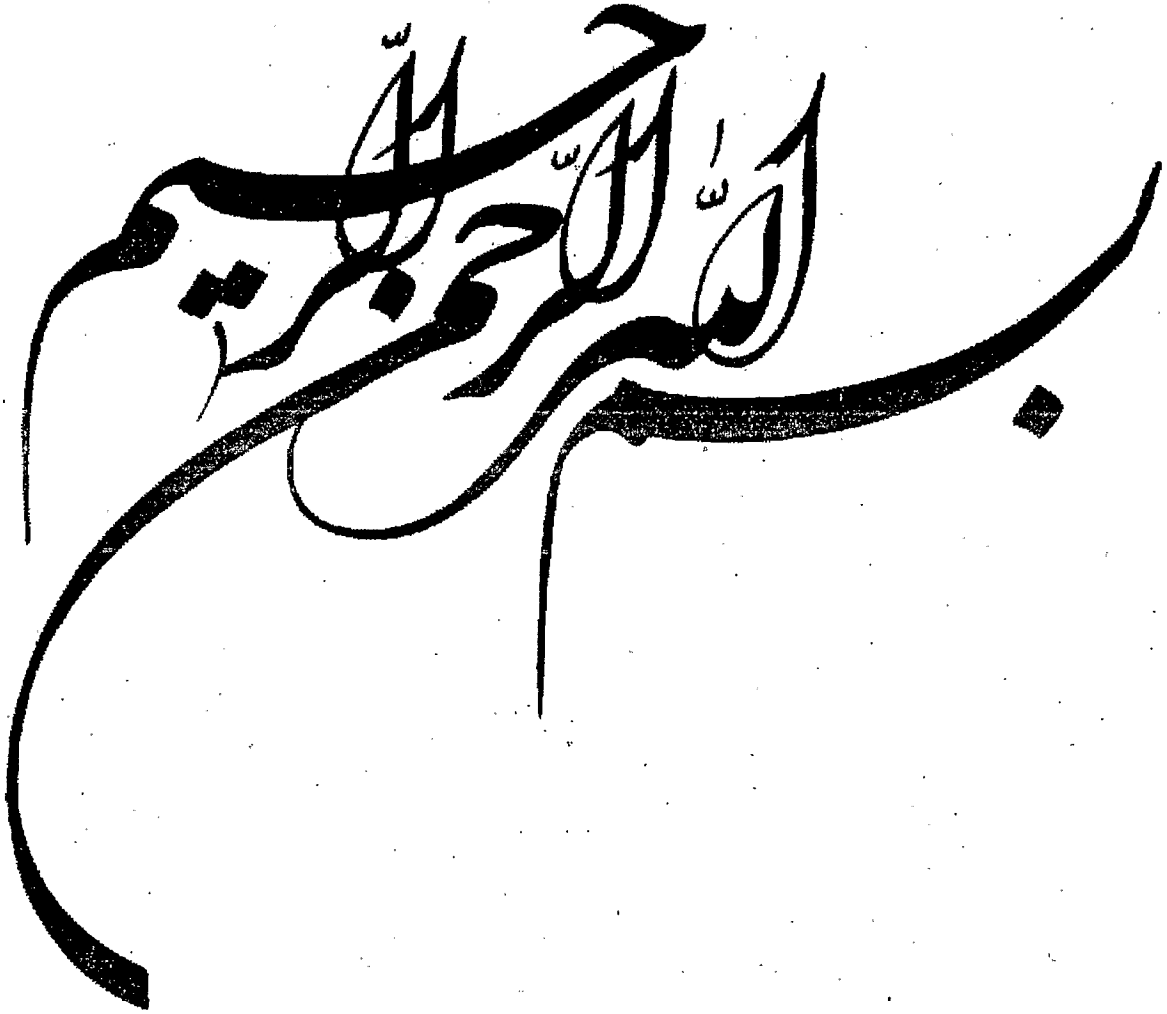

١٠٧٧٢٩

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

نظریه سرعت نور متغیر و بررسی مدلهای آن

استاد راهنما

دکتر مهرداد فرهودی

استاد مشاور

دکتر حسین شجاعی

دانشجو

عاطفه رفیعی

۱۳۸۷/۱۰/۱ - ۶

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک – گرایش گرانش

بهمن ۱۳۸۶

۱۰۷۷۲۶

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

دانشگاه شهید بهشتی

بسمه تعالی

«صورتجلسه دفاع پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۲۰۰/۳۷۹۲/ت/د مورخ ۸۶/۱۱/۲ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه عاطفه رفیعی به شماره شناسنامه ۳۸۴صادره ازساوه متولد۱۳۶۰دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فیزیک – ذرات بنیادی و نظریه میدانها

با عنوان :

نظریه سرعت نور متغیر و بررسی مدلهای آن

به راهنمائی:

دکترمهرداد فرهودی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۱۳۸۶/۱۱/۱۷تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوری و با عنایت به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۸/ــ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱ -استاد راهنما: آقای دکتر مهرداد فرهودی

۲-استادمشاور:آقای دکتر حسین شجاعی

۳- استاد داور: خانم دکتر فاطمه شجاعی

۴- استاد داورونماینده تحصیلات تکمیلی : آقای دکتر حمید رضا سپنجی

تقدیم به

پدر و مادر مهربان و دلسوزم

و

همسر مهربان و صبورم

با سپاس از ایزد منان که عنایت و یاریم نمود تا این پایان نامه به اتمام رسد،

و

با تشکر و قدردانی از

استاد محترم جناب آقای دکتر فرهودی

که از راهنمایی و یاری ایشان بسیار بهره بردم، همچنین از جناب آقای دکتر شجاعی کمال سپاس را دارم و البته از تمامی اساتید محترم گروه فیزیک که از محضرشان استفاده بردم بینهایت سپاسگزارم. از خانواده ام و همسر عزیزم که اگر حمایت و همراهی ایشان نبود مشکلات برایم آسان نمی گشت، از صمیم دل متشکر و ممنونم.

چکیـده

امروزه مدلها و نظریاتی که به مبحث سرعت نور متغیر پرداخته اند بسیار مورد توجه قرار گرفته اند زیرا مدعی هستند که روشی جایگزین برای حل مشکلات کیهان شناسی استاندارد ارائه نموده اند. در این مجموعه ما به بررسی نظریه‌های سرعت نور متغیر می‌پردازیم. در ابتدا، مقدمه ای درمورد کیهان شناسی بیان می شود که مطالبی همچون : جهان اینشتین، دنیای در حال انبساط، رابطه فریدمن، مشکلات مدل مه‌بانگ، مدل تورمی و راه حل های آن برای مشکلات مدل انفجار بزرگ را شامل می شود.

سپس، درباره معنی فیزیکی c متغیر بحث می کنیم و بیان می نمائیم که چه شرایطی نظریه‌های سرعت نور متغیر(VSL) را از هم متفاوت می سازد. چند راه کار و مدل برای توصیف این نظریه ارائه شده است که ما تنها به توضیح و معرفی چهار تا از این مدلها پرداخته ایم : مدل دومتریکی که از دو متریک مجزا برای ماده و گرانش استفاده می نماید و این دو متریک با یک میدان اسکالر به هم جفت می شوند، مدل تغییر فاز سرعت نور که درآن سرعت نور در زمانی نزدیک به ابتدای عالم بطور ناگهانی بشدت افت می کند و به مقدار کنونی آن می رسد، مدلی که سرعت نور به صورت تابعی نمایی از فاکتور مقیاس تغییر می کند، ونهایتاً بررسی سرعت نور متغیر در سناریوی دنیای شامه. البته برخی دیگر از مدلهای c متغیر هم در دنیای شامه صادق اند. در این پایان نامه مدل تغییر فاز سرعت نور را در سناریوی دنیای شامه هم حل کرده ایم. عقیده بر این است که اگر شامه در محدوده یک سیاهچاله قرار داشته باشد ممکن است که ناوردایی لورنتس کامل داشته باشیم و روی شامه، سرعت نور متغیر باشد. در این رهیافت، VSL از یک اثر تصویری بدست می آید و ناوردایی لورنتس کل نظریه دست نخورده باقی می ماند.

فهرست

پیشگفتار ۱

فصل اول : مقدمه ای بر کیهانشناسی ۲

۱-۱) پیشینه تاریخی ۲

۱-۲) جهان اینشتین ۴

۱-۳) جهان درحال انبساط ۸

۱-۴) گرانش نیوتنی ۱۲

۱-۵) معادله فریدمن ۱۳

۱-۶) مفهوم انبساط چیست؟ ۱۵

۱-۷) معادله شتاب ۱۷

۱-۸) حل معادلات در محیطهای مختلف؛ماده، تشعشع، مخلوطی از هردو ۱۸

۱-۹) مشکلات مدل انفجار بزرگ ۲۰

۱-۹-۱) مشکل تختی ۲۰

۱-۹-۲) مشکل افق ۲۲

۱-۹-۳) مشکل فراوانی ذرات باقیمانده ۲۳

۱-۱۰) گسترش تورمی ۲۴

۱-۱۰-۱) حل مشکل تختی ۲۶

۱-۱۰-۲) حل مشکل افق ۲۷

۱-۱۰-۳) حل مشکل فراوانی ذرات باقیمانده ۲۷

فصل دوم : کیهانشناسی سرعت نور متغیر ۲۸

۲-۱) کیهانشناسی با ثابتهای متغیر ۲۸

۲-۲) معنی سرعت نور متغیر ۳۱

۲-۳) تعریفی کلی از VSL ۳۶

۲-۴) c متغیر بدون بعد ۳۸
۲-۵) دینامیک هندسی کیهانشناسی VSL ۳۹

فصل سوم : مدل دو متریکی ۴۵
۳-۱) نظریه گرانش دو متریک ۴۵
۳-۲) کیهانشناسی گرانش دو متریک ۵۶
۳-۳) حل مشکلات مدل مه‌بانگ ۶۱

فصل چهارم : مدل تغییر فاز سرعت نور ۶۶
۴-۱) حل مشکل تختی ۶۸
۴-۲) حل مشکل افق ۷۲
۴-۳) حل مشکل ثابت کیهانشناسی ۷۶

فصل پنجم : مدل تابع نمایی سرعت نور ۷۹
۵-۱) حل مشکل تختی ۸۰
۵-۲) حل مشکل افق ۸۴
۵-۳) حل مشکل ثابت کیهانشناسی ۸۵
۵-۴) فرمول بندی دیگر ۸۶

فصل ششم : کیهانشناسی سرعت نور متغیر در دنیای شامه ۸۸
۶-۱) مقدمه ای بر دنیای شامه ۸۸
۶-۲) مدل سرعت نور متغیر در جهان شامه ۸۹
۶-۳) کیهانشناسی سرعت نور متغیر در مدل RS1 ..... ۹۲
۶-۴) حل مشکل تختی ۹۷
۶-۵) حل مشکل ثابت کیهانشناسی ۱۰۰

فصل هفتم : جمع بندی ۱۰۵
مراجع ۱۱۱

پیشگفتـار

علم کیهانشناسی از دیرباز مورد توجه دانشمندان و نظریه پردازان علم فیزیک بوده است. نتایج و دستاوردهای علمی مهم در این زمینه بدست آمده و همچنان تعداد قابل توجهی از فیزیکدانان را به خود جلب می نماید. گاهی شاهد ارائه نظریه جدیدی هستیم که نظریاتی که تاکنون مورد قبول بوده را زیر سوال می برد. مطرح شدن نظریات جدیدی، که برخی از قوانین و اصول مورد پذیرش و تائید شده کنونی را نقض کرده و بهم بزند، شاید در ابتدا برایمان قابل تحمل نباشد- همچنان که در گذشته با هر نظریه ای غیر از نظریات رایج آن زمان بشدت برخورد می شد. اما از آنجا که بشر ذاتاً همواره به دنبال کشف و دسترسی به یافته های جدید و تازه تر است، درنهایت به بررسی آن نظریه تازه می پردازد.

یکی از باارزش ترین اصول علم این است که باید مجموعه واحد و تغییرناپذیری از قوانین حاکم بر جهان وجود داشته باشد که در همه زمانها و مکانها ثابت بماند. درواقع این مطلب اغلب به ایده تغییر ناپذیری خود جهان تعمیم داده می شود. نکته قابل توجه درباره همه مدلهای کیهانشناسی در طول تاریخ، از مدلهای بابلی قدیم مانند مدل بطلمیوس و ارسطو تا مدلهای بسیار جدید مانند مدل «حالت پایدار جهان» ، مشخصه تغییرناپذیری آنهاست.

همانطور که می دانیم امروزه مدل استاندارد انفجار بزرگ به همراه سناریوی تورمی برای توضیح فرایند پیدایش جهان به کار می رود. در دهه گذشته یکی از نظریات مطرح شده که برخی از قوانین کیهانشناسی را نقض می کند، نظریه سرعت نور متغیر (VSL) است که به عنوان جایگزینی برای سناریوی تورمی ارائه شده است. براساس این نظریه، سرعت نور در ابتدای عالم بسیار بیشتر از مقدار کنونی آن بوده است و از این نکته برای حل مشکلات مطرح در کیهانشناسی استفاده می شود. ما در این مجموعه به بررسی این نظریه می پردازیم.

فصل اول

مقدمه ای بر کیهانشناسی

۱-۱) پیشینه تاریخی

در سال ۱۹۱۵ اینشتین آخرین کارهای نسبیت عام را به انجام رساند. حل شوارتزشیلد، اولین حل فیزیکی معادلات میدان اینشتین بود. این معادلات نشان می دهند که چگونه فضا- زمان، حول یک توزیع متقارن کروی از ماده خمیده می شود. حل شوارتزشیلد اساساً یک حل موضعی بود، به طوری که انحرافات هندسه فضا- زمان از هندسه

مینکوفسکی نسبیت خاص کم کم به سمت صفر میل می کند. این نتیجه می تواند به آسانی از رابطه (۱) دیده شود اگر $r \to \infty$.

$$ds^2 = \left(1-\frac{2GM}{c^2 r}\right)c^2 dt^2 - \left(1-\frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right) \qquad (۱)$$

هندسه ای که این ویژگی را داشته باشد به طور مجانبی تخت نامیده می شود. در کل، هر هندسه فضا- زمانی که از یک توزیع موضعی مادی تولید شده، انتظار می رود که این ویژگی را داشته باشد. حتی از گرانش نیوتنی هم انتظار داریم که میدان گرانشی ناشی از توزیع موضعی ماده ، در فواصل بسیار دور از این توزیع ، از بین برود. آیا می توان جهان را با توزیع مادی موضعی ، تقریب زد ؟

اینشتین دریافت که پاسخ این سؤال، منفی خواهد بود. البته او انتظار داشت که جهان، پر از ماده باشد ، که بعداً ثابت شد. پس حل شوارتز شیلد، نمی تواند هندسه درست فضا – زمان یک چنین توزیع مادی را بدهد. چون هیچگاه نمی توانیم از ماده گرانشی جدا شویم، پس مفهوم مسطح بودن باید شکسته شود. پس برای توصیف دنیایی که همه جای آن از ماده ، پر شده است ، به حل جدیدی نیاز است. اینشتین این حل را در سال ۱۹۱۷ ارائه داد .

قبل از بررسی حل اینشتین ، باید اشاره شود که بیش از دو قرن قبل ، نیوتن هم، تلاش کرد تا راه حلی برای توصیف جهان پر از ماده با گستره نامعین ، ارائه دهد. توزیع بسیار متقارن ماده به حلی در گرانش نیوتنی منجر می شود. یک توزیع یکنواخت از ماده را در نظر بگیرید که فضای اقلیدسی نامحدود را پر کرده است. مشاهده گر از هر نقطه ای که

نگاه کند دنیا را به یک شکل می بیند و در همه جهات یکسان به نظر می رسد. این دو خاصیت را همگنی و همسانگردی میگویند . نیوتن دریافت که چنین دنیایی ، برای هر ذره مادی ، پایدار است ، جاذبه در همه جهات برابر است و هر چیزی باید همان جایی که هست بماند .

می دانیم که هر توزیع مادی معینی که تحت فشار نباشد تمایل دارد تا تحت جاذبه اش در هم بریزد. ستارگان قادرند به یک شکل پایدار باقی بمانند تنها به دلیل اینکه نیروی فشار داخلی که در برابر گرانش آنها مقاومت کند به اندازه کافی بزرگ است . واضحاً ، اگر بحث در مورد جهان معین را به بحث جهان نامحدود انتقال دهیم ، چیز جدیدی به عنوان شرایط مرزی در بینهایت وارد مسأله می شود .

نیوتن دریافت که حل وی ، ناپایدار است : هر ناهمگنی موضعی ، انقباض گرانشی را تسریع می کند که این خود به افزایش ناهمگنی موضعی منجر می شود. نیوتن ناپایداری این حل را به سوزن هایی تشبیه کرد که روی نوک قرار گرفته و ایستاده اند .

۱-۲) جهان اینشتین

از معادلات میدان نسبیت عام ، روشن است که حل آنها در کلی ترین شکل – حل یک مجموعه معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی وابسته به هم – فرا تر از روش هایی است که در حال حاضر در ریاضیات کاربردی ، وجود دارد. برای ساده تر شدن کار ، می بایست مسأله را متقارن در نظر بگیریم. همانطور که شوارتز شیلد تقارن کروی را در حل

خود ، بیان کرد ، اینشتین هم ، همگنی و ایزوتروپی را حل کیهانشناسی خود ارائه داد. همچنین ، فضا- زمان هم مانند شوارتز شیلد، پایا (ایستا) بود. این به او اجازه داد تا مختصه زمانی t را وارد کند به طوریکه رابطه فضا- زمان را می توان توسط رابطه زیر توصیف کرد :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \alpha_{\mu\upsilon} dx^\mu dx^\upsilon \qquad (۲)$$

که $\alpha_{\mu\upsilon}$ توابعی از مختصات فضایی $x^\mu(\mu,\upsilon=1,2,3)$ هستند .

توجه کنید که قید همگن بودن ، بیان می کند که ضریب dt^2 تنها می تواند ثابت باشد . به طور مشابه ، شرط همسانگردی به ما می گوید که در هر عنصر خطی ، نباید جمله ای به شکل $dtdx^\mu$ وجود داشته باشد . به راحتی می توان دید که اگر جمله ای مانند $g_{0\mu}\, dtdx^\mu$ داشته باشیم جابجایی فضایی dx^μ و $-dx^\mu$ با ds^2 به طور مخالف هم ، ترکیب می شود ، در یک بازه زمانی کوچک dt و چنین تغییر جهتی قابل مشاهده خواهد بود و موافق با همسانگردی نیست .

اینشتین اعتقاد داشت که دنیا ، دارای ماده بسیار بیشتری است به طوریکه فضا را می بندد. این بیان او را به سمت فرم خاصی برای $\alpha_{\mu\upsilon}$ سوق داد .

المان مسیر فضایی در سطح سه بعدی s_3 با رابطه زیر داده می شود :

$$d\sigma^2 = a^2\left[d\chi^2 + \sin^2\chi\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)\right] \qquad (۳)$$

که محدوده χ,φ,θ به صورت زیر هستند :

$$0 \le \chi \le \pi \quad \text{و} \quad 0 \le \theta \le \pi \quad \text{و} \quad 0 \le \varphi \le 2\pi \qquad (۴)$$

شکل دیگر نمایش $d\sigma^2$ با مختصات φ, θ, r است که $r = \sin\chi$ ، $(0 \le r \le 1)$.

$$d\sigma^2 = a^2\left(\frac{dr^2}{1-r^2} + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)\right) \qquad (۵)$$

ثابت a ، شعاع جهان نامیده می شود .

در نتیجه ، المان مسیر برای جهان اینشتین ، به صورت زیر خواهد بود :

$$ds^2 = c^2dt^2 - d\sigma^2$$

$$= c^2dt^2 - a^2\left[d\chi^2 + \sin^2\chi\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)\right]$$

$$= c^2dt^2 - a^2\left(\frac{dr^2}{1-r^2} + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)\right) \qquad (۶)$$

اجزاء غیر صفر تانسور اینشتین عبارتند از :

$$R_0^0 - \frac{1}{2}R = -\frac{3}{a^2} \qquad (۷)$$

$$R_1^1 - \frac{1}{2}R = R_2^2 - \frac{1}{2}R = R_3^3 - \frac{1}{2}R = -\frac{1}{a^2} \qquad (۸)$$

که از آنجایی که طبق رابطه تانسور انرژی- تکانه داریم $T^{ik} = \rho_0 c^2 u^i u^k$ ، پس

$$T_0^0 = \rho_0 c^2 \quad \text{و} \quad T_1^1 = T_2^2 = T_3^3 = 0 \qquad (۹)$$

و روابط (۷) و (۸) به دو رابطه مستقل از هم تبدیل می شوند :

$$\frac{-3}{a^2} = \frac{-8\pi G}{c^2}\rho_0 \quad \text{و} \quad \frac{-1}{a^2} = 0 \qquad (۱۰)$$

چون این معادلات نمی توانست یک مدل چگال همسانگرد و همگن را که پایدار باشد برای جهان توصیف کند ، اینشتین بر آن شد تا روابطش را تغییر دهد و جمله معروف λ را معرفی نمود . معادلات به صورت زیر تغییر کردند :

$$\lambda - \frac{3}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2}\rho_0 \qquad (11)$$

$$\lambda - \frac{1}{a^2} = 0 \qquad (12) \qquad \text{که} \qquad a = \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \frac{c}{2\sqrt{\pi G \rho_0}}$$

طبق این رابطه ρ_0 و a با هم رابطه دارند به طوریکه هر چه ρ_0 بزرگتر شود، a کوچکتر می شود . اگر λ مانند G یک ثابت جهانی باشد ، ρ_0 و a را می توان بر حسب λ تعریف کرد . λ نیروی دافعه میان اجسام را معرفی می کند که متناسب با فاصله بین آنها افزایش می یابد . مقدار بدست آمده برای λ یعنی $\lambda \approx 10^{-58}\ cm^{-2}$ ، برای هر تفاوت قابل تشخیصی از پیش بینی نسبیت عام در هر آزمایش منظومه ای (با $\lambda=0$) بسیار کوچک بود. بنابراین ، جهان اینشتین با هیچ تهدیدی از سوی آزمایشات موضعی نسبیت روبرو نشد . به هر حال این مدل ، بیش از یک دهه دوام نیاورد، زیرا حل وی پایدار نبود و مهمتر اینکه حل وی ایستا بود. در سال ۱۹۲۹ هابل و دیگران وی را قانع کردند که جهان درحال گسترش است و ایستا نیست.

۱-۳) جهان در حال انبساط

در اواخر قرن نوزدهم ، فیلسوف و دانشمند، ارنست ماخ[1] ، ایده جدیدی را در مورد جرم و حرکت بیان کرد. ماخ گفت اینرسی نتیجه شتابی است که از دیگر اجرام و اجسام موجود در هستی به جسم وارد می شود. اینشتین از صحبت های ماخ اثر پذیرفت . جهان اینشتین که توصیف شد ، شامل فضای پر از ماده است . درواقع او بیان کرد که برای یک فضای خالی بدون ماده نباید هندسه ای تعریف شود، اما مدت کوتاهی پس از انتشار مقاله -اش در ۱۹۱۷، شوارتزشیلد معادله اینشتین را حل کرد و متریک خود را ارائه داد. اینشتین برای اصلاح رابطه خود جمله ثابت کیهانشناسی را به آن اضافه نمود ولی چند ماه بعد ، در همان سال، دوسیته[2] حل دیگری از معادلات میدان را با المان مسیر زیر منتشر کرد :

$$ds^2 = c^2\left(1-\frac{H^2R^2}{c^2}\right)dT^2 - \frac{dR^2}{1-\frac{H^2R^2}{c^2}} - R^2\left(d\theta^2+\sin^2\theta\, d\varphi^2\right) \qquad (۱۳)$$

که H ثابتی وابسته به λ است به صورت:

$$\lambda = \frac{3H^2}{c^2} \qquad (۱۴)$$

نکته قابل توجه جهان دوسیته این است که خالی است . اگر چه مختصات بالا این اطمینان را می دهد که جهان پایدار است ، می توان یک سیستم مختصات جدید $(t\ ,\ r\ ,\theta\ ,\varphi)$ برای المان مسیر (۱۳) پیدا کرد تا شکل دینامیکی زیر را پیدا کند :

$$ds^2 = c^2dt^2 - e^{2Ht}\left[dr^2 + r^2\left(d\theta^2+\sin^2\theta\, d\varphi^2\right)\right] \qquad (۱۵)$$

---

[1] Ernst Mach
[2] W. de Sitter

به سادگی می توان تشخیص داد که ذرات آزمون با مقادیر ثابت (r, θ, φ) از ژئودزیک زمان گونه ای در این مدل پیروی می کنند . فاصله خاص بین هر دو ذره در یک زمان t داده شده اندازه گیری می شود که با زمان به نسبت e^{Ht} افزایش می یابد ، یعنی این ذرات همگی در حال دور شدن از همند .

در هر صورت ، این ذرات هیچ پایه مادی ندارند . آنها نه جرم دارند و نه بر هندسه فضا زمان اثر می گذارند . جهان از لحاظ دینامیکی خالی است ، گر چه از لحاظ سینماتیکی در حال گسترش است .

دنیای دوسیته ، دارای حرکت بدون ماده است ، در مقابل جهان اینشتین که دارای ماده بدون حرکت است. جهان دوسیته نشان داد که فضا زمان خالی می تواند به عنوان حل نسبیت عام قلمداد شود . جهانی از این نوع ، موفق نمی شود تا این معیار (محک) ماخ را تصدیق کند که باید یک پایه مادی در مقابل حرکت موضعی که اندازه گیری می شود، وجود داشته باشد . اگر چه ویژگی خالی بودن جهان دوسیته ، شگفت آور بود ،ولی خاصیت انبساط آن ، منشأ حقیقت را در بر دارد. در انتهای دهه سوم همین قرن ، مشاهدات هابل[1] و هوماسون[2] نشان داد که جهان ایستا نیست و در حال گسترش است . همانطور که گفته شد ، کلیدی ترین اثر مشاهداتی در کیهانشناسی این است که به نظر می رسد تقریباً همه چیز در دنیا در حال دور شدن از هم است و هر چه بیشتر دور می شوند سرعت دور

[1] Hubble
[2] Humason

شدن بیشتر می شود . این سرعت ها را تحت عنوان " جابجایی سرخ " اندازه گیری می-کنند، که اساساً اثر دوپلر برای امواج نوری به کار می رود .

کهکشان ها مجموعه ای از خطوط جذب و انتشار در طیف خود دارند که قابل تشخیص اند و فرکانسهای مشخصه به خوبی معلومند . اگر یک کهکشان از جای خود به سمت ما حرکت کند ، امواج نوری بیشتری به ما می رسد و فرکانس بالا می رود. چون نور آبی در انتهای فرکانس بالای طیف مرئی است ، به آن نام" جابجایی آبی"[1] را می-دهیم . اگر کهکشان در حال دور شدن باشد، خطوط مشخصه به سمت انتهای قرمز طیف می روند که این اثـر را با نام "جابجایی سـرخ" می شناسیم . این روش، در ابتدا توسط وستو اسلیفر [2] در حدود ۱۹۱۲ برای اندازه گیری سرعت یک کهکشان استفاده شد و به طور سیستماتیکی توسط یکی از معروف ترین کیهانشناسان "ادوین هابل"[3] در دهه های بعدی به کار رفت .

در یافتیم که تقریباً همه کهکشان ها در حال دور شدن از ما هستند، پس "جابجایی سرخ" Z تعریف می شود با :

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \qquad (۱۶)$$

که λ_{em} و λ_{obs} ،طول موج های نور در نقاط انتشار (در کهکشان) و مشاهده (ما) هستند.

اگر یک شی نزدیک با سرعت V از ما دور شود ، جابجایی سرخ آن می شود :

$$z = \frac{v}{c} \qquad (۱۷)$$

---

[1] blueshift
[2] Vesto Slipher
[3] Edwin Hubble

که c سرعت نور است . مشاهدات هابل نشان داد که سرعت دور شدن با فاصله شی از ما متناسب است :

$$\vec{V} = H_0 \cdot \vec{r} \qquad (۱۸)$$

این رابطه به " قانون هابل " مشهور است و ثابت تناسبی H_0 ، ثابت هابل نامیده می شود .

قانون هابل دقیق نیست ، به طوریکه اصل کیهانشناسی را برای کهکشانهای نزدیک ، کاملاً تایید نمی کند ، این کهکشان ها دارای بعضی حرکات رندوم به نام سرعت های ویژه[1] هستند . اما رفتار متوسط کهکشانها را بسیار عالی توصیف می کند . در اصل فرم کلی قانون هابل به صورت $\vec{V} = H\vec{r}$ است که H پارامتر هابل نامیده می شود و H_0 مقدار کنونی این پارامتر است .

در نگاه اول ، به نظر می رسد که باید اصل کیهانشناسی – که می گوید در همه دنیا ، همگنی و ایزوتزوپی وجود دارد – نقض شود چون اگر ما ببینیم که همه چیز در حال دور شدن از ماست ، یعنی ما در مرکز جهان قرار داریم . چیزی بیش از واقعیت نمی تواند باشد. در واقع هر ناظری همه چیز را در حال دور شدن از خودش می بیند با سرعتی که متناسب با فاصله است .

چون همه چیز در حال دور شدن از یکدیگر است ، در می یابیم که در گذشته ، همه چیز در دنیا بسیار نزدیکتر به هم بوده است. یعنی اگر در تاریخ به گذشته برگردیم همه چیز به سمت یکدیگر حرکت می کند . شروع اولیه، "انفجار بزرگ" (Big Bang)

[1] peculiar