



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده فیزیک

گزارش پروژه درس کیهان‌شناسی

تعیین پارامتر هابل با استفاده از پدیده‌ی عدسی گرانشی

نگارش:

آیلار صدائی

استاد راهنما:

دکتر شانت باغرام

خرداد ۱۴۰۲

سپاس‌گزاری

لازم می‌دانم از استاد دلسوز و گران‌قدر جناب آقای دکتر شانت باغرام تشکر کنم که مطالب بسیار زیادی را به بهترین نحو من آموختند و بدون راهنمایی و دلسوزی ایشان، تهیه این گزارش امکان‌پذیر نبود. از زحماتشان صمیمانه سپاس‌گزارم و برایشان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

آیلار صدائی

خرداد ۱۴۰۲

چکیده

در دهه‌های گذشته با پیشرفت تکنولوژی و ساخت ابزارهای رصدی بسیار دقیق، انسان موفق به جمع‌آوری انبوهی از اطلاعات از آسمان شده است. با پیشرفت فناوری رصدی می‌توانیم شواهدی برای نظریات فیزیکی که تا کنون برای اثبات آن‌ها مشاهده‌ای صورت نگرفته است به دست آوریم. همچنین، داده‌های به دست آمده از این ابزارها می‌توانند دریچه‌های جدید به سوی علم فیزیک جدید باز کنند که تا کنون به آن‌ها پرداخته نشده است.

در این گزارش به معرفی مدل استاندارد کیهان‌شناسی و مرور مسائل باز آن می‌پردازیم. سپس به طور خاص مسئله‌ی تنش پارامتر هابل را مطرح کرده و یکی از روش‌های اندازه‌گیری پارامتر هابل، تأخیرهای ناشی از لنزینگ گرانشی را بررسی می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی:

عدسی گرانشی، نسبیت عام، میدان‌های گرانشی، تنش پارامتر هابل، مدل استاندارد کیهان‌شناسی

فهرست مطالب

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| ۱ | فصل اول: مقدمه |
| ۴ | فصل دوم: مروری بر مدل استاندارد و مشکلات آن |
| ۵ | ۲- مدل استاندارد کیهان‌شناسی |
| ۵ | ۱-۲ مدل استاندارد کیهان‌شناسی (Λ CDM) |
| ۷ | ۲-۲ ناسازگاری‌های مدل استاندارد کیهان‌شناسی |
| ۷ | ۱-۲-۲ تنش H_0 |
| ۱۱ | ۲-۲-۲ تنش S_8 |
| ۱۳ | ۳-۲-۲ آنومالی A_{lens} |
| ۱۴ | ۴-۲-۲ تنش Ω_k |
| ۱۵ | ۳-۲ جمع‌بندی |
| ۱۷ | فصل سوم: مروری بر مفاهیم پایه لنز گرانشی |
| ۱۸ | ۳- مروری بر لنز گرانشی |
| ۱۸ | ۱-۳ تاریخچه |
| ۱۸ | ۲-۳ منشاء |
| ۱۹ | ۳-۳ مباحث نظری |
| ۲۲ | ۱-۳-۳ معادله لنز |
| ۲۳ | ۲-۳-۳ شعاع ایشیتین |
| ۲۵ | ۳-۳-۳ بزرگنمایی |

| | |
|----|---|
| ۲۵ | تأخیر زمانی ۴-۳-۳ |
| ۲۶ | جمع‌بندی ۴-۳ |
| ۲۷ | فصل چهارم: توضیح روش و پژوهش‌های انجام شده |
| ۲۸ | تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنز گرانشی ۴-۲ |
| ۲۸ | ۱-۴ روش کلی |
| ۳۲ | ۲-۴ مشکلات روش |
| ۳۳ | پژوهش‌های انجام شده ۴-۳ |
| ۳۳ | ۱-۳-۴ لنز طلایی شکتر: VAS۰۲۱۸+۳۵۷ |
| ۳۴ | ۲-۳-۴ لنز B۱۶۰۸+۶۵۶ |
| ۳۶ | ۳-۳-۴ پروژه COSMOGRAIL |
| ۳۷ | ۴-۳-۴ پروژه H۰LiCOW |
| ۳۸ | جمع‌بندی ۴-۴ |
| ۳۹ | فصل پنجم: نتیجه‌گیری |
| ۴۱ | منابع و مراجع |

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

کیهان‌شناسی عبارت است از علمی که سرگذشت، سرنوشت و ساختار کنونی کیهانی که می‌شناسیم را با استفاده از مدل‌های ریاضی و علم فیزیک، و در بستر مشاهداتی که توسط ابزارهای رصدی به دست می‌آیند، بررسی می‌کند. بنابراین اهمیت مدل مرجع در این علم بسیار بالاست، چون فرضیات هر مدل با بقیه مدل‌ها متفاوت است و این موضوع می‌تواند باعث شود مشاهداتی که انجام می‌شوند، معنا و مفهوم متفاوتی را نسبت به هر مدل پیدا کنند.

مدل استاندارد کیهان‌شناسی مبتنی بر نظریه بیگ بنگ است و ادعا می‌کند که جهان به عنوان یک تکینگی شروع شده و از آن زمان تاکنون در حال انبساط بوده است. این مدل توسط شواهد رصدی فراوانی از جمله تابش پس‌زمینه مایکروویو کیهانی و ساختار مقیاس بزرگ کیهان پشتیبانی می‌شود.

با این حال، مشاهدات اخیر ثابت هابل (H_0) منجر به تنش بین مقدار پیش‌بینی شده بر اساس مدل استاندارد کیهان‌شناسی و مقدار استنتاج شده از اندازه‌گیری‌های ابرنواخترهای مجاور و روش‌های دیگر اندازه‌گیری آن شده است. این تنش می‌تواند نشانه‌ای از فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد کیهان‌شناسی باشد.

لنز گرانشی - خم شدن نور توسط میدان گرانشی در اطراف اجرام بسیار پر جرم - ابزار قدرتمندی را برای اندازه‌گیری پارامتر هابل فراهم می‌کند. با تجزیه و تحلیل اعوجاج کهکشان‌های پس‌زمینه ناشی از خوشه‌های کهکشانی پیش‌زمینه، کیهان‌شناسان می‌توانند توزیع جرم خوشه‌ها را تعیین کنند و از این طریق پارامتر هابل را محاسبه کنند.

مطالعات اخیر با استفاده از عدسی گرانشی نتایجی مطابق با مقادیر H_0 استنباط شده از ابرنواخترهای مجاور و امواج پس‌زمینه کیهانی به دست آورده‌اند که به شواهد موجود مسئله‌ی تنش H_0 اضافه می‌کند. با این حال، برای حل کامل تنش و تعیین اینکه آیا واقعاً نشانه‌ای از فیزیک جدید است یا صرفاً یک تصادف آماری، به اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری نیاز است.

در این گزارش، هدف، آشنایی با مسئله تنش H_0 و بررسی نقش لنز گرانشی در حل آن است. در این راستا، لازم است ابتدا با مدل استاندارد کیهان‌شناسی و به طور خاص مسئله‌ی تنش H_0 آشنا شویم که در فصل

دوم به طور خلاصه به این موضوع خواهیم پرداخت. پس از مروری بر این مشکلات، در فصل سوم به آشنایی با پدیده‌ی لنز گرانشی و ریاضیات آن می‌پردازیم. در فصل چهارم با برخی از پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنزینگ گرانشی آشنا می‌شویم و در نهایت، به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری موضوعات مورد بحث در گزارش خواهیم پرداخت.

فصل دوم

مروری بر مدل استاندارد کیهان‌شناسی و مشکلات آن

۲- مروری بر مدل استاندارد کیهان‌شناسی

در این بخش قصد داریم به بررسی مفاهیم پایه در کیهان‌شناسی و معرفی مسئله تنش پارامتر هابل بپردازیم. ابتدا کمی درباره مدل استاندارد کیهان‌شناسی صحبت می‌کنیم و مشکلات آن را به طور مختصر شرح می‌دهیم.

۲-۱ مدل استاندارد کیهان‌شناسی (Λ CDM)

مدل‌های کیهان‌شناسی چارچوب‌های ریاضی هستند که تکامل و ساختار جهان را بر اساس درک فعلی ما از فیزیک بنیادی و مشاهدات کیهان توصیف می‌کنند. این مدل‌ها ویژگی‌های کیهان را در این موارد بررسی می‌کنند: نحوه گسترش کیهان، خواص هندسی، سن، ترکیبات، نحوه آغاز، و نحوه‌های ممکن پایان آن.

در میان بسیاری از مدل‌های کیهان‌شناسی مختلف معرفی شده، مدل Λ CDM از نظر ریاضی ساده‌ترین مدل کیهان‌شناسی است و در حال حاضر به عنوان مدل کیهان‌شناسی «استاندارد» انتخاب شده است، زیرا توصیف فوق‌العاده ساده و سازگاری از یک طیف گسترده از وقایع فیزیکی کیهان در طیف گسترده‌ای از زمان (از گذشته بسیار دور تا آینده بسیار دور) ارائه می‌کند.

مدل استاندارد، دو ویژگی مهم دارد: شروع کیهان با انفجار بزرگ^۱، و نقش ماده تاریک سرد^۲ و انرژی تاریک^۳ به عنوان اجزای اصلی کیهان. طبق مشاهدات ماهواره پلانک، ماده تاریک حدود ۲۷٪ و انرژی تاریک حدود ۶۸٪ از پارامتر چگالی کیهان را تشکیل می‌دهد^۱.

فرض دیگر در این مدل، تخت بودن کیهان است ($\Omega_k = 0$).

^۱ Big Bang

^۲ Cold Dark Matter (CDM)

^۳ Dark Energy (Λ)

بر اساس این مدل جهان از یک توده بسیار داغ، بسیار متراکم و همگن آغاز شد که به انفجار بزرگ یا بیگ بنگ معروف است. با انبساط پس از بیگ بنگ، جهان سرد شده و تشکیل ساختارهایی که امروزه مشاهده می‌کنیم اتفاق افتاده است.

تا به این لحظه قدرتمندترین مجموعه داده برای تعیین پارامترهای مدل استاندارد کیهان‌شناسی، داده‌های ۲۰۱۸ ماهواره پلانک درباره تابش زمینه کیهانی است. این مجموعه داده به اندازه‌ای قدرتمند است که حداقل برای ساده‌ترین مدل‌های کیهان‌شناسی، می‌توان نتایج کاملاً قطعی را با استفاده از آن به‌تنهایی به‌دست آورد. شکل ۱-۲ پارامترهای آزاد مدل استاندارد کیهان‌شناسی را به همراه مقادیر بدست آمده توسط ماهواره پلانک در ۲۰۱۸ نشان می‌دهد.

| Parameter | Best fit value | Uncertainty |
|----------------|----------------|-------------|
| $\Omega_b h^2$ | 0.02233 | 0.00015 |
| $\Omega_c h^2$ | 0.1198 | 0.0012 |
| $\Omega_m h^2$ | 0.1428 | 0.0011 |
| H_0 | 67.37 | 0.54 |
| Ω_m | 0.3147 | 0.0074 |
| Age (Gyr) | 13.801 | 0.024 |
| z_{re} | 7.64 | 0.74 |
| $100\theta_*$ | 1.04108 | 0.00031 |

شکل ۱-۲: داده‌های به دست آمده از ماهواره پلانک در سال ۲۰۱۸^۱

۲-۲ ناسازگاری‌های مدل استاندارد کیهان‌شناسی

در فیزیک و کیهان‌شناسی، اگر مشاهدات با پیش‌بینی‌های یک مدل خاص مغایرت داشته باشد، می‌تواند به این معنی باشد که مدل ناقص یا نادرست است. شناسایی ناسازگاری‌ها می‌تواند به فیزیک‌دانان کمک کند تا درک خود از جهان را اصلاح کنند و مدل‌های خود را بهبود ببخشند.

علاوه بر این، ناسازگاری‌ها همچنین می‌توانند به وجود پدیده‌ها یا ذرات جدیدی بینجامند که در حال حاضر در مدل‌های ما لحاظ نشده‌اند. به عنوان مثال، ناسازگاری منحنی چرخش مشاهده شده از کهکشان‌ها با توزیع شناخته شده ماده مرئی کهکشان‌ها منجر به کشف ماده تاریک شد.

با وجود تطابق بسیار بالای مدل استاندارد با مشاهدات رصدی و قوانین فیزیکی کشف شده تا به امروز، این مدل از بعضی جنبه‌ها با مشاهدات و تئوری ناسازگار است. با مشاهدات کیهان‌شناسی و اخترفیزیکی در طیف وسیعی از مقیاس‌ها و دوره‌ها، تنش‌هایی بین کاوشگرهای کیهانی و آنومالی‌های موجود در داده‌های CMB ظاهر شده‌اند. این اختلافات دارای اهمیت آماری متفاوتی هستند، و اگرچه ممکن است برخی از اختلاف‌ها به دلیل خطاهای سیستماتیک باشند، مجموعه‌ی آن‌ها نشان دهنده خلاءهای احتمالی در مدل استاندارد Λ CDM است. در این زیربخش به طور مختصر به برخی از مهم‌ترین این اختلافات می‌پردازیم.

۲-۲-۱ تنش H_0

پارامتر هابل، نشان دهنده آهنگ انبساط کیهان است. این پارامتر را می‌توان از طریق چندین روش مشاهده‌ی متفاوت به دست آورد، به این صورت که کمیت‌های رصدی قابل مشاهده را اندازه‌گیری کرده و سپس پارامتر هابل را طوری تنظیم کنیم که با مقادیر رصد شده همخوانی داشته باشد.

اندازه‌گیری پارامتر هابل از دو دسته روش امکان‌پذیر است: روش‌های مستقل از مدل استاندارد، و روش‌های وابسته به مدل استاندارد. در روش‌های وابسته به مدل استاندارد، در تعیین پارامتر هابل از فرضیات مدل استاندارد استفاده می‌شود، و در روش‌های مستقل، این اتفاق نمی‌افتد².

در صورتی که مدل استاندارد خلاء نداشته باشد انتظار می‌رود که اندازه‌گیری پارامترها با هر دسته از این روش‌ها، تفاوت چندانی نداشته باشد و نتایج اندازه‌گیری شده، با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند. اما یکی از چالش‌های مدل استاندارد این است که اندازه‌گیری‌های ناشی از طیف توانی تابش زمینه کیهانی و اندازه‌گیری‌های مربوط به نردبان‌های فاصله و خط‌کش‌های استاندارد با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند و اختلاف مشهودی بین آن‌ها دیده می‌شود.

بنابراین به دلیل خلاء‌های مدل استاندارد، دو مجموعه داده متفاوت از پارامتر هابل وجود دارد که در هر مجموعه، بین اندازه‌گیری از روش‌های مختلف سازگاری وجود دارد اما در مقایسه با یکدیگر، این دو مجموعه سازگاری ندارند.

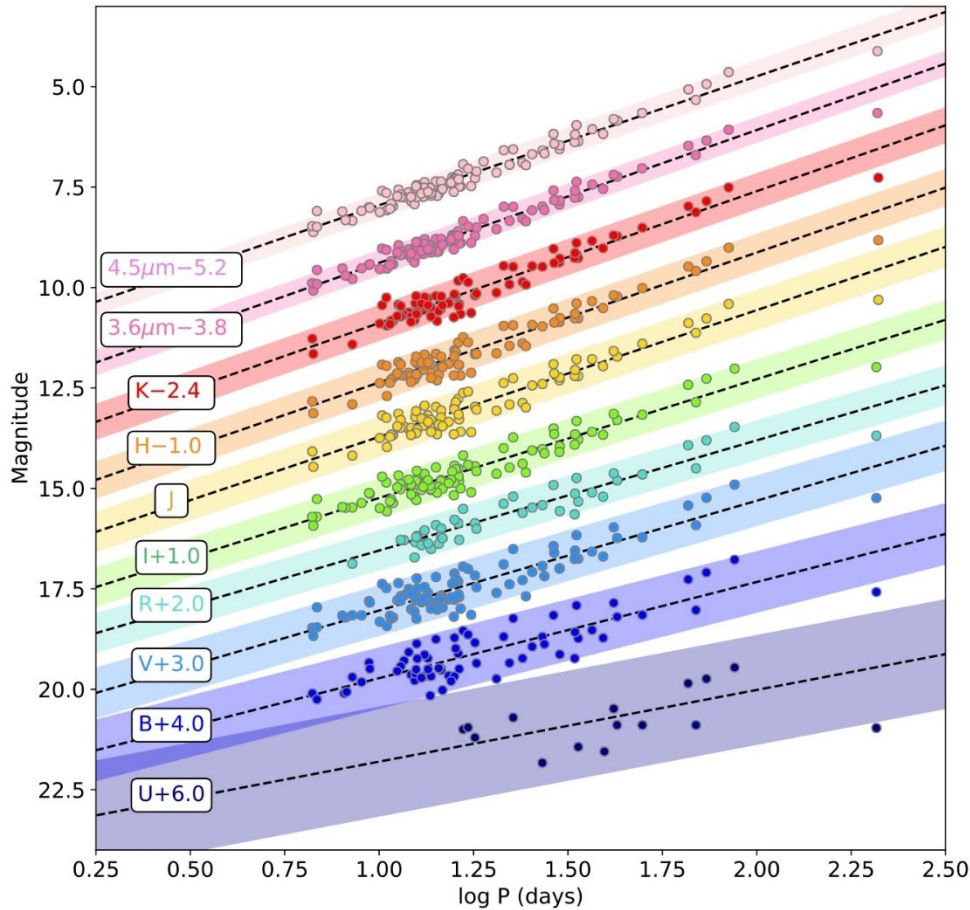
به طور کلی، اختلاف 5.0σ بین رصدهای ناشی از CMB و رصدهای مستقل از مدل استاندارد از جمله تعیین پارامتر هابل با استفاده از ابرنواخترهای SN Ia، مسئله تنش هابل نامیده می‌شود³.

با مقایسه‌ی طیف توانی‌ای که نظریه‌های کیهان‌شناسی پیش‌بینی می‌کنند با طیف توانی رصد شده، می‌توان پارامتر هابل را تعیین کرد. روش دیگر تعیین پارامتر هابل، استفاده از شمع‌های استاندارد دوردست (ابرنواخترهای SN Ia) است که درخشندگی آن‌ها برایمان مشخص است و با اندازه‌گیری قرمزگرایی هابلی آن‌ها می‌توان نسبت فاصله و سرعتشان را پیدا کرد.

$$\mu = m - M = 5 \log(d) - 5$$

$$v_H = H_0 r$$

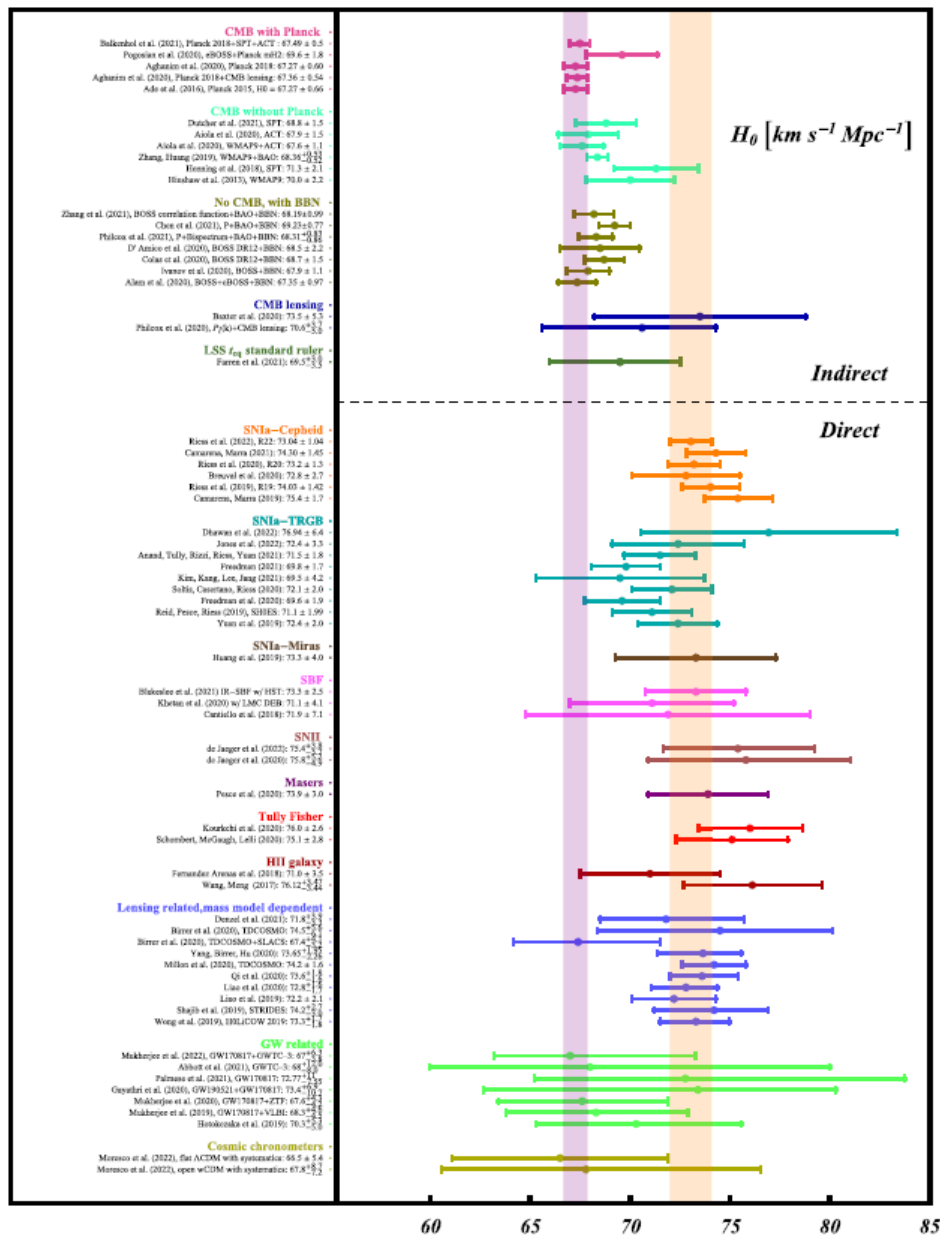
شکل ۲-۲ رابطه بین درخشندگی شمع‌های استاندارد و دوره تناوب آن‌ها را نشان می‌دهد که با استفاده از روابط مطرح شده در بالا به دست آوردن فاصله این شمع‌های استاندارد و در نهایت، تعیین پارامتر هابل منجر می‌شود.



شکل ۲-۲: رابطه لگاریتمی بین دوره‌ی تناوب و قدر مطلق ابرنواخترهای SN_{Ia} ^۴

یک توضیح احتمالی برای تنش H_0 وجود فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد کیهان‌شناسی است. به عنوان مثال، یکی از فرضیات این است که این تنش به دلیل وجود ذرات نسبیتی اضافی در جهان اولیه است، مانند نوترینوهای استریل. این ذرات سرعت انبساط جهان را افزایش می‌دهند و به مقدار بالاتری از H_0 منجر می‌شوند.

توضیح احتمالی دیگر این است که تنش به دلیل خطاهای سیستماتیک در اندازه‌گیری‌هاست. برای مثال، ممکن است در کالیبر کردن نردبان فاصله‌ای که برای تعیین فاصله تا ابرنواخترها استفاده می‌شود، خطاهایی وجود داشته باشد. از طرف دیگر، ممکن است در اندازه‌گیری طیف تابش پس‌زمینه کیهانی خطا داشته باشیم. اما صرف نظر از علت تنش، واضح است که اندازه‌گیری دقیق پارامتر هابل برای درک تکامل جهان بسیار مهم است. عدسی گرانشی یک راه امیدوارکننده برای چنین اندازه‌گیری‌هایی فراهم می‌کند.



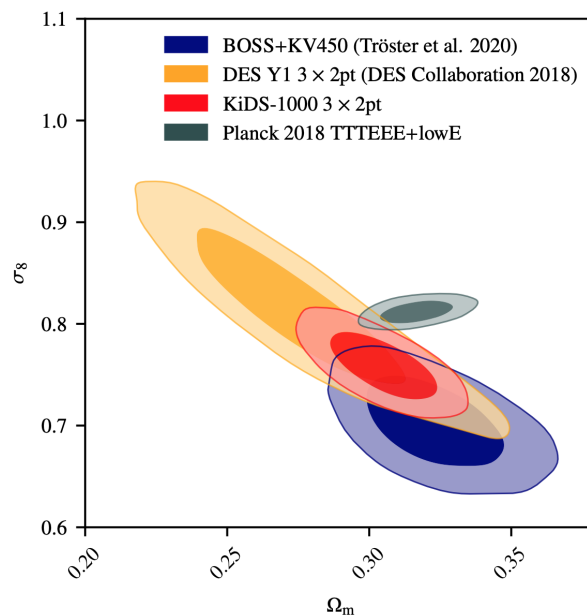
شکل ۲-۳: مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی پارامتر هابل با استفاده از ابزارها و روش‌های مختلف^۳.

۲-۲-۲ تنش S_8

پارامتر S_8 به صورت ترکیبی از پارامتر چگالی ماده (Ω_M) و ریشه‌ی میانگین مربعات دامنه نوسانات چگالی ماده در مقیاس ۸ مگاپارسک که به آن پارامتر σ_8 گفته می‌شود، تعریف شده است:

$$S_8 = \sigma_8 \sqrt{\frac{\Omega_M}{0.3}}$$

دلیل استفاده از S_8 به جای استفاده مستقیم از Ω_M و σ_8 این است که این دو پارامتر از یکدیگر مستقل نیستند. در واقع، آنها به شدت هم‌بستگی دارند، به این معنی که تغییر در یکی بر دیگری تأثیر می‌گذارد. تعریف S_8 این امکان را می‌دهد که پیش‌بینی‌های نظری را با داده‌های مشاهداتی آسان‌تر مقایسه شوند.



شکل ۴-۲: نمودار منحنی‌های هم‌تراز σ_8 بر حسب Ω_M . ناحیه‌ی تیره‌تر درونی بازه اطمینان ۹۵٪ و ناحیه‌ی روشن‌تر بیرونی بازه اطمینان ۶۸٪ را نشان می‌دهد.^۵

مشاهدات اخیر کاوشگرهای ساختارهای بزرگ مقیاس به ما این امکان را داده است که قدرت خوشگی ماده در کیهان را محدود کنیم. این محدودیت‌ها در قدرت خوشگی ماده با محدودیت‌های استنباط‌شده

توسط کاوشگرهای کیهان اولیه متفاوت است. به طور خاص، ناهمسانگردی‌های اولیه تابش پس‌زمینه کیهانی (CMB) که توسط ماهواره پلانک اندازه‌گیری می‌شود، در مقایسه با کاوش‌های با قرمزگرایی پایین‌تر مانند عدسی‌های گرانشی ضعیف و خوشه‌بندی کهکشانی، تنش در قدرت خوشه‌بندی ماده در سطح ۲ تا ۳σ نشان می‌دهند.^۵

کاوش‌گرهای قرمزگرایی پایین، معمولاً مقدار S_8 کمتری را در مقایسه با تخمین CMB قرمزگرایی بالا اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه‌گیری S_8 به مدل استاندارد کیهان‌شناسی وابسته است. این مدل تناسب خوبی برای پارامتر S_8 با داده‌های بقیه‌ی کاوش‌گرها فراهم می‌کند، اما سطح پایین‌تری از تشکیل ساختار را در مقایسه با آنچه از مشاهدات CMB انتظار می‌رود، پیش‌بینی می‌کند.

اختلاف در مقدار تخمین زده شده توسط پلانک با فرض مدل استاندارد کیهان‌شناسی (کانتور خاکستری در شکل ۱)، $S_8 = 0.834 \pm 0.016$ ، و مقدار اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های مختلف در cosmic shear در جدول ۲-۲ گزارش شده است.^۵

| ماهواره | داده‌های گزارش شده | سطح تنش |
|-----------|---------------------------|-------------|
| DES-Y3 | $0.759^{+0.025}_{-0.025}$ | 2.5σ |
| KiDS-1000 | $0.766^{+0.020}_{-0.014}$ | 3.1σ |
| Planck | $0.834^{+0.016}_{-0.016}$ | - |

جدول ۲-۱: مقادیر S_8 اندازه‌گیری شده توسط دو ماهواره‌ی مختلف و تفاوت آن با مقدار پلانک

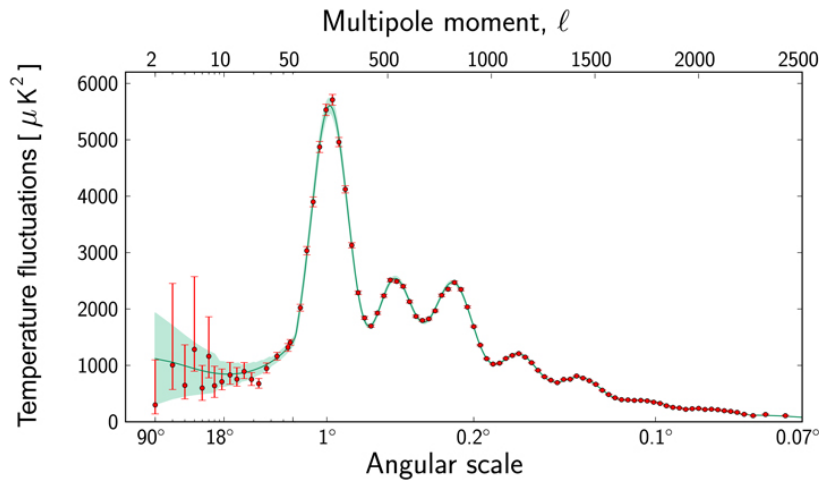
۲-۲-۳ آنومالی A_{lens}

پارامتر A_{lens} یا دامنه‌ی لنز، که به عنوان پارامتر دامنه نوسانات ماده هم شناخته می‌شود، پارامتری است که دامنه طیف توانی ماده را در مدل کیهان‌شناسی مشخص می‌کند. طیف توانی ماده، توزیع ماده در کیهان را در مقیاس‌های مختلف توصیف می‌کند و کمیت مهمی است که می‌تواند برای آزمایش مدل‌های کیهانی و ایجاد محدودیت‌هایی در مقادیر پارامترهای آنها استفاده شود.⁶

پارامتر دامنه‌ی لنز در یک wave number همراه $k = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ تعریف می‌شود. مقدار A معمولاً از طریق مشاهدات تابش پس‌زمینه کیهانی و همچنین بررسی‌های ساختاری در مقیاس بزرگ از کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی تعیین می‌شود.

مقدار پارامتر دامنه‌ی لنز به پارامترهای کیهانی مختلف مانند چگالی ماده، چگالی باریون، چگالی انرژی تاریک و طیف توان اولیه حساس است. با مقایسه مقدار مشاهده‌شده A با پیش‌بینی‌های یک مدل کیهانی معین، می‌توان مقادیر این پارامترها را محدود کرد و اعتبار مدل را آزمایش کرد. اگر این پارامتر را آزاد بگذاریم تا تغییر کند، تأثیر آن بر طیف توانی، هموارسازی پیک‌های صوتی در هنگام افزایش A_{lens} خواهد بود.⁶

از این پارامتر می‌توان برای بررسی سازگاری مدل کیهان‌شناسی استفاده کرد. به این صورت که میزان هموارسازی طیف توانی تابش CMB از طریق همین پارامتر تعیین می‌شود و از طرفی، می‌توان مقدار آن را با بازسازی لنزهای گرانشی هم به دست آورد. در صورتی که این دو مقدار با یکدیگر مطابقت داشته باشند، مدل کیهان‌شناسی موفق عمل کرده است. در غیر این صورت پای فیزیک جدید و یا خطاهای سیستماتیک در میان است.



شکل ۵-۲: طیف توانی تابش CMB⁷

۴-۲-۲ تنش Ω_k

پارامتر Ω_k انحناى جهان را توصیف می کند. به این معنا که اگر Ω_k برابر با صفر باشد، جهان دقیقاً مسطح است، به این معنی که خطوط موازی موازی باقی می مانند و مجموع زوایای یک مثلث به 180° درجه می رسد. اما اگر Ω_k مثبت باشد، جهان دارای هندسه بسته است، به این معنی که خطوط موازی در نهایت همگرا می شوند و مجموع زوایای یک مثلث بیشتر از 180° درجه خواهد بود. اگر Ω_k منفی باشد، جهان دارای هندسه باز است، به این معنی که خطوط موازی واگرا می شوند و مجموع زوایای یک مثلث کمتر از 180° درجه خواهد بود.

اندازه گیری های مختلف پارامترهای کیهان شناسی مقادیر تا حدودی متناقضی برای Ω_k ارائه کرده است. برای مثال، اندازه گیری های تابش پس زمینه کیهانی نشان می دهد که Ω_k بسیار نزدیک به صفر است، در حالی که اندازه گیری های ساختارهای بزرگ مقیاس جهان نشان می دهد که Ω_k ممکن است کمی مثبت باشد.

به طور خاص، ماهواره‌ی پلانک ۲۰۱۸ در 3.4σ ، با بازه‌ی اطمینان ۹۹٪ این پارامتر را به صورت $-0.007 < \Omega_k < -0.095$ پیدا کرد. اولین سوالی که باید به آن پاسخ داد این است که آیا پلانک یک تخمین بدون بایاس و قابل اعتماد ارائه می‌دهد یا خیر. از انحنای کیهان ممکن است اینطور نباشد، زیرا یک «انحطاط هندسی» با پارامتر Ω_M وجود دارد که می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.

با ترکیب نتایج پلانک، عدسی‌های گرانشی، و BAO، پارامتر چگالی تقریباً نشان‌دهنده‌ی تخت بودن جهان است. پارامتر چگالی انحنای به صورت $\Omega_k = 0.0007 \pm 0.0019$ در بازه اطمینان ۶۸٪ تعیین می‌شود. و همچنین با استفاده از احتمال جایگزین $\Omega_k = 0.0004 \pm 0.0019$ در ۶۸٪ بازه‌ی اطمینان تعیین می‌شود.

با توجه به تغییر قابل توجه در نتیجه‌گیری از پلانک به تنهایی، بررسی اینکه آیا داده‌های ترکیب‌شده با هم واقعاً سازگار هستند، الزامی است. یک پیش‌نیاز اساسی برای ترکیب داده‌های اندازه‌گیری شده توسط کاوش‌گرهای مختلف این است که آنها از یک مدل کیهان‌شناسی به دست آمده باشند. در یک مدل Λ CDM، داده‌های BAO به خوبی با اندازه‌گیری‌های پلانک مطابقت دارند. اما وقتی انحنای تغییر کند، اختلاف شدید بیشتر از 3σ بین محدودیت‌های پلانک و اندازه‌گیری‌های BAO وجود دارد^۸.

۳-۲ جمع‌بندی

در این بخش با مدل استاندارد کیهان‌شناسی آشنا شدیم و دریافتیم که چرا در علم کیهان‌شناسی، به مدل ریاضیاتی دقیق و به دور از خطا نیاز داریم. همچنین به اهمیت مطابقت داده‌های رصدی با یکدیگر پرداختیم و مشکلاتی که مدل کنونی Λ CDM دارد را به صورت اجمالی بررسی کردیم. در واقع هدفمان این بود که ایده‌آل نبودن و خلاءهای موجود در مدل استاندارد کیهان‌شناسی را مطرح کنیم. همچنین دیدیم که به علت

تنوع در روش‌های اندازه‌گیری و آماری ممکن است بعضی از این خطاها، خطاهای سیستماتیک باشند اما به دلیل ادامه‌دار بودن بعضی از این مشکلات از جمله تنش H_0 ، نمی‌توان این ضعف‌ها را در مدل نادیده گرفت. در این فصل همچنین اشاره شد که یکی از روش‌های تعیین مقادیر پارامترهای دارای تنش (از جمله H ، A ، S ، ...) به طور مستقل از مدل استاندارد، از طریق لنزهای گرانشی است. در فصل آینده مروری بر لنز گرانشی خواهیم داشت.

فصل سوم

مروری بر مفاهیم پایه لنز گرانشی

۳- مروری بر لنز گرانشی

همانطور که در فصل قبل اشاره شد، یکی از روش‌های تعیین پارامتر هابل به صورت مستقل از مدل استاندارد کیهان‌شناسی، با استفاده از لنز گرانشی است. در این فصل به ساختار لنز گرانشی و ریاضیات آن می‌پردازیم.

۳-۱ تاریخچه

لنز گرانشی اولین بار توسط سولدنر و با استفاده از فرضیات فیزیک نیوتنی پیش‌بینی شد. او زاویه‌ی انحراف نور را به این ترتیب به دست آورده بود. برای خورشید این زاویه برابر با ۰.۸۵ ثانیه قوس است.

$$\alpha = \frac{2GM}{v^2 r} \quad (1-3)$$

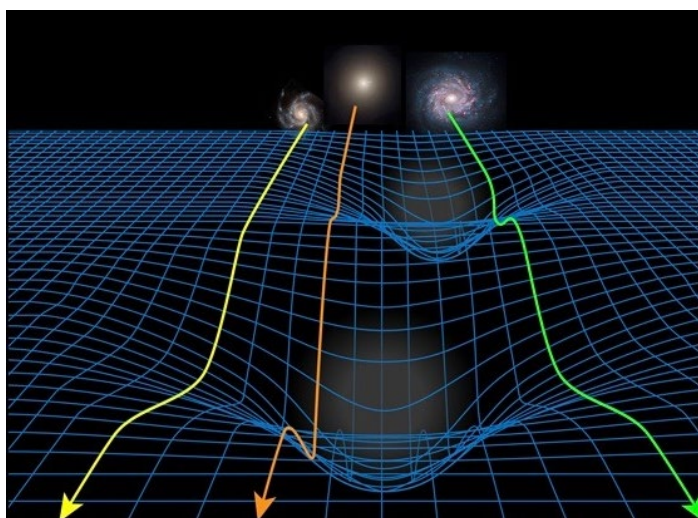
سپس آلبرت اینشتین همین نتیجه را با استفاده از اصل هم‌ارزی و ماتریس اقلیدسی به دست آورد. در سال ۱۹۱۵ اینشتین معادله‌ی زیر را با استفاده از نسبیت عام به دست آورد، که برای خورشید این زاویه برابر با ۱.۷ ثانیه قوس است. در ادامه به صورت فرموله شده به لنز گرانشی می‌پردازیم.

۳-۲ منشاء

پدیده لنز گرانشی زمانی اتفاق می‌افتد که نور یک جسم درخشان توسط گرانش یک یا چند کهکشان عظیم در پیش‌زمینه منحرف می‌شود، به‌طوری که تصاویر سراسری متعددی از همان جرم هنگام مشاهده از تلسکوپ نمایان می‌شوند.

منشاء این پدیده، نظریه نسبیت عام است. در یک میدان گرانشی ضعیف، پتانسیل گرانشی ضریب شکست نور را افزایش می‌دهد که این موضوع منجر به کاهش سرعت نور در هنگام عبور از اطراف آن میدان می‌شود.

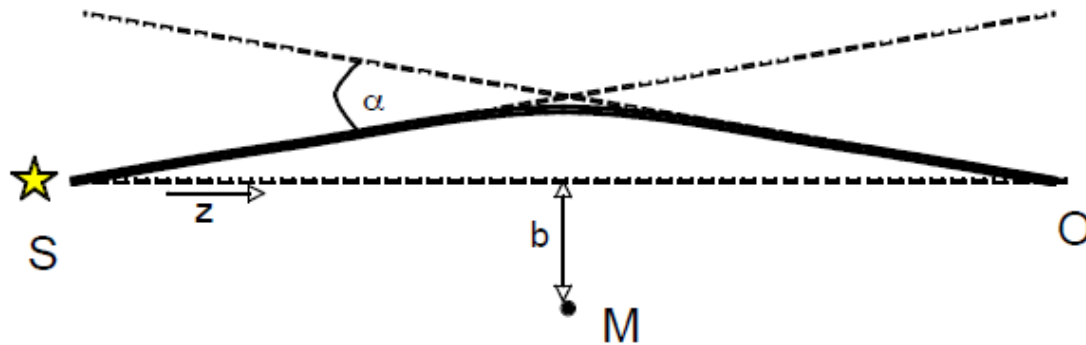
اصل فرما بیانگر این است که نور باید در مسیری حرکت کند که زمان حرکت آن کمینه، بیشینه یا روی نقطه زینی تابع زمان طی شدن آن مسیر باشد. در نتیجه‌ی این موضوع، نور برای آنکه به پیروی از اصل فرما ادامه دهد دیگر در یک خط مستقیم حرکت نمی‌کند. این موضوع به این دلیل است که با کمتر شدن سرعت نور در محیط یک میدان گرانشی، مسیری ویژگی زمانی موردنظر اصل فرما را دارد که لزوماً یک خط مستقیم نیست و یک مسیر خم شده است. برای شهود فیزیکی این موضوع، می‌توان به لزوم ایجاد تعادل بین افزایش زمان ناشی از کاهش سرعت، و افزایش زمان ناشی از بیشتر شدن طول هندسی مسیر توجه کرد. نتیجه این ایجاد تعادل آن است که مسیر نور مانند شکل ۴-۱ خم می‌شود.



شکل ۳-۱ خمش مسیر نور در سطح فضا-زمان به دلیل تفاوت مقدار پتانسیل گرانشی. مناطق فرورفته‌تر نشان‌دهنده‌ی پتانسیل گرانشی قوی‌تر هستند.

۳-۳ مباحث نظری

در این زیربخش به معادلات و مباحث نظری لنز گرانشی می‌پردازیم. در تهیه‌ی این بخش از منبع ۹ کمک گرفته شده است. جزئیات هندسی یک لنز گرانشی ضعیف در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: خم شدن نور سطح شده از منبع S در اثر لنز M از دید ناظر O. زاویه انحراف این لنز در شکل با نماد α و فاصله بین لنز و منبع واقعی از دید ناظر با علامت b نشان داده شده است.

ابتدا زاویه انحراف نور را نسبت به میدان پتانسیل گرانشی Φ لنز، با استفاده از متریک، معادله پواسون، معادله ژئودزی، شرط تهی بودن ژئودزی نور، و فرض کوچک بودن زاویه انحراف آلفا به صورت زیر به دست می آوریم.

$$\hat{\alpha} = 2 \int \nabla_{\perp} \Phi \, ds \quad (2-3)$$

با استفاده از معادله پواسون، می توان پتانسیل گرانشی را برای شکل ۴-۱ به صورت زیر نوشت:

$$\nabla_{\perp} \Phi(r) = \frac{\partial \Phi}{\partial b} = - \frac{GMb}{(b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (3-3)$$

حال این معادله را در معادله زاویه انحراف جایگذاری کرده و با انتگرال گیری، به معادله زیر می رسیم:

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{b} \quad (4-3)$$

با توجه به اینکه برای قابل توجه بودن زاویه انحراف، لنزهای گرانشی باید از دید ناظر نزدیک به منبع باشند و زاویه بین این دو از دید ناظر کوچک باشد ($z \sim b$)، ما این زاویه را ξ می‌نامیم و آن را در ادامه‌ی محاسبات کوچک در نظر می‌گیریم. به اثر لنز گرانشی که در آن زاویه ξ صفر باشد لنز گرانشی قوی و به لنزی که با منبع زاویه غیر صفر داشته باشد لنز گرانشی ضعیف گفته می‌شود. حال با توجه به معادله زیر برای چگالی پخش شده:

$$\Sigma(\vec{\xi}) = \int \rho(\vec{\xi}, z) dz \quad (5-3)$$

برای لنزهای گرانشی ضعیف، نسبت به لنزهای قوی می‌توان رابطه زیر را بر حسب جدایی زاویه‌ای ξ نوشت.

$$\vec{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c^2} \int \frac{(\vec{\xi} - \vec{\xi}') \Sigma(\vec{\xi}')}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2 \xi' \quad (6-3)$$

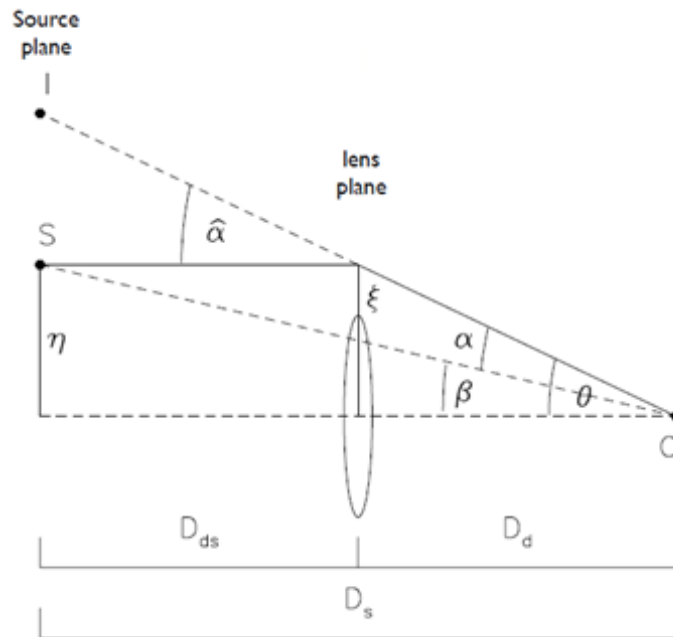
که در صورت تقارن دایره‌ای خواهیم داشت:

$$\hat{\alpha}(\xi) = \frac{4GM(\xi)}{c^2 \xi} \quad (7-3)$$

$$M(\xi) = 2\pi \int_0^\xi \Sigma(\xi') \xi' d\xi' \quad (8-3)$$

حال می‌خواهیم بررسی معادلات لنز را از روی شکل انجام دهیم.

۱-۳-۳ معادله لنز



شکل ۳-۳ فواصل مختلف معادله لنز گرانشی نشان داده شده روی شکل

با توجه به کوچک بودن زوایا می‌توانیم آن‌ها را تقریب بزنیم و برای کیهان تخت^۴، طول مماسی را صورت حاصل ضرب جدایی زاویه‌ای در فاصله از جسم بنویسیم. در آن صورت خواهیم داشت:

$$\xi = D_d \theta \quad (۹-۳)$$

$$D_{ds} \hat{\alpha} = D_s \alpha \quad (۱۰-۳)$$

و از روی شکل ۲-۴ به این معادله خواهیم رسید که به آن معادله لنز می‌گویند.

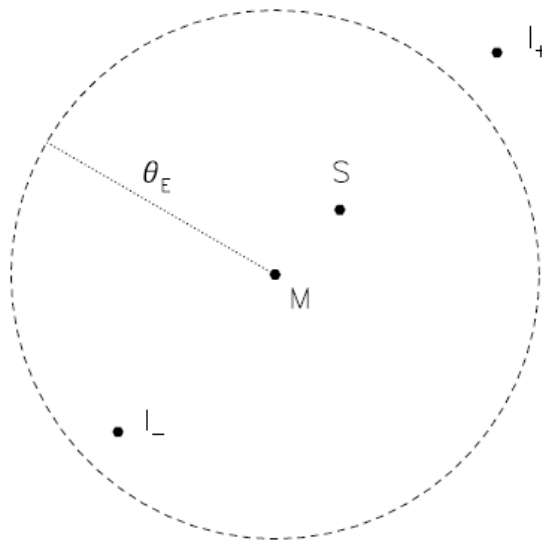
$$\beta = \theta - \alpha(\theta) \quad (۱۱-۳)$$

از طریق اندازه گیری طول‌های مشاهده شده در لنز گرانشی می‌توان به صورت مستقل از مدل استاندارد، راجع به انحنای کیهان هم اطلاعاتی به دست آورد که البته از^۴ موضوع بحث خارج است.

$$\alpha(\theta) = \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}(D_d \theta) \quad (12-3)$$

۲-۳-۳ شعاع اینشتین

به عنوان یک مثال، معادلات را برای یک جسم نقطه‌ای (شکل ۳-۴) تعیین می‌کنیم.



شکل ۳-۴

در این صورت خواهیم داشت:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\alpha} &= \frac{4GM}{c^2 |\xi|} \\ \alpha(\theta) &= \frac{D_{LS}}{D_s} \hat{\alpha}(\theta) \end{aligned} \right\} \quad \alpha(\theta) = \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_s D_L} \frac{\theta}{|\theta|^2} \quad (13-3)$$

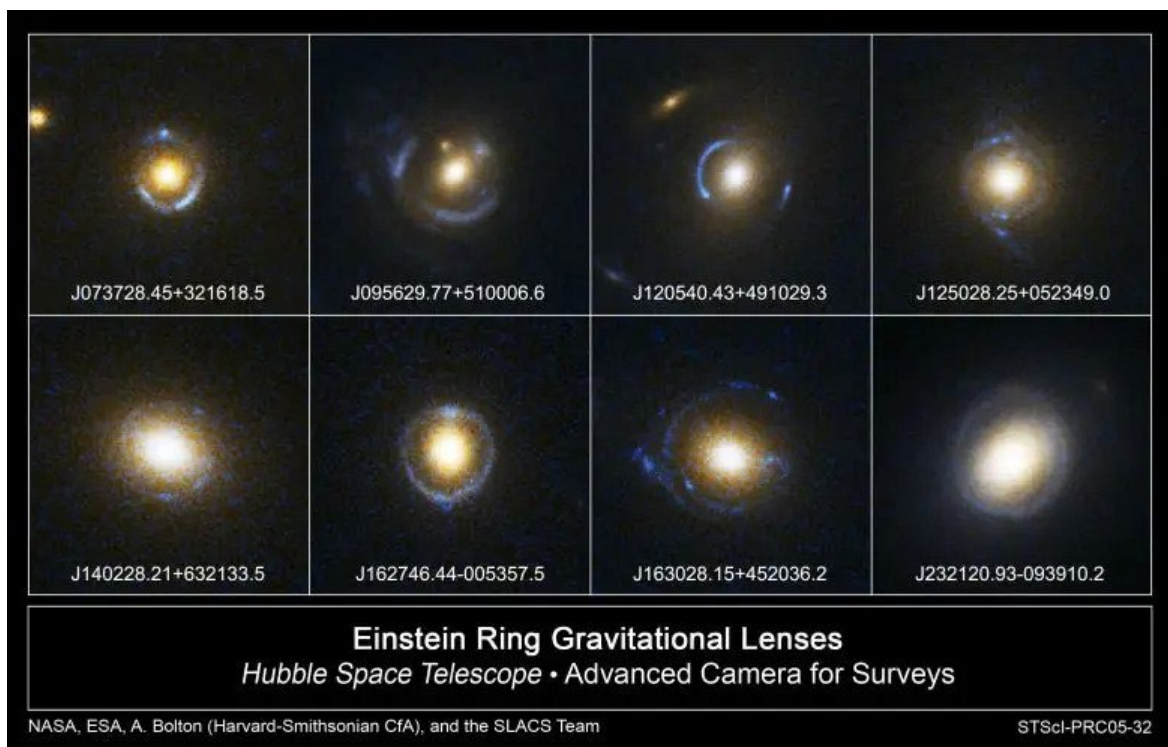
به ضرایب مستقل از θ در معادله‌ی بالا، زاویه اینشتین یا θ_E گفته می‌شود.

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L}} \quad (14-3)$$

بنابراین معادله لنز به صورت زیر خواهد شد:

$$\beta = \theta - \theta_E^2 \frac{\theta}{|\theta|^2} \quad (15-3)$$

در صورتی که لنز و منبع از دید ناظر کاملاً پشت سر هم باشند، یعنی $\beta = 0$ باشد، خواهیم داشت: $\theta = \pm \theta_E$ و به دلیل تقارن در تمامی جهات، حلقه‌ی نورانی‌ای به شعاع θ_E در اطراف لنز تشکیل خواهد شد که همان تصویر منبع تحت اثر لنزینگ است. تصویر ۴-۴ مثال خوبی از این اتفاق است.



شکل ۵-۳: چندین تصویربرداری از لنزهای گرانشی قوی توسط تلسکوپ هابل. حلقه‌ی اینشتین به صورت حلقه‌ای در اطراف لنز اصلی دیده می‌شود.¹⁰

۳-۳-۳ بزرگنمایی

لنز گرانشی روشنایی سطحی را حفظ می کند، اما زاویه ظاهری را تغییر می دهد. بنابراین بزرگنمایی در لنز گرانشی را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\mu = \frac{\text{روشنایی سطحی تصویر}}{\text{روشنایی سطحی منبع}}$$

و در معادله‌ی لنز آن را به صورت زیر به دست می آوریم:

$$\mu = \left| \det \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta} \right) \right|^{-1} \equiv \left| \det \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial \theta_j} \right) \right|^{-1} \quad (16-3)$$

۳-۳-۴ تأخیر زمانی

گذشتن نور از اطراف یک پتانسیل گرانشی باعث به وجود آمدن تأخیر زیر می شود:

$$\Delta t = - \int \Phi ds \quad (17-3)$$

و انحراف مسیر نور، فقط به گرادیان میدان پتانسیل گرانشی حساس است.

$$\hat{\alpha} = 2 \int \nabla_{\perp} \Phi ds \quad (18-3)$$

همانطور که پیش تر گفتیم، تأخیر زمانی نور، حاصل برآیند تأخیر ناشی از طی مسیر اضافه به دلیل انحراف، و تأخیر زمانی ناشی از میدان پتانسیل گرانشی است. بنابراین تأخیر مجموع به صورت زیر است:

$$t(\vec{\theta}) = \frac{(1+z_d)}{c} \frac{D_d D_s}{D_{ds}} \left[\frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi(\vec{\theta}) \right] \quad (19-3)$$

$$= t_{geom} + t_{grav} .$$

۳-۴ جمع بندی

در این فصل، بر آن شدیم تا ریاضیات و علل فیزیکی پدیده‌ی لنز گرانشی را مورد بررسی قرار دهیم. در همین راستا، ابتدا به تاریخچه مورد توجه قرار گرفتن این پدیده و مشاهده شدن آن پرداختیم و سپس به دلایل فیزیکی آن پرداختیم. در ادامه، با استفاده از یک هندسه‌ی ساده‌ی دوبعدی مسئله را به صورت ریاضی مدل سازی کردیم. در همین راستا پارامترهای مهم و حائز اهمیت در پدیده‌ی لنز گرانشی را تعریف کردیم. در فصل آینده به روش تعیین پارامتر هابل با لنز گرانشی می پردازیم.

فصل چهارم

توضیح روش و پژوهش‌های انجام شده

۴- تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنز گرانشی

در فصل دوم دیدیم که در چارچوب مدل استاندارد کیهان‌شناسی، اندازه‌گیری ثابت هابل با کاوش گرهای کیهانی مختلف و از روش‌های مختلف، منجر به تنش قابل توجهی با یکدیگر می‌شود. برای ارزیابی اینکه آیا این تنش ناشی از خطاهای سیستماتیک نامشخص است یا به ضعف مدل کیهان‌شناسی اشاره دارد، به تکنیک‌هایی نیاز داریم که هم دقیق و هم واقعاً مستقل از یکدیگر باشند. دیدیم که یکی از این روش‌ها استفاده از لنزهای گرانشی است که به آن کیهان‌نگاری با تأخیر زمانی^۵ گفته می‌شود. در این فصل، به این روش می‌پردازیم و پژوهش‌هایی که تا کنون در این زمینه انجام شده را مرور می‌کنیم.

۴-۱ روش کلی

تأخیر زمانی گرانشی در لنزهای گرانشی قوی مشاهده می‌شود. در این لنزها منبع نور پس‌زمینه، به دلیل لنزینگ دچار اعوجاج شده و از دید ناظر به صورت تصاویر متعددی دیده می‌شود. این موضوع باعث می‌شود به طور مستقیم بتوانیم فاصله کیهانی را اندازه‌گیری کنیم.

موفقیت این روش به عوامل زیادی بستگی دارد. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به در دسترس بودن و اندازه‌ی مناسب لنز نمونه، اندازه‌گیری دقیق تأخیرهای زمانی، مدل‌سازی دقیق پتانسیل گرانشی لنز، و مدل‌سازی توزیع جرم در راستای خط دید ناظر نسبت به منبع اشاره کرد^{۱۱}.

ایده‌ی کیهان‌نگاری با تأخیر زمانی در ابتدا توسط رفزدال ارائه شد، که پیشنهاد استفاده از ابرنواخترها به عنوان منبع عدسی را داد. با این حال، این پیاده‌سازی ابتدا با اختروش‌ها محقق شد^{۱۲}.

⁵ Time-Delay Cosmography

اگر یک اختروش یا ابرنواختر دوردست تحت تأثیر عدسی گرانشی قوی قرار گیرد، جبهه موج منتشر کننده آن در حین عبور از کنار جرم پیش‌زمینه شکافته می‌شود و چندین تصویر را تشکیل می‌دهد، همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است. جبهه‌های موجی که در امتداد هر مسیر نوری عدسی منتشر می‌شوند، به دلیل تفاوت‌های هندسی بین مسیرهای نور و چاه پتانسیل گرانشی عدسی، نسبت به یکدیگر تاخیر دارند. بنابراین تأخیر زمانی به هندسه فضا-زمان، یعنی ثابت هابل، و به توزیع جرم جسم عدسی‌دهنده و همه اجرام در امتداد خط دید بستگی دارد.



شکل ۱-۴: چهار اختروش لنز شده‌ی چهارتایی و یک اختروش دو بار لنز شده. اعتبار تصویر: ESA/Hubble, NASA. سویو و دیگران.

در ادامه به روش تئوری استفاده از تأخیر زمانی لنزها برای به دست آوردن فاصله آن‌ها و در نتیجه، تعیین پارامتر هابل می‌پردازیم.

اصل فرما برای انتشار پرتوهای نور، در همه‌ی حالات فضا-زمان، از جمله فضا-زمان منحنی، برقرار است. زمان حرکت نور در یک عدسی گرانشی تک و نازک با استفاده از معادله‌ی زیر داده می‌شود:

$$\tau(\theta) = \frac{D_{\Delta t}}{c} \cdot \Phi(\theta, \beta)$$

$$\Phi(\theta, \beta) = \frac{1}{2}(\theta - \beta)^2 - \psi(\theta).$$

در این معادله، θ زاویه‌ی ظاهری منبع نور در آسمان، و β زاویه‌ی واقعی منبع نور است. تفاوت بین مکان مشاهده‌شده‌ی منبع نور و مکان واقعی آن، همان‌طور که در فصل سوم توضیح داده شده، از طریق زاویه‌ی انحراف ($\alpha(\theta)$) داده می‌شود که برای یک لنز گرانشی قوی در مقیاس یک کهکشان، به طور میانگین حدود ۱ ثانیه قوسی است. تابع $\psi(\theta)$ هم مقیاسی از پتانسیل گرانشی جسم لنز در صفحه‌ی لنز را نشان می‌دهد. در صورتی که یک مدل از توزیع جرم لنز داشته باشیم، توابع $\alpha(\theta)$ و $\psi(\theta)$ به راحتی قابل پیش‌بینی هستند.

تصاویر ظاهر شده در اطراف لنز از دید ناظر، در نقاط ثابتی که $\nabla\tau(\theta) = \nabla\Phi(\theta) = 0$ است تشکیل می‌شوند. برای همین، به $\Phi(\theta)$ پتانسیل فرما نیز گفته می‌شود. این کمیت، می‌تواند به عنوان ضریب شکست نور تحت تأثیر لنز هم در نظر گرفته شود.

زمان رسیدن نور به خودی خود قابل اندازه‌گیری نیست اما تفاوت بین رسیدن نور تصاویر لنز شده‌ی مختلف قابل اندازه‌گیری است. با استفاده از معادله‌ی بالا می‌توانیم برای تصویر A و تصویر B که از یک کهکشان واحد تحت تأثیر لنز گرانشی قرار گرفته اند بنویسیم:

$$\Delta\tau_{AB} = \frac{D_{\Delta t}}{c} \cdot \Delta\Phi_{AB}$$

در این معادله، $\Delta\Phi_{AB}$ نشان‌دهنده‌ی اختلاف پتانسیل فرما در مکان عکس A نسبت به عکس B است. معادله‌ی بالا نشان‌دهنده‌ی این است که در صورتی که مدل توزیع جرم بین دو تصویر مشاهده شده، اختلاف پتانسیل $\Delta\Phi_{AB}$ را پیش‌بینی کند و تأخیر زمانی بین دو تصویر را هم به صورت $\Delta\tau_{AB}$ رصد کنیم، کمیت $D_{\Delta t}$ که نشان‌دهنده‌ی اختلاف فاصله‌ی طی شده توسط نور بین دو تصویر است را می‌توان به دست آورد. که این کمیت، طبق معادله‌ی ۳-۱۸ به صورت زیر با فواصل لنز و منبع متناسب است:

$$D_{\Delta t} = (1 + z_d) \frac{D_d D_s}{D_{ds}}$$

در صورت مشخص بودن قرمزگرایی منبع (Z_S) و لنز (Z_d) و پارامترهای چگالی ناشی از مدل کیهان‌شناسی فرض شده (Ω)، می‌توان مقدار قطرهای زاویه‌ای را به دست آورد.

تمام معادلات بالا مربوط به مدل ساده‌ای است که در آن تمام جرم لنز روی یک صفحه لنز قرار گرفته است. با وجود اینکه صفحه‌ی لنز چند جسم پرجرم پیچیده‌تر است. اما در آن صورت هم مقادیری مانند $D_{\Delta t}$ در سراسر معادلات ظاهر می‌شوند که تأخیرهای زمانی را پیش‌بینی می‌کنند، فواصل بین صفحات عدسی را ثبت می‌کنند و تقریباً همان وابستگی را به پارامترهای کیهان‌شناسی حفظ می‌کنند.

کیهان‌نگاری دقیق با سیستم‌های لنز تکی شامل مراحل تجزیه و تحلیل کلیدی زیر است، که بعد از طی شدن این مراحل، تعیین پارامترهای کیهان‌شناسی از جمله پارامتر هابل می‌تواند اتفاق بیفتد.

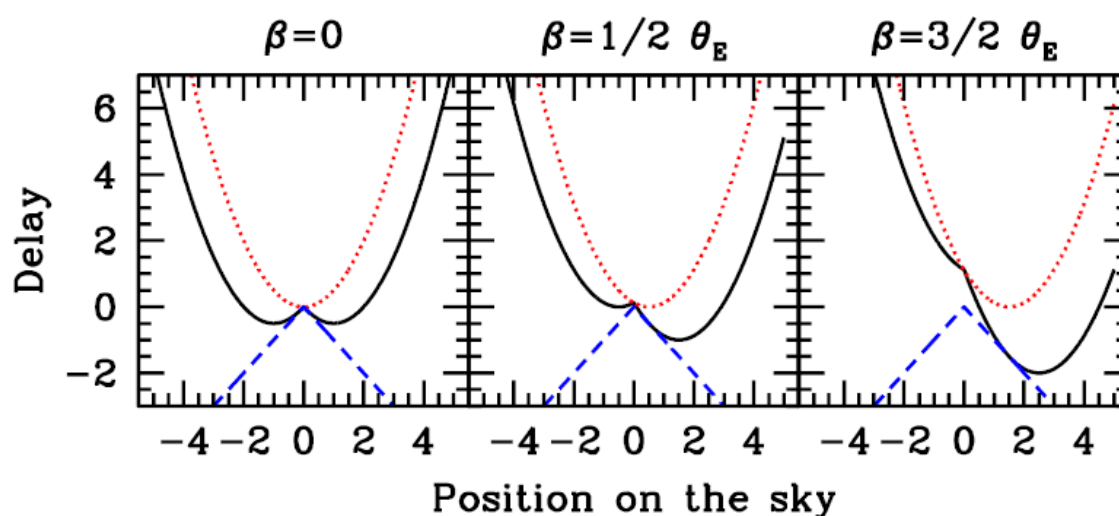
تخمین تاخیر زمانی: منحنی نور استخراج شده از مشاهدات نظارتی به عنوان ورودی برای استنتاج تاخیر زمانی بین تصاویر متعدد استفاده می‌شود.

مدل‌سازی جرم کهکشان لنز: تصویربرداری با وضوح بالا و داده‌های طیف‌سنجی برای محدود کردن مدلی برای توزیع جرم کهکشان عدسی استفاده می‌شود، که می‌تواند برای پیش‌بینی تفاوت‌های پتانسیل فرما استفاده شود. هم تصویر حلقه انیشتین و هم پراکندگی سرعت ستاره مهم هستند.

محیط و مدل‌سازی خط دید: اطلاعات مشاهده‌ای اضافی در مورد قسمت دید اطراف سیستم لنز برای توضیح اثرات ضعیف عدسی به دلیل ساختارهای عظیم در صفحه عدسی و در امتداد خط دید استفاده می‌شود.

البته در عمل بین مراحل بالا و تعیین پارامترهای کیهان‌شناسی، تفکیک چندانی وجود ندارد و این مراحل خیلی از هم قابل جدا شدن نیستند. اکثر فیزیک‌دانان عمل گرا هم متمایل به انجام همه مراحل به طور مشترک و همزمان بین همه‌ی داده‌ها هستند.

$$\text{Geometric Delay} + \text{Shapiro Delay} = \text{Total Delay}$$



شکل ۲-۴: ترکیب تأخیر زمانی هندسی و نسبیت عامی (شاپیرو) در تأخیر زمانی لنز. تصاویر لنز شده‌ی منبع در مینیمم و نقاط زینی این نمودارها شکل می‌گیرند. سایر موقعیت‌های منبع منجر به تأخیرهای هندسی متفاوت و همچنین جابجایی موقعیت تصاویر می‌شود.^{۱۱}

۲-۴ مشکلات روش

در سال ۲۰۰۴، پاول شکتر پژوهشی تحت عنوان «ثابت هابل از روش تأخیر زمانی لنزهای گرانشی» انجام داد. در بخشی از این مقاله، شکتر به مشکلات اندازه‌گیری ثابت هابل با استفاده از لنز گرانشی می‌پردازد و عنوان می‌کند که همه‌ی لنزها برای تعیین این پارامتر کارآمد نیستند. برای مثال می‌توان به مشکل تبهگنی صفحه‌ی جرم^۶، تبهگنی مرکز تصویر^۷، و لزوم تشکیل چندین تصویر از منبع در اطراف لنز اشاره کرد^{۱۳}.

^۶ Mass-sheet degeneracy

^۷ Central concentration degeneracy

۳-۴ پژوهش‌های انجام شده

در این زیربخش به طور خلاصه به مرور مهم‌تری کارهایی که تا کنون در زمینه تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنز گرانشی انجام شده است می‌پردازیم. گفتنی است که مهمترین هدف تعیین این ثابت با این روش، این است که بتوانیم با بازه خطای کوچکتری ثابت هابل را تعیین کنیم و آن را با روش‌های ناشی از مدل استاندارد مقایسه کنیم.

۱-۳-۴ لنز طلایی شکتر: VAS0218+357

در سال ۲۰۰۴، شکتر و همکاران در مقاله‌ای به توصیف دلایلی که باعث می‌شود ثابت هابل را با لنزینگ گرانشی در بازه‌ی خطای پایین تعیین کرد پرداختند. این مشکلات در زیربخش ۵-۲ به اختصار توضیح داده شدند. هدف این پژوهش این بود که تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنز گرانشی با خطایی کمتر یا در اندازه‌ی خطای روش فاصله‌یابی متغیرهای قیفاووسی انجام شود. سپس مشکلات تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنزینگ شرح داده شده و ذکر شده است که این مشکلات به بزرگ شدن بازه‌ی خطای تعیین پارامتر می‌انجامند.

تصاویر لنزی که هیچ یک از آن مشکلات شامل حالشان نمی‌شود، بسیار انگشت شمار هستند. مبنای کار شکتر و همکاران اختروش VAS0218+357 بوده است که توسط مساحی کیهانی لنزهای گرانشی کشف شده است و هیچ یک از مشکلات زیربخش ۵-۲ را ندارد. شکتر و همکاران، با استفاده از بررسی‌های تأخیر زمانی بر روی این لنز، با بازه‌ی خطایی کوچکی پارامتر هابل توسط این اختروش لنز شده، تعیین کرده‌اند. در نتیجه‌ی این پژوهش، مقدار ثابت هابل برابر با $H_0 = 78 \pm 6 \frac{km}{s\ Mpc}$ در عدم قطعیت 2σ به دست آمده است.¹³

شکتر و همکاران از این اختروش برای اندازه‌گیری موقعیت‌ها و فواصل زاویه‌ای تصاویر لنز شده استفاده کردند و توزیع جرم کهکشان‌ها یا خوشه‌های کهکشان‌ها را مدل‌سازی کردند. سپس از این مدل‌ها برای محاسبه پارامتر هابل استفاده کردند.

برای استخراج ثابت هابل از داده‌های لنزینگ مشاهده‌شده، شکتر یک تجزیه و تحلیل آماری انجام داد که شامل مقایسه مقادیر مشاهدات شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های توزیع جرم بود. این مقایسه با استفاده از یک روش آماری به نام بیشینه درست‌نمایی^۸ انجام شد که به کمک آن می‌توان بهترین مقدار تخمینی برای جرم و ثابت هابل را پیدا کرد.

۴-۳-۲ لنز B1608+656

مانیتورینگ لنز B1608+656 در طول موج رادیویی با آرایه‌های بسیار بزرگ، باعث پیشرفت بسیار زیادی در اندازه‌گیری تأخیر زمانی شد. در فاز اول این پروژه، اندازه‌گیری‌های هر سه تأخیر زمانی را در این سیستم تصویر چهارتایی با دقت ۶ تا ۱۰٪ انجام داد^۲. با افزایش تنوع منبع در طول دو فاز بعدی، این پروژه توانست عدم قطعیت قبلی را به ۲ تا ۵٪ کاهش دهد. چنین دقت بالایی نتیجه یک کمپین با فازهای ۸ ماهه و میانگین فاصله رصدی در حدود ۳ روز بود. منحنی‌های نور با دقت ۰.۶ درصد کالیبره شدند. در حالی که تأخیرهای زمانی قبلاً در ده سیستم لنز دیگر اندازه‌گیری شده بود، این اولین باری بود که تمام تأخیرهای یک لنز چهارتایی به دست می‌آمد. علاوه بر این، در این پروژه عدم قطعیت تأخیر زمانی به پایین‌تر از عدم قطعیت سیستماتیک ناشی از مدل لنز رسانده شد و تلاش‌های جدیدی را در این جهت فراتر از آنچه کوپمانس و فسنت^۲ انجام می‌دادند، برانگیخت.

⁸ Maximum Likelihood



شکل ۳-۴: لنز چهارتایی B1608+656

با وجود همه‌ی مزایای موجود، رصد رادیویی و به دست آوردن تصاویر با کیفیت بالا چالش‌های بسیاری دارد در حالی که رصد اپتیکی اینگونه نیست. با وجود اینکه B1608+656 تنها لنز رادیویی با تأخیرهای زمانی اندازه گیری شده نیست، این پروژه باعث شد تمرکز رصدهای کیهان‌نگاری با تأخیر زمانی، به سمت مانیتورینگ اپتیکی تغییر جهت دهد. با افزایش تعداد اختروش‌های لنز شده‌ی شناخته شده، پروژه‌هایی جهت بررسی اختروش‌های لنز شده در طول موج‌های پایین‌تر و با ابزارهای ۱ تا ۲ متری شروع شدند.

۴-۳-۳ پروژۀ COSMOGRAIL

پروژه COSMOGRAIL درباره‌ی نظارت بر اختروش‌های لنز شده‌ی قوی و اندازه‌گیری تأخیر زمانی بین تغییرات درخشندگی تصاویر لنزدار است. در این پروژه، اختروش‌های لنز شده‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند که در نتیجه لنزینگ، چندین تصویر (معمولاً ۲ یا ۴) از آن‌ها توسط ناظر مشاهده می‌شود¹⁴.

یکی از کلیدهای موفقیت این پروژه، دکانولوشن همزمان فریم‌های جداگانه در مجموعه داده تصویربرداری، با استفاده از یک مدل ترکیبی برای توصیف تصاویر نقطه‌ای منبع و لنزهای گسترده مثل کهکشان‌های دارای AGN بوده است (Magain et al, 1998). از عوامل دیگر می‌توان به شبکه تلسکوپ‌های ویژه‌ی به کار رفته و کالیبراسیون دقیق نورسنجی در سراسر این سیستم اشاره کرد. فازهای ۸ تا ۱۲ ماهه این پروژه در کمپین‌هایی با طول ۹ سال و با میانگین فاصله‌ی رصدی حدود ۳ تا ۴ روز به تأخیرهای زمانی با دقت بالا منجر شده است:

برای WFIJ2033-4723: ۳۸٪

برای HE0435-1223: ۵.۶٪

برای SDSS J1206+4332: ۲.۷٪

برای RXJ1131-1231: ۱.۵٪

برای SDSS J1001+5027: ۲.۸٪

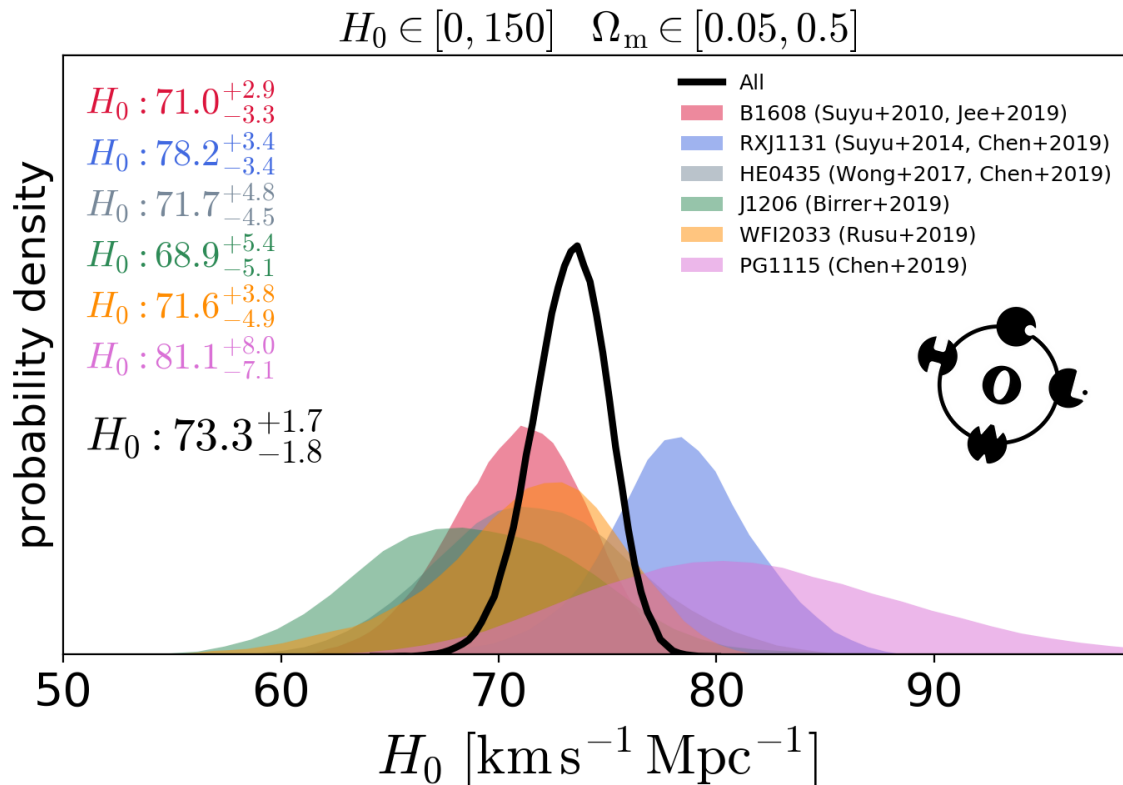
و این نتایج فقط بخش کوچکی از دقت‌های به دست آمده در این پروژه هستند. باید توجه داشت که به طور معمول به دلیل نوسانات منبع و احتیاج به اندازه‌گیری‌های متعدد برای اطمینان از عدم وجود خطا، برای به دست آوردن یک تأخیر زمانی دقیق چندین سال نظارت مورد نیاز است. این پروژه تا به امروز ادامه دارد¹¹.

۴-۳-۴ پروژهی H0LiCOW

پروژهی H0LiCOW اندازه‌گیری ثابت هابل را از تجزیه و تحلیل خود از شش سیستم اخترش چندتایی از طریق لنزینگ گرانشی قوی نشان داده است. نتیجه کنونی این پروژه برای پارامتر هابل، در مدل تخت استاندارد Λ CDM با دقت ۲.۴٪ به صورت زیر است:

$$H_0 = 73.3^{+1.7}_{-1.8} \frac{\text{km}}{\text{s.Mpc}}$$

این اندازه‌گیری کاملاً مستقل از اندازه‌گیری‌های نردبان فاصله محلی و منطبق با آن است. از سوی دیگر، این مقدار به دست آمده از پیش‌بینی‌های تابش پس‌زمینه‌ی کیهانی در مدل Λ CDM، و همچنین خوشه‌بندی کهکشان‌ها همراه با لنز ضعیف، بالاتر است¹⁵.



شکل ۴-۴: تابع چگالی احتمال H_0 برای ۶ لنز نمونه ارائه شده در پروژهی H0LiCOW XII¹⁵

از آنجایی که مقدار اندازه‌گیری شده از پروژه SH0ES با استفاده از متغیرهای قیفاووسی و ابرنواخترها کاملاً مستقل از مقدار H0LiCOW است، هر دو را می‌توان در یک اندازه‌گیری واحد از ثابت هابل در جهان محلی ترکیب کرد. این مقدار ترکیبی جدید، در 5.35 با آخرین پیش‌بینی CMB از ماهواره پلانک و 4.15 از خوشه بندی کهکشان‌ها و اندازه‌گیری لنزهای گرانشی ضعیف از همکاری DES در تنش است.

به ضمیمه‌ی این گزارش، فایل کدی که شبیه‌سازی‌های این پروژه با استفاده از دادگان این ۶ اختروش در آن انجام شده است، آمده است و با اجرای کد می‌توان به صورت عملی به نتایج گزارش شده در این پروژه دست یافت.

۴-۴ جمع‌بندی

در این فصل از گزارش ابتدا به روش تعیین پارامتر هابل پرداختیم. سپس مشکلاتی که ممکن است در تعیین پارامتر هابل با استفاده از این روش به وجود بیاید را به طور خلاصه مطرح کردیم و در آخر، گزیده‌ای از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه را شرح دادیم. در این فصل سعی بر آن بود تا موضوع اصلی گزارش که بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنز گرانشی است، تا حد خوبی پوشش داده شود.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵- نتیجه گیری

در این گزارش، با هدف تمرکز بر تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنزینگ گرانشی، و همچنین بررسی نقش آن در مسئله‌ی تنش پارامتر هابل، در ابتدا سعی کردیم مفاهیم مربوط به مدل استاندارد کیهان‌شناسی و مشکلات آن را به طور مختصر شرح دهیم. دیدیم که مدل استاندارد کیهان‌شناسی با وجود موفقیت‌های چشم‌گیر در توصیف مشاهدات انجام شده به روش ریاضی، کامل نیست و ناسازگاری‌هایی دارد: تنش پارامتر هابل، تنش پارامتر چگالی انحناء، تنش S_8 و تنش A_{lens} . در توضیح هر یک از این مشکلات، سعی شد مفهوم هر پارامتر و نحوه اندازه‌گیری آن از روش‌های مختلف که به ناسازگاری می‌انجامند، به صورتی ساده عنوان شود. پس از بررسی مدل استاندارد کیهان‌شناسی، به سراغ موضوع اصلی بحث یعنی لنز گرانشی رفتیم و با جزئیات بیشتری این پدیده‌ی فیزیکی را بررسی کردیم و به پارامترهای مختلف هندسی و فیزیکی لنز گرانشی پرداختیم. در انتها، روش تعیین پارامتر هابل با استفاده از معادلات لنز گرانشی به اختصار بیان شد. در قسمت پایانی گزارش، چالش‌های تعیین پارامتر هابل با استفاده از لنز گرانشی را بررسی کردیم و با بیان تاریخچه‌ای مختصر از سوابق استفاده از لنز گرانشی در تعیین پارامتر هابل پژوهش‌های کنونی را هم بررسی کردیم.

منابع و مراجع

1. Collaboration, P. *et al.* Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *arXiv.org* <https://arxiv.org/abs/1807.06209v4> (2018) doi:10.1051/0004-6361/201833910.
2. A Determination of H_0 with the CLASS Gravitational Lens B1608+656. I. Time Delay Measurements with the VLA - IOPscience. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/308118>.
3. Abdalla, E. *et al.* Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies. *J. High Energy Astrophys.* **34**, 49–211 (2022).
4. Scowcroft, D. V. *Relativistic Cosmology Part 2*.
5. Di Valentino, E. *et al.* Cosmology intertwined III: $f\sigma_8$ and S_8 . *Astropart. Phys.* **131**, 102604 (2021).
6. Renzi, F., Di Valentino, E. & Melchiorri, A. Cornering the Planck A_{lens} tension with future CMB data. *arXiv.org* <https://arxiv.org/abs/1712.08758v3> (2017) doi:10.1103/PhysRevD.97.123534.
7. ESA - Planck Power Spectrum. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_Power_Spectrum.
8. Di Valentino, E. Challenges of the Standard Cosmological Model. *Universe* **8**, 399 (2022).

9. Petters, A. O. & Werner, M. C. Mathematics of gravitational lensing: multiple imaging and magnification. *Gen. Relativ. Gravit.* **42**, 2011–2046 (2010).
10. Einstein Ring: Astronomers Just Found Cosmic Golden Needle That Was Buried for Two Decades. <https://scitechdaily.com/einstein-ring-astronomers-just-found-cosmic-golden-needle-that-was-buried-for-two-decades/>.
11. Treu, T. & Marshall, P. J. Time Delay Cosmography. *Astron. Astrophys. Rev.* **24**, 11 (2016).
12. Kelly, P. L. *et al.* Constraints on the Hubble constant from Supernova Refsdal's reappearance. *Science* **380**, eabh1322 (2023).
13. Schechter, P. L. The Hubble Constant from Gravitational Lens Time Delays. *Proc. Int. Astron. Union* **2004**, 281–296 (2004).
14. Millon, M. *et al.* TDCOSMO. I. An exploration of systematic uncertainties in the inference of H_0 from time-delay cosmography. *Astron. Astrophys.* **639**, A101 (2020).
15. Wong, K. C. *et al.* H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3σ tension between early and late-Universe probes. *arXiv.org* <https://arxiv.org/abs/1907.04869v2> (2019) doi:10.1093/mnras/stz3094.