

# درس نامه کیهانشناسی ۱

شانت باغرام

تنظیم: ۶ تیر ماه ۱۳۹۰

## ۱.۰ مقدمه

کیهان شناسی علمی است که به بررسی کیهان به صورت یک کل می پردازد. سولاتی در باره آغاز کیهان، تحوا آن، مولفه های تشکیل دهنده کیهان و سرانجام آن از سولاتی است که در کیهانشناسی مطرح می شود. اگرچه انسان از دیرباز قصد شناخت آسمان ها را داشته است و شواهد تاریخی نشان می دهند که سوال در باره هستی و چیستی کیهان از بدو تاریخ انسان وجود داشته است، اما کیهانشناسی به عنوان یک علم تجربی مدرن سابقه طولانی ندارد و به سده قبل بر می گردد. به صورت بسیار کلی و نه چندان دقیق می توان مدل های ارائه شده برای کیهان را از نظر تاریخی به ۳ دسته تقسیم کرد. مدل کیهان بطلمیوسی که بر پایه فیزیک ارسطویی بنا نهاده شده بود.

ب) مدل پسا کوپرنیکی که بر اساس فیزیک نیوتن بنا شده بود  
ج) در حال حاضر مدل استاندارد کیهانشناسی که بر اساس فیزیک انشتینی می باشد.

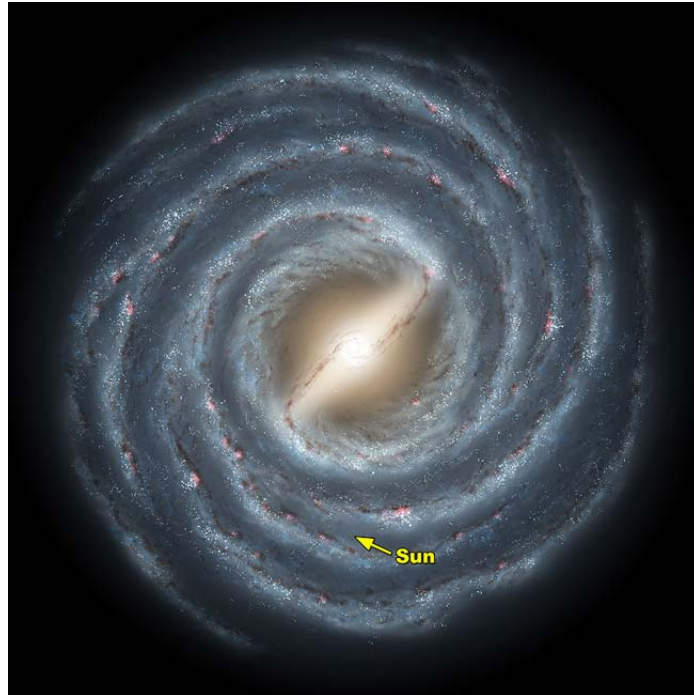
## ۲.۰ تصویر ما از کیهان

امروز در ابتدای دهه دوم قرن ۲۱ میلادی، تصویر انسان از عالمی که در آن زندگی می کند به شدت از آن چه در سده ها و حتی دهه های قبلی می انگاشت، فاصله دارد. در قرن ۲۰ میلادی با دو نظریه نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، بزرگترین جهش انسان در شناخت از طبیعت اتفاق افتاده است، که این شناخت با ساختن ابزارهای آزمایشی، که موفق ترین نمونه های آن تلسکوپ های فضایی و شتاب دهنده بزرگ هادرونی در سرن<sup>۱</sup> است وارد مرحله جدیدی شده است. امروز می دانیم که زمین سیاره ای به دور یک ستاره معمولی از  $10^{11}$  ستاره ی کهکشان راه شیری است، که در فاصله  $25,000 \text{ ly} \sim 8 \text{ kpc}$  از مرکز کهکشان با سرعت  $220 \text{ km/s} \sim v$  در حال چرخش است (شکل ۱). راه شیری نیز، یکی از میلیاردها کهکشان موجود در کیهان است. امروز ۹۰ سال از بحث های جدل انگیز شاپلی<sup>۲</sup> و کرتیس<sup>۳</sup> در باره مقیاس کیهان و آیا این که کل کیهان در کهکشان راه شیری خلاصه می شود و یا خیر گذشته است. امروز به کمک رصد امواج الکترومغناطیس در طول موج های مختلف، تصویری متفاوت از آن چه نیوتن آن را فضای ایستا می دانست، داریم. با رصد اجرام کیهانی فراتر از کهکشان راه شیری، دریافته ایم که کیهان در حال انبساط تند شونده است. کهکشان ها به عنوان بلوک های سازنده کیهان از هم دور می شوند و علاوه بر آن با تقریب خوبی می دانیم که این انبساط ۱۳.۷ میلیارد سال قبل، از یک انفجار بزرگ (مهبانگ) آغاز شده است. (برای تعریف مفاهیم نجومی و فواصل کیهانی می توان از مرجع [۳۶۳] استفاده کرد.) فضا و زمان اینشتینی، ظرف مطلق و ثابتی نیست که رویدادهای فیزیکی در آن رخ می دهند بلکه خود دارای دینامیک است و به یکی از بازیگران اصلی تبدیل شده است. نسبیت عام هندسه فضا و زمان را به انرژی و تکانه مواد تشکیل دهنده کیهان ربط داده است. اما داستان بدین جا ختم نمی شود زیرا امروز بر اساس شواهد رصدی فقط فیزیک ۴٪ از کل انرژی و ماده کیهان را که شامل انسان، زمین

<sup>۱</sup> Large Hadron Collider

<sup>۲</sup> Shapley

<sup>۳</sup> Curtis

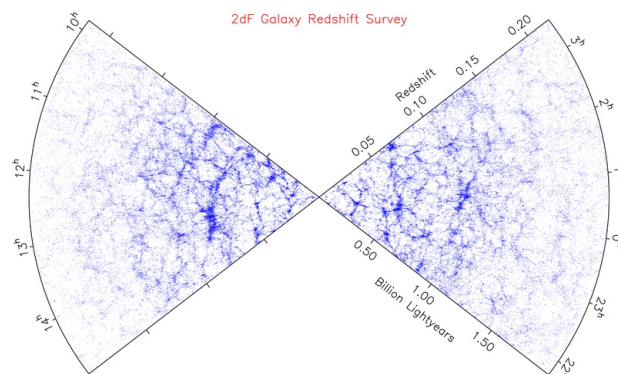


شکل ۱: تصویری ترسیمی از کهکشان راه شیری و مکان خورشید  
[۲۸۸]

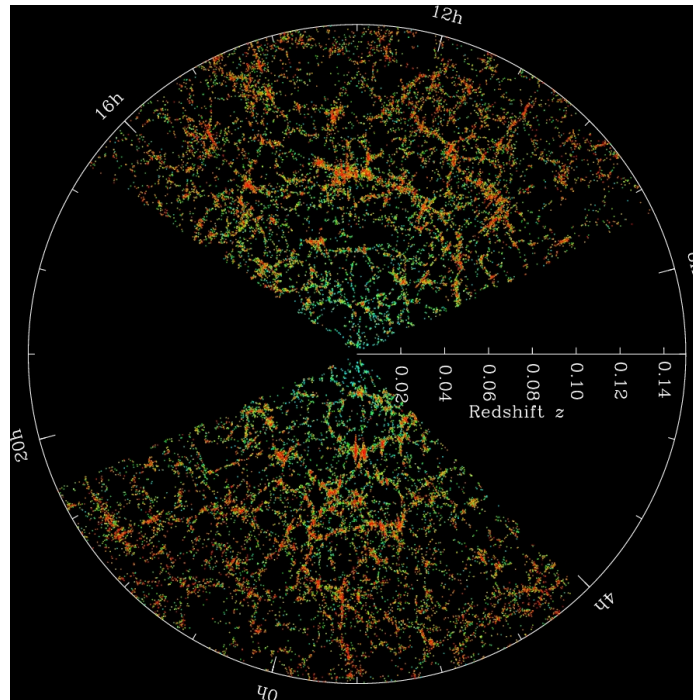
، ستاره ها و کهکشان ها است را می توانیم با مدل های استاندارد ذرات و فیزیک قرن گذشته توضیح دهیم، و ما بقی ۹۶٪ کیهان از مولفه های ناشناخته ای تشکیل شده است که امروزه آن را ماده و انرژی تاریک می نامیم.

اگرچه امروز کیهان شناسی با سوالات اساسی روبرو است که همان سوالات فیلسوفان یونان قدیم در مورد منشأ کیهان و مواد تشکیل دهنده آن است و اطلاعات ما از کیهان همانند دوران طلایی آتن ناچیز است، اما از طرفی به دلیل تمام ابزارهای رصدی موجود در حال و آینده نزدیک، کیهان شناسی به یک علم دقیق و تجربی بیش از پیش نزدیک می شود و به بیانی دیگر حجم وسیع اطلاعاتی را که امروز از کیهان داریم ما را در عصر طلایی کیهان شناسی قرار داده است.

امروزه مساحی های کیهانی، تصویری دقیق تر و جدیدتری از توزیع ماده در کیهان را به دست می دهد. به طور مثال مساحی ۲ درجه کیهانی به نام 2dF Galaxy Survey تصویری با قطاع ۲ درجه از کیهان تا انتقال به سرخ  $z \sim 1/5$  (بیش از نصف سن عالم) به دست آورده است، که در شکل (۲) مشاهده می کنید. [۱۱۳].



شکل ۲: توزیع کهکشان ها در کیهان - مساحی 2df  
[۱۱۳]



شکل ۳: توزیع کهکشان‌ها در کیهان - مساحی SDSS [۵]

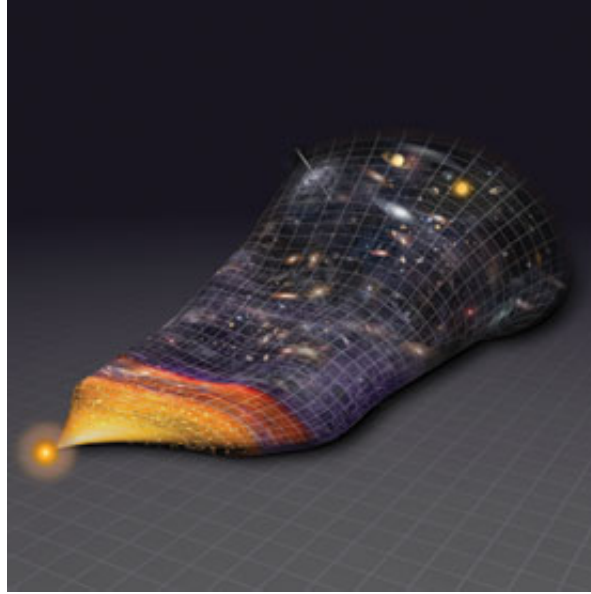
یکی دیگر از مساحی‌های کیهانی پروژه SDSS می‌باشد که در طی سه مرحله I، II، III در طی ۸ سال با تصاویری عمیق؛ در طول موج‌های مختلف به مساحی کیهان پرداخته و با رصد بیش از ۹۳۰،۰۰۰ کهکشان تصویری ۳ بعدی از کیهان با زاویه فضایی برابر ۱/۴ کل آسمان به دست آورده است. (شکل ۳) نقشه کیهانی SDSS را نشان می‌دهد که چگونه ماده در کیهان به صورت واحد‌های کهکشانی در مقیاس‌های بزرگ توزیع شده است [۵].

در نهایت اگرچه با مساحی‌های بزرگ مقیاس کیهانی، مشاهده تابش پس زمینه کیهانی، رصد ابر نواخترهای نوع یک به عنوان شمع استاندارد، اندازه‌گیری فواصل کیهانی، بررسی شکل‌گیری و تحول ساختارها در کیهان، اعمال نظریه نسبیت عام بر کیهان بزرگ مقیاس و به کارگیری فیزیک ذرات در انرژی‌های بالا، تصویری از تاریخچه کیهان (شکل ۴) از اولین لحظات مه‌بانگ تا تشکیل اولین ستاره‌ها و کهکشان‌ها داریم. اما وضعیت ما در برابر نادانسته‌ها و فرصت‌های پیش رو برای کشف کیهان بسیار شبیه دوران گذر از کیهان‌شناسی ارسطو-بطلمیوسی به کیهان‌شناسی پس از کوپرنیکی است که در اثر هنری در کتاب فلاماریون (۱۸۸۸)<sup>۴</sup> از یک هنرمند ناشناس به زیبایی ترسیم شده است. (شکل ۵)

### ۳۰. کیهان در حال انبساط

مشاهدات رصدی ادوین هابل در رصدخانه ویلسون<sup>۵</sup> در سال ۱۹۲۹، به عنوان جمع‌بندی تمام رصد‌های انجام شده از ابتدای قرن ۲۰ ام که با وستو سلینفر<sup>۶</sup> آغاز شده بود، نشان داد که کهکشان‌های همسایه در حال دور شدن از ما هستند، بدین ترتیب که طول موج دریافت شده  $\lambda$  از خطوط جذبی کهکشان‌ها، از طول موج آن‌ها در مختصات همراه  $\lambda$  بزرگتر است. بدین ترتیب که طول موج طیف جذبی به اندازه فاکتور مقیاس (در ادامه فاکتور مقیاس را تعریف خواهیم کرد)  $(a = 1/(1+z))$ ، بزرگ شده است. برای کمی کردن این مشاهده می‌توان پارامتر انتقال به

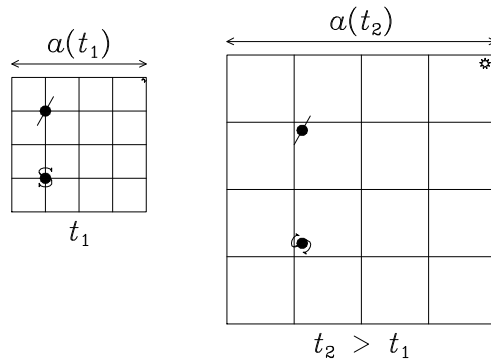
Flammarion<sup>۴</sup>  
Mount Willson Observatory<sup>۵</sup>  
Slipher Vesto<sup>۶</sup>



شکل ۴: تصویری از تحول عالم بر اساس مدل استاندارد کیهانشناسی [۳۵۸]



شکل ۵: اثر هنری در کتاب فلاماریون



شکل ۶: [۱] عامل مقیاس و کیهان منبسط شونده

سرخ را به صورت زیر تعریف کرد:

$$z \equiv \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1, \quad (1)$$

که  $z = 0$  معادل زمان حال است. این مشاهدات بدین معنا است که کیهان ما در حال انبساط است. برای کمی کردن این مشاهده و با فرض همگن و همسانگرد بودن کیهان در مقیاس های بزرگ، می توان عالم را شبکه بندی کرد و برای بررسی دینامیک کیهان در حال رشد، به بررسی این مدل شبکه ای پرداخت. بدین منظور کمیت های چون طول همراه  $^y$ ، طول فیزیکی  $^x$ ، عامل مقیاس  $^a$  و در نهایت پارامتر هابل  $^{10}$  را تعریف می کنیم. طول هر شبکه بین دو نقطه مفروض در کیهان و در زمان حال را طول همراه  $\chi$  می نامیم، این فاصله برای دو جسم کیهانی همواره ثابت است و برابر گام های مورد نیاز برای رسیدن از یک نقطه به نقطه دیگر، فارغ از طول گام است. فاصله فیزیکی بین دو نقطه که در راس های این شبکه قرار دارد و با زمان تغییر می کند برابر است با:

$$r(t) = a(t)\chi, \quad (2)$$

که  $a(t)$  عامل مقیاس، نشان دهنده تغییرات طول شبکه های کیهانی با زمان است و در اصل نشان دهنده تحول دینامیکی کیهان می باشد. در شکل (۶) به صورت نمادین شبکه بندی کیهان و تعریف عامل مقیاس را مشاهده می کنید. در هر زمان آهنگ انبساط عالم توسط پارامتر هابل داده می شود که برابر است با نسبت مشتق زمانی عامل مقیاس بر عامل مقیاس:

$$H(t) = \frac{\dot{a}}{a}, \quad (3)$$

که ”مشق نسبت به زمان فیزیکی است. مشابه طول همراه، زمان همدیس  $^{11}$  را نیز به صورت زیر بر حسب زمان فیزیکی تعریف می کنیم:

$$d\eta = \frac{dt}{a} \quad (4)$$

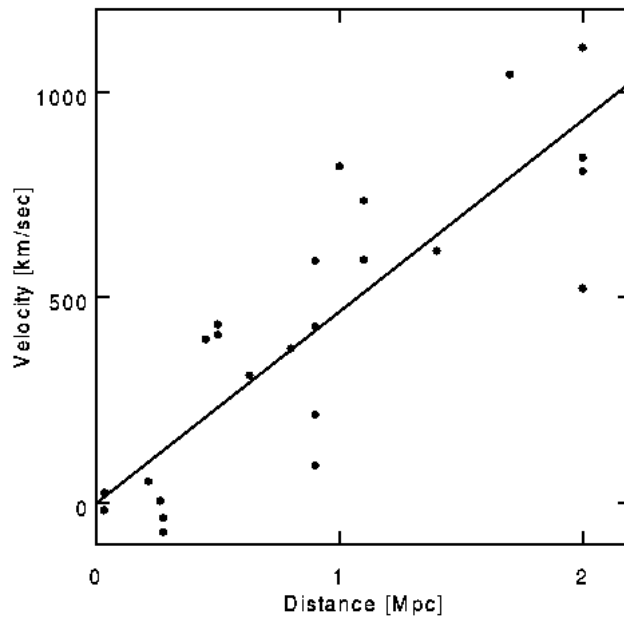
در قدم بعد، می خواهیم قانون هابل را با مشتق گیری از فاصله فیزیکی به صورت زیر به دست می آوریم:

$$\frac{dr(t)}{dt} = \frac{da(t)}{dt}\chi + a(t)\frac{d\chi}{dt}. \quad (5)$$

برای کیهان همگن می توان از جمله دوم سمت راست معادله (۵) صرف نظر کرد، زیرا در تعریف طول همراه، فرض بر ثابت بودن آن کرده ایم؛ در نتیجه معادله (۵) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{da/dt}{a}\chi. \quad (6)$$

Comoving Distance<sup>y</sup>Physical Distance<sup>x</sup>Scale Factor<sup>a</sup>Hubble Parameter<sup>10</sup>Conformal Time<sup>11</sup>



شکل ۷: [۱] نمودار سرعت دور شدن اجرام کیهانی از ناظر در فواصل نزدیک

حال با استفاده از تعریف پارامتر هابل و طول فیزیکی رابطه (۶) را می توان به صورت زیر نوشت:

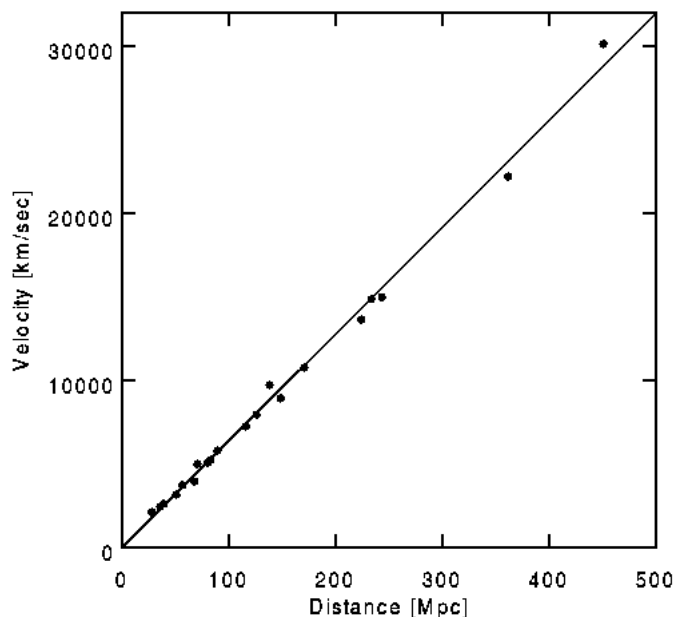
$$v = Hr, \quad (۷)$$

که  $v$  سرعت هابلی است. به این ترتیب قانون هابل را استخراج کرده ایم. این قانون به این معنا است که اجرامی که دورتر هستند با سرعت بیشتری از ما دور شوند و این نسبت دور شدن با پارامتر هابل برابر است. این نتیجه گیری بود که از مشاهدات هابل به دست آمد.

همانطور که قبلا اشاره شد، در مقیاس های بزرگ  $l \sim 100 \text{ Mpc}$  کیهان همگن و همسانگرد است و در نتیجه طول همراه ثابت است، ولی در واقعیت، ناهمگنی هایی را در کیهان (خوشه ها، کهکشان ها و ...) مشاهده می کنیم. وجود مناطق فرا و فرو چگال باعث به وجود آمدن سرعت خاصه<sup>۱۲</sup> برای اجرام کیهانی می شود که متفاوت از سرعت انبساط کیهانی است و از جمله دوم رابطه (۵) به صورت زیر تعریف می شود:

$$v_p = a(t) \frac{d\chi}{dt}. \quad (۸)$$

رابطه سرعت اجرام کیهانی بر حسب فواصل آن ها در شکل (۷) و (۸) رسم شده است. در فواصل  $l > 100 \text{ Mpc}$  نمودار سرعت بر حسب مکان از قانون  $v = Hr$  به خوبی تبعیت می کند، زیرا در این فواصل کیهان همگن و همسانگرد است و سرعت خاصه اجرام کیهانی نسبت به سرعت هابلی قابل نظر است. در حالی که در فواصل نزدیک  $l < 10 \text{ Mpc}$  انحراف از رابطه خطی  $v = Hr$  در شکل (۸) دیده می شود و این به دلیل اهمیت ناهمسانگردی ها و سرعت خاصه است. با تعریف پارامتر هابل و عامل مقیاس به تنهایی قادر به دست آوردن دینامیک و تحول کیهان نیستیم. برای این منظور احتیاج به هندسه عالم و مولفه های تشکیل دهنده کیهان هستیم و این دو نیز طبق نظریه نسبیت عام اینشتین که هندسه کیهان را به انرژی- ماده عالم ربط داد به هم وابسته اند. از این رو برای بررسی دینامیک کیهان، در بخش بعد به معرفی نسبیت عام و سپس مولفه ای تشکیل دهنده عالم خواهیم پرداخت. البته برای به دست آوردن دینامیک کیهان می توان با تقریب نظری و استدلال نه چندان دقیق از مکانیک نیوتنی استفاده کرد. به بررسی دینامیک کیهان با استفاده از مکانیک نیوتنی، کیهانشناخت نیوتنی<sup>۱۳</sup> می گویند.



شکل ۸: [۴] نمودار سرعت دور شدن اجرام کیهانی از ناظر در فواصل دور

### ۴.۰ کیهانشناخت نیوتنی

با تقریب فرض کیهان را کره ای به چگالی  $R$  و به جرم  $M$  در نظر بگیرید. انرژی کل ذره ای به جرم  $m$  را که در فاصله  $r$  از ناظر قرار گرفته باشد را می توان به صورت زیر نوشت:

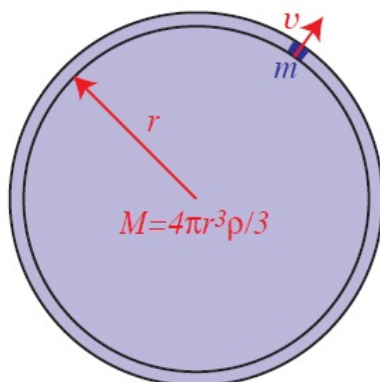
$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{GMm}{r}, \quad (9)$$

که  $v$  سرعت هابلی جسم با جرم  $m$  است که می توان آن را به صورت  $v = Ha\chi$  نوشت. معادله (۹) را برحسب چگالی کره به شعاع  $r$  و انرژی در واحد جرم  $m$  را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$2E' = H^2 a^2 \chi^2 + 2G(4\pi/3)r^2 \rho. \quad (10)$$

که در نتیجه معادله اول فریدمن را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$H^2 - \frac{K}{a^2} = \frac{\Lambda\pi G}{3}\rho. \quad (11)$$



شکل ۹: [۲۰۱] کره با چگالی یکنواخت برای کیهانشناخت نیوتنی

که  $K$  را به صورت زیر تعریف کرده ایم:

$$K = -\frac{2E'}{\chi^2}. \quad (12)$$

هنگامی که معادله اول فریدمن را از معادلات نسیت عام به دست آوردیم، نشان خواهیم داد که  $K$  هندسه بخش فضایی کیهان را نشان می دهد، که این برداشت از کیهانشناخت نیوتنی به دست نمی آید. البته می توان ارتباط یک به یک بین هندسه بخش فضایی و انرژی کل سیستم ایجاد کرد. به طور مثال برای  $E < 0$  که به معنی مقید بودن ذره است  $K > 0$  به دست می آید که معادل کیهان با هندسه بسته (مانند کره) است. در صورتی که  $E > 0$  باشد، ذره آزاد و معادل کیهان باز است  $K < 0$  است و در نهایت  $E = 0$  کیهان تخت  $K = 0$  را نمایندگی می کند. با استفاده از معادله نیرو در مکانیک نیوتنی یا با استفاده از معادله (۹) معادله دون نیوتن به صورت زیر به دست می آید (تمرین):

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P/c^2), \quad (13)$$

سرعت نور را در ادامه بحث می توان  $c = 1$  در نظر گرفت. البته ترم  $P/c^2$  در معادله دوم فریدمن، بدین معنا است که برای مولفه هایی از کیهان که غیر نسیتی هستند  $v \ll c$  می توان از جمله فشار، در برابر چگالی انرژی صرف نظر کرد. (زیرا فشار سیالات با مجذور سرعت پخشی آن ها برابر است). حال که معادلات فریدمن را به دست آوردیم، می توانیم با حل معادلات (؟؟) و (؟؟) پارامتر هابل را به دست آوریم. البته برای به دست آوردن پارامتر هابل باید مولفه های تشکیل دهنده کیهان را بدانیم.

## ۵.۰ مولفه های تشکیل دهنده کیهان

کیهان از ذرات نسیتی مانند فوتون و نوترینو ها، ماده غیر نسیتی مانند ماده باریونی کم انرژی، ماده تاریک و مولفه انرژی تاریک تشکیل شده است. در کیهانشناسی ذرات نسیتی را در کل تابش<sup>۱۴</sup> (با اندیس  $r$  نشان خواهیم داد) و مولفه غیر نسیتی را ماده<sup>۱۵</sup> (با اندیس  $m$  نشان خواهیم داد) نامگذاری می کنند و به ترتیب دوران های از کیهانشناسی را که تابش و یا ماده، غالب چگالی انرژی کیهان را تشکیل می داده است را دوران تابش غالب<sup>۱۶</sup> و ماده غالب<sup>۱۷</sup> نام گذاری کرده اند. دوران اخیر را که کیهان در فاز انبساط تند شونده قرار دارد را فاز انرژی تاریک غالب می گویند.

### ۱.۵.۰ مولفه نسیتی

یکی از شناخته ترین مولفه های ماده نسیتی در کیهان فوتون های تابش پس زمینه کیهانی است. با توجه به طیف جسم سیاه و دمای تابش پس زمینه کیهانی  $T_{CMB} = 2.73 K$  می توان چگالی انرژی مولفه نسیتی را در زمان حال به صورت تقریبی به دست آورد:

$$\rho_{\gamma,0} \approx 4/7 \times 10^{-34} \text{ gcm}^{-3}, \quad \Omega_{\gamma,0} = 2/5 \times 10^{-5} h^{-2}. \quad (1)$$

همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می کنید؛ بیشتر سهم مولفه نسیتی کیهان از تابش پس زمینه کیهانی و نوترینوها است [۳۶۶]. در نتیجه با محاسبه چگالی انرژی CMB تقریب خوبی از مولفه تابش به دست خواهیم آورد. مولفه نسیتی دیگر تابش پس زمینه نوترینو است که تاکنون آن را آشکار نکرده ایم زیرا این مولفه در دمای بالاتری از جدایی فوتون ها و باریون ها از شار کیهانی جدا شده است. همان طور که بعداً نشان خواهیم داد، در کیهان تخت که چگالی انرژی کیهان نزدیک به چگالی بحرانی است که در این صورت در کیهان زمان حال می توان از انرژی مولفه تابش صرف نظر کرد.

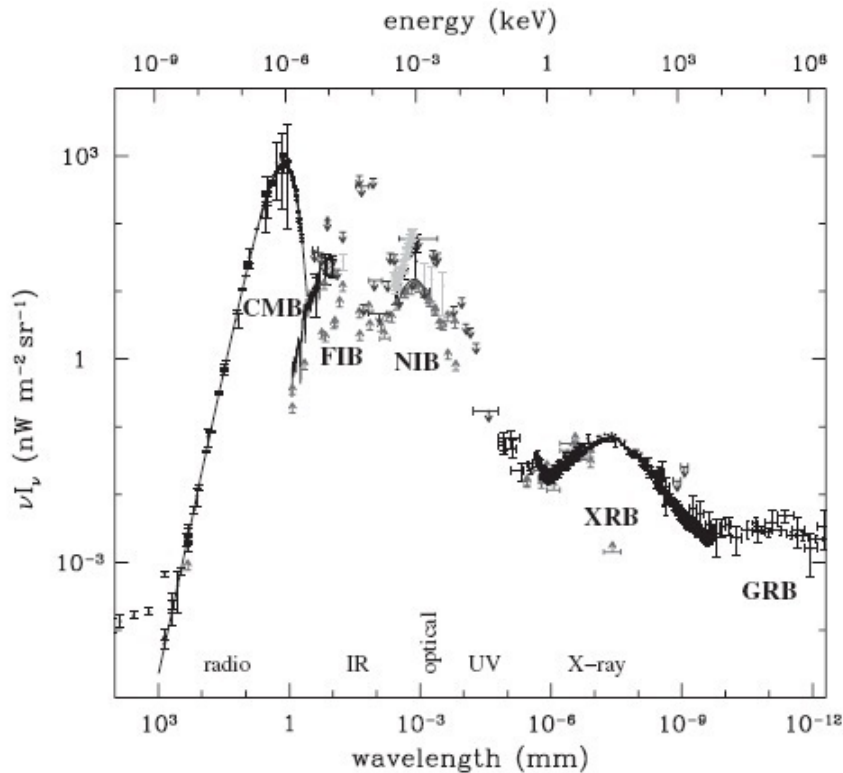
Radiation<sup>۱۴</sup>

Matter<sup>۱۵</sup>

Radiation Dominated Era<sup>۱۶</sup>

Matter Dominated Era<sup>۱۷</sup>





شکل ۱۰: چگالی انرژی تابش زمینه کیهانی در طول موج های مختلف [۳۶۶]

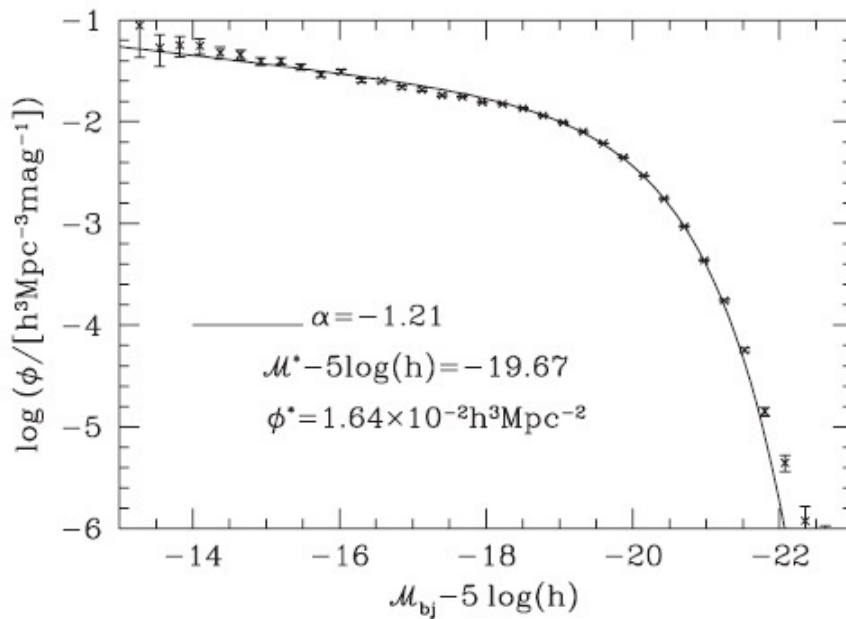
## ۲.۵.۰ ماده باریونی

دومین مولفه تشکیل دهنده کیهان ماده باریونی است، که فیزیک آن را از مدل استاندارد ذرات می دانیم. از آن جایی که بیشتر سهم ماده باریونی کیهان در ستاره ها است. از این رو برای به دست آوردن تقریبی چگالی ماده باریونی می توان چگالی ستاره ها در کهکشان ها را به دست آورد. میانگین چگالی درخشندگی ستاره ها را می توان از چگالی درخشندگی کهکشان ها به دست آورد. زیرا یکی از مهمترین کمیت های مشاهده پذیر کهکشان ها درخشندگی آن ها در یک فیلتر خاص است. تابع درخشندگی  $\phi(L)dL$  که نشان دهنده تعداد کهکشان ها با درخشندگی بین  $L \pm dL/2$  می باشد. در شکل (۱۱) تابع درخشندگی کهکشان های مساحی شده توسط  $2dF$  در فیلتر  $b_j$  نمایش داده شده است. تابع های برازش پدیدار شناسانه متفاوتی به درخشندگی کهکشان ها برازش می شود. یکی از مهمترین این توابع، تابع برازش شستر<sup>۱۸</sup> است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_*}\right) \frac{dL}{L_*} \quad (1)$$

که  $L_*$  درخشندگی مشخصه است، و  $\alpha$  شیب قسمت کم نور تابع شستر می باشد و  $\phi^*$  تابع بهنجارش است. همان طور که از شکل (۱۱) مشخص است تابع شستر تقریباً برای تمام قدرهای کهکشانی برازش خوبی با داده های تجربی دارد. با استفاده از تابع شستر می توان تابع میانگین چگالی عددی کهکشان ها  $n_g$  و چگالی درخشندگی را به صورت زیر به دست آورد:

$$n_g \equiv \int_0^\infty \phi(L)dL = \phi^* \Gamma(\alpha + 1), \quad (2)$$



شکل ۱۱: تابع درخشندگی کهکشان‌ها در باند  $b_j$  [۲۹۳]

و

$$\mathcal{L} \equiv \int_0^{\infty} \phi(L) L dL = \phi^* L^* \Gamma(\alpha + 2), \quad (3)$$

که  $\Gamma(x)$  تابع گاما است. مشاهدات رصدی در طول موج‌های ماورا بنفش نزدیک و مادون قرمز نشان می‌دهند که  $-2 < \alpha < -1$  که این بدین معنا است که تعداد کهکشان‌های کم نور بیشتر است، در حالی که چگالی درخشندگی بیشترین سهم را از کهکشان‌های پر نور دارد. بهترین پارامترهای برازش برای تابع ششتر در باند B عبارتند از:

$$\alpha \approx -1/2, \quad \phi^* \approx 1/2 \times 10^{-2} h^3 \text{Mpc}^{-3}, \quad \mathcal{M} \approx -20/05 + 5 \log h \quad (4)$$

$$L^* = 1/24 \times 10^{10} h^{-2} L_{\odot}.$$

که  $l_{\odot}$  درخشندگی خورشید است، در نتیجه:

$$\mathcal{L}_B \approx 2 \times 10^8 h \mathcal{L}_{\odot} \text{Mpc}^{-3}. \quad (5)$$

حال با تقسیم این عبارت به چگالی بحرانی، می‌توان واحد جرم به درخشندگی مشاهده شده برای کهکشان‌هایی که کیهان با چگالی بحرانی را ایجاد کنند را به دست آورد. نسبت جرم به روشنایی<sup>۱۹</sup> بحرانی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\left(\frac{M}{L}\right)_{B,crit} = \frac{\rho_{crit}}{\mathcal{L}_B} \approx 1500 h \left(\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}\right)_B \quad (6)$$

نسبت جرم به روشنایی کهکشان‌ها را از برازش طیف آن‌ها با جمعیت ستاره‌ای آن‌ها به دست می‌آید. نسبت جرم به روشنایی کهکشان‌ها در بازه  $10 \left(\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}\right) - 2$  به دست می‌آید. اگر فرض کنیم که  $M/L = 5 \left(\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}\right)$  به عنوان مقدار میانگین، آن‌گاه پارامتر چگالی ستاره‌ها برابر خواهد بود:

$$\Omega_{*,0} \sim 0/003 h^{-1}. \quad (7)$$

در نتیجه قسمت مرئی کهکشان ها، کمتر از ۱٪ چگالی کل کیهان را تشکیل می دهند. از طرفی با توجه به قیده های مربوط به ماهواره WMAP بر روی  $\Omega_{b,0}$  و پارامتر هابل سهم ستاره ها کمتر از ۱۰٪ کل ماده باریونی است. بقیه ماده باریونی در انتقال به سرخ های کم به صورت گاز سرد اتمی و یا مولکولی است که آشکارسازی آن به روش تابش و یا جذب می باشد. مقدار گاز سرد باریونی از داده های رصدی برابر است با [۱۶۹]:

$$\Omega_{cold} \sim 0.0005 h^{-1} \quad (8)$$

اما بیشترین سهم ماده باریونی مربوط است به گاز داغ میان کهکشانی، که این گاز را می توان در طول موج X و تحت اثر تابش ترمزی آشکارسازی کرد. با توجه به چگالی عددی خوشه های کهکشانی و جرم نسبی گاز داغ میان کهکشانی، پارامتر جرم گاز داغ برابر است با [۱۶۹]:

$$(\Omega_{HII})_{cl} \sim 0.0016 h^{-3/2}. \quad (9)$$

از طرف دیگر اندازه گیری میزان گاز میان کهکشانی در گروه های کهکشانی به دلیل سرد بودن نسبی گاز، سخت تر از خوشه کهکشانی است. البته فوکوجیتا و بقیه [۱۶۹] این میزان را به صورت زیر تخمین زده اند.

$$(\Omega_{HII})_{group} \sim 0.003 h^{-3/2}, \quad (10)$$

اگر فرض کنیم که نسبت گاز داغ باریونی به جرم کل کهکشان نسبت ثابتی باشد، در نتیجه جرم گاز گروه های کهکشانی می تواند دو و یا سه برابر میزان گاز مشاهده شده در گروه باشد، حتی با این فرض نیز جرم ستاره ها، گاز داغ و گاز سرد کمتر از ۵۰٪ جرم ماده باریونی را که توسط CMB پیش بینی می شود را تشکیل می دهند. در حالی که اوضاع ماده باریونی در انتقال به سرخ بالا متفاوت است. با توجه به رصد طیف جذبی کوازارها در انتقال به سرخ  $z \approx 3$  بیشتر ماده باریونی به صورت هیدروژن می باشد و مقدار آن ها به صورت تقریبی برابر است با مقداری که از تابش پس زمینه کیهان پیش بینی می شود. اگرچه در انتقال به سرخ  $z \approx 3$  به نظر می رسد که تمام باریون ها را رصد کرده ایم، اما بیش از ۵۰٪ ماده باریونی در انتقال به سرخ های نزدیک صفر قابل رصد نیستند که به این مسئله، مسئله ماده تاریک باریونی می گویند. یکی از پیشنهادات برای ماده تاریک باریونی این است که گاز میان کهکشانی تا دمای  $10^6 - 10^5$  گرم شده است که در این طول موج آشکارسازی ماده باریونی بسیار سخت است، امکان دیگر این است که مقداری از ماده باریونی به صورت اجرام فشرده مانند کوتوله های قهوه ای و یا سیاهچاله در آمده اند. هیچ کدام از این نظریه ها تصدیق نشده اند زیرا از طرفی آهنگ تشکیل ستاره برای ایجاد اجرام فشرده به اندازه کافی نیست از طرفی پروژه هایی مانند MACHO و EROS که توسط بودهان پاچینسکی<sup>۲۰</sup> در سال ۱۹۸۶ برای آشکارسازی اجرام فشرده جرم دار هاله<sup>۲۱</sup> پیش بینی شده بود جرم ماده باریونی به صورت MACHO را کمتر از ۸٪ به دست آورده اند. یکی دیگر از کاندیدهای ماده تاریک باریونی گاز مولکولی  $H_2$  در فضای میان کهکشانی است. این گاز که تابش قابل توجهی ندارد و بسیار سرد می باشد. برای آشکارسازی این گاز سرد مولکولی روش اپتیکی توسط حبیبی و بقیه پیشنهاد شده است [۱۸۴، ۲].

### ۳.۵.۰ ماده تاریک غیر باریونی

با توجه به قیده های حاصل از طیف توان تابش پس زمینه کیهان، ماده باریونی تنها می تواند ۲۰٪ - ۱۵٪ کل ماده موجود در کیهان را توضیح دهد. از طرف دیگر مشاهدات بسیاری مانند طیف توان ماده در کیهان، مشاهدات همگرایی ضعیف و برش کیهانی، سرعت چرخشی کهکشان و ... نشان می دهند که پارامتر چگالی کیهان از مرتبه  $\Omega_{m,0} \sim 0.3$  می باشد و ماده باریونی به تنهایی نمی تواند چگالی ماده در کیهان را توضیح دهد. در فصل (؟؟) با جریئات بیشتری به بررسی شواهد اخترفیزیکی ماده تاریک، خواهیم پرداخت. از طرف دیگر پارامتر چگالی ماده باریونی نیز توسط تابش پس زمینه، هسته زایی و مقادیر عناصر اولیه به خوبی مقید شده است. از این رو یکی از مهمترین چالش های فیزیک نظری و کیهانشناسی، کشف ماهیت ماده تاریک کیهانی است. فیزیک ذرات کاندیدهای مختلفی برای ماده تاریک دارد ولی تاکنون این ذرات به صورت مستقیم آشکارسازی نشده اند. آن چه از مشاهدات جرم به روشنایی کهکشان ها، گروه های کهکشانی و خوشه ها به دست آمده است:

<sup>۲۰</sup>Bohdan Paczynski

<sup>۲۱</sup>Massive Compact Halo Objects

$$M/L \sim 30h(M/L)_{\odot}, \quad 30h^{-1}kpc \quad (1)$$

$$M/L \sim 100h(M/L)_{\odot}, \quad 100h^{-1}kpc, \quad (2)$$

$$M/L \sim 350h(M/L)_{\odot}, \quad 1h^{-1}Mpc, \quad (3)$$

این است که ماده تاریک، غیر باریونی است چون اندرکنش الکترومغناطیس ندارد و غیر نسبیتی (سرد) است، زیرا به صورت خوشه شده (هاله های ماده تاریک) وجود دارد [۳، ۲۸۰].

## ۴.۵.۰ انرژی تاریک

مشاهدات تابش پس زمینه کیهان نشان می دهند که کیهان با تقریب خوبی دارای هندسه فضایی تخت است. این بدین معنا است که چگالی کل مولفه های تشکیل دهنده کیهان برابر با چگالی بحرانی کیهان است. از طرف دیگر مشاهدات اخترفیزیکی و همچنین طیف توان ساختارهای بزرگ مقیاس نشان می دهند که تنها ۲۵٪ از چگالی کیهان را ماده باریونی و تاریک تشکیل داده است. در نتیجه ۷۵٪ کیهان باید از مولفه تشکیل شده باشد که به صورت تقریباً یکنواخت در کیهان وجود دارد. از طرف دیگر رصد های مربوط به ابرنواخترهای نوع یک به عنوان شمع استاندارد نشان داده اند که کیهان در فاز انبساط تند شونده قرار دارد. از این رو برای تامین دینامیک کیهان، نیاز به مولفه دیگری داریم به نام انرژی تاریک، که در مقیاس کیهانی، اثر دافعه گرانشی داشته باشد. ثابت کیهانشناسی به معادله حالت  $w_{\Lambda} = P/\rho = -1$  یکی از کاندید ها برای ۷۵٪ انرژی-تکانه کیهان می باشد. مدل های میدان اسکالری انرژی تاریک، به عنوان سیالی با معادله حالت منفی و مدل های گرانش تعمیم یافته، هر کدام جایگزینی برای  $\Lambda$  هستند [۱].

## درس نامه کیهانشناسی ۲

شانت باغرام

تنظیم: ۶ تیر ماه ۱۳۹۰

### ۶۰۰. اندازه گیری فواصل در کیهان

از آن جایی که مهمترین شاهد رصدی انبساط (تند شونده) کیهان، از اندازه گیری فواصل کیهانی به دست می آید. از این رو در این بخش فواصل کیهانی را شامل طول همراه، فاصله درخشندگی و فاصله زاویه ای را برای فضا و زمان FRW تعریف می کنیم. با در نظر گرفتن متریک (؟؟) کمیت  $r$  را برای کیهان باز، بسته و تخت به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\begin{aligned} r &= \sin \chi, & K &= +1, \\ r &= \chi, & K &= 0, \\ r &= \sinh \chi, & K &= -1, \end{aligned} \quad (1)$$

طول فضا و زمان ۳ بعدی در متریک FRW را می توان به صورت زیر تعریف می شود:

$$ds^2 = d\chi^2 + (f_K(\chi))^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (2)$$

که

$$f_K = \sin \chi \quad K = +1; \quad f_K = \chi, \quad k = 0; \quad f_K = \sinh \chi, \quad K = -1; \quad (3)$$

که تابع  $f_K$  را می توان به صورت کلی زیر نوشت:

$$f_K(\chi) = \frac{1}{\sqrt{-K}} \sinh \sqrt{-K} \chi; \quad (4)$$

به طوری در کیهان تخت در حد  $K \rightarrow -0$  به دست می آید. در ابتدا فاصله همراه را به دست می آوریم. پرتو نور که در جهت  $\chi$  حرکت می کند، در معادله ژئودزی زیر صدق می کند:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) d\chi^2 = 0, \quad (5)$$

برای به دست آوردن فاصله همراه، فرض کنید منبعی در  $\chi_1 (z = z_1)$  پالسی نوری را ساطع می کند که به مشاهده گری که در مکان  $\chi = 0 (z = 0)$  قرار دارد آن را دریافت می کند. در نتیجه با انتگرال گیری از  $d\chi$  بر روی مسیر حرکت فوتون خواهیم داشت:

$$d_c \equiv \chi_1 = \int_{\cdot}^{\chi_1} d\chi = - \int_{t_1}^{t_0} \frac{c}{a(t)} dt, \quad (6)$$

و با توجه به تبدیل:

$$dt = \frac{-dz}{H(1+z)}; \quad (7)$$

که فاصله همراه منبعی در انتقال به سرخ  $z$  به صورت زیر به دست می آید [۲۶۲، ۳۵۰]:

$$d_c = \frac{c}{a_0 H_0} \int_{\cdot}^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})}, \quad (8)$$

که  $E(z) = H(z)/H$  پارامتر هابل بدون بعد است. انتگرال فاصله همراه را بر حسب انتقال به سرخ می توان به صورت زیر بسط داد:

$$\int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})} = z - \frac{E'(\cdot)}{2} z^2 + \frac{1}{6} \{2E'^2(\cdot) - E''(\cdot)\} z^3 + O(z^4), \quad (9)$$

که  $1$  مشتق نسبت به انتقال به سرخ است. در انتقال به سرخ های کوچک و نزدیک به صفر، طول همراه را به صورت زیر تقریب زده می شود:

$$d_c \approx \frac{cz}{a \cdot H}, \quad \text{for } z \ll 1 \quad (10)$$

و با توجه به ارتباط انتقال به سرخ با سرعت سیال  $v/c \approx z$ ، می توان سرعت سیال را بر حسب فاصله همراه به صورت زیر به دست آورد:

$$v \approx (a \cdot H) d_c \quad (11)$$

که این تقریب برابر است با قانون هابل، زیرا  $r = a \cdot d_c$  طول فیزیکی است، و در نتیجه  $v \approx H \cdot r$  است. نکته مهم که از بسط (9) نیز مشهود است، این است که قانون هابل در انتقال به سرخ های  $z \ll 1$  صادق است و در انتقال به سرخ های بالاتر، باید جمله های مرتبه بالاتر بسط را نیز در نظر گرفت.

### ۱.۶.۰ فاصله درخشندگی

کمیت مهم دیگر برای اندازه گیری فواصل کیهانی، فاصله درخشندگی است، که در ارتباط درخشندگی به شار دریافتی به دست می آید. این کمیت مهم در مشاهدات ابرنواخترها اندازه گیری می شود و به صورت زیر تعریف می شود:

$$d_L^{\gamma} = \frac{L_s}{\sqrt{4\pi} F_s} \quad (1)$$

که  $L_s$  درخشندگی مطلق منبع و  $F_s$  شار مشاهداتی است. نکته قابل توجه این است که  $L_s$  با درخشندگی که توسط مشاهده گر دریافت می شود  $L_*$  ( $z = 0$ )، متفاوت است. شار دریافتی بر حسب درخشندگی دریافتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$F \equiv \frac{L_*}{S}, \quad (2)$$

که  $S$  سطح شار دریافتی است:

$$S = \sqrt{4\pi} (a \cdot f_K(\chi))^2 \quad (3)$$

این بدان معنا است، که فاصله درخشندگی متناسب است با نسبت  $L_s/L_*$ :

$$d_L = (a \cdot f_K(\chi))^2 \frac{L_s}{L_*}, \quad (4)$$

حال اگر انرژی ساطع شده در بازه زمانی  $\Delta t_1$  برابر با  $\Delta E_1$  باشد، درخشندگی مطلق برابر خواهد بود با  $L_s = \Delta E_1 / \Delta t_1$ . به طور مشابه درخشندگی ظاهری برابر خواهد بود با  $L_* = \Delta E_* / \Delta t_*$ . از آن جایی که انرژی فوتون ها برابر است با عکس طول موج، در نتیجه نسبت انرژی ساطع شده به انرژی دریافتی برابر خواهد بود:

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_*} = \frac{\lambda_*}{\lambda_1} = 1 + z, \quad (5)$$

که تغییر طول موج برابر با انتقال به سرخ منبع درخشندگی است. از در طرف دیگر ثابت بودن سرعت نور، و رابطه دو بازه زمانی، نسبت درخشندگی برابر خواهد بود با: نسبت دو بازه زمانی را به صورت زیر به دست می دهد:

$$c = \frac{\lambda_1}{\Delta t_1} = \frac{\lambda_*}{\Delta t_*} \rightarrow \frac{\Delta t_*}{\Delta t_1} = \frac{\lambda_*}{\lambda_1} = 1 + z \quad (6)$$

از ثابت بودن سرعت نور و نسبت انرژی ها داریم:

$$\frac{L_s}{L_*} = \frac{\Delta E_1}{\Delta E_*} \frac{\Delta t_*}{\Delta t_1} = (1 + z)^2. \quad (7)$$

اکنون با استفاده از روابط (۱۰) و (۷) فاصله درخشندگی به صورت زیر به دست می آید:

$$d_L = a \cdot f_K(\chi)(1+z), \quad (۸)$$

که  $f_K$  از رابطه (۴) تعریف می شود، حال که فاصله همراه را به صورت زیر تعریف کرده ایم:

$$\chi = d_c = \frac{c}{a \cdot H} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})}. \quad (۹)$$

آن گاه  $d_L$  به صورت زیر به دست می آید:

$$d_L = \frac{c(1+z)}{H \cdot \sqrt{\Omega_K^{(\cdot)}}} \sinh \left( \sqrt{\Omega_K^{(\cdot)}} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})} \right), \quad (۱۰)$$

که  $\Omega_K^{(\cdot)} = -\frac{Kc^2}{(a \cdot H)^2}$  و این بدین معنا است که فاصله درخشندگی، با انبساط کیهان متناسب است. فاصله درخشندگی را می توان در انتقال به سرخ  $z \sim 0$  با توجه به رابطه (۹) و بسط  $\sinh(x) = x + \frac{x^3}{6} + \mathcal{O}(x^5)$  به صورت زیر بسط داد:

$$d_L = \frac{c}{H} \left[ z + \left\{ 1 - \frac{E'(\cdot)}{2} \right\} z^2 + \frac{1}{6} (2E'(\cdot)^2 - 3E''(\cdot) - E''(\cdot) + \Omega_K^{(\cdot)}) z^3 + \mathcal{O}(z^4) \right]. \quad (۱۱)$$

که در حد  $z \ll 1$  داریم:

$$d_L \approx \frac{cz}{H}. \quad (۱۲)$$

که از رابطه  $z \approx \frac{v}{c}$  می توان قانون هابل را برای فاصله درخشندگی به دست آوریم:

$$v \approx H \cdot d_L, \quad z \ll 1. \quad (۱۳)$$

## ۲.۶.۰ فاصله زاویه ای قطری

در کیهانشناسی، علاوه بر اندازه گیری شمع های استاندارد و فواصل درخشندگی، خط کش های استاندارد را نیز اندازه گیری می کنیم. بدین ترتیب که فاصله خود را از یک جسم کیهانی با طول مشخص  $\Delta x$  را می خواهیم اندازه گیری کنیم از این رو فاصله زاویه ای قطری  $d_A$  را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$d_A \equiv \frac{\Delta x}{\Delta \theta}, \quad (۱)$$

که  $\Delta \theta$  زاویه ای است که جسم کیهانی را با طول  $\Delta x$  عمود بر مسیر دید، مشاهده می کنیم. این فاصله را برای مشاهده ناهمسانگردی ها بر سطح تابش پس زمینه کیهانی استفاده می کنیم. از آن جایی که تابش پس زمینه بر روی کره ای به فاصله شعاعی  $\chi$  از ناظری که در مرکز کره قرار دارد تعریف می شود، آن گاه  $\Delta x$  در زمان  $t_1$  در فضا و زمان فریدمنی به صورت زیر داده می شود:

$$\Delta x = a(t_1) f_K(\chi) \Delta \theta. \quad (۲)$$

در نتیجه فاصله زاویه ای قطری به صورت زیر داده می شود:

$$d_A = a(t_1) f_K(\chi) = \frac{a \cdot f_K(\chi)}{1+z} = \frac{1}{1+z} \frac{c}{H \cdot \sqrt{\Omega_K^{(\cdot)}}} \sinh \left( \sqrt{\Omega_K^{(\cdot)}} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})} \right), \quad (۳)$$

که در به دست آوردن رابطه فوق از تعریف  $f_K$  و انتقال به سرخ استفاده کرده ایم:

$$f_K = \frac{c}{a \cdot H \cdot \sqrt{\Omega_K^{(\cdot)}}} \sinh \left( \sqrt{\Omega_K^{(\cdot)}} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})} \right), \quad (۴)$$

حال با توجه به روابط (۱۰) و (۳) فاصله درخشندگی و فاصله زاویه ای قطری به صورت زیر به هم بستگی دارند.

$$d_A = \frac{d_L}{(1+z)^2}. \quad (۵)$$

که این رابطه را رابطه دوگان و یا اترینگتون<sup>۲۲</sup> می گویند. انحراف از رابطه اترینگتون نشان دهنده وجود فیزیک نامتعارفی خواهد بود که در آن پرتوهای نور بر روی ژئودزیها حرکت نمی کنند و یا شار فوتونی پایستگی ندارد [۵۱]. از این رو تست های متفاوتی برای صحت رابطه (۵) پیشنهاد شده است [۱۹۹، ۲۶۰] این رابطه برای متریک در حالت کلی که پایستگی شار را حفظ می کند، صادق است.

تمام فواصل کیهانی که در بالا آن ها را تعریف کردیم، در حد  $z \ll 1$  به مقدار فضای تخت  $K = 0$  همگرا می شوند. از طرف دیگر تمام فواصل فوق از طریق تعریف طول همراه  $\chi = (c/(a, H_0)) \int_0^z d\tilde{z}/E(\tilde{z})$  در فضای تخت و به  $f_K$  در فضای خمیده بستگی دارد. در نتیجه تمام فواصل کیهانی که از شمع های استاندارد مانند ابرنواخترها و یا خط کش های استاندارد مانند قله های طیف توان تابش پس زمینه کیهانی به دست می آید، می توانند پارامترهای کیهانشناسی را که در تعریف  $E(z)$  از طریق  $\chi$  و  $f_K$  وجود دارند را مقید می کنند. در نتیجه اگر فاصله یک جرم کیهانی را در انتقال به سرخ  $z$  داشته باشیم، هر یک از ترکیب های  $f_K$  را تولید کنند قابل قبول است.

## ۷.۰ انبساط تند شونده کیهان

مشاهدات کیهانشناسی که در آن فواصل کیهانی را با استفاده از شمع های استاندارد، مانند ابرنواخترهای نوع I، و یا فاصله ما تا خط کش های استاندارد مانند طیف توان تابش پس زمینه کیهانی و یا نوسانات اکوستیکی باریون ها بر روی ساختارهای کیهانی اندازه گیری می شوند. نشان می دهند که شتاب انبساط کیهان مثبت است:

$$\ddot{a} > 0 \quad (6)$$

این بدین معنا است که شمع ها استاندارد کم سوتر از آن چه در مدل استاندارد کیهانشناسی، با ماده تاریک و باریونی انتظار داریم دیده می شود. این بدین معنا است که از لحاظ دینامیک کیهان در سمت راست معادله فریدمن جمله ی ناپیدایی به صورت  $A_{dark}$  زیر باید وجود داشته باشد:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_T + 3P_T + A_{dark}) \quad (7)$$

که شتاب کیهان را مثبت کند. در این صورت این ترم از تغییر در قسمت انرژی-تکانه یا و بخش هندسی باید حاصل شود، که مدل های اول را مدل های انرژی تاریک و مدل های دسته دوم را گرانش تعمیم یافته می گویند. از آن جا که مشاهدات طیف توان تابش پس زمینه کیهان با دقت خوبی کیهان را تخت به دست می آورند. از این رو تعمیم معادلات میدان اینشتین رهیافت موجه تری می شود. ثابت کیهانشناسی با معادله حالت  $\omega_\Lambda = P_\Lambda/\rho_\Lambda = -1$  یکی از گزینه های انرژی تاریک است و یا هر سیال کاملی که دارای معادله حالت زیر باشد می تواند شتاب تند شوند کیهان را تامین کند:

$$\omega_{DE} = \frac{P_{DE}}{\rho_{DE}} < -1/3 \Rightarrow \ddot{a} > 0. \quad (8)$$

در بخش بعد به بررسی دینامیک کیهان در حضور انرژی تاریک خواهیم پرداخت و در فصل (۹؟) با جزئیات بیشتری به بررسی شواهد رصدی انبساط تند شونده کیهان خواهیم پرداخت.

## ۸.۰ دوران انرژی تاریک (ثابت کیهانشناسی) غالب

همان طور که در بخش قبل به صورت مختصر اشاره شد، مشاهدات کیهانشناسی نشان می دهند که کیهان در حال انبساط تند شونده است. از این رو در این بخش به صورت مختصر جواب های معادله فریدمن را برای ثابت کیهانشناسی (یکی از راه حل های محتمل برای توصیف فاز تند شونده کیهان) با معادله حالت خاص  $\omega_\Lambda \equiv P_\Lambda/\rho_\Lambda = -1$  می پردازیم. جواب معادلات فریدمن و تحول کیهان در دوران های ماده و تابش غالب را می توان در مراجع [۱۳۳، ۴۱۹، ۱] نکته مهم این است که فارغ از مشاهدات مبنی بر انبساط تند شونده کیهان، ثابت کیهانشناسی به عنوان ثابت انتگرال گیری معادلات اینشتین، می تواند در معادلات وجود داشته باشد. در فصل های بعد به صورت دقیق تر مسئله را واشکافی خواهیم کرد.



در کیهان تخت بستگی انرژی ثابت کیهانشناسی با معادله حالت  $\omega_\Lambda = -1$  به صورت زیر به دست خواهد آمد. (رجوع به فصل؟؟)

$$\rho_\Lambda \sim a. \sim const \quad (9)$$

و عامل مقیاس در کیهان های باز، بسته و تخت به صورت زیر تغییر می کند.

$$\begin{aligned} a(t) &= a. \cosh(H(t-t.)), & K &= +1 \\ a(t) &= a. e^{H(t-t.)}, & K &= 0, & H &= cte, \\ a(t) &= a. \sinh(H(t-t.)), & K &= -1, \end{aligned} \quad (10)$$

نکته مهم دیگر این است که شتاب کیهان  $\ddot{a} > 0$  (معادله؟؟) با حضور ثابت کیهانشناسی مثبت است، از این رو ثابت کیهانشناسی فارغ از مرتبه بزرگی آن، کاندید مناسبی برای مسئله انبساط تند شونده کیهان است. در ادامه پارامترهای بدون بعد چگالی را تعریف کرده و پارامتر  $E(z) \equiv H/H_0$  را بر حسب پارامترهای چگالی به دست می آوریم، در این جا  $H_0 = 10.0 \text{ hkm/s/Mpc}$  پارامتر هابل در زمان حال است. معادله اول فریدمن با تمام مولفه های که دینامیک کیهان را با آن ها به دست آوردیم به صورت زیر نوشته می شود:

$$H^2 = \frac{\Lambda\pi G}{3}(\rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda) - \frac{K}{a^2} \quad (11)$$

برای این که رابطه فوق را به صورت کمیت بدون بعد بازنویسی کنیم؛ کمیت جدیدی به نام چگالی بحرانی<sup>۲۳</sup> را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{\Lambda\pi G}. \quad (12)$$

چگالی بحرانی را چگالی تعریف می کنیم که کیهان در آن تخت است ( $K = 0$ ). حال پارامتر چگالی هر یک از مولفه های کیهانی  $i = r, m, \Lambda$  را که نسبت چگالی هر یک از مولفه ها نسبت به چگالی بحرانی است را همراه با پارامتر چگالی خمش کیهانی به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\Omega_i = \frac{\Lambda\pi G\rho_i}{3H^2}, \quad \Omega_K = -\frac{K}{(aH)^2} \quad (13)$$

در نتیجه معادله فریدمن با تبدیل عامل مقیاس به انتقال به سرخ  $a = 1/(1+z)$  به صورت زیر باز نوشته می شود:

$$E^2(z) \equiv \frac{H^2}{H_0^2} = [\Omega_m^{(0)}(1+z)^3 + \Omega_r^{(0)}(1+z)^4 + \Omega_\Lambda + \Omega_K(1+z)^2], \quad (14)$$

که اندیس صفر نشان گر این است که هر یک از پارامترهای چگالی در زمان حال تعریف شده اند. کمیت مفید دیگر، پارامتر چگالی کل است  $\Omega_{tot}$  که آن را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\Omega_{tot} = \Omega_r + \Omega_m + \Omega_\Lambda \quad (15)$$

که با استفاده از معادله فریدمن می توان نشان داد که پارامتر چگالی کل به خمش، فضا مربوط است.

$$\Omega_{tot} = 1 + \frac{K}{H_0^2} \quad (16)$$

در نتیجه کیهان تخت ( $K = 0$ ) معادل است با پارامتر چگالی واحد  $\Omega_{tot} = 1$  و به این ترتیب با استفاده از معادله (۱۶) معادله فریدمن (۱۴) را می توان به صورت نهایی زیر نوشت:

$$E^2(z) = \Omega_m^{(0)}(1+z)^3 + \Omega_r^{(0)}(1+z)^4 + \Omega_\Lambda + (1 - \Omega_{tot})(1+z)^2 \quad (17)$$

## ۱.۸.۰ دینامیک کیهان با حضور انرژی تاریک

در این بخش به طور مختصر به بررسی دینامیک کیهان با حضور انرژی تاریک می پردازیم. ( مبحث مربوط به انرژی تاریک به طور کامل در فصل؟؟ بحث خواهد شد. ) با توجه به معادله دوم فریدمن  $\rho_{eff} + 3P_{eff}$  که سمت راست آن را چگالی انرژی و فشار موثر کیهان گذاشته شده است، برای توصیف کیهان با انبساط تند شونده  $\ddot{a} > 0$ ، می توان فرض کرد که کیهان از سیالی همگن در فضا پر شده است که معادله حالت موثر آن برابر است با:

$$\omega_{eff} = \frac{P_{eff}}{\rho_{eff}} < -\frac{1}{3} \quad (1)$$

حال فرض کنید که در زمان حال، انرژی تاریک با چگالی  $\rho_{DE}$  و فشار  $P_{DE}$  غالب باشد، از این رو معادله حالت انرژی تاریک که در حالت کلی می تواند تابعی از زمان (انتقال به سرخ) باشد، باید در شرط زیر صدق کند:

$$\omega_{DE}(z) = \frac{P_{DE}(z)}{\rho_{DE}} < -\frac{1}{3}, \quad (2)$$

که با قرار دادن رابطه فوق در معادله پیوستگی انرژی تاریک داریم:

$$\dot{\rho}_{DE} + 3H(\rho_{DE} + P_{DE}) = 0 \quad (3)$$

که در نتیجه آن می توان بستگی زمانی چگالی انرژی این مولفه کیهانی را به دست آورد، بدین ترتیب که با انتگرال گیری نسبت به زمان و استفاده از تغییر متغیر:

$$dt = -\frac{dz}{H(1+z)} \quad (4)$$

می توان چگالی انرژی تاریک را بر حسب معادله حالت و انتقال به سرخ به دست آورد:

$$\rho_{DE} = \rho_{DE}^{(0)} \exp \left[ \int_0^z \frac{3(1+\omega_{DE})}{1+z'} dz' \right] \quad (5)$$

البته می توان چگالی انرژی را بر حسب معادله حالت میانگین  $\bar{\omega}_{DE}$  نیز به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \rho_{DE} &= \rho_{DE}^{(0)} (1+z)^{3(1+\bar{\omega}_{DE})}, \\ \bar{\omega}_{DE} &= \frac{1}{\ln(1+z)} \int_0^z \frac{\omega_{DE}}{1+z'} dz'. \end{aligned} \quad (6)$$

و در نهایت می توانیم سهم انرژی تاریک را در معادله اول فریدمن به صورت زیر اضافه کرد:

$$H^2(z) = H_0^2 \left[ \Omega_m^{(0)} (1+z)^3 + \Omega_r^{(0)} (1+z)^4 + \Omega_{DE}^{(0)} \exp \left\{ \int_0^z \frac{3(1+\omega_{DE})}{1+z'} dz' \right\} + \Omega_K (1+z)^2 \right] \quad (7)$$

که در این صورت ثابت کیهانشناسی، حالت خاصی از انرژی تاریک ( $\omega_{DE} = -1$ ) و چگالی انرژی تاریک برابر با  $\Omega_\Lambda$  خواهد بود.

در انتهای این بخش کمیت  $q$  که به آن پارامتر شتاب کندشونده کیهانی<sup>۲۴</sup> گفته می شود ( از لحاظ تاریخی این کمیت قبل از کشف انبساط تند شونده کیهانی تعریف شده است زیرا باور بر این بود که به دلیل گرانش اجرام کیهانی انبساط کیهان در حال کند شدن است؛ از این رو  $q < 0$  به معنی شتاب تند شونده است) را تعریف می کنیم.

$$q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = -\frac{\ddot{a}}{aH^2} \quad (8)$$

با اندازه گیری فواصل کیهانی می توان پارامتر هابل و یا پارامتر شتاب کند شونده کیهانی را به دست آورد و دینامیک کیهانی و مولفه ای تشکیل دهنده آن را بررسی کرد.

## ۹.۰. تاریخچه حرارتی کیهان

یکی از مهمترین دستاوردهای کیهانشناسی استاندارد، در بر گرفتن نظریه آغازین کیهان (مهبانگ) و پیش بینی تاریخچه حرارتی کیهان است. دما و چگالی کیهان در زمان آغازین به شدت بالا بوده و دما و چگالی کیهان به تدریج و به صورت پیوسته از زمان مهبانگ تا به امروز کاسته شده است. با توجه به همگنی کیهان، تاریخچه حرارتی کیهان را می توان از اعمال ساده نظریه ترمودینامیک بر ناحیه ای از کیهان به دست آورد و آن را برای تمام کیهان استفاده کرد. مدل استاندارد کیهانشناسی با اعمال نظریه ترمودینامیک و فیزیک ذرات می تواند در هر مرحله از تحول کیهان نسبت ذرات را پیش بینی کند. بستگی دمایی تحول کیهان و وجود ذرات مختلف به این دلیل است که اگر دمای کیهان از انرژی سکون ذرات بیشتر باشد، فوتون ها می توانند تولید زوج کنند. دمای بالاتر، ذرات سنگین تر تولید می کند. به طور مثال وقتی دمای کیهان بیشتر از انرژی در حال سکون الکترون ها باشد.

$$k_B T > m_e c^2 \approx 0.511 \text{ MeV} \quad \equiv T \sim 5/8 \times 10^9 K \quad (9)$$

الکترون و پوزیترون می تواند به وسیله تولید زوج به دست بیاید.  $\gamma + \gamma \Leftrightarrow e + \bar{e}$  و همچنین نوترینوهای الکترون نیز به وسیله جریان خنثی به دست می آیند:  $e + \bar{e} \Leftrightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$  در صورتی که دمای کیهان به حدی بالا باشد که واکنش کامپتون الکترون و پوزیترون با فوتون ها و جریان خنثی نوترینوها به تعادل برسد، کل سیستم به تعادل ترمودینامیکی می رسد در این صورت پلاسمای گرمی از  $\gamma, e, \bar{e}, \nu_e, \bar{\nu}_e$  خواهیم داشت. برای پا بر جا ماندن تعادل ترمودینامیکی، بین ذرات کیهان در هر دوره از تاریخچه حرارتی کیهان، باید آهنگ واکنش ها بسیار بیشتر از آهنگ انبساط کیهان باشد. از این رو آهنگ واکنش ها را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\Gamma \equiv n \langle \nu \sigma \rangle \quad (10)$$

که  $n$  چگالی تعداد ذرات است  $v$ ، سرعت نسبی ذرات و  $\sigma$  سطح مقطع برخورد است. در زمانی که کیهان منبسط می شود و دمای کیهانی کاهش پیدا می کند، آهنگ واکنش ها کاسته می شود و زمانی که این آهنگ از سرعت انبساط کیهان، پارامتر هابل  $H(t)$ ، کم شد ذرات از شاره فوتونی واجفتیده می شوند و تا زمانی که این ذرات پایدار هستند، تعداد آن ها ثابت می ماند<sup>۲۵</sup>. بدین ترتیب به جز ذراتی که خارج از تعادل ترمودینامیکی تولید می شود مانند آکسیون ها<sup>۲۶</sup> یا ذراتی که در فرایند ها پر انرژی کیهانی به دست می آیند، بقیه ذرات بازمانده کیهان اولیه هستند که در زمانی از شاره کیهانی جدا شده اند<sup>۲۷</sup>. در ادامه به بررسی تاریخ تحول کیهان و ذرات تشکیل دهنده آن در کیهانشناسی استاندارد می پردازیم. در کیهان اولیه از آن جا که دما با عکس عامل مقیاس تغییر می کند می توانیم دما را به زمان کیهانی مرتبط بسازیم. در دماهای بالا از واحد های طبیعی استفاده می کنیم که:

$$c = k_B = \hbar = 1, \quad (11)$$

که در این صورت از نظر تحلیل ابعادی:

$$[energy] = [mass] = [temperature] = [time]^{-1} = [length]^{-1} \quad (12)$$

از آنجا که تمام واحد ها را بر حسب انرژی و یا جرم بیان می شود، می توان از روابط تبدیلی زیر استفاده کرد:

$$\begin{aligned} 1 \text{ MeV} &= 1/6.02 \times 10^{-6} \text{ erg} = 1/161 \times 10^{10} K = 1/783 \times 10^{-29} g = 5/0.68 \times 10^{10} (m^3) \\ &= 1/519 \times 10^{21} s^{-1}. \end{aligned}$$

و با تبدیل ابعادی در صورت نیاز کمیت های  $k_B, c$  و  $\hbar$  را

$$[c] = \text{cms}^{-1}, \quad \hbar = \text{gcm}^2 \text{s}^{-1}, \quad [k_B] = \text{gcm}^2 \text{s}^{-2} K^{-1} \quad (14)$$

می توان در محاسبات وارد کرد.

از آن جایی که فیزیک ذرات را تا انرژی های ( $\sim 10^{13}$ )  $1 \text{ GeV}$  به خوبی می شناسیم، اطلاعات ما از کیهان با دمای بالاتر و زمان  $t < 10^{-6} \text{ s}$  چندان دقیق نیست. البته نظریه های برای زمان های نزدیک تر به مهبانگ وجود دارد که شامل مدل های شکست تقارنی است که در این فاز ها ذرات غریبی<sup>۲۸</sup> تولید می شوند که می توانند منشا ماده

freeze Out<sup>۲۵</sup>

axions<sup>۲۶</sup>

Cosmic Relics<sup>۲۷</sup>

exotic<sup>۲۸</sup>

تاریک باشند. البته هیچ کدام از این نظریه متقین نیستند و تاکنون شاهد بر رصد مستقیم این ذرات وجود ندارد. دو فاز مهم کیهانشناسی که در زمان اولیه و انرژی های بالاتر از  $1\text{ GeV}$  اتفاق افتاده است، عبارت است از تورم و دوران سنتز باریون ها. تورم که بستگی به رفتار میدان اسکالر ناشناخته ای دارد که باعث انبساط تند شونده در کیهان اولیه می شود، بعضی از مشکلات مدل استاندارد را مانند تخت بودن کیهان و مسئله افق را حل می کند. از طرف دیگر سنتز باریون ها مکانیسمی است برای توضیح عدم تقارن میان باریون ها و پاد باریون ها که در کیهان کنونی مشاهده می شود و از طرفی باعث پایستگی تعداد باریون ها می شود [۲۴۵]. از این رو در ادامه اشاره به مهمترین رویداد ها حرارتی کیهان از دمای  $10^{13}\text{ K}$  تا زمان تابش پس زمینه کیهان می پردازیم و سپس به بررسی آمار ذرات در تعادل ترمودینامیکی می پردازیم [۲۸۰]. خلاصه ای از آن چه در که در ذیل می آید در شکل (۱۲) آمده است.

۱. در فاز  $(t \sim 10^{-5}) K \sim 3 \times 10^{12}$  که معادل انرژی  $300 - 200\text{ MeV}$  می باشد. در این مرحله گذار از کوارک به هادرون را داریم؛ که با کاهش دما کوارک ها محدود شده و هادرون ها را ایجاد می کنند. در این فاز پلاسمای داغ کیهانی شامل هادرون های نسبی  $\pi^+, \pi^-, \pi^0$  و نوکلئون های غیر نسبی  $p, n$  و لپتون های  $e, e^-, \mu, \mu^-$  و نوترینوهای وابسته هستند، در حالی که  $\tau, \tau^-$  فنا شده و نوترینو  $\nu_\tau$  از شاره کیهانی جدا شده است. در صورتی که تغییر فاز کوارک- هادرونی از مرتبه اول و قوی باشد، ناهمگنی در تعداد فوتون ها و باریون ها خواهیم دید.

۲. در  $(t \sim 10^{-4}\text{ s}) K \sim 10^{12}$  ذرات  $\pi^+, \pi^-$  شروع به فنا می کنند و  $\pi^0$  به فوتون تبدیل می شود، در نتیجه تنها هادرون های موجود در پلاسمای کیهانی نوکلئون ها هستند. زمانی که دمای شاره کیهانی به  $k \sim 10^{11}\text{ K}$  می رسد  $\mu, \mu^-$  نوترینوهای مربوطه نیز از شاره کیهانی جدا می شوند و سیال متشکل از میون ها و نوترینو های مربوطه جریان آزاد پیدا می کنند.

۳. زمانی که دمای شاره کیهانی از  $10^{11}\text{ K}$  کم می شود، تعداد نوترون ها با فاکتور  $\exp(-\Delta m/T)$  کاهش پیدا می کند که  $\Delta m$  تفاوت جرم پروتون و نوترون است و برابر است با  $(1/3\text{ MeV})$  این کاهش تا زمانی که نوترون ها و پروتون ها با هم اندرکنش دارند، ادامه پیدا می کند تا زمانی که نسبت نوترون ها و پروتون ها به میزان فعلی آن می رسد.

۴. در دمای  $(t \sim 4\text{ s}) k \sim 5 \times 10^9$  و کمتر از آن  $e, e^-$  شروع به فنا می کنند و در نتیجه نوترینو های  $\nu_e, \nu_{e^-}$  از شاره کیهانی جدا می شود در حالی که الکترون ها در اثر اندرکنش با فوتون ها دمای آن ها را کمی بالا می برند. در نتیجه دمای فوتون های تابش پس زمینه کیهانی بیشتر از دمای نوترینو ها است. از طرف دیگر به دلیل واجفتیدگی نوترینو ها واکنش هایی مانند  $p + e \Leftrightarrow n + \nu_e$  و  $p + \bar{\nu}_e \Leftrightarrow n + e^-$  انجام نمی شود.

۵. در دمای  $(t \sim \text{few minutes}) K \sim 10^9 \sim 0.1\text{ MeV}$  نوکلئوسنتز شروع می شود و عناصری مانند  $\text{He D}$  شروع به شکل گیری می کنند. اما چون دما بسیار بالا است این عناصر به شدت یونیزه هستند، در نتیجه کیهان از نوترینو ها آزاد، پروتون و  $\text{He}^{++}$  و الکترون ها تشکیل شده است و به تعداد کمی  $\text{He}^3$  و  $\text{D}$  نیز به وجود می آید. با کاهش دما، الکترون ها جذب پروتون شده و عناصر خنثی شروع به شکل گیری می کند. میزان ماده باریونی کیهان را می توان با استفاده از فراوانی عناصر به دست آورد.

۶. در دمای  $(t \sim 2 \times 10^5\text{ yr}) K \sim 4000$ ،  $50\%$  ماده باریونی کیهان به صورت اتم های خنثی می باشد. در این زمان که به آن زمان واجفتیدگی  $2^9$  می گویند به دلیل کاهش چگالی الکترون ها، کیهان نسبت به فوتون ها شفاف شده و فوتون ها به صورت آزاد حرکت می کنند. این فوتون ها همان تابش پس زمینه کیهانی  $30$  است. در نتیجه کیهان در این زمان از فوتون ها و نوترینو ها و اتم های  $\text{He H}$  تشکیل شده است. پس از زمان واجفتیدگی، به دلیل کاهش دمای کیهان، انرژی جنبشی ذرات از انرژی جرم سکون آن ها کمتر شده و کیهان وارد فاز ماده غالب می شود.

Time	Energy Scale $1 \text{ GeV} = 1.16 \cdot 10^{13} \text{ K}$	Physical Phenomena	Era $1+z = a(t_0)/a(t)$ Scale Factor $a(t)$
$\sim 10^{-44} \text{ sec.}$	$\sim 10^{19} \text{ GeV}$	Quantum Gravity String Theory Inflation starts	$z > 10^{26+20} = 10^{46}$  $a(t) \sim e^{Ht}$ <i>Inflationary Era</i> $z \sim 10^{20}$
$\sim 10^{-30} \text{ sec.}$	$\sim 10^{12} \text{ GeV}$	Inflation Ends and	
$\sim 10^{-10} \text{ sec.}$	$\sim 10^3 \text{ GeV}$	Particle Creation Starts Reheating Transition GUT Phase Transition Hot Big Bang: Thermalization	$a(t) \sim \sqrt{t}$
$\sim 10^{-4} \text{ sec.}$	$\sim 10^2 \text{ GeV}$	Electro-Weak Phase Transition Baryon Asymmetry Originates?	Radiation
$\sim 10^{-2} \text{ sec.}$	$\sim 1 \text{ GeV}$	Baryogenesis	Dominated
$\sim 10^{-2} \text{ sec.}$	$\sim 0.1 \text{ GeV}$	Quark-hadron and Chiral Phase Transitions	Era
$1 \text{ sec.}$	$\sim 1 \text{ MeV}$	$\gamma, \nu, e, \bar{e}, n, p$ in thermal equilibrium Neutrinos decouple	
$100 \text{ sec.}$	$\sim 0.1 \text{ MeV}$	Nucleosynthesis Creation of Light Elements	$z \sim 10^4$
$20000 \text{ years}$		Structure Formation Begins Onset of Gravitational Unstability	$a(t) \sim t^{2/3}$
$10^5 \text{ years}$		Atoms Form	$z \sim 10^3$
$10^9 \text{ years}$	first bound structures	Photon Decoupling The Universe Becomes Transparent	Matter Dominated Era
$10^9 \text{ years}$		Galaxy Formation	Cold matter dominates but dark energy...
$1.4 \cdot 10^{10} \text{ years}$	$\sim 10^{-4} \text{ eV}$	Solar system formation  Today	$z = 1$

شکل ۱۲: دوران تحول عالم بر اساس مدل استاندارد کیهانشناسی

برای بررسی دقیق تر تاریخچه حرارتی کیهان می توان به بورنر<sup>۳۱</sup> و کولب و ترنر<sup>۳۲</sup> مراجعه کرد [۷۲، ۲۴۵]. همان طور که در دوران های مختلف دمایی بررسی کردیم، سیال کیهانی، در تعادل گرمایی قرار دارند و به صورت آزاد با کیهان منبسط می شوند و یا در فاز بینابینی قرار دارند. از این رو برای بررسی حالت ذرات تشکیل دهنده کیهانی، چگالی عددی  $n$ ، چگالی انرژی  $\rho$  و فشار  $P$  هر یک از ذرات را با استفاده از تابع توزیع بولتزمان  $f(\vec{x}, \vec{p}, t)$  استخراج می کنیم. از آن جایی که کیهان اولیه، همگن و همسانگرد است، تابع بولتزمان به صورت زیر به دست می آید:

$$f(\vec{x}, \vec{p}, t) = f(p, t) \quad p = |\vec{p}|. \quad (15)$$

در نتیجه چگالی عددی، چگالی انرژی و فشار را به صورت زیر به دست می آوریم:

$$n(t) = 4\pi \int f(p, t) p^2 dp, \quad (16)$$

$$\rho(t) = 4\pi \int E(p) f(p, t) p^2 dp, \quad (17)$$

$$P(t) = 4\pi \int \frac{p^2}{3E(t)} f(p, t) p^2 dp \quad (18)$$

که انرژی کل به صورت  $E(p) = (p^2 + m^2)^{1/2}$  تعریف می شود. از طرفی فشار را از نظریه جنبشی گازها با توجه به تعریف سرعت نسبی  $v = pc^2/E$  داریم:

$$P = \frac{1}{3} n \langle pv \rangle = n \langle \frac{p^2 c^2}{3E} \rangle. \quad (19)$$

که در رابطه (۱۸) از آن استفاده شده است. حال از مکانیک آماری می دانیم، که توزیع ذراتی که در تعادل گرمایی هستند، دارای توزیع بوز-اینشتین و با فرمی دیراک به شکل زیر است:

$$f(\vec{p}, t) d^3p = \frac{g}{(2\pi)^3} \left\{ \exp \left[ \frac{E(p) - \mu}{T(t)} \right] \pm 1 \right\}^{-1} d^3p, \quad (20)$$

که در این جا  $\mu$  پتانسیل شیمیایی هر یک از ذرات است و  $T(t)$  دمای سیال کیهانی است که در تعادل قرار دارد و با زمان تغییر می کند. علامت + برای توزیع فرمی-دیراک<sup>۳۳</sup> است (ذرات با اسپین نصف صحیح)، در حالی که علامت - برای توزیع بوز اینشتین<sup>۳۴</sup> BE است (ذرات با اسپین صحیح). ضریب  $1/(2\pi)^3$  از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ<sup>۳۵</sup> است بدین معنی که هیچ ذره ای در فضای فاز در حجم کوچکتر از  $(2\pi\hbar)^3$  نمی تواند قرار بگیرد. (توجه داشته باشید که  $\hbar = c = k_B = 1$ ). همچنین  $g$  تبهگنی اسپینی است که برای نوترینوها برابر یک است، برای فوتونها و ذرات باردار  $g = 2$  و  $g = 6$  می باشد. حال با توجه به تابع بولتزمان در تعادل ترمودینامیکی، چگالی عددی، انرژی و فشار ذرات فرمی-دیراک (علامت مثبت) و بوز-اینشتین (علامت منفی) به صورت زیر به دست می آید:

$$n_{eq} = \frac{g}{2\pi^2} \int_m^\infty \frac{(E^2 - m^2)^{1/2} E dE}{\exp[(E - \mu)/T] \pm 1}, \quad (21)$$

$$\rho_{eq} = \frac{g}{2\pi^2} \int_m^\infty \frac{(E^2 - m^2)^{1/2} E^2 dE}{\exp[(E - \mu)/T] \pm 1}, \quad (22)$$

$$P_{eq} = \frac{g}{6\pi^2} \int_m^\infty \frac{(E^2 - m^2)^{3/2} dE}{\exp[(E - \mu)/T] \pm 1}. \quad (23)$$

Borner<sup>۳۱</sup>Kolb and Turner<sup>۳۲</sup>Fermi Dirac Distribution<sup>۳۳</sup>Bose Einstein Distribution<sup>۳۴</sup>Hiesenberg Uncertainty Principle<sup>۳۵</sup>

حال توزیع ذرات را در دوران غیر نسبیته  $T \ll m$  و نسبیته  $T \gg m$  بررسی می کنیم. در دورانی که دمای کیهان از جرم سکون ذرات بسیار کوچک است، چگالی عددی، انرژی و فشار ذرات  $BE$  و  $FD$  یکسان است و به تابع بولتزمن تبدیل می شود.

$$n_{eq} = g \left( \frac{mT}{\pi} \right)^{3/2} e^{(\mu-m)/T}, \quad (24)$$

$$\rho_{eq} = nm, \quad P_{eq} = nT, \quad (25)$$

در حالی که برای دوران نسبیته و برای گاز ناتبهگن  $\mu \ll T$  که  $E = p$  داریم:

$$n_{eq} = \frac{\zeta(3)}{\pi^2} g T^3, \quad BE \quad (26)$$

$$n_{eq} = \frac{3}{4} \left[ \frac{\zeta(3)}{\pi^2} \right] g T^3, \quad FD.$$

$$\rho_{eq} = \frac{\pi^2}{30} g T^4, \quad BE, \quad (27)$$

$$\rho_{eq} = \frac{7\pi^2}{8 \cdot 30} g T^4, \quad FD.$$

$$P_{eq} = \frac{\rho_{eq}}{3}. \quad (28)$$

که  $\zeta(3)$  تابع زتای ریمان<sup>۳۶</sup> است.  $\mu$  پتانسیل شیمیایی است که در طی یک واکنش شیمیایی  $i + j \rightarrow k + l$  به صورت زیر ثابت است [۲۵۳]:

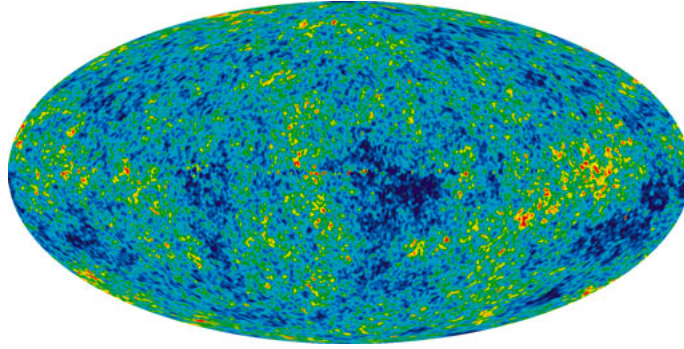
$$\mu_i + \mu_j \Rightarrow \mu_k + \mu_l \quad (29)$$

پایستگی این کمیت بستگی به سایر کمیت های پیوسته است. به طور مثال چون تعداد فوتون ها در تعادل ترمودینامیکی ثابت نیست به تبع آن پتانسیل شیمیایی فوتون ها صفر است از این رو فوتون ها می توانند توزیع پلانک داشته باشند و از آن جا که  $\mu_\gamma = 0$  پتانسیل شیمیایی ضد ذره، منفی پتانسیل شیمیایی ذره است زیر ماده و ضد ماده فنا شده و تبدیل به فوتون می شود. از آن جایی که چگالی عددی لپتون ها و باریون ها بسیار کمتر از فوتون ها است، می توان پتانسیل شیمیایی باریون ها و لپتون ها را صفر در نظر گرفت، در حالی که انتظار داریم در کیهان اولیه پایستگی عدد باریونی و لپتونی وجود داشته باشد. که این اختلاف بین ماده و ضد ماده، طبق رابطه (۲۶) به صورت زیر به پتانسیل شیمیایی بستگی پیدا می کند:

$$n - \bar{n} = \frac{gT^3}{6\pi^2} \left[ \pi^2 \left( \frac{\mu}{T} \right) + \left( \frac{\mu}{T} \right)^3 \right], \quad (30)$$

و از آن جایی که در کیهان، تعداد باریون ها و لپتون بیشتر از ضد باریون ها و ضد لپتون ها است می توان که پتانسیل شین نتیجه گرفت که پتانسیل شیمیایی این ذرات دقیقاً صفر نیست. به این برحه از تاریخچه حرارتی کیهان که باعث ایجاد لپتون ها و باریون ها می شود دوران لپتوسنتز<sup>۳۷</sup> و باریوسنتز<sup>۳۸</sup> می گویند. با توجه به رابطه (۲۴)، چگالی عددی، ذرات غیر نسبیته با ضریب نمایی کاهش پیدا می کند. این بدین معنا است که در دوران نسبیته  $T \gg m$  فوتون ها انرژی کافی برای تولید ذرات به جرم  $m$  را دارند، در حالی که  $T \ll m$  تنها انتهای منحنی توزیع فوتون ها می تواند ذرات به جرم  $m$  تولید کند. در نتیجه چگالی این ذرات به شدت کاهش پیدا می کند. در نتیجه با تقریب بسیار خوبی چگالی انرژی و فشار سیال کیهانی را در دوران تابش غالب می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\rho(T) = \frac{\pi^2}{30} g_* T^4, \quad n(T) = \frac{\zeta(3)}{\pi^2} g_{*,n} T^3, \quad P(T) = \rho(T)/3. \quad (31)$$



شکل ۱۳: WMAP [۲۲۴] تابش پس زمینه کیهانی - ماهواره نتایج ۷ ساله

$$g_* = \sum_{i,Boson} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4 + \frac{7}{8} \sum_{i,Fermion} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4 \quad (۳۲)$$

$$g_{*,n} = \sum_{i,Boson} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^3 + \frac{3}{4} \sum_{i,Fermion} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^3 \quad (۳۳)$$

که  $T_i$  دمای هر یک از ذرات است که می تواند از دمای تابش متفاوت باشد.  $g_{*,n}$  و  $g_*$  را می توان از محاسبه تعداد ذراتی که در دمای خاص نسبی هستند به دست آورد. به طور مثال در دمای  $1 MeV \ll T$  فوتون ها و نوترینوها با ضد ذرات آن، تنها ذراتی که نسبی هستند در نتیجه  $g_*$  را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

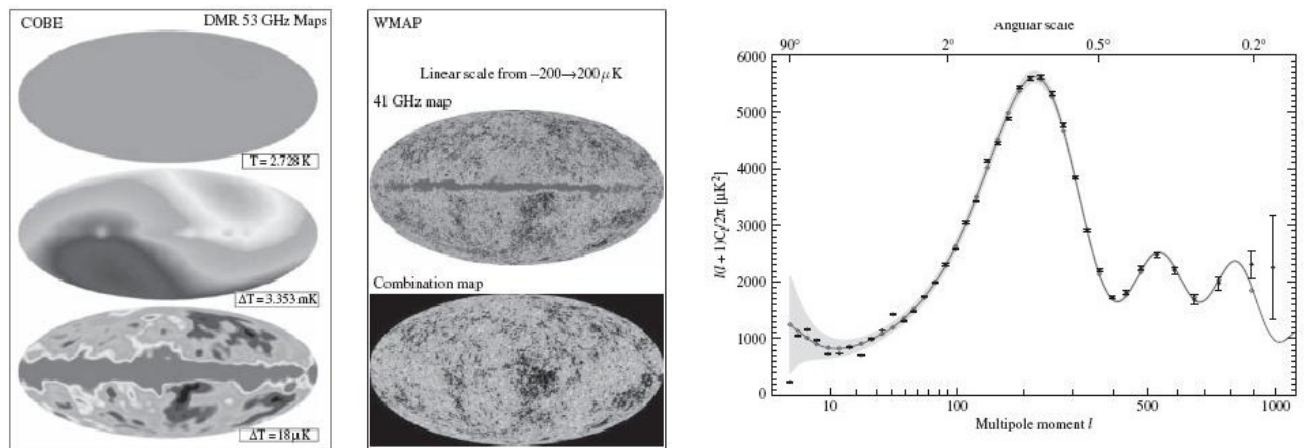
$$g_* = g_\gamma + \frac{7}{8} (3 \times 2 \times g_\nu) \left(\frac{T_\nu}{T}\right)^4 \approx 3.36 \quad (۳۴)$$

واضح است که با افزایش دما، تبهگنی  $g_*$  به دلیل افزایش تعداد ذرات نسبی افزایش پیدا می کند. در شکل (؟؟) بستگی  $g_*$  را بر حسب دما و مدل استاندارد رسم کرده ایم، که از ۳.۳۶ در دمای فعلی کیهان  $T = ۲.۷۳$  به ۱۰۶.۷۵ در دمای  $T > 300 GeV$  افزایش پیدا می کند. در بخش بعد به بررسی دوران واجفتیدگی و تابش پس زمینه کیهانی می پردازیم که از نظر زمانی، دوره بعدی در تاریخچه حرارتی کیهان است که به دلیل اهمیت مشاهداتی آن در فصل (؟؟) به تفصیل بیشتری به مطالعه آن خواهیم پرداخت.

## ۱۰۰۰ تابش پس زمینه کیهان

یکی از مهمترین موفقیت های مدل استاندارد کیهانشناسی، کشف تابش پس زمینه کیهانی است. تابش پس زمینه کیهانی توسط پنزیاس و ویلسون در سال ۱۹۶۵ هنگامی که دریافت کننده بسیار قوی را در طول موج سانتی متر در آزمایشگاه بل نصب کرده بودند، کشف شد. پس از کشف تابش پس زمینه کیهانی به زودی روشن شد که این تابش همسانگرد است و دارای طیف جسم سیاه در دمای  $T = 3K$  می باشد. این تابش قبلا توسط گاموف به عنوان نتیجه نظریه انفجار بزرگ پیش بینی شده بود، از این رو پس از کشف ویلسون و پنزیاس، اهمیت آن به سرعت توسط دیکی<sup>۳۹</sup> در همان سال مشخص شد. فیزیک تابش پس زمینه کیهانی در قالب مدل استاندارد کیهانشناسی به خوبی تعریف می شود. در کیهان اولیه و بسیار داغ فوتون ها مرتب توسط شاره یونیزه کیهانی جذب و منتشر می شوند به طوری که در حالت تعادل دارای طیف جسم سیاه می شوند. پس از این که کیهان سرد شد، سطح مقطع برخورد فوتون ها با باریون ها کاسته شده و فوتون ها آزادانه حرکت می کنند تا آخرین سطح پراکندگی که فوتون ها جریان آزاد پیدا می کنند و اثر انگشت طیف جسم سیاه را با خود به همراه دارند. از آن جایی که تابش پس زمینه کیهانی از اهمیت فوق العاده ای در بررسی رشد و تحول ساختارهای کیهانی دارد، در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی تلاش فراوانی برای اندازه گیری دقیق تر طیف تابش جسم انجام شد و از آن جایی که قله تابش جو در نزدیکی  $3K$  است تلاش شد که بالون هایی به





شکل ۱۴: [۲۸۰] دو قطبی و طیف توان تابش پس زمینه کیهانی

بالای جو فرستاده شود [۳۱۴]. یکی از مهمترین اتفاقات در زمینه مطالعه تابش پس زمینه کیهانی، استفاده از ماهواره کاوشگر تابش پس زمینه  $\text{COBE}$ ، ناسا  $\text{COBE}$  در سال ۱۹۸۹ بود.  $\text{COBE}$  که توانایی اندازه گیری تابش پس زمینه کیهان با دقت بالا و جدایی زاویه ای  $7^\circ$  درجه را دارا بود، دمای جسم سیاه را با دقت خوبی به صورت زیر به دست آورد:

$$T = 2.728 \pm 0.002 K \quad (35)$$

دمای جسم سیاه تابش پس زمینه نشان می دهد که فیزیک پس از دوران واجفتیدگی تاثیر بسیار کمی بر روی فوتون های اولیه دارد. مهم ترین کشف  $\text{COBE}$ ، وجود ناهمسانگردی های دما در تابش پس زمینه کیهانی بود. اگرچه سطح آخرین پراش با تقریبی بسیار خوبی همسانگرد است ولی رادیومتر ریز موج دیفرانسیلی  $\text{COBE}$ <sup>۴۱</sup>، به اسم DIR ناهمسانگردی بزرگ مقیاس در تابش پس زمینه کیهانی با اختلاف

$$T(\alpha) = T \cdot \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \alpha \right), \quad (36)$$

به دست آورد، که  $\alpha$  جهت مسیر دید به سمت معینی از فضا است. این تغییر دما را می توان با توجه به حرکت نسبی زمین با سرعت  $369 \pm 3 \text{ km s}^{-1}$  نسبت به جهت:

$$(l, b) = (264/31^\circ \pm 0/20^\circ, 48/05^\circ \pm 0/10^\circ) \quad (37)$$

در مختصه کهکشانی توجیه کرد [۲۷۰]. با کم کردن اثر دو قطبی حاصل از حرکت زمین نسبت به صفحه کهکشان و اثرات میان راهی اختلاف دمایی به اندازه  $\sim 2 \times 10^{-5}$  مشاهده می شود. شکل (۱۴) این رصد که جایزه نوبل ۲۰۰۶ را برای گروه  $\text{COBE}$  (جورج سموث  $^{42}$  و جان مائر  $^{43}$ ) به ارمغان آورد، آن ها جوانه های اولیه تشکیل ساختار در کیهان را مشاهده کرده بودند. از آن جا که قدرت تفکیک  $\text{COBE}$  به اندازه  $7^\circ$  درجه است، قدرت تفکیک ناهمسانگردی های کوچکتر از آن را نداشت؛ در نتیجه پروژه های بعدی با ارسال بالون هایی مانند بومرنگ  $^{44}$ ، [۶۱] و ماکزیم  $^{45}$ ، [۱۸۷] و یا پروژه های زمینی مانند داسی  $^{46}$  و CBI و مهم تر از همه آزمایش ماهواره ای WMAP کاوشگر ناهمسانگردی های ریز موج ویلکینسون  $^{47}$  که نقشه بسیار دقیقی از ناهمسانگردی های کیهانی که در شکل (۱۳) مشاهده می کنیم. تباین چگالی دمایی که بر روی آخرین سطح پراکندگی وجود دارد را می توان بر حسب

Cosmic Background Explorer<sup>۴۰</sup>  
 Differential Microwave Radiometer<sup>۴۱</sup>  
 George Smoot<sup>۴۲</sup>  
 John Mathler<sup>۴۳</sup>  
 Boomerang<sup>۴۴</sup>  
 Maxima<sup>۴۵</sup>  
 Dasi<sup>۴۶</sup>  
 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe<sup>۴۷</sup>

هارمونیک های کروی بسط داد.

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) \equiv \frac{T(\theta, \phi) - \bar{T}}{\bar{T}} = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{l,m}(\theta, \phi) \quad (38)$$

که  $\bar{T}$  میانگین دمایی تابش پس زمینه کیهانی است و  $Y_{l,m}$  توابع کروی و  $a_{lm}$  ضرایب بسط است. طیف توان زاویه ای را به صورت  $C_l \equiv \langle |a_{lm}|^2 \rangle^{1/2}$  تعریف می کنیم، که ازم توسط گیری بر روی پارامتر  $m$  به دست آمده است که نشانگر دامنه اختلالات دمایی در مقیاس های متفاوت است. شکل سمت راست (۱۴) طیف توان را برای نتایج ۵ ساله WMAP رسم کرده ایم.

## مسائل

سوال ۱) فواصل در کیهان: الف) با توجه به تعریف پارسک به عنوان فاصله ای که یک واحد نجومی در یک ثانیه قوسی دیده می شود، نشان دهید که  $1 pc \simeq 3.1 \times 10^{16} m$  است.  
 ب) سرعت دور شدن کهکشان نوعی (انبساط هابلی) را در خوشه گیسو و سنبله به دست آورید.  
 سوال ۲) معادله دوم فریدمن را در چارچوب کیهانشناسی نیوتنی به دست آورید و درباره فشاری که در رابطه زیر وارد شده است، بحث کنید:

$$\ddot{a}/a = -4\pi G/3(\rho + 3P/c^2)$$

سوال ۲) نسبت عام و متریک FRW: هموستارها را برای متریک فریدمن - رابرتسون واکر به دست آورید.

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} = \frac{1}{2}g^{\alpha\beta} (g_{\beta\nu,\mu} + g_{\mu\beta,\nu}) - g_{\mu\nu,\beta}$$



## کتابنامه

- [۱] باغرام، شانت، پایان نامه کارشناسی ارشد ” گرانش تعمیم یافته به عنوان انرژی تاریک ”، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، شهریور ۱۳۸۶.
- [۲] حبیبی، فرهنگ، پایان نامه دکتری ” جستجوی گاز ناپیدای کهکشانی به روش سوسو زدن ستاره ای ”، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۱۳۹۰.
- [۳] راهوار، سهراب، پایان نامه دکتری ” ماده تاریک در کیهانشناسی ”، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، مهر ۱۳۸۰.
- [۴] صادق موحد، سید محمد، پایان نامه دکتری ” کیهانشاخ انرژی تاریک متغیر و تحلیل آماری تابش پس زمینه کیهان ” دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۱۳۸۶.
- [5] Abazajian, K., *et al.*, 2009, *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543.
- [6] Afshordi, N., 2008, arXiv:astro-ph/0807.2639.
- [7] Afshordi, N., Mohayaee, R. and Bertschinger, E, (2009), *Phys. Rev. D* **79**, 083526.
- [8] Afshordi, N., Mohayaee, R. and Bertschinger, E., 2010, *Phys. Rev. D* **81**, 101301.
- [9] Alam, U., Sahni, V., Saini, T.D. and Starobinsky, A.A., 2003, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **344**, 1057.
- [10] Alam, U., Sahni, V., Saini, T.D. and Starobinsky, A.A., 2004, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **345**, 275.
- [11] Aldering, G.*et al.*, SNAP collaboration, astro-ph/0405232
- [12] Allemandi, G., Borowiec, A., Francaviglia, M., 2004, *Phys. Rev. D* **70**, 043524.
- [13] Allemandi, G., Borowiec, A., Francaviglia, M., 2004, *Phys. Rev. D* **70**, 103503.
- [14] Allen, S.W. *et al.*, 2004, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **353**, 457.
- [15] Alishahia, M., Silverstein, E. and Tong, D., 2004, *Phys. Rev. D* **70**, 123505.
- [16] Alnes, H., Amarzguioui, M. and Gron, O., 2006, *Phys. Rev. D* **73**, 083519.
- [17] Alves, M.E.S., Miranda, O.D. and de Araujo, J.C.N., 2009, *Phys. Lett. B* **679**, 401.
- [18] Amarzguioui, M. *et. al*, 2006, *Astron. Astrophys.* **454**, 707.
- [19] Amendola, L., 1999, *Phys. Rev. D* **60**, 043501.

- [20] Amendola, L., 2000, Phys. Rev. D **62**, 043511.
- [21] Amendola, L., Charmousis, C. and Davis, S.C., 2006, JCAP **0612**, 020.
- [22] Amendola, L., Gannouji, R., Polarski, D. and Tsujikawa, S., 2007, Phys. Rev. D **75**, 083504.
- [23] Amendola, L., Polarski, D. and Tsujikawa S., 2007, Phys. Rev. Lett. **98**, 131302.
- [24] Amendola, L., Campos, G.C. and Rosenfeld, R., 2007, Phys. Rev. D **75**, 083506.
- [25] Amendola, L. and Tsujikawa S., 2008, Phys. Lett. B **660**, 125.
- [26] Amendola L. and Tsujikawa Sh., 2010, *Dark Energy, Theory and observation*, Cambridge.
- [27] Amico, G.D., Kamionkowski, M. and Sigurdson, K., 2009, Based on at Villa Olmo and Hiedlberg Lectures, arXiv: 0907.1912.
- [28] Appleby, S.A. and Battye, R.A., 2007, Phys. Lett. B, **654**, 7.
- [29] Arkani-Hamed, N., Cheng, H.C., Luty, M.A. and Mukohyama, S., 2004, JHEP, **0405**, 074.
- [30] Armendariz, C.P., Damour T. and Mukhanov, V.F., 1999, Phys. Lett. B. **458**, 209.
- [31] Armendariz, P.C., Mukhanov, V.F. and Steinhardt, P.J., 2000, Phys. Rev. Lett. **85**, 4438.
- [32] Armendariz, P.C., Mukhanov, V.F. and Steinhardt, P.J., 2001, Phys. Rev. D. **63**, 103510.
- [33] Ashtekar, A., 2009, Gen. Rel. Grav. **41**, 707.
- [34] Astier, P. *et al.*, 2006, Astron. Astrophys. **447**, 31.
- [35] Bacon, D.J., Refregier, A.R. and Ellis, R.S., 2000, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **318**, 625.
- [36] Baghran, Sh., Farhang M. and Rahvar S., 2007, Phys. Rev. D **75**, 044024.
- [37] Baghran, Sh. and Rahvar, S., 2009, Phys. Rev. D **80**, 124049.
- [38] Baghran, Sh. and Rahvar, S., 2010, J. Cosm. Astropar. Phys. **1012**, 068.
- [39] Baghran, Sh., Afshordi, N. and Zurek Kathryn, 2011, arXiv:1101.5487
- [40] Bailin, D. and Love, A., 1994, *Supersymmetric Gauge Field Theory and String Theory*, Institute of Physics Publishing.
- [41] Balbi, A. *et al.*, 2000, Astrophys. J. **545** L1.
- [42] Bamba, K., Geng, C.Q. and Ho, S.H., 2008, JCAP, **0809**, 001.
- [43] Banerjee, R., Ghosh, S. and Kulkarni, S., 2007, Phys. Rev. D **75**, 025008.

- [44] Bardeen, J.M., 1980, Phys. Rev. D **22**, 1882.
- [45] Bardeen, J.M., Bond, J.R., Kaiser, N. and Szalay, A.S., 1986, ApJ, **304**, 15.
- [46] Barrow, J. and Tipler, F., 1988, *The Cosmological Anthropic Principle*, Oxford University Press, Oxford.
- [47] Borrow, J., 2010, Annalen der Physik, **19**, 3, 202.
- [48] Bartelmann, M. and Schneider, D., 2001, Phys. Rept. **340**, 291.
- [49] Bartolo N. and Pietroni, M., 2000, Phys. Rev. D **61**, 023518.
- [50] Bassett, B.A., Kunz, M., Silk, J. and Ungarelli, C., 2002, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **336**, 1217.
- [51] Bassett, B.A., Kunz, M., 2004, Phys. Rev. D **69**, 101305.
- [52] Bassett B.A., Tsujikawa S. and Wands, D., 2006, Rev. Mod. Phys. **537**, 78.
- [53] Baumann, D., Nicolis, A., Senatore, L. and Zaldarriaga, M., 2010, arXiv:1004.2488.
- [54] Bean, R., Bernat, D., Pogosian, L., Silvestri A. and Trodden M., 2007, Phys. Rev. D **75**, 064020.
- [55] Begeman, K.G., Broeils, A.H. and Sanders, R.H., 1991, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **249**, 523.
- [56] Bekenstein, J.D., 1982, Phys. Rev. D **25**, 1527.
- [57] Bento, M.C., Bertolami, O. and Sen, A.A., 2002, Phys. Rev. D **66**, 043507.
- [58] Bergquist, G., 1999, Class. Quant. Grav. **9**, 1753.
- [59] Bergstorm, L., 2000, Rept. Prog. Phys. **63**, 793.
- [60] Bernabei, R. *et al.* [DAMA collaboration], 2000, Phys. Lett. B **486**, 23.
- [61] Bernardis, P. de *et al.*, 2000, Nature **404**, 955.
- [62] Bertone, G., Hooper D. and Silk, J., 2005, Phys. Rev. Rep. **405**, 279.
- [63] Bertschinger, E. *et al.*, 1996, in Schaeffer, Cosmology and Large Scale Structure, Elsevier, Amesterdam, 273.
- [64] Binetury, P., 2000, Phys. Rev. D **61**, 023504.
- [65] Binetury, P., Deffayet, C. and Langlois, D., 2000, Nucl. Phys. B **565**, 269.
- [66] Binetury, P., Deffayet, C., Ellwanger, U. and Langlois, D., 2000, Phys. Lett. B **477**, 285.
- [67] Blanchard, A., Douspis M., Rowan-Robinson, M. and Sarkar, S., 2006, Astron. Astrophys. **449**, 925.

- [68] Bombelli L., Couch, W. E., Torrence, R.J., 1991, Phys. Rev. D. **44**, 2589.
- [69] Boisseau, B., Esposito-Farese, G., Polarski, D. and Starobinsky, A.A., 2000, Phys. Rev. Lett. **85**, 2236.
- [70] Bond, J.R. and Efstathiou, G., 1984, ApJ., **285**, L45.
- [71] Bondi, H., 1957, Rev. Mod. Phys. **29**, 423.
- [72] Borner, G., 2003, *The Early Universe: Facts and Fiction*, Springer, Berlin.
- [73] Brandenberger, R.H., 2004, *In the early Universe and observational Cosmology*, edited by NBreton, N., Cervantes-Cota, J.L. and Salgado, M., Lecture Notes in Physics Vol. 646, 127 Springer.
- [74] Brans, C. and Dicke, R.H., 1961, Phys. Rev. **124**, 925.
- [75] Brax, P. and Martin, J., 1999, Phys. Lett. B **486**, 40.
- [76] Brevik, I.H., Nojiri, S., Odintsov, S.D. and Vanzo, L., 2004, Phys. Rev. D **70** 043520.
- [77] Bryan, G.L. and Norman, M.L., 1998, ApJ **495**, 80.
- [78] Calcagni, G., Tsujikawa, S. and Sami, M. , 2005, Class Quant. Grav. **22**, 3977.
- [79] Calcagni, G., Carlos B.de and Felice, A. de, 2006, Nucl. Phys. B **752**, 404.
- [80] Caldera-Cabral, G., Maartens, R. and Urena-Lopez, L.A., 2009, Phys. Rev. D **79**, 063518.
- [81] Caldwell, R.R., Dave R. and Steinhardt, P.J., 1998, Phys. Rev. Lett. **80**, 1582.
- [82] Caldwell, R.R., 2002, Phys. Lett. B **545**, 23.
- [83] Caldwell, R.R. and Linder, E.V., 2005, Phys. Rev. Lett. **95**, 14130.
- [84] Caldwell, R.R. and Kamionkowski, M., 2009, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., **59**, 397.
- [85] Campo, S. del, Herrera, R., Olivares, G. and Pavon, D., 2006, Phys. Rev. D **74**, 023501.
- [86] Capozziello, S., 2002, Int. J. Mod. Phys. D **11**, 483.
- [87] Capozziello, S., Cardone, V.F., Carloni, S. and Troisi A., 2003, Int. J. Mod. Phys. D **12**, 1969.
- [88] Capozziello, S. , Cardone, V.F. and Troisi A., 2005, Phys. Rev. D **71**, 043503.
- [89] Capozziello, S., Cianci, R., Stornaioolo, C. and Vignolo, S., 2007, Class. Quant. Grav. **24**, 6417.
- [90] Capozziello, S. and Tsujikawa, S., 2008, Phys. Rev. D **77**, 107501.
- [91] Capozziello, S. and Vignolo, S., 2010, Annalen. Phys. **19**, 238.



- [92] Capozziello, S., Stabile, A., Troisi, A., 2010, Int. J. Theo. Phys. V.49 **6**, 1251.
- [93] Carretta, E. *et al.*, 2000, Astrophys. J. **533**, 215.
- [94] Carroll, S.M., Press, W.H. and Turner, E.L., 1992, ARAA, **30**, 499.
- [95] Carroll, S.M., 2003, *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*, Benjamin Cummings.
- [96] Carroll, S.M., Duvvuri, V., Trodden, M. and Turner, M.S., 2004, Phys. Rev. D **70**, 043528.
- [97] Carroll, S.M., Felice, A. de, Duvvuri, V., Easson, D.A., Trodden, M. and Turner, M.S., 2005, Phys. Rev. D **71**, 063513.
- [98] Carroll, S.M., Sawicki, I., Silvestri, A. and Trodden M., 2006, New J. Phys. **8**, 323.
- [99] Carter, B.M.N. and Neupane, I.P., 2006, JCAP **0606**, 004.
- [100] Carturan, D. and Finelli, F., 2003, Phys. Rev. D **68**, 103501.
- [101] Celerier, M.N., 2000, Astron. Astrophys. **353**, 63.
- [102] Chaboyer, B. and Krauss, L.M., 2002, Astrophys. J. Lett. **567**, L45.
- [103] Chandrasekhar, S., 1931, Astrophys. J. **74**, 81.
- [104] Chang, P. and Hui, L., 2010, arXiv:1011.4107.
- [105] Chevallier, M. and Polarski, D., 2001, Int. J. Mod. Phys. D **10**, 213.
- [106] Chiba, T., 1999, Phys. Rev. D **60**, 083508.
- [107] Chiba, T. and Nakamura, T., 2000, Phys. Rev. D **62**, 121301.
- [108] Chiba, T., Okabe, T. and Yamaguchi, M., 2000, Phys. Rev. D **62**, 023511.
- [109] Chiba T., Okabe T. and Yamaguchi, 2000, Phys. Rev. D **62**, 023511.
- [110] Chiba, T., (2003), Phys. Lett. B **575**, 1.
- [111] Cole, S. *et al.*, [The 2dFGRS Collaboration], 2005, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **362**, 505.
- [112] Coles, P. and Jones, B., 1991, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **248**, 1.
- [113] Colless, M.M., *et al.*, 2001, MNRAS, **328**, 1039.
- [114] Cooray, A., & Sheth R. 2002, Physics Report, **372**, 1.
- [115] Conley, A. *et al.*, 2011, arXiv:1104.1443.
- [116] Copi, C.J., Schramm, D.N. and Turner, M.S., 1995, Science **267**, 192.
- [117] Corasaniti, P.S. and Copeland, E.J., 2003, Phys. Rev. D **67**, 063521.

- [118] Crittenden, R., Majerotto, E. and Piazza, F., 2007, Phys. Rev. Lett. **98**, 251301.
- [119] Cyburt, R.H., Fields, B.D. and Olive, K.A., 2008, J. Cosmol. Astro. Part. Phys. **11**, 12.
- [120] Dalal, N., Abazajian, K., Jenkins, E.E. and Manohar, 2001, Phys. Rev. Lett. **87**, 141302.
- [121] Damour, T., Gibbons, G.W. and Gundlach, C., 1990, Phys. Rev. Lett. **64**, 123.
- [122] Davidson, S., Hannestad, S. and Raffett, G., 2000, JHEP **0005**, 003.
- [123] Davis, M. and Peebles, P.J.E., 1977, ApJ. Suppl. **34**, 425.
- [124] Davis, M. and Peebles, P.J.E., 1983, Astrophys. J. **267**, 465.
- [125] Davis, T.M. *et al.*, Astrophys. J. **666**, 716.
- [126] Deffayet, C., 2001, Phys. Lett. B **502**, 199.
- [127] Deffayet, C., Dvali, G.R. and Gabadadze, G., 2002, Phys. Rev. D **65**, 044023.
- [128] Denef, F. and Douglas, M.R., 2004, JHEP, **0405**, 072.
- [129] Deruelle, N., Sasaki, M. and Sendouda, Y., 2008, Phys. Rev. D **77**, 124024.
- [130] Dev, A., Jain, D., Jhingan, S., Nojirir, S., Sami, M. and Thonghool, I., 2008, Phys. Rev. D **78**, 083515.
- [131] Dicke, R.H., 1968, Am. J. Phys. **28**, 344.
- [132] d’Inverno, R., 1992, *Introduction to Einsteins Relativity*, Oxford University Press.
- [133] Dodelson, S., 2003, *Modern Cosmology*, Academic Press (Elsevier) New York.
- [134] Dolgov, A. D. and Kawasaki, M., 2003, Phys. Lett. B., **573**, 1.
- [135] Doran, M., Lilley M., Schwindt, J. and Wetterich, C., 2001, Astrophys. J. **559**, 501.
- [136] Doran, M. and Lilley M., 2002, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **330**, 965.
- [137] Dunkley, J. *et al.*, [WMAP collaboration] 2009, Astrophys. J. Suppl. **180**, 306.
- [138] Dunlop, J., *et al.*, 1996, Nature, **381**, 581.
- [139] Dunlop, J., 1999, in *The Most Distant Radio Galaxies*, edited by Rottgering, H.J.A., Best, P. and Lehnert, M.D., Kluwer, Dordrecht, 71.
- [140] Dvali, G.R., Gabadadze, G. and Porrati, M., 2000, Phys. Lett. B **485**, 208.
- [141] Dvali, G.R. and Gabadadze, G., 2001, Phys. Rev. D **63**, 1065007.
- [142] Dvali, G. and Zaldarriaga M., 2002, Phys. Rev. Lett. **88**, 091303.
- [143] Efstathiou, G., 2000, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **342**, 810.

- [144] Einstein, A., (1916), *Annalen Phys.* **49**, 769.
- [145] Einstein, A., (1917), *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys. math, Klass VI*, 142.
- [146] Einstein, A., 1936, *Science*, **84**, 506.
- [147] Einstein, A., 1945, *The meaning of Relativity*, Princeton University Press.
- [148] Eisenstein, D.J. and Hu, W., 1998, *Astrophys. J.* **496**, 605.
- [149] Eisenstein, D.J., *et al*[SDSS Collaboration], 2005, *Astrophys. J.* **633**, 560.
- [150] Eotvos, R.V., Pekar, V. and Fekete, E., 1922, *Ann. Phys.* **68**, 11.
- [151] Eposito-Farese, G. and Polarski, D., 2001, *Phys. Rev. D* **63**, 063504.
- [152] Everitt, C.W.F. *et al.*, 2011 [Gravity Probe B Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **106**, 221101.
- [153] Fabris, J.C., Guio, T.C.C., Hamani Daouda, M. and Piattella, O.F., 2011, arXiv:1011.0286.
- [154] Faraoni, V., 2004, *Phys. Rev. D* **70**, 044037.
- [155] Faraoni V., 2006, *Phys. Rev. D*, **74**, 023529.
- [156] Faraoni, V., 2010, *Phys. Rev. D* **81**, 044002.
- [157] Fardon, R. Nelson, A.E. and Weiner, N., 2004, *JCAP*, **0410**, 005.
- [158] Faulkner T., Tegmark, M., Bunn, E.F. and Mao, Y., 2007, *Phys. Rev. D* **76**, 063505
- [159] Fay, S., Tavakol, R. and Tsujikawa S., 2007, *Phys. Rev. D* **75**, 063509.
- [160] Felice, A.de, Hindmarsh, M. and Trodden, M., 2006, *JCAP* **0608**, 005.
- [161] Firouzjaee, J.T., Parsi Mood, M. and Mansouri, R., 2010, arXiv:1010.3971
- [162] Ford, L.H., 1987, *Phys. Rev. D* **35**, 2339.
- [163] Freedman, W.L. *et al.*, 2001, *Astrophys. J. Lett.* **553**, 47.
- [164] Friedmann, A., 1924, *Z. Phys.* **21**, 326.
- [165] Frieman, J.A., Hill, C.T., Stebbins, A. and Waga, I., 1995, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2077.
- [166] Fruchter, A. and ERO team, image credit: NASA.
- [167] Fujii, Y., 1982, *Phys. Rev. D.* **26**, 2580.
- [168] Fujii, Y. and Maeda, K., 2003, *The Scalar- Tensor Theory of Gravitation*, Cambridge University Press.
- [169] Fukugita, M., Hogan, C.J. and Peebles, P.J.E., 1998, *ApJ.*, **503**, 518.
- [170] Fuzfa, A. and Alimi, J.M., 2007, *Phys. Rev. D* **75**, 123007.

- [171] Gamov, G., 1970, *My world line*, Viking, New York.
- [172] Garousi, M.R., 2000, Nucl. Phys. B **584**, 284.
- [173] Garriga, J. and Mukhanov, V.F., 1999, Phys. Lett. B **458**, 219.
- [174] Gasperini, M., Piazza, F. and Veneziano, G., 2002, Phys. Rev. D **65**, 023508.
- [175] Gasperini, M. and Veneziano, 2003, Phys. Rept. **373**, 1.
- [176] Gibbons, G.W., 1985, eds. F. del Aguila, J.A. de Azcarraga, and Ibanez, L.E., World Scientific, 346.
- [177] Giulini, D., 2006, arXiv:gr-qc/0603087.
- [178] Green, M., Schwarz, J.H. and Witten, E., 1987, *Superstring Theory*, Cambridge University Press.
- [179] Gu, P., Wang, X. and Zhang, X., 2003, Phys. Rev D **68**, 087301.
- [180] Guo, Z.K., Ohta, N. and Tsujikawa, S., 2007, Phys. Rev. D **76**, 023508.
- [181] Guo, Z.K. and Ohta, N., 2008, JCAP, 0804, 035.
- [182] Gunn, J.E. and Gott, A.M., 1972, Astrophys. J. **176**, 1.
- [183] Guth, A., 1981, Phys. Rev. D, **23**, 2.
- [184] Habibi, F., Moniez, M., Ansari, R. and Rahvar, S., 2011, Astron. and Astrophys. **525**, A108.
- [185] Hamilton, A.J.S., Kumar, P., Lu, E. and Matthews, A., 1991, ApJ. Lett., **374**, L1.
- [186] Hamuy, M. *et al.*, 1996, Astron.J. **112**, 2391.
- [187] Hanany, S., Ade, P., Balbi, A. *et al.*, 2000, ApJ **545**, L5.
- [188] Hansen, B.M.S. *et al.*, 2002, Astrophys. J. **574**, L155.
- [189] Hasinger, G., Schartel, N. and Komossa, S., 2002, Astrophys. J. Lett. **573**, L77.
- [190] Hawking, S.W. and Ellis, G.F.R., 1973, *The large Scale Structure of Space Time*, Cambridge University Press.
- [191] Hawkins, E. *et al.*, 2003, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **346**, 78.
- [192] Hebecker, A. and Wetterich, C., 2000, Phys. Rev. Lett. **85**, 3339.
- [193] Hehl, F.W. and Kerling, G.D., 1978, Gen. Rel. Grav. **9**, 691.
- [194] Hirata, C.M. and Seljak, U., 2005, Phys. Rev. D **72**, 083501.
- [195] Hobbs, G.B. *et al.*, 2009, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **394**, 1945.
- [196] Hobbs, G.B., *et al.*, 2009, PASA, **26**, 103.

- [197] Hobbs, G.B., 2010, arXiv: 1006.3969.
- [198] Hobson, M.P. *et al.*, 2010, *Bayesian Methods in Cosmology*, Cambridge University Press.
- [199] Holanda, R.F.L., Lima, J.A.S. and Riberio, M.B., 2011, **528**, L14.
- [200] Hoyle, C.D. *et al.*, 2004, Phys. Rev. D **70**, 042004.
- [201] Hu, W., Cosmology Lecture Notes: <http://background.uchicago.edu/~whu/>
- [202] Hu, W. and Sugiyama, N., 1995, Astrophys. J. **444**, 489.
- [203] Hu, W. and Sugiyama, N., 1996, Astrophys. J. **471**, 542.
- [204] Hu, W., Sugiyama, N. and Silk, J., 1997, Nature **386**, 37.
- [205] Hu, W., 1998, Astrophys. J. **506**, 485.
- [206] Hu, W., Fukugita, K., Zaldarriaga, M. and Tegmark M., 2001, Astrophys. J. **549**, 699.
- [207] Hu, W. and Sawicki, I., 2007, Phys. Rev. D, **76**, 064004.
- [208] Hu, W. and Sawicki, I., 2007, Phys. Rev. D, **76**, 104043.
- [209] Hubble, E., 1929, Proc. Nat. Acad. Sci. **15**, 168.
- [210] Hui, L., Nicolis, A. and Stubbs, C., 2009, Phys. Rev. D **80**, 104002.
- [211] Hulse, R.A. and Taylor, J.H., 1975, Astrophys. J., **195**, L51.
- [212] Hung, P.Q., 2000, arXiv:hep-ph/0010126.
- [213] Huterer, D. and Turner, M.S., 1999, Phys. Rev. D **60**, 081301.
- [214] Hwang, J.C., Noh, H. and Puetzfeld, D., 2008, JCAP **0803**, 010.
- [215] Ichikawa, K. and Takahashi, T., 2007, JCAP, **0702**, 001.
- [216] Iguchi, H., Nakamura, T. and Nakao, K.i., 2002, Prog. Theor. Phys. **108**, 809.
- [217] Iocco, F. *et al.*, 2009, Phys. Rept. **472**, 1.
- [218] Islam, J.N., 1992, *An Introduction to Mathematical Cosmology*, Cambridge University Press.
- [219] Jaffe, A.H. *et al.*, [Boomerang Collaboration], 2001, Phys. Rev. Lett. **86**, 3475.
- [220] Jain, B. and Khoury, J., 2010, Review for Annals of Physics. arXiv:1004.3294.
- [221] Jain, B., Nicolis, A. and Stubbs, 2011, arXiv:1104.0415.
- [222] Jain, B., 2011, arXiv:1104.0415.
- [223] Jain, B. and Plas J.V., 2011, arXiv:1106.0065.

- [224] Jarosik, N., *et al.*, 2010, Astrophysical Journal Supplement Series, arXiv: <http://arxiv.org/abs/1001.4744v1>.
- [225] Jassal, H.K., Bagla, J.S. and Padmanabhan, T., 2005, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **356**, L11.
- [226] Jenet, F.A., Hobbs, G.B., Lee, K.J. and Manchester, R.N., 2005, Astrophys. J. **625**, 123.
- [227] Jenet, F.A., *et al.*, 2006, ApJ. **653**, 1571.
- [228] Jungman, G., Kamionkowski, M. and Griest, K., 1996, Phys. Rept. **267**, 195.
- [229] Jungman, G., Kamionkowski, M., Kosowsky, A. and Spergel, D.N., 1996, Phys. Rev. Lett. **76**, 1007.
- [230] Jungman, G., Kamionkowski, M., Kosowsky, A. and Spergel, D.N., 1996, Phys. Rev. D **54**, 1332.
- [231] Kachru, S., Kallosh, R., Linde, A. and Trivedi, S.P., 2003, Phys. Rev. D **68**, 046005.
- [232] Kaiser, N., 1987, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **277**, 1.
- [233] Kaiser, N., 1992, Astrophys. J. **388**, 272.
- [234] Kallosh, R., Kratochvil, J., Linde, A., Linder, E.V. and Shmakova, M., 2003, JCAP, **310**, 015.
- [235] Kamenshchik, A.Y., Moschella, U. and Pasquier, V., 2001, Phys. Lett. B **511**, 265.
- [236] Kamionkowski, M., 2007, arXiv:0706.2986[astro-ph].
- [237] Khoury, J. and Weltman, A., 2004, Phys. Rev. Lett. **93**, 171104.
- [238] Khoury, J. and Weltman, A., 2004, Phys. Rev. D **69**, 044026.
- [239] Kobayashi, S. and Nomizu, K., 1963, *Foundation of Differential Geomeetry*, V.1, Wiley.
- [240] Kodama, H. and Sasaki, M., 1984, Prog. Theor. Phys. Suppl. **78**, 1.
- [241] Koivisto, T., 2006, Class. Quant. Grav. **23**, 4289.
- [242] Koivisto, T. and Suonio, H.K., 2006, Class. Quant. Grav. **23**, 2355 .
- [243] Koivisto, K., 2006, Phys. Rev. D, **73**, 083517.
- [244] Koivisto, T. and Mota, D.F., 2008, JCAP **06**, 018.
- [245] Kolb, E. and Turner, M., 1990, *The Early Universe*, Addison Wesley, Redwood city, CA.
- [246] Kolb, E.W., Matarrese, S., Notari, A. and Riotto, A., 2005, Phys. Rev. D **71**, 023524.
- [247] Komatsu, E. *et al.*, 2009, [WMAP collaboration] Astrophys. J. Suppl. **180**, 330.

- [248] Komatsu, E. *et al.*, 2011, [WMAP collaboration] *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 18.
- [249] Kowalski, M. *et al.*, 2008, *Astrophys. J.* **686**, 749.
- [250] Koyama, K. and Maartens, R., 2006, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **01**, 016.
- [251] Kunz, M. and Sapone, D., 2007, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 121301.
- [252] Kutner, M.L., 2003, *Astronomy, A Physical Perspective*, Cambridge University Press.
- [253] Landau, L.D. and Lifshitz, E.M., 1959, *Fluid Mechanics*, Pergamon Press, Oxford.
- [254] Landau, L.D. and Lifshitz, E.M., 1975, *The Classical Theory of Fields*, Pergamon Press, Oxford.
- [255] Lapparent, V.de, Geller, M. and Huchra, J., 1986, *Ap. J. Lett.* **302**, L1.
- [256] Lazkoz, R., Nesseris, S. and Perivolaropoulos, L., 2005, *JCAP*, **0511**, 010.
- [257] Lemaitre, G., 1927, *Ann. Soc. Sci. Bruxelles, Ser. 1*, **47**, 49.
- [258] Lense, J. and Thirring, H., 1918, *Physik Zeitschr*, **19**, 156.
- [259] Li, B. and Chu, M.C., 2006, *Phys. Rev. D* **74**, 104010.
- [260] Li, Z., Wu, P., Yu, H., 2011, *ApJ.*, **729**, L14.
- [261] Liddle, A.R. and Lyth, D.H., 2000 *Cosmological Inflation and Large Scale Structure*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [262] Liddle, A., 2003, *An Introduction to Modern Cosmology*, Wiley.
- [263] Lidsey, J.E., Wands, D. and Copeland, E.J., 2000, *Phys. Rept.* **337**, 343.
- [264] Lifshitz, E.M., 1946, *J. Phys. (Moscow)*, **10**, 116.
- [265] Linde, A.D., 1983, *Phys. Lett. B* **129**, 177.
- [266] Linde, A.D., 1983, *The very Early Universe*, eds. Gibbons, G.W., Hawking, S.W. and Siklos, S., Cambridge University Press, 205.
- [267] Linde, A.D., 1987, *Inflation and Quantum Cosmology*, In 100 years of Gravitation, eds. Hawking, S.W., Israel, W., Cambridge University Press, 604.
- [268] Linder, E.V., 2003, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 091301.
- [269] Linder, E.V., 2006, *Phys. Rev. D* **73**, 063010.
- [270] Lineweaver, C.H., Tenorio, L., Smoot G.F., *et al.*, 1996, *ApJ*, **470**, 38.
- [271] Lyth, D.H. and Woszczyna, A., 1995, *Phys. Rev. D* **52**, 3338.
- [272] Maeda, K.i., 1989, *Phys. Rev. D* **39**, 3159.
- [273] Maldacena, J. and Nunez, C., 2001, *Int. J. Mod. Phys. A* **16**, 822.

- [274] Malquarti, M. and Liddle, A.R., 2002, Phys. Rev. D **66**, 123506.
- [275] Maltingly, D., 2005, Living Rev. Relativity, **8**, 5..
- [276] Manchester, R.N., 2010, arXiv:1004.3602.
- [277] Maor, I., Brustein, R., McMahon, J. and Steinhardt, 2002, Phys. Rev. D **65**, 123003.
- [278] Matsakis, D.N., Taylor J.H. and Eubanks, T.M., 1997, A.A. **326**, 924.
- [279] Miranda V., Joras, S.E., Waga, I. and Quartin, M. (2009), Phys. Rev. Lett. **102**, 221101.
- [280] Mo, H., Bosch, F.V. and White S., 2010 *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [281] Movahed, M.S. and Rahvar, S., 2006, Phys. Rev. D **73**, 083518.
- [282] Movahed, M.S., Baghran, Sh. and Rahvar, S. , 2007, Phys. Rev. D **76**, 044008.
- [283] Mukhanov V.F., Feldman H.A. and Brandenberger, R.H., 1992, Phys. Rept. **215**, 203.
- [284] Mukhanov, V., 2005, *Physical Foundations of Cosmology*, Cambridge University Press.
- [285] Muller V., Schmidt H. J. and Starobinsky, A.A. , Phys. Lett. B, **202**, 198.
- [286] Nakamura, T. and Chiba, T., 1999, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **306**, 696.
- [287] Navarro, I. and Acoleyen, K.V., 2007, J. Cosm. Astro. Part., **0702**, 022.
- [288] Nasa-JPL: Image credit to Hurt, R., Caltech.
- [289] Nesseris, S. and Perivolaropoulos, L., 2004, Phys. Rev. D **70**, 043531.
- [290] Nojiri, S. and Odintsov, S.D., 2003, Phys. Rev. D **68**, 123512.
- [291] Nojiri, S. and Odintsov, S.D., 2005, Phys. Rev. D **71**, 123509.
- [292] Nojiri, S. and Odintsov, S.D., 2005, Phys. Rev. D **72**, 023003.
- [293] Norberg, P., Baugh, C.M., Hawkins, E., *et al.*, MNRAS, 332, 827.
- [294] Nordtvedt, K., 1968, Phys. Rev. **169**, 1014.
- [295] Nordtvedt, K., 1968, Phys. Rev. **169**, 1017.
- [296] National Radio Astronomy Observatory (NRAO), image credit.
- [297] Nunez, A. and Solganik, S., 2005, Phys. Lett. B. **608**, 189.
- [298] Official website of Large Synoptic Survey Telescope.
- [299] Official website of European Space Agency: <http://www.esa.int/esaCP/index.html>



- [300] Official website of Isaac Newton Group Telescopes: <http://www.ing.iac.es/>
- [301] Homepage of Martin White: [astro.berkeley.edu/~mwhite/](http://astro.berkeley.edu/~mwhite/)
- [302] Official website of WMAP Team: <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- [303] Okumura, T. *et al.*, 2008, *Astrophys. J.* **677**, 889.
- [304] Olmo, G.J., 2005, *Phys. Rev. D* **72**, 083505.
- [305] Olmo, G.J., 2006, *Phys. Rev. D* **74**, 023529.
- [306] Olmo, G.J. and Singh, P., 2009, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0901**, 030.
- [307] Olmo, G.J., 2011, Review article in: *Int. J. M. Phys. D*, arXiv:1101.3864.
- [308] Ostriker, J.P. and Steinhardt, P.J., 2001, *Sci. Am.* **284**(1), 46.
- [309] Oyaizu, H., 2008, *Phys. Rev. D* **78**, 123523.
- [310] Padmanabhan, T., 1993, *Structure Formation in the Universe*, Cambridge University press.
- [311] Padmanabhan, T., 2006, *AIP Conf. Proc.* **861**, 179.
- [312] Padmanabhan, T., 2008, *Gen. Rel. Grav.* **40**, 529.
- [313] Padmanabhan, T., 2008, arXiv:0807.2356.
- [314] Partridge, R.B., 1995, *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [315] Peacock, J.A. and Dodds, S.J., 1994, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **267**, 1020.
- [316] Peacock, J.A. and Dodds, S.J., 1996, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **280**, L19.
- [317] Peacock, J.A., 1999, *Cosmological Physics*, Cambridge University Press.
- [318] Peebles, P.J.E. and Yu, J.T., 1970, *ApJ* **162**, 815.
- [319] Peebles, P.J.E., 1980, *The Large Scale Structure of Universe*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [320] Peebles, P.J.E., 1981, *ApJ*, **248**, 885.
- [321] Peebles, P.J.E., 1982, *ApJ*, **263**, L1.
- [322] Peebles, P.J.E. and Ratra, B., 2003, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 559.
- [323] Pen, U., 1997, *New Astron. Rev.* **2**, 309.
- [324] Penzias, A.A. and Wilson R.W., 1965, *Astrophys. J.* **142**, 419.
- [325] Percival, W.J. *et al.*, 2007, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **381**, 1053.
- [326] Perlmutter, S., *et al.*, 1999, *Astrophys. J.* **517**, 565.

- [327] Perrotta, F., Baccigalupi, C. and Matarrese S., Phys. Rev. D **61**, 023507.
- [328] Pogosian, L. and Silvestri A., 2008, Phys. Rev. D, **77**, 023503.
- [329] Pound, R.V. and Rebka, G.A., 1960, Phys. Rev. Lett. **4**, 337.
- [330] Profumo, S., Sigurdson, K. and Kamionkowski, M., 2006, Phys. Rev. Lett. **97**, 031301.
- [331] Querella, L., 1999, arXiv:gr-qc/9902044.
- [332] Rahvar, S., 2006, arXiv:phys/0603087.
- [333] Rahvar, S. and Movahed, M.S., 2007, Phys. Rev. D **75**, 023512.
- [334] Rahvar, S. and Sobouti, Y., 2008, Mod. Phys. Lett. A, **23**, 1929.
- [335] Randall, L. and Sundrum, R., 1999, Phys. Rev. Lett. **83**, 3370.
- [336] Randall, L. and Sundrum, R., 1999, Phys. Rev. Lett. **83**, 4690.
- [337] Randall, S.W., Markevitch, M., Clowe, D., Gonzalez, A.H. and Brada M., 2007, arXiv: 0704.0261.
- [338] Rapetti, D., Allen, S.W. and Mantz, 2008, Mon. Not. R. Astron. Soc. **338**, 1265.
- [339] Rasanen, S., 2004, JCAP, **0402**, 003.
- [340] Ratra, B. and Peebles, P.J.E., 1998, Phys. Rev. D **37**, 3406.
- [341] Reyes, R. *et al.*, 2010, Nature **464**, 256.
- [342] Rham, C.de, Dvali, G., Hofmann, S., Khoury, J., Pujolas, O., Redi, M. and Tolley, A.J., 2008, Phys. Rev. Lett. **100**, 251603.
- [343] Rham, C.de, Hofmann, S., Khoury and Tolley, 2008, JCAP, **0802**, 011.
- [344] Richer, H.B. *et al.*, 2002, Astrophys. J. **574**, L151.
- [345] Riess, A., *et al.*, 1998, Astrophys. J. **116**, 1009.
- [346] Riess, A. G., *et al.*, 2004, Astrophys. J., **607**, 655.
- [347] Riess, A.G., *et al.*, 2007, Astrophys. J., **659**, 98.
- [348] Roos, M., 2010, *Dark Matter: The evidence from astronomy, astrophysics and cosmology*, arXiv:1001.0316.
- [349] Rovelli, C., 2000, *Notes for a brief history of quantum gravity*, arXiv:gr-qc/0006061.
- [350] Ryden, B., 2002, *Introduction to Cosmology*, Benjamin Cummings.
- [351] Sachs, R.K. and Wolfe, A.M., 1967, Astrophys. J., **147**, 73.
- [352] Sahni, V., Saiini, T.D., Starobinsky, A.A. and Alam, U., JEPT Lett. **77**, 201.

- [353] Saini, T.D. *et al.*, 2000, Phys. Rev. Lett. **85**, 1162.
- [354] Sami, M. and Toporensky, A., 2004, Mod. Phys. Lett. A **19**, 1509.
- [355] Sandbers, V.D., 1975, Phys. Rev. D **12**, 3013.
- [356] Sandvik, H., Tegmark, M., Zaldarriaga, M. and Waga, I., 2004, Phys. Rev. D **69**, 123524.
- [357] Sasaki, S., 1996, Publ. Astron. Soc. Jpn. **48**, L119.
- [358] Scientific American, Issue. January 2011, image credit.
- [359] Scherrer, R.J., 2004, Phys. Rev. Lett. **93**, 011301.
- [360] Schiff, L.I., 1960, Am. J. Phys. **28**, 340.
- [361] Schimd, C., *et al.*, 2007, Astron. Astrophys. **463**, 405.
- [362] Schmidt, F., 2010, Phys. Rev. D **81**, 103002.
- [363] Schneider, P., 2006, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, Springer.
- [364] Schneider, P., 2006, *Weak Gravitational Lensing, Gravitational Lenses: Strong, Weak, Micro*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- [365] Schutz, B., 2009, *A first Course in General Relativity*, Cambridge University Press.
- [366] Scott, D., 2000, in Courteau S., Willick J., eds., Cosmic flow workshop, vol 201 of ASP, 403.
- [367] Seljal, U. and Zaldarriga, M., 1996, ApJ. **469**, 437.
- [368] Sen, A., 2002, JHEP, **0204**, 048.
- [369] Sesana, A., Vecchio A. and Colacino, C.N., 2008, Mon. Not. Astron. Roy. Soc. **390**, 192.
- [370] Sigurdson, K., Doran, M., Kurylov, A., Caldwell R.R. and Kamionkowski, M., 2004, Phys. Rev. D **70**, 083501.
- [371] Singh, P., Sami, M. and Dadhich, N., 2003, Phys. Rev. D **68**, 023522.
- [372] Sitter, W. de, 1917, Proc. Kon. Ned. Acad. Wet. **19**, 1217.
- [373] Shafieloo, A. *et al.*, 2006, Mon. Not. R. Astron. Soc. **366**, 1081.
- [374] Shandarin, S.F. and Zel'dovic Y.B., 1989, Rev. Mod. Phys. **61**
- [375] Shapiro, I.I., 1964, Phys. Rev. Lett. **13**, 789.
- [376] Sheth, R.K. , & Toemmn, G. 1999, MNRAS, **308**, 119.
- [377] Shiromizu, T., Maeda, K. and Sasaki, M., 2000, Phys. Rev. D **62**, 024012.
- [378] Shoji, M., Jeong, D. and Komatsu, D., 2009, Astrophys. J. **693**, 1404.

- [379] Silverstein, E. and Tong, D., 2004, Phys. Rev. D **70**, 103505.
- [380] Slipher, V.M., 1913, lowell Observatory Bulletin, Vol. 1, pp 56-57.
- [381] Smith, R.E., *et al.*, 2003, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., V. 341, Issue 4, 1311.
- [382] Smiths, R. *et al.*, 2008, arXiv:0811.0211.
- [383] Smoot, G.F. *et al.*, 1992, Astrophys. J. **396**, L1.
- [384] Sohnius, M.F., 1985, Phys. Rept. **128**, 39.
- [385] Song, Y.S., Hu W. and Sawicki, I. 2007, Phys. Rev. D **75**, 044004
- [386] Song, Y.S., Peiris, H. and Hu, W., Phys. Rev. D **76**, 063517.
- [387] Song, Y.S. and Koyama, K., 2009, J. Cosm. Astropart. Phys. **0901**, 048.
- [388] Song, Y.S. *et al.*, 2010, arXiv:1001.0969.
- [389] Sotiriou, T.P., 2006, Classical Quantum Gravity **23**, 1253.
- [390] Sotiriou, T.P. and Liberati, S., 2007, Ann. Phys. **322**, 935.
- [391] Sotiriou, T.P., 2007, Phys. Lett. B **645**, 389.
- [392] Sotiriou, T.P., 2007, Ph.D. thesis: *Modified Actions for Gravity: Theory and Phenomenology*, Trieste.
- [393] Sotiriou, T.P., 2009, Phys. Rev. D, **79**, 044035.
- [394] Sotiriou, T.P., 2009, Class. Quant. Grav. **26**, 152001.
- [395] Soussa, M.E. and Woodard, R. P., 2004, Gen. Rel. Grav. **36**, 855.
- [396] Spergel, D., *et al.*, 2003, Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 175.
- [397] Spinrad, H., 1997, Astrophys. J. **484**, 581.
- [398] Starobinsky, A.A., 1980, Phys. Lett. B, **91**, 99.
- [399] Starobinsky, A.A., 1998, JETP Lett. **68**, 757.
- [400] Starobinsky, A.A., 2007, JETP lett. **86**, 157.
- [401] Steinhardt, P.J., Wang, L.M. and Zlatev, I., 1999, Phys. Rev. D **59**, 123504.
- [402] Steinhardt, P.J. and Turok, N., 2002, Science **296**, N. 5572, 1436.
- [403] Steinhardt, P.J. and Turok, N., 2008, *Endless Universe: Beyond the Big Bang*, Broady Press.
- [404] Stephani, H., 1985, *General Relativity*, Cambridge University Press.
- [405] Strobel, N. 2010, credit for figure, www.astronomynotes.com

- [406] Space Telescope Science Intitute, (STScI), image credit.
- [407] Sugiyama, N., 1995, ApJS, **100**, 281.
- [408] Sunyaev, R.A. and Zeldovich, Y.B., 1980 Ann. Rev. Astron. Astrophys. **18**, 537.
- [409] Sunyaev, R.A. and Zeldovich, Y.B., 1992, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **30**, 311.
- [410] Takahashi, R. and Tanimoto, M., 2006, Phys. Lett. B **633**, 675.
- [411] Tamaki, T. and Tsujikawa, S., 2008, Phys. Rev. D **78**, 084028.
- [412] Tegmark, M., Hamilton, A.J.S. and Xu, Y.Z., 2002, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **335**, 887.
- [413] Tegmark, K.M. *et al.*, [SDSS Collaboration], 2006, Phys. Rev. D **74**, 123507.
- [414] Thong, L.D. *et al.*, 2010, Astrophys. and Space. Sci.
- [415] Tomita, K., 2000, Astrophys. J. **529**, 38.
- [416] Tomita, K., 2001, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **326**, 287.
- [417] Torres, D.F., 2002, Phys. Rev. D **66**, 043522.
- [418] Tremaine, S. and Gunn, J.E., 1979, Phys. Rev. Lett. **42**, 407.
- [419] Trodden, M. and Carroll, S.M., 2004, arXiv:astro-ph/0401547.
- [420] Tsujikawa Sh., Uddin K., Tavakol R., 2008, Phys. Rev. D **77**, 043007.
- [421] Tsujikawa, S., 2008, Phys. Rev. D. **77**, 023507.
- [422] Tsujikawa, S., Gannouji, R., Moraes, B. and Polarski, D., 2009, Phys. Rev. D **80**, 084044.
- [423] Upadhye, A., Ishak, M. and Steinhardt, 2005, Phys. Rev. D **72**, 063501.
- [424] Uzan, J.P., 1999, Phys. Rev. D **59**, 123510.
- [425] Verbiest, J.P.W., *et al.*, 2009 , MNARS, Volume 400, issue 2, 951.
- [426] Verbiest, J.P.W., *et al.*, 2010, Class. and Quant. Grav. **27**(8), 084, 015.
- [427] Verde, L., 2010, *Lecture Notes in Cosmology: Statistical Methodes in Cosmology*, Springer. arXiv:0911.3105.
- [428] Waerbeke, L. van *et al.*, 2000, Astron. Astrophys. **358**, 30.
- [429] Waerbeke, L.V. *et al.*, 2001, Astron. Astrophys. **374**, 757.
- [430] Wald, R.M., 1984, *General Relativity*, University of Chicago Press.
- [431] Wang, Y., 2010, *Dark Energy*, Wiley Press.
- [432] Webb. J.K. *et al.*, 1999, Phys. Rev. Lett. **82**, 884.

- [433] Webb, J.K., *et al.*, 2003, *Astrophys. Space Sci.* **283**, 565.
- [434] Wei, H. and Zhang, S.N., 2007, *Phys. Lett. B* **644**, 7.
- [435] Weinberg, S., 1972, *Gravitation and Cosmology*, Wiley and Sons, New York.
- [436] Weinberg, S., 1987, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2607.
- [437] Weinstein, C.P. and Afshordi, N., 2010, arXiv:1010.5501 .
- [438] Weller, J. and Albrecht, A.J., 2002, *Phys. Rev. D* **65**, 103512.
- [439] Wetterich, C., 1988, *Nucl. Phys. B* **302**, 668.
- [440] Wetterich, C., 1995, *Astron. Astrophys.* **301**, 321.
- [441] White, S.D.M., Navarro, J.F., Evrard, A.E. and Frenk, C.S., 1993, *Nature* **366**, 429.
- [442] White, S.D.M. *et al.*, 1996, Schaeffer, Elsevier, Amsterdam, 349.
- [443] Will, C.M., 1971, *Astrophys. J.* **163**, 611.
- [444] Will, C.M. and Nordtvedt, K., 1972, *Astrophys. J.* **177**, 757.
- [445] Will, C.M., 1973, *Astrophys. J.*, 185, 31.
- [446] Will, C.M., 1993, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, 2nd edition, Basic Books/Perseus Group, New York; 2001, *living Rev. Relativ.* **4**,4.
- [447] Will, C.M., 2006, *Living Rev. Relativity*, **9**, 3.
- [448] Wolschin, G.,(Editor) 2010, *Lectures On Cosmology, Accelerated Expansion of Universe*, Springer.
- [449] Wood-Vassey, W.M. *et al.*, 2007, *Astrophys. J.* **666**, 694.
- [450] Zanelli, J., 2005, arXiv:hep-th/0502193.
- [451] Zel'dovich, Y.B., 1967, *JETP letters*, **6**, 316 (1967).
- [452] Zeldovich, Y.B., 1968, *Soviet Physics Uspekhi*, **11**, 381.
- [453] Zel'dovic, Y.B. 1970, *Astr. & Astrophys.* , **5**, 84.
- [454] Zhang, X. and Wu, F.Q., *Phys. Rev. D* **72**, 043524.
- [455] Zhang, P., 2006, *Phys. Rev. D* **73**, 123504.
- [456] Zhao, G.B., Xia, J.Q., Feng, B. and Zhang, X., 2007, *Int. J. Mod. Phys. D* **16**, 1229.
- [457] Zhao, G.B., Pogosian, L., Silvestri, A. and Zylberbeg, J., 2009, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 241301.
- [458] Zhao, G.B., Li, B. and Koyama, K., 2011, *Phys. Rev. D* **83**, 044007.
- [459] Zimdahl, W., Pavon, D. and Chimento, P., 2001, *Phys. Lett. B*, **521**, 133.

- [460] Zlatev, I., Wang, L.M. and Steinhardt, P.J., 1999, Phys. Rev. Lett., **82**, 896.
- [461] Zumino, B., 1975, Nucl. Phys. **89**, 535.
- [462] Zwicky, F., 1933, Helv. Phys. Acta., 1933 **6**, 110.
- [463] Zwicky, F., 1937, Phys. Rev. **51**, 290.