



پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش ذرات بنیادی

عنوان

مطالعه مکانیزم کروتون در تورم کیهانی و تولید اختلالات غیر گاوسی

استاد راهنمای اول

دکتر محمدرضا گروسی

استاد راهنمای دوم

دکتر حسن فیروزجاهی

دانشجو

حسین بذرافشان مقدم

مرداد ۱۳۹۰

چکیده

مدل استاندارد کیهان شناسی، یکی از ساده ترین و موفق ترین مدل‌های فیزیک می باشد که توصیفی قابل قبول از تاریخ تحول جهان در اختیار می گذارد. علی رغم این موفقیت ها، سوالاتی وجود دارد که این مدل از پاسخ به آنها عاجز است. این سوالات به مسائل شرایط اولیه^۱ معروف هستند. پارادایم تورم کیهانی^۲ علاوه بر حل این مشکلات، مکانیزمی موفق برای تبدیل افت و خیزهای کوانتومی میدان های نخستین به اختلالات کیهانی که هسته اولیه شکل گیری ساختارها در عالم هستند، فراهم می کند. ما مکانیزم کروتون^۳ در تورم کیهانی را معرفی کرده و به مطالعه وجوه مختلف آن، مانند تولید اختلالات آدیاباتیکی و آنتروپی و نیز اختلالات غیر گاوسی می پردازیم. نهایتاً با تعبیه این مکانیزم در ابر گرانش^۴، مشاهده خواهیم کرد که مکانیزم قابل انعطافی حاصل خواهد شد که می تواند در تفسیر داده های رصدی آینده از اهمیت فوق العاده ای برخوردار باشد.

کلید واژها

مدل استاندارد کیهان شناسی^۵، تورم کیهانی، نظریه اختلالات کیهان شناسی^۶، اختلالات غیر گاوسی^۷، طیف توان^۸، کروتون، نظریه میدان های کوانتومی^۹، جهان اولیه^{۱۰}

¹ Initial condition problems

² Cosmic inflation

³ Curvaton

⁴ Supergravity

⁵ Standard model of cosmology

⁶ Cosmological perturbation theory

⁷ Non-Gaussian perturbations

⁸ Power spectrum

⁹ Quantum field theory

¹⁰ Early universe

به نام او که هستی از او هست یافت.

فهرست مطالب

۱	مدل استاندارد کیهان شناسی	۱
۱	..... متریک فضا- زمان	۱.۱
۳	..... افق ذره	۱.۲
۴	..... معادلات حرکت	۱.۳
۶	..... تستهای مدل استاندارد کیهان شناسی	۱.۴
۹	..... تاریخچه گرمایی عالم	۱.۵
۱۳	..... مشکلات شرایط اولیه	۱.۶
۱۵	..... مراجع	
۱۷	تورم کیهانی	۲
۱۷	..... ایده اصلی	۲.۱
۱۸	..... حل مشکلات مدل استاندارد	۲.۲
۲۰	..... شرایط تورم	۲.۳
۲۳	..... فیزیک دوره تورم	۲.۴
۲۵	..... تورم غلطش آهسته	۲.۵
۲۹	..... مطالعه یک مورد خاص	۲.۶
۳۱	..... بازگرمایش	۲.۷
۳۱	..... مدل های تورمی	۲.۸
۳۸	..... مراجع	
۳۹	نظریه اختلالات کیهان شناسی	۳
۴۰	..... بیان نظریه	۳.۱
۴۰	..... اختلالات و آزادی پیمانہ ای	۳.۲
۴۲	..... تبدیلات پیمانہ ای و متغییر های پیمانہ - ناوردا	۳.۳
۴۹	..... معادلات حرکت	۳.۴
۵۴	..... جنبه های آماری اختلالات کیهان شناسی	۳.۵
۵۵	..... محاسبه طیف توان برای اختلالات اسکالر	۳.۶
۶۱	..... تورم با چند میدان اسکالر	۳.۷

۷۰	.....	اختلالات غیر گاوسی.....	۳.۸
۷۲	.....	فرمالیزم δV برای محاسبه تحول اختلالات کیهان شناسی	۳.۹
۷۶	.....	مراجع.....	
۷۸		مکانیزم کروتون در تورم کیهانی	۴
۷۹	.....	اختلال انحنای.....	۴.۱
۸۷	.....	غیر گاوسی بودن اختلالات در مکانیزم کروتون	۴.۲
۸۹	.....	اختلال ایزو انحنای در مکانیزم کروتون	۴.۳
۹۰	.....	تجزیه و تحلیل داده های مشاهداتی	۴.۴
۹۲	.....	ابر کروتون.....	۴.۵
۱۰۱	.....	مراجع.....	
۱۰۳	.....	نتیجه گیری.....	

فصل اول

مدل استاندارد کیهان شناسی

۱.۱ متریک فضا-زمان

مدل استاندارد کیهان شناسی بر دو پایه استوار است: اول نسبیت عام اینشتین و دوم اصل کیهان شناسی.

اصل کیهان شناسی بیان می کند که قسمت های فضایی عالم در مقیاس های بزرگ (بزرگتر از ۱۰۰ مگاپارسک) همگن و همسانگرد است و با زمان متحول می شود. این فرض را می توان در نسبیت عام به این صورت فرموله کرد که فضا را با برش های فضا-گونه ای پارامتریزه کنیم که هر برش سه بعدی "حداکثرمتقارن"^۱ باشد. بنابراین متریک فضا-زمان بصورت زیر خواهد بود:

(1)

که t متغییر زمان-گونه است و $a(t)$ تابع بدون بعدی از زمان است که به "ضریب مقیاس"^۲ مشهور است. همچنین $d\sigma^2$ متریک روی سطوح فضایی ست که بصورت زیر تعریف می شود:

$$d\sigma^2 = \gamma_{ij} dx^i dx^j$$

که x^i ها مختصات روی سطوح فضایی هستند و γ_{ij} متریک حداکثرمتقارن سه بعدی ست. ضریب مقیاس به ما می گوید که بزرگی برش های فضا-گونه در هر لحظه t چقدر است.

¹Maximally symmetric

²Scale factor

لازم به ذکر است که در تعریف متریک (۱) مختصات خاصی بکارگرفته شده است که در آن اولاً ضریب dt^2 مستقل از x است و ثانیاً جملاتی مثل $dt dx^i$ حضور ندارند. این مختصات خاص به مختصات "هم-حرکت"^۳ معروف است و ناظری که در x^i ثابت قرار دارد ناظر هم-حرکت است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که ناظر هم-حرکت تنها ناظری است که تقارن های فضا را بطور کامل می بیند.

می توان نشان داد [4] که

$$(2) \quad d\sigma^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2$$

که r مختصه شعاعی و $k = \pm 1, 0$ است. اگر $k = 0$ همانطور که از (۲) دیده می شود $d\sigma^2$ متریک قسمت فضایی فضا-زمان مینکوسکی است و لذا $k = 0$ متناظر با جهان تخت است.

$k = -1$ متناظر با انحنای ثابت منفی سطوح فضایی است و به "جهان باز"^۴ معروف است و $k = +1$ هم که متناظر با انحنای ثابت مثبت سطوح فضایی است به "جهان بسته"^۵ معروف است.

بنابراین متریک فضا-زمانی که این ابرسطوح حداکثر متقارن و متحول شونده با زمان توصیف می کنند را می توان بصورت زیر نوشت :

$$(3) \quad ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right]$$

که به متریک FRW^۶ مشهور است.

برحسب زمان همدیس τ^v ، $d\tau = \frac{dt}{a(t)}$ ، داریم :

که اگر $k = 0$ باشد خواهیم داشت

³ Comoving coordinates

⁴ Open universe

⁵ Closed universe

⁶ Friedmann-Robertson-Walker

⁷ Conformal time

جالب اینکه قسمت داخل پراتنز همان متریک مینکوسکی ست. بنابراین متریک FRW تخت همدیس به متریک مینکوسکی ست و عنصر طول در آن برابر است با حاصلضرب عنصر طول مینکوسکی و ضریب همدیس.

۱.۲ افق ذره

اکنون که صحبت از زمان همدیس به میان آمده، مناسب است که در مورد افق ذره که ارتباط مستقیم با زمان همدیس دارد هم سخنی بگوییم.

یکی از سوال های بنیادی در کیهان شناسی اینست که چه کسری از عالم در ارتباط علی هستند یا به عبارت دقیقتر برای ناظر هم- حرکت $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$ برای چه مقادیری از (r, θ, φ) یک سیگنال نوری که در $t=0$ ارسال شده در زمان t (و یا قبل از آن) به این ناظر می رسد؟ با در اختیار داشتن متریک FRW می توان به این سوال پاسخ داد.

برای سادگی r_0 (محل دریافت سیگنال) را صفر می گیریم، برای سیگنال نوری $ds^2 = 0$ است و فرض می کنیم نور در مسیر شعاعی به سمت ناظر حرکت کند یعنی $d\theta = d\varphi = 0$ ، بنابراین :

$$ds^2 = 0 \rightarrow dt^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} a(t)^2$$

$$\rightarrow \int_0^t \frac{dt'}{a(t')} = \int_0^{r_H} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}$$

که r_H شعاع افق یا عبارتی دورترین محلی ست که نور ارسالی در $t=0$ در زمان t به ناظر هم-حرکت می رسد و لذا طول ویژه تا افق که در زمان t اندازه گرفته می شود عبارتست از :

$$(4) \quad d_H(t) = \int_0^{r_H} \sqrt{g_{rr}} dr = a(t) \int_0^{r_H} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}} = a(t) \int_0^t \frac{dt'}{a(t')}$$

که اگر d_H را برحسب زمان همدیس محاسبه کنیم ، داریم :

$$ds^2 = 0 \rightarrow d\tau^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} \rightarrow \tau(t) - \tau(0) = \int_0^{r_H} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}$$

$$(5) \quad \rightarrow d_H(t) = \int_0^{r_H} \sqrt{g_{rr}} dr = a(t)(\tau(t) - \tau(0))$$

مشاهده می شود که افق ذره به صورت خطی با تفاضل زمان همدیس در موقع دریافت و ارسال متناسب است و این هم موید اهمیت زمان همدیس می باشد.

۱.۳ معادلات حرکت

با در اختیار داشتن متریک FRW و استفاده از معادلات اینشتین می توانیم به دینامیک حاکم بر فضا-زمان پی ببریم. در ادامه ابتدا کمیت های انحنای یافته و سپس به سراغ معادلات اینشتین می رویم.

نماد های کریستوفل از رابطه

$$(5) \quad \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\alpha\lambda} (g_{\mu\alpha, \nu} + g_{\alpha\nu, \mu} - g_{\mu\nu, \alpha})$$

بدست می آیند و نماد های غیر صفر عبارتند از: (پارامتر هابل عبارتست از $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$)

$$\Gamma_{11}^0 = \frac{a^2 H}{1-kr^2} \quad \Gamma_{22}^0 = a^2 H r^2 \quad \Gamma_{33}^0 = a^2 H r^2 \sin^2(\theta)$$

$$\Gamma_{01}^1 = \Gamma_{02}^2 \quad \Gamma_{03}^3 = H \quad \Gamma_{11}^1 = \frac{kr}{1-kr^2}$$

$$(6) \quad \Gamma_{22}^1 = -r(1-kr^2) \quad \Gamma_{33}^1 = -r(1-kr^2)\sin^2(\theta)$$

$$\Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r} \quad \Gamma_{13}^3 = \frac{1}{r} \quad \Gamma_{33}^2 = -\sin(\theta)\cos(\theta)$$

$$\Gamma_{32}^3 = \cot(\theta)$$

با استفاده از این نمادها می توان تانسور ریچی^۸ را بدست آورد که مولفه های غیر صفرش عبارتست از:

$$R_{00} = -3 \frac{\ddot{a}}{a}$$

$$R_{11} = \frac{a\ddot{a} + 2a^2 H^2 + 2k}{1-kr^2}$$

(7)

$$R_{22} = r^2(a\ddot{a} + 2a^2 H^2 + 2k)$$

$$R_{33} = r^2(a\ddot{a} + 2a^2 H^2 + 2k)\sin^2(\theta)$$

⁸Ricci tensor

و نهایتاً از ادغام اندیس های تانسور ریچی ، می توانیم اسکار ریچی⁹ را بصورت زیر بدست بیاوریم :

$$(8) \quad R = 6\left[\frac{\ddot{a}}{a} + H^2 + \frac{k}{a^2}\right]$$

معادله اینشتین عبارتست از :

$$(9) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

که G ثابت نیوتون و $T_{\mu\nu}$ هم تانسور انرژی-مومنتوم¹⁰ است. با قرار دادن کمیت های انحنای در این معادله می توانیم معادلات حرکت را بدست آوریم. اگر مولفه 0-0 معادله اینشتین را در نظر بگیریم به معادله مهم زیر می رسیم :

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

که به معادله فریدمن مشهور است.

می توان کمیت پارامتر هابل را بصورت $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$ تعریف کرد که در این صورت معادله فریدمن بصورت زیر خواهد بود

$$(10) \quad H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}$$

همچنین بقای انرژی مومنتوم ($\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$) معادله زیر را بدست می دهد

$$(11) \quad \dot{\rho} = -3H(\rho + p)$$

که نقطه، مشتق نسبت به زمان فیزیکی t است و p فشار سیال می باشد.

همچنین تفاضل مؤلفه $i-i$ و $0-0$ هم منجر به یک رابطه برای شتاب انبساط عالم بصورت زیر خواهد شد

$$(12) \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

که سه معادله ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در تحلیل تحول عالم فوق العاده مهم می باشند. ذکر یک نکته در مورد معادله ۱۲ حائز اهمیت است که در نسبیت عام مفهوم "شرط انرژی قوی"¹¹ تعریف شده است که می گوید:

$$\rho + 3p > 0$$

⁹Ricci scalar

¹⁰Energy-Momentum tensor

¹¹Strong Energy condition

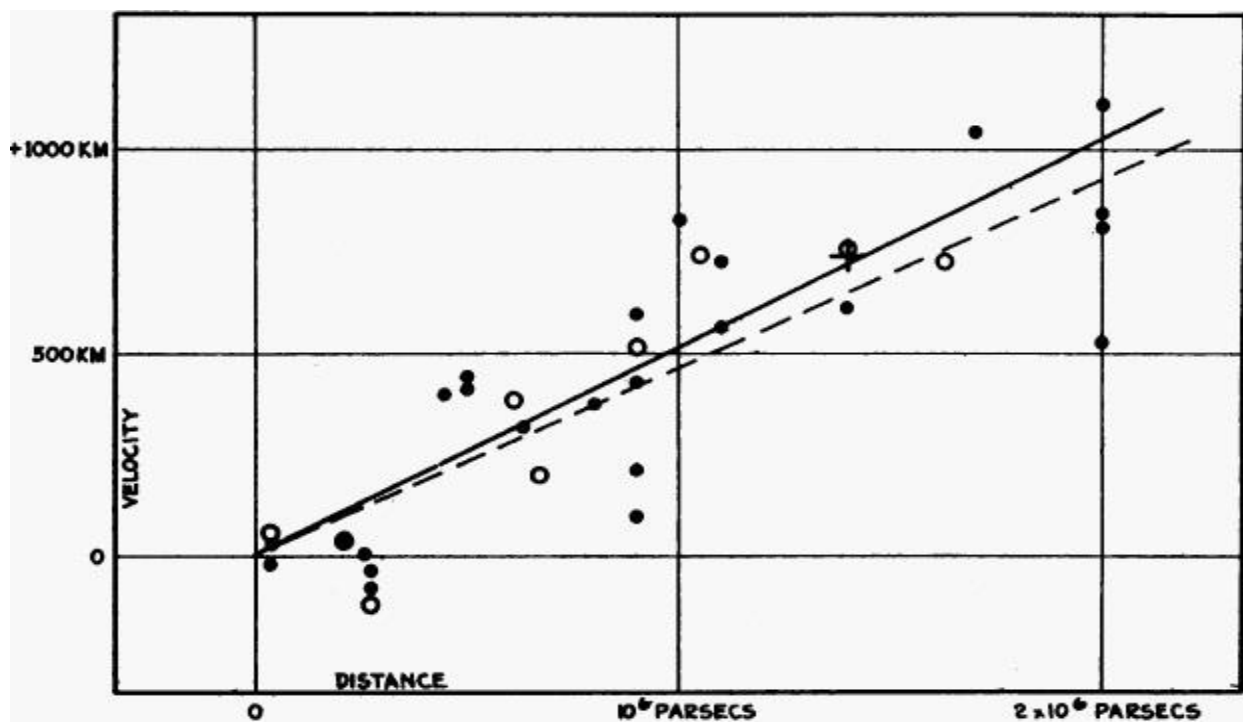
تقریباً تمام مواد معمولی که با آنها سرو کار داریم در این شرط صدق میکنند، بنابراین با فرض شرط انرژی قوی طرف دوم معادله ۱۲ همواره منفی ست و لذا مدل استاندارد کیهان شناسی که در آن شرط انرژی قوی برقرار است متناظر با جهانی که با شتاب منفی منبسط می شود .

۱.۴ آزمون های مدل استاندارد کیهان شناسی

در این بخش به بیان سه آزمون فیزیکی که مؤید مدل استاندارد کیهان شناسی ست می پردازیم :

الف) نمودار هابل و انبساط عالم (۱۹۲۹)

چند سال بعد از ارائه متریک FRW فیزیکدان امریکایی ادوین هابل^{۱۲} مشاهده کرد که عموماً کهنکشانها در حال دور شدن از ما هستند، که این مشاهده می توانست مهر تاییدی بر صحت مدل استاندارد کیهان شناسی باشد .



شکل ۱. نمودار هابل نشان دهنده انبساط همگن عالم است. [6]

¹² Edwin Hubble

ادوین هابل مشاهده کرد که سرعتی که کهکشانها از ما دور می شوند به فاصله آنها از ما بستگی دارد. هابل نتایج مشاهدات خود را تحت عنوان قانون هابل بصورت زیر ارائه کرد

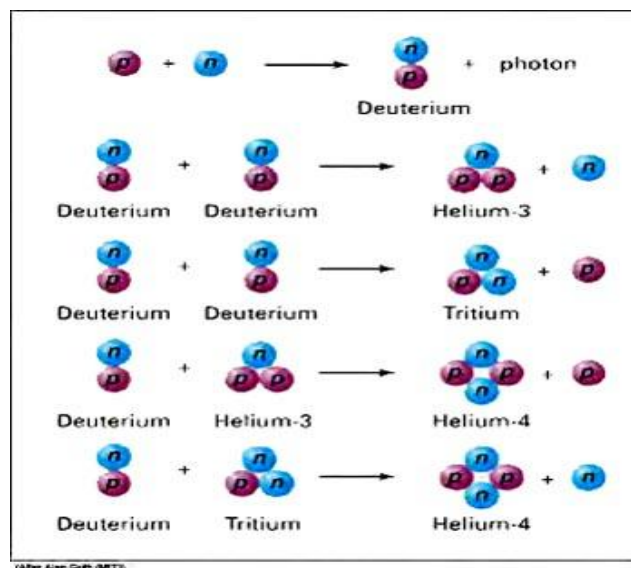
$$v = H_0 D$$

که در آن v سرعت دور شدن کهکشان، H_0 ثابت هابل (یا عبارتی مقدار پارامتر هابل در زمان حال) و D فاصله کهکشان مورد نظر تا ناظر است.

همانطور که از قانون هابل دیده می شود، این سرعت دور شدن به جهت بستگی ندارد و لذا در تمام جهت ها یکسان اتفاق می افتد و به عبارت دقیق تر قانون هابل بیان کننده انبساط همگن عالم است، یعنی همان چیزی که مدل استاندارد پیش بینی می کند.

ب) هسته زایی در جهان اولیه¹³ (BBN)

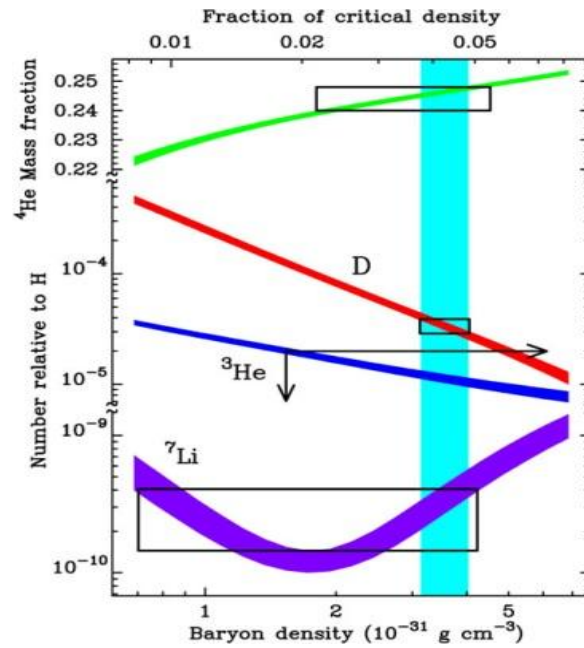
عبارت "هسته زایی" به تشکیل عناصر سنگینتر (هسته های اتمی با چندین نوترون و پروتون) از هم جوشی عناصر سبکتر بر می گردد. مدل استاندارد کیهان شناسی پیش بینی می کند که جهان اولیه مکان بسیار داغی بوده است. یک ثانیه بعد از مهپانگ دمای عالم حدود $10^{10} K$ بوده و جهان مملو از فوتون، نوترون، نوترینو، الکترون، پوزیترون، نوترون و پروتون بوده است همچنان که جهان سرد می شده نوترون ها، یا به پروتون و الکترون واپاشی کرده اند یا با پروتون های موجود ترکیب شده اند و ایزوتوپ سنگین تر هیدروژن یعنی دوتریوم را ساخته اند. در طی سه دقیقه اول عالم اکثر دوتریم ها با هم ترکیب شده اند و ایزوتوپ های مختلف هلیوم را ساخته اند. به همین صورت می توانیم تولید لیتیوم را هم بررسی کنیم.



شکل ۲. تشکیل عناصر سبک از ایزوتوپ های هیدروژن [7]

¹³ Big Bang Nucleosynthesis

فراوانی پیش بینی شده دوتریوم، هلیوم و لیتیوم به چگالی مواد معمولی (مواد باریونی) در جهان اولیه بستگی دارد.



شکل ۳. چگالی تعداد عناصر موجود در جهان اولیه بر حسب چگالی باریون ها [8]

این نتایج نشان می دهد که تولید هلیوم از یک حد آستانه به بالا به فراوانی مواد معمولی حساسیت ندارد.

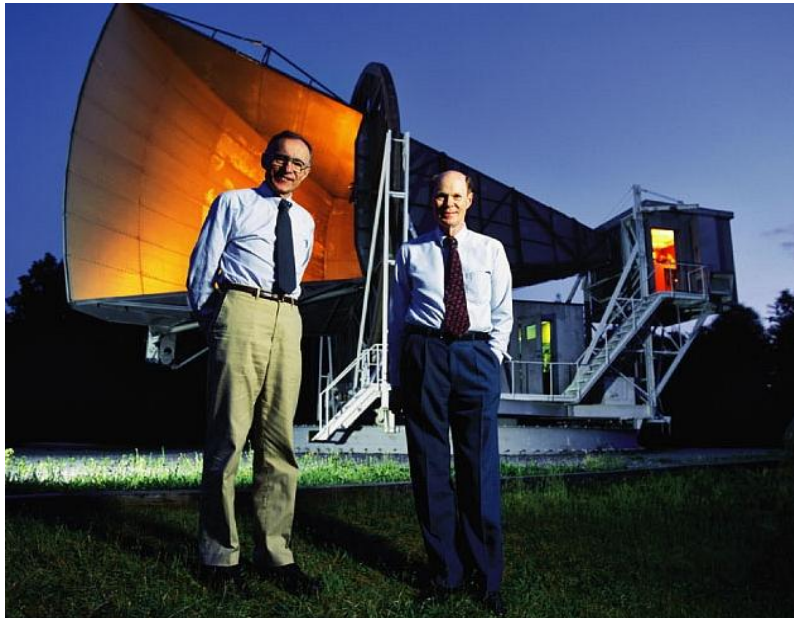
بطور عمومی انتظار داریم که ۲۴٪ مواد معمولی جهان، هلیوم که در مهبانگ تولید شده، باشد که این موضوع توافق خوبی با مشاهدات دارد و لذا مؤید مدل استاندارد کیهان شناسی است.

ج) تابش زمینه کیهانی CMB^{۱۴}

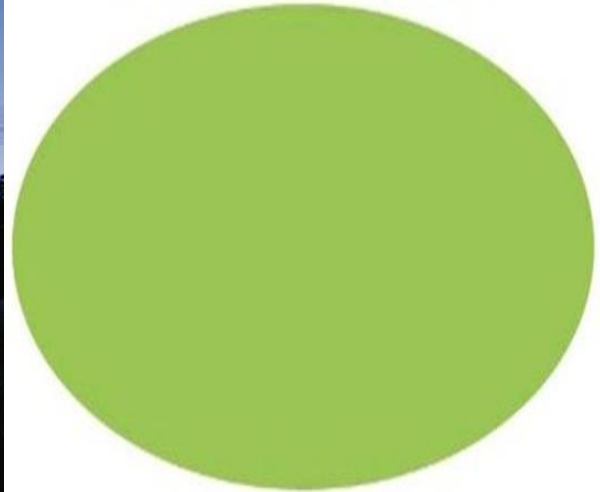
مدل استاندارد کیهان شناسی پیش بینی می کند ، زمانی که جهان به اندازه کافی سرد شود، شرایط برای ترکیب یون های آزاد و تشکیل اتمهای خنثی مهیا می شود. اتمهای خنثی دیگر قادر به جذب تابش گرمایی نیستند و لذا فوتون های موجود در آن زمان از سطح اتمها پراکنده می شوند و در تمام جهات منتشر می شوند. همچنان که جهان منبسط می شود و دمای آن کاهش می یابد، این فوتون ها انرژی خود را از دست می دهند و سرد می شوند. در حال حاضر این تابش گرمایی، دمایی حدود ۲.۷ K دارد.

¹⁴Cosmic Microwave Background

این پیش بینی CMB اولین بار توسط ر.الفر، ر.هرمان، ج.گاموف بعنوان بخشی از کارشان روی BBN مطرح شد اما اولین بار آ.پنزیاس و ر.ویلسون در سال ۱۹۶۴ این تابش گرمایی همگن زمین را کشف کردند و به خاطر این کشف در سال ۱۹۷۸ جایزه نوبل فیزیک را دریافت کردند.



ISOTROPY OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND



شکل ۴. نتیجه اندازه گیری های اولیه تابش زمینه کیهانی که بیانگر همگنی این تابش بود [9]

۱.۵ تاریخچه گرمایی عالم

در مدل استاندارد کل عالم به مثابه سیال در حال جریانی در نظر گرفته می شود و انواع مختلف ماده زمانیکه از تعادل گرمایی با این سیال خارج شوند، از جریان این سیال جدا شده و اصطلاحاً واجفتیده^{۱۵} می شوند اما معیار اینکه یک گونه از ماده در تعادل گرمایی هست یا نه چیست؟ در پاسخ باید گفت که یک گونه از ماده تا زمانی در تعادل گرمایی باقی می ماند که آهنگ برهمکنش آن از آهنگ انبساط عالم بزرگ باشد $\Gamma > H$ یعنی تعادل ایجاد می کند که محصولات یک واکنش خاص فرصت وامکان این را داشته باشند که خلاف جهت واکنش اولیه بازترکیب شوند و عناصر اولیه را بسازند. اگر انبساط به اندازه ای سریع باشد که برای گونه ای آهنگ برهمکنش از آهنگ انبساط کمتر شود $\Gamma < H$ گفته می شود آن گونه واجفتیده شده است.

ذیلاً به اختصار به مهمترین رویدادهای تاریخ عالم می پردازیم. (زمان ها بر حسب ثانیه بعد از مهبانگ می باشد.)

¹⁵Decoupled

- $\sim 10^{-43} s (10^{19} GeV)$
که مقیاس پلانک است. نسبیّت عام در این محدوده کار نمی کند و نیاز به نظریه گرانش کوانتومی داریم.
- $\sim 10^{-14} s - 10^{-43} s (10^{19} GeV - 10 TeV)$
➤ عدم تقارن باریونی؛ منشا این عدم تقارن به فیزیک "فرا تر از مدل استاندارد ذرات"^{۱۶} مربوط میشود. دلایل خوبی وجود دارد که انتظار داشته باشیم که یک وحدت بزرگ بین برهمکنش های الکترو ضعیف و قوی در انرژیهای حدود $10^{16} GeV$ برقرار بوده است.
- Topological defect ها مانند ریسمانهای کیهانی و تک قطبی ها که به طور طبیعی در نظریه های GUT^{17} بوجود می آید ممکن است در جهان اولیه ایفای نقش کرده باشند، اگرچه مشاهدات کنونی CMB مؤید نقش مؤثر آنها در ساختار بزرگ مقیاس نیست.
- تورم^{۱۸}: شاید جالب ترین پدیده در این بازه زمانی، انبساط با شتاب مثبت عالم باشد که به تورم کیهانی مشهور است و در فصل بعد به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد. این پدیده جایی در نزدیکی های مقیاس GUT اتفاق افتاده است.
- $\sim 10^{-10} s - 10^{-14} s (10 TeV - 100 GeV)$
در این بازه انرژی، مدل استاندارد بر همکنش های الکترو ضعیف و قوی به کار می آید، انتظار داریم در انرژی های بالاتر از $100 GeV$ تقارن الکترو ضعیف باز گردد و بوزون های پیمانه ای بدون جرم باشند. اعداد فرمیونی و باریونی در مقیاس های بالاتر از تجدید تقارن^{۱۹} در گذارهای توپولوژیکی بشدت نقض می شوند.
- $\sim 10^{-5} s (200 MeV)$
انتظار داریم گذار کوارک-گلوآن اتفاق بیفتد، یعنی کوارک ها و گلوآن ها درون باریون ها و مزون ها محدود می شوند.
- $\sim 0.2 s (1 - 2 MeV)$
دو اتفاق مهم در این دوره به دلیل اینکه فرایند های خاصی از برهمکنش های الکترو ضعیف از تعادل خارج شده اند روی می دهد:
➤ اول اینکه نوترینوها از سایر ذرات واجفتیده شده و بدون پراکندگی منتشر شده اند.
➤ دوم اینکه نسبت نوترون به پروتون $freez out$ شده، زیرا برهمکنش هایی که پروتون و نوترون را در تعادل شیمیایی قرار می داده غیر مؤثر شده اند و نتیجتاً تعداد نوترون های باقی مانده مشخص کننده فراوانی عناصر نخستین است.
- $\sim 1 s (0.5 - 1 MeV)$

¹⁶ Beyond standard model of particle physics¹⁷ Grand Unification Theory¹⁸ Inflation¹⁹ Symmetry restoration

انرژی نوعی، در این زمان از مرتبه جرم الکترون است. تعداد بیشماری از جفت های الکترون-پوزیترون که در جهان اولیه حاضر بودند، زمانیکه دما به پائین تر از مقدار جرم سکون آنها برسد شروع به نابودی یکدیگر می کنند و در نهایت مقدار اندکی الکترون بیش از پوزیترون باقی می ماند. اما فوتون های تولید شده در تعادل گرمایی اند و لذا دمای تابشی در مقایسه با دمای نوترینوها که قبلاً واجفتیده شده اند، بالاتر می رود.

- $200-300 \text{ s} \sim (0.05 \text{ MeV})$

در این انرژی برهمکنش های هسته ای مهم می شوند و در نتیجه پروتون ها و نوترون های آزاد ، هلیوم و سایر عناصر سبک را می سازند .

- $10^{11} \text{ s} \sim (1 \text{ eV})$

این زمان متناظر با برابری چگالی انرژی ماده و تابش²⁰ است که دوره تابش - غالب را از ماده- غالب می کند.

- $10^{12} - 10^{13} \text{ s}$

در این زمان تقریباً همه الکترون های آزاد و پروتون ها ترکیب شده و هیدروژن را ساخته اند ، لذا جهان برای فوتون های زمینه شفاف شده است و پرتوهای زمینه کیهانی که در حال حاضر در یافت می شوند ، در این زمان از سطح اتمهای خنثی پراکنده شده اند. افت و خیزهای دمایی CMB از ناهماهنگی های جزئی در توزیع ماده در زمان باز ترکیب²¹ ماده القا شده اند.

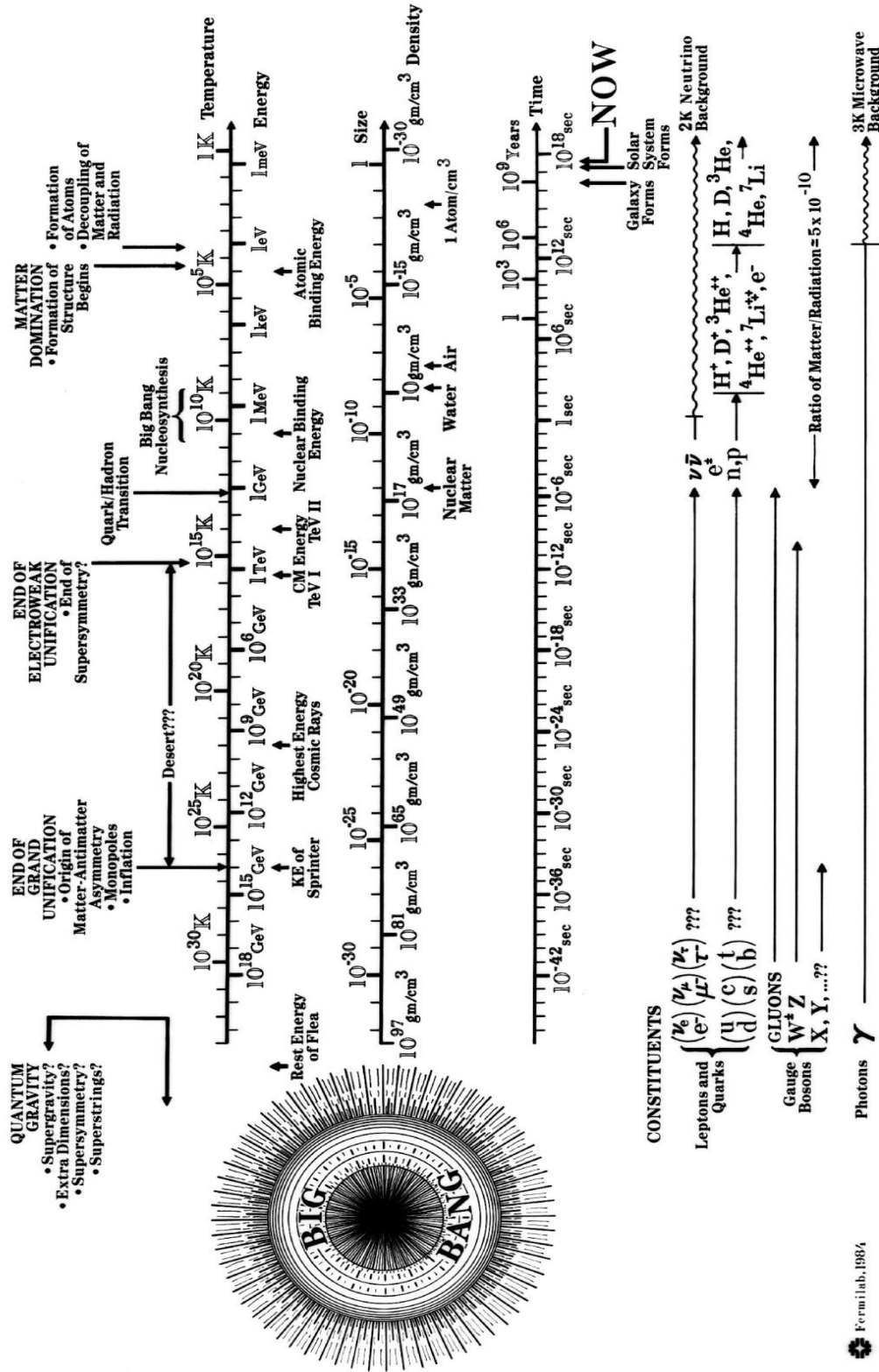
- $10^{16} - 10^{17} \text{ s}$

کهکشانهها و خوشه هایشان از ناهماهنگی های اولیه کوچک و به دلیل ناپایداری گرانشی شکل گرفته اند ، که شکل گیری ساختارها را می توان با مکانیک نیوتونی توصیف کرد.

تصویر صفحه بعد نمایی کلی از تاریخچه گرمایی عالم را به نمایش گذاشته است.

²⁰ Matter-Radiation equality

²¹ Recombination



۱.۶ مشکلات شرایط اولیه^{۲۲}

مدل استاندارد کیهان شناسی به واقع مدل موفقیت ست و می توان موفقیت های آنرا در حد موفقیت های مدل استاندارد ذرات بنیادی یعنی $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ ، نظریه پیمانه ای برهمکنش های الکترو مغناطیسی ضعیف و قوی دانست. اما همانند مدل استاندارد ذرات بنیادی این مدل هم خالی از عیب و نقص نیست . این عیب و نقص ها در حقیقت خود- ناسازگاری های این مدل نیستند، بلکه سؤالاتی هستند که در عین خودسازگاری، این مدل امکان طرح آنها را فراهم می کند. ذیلاً به دو مشکل عمده که در ادبیات معمولاً به آنها توجه می شود می پردازیم و راه حل این مشکل را با پارادایم تورم در فصل آینده بیان می کنیم.

۱ - مشکل افق^{۲۳}

در بخشهای قبلی دیدیم که افق ذره به طور خطی با زمان هم‌مدیس متناسب بود

$$(13) \quad \tau \equiv \int_0^t \frac{dt'}{a(t')} = \int_0^a \frac{da}{Ha^2} = \int_0^a d \ln a \left(\frac{1}{aH} \right)$$

به τ "افق هم- حرکت"^{۲۴} هم گفته می شود. در اینجا افق هم- حرکت را بر حسب شعاع هابل هم- حرکت^{۲۵}، $(aH)^{-1}$ بیان کردیم (اهمیت مفهوم شعاع هابل هم حرکت را در فصل آینده بیان می کنیم).

اگر معادله حالت سیال غالب در جهان را بصورت $p = w\rho$ در نظر بگیریم، از معادله بقای انرژی داریم:

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H(\rho + w\rho) = -3 \frac{d \ln a}{dt} \rho(1 + w)$$

$$(14) \quad \frac{d \ln \rho}{d \ln a} = -3(1 + w) \rightarrow \rho \propto a^{-3(1+w)}$$

از معادله فریدمن داریم:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \rightarrow (aH)^2 \propto a^{-(1+3w)} \rightarrow (aH)^{-1} \propto a^{\frac{(1+3w)}{2}}$$

اگر توجه به توان ضریب مقیاس شود، متوجه وابستگی به عامل $(1 + 3w)$ می شویم. در مدل استاندارد کیهان شناسی $w \geq 0$ و لذا $(aH)^{-1}$ بصورت یکنواخت رشد می کند و لذا افق هم- حرکت τ یا به عبارتی، کسری از جهان که در ارتباط علی هستند، بازمان افزایش می یابد

²² Initial condition problems

²³ Horizon problem

²⁴ Comoving horizon

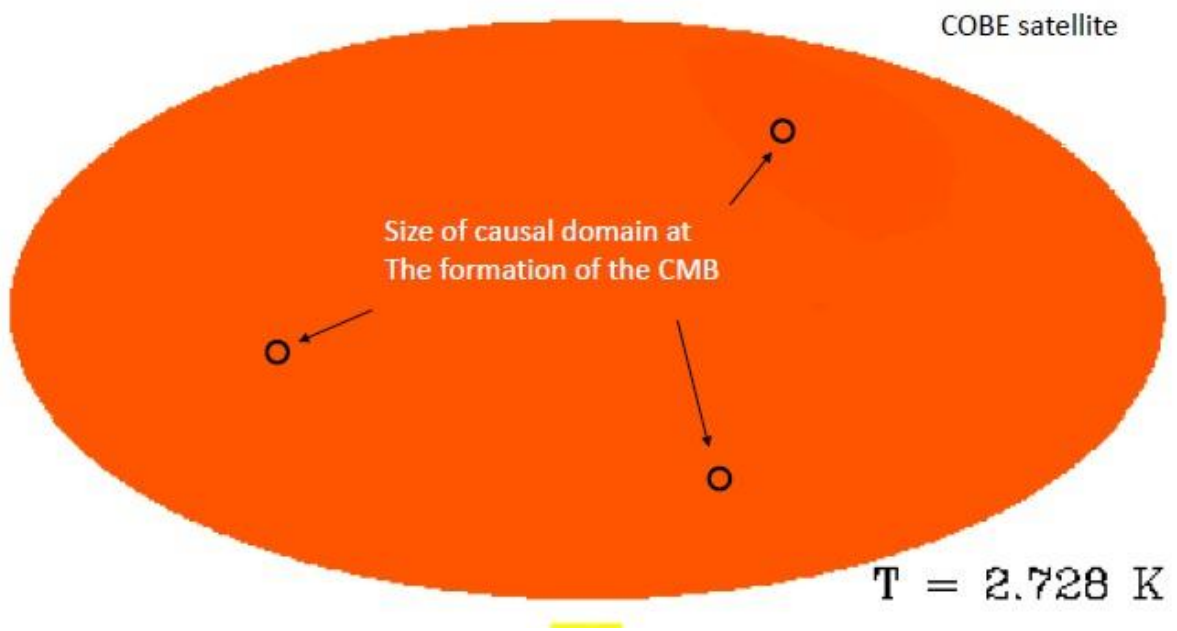
²⁵ Comoving Hubble radius

$$(15) \quad \tau \propto a^{\frac{1+3w}{2}}$$

بطور خاص در دوره ماده- غالب و تابش- غالب روابط زیر برقرار است :

$$(16) \quad \tau = \int_0^a \frac{da}{Ha^2} \propto \left\{ \begin{array}{l} a \\ a^{1/2} \end{array} \quad \begin{array}{l} RD \\ MD \end{array} \right\}$$

(RD دوره تابش- غالب و MD دوره ماده- غالب است) یعنی افق هم- حرکت با زمان بصورت یکنواخت رشد می کند و این موضوع بیان می کند که مقیاس های هم- حرکت که امروزه وارد افق می شوند، در زمان CMB کاملاً خارج از افق بوده اند.



شکل ۶. دایره های کوچک نشان دهنده اندازه ناحیه علی در زمان شکل گیری تابش زمینه کیهانی هستند [11]

اما چیزیکه از CMB مشاهده می شود بیانگر این است که جهان در زمان آخرین پراکندگی بشدت همگن بوده است یعنی نواحی که هیچ ارتباط علی با هم نداشته اند، تقریباً یکسان بوده اند و سوال اینجاست که چطور چنین چیزی ممکن است؟

۲- مشکل تختی^{۲۶}

باتعریف کمیات چگالی بحرانی $\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}$ و $\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$ می توان معادله فریدمن را بصورت زیر باز نویسی کرد:

²⁶ Flatness

$$(17) \quad \Omega - 1 = \frac{k}{(aH)^2}$$

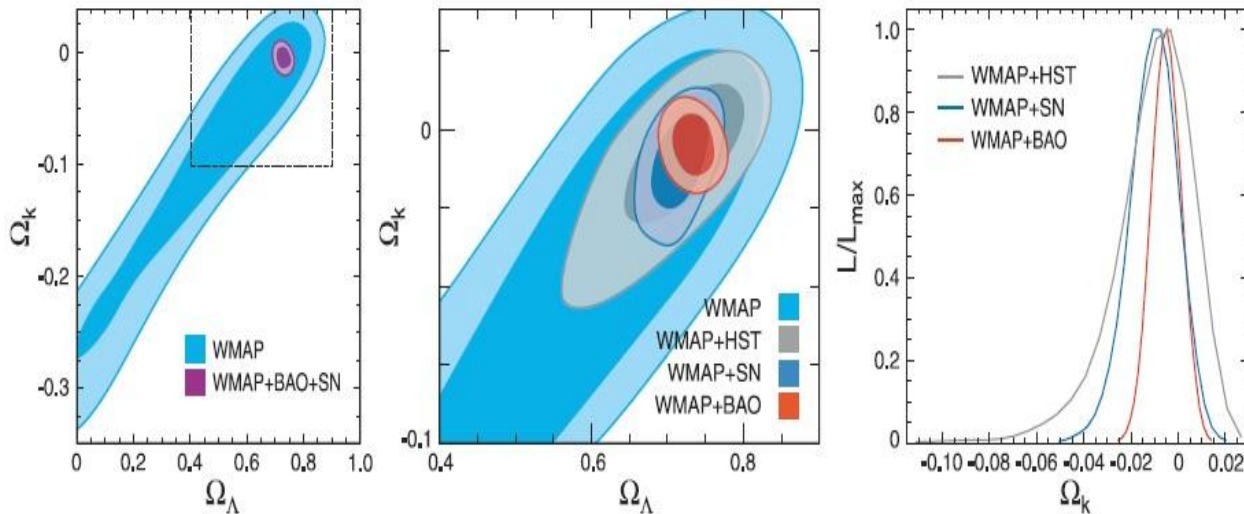
امادیدیم که $aH = \dot{a}$ و همچنین دیدیم که $\rho + 3p > 0$ و $\ddot{a} < 0$ ، در نتیجه

$$(18) \quad \frac{d\dot{a}}{dt} = \frac{d(aH)}{dt} < 0 \rightarrow \frac{d(aH)^{-1}}{dt} > 0 \Rightarrow \frac{d(\Omega-1)}{dt} > 0$$

یعنی در یک زمان اولیه t_i ، $\Omega - 1$ هر مقداری که داشته باشد، این مقدار با گذشت زمان رشد می کند و در حال حاضر می تواند بسیار بزرگ باشد. ولی مشاهدات کنونی دلالت بر این دارد که $\Omega - 1 \simeq 0$ است.

با توجه به توضیحات بالا $\Omega - 1$ در لحظه t_i باید به شدت به صفر نزدیک بوده باشد تا با گذشت زمان زیاد همچنان نزدیک صفر بماند، (می توان نشان داد که $(\Omega - 1)_i \sim 10^{-50}$) باید باشد تا مشاهدات کنونی توجیه شود) اما $\Omega - 1 = 0$ متناظر با جهان تخت است و سوال اینجاست که چه دلیلی دارد که در ابتدای عالم، جهان تا این حد تخت بوده باشد؟

در فصل آینده خواهیم دید که این مشکلات بوسیله پارادایم تورم کیهانی بخوبی حل خواهد شد.



شکل ۸. ترکیبی از مشاهدات تابش زمینه کیهانی و ساختارهای بزرگ مقیاس نشان دهنده قیدهای رصدی روی چگالی انرژی خلا Ω_Λ و پارامتر انحنای فضایی Ω_k است. شایان ذکر است که $\Omega_k = 0$ معادل جهان تخت می باشد. [12]

مراجع

- [1] E.Kolb and M.Turner, *The Early Universe*, Addison-Wesley (1990)