کیهانشناسی مدرن

از جهل مرکب به جهل بسیط

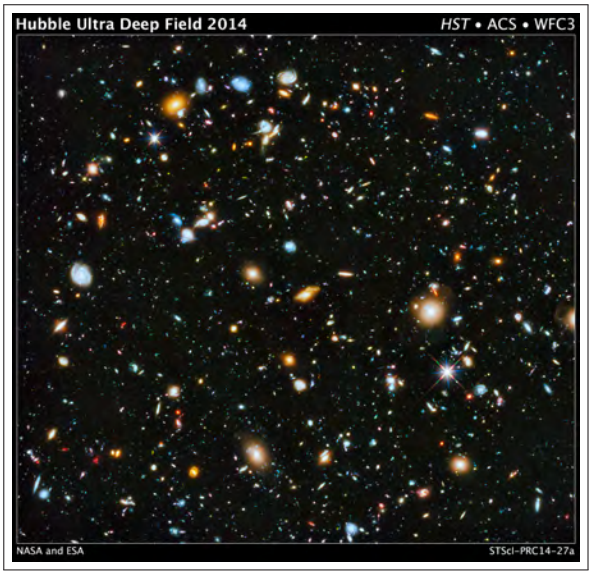
یا چطور جهان را با شش عدد توصیف کنیم؟

محمدحسین نامجو
پژوهشکدهٔ نجوم

کیهانشناسی ــ علم مطالعهٔ کل کیهان ــ علی رغم کنجکاوی همیشگی بشر نسبت به این موضوع، یک علم مدرن محسوب می‌شود. دلیل آن، توسعهٔ نظری و پیشرفت‌های قابل توجه در حوزهٔ فناوری در سدهٔ اخیر است که این امکان را فراهم آورده تا به معنای واقعی دریافتی از کیهان ــ و نه صرفاً اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن ــ داشته باشیم. با اینکه کیهان یک موجود بسیار پیچیده است، می‌توان گفت که تصور امروزی ما از کیهان در نهایت سادگی است، به این معنا که تنها با شش پارامتر می‌توان به‌خوبی آن را در چارچوب نظریه‌های فیزیکی توصیف کرد. در این مقاله به بحث راجع به معنای این گفته، اینکه این شش پارامتر چه هستند و همچنین برخی دیگر از جنبه‌های کیهانشناسی می‌پردازم که اولاً با زبان ساده قابل بیان هستند و ثانیاً می‌توانند زیبایی‌ها و چالش‌های این مبحث را نشان دهند. با وجود این، سعی می‌کنم که دقت علمی فدای جذابیت نشود. همچنین، به برخی مسائل فلسفهٔ علم در ارتباط با کیهانشناسی اشاراتی بسیار کوتاه خواهم داشت.

۱. مقدمه

شناخت جهان در بزرگترین مقیاس خود هدف اصلی علم کیهانشناسی است. جهان ــ تا آنجایی که برای ما قابل مشاهده است ــ شامل میلیاردها کهکشان است که هر کهکشان خود مجموعه‌ای از میلیاردها ستاره و منظومه‌های سیاره‌ای است (شکل ۱). کهکشان راه شیری تنها یک نمونه از این مجموعه‌های عظیم ستاره‌ای است که ما در آن قرار داریم. یک فرض اساسی در مورد جهان، همگنی (یکنواختی در نقاط مختلف) و همسانگردی (یکسان در جهات مختلف) آن در بزرگترین مقیاس‌هاست که انتظار می‌رود با تقریب خوبی برقرار باشد. شواهد متعددی هم این فرضیه را تأیید می‌کند. یک مورد سادهٔ آن این است که اگر با یک تلسکوپ بسیار قوی در جهات مختلف به آسمان شب نگاه کرده و تعداد کهکشان‌ها را در یک پنجرهٔ کوچک بشماریم، این تعداد در جهات مختلف تقریباً یکسان خواهد بود. نکتهٔ شگرف دیگر راجع به کیهان این است که کیهان در حال انبساط هم هست، یعنی با گذشت زمان بزرگتر شده و فاصلهٔ کهکشان‌ها بیشتر می‌شود. علم



شکل ۱. تصویری از ناحیهٔ کوچکی از عمق کیهان با حدود ده‌هزار کهکشان که توسط تلسکوپ فضایی هابل گرفته شده است. (منبع hubblesite.org).

کیهانشناسی در قرن اخیر با مطالعهٔ این سیستم پیچیده (که خود ما هم جزئی از آن هستیم) به موفقیت‌های عظیمی دست یافته است که درک ما را از جهان پیرامونی دگرگون کرده است. در کنار این موفقیت‌ها، چالش‌هایی نیز برای این حوزه از علم وجود دارد که با برخی از آنها در حوزه‌های دیگر علم مواجه نیستیم. در ادامهٔ این مقاله به‌طور مختصر به برخی از این موفقیت‌ها و چالش‌ها می‌پردازم. عددهای مذکور در این مقاله تقریبی هستند ولی با یک جستجوی ساده در اینترنت می‌توان مقادیر دقیق‌تر آنها را یافت.

برای توصیف کیهان از دو ابزار نظری استفاده می‌شود. یکی نسبیت عام (general relativity) اینشتین است که نظریه‌ای است برای توصیف نیروی گرانشی. در این مقاله سعی شده است که از روابط ریاضی اجتناب شود اما صرفاً برای افرادی که به زیبایی‌های ریاضی مسئله علاقه‌مند هستند (و برای توضیح چند مفهوم به زبان ساده)، اشاره می‌کنم که معادلات نسبیت عام را می‌توان به‌صورت فشرده با رابطهٔ زیر نشان داد:

$$M_{\rm pl}^{2}\, G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}.$$

این رابطه هندسهٔ فضا و زمان (یا به تعبیر رسمی‌تر، فضا-زمان) و دینامیک حاکم بر آن را به مقدار و نوع مادهٔ موجود در فضا-زمان ربط می‌دهد. M_{pl} عدد ثابتی است به نام جرم پلانک، معادل حدود 10^{-6} گرم. $G_{\mu\nu}$ تانسور اینشتین است که انحنا و هندسهٔ فضا-زمان را تعیین می‌کند و $T_{\mu\nu}$ تانسور انرژی-تکانه است که نوع و مقدار مادهٔ درون فضا-زمان را مشخص می‌کند. به‌عنوان مثال، سهم چگالی انرژی (انرژی در واحد حجم) هر مؤلفهٔ تشکیل‌دهندهٔ مواد عالم و همچنین فشاری که هر مؤلفه ایجاد می‌کند درون این تانسور جای می‌گیرد. بنابراین چگالی انرژی یک کمیت بسیار مهم است که مثلاً ـ اگر این معادلات را برای کل کیهان به کار ببریم ـــ آهنگ انبساط عالم را تعیین می‌کند. در مورد اینکه چه نوع موادی در کیهان وجود دارد و هر یک چه سهمی از چگالی انرژی کل عالم دارند در بخش‌های بعد صحبت خواهم کرد. معادلهٔ بالا در واقع یک معادلهٔ دیفرانسیل است که برای حل آن، علاوه بر مادهٔ موجود در عالم، احتیاج به شرایط اولیه خواهیم داشت. خواهیم دید که هر دو مسئله (یعنی نوع و مقدار ماده و همچنین شرایط اولیهٔ کیهان) اهمیت اساسی دارند و با چالش‌هایی هم مواجه هستند.

همان‌طور که اشاره شد، برای توصیف تحول کیهان، به چند نوع ماده احتیاج است. اما به عنوان یک مثال ساده برای درک بهتر مطلب، جهانی را در نظر بگیرید که تنها با ذرات با سرعت بسیار پایین (به اصطلاح، ذرات غیرنسبیتی) پر شده است. در این صورت، اگر زمان را با t نشان دهیم، مقدار انبساط کیهان رابطه‌ای به صورت $t^{2/3}$ با زمان دارد. این بدان معناست که اگر عمر کیهان ده برابر شود، ابعاد کیهان حدود چهار و نیم برابر می‌شود! حالا جهانی را در نظر بگیرید که ذرات درون آن سرعت بسیار بالا داشته باشند (اصطلاحاً نسبیتی باشند). در این صورت مقدار انبساط کیهان علاوه بر کم کردن چگالی عددی این ذرات (با بزرگ شدن حجم) سرعت آنها را نیز کاهش می‌دهد. این بدین معناست که چگالی انرژی این ذرات (که هم به چگالی عددی و هم به سرعت آنها وابسته است) سریع‌تر افت می‌کند (نسبت به زمانی که جهان پر از ذرات غیرنسبیتی بود، که در این صورت تنها چگالی عددی آنها اهمیت پیدا می‌کرد). در نتیجهٔ این افت سریع، آهنگ انبساط عالم هم سریع‌تر افت می‌کند. در این صورت رابطهٔ انبساط کیهان با زمان به‌صورت $t^{1/2}$ خواهد بود، یعنی اگر عمر کیهان ده برابر شود، ابعاد کیهان حدود سه برابر خواهد شد.

دومین ابزار نظری که برای شناخت کیهان ضروری است، نظریهٔ مربوط به ذرات بنیادی است ـــ ذرات در ریزترین شکل آن که دیگر ساختار و اجزایی برایش تصور نمی‌شود. این نظریه تحت عنوان نظریهٔ کوانتوم (یا به عبارت دقیق‌تر، نظریهٔ میدان‌های کوانتومی) شناخته می‌شود. بدون دانش راجع به ذرات تشکیل‌دهندهٔ عالم، نمی‌توان تحول کیهان از آغاز تا اکنون را به‌خوبی توضیح داد. به نظر من این یکی از شگفتی‌های علم کیهانشناسی است: برای توصیف جهان در بزرگترین مقیاس‌ها، نیاز اساسی به دانش دربارهٔ کوچکترین مقیاس‌ها داریم! البته، همان‌طور که خواهیم دید، به نظر می‌رسد ذرات کشف شده که به خوبی توسط نظریهٔ کوانتوم (و تحت مدلی به نام مدل استاندارد ذرات بنیادی) توصیف می‌شوند، کافی نخواهند بود و شاید احتیاج به توسعهٔ این نظریه یا ایجاد نظریه‌های جامع‌تر وجود داشته باشد.

با توجه به اینکه هر دو نظریه بنیادی علم فیزیک در کیهانشناسی نقش اساسی بازی می‌کنند، مسائل فلسفی مربوط به آنها نیز در این حوزه قابل طرح هستند. برای علاقه‌مندان به این نوع مباحث اشاره‌ای گذرا به چند مسئلهٔ مطرح‌شده (و نه همهٔ آنها) می‌کنم بدون اینکه موضع‌گیری داشته باشم: الف) مساله تعیّنی (deterministic) بودن یا نبودن نظریه‌ها و به تبع آن، تحول جهان (با فرض اینکه نظریه‌ها توصیفی از جهان خارج ارائه می‌دهند، که خود این فرض هم قابل بحث و مناقشه است)، یکی از بحث‌های معروف و قدیمی در فلسفهٔ علم بوده که در مورد هر دو نظریه قابل طرح است. در نسبیت عام مسائلی مانند تکینگی‌ها (singularities) و همچنین افق کوشی (Cauchy horizon) باعث می‌شود که جواب دادن به این سوال چندان ساده نباشد. در حوزهٔ کوانتوم هم احتمالاتی بودن نظریه، چالشی برای تعینی بودن آن ایجاد می‌کند. ب)مسئله دیگر امکان و معنای ارائهٔ پیش‌بینی در قالب نظریه‌هاست که باز هم ـــ به خصوص در نسبیت عام ـــ چالش‌برانگیز است. ج) موضوع مورد بحث دیگر امکان سفر

در زمان (با توجه به اینکه نظریه‌ها آن را منع نمی‌کنند) و تناقض‌های ناشی از آن است.

با در دست داشتن دو نظریهٔ نسبیت عام و کوانتوم می‌توان در جهت توصیف کیهان و توجیه رصدهای کیهانی تلاش کرد که در بخش‌های بعد به آن می‌پردازم. خواهیم دید که علاوه بر پارامترهایی که از قبل شناخته شده و مقادیر آنها توسط آزمایش‌ها تعیین شده است (همانند مقادیر پارامترهای نظریهٔ ذرات بنیادی که توسط شتابگرها تعیین شده‌اند)، به شش پارامتر جدید احتیاج داریم. با داشتن این شش پارامتر، می‌توان به‌خوبی داده‌های رصدی از تحول کیهان را با دقتی خوب توضیح داد.

۲. تاریخچهٔ گرمایی کیهان

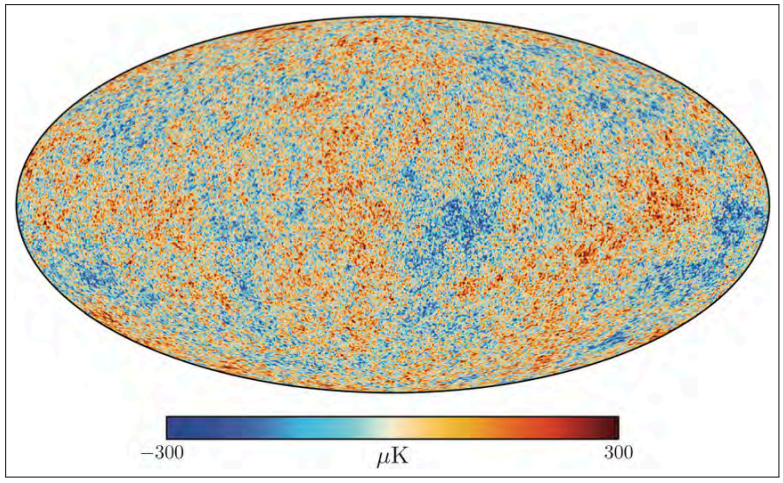
همان‌طور که اشاره شد، جهان کنونی در حال انبساط است. بنابراین با بازگشت به زمان گذشته جهانی با ابعاد کوچکتر خواهیم داشت. همان‌طور که اگر یک گاز که درون یک محفظه ایزوله قرار دارد را به آرامی فشرده کنیم، دمای گاز بالا می‌رود، اگر به کیهان یک دما نسبت داده و به گذشته برگردیم دمای کیهان بالاتر است. بنابراین می‌توان به جای زمان از دما به عنوان پارامتری که سن عالم را نشان می‌دهد استفاده کرد. هرقدر عمر کیهان بیشتر می‌شود، دمای آن کمتر می‌شود[۱]. به این دلیل، به تحول کیهان از زمانهای اولیه تا کنون، تاریخچهٔ گرمایی گفته می‌شود. تاریخچه گرمایی کیهان دارای جزئیات بسیاری است که تنها به چند رخداد مهم در این بخش اشاره می‌شود [1].

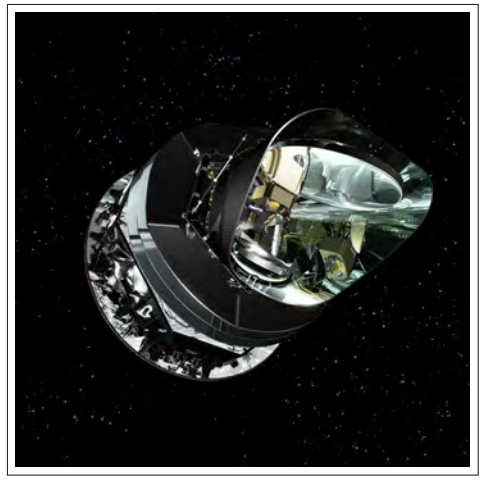
اگر بخواهیم از آغاز کیهان شروع کنیم دچار یک مشکل اساسی می‌شویم. از آنجایی که جهانِ جوانتر، داغتر و چگالتر بوده است، اگر در زمان به عقب برگردیم، به نقطه‌ای می‌رسیم که چگالی انرژی کیهان آنقدر زیاد می‌شود که دو نظریه‌ای که برای توصیف کیهان به کار می‌بردیم ــ یعنی نسبیت عام و نظریهٔ کوانتوم ــ با شکست مواجه می‌شوند. در واقع در زمان‌های اولیه کیهان هیچکدام از دو نظریه برای توصیف کیهان، قابل اعتماد نیستند، چرا که هر دو نظریه را باید به دید نظریه‌های مؤثر (و نه دقیق) که به تقریب و در انرژی‌های به اندازهٔ کافی پایین کار می‌کنند نگاه کرد. بنابراین ابزار نظری برای توصیف کیهان در لحظات اولیهٔ آن ــ اگر بتوان برای آن آغازی در نظر گرفت ــ نخواهیم داشت. شاید یک نظریهٔ جامع‌تر بتواند راهگشا باشد اما علی‌رغم چندین دهه تلاش دانشمندان، در این زمینه موفقیت چندانی حاصل نشده است. بنابراین ــ برخلاف چیزی که بعضاً ادعا می‌شود ــ در مورد آغاز عالم، علم مدرن تقریباً ساکت است! از بحث‌های فلسفی و شبه‌فلسفی در این مورد نیز صرف‌نظر می‌کنم.

علی‌رغم این مسئله، اگر با تسامح یک نقطهٔ آغازین برای کیهان تصور کنیم، می‌توان عمر کیهان را از زمان آغازین (یا آغاز زمان) در مراحل مختلف با استفاده از معادلات نسبیت عام محاسبه و بیان کرد. زمانی که کیهان بسیار جوان بود، به دلیل دمای بسیار زیاد، امکان ایجاد هیچ ساختاری وجود نداشت و تنها ذرات به بنیادی‌ترین شکل خود، انرژی جهان را حمل می‌کردند. با انبساط کیهان به‌تدریج جهان سرد شده و پس از گذشت حدود سه تا چهار دقیقه از نقطهٔ آغاز کیهان، که دمای کیهان به حدود یک میلیارد درجهٔ سانتیگراد رسید، سبک‌ترین هسته‌های اتم‌ها تشکیل شدند. اما به دلیل دمای بالا، هسته‌های اتم‌ها به صورت یونیزه باقی ماندند. انبساط عالم ادامه پیدا کرده تا زمان حدود ۳۸۰۰ سال از آغاز عالم ــ یا دمای حدود سه هزار درجهٔ سانتیگراد ــ که جهان به اندازهٔ کافی سرد شده است که ترکیب هسته‌ها با الکترون‌ها امکان‌پذیر شده و اتم‌های خنثی تشکیل شوند. در این زمان اتفاق بسیار مهم دیگری نیز رخ داده است: قبل از تشکیل اتم‌های خنثی، فوتون‌ها (امواج الکترومغناطیسی، نور) به شدت با الکترون‌ها برخورد و برهمکنش دارند و امکان فرار ندارند. اما پس از ترکیب الکترون‌ها با هسته‌ها و تشکیل اتم‌های خنثی، فوتون‌ها آزاد شده و در کیهان منتشر می‌شوند. نتیجهٔ مهم این است که باید بتوان این فوتون‌های آزاد شده را که از نقاط دوردست کیهان شروع به حرکت کرده و الان ــ پس از گذشت میلیاردها سال ــ به ما رسیده‌اند مشاهده کرد. طیف فوتون‌های دریافتی از جهات مختلف کیهان با تقریب خوبی یکسان خواهد بود که نتیجه‌ای است از همگنی و همسانگردی کیهان در بزرگترین مقیاس‌ها. این فوتون‌ها در سال ۱۹۶۵ به‌طور اتفاقی توسط پنزیاس(Penzias) و ویلسون(Wilson) که در حال آزمودنِ یک آنتن برای هدفی دیگر بودند کشف شد. به این پدیده تابش زمینهٔ کیهانی (cosmic microwave background radiation) گفته می‌شود. با توجه به جدا شدن فوتون‌ها از بقیهٔ ماده، تحول این دو مؤلفه متفاوت خواهد بود و دمای متفاوتی نیز خواهند داشت. از این به بعد، مرسوم است که دمای کیهان را دمای مربوط به فوتون‌های تابش زمینهٔ کیهانی در نظر بگیریم. از زمان کشف تابش زمینهٔ کیهانی تاکنون، رصدهای متعددی با دقت‌های بالا در مورد آن انجام شده است که اطلاعات بسیار با ارزشی راجع به کیهان در زمان‌های اولیهٔ آن به‌دست داده است (به این دلیل که این تابش از زمان حدود ۳۸۰۰ سال از آغاز عالم به ما می‌رسند و اطلاعات آن زمان و قبل از آن را با خود حمل می‌کنند). به علاوه، برنامه‌های متعددی برای رصدهای با دقتی حتی بیشتر از این وجود دارد که برخی از آنها در آیندهٔ نزدیک به ثمر خواهند نشست.

گفته شد که تابش زمینهٔ کیهانی به صورت همسانگرد دریافت

۱. این رابطه در برخی مواقع مانند فرایند *بازگرمایش* درست نخواهد بود اما راجع به این موارد خاص در این مقاله صحبت نخواهم کرد.

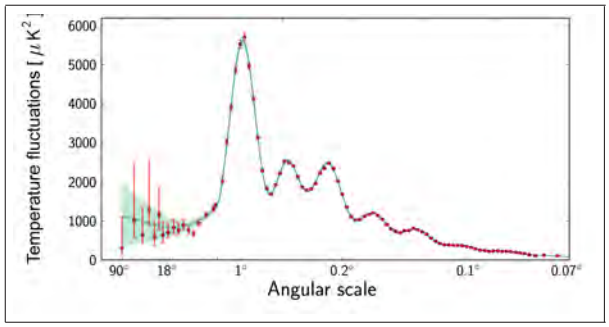




شکل ۲. نقشهٔ افت‌وخیزهای تابش زمینهٔ کیهانی که توسط ماهوارهٔ پلانک (سمت راست) از کرهٔ سماوی به دست آمده است. افت‌وخیزهای دمایی با واحد میکروـکلوین نمایش داده شده و نقاط قرمز گرم‌تر و نقاط آبی سردتر بودن ناحیه‌های مختلف را نشان می‌دهند. (منبع esa.int).

می‌شود که نتیجهٔ همگنی و همسانگردی کیهان در مقیاس‌های بزرگ و با تقریب خوب است. اما اگر اندازه‌گیری دقیق‌تری از تابش زمینهٔ کیهانی داشته باشیم، خواهیم دید که افت‌وخیزهای بسیار کوچکی روی آن وجود دارد. خواص آماری این افت‌وخیزها اطلاعات ارزشمندی از تحول کیهان و مؤلفه‌های تشکیل‌دهندهٔ آن به‌دست می‌دهد. آمار این افت‌وخیزها را با کمیتی به نام طیف توان (power spectrum) مطالعه می‌کنند که در واقع همبستگی دو نقطهٔ مختلف کیهان را به صورت میانگین به عنوان تابعی از فاصلهٔ دو نقطه نشان می‌دهد. آخرین اندازه‌گیری تابش زمینهٔ کیهانی مربوط است به ماهوارهٔ پلانک که از سال ۲۰۰۹ میلادی به مدت چهار سال داده‌های دقیقی را جمع‌آوری کرد. شکل ۲ نقشهٔ افت‌وخیزهای تابش زمینهٔ کیهانی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳ طیف توان تابش زمینهٔ کیهانی حاصل از اندازه‌گیری‌های ماهوارهٔ پلانک نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تطابق بین داده‌های مشاهداتی و نتایج نظری بسیار قابل توجه است. برای برقراری این تطابق ــ همان‌طور که گفته شد ــ نیاز به شش پارامتر خواهیم داشت که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

بازگردیم به بحث راجع به تاریخچهٔ گرمایی کیهان. پدیدهٔ مهم دیگر که پس از تابش زمینهٔ کیهانی اتفاق می‌افتد، تشکیل ساختارهای بزرگ‌مقیاس است. افت‌وخیزهای بسیار کوچک که ردپای آنها را از روی تابش زمینهٔ کیهانی دیدیم، اهمیت اساسی برای تشکیل ساختارهای بزرگ مانند کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی دارند. این افت‌وخیزهای کوچک در طی زمان به‌دلیل جاذبهٔ گرانشی که ایجاد می‌کنند رشد کرده و تبدیل به هسته‌های اولیه برای تشکیل ساختارهای بزرگتر می‌شوند. در نهایت از زمان چهارصد میلیون سال پس از آغاز



شکل ۳. طیف توان اندازه‌گیری شده توسط ماهوارهٔ پلانک. محور عمودی تابع همبستگی میانگین بین دو نقطه و محور افقی فاصلهٔ زاویه‌ای دو نقطه را نشان می‌دهد. منحنی سبز رنگ نیز نشان‌دهندهٔ پیش‌بینی نظری با شش پارامتر اشاره شده در متن است. (منبع esa.int)

عالم (معادل دمای حدود ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد زیر صفر!) به بعد، ستاره‌زایی رخ می‌دهد و کهکشان‌ها شروع به تشکیل شدن می‌کنند. از این به بعد، ستاره‌ها جهان را که قبل از آن تاریک بود، با فرآیند همجوشی هسته‌ای روشن و گرم می‌کنند. این اتفاق باعث تحت تأثیر قرار گرفتن فوتون‌های تابش زمینهٔ کیهانی نیز می‌شود زیرا گرم شدن جهان می‌تواند دوباره اتم‌های خنثی را به پلاسمایی از الکترون‌ها و هسته‌های اتم‌ها تبدیل کند که مسیر حرکت فوتون‌های آزاد شده در زمان ایجاد تابش زمینهٔ کیهانی را ــ به‌دلیل برخورد فوتون‌ها با الکترون‌ها ــ تغییر می‌دهد. برای کمّی کردن این رخداد از پارامتری به نام عمق نوری (optical depth) استفاده می‌شود. عمق نوری مربوط است به احتمال حداقل یک برخورد با الکترون‌ها از زمانی که ستاره‌ها باعث یونیزه شدن اتم‌ها می‌شوند تا زمانی که فوتون‌ها به ما می‌رسند. با مشاهدات ماهوارهٔ پلانک مقدار عمق نوری حدود ۰/۰۵ است که

احتمال متناظر آن حدود ۵٪ خواهد بود. این یکی دیگر از شش پارامتر مورد نیاز در کیهانشناسی است. در نهایت این ستاره‌زایی‌ها به همراه تشکیل منظومه‌های پیچیده‌تر ادامه پیدا می‌کنند تا به زمان کنونی یعنی حدود چهارده میلیارد سال از آغاز عالم (معادل دمای حدود ۲۷۰ درجه سانتیگراد زیر صفر) می‌رسیم. سن عالم در واقع یکی از شش پارامتر مورد نیاز برای توصیف کیهان است که از روی مشاهدات تابش زمینهٔ کیهانی و دیگر رصدها به‌دست می‌آید.

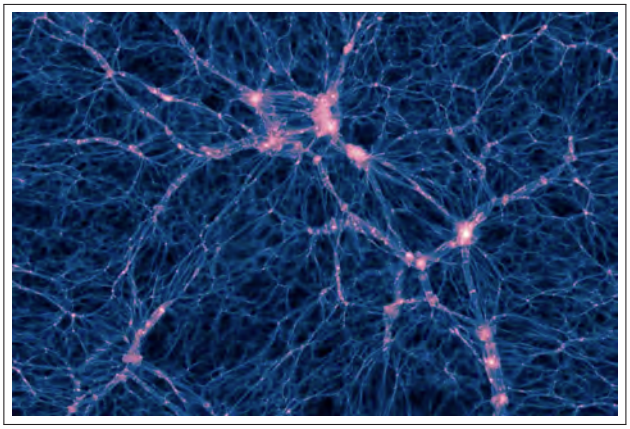
۱.۲ مادهٔ تاریک و انرژی تاریک

همان‌طور که اشاره شد، برای توضیح آنچه از کیهان مشاهده می کنیم، احتیاج به شش پارامتر داریم که در بخش قبل به دو پارامتر آن (عمق نوری و عمر کیهان) پرداختم. در این بخش دو پارامتر دیگر را معرفی می‌کنم که مربوط هستند به مواد تشکیل‌دهندهٔ عالم که طبق نظریهٔ نسبیت عام اینشتین، دینامیک و هندسهٔ کیهان را نیز تعیین می‌کنند. کیهان حداقل سه مؤلفه دارد که هر کدام نقش مهمی در تحول کیهان ایفا می‌کند. یکی همین مادهٔ شناخته شده که بدن ما، کرهٔ زمین، ستاره‌ها و کهکشان‌ها را تشکیل می‌دهد و ذرات تشکیل‌دهندهٔ آنها را با شتابگرها و دیگر آزمایش‌ها کشف کرده‌ایم. اما به نظر می‌رسد که این نوع ماده به تنهایی برای توصیف کیهان کافی نیست و در واقع فقط ۵٪ از چگالی انرژی کیهان را مادهٔ معمولی تشکیل می‌دهد! رصدهای کیهانی نشان می‌دهند که حداقل دو نوع مادهٔ دیگر نیاز است که تحت عنوان مادهٔ تاریک و انرژی تاریک شناخته می‌شوند. سهم این دو از چگالی انرژی عالم، دو پارامتر دیگر از شش پارامتر کیهانشناسی هستند.

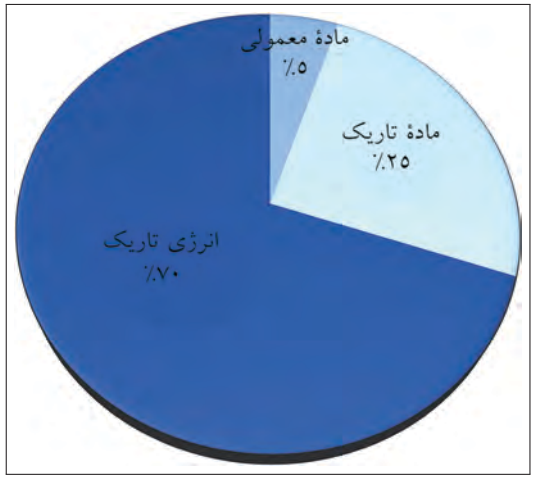
مادهٔ تاریک نوعی از ماده است که به لحاظ اثرات گرانشی بسیار شبیه به مادهٔ معمولی است. اما اگر به دید ذرات بنیادی به آن بنگریم برهمکنش بسیار ضعیفی با ذرات مادهٔ معمولی دارد (و به همین دلیل است که قبل از مشاهدات دقیق کیهانی، موفق به کشف آنها ــ مثلاً در شتابگرها ــ نشدیم). علی‌رغم عدم مشاهدهٔ مستقیم این ذرات، به دلیل جرم‌دار بودن آنها، اثرات گرانشی قابل‌ملاحظه‌ای در طی تحول کیهان داشته‌اند. این ماده حدود ۲۵٪ چگالی عالم را شامل می‌شود. دلایل مشاهداتی متعددی برای مادهٔ تاریک وجود دارد که از جملهٔ آن می‌توان به طیف توان افت‌وخیزهای دمایی روی تابش زمینهٔ گرمایی (شکل ۳) و تشکیل ساختارها اشاره کرد (شکل ۴). بدون در نظر گرفتن مادهٔ تاریک، عمر کیهان ــ علی‌رغم اینکه مثلاً در مقایسه با عمر انسان بسیار طولانی است ــ برای تشکیل ساختارهای بزرگ مانند کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی کافی نبوده است!

دلایل دیگری وجود دارد که ما را به این نتیجه می‌رساند که حتی اضافه کردن مادهٔ تاریک نیز کفایت نمی‌کند. در اواخر دههٔ ۱۹۹۰ میلادی، نتایجی از مشاهدهٔ اجرام بسیار دوردست به دست آمد که از تحلیل آن این نتیجه گرفته شد که سرعت انبساط جهان در حال افزایش است (به عبارت فنی‌تر جهان شتابدار و با شتاب مثبت است). این با درک ابتدایی ما از نیروی گرانش بسیار متفاوت است چرا که ما گرانش را به عنوان نیروی جاذبه می‌شناسیم بنابراین توقع داریم که نیروی گرانشی کهکشان‌ها ــ به عنوان نیروی غالب در مقیاس کیهانی ــ مانند یک ترمز برای انبساط عمل کند و سرعت انبساط کاهش یابد. برخلاف تصور، به نظر می‌رسد در زمان‌های متأخر نیروی گرانشی مانند یک نیروی دافعه عمل کرده و به انبساط عالم کمک می‌کند. برای اینکه بتوان این پدیده را توصیف کرد به یک ماده اضافی ــ که به آن انرژی تاریک گفته می‌شود ــ نیاز است که ۷۵٪ چگالی انرژی کیهان را تشکیل می‌دهد. خاصیت انرژی تاریک این است که چیزی شبیه به نیروی دافعهٔ گرانشی ایجاد می کند. علاوه بر شتاب کیهان اندازه‌گیری شده با مشاهدهٔ اجرام دوردست، باز هم توصیف طیف توان تابش زمینهٔ کیهانی تأییدی است بر فرض وجود انرژی تاریک. شکل ۵ سهم هر مؤلفه از کیهان را در چگالی انرژی در زمان حال نشان می‌دهد.

با فرض وجود مادهٔ تاریک و انرژی تاریک، مسئله پایان نمی‌یابد. بلکه منشأ این مؤلفه‌های کیهانی سؤالی است که باید برای یافتن پاسخ آن تلاش کرد. در مورد مادهٔ تاریک، واضح است که مدل استاندارد ذرات بنیادی پیشنهادی برای نوع ذرهٔ تشکیل‌دهندهٔ آن نمی‌دهد و باید این مدل را توسعه داد به نحوی که ذرات مادهٔ تاریک را شامل شود. مدل‌های بسیاری پیشنهاد شده‌اند اما به لحاظ مشاهداتی تاکنون طبیعت راهنمایی چندانی برای تصمیم‌گیری در مورد مدل‌ها نکرده است



شکل ۴. نتیجهٔ یک شبیه‌سازی کیهانی با مادهٔ تاریک. نواحی روشن تر نشان‌دهندهٔ چگالی بیشتر مادهٔ تاریک است. کهکشان‌ها درون نواحی چگال تشکیل می‌شوند. این نتیجه به صورت آماری تطابق بسیار خوبی با رصدهای کیهانی (شبیه آنچه که در شکل ۱ آمده) دارد. (منبع illustris-project.org).



شکل ۵. سهم مادهٔ معمولی، مادهٔ تاریک و انرژی تاریک از چگالی انرژی عالم در زمان حال. ۹۵٪ از مادهٔ موجود در عالم به صورت مادهٔ تاریک و انرژی تاریک است که منشأیی ناشناخته دارند.

(به دلیل اینکه ذرات مادهٔ تاریک کشف نشده‌اند، بلکه فقط اثرات گرانشی آنها مشاهده شده است).

در مورد انرژی تاریک وضعیت قدری بغرنج‌تر است چرا که احتیاج به ماده‌ای داریم که نیروی دافعهٔ گرانشی ایجاد کند. یک توضیح که می‌توانست بسیار خوب باشد این است که انرژی تاریک در واقع انرژی خلاء کوانتومی است که مانند انرژی تاریک عمل می‌کند. انرژی خلاء معمولاً در دیگر آزمایش‌ها (مانند آنچه در شتابگرها انجام می‌شود) قابل مشاهده نیست ولی اثرات گرانشی آن، خود را در مقیاس‌های بزرگ نشان می‌دهد. اما محاسبات کمّی در قالب نظریهٔ میدان‌های کوانتومی تخمینی ارائه می‌دهد که بسیار متفاوت است با آنچه که مشاهده می‌کنیم: مقدار پیش‌بینی‌شده در نظریهٔ کوانتوم چیزی در حدود 10^{56} برابر بیشتر است! می‌توان گفت این یکی از بزرگترین ناسازگاری‌های یک نظریه (که البته موفقیت‌های کم‌نظیری در توصیف بسیاری دیگر از پدیده‌ها داشته) با اندازه‌گیری‌ها در تاریخ علم است! برای حل این مسئله باز هم به نظر می‌رسد که باید نظریهٔ کنونی ذرات بنیادی را تعمیم داد یا تصحیح کرد.

در پایان این بخش، این نکته شایان ذکر است که راه حل ارائه‌شده تحت عنوان مادهٔ تاریک و انرژی تاریک شاید ساده‌ترین و زیباترین توضیح ــ حداقل از دید برخی از کیهانشناسان ــ برای پدیده‌های کیهانی باشد اما تنها راه حل نیست. ایدهٔ دیگر، تغییر نظریهٔ گرانش از نسبیت عام به یک نظریهٔ تعمیم‌یافته است. اما این راه، هزینه و پیچیدگی‌های متعددی ایجاد می‌کند که جذاب به نظر نمی‌رسد. هرچند که این مسئله قدری سلیقه‌ای است و همچنین شاید جذابیت یک نظریه دلیل محکمی برای رد یا تأیید آن نباشد.

۳. مسئلهٔ تنظیم ظریف و تورم

توصیف تاریخچهٔ گرمایی با استفاده از نظریه‌های نسبیت عام و کوانتوم به طرز شگفت‌آوری موفق بوده است و توسط مشاهدات و رصدهای متعددی تأیید شده است. اما همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، علاوه بر مواد موجود در کیهان که توسط معادلات نسبیت عام دینامیک کیهان را به دست می‌دهند، به شرایط اولیهٔ مناسب برای ارائهٔ یک توصیف کامل احتیاج داریم. با بررسی امکانات مختلف برای شرایط اولیهٔ کیهان، دچار مسئله‌ای می‌شویم که به عنوان تنظیم ظریف شناخته می‌شود. به طور مختصر، این مسئله به تنظیم دقیق شرایط اولیه ــ در میان تمام شرایط ممکن ــ اشاره دارد. به بیان دیگر، با توجه به اینکه شرایط متعددی می‌توانست در کیهان اولیه حاکم باشد (که قوانین فیزیکی که از آنها آگاه هستیم آنها را محدود نمی‌کنند)، به نظر می‌رسد یک مجموعه از شرایط خیلی خاص با دقت بسیار بالا نیاز است که جهانی که مشاهده می‌کنیم به وجود آمده باشد. اندک تغییری در این شرایط (که می‌تواند به صورت کاملاً طبیعی توسط افت‌وخیزهای دمایی یا کوانتومی رخ دهد) می‌توانست به جهانی بسیار متفاوت از آنچه که می‌بینیم بینجامد. به عنوان مثال، اشاره کردم که جهان در مقیاس‌های بزرگ همگن و همسانگرد به نظر می‌رسد. این در حالی است که با در نظر گرفتن تاریخچهٔ گرمایی کیهان، به این نتیجه می‌رسیم که نواحی زیادی از کیهانی که اکنون مشاهده می‌کنیم فاقد هرگونه رابطهٔ علّی با همدیگر بوده‌اند چرا که به دلیل وسعت کیهان، حتی نور هم فرصت انتشار از یک نقطه به نقطهٔ دیگر نداشته است. بنابراین، این نواحی اگر در ابتدا با هم متفاوت بوده باشند، فرصت همدما و همگن شدن را نداشته‌اند. این بدین معناست که شرایط اولیه برای نواحی بسیار دور از هم با دقت بسیار زیاد، به صورت یکسان قرار داده شده است در حالی که نواحی دور از هم به راحتی می‌توانستند بسیار متفاوت باشند. این یک نوع از مسئلهٔ تنظیم ظریف است. مسائل تنظیم ظریف شرایط اولیه به همگنی و همسانگردی کیهان محدود نیست ولی به این مثال اکتفا می‌کنم.

خوب، این مسئله به نظر یک مشکل فلسفی است، که البته درست است و در فلسفه دربارهٔ آن بحث می‌شود. اما به دید علمی هم می‌توان نگران این موضوع بود. شاید مهمترین دلیل این است که هرگاه با مسئلهٔ تنظیم ظریف روبه‌رو می‌شویم، این احتمال هست که تنظیم ظریف نه در واقعیت بلکه ناشی از جهل ما نسبت به مسئله باشد و نشان از فیزیک جدیدی داشته باشد که باید سعی در کشف آن داشته باشیم. این مسئله در تاریخ علم هم تجربه شده است. یک نمونهٔ تاریخی معروف مربوط است به سرعت امواج الکترومغناطیسی. ماکسول (Maxwell) در دههٔ ۱۸۶۰ میلادی تلاش کرد که قوانین حاکم بر میدان‌های الکتریکی

و مغناطیسی را در یک چارچوب ــ تحت نظریهٔ الکترومغناطیسی ــ بیان کند. با استفاده از این نظریه، او معادلاتی به دست آورد که انتشار امواج الکترومغناطیسی را بیان می‌کرد و بلافاصله متوجه شد که سرعت انتشار این امواج بسیار به سرعت انتشار نورِ اندازه‌گیری‌شده ــ با دقت‌های آن زمان ــ نزدیک است. این تساوی یک نوع تنظیم ظریف است. اما ماکسول به گزارش این تنظیم ظریف بسنده نکرد و نتیجه گرفت که نور در واقع یک موج الکترومغناطیسی است، که نتیجه‌گیری درستی هم بوده است. این مثال نشان می‌دهد که تلاش برای توضیح تنظیم ظریف می‌تواند به درک ما از طبیعت کمک شایانی بکند.

برگردیم به مسئلهٔ تنظیم ظریف در کیهانشناسی. آلن گوث (Alan Guth) در سال ۱۹۸۰ میلادی و پس از آنکه از این مسئله در کیهانشناسی مطلع شد، تلاش کرد که توضیحی برای این تنظیم ظریف ارائه دهد. او اسم این ایده را تورم (inflation) گذاشت: اگر جهان در زمانی که بسیار جوان بوده، یک فاز انبساط بسیار شدید و تندشونده را تجربه کرده باشد می‌توان همگنی و همسانگردی جهان را توضیح داد بدون این که نیاز به تنظیم ظریف وجود داشته باشد. این ایده آنچنان موفقیت‌آمیز بوده است که امروزه به عنوان بخشی از تاریخچهٔ کیهان توسط طیف وسیعی از کیهانشناسان پذیرفته شده است.[۲] به زبان ساده، این فاز تورمی باعث می‌شود که قسمت کوچکی از جهان ــ که در تعادل ترمودینامیکی و تقریباً همگن بوده است ــ به شدت منبسط شود و جهان کنونی را بسازد. بنابراین، دیدن جهانی همگن و همسانگرد با این وسعت توضیح داده می‌شود. طول دورهٔ تورم به برخی جزئیات بستگی دارد که بحث راجع به آنها در این مقال نمی‌گنجد اما برای داشتن یک تخمین نوعی، حالتی را در نظر بگیرید که تورم در زمان 10^{-38} ثانیه از آغاز کیهان (متناظر دمای 10^{29} درجهٔ سانتی‌گراد [۳]) شروع می‌شود. در این صورت، اگر تورم به مدت تقریباً 10^{-36} ثانیه طول بکشد برای حل کردن مسئلهٔ تنظیم ظریف کاملاً کافی خواهد بود. در این مدت بسیار کوتاه، ابعاد کیهان براثر تورم 10^{43} برابر می‌شود!

موفقیت تورم به حل مسئلهٔ تنظیم ظریف محدود نمی‌شود. تورم همچنین توضیح زیبایی برای منشاء افت‌وخیزهای کیهانی (که در تابش زمینهٔ کیهانی (شکل ۲) و همچنین تشکیل ساختارهای بزرگ ردپای آن را می‌بینیم) ارائه می‌دهد: در مقیاس‌های بسیار کوچک، افت‌وخیزهای کوانتومی به صورت طبیعی وجود دارند که طبق نظریهٔ کوانتوم از آنها گریزی نیست و نظریهٔ کوانتوم می‌تواند آنها را به خوبی توصیف کند.

۲. البته توجه شود که تورم ــ علی‌رغم موفقیت‌هایی که در توضیح پدیده‌های کیهانی داشته است ــ مخالفان سرسختی نیز دارد. دلایل مخالفان و پاسخ‌های احتمالی، خارج از حوصلهٔ این مقاله است.

۳. این دما متناظر با انرژی نظریهٔ یکپارچهٔ بزرگ (Grand Unified Theory) انتخاب شده است.

تورم، این افت‌وخیزهای کوانتومی را با ایجاد انبساط بسیار شدید در کیهان کشیده و آنها را تبدیل به افت‌وخیزها در مقیاس‌های کیهانی می‌کند! بنابراین آمار افت‌وخیزهایی که در کیهان مشاهده می‌کنیم باید با آمار این افت‌وخیزهای کوانتومی اولیه رابطه داشته باشد. تورم این رابطه را پیش‌بینی می‌کند که با مشاهدات سازگاری بسیار خوبی دارد. در واقع از شش پارامتر در کیهانشناسی دو پارامتر آن مربوط به همین آمار افت‌وخیزهای اولیه است. یک پارامتر، اندازهٔ نوعی این افت‌وخیزها را نشان می‌دهد که حدود 10^{-5} (و بنابراین بسیار کوچک) است. کمیت دیگر مربوط است به اینکه بزرگی نوعی این افت‌وخیزها چطور با تغییر مقیاس تغییر می‌کند، که به آن اندیس طیفی (spectral index) گفته می‌شود. اگر این عدد، ۱ باشد به این معنی است که اندازه نوعی افت‌وخیزهای اولیه به مقیاس وابسته نیست. مشاهدات، عدد ۰/۹۷ را به دست می‌دهد که بدین معناست که اگر به مقیاس‌های کوچکتر نگاه کنیم اندازهٔ افت‌وخیزهای اولیه قدری کمتر می‌شوند. به سادگی می‌توان این دو عدد را در مدل‌های تورمی توجیه کرد.

یک سؤال که به طور طبیعی پیش می‌آید این است که آیا برای وقوع خودِ تورم نیاز به شرایط اولیهٔ خاص ــ و بنابراین تنظیم ظریف ــ داریم یا خیر. متأسفانه ــ به دلایل متعددی ــ جواب به این سؤال بسیار سخت است و هنوز این مسئله در دست بررسی و تحقیق است [2].

۱.۳ تورم ابدی و چندجهانی

ایدهٔ تورم در کنار موفقیت‌هایش، تبعاتی نیز دارد که قدری چالش‌برانگیز است. به نظر می‌رسد که دورهٔ تورم در جهانی که مشاهده می‌کنیم موقت بوده است و بعد از یک دورهٔ کوتاه متوقف شده است. اما تورم در نواحی دیگری از کیهان می‌تواند برای مدت طولانی‌تری تداوم داشته باشد. اگر کل جهان را به قسمت در حال تورم و قسمت‌هایی که تورم در آنها پایان یافته تقسیم کنیم، از آنجا که تورم باعث انبساط بسیار سریع می‌شود، این امکان وجود دارد که نواحی بسیار بیشتری از کیهان ــ نسبت به آن ناحیه‌ای که ما مشاهده می‌کنیم ــ هنوز در حال تورم باشند و این تورم ادامه پیدا کند. به عبارت دیگر تورم ممکن است ابدی باشد. نتیجهٔ طبیعی تورم ابدی این خواهد بود که ما با جهانی بسیار بسیار بزرگتر از آنچه برای ما قابل مشاهده است روبه‌رو خواهیم بود، که به مسئله چندجهانی (multiverse) معروف شده است.

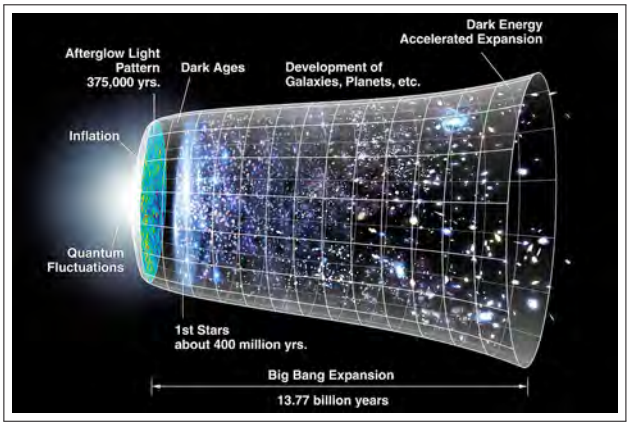
باز هم در این موضوع پای فلسفه باز می‌شود. می‌توان پرسید آیا اصلاً صحبت از جهانی که قسمت اعظم آن غیر قابل دسترسی است ــ و حتی نور آن نواحی هم فرصت رسیدن به ما را پیدا نکرده ــ به لحاظ علمی توجیهی دارد یا خیر. و اگر بله، آیا می‌توان ارزیابی‌های

مرسوم علمی را برای مقایسهٔ نظریه‌های چندجهانی با یکدیگر و یافتن بهترین نظریه به کار بست یا خیر. جواب‌های متعدد و بعضاً متضاد به این سؤالات داده شده است. اما به نظر من ــ فارغ از اینکه آیا چنین سؤالی در قالب علم تجربی (empirical science) می‌گنجد یا نه (که به این بستگی دارد که علم را چگونه تعریف می‌کنیم) ــ اگر چندجهانی امکان وقوع داشته باشد باید به آن پرداخت، همانند بسیاری دیگر از کنجکاوی‌های بشری راجع به حقایق این عالم. روش‌های علمی مرسوم طبیعتاً در این حوزه دچار چالش‌هایی می‌شوند اما باید سعی داشت بر این چالش‌ها فائق آمد یا روش‌های جدیدی را ابداع کرد. از این گذشته، حتی اگر تنها به چیزهایی که مشاهدهٔ مستقیم آنها امکان‌پذیر است اهمیت می‌دهیم ــ که من اینچنین فکر نمی‌کنم ــ در نظر گرفتن چندجهانی می‌تواند به حل برخی مسائل کمک کند. یک نمونه از این مسائل، تنظیم ظریف پارامترها و قوانین فیزیکی برای امکان تداوم حیات است که به نظر می‌رسد در یک جهان با ابعاد کوچک وجود دارد. اما اگر چندجهانی واقعیت داشته باشد و قوانین فیزیکی در نقاط مختلف کیهان متفاوت باشند، در این جهان بسیار گسترده، احتمال اینکه یک ناحیه با قوانین مناسب برای تداوم حیات وجود داشته باشد می‌تواند زیاد باشد. در این صورت نیاز به تنظیم ظریف قوانین و پارامترهای فیزیکی نخواهیم داشت [3].

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی کردم راجع به تاریخچهٔ کیهان و گزارهٔ مشهور مربوط به آن که «جهان را می‌توان با شش پارامتر توصیف کرد» توضیح مختصری ارائه دهم. شکل ۶ یک جمع‌بندی کلی از مباحث مطرح شده ارائه می‌دهد. از این شش پارامتر ــ همان‌طور که دیدیم ــ دو پارامتر مربوط به شرایط اولیه است که یکی اندازهٔ نوعی افت‌وخیزهای اولیه و دیگری اندیس طیفی آنها (یعنی وابستگی اندازهٔ افت‌وخیزها به مقیاس) را مشخص می‌کند. این افت‌وخیزهای اولیه در نهایت رد پای خود را روی تابش زمینهٔ کیهانی و ساختارهای بزرگ‌مقیاس به جای می‌گذارند. دو پارامتر دیگر، سهم دو مؤلفهٔ کیهان (با منشاء ناشناخته) یعنی مادهٔ تاریک و انرژی تاریک را در چگالی انرژی عالم بیان می‌کنند. مادهٔ تاریک در تشکیل ساختارهای بزرگ‌مقیاس نقش اساسی ایفا می‌کند، در حالی که انرژی تاریک مسئول انبساط تندشوندهٔ عالم در دورهٔ اخیر کیهان می‌باشد. یک پارامتر دیگر، عمق نوری است که احتمال برخورد فوتون‌های تابش زمینهٔ کیهانی را با الکترون‌های آزادشده پس از گرم شدن محیط توسط ستاره‌ها تعیین می‌کند. در نهایت، یک پارامتر هم عمر کیهان را بیان می‌کند.

علم کیهانشناسی با استفاده از ابزارهای نظری و تکنولوژی، درک ما را از جهان به‌کلی تغییر داده است. اما این به معنای تمام شدن



شکل ۶. خلاصه‌ای از تاریخچهٔ گرمایی کیهان. اعداد در این شکل قدری دقیق‌تر از آنچه هستند که در متن ذکر شده است. (منبع maps.gsfc.nasa.gov).

کیهانشناسی نیست بلکه تازه در اول راه هستیم، به این معنی که شناخت ما از جهان نه تنها کامل نیست بلکه حدود یک قرن فعالیت در حوزهٔ کیهانشناسی ما را به این نتیجه رسانده که نادانی‌های بسیار اساسی در مورد کیهان داریم. اما این خود یک قدم بزرگ برای کشف حقایق عالم است: شاید بتوان گفت که ما در حال گذار از جهل مرکب به جهل بسیط هستیم. تا چند دهه پیش کسی فکر نمی‌کرد که ما نسبت به ۹۵٪ مادهٔ موجود در کیهان (مادهٔ تاریک و انرژی تاریک) شناخت بسیار اندکی داریم. به علاوه، امکان وقوع چندجهانی ما را به این نتیجه می‌رساند که با ابزارهای کنونی در حوزهٔ علم تجربی ممکن است دستیابی به دانشی کامل در مورد کل کیهان امکان‌ناپذیر باشد.

داده‌های جدید که در آیندهٔ نزدیک توسط دستگاه‌های دقیق و پیشرفته جمع‌آوری خواهند شد، به همراه توسعه و تکمیل نظریه‌ها می‌تواند در یافتن جواب به سؤالات حوزهٔ کیهانشناسی کمک شایانی بکند، اما باید توجه داشت که تضمینی برای آن وجود ندارد مخصوصاً به این دلیل که محدودیت‌های اساسی ما در دسترسی به نقاط دوردست کیهان، باعث می‌شود که مقدار داده‌ای که می‌توان علی‌الاصول به دست آورد محدود باشد. ■

مراجع

1 **S. Weinberg**, *The First Three Minutes. A Modern View of the Origin of the Universe*, Basic Books, New York, 1977.

2 **Alan Guth**, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Perseus Books, New York, 1997.

3 **D. Perlov** and **A. Vilenkin**, *Cosmology for the Curious*, Springer, New York, 2017.