

تابش ریز موج زمينه‌ی کیهانی، نقشه‌ای دقیق از کیهان

حسین مصحفی

hosseinmoshafi@gmail.com

در این نوشتار، با تابش ریزموج زمينه‌ی کیهانی آشنا خواهیم شد. فیزیک این تابش و ناهمسان‌گردی‌ها را خواهیم شناخت و اطلاعات ارزشمندی که تابش زمينه پیرامون کیهان می‌دهد را مرور می‌نماییم. در پایان با برخی از خواص آماری تابش آشنا می‌شویم.

مقدمه

تابش ریزموج زمينه‌ی کیهانی^۱ پدیده‌ی آشنایی‌ست که هر کدام از ما احتمالاً بارها با آن برخورد کرده‌ایم! وقتی شما دستگاه گیرنده‌ی تلویزیونی را تنظیم می‌کنید، حدود یک درصد از نویزهایی که به صورت برفک مشاهده می‌کند را تابش زمينه‌ی کیهان، آخرین بازمانده‌ی عالم اولیه تشکیل می‌دهد.

خصوصیت شگفت‌آور و مهمی که تابش زمينه یا همان CMB دارد، همگنی و (تقریباً) همسان‌گردی آن است. این موضوع را پنزیاس و ویلسون، دو مهندس مخابرات که در سال ۱۹۶۵ بر روی نوعی از آنتن‌ها کار می‌کردند، به خوبی درک کردند. این دو نفر در هنگام کار متوجه شدند که نوعی نوفه^۲ دریافت می‌کنند که از مستقل از جهت و مکان آنتن به طور ثابت وجود دارد. امروزه با رصدهای بسیار دقیق بر ما روشن است که تابش CMB در همه جای کیهان و در تمامی جهت به طور یکسان وجود دارد. این یعنی همگنی و همسان‌گردی در کیهان.

در سال ۱۹۹۰، ماهواره‌ی کُبی^۳ طیف تابش زمينه را اندازه‌گیری نمود. کُبی کشف مهمی برای ما به ارمغان آورد. طیف تابش زمينه کاملاً همسان‌گرد نیست، بلکه در جهات مختلف تغییراتی از مرتبه‌ی 10^{-5} از خود نشان می‌دهد. با این کشف، تلاش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری دقیق‌تر ناهمسان‌گردی‌ها آغاز شد.

تاکنون سؤالاتی از این قبیل برای شما پیش آمده است؟

- در کجای عالم انفجار بزرگ اولیه رخ داده است؟

- چگونه جسمی می‌تواند در فاصله‌ای بیش از ۱۴ میلیارد

سال نوری قرار گرفته باشد در حالی که سن عالم فقط حدود ۱۴

میلیارد سال است؟

- قبل از انفجار بزرگ اولیه چه چیز بوده است؟

- انرژی تاریک و ماده تاریک چه هستند؟

این‌ها بخشی از سؤالاتی است که فیزیکدانان به دنبال پاسخ آن‌ها می‌باشند. به سبب محدود بودن سرعت نور با نگاه کردن به اعماق کیهان در حقیقت می‌توان ماشین زمانی ساخت که ما را به دوره‌های اولیه‌ی کیهان ببرد و پاسخی برای سؤالات خود بیابیم.

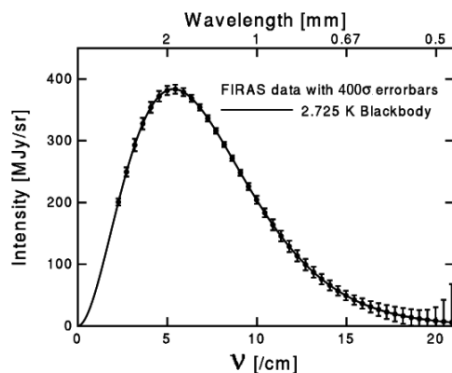
در آغاز، کیهان، مملوء از فوتون و ذرات بنیادی بود. با گذشت زمان و تشکیل ذرات، فوتون‌های پر انرژی در مه‌ای از ذرات گرفتار شدند و عالم به دوره تاریکی فرو رفت. هنگامی که عالم حدود ۳۸۰۰۰۰ سال از عمر خود را سپری می‌کرد، دمای کیهان به اندازه‌ی کافی پایین آمده بود تا الکترون‌ها و پروتون‌ها مقید شده، اتم‌های خنثی تشکیل شوند و فوتون‌ها نیز اجازه‌ی پراکنده شدن از میان اتم‌ها را یافتند. این‌جا نقطه‌ی آغاز تابش الکترومغناطیسی زمينه‌ی کیهان است.

^۱ Cosmic Microwave Background Radiation

^۲ Noise

^۳ Cosmic Background Explorer (COBE)

شاهدی بر این است که عالم در آغاز بسیار داغ و چگال بوده است.



شکل ۱- انطباق بسیار زیاد طیف CMB با طیف جسم سیاه پلانک [۵]

ناهمسان‌گردی‌های تابش زمينه

ناهمسان‌گردی‌های CMB شاید مهم‌ترین و ارزشمندترین ویژگی این تابش باشند. هر چند مقدار این افت‌وخیزها کوچک است اما حجم اطلاعات درون آن‌ها بسیار بزرگ است. افت‌وخیزها یا همان ناهمسان‌گردی‌های روی CMB به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- افت‌وخیزهای اولیه

- افت‌وخیزهای ثانویه

در ادامه هر یک از این دو دسته افت‌وخیزها را بحث می‌نماییم.

✓ افت‌وخیزهای اولیه

افت‌وخیزهای اولیه در زمان جدا شدن تابش از آخرین سطح پراکندگی رخ داده‌اند. یعنی اثراتی که در زمان آغاز انتشار CMB غالب بوده‌اند. این افت‌وخیزها به چند نوع تقسیم می‌شوند:

- اثر دوپلر

اثر دوپلر بر روی تابش CMB به دو گونه‌ست. یک اثر، اثری موضعی ناشی از حرکت ناظر نسبت به تابش است.

در سال ۲۰۰۱ ماهواره‌ی دبلیومپ^۴ به منظور سنجش دقیق ناهمسان‌گردی‌ها پرتاب شد و نتایج آن (که اخیراً نیز داده‌های ۷ ساله‌ی دبلیومپ منتشر شد) نشان داد که الگوی افت‌وخیزهای دمایی CMB از پیش‌بینی‌های نظریه‌های کیهان‌شناختی تبعیت می‌کنند یعنی نقاط داغ و سرد در نقشه‌ی دمایی CMB نشان‌دهنده‌ی طول‌های مشخصه در کیهان هستند. کیهان‌شناس‌ها از روی داده‌های افت‌وخیز CMB می‌توانند، سن عالم، اجزای سازنده‌ی عالم و همین‌طور هندسه‌ی عالم را بدست آورند.

فیزیک تابش زمينه‌ی کیهانی

همان‌طور که ذکر شد، CMB در واقع تصویری از عالم در سن ۳۸۰۰۰۰ سال است. در این دوره دمای عالم به حدود ۴۰۰۰ کلوین یا $0.25eV$ رسیده بود و این پایین‌تر از انرژی مورد نیاز برای یونیزاسیون هیدروژن، $13.6eV$ است؛ پس الکترون‌ها و پروتون‌ها توانستند اتم‌های خنثی را تشکیل بدهند. در ادبیات کیهان‌شناسی به این اتفاق و دوره، بازترکیب^۵ می‌گویند. در این دوره، کیهان برای فوتون‌ها شفاف شد و فوتون‌ها توانستند از میان اتم‌ها و ذرات پراکنده شوند و در کیهان انتشار یابند. این پراکندگی را در اصطلاح، سطح آخرین پراکندگی^۶ گویند. بنابراین تابش CMB چیزی جز یک تابش الکترومغناطیسی نیست که در ابتدا دارای طول موج‌های کوتاه بوده اما به همراه انبساط کیهان، طول موج این تابش نیز افزایش یافته و امروزه در طول موج‌های ریزموج قرار دارد.

نکته مهم دیگر پیرامون CMB، هم‌خوانی بسیار دقیق آن با طیف جسم سیاه پلانک است. طیف CMB دقیق‌ترین طیف جسم سیاه موجود در طبیعت است (شکل پایین). این خود

^۴ Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

(WMAP)

^۵ Recombination

^۶ Last Scattering Surface

طی رسیدن به ما بر روی CMB نقش بسته‌اند. این اثرات به چند دسته تقسیم می‌شوند:

▪ اثر سَکس- ولف پیوسته

اگر فوتون در مسیر خود یک چاه پتانسیل ببیند که با زمان تغییر نمی‌کند، با ورود به چاه انرژی کسب کرده و در هنگام خروج همان مقدار انرژی را پس می‌دهد و تغییری حاصل نمی‌شود. اما اگر عمق چاه پتانسیل با زمان تغییر کند و مقیاس زمانی این تغییرات با مقدار زمانی که فوتون لازم دارد تا از چاه خارج شود قابل مقایسه باشد، تغییر بر روی انرژی فوتون صفر نخواهد شد و اثر سَکس- ولف پیوسته^۸ پدید می‌آید. اثر ISW به ویژه در دوره‌های اخیر عالم به دلیل غالب شدن انرژی تاریک که موجب انبساط شتاب‌دار عالم و در نتیجه تحول چاه پتانسیل ماده می‌شود، مهم خواهد شد.

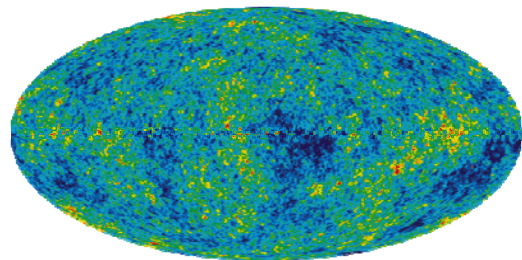
نکته دیگر این که اگر اثر ISW به واسطه عبور فوتون‌ها از ساختارهای غیر خطی ایجاد شود، اثر سَکس- ولف پیوسته‌ی غیر خطی بوجود می‌آید که به آن اثر ریس- سیاما^۹ می‌گویند.

▪ اثر سونیاِف- زلدوویچ

در هنگام تشکیل ساختارهای عالم، نواحی گازی داغ در میان خوشه‌های کهکشان‌ها تشکیل یافته‌اند. ما با پراکندگی کامپتون فوتون از الکترون کم انرژی آشنا هستیم. اما وقتی فوتون از الکترون داغ و پراثری پراکنده می‌شود پراکندگی کامپتون معکوس رخ داده، فوتون از الکترون انرژی کسب می‌کند. این فرآیند، فوتون‌های کم انرژی را به بخش پر انرژی طیف می‌راند و طیف جسم سیاه کمی تغییر می‌کند.

یعنی در نقشه‌های دمایی CMB یک دو قطبی دیده می‌شود که ناشی از حرکت ماهواره یا وسیله اندازه‌گیر نسبت به تابش است.

اما اثر ذاتی و اولیه، ناشی از حرکت کاتوره‌ای نقاط تابنده بر روی سطح آخرین پراکندگی است. این اثر ذاتی در زمان آغاز تابش فوتون از سطح آخرین پراکندگی (یا دیوار CMB) بوجود آمده است.



شکل ۲- نقشه‌ی ناهمسان‌گردی‌های دمایی بدست آمده توسط WMAP [۶]

• اثر سَکس- ولف

اثر سَکس- ولف^۷ به طور ساده اثر افت‌وخیز پتانسیل گرانشی بر روی سطح آخرین پراکندگی بر تابش زمینه است. می‌دانیم فوتون در هنگام ورود به چاه پتانسیل گرانشی انرژی گرفته و انتقال به آبی پیدا می‌کند و بالعکس. در زمان باز ترکیب و روی سطح آخرین پراکندگی نیز افت‌وخیزهای مختلف ماده وجود داشته و چاه‌های پتانسیل متعددی برای فوتون‌ها وجود داشته. حال، بسته به این که چاه‌های پتانسیل چقدر سریع از بین بروند، فوتون‌ها از ته یک چاه پتانسیل یا قله پتانسیل به ما رسیده‌اند و این سبب انتقال به سرخ‌های آبی و قرمز در طیف CMB گشته است. پس به بیان ساده اثر سَکس- ولف، افت‌وخیز میدان پتانسیل گرانشی را به افت‌وخیز دمایی تابش مربوط می‌کند.

✓ افت‌وخیز ثانویه

افت‌وخیزهای ثانویه همان‌طور که از نامش برمی‌آید اثراتی هستند که بعد از جدا شدن از آخرین سطح پراکندگی و در

^۸ Integrated Sachs- Wolfe effect

^۹ Rees- Sciama

^۷ Sachs- Wolfe effect

فوتون‌ها در زمان باز ترکیب نور قطبیده در CMB را تولید کرده است.

اگرچه قطبش تابش زمينه کمی بعد از کشف آن پیش‌بینی شد اما به دلیل کافی نبودن دقت ابزارهای اندازه‌گیری تا سال‌های اخیر چیز زیادی پیرامون قطبش CMB نمی‌دانستیم. تابش CMB در مقیاس حدود میکرو کلون قطبیده است. این تابش دو نوع قطبش دارد، مدهای E و مدهای B. مدهای E به طور طبیعی از پراکندگی تامسون در یک پلاسمای ناهمگن ناشی می‌شوند. مدهای B، که تاکنون اندازه‌گیری نشده‌اند و تصور می‌شود که دامنه‌ای حدود ۰/۱ میکرو کلون داشته باشند، فقط از فیزیک پلازما ناشی نمی‌شوند. آن‌ها نشانه‌هایی از تورم کیهانی هستند و توسط چگالی امواج گرانشی اولیه تعیین می‌شوند. آشکارسازی مدهای B نیاز به دقت بسیار زیادی دارد.

مشاهدات تابش ریز موج زمينه

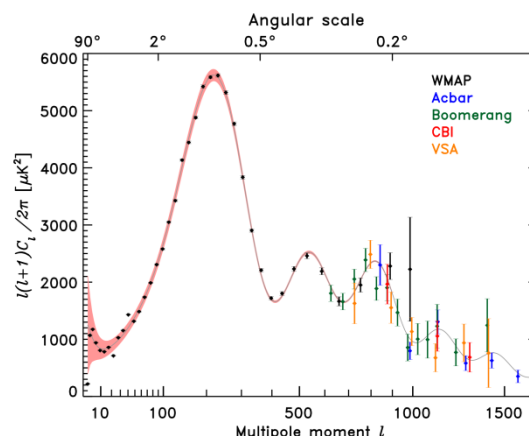
از زمان کشف CMB، صدها آزمایش انجام شد تا ویژگی‌های تابش را مشخص و اندازه‌گیری نمایند. ماهواره کبی که ناسا در سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۶ انجام داد نو جایزه نوبل ۲۰۰۶ را به خود اختصاص داد، اهم‌سان‌گردی‌ها را با دقت زاویه‌ای 7° اندازه‌گیری کرد. با الهام‌گیری از نتایج اولیه کبی، یک سری از آزمایش‌های زمینی و توسط بالون، ناهم‌سان‌گردی‌های CMB را در مقیاس‌های زاویه‌ای کوچک طی دهه‌ی گذشته اندازه گرفته‌اند. برخی از تداخل‌سنجی‌های زمینی اندازه‌گیری افت و خیزها با دقت بالاتر را در سال‌های اخیر فراهم کرده‌اند که شامل VSA^{12} ، $DASI^{13}$ و CBI^{14}

این اثر بر روی تابش زمينه، معروف به اثر سوناف-زلدوویچ^{۱۰} است.

■ اثر هم‌گرایی گرانشی

هم‌گرایی گرانشی که از نتایج نسبیت عام است، می‌تواند مسیر حرکت فوتون‌ها را تغییر دهد اما انرژی آن‌ها را دست نمی‌زند. اثر هم‌گرایی گرانشی ضعیف، در حقیقت ایجاد اعوجاج در تصویر ما از آخرین سطح پراکندگی است.

محاسبه‌ی مجموع تمام این اثرات ناهم‌سان‌گردی بر روی CMB نیاز به حل مجموعه معادلات جفت‌شده‌ی اینشتین-بولتزمن^{۱۱} دارد. برای حل این مجموعه معادلات، کدهای رایانه‌ای مختلفی نوشته شده که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به $CAMB$ [۷] و $CMBFAST$ [۸] اشاره کرد.



شکل ۳- طیف توان ناهم‌سان‌گردی‌های CMB به دست آمده از رصد [۶]

قطبش تابش زمينه‌ی کیهان

اندازه‌گیری طیف ناهم‌سان‌گردی‌های دمایی طی دهه‌های اخیر اطلاعات بسیار زیادی پیرامون فیزیک کیهان در اختیار ما نهاده است. اما تابش CMB علاوه بر این افت‌وخیزهای دمایی، دارای ویژگی قطبش نیز می‌باشد. پراکندگی تامسون

^{۱۲} Very Small Array

^{۱۳} Degree Angular Scale Interferometer

^{۱۴} Cosmic Background Imager

^{۱۰} Sunyaev-Zel'dovich

^{۱۱} Einstein- Boltzmann equations

۲ ماه به فاصله 1.5 میلیون کیلومتری از زمین رسید و حول نقطه‌ی لاگرانژی دوم شروع به گردش نمود.

پلانک با دقت زاویه‌ای $5'$ (دقیق قوسی) و حساسیت دمایی 2×10^{-6} و باند فرکانسی $30 - 857 GHz$ ناهمسان‌گردی‌های دمایی را اندازه می‌گیرد. همچنین وظیفه‌ی مهم دیگر پلانک، اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر قطبش تابش زمينه است.

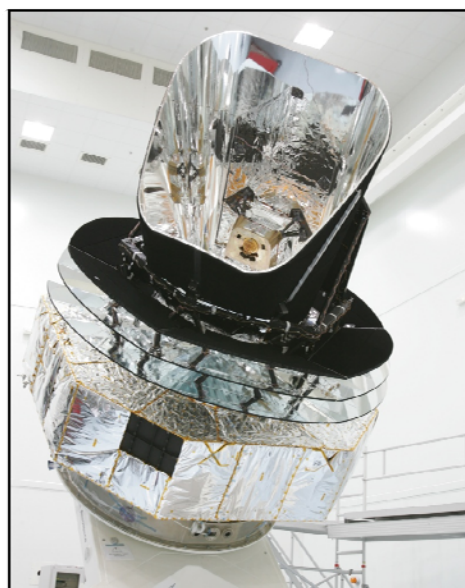
خواص آماری تابش زمينه کیهانی

(۱) **گوسی بودن:** اگر عواملی که منجر به ایجاد افت‌وخیز دما بر روی سطح آخرین پراکندگی شده‌اند را بتوان به طور مستقل در نظر گرفت در آن صورت بر اساس قضیه‌ی حد مرکزی انتظار داریم که تابع توزیع این افت‌وخیزها با دقت خوبی با شکل تابع گوسی هم‌خوانی داشته باشد.

از آن‌جا که بذر افت‌وخیزهای اولیه در دوران به اصطلاح تورمی ریخته شده است بنابراین هرگونه بررسی از این نقطه نظر نه تنها می‌تواند اطلاعاتی پیرامون شرایط اولیه مربوط به آن را بدست دهد بلکه با توجه به خصوصیت تابع گوسی در آن صورت ممان‌های مرتبه دوم اطلاعات آماری بسیاری پیرامون این نقشه بدست می‌دهد که اهمیت آن را از نظر صرف هزینه برای ساخت آشکارسازهایی که دقت بالایی نیاز ندارد را به خوبی آشکار می‌کند. هرگونه انحراف از گوسی بودن نظریه‌های دیگری چون نواقص توپولوژیکی و مدل‌های غیر استاندارد تورم و البته وجود ریسمان‌های کیهانی را مورد توجه قرار می‌دهد.

(۲) **همسان‌گردی آماری:** یکی دیگر از مهم‌ترین خصوصیات آماری نقشه دو بعدی بر روی سطح کره‌ی CMB می‌باشد. به بیان ساده وجود این خاصیت سبب می‌شود که همبستگی دو نقطه‌ای بر روی این نقشه در اثر دوران تحت زوایای اوپلر ناوردا

می‌شوند. در حقیقت، DASI اولین آشکارسازی از قطبش CMB را انجام داد.



شکل ۴- نمایی از ماهواره‌ی پلانک [۳]

در ژوئن ۲۰۰۱، ناسا دومین ماهواره‌ی CMB، دبلیومپ را برای تهیه اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر از ناهمسان‌گردی‌های بزرگ مقیاس در سراسر آسمان به فضا پرتاب کرد. اولین نتایج این مأموریت که اندازه‌گیری‌های طیف توان زاویه‌ای را با دقت زاویه‌ای $13'$ (دقیقه قوسی) فراهم کرد، در سال ۲۰۰۳ منتشر شد. نتایج با نتایج مورد انتظار تورم کیهانی به خوبی سازگار هستند. اگرچه دبلیومپ اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از افت و خیزهای CMB فراهم کرده، اما دقت لازم برای اندازه‌گیری افت و خیزهای کوچک مقیاس که با استفاده از تداخل‌سنجی‌های زمینی مشاهده شده‌اند را ندارد.

اما سومین ماهواره‌ی مهم که به منظور سنجش هرچه دقیق‌تر ناهمسان‌گردی‌های دمایی و قطبش تابش زمينه به فضا پرتاب شد، ماهواره‌ی پلانک^{۱۵} است که در ماه می ۲۰۰۹ به همراه ماهواره‌ی هرشل^{۱۶} به فضا پرتاب شد. پلانک پس از حدود

^{۱۵} Planck mission

^{۱۶} Herschel

منابع و مأخذ:

- [1] W. Hu and M. White, "The Cosmic Symphony", Scientific American, February 2004
- [2] astro-ph/9607088 : "Calculation of cosmic background radiation anisotropies and implications".
- [3] <http://www.sciops.esa.int/index.php?project=PLANCK>
- [4] <http://www.esa.int/SPECIALS/Planck/index.html>
- [5] <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
- [6] <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/>
- [7] <http://camb.info/>
- [8] http://lambda.gsfc.nasa.gov/toolbox/tb_cmb_fast_ov.cfm
- [9] S.M.S. Movahed, "PhD thesis".
- [10] A.Hajian, "Cosmic Microwave Background", Gamma magazine, no. 12.
- [11] V. Martinez , "Data Analysis in Cosmology", Springer, 2009

باشد. بر این اساس و با توجه به قضیه‌ی ارگودیک می‌توان از یک نقشه برای بررسی خواص آماری تابش زمينه‌ی کیهانی به خوبی استفاده کرد.

اگر همسان‌گردی آماری نقض شود در آن صورت تابع همبستگی دو نقطه‌ای لزوماً تابعی از فاصله زاویه‌ای دو نقطه بر روی نقشه نخواهد بود، پس برای بررسی خواص آماری مجبوریم از نقشه‌های متعددی برای متوسط‌گیری آماری استفاده کنیم و از آن‌جا که در عالم فقط یک نقشه داریم پس در این بخش متوقف خواهیم شد. در حضور ناوردایی همبستگی تحت دوران به راحتی می‌توان از یک نقشه برای متوسط‌گیری آماری بهره جست جز این‌که در زوایای بزرگ خطای کیهانی^{۱۷} غالب خواهد بود که این تنها محدودیت بزرگ تلقی خواهد شد. پس بررسی این خاصیت و تایید یا رد آن که تا کنون تقریباً به عنوان یک فرض اساسی در نظر گرفته شده است، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

(۳) **خواص فرکتالی:** خواص فرکتالی این تابش نیز گویای رفتارهای مقیاسی در شرایط اولیه ساختارهای بزرگ مقیاس کنونی عالم می‌باشد که این بخش هم اهمیت ویژه‌ای دارد که تا کنون به طور دقیق بحث و بررسی نشده است.