

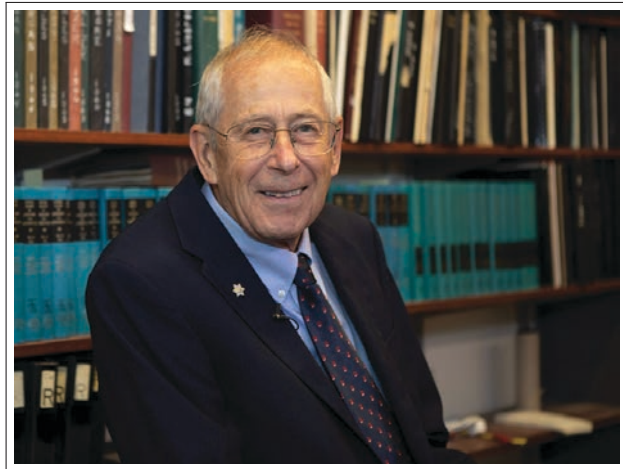
## سه‌می از جایزه نوبل برای کیهان‌شناسی فیزیکی

ریچل برگوویتز

جیمز پیبلز چارچوبی ریاضی برای توصیف تحول کیهان به دست آورد که پس از چندین دهه شواهد تجربی هنوز پابرجا مانده است.

بعد از پایان جنگ جهانی دوم، بحث‌های کیهان‌شناسی بر دو نظریه رقیب متمرکز بود: نظریه تحول نسبیتی که به نظریه مه‌بانگ (Big Bang theory) معروف شد، این فرض را می‌پذیرفت که عالم در آغاز نقطه‌ای بسیار پرچگال بوده که تمامی ماده موجود در عالم کنونی را در خود داشته است. نظریه دیگر، یعنی نظریه حالت پایا (steady state theory)، مفهوم لحظه آفرینش را نمی‌پذیرفت و فرض می‌کرد که کیهان انبساط می‌یابد اما پیوسته ماده خلق می‌شود طوری که میانگین چگالی عالم تغییر نکند (مقاله جفری بریج، فرد هویل، و جایانت نارلیکار را در صفحه ۳۸ شماره آوریل ۱۹۹۹ فیزیکس تودی ببینید). دیوید کایزر (David Kaiser) که متخصص تاریخ علم در ام‌آی‌تی است می‌گوید که «این بحث در حاشیه‌های فیزیک صورت می‌گرفت و از جریان اصلی پژوهش‌های فیزیکی دور بود.»

جیمز پیبلز، استاد دانشگاه پرینستون، این وضع را دگرگون کرد. در آغاز دهه ۱۹۶۰، او با نظریه‌های دقیق ریاضی چارچوبی برای تحول کیهان ساخت که شواهد تجربی تا به امروز آن را تأیید کرده است. او پرسش‌هایی را به میان آورد که تجزیه و تحلیل ریاضی را به نتایج بالقوه فیزیکی مرتبط می‌کند: مثلاً او پرسید که بر اساس شرایط مختلفی که می‌توانست در اولین لحظات عالم برقرار باشد چه الگویی را باید بتوان امروز در کهکشان‌ها مشاهده کرد. امسال فرهنگستان سلطنتی علوم سوئد برای قدرشناسی از کارهای علمی پیبلز، جایزه نوبل فیزیک را «به خاطر کشف‌های نظری در کیهان‌شناسی فیزیکی» به او اهدا کرد.



جیمز پیبلز

عالم هستی چگونه و چه زمان آغاز شد؟ سرانجام عالم چه خواهد بود؟ در آغاز قرن بیستم اینشتین و دیگران به این پرسش‌ها اندیشیدند. اما تا سال ۱۹۲۹ که مشاهدات ادوین هابل نشان داد کهکشان‌ها در همه جهت‌ها از ما دور می‌شوند، شواهد محکم تجربی برای تأیید هیچ‌یک از پاسخ‌های فرضی وجود نداشت. و تا نیمه دوم قرن طول کشید تا کیهان‌شناسی از رشته‌ای مجرد و نظری به زمینه‌ای تبدیل شود که در آن نظریه‌های پذیرفته‌شده باید با اندازه‌گیری‌ها در توافق باشد.

## مسیر متفاوت

به‌جز مشاهدات هابل، فقدان مشاهداتی که با آنها بتوان نظریه را آزمود کیهان‌شناسی را به علمی تبدیل کرده بود که با کمیت سر و کار ندارد بلکه فقط مبتنی بر حدس و گمان است. تنها در دهه ۱۹۵۰ بین ۳۰ تا ۴۰ مقاله کیهان‌شناسی در نشریات علمی ظاهر شد. هنگامی که پیبلز در سال ۱۹۵۸ برای آغاز دوره کارشناسی ارشد در پرینستون از مانیتوبا (Manitoba) به نیوجرسی نقل مکان کرد، بیشتر دانشجویان دکتری امکان گذراندن درسی درباره نظریه اسرارآمیز نسبیت عام را نداشتند.

پرینستون استثنا بود. جان ویلر (John Wheeler) در سال ۱۹۵۴ نسبیت عام را به دانشکده فیزیک آورد و گفت‌مان آکادمیک درباره مدل‌سازی پدیده‌ها در کهکشان خودمان و فراسوی آن را باب کرد (مقاله چارلز میزنر، کیپ تورن، و ویچک زورک در صفحه ۴۰ شماره آوریل ۲۰۰۹ فیزیکس تودی). پیبلز می‌گوید رابرت دیکی (Robert Dicke) که در دوران جنگ جهانی دوم در آزمایشگاه تابش ام‌آی‌تی (MIT's Radiation Laboratory) کار کرده بود و بعد در پرینستون کارهایش را بر اپتیک کوانتومی متمرکز کرده بود به این فکر افتاد که فیزیک گرانش «بیش از آن جالب است که بتوان فراموش کرد» (یادنامه دیکی به قلم ویلیام هارپر، جیمز پیبلز، و دیوید ویلکینسون را در صفحه ۹۲ شماره سپتامبر ۱۹۹۷ فیزیکس تودی ببینید). پیبلز برای کار دوره دکتری به گروه «جوجه‌دیکی‌ها»<sup>۱</sup> پیوست و با نظریه و آزمایش به آزمودن ایده‌های بنیادی در زمینه گرانش و نتایجی پرداخت که این ایده‌ها برای تحول کیهان در مقیاس عظیم در بر داشت. پیبلز می‌گوید که «بیرون از پرینستون کیهان‌شناسی موضوعی تقریباً ملال‌آور بود. کسی از من انتقاد نمی‌کرد اما این احساس به من دست می‌داد که همه در دلشان می‌گفتند درباره این مسائل «همان بهتر که تو کار کنی تا من»».

دیکی خود گفته که از کارهای نظریه پرداز شوروی-آمریکایی، جورج گاموف (George Gamow)، و همکاران او بی‌خبر بوده است که در بازنگری، همان نظریه کیهان‌شناختی معاصر است. گاموف در سال ۱۹۴۸ استدلال کرده بود که کیهان اولیه مهبانگ، کیهانی است که عنصر غالب در آن، تابش پراثریست (مقاله مایکل ترنر در صفحه ۸ شماره دسامبر ۲۰۰۸ فیزیکس تودی را ببینید). با انبساط عالم بیشتر آن انرژی به ماده تبدیل می‌شود اما بخشی از آن به شکل تابشی که دمایش به صفر مطلق نزدیک شده است در سرتاسر فضا باقی می‌ماند. در سال ۱۹۶۴ دیکی [هم] این ایده را مطرح کرد که پس‌مانده آن انرژی گرمایی اولیه باید به شکل تابش پس‌زمینه کیهانی (cosmic background radiation) هنوز وجود داشته باشد و پیشنهاد کرد که استاد تازه‌کار،

دیوید ویلکینسون (David Wilkinson)، راهی برای آشکارکردن این تابش پیدا کند و پیبلز هم که بعد از اتمام کار دکتری، کار پژوهش را در پرینستون ادامه داده بود نتایج نظری وجود یا فقدان چنین تابشی را بررسی کند. این راهنمایی دیکی مسیر زندگی حرفه‌ای پیبلز را مشخص کرد.

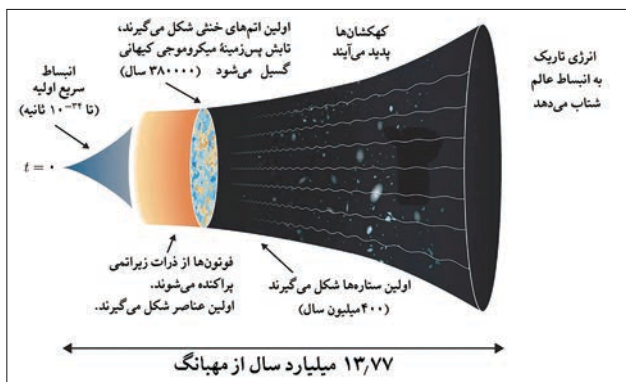
## فضله کبوتر یا تابش پس‌زمینه کیهان؟

در سال ۱۹۶۴، پیبلز دست‌نویس متنی را آماده کرد که چگونگی انبساط و خنک‌شدن «آذرگویی آغازین» (the primeval fireball) متشکل از ذرات زیراتمی و تابش، و آفرینش عالم از آن را توضیح می‌داد. با کاهش دمای عالم، ذرات بخشی از انرژی خود را از دست می‌دادند و هسته‌های اتمی با الکترون‌ها پیوند می‌خوردند و اتم‌های پایدار می‌ساختند. از آن زمان تابش که دیگر ماده بسیار یونیده پراکنده‌اش نمی‌کرد آزاده در عالم منتشر می‌شد در حالی که عالم انبساط می‌یافت تا به چگالی فعلی برسد.

پیبلز هم چنین پیش‌بینی کرد که این تابش، طیف گرمایی جسم سیاه (thermal blackbody spectrum) را خواهد داشت و محاسبه کرد که دمای این طیف باید از مقدار اولیه ۱۰۱۰ کلوین به مقدار ۱۰ کلوین رسیده باشد. هم‌زمان همکاران او، دیوید ویلکینسون و پیتر رول (Peter Roll) تابش‌سنجی (radiometer) ساختند که بتوانند با آن تابش با طول‌موج ۳ سانتی‌متر را اندازه بگیرند. این طول‌موج به این دلیل انتخاب شد که بتوان اطمینان داشت تابش از چشمه‌های فrazیمینی دیگر گسیل نشده است چون دمای متناظر با تابش این چشمه‌ها در این گستره، چندین مرتبه کوچک‌تر از دمایی است که پیبلز پیش‌بینی کرده بود. قصد این گروه اندازه‌گیری تابشی بود که کیهان اولیه گسیل کرده است.

اما آرنو پنزیاس (Arno Penzias) و رابرت ویلسون (Robert Wilson) از آزمایشگاه‌های بل این اندازه‌گیری را زودتر به انجام رساندند. آزمایشگاه‌های بل (Bell Labs) تحت تأثیر رونق نجوم رادیویی پس از جنگ جهانی دوم، آنتنی ساخته بود که سیگنال‌های رادیویی را آشکار کند. این آنتن، بخشی از پروژه ساخت سیستم‌های اولیه برای مخابرات ماهواره‌ای بود. وقتی این آنتن، قدیمی و منسوخ شد، آزمایشگاه آن را در اختیار پژوهشگران قرار داد. پنزیاس و ویلسون فرصت یافتند این آنتن را برای بررسی سیگنال‌های رادیویی که خاستگاه‌شان فضای بین کهکشان‌ها باشد به کار ببرند. اما در اندازه‌گیری‌های سال ۱۹۶۴ آنچه می‌دیدند مهمه پایدار نوفه‌ای میکروموجی با دمای ۳/۵ کلوین بود که از تمامی جهت‌ها وارد آنتن

۱. Dickie-birds: اشاره طعنه‌آمیز به ترانه کودکانه Two Little Dickie Birds.



شکل ۱. جیمز پیبلز چارچوب تحول عالم را پی ریخت: مدل‌ها و مشاهدات براساس این کار هنوز جزئیات دقیق‌تری دربارهٔ مراحل اصلی گذشتهٔ عالم را به دست می‌دهد که برخی از آنها را این تصویر نشان می‌دهد [شکل از سازمان جایزهٔ نوبل].

برای درک چگونگی توزیع ماده در مقیاس عظیم در سرتاسر عالم آماده کرد.

### توجیه مادهٔ تاریک

پیبلز تلاش می‌کرد توضیح دهد که چگونه انواع مختلف ماده می‌توانسته‌اند به شکل خوشه‌هایی در آیند که تحول آنها منجر به توزیع غیریکنواخت ماده در عالم کنونی شده است. نوسان امواج فشار در پلاسمای داغ قبل از شکل‌گیری اتم‌های خنثی، بخش‌هایی از پلازما را فشرده می‌کرده و بخش‌هایی دیگر را کش می‌آورده است و باعث می‌شده چگالی ماده تغییرات بسیار کوچک داشته باشد. بخش‌هایی که در این توزیع تقریباً یکنواخت کمی سنگین‌تر بوده با نیروی گرانش، مادهٔ بیشتری را به سوی خود جذب می‌کرده که منجر به شکل‌گیری خوشه‌های گاز و ستاره‌ها شده است. در سال ۱۹۷۰، پیبلز و دانشجویش، جریو (Jer Yu)، ثابت کردند که تغییرات اولیهٔ چگالی مادهٔ عالم باید با نوسان دمای تابش پس‌زمینهٔ کیهانی همبستگی داشته باشد [4]. طی زمان طولانی، این ناهمسانگردی‌ها افزایش می‌یافته و توزیع کنونی کهکشان‌ها را به وجود می‌آورده است. در همین زمان، فیزیکدان شوروی، یاکوو زلدوویچ (Yakov Zel'dovich)، محاسبات مشابهی را انجام داد اما هیچ‌کدام از این دو دانشگر از کار دیگری آگاه نبود.

برای بررسی تحول کهکشان‌ها، پیبلز و ستاره‌شناس پرینستون، جریمایا آستریکر (Jeremiah Ostriker)، حرکت ستاره‌هایی را که در مدار قرص کهکشان‌هایی مانند کهکشان خودمان قرار دارند، شبیه‌سازی عددی کردند. این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌داد که ستاره‌های شیئی به بزرگی راه شیری، به سرعت آرایش میله‌مانند به خود می‌گیرند که هیچ شباهتی به بازوهای مارپیچی راه شیری و کهکشان‌های پرشمار دیگر

آنها می‌شد. پژوهشگران تمام علت‌ها را بررسی کردند از جمله فضلهٔ کبوترهایی که در آنتن انباشته شده بود. سپس یکی از همکارانشان با آنها دربارهٔ کار پیبلز صحبت کرد و توضیح منطقی برای این مهمهٔ پایدار پیدا شد. نوفهٔ گرمایی در واقع تابش یادگار مهبانگ بود که طیفش، طیف جسم سیاه و قله‌اش در گسترهٔ میکروموجی است. برای این کشف، جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۷۸ به پنزیاس و ویلسون داده شد (صفحهٔ ۱۷ شمارهٔ دسامبر ۱۹۷۸ فیزیکس تودی).

در سال ۱۹۶۵، پیبلز، دیکی، و همکارانشان مقاله‌ای در مجلهٔ اخترشناسی *Astrophysical Journal* منتشر کردند که ارتباط اندازه‌گیری‌های تابش پس‌زمینهٔ میکروموجی کیهانی (cosmic microwave background radiation) یا به اختصار CMB را به محاسباتی که پیبلز دربارهٔ پس‌تابش (afterglow) مهبانگ انجام داده بود نشان داد [1]. این مقاله وضعیت نظریهٔ مهبانگ را مستحکم کرد و آن را به مدل غالب برای کیهان‌شناسی تبدیل کرد. در این مقاله گفته شد که «به اندازه‌گیری‌های بیشتری نیاز است تا شکل طیف معلوم شود» و آزموده شود که تابش پس‌زمینهٔ کیهانی در تمام طول‌موج‌ها با تابش جسم سیاه هم‌خوانی دارد. چندین دهه زمان باید می‌گذشت تا این اندازه‌گیری‌ها انجام شود.

پیبلز به کارش ادامه داد و بسیاری از مفاهیمی را به بار آورد که اساس درک نوین ما از تحول عالم است (شکل ۱). کمی پس از مقالهٔ دوران‌ساز ۱۹۶۵، پیبلز نشان داد چگونه تغییرات کوچک چگالی، و در نتیجه گرانش، در عالم اولیه توانسته منجر به شکل‌گیری کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی شود. تابش جسم سیاه، با واردکردن نیرویی بازدارنده بر الکترون‌ها، خلاف نیروی گرانشی وارد بر پروتون‌ها عمل می‌کرده و مانع از آن می‌شده است که تغییرات چگالی در عالم اولیه چندان رشد کنند که منجر به سیستم‌های مقیدگرانشی شود. این وضعیت تا آنجا تداوم داشته که انبساط عالم، اندازهٔ آن را به حدی بحرانی برساند [2].

در سال ۱۹۶۶ پیبلز با محاسباتش نشان داد که هستهٔ غالب [به جز هستهٔ هیدروژن م] که از پلاسمای داغ عالمی بیرون می‌آید که بین چند ثانیه تا چند دقیقه از عمرش می‌گذرد هلیوم ۴ است. با شروع از آهنگ انبساط و چگالی جرمی فعلی و دمای کنونی تابش پس‌زمینهٔ کیهانی و بازیابی وضعیت گذشتهٔ عالم پیبلز محاسبه کرد که بین ۲۶ و ۲۸ درصد مادهٔ عالم اولیه هلیوم ۴ بوده است. این مقدار در رصدهای پرشمار تأیید شده است. در سال ۱۹۶۸ پیبلز این ایده را پیش نهاد که ۳۸۰۰۰۰ سال پس از مهبانگ از ترکیب پروتون‌ها و الکترون‌های آزاد اتم‌های خنثای هیدروژن شکل گرفت که همراه با هلیوم بخش عمدهٔ ماده کیهان اولیه را ساختند [3]. آن محاسبات و محاسبات دیگر صحنه را

## لامبدا [لاندا]ی دست نیافتنی

دیوید اسپرگل (David Spergel)، اخترفیزیکدان نظری دانشگاه پرینستون، می‌گوید: «پیبلز و آستریکر نشان دادند که پایداری قرص کهکشان‌ها مستلزم وجود مادهٔ تاریک است.» اما با آن‌که هیچ‌کس نمی‌دانست مادهٔ تاریک واقعاً چیست، پیبلز در سال ۱۹۸۲، فرض کرد که مادهٔ غالب در عالم «ذراتی سنگین با برهم‌کنش ضعیف» هستند که با تابش برهم‌کنش ندارند و سرعتشان غیرنسبیتی است - به عبارت دیگر، مادهٔ تاریک سرد [6]. او محاسبه کرد که تغییرات دمای تابش پس‌زمینهٔ کیهانی در چنین عالمی ۵ صدهزارم خواهد بود. مقداری که او می‌گوید نشان می‌دهد «توزیع کهکشان‌ها بسیار کلوخه‌ای است در حالی که توزیع تابش بسیار هموار است.»

پیبلز می‌گوید: «در آن زمان بیشتر مردم این ایده را جذب کرده بودند که مدل اینشتین-د سیتز (Einstein-de Sitter model) ساده‌ترین مدل برای عالم است.» این مدل می‌انگارد که عالم منبسط می‌شود و چگالی جرم آن چگالی بحرانی است و خمش آن صفر است. اما در سال ۱۹۸۴ پیبلز تردید داشت که جرم عالم به آن بزرگی باشد که از این مدل برمی‌آید.

اینشتین در شکل اولیهٔ نظریهٔ نسبیت عام، برای رسیدن به عالمی ایستا، پارامتری با نماد  $\Lambda$  را برای تغییر مقیاس در نظریه وارد کرده بود که ثابت کیهان‌شناختی (cosmological constant) خوانده می‌شود. او بعداً این ایده را رها کرد چون با مشاهداتی که نشان می‌داد عالم منبسط می‌شود در تناقض بود (مقالهٔ تام بنکس را در صفحهٔ ۴۶ شمارهٔ مارس ۲۰۰۴ فیزیکس تودی ببینید). پیبلز دوباره ثابت کیهان‌شناختی را وارد مدل خود کرد تا مشکلی را که اختلاف بین اندازه‌گیری‌های چگالی مادهٔ عالم و این قید که عالم در حال انبساط در مقیاس‌های عظیم تخت باشد، برطرف کند. مدل پیبلز به مدل لامبدا-مادهٔ تاریک سرد یا  $\Lambda$ CDM (Lambd-Cold Dark Matter) معروف شد [7]. اما او می‌گوید: «از محبوبیت مدل  $\Lambda$ CDM زیاد راضی نبودم. چه چیزی باعث می‌شود فکر کنیم عالم باید شبیه به ساده‌ترین مدل ما باشد.»

### ناشناخته‌ها

اندازه‌گیری‌های کاوشگر پس‌زمینهٔ کیهانی (Cosmic Background Explorer، به اختصار COBE)، فضاپیمای ناسا، که پیشنهاد سال ۱۹۷۴ جرج اسموت (George Smoot) و جان مدر (John Mather)، برندگان جایزهٔ نوبل، بود و در سال ۱۹۸۹ به فضا پرتاب شد، سنجش‌هایی را فراهم کرد که نشان می‌دهد مدل  $\Lambda$ CDM در مسیر درست است (مقالهٔ صفحهٔ ۱۸ شمارهٔ دسامبر ۲۰۰۶ فیزیکس تودی

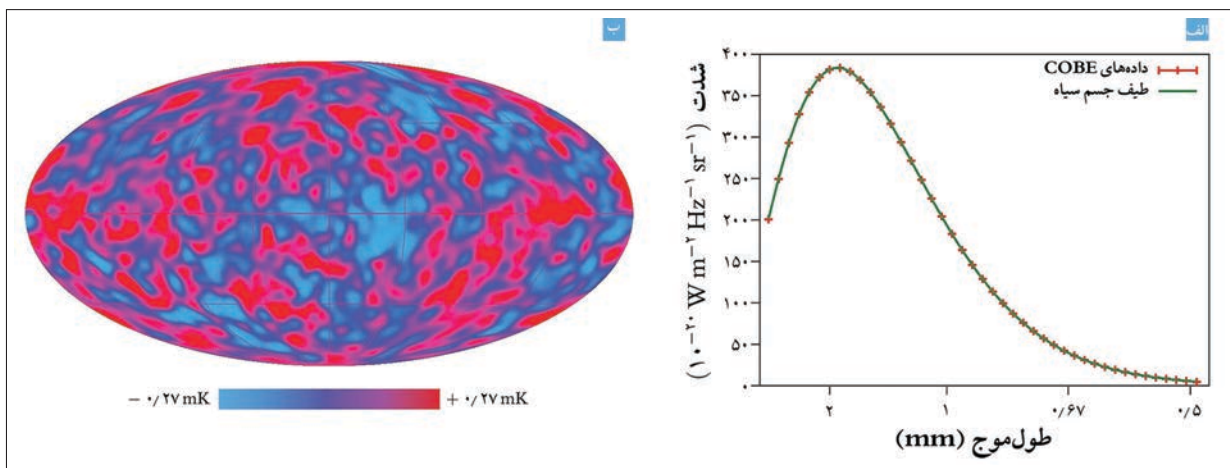
ندارد. آستریکر می‌گوید: «بیباید و ببینید که کهکشان‌های دلخواه اخترشناسان به‌شدت ناپایدار هستند.»

برای توضیح این تضاد آشکار، پیبلز و آستریکر ایده‌ای را که در دههٔ ۱۹۳۰، فریتس تسویکی (Fritz Zwicky)، مطرح کرده بود زنده کردند. تسویکی به این نتیجه رسیده بود که کهکشان‌هایی که گرانش آنها را به‌شکل خوشه در آورده و به یکدیگر مقید کرده است باید مقدار زیادی «مادهٔ تاریک» داشته باشند، ماده‌ای اضافه بر مجموع جرم ستاره‌های آن کهکشان‌ها. با افزودن توزیع چنین مادهٔ تاریکی به شبیه‌سازی خود، آستریکر و پیبلز توانستند ساختار آشنای کهکشان‌ها را بازسازی کنند [5]. مادهٔ تاریک اضافی به شکل هاله‌ای کروی قرص اصلی ستاره‌ها را احاطه می‌کند و مانع از آن می‌شود که ستاره‌ها آرایش میله‌مانند به خود بگیرند. آنها تخمین زدند که چگالی مادهٔ تاریک عالم ۰/۲ «چگالی بحرانی» است که برای عالمی با هندسهٔ تخت لازم است. این تخمین به بهترین تخمین کنونی که ۰/۲۶ است بسیار نزدیک است.

مدیر مؤسسهٔ اخترفیزیک ماکس پلانک، سایمون وایت (Simon White) می‌گوید: «در دههٔ ۱۹۷۰ به‌تدریج مردم مادهٔ تاریک را جدی گرفتند و قدر و منزلتی بیش از معما به آن دادند.» وایت و همکارش، مارتین ریس (Martin Rees)، بر اساس کار پیبلز، صورت‌بندی سلسله مراتب فرایندی را به دست آوردند که در آن ابتدا مادهٔ تاریک در اثر نیروهای گرانشی خوشه‌خوشه می‌شود و به‌شکل هاله در می‌آید، سپس مادهٔ معمولی در این هاله، سرد و متراکم می‌شود و مؤلفهٔ پرچگال و نورانی کهکشان‌ها را که به آسانی دیده می‌شود، می‌سازد (برای اطلاعات بیشتر دربارهٔ شکل‌گیری کهکشان‌ها، مقالهٔ جرما یا آستریکر و تورستن ناب را در صفحهٔ ۴۳ شمارهٔ اوت ۲۰۱۲ فیزیکس تودی ببینید).

رصدهای نجومی شواهد بیشتری برای پیش‌بینی پیبلز دربارهٔ وجود مادهٔ تاریک به دست داد. ورا روبین (Vera Rubin) و کنت فورد (Kent Ford) و دیگران سرعت مداری ستاره‌ها و گازها در فواصل مختلف از مرکز کهکشان آندرومدا را اندازه گرفتند (مقالهٔ ورا روبین در صفحهٔ ۸ شمارهٔ دسامبر ۲۰۰۶ فیزیکس تودی را بخوانید) ۲. اگر مادهٔ تاریک وجود نداشته باشد، قانون گرانش نیوتون پیش‌بینی می‌کند هر چه شیئی از مرکز کهکشان دورتر باشد سرعتش باید از سرعت اشیاء نزدیک‌تر به مرکز کهکشان کم‌تر باشد. اما روبین مشاهده کرد که سرعت بیرونی‌ترین ستاره‌ها تقریباً همان سرعت ستاره‌های درونی است. از یافته‌های او چنین بر می‌آمد که با افزایش فاصله [از مرکز کهکشان] جرم کل به شکل خطی افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های مشابه برای ۶۰ کهکشان مارپیچی دیگر، روبین و فورد را به این نتیجه رساند که «مقادیر بی‌اندازه عظیم ماده‌ای که نوری ساطع نمی‌کند تا بسیار فراتر از محدودهٔ مرئی کهکشان گسترده است.»

۲. ترجمهٔ فارسی مقاله در مجلهٔ فیزیک، بهار و تابستان ۱۳۸۷، ۲۴-۲۱.



شکل ۲. تابش گرمایی گسیل شده از عالم اولیه را کاوشگر پس‌زمینه کیهان (COBE) اندازه گرفته است: (الف) فوتوتیف‌سنج فرورسرخ دور، تابش پس‌زمینه میکروموجی را در گستره طول‌موج‌های ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌متر اندازه گرفته است. منحنی سیاه طیف جسم سیاه در دمای ۲/۷۲۵ کلونین را که پیش‌بینی نظریه مه‌بانگ است نشان می‌دهد. (ب) تابش‌سنج میکروموجی تقاضلی، افت‌وخیز تابش پس‌زمینه کیهانی را با دقت یک صدهزارم اندازه گرفته است. این نقشه آسمان که بر اساس داده‌های دو سال اول فضاپیمای (COBE) رسم شده است اولین نظر به ناهمسانگردی‌های تابش پس‌زمینه است. این نوسانات عامل به‌وجود آمدن ساختارهایی است که امروز می‌بینیم (با تشکر از مرکز پروازهای فضایی گادارد متعلق به ناسا).

تأثیر انرژی تاریک و ماده تاریک بر تحول کیهان فراهم خواهد کرد. آستریکر می‌گوید: «پژوهشگران به دنبال یافتن انحراف‌هایی از این تصویر ساده هستند. ما برای انرژی تاریک برچسب درست کرده‌ایم. اما انرژی تاریک مثل نیروی فیزیکی عمل نمی‌کند. انرژی تاریک تا آنجا که ما می‌دانیم فقط عدد است.» و به نظر پیبلز فهم اینکه چرا برخی کهکشانشان‌ها با مدل  $\Lambda$ CDM در توافق نیستند، زمینه تحقیقاتی مناسبی برای کارهای آینده است: «من باور ندارم که هیچ نظریه‌ای نهایی است. هنوز به دنبال آن هستیم که چیز تازه‌ای در تور ما بیفتد.»

• Rachel Berkowitz, *Physical cosmology wins a share of the Nobel Prize in Physics*, Physics Today 72 (2019), 14-17.

#### مراجع

1. R.H. Dicke, P.J. Peebles, P.G. Roll, D.T. Wilkinson, *Astrophys. J.* **142** (1965), 414.
2. P.J.E. Peebles, *Astrophys. J.* **142** (1965), 1317.
3. P.J.E. Peebles, *Astrophys. J.* **142** (1968), 1.
4. P.J.E. Peebles, J.T. Yu, *Astrophys. J.* **162** (1970), 815.
5. J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles, *Astrophys. J.* **186** (1973), 467.
6. P.J.E. Peebles, *Astrophys. J.* **263** (1982), L1.
7. P.J.E. Peebles, *Astrophys. J.* **284** (1984), 439.

را ببینید). این کاوشگر نشان داد که طیف تابش پس‌زمینه همان‌طور که انتظار می‌رفت طیف گرمایی متناظر با دمای ۲/۷۲۵ کلونین است (شکل ۲الف). پیبلز می‌گوید: «هنوز لحظه‌ای را که اندازه‌گیری طیف را دیدم به خاطر دارم.» کاوشگر هم‌چنین اولین نقشه ناهمسانگردی‌های تابش پس‌زمینه را فراهم کرد (شکل ۲ب) پیبلز که این ناهمسانگردی‌ها را نیز پیش‌بینی کرده بود می‌گوید: «واقعاً تحت تأثیر قرار گرفتم.»

مدل  $\Lambda$ CDM با کشف سال ۱۹۹۸ که آهنگ انبساط عالم شتاب دارد در توافق است (صفحه ۱۷ شماره ژوئن ۱۹۹۸ فیزیکس تودی) و اکنون  $\Lambda$  با انرژی تاریک معادل گرفته می‌شود. از زمان کاوشگر COBE تا کنون آزمایش‌های دیگر جزئیات نقشه تابش پس‌زمینه را روشن‌تر کرده و قیده‌های سخت‌تری بر محتوا و عمر و هندسه عالم گذاشته است که همه با پیش‌بینی‌های مدل  $\Lambda$ CDM در توافق است. از آغاز قرن بیست و یکم تلاش‌های کیهان‌شناسی بر شناخت ماده تاریک و انرژی تاریک متمرکز شده است. وندی فریدمن (Wendy Freedman) از دانشگاه شیکاگو، که در زمینه اندازه‌گیری آهنگ انبساط عالم در گذشته و حال و سرشت ماده تاریک کار می‌کند، می‌گوید: «پیبلز برای هر چه امروز در کیهان‌شناسی انجام می‌دهیم شالوده‌ای ریاضی بنیان نهاده است.»

پیبلز به رصد مستقیم ماده تاریک امید بسیار بسته است و گمان می‌کند «جایزه نوبلی منتظر» این اندازه‌گیری‌های بخش تاریک عالم باشد. مثلاً تلسکوپ نقشه‌برداری فرورسرخ از میدان گسترده (Wide-Field Infrared Survey Telescope) که پرتاب آن به فضا برای اواسط سال ۲۰۲۰ برنامه‌ریزی شده است، تغییر توزیع کهکشانشان‌ها در زمان‌های مختلف را اندازه خواهد گرفت و معیار دیگری برای سنجش

## نیمی از جایزه نوبل فیزیک برای قدردانی از راهگشایان جست‌وجوی سیارات فراخورشیدی\*

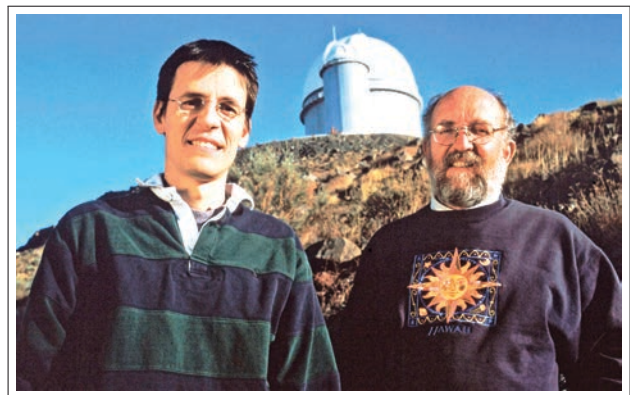
آندرو گرنٹ

با کشف سیاره‌ای بیرون منظومه شمسی در مدار ستاره‌ای شبیه به خورشید، برندگان جایزه نوبل امسال در گشایش زمینه‌ای نقش داشتند که مجموعه جهان‌های گوناگون و توان بالقوه این جهان‌ها را برای میزبانی حیات بررسی می‌کند.

سیارات شکل می‌گیرند و میزبان آنها که ستاره‌ای مرده است محتمل نیست که محیطی مناسب برای پیدایش حیات فراهم کند. تنها ستاره شبیه به خورشید که می‌دانستیم سیاره دارد خود خورشید بود.

مشکل این نبود که اخترشناس‌ها نمی‌دانستند چگونه در جست‌وجوی جهان‌های فراخورشیدی باشند. در دهه ۱۹۸۰ چند پژوهشگر در تلاش بودند با کاربرد روش رایج قرن نوزدهمی اندازه‌گیری سرعت ستاره، موسوم به روش سرعت شعاعی (RV یا  $Ra-$  Doppler) یا طیف‌نمایی دوپلری (Doppler dial Velocity method) یا طیف‌نمایی دوپلری (Doppler spectroscopy) همراهان ستاره‌ها به اندازه سیارات را بیابند.

اخترشناسان خط‌های طیف ستاره‌های نزدیک را بررسی می‌کردند تا شاید جابه‌جایی تناوبی این خطوط به سمت سرخ و به سمت آبی را در اثر نیروی جاذبه بسیار کم سیاره‌ای که در مدار ستاره قرار دارد، مشاهده کنند. اندازه این پس‌و‌پیشی به جرم ستاره و سیاره‌اش، فاصله بین ستاره و سیاره، و راستاگرایی صفحه مدار از منظرگاه زمین بستگی دارد. نمونه‌ای که اخترشناس‌ها در نظر داشتند برجیس (مشتری) بود. مشاهده‌گر هوشیار و موشکاف که منظومه شمسی ما را از راستایی موازی با صفحه دایره البروج رصد کند متوجه جابه‌جایی طیف، متناظر با تغییر جهت سرعت به مقدار ۱۳ متر بر ثانیه خواهد شد. گرچه این



میشل میئر (سمت راست) و دیدیه کلو

امروز شمار سیاره‌هایی که در کهکشان خودمان می‌شناسیم از ۴۰۰۰ فراتر رفته است. با برون‌یابی از این عدد، در می‌یابیم که راه شیری بیش از آنکه ستاره داشته باشد سیاره دارد. با این‌همه، ربع قرن پیش چشم‌انداز چنین سرشماری کهکشان‌ی تیره‌وتار به‌نظر می‌رسید. با آن‌که اجرامی در حد و اندازه سیارات در اطراف ستاره‌ای نوترونی پیدا شده بود [1]، به‌احتمال زیاد آن اجرام آن‌گونه شکل نگرفته‌اند که بیشتر

جابه‌جایی را می‌توان آشکار کرد، پیش از این روش RV برای سنجش سرعت‌هایی به کار می‌رفت که چند مرتبه بزرگ‌تر بود مثلاً در بررسی مدار ستاره‌های دوتایی.

پس از چند ادعای کشف سیاره فراخورشیدی که کسی را متقاعد نکرد یا مشخصاً اشتباه بود، اوضاع در ۶ اکتبر ۱۹۹۵ کاملاً تغییر کرد. در این روز میشل میئر (Michel Mayor) از دانشگاه ژنو به هیئتی در کنفرانسی در فلورانس ایتالیا پیوست و اعلام کرد که او و دانشجوی دکتری‌اش، دیدیه کلو (Didier Queloz)، ۵۱ پگاسوس ب (51 Pegasi b) را کشف کرده‌اند که جرمی آسمانی به اندازه برجیس در مدار ستاره ۵۱ پگاسوس (51 Pegasi) [در صورت فلکی اسب‌الدردار (فَرَسِ اعظم)] است.

میئر و کلو برجیس دیگری پیدا کرده بودند اما نه آن که همه انتظار داشتند. دوازده سال طول می‌کشید تا برجیس مدارش را یک بار دور بزند اما ۵۱ پگاسوس ب هر چهار روز ستاره‌اش را دور می‌زند و پژوهشگران دمای سیاره را ۱۳۰۰ کلوین تعیین کرده‌اند. چند سال طول کشید تا جامعه اخترشناسان کاملاً این کشف و چالش‌های آن را برای نظریه‌های شکل‌گیری سیارات بپذیرند. اما این واقعیت که چنین برجیس‌های داغ وجود دارند و از اولین جهان‌های کشف‌شده بیرون سامانه خورشیدی هستند، تأثیری عمیق بر مسیر علم سیارات فراخورشیدی داشت.

تقریباً ۲۴ سال بعد از تاریخی که میئر کشف خود را اعلام کرد، فرهنگستان سلطنتی علوم سوئد نیمی از جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۹ را به میئر و کلو اهدا کرد. ناتالی باتالیا (Natalie Batalha)، اخترفیزیکدان دانشگاه کالیفرنیا در سانتاکروز، می‌گوید: «زمینه پژوهشی کاملی بر شالوده این کشف بنا شده است.»

### طیف‌نمایی بسیار دقیق

میئر در آغاز کار، مانند بسیاری از جویندگان قدیمی سیاره‌های فراخورشیدی، اخترفیزیکدان بود و در باره ستاره‌ها تحقیق می‌کرد. او در دهه ۱۹۷۰ در ساخت طیف‌سنج [CORAVEL] COR[relation] And VELOCITY] نقش داشت. این طیف‌سنج برای سنجش مدار ستاره‌های دوتایی و ردگیری مدار خوشه‌های ستاره‌ای کروی (globular clusters) و برخی پژوهش‌های دیگر به کار برده می‌شد، اما معلوم شد که توان یافتن شیء‌هایی را نیز دارد که جرمشان به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از ستاره‌هایی است که در مدارشان قرار دارند. میئر عضو گروهی بود که در سال ۱۹۸۹ شواهد اولیه وجود شیئی با جرم یازده برابر جرم برجیس در مدار ستاره اچ دی ۱۱۴۷۶۲ (HD 114762) را ارائه کردند که شبیه به خورشید و به ما نزدیک است [2]. دامنه

سیگنال RV برای این جرم آسمانی حدود ۶۰۰ متر بر ثانیه بود.

سال بعد، میئر، از دانشجوی جدید خود، کلو، طراحی طیف‌سنجی را خواست که دقتش حدوداً ده برابر دقت CORAVEL باشد. کلو کار را با بهتر کردن سیستم اپتیکی آغاز کرد. در آن زمان، برای درجه‌گذاری (calibration) بهترین طیف‌سنج‌ها نور بر سلول حاوی هیدروژن فلورید یا ید تابانده و پس از گذر از سلول با طیف ستاره ترکیب می‌شد تا مجموعه‌ای از خطوط طیفی مرجع روی طیف ستاره سوار شود. این روش از پس کار برمی‌آمد اما شدت نور چشمه مرجع به اندازه‌ای بود که ویژگی‌های طیفی بیشتر ستاره‌ها به جز درخشان‌ترین‌شان اغلب محو می‌شد.

کلو جفتی تار اپتیکی در طیف‌سنج کار گذاشت که یکی نور چراغ توریوم-آرگون را هدایت می‌کرد و دیگری نور ستاره را. جدایی طیف‌سنج از چراغ توریوم-آرگون مانع از آن می‌شد که سیگنال ستاره در نور مرجع غرق شود و جدایی طیف‌سنج از تلسکوپ امکان می‌داد که طیف‌سنج در محیطی به دقت کنترل‌شده جا داده شود. با این بهبودها به علاوه کاربرد مدارهای بارجفت‌شده (charge-coupled device) برای ثبت دقیق مکان فوتون‌های پاشیده (dispersed photons)، میئر و کلو توانستند طیف‌سنجی با دقت ۱۳ متر بر ثانیه بسازند که درست در محدوده لازم برای آشکار کردن سیگنال‌های RV سیاره‌ای در حد و اندازه همزادهای برجیس بود.

در سال ۱۹۹۴ میئر و کلو طیف‌سنج خود را که ELODIE نامیده بودند، با تلسکوپ ۱٫۸۳ متری رصدخانه اوت‌دپروانس (Haute-Provence) در جنوب شرق فرانسه جفت کردند و بررسی ۱۴۲ ستاره را آغاز کردند. یکی از این هدف‌ها ۵۱ پگاسوس در فاصله حدود ۵۰ سال نوری بود که از نظر طبقه‌بندی طیف مشابه خورشید بود. پس از رصدهای سپتامبر ۱۹۹۴ و ژانویه ۱۹۹۵، کلو متوجه سیگنالی تناوبی با دامنه ۶۰ متر بر ثانیه و دوره تناوب ۴٫۲ روز شد. میئر برای فرصت مطالعاتی به سفر رفته بود و ستاره‌های صورت فلکی اسب‌الدردار زیر افق بودند، بنابراین کلو با وسواس زیاد داده‌هایی را که داشت تحلیل کرد تا شاید توضیحی غیر از وجود سیاره برای داده‌ها پیدا کند. اما چنین توضیحی پیدا نکرد.

میئر بازگشت، و کلو دلایل خود را برای او ارائه کرد و در ژوئیه ۱۹۹۵ به رصدخانه رفتند تا ببینند که آیا سیگنال RV سر جایش هست یا نه. سیگنال سر جایش بود. کلو می‌گوید: «آن موقع بود که متقاعد شدیم». آنها شواهدی قوی داشتند برای وجود سیاره‌ای در فاصله ۰٫۵ یکای نجومی یعنی یک هشتم فاصله میانگین تیر تا خورشید.

میئر و کلو با عجله کار روی نوشتن مقاله‌ای را آغاز کردند که در

ماه اوت برای مجله نیچر فرستادند [3]. کمی پس از اعلام کشف میسر در کنفرانس ماه اکتبر، وجود سیاره ۵۱ پگاسوس ب را رقبای اصلی میسر و کلو، جفری مارس (Geoffrey Marcy) و پل باتلر (Paul Butler) از دانشگاه ایالتی سان فرانسیسکو، تأیید کردند.

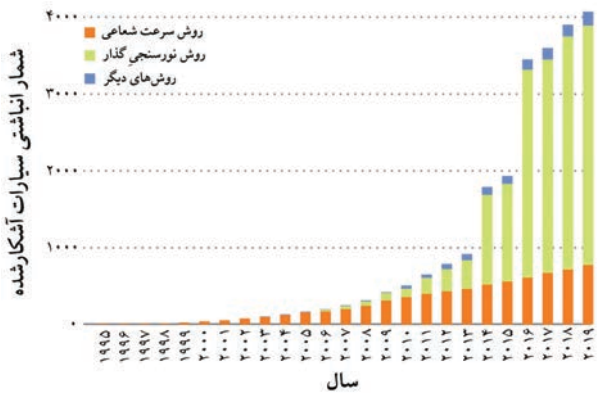
### فراسوی کلکسیون تمبر

ابتدا نظریه پردازان فکر نمی کردند چنین سیاره پرجرمی در نزدیکی ستاره بتواند شکل بگیرد یا بدون آنکه بسوزد از مداری دورتر به مداری داخلی تر مهاجرت کند. در واقع اخترشناسان هنوز مطمئن نیستند چطور سیاراتی با جرم برجیس در نزدیکی ستاره میزبان خود پیدا می شوند [4]. علی رغم این معمای حل نشده، کشف ۵۱ پگاسوس ب راه را برای یافتن صدها سیاره فراخورشیدی دیگر با استفاده از روش RV گشود. هم چنین این کشف منجر به اثباتی حیاتی برای درستی روش دیگر جست و جوی سیارات فراخورشیدی شد.

در سال ۱۹۹۹، داوید شاربتو (David Charbonneau) از هاروارد و همکارانش نور ستاره اچ دی ۲۰۹۴۵۸ (HD 209458) را سنجیدند. میسر و دیگران قبلاً این ستاره را نشان کرده بودند که احتمالاً سیاره ای داغ شبیه به برجیس دارد. بر اساس بزرگی سیاره و دوره تناوب کوچک آن، احتمال این که در خط رصد از زمین، سیاره از جلوی ستاره رد شود، زیاد بود. چنین نیز بود: وضعیت هندسی صفحه مدار سیاره برای رصد از زمین بسیار مناسب بود: سیاره اچ دی ۲۰۹۴۵۸ ب (HD 209458 b) هر ۳٫۵ روز از جلوی ستاره اش رد می شود. این اولین سیاره ای بود که با روش گذار (transit) شناسایی شد [5].

کشف گروه شاربتو همراه با کشف سیاراتی دیگر با روش RV که همه پس از کشف ۵۱ پگاسوس ب رخ داد، نعمتی برای جمعی از اخترشناسان ناسا بود که مدت ها پیش، موضوع ساخت تلسکوپی فضایی برای آشکار کردن سیارات با روش نورسنجی گذار (transit photometry) را مطرح کرده بودند. با آنکه ناسا این پروژه را پیش از این چهار بار رد کرده بود، در سال ۲۰۰۱ ساخت [تلسکوپ فضایی] کپلر را تصویب کرد که هدف اصلیش تعیین میزان فراوانی سیاراتی در حد و اندازه زمین در مدار ستاره هایی شبیه به خورشید و با دوره تناوب حدود یک سال بود. این تلسکوپ هشت سال بعد به فضا پرتاب شد و در نهایت شناخت ما از جمعیت سیارات در کهکشان را متحول کرد. همان طور که انتظار می رفت، اولین کشف های کپلر سیاراتی داغ در اندازه برجیس مانند ۵۱ پگاسوس ب بود. اما طولی نکشید که در میان داده ها نشانه های جهان های کوچک تر پیدا شد. برخی از این

سیارات در مدار ستاره هایی با جرم و عمر متوسط شبیه به خورشید ما بودند؛ برخی دیگر در مدار ستاره های کوتوله قرار داشتند که فراوان ترین ستاره های عالم با طولانی ترین عمر هستند (مقاله جان جانسون در صفحه ۳۱ شماره مارس ۲۰۱۴ فیزیکس تودی را ببینید). در رصدخانه لاسیا (La Silla) در شیلی، گروهی به رهبری میسر نیز، با استفاده از طیف سنج HARPS (High Accuracy Radial-velocity Planet Searcher) که سیگنالش را از تار نوری می گیرد، جهان های گوناگون دیگری کشف کردند. اخترشناسان توانستند برخی از رصدهای نورسنجی گذار را (که قطر سیاره را به دست می دهد) با اندازه گیری RV (که جرم سیاره را معلوم می کند) همراه کنند تا تصویری از ترکیب کپه ای این جهان ها به دست آورند.



شکل ۱: جمع انباشتی سیارات فراخورشیدی کشف شده از سال ۱۹۵۵ تا کنون با فرستادن تلسکوپ کپلر به فضا در سال ۲۰۰۹، به شکل چشمگیری رشد کرد [برگرفته از بایگانی سیارات فراخورشیدی ناسا با تغییرات].

بعد از دوران اولیه ای که باتالیا (Batalha) آن را دوران تمبر جمع کردن می نامد و پژوهشگران و روزنامه ها از هر کشفی اظهار شگفتی می کردند و از خود بی خود می شدند، در مدتی کوتاه کپلر آن قدر سیاره پیدا کرد که بتوان بررسی های آماری انجام داد (صفحه ۱۰ شماره ژانویه ۲۰۱۴ فیزیکس تودی). همان طور که شکل ۱ نشان می دهد، تا پیش از پرتاب کپلر به فضا اخترشناسان تنها چند صد سیاره را شناسایی کرده بودند و ۹۰٪ این جهان ها از نپتون بزرگ تر بود. یک دهه پس از آن با کشف ۳۷۰۰ سیاره فراخورشیدی دیگر ۹۰٪ سیاره های شناخته شده از نپتون کوچک تر است. فراوان ترین گونه سیاراتی که تا کنون دیده شده اجرام آسمانی سنگی بزرگ تر از زمین و جهان های گازی کوچک تر از نپتون هستند که در منظومه خورشیدی وجود ندارد.



۶۴ شماره ژوئیه ۲۰۱۳ فیزیکس تودی). تلسکوپ فضایی جیمز وب (James Webb Space Telescope) که در سال ۲۰۲۱ به فضا پرتاب خواهد شد (شکل ۲) بهترین ابزار طراحی شده برای جداکردن اثرانگشت سیاره از بقیه داده‌هاست.

برای آنها که در زمینه سیارات فراخورشیدی کار می‌کنند، این بررسی‌ها برای گذار به دوران وسوسه‌انگیز جست‌وجو برای حیات در بقیه عالم، مهم و اساسی است (مقاله صفحه ۲۴ شماره مارس ۲۰۱۹ فیزیکس تودی را ببینید). از تحلیل داده‌های کپلر برمی‌آید حدود ده میلیارد سیاره مانند زمین در کهکشان راه شیری وجود دارد که شاید بتوانند میزبان حیات از آن‌گونه ما می‌شناسیم باشند. اخترشناسان می‌خواهند تا آنجا که امکان‌پذیر است این سیارات را بررسی کنند. کلو امیدوار است با آزمایش شکار زمین (Terra Hunting Experiment) خودگامی در این راه بردارد. این آزمایش جست‌جویی نظام‌مند برای یافتن سیاره‌های مانند زمین در مدار ستاره‌های نزدیک است. او می‌خواهد این جهان‌ها را با روش RV و با طیف‌سنج جدیدی پیدا کند که در طراحی سهم داشته است.

ترجمه نادر حیدری

(ویراستار مجری پیشین مجله فیزیک مرکز نشر دانشگاهی)

- Andrew Grant, *Half of Nobel Prize in Physics honors exoplanet trailblazers*, Physics Today **72** (2019) 12.

## مراجع

1. A. Wolszczan and D.A. Frail, Nature **355** (1992), 145.
2. D.W. Latham et al., Nature **378** (1989), 38.
3. Michel Mayor and Didier Queloz, Nature **378** (1995), 355.
4. R.I. Dawson and J.A. Johnson, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **56** (2018), 175.
5. D. Charbonneau et al., Astrophys. J. **529** (2000), L45.



شکل ۲- تلسکوپ فضایی جیمز وب در این عکس در اوت ۲۰۱۹ پس از تکمیل ساخت دیده می‌شود. وقتی تلسکوپ در سال ۲۰۲۱ در مدار زمین فرار بگیرد جو سیارات فراخورشیدی را تحلیل خواهد کرد (عکس از ناسا/کریس گان).

اکنون که اخترشناسان برای چشم‌انداز سیارات فراخورشیدی نقشه‌ای به‌دست آورده‌اند، می‌خواهند از سیاراتی خاص تصویر دقیق‌تری دست آورند. سال گذشته ماهواره نقشه‌برداری از سیارات فراخورشیدی در حال گذار (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) به فضا پرتاب شد، این ماهواره در جست‌وجوی سیاراتی در مدار آن ستاره‌های نزدیک است که بتوان با سنجش‌های دقیق ترکیب جو آنها را معلوم کرد. با استفاده از تلسکوپ‌های روی زمین با گشودگی زیاد (large-aperture) و نسل بعدی رصدخانه‌های فضایی، اخترشناسان خواهند توانست وقتی سیاره از برابر ستاره می‌گذرد بخشی از نور ستاره را که از جو سیاره عبور کرده یا از آن بازتاب یافته است، جداگانه بررسی کنند (مقاله هیدرکنتوتسن در صفحه