نردبان فاصله‌های کیهانی •

«اخترسنجی» یا اندازه‌گیری فاصله‌ها و حرکات اجرام آسمانی، یکی از شاخه‌های اصلی و قدیمی علم نجوم است. اندازه‌گیری این فواصل بیشتر از آنکه بر فناوری استوار باشد، بر روش‌های ریاضی و رصد تکیه داشته است. سؤالات اساسی در اخترسنجی از این دست‌اند:

۱) فاصلهٔ زمین تا ماه چقدر است؟

۲) فاصلهٔ زمین تا خورشید چقدر است؟

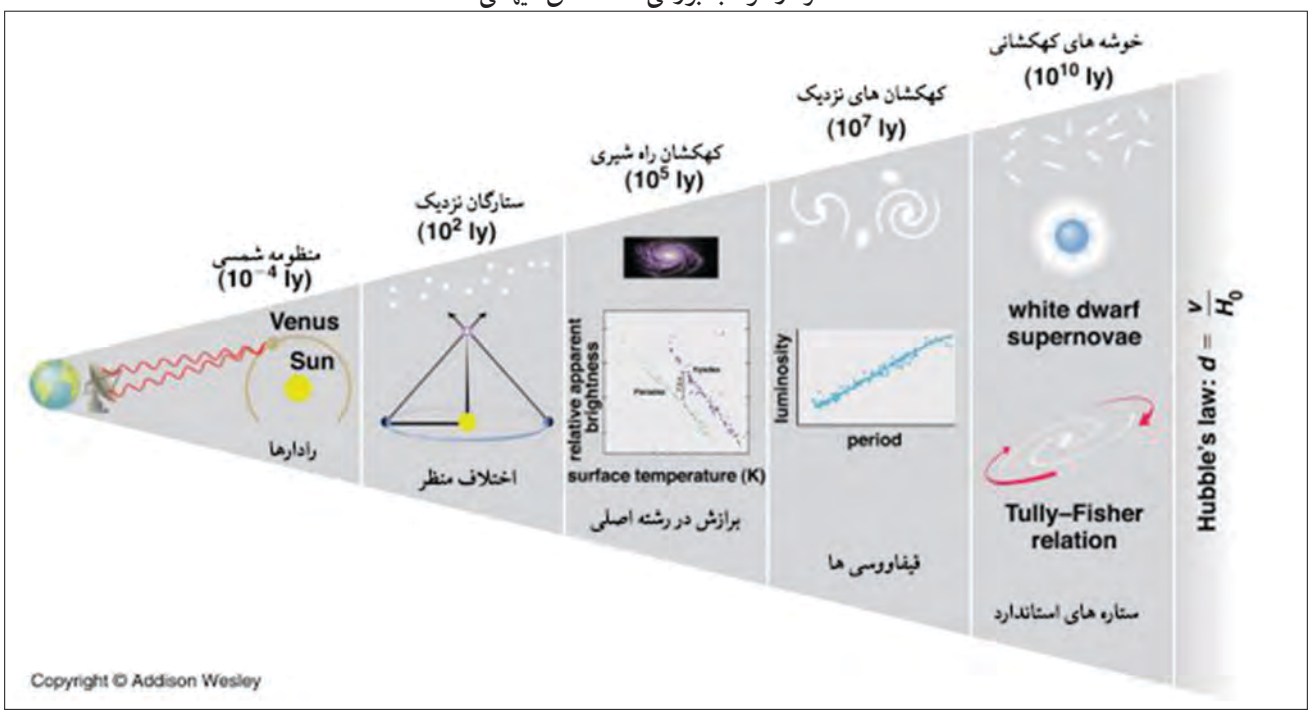
۳) فاصلهٔ خورشید تا سیارات دیگر چقدر است؟

۴) فاصلهٔ خورشید تا ستارگان نزدیک چقدر است؟

۵) فاصلهٔ خورشید تا ستارگان دور چقدر است؟

اما به علت زیاد بودن فاصله‌ها در نجوم، اندازه‌گیری مستقیم آنها غیرممکن است. بنابراین به روش‌های غیرمستقیم متوسل می‌شوند. در این روش‌ها برای اندازه‌گیری فاصله‌های بزرگ از مقیاس فاصله‌های کوچک استفاده می‌گردد. برای اندازه‌گیری فاصله‌های کوچک از مقیاس فاصله‌های کوچک‌تر استفاده می‌شود، و آنقدر این روش را ادامه می‌دهند تا به اندازه‌ای برسند که بتوان به روش مستقیم فاصله را اندازه‌گیری کرد.

نمودار مراتب بزرگی فاصله‌های کیهانی



پلهٔ اول: زمین

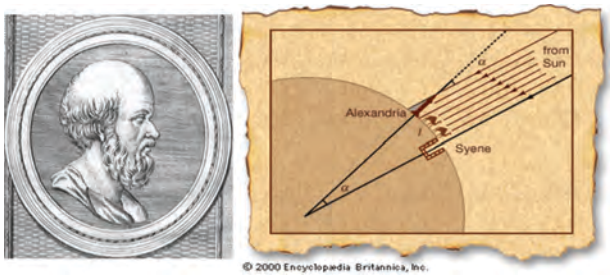
امروزه می‌دانیم که زمین تقریباً کروی است و به کمک ماهواره‌های مدرن، با دقت بسیار بالایی شعاع زمین را در استوا و قطب‌ها اندازه گرفته‌ایم (به ترتیب، ۶۳۷۸ و ۶۳۵۶ کیلومتر). اما فرض کنید هیچ فناوری پیشرفته‌ای مانند فضاپیماها، اقیانوس‌پیماها و امکانات دیگری مانند بالن‌ها، یا حتی تلسکوپ و جایاب (sextant) نداریم. آیا باز هم می‌توانیم نیم‌شعاع زمین را محاسبه کنیم یا حتی بگوییم که به شکل کره است؟ جواب مثبت است. به شرطی که کمی هندسه بدانیم.

ارسطو (۳۲۲-۳۸۴ ق‌م) استدلال غیرمستقیم قانع‌کننده‌ای ارائه کرد که نشان می‌داد زمین چرا به شکل کره است (این ادعا پیشتر توسط **پارمنیدس** (۴۵۰-۵۱۵ ق‌م) مطرح شده بود).

ارسطو استدلال کرد که ماه‌گرفتگی در اثر قرارگرفتن سایهٔ زمین روی ماه رخ می‌دهد. اما مرز این سایه روی ماه همیشه یک کمان دایره‌ای است و مهم نیست موقعیت ماه و خورشید چه باشد. بنابراین هر طرح سایه‌ای از زمین یک دایره است، به این معنی که زمین به احتمال زیاد یک کره است. به عنوان مثال، زمین نمی تواند یک دیسک باشد، زیرا سایه ها در این حالت به جای کمان‌های دایره ای شکل، کمان‌های بیضوی می‌شوند. وی همچنین استدلال کرد که شعاع زمین نمی‌تواند بسیار زیاد باشد، زیرا برخی از ستارگان را می‌توان در مصر دید، اما در یونان دیده نمی‌شوند و بالعکس، اما نتوانست اندازهٔ دقیقی برای این شعاع به دست آورد.

اِراتوسْتِن (۱۹۴-۲۷۶ ق‌م) شعاع زمین را در حدود ۴۰۰۰ اِستادیوم یا ۶۸۰۰ کیلومتر محاسبه کرد (هر استادیوم تقریباً معادل ۱۸۵ متر بوده است). از آنجایی که شعاع زمین بین ۶۳۷۸ و ۶۳۵۶ کیلومتر است، اندازه‌گیری‌های اراتوستن تنها ۸ درصد خطا دارد. وی نخستین کسی بود که شعاع زمین را محاسبه کرد. او می‌دانست که در اواسط ظهر تابستان (در انقلاب تابستانی، ۲۱ ژوئن) نور خورشید در شهر سین (Syene) در مصر (که امروزه به نام اسوان خوانده می‌شود)، به طور قائم درون چاه عمیقی که در آن شهر وجود داشت می‌تابد و ته چاه روشن است، در صورتی که در همان ساعت و در شهر اسکندریه که به فاصلهٔ تقریبی۷۴۰ کیلومتر از سین قرار داشت، امتداد شاغولی دارای سایه است. او بعد از اندازه‌گیری متوجه شد که در این نقطه آفتاب با امتداد شاقولی زاویهٔ ۷/۲ درجه تشکیل می‌دهد. این زاویه برابر است با یک پنجاهم کمان یک دایره (که ۳۶۰ درجه می‌باشد). او با استفاده از روابط سادهٔ هندسی توانست شعاع کرهٔ زمین را محاسبه کند.

اِراتوسْتِن براساس اطلاعات کاروان‌های تجاری و دیگر منابع می‌دانست که فاصلهٔ اسکندریه و سین حدود ۵۰۰۰ استادیوم (حدود ۷۴۰ کیلومتر) است. این تنها اندازه‌گیری مستقیم است که در اینجا استفاده می‌شود و می‌توان آن را «پلهٔ صفر» روی نردبان فاصلهٔ کیهانی دانست. با این اطلاع، مثلثات دبیرستان برای تخمین شعاع زمین کافی است.



اِراتوسْتِن و روش اندازه‌گیری شعاع زمین

پلهٔ دوم: ماه

۱) ماه چه شکلی دارد؟

۲) شعاع ماه چقدر است؟

۳) فاصله ماه از زمین چقدر است؟

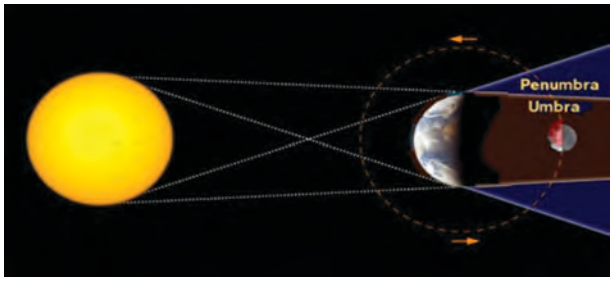
به این سؤالات هم یونانیان باستان با دقت قابل توجهی پاسخ دادند.

ارسطو استدلال می‌کرد که ماه یک کره است (نه یک دیسک) زیرا انتهای مرز نور خورشید روی ماه همیشه یک کمان دایره‌ای است.

آریستارخوس (۲۳۰-۳۱۰ ق‌م) فاصلهٔ زمین تا ماه را حدود ۶۰ برابر شعاع زمین محاسبه کرد (در واقع بین ۵۷ و ۶۳ برابر شعاع زمین است که به دلیل خروج از مرکز مدار تغییر می‌کند). همچنین او شعاع ماه را ۱/۳ شعاع زمین تخمین زد (شعاع ماه در واقع ۰/۲۷۳ شعاع زمین است).

آریستارخوس [ارسطرخس] می‌دانست که ماه‌گرفتگی ناشی از سایهٔ زمین و قطر سایه تقریباً دو برابر شعاع زمین است (با این فرض که خورشید بسیار دور از زمین است؛ اطلاعات بیشتر در این مورد در «پلهٔ سوم»).

مشاهدات گوناگون نشان دادند که گرفتگی ماه حداکثر سه ساعت طول می‌کشد. همچنین می‌دانستند که یک دور چرخش کامل ماه به دور زمین یک ماه طول می‌کشد. با استفاده از این اطلاعات و اندکی محاسبات جبری ساده، آریستارخوس نتیجه گرفت که فاصلهٔ زمین تا ماه حدود ۶۰ برابر شعاع زمین است.

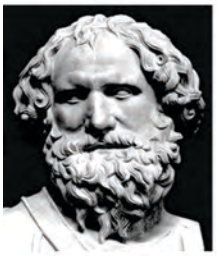


سایه ـ نیم‌سایه

غروب ماه حدود ۲ دقیقه طول می‌کشد (۱/۷۲۰ شبانه‌روز). بنابراین قطر زاویه‌ای ماه ۱/۷۲۰ اندازهٔ یک زاویهٔ کامل یا ۱/۲ درجهٔ قوسی یا به عبارت دقیق‌تر ۳۱ دقیقهٔ قوسی است.

از آنجا که آریستارخوس می‌دانست فاصلهٔ ماه تا زمین ۶۰ برابر شعاع زمین است ، با استفاده از مثلثات پایه، شعاع ماه را تقریباً ۱/۳ شعاع زمین به دست آورد (ولی در محاسبهٔ او به مقدار دقیق عدد π نیاز بود که او در اختیار نداشت و باید چند دهه منتظر می‌ماند تا **ارشمیدس** (۲۱۲-۲۸۷ ق‌م) این مقدار را به دست بیاورد!).

غروب ماه دو دقیقه طول می‌کشد



ارشمیدس

پلهٔ سوم: خورشید

۱) شعاع خورشید چقدر است؟

۲) فاصله خورشید تا زمین چقدر است؟

یونانیان باستان توانستند به این سوال هم پاسخ دهند! (هر چند بدون دقت کافی). روش آنها غیرمستقیم و مبتنی بر ماه بود. آریستارخوس از قبل محاسبه کرده بود که شعاع ماه تقریباً ۱/۱۸۰ فاصلهٔ ماه تا زمین است. از آنجا که قطر زاویه‌ای خورشید و ماه تقریباً یکسان هستند (در هنگام خورشیدگرفتگی به وضوح دیده می‌شود)، او با استفاده از مثلث‌های متشابه نتیجه گرفت که شعاع خورشید هم ۱/۱۸۰ فاصلهٔ خورشید تا زمین است (پاسخ درست ۱/۲۱۵ است.)

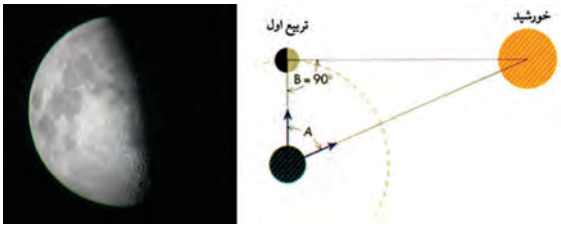
همچنین به کمک مثلثات تخمین زد که فاصله تا خورشید تقریباً ۲۰ برابر فاصله تا ماه است؛ که نادرست بود (مقدار واقعی تقریباً ۳۹۰ برابر است). علت آن این بود که اگرچه روش ریاضی مورد استفادهٔ او اساساً درست بود، اما بسیار خطا داشت. هیپارخوس (۱۲۰-۱۹۰ ق‌م) و بطلمیوس (۱۶۸-۹۰ م) نسبت دقیق‌تر ۴۲ را به دست آوردند.

بطلمیوس هیپارخوس خورشیدگرفتگی

با این حال، این نتایج برای اثبات این واقعیت مهم که خورشید بسیار بزرگتر از زمین است؛ کافی بود. بر همین مبنا، آریستارخوس نتیجه گرفت که فکرِ گردش خورشید به دور زمین نامعقول است و بیش از ۱۷۰۰ سال قبل از کوپرنیک مدل خورشیدمرکزی را ارائه داد! (کوپرنیک نیز در اثر معروف خود آریستارخوس را صاحب اصلی این نظریه می‌داند).

از قضا، مدل خورشیدمرکزی آریستاخوس را متفکران بعدی یونان باستان نپذیرفتند. از آنجا که فاصله تا ماه در پلهٔ قبلی نردبان مشخص شد، اکنون اندازه و فاصله تا خورشید را می‌دانیم (فاصله تا خورشید به عنوان واحد نجومی (AU) شناخته می‌شود و برای سه پلهٔ بعدی نردبان بسیار مهم خواهد بود).

روش کار آریستارخوس این شکل بود: او می‌دانست که هر ماه نو یک ماه قمری پس از ماه قبل است. با مشاهدات دقیق، دریافت که تربیع اول کمی زودتر از دقیقاً وسط ماه نو و ماه کامل رخ می‌دهد. او این اختلاف را ۱۲ ساعت اندازه‌گیری کرد (متأسفانه اندازه‌گیری دقیق تربیع اول کاملاً دشوار است و اختلاف واقعی نیم ساعت است). با استفاده از مثلثات ابتدایی، فاصله تا خورشید تقریباً ۲۰ برابر فاصله تا ماه به دست می‌آید.



تربیع اول

پلهٔ چهارم: سیارات

منجمان باستان می‌دانستند که خورشید و سیارات تنها در منطقه‌البروج حرکت می‌کنند، و این بدان معناست که منظومهٔ شمسی اساساً روی یک صفحهٔ دوبعدی قرار دارد (دایره‌البروج). اما سؤالات دیگری نیز مطرح بودند:

۱) فاصلهٔ سیاره‌ها (مثلاً مریخ) تا خورشید چقدر است؟

۲) مدار آنها به چه شکل است؟

۳) چه مدت طول می‌کشد تا دور خورشید بچرخند؟

بطلمیوس (۱۶۸-۹۰ م) پاسخ‌هایی به این پرسش‌ها داد، اما پاسخ‌هایی بسیار نادقیق، که دلیلش استفادهٔ او از مدل زمین‌مرکزی به جای مدل خورشیدمرکزی برای منظومهٔ شمسی بود.

نیکولاس کوپرنیک (۱۵۴۳-۱۴۷۳) نخستین کسی بود که پاسخ‌های دقیق را به دست آورد. وی دورهٔ تناوب مریخ (یک سال مریخی) را ۶۸۷ روز و فاصلهٔ آن تا خورشید را ۱/۵ واحد نجومی تخمین زد. هر دو اندازه‌گیری تا دو رقم اعشار دقیق است (بطلمیوس این مقادیر را ۱۵ سال(!) و ۴/۱ واحد نجومی به دست آورده بود).

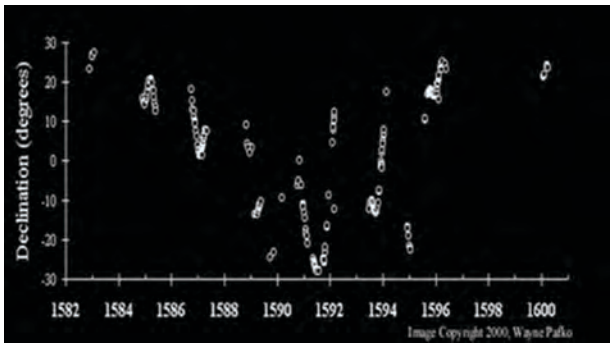
کوپرنیک چگونه این کار را انجام داد؟ بابلی‌ها قبلاً می‌دانستند که حرکت ظاهری مریخ در آسمان هر ۷۸۰ روز (دورهٔ هلالی مریخ) تکرار می‌شود. مدل کوپرنیک ادعا می‌کند که زمین هر سال خورشیدی (۳۶۵ روز) یکبار به دور خورشید می‌چرخد. با کم کردن دو سرعت زاویه‌ای نسبی، سال واقعی مریخ (سال نجومی) ۶۸۷ روز حاصل می‌شود. زاویهٔ بین خورشید و مریخ از روی زمین را می‌توان با استفاده از یک ستارهٔ مرجع محاسبه کرد. کوپرنیک با استفاده از اندازه‌گیری از این زاویه در تاریخ‌های مختلف، همراه با اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای فوق و اندکی مثلثات پایه، فاصلهٔ مریخ تا خورشید را تقریباً ۱/۵ واحد نجومی محاسبه کرد.

کوپرنیک

کپلر

تیکو براهه

رصدهای دقیق نجومی تیکو براهه (۱۶۰۱-۱۵۴۶) و استدلال ریاضیاتی یوهانس کپلر (۱۶۳۰-۱۵۷۱) به این نتیجه انجامید که مدار مریخ در واقع دایره‌ایِ کامل نیست، بلکه در مداری بیضوی می‌چرخد. این اطلاعات منجر به قوانین حرکت کپلر شد که نظریهٔ جاذبهٔ نیوتن از آن الهام گرفت.



رصدهای تیکو براهه از مریخ

نظریهٔ کوپرنیک فرض می‌کرد که زمین و مریخ در یک مدار دایره‌ایِ کامل حرکت می‌کنند. کپلر متوجه شد که چنین نیست. این کاملاً با مشاهدات براهه همخوانی نداشت. اما چگونه مدار صحیح مریخ را پیدا می‌کنیم؟ مشاهدات براهه زاویهٔ بین خورشید و مریخ را از زمین بسیار دقیق نشان می‌دهد. اما زمین ثابت نیست و ممکن است در یک مدار دایره‌ایِ کامل حرکت نکند. علاوه بر این فاصلهٔ زمین تا مریخ معلوم نبود، مدار مریخ ناشناخته بود. بنابراین محاسبهٔ دقیق مدار مریخ با استفاده از این داده‌ها ناممکن به نظر می‌رسید.

برای حل این مشکل، کپلر دو ایدهٔ بسیار هوشمندانه ارائه داد. برای محاسبهٔ دقیق مدار مریخ، ابتدا مدار زمین را به طور دقیق محاسبه کرد. اگر بدانید زمین در هر لحظه دقیقاً کجاست، با محاسبات ریاضی

می‌توان حرکت زمین را در محاسبات وارد کرد و اثر آن را خنثی نمود. برای محاسبهٔ مدار زمین، از خود مریخ به عنوان یک مرجع ثابت استفاده کرد! برای مشخص کردن موقعیت زمین در هر لحظه، دو اندازه‌گیری نیاز است (زیرا صفحهٔ منظومهٔ شمسی دوبعدی است)، جهت خورشید (نسبت به دیگر ستارگان) و جهت مریخ، اما مریخ نیز حرکت می‌کند!

قطر کهکشان راه شیری برابر با ۱۰۰ هزار سال نوری است.

دورترین ستارهٔ قیفاووسی کشف‌شده (با تلسکوپ فضایی هابل) در فاصلهٔ ۱۰۸ میلیون سال نوری است.

قطر عالم بزرگ‌تر از ۹۳ میلیارد سال نوری است.

هوشمندی کپلر اندازه‌گیری‌هایی با فاصلهٔ ۶۸۷ روز بود، یعنی زمانی که مریخ به محل قبلی خود در آسمان بازمی‌گشت و بنابراین به عنوان یک نقطهٔ ثابت عمل می‌کرد. پس می‌توان بین خورشید و مریخ یک مثلث رسم کرد تا موقعیت زمین به دست بیاید. هنگامی که مدار زمین محاسبه شد، می‌توان این ترفند را وارونه کرد و سپس مدار مریخ را نیز محاسبه کرد. این اندازه‌گیری‌ها با قوانین جاذبهٔ نیوتن قابل توجیه نبود و به عنوان اولین قدم‌ها در تأیید نظریهٔ نسبیت عام از آن یاد می‌شود.

آلبرت اینشتین (۱۹۵۵-۱۸۷۹) از این ایدهٔ کپلر به عنوان «ایدهٔ نبوغ‌آمیز ناب» یاد کرد. ایده‌های مشابه برای سایر سیارات نیز قابل کاربرد است. از آنجا که می‌توان یک واحد نجومی را از پله‌های قبلی نردبان محاسبه کرد، اکنون فاصله تا همه سیارات را داریم. از قرن نوزدهم هنگامی که مسافرت در سرتاسر زمین آسان‌تر شد، با روش اختلاف منظر (به عنوان مثال اندازه‌گیری زمان گذر ناهید از مقابل خورشید در مکان‌های مختلف روی زمین؛ روشی که اولین بار در سال ۱۷۷۱ از آن استفاده شد!) می‌توان این فواصل را به طور مستقیم و دقیق‌تری محاسبه و تمام پله‌های نردبان فاصله‌های کیهانی را تأیید و تقویت کرد.

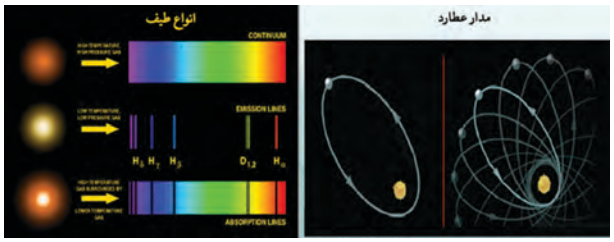
پلهٔ پنجم: سرعت نور

از نظر فنی، سرعت نور، c، فاصله نیست. با این حال دانستن مقدار این سرعت برای صعود به پله‌های بعدی مهم است. اوله رامر (۱۶۴۴-۱۷۱۰) و کریستین هویگنس (۱۶۹۵-۱۶۲۹) نخستین‌بار با استفاده از مدار قمر Io به دور مشتری، مقدار ۲۲۰۰۰۰ کیلومتر در ثانیه را برای سرعت نور به دست آوردند، بسیار کمتر از مقدار واقعی آن‌که از روش‌های مدرن به دست آمده است یعنی ۲۹۹۷۹۲ کیلومتر در ثانیه. رامر با استفاده از اندازه‌گیری زمان ورود Io به سایهٔ مشتری و زمان خروج آن از سایه، سرعت چرخش Io به دور مشتری را ۴۲/۵ ساعت اندازه‌گیری کرد. اما این بازه یکنواخت نبود. وقتی زمین با مشتری در یک راستا بود تا زمانی که به جهت مخالف مشتری منتقل می‌شد، این بازهٔ زمانی حدود ۲۰ دقیقه عقب می‌ماند. هویگنس استدلال کرد که نور برای پیمودن مسافتی به اندازهٔ ۲ واحد نجومی به ۲۰ دقیقه زمان نیاز دارد (در واقع حدود ۱۷ دقیقه طول می‌کشد). هویگنس برای به دست آوردن سرعت نور این محاسبات را با محاسبه‌ای دقیق از یک واحد نجومی (حداقل برای زمان خود) ترکیب کرد.

اکنون دقیق‌ترین اندازه‌گیری فاصله تا سیارات توسط رادار به دست می‌آید که به مقدار دقیق سرعت نور نیاز دارد. سرعت نور را در حال حاضر می‌توان با استفاده از ابزارهای زمینی با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری کرد، بنابراین نردبان فاصله‌ها دقت بیشتری خواهد داشت. داده‌های جمع‌آوری شده از این پله‌های نردبان علاوه بر پیشرفت بیشترِ فیزیک برای رسیدن به پله‌های بالاتر نردبان تعیین‌کننده بوده است.

جیمز کلارک ماکسول (۱۸۷۹-۱۸۳۱) ملاحظه کرد که سرعت نور با سرعتی که نظریهٔ تابش الکترومغناطیسی او پیش‌بینی می‌کند تقریباً مطابقت دارد، و از اینجا به این نتیجهٔ مهم رسید که نور، نوعی تابش الکترومغناطیسی است. این نتیجه‌گیری در نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین اهمیت اساسی داشت و همچنین به پیدایش طیف‌نگاری انجامید. معادلات ماکسول و اندازه‌گیری دقیق سرعت نور نشان داد که سرعت نور در خلا و هر چارچوب مرجعی که معادلات ماکسول برای آن برقرار است، یک ثابت جهانی است.

اینشتین استدلال کرد که معادلات ماکسول به عنوان یک قانون اساسی در فیزیک، باید در هر چارچوب مرجع لخت وجود داشته باشد. دو فرضیهٔ فوق ناگزیر به نظریهٔ نسبیت خاص منجر می‌شوند. این نظریه در پلهٔ نهم نردبان، برای درک ارتباط دقیق سرخ‌گرایی با سرعت، مهم می‌شود.



حرکت تقدیمی مدار عطارد

اندازه‌گیری دقیق مدار عطارد انحراف مداری کوچکی را در مدار بیضوی آن نشان داد که این یکی از اولین تأییدهای تجربی نظریهٔ نسبیت عام اینشتین است. این نظریه در پلهٔ نهم نردبان نیز بسیار مهم است. نظریهٔ ماکسول مبنی بر اینکه نور نوعی تابش الکترومغناطیسی است به ابزار مهم طیف‌سنج نجومی نیز کمک می‌کند، که در پله‌های هفتم و نهم نردبان اهمیت می‌یابد.

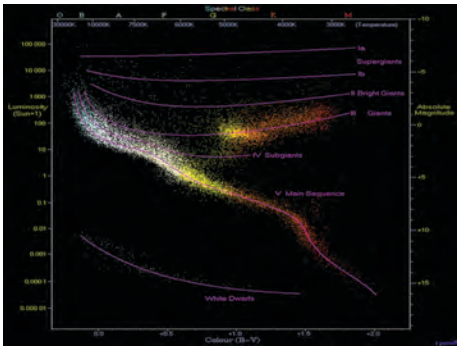
پلهٔ ششم: ستارگان نزدیک

قبلاً دیدیم که با استفاده از اختلاف‌منظر از دو نقطهٔ روی زمین می‌توان فاصله تا ستاره‌ها را برحسب واحد نجومی محاسبه کرد. با اندازه‌گیری مکان یک ستاره در فاصلهٔ شش ماه از هم و مقایسهٔ انحراف زاویه‌ای، فاصله تا آن ستاره برحسب واحد نجومی به دست می‌آید. ایدهٔ اختلاف منظر، که به تلسکوپی نسبتاً دقیق نیاز دارد، اولین بار توسط فردریش بسل (۱۸۴۶-۱۷۸۴) در سال ۱۸۳۸ با موفقیت به‌کار گرفته شد. این روش تا فاصلهٔ حدود ۱۰۰ سال نوری (۳۰ پارسک) دقیق است که برای یافتن چندین هزار ستارهٔ نزدیک کافی است (۱ سال نوری حدود ۶۳۰۰۰AU است). از قضا، یونانیان باستان برآورد آریستارخوس از یک واحد نجومی و مدل خورشیدمرکزی را که او پیشنهاد می‌کرد، رد کردند زیرا این امر با توجه به اختلاف منظر به این معنی بود که ستارگان فاصلهٔ بسیار زیادی با هم دارند (که البته دارند)!

پله هفتم: کهکشان راه شیری

با استفاده از طیف‌سنجی می‌توان «رنگ» یک ستارهٔ نزدیک را اندازه‌گیری کرد، و تلسکوپ‌های جدید به‌راحتی می‌توانند روشنایی ظاهری ستارگان را محاسبه کنند. با ترکیب کردن فاصله تا ستاره‌های نزدیک از نردبان قبلی و قانون عکس مربع، می‌توان روشنایی مطلق ستاره‌های نزدیک را به دست آورد.

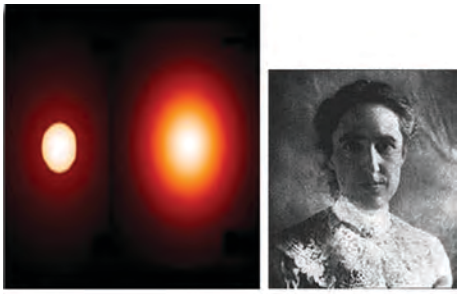
اجنار هرتسپرانگ (Ejnar Hertzsprung، ۱۹۶۷-۱۸۷۳) و هنری راسل (۱۹۵۷-۱۸۷۷) این روشنایی مطلق را برحسب رنگ در سال‌های ۱۹۱۵-۱۹۰۵ برای هزاران ستارهٔ نزدیک رسم کردند که منجر به نمودار معروف هرتسپرانگ-راسل (HR) شد، که نشان‌دهندهٔ رابطهٔ این دو بود. اکنون می‌توان رنگ ستارگان دور را اندازه‌گیری کرد و روشنایی مطلق را به دست آورد. از آنجا که روشنایی ظاهری نیز قابل اندازه‌گیری است، می‌توان فاصله را اندازه‌گیری کرد. این روش تا ۳۰۰۰۰۰ سال نوری کارایی دارد! فراتر از آن، ستاره‌های نمودار HR کم‌نورتر از آن هستند که به طور دقیق فاصلهٔ آنها اندازه‌گیری شود.



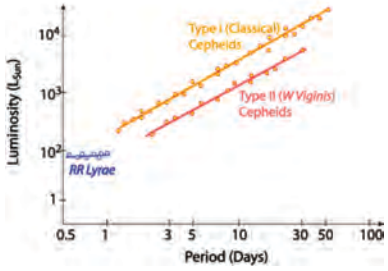
نمودار هرتسپرانگ-راسل

پلهٔ هشتم: کهکشان‌های دیگر

هنریتا اسوان لویت (Henrietta Swan Leavitt، ۱۸۶۸-۱۹۲۱) گروه خاصی از ستاره‌ها (قیفاووسی‌ها) را مشاهده کرد که روشنایی آنها به صورت دوره‌ای نوسان می‌کند و با رسم روشنایی مطلق بر حسب دورهٔ تناوب، رابطهٔ دقیقی را مشاهده کرد. این هم روش دیگری را برای به دست آوردن روشنایی مطلق و از این رو به دست آوردن فواصل در اختیار ما قرار می‌دهد. از آنجا که قیفاووسی‌ها بسیار درخشان هستند، این روش تا فاصلهٔ ۱۳ میلیون سال نوری کارایی دارد! خوشبختانه اکثر کهکشان‌ها حداقل یک ستارهٔ قیفاووسی در خود دارند، بنابراین ما فاصله تا همهٔ کهکشان‌ها را، تا فاصله‌های زیادی می‌دانیم. روش‌های مشابهی، با استفاده از ابرنواختر به جای قیفاووسی‌ها، وجود دارد که گاهی حتی برای مقیاس‌های بزرگ‌تر نیز کارساز است.



هنریتا استوان لویت

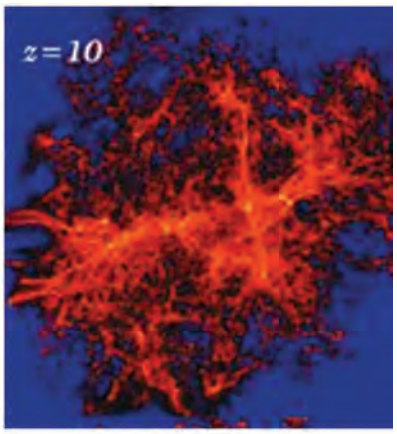


نمودار دورهٔ تناوب-درخشندگی

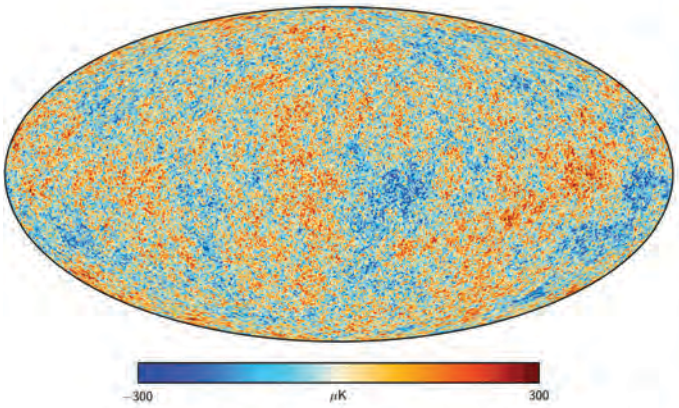
پلهٔ نهم: شکل کیهان

ادوین هابل

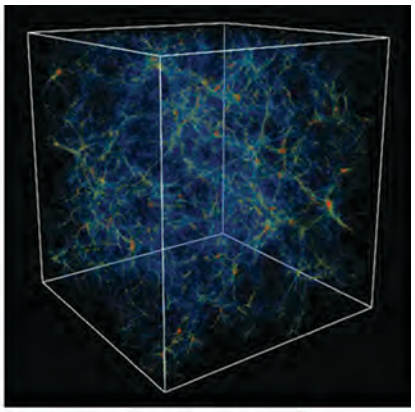
ادوین هابل (۱۹۵۳-۱۸۸۹) با ترکیب تمام داده‌های فوق و اندازه‌گیری دقیق‌تر انتقال به سرخ، همراه با سرعت شناخته‌شدهٔ نور (از پلهٔ پنجم) قانون معروف هابل را فرمولبندی کرد: انتقال به سرخ یک شیء متناسب با فاصلهٔ آن است. این قانون به نوبهٔ خود به مدل معروف «مهبانگ» برای جهان در حال انبساط منجر شد که با بسیاری از مشاهدات کیهان‌شناختی دیگر تأیید شده است. می‌توان از این قانون برای اندازه‌گیری فاصله‌ها در بزرگترین مقیاس‌ها استفاده کرد.



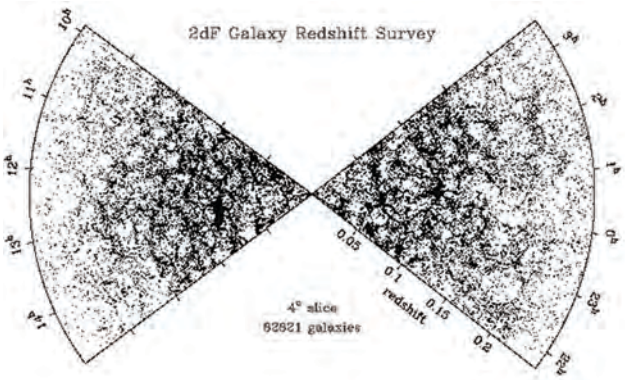
شبکهٔ کیهانی



تصویر تابش زمینهٔ کیهانی (تغییرات دمایی) از داده‌های ماهوارهٔ پلانک ۲۰۱۶



شبیه‌سازی شبکهٔ کیهانی



برش چهار درجه‌ای از آسمان

این اندازه‌گیری‌ها منجر به ایجاد نقشه‌های دقیق از جهان در مقیاس‌های بسیار بزرگ شده و این نیز به کشف بسیاری از ساختارهای بسیار بزرگ مانند دیوار بزرگ اسلون (Sloan) انجامیده است که بدون چنین دانشی از نجوم امکان پذیر نبود. به عنوان مثال، بهترین تخمین ما (تا سال ۲۰۱۶) از قطر فعلی جهانِ قابل مشاهده حداقل ۹۳ میلیارد سال نوری است[1] ریاضیات در این مرحله پیچیده‌تر می‌شود، زیرا تأثیرات نسبیت عام بر داده‌هایی که در این مقیاس جهان داریم بسیار بیشتر است. فناوری پیشرفته (مانند تلسکوپ فضایی هابل و WMAP) نیز بسیار حیاتی بوده است. بالا رفتن از این پله از نردبان (یعنی نقشه‌برداری از جهان در مقیاس‌های بسیار بزرگ) امروزه همچنان یک موضوع بسیار مورد توجه در نجوم است.

- **برگرفته از وبلاگ ترنس تائو (Terence Tao)**

تلخیص و ترجمه: آرش دانش، پژوهشکدهٔ نجوم

۱. در متن اصلی، ۷۸ میلیارد سال‌نوری آمده که مربوط به تخمین سال ۲۰۰۴ است.