

سیارات و فراخورشیدی ها

Rosa M. Ros, Hans Deeg

¹International Astronomical Union, Technical University of Catalonia (Barcelona, Spain), ²Instituto de Astrofísica de Canarias and University of La Laguna (Canarias, Spain)

خلاصه

این بخش شامل مجموعه ای فعالیت ها برای درک ویژگی های قابل مشاهده سیارات منظومه شمسی (مانند: اندازه، فاصله، سرعت مداری و سرعت فرار) است. هر فعالیت در تلاش است تا از طریق محاسبه و کار عملی، داده های عددی جداول مربوط به ویژگی سیارات را برای دانش آموزان ملموس نماید.

اهداف

درک مفهوم مقادیر عددی مربوط به داده های منظومه ی شمسی
فهمیدن مشخصات مهم منظومه های فراخورشیدی از طریق مقایسه ویژگی های آن ها با سیستم مشتری و قمرهای گالیله ای آن

منظومه شمسی

دانش آموزان با استفاده از مدل های مقیاسی منظومه ی شمسی، قادر به مقایسه ویژگی های متفاوت سیارات خواهند بود. برای شروع این فعالیت، از جدول داده های شماره یک استفاده می کنیم.

| سیارات | قطر (کیلومتر) | فاصله از خورشید (کیلومتر) |
|---------|------------------|------------------------------|
| Sun | 1 392 000 | |
| Mercury | 4 878 | $57.9 \cdot 10^6$ |
| Venus | 12 180 | $108.3 \cdot 10^6$ |
| Earth | 12 756 | $149.7 \cdot 10^6$ |
| Marte | 6 760 | $228.1 \cdot 10^6$ |
| Jupiter | 142 800 | $778.7 \cdot 10^6$ |
| Saturn | 120 000 | $1 430.1 \cdot 10^6$ |
| Uranus | 50 000 | $2 876.5 \cdot 10^6$ |
| Neptune | 49 000 | $4 506.6 \cdot 10^6$ |

جدول 1: اعضای منظومه شمسی

هدف همه ی مدل ها، قابل درک کردن داده های عددی است. بدون شک درک فاصله ی میلیون ها کیلومتر برای دانش آموزان دشوار است، اما تبدیل فاصله ها و اندازه به مقیاس های مناسب، فهم آن ها را بسیار آسان خواهد کرد.

مدل های منظومه شمسی

فعالیت 1: مدل قطرها

برای ساختن این مدل یک کاغذ زرد رنگ به قطر 139 سانتی متر را برش

دهید. در این مدل هر 1 سانتی متر معادل 10000 کیلومتر است. سپس سایر سیارات را روی مقوا یا کاغذ برش دهید و ویژگی های ظاهری هر سیاره را ترسیم کنید. پس از آماده شدن همه ی سیارات؛ آن ها را در نزدیکی خورشید قرار دهید، حال به راحتی دانش آموزان تفاوت اندازه ی سیارات را درک خواهند کرد.

با استفاده از مقیاس هر یک سانتی متر، 10000 کیلومتر، قطر سیارات به شرح زیر خواهد بود: خورشید 139 سانتی متر، تیر 0.5 سانتی متر، ناهید 1.2 سانتی متر، زمین 1.3 سانتی متر، بهرام 0.7 سانتی متر، هرمز 14.3 سانتی متر، کیوان 12.0 سانتی متر، اورانوس 5.0 سانتی متر، و نپتون 4.9 سانتی متر.

پیشنهاد: این مدل را می توان بر روی لباس نیز انجام داد، برای این منظور و حفظ مقیاس سیارات، متوان تابش های خورشید و سیارات را رسم کرد.



شکل 2: مدلی از منظومه شمسی براساس مقیاس قطر بر روی تی شرت

فعالیت 2: مدل فاصله

با مقایسه ی فاصله ی سیارات از خورشید، می توان یک مدل ساده برای اجرا در مدرسه ساخت. برای ساخت این مدل به صورت ساده به صورت زیر عمل کنید: برش هایی از مقوا به عرض ده سانتی متر فراهم کنید، سپس آن ها را به هم چسبانده تا یک نوار چند متری به دست آید (شکل 3). سپس مکان دقیق سیارات را با توجه به مقیاس مورد استفاده بر روی نوار مشخص کنید. دقت داشته باشید که دانش آموزان مقیاس فاصله و اندازه را با هم اشتباه نگیرند. مقیاس پیشنهاد در این فعالیت هزار بار کوچکتر از مدل قبلی است. در این مدل هر 1 سانتی متر برابر با 10000000 کیلومتر است در حالی که در مدل پیشین هر 1 سانتی متر معادل 10000 بود. با توجه به این مقیاس فاصله ی سیارات به شرح زیر خواهد بود:

تیر 6 سانتی متر، ناهید 11 سانتی متر، زمین 15 سانتی متر، بهرام 23

سانتی متر، هرمز 78 سانتی متر، کیوان 143 سانتی متر، اورانوس 288 سانتی متر ونپتون 450 سانتی متر.



شکل 3: مدل فاصله

پیشنهاد: یک نمونه ی دیگر از این مدل، استفاده از دستمال توالت است. در این نمونه، هر برگه را می توان معاد 20 میلیون کیلومتر در نظر گرفت.

فعالیت 3: مدل قطر و فاصله

چالش بعدی، ترکیب کردن دو فعالیت بالا و ایجاد مدلی است که در آن اندازه ی سیارات و فاصله ی آن ها به صورت صحیح رعایت شود. واقع امر این است که ساختن مدلی که در آن سیارات را با اجسام نه چندان کوچک نشان داد و در عین حال فاصله ها هم زیاد نباشد، کار ساده ای نیست، در حقیقت کنار هم قرار دادن دو ویژگی فاصله و اندازه کار دشواری است و چندان هم برای دانش آموزان مفید نیست. به عنوان یک پیشنهاد می توان این مدل را در حیطه مدرسه و به کمک توپ هایی با قطرهای مختلف انجام داد.



شکل 4: خورشید و سیارات در مدل فاصله و قطر

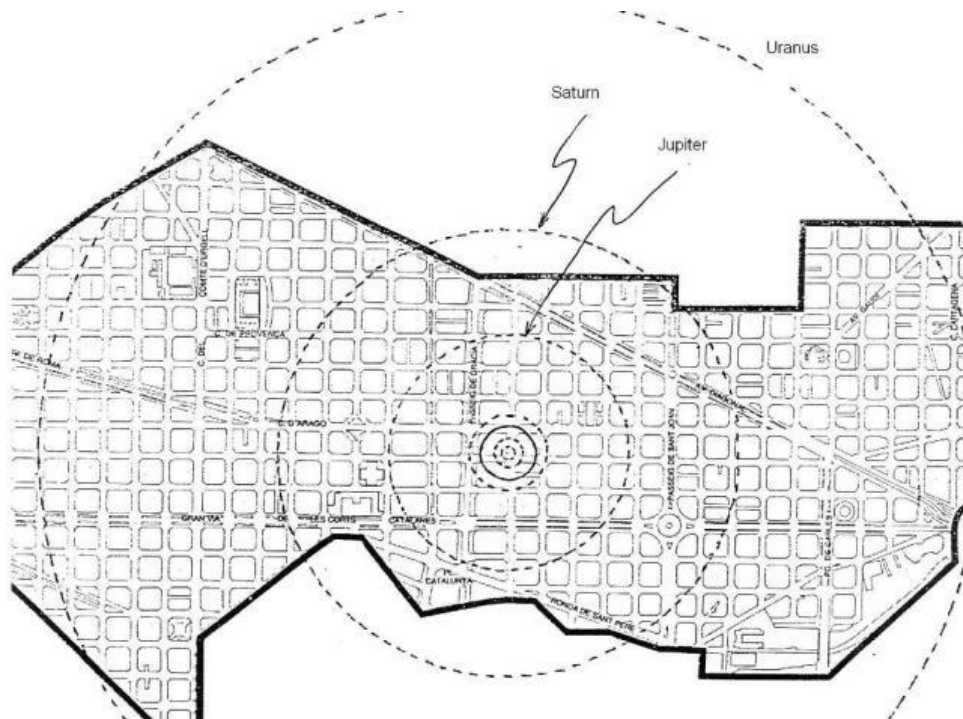
برای مثال، یک راه حل ساده برای اجرای این مدل استفاده از حیطه

مدرسه است، یک توپ بسکتبال با قطر تقریبی 25 سانتی متر، به عنوان خورشید در یک گوشه حیاط قرار داده شود و سیارات به ترتیب: تیر، به اندازه ی سر یک سوزن ته گرد (1 میلی متر) در فاصله ی 10 متری، یک سوزن با سر بزرگ تر (2 میلی متر)، در فاصله ی 19 متری به عنوان ناهید، یک سوزن مشابه دیگر (قطر 2 میلی متر) به عنوان زمین در فاصله 27 متری، بهرام یک سوزن ته گرد کوچک (1 میلی متر) در فاصله ی 41 متری از خورشید قرار داده می شوند. در این حالت معمولا حیاط مدرسه به پایان می رسد. حال برای ادامه، می بایست به بیرون از مدرسه رفت و سیارات را در مکان هایی قرار داد که دانش آموزان با آنجا آشنا هستند و فاصله ی تقریبی را می دانند. سیاره ه ی مشتری، یک توپ پینگ پونگ (قطر 2.5 سانتی متر) در فاصله ی 140 متری، کیوان یک توپ پینگ پنگ (قطر 2 سانتی متر) در فاصله ی 250 متری، یک تیله ی شیشه ای (قطر 1 سانتی متر) در فاصله ی 500 متری به عنوان اورانوس، و در نهایت یک تیله شیشه ای دیگر (قطر یک سانتی متر) در فاصله ی 800 متری، به عنوان نپتون قرار خواهند گرفت.

در نظر داشته باشید که این مدل منظومه شمسی در مدرسه جا نمی شود. با این حال اگر بخواهیم فاصله ها را کاهش دهیم، اندازه ی سیارات از سر سوزن کوچک تر خواهد شد و این درک مفاهیم و تصور آن ها را برای دانش آموزان مشکل می کند. به عنوان یک تمرین، مقیاسی برای توسعه این مدل، بدست آورید.

فعالیت 4: مدلی بر روی نقشه ی شهر

استفاده از نقشه ی شهر برای مشخص کردن موقعیت سیارات بر روی آن، یک ایده ی بسیار ساده است. برای این منظور خورشید را در ورودی مدرسه در نظر می گیریم. در این مثال، ما از نقشه ی شهر بارسلونا و اشیا متفاوت به عنوان سیارات (مثلا میوه و سبزیجات) استفاده کرده ایم و آن ها را در خیابان ها متفاوت قرار داده ایم. به عنوان تمرین، پیشنها می کنیم، این کار را بر روی نقشه ی شهر خود انجام دهید.



شکل 5: نقشه ی شهر بارسلونا و چند سیاره

در نقشه ی نشان داده شده، تیر یک تخم خاویار، ناهید و زمین نخود، بهرام دانه ی فلفل؛ مشتری پرتقال، کیوان نارنگی، اورانوس و نپتون به اندازه ی گردو هستند. برای خورشید میوه ای به بزرگی مورد نیاز نداریم، بنابراین می توان از دانش آموزان خواست که یک کره به اندازه ی یک ماشنی ظرفشویی در نظر بگیرند. مدرس می تواند فعالیت مشابه ای با توجه به شهر خود انجام دهد.



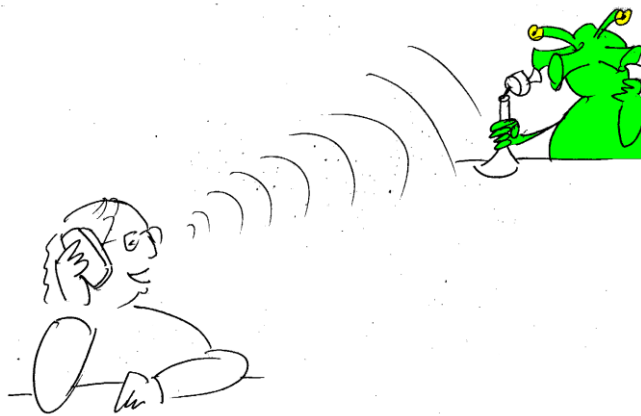
شکل 6: تصویری از شهر متز فرانسه.

در شهر متز (فرانسه) اجزای منظومه شمسی در خیابان ها و میداین پخش شده اند، همچنین تابلویی از اطلاعات در کنار

آن ها، برای افرادی که در آن مکان ها قدم می زنند قرار داده شده است.

فعالیت 5: مدل فاصله ی نور

در نجوم از سال نوری به عنوان واحدی برای اندازه گیری استفاده می شود، که اغلب به عنوان واحد اندازه گیری زمان اشتباه گرفته می شود. این مفهوم را به کمک مدل منظومه شمسی می توان نشان داد. سرعت نور سیصد هزار کیلومتر در ثانیه است، یعنی نور در مدت یک ثانیه مسافتی معادل 300000 کیلومتر را طی می کند. برای مثال، فاصله زمین تا ماه 384.000 کیلومتر است، و نور این مسافت را در مدت 1.3 ثانیه طی می کند.



شکل 7: یک مثال دیگر

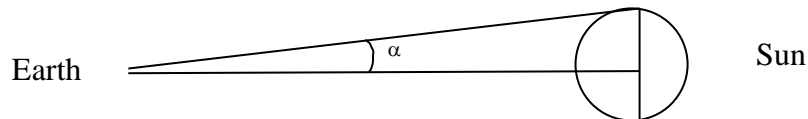
با استفاده از این واحد، می توان از دانش آموزان خاص تا زمان مورد نیاز برای رسیدن نور خورشید به هر سیاره را محاسبه کنند. (برای مدرس، زمان مورد نیاز برای رسیدن نور خورشید به هر سیاره: تیر 3.3 دقیقه، ناهید 6 دقیقه، زمین 8.3 دقیقه، بهرام 12.7 دقیقه، مشتری 43.2 دقیقه، کیوان 1.32 ساعت، اورانوس 2.66 ساعت، نپتون 4.16 ساعت) ممکن است که شما از دانش آموزان بخواهید که یک ویدئوکنفرانس از خورشید به هر سیاره را تصور کند.

ما در اینجا فاصله نزدیک ترین ستاره را معرفی می کنیم، تا دانش آموزان فواصل عظیم بین ستارگان را تجسم و به علت سخت بودن کشف سیارات فراخورشیدی پی ببرند. آلفا- قنطورس با فاصله ی 4.37 سال نوری یا 4.13 کیلومتر نزدیک ترین ستاره به ماست. شما می توانید از دانش

آموزان بخواهید تا با استفاده از مدل های منظومه شمسی، فاصله تا این ستاره را محاسبه کنند. در مدل حیاط مدرسه، با مقیاس 1 سانتی متر معادل 56000 کیلومتر، این ستاره در فاصله ی 7375 کیلومتری خواهد بود.

مدل محاسبه اندازه ی ظاهری قطر خورشید از روی هر سیاره

از هر سیاره، برای مثال زمین، زاویه خورشید α است. برای مقادیر کوچک α ، ما $\tan \alpha \approx \alpha$ را قرار می دهیم. (برحسب رادیان)



شکل 8: از زمین، خورشید با زاویه α دیده می شود.

می دانیم که قطر خورشید 1.4×10^6 در نتیجه شعاع آن 0.7×10^6 است و فاصله زمین تا خورشید 150×10^6 کیلومتر است. ما نتیجه می گیریم:

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{0.7 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6} = 0.0045 \text{ radians}$$

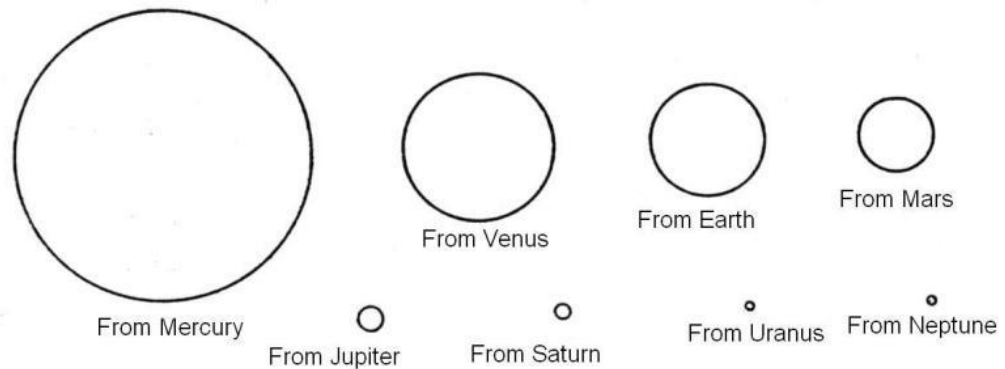
و برحسب درجه

$$\frac{0.0045 \cdot 180}{\pi} = 0.255^\circ$$

اندازه ی خورشید از روی زمین حدود $0.51^\circ \approx 2 \times 0.255$ ، نیم درجه خواهد بود. به صورت مشابه، برای سایر سیارات، می توان محاسبه کرد، ما اندازه ی خورشید را در جدول 2 محاسبه کرده ایم و می توان اندازه ی نسبی خورشید را نشان داد (شکل 9)

| Planets | $2 \tan \alpha$ | 2α (°) | 2α (°) approx. |
|---------|-----------------|---------------|-----------------------|
| Mercury | 0.024 | 1.383 | 1.4 |
| Venus | 0.0129 | 0.743 | 0.7 |
| Mars | 0.006 | 0.352 | 0.4 |
| Jupiter | 0.0018 | 0.1031 | 0.1 |
| Saturn | 0.000979 | 0.057 | 0.06 |
| Uranus | 0.00048 | 0.02786 | 0.03 |
| Neptune | 0.0003 | 0.0178 | 0.02 |

جدول 2: اندازه ی خورشید در سیارات مختلف



شکل 9: خورشید از سیارات: تیر، ناهید، مریخ، مشتری، اورانوس و نپتون.

فعالیت 6: مدل چگالی

هدف این مدل، یافتن موادی با چگالی مشابه سیارات منظومه شمسی است، تا به راحتی بتوانیم در دستان خودمان، چگالی آن ها را احساس کنیم.

| | Density (g/cm ³) |
|---------|------------------------------|
| Sun | 1.41 |
| Mercury | 5.41 |
| Venus | 5.25 |
| Earth | 5.52 |
| Moon | 3.33 |
| Mars | 3.9 |
| Jupiter | 1.33 |
| Saturn | 0.71 |
| Uranus | 1.3 |
| Neptune | 1.7 |

جدول 3: چگالی اجرام در منظومه شمسی



شکل 10: مدل چگالی

| Minerals | Density | Other materials | Density |
|--------------|---------|-----------------|-----------|
| Plaster | 2.3 | Glycerin | 1.3 |
| Orthoclase | 2.6 | Cork | 0.24 |
| Sulfur | 1.1-2.2 | Aluminium | 2.7 |
| Alite | 2 | Iron | 7.86 |
| quartz | 2.65 | Cement | 2.7 – 3.1 |
| Borax | 1.7 | Glass | 2.4 – 2.8 |
| Blende | 4 | Tin | 7.3 |
| Pyrite | 5.2 | Clay | 1.8 – 2.5 |
| Erythrocytes | 5.4 | Bakelite | 1.25 |
| Calcite | 2.7 | Oak | 0.90 |
| Galena | 7.5 | Pinewood | 0.55 |

جدول 4: مثالی از چگالی اجسام مختلف

جدول سه، چگالی سیارات را با چگالی مواد معدنی متفاوتی (که مجموع ای از آن ها در آزمایشگاه هر مدرسه ای یافت می شود)، یا سایر موادی که به آسانی یافت می شود، مانند شیشه، سرامیک، چوب و... مقایسه کرده است. به کمک جدول 4، مواد با چگالی مورد نظر را بیابید.

اگر از موادی غیر از مواد ذکر شده در جدول استفاده نمودید، به راحتی می توان چگالی آن را محاسبه نمود. تکه ای از آن را برداشته و وزن نمایید و جرم آن را بدست آورید، سپس با انداختن آن در ظرف آب، حجم آن را حساب کنید. چگالی را از طریق فرمول زیر می توان بدست آورد:

$$d = \frac{m}{V}$$

دانش آموزان باید در نظر داشته باشند چون چگالی کیوان کمتر از یک است، بنابراین بر روی آب شناور می ماند.

فعالیت 7: مدل صاف کردن سیارات

- برای تجسم تغییر شکل سیارات گاز بر اثر نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخششان، ما یک مدل ساده می سازیم.
- با توجه به شکل 9، با یک چوب و تعدادی نوارهای کاغذی، می توان یک مدل ساده برای درک مسطح شدن سیارات در اثر چرخش، بسازیم.
- نوارهایی به عرض 1 سانتی متر و طول 35 سانتی متر برش دهید.
 - هر دو انتهای نوارها را به یک چوب استوانه ای شکا به طول 50 سانتی متر وصل کنید. قسمت بالایی نوارها را چسبانده تا نتوانند حرکت کنند، اما قسمت پایین را آزاد بگذارید تا به هنگام چرخش بتوانند به راحتی حرکت کنند.
 - چوب استوانه ای را در میان دو دست خود قرار دهید و شروع به چرخاندن آن در یک جهت و سپس جهت دیگر نمایید. تغییر شکل

نوارهای کاغذی در اثر نیروی گریز از مرکز را مشاهده خواهید نمود (شکل 11) این نیرو به صورت مشابه در سیارات نیز عمل می کند.



شکل 11: مدلی برای شبیه سازی پخش شدگی

فعالیت 8: مدلی برای دوره ی سیارات

سیارات با سرعت و دوره ی مداری متفاوتی به دور خورشید در حال گردش هستند (جدول 5). با دانستن دوره چرخش و میانگین فاصله سیاره تا خورشید، می توان سرعت میانگین مداری سیاره در مدار را به دست آورد. برای مثال زمین را نظر بگیرید، البته می توان این کار را برای سایر سیارات نیز انجام داد.

مسافت مدار انتقالی برابر با $L = 2\pi R$ ، است، بنابراین سرعت مداری میانگین مداری برابر است با $v = L/T = 2\pi R/T$. برای زمین دوره ی انتقالی برابر با 365 روز و بنابراین با توجه فاصله زمین تا خورشید که برابر با $R = 150 \times 10^6 \text{ km}$ است، سرعت $v = 2,582,750 \text{ km/day} = 107,740 \text{ km/h} = 29.9 \text{ km/s}$ خواهد بود. همچنین در نظر داشته باشید که خورشید با سرعت 220 km/s یا به عبارتی $800,000 \text{ km/h}$ در حال حرکت به دور مرکز کهکشان است.

| Planet | Orbital period (days) | Distance from the Sun (km) | Orbital average speed (km/s) | Orbital average speed (km/h) |
|---------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Mercury | 87.97 | 57.9×10^6 | 47.90 | 172440 |
| Venus | 224.70 | 108.3×10^6 | 35.02 | 126072 |
| Earth | 365.26 | 149.7×10^6 | 29.78 | 107208 |
| Mars | 686.97 | 228.1×10^6 | 24.08 | 86688 |
| Jupiter | 4331.57 | 778.7×10^6 | 13.07 | 47052 |
| Saturn | 10759.22 | $1\ 430.1 \times 10^6$ | 9.69 | 34884 |
| Uranus | 30.799.10 | $2\ 876.5 \times 10^6$ | 6.81 | 24876 |
| Neptune | 60190.00 | $4\ 506.6 \times 10^6$ | 5.43 | 19558 |

جدول 5: داده های مداری اعضای منظومه شمسی

تیر، سریع ترین سیاره، نزدیک ترین سیاره به خورشید و نپتون، دورترین سیاره، کندترین سیاره است. رومیان باستان متوجه شدند که تیر بسیار سریع حرکت می کند بنابراین آن را پیک خدایان نامیده و با پاهای بالدار نمایش دادند. یک سال سیاره ی تیر، 88 روز به طول می انجامد. برای مثال، اگر چند هفته با چشم غیر مسلح به رصد پردازیم، مشتری و کیوان را خواهیم دید که آهسته تر از مریخ و ناهید در میان صورت های فلکی دایره البروج جابه جا می شوند.



شکل 12: شبیه سازی حرکت دایره ای سیارات.

این یک آزمایش ساده برای تجربه ی رابطه ی بین فاصله و دوره ی مداری است.

یک جسم نیمه سنگین مثلا گردو را به یک نخ وصل می کنیم. انتهای نخ را از محلی که آزاد است در دست می گیریم، سپس شروع به چرخاندن آن در بالای سر کرده، با افزایش طول نخ مشاهده می کنیم که زمان بیشتری برای طی کردن مدار نیاز است و اگر نخ را به داخل بکشیم (کوتاه کنیم) زمان کمتری نیاز خواهد داشت.

با استفاده از اجیل و نخ های به طول متفاوت می توان این مدل را توسعه داد (همه ی آن ها در مدارهای دایره ای حرکت می کنند). با اینحال به جای بریدن نخ هایی با طول متفاوت، می توانید نخ ها را با طول 20 سانتی متر برش دهید، و سپس با یک مقیاس نسبی، فاصله مناسب از جسم را با یک گره مشخص کنید. سپس نخ را در محل گره در دست خود قرار دهید.

برای استفاده از این مدل، ما باید یک سر نخ را در محل گره در دست نگه داشته، و سپس شروع به چرخش آن با حداقل سرعت ممکن در صفحه ای موازی کرده، تا جسم ما در مدار خود باقی بماند. مشاهده می کنیم که اجسام با شعاع کمتر، زمان کوتاه تری نیز برای چرخش نیاز

دارند.

مدل گرانش سطحی

فرمول نیروی گرانش، $F = G \frac{Mm}{d^2}$ ، به ما اجازه می‌دهد که محاسبه گرانش سطحی g ،

وارد بر سطح سیاره ای با جرم M را می‌دهد. با در نظر گرفتن جرم واحد ($m=1$) بر سطح سیاره ($d=R$) شعاع سیاره، و ثابت جهانی گرانش $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ، می‌توان جاذبه سطحی را بدست آورد. اگر جرم سیاره از رابطه $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$ که چگالی سیاره و شعاع R سیاره باشد، ما بدست می‌آوریم:

$$g = \frac{4}{3} \pi G \rho R$$

با جایگزین کردن مقادیر مربوط به هر دو متغیر طبق جدول 6 (شعاع بر حسب متر، چگالی بر حسب kg/m^3 و $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$) می‌توان مقدار جاذبه سطحی هر سیاره را محاسبه نمود.

| Planet | R equatorial radius (km) | ρ density (g/cm^3) | g surface gravity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) |
|---------|--------------------------|------------------------------------|--|
| Moon | 1738 | 3.3 | 1.62 |
| Mercury | 2439 | 5.4 | 3.70 |
| Venus | 6052 | 5.3 | 8.87 |
| Earth | 6378 | 5.5 | 9.81 |
| Mars | 3397 | 3.9 | 3.71 |
| Jupiter | 71492 | 1.3 | 24.8 |
| Saturn | 60268 | 0.7 | 8.96 |
| Uranus | 25559 | 1.2 | 8.69 |
| Neptune | 25269 | 1.7 | 11.00 |

جدول 6: اندازه، چگالی و جاذبه سطحی اجرام منظومه شمسی

به دو مثال زیر توجه کنید:

$$g_{\text{mercury}} = \frac{4}{3} \pi G \cdot 2439 \times 10^3 \text{ m} \cdot 5400 \text{ kg/m}^3 = 3.7 \text{ m/s}^2,$$

$$g_{\text{venus}} = \frac{4}{3} \pi G \cdot 6052 \times 10^3 \text{ m} \cdot 5300 \text{ kg/m}^3 = 8.9 \text{ m/s}^2.$$

به صورت مشابه می‌توان g را برای سایر سیارات نیز بدست آورد. در جدول 7، مقادیر جاذبه سطحی نسبت به زمین با حرف g نشان داده شده است.

فعالیت 9: مدل ترازوی عقربه ای

هدف این مدل، بهینه کردن 9 ترازوی عقربه ای (هشت سیاره و ماه) است که دانش آموزان به کمک آن وزن خود در سایر سیارات و ماه را بدست آورند.

مراحل برای همه ی سیارات یکسان است. ایده ی اصلی تعویض صفحه ی اعداد روی هر ترازو، با صفحه ی اعداد متناسب با سیاره ی اصلی

است.

در ابتدا ترازو را باز می کنیم. در همه ی ترازوها، دو عدد فنر تنظیم کننده وجود دارد. در نظر داشته باشید که در پایان کار فنرها را باید به جای خود برگردانیم (شکل) پس از باز کردن، صفحه ی اعداد را تعویض یا مقادیر مورد نظر را روی آن نوشته.

در جدول زیر مقادیر جاذبه ی سطحی ماه و سیارات ($m \cdot s^{-2}$) نوشته شده است. در ستون اول، مقادیر مطلق و در ستون دیگر مقادیر نسبی با توجه به جاذبه سطحی زمین ذکر شده است. ما از این مقادیر برای تبدیل وزن زمینی به وزن سیاره ی مورد نظر استفاده می کنیم.

در پایان، ترازو را می بندیم. حال می توانیم وزن خود در سایر سیارات را بدست آوریم.

| | g surface gravity ($m \cdot s^{-2}$) | g surface gravity (relative to Earth) |
|---------|---|--|
| Moon | 1.62 | 0.16 |
| Mercury | 3.70 | 0.37 |
| Venus | 8.87 | 0.86 |
| Earth | 9.81 | 1.00 |
| Mars | 3.71 | 0.38 |
| Jupiter | 24.79 | 2.53 |
| Saturn | 8.96 | 0.91 |
| Uranus | 8.69 | 0.88 |
| Neptune | 11.00 | 1.12 |

جدول 7: مقدار مطلق و نسبی جاذبه ی سطحی اجزای منظومه شمسی



شکل 13: ترازو با مقیاس عوض شده



شکل 14: منظومه شمسی با ترازو

فعالیت 10: مدل دهانه ها

بیشتر دهانه های منظومه ی شمسی ناشی از آتش فشان نیستند، بلکه بر اثر برخورد شهابسنگ ها با سطح سیارات و قمرها به وجود آمده اند. در ابتدا به منظور رعایت نظافت، کف زمین یک روزنامه قدیمی پهن کنید. 1.

سپس به کمک یک الک، لایه ای آرد به ضخامت 2-3 سانتی متر ایجاد کنید. 2.

سپس یک لایه ی میلتری نازک از پودر کاکائو به کمک الک روی آن ایجاد کنید. 3.

4. از ارتفاع دو متری، یک قاشق غذا خوری پودر کاکائو رها کنید. دهانه های برخوردی شما ایجاد می شوند

5. ممکن است با تغییر ارتفاع، جرم، نوع ماده و ... دوباره آزمایش کنید. در برخی موارد شما می توانید دهانه هایی با قله ی مرکزی بسازید.



شکل 15: سمت چپ: شبیه سازی دهانه ها، سمت راست: نتیجه ی برخورد

مدل سرعت فرار

اگر سرعت پرتاپ یک موشک به اندازه ی کافی زیاد نباشد، نیروی جاذبه ی سیاره، موشک را به سطح زمین برمی گرداند. اگر سرعت پرتاب به اندازه ی کافی بزرگ باشد، موشک می تواند از دام میدان گرانش سیاره فرار کند. اجازه دهید تا سرعت مورد نیاز برای فرار موشک، یا همان حداقل سرعت پرتاپ یا سرعت فرار را محاسبه کنیم. فرمول حرکت با شتاب ثابت را در نظر بگیرید که در آن e مسافت طی شده و a شتاب است:

$$e = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$$

$$v = at + v_0$$

اگر ما شتاب را با g جایگزین و سرعت اولیه را برابر با صفر در نظر گرفته، بر سطح سیاره $R = \frac{1}{2}gt^2$ و $v = gt$ بدست می آوریم. بعد از حذف زمان متغیر:

$$v = \sqrt{2gR}$$

سپس می توان مقادیر g و R را با مقادیر ارائه شده در جدول 6 جایگزین و مقدار سرعت فرار را بدست آورد.

اما از روش دیگری نیز می توان سرعت فرار را محاسبه کرد.

محاسبه ی سرعت فرار با استفاده از فرمول های انرژی جنبشی و پتانسیل:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_p = -G\frac{Mm}{R}$$

$$\frac{1}{2}mv_e^2 - G\frac{Mm}{R} = 0$$

و بنابراین سرعت:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR}$$

که v_e ، سرعت فرار، G ثابت جهانی گرانش، $(6.672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2)$ ، M جرم ستاره، m جرم پرتابه، R شعاع ستاره، g شتاب گرانش بر سطح ستاره. بر روی زمین $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

برای مثال ما سرعت فرار برخی از سیارات را محاسبه می کنیم، مثلاً زمین:

$$v_{earth} = \sqrt{2gR} = (2 \cdot 9.81 \text{ m s}^{-2} \cdot 6378 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 11186 \text{ m/s} \approx 11.2 \text{ km/s.}$$

به صورت مشابه، برای کوچکترین سیاره، تیر:

$$v_{mercury} = (2 \cdot 3.78 \text{ m s}^{-2} \cdot 2439 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 4294 \text{ m/s} \approx 4.3 \text{ km/s.}$$

برای بزرگ ترین سیاره، مشتری:

$$v_{jupiter} = (2 \cdot 23.1 \text{ m s}^{-2} \cdot 71492 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 57471 \text{ m/s} \approx 57 \text{ km/s.}$$

بدیهی است که پرتاب موشک از روی تیر خیلی آسان تر از زمین است، اما پرتاب از روی مشتری با سرعت فرار 60 km/s سخت است.

ب) برای مقایسه ی نتایج بدست آمده، سرعت فرار در اجزای منظومه ی شمسی به شرح زیر می باشد: تیر 4.3 km/s ، ناهید 10.3 km/s ، زمین 11.2 km/s ، مریخ 5.0 km/s ، مشتری 59.5 km/s ، کیوان 35.6 km/s ، اورانوس 23.6 km/s ، نپتون 2102 km/s (

فعالیت 11: مدل موشک با قرص جوشان

با استفاده از آسپرین یا قرص جوشان به عنوان محرک، می توان یک موشک ایمن در محیط کلاس ساخت.

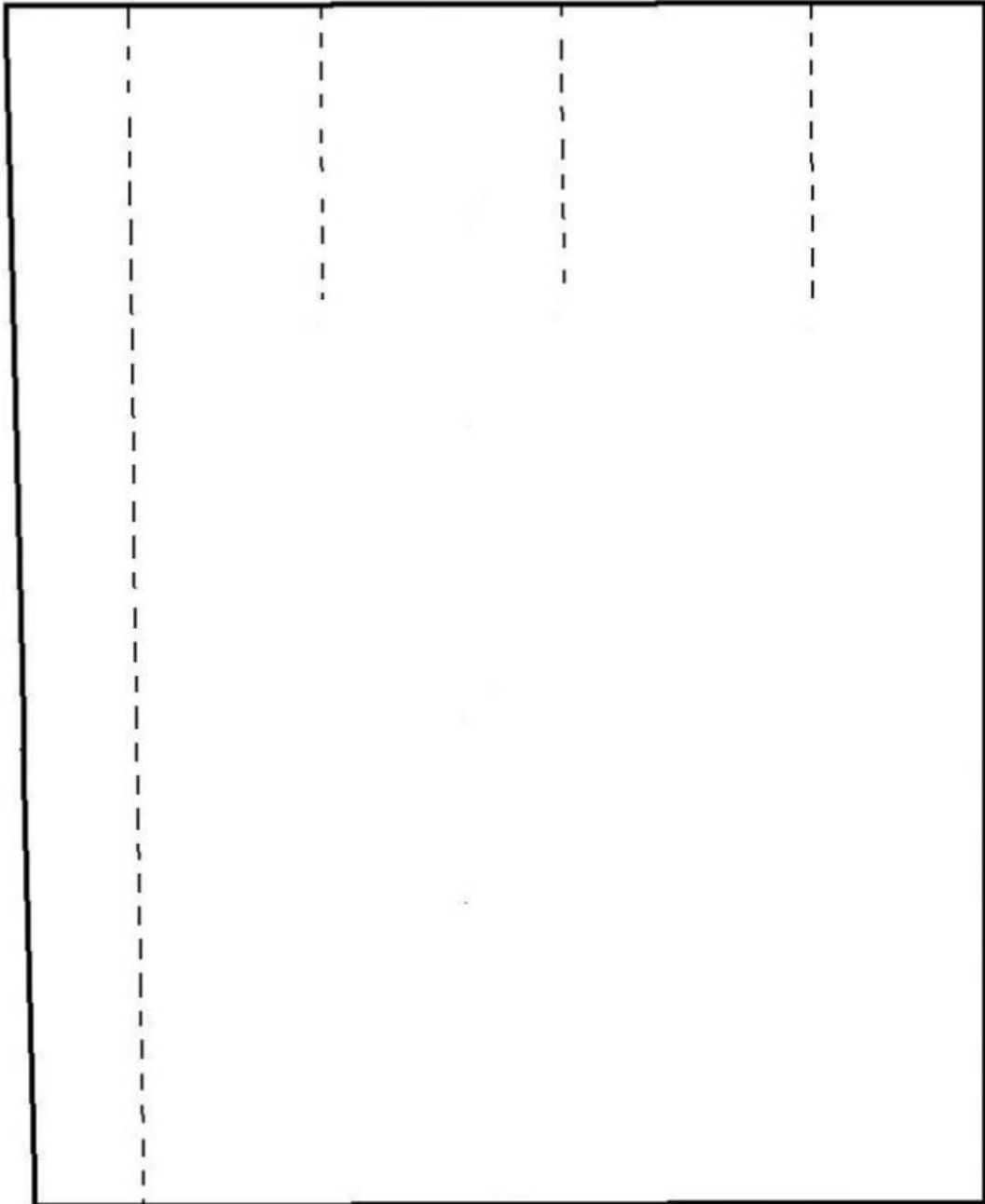
با استفاده از مدل، از روی محل خط های کامل برش ایجاد کرده و سپس از روی نقطه چین ها تا می زنیم.

سپس از یک جعبه ی نگهداری دارو یا غذای ماهی استفاده می کنیم مطمئن شوید که محفظه درون استوانه ی موشک به خوبی قرار می گیرد. سپس پایه های نگهدارنده را به موشک وصل کنید و در پایان مخروط سر را قرار دهید.

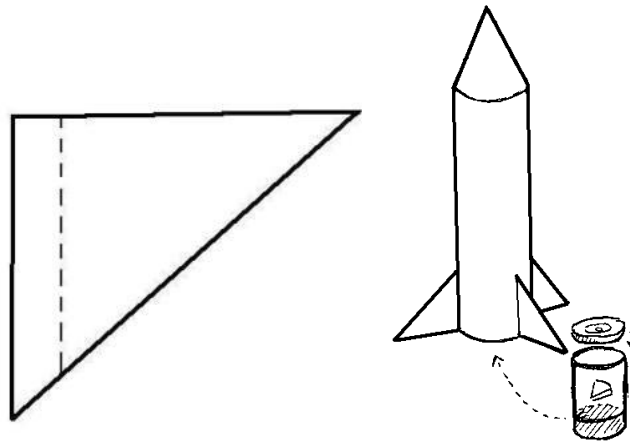


شکل 16: فرایند ساخت موشک در چهار مرحله

بعد از ساختن موشک، پرتاب را باید آغاز کرد. برای این منظور یک سوم ظرف (معادل یک سانتی متر) را آب می کنیم و یک چهارم قرص جوشان را در / ان می اندازیم. در ظرف را بسته و موشک را روی آن قرار می دهیم. بعد از یک دقیقه موشک پرتاب می شود. بدون شک می توان این آزمایش را بارها و بارها انجام داد ولذت برد. (در حالت حداکثر سه چهارم اسپرین می ریزیم و از پرتاب لذت می بریم.)



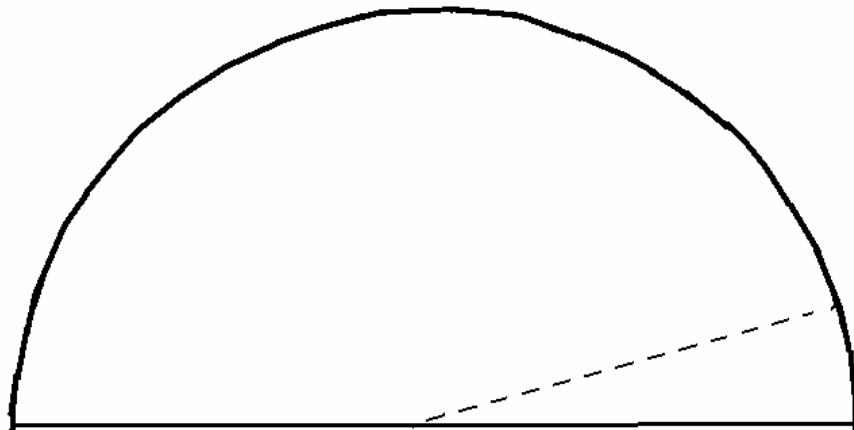
شکل 19: بدنه ی موشک. در محدوده ی نقطه چین ها، پایه ها را قرار دهید.



شکل 18: یک طرح ساده



شکل 17: چند موشک
شکل 19: مدلی برای سه پایه موشک



شکل C19: درپوش موشک

فراخورشیدی

ستاره شناسان، 4000 سیاره و 500 سیستم چندگانه سیاره ای کشف کرده اند. در شکل یک، تصویر یکی از اولین سیاراتی که عکس برداری شده است را مشاهده می کنید.

تمام موضوعات این کارگاه، بخشی از تحولات تکنولوژی می باشد که پیشرفت در این زمینه موجب شده است. برخی موارد ممکن است در آینده از اهمیت آن ها کاسته شود؛ اما خوب است که در کلاس درس مطرح شوند. این شاخه بشدت در حال رشد است و ممکن است برخی از بخش های آن به روزرسانی نیاز داشته باشند.

اجازه دهید تا با یک مثال از تاریخ نجوم شروع کنیم. در سال 1610 گالیله برای اولین بار به زحل نگاه کرد. او متوجه نشد، پیرامون

سیاره حلقه ای وجود دارد. در عوض او زحل را خوشه ی ستاره ای سه جزیی در نظر گرفت.

ما باید صبر می کردیم تا هویگنس با تلسکوپ قوی تر خود به زحل نگاه کند و راز حلقه های آن را کشف کند. برای چندین سال، جامعه ی علمی ساختار زحل را اشتباه تفسیر کرد. نمونه ای از آن را می توان در نقاشی وربین 1638-1636 دید. او با توجه به مشاهدات گالیله، کیوان به مانند سه ستاره ترسیم کرد.



شکل 1: اولین سیاره (2M1207b) که در 16 مارس 2003 با تلسکوپ 8 متری VLT. جرم آن 3-10 برابر جرم خورشید است و در مداری به فاصله 41 واحد نجومی از ستاره ی مادر که یک کوتوله قهوه ای است، قرار دارد. در سال 2006 یک دیسک غباری پیرامون ستاره ی مرکزی کشف شد، که شواهدی برای ادامه ی سیاره سازی در این سیستم جوان را فراهم آورد. (منبع: ESO)



شکل 2: زحل در نقاشی روبین (1636-1638) و نقاشی گالیله در 1610.

در همین راستا، خوب است به یاد بیاوریم که پس از کشف سرس در قرن 19 (1801 تا 1850)، این جرم در رده ی سیارات دسته بندی شد، اما بعدها به عنوان یک سیارک در نظر گرفته شد. به صورت مشابه، زمانی که در سال 1930 پلوتو کشف شد، در ابتدا به عنوان سیاره اما بعدها در سال 2006 در رده ی سیارات کوتوله دسته بندی شد. بنابراین، برخی از اطلاعات ما در مورد سیارات فراخورشیدی، در آینده مورد تجدید نظر قرار خواهد گرفت، اما این موضوع نباید ما را از معرفی این شاخه در مراکز آموزشی باز دارد.

معرفی فرا خورشیدی ها

سیارات فراخورشیدی، سیاراتی هستند که به دور ستاره ای غیر از خورشید ما در حال گردش هستند و به منظومه ی شمسی تعلق ندارند، NASA فهرستی (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) با بیش از 4000 سیاره را در سال 2019 منتشر کرد. نام گذاری سیارات فراخورشیدی ساده و برآمده از روشی است که برای ستارگان دوتایی استفاده می شود. برای نام گذاری سیاره فرا خورشیدی حرف A در نظر گرفته نمی شود و اولین سیاره کشف شده با حرف b بعد از نام ستاره مشخص می شود (برای مثال: 51 Pegasi b) سایر سیاره های کشف شده پس از آن به ترتیب با حروف بعدی الفبا: c,d,e,... نشان داده می شوند (برای نمونه: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e or 51 Pegasi f). ترتیب حروف ارتباط با دوره ی مداری سیارات یا سایر ویژگی های آن ها ندارد. علاوه بر این، در سال 2019 اتحادیه بین المللی ستاره شناسی، برای 19 سیاره ی فراخورشیدی کشف شده، نام هایی پیشنهاد کرد. برای مثال: سیستم ستاره ی اپسیلون آندرومدا (به جدول 8 نگاه کنید)، ستاره ی اصلی (Ups And) دارای نام Titawin نیز می باشد و سیارات b,c و d با نام های Saffar، Samh و Makriti نام گذاری شدند. البته امروزه این نام ها توسط کمیته های تخصصی و حتی منجمان آماتور نیز استفاده نمی شود.

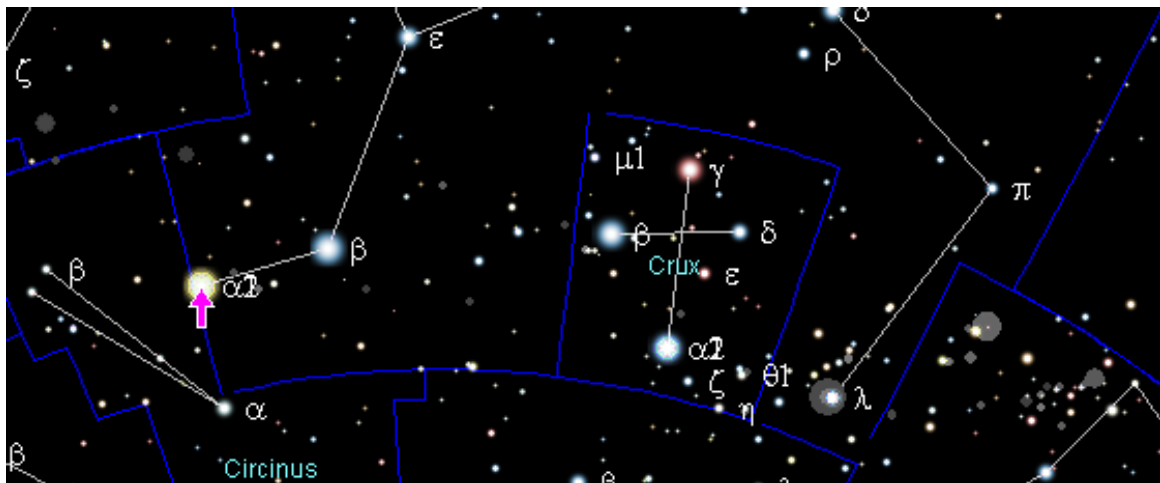
شناسایی سیستم های فراخورشیدی

آلفا یا پروکسیما قنطورس، به عنوان نزدیک ترین ستاره ها به ما در فاصله ی 4.5 سال نوری است. این فاصله را می توان با فاصله ی سیارات خودمان در منظومه شمسی مقایسه کرد. آلفا - قنطورس نزدیک به 10000 برابر دورتر از آخرین سیاره ی منظومه شمسی، نپتون، از ما قرار دارد، این فواصل عظیم شناسایی سیارات پیرامون ستارگان را بسیار سخت می کرد، تا اینکه تکنولوژی های رصدی در پایان قرن گذشته رو به پیشرفت رفت.

آلفا - قنطورس سومین ستاره پرنور آسمان شب است. این ستاره در واقع یک سیستم سه گانه است که از یک دوتایی، آلفا قنطورس A و B به همراه یک ستاره ی کوتوله با نام پروکسیما قنطورس تشکیل شده است. پیرامون ستاره ی سوم که یک کوتوله ی قرمز است، یک سیاره ی سنگی با ویژگی های بسیار شبیه به زمین کشف شد: پروکسیما b، نزدیک ترین فراخورشیدی به زمین که به صورت مستقیم مشاهده نشده است. این سیاره از طریق اختلال کوچک ایجاد شده در مدار ستاره که ناشی از اثرات میدان مغناطیسی سیاره بود، کشف شد. این آشفتگی موجب شناسایی سیاره و برخی از ویژگی های آن شد.

این سیاره هر 11 روز به دور ستاره مادر می چرخد، کمی بزرگ تر از زمین بوده و احتمالاً دارای سطحی جامد است.

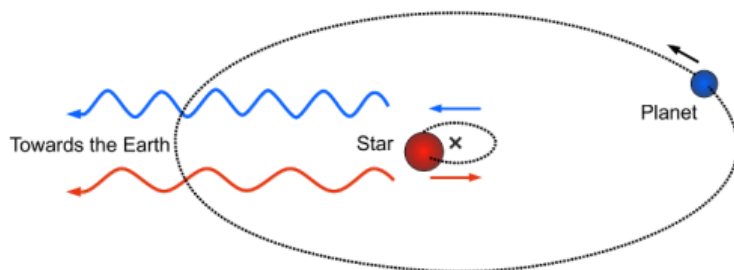
ویژگی بارز این سیاره فرخورشیدی، نزدیکی آن به ستاره ی مادر، پروکسیما قنطورس است. این سیاره در فاصله ی تقریبی 5 درصد مسافت زمین- خورشید، یعنی حدود 0.05 واحد نجومی است. اگر ستاره ی مادر این سیاره مانند خورشید بود، این سیاره را به جهنمی سوزان تبدیل می کرد. اما خوشبختانه ستاره ی مادر، یک کوتوله ی قرمز است، بنابراین سیاره در کمربند حیات قرار دارد. کوتوله ی قرمزی به مانند پروکسیما قنطورس، در حدود 12 درصد جرم خورشید و 0.1 درصد درخشندگی آن را دارد. با این ویژگی ها، سیاره ی جدید، دمایی در حدود 40 درجه زیر صفر



شکل 14: آلفا قنطورس در نزدیکی صلیب جنوبی

یکی از راه های امکان وجود حیات در سیستم های سیاره ای پیرامون کوتوله ی قرمز است که سیاره به اندازه ای به ستاره ی مادر نزدیک بوده که دمای آن امکان تشکیل آب به صورت مایع را فراهم کند. وقتی این اتفاق رخ دهد، در بسیاری از موارد شاهد پدیده ی چرخش همزمان خواهیم بود، مانند آنچه در مورد ماه شاهد هستیم. دوره حرکت انتقالی و چرخشی سیاره مشابه شده ، در نتیجه همیشه یک سمت سیاره به سوی ستاره ی مادر خواهد بود. این امر موجب می شود که در اثر تبخیر جو، یک سمت سوخته و سمت دیگر یخبندان شود. مگر آن که اتمسفر آن بسیار چگال تر از جو زمین بوده و با به جریان در آوردن گرمای زیاد، دما متعادل شود.

روش سرعت شعاعی در حال حاضر دو روش برای شناسایی فراخورشیدی ها وجود دارد. هر دو روش غیر مستقیم بوده و شناسایی سیستم سیاره ای به کمک رصد ستاره ی مرکزی سیستم صورت می گیرد.



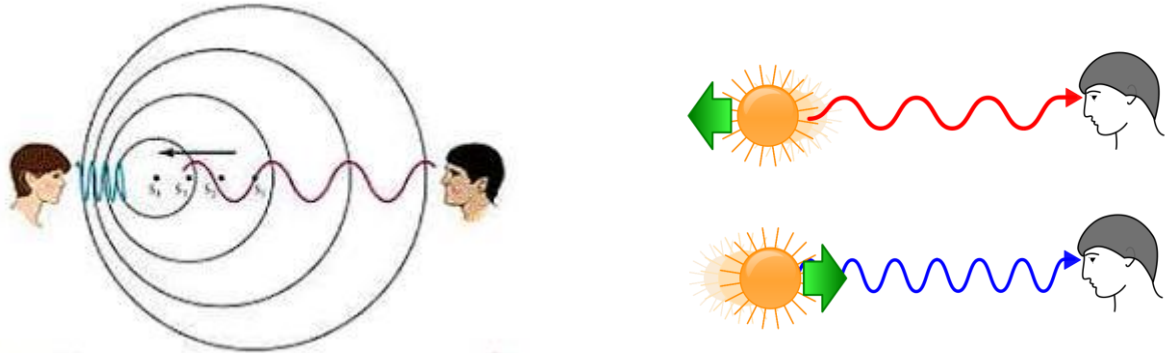
شکل 15: روش سرعت شعاعی برای شناسایی سیارات.

51 Pegasus b اولین سیاره ای بود که به کمک روش سرعت شعاعی پیرامون ستاره ی مرکزی در سال 1995 کشف شد. در این روش لرزش های ستاره ی مرکزی که ناشی از حرکت سیاره پیرامون آن سات، اندازه گیری می شود. ستاره و سیاره به دور مرکز جرم می چرخند. این حرکت، موجب جابه جایی بسیار کمی در نور ستاره از قرمز به آبی می شود که ناشی از اثر دوپلر است (شکل 15). به کمک این روش، می توان جرم سیاره را با توجه به جرم ستاره ی مرکزی بدست آورد. در عمل، چینش اکثر سیستم های سیاره ای کشف شده با این روش را نمی دانیم، از این رو، جرم سیاره های کشف شده را حداقل جرم در نظر می گیریم (به این معنا که جرم واقعی می تواند بیشتر باشد)

فعالیت 12: اثر دوپلر

همانطور که در قسمت انبساط جهان دیدیم، در اثر دوپلر، طول موج صدا با حرکت منبع آن تغییر می کند. این اثر را به کمک یک ساعت زنگدار که در یک کیسه ی پارچه ای در بالای سرمان به چرخش در آورده ایم، می توان آزمود. هنگامی که ساعت به سمت حضار می رود، طول موج کوتاه و صدا زیر می شود و هنگامی که ساعت از آن ها دور می شود، طول موج زیاد و صدا بم می شود. شخصی که در مرکز چرخش قرار دارد، این تغییرات را حس نمی کند.

در سیستم های فراخورشیدی و ستاره، امواج نور، از ستاره متاثر می شوند. وقتی یک ستاره به ما نزدیک می شود، طول موج آن کاهش و به سمت قسمت آبی طیف مرئی جابه جا می شود. هنگامی که ستاره شروع به دور شدن می کند، طول موج افزایش و نور به سمت قرمز انتهای طیف مرئی جابه جا می شود.



شکل 17: وقتی منبع نزدیک می شود، آبی و وقتی دور می شود، قرمز به نظر می رسد. شکل 16: وقتی منبع نزدیک می شود، طول موج کاهش و وقتی منبع شروع به دور شدن می کند، طول موج افزایش می یابد.

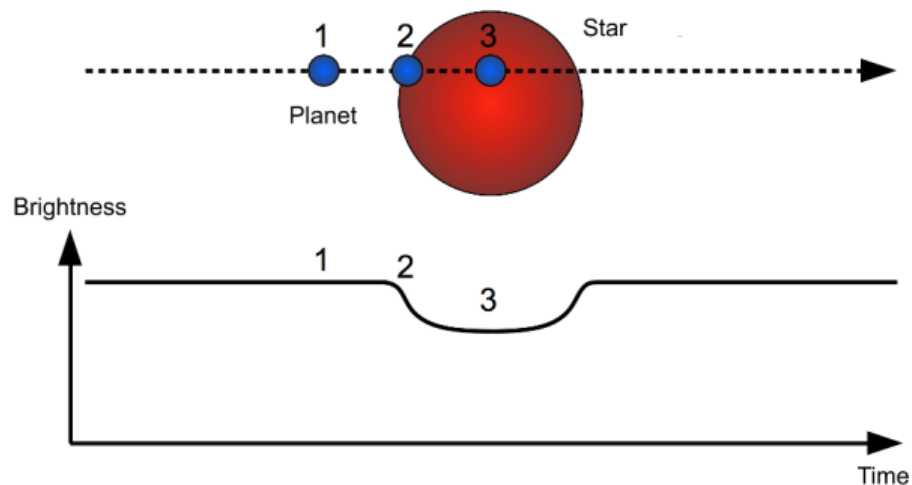
این اثر دوپلر ناشی از حرکت نسبی است، و وقتی سیاره به دور ستاره ی مادر حرکت می کند رخ می دهد. وقتی سیاره ی فراخورشیدی، از ما دور می شود، طول موج به سمت قرمز، و وقتی به ما نزدیک می شود، طول موج به سمت آبی جابه جا می شود.

روش گذر (ترانزیت)

یک روش مهم دیگر، روش گذر یا ترانزیت است. این روش بر اساس تغییرات مشاهده شده در نور ستاره ی مادر به هنگام عبور سیاره از مقابل ستاره و پوشیدن بخش کوچکی از قرص آن است (شکل 18). به کمک روش گذر می توان اندازه ی سیاره R_p را در مقایسه با اندازه ی ستاره ی مرکزی R_* از طریق فرمول زیر بدست آورد:

$$R_p / R_* = \sqrt{dF / F}$$

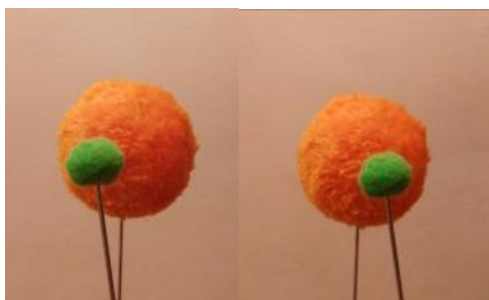
$dF / F = 0.01$ تغییر نسبی روشنایی به هنگام عبور سیاره است (برای مثال بیانگر کاهش 1 درصدی نور ستاره در هنگام عبور است).



شکل 18: روش گذر، برای شناسایی سیارات.

فعالیت 13: شبیه سازی گذر

روش گذر را به کمک دو توپ ساده یم توان شبیه سازی کرد. یک توپ بزرگ به عنوان ستاره ی مادر و یک توپ کوچک به عنوان سیاره. اگر راستای دید رصدگر با صفحه ی مداری سیاره به دور ستاره در یک راستا باشد، به هنگام عبور سیاره از مقابل خورشید، میزان درخشندگی نمودار ستاره کم و زیاد می شود (شکل 19). روشن است که اگر رصدگر در راستای صفحه ی چرخش ستاره نباشد، تغییری در نمودار درخشندگی ایجاد نمی شود.



شکل 19: ناظر در راستای صفحه ی چرخش باشد، می تواند عبور سیاره و تغییرات منحنی نوری را شناسایی کند.



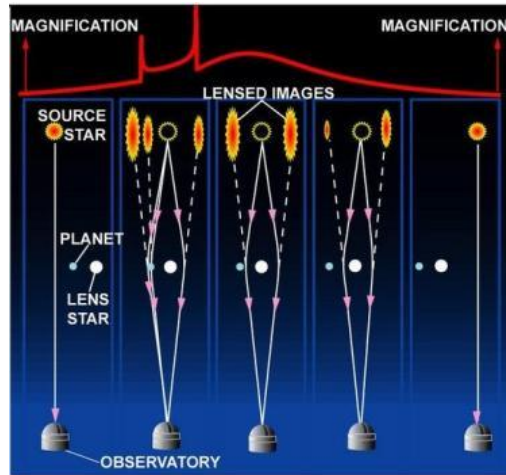
شکل 20: ناظر خارج از صفحه ی چرخش سیاره باشد، نمی تواند تغییرات منحنی نوری را مشاهده کند.

روش عدسی میکرو گرانشی

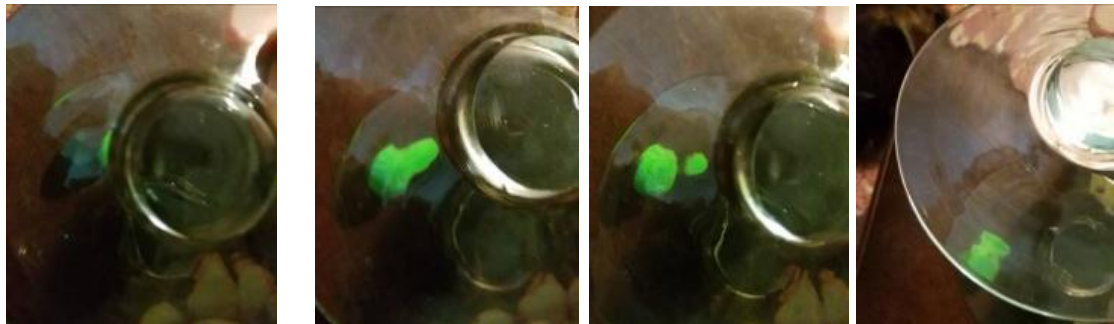
روش دیگر که کمتر استفاده می شود، روش عدسی میکروگرانشی است. در این روش، عدسی که موجب افزایش درخشندگی ستاره ی زمینه می شود، ناشی از تراز شدن آن با سیاره ی فراخورشیدی و ستاره ی مادر است. سیستم فراخورشیدی به صورت یک عدسی عمل کرده و موجب روشنایی بسیار شاخصی می شود (خط قرمز در شکل 21). برای اجرای این روش، سه جز (ستاره ی زمینه، سیستم فراخورشیدی و زمین) می بایست به صورت فرضی تراز باشند.

فعالیت 14: شبیه سازی ریزعدسی

به کمک یک جفت لیوان های پایه دار استفاده شده در بخش انبساط جهان، شناسایی سیاره ی فراخورشیدی به دور ستاره ی مادر رای می توان شبیه سازی کرد. در ابتدا، تنها از یک لیوان استفاده کرده و چیزی مشاهده نمی کنیم. سپس از هر دو استفاده کرده در این حالت یک یا دو نقطه نمایان می شود.



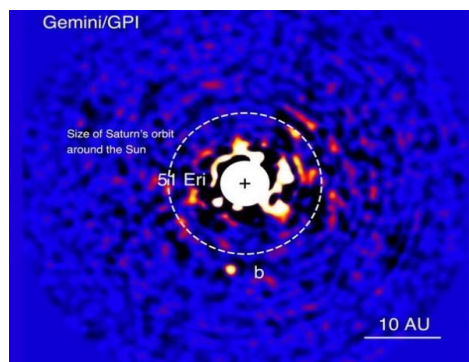
شکل 21: مدل میکرو لنزینگ برای شناسایی سیارات



شکل 22: در ابتدا با یک عدسی.

شکل 23: عدسی دوم را بر روی عدسی اول قرار دهید، ابتدا یک و سپس دو نقطه ظاهر می شود. در همه ی این ها، عدسی اول ثابت است.

روش شناسایی مستقیم روش مستقیم، از تصاویر با کیفیت بالا برای شناسایی سیاره پیرامون ستاره ها استفاده می کند. به علت نور زیاد منتشر شده از ستاره، این روش برای شناسایی سیاره هایی که به اندازه ی کافی از ستاره ی مرکزی دور بوده و در عین حال جوان هستند و همچنان بر اثر گرمای ناشی از شکل گیری می درخشند، موفقیت آمیز بوده است.



شکل 24: روش شناسایی مستقیم، برای یافتن سیارات.

مثال هایی از سیستم های فرخورشیدی

مشهورترین سیارات فراخورشیدی دارای جرمی معادل جرم سیاره ی مشتری، بزرگ ترین سیاره ی منظومه ی شمسی هستند. به همین علت جرم و اندازه ی سیارات فراخورشیدی بر حسب واحد جرم مشتری (1.90×10^{27} kg) M_J و شعاع مشتری (71492 km) R_J بیان می شود. تعداد کمی سیاره (در حدود 20) دارای جرمی قابل مقایسه با زمین هستند. با این حال سیارات زیادی (در حدود 700، یا 20 درصد سیارات شناخته شده) دارای اندازه ای قابل مقایسه با زمین تا $1.5 R_t$ (شعاع زمین) هستند. این نشان می داد که سیاراتی از این دست بیشتر متداول هستند، اما با تصحیح و پیشرفت تکنولوژی های شناسایی، موفقیت در شناسایی اجرامی با جرم و اندازه ی بزرگ تر، افزایش یافته است.

| Planet Name | Average distance AU | Orbital period days | Minimum mass * Jupiter or Terrestrial Mass | Discovered year | Radius km |
|--------------|---------------------|---------------------|--|-----------------|-----------|
| Ups And b | 0,059 | 4,617 | 0,69 Mj | 1996 | 124000* |
| Ups And c | 0,83 | 241,5 | 1,98 Mj | 1999 | 176000* |
| Ups And d | 2,51 | 1274,6 | 4,13 Mj | 1999 | 221999* |
| Ups And e | 5,24 | 3832,5 | 1,06 Mj | 2010 | 70000* |
| Gl 581 e | 0,030 | 3,149 | 1,9 Mt | 2009 | 7600* |
| Gl 581 b | 0,041 | 5,368 | 15,7 Mt | 2005 | 16000* |
| Gl 581 c | 0,073 | 12,932 | 5,7 Mt | 2007 | 11000* |
| Kepler-62 b | 0,0553 | 5,714 | 9 Mt | 2013 | 8350 |
| Kepler-62 c | 0,0929 | 12,441 | 4 Mt | 2013 | 3400 |
| Kepler-62 d | 0,120 | 18,164 | 14 Mt | 2013 | 12400 |
| Kepler-62 e | 0,427 | 122,387 | 1,6 Mt | 2013 | 10300 |
| Kepler-62 f | 0,718 | 267,291 | 2,8Mt | 2013 | 9000 |
| Trappist-1 b | 0,012 | 1,5111 | 1,02 Mt | 2016 | 7100 |
| Trappist-1 c | 0,016 | 2,422 | 1,16 Mt | 2016 | 7000 |
| Trappist-1 d | 0,022 | 4,050 | 0,30 Mt | 2016 | 5000 |
| Trappist-1 e | 0,030 | 6,099 | 0,77 Mt | 2017 | 5800 |
| Trappist-1 f | 0,039 | 9,206 | 0,93 Mt | 2017 | 6700 |
| Trappist-1 g | 0,047 | 12,354 | 1,15 Mt | 2017 | 7300 |
| Trappist-1 h | 0,062 | 18,768 | 0,33 Mt | 2017 | 4900 |

در این بخش چند مثال از سیارات فراخورشیدی که سه و یا تعداد بیشتری سیاره دارند را مورد توجه قرار می دهیم. جدول 3، سیارات پیرامون **Ups Andromeda, Gliese 581, Kepler-62 and Trappist-1** را نشان می دهد. سیستم های سیاره ای **Ups Andromeda** و **Gliese 581** به کمک روش سرعت شعاعی شناسایی شده اند، در مرود این سیارات تنها حداقل جرم آن ها را می دانیم و در زمینه اندازه ی آن ها اطلاعی نداریم. شعاع آن ها بین 50000-100000 کیلومتر در نظر گرفته می شود (مقادیر ممکن در جدول 1 نشان داده شده است). برای **Gliese 581** چند سیاره دیگر اعلام شد، اما در

مقالات رد شد و شناسایی آن ها نیز باطل اعلام شد. این موضوع ممکن است ناشی از سیگنال ها حاشیه ای و یا نویزهای سایر منابع باشد.

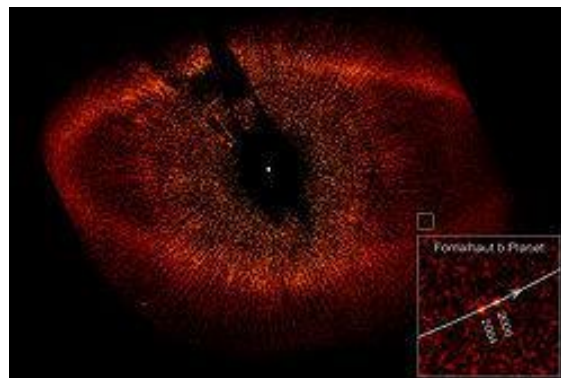
سیستم Kepler-62، به وسیله ی روش گذر کشف شد. بنابراین اندازه ی آن ها مشخص است. همچنین می دانیم که جرم آن ها کمی بیشتر از محدوده (حداکثر جرم) است، برای شناسایی به روش سرعت شعاعی بسیار کوچک (و وزن کم) هستند. با این حال سیاره های بسیاری به روش گذر و سرعت شعاعی کشف و جرم و اندازه ی آن ها مشخص شده است.

برخی از سیارات فراخورشیدی بسیار به ستاره ی مرکزی نزدیک هستند (همه ی سیاره های Gliese 876 مداری بسیار نزدیک تر از سیاره ی تیر به خورشید دارند). برخی دیگر سیارات فاصله ی زیادی دارند مانند سیستم 2M1207b (شکل 1) با سیاره ای شکل گرفته در فاصله ی 41 واحد نجومی یا 1.4 دورتر از نپتون. یک راه برای تصور این داده ها، ساخت مدلی برای سیستم های سیاره ی انتخابی است برای مقایسه با سیستم منظومه ی شمسی است.

| Planet Name | Average distance AU | Orbital Period years | Mass, Jupiter Mass | Radius km |
|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|-----------|
| Mercury | 0.3871 | 0.2409 | 0.0002 | 2439 |
| Venus | 0.7233 | 0.6152 | 0.0026 | 6052 |
| Earth | 1.0000 | 1.0000 | 0.0032 | 6378 |
| Mars | 1.5237 | 1.8809 | 0.0003 | 3397 |
| Jupiter | 5.2026 | 11.8631 | 1 | 71492 |
| Saturn | 9.5549 | 29.4714 | 0.2994 | 60268 |
| Uranus | 19.2185 | 84.04 | 0.0456 | 25559 |
| Neptune | 30.1104 | 164.80 | 0.0541 | 25269 |

جدول 4: سیارات منظومه شمسی

امروزه می دانیم که فراخورشیدی هایی پیرامون ستاره هایی متفاوت با خورشید ما وجود دارند. در سال 1992، منجمان رادیویی از شناسایی اولین فرخورشیدی پیرامون تپ اختر PSR 1257 + 12 خبر دادند. این کشف سه سال بعد از کشف اولین فرخورشیدی پیرامون یک ستاره ی معمولی 51 Pegasi بود. بعد از آن فراخورشیدی های بسیاری کشف شدند: کوتوله قرمز (eg Gliese 876 in 1998)، گول ستاره ای (Iota Draconis in 2001)؛ کوتوله قهوه ای (2M1207 in 2004)، ستاره ی نوع A (Fomalhaut in 2008, see Fig. 25)، کوتوله سفید (WD1145-1017 in 2015)، پیرامون ستاره های دوتایی (Kepler-16b in 2011)،



فعالیت 15: مدلی برای سیستم های فراخورشیدی

در ابتدا مقیاس مورد نظر برای مدل را انتخاب می کنیم. نمی توان از مقیاس یکسان برای فاصله و اندازه استفاده کرد. برای فاصله در این مدل، $1 \text{ AU} = 1 \text{ m}$ است. با این مقیاس می توان سیارات فراخورشیدی را به مانند پنج سیاره ی نخست منظومه شمسی در کلاس جا داد. برای اندازه، هر 10.000 کیلومتر شعاع سیاره را برابر با 0.5 سانتی متر در نظر می گیریم. در این حالت قطر بزرگترین سیاره ی منظومه شمسی، 7 سانتی متر وتیر، کوچکترین سیاره، 0.2 سانتی متر خواهد بود. اگر فعالیت در فضای باز (مثلا حیاط مدرسه) صورت پذیرد، می توان یک مدل کامل با مقیاس مشابه برای قطر و فاصله ساخت. برای اندازه ی ستاره ی مادر نیز از همان مقیاس مشابه استفاده می کنیم، مثلا ستاره ای با شعاع 10.000 کیلومتر، قطر 0.5 سانتی متر در این مدل دارد.

| Solar System | Distance | Radius km | Model Distance | Model Diameter |
|--------------|----------|-----------|----------------|----------------|
| Mercury | 0.39 AU | 2439 | 40 cm | 0.1 cm |
| Venus | 0.72 AU | 6052 | 70 cm | 0.3 cm |
| Earth | 1 AU | 6378 | 1.0 m | 0.3 cm |
| Mars | 1.5 AU | 3397 | 1.5 m | 0.1 cm |
| Jupiter | 5.2 AU | 71492 | 5.0 m | 3.0 cm |
| Saturn | 9.55 AU | 60268 | 10 m | 2.5 cm |
| Uranus | 19.22 AU | 25559 | 19 m | 1.0 cm |
| Neptune | 30.11 AU | 25269 | 30 m | 1.0 cm |

جدول 5: منظومه شمسی. ستاره ی مادر، خورشید G2V است، با قطر 35 سانتی متر در مدل مورد استفاده. محدوده ی حیات در قسمت سبز قرار دارد.

با توجه به شرایط بیان شده در مقیاس، مقادیر برای منظومه شمسی محاسبه شد (جدول 2). برای سایر سیستم های ذکر شده در جدول 1 نیز می توان مقادیر فاصله و شعاع را حساب کرد. برای ساده سازی این فرایند، جدول داده ها با توجه به مقیاس برای آن ها محاسبه شده است.

با اولین سیستم سیاره ای که در سال 1999 به کمک اثر دوپلر اعمال شده بر سرعت شعاعی ستاره کشف شد شروع می کنیم. این روش، اجازه شناسایی سیارات فراخورشیدی نزدیک به ستاره ی مادر را فراهم کرد. بدون شک، روش شناسایی، ویژگی ها موقعیتی سیاره را نیز تعیین می کند. با این روش شناسایی، سیارات گازی مانند مشتری و حتی بزرگ تر شناسایی شدند. برای تعیین مکان سیاراتی که قابلیت حیات داشته باشند، نیاز به شناسایی سیاره های کوچک تر و زمین مانند است.

| Upsilon Andromedae Titawin | Distance AU | Diameter km | Model Distance | Model Diameter |
|-------------------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|
| Ups And b / Saffar | 0.059 AU | 108000 | 6 cm | 5.5 cm |
| Ups And c / Samh | 0.830 AU | 200000 | 83 cm | 10.0 cm |
| Ups And d / Majriti | 2.510 AU | 188000 | 2.5 m | 9.5 cm |
| Ups And e / Titawin e | 5.24 AU | 140000 | 5.2 m | 7.0 cm |

سیارات گازی قابلیت حیات به آن معنا که ما می شناسیم را ندارند، بنابراین تمایل به مطالعه ی سیاراتی سنگی و زمین مانند بیشتر است.

Gliese 581، یکی از اولین سیستم های فراخورشیدی زمین مانند شناسایی شده است. از سال 2014 برخی از این فرخورشیدی ها مورد بحث هستند. روش استافده شده برای شناسایی، سرعت شعاعی است

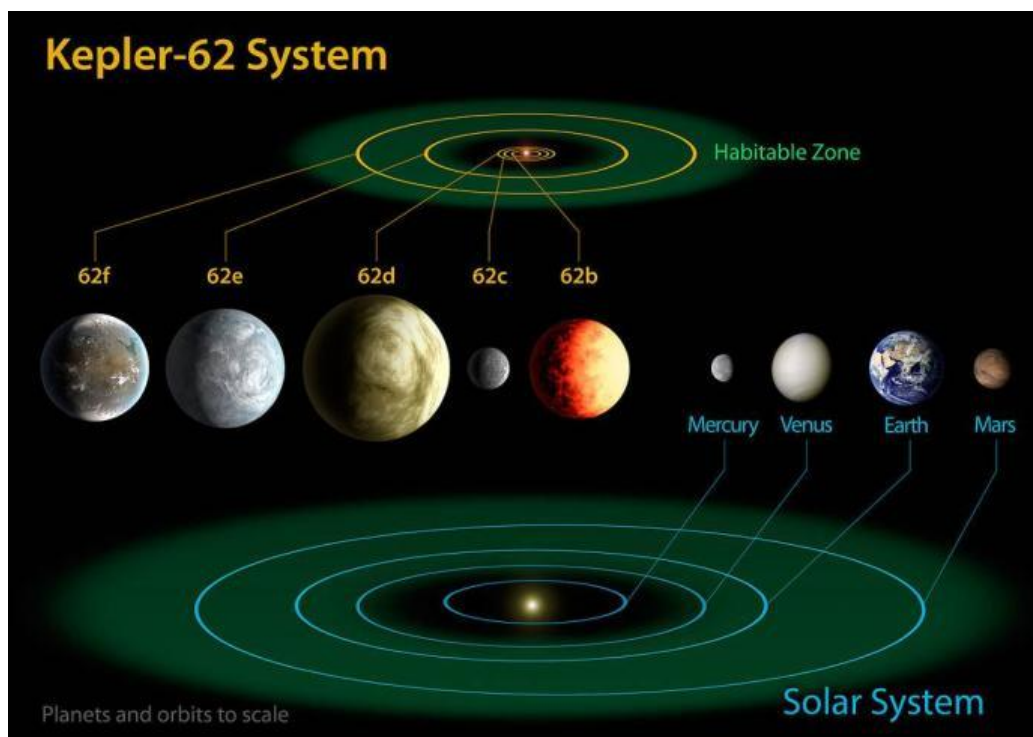
| Gliese 581 | Distance AU | Diameter / km | Model Distance | Model Diameter |
|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Gliese 581 e | 0.030 AU | 15200 | 3 cm | 0.8 cm |
| Gliese 581 b | 0.041 AU | 32000 | 4 cm | 1.6 cm |
| Gliese 581 c | 0.073 AU | 22000 | 7 cm | 1.1 cm |

جدول 7: ستاره ی مادر Gliese 581 یک کوتوله قرمز M2.5V است در فاصله ی 20.5 سال نوری در صورت فلکی ترواز است. یک سوم جرم خورشید، جرم دارد با درخشش کمتر و دمای کمتر. شعاع آن 0.29 جرم خورشید است و در این مدل قطر آن 10 سانتی متر است.

در سال 2009 فضاپیمای کپلر پرتاب شد. این رصدخانه ی فضایی، به دور خورشید می گردد و سیاره های فراخورشیدی هم اندازه با زمین که در کمربند حیات قرار دارند را جستجو می کند. در طی 9 سال ماموریت، حدود 3000 سیاره ی فراخورشیدی کشف و چند هزار نیز در انتظار تایید هستند. کپلر 0.25 درصد آسمان را جستجو کرده و نتایج نشان می دهد، سیارات در کهکشان راه شیری بسیار متداول هستند. در سال 2018 ماهواره ی TESS پرتاب شد. این ماهواره برای شناسایی سیاره های نزدیک با اندازه ای نه چندان بیشتر از دو برابر زمین در پهنه ای وسیع از آسمان در حدود 85 درصد گنبد آسمان طراحی شده است. کپلر و تِس برای کشف سیارات فراخورشیدی به روش گذر طراحی شده اند.

| Kepler 62 | Distance AU | Diameter / km | Model Distance | Model Diameter |
|------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Kepler 62 b | 0.056 AU | 33600 | 5.5 cm | 1.7 cm |
| Kepler 62 c | 0.093 AU | 13600 | 9 cm | 0.7 cm |
| Kepler 62 d | 0.120 AU | 48000 | 12 cm | 2.4 cm |
| Kepler 62 e | 0.427 AU | 40000 | 43 cm | 2.0 cm |
| Kepler 62 f | 0.718 AU | 36000 | 72 cm | 1.8 cm |

جدول 8: ستاره ی مادر Kepler 62 ستاره ی F2V در صورت فلکی ترازو در فاصله ی 1200 سال نوری است. این ستاره یک ستاره ی سبک، با دمای کمتر و کوچک تر از خورشید است. شعاع آن 0.64 شعاع خورشید است و در این مدل، قطر 22 سانتی متر است.



شکل 27: مقایسه منظومه Kepler-62، با منظومه شمسی. رنگ سبز، کمر بند حیات را نشان می دهد که امکان حیات در آن وجود دارد. منبع: Source NASA Ames / JPL-Caltech.

یک کوتوله ی قرمز با نام 2MASS J23062928-0502285 به روش گذر در سال 2014 توسط تلسکوپ تراپیست مورد بررسی قرار گرفت و طی آن سه سیاره ی زمین مانند: Trappist-1b، c و d کشف شد. مطالعات بعدی به کمک تلسکوپ های هابل، کیپلر، اسپیتزر و تلسکوپ های مستقر در شیلی، منجر به شناسایی کامل هفته سیاره شد. پنج سیاره (g و f، d، c، b) اندازه ای مشابه زمین دارند و دو سیاره ی دیگر (h و d) اندازه ای بین مریخ و زمین دارند. سه سیاره (e، f و g) در کمر بند حیات قرار دارند.

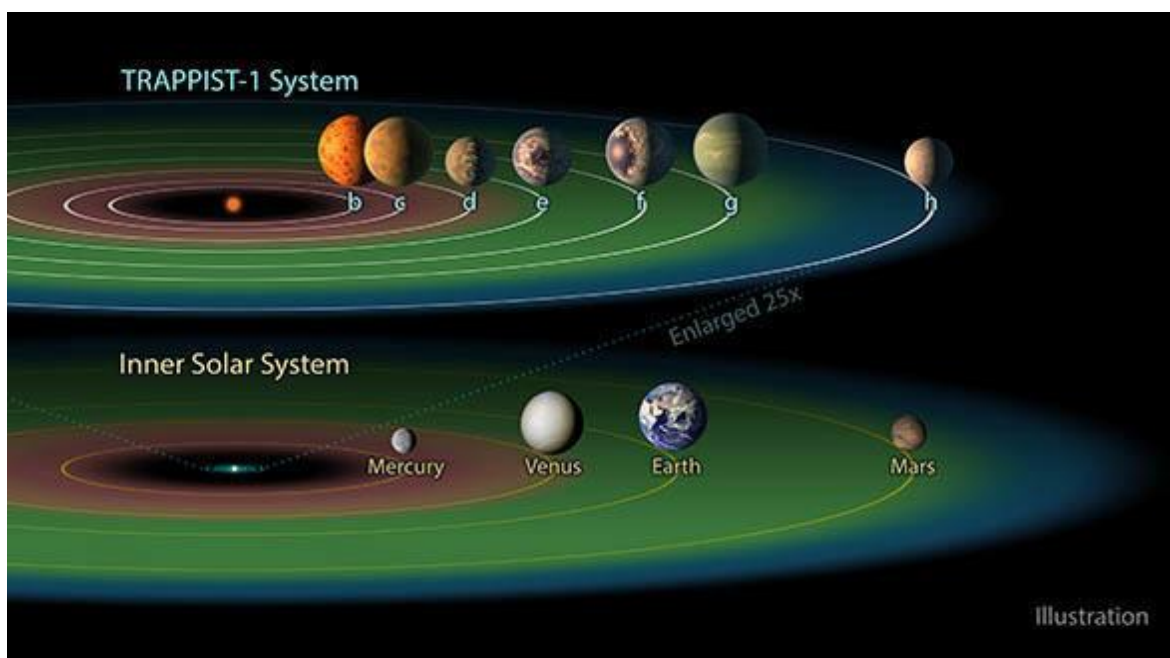
مدار سیارات TRAPPIST-1، بسیار نزدیک به ستاره ی مادر است و همچنین به یکدیگر نیز نزدیک است و برهمکنش های گرانشی مشهود بوده و موجب رزونانس در دوره ی مداری آن ها می شود. سیارات در آسمان همسایگان خود ظاهر شده و گاهی حتی از ماه زمین نیز بزرگ تر هستند. در حقیقت جرم آن ها به روش سرعت شعاعی تعیین نشده و با توجه به انحراف در دوره ی مداری آن ها، روشی که با نام تغییرات زمان گذر به دست آمده است.

جرم همه ی آن ها با خطای کمی تعیین شده و به ما امکان تعیین ترکیب و چگالی آن ها را می دهد. جرم این فراخورشیدی ها بین 0.3 تا 1.16 جرم زمین است با چگالی 0.62 تا 1.04 زمینی (3.4-5.6 گرم بر سانتی متر مکعب). سیاره c و e کاملاً سنگی، سیاره b، d، f، g و h یک لایه

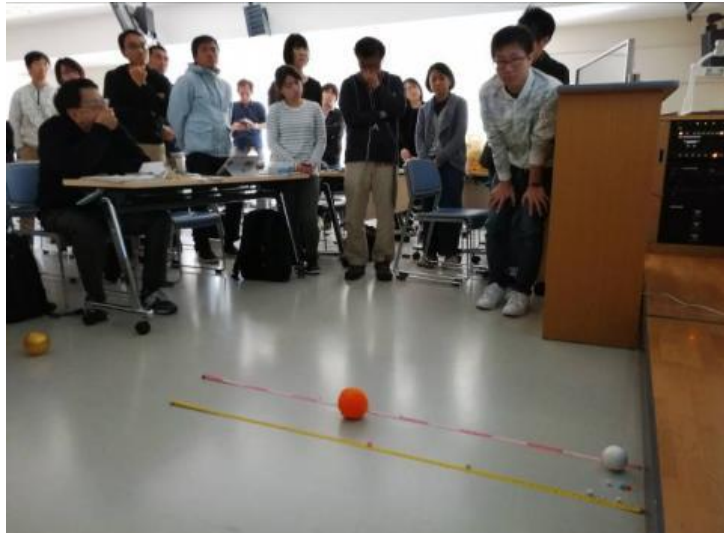
نازک از آب، یخ یا اتمسفر غلیظ دارند. به نظر می رسد که Trappist-1d دارای یک اقیانوس از آب مایع است که 5 درصد جرم آن را تشکیل می دهد، برای مقایسه آب زمین کمتر از 0.1 درصد است، در حالی که لایه های آب در Trappist-1f احتمالاً یخ زده هستند. چگالی Trappist-1e اندکی بیشتر از زمین است. علاوه بر این اتمسفر Trappist-1b، مانع فرار اثر گلخانه ای شده و فشار آن 101 تا 104 بار بخار آب است. در سیارات c، d، e و f اتمسفر هیدروژن- هلیوم وجود ندارد. سیاره g نیز مشاهده شده است، اما اطلاعات چندانی در مورد آن در دسترس نیست.

| Trappist - 1 | Distance AU | Diameter / km | Model Distance | Model Diameter |
|--------------|-------------|---------------|----------------|----------------|
| Trappist-1 b | 0.012 | 14284 | 1.2 cm | 1.4 cm |
| Trappist-1 c | 0.016 | 13952 | 1.6 cm | 1.4 cm |
| Trappist-1 d | 0.022 | 9990 | 2.2 cm | 1.0 cm |
| Trappist-1 e | 0.030 | 11595 | 3.0 cm | 1.2 cm |
| Trappist-1 f | 0.039 | 13328 | 3.9 cm | 1.3 cm |
| Trappist-1 g | 0.047 | 14628 | 4.7 cm | 1.5 cm |
| Trappist-1 h | 0.062 | 9850 | 6.2 cm | 1.0 cm |

جدول 9: ستاره ی مادر Trappist-1، یک کوتوله قرمز M8V که در صورت فلکی قوس در فاصله 40 سال نوری است. ستاره ای هست که تقریباً بزرگ تر از مشتری با قطر 168.000 کیلومتر و قطر 7 سانتی در مدل است. مشاهده شده که فاصله ی سیارات در این مدل، کمتر از قطر ستاره است.



شکل 28: منظومه Trappist-1 در مقایسه با منظومه شمسی در داخل کلاس. قسمت سبز رنگ، کمر بند حیات را نشان می دهد، ناحیه ای که قابلیت حیات دارد.



شکل 29: همه ی مدل ها ساخته شده، منطقه ی حیات در آن مشخص شده است. با توجه به جرم و نوع ستاره ی مادر کمربند حیات ممکن بیشتر یا کمتر باشد.

هنوز سوالات بی پاسخ بسیاری در مورد ویژگی ها و قبل حیات بودن فر خورشیدی ها وجود دارد. تلاش برای بیشار دانستن در مورد این ویژگی ها، خود انگیزه و عامل برخی از ماموریت های فضایی فعلی و آینده، مانند : NASA's TESS و JWST و ESA's CHEOPS و PLATO است. که آخرین مورد قرار است در سال 2026 پرتاب شود و تعداد سیارات فراخورشیدی زمین مانند را افزایش دهد.

کتابشناسی

- Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., *Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17th century*, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona, 2006.
- Gaitsch, R., *Searching for Extrasolar Planets*, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.
- Ros, R.M., *A simple rocket model*, Proceedings of 8th EAAE International Summer School, 249, 250, Barcelona, 2004.
- Ros, R.M., *Measuring the Moon's Mountains*, Proceedings of 7th EAAE International Summer School, 137, 156, Barcelona, 2003.
- Vilks I., *Models of extra-solar planetary systems*, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.