

# Planete și exoplanete

**Rosa M. Ros, Hans Deeg**

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

## Sumar

Acest workshop oferă o serie de activități destinate să compare multe proprietăți observabile (cum ar fi dimensiunea, distanțele, vitezele orbitale și vitezele de evadare) ale planetelor din sistemul nostru solar. Fiecare secțiune oferă contexte pentru diferitele tabele cu date planetare și oferă demonstrații sau calcule pentru a pune față în față proprietățile planetelor, dând elevilor un sens concret a ceea ce înseamnă datele colectate.

În prezent, mai multe metode sunt folosite pentru a găsi exoplanete, mai mult sau mai puțin indirecte. Au putut fi detectate aproape 4000 de planete și aproximativ 500 de sisteme cu mai multe planete.

## Obiective

- Înțelegerea semnificației valorilor numerice din tabelele cu date referitoare la sistemul solar.
- Înțelegerea principalelor caracteristici ale sistemelor planetare extrasolare comparând proprietățile lor cu sistemul orbital al lui Jupiter și a sateliților săi galileeni.

## Sistemul solar

Prin crearea de modele la scară ale sistemului solar elevii vor compara diferiți parametri planetari. Pentru a realiza aceste activități vom utiliza datele din Tabelul 1.

Planete	Diametrul (km)	Distanța față de Soare (km)
Soare	1 392 000	
Mercur	4 878	$57,9 \cdot 10^6$
Venus	12 180	$108,3 \cdot 10^6$
Pământ	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	$2 876,5 \cdot 10^6$
Neptun	49 000	$4 506,6 \cdot 10^6$

Table 1: Datele corespunzătoare corpurilor din sistemul solar

În toate cazurile, scopul principal al modelului este de a face datele inteligibile. Milioane de kilometri nu sunt distanțe care să fie ușor de conceptualizat. Însă, dacă acestea sunt translatate la distanțe și dimensiuni la scară, de regulă, elevii reușesc să le înțeleagă mai ușor.

## Modelul sistemului solar

### Activitatea 1: Modelul diametrelor

Folosim o bucată mare (sau mai multe bucăți dacă este necesar) de hârtie galbenă tăiată în formă de cerc care reprezintă Soarele. Dimensiunea Soarelui este reprezentată la scară ca fiind 139 cm în diametru, astfel încât 1 cm corespunde la 10 000 km. Se taie diferitele planete din hârtie groasă sau din carton și se reprezintă caracteristicile lor morfologice. Prin așezarea planetelor în apropierea discului solar elevii pot estima diferitele scări la care pot fi reprezentate planete.

Pentru o scară de 1 cm la 10 000 km, folosiți următoarele valori pentru diametrele planetelor: Soare 139 cm, Mercur 0,5 cm, Venus 1,2 cm, Pământ 1,3 cm, Marte 0,7 cm, Jupiter 14,3 cm, Saturn 12,0 cm, Uranus 5,0 cm și Neptun 4,9 cm.

Sugestie: Este, de asemenea, posibil să se completeze modelul anterior prin pictarea planetelor pe un tricou păstrând scara pentru planete și pictând doar o fracțiune din Soare.



Fig. 2a și 2b: Exemple de tricouri care prezintă comparații între diametrele Soarelui și cele ale planetelor

### Activitatea 2: Modelul distanțelor

Prin compararea distanțelor dintre planete și Soare putem produce un alt model care este ușor de realizat pe holul oricărei școli. Mai întâi, tăiați pur și simplu benzi din carton de 10 cm lățime, lipiți-le una după alta pentru a obține o bandă lungă de câțiva metri (figura 3). Apoi așezați planetele decupate pe banda obținută la distanțele lor corecte față de Soare și unele față de altele. Reamintiți elevilor faptul că distanțele dintre planete nu sunt la scară cu diametrele. La scara sugerată, planetele ar fi de o mie de ori mai mici decât cele de aici, în care am folosit 1 cm la 10 000 000 km, în timp ce în prima activitate de mai sus am folosit 1

cm la 10 000 km. Dacă folosim o scară de 1 cm la 10 milioane de km, distanțele la scară sunt: Mercur 6 cm, Venus 11 cm, Pământul 15 cm, Marte 23 cm, Jupiter 78 cm, Saturn 143 cm, Uranus 288 cm și Neptun 450 cm.



Fig. 3: Modelarea distanțelor.

Sugestie: O variantă amuzantă a acestui model constă în utilizarea pentru reprezentarea la scară a secvențelor unei role de hârtie igienică. De exemplu, se poate lua ca scară o porțiune de hârtie pentru fiecare 20 milioane de km.

### Activitatea 3: Modelul diametrelor și distanțelor

Următoarea provocare este de a combina cele două activități de mai sus și a obține un model care reprezintă corpurile de reprezentat la scară, precum și distanțele corespunzătoare dintre ele. De fapt, nu este chiar atât de ușor de definit o scară care să ne permită să reprezentăm planetele cu ajutorul unor obiecte care să nu fie prea mici și totodată să se păstreze distanțele care nu sunt foarte mari, caz în care dimensiunile și distanțele nu sunt asimilate, iar modelul nu este foarte util elevilor. Ca sugestie, ar putea fi o bună idee să se apeleze la curtea școlii pentru a realiza modelul și să se folosească mingi pentru a ilustra planetele, mingi de diferite diametre existente și în dotarea școlii.



Fig. 4: Soarele și planetele în modelul diametrelor și distanțelor.

Ca un exemplu, oferim o posibilă soluție. La un capăt al curții școlii se așează o minge de baschet cu diametrul de 25 cm care reprezintă Soarele. Mercur va fi vârful unui ac (diametrul de 1 mm) așezat la 10 m față de Soare. Vârful unui ac mai gros (diametrul de 2 mm) va

reprezenta planeta Venus la 19 m față de Soare, în timp ce Pământul va fi capul unui ac similar cu anteriorul (2 mm) la 27 m față de Soare. Marte este un ac ceva mai mic (1 mm), situat la 41 m față de Soare. De obicei, curtea obișnuită a unei școli se termină la această distanță, dacă nu și mai repede. Va trebui să așezăm celelalte planete în afara curții școlii dar în locuri reprezentative, astfel încât elevii să fie familiarizați cu distanțele până la ele.

O minge de ping-pong (diametrul de 2.5 cm) corespunde lui Jupiter la 140 m față de Soare. O altă minge de ping-pong (diametrul de 2 cm) va fi Saturn la 250 m față de Soare, o bilă de sticlă (diametrul de 1 cm) va reprezenta Uranus la 500 m față de Soare, iar o ultimă bilă (1 cm), situată la 800 m, va reprezenta Neptun.

Trebuie subliniat că acest sistem planetar nu se potrivește în orice școală. Dacă reducem distanțele, atunci planetele vor fi mai mici decât vârful unui ac și ar fi aproape imposibil de vizualizat. Ca sarcină finală, se poate calcula ce scară a fost folosită pentru a dezvolta acest model.

#### Activitatea 4: Modelarea pe harta unui oraș

Idea este simplă - folosirea hărții unui oraș pentru a stabili pozițiile diferitelor planete presupunând că Soarele este situat la intrarea în școală. Ca exemplu, prezentăm harta Barcelonei împreună cu diferite obiecte (de exemplu fructe și legume) care vor fi așezate pe diferite străzi; astfel se poate imagina mai ușor dimensiunea planetelor. Ca exercițiu, sugerăm să se realizeze această activitate în propriul oraș.

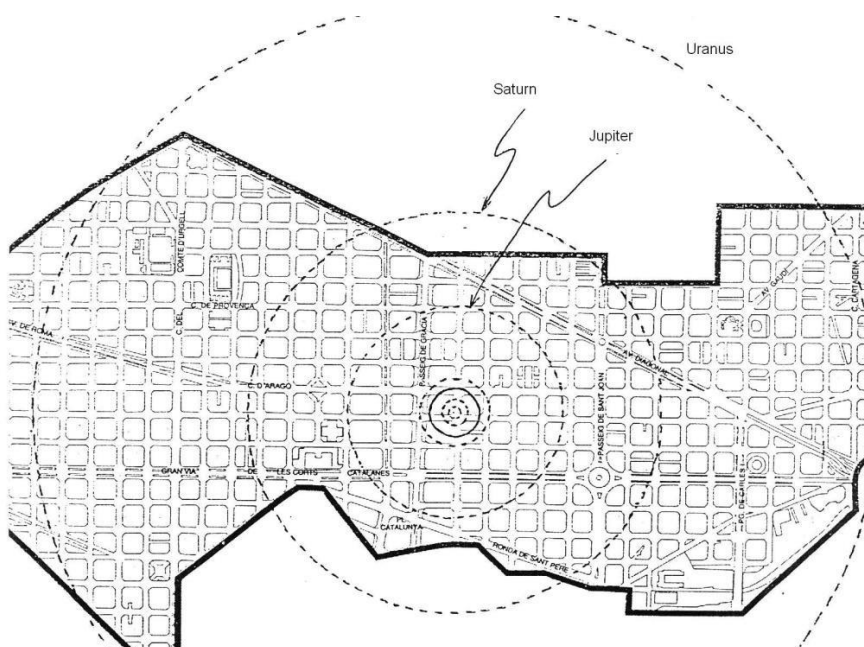


Fig. 5: Harta Centrului Barcelonei împreună cu unele planete.

Folosind harta prezentată aici, Mercur ar fi o bucătică de caviar, Venus și Pământul ar fi două boabe de mazăre, Marte o boabă de piper, Jupiter o portocală, Saturn o mandarină și Uranus și Neptun o pereche de nuci. Pentru Soare, deoarece nu există o legumă suficient de mare, elevii își pot imagina o sferă având dimensiunea unei mașini de spălat. Profesorul poate realiza

aceeași activitate folosind propriul oraș.

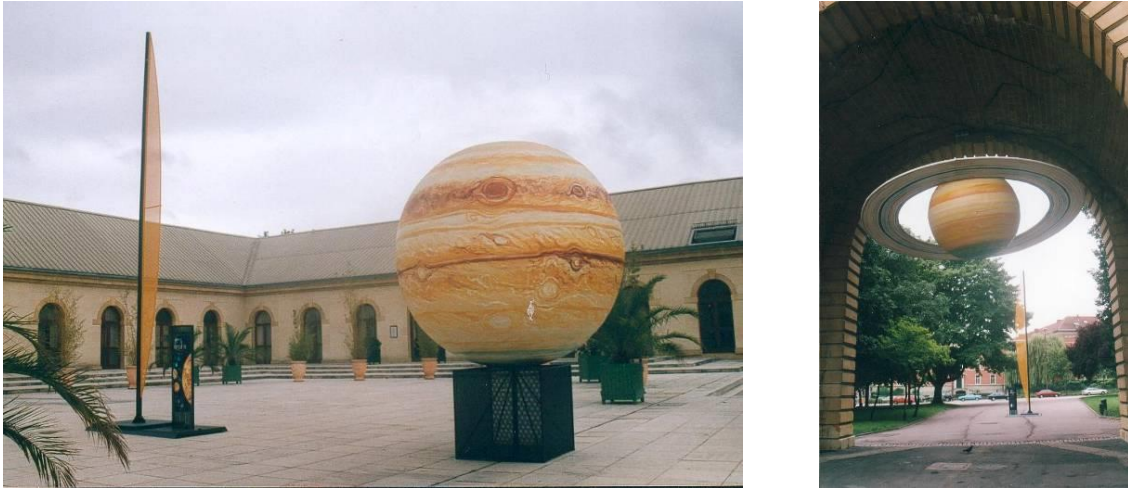


Fig. 6a și 6b: Fotografii ale orașului Metz.

În orașul Metz (Franța) există un sistem solar amplasat pe străzile și în piețele orașului, cu planetele corespunzătoare însoțite de panouri cu informații pentru trecători și turiști.

**Activitatea 5: Modele ale distanțelor-lumină** În astronomie se obișnuiește a se utiliza anul-lumină ca unitate de măsură, ceea ce poate fi adesea confundat cu o unitate de măsură a timpului. Acest concept poate fi ilustrat cu ajutorul unui model al sistemului solar. Deoarece viteza luminii este  $c = 300.000 \text{ km/s}$ , distanța care corespunde unei secunde este  $300.000 \text{ km}$ . De exemplu, pentru a călători de la Lună la Pământ, cele două corpuri cerești fiind la o distanță de  $384.000 \text{ km}$ , lumina are nevoie de  $384.000/300.000 = 1,3$  secunde.

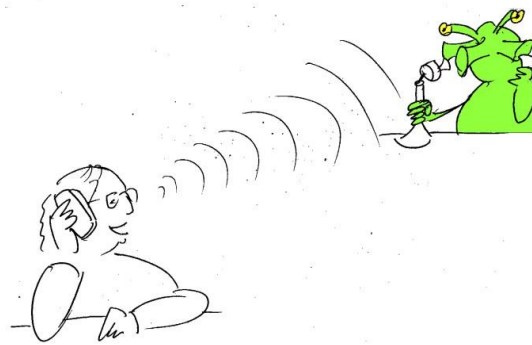


Fig. 7: Un alt exemplu

Folosind aceste unități, vom învăța elevii să calculeze timpul necesar luminii Soarelui pentru a ajunge la fiecare dintre planetele sistemului solar. (Pentru profesor, redăm aici timpii necesari: timpul necesar luminii soarelui să ajungă la Mercur este 3,3 minute, la Venus sunt necesare 6,0 minute, la Pământ 8,3 minute, la Marte 12,7 minute, la Jupiter 43,2 minute, la Saturn 1,32 ore, la Uranus 2,66 ore și la Neptun, 4,16 ore.

Puteți solicita elevilor să-și imagineze cum ar arăta o video-conferință între Soare și oricare dintre planetele sistemului solar.

Introducem aici și distanța până la cea mai apropiată stea, deoarece este foarte utilă pentru a vizualiza distanțele enorme până la alte stele, motiv pentru care este atât de dificil de detectat planetele extrasolare. Cea mai apropiată de noi este Alpha Centauri, la o distanță de 4,37 ani lumină sau  $4,13 \cdot 10^{13}$  km. Le puteți cere elevilor să calculeze distanța până la această stea în oricare dintre modelele de sisteme planetare menționate anterior. În "modelul din curtea școlii", cu o scară de 1 cm la 56000 km, steaua s-ar afla la o distanță de 7 375 km!

### Activitatea 6: Modelul dimensiunii aparente a discului solar de pe fiecare planetă

De pe o planetă, de exemplu Pământul, Soarele subîntinde un unghi  $\alpha$  (figura 8). Pentru valori foarte mici ale lui  $\alpha$ , se poate lua  $\text{tg } \alpha = \alpha$  (în radiani)

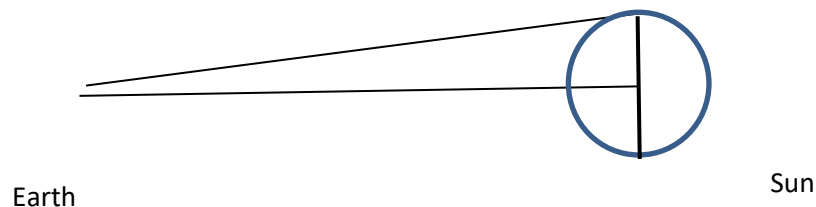


Fig. 8: De pe Pământ Soarele subîntinde un unghi  $\alpha$ .

Știind că diametrul Soarelui este  $1,4 \times 10^6$  km, adică o rază de  $0,7 \times 10^6$  km și că distanța Pământ-Soare este  $150 \times 10^6$  km, se poate deduce:

$$\alpha \approx \text{tg } \alpha = \frac{0,7 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6} = 0,0045 \text{ radians}$$

Și în grade

$$\frac{0,0045 \cdot 180}{\pi} = 0,255^\circ$$

Adică, de pe Pământ, Soarele are o dimensiune de  $2 \times 0,255 = 0,51^\circ$ , deci, aproximativ, o jumătate de grad.

Repetând același procedeu pentru fiecare planetă, prezentăm rezultatele în tabelul 2 și putem reprezenta dimensiunile lor relative (figura 9).

Planete	$2 \tan \alpha$	$2 \alpha$ (°)	$2 \alpha$ (°) aprox.
Mercur	0,024	1,383	1,4
Venus	0,0129	0,743	0,7
Marte	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
Neptun	0,0003	0,0178	0,02

Tabelul 2: Rezultatele pentru diferite planete

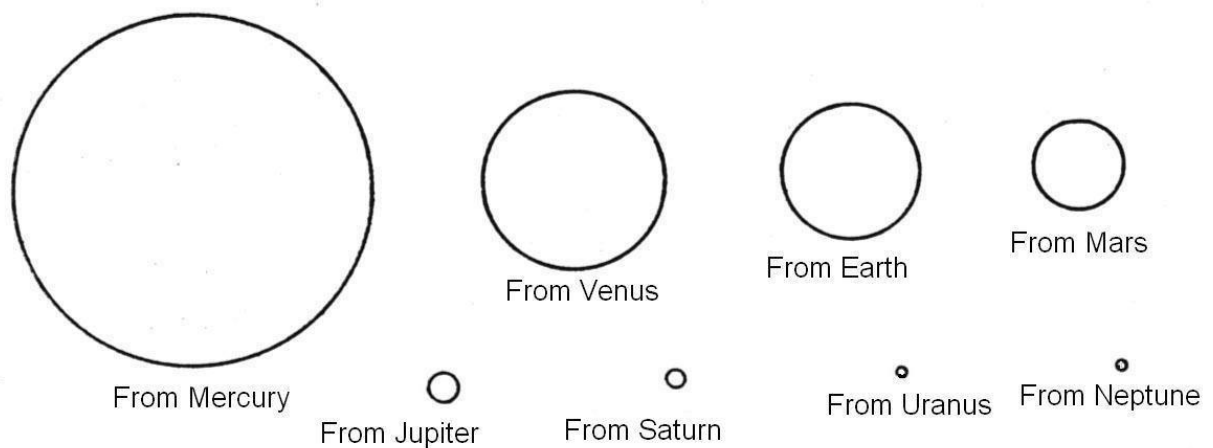


Fig. 9: Soarele văzut de pe fiecare planetă: Mercur, Venus, Pământ, Marte, Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun.

### Activitatea 7: Model densităților

Obiectivul acestui model este de a căuta mostre de materiale care pot fi manipulate ușor și care au o densitate similară cu fiecare dintre corpurile care alcătuiesc sistemul solar, cu scopul ca elevii să aibă posibilitatea de a "le simți cu propriile mâini."

	Densitatea ( $\text{g/cm}^3$ )
Soare	1,41
Mercur	5,41
Venus	5,25
Pământ	5,52
Luna	3,33
Marte	3,9
Jupiter	1,33
Saturn	0,71
Uranus	1,3
Neptun	1,7

Tabelul 3: Densitățile corpurilor din sistemul solar





Fig. 10: Modelul densităților

Din tabelul 3 al densităților planetare, se compară pur și simplu cu densitățile diferitelor minerale (de regulă, în fiecare școală există o colecție de materiale) sau cu exemplare al altor materiale care sunt ușor de găsit cum ar fi sticla, ceramica, lemnul, material plastic etc.. Tabelul următor (Tabelul 4) prezintă câteva exemple de astfel de materiale împreună cu densitățile lor.

Minerale	Densitate	Alte materiale	Densitate
Ipsos	2,3	Glicerină	1,3
Ortoclaz	2,6	Plută	0,24
Sulf	1,1-2,2	Aluminiu	2,7
Alită	2	Fier	7,86
Cuarț	2,65	Ciment	2,7 - 3,1
Borax	1,7	Sticlă	2,4 - 2,8
Blendă	4	Cositor	7,3
Pirită	5,2	Argilă	1,8 - 2,5
Eritrocit	5,4	Bachelită	1,25
Calcit	2,7	Stejar	0,90
Galenă	7,5	Pin	0,55

Tabelul 4: Exemple de densități ale unor materiale

Din tabelul 3 al densităților planetare, comparați pur și simplu cu densitățile diferitelor minerale (în fiecare școală există de obicei o colecție de materiale) sau cu mostre de alte materiale care sunt ușor de găsit, cum ar fi sticla, ceramica, lemn, materialele plastice etc.. Următorul tabel 4 prezintă câteva exemple de materiale și densitățile acestor

Atunci când se folosesc materiale care nu sunt incluse în Tabelul 4, este foarte ușor de calculat densitatea acestora. Pur și simplu se ia o porțiune din materialul respectiv, se cântărește pentru a-i afla masa,  $m$ , apoi se scufundă într-un vas cu apă pentru a-i măsura volumul  $V$ . Densitatea  $d$  a materialului va fi

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

Elevii ar trebui să observe că Saturn ar "pluti" în apă, deoarece densitatea sa este mai mică decât 1.



## Activitatea 8: Modelul aplatizării planetelor

Pentru a vizualiza deformarea (turtirea) planetelor gazoase datorită forței centrifuge generate de propria lor rotație vom construi un model simplu.

Așa cum se poate observa din figura 9, cu ajutorul unui băț și al câtorva panglici din carton, se poate realiza acest model simplu care reproduce turtirea planetelor din sistemul solar datorită rotației.

1. Tăiați câteva panglici de carton cu dimensiunea de 35 cm pe 1 cm.
2. Atașați ambele capete ale panglicilor din carton pe un bețișor cilindric lung de 50 cm. Atașați capetele de sus ale panglicilor de bețișor astfel încât să nu se poată mișca dar să permită capetelor de jos să se miște liber de-a lungul bețișorului.

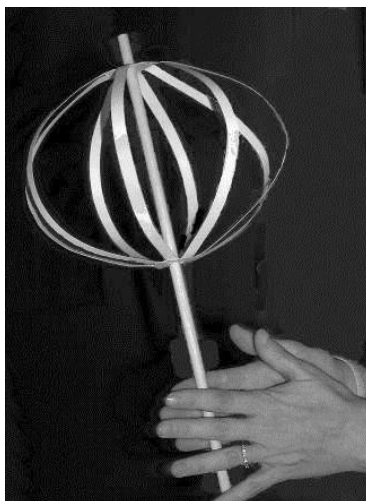


Fig. 11: Model pentru simularea turtirii datorită rotației

3. Puneți în mișcare bețișorul răsucindu-l între cele două palme, rapid când într-un sens, când în sens opus. Veți putea observa modul în care forța centrifugă deformează benzile din carton (figura 11) într-un mod asemănător celui în care acționează asupra planetelor.

## Activitatea 9: Modelul perioadelor orbitale planetare

Planetele orbitează în jurul Soarelui cu viteze și perioade orbitale diferite (tabelul 5). Cunoscând perioada și distanța medie față de Soare se poate deduce viteza orbitală medie a planetei pentru a explora orbita sa. Vedeți de exemplu cazul Pământului, dar puteți repeta același raționament la orice altă planetă.

Lungimea unei revoluții orbitale este  $L = 2 \pi R$ , deci viteza orbitală medie este  $v = L / T = 2 \pi R / T$ . În cazul Pământului, perioada este de 365 de zile, atunci  $v = 2 \cdot 582 \cdot 750 \text{ km} / \text{zi} = 107 \cdot 740 \text{ km} / \text{h} = 29,9 \text{ km} / \text{s}$ , unde distanța de la Pământ la Soare  $R = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Subliniem că și Soarele se rotește în jurul centrului galactic cu o viteză de  $220 \text{ km} / \text{s}$ , sau ceea ce este același lucru aproximativ  $800.000 \text{ km} / \text{h}$ .

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 $10^6$	9.69	34884
Uranus	30.799.10	2 876.5 $10^6$	6.81	24876
Neptune	60190.00	4 506.6 $10^6$	5.43	19558

Table 5: Date orbitale ale corpurilor din Sistemul Solar

Cel mai rapid este Mercur, cel mai apropiat de Soare, iar cel mai lent este Neptun, cel mai îndepărtat. Romanii observaseră deja că Mercur era cel mai rapid dintre toate, așa că a fost identificat ca fiind mesagerul zeilor și reprezentat cu picioare înaripate. O perioadă orbitală sau un "an" pe Mercur durează doar 88 de zile. Chiar dacă se observă cu ochiul liber, pe parcursul a mai multor săptămâni este posibil să spunem că Jupiter și Saturn se deplasează mult mai încet prin constelațiile zodiacale decât Venus și Marte, de exemplu.

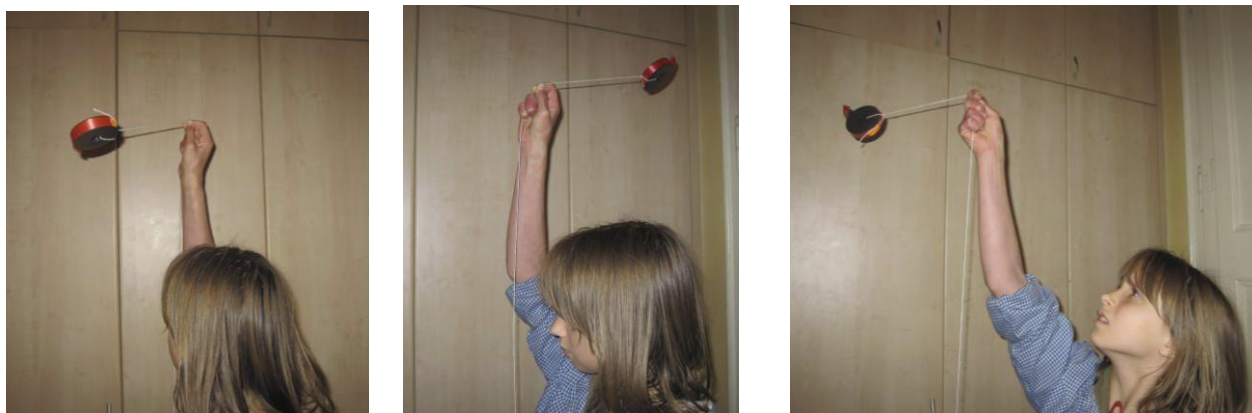


Fig. 12a, 12b și 12c: Simularea mișcării circulare a planetelor.

Există, de asemenea, o modalitate simplă de a experimenta relația dintre distanță și perioada orbitală. Începem prin a lega un obiect greu, cum ar fi o nucă de o bucată de sfoară. Dacă ținem sfoara de capătul opus obiectului greu, rotim obiectul într-o mișcare circulară deasupra capului. Putem vedea apoi că dacă eliberăm sfoara în timp ce o rotim (lăsând sfoara mai lungă), obiectul va pierde din viteza sa. Invers, dacă scurtăm sfoara, acesta va câștiga viteză. De fapt, aceasta (vezi legea a treia a lui Kepler) este o consecință a conservării momentului cinetic.

Putem apoi dezvolta un model al sistemului solar format din nuci și bucăți de sfoară având lungimea proporțională cu raza orbitelor planetare (presupunând, din nou, că toate se deplasează pe orbite circulare). Oricum, în loc de a tăia o bucată separată pentru fiecare planetă, se taie toate bucățile la o lungime de cca 20 cm. Apoi, folosind o relație potrivită de reprezentare la scară, se măsoară distanța corectă de la obiectul greu și se face un semn corespunzător acestui punct. Apoi, sfoara poate fi ținută în poziția în care am făcut semnul în timp ce rotim obiectul greu.

Pentru a utiliza modelul trebuie să ținem sfoara în dreptul semnului pe care l-am făcut și să-l

rotim deasupra capetelor noastre într-un plan paralel cu solul cu viteza minimă posibil care îl păstrează pe orbită. Vom vedea că această viteză este mai mare în cazurile în care raza este mai mică.

### Model pentru gravitația la suprafață

Formula pentru forța gravitațională,  $F = G \frac{Mm}{d^2}$ , ne permite să calculăm accelerația gravitațională  $g$  ce există la suprafața unei planete cu masa  $M$ . Considerând o masă unitară ( $m = 1$ ) pe suprafața planetei ( $d = R$ , raza planetei), obținem gravitația  $g = \frac{GM}{R^2}$ , unde  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  este constanta universală gravitațională. Când înlocuim apoi masa planetei,  $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$ , unde  $\rho$  este densitatea planetei și  $R$  este raza, găsim:

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

Înlocuind aceste ultime două variabile cu valorile enumerate în tabelul 6 (după convertirea razei în metri și a densității în  $\text{kg/m}^3$ , cu  $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$ ), putem calcula valoarea gravitației de suprafață  $g$  pentru toate planetele.

Planet	R equatorial radius (km)	$\rho$ density ( $\text{g/cm}^3$ )	$g$ 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

Tabelul 6: Mărimi, densitățile și gravitația de suprafață a corpurilor din sistemul solar

Să vedem câteva exemple:

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

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

Analog, putem calcula  $g$  pentru celelalte planete. (Rezultatele corespunzătoare sunt: Marte: 3,7, Jupiter: 24,9, Saturn: 10,5, Uranus: 7,8 și Neptun: 11,8) Ca și în tabelul 7, gravitațiile de suprafață sunt adesea date în raport cu cea a Pământului și sunt indicate prin litera  $g$

### Activitatea 10: Modelul cântarelor de baie

În acest caz, scopul modelului este de a dezvolta un set de 9 cântare de baie (8 planete și Luna), astfel încât elevii să poată simula cântărirea propriei persoane pe fiecare dintre planete și pe Lună.

Deoarece procesul este același pentru fiecare planetă, vom prezenta în detaliu numai exemplul u nei planete. Ideea este de a demonta un cântar de baie și de a înlocui discul etalonat pentru masa pe Pământ cu un altul care să fie calibrat corespunzător cântării pe o altă planetă.

1. Mai întâi, desfacem cântarul. În cazul majorității cântarelor, există două resorturi care asigură fixarea față de bază. Țineți minte că va trebui să le fixăm înapoi împreună (figurile 13a și 13b).
2. Odată deschis, discul cântarului trebuie îndepărtat, fie pentru a-l înlocui, fie pentru a fi trasat cu greutatele specifice planetei.
3. În tabelul care urmează sunt prezentate gravitațiile superficiale ale Lunii și ale diferitelor planete din sistemul solar. Pe o coloană sunt prezentate accelerațiile gravitaționale exprimate în valori absolute ( $m \cdot s^{-2}$ ), iar pe cealaltă aceeași mărime în valori relative față de accelerația gravitațională terestră. Aceste valori sunt cele pe care le vom utiliza pentru a transforma unitățile de masă “terestră” în unitățile proporționale de masă pe alte planete.
4. În final, vom închide din nou cântarul și putem vedea cât am cântări pe o altă planetă.

	Accelerația gravitațională ( $m \cdot s^{-2}$ )	Accelerația gravitațională (T=1)
Luna	1,62	0,16
Mercur	3,70	0,37
Venus	8,87	0,86
Pământul	9,80	1,00
Marte	3,71	0,38
Jupiter	23,12	2,36
Saturn	8,96	0,91
Uranus	8,69	0,88
Neptun	11,00	1,12

Tabelul 7: Accelerațiile gravitaționale pentru fiecare corp din sistemul solar.



Fig.13a și 13b: Cântare de baie cu discul înlocuit.



Fig. 14: Modelul sistemului solar cu ajutorul cântarelor de baie.

## Modele de cratere

Majoritatea craterelor din sistemul solar nu sunt de natură vulcanică ci sunt rezultatul căderii meteoriților pe suprafețele planetelor și sateliților.

1. Mai întâi, acoperiți parchetul cu ziare vechi astfel încât să-l protejați să nu se murdărească.
2. Turnați un strat de 2-3 cm de făină într-o tavă, distribuind-o atent astfel încât suprafața să fie foarte netedă.
3. Turnați un strat de câțiva milimetri de praf de cacao deasupra făinii (figura 15a).
4. De la o înălțime de circa 2 metri lăsați să cadă un proiectil: o lingură de praf de cacao. Căderea va lăsa urme similare celor ale craterelor de impact (figura 15b).
5. Se poate experimenta folosind diferite înălțimi, diferite tipuri, forme și mase etc. ale proiectilelor. În unele cazuri, se poate obține chiar un crater având un vârf central.



Fig. 15a: Simularea craterelor.



Fig. 15b: Craterele rezultate.

## Modelul vitezelor de evadare

Viteza de evadare depinde de forma potențialului gravitațional în care se află proiectilul. Prin urmare, pe suprafața unui obiect ceresc, viteza de evadare depinde doar de înălțimea punctului de lansare, dacă forțele de frecare din atmosferă, dacă ar fi prezente (cum este cazul Pământului)

Viteza de evadare nu depinde de masa proiectilului sau de direcția de lansare, iar deducerea ei poate fi făcută în termeni pur energetici.

Pentru calcularea vitezei de evadare, se utilizează următoarele formule legate de energia potențială și de energia cinetică:

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

Ținând cont de principiul conservării energiei, dacă stabilim condiția ca obiectul să se îndepărteze la o distanță infinită și să rămână în repaus, rezultă:

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

și viteza::

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

unde:  $v_e$  este viteza de evadare,  $G$  este constanta de gravitație universală ( $6,672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$ ),  $M$  este masa stelei,  $m$  este masa proiectilului,  $R$  este raza stelei (în ipoteza formei sferice),  $g$  este accelerația gravitațională pe suprafața stelei. Pe Pământ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

Ca exemplu, calculăm vitezele de evadare ale unor planete. Pentru Pământ,  $v_{\text{earth}} = \sqrt{2gR} = (2 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot 6378 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 11186 \text{ m/s} \approx 11,2 \text{ km/s}$ .

Similar, pentru cea mai mică planetă, Mercur,

$$v_{\text{mercury}} = (2 \cdot 3,78 \text{ m s}^{-2} \cdot 2439 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 4294 \text{ m/s} \approx 4,3 \text{ km/s}$$

Iar pentru cea mai mare planetă, Jupiter,

$$v_{\text{jupiter}} = (2 \cdot 23,1 \text{ m s}^{-2} \cdot 71492 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 57471 \text{ m/s} \approx 57 \text{ km/s}$$

Este clar că este mai ușor să lansezi o rachetă de pe Mercur decât de pe Pământ, dar cel mai dificil este să lansezi o rachetă pe Jupiter, unde viteza de evadare este de aproximativ 60 km/s.

(Pentru a putea compara rezultatele, viteza de evadare acceptată pentru fiecare corp din Sistemul Solar este următoarea: Mercur 4,3 km/s, Venus 10,3 km/s, Pământ 11,2 km/s, Marte 5,0 km/s, Jupiter 59,5 km/s, Saturn 35,6 km/s, Uranus 21,2 km/s, Neptun 23,6 km/s. După cum putem vedea, calculele noastre simple ne dau rezultate acceptabile).



## Modelul unei rachete cu ajutorul unei tablete efervescente

Ca un exemplu de rachetă care poate fi lansată în mod sigur în sala de clasă, propunem următoarea rachetă, care utilizează pentru propulsie o aspirină sau o tabletă efervescentă. Începem prin a tăia modelul de rachetă pe liniile continue și apoi continuăm cu lipirea acesteia pe liniile punctate ca în fotografie.

Vom utiliza o capsulă din material plastic cum ar fi un recipient de film, asigurându-ne să se potrivească atent capsula în interiorul cilindrului rachetei. Apoi, fixăm cele trei triunghiuri ca suporturi pe corpul rachetei și, la final, adăugăm conul în vârful cilindrului (figurile 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b, 19c)



Fig. 16a, 16b, 16c și 16d: Procesul în patru imagini.

După construirea rachetei, trebuie să efectuăm lansarea. Pentru aceasta, vom turna apă în capsula de plastic până la aproximativ  $\frac{1}{3}$  din înălțime (cca 1 cm). Adăugăm  $\frac{1}{4}$  dintr-o tabletă efervescentă de aspirină (sau altă tabletă efervescentă). Fixăm banda și racheta deasupra capsulei. După cca 1 minut, racheta decolează. Evident, putem repeta de câte ori dorim acest proces (cel puțin  $\frac{3}{4}$  din tableta de aspirină rămâne, astfel încât ne putem bucura mult timp pansând rachete!). Deasemenea este posibil să lansezi rachete folosind bicarbonat și oțet

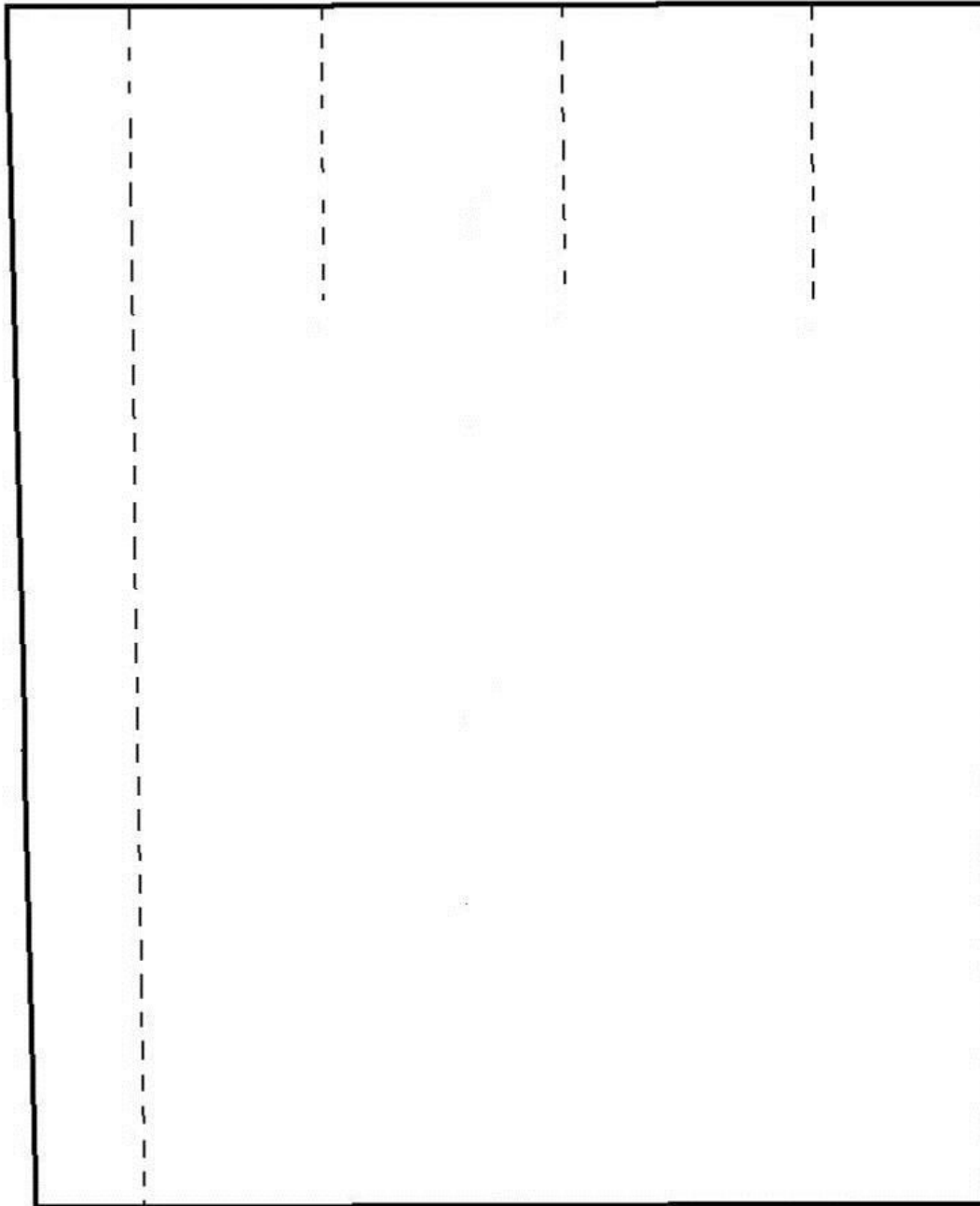


Fig. 19a: Corpul rachetei. Lipiți aripioare pe zona punctată.



Fig. 17: Exemple de rachete.

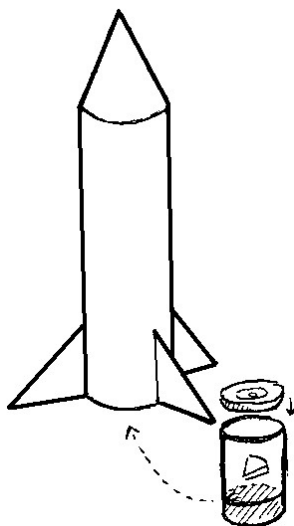


Fig. 18: Schema simplificată

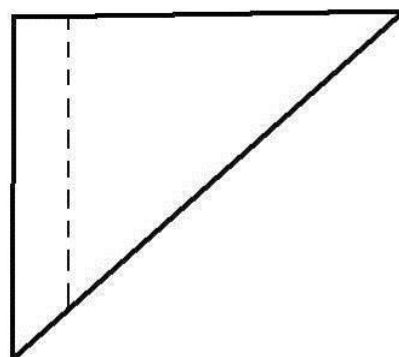


Fig. 19b: Modelul pentru cele trei aripi.

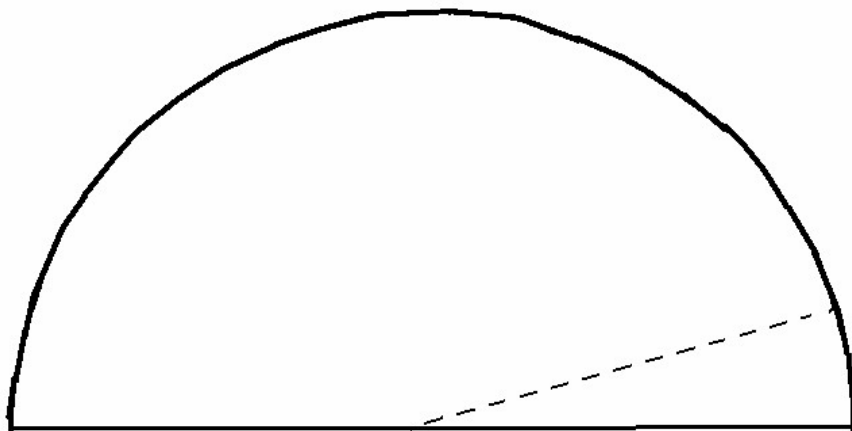


Fig. 19c: Conul rachetei.

## Exoplanete

Până în prezent, astronomii au detectat aproximativ 4000 de planete și 500 de sisteme planetare multiple. Un exemplu al uneia dintre primele planete fotografiate direct este prezentat în figura 20.

Toate subiectele acestui atelier fac parte din evoluția tehnologică care permite progrese în acest domeniu. Este posibil ca unele aspecte să fie mai puțin importante în viitor, dar este bine să le prezentăm în școli. Acesta este un domeniu care evoluează rapid și este posibil ca unele conținuturi să trebuiască să fie actualizate.

Să luăm un exemplu din istoria astronomiei. În 1610, Galileo a observat Saturn pentru prima dată. El nu a înțeles că obiectul era o planetă înconjurată de un inel fin. În schimb, el l-a interpretat ca pe un roi stelar cu trei componente. Va trebui să așteptăm observațiile lui Huygens cu un telescop mai bun pentru a rezolva sistemul de planete și inele. Timp de câțiva ani, comunitatea științifică a interpretat greșit structura lui Saturn. Un exemplu în acest sens se poate vedea în pictura lui Rubens din 1636-1638, care îl reprezintă pe Saturn ca trei stele, în urma descoperirii sale de către Galileo

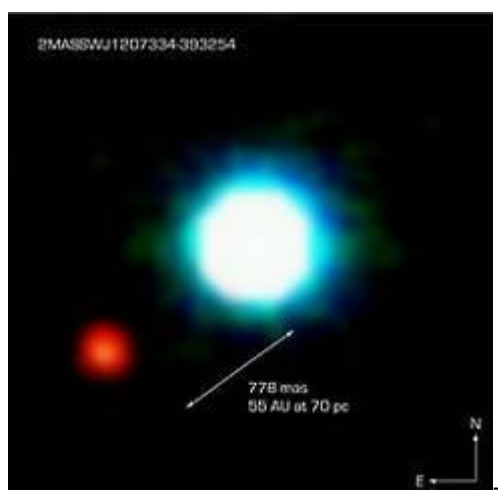


Fig. 20: Prima planetă (2M1207b) observată direct, la 16 martie 2003, cu unul dintre telescoapele VLT de 8 m ale ESO. Aceasta are o masă de 3-10 ori mai mare decât cea a lui Jupiter și orbitează la 41 UA de steaua sa centrală, care este o pitică brună. În 2006, a fost descoperit un disc de praf în jurul stelei centrale, oferind dovezi ale formării continue de planete în acest sistem tânăr (Sursa: ESO).



Fig. 21a și 21b: Saturn, după Rubens (1636-1638) și desen realizat de Galileo în 1610.

În aceeași ordine de idei, este bine să ne amintim că Ceres a fost considerată o planetă în secolul al XIX-lea (între 1801 și 1850), dar a fost clasificată ulterior ca asteroid. În același mod, atunci când Pluto a fost descoperit în 1930 a fost clasificat ca planetă. Cu toate acestea, în 2006 a fost reclassificată ca planetă minoră, la fel ca și Ceres. Așadar, cu siguranță, este posibil ca o parte din înțelegerea actuală a exoplanetelor să trebuiască să fie reconsiderată în viitor, dar acest lucru nu ar trebui să ne împiedice să introducem acest subiect în centrele educaționale.

## Nomenclatura exoplanetelor

O planetă extrasolară sau exoplanetă este considerată a fi o planetă care orbitează în jurul unei alte stele decât Soarele și, prin urmare, nu aparține sistemului nostru solar. NASA menține un catalog (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) cu peste 4000 de exoplanete confirmate în 2019. Nomenclatura exoplanetelor este simplă și provine din utilizarea acesteia în cazul stelelor binare. O literă minusculă este plasată după numele stelei de la litera "b" pentru prima planetă găsită în sistem (de exemplu: 51 Pegasi b). Următoarea planetă detectată în sistem este etichetată cu următoarea literă din alfabetul c, d, e, f etc. (de exemplu: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e sau 51 Pegasi f). Astfel, ordinea literelor nu are nicio legătură cu perioada orbitală a planetelor sau cu alți parametri. În plus, în 2015, Uniunea Astronomică Internațională (IAU) a atribuit nume primelor 19 sisteme exoplanetare descoperite. Astfel, în sistemul stelar Upsilon Andromedae (a se vedea Tabelul 8), steaua principală (Upsilon And) are numele alternativ de Titawin, iar planetele b, c și d vor fi numite Saffar, Samh și Makriti. Dar, în prezent, aceste denumiri nu au intrat în uz nici în comunitatea astronomilor profesioniști, nici în cea a astronomilor amatori.

## Detectarea sistemelor exoplanetare

Distanța până la Alpha Centauri sau Proxima Centauri, cele mai apropiate stele de noi, aflate la doar 4,5 ani lumină, este enormă în comparație cu distanța planetelor din sistemul nostru solar. De fapt, Alpha Centauri este de aproximativ 10 000 de ori mai departe decât Neptun, cea mai îndepărtată planetă a noastră. Aceste distanțe enorme au făcut imposibilă detectarea planetelor din jurul altor stele până la dezvoltarea unor tehnici de observare sofisticate, spre sfârșitul secolului trecut.

A treia cea mai strălucitoare stea de pe cerul nopții este Alpha Centauri. Alpha Centauri este, în realitate, un sistem stelar triplu. Acesta este format dintr-o pereche binară, Alpha Centauri A și B, și o stea pitică, cea mai apropiată de noi, numită Proxima Centauri. În jurul acestei a treia stele, de tip "pitică roșie", a fost detectată o planetă stâncoasă care ar putea avea unele asemănări cu Pământul: Proxima b, așa a fost numită noua exoplanetă, cea mai apropiată de Pământ despre care se știe, dar care nu a fost observată direct. Cei responsabili de descoperire i-au dezvăluit prezența prin observarea unei mici anomalii pe orbita stelei, cauzată de influența gravitațională a planetei. Această perturbare a servit la deducerea prezenței planetei și a unora dintre caracteristicile sale. Aceasta se învârtă în jurul Soarelui în doar 11 zile, este puțin mai mare decât Pământul și are probabil o suprafață solidă.

O caracteristică semnificativă a acestei exoplanete este apropierea sa de steaua mamă, Proxima Centauri. Aceasta se află la 5% din distanța care separă Pământul de Soare, adică aproximativ 0,05 UA. Această proximitate ar face din ea un iad arzător dacă steaua sa ar fi ca Soarele nostru. Cu toate acestea, soarele său este o pitică roșie, astfel că planeta se află în zona locuibilă. Acest lucru se datorează faptului că o pitică roșie precum Proxima Centauri, cu o masă de 12% din cea a Soarelui, are o strălucire de numai 0,1% din cea a Soarelui. Cu aceste caracteristici, noua planetă ar avea o temperatură de 40 de grade sub zero, fără efectul de seră al unei eventuale atmosfere, care ar putea ridica temperatura cu câteva grade peste punctul de îngheț al apei.

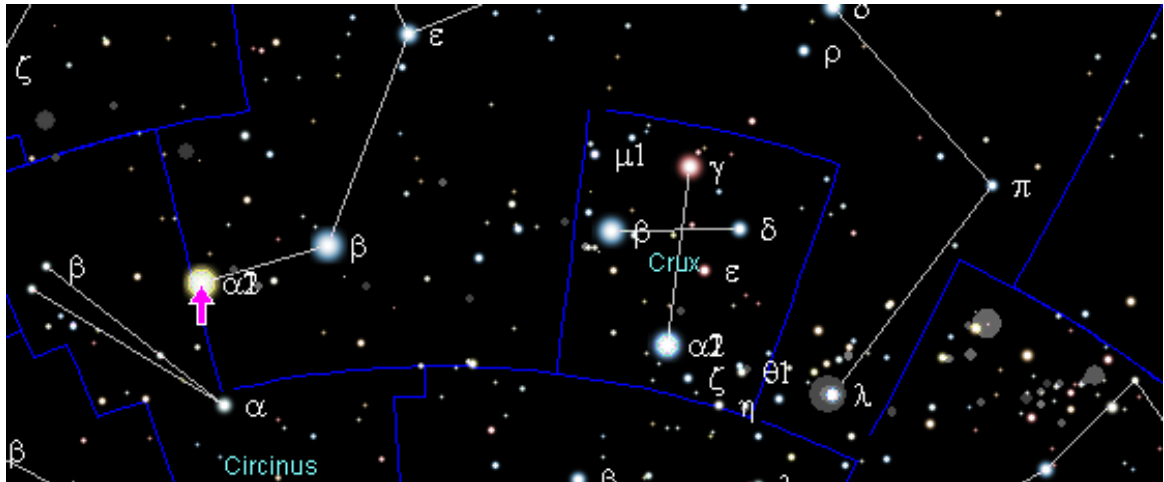


Fig. 22: Alpha Centauri lângă Southern Cross.

Unul dintre impedimentele prezenței vieții în aceste sisteme planetare din jurul unei pitice roșii este că planetele trebuie să fie foarte aproape de steaua lor pentru a avea o temperatură la care apa poate exista în stare lichidă. Atunci când se întâmplă acest lucru, în multe cazuri se produce un fenomen numit rotație sincronă, pe care îl observăm în cazul propriei noastre Luni. Timpul orbital și timpul de rotație se egalizează, iar planeta își arată întotdeauna aceeași față către stea. Acest lucru ar sugera o emisferă arsă, în care atmosfera s-a evaporat, iar cealaltă a înghețat. Cu toate acestea, o atmosferă mai densă decât cea a Pământului ar permite ca aceste temperaturi extreme să fie temperate prin circulația atmosferică și redistribuirea căldurii.

## Metoda vitezei radiale

În prezent, există două metode care domină descoperirea de exoplanete. Ambele sunt metode indirecte, în care prezența unui sistem planetar este dedusă din observarea stelei centrale a sistemului

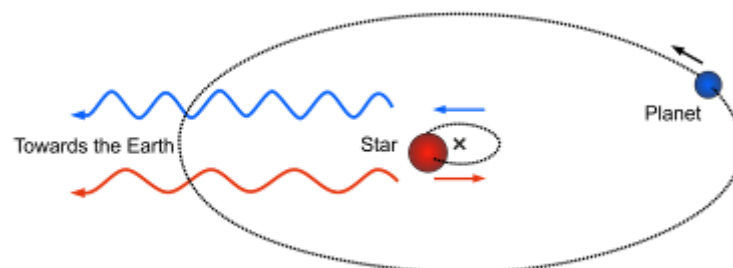


Fig. 23: Metoda vitezei radiale pentru detectarea planetelor.

Prin metoda vitezei radiale a fost descoperită prima exoplanetă care se rotește în jurul unei stele centrale, odată cu descoperirea lui 51 Pegasus b în 1995. În această metodă, se măsoară oscilația stelei centrale datorată mișcării planetei în jurul stelei centrale.



Steaua și planeta orbitează în jurul baricentrului sistemului stea-planetă. Această mișcare a stelei centrale induce schimbări foarte mici în lumina stelei, de la roșu la albastru (figura 23), datorită deplasării Doppler. În acest fel, putem determina masa unei planete în raport cu masa stelei centrale. Cu toate acestea, în practică, nu cunoaștem orientarea majorității sistemelor de planete detectate prin această metodă, prin urmare, masele planetelor pe care le putem extrage sunt mase minime (ceea ce înseamnă că masele reale ar putea fi mult mai mari).

### Activitatea 13: Efectul Doppler

După cum s-a văzut în atelierul despre expansiunea universului, efectul Doppler este cel care face ca lungimea de undă a unui sunet să difere atunci când sursa este în mișcare. Acesta poate fi demonstrat prin rotirea unui ceas deșteptător introdus într-o pungă de pânză legată cu o frânghie într-un plan orizontal. Când se apropie de ascultător, lungimea de undă se scurtează, iar sunetul are o înălțime mai mare. Când se îndepărtează, lungimea de undă se mărește și sunetul are o înălțime mai mică. Persoana aflată în centrul de rotație nu detectează nicio variație.

În cazul exoplanetei și al stelei, undele luminoase de la stea sunt afectate. Atunci când o stea se apropie de noi, lungimea de undă aparentă a radiației sale scade, iar lumina sa se deplasează spre capătul albastru al spectrului vizibil. Atunci când steaua se îndepărtează, lungimea de undă aparentă crește, iar lumina sa se deplasează spre partea roșie a spectrului vizibil.

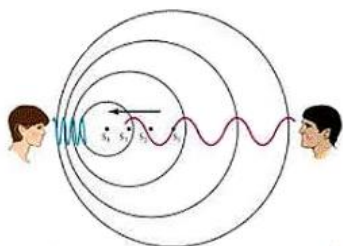


Fig. 24: Când sursa se apropie de ea, lungimea de undă scade, iar când sursa se îndepărtează, lungimea de undă crește.

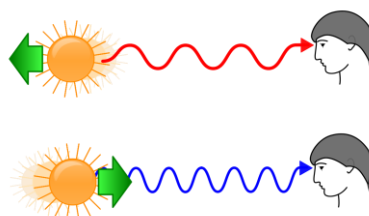


Fig. 25: Când sursa se apropie, pare mai albastră, iar când sursa se îndepărtează, pare mai roșie.

Acest efect Doppler se datorează mișcării relative și este cel pe care îl au exoplanetele atunci când se deplasează în jurul stelei-mamă. Atunci când exoplaneta se îndepărtează de noi, lumina sa se deplasează spre roșu, iar atunci când se apropie, lumina sa se deplasează spre albastru.

## Metoda tranzitelor

Cealaltă metodă importantă, numită "metoda tranzitelor", se bazează pe observarea modificărilor de strălucire a unei stele atunci când una dintre planetele sale trece ("tranzitează") prin fața stelei, ascunzând astfel o mică parte din discul său stelar (figura 26). Cu ajutorul metodei tranzitului, dimensiunea unei planete,  $R_p$ , poate fi măsurată în raport cu dimensiunea  $R_*$  a stelei sale centrale și este dată aproximativ de următoarea relație:

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

unde  $dF / F$  este modificarea relativă a luminozității observată în timpul tranzitului unei planete (de exemplu,  $dF / F = 0,01$  indică o reducere de 1% a luminozității stelei în timpul tranzitării).

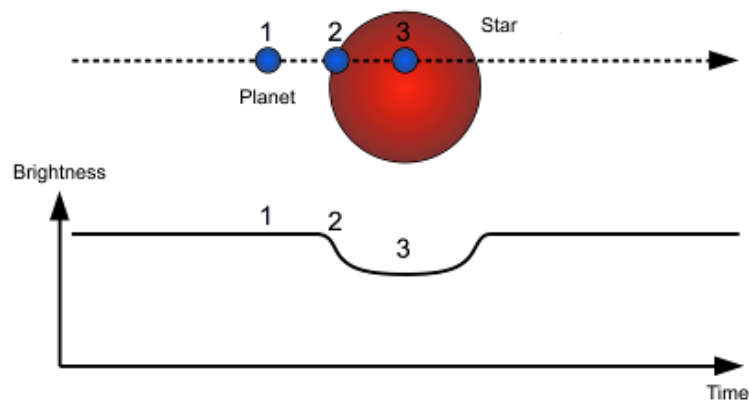


Fig. 26: Metoda de tranzit pentru detecția planetelor.

## Activity 14: Simularea tranzitării

Un tranzit poate fi simulat cu ajutorul a două bile: una mare, care reprezintă steaua, și una mică, care reprezintă planeta care orbitează în jurul stelei centrale. Dacă observatorii se află în același plan cu orbita planetei și observă în acel moment, ei vor ști când planeta trece prin fața stelei prin scăderea și creșterea curbei de luminozitate a stelei (figura 27). Dar este clar că, dacă observatorul nu se află în același plan de rotație, nu se va observa nicio schimbare în curba de luminozitate (figura 28).



Fig. 27: Observatorul aflat în planul de rotație poate vedea tranzitul planetei și poate detecta schimbările de luminozitate. Fig. 28: Observatorul aflat în afara planului de rotație nu poate vedea nicio modificare a curbei de luminozitate

## Metoda lentilelor microgravitaționale

Alte metode de detectare a exoplanetelor se disting și ele, deși sunt mai puțin utilizate. Metoda lentilelor microgravitaționale constă în observarea unei creșteri a luminozității unei stele de fond, datorată alinierii stelei de fond cu o stea cu exoplanete. Sistemul exoplanetar acționează ca o lentilă gravitațională și ar genera o extindere foarte caracteristică a luminozității (linia roșie din figura 29). Pentru ca aceasta să funcționeze, trebuie să existe o aliniere vizuală completă între cele trei părți (steaua de fundal, steaua cu exoplanetă și Pământul).

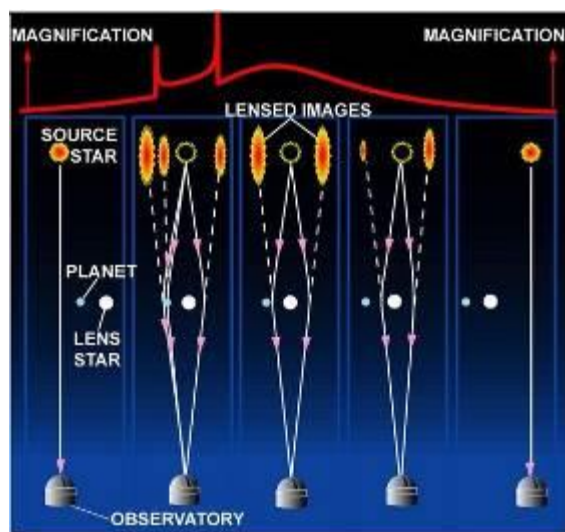


Fig. 29: Metoda microlentilelor pentru detectarea planetelor.

## Activity 15: Simularea microlentilelor

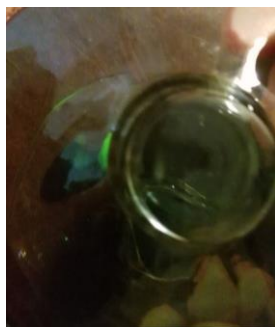


Fig. 30: Doar cu o lentilă.

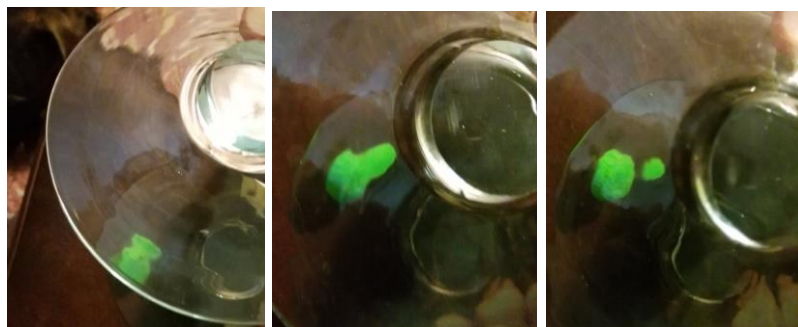


Fig. 31: Prin deplasarea celei de-a doua lentile peste prima, apare un punct și apoi două, în toate cazurile fără a muta prima lentilă.

Puteți simula detectarea unei exoplanete în jurul unei stele-mamă cu ajutorul unei perechi de socluri de pahare de vin, așa cum a fost folosit în atelierul Expansiunea Universului. La început folosim doar o singură bază și nu se vede nimic. Apoi o trecem pe cealaltă și apare un punct și apoi poate chiar două.

## Metoda detecției directe

În sfârșit, metoda de detecție directă corespunde achiziționării și analizei imaginilor de foarte înaltă rezoluție ale stelei, pentru a determina existența planetelor în jurul acesteia. Din cauza cantității de lumină emisă de o stea, această metodă a avut succes doar în cazul planetelor care se află foarte departe de steaua lor centrală și care, în același timp, sunt foarte tinere, astfel încât încă emit lumină datorită căldurii generate în timpul formării lor (a se vedea și figura 32).

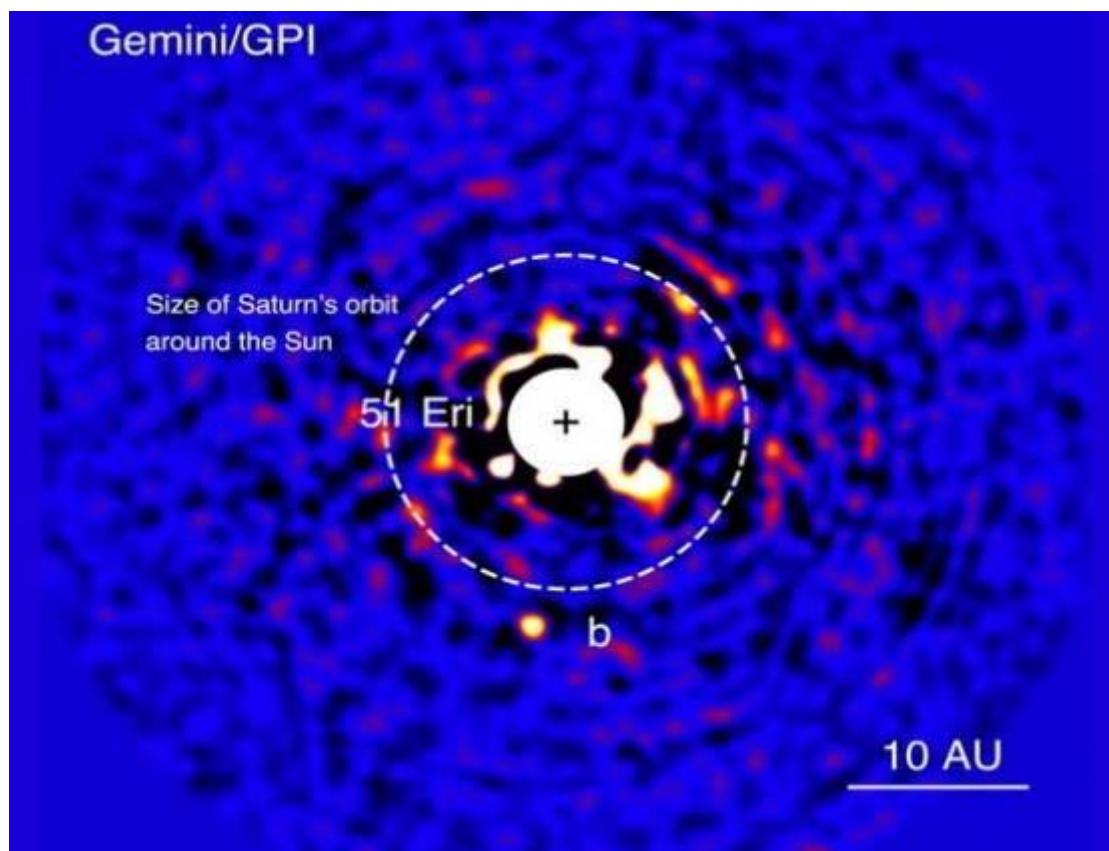


Fig. 32: Metoda detecției directe a planetelor

## Exemple de sisteme extrasolare

Cele mai cunoscute exoplanete au mase comparabile cu cea a lui Jupiter, cea mai mare planetă din sistemul nostru solar. De aceea, sunt adesea indicate masele și dimensiunile planetelor extrasolare în unități de masă ale lui Jupiter MJ ( $1,90 \times 10^{27}$  kg) și raza lui Jupiter RJ (71492 km). Se știe că doar foarte puține planete (aproximativ 20) au mase comparabile cu cea a Pământului. Cu toate acestea, există mai multe planete (aproximativ 700, adică 20% din totalul cunoscut) cu dimensiuni comparabile cu Pământul, până la  $1,5 R_t$  (raze terestre). S-a demonstrat că aceste planete sunt cele mai comune, dar tehnicile actuale de detectare au mai mult succes în detectarea obiectelor mai masive sau mai mari.

Planet Name	Average distance AU	Orbital period days	Minimum mass * Jupiter or Terrestrial Mass	Discovered year	Radius km
Urs And b	0,059	4,617	0,69 Mj	1996	124000*
Urs And c	0,83	241,5	1,98 Mj	1999	176000*
Urs And d	2,51	1274,6	4,13 Mj	1999	221999*
Urs 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

Table 8: Patru sisteme extrasolare reprezentative cu mai multe planete. Date extrase din Extrasolar Planets Catalogue 2 (cu excepția ultimei coloane). \* Aceste planete au fost descoperite cu ajutorul vitezei radiale; din acest motiv nu există certitudini cu privire la dimensiunile lor. Pentru planetele gigantice, cu mase de 0,5-20 Mj, se știe că aproape toate au o rază de 0,7-1,4 ori mai mare decât cea a lui Jupiter (50-100 de mii de kilometri), cu o corelație redusă cu masa lor. Pentru planetele terestre din GJ861, raza sa a fost calculată presupunând că densitatea planetei este egală cu cea a Pământului (5520 kg/m<sup>3</sup>).

În această secțiune, luăm în considerare câteva exemple de sisteme planetare extrasolare care au trei sau mai multe planete cunoscute. Tabelul 3 prezintă planetele din jurul stelelor Urs Andromeda, Gliese 581, Kepler-62 și Trappist-1. Sistemele planetare Urs Andromeda și Gliese 581 au fost descoperite folosind metoda vitezei radiale și despre aceste planete cunoaștem doar masele lor minime, dar nu și dimensiunile lor. Se consideră că razele lor sunt cuprinse între 50000-100000 km (deși tabelul 1 prezintă una dintre valorile posibile). Pentru Gliese 581, au fost anunțate alte câteva planete (d, f, g), dar au fost contrazise în alte publicații; astfel, descoperirea lor a fost retrasă. Aceasta a fost probabil cauzată de semnalele marginale sau de zgomotul provenit din alte surse din date.

Planetele din sistemul Kepler-62 au fost descoperite în urma unor tranzite. Prin urmare, dimensiunile lor sunt cunoscute. Despre masele lor cunoaștem doar limitele superioare (masele maxime) și sunt prea mici (și ușoare ca greutate) pentru a putea fi detectate prin metoda vitezei radiale. Cu toate acestea, există, de asemenea, multe planete care au fost detectate atât prin metoda tranzitului, cât și prin metoda vitezei radiale și le cunoaștem atât masele, cât și dimensiunile.

Există unele exoplanete care se află foarte aproape de steaua centrală (de exemplu, toate planetele din Gliese 876 au orbite mai apropiate de stea decât Mercur de Soare). Altele au planete mai îndepărtate, cum ar fi sistemul 2M1207b (a se vedea Fig. 1), cu o planetă în formare la o distanță de 41 UA, adică de 1,4 ori distanța lui Neptun. Una dintre posibilitățile de vizualizare a acestor date este construirea unor modele la scară a sistemului planetar ales. Acest lucru ne va permite să comparăm cu ușurință între ele și cu sistemul nostru solar.

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

Table 9: Solar System Planets.

În prezent, știm că există și exoplanete în jurul unor stele foarte diferite de Soare. În 1992, radioastronomii au anunțat descoperirea primei exoplanete, în jurul pulsarului PSR 1257 + 12. A fost nevoie de încă trei ani pentru a descoperi prima exoplanetă în jurul unei stele "normale" de tip solar, 51 Pegasi. Ulterior, au fost detectate exoplanete în jurul: pitice roșii (de exemplu Gliese 876 în 1998), stele gigantice (Iota Draconis în 2001), pitice brune (2M1207 în 2004), stele de tip A (Fomalhaut în 2008, a se vedea figura 33 ), pitice albe (WD1145-1017 în 2015, cu o planetă în dezintegrare), în jurul unor sisteme binare (Kepler-16b în 2011), printre altele

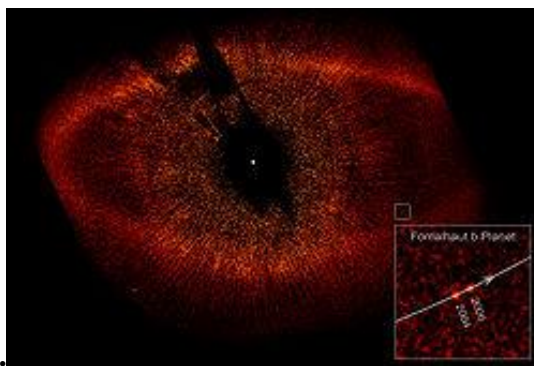


Fig. 33: Planet Fomalhaut b within the interplanetary dust cloud of Fomalhaut in an image of the Hubble Space Telescope, with positions in 2004 and 2006 (see small image). (Photo: NASA)



## Activitatea 16: Modele de sisteme exoplanetare

În primul rând, alegem scara modelului. Nu este convenabil să se utilizeze aceeași scară pentru diametre și distanțe din cauza unei probleme de mărime. Pentru distanțe, scara luată în considerare este: 1 UA = 1 m. În acest caz, toate exoplanetele pot încăpea într-o sală de clasă obișnuită, precum și primele cinci planete ale sistemului nostru solar. În ceea ce privește scara de mărime pentru planetă, o rază a planetei de 10.000 km corespunde unui diametru al modelului de 0,5 cm. În acest caz, cea mai mare planetă, Jupiter, cu o rază de 71.000 km, are un diametru de 7 cm, iar cea mai mică, Mercur, va avea un diametru de 0,2 cm. În cazul în care activitatea se desfășoară în exterior (de exemplu, în curtea școlii), putem construi un model complet cu scări similare pentru diametre și distanțe. Pentru stelele-mamă este aceeași scară, o rază a stelei-mamă de 10 000 km corespunde unui diametru al modelului de 0,5 cm.

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

Table 10: Solar System. The parent star, the Sun is G2V, with a diameter in the model of 35 cm. Habitability zone indicated in green.

În condițiile de scară exprimate, se construiește sistemul solar (tabelul 10) sau oricare dintre sistemele din tabelul 1, folosind razele și valorile distanței medii incluse în tabel. Pentru a simplifica procesul, tabelele cu scara menționată mai sus sunt incluse mai jos.

Se începe cu primul sistem planetar care a fost descoperit în 1999 prin detectarea planetelor sale prin efectul Doppler aplicat la viteza radială a stelei. Această metodă, datorită nivelului tehnologic, permite detectarea exoplanetelor foarte mari care se află în apropierea stelei-mamă. Fără îndoială, metoda de detectare determină și caracteristicile planetelor localizate. Cu ajutorul acestei metode de detectare, au fost localizate planete gazoase precum Jupiter sau chiar mult mai mari. Pentru a localiza planete care ar putea susține viața, a fost necesar să se încerce să se detecteze planete terestre mai mici, precum Pământul.

<b>Upsilon Andromedae Titawin</b>	<b>Distance AU</b>	<b>Diameter km</b>	<b>Model Distance</b>	<b>Model Diameter</b>
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

Table 11: Steaua mamă Upsilon Andromedae este o stea F8V la 44 de ani lumină în constelația Andromeda. Este o stea binară compusă din Ups And A, o stea destul de asemănătoare cu Soarele, dar ceva mai fierbinte și mai strălucitoare, cu o rază de 1,28 R<sub>sun</sub> și Ups And B care este o pitică roșie mică. În modelul Ups And A, aceasta are un diametru de 45 cm.

Se consideră că planetele gazoase nu sunt capabile să susțină viața în sensul în care o cunoaștem noi, astfel încât există o tendință de a studia planetele stâncoase de tip Pământ în locul planetelor Jupiter, care au fost primele descoperite.

Gliese 581 este unul dintre primele sisteme în care a fost posibil să se detecteze exoplanete de tip terestru. Cu toate că începând cu 2014 au fost discutate unele dintre exoplanetele sale. Metoda de detecție avută în vedere în acest caz a fost cea a vitezelor radiale, dar datorită masei reduse a lui GL 581, de 0,31 M<sub>sun</sub>, a fost posibilă găsirea de exoplanete terestre.

<b>Gliese 581</b>	<b>Distance AU</b>	<b>Diameter / km</b>	<b>Model Distance</b>	<b>Model Diameter</b>
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

Table 12: Steaua mamă Gliese 581 este o pitică roșie M2.5V situată la 20,5 ly în constelația Libra. Are o treime din masa Soarelui și este mai puțin luminoasă și mai rece decât acesta. Raza sa este de 0,29 R<sub>sun</sub>, iar în model corespunde unui diametru de 10 cm.

<b>Kepler 62</b>	<b>Distance AU</b>	<b>Diameter / km</b>	<b>Model Distance</b>	<b>Model Diameter</b>
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

Tabelul 13: Steaua mamă Kepler 62 este o stea F2V, în constelația Lyra la 1200 ly. Este o stea puțin mai rece și mai mică decât Soarele. Raza sa este de 0,64 R<sub>sun</sub>, iar în model corespunde unui diametru de 22 cm.

În 2009, a fost lansată misiunea Kepler. Acest observator spațial orbitează în jurul Soarelui și caută planete extrasolare, în special pe cele de dimensiuni similare cu Pământul, care se află în zona locuibilă a stelei lor mamă. În cei 9 ani cât a durat misiunea au fost detectate aproximativ 3000 de exoplanete și există încă mii de candidate care așteaptă să fie confirmate.

Kepler a măturat 0,25% din cer, iar descoperirile sale au arătat că planetele sunt foarte frecvente în Calea Lactee. În 2018, a fost lansat satelitul TESS. Acesta este conceput pentru a identifica planetele din apropiere cu o dimensiune nu mai mare decât dublul Pământului și într-o zonă mult mai largă a cerului, care va acoperi 85% din bolta cerească. Atât Kepler, cât și TESS au fost concepute pentru a explora cerul în căutarea tranzitelor planetare.

Kepler-62 este unul dintre cele mai interesante exemple de sistem planetar potențial locuibil. De un interes deosebit sunt planetele e și f, deoarece acestea sunt cele mai bune candidate pentru planete solide care se încadrează în zona locuibilă a steii lor. Razele lor, 1,61 și, respectiv, 1,41 raze terestre, le plasează în intervalul de raze a ceea ce ar putea fi planete terestre solide și se încadrează în zona locuibilă a lui Kepler-62: și la un interval de distanță la care aceste două planete ar putea avea apă lichidă pe suprafețele lor, poate acoperindu-le complet. Pentru Kepler-62e, care se află aproape de marginea interioară a zonei locuibile, acest lucru ar necesita o acoperire de nori reflectori care să reducă radiația care încălzește suprafața. Kepler-62f, pe de altă parte, este situat în zona exterioară a zonei locuibile, la fel ca Marte în sistemul nostru solar. Acolo, sunt necesare cantități semnificative de dioxid de carbon pentru a menține caldă suprafața unei planete cu suficientă apă pentru suprafața lichidă.

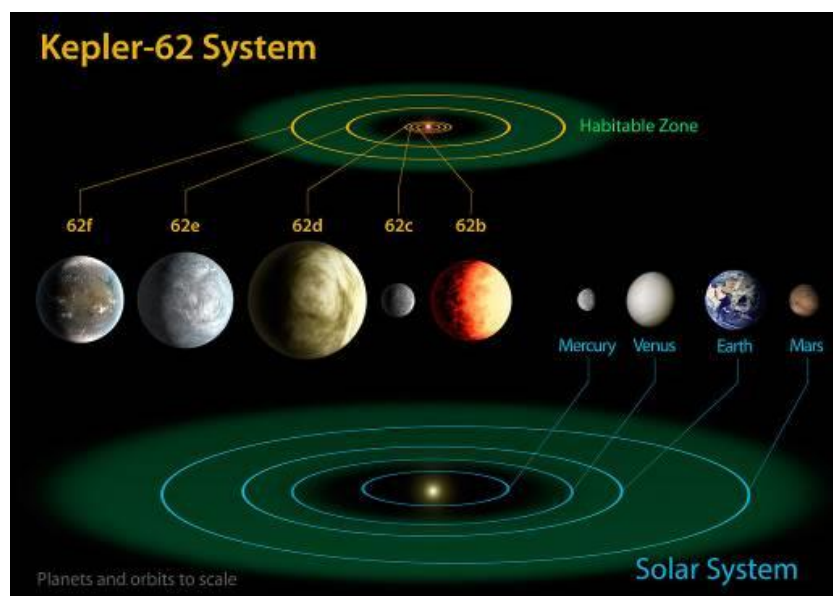


Fig. 34: Sistemul Kepler-62 în comparație cu sistemul solar interior. Regiunea verde indică zona locuibilă - zona în care ar putea exista viață așa cum o cunoaștem. Sursa: NASA Ames / JPL-Caltech.

O pitică roșie din apropiere, catalogată ca fiind 2MASS J23062928-0502285, a fost urmărită în tranzit în 2015 cu ajutorul telescopului Trappist, descoperindu-se inițial aproximativ trei planete de dimensiuni terestre, botezate Trappist-1b, c și d. Studii ulterioare efectuate de echipe internaționale cu ajutorul telescoapelor Hubble, Kepler, Spitzer și Telescopul din Chile, au permis o mai bună înțelegere a unui număr total de șapte planete. Cinci dintre aceste planete (b, c, e, f și g) au dimensiuni similare cu cele ale Pământului, iar două (d și h) au dimensiuni intermediare între Marte și Pământ. Trei dintre aceste planete (e, f și g) orbitează în zona locuibilă.

Planetele TRAPPIST-1 orbitează toate foarte aproape de steaua lor și trec atât de aproape una de cealaltă încât interacțiunile gravitaționale sunt semnificative, iar perioadele lor orbitale sunt aproape rezonante. Planetele ar apărea proeminente pe cerul vecinilor lor și, în unele cazuri, de câteva ori mai mari decât apare Luna de pe Pământ. De fapt, masele lor nu au fost determinate cu ajutorul vitezelor radiale, ci cu ajutorul abaterilor de la periodicitatea orbitelor lor, folosind o metodă numită "transit timing variations" (abateri ale timpului de tranzit).

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

Tabelul 14: Steaua mamă Trappist-1 este o pitică roșie de tip M8V situată în constelația Aquarius la 40 ly. Este o stea puțin mai mare decât Jupiter, cu un diametru de 168.000 km și un model cu diametrul de 7 cm. Se observă că distanțele până la planetele din model sunt mai mici decât diametrul stelei, ceea ce dă o idee despre compactitatea acestui sistem.

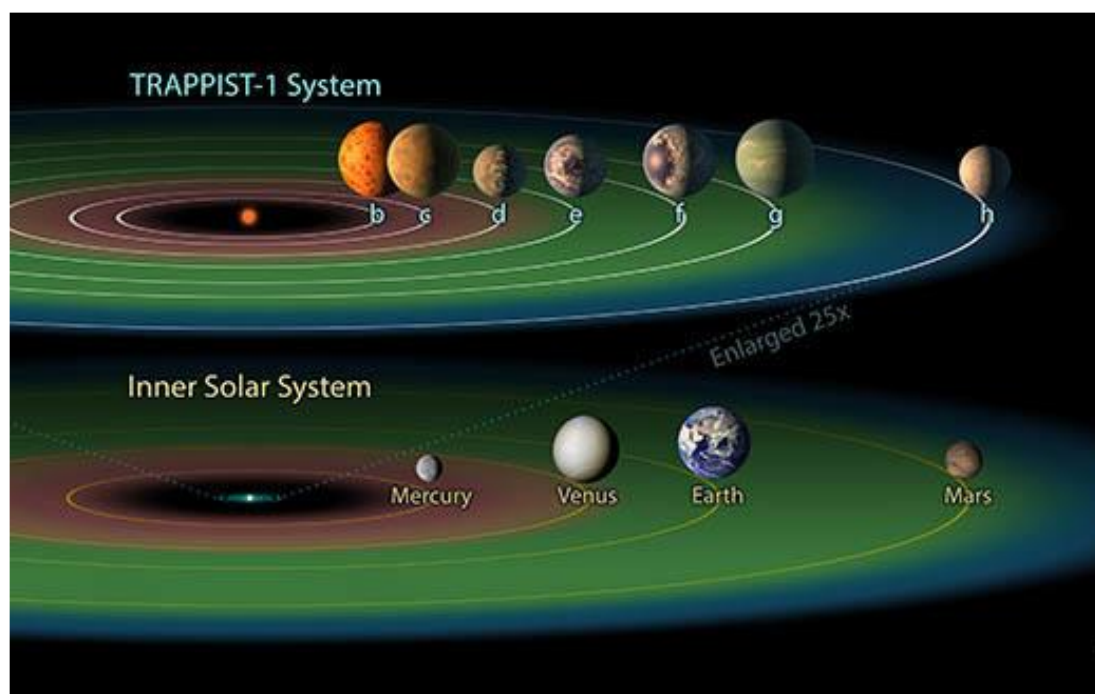


Fig. 35: Sistemul Trappist-1 în comparație cu sistemul solar de interior. Regiunea verde indică zona locuibilă - zona în care ar putea exista viața așa cum o știm.

Masele tuturor acestora au putut fi obținute cu o marjă de eroare foarte mică, ceea ce a permis determinarea cu precizie a densității, a gravitației superficiale și a compoziției lor. Exoplanetele au un interval de masă de aproximativ 0,3 Mt până la 1,16 Mt, cu densități de 0,62 până la 1,02 terestre (3,4-5,6 g/cm<sup>3</sup>). Planetele c și e sunt aproape în totalitate stâncoase, în timp ce b, d, f, g și h au un strat volatil sub forma unui înveliș de apă, de gheață sau a unei atmosfere groase. Trappist-1d pare să aibă un ocean de apă lichidă care cuprinde aproximativ 5% din masa sa, pentru comparație, conținutul de apă al Pământului este <0,1%, în timp ce straturile de apă ale planetelor Trappist-1f și g sunt probabil înghețate. Trappist-1e are o densitate ușor mai mare decât cea a Pământului, ceea ce indică o compoziție de rocă terestră și fier. În plus, s-a descoperit că atmosfera lui Trappist-1b se afla peste limita efectului de seră de fugă de la 101 la 104 bar de vapori de apă. Planetele c, d, e și f nu au atmosfere de hidrogen și heliu. Planeta g a fost, de asemenea, observată, dar nu existau suficiente date pentru a exclude o atmosferă de hidrogen.



Fig. 36: După ce toate modelele au fost construite, trebuie comentate punctele evidențiate în prezentarea zonei de locuibilitate. În funcție de masa și de tipul stelei-mamă, zona de habitabilitate este mai mult sau mai puțin apropiată.

Există încă multe întrebări fără răspuns cu privire la proprietățile și habitabilitatea exoplanetelor. Cunoașterea mai multor informații despre acestea și aflarea mai multor informații despre proprietățile și caracteristicile lor a motivat mai multe misiuni spațiale actuale și viitoare, cum ar fi misiunile TESS și JWST ale NASA și CHEOPS și PLATO ale ESA, cea din urmă cu lansarea în 2026 și în așteptarea unei extinderi a numărului de planete terestre cunoscute.

## **Bibliografie**

- Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17<sup>th</sup> century, Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School, Barcelona, 2006.
- Gaitsch, R., Searching for Extrasolar Planets, Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School, Barcelona 2006.
- Ros, R.M., A simple rocket model, Proceedings of 8<sup>th</sup> EAAE International Summer School, 249, 250, Barcelona, 2004.
- Ros, R.M., Measuring the Moon's Mountains, Proceedings of 7<sup>th</sup> EAAE International Summer School, 137, 156, Barcelona, 2003.
- Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., Sistema Solar Actividades para el Aula, Antares, Barcelona, 2005.
- Ros, R.M., Viñuales, E., Determination of Jupiter's Mass, Proceedings of 1<sup>st</sup> EAAE International Summer School, 223, 233, Barcelona, 1997.
- Ros, R.M., Viñuales, E., Saurina, C., Astronomía: Fotografía y Telescopio, Mira Editores, Zaragoza, 1993.
- Vilks I., Models of extra-solar planetary systems, Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School, Barcelona 2006.