

METODE DE DETECȚIE A EXOPLANETELOR

Maria VELEA*

Key Words: Exoplanets, transit method, Doppler method, micro-lensing effect.

Primele 2 exoplanete au fost descoperite în anul 1992 de către astronomii Aleksander Wolszczan și Dale Frail. Această descoperire a surprins nu numai prin faptul că erau primele planete detectate în afara Sistemului Solar, dar și prin faptul că aceste exoplanete orbitau în jurul unui pulsar, mulți astronomi crezând până atunci că planetele pot exista doar în jurul stelelor din secvența principală. Pulsarii sunt stele neutronice aflate în rotație extrem de rapidă ce emit unde electromagnetice pe la polii lor magnetici, iar dacă acestea sunt îndreptate spre Terra noi le observăm ca niște pulsuri periodice, perioada acestora fiind de fapt perioada de rotație a pulsarului. Măsurând cu atenție perioada acestor pulsuri în cazul pulsarului PSR 1257+12, cei doi astronomi au observat că aceasta se modifică periodic, indicând prezența unor corpuri cerești care orbitează în jurul pulsarului și îl perturbă gravitațional. De la acea primă descoperire și până la 1 martie 2013 a fost confirmată existența a 861 de planete extrasolare grupate în 677 de sisteme planetare, 15 dintre aceste exoplanete fiind descoperite prin această metodă de **cronometrare a pulsarilor**.

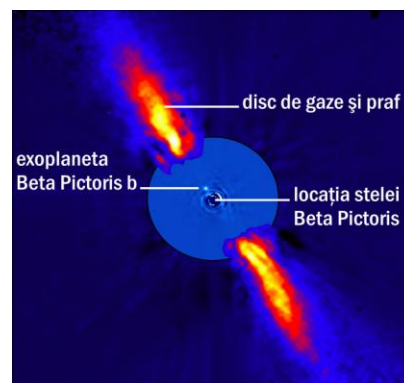
Exoplanetele sunt greu de observat direct întrucât ele se pierd în strălucirea stelei-mamă, până în prezent fiind **detectate fotografic** doar 32 de exoplanete.



Imaginea nr.1
Exoplaneta 2M1207b



Imaginea nr. 2
Steaua HR 8799



Imaginea nr. 3
Beta Pictoris

Dar dacă în jurul unei stele orbitează o exoplanetă, atât steaua cât și exoplaneta orbitează de fapt în jurul centrului comun de masă. În cazul sistemului Soare – Jupiter centrul de masă se află undeva cam pe la suprafața Soarelui, în fotosferă. Dacă am privi de la depărtare Soarele am vedea cum se mișcă pe un cerc în jurul centrului de masă cu o perioadă de aproape 12 ani (perioada de revoluție a lui Jupiter). Această oscilație a stelei poate fi detectată fie cu ajutorul **astrometriei**, măsurându-se cu precizie poziția stelei pe cer și observându-se modul în care aceasta își modifică poziția în timp, fie prin **metoda Doppler**, metodă prin care sunt măsurate variațiile în viteza de mișcare a stelei pe direcția Terra - stea utilizându-se efectul Doppler. Acest efect determină liniile spectrale din spectrul stelei respective să se deplaseze către lungimi de undă mai mari (deplasare spre roșu) când steaua se

* Muzeograf, Observatorul Astronomic "Victor Anestin" Bacău.

îndepărtează de Terra, și să se deplaseze către lungimi de undă mai mici (deplasare spre albastru) când se apropie.

Cu cât masa exoplanetei este mai mare, cu atât oscilația steii este mai puternică și atunci și deplasarea liniilor spectrale din spectrul steii datorită efectului Doppler este mai mare. Cu ajutorul unui spectrometru se măsoară efectul Doppler în cazul steii și se pot estima astfel atât **masa** exoplanetei cât și **perioada sa de revoluție** în jurul steii. În cazul metodei Doppler cea mai importantă problemă este că ea măsoară mișcarea doar pe direcția Terra – stea, precizia ei depinzând deci de înclinația orbitei exoplanetei față de această direcție. Dacă înclinația este mică sau nulă se obține o valoare precisă a masei exoplanetei, dar dacă înclinația este mare se obține doar valoarea unei mase minime a exoplanetei. Pentru a se corecta această marjă de eroare, se combină măsurătorile realizate cu ajutorul metodei Doppler cu cele realizate cu ajutorul astrometriei, care măsoară mișcarea steii în planul perpendicular pe direcția Terra – stea, putându-se astfel obține masa reală a exoplanetei. Aceasta este și cea mai prolifică metodă de detectare a planetelor extrasolare, cu ajutorul ei fiind descoperite până acum 502 exoplanete.

Exoplanetele mai pot fi descoperite și atunci când ele tranzitează steaua-mamă. Atunci când planeta trece prin fața steii luminozitatea steii scade puțin, măsura cu care scade fiind proporțională cu raportul (aria discului aparent al exoplanetei)/(aria discului aparent al steii). Măsurând cu ajutorul fotometriei valoarea cu cât a scăzut strălucirea steii pe perioada tranzitului, astronomii pot determina **diametrul** exoplanetei, iar măsurând perioada la care strălucirea steii variază, ei determină **perioada de revoluție** a exoplanetei, și cu ajutorul legii a III-a a lui Kepler și **distanța exoplanetei față de stea**. Prin această **metodă a tranzitului** pot fi descoperite doar acele exoplanete ale căror orbite au înclinații foarte mici sau nule față de direcția Terra – stea, astfel încât de pe Terra noi să avem posibilitatea să vedem cum exoplaneta tranzitează steaua. Tot prin metoda tranzitului se poate determina și **înclinația orbitei** exoplanetei. Acest lucru se face măsurându-se durata tranzitului precum și intervalele de timp necesare pentru ca discul exoplanetei să intre peste discul steii și să iasă de pe discul steii: o exoplanetă ce nu tranzitează exact peste centrul discului steii (înclinația orbitei $\neq 0$) va avea un tranzit mai scurt dar intrarea/ieșirea discului exoplanetei peste/de pe discul steii va dura mai mult față de exoplanetele care tranzitează centrul steii (înclinația orbitei = 0). Când se confirmă o exoplanetă prin metoda tranzitului trebuie să i se măsoare cel puțin 3 tranzite și să se verifice dacă acele tranzite nu sunt cumva eclipsele unei stele duble, prin această metodă fiind confirmate până în prezent 294 de exoplanete.

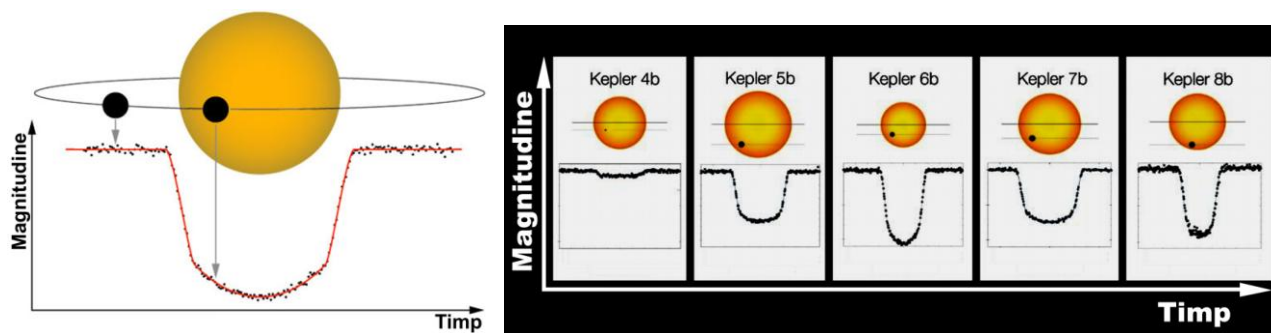


Figura nr.1 *Tranzitul unui exoplanete*

Măsurătorile realizate prin metoda tranzitului sunt puternic afectate de prezența atmosferei terestre, acele mici variații ale strălucirii steii datorate tranzitului exoplanetei putând fi perturbate sau chiar acoperite de scintilația steii datorită turbulențelor din atmosferă. Astfel că această metodă este mult mai eficientă atunci când se utilizează telescoape spațiale, în special atunci când se caută exoplanete terestre. De exemplu, dacă Jupiter ar tranzita Soarele, strălucirea Soarelui ar scădea cu

1/100, având în vedere că raza lui Jupiter este de aproximativ 1/10 din raza Soarelui. Dar dacă Terra ar tranzita Soarele, aproximând în mare că raza Terrei ar fi de 1/100 din raza Soarelui, în acest caz strălucirea Soarelui ar scădea doar cu 1/10 000, această variație fiind deci de 100 de ori mai mică decât în cazul tranzitului lui Jupiter. Variațiile de strălucire atât de mici pot fi decelate doar de telescoapele spațiale sau de telescoapele terestre care utilizează tehnologia opticii adaptive, tehnologie care anulează distorsiunile optice datorate atmosferei terestre.

Prin metoda tranzitului pot fi studiate și atmosferele exoplanetelor. Când o exoplanetă tranzitează steaua (1), atmosfera ei absoarbe radiații cu anumite lungimi de undă, în funcție de compoziția atmosferei, atmosferele mai dense absorbind mai mult iar cele mai rarefiate mai puțin. Determinându-se lungimile de undă ale radiației absorbite se deduce compoziția atmosferei planetei extrasolare, iar din măsura cu care a variat intensitatea radiației cu acele lungimi de undă pe perioada tranzitului se determină cât de densă este atmosfera. Când exoplaneta trece în spatele stelei (2) se studiază cum radiația ei termică și lumina reflectată de ea dispar și apoi reapar, obținându-se astfel informații despre temperatura exoplanetei și chiar despre existența norilor în atmosfera ei. Iar pentru a se studia circulația atmosferei exoplanetei se urmăresc variațiile ciclice ale strălucirii exoplanetei în funcție de faza ei (3).

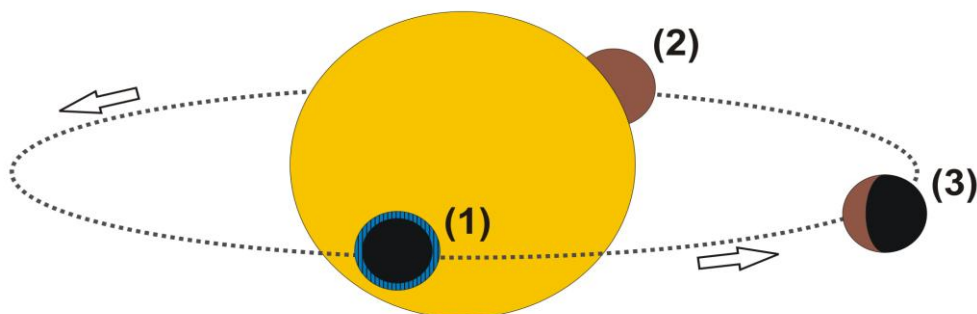


Figura nr. 2 *Tranzitul unui exoplanete*

Au fost descoperite în spațiul cosmic și obiecte cerești de tipul planetelor dar care nu orbitează în jurul unei stele - astronomii le-au numit planete interstelare. Aceste planete interstelare rătăcesc la infinit prin galaxie, și neavând o stea-mamă care să le încălzească sunt cufundate în frig, întuneric și o liniște mormântală. Sunt lumi în care zilele și anii nu există. Ele sunt probabil exoplanete aruncate din sistemele lor planetare de haosul migrației planetare. Planetele interstelare pot fi descoperite cu ajutorul **efectului de micro-lentilă gravitațională**: te uiți la un câmp de stele și speri să vezi la un moment dat cum la una dintre stele îi crește strălucirea pentru scurt timp datorită efectului de micro-lentilă gravitațională a unei planete interstelare ce trece între noi și stea. Studiind curba de lumină a stelei din fundal se poate deduce masa planetei interstelare care a acționat ca lentilă gravitațională.

Efectul de micro-lentilă gravitațională permite studiul corpurilor cerești fără lumină proprie sau de luminozitate mică precum planetele, piticele maro, stelele pitice roșii, piticele albe, stelele neutronice și găurile negre. El este utilizat și pentru detectarea sistemelor planetare: în cazul în care „lentila” este un sistem stea – exoplanetă avem de-a face cu o micro-lentilă gravitațională binară. În acest caz apar niște deviații în curba de lumină a stelei din fundal față de cazul în care ar fi fost o micro-lentilă gravitațională singulară. Studiindu-se aceste deviații se pot determina atât masa exoplanetei cât și distanța sa orbitală. Această metodă este foarte eficientă în detectarea exoplanetelor de masă mică ce orbitează la distanță mare de steaua-mamă, categorie de exoplanete ce este foarte greu

de explorat cu celelalte metode de detecție, până în prezent fiind descoperite prin această tehnică 18 planete extrasolare.

Prima exoplanetă descoperită în jurul unei stele din secvența principală a fost găsită în jurul stelei 51 Pegasi, aceasta fiind chiar o stea de tipul Soarelui (clasă spectrală G). Exoplaneta, numită 51 Pegasi b sau Bellerophon, este o gigantă gazoasă ($M = 150 M_{\text{Terra}}$) ce orbitează foarte aproape de steaua ei (8 milioane km), ea parcurgând o orbită completă în doar 4,2 zile terestre. Bellerophon este pârjolită de steaua-mamă, temperatura la suprafață ajungând la $1\ 200^{\circ}\text{C}$. Deși are masa doar jumătate cât cea a lui Jupiter, ea are probabil diametrul mai mare decât acesta și asta datorită temperaturii atât de mari care a făcut ca gazele de pe exoplanetă să se dilate foarte tare. Bellerophon este ceea ce astronomii numesc un „Jupiter încins”. Această categorie de exoplanete sunt gigante gazoase ce orbitează foarte aproape de stea, distanța dintre exoplanetă și stea fiind de circa 3 – 4 diametre stelare. În plus, ele au o rotație sincronă în jurul stelei, prezentând mereu aceeași față către stea: într-o parte a planetei este mereu zi, iar în cealaltă este mereu noapte. Variațiile mari de temperatură dau naștere la vânturi foarte puternice, ce ating viteze de mii de km/h. Datorită temperaturii foarte mari aici pot exista și nori de silicați, în atmosferele celor mai fierbinți planete formându-se și nori de vapori de fier!

Deși majoritatea exoplanetelor descoperite până în prezent sunt planete gigante gazoase, au fost găsite și exoplanete solide, de tipul planetelor terestre. Cea mai mică exoplanetă descoperită până în prezent este Kepler-37b. Ea este o planetă solidă cu raza de 3 ori mai mică decât cea a Terrei, fiind doar puțin mai mare ca Luna, și cu o masă minimă de doar un procent din masa terestră. Orbitând în jurul stelei la o distanță de doar 15 milioane km, ea parcurge o orbită completă în doar 13 zile terestre, iar temperatura la suprafață se ridică până la 425°C . Ea orbitează în jurul stelei împreună cu alte 2 exoplanete: Kepler-37c, diametrul acesteia fiind 75% din diametrul Terrei, și Kepler-37d, al cărei diametru este dublu față de diametrul Terrei.

De altfel și cea mai apropiată exoplanetă descoperită, Alpha Centauri Bb, este tot o planetă de tip terestru, ea aflându-se la doar 4,37 ani-lumină depărtare de Terra. Aceasta este și cea mai mică exoplanetă descoperită în jurul unei stele de tipul Soarelui. Ea orbitează la o distanță de doar 6 milioane km de stea, astfel că parcurge o orbită completă în doar 3,2 zile terestre, iar temperatura la suprafața ei se ridică până la $1\ 500^{\circ}\text{C}$, temperatură la care rocile se topesc.

Exoplanetele cu raza mai mare decât $1,25 R_{\text{Terra}}$ și cu masa de până la 10 mase terestre sunt numite Super-Terre. Unele seamănă cu Terra, având continente și oceane, altele sunt aride precum Marte. Dar mai există o categorie: „planetele ocean”, acestea fiind complet acoperite cu apă. Aici oceanele ating adâncimi de sute de kilometri, pe fundul oceanelor ajungându-se la presiuni uriașe, de peste 1 milion de atmosfere. Presiunea imensă comprimă apa, formând sub ocean o manta alcătuită din forme exotice de gheață. Aceste exoplanete au atmosfere mai extinse decât cea terestră, alcătuite în principal din vapori de apă, în ele producându-se un efect de seră foarte puternic. O astfel de planetă este și Gliese 1214b.

Cea mai îndepărtată exoplanetă descoperită este OGLE-2005-BLG-390Lb, ea aflându-se la o depărtare de 21 500 ani-lumină. Această exoplanetă are o masă de 5,5 mase terestre și orbitează în jurul unei stele pitice roșii de la o distanță de aproximativ 3 UA, parcurgând o orbită completă în circa 10 ani terestri. Depărtarea mare de stea și temperatura relativ scăzută a stelei fac ca temperatura pe această Super-Terră să fie extrem de scăzută: -220°C .

Steaua cu cele mai multe exoplanete confirmate până în prezent este HD 10180. Aceasta este o stea chiar de tipul Soarelui aflată la o distanță de 127 de ani-lumină, în jurul ei orbitând 7 exoplanete. Prima dintre ele are o masă minimă calculată de doar 1,3 mase terestre, fiind probabil o planetă terestră, următoarele 5 exoplanete sunt comparabile ca masă cu Uranus și Neptun, a șaptea exoplanetă apropiindu-se ca dimensiuni de Saturn. Dar pe lângă aceste 7 exoplanete se presupune că mai există 2 exoplanete de tipul Super-Terrelor, existența acestora urmând să fie confirmată ulterior.

Deși în Sistemul Solar toate cele 8 planete au orbite cvasi-circulare, au fost descoperite exoplanete ale căror orbite au o excentricitate considerabilă, aceste orbite fiind extrem de alungite. Dacă în cazul Terrei anotimpurile se formează datorită faptului că axa de rotație a planetei este înclinată, și în cazul acestor exoplanete cu orbite alungite se formează anotimpuri, doar că aici ele se datorează tocmai excentricității mari a orbitei. Se remarcă exoplaneta HD 20782 b a cărei excentricitate este de 0,97! Ea orbitează în jurul unei stele HD 20782, o stea de tipul Soarelui, care face parte dintr-un sistem binar. HD 20782 împreună cu HD 20781 formează o stea dublă, și fiecare dintre aceste 2 stele are propriul său sistem planetar.

S-au descoperit și planete extrasolare cu orbite extrem de înclinate, cum este și exoplaneta XO-3 b, a cărei orbită are o înclinație de $84,2^{\circ}$. Au fost găsite exoplanete cu o înclinație a orbitei chiar mai mare de 90° , planete care orbitează în jurul stelei în direcție opusă direcției în care se rotește steaua în jurul axei proprii. Prima exoplanetă descoperită pe o asemenea orbită retrogradă este exoplaneta WASP-17b. Asemenea orbite cu înclinații mari se crede că sunt rezultatul migrației planetare.

În septembrie 2011 a fost descoperită și prima planetă circumbinară: Kepler-16b, supranumită și Tatooine. Planetele circumbinare sunt planete care orbitează în jurul a două stele. Exoplaneta Kepler-16b orbitează în jurul unei stele duble alcătuită din 2 stele mai mici și mai reci decât Soarele, una de clasă spectrală K și cealaltă de clasă spectrală M. Kepler-16b este aproape la fel de mare ca și Saturn doar că are densitatea mai mare decât acesta, această exoplanetă fiind jumătate rocă, jumătate gheață. Pe Kepler-16b se văd zilnic 2 răsărituri și 2 apusuri de sori, iar pe această exoplanetă fiecare obiect ar avea 2 umbre.

În luna august a anului 2012 a fost anunțată descoperirea primului sistem planetar circumbinar: în jurul stelei duble Kepler-47 s-a descoperit că orbitează 2 exoplanete, Kepler-47b și Kepler-47c, a doua exoplanetă orbitând în zona habitabilă a acestei stele duble. În octombrie 2012 s-a găsit o planetă circumbinară într-o stea cvadruplă. Steaua cvadruplă Kepler-64 constă dintr-o pereche de stele duble ce se orbitează reciproc, exoplaneta Kepler-64b orbitând în jurul uneia din cele 2 stele duble. Exoplaneta Kepler-64b se află la o distanță de doar 0,63 UA de steaua dublă în jurul căreia orbitează și la o depărtare de 1 000 UA de cealaltă stea dublă din acest sistem cvadruplu.

Deși nu au trecut decât 2 decenii de când sunt descoperite și studiate planetele extrasolare, diversitatea exoplanetelor descoperite este impresionantă, ele uimind prin varietatea proprietăților lor fizice și chimice, precum și a parametrilor lor orbitali. Cercetările recente sugerează că stelele cu planete în jurul lor reprezintă un lucru comun în Univers, crescând speranțele pentru cei ce caută viață extraterestră.

METHODS FOR DETECTION OF EXOPLANETS

Exoplanets are fascinating because they may solve mysteries about our own Solar System. This paper describes the main detection techniques that can be used to find extrasolar planets and gives some interesting examples of exoplanets discovered so far.

Bibliografie

1. <http://kepler.nasa.gov/>
2. www.spacetelescope.org/
3. <http://hubblesite.org/>
4. www.spitzer.caltech.edu/
5. <http://smc.cnes.fr/COROT/>
6. www.eso.org/
7. <http://keckobservatory.org/>
8. <http://subarutelescope.org/>
9. <http://exoplanet.eu/>
10. <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
11. <http://nexsci.caltech.edu/>
12. <http://exep.jpl.nasa.gov/>
13. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/>
14. www.seti.org/