

DIVERSITATEA SISTEMELOR PLANETARE

Maria VELEA*, Salomeea VELEA**

Keywords: star, exoplanet, planetary system, orbit, inclination.

Înainte de descoperirea primelor exoplanete, majoritatea astronomilor se așteptau ca celelalte sisteme planetare existente în Univers să semene în mare măsură cu al nostru, adică planetele sistemului să aibă orbite cvasicirculare situate aproximativ în același plan, planetele mai mici orbitând mai aproape de stea iar cele mari mai departe de aceasta. Deși sisteme planetare de acest tip s-au găsit în număr mare, totuși, multe dintre sistemele planetare descoperite până în prezent sunt foarte diferite de al nostru. Și, în plus, au fost descoperite clase de planete care nu există în

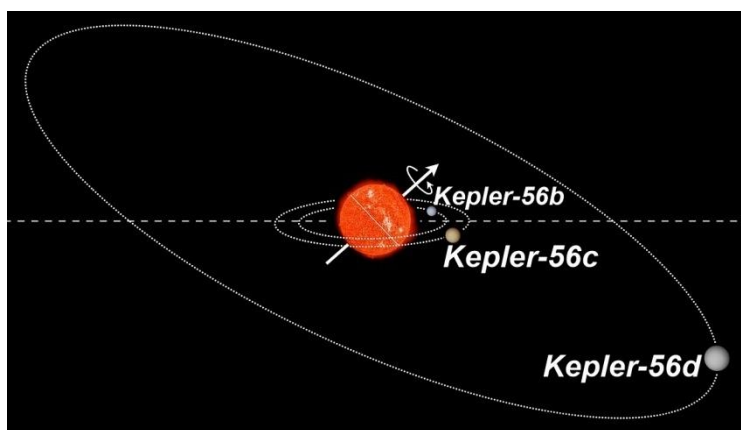
Sistemul Solar: exoplanete care au masele situate între masa Pământului și masa lui Neptun (super-Terre sau mini-Neptun), ori exoplanete care au masa de câteva ori mai mare decât masa lui Jupiter.



Comparație între Sistemul Solar și sistemul planetar Kepler-90

Au fost descoperite sisteme multiplanetare mult mai compacte decât

Sistemul Solar. Un exemplu ar fi sistemul planetar **Kepler-90**, acesta având tot 8 planete ca și Sistemul Solar, doar că diametrul acestui sistem planetar este doar cu puțin mai mare decât diametrul orbitei Pământului! Steaua Kepler-90 este doar cu puțin mai mare și mai strălucitoare decât Soarele, exoplanetele ce o orbitează având aceeași dispunere ca și planetele Sistemului Solar, adică planetele mai mici orbitează mai aproape de stea, iar cele mai mari mai departe: primele 6 exoplanete ce orbitează în jurul ei sunt din categoria super-Terre, ultimele 2 exoplanete fiind gigante gazoase. Dacă exoplaneta de la marginea acestui sistem planetar, Kepler-90h, are o perioadă orbitală de 331 zile terestre, exoplaneta cea mai apropiată de stea, Kepler-90b, are o perioadă orbitală de doar 7 zile terestre! La cealaltă extremă se află sisteme planetare precum **GU Piscium**: în jurul stelei pitice roșii GU Piscium orbitează o exoplanetă gigantă gazoasă (GU Piscium b) pe o orbită cu semiaxa mare de 2 000 UA, cu o perioadă orbitală de circa 160 000 ani!



Sistemul planetar Kepler-56

Întrucât planetele unui sistem planetar se formează din discul de

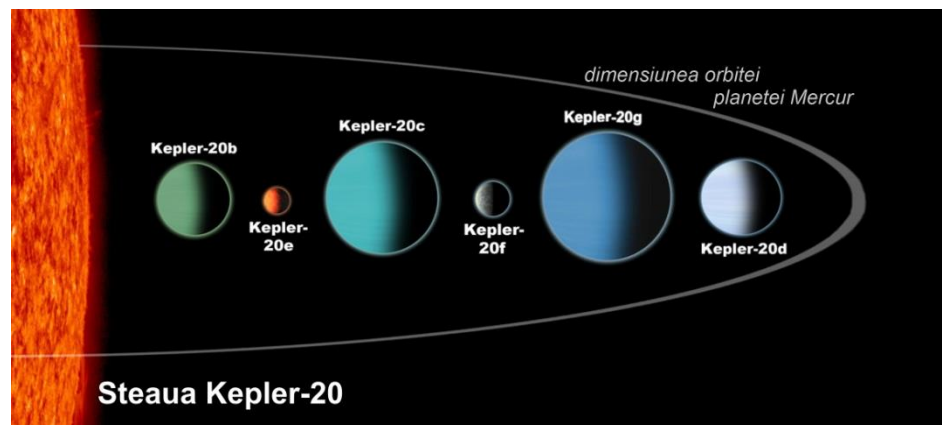
gaze și praf rămas în planul ecuatorial al stelei în momentul formării acesteia, ne-am aștepta ca aceste planete să orbiteze aproximativ în planul ecuatorial al stelei-mamă, cum se întâmplă, de altfel, cu planetele din Sistemul Solar. S-au descoperit, însă, numeroase exoplanete ale căror orbite

* Muzeograf, Observatorul Astronomic „Victor Anestin” Bacău.

** Profesor de matematică, Liceul de Arte Oradea.

sunt înclinate față de planul ecuatorial al stelei-mamă. Primul sistem multiplanetar de acest fel descoperit este sistemul planetar **Kepler-56**. Acest sistem planetar este alcătuit dintr-o stea gigantă roșie în jurul căreia orbitează 3 exoplanete gigante, primele 2 exoplanete ale acestui sistem având orbitele înclinate la circa 45° față de planul ecuatorial al stelei-mamă! Dacă primele 2 exoplanete (Kepler-56 b și Kepler-56 c) orbitează foarte aproape de steaua-mamă (semiaxa mare: 0,103 UA, respectiv 0,165 UA), cea de-a treia exoplanetă (Kepler-56 d) (cea mai mare dintre ele) are orbita mai îndepărtată (semiaxa mare: 2,16 UA) și mai excentrică, dar și mai puțin înclinată față de planul ecuatorial al stelei. Astronomii cred că înclinarea mare a orbitelor primelor 2 exoplanete a fost produsă de cea de-a treia exoplanetă din sistem prin mecanismul Kozai. Într-un sistem planetar în care există o exoplanetă care orbitează aproape de steaua-mamă și mai există și a doua exoplanetă mai masivă ce orbitează pe o orbită mult mai largă și înclinată față de orbita primei exoplanete, exoplaneta mai masivă și mai îndepărtată va produce niște oscilații ale înclinației și excentricității orbitei planetei interioare, oscilații care se produc la o scară de timp mult mai mare decât perioadele orbitale ale celor 2 exoplanete, acest efect dinamic fiind numit mecanismul Kozai, acest mecanism producându-se dacă înclinația dintre orbitele inițiale ale celor 2 exoplanete depășea valoarea critică de 39° . Prin intermediul acestui mecanism, exoplaneta mai îndepărtată („perturbatoare”) poate modifica orbita exoplanetei mai apropiate de stea într-atât încât să o transforme dintr-o orbită cvasi-circulară într-o orbită cu excentricitate mare, ori dintr-o orbită cu înclinație mică față de planul ecuatorial al stelei-mamă într-o orbită cu înclinație mare sau chiar într-o orbită retrogradă! În cazul sistemului planetar Kepler-56, exoplaneta Kepler-56 d (mai masivă și mai îndepărtată) este corpul perturbator, iar planetele extrasolare Kepler-56 b și Kepler-56 c (mai mici și mult mai apropiate de stea) sunt corpurile perturbate.

Întrucât discul protoplanetar din care se formează planetele în jurul unei stele se rotește în același sens în care se rotește steaua în jurul axei sale, ne-am aștepta ca toate exoplanetele existente în Univers să orbiteze în jurul stelei-mamă în același sens în care aceasta se rotește în jurul axei proprii, cum este, de altfel, și cazul planetelor din Sistemul Solar. Și, totuși, astronomii au avut surpriza să descopere exoplanete care orbitează în jurul stelei-mamă în sens invers (retrograd) decât sensul în care se rotește steaua în jurul axei sale. Prima exoplanetă de acest tip descoperită este exoplaneta **WASP-17b**. WASP-17b este o exoplanetă din categoria „Jupiter fierbinte” ce are și o densitate extrem de mică, ea orbitând în jurul unei stele puțin mai mare decât Soarele. Orbita retrogradă a acestei exoplanete poate fi datorată unei întâlniri strânse cu un alt corp ceresc (o altă planetă sau o stea), influența gravitațională puternică a acestuia schimbând într-atât înclinația exoplanetei încât să o aducă pe o orbită retrogradă. O altă cauză a orbitei retrograde a exoplanetei WASP-17b ar fi existența încă a unei exoplanete în jurul stelei WASP-17, care ar avea o orbită mult mai largă și care ar fi modificat în timp înclinația orbitei exoplanetei WASP-17b prin mecanismul Kozai până când orbita acesteia a devenit retrogradă.

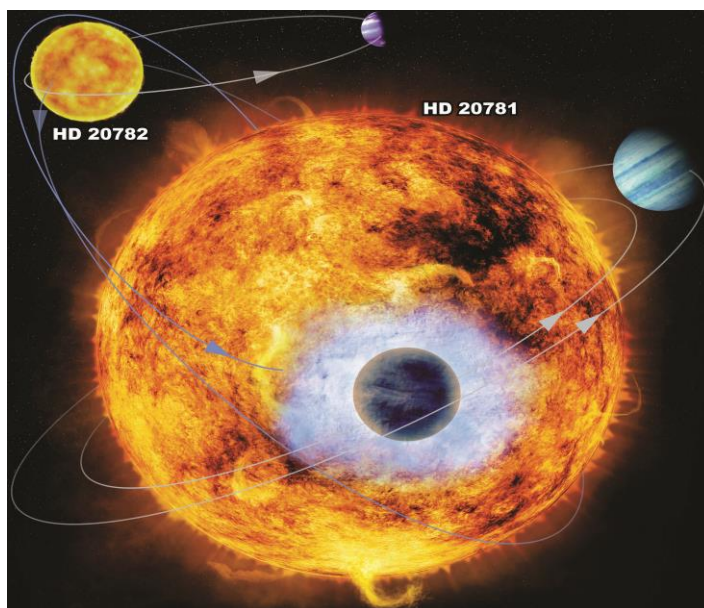


Sistemul planetar Kepler-20

Multe dintre sistemele planetare descoperite au o dispunere diferită a diverselor categorii de planete față de cea a Sistemului Solar, în care planetele terestre sunt mai apropiate de stea, iar cele gigante sunt mai îndepărtate. Un exemplu ar fi sistemul planetar **Kepler-20**, în care în jurul unei stele doar puțin mai mică și mai rece decât Soarele orbitează 6 exoplanete: 2 exoplanete de tip terestru și 4 exoplanete gigante. În acest sistem planetar, exoplanetele mici și cele mari sunt așezate

alternativ: mare, mică, mare, mică, mare, mare. Și, în plus, sistemul planetar Kepler-20 este și foarte compact, diametrul lui fiind puțin mai mic decât cel al orbitei planetei Mercur. Multe dintre sistemele planetare descoperite conțin doar o singură categorie de planete (terestre, super-Terre sau gigante), un exemplu fiind sistemul planetar TRAPPIST 1, care conține 7 exoplanete terestre!

Nu toate sistemele planetare descoperite până în prezent au în centrul sistemului o singură stea. Au fost descoperite exoplanete ce orbitează în interiorul unor sisteme stelare multiple: duble, triple sau chiar cvadruple. Unele sisteme planetare descoperite conțin una sau mai multe exoplanete ce orbitează în jurul uneia dintre stelele unui sistem stelar binar. Un exemplu ar fi sistemul planetar **55 Cancri**: steaua portocalie 55 Cancri A și steaua pitică roșie 55 Cancri B orbitează în jurul centrului de masă comun (baricentru), în jurul primei stele orbitând 5 exoplanete (o exoplanetă de tipul super-Terră și 4 exoplanete gigante). Un alt exemplu ar fi sistemul stelar binar alcătuit din 2 stele de tipul Soarelui, **HD 20781** și **HD 20782**, fiecare dintre cele 2 stele având propriul său sistem planetar!



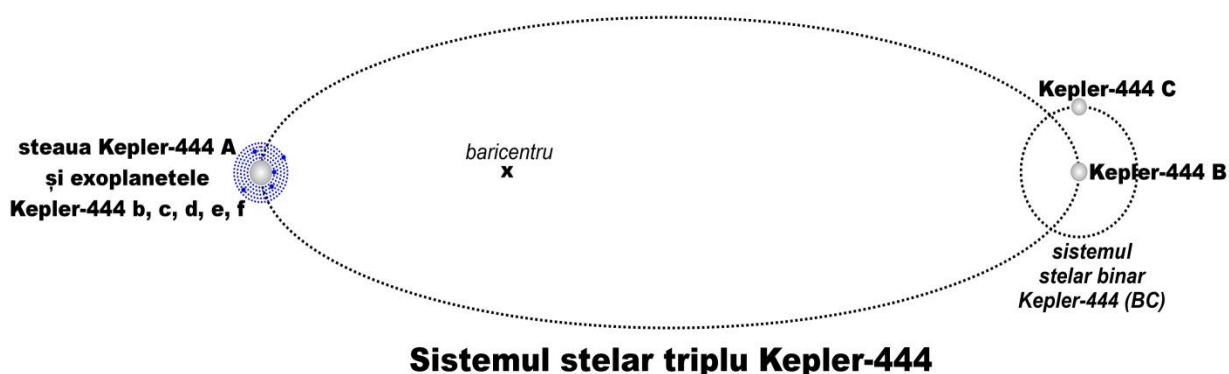
Sistemul stelar binar HD 20781/20782

În jurul stelei HD 20781 orbitează 2 exoplanete, iar în jurul stelei HD 20782 orbitează o exoplanetă. Alte sisteme planetare conțin exoplanete ce orbitează în jurul unor sisteme stelare binare, acestea fiind numite sisteme planetare circumbinare. Un exemplu de sistem planetar circumbinar este sistemul planetar **Kepler-16**: steaua portocalie Kepler-16 A și steaua pitică roșie Kepler-16 B orbitează în jurul centrului de masă comun, în jurul celor 2 stele orbitând exoplaneta gigantă gazoasă Kepler-16 (AB) b, aceasta fiind și prima exoplanetă circumbinară descoperită.

Până în prezent a fost descoperit un singur sistem multiplanetar circumbinar, și anume sistemul planetar **Kepler-47**: 3 exoplanete orbitează în jurul sistemului stelar binar Kepler-47 (AB), sistem alcătuit dintr-o stea de clasă spectrală G (de tipul Soarelui) (Kepler-47 A) și o stea pitică roșie (Kepler-47 B). Deși orbitează în jurul a 2 stele, sistemul planetar Kepler-47 este un sistem compact, diametrul acestuia fiind mai mic decât cel al orbitei Pământului, și, în plus, orbitele celor 3 exoplanete sunt în mod remarcabil co-planare (sunt diferențe mai mici de 2 grade între planurile orbitelor lor). Toate cele 3 planete ale sistemului au densități foarte mici, chiar mai mici decât densitatea lui Saturn, planeta cu cea mai mică densitate dintre planetele Sistemului Solar. Densități atât de mici sunt caracteristice exoplanetelor de tip „Jupiter fierbinte”, ele se întâlnesc foarte rar în cazul exoplanetelor cu temperaturi relativ moderate, precum cele 3 exoplanete din sistemul Kepler-47. Înaintea descoperirii sistemului planetar Kepler-47, se credea că sistemele multiplanetare circumbinare nu pot exista întrucât perturbațiile gravitaționale ale celor 2 stele asupra exoplanetelor circumbinare ar face ca orbitele acestora să fie instabile, astfel că în timp aceste exoplanete fie s-ar ciocni între ele, fie ar fi deviate în interiorul sistemului și ar cădea pe una dintre stele, ori ar fi deviate spre exterior și ar fi expulzate din sistemul planetar. Descoperirea sistemului planetar Kepler-47 a dovedit contrariul, mai ales că vârsta acestui sistem planetar este estimată că ar fi de 3,5 miliarde de ani. Pe de altă parte, existența sistemului multiplanetar circumbinar Kepler-47 sugerează că interacțiunile gravitaționale din interiorul unor asemenea sisteme limitează dimensiunile exoplanetelor circumbinare. Atunci când planetele se formează din discul protoplanetar de gaze și praf, interacțiunea lor cu gazul și praful din discul protoplanetar le face să migreze spre interior, viteza de migrație fiind proporțională cu masa planetei. Planetele de masă mică sunt mai puțin afectate de această migrație, în schimb, forțele de atracție gravitațională

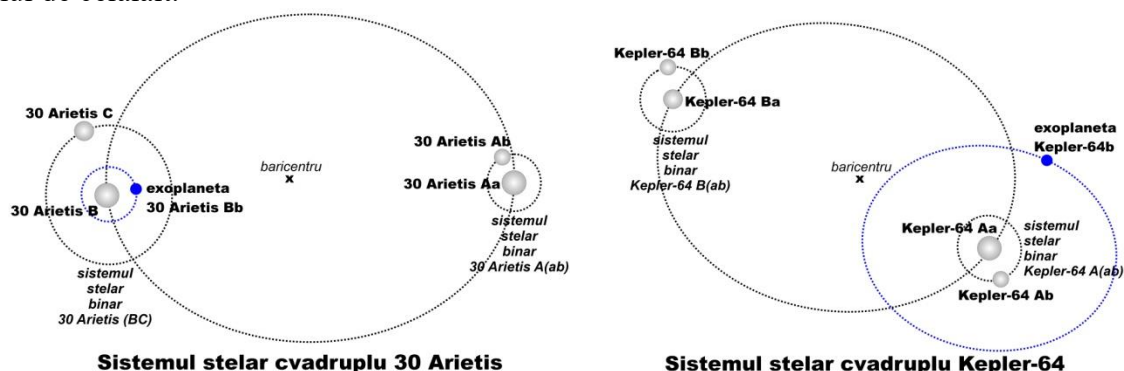
concurrente din partea celor 2 stele duc, în final, la expulzarea acestor planete de masă mică din sistemul multiplanetar circumbinar. Planetele de masă mare, pe de altă parte, au o viteză mai mare de migrație spre interior, astfel că ele, în final, ajung să se prăbușească pe una din cele 2 stele. Rămân, astfel, pe orbită, în jurul sistemului stelar binar, doar planetele de masă intermediară: acestea nu au o viteză de migrație către interior atât de mare precum cea a planetelor gigante, iar, pe de altă parte, ele sunt mai stabile decât planetele de masă mică vizavi de forțele de atracție gravitațională concurrente din partea celor 2 stele.

Câteva dintre planetele extrasolare descoperite până în prezent orbitează în interiorul unor sisteme stelare triple, cum ar fi, de exemplu, exoplaneta **16 Cygni Bb**. În sistemul stelar triplu 16 Cygni, steaua galbenă 16 Cygni A și steaua pitică roșie 16 Cygni C formează un sistem stelar binar strâns, iar acesta împreună cu steaua galbenă 16 Cygni B orbitează în jurul centrului de masă comun pe o orbită mult mai largă și înclinată. În jurul stelei 16 Cygni B a fost descoperită o exoplanetă gigantă (16 Cygni Bb), orbita acesteia având o excentricitate foarte mare. Excentricitatea mare a orbitei exoplanetei 16 Cygni Bb se datorează, probabil, mecanismului Kozai: dacă exoplaneta 16 Cygni Bb s-a format pe o orbită cvasi-circulară într-un plan a cărui înclinație față de planul orbitei stelei 16 Cygni A depășea valoarea critică de 39° , atunci mecanismul Kozai a intrat în funcțiune, steaua 16 Cygni A fiind „corpul perturbator” iar exoplaneta 16 Cygni Bb fiind „corpul perturbat”, astfel că excentricitatea orbitei exoplanetei 16 Cygni Bb a oscilat în timp între valori mici și valori foarte mari. Un exemplu de sistem stelar triplu ce include un sistem multiplanetar este **Gliese 667**: stelele portocalii Gliese 667 A și Gliese 667 B formează un sistem stelar binar, care împreună cu steaua pitică roșie Gliese 667 C orbitează în jurul centrului de masă comun. În jurul stelei Gliese 667 C au fost descoperite 2 exoplanete (Gliese 667 Cb și Gliese 667 Cc), ambele de tipul super-Terre, una dintre ele (Gliese 667 Cc) orbitând în zona habitabilă a stelei. Un alt sistem multiplanetar ce aparține unui sistem stelar triplu este sistemul **Kepler-444**. 5 exoplanete de tip terestru orbitează steaua principală a acestui sistem stelar triplu, și anume steaua portocalie Kepler-444 A, ele formând un sistem planetar extrem de compact, toate cele 5 exoplanete ale sistemului având perioadele orbitale mai mici de 10 zile terestre! Kepler-444 A este o stea bătrână, ea având o vârstă de 11,2 miliarde de ani, cele 5 exoplanete ce orbitează în jurului ei formând unul dintre cele mai bătrâne sisteme planetare descoperite până în prezent. Steaua Kepler-444 A împreună cu un sistem stelar binar alcătuit din 2 stele pitice roșii (Kepler-444 (BC)) orbitează în jurul centrului comun de masă, formând un sistem stelar triplu.



Prima exoplanetă descoperită într-un sistem stelar cvadruplu este **30 Arietis Bb**, aceasta orbitând în jurul uneia dintre cele 4 stele ale sistemului 30 Arietis. Sistemul stelar cvadruplu 30 Arietis constă din 2 sisteme stelare binare (30 Arietis A(ab) și 30 Arietis (BC)) ce orbitează în jurul centrului de masă comun, componentele principale ale celor două sisteme stelare binare (30 Arietis Aa și 30 Arietis B) fiind 2 stele alb-gălbui. În jurul stelei 30 Arietis B orbitează exoplaneta gigantă 30 Arietis Bb pe o orbită cu semi-axa mare de 0,99 UA, cu o perioadă orbitală de circa 335 zile terestre. O altă exoplanetă descoperită într-un sistem stelar cvadruplu este **Kepler-64b**, aceasta fiind prima planetă circumbinară descoperită într-un sistem stelar cvadruplu. Exoplaneta gigantă Kepler-64b orbitează în jurul sistemului stelar binar Kepler-64 A(ab), care împreună cu sistemul stelar

binar Kepler-64 B(ab) orbitează în jurul centrului de masă comun, formând, astfel, sistemul stelar cvadruplu Kepler-64. Stelele principale ale celor 2 sisteme stelare binare sunt Kepler-64 Aa, o stea alb-gălbuie, și Kepler-64 Ba, o stea galbenă, fiecare având drept companion câte o stea pitică roșie, cele 2 sisteme stelare binare orbitând în jurul centrului de masă comun de la o distanță de circa 1000 UA unul de celălalt.



Sisteme planetare au fost descoperite nu doar în sisteme stelare multiple, ci chiar și în roiuri stelare. Un exemplu de roi stelar deschis în care s-au descoperit sisteme planetare este roiul Praesepe. În acest roi stelar deschis, ce conține circa 1000 de stele, au fost descoperite 2 sisteme planetare, fiecare conținând câte o exoplanetă gigantă de tipul „Jupiter fierbinte”: exoplaneta **Pr0201b** orbitează în jurul unei stele de clasă spectrală F, iar exoplaneta **Pr0211b** orbitează în jurul unei stele de clasă spectrală G. În roiul stelar globular Messier 4 a fost descoperit un sistem planetar: exoplaneta **PSR B1620-26 b** orbitează în jurul unui sistem stelar binar alcătuit dintr-un plugar (PSR B1620-26 A) și o stea pitică albă (PSR B1620 B), aceasta fiind și una dintre cele mai bătrâne exoplanete descoperite până în prezent (12,7 miliarde de ani).

Studiul exoplanetelor este unul dintre domeniile astronomiei ce au o dezvoltare foarte rapidă, numărul mare de exoplanete descoperite în ultimii ani și diversitatea sistemelor planetare pe care acestea le formează sugerând faptul că stelele cu planete ce orbitează în jurul lor reprezintă un lucru comun în Univers, sistemele planetare formându-se și în aglomerări mai mari de stele și supraviețuind dinamicii complicate ale acestora. Înțelegerea modului în care sistemele planetare se formează și evoluează ne ajută să înțelegem modul în care s-a format Sistemul Solar și stadiul de evoluție în care se află acesta.

THE DIVERSITY OF PLANETARY SYSTEMS

This paper presents the wide variety of planetary systems discovered in our galaxy. These planetary systems display a wide range of architectures, with different shapes, spacings, and orientations of planetary orbits. A cornucopia of different types of planets were discovered in these planetary systems. Besides gas giants and terrestrial planets, these planetary systems contain new classes of planets, like super-Earth, mini-Neptune, or super-Jupiter, types of planets that do not exist in the Solar System. Although most of the exoplanets found so far revolve around a single star, astronomers discovered also exoplanets orbiting binary star systems, or even multiple-star systems that contain exoplanets. Understanding how planets and planetary systems form is critical to understanding the stages of planetary development and the uniqueness of our Solar System.

Bibliografie

1. <http://exoplanet.eu/>
2. https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/
3. <https://corot.cnes.fr/fr/>
4. <https://tess.mit.edu/>
5. <http://nexsci.caltech.edu/>
6. <http://exep.jpl.nasa.gov/>