

EVOLUȚIA DINAMICĂ ȘI REZONANȚELE SPIN-ORBITĂ ALE EXOPLANETELOR LOCUIBILE: CAZUL PLANETEI GJ581d

Ciprian BERGHEA*

Key Words: Astrophysical, system of exoplanets, orbital motion, spin-orbit, GJ 581d.

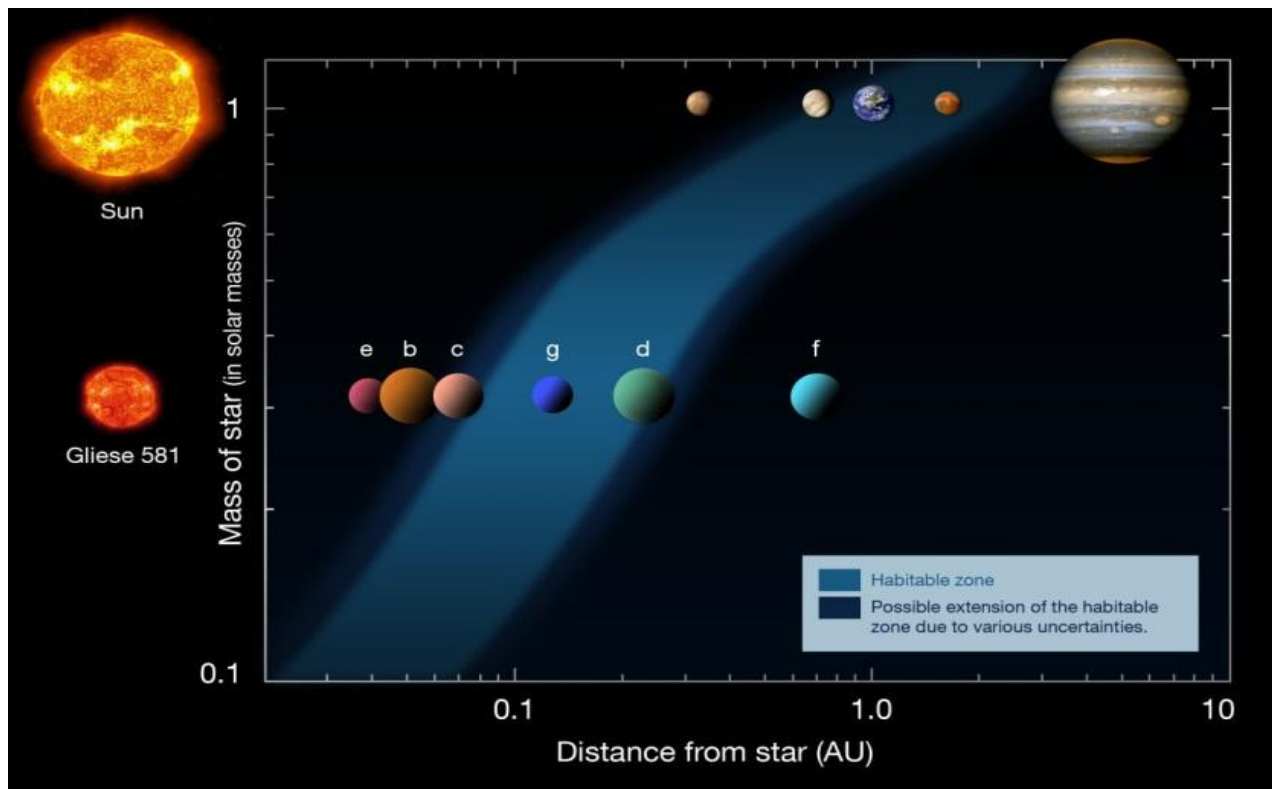


Figura 1. Sistemul exoplanetar GJ 581 cu 6 planete în comparație cu sistemul nostru solar (în partea de sus); două dintre cele 6 planete ele se află în zona locuibilă (zona albastră), inclusiv planeta d despre care e vorba în articolul de față.

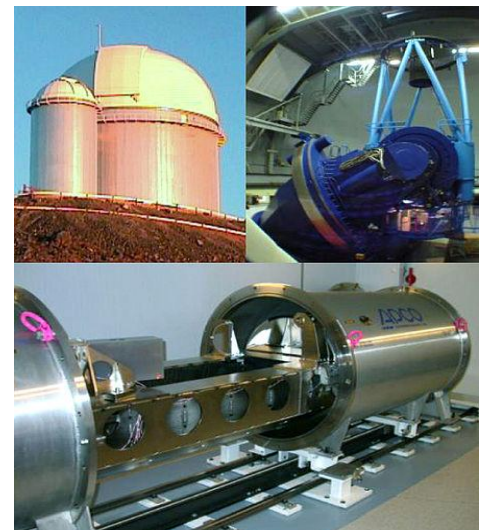
Introducere

GJ 581 este unul dintre cele mai interesante dintre sistemele exoplanetare descoperite în ultimii ani. În special fiindcă una dintre planetele care formează acest sistem, GJ581d, e posibil să aibă condiții propice apariției vieții (așa-numita zonă locuibilă). Dintre aceste condiții, radiația primită de la steaua centrală este crucială. Compoziția chimică a planetei influențează temperatura medie și variațiile de temperatură. De exemplu, după unele estimări, e nevoie de o cantitate minimă de CO₂ în atmosfera planetei ca apa să se mențină în stare lichidă la suprafața planetei.

Câte planete se pot detecta în sistemul GJ 581? Numeroase echipe de cercetători au studiat acest sistem folosind tehnica de viteză radială, ajungând la concluzii diferite. Unele pretind că datele indică 6 planete componente (vezi figura nr. 1), pe când altele au găsit numai 4 sau 5 planete¹. Aceste date au fost obținute cu instrumentul HARPS de la observatorul La Silla (imaginea nr. 1).

* Astronom la Observatorul Naval al Statelor Unite - Washington DC

¹ Gregory, P. C., 2011, *Bayesian re-analysis of the Gliese 581 exoplanet system*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415, 2523



Imaginea nr. 1 Telescopul european de 3.6 m de la La Silla în Chile și spectrograful HARPS folosit pentru a măsura viteza radială a exoplanetelor

Și noi am folosit aceleași date, ce se întind pe o perioadă de 1570 de zile și au o precizie de măsurare medie de aproximativ 1 m/s. Pentru detecția planetelor și calculul orbitelor am folosit un program scris de unul dintre noi (Valeri Makarov), cu un algoritm de optimizare iterativ, bazat pe o căutare simplă de grilă în spațiul parametrilor variabili. În primul rând variațiile sinusoidale cele mai semnificative sunt determinate cu ajutorul unei metode numită “periodograma Lomb-Scargle”. Contrar unora dintre rezultatele obținute de alți cercetători, noi nu am detectat decât 4 planete.

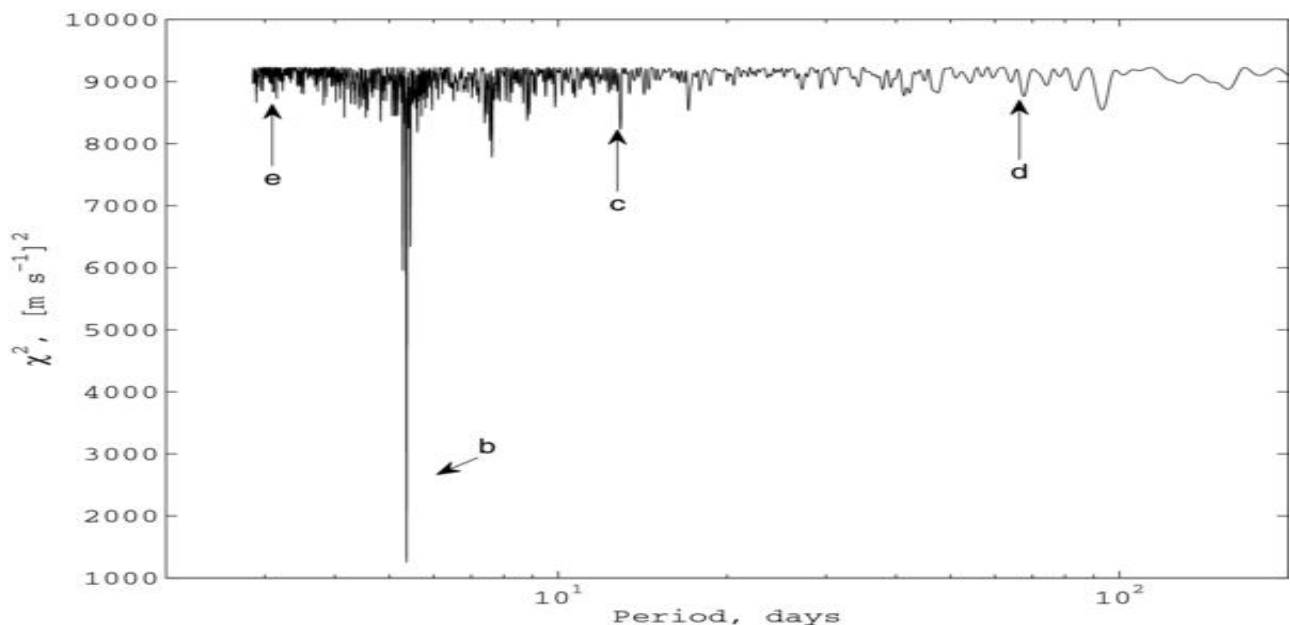


Figura nr. 2 În această periodogramă Lomb-Scargle, cele patru semnale indicate de săgeți arată perioadele orbitale pentru planetele detectate. Se observă și câteva faze reziduale, care trebuie identificate pentru a nu fi confundate cu semnale autentice.

După acest pas preliminar, urmează determinarea parametrilor orbitali. Rezultatele pentru cele 4 planete sunt în tabelul următor:

Planet	P (days)	Mass (M_{\odot})	a (AU)	e	ω ($^{\circ}$)	\mathcal{M}_0 ($^{\circ}$)
... b	5.37	4.8×10^{-5}	0.041	0.01	288.2	52
... c	12.91	1.8×10^{-5}	0.073	0.09	349.7	160
... d	66.98	1.8×10^{-5}	0.218	0.27	180.9	92
... e	3.15	5.5×10^{-6}	0.028	0.13	327.2	356

Observăm că planetele c și e sunt aproape de rezonanța 4:1, iar valorile apropiate ale argumentului periheliului (ω) dau mai multă greutate acestei concluzii. Rezultatele obținute de cercetătorii care au detectat 6 planete în loc de 4 se pot explica prin metodele diferite de a prelucra datele și prin asumțiile făcute de aceștia. De exemplu, unii fixează excentricitatea la zero, argumentând că sistemele cu excentricitate mare nu sunt stabile. Cititorii care se întreabă cum de este posibil ca diferiți cercetători să obțină rezultate atât de diferite, trebuie să înțeleagă că aceste semnale sunt foarte slabe, cu atât mai mult cu cât se detectează mai multe planete. În plus, spațiul parametrilor de căutare e foarte mare, de regulă 6 parametri pentru fiecare planetă, și unii dintre parametri pot fi corelați între ei.

Haos și stabilitate. De regulă, după fiecare soluție obținută pentru un sistem planetar, aceasta trebuie verificată prin simulări. După cum tocmai am explicat, calculul acestor sisteme e foarte complicat și poate releva rezultate diferite, dintre care unele pot fi instabile. Verificarea stabilității oferă o mai mare credibilitate soluției și poate elimina greșeli în procesul de detecție. Folosind valorile din tabelul de mai jos, am simulat sistemul GJ 581 cu patru planete cu ajutorul programului HNBODY. Am ales un pas de 0.018 zile și am integrat acest sistem pe o perioadă de 100 milioane de ani. Rezultatele arată că într-adevăr sistemul e stabil. Figura 3 arată variațiile parametrilor pentru planeta d . Excentricitatea acestei planete oscilează periodic, dar variația este mică.

Parameter	Value
ξ	... $\frac{2}{5}$
R	... $1.7 R_{\text{Earth}}$
M_{planet}	... $7.1 M_{\text{Earth}}$
M_{star}	... $0.31 M_{\odot}$
a	... 0.218 AU
e	... 0.27
$(B - A)/C$... 5×10^{-5}
P_{orb}	... 67 days
τ_M	... 50 yr
μ	... $0.8 \times 10^{11} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$
α	... 0.2

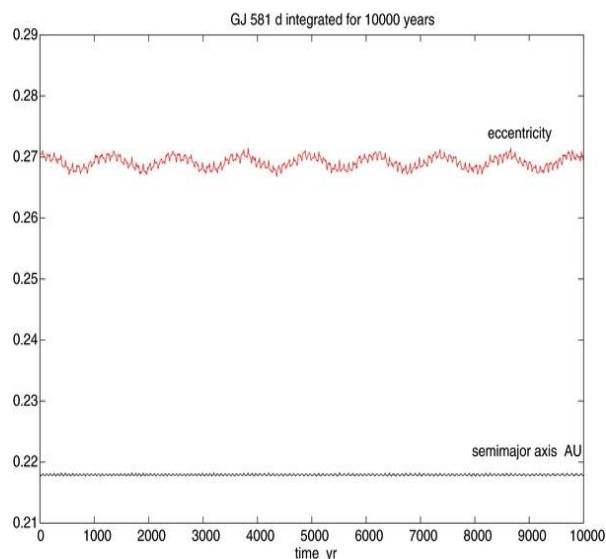


Figura nr. 3 Evoluția planetei d în primii 10000 de ani în simulația cu programul HNBODY. Toți parametrii variază foarte puțin. Aici arătăm numai excentricitatea și semi-axa majoră.

Comportamentul haotic al sistemelor planetare este un factor important în estimarea stabilității lor. Evoluția în viitor a sistemelor planetare depinde de scala de timp în care haosul apare (așa numitul timp Lyapunov). De exemplu, sistemul nostru solar e haotic la nivelul a zeci de milioane de ani, deci e inutil să-i calculăm stabilitatea până când soarele se transformă într-o gigantă roșie (5 miliarde de ani).

Pentru a estima existența haosului în GJ 581, am folosit așa numita tehnică de simulare cu 'siblings' (frați). Un 'sibling' este o traiectorie simulată care se obține printr-o foarte mică perturbare a condițiilor inițiale ale sistemului planetar. În cazul nostru, am modificat semi-axa majoră inițială a planetei b cu un factor de numai 10^{-14} . Apoi se calculează distanța, în funcție de timp, dintre planete, pentru cei doi 'siblings' (traiectoria originală și cea perturbată). În sistemele haotice, această distanță crește exponențial în timp. În Figura 4 mai jos, această distanță e prezentată pentru planeta d folosind o scală logaritmică. În acest caz, haosul e identificat prin linia dreaptă aproape verticală ce apare după aproximativ 4000 de ani de la începutul simulării. Pentru timpul Lyapunov al planetei b am obținut o valoare de numai 38 de ani.

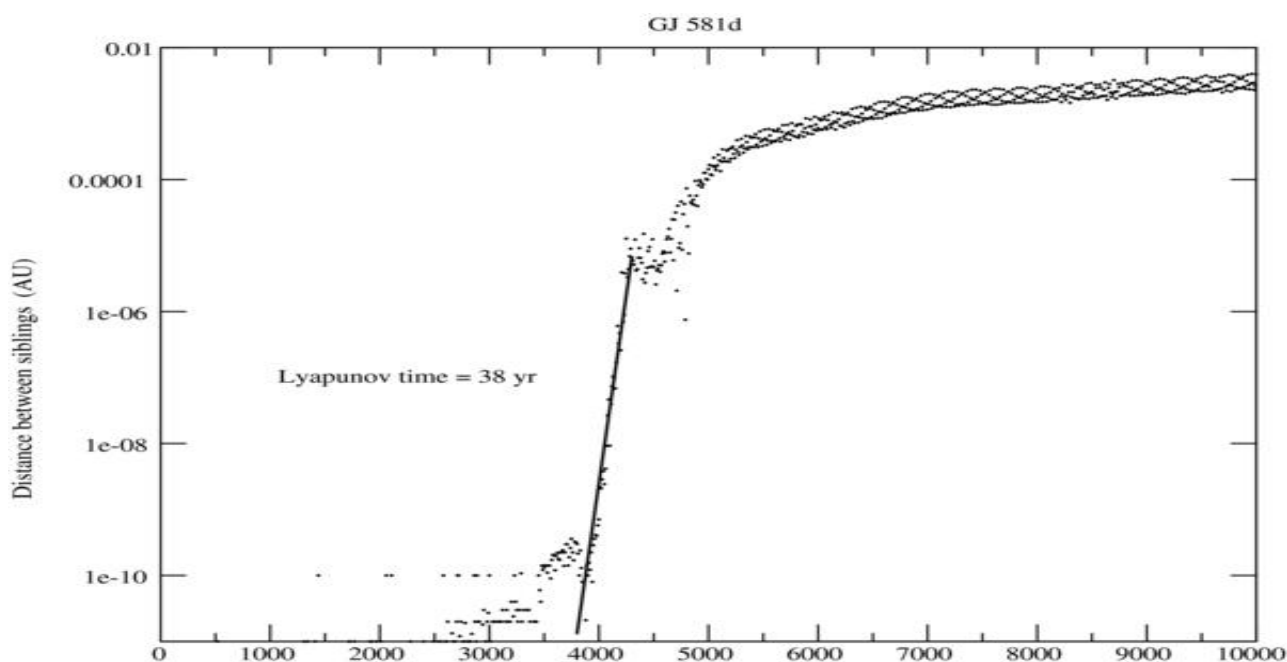


Figura nr. 4 Distanța între traiectoriile 'siblings' pentru planeta d. Distanța crește exponențial după aproximativ 4000 de ani, confirmând existența haosului în acest sistem.

Evoluția rotației planetei GJ 581d și probabilitatea de capturare în rezonanță

După cum am mai amintit, condițiile propice vieții depind de mulți parametri, nu doar de orbita planetelor. Un factor important este rotația planetei și, în mod particular, relația perioadei de rotație față de perioada de revoluție. În general, în sistemele planetare relativ tinere, rotația planetei e mult mai rapidă decât revoluția pe orbită (în cazul Pământului, în prezent, de aproximativ 365 de ori, dar se știe că această diferență a fost și mai mare în trecut). Mișcarea de rotație e încetinită de forțele de cuplu și de maree și, în anumite condiții, planeta poate ajunge într-o stare de rezonanță, când rotația nu mai încetinește. Cel mai bun exemplu e Mercur, care este într-o rezonanță spin-orbitală 3:2 (un an mercurian are numai o zi mercuriană și jumătate!). Un exemplu și mai familiar este Luna, care ne arată o singură față, deci e într-o rezonanță 1:1. O planetă aflată într-o asemenea rezonanță n-ar fi foarte propice vieții, fiind foarte fierbinte pe o parte și rece pe cealaltă. Furtunile pe o asemenea planetă ar fi deosebit de violente din cauza acestei diferențe de temperatură. Încetinirea rotației depinde de perioada de revoluție a planetei și de excentricitate. De aceea Mercur a ajuns deja în această stare de rezonanță iar restul planetelor din sistemul nostru solar probabil că nu vor ajunge niciodată.

Este, deci, important să se studieze rotația exoplanetelor și posibilitatea de rezonanță spin-orbită. Doi dintre noi (Michael Efroimsky și Valeri Makarov), au adus în ultimii ani îmbunătățiri remarcabile teoriei forțelor de cuplu ce apar în fenomenul de maree². Ei au aplicat aceste teorii cu succes în explicarea rezonanței pentru planeta Mercur și în cazul Lunii³. Au arătat pentru prima dată că, pornind de la o rotație inițial ridicată, ele traversează rezonanțele de nivel ridicat și, în final, ajung în situația din prezent.

Am aplicat, deci, aceste metode și planetei GJ 581d. Probabilitățile de captură în funcție de excentricitate sunt prezentate în Figura 5. Am calculat probabilitățile pentru patru nivele de rezonanță și două cazuri de vâscozitate a planetei. Această vâscozitate e descrisă de așa-numitul timp Maxwell, care, pentru cazul Pământului, este estimat la 500 de ani (panoul din dreapta). Am considerat și cazul unei planete mai calde, cu un timp Maxwell de 50 de ani.

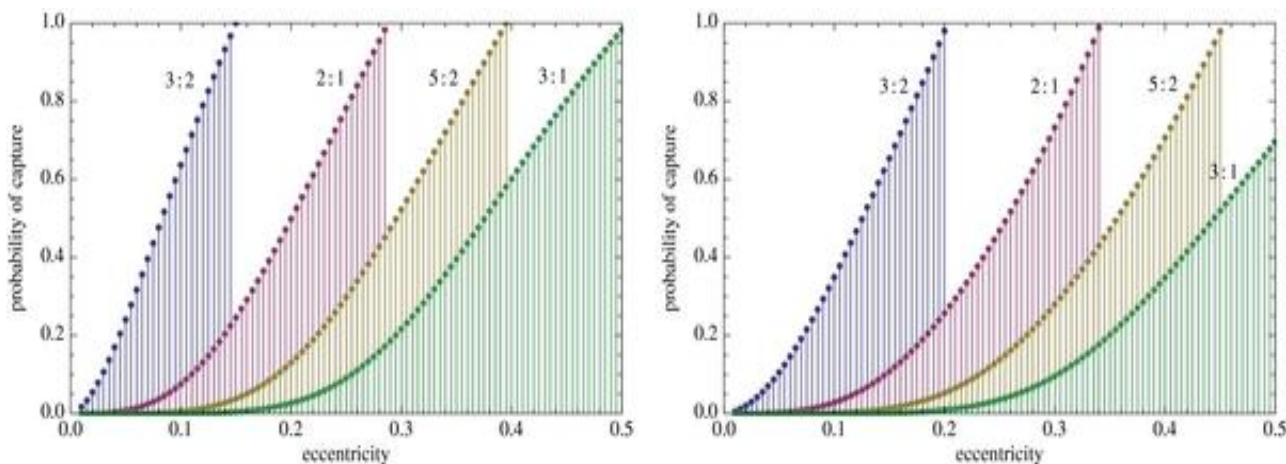


Figura nr. 5 Probabilitatea de captură a planetei GJ 581d pentru 4 valori de rezonanță spin-orbită în funcție de excentricitate. În stânga, vâscozitatea planetei corespunde unui timp Maxwell de 50 de ani, iar în dreapta de 500 de ani, asemănător cu Pământul.

De exemplu, pentru planeta d cu $e = 0.27$ cu timpul Maxwell de 50 de ani (panoul din stânga), obținem următoarele probabilități de captură: 1 pentru rezonanța 1:1, 0.897 pentru 2:1, 0.383 pentru 5:2, 0.133 pentru 3:1 și 0.04 pentru 7:2. Aceste probabilități au fost calculate independent de probabilitățile de captură în alte stări de rezonanță. Dacă planeta a avut timp suficient să aibă rotația încetinită, probabilitățile de captură, progresiv, până în starea cea mai de jos, sunt: 0.05 pentru 3:2, 0.46 în 2:1, 0.32 în 5:2, 0.13 în 3:1 și 0.04 în 7:2. Deci, dacă planeta e, în prezent, într-o stare de rezonanță spin-orbită, probabilitatea cea mai mare o are rezonanța 2:1, când planeta face două rotații pe an. Dacă vâscozitatea e mai mare, de exemplu asemănătoare Pământului, această probabilitate scade, dar rămâne, totuși, cea mai mare pentru rezonanța 2:1. Din păcate, aceste condiții nu ar fi foarte favorabile vieții pe această planetă, fiindcă diferențele de temperatură ar trebui să fie foarte ridicate de la o zonă la alta.

Bibliografie

Gregory, P. C., 2011, *Bayesian re-analysis of the Gliese 581 exoplanet system*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415, 2523.

² Efroimsky, M., 2012, *Bodily tides near spin-orbit resonances*, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 112, 283

³ Makarov, V. V., 2013, *Why is the Moon synchronously rotating?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 434, L21

- Efroimsky, M., 2012, *Bodily tides near spin-orbit resonances*, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 112, 283.
- Makarov, V. V., Berghea, C. T., Efroimsky, M., 2012, *Dynamical Evolution and Spin-Orbit Resonances of Potentially Habitable Exoplanets: The Case of GJ 581d*, *The Astrophysical Journal*, 761, 83.
- Makarov, V. V., 2012, *Conditions of Passage and Entrapment of Terrestrial Planets in Spin-orbit Resonances*, *The Astrophysical Journal*, 752, 73.
- Makarov, V. V., 2013, *Why is the Moon synchronously rotating?*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434, L21.
- Vogt, S. S., Butler, R. P., Rivera, E. J., et al., 2010, *The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: A 3.1 M_J Planet in the Habitable Zone of the Nearby M3V Star Gliese 581*, *The Astrophysical Journal*, 723, 954.

DYNAMIC EVOLUTION AND RESONANCE SPIN-ORBIT HABITABLE EXOPLANETS: PLANET CASE GJ581d

This is the summary of an article which I published in December 2012 in ‘The Astrophysical Journal’ with my collaborators, Valeri Makarov and Michael Efroimsky (1). GJ 581d is a potentially habitable super-Earth in the multiple system of exoplanets orbiting a nearby M dwarf. We investigate this planet's long-term dynamics with an emphasis on its probable final rotation states acquired via tidal interaction with the host. The published radial velocities for the star are re-analyzed with a benchmark planet detection algorithm to confirm that there is no evidence for the recently proposed two additional planets (f and g). Limiting the scope to the four originally detected planets, we assess the dynamical stability of the system and find bounded chaos in the orbital motion. For the planet d, the characteristic Lyapunov time is 38 yr. Long-term numerical integration reveals that the system of four planets is stable, with the eccentricity of the planet d changing quasi-periodically in a tight range around 0.27, and with its semimajor axis varying only a little. The spin-orbit interaction of GJ 581d with its host star is dominated by the tides exerted by the star on the planet. We model this interaction, assuming a terrestrial composition of the mantle. It turns out that, depending on the mantle temperature, the planet gets trapped into the 2:1 or an even higher spin-orbit resonance. It is very improbable that the planet could have reached the 1:1 resonance. This improves the possibility of the planet being suitable for sustained life.