

SOARTA SISTEMULUI SOLAR ÎN JURUL UNUI SOARE MURIBUND: PITICE ALBE ȘI PLANETE ÎNTUNECATE

Ciprian BERGHEA*

Key Words: solar system, giant stars, exoplanets, stellar evolution, celestial mechanics

Folosim sistemul nostru solar ca un caz de studiu pentru a vedea ce se întâmplă cu planetele atunci când stelele își termină combustibilul și mor. Ultimul stadiu al stelelor care au masa apropiată de soarele nostru e foarte violent. Steaua și-a epuizat hidrogenul din nucleu și consumă acum pe cel aflat în straturile exterioare. Steaua se dilată enorm și se răcește în același timp – se transformă într-o gigantă roșie. În procesul de dilatare steaua înghite planetele apropiate. Un alt efect important al dilatării este că steaua pierde o parte importantă din învelisul exterior deoarece atracția gravitațională scade puternic. Această pierdere de masă poate perturba orbitele planetelor care nu sunt înghițite.

În ultimii ani, sute de sisteme solare au fost descoperite în jurul unor sori destul de apropiați¹. Unele dintre acestea au câteva planete care au putut fi detectate, dar studiul sistemelor planetare e încă la început. Ne putem pune următoarele întrebări. Ce se întâmplă cu sistemele planetare când steaua centrală se transformă într-o gigantă roșie și, în final, într-o pitică albă? Ne așteptăm să găsim planete în jurul piticelor albe? Sunt orbitele planetelor perturbate când steaua pierde învelișurile exterioare? Sunt cumva expulzate din această cauză? Există planete „vagaboande” care au fost expulzate și acum călătoresc neștiute prin Galaxie? Ca să încercăm să răspundem la aceste întrebări vom folosi exemplul sistemului nostru solar, fiindcă îl cunoaștem mult mai bine decât altele.

Știm deja că planetele interioare sistemului nostru solar vor fi înghițite când Soarele se transformă într-o gigantă roșie. Acest lucru se poate produce în două feluri: 1. Direct, pentru planetele mai apropiate (Mercur, Venus și probabil Pământul) și 2. Indirect, prin forțele de maree (Marte și posibil Pământul). Nu se știe exact cât de departe se va extinde giganta roșie, deci e posibil ca Pământul să scape în primă fază. Forțele de maree încetinesc planetele care scapă de înghițirea directă și acestea pot, la rândul lor, să fie eventual înghițite. Această a doua posibilitate e probabilă, iarăși, numai pentru planetele mai apropiate de Soare, care scapă de înghițirea directă, deci pentru Marte sau Pământ.

Calculul efectului de maree asupra orbitelor planetelor nu e foarte simplu dar o estimare² arată că Marte e într-adevăr înghițit de soarele-gigantă roșie în aproximativ 100 de milioane de ani după ce începe stadiul de gigantă roșie. Planeta următoare, Jupiter e foarte puțin afectată de forța de maree. În concluzie, toate planetele interioare, inclusiv Pământul, sunt înghițite direct sau indirect de Soarele-gigantă roșie, deci rămâne să vedem ce se întâmplă cu cele patru planete exterioare: Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun. Instinctiv, efectul pierderii de masă asupra orbitelor acestor planete ar fi că ele se extind, fiindcă forța gravitațională scade. Mai precis, semiaxa mare se mărește



Figura nr. 1 Reprezentare artistică a unui sistem solar ce conține o gigantă roșie

* Astronom la Observatorul Naval al Statelor Unite

¹ <http://www.exoplanets.org/>

² Rasio, F. A., Tout, C. A., Lubow, S. H., & Livio, M. 1996, *Tidal decay of planetary orbits*, The Astrophysical Journal, 470, 1187

invers proporțional cu masa Soarelui. Dar acest lucru nu e adevărat decât dacă pierderea de masă se face foarte încet, deci acest proces trebuie studiat în detaliu.

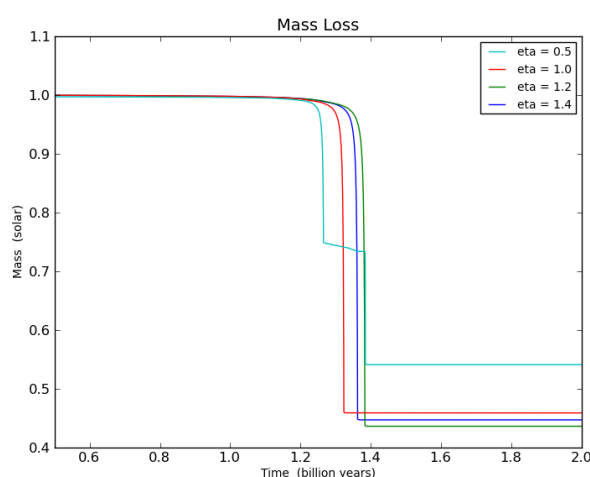


Figura 2. Pierderea de masă a Soarelui în faza de gigantă roșie

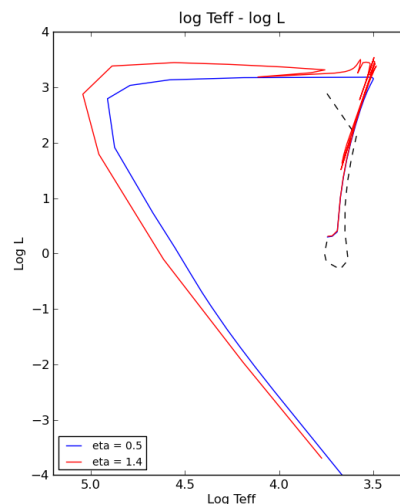


Figura 3. Evoluția Soarelui în spațiul temperatură-luminozitate

Pentru aceasta, mai întâi trebuie să vedem mai în detaliu cum evoluează Soarele în faza finală. Am folosit cel mai nou program de simulare a stelelor numit MESA (Module pentru Experimente de Evoluție Stelară)³. Cu acest program am obținut evoluția unei stele de mărimea Soarelui, de la naștere până la faza de pitică albă. Din păcate, rata de pierdere a masei Soarelui în fază de gigantă roșie nu se cunoaște cu mare precizie și de aceea am considerat mai multe cazuri. Această rată se precizează cu ajutorul unui parametru η , numit „rata Reimers”⁴. Acest factor e proporțional cu rata de pierdere a masei. Am considerat patru cazuri pentru η : 0.5, 1.0, 1.2 și 1.4.

Figura 2 arată cum Soarele va pierde masă în cele patru cazuri, folosind programul MESA. Din toată evoluția Soarelui ne interesează în acest studiu numai partea finală care începe la 6.4 miliarde de ani în viitor (în prezent, Soarele are vârsta de aproximativ 4.8 miliarde de ani). În Figura 2 vedem că Soarele pierde până în faza finală între 0.45 și 0.65 din masa totală. Perioada de timp când aceasta se întâmplă e destul de scurtă, de aproximativ 100 de milioane de ani.

Figura 3 arată evoluția Soarelui în funcție de temperatură și luminozitate (unitatea pentru L este luminozitatea Soarelui din prezent) pentru cazurile extreme de pierdere de masă (0.5 și 1.4). Linia punctată arată evoluția de la naștere până când începe faza de gigantă roșie, care nu ne interesează în prezentul studiu. Soarele își petrece aproape întreaga existență în bucla mică care se vede în Figura 3. În prezent, luminozitatea crește, însă foarte încet. Totuși, această creștere e suficientă pentru ca viața pe Pământ să dispară cu mult înainte de faza de gigantă roșie (în aproximativ 1 miliard de ani în viitor), dacă nu reușim să ne distrugem noi înșine planeta mult mai înainte, prin război nuclear sau poluare. Figura 3 arată ce mult crește luminozitatea în faza de gigantă roșie (de o mie de ori). În stadiul final, de pitică albă, luminozitatea scade iarăși foarte mult.

După cum am menționat mai sus, vom simula ce se întâmplă cu planetele exterioare la sfârșitul evoluției Soarelui, începând cu 6.4 miliarde de ani în viitor și până la stadiul de pitică albă. Simulările se extind pe 10 miliarde de ani. Folosim programul *Mercury*⁵ cu metoda symplectică de integrare Bulirsch-Stoer. Pasul de integrare este de 20 de zile, suficient de mic față de perioada de revoluție a planetelor, care e mai mare de 4000 de zile. La fiecare pas, modificăm masa Soarelui în funcție de rezultatele obținute cu MESA și prezentate în Figura 2. Pentru fiecare rată de pierdere a

³ Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., et al. 2011, *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA)*, The Astrophysical Journal Supplement, 192, 3

⁴ Reimers, D., 1975, *Circumstellar absorption lines and mass loss from red giants*, Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege, 8, 369

⁵ Chambers, J. E. 1999, *A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 304, 793

masei obținem câte un set de simulări diferite prin modificarea condițiilor inițiale. Acest lucru se poate face foarte ușor prin schimbarea timpului când începe simularea printr-o cantitate mică (100 zile).

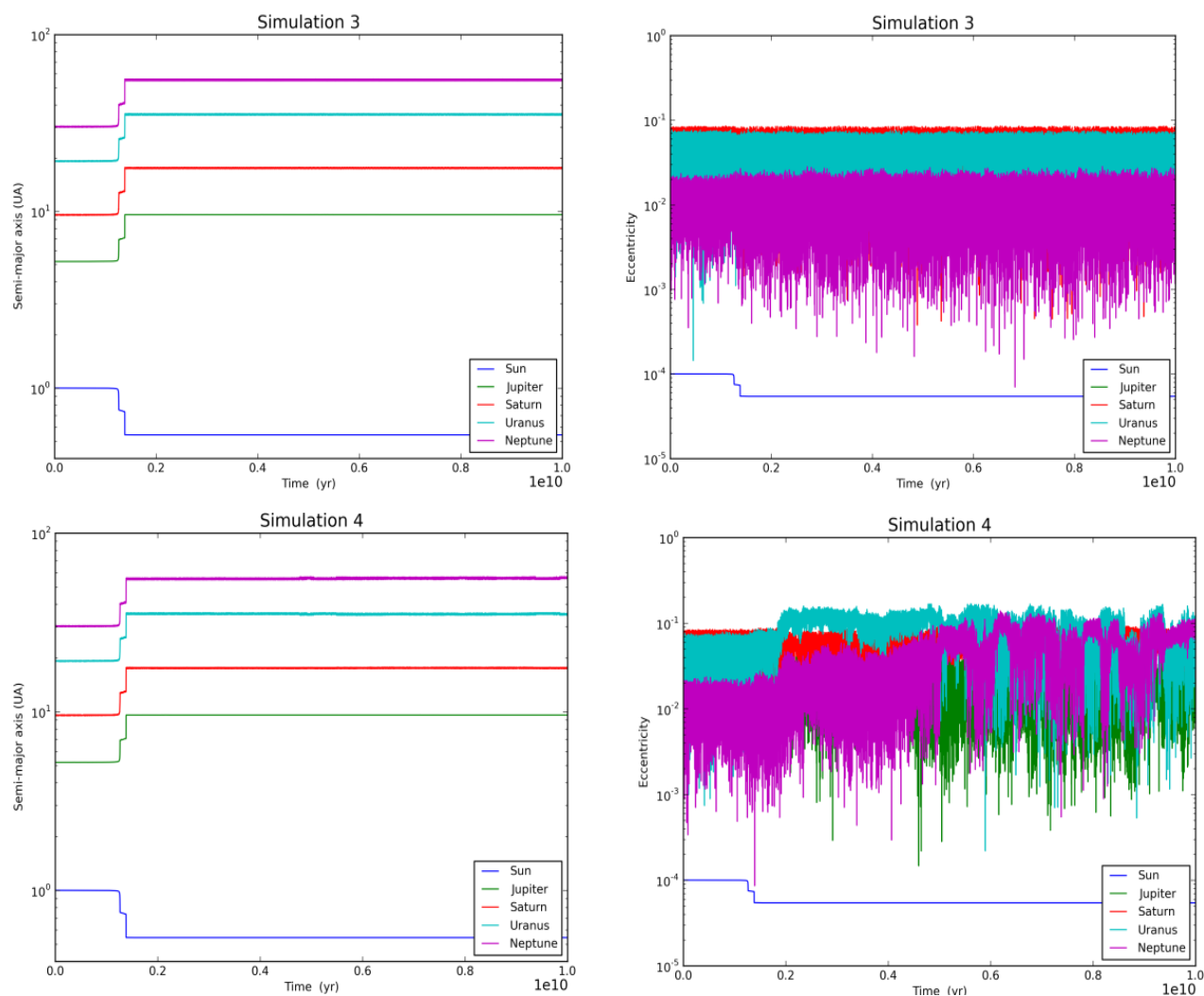


Figura 4. Exemple de simulări cu rata $\eta=0.5$, semiaxa mare în stânga și elipticitatea în dreapta. În partea de jos, cu linie albastră, arătăm ca referință pierderea de masă a Soarelui.

În Figura 4 arătăm două cazuri obținute cu rata cea mai mică, $\eta = 0.5$. În primul (simularea nr. 3) nu se întâmplă nimic deosebit. După cum ne așteptăm, semiaxa mare se mărește invers proporțional cu masa Soarelui. Excentricitatea arată variații foarte mici dar, în general, orbitele nu sunt perturbate. Aceasta se întâmplă în majoritatea cazurilor pentru rata $\eta = 0.5$. În câteva cazuri se întâmplă perturbații puternice, ca de exemplu în simularea nr. 4 din Figura 4 dar nu există cazuri când planetele sunt expulzate.

Pentru cazurile de pierdere de masă mai mari (1.0 și 1.2), cazurile cu perturbare puternică se înmulțesc dar tot nu găsim cazuri de expulzare a unei planete. Numai când ajungem la $\eta = 1.4$ găsim asemenea cazuri, așa cum arată Figura 5. În simularea nr. 348 Uranus și Neptun sunt expulzate. Două cazuri interesante sunt simulările 344 și 330. În primul caz, expulzarea lui Neptun apare foarte târziu, după aproape 10 miliarde de ani. În cazul celălalt, după ce Neptun e perturbat, se apropie de orbita lui Uranus, cele două planete interacționează puternic și, în sfârșit, Uranus e cel expulzat. În general, 75% din simulări pentru $\eta = 1.4$ sunt perturbate puternic, dar numai 11.4% din cazuri arată expulzări în intervalul considerat de noi (10 miliarde de ani). Când aceasta se întâmplă, planetele cele mai des expulzate sunt Neptun și Uranus.

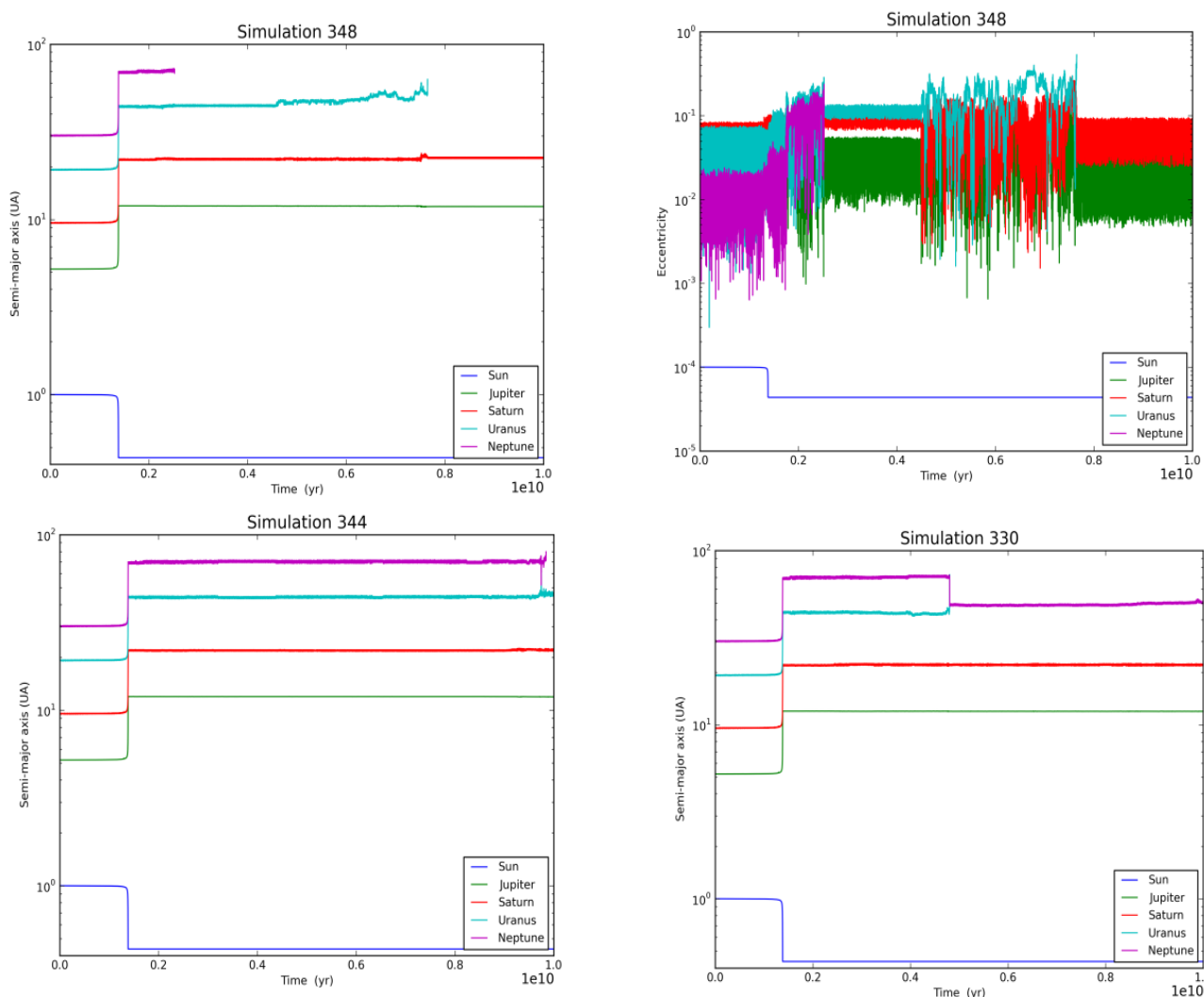


Figura 2. Exemple de simulări cu rata de pierdere de masă $\eta=1.4$

Concluzia studiului nostru este că planetele exterioare sunt perturbate dar au o mare șansă să supraviețuiască „morții” Soarelui. Numai în cazul mai puțin probabil că rata de pierdere a masei Solare e foarte ridicată, Uranus și Neptun sunt expulzate dar nu foarte des nici atunci. Ne așteptăm, deci, ca și în alte sisteme solare să găsim planete care au supraviețuit și acum orbitează pitice albe. Dacă, însă, aceste sisteme solare sunt foarte diferite de al nostru, multe planete ar putea să fi fost expulzate și acum să rătăcească prin Galaxie, neștiute și orfane.

THE FATE OF THE SOLAR SYSTEM AROUND A DYING SUN: WHITE DWARFS AND DARK PLANETS

What is the fate of planetary systems when the star goes through the red giant phase and eventually becomes a white dwarf? Do we expect to detect planets around white dwarfs? Are the planets ejected when perturbed by the high mass-loss episodes? This study aims at answering all of these questions using our own Solar system as a case study. The interior planets are either directly engulfed by the Sun in the red-giant phase or - for Mars - the tidal forces cause the planet to fall on the swollen Sun. Using an adapted version of the code *Mercury*, we integrated the remaining four exterior planets to the white dwarf phase of the Sun, running hundreds of simulations with different initial conditions.