

**PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
NOVI SAD**

**SEMINARSKI RAD**

**Kurs: Spektroskopija vasiona**

**Tema: *Otkriće vode na ekstrazolarnoj  
planeti HD 209458 b***

**Mentor:**  
**dr. Tijana Prodanović**

**Student:**  
**Prašćalo Zoran**

## **SADRŽAJ:**

<b>1. Opšta slika i posmatrački podaci.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Otkriće.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Detekcija atmosfere.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Potraga za vodenom parom.....</b>	<b>5</b>
<b>5. Rezultati.....</b>	<b>6</b>
<b>6. Reference.....</b>	<b>7</b>

## Opšta slika i posmatrački podaci

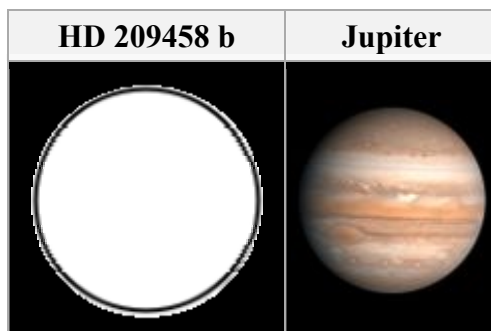
HD 209458 b je ekstrasolarna planeta koja orbitira oko zvezde tipa Sunca, pod imenom HD 209458 u sazvežđu Pegaz, nekih 150 svetlosnih godina od Sunčevog sistema.

Radijus planetarne orbite je 7 miliona kilometara ili oko 0,047 astronomskih jedinica što odgovara 1/8 radijusa Merkurove orbite. Ovaj mali radijus rezultuje u tome da period obilaska ove planete oko matične zvezde (njena godina) iznosi oko 3,5 zemaljskih dana. Procenjena površinska temperatura je oko 1000°C. Masa planete je oko 220 Zemljinih masa (0,69 masa Jupitera). Znajući to da je planeta veoma zapreminski velika (32% veća od Jupitera), sa sigurnošću se može konstatovati da je to gasoviti džin – Vreli Jupiter.

HD 209458 b predstavlja jednu od mnogih prekretnica u egzoplanetarnom istraživanju. To je bila prvootkrivena tranzitna egzoplaneta, prva na kojoj je detektovana atmosfera, i to sastavljena od vodonika, ugljenika i kiseonika, i jedna od prvih dveju planeta koje su direktno posmatrane spektroskopski. Bazirajući se na nekim aplikacijama novih, teorijskih modela, aprila 2007. godine je objavljeno da je to prva egzoplaneta koja u sastavu svoje atmosfere ima i vodenu paru.

HD 209458 b ima neformalno ime, ili nadimak, *Oziris* i taj naziv joj nisu dali astronomi koji su je otkrili.

Matična zvezda ove planete je zvezda sedme magnitude, vidljiva sa Zemlje kroz dvogled.



## Otkriće

Spektroskopska izučavanja su prva otkrila prisustvo planete koja orbitira zvezdu HD 209458, i to 5. Novembra 1999. godine. Koristeći precizna fotometrijska merenja, tražio se pad sjaja matične zvezde i to usled tranzita planete preko njene površine. Ovo nalaže da planetarna orbita bude nagnuta tako da planeta prođe između Zemlje i matične zvezde.

Dva tima naučnika su uporedo vršila posmatranja i zabeležen je pad sjaja zvezde HD 209458 za 1,7%, što je pripisano prolasku planete preko njene površine. Svaki tranzit traje oko 3 časa, za vreme koga planeta pokrije oko 1,5% zvezdinog diska.

Zvezda je mnogo puta posmatrana Hiparh satelitom, i s obzirom na ova posmatranja, veoma precizno je određen orbitalni period od 3,524736 dana.

Takođe je potvrđena prethodno postavljena hipoteza da su Vreli Jupiteri veoma blizu svojim matičnim zvezdama te da im se zapremina povećava usled intenzivnog zagrevanja gornje atmosfere.

HD 209458 b ima albedo (reflektivnost) koji je manji od 30% što znači da je to iznenađujuće taman objekat. Jupiter, recimo, ima albedo od 52%. Ovo može značiti da ova planeta nije pokrivena oblacima (koji su inače mnogo reflektivniji), što je u suprotnosti sa očekivanjima.

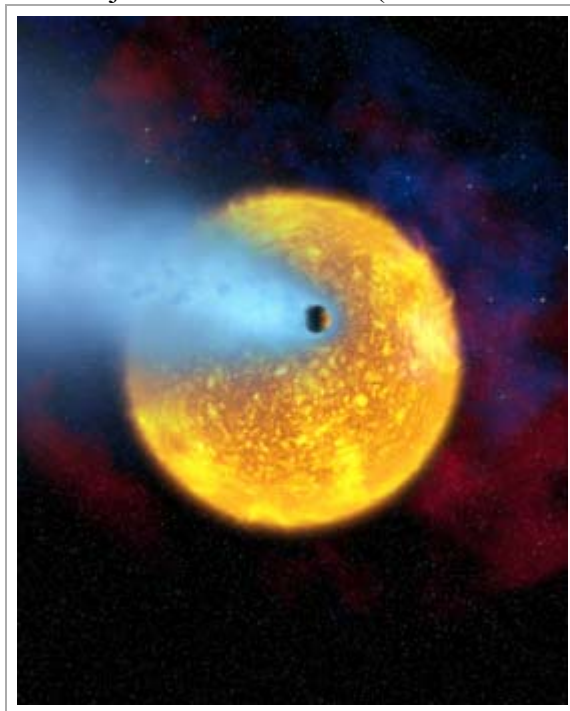
## Detekcija atmosfere

27. novembra 2001. godine, HST je detektovao natrijum u nižoj atmosferi ove planete. Zatim, tokom 2003-04, otkriven je ogromni elipsodni omotač od vodonika, ugljenika i kiseonika, koji okružuje planetu i dostiže temperaturu od  $10^4$  K. Pri ovim temperaturama, u repu Maksvel-Bolcmanove raspodele postoje čestice sa brzinama većim od druge kosmičke brzine za ovu planetu pa se procenjuje da planeta gubi oko  $10^4$  tona vodonika u sekundi. Analizom svetlosti zvezde, koja prođe kroz ovaj omotač, pokazano je da ova dva teža elementa, kiseonik i ugljenik, podležu velikoj hidrodinamičkoj vučnoj sili, a koju stvara vodonični tok, pa i sami ističu iz donje atmosfere u gornju. Brzina kojom gas ističe je preko  $35000 \text{ km/h}$ . Dokaz za ovo se može naći ako se ova planeta uporedi sa Jupiterom i Saturnom, jer kod njih takođe postoje kiseonik i ugljenik i to u molekulima metana i vode ali u donjoj atmosferi pa ostaju nevidljivi. Kod HD 209458 b ovi elementi se nalaze u atomskom obliku i vidljivi su u gornjoj atmosferi što je dobar dokaz da postoji efekat «oduvavanja» iz donjih slojeva. Struja vodonika koja ističe sa planete je duga oko  $2 \times 10^5 \text{ km}$ .

Ceo proces isparavanja je toliko svojstven pa postoji razlog za predlog uvođenja nove klase ekstrazolarnih planeta – Ktonijanske (*chthonian*) planete (po grčkom Bogu vrelog unutrašnjeg podzemnog sveta) i to su, ustvari, čvrsta zaostala jezgra ili ispareni gasni džinovi.

U martu 2005. godine je merena infracrvena svetlost sa planete, i to kao razlika konstantne svetlosti zvezde i one svetlosti kada je tranzit u toku. Ovim je pokazano da je temperatura na površini planete najmanje  $750^\circ\text{C}$  a potvrđena je i kružna orbita.

Smatra se je dan na ovoj planeti dugačak isto kao i godina, tj. da se obrne oko svoje ose za isto vreme za koje obiđe oko zvezde (isto kao kod Meseca).



## Potruga za vodenom parom

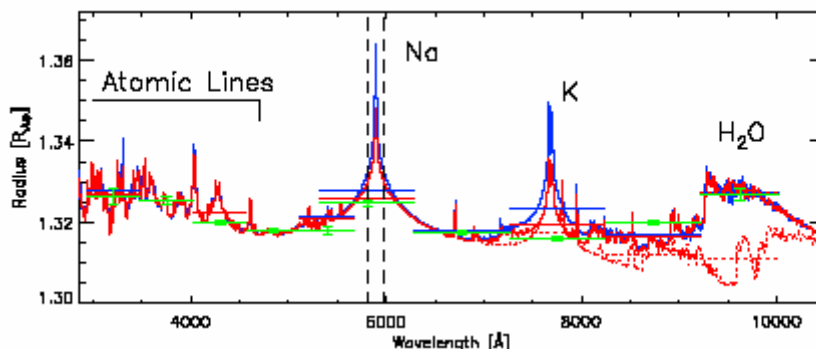
U februaru 2007. započeta je spektralna analiza u ovom smeru. Spektroskopskim analiziranjem atmosfere ove planete, u opsegu od 7,2 do 13,2 mikrometra dobijeni su rezultati koji se ne slažu sa teorijom u nekoliko tačaka. Predviđeno je da spektar ima maksimum na  $10 \mu m$ , što bi ukazalo na postojanje vodene pare, ali takvog pika nije bilo. Drugi, nepredviđeni maksimum, pojavio se na  $9,65 \mu m$ , koji je pripisan oblacima silikatne prašine, što je do sad neotkriveni fenomen. Još jedan pik se pojavio na  $7,78 \mu m$ , za koji još ne postoji adekvatno objašnjenje.

10. aprila 2007. godine, Travis Barman je na Lowel Observatoriji objavio dokaz o postojanju vodene pare u atmosferi. Koristeći prethodno objavljena HST merenja i nove teorijske modele, Barman je našao jak dokaz za apsorpciju vode u atmosferi ove planete. U Barman - ovom radu se kreće od modela *limba*.

Tranzitna spektroskopija ispituje limb planete, koji je u stvari tranzitni region između dnevne i noćne strane. Može se očekivati, u prisustvu horizontalnog temperaturnog gradijenta između zagrejane i nezagrejane hemisfere, da će temperature preko samog limba biti hladnije od proseka temperatura na dnevnoj strani. Poslednja Spitzer posmatranja tranzitnih i netranzitnih vrelih Jupitera pokazuju velike varijacije fluksa i to sa fazom koja obezbeđuje jak dokaz o dnevno - noćnom temperaturnom gradijentu. Opisivanje limba bezuslovno zahteva multidimenzionalno rešenje modela atmosfere; međutim, kao što je česta praksa, ovde je iskorišćen jednostavniji jednodimenzioni model, radi predstavljenja prosečnih svojstava limba, i u longitudinalnom i u latitudalnom smislu. Za ispitivanje varijacija temperaturnih struktura limba, upadni stelarni fluks je skaliran parametrom  $\alpha$ . Model sa  $\alpha = 0,25$  predstavlja prosečan opis cele planete u prisustvu veoma efikasnog horizontalnog energetskog transporta. Povećanjem  $\alpha$  na 0,5 povećava se zagrevanje modela atmosfere čineći ga podesnijim samo za *dnevnu stranu* koja predstavlja gornji limit za moguću srednju temperaturu limba.

Osnovna hemija zastupljena u limbu je modelirana na pretpostavci hemijske ravnoteže, određene minimalizovanjem slobodne energije sa uključenjem zrnaste formacije. Za razumevanje gravitacione postavke granula u hemijskom sastavu i na transmisivnom spektru, uklanjanje zrna iz atmosfere je uključeno preko dve proste aproksimacije, koje predstavljaju suprotne ekstreme. Prva je *cond* aproksimacija, koja jednostavno ignoriše neprozračnost zrna bez menjanja hemije ili zastupljenosti. Druga je *rainout* aproksimacija, koja iterativno smanjuje, u svakom sloju, elementarne zastupljenosti uključene u zrnastu formaciju i preračunava hemijsku ravnotežu sa svakim novim setom stratifikovanih zastupljenosti elemenata. Pristup je sličan drugim *rainout* modelima osim što se crpljenje elemenata nastavlja sve dok zrna ne budu više prisutna.

Transmisija stelarnog fluksa kroz limb planete HD 209458 b je određena rešavanjem sferno simetrične jednačine radijativnog transfera sa potpunim opisom za rasejanje i apsorpciju i unutrašnjeg i spoljašnjeg zračenja. Sferna, umesto tradicionalne planparalelne geometrije, opisuje krivine atmosferskih slojeva i promene u hemijskom sastavu duž nagiba putanja kroz gornju atmosferu. Radijus planete na datoj talasnoj dužini ( $R_\lambda$ ), dobijen je određivanjem radijalne dubine na kojoj je preneseni fluks jednak  $e^{-1}$  puta upadna svetlost zvezde, duž iste staze.



Monohromatski tranzitni radijusi preko STIS spektralnog opsega za osnovni rainout model sa (crveno) i bez (plavo) fotojonizacije Na i K. Pune i isprekidane crvene linije su iste, osim H<sub>2</sub>O linije neprozračnosti koja je na kraju odvojena. Horizontalne crtice odgovaraju srednjim radijusima preko označenih "binova" sa  $\lambda$  - opsegom koji odgovara dužini svake crtice. STIS merenja koje je izvršila Heather Knutson su prikazani zelenom bojom sa  $1 \sigma$  linijama koje označavaju greške. Vertikalne isprekidane linije označavaju uski  $\lambda$  - opseg koji je koristio Charbonneau (2002).

## Rezultati

Atmosfera bez oblaka sa rainout-om,  $\alpha = 0,25$  i solarim zastupljenostima je prihvaćena kao osnovni model. Ovaj model, zajedno sa ostalima, je upoređen sa relativnim  $R_\lambda$  merenjima (Knutson 2007) koja imaju dovoljno visoku preciznost da ograniče osnovna atmosferska svojstva. Kako je poređenje napravljeno sa *relativnim*  $R_\lambda$  vrednostima, rezultati modela su bili uniformno skalirani na obradu posmatranja u binu talasnih dužina od 4580Å do 5120Å; ovo skaliranje je uvek bilo manje od 0,005  $R_{Jup}$ . Povrh svega, osnovni model (puna crvena linija na slici iznad) reprodukuje posmatrani porast  $R_\lambda$  prema kraćim talasnim dužinama, povećanje preko Na dubleta, i povećanje na dalekim crvenim talasnim dužinama. Osnovni model, upoređen sa podacima, ima  $\chi^2$  koje je tri puta *manje* od konstantnog  $R_\lambda$ .

Voda je predviđena kao jedna od najzastupljenijih komponenti egzoplanetskih atmosfera, i sa postojećim apsorpcionim pojavama u infracrvenom delu, igra ključnu ulogu u regulisanju profila temperatura-pritisak (T-P). Prvi veliki H<sub>2</sub>O apsorpcioni pojas se javlja između 0,8 $\mu$ m i 1 $\mu$ m, i to je region pokriven sa poslednja dva bina, po Knutson 2007. Kao što se vidi sa slike, postoji odlično slaganje između osnovnog modela i posmatranja u ovom delu spektra, naročito preko najdužeg bina koji se nalazi na vrhu H<sub>2</sub>O pojasa. Osnovni model takođe predviđa srednje  $R_\lambda$  pikove od 1,330, 1,343 i 1,341  $R_{Jup}$  za sledeća tri "vodena" opsega:  $\lambda \sim 1,15$ , 1,14 i 1,9  $\mu$ m.

Gore predstavljeni modeli jasno pokazuju da su merenja Heather Knutson konzistentna sa pojavom apsorpcije na molekulima vode blizu 1  $\mu$ m. Međutim, detekcija vode u limbu HD 209458 b se, u principu, ne slaže sa skorašnjim Spitzer IRS spektrom koji ne pokazuje detekciju vode na ovoj planeti. Podaci sa Spitzera su dobijeni za vreme *sekundarne* eklipse i direktno ispituju dnevnu stranu planete. Moguće je da je atmosfera dnevne strane približno izotermalna što rezultuje da se u spektru ne vide tragovi vode.

24. aprila 2007. astronom David Charboneau, koji je bio vođa tima koji obrađuje HST podatke, ukazao je na mogućnost postojanja varijacija u samom teleskopu i samim tim stvaranjem pikova u spektru ove planete koji neosporno liče na vodu, koja po njemu, tamo nije detektovana.

U narednom periodu, na astronomima je da dobro prouče i objasne koja je od ove dve tvrdnje tačna.

## Reference:

1. **IDENTIFICATION OF ABSORPTION FEATURES IN AN EXTRASOLAR PLANET ATMOSPHERE – Travis Barman, Draft Version, April 10, 2007 (arXiv:0704.1114v1 [astro-ph] 9 Apr 2007.**
2. [www.en.wikipedia.org/wiki/HD\\_209458\\_b](http://www.en.wikipedia.org/wiki/HD_209458_b) uz proveru kroz sve validne reference na koje se poziva taj dokument