

Atmosféry extrasolárnych planét
Ján Budaj
Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica

DEFINÍCIE

Na úvod sa zmienim podrobnejšie o tom, čo budeme rozumieť pod pojmom extrasolárna planéta (exoplanéta). Tento pojem, na rozdiel od pojmu 'planéta', nemá zatiaľ striktnú definíciu.

Väčšina výskumníkov pod týmto pojmom rozumie objekty, ktoré obiehajú okolo hviezdy alebo pozostatku hviezdy, a ktorých 'msini' je menšie ako 13 hmotností Jupitera (M_j), kde 'm' je hmotnosť planéty a 'i' je sklon jej obežnej dráhy k rovine oblohy. Hranica 13 hmotností Jupitera bola zvolená hlavne preto, lebo je to približne dolná hranica spaľovania deutéria. Objekty, ktoré sú hmotnejšie ako 13 M_j môžu spaľovať deutérium a spravidla sa radia medzi hnedých trpaslíkov.

Exoplanéte potom zostáva ako rozhodúci zdroj vnútornej energie najmä jej vlastná gravitácia.

'Msini' tiež preto lebo sklon dráhy väčšinou nepoznáme a môžeme určiť len túto veličinu. Niekedy sa do tejto kategórie zahŕňajú aj podobné objekty obiehajúce okolo substelárnych objektov (napr. hnedých trpaslíkov) alebo tzv. voľne sa vznášajúce planéty, ktoré neobiehajú okolo žiadneho stelárneho objektu.

Atmosférou exoplanéty, analogicky ako je tomu u hviezd, sa rozumie povrchová oblasť planéty, kde sa rozhodujúcou mierou formuje vystupujúce žiarenie planéty. Atmosféra planéty, okrem toho, že formuje spektrum planéty má ďalšie dôležité funkcie. Môžeme si ju predstaviť ako akýsi (1) ventil, ktorým sa vypúšťa teplo z planéty a reguluje ako planéta chladne, alebo ako (2) slnečný kolektor, ktorý rozhoduje o tom koľko tepla z materskej hviezdy sa pohltí a nakoniec atmosféra funguje aj ako (3) akýsi vymenník tepla, ktorý rozváža teplo prijaté od hviezdy po povrchu, najmä medzi dennou a nočnou stranou planéty.

HISTÓRIA

V súčasnosti (k 27.4.2009) poznáme 346 extrasolárnych planét. Väčšina z nich bola objavená meraním radiálnych rýchlostí materskej hviezdy, čo neumožňuje určiť sklon dráhy planéty. Len u 58 planét sa podarilo detekovať tranzit planéty popred kotúčik hviezdy. Tieto tzv. 'tranzitujúce planéty' sú veľmi dôležité, lebo umožňujú nielen merať sklon dráhy planéty, jej hmotnosť, ale aj jej polomer.

Prvú extrasolárnu planétu (naraz 2 planéty) objavil americko-poľský astronóm Alex Wolszczan v r. 1992. Planéty obiehajú okolo pulzara PSRB1257+12 a boli objavené meraním zmeny frekvencie pulzov s použitím rádioteleskopu. O pár rokov neskôr, r.1995, Mayor a Queloz objavili prvú planétu obiehajúcu okolo hviezdy na hlavnej postupnosti, 51 Peg. Planéta mala rádovo hmotnosť Jupitera a obiehala veľmi blízko materskej hviezdy. Nastal boom a nasledovalo veľké množstvo objavov podobných obrých planét, pre ktoré sa zaužíval názov 'Horúci Jupiter'. Keďže 'Horúci Jupiter' je relatívne veľká planéta blízko pri hviezde, bolo len otázkou času, kým r. 2000 Henry a kol. objavili prvú tranzitujúcu planétu HD209458b. (Planéty sa označujú názvom materskej hviezdy s pridaním koncovky 'b','c'... podľa poradia objavu). Táto planéta sa stala asi najviac študovanou extrasolárnou planétou. R. 2002 Charbonneau a kol. u nej prvýkrát detekoval atmosféru a v nej prvý chemický prvok -sodík. R.2003 česko-americký astronóm Ivan Hubený predpovedal možnú prítomnosť stratosféry, čo r.2007 potvrdil Burrows a kol..

ATMOSFÉRA, CHLADNUTIE A POLOMER PLANÉTY

Planéty tesne po sformovaní sú pomerne horúce a majú vysoký obsah tepla. V priebehu ich vývoja potom nevyhnutne chladnú a zmršťujú svoj objem. Dokonca aj keď sú počas vývoja vystavené ožarovaniu hviezdou, zmene jasnosti materskej hviezdy, alebo migrácii, tak raz vychladnutú a scvrknutú planétu to už veľmi naspäť nezohreje a nenafúkne.

Na obr. 1 je znázornený vývoj polomeru planéty s vekom pre dve rôzne hmotnosti planéty a rôzne vzdialenosti planéty od Slnku podobnej hviezdy. Planéty s atmosférami, ktoré obsahujú množstvo pomerne silno absorbujúceho materiálu (ťažšie prvky, rôzne molekuly) nemôžu tak rýchlo chladnúť a môžu mať väčšie polomery. Tento efekt sa však čiastočne môže kompenzovať tým, že ak silná absorpcia-opacita v atmosfére je sprevádzaná zvýšeným obsahom ťažších prvkov v celej planéte, to bude zvyšovať hustotu a gravitáciu planéty, čo bude naopak znižovať jej polomer. Takisto u planét, ktoré sú vystavené silnému ožarovaniu hviezdou dochádza k zmene štruktúry jej atmosféry, jej tepelný gradient sa výrazne zníži, to zabraňuje úniku vlastného tepla planéty a následne udržiava planétu nafúknutú po dlhšiu dobu.

TRANZIT PLANÉTY

je veľmi dôležitý náhodný jav, ktorý nám príroda ponúka. Svetlo samotnej planéty je spravidla veľmi slabé nato, aby sme ho priamo boli schopní detekovať aj najlepšími súčasnými astronomickými prístrojmi. Keď však tmavý 'Horúci Jupiter' prechádza popred kotúčik oveľa horúcejšej a jasnejšej hviezdy spôsobuje malý pokles jej jasnosti úmerný $(R_{\text{planéty}}/R_{\text{hviezdy}})^2$. Keďže priemer Jupitera je asi 1/10 priemeru Slnka, tak to vyvolá zoslabenie jeho jasnosti o rádovo 1 percento. Samozrejme závisí to značne aj od sklonu dráhy planéty. Podrobnou analýzou tohoto javu analogicky ako u zákrytových dvojhviezd sa potom spätne dá určiť polomer planéty a sklon jej dráhy.

Úkážku takéhoto javu môžeme vidieť na obr.2. Tento jav je pozorovateľný aj úplne malými ďalekohľadmi vybavenými CCD kamerou a človek môže žasnúť nad tým ako dlho sme mali exoplanéty priamo "pod nosom" alebo ako dlho to príroda pred nami skrývala. Tento jav závisí na vlnovej dĺžke. Na niektorých vlnových dĺžkach sa pozoruje zákryt hlbší, na niektorých plytší s plochým dnom. Je to v dôsledku rozdelenia jasnosti hviezdy po jej povrchu - jav dobre známy ako okrajové stemnenie Slnka. Táto závislosť je nežiadúca komplikácia pri určovaní polomeru planéty. Na dlhších vlnových dĺžkach okrajové stemnenie nebýva také silné ako na kratších vlnových dĺžkach. Charbonneau a kol. (2002) však zistil, že na vlnových dĺžkach okolo 590nm zodpovedajúcich dvom silným spektrálnym čiarom sodíka je zákryt ešte hlbší ako by mal byť a nedá sa to vysvetliť okrajovým stemnením hviezdy. Jediné možné vysvetlenie je, že planéta je na tých vlnových dĺžkach skutočne väčšia ako na iných vlnových dĺžkach. Z toho vyplývajú dve veci, 1. planéta musí mať atmosféru a 2. v atmosfére je sodík, ktorý silno pohlcuje a opticky tak zväčšuje polomer planéty na daných vlnových dĺžkach.

Zanedlho potom boli podobným spôsobom detekované v atmosférach exoplanét aj ďalšie chemické prvky a ich molekuly - vodík, kyslík, uhlík, a nie tak dávno aj voda. Obr. 3 znázorňuje ako závisí polomer planéty od vlnovej dĺžky.

SEKUNDÁRNY ZÁKRYT

Podobne ako je tomu u zákrytových dvojhviezd, okrem primárneho zákrytu (u planét nazývaných

tranzitom) keď chladnejší objekt prechádza popred teplejší, môže dochádzať aj tu k sekundárnemu zákrytu. Vzhľadom na to, že planéta, je spravidla oveľa menšia ako materská hviezda, počas sekundárneho zákrytu je takmer vždy celá planéta schovaná za hviezdou. Pozorovať sekundárny zákryt je však oveľa náročnejšie než pozorovať tranzit. Vyplýva to z toho, že hĺbka sekundárneho zákrytu relatívne k hĺbke tranzitu je úmerná pomeru povrchovej intenzity svetla planéty a hviezdy, čo v integrovanom svetle je rádovo $(T_{\text{planéty}}/T_{\text{hviezdy}})^4$. Keďže povrchová teplota Horúceho Jupitera je cca. 1000K a povrchová teplota hviezdy cca 6000K tak hĺbka zákrytu je typicky ešte o 3 rády menšia ako hĺbka tranzitu. Relatívna hĺbka samotného zákrytu zároveň priamo odráža pomer toku svetla od planéty a od hviezdy. Tento pomer silno závisí od vlnovej dĺžky a je najväčší na dlhých vlnových dĺžkach, kde planéta, relatívne k hviezde, vyžaruje najviac.

Ak sa nám podarí odpozorovať planétu s hviezdou tesne pred a po zákryte, keď vidíme obidva objekty súčasne a potom počas zákrytu keď vidíme iba hviezdu, jednoduchým odčítaním spektier alebo svetla môžeme dostať spektrum alebo svetlo planéty v plnej fáze. Zdôrazňujem, v plnej fáze, lebo svetlo exoplanéty, podobne ako planét či mesiacov v Slnčnej sústave, silno závisí od fázy alebo uhla planéta-hviezda-pozorovateľ. Sekundárny zákryt je tak ešte oveľa úžasnejším a dôležitejším úkazom ako tranzit, lebo nám umožňuje nepriamo detekovať a potom študovať svetlo a spektrum prichádzajúce z atmosféry planéty. Našťastie, aj napriek uvedeným komplikáciám, sa sekundárny zákryt, na dosť veľké prekvapenie, podarilo pre pár vyvolených planét, spravidla na infračervených vlnových dĺžkach detekovať, najmä vďaka družici Spitzer. To umožnilo ďalší prielom v problematike a následný objav stratosféry u nietorých exoplanét.

STRATOSFÉRA:

Všetky hore uvedené efekty poukazujú na to, akú dôležitú funkciu má atmosféra planéty a čo všetko sa jej podrobným štúdiom môžeme dozvedieť o vzdialených svetoch. Modelovanie atmosfér je preto kľúčovou vedeckou disciplínou. A práve na tomto poli zohral rozhodujúcu úlohu český astronóm dlhodobo pôsobiaci v USA, Dr. Ivan Hubený.

V r. 2003 si všimol, že pri výpočtoch modelov planetárnych atmosfér, za istých okolností, najmä za silného ožarovania planéty hviezdou, môže mať atmosféra planéty dve alebo viac riešení. Inými slovami, planéta si môže vybrať napr. či bude jej teplota smerom von klesať a mať nízku opacitu alebo či bude nečakane stúpať a mať vysokú opacitu. Obe možnosti boli legitímnym riešením problému. Ktoré si však príroda vyberie? Taká oblasť inverzie v chode teploty je nám dobre známa z atmosféry našej Zeme a nazýva sa stratosféra. Prítomnosť stratosféry u exoplanéty mala mať katastrofálne následky na spektrum objektu. Zatiaľ čo bežná atmosféra s klesajúcou teplotou mala byť zdrojom klasických hlbokých absorpčných čiar, stratosféra s inverzným chodom teploty mala produkovať úplne odlišné - takmer opačné spektrum, tam kde predtým boli absorpcie mali byť silné emisie, najmä emisie vody a opačne.

Takúto predpoveď stratosféry nikto nebral vážne, až kým sa neobavili prvé dáta zo sekundárnych zákrytov exoplanét. Na obr.4 vidíte originálne pozorovania toku žiarenia planéty HD209458b relatívne k toku hviezdy porovnané s klasickými teoretickými výpočtami bez stratosféry (čierna krivka) a so stratosférou (fialová, zelená a červená krivka). Zdanlivá emisia na čiernej krivke okolo 4 mikróv je spôsobená tým, že na obe strany od nej sa nachádzajú silné absorpčné pásy vody, ktoré požierajú tok po oboch jej stranách. V prípade stratosféry sa táto zdanlivá emisia premení na absorpciu a okolité vodné absorpcie sa premenia na vodné emisie. To, že čierna krivka vôbec nefituje dáta, najmä hnedé štvorce a naopak napr. zelená krivka ich celkom dobre fituje má naraz 3 fundamentálne závery:

1. planéta má stratosféru, 2. na planéte je VODA!, 3. planéta má nečakaný zdroj opacity, ktorá je príčinou stratosféry, no čo to presne je, zatiaľ nie je ešte úplne jasné (vo výpočtoch sa extra opacita modeluje ako voľný parameter). Na obr.5 potom vidíte ako vyzerá samotný priebeh teploty v atmosfére planéty zodpovedajúci teoretickým spektrám z obr.4.

SVETELNÁ KRIVKA

V ojedinelých prípadoch sa podarilo detekovať svetelnú krivku planéty aj mimo tranzitu či sekundárneho zákrytu. Amplitúda svetelnej krivky do značnej miery závisí od rozdielu medzi dennou a nočnou stranou a sklonu dráhy. Pokiaľ poznáme sklon dráhy, takáto informácia je nesmierne užitočná, lebo nám umožňuje študovať rozdelenie jasnosti po povrchu planéty. Príkladom je pozorovanie tranzitujúcej planéty HD189733b. Na základe takejto svetelnej krivky sa autorom jej spätnou dekonvolúciou podarilo určiť rozloženie jasnosti po povrchu planéty, ktoré je zobrazené na obr.6. Rozdelenie jasnosti po povrchu, je do značnej miery dané schopnosťou planéty roznášať teplo po povrchu, hydrodynamikou a meteorológiou povrchových vrstiev.

PRENOS TEPLA

Žiarenie hviezdy dopadajúce na planétu na povrchu podlieha komplexnému spracovaniu. Časť z neho sa odráža bez toho, aby nejakým ďalším spôsobom interagovalo s planétou. Časť sa pohltí, čím sa nahrieva denná strana planéty. Následne vzniká silný horizontálny gradient teploty medzi dennou a neožarovanou nočnou stranou planéty. Na povrchu planéty sa indukujú intenzívne prúdy, ktoré hrajú rozhodujúcu úlohu pri vedení tepla, ohreve nočnej strany a ochladzovaní dennej strany planéty. Na obr.5 si môžete všimnúť ako intenzívny prenos tepla (väčšie hodnoty parametra P_n) ochladzuje dennú stranu. Bohužiaľ zatiaľ vieme len veľmi málo o tomto procese a o tom aká časť energie a ako sa prerozdeli po planéte. Do značnej miery to závisí od opacity na dennej strane a od toho v akej hĺbke celý proces prebieha. Všeobecne platí, že čím hlbšie sa dostávajú prúdy tým efektívnejšie prenášajú a vymieňajú teplo po povrchu. Na obr.7 je ukážka 3D hydrodynamických simulácii tohoto procesu.

Obr.1.

Polomer planéty (v jednotkách polomeru Jupitera) ako funkcia veku (v miliardách rokov) pre dve rôzne hmotnosti planéty a rôzne vzdialenosti planéty od Slnku podobnej hviezdy. Vidíme, že polomer planéty stále klesá s časom, čo súvisí s celkovým chladnutím planéty. Zároveň planéty, ktoré sú bližšie pri hviezde chladnú pomalšie a sú väčšie. To je v dôsledku ožarovania planéty hviezdou a následnej zmeny štruktúry jej atmosféry. Obrázok je prevzatý z článku

Burrows A., Hubeny I., Budaj J., Hubbard W. B. 2007, ApJ, 661, 502

Obr.2.

Tranzit planéty Corot-2b popred kotúčik hviezdy. Obrázok ukazuje priebeh zmeny jasnosti hviezdy v magnitudách ako funkciu orbitálnej fázy planéty. Tento tranzit zodpovedá, prechodu planéty s polomerom 1.32 Jupitera a sklonom dráhy 87.88 stupňa. Pozorovania boli získané vo filtri R s 60 cm ďalekohľadom na observatóriu v Modre a obrázok je prevzatý z článku

Vereš P., Budaj J., Világi J., Galád A., Kornoš L. 2009, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 39, 34

Obr.3.

Závislosť polomeru planéty od vlnovej dĺžky. Červená krivka je teoretický model, zelené horizontálne

čiaru sú merania. Všimnite si veľký polomer planéty zodpovedajúci silným čiarom sodíka-Na, draslíka-K a vody. Tým sa dokazuje prítomnosť sodíka a vody v atmosfére planéty.

Obrázok je prevzatý z článku Barman T. 2007, ApJ 661, L191

Obr.4.

Pozorovania sekundárneho zákrytu exoplanéty HD209254b versus teória. Tok žiarenia planéty (relatívne k toku hviezdy) ako funkcia vlnovej dĺžky. Pozorovania - najdôležitejšie sú štyri hnedé štvorce, ktoré zodpovedajú 4 fotometrickým kanálom (IRAC1-4) družice Spitzer.

Na veľké prekvapenie teoretické výpočty bez stratosféry (čierna krivka) vôbec nefitujú dáta. Modely so stratosférou (fialová, zelená a červená krivka) dáta celkom dobre fitujú. P_n je parameter súvisiaci s prenosom tepla z dennej na nočnú stranu planéty. Čím je P_n väčší tým viac tepla sa preniesie, 0 znamená žiadny prenos, 0.5 odpovedá takmer rovnomernému rozdeleniu. Všimnite si, že tok žiarenia z planéty (relatívne k hviezde) rýchlo padá smerom ku kratším vlnovým dĺžkam. Preto sa sekundárny zákryt aj svetlo planéty dá najľahšie detekovať práve na týchto vlnových dĺžkach v infračervenej oblasti. Obrázok je prevzatý z článku

Burrows A., Hubeny, I., Budaj J., Knutson H. A., Charbonneau D. 2007, ApJ 668, L171

Obr.5.

Model atmosféry dennej strany alebo priebeh teploty v Kelvinoch ako funkcia tlaku v baroch. Farby sú tie isté ako na obrázku 4. Čierna - model bez stratosféry, fialová, zelená a červená majú silný nárast teploty a stratosféru pri tlakoch cca 0.003-0.03 bar. Štvorce na krivkách indikujú kde sa zhruba formuje spektrum pozorované v kanáloch IRAC1-4. Všimnite si, že modely s intenzívnym prenosom tepla z dennej na nočnú stranu (veľká hodnota P_n parametra) majú výrazne ochladenie na dennej strane. Tomu naopak zodpovedá oteplenie na nočnej strane. Obrázok je prevzatý z článku

Burrows A., Hubeny, I., Budaj J., Knutson H. A., Charbonneau D. 2007, ApJ 668, L171

Obr.6.

Rozdelenie jasnosti po povrchu planéty HD189733b na vlnovej dĺžke 8 mikrónov.

Vidno, že planéta je najjasnejšia na ožarovanej dennej strane, no maximum je málo posunuté, asi 16 stupňov východne od substelárneho bodu. Zároveň nočná strana nie je úplne čierna.

To indikuje pomerne silnú a efektívnu výmenu tepla medzi dennou a nočnou stranou planéty.

Obrázok je prevzatý z článku

Knutson H.A., Charbonneau D., Allen L.E., Fortney J.J., Agol E., Cowan N. B., Showman A.P., Cooper C. S., Megeath S. T., 2007, Nature 447, 183

Obr.7.

Simulované rozdelenie teploty po povrchu exoplanéty. Vidno jasný rozdiel medzi dennou a nočnou stranou. Nočná strana je chladnejšia. Na rovníku sa vytvára silné prúdenie smerom na východ (v smere rotácie planéty), ktoré do značnej miery ovplyvňuje teplotu na nočnej strane. Jeho rýchlosť sú rádovo km za sekundu. Obrázok je výsledkom 3D-hydrodynamických simulácií a je prevzatý z článku Dobbs-Dixon I., Lin D.N.C., 2008, ApJ 673, 513.