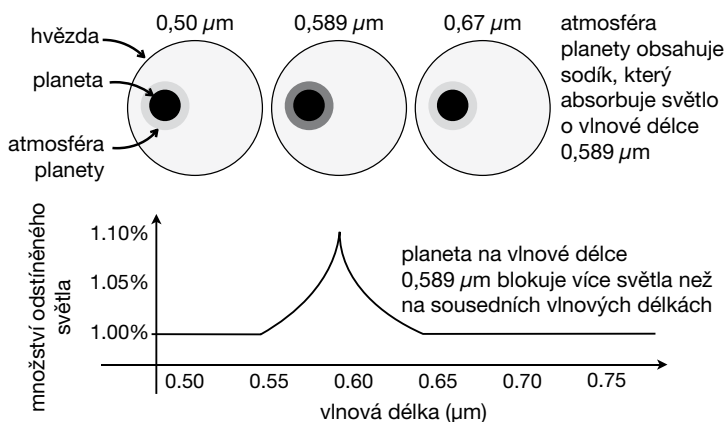


Takto pozorujeme spektrální absorpční čáry ve fyzikální laboratoři. Abychom je mohli pozorovat na obloze, používáme dalekohled s připojeným spektrografem. Intenzivní záření šířící se vzhůru z hloubi horkého nitra hvězdy zde sehraje stejnou roli jako intenzivní světelný paprsek v laboratorním experimentu. Světlo prochází řídkými vnějšími vrstvami hvězdné atmosféry, které se chovají podobně jako nádoba se zředěným plynem v laboratoři. Ve světle hvězdy, které nakonec projde naším spektrografem, chybí fotony, které byly odfiltrovány složkami hvězdné atmosféry.

Spektroskopie horkých Jupiterů

Porovnáním výskytu tmavých čar ve spektru s různými hladinami energie, které mohou být absorbovány různými látkami, můžeme určit, jaké látky jsou přítomny v atmosféře hvězdy. Podrobnější analýza může také odhalit teplotu a tlak atmosféry hvězdy. U exoplanet však nastává problém. Jak jsme si už ukázali, je téměř nemožné oddělit na snímku světlo hvězdy a jejích planet – jejich záře v našich dalekohledech splývá. Pokud tedy jasná záře hvězdy překrývá světlo planety, jak můžeme prozkoumat spektrum planety?

Trik spočívá v porovnání spektra hvězdy před tranzitem, během něj a opět po přechodu planety. Kdybychom mohli pozorovat tranzit zblízka, viděli bychom malý černý kotouč – siluetu planety – pohybující se přes větší a jasnější zářící kotouč hvězdy. Při pohledu ještě blíže bychom viděli, že černý kotouč má rozmazaný okraj, kde malá část světla hvězdy proniká skrz částečně průhledné vnější vrstvy atmosféry planety. Předpokládejme, že atmosféra obsahuje atomy sodíku, které přednostně pohlcují světlo o vlnové délce $0,589 \mu\text{m}$. Kdybychom se na tranzit mohli



OBRAZÉK 6.4. Základní koncept tranzitní spektroskopie. Když tranzit pozorujeme na vlnové délce absorpční čáry v atmosféře planety, planeta blokuje více světla než obvykle. Pozorováním na mnoha vlnových délkách lze identifikovat různé spektrální čáry a získat tak informace o složení atmosféry.

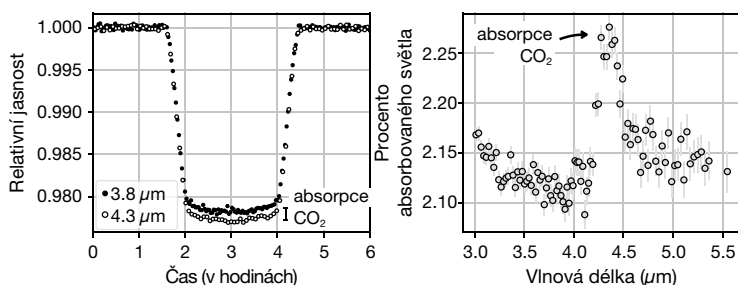
dívat přes brýle, které propouštějí pouze světlo o vlnové délce $0,589 \mu\text{m}$, způsobila by absorpce sodíkem, že by atmosféra planety působila tmavší. Temná silueta planety by měla větší poloměr a blokovala by více světla než na sousedních vlnových délkách (obrázek 6.4.).

Zdálky neuvidíme siluetu planety ani její rozostřený okraj. Nicméně díky záznamu spektra hvězdy během tranzitu můžeme identifikovat vlnové délky, na kterých je záře hvězdy o něco slabší, protože vnější atmosféra planety na nich pohlcuje více světla. Rozdíl mezi těmito absorpčními čarami planety a absorpčními čarami hvězdy můžeme zjistit pozorováním hvězdy před tranzitem a po něm, kdy vidíme nezměněné spektrum hvězdy.

První detekce atmosféry exoplanety byla provedena v roce 2001, jen pár let po prvním objevu tranzitující planety HD 209458 b. Vedl ji David Charbonneau z Harvardovy univerzity, jehož tým použil spektrograf na palubě Hubbleova vesmírného dalekohledu. Jeho harvardští kolegové Sara Seagerová a Dimitar Sasselov vypočítali, že atomy sodíku by měly vytvářet nejsilnější absorpční čáru, což vychází z předpokládaných podmínek v atmosféře horkého Jupiteru – a sodík byl skutečně zachycen.⁴⁷ Od té doby byla stejná metoda použita k výzkumu atmosfér asi 50 dalších exoplanet, z nichž většina jsou horké Jupitery. V některých případech byl opětovně detekován sodík a občas i jeho chemický příbuzný draslík. Tyto prvky ovšem nejsou nijak zvlášť hojné. Vodík je daleko hojnější; na 100 000 atomů vodíku připadá pouze jeden atom sodíku. V podmínkách atmosféry horkého Jupiteru však vodík nemá absorpční čáry na vlnových délkách viditelného světla⁴⁸, zatímco sodík má náhodou velmi silnou čáru ve žlutooranžové části spektra. Jakmile bylo možné získat spolehlivá měření na infračervených vlnových délkách, objevili astronomové v atmosférách některých horkých Jupiterů vodní páru, která se tam možná vyskytuje jen v malém množství, ale způsobuje tmavé absorpční čáry v infračervené části spektra. Na chvíli se zamyslete nad tím, že studiem světla vzdálené hvězdy můžeme

⁴⁷ V roce 2022 se tým vedený Giuseppem Morellem vrátil k datům z roku 2001 a zjistil, že tvrzení o detekci sodíku nebylo zcela oprávněné – další příklad obtížnosti určení, kdo byl první, kdo učinil ten či onen objev (viz kapitola 3).

⁴⁸ Již zmíněná červená absorpční čára vodíku na vlnové délce $0,656\ \mu\text{m}$ je výrazná pouze při teplotě kolem $10\ 000\ ^\circ\text{C}$, protože vyžaduje, aby elektron začínal na druhé energetické hladině, a nikoli na nejnižší energetické hladině. Horké Jupitery, které mají obvykle teplotu mezi $700\ ^\circ\text{C}$ a $2\ 200\ ^\circ\text{C}$, jsou příliš chladné.



OBRÁZEK 6.5. Důkazy o přítomnosti oxidu uhličitého v atmosféře horkého Jupiteru WASP-39 b na základě pozorování Vesmírným dalekohledem Jamese Webba. Na levém panelu je znázorněna závislost jasnosti hvězdy na čase na dvou různých vlnových délkách. Planeta blokovala o něco více světla na vlnové délce $4,3\ \mu\text{m}$ než na $3,8\ \mu\text{m}$ kvůli absorpci oxidem uhličitým na vlnové délce $4,3\ \mu\text{m}$. Pravý panel ukazuje úplné tranzitní spektrum – množství světla blokovaného na každé z mnoha vlnových délek –, ve kterém je zřetelnější silnější absorpce na $4,3\ \mu\text{m}$.

nejenom odhalit existenci obřích planety, ale také zjistit, že v něčem připomíná váš parní hrnec.

Na horké Jupitery jsme se zatím zaměřovali hlavně z praktických důvodů. Atmosféru obřích planet s blízkou oběžnou dráhou dokážeme nejsnáze zachytit. Jejich krátké oběžné doby nám umožňují časté pozorování tranzitů a jejich velké rozměry pro změnu vedou k relativně velkým atmosférickým signálům – i když musíme jedním dechem dodat, že i v případě horkých Jupiterů se jedná o náročná měření s typickými odchylkami jasnosti menšími než 0,1 % mezi různými vlnovými délkami daného spektra (obrázek 6.5.).