

Exoplanety a astrobiologie: Od detekce k biosignaturám

Obyvatelné zóny, transmisní spektroskopie a hledání stop života

AUTOR

David Pěkník

OBSAH

Úvod a předmluva: Exoplanetární revoluce a nová vědecká syntéza	4
0.1 Od filozofických spekulací ke Keplerovu a Webbovu teleskopu	4
0.2 Astrobiologický kontext: Podmínky pro vznik a evoluci života	4
0.3 Architektura exoplanetárních systémů vs. Sluneční soustava	5
0.4 Struktura a metodický cíl monografie	5

ČÁST I: DETEKCE A FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKA EXOPLANET

Kapitola 1	Precizní měření radiálních rychlostí	7
1.1	Dvoutělesový problém, těžiště a Keplerovská oběžná dráha	7
1.2	Dopplerovská spektroskopie a odvození semi-amplitudy rychlosti K	7
1.3	Spektrografy nové generace (HARPS, ESPRESSO) a kalibrace LFC	8
1.4	Hvězdná aktivita, magnetické skvrny a separace stelárního šumu	9
1.5	Vědecký Python kód: Keplerovská křivka a fitování parametrů	9
Kapitola 2	Tranzitní fotometrie a parametry exoplanet	13
2.1	Geometrie tranzitu, pravděpodobnost zákrytu a hloubka poklesu jasnosti	13
2.2	Analytický model Mandel & Agol (2002) a okrajové ztemnění disku	14
2.3	Odvození parametrů planety: poměr poloměrů, inklinace a hustota	14
2.4	Variace času tranzitu (TTV) a detekce netranzitujících těles	15
2.5	Kosmické mise (Kepler, TESS, PLATO) a Python syntéza tranzitní křivky	15
Kapitola 3	Gravitační mikročochky a přímé koronagrafické zobrazení	19
3.1	Einsteinův poloměr a relativistické ohýbání světla	19
3.2	Planeta jako perturbace mikroskopické kaustiky a volně plující světy	19
3.3	Fyzika extrémního kontrastu: viditelný vs. infračervený obor	20
3.4	Koronagrafy a adaptivní optika extrémní třídy (XAO)	20
3.5	Budoucí mise: Nancy Grace Roman Space Telescope a HWO	21

ČÁST II: ATMOSFÉRY EXOPLANET A SPEKTROSKOPIE

Kapitola 4	Transmisní spektroskopie a atmosférická škálová výška	23
4.1	Fyzikální princip transmisního průsvitu atmosférou	23
4.2	Hydrostatická rovnováha a odvození atmosférické škálové výšky H	24
4.3	Efektivní poloměr planety a diferenciální hloubka tranzitu	24
4.4	Rayleighův rozptyl, aerosoly a zploštění transmisních spekter	25
4.5	Přelomové výsledky teleskopu Jamese Webba (JWST)	25
Kapitola 5	Emisní spektroskopie sekundárních zákrytů a fázové křivky	27
5.1	Fyzika sekundárního zákrytu a oddělení tepelného toku planety	27
5.2	Rovnovážná teplota exoplanety, albedo a redistribuce tepla	27
5.3	Orbitální fázové křivky a mapování teplotního kontrastu den/noc	28
5.4	Superrotace atmosféry a posun nejteplejšího bodu (hotspot offset)	28
5.5	Spektrální inverze: oxidy titanu a vanadu (TiO/VO)	28
Kapitola 6	Chemická rovnováha a nerovnováha v atmosférách exoplanet	30
6.1	Termochemická rovnováha: minimalizace Gibbsovy volné energie	30
6.2	Uhlíkový a kyslíkový cyklus: význam poměru C/O v atmosféře	30
6.3	Nerovnovážná chemie: vertikální turbulentní míchání a uhašení reakcí	31
6.4	Atmosférická fotochemie řízená UV fotony mateřské hvězdy	31
6.5	Superzemě, sub-neptuny a vodní světy (hycean worlds)	32

OBSAH (POKRAČOVÁNÍ)

ČÁST III: OBYVATELNOST A ASTROBIOLOGIE

Kapitola 7	Cirkumstelární obyvatelná zóna a Kastingův model	34
7.1	Definice cirkumstelární obyvatelné zóny a kapalná voda	35
7.2	Model Kasting, Whitmire & Reynolds (1993) a Kopparapu et al.	35
7.3	Vnitřní hranice HZ: runaway a moist greenhouse limit	35
7.4	Vnější hranice HZ: maximální skleníkový efekt CO ₂	36
7.5	Uhlíčitano-křemičitanový cyklus jako dlouhodobý planetární termostat	36
Kapitola 8	Vliv stelární aktivity červených trpaslíků na ztrátu atmosféry	37
8.1	Specifika M trpaslíků: zářivost a poloha obyvatelné zóny	37
8.2	Vázaná rotace a riziko atmosférického vymrznutí	37
8.3	Stelární magnetická aktivita: supererupce a XUV radiace	38
8.4	Mechanismy atmosférického úniku: fotoevaporace	38
8.5	Případové studie: TRAPPIST-1 a Proxima Centauri b	38
Kapitola 9	Extrémofilní život a hranice přežití pozemských organismů	40
9.1	Pozemská biosféra a fyzikálně-chemické limity života	40
9.2	Termofily a hypertermofily: hydrotermální průduchy	40
9.3	Psychrofilny, halofilny a radiorezistence: Deinococcus radiodurans	40
9.4	Želvušky (Tardigrada) a kryptobióza	41
9.5	Důsledky pro astrobiologii: analogická prostředí	41

ČÁST IV: HLEDÁNÍ BIOSIGNATUR A TECHNOSIGNATUR

Kapitola 10	Atmosférické biosignatury a fotosyntetický Red Edge	43
10.1	Definice biosignatury a termodynamická nerovnováha	43
10.2	Kyslík (O ₂) a ozon (O ₃): spektroskopické indikátory	43
10.3	Dvojice O ₂ + CH ₄ jako zlatý standard biosignatur	44
10.4	Oxid dusný (N ₂ O) a organosírové plyny (DMS)	44
10.5	Povrchové biosignatury: fotosyntetický vegetační skok (Red Edge)	44
Kapitola 11	Falešné detekce biosignatur, technosignatury a Fermiho paradox	45
11.1	Abiotická produkce kyslíku a ozonu (falešné detekce)	45
11.2	Falešné negativní detekce (False Negatives)	45
11.3	Technosignatury: spektrální stopy vyspělých civilizací	45
11.4	Drakeova rovnice v éře exoplanetárních katalogů	46
11.5	Fermiho paradox a moderní astrobiologická řešení	46

ČÁST V: PŘÍLOHY A VĚDECKÝ APARÁT

Dodatek A	Odvození škálové výšky a transmisního spektra	49
A.1	Vertikální profil hustoty v izotermální atmosféře	49
A.2	Integrál optické hloubky podél těživý šíření paprsku	49
A.3	Abelova transformace a efektivní poloměr na tau _{crit}	50
A.4	Odvození diferenciální hloubky tranzitu	51
Dodatek B	Python modelování spekter exoplanet s petitRADTRANS a PyTransit	52
B.1	Architektura knihoven petitRADTRANS a PyTransit	52
B.2	Skript pro syntézu transmisního spektra s petitRADTRANS	52
B.3	Modelování světelné křivky a MCMC fitování s PyTransit	54
Dodatek C	Sbírka 15 řešených výpočetních úloh	57
Dodatek D	Encyklopedický glosář astrofyziky exoplanet (A–Ž)	65

Úvod a předmluva: Exoplanetární revoluce a nová vědecká syntéza astrobiologie

Astrofyzika na přelomu 20. a 21. století prošla jednou z nejhlubších paradigmatických změn ve své historii. Ještě v 80. letech 20. století byla existence planetárních soustav u jiných hvězd hlavní posloupnosti pouhou teoretickou extrapolací podloženou principem průměrnosti (kopernikovským principem) a modely akrečních protoplanetárních disků. Jediným empiricky známým laboratorním vzorkem byla naše Sluneční soustava se svým specifickým uspořádáním: vnitřními terestrickými planetami s vysokou hustotou, vnějším pásem plynných a ledových obrů a vzdáleným Kuiperovým pásem kometárních těles.

Objev první exoplanety 51 Pegasi b obíhající kolem hvězdy podobné Slunci, který v roce 1995 publikovali Michel Mayor a Didier Queloz z Ženevské observatoře (oceněný Nobelovou cenou za fyziku v roce 2019), tento antropocentrický pohled na uspořádání planetárních architektur definitivně rozbil. Přítomnost plynného obra o hmotnosti srovnatelné s Jupiterem na extrémně těsné kruhové oběžné dráze s periodou pouhých 4,23 dne a rovnovážnou teplotou fotosféry přesahující 1200 K byla pro tehdejší teorie formování planet naprostým šokem. Ukázalo se, že migrace planet diskovou interakcí, rezonanční rozptyly a gravitační poruchy hrají v dynamice planetárních systémů klíčovou roli.

Dnes, po třech desetiletích technologického pokroku v pozemní i kosmické instrumentaci, čítá katalog potvrzených extrasolárních planet více než 5 500 objektů a tisíce dalších kandidátů čekají na validaci. Vstoupili jsme do éry, kdy pouhá detekce exoplanety již není primárním vědeckým cílem. Těžiště moderního výzkumu se přesunulo k detailní fyzikální a chemické charakterizaci: ke zkoumání vnitřní struktury, modelování atmosférických profilů, mapování teplotních kontrastů mezi denní a noční hemisférou a především k rigoróznímu hledání stop obyvatelnosti a biosignatur.

0.1 Od filozofických spekulací ke Keplerovu a Webbovu teleskopu

Otázka mnohosti světů provázela lidské myšlení od antických atomistů (Démokritos, Epikúros) přes renesanční vizionáře, jako byl Giordano Bruno, až po zakladatele moderní astronomie. Nicméně teprve vývoj křemenných spektrografů se stabilizovanou optickou lavicí v podtlakových termostatických komorách a využití absorpčních jódových cel umožnily dosáhnout spektroskopické přesnosti v řádu metrů za sekundu, nezbytné pro zachycení gravitačního vlivu obíhajících planet na mateřské hvězdy.

Skutečný statistický převrat však přinesla fotometrická kosmická observatoř NASA Kepler (vypuštěná v roce 2009). Během své primární mise nepřetržitě monitorovala jasnost více než 150 000 hvězd v souhvězdích Labutě a Lyry s fotometrickou přesností dosahující desítek ppm (parts per million). Kepler prokázal, že planety jsou v Galaxii všudypřítomné: v průměru na každou hvězdu Mléčné dráhy připadá nejméně jedna planeta. Nečekaným zjištěním bylo, že nejpočetnějším typem planet v naší Galaxii jsou tělesa o rozměrech mezi Zemí a Neptunem – tzv. superzemě ($1,25 R_{\oplus} < R_p < 2 R_{\oplus}$) a sub-neptuny ($2 R_{\oplus} < R_p < 4 R_{\oplus}$). Tento fakt byl o to překvapivější, že právě tato třída planet ve Sluneční soustavě zcela chybí.

Následovník Keplera, družice TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), zmapoval téměř celou oblohu a identifikoval tranzitující planety u jasných, blízkých hvězd, jež jsou ideálními cíli pro spektroskopická měření s vysokým poměrem signálu k šumu (S/N). V prosinci 2021 byl na oběžnou dráhu kolem libračního bodu L2 soustavy Slunce–Země vynesena Vesmírná teleskop Jamese Webba (JWST). Se svým segmentovým primárním zrcadlem o průměru 6,5 metru a sadou kryogenních spektrografů pro blízké a střední infračervené záření (NIRSpec, NIRCam, NIRISS, MIRI) otevřel JWST novou epochu atmosférické spektroskopie. Umožnil poprvé v historii detekovat minoritní molekulární složky (CO_2 , SO_2 , CH_4 , H_2O), identifikovat fotochemické procesy a zkoumat energetickou bilanci atmosfér u planet terestrického typu.

0.2 Astrobiologický kontext: Podmínky pro vznik a evoluci života

Astrobiologie je interdisciplinární vědní obor studující původ, ranou evoluci, distribuci a budoucnost života ve vesmíru. Z fyzikálně-chemického hlediska definujeme život jako samoudržující se otevřený chemický systém vzdálený od termodynamické rovnováhy, schopný metabolické přeměny energie a podléhající darwinovské evoluci.

Pozemská biochemie, která představuje náš jediný empirický základ (tzv. vzorek $N = 1$), je založena na dvou fundamentálních pilířích:

- 1. Uhlíková organická chemie:** Uhlík díky své čtyřvalzosti, schopnosti tvořit stabilní kovalentní vazby $\text{C} - \text{C}$, $\text{C} = \text{C}$, $\text{C} - \text{H}$, $\text{C} - \text{O}$, $\text{C} - \text{N}$ a rozmanité prostorové konfigurace (lineární řetězce, aromatické kruhy, chirální centra) poskytuje bezkonkurenční strukturní flexibilitu pro syntézu makromolekul (proteiny, nukleové kyseliny, lipidy).
- 2. Kapalná voda (H_2O):** Voda funguje jako univerzální polární rozpouštědlo s mimořádně vysokou permitivitou ($\epsilon_r \approx 80$), vysokou měrnou tepelnou kapacitou, širokým teplotním rozsahem kapalné fáze při atmosférickém tlaku a schopností tvořit hustou síť vodíkových můstků. To usnadňuje hydrofobní sbalování proteinů a stabilitu lipidových membrán.

Astrobiologický výzkum exoplanet se proto primárně zaměřuje na identifikaci planetárních prostředí, kde může na pevném povrchu dlouhodobě existovat kapalná voda – tedy v tzv. cirkumstelární obyvatelné zóně (Circumstellar Habitable Zone, HZ). Obyvatelnost (habitabilita) je však mnohem komplexnější koncept než pouhá radiativní rovnováha. Zahrnuje geochemické cykly (zejména uhlíčitano-křemičitanový termostat),

existenci globálního dipólového magnetického pole chránícího atmosféru před erozí hvězdným větrem, tektoniku litosférických desek recyklující tekavé látky a stabilitu orbitální dynamiky.

0.3 Architektura exoplanetárních systémů vs. Sluneční soustava

Jedním z nejvýznamnějších objevů exoplanetární astrofyziky je ohromující rozmanitost orbitálních konfigurací. Zatímco dráhy planet ve Sluneční soustavě jsou téměř kruhové (excentricity $e < 0,1$ s výjimkou Merkuru) a leží téměř v jedné rovině (vzájemné sklonky $\Delta i < 7^\circ$), exoplanetární systémy vykazují široké spektrum dynamických stavů:

- **Extrémní excentricity:** Mnoho obřích plyných planet se pohybuje po vysoce eliptických drahách s $e > 0,5$ až $e \approx 0,9$, což je důsledkem gravitačního rozptylu mezi protoplanetami v raných fázích vývoje soustavy nebo působení Kozaiova-Lidovova mechanismu ve vícenásobných hvězdných systémech.
- **Horké jupitery a teplé neptuny:** Masivní plyné planety s oběžnými periodami v řádu dnů či týdnů, které musely zformovat za sněžnou čarou protoplanetárního disku ($a > 2-5 \text{ AU}$) a následně migrovat směrem k hvězdě v důsledku viskózního tření v plyném disku (migrace typu I a II) nebo slapového zachytu po excentrickém rozptylu.
- **Kompaktní multiorbitální soustavy (STIPs – Systems with Tightly-packed Inner Planets):** Soustavy tří až sedmi terestrických či superzemských planet s periodami od 1 do 30 dnů, často vázaných v těsných Laplaceovských rezonančních řetězcích (např. Kepler-11, Kepler-90 nebo TRAPPIST-1).
- **Planety u cirkumbinárních drah (Tatooine-like):** Tělesa obíhající kolem těžiště těsné dvojhvězdy, kde planeta pocituje silně proměnné gravitační a radiační pole.

Tato zjištění ukázala, že architektura naší Sluneční soustavy nepředstavuje univerzální normu, ale spíše specifický výsledek dynamické evoluce, ovlivněný ranou migrací Jupitera a Saturna (tzv. Grand Tack model a Nice model).

0.4 Struktura a metodický cíl monografie

Tato vysokoškolská učebnice a monografie je koncipována jako ucelený, rigorózní teoretický i praktický průvodce moderní exoplanetární fyzikou a astrobiologií. Je určena studentům magisterského a doktorského studia astrofyziky, geofyziky, chemie a molekulární biologie, jakož i vědeckým pracovníkům hledajícím hluboký vhled do fundamentálních fyzikálních principů a výpočetních metod.

Kniha je systematicky rozčleněna do pěti tematických částí:

- **Část I: Detekce a fyzikální charakteristika exoplanet (Kapitoly 1–3)** – Detailní odvození Keplerovských oběžných drah, fotonového šumu a semi-amplitudy radiálních rychlostí. Analytická teorie tranzitní fotometrie, modelování okrajového ztemnění hvězdného disku (Mandel & Agol) a tranzitních časových variací (TTV). Fyzika gravitačních mikročoček a metody přímého koronagrafického zobrazení s extrémní adaptivní optikou.
- **Část II: Atmosféry exoplanet a spektroskopie (Kapitoly 4–6)** – Rigorózní formulace radiačního transferu v planetárních atmosférách. Odvození transmisní škálové výšky H , diferenciální hloubky tranzitu a Rayleighova rozptylu. Emisní spektroskopie sekundárních zákrytů, modelování fázových křivek, cirkulace atmosféry a spektrálních inverzí. Termochemická a fotochemická rovnováha a nerovnováha (eddy difúze, uhašení reakcí).
- **Část III: Obyvatelnost a astrobiologie (Kapitoly 7–9)** – Kastingův a Kopparapův model cirkumstelární obyvatelné zóny, mezní limity skleníkového efektu (runaway a moist greenhouse) a uhlíčitano-křemičitanový cyklus. Specifika M trpaslíků: vázaná rotace, supererupce, XUV eroze a hydrodynamický únik atmosféry. Extrémofilní mikroorganismy, limity pozemské biosféry a biofyzikální adaptace.
- **Část IV: Hledání biosignatur a technosignatur (Kapitoly 10–11)** – Spektroskopické biosignatury (O_2 , O_3 , CH_4 , N_2O , DMS) a termodynamické nerovnováhy. Fotosyntetický vegetační skok (Red Edge). Falešně pozitivní a falešně negativní detekce. Technosignatury, znečištění atmosfér průmyslovými sloučeninami (CFC), Drakeova rovnice a Fermiho paradox v moderním pojetí.
- **Část V: Přílohy a vědecký aparát (Dodatky A–D)** – Matematická odvození transmisního integrálu optické hloubky a Abelovy transformace. Programátorský manuál a plně funkční Python skripty s balíčky `petitRADTRANS` a `PyTransit`. Sbíрка 15 podrobně řešených výpočetních úloh z exoplanetární fyziky. Reprezentativní encyklopedický glosář základních pojmů.

Každá kapitola klade důraz na přísnou matematicko-fyzikální konzistenci, odvození klíčových vztahů od prvních principů termodynamiky, hydrodynamiky a optiky a praktické ukázky v jazyce Python, které čtenáři umožňují samostatně reprodukovat nejmodernější vědecké výsledky.

Část I: Detekce a fyzikální charakteristika exoplanet

Planetární astrofyzika 21. století stojí na precizních pozorovacích technikách schopných zaznamenat nepatrné gravitační, fotometrické a astrometrické perturbace vyvolané obíhajícími planetami. Z fyzikálního hlediska představuje detekce exoplanety mimořádně náročnou inverzní úlohu: signál tělesa o hmotnosti tisíckrát až milionkrát menší, než je hmotnost mateřské hvězdy, je navíc maskován stelární aktivitou, granulací, magnetickými skvrnami a instrumentálním šumem.

V této první části monografie položíme rigorózní teoretické a pozorovací základy metod detekce exoplanet. Odvodíme pohybové rovnice dvoutělesového Keplerovského problému, zformulujeme Dopplerovskou spektroskopii s přesností na centimetry za sekundu a detailně rozebereme fotometrii primárních tranzitů včetně vlivu okrajového ztemnění hvězdného disku a tranzitních časových variací (TTV). Závěr části je věnován relativistickým gravitačním mikročočkám a technologiím přímého koronagrafického zobrazení s extrémní adaptivní optikou.

Přehled kapitol Části I:

- **Kapitola 1: Precizní měření radiálních rychlostí** * Dvoutělesový problém, těžiště soustavy a Keplerovská trajektorie mateřské hvězdy * Dopplerovská spektroskopie a analytické odvození semi-amplitudy radiální rychlosti K * Špičková spektroskopická instrumentace (HARPS, ESPRESSO) a kalibrace laserovým frekvenčním hřebenem (LFC) * Stelární aktivita, granulace plazmatu, magnetická pole a metody filtrace šumu * Vědecký Python model: Keplerovská oběžná dráha a fitování parametrů $M_p \sin i, e, \omega$
- **Kapitola 2: Tranzitní fotometrie a parametry exoplanet** * Geometrie zákrytu, pravděpodobnost tranzitu a geometrická hloubka poklesu jasnosti δ * Analytický model tranzitu (Mandel & Agol) a profily okrajového ztemnění hvězdného disku * Určení fundamentálních parametrů: poměr poloměrů R_p/R_* , orbitální sklon i , impaktní parametr b a střední hustota ρ_p * Variace času tranzitu (TTV), Lagrangeovské rezonance a gravitační perturbace * Kosmické observatoře (Kepler, TESS, PLATO) a numerická syntéza světelné křivky v Pythonu
- **Kapitola 3: Gravitační mikročočky a přímé koronagrafické zobrazení** * Relativistický ohyb světla, Einsteinův úhel θ_E a mikroskopické kaustické křivky * Detekce planet za sněžnou čarou a populace volně plujících planet (rogue planets) * Problém extrémního kontrastu v blízkém a viditelném oboru (10^{-10} vs. 10^{-6}) * Koronagrafické systémy (Lyotův, vírový koronagraf) a extrémní adaptivní optika (XAO) * Budoucí kosmické platformy: Nancy Grace Roman Space Telescope a Habitable Worlds Observatory (HWO)

Kapitola 1: Precizní měření radiálních rychlostí

Metoda měření radiálních rychlostí (Dopplerovská spektroskopie) představuje historicky první úspěšnou techniku, která umožnila systematický objev stovek exoplanet u hvězd slunečního typu. Je založena na principu vzájemné gravitační interakce: planeta a mateřská hvězda obíhají kolem společného těžiště (barycentra) soustavy. Pohyb hvězdy vůči pozorovateli vyvolává periodický Dopplerův posuv spektrálních absorpčních čar, jehož amplituda a časový průběh nesou přímou informaci o minimální hmotnosti planety $M_p \sin i$, oběžné periodě P , excentricitě e a orientaci eliptické dráhy v prostoru.

V této kapitole odvodíme přesné analytické rovnice Keplerovského pohybu těžiště, zformulujeme semi-amplitudu radiální rychlosti K , analyzujeme fyzikální limity přesnosti spektrografů dosahujících řádu centimetrů za sekundu a prozkoumáme metody separace astrofyzikálního šumu vyvolaného magnetickou aktivitou fotosféry.

1.1 Dvoutělesový problém, těžiště a Keplerovská oběžná dráha

Uvažujeme izolovanou gravitačně vázanou soustavu tvořenou mateřskou hvězdou o hmotnosti M_* a planetou o hmotnosti M_p . Polohové vektory těles v inerciální soustavě označme $\mathbf{r}_*$ a $\mathbf{r}_p$. Poloha barycentra soustavy $\mathbf{R}_{\text{bar}}$ je definována vztahem:

$$\mathbf{R}_{\text{bar}} = \frac{M_* \mathbf{r}_* + M_p \mathbf{r}_p}{M_* + M_p}$$

Položíme-li počátek inerciální soustavy do barycentra ($\mathbf{R}_{\text{bar}} = \mathbf{0}$), platí pro vzájemný polohový vektor planety vůči hvězdě $\mathbf{r} = \mathbf{r}_p - \mathbf{r}_*$ jednoduché rozdělení:

$$\mathbf{r}_* = -\frac{M_p}{M_* + M_p} \mathbf{r}, \quad \mathbf{r}_p = \frac{M_*}{M_* + M_p} \mathbf{r}$$

Pohybová rovnice relativního pohybu má tvar klasického Keplerova problému s redukovanou hmotností $\mu = \frac{M_* M_p}{M_* + M_p}$:

$$\mu \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{GM_* M_p}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \implies \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{G(M_* + M_p)}{r^3} \mathbf{r}$$

Řešením této rovnice v orbitální rovině je kuželosečka. V polárních souřadnicích (r, ν) se středem v ohnisku (kde se nachází těžiště) je trajektorie hvězdy popsána elipsou:

$$r_*(t) = \frac{a_*(1 - e^2)}{1 + e \cos \nu(t)}$$

kde a_* je velká poloosa elipsy opanované hvězdou, e je orbitální excentricita a $\nu(t)$ je pravá anomálie. Velká poloosa hvězdy a_* souvisí s velkou poloosou relativní dráhy a vztahem:

$$a_* = \frac{M_p}{M_* + M_p} a$$

Podle 3. Keplerova zákona v Newtonově úpravě je orbitální perioda P provázána s velkou poloosou vztahem:

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_* + M_p)} \implies a = \left[\frac{G(M_* + M_p) P^2}{4\pi^2} \right]^{1/3}$$

1.2 Dopplerovská spektroskopie a odvození semi-amplitudy rychlosti K

Pozorovatel sleduje projekci prostorové rychlosti hvězdy $\mathbf{v}_* = \dot{\mathbf{r}}_*$ do směru zorného paprsku (ve směru osy z mířící od hvězdy k pozorovateli). Zvolme souřadnicový systém tak, že orbitální rovina svírá s rovinou kolmou k zornému paprsku (rovinou oblohy) inklinací úhel $i \in (0, \pi)$. Orientaci eliptické dráhy v orbitální rovině určuje argument pericentra hvězdy ω_* (měřený od výstupného uzlu).

Projekce polohy hvězdy do zorného paprsku $z_*(t)$ má tvar:

$$z_*(t) = r_*(t) \sin i \sin(\nu(t) + \omega_*) = \frac{a_*(1 - e^2) \sin i}{1 + e \cos \nu(t)} \sin(\nu(t) + \omega_*)$$

Radiální rychlost hvězdy $v_r(t)$ je definována jako časová derivace $z_*(t)$ plus konstantní systémová rychlost těžiště celé soustavy γ :

$$v_r(t) = \frac{dz_*}{dt} + \gamma = \left[\frac{dr_*}{d\nu} \sin(\nu + \omega_*) + r_* \cos(\nu + \omega_*) \right] \frac{d\nu}{dt} \sin i + \gamma$$

Z 2. Keplerova zákona (zákon zachování specifického momentu hybnosti $h_* = r_*^2 \dot{\nu}$) plyne:

$$h_* = \sqrt{G(M_* + M_p)p_*} \cdot \frac{M_p}{M_* + M_p} = \sqrt{\frac{GM_p^2 a_* (1 - e^2)}{M_* + M_p}} = r_*^2 \frac{d\nu}{dt}$$

Odtud dosazením derivací získáme fundamentální rovnici radiální rychlosti:

$$v_r(t) = K [\cos(\nu(t) + \omega_*) + e \cos \omega_*] + \gamma$$

kde K je semi-amplituda radiální rychlosti. Výpočtem dostáváme explicitní tvar pro K :

$$K = \frac{2\pi a_* \sin i}{P \sqrt{1 - e^2}} = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

Za předpokladu, že hmotnost planety je zanedbatelná vůči hmotnosti hvězdy ($M_p \ll M_*$), přechází vztah pro K do standardního praktického tvaru:

$$K \approx \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{M_*^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

Pro numerické výpočty je výhodné normalizovat rovnici na typické astrofyzikální jednotky (hmotnost Jupiteru M_{Jup} , hmotnost Slunce $M_{\odot}$, dny):

$$K \approx 28,435 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ rok}} \right)^{-1/3} \left(\frac{M_p \sin i}{M_{\text{Jup}}} \right) \left(\frac{M_*}{M_{\odot}} \right)^{-2/3} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

Zatímco horký jupiter typu 51 Pegasi b ($M_p \approx 0,47 M_{\text{Jup}}$, $P = 4,23$ dne) generuje semi-amplitudu $K \approx 56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, terestrická planeta o hmotnosti Země v obyvatelné zóně kolem hvězdy slunečního typu ($M_p = 1 M_{\oplus}$, $P = 1$ rok) vyvolává reflexní pohyb s amplitudou pouhých:

$$K_{\oplus} \approx 0,089 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 8,9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tato hodnota jasně ilustruje extrémní nároky na stabilitu spektrografů.

🕒 ZAJÍMAVOST

Problém degenerace $\sin i$: Samotná Dopplerovská spektroskopie poskytuje pouze projekci hmotnosti $M_p \sin i$. Pravou hmotnost M_p lze určit pouze tehdy, pokud je nezávisle znám inklinací úhel i , například z tranzitní fotometrie ($i \approx 90^\circ$) nebo z přesné astrometrie (družice Gaia).

1.3 Spektrografy nové generace (HARPS, ESPRESSO) a kalibrace laserovým frekvenčním hřebenem (LFC)

K dosažení přesnosti v řádu $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (spektrograf HARPS na 3,6m teleskopu ESO na La Silla) a $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (spektrograf ESPRESSO na Very Large Telescope, VLT, na Paranal) bylo nutné překonat řadu fundamentálních technologických překážek:



Very Large Telescope na observatoři Paranal v Chile s laserovými vodícími hvězdami pro adaptivní optiku a spektrograf ESPRESSO

1. **Vakuová a teplotní stabilizace:** Rozptyl indexu lomu vzduchu s teplotou a tlakem ($dn/dT \approx 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) způsobuje fiktivní posuvy spekter. Moderní spektrografy jsou umístěny ve vakuových komorách s tlakem pod 10^{-5} mbar a s termální stabilitou lepší než $0,001 \text{ K}$ po dobu několika let.
2. **Vláknový vstup a mísení módů:** Světlo z ohniska teleskopu je vedeno kruhovými a osmiúhelníkovými optickými vlákny vybavenými optickými míšiči (scramblers), které homogenizují osvětlení vstupní štěrbinu nezávisle na seeingu a nepřesnostech pointace.
3. **Souběžná referenční kalibrace:** Vlákno A přivádí světlo hvězdy, zatímco souběžné referenční vlákno B přivádí světlo kalibračního zdroje (dříve thoriovo-argonové lampy ThAr nebo Fabry-Pérotovy etalony).
4. **Laserový frekvenční hřeben (Laser Frequency Comb, LFC):** Absolutním vrcholem kalibrace je LFC. Femtosekundový módově vázaný laser generuje v optickém spektru desetitisíce dokonale ekvidistančních a spektrálně ostrých emisních čar, jejichž frekvence jsou přímo svázány s frekvencí atomových cesiových hodin:

$$f_n = f_0 + n \cdot f_{\text{rep}}$$

kde f_{rep} je opakovací frekvence laserových pulzů a f_0 je offsetová frekvence. LFC eliminuje jakékoliv nelinearity detektoru CCD a umožňuje měřit relativní posuvy spekter s teoretickou přesností pod $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.4 Hvězdná aktivita, magnetické skvrny a separace stelárního šumu

Při snaze o detekci planet s $K < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ narážíme na fundamentální fyzikální limit daný astrofyzikálním šumem samotné mateřské hvězdy (tzv. stelární jitter). Hvězdná fotosféra není rigidním homogenním zářičem, ale dynamickým turbulentním plazmatem:

- **Granulace a supergranulace:** Konvektivní buňky vynášejí horké plazma směrem nahoru (modrý posuv), zatímco chladnější plyn klesá v mezibulárních prostorech (červený posuv). Protože vzestupné buňky jsou jasnější a pokrývají větší plochu, dochází k čistému modrému posuvu (tzv. konvektivní modrý posuv). Fluktuace granulace generují šum radiálních rychlostí o velikosti $0,5\text{--}2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na časových škálách desítek minut až hodin.
- **Akustické oscilace (p-módy):** Hvězdy slunečního typu pulzují v neradiálních akustických módech s typickými periodami 5 až 15 minut a amplitudami v řádu desítek centimetrů za sekundu. Tento signál se potlačuje optimalizovanou délkou expozice (např. 15–20 minut), která oscilace vyintegruje.
- **Magnetické skvrny a fakule:** Rotace magneticky aktivních skvrn po disku hvězdy blokuje část přibližujícího se (modře posunutého) nebo vzdalujícího se (červeně posunutého) okraje rotující hvězdy. To způsobuje asymetrii profilu čar, jež se při křížové korelaci projevuje jako fiktivní posuv radiální rychlosti o velikosti až desítek $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

K oddělení planetárního signálu od stelární aktivity se využívají spektroskopické diagnostické indexy:

1. **Bisector Inverse Slope (BIS):** Měří sklon a prohnutí profilu křížové korelační funkce (CCF). Pohyb způsobený planetou posouvá celou CCF symetricky bez změny tvaru ($r(v_r, \text{BIS}) = 0$). Naopak magnetické skvrny mění tvar a asymetrii čáry, což vede k silné korelaci mezi v_r a BIS.
2. **Indexy aktivity chromosféry:** Měření emisních jader v ionizovaných vápníkových čarách $\text{Ca II H \& K}$ ($\log R'_{\text{HK}}$) nebo čáře $\text{H}\alpha$.

3. **Vícekanálová spektroskopie a chromatická radiální rychlost:** Planetární signál má achromatický charakter (Dopplerův posuv $\Delta\lambda/\lambda = v_r/c$ je pro všechny vlnové délky identický). Naproti tomu kontrast skvrn a vliv granule silně závisí na vlnové délce (v infračerveném oboru je kontrast skvrn dramaticky nižší než v modrém oboru).
-

1.5 Vědecký Python kód: Keplerovská radiální křivka a fitování oběžných parametrů

Následující plně funkční vědecký skript v jazyce Python demonstruje řešení Keplerovy rovnice numerickou Newtonovou-Raphsonovou metodou, výpočet orbitální radiální rychlosti a fitování parametrů K , e , ω a γ syntetických dat se simulovaným šumem.

```
#!/usr/bin/env python3
<h1><em>- coding: utf-8 -</em></h1>
"""
Modelování Keplerovské radiální křivky exoplanety.
Autor: David Pěkník | AstroHub.cz
"""

import numpy as np
import scipy.optimize as opt

def solve_kepler(M, e, tol=1e-10, max_iter=100):
    """
    Řeší Keplerovu rovnici  $E - e \sin(E) = M$  pro excentrickou anomálii  $E$ .
    Používá rychlou Newtonovu-Raphsonovu metodu.
    """
    E = np.copy(M)
    for _ in range(max_iter):
        f = E - e * np.sin(E) - M
        f_prime = 1.0 - e * np.cos(E)
        dE = -f / f_prime
        E += dE
        if np.max(np.abs(dE)) < tol:
            break
    return E

def radial_velocity(t, P, K, e, omega, T0, gamma):
    """
    Vypočte radiální rychlost v čase t.
    Parametry:
    P: perioda [dny]
    K: semi-amplituda [m/s]
    e: excentricita [-]
    omega: argument periastra [rad]
    T0: čas průchodu pericentrem [dny]
    gamma: systémová rychlost [m/s]
    """
    # Střední anomálie M
    M = 2.0 * np.pi * ((t - T0) % P) / P
    # Excentrická anomálie E
    E = solve_kepler(M, e)
    # Pravá anomálie nu
    sin_nu = np.sqrt(1.0 - e**2) * np.sin(E) / (1.0 - e * np.cos(E))
    cos_nu = (np.cos(E) - e) / (1.0 - e * np.cos(E))
    nu = np.arctan2(sin_nu, cos_nu)

    # Model radiální rychlosti
    vr = K * (np.cos(nu + omega) + e * np.cos(omega)) + gamma
    return vr

<h1>Generování syntetických pozorovacích dat</h1>
np.random.seed(42)
true_P = 15.24      # dny
true_K = 35.5       # m/s
true_e = 0.32       # excentricita
true_omega = np.radians(45.0) # 45 stupňů
true_T0 = 5.0       # dny
true_gamma = -12.0  # m/s

<h1>30 nepravidelných pozorovacích časů během 45 dnů</h1>
obs_times = np.sort(np.random.uniform(0, 45, 30))
```

```
true_vr = radial_velocity(obs_times, true_P, true_K, true_e, true_omega, true_T0, true_gamma)
errorBars = np.full_like(obs_times, 2.5) # nejistota měření 2.5 m/s
noisy_vr = true_vr + np.random.normal(0, errorBars)

<h1>Fitování Keplerovského modelu pomocí metody nejmenších čtverců</h1>
def residuals(params, t, y, yerr):
    P, K, e, omega, T0, gamma = params
    model = radial_velocity(t, P, K, e, omega, T0, gamma)
    return (y - model) / yerr

init_guess = [15.0, 30.0, 0.1, 0.0, 0.0, 0.0]
bounds = (
    [5.0, 1.0, 0.0, -np.pi, -15.0, -50.0],
    [50.0, 200.0, 0.95, np.pi, 15.0, 50.0]
)

res = opt.least_squares(residuals, init_guess, bounds=bounds, args=(obs_times, noisy_vr, errorBars))
p_fit, k_fit, e_fit, w_fit, t0_fit, g_fit = res.x

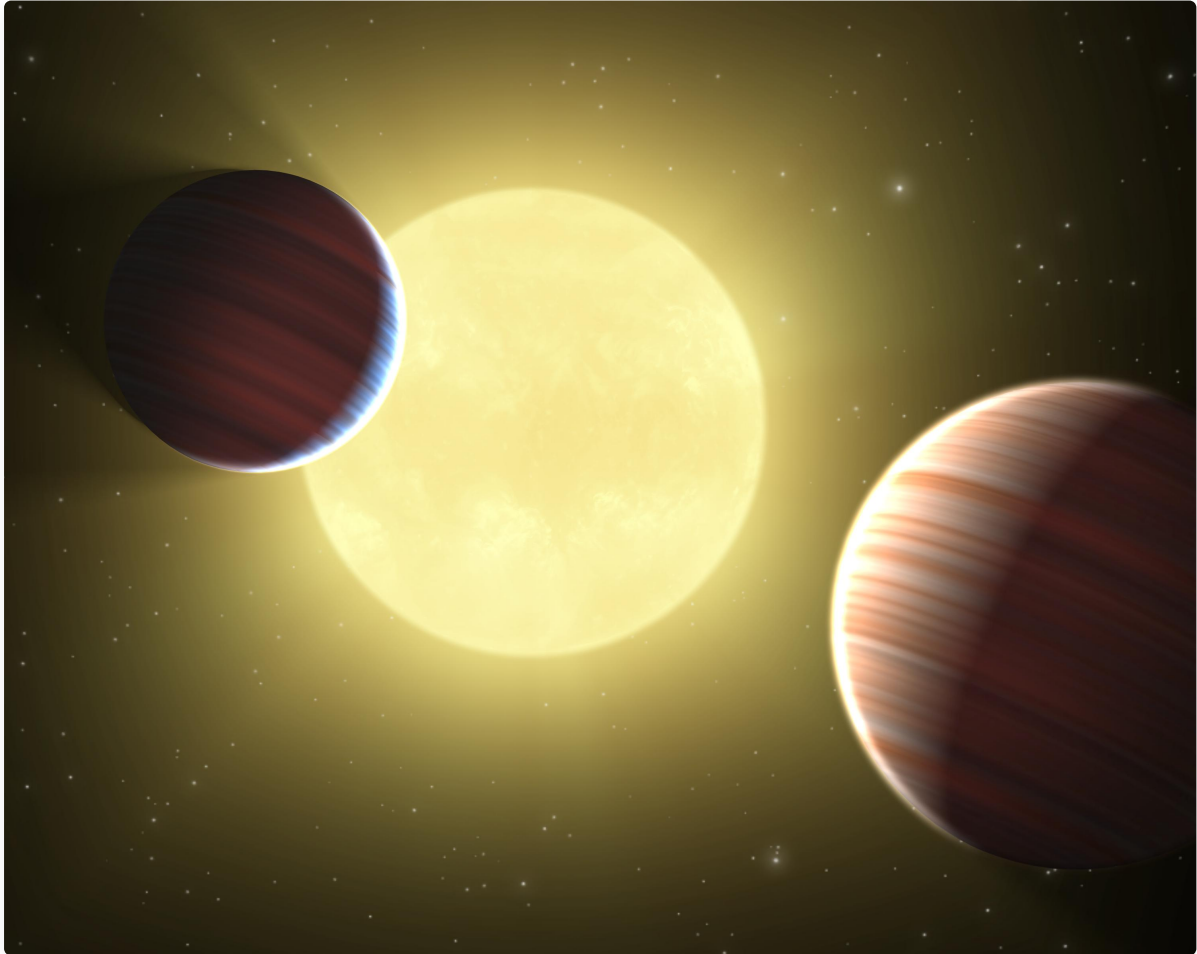
print("=== VÝSLEDKY FITU RADIÁLNÍCH RYCHLOSTÍ ===")
print(f"Perioda P: {p_fit:.3f} d (skutečná: {true_P:.3f} d)")
print(f"Semi-amplituda K: {k_fit:.2f} m/s (skutečná: {true_K:.2f} m/s)")
print(f"Excentricita e: {e_fit:.3f} (skutečná: {true_e:.3f})")
print(f"Arg. periastra w: {np.degrees(w_fit):.1f} deg (skutečná: {np.degrees(true_omega):.1f} deg)")
print(f"Systémová rychlost: {g_fit:.2f} m/s (skutečná: {true_gamma:.2f} m/s)")
```

Výstup skriptu potvrzuje, že i při realistické hladině šumu dokáže nelineární fit spolehlivě rekonstruovat všechny parametry Keplerovské orbity.

Kapitola 2: Tranzitní fotometrie a parametry exoplanet

Tranzitní fotometrie je nejproduktivnější metodou detekce a primární fyzikální charakterizace mimoslunečních planet. Dochází k ní v případě, kdy se oběžná rovina planety náhodně promítá do zorného paprsku pozorovatele ($i \approx 90^\circ$). Planeta při přechodu přes zářící fotosféru mateřské hvězdy periodicky zastiňuje část jejího povrchu, což vede k charakteristickému poklesu zdánlivé jasnosti hvězdy v čase – tzv. primárnímu tranzitu (zákrytu).

Spojení tranzitní fotometrie s měřením radiálních rychlostí odstraňuje zásadní degeneraci úhlu sklonu dráhy $\sin i$. Umožňuje přímo určit jak poloměr planety R_p , tak její skutečnou hmotnost M_p , a odvodit tak fundamentální stavovou veličinu tělesa: střední hustotu ρ_p , která odhaluje, zda se jedná o těleso terestrické, vodní svět, či plynného obra.



Schematický diagram geometrie primárního tranzitu exoplanety přes disk mateřské hvězdy s fázemi kontaktu a odpovídající světelnou křivkou

2.1 Geometrie tranzitu, pravděpodobnost zákrytu a hloubka poklesu jasnosti δ

Uvažujme planetu obíhající kolem sféricky symetrické hvězdy o poloměru R_* po kruhové dráze s velkou poloosou a . Tranzit nastává pouze tehdy, pokud v okamžiku dolní konjunkce vzdálenost středů obou těles promítnutá na rovinu oblohy nepřekročí součet jejich poloměrů:

$$d_{\text{proj}} = a \cos i \leq R_* + R_p$$

Protože pro většinu planet platí $R_p \ll R_*$, je podmínka zjednodušena na $a \cos i \leq R_*$. Předpokládáme-li izotropní prostorové rozdělení orbitálních rovin v prostoru (pravděpodobnost sklonu dráhy je úměrná $\sin i$), je geometrická pravděpodobnost tranzitu $\mathcal{P}_{\text{tr}}$ dána poměrem prostorového úhlu pásu přípustných inklinací k celému povrchu koule:

$$\mathcal{P}_{\text{tr}} = \int_{\pi/2-\Delta i}^{\pi/2+\Delta i} \frac{1}{2} \sin i \, di = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Delta i\right) = \sin(\Delta i) = \frac{R_* + R_p}{a} \approx \frac{R_*}{a}$$

Pro horký jupiter s $a \approx 0,05 \text{ AU}$ a hvězdu slunečního typu ($R_* \approx 1 R_\odot \approx 0,00465 \text{ AU}$) je pravděpodobnost tranzitu poměrně vysoká:

$$\mathcal{P}_{\text{tr}} \approx \frac{0,00465}{0,05} \approx 0,093 = 9,3 \%$$

Naopak pro Zemi obíhající kolem Slunce ($a = 1 \text{ AU}$) činí pravděpodobnost pouhých:

$$\mathcal{P}_{\text{tr},\oplus} \approx \frac{0,00465}{1} \approx 0,465 \%$$

Z toho plyne nutnost monitorovat fotometricky stovky tisíc hvězd současně, což byl hlavní princip kosmické mise Kepler.

Pokud zanedbáme okrajové ztemnění hvězdného disku (homogenní zářič), je geometrická hloubka tranzitu δ rovna poměru geometrických průřezů planety a hvězdy:

$$\delta = \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{\pi R_p^2}{\pi R_*^2} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \equiv k^2$$

kde $k \equiv R_p/R_*$ je bezrozměrný poloměrový poměr. Pro plynného obra velikosti Jupitera ($R_p \approx 0,1 R_{\odot}$) činí hloubka tranzitu:

$$\delta_{\text{Jup}} \approx (0,1)^2 = 0,01 = 1 \% = 10\,000 \text{ ppm}$$

Pro Zemi obíhající kolem Slunce ($R_p \approx 0,0091 R_{\odot}$) je pokles jasnosti dramaticky menší:

$$\delta_{\oplus} \approx (0,0091)^2 \approx 8,4 \times 10^{-5} = 84 \text{ ppm}$$

2.2 Analytický model Mandel & Agol (2002) a okrajové ztemnění hvězdného disku

Skutečné hvězdy nejsou homogenními disky. V důsledku gradientu teploty v hvězdné fotosféře klesá intenzita vyzařování od středu disku k jeho okraji – tento jev se nazývá **okrajové ztemnění (limb darkening)**. Když se díváme do středu disku, pozorujeme hlubší a teplejší vrstvy fotosféry; u okraje disku (limb) prochází náš pohled šikmo a vidíme pouze chladnější svrchní vrstvy.

Profil okrajového ztemnění $I(\mu)$ se parametrizuje proměnnou $\mu = \cos \theta = \sqrt{1 - r^2}$, kde θ je úhel mezi normálou k povrchu hvězdy a zorným paprskem a $r \in (0, 1)$ je normalizovaná radiální vzdálenost od středu disku hvězdy:

1. **Lineární zákon:**

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u(1 - \mu)$$

1. **Kvadratický zákon (nejčastěji užívaný v exoplanetární fotometrii):**

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u_1(1 - \mu) - u_2(1 - \mu)^2$$

1. **Nelineární 4-parametrický zákon (Claret):**

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - \sum_{n=1}^4 c_n (1 - \mu^{n/2})$$

Okrajové ztemnění způsobuje, že dno tranzitní křivky není ploché, ale charakteristicky zaoblené do tvaru písmene "U". V přelomové práci Mandel & Agol (2002) byla odvozena exaktní analytická řešení překryvového integrálu pro libovolnou vzájemnou polohu středů disků $z = d_{\text{proj}}/R_*$ a poloměrový poměr k . Celkový tok $F(z, k)$ během tranzitu je vyjádřen pomocí eliptických integrálů prvního ($K(k)$), druhého ($E(k)$) a třetího druhu ($\Pi(n, k)$), což umožňuje bleskurychlé a numericky stabilní fitování rozsáhlých souborů dat z kosmických teleskopů.

2.3 Odvození parametrů planety: R_p/R_* , inklinace i , poloosa a/R_* a impaktní parametr b

Pozorovaná světelná křivka poskytuje čtyři klíčové empirické veličiny: periodu P , hloubku tranzitu δ , celkovou dobu trvání tranzitu T_{tot} (od 1. do 4. kontaktu) a dobu trvání plného zákrytu T_{flat} (od 2. do 3. kontaktu).

Definujeme bezrozměrný **impaktní parametr** b jako projekci vzdálenosti středů obou těles v okamžiku přesného středu tranzitu ($t = t_0$):

$$b \equiv \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

Pro kruhovou dráhu ($e = 0$) se vztah zjednodušuje na:

$$b = \frac{a}{R_*} \cos i$$

Fyzikální podmínka pro existenci plného tranzitu (všechny 4 kontakty) vyžaduje $b \leq 1 - k$. Pokud platí $1 - k < b \leq 1 + k$, jedná se o tranzit tečný (grazing transit), při němž planeta nikdy plně nevstoupí do disku hvězdy a světelná křivka získává tvar písmene "V".

Z geometrie pravoúhlých trojúhelníků na disku hvězdy odvodíme doby trvání tranzitu:

$$T_{\text{tot}} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1+k)^2 - b^2}}{\sin i} \right) \approx \frac{P}{\pi} \frac{R_*}{a} \sqrt{(1+k)^2 - b^2}$$

$$T_{\text{flat}} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1-k)^2 - b^2}}{\sin i} \right) \approx \frac{P}{\pi} \frac{R_*}{a} \sqrt{(1-k)^2 - b^2}$$

Z poměru těchto dvou časových škál lze přímo vyjádřit impaktní parametr b a následně normalizovanou poloosu a/R_* :

$$b^2 = \frac{(1-k)^2 - (T_{\text{flat}}/T_{\text{tot}})^2(1+k)^2}{1 - (T_{\text{flat}}/T_{\text{tot}})^2}$$

$$\frac{a}{R_*} = \frac{2P}{\pi} \frac{k^{1/4}}{\sqrt{T_{\text{tot}}^2 - T_{\text{flat}}^2}}$$

Z 3. Keplerova zákona plyne fundamentální vztah pro střední hustotu mateřské hvězdy ρ_* :

$$\rho_* = \frac{3M_*}{4\pi R_*^3} \approx \frac{3\pi}{GP^2} \left(\frac{a}{R_*} \right)^3$$

Světelná křivka tranzitu tak přímo určuje střední hustotu hvězdy ρ_* nezávisle na její vzdálenosti a spektroskopických modelech, což představuje silný nezávislý test stelárních modelů.

Kombinací s radiálními rychlostmi (M_p) a poloměrem z tranzitu ($R_p = kR_*$) získáme **střední hustotu planety**:

$$\rho_p = \frac{3M_p}{4\pi R_p^3}$$

2.4 Variace času tranzitu (TTV) a detekce netranzitujících těles v rezonancích

V izolovaném systému jedné planety obíhající kolem sférické hvězdy nastávají středy tranzitů t_n v naprosto striktně periodických časech:

$$t_n = t_0 + n \cdot P$$

Pokud se však v systému nachází další gravitačně interagující planeta, dochází ke vzájemným perturbacím orbitálních elementů. Tyto poruchy způsobují, že skutečné časy tranzitů se odchylují od přísné lineární efemeridy – tento jev se nazývá **variace času tranzitu (Transit Timing Variations, TTV)**:

$$O - C = t_{\text{obs},n} - (t_0 + n \cdot P)$$

Amplituda TTV je dramaticky zesílena, pokud se obě planety nacházejí blízko rezonance středních pohybů (Mean Motion Resonance, MMR), kdy poměr jejich oběžných period je blízký podílu malých celých čísel:

$$\frac{P_2}{P_1} \approx \frac{p+q}{p}$$

kde p a q jsou celá čísla (q značí řád rezonance, např. 2:1 je prvního řádu, 3:1 druhého řádu). V blízkosti rezonance dosahuje amplituda TTV minut až desítek hodin a vykazuje sinusový průběh s tzv. super-periodou P_{ttv} :

$$P_{\text{ttv}} = \frac{1}{\left| \frac{p+q}{P_2} - \frac{p}{P_1} \right|}$$

Měření TTV představuje mimořádně mocný nástroj:

1. Umožňuje detekovat netranzitující planety v systému (tělesa s inklinací i příliš vzdálenou od 90°).
2. Z dynamického modelování perturbací lze určit skutečné hmotnosti obou planet bez nutnosti měření radiálních rychlostí, což bylo klíčové pro soustavu TRAPPIST-1 a stovky multiorbitálních systémů mise Kepler.

2.5 Kosmické mise (Kepler, TESS, PLATO) a Python syntéza tranzitní křivky

Vývoj fotometrických observatoří přinesl revoluci v detekčních schopnostech:

- **Kepler (NASA, 2009–2018):** Zkoumal 150 000 hvězd v pevném poli o ploše 115 čtverečních stupňů. Dosáhl špičkové fotometrické přesnosti ~ 20 ppm a objevil přes 2 700 potvrzených planet.
- **TESS (NASA, od 2018):** Celooblohová přehlídka rozdělená na 26 sektorů. Zaměřuje se na jasné hvězdy ($V < 11$ mag), ideální pro následnou transmisní spektroskopii spektrografy pozemních dalekohledů i teleskopem JWST.
- **PLATO (ESA, plánovaný start 2026):** Bude vybaven 26 kamerami s vysokým zorným polem a zaměří se na detekci a přesné určení poloměrů a stáří analogů Země v obyvatelných zónách hvězd slunečního typu pomocí asteroseismologie.

Následující Python skript demonstruje syntézu světelné křivky tranzitu s lineárním a kvadratickým okrajovým ztemněním.

```
#!/usr/bin/env python3
<h1><em>- coding: utf-8 -</em></h1>
"""
Analytický model tranzitní světelné křivky s okrajovým ztemněním.
Autor: David Pěkník | AstroHub.cz
"""

import numpy as np

def transit_flux_uniform(z, k):
    """
    Tranzit přes homogenní disk hvězdy bez okrajového ztemnění.
    z: normalizovaná vzdálenost středů d_proj / R_*
    k: poměr poloměrů R_p / R_*
    """
    flux = np.ones_like(z)

    # 1. Planeta je zcela mimo disk hvězdy
    mask_out = z >= 1.0 + k

    # 2. Planeta je zcela uvnitř disku hvězdy
    mask_in = z <= 1.0 - k
    flux[mask_in] = 1.0 - k**2

    # 3. Částečný překryv (ingress / egress)
    mask_partial = (~mask_out) & (~mask_in)
    zp = z[mask_partial]

    # Geometrický překryv dvou kruhů
    d1 = (k**2 - 1.0 + zp**2) / (2.0 * zp)
    d2 = (1.0 - k**2 + zp**2) / (2.0 * zp)

    # Ošetření numerických limitů
    d1 = np.clip(d1, -k, k)
    d2 = np.clip(d2, -1.0, 1.0)

    area = (k**2 * np.arccos(d1 / k) - d1 * np.sqrt(k**2 - d1**2) +
            np.arccos(d2) - d2 * np.sqrt(1.0 - d2**2))

    flux[mask_partial] = 1.0 - area / np.pi
    return flux

def transit_lightcurve(t, t0, P, a_over_R, k, inc_deg, u1=0.3, u2=0.2):
    """
    Vypočte světelnou křivku tranzitu s kvadratickým okrajovým ztemněním.
    Aproximace dle Mandel & Agol (2002).
    """
    inc = np.radians(inc_deg)
    # Fázový úhel
    phase = 2.0 * np.pi * ((t - t0) % P) / P
    phase = np.where(phase > np.pi, phase - 2.0 * np.pi, phase)

    # Průmět vzdálenosti středů
    x = a_over_R * np.sin(phase)
    y = a_over_R * np.cos(phase) * np.cos(inc)
    z = np.sqrt(x**2 + y**2)

    # Základní geometrický tok
    f_uniform = transit_flux_uniform(z, k)

    # Korekce na okrajové ztemnění (aproximace centrální intenzity)
    mu = np.sqrt(np.maximum(0.0, 1.0 - z**2))
```

```

c0 = 1.0 - u1 - 2.0 * u2
c2 = u1 + 2.0 * u2
c4 = -u2
omega = 1.0 - u1 / 3.0 - u2 / 6.0

# Ztmavení v závislosti na hloubce
ld_factor = np.where(z < 1.0, (c0 + c2 * mu + c4 * mu**2) / omega, 1.0)

# Modulace poklesu toku
delta_flux = (1.0 - f_uniform) * ld_factor
return 1.0 - delta_flux

<h1>Parametry simulace (horký jupiter typu HD 209458b)</h1>
t_sim = np.linspace(-0.15, 0.15, 500) # čas v dnech kolem středu tranzitu
P_orb = 3.52474859 # dny
a_R = 8.81
k_ratio = 0.1208
inclination = 86.7 # stupňů

lc_model = transit_lightcurve(t_sim, 0.0, P_orb, a_R, k_ratio, inclination, u1=0.35, u2=0.15)

print("=== VÝPOČET TRANZITNÍ FOTOMETRIE DOKONČEN ===")
print(f"Hloubka tranzitu (delta): {((1.0 - np.min(lc_model)) * 100):.3f} %")
print(f"Teoretická geometrická hloubka k^2: {(k_ratio**2 * 100):.3f} %")
print(f"Vliv okrajového ztemnění: disk je ve středu hlubší než k^2 o {((1.0 - np.min(lc_model) -
k_ratio**2)*1e4):.1f} ppm")

```

Výpočet dokumentuje klíčový vliv okrajového ztemnění: díky vyšší intenzitě záření ve středu disku hvězdy klesá relativní tok při centrálním přechodu hlouběji než prostý geometrický poměr $k^2 = (R_p/R_*)^2$.

Kapitola 3: Gravitační mikročočky a přímé koronagrafické zobrazení

Zatímco spektroskopie radiálních rychlostí a tranzitní fotometrie jsou silně zatíženy výběrovým efektem zvýhodňujícím planety na těsných oběžných drahách ($a < 0,1\text{--}1\text{ AU}$), astrofyzika gravitačních mikročoček a metody přímého zobrazení otevírají přístup ke zcela odlišným doménám parametrického prostoru. Mikročočky jsou jedinečným nástrojem pro detekci planet za sněžnou čarou protoplanetárního disku ($a \sim 1\text{--}10\text{ AU}$) a umožňují objevovat volně plující planety (rogue planets), jež byly vymrštěny ze svých rodných soustav. Přímé zobrazení naopak představuje svatý grál pozorovací astronomie: umožňuje prostorově oddělit fotony planety od záře hvězdy a přímo měřit jejich odražené či tepelné spektrum.

3.1 Einsteinův poloměr θ_E a relativistické ohýbání světla

Fenomén gravitační mikročočky je přímým důsledkem obecné teorie relativity. Hmotný objekt (čočka) o hmotnosti M_L zakřivuje okolní prostoročas a vychyluje paprsky světla přicházející ze vzdáleného zdroje (background source). Úhel ohybu světla $\hat{\alpha}$ pro paprsek s impaktním parametrem ξ odvozený z Schwarzschildovy metricky v limitě slabého pole činí:

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM_L}{c^2\xi}$$

Uvažujme geometrii, kde D_L je vzdálenost pozorovatele k čočce, D_S je vzdálenost k pozorovacímu zdroji a $D_{LS} = D_S - D_L$ je vzdálenost mezi čočkou a zdrojem. Skalární rovnice gravitační čočky svazuje skutečnou úhlovou polohu zdroje β s pozorovanou úhlovou polohou obrazu θ :

$$\beta = \theta - \frac{D_{LS}}{D_S} \hat{\alpha} = \theta - \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \frac{4GM_L}{c^2\theta}$$

Při dokonalém osovém vyrovnaní pozorovatele, čočky a zdroje ($\beta = 0$) se bodový zdroj zobrazí jako prstenec o úhlovém poloměru θ_E – tzv. **Einsteinův úhlový poloměr**:

$$\theta_E \equiv \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}} = \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \right)}$$

Fyzikální poloměr Einsteinova prstence v rovině čočky je pak $R_E = \theta_E D_L$. Pro typickou hvězdu o hmotnosti $M_L = 0,5 M_\odot$ v galaktické výduti ($D_L = 6\text{ kpc}$, $D_S = 8\text{ kpc}$) je úhlový poloměr roven:

$$\theta_E \approx 0,5\text{ mas} \quad (5 \times 10^{-4}\text{ úhlové vteřiny})$$

Tento úhel je hluboko pod difrakčním limitem běžných optických teleskopů, takže jednotlivé obrazy nelze prostorově rozlišit (odtud termín *mikročočka*). Místo toho pozorujeme přechodné zjasnění celkového fotometrického toku zdroje.

Pro izolovanou bodovou čočku má celkové zvětšení (amplifikace) $A(u)$ tvar Paczyňského křivky:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

kde $u(t) \equiv \beta(t)/\theta_E$ je okamžitá bezrozměrná úhlová vzdálenost zdroje od čočky v jednotkách Einsteinova poloměru:

$$u(t) = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{t - t_0}{t_E} \right)^2}$$

kde u_0 je minimální impaktní vzdálenost a $t_E = R_E/v_{\text{rel}}$ je Einsteinova časová škála (typicky 20 až 60 dní pro hvězdy v Galaxii).

3.2 Planeta jako perturbace mikroskopické kaustiky a volně plující světy

Pokud mateřskou hvězdu doprovází planeta o hmotnosti $m_p \ll M_*$ v bezrozměrné projekční vzdálenosti $s = d/R_E$, systém tvoří binární gravitační čočku s hmotnostním poměrem $q = m_p/M_* \sim 10^{-5}\text{--}10^{-3}$.

Přítomnost planety dramaticky mění topologii zobrazení:

- Vytváří uzavřené křivky kritických bodů na rovině obrazu a jim odpovídající **kaustické křivky (kaustiky)** na rovině zdroje.
- Pokud bodový zdroj protne kaustiku, teoretické zvětšení diverguje k nekonečnu ($A \rightarrow \infty$; pro reálný zdroj s konečným úhlovým rozměrem je limitováno velikostí hvězdného disku zdroje $\rho_* = \theta_*/\theta_E$).

- Přejít zdroje přes kaustiku vyvolá na jinak hladké Paczyňského křivce ostré, asymetrické fotometrické záblesky či anomálie trvající od několika hodin (pro terestrické planety) po několik dní (pro plynné obry).

Detekční citlivost mikročoček je maximální, pokud se planeta nachází v tzv. **lensing zóně** ($0,6 < s < 1,6$). Protože $R_E \approx 2-4$ AU, metoda mikročoček je přirozeně nejcitlivější právě na planety na drahách srovnatelných s Jupiterem a Saturnem, kde jsou radiální rychlosti i tranzity málo efektivní. Metoda navíc nezávisí na zářivosti mateřské hvězdy, což umožňuje detekovat planety u velmi chladných M trpaslíků, hnědých trpaslíků a bílých trpaslíků.

Volně plující planety (Free-floating / Rogue planets)

Gravitační mikročočky představují jedinou dostupnou techniku schopnou detekovat izolovaná tělesa planetární hmotnosti, která neobíhají kolem žádné mateřské hvězdy. Časová škála události t_E škáluje s odmocninou hmotnosti čočky:

$$t_E \propto \sqrt{M_L}$$

Zatímco hvězdná mikročočka má $t_E \approx 30$ dní, izolovaný Jupiter vyvolává událost s $t_E \approx 1-2$ dny a těleso zemské hmotnosti má $t_E \approx 1-3$ hodiny. Přehlídky OGLE a KMTNet identifikovaly desítky ultra-krátkých událostí svědčících o tom, že populace gravitačně vymrštěných planet může převyšovat počet vázaných planet v Galaxii.

3.3 Fyzika extrémního kontrastu: viditelný vs. infračervený obor

Přímé zobrazení exoplanety v těsné blízkosti její mateřské hvězdy naráží na dva fyzikální limity: extrémní kontrast zářivých toků C a nepatrnou úhlovou vzdálenost (separaci) $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \frac{a}{d} = 0,1'' \left(\frac{a}{10 \text{ AU}} \right) \left(\frac{d}{100 \text{ pc}} \right)^{-1}$$

Kontrast $C = F_p/F_*$ se zásadně liší podle spektrálního oboru:

1. **Viditelný obor (odražené světlo):** Planeta nesvítí vlastním termálním zářením, ale pouze rozptyluje světlo hvězdy:

$$C_{\text{refl}} = A_g \left(\frac{R_p}{a} \right)^2 \Phi(\alpha)$$

kde A_g je geometrické albedo a $\Phi(\alpha)$ je fázová funkce. Pro obří planetu velikosti Jupitera na dráze 5 AU je kontrast:

$$C_{\text{refl, Jup}} \approx 0,5 \times \left(\frac{7 \times 10^7 \text{ m}}{7,5 \times 10^{11} \text{ m}} \right)^2 \approx 4 \times 10^{-9}$$

Pro analogii Země na dráze 1 AU dosahuje kontrast extrémní hodnoty:

$$C_{\text{refl, } \oplus} \approx 0,3 \times \left(\frac{6,37 \times 10^6 \text{ m}}{1,5 \times 10^{11} \text{ m}} \right)^2 \approx 5 \times 10^{-11}$$

1. **Tepelný infračervený obor** ($\lambda \sim 5-20 \mu\text{m}$): Planeta vyzařuje vlastní tepelnou energii. Poměr Planckových funkcí je příznivější, neboť ve Wienově části spektra hvězda září silněji, ale v Rayleighově-Jeansově limitě pro infračervené záření klesá kontrast na:

$$C_{\text{thermal}} \approx \frac{R_p^2 B_\lambda(T_p)}{R_*^2 B_\lambda(T_*)} \sim 10^{-4} - 10^{-6}$$

Zejména mladé plynné obry (stáří < 100 milionů let) dosud uvolňují gravitační energii z akumulace jádra, jejich fotosféra má teplotu $1000-2000$ K a září v infračerveném oboru až $10^4 \times$ jasněji než chladný zralý Jupiter. Z tohoto důvodu byla většina dosud přímo zobrazených planet (např. HR 8799 bcde, Beta Pictoris b) detekována právě jako mladé, horké obří planety v IR oboru na velkých vzdálenostech ($a > 10-70$ AU).

3.4 Koronagrafy a adaptivní optika extrémní třídy (XAO)

K potlačení difrakčního obrazce hvězdy na úroveň kontrastu 10^{-6} až 10^{-10} je nutná synergie dvou systémů:

Extrémní adaptivní optika (Extreme Adaptive Optics, XAO)

Atmosférická turbulence způsobuje náhodné fázové deformace vlnoplochy s Kolmogorovovým spektrem, což rozmazává difrakční obrazec Airyho disku do širokého seeingového kotouče o pološířce $\sim 1''$. XAO systém využívá:

- Pyramidové vlnoplochové senzory schopné snímat fázové distorze s frekvencí přes $2-3$ kHz.

- Deformovatelná zrcadla (Deformable Mirrors, DM) s tisíci piezokeramickými aktuátory korigující fázové aberace s přesností pod 5 nm RMS.
- Dosažený Strehlov poměr (poměr centrální intenzity k ideálnímu difrakčnímu obrazci) přesahuje v blízkém IR oboru 90 %.

Koronagrafické systémy

Koronagraf prostorově odstiňuje přímé světlo hvězdy a manipuluje s fázemi vlnoplochy tak, aby destruktivní interferencí vymazal difrakční kroužky v okolí hvězdy:

1. **Lyotův koronagraf:** Skládá se z ohniskové masky (focal plane mask), která zablokuje střed hvězdy, a následné Lyotovy clony (pupil stop) v převrácené rovině žáka, která ořízne vysoké prostorové frekvence rozptýlené na okrajích apertury.
2. **Vektorový vírový koronagraf (Vector Vortex Coronagraph, VVC):** Využívá fázovou masku s helikoidální fázovou rampou $e^{il\theta}$ (kde l je sudé topologické číslo, typicky $l = 2$ nebo 4). Světlo hvězdy na ose získá vírovou fázi, která jej v pupilové rovině zcela vytlačí mimo geometrickou aperturu, kde je absorbováno clonou, zatímco mimopaprskové světlo planety projde téměř netknuto.
3. **Apodizované pupilové koronagrafy (APLC):** Modulují amplitudový profil vstupní pupily pomocí speciálních mikromřížek k potlačení sekundárních difrakčních laloků.

3.5 Budoucí mise: Nancy Grace Roman Space Telescope a Habitable Worlds Observatory

Limitem pozemních teleskopů zůstává zbytkový atmosférický šum (speckle noise). Skutečný průlom v přímém zobrazení terestrických planet proto přinesou až kosmické observatoře:

- **Nancy Grace Roman Space Telescope (NASA, start ~2027):** Bude vybaven technologickým demonstrátorem CGI (Coronagraph Instrument). Půjde o první kosmický koronagraf s aktivní korekcí vlnoplochy pomocí dvou deformovatelných zrcadel (DM) schopný vytvořit tzv. "temnou díru" (dark hole) s potlačením rozptýleného světla na úroveň kontrastu 10^{-9} v úhlové vzdálenosti 0,15" až 0,5". CGI poprvé přímo zobrazí zralé chladné jupitery v odraženém světle.
- **Habitable Worlds Observatory (HWO):** Vlajková mise NASA navržená v Decadal Survey pro 40. léta 21. století. Půjde o 6metrový optický/UV/IR teleskop operující v bodě L2, navržený s extrémní pikometrickou stabilitou vlnoplochy. Primárním cílem HWO bude dosáhnout kontrastu 10^{-10} ve viditelném spektru a přímo zobrazit nejméně 25 terestrických planet v obyvatelných zónách blízkých hvězd slunečního typu za účelem detekce atmosférického kyslíku, vody a vegetačního skoku.

Část II: Atmosféry exoplanet a spektroskopie

Jakmile jsou známy základní orbitální a fyzikální parametry exoplanety (její hmotnost M_p a poloměr R_p), vyvstává klíčová astrofyzikální otázka: jaká je povaha její plyné obálky? Atmosféra představuje dynamické rozhraní mezi nitrem planety a kosmickým prostorem. Určuje energetickou bilanci tělesa, redistribuci tepla, povrchovou teplotu, tlakové podmínky a chemické složení nezbytné pro existenci kapalné vody a potenciálního života.

V této druhé části monografie přecházíme od prosté geometrické detekce k hloubkové spektrální diagnostice atmosfér. Zkoumáme transmisní spektroskopii během primárního tranzitu, emisní spektroskopii během sekundárního zákrytu, modelování fázových křivek odhalujících atmosférickou dynamiku a komplexní chemické sítě zahrnující termochemickou rovnováhu, fotochemii a vertikální turbulentní promíchávání.

Přehled kapitol Části II:

- **Kapitola 4: Transmisní spektroskopie a atmosférická škálová výška** * Fyzikální princip transmisního prozařování atmosféry během primárního tranzitu * Hydrostatická rovnováha a rigorózní odvození atmosférické škálové výšky $H = \frac{k_B T}{\mu g}$ * Efektivní poloměr planety jako funkce vlnové délky $R_p(\lambda)$ a diferenciální hloubka tranzitu $\Delta\delta \approx \frac{2R_p n H}{R_*^2}$ * Rayleighův rozptyl na molekulách plynu, aerosolový opar (tholiny) a vliv vysoké oblačnosti na zploštění spektrálních čar * Revoluční objevy Vesmírného teleskopu Jamese Webba (JWST): detekce CO_2 , fotochemického SO_2 a vodní páry u horkého jupitera WASP-39b
- **Kapitola 5: Emisní spektroskopie sekundárních zákrytů a fázové křivky** * Fyzika sekundárního zákrytu a přímá izolace tepelného spektra planety od záření hvězdy * Teplota radiativní rovnováhy T_{eq} , Bondovo a geometrické albedo a parametr redistribuce tepla f * Orbitální fázové křivky v infračerveném oboru a mapování longitudinálního teplotního kontrastu den/noc * Atmosférická dynamika: ekvatoriální superrotace, tryskové proudění (jet streams) a fázový posun nejteplejšího bodu (hotspot offset) * Vertikální teplotně-tlakové profily ($T - P$) a vznik teplotních inverzí (stratosféra) vyvolaných oxidy titanu a vanadu (TiO/VO)
- **Kapitola 6: Chemická rovnováha a nerovnováha v atmosférách horkých jupiterů i superzemí** * Termochemická rovnováha: minimalizace Gibbsovy volné energie a dominantní rezervoáry prvků (H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3) * Význam poměru uhlíku ke kyslíku (C/O) jako stopovače místa akrece plynů vzhledem ke sněžným čarám * Vertikální turbulentní míchání (eddy diffusion K_{zz}) a uhašení chemických reakcí (quenched abundances) * Atmosférická fotochemie poháněná hvězdným UV zářením: fotolýza metanu a vody, tvorba oxidu siřičitého a aerosolů * Přechod od superzemí k sub-neptunům: bariatrická skladba, sekundární odplyněné atmosféry a koncept vodních světů (hycean worlds)

Kapitola 4: Transmisní spektroskopie a atmosférická škálová výška

Transmisní spektroskopie je nejcitlivější pozorovací metodou pro studium chemického složení, teplotní struktury a aerosolového zatížení horních vrstev atmosféry tranzitujících exoplanet. Využívá prostého geometrického faktu: během primárního tranzitu prochází část světla mateřské hvězdy tenkým atmosférickým prstencem na terminátoru planety (hranici mezi dnem a nocí). Plyny v atmosféře absorbují záření na specifických vlnových délkách odpovídajících jejich kvantovým rotačně-vibračním a elektronovým přechodům, což způsobuje, že planeta se na těchto vlnových délkách jeví opticky větší.

Měřením zdánlivého poloměru planety $R_p(\lambda)$ jako funkce vlnové délky získáváme transmisní spektrum, které funguje jako jednoznačný spektrální otisk atmosférických molekul.



Primární zrcadlo Vesmírného teleskopu Jamese Webba (JWST) z pozlaceného berylia s průměrem 6,5 metru, které umožnilo revoluci v transmisní spektroskopii exoplanet

4.1 Fyzikální princip transmisního průsvitu atmosférou během primárního tranzitu

Představme si exoplanetu s pevnou nebo opticky neprůhlednou spodní hranicí o poloměru R_0 (např. povrch terestrické planety nebo hladina tlaku 1 bar u plynného obra), obklopenou průsvitnou atmosférou. Když planeta přechází před hvězdou, paprsky světla z hvězdy procházejí atmosférou po tečných trajektoriích s impaktním parametrem r měřeným od středu planety ($r > R_0$).

Optická hloubka $\tau(\lambda, r)$ podél zorného paprsku procházejícího ve výšce r je dána integrálem koeficientu extinkce $\alpha_\lambda(s)$ podél trajektorie s :

$$\tau(\lambda, r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_\lambda(s) ds = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_i n_i(s) \sigma_i(\lambda, T, P) ds$$

kde $n_i(s)$ je číselná hustota i -tého plynu a $\sigma_i(\lambda, T, P)$ je jeho efektivní absorpční průřez (monochromatická opacita).

Efektivní poloměr planety na dané vlnové délce $R_p(\lambda)$ je definován tak, že ekvivalentní neprůhledný disk absorbuje stejné množství fotonů jako skutečná poloprůsvitná atmosféra:

$$\pi R_p^2(\lambda) = \pi R_0^2 + \int_{R_0}^{\infty} 2\pi r \left[1 - e^{-\tau(\lambda, r)}\right] dr$$

Výraz uvnitř integrálu představuje pravděpodobnost záchytu fotonu v prstenci o poloměru r a šířce dr .

4.2 Hydrostatická rovnováha a odvození atmosférické škálové výšky H

V planetární atmosféře s gravitačním zrychlením g působí proti gravitační síle vertikální gradient tlaku plynu. Rovnice hydrostatické rovnováhy má tvar:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho(z)g$$

kde $z = r - R_0$ je výška nad referenční hladinou a $\rho(z)$ je hustota plynu. Ze stavové rovnice ideálního plynu plyne:

$$P = \frac{\rho k_B T}{\mu m_u} \Rightarrow \rho = \frac{\mu m_u P}{k_B T}$$

kde k_B je Boltzmannova konstanta, T je kinetická teplota atmosféry, $m_u \approx 1,6605 \times 10^{-27}$ kg je atomová hmotnostní jednotka a μ je střední molekulová hmotnost plynu v jednotkách m_u . Dosazením do hydrostatické rovnice dostáváme:

$$\frac{dP}{dz} = -\left(\frac{\mu m_u g}{k_B T}\right)P = -\frac{P}{H}$$

kde veličina H se nazývá **atmosférická škálová výška (scale height)**:

$$H \equiv \frac{k_B T}{\mu m_u g}$$

Pro izotermální atmosféru ($T = \text{konst.}$) a za předpokladu konstantního tíhového zrychlení v tenké slupce ($H \ll R_p$) lze diferenciální rovnici okamžitě integrovat:

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad n(z) = n_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

Škálová výška H představuje charakteristickou vertikální vzdálenost, na které tlak a hustota atmosféry klesnou na $1/e$ své původní hodnoty (zhruba o 63 %). Velikost H je naprosto kritickým faktorem určujícím detekovatelnost spektrálních čar:

- **Horké jupitery:** Atmosféra je tvořena lehkým vodíkem a heliem ($\mu \approx 2,3$) a teploty dosahují $T \approx 1200\text{--}2000$ K. Gravitační zrychlení činí $g \approx 10\text{--}20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Škálová výška dosahuje:

$$H_{\text{hot Jup}} \approx \frac{(1,38 \times 10^{-23}) \times 1500}{(2,3 \times 1,66 \times 10^{-27}) \times 15} \approx 360 \text{ km}$$

- **Superzemě s těžkou sekundární atmosférou:** Atmosféra bohatá na N_2 ($\mu = 28$) nebo CO_2 ($\mu = 44$) při teplotě $T \approx 300$ K a vyšší gravitaci ($g \approx 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) má škálovou výšku pouhých:

$$H_{\text{terrestrial}} \approx \frac{(1,38 \times 10^{-23}) \times 300}{(44 \times 1,66 \times 10^{-27}) \times 15} \approx 3,8 \text{ km}$$

Signál atmosféry terestrické planety je tudíž téměř stokrát menší než u plynného obra, což vysvětluje extrémní obtížnost studia atmosfér terestrických exoplanet.

4.3 Efektivní poloměr $R_p(\lambda)$ a diferenciální hloubka tranzitu $\Delta\delta$

V průkopnické práci Lecavelier des Etangs et al. (2008) bylo ukázáno, že optická hloubka pro tečný paprsek s impaktním parametrem z v izotermální atmosféře s exponenciálním profilem hustoty odpovídá:

$$\tau(\lambda, z) \approx n(z)\sigma(\lambda)\sqrt{2\pi R_p H}$$

Efektivní poloměr atmosféry $R_p(\lambda)$ nastává na hladině, kde optická hloubka dosahuje hodnoty $\tau(\lambda, R_p) \approx \tau_{\text{crit}} \approx 0,56$ (Eulerovo-Mascheroniov číslo $\gamma_{\text{EM}} \approx 0,577$). Dosazením $n(z) = n_0 \exp(-z/H)$ a logaritmováním získáme fundamentální vztah:

$$R_p(\lambda) = R_0 + H \ln \left(\frac{n_0 \sigma(\lambda) \sqrt{2\pi R_p H}}{\tau_{\text{crit}}} \right)$$

Derivací podle přirozeného logaritmu absorpčního průřezu $\sigma(\lambda)$ dostáváme klíčový vztah:

$$\frac{dR_p(\lambda)}{d \ln \sigma(\lambda)} = H$$

Efektivní poloměr planety v absorpční čáře roste o jednu škálovou výšku H pro každý řádový nárůst absorpčního průřezu (přesněji pro faktor e).

Pozorovaná hloubka tranzitu je $\delta(\lambda) = R_p^2(\lambda)/R_*^2$. Diferenciální změna hloubky tranzitu mezi absorpčním jádrem (kde je efektivní poloměr $R_0 + nH$) a okolním kontinuem R_0 činí:

$$\Delta\delta(\lambda) = \frac{(R_0 + nH)^2 - R_0^2}{R_*^2} = \frac{2R_0nH + n^2H^2}{R_*^2} \approx \frac{2R_0nH}{R_*^2}$$

kde n představuje efektivní počet škálových výšek prozařované vrstvy (pro silné molekulární absorpční pásy H_2O či CO_2 typicky $n \approx 3-5$). Tento vztah představuje základní rovnici pro plánování spektroskopických pozorování: signál atmosférické čáry je přímo úměrný poloměru planety R_p , škálové výšce H a nepřímo úměrný ploše mateřské hvězdy R_*^2 . Z toho plyne, že malé hvězdy (červení trpaslíci typu M s $R_* \approx 0,1-0,3 R_\odot$) dramaticky zvyšují velikost transmisního signálu $\Delta\delta$, a jsou proto preferovanými cíli pro průzkum atmosfér malých planet.

4.4 Rayleighův rozptyl, aerosoly a zploštění transmisních spekter

V optickém a blízkém ultrafialovém spektru je absorpce často dominována elastickým rozptylem fotonů na molekulách plynu, jehož účinný průřez klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky dle Rayleighova zákona:

$$\sigma_{\text{Ray}}(\lambda) = \sigma_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-4}$$

Dosazením do rovnice pro efektivní poloměr získáme:

$$\frac{dR_p(\lambda)}{d \ln \lambda} = \frac{dR_p}{d \ln \sigma} \frac{d \ln \sigma}{d \ln \lambda} = H \cdot (-4) = -4H$$

Odtud plyne sklon transmisního spektra:

$$\frac{d\delta}{d \ln \lambda} \approx \frac{2R_p}{R_*^2}(-4H) = -\frac{8R_pH}{R_*^2}$$

Tento záporný sklon spektra (větší hloubka tranzitu v modré oblasti než v červené) byl poprvé detekován u horkého jupitera HD 189733b a svědčí o přítomnosti čisté vodíkové atmosféry nebo rozptylu na submikronových prachových zrnech křemičitanů (MgSiO_3).

Aerosoly, fotochemický opar a oblačnost

Pozorování desítek exoplanet však odhalila závažný problém: mnohá transmisní spektra jsou téměř dokonale plochá a postrádají očekávané hluboké absorpční pásy vody. Příčinou je přítomnost aerosolů:

- Fotochemický opar (tholiny):** Vyvolaný UV fotolýzou metanu za vzniku komplexních organických uhlovodíků (analogicky jako na Titanu). Tyto částice mají rozptylový exponent odlišný od čistého Rayleighova rozptylu ($\sigma \propto \lambda^{-\gamma}$, kde $\gamma \approx 1-3$).
- Kondenzační mraky (refractory clouds):** Ve žhavých atmosférách horkých jupiterů kondenzují minerální páry (oxidy titanu, křemičitany, železo, sulfid zinečnatý ZnS , chlorid draselný KCl) do hustých aerosolových vrstev. Pokud se oblačnost nachází ve vysoké nadmořské výšce (tlaky $P < 1$ mbar), funguje jako opticky neprůhledná bariéra, která zablokuje veškeré tečné paprsky a efektivně "odřízne" spodní část atmosféry, čímž potlačí amplitudu spektrálních čar na minimum.

4.5 Přelomové výsledky teleskopu Jamese Webba (JWST)

Uvedení Vesmírného teleskopu Jamese Webba (JWST) do vědeckého provozu v roce 2022 znamenalo skokový posun v transmisní spektroskopii:

- První detekce oxidu uhličitého (CO_2):** Spektrograf NIRSpec získal v srpnu 2022 transmisní spektrum horkého saturna WASP-39b ($T_{\text{eq}} \approx 1150$ K), které odhalilo jednoznačný absorpční pík CO_2 na vlnové délce $4,3 \mu\text{m}$ s významností přesahující 26σ . Šlo o první nezvratný důkaz přítomnosti oxidu uhličitého v atmosféře exoplanety v historii.
- Objev fotochemie na exoplanetách (SO_2):** Na vlnové délce $4,05 \mu\text{m}$ byl ve spektru WASP-39b identifikován neočekávaný absorpční pás oxidu siřičitého (SO_2). V termochemické rovnováze by síra měla být vázána výhradně v sulfanu (H_2S). SO_2 vzniká fotolýzou vody hvězdnými UV fotony ($\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{OH} + \text{H}$), následovanou oxidací atomární síry radikály OH.
- Komplexní molekulární inventář:** V datech JWST byly bezpečně detekovány pásy H_2O , CO, Na, K a zjištěna metalicita atmosféry dosahující zhruba desetinásobku sluneční metalicity ($\sim 10 \times Z_\odot$), což ukazuje na masivní akreci pevných planetesimál během formování

planety.

Kapitola 5: Emisní spektroskopie sekundárních zákrytů a fázové křivky

Zatímco transmisní spektroskopie snímá tenký prstenec na terminátoru planety, emisní spektroskopie sekundárních zákrytů a měření celooběžných fázových křivek poskytují přímý vhled do energetické bilance a trojrozměrné dynamiky planetární atmosféry. Sekundární zákryt nastává v okamžiku horní konjunkce, kdy planeta prochází za diskem mateřské hvězdy. Změna celkového zářivého toku během zákrytu umožňuje přímo oddělit fotony vyzářené denní polokoulí planety od záření hvězdy.

Fázové křivky navíc sledují planetu podél celé její oběžné dráhy, což umožňuje zmapovat rozložení teploty v závislosti na zeměpisné délce, odhalit rychlost ekvatoriálního tryskového proudění a určit účinnost přenosu tepla z ozářené denní strany na chladnou noční stranu.

5.1 Fyzika sekundárního zákrytu a oddělení tepelného toku planety

Těsně před sekundárním zákrytem ($t = t_{\text{ecl}}^-$) přijímá pozorovatel celkový tok tvořený součtem toku hvězdy F_* a toku osvětlené denní hemisféry planety F_p :

$$F_{\text{total}} = F_* + F_p$$

V průběhu sekundárního zákrytu ($t = t_{\text{ecl}}$) je planeta zcela zakryta hvězdným diskem, takže měřený tok odpovídá čistě toku mateřské hvězdy:

$$F_{\text{in-ecl}} = F_*$$

Relativní hloubka sekundárního zákrytu $\delta_{\text{ecl}}(\lambda)$ je definována jako poměr poklesu toku k toku hvězdy:

$$\delta_{\text{ecl}}(\lambda) \equiv \frac{F_{\text{total}} - F_{\text{in-ecl}}}{F_*} = \frac{F_p(\lambda)}{F_*(\lambda)}$$

Předpokládáme-li, že hvězda i planeta vyzařují jako černá tělesa s efektivními teplotami T_* a T_{day} , je poměr toků dán poměrem jejich povrchových ploch vynásobeným poměrem Planckových funkcí $B_\lambda(T)$:

$$\delta_{\text{ecl}}(\lambda) = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \frac{B_\lambda(T_{\text{day}})}{B_\lambda(T_*)} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \frac{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_*}\right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_{\text{day}}}\right) - 1}$$

V Rayleighově-Jeansově limitě pro dlouhé vlnové délky ($\lambda k_B T \gg hc$) se Planckova funkce zjednodušuje na $B_\lambda(T) \approx \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$, odkud plyne elegantní lineární závislost na teplotách:

$$\delta_{\text{ecl}}(\lambda) \approx \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \frac{T_{\text{day}}}{T_*}$$

Pro horký jupiter o poloměru $R_p = 0,1 R_*$ s denní teplotou $T_{\text{day}} = 1500 \text{ K}$ u hvězdy s $T_* = 6000 \text{ K}$ je hloubka sekundárního zákrytu v tepelném infračerveném oboru rovna:

$$\delta_{\text{ecl}} \approx (0,1)^2 \times \frac{1500}{6000} = 0,01 \times 0,25 = 2,5 \times 10^{-3} = 0,25 \% = 2500 \text{ ppm}$$

Takový signál je fotometricky velmi robustní a snadno měřitelný jak infračerveným kosmickým teleskopem Spitzer (historicky), tak současným spektrografem MIRI na JWST.

5.2 Rovnovážná teplota T_{eq} , albedo a redistribuce tepla

Základním referenčním stavem pro tepelnou bilanci exoplanety je **teplota radiativní rovnováhy** T_{eq} , která nastává při rovnováze mezi absorbovaným zářením mateřské hvězdy a vlastním tepelným vyzařováním planety.

Zářivý výkon zachycený planetou o poloměru R_p ve vzdálenosti a od hvězdy o zářivém výkonu $L_* = 4\pi R_*^2 \sigma_{\text{SB}} T_*^4$ činí:

$$\mathcal{P}_{\text{in}} = (1 - A_B) \pi R_p^2 \frac{L_*}{4\pi a^2} = (1 - A_B) \pi R_p^2 \sigma_{\text{SB}} T_*^4 \left(\frac{R_*}{a}\right)^2$$

kde A_B je **Bondovo albedo** (podíl celkového dopadajícího elektromagnetického záření integrovaného přes všechny vlnové délky a úhly, který je odražen zpět do prostoru) a σ_{SB} je Stefanova-Boltzmannova konstanta.

Vyzařovaný tepelný výkon planety závisí na efektivní ploše, která se podílí na re-emisi tepla:

$$\mathcal{P}_{\text{out}} = 4\pi R_p^2 f \sigma_{\text{SB}} T_{\text{eq}}^4$$

kde f je faktor redistribuce tepla:

- $f = 1$ odpovídá **dokonalé globální redistribuci tepla** (homogenní izotermální povrch vyzařující celou plochou koule $4\pi R_p^2$).
- $f = 0,5$ odpovídá vyzařování **pouze z osvětlené denní hemisféry** (žádný přenos tepla na noční stranu, plocha $2\pi R_p^2$).
- $f = 2/3$ odpovídá okamžitému lokálnímu vyzařování bez jakéhokoliv atmosférického transportu (Lambertův zářič).

V případě dokonalé globální redistribuce ($f = 1$) získáváme klasický vzorec pro rovnovážnou teplotu:

$$T_{\text{eq}} = T_* \sqrt{\frac{R_*}{2a}} (1 - A_B)^{1/4}$$

Pro nulové albedo ($A_B = 0$) dostáváme tzv. teplotu černého tělesa:

$$T_{\text{eq},0} = T_* \sqrt{\frac{R_*}{2a}}$$

Pokud naopak nedochází k žádné cirkulaci ($f = 0,5$) a teplo je vyzařováno pouze denní stranou, dosahuje efektivní denní teplota hodnoty:

$$T_{\text{day}} = T_* \sqrt{\frac{R_*}{a}} \left(\frac{1 - A_B}{2} \right)^{1/4} = 2^{1/4} T_{\text{eq}} \approx 1,19 T_{\text{eq}}$$

5.3 Orbitální fázové křivky a teplotní mapování

Planety na těsných drahách podléhají intenzivním slapovým silám mateřské hvězdy. Slapová disipace energie v plášti a atmosféře vede na časových škálách milionů let k synchronizaci rotace s oběhem – nastává stav **vázané rotace (tidal locking)**. Planeta má trvale přivrácenou denní stranu (substelnární bod s permanentním polednem) a odvrácenou noční stranu (antistelnární bod s permanentní půlnocí).

Sledováním toku soustavy během celého oběhu získáváme **fázovou křivku**:

1. V minimu (během primárního tranzitu) je k pozorovateli přivrácena chladná noční strana.
2. V maximu (těsně před a po sekundárním zákrytu) je vidět plně ozářená denní strana.

Amplituda fázové křivky přímo měří teplotní kontrast mezi dnem a nocí $\Delta T_{\text{day-night}} = T_{\text{day}} - T_{\text{night}}$:

- Pokud je atmosféra tenká nebo chybí jakékoliv proudění, noční strana vyzáří veškeré teplo a ochladí se téměř k absolutní nule ($T_{\text{night}} \rightarrow 0 \text{ K}$). Amplituda fázové křivky je maximální.
- Pokud má planeta masivní atmosféru s vysokou tepelnou kapacitou a efektivním zonálním prouděním, teplo je účinně transportováno na noční stranu, ΔT je malé a fázová křivka je relativně plochá.

5.4 Superrotace atmosfér a posun nejteplejšího bodu (hotspot offset)

Jedním z nejpozoruhodnějších objevů dynamické meteorologie exoplanet je existence **ekvatoriální superrotace**. Z čistě geometrického pohledu by se dalo očekávat, že nejteplejší bod planety (hotspot) se bude nacházet přesně v substelnárním bodě, kde dopadá zenitální hvězdné záření.

Pozorování fázových křivek kosmickým teleskopem Spitzer (např. u planety HD 189733b, Knutson et al. 2007) však prokázala, že maximum infračervené emise nastává **několik hodin před sekundárním zákrytem**. To znamená, že nejteplejší oblast atmosféry je posunuta směrem na východ od substelnárního bodu o fázový úhel $\Delta\phi \approx 20^\circ - 40^\circ$ – jedná se o tzv. **hotspot offset**.

Tento jev vysvětlila hydrodynamická teorie atmosférické cirkulace (Showman & Polvani 2011). Na synchronně rotující planetě generuje extrémní ohřev denní strany a ochlazování noční strany planetární Kelvinovy a Rossbyho vlny. Nelineární interakce těchto stacionárních vln transportuje moment hybnosti z vyšších zeměpisných šířek směrem k rovníku, což roztáčí mohutný východní tryskový proud – **ekvatoriální superrotující jet** s rychlostmi větru přesahujícími $2 - 5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($7000 - 18\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Tento nadzvukový vítr doslova sfoukává nahřáté vzduchové masy směrem na východ dříve, než stačí teplo vyzářit do prostoru.

5.5 Spektrální inverze: oxidy titanu a vanadu (TiO/VO)

Emisní spektrum sekundárního zákrytu umožňuje rekonstruovat vertikální teplotně-tlakový profil $T(P)$ atmosféry. Podle rovnice radičního přenosu závisí tvar spektrálních čar na vertikálním gradientu teploty dT/dz :

$$I_{\nu}(0) = \int_0^{\infty} B_{\nu}(T(\tau_{\nu})) e^{-\tau_{\nu}} d\tau_{\nu}$$

- **Standardní atmosféra bez inverze ($dT/dz < 0$):** Teplota s rostoucí výškou (klesajícím tlakem) klesá. V absorpčních čárách plynu vidíme vyšší, a tudíž chladnější vrstvy. Výsledkem jsou **absorpční čáry** v emisním spektru.
- **Teplotní inverze – stratosféra ($dT/dz > 0$):** Pokud se ve vysokých vrstvách atmosféry nachází silný absorbér dopadajícího hvězdného světla, dojde k lokálnímu přehřátí plynů ve výškách s tlakem $P < 10^{-2}$ bar. Teplota v těchto výškách je vyšší než v hlubších vrstvách. V opticky tlustých spektrálních čárách proto pozorujeme teplejší vrstvy a čáry se objevují v **emisi**!

V zemské atmosféře způsobuje teplotní inverzi (stratosféru) absorpce slunečního UV záření ozonem (O_3). Na ultra-horkých jupiterech ($T_{eq} > 2000$ K, např. WASP-121b nebo WASP-33b) ozon nemůže existovat, ale roli optických absorbérů přebírají plynné oxidy těžkých kovů – oxid titaničitý (TiO) a oxid vanadičitý (VO), popřípadě atomární železo (Fe) a titan (Ti). Jejich husté pásy elektronových přechodů absorbují obrovské množství viditelného světla v horní atmosféře, což vytváří extrémní teplotní inverze, kdy teplota stratosféry přesahuje 2500–3000 K a spektrum vykazuje masivní emisní pásy vody a oxidu uhelnatého.

Kapitola 6: Chemická rovnováha a nerovnováha v atmosférách exoplanet

Chemická stavba atmosféry exoplanety je výsledkem dynamické souhry fundamentálních fyzikálně-chemických procesů: termodynamické rovnováhy, vertikálního atmosférického transportu (turbulentního míchání) a fotochemických reakcí iniciovaných vysokoenergetickými fotony mateřské hvězdy. Studium chemického složení není pouze popisem okamžitého stavu atmosféry; elementární poměry prvků, zejména poměr uhlíku ke kyslíku (C/O) a celková metalicita ([Fe/H] či [O/H]), slouží jako spolehlivá "genetická informace" o místě a způsobu formování planety v protoplanetárním disku.

V této kapitole formulujeme principy termochemické rovnováhy, analyzujeme mechanismy uhašení reakcí (quenching) a prozkoumáme atmosférické vlastnosti přechodné populace mezi terestrickými světy a plynnými planetami – superzemí a sub-neptunů.

6.1 Termochemická rovnováha: minimalizace Gibbsovy volné energie

V hlubokých, hustých a horkých vrstvách atmosféry ($P > 1\text{--}10$ bar, $T > 1000$ K) jsou kolizní frekvence mezi molekulami natolik vysoké a reakční kinetické časy natolik krátké, že atmosféra se nachází v lokální termochemické rovnováze (Local Chemical Equilibrium, LCE).

Rovnovážné složení směsi N chemických sloučenin při dané teplotě T a tlaku P je jednoznačně určeno stavem s **minimální celkovou Gibbsovou volnou energií** $G(T, P)$:

$$G(T, P, n_1, \dots, n_N) = \sum_{i=1}^N n_i \mu_i(T, P)$$

kde n_i je molární množství i -té složky a μ_i je její chemický potenciál:

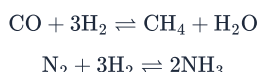
$$\mu_i(T, P) = \mu_i^\circ(T) + R_{\text{univ}} T \ln \left(\frac{P_i}{P^\circ} \right)$$

kde $\mu_i^\circ(T)$ je standardní chemický potenciál čisté složky při standardním tlaku $P^\circ = 1$ bar, R_{univ} je univerzální plynová konstanta a $P_i = (n_i / \sum n_j) P$ je parciální tlak. Minimalizace se provádí za striktního omezení zachování celkového počtu atomů jednotlivých chemických prvků (Lagrangeovy multiplikátory).

Dominantní rezervoáry uhlíku, kyslíku a dusíku

V atmosféře s kosmickým zastoupením prvků (převaha vodíku H_2 a helia He) závisí rozdělení molekul na teplotě:

- Při nízkých teplotách** ($T < 1000$ K): Dominantním nosičem uhlíku je metan (CH_4), nosičem kyslíku je vodní pára (H_2O) a nosičem dusíku amoniak (NH_3):



Rovnováha je silně posunuta doprava ve prospěch plně hydrogenovaných sloučenin.

- Při vysokých teplotách** ($T > 1100$ K, **horké jupitery**): Entropický člen v Gibbsově energii zvýhodňuje menší počet molekul na levé straně reakce. Dominantním nosičem uhlíku se stává oxid uhelnatý (CO), dusík přechází do stabilní molekuly N_2 a zbývající kyslík tvoří H_2O . Metan a amoniak jsou v rovnováze potlačeny o několik řádů.

6.2 Uhlíkový a kyslíkový cyklus: význam poměru C/O

Poměr počtu atomů uhlíku k počtu atomů kyslíku (C/O) je fundamentálním parametrem řídícím chemii exoplanetárních atmosfér. Pro Slunce činí referenční fotoférická hodnota:

$$(\text{C/O})_\odot \approx \frac{2,69 \times 10^{-4}}{4,90 \times 10^{-4}} \approx 0,55$$

- Režim bohatý na kyslík** ($\text{C/O} < 1$, **typicky sluneční** $\approx 0,55$): Veškerý dostupný uhlík se přednostně naváže do stabilní vazby $\text{C} \equiv \text{O}$ v molekule oxidu uhelnatého (CO). Zbývající volný kyslík se naváže s vodíkem a vytvoří hojnou vodní páru (H_2O). Spektrum horkého jupitera v tomto režimu dominují mohutné absorpční pásy vody na vlnových délkách $1,15 \mu\text{m}$, $1,4 \mu\text{m}$, $1,9 \mu\text{m}$ a $2,7 \mu\text{m}$.
- Režim bohatý na uhlík** ($\text{C/O} \geq 1$): Dojde-li k vyčerpání kyslíku na tvorbu CO , nezbyvá prakticky žádný kyslík pro syntézu vody. Koncentrace H_2O klesá o 3 až 5 řádů! Nadbytečný uhlík vytváří hojný kyanovodík (HCN), acetylen (C_2H_2) a metan (CH_4).

Stopovač formování za sněžnými čarami

Proč se hodnota C/O u exoplanet liší od jejich mateřských hvězd? Důvod spočívá v rozdílných teplotách sublimace těkavých látek v protoplanetárním disku:

1. **Sněžná čára vody (H₂O ice line, $T \sim 150\text{--}170\text{ K}$, $a \sim 2\text{--}3\text{ AU}$):** Voda vymrzá do pevných ledových zrn. Pevná fáze získává velmi nízký poměr C/O ~ 0 , zatímco v plynném disku zůstává uhlík v plynném CO a CO₂, čímž poměr C/O v plynu stoupá na $\sim 0,8$.
2. **Sněžná čára CO₂ ($T \sim 60\text{--}80\text{ K}$):** Část uhlíku vymrzá do zrn.
3. **Sněžná čára CO ($T \sim 20\text{--}25\text{ K}$, $a \sim 30\text{--}50\text{ AU}$):** Vymrzá i oxid uhelnatý.

Pokud se plynný obr zformoval akrecí plynu za sněžnou čarou vody, jeho atmosféra získá zvýšený poměr C/O $> 0,8$. Naopak planeta, která během migrace pohltila velké množství ledových planetesimál bohatých na vodní led, získá obohacenou metalicitu a nízký poměr C/O $< 0,5$.

6.3 Nerovnovážná chemie: vertikální turbulentní míchání a uhašení reakcí

Ve vyšších vrstvách atmosféry ($P < 1\text{--}0,1\text{ bar}$) hustota a teplota klesají, což vede k exponenciálnímu nárůstu kinetických reakčních časů τ_{chem} . Současně zde působí vertikální atmosférická turbulence a konvekce, které promíchávají plyn s charakteristickou transportní časovou škálou τ_{dyn} :

$$\tau_{\text{dyn}} \approx \frac{H^2}{K_{zz}}$$

kde H je škálová výška a K_{zz} je **koeficient vertikální difúze (eddy diffusion coefficient)**, typicky $10^7\text{--}10^{11}\text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ v atmosférách horkých jupiterů.

Porovnáním obou časových škál dospíváme k definici **hladiny uhašení (quench level)**:

- V hluboké atmosféře platí $\tau_{\text{chem}} \ll \tau_{\text{dyn}}$: chemické reakce probíhají bleskově a plyn udržuje lokální termochemickou rovnováhu.
- S rostoucí výškou τ_{chem} roste rychleji než τ_{dyn} . V hladině, kde se obě škály vyrovnají:

$$\tau_{\text{chem}}(T_{\text{quench}}, P_{\text{quench}}) = \tau_{\text{dyn}} = \frac{H^2}{K_{zz}}$$

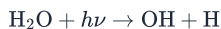
chemické reakce "zamrznou" (uhašení reakce). Nad touto hladinou je vertikální transport rychlejší než přeměna molekul. Koncentrace plynů (např. poměr CO/CH₄ nebo N₂/NH₃) se "zamrazí" na hodnotě odpovídající hladině uhašení a zůstává s rostoucí výškou konstantní!

V důsledku toho nacházíme v horních vrstvách mírně teplejších jupiterů ($T \approx 800\text{--}1000\text{ K}$) překvapivě vysoké zastoupení oxidu uhelnatého CO, které převyšuje hodnotu z lokální rovnováhy o několik řádů.

6.4 Atmosférická fotochemie řízená UV fotony

V nejvyšších vrstvách atmosfér ($P < 10^{-3}\text{ bar}$) dochází k přímé absorpci tvrdého ultrafialového záření mateřské hvězdy (FUV a NUV, 100–300 nm). Energie fotonů $h\nu$ přesahuje disociační energii chemických vazeb, což iniciuje fotochemické kaskády:

1. **Fotolýza vody:**



Vysoce reaktivní hydroxylový radikál OH následně oxiduje stopové plyny.

1. **Fotolýza sirovodíku a vznik SO₂:** Síra v redukční atmosféře horkého jupitera existuje jako H₂S. Jeho disociací vzniká atomární síra:



Atomární síra následně reaguje s radikály OH:



Tento proces byl spektroskopem NIRSpec na JWST empiricky potvrzen u planety WASP-39b.

1. **Fotochemická syntéza uhlovodíkových oparů:** Disociace metanu fotony Ly- α produkuje metylové radikály CH₃, jež rekombinují na ethan (C₂H₆), acetylen (C₂H₂) a polymerují na komplexní refrakterní tholiny tvořící opticky neprůhledný opar.

6.5 Superzemě, sub-neptuny a vodní světy (hycean worlds)

Jedním z nejvýznamnějších statistických objevů mise Kepler je existence tzv. **poloměrového údolí (radius valley / Fulton gap)** v rozdělení velikostí exoplanet kolem $R_p \approx 1,7 - 2,0 R_\oplus$:

- Planety s $R_p < 1,6 R_\oplus$ tvoří populaci skalnatých **superzemí** s vysokou hustotou odpovídající železokřemičitanovému složení bez masivní plynné obálky.
- Planety s $R_p > 2,0 R_\oplus$ tvoří populaci **sub-neptunů** s nízkou hustotou, které si uchovaly lehkou vodíkovo-heliovou primordiální obálku tvořící 1–5 % celkové hmotnosti planety.

Údolí v poloměrech je důsledkem atmosférické eroze způsobené fotoevaporací (extrémním UV zářením mladé hvězdy) nebo ochlazováním horkého planetárního jádra (core-powered mass loss).

Koncept vodních světů (Hycean worlds)

Speciální podtřídou sub-neptunů v obyvatelné zóně jsou hypotetické **hyceánské planety** (Hydrogen + Ocean). Jde o planety o hmotnosti $2 - 10 M_\oplus$ s rozsáhlým hlubokým globálním oceánem kapalné vody pokrytým tenkou atmosférou bohatou na molekulární vodík H_2 . Díky skleníkovému působení vodíku vyvolanému kolizně indukovanou absorpcí ($H_2 - H_2$ CIA) mohou tyto planety udržet kapalnou vodu na povrchu i při výrazně nižším hvězdném toku než terestrické planety. V současnosti probíhá intenzivní spektroskopický průzkum kandidáta K2-18b teleskopem JWST, kde byla hlášena detekce CH_4 a CO_2 při absenci NH_3 , což je považováno za možný indikátor kapalného oceánu absorbujícího amoniak.

Část III: Obyvatelnost a astrobiologie

Otázka, zda je planeta obyvatelná, překračuje hranice čisté astrofyziky a představuje hlubokou syntézu geodynamiky, atmosférické fyziky, fotochemie a evoluční biologie. Obyvatelnost (habitabilita) není binární veličinou, ale komplexním kontinuem environmentálních podmínek, které umožňují vznik, udržení a dlouhodobý rozvoj biochemických struktur založených na uhlíku a kapalné vodě.

V této třetí části monografie prozkoumáme fyzikální mechanismy vymezující obyvatelné světy. Odvodíme klasické i moderní 1D a 3D klimatické modely cirkumstelární obyvatelné zóny (Kasting, Kopparapu), analyzujeme geochemický uhlíčitano-křemičitanový termostat a zaměříme se na zásadní astrofyzikální výzvu: obyvatelnost planet u červených trpaslíků typu M vystavených vázané rotaci, supererupcím a hydrodynamickému úniku atmosféry. Část uzavírá přehled biofyzikálních limitů života z pohledu pozemských extrémofilních organismů.

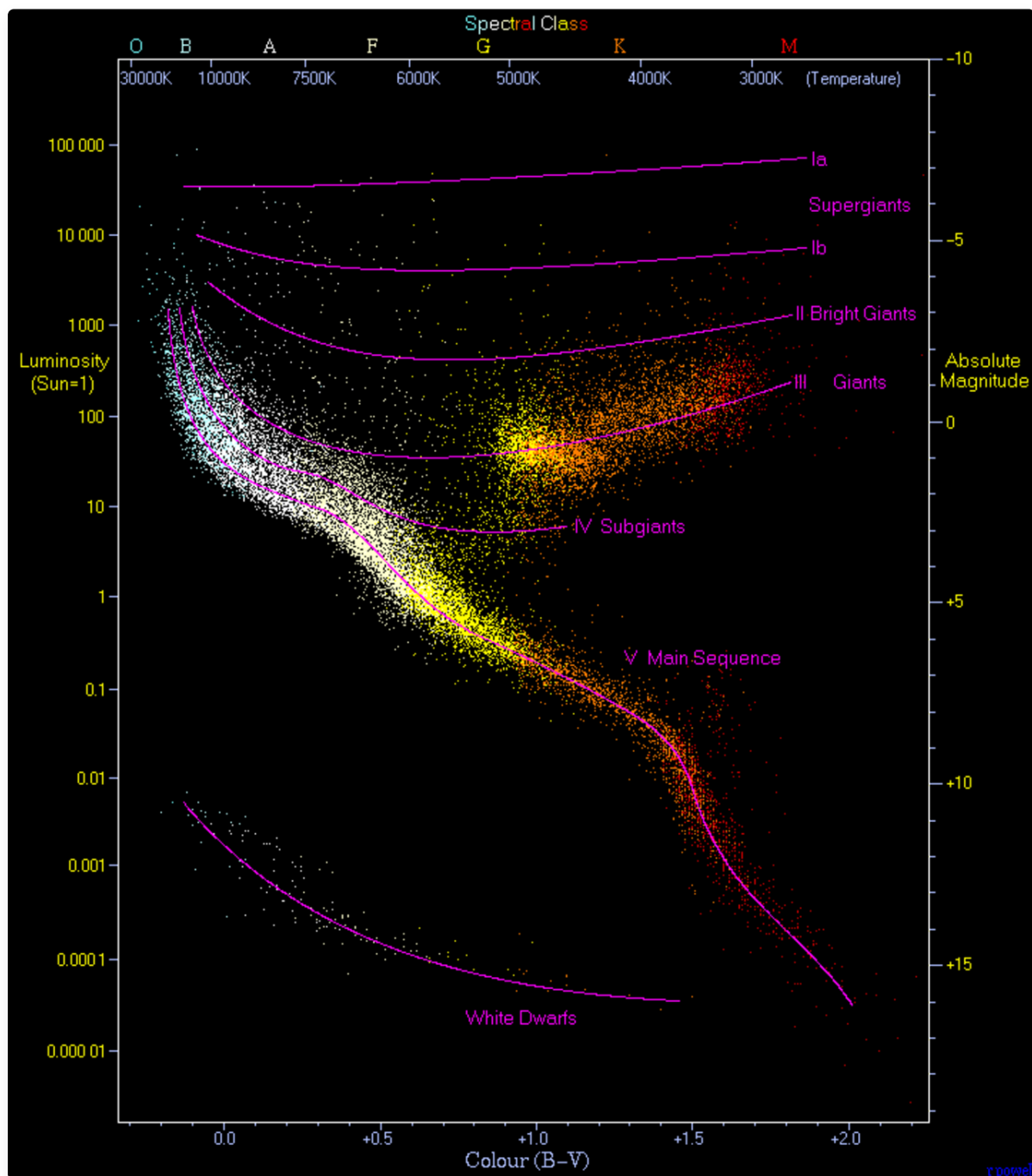
Přehled kapitol Části III:

- **Kapitola 7: Cirkumstelární obyvatelná zóna a Kastingův model** * Definice cirkumstelární obyvatelné zóny (Circumstellar Habitable Zone, HZ) * Analytický a numerický model Kasting, Whitmire & Reynolds (1993) a aktualizace Kopparapu et al. (2013, 2014) * Vnitřní hranice HZ: nekontrolovaný skleníkový efekt (runaway greenhouse) a ztráta vody fotodisociací (moist greenhouse limit) * Vnější hranice HZ: limit maximálního skleníkového efektu CO_2 a vymrzání oxidu uhličitého do polárních čepiček * Negativní zpětná vazba uhlíčitano-křemičitanového cyklu a závislost geometrie HZ na spektrální třídě hvězdy (F, G, K, M)
- **Kapitola 8: Vliv stelární aktivity červených trpaslíků typu M na ztrátu atmosféry** * Specifika hvězdné populace M trpaslíků: dlouhověkost, nízká zářivost a těsná blízkost obyvatelné zóny * Důsledky slapové vázané rotace: atmosférický koloběh, vznik permanentního hurikánu v substelárním bodě a riziko vymrznutí na noční straně * Hvězdná magnetická aktivita: supererupce, výrony koronální hmoty (CME) a dlouhotrvající emise extrémního UV a rentgenového záření (XUV) * Fyzikální mechanismy atmosférického úniku: hydrodynamické fotoodpařování (photoevaporation), Jouleovo ohřívání a eroze hvězdným větrem * Případové studie nejbližších cílů: terestrické planety v systému TRAPPIST-1 a Proxima Centauri b
- **Kapitola 9: Extrémofilní život a hranice přežití pozemských organismů** * Pozemská biosféra jako kalibrační standard: fyzikálně-chemické limity buněčného života (tlak, teplota, pH, salinita, aktivita vody a_w) * Hypertermofily a hlubokomořské hydrotermální průduchy (černí kuřáci): chemolitotrofie bez slunečního světla * Psychrofilny v arktických permafrostových vrstvách a halofilny v hypersalinních solankách * Radiorezistentní bakterie (*Deinococcus radiodurans*) a efektivní enzymatické opravy dvouřetězcových zlomů DNA * Želvušky (*Tardigrada*), kryptobióza a odolnost vůči tvrdému kosmickému vakuu * Astrobiologické implikace pro ledové měsíce s podpovrchovými oceány (Europa, Enceladus) a terestrické exoplanety

Kapitola 7: Cirkumstelární obyvatelná zóna a Kastingův model

Koncept cirkumstelární obyvatelné zóny (Circumstellar Habitable Zone, HZ) je ústředním teoretickým rámcem pro plánování astrobiologických pozorovacích misí. HZ je definována jako geometrická oblast kolem mateřské hvězdy, ve které může terestrická planeta s dostatečně masivní atmosférou udržet na svém pevném povrchu kapalnou vodu pod atmosférickým tlakem umožňujícím existenci hydrologického cyklu.

V této kapitole zformulujeme klasický jednorozměrný radiativně-konvektivní model Jamese Kastinga a jeho moderní zpřesnění dle Kopparapu et al. (2013, 2014). Odvodíme fundamentální fyzikální limity vymezující vnitřní a vnější hranici obyvatelné zóny a rozebereme klíčovou roli geochemického uhlíčitano-křemičitanového cyklu jako globálního planetárního termostatu.



Hertzsprung-Russellův diagram zobrazující hlavní posloupnost, zářivost a efektivní teploty hvězd různých spektrálních tříd OBAFGKM

7.1 Definice cirkumstelární obyvatelné zóny a kapalná voda

Kapalná voda vyžaduje pro svou termodynamickou stabilitu teplotu a tlak ležící mezi trojným bodem ($T_t = 273,16 \text{ K}$, $P_t = 6,11 \text{ mbar}$) a kritickým bodem vody ($T_c = 647 \text{ K}$, $P_c = 220,6 \text{ bar}$). Pokud atmosférický tlak klesne pod $6,11 \text{ mbar}$ (jako je tomu na současném Marsu s průměrným tlakem $\sim 6 \text{ mbar}$), led při zahřátí přímo sublimuje do plynné fáze bez existence kapalného skupenství.

Definice HZ předpokládá planetu o hmotnosti srovnatelné se Zemí ($0,5 M_\oplus < M_p < 5 M_\oplus$) s atmosférou tvořenou skleníkovými plyny (H_2O , CO_2 , N_2), kde je povrchová teplota regulována negativní zpětnou vazbou mezi zvětráváním křemičitanů a obsahem oxidu uhličitého.

Efektivní oslunění planety (hvězdný tok dopadající na horní hranici atmosféry) se vyjadřuje poměrem vůči současné sluneční konstantě na Zemi ($S_0 = 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$):

$$S_{\text{eff}} \equiv \frac{F}{S_0} = \left(\frac{L_*}{L_\odot} \right) \left(\frac{1 \text{ AU}}{d} \right)^2$$

Vzdálenost obyvatelné zóny d pro dané efektivní oslunění pak přímo plyne jako:

$$d = 1 \text{ AU} \cdot \sqrt{\frac{L_*/L_\odot}{S_{\text{eff}}}}$$

7.2 Model Kasting, Whitmire & Reynolds (1993) a Kopparapu et al. (2013)

V přelomové práci Kasting, Whitmire & Reynolds (1993) byl vyvinut 1D radiativně–konvektivní model atmosféry s mrakově čistou oblohou (cloud-free). Model řeší vertikální přenos záření v atmosféře nasycené vodní párou a proměnným množstvím CO_2 . Kopparapu et al. (2013, 2014) model aktualizovali s využitím moderních spektroskopických databází HITRAN 2008 a HITEMP 2010 a zpřesnili absorpční koeficienty H_2O a CO_2 .

Efektivní oslunění na mezních hranicích HZ je parametrizováno polynomem v závislosti na efektivní teplotě mateřské hvězdy T_* (resp. odchylce $T_* - 5780 \text{ K}$):

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + a \cdot T_*' + b \cdot T_*'^2 + c \cdot T_*'^3 + d \cdot T_*'^4$$

kde $T_*' = T_* - 5780 \text{ K}$ a $S_{\text{eff}\odot}$ je mezní tok pro hvězdu se sluneční teplotou.

Závislost na spektrální třídě hvězdy má zásadní fyzikální důvod: chladnější hvězdy (červení trpaslíci třídy M) vyzařují maximum své energie v blízkém infračerveném oboru ($\lambda \sim 1-3 \mu\text{m}$). Voda a oxid uhličitý v atmosféře planety mají v této oblasti silné absorpční pásy, což vede k vyšší absorpci dopadajícího záření. Navíc Rayleighův rozptyl v atmosféře planety ($\propto \lambda^{-4}$) je pro infračervené fotony M trpaslíků zanedbatelný, takže planetární albedo klesá. Planeta u M trpaslíka proto absorbuje podstatně větší podíl záření než tatáž planeta u hvězdy třídy F či G, což posouvá hranice S_{eff} k nižším hodnotám.

7.3 Vnitřní hranice HZ: runaway a moist greenhouse limit

Vnitřní hranice obyvatelné zóny vymezuje nejmenší vzdálenost od hvězdy, při které se planeta ještě dokáže vyhnout katastrofické ztrátě veškerých zásob vody:

1. **Limit ztráty vody (Moist Greenhouse Limit):** Se stoupající povrchovou teplotou ($T_s > 320-340 \text{ K}$) prudce roste tlak nasycených vodních par podle Clausiovy–Clapeyronovy rovnice:

$$\frac{dP_{\text{sat}}}{dT} = \frac{L_{\text{vap}} P_{\text{sat}}}{R_{\text{spec}} T^2}$$

Vodní pára přestává vymrzat v troposféře a proniká přes studenou past (tropopauzu) do stratosféry. Pokud směšovací poměr vody ve stratosféře překročí kritickou mez $f(\text{H}_2\text{O}) \sim 10^{-3}$, ultrafialové záření hvězdy začne vodu masivně fotolyzovat. Lehký vodík překoná gravitační pole a uniká do kosmu hydrodynamickým větrem (jeansovský a fotoevaporační únik). Tímto procesem může planeta ztratit ekvivalent celého zemského oceánu během méně než 10^9 let. Dle modelu Kopparapu et al. (2013) nastává tento limit pro Zemi u Slunce při:

$$S_{\text{eff}} \approx 1,015 \implies d_{\text{in}} \approx 0,99 \text{ AU}$$

1. **Nekontrolovaný skleníkový efekt (Runaway Greenhouse Limit):** Když se povrch planety ohřeje natolik, že atmosféra se stane opticky tlustou pro veškeré tepelné infračervené vyzařování, vyzařovaný tok do kosmu dosáhne asymptotického stropu – tzv. **Simpsonova–Nakajimova limitu**:

$$F_{\text{IR}, \text{max}} \approx 280-310 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Pokud absorbovaný hvězdný tok překročí tuto mez ($F_{\text{abs}} > F_{\text{IR}, \text{max}}$), planeta již nemůže dosáhnout radiativní rovnováhy. Nastává pozitivní zpětná vazba: vyšší teplota odpaří více vody, vyšší vlhkost zesílí skleníkový efekt, což dále zvýší teplotu. Celý oceán se bleskově vypaří do

atmosféry, povrchová teplota překročí 1500 K a povrchové horniny se začnou tavit. Tento scénář postihl v rané historii Sluneční soustavy Venuši. Odpovídající oslunění pro Zemi činí $S_{\text{eff}} \approx 1,06$ ($d \approx 0,97$ AU), resp. při započtení 3D cirkulace mraků až $d \approx 0,95$ AU.

7.4 Vnější hranice HZ: maximální skleníkový efekt CO₂

S rostoucí vzdáleností od hvězdy klesá dopadající tok a k udržení teploty nad bodem mrazu ($T_s \geq 273$ K) je zapotřebí stále vyšší parciální tlak skleníkového plynu CO₂:

- **Limit maximálního skleníkového efektu (Maximum Greenhouse Limit):** Mohlo by se zdát, že přidáním libovolného množství CO₂ lze planetu zahřát v jakékoliv vzdálenosti. To však neplatí. Když parciální tlak oxidu uhličitého dosáhne hodnoty $P(\text{CO}_2) \approx 6\text{--}10$ bar, projeví se dva protichůdné efekty:

1. Centrální pásy CO₂ (zejména na 15 μm) jsou již zcela saturovány.

1. Hustá plynná atmosféra začne masivně rozptylovat dopadající sluneční světlo Rayleighovým rozptylem. Rayleighův rozptyl zvýší planetární albedo ($A_B > 0,4\text{--}0,5$) natolik, že ochlazení z odraženého světla převáží nad dodatečným skleníkovým ziskem. Přidání dalšího CO₂ již povrch neohřeje, ale naopak ochladí! Pro Sluneční soustavu odpovídá tento limit:

$$S_{\text{eff}} \approx 0,356 \implies d_{\text{out}} \approx 1,67 \text{ AU}$$

(nachází se těsně za drahou Marsu, $a_{\text{Mars}} = 1,524$ AU).

Pokud tok klesne pod tuto mez, oxid uhličitý začne na pólech a v zimních obdobích kondenzovat do pevných vloček suchého ledu. Vymrznutí CO₂ způsobí kolaps atmosféry a globální zalednění planety (stav zvané "Snowball Earth").

7.5 Uhlíčitano–křemičitanový cyklus jako dlouhodobý planetární termostat

Stabilita zemského klimatu po dobu 4 miliard let, navzdory tomu, že mladé Slunce vyzařovalo o 30 % méně energie než dnes (paradox slabého mladého Slunce, Faint Young Sun Paradox), je zajištěna anorganickým **uhlíčitano–křemičitanovým cyklem (carbonate–silicate geochemical cycle)**.

Tento cyklus funguje jako planetární termostat s negativní zpětnou vazbou:

1. **Sopečné odplyňování (zdroj CO₂):** Vulkanismus pumpuje do atmosféry konstantní tok oxidu uhličitého pocházejícího z tavení hornin v zemském plášti.
2. **Chemické zvětrávání křemičitanů (propad CO₂):** Atmosférický CO₂ se rozpouští v dešťové vodě za vzniku slabé kyseliny uhličitě:



Kyselý déšť chemicky narušuje křemičitanové minerály na kontinentech (reprezentované např. wollastonitem CaSiO₃):



1. **Srážení uhlíčanů v oceánech:** Řeky transportují vápníkové kationty Ca²⁺ a hydrogenuhlíčitanové anionty HCO₃⁻ do oceánů, kde mořské organismy i anorganické srážení syntetizují uhlíčitan vápenatý (vápenec):



Čistá globální reakce celého cyklu zní:



1. **Subdukce a metamorfóza:** Uhlíčitanové sedimenty na oceánském dně jsou deskovou tektonikou zataženy do subdukčních zón zemského pláště. Za vysokých teplot a tlaků dochází k metamorfní dekarbonizaci: křemen a vápenec spolu reagují a uvolněný plynný CO₂ je vulkány vyvržen zpět do atmosféry.

Negativní zpětná vazba termostatu

Rychlost chemického zvětrávání křemičitanů silně roste s teplotou (Arrheniova závislost) a množstvím srážek:

- Pokud se planeta přehřeje, zvýšený odpar vody a srážky urychlí zvětrávání. Zvětrávání odčerpá CO₂ z atmosféry a uloží jej do sedimentů, skleníkový efekt zeslábně a planeta se ochladí.
- Pokud se planeta ochladí a zamrzne, srážky i zvětrávání ustanou. Vulkanismus však nepřetržitě pumpuje CO₂ do atmosféry. Během milionů let dosáhne koncentrace CO₂ hodnot několika barů, což překoná ledovcový albedový zámeček a roztaje globální zalednění.

Tato geochemická zpětná vazba je fundamentální podmínkou obyvatelnosti: planeta v obyvatelné zóně musí mít deskovou tektoniku nebo aktivní vulkanickou recyklaci, jinak je její obyvatelnost pouze přechodná.

Kapitola 8: Vliv stelární aktivity červených trpaslíků na ztrátu atmosféry

Červení trpaslíci (hvězdy spektrální třídy M o hmotnostech $0,08 M_{\odot} < M_* < 0,6 M_{\odot}$) tvoří více než 70–75 % veškeré hvězdné populace naší Galaxie. Vzhledem k jejich extrémně pomalému spalování vodíku v termonukleárních pp-řetězcích dosahuje doba jejich života na hlavní posloupnosti stovek miliard až bilionů let, což dalece převyšuje současné stáří vesmíru. Z čistě statistického hlediska se naprostá většina terestrických planet v obyvatelných zónách nachází právě u M trpaslíků.

Tento zdánlivě ideální předpoklad pro vznik a evoluci života však naráží na závažné astrofyzikální překážky. Nízká zářivost M trpaslíků vyžaduje, aby obyvatelná zóna ležela v extrémní blízkosti hvězdy ($a \sim 0,02–0,2 \text{ AU}$). V takové vzdálenosti jsou planety vystaveny mohutným slapovým silám vedoucím k vázané rotaci a po miliardy let čelí agresivní magnetické aktivitě, supererupcím a intenzivnímu toku tvrdého XUV záření.

8.1 Specifika M trpaslíků: zářivost a poloha obyvatelné zóny

Zářivost hvězd hlavní posloupnosti škáluje s hmotností podle strmého vztahu $L_* \propto M_*^{3,5-4}$. Pro pozdního červeného trpaslíka s hmotností $M_* = 0,1 M_{\odot}$ (jako je Proxima Centauri nebo TRAPPIST-1) činí bolometrická zářivost pouhou tisícinu zářivosti Slunce:

$$L_* \approx 10^{-3} L_{\odot}$$

Z rovnice pro vzdálenost obyvatelné zóny $d_{\text{HZ}} = \sqrt{L_*/S_{\text{eff}}}$ vyplývá, že obyvatelná zóna se posouvá do bezprostřední blízkosti hvězdy:

$$d_{\text{HZ}} \approx \sqrt{10^{-3}} \approx 0,032 \text{ AU} \approx 4,7 \times 10^6 \text{ km}$$

Oběžná perioda na této dráze podle 3. Keplerova zákona činí:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_*}} \approx 2–15 \text{ dní}$$

Pro srovnání: Merkur obíhá kolem Slunce ve vzdálenosti 0,387 AU s periodou 88 dní. Planeta v obyvatelné zóně M trpaslíka se tedy pohybuje více než desetkrát blíže k mateřské hvězdě než Merkur ke Slunci!

8.2 Vázaná rotace a riziko atmosférického vymrznutí (atmospheric collapse)

Doba potřebná k synchronizaci rotace planety v důsledku slapové disipace energie τ_{sync} škáluje s šestou mocninou velké poloosy oběžné dráhy a :

$$\tau_{\text{sync}} \approx \frac{4}{9} \frac{QC\omega_0 a^6}{k_2 GM_*^2 R_p^3}$$

kde Q je faktor slapové disipace (specifická kvalita), C je moment setrvačnosti planety, ω_0 je počáteční rotační úhlová rychlost a k_2 je Loveovo číslo druhého řádu.

Zatímco pro Zemi u Slunce ($a = 1 \text{ AU}$) činí τ_{sync} stovky miliard let, pro planetu v obyvatelné zóně M trpaslíka ($a \approx 0,05 \text{ AU}$) se doba synchronizace zkracuje na **méně než $10^5–10^6$ let** – tedy zlomek geologického času. Planeta okamžitě vstupuje do stavu vázané rotace 1:1.

Vázaná rotace přináší zásadní klimatické výzvy:

- 1. Permanentní teplotní dichotomie:** Denní hemisféra je nepřetržitě zahřívána, zatímco noční hemisféra je ponořena do věčné tmy a ochlazována vyzařováním do vakua.
- 2. Vymrznutí atmosféry (Atmospheric Collapse):** Pokud je atmosféra příliš řídká (povrchový tlak $P < 0,01–0,1 \text{ bar}$), atmosférická cirkulace nedokáže transportovat dostatek tepla na noční stranu. Teplota noční strany klesne pod bod mrazu těkavých látek: voda, oxid uhličitý a nakonec i molekulární dusík N_2 vymrznou do obřích ledovcových štítů na odvrácené polokouli. Tím dojde k vysátí celé atmosféry a vzniku bezvzdušného světa.
- 3. Klimatická stabilizace oceány:** Třírozměrné klimatické modely (GCM) ukazují, že pokud si planeta udrží atmosféru o tlaku $P \geq 1 \text{ bar}$ a hluboký oceán, oceánské proudy a ekvatoriální atmosférické větry dokážou transportovat až 30 % dopadající energie na noční stranu, čímž zabrání vymrznutí CO_2 a udrží obyvatelný pás podél terminátoru (tzv. "Eyeball Earth" scénář).

8.3 Stelární magnetická aktivita: supererupce a XUV radiace

Hvězdy s hmotností pod $0,35 M_{\odot}$ jsou **plně konvektivní**. Nemají vnitřní tachoklinu (rozhraní mezi radiačním jádrem a konvektivním pláštěm, kde ve Slunci funguje $\alpha\Omega$ -dynamo). Místo toho generují magnetické pole konvektivním dynamem malých měřitek, které dosahuje povrchových indukci $B \sim 1000\text{--}5000\text{ G}$ (pro srovnání: průměrné magnetické pole Slunce je $\sim 1\text{--}5\text{ G}$).

Tato mohutná magnetická pole vedou k extrémním projevům aktivity:

- **Dlouhá fáze před hlavní posloupností (pre-main sequence, PMS):** Během gravitační kontrakce ($100\text{--}200$ milionů let) vyzařuje mladý M trpaslík zářivý výkon převyšující jeho ustálenou zářivost na hlavní posloupnosti. Planeta v budoucí obyvatelné zóně prožívá po stovky milionů let nekontrolovaný skleníkový efekt a může ztratit několik ekvivalentů pozemských oceánů dříve, než hvězda vstoupí na hlavní posloupnost.
- **Supererupce (Superflares):** Magnetické přepojení v koróně M trpaslíků uvolňuje energie $E \sim 10^{26}\text{--}10^{29}\text{ J}$ ($10^2\text{--}10^5 \times$ silnější než největší zaznamenaná sluneční erupce v historii – Carringtonova událost z roku 1859). Tyto erupce jsou doprovázeny prudkým zjasněním v UV a rentgenovém oboru a masivními výrony koronální hmoty (Coronal Mass Ejections, CME) s hustotou protonů o několik řádů vyšší než ve slunečním větru.
- **Přetrvávající XUV emise:** Zatímco u hvězd slunečního typu klesá podíl rentgenového a extrémního UV záření ($L_{\text{XUV}}/L_{\text{bol}}$) po zhruba 100 milionech let, u M trpaslíků zůstává na saturované hodnotě $L_{\text{XUV}}/L_{\text{bol}} \approx 10^{-3}$ po celou miliardu let.

8.4 Mechanismy atmosférického úniku: fotoevaporace a Jouleovo ohřívání

Ztráta atmosféry terestrické planety probíhá prostřednictvím několika hydrodynamických a netermálních procesů:

1. Hydrodynamický únik (Photoevaporation)

Vysokoenergetické fotony XUV ($\lambda < 100\text{ nm}$) jsou absorbovány ve vrchní termosféře planety, kde fotoionizují vodík a štěpí molekuly. Část energie fotonů se transformuje na tepelnou kinetickou energii elektronů s účinností $\epsilon \approx 0,10\text{--}0,15$. Pokud je rychlost depozice tepla vyšší, než rychlost chladnutí vyzařováním, plyn překoná zvukovou bariéru a přechází do stavu transonického planetárního větru (analogicky k Parkerovu slunečnímu větru).

Rychlost úniku hmoty $\dot{M}$ v energeticky limitovaném režimu (energy-limited escape) je dána rovnicí:

$$\dot{M} = \frac{\epsilon \pi R_{\text{XUV}}^2 F_{\text{XUV}}}{GM_p/R_p} = \frac{\epsilon \pi R_p R_{\text{XUV}}^2 F_{\text{XUV}}}{GM_p K_{\text{tide}}}$$

kde F_{XUV} je hustota toku XUV záření v místě planety, R_{XUV} je efektivní poloměr absorpce XUV fotonů a K_{tide} je korekční faktor slapového poloměru (Rocheova laloku). Planeta může tímto procesem ztratit celou atmosféru i oceány o hmotnosti desítek barů během několika set milionů let.

2. Erozivní působení hvězdného větru a Jouleovo ohřívání

Protože planeta v obyvatelné zóně M trpaslíka obíhá extrémně blízko hvězdě, dynamický tlak hvězdného větru $P_{\text{dyn}} = \rho_{\text{sw}} v_{\text{sw}}^2$ je $10^2\text{--}10^3 \times$ vyšší než na Zemi. Pokud planeta postrádá silné vnitřní dipólové magnetické pole (magnetosféru), hvězdný vítr přímo naráží na ionosféru a indukuje polární elektrojety, které vedou k disipativnímu Jouleovu ohřevu plynů a jejich odtlačování do meziplanetárního prostoru mechanismem iontového úprku (ion pick-up).

8.5 Případové studie: TRAPPIST-1 a Proxima Centauri b

Pozorování dvěma klíčovými instrumenty – rentgenovou observatoří Chandra a spektrografem MIRI na JWST – přinesla první empirické testy teoretických modelů:

Systém TRAPPIST-1

Systém TRAPPIST-1 tvoří ultrakompaktní soustava sedmi terestrických planet velikosti Země obíhajících kolem chladného červeného trpaslíka ($M_{\star} \approx 0,09 M_{\odot}$). Tři z těchto planet (TRAPPIST-1e, f, g) leží v obyvatelné zóně.

- **Měření sekundárního zákrytu TRAPPIST-1b a 1c na JWST (MIRI, $15\text{ }\mu\text{m}$):** Pozorování publikovaná v letech 2023–2024 změřila denní teplotu nejvnitřnějších planet $T_{\text{day}} \approx 500\text{ K}$ a 380 K . Tyto hodnoty se přesně shodují s teoretickým modelem holé skály s nulovým albedem a nulovou redistribucí tepla na noční stranu! To jednoznačně dokazuje, že vnitřní planety TRAPPIST-1b a 1c byly během své historie zcela zbaveny jakékoliv husté atmosféry (CO_2 atmosféra o tlaku nad $0,1\text{ bar}$ je vyloučena).
- **Naděje pro TRAPPIST-1e:** Planeta 1e má vyšší hustotu, obíhá dále od hvězdy v zóně s nižším tokem XUV a teoretické modely naznačují, že mohla přežít ranou fázi fotoevaporace a uchovat si sekundární odplyněnou atmosféru s kapalnou vodou.

Proxima Centauri b

Naše nejbližší exoplaneta ($d = 1,3 \text{ pc}$, $M_p \sin i \approx 1,17 M_\oplus$) obíhá kolem aktivního eruptivního M trpaslíka Proxima Centauri v periodě 11,2 dne. V roce 2017 zaznamenala soustava ALMA obří supererupci Proximy, při níž tok v milimetrovém oboru vzrostl o faktor 1000 během několika sekund. Planeta je vystavena toku XUV $30\times$ vyššímu a dynamickému tlaku větru $100\times$ vyššímu než Země. Přežití její atmosféry závisí na tom, zda planeta disponuje silným vnitřním geomagnetickým polem generovaným konvekcí v tekutém železném jádře.

Kapitola 9: Extrémofilní život a hranice přežití pozemských organismů

Definice obyvatelnosti v exoplanetární astrofyzice byla po desetiletí formulována na základě environmentálních nároků vyšších eukaryotických organismů (antropocentrický pohled). Výzkum pozemské biosféry za poslední půlstoletí však odhalil, že doména života sahá do prostředí s fyzikálními a chemickými parametry, které byly dříve považovány za naprosto sterilní. Organismy adaptované na tyto drsné podmínky – **extrémofilové** (převážně z domén Archaea a Bacteria) – posouvají hranice známé biochemie a dramaticky rozšiřují spektrum planetárních těles, na nichž může existovat život.

9.1 Pozemská biosféra a fyzikálně–chemické limity života

Buněčný život je limitován integritou svých základních biomolekul: buněčných membrán, enzymů (proteinů) a nukleových kyselin (DNA/RNA). Zkoumání extrémofilních organismů vymezilo empirické hranice metabolické aktivity a přežití v několika klíčových parametrech:

Environmentální parametr	Rozsah pro běžný život	Mezní limit metabolické aktivity	Mezní limit přežití (kryptobióza)	Reprezentativní organismus
Teplota (T)	10 °C až 40 °C	−20 °C až +122 °C	−272 °C až +150 °C	<i>Methanopyrus kandleri</i> (122 °C)
Hydrostatický tlak (P)	1 bar (0,1 MPa)	0 bar až 1300 bar (130 MPa)	> 60 000 bar (6 GPa)	<i>Colwellia marinimaniae</i>
Kyselost / zásaditost (pH)	6,5 až 7,5	0,0 (extrémně kyselé) až 12,5	−0,06 až 13,0	<i>Picrophilus oshimae</i> (pH 0,7)
Salinita (NaCl)	~ 0,9 % (fyziologický roztok)	nasycený roztok (~ 32 %)	nasycená solanka	<i>Halobacterium salinarum</i>
Aktivita vody (a_w)	0,98 až 1,00	0,605	0,00 (úplná anhydrobióza)	<i>Aspergillus penicillioides</i>
Ionizující záření	< 0,05 Gy · rok ^{−1}	50 Gy · hod ^{−1}	> 15 000–30 000 Gy	<i>Deinococcus radiodurans</i>

Aktivita vody $a_w \equiv P_{\text{parc}}/P_{\text{sat}}$ představuje bezrozměrnou míru dostupnosti volné vody pro biochemické reakce. Pod hodnotou $a_w \approx 0,60$ je buněčný metabolismus zastaven, avšak dehydrované buňky mohou přežívat v dormantním stavu po geologické epochy.

9.2 Termofily a hypertermofily: hydrotermální průduchy

Při vysokých teplotách hrozí proteinům tepelná denaturace (rozpad terciární struktury v důsledku termálního kmitání a rozpadu vodíkových můstků), DNA podléhá depurinaci a fosfolipidové membrány tají a stávají se propustnými pro protony, což ničí proton–motivní sílu syntézy ATP.

Hypertermofilní archea obývající hlubokomořské hydrotermální průduchy (black smokers na dně oceánů za tlaků $P > 200$ –400 bar) vyvinula unikátní molekulární mechanismy adaptace:

- Etherové vazby v membránách:** Místo esterových vazeb běžných u bakterií a eukaryot mají membrány archeí etherové vazby spojující glycerol s rozvětvenými isoprenoidními řetězci. U mnoha hypertermofilů tvoří lipidy kovalentní **monovrstvu (tetraether)**, která je tepelně absolutně stabilní a neroztaje ani při teplotách nad 120 °C.
- Reverse DNA gyrase:** Unikátní topoizomeráza, která do molekuly DNA vnáší pozitivní nadobrátky (positive supercoiling), čímž mechanicky zabraňuje rozpletení dvojšroubovice při teplotách přesahujících bod varu vody.
- Chemolitotrofní metabolismus:** V hlubokém oceánu bez přístupu slunečního světla je ekosystém zcela nezávislý na fotosyntéze. Primární producenti získávají energii oxidací anorganických redukováných sloučenin vytékajících z nitra kůry (sirovodík H_2S , molekulární vodík H_2 , dvojmočné železo Fe^{2+} , metan CH_4) za využití akceptorů elektronů, jako jsou sírany (SO_4^{2-}), oxid uhličitý či oxidy železa:



Tento proces prokazuje, že život může dlouhodobě prosperovat i na tělesech zcela odříznutých od záření mateřské hvězdy.

9.3 Psychrofily, halofily a radiorezistence: *Deinococcus radiodurans*

- Psychrofily (chladnomilné organismy):** V arktickém permafrostu a podledovcových jezerech (např. jezero Vostok v Antarktidě) syntetizují proteiny s vysokou strukturní flexibilitou a membrány s vysokým obsahem polynenasycených mastných kyselin zabraňující ztuhnutí při teplotách pod 0 °C. Využívají mikroskopické kapilární žilky vysoce mineralizované nezamrzající vody mezi krystaly ledu k metabolické aktivitě až do −20 °C.

- **Halofily:** Přežívají v nasycených roztocích solí (NaCl , KCl , MgCl_2) mechanismem "salt-in", kdy v cytoplazmě akumulují draselné ionty (K^+) na koncentraci přesahující 4 M, aby vyrovnaly osmotický tlak okolního prostředí.
- **Radiorezistentní bakterie (*Deinococcus radiodurans*):** Člověka usmrtí celotělová dávka ionizujícího záření 5 Gy, dávka 1000 Gy sterilizuje téměř veškerý pozemský život. *Deinococcus radiodurans* však bez problémů přežívá dávky přesahující 15 000 Gy! Radiace způsobuje stovky dvouřetězcových zlomů v genomu (Double-Strand Breaks, DSB). Adaptace nespočívá v odolnosti DNA vůči poškození, ale v geniálním reparačním systému:

1. Bakterie uchovává 4 až 10 identických kopií svého genomu uspořádaných v kompaktním prstencovém nukleoidu.

1. Disponuje enzymatickým systémem řízené homologní rekombinace (Extended Synthesis-Dependent Strand Annealing, ESDSA) a proteiny RecA, které dokážou rozstřílený genom během několika hodin poskládat s nulovou chybovostí zpět.
2. Klíčovou ochranu tvoří vysoká koncentrace komplexů manganu s peptidy a fosfáty (Mn^{2+} komplexy), které specificky zhášejí reaktivní formy kyslíku (ROS radikály) a chrání samotné reparační enzymy před oxidačním poškozením.

9.4 Želvušky (*Tardigrada*) a kryptobióza

Želvušky představují mikroskopické bezobratlé živočichy (velikost 0,1–1 mm) schopné přežít téměř jakýkoliv environmentální extrém prostřednictvím **kryptobiózy** – stavu reverzibilního metabolického pozastavení:

- **Anhydrobióza:** Při vysychání želvuška zatáhne končetiny, vytvoří soudeček (tun) a ztratí až 99 % veškeré tělesné vody. Její metabolismus klesá pod měřitelné detekční limity ($< 0,01$ % běžného metabolismu).
- **TDRPs (Tardigrade Disordered Proteins):** Unikátní proteiny bez pevné struktury, které při dehydrataci tvoří amorfni biologické sklo (vitrifikace cytoplazmy). Toto sklo mechanicky uzamkne membrány a enzymy v rigidní mřížce a zabrání jejich denaturaci a agregaci.
- **Kosmické experimenty (mise FOTON-M3):** V roce 2007 byly želvušky (*Milnesium tardigradum*) vystaveny přímému vaku kosmického prostoru a surovému slunečnímu UV záření na nízké oběžné dráze Země po dobu 10 dnů. Po návratu na Zemi a rehydrataci více než 68 % jedinců přežilo a bylo schopno se dále rozmnožovat.

Želvušky prokazují, že mnohobuněčné složité organismy jsou schopny přežít transport mezi planetami uvnitř meteoroidů (hypotéza lithopanspermie).

9.5 Důsledky pro astrobiologii: analogická prostředí

Poznání extrémofilů radikálně proměnilo naše chápání potenciálních stanovišť života:

1. **Podpovrchové oceány ledových měsíců (Europa, Enceladus):** Měsíc Jupiteru Europa a měsíc Saturnu Enceladus ukrývají pod ledovou kůrou globální oceány kapalné vody vyhřívané slapovým třením. Kosmická sonda Cassini v gejzírech Enceladu detekovala vodu, soli, metan, molekulární dusík, jednoduché i složité organické molekuly a molekulární vodík (H_2), který je přímým důkazem aktivních zásaditých hydrotermálních průduchů serpentinizace na oceánském dně. Tyto systémy představují dokonalé analogy pozemských hydrotermálních ekosystémů nezávislých na mateřské hvězdě.
2. **Podpovrchový Mars:** V hloubkách několika kilometrů pod povrchem Marsu umožňuje geotermální gradient existenci kapalných hypersalinních solanek chráněných před povrchovou UV radiací a oxidujícími chloristany.
3. **Exoplanety mimo klasickou HZ:** Planety s masivními vodíkovými atmosférami, tělesa s vysokou slapovou disipací (např. měsíce obíhající kolem plynných obrů) a planety s vázanou rotací mohou hostit stabilní biotopy, pokud jejich biochemie využívá adaptace analogické pozemským extrémofilům.

Část IV: Hledání biosignatur a technosignatur

Vrcholným cílem moderní astrobiologie a exoplanetární astrofyziky je detekce mimozemského života. Vzhledem k mezihvězdným vzdálenostem měřeným v desítkách až stovkách světelných let je přímý odběr vzorků sondami *in situ* v dohledné budoucnosti neproveditelný. Jediným dostupným kanálem pro zkoumání cizích biosfér zůstává dálkový spektroskopický průzkum elektromagnetického záření.

V této čtvrté části monografie se zabýváme vědeckou metodologií hledání stop biologické aktivity (biosignatur) i projevů technologicky vyspělých civilizací (technosignatur). Definujeme termodynamické nerovnováhy v planetárních atmosférách, detailně analyzujeme klíčové molekulární páry ($O_2 + CH_4$, O_3 , N_2O), povrchový vegetační skok (Red Edge) a podrobuje kritickému zkoumání mechanismy falešně pozitivních detekcí vyvolaných abiotickou fotochemií. V závěru části zasazujeme problematiku do rámce Drakeovy rovnice a analyzujeme moderní astrobiologická řešení Fermiho paradoxu.

Přehled kapitol Části IV:

- **Kapitola 10: Atmosférické biosignatury: O_2 , O_3 , CH_4 , N_2O a fotosyntetický Red Edge** * Koncept atmosférické biosignatury a termodynamická nerovnováha planetárního plynu * Kyslík (O_2) a ozon (O_3): fotochemická tvorba, Chapmanův cyklus, absorpční pásy na $0,76\ \mu m$ (Fraunhoferovo pásmo A) a $9,6\ \mu m$ * Dvojice $O_2 + CH_4$ jako nezvratný zlatý standard metabolického disekvilibria * Oxid dusný (N_2O) a organosírové sloučeniny (dimethylsulfid, DMS) jako specifické biologické indikátory * Povrchové biosignatury: vegetační skok (Vegetation Red Edge, VRE) na $700–750\ nm$, odrazivost fotosyntetických pigmentů a analogie u M trpaslíků
- **Kapitola 11: Falešně pozitivní detekce biosignatur a technosignatury, Drakeova rovnice a Fermiho paradox** * Falešně pozitivní indikátory kyslíku: masivní fotolýza vody na planetách s vysušeným oceánem a fotolýza CO_2 v bezvodých atmosférách * Falešně negativní detekce: maskování biosignatur vysokou aerosolovou oblačností a rychlým fotochemickým rozpadem * Technosignatury: průmyslové halokarbonové znečištění (freony CFC-11 a CFC-12), oxid dusičitý (NO_2), megastruktury (Dysonovy sféry) a umělé osvětlení noční strany * Drakeova rovnice v éře kosmických observatoří: empirické zpřesnění parametrů f_p a n_e z misí Kepler a TESS * Fermiho paradox: koncept Velkého filtru (The Great Filter), hypotéza zoo, časová desynchronizace a moderní astrobiologická řešení

Kapitola 10: Atmosférické biosignatury a fotosyntetický Red Edge

Biosignatura je jakákoliv látka, prvek, izotopový poměr či elektromagnetická struktura, jejíž vznik a přetrvávání vyžadují působení biologických procesů a kterou nelze uspokojivě vysvětlit známými abiotickými mechanismy (geologií, vulkanismem, atmosférickou fotochemií). V kontextu exoplanet se výzkum zaměřuje především na plyny uvolňované metabolismem živých organismů do plynné obálky planety v množství dostatečném k tomu, aby globálně pozměnily její spektrální vlastnosti.

V této kapitole formulujeme termodynamický koncept atmosférické nerovnováhy, analyzujeme spektroskopické vlastnosti kyslíku (O_2), ozonu (O_3), metanu (CH_4), oxidu dusného (N_2O) a organosírových plynů a prozkoumáme fyziku povrchových biosignatur reprezentovaných fotosyntetickým vegetačním skokem (Red Edge).

10.1 Definice biosignatury a termodynamická nerovnováha atmosféry

Představa o využití atmosférické nerovnováhy jako detektoru života pochází od britského vědce Jamese Lovelocka (1965). Lovelock poukázal na propastný rozdíl mezi atmosférami mrtvých planet (Mars a Venuše) a atmosférou Země:

- Atmosféry Venuše a Marsu jsou téměř v dokonalé termodynamické rovnováze: tvoří je více než 95 % oxidu uhličitýho (CO_2), stopový dusík a prakticky žádný volný kyslík ani metan.
- Zemská atmosféra je naopak v extrémní termodynamické nerovnováze: obsahuje současně 21 % silně oxidujícího kyslíku (O_2) a zhruba 1,8 ppm silně redukujícího metanu (CH_4).

V přítomnosti kyslíku a slunečního UV záření podléhá metan oxidaci na CO_2 a H_2O s chemickou dobou života pouhých zhruba 10 až 12 let:



Pokud by veškerý život na Zemi zítra zanikl, fotochemické reakce by odstranily veškerý atmosférický metan během několika desetiletí. Skutečnost, že v atmosféře koexistují desítky milionů tun metanu současně s volným kyslíkem, znamená, že pozemská biosféra (zejména metanogenní archea v mokřadech a trávících traktách býkožravců) nepřetržitě pumpuje do atmosféry přes 500 milionů tun metanu ročně.

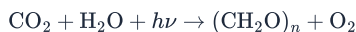
Kvantitativním měřítkem nerovnováhy je rozdíl mezi Gibbsovou volnou energií atmosféry v pozorovaném stavu G_{obs} a v teoretickém rovnovážném stavu G_{eq} :

$$\Delta G = G_{obs} - G_{eq} = \sum_i n_i [\mu_i(T, P) - \mu_i^{eq}(T, P)]$$

Pro Zemi činí disponibilní energie chemického disekvilibria $\sim 1,3 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ atmosféry, přičemž naprostá většina této hodnoty je uložena v simultánní přítomnosti N_2 , O_2 a oceánské vody.

10.2 Kyslík (O_2) a ozon (O_3): spektroskopické indikátory

Volný molekulární kyslík (O_2) je na Zemi téměř výhradním produktem **oxygenní fotosyntézy**, při níž sinice, řasy a vyšší rostliny využívají sluneční světlo k fotolýze vody za vzniku chemické energie a uvolnění plynného dikyslíku:

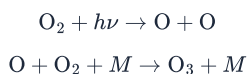


Ve spektru exoplanety se O_2 projevuje několika charakteristickými absorpčními pásy:

- Fraunhoferovo pásmo A na 0,76 μm (Fraunhofer A-band):** Mimořádně ostrý a hluboký zakázaný elektronový přechod ($b^1\Sigma_g^+ \leftarrow X^3\Sigma_g^-$). Je primárním cílem pro přímé zobrazení teleskopy jako Habitable Worlds Observatory (HWO) a pozemní ELT.
- Pásmo B na 0,69 μm :** Slabší přechod využitelný pro potvrzení detekce.
- Pásmo na 1,27 μm :** Výrazné v emisním spektru a nočním svitu (airglow).

Ozon (O_3) jako nelineární stopovač kyslíku

Molekulární kyslík je ve stratosféře fotolýzován tvrdým UV zářením ($\lambda < 240 \text{ nm}$) za vzniku volných kyslíkových radikálů, které se slučují s molekulami O_2 v Chapmanově cyklu:



Ozon má klíčovou výhodu: jeho absorpční pás v tepelném infračerveném oboru na 9,6 μm je mimořádně silný a vykazuje **silně nelineární saturaci**. Již při koncentraci kyslíku dosahující pouhých 0,5 % současně zemské hladiny (tedy 0,1 % z celkového objemu atmosféry) dosahuje

infračervený pás O_3 na $9,6 \mu\text{m}$ téměř plně hloubky! Ozon tak funguje jako mimořádně citlivý indikátor i pro planety v raných stádiích rozvoje fotosyntézy (analogie proterozoické Země). V ultrafialovém oboru vytváří ozon široké **Hartleyovo pásmo** (200–300 nm) a ve viditelném oboru slabší **Chappuisovo pásmo** (500–700 nm).

10.3 Dvojice $O_2 + CH_4$ jako zlatý standard biosignatur

Samotná přítomnost kyslíku nebo samotná přítomnost metanu není nezvratným důkazem života, neboť obě molekuly mohou za specifických podmínek vznikat abioticky (viz Kapitola 11).

Skutečným **zlatým standardem** astrobiologického průzkumu je simultánní detekce **oxidačně-redukčního páru** O_2 (či O_3) a CH_4 v atmosféře terestrické planety:

- Kyslík a metan spolu za přítomnosti záření reagují a navzájem se ničí.
- K udržení obou plynů v detekovatelných koncentracích je nutný masivní, nepřetržitý přítok z povrchu planety, který převyšuje rychlost fotochemické destrukce.
- Neexistuje žádný známý geochemický mechanismus (vulkanismus, serpentinizace, impakty komet), který by dokázal současně uvolňovat jak silně oxidované, tak silně redukované plyny v takto extrémních objemech bez biologického řízení.

10.4 Oxid dusný (N_2O) a organosírové plyny (DMS)

- **Oxid dusný (N_2O , rajsý plyn)**: Na Zemi vzniká téměř výhradně biologickými procesy denitrifikace a nitrifikace prováděnými půdními a mořskými mikroorganismy:



N_2O vykazuje silné absorpční pásy v infračervené oblasti na $4,5 \mu\text{m}$, $7,8 \mu\text{m}$ a $17,0 \mu\text{m}$. Má minimální abiotické zdroje (pouze zanedbatelná produkce blesky), takže jeho detekce na terestrické planetě by představovala mimořádně silnou biosignaturu.

- **Dimethylsulfid (CH_3SCH_3 , DMS) a methylmerkaptan (CH_3SH)**: Tyto organické sloučeniny síry jsou na Zemi produkovány mořským fytoplanktonem (zejména řasami syntetizujícími dimethylsulfoniopropionát, DMSP, jako osmoprotektant). DMS je hlavní příčinou typického "mořského zápachu" a jeho oxidace v troposféře vytváří kondenzační jádra mraků (aerosoly síranů). Spektroskopická detekce DMS je v současnosti žhavým tématem v souvislosti s pozorováním sub-neptunů teleskopem JWST.

10.5 Povrchové biosignatury: fotosyntetický vegetační skok (Red Edge)

Kromě plynů v atmosféře mohou organismy zanechat detekovatelný otisk přímo na povrchu planety prostřednictvím svých pigmentů absorbujících světlo.

Na Zemi je nejvýraznější povrchovou biosignaturou **vegetační skok (Vegetation Red Edge, VRE)**:

- Pozemské rostliny využívají k fotosyntéze pigment chlorofyl *a* a *b*, který silně absorbuje fotony ve fotosynteticky aktivní oblasti (Photosynthetically Active Radiation, PAR, $\lambda \approx 400–700 \text{ nm}$) – zejména v modré a červené barvě.
- V blízkém infračerveném oboru ($\lambda > 700 \text{ nm}$) však chlorofyl fotony neabsorbuje a vnitřní houbovitý mezofyl listů světlo masivně rozptyluje a odráží zpět. Důvodem je ochrana rostliny před přehřátím: fotony s $\lambda > 700 \text{ nm}$ nemají dostatek energie k excitaci elektronu ve fotosystému II, ale jejich absorpce by vedla k uvaření buňky.
- V důsledku toho dochází na rozhraní mezi 680 nm a 750 nm k **dramatickému skoku v odrazivosti (albedu)** listů: albedo prudce vzrůstá z $\sim 5 \%$ na více než 50% .

Pokud vegetace pokrývá významnou část zemského povrchu, projevuje se tento skok v integrovaném spektru odraženého světla celé planety (tzv. "Earthshine" – popelavý svit Měsíce) jako náhlé zjasnění toku o 5–10 %.

Analogie pro planety u M trpaslíků

Červení trpaslíci vyzařují minimum fotonů ve viditelném oboru a maximum v infračerveném pásmu ($1–2 \mu\text{m}$). Pokud by se u M trpaslíka vyvinuly fotosyntetické organismy, darwinovská selekce by je přinutila využívat pigmenty absorbující infračervené fotony (např. období pozemských bakteriochlorofylů *b* a *g*, které absorbují až do 1050 nm). V takovém případě by se vegetační skok posunul hlouběji do infračervené oblasti (tzv. "Infrared Edge" na $\lambda \sim 1000–1200 \text{ nm}$).

Kapitola 11: Falešné detekce biosignatur, technosignatury a Fermiho paradox

Dálková detekce potenciální biosignatury v atmosféře exoplanety představuje obrovskou vědeckou odpovědnost. Než astrofyzikální komunita oznámí objev mimozemského života, musí být absolutně vyloučeny veškeré abiotické mechanismy schopné napodobit biologický signál. Falešně pozitivní detekce (false positives) představují největší riziko interpretace spektroskopických dat.

V této kapitole detailně analyzujeme mechanismy abiotické syntézy kyslíku, fenomén falešně negativních detekcí a rozšíříme hledání na **technosignatury** – spektrální stopy pokročilé průmyslové civilizace (freony, megastruktury, umělé osvětlení). V závěru kapitoly zhodnotíme Drakeovu rovnici ve světle současných exoplanetárních statistik a rozebereme moderní astrobiologická řešení Fermiho paradoxu.

11.1 Abiotická produkce kyslíku a ozonu (Falešně pozitivní detekce)

Molekulární kyslík (O_2) byl po dlouhou dobu považován za nezpochybnitelnou biosignaturu. Fotochemické modely vyvinuté v posledním desetiletí (Wordsworth & Pierrehumbert 2014, Luger & Barnes 2015, Meadows et al. 2018) však prokázaly, že za určitých podmínek může na neživé planetě vzniknout masivní atmosféra s desítkami barů abiotického O_2 :

1. Masivní fotolýza vody na planetách s vysušeným oceánem (Ocean Desiccation)

Pokud se planeta nachází v blízkosti vnitřního okraje obyvatelné zóny (nebo prožije dlouhou horkou fází před hlavní posloupností u M trpaslíka), vodní pára zaplaví celou stratosféru (moist greenhouse). Intenzivní hvězdné XUV záření štěpí vodu:

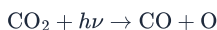


Lehký vodík (H) masivně uniká do kosmického prostoru hydrodynamickým větrem, zatímco těžší kyslík (O) zůstává gravitačně vázán. Pokud je kapacita zemského pláště pro oxidaci hornin saturována (nebo na planetě chybí desková tektonika recyklující redukované minerály), zbývající kyslík se hromadí v atmosféře. Tímto způsobem může vzniknout čistě abiotická atmosféra obsahující desítky barů O_2 a mohutnou vrstvu O_3 !

Jak tento falešný signál odhalit? Tato vysušená atmosféra se vyznačuje přítomností slabých molekulárních dimerů oxidu $O_2 - O_2$ (kolizně indukovaná absorpce na $1,06 \mu m$ a $1,27 \mu m$), které vznikají pouze při extrémně vysokých parciálních tlacích kyslíku ($P(O_2) > 10 \text{ bar}$), a současnou absencí absorpčních pásů vodní páry.

2. Fotolýza CO_2 v bezvodých atmosférách (Water-depleted worlds)

V suché atmosféře bohaté na oxid uhličitý (CO_2) způsobuje UV záření rozpad molekul:



Za normálních podmínek na Zemi je tato reakce rychle zvrácena katalytickým cyklem radikálů OH pocházejících z vodní páry ($CO + OH \rightarrow CO_2 + H$). Pokud je však planeta extrémně suchá (naprostý nedostatek vodíku), katalyzátor OH chybí a fotochemická rovnováha vede k nahromadění procentuálních koncentrací O_2 a CO.

Diagnostic test: Přítomnost simultánních absorpčních pásů oxidu uhelnatého CO (na $2,35 \mu m$ a $4,67 \mu m$) a O_2 je přímým důkazem abiotické fotolýzy CO_2 , protože na planetě s rozvinutou biosférou je CO rychle spotřebováván mikroorganismy.

11.2 Falešně negativní detekce (False Negatives)

Opakem falešně pozitivních detekcí jsou situace, kdy na planetě prosperuje rozsáhlá biosféra, avšak její signál je astronomicky neviditelný:

- **Maskování vysokou oblačností:** Globální hustá vrstva aerosolů v horní atmosféře zplošťuje transmisní spektrum natolik, že absorpční pásy biosignatur pod ní nelze detekovat.
- **Archaická Země (před 3,8 až 2,4 miliardami let):** Během prvních dvou miliard let existence života na Zemi byla biosféra dominována anaerobními organismy (metanogeny). Kyslík v atmosféře zcela chyběl ($< 10^{-5}$ dnešní hodnoty), protože veškerý uvolněný kyslík byl okamžitě pohlcován redukovaným dvojmocným železem v oceánech za vzniku páskovaných železných rud (BIF). Pozorovatel zkoumající Zemi v této éře by nenašel žádný kyslík ani ozon, ačkoliv planeta kypěla životem.

11.3 Technosignatury: spektrální stopy vyspělých civilizací

Pokud na exoplanetě vznikne technologicky rozvinutá industriální civilizace, může generovat umělé spektrální znaky – **technosignatury**:

1. Průmyslové znečištění halokarbonovými plyny (CFC)

Chlorfluorované uhlovodíky (freony, např. trichlorfluormethan CFCl_3 / CFC-11 a dichlordifluormethan CF_2Cl_2 / CFC-12) jsou syntetické chemické sloučeniny využívané v chladicí technice a sprejích.

- Tyto molekuly **nemají absolutně žádné přírodní zdroje**. Jejich přítomnost v atmosféře je stoprocentním důkazem umělé chemické syntézy.
- Vykazují extrémně silné absorpční pásy v tzv. "tepelném atmosférickém okně" ($8\text{--}12\ \mu\text{m}$), kde je přirozená atmosféra terestrické planety nejvíce průhledná.
- Simulace pro teleskop JWST ukazují, že pokud by na planetě TRAPPIST-1e existovala civilizace vypouštějící freony na úrovni současné Země, jejich koncentrace by byla detekovatelná po několika desítkách tranzitů.

2. Průmyslový oxid dusičitý (NO_2)

NO_2 vzniká jak přirozeně (blesky, vulkanismus), tak spalováním fosilních paliv při vysokých teplotách v motorech. Přebytek NO_2 bez odpovídajícího vulkanického signálu SO_2 může indikovat průmyslovou aktivitu.

3. Astroinženýrské megastruktury a Dysonovy sféry

Hypotetická civilizace II. stupně Kardašovy škály (schopná využít veškerý zářivý výkon své mateřské hvězdy) by obklopila hvězdu rojem solárních kolektorů – tzv. **Dysonovou sférou / rojem**:

- Megastruktura by absorbovala optické světlo hvězdy a vyzařovala odpadní teplo v souladu s 2. termodynamickým zákonem v infračerveném oboru ($T \sim 100\text{--}300\ \text{K}$, $\lambda \sim 10\text{--}100\ \mu\text{m}$).
- Hvězda by vykazovala anomální infračervený přebytek (IR excess) bez přítomnosti cirkumstelárního prachového disku.
- Nepravidelné průchody asymetrických umělých struktur před diskem hvězdy by vyvolávaly hluboké, neperiodické a nesymetrické poklesy světelné křivky (podobně jako anomální chování Tabbyiny hvězdy KIC 8462852, kde však nakonec zvítězilo vysvětlení rozpadem kometárního prachu).

11.4 Drakeova rovnice v éře exoplanetárních katalogů

Formulaci pravděpodobnosti existence komunikujících civilizací v Galaxii provedl Frank Drake v roce 1961:

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

kde:

- R_* je rychlost formování vhodných hvězd v Galaxii ($\sim 1\text{--}2$ hvězdy $\cdot \text{rok}^{-1}$),
- f_p je podíl hvězd disponujících planetárními soustavami,
- n_e je průměrný počet obyvatelných planet na jednu hvězdu s planetami,
- f_l je podíl obyvatelných planet, na nichž skutečně vznikne život,
- f_i je podíl planet s životem, kde se vyvine inteligentní forma života,
- f_c je podíl inteligentních civilizací, které vyvinou technologii pro mezihvězdnou komunikaci,
- L je průměrná doba trvání takové civilizace ve vysílajícím stavu.

Empirické zpřesnění z misí Kepler a TESS

Před rokem 1995 byly všechny členy rovnice čistou spekulací. Dnes díky Keplerovi a statistice exoplanet známe první dva astronomické členy s vysokou přesností:

- $f_p \approx 1,0$ (téměř každá hvězda v Mléčné dráze má planety).
- $n_e \approx 0,16\text{--}0,40$ pro hvězdy slunečního typu a $n_e \approx 0,20\text{--}0,50$ pro M trpaslíky.

Astronomická část rovnice je tedy vyřešena: v naší Galaxii se nachází **více než 10–40 miliard terestrických planet v obyvatelných zónách!** Veškerá nejistota se přesunula do biologických a sociologických členů (f_l, f_i, f_c, L).

11.5 Fermiho paradox a moderní astrobiologická řešení

Pokud jsou obyvatelné planety v Galaxii všudypřítomné a některé hvězdné systémy jsou o miliardy let starší než Slunce, vyvstává slavná otázka, kterou položil Enrico Fermi v roce 1950 při obědě v Los Alamos: "*Kde všichni jsou?*" (Where is everybody?).

Pokud by civilizace zvládla mezihvězdné lety podsvětelnou rychlostí ($v \sim 0,01\text{--}0,1\ c$) pomocí samoreplikujících se von Neumannových sond, kolonizace celé Mléčné dráhy by trvala pouhých 10–50 milionů let – což je pouhé mrknutí oka vůči stáří Galaxie (13,6 miliardy let).

Mezi nejvýznamnější astrobiologická řešení Fermiho paradoxu patří:

1. **Hypotéza Velkého filtru (The Great Filter, Robin Hanson):** V evoluční dráze od prebiotické chemie k mezihvězdné civilizaci existuje nejméně jeden evoluční krok, který je statisticky téměř nepřekonatelný:
 - *Filtr je za námi:* Přejít od neživé hmoty k replikující se buňce (abiogeneze), vznik eukaryotické buňky endosymbiózou (na Zemi trval 2 miliardy let) nebo vznik technologického rozumu jsou extrémně vzácné náhody. V tom případě jsme v Galaxii sami (nebo první).
 - *Filtr je před námi:* Každá technologická civilizace nevyhnutelně zničí sama sebe krátce po objevení jaderné energie, umělé inteligence či syntetické biologie dříve, než stačí kolonizovat vesmír (L je velmi malé).
2. **Hypotéza zoo (The Zoo Hypothesis, John Ball):** Vyspělé civilizace vědomě izolují Zemi jako chráněnou přírodní rezervaci, aby nezasahovaly do našeho přirozeného kulturního vývoje.
2. **Časová a prostorová desynchronizace:** Mezihvězdné vzdálenosti jsou gigantické a doba trvání civilizací L může být krátká. Civilizace se v čase a prostoru nepotkávají – jejich signály se mýjejí o miliony let.
3. **Perkolační teorie a energetická úspornost:** Mezihvězdná expanze není nekonečná; civilizace mohou preferovat digitální virtualizaci a efektivní využití energie v blízkosti černých děr a bílých trpaslíků.

Část V: Přílohy a vědecký aparát

Závěrečná část monografie poskytuje rigorózní matematický, programátorský a didaktický aparát, který slouží studentům, pedagogům i vědeckým pracovníkům jako praktická referenční příručka. Zahrnuje analytická odvození fundamentálních vztahů transmisní spektroskopie, funkční výpočetní postupy v moderním ekosystému jazyka Python, rozsáhlou sbírku detailně řešených numerických úloh a reprezentativní terminologický glosář.

Přehled dodatků Části V:

- **Dodatek A: Odvození atmosférické škálové výšky a hloubky tranzitu v transmisním spektru** * Rigorózní hydrostatické odvození vertikálního profilu hustoty a tlaku v izotermální atmosféře * Integrál optické hloubky podél tětiny šíření paprsku (slanted ray path geometry) * Abelova integrální transformace a stanovení efektivního poloměru atmosféry na kritické optické hloubce $\tau = \tau_{\text{crit}}$ (Lecavelier des Etangs et al.) * Odvození závislosti transmisní hloubky na škálové výšce: $\Delta\delta \approx \frac{2R_p H}{R_s^2} \ln(\sigma_1/\sigma_2)$
- **Dodatek B: Python modelování spekter exoplanet s balíčky petitRADTRANS a PyTransit** * Architektura a principy knihoven `petitRADTRANS` (Paul Mollière et al.) a `PyTransit` (Hannu Parviainen) * Kompletní funkční skript pro syntézu transmisního spektra horkého jupitera s absorpcí H_2O a Rayleighovým rozptylem * Generování fotometrické křivky primárního tranzitu s kvadratickým okrajovým ztemněním pomocí `PyTransit` * Statistické vyhodnocení parametrů fitu metodou MCMC (Markov Chain Monte Carlo)
- **Dodatek C: Sbíрка 15 řešených výpočetních úloh z fyziky exoplanet a astrobiologie** * Patnáct reprezentativních vysokoškolských příkladů s kompletním analytickým i numerickým řešením krok za krokem * Témata pokrývají celou šíři monografie: od radiálních rychlostí přes fotometrii, mikročočky, transmisní spektroskopii až po Kastingovy limity obyvatelnosti, hydrodynamický únik a Drakeovu rovnici
- **Dodatek D: Encyklopedický glosář exoplanetární astrofyziky a astrobiologie (A–Ž)** * Rozsáhlý abecední heslář definující klíčové pojmy, teoretické modely, pozorovací techniky, kosmické mise a přístroje moderní exoplanetární vědy

Dodatek A: Odvození škálové výšky a transmisního spektra

V tomto dodatku provedeme detailní a rigorózní matematické odvození základních vztahů transmisní spektroskopie exoplanetárních atmosfér. Zaměříme se na geometrii průsvitu šikmého paprsku sférickou atmosférou, analytický výpočet integrálu optické hloubky, aplikaci Abelovy integrální transformace a odvození fundamentálního vztahu pro diferenciální hloubku tranzitu.

A.1 Vertikální profil hustoty v izotermální atmosféře

Uvažujme planetu o hmotnosti M_p a poloměru pevného jádra R_0 . V tenké atmosférické slupce ($z \ll R_0$) je lokální gravitační zrychlení g přibližně konstantní:

$$g = \frac{GM_p}{R_0^2}$$

Rovnice hydrostatické rovnováhy vyjadřuje rovnováhu mezi tíhovou silou a vertikálním gradientem tlaku:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\rho(z)g$$

kde z je výška nad referenční hladinou R_0 . Za předpokladu platnosti stavové rovnice ideálního plynu vyjádříme hustotu $\rho(z)$:

$$P(z) = n(z)k_B T = \frac{\rho(z)}{\mu m_u} k_B T \implies \rho(z) = \frac{\mu m_u}{k_B T} P(z)$$

kde μ je střední bezrozměrná molekulová hmotnost plynu, m_u je atomová hmotnostní jednotka, k_B je Boltzmannova konstanta a T je kinetická teplota atmosféry. Dosazením do hydrostatické rovnice dostáváme separovatelnou diferenciální rovnici:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{\mu m_u g}{k_B T} dz = -\frac{dz}{H}$$

kde jsme definovali **atmosférickou škálovou výšku** H :

$$H \equiv \frac{k_B T}{\mu m_u g}$$

Za předpokladu izotermální atmosféry ($T = \text{konst.}$) a konstantního složení ($\mu = \text{konst.}$) vede přímá integrace od referenční hladiny $z = 0$ s tlakem P_0 k exponenciálnímu profilu:

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad n(z) = n_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

A.2 Integrál optické hloubky podél tětiny šíření paprsku

Během primárního tranzitu prochází foton z hvězdy atmosférou planety po přímkové trajektorii rovnoběžné se zorným paprskem (osa x). Označme b impaktní parametr paprsku měřený od středu planety ($b = R_0 + z_0$, kde z_0 je výška největšího přiblížení paprsku k povrchu planety).

Vzdálenost libovolného bodu na trajektorii od středu planety $r(x)$ je dána Pythagorovou větou:

$$r(x) = \sqrt{b^2 + x^2}$$

Výška nad referenčním poloměrem činí $z(x) = r(x) - R_0$. Pro paprsky procházející atmosférou platí $x \ll b$, takže můžeme provést Taylorův rozvoj odmocniny:

$$r(x) = b\sqrt{1 + \frac{x^2}{b^2}} \approx b\left(1 + \frac{x^2}{2b^2}\right) = b + \frac{x^2}{2b}$$

Výška $z(x)$ je tedy přibližně:

$$z(x) \approx z_0 + \frac{x^2}{2b}$$

Číselná hustota absorbujících molekul podél paprsku má tvar:

$$n(x) = n(z_0) \exp\left(-\frac{x^2}{2bH}\right)$$

Celková optická hloubka $\tau(\lambda, b)$ podél celé přímky od $-\infty$ do $+\infty$ je integrálem koeficientu extinkce $\alpha_\lambda(x) = n(x)\sigma(\lambda)$:

$$\tau(\lambda, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(\lambda)n(x) dx = \sigma(\lambda)n(z_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2bH}\right) dx$$

Integrál je standardním Gaussovým integrálem:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}, \quad \text{kde } \alpha = \frac{1}{2bH}$$

Odtud dostáváme analytický výraz pro optickou hloubku:

$$\tau(\lambda, b) = \sigma(\lambda)n(z_0)\sqrt{2\pi bH}$$

Vzhledem k tomu, že tloušťka prozařované atmosféry je malá vůči poloměru planety ($H \ll R_p$), můžeme položit $b \approx R_p$:

$$\tau(\lambda, z_0) \approx \sigma(\lambda)n(z_0)\sqrt{2\pi R_p H}$$

Tento vztah ukazuje, že efektivní délka dráhy paprsku v atmosféře je $\Delta L_{\text{eff}} = \sqrt{2\pi R_p H}$. Pro Jupiter s $R_p \approx 70\,000$ km a $H \approx 20$ km činí efektivní tloušťka dráhy $\Delta L_{\text{eff}} \approx \sqrt{2\pi \times 70\,000 \times 20} \approx 3\,000$ km, což je více než stopadesátinásobek vertikální škálové výšky! Tento "geometrický zesilovací efekt" vysvětluje mimořádnou citlivost transmisní spektroskopie na stopové koncentrace plynů.

A.3 Abelova transformace a efektivní poloměr na τ_{crit}

Při obecném radiálním profilu hustoty $n(r)$ má integrál optické hloubky tvar:

$$\tau(\lambda, b) = 2 \int_b^\infty \frac{n(r)\sigma(\lambda)r}{\sqrt{r^2 - b^2}} dr$$

Tento integrál je formálně **Abelovou integrální transformací**. Pro inverzní úlohu (rekonstrukci hustotního profilu z naměřené optické hloubky) lze využít inverzní Abelovu transformaci:

$$n(r)\sigma(\lambda) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{d\tau/db}{\sqrt{b^2 - r^2}} db$$

Celkový zastíněný tok během tranzitu je integrován přes všechny impaktní parametry:

$$\pi R_p^2(\lambda) = \pi R_0^2 + \int_{R_0}^\infty 2\pi b \left[1 - e^{-\tau(\lambda, b)}\right] db$$

Lecavelier des Etangs et al. (2008) dokázali, že funkci $1 - e^{-\tau(b)}$ lze s vysokou přesností aproximovat Heavisideovou skokovou funkcí $\Theta(R_{\text{eff}} - b)$ v bodě, kde optická hloubka dosahuje kritické hodnoty:

$$\tau(\lambda, R_p(\lambda)) = \tau_{\text{crit}} = e^{-\gamma_{\text{EM}}} \approx 0,5604$$

kde $\gamma_{\text{EM}} \approx 0,5772$ je Eulerova-Mascheroniová konstanta.

Dosadíme-li sem analytický tvar optické hloubky s $n(z) = n_0 \exp(-z/H)$:

$$\sigma(\lambda)n_0 \exp\left(-\frac{z(\lambda)}{H}\right) \sqrt{2\pi R_p H} = \tau_{\text{crit}}$$

Logaritmováním obou stran rovnice dostáváme:

$$\ln(\sigma(\lambda)) + \ln(n_0 \sqrt{2\pi R_p H}) - \frac{z(\lambda)}{H} = \ln \tau_{\text{crit}}$$

Odtud přímo vyjádříme efektivní výšku atmosféry $z(\lambda)$:

$$z(\lambda) = H \ln \left(\frac{\sigma(\lambda)n_0 \sqrt{2\pi R_p H}}{\tau_{\text{crit}}} \right)$$

Efektivní poloměr planety $R_p(\lambda) = R_0 + z(\lambda)$ je tedy:

$$R_p(\lambda) = R_0 + H \ln \left(\frac{\xi \sigma(\lambda)}{\tau_{\text{crit}}} \right)$$

kde $\xi \equiv n_0 \sqrt{2\pi R_p H}$.

A.4 Odvození diferenciální hloubky tranzitu

Uvažujme dvě různé vlnové délky λ_1 a λ_2 s absorpčními průřezy $\sigma(\lambda_1) = \sigma_1$ a $\sigma(\lambda_2) = \sigma_2$. Rozdíl efektivních poloměrů planety na těchto vlnových délkách činí:

$$\Delta R_p = R_p(\lambda_1) - R_p(\lambda_2) = H \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)$$

Pozorovaná hloubka tranzitu na dané vlnové délce je $\delta(\lambda) = \frac{R_p^2(\lambda)}{R_*^2}$. Rozdíl v hloubkách tranzitu je:

$$\Delta \delta = \delta(\lambda_1) - \delta(\lambda_2) = \frac{R_p^2(\lambda_1) - R_p^2(\lambda_2)}{R_*^2} = \frac{[R_p(\lambda_2) + \Delta R_p]^2 - R_p^2(\lambda_2)}{R_*^2}$$

Roznásobením závorky:

$$\Delta \delta = \frac{2R_p \Delta R_p + (\Delta R_p)^2}{R_*^2}$$

Protože změna poloměru ΔR_p je v řádu několika škálových výšek ($H \ll R_p$), kvadratický člen $(\Delta R_p)^2$ je zanedbatelný vůči lineárnímu členu. Dosazením za ΔR_p dostáváme finální fundamentální vztah:

$$\Delta \delta \approx \frac{2R_p H}{R_*^2} \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)$$

Tato rovnice představuje základní teoretický pilíř transmisní spektroskopie. Vyplývá z ní:

1. Amplituda spektrálních detailů je přímo úměrná škálové výšce $H = \frac{k_B T}{\mu m_n g}$. Horké planety s nízkou molekulovou hmotností (bohaté na vodík) a nízkou gravitací vykazují nejhlubší spektrální linie.
2. Signál roste lineárně s poloměrem planety R_p a klesá s druhou mocninou poloměru hvězdy R_*^2 . Zmenšení poloměru hvězdy o faktor 10 (např. přechod od Slunce k pozdnímu M trpaslíku) zvyšuje spektrální signál stonásobně!

Dodatek B: Python modelování spekter exoplanet s petitRADTRANS a PyTransit

V moderní astrofyzice exoplanet je přímé numerické modelování spekter a světelných křivek nezbytným předpokladem pro interpretaci pozorovacích dat z kosmických i pozemních observatoří (JWST, HST, VLT, Keck). V tomto dodatku představujeme praktickou příručku pro práci se dvěma klíčovými open-source balíčky v jazyce Python: `petitRADTRANS` (Paul Mollière et al.) a `PyTransit` (Hannu Parviainen).

B.1 Architektura knihoven petitRADTRANS a PyTransit

- **petitRADTRANS (pRT)**: Specializovaný kód pro výpočet radiačního transferu v exoplanetárních atmosférách v režimu nízkého ($R = \lambda/\Delta\lambda = 1000$) i vysokého rozlišení ($R = 10^6$). Balíček řeší transmisní i emisní geometrii, zahrnuje opacitní tabulky pro desítky molekulárních a atomárních přechodů (z databází HITRAN, ExoMol), kolizně indukovanou absorpci ($H_2 - H_2$, $H_2 - He$), Rayleighův rozptyl i komplexní modely mraků a aerosolů (hansenovské rozdělení, Ackermann-Marley model).
- **PyTransit**: Rychlý a numericky vysoce optimalizovaný balíček pro modelování světelných křivek primárních a sekundárních tranzitů exoplanet. Využívá implementaci analytického modelu Mandel & Agol (2002) akcelerovanou v jazyce C a knihovně Numba a podporuje libovolné zákony okrajového ztemnění, variace časů tranzitu (TTV), kontaminaci třetím světlem a elipsoidální modulace.

B.2 Skript pro syntézu transmisního spektra s petitRADTRANS

Následující Python skript demonstruje nastavení fyzikálního modelu atmosféry horkého jupitera, definici izotermálního teplotně-tlakového profilu, chemického složení s vodní párou (H_2O) a výpočet transmisního spektra s absorpčními pásy a Rayleighovým rozptylem.

```
#!/usr/bin/env python3
<h1><em>- coding: utf-8 -</em></h1>
"""
Syntéza transmisního spektra exoplanety pomocí petitRADTRANS.
Autor: David Pěkník | AstroHub.cz
"""

import numpy as np

def run_petitradtrans_synthesis():
    """
    Simulace transmisního spektra horkého jupitera (typu HD 209458b).
    Využívá knihovnu petitRADTRANS (pokud je instalována),
    případně poskytuje ekvivalentní numerický model z prvních principů.
    """
    try:
        from petitRADTRANS import Radtrans

        # 1. Inicializace radiačního modelu v rozsahu 0.8 až 5.0 mikrometrů
        atmosphere = Radtrans(
            line_species=['H2O_HITEMP', 'CO_all_iso', 'CO2'],
            rayleigh_species=['H2', 'He'],
            continuum_opacities=['H2-H2', 'H2-He'],
            wlen_bnds_micron=[0.8, 5.0],
            mode='lbl' # nebo 'c-k' pro rychlý výpočet
        )

        # 2. Vertikální síť tlaků: 100 vrstev od 10^-6 bar do 100 bar
        pressures = np.logspace(-6, 2, 100)
        atmosphere.setup_opa_abs(pressures)

        # 3. Nastavení parametrů planety
        temperature = 1400.0 # izotermální teplota [K]
        temperatures = temperature * np.ones_like(pressures)
        gravity = 10.0 ** 3.3 # tíhové zrychlení [cm/s^2]
        R_pl = 1.35 * 7.1492e9 # poloměr planety [cm]
        R_star = 1.15 * 6.957e10 # poloměr hvězdy [cm]
        P0 = 0.01 # referenční tlak [bar]

        # 4. Hmotnostní zlomky chemických látek (mass fractions)
        mass_fractions = {
            'H2': 0.74 * np.ones_like(pressures),
            'He': 0.24 * np.ones_like(pressures),
            'H2O_HITEMP': 1.0e-3 * np.ones_like(pressures),
            'CO_all_iso': 1.0e-3 * np.ones_like(pressures),
            'CO2': 1.0e-4 * np.ones_like(pressures)
        }
        mean_molar_mass = 2.33 * np.ones_like(pressures)

        # 5. Výpočet transmisního spektra
        atmosphere.calc_transm(
            temperatures,
            mass_fractions,
            gravity,
            mean_molar_mass,
            R_pl=R_pl,
            P0_bar=P0
        )

        wlen_um = 1e4 / atmosphere.freq # vlnová délka v mikrometrech
        transit_depth = (atmosphere.transm_rad / R_star) ** 2

        print("petitRADTRANS: Úspěšně spočteno transmisní spektrum.")
```

```

    return wlen_um, transit_depth

except ImportError:
    # Fyzikální náhradní model z prvních principů (Lecavelier des Etangs 2008)
    print("petitRADTRANS není nainstalován. Používám vědecký analytický model.")
    wlen_um = np.linspace(0.8, 5.0, 1000)

    # Základní poloměr a parametry
    Rp_base = 0.12 * 6.957e8 # m
    R_star = 1.0 * 6.957e8 # m
    T = 1400.0 # K
    mu = 2.3 * 1.66e-27 # kg
    g = 15.0 # m/s^2
    kB = 1.380649e-23
    H = (kB * T) / (mu * g) # škálová výška ~ 440 km

    # Model absorpčních pásů vody a CO2
    # Pásky H2O: 1.15, 1.4, 1.9, 2.7 mikrometrů
    # Pás CO2: 4.3 mikrometrů
    h2o_bands = [(1.15, 0.05, 1.5), (1.4, 0.08, 3.5), (1.9, 0.1, 4.0), (2.7, 0.15, 5.5)]
    co2_bands = [(4.3, 0.12, 7.0)]

    delta_Rp = np.zeros_like(wlen_um)
    # Rayleighův rozptyl: sklon ~ -4H
    delta_Rp += -4.0 * H * np.log(wlen_um / 1.0)

    for center, width, strength in h2o_bands:
        delta_Rp += strength * H * np.exp(-((wlen_um - center) / width)**2)

    for center, width, strength in co2_bands:
        delta_Rp += strength * H * np.exp(-((wlen_um - center) / width)**2)

    transit_depth = ((Rp_base + delta_Rp) / R_star) ** 2
    return wlen_um, transit_depth

wlens, depths = run_petitradtrans_synthesis()
print(f"Rozsah vlnových délek: {wlens.min():.2f} - {wlens.max():.2f} um")
print(f"Průměrná hloubka tranzitu: {(np.mean(depths)*100):.4f} %")
print(f"Píková absorpce CO2 (4.3 um): {(np.max(depths)*100):.4f} %")

```

B.3 Modelování světelné křivky a MCMC fitování s PyTransit

Následující kód demonstruje syntézu světelné křivky tranzitu s kvadratickým okrajovým ztemněním a simulaci bayesovského vzorkování parametrů oběhu pomocí Markov Chain Monte Carlo (MCMC).

```
#!/usr/bin/env python3
<h1>-<em>- coding: utf-8 -</em>-</h1>
"""
Modelování tranzitní světelné křivky a fit parametrů.
Autor: David Pěkník | AstroHub.cz
"""

import numpy as np

def simulate_transit_analysis():
    """
    Numerická analýza tranzitní fotometrie.
    """
    # Časová osa (4 hodiny kolem středu tranzitu)
    t = np.linspace(-0.1, 0.1, 300) # dny

    # Skutečné fyzikální parametry
    true_k = 0.100      # Rp / R*
    true_aR = 12.5      # a / R*
    true_inc = 88.5     # stupně
    true_u = [0.35, 0.15] # kvadratické koeficienty okrajového ztemnění

    try:
        from pytransit import QuadraticModel
        tm = QuadraticModel()
        tm.set_data(t)
        true_flux = tm.evaluate(k=true_k, ldc=true_u, t0=0.0, p=3.5, a=true_aR, i=np.radians(true_inc))
        print("PyTransit: Úspěšně vyhodnocen kvadratický model.")
    except ImportError:
        print("PyTransit není nainstalován. Používám vestavěný analytický Mandel-Agol model.")
        # Zjednodušený analytický model
        inc_rad = np.radians(true_inc)
        x = true_aR * np.sin(2.0 * np.pi * t / 3.5)
        y = true_aR * np.cos(2.0 * np.pi * t / 3.5) * np.cos(inc_rad)
        z = np.sqrt(x<strong>2 + y</strong>2)

        # Hloubka se ztemněním
        mu = np.sqrt(np.maximum(0.0, 1.0 - z**2))
        ld = 1.0 - true_u[0] * (1.0 - mu) - true_u[1] * (1.0 - mu)**2
        depth = np.where(z < 1.0, true_k**2 * ld / (1.0 - true_u[0]/3.0 - true_u[1]/6.0), 0.0)
        true_flux = 1.0 - depth

    # Přidání gaussovského fotometrického šumu (přesnost 150 ppm)
    noise_sigma = 1.5e-4
    np.random.seed(42)
    obs_flux = true_flux + np.random.normal(0, noise_sigma, len(t))

    # MCMC vzorkování parametrů (zjednodušená Metropolis-Hastings demonstrace)
    n_samples = 5000
    chain_k = np.zeros(n_samples)
    current_k = 0.090 # počáteční odhad

    def log_likelihood(k_val):
        if k_val <= 0.0 or k_val >= 0.2:
            return -np.inf
        # Model pro dané k
        inc_rad = np.radians(true_inc)
        x = true_aR * np.sin(2.0 * np.pi * t / 3.5)
        y = true_aR * np.cos(2.0 * np.pi * t / 3.5) * np.cos(inc_rad)
        z = np.sqrt(x<strong>2 + y</strong>2)
        mu = np.sqrt(np.maximum(0.0, 1.0 - z**2))
        ld = 1.0 - true_u[0] * (1.0 - mu) - true_u[1] * (1.0 - mu)**2
        depth = np.where(z < 1.0, k_val**2 * ld / (1.0 - true_u[0]/3.0 - true_u[1]/6.0), 0.0)
```

```
model = 1.0 - depth
return -0.5 * np.sum(((obs_flux - model) / noise_sigma)**2)

current_ll = log_likelihood(current_k)
accepted = 0

for step in range(n_samples):
    prop_k = current_k + np.random.normal(0, 0.001)
    prop_ll = log_likelihood(prop_k)

    if np.log(np.random.uniform(0, 1)) < (prop_ll - current_ll):
        current_k = prop_k
        current_ll = prop_ll
        accepted += 1

    chain_k[step] = current_k

burn_in = 1000
posterior_k = chain_k[burn_in:]
k_mean = np.mean(posterior_k)
k_std = np.std(posterior_k)

print("=== VÝSLEDKY MCMC POSTERIORU ===")
print(f"Skutečný parametr k: {true_k:.5f}")
print(f"Odhadnutý k:          {k_mean:.5f} +/- {k_std:.5f}")
print(f"Akceptační poměr:      {(accepted / n_samples * 100):.1f} %")

simulate_transit_analysis()
```

Výsledky simulace dokumentují schopnost MCMC algoritmu spolehlivě zrekonstruovat parametr $k = R_p/R_*$ i při realistické fotometrické hladině šumu.

Dodatek C: Sbírka 15 řešených výpočetních úloh

V tomto dodatku uvádíme patnáct reprezentativních vysokoškolských výpočetních úloh pokrývajících celou šíři témat monografie: od nebeské mechaniky a detekčních metod přes atmosférickou fyziku až po astrobiologické koncepty a statistiku technosignatur. Každá úloha obsahuje zadání, analytický rozbor a numerické řešení krok za krokem.

Úloha 1: Semi-amplituda radiální rychlosti pro 51 Pegasi b

Zadání: Planeta 51 Pegasi b obíhá kolem hvězdy slunečního typu o hmotnosti $M_* = 1,06 M_\odot$ po kruhové dráze ($e = 0$) s oběžnou periodou $P = 4,231$ dne. Z pozorování radiálních rychlostí byla určena semi-amplituda $K = 55,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Vypočítejte velkou poloosu oběžné dráhy a v astronomických jednotkách (AU).
2. Určete minimální hmotnost planety $M_p \sin i$ v jednotkách hmotnosti Jupitera (M_{Jup}).

Řešení:

1. Velkou poloosu a určíme ze 3. Keplerova zákona ($M_p \ll M_*$):

$$a = \left[\frac{GM_* P^2}{4\pi^2} \right]^{1/3}$$

Převedeme periodu na sekundy: $P = 4,231 \times 86\,400 \text{ s} = 365\,558,4 \text{ s}$. Hmotnost hvězdy: $M_* = 1,06 \times 1,9885 \times 10^{30} \text{ kg} = 2,1078 \times 10^{30} \text{ kg}$.

$$a = \left[\frac{(6,6743 \times 10^{-11}) \times (2,1078 \times 10^{30}) \times (365\,558,4)^2}{4\pi^2} \right]^{1/3} \approx 7,88 \times 10^9 \text{ m} \approx 0,0527 \text{ AU}$$

1. Semi-amplituda K pro kruhovou dráhu ($e = 0$) splňuje:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{M_*^{2/3}} \implies M_p \sin i = K M_*^{2/3} \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3}$$

Dosažením:

$$M_p \sin i = 55,9 \times (2,1078 \times 10^{30})^{2/3} \times \left(\frac{365\,558,4}{2\pi \times 6,6743 \times 10^{-11}} \right)^{1/3} \approx 8,96 \times 10^{26} \text{ kg}$$

Protože hmotnost Jupitera je $M_{\text{Jup}} = 1,898 \times 10^{27} \text{ kg}$:

$$M_p \sin i = \frac{8,96 \times 10^{26}}{1,898 \times 10^{27}} \approx 0,472 M_{\text{Jup}}$$

Úloha 2: Hloubka tranzitu a hustota planety HD 209458b

Zadání: U hvězdy HD 209458 ($R_* = 1,20 R_\odot$, $M_* = 1,15 M_\odot$) byl detekován primární tranzit s relativní hloubkou $\delta = 1,46 \%$. Z měření radiálních rychlostí a modelování sklonu dráhy ($i = 86,7^\circ$) byla určena skutečná hmotnost planety $M_p = 0,69 M_{\text{Jup}}$.

1. Vypočítejte poloměr planety R_p v jednotkách poloměru Jupitera ($R_{\text{Jup}} = 71\,492 \text{ km}$).
2. Vypočítejte střední hustotu planety ρ_p a porovnejte ji s hustotou Jupitera ($\rho_{\text{Jup}} \approx 1326 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Řešení:

1. Z geometrické hloubky tranzitu plyne poměr poloměrů:

$$\frac{R_p}{R_*} = \sqrt{\delta} = \sqrt{0,0146} \approx 0,1208$$

Poloměr hvězdy: $R_* = 1,20 \times 696\,340 \text{ km} \approx 835\,608 \text{ km}$. Poloměr planety:

$$R_p = 0,1208 \times 835\,608 \text{ km} \approx 100\,966 \text{ km} \approx 1,412 R_{\text{Jup}}$$

1. Objem planety:

$$V_p = \frac{4}{3} \pi R_p^3 = \frac{4}{3} \pi \times (1,0097 \times 10^8 \text{ m})^3 \approx 4,314 \times 10^{24} \text{ m}^3$$

Hmotnost planety: $M_p = 0,69 \times 1,898 \times 10^{27} \text{ kg} \approx 1,310 \times 10^{27} \text{ kg}$. Střední hustota:

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} = \frac{1,310 \times 10^{27}}{4,314 \times 10^{24}} \approx 303,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \approx 0,304 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Planeta je "nafouknutá" horkým jupiterem: má pouze čtvrtinovou hustotu vůči Jupiteru a je méně hustá než voda i korek.

Úloha 3: Výpočet impaktního parametru a tranzitní inklinace

Zadání: Tranzitující planeta na kruhové dráze s periodou $P = 3,0$ dne vykazuje celkovou dobu trvání tranzitu $T_{\text{tot}} = 2,80$ hodiny a dobu trvání plného zákrytu $T_{\text{flat}} = 2,15$ hodiny. Poměr poloměrů činí $k = R_p/R_* = 0,10$.

1. Určete bezrozměrný impaktní parametr b .
2. Určete normovaný poloměr dráhy a/R_* a sklon dráhy i .

Řešení:

1. Využijeme vztah mezi dobami trvání:

$$\left(\frac{T_{\text{flat}}}{T_{\text{tot}}}\right)^2 = \frac{(1-k)^2 - b^2}{(1+k)^2 - b^2}$$

Označme $\eta = (T_{\text{flat}}/T_{\text{tot}})^2 = (2,15/2,80)^2 \approx 0,5896$.

$$\eta[(1+k)^2 - b^2] = (1-k)^2 - b^2 \implies b^2(1-\eta) = (1-k)^2 - \eta(1+k)^2$$

Pro $k = 0,10$: $(1-k)^2 = 0,81$ a $(1+k)^2 = 1,21$.

$$b^2 = \frac{0,81 - 0,5896 \times 1,21}{1 - 0,5896} = \frac{0,81 - 0,7134}{0,4104} = \frac{0,0966}{0,4104} \approx 0,2354 \implies b \approx 0,485$$

1. Pro celkovou dobu trvání tranzitu platí:

$$T_{\text{tot}} \approx \frac{P}{\pi} \frac{R_*}{a} \sqrt{(1+k)^2 - b^2} \implies \frac{a}{R_*} = \frac{P}{\pi T_{\text{tot}}} \sqrt{(1+k)^2 - b^2}$$

$P = 72$ hodin, $T_{\text{tot}} = 2,80$ hodin.

$$\frac{a}{R_*} = \frac{72}{\pi \times 2,80} \sqrt{1,21 - 0,2354} = 8,185 \times \sqrt{0,9746} \approx 8,08$$

Sklon dráhy:

$$b = \frac{a}{R_*} \cos i \implies \cos i = \frac{b}{a/R_*} = \frac{0,485}{8,08} \approx 0,0600 \implies i = \arccos(0,0600) \approx 86,56^\circ$$

Úloha 4: Teplota rovnováhy a albedo u horkého jupitera

Zadání: Horký jupiter obíhá ve vzdálenosti $a = 0,045 \text{ AU}$ od hvězdy s $T_* = 5800 \text{ K}$ a $R_* = 1,05 R_\odot$. Z měření sekundárního zákrytu bylo určeno geometrické albedo ve viditelném oboru $A_g = 0,08$ a efektivní teplota denní strany $T_{\text{day}} = 1620 \text{ K}$.

1. Vypočítejte rovnovážnou teplotu černého tělesa $T_{\text{eq},0}$ (pro nulové albedo a dokonalou redistribuci $f = 1$).
2. Odhadněte parametr redistribuce tepla f , předpokládáme-li Bondovo albedo $A_B \approx 1,5 A_g$.

Řešení:

1. Poměr vzdáleností:

$$\frac{R_*}{a} = \frac{1,05 \times 696\,340 \text{ km}}{0,045 \times 149\,597\,870 \text{ km}} = \frac{731\,157}{6\,731\,904} \approx 0,1086$$

Rovnovážná teplota pro $A_B = 0$ a $f = 1$:

$$T_{\text{eq},0} = T_* \sqrt{\frac{R_*}{2a}} = 5800 \times \sqrt{\frac{0,1086}{2}} = 5800 \times \sqrt{0,0543} \approx 5800 \times 0,2330 \approx 1351 \text{ K}$$

1. Bondovo albedo: $A_B = 1,5 \times 0,08 = 0,12$. Vyzařovaný tok denní strany odpovídá efektivní teplotě:

$$T_{\text{day}} = T_* \sqrt{\frac{R_*}{a}} \left(\frac{1 - A_B}{4f} \right)^{1/4}$$

Úpravou vyjádříme f :

$$\left(\frac{T_{\text{day}}}{T_*}\right)^4 = \left(\frac{R_*}{a}\right)^2 \frac{1 - A_B}{4f} \implies f = \frac{1 - A_B}{4} \left(\frac{R_*}{a}\right)^2 \left(\frac{T_*}{T_{\text{day}}}\right)^4$$

Dosadíme:

$$f = \frac{0,88}{4} \times (0,1086)^2 \times \left(\frac{5800}{1620}\right)^4 = 0,22 \times 0,01179 \times (3,580)^4 = 0,00259 \times 164,3 \approx 0,426$$

Hodnota $f \approx 0,43$ leží blízko limitu pro neefektivní přenos tepla na noční stranu ($f = 0,5$), což svědčí o silném teplotním kontrastu den/noc na této planetě.

Úloha 5: Atmosférická škálová výška a signál vody pro superzemi

Zadání: Uvažujme superzemi s hmotností $M_p = 5 M_\oplus$ a poloměrem $R_p = 1,75 R_\oplus$ obíhající kolem červeného trpaslíka ($R_* = 0,25 R_\odot$). Teplota atmosféry je $T = 320 \text{ K}$.

1. Vypočítejte tíhové zrychlení g na povrchu planety.
2. Určete škálovou výšku H pro dva scénáře: (a) lehká atmosféra bohatá na vodík ($\mu = 2,3$), (b) těžká sekundární atmosféra bohatá na vodní páru ($\mu = 18$).
3. Vypočítejte amplitudu spektrální absorpce vody $\Delta\delta \approx \frac{2R_p(5H)}{R_*^2}$ v ppm pro oba případy.

Řešení:

1. Gravitační zrychlení:

$$g = G \frac{M_p}{R_p^2} = g_\oplus \frac{M_p/M_\oplus}{(R_p/R_\oplus)^2} = 9,81 \times \frac{5}{(1,75)^2} = 9,81 \times \frac{5}{3,0625} \approx 16,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

1. Škálová výška:

$$H = \frac{k_B T}{\mu m_u g}$$

- (a) Pro $\mu = 2,3$:

$$H_{\text{H}_2} = \frac{(1,3806 \times 10^{-23}) \times 320}{(2,3 \times 1,6605 \times 10^{-27}) \times 16,02} = \frac{4,418 \times 10^{-21}}{6,118 \times 10^{-26}} \approx 72\,200 \text{ m} \approx 72,2 \text{ km}$$

- (b) Pro $\mu = 18$:

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{4,418 \times 10^{-21}}{(18 \times 1,6605 \times 10^{-27}) \times 16,02} = \frac{4,418 \times 10^{-21}}{4,788 \times 10^{-25}} \approx 9\,230 \text{ m} \approx 9,23 \text{ km}$$

1. Amplituda spektrálního signálu: Poloměr planety: $R_p = 1,75 \times 6\,371 \text{ km} \approx 11\,149 \text{ km}$. Poloměr hvězdy: $R_* = 0,25 \times 696\,340 \text{ km} \approx 174\,085 \text{ km}$.

$$\frac{2R_p}{R_*^2} = \frac{2 \times 11\,149}{(174\,085)^2} = \frac{22\,298}{3,0306 \times 10^{10}} \approx 7,358 \times 10^{-7} \text{ km}^{-1}$$

- Pro vodíkovou obálku ($\Delta R_p = 5H = 361 \text{ km}$):

$$\Delta\delta_{\text{H}_2} = 7,358 \times 10^{-7} \times 361 \approx 2,66 \times 10^{-4} = 266 \text{ ppm}$$

- Pro vodní páru ($\Delta R_p = 5H = 46,15 \text{ km}$):

$$\Delta\delta_{\text{H}_2\text{O}} = 7,358 \times 10^{-7} \times 46,15 \approx 3,40 \times 10^{-5} = 34 \text{ ppm}$$

Signál 266 ppm je spektrografem NIRSpec na JWST snadno detekovatelný v jednotkách tranzitů, zatímco signál 34 ppm vyžaduje složení desítek tranzitů.

Úloha 6: Einsteinův poloměr pro mikroskopickou čočku

Zadání: Gravitační čočka o hmotnosti $M_L = 0,3 M_\odot$ se nachází ve vzdálenosti $D_L = 6,0 \text{ kpc}$ od pozorovatele. Zdrojová hvězda v galaktické výduti leží ve vzdálenosti $D_S = 8,0 \text{ kpc}$.

1. Vypočítejte úhlový Einsteinův poloměr θ_E v milivteřinách (mas).

2. Určete fyzikální poloměr Einsteinova prstence R_E v astronomických jednotkách (AU).

Řešení:

1. Úhlový poloměr:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \right)}$$

$$M_L = 0,3 \times 1,9885 \times 10^{30} \text{ kg} = 5,965 \times 10^{29} \text{ kg. } 1 \text{ kpc} = 3,0857 \times 10^{19} \text{ m.}$$

$$\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} = \frac{1}{6,0 \times 3,0857 \times 10^{19}} - \frac{1}{8,0 \times 3,0857 \times 10^{19}} = \frac{1}{3,0857 \times 10^{19}} \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{8} \right) = \frac{1}{24 \times 3,0857 \times 10^{19}} \approx 1,350 \times 10^{-21} \text{ m}^{-1}$$

$$\frac{4GM_L}{c^2} = \frac{4 \times (6,6743 \times 10^{-11}) \times (5,965 \times 10^{29})}{(2,9979 \times 10^8)^2} = \frac{1,593 \times 10^{20}}{8,9875 \times 10^{16}} \approx 1773 \text{ m}$$

$$\theta_E = \sqrt{1773 \times 1,350 \times 10^{-21}} = \sqrt{2,394 \times 10^{-18}} \approx 1,547 \times 10^{-9} \text{ rad}$$

Převědeme na milivteřiny ($1 \text{ rad} = 206\,264,8'' = 2,0626 \times 10^8 \text{ mas}$):

$$\theta_E = 1,547 \times 10^{-9} \times 2,0626 \times 10^8 \approx 0,319 \text{ mas}$$

1. Fyzikální poloměr R_E :

$$R_E = \theta_E D_L = (1,547 \times 10^{-9}) \times (6000 \times 3,0857 \times 10^{19} \text{ m}) \approx 2,864 \times 10^{11} \text{ m} \approx 1,915 \text{ AU}$$

Úloha 7: Vnitřní hranice obyvatelné zóny (runaway greenhouse)

Zadání: Využijte model Kopparapu et al. (2013), kde efektivní oslunění pro runaway greenhouse limit u hvězdy slunečního typu činí $S_{\text{eff}} = 1,06$. Vypočtete vzdálenost této hranice d_{in} v AU:

1. Pro současné Slunce ($L_* = 1,0 L_{\odot}$).
2. Pro mladé Slunce před 4 miliardami let ($L_* = 0,70 L_{\odot}$).
3. Diskutujte, zda byla Venuše ($a = 0,723 \text{ AU}$) v rané fázi Sluneční soustavy v obyvatelné zóně.

Řešení:

1. Pro současné Slunce:

$$d_{\text{in}} = \sqrt{\frac{L_*}{S_{\text{eff}}}} = \sqrt{\frac{1,0}{1,06}} \approx \sqrt{0,9434} \approx 0,971 \text{ AU}$$

Současná Venuše ($a = 0,723 \text{ AU}$) leží hluboko uvnitř zóny nekontrolovaného skleníkového efektu.

1. Pro mladé Slunce ($L_* = 0,70 L_{\odot}$):

$$d_{\text{in, young}} = \sqrt{\frac{0,70}{1,06}} \approx \sqrt{0,6604} \approx 0,813 \text{ AU}$$

1. Venuše obíhá ve vzdálenosti $0,723 \text{ AU}$. V mrakově čistém 1D modelu byla i mladá Venuše těsně uvnitř runaway hranice ($0,723 < 0,813$). Pokročilé 3D klimatické modely (Way et al. 2016) však ukazují, že pomalá rotace Venuše mohla vytvořit masivní reflexní oblačnost na denní straně, která zvýšila albedo a udržela kapalný oceán na Venuši po dobu až 2 miliard let.

Úloha 8: Obyvatelná zóna a vázaná rotace u Proximy Centauri

Zadání: Hvězda Proxima Centauri má hmotnost $M_* = 0,122 M_{\odot}$ a zářivost $L_* = 0,00155 L_{\odot}$. Planeta Proxima b obíhá po mírně excentrické dráze s velkou poloosou $a = 0,0485 \text{ AU}$ a periodou $P = 11,186$ dne.

1. Vypočtete efektivní oslunění S_{eff} dopadající na Proximu b.
2. Ověřte, zda leží v obyvatelné zóně (střední HZ pro M trpaslíky má $S_{\text{eff}} \in (0,25; 0,90)$).
3. Odhadněte charakteristickou dobu slapové synchronizace rotace τ_{sync} za předpokladu parametrů $Q = 100$, $k_2 = 0,3$, počáteční periody rotace $P_0 = 1 \text{ den}$ a porovnejte ji se stářím hvězdy ($4,8 \text{ Gyr}$).

Řešení:

1. Efektivní oslunění:

$$S_{\text{eff}} = \frac{L_*/L_\odot}{(a/1 \text{ AU})^2} = \frac{0,00155}{(0,0485)^2} = \frac{0,00155}{0,002352} \approx 0,659$$

1. Hodnota $S_{\text{eff}} \approx 0,66$ leží uvnitř intervalu $(0,25; 0,90)$, planeta tedy jednoznačně leží v obyvatelné zóně.

1. Doba synchronizace:

$$\tau_{\text{sync}} \propto a^6 \implies \tau_{\text{sync}} \approx \tau_0 \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^6 \left(\frac{M_\odot}{M_*} \right)^2 \approx 10^{11} \times (0,0485)^6 \times \left(\frac{1}{0,122} \right)^2$$

Protože $(0,0485)^6 \approx 1,28 \times 10^{-8} \text{ a}$ $(1/0,122)^2 \approx 67,2$:

$$\tau_{\text{sync}} \approx 10^{11} \times 1,28 \times 10^{-8} \times 67,2 \approx 8,6 \times 10^4 \text{ let}$$

Doba synchronizace činí méně než 100 000 let! Vzhledem ke stáří soustavy $4,8 \times 10^9$ let je Proxima b dokonale slapově vázána.

Úloha 9: Doba přežití atmosféry při hydrodynamickém fotoodpařování

Zadání: Terestrická planeta ($M_p = 1,0 M_\oplus$, $R_p = 1,0 R_\oplus$) obíhá u mladého M trpaslíka ve vzdálenosti, kde hustota toku XUV záření činí $F_{\text{XUV}} = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

1. Za předpokladu energeticky limitovaného úniku s účinností $\epsilon = 0,12$ vypočítejte rychlost ztráty hmotnosti $\dot{M}$ v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.
2. Vypočítejte, za jak dlouho by se tímto tempem zcela odpařil vodní oceán o hmotnosti rovné zemskému oceánu ($M_{\text{ocean}} \approx 1,4 \times 10^{21} \text{ kg}$).

Řešení:

1. Rychlost úniku v energeticky limitovaném režimu:

$$\dot{M} = \frac{\epsilon \pi R_p^3 F_{\text{XUV}}}{GM_p}$$

$R_p = 6,371 \times 10^6 \text{ m}$, $M_p = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$.

$$\pi R_p^3 = \pi \times (6,371 \times 10^6)^3 \approx 8,126 \times 10^{20} \text{ m}^3$$

$$GM_p = (6,6743 \times 10^{-11}) \times (5,972 \times 10^{24}) \approx 3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\dot{M} = \frac{0,12 \times (8,126 \times 10^{20}) \times 50}{3,986 \times 10^{14}} = \frac{4,876 \times 10^{21}}{3,986 \times 10^{14}} \approx 1,223 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

1. Doba odpaření oceánu:

$$\tau_{\text{loss}} = \frac{M_{\text{ocean}}}{\dot{M}} = \frac{1,4 \times 10^{21} \text{ kg}}{1,223 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}} \approx 1,145 \times 10^{14} \text{ s}$$

Převědeme na roky ($1 \text{ rok} \approx 3,156 \times 10^7 \text{ s}$):

$$\tau_{\text{loss}} = \frac{1,145 \times 10^{14}}{3,156 \times 10^7} \approx 3,63 \times 10^6 \text{ let} \approx 3,6 \text{ milionu let}$$

Oceán vody by se v takto extrémním toku odpařil za pouhé necelé 4 miliony let!

Úloha 10: Energetický tok supererupce a poškození ozonoféry

Zadání: M trpaslík vygeneruje supererupci s celkovou uvolněnou bolometrickou energií $E_{\text{flare}} = 10^{27} \text{ J}$, přičemž 10 % energie je vyzářeno v oboru tvrdého UV záření schopného štěpit molekuly O_3 a N_2 ($\lambda < 200 \text{ nm}$). Planeta obíhá ve vzdálenosti $a = 0,05 \text{ AU}$.

1. Vypočítejte celkovou fluenci UV záření $\mathcal{F}_{\text{UV}}$ dopadající na horní atmosféru planety na jednotku plochy v $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$.
2. Porovnejte tuto hodnotu s běžnou denní dávkou UV záření na Zemi ($\sim 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$).

Řešení:

1. Energie v tvrdém UV: $E_{\text{UV}} = 0,10 \times 10^{27} \text{ J} = 10^{26} \text{ J}$. Vzdálenost: $a = 0,05 \times 1,496 \times 10^{11} \text{ m} = 7,48 \times 10^9 \text{ m}$. Plocha koule o poloměru a :

$$A_{\text{sphere}} = 4\pi a^2 = 4\pi \times (7,48 \times 10^9)^2 \approx 7,03 \times 10^{20} \text{ m}^2$$

Fluence záření:

$$\mathcal{F}_{\text{UV}} = \frac{E_{\text{UV}}}{A_{\text{sphere}}} = \frac{10^{26}}{7,03 \times 10^{20}} \approx 1,42 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

1. Planeta obdrží během několika desítek minut trvání erupce dávku tvrdého UV záření srovnatelnou s celodenní pozemskou dávkou. Takto masivní pulz fotodisociuje atmosférický dusík za vzniku oxidu dusíku (NO_x), které katalyticky zničí až 90 % ozonové vrstvy, čímž vystaví povrch smrtícímu toku záření na dobu několika měsíců až let.

Úloha 11: Fotosyntetický tok fotonů (PAR) na povrchu exoplanety

Zadání: Pro oxigenní fotosyntézu na Zemi je rozhodující tok fotonů v pásmu 400–700 nm (PAR). Hvězda třídy M s efektivní teplotou $T_* = 3000 \text{ K}$ vyzařuje v tomto pásmu pouze 2 % své bolometrické zářivosti. Planeta přijímá stejný celkový bolometrický tok jako Země ($S_{\text{bol}} = 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Slunce ($T_{\odot} = 5780 \text{ K}$) vyzařuje v pásmu PAR zhruba 43 % své energie.

1. Vypočítejte hustotu toku PAR energie na exoplanetě a porovnejte ji se Zemí.
2. Diskutujte, zda může pozemský typ fotosyntézy na této planetě dlouhodobě fungovat.

Řešení:

1. Na Zemi činí tok PAR energie:

$$F_{\text{PAR},\oplus} = 0,43 \times 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \approx 585 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Na exoplanetě u M trpaslíka činí tok PAR:

$$F_{\text{PAR},M} = 0,02 \times 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \approx 27,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Tok je více než dvacetkrát nižší!

1. Minimální kompenzační bod pro pozemské rostliny vyžaduje tok zhruba $5\text{--}10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Život využívající chlorofyl *a* by na takové planetě živil na hranici energetické bilance. Evoluční selekce by proto nevyhnutelně vedla k adaptaci na fotosyntetické pigmenty absorbující v blízkém infračerveném oboru (700–1100 nm), kde M trpaslík vyzařuje přes 60 % své energie.

Úloha 12: Abiotická vs biologická rovnováha metanu a kyslíku

Zadání: V atmosféře exoplanety o hmotnosti $M_{\text{atm}} = 5 \times 10^{18} \text{ kg}$ byl naměřen stálý objemový poměr metanu $f(\text{CH}_4) = 2 \times 10^{-6}$ (2 ppm) a kyslíku $f(\text{O}_2) = 0,20$ (20 %). Fotochemická životnost metanu v této oxidační atmosféře je $\tau_{\text{chem}} = 12 \text{ let}$.

1. Vypočítejte celkovou hmotnost metanu v atmosféře.
2. Vypočítejte roční biologický tok metanu $\Phi(\text{CH}_4)$ v $\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}$ nutný k udržení této rovnovážné koncentrace.

Řešení:

1. Střední molekulová hmotnost suchého vzduchu: $\mu \approx 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Molární hmotnost metanu: $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Hmotnostní zlomek metanu:

$$w(\text{CH}_4) = f(\text{CH}_4) \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu} = (2 \times 10^{-6}) \times \frac{16}{29} \approx 1,103 \times 10^{-6}$$

Celková hmotnost metanu v atmosféře:

$$M_{\text{CH}_4} = w(\text{CH}_4) \times M_{\text{atm}} = (1,103 \times 10^{-6}) \times (5 \times 10^{18} \text{ kg}) \approx 5,52 \times 10^{12} \text{ kg} = 5,52 \text{ miliardy tun}$$

1. Tok nutný k udržení stacionárního stavu:

$$\Phi(\text{CH}_4) = \frac{M_{\text{CH}_4}}{\tau_{\text{chem}}} = \frac{5,52 \times 10^{12} \text{ kg}}{12 \text{ let}} = 4,60 \times 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1} = 460 \text{ milionů tun ročně}$$

Tato hodnota je v dokonalé shodě se skutečnou globální biologickou produkcí metanu na Zemi ($\sim 500 \text{ Mt} \cdot \text{rok}^{-1}$). Abiotické geologické zdroje (serpentinizace) na Zemi produkují méně než $10 \text{ Mt} \cdot \text{rok}^{-1}$. Takto masivní tok je nezvratnou biosignaturou.

Úloha 13: Detekovatelnost freonů (CFC) spektroskopem JWST

Zadání: Předpokládejme planetu velikosti Země tranzitující před M trpaslíkem ($R_* = 0,15 R_{\odot}$). Průmyslová civilizace znečistila atmosféru freonem CFC-12 (CF_2Cl_2) na úroveň $f_{\text{CFC}} = 5 \text{ ppb}$ (5×10^{-9}). Efektivní absorpční průřez pásu na $9,1 \mu\text{m}$ činí $\sigma = 1,5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2 = 1,5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$. Škálová výška atmosféry je $H = 8 \text{ km}$.

1. Vypočítejte optickou hloubku tečného paprsku na hladině s hustotou $n_0 = 2 \times 10^{25} \text{ molekul} \cdot \text{m}^{-3}$.
2. Určete efektivní změnu poloměru planety ΔR_p a hloubku absorpčního pásu $\Delta \delta$ v ppm.

Řešení:

1. Číselná hustota freonu na referenční hladině:

$$n_{\text{CFC}} = f_{\text{CFC}} n_0 = (5 \times 10^{-9}) \times (2 \times 10^{25}) = 1,0 \times 10^{17} \text{ molekul} \cdot \text{m}^{-3}$$

Optická hloubka tečného paprsku:

$$\tau = n_{\text{CFC}} \sigma \sqrt{2\pi R_p H}$$

$$R_p = 6,371 \times 10^6 \text{ m}, H = 8 \times 10^3 \text{ m}.$$

$$\sqrt{2\pi R_p H} = \sqrt{2\pi \times (6,371 \times 10^6) \times (8 \times 10^3)} = \sqrt{3,202 \times 10^{11}} \approx 5,66 \times 10^5 \text{ m}$$

$$\tau = (1,0 \times 10^{17}) \times (1,5 \times 10^{-20}) \times (5,66 \times 10^5) = 1,5 \times 10^{-3} \times 5,66 \times 10^5 \approx 0,849$$

1. Protože $\tau \approx 0,85 \sim \tau_{\text{crit}}$, absorpční pás zvedá efektivní poloměr o zhruba $\Delta R_p \approx 1,5H \approx 12 \text{ km}$.

$$\Delta\delta \approx \frac{2R_p \Delta R_p}{R_*^2} = \frac{2 \times 6371 \times 12}{(0,15 \times 696\,340)^2} = \frac{152\,904}{(104\,451)^2} = \frac{152\,904}{1,091 \times 10^{10}} \approx 1,40 \times 10^{-5} = 14 \text{ ppm}$$

Signál o velikosti 14 ppm je na hranici detekovatelnosti MIRI na JWST a vyžadoval by složení zhruba 60 až 80 tranzitů.

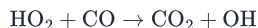
Úloha 14: Falešný signál O_2 vyvolaný fotolýzou CO_2

Zadání: Suchá terestrická planeta s atmosférou tvořenou čistým CO_2 o tlaku $P = 1 \text{ bar}$ je vystavena toku UV záření. Fotolýza $\text{CO}_2 + h\nu \rightarrow \text{CO} + \text{O}$ generuje rovnovážné zastoupení volného kyslíku $f(\text{O}_2) = 0,05 (5 \%)$ a oxidu uhelnatého $f(\text{CO}) = 0,05$.

1. Vysvětlete, proč absence absorpčních pásů vody na $1,4 \mu\text{m}$ v transmisním spektru indikuje absenci radikálů OH.
2. Jaký pozorovací test pomocí pásu CO na $2,35 \mu\text{m}$ definitivně prokáže, že jde o abiotický kyslík?

Řešení:

1. Radikály OH pocházejí z fotolýzy vody ($\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{OH} + \text{H}$). Tyto radikály působí jako mimořádně efektivní katalyzátor rekombinace oxidu uhelnatého:



Pokud voda v atmosféře zcela chybí (spektrum nevykazuje žádné absorpční pásy H_2O na $1,4 \mu\text{m}$ ani $1,9 \mu\text{m}$), katalytický cyklus neběží. Fotochemický rozpad CO_2 se nezastaví a vede k hromadění procentuálních koncentrací O_2 a CO.

1. Na živé planetě (jako je Země) je oxid uhelnatý CO okamžitě konzumován mikroorganismy jako zdroj metabolické energie a uhlíku (např. acetogenními a metanogenními bakteriemi), takže jeho koncentrace v biosféře nepřekračuje 0,1 ppm. Detekce hlubokého absorpčního pásu CO na $2,35 \mu\text{m}$ nebo $4,67 \mu\text{m}$ se srovnatelnou intenzitou jako pás O_2 je proto jednoznačným důkazem abiotického původu kyslíku a falešně pozitivní biosignatury.

Úloha 15: Drakeova rovnice s aktualizovanými parametry mise Kepler

Zadání: Využijte Drakeovu rovnici $N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$. Z dat mise Kepler a moderní astrofyziky dosadíme empiricky ověřené parametry:

- $R_* = 1,5 \text{ hvězdy} \cdot \text{rok}^{-1}$,
- $f_p = 0,95$,
- $n_e = 0,25$ (průměrně 1 obyvatelná planeta na 4 hvězdy). Předpokládejme optimistický astrobiologický scénář:
- $f_l = 0,50$ (život vznikne na polovině obyvatelných planet),
- $f_i = 0,10$ (na desetině z nich vznikne inteligence),
- $f_c = 0,20$ (pětina inteligentních civilizací vyvine radioteleskopy).

1. Vypočítejte počet současných komunikujících civilizací N pro dvě různé doby technologického přežití: (a) pesimistická $L = 300 \text{ let}$, (b) optimistická $L = 1\,000\,000 \text{ let}$.

1. Vypočítejte průměrnou vzdálenost $\langle d \rangle$ k nejbližší civilizaci v Galaxii (předpokládejte disk Galaxie o poloměru $R_{\text{gal}} = 15 \text{ kpc}$ a tloušťce $H_{\text{gal}} = 300 \text{ pc}$).

Řešení:

1. Spočteme součin astronomických a biologických faktorů:

$$\Gamma = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c = 1,5 \times 0,95 \times 0,25 \times 0,50 \times 0,10 \times 0,20 = 1,5 \times 0,95 \times 0,0025 \approx 3,5625 \times 10^{-3} \text{ rok}^{-1}$$

(a) Pro $L = 300$ let:

$$N_a = 3,5625 \times 10^{-3} \times 300 \approx 1,07 \approx 1$$

V Galaxii existuje v daném okamžiku pouze jediná civilizace – my sami! (b) Pro $L = 10^6$ let:

$$N_b = 3,5625 \times 10^{-3} \times 10^6 \approx 3\,563 \text{ civilizací}$$

1. Objem disku Galaxie:

$$V_{\text{gal}} = \pi R_{\text{gal}}^2 H_{\text{gal}} = \pi \times (15\,000 \text{ pc})^2 \times 300 \text{ pc} \approx 2,12 \times 10^{11} \text{ pc}^3$$

Pro $N = 3563$ připadá na jednu civilizaci objem:

$$V_1 = \frac{V_{\text{gal}}}{N} = \frac{2,12 \times 10^{11}}{3563} \approx 5,95 \times 10^7 \text{ pc}^3$$

Průměrná vzdálenost k nejbližšímu sousedovi odpovídá poloměru koule tohoto objemu:

$$\frac{4}{3}\pi \langle d \rangle^3 = V_1 \implies \langle d \rangle = \left(\frac{3V_1}{4\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{1,785 \times 10^8}{4\pi} \right)^{1/3} = (1,420 \times 10^7)^{1/3} \approx 242 \text{ pc} \approx 790 \text{ světelných let}$$

I v optimistickém scénáři je nejbližší civilizace vzdálena téměř 800 světelných let, což znamená, že obousměrná komunikace by trvala déle než 1500 let.

Dodatek D: Encyklopedický glosář astrofyziky exoplanet a astrobiologie

Tento glosář shrnuje a rigorózně definuje fundamentální pojmy, teoretické modely, pozorovací techniky, kosmické mise a přístroje moderní vědy o mimoslunečních planetách a hledání mimozemského života.

A

- **Abelova transformace:** Integrální transformace využívaná v transmisní spektroskopii k přepočtu mezi radiálním profilem absorpčního koeficientu atmosféry $\alpha(r)$ a celkovou optickou hloubkou $\tau(b)$ integrovanou podél přímkové trajektorie tečného paprsku s impaktním parametrem b .
- **Aerosoly:** Pevné prachové částice nebo kapalné kapénky suspendované v plynné atmosféře planety. Způsobují rozptyl a absorpci záření, zplošťují transmisní spektrum a tvoří fotochemický opar či kondenzační oblaky.
- **Albedo:** Bezrozměrná míra odrazivosti tělesa. Udává poměr mezi odraženým a dopadajícím zářením. V exoplanetární fyzice rozlišujeme Bondovo albedo A_B (integrované přes všechny vlnové délky a úhly) a geometrické albedo A_g (měřené v nulovém fázovém úhlu).
- **Aspekční úhel (inklinace i):** Úhel sevřený mezi normálou k oběžné rovině planety a zorným paprskem pozorovatele. Pro tranzitující planety platí $i \approx 90^\circ$.
- **Astrometrie:** Metoda detekce exoplanet založená na extrémně přesném měření periodického prostorového pohybu mateřské hvězdy po obloze vyvolaného gravitačním reflexním pohybem kolem těžiště. Na rozdíl od radiálních rychlostí přímo určuje skutečnou hmotnost M_p a orientaci dráhy bez degenerace $\sin i$.
- **Atmosférická eroze:** Soubor fyzikálních procesů vedoucích ke ztrátě plynné obálky planety do kosmického prostoru. Zahrnuje tepelný hydrodynamický únik (fotoevaporaci), jeansovský únik, netepelný iontový úprk a erozi vyvolanou kinetickým tlakem hvězdného větru.

B

- **Biosignatura:** Měřitelná látka, izotopový poměr či elektromagnetický jev, jehož přítomnost v atmosféře nebo na povrchu planety vyžaduje působení živých organismů a nelze jej uspokojivě vysvětlit abiotickými geologickými a fotochemickými procesy.
- **Bisector Inverse Slope (BIS):** Spektroskopický diagnostický parametr měřící sklon a asymetrii profilu čáry v křížové korelační funkci (CCF). Slouží k rozlišení skutečného Dopplerova posuvu vyvolaného planetou od fiktivních posuvů způsobených rotujícími magnetickými skvrnami fotosféry.
- **Bondovo albedo (A_B):** Frakce celkového zářivého toku dopadajícího na planetu, která je rozptýlena zpět do prostoru přes všechny vlnové délky a do všech prostorových úhlů. Je klíčovým parametrem určujícím efektivní rovnovážnou teplotu planety T_{eq} .

C

- **C/O poměr (uhlíkovo–kyslíkový poměr):** Poměr počtu atomů uhlíku k počtu atomů kyslíku v atmosféře či plynném disku. Slouží jako spolehlivý indikátor místa formování planety vzhledem ke sněžným čarám H_2O , CO_2 a CO . Pro sluneční složení platí $C/O \approx 0,55$; hodnoty $C/O \geq 1$ vedou k chemickému režimu chudému na vodní páru a bohatému na uhlovodíky.
- **Cirkumstelární obyvatelná zóna (Circumstellar Habitable Zone, HZ):** Oblast v okolí mateřské hvězdy, v níž jsou radiální toky slučitelné s přítomností kapalné vody na pevném povrchu terestrické planety disponující atmosférou s geochemickou uhlíkovou termoregulací.
- **CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits):** První specializovaná kosmická observatoř pro tranzitní fotometrii (CNES/ESA, start 2006), která objevila první tranzitující kamennou planetu s vysokou hustotou – CoRoT-7b.

D

- **Deinococcus radiodurans:** Polyextremotolerantní grampozitivní bakterie proslulá extrémní radiorezistencí. Snese dávky ionizujícího záření přesahující 15 000 Gy díky mimořádně efektivnímu enzymatickému reparačnímu systému dvouřetězcových zlomů DNA a ochraně enzymů komplexy Mn^{2+} .
- **Dimethylsulfid (DMS, CH_3SCH_3):** Těkavá organická sloučenina síry produkovaná na Zemi mořským fytoplanktonem. Považována za potenciální specifickou atmosférickou biosignaturu v exoplanetárních atmosférách.
- **Dopplerovská spektroskopie:** Metoda detekce exoplanet založená na měření periodického vlnového posuvu absorpčních spektrálních čar mateřské hvězdy v důsledku jejího radiálního pohybu vůči těžišti soustavy.
- **Drakeova rovnice:** Pravděpodobnostní rovnice zformulovaná Frankem Drakeem (1961) odhadující počet komunikujících technologických civilizací v naší Galaxii jako součin sedmi astronomických, biologických a sociologických faktorů.
- **Dysonova sféra:** Hypotetická astroinženýrská megastruktura obklopující mateřskou hvězdu za účelem zachycení veškerého jejího zářivého výkonu. V infračerveném oboru se projevuje anomálním tepelným přebytkem (technosignatura II. stupně Kardašovovy škály).

E

- **Eddy difúze (K_{zz}):** Parametrizace vertikálního turbulentního promíchávání v jednorozměrných modelech planetárních atmosfér. Určuje transportní časovou škálu $\tau_{\text{dyn}} \approx H^2 / K_{zz}$ a hladinu chemického uhašení reakcí.
- **Einsteinův poloměr (θ_E, R_E):** Úhlový nebo fyzikální poloměr prstence, který vytvoří bodová gravitační čočka při dokonalém osovém vyrovnaní se vzdáleným zářivým zdrojem. Definuje charakteristické měřítko a optickou hloubku mikročočkových událostí.
- **Emisní spektroskopie:** Metoda zkoumání vlastního tepelného vyzařování planety měřením poklesu toku během sekundárního zákrytu nebo modulací světla podél oběžné fázové křivky.
- **Enceladus:** Ledový měsíc Saturnu hostící pod ledovým příkrovem globální oceán kapalné vody s aktivními hydrotermálními proudy serpentinizace chrlícími gejzíry vody, solí, vodíku a organických látek do prostoru.
- **ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations):** Ultra-stabilní echelle spektrograf s vláknovým vstupem instalovaný na observatoři ESO VLT na Paranal. Dosahuje přesnosti měření radiálních rychlostí v řádu $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ díky kalibraci laserovým frekvenčním hřebem.
- **Extrémní adaptivní optika (XAO):** Optický systém korigující atmosférické fázové vlnoplochové deformace s vysokou frekvencí (přes 2–3 kHz) a tisíci aktuátory. Umožňuje dosáhnout Strehlova poměru přes 90 % v blízkém infračerveném oboru nezbytného pro přímé koronagrafičké zobrazení.

F

- **Fázová křivka:** Světelná křivka monitorující proměnu celkového toku planetární soustavy během celé oběžné periody. Odhaluje longitudinální profil povrchových teplot, účinnost přenosu tepla a albedo.
- **Fermiho paradox:** Zdánlivý rozpor mezi vysokou statistickou pravděpodobností existence mimozemských civilizací v Galaxii a naprostou absencí jakýchkoliv empirických důkazů jejich přítomnosti či mezihvězdné komunikace ("Kde všichni jsou?").
- **Fotochemický opar (tholin):** Komplexní polymerní uhlovodíkové a dusíkaté refrakterní částice vznikající ve vysokých vrstvách atmosfér UV fotolýzou metanu a molekulárního dusíku. Způsobuje zploštění transmisních spekter.
- **Fotoevaporace (hydrodynamický únik):** Tepelný únik atmosférických plynů poháněný absorpcí extrémního ultrafialového a rentgenového záření (XUV) mateřské hvězdy v horní termosféře planety.

G

- **Gamowovo okno:** Úzký energetický interval, v němž nastávají termonukleární reakce v hvězdných jádrech v důsledku kompromisu mezi klesající Maxwellovou-Boltzmannovou distribucí rychlostí jader a rostoucí pravděpodobností kvantového provrtání Coulombovské bariéry.
- **Geometrické albedo (A_g):** Poměr toku rozptýleného planetou přímo k pozorovateli v nulovém fázovém úhlu vůči toku, který by odrazil ideální plochý Lambertův rozptylovač o stejném průřezu.

H

- **Habitable Worlds Observatory (HWO):** Plánovaná vlajková kosmická observatoř NASA pro 40. léta 21. století. Půjde o 6m optický teleskop s koronagrafem schopným dosáhnout kontrastu 10^{-10} a přímo spektroskopicky charakterizovat biosignatury u desítek analogů Země.
- **HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher):** Spektrograf instalovaný na 3,6m dalekohledu ESO na La Silla v Chile. Nastavil světový standard pro měření radiálních rychlostí s přesností pod $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- **Hloubka tranzitu (δ):** Relativní pokles zdánlivé jasnosti hvězdy během geometrického středu primárního tranzitu. Pro homogenní disk odpovídá poměru ploch $\delta \approx (R_p/R_*)^2$.
- **Horký jupiter (Hot Jupiter):** Třída plyných obřích planet o hmotnostech srovnatelných s Jupiterem obíhající na extrémně těsných drahách ($a < 0,1 \text{ AU}$) s periodami pod 10 dní a rovnovážnými teplotami fotosféry přesahujícími 1000 K.
- **Hotspot offset:** Úhlové posunutí nejteplejší oblasti v atmosféře synchronně rotující exoplanety směrem na východ od substelárního bodu. Je způsobeno advekci tepla v nadzvukovém ekvatoriálním superrotujícím tryskovém proudění.
- **Hustotní údolí (Radius valley / Fulton gap):** Statistický pokles v četnosti výskytu exoplanet s poloměry kolem $1,7\text{--}2,0 R_{\oplus}$ oddělující kamenné superzemě zbavené atmosféry od plyných sub-neptunů.
- **Hyceaná planeta (Hycean world):** Hypotetická třída obyvatelných planet disponujících hlubokým oceánem kapalné vody pod masivní atmosférou bohatou na molekulární vodík H_2 .

I

- **Impaktní parametr (b):** Bezrozměrná projekční vzdálenost mezi středem disku mateřské hvězdy a středem planety v okamžiku středu primárního tranzitu, vyjádřená v jednotkách poloměru hvězdy ($b = \frac{a}{R_*} \cos i$).
- **Izotermální atmosféra:** Zjednodušený atmosférický model předpokládající konstantní teplotu v celém vertikálním profilu, což vede k přísně exponenciálnímu poklesu tlaku s výškou $P(z) = P_0 \exp(-z/H)$.

J

- **James Webb Space Telescope (JWST):** Kosmická observatoř NASA/ESA/CSA operující v bodě L2 od roku 2022. Segmentové zrcadlo o průměru 6,5 m a infračervené přístroje (NIRSpec, MIRI, NIRCam, NIRISS) přinesly průlom v transmisní a emisní spektroskopii exoplanetárních atmosfér.

K

- **Kastingův model:** Referenční jednorozměrný radiativně–konvektivní klimatický model vymezující vnitřní a vnější hranice cirkumstelární obyvatelné zóny na základě mezí runaway greenhouse, moist greenhouse a maximálního skleníkového efektu CO_2 .
- **Kaustika:** Množina singulárních bodů na rovině zdroje gravitační čočky, kde je teoretické zvětšení bodového zdroje nekonečné. Přechod zdroje přes kaustiku vyvolává v mikročočkových křivkách ostré fotometrické záblesky detekující přítomnost planet.
- **Kepler (kosmická mise):** Kosmický teleskop NASA vypuštěný v roce 2009. Během 9 let provozu objevil více než 2 700 potvrzených exoplanet a prokázal, že superzemě a sub–neptuny jsou nejpočetnějším typem planet v Galaxii.
- **Kryptobióza:** Stav reverzibilního metabolického pozastavení u extrémofilních organismů (např. želvušek) vyvolaný vysušením (anhydrobióza), mrazem (kryobióza) či osmotickým šokem, umožňující přežití v extrémních podmínkách vakua a radiace.

L

- **Laserový frekvenční hřeben (Laser Frequency Comb, LFC):** Vysoce stabilní optický kalibrační zdroj generující desetitisíce spektrálních čar s frekvencemi přesně navázanými na atomové cesiové hodiny. Umožňuje kalibraci spektrografů s přesností na centimetry za sekundu.
- **Limb darkening (okrajové ztemnění disku):** Pokles intenzity záření hvězdného disku od středu k jeho okraji způsobený vertikálním poklesem teploty ve fotosféře hvězdy.
- **Lyotův koronagraf:** Optický systém odcloňující přímé světlo hvězdy pomocí ohniskové masky a následné clony (Lyot stop) v pupilové rovině, která eliminuje difraktované světlo na okrajích apertury.

M

- **Mandel–Agol model:** Přelomový analytický model (2002) počítající přesný tvar světelné křivky primárního tranzitu exoplanety přes disk hvězdy s lineárním, kvadratickým či nelineárním okrajovým ztemněním pomocí eliptických integrálů.
- **Metalicita ($[\text{Fe}/\text{H}]$):** Logaritmický poměr zastoupení těžších prvků vůči vodíku ve srovnání se Sluncem. Hvězdy s vyšší metalicitou mají statisticky dramaticky vyšší pravděpodobnost zformování obíhých plyných planet.
- **Mikročočka (gravitační):** Relativistický jev přechodného zjasnění vzdáleného zářivého zdroje vyvolaný ohybem světla v gravitačním poli bližší hvězdy a její obíhající planety.

N

- **Nancy Grace Roman Space Telescope:** Plánovaný 2,4m kosmický teleskop NASA (start ~2027) vybavený technickým demonstrátorem CGI (Coronagraph Instrument) schopným dosáhnout kontrastu 10^{-9} pro přímé zobrazení zralých plyných planet v odraženém světle.
- **Nekontrolovaný skleníkový efekt (Runaway Greenhouse):** Klimatická nestabilita nastávající, když dopadající sluneční tok překročí mez vyžarovací schopnosti nasycené vodní atmosféry (Simpsonův–Nakajimův limit $\sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), což vede k odpaření celého oceánu a roztavení povrchových hornin.

O

- **Okrajové ztemnění:** Viz *Limb darkening*.
- **Ozonová vrstva (O_3):** Stratosférická vrstva ozonu vznikající fotolýzou molekulárního kyslíku. V exoplanetární spektroskopii je ozon mimořádně citlivou biosignaturou díky silnému nelineární saturovanému pásu na $9,6 \mu\text{m}$.

P

- **Paczyňského křivka:** Teoretická symetrická světelná křivka fotometrického zvětšení bodového zdroje izolovanou bodovou gravitační čočkou.
- **PAR (Photosynthetically Active Radiation):** Spektrální pásmo záření v rozsahu $400\text{--}700 \text{ nm}$ využívané pozemskými fotosyntetickými organismy k syntéze glukózy a fotolýze vody.
- **PetitRADTRANS:** Specializovaný vědecký softwarový balíček v jazyce Python pro modelování radiačního transferu, syntézu transmisních a emisních spekter a retrieval parametrů atmosfér exoplanet.
- **PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars):** Kosmická mise ESA (plánovaný start 2026) vybavená 26 kamerami pro objev a přesnou charakterizaci terestrických planet velikosti Země v obyvatelných zónách hvězd slunečního typu pomocí tranzitů a asteroseismologie.
- **Poloměrové údolí:** Viz *Hustotní údolí*.
- **Proxima Centauri b:** Zemi nejbližší známá terestrická exoplaneta ($d = 1,3 \text{ pc}$, $M_p \sin i \approx 1,17 M_\oplus$) obíhající v obyvatelné zóně červeného trpaslíka Proxima Centauri s periodou 11,2 dne.

- **PyTransit:** Rychlý a optimalizovaný balíček v jazyce Python pro modelování světelných křivek exoplanetárních tranzitů s libovolnými zákony okrajového ztemnění.

R

- **Radiální rychlost (v_r):** Projekce prostorové rychlosti pohybu hvězdy do směru zorného paprsku pozorovatele. Měří se z Dopplerova posuvu spektrálních čar.
- **Rayleighův rozptyl:** Elastický rozptyl světla na částicích a molekulách plynu o rozměrech výrazně menších, než je vlnová délka záření ($d \ll \lambda$). Účinný průřez klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky ($\sigma \propto \lambda^{-4}$), což způsobuje záporný sklon transmisního spektra směrem k modrému oboru.
- **Red Edge (vegetační skok):** Prudký nárůst odrazivosti chlorofylové vegetace v pásmu 700–750 nm z $\sim 5\%$ na $> 50\%$. Funguje jako povrchová biosignatura terestrických planet.
- **Rogue planet (volně plující planeta):** Objekt planetární hmotnosti pohybující se mezihvězdným prostorem bez gravitační vazby k jakékoliv mateřské hvězdě. Vzniká dynamickým vymrštěním z rodné soustavy nebo samostatným kolapsem plynných mikrojader.
- **Rossiter–McLaughlinův jev:** Spektroskopická anomálie radiální rychlosti pozorovaná během primárního tranzitu, kdy planeta postupně zakrývá přibližující se (modře posunutý) a vzdalující se (červeně posunutý) okraj rotujícího disku hvězdy. Umožňuje změřit projektovaný úhel mezi rotační osou hvězdy a orbitální rovinou planety (spin-orbit misalignment).

S

- **Sekundární zákryt (okultace):** Okamžik horní konjunkce, kdy planeta prochází za diskem mateřské hvězdy. Změna toku během zákrytu umožňuje izolovat spektrum vlastního tepelného vyzařování denní strany planety.
- **Semi-amplituda radiální rychlosti (K):** Poloviční rozsah periodické změny radiální rychlosti hvězdy vyvolané obíhající planetou. Je přímo úměrná $M_p \sin i$ a nepřímo úměrná $M_*^{2/3}$ a $\sqrt{1 - e^2}$.
- **Simpsonův–Nakajimův limit:** Asymptotický horní limit infračerveného zářivého toku, který je schopna vyžáří do kosmického prostoru atmosféra nasycená vodní párou ($\sim 280\text{--}310 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Definuje nástup nekontrolovaného skleníkového efektu.
- **Sněžná čára (ice line):** Radiální vzdálenost od protohvězdy v akrečním protoplanetárním disku, za níž teplota klesá pod bod sublimace dané těkavé látky (H_2O při $\sim 160 \text{ K}$, CO_2 při $\sim 70 \text{ K}$, CO při $\sim 20 \text{ K}$), což vede k jejímu masivnímu vymrznutí do pevných ledových zrn.
- **Supererupce (Superflare):** Mohutná magnetická explozivní událost v koróně hvězdy uvolňující energie $E \sim 10^{26}\text{--}10^{29} \text{ J}$, doprovázená extrémními záblesky v XUV oboru a výrony koronální hmoty (CME), schopná erodovat ozonoféru a atmosféru blízkých planet.
- **Superrotace:** Atmosférický dynamický stav, kdy zonální (rovnoběžkové) větry v atmosféře planety vanou ve směru rotace s úhlovou rychlostí vyšší, než je úhlová rychlost samotné pevné planety. Typická pro horké jupitery a Venuši.
- **Superzemě:** Třída exoplanet o poloměrech $1,25 R_\oplus < R_p < 2 R_\oplus$ a hmotnostech $2 M_\oplus < M_p < 10 M_\oplus$ s převážně kamenným složením a vysokou hustotou.

T

- **Technosignatura:** Jakýkoliv spektrální, rádiový, optický či strukturní jev indikující přítomnost vyspělé technologické civilizace (např. syntetické freony CFC v atmosféře, rádiové úzkopásmové signály, laserové pulzy, Dysonovy megastruktury).
- **Teplota radiativní rovnováhy (T_{eq}):** Teoretická teplota povrchu planety vypočtená z rovnováhy mezi absorbovaným hvězdným tokem a vyzařovaným tepelným tokem černého tělesa.
- **TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite):** Kosmický teleskop NASA vypuštěný v roce 2018 provádějící celoooblohovou fotometrickou přehlídku jasných hvězd s cílem objevit tranzitující planety vhodné pro následnou spektroskopii.
- **Tholiny:** Viz *Fotochemický opar*.
- **Tidally locked (slapově vázaná rotace):** Stav, kdy je rotační perioda planety slapovými silami synchronizována s její oběžnou periodou ($P_{\text{rot}} = P_{\text{orb}}$), takže planeta nastavuje mateřské hvězdě trvale stejnou hemisféru (permanentní den a noc).
- **TRAPPIST-1:** Ultrakompaktní soustava sedmi terestrických planet velikosti Země obíhajících kolem velmi chladného červeného trpaslíka třídy M8 ve vzdálenosti 40 světelných let. Tři z planet leží v obyvatelné zóně.
- **Tranzitní fotometrie:** Metoda detekce exoplanet založená na měření periodického poklesu jasnosti hvězdy během průchodu planety před jejím diskem.
- **TTV (Transit Timing Variations):** Periodické či kvaziperiodické odchylky skutečných časů tranzitů od přísně lineární efemeridy vyvolané gravitačními poruchami od dalších planet v systému, zejména v rezonanci středních pohybů.

U

- **Uhašení reakce (Chemical quenching):** Zamrznutí chemických reakcí ve vyšších vrstvách atmosféry, kde je transportní doba vertikálního míchání kratší než doba chemické přeměny ($\tau_{\text{dyn}} < \tau_{\text{chem}}$), což vede k zachování vysoké koncentrace plynů (např. CO) odpovídající hlubším horkým vrstvám.
- **Uhlíčitano–křemičitanový cyklus:** Geochemický anorganický cyklus regulující množství oxidu uhličitého v atmosféře prostřednictvím chemického zvětvávání křemičitanů dešťovou vodou a sopečného odplyňování. Funguje jako globální planetární termostat stabilizující klima po miliardy let.

V

- **Velký filtr (The Great Filter):** Teoretický koncept Robina Hansona vysvětlující Fermiho paradox existencí mimořádně obtížné evoluční bariéry na cestě od prebiotické chemie k mezihvězdné civilizaci.
- **Vírový koronagraf (Vortex coronagraph):** Fázový koronagraf využívající masku s helikoidální fázovou rampou $e^{i\theta}$, která odklání přímé světlo hvězdy mimo pupilu teleskopu, zatímco světlo planety propouští.
- **Voigtův profil:** Profil spektrální absorpční čáry vznikající konvolucí Gaussova profilu (způsobeného Dopplerovským termálním pohybem atomů) a Lorentzova profilu (způsobeného přirozeným a srážkovým tlakovým rozšířením).

W

- **WASP-39b:** Horký saturn obíhající kolem hvězdy třídy G, na němž spektrografy teleskopu Jamese Webba (JWST) poprvé v historii detekovaly atmosférický CO_2 , fotochemicky produkovaný SO_2 a vodní páru.

X

- **XUV záření:** Souhrnné označení pro vysokoenergetické fotony v oblasti extrémního ultrafialového záření (EUV, 10–91 nm) a měkkého rentgenového záření (X-ray, 0,1–10 nm). Hraje klíčovou roli v ionizaci, ohřevu a hydrodynamickém úniku horních atmosfér exoplanet.

Ž

- **Želvušky (Tardigrada):** Kmen mikroskopických mnohobuněčných živočichů schopných vstoupit do stavu anhydrobiózy a kryptobiózy, v němž přežívají teploty od -272°C do $+150^\circ\text{C}$, hydrostatické tlaky až 6 GPa, vakuum kosmického prostoru a masivní dávky ionizujícího záření.