

51 Pegasi b a exoplanetární revoluce

Přednáška u příležitosti udělení Nobelovy ceny za fyziku za rok 2019

© The Nobel Foundation 2019

Didier Queloz

Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, Spojené království a Department of Astronomy, University of Geneva, Geneva 1207, Švýcarsko

I. Úvod

Také světy jsou nekonečné, ať se podobají tomu našemu, či se od něj liší.

Epikúros, 300 let před naším letopočtem [1, 2]

Vědecké experimenty, které vedou ke změně paradigmatu, jsou vzácné a neočekávané. Jde o úhrnný výsledek těžké práce, příležitosti, připravenosti a přispěvků mnoha lidí. S trochou štěstí hrají všechny tyto elementy v harmonii a konvergují k výjimečnému okamžiku, kdy poznání udělá krok vpřed. Nakonec však jen malý počet klíčových přispěvatelů dostane šanci být odměněn za výsledky, které zahrnují přispěvky a nápady mnoha dalších. Ke všem těmto lidem se cítím jako dlužník. Zvláště rád bych vyjádřil svoji hlubokou vděčnost všem inženýrům, technikům a spolupracovníkům Observatoře v Haute-Provence (*Observatoire de Haute-Provence – OHP*) a Ženevské observatoře, kteří přispěli ke konstrukci a provozu spektrografu ELODIE a teleskopu o průměru zrcadla 193 cm v OHP. Bez jejich profesionality a neutuchající motivace by objev první exoplanety a také můj příběh dopadly jinak.

Tento článek je věnován příběhu objevení objektu 51 Pegasi b, exoplanety, tj. planety obíhající kolem jiné hvězdy, než je naše Slunce. Rozvedu hluboký dopad tohoto objevu na naše obecné znalosti a na porozumění tvorbě planet, a také vysvětlím, proč jde o klíčový moment pro vznik nového výzkumného oboru astrofyziky



Didier Queloz při své nobelovské přednášce v sále Aula Magna na Stockholmské univerzitě 8. prosince 2019.

© Nobel Media AB. Foto: A. Mahmoud

a současně i impozantní popud k nastartování výzkumu života ve vesmíru.

II. Přesná dopplerovská spektroskopie

Na existenci obíhající planety můžeme usoudit z pozorování reflexního pohybu její mateřské hvězdy. Orbitální trajektorii hostitelské hvězdy kolem těžiště systému hvězdy a jejích planet můžeme detekovat buď prostřednictvím její astrometrické orbity, nebo z periodických změn radiální rychlosti. Když je geometrie orbitální roviny planety náhodou taková, že spojnice mezi pozorovatelem a planetou a hvězdou prochází dráhou planety, dochází k tranzitům. Jakákoli z těchto „nepřímých“ metod může být považována za detekci planety jako alternativa k „přímému“ pozorování, při kterém bychom prostorově rozlišili planetu od její hvězdy (což je stále ještě impozantní technickou výzvou).

Ve 20. století se objevila různá oznámení o objevu exoplanet astrometrickou metodou, která však byla později vyvrácena na základě nových dat [3]. Po celé půlstoletí byla astrometrie považována v podstatě za jedinou metodu, která by mohla objevit obří planetu v konfiguraci podobné Jupiteru. Nikdo reálně neuvažoval o pátrání po planetách měřením radiálních rychlostí hvězd. Měli k tomu dobré důvody. Obří planeta obíhající ve vzdálenosti několika astronomických jednotek od hvězdy by měnila radiální rychlost své mateřské hvězdy řádově o desítky $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Detekce změny takového řádu s tehdy dostupnou technikou byla pouhou utopickou představou.

V roce 1952 publikoval Struve [4] překvapující vizionářskou poznámku, v níž se zmiňoval o využití „*vysoce přesného měření radiální rychlosti*“ k pátrání po planetách „*mnohem blíže k jejich mateřským hvězdám, než je tomu ve Sluneční soustavě*“. Tato myšlenka daleko předběhla svoji dobu, dokud celá řada inovací výrazně neredukovala nejistoty v měření radiálních rychlostí. Až do následující dekády tehdy nikdo vážně neuvažoval o pátrání po planetách pomocí dopplerovské spektroskopie.

Griffinova úspěšná implementace technik porovnání spekter v roce 1967 [5], následovaná o několik let později publikací „O možnosti určení radiálních rychlostí hvězd s přesností $0,01 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ “ [6], změnila per-



Didier Queloz
© Nobel Media.
Foto: A. Mahmoud

Nobelova cena
za fyziku 2019





Obr. 1 Spektrograf ELODIE na observatoři OHP. Na levé straně je difrakční mřížka typu échelle. Optická vlákna (červená) přivádí signál do spektrometru. Nahoře je kryostat, v němž je umístěn CCD detektor. Optika se zkříženou disperzí je umístěna ve střední vertikální černé části.

spektivu. Otevřela tak realistický pohled na dosažení požadovaného výkonu k případné detekci planet pomocí přesné dopplerovské spektroskopie.

Campbell a Walker předvedli první úspěšnou implementaci idejí navrhovaných Griffinem & Griffinem [6], referenční zdroj spektroskopické čáry, superponovaný na optickou dráhu světla hvězdy s použitím absorpční komůrky umístěné na vstupu do spektrografu a naplněné plynným fluoridem vodíku (HF) [7]. Přes bezpečnostní rizika a úskalí spojená s používáním této techniky provedli během 12 let první průzkum a pátrání po „substelárních souputnicích hvězd solárního typu“ s využitím přesných dopplerovských měření [8, 9]. Použití plynové komůrky jako referenční ke stanovení přesných radiálních rychlostí později zdokonalili Marcy a Butler, kteří nahradili metrovou komůrkou se smrtelně nebezpečným a korozivním HF kompaktnější komůrkou plněnou parami jodu (I_2) [10]. Snadnost a flexibilita, jakou nabízela komůrka s I_2 , by otevřela možnosti pro jakýkoli existující spektrograf s vysokým rozlišením k přesnému měření radiálních rychlostí, tedy i k pátrání po planetách. Zdánlivá jednoduchost tohoto technického řešení však stála před obtížnou výzvou netriviální analýzy dat, související s hustým a komplikovaným „lesem“ spekter molekulárních přechodů v I_2 [11].

Alternativou k autokalibrační metodě s plynovou komůrkou bylo použití stabilního a přesného spektrografu. V roce 1990 uvažoval Brown o kompromisech nutných k optimalizaci koncepce takového přístroje [12]. Použití spektrografu typu échelle je podstatné k získání spekter o vysokém rozlišení a širokém oboru vlnových délek při stejné expozici. Tyto dvě charakteristiky nám umožnily pozorovat dostatečný počet spektrálních čar k přesnému výpočtu radiálních rychlostí z Dopplerova jevu pomocí korelační metody (*cross correlation*) s vhodným filtrem (numerickou korelační maskou) [13] a dosáhnout hodnoty $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, uvážme-li realistické sekvence pozorování s existujícími teleskopy [14].

V devadesátých letech byla podle této koncepce úspěšně vyvinuta jen hrstka přístrojů, která splňovala svůj účel: dosáhnout vysoké přesnosti v měření radiálních rychlostí. Ty úspěšné [15, 16, 17] jsou v podstatě

postaveny na podobných koncepcích. Optika je upevněná na pevné optické lavici umístěné ve stabilním prostředí daleko od všech ostatních teleskopů a izolovaná od zdrojů veškerého mechanického, tepelného a akustického rušení. K osvětlení vstupní štěrbině spektrografů obrazem získaným teleskopem se používají multimódová vlákna, zatímco další vlákno sleduje přístroj a variace indexu lomu vzduchu ve spektrografu. Kromě toho, že je přístroj umístěn daleko od rušivého okolí teleskopu, má „injekce“ obrazu optickým vláknem podstatnou (intrinsickou) vlastnost, že promíchá distribuci intenzity obrazu z teleskopu, čímž vznikne na vstupní štěrbině víceméně rovnoměrně osvětlený disk, v němž je téměř úplně potlačen vliv chodu dalekohledu a efektu „seeing“ [18].

ELODIE

Spektrograf ELODIE (viz obr. 1) zahájil vědecká pozorování v roce 1994 na teleskopu o průměru 193 cm na Observatoři Haute-Provence (OHP). Jeho stavba začala v roce 1989 jako spolupráce mezi observatoří OHP a astronomickým oddělením univerzity v Ženevě. Jeho hlavním účelem bylo nabídnout novou, moderní možnost pozorování zejména při světlé obloze (kdy je viditelný Měsíc), zatímco v téže době bylo postaveno „dvojče“ (CORALIE), které mělo být později umístěno na švýcarském teleskopu o průměru 1,2 m observatoře La Silla (ESO) v Chile [19].

Spektrograf byl navržen k přesným měřením metodou dopplerovské spektroskopie. Optická koncepce byla dána požadavkem na kompaktní, stabilní přístroj a na maximální využití celé dostupné plochy (1024×1024 pixelů) CCD detektoru E2V k získání spekter s nejvyšším možným rozlišením v celém rozsahu viditelného spektra – od 390 nm do 681 nm. To bylo umožněno použitím velké stupňovité difrakční mřížky typu échelle, vyrobené firmou Milton and Roy. Ke zvýšení stability osvětlení mřížky byl na vstupu do optického vlákna použit dvojitý *scrambler*. Navíc byla ELODIE vybavena softwarem pro zpracování dat (*pipeline*) redukujícím data tak, aby krátce po pozorování již byla k dispozici radiální rychlost prostřednictvím numerické korelační metody [16].

Vývoj numerických metod k automatické redukci dat, které by rutinně poskytovaly vysoce přesné radiální rychlosti, byl v té době náročný úkol, jehož řešení bylo možné pouze s využitím velké paměti RAM a rychlosti tehdy nové výpočetní minitanice SPARC od firmy Sun Microsystems. Spektrální informace z ELODIE, zaznamenaná na CCD, je distribuována přes 67 zakřivených



Didier Queloz v den oznámení Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2019. Foto: Nick Saffell

vených a překrývajících se řádů. Tato složitá struktura dat ve spektru difrakční mřížky přináší nejednu výzvu pro algoritmus softwaru. Kupříkladu rozlišení spektroskopického prvku bylo pouhých $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, tisíckrát větší než dopplerovská přesnost, o jakou jsme usilovali. Na základě inspirace implementací Griffinova fotometrického velocimetru a spektrometru CORAVEL [20] byly vyvinuty softwarové algoritmy založené na přizpůsobených filtrech (korelačních maskách). To umožnilo optimálně zkombinovat veškerou dopplerovskou informaci obsaženou ve spektrech. Užití referenčního vlákna osvětleného thoriovou lampou během expozice spektra hvězdy umožnilo získat referenční spektra, která pak software využil ke korekci mechanických fluktuací a změn indexu lomu vzduchu ve spektrografu (viz obr. 2). Implementace „simultánní reference“ byla jedním z nejcitlivějších triků analýzy dat k dosažení vysoké přesnosti měření radiálních rychlostí. Konstrukce spektrografu ELODIE a vývoj softwaru úspěšně implementovaly celou řadu nových koncepcí, které se staly standardem pro následující generace stabilních spektrografů umožňujících další zdokonalení přesnosti [21, 22, 23].

III. Planeta, která neměla existovat

51 Pegasi

V létě 1994, když byla ELODIE sotva provozuschopná, jsme začali s průzkumem. Naším záměrem bylo zjistit výskyt planetárních souputníků hvězd v sousedství Slunce. Nalezení obřích planet nebylo jediným cílem našeho průzkumu. Stojí za připomenutí, že v 90. letech bylo pátrání po hnědých trpaslících módním tématem výzkumu, který se rozšířil až do planetárního režimu [24, 25]. Navíc je třeba připomenout, že jsme potřebovali získat nějaký přesvědčivý a realistický případ po-



Obr. 2 Střední část hvězdného spektra zaznamenaného CCD detektorem ELODIE, spolu se spektrem thoria. Zakřivená posloupnost spektroskopických řádů spektru spolu s emisním spektrem thoriové lampy ozařující druhé optické vlákno.

zorování pro alokační komisi teleskopu kvůli získání přístupu k dalším pozorováním.

Původní cílový vzorek zahrnoval 142 hvězd typu F, G a K hlavní posloupnosti [26], zvolených proto, že se nejednalo o spektroskopické dvojhvězdy a nacházely se ve vzdálenosti asi 25 parseků (od Slunce), které – pokud nám bylo známo – nebyly dosud pozorovány v rámci žádného jiného vysoce přesného dopplerovského průzkumu. Naši strategií bylo začít se vzorkem podstatně větším, než byly ty dosud prozkoumané [8] a v nichž se nenalezli žádní planetární souputníci.

Na podzim 1994 mi Michel Mayor (můj školitel) do slova předal klíče od přístroje a odjel na šestiměsíční vědeckou „dovolenou“ (*sabbatical*) na Havaj. Byl jsem nadšen a vzrušen, že mi byl svěřen program pravidel-



Didier Queloz se skupinou SPECULOOS na Univerzitě v Cambridge. Fotografie byla pořízena méně než 15 min po telefonátu oznamujícím udělení ceny.

Foto: Peter Pihlmann Pedersen

ných pozorování na ELODII, kterou jsem tak trochu považoval za své „dítě“, což mi mimochodem umožnilo nasbírat více dat pro svoji doktorskou práci (Ph.D.), kterou jsem měl odevzdat v následujícím roce.

V původním vzorku přehlídky jsme předtím identifikovali 24 jasných hvězd rovnoměrně rozložených na obloze. Chtěli jsme pozorovat tuto podmnožinu trochu častěji než ostatní, aby nám posloužila jako validace přesnosti. Hvězda HD217014, známá jako 51 Peg, patřila do této skupiny. Každé dva měsíce jsme měli pozorovací období, které obvykle trvalo týden.

Sluší se říci, že v lednu 1995 byla moje první reakce poněkud panická, když jsem si uvědomil, že hvězda HD217014 vykazuje větší změny radiální rychlosti, než by vyplývalo pouze z přesnosti dopplerovských měření, jakou jsem z dostupných spektroskopických informací očekával. Myslel jsem si, že jde o nějakou chybu ve spektrografu nebo v analýze dat. Po dnech a nocích, které jsem s úzkostí strávil sám kontrolou všech součástí a možných chyb softwaru, jsem po získání dalších dat došel k jedinému možnému závěru, který by mohl kolísání rychlosti vysvětlit: kolem hvězdy 51 Peg obíhá planeta o hmotnosti Jupitera s periodou 4,25 dne, což odpovídá orbitální vzdálenosti 0,05 astronomické jednotky. Planeta je doslova „upečená“ a její atmosféra má teplotu 1 000 K. Když o tom zpětně přemýšlím, uvědomuji si, jaká to byla odvážná a pošetilá představa: privilegium nadšeného doktoranda.

Když jsem později Michelu Mayorovi hlásil, že jsem objevil planetu, nepřekvapivě reagoval s umírněným nadšením. Myslím si, že tomu nemohl uvěřit. To bylo celkem fér. Když jsme s pátráním začínali, pamatuji si stále, jak mi říkal, že bych neměl očekávat, že objevím nějakou planetu do své doktorské disertace. To bude trvat léta! Nakonec však svůj názor změnil, když dodatečná měření radiální rychlosti, provedená v červenci 1995, potvrdila moje původní efemeridy založené na předchozích pozorováních.

Léto 1995 jsme strávili psaním článku, který popisoval náš objev. Museli jsme překonat fantastickou výzvu, jak přesvědčit naše recenzenty – vždyť objevená planeta neměla žádnou obdobu ve Sluneční soustavě a neexistovala žádná teoretická podpora, která by konfiguraci horkého Jupitera vysvětlila. Navíc, ELODIE byla zbrusu novým hráčem bez jakýchkoliv demonstrování výsledků a obor byl historicky poznamenan

Nobelova cena
za fyziku 2019





Didier Queloz po obdržení Nobelovy ceny v Koncertním domě ve Stockholmu 10. prosince 2019. © Nobel Media.

Foto: Nanaka Adachi

řadou nesprávných úsudků a chyb v analýze dat. Malé změny v Dopplerově posuvu mohly být ostatně způsobeny efekty hvězdné fotosféry, což by naše data také vysvětlovalo. Byla to nemožná práce! V následujících letech jsme byli konfrontováni s vlnou skepse. Léta trvalo, než většina komunity přijala realitu horkého jupitera u hvězdy 51 Peg a modifikaci paradigmatu o univerzálnosti planetární architektury Sluneční soustavy.

Alternativa k planetární hypotéze

Nejsilnější námitky, kterým naše interpretace čelila, souvisely s faktem, že měření změn radiální rychlosti z hvězdných spekter nemusejí vždy implikovat, že pohyb hvězdy je ovlivněn obíhající planetou. Konvektivní transport tepla v hvězdách slunečního typu je nesen asi milionem plynových buněk, pohybujících se typickou vertikální rychlostí řádu kilometrů za sekundu. Výsledný viditelný efekt na povrchu hvězdy je popisován jako „granulace fotosféry“. Magnetické pole je generováno prostým pohybem konvektivního mechanismu prostřednictvím procesu alfa-dynama, který vytváří na fotosféře aktivní oblasti, jež mohou vykazovat tmavé body v místech, kde vznikají silné magnetické siločáry. Trubice magnetického toku vznikají a zanikají na časových škálách typicky srovnatelných s periodou rotace hvězdy a dlouhodobé magnetické cykly modifikují konvektivní schémata. Výsledkem kombinace všech těchto procesů jsou spektrální čáry různého tvaru, s periodickými a pseudoperiodickými vzory. V praxi, při měření radiálních rychlostí, je poměrně snadné pozorovat variace produkované kombinací všech těchto efektů, zejména je-li hvězda mladá a aktivní [27].

V článku popisujícím náš objev [28] jsme pečlivě posoudili všechny možné cesty vzniku pozorovaných změn radiální rychlosti vlivem efektů hvězdné atmosféry. Hledali jsme záznamy změn fotometrické amplitudy, které svědčí o mladé a rychle rotující hvězdě. Použili jsme vlastností korelační funkce k pátrání

po změnách profilu dráhy hvězdy. Jasně jsme vyloučili všechny alternativní možnosti vlivu hvězdné atmosféry, avšak představa planety jako „horkého jupitera“ byla natolik ošemetná, že byla jen těžko přijatelná. Hlavním problémem bylo, že bez zásadní úpravy nezapadala do žádného paradigmatu tvorby planet. Změna dobře etablované teorie je zřídka prvním nápadem, o jakém uvažuje fyzik snažící se vysvětlit neobvyklý experimentální výsledek. A přesto bude třeba základy teorie vzniku planet revidovat.

Náročné formování planet

Proces tvorby planet je založen na akrečním mechanismu jader v disku. Základním principem je řada kroků, při nichž planeta postupně narůstá akrecí dostupného materiálu v disku. V počátečních stádiích v protoplanetárním disku převládá plyný vodík a plyné helium. Disk také obsahuje malé množství pevných částic. Blíže k hvězdě nacházíme ve vnější části žáravzdorný prach. Ve vnější části disku – „za čarou sněhu“ [29] – je zmrzlý led, pocházející z fázového přechodu molekulárních plynů do pevné fáze (H_2O , CO , CO_2 , CH_4 ...).

Pevné materiály v disku se rychle, dynamicky oddělí od plynu a usadí se ve střední rovině disku, kde se navzájem spojují dohromady. Výsledkem je roj planetárních zárodků (planetesimály), které vzájemnými srážkami narůstají, až nakonec vniknou planetární embrya [30]. Akrecí zbylého plynu v disku pak z těchto embryí dojde ke tvorbě velkých planet [31]. Výsledek závisí na dvou konkurujících si procesech: na disperzi plynového disku na jedné straně a na straně druhé na tvorbě masivního jádra, dostatečně velkého, aby mohlo dojít k účinné akreci veškerého zbylého plynu v okolí.

Skutečnost, že 90 % hmoty Jupitera tvoří H a He , znamená, že jádro planety se zformovalo dostatečně rychle, aby došlo k akreci významného objemu plynu, než by se rozptýlil. Takové příznivé načasování vyžaduje vysokou povrchovou hustotu přítomných planetárních zárodků (tzv. planetesimál) v době, kdy je v okolí ještě plyn. K tomu dochází pouze ve vnějších částech disku, ve vzdálenosti několika astronomických jednotek [32]. Aby teorie vzniku planet mohla vysvětlit přítomnost gigantických planet v blízkosti hvězdy, musíme vzít v úvahu silnou a účinnou dynamickou interakci s diskem (migrace) a jinými masivními tělesy v systému, která změni počáteční orbitální konfiguraci [33]. Badatelé pracující na modelech vzniku a tvorby planet o tomto aspektu nikdy vážně neuvažovali, ačkoli byl explicitně zmíněn a vypočten již patnáct let předtím [34]. Předpověď z Goldreichova a Tremaino-



Didier Queloz přebírá Nobelovu cenu z rukou švédského krále Carla XVI Gustafa v Koncertním sále dne 10. prosince 2019. © Nobel Media. Foto: Alexander Mahmo

va článku z osmdesátých let se znovu vynořila v době, kdy byl publikován první model migrace [35], krátce po oznámení objevu 51 Peg b.

IV. Žeň exoplanet

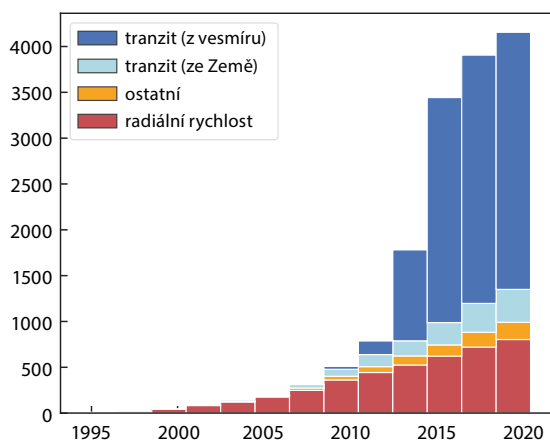
Obhajobu své doktorské disertace jsem zakončil prorockým výrokem, že objev 51 Peg b byl jen vrcholem ledovce a že bude brzy nalezeno více planet tohoto typu. Nemohl jsem prostě věřit, že jsme měli výjimečné štěstí a detekovali nějakou extrémně vzácnou planetární konfiguraci. Nemusel jsem dlouho čekat, než se ukázalo, že jsem měl pravdu.

A zde přichází tranzit

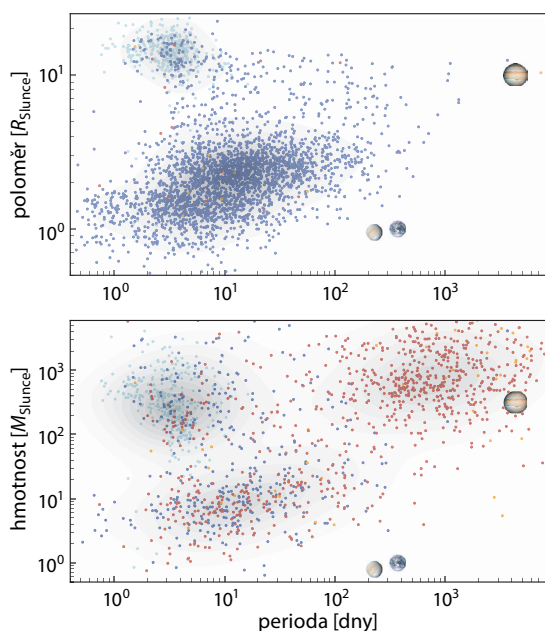
Několik měsíců po publikaci objevu 51 Peg b byly oznámeny dvě další exoplanety, detekované technikou radiální rychlosti [36, 37]. Tři roky poté bylo nalezeno osm planet, všechny s hmotností řádu gigantických planet a tři planety typu horkého Jupitera [38]. Pak se koncem roku 1999 objevil nový „horký jupiter“ obíhající kolem hvězdy HD 209458 a šťastnou náhodou přecházel před hvězdou. Tento výsledek, založený na shodné interpretaci dvou nezávislých metod, měl poslední slovo a smetl se stolu jakékoli zbylé výhrady týkající se reality objevů exoplanet [39, 40].

Když si komunita uvědomila, že „horkí jupiterové“ skutečně existují, byli jsme svědky rozkvětu specializovaných pátrání po přechodech [41]. Exoplaneta typu horkého Jupitera je 10× menší než naše Slunce a má desetiprocentní šanci být spatřena v orbitální konfiguraci v zákrytu se svojí hostitelskou hvězdou, což představuje dobrý terč pro hledání tranzitu metodou pozemní diferenciální fotometrie. Metoda tranzitu nám poskytuje alternativu k hledání planet pomocí dopplerovské spektroskopie. Umožňuje nám stanovit velikost planety místo její hmotnosti.

V roce 2006 bylo zahájeno první pátrání po exoplanetách z vesmíru. Byl vypuštěn satelit COROT, který nám v krátké době přinesl svědectví o první kamené exoplanetě COROT-7b [43, 44]. Mise *Kepler*, která odstartovala o tři roky později, nakonec dodala celou řadu objevů malých multiplanetárních systémů [45]. Za necelé desetiletí se aktivita „lovů na planety“ proměnila od opakovaných neúspěchů v exoplanetární zlatou horečku, zahrnující rozsáhlá pátrání a vesmírné mise řízení velkými mezinárodními konsorciemi. Výsledkem této rychlé expanze možností byl spektakulární



Obr. 3 Kumulativní histogram časové posloupnosti objevů exoplanet [42] rozdělených podle detekčních technik. Působivý nárůst detekce zákrytů ve vesmíru pochází od mise *Kepler* (modrá barva).



Obr. 4 Měřené hmotnosti, poloměry a orbitální periody všech známých exoplanet [42]. Barvou jsou odlišeny techniky použité k detekci (stejně jako na obr. 3). Pro měření dopplerovskou spektroskopií je použit vztah $\sin i = 1$. Pro srovnání je v grafu naznačeno umístění Jupitera, Země a Venuše. Šedou barvou jsou na těchto diagramech vyznačeny „klastry podobných exoplanet“.

nárůst detekce exoplanet (viz obr. 3), který „nadzdvihl závoj“ nad mimořádně rozmanitou říší exoplanet.

Změna perspektivy

Objev exoplanety 51 Peg b okamžitě nastroval nové pole výzkumu současné astrofyziky. Zapůsobil jako stimul vývoje nových přístrojů a pozorovacích možností. O čtvrt století později pak kombinace průzkumů pomocí přesné dopplerovské spektroskopie, kosmických misí pátrajících po tranzitech a pozemní přehlídky oblohy s širokým zorným polem zcela změnila náš pohled na architekturu a vlastnosti planetárních systémů ve vesmíru. Dozvěděli jsme se, že naše Sluneční soustava zdaleka není normou. Bohatství diverzity pozorované ve strukturách exoplanet a orbitálních konfigurací (obr. 4) s naší Sluneční soustavou překvapivě kontrastuje.

Metody zákrytové a přesná dopplerovská spektroskopie favorizují detekci exoplanet s krátkými orbitálními periodami. Významný počet planet obíhajících blízko své hvězdy, tak nepříjemný pro teorii tvorby planet, se z hlediska jejich detekce ironicky jeví jako šťastná situace. Je úchvatné si představit, že by obr. 4 vykazoval jen několik málo změřených bodů, pokud by normou byla Sluneční soustava. Zájem a spektakulární nárůst zainteresované komunity by nebyl takový, jaký vidíme dnes.

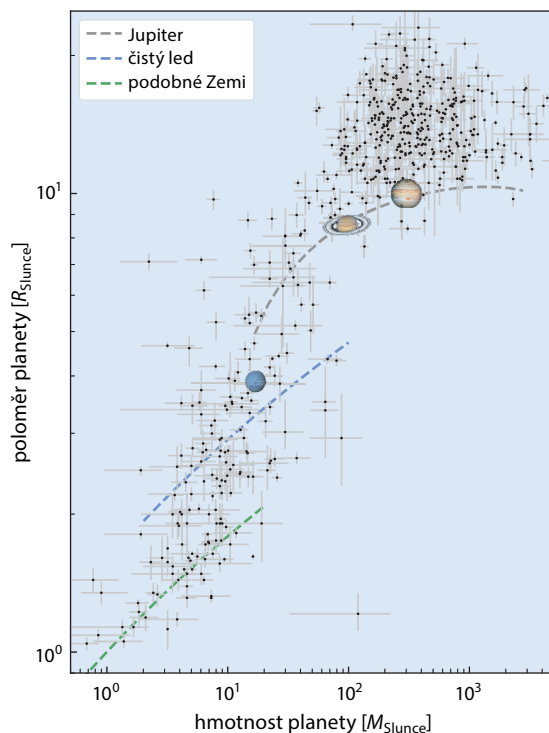
Exoplanety s charakteristikami srovnatelnými s planetami naší Sluneční soustavy jsou mnohem obtížnější detekovatelné než většina dosud objevených. To vysvětluje nedostatek dvojčat Země (tzv. *Goldilocks*)¹

¹ Pozn. rec. a red.: Tímto termínem je myšlena dívka z pohádky o třech medvědech, která se v angličtině jmenuje Goldilocks (Zlatovláska), ovšem v češtině je to Máša. V pohádce si holčička vybírá ze tří možností v sadě misek, postelí atd., přičemž vylučuje extrémy – vybírá si přesně to, co nejlépe vyhovuje: ne moc horké, ne moc studené, ne moc velké, ne moc malé. V analogii s pohádkou se planetám v obyvatelné zóně říká Goldilocks.

» Metoda tranzitu nám poskytuje alternativu k hledání planet pomocí dopplerovské spektroskopie. Umožňuje nám stanovit velikost planety. «

Nobelova cena
za fyziku 2019





Obr. 5 Všechny známé exoplanety [42] s měřením jejich hmotnosti a poloměru. Čárkované křivky naznačují model objemové hustoty pro tři různá složení. Pro srovnání je v grafu vyznačeno umístění Jupitera, Saturnu a Neptuna.

v současných nálezech. Ve srovnání s planetami typu Země jsou planety typu Jupiterova dvojčete snadnější a v dosahu dopplerovských průzkumů. Stále je však zapotřebí dlouhých sérií měření a značného množství pozorovacího času. V blízké budoucnosti, po spuštění mise *Gaia*, bude finální katalog pravděpodobně obsahovat více dat v oblasti hmotností a period podobných Jupiteru [46, 47].

Měření poloměru planety metodou tranzitu je účinné v případech krátké orbitální periody. Pro exoplanety s dlouhou periodou je pravděpodobnost nalezení správného geometrického směru pohledu tak zanedbatelně nízká, že to již není praktické. Toto omezení je zřetelně viditelné na obr. 4, jako nedostatek počtu měření poloměrů pro exoplanety s orbitálními periodami typicky delšími než 100 dní.

Na obr. 4 jsou vidět tři jasné odlišené skupiny exoplanet. Populace „horkých jupiterů“ je skupina obřích planet s krátkou periodou (kratší než 10 dní), jejímž ukázkovým členem je 51 Peg b. Na chladnější konci, dále od středu, nacházíme „klasické“ velké planety typu našeho Jupitera. Dále vidíme shluk menších exoplanet (většinou na krátkých orbitech) kompaktních systémů, neformálně nazývaných *superzemě* nebo *minineptun*. Tato skupina planet je směsicí všeho, co patří do oblasti definované z jedné strany fyzikálními charakteristikami Země a z druhé strany Neptunem.

Detailní statistická analýza výskytu jednotlivých skupin exoplanet je netriviálním problémem. Zdánlivý počet objevů nemůže být jednoduše transformován ve výskyt každého z typů exoplanet u zkoumaných hvězd. Technická omezení možností jejich detekce a rozdílnost citlivosti každé z přehlídek je třeba pečlivě vzít v úvahu, aby byl výsledek dostatečně robustní [48]. Planety typu horkého Jupitera, snadno detekovatelné oběma metodami, ve skutečnosti nejsou nejčetnějšími

objevenými objekty, obíhající cizí hvězdy. Jejich průměrný výskyt činí 1 % a vykazuje tendenci častějšího výskytu, je-li metalicita jejich hostitelské hvězdy vyšší [49]. Výskyt chladných jupiterů mezi analogy Jupitera je přibližně 10 % [48]. Vezmeme-li v úvahu širší definici, zahrnující všechny planety hmotnější než Jupiter až do hmotností $20 M_J$, vzroste jejich výskyt téměř na 50 %. Povšimněte si, že tato velká skupina exoplanet se zřetelně liší od ostatních planet naší Sluneční soustavy širokým rozsahem orbitálních excentricit. Planetační konfigurace odpovídající skupině superzemě a minineptuna se zdá být nejběžnější konfigurací v naší galaxii. Odtud odvodíme, že průměrný výskyt planet s orbitální periodou kratší než 100 dní činí přibližně 60 % na jednu hvězdu [50]. Objev tak masivní populace planet s krátkými periodami je výzvou pro teorii vzniku planet. Chápeme to jako nezdar popisu dynamických jevů, k nimž při tvorbě planet dochází [51]. Naznačuje to také poněkud podivuhodnou možnost, že by konfigurace naší Sluneční soustavy mohla být mnohem méně běžná, než se očekávalo.

Počátky exoplanetární vědy

Bohatý nález exoplanet odhalil nejen rozmanitost orbitálních konfigurací planet, ale také velké množství různých fyzikálních struktur. Kombinace měření tranzitů a přesné dopplerovské spektroskopie nám dovoluje měřit objemovou hustotu exoplanet a tak „nahlédnout“ do struktury jejich vnitřku. Graf měření hmotností a poloměrů na obr. 5 zahrnuje všechny planety, pro něž byly tyto dva fyzikální parametry měřeny, spolu s překrytou vypočtenou hustotou pro různé planetační vnitřky [52].

Vypočtená hustota planet, u nichž dominuje složení vodík–helium, platné v případě Jupitera, leží na nižším okraji hodnot hustoty u pozorovaných gigantských exoplanet. Skutečnost, že většina měření obřích planet znázorněná na tomto grafu ukazuje na hustoty nižší, než je Jupiterova, je důsledkem výběrového jevu, který upřednostňuje detekce krátkoperiodických exoplanet, a skutečnosti, že průměry planet typu horkého Jupitera jsou nafouknuté [53]. U některých exoplanet byla nalezena hustota sotva 10 % hustoty Jupitera [54]. Fyzikální mechanismy jejich „nafouklé“ povahy mohou být důsledkem kombinace různých jevů, souvisejících s blízkostí jejich hostitelské hvězdy a s procesy jejich vzniku [55].

V případě exoplanet s hmotností menší než Saturn vykazuje vypočtená objemová hustota pro jakýkoliv rozsah velkou disperzi, ukazující na smíšenou vnitřní strukturu planety. Některé exoplanety mají objemovou hustotu, kterou můžeme chápat jako redukovanou extrapolaci vnitřku Jupitera. Ostatní, s větší hustotou, mohou být modelovány snížením obsahu H a He na 10 % a zvýšením množství „těžkých prvků“ (např. H_2O , NH_3 , CO_2 , ...) ve vnitřku planet, jako tomu je např. v Uranu a Neptunu. Pokračujeme-li dále k planetám s hmotnostmi menšími než Saturn, nalezneme exoplanety s objemovou hustotou příliš vysokou, než by odpovídalo prostému škálování vnitřků planet Uranu a Neptuna. Je třeba uvažovat o nových strukturách bez H a He.

Scénář tvorby planet akrecí jader vede k tvorbě vnitřní struktury se schematicky třemi zřetelně odlišenými vrstvami: jádro (nejhustší složka), plášť a atmosféra (viditelná část). Volnost, s jakou si můžeme

pohrát při „vyvážení“ těchto tří složek přirozeně vede k matoucímu rozsahu hodnot objemové hustoty. Daná objemová hustota může v praxi odpovídat různým poměrům těchto komponent. K zjednodušení interpretace je na obr. 5 znázorněn hypotetický model planety, odpovídající „čistému ledu“. Je poučné porovnat jej s objemovou strukturou podobnou Zemi, extrapolovanou do stejného rozsahu hmotností. Skupina exoplanet v rozsahu superzemě a minineptuna (obr. 5) vykazuje velkou disperzi, naznačující rozmanitost planetárních modelů. Zjistilo se například, že některé planety o hmotnosti 5 M jsou kompatibilní s hustotou podobnou Zemi, kdežto jiné zase měly strukturu podobnou Neptunu. Tato situace souvisí se skutečností, že u této skupiny planet nepozorujeme žádný přímý vztah mezi hmotností a poloměrem. Pečlivá inspekce tohoto grafu by demonstrovala statistickou významnost obou skupin struktur objemové hustoty: jedné více podobné vodě a druhé více podobné Zemi [50]. To naznačuje, že kategorie superzemě a minineptuna je možná skupina smíšeného původu s různým složením nitra [56].

V. Vyhledky

Fascinující diverzita objemových hustot, jakou nacházíme u kompaktních exoplanet typu superzemě a minineptuna, spolu se skutečností, že nemají ve Sluneční soustavě žádný ekvivalent, s nímž bychom je mohli porovnat, je výzvou k vytvoření modelu jejich vnitřní struktury, právě tak jako k vystopování jejich původu. Naštěstí se to pravděpodobně změní s vypuštěním vesmírného teleskopu JWST a dostupností velkých pozemních zařízení, které se již budují (jako např. ELT). Využitím pozorování pomocí spektroskopie během tranzitů (*transit spectroscopy*) a kombinace zákrytových technik bude možné zjistit o těchto planetách mnohem více informací [57]. Určení složení atmosféry a povrchu [58, 59] nabídne vzrušující příležitost objasnit jejich povahu a původ.

Blízká vyhlídka na měření atmosférických vlastností malých exoplanet při přechodu přes jejich mateřskou hvězdu otvírá fascinující možnost na dálku nalézt život na těchto planetách. Obyvatelná zóna, kterou vymezuje takový rozsah vzdáleností od hostitelské hvězdy, v němž se voda udrží v kapalném stavu [60], je obecně považována za minimální podmínku, aby oběžná dráha exoplanety mohla vzbudit zájem o případné pátrání po známkách života (tzv. biomarkerech) [61].



Didier Queloz a Michel Mayor se Stanley Whittinghamem, nositelem Nobelovy ceny za chemii, hovoří s astronauty na ISS Lucem Parmitanem a Jessicou Meirovou v Muzeu Nobelových cen ve Stockholmu 6. prosince 2019. © Nobel Media. Foto: Clément Morin



D. Queloz předává do sbírky Muzea Nobelových cen „artefakt“ – klíč od vstupu k teleskopu na Observatoři Haute Provence.. © Nobel Media. Foto: A. Mahmoud

V praxi je koncept obyvatelných zón vodítkem k plánování příštích pozorování. Obyvatelná zóna předpokládá *ad hoc* atmosféru a vlastnosti povrchu planety a takové osvětlení, které by udržely vodu v kapalném stavu (za předpokladu, že je voda přítomna...). Pro malé a chladnější hvězdy (M trpaslíky) se vnitřní hranice obyvatelné zóny dostává natolik blízko, aby pokryla celou řadu objevených malých krátkoperiodických planet. Mezi nimi je nedávné potvrzení objevu skalnatých planet s objemovou hustotou podobnou té na naší Zemi [63, 64], umístěných v obyvatelné zóně, obstojně připouštějící možnost života v těchto systémech. Vyhledka na případné prozkoumání atmosféry a geochemických podmínek na těchto systémech přitahuje pozornost nejen komunity astronomů.

Odpověď na stěžejní otázku o životě na exoplanetách si vyžádá spojené úsilí mezi astrofyzikou, odborníky na planetární vědu, geofyzikou a molekulárními biologi. Nedávný vývoj poznatků o původu vzniku života na Zemi [65] jako planetárního fenoménu a jeho významu pro pátrání o životě na jiných planetách nás přivádí na novou vzrušující cestu výzkumu. Současné úsilí o identifikaci skutečného dvojčete planetární soustavy Země u blízkých hvězd [66] nás nakonec zavede k vývoji celé řady výzkumných programů a budoucích nástrojů pátrání po známkách života a ke zkoumání původu, povahy a rozšíření života ve vesmíru. Mars, Venuše a satelity obřích planet v naší Sluneční soustavě jsou zřejmými místy k tomuto pátrání.

Objev exoplanet je výjimečným okamžikem ve snaze lidstva o poznání a v našem přirozeném sklonu ke zvědavosti. Pokračuje v krocích Koperníkovy revoluce a dále ji rozšiřuje tím, že klade naši Sluneční soustavu mezi nespočetné planetární systémy a zaměřuje se na fyzikální podmínky vedoucí ke vzniku života. Velká různorodost a hojný výskyt exoplanet obíhajících kolem hvězd nabízí tolik možností zrodu života, že ho možná jednou na jiné planetě objevíme. Je to jen otázka času.

Poděkování

Děkuji Nobelově nadaci a Královské švédské akademii věd za tuto velkou poctu a privilegium získat tuto cenu a podílet se na ní s profesorem Peeblesem a se svým mentorem a kolegou, profesorem Michele Mayorem. Jsem vděčen Ženevské univerzitě, univerzitě v Cambridgeu a všem svým spolupracovníkům za jejich důvěru a podporu v mé snaze vyvinout komplexní výzkumný program věnovaný exoplanetám a pátrání po životě ve vesmíru. Jsem potěšen a šťasten, že mohu sdílet tento

Nobelova cena
za fyziku 2019





Didier Queloz na Univerzitě v Ženevě. Foto: Université de Genève.

výjimečný okamžik se svou rodinou a zejména s Tinou, její skvělou manželkou. Jejich neochvějná podpora a láska je nesmírně cenným darem. Děkuji vám!

Přeložil Ivan Gregora

Literatura

- [1] Laërtius, Diogenes: *Lives of Eminent Philosophers*. Loeb Classical Library, Vol. 3, Book 10, Harvard University Press, Cambridge 1925.
- [2] H. S. Long: Introduction. In *Lives of Eminent Philosophers*. Loeb Classical Library, Harvard University Press, Cambridge 1972, s. xvi.
- [3] A. Boss: *Looking for Earths: The race to Find New Solar Systems*. J. Wiley, New York 1998.
- [4] O. Struve: *The Observatory* **72**, 199–200 (1992).
- [5] R. F. Griffin: *Astrophys. J.* **148**, 465–476 (1967).
- [6] R. F. Griffin, R. E. M. Griffin: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **479**, 243–253 (1973).
- [7] B. Campbell, G. A. H. Walker: *Publ. Astron. Soc. Pac.* **91**, 540 (1979).
- [8] B. Campbell, G. A. H. Walker, S. Yang: *Astrophys. J.* **331**, 902–921 (1988).
- [9] G. A. H. Walker a kol.: *Icarus* **116**, 359–375 (1995).
- [10] G. W. Marcy, R. P. Butler: *Publ. Astron. Soc. Pac.* **104**, 270 (1992).
- [11] R. P. Butler, G. W. Marcy: *J. Lett.* **464**, L153 (1996).
- [12] T. M. Brown: High precision doppler measurements via echelle spectroscopy. In *CCDs in Astronomy* (Ed. G. H. Jacoby), Astr. Soc. Pac., San Francisco 1990.
- [13] D. Queloz: Echelle spectroscopy with a CCD at low signal-to-noise ratio. In *New Developments in Array Technology and Applications*. Int. Astr. Un. Symposia, Vol. **167**, Ed. A. G. Davis Philip, K. A. Janes, A. R. Upgren, Springer, New York 1995.
- [14] F. Bouchy, F. Pepe, D. Queloz: *Astron. Astrophys.* **374**, 733–739 (2001).
- [15] T. M. Brown a kol.: *Astron. Soc. Pac.* **106**, 1285 (1994).
- [16] A. Baranne a kol.: *ELODIE: Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **119**, 373–390 (1996).
- [17] A. B. Kaufer a kol.: *The Messenger* **89**, 1–4 (1997).
- [18] W. D. Heacox: Wavelength-precise slit spectroscopy with optical fibre image scramblers. In *Fibre Optics in Astronomy*. Astr. Soc. Pac. Conf. Ser., Vol. **3**, Ed. S. C. Barden, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1988.
- [19] D. Queloz a kol.: *Astron. Astrophys.* **354**, 99–102 (2000).
- [20] A. Baranne, M. Mayor, J. L. Poncet: *Vistas Astron.* **23**, 279–316 (1979).
- [21] D. Queloz a kol.: *The Messenger* **105**, 1–7 (2001).
- [22] P. Plavchan a kol.: *arXiv*: 1503.01770 (2015).
- [23] F. Pepe a kol.: *High precision spectrographs for Exoplanet Research: CORAVEL, ELODIE, CARALIE, SOPHIE and HARPS*. Handbook of Exoplanets, Ed. H. J. Deeg a J. A. Belmonte, Springer, New York 2018.
- [24] D. W. Latham a kol.: *Nature (London)* **339**, 38–40 (1989).
- [25] G. W. Marcy, R. P. Butler: *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.* **64**, 587–589 (1994).
- [26] D. Queloz a kol.: The Observatoire de Haute-Provence search for extrasolar planets with ELODIE. In *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*, ASP Conference Series Proceedings, Vol. **134**. Ed. R. Rebolo a kol., Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1998.
- [27] D. Queloz a kol.: *Astron. Astrophys.* **379**, 279–287 (2001).
- [28] M. Mayor, D. Queloz: *Nature (London)* **378**, 355–359 (1995).
- [29] J. P. Williams, L. A. Cieza: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **49**, 67–117 (2011).
- [30] V. S. Safronov a E. V. Zvjagina: *Icarus* **10**, 109–115 (1969).
- [31] J. B. Pollack a kol.: *Icarus* **124**, 62–85 (1996).
- [32] M. Lecar a kol.: *Astrophys. J.* **640**, 1115 (2006).
- [33] R. I. Dawson a J. A. Johnson: *arXiv*:180106117 (2018).
- [34] P. Goldreich, S. Tremaine: *Astron. J.* **241**, 425–441 (1980).
- [35] D. N. C. Lin, P. Bodenheimer, D. C. Richardson: *Nature (London)* **380**, 606–607 (1996).
- [36] R. P. Butler a kol.: *Publ. Astron. Soc. Pac.* **108**, 500 (1996).
- [37] G. V. Marcy a R. P. Butler: *Astrophys. J. Lett.* **464**, L147 (1996).
- [38] G. V. Marcy a R. P. Butler: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 57–97 (1998).
- [39] D. Charbonneau a kol.: *Astrophys. J.* **529**, L45 (2000).
- [40] T. Mazeh a kol.: *Astrophys. J.* **532**, L55 (2000).
- [41] D. L. Pollaco a kol.: *Publ. Astron. Soc. Pac.* **118**, 104 (2006).
- [42] R. L. Akeson a kol.: *Publ. Astron. Soc. Pac.* **125**, 989 (2013).
- [43] A. Leger a kol.: *Astron. Astrophys.* **506**, 287–302 (2009).
- [44] D. Queloz a kol.: *Astron. Astrophys.* **506**, 303–319 (2009).
- [45] J. J. Lissauer, R. I. Dawson, S. Tremaine: *arXiv*:1409.1595 (2014).
- [46] M. G. Latanzi, A. Sozzetti: *arXiv*:1003.1173 (2010).
- [47] P. Perryman a kol.: *arXiv*:1411.1173 (2014).
- [48] J. N. Winn: *arXiv*:1801.08543 (2018).
- [49] N. C. Santos, G. Israelian, M. Mayor: *Astron. Astrophys.* **373**, 1019–1031 (2001).
- [50] B. J. Fulton, E. A. Petigura: *Astron. J.* **156**, 264 (2018).
- [51] J. N. Winn, D. C. Fabrycky: *arXiv*:1410.4199 (2014).
- [52] J. J. Fortney, M. S. Marley, J. W. Barnes: *Astrophys. J.* **659**, 1661 (2007).
- [53] T. Guillot, D. Gautier: *arXiv*:0912.2019 (2009).
- [54] D. R. Anderson a kol.: *Astrophys. J.* **709**, 159 (2010).
- [55] R. I. Dawson, J. A. Johnson: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 171–221 (2018).
- [56] A. R. Neil, E. A. Rogers: *arXiv*:191103582 (2019).
- [57] J. N. Winn: Exoplanet transits and occultations. In *Exoplanets*. University of Arizona Press, Tucson 2010.
- [58] B. O. Demory a kol.: *Nature (London)* **532**, 207–209 (2016).
- [59] L. Kreidberg a kol.: *arXiv*:1908.06834 (2019).
- [60] M. H. Hart: *Icarus* **33**, 23–39 (1978).
- [61] L. Kaltenegger: *arXiv*:1911.05597 (2019).
- [62] R. K. Kopparapu a kol.: *arXiv*:1301.6674 (2013).
- [63] M. Gillon a kol.: *Nature (London)* **542**, 456–460 (2017).
- [64] S. L. Grimm a kol.: *arXiv*:1902.01377 (2018).
- [65] D. D. Sasselov, J. P. Grotzinger a J. D. Sutherland: *Sci. Adv.* **6**, eaax3419 (2020).
- [66] R. D. Hall a kol.: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **479**, 2968–2987 (2018).

Nobelova cena
za fyziku 2019

