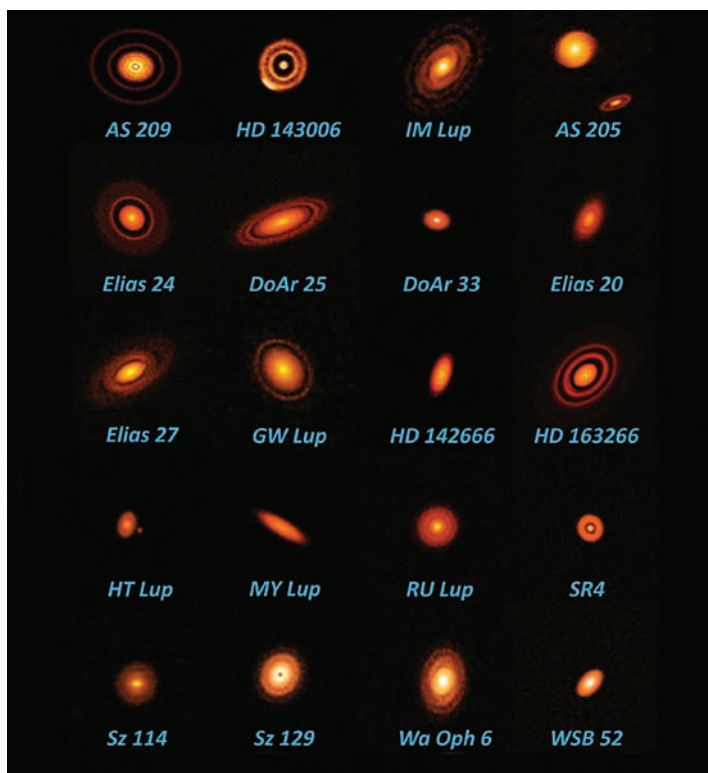


Podle mlhovinové hypotézy navržené již v roce 1734 švédským vědcem Emanuelem Swedenborgem [8], vznikla Sluneční soustava kondenzací plynů a prachu z molekulárního mračna. Za dosud nejstarší identifikovaný materiál ve Sluneční soustavě jsou dle současných poznatků považovány refraktorní vápenato-hlinité inkluze (angl. *Calcium-Aluminium-Rich Inclusion*, CAI), které se nacházejí převážně v primitivních uhlíkatých meteoritech. Na základě radiometrického datování  $^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}$  CAI v uhlíkatém chondritu NWA 2367 (třída CV<sub>3</sub>), bylo stáří Sluneční soustavy určeno na  $4,568 2 \pm 0,000 2$  mld. let [9]. Podle současných představ došlo v této době ke gravitačnímu kolapsu mateřské mlhoviny a vznikla oblast nových, rodících se hvězd (tzv. hvězdná porodnice). Mezi formujícími se hvězdami bylo i mladé Protoslunce, jež obklopoval rotující protoplanetární disk plynu a prachových částic. V disku docházelo ke kolizím prachových zrn za vzniku postupně rostoucích agregátů až větších těles. V průběhu akrece postupně vznikly planetesimály, které se vzájemnými srážkami buď tříštily na menší tělesa či naopak docházelo k jejich další kumulaci. Fyzika protoplanetárních disků tvoří významnou část odvětví astronomie a současné poznatky jsou shrnuty například v přehledovém článku W. Kleye a R. P. Nelsona z roku 2012 [10].

Pokud hmotnost akretovaného tělesa v protoplanetárním disku byla dostatečná, došlo k překonání pevnosti částic gravitační silou a k dosažení stavu přibližné hydrostatické rovnováhy v celém jeho objemu, čímž bylo zformováno do přibližně kulovitého tvaru. Vlivem kinetické energie menších dopadajících těles, rozpadu krátkce žijících radioaktivních izotopů a také vlivem tepla uvolněného

stlačením hmoty bylo těleso ohřáto a původní chondritický materiál byl přetaven. Roztavená hmota byla diferencována na základě hustot jednotlivých složek. Těžší hmota (Fe-Ni) začala klesat směrem ke středu tělesa, zatímco lehčí horniny a minerály vytvořily jeho kůru. Vzniklo tak diferencované těleso – protoplaneta. Jak s postupem času docházelo k dopadům menších těles na protoplanety, jejich hmotnost rostla, což nakonec vedlo ke zformování těles s dominantními oběžnými drahami – planet. Během dalších několika set milionů let se pak oběžné dráhy planet stabilizovaly do dnešní podoby. Za pozůstatky diferencovaných těles (protoplanet a velkých asteroidů) rozbitých při kataklyzmatických kolizích jsou považovány diferencované meteority, jež jsou klasifikované jako achondrity (pocházející z kůry), siderity (z rozhraní pláště/jádro) a siderolity (z jádra). Podrobný popis dělení meteoritů obsahuje i s příslušně citovanými zdroji autorova bakalářská práce [11]. Nediferencovaná tělesa meziplanetární hmoty jsou zdrojem tzv. primitivních chondritických meteoritů. Ty v závislosti na stupni tepelné metamorfózy či vodní alterace představují původní složení protoplanetárního disku a jsou tak významné zejména pro studium vzniku a evoluce Sluneční soustavy. Takovým primitivním meteoritem může být například meteorit Porangaba, jehož studium bylo zahájeno a částečně publikováno již v rámci autorovy bakalářské práce [11] a následně dokončeno v jeho odborné publikaci [12], jejíž výsledky jsou prezentovány i v této práci.

Na obr. 1 je dvacet fotografií právě se rodících planetárních systémů. Na jednotlivých snímcích lze pozorovat jednak mladé protoplanetární disky (např. Sz 114, AS 205), jednak protoplanetární disky s jasně viditelnými tmavými místy, která odpovídají oběžným drahám již vzniklých protoplanet či planet (např. AS 209 či HD 163266).



obr. 1 — Dvacet snímků protoplanetárních disků; grafický materiál převzat a upraven z <https://public.nrao.edu/>

Tak, jak se vzniklé mladé planety pohybovaly protoplanetárním diskem, docházelo zákonitě k jejich neustálým kolizím s menšími tělesy [13]. Toto období vývoje Sluneční soustavy označujeme jako rané velké bombardování (angl. *Early Heavy Bombardment*, EHB). Četnost impaktů asteroidů na rané planety během tohoto období exponenciálně klesala. Předpokládá se, že ve Sluneční soustavě v období mezi 4,1 až 3,8 mld. let došlo k uspořádání oběžných drah Jupiteru a Saturnu v rezonanci 1:2. Při každém oběhu Saturnu kolem Slunce to vedlo ke gravitačnímu „šťouchnutí“ směrem

k Uranu a Neptunu. Tím byly tyto planety vymršťeny na vzdálenější a excentričtější dráhy, což vedlo k jejich kolizi s tehdy přítomným pásem asteroidů a komet. Touto kolizí došlo k téměř úplnému rozptýlení tohoto pásu, přičemž část těles byla katapultována přímo do středu Sluneční soustavy. To vedlo k bombardování převážně vnitřních planet po dobu zhruba 300 milionů let. Toto období označujeme jako pozdní velké bombardování (angl. *Late Heavy Bombardment*, LHB). Kromě geologických důkazů na povrchu Měsíce bylo predikováno také matematickým modelem z Nice [13]–[16], který popisuje evoluci Sluneční soustavy. Vědci však o existenci LHB stále diskutují.

Nicméně LHB je potenciálně velmi významnou událostí v evoluci Země, Marsu a Venuše. Mohlo mít značný vliv na chemické prostředí planet a důsledky pro hypotetickou prebiotickou evoluci na Marsu či Venuši, pakliže výchozí podmínky na těchto planetách byly podobné, tzn. plauzibilní pro prebiotické procesy. Je také možné, že např. na Marsu byly podmínky pro prebiotickou evoluci dokonce ještě vhodnější než na Zemi. Tato hypotéza je součástí navrhovaného scénáře předkládaného v této práci (kapitola 2.4).

Díky moderním technologiím jsme dnes schopni pozorovat vznik ostatních planetárních systémů s nadsázkou „v přímém přenosu“ (obr. 1) a na jejich základě určit statistickou podobnost vznikajících systémů a konečně učinit předpoklad, jak moc je naše Sluneční soustava výjimečná a zda skutečně jde o průměrnou planetární soustavu u průměrné hvězdy, či nikoliv. Současné poznatky naznačují, že ve vesmíru existuje spíše velké množství různých variant uspořádání planetárních systémů. Sluneční soustava je tedy stejně unikátní, jako všechny ostatní. Avšak s tím rozdílem, že uspořádání naší Sluneční soustavy je vhodné pro vznik a udržení života alespoň na jedné z planet. Objev každé exoplanety podobné Zemi se tak stává spíše senzací než rutinou. Skutečné statistické zhodnocení však bude možné až s budoucími misemi nových hledačů exoplanet (např. PLATO).

Je tomu již čtvrt století, co dvojice švýcarských astronomů, Michel Mayor a jeho tehdejší postgraduální student Didier Queloz, oznámila objev první exoplanety obíhající hvězdu hlavní posloupnosti [17]. Oba vědci za tento objev obdrželi v roce 2019 Nobelovu cenu za fyziku.

S rozvojem studia v tomto odvětví bylo však postupem času zpětně zjištěno, že publikovanému objevu předcházela celá řada nepotvrzených detekcí exoplanet. Za historicky prvního pozorovatele takového systému tak lze považovat amerického astronoma Waltera Sydneyho Adamse. Ten pozoroval v atmosféře van Maanenovy hvězdy (13,9 světelných let vzdáleného bílého trpaslíka objeveného v roce 1917) spektrální přechody iontů vápníku, které – jak se později ukázalo –, indikovaly přítomnost exoplanety. Ve své době si však Adams nebyl svého objevu vědom.

Jako další příklady lze uvést pozorování astronomů Bruce Campbela a Gordona Walkera z roku 1987, Davida Lathama z roku 1989, Alexandra Wolszana z roku 1992 a také Artie Hatzese a Williama Cochрана z roku 1993. Všechny tyto práce byly v pozdější době potvrzeny jako úspěšná pozorování exoplanet; prvenství v tomto astronomickém oboru je však přisuzováno Mayorovi s Quelozem, s jejichž objevem a oceněním došlo ke značnému rozvoji v pozorování exoplanet.

Výsledky Mayorova a Quelozova objevu znamenaly převrat v tehdejších představách o formování planetárních systémů. V devadesátých letech minulého století byl obecně přijímán názor, že plynní obří, kterými jsou ve Sluneční soustavě planety Jupiter, Saturn, Uran a Neptun, se formují až za tzv. sněžnou čarou, tedy

na okraji protoplanetárního disku. Ta představuje vzdálenost od protohvězdy, kde je teplota dostatečně nízká na to, aby těkavé sloučeniny, jako například  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  a  $\text{CO}$ , mohly začít kondenzovat. Z toho plyne, že 51 Pegasi b – exoplaneta o téměř dvojnásobném průměru, než má Jupiter, která obíhá hvězdu podobnou Slunci (avšak přibližně stokrát blíže než Jupiter) – vyvolala silnou diskuzi a vedla tehdejší vědeckou komunitu ke značnému zájmu o nalezení dalších exoplanet. Srovnání vybraných vlastností planet 51 Pegasi b a Jupitera je uvedeno v tab. 1.

Dodnes (srpen 2021) bylo potvrzeno více než 4800 exoplanet, vyskytujících se ve více než 3500 planetárních systémech, přičemž 790 z nich tvoří systémy s více než jednou planetou [18] a [19].

VLASTNOSTI PLANETY	51 PEGASI b	JUPITER
orbitální perioda	4,2 dne	4322 dnů = 11,8 let
hlavní poloosa	0,05 AU	5,20 AU
excentricita	0,013	0,048
hmotnost	0,47 $M_{\text{Jup}}$	1,00 $M_{\text{Jup}}$
poloměr	1,94 $R_{\text{Jup}}$	1,00 $R_{\text{Jup}}$
teplota	1300 K	152 K
spektrální typ mateřské hvězdy	G2IV	G2V

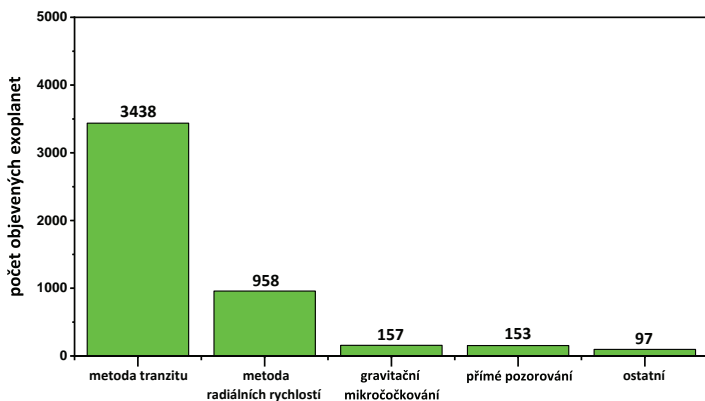
tab. 1 — Porovnání vybraných charakteristik planet Jupiter a 51 Pegasi b; hmotnost a poloměr obou planet jsou relativně vztaženy k Jupiteru

Studium exoplanet a extrasolárních systémů obecně přináší řadu cenných informací, jež mohou najít uplatnění v široké škále vědeckých oborů. Největší potenciál spočívá ve statistické distribuci jejich vlastností, jakými jsou například orbitální či fyzikální charakteristiky. Jinými slovy: poznatky z dosud více než 4800 potvrzených exoplanet začínají pomalu vnášet statistickou váhu do vědeckých teorií o formování planetárních systémů. K poznání pravidel evoluce planetárních soustav zjevně nestačí znalost uspořádání osmi planet Sluneční soustavy. Na druhou stranu je nutno

podotknout, že omezení v přesnosti pozorovacích dat zatím ani zdaleka neumožňuje prostudovat exoplanety tak, jako planety Sluneční soustavy. V současné době rovněž nejsme schopni s jistotou říci, zda dokážeme kolem dané hvězdy detekovat všechna tělesa, a jestli současný soubor objevených exoplanet statisticky odráží skutečný výskyt exoplanet v Mléčné dráze či v samotném vesmíru. Důvodem jsou dva limitující faktory existujících detekčních metod: omezení z hlediska hmotnosti nebo průměru exoplanety a rovněž vzdálenosti planety od mateřské hvězdy. Obecně platí, že čím menší planeta je, tím větší citlivost daných metod je zapotřebí k její detekci. Dvě nyní nejpoužívanější metody (metoda radiálních rychlostí a metoda tranzitu) potřebují pro potvrzení detekce statistické zpracování více jednotlivých oběhů. Z toho plyne, že nyní jsou pro nás lépe detekovatelné hmotné exoplanety obíhající blíže své mateřské hvězdě. Nicméně lze předpokládat, že s postupně se rozvíjející technikou se přesnost těchto pozorování bude neustále zvyšovat, a to současně s počtem objevených exoplanet podobných Zemi. V konečném důsledku by tak bylo možné najít tzv. Zemi 2.0 – planetu téměř totožnou se Zemí.

### **2.2.1 DETEKCE EXOPLANET**

Detekce exoplanet je rozsáhlou problematikou a podrobnější výčet alespoň základních detekčních metod by byl nad rámec této práce. Proto jsou následně stručně shrnuty jen ty nejvýznamnější metody detekce, kterými jsou: metoda tranzitní fotometrie, dále metoda radiální rychlosti, přímé pozorování a gravitační mikročočkování. Přehled počtu exoplanet detekovaných jednotlivými metodami je na obr. 2.



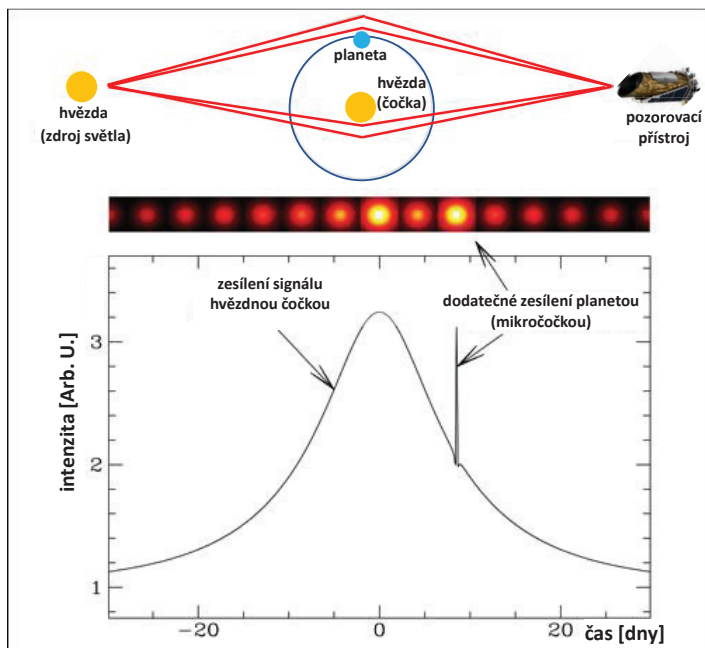
obr. 2 — Přehled detekce exoplanet jednotlivými metodami; data převzata

z [www.exoplanet.eu](http://www.exoplanet.eu), údaje aktualizovány k 3. 8. 2021

**Metoda radiálních rychlostí** byla první metodou, kterou byla detekována exoplaneta obíhající hvězdu hlavní posloupnosti [17]. Současně jde o druhou neúspěšnější metodu v počtu detekovaných exoplanet (obr. 2). Metoda je založena na principu měření amplitudy radiální rychlosti hvězdy, kterou lze stanovit na základě míry posuvu spektrálních čar ve spektru hvězdy. Tato metoda využívá skutečnosti, že planeta i hvězdy obíhají kolem společného těžiště – barycentra. Pokud taková hvězda vykonává radiální pohyb v rovině pozorovatele, pak lze na základě časové změny posuvu spektrální čáry určit rychlost, jakou se hvězda pohybuje. Z její radiální rychlosti je možné následně stanovit především dolní limit hmotnosti planety a excentricitu její dráhy. Nelze však odhadnout poloměr planety.

**Gravitační mikročočkování** je metoda vycházející z principu obecné relativity. Tato metoda využívá ohybu světla gravitačním polem. V případě, že před pozorovaným objektem (hvězdou) projde gravitační pole (hmotný objekt, primární čočka) dojde ke chvilkovému zjasnění pozorované hvězdy. Pro detekci exoplanety efektem mikročočky je tedy zapotřebí, aby před slabou sledovanou hvězdou



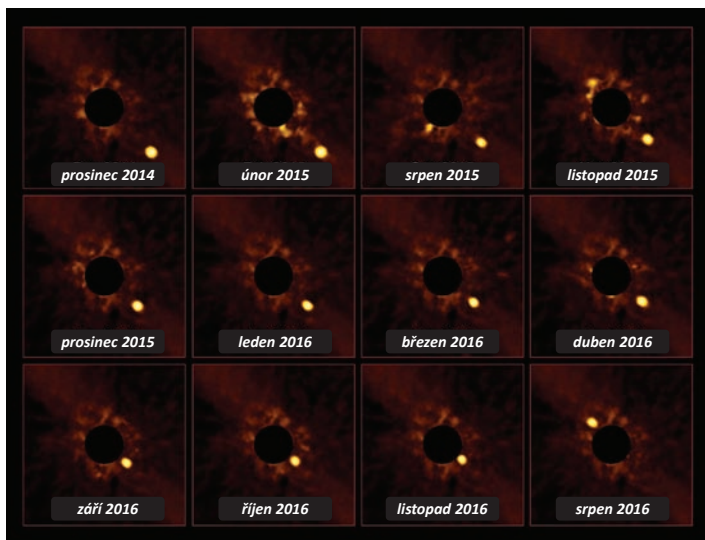


obr. 3 — Schematické znázornění gravitačního mikročočkování; zdroj: *aldebaran.cz*

procházel hmotný objekt (jiná hvězda), která způsobí na určitý čas zjasnění. Pokud kolem procházející hvězdy obíhá planeta, můžeme vidět na výsledné světelné křivce kromě zesílení signálu samotnou hvězdou i dodatečné zesílení signálu planetou (obr. 3).

Tato metoda je vhodná pro detekci exoplanet s malou hmotností. Její nevýhodou je fakt, že samotný proces průchodu primární čočky před zdrojem je statisticky nereprodukovatelný. Jinými slovy, jde o naprosto unikátní jev, který se již nikdy nebude opakovat.

**Přímé pozorování** (angl. *direct imaging*) je metoda založená na měření emise elektromagnetického záření samotné planety. Vzhledem k její teplotě jde o záření v infračervené oblasti spektra. Pro úspěšnost této metody je důležité, aby bylo co nejvíce odstíněno vlastní záření mateřské hvězdy (obr. 4).



obr. 4 — Schematické znázornění přímého zobrazení exoplanety Beta Pictoris b v čase;  
zdroj: *eso.org*

Toho lze docílit například koronografem, který odstíní světlo z mateřské hvězdy, nebo přímo interferometrem, který interferuje světlo z mateřské hvězdy. V počtu detekovaných exoplanet se přímé pozorování exoplanet prozatím z technologických důvodů nevyrovná metodě tranzitu. Jde však o metodu s velkým potenciálem, která bude také součástí kosmické mise HabEx [20].

### Tranzitní fotometrie a transmisní spektroskopie

**Tranzitní fotometrie** je v současnosti nejúspěšnější metodou detekce exoplanet. Dosud jich bylo touto metodou objeveno více než 3000 (obr. 2) a toto číslo neustále narůstá. Metoda tranzitu je založena na principu měření periodické změny intenzity záření mateřské hvězdy, způsobené přechodem exoplanety před hvězdným diskem. Tento proces je schematicky znázorněn na obr. 5, panel A.