

Petr Kabáth

Nobelova cena za fyziku a exoplanety - příběh planety 51 Pegasi b

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 65 (2020), No. 1, 10–18

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/148113>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2020

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library*  
<http://dml.cz>

# Nobelova cena za fyziku a exoplanety – příběh planety 51 Pegasi b

*Petr Kabáth*

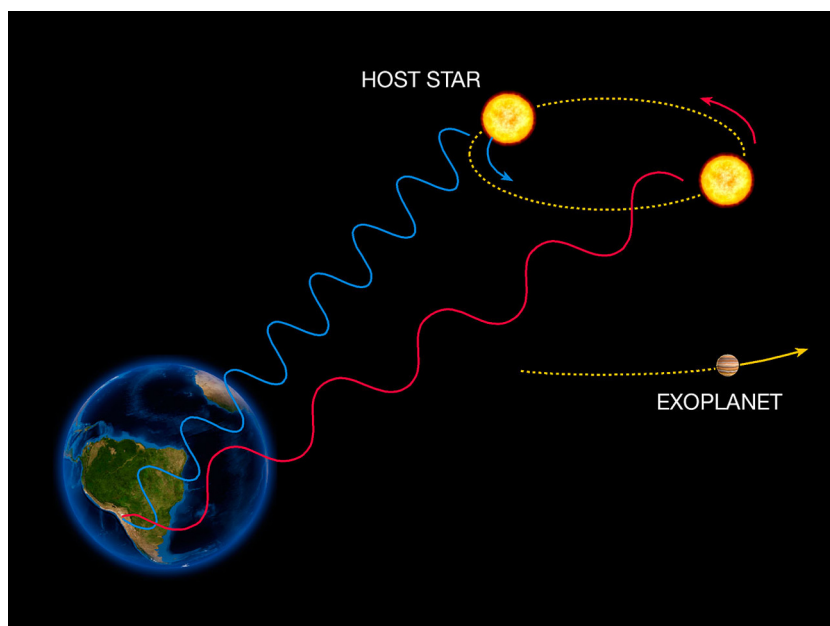
*Abstrakt.* Nobelova cena za fyziku v roce 2019 byla z jedné poloviny udělena za objev první exoplanety, obíhající okolo hvězdy podobné Slunci, s katalogovým číslem 51 v souhvězdí Pegase. Objev planety 51 Pegasi b byl oznámen v roce 1995. Od té doby odvětví astrofyziky zabývající se výzkumem exoplanet zažilo překotný rozvoj a ani nyní po ocenění Michela Mayora a Didiera Quelozze za tento jejich stěžejní objev se stále nedá očekávat, že by bylo vše o exoplanetách už známo. Pojďme se podívat, co ve výzkumu exoplanet předcházelo udělení Nobelovy ceny, a co naopak očekáváme v příští dekádě.

## 1. Byli Mayor s Quelozem první?

Na podzim v roce 1995 vyšel článek dvou astronomů Michela Mayora a Didiera Quelozze v prestižním časopise Nature [18]. Článek pojednával o objevu planety obíhající hvězdu 51 v souhvězdí Pegase pomocí spektroskopické metody, která měří změny radiálních rychlostí hvězdy způsobené planetou (obrázek 1). Jak se později ukázalo, tento článek byl průlomovým článkem pro další výzkum exoplanet a v roce 2019 za něj Mayor s Quelozem dostali polovinu Nobelovy ceny za fyziku (obrázek 2). Vraťme se však před rok 1995. Téma hledání exoplanet, neboli planet mimo Sluneční soustavu, nebylo nové. V 50. letech 20. století americký astronom Otto Struve spočítal přesnost měření, jakou by bylo třeba pro objev Jupitera obíhajícího Slunce, kdyby se na naši soustavu někdo díval ze vzdálené planety pomocí spektrografu. Změny radiálních rychlostí Slunce vlivem Jupitera jsou zhruba 12 m/s. Po téměř třicetileté přestávce se objevily velice nadějně zprávy, když Kanadáné Bruce Campbell a Gordon Walker přišli s postupem, díky kterému byli schopni měřit radiální rychlosti s přesností kolem 15 m/s [4] a dále svá měření zpřesňovali. Tentýž tým v roce 1988 koketoval s myšlenkou, že u hvězdy  $\gamma$  Cephei A obíhá planeta [5]. Bohužel sami svému objevu planety neuvěřili a v roce 1992 se odhodlali k velmi odvážnému kroku, stažení domněnky o exoplanetě z důvodu nedostatečné kvality dat [24]. Planeta  $\gamma$  Cephei Ab byla potvrzena až v roce 2003 Artiem Hatzesem a jeho týmem, který na základě měření dlouhé sady radiálních rychlostí konečně s jistotou ohlásil planetu o hmotnosti minimálně 1,59 hmotnosti Jupitera s oběžnou dobou 2,48 roku [9]. V roce 1993 publikovali Artie Hatzes a William Cochran (stejný tým, který potvrdil planetu  $\gamma$  Cephei Ab) článek o změnách radiálních rychlostí u hvězdy  $\beta$  Geminorum (Pollux) [8], nicméně v té době také nevěřili, že se jedná o planetu. Nezařadili se tedy k prvním objevitelům exoplanety u hvězdy slunečního typu i přesto, že jsou průkopníky v oboru. Nakonec ale byla existence planety u hvězdy  $\beta$  Geminorum potvrzena právě Hatzesem a Cochranem, ale také až v roce 2003 [9].

---

Dipl.-Phys. PETR KABÁTH, Dr. rer. nat., Astronomický ústav Akademie věd České republiky, Fričova 298, 251 65 Ondřejov, e-mail: petr.kabath@asu.cas.cz



Obr. 1. Spektroskopická metoda: Z měření posuvu spektrálních čar ve spektru hvězdy lze změřit rychlost, jakou se k nám a od nás hvězda pohybuje kvůli existenci dalšího tělesa v systému (planety). Tyto rychlosti se nazývají radiální rychlosti. Použitý zdroj: European Southern Observatory, <http://www.eso.org/esopia/images/html/phot-22e-07.html>



Obr. 2. Michel Mayor a Didier Queloz získali polovinu Nobelovy ceny za fyziku v roce 2019. (Autor fotografií A. Mahmoud, © Nobel Media)

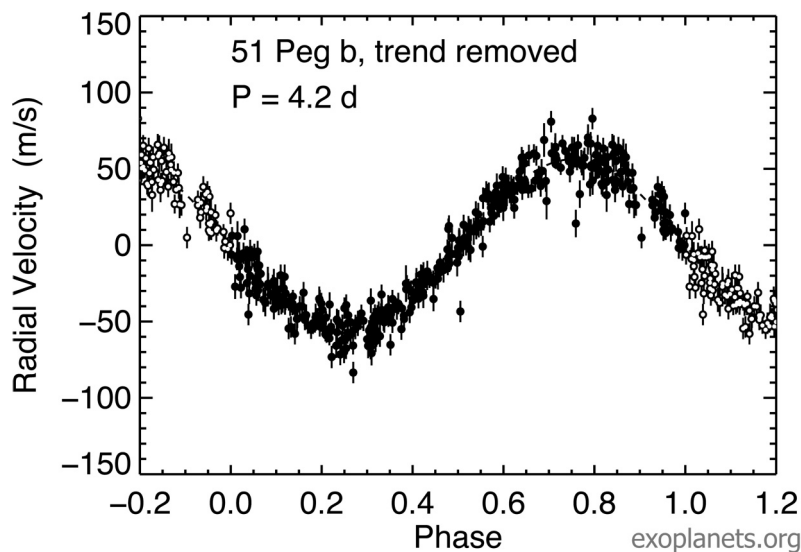
David Latham v roce 1989 publikoval v časopise Nature článek, ve kterém popsal objev hnědého trpaslíka HD 114762 b [15], o kterém se dnes vedou diskuse, zda je či není planetou nebo hnědým trpaslíkem [6], [14]. Problémem bylo, že Latham nedisponoval přesným měřením hmotnosti, což je bohužel obecně problém spektroskopické metody. Ze spekter nelze měřit úhel sklonu (inklinaci) oběžné roviny planety a jeho sinus se promítá do určení hmotnosti, tedy čím větší inklinace, tím větší je skutečná hmotnost objektu (planety). Ze samoté spektroskopie lze tedy určit pouze dolní odhad hmotnosti. Pro přesné měření hmotnosti je třeba spektroskopickou metodu kombinovat s dalšími metodami detekce, jako je metoda zákrytová (viz text dále).

Jen jako drobnou odbočku je třeba také zmínit, že v roce 1992 astronom Alexander Wolszczan s kolegou Dalem A. Frailem publikovali rovněž v časopise Nature článek popisující objev planety obíhající kolem milisekundového pulzaru PSR1257+12, což je ale zase jiná kapitola, protože se v tomto případě jedná o zcela jinou fyziku [27].

V roce 1995 obdržel Gordon Walker jako recenzent již zmiňovaný článek Michela Mayor a Didiera Queloz o objevu první exoplanety 51 Pegasi b. Walker tak věděl jako jeden z prvních o objevu planety, který se zdál být přesvědčivý, protože semi-amplituda změn radiálních rychlostí byla relativně velká, zhruba 50 m/s. Co bylo jinak, proč vlastně v osmdesátých letech neobjevili první planetu Kanadané? Pravděpodobně proto, že hledali něco, co známe z naší Sluneční soustavy, tedy Jupitera, který oběhne Slunce za 12 let, kdežto Mayor a Queloz objevili planetu o něco menší než Jupiter, ale obíhající hvězdu 51 Pegasi za zhruba čtyři dny. Pokud chcete objevit planetu typu našeho Jupitera, musíte systém pozorovat celých dvanáct let a to je dlouhá doba. Musíte také mít štěstí a systém s takovou planetou objevit. Je nepoměrně jednodušší objevit planetu, která oběhne svoji hvězdu za pár dní, ale kdo by byl tušil, že takové planety existují? A koneckonců i změny radiálních rychlostí v řádech desítek metrů za sekundu se lépe objevují, protože 12 m/s bylo v osmdesátých letech na hranici měřitelnosti, nikoliv nemožné, ale ne jednoduché. Svoji roli tedy sehrála kvalita dat, při které Walker a Campbell nebyli schopni vyloučit, zda se nejedná například o pulzace hvězdy. Gordon Walker pěkně popisuje úskalí jejich prvního programu pro hledání exoplanet pomocí měření přesných radiálních rychlostí v přehledové publikaci z roku 2012 [23]. Nicméně takto funguje věda a všechny jmenované týmy mají lví podíl na rozvoji výzkumu exoplanet, ale Mayor s Quelozem byli opravdu první, kdo objevil extrasolární planetu obíhající hvězdu podobnou Slunci. I přesto byli Gordon Walker a jeho tým prvními astronomy, kteří uměli získat velice přesné radiální rychlosti a začali hledat exoplanety [23].

## 2. Podivná planeta 51 Pegasi b

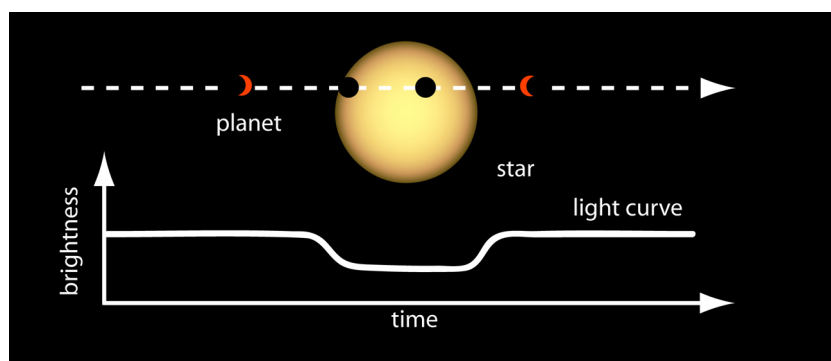
Pojďme si nyní blíže prohlédnout planetu 51 Pegasi b. Jak již bylo řečeno, z měření vychází změny radiálních rychlostí hvězdy v intervalu od plus do minus 50 m/s (obrázek 3), a tedy planeta je hmotností zhruba polovinou našeho Jupitera a poloměrem skoro dvakrát větší než náš Jupiter. Planeta 51 Pegasi b obíhá svoji hvězdu za 4,2 dne a hvězda 51 Pegasi je jen o něco teplejší než naše Slunce, je tedy velice podobná naší hvězdě [18], [17]. Jak je možné, že planeta tak blízko hvězdě může vůbec existovat? Další planetární systémy, se kterými se po roce 1995 roztrhl pytel, byly ale velice podobné. Prototypem nově objevovaných planet se stala velká plynná planeta



Obr. 3. Měřená data radiálních rychlostí pro exoplanetu 51 Pegasi b z různých přístrojů. Použitý zdroj: [http://exoplanets.org/public/plots/51\\_Peg\\_b.pdf](http://exoplanets.org/public/plots/51_Peg_b.pdf) [7]

obíhající svoji hvězdu v řádu několika dní. Poznamenejme na okraj, že dodnes není úplně jasný mechanismus vzniku takovýchto planet. Samozřejmě vyvstala otázka, jak vypadá typický planetární systém: Je to systém jako naše Sluneční soustava, nebo je to systém s velkou planetou obíhající blízko své hvězdy? Přesnou odpověď dodnes neznáme. Nicméně dnes už víme, že existuje spíše více malých planet, mnohem menších než Jupiter, ale žádný ze známých systémů se nepodobá Sluneční soustavě, která se skládá z malých kamenných planet a velkých plynných obrů s oběžnými dobami čítajícími několik desítek let. Na zodpovězení výše zmíněné otázky si budeme ještě muset chvíli počkat, nejméně do doby, než v roce 2026 vystartuje vesmírná mise PLATO [19]. Objev planety 51 Pegasi b tedy ukazuje, že nejdůležitější bylo věřit vlastním datům a že to, co astronomové hledali, vypadalo úplně jinak, než známe z naší Sluneční soustavy.

Po planetě 51 Pegasi b následovala spousta dalších planet a v roce 2000 byla potvrzena první planeta HD209458 b [10], [11], která přecházela přes disk své hvězdy a ztemňovala tak po dobu přechodu neboli tranzitu světlo z hvězdy (obrázek 4). Hloubka zákrytu pak ukazuje na velikost planety. Samozřejmě je třeba vzít v potaz velikost hvězdy, kterou můžeme určit ze spektroskopických pozorování, ale zjednodušeně lze říci, že čím větší je ztemnění světla u dané hvězdy, tím větší je planeta, která ji obíhá. Na druhou stranu je patrné, že čím blíže planeta u hvězdy obíhá, tím větší je pravděpodobnost, že nastane zákryt hvězdy planetou. Naopak, čím dále od hvězdy planeta obíhá, tím větší je pravděpodobnost, že mine hvězdný disk. Aby se zvýšila šance na pozorování zákrytu je třeba pozorovat obrovské množství hvězd, než nalezneme tranzitující systém. Campbell s Walkerem měli prostě smůlu, protože pozorovali vzorek pouze 21 hvězd, a to ještě celkem komplikovaných [25].



Obr. 4. Metoda detekce exoplanet pomocí zákrytu. Planeta přechází z pohledu pozorovatele na Zemi přes disk hvězdy a ztemňuje světlo z hvězdy. Podle velikosti hvězdy a podle hloubky zákrytu lze určit velikost planety. Typický horký Jupiter způsobí zákryt (ztemnění) o hloubce zhruba 2 %. Použitý zdroj: NASA, [https://www.nasa.gov/mision\\_pages/kepler/multimedia/images/transit-light-curve.html](https://www.nasa.gov/mision_pages/kepler/multimedia/images/transit-light-curve.html)

### 3. Lov exoplanet ze Země a z vesmíru

V roce 2000 už bylo několik desítek planet objevených pomocí metody měření radiálních rychlostí a vědělo se, že opravdu horké Jupitery, tedy planety obíhající blízko hvězdy, nejsou nic výjimečného. Jak tedy nejlépe takoveto planety hledat? Je zřejmé, že je třeba pozorovat velké množství hvězd a co nejdříve možnou dobu. Ideální je také kombinovat spektroskopickou a fotometrickou metodu, protože z fotometrie lze určit sklon oběžné dráhy planety a v kombinaci se spektroskopickými daty určit přesnou hmotnost [26]. Z toho důvodu začaly vznikat malé dalekohledy s fotometrickými kamerami, které monitorovaly velkou plochu na obloze a díky robotickému provozu, tedy s minimálním přispěním člověka, mohly fungovat velice spolehlivě a byly limitovány pouze počasím a střídáním dne a noci, tedy zemskou rotací. Pro nejúspěšnější projekt SUPERWASP provozovaný konsorciem britských univerzit byly jako pozorovací místa vybrány Kanárské ostrovy a Jižní Afrika. Výběrem místa se omezil vliv počasí. Ondřejov má příhodné podmínky k pozorování zhruba po 90–130 nocí, ale Kanárské ostrovy mohou nabídnout až 300 a více nocí ročně podobně jako například observatoře v Chile v Jižní Americe. Projekt SUPERWASP našel dodnes bezmála 200 exoplanet. Podobné projekty HAT, HATNET, KELT a další také našly několik desítek planet. Díky fotometrickým systémům tedy bylo objeveno několik stovek tranzitujících planet a tento koncept detekce planet byl zvolen pro v té době budoucí vesmírné mise. První byla evropská mise ESA CoRoT, která sestávala z dalekohledu s čočkou o průměru 27 cm a s fotometrickou kamerou monitorující  $1,5 \times 1,5$  stupně na obloze [1]. Satelit CoRoT startoval v roce 2006 a do roku 2013 úspěšně hledal nové planety. Mezi jeho nejznámější úlovky patří planeta CoRoT-7b, která byla ve své době s poloměrem pouze 1,5krát větším než Země nejmenší známou exoplanetou [16].

Mise CoRoT byla v roce 2009 následována misí NASA Kepler [2]. Kepler byl vesmírný dalekohled o průměru zrcadla 1,4 metru a byl vybaven fotometrickou široko-

úhlu kamerou, která sledovala pole o rozloze 116 čtverečních stupňů (do pozorovacího pole Keplera by se vešlo zhruba 30 Měsíců naskládaných vedle sebe) v souhvězdí Labutě. Kepler sledoval kolem 100 tisíc hvězd, objevil do roku 2018 přes 2 500 planet a zanechal po sobě stovky dalších kandidátů, které je třeba potvrdit pozemními pozorováními. Mise Kepler si připsala také prvenství v počtu malých planet, tzv. superzemí, které by mohly být podobné naší Zemi, jen o trochu větší. Několik z těchto planet objevených Keplerem by dokonce mohlo mít příhodné podmínky pro život, jak ho známe ze Země, tedy teplotu atmosféry, která umožňuje udržet vodu v kapalném skupenství. Pár příkladů je popsáno v [3], [12]. Nicméně se zde jedná pouze o více či méně přesný odhad, který vychází ze znalosti typu hvězdy a parametrů oběžné dráhy planety. Na potvrzení faktu, zda se jedná opravdu o obyvatelné planety, si budeme ještě muset počkat například na vesmírný dalekohled Jamese Webba.

Mise Kepler byla oficiálně ukončena 30. října 2018, protože satelitu došlo palivo, ale na stabilní oběžné dráze kolem Země už se připravovala další mise NASA TESS. Mise sestává ze čtyř malých širokoúhlých objektivů s průměrem čočky pouze 10 centimetrů. Obrovskou výhodou mise TESS je pokrytí oblohy. TESS monitoruje celkem zhruba 95 % oblohy a přes 400 tisíc jasných hvězd [20]. Veškeré testy proběhly na výbornou a začaly se objevovat první planety. Jedním ze zatím nejzajímavějších objevů mise TESS jsou planety s extrémně krátkou oběžnou dobou. První takovou je planeta obíhající hvězdu LHS 3844 za pouhopouhých 11 hodin. Zajímavý objev se povedl také českým astronomům, když z Ondřejova potvrdili prvního hnědého trpaslíka, kterého našla mise TESS (viz dále v kapitole Česká účast při hledání exoplanet).

O Vánocích roku 2019 úspěšně vstartovala malá mise ESA CHEOPS<sup>1</sup>, která bude zpřesňovat parametry už známých exoplanet. Zatím je sonda v pořádku a netrpělivě čekáme na první pozorování.

## 4. Co nás čeká dále?

### 4.1. PLATO

Kromě dalších planet, které objeví mise TESS, nás v roce 2026 čeká start evropské mise ESA PLATO s českou účastí. PLATO se bude skládat z 26 dalekohledů o průměru 20 centimetrů, které budou hledat zakryty u zhruba milionu jasných hvězd [19]. Rozdíl oproti TESS bude v tom, že mise PLATO bude schopna díky své fotometrické přesnosti a pozorovací strategii zachytit opravdové dvojče Země. To znamená, že se bude jednat o planetu o velikosti a parametrech Země, která obíhá hvězdu o teplotě zhruba 5 700 Kelvinů starou zhruba 4,5 miliardy let. Tato planeta by měla obíhat svoji hvězdu ve vzdálenosti 1 AU (astronomická jednotka – 150 milionů kilometrů) a jeden oběh by měl trvat kolem 365 pozemských dní. Vesmírná mise PLATO by tedy měla zodpovědět otázku, zda je naše Sluneční soustava jedinečná. Předpokládá se, že PLATO najde několik desítek pozemských dvojčat. A pokud je nenajde, bude to samozřejmě také zajímavé, protože pak ihned vyvstane na mysli otázka, proč by Země a Sluneční soustava měly být jedinečné. Nechejme se překvapit, zatím můžeme výsledek pouze hádat.

---

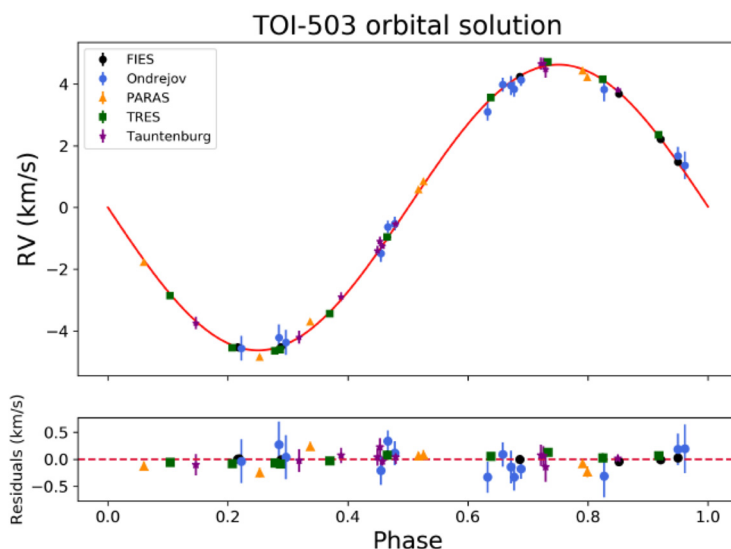
<sup>1</sup><https://cheops.unibe.ch>

## 4.2. ARIEL

V roce 2028 bude startovat další evropská mise ESA s českou účastí, mise ARIEL [22], která bude sestávat z dalekohledu s eliptickým zrcadlem o průměru 1 metr a spektrografem, který bude exoplanety přímo charakterizovat, tedy nejen hledat, ale i popisovat složení jejich atmosféry a planet samotných. Mise ARIEL nás opět přiblíží k odpovědi na otázku, zda jsme ve vesmíru sami.

## 5. Česká účast v lovu exoplanet

A jak se na celém dobrodružství hledání exoplanet podílejí čeští vědci? Do roku 2015 byly exoplanety doménou hlavně zahraničních astronomů, převážně ze Švýcarska, Francie, Německa, Velké Británie a USA, nicméně v roce 2018 oficiálně vznikla skupina exoplanet v Astronomickém ústavu Akademie věd ČR v Ondřejově<sup>2</sup> a od roku 2019 je společně s českým průmyslem oficiálně zapojena v misi PLATO. Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského Akademie věd ČR je zase českým řešitelem mise ARIEL. Kromě vesmírných misí pro výzkum exoplanet se čeští vědci zapojují i do pozemních projektů. Ondřejovský dvoumetr je hojně využíván k potvrzování planet z mise TESS [13], a jak již bylo uvedeno výše, nejnovějším objevem je potvrzení prvního tranzitujícího hnědého trpaslíka z mise TESS pomocí ondřejovského spektrografu (obrázek 5 [21]). Český tým výzkumu exoplanet je také zapojen v mezinárodní skupině institutů zabývajících se potvrzováním exoplanet, které jsou sdruženy v konsorciu KESPRINT<sup>3</sup>, jež je jedním z neúspěšnějších týmů charakterizujících exoplanety a jejich vlastnosti.



Obr. 5. Potvrzení hnědého trpaslíka TOI-503b z ondřejovských dat týmem Ján Šubjak a Petr Kabáth (student a školitel). Ondřejovská data jsou v obrázku ve srovnání s daty z dalších pozemních přístrojů. Obrázek z archivu Jána Šubjaka

<sup>2</sup><http://stelweb.asu.cas.cz/exogroup/>

<sup>3</sup><http://research.iac.es/proyecto/kesprint/>



Dále je Astronomický ústav zapojen jako vedoucí pracoviště v mezinárodním projektu PLATOSPec<sup>4</sup>, který má za cíl výstavbu nového spektrografu na observatoři La Silla v Chile. PLATOSPec bude schopen měřit radiální rychlosti s přesností kolem pár m/s, což je přesnost potřebná pro detekci některých superzemí a třeba i našeho Jupitera, který by měl vykazovat změny radiálních rychlostí o velikosti kolem 12 m/s. PLATOSPec bude tedy schopen potvrzovat zejména plynné planety v soustavách, které najde vesmírná mise PLATO. Česká republika se tedy plně zapojila do výzkumu exoplanet a česká astronomie byla doplněna o donedávna chybějící obor výzkumu.

## 6. Nobelova cena za fyziku 2019 – epilog

Nyní se ale v našem putování časem vraťme do roku 2019. Polovinu Nobelovy ceny za fyziku získali Michel Mayor a Didier Queloz za objev planety 51 Pegasi b. Jak už bylo uvedeno, 51 Pegasi b byla první potvrzenou exoplanetou, ale bylo to završení úsilí mnoha týmů, které se snažily první exoplanetu objevit. Bez úsilí ostatních týmů by nyní výzkum exoplanet nebyl jedním ze žhavých témat astrofyziky a neočekávali bychom s napětím start nových vesmírných misí. I přes ocenění celého oboru je výzkum exoplanet stále na počátku, teprve začínáme chápat, jak vypadají cizí světy, a popisovat exoplanetární prostředí. V příští dekádě očekáváme, že objevíme svět podobný našemu a snad budeme schopni také popsat jeho atmosféru. Co bude dále, na to si však musíme počkat, ale Evropská kosmická agentura právě otevírá program Voyage 2050 a nové vesmírné mise, tentokrát už třeba zaměřené přímo na detekci prvků v atmosférách exoplanet, na sebe určitě nedají dlouho čekat. Nobelova cena udělená tomuto oboru byla zajisté zcela zasloužená a jen pomůže jeho rozvoji v budoucnosti.

**Poděkování.** V článku byly využity údaje z Exoplanet Orbit Database a Exoplanet Data Explorer na webu [exoplanets.org](http://exoplanets.org).

### L i t e r a t u r a

- [1] BAGLIN, A., AUVERGNE, M., BARGE, P., MICHEL, E., CATALA, C., DELEUIL, M., WEISS, W.: *The CoRoT mission and its scientific objectives*. AIP Conference Proceedings 895 (2007), 201–209.
- [2] BORUCKI, W. J.: *KEPLER Mission: development and overview*. Rep. Progr. Phys. 79 (2016), article no. 036901.
- [3] BORUCKI, W. J., AGOL, E., FRESSIN, F., et al.: *Kepler-62: A five-planet system with planets of 1.4 and 1.6 Earth radii in the habitable zone*. Science 340 (2013), 587–590.
- [4] CAMPBELL, B., WALKER, G. A. H.: *Precision radial velocities with an absorption cell*. Publ. Astron. Soc. Pac. 91 (1979), 540–545.
- [5] CAMPBELL, B., WALKER, G. A. H., YANG, S.: *A search for substellar companions to solar-type stars*. Astrophys. J. 331 (1988), 902–921.
- [6] HALE, A.: *On the nature of the companion to HD 114762*. Publ. Astron. Soc. Pac. 107 (1995), 22–26.
- [7] HAN, E., WANG, S. X., WRIGHT, J. T., et al.: *Exoplanet orbit database II. Updates to Exoplanets.org*. Publ. Astron. Soc. Pac. 126 (2014), 827–837.

---

<sup>4</sup><https://stelweb.asu.cas.cz/plato/index.html>

- [8] HATZES, A. P., COCHRAN, W. D.: *Long-period radial velocity variations in three K giants*. *Astrophys. J.* 413 (1993), 339–348.
- [9] HATZES, A. P., COCHRAN, W. D., ENDL, M., et al.: *A planetary companion to  $\gamma$  Cephei A*. *Astrophys. J.* 599 (2003), 1383–1394.
- [10] HENRY, G. W., MARCY, G. W., BUTLER, R. P., et al.: *A transiting “51 Peg-like” planet*. *Astrophys. J.* 529 (2000), L41–L44.
- [11] CHARBONNEAU, D., BROWN, T. M., LATHAM, D. W., MAYOR, M.: *Detection of planetary transits across a Sun-like star*. *Astrophys. J. Lett.* 529 (2000), L45–L48.
- [12] JENKINS, J. M., TWICKEN, J. D., BATALHA, N. M., et al.: *Discovery and validation of Kepler-452b: A 1.6  $R_{\oplus}$  super Earth exoplanet in the habitable zone of a G2 star*. *Astron. J.* 150 (2015), article no. 56.
- [13] KABÁTH, P., SKARKA, M., SABOTTA, S., et al.: *Ondřejov echelle spectrograph, ground based support facility for exoplanet missions*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 132 (2020), article no. 035002.
- [14] KIEFER, F.: *Determining the mass of the planetary candidate HD 114762 b using Gaia*. *Astron. Astrophys.* 632 (2019), L9.
- [15] LATHAM, D. W., MAZEH, T., STEFANIK, R. P., MAYOR, M., BURKI, G.: *The unseen companion of HD114762: a probable brown dwarf*. *Nature* 339 (1989), 38–40.
- [16] LÉGER, A., ROUAN, D., SCHNEIDER, J., et al.: *Transiting exoplanets from the CoRoT space mission VIII. CoRoT-7b: the first super-Earth with measured radius*. *Astron. Astrophys.* 506 (2009), 287–302.
- [17] MARCY, G. W., BUTLER, R. P., WILLIAMS, E., et al.: *The planet around 51 Pegasi*. *Astrophys. J.* 481 (1997), 926–935.
- [18] MAYOR, M., QUELOZ, D.: *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. *Nature* 378 (1995), 355–359.
- [19] RAUER, H., CATALA, C., AERTS, C., et al.: *The PLATO 2.0 mission*. *Exp. Astron.* 38 (2014), 249–330.
- [20] RICKER, G. R., WINN, J. N., VANDERSPEK, R., et al.: *Transiting exoplanet survey satellite*. *J. Astronom. Telescopes Instruments Systems* 1 (2015), article no. 014003.
- [21] ŠUBJAK, J., et al.: *TOI-503: The first known brown dwarf-Am star binary from the TESS mission*.
- [22] TINETTI, G., DROSSART, P., ECCLESTON, P., et al.: *A chemical survey of exoplanets with ARIEL*. *Exp. Astron.* 46 (2018), 135–209.
- [23] WALKER, G. A. H.: *The first high-precision radial velocity search for extra-solar planets*. *New Astron. Rev.* 56 (2012), 9–15.
- [24] WALKER, G. A. H., BOHLENDER, D. A., WALKER, A. R., et al.: *Gamma Cephei: Rotation or planetary companion?* *Astrophys. J. Lett.* 396 (1992), L91–L94.
- [25] WALKER, G. A. H., WALKER, A. R., IRWIN, A. W., et al.: *A search for Jupiter-mass companions to nearby stars*. *Icarus* 116 (1995), 359–375.
- [26] WINN, J. N.: *Exoplanet transits and occultations*. *Exoplanets* (ed. S. Seager), Univ. Arizona Press, Tucson, 2011.
- [27] WOLSZCZAN, A., FRAIL, D. A.: *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*. *Nature* 355 (1992), 145–147.