

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Grygar

Úloha přesnosti při astronomických objevech

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 43 (1998), No. 3, 177--183

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137582>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1998

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



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

Úloha přesnosti při astronomických objevech

Jiří Grygar, Praha

1. Úvod

Lidské oko bylo po tisíciletí jediným astronomickým detektorem a přístrojem. Jeho úhlové rozlišení dosahuje za optimálních podmínek $1'$ a největší apertura při nočním vidění činí 8 mm. Jeho kvantová účinnost 0,5 je slušná a dynamický rozsah až neuvěřitelně vysoký ($1 : 10^7$), spektrální pokrytí je však velice úzké. Poměr největší a nejmenší viditelné vlnové délky je pouze 1,8 : 1 (pro čípky, které jsou ale málo citlivé) a při nočním vidění téměř 1 : 1 (citlivější tyčinky vnímají monochromatické světlo o vlnové délce kolem 510 nm). Lidské oko má velmi omezenou integrační schopnost, nejvýše 1 s.

Jakýkoli přístroj nebo detektor, který překonává možnosti lidského oka, je tedy schopen přinést nové astronomické objevy, jak se už v minulosti mnohokrát ukázalo. Tycho Brahe (1546–1601) zůstává největším pozorovatelem před objevem dalekohledu, který výborně využíval schopností lidského oka. Galileo Galilei (1564–1642), jenž zřejmě jako první vědec používal jednoduché dalekohledy k pozorování oblohy, učinil epochální astronomické objevy v docela krátkém období mezi lety 1609–1611, díky poměrně mírnému zvětšení přesnosti svých měření, jak je to vidět v tabulce 1.

TABULKA 1. Galileovy dalekohledy

Parametr	Numerická hodnota	Zlepšení vůči lidskému oku
Apertura	16–38 mm	23 : 1
Rozlišení	20–10 mm	6 : 1
Zvětšení	3–33krát	33 : 1

Tato relativně malá vylepšení zhruba o jeden řád stačila k velkým objevům — viz tabulku 2.

RNDr. Jiří GRYGAR, CSc. (1936), pracuje ve Fyzikálním ústavu AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8.

Redakce PMFA článek obdržela v angličtině. Do češtiny text přeložila ZUZANA BUDÍNOVÁ, posluchačka 3. ročníku MFF UK, obor astronomie a astrofyzika.

Na stejné téma proslovil autor přednášku na MFF UK v Praze dne 5. 2. 1998 v rámci programu „Jednoho dne s fyzikou“ pro středoškolské studenty. Pro velký počet zájemců, značně převyšující kapacitu každé z poslucháren v karlovském areálu, musel autor přednášku přednést dvakrát.

TABULKA 2. Galileova pozorování

říjen–prosinec 1609	mapa Měsíce
leden 1610	objev čtyř Jupiterových měsíců
říjen 1610	objev fází Venuše
červen 1611	pozorování slunečních skvrn; důkaz rotace Slunce
1611	Mléčná dráha je složena z mnoha slabých hvězd

Galileo také pozoroval zvláštní vzhled kotouče planety Saturn, ale jeho dalekohledy nestačily k objevu přesného tvaru Saturnova prstence. Během svých systematických pozorování Jupitera a jeho satelitů náhodou zaznamenal polohu planety Neptun; považoval jej však za hvězdu.

2. Éra refraktorů

Galileovi následníci používali refraktory Keplerova typu, který vynalezl roku 1613 Johannes Kepler (1571–1630). Na konci 19. století dosahovaly refraktory nejvyššího technicky proveditelného průměru 1 m. Jejich citlivost překonávala prosté lidské oko o více než čtyři řády a úhlové rozlišení o více než dva řády. V roce 1655 správně popsal Christiaan Huygens (1629–1695) tvar Saturnova prstence, roku 1725 pak James Bradley (1693–1762) objevil aberaci světla (aberační konstanta činí 20,5") a roku 1839 změřil Friedrich Bessel (1784–1846) první hvězdnou paralaxu (o velikosti mírně menší než 1").

3. Éra reflektorů

Refraktory měly omezený průměr a také spektrální rozsah (optické sklo je zčásti průhledné v blízkém ultrafialovém oboru spektra, ale téměř neprůhledné v infračervené stejně jako v daleké ultrafialové oblasti spektra), takže vynález zrcadlového dalekohledu Isaacem Newtonem (1643–1727) v roce 1671 znamenal novou astronomickou éru. Vhodná technologie k výrobě velkých skleněných zrcadel byla nicméně k dispozici až na konci 19. století a skutečně velké přístroje se začaly stavět až v průběhu 20. století, jak ukazuje následující tabulka 3.

Úhlové rozlišení dalekohledu roste obecně přímo úměrně s jeho průměrem a jeho citlivost je úměrná druhé mocnině průměru. Zlepšení je ale větší než nominální, když vezmeme v úvahu pomocné systémy aktivní a adaptivní optiky, které se používají u velkých reflektorů, dokončených nebo obnovených po roce 1990.

TABULKA 3. Největší astronomické reflektory

Rok	Místo	Apertura (m)
1908	Mt. Wilson, CA, USA	1,5
1917	Mt. Wilson, CA, USA, (Hooker)	2,5
1949	Mt. Palomar, CA, USA, (Hale)	5,1
1976	Zelenčukskaja, Rusko, (BTA)	6,0
1992	Mauna Kea, HI, USA, (Keck I)	10,0
2000?	Mt. Graham, AZ, USA, (LBT)	11,8
2004?	Mt. Paranal, Chile, (VLT)	16,0

4. Zdokonalování detektorů

Přibližně do roku 1885 se všechna pozorování omezovala na využití schopností lidského oka. Vynález fotografie astronomii velice změnil. Fotografické emulze mají značnou integrační schopnost a již kolem roku 1890 umožňovaly až desetihodinové expozice, což významně zvětšilo citlivost dalekohledů pro zobrazení slabých objektů. Postupně se zdařilo připravit fotografické emulze s rozličně širokými spektrálními rozsahy pro různé oblasti záření od daleké ultrafialové až po infračervenou. Fotografie, schopná věrně zaznamenávat a uchovávat astronomická pozorování po staletí, značně přispěla k největší revoluci v astronomické detekční technice. Byla také nepostradatelná pro využití spektroskopie v moderní astrofyzice. Použití klasické fotografie má však dvě nevýhody: reakce emulze na dopadající světlo je vysoce nelineární a její dynamický rozsah je malý (1 : 100). Také kvantová účinnost emulze je velmi nízká (0,02). Jisté zlepšení linearitu a dynamického rozsahu ve dvacátých letech umožnilo první použití fotočlánků a poté ve čtyřicátých letech mnohem citlivějších fotonásobičů, které jsou dodnes hlavními detektory pro široko- i úzkopásmovou fotometrii v ultrafialové a optické oblasti. Zatím poslední revoluce nastala v osmdesátých letech, kdy se staly dostupnými matice CCD. Během několika let nahradily matice CCD fotografii s výjimkou širokoúhlého zobrazení a astrometrie. Kamery CCD s kvantovou účinností okolo 0,8 mají výborný dynamický rozsah a integrační schopnost a jejich výstup se dá snadno digitalizovat. Současný reflektor s průměrem 0,6 m, vybavený maticí CCD, je schopen poměrně levně zobrazovat hvězdy, mlhoviny a galaxie tak slabé, jaké dokázal na počátku šedesátých let zachycovat jedině pětimetrový Haleův teleskop, vybavený fotografickou kamerou.

5. Neoptická astronomie

V roce 1932 objevil Karl Jansky (1905–1950) dekametrové rádiové vlny vysílané Mléčnou dráhou a založil radioastronomii jako nový nástroj výzkumu vesmíru. Vylepšené anténní systémy a přijímače umožnily astronomům otevřít ve čtyřicátých letech

rádiové okno metrových vln a v padesátých letech vln decimetrových, v šedesátých letech pásmo centimetrových vln, v sedmdesátých letech dokonce obor vln milimetrových a konečně v devadesátých letech pásmo submilimetrové. Všechny uvedené rádiové signály z vesmíru jsou tedy dostupné díky dobré rádiové průhlednosti atmosféry Země a mohou být dále analyzovány (rozsah poměru vlnových délek zde činí $10^4 : 1$).

Ne všechna „spektrální okna“ jsou ale dostupná ze zemského povrchu, takže bylo potřebí nemalého úsilí, aby byla pozorovací stanoviště postupně umístěna dostatečně vysoko v zemské atmosféře nebo za jejími hranicemi. Raketové sondy a výškové balóny umožnily roku 1947 ultrafialové snímkování Slunce, ale skutečný průlom do ultrafialové oblasti (vlnové délky kratší než 330 nm) nastal až po zavedení umělých družic po roce 1957. Tímto způsobem se roku 1962 stalo dostupným rentgenové záření (vlnové délky kratší než 10 nm, tj. energie fotonů větší než 0,1 keV) a od roku 1975 i záření gama (vlnové délky kratší než 0,01 nm, tj. energie fotonů nad 100 keV až do 100 EeV). Poslední spektrální okno ve středním a dlouhém infračerveném záření (vlnové délky 20–200 μm) bylo otevřeno v roce 1983 díky první kryogenní astronomické družici IRAS.

6. Současný stav pozorovací astronomie

V posledním desetiletí jsou tedy všechny frekvence elektromagnetického spektra od desetimetrových rádiových vln až po vysokoenergetické záření gama otevřeny k astronomickým studiím; odpovídající poměr pozorovatelných vlnových délek, resp. energií fotonů činí $10^{24} : 1$. Relativní spektrální rozlišení dosahuje rekordní hodnoty 10^{-8} a poměr měřitelných intenzit zdrojů v optické oblasti $10^{23} : 1$, zatímco časové rozlišení změn intenzity nabývá hodnot od 3 μs do $3 \cdot 10^{17}$ s (poměr $10^{23} : 1$). Sběrná plocha největších optických teleskopů, která určuje množství zachycených fotonů za jednotku času, se v druhé polovině našeho století zvýšila rychleji než populace na Zemi, jak je vidět z následující tabulky 4:

TABULKA 4. Zvětšování sběrné plochy největších optických teleskopů

Rok	Sběrná plocha (m^2)	Lidská populace (v miliardách)
1950	50	2,6
1980	150	4,4
1992	270	5,5
2000	1000 ?	6,5 ?

V radioastronomii od roku 1963 náleží největší sběrná plocha sférickému reflektoru v portorickém Arecibu — 70 700 m^2 . Obří nepohyblivý reflektor byl několikrát vylepšován kvůli zvětšení poměru signál–šum a rozsahu přijímaných vlnových délek. Tento významný přístroj pracuje také jako nejsilnější astronomický radar při studiu těles sluneční soustavy.

Radioteleskopy mohou být navíc docela snadno použity jako interferometry s velmi dlouhou základnou (VLBI), porovnatelnou s průměrem Země. To dává astronomii nepřekonatelnou úhlovou rozlišovací schopnost, přibližně nepřímo úměrnou vlnové délce. Současné úhlové rozlišení je vskutku ohromující (tabulka 5):

TABULKA 5. VLBI interferometry (základna 10 000 km) — úhlové rozlišení

Vlnová délka (mm)	Frekvence (GHz)	Rozlišení (úhlové milivteřiny)
900	0,33	24
60	5,0	0,4
7	43,0	0,2

7. Příklady epochálních objevů

Výběr převratných objevů v posledním století je vždy trochu subjektivní, ale skoro každý by souhlasil, že mezi ně musíme zařadit Hubblův (Edwin Hubble, 1889–1953) lineární vztah mezi vzdáleností a rudým posuvem z kosmologických objektů (galaxií a kvasarů). Objev umožnilo použití tehdy největšího 2,5metrového Hookerova reflektoru na Mt. Wilsonu, který zůstal nejmocnějším přístrojem na světě až do zahájení provozu 5,1metrového Haleova reflektoru na Mt. Palomaru roku 1948.

7.1. Kvasary

Nový kalifornský reflektor napomohl v letech 1960–63 objevu kvazistelárních objektů (kvasarů) a jejich rekordních červených posuvů (od $z = 0,16$ roku 1963 do $z = 4,9$ v roce 1991). Nespočetné studie kvasarů jsou založeny na pozorováních mnoha prvotřídními přístroji na Zemi i na oběžné dráze. Je zřejmé, že se tyto objekty většinou zrodily v počátečních fázích existence vesmíru a představují neuvěřitelně účinné stroje na přeměnu gravitační energie v elektromagnetické záření.

7.2. Pulsary

Ke konci šedesátých let byl objeven jiný typ mimořádně účinných „měničů energie“ díky úsilí britských radioastronomů z Mullardovy observatoře (Cambridge, England). Pod dohledem Antona Hewishe (*1924) vybudovali rozsáhlé pole rádiových antén s celkovou sběrnou plochou 340 000 m² pracující na frekvenci 81,5 MHz (3,7 m) s dobrým časovým rozlišením 0,1 s. Po pěti měsících rádiového mapování severní oblohy objevila Hewishova studentka Jocelyn Bellová (*1939) několik rádiových zdrojů vykazujících pravidelné „oscilace“ s periodou 0,25 až 1,34 s. Článek o objevu byl publikován v časopise Nature v březnu 1968 a vedl k rozpoznání nové třídy astronomických objektů nazvaných pulsující rádiové zdroje (krátce pulsary). Roku 1969 vysvětlil Thomas Gold

(*1920) pulsary jako rychle rotující kompaktní neutronové hvězdy s extrémně mocnou magnetosférou. Hewish dostal Nobelovu cenu za fyziku v roce 1974 za svůj podíl na tomto znamenitém objevu.

7.3. Reliktní záření

Američtí radioastronomové Arno Penzias (*1933) a Robert Wilson (*1936) vybudovali roku 1964 anténu vybavenou velice citlivým radiometrem pracujícím na frekvenci 4,1 GHz (73 mm) v Holmdelu, N. J. (ve stejných Bellových laboratořích, kde roku 1932 vykonal Karl Jansky svá průkopnická měření). V roce 1965 oznámili objev izotropního mikrovlnného záření vesmírného pozadí, odpovídajícího záření černého tělesa o teplotě 3 K. Během roku potvrdila tento překvapivý objev měření Roberta Dicka (1916–1997) a jeho spolupracovníků, a tím bylo dokázáno, že se jedná o pozůstatek velmi horkého elektromagnetického vlnění z éry záření v rané fázi vývoje vesmíru (300 000 let po velkém třesku). Toto záření je tedy mnohem starší než všechny hvězdy a galaxie pozorované nejmocnějšími optickými a rádiovými teleskopy. Penziasovi a Wilsonovi byla roku 1978 udělena Nobelova cena za fyziku.

7.4. Planety mimo sluneční soustavu

Roku 1995 oznámili Michael Mayor a Didier Queloz, že získali silný nepřímý důkaz existence jupiterovské planety u hvězdy slunečního typu 51 Pegasi, vzdálené 18 parseků od Slunce. Jako důkaz uvedli sinusové změny radiální rychlosti hvězdy s amplitudou $59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jejich spektrograf připojený k 1,8metrovému reflektoru observatoře Haute Provence ve Francii byl schopen zjistit změny rychlosti o velikosti $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Systematická měření tedy během roku poskytla základní parametry nepozorované složky — planety nepatřící do sluneční soustavy (krátce exoplanety). Tato planeta obíhá okolo hvězdy slunečního typu po kruhové dráze o poloměru pouhých 7,5 miliónu kilometrů s periodou 4,2 dne. Hmotnost má určitě větší, než Jupiter, ale pravděpodobně ne více než dvakrát. Hvězda 51 Pegasi se Slunci podobá svou barvou a povrchovou teplotou. Je o něco málo méně hmotná než Slunce, ale zato o něco větší a o osmdesát procent zářivější, takže bude oproti Slunci zhruba o dvě miliardy let starší.

Objev byl skutečným průlomem; během roku bylo v Evropě a Spojených státech detekováno více než deset exoplanet použitím stejné pozorovací techniky na další hvězdy slunečního typu. Tyto exoplanety jsou obecně hmotností srovnatelné s Jupiterem, ale mají rozličné dráhy, od velice blízkých k centrální hvězdě (jako 51 Pegasi) až po poměrně vzdálené orbity s periodami srovnatelnými s naším Jupiterem.

Pokud by snad nějakí mimozemšťané pozorovali z dálky Slunce, mohli by detektovat Jupiter díky jeho gravitačnímu působení na Slunce v případě, že by jejich přístroje byly schopny rozlišit změny rychlosti okolo $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Stejným způsobem by mohl

být zjištěn Saturn, kdyby rozlišení dosáhlo $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. To je právě přesnost nejlepšího současného spektrografu, pracujícího od roku 1996 na Mauna Kea na Havaji u obřího desetimetrového Keckova teleskopu.

8. Fundamentální objevy z pohledu Martina Harwita

Profesor Martin Harwit z Cornellovy univerzity vydal v roce 1981 zajímavou knihu, ve které podrobně analyzoval podmínky a okolnosti důležitých astronomických objevů v celé historii lidstva. Vybral 43 fundamentálních objevů od velmi dávné minulosti (planety, komety, hvězdy) až do současnosti (kvasary, pulsary, reliktní záření). Jeho analýza jasně ukazuje, jak technická zdokonalení téměř nevyhnutelně vedou k zásadním objevům. Technickým zdokonalením má na mysli řádová zvýšení spektrálního pokrytí, úhlového a časového rozlišení, poměru signálu k šumu apod. Dále ukazuje, že možnost fundamentálních objevů pomocí konkrétního nového přístroje je časově omezená (například Galileo učinil všechny epochální objevy během pouhých tří let; k dalším zásadním objevům došlo až při použití přístrojů podstatně lepších, než byly jeho primitivní dalekohledy). Je také zřejmé, že současná astronomie za mnohé vděčí vývoji ve vojenské technice (radaru, raketám, dozoru nad zákazem jaderných zbraní, špionážním družicím, adaptivní optice apod.). V poslední době přicházejí s nejdůležitějšími objevy technici a fyzikové spíše než klasicky zaměřeni astronomové.

Harwit uzavírá svou knihu zaslíbeným odhadem, že dosud byla objevena pouze třetina všech fundamentálních astronomických jevů, takže je před námi stále ještě mnoho práce, směřující ke zdokonalení přesnosti a síly pozorovací techniky. Úsilí nutné k dalšímu vylepšování navíc nelineárně roste. Patrně se ukáže, že téměř celou práci v oblasti astronomie máme ještě před sebou, což zabere další staletí nebo spíše tisíciletí.

L i t e r a t u r a

- [1] M. HARWIT: *Cosmic Discovery. The search, scope and heritage of astronomy*. Basic Books, Inc., New York 1981.