

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS

**PRO FYZIKU**



2010

**Nobelova cena za fyziku 2008:  
plné texty přednášek  
o narušení symetrií**

**Cesta k udělení  
Nobelovy ceny  
Jaroslavu Heyrovskému  
v roce 1959**

**Nobelova cena za fyziku 2009:  
triumf prakticky využitých  
objevů – optická vlákna  
a nábojově vázané struktury (CCD)**



Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v. v. i., Praha;  
<http://cscasfyz.fzu.cz>

**svazek 60** ISSN 0009-0700



# Charles Kuen Kao a optická vlákna

## Polovina Nobelovy ceny za fyziku 2009

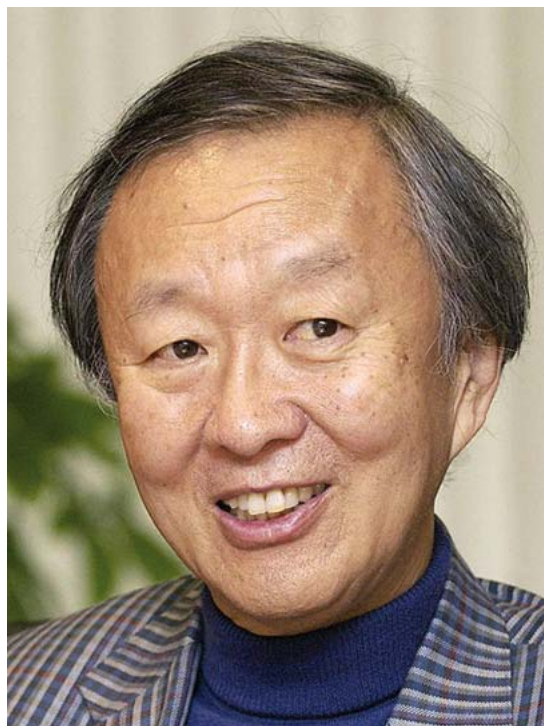
Ivan Kašík

Oddělení technologie optických vláken, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8

**D**ne 10. prosince 2010 udělila Švédská královská akademie věd Nobelovu cenu za fyziku trojici vědců, kteří významně přispěli k posunutí hranic lidského poznání v oblasti fotoniky. Polovinu ceny získal Charles Kuen Kao (obr. 1) za průlomové výsledky týkající se přenosu světla ve vláknech pro optickou komunikaci. Po čtvrtině ceny získali George Smith s Willardem Boylem za vynález CCD čipu, který je dnes základním prvkem fotoaparátů a kamer (viz další aktualita v tomto čísle na str. 12).

Ve většině odborných nebo laických průzkumů o nejvýznamnější vědecký či vědecko-technický počin 20. století zaujímá internet vždy jedno z předních míst. Přitom právě rozvoj informačních sítí stojí na základě dvou klíčových objevů: laseru a optických vláken [Townes\_2006]. Za objev laseru získala Nobelovu cenu trojice vědců N. G. Basov, A. M. Prochorov a C. H. Townes. Stalo se tak v roce 1966, tedy přesně v době, kdy K. C. Kao publikoval svůj klíčový článek o optických vláknech [Kao\_1966], na jehož základě získal nejvyšší vědecké ocenění teprve nedávno. Ačkoliv to nemusí být na první pohled zřetelné, sotva si dnes představíme život bez optických vláken. Zdaleka nemusíme být horlivými uživateli e-mailové komunikace, e-learningu a podobných novostí, stačí jen použít služeb kteréhokoliv bankomatu nebo si vybrat peníze „z knížky“ na poštu. Ani příznivci mobilních telefonů se zpravidla neobejdou bez služeb optických sdělovacích sítí, ačkoliv viditelné kabelové spojení mezi jejich aparátem a prvním komunikačním uzlem je nahrazeno neviditelným mikrovlnným pojítkem. Většina telekomunikačních systémů dnes využívá datového přenosu po vysokorychlostních sítích budovaných na základě optických vláken. Z jedné strany nás taková výměna informací činí svobodnějšími a přispívá ke globalizaci – není dnes problémem vyměnit si čerstvé informace třeba o počasí s kamarády na Novém Zélandu. Z druhé strany nás však může na svobodě omezovat např. různými detekčními systémy a přispívá k odlišnění našeho života, kdy elektronická komunikace převládá nad tou přímou mezilidskou. Záleží jen na uživateli a sám oceněný Kao projevil obavu spojenou s přáním, aby výsledky jeho práce lidé využívali ke svému prospěchu.

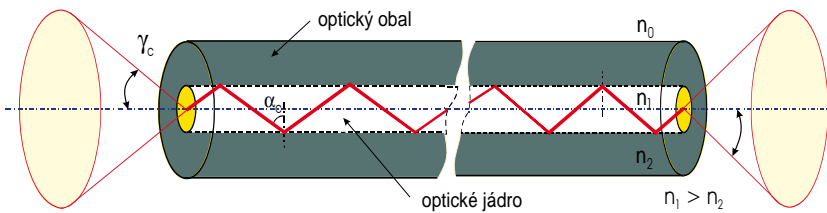
Počátky optického sdělování jsou staré jako lidstvo samo. Již staří Indiáni zapalovali své ohně na znamení blízkého se nebezpečí a dlouhá staletí to po nich opako-



Obr. 1 Charles Kuen Kao

vali jiní. Za počátky sdělování pomocí optického vlnovodu se obvykle považují experimenty sira J. Tyndalla. Ten si uvědomil fyzikální princip totálního odrazu paprsku šířícího se prostředím o vyšším indexu lomu na rozhraní s dielektrikem o nižším indexu lomu, který vyplývá ze Snellova zákona. V roce 1853 ho demonstroval pomocí pramene vody (o indexu lomu 1,33) obklopeného atmosférou (o indexu lomu  $\sim 1$ ) na výtoku z nádoby, do které soustředil svazek viditelného světla. Ačkoliv podobný experiment předváděl v řadě míst Evropy již v roce 1841 D. Colladon z univerzity v Ženevě a popsal je ve francouzském časopise Comptes Rendus, Tyndallový populární prezentace se staly známějšími. Dodnes po celém světě pracují na tomto principu všechny světelné fontány, tu Křížkovu z roku 1891 nevyjímaje. Praktickému využití principu světelného přenosu na delší vzdálenosti však bránily poměrně vysoké optické ztráty a disperze optických vláken – vlnovodů. A právě na tento problém se soustředil Kao se svými spolupracovníky G. A. Hockhamem a T. Karbowiakem.

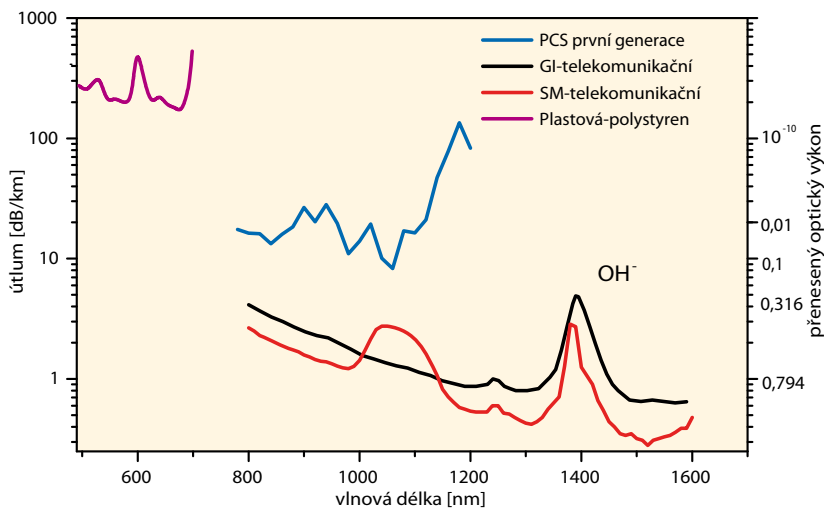
>> citace <<



Obr. 2 Optické vlákno – princip

Ve své průlomové práci prezentované v Proceedings IEE v červenci 1966 Kao poprvé souhrnně popsal problematiku optického přenosu v optických vláknech [Kao\_1966]. Definoval optická vlákna jako dielektrické vlnovody převážně kruhové symetrie, jejichž podélný rozměr je mnohonásobně větší než příčný, kde k přenosu světla dochází na základě totálního odrazu na rozhraní optického jádra o vyšším indexu lomu a optického obalu o nižším indexu lomu (obr. 2). Soustředil se na teoretický rozbor příčin optických ztrát, odhadl potenciální snížení optických ztrát ve vláknech z křemenného skla a experimentálně demonstroval optický přenos pomocí připraveného jednovidového vlákna a He-Ne laseru. Z hlediska času soutěžil s týmem vedeným E. Spitzem pracujícím v Orsay u Paříže, z hlediska principu soutěžil s optickým přenosem ve volné atmosféře a s přenosem pomocí mikrovln. Soubor o čas i princip nakonec vyhrál. Z prostého poměru frekvencí je zřejmé, že mikrovlny by přinesly jen malé zlepšení šířky přenášeného pásma. A zatímco první experimenty přenosu záření laserů zemskou atmosférou sice prokázaly ztráty jen asi 1 dB/km (to znamená snížení výkonu asi o 21 % na vzdálenosti 1 km) za optimálních podmínek, což bylo řádově méně než kolik byly ztráty soudobých optických vláken, při smogu, mlze, dešti nebo sněžení byl přenos zcela nerealizovatelný.

Kao se tedy soustředil na problém optických ztrát a disperze optických vláken. Správně konstatoval, že příprava vláken o větší délce z krystalických nebo polykrytalických materiálů je nereálná. Proto se soustředil na amorfni materiály, zejména křemenné sklo, polymethylmetakrylát a polystyren. V poválečných letech měl již od kolegů z týmu vedeného F. Hydem k dispozici syntetické křemenné sklo vzniklé hydrolyzou  $\text{SiCl}_4$ , jehož optické ztráty byly asi o jeden řád nižší než u ostatních materiálů. Z výpočtu Rayleighova rozptylu určil minimum optických ztrát do oblasti 300–1 000 nm a identifikoval kritické nečistoty způsobující značné absorpční

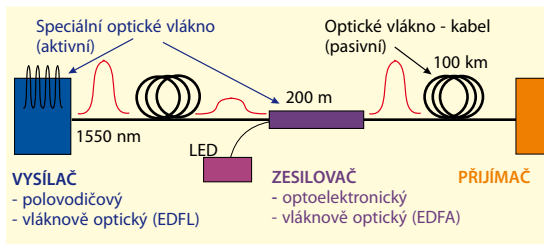


Obr. 3 Optické ztráty (útlum)

ztráty, především ionty  $\text{Fe}^{3+}$ . Dnes hovoříme o uvedené spektrální oblasti jako o prvním telekomunikačním „okně“ a ke kritickým nečistotám přibyla chemicky vázaná vlhkost (ionty OH<sup>-</sup>), která intenzivně absorbuje záření dále v blízké infračervené oblasti okolo 1 400 nm. Kao předpověděl, že pokud bude dosaženo obsahu železitých iontů ve skle na úroveň jednoho ppm (tj. desetitisíciny procenta), optické ztráty vláken se sníží na úroveň okolo 20 dB/km. Pro přenos to znamená, že na vzdálenost 1 km bude přeneseno 1 % z navázaného vstupního optického výkonu, což je ještě postačující pro telekomunikační přenosy na kratší až střední vzdálenosti. Z tehdejšího hlediska to byla předpověď vizionářská, protože ztráty optických skel se v té době pohybovaly okolo 1 000 dB/km. S disperzí se hodlal Kao vypořádat přípravou jednovidového vlnovodu, tedy vlákna, ve kterém se bude šířit jeden jediný vid. Při vlnové délce použité pro přenos je jasné, že vlnovodné jádro takového vlákna mělo průměr jen několik mikrometrů. To samozřejmě přinášelo problémy jak mechanické pevnosti, tak přesné kontroly průměru jádra vlákna a ztrát vlivem (mikro) ohybů. Nicméně se mu podařilo připravit vlákno o průměru v jednotkách mikrometrů s tolerancí okolo 5 %, zafixovat ho do kapiláry naplněné imerzní kapalinou a s pomocí He-Ne a/nebo GaAs laseru demonstrovat přenos ve viditelné a blízké infračervené oblasti.

Malé rozměry vyvinutých vláken samozřejmě vyvolávaly pochybnosti o jejich praktickém využití v komunikacích stejně tak jako tehdejší vysoké optické ztráty použitých materiálů. Poměrně brzy si skleněná vlákna našla své využití v elektrotechnice, kde přenos na vzdálenosti několika metrů byl zároveň dostačující pro galvanické oddělení jednotlivých vysokonapěťových částí strojů a zařízení. Dále začala být vlákna vzhledem ke svým rozměrům úspěšně využívána pro optické senzory [Boisde\_1996]. Francouzský tým od výzkumu na poli telekomunikačních vláken zakrátko upustil, zatímco Kao se soustředil na základní výzkum dostatečně čistých materiálů vhodných pro přenos. Jeho myšlenkám vyšli vstříc ve sklárnách Corning Glass pánové R. Maurer, P. Schultz a D. Keck. Přišli s myšlenkou vytáhnout vlákno z „preformy“ složené z tyčky křemenného skla dopovaného  $\text{TiO}_2$  umístěné v trubce z čistého křemenného skla. Rozdíl ve složení sklovin jim zajišťoval potřebný rozdíl indexu lomu mezi optickým jádrem a obalem. Modifikovali vyvinutou metodu přípravy syntetického křemene a překonali problém vysoké teploty zpracování okolo 2 000 °C při přípravě vlákna. Přes počáteční obtíže se jim nakonec v roce 1970 podařilo připravit dostatečně dlouhé jednovidové vlákno s útlumem pod 20 dB/km v červené části spektra.

Zásadní kvalitativní posun v oblasti optických vláken [Miller\_1979] přinesl vynález metody Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) pro přípravu preforem – tyčí pro tažení optických vláken. J. B. McChesney ji prezentoval v roce 1974 na sklářském kongresu v Číně, resp. v roce 1982 [Nagel\_1982]. Vycházel ze skutečnosti, že prakticky nelze efektivně čistit látky v pevném stavu, avšak např. destilací nebo mikrofiltrací lze dobře čistit výchozí kapaliny, které pak mohou sloužit k přípravě vysoce čistého skla. V této sklářsky poněkud neobvyklé metodě navrhl oxidovat páry  $\text{SiCl}_4$  přímo v prostoru substrátové trubice a vzniklé submikronové částice  $\text{SiO}_2$  usazovat na stěny ve formě tenkých skelných vrstev. Přípravou preforem po jednotlivých vrstvách tak lze, při vhodném dopování, dosáhnout li-



**Obr. 4** Optické komunikace – princip

bovolného koncentračního profilu, a tedy i profilu indexu lomu. Ale především se lze pečlivým čištěním výchozích látek dopracovat obsahu např. železitých iontů pod 1 ppm, který v roce 1966 označil K. C. Kao za kritický. Koncept metod CVD byl později rozpracován do řady modifikací (PCVD, OVD, VAD). Jednovidová vlákna tažená z preforem připravených metodou MCVD dnes dosahují minimálních optických ztrát okolo 0,2 dB/km, což odpovídá poklesu optického výkonu o 4,6% na vzdálenosti 1 km, jak je patrné z obr. 3.

Při pohledu do nedávné historie zjistíme, že již v roce 1975 byla instalovaná (v Dorsetu) první komerční optická přenosová trasa pracující na vlnové délce okolo 1 300 nm. V současné době je rekordem přenos rychlostí 25,6 terabitů za sekundu, kdy bylo multiplexováno 320 signálů, každý s kapacitou 80 gigabitů za sekundu, na 160 různých vlnových délkách a ve dvou ortogonálních polarizacích po 240 km vlákna [Gnauck\_2007]. Ačkoliv bylo již podle odhadů položeno na zeměkouli kolem jedné miliardy kilometrů telekomunikačních vláken, z toho asi 700 tisíc kilometrů jen v naší malé zemi, výzkum na tomto poli pokračuje dále. S rozvojem optických komunikací (obr. 4) se ukázala např. potřeba optického zesilování, která znamenala velkou výzvu pro rozvoj vláknových zesilovačů a laserů [Desurvire\_1994]. Výzvu bylo zvyšování přenosové kapacity instalované kabeláže. To lze zařídit dvěma způsoby – multiplexováním v časové oblasti nebo ve spektrální oblasti. V prvním případě to znamená vývoj velmi rychlých zdrojů – např. solitonových laserů, pracujících na standardní telekomunikační délce (1 550 nm), kdy kapacita přenosu je dána vysokou opakovací rychlostí laseru. V druhém případě to znamená vývoj vláknových laserů a zesilovačů pracujících na vlnových délkách mimo standardní oblast, umožňující rozdělení datového toku do více kanálů (vlnových délek). Vývoj nezadržitelně směřuje k celooptickému zpracování informací.

První tuzemské optické vlákno vzniklo v roce 1980 v Československé akademii věd, resp. ve Společné laboratoři pro chemii a technologii silikátů ČSAV a VŠCHT v Praze. Jeho optické ztráty byly na úrovni srovnatelné s tehdejší světovou produkcí (obr. 3). První optický přenos byl demonstrován v téže době na Karlově mostě a první optická trasa byla položena mezi Dejvicemi a Smíchovem v roce 1986, kdy vedle japonských kabelů byly položeny i zkušební tuzemské. Na základě těchto úspěchů bylo investováno do vývoje technologie pro výrobu mnohavidových gradientních vláken a jednovidových vláken pro oblast 1 550 nm. Technologie byly předány do sériové výroby do Sklo Unionu Teplice (dnešní Glaverbel), odkud byly na základě politických rozhodnutí po roce 1989 odprodány do zahraničí, kde fungují dodnes. Výzkum na poli optických vláken se však nezastavil; dnes je laboratoř s jedinou kompletní technologií pro přípravu optických vláken v ČR (obr. 5) součástí Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AV ČR.

Řeší se zde projekty základního materiálového výzkumu zabývající se speciálními vlákny s nanostrukturovanými jádrem pro vláknové lasery a zesilovače, vlákny mikrostrukturními (obr. 6) nebo vlákny dvouplášťovými s nekruhovým průřezem [Peterka\_2009]. Nemalá pozornost je také věnována speciálním vláknům pro vláknové senzory – vláknům s invertovaným profilem indexu lomu, se zapsanými mřížkami, vláknům tape-rovaným a dalším. Výzkumu optických vláken v ÚFE bude speciálně věnované dubnové číslo časopisu Jemná mechanika a optika.

Od doby, kdy Charles Kuen Kao publikoval svůj průkopnický článek, se optická vlákna stala nedílnou součástí naší každodenní reality. Nobelova cena mu tedy právem náleží, i když jeho práce není registrována vyhledavačem Scopus a praktické výsledky se dostavily až s časovým odstupem.

### Literatura

- [Boisde\_1996] G. Boisde, A. Harmer: *Chemical and Biochemical Sensing with Optical Fibers and Waveguides*. Artech House, Norwood 1996.
- [Desurvire\_1994] E. Desurvire: „The golden age of optical fiber amplifiers“, *Physics Today*, 28 (Jan. 1994); český překlad M. Chomát: *Čs. čas. fyz.* 44, 183 (1994).
- [Gnauck\_2007] A. H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran, P. J. Winzer, C. R. Doerr, J. C. Centanni, E. C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, K. Higuma: „25.6-Tb/s C+L-band transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signálu“, *Optical Fiber Commun. Conf., Anaheim, 2007*, Postdeadline paper PDP19.
- [Kao\_1966] K. C. Kao, G. A. Hockham: „Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies“, *Proc. IEE* 113, 1151 (1966).
- [Miller\_1979] S. E. Miller, A. B. Chynoweth: *Optical Fiber Telecommunications*. Academic Press, Orlando 1979.
- [Nagel\_1982] S. R. Nagel, J. B. McChesney, K. L. Walker: „An overview of the MCVD process and performance“, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, 459 (1982).
- [Peterka\_2009] P. Peterka, I. Kašík, V. Matějec: *Zařízení a způsoby pro navázání signálu a čerpání do dvouplášťového optického vlákna*. CZ Pat. 301215, 2009.
- [Townes\_2006] C. H. Townes: „Birth of the maser and laser“, in: *Optical Chemical Sensors*, red. F. Baldini a kol., Springer-Verlag, Berlin 2006, s. 1–15.



**Obr. 6** Mikrostrukturní optické vlákno.



**Obr. 5** Tažička optických vláken.



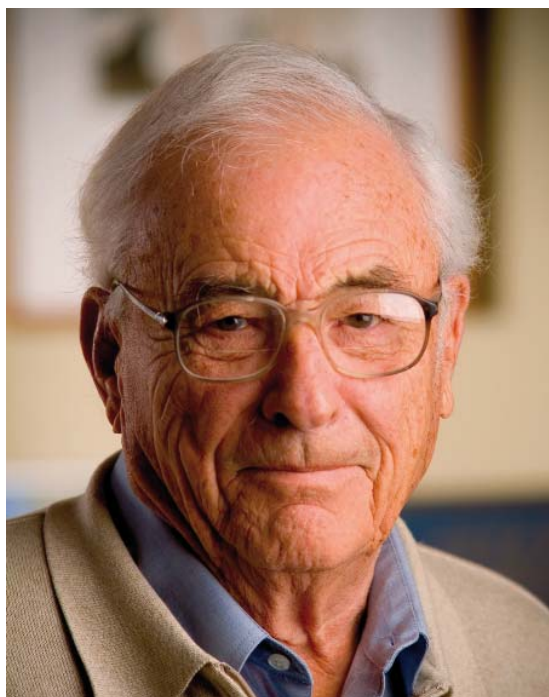
# CCD revolúcia v ríši elektronického obrazu

## ocenená polovicou Nobelovej ceny v r. 2009

**Milan Ožvold**

Fyzikálny ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava 45

*Kráľovská švédská akadémia vied rozhodla, že druhú polovicu Nobelovej ceny za fyziku v roku 2009 získavajú spoločne rovným dielom Willard S. Boyle a George E. Smith „za vynález snímacieho polovodičového obvodu – CCD“.*



**Willard Sterling Boyle** sa narodil v roku 1924 v Amherst, Nova Scotia, Kanada, občan Kanady a USA. PhD z fyziky získal v roku 1950 na McGill University, QC, Kanada, riaditeľ Oddelenia komunikačných vied (Communication Sciences Division) Bellových laboratórií v Murray Hill, NJ, USA. v dôchodku od roku 1979.  
Copyright © National Academy of Engineering

**C**CD pochádza z anglického názvu *Charge Coupled Device*, alebo po slovensky súčiastka s nábojovou väzbou. Snímač obrazu CCD je elektronická súčiastka, ktorá je schopná previesť svetelný obraz do elektronickej podoby. Boyle a Smith vynášli v roku 1969 prvý snímač CCD, ktorý transformuje svetlo na elektrický signál vo veľkom počte usporiadaných svetlomitlivých bodoch – pixeloch, v krátkom čase. Tento vynález umožnil veľa praktických inovácií a poskytol nové prostriedky vo vedeckej činnosti i medicíne. Digitalizácia „elektronického obrazu“, digitálna fotografia sa stala



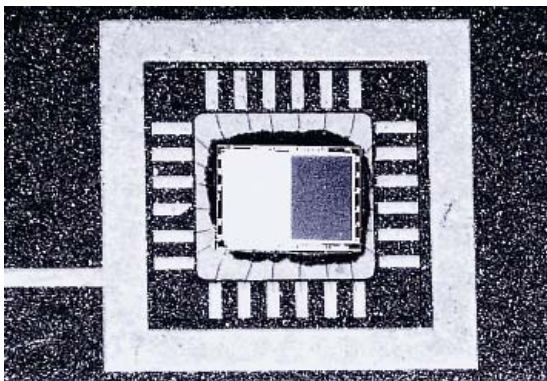
**George Elwood Smith** sa narodil v roku 1930 vo White Plains, NY, USA. PhD z fyziky získal v roku 1959 na University of Chicago, IL, USA. Vedúci Oddelenia VLSI súčiastok Bellových laboratórií v Murray Hill, NJ, USA. v dôchodku od roku 1986.  
Copyright © National Academy of Engineering

nenahraditeľnou. Polovodičové snímače obrazu nájdeme v komerčných digitálnych fotoaparátoch ale i v kamerách vesmírnych lodí, či vo výskume dna oceánov. CCD je použité v Hubbleovom vesmírnom ďalekohľade, či v roveri vyslanom na Mars.

Willard S. Boyle a George E. Smith (obr. 1) popísali svoju novú súčiastku v článku [1]. CCD je polovodičový obvod vyrobený technológiou MOS (*metal oxide semiconductor*). Pixle sú tvorené kapacitormi MOS (pomenovanie kov „M“ je anachronizmom, ale používa sa aj keď hradlá v moderných čipoch sú z polykryštalického

kremíka). Dopadajúce svetlo generuje páry elektrón-diera (vnútorný fotoefekt), ktoré sú vnútorným elektrickým poľom separované a elektróny sú uchovávané v kapacitore. Počet akumulovaných elektrónov je priamo úmerný intenzite dopadajúceho svetla na jednotlivý pixel. Takže rozloženie náboja v pixeloch je analógovou reprezentáciou obrazu. V prípade obrazového snímača CCD so snímkovým prenosom (*frame transfer*) sa po integračnej dobe všetky nábojové balíky presunú zo snímacej matice do pamäťovej matice, ktorá je pokrytá tieniacou vrstvou hliníka, obr. 2. Postupným presúvaním tohto náboja a „čítaním“ jeho veľkosti je možné rekonštruovať obraz. Posuv náboja zabezpečujú elektrické pulzy privádzané na hradlá MOS kapacitorov, obr. 3.

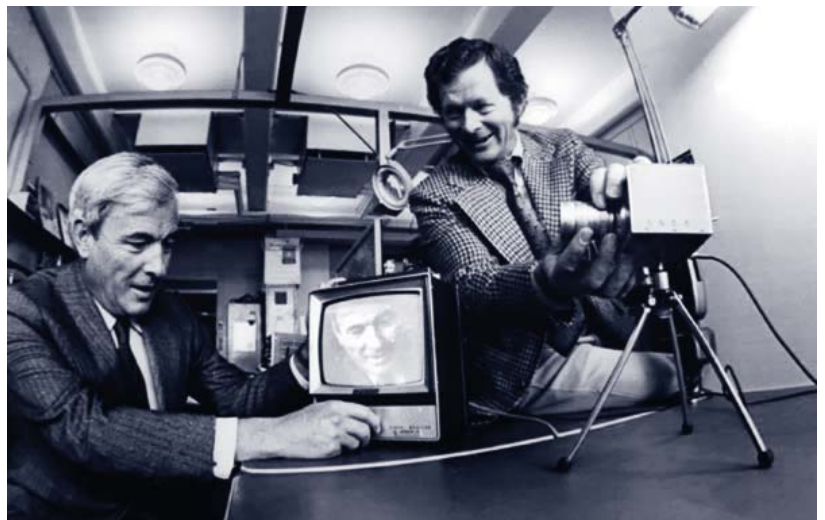
V prvých CCD sa náboj presúval na rozhraní Si-SiO<sub>2</sub>, tzv. CCD s povrchovým kanálom. To obmedzovalo účinnosť prenosu náboja zachytávaním náboja na stavoch rozhrania. Riešením bolo vytvorenie ponoreného kanála implantáciou prímiesi, takže sa náboj presúval nižšie pod rozhranie. Ďalší problém, ktorý bolo treba riešiť, bolo prelievanie náboja medzi pixelmi v prípade intenzívneho osvetlenia (*blooming*). Použitie farebných filtrov priamo na čipe vyriešilo lacno i farebnú fotografiu. Podrobný opis štruktúry a funkcie CCD je v tomto časopise podaný v [2]. Prvé súčiastky s prenosom náboja mali slúžiť ako sériové pamäte, posuvné registre. Táto ich aplikácia však nebola až tak veľmi úspešná. Čo inšpirovalo autorov CCD k tomu, že použili tieto súčiastky ako snímače obrazu, nájde čitateľ v spomienkach G. E. Smitha [3].



**Obr. 2** Čip snímača CCD so snímkovým prenosom s 2x288x384 snímacími elementmi v puzdre (vývoj SAV&Tesla Piešťany 1984-86).

Niekedy po roku 1990 dosiahol vývoj CMOS snímačov obrazu úroveň CCD snímačov. CMOS (*Complementary metal oxide semiconductor*) snímače pracujú s nižšími napätiami než CCD, majú nižšiu spotrebu energie, čo je dôležité pre prenosné prístroje. Analógové i digitálne funkcie možno integrovať na CMOS čip, čo redukuje rozmery aj cenu. Vynález CMOS snímačov dokonca predbehol vynález snímačov CCD. Peter J. W. Noble v roku 1968 [4] a Savvas G. Chamberlain v 1969 [5] publikovali v podstate troj-tranzistorovú konfiguráciu aktívneho pixel – senzora. V tom čase technológia výroby integrovaných obvodov (najmä litografia) neumožňovala výrobu CMOS snímačov, ktoré by dosahovali kvalitu obrazu akú poskytovali CCD. CMOS snímače museli získať vyššiu homogenitu (čo je kľúčový ukazovateľ snímača) a znížiť šum. Dnes oba typy snímačov dosahujú vysokú kvalitu obrazu a nemožno jednoznačne odpovedať, ktorý typ je lepší. Výber závisí od aplikácie.

Cena obnáša 10 miliónov švédskych korún (1,5 mil. dolárov). Laureáti dostali diplom a pozvanie na sláv-

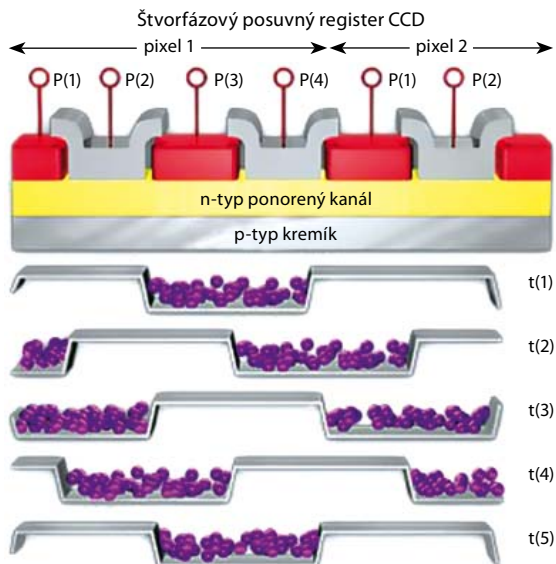


**Obr. 1** Fotografia z roku 1970 ukazuje výskumníkov Bellových laboratórií Willarda Boyla, vľavo, a Georgea Smitha v Bellových laboratóriách v Murray Hill, N.J. s kamerou CCD. (Zdroj: Alcatel-Lucent/Bell Labs/Associated Press)

nostný ceremoniál v Štokholme a Oslo konaný 10. decembra 2009, vo výročný deň úmrtia Nobela v roku 1896. Všetci traja čerství nositelia Nobelovej ceny za fyziku sú už na dôchodku. Ešteže to po 40 rokoch od vynálezov stihli. Prenos informácií svetlom v kábloch a digitálne snímače zatiaľ už stihli „zludoviet“. Takmer sa vytratil mená autorov, ako pri zludových piesňach. Pritom je to krásny príklad toho, že ak základný výskum rieši praktické problémy, poskytuje revolučné riešenia. Digitálna fotografia viedla v rokoch 2008-9 i k zastaveniu výroby fotoaparátov Polaroid pre instantnú fotografiu. To je dôkaz, že skončila éra „chemickej“ fotografie a ideme cestou elektronickej.

### Literatúra

- [1] W. S. Boyle, G. S. Smith: „Charge coupled semiconductor devices“, *Bell Syst. Tech. J.* **49**, 587 (1970).
- [2] S. Koc: „Nábojové väznané štruktúry“, *Čs. čas. fyz.* **A27**, 470 (1977).
- [3] G. S. Smith: „The invention and early history of CCD“, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **A607**, 1 (2009).
- [4] P. J. W. Noble: „Self-scanned silicon image detector arrays“, *IEEE Trans. Electronic Devices* **ED-15**, 202 (1968).
- [5] S. G. Chamberlain: „Photosensitivity and scanning of silicon image detector arrays“, *IEEE J. Solid-State Circuits* **SC-4**, 333 (1969).



**Obr. 3** Časovanie riadiacich pulzov posuvného registra CCD.



# Astrobiologie ve Vatikánu

Pavel Gábor

Institut d'astrophysique spatiale, Université Paris XI, 91405 Orsay, Francie

Charles Darwin v jednom dopise R. Hookerovi z r. 1863 napsal: „Je holým nesmyslem nyní přemýšlet o původu života; stejně dobře bychom mohli přemýšlet o původu hmoty.“

[*It is mere rubbish thinking, at present, of origin of life; one might as well think of origin of matter.*] Pokud jde o původ hmoty, dnešní fyzikální kosmologie a částicová fyzika učinily značný pokrok v přírodovědeckém uvažování o této problematice. Otázka původu života badatelům odolává mnohem urputněji.

Ve dnech 6. až 10. listopadu 2009 pořádala Papežská akademie věd (PAS) symposium (*study week*) o astrobiologii, jehož se zúčastnilo 27 čelných badatelů, kteří se věnují tomuto mezioborovému tématu. Z vědeckého hlediska se jednalo o jeden z vrcholů vatikánského programu k Mezinárodnímu roku astronomie a zároveň šlo o příležitost opět si připomenout letošní darwinovská výročí (už plenární zasedání PAS v listopadu 2008 se týkalo evoluce).

Astrobiologie se zabývá základními otázkami života v kosmickém měřítku. Snaží se o přírodovědecké uchopení podstaty života a jeho vzniku, a to nejen z hlediska jeho biochemických principů, ale i z hlediska konkrétního vzniku pozemské biosféry. Rovněž zkoumá fyzikální, chemické, geologické i astronomické podmínky života. Z tohoto pohledu přistupuje k výzkumu sluneční soustavy, extrasolárních planet a jejich obyvatelnosti. Základním metodologickým problémem je banální fakt, že k dispozici máme právě jeden exemplář zkoumaného jevu – totiž život pozemský. Objev dalších příkladů by nepochybně byl velkým obratem, a to nejen pro astrobiologii jako akademickou disciplínu. Proto je hledání života v kosmickém měřítku jednou ze základních strategií astrobiologie. Konkrétně jde o výzkum sluneční soustavy (Mars, Titan, Evropa, Enceladus) a extrasolárních planet, hledání zejména radioastronomických stop technic-



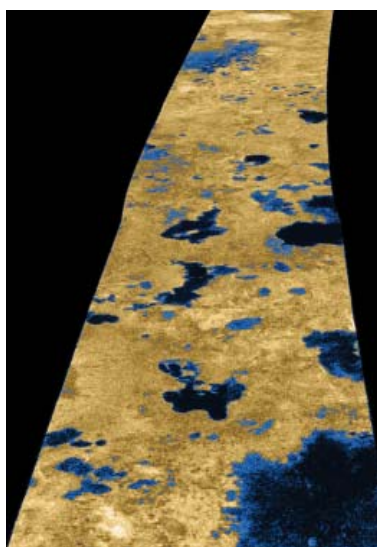
Sídlo Papežské akademie věd (Casina Pio IV. z r. 1561) ve Vatikánských zahradách.

ky vyspělých civilizací (SETI), pokusy o syntetizaci života v laboratoři a v poslední době i hledání paralelní biosféry na naší vlastní planetě (mikroorganismy, které by se nedaly zařadit do vývojového stromu známého života).

Účastníci symposia se shodli na řadě poznatků, které budou zveřejněny v závěrečném stanovisku, jež PAS publikuje do konce r. 2009. Z jeho prvního návrhu tento článek volně vychází.

Předně se zdá, že RNA, která mohla sloužit současně jako katalyzátor i nosič informace, sehrála klíčovou roli při vzniku pozemského života, a snad tedy existovala etapa, kdy RNA dominovala (*RNA world*). Pozdní těžké bombardování (*late heavy bombardment*), včetně obřího impaktu, který dal vznik Měsíci, by podle všeho nevedlo k úplné sterilizaci Země, existoval-li na ní život již v té době. Velkým zvratem byl konec archaika (před 2,5 až 2,3 miliardy let), kdy fotosyntéza oxygenizovala atmosféru a hydrosféru, což snad vedlo ke globálnímu zalednění Země. Objevy kapalné vody uvnitř ledových měsíců, jakými jsou Evropa a Enceladus, kapalného metanu a etanu na povrchu Titanu a dalších rozšířily panorama možných astrobiologicky významných objektů sluneční soustavy.

Proces poznávání nutně vede k rozšiřování horizontu otázek, a to otázek stále lépe formulovaných. Diskutovaných problémů je celá řada. Již zmíněná oxygenizace zřejmě proběhla, a to zhruba v uvedené době. Nicméně badatelé se rozcházejí v názorech na její konkrétní podobu. Zdá se totiž, že kyslík produkující fotosyntéza se vyvinula mnohem dříve. Proč proto hladina  $O_2$  v oceánech vzrostla až na konci archaika? Jedni pohlížejí na oxygenizaci jako na rizikový náhlý proces, zatímco druzí se domnívají, že i při nízkých hladinách  $O_2$  se během



Mise Cassini-Huygens zanechala na oběžné dráze kolem Saturnu umělou družici, která při přeletěch kolem Titanu provádí mj. i radarové snímkování povrchu tohoto největšího Saturnova měsíce. Tmavé plochy na snímku jsou hladké povrchy. Jedná se o volné hladiny jezer směsi kapalných uhlovodíků (metan a etan).

geologicky významných dob biogeochemická soustava adaptovala, a tak byla na oxygenizaci připravena.

Otevřenou otázkou je i dlouhá doba mezi klíčovými náhlými událostmi – vznik eukaryotů, vznik mnohobuněčných organismů, vznik inteligentních tvorů. Je velmi dobře možné, že tato charakteristika vývoje souvisí s velkými výkyvy v podmínkách na Zemi, které v průběhu geologických dob nastávaly – atmosféra s vysokým obsahem metanu, sulfidový oceán, globální zalednění. Nicméně prozatím se jedná o neprobádanou oblast.

Dalším obtížným tématem je otázka, které těleso sluneční soustavy by mělo být zkoumáno dřív – Titan, Evropa, Enceladus... Spory se vedou i o jednotlivostech takového průzkumu – ve které oblasti daného objektu přistát, jak tam sbírat vzorky, jak je analyzovat atd. V této souvislosti se rovněž diskutuje o ochraně těchto prostředí před kontaminací pozemskými mikroorganismy, jakož i naopak o ochraně Země před kontaminací zvenčí.

Ani původ pozemské hydrosféry není jasný. Je možné, že Země získala vodu díky zákonitým jevům typickým pro formaci planetárních soustav, ale je stejně tak možné, že se jednalo o krajně náhodný proces a v jiné planetární soustavě vůbec nemusel proběhnout. Je oprávněné předpokládat, že exoplanety velikosti Země, které se nacházejí v tzv. obyvatelné zóně svých hvězd (tzn. tam, kde podle prostých úvah o ohřevu planety zářením její hvězdy lze očekávat přítomnost kapalné vody na planetárním povrchu), získají během své formace významné množství vody? Na tuto a další otevřené otázky (např. jak mohlo vzniknout těleso o velikosti Marsu zároveň se vznikem značně větších planet – Země a Venuše) se snaží odpovědět numerické simulace vývoje planetárních soustav.

Kde hledat prostředí, v němž pozemský život vznikl? V hydrotermálních průduších? Kolikrát na Zemi nezávisle vznikl život? Zajímavý rozměr problému původu pozemského života představuje možnost, že prvotně vznikl na Marsu a na Zemi byl přenesen meteoriticky.

V souvislosti s objevem metanových a etanových jezer, metanového deště a řek na Titanu se nabízí otázka, zda je život (značně odlišný od pozemského) možný v takovém prostředí. Jak by v těchto nepolárních tekutinách mohly vzniknout membrány?

Důležitou součástí setkání tak významných badatelů, jací se zúčastnili sympozia PAS, jsou debaty o strategii dalšího výzkumu, zejména pokud se jedná o nákladnější projekty. Astrobiologické aspekty mnoha výzkumných programů jsou nezanedbatelné pro jejich vědeckou, ale i všeobecně lidskou přitažlivost. Stačí připomenout řadu kosmických sond, jejichž cílem byl a je průzkum Marsu, a to především průzkum astrobiologický. V současné době se diskutuje o společných misích NASA a ESA (*European Space Agency*) k Jupiteru a k Saturnu. Astrobiologická motivace je v obou případech velmi silná. Oceán kapalné vody pod povrchem Jupiterova měsíce Evropa, kapalná voda pod povrchem Saturnova měsíce Enceladu a uhlovodíková jezera na povrchu Titanu rovněž v soustavě Saturnu – to jsou prostředí, která bude potřeba probádat. Tento výzkum, jakož i další výzkum Marsu a Venuše, bude astrobiologicky relevantní, i kdyby se na těchto tělesech nenašly stopy života. Určitě totiž přispěje k lepšímu porozumění vývoje sluneční soustavy.

Druhou oblastí, kde se pomalu spěje ke strategickým rozhodnutím, je konstrukce dedikovaných astronomických přístrojů na zemském povrchu. Jedná se především o dalekohledy a spektrografy, které by umožnily



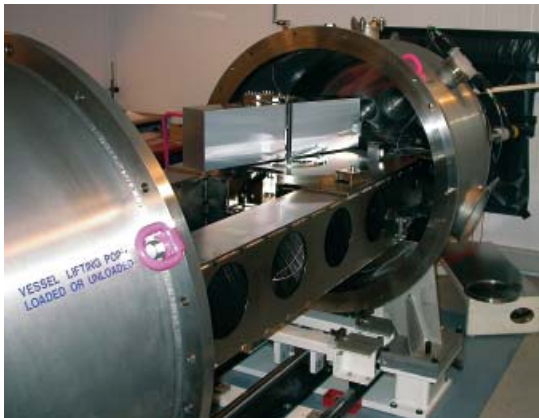
V r. 2009 mise CoRoT objevila první kamennou exoplanetu, jejíž rozměry i hmotnost známe (CoRoT-7b:  $R = 1,68 \pm 0,09 R_{země}$ ,  $M = 4,8 \pm 0,8 M_{země}$ ). Její oběžná dráha je kruhová a má průměr jen asi 2,6 mil. km, takže planeta, jejíž rotace je vázaná a stále své hvězdě nastavuje stejnou tvář, má v substelárním bodě oceán roztavené horniny dosahující 2 300 K.

zlepšit naši schopnost měřit planetárním oběhem způsobené výkyvy v rychlostech hvězd vzhledem k pozemskému pozorovateli (radiální velocimetrie). V současné době je možné reprodukovatelně měřit výkyvy o velikosti 50 cm/s. Zlepšení tohoto parametru o jeden řád by mělo být dosažitelné v časovém horizontu několika let, což umožní detekci planet o hmotnosti Země.

Spektroskopické studium extrasolárních planet se zvláštním zřetelem k chemickému složení atmosfér Zemí podobných planet (efektivní rozlišení 100 při poměru signálu k šumu 50) je klíčovým dalším krokem komparativní planetologie a astrobiologie. V této oblasti existuje několik rozpracovaných technických řešení a debata se vede o tom, jak dosáhnout vědeckých cílů tohoto výzkumu.

V oblasti geologie Sloanova nadace rozbíhá projekt výzkumu hlubinného koloběhu uhlíku (*deep carbon cycle*). Jeví se totiž jako pravděpodobné, že litosferická etapa koloběhu uhlíku se netýká jen zemské kůry, ale sahuje až do pláště. Jedná se o příklad interdisciplinárního výzkumného programu v oblasti biogeochemie, jaké jsou nutné pro lepší pochopení planetárních procesů.

Přístup odborné veřejnosti k otázce života, jeho podmínek, původu a rozšíření ve vesmíru za posledních několik desetiletí prodělal značné změny. Enrico Fermi se před 60 lety podívoval: „Kde všichni ti mimozemšťané jsou?“ (*Where is everybody?*) když mu totiž vyšlo, že by jen v naší Galaxii měl být milion vyspělých civilizací



Echelle spektrograf HARPS vysoké přesnosti instalovaný u 3,6metrového teleskopu Evropské jižní observatoře v La Silla (Chile) umožňuje měření výkyvů v rychlostech hvězd, přesněji její složky ve směru zorného paprsku (radiální velocimetrie) na úrovni 50 cm/s. Do listopadu 2009 byly ohlášeny objevy 75 extrasolárních planet pomocí HARPS.



&gt;&gt; citace &lt;&lt;

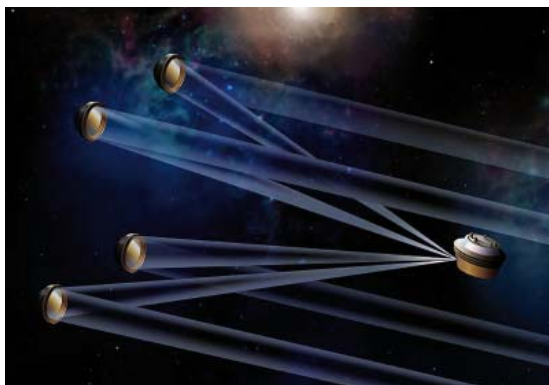


Navrhovaná mise *New Worlds Observer*. Do optické osy konvenčního kosmického dalekohledu (např. JWST) se ve velké vzdálenosti (v případě JWST by to bylo asi 50 000 km) umístí stínítko (v daném případě o průměru asi 50 m), které eliminuje světlo hvězdy a umožňuje pozorovat světlo planet.

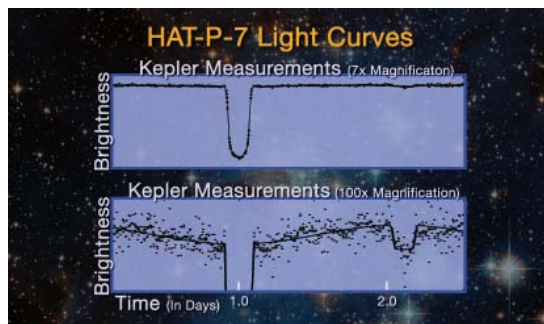
(Fermiho paradox). Naopak před třiceti lety bylo naprosto běžné domnívat se, že vznik života na Zemi byl tak nepravděpodobnou událostí, že ani v kosmických měřítcích není velká pravděpodobnost, že by existoval další podobný případ (*rare Earth hypothesis*). Objev planet mimo sluneční soustavu asi před 15 lety vedl k novému příklonu k astrobiologickému optimismu. Ukázalo se totiž, že podle všeho planety vznikají zcela zákonitě všude, kde to je jen trochu možné. Jinou otázkou je, zda vznikají i planety podobné Zemi. Přesto dnes ve vědecké komunitě převládá názor, že život na zemi je výsledkem fyzikálních, chemických a jiných faktorů, které dříve nebo později život vytvořit musely a že podobným způsobem musí vznikat život i na jiných místech ve vesmíru.

Do r. 2012 budeme mít (mj. i díky misi Kepler) statistický odhad, jak časté jsou Zemi podobné planety. Radikální velocimetrie pak proměří jejich hmotnosti a s jistou dávkou štěstí tak bude v obyvatelné zóně nějaké hvězdy objevena planeta o hmotnosti Země. Kolem r. 2020 by bylo reálné prozkoumat několik těles tohoto typu pomocí stínítka umístěného před JWST (*New Worlds Observer*). I když ještě dlouho nebude myslitelné „zajet se“ na některou z těchto planet podívat zblízka, pozorování pomocí dalekohledů nám umožní získat mnoho vědomostí o jejich složení, atmosférách a možných známkách přítomnosti života. V horizontu příštích 20 až 30 let budeme mít mnohem jasnější představu o tom, do jaké míry je Země a život na ní kosmickou výjimkou či pravidlem.

Na závěr se zastavím u logické otázky, proč setkání věhlasných astrobiologů svolala právě Papežská akademie věd. Důvody můžeme hledat na mnoha rovinách. PAS chce být především špičkovou učenou společností,



Navrhovaná mise *Darwin* (Evropská kosmická agentura) a *Terrestrial Planet Finder Interferometer* (NASA). Jedná se o čtyři primární zrcadla (průměr 1,5 m, vzájemná vzdálenost 50–200 m) a rekombinační jednotku, kde se světlo nechává interferovat tak, aby bylo světlo hvězdy eliminováno a bylo možné identifikovat světlo planety.



Mise Kepler, která zahájila činnost v r. 2009, si klade za cíl sledovat světelné křivky statisíce hvězd a hledat v nich známky tranzitů planet, které se projevují jako periodické poklesy jasnosti. Kepler dovede změřit poklesy o víc než  $10^{-4}$ . Na obrázku jsou první zveřejněné křivky – Kepler proměřoval již známou planetární soustavu (obě křivky představují stejný datový soubor, liší se měřítkem). Větší pokles odpovídá přechodu planety před hvězdou (z našeho pohledu), zatímco mělčí minimum odpovídá zákrytu planety hvězdou, sklon křivky odpovídá fázím planety.

kteřá se může pyšnit tím, že v té či oné podobě existuje již od r. 1603, kdy v Římě pod patronací Klimenta VIII. vznikla *Accademia dei Lincei*. Počet členů je omezen na 80. V současné době více než polovina z nich jsou nositelé Nobelovy ceny. Výběr akademiků se neřídí příslušností ke katolické církvi. Papežové opakovaně vyjadřují přesvědčení, že pravdivé poznání, a to jak teologické, tak přírodovědecké, si nemůže protiřečit, protože se dotýká různých aspektů téže Skutečnosti, která je racionální.

Jako každá učená společnost tohoto typu je i PAS shromážděním odborníků z různých oblastí přírodních věd. Jelikož témata plenárních zasedání (konávají se na podzim každého sudého roku) musí být zajímavá pro všechny akademiky, zpravidla se vybírají otázky s velkým interdisciplinárním dosahem. Podobně je tomu i u seminářů a symposií, i když těch se obvykle neúčastní zdaleka všichni akademici.

Svoláním symposia o astrobiologii tak PAS především vyjádřila uznání aktuálnosti tohoto nového oboru badání, který sice (ještě) není jednotnou disciplínou, ale v jeho rámci se rozvíjí mnoho velmi zajímavých projektů, které mohou proměnit náš pohled na svět a na lidstvo v něm.

Mikuláš Kuzánský v r. 1440 vyjádřil přesvědčení, že Země není jediným obydleným světem – naopak, jelikož Země je jedním z mnoha kosmických těles a přitom je obydlená, lze extrapolovat, že i ostatní kosmická tělesa jsou obydlená (*De docta ignorantia*, lib. II, cap. 12). (Kuzánský byl v r. 1448 jmenován kardinálem, takže kosmický pluralismus nijak neublížil jeho kariéře.) Jeho argumentaci přijímali mnozí myslitelé od Johanna Keplera až po Karla Rahnera. Objev Nového světa vedl v 16. století k debatě o lidství jeho původních obyvatel, přičemž jeden z argumentů proti byl rádo by biblický – prý se o nich Písmo nezmiňuje. Již v té době však bylo jasně řečeno, že jednak Kristus krypticky mluví o ještě jiném „ovčinci“ (Jan 10, 16), takže argument o biblické absenci není průkazný. Navíc stále platí, co řekl pařížský biskup Etienne Tempier v r. 1277, když odsoudil na aristotelismu založené tvrzení, že by „První Příčina nemohla stvořit mnoho světů“ (propozice č. 34) – pojem Boží svobody nemáme omezovat apriorními spekulacemi.

Už sv. Albert Veliký napsal: „Jednou z nejpodivuhodnějších a nejvznešenějších otázek o přírodě je, zda existuje více světů (což touží vědět i lidská duše sama od sebe).“ (*De caelo et mundo*, lib. I, tract. III, cap. I.) Naše generace má tu výsadu, že se smí podílet na přesunu této problematiky z roviny čistě filozofické do roviny přírodovědecké.