

Hledání života ve vesmíru...

... aneb život za kosmickými
humny?

Vladimír Kopecký Jr.

Fyzikální ústav
Matematicko-fyzikální fakulty
Univerzity Karlovy v Praze
<http://biomolecules.mff.cuni.cz>
kopeccky@karlov.mff.cuni.cz



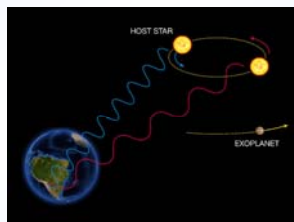
Exoplanety spektroskopicky Metoda radiálních rychlostí

- Amplituda změn radiální rychlosti K hvězdy o hmotnosti M_* způsobená planetou hmotnosti M_p s oběžnou periodou P a výstředností dráhy e je dána jako

$$K = \frac{(2\pi G/P)^{1/3} M_p \sin(i)}{[(1-e)^{1/2}]}$$
- Je-li $M_p \ll M_*$, pak

$$K = 28,4 \cdot P^{-1/3} (M_p \sin(i)) M_J$$
- Dle 3. Keplerova zákona

$$P = a^{2/3} \cdot M_*^{-1/2}$$
- Pro Jupiter ($P = 11,9$ roku) je $K = 12,5$ m/s, pro Zemi $K = 0,1$ m/s



■ A. Cumming et al., Astrophys. J. 581 (1999) 890–915. Z. Pokorný: Exoplanety, Academia, Praha 2007.

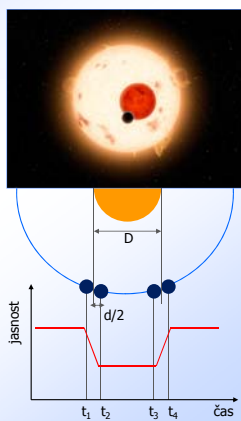
Tranzitní exoplanety... Fotometrická metoda

- Při vhodné geometrii dochází při přechodu exoplanety k poklesu jasnosti hvězdy s periodou P , pro relativní změnu jasnosti platí

$$\Delta j / j_* = (R_p / R_*)^2$$
 (Zanedbáváme okrajové ztemnění kotoučku hvězdy)
- Pro zákryt platí

$$(t_4 - t_1) / P = (D + d) / (2\pi r)$$

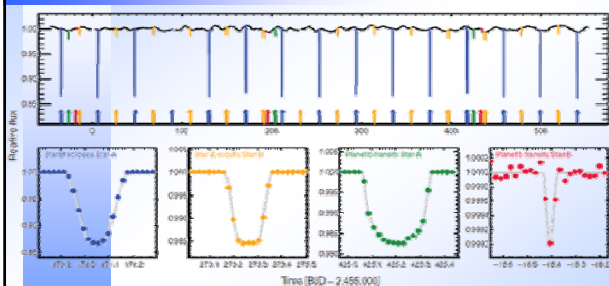
$$(t_3 - t_2) / P = (D - d) / (2\pi r)$$
 kde t_i jsou časy kontaktů a r poloměr kruhové dráhy exoplanety
- Lze určit pouze D/r a d/r , sic!
- Pokud ze spektrometrie zjistíme v (km/s), pak $2\pi r = P \cdot v$, a následně dopočteme D a d



■ Z. Pokorný: Exoplanety, Academia, Praha 2007. L. R. Doyle et al., Science 333 (2011) 1602–1606.

Tranzitní exoplanety...

Planeta dvou sluncí...



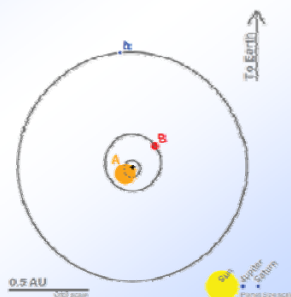
- Fotometrie soustavy Kepler-16b.

■ L. R. Doyle et al., Science 333 (2011) 1602–1606.

Tranzitní exoplanety...

Planeta dvou sluncí

- Exoplaneta Kepler-16b – podobná Saturnu – obíhá kolem rudého (20 % MS) a oranžového trpaslíka (69 % MS)
- Hvězdy kolem sebe oběhnou za 41 dní
- Planeta kolem nich po kruhové dráze oběhne za 229 dní
- Oběh vně obyvatelné zóny
- Terestrické planety v obyvatelné zóně na nestabilních drahách
- Kepler-16b se **na příslušné dráze zformoval – nebyl zachycen, sic!**

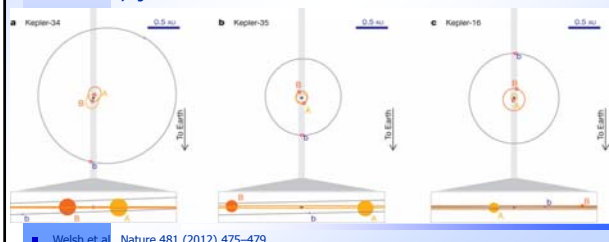


■ L. R. Doyle et al., Science 333 (2011) 1602–1606. Welsh et al., Nature 481 (2012) 475–479.

Tranzitní exoplanety...

Cirkumbinární exoplanety...

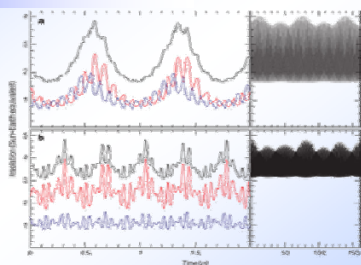
- Pozorovány zatím na nejvnitřnějších ze stabilních orbitů (výběrový efekt)
- Problém tří těles může vést k neuzavřenosti dráhy...
- **1 % těsných dvojhvězd má zřejmě planety na cirkumbinárních drahách, tj. několik milionů v Galaxii!**



■ Welsh et al., Nature 481 (2012) 475–479.

Tranzitní exoplanety... Cirkumbinární exoplanety

- **Komplikované dráhy mohou vést k mutiperiodické insolaci povrchu exoplanet**
- U Kepler-34b a 35b je poměr mezi maximem a minimem 250 a 160 %
- U Venuše je to 1,9násobek 2,7% variace u Země
- Je třeba prozkoumat tento vliv na atmosféru potažmo na obyvatelnost exoplanet

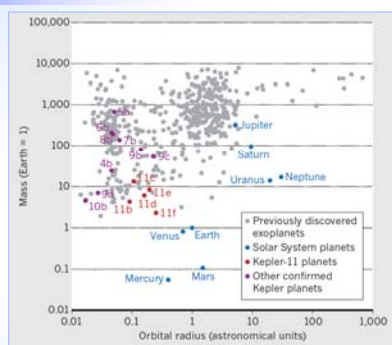


Variace osvitů exoplanet a) Kepler-34b a b) Kepler-35b v jednotkách insolance Slunce–Země. Černá křivka představuje celkový tok, červená a modrá jsou pak příspěvkem jednotlivých hvězdných složek

■ Welsh et al., Nature 481 (2012) 475–479.

Rozmanitost exoplanet Země 2.0 na obzoru?

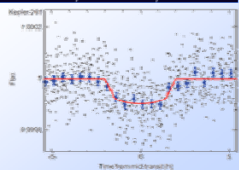
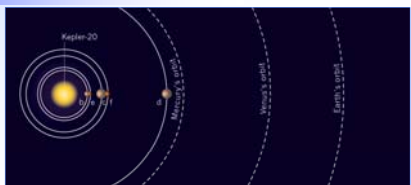
- Mezi exoplanetami **převažují planety Jupiterova typu**
- Horčí Jupiteri diskvalifikují exoplanety zemského typu v obyvatelných zónách



■ E. S. Reich, Nature 470 (2011) 24–26.

Rozmanitost exoplanet Země 2.0 na obzoru?

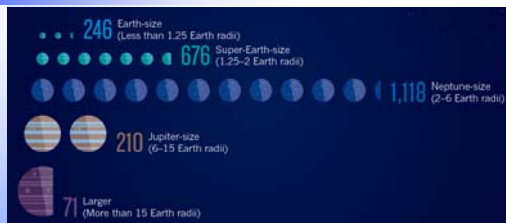
- Komplikovaný systém Kepler 20 (1000 ly) se 3 exoplanetami Neptunova typu
- Statistickou analýzou dat nalezeny **exoplanety s poloměrem $e 1,03 R_z$ a $f 0,87 R_z$ a oběžnou dobou 6,1 a 19,6 dne**
- Teoretické modely předpovídají planety složené ze silikátu a Fe (povrchové teploty ca. 1040 a 705 K)
- Hmotnosti jsou stále nejisté...



■ D. Queloz, Nature 482 (2012) 166–167. F. Fresin et al., Nature 482 (2012) 195–198.

Rozmanitost exoplanet

Země 2.0 na obzoru?

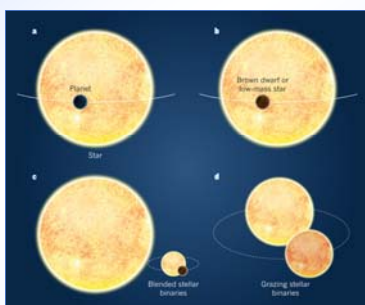


- Mise dalekohledu Kepler hledá exoplanety metodou tranzitů
- Falešně pozitivní výsledky se odhadují na max. 10 %
- Většina z dosud nalezených **2 321 kandidátů na exoplanety je jen o málo větší než Země**
- Další pozorování ukáží, zdali jde o vodní či plynné nebo kamenné světy
- E. Hand, Nature 483 (2012) 522–523.

Tranzitní exoplanety...

Falešná pozitiva

- Kepler rozlišuje zákrytovou křivku „U“ (exoplaneta) a „V“ (hvězda)
- Pomocí spektrografu Sophie ověřen vzorek 46 kandidátů – stanovena hmotnost
- Možné zdroje falešných signálů od exoplanet (a)
 - Hnědý trpaslík (b)
 - Smíšený vícenásobný hvězdný systém (c)
 - Dvojhvězda s částečným zákrytem

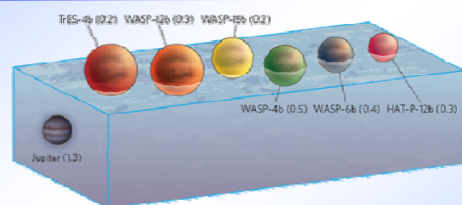


- **Falešně pozitivních výsledků 35 %**

■ A. L. Cameron, Nature 492 (2012) 48–50, A. Santerne et al., Astron. Astrophys. 545 (2012) A76.

Rozmanitost exoplanet

Plynní obři...

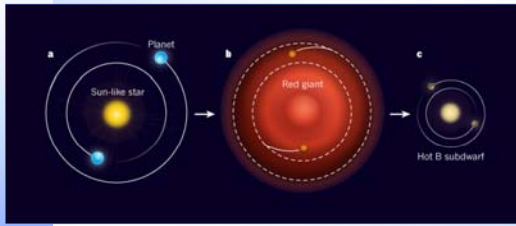


- Mnohem více **plynných exoplanet je řidších než voda** než plyne z teorie formování planetárních systémů
- Vyzařování smršťování je naopak „zahušťuje“
- Na vinně je pravděpodobně **slapové působení** při oběhu na eliptické dráze

■ P.-G. Gu, Nature 465 (2010) 300–301, L. Ibáñez et al., Astrophys. J. 713 (2010) 751–763.

Rozmanitost exoplanet

Neslavné konce exoplanet

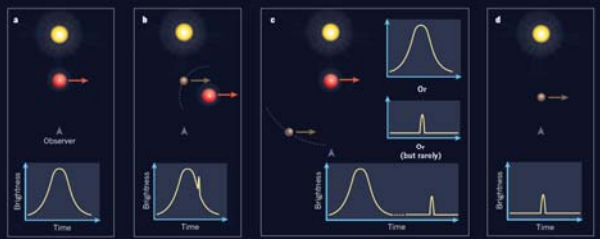


- Planety mohou přežít i hlubší „zanoření“ do rudého obra
- Jde pravděpodobně o jádra plyných obrů o velikosti Země
- Ve vzdálenosti 0,0060 a 0,0076 AU s orbitální periodou 5,7 a 8,2 hodiny
- Mohou se planety i nově zformovat po ukončení vývoje hvězdy?

■ E. M. R. Kempton Nature 480 (2011) 460–461. S. Charpinet et al., Nature 480 (2011) 496–499.

Mikročočující exoplanety

Nevázané exoplanety...



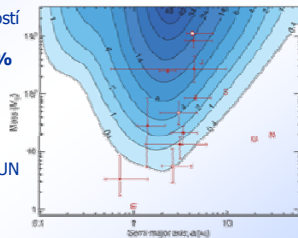
- XXXX Planety mohou přežít i hlubší „zanoření“ do rudého obra
- Jde pravděpodobně o jádra plyných obrů o velikosti Země
- Ve vzdálenosti 0,0060 a 0,0076 AU s orbitální periodou 5,7 a 8,2 hodiny
- Mohou se planety i nově zformovat po ukončení vývoje hvězdy?

■ J. Wambsganss, Nature 473 (2011) 289–290. MOA & OGLE, Nature 473 (2011) 349–352.

Mikročočující exoplanety

Planety jsou pravidlem

- Metody transitů i radiálních rychlostí nachází preferenčně exoplanety blízko hvězd s odhadem **17–30 %** hvězd s planetami
- Gravitační mikročočkování odhaluje i exoplanety na vzdálených drahách
- Projekty OGLE, MOA, Planet a μ FUN z let 2002–07 ukazují pro vzdálenosti 0,5–10 AU
 - 17 % obřích Jupiterů ($0,3\text{--}10 M_J$)
 - 52 % chladných Neptunů ($10\text{--}30 M_J$)
 - 62 % super-Zemí ($5\text{--}10 M_J$)
- Planety nejsou výjimkou!



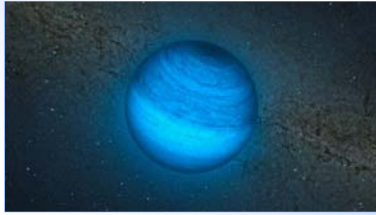
Citlivost detekce exoplanet v OGLE, MOA atd. Červená písmena odpovídají našim planetám. Nalezení planet nízkých hmotností je méně pravděpodobné.

■ A. Cassan et al., Nature 481 (2012) 167–169.

Rozmanitost exoplanet

Nevázané exoplanety

- V roce 2012 objevena **bludná exoplaneta** **CFBDSIR2149** ve vzdálenosti 100 ly
- Exoplaneta je součástí pohybové hvězdokupy AB Doradus (skupina 30 hvězd, jádro 10 hvězd zabírá 10 pc)



- Exoplaneta stejně mladá jako hvězdy AB Doradus, tj. 50–120 Myr
- Hmotnost 4–7 hmotností Jupitera (s jistotou nejde o hnědého trpaslíka)
- Pozorována atmosféra s příměsí metanu o teplotě ~700 K
- **Může existovat život na bludných exoplanetách?**

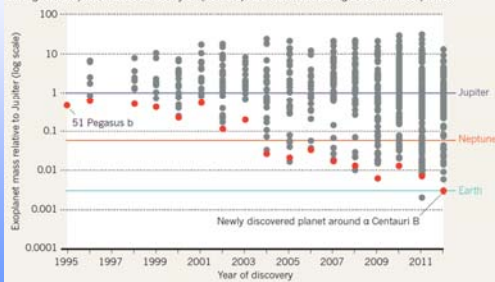
■ P. Delorme et al., Astron. Astrophys. 548 (2012) A26.

Jedinečnost sluneční soustavy

Porovnání s exoplanetárními systémy

LOWEST OF THE LOW

With improving techniques for measuring exoplanets' mass through their gravitational influence on stars, the lightest exoplanets detected each year (red dots) have reached the range of Earth-mass planets.

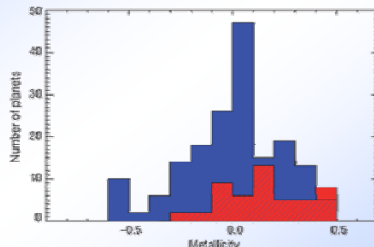


■ E. Hand, Nature 490 (2012) 323.

Rozmanitost exoplanet

Kde se které berou

- Složení fotosfér hvězd představuje „fosilní“ záznam o složení zárodečné mlhoviny
- **Hvězdy s vyšší metalicitou hostí plynné obry**
- **Planety zemského typu** (do $4 \times R_Z$) se tvoří kolem hvězd s **metalicitou podobnou Slunci**
- Obecně ale nevyžadují specifické metalicity...



Porovnání metalicity hvězd hostících **planety zemského typu** $<4R_Z$ (v širokém rozsahu) a **plynné obry** $>4R_Z$ (s vyšší metalitou mateřské hvězdy).

■ L. A. Buchhave et al., Nature 486 (2012) 375–377.

Spektrální charakteristiky

Přímé pozorování exoplanet

- **Poměr jasnosti planety a hvězdy** j_p / j_* závisí na velikosti planety R_p a její vzdálenosti od hvězdy a , též na rozptylových vlastnostech povrchu či atmosféry planety

$$j_p / j_* = p(\lambda, \alpha) (R_p / a)^2,$$

kde $p(\lambda, \alpha)$ je fázová funkce udávající pravděpodobnost rozptylu záření při dané vlnové délce λ a úhlu α (vůči pozorovateli)

- Pro objekty jako Jupiter je j_p / j_*
 - $\sim 10^{-9}$ (ca. 23 mag) ve viditelné oblasti
 - $\sim 10^{-6}$ (ca. 15 mag) v infračerveném oboru $\lambda = 10 \mu\text{m}$
- Je výhodné snažit se pozorovat exoplanety přímo v infračervené oblasti spektra

■ Z. Pokorný: Exoplanety, Academia, Praha 2007.

Spektrální charakteristiky

Přímé pozorování exoplanet – výhledy?

BLOT OUT THE LIGHT

Seeing an Earth-like planet orbiting a star 10 billion times brighter has been likened to trying to see a tiny firefly next to a blinding searchlight.

To block the starlight, astronomers are developing five types of coronagraph:

WAVELENGTH

Using a mask that resembles a barcode, the coronagraph suppresses starlight along the telescope's optical axis while transmitting light from off-axis planets.

Key challenge:
Precision manufacture of the barcode-like mask.

VECTOR VORTEX

A circular mask rotates the angle of polarization of photons from the star, so they cancel each other out.

Key challenge:
The need to manufacture the fine circular pattern of the mask, made from liquid-crystal polymers, to a precision of micrometres.



VISIBLE NULLING
Aim to flying several telescopes in formation, a device installed in a single spacecraft generates an interference pattern that suppresses starlight.

Key challenge:
Extending the technique to a broad band of wavelengths.



PHASE-INDUCED AMPLITUDE APODIZATION
Two asymmetrical mirrors reshape the incoming light beam to shunt starlight off to the side and preserve planetary light.

Key challenge:
The manufacture of correctly shaped optics.



STARSHADE
A petal-shaped structure carried into space on a separate spacecraft shades the telescope optics from the glare of the star.

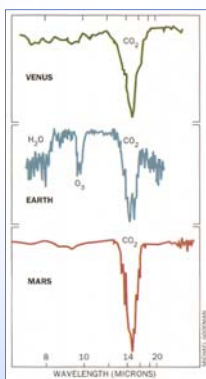
Key challenge:
Telescope and shade must fly in formation, separated by tens of thousands of kilometres.

■ R. Cowen, Nature 493 (2013) 464–465.

Spektrální charakteristiky

Základní rysy obyvatelné atmosféry

- Pokud se v budoucnu podaří detekovat spektra exoplanet, bude možné analyzovat složení atmosféry
- **Přítomnost CO₂** je možným znakem planety terestrického typu s hustší atmosférou
- **Přítomnost O₃** svědčí o přítomnosti stínící vrstvy a kyslíkaté atmosféry
- **Přítomnost CH₄ za současné přítomnosti O₂** ukazuje na možný organický původ (možné jsou podzemní rezervoáry)



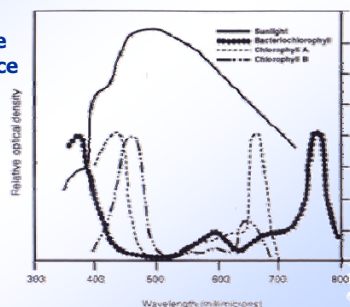
Spektrální charakteristiky Univerzální chlorofyl?

- Spektrální distribuce chlorofylu **nekopíruje průběh záření Slunce**

- Maximum slunečního záření zůstává nevyužito!

- Může jít o fyzikálně-chemické důvody?!

- Fototrofie na jiných planetách může mít stejné spektrální charakteristiky



■ S. C. Morris: Life's solution, Cambridge University Press (2003) p. 91.

„...jsou-li tam tvoří jako my, jsou-li tam žáby taky?“

Drakeova rovnice

N – počet civilizací schopných v současnosti komunikace

R – roční přírůstek hvězd v Galaxii

f_p – podíl hvězd s planetárními systémy

n_e – průměrný počet planet u jedné hvězdy

f_e – podíl planet s podmínkami vhodnými pro život

f_i – podíl planet na nichž život vznikl

f_i – podíl planet na nichž se vyvinul inteligentní život

f_c – podíl planet s technickou civilizací

L – trvání technické civilizace

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_e \cdot f_i \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

Hledání mimozemšťanů Drakeova rovnice...

Autor	f _e	f _i	f _i	f _c	L _s	L	N
Cameron (1963)	1×10 ¹⁰	1	1	0,5	3×10 ⁹	10 ⁶	2×10 ⁶
Sagan (1963)	1×10 ¹¹	1	0,5	0,1	1×10 ¹⁰	10 ⁷	1×10 ⁶
Rood a Trefil (1981)	2×10 ⁶	0,01	0,5	0,25	1×10 ¹⁰	10 ⁴	0,003
Goldsmith (1993)	2×10 ¹⁰	0,5	0,75	1	8×10 ⁹	10 ⁶	1×10 ⁶
Ulmschneider (2002)	4×10 ⁶	1	1	1	1×10 ¹⁰	10 ⁷	4×10 ³

- **L_s** – je doba obyvatelnosti planety Zemského typ
- **R** – roční přírůstek hvězd v Galaxii = 10
- **f_p** – podíl hvězd s planetárními systémy = 0,1
- **n_e** – průměrný počet planet u jedné hvězdy = 1–0,1
- Existuje řada modifikací této rovnice...

Hledání mimozemšťanů

Drakeova rovnice – modifikace vzácná Země

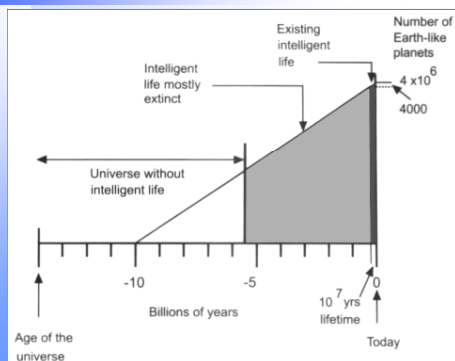
$$N = N^* \times f_p \times f_{pm} \times n_e \times n_g \times f_i \times f_c \times f_l \times f_m \times f_j \times f_{me}$$

- N^* – počet hvězd v Mléčné dráze
- f_p – podíl hvězd s planetami
- f_{nm} – podíl na kovy bohatých planet
- n_e – planety v obyvatelné zóně hvězdy
- n_g – hvězdy v obyvatelné zóně galaxie
- f_i – počet obyvatelných planet kde povstal život
- f_c – podíl planet s vícebuněčným životem
- f_l – procento doby života s komplexními vícebuněčnými
- f_m – podíl planet s velkým měsícem
- f_j – podíl planetárních soustav s planetami Jupiterova typu
- f_{me} – podíl planet s nízkým počtem ničivých dopadů

■ P.D. Ward, D. Brownlee: Rare Earth, Copernicus Books (2003) p. 268–275.

Hledání mimozemšťanů

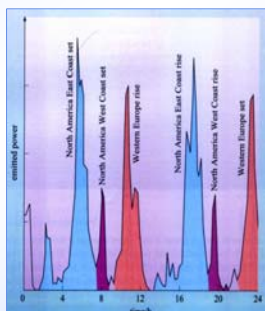
Drakeova rovnice



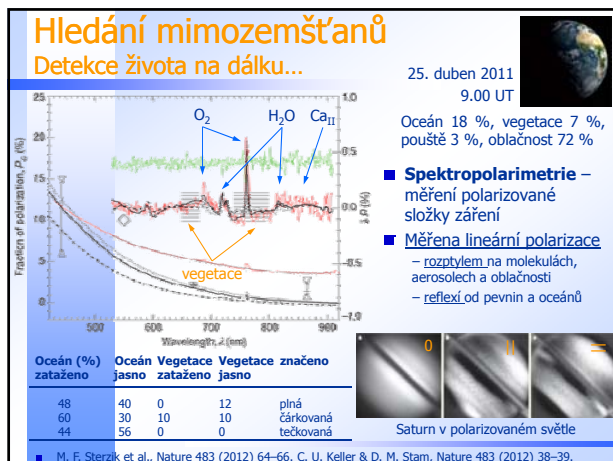
Hledání mimozemšťanů

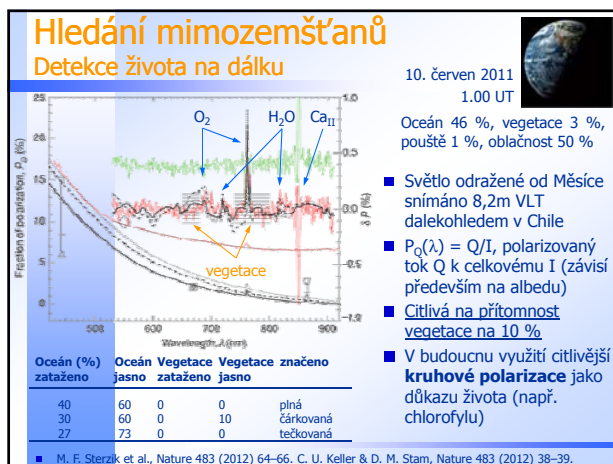
Hurá, život ve vesmíru nalezen

- Sonda Galileo otestovala své přístroje při průletu kolem Země v prosinci 1990
- Fotografie ukázaly oblačnost a projevy počasí
- Nalezla jasné stopy po O_2
- Spektrum vykazovalo jasnou a ostrou absorpční hranu v červené oblasti
- Podařilo se detekovat CH_4 v silné termodynamické nerovnováze
- Výše zmíněné svědčí o přítomnosti života
- Navíc byly zaznamenány periodické oscilace v radiových signálech, které navíc měly přesné frekvence
- Jde o praktickou demonstraci sondy, která úspěšně našla inteligentní život ve vesmíru



■ C. Sagan et al., Nature 365 (1993) 715–721.







Hledání mimozemšťanů

Rádiové naslouchání projektu SETI...

■ SETI @ Berkely

- Analýza dat z 300m antény v [Arecibo](#) na Portoriku
- [SETI@home](#)
- SETI & spol. (725 k\$/rok)

■ Allen Telescope Array

- Soustava 350 antén o průměru 6 m (v provozu zatím 42 antén)
- Bezprecedentní frekvenční (0,5–11,2 GHz) i plošný rozsah (17×VLA)
- Užiti pro radioastronomii
- SETI institut (projekt 50 M\$)
- Trvalé finanční potíže...



Hledání mimozemšťanů

Rádiové naslouchání projektu SETI

■ Southern SETI

- Jeden z nemnoha projektu SETI na jižní polokouli
- Dvě 30m antény [Argentinského radioastronomického institutu](#) u Buenos Aires
- Planetární spol. (16,5 k\$/rok)

■ Projekt Argus

- Radioamatérské pozorování z ca. 147 radioteleskopů koordinováno SETI
- Amatéři (4 k\$/rok/anténa)



Hledání mimozemšťanů

Optické pozorování projektu SETI

■ SETI @ Berkely

- 0,76m dalekohled [University of California, Berkley's Leuschner Observatory](#)
- Hledání ns laserových pulsů

■ SETI Optical Telescope

- 1,8m dalekohled v Harvardu v [Massachusetts](#)
- Rovněž hledá ns laserové pulsy

■ Lick Observatory Optical SETI

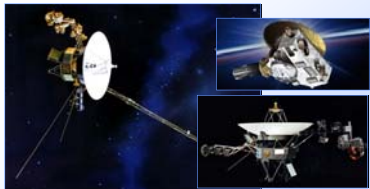
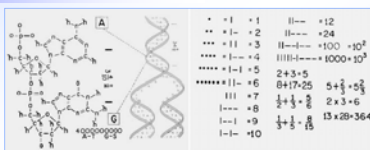
- 1m dalekohled [Lickovy observatoře](#) v Berkeley
- Hledání laserových pulsů 2000–2007, momentálně bez financí...



Hledání mimozemšťanů

Hlavně neztrácej optimismus

- Radiová komunikace vyžaduje trvalé vysílání či příjem
- Signál (radiový či optický) postupně mizí v šumu...
- Nejlepší metodou je posílat artefakty
- Kde jsou ufoři?
 - Neexistují
 - Schovávají se
 - Nezajímají se o nás
 - Jsou rezignovaní (Cesty jsou příliš obtížné a vesmír je nehostinný)
 - Jsou blízko...



■ C. Wright et al., Nature 431 (2004) 47–49.

Antropický princip

- Slabý antropický princip
 - Naše existence stanovuje zákony určující, odkud a v jakou chvíli bude možné abychom pozorovali vesmír
 - To, že existujeme, omezuje parametry v prostředí, v němž se nacházíme
- Silný antropický princip
 - Naše existence klade omezení nejen na naše okolí, ale i na možný tvar a obsah přírodních zákonů
 - **3-alfa proces** ($\text{He} + \text{He} \leftrightarrow \text{Be}$, $\text{Be} + \text{He} \rightarrow \text{C}$), změna silné interakce o 0,5 % a 4 % el. síly vedou ke zničení C
 - p o 0,2 % těžší se rozpadají na n
 - Hmotnosti kvarků optimalizovány na maximum stabilních prvků
 - Stabilitní eliptické dráhy existují pouze ve 3 dimenzích
 - „Čtvercové“ úbytky sil fungují pouze ve 3 dimenzích
 - Vyladění kosmologické konstanty...

■ S. Hawking, L. Mlodinow: Velikolepý plán, Argo & Dokořán, Praha 2011.

Doporučená literatura

- P. Davies: Podivné ticho (Hledání mimozemské civilizace 2.0). Argo/Dokořán, Praha 2011.
{Skvělá populárně naučná kniha o hledání mimozemšťanů, z pera povolaného}
- I. Gilmour, M. A. Septon: **An Introduction to Astrobiology**. Cambridge University Press, Cambridge 2004.
{Hezká učebnice astrobiologie, s kapitolami o exoplanetách a SETI}
- Z. Pokorný: Exoplanety: Najdeme ve vesmíru další Zemi? Academia, Praha 2007.
{Populárně naučná kniha o exoplanetách, v počátcích jejich objevů}
- P. Ulmschneider: Intelligent Life in the Universe. Springer, Berlin 2004
{Přehledová kniha s kapitolami o exoplanetách a mimozemském životě}

Země je opravdu jedinečná...



... ale alespoň si můžeme užít samotu...
