

Hledání života ve sluneční soustavě...

... aneb život za humny?

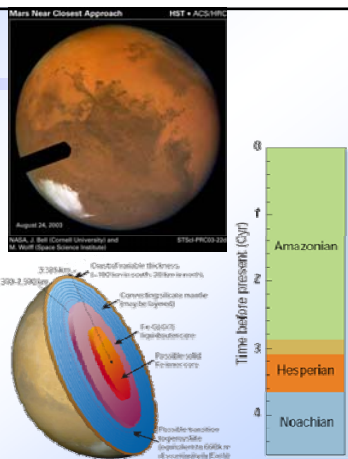
Vladimír Kopecký Jr.

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

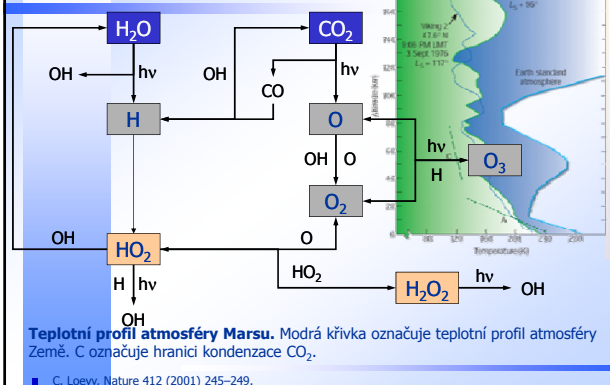


Mars Těleso planety

- Průměr 6 757 km
- Rotační perioda 24 h 39 min
- Vzdálenost 227,9 mil. km
- Tlak na povrchu 600 Pa
- Magnetické pole 500× slabší
- Povrchová teplota -90 °C až -20 °C
- Průměrná hustota CO₂ 95 %, N₂ 3 %, Ar 2 %, H₂O stopová množství

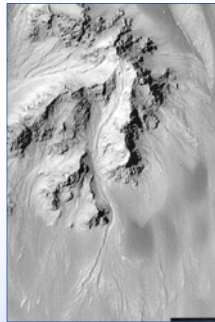
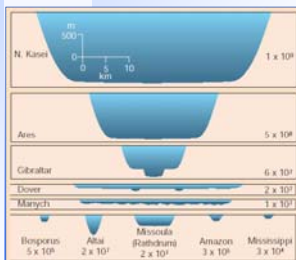


Mars Atmosféra



Mars

Voda na povrchu

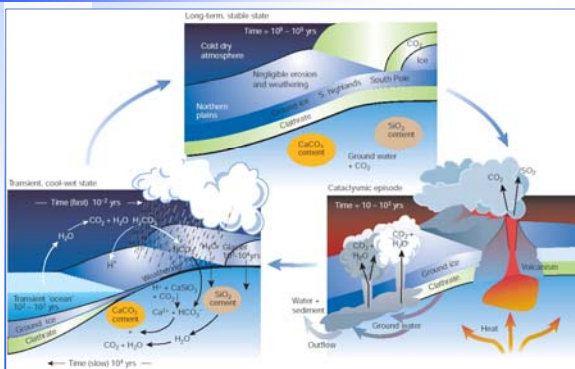


- Vody je na Marsu jistě dost, ale je vázána v permafrostu v podpovrchových vrstvách

■ V. R. Baker, Nature 412 (2001) 228–235.

Mars

Epizody klimatu...



Mars

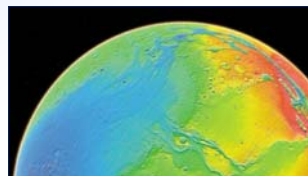
Epizody klimatu – globální oceán?

■ Pro oceán

- Rozsáhlá řeky svědčí o velkém množství vody na povrchu
- Hojný výskyt jílových materiálů, které vznikají v přítomnosti kapalné vody

■ Proti oceánu

- Nenalezení pobřežní linie
- Nedostatečná teplota pro dešť
- Nízká hustota atmosféry pro vznik skleníkového efektu (mladé Slunce svítilo méně) a udržení teploty nad bodem mrazu



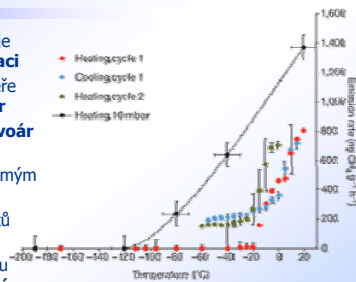
Znázornění poněkud sporné možnosti **rozsáhlého oceánu** (modře) na severní polokouli Marsu

■ E. Hand, Nature 484 (2012) 153.

Mars

Metan a život...

- Metan v atmosféře vykazuje **sezónní a šířkovou variaci**
- Existence CH_4 je v atmosféře **omezena na 300–600 yr**
- Existuje biogenní rezervoár metanu?**
- Je metan uvolňován neznámým geologickým procesem?
- Ablace uhlíkových meteoritů přispívá zanedbatelně
- Metan je utvářen přeměnou organické hmoty **působením UV-záření ve značném množství z uhlíkatých chondritů** (typ CM2)



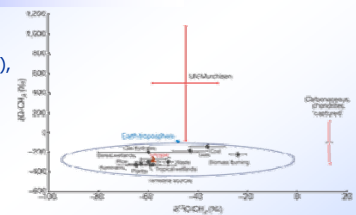
Rychlost **emise CH_4 vlivem UV záření** z Murchinsonského meteoritu jako funkce teploty a různého tlaku (tlak 10 mbar N_2 odpovídá povrchu Marsu)

F. Keppler et al., Nature 486 (2012) 93–96.

Mars

Metan a život

- Ročně dopadá na povrch 2700–59000 t meteoritů (převážně mikro-meteoritů), tj. 54–1180 t uhlíku
- 8–787 t CH_4 může být produkováno UV-přeměnou 10–50 % organické hmoty**
- 120–270 t CH_4 stačí pro objasnění pozorovaného množství v atmosféře**
- Izotopové složení CH_4 je velmi podobné z meteoritů jako z organismů!**
- Sezónní a šířkové variace je stále těžké objasnit...
- Curiosity vylučuje $\text{CH}_4 > 5 \text{ p.p.b.}$ (tj. objasnitelné nebiologicky)**



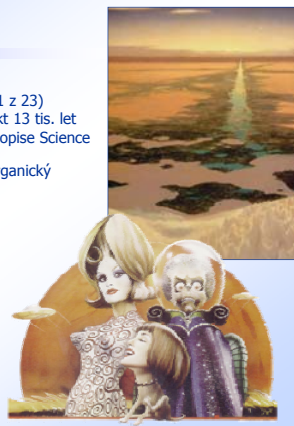
Izotopové složení CH_4 uvolněného UV-zářením z Murchinsonského meteoritu, uhlíkatých chondritů (tepelným rozkladem) a z pozemských zdrojů (trojúhelník označuje sopečnou půdu z Havaje)

F. Keppler et al., Nature 486 (2012) 93–96. E. Hand Nature 491 (2012) 174.

Mars

Hledání života

- Meteorit ALH84001**
 - Nalezen v Antarktidě v Allan Hills (1 z 23)
 - Stáří ca. 4 Gy, ejekce 15 My, impakt 13 tis. let
 - Objev „mikrobů“ opublikován v časopise Science v r. 1996
 - Dnes převládá názor, že jde o anorganický artefakt



Mars

Panspermie mezi terestrickými planetami

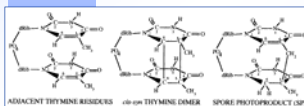
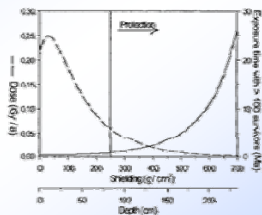
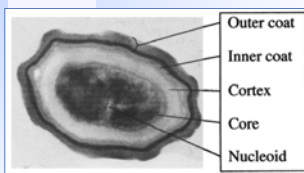
Rychlost (v_c/v_s)		Země	Venuše	Mars	Slunce	Jupiter
1,0	5,13	3,1	1,5	9,5	9,0	3,0
1,8	5,34	4,0	2,7	2,7	8,0	6,0
2,3	5,53	7,7	4,7	0,7	9,0	5,0
2,7	5,71	5,3	4,0	1,7	9,3	5,0
3,3	6,02	6,3	3,7	2,0	13,3	6,7

- Tabulka ukazuje účinnost přenosu částic vyvržených z povrchu Marsu (úniková rychlost 5 km/s) v prvních 15 My po vyvržení do kosmu. Účinnost je udána jako % dopadnuvších částic (ze 300 počítačově simulovaných)
- Nepravděpodobnější je výměna materiálu Země-Měsíc, dále Mars-Země**, nejméně pravděpodobný je dopad materiálu na Zemi z Venuše
- Dopad materiálu z Marsu obnáší cestu v průměru 15 My, ale simulace ukazuje i možnost dopadu po 16 000 letech, sic!

■ B. J. Gladman et al., Science 271 (1996) 1387-1392.

Mars

Panspermie mezi terestrickými planetami



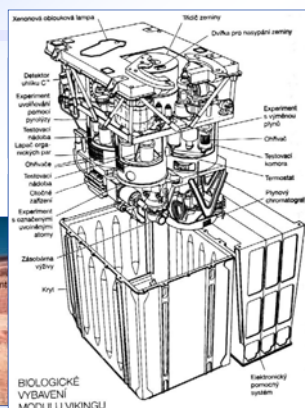
Přežití mikrobů je možné ve fázi sporulace a při stínění větším množstvím horniny. Problémem je přežít dopad takového tělesa...

■ W. L. Nicholson et al., Microbiol. Mol. Biol. Rev. 64 (2000) 548-572.

Mars

Kosmický výzkum

- Viking 1 a 2**
- start 20. srpna a 9. září 1975
- dosažení cíle v srpnu 1976
- výměna látek mezi půdou a atmosférou
- uvolňování a asimilace uhlíku v půdě
- hledání organických složek

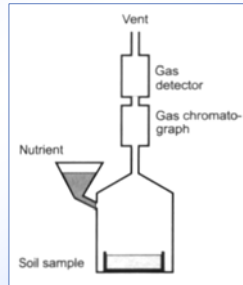


Mars

Hledání života – experimenty na Vikingu

■ Experiment s výměnou plynů

- Vzorek martánské půdy byl nabrán do reakční komory
- Byl přidán výživný roztok
- Očekávalo se, že mikroorganismy budou při dobré výživě produkovat O_2 , CO_2 a H_2
- Zvýšená produkce plynů by byla důkazem metabolismu a tudíž života
- Uvolnila se velká množství O_2 ...
- Produkce tohoto plynu byla dána reakcí H_2O s horninou na Marsu
- Výsledky s posledních let, s půdou z pouště Atacama (tj., extrémně suchou) ukázaly naprosto shodné výsledky



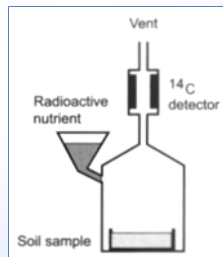
■ P. Ulmschneider: Intelligent life in the universe. Springer (2003) p. 155.

Mars

Hledání života – experimenty na Vikingu

■ Experiment s izotopickým značenou výměnou

- Vzorek martánské půdy byl nabrán do reakční komory
- Byl přidán výživný roztok obsahující radioaktivně značený uhlík C^{14}
- Očekávalo se, že mikroorganismy budou po metabolizaci nutrientů uvolňovat radioaktivně značené plyny jako CO_2 a CH_4 , které budou detekovány radiačním detektorem
- Opakovaná produkce radioaktivně značených plynů by byla důkazem metabolismu a tedy i života...
- Po prvním přidání se náhle uvolnily radioaktivně značené plyny ve velkém množství
- Po druhém přidání se nestalo téměř nic
- Výživný roztok reagoval s na oxid bohatými minerály v martánské půdě, po prvním přidání zreagovaly všechny složky...



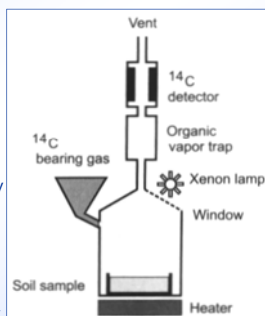
■ P. Ulmschneider: Intelligent life in the universe. Springer (2003) p. 155.

Mars

Hledání života

■ Pyrolytický experiment

- Vzorek martánské půdy byl nabrán do reakční komory
- Byla přidána směs plynů identická s martánskou atmosférou, CO a CO_2 byly radioaktivně značeny C^{14}
- Očekávalo se, že mikroorganismy po inkubační době užijí plyny k fotosyntéze a zabudují C^{14} do organických látek
- Vzorek byl následně zahřán na sterilizační teplotu $750^\circ C$, při které se organické látky odpaří
- Detekce C^{14} by znamenala přítomnost fotosyntetizujících mikroorganismů
- Nestalo se nic...
- Experiment byl po dlouhodobém vysterilizování při $175^\circ C$ opakován – zase nic...
- Na Marsu nejsou přítomny fotosyntetizující organismy

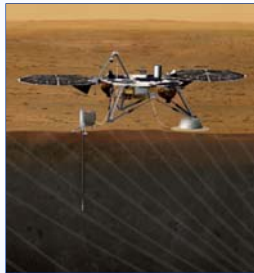


■ P. Ulmschneider: Intelligent life in the universe. Springer (2003) p. 155.

Mars

Budoucí kosmické mise

- **InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport)**
- Design podobný sondě Phoenix z roku 2007
- Přistání v rovníkové oblasti, pravděpodobně Elysium Planitia v roce 2016
- Seismometrická měření (od mag. 3)
- Šíření seismických vln vlivem dopadu asteroidů a průchodu měsíce Phobos
- Mapování vnitřní struktury Marsu

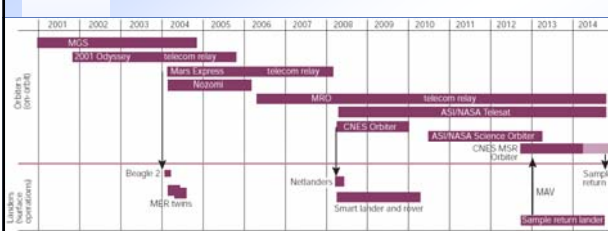


InSight mapuje strukturu Marsu

■ E. Hand, Nature 487 (2012) 150–151.

Mars

Kosmické mise – sny a skutečnost...

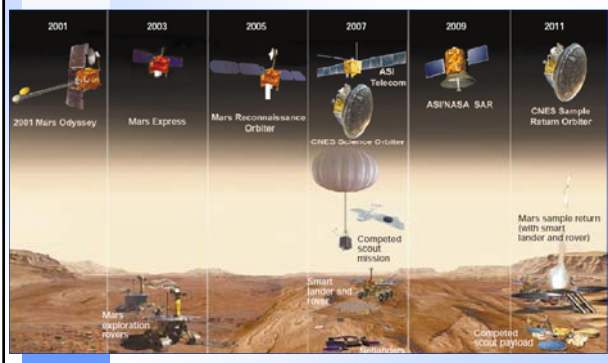


Plánované mise k Marsu. Stav z roku 2001...

■ M. H. Carr & J. Garvin, Nature 412 (2001) 250–253.

Mars

Kosmické mise – sny a skutečnost...



Mars

Kosmické mise – sny a skutečnost

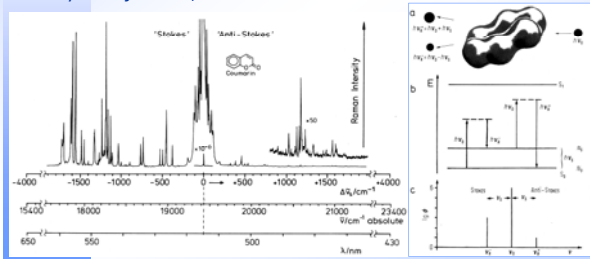


Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – co je zač?

- Ramanův rozptyl je dvoufotonový přechod, který odráží vibrace molekuly
- Molekula absorbuje foton a emituje druhý ve stejné chvíli, síť!

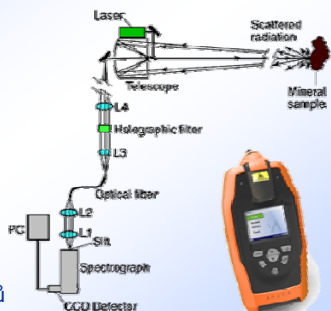
- C. V. Raman** (1888–1970)
- Nobelova cena 1930
- Ind. J. Phys. 2 (1928) 387



Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – jak na to...

- Umožňuje **studovat vzorky in situ v pevné, práškové, gelové, kaplné i plynné formě**
- S pomocí teleskopu možnost studovat vzorky **na velkou vzdálenost** (až stovky metrů)
- Možnost studovat složení hornin a povrchů těles sluneční soustavy

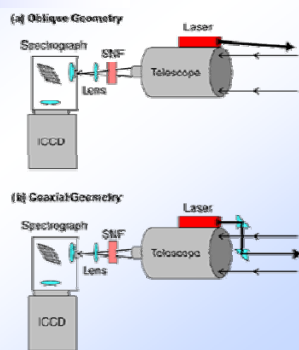


S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.

Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – jak na to

- Systémy pracují s různými vlnovými délkami (předpokládají se spíše kratší kolem 450 nm)
- Pulzní i kontinuální lasery
- Šikmá geometrie vyžaduje přenastavení systému pro různé vzdálenosti
- Souosá geometrie nevyužívá plný výkon laseru
- Rozlišení na ~100 m ca. 2 mm
- Pulzní laser – Raman/laser-induced fluorescence (LIF) – ~10 ns pulsy, odpadá problém s fluorescencí
- Lépe měření provádět v noci...

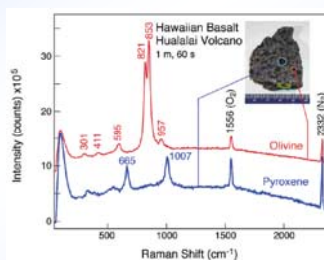


■ S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.

Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – co měřit na Marsu

- Cyklus síry hrál zřejmě v minulosti „životu“ na Marsu jistou roli
- Primárně se očekává studium minerálů vážících síru, SO_2 a H_2S (FeSO_4 , FeS , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ etc.)
- Testování přístrojů probíhá v Antarktidě, pouštních oblastech i v laboratořích na meteoritech
- Adaptace Raman/LIF pro martánská vozítka s měřením na vzdálenost 5 km
- **Netřeba jezdit, netřeba sbírat vzorky...**



Ramanova spektra hydrátů sulfátů měřená na vzdálenost 50 m
Ramanova spektra Havajské basaltické lávy

■ S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.

Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – jak se měří na Marsu?

- **Mars Science Laboratory – Curiosity Rover** – přistání 6. srpna 2012 v kráteru Gale (156 km v průměru)
- Očekávané stopy po proudu vody a její pradávná přítomnost v kráteru
- Testování podmínek umožňujících život
- **Sample analyst at Mars (SAM)** – hmotový spektrometr, plynový chromatograf, laditelný laserový spektrometr (ohřev vzorků na 1000 °C); možná detekce jednoduchých organických molekul

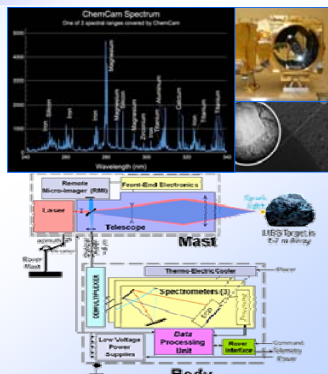


Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – jak se měří na Marsu?

■ Mars Science Laboratory – Curiosity Rover

- **LIBS** (laser induce brekdown spectroscopy) na ChemCam – po zásahu 5 ns pulsem (~ 14 mJ) Nd:YAG laseru (1064 nm) je detekováno záření vytvořeného plazmatu
- Fokuse svazku na $<0,6$ mm
- 10% přesnost na vzdálenost až 7 m (limit ca. 100 ppm)
- Primární chemická analýza
- Počítáno s opakováním 500x, zpracování pomocí PCA, PLS



Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – bude se měřit na Marsu!

■ ExoMars (Exobiology on Mars) – evropská mise pátrající po známkách života na Marsu

- Rover s vrtákem a robotickou paží pro dopravu vzorků
- Start 2016 nebo 2018
- **Modul Pasteur**
 - Umístěn uvnitř modulu vozítka
 - Obsahuje řadu přístrojů včetně GC-MS, XRD, IR
 - **Ramanův spektrometr (RLS)** kombinovaný s mikroskopem a LIBS – pracuje v mikro ($20\text{--}100\ \mu\text{m}$) i makro módu pomocí robotického ramene, hmotnost 2 kg, spotřeba energie 30 W



■ S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.

Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – k Venuši a dále

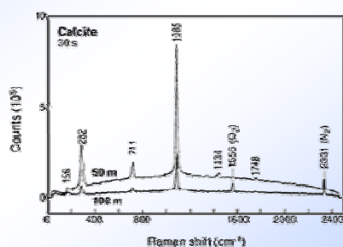
■ Venuše

- Především rychlé geochemické analýzy bez nutnosti pohybu sondy
- Sulfáty, uhlikaté minerály, silikáty v přítomnosti CO_2

■ Měsíc

- Geochemické analýzy
- Pyroxeny, olivíny, hledání pozemských zkmenešin

■ a dále...



Ramanova spektra kalcitu měřená na vzdálenost 50 a 100 metrů

■ S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.

Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – co se hledá

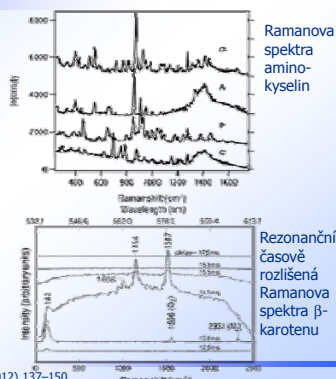
Aminokyseliny

- Metodou DCDR; potřebné rozlišení 16 cm^{-1} v rozsahu $500\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$
- Očekává se detekce Phe, Tyr, Trp, Cys, Met
- UV excitace předností

Pigmenty

- Chlorofil, karotenoidy (β -karoten), scytonemin, etc.
- Možná detekce minulého života vzhledem k větší stabilitě

S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.



Ramanova spektra aminokyselin

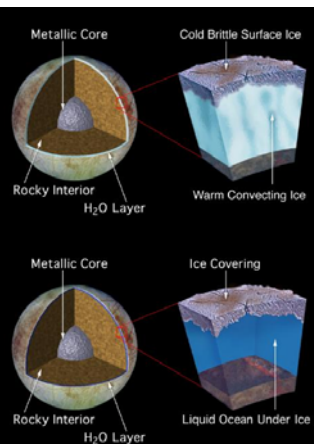
Rezonanční časově rozlišená Ramanova spektra β -karotenu

Europa

Těleso měsíce

- Průměr 1569 km, O_2 atmosféra, stopová množství sírných sloučenin**

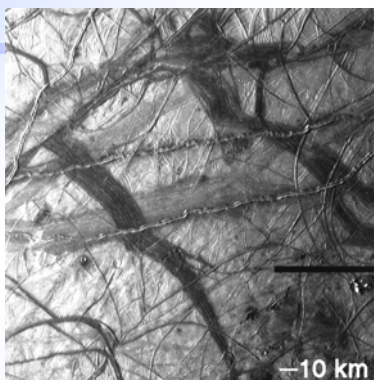
- Europu objevil Galileo Galileo r. 1610
- 1973 – průlet sond Pioneer
- 1977 – průlet sond Voyager – první kvalitní snímky Europy
- 1999 – sonda Galileo přinesla důkazy o možném oceánu



Europa

Hledání oceánu...

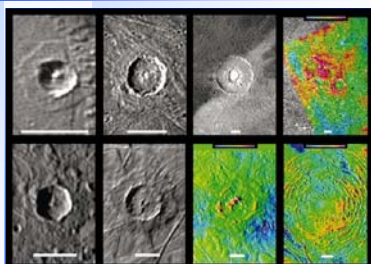
- Vlivem slapového působení Jupiteru vznikají na Europě cykloidální praskliny
- Model ukazuje, že tento typ prasklin vyžaduje tekutou vrstvu pod ledovým příkrovem
- Ledový příkrov nemůže být více než 40 km silný



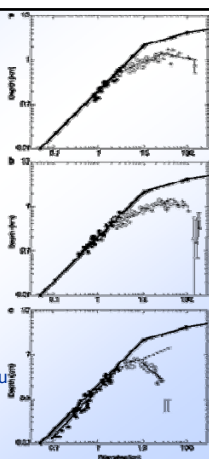
G. V. Hoppa et al., Science 285 (1999) 1899–1902.

Europa

Hledání oceánu...



- Analýza hloubek kráterů na Callistu, Ganymedu a Europě prokázala přítomnost kapalné vrstvy pod ledovým příkrovem
- ledový příkrov by měl mít mocnost > 19 km a pravděpodobně spíše jen 7–8 km



Europa

Hledání oceánu...

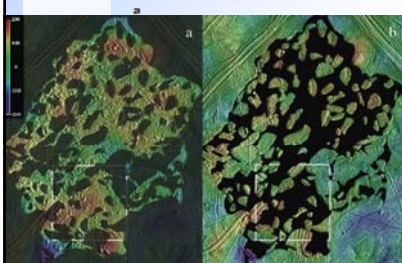
- Zvláštní nepravidelné útvary
- Narušují systém prasklin
- Jde o vyvýšeniny nebo propadliny
- Velikost je < 10 km a zdola nebylo nalezeno omezení
- Může jít o vyvěraní tekoucího ledu, nebo teplé vody



■ R. Greenberg et al., Icarus 161 (2003) 102–126.

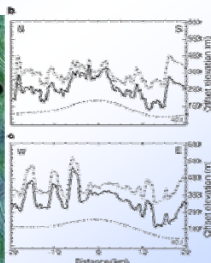
Europa

Hledání oceánu...



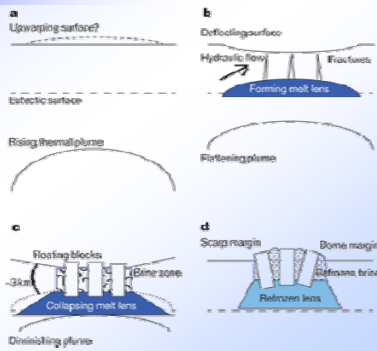
- Chaotický terén v oblasti Conamara Chaos je vyvýšeninou o ca. 100 m
- Základní ledovcové bloky vyčnívají až o 200 m nad terén

■ B. E. Schmidt et al., Nature 479 (2011) 502–505.



Europa Hledání oceánu...

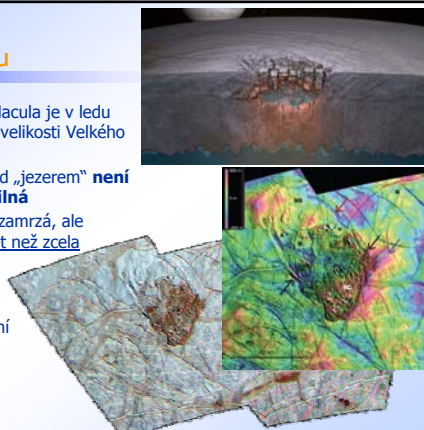
- A) Zdroj tepla (erupce vulkánů) vytvoří „bublinu“ teplé vody – zdvihne povrch
- B) roztaví led, pronikne puklinami k povrchu – vznikne deprese
- C) „bublina“ teplé vody kolabuje – vzniká solankové jezero s ledovcovými bloky
- D) opětovné zamrzání „jezera“ vyzdvihne terén



■ B. E. Schmidt et al., Nature 479 (2011) 502–505.

Europa Hledání oceánu

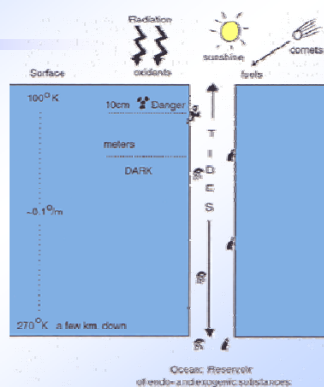
- V oblasti Thera Macula je v ledu skryto „jezero“ o velikosti Velkého jezera v Americe
- Ledová kůra nad „jezerem“ **není více jak 3 km silná**
- Jezero postupně zamrzá, ale potrvá 10^5 – 10^6 let než zcela zmrzne
- Oblasti chaotického terénu jsou ideální místo pro astrobiologický výzkum!



■ B. E. Schmidt et al., Nature 479 (2011) 502–505.

Europa Život v oceánu?

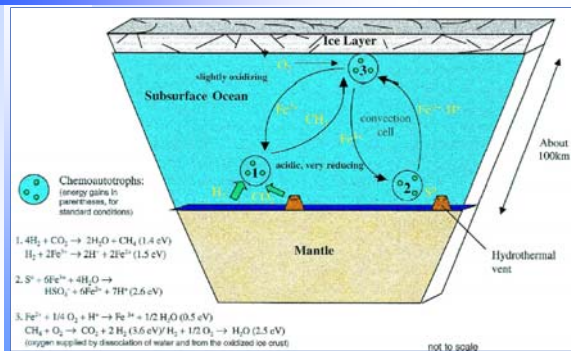
- Horká zřídla, ale především zlomy v ledovém příkrovu mohou představovat **oázy života**
- Spojují povrch s oceánem – přinášejí živiny
- Při zvládnutí hybernace nebo přemístění přes oceán je možné, že organismy obývají převážně tyto oblasti
- Ve vrstvách blízkých povrchu je dokonce v principu možná fototrofie



■ G. Horneck & C. Bazm Stark-Khan: Astrobiology, Springer (2001) p. 120.

Europa

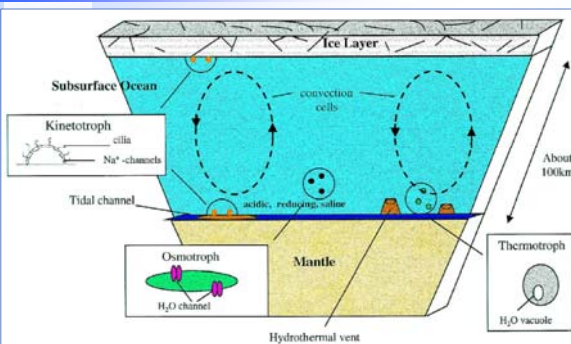
Život v oceánu – hledání zdrojů energie



■ D. Schulze-Makuch & L. N. Irwin, Astrobiology 2 (2002) 105–121.

Europa

Život v oceánu – hledání zdrojů energie

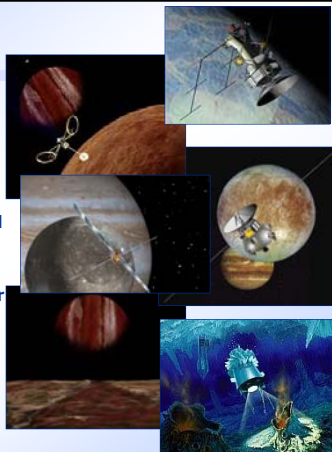


■ D. Schulze-Makuch & L. N. Irwin, Astrobiology 2 (2002) 105–121.

Europa

Plánovaný výzkum

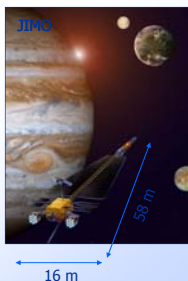
- Snahou je vyslat sondu, jež by detailně prozkoumala povrch Europy a ledovou tloušťku příkrovu
- >2008 – **Europa Jupiter System Mission – Laplace Jupiter Europa Orbiter** (NASA) & **Jupiter Ganymed Orbiter** (ESA) – zrušeno
- >2010 – **JIMO** (Jupiter Icy Moons Orbiter) – zrušeno
- **Jupiter ICy Moon Explorer (JUICE)** – projekt ESA, start 2022, přilet 2033
- Další fáze zahrnuje přistání na povrchu, provrtání ledu a vypuštění hydrobota
- >2009 – **Europa Landers**
- Osud dalšího výzkumu velice nejistý...



Instrumenty k hledání života

Ramanova spektroskopie – Europa a jiné zdálky?

- Cílem je získávat **Ramanova data z povrchu ledových měsíců** (Europa, Ganymed, Enceladus) **z orbity ~10–100 km** při užití UV-Vis pulzních laserů
- **Potřeba velkých sond** (jako JIMO) **pro 1–2 m zrcadlo a dostatek energie pro laser**
- Problémem neznámá koncentrace látek a absorpce svazku povrchem (<1 m pro vodní led)
- Při orbitální rychlosti 1,3 km/s, 1 m stopě (na 100 km difrakční limit 0,13 m) 266 nm laseru o 0,5 J na 7 ns puls je posun stopy 10 μm při opakování (očekáváno ca. 100 Hz při integraci 1 s) = 1 m stopy na 1,3 km s pauzou 130 m
- Zlepšení otočnými systémy k pozorování místa
- **Nehrozí kontaminace povrchu ani poškození přístrojů**

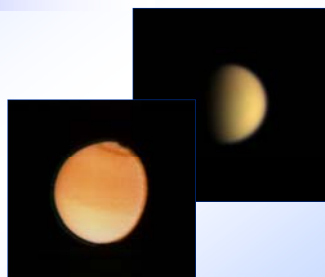


■ S. M. Angel et al., Appl. Spectrosc. 66 (2012) 137–150.

Titan

Základní historické údaje

- 1655 – objeven Christianem Huyensem
- 1900 – Comas Sola objevuje **projevy atmosféry**
- 1944 – Gerard Cuiper spektroskopicky odhaluje **methanovou atmosféru**
- 1980–81 – **přelet sond Voyager 1 a 2** (min. 4000 km)
- 1. 7. 2004 – **přilet sondy Cassini-Huygens** k Saturnu
- 14. 1. 2005 – **přistání sondy Huygens** na Titanu

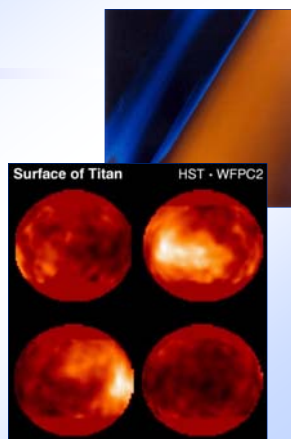


Fotografie ve viditelném světle. Dole – Voyager 2 (24. 8. 1981, 2,3 mil. km), nahoře Cassini (10. 6. 2004, 13,1 mil. km)

Titan

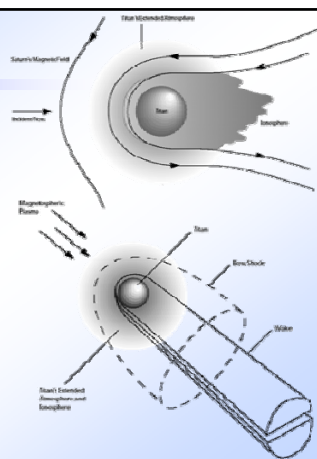
Měsíc Saturnu v číslech

- Největší měsíc Saturnu a **2. největší měsíc vůbec**
- **Poloměr** 2 575 km
- **Rotační perioda** 15,95 dne
- **Vzdálenost** od Saturnu 1 221 850 km
- **Průměrná hustota** 1,88 g/cm³ (Měsíc 3,34 g/cm³, Europa 2,97 g/cm³, Ganymed 1,94 g/cm³)

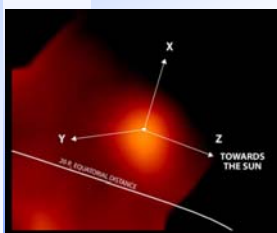


Titan Magnetosféra

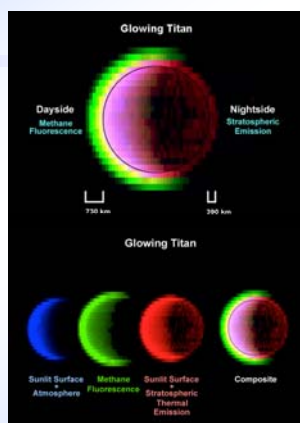
- Titan obíhá ve vzdálenosti 20,3 poloměrů Saturnu
- Titan prochází magnetosférou Saturnu (vně i uvnitř) v různých úhlech vzhledem k slunečnímu toku
- Interakce plazmy s vrchní vrstvou atmosféry vytváří složitější organické sloučeniny
- V ionosféře převládají nabitě uhlovodíky
- Má Titan vlastní magnetosféru?
- Vznikají v atmosféře blesky?



Titan Složení atmosféry



Oblak neutrálních atomů kolem Titanu se prostírá až do vzdálenosti 70 000 km. Atmosféra se rozprostírá do ca. 450 km nad povrchem Titanu.



Titan Složení atmosféry

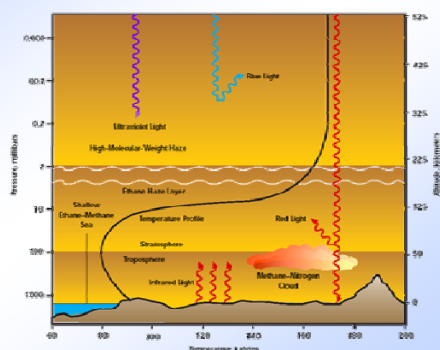
Vzorec	Název	Koncentrace v atmosféře
N_2	dusík	90–97 %
uhlovodíky		
CH_4	methan	2–10 %
C_2H_2	acetylen	2,2 ppm
C_2H_4	ethylen	0,1 ppm
C_2H_6	ethan	13 ppm
C_3H_8	propan	0,7 ppm
nitrily		
HCN	kyanovodík	160 ppb
HC_3N	kyanoacetylen	1,5 ppb

■ L. J. Spilker (Ed.): Passage to a ringed world. JPL, NASA, CIT (1997).

Titan

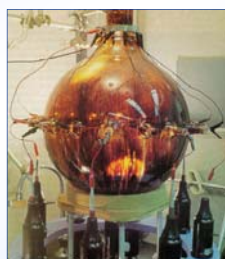
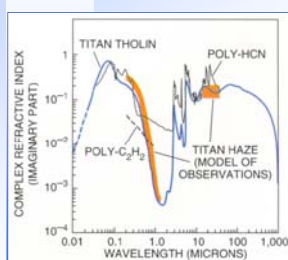
Struktura atmosféry

- **Tlak na povrchu 1,5 atmosféry**
- **Teplota na povrchu 94 K**
- **Tropopauza** ve 42 km má teplotu 70 K
- Velice komplexní atmosféra s projevy počasí



Titan

Simulace atmosféry v pozemských laboratořích



Vznik tholinů. Při simulaci Titanovy atmosféry v laboratoři vznikají při UV-ozáření směsi methanu a dalších sloučenin organické polymery, oranžovohnědé barvy, zvané tholiny – zodpovědné za oranžový nádech atmosféry a její neprůhlednost.

Titan

Chemie atmosféry

- **Fotochemie ve vysokých vrstvách:** $\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2$
→ rekombinací vznikají různé uhlovodíky
- Ethan je nejčastějším produktem fotochemického rozkladu methanu
- **Jde o nevratný proces** Vodik uniká do kosmu, tj. veškerý methan se bez doplnění spotřebuje za 10 milionů let
- Uhlovodíky polymerizují v atmosféře (především HCN a C_2H_2) a snášejí se k povrchu, vzniká „frakcionace“ vrstev atmosféry

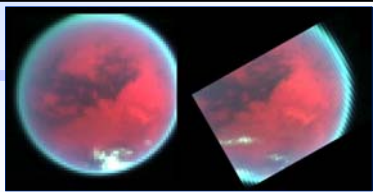


Detail atmosféry ve výškách stovek km.

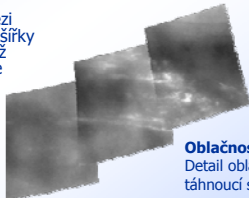
Titan

Projekty počasí

- Atmosféra je přesytna parami methanu
- Methan může tvořit oblaka
- Déšť a methanový sníh jsou závislé na přítomnosti prachových částic v atmosféře (je jich nedostatek)
- Rozdíl teplot mezi rovníkem a 60° šířky činí ca. 15 K, což vyvolává vítr, ve stratosféře tryskové proudění až 100 m/s



Oblačnost v Titanově atmosféře. Dvojice snímků ze sondy Cassini pořízená s odstupem 7 týdnů ukazuje vývoj methanové oblačnosti nad jižním pólem.

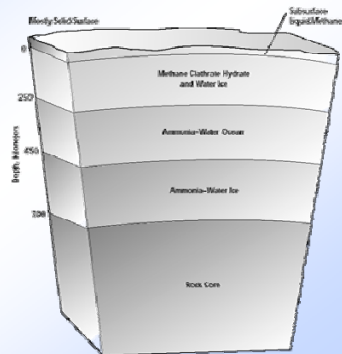


Oblačnost ve středních šířkách. Detail oblačnosti na 38° jižní šířky táhnoucí se do délky 250 km.

Titan

Povrch a těleso měsíce

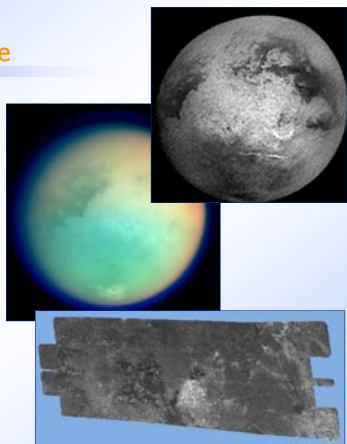
- Nízká hustota ($1,88 \text{ g/cm}^3$) ukazuje, že těleso je složeno z 50 % z vodního ledu a 50 % tvoří křemičité horniny
- Těleso měsíce je s velkou pravděpodobností diferenciováno
- V hloubce ca. 250 km pod povrchem se nachází oceán z čpavku a vody
- Těsně pod povrchem se nachází vrstvy kapalného methanu



Titan

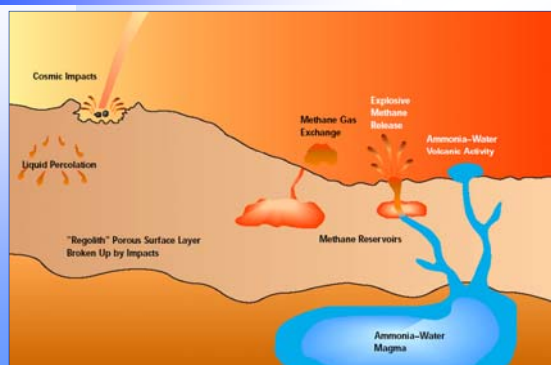
Povrch a těleso měsíce

- Teplota na povrchu umožňuje existenci oceánu methanu a ethanu (-182° – -160° , -172° – -83° C resp.)
- Na povrchu není žádný rozsáhlý oceán, možná jsou ale jezera
- Převážná část povrchu je tvořena vodním ledem
- Na povrchu je svět 1/1000 pozemského denního světla (ca. 350× více než za úplňkové noci) ?
- Povrch je mladý...



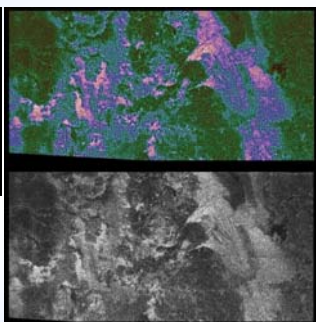
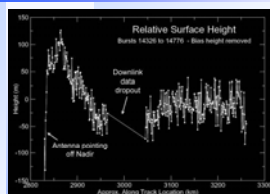
Titan

Geochemie povrchu



Titan

Povrch a těleso měsíce



Povrch Titanu je relativně hladký s malým převýšením. Oblast vlevo má rozměry 150×300 km a ukazuje ostré rozdíly mezi hladkými (tmavé, zelené) a členitými oblastmi povrchu.

Titan

Kosmická sonda Cassini-Huygens

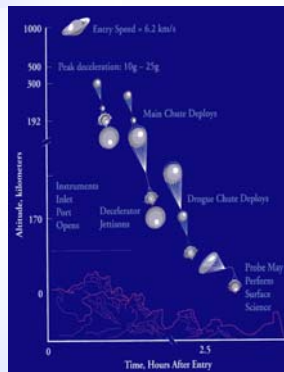
- Start sondy 15. 10. 1997
- Gravitální urychlení 2× u Venuše (1998, 1999), u Země (1999), u Jupitera (2000)
- 1. 7. 2004 vstup na oběžnou dráhu kolem Saturnu
- 25. 12. 2004 oddělení sondy **Huygens**
- 14. 1. 2005 přistání sondy **Huygens** na měsíci Titan



Titan

Kosmická sonda Cassini-Huygens

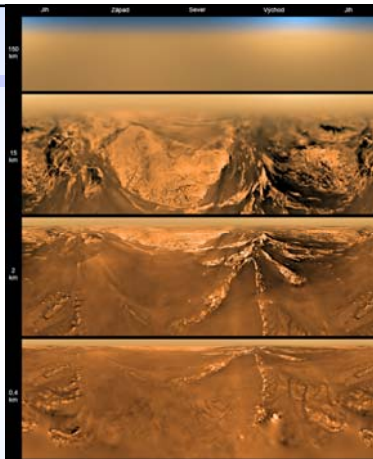
- Sonda byla vybavena experimenty:
- Doplerovský experiment – měření rychlosti větru v atmosféře
- Sběračem aerosolu pyrolyzátor – sběr aerosolu 18–23 km a následná analýza
- Plyným chromatograf a hmotový spektrometr – analýza plyných vzorků
- Sestupová kamera a radiometr – měření optických vlastností prostředí, snímkování povrchu
- Měření vlastností atmosféry – teplota, tlak, konduktivita, etc.
- Experimenty na povrchu – spektrometrie povrchu



Titan

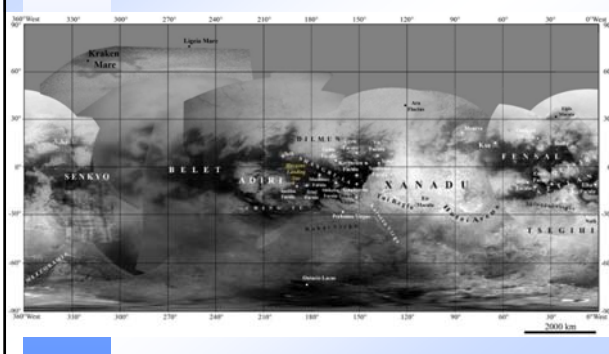
Panorama

- Přistání do blízkosti oblasti **Xanadu** (dle mytického paláce Kublaj Chána z románu S. D. Coleridge)
- Velké náhorní planiny tvořené pravděpodobně vodním ledem
- Přesně do bájně **Shangri-la** (severního horského údolí – rajske Himalájské zahrady) do místa **Antilia** (mytický ostrov mezi Amerikou a Evropou)



Titan

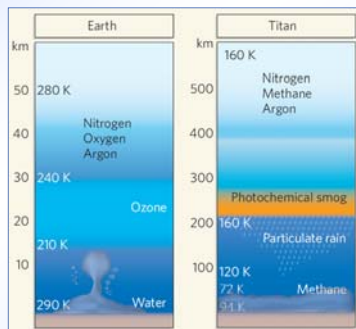
Radarová mapa



Titan

Kosmická sonda Huygens – první výsledky

- Huygens sestupoval atmosférou 2 h 27 min a ještě 67 min po přistání vysílal
- Jak atmosféra Země tak Titanu obsahují velké množství N
- V atmosféře Titanu chybí ^{40}Ar
- Stopové množství ^{36}Ar ukazuje na původ N z amoniaku

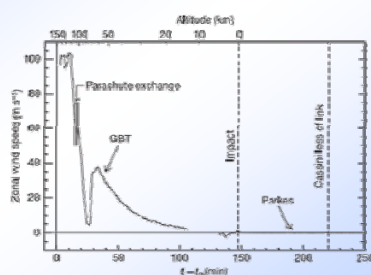


■ T. Owen, Nature 438 (2005) 756–757.

Titan

Kosmická sonda Huygens – první výsledky

- Rychlosti atmosféry stanoveny pomocí **HASI Doppler Wind Experiment**
- Rotace atmosféry na Titanu je prográdní a existuje superrotace atmosféry
- Nejvyšší zaznamenaná rychlost 120 m/s, tj. 430 km/h, byla zaznamenaná ve 120 km
- Na povrchu je rychlost větru 1 m/s a méně
- Zaznamenaný výrazný pokles rychlosti větru téměř až k nule ve výšce 60–100 km

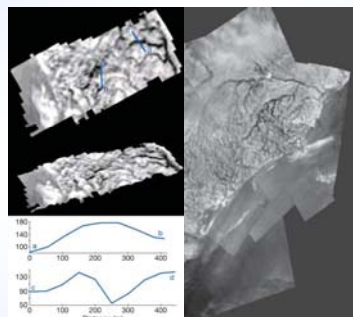


■ M. K. Bird et al., Nature 438 (2005) 800–802.

Titan

Kosmická sonda Huygens – první výsledky

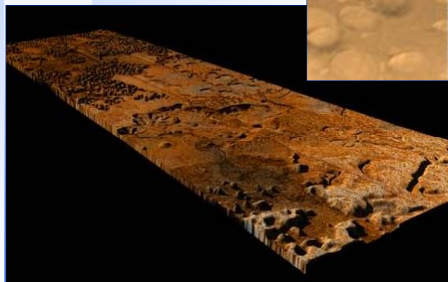
- Teplota $93,65 \pm 0,25 \text{ K}$ ($179,5 \text{ °C}$)**
- Tlak $1467 \pm 1 \text{ hPa}$**
- Povrch není tvrdý (není to led), podobá se konzistenci vlhkému jílu, či těžkému sněhu nebo písku
- Velikost kamenů na povrchu je 10–15 cm



■ M. G. Tomasko et al., Nature 438 (2005) 765–778.

Titan

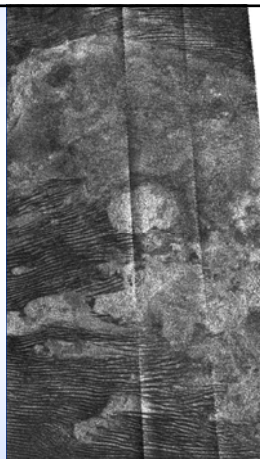
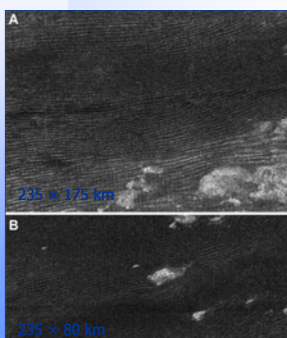
Kresby a příměry krajiny



- Kresba Sikunh Labyrinth založená na radarových mapách z Cassiniho a snímcích ze sondy Huygens. Rozložení výšek je poněkud spekulativní

Titánské duny

Radarová pozorování



Titánské duny

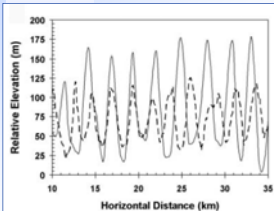
Srovnání s pozemskými dunami...



- Existují fyzikální i vzhledové podobnosti mezi dunami na Titanu a na Zemi – fyzika je všude stejná
- Pohled na poušť Namib z výšky 283 km (STS – 107) ve viditelném světle (vlevo) a radarový snímek oblasti 100 x 70 km

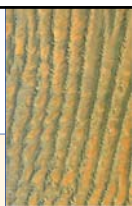
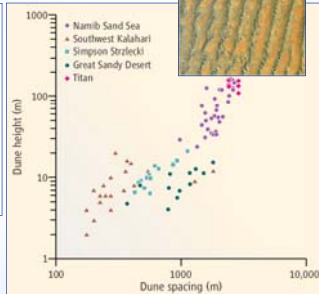
Titanánské duny

Srovnání s pozemskými dunami



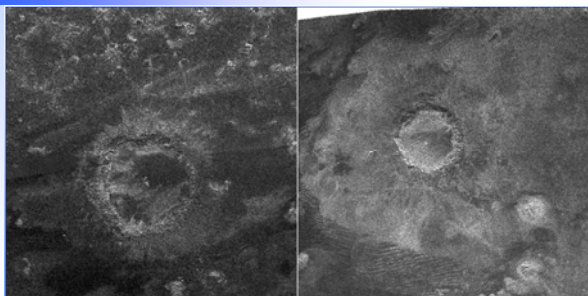
- Duny na Titanu se nejvíce podobají poušti Namib, ale velikosti pozemské duny předčí

■ R. D. Lorenz et al., Science 312 (2006) 724.



Titanánské krátery

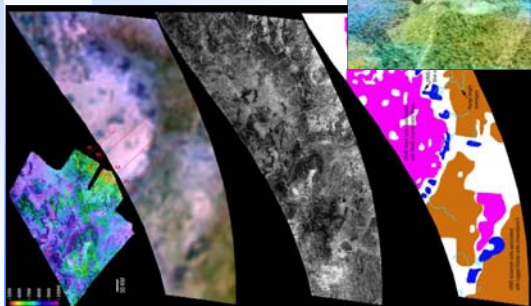
A příliš mladý povrch



- Vpravo – kráter Sinlap o průměr 80 km a hloubce 1300 m, způsobený tělesem o velikosti ca. 5–10 km, ukazuje světlý materiál vyvržený při impaktu
- Vlevo – 120 km kráter v oblasti Dilmun má pravděpodobně středový vrcholek

Titanánské sopky

Podivné kryovulkány



- Dole – **vulkanické toky** v oblasti Hotei Regio; nahoře – **Sotra Facula** (1000 a 1500 m)

Titanánské zlomy

Geologicky aktivní těleso

- Dole – Paralelní zlomy v oblasti Xanadu ukazují na tektoniku povrchu
- Nahře – podivně skrabacný povrch v okolí dvou hor

Titanánské kanály

Kde se berou a kam míří?

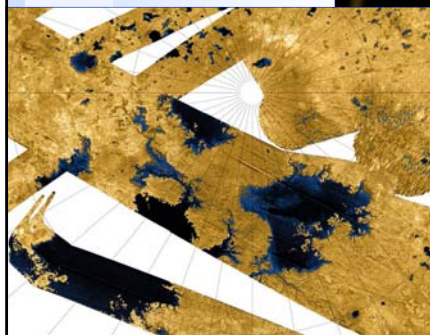
Ztracená moře

znovu nalezená...

Diagram illustrating the methane cycle on Titan:

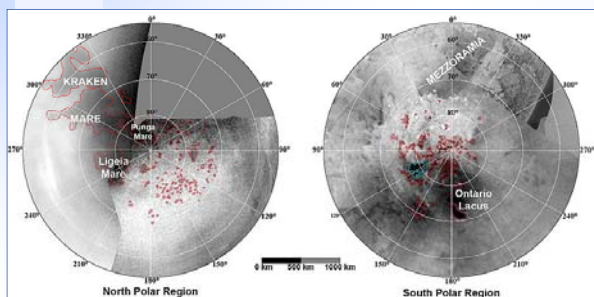
- a** Methane clouds, Evaporation, Precipitation
- b** Liquid methane lake

Ztracená moře ... a potvrzená



- Odras od mořské hladiny v blízké IC oblasti od Kraken Mare (400 000 km²)
- Vlevo – Ligea Mare a Kraken Mare

Ztracená moře Sezónní výkyvy?



Ztracená moře Moře vs. Atmosféra



- Předpokládejme, že 50 % Titanu je pokryto metano-etano-N oceánem o hloubce 0,5 km a hustotě $0,66 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Oceán je složen (hmotnostně) ze 70 % metanu, 25 % etanu a 5 % N. Předpokládejme, že metan se vytrácí z atmosféry rychlostí $4 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. **Vypočítejte za jak dlouho oceán nahradí metanovou atmosféru.**

- Objem oceánu je $4\pi R^2 \times 0,5 \times D$, kde D je hloubka a R je poloměr Titanu

- Hmotnost oceánu je $4\pi R^2 \times 0,5 \times D \times \rho$, kde ρ je hustota

- Ztráta metanu za s je $4 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \times 4\pi R^2$

- Tedy čas k obnově atmosféry je dán jako:

$$T = [4\pi R^2 \times 0,5 \times D \times \rho \times 0,7] / [4 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \times 4\pi R^2]$$

$$= [0,5 \times D \times \rho \times 0,7] / [4 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = 2,9 \times 10^{16} \text{ s} \sim 1 \text{ Gyr}$$

- To ukazuje, že v časové škále vývoje sluneční soustavy může oceán nahrazovat metan v atmosféře Titanu, neboť jeho ztráta do prostotu i v reakcích je ihned nahrazena metanem z hypotetického oceánu.

Život na Titanu?

Skutečnost...

- Na povrchu prakticky není voda, ale ukrytý hluboký oceán voda-amoniak skýtá naději
- 2009 – **první syntéza aminokyselin a bází nukleových kyselin v umělé Titanově atmosféře** (působením soft X-ray)
- Za 6 Gy se Slunce stane rudým obrem, pak se Titan se oteplí na -70°C
- Panspermie ze Země prakticky nemožná (vzdálenost a typ mikrobů)

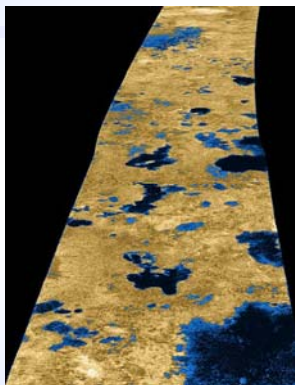


■ S. Pilling et al., J. Phys. Chem. A 113 (2009) 11161–11166.

Život na Titanu?

... a mýty

- Mikroorganismy mohou **užívat H_2 místo O_2** , následně reagovat s acetylenem (C_2H_2) místo s glukózou a produkovat CH_4 místo CO_2
- V úvahu připadá i exotická **možnost „života“ ve fosfanových (PH_3) kapičkách** (kapalné při 140 až 185 K) rozptýlených v ethanových jezerech (život bez membrán, sic!)



■ T. Naganuma & Sete, Journal of Cosmology 5 (2010) 905–911.

Život na Titanu?

... a mýty?

- 2005 – **Mikroorganismy „dýchající“ H_2** musí způsobovat měřitelný úbytek H_2 u povrchu (ca. $>1000\times$), konzumaci ethanu C_2H_6 a acetylenu C_2H_2 a přítomnost CH_4 (ne v geologickém čase)
 - $\text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_4$ (334 kJ/mol)
 - $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_4$ (57 kJ/mol)
 - $\text{R-CH}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{R} + \text{CH}_4$ (54 kJ/mol)
- 2010 – Data z Cassini potvrzují **nepřítomnost vodního ledu a acetylenu na povrchu** (Clark et al.), model atmosférického proudění (Strobel) předpovídá tok H_2 k povrchu stejný jako únik do vesmíru
 - C_2H_2 a H_2O nezpochybnitelné a v soulasu s Huygensem
 - H_2 je – špatný model?, existuje adsorpce H_2 na tholiny?, zvláštní chemie na povrchu sorbující H_2 , život na Titanu?!

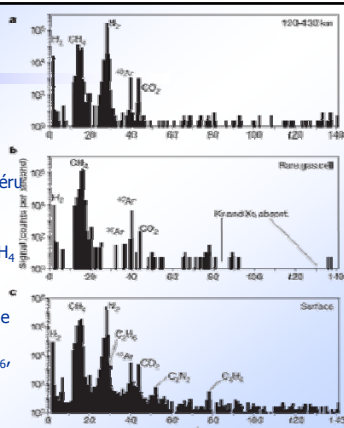
■ C. P. McKay & H. D. Smith, Icarus 178 (2005) 274–276. R. N. Clark et al. J. Geophys. Res., 115 (2010) E10005. D. F. Strobel, Icarus 208 (2010) 878–886.

Titan

Příslib dalšího...

- **Nepřítomnost** (^{36}Ar je stopový) **primordiálních vzácných plynů** Kr, Xe (v 77–75 km) v atmosféře implikuje sekundární atmosféru
- **N atmosféra pochází z fotolýzy NH_3**
- Koncentrace atmosférická CH_4 je uniformní $1,6 \times 10^{-2}$ M u povrchu až $4,9 \times 10^{-2}$ M
- Analýza vyšších uhlovodíků je pouze předběžná a ukazuje přítomnost C_2H_6 , C_2N_2 a C_6H_6 , došlo k ovlivnění analýzy odpařením povrchu při kontaktu se sondou

■ H. B. Niemann et al, Nature 438 (2005) 779–784.



Huygens svoji misi ukončil...

avšak nevyřkl ještě poslední slovo...



Titan

Budoucí kosmické mise

- **TIME (Titan Mare Explorer)**
- Start 2016, přistání roku 2024
- 1,5hodinový sestup atmosférou a její analýza
- Přistání u severního pólu v moři Ligeia Mare
- Plocha moře větší než Velké jezero v Americe, hloubka >10 m
- Volná plavba po hladině
- Detailní spektrometrická analýza složení
- Pátrání po komplexní prebiotické chemii
- Test limitů života?



TIME bude plavat na hladině uhlovodíkového moře na Titanu

■ E. Hand, Nature 487 (2012) 150–151.

Doporučená literatura

- I. Gilmour, M. A. Septon: An Introduction to Astrobiology. Cambridge University Press, Cambridge 2004.
{Hezká učebnice astrobiologie, s kapitolami o průzkumu sluneční soustavy}
- J. I. Lunine: **Astrobiology (A multidisciplinary approach)**. Pearson Education & Addison Wesley, New York 2005.
{První a skutečně základní učebnice astrobiologie, s kapitolami o hledání života ve sluneční soustavě}

Dárky bývají různé Pozor na kontaminaci cizích světů!



PŘINESLI JIMÉ VÁM NĚKOLIK UŽITEČNÝCH DÁRKŮ: NEWTONŮV ZÁKON, TEORII
RELATIVITY, POLYMERACI, DETERGENTY, PESTICIDY...
