

Astrobiológia

Život, vesmír a podobné zázraky



RNDr. Tomáš Paulech, PhD.
AGO FMFI UK

Objavovňa SNM-PM, 17.9.2020

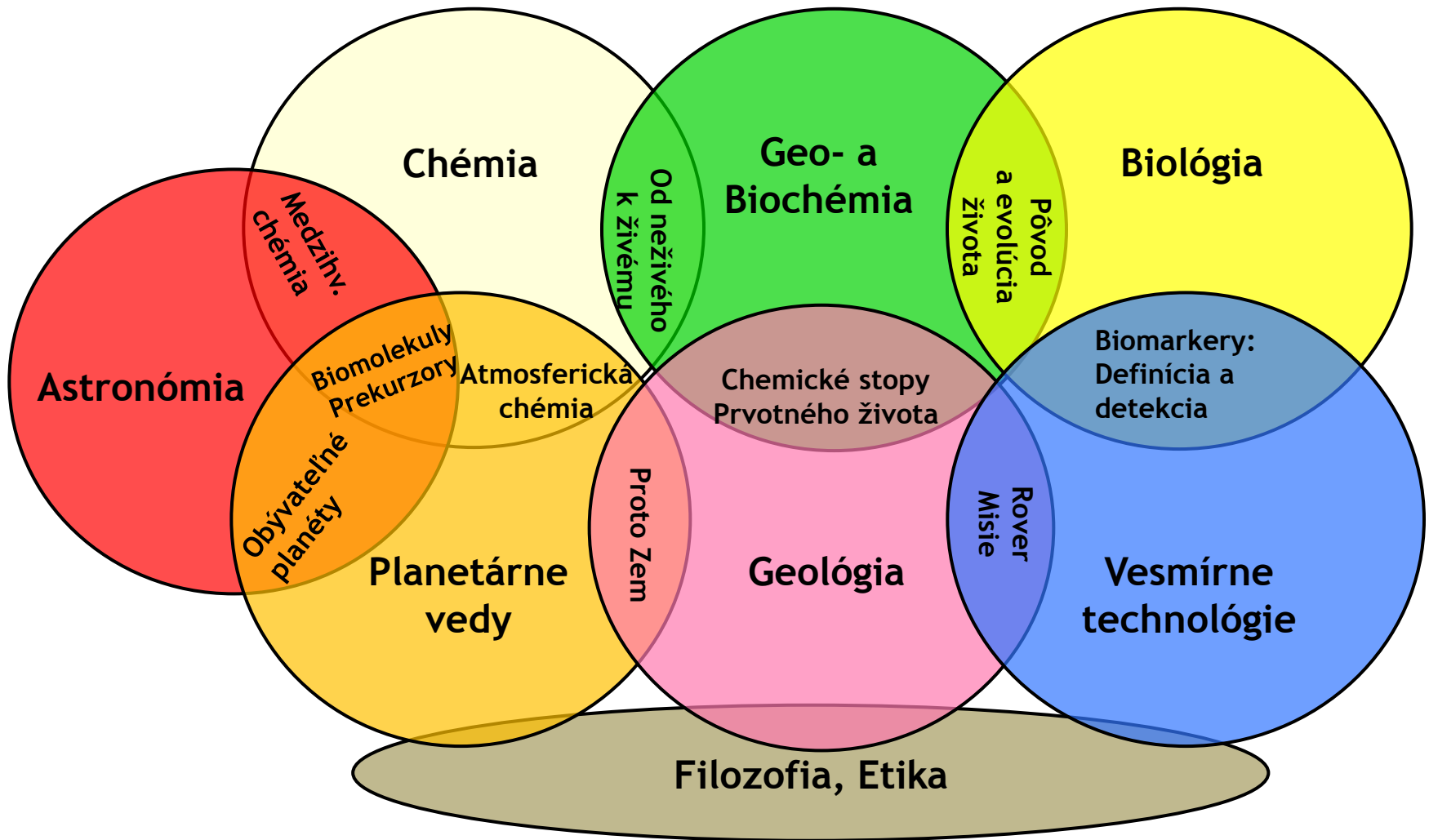
Astrobiológia - čo je a čo študuje

- Astrobiológia = vedecká oblasť, ktorá študuje
 - Pôvod
 - Evolúciu
 - Distribúciu
 - Budúcnosť života vo vesmíre.



- 3 základné otázky:
 - Ako život vznikol a ako sa vyvinul?
 - Existuje život inde vo vesmíre?
 - Aká je budúcnosť života na Zemi a inde?
- Integruje náuky o vesmíre, Zemi a živote

Astrobiológia - mozaika disciplín



Život

Čo je a aký je...



Vírusy napádajúce baktériu (Wikipedia)

Život – pokusy o definíciu

- **Historické pohľady**

- Empedokles (5. stor pred n.l.)
 - Náuka o živloch a pralátke - život ako kombinácia a spolupôsobenie živlov
- Náboženské predstavy
 - počiatok chaos, stvorenie neba a Zeme, duša, človek iný ako ostatný život
- Vitalizmus (16.-18. stor.) – životná sila - vis vitalis
 - vyvrátili Redi 1668, Wöhler 1828 a Pasteur 1859
- 20 stor. – intenzívne hľadanie univerzálnej definície
 - aj E. Schrödinger, C. Sagan...

- **3 výstižné (a univerzálne) definície**

- „Život nie je nič iné ako **elektrón hľadajúci, kde by spočinul**“
 - (A. Szent-Györgyi, Nobelova cena 1937 za izolovanie vitamínu C a fáz Krebsovho cyklu)
- „Nákupný zoznam života: **Olivín, voda, CO₂**“
 - (N.Lane, The Vital Question, 2015)
- „Život je samo-udržujúci sa chemický systém schopný vyvíjať sa **Darwinovskou evolúciou**“
 - (G.Joyce, NASA, 1994) – akceptovaná ako doteraz najlepšia definícia života
 - Nepoužiteľné pre vesmírne misie, používajú sa biologické signatúry

Život – univerzálne vlastnosti

- Neexistuje univerzálna a všeobecne použiteľná definícia života
 - Je život ako voda tzv. „Natural kind“ – čakáme principiálne pochopenie ?
- Základné charakteristiky života
 - Komplexita – vysoká miera samo-organizácie (napr. bunková membrána)
 - Reprodukcia
 - Rast a vývin
 - Metabolizmus – využitie (utilizácia) energie prostredia
 - Reakcia na podnety - interakcia s okolím
 - Homeostáza – stabilné vnútorné prostredie
 - Evolúcia – adaptácia na prostredie počas generácií a zmena dedičných znakov reprodukciou
- Hraničné príklady neživých foriem
 - Vykazujú niektoré, nie však všetky vlastnosti živých organizmov
 - Vírusy, Transpozóny a ich evolúcia, pohlavné rozmnožovanie (vyžaduje dvoch), kryštály, mémy,...

Prekurzory života



Murchison meteorit, celkom cca 100kg, 75 aminokyselín

Nukleogenéza prvků ve vesmíre

The Astrobiology Periodic Table

© Charles S Cockell, v. 5.0 [December 2016]: The Astrobiological Periodic Table

For comments email: c.s.cockell@ed.ac.uk

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Period

1 H 1 He 2

2 Li 3 Be 4

3 Na 11 Mg 12

4 K 19 Ca 20 Sc 21 Ti 22 V 23 Cr 24 Mn 25 Fe 26 Co 27 Ni 28 Cu 29 Zn 30 Ga 31 Ge 32 As 33 Se 34 Br 35 Kr 36

5 Rb 37 Sr 38 Y 39 Zr 40 Nb 41 Mo 42 Tc 43 Ru 44 Rh 45 Pd 46 Ag 47 Cd 48 In 49 Sn 50 Sb 51 Te 52 I 53 Xe 54

6 Cs 55 Ba 56 Hf 72 Ta 73 W 74 Re 75 Os 76 Ir 77 Pt 78 Au 79 Hg 80 Tl 81 Pb 82 Bi 83 Po 84 At 85 Rn 86

7 Fr 87 Ra 88 Rf 104 Db 105 Sg 106 Bh 107 Hs 108 Mt 109 Ds 110 Rg 111 Cn 112 Nh 113 Fl 114 Mc 115 Lv 116 Ts 117 Og 118

89 La 90 Ce 91 Pr 92 U 93 Np 94 Pu 95 Am 96 Cm 97 Bk 98 Cf 99 Es 100 Fm 101 Md 102 No 103 Lr

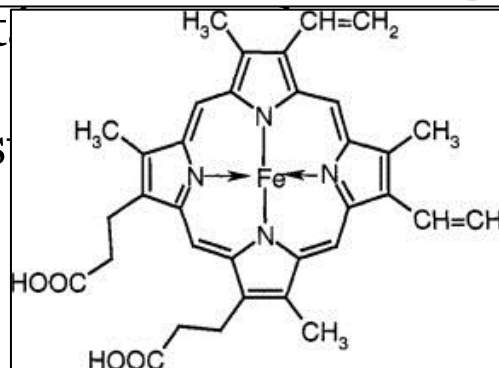
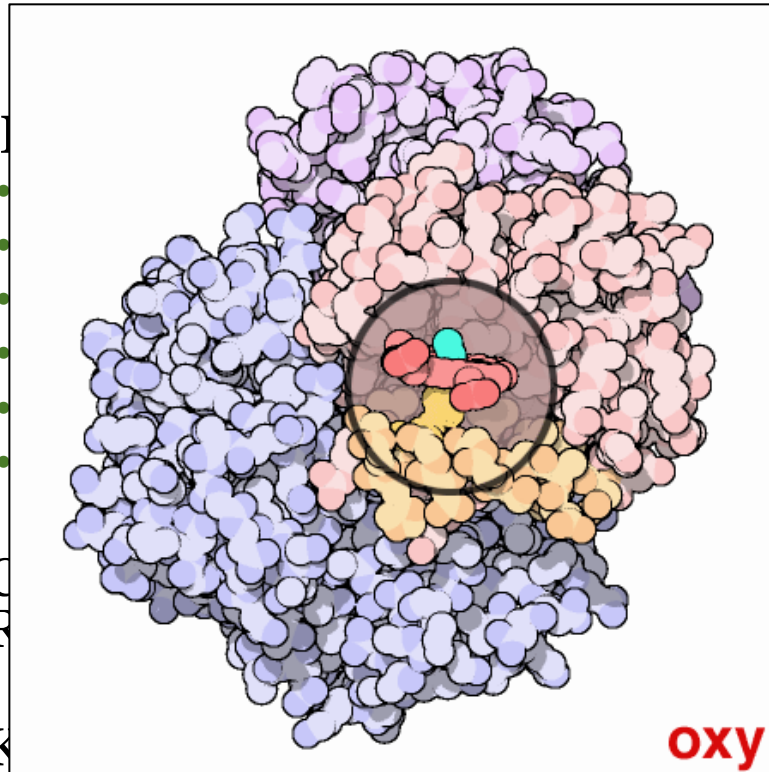
94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 9

Biological data from Wackett, L.P., Dodge, A.G., Ellis, L.B.M. (2004) *Applied and Environmental Microbiology* **70**, 647-655.

* Stable isotope values of non-radioactive elements

Biogénne prvky

- I
- C
- R
- K
- medziplanet
- Esenciálne s



97% biomasy
 “chémie)–variabilita, reaktivita „akurát“
 (pri 2/2 atómov človeka)

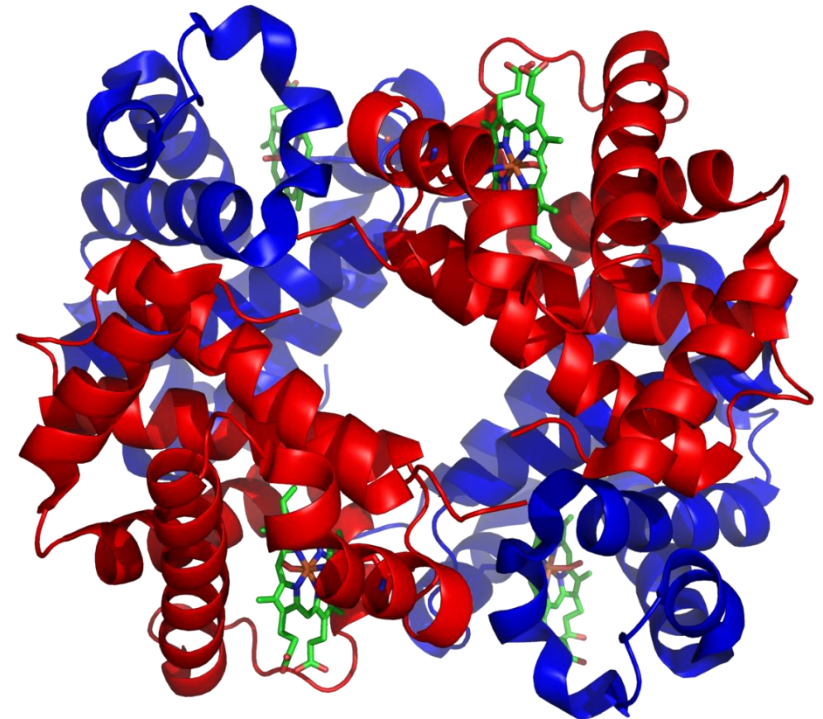


Foto: molekulárna štruktúra hemoglobínu, wiki

ISM molekuly - mimozemská chémie

Known Interstellar and Circumstellar Molecules (July 2000)

2	3	4	5	6	7	8	9
H ₂	H ₂ O	NH ₃	SiH ₄	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	CH ₃ CO ₂ H	CH ₃ CH ₂ OH
OH	H ₂ S	H ₃ O ⁺	CH ₄	NH ₂ CHO	CH ₃ NH ₂		
SO ⁺	SO ₂	H ₂ CO	CHOOH	CH ₃ CN	CH ₃ C		
SiO	SiH ₂	H ₂ CS	HC≡CCN	CH ₃ NC	CH ₂ C		
SiS	SiH ₂ ?	HNCO	CH ₂ NH	CH ₃ SH	HC ₄		
NO	NH ₂	HNCS	NH ₂ CN	C ₅ H	C ₆ H		
NS	H ₃ ⁺	CCCN	H ₂ CCO	HC ₂ CHO	c-CH ₃		
HCl	NNO	HCO ₂ ⁺	C ₄ H	CH ₂ =CH ₂	C ₇ ⁻ ?		
NaCl	HCO	CCCH	c-C ₃ H ₂	H ₂ CCCC			
KCl	HCO ⁺	c-CCCH	CH ₂ CN	HC ₃ NH ⁺			
AlCl	OCS	CCCO	C ₅	C ₅ N			
AlF	CCH	CCCS	SiC ₄	C ₅ S?			
PN	H ₂ CC	HCCH	H ₂ CCC				
SiN	SiCC	HCCNH ⁺	HCCNC				
NH	CCO	HCCN	HNCCC				
CH	CCS	H ₂ CN	H ₃ CO ⁺				
CH ⁺	C ₃	c-SiC ₃					
CN	MgNC	CH ₃					
CO	NaCN	CH ₂ D ⁺ ?					
CS	CH ₂						
C ₂	MgCN						
SiC	HOC ⁺						
CP	HCN						
HF	HNC						
	SiCN						
	KCN?						

Number of Atoms

Year

CH₃, CH₃⁺, CN

H₂O, NH₃

OH

4 per 100

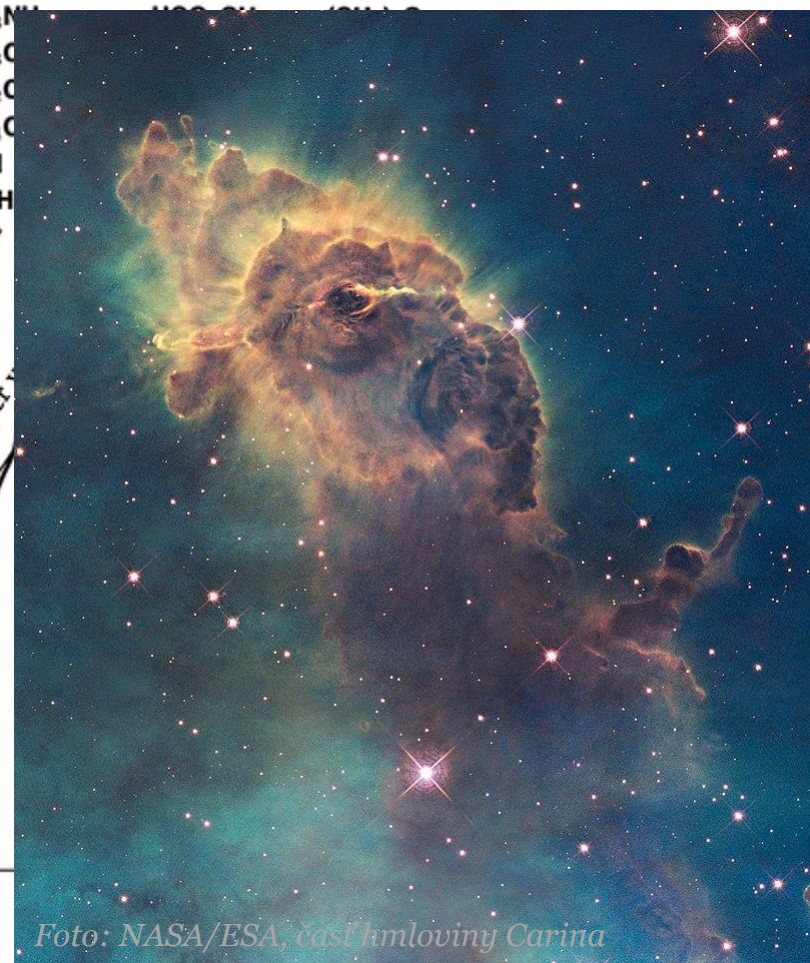
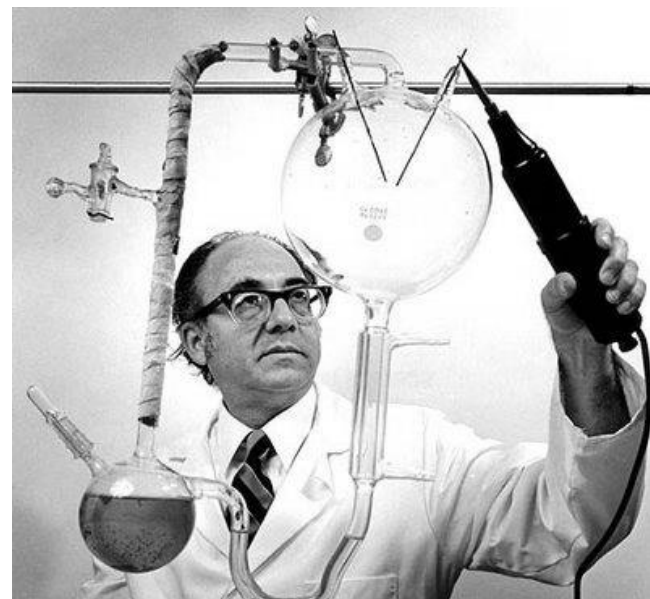
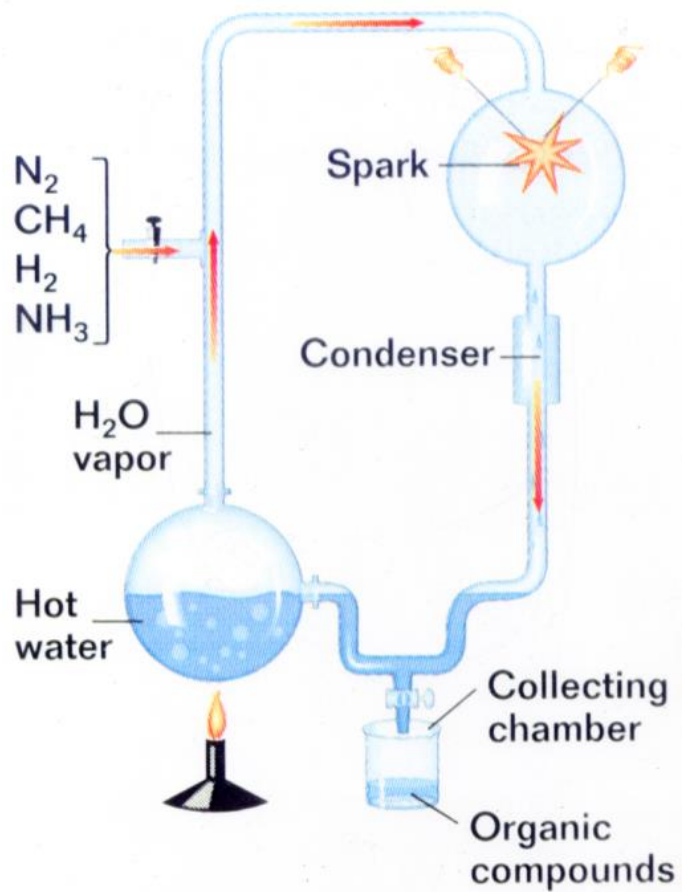


Foto: NASA/ESA, část hmloviny Carina

Kometárna chémia



Urey-Millerov experiment



"A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions," Stanley L. Miller, *Science*, Vol. 117, (May 15, 1953), pp. 528-529.

Vzniklo mnoho druhov aminokyselín (aj biogénne)

Urey-Millerov experiment, 1953 Univ. Chicago – simulácia proto-atmosféry Zeme

Vznik a dejiny života na Zemi



Stromatolity, Austrália / Wiki

Chémia k základným kameňom života

H_2 , CO , CH_4 (metán), NH_3 (amoniak), N_2 , HCHO (formaldehyd), HCN (kyanovodík)

aminokyseliny

lipidy

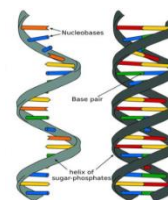
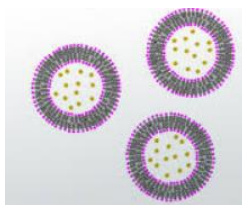
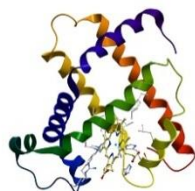
cukry

nukleobázy

peptidy, proteíny

membrány

RNA, DNA

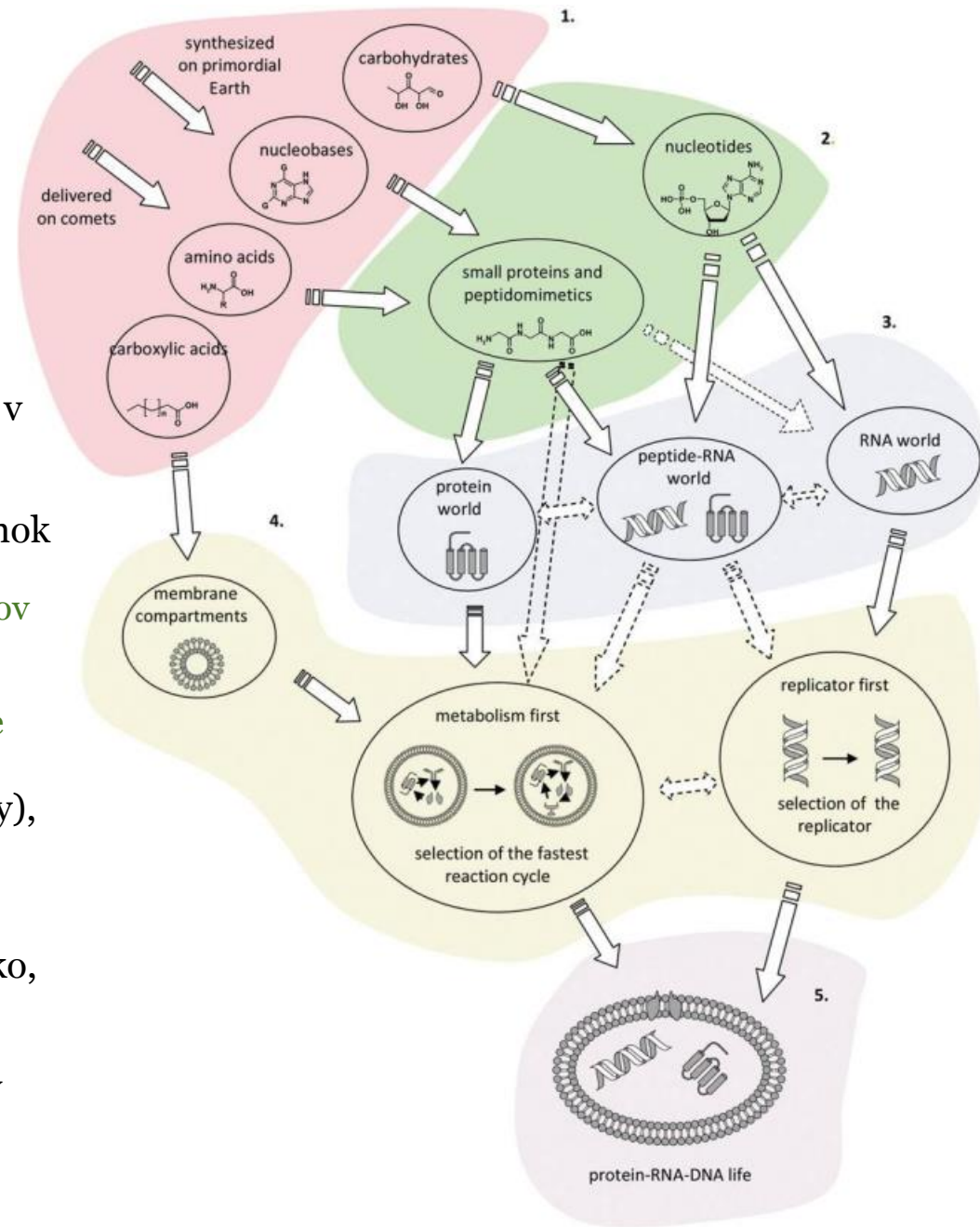


Základné stavebné bloky života - dostupné z
prebiotickej chémie

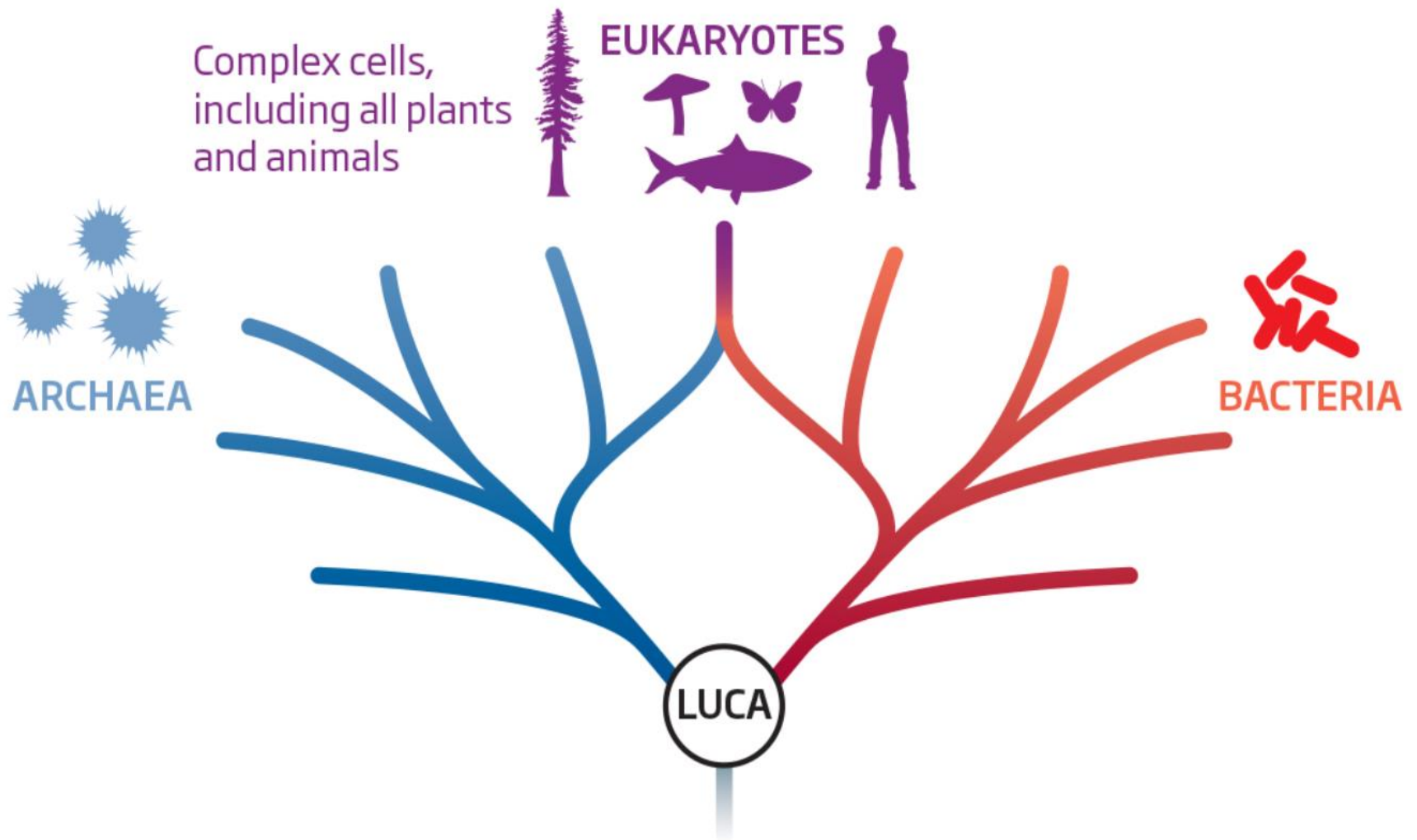
Abiogenéza života

• EVOLÚCIA

- Zmena dedičných vlastností organizmov v priebehu generácií
- Nastane ZÁKONITE pri splnení podmienok (nie náhodne!):
 - variabilita znakov v populácii organizmov
 - dedičnosť týchto znakov
 - zdedené znaky ovplyvňujú pravdepodobnosť prežitia a reprodukcie
- Hlavné sily: **Prírodný výber** (adaptívny), pohlavný výber, g.drift
- Konvergentná evolúcia: 30x vznik mnohobunkovcov, 6x schopnosť lietať, oko, teplokrvnosť...
- Postupná divergencia druhov = spoločný predok (**LUCA**)



Fylogenéza života



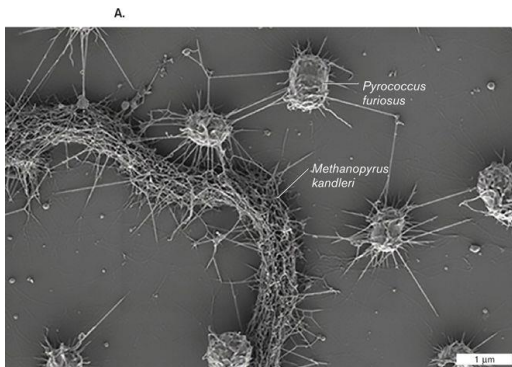
LUCA

- **Last Universal Common Ancestor**
 - hypotetický organizmus/druh v rámci fylogenetického výskumu
 - predchodca oboch domén (Bakteriá a Eukaryota)
- **Predpokladané (veľmi pokročilé) vlastnosti:**
 - (jedno)bunkový organizmus s dvojvrstvou membránou
 - **DNA** genóm 500-1000 génov
 - **Chemiosmóza** cez membránu +ATP syntáza
 - **Genetický kód** (platí Centrálna dogma molek. biológie)
 - Katalýza reakcií proteínmi (variabilita biochemických dráh)
 - Schopnosť EVOLÚCIE/speciácie
- **Extrémofily** – evolučne najbližšie žijúce organizmy k LUCA

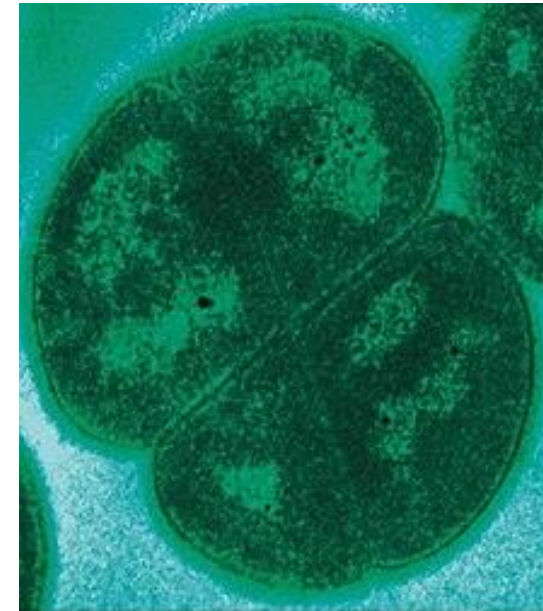
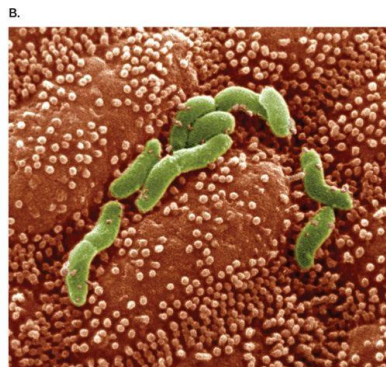


Extrémofily

- **Termofily** (horúco) – hydrotermálne pramene, komíny, gejzíry, max. 121°C
- **Psychrofily** (chlad) – pod 15°C, Antarktída, jazero Vostok
- **Halofily** (salinita a pH) – 15-37% koncentrácie soli, extrémne kyslé prostredie
- **Xerofily** (sucho) – púšte, v horninách
- **Piezofily** (tlak) – 1000 atm., niekoľko km v Zemi a oceáne
- **Radiofily** (žiarenie) – 1,5 roka vo vesmíre, reaktory
- Polyextremofily – zvládajú viac extrémov súčasne



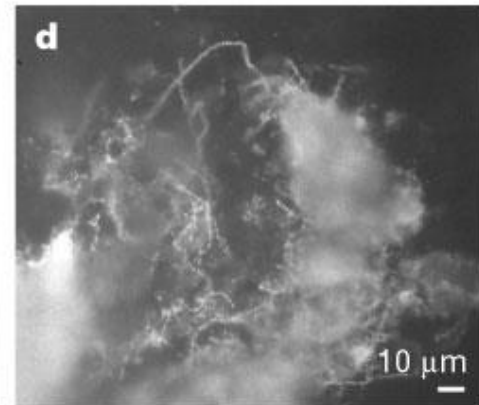
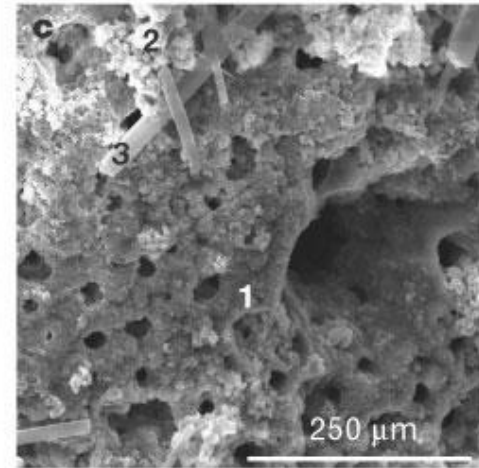
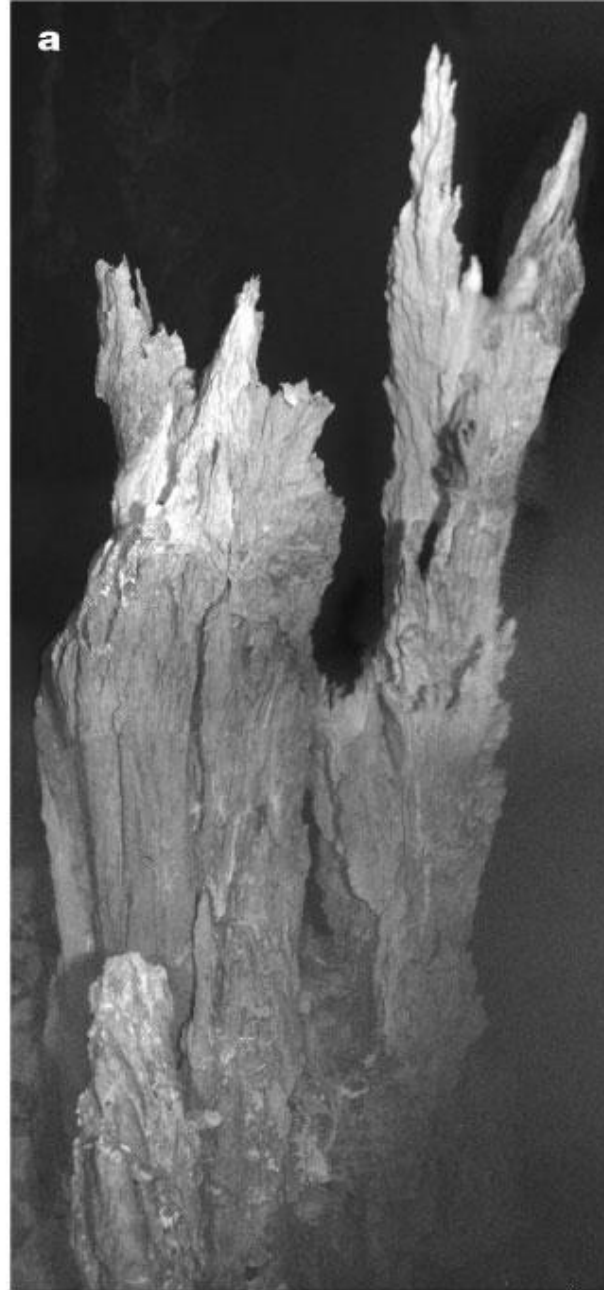
Methanopyrus kandleri a *pyrococcus furiosus* - hypertermofily



Deinococcus radiodurans
foto: Wiki

Hypotézy abiog

- Primordiálna „po
- Panspermia – im
- Metabolizmus na minerals, FeS clu
- Čierne podmorsk
- Zásadité podmor



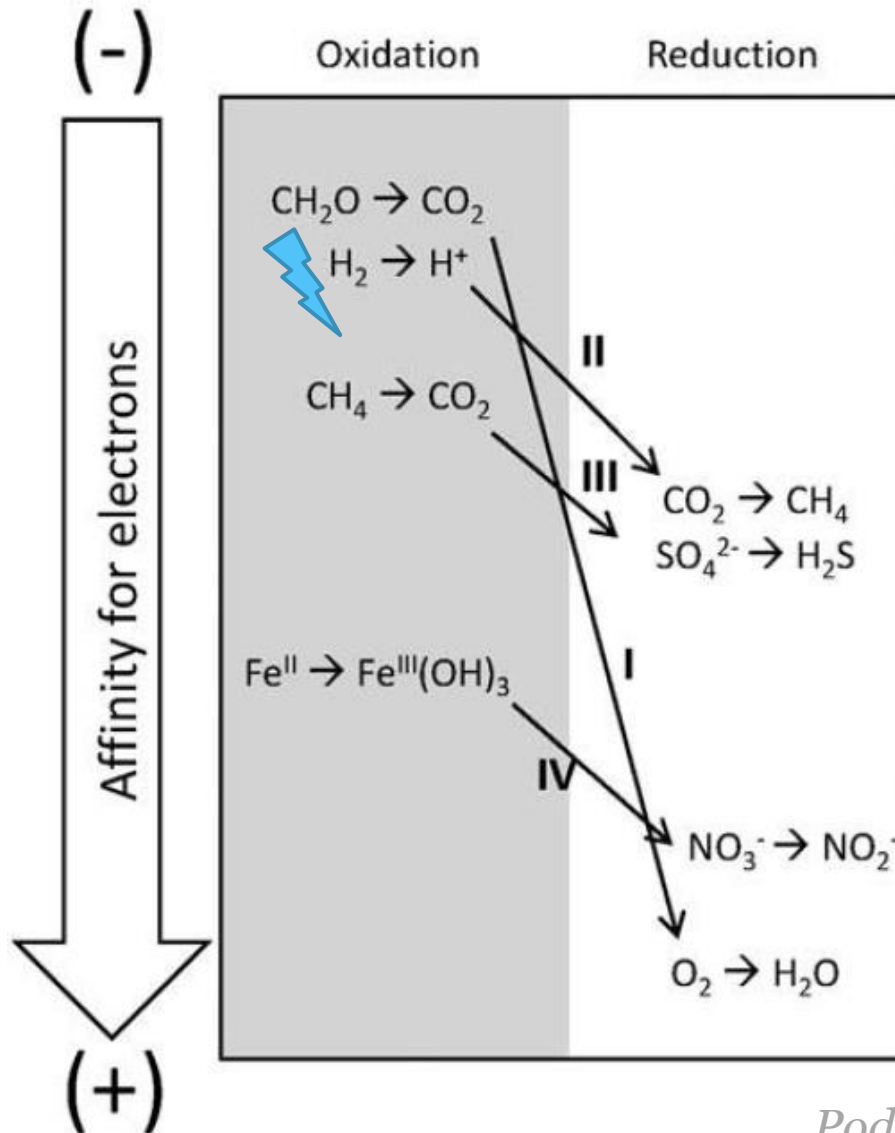
Lost City, Atlantický oceán – zásadité prieduchy na oceánskom dne (zdroj: Nature)

Serpentinizácia hornín

- Olivín = $(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$
 - bežná hornina Z. plásta (aj Mesiaca, Marsu, asteroidov, meteoritov)
- Serpentinizácia 
 - Olivín + voda = Serpentin + H_2 + Fe, Mg + teplo
 - kondenzácia do podoby komínov
 - Horúce ($60\text{--}90^\circ\text{C}$) zásadité prúdy bohaté na H_2 presakujú cez póry
 - Produkuje H_2 , CH_4 , H_2S – zdroje pre chemo-lito-autotrofný metabolizmus
- Mesiace SS a exoplanéty: oceán v styku s horninou

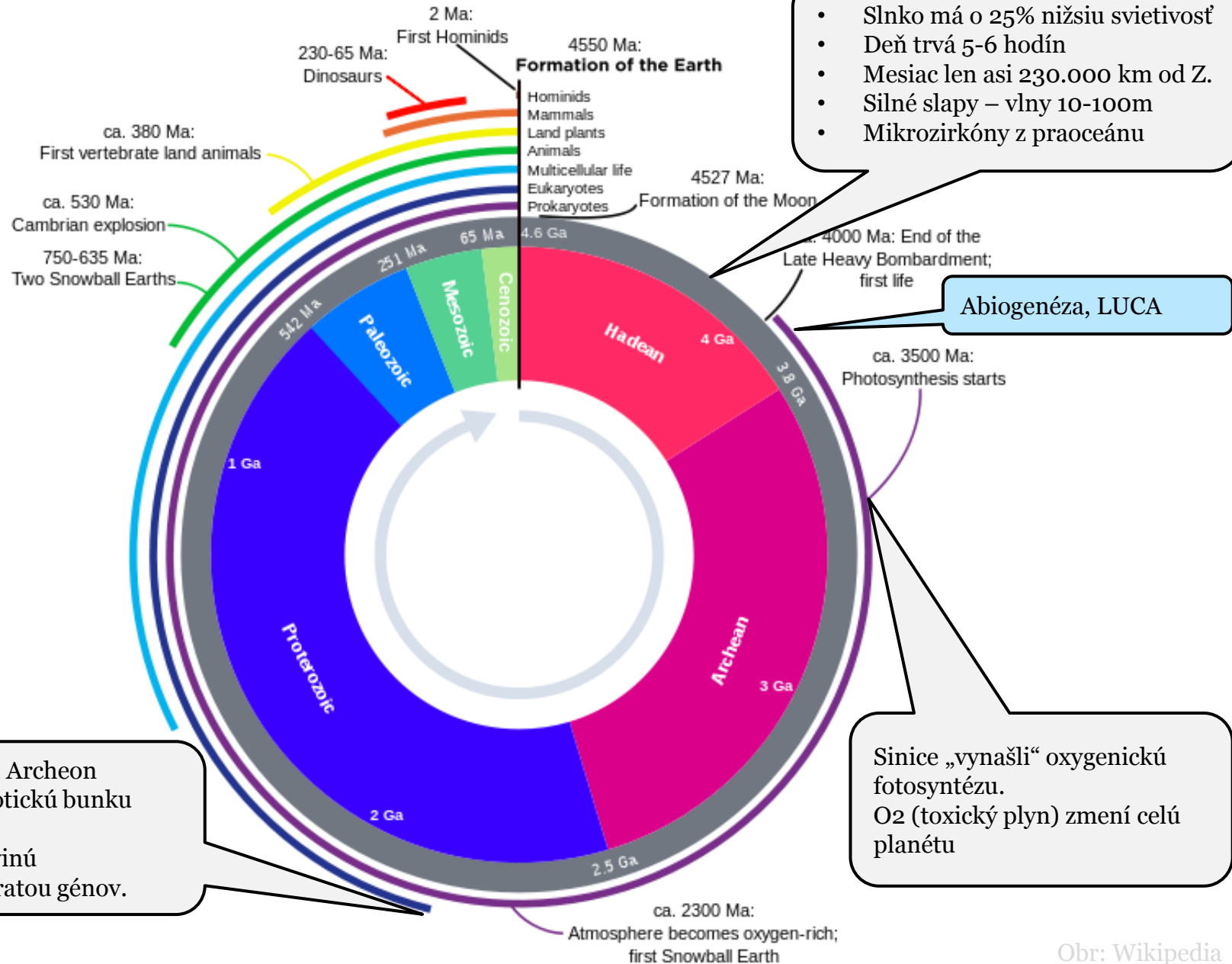


Redox - príklady metabolizmov

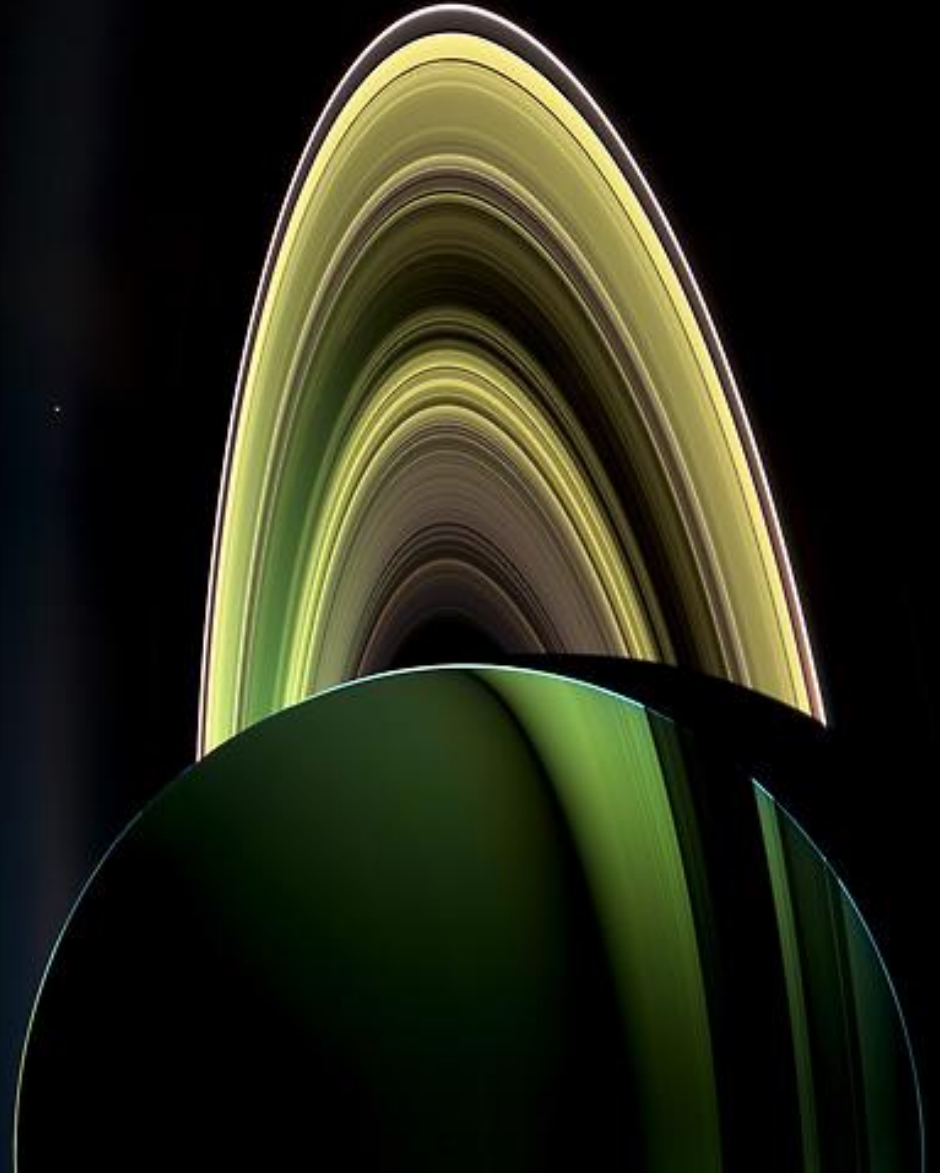


- I – respirácia kyslíka
- II – Metanogenéza
- III – anaeróbna respirácia síry
- IV – anaeróbna respirácia železa

Dejiny života na Zemi

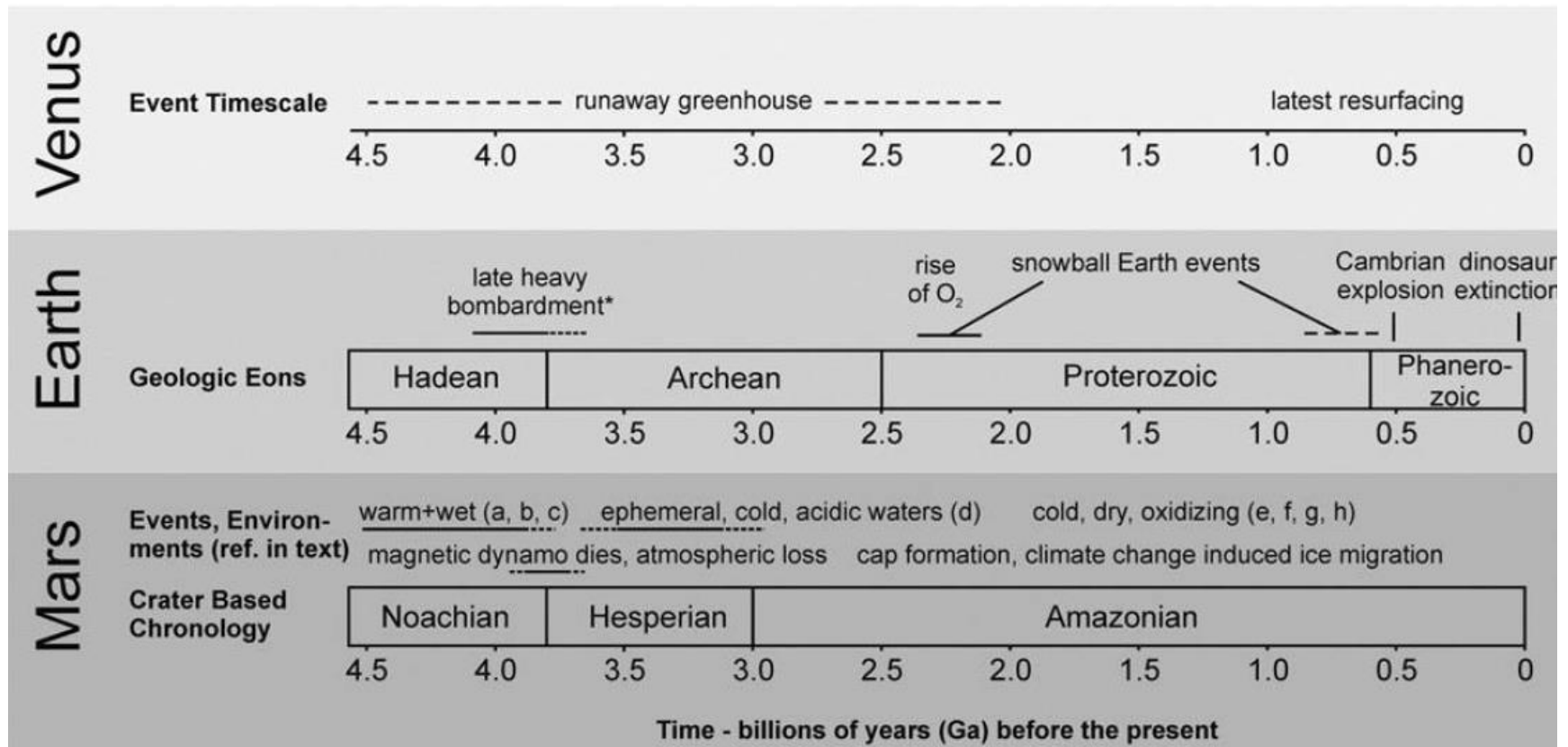


Hľadanie mimozemského života



Saturn s mesiacmi Enceladus a Tetys

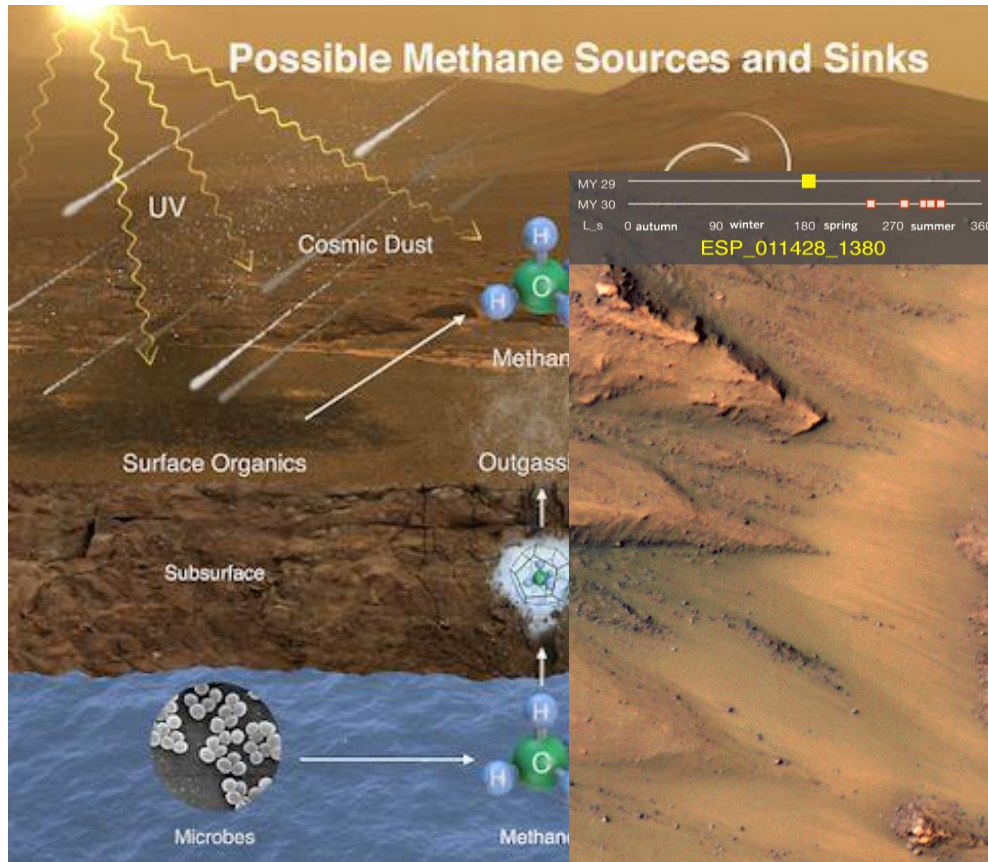
Venuša, Zem, Mars - geologické epochy



- Astrobiology primer v.2, p.599

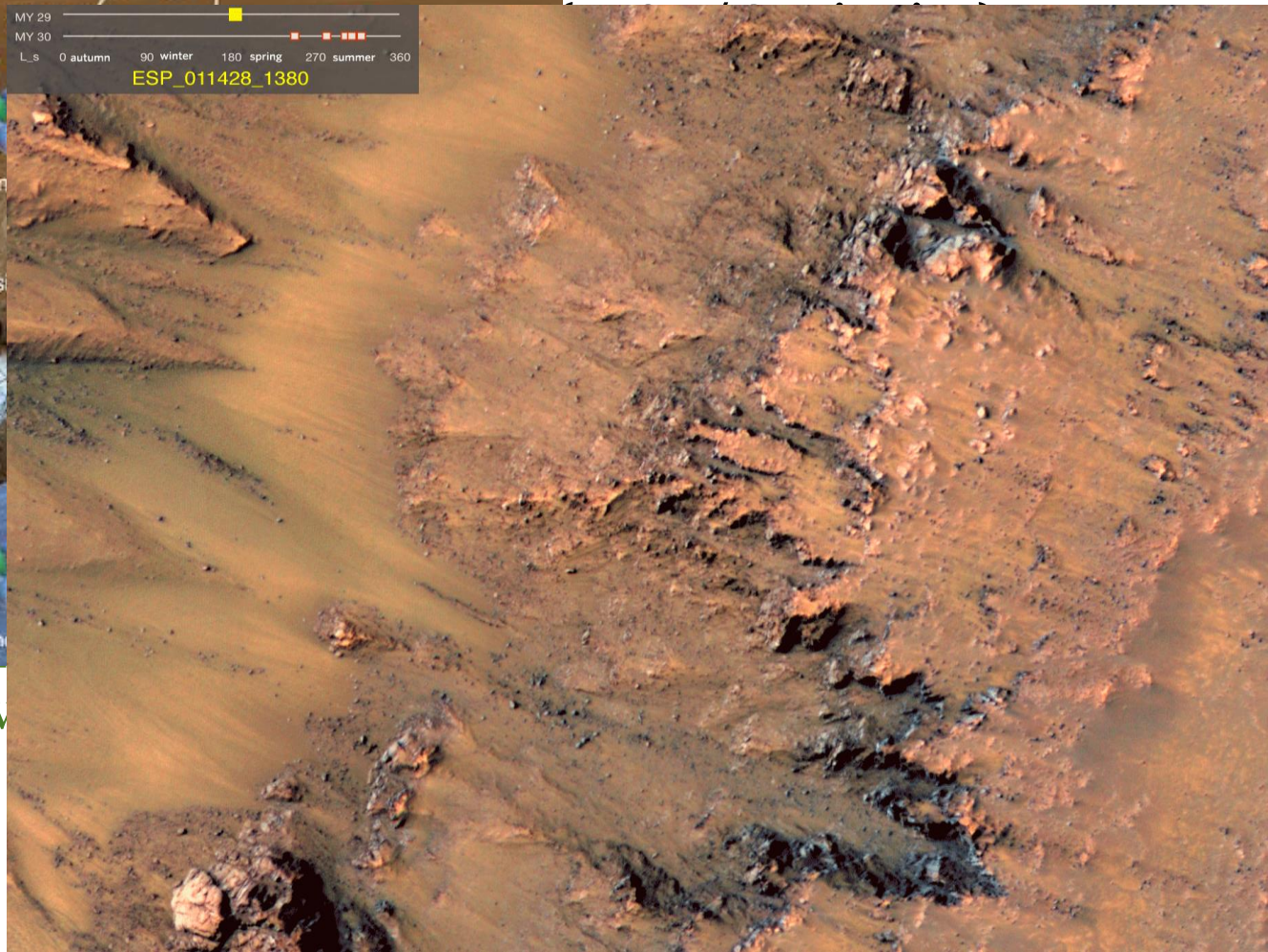
Mars - najväčšia nádej

le teleso
prvotných telies



- Mars2020/rover
- Čína, SAE...

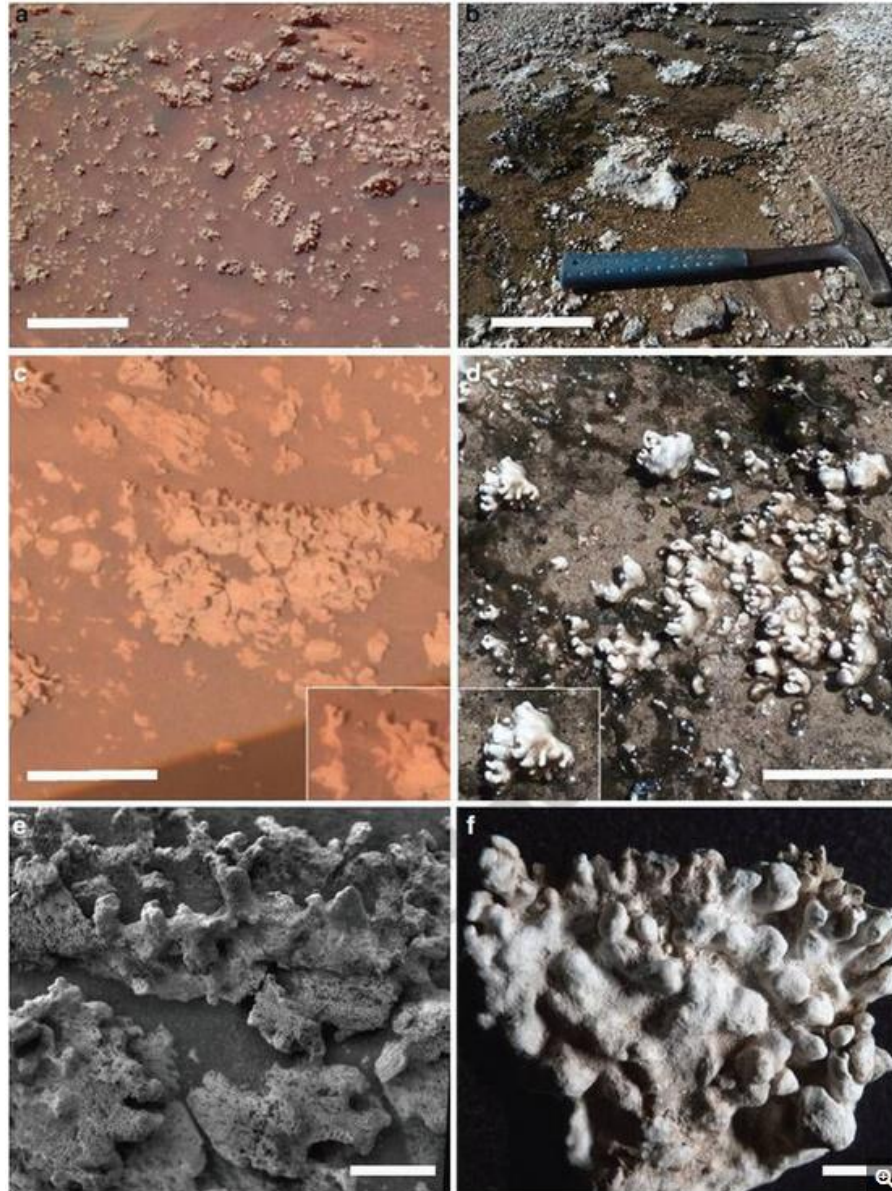
MY 29
MY 30
L.s. 0 autumn 90 winter 180 spring 270 summer 360
ESP_011428_1380



Mars vs Chile

...nodular and digitate silica structures at El Tatio (hot springs @Chile) that most closely resemble those on Mars include complex sedimentary structures produced by a combination of biotic and abiotic processes...

Podl'a space.com
(<http://www.space.com/34795-mars-life-nasa-spirit-rover.htm>)

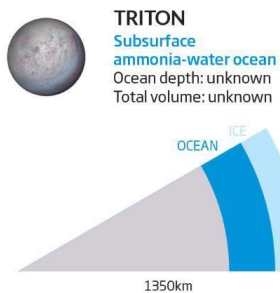
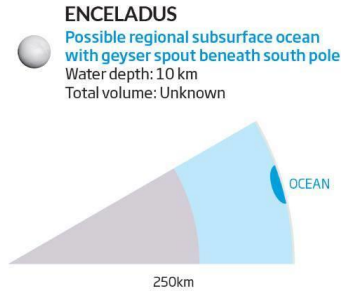
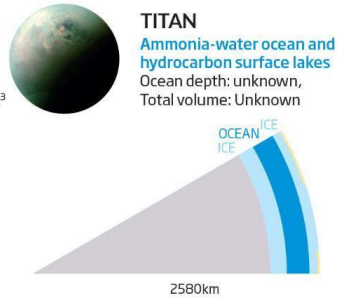
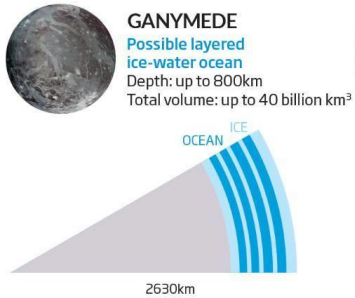
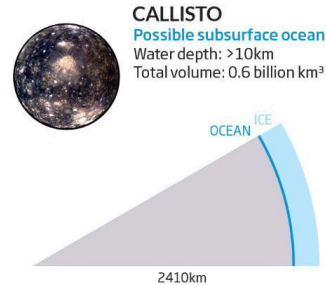
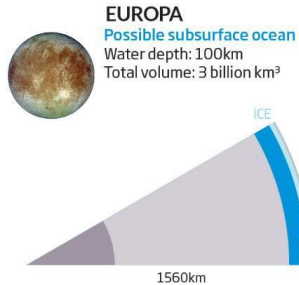
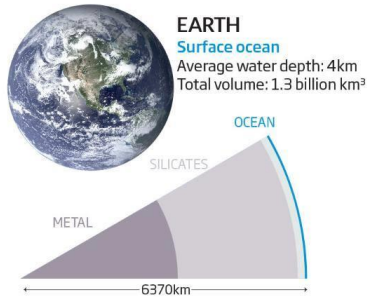


Home Plate opaline silica (left) occurs in nodular masses with digitate structures that resemble those at El Tatio (right).

Credit: ASU/Ruff & Farmer

Oceans of the solar system

Large bodies of water pop up all over our patch of the cosmos – but all of them are very different to Earth's thin surface skin



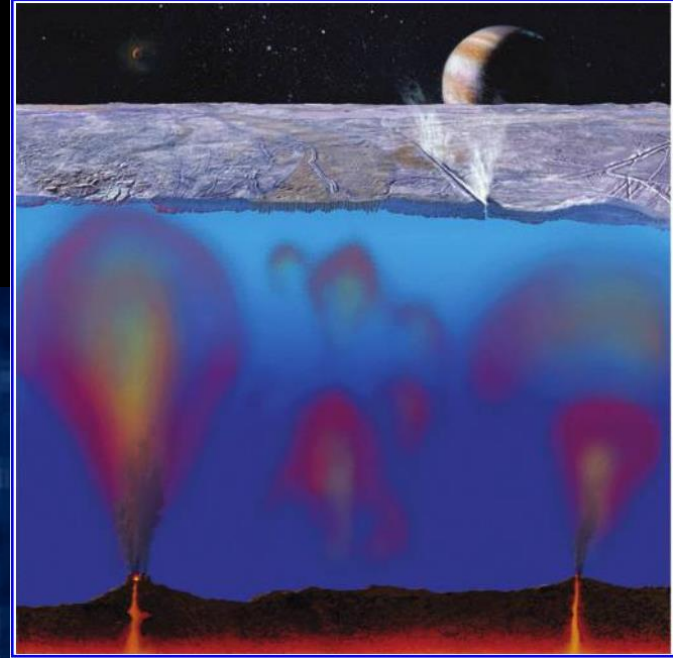
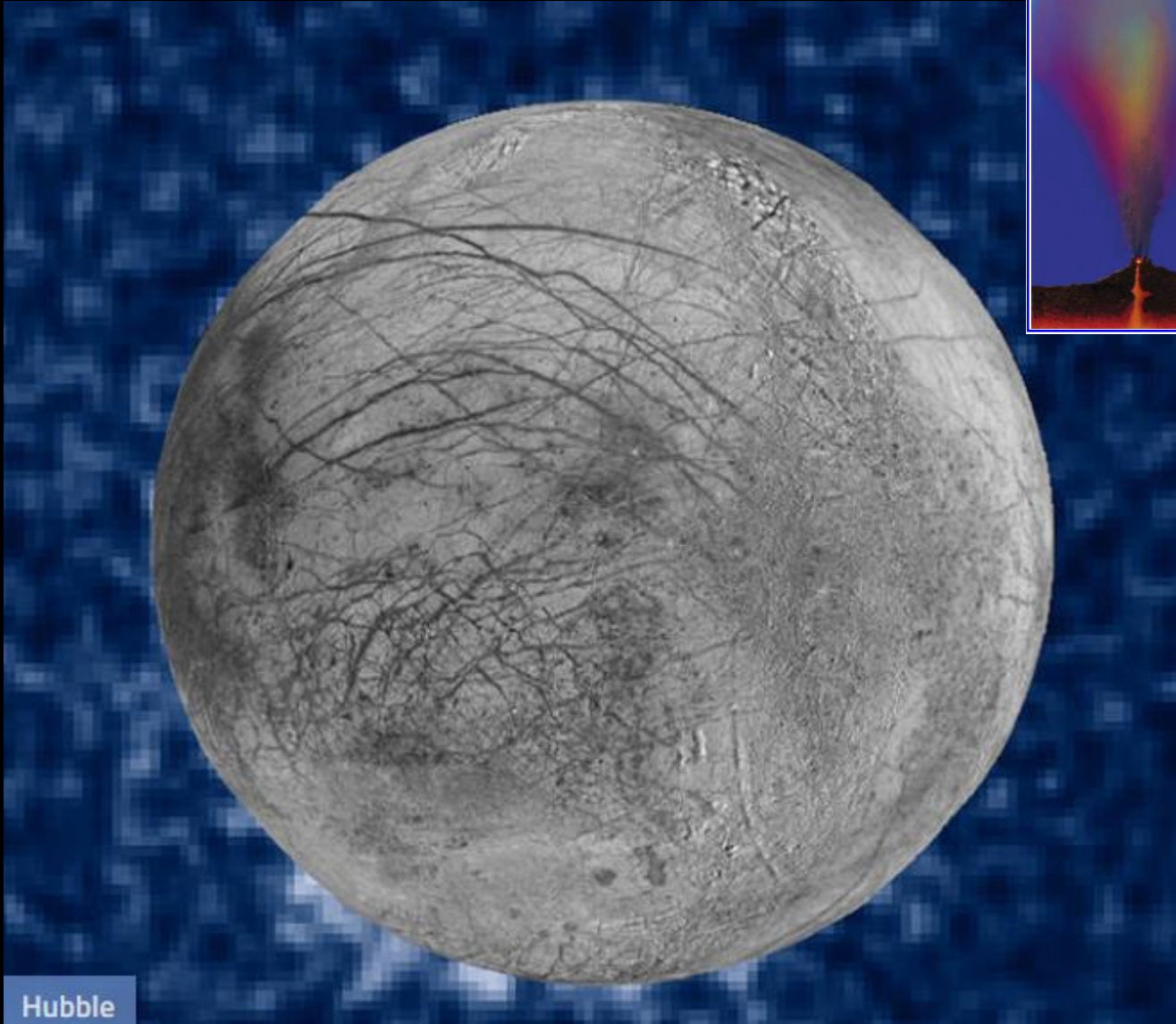
OUR SOLAR SYSTEM

Mimas might harbour a newly discovered ocean below its surface

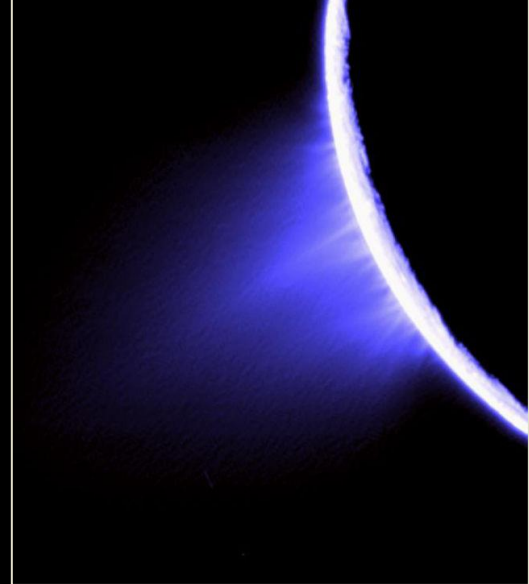
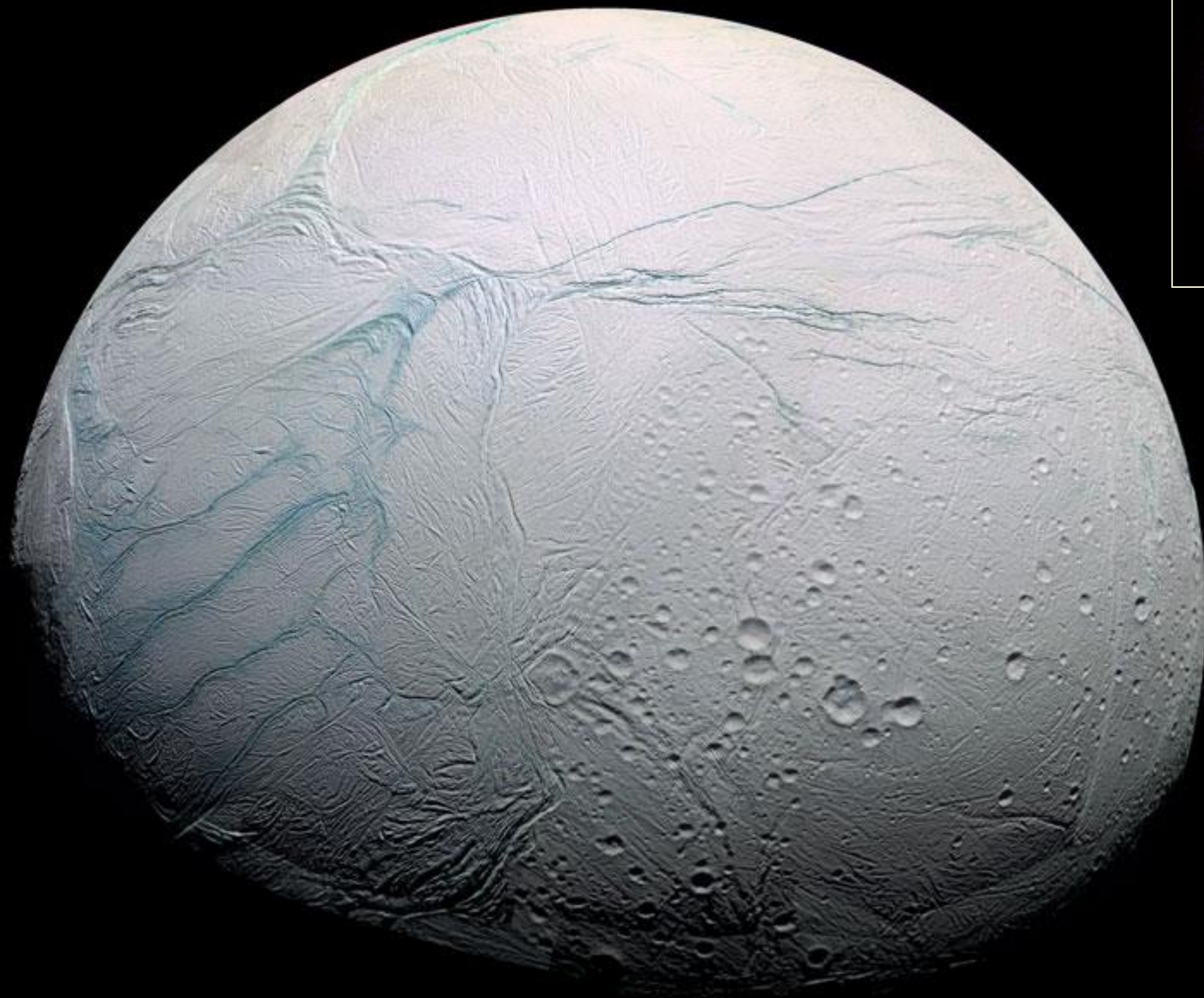


Vodné svety v Slnečnej sústave

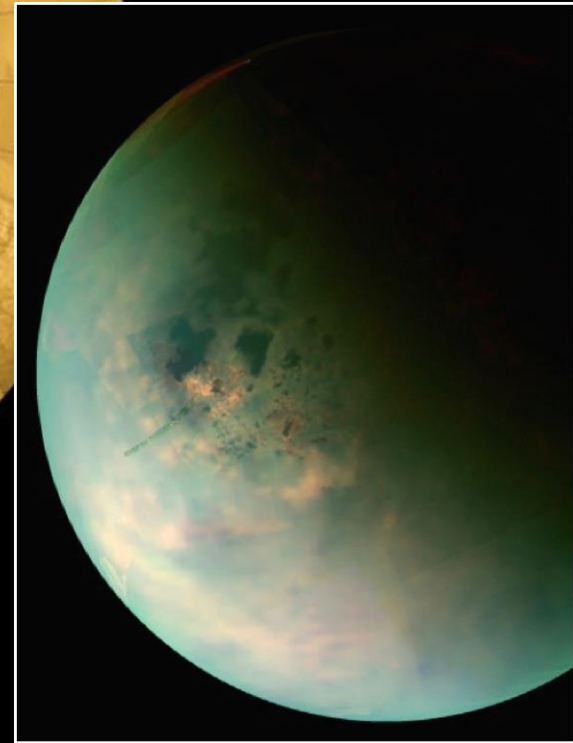
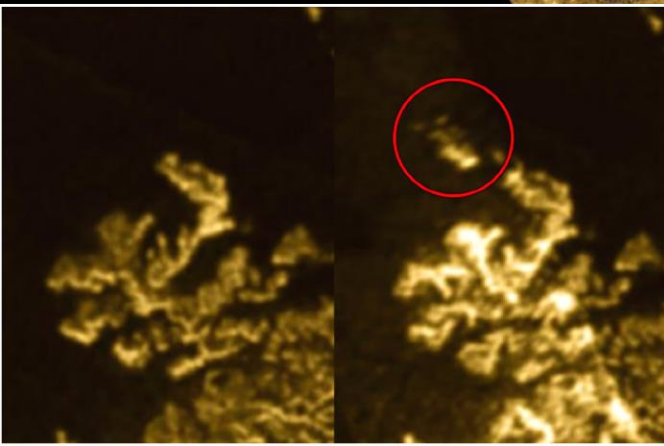
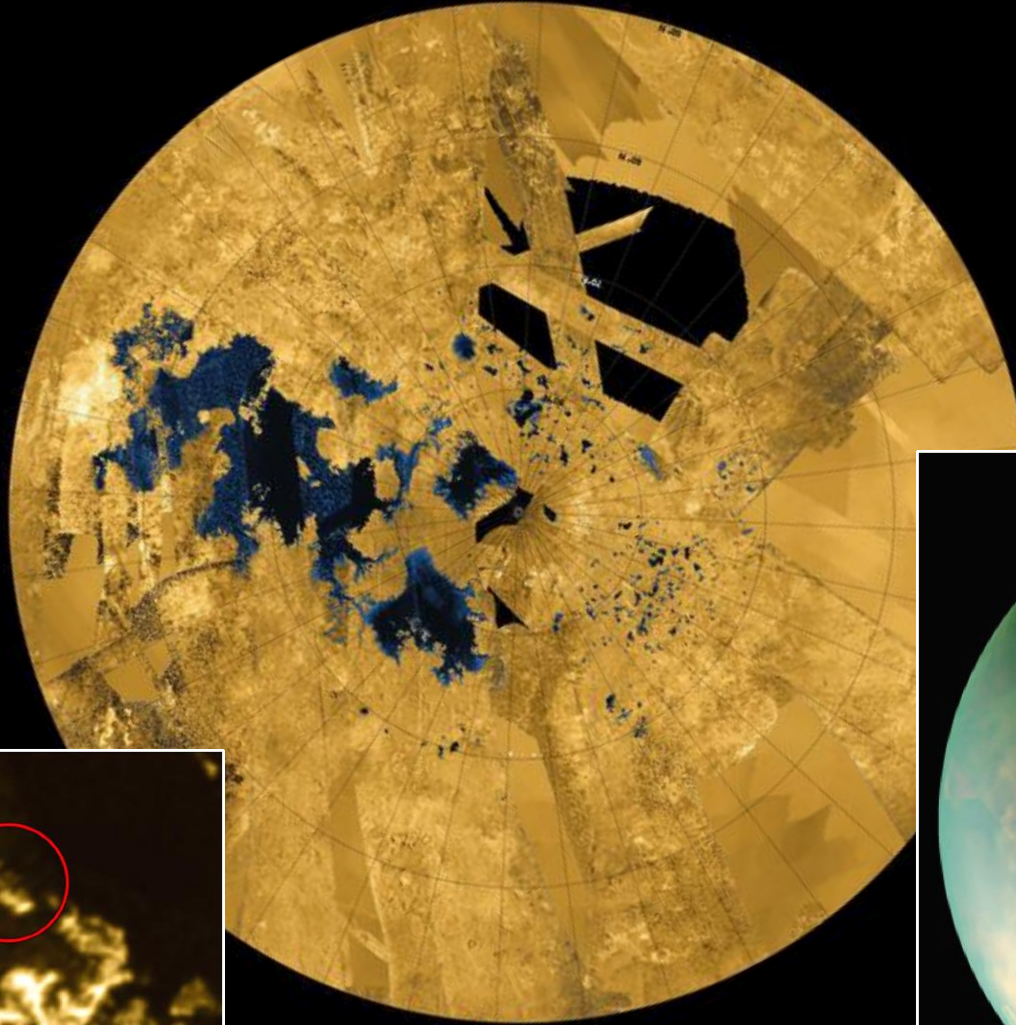
Európa @ Jupiter

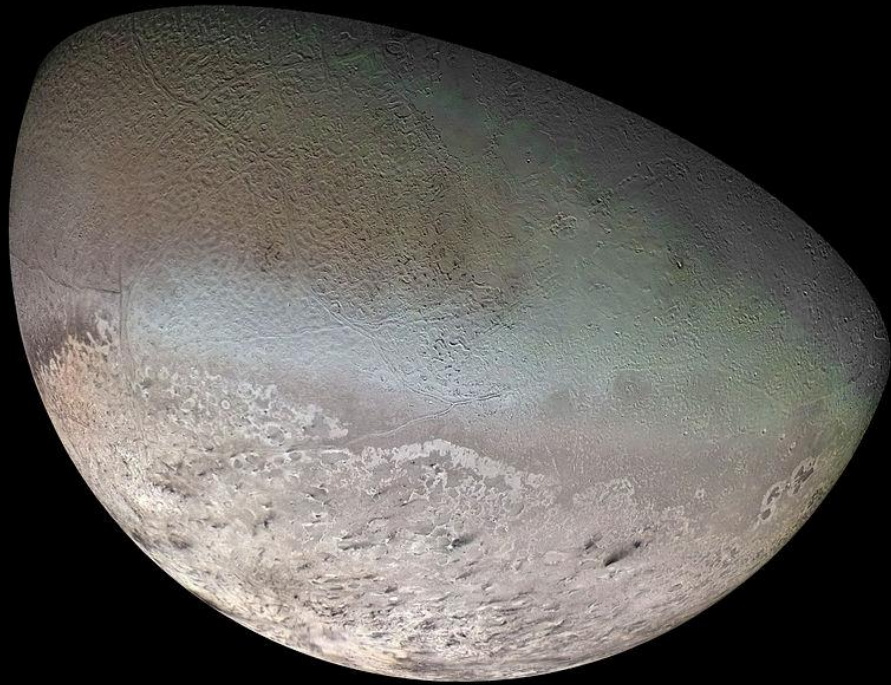


Enceladus @ Saturn



Titán @ Saturn





Tritón Neptúna a Ganymedes Jupitera

1/Ceres @ hlavný pás asteroidov

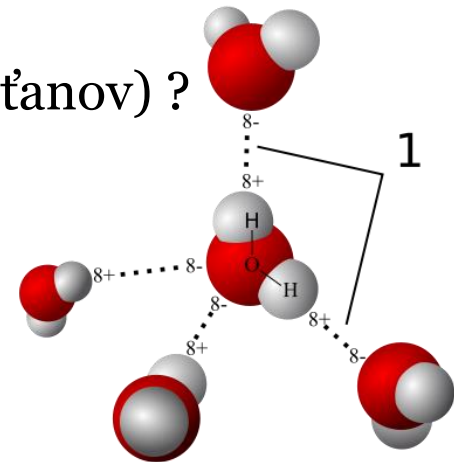


Sonda Dawn/NASA
Kráter Occator (92km)
Biele miesta – soli na povrchu
Zdroj – kryovulkán a
podpovrchový oceán?

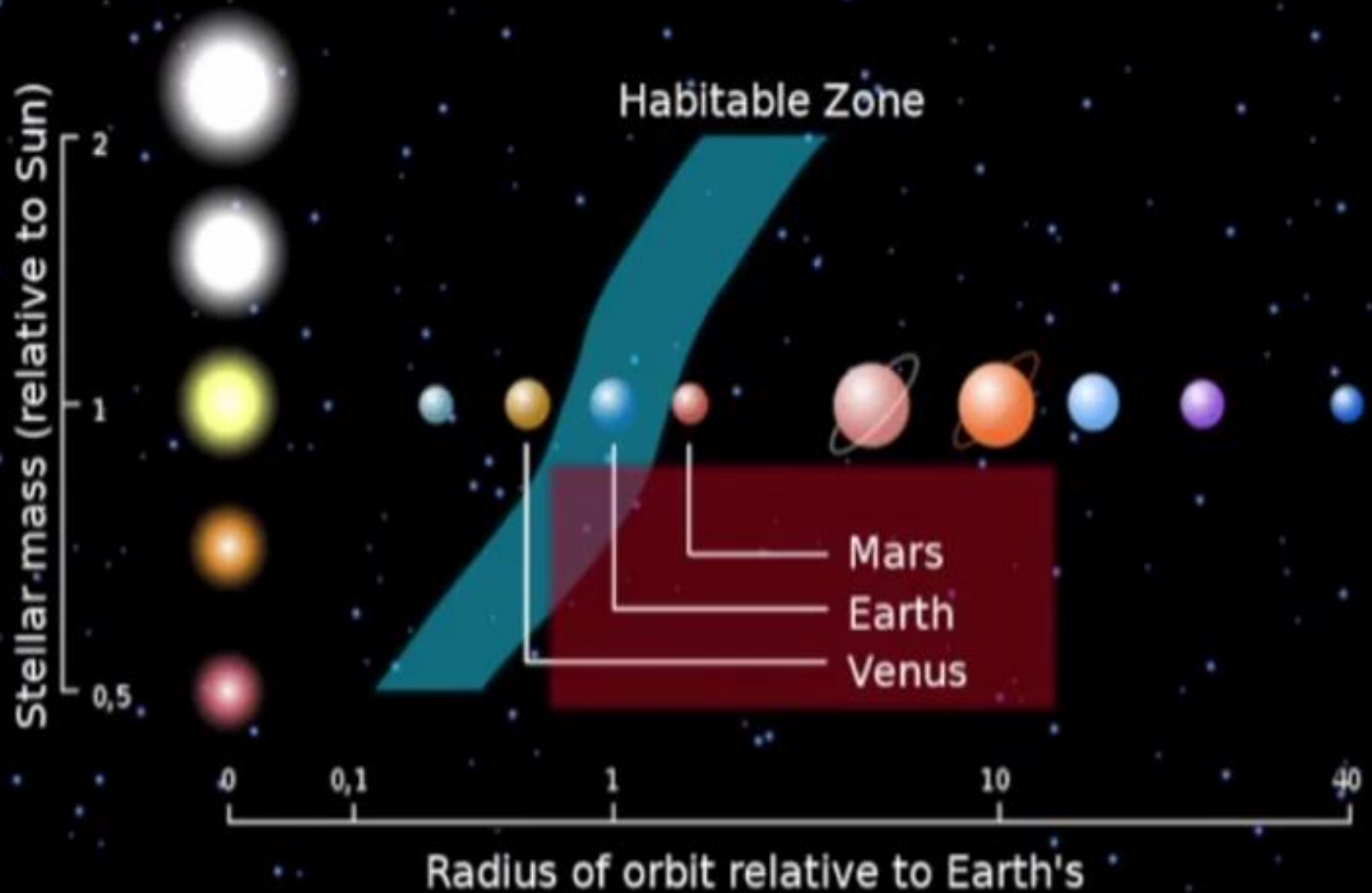
*Zdroj: NASA / JPL-Caltech / UCLA / MPS / DLR /
IDA*

Život mimo Slnečnej sústavy ?

- Čo robí vesmírne teleso obývateľným (podľa pozemšťanov) ?
 - zdroj kvapalnej vody (nie nutne na povrchu)
 - zdroj energie pre biochem procesy
 - zdroj prvkov
 - fyzikálne podmienky v limitoch biosfery
 - aktívne geochemické procesy
 - vulkanizmus kôry vytvára zdroje energie
 - platňová tektonika
- Voda- esenciálna molekula (pozemského) života:
 - $2\text{xH} + \text{O}$ viazané polárnou kovalentnou väzbou , malá molekula
 - **rozpúšťa** mnoho chemikálií (vďaka polarite)
 - **ľad pláva** na vode (917kg/m^3 vs 1000kg/m^3) – život môže existovať pod ľadom
 - vyskytuje sa v kvapalnom stave v **širokom rozmedzí teplôt**
 - v kvapalnej fáze sú molekuly viazané vodíkovými väzbami
 - makroskopické prejavy: povrchové javy, kapilaritu, vysokú teplotu varu
 - OH väzby intenzívne pohlcujú UV žiarenie



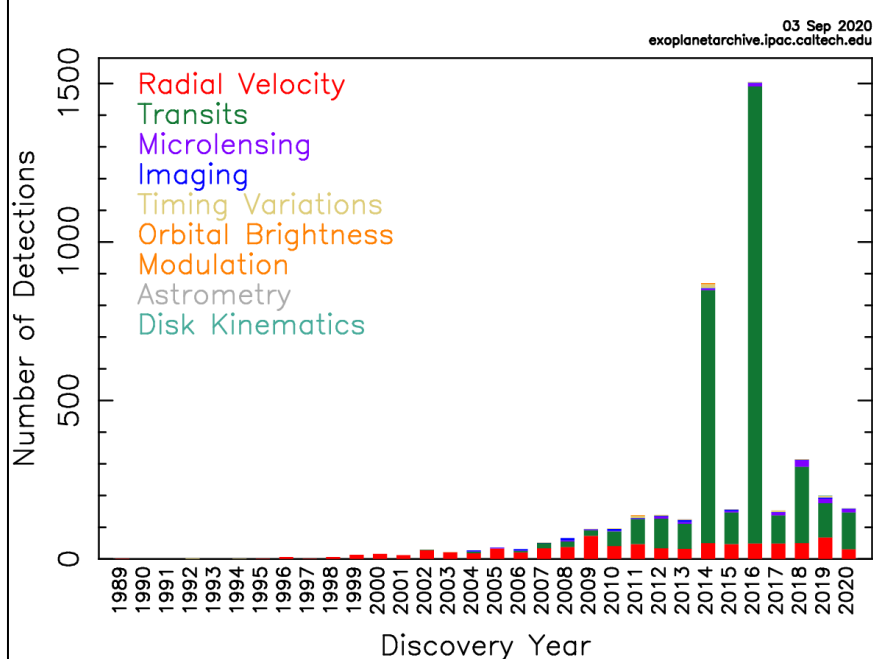
Obývatelná zóna



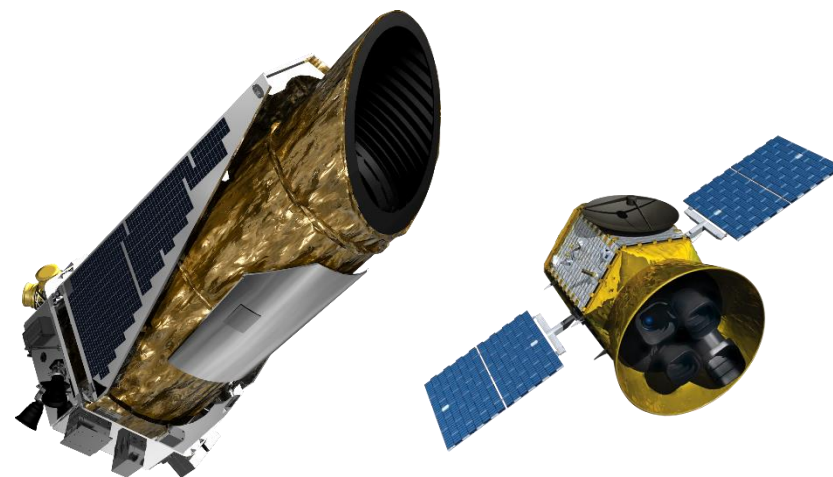
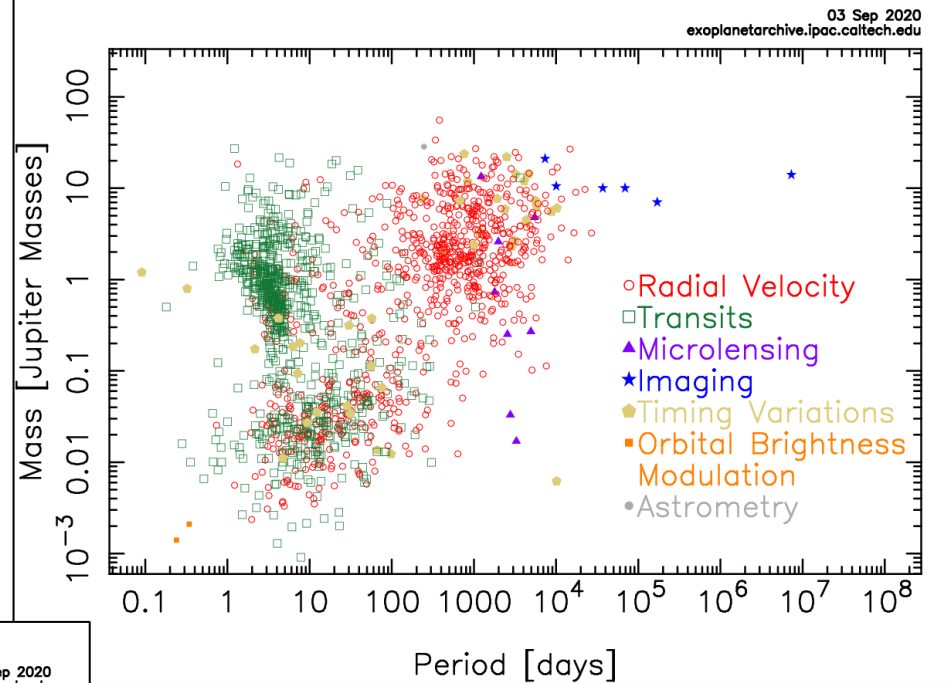
Štatistika exoplanét:

- 4276 potvrdených planét
 - 3173 planetárnych sústav
 - 5000+ kandidátov
-
- 1992 – 1. exoplanéta (pri pulzare)
 - 1995 – 51 Peg-b – 1. exopl. pri hviezde ako Slnko
 - 2009 – 2013 - misia Kepler 1
 - 2014 – Kep-186f - 1. Zemi podobná pl. v obyv. z.
 - 2014 – 2018 – misia Kepler 2
 - 2018 – dnes – misia TESS

Detections Per Year



Mass – Period Distribution



Proxima b v obývateľnej zóne



OUR SOLAR SYSTEM

MERCURY'S ORBIT

PROXIMA SYSTEM

SUN

PROXIMA CENTAURI

PROXIMA B ORBIT

HABITABLE ZONE

TRAPPIST-1 System



Illustration

- 2016 - objav systému ďalekohľadom Trappist-S
- 39ly od Zeme, kamenné planéty pri trpaslíkovi v Aqr
- 3 zo 7 v obývateľnej zóne hviezdy
- www.trappist.one, 2 x 60 cm belgický ďalekohľad

Biosignatúry - z

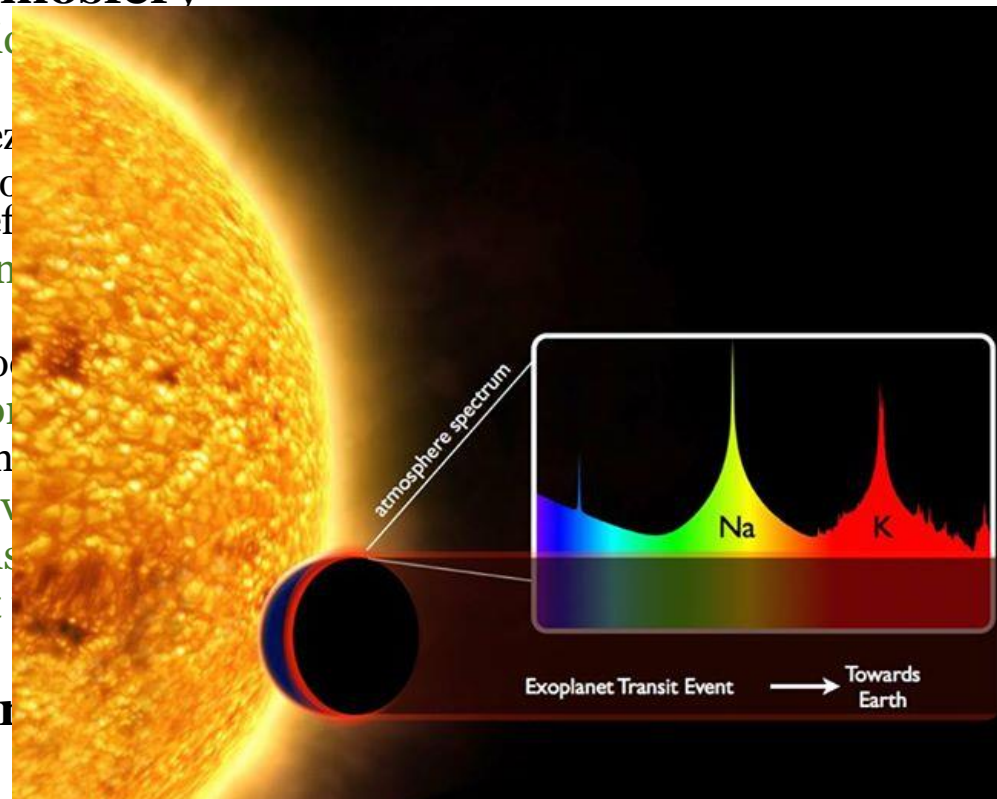
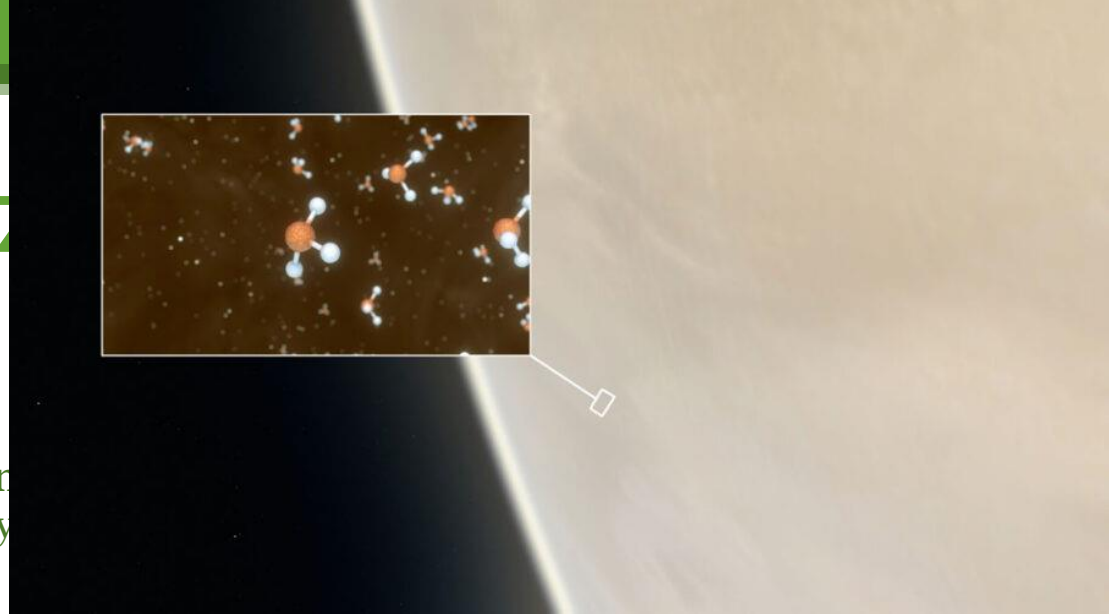
- **Spektroskopia**

- Emisné a absorpčné čiary bio
- pozemská biosféra (chlorofyl) vy

- **Nerovnováha v zložení atmosféry**

- Súčasná prítomnosť oxidujúcich
- O_2 a CH_4 - súčasný výskyt
 - aby existovali v atmosfére bez
 - samostatne nie sú silnými bio
 - vody (runaway greenhouse ef
- N_2O – oxid dusný (rajský plyn)
 - Silná biosignatúra
 - Nemá známy abiologický pro
- O_3 , C_2H_6 (etán) – vedľajšie p
- O_3 detekovateľný pri veľmi n
- NO_2 , NH_3 , CH_3Cl ... – pôvod v
- H_2O , CO_2 – nutné pre pozems
- Nutné poznať a zvážiť kontext

- **Detekcia signálu mimozem**



Inteligentný život mimo Zeme



Vesmírne civilizácie

- **Drakeova rovnica**

- odhad počtu civilizácií v galaxii
- $N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$
- Pôvodný odhad cca 10.000 komunikujúcich civilizácií

- **Fermiho paradox** – kde všetky tie civilizácie sú?

- nemôžu sa sem dostať
- civilizácie nežijú dosť dlho
- sledujú naše počínanie a nechcú s nami nič mať
- sme ZOO pozorované ako biologický experiment s evolúciou...
- **Evolúcia eukaryot je extrémne nepravdepodobná**

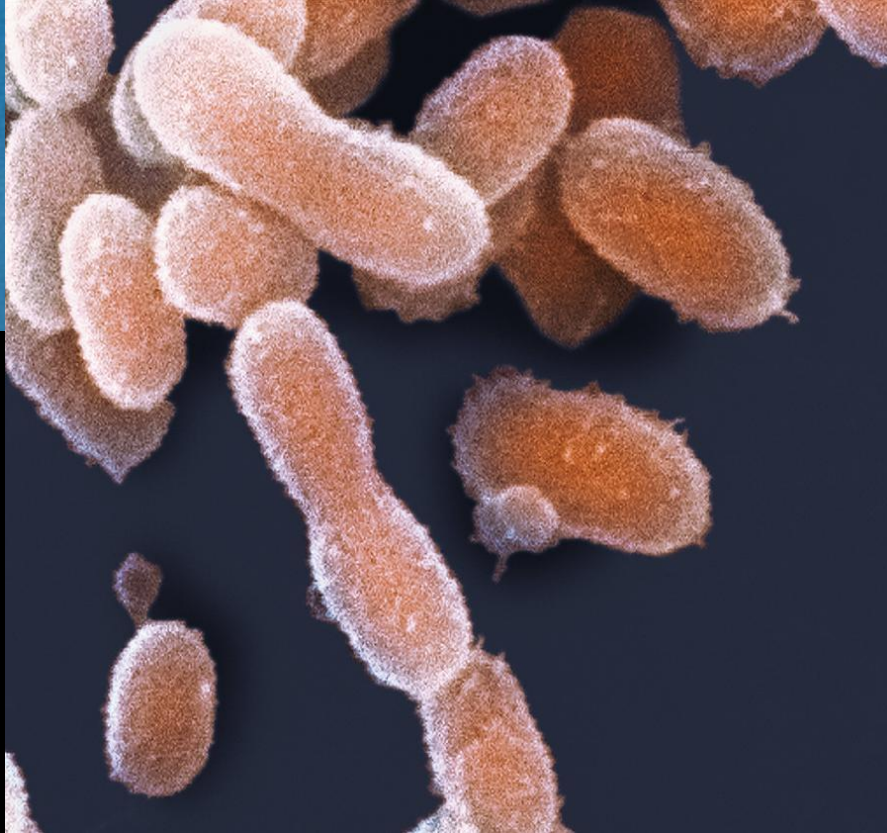
- **SETI**

- Arecibo radar
- Pioneer 1+2 (plakety)
- Voyager 1+2 (nahrávky)

- **Expanzia ľudstva? (simulované misie- fyziológia a psychológia)**

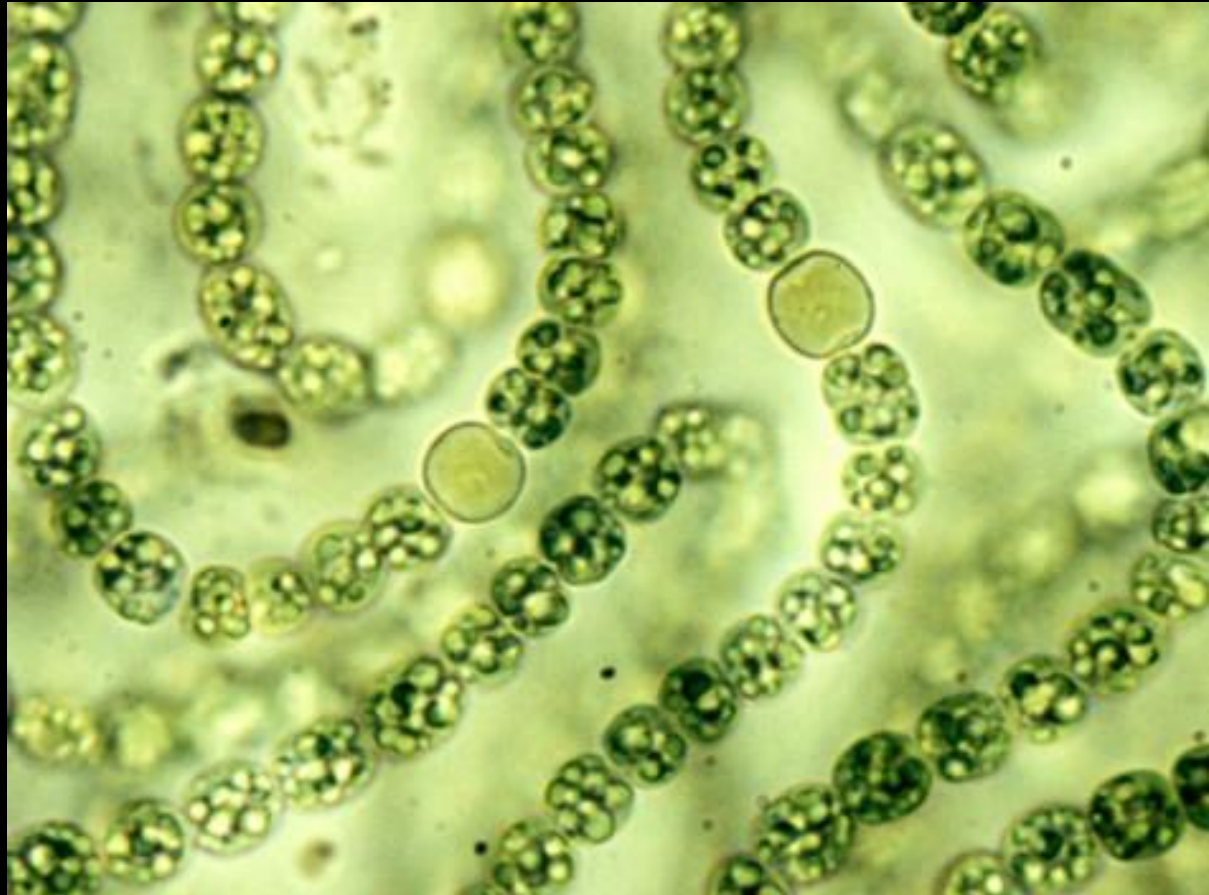
- Kontaminácia telies životom zo Zeme

Aký život očakávať?



Ďakujem za pozornosť

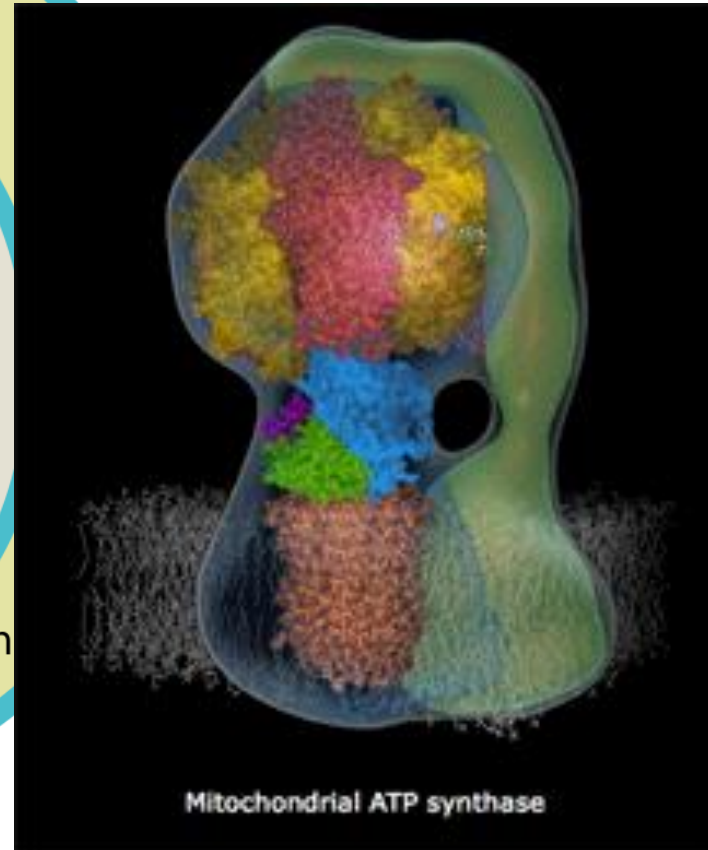
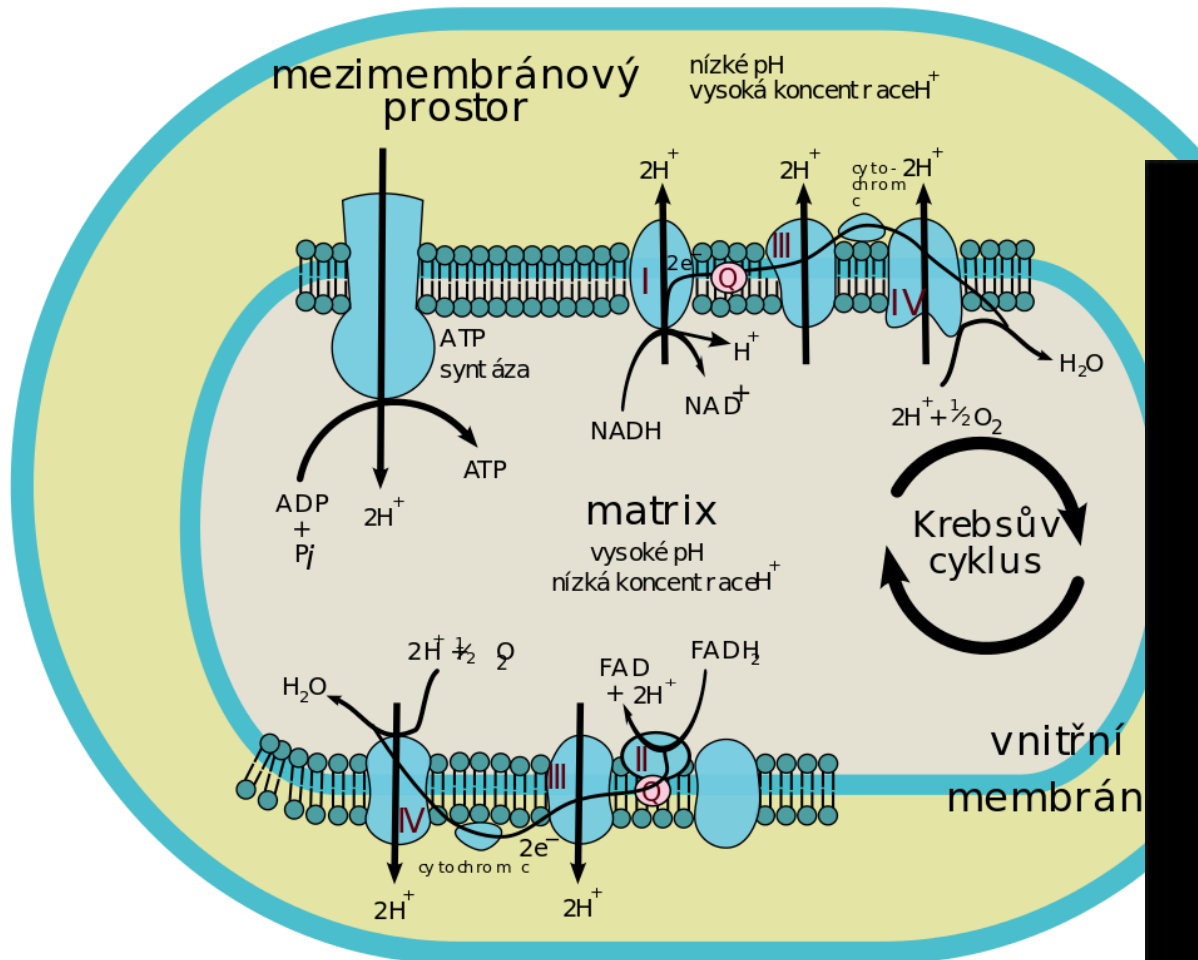
Bonus: 3 zázraky biochémie



Zázraky biochémie

- Chemiosmóza
 - kvantová mechanika nanoturbín vládnuca svetú
 - AB: hľadanie univerzálnosti
- Fotosyntéza
 - Ako sinice zmenili planétu kyslíkom
 - AB: extrémna variabilita prvotného života
- OEC
 - dokonalý zdroj energie pre ľudstvo
 - AB: okysličenie planéty (GOE)
- Vírusy
 - óda na Platóna a jeho telesá od neživých
 - AB: samoorganizácia a komplexita

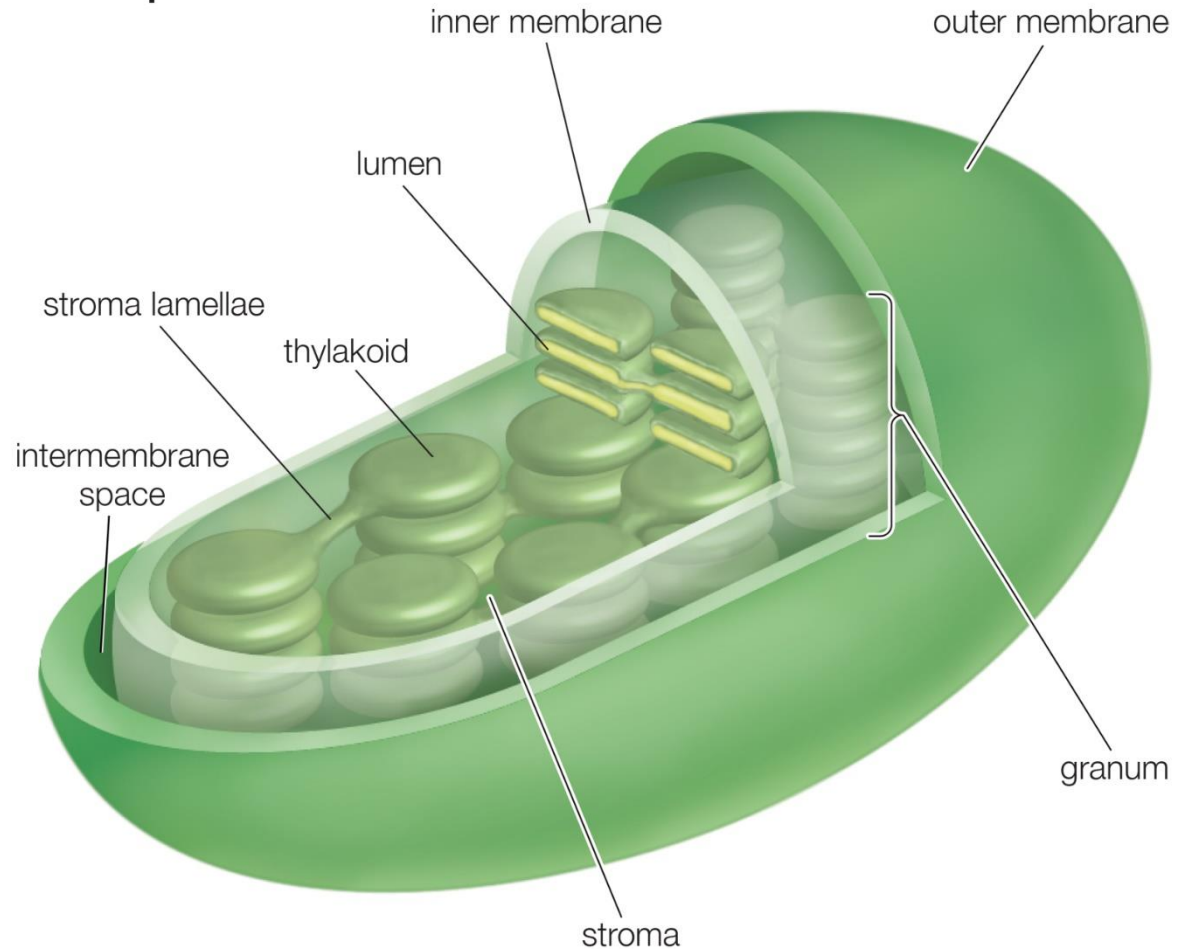
Mitochondria - dýchanie eukaryot



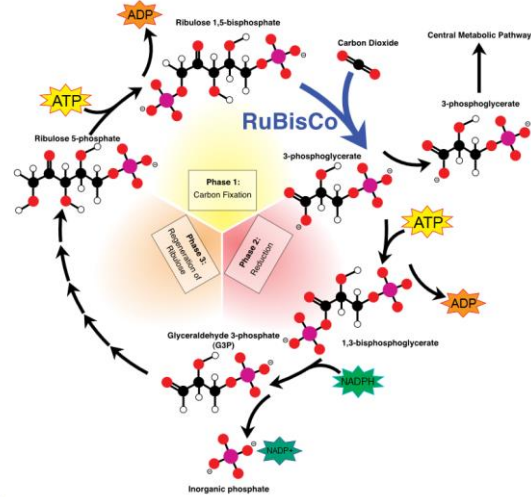
Fotosyntéza - foto-autotrofia

- Všeobecný „recept“ na fotosyntézu
 - Oxidácia donora (Fe²⁺) – katalyzátora
 - Redukcia CO₂ – vytváranie organických látok
 - „Odpadové“ látky (atmosférický kyslík)
- Zrod fotosyntézy na Zemi
 - Pôvodne prevládala anaeróbna fotosyntéza
- **Kyslíková** (oxygenická) fotosyntéza
 - $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energia}$
 - **cyanobaktérie** (sivobíle)
 - Stalo sa to **iba jediným** spôsobom, ako organizmy dokážu disociovať vodu cez fotosyntézu
 - Pigment chlorofyl – vstrebáva svetlo
 - Kyslíková fotosyntéza poskytuje organizmům výživu/energie

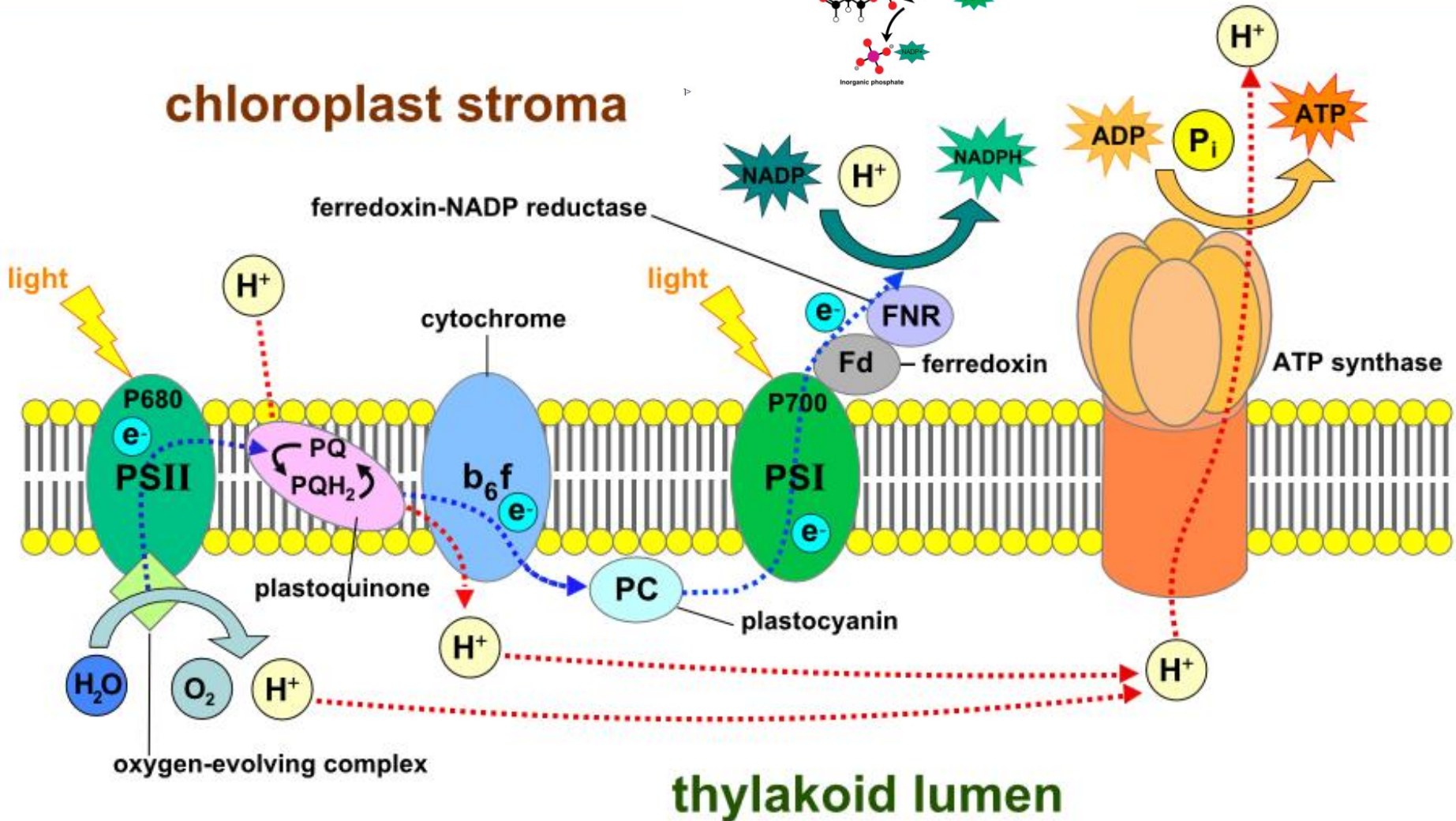
Chloroplast



Fotosyntéza

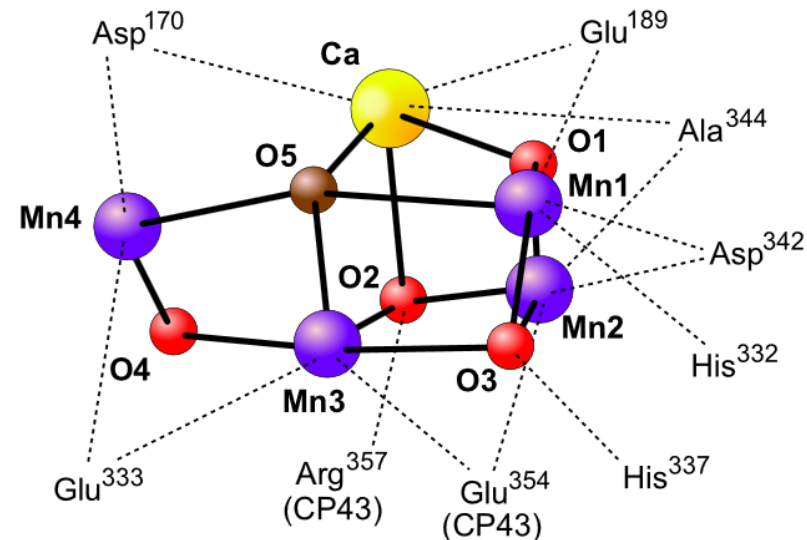
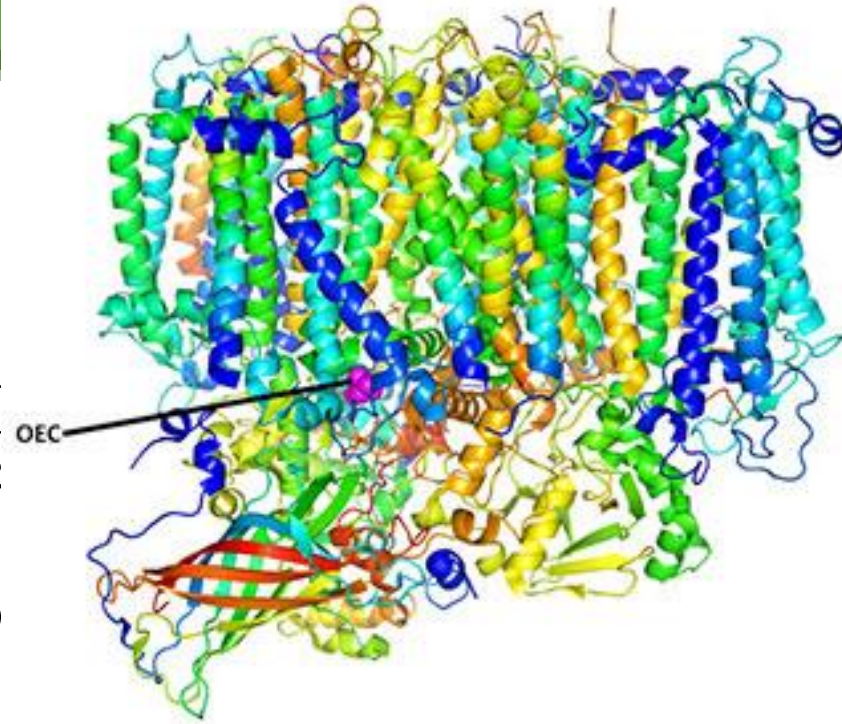


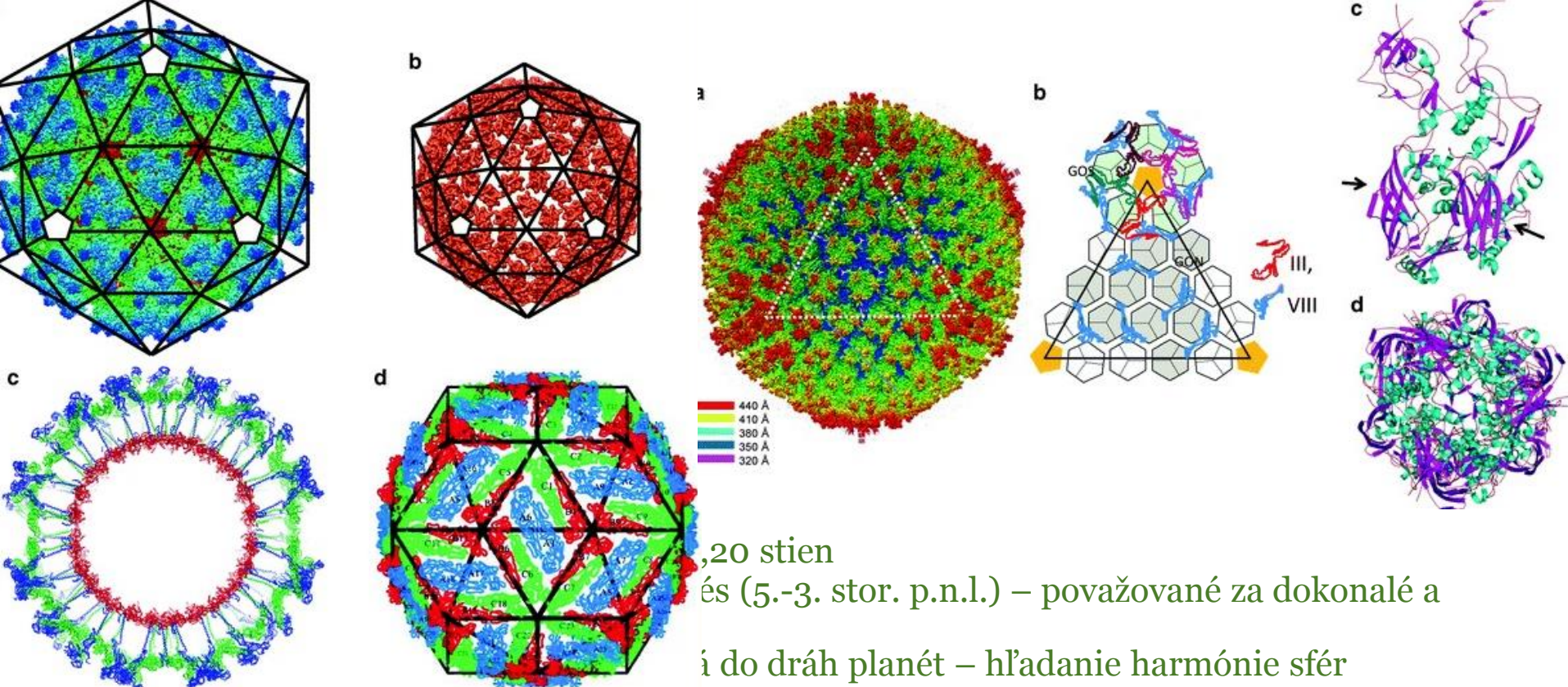
chloroplast stroma



Fotosyntéza - OEC

- OEC = oxygen evolving complex
- Chemický $\text{Mn}_4\text{O}_5\text{Ca}$ – špecifické usporiadanie
- Anorganická molekula schopná získať:
 - 2H^+ - protóny zvyšujú potenciál membrány
 - 2e^- - OEC je oxidovaný a získava elektróny z chlorofylu
 - O – kyslík – vo forme plynu vedľajší produkt
- Možný pôvod OEC - je silný atmosfére bez O_2 chránil živé organizmy namiesto organických molekúl





Pomerne bežné v neživej prírode: kryštály, molekuly

„Platónske“ vírusy

- Kapsid niektorých vírusov je ikosaéder - pravidelný 20-sten
- Vírus tým minimalizuje množstvo druhov „dielov“ a maximalizuje ich množstvo pre daný objem
- Obr.1 - a) b) vírus Venezuelskej encefalitídy
- Obr.2 – adenovírus – „hnusoba“ spôsobujúca sezónne respiračné ochorenia

Ďakujem za pozornosť

