

Eduard Kejnovský + Roman Hobza

EVOLUČNÍ GENOMIKA:
OD VZNIKU ŽIVOTA KE
KOMPLEXNÍM GENOMŮM

Evoluční genomika 2009 - časový plán

16.2. - Historie genomiky

23.2. - Vznik života, genetický kód a svět RNA

2.3. - Malé RNA

9.3. - Relikty světa RNA

16.3. - Polyploidizace

23.3. - Evoluce genomů I.

30.3. - Evoluce genomů II.

6.4. - Evoluce genů

13.4. - Velikonocce

20.4. - Evoluce sexuality I.

27.4. - Dynamika genomů

4.5. - Lidský genom a evoluce člověka

11.5. - Evoluce sexuality II.

18.5. - Strategie a metody genomiky

OSNOVA

1. Kosmologická předehra
2. Vznik života
3. První genetické systémy a vznik genetického kódu

KOSMOLOGICKÁ PŘEDEHRA

Mýty a náboženství

Albert Einstein - teorie relativity, první rovnice pro vesmír

Alexander Friedmann (1922) - rovnice nemají statické řešení, smršťování nebo rozpínání vesmíru

Edwin Hubble (1929) - rudý posun ve spektrech vzdálených galaxií, úměrný vzdálenosti, vesmír se rozpíná

George Gamow (1948) - původ těžších prvků, vyšší hustota na počátku, existence počátku, „big bang“ (**Fred Hoyle**)

Penzias a Wilson (1964) - reliktní záření, 2.7K, izotropní

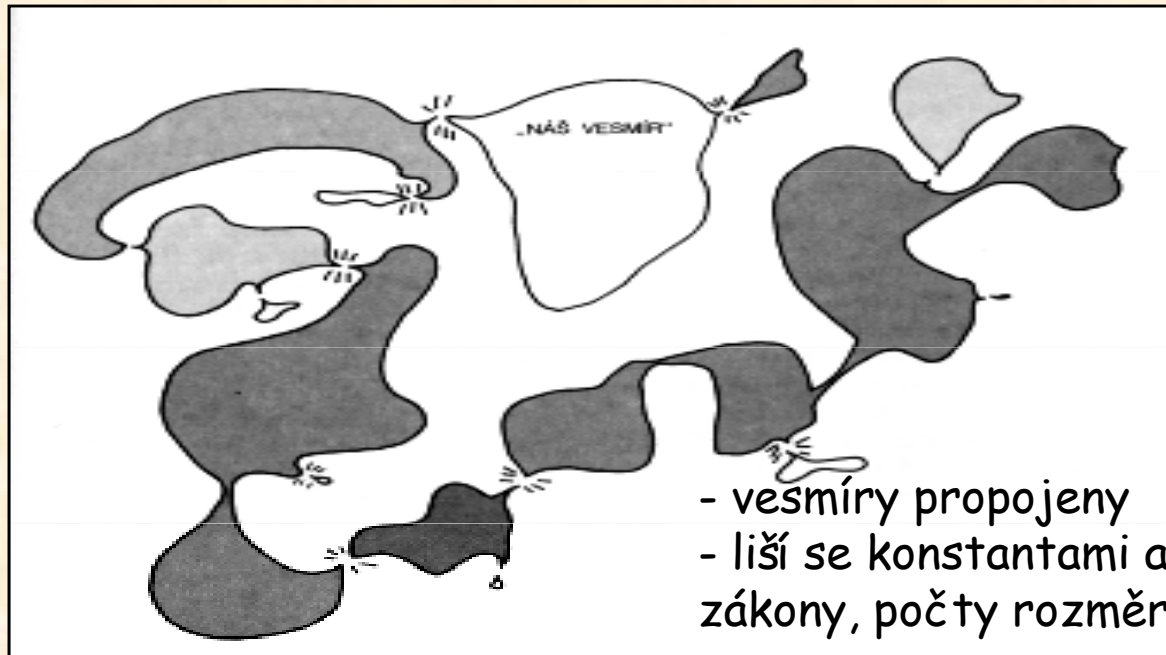
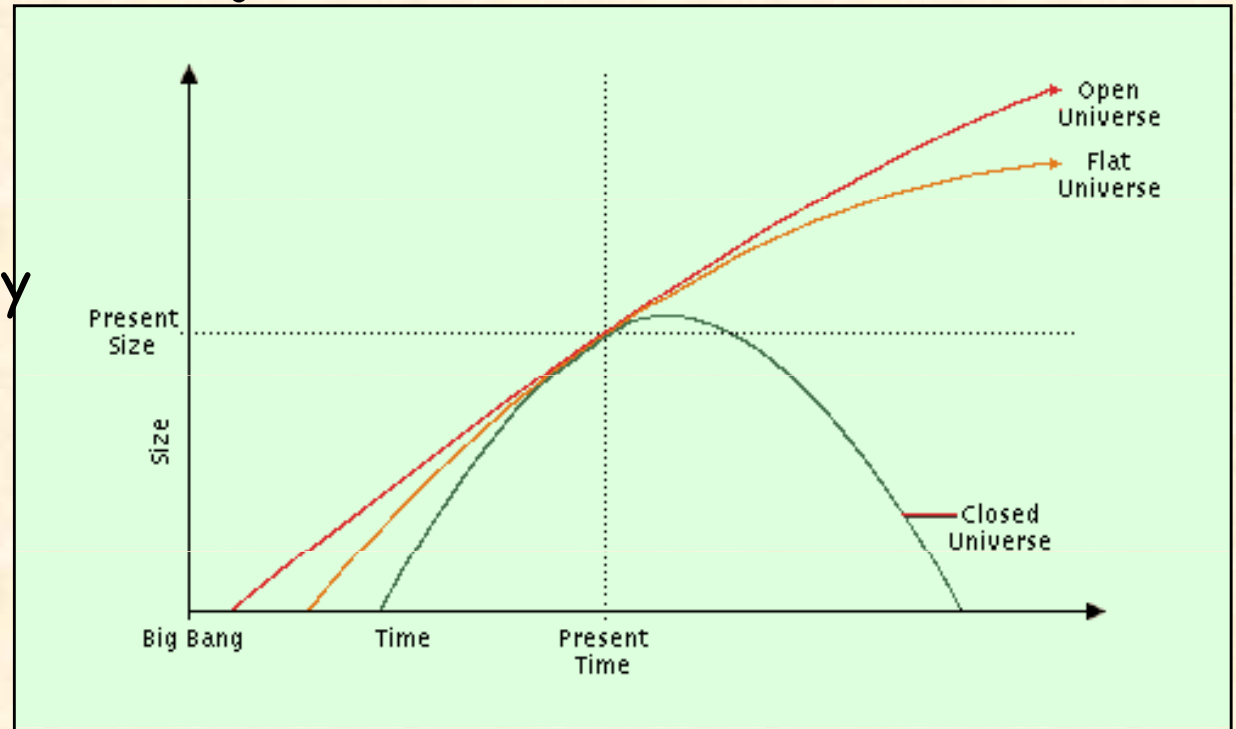
Velký třesk a rozpínání vesmíru

Velký třesk (Big bang):

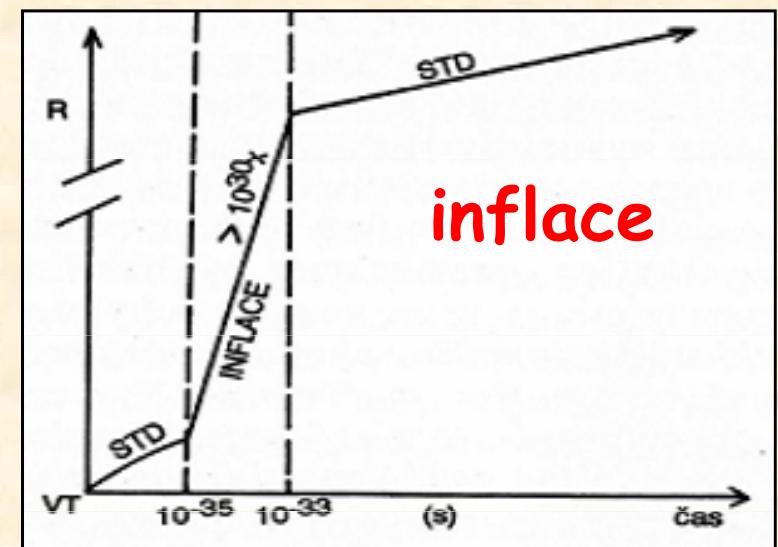
- singularita
- neplatí fyzikální zákony
- vznik prostoru, času a hmoty
- reliktní záření, inflace

Otázka vzniku času:

- Aristoteles
- křesťanství
- kosmologie
- teorie strun



- vesmíry propojeny
- liší se konstantami a zákony, počty rozměrů



Temná hmota, temná energie

Fáze vývoje vesmíru

1. Hadronová éra:

- 10^{-44} s až 10^{-4} s, teplota 10^{33} K až 10^{12} K
- inflace vesmíru - 10^{-35}
- **hadrony** (složeny z kvarků) - jsou to mezony (2kv.) a baryony (3kv., např. proton)
- z vakua se tvoří baryony (neutrony a protony) a antibaryony
- **anihilace** a vznik hmoty a záření (fotony) prvotní asymetrie

2. Leptonová éra:

- 10^{-4} s až 10s, teplota 10^{12} K až 10^{10} K
- nejvíce obsaženy ve vesmíru **leptony** (= elektrony, pozitrony, neutrina aj.)
- netvoří silné jaderné interakce

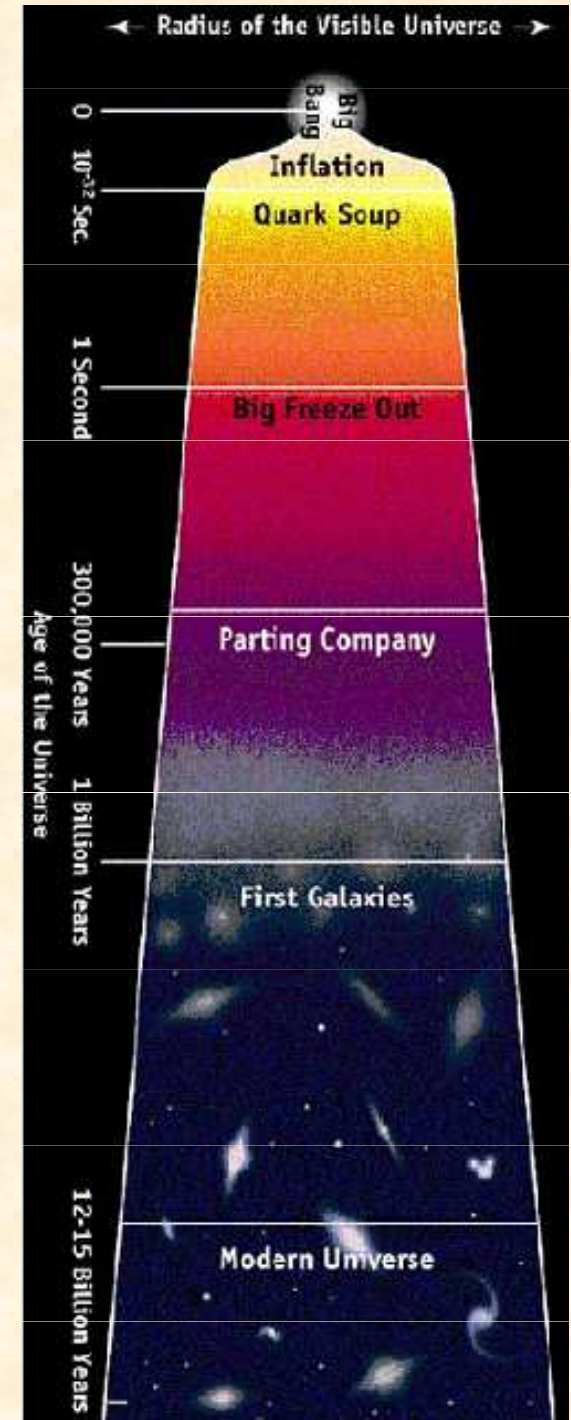
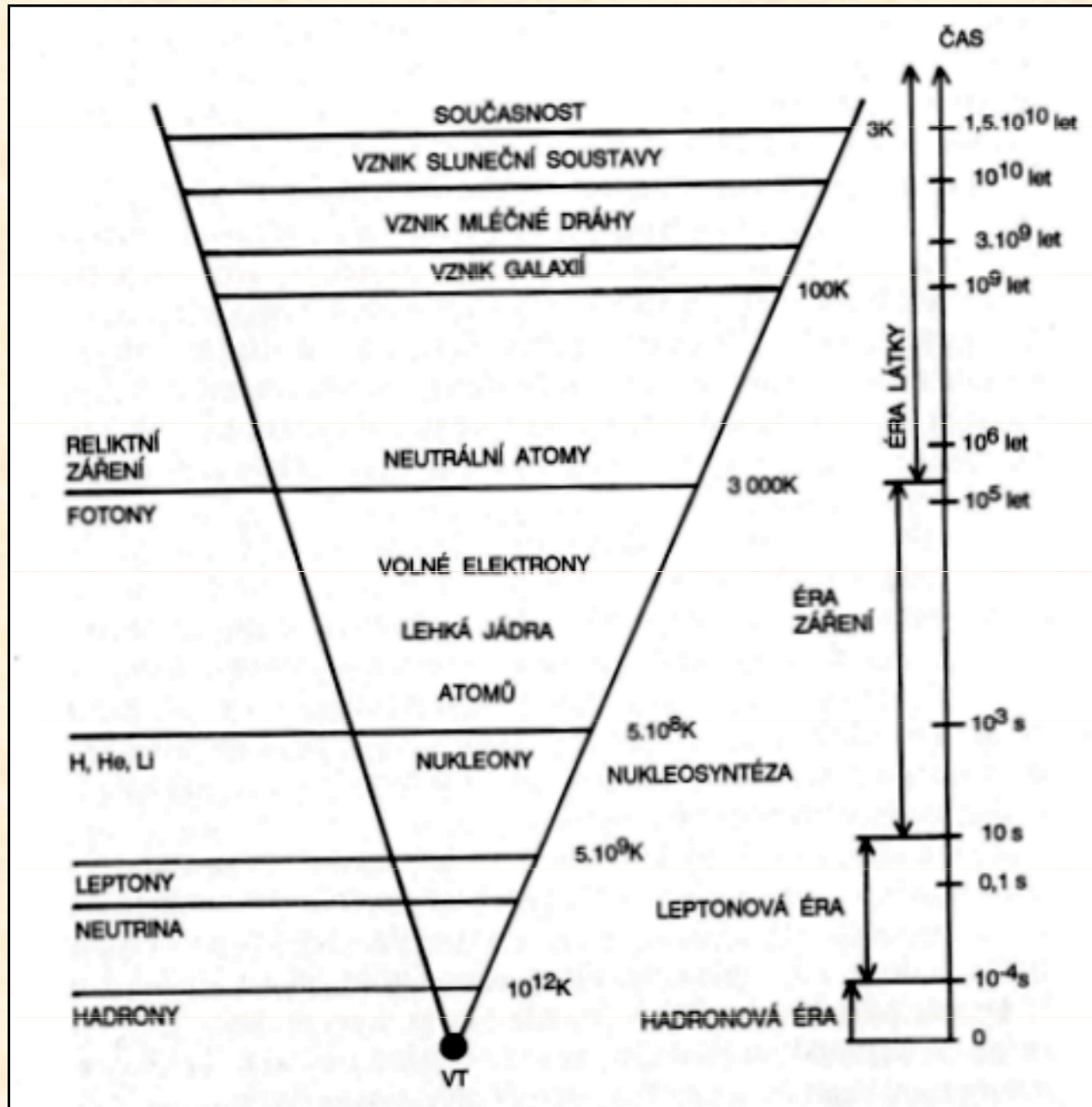
3. Éra záření:

- 10s až 10^5 let, teplota 10^{10} K až 3000K
- **anihilace** pozitronů s elektrony, vznik záření
- dále přítomny volné elektrony, slučují se protony a neutrony → první jádra

4. Éra látky:

- 10^5 až dodnes, teplota 3000K až 3K
- elektrony se spojují s jádry za vzniku neutrálních atomů
- vesmír **průhledný** pro fotony (300 000 let), rozpínání a doba **temna**
- formování galaxií, hvězdy - **světlo**, dva scénáře - adiabatický a izotermní

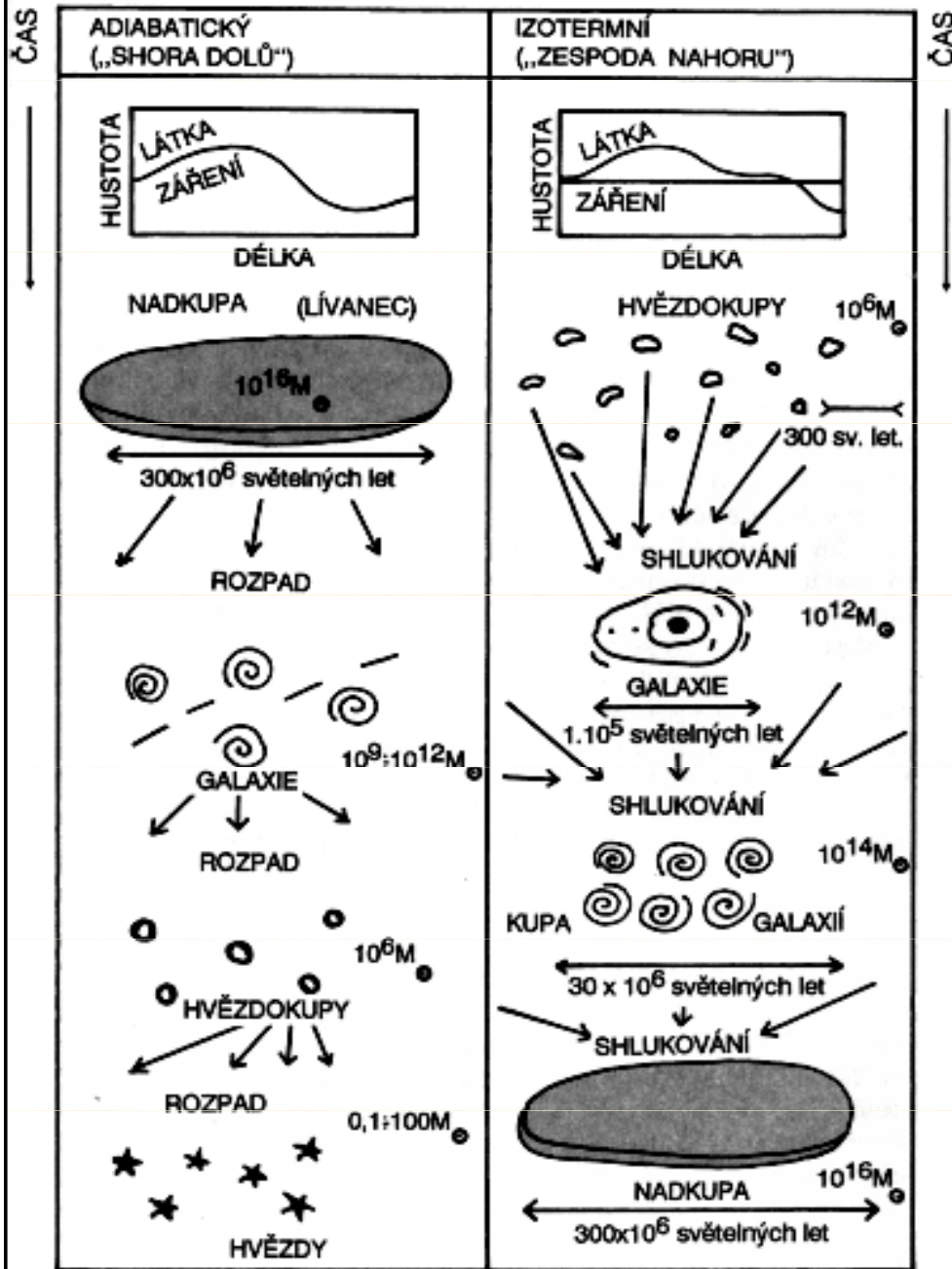
Vývoj vesmíru



Formování galaxií

shora dolů zdola nahoru

SCÉNÁŘ



Reliktní záření: pozůstatek velkého třesku

- předpověděl Gamow
- objevili Robert Wilson a Arno Penzias (1964-1965)
- teplota 2.7K, izotropní
- rozpínáním se protáhla vlnová délka fotonů 1000x, původní teplota záření byla 3000K
- poměr fotonů a baryonů $10^9:1$ v čase 10^{-35} s po velkém třesku
- přesnější měření - neizotropní charakter
- náhodné fluktuace - vznik galaxií

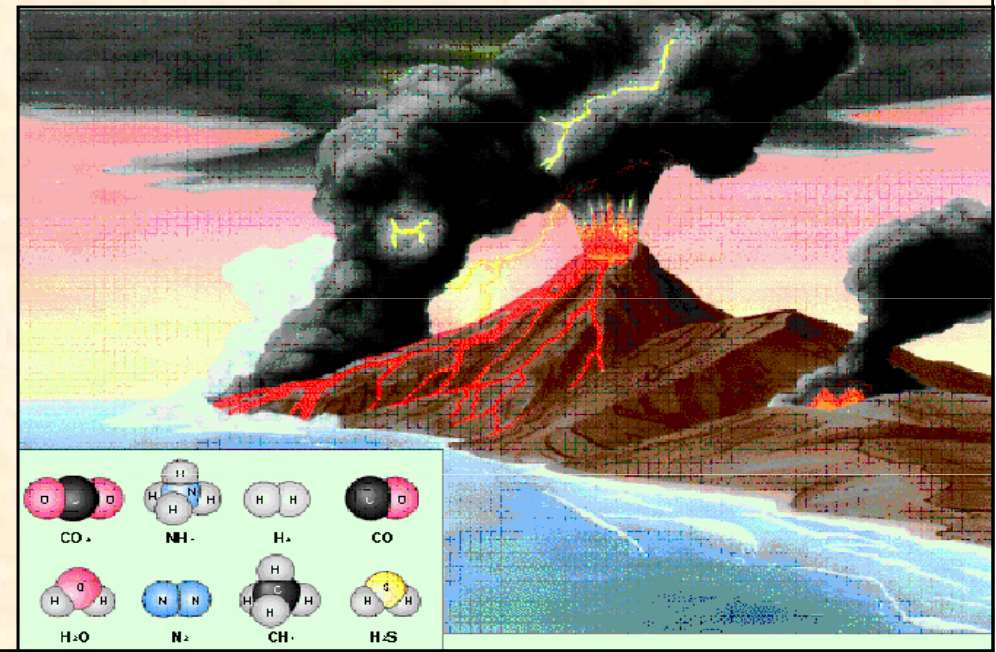
Formování Země



- **Hvězdy** - jaderné reaktory, 69% H + 29% He
- nukleosyntéza (v nitru hvězd):
proton \rightarrow vodík (${}^1_1\text{H}$) + neutron \rightarrow deuterium (${}^2_2\text{D}$) \rightarrow tritium (${}^3_3\text{D}$) \rightarrow tritium (${}^3_3\text{D}$) \rightarrow tritium (${}^3_3\text{D}$) \rightarrow tritium (${}^3_3\text{D}$)
triflium (lehké helium ${}^3_2\text{He}$) \rightarrow helium (${}^4_2\text{He}$) \rightarrow lithium ${}^6_3\text{Li}$,
 ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \Rightarrow {}^8\text{Be} + {}^4\text{He} = {}^{12}\text{C}$
- Rozptýlení těžších prvků - supernovy

- **Sluneční soustava** - z mezihvězdného oblaku plynů a prachu, rotace, zahuštění, 4.5 mld let
- Slunce - ideální velikost,

- **Země:**
 - optimální hmotnost a poloha
 - tektonika, vrásnění
 - Měsíc
 - sopečná činnost a atmosféra
 - po zchladnutí moře
 - prvních 500 mil. let sterilní
 - život před 3.8 mld let



Antropický princip



Fyzika totiž zjistila, že existence života na Zemi je téměř zázrakem. Stačilo by, aby fyzikální konstanty vesmíru byly jen nepatrně odlišné a hmota ani život, jak je známe, by nevznikly. Vlastnosti vesmíru jsou přesně a jemně vyladěné právě tak, že na Zemi mohl vzniknout život a nakonec člověk. Téměř se zdá, že vesmír vznikl proto, aby mohla inteligentní bytost vzniknout. V USA dal antropický princip podnět ke vzniku nového kreacionistického hnutí, "**Intelligent Design**".

Zrodil se tak tzv. **antropický princip**, který zformuloval v r.1973 kosmolog Brandon Carter ve dvou verzích:

"Slabá" verze konstatuje skutečnost, že svět je právě takový, že na něm mohl vzniknout život. *"Povaha vesmíru a naše místo v něm jsou slučitelné s naší existencí jako pozorovatelů"*. Prostě tu jsme, protože tu můžeme být.

"Silná" verze říká, že do základů vesmíru byly vloženy takové specifické informace, aby v něm **zákonitě inteligentní život musil** vzniknout.

VZNIK ŽIVOTA

Co je život?

Erwin Schrodinger: *What is life* (1947)

Definice NASA:

- otevřený systém
- replikace - cyklická reprodukce
- samosestavování - hierarchické struktury, fraktály
- evoluce - směřování ke komplexním strukturám

Atributy života:

- reprodukce, metabolismus, růst, adaptace, odpověď na podněty, organizace
- život a druhý zákon termodynamiky

Klasická a moderní abiogeneze

Aristoteles - život má původ v neživé hmotě

Louis Pasteur (1862)- mikroorganismy přítomny v organických materiálech, sterilizace

Woehler (1828) - syntéza močoviny, kvantifikace energie při reakcích, není prostor pro vitální sílu, redukcionismus

Moderní abiogeneze:

- vznik života na Zemi sérií postupných kroků
- stavební kameny (AK, báze) → polymery → buňka
- různé hypotézy (svět RNA, Miller, panspermie)

Oponenti - falzifikovatelnost, malá pravděpodobnost

Rozdíl mezi klasickou a moderní abiogenezí:

- frekvence vzniku života
- složitost vznikajících organismů



Redukcionismus - odmítá rozdíl mezi anorganickou a organickou hmotou, složité věci lze vysvětlit jednoduššími, řada fyzika-chemie-biologie-sociologie, Dawkins

Vitalistická filozofie - dělila přírodu na živou a neživou, vyloučila abiogenezi

Moderní teorie chemické evoluce a podmínky na Zemi v době vzniku života



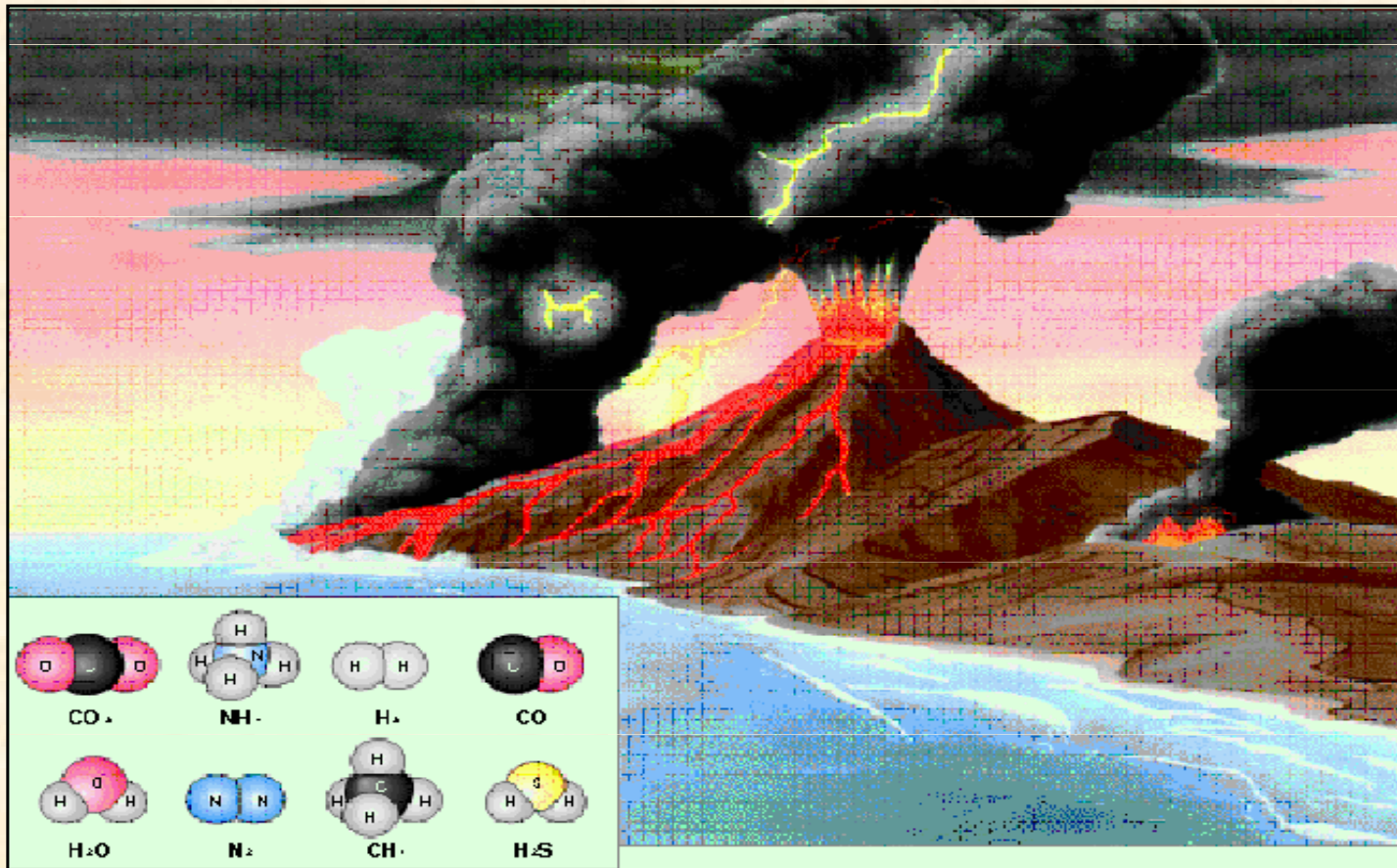
A.I. Oparin (1924) - složité molekulární struktury vznikly z jednodušších

Haldane (1928) - život vzešel z primordiální polévky, úloha UV záření

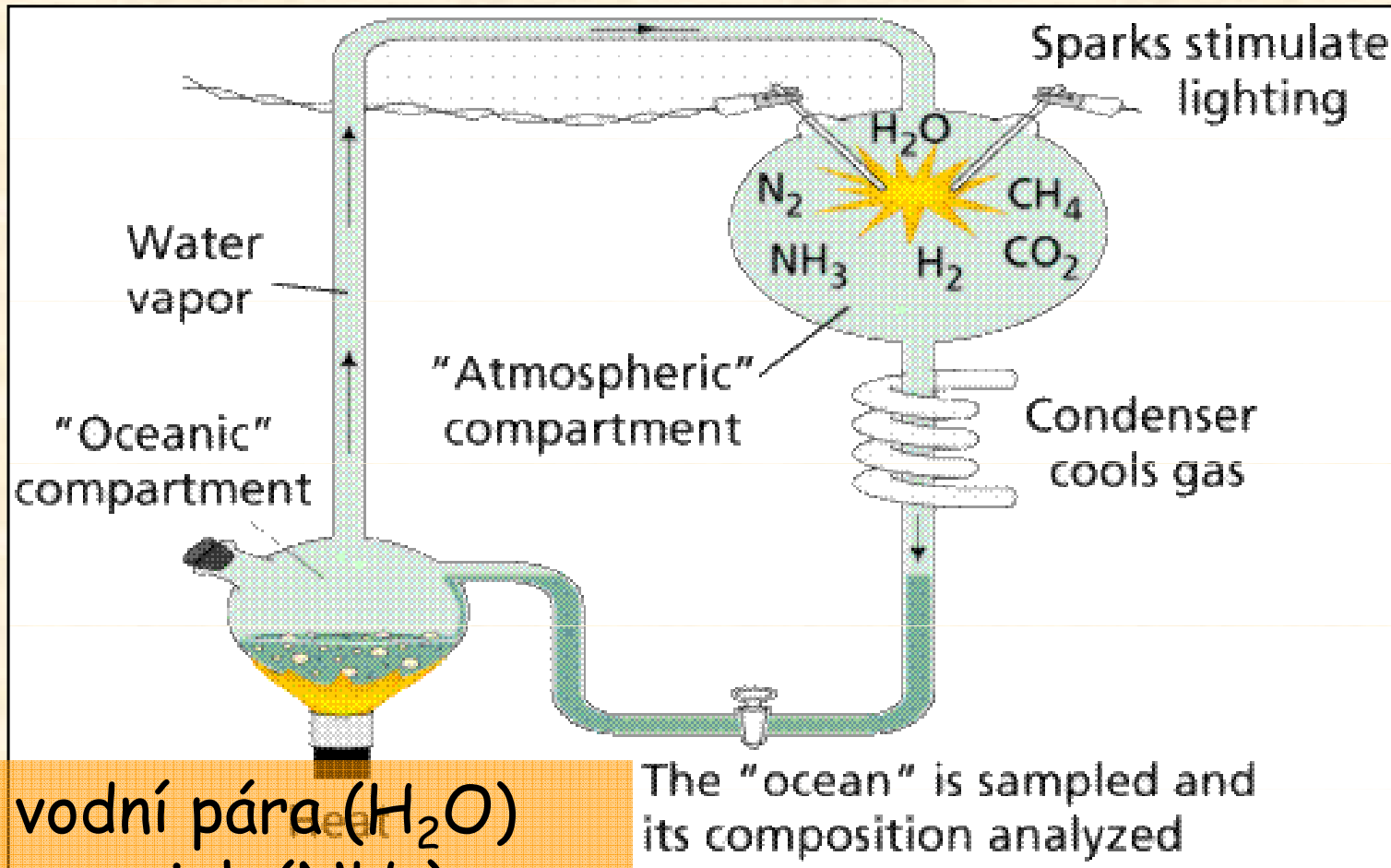
H. Urey - atmosféry ostatních planet jsou redukující

Více různých teorií:

svět RNA, protenoidy, Millerovy experimenty, panspermie aj.



Urey-Millerův experiment



vodní pára (H_2O)
amoniak (NH_3)
metan (CH_4)
vodík (H_2)
dusík (N_2)
oxid uhličitý (CO_2)

Modifikace:

1. Pyrosyntéza
2. UV záření
3. tlakově vlny
4. kosmické záření
5. radioaktivita
6. sluneční vítr

Výsledek:

→ 20 AK, 5 bází, hlavní cukry

Námitky a současný pohled

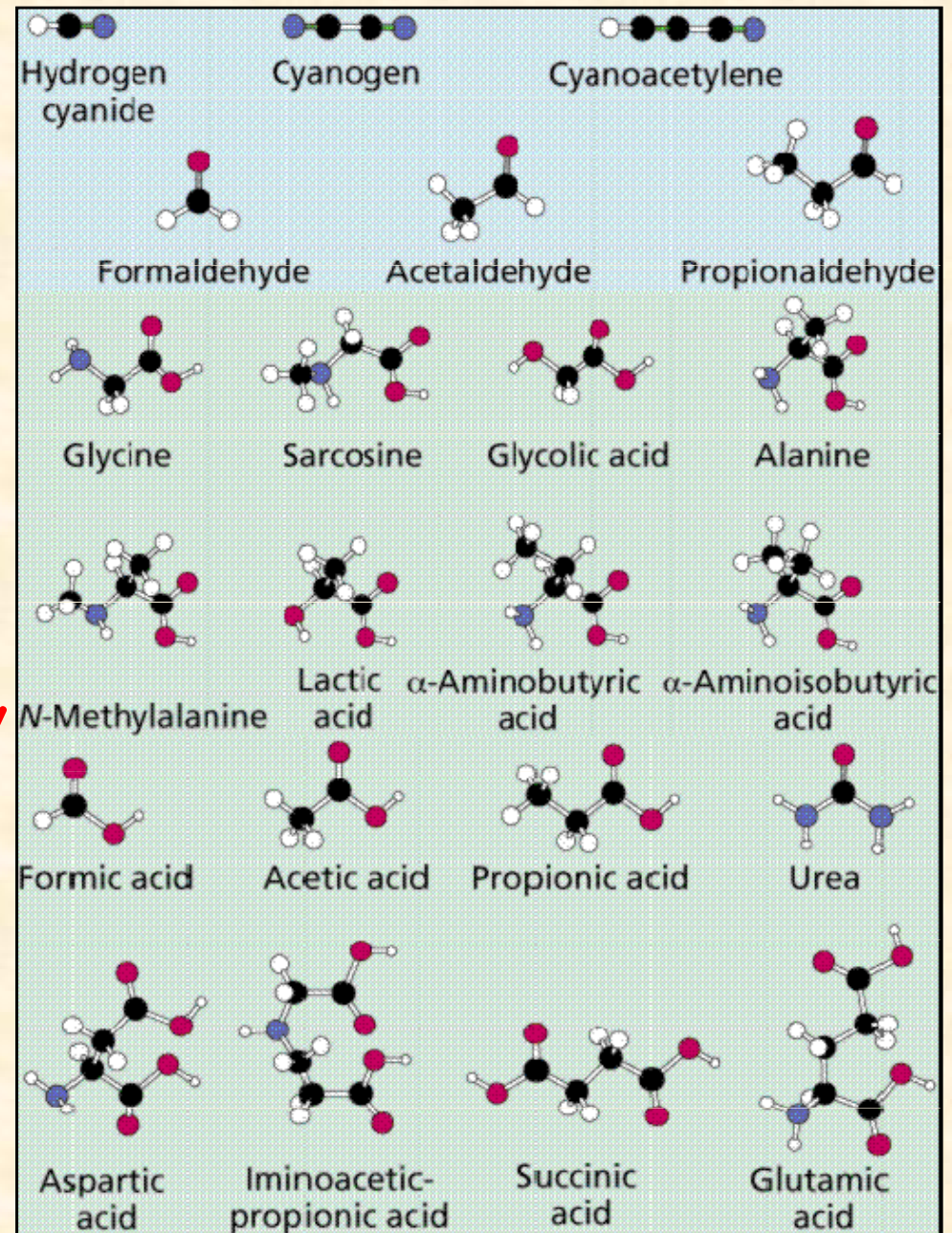
Modifikace Urey-Millerova experimentu

1. Pyrosyntéza (S. Fox) - pícka (sopky)
2. UV záření
3. tlakově vlny (průlety meteoritů)
4. kosmické záření
5. radioaktivita
6. sluneční vítr

Výsledek:
20 AK, 5 bází, hlavní cukry

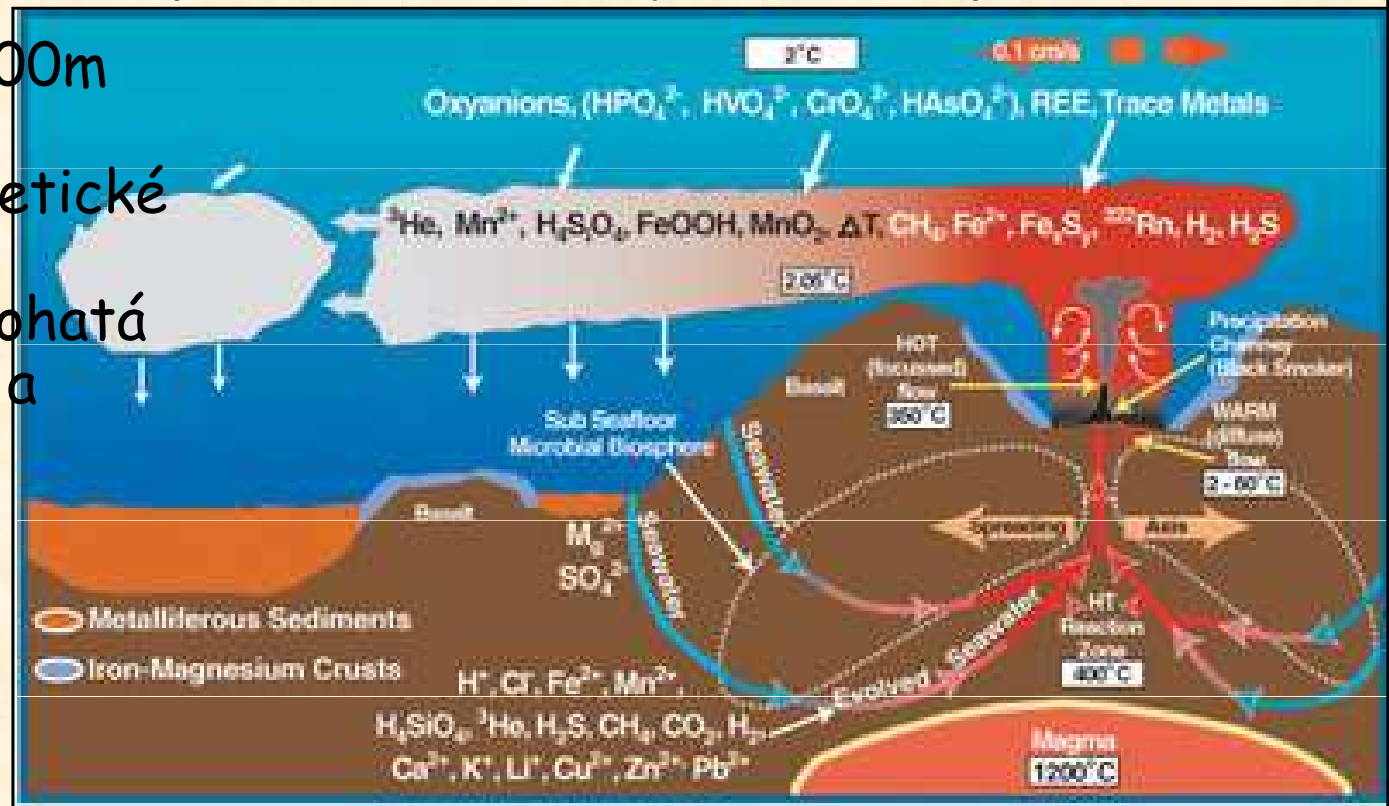
Námítky a současný pohled:

- atmosféra nebyla redukující
- kyslík z fotolýzy vody a hornin
- problém - kyslík byl jedem



Vznik života v podmorských sopkách

- podmorské komíny - 2000m
- zvláštní ekosystém (extremofilové, fotosyntetické bakterie)
- vyvěrá přehřátá voda bohatá na minerály, krystalizuje a sedimentuje, katalýza



Teorie „hluboké horké biosféry“

- první život se vyvinul hluboko pod povrchem Země
- dnešní bakterie několik kilometrů pod povrchem
- možnost života na jiných planetách nebo měsících



Teorie světa sulfidů kovů (Wachtershauser, 1980)

- za přítomnosti **sulfidů kovů** vznikají složitější uhlíkaté sloučeniny - jednoduchý **metabolismus** předcházel genetice
- reakce vytvářející energii využitelnou pro další reakce cyklů
- vzrůstá složitost **cyklů**
- reakce neprobíhaly ve volném oceánu ale **na povrchu minerálů** (pyrit)
- důležitá role **kyseliny octové** - jednoduchá kombinace C+H+O, dodnes klíčové postavení v metabolismu
- 1997: smíchal CO, H₂S, NH₃, NiS, FeS **při 100°C** a získal AK a peptidy
- podmínky podobné blízkosti podmořských sopek

Potíže teorií vzniku života:

vznik na povrchu Země - jedovatý kyslík rozkládá organické látky
vznik na dně oceánů - RNA je nestabilní při vysokých teplotách

—————> Vznik života v mělkých lagunách na povrchu

Panspermie („www.panspermia.com“)

Anaxagoras (5. stol. př.n.l.): zárodky života rozptýleny po celém vesmíru

Lord Kelvin, Arrhenius (1908): Panspermie

Sir Fred Hoyle, Crick - řízená panspermie



Vesmír je bohatý na organické látky

Komety:

- mohou přenášet organické látky, Halley - 25% org., Hyakutake - methan

Meteority:

- denně na Zemi dopadá 30-150 tun kosmického organického materiálu, dříve více

- prebiotické reakce v mělkých lagunách, vypařování

- objev aromatických polycyklických uhlovodíků (PAH) v okolí mrtvých hvězd, glycin v mezihvězdném prachu

Chondrity - nejstarší kamenné meteority, obsahují chondruly s organickými látkami, Murchison - 64 druhů AK, jen 8 „pozemských“ AK

MEZIPLANETÁRNÍ EXPRES

Vždy jednou za několik milionů let do Marsu narazí asteroid nebo kometa s energií, která postačuje k vyvrstvení hornin, jež mohou uniknout z dosahu přitažlivosti červené planety a nakonec se dostat na Zemi. Pokud se před miliardami let vyvinul na Marsu život, lze si představit, že horniny s biologickými materiály podnikly vesmírnou pouť dostatečně rychle a přenesly život na Zemi.

Dokonce i velmi prudké nárazy mohou vyvrstvit horniny a prachové částice z povrchové vrstvy Marsu bez toho, aby je zahřály na teplotu neslučitelnou s životem.



Většina hornin spojených se Zemí strávila ve vesmíru dlouhou dobu. Nejznámější marsovský meteorit, ALH84001 (nahore), putoval vesmírem 15 milionů let. Ale z každých deseti miliónů předmětů/objektů se jeden dostane na Zemi za méně než jeden rok, a je tak jen velmi krátce vystaven meziplanetárnímu záření.

Meziplanetární expres

Při vstupu do atmosféry Země by se zahřál povrch meteoritu, ale ne jeho vnitřek. Jakékoli mikroby v nitru horniny by přežily. Prachové částice by se vyhnuly přílišnému zahřátí tím, že jejich rychlost by se snižovala postupně.

Bakterie - vesmírní kolonizátoři?

Streptococcus mitis:

- náhodně zavlečen na Měsíc (Surveyor3) a po 31 měsících zpět (Apollo12) a byl životaschopný

Deinococcus radiodurans:

- 15 000 Gy/ 37% životaschopnost
člověk 10 Gy, *E. coli* 60 Gy

bakteriální spóry:

- odolnost, konformace A-DNA
- izolace bakterií z trávicího traktu hmyzu zalitého v jantaru (25-40 mil. roků)
- solné vrstvy (New Mexico) - bakterie 300 mil let



Extremofilové

Acidophile: An organism with an optimum pH level at or below pH 3.

Aerobe: requires O₂ to survive.

Alkaliphile: An organism with optimal growth at pH levels of 9 or above.

Anaerobic: does not need O₂ to survive.

Endolith: An organism that lives inside rocks.

Halophile: An organism requiring at least 0.2M of NaCl for growth.

Hypolith: An organism that lives inside rocks in cold deserts.

Mesophile: An organism that thrives in temperatures between 15-60 °C.

Metalotolerant: capable of tolerating high levels of heavy metals, such as copper, cadmium, arsenic, and zinc.

Microaerophilic: requires levels of O₂ that are lower than atmospheric levels.

Oligotroph: An organism capable of growth in nutritionally limited environments.

Piezophile: An organism that lives optimally at high hydrostatic pressure. See also Barophile

Psychrophile: An organism that can thrive at temperatures of 15 °C or lower.

Radioresistant: resistant to high levels of ionizing radiation.

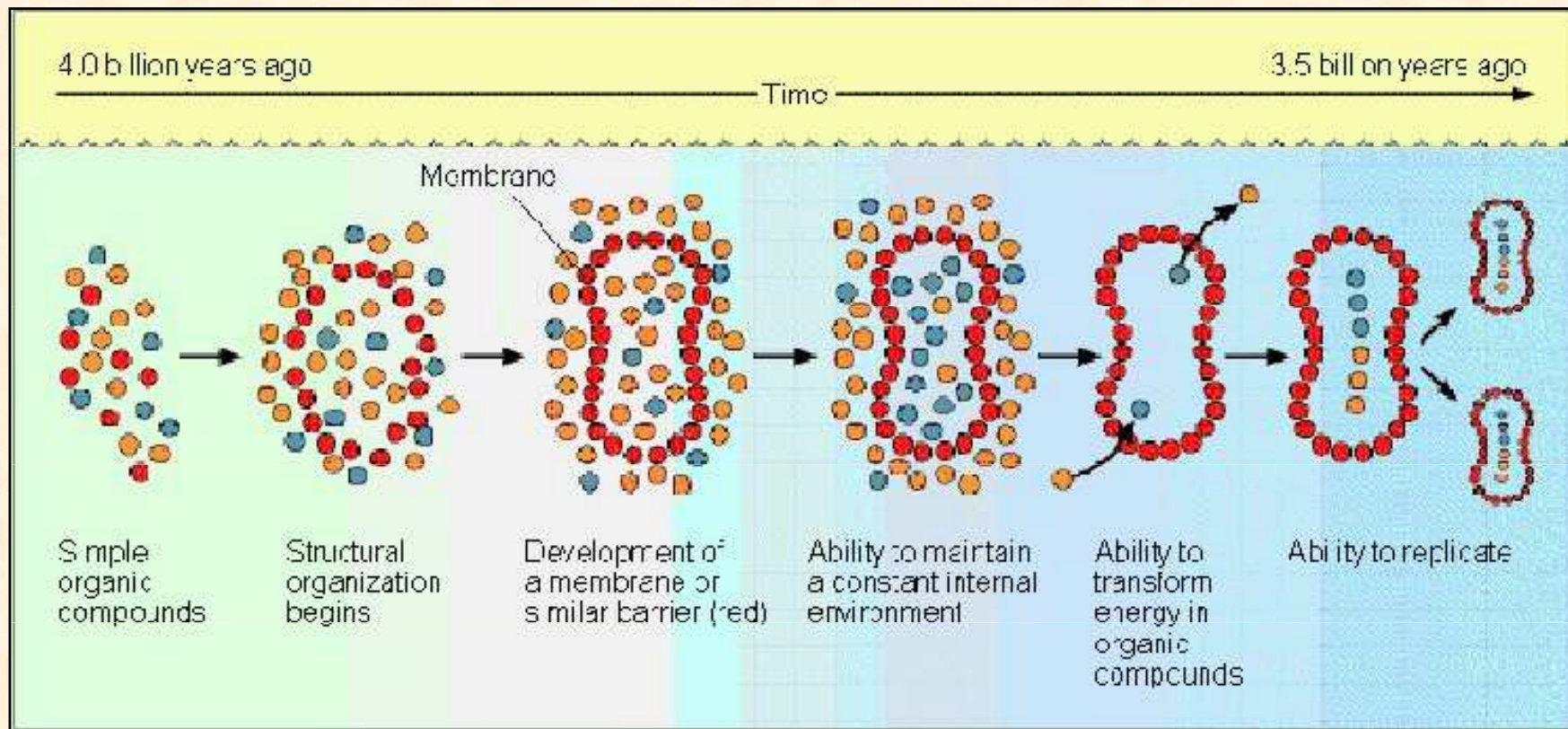
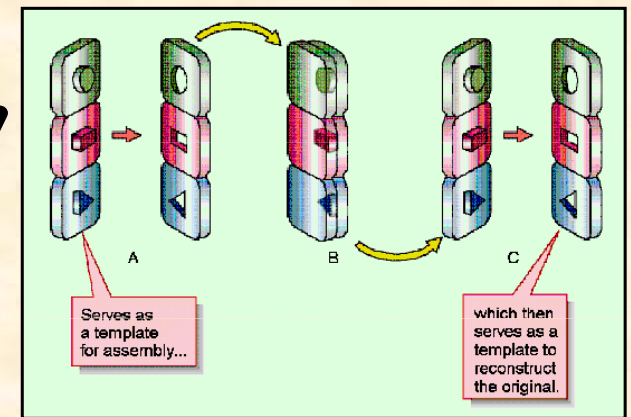
Thermophile: An organism that can thrive at temperatures between 60-80 °C.

Xerotolerant: requires water to survive

PRVNÍ GENETICKÉ SYSTÉMY A VZNIK GENETICKÉHO KÓDU

První genetické systémy

1. Proteiny - koacerváty a mikrosféry
2. Nukleové kyseliny - genová teorie a ribozymy
3. Proteiny i nukleové kyseliny - genetický kód
4. Jiný princip - PNA, polycyklické aromatické uhlovodíky, jílly

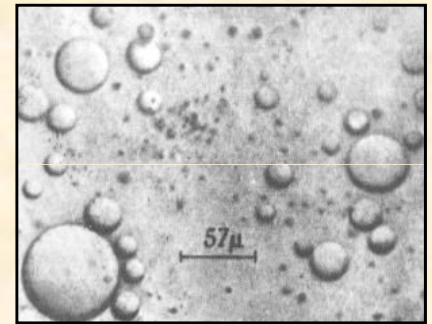


Na počátku byly pouze **proteiny**:



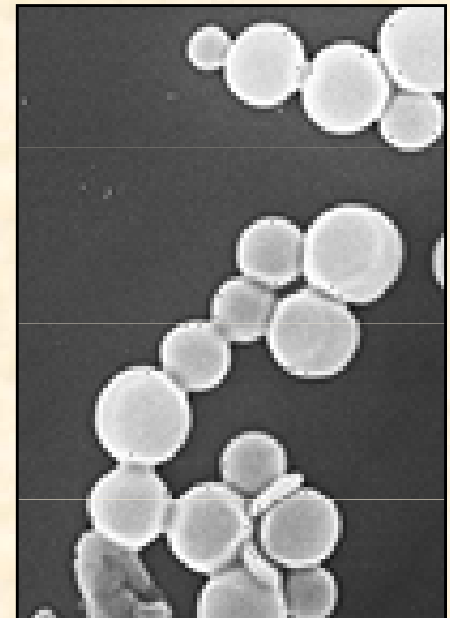
1. Oparinovy koacerváty

- aminokyseliny vznikají snadněji než báze NK
- primitivní modely buňky
- hromadění produktů, reakce, růst, dělení
- vznikají v koloidních roztocích
- problém ředění



2. Foxovy mikrosféry

- otázka původu enzymatických molekul
- vznikají z protenoidů = polymery vzniklé kondenzací aminokyselin
- pořadí AK v těchto polymerech je náhodné
- některé mohou vykazovat katalytickou funkci



Na počátku byly pouze **nukleové kyseliny**

- genová hypotéza

Co bylo dříve

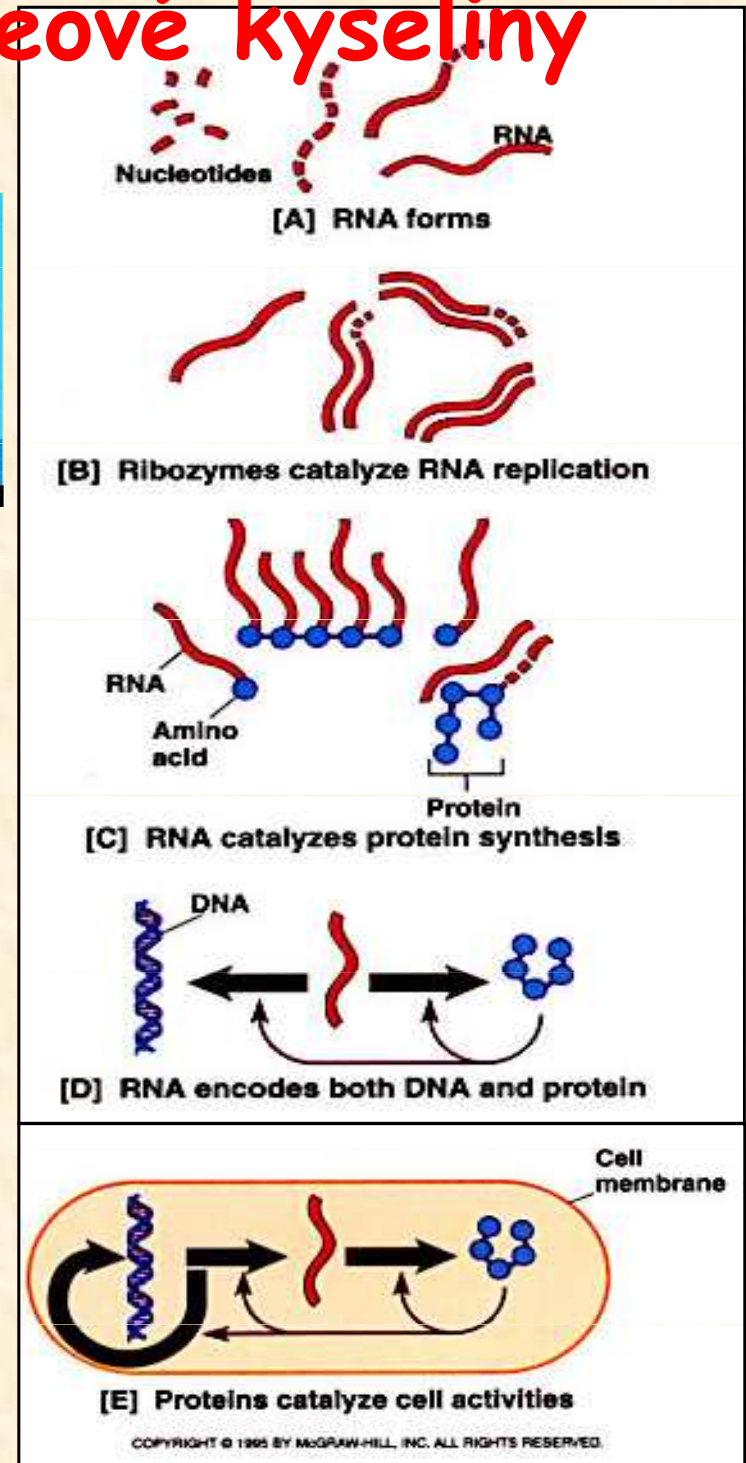
- DNA nebo proteiny?



- RNA je genetický materiál i katalyzátor postuloval Crick 1968
 - katalyticky aktivní RNA - **RIBOZYM** (Cech 1982)
 - RNA svět (W. Gilbert 1986)
 - vznik genetického kódu a proteosyntézy
- jednoduché polymery - replikátory, RNA**

↓
evoluce

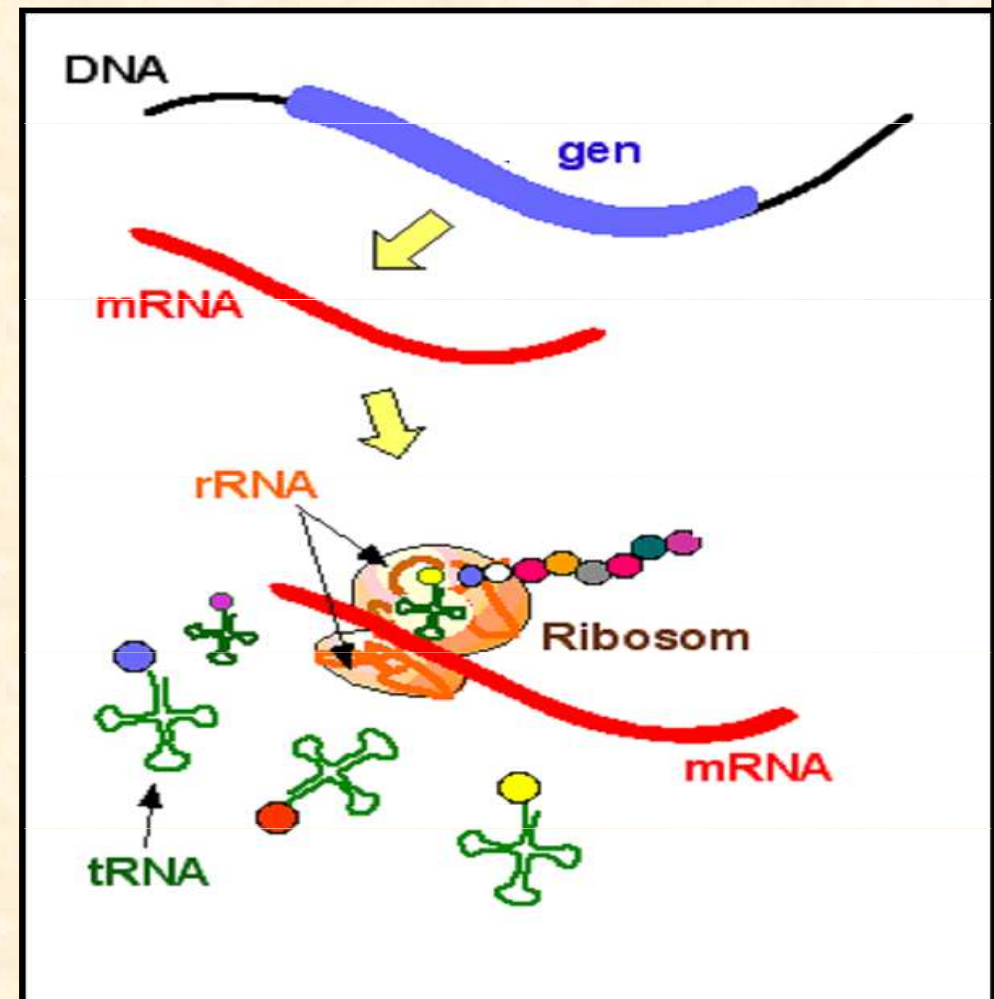
složitá biochemie: **DNA** - RNA - **protein**



Na počátku byly proteiny i nukleové kyseliny (**koevoluce**)

VZNIK GENETICKÉHO KÓDU

1. Unikátní vysoce nepravděpodobná **událost** („frozen accident“)
2. Postupný **vývoj**
3. Produkt rozumné **bytosti** - nesplňuje kritérium vědecké hypotézy (ověřitelnosti)

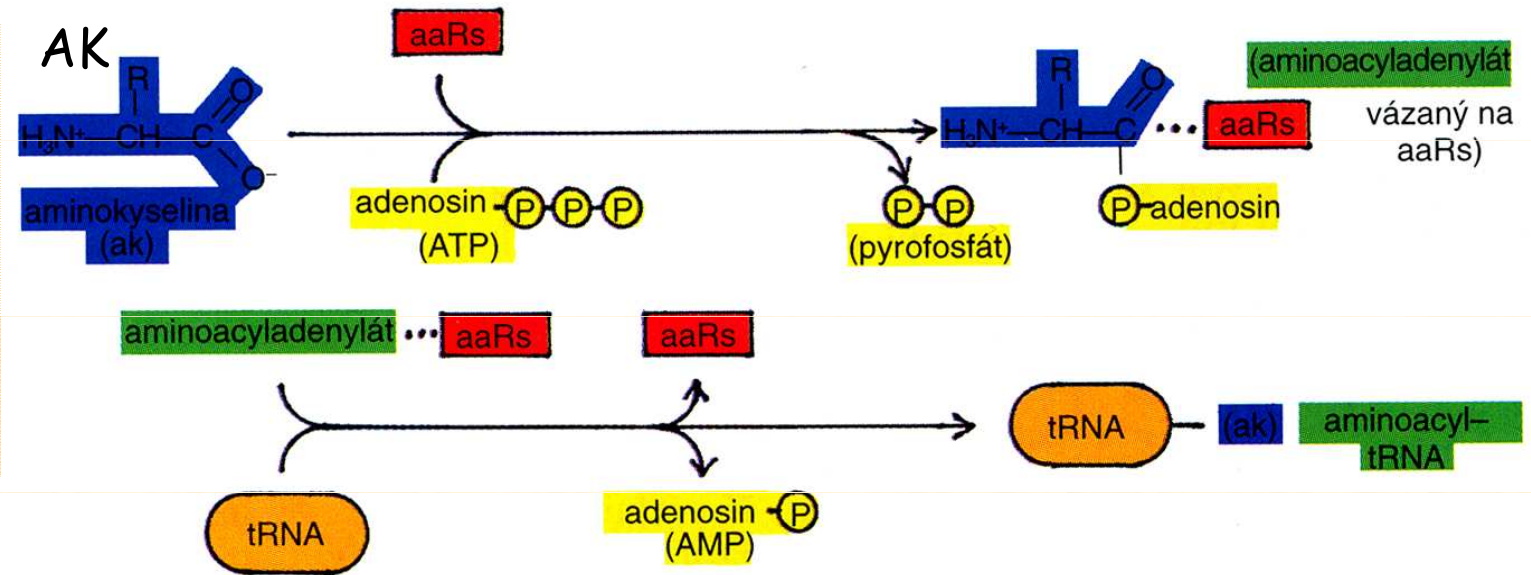


Inkorporace bílkovin do RNA světa

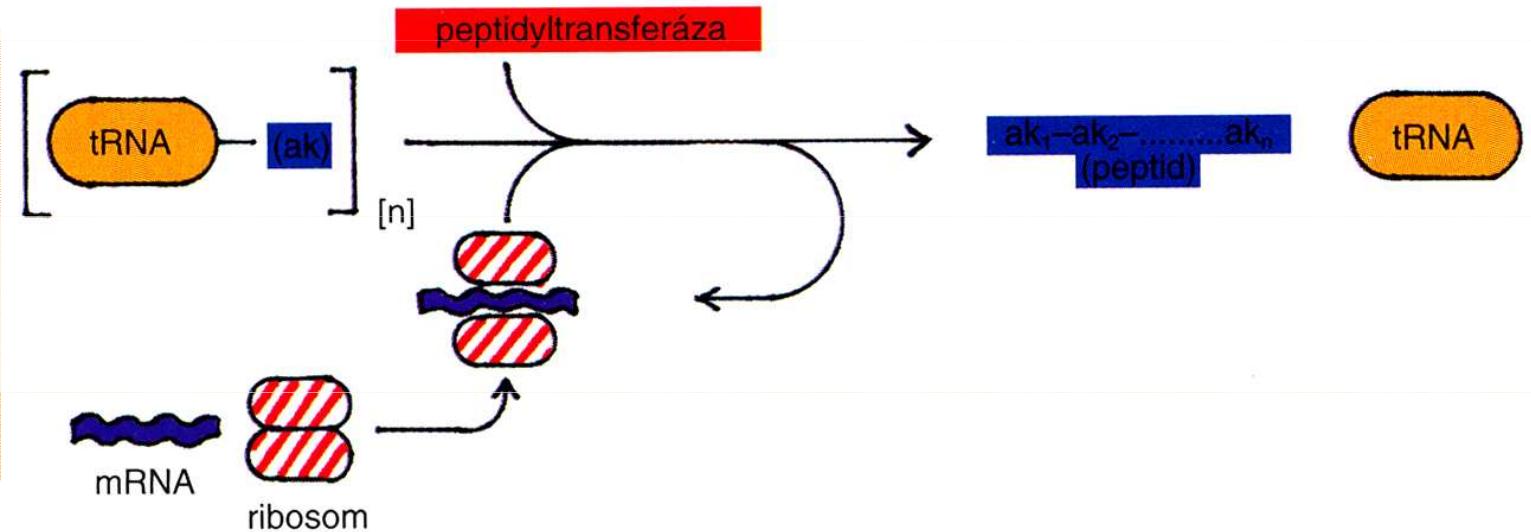
Dvoukroková syntéza bílkovin:

1. $AK + ATP \rightarrow AK-AMP$
2. $AK-AMP + tRNA \rightarrow AK-tRNA$

Aktivace tRNA,
aminoacyl-tRNA
synthetasa,
mohl být ribozym,
bez templátu,
operační kód



Kondenzace
aminokyselin,
peptidyltransferasa,
je ribozym,
podle templátu,
genetický kód












Důkazy postupné evoluce genetického kódu

- Minimalizace **chyb**
- Přímé **interakce** AK s kodony
- AK kódované podobnými kodony jsou syntetizované stejnými **biochemickými** dráhami

GC model

Nejstarší triplety **GXC**
Gly, Ala, Val, Asp
 glycinové hodiny
 mutační expanze

	U	C	A	G
U	UUU Phe	UCU Ser	UAU Tyr	UGU Cys
	UUC Phe	UCC Ser	UAC Tyr	UGC Cys
	UUA Leu	UCA Ser	UAA TER	UGA TER
	UUG Leu	UCG Ser	UAG TER	UGG Trp
C	CUU Leu	CCU Pro	CAU His	CGU Arg
	CUC Leu	CCC Pro	CAC His	CGC Arg
	CUA Leu	CCA Pro	CAA Gln	CGA Arg
	CUG Leu	CCG Pro	CAG Gln	CGG Arg
A	AUU Ile	ACU Thr	AAU Asn	AGU Ser
	AUC Ile	ACC Thr	AAC Asn	AGC Ser
	AUA Ile	ACA Thr	AAA Lys	AGA Arg
	AUG Met	ACG Thr	AAG Lys	AGG Arg
G	GUU Val	GCU Ala	GAU Asp	GGU Gly
	GUC Val	GCC Ala	GAC Asp	GGC Gly
	GUA Val	GCA Ala	GAA Glu	GGA Gly
	GUG Val	GCG Ala	GAG Glu	GGG Gly

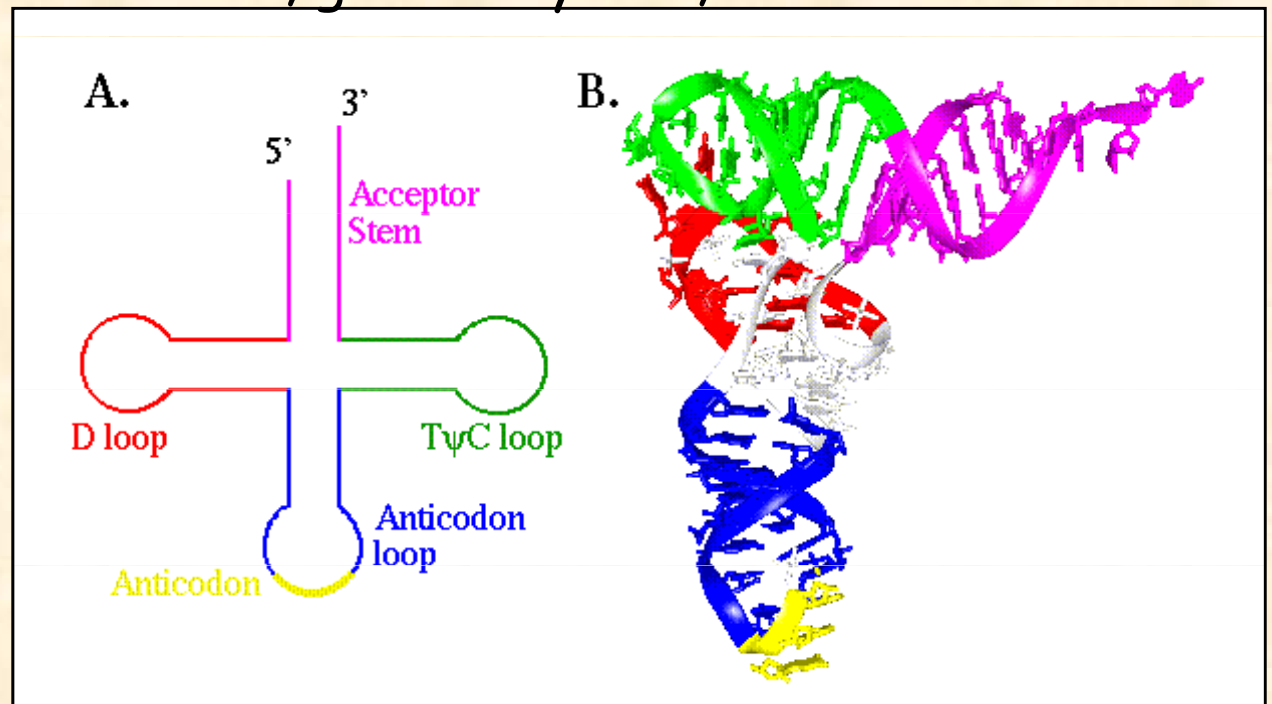
 Acidic	 Amide	 Hydroxyl containing
 Alkyl	 Aromatic	 Sulfur containing
 Alkyl	 Basic	 STOP

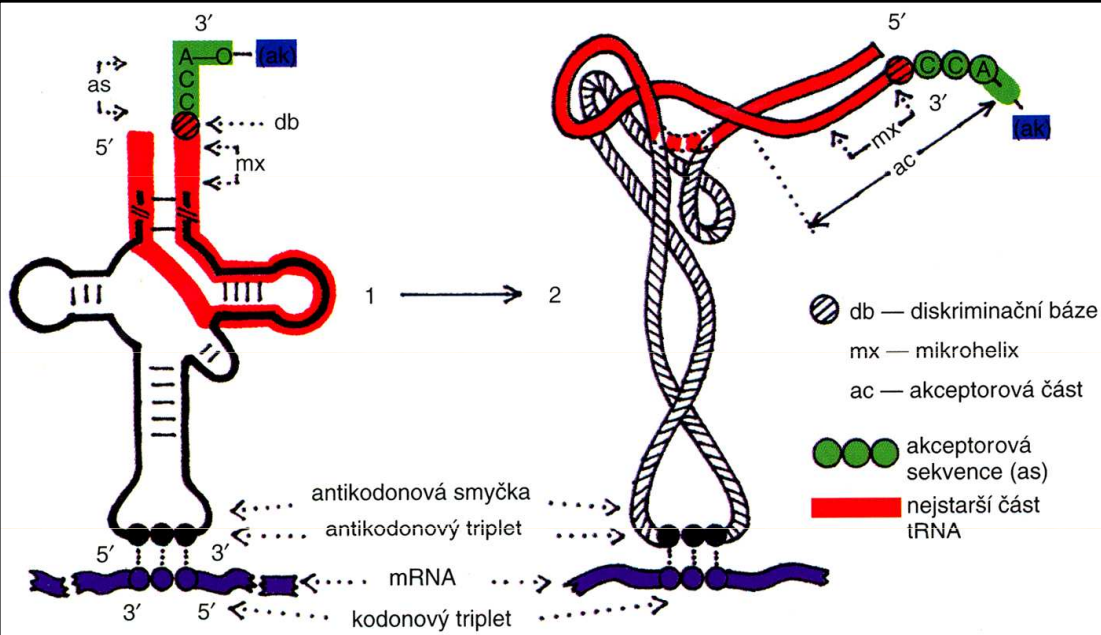
Stejné AK v prebiotické syntéze, v prakódu i v meteoritech

Odchylky od standardního kódu

tRNA: nejstarší biomakromolekula

- replikace RNA genomů s náhodným počátkem, fosilie - fág Q β
 - výhodný počátek na 3' konci, mikrohelix
 - vazba AK stabilizuje replikázový komplex,
 - po replikaci odštěpení vlásenek \rightarrow předchůdce tRNA
 - dle homologie se řadí vedle sebe \rightarrow kondenzace AK
-
- ribozymové aaRs připojují AK, interakce AK-tRNA, aptamery
 - za CCA jsou diskriminační báze, operační kód
 - přesun bází do antikodonové oblasti, genetický kód, GC- AU-kód





Předchůdce tRNA

Snad signál pro replikasu, vlásenka na 3'-konci genomové RNA viru Q β dodnes nese adaptér -CCA

Syntéze peptidů předcházely jiné funkce aminokyselin - aminoacylace, předstupeň aktivace tRNA, vznik operačního kódu

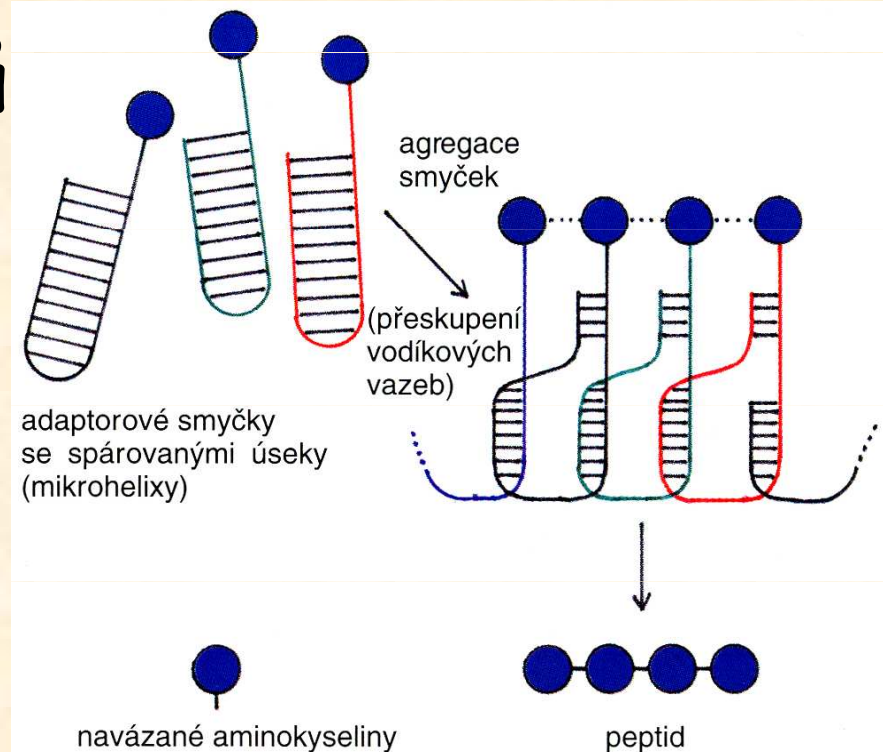
Struktury nebo vlastnosti vzniklé v ranějších evolučních etapách bývají v modifikované podobě použity později k jiným účelům

Nekódovaná syntéza peptidů

Adaptorové smyčky

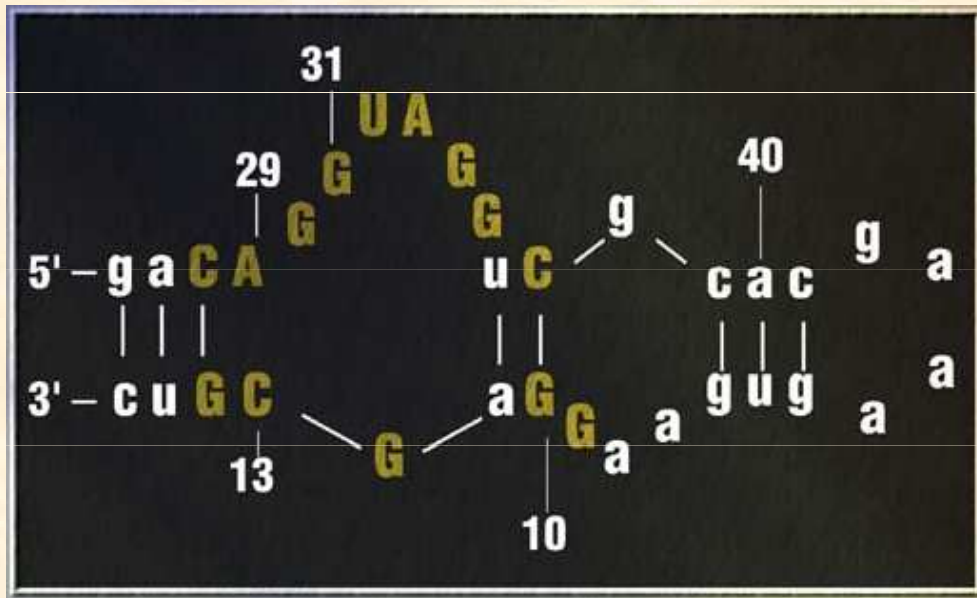
Diferenciace RNA na genotyp (komplementární vlákna) a fenotyp (adaportory)

Změna terciální a kvartérní struktury adaptorů mohla vytvořit podmínky pro vznik peptidové vazby

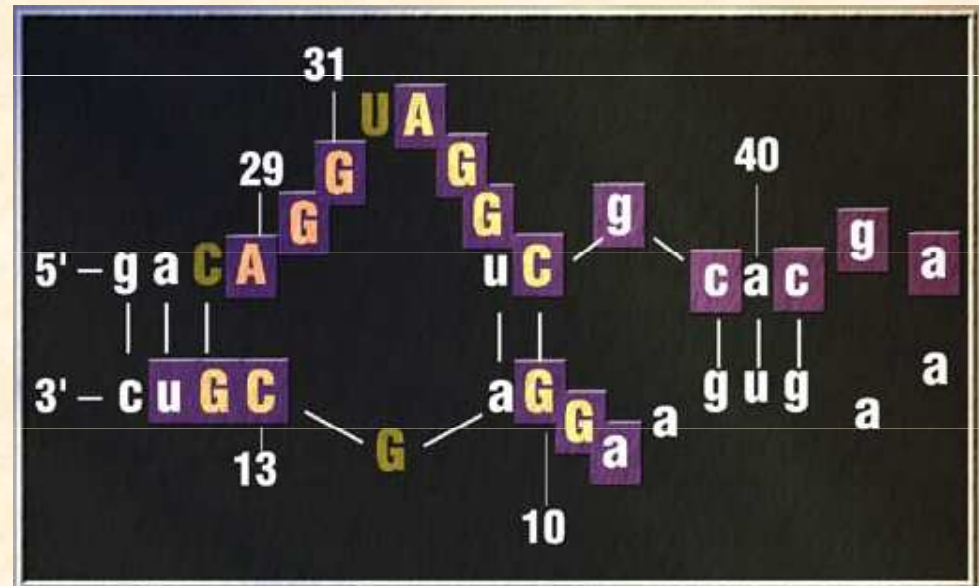


Aptamery a genetický kód

- SELEX experimenty
- aptamerové RNA silně se **váží** na arginin obsahují argininové **kodony** (Schostak)
- na počátku přímé interakce AK a RNA (kodonů)
- složitý translační aparát (tRNA) až pozdějším výdobytkem



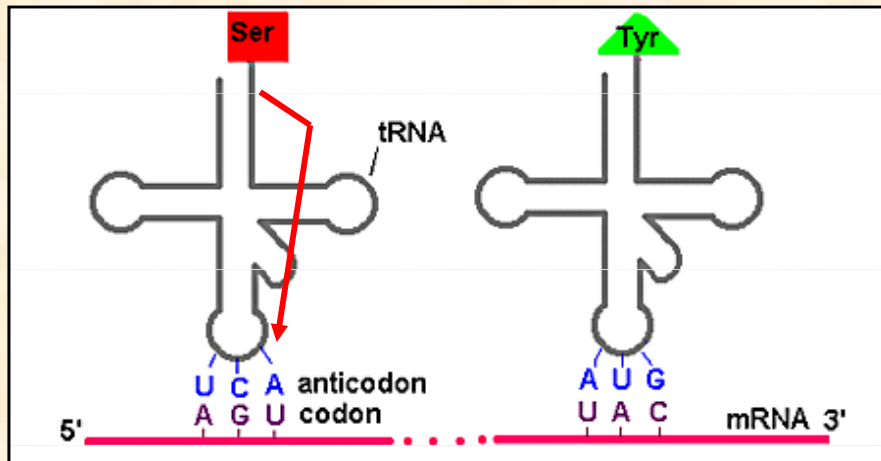
Báze **váží** arginin (zeleně)



Argininové **kodony** (AGG)

Přechod ke kódované syntéze - od operačního ke genetickému kódu

Vznik operačního kódu předcházela vzniku genetického kódu



Bioinformatické studie -
přímá genetická souvislost
operačního a **genetického** kódu

Sekvence dnešních tRNA lze
odvodit z opakovaných spojení,
rekombinací a mutací krátkých
palindromických sekvencí

Antikodony - pocházejí z první
trojice spárovaných bazí v
akceptorové části prvotních
adaptorových RNA

		2nd base in codon				
		U	C	A	G	
1st base in codon	U	Phe Phe Leu Leu	Ser Ser Ser Ser	Tyr Tyr STOP STOP	Cys Cys STOP Trp	U C A G
	C	Leu Leu Leu Leu	Pro Pro Pro Pro	His His Gln Gln	Arg Arg Arg Arg	U C A G
	A	Ile Ile Ile Met	Thr Thr Thr Thr	Asn Asn Lys Lys	Ser Ser Arg Arg	U C A G
	G	Val Val Val Val	Ala Ala Ala Ala	Asp Asp Glu Glu	Gly Gly Gly Gly	U C A G
						3rd base in codon

The Genetic Code

Expanze genetického kódu

První poloha	Druhá poloha				Třetí poloha
	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	term	term	A
	Leu	Ser	term	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

GC model

Nejstarší triplety **GXC** ~ Val, Ala, Asp, Gly
nejčastější AK, abiotická syntéza,
Další vývoj mutační expanzí, adaptivní

AU model

Prakód obsahoval jen báze A,U

První poloha: Mění smysl kódování (aa), nemění povahu aa

Druhá poloha: Mění smysl kódování, Pur/Pur, Pyr/Pyr - nemění povahu aa, Pur/Pyr - mění i povahu aa

Třetí poloha: Nemění smysl kódování, když ano, zachovává chemickou povahu aa

GCU model (Trifonov)

GCX, GXU, XCU

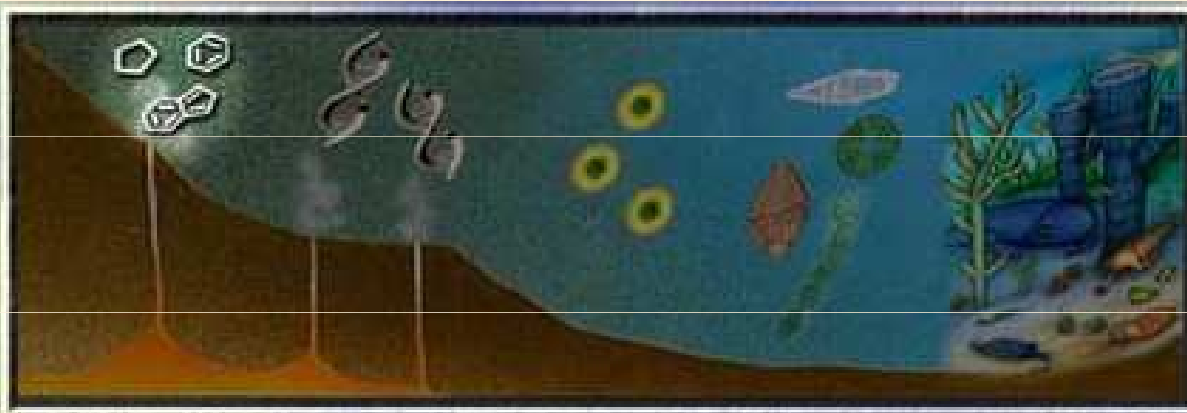
expanze GCT-nemoci

pořadí kodonů v evoluci a stabilita

obě vlákna kódující

glycinové hodiny

Stejné AK v prebiotické syntéze, v prakódu i v meteoritech



Same amino acids in prebiotic syntheses, meteorites

Most common α -amino acids present in code

Some curiously absent from code — maladaptive?

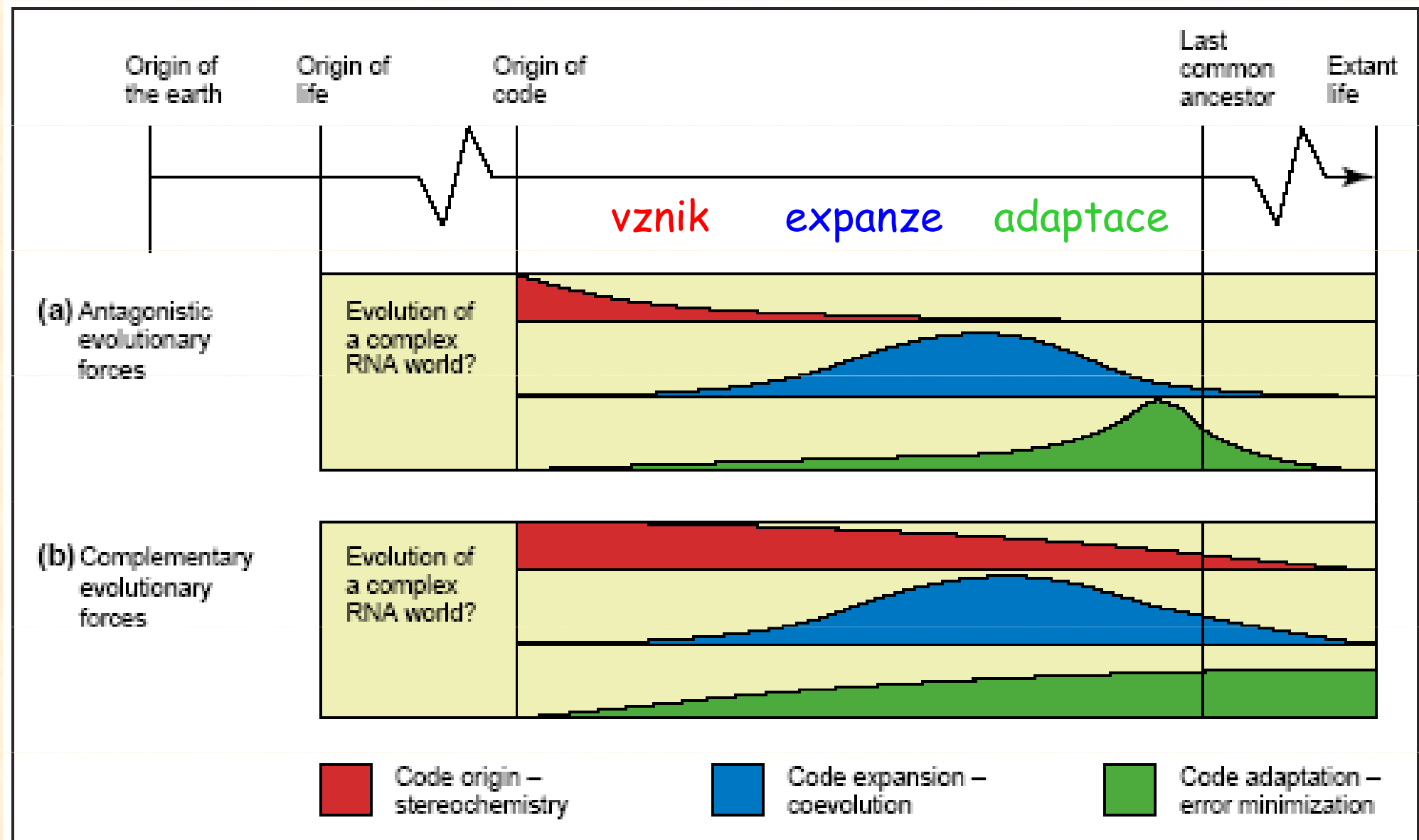
Amino Acid	Gly	Ala	Asp	Glu	Pro	Val	Ser	ILTK	X
Spark Tube	++	++	+	+	+	+	+	+	-
HCN Polymerization	++	++	++	+	?	-	-	-	-
Murchison Meteorite	++	++	+	+	++	+	-	-	-
Nakhla Meteorite	++	++	+	++	-	-	+	-	-



Did prebiotic conditions influence the amino acid repertoire?

Weber & Miller (1981), Wong & Bronskill (1979), Kvenwolden et al. (1970, 1971), Glavin et al. (1999)

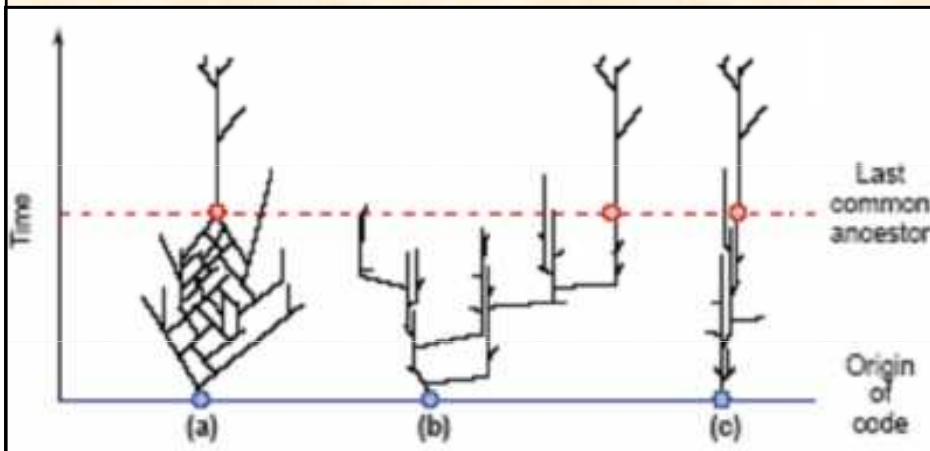
Evolve genetického kódu: Antagonistické nebo komplementární síly?



Odchylky od univerzálního genetického kódu

AK → jiná AK
 AK → nonsense
 Stop → AK

mt kvasinek, obratlovců,
 ostnokožců aj.



(a) Nuclear variants

	U	C	A	G		
U	UUU Phe UUC Phe	UCU Ser UCC Ser	UAU Tyr UAC Tyr	UGU Cys UGC Cys	<p>Gln <i>Diplomonads</i> <i>Acetabularia</i> Some ciliates -Other ciliates</p>	
	UUA Leu UUG Leu	UCA Ser UCG Ser	UAA TER UAG TER	UGA TER UGG Trp		<p>Cys/Trp <i>Euplokea</i>/ <i>Mycoplasma</i> <i>Spiroplasma</i></p>
C	CUU Leu CUC Leu CUA Leu CUG Leu	CCU Pro CCC Pro CCA Pro CCG Pro	CAU His CAC His CAA Gln CAG Gln	CGU Arg CGC Arg CGA Arg CGG Arg		<p>Ser <i>Candida</i> -<i>Saccharomyces</i></p> <p>Nonsense <i>Mycoplasma</i> <i>Spiroplasma</i></p>
A	AUU Ile AUC Ile AUA Ile AUG Met	ACU Thr ACC Thr ACA Thr ACG Thr	AAU Asn AAC Asn AAA Lys AAG Lys	AGU Ser AGC Ser AGA Arg AGG Arg	<p>Nonsense Micrococci</p>	
G	GUU Val GUC Val GUA Val GUG Val	GCU Ala GCC Ala GCA Ala GCG Ala	GAU Asp GAC Asp GAA Glu GAG Glu	GGU Gly GGC Gly GGA Gly GGG Gly		

(b) Mitochondrial variants

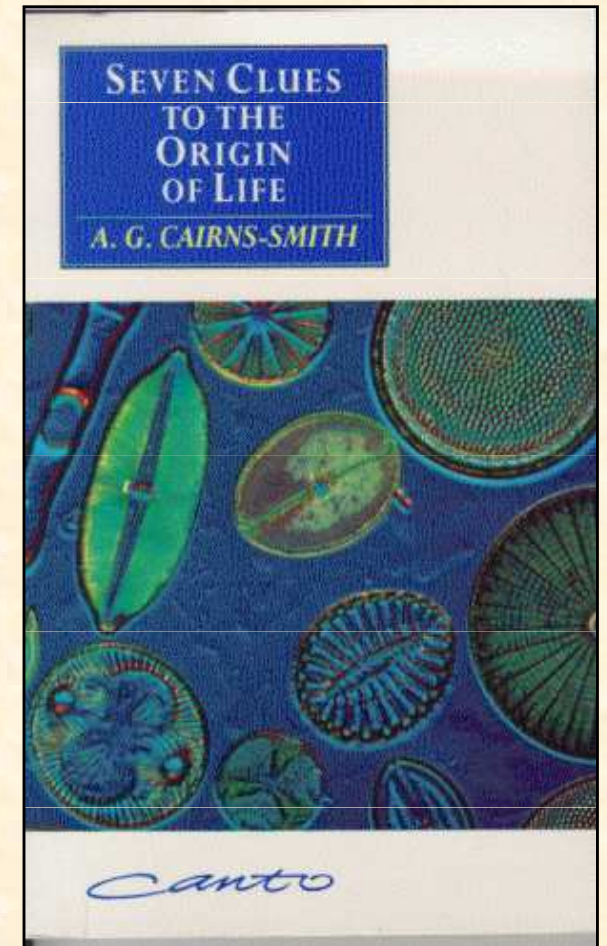
	U	C	A	G		
U	UUU Phe UUC Phe	UCU Ser UCC Ser	UAU Tyr UAC Tyr	UGU Cys UGC Cys	<p>Various <i>Some chlorophytes (UAG = Leu)</i> <i>Some chlorophytes (UAG = Ala)</i> <i>Platyhelminths (UAA = Tyr)</i></p>	
	UUA Leu UUG Leu	UCA Ser UCG Ser	UAA TER UAG TER	UGA TER UGG Trp		<p>Trp Ancestral mitochondrion -<i>Dicystidium</i> -<i>Plants</i> <i>Chondrus crispus</i> Some prymniophytes</p>
C	CUU Leu CUC Leu CUA Leu CUG Leu	CCU Pro CCC Pro CCA Pro CCG Pro	CAU His CAC His CAA Gln CAG Gln	CGU Arg CGC Arg CGA Arg CGG Arg		<p>Nonsense Yeast</p> <p>Nonsense <i>Candida</i> <i>Protobionta (algae)</i></p>
A	AUU Ile AUC Ile AUA Ile AUG Met	ACU Thr ACC Thr ACA Thr ACG Thr	AAU Asn AAC Asn AAA Lys AAG Lys	AGU Ser AGC Ser AGA Arg AGG Arg	<p>Various <i>Bacteria (Ser)</i> -<i>Drosophila</i> (nonsense) -<i>Vertebrates (Gly)</i> -<i>Tunicata (TER)</i></p>	
G	GUU Val GUC Val GUA Val GUG Val	GCU Ala GCC Ala GCA Ala GCG Ala	GAU Asp GAC Asp GAA Glu GAG Glu	GGU Gly GGC Gly GGA Gly GGG Gly	<p>Asn <i>Platyhelminths</i> <i>Echinodermata</i></p>	

Jiný organizační princip: Teorie jílů

Alexander Graham Cairns-Smith (1985):
„Seven Clues to the Origins of Life“

- anorganické křemičitanové látky tvořící krystaly
- replikace
- mutace
- šíření do okolí, sedimentace
- obdoba přírodního výběru

Problém **přechodu** („takeover“) od jílů
k nukleovým kyselinám, teorie není
široce akceptována



Život na bázi křemíku?

Důvody pro křemík:

- vyšší stabilita, možnost života při vyšších teplotách
- ve vesmíru velmi rozšířen
- v periodické tabulce leží pod uhlíkem, podobná chemie
- váže čtyři vodíky (SiH_4 , silan), tvoří polymery (silikony), kde se střídají Si-O (podobně jako C-O tvoří polyacetaly)

Nevýhody:

- je větší a proto hůře tvoří dvojně a trojně vazby
- dlouhé řetězce méně stabilní
- silany jsou velmi reaktivní s vodou

Další prvky a rozpouštědla

Fosfor:

- může tvořit dlouhé polymery
- velmi reaktivní, stabilnější v kombinaci s dusíkem
- P-N vazbu tvoří různé sloučeniny i cyklické

Síra místo kyslíku - některé bakterie

Rozpouštědla:

Čpavek:

- rozpouští většinu organických látek i některé kovy
- normální tlak: kapalný při -79 až -33°C
- při 60 atm: kapalný při -77 až $+98^{\circ}\text{C}$
- podmínky pod povrchem měsíce Titanu