



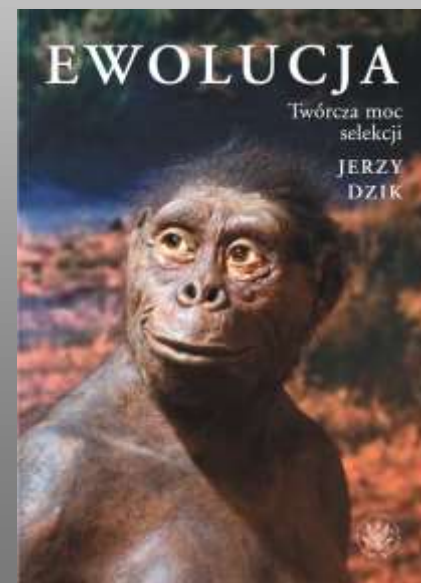
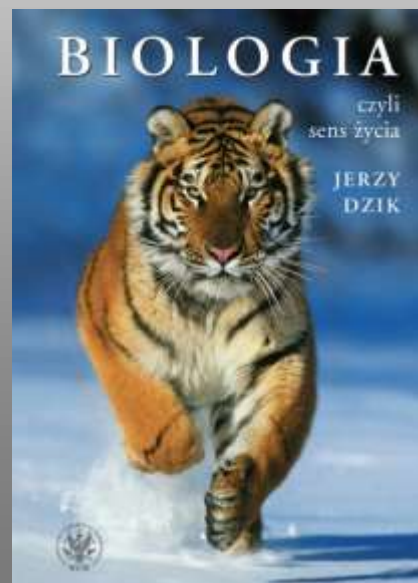
Ewolucja **8.**

BIOGENEZA

Jerzy Dzik

*Instytut Paleobiologii PAN
Instytut Biologii Ewolucyjnej UW*

2022



WIARYGODNOŚĆ

zapisu kopalnego

- zapis ewolucji świata zwierząt udokumentowany mineralnymi szkieletami od 540 mln lat
- bardzo rozmaicie są interpretowane odciski „fauny ediakarskiej” sprzed 580–555
- kontrowersyjna jest przynależność dawniejszych skamieniałości do eukariotów bądź prokariotów

fosfatyfikacja utrwaliła prapoczątkowe struktury komórkowe

fosforyty formacji
Doushantuo, Chiny
600 Ma

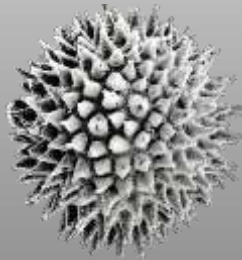
MIKROORGANIZMY

prekambru

- różnorodne cysty wiciowców
- drobnokomórkowe krasnorosty
- wielkokomórkowe embriony?



cysty i/lub phycoma



Distosphaera

Meghystrichosphaeridium

Parapandorina

rzekomy embrion



krasnorosty

Yuan et al. (2002)

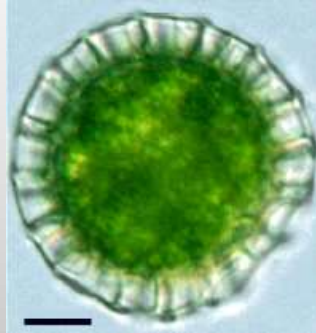
Sarcinophycus



podziały komórek embriona poprzedzają wzrost

EMBRIONY

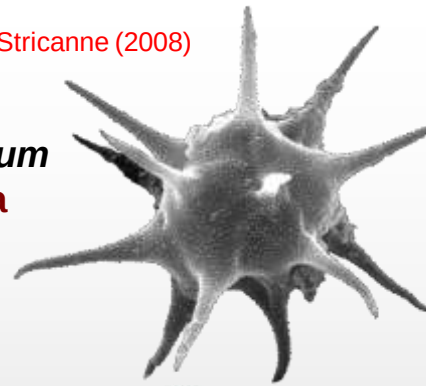
czy zielenice?



zielenica *Trochiscia*
Trebouxiophyceae
dziś

Stricanne (2008)

Micrhystridium
sylur 410 Ma

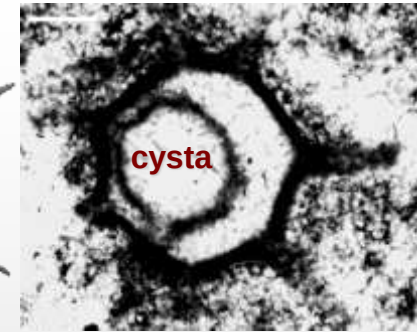


Bailey et al. (2007)

Parapandorina
formacja Doushantuo
600 Ma



Kaźmierczak & Kremer (2009)



Yurtusia
kambr 540 Ma

Shang et al. (2020)

autospor?

- podziały komórek wewnątrz sporopolleninowej otoczki
- dały przetrwalnikowe cysty lub potomne komórki (autospor)

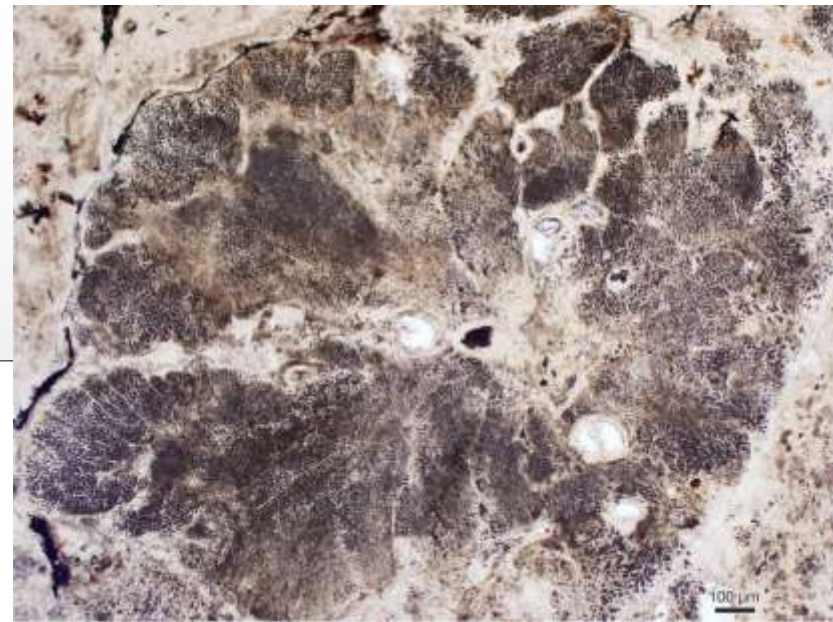
zapis kopalny wskazuje na pierwotność krasnorostów

Ramathallus

KRASNOROSTY

najstarsze

- 1,6 Ga nitkowate krasnorosty?
- oraz pseudoparenchymatyczne plechy z apikalnym wzrostem
- niewątpliwe krasnorosty od 1,2 Ga

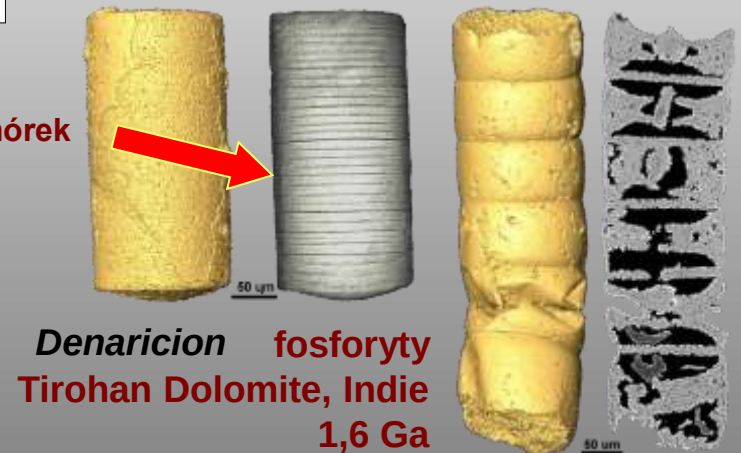


Butterfield (2000)

Bangiomorpha
formacja Hunting, Kanada
1,2 Ga

komórki chwytnikowe

serie po 8 komórek



Denaricion fosforyty
Tirohan Dolomite, Indie
1,6 Ga

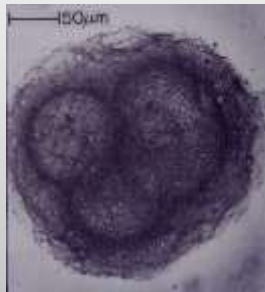
Bengtson et al. (2017)

Rafatazmia

zatem wici późniejsze a od kiedy mejoza?

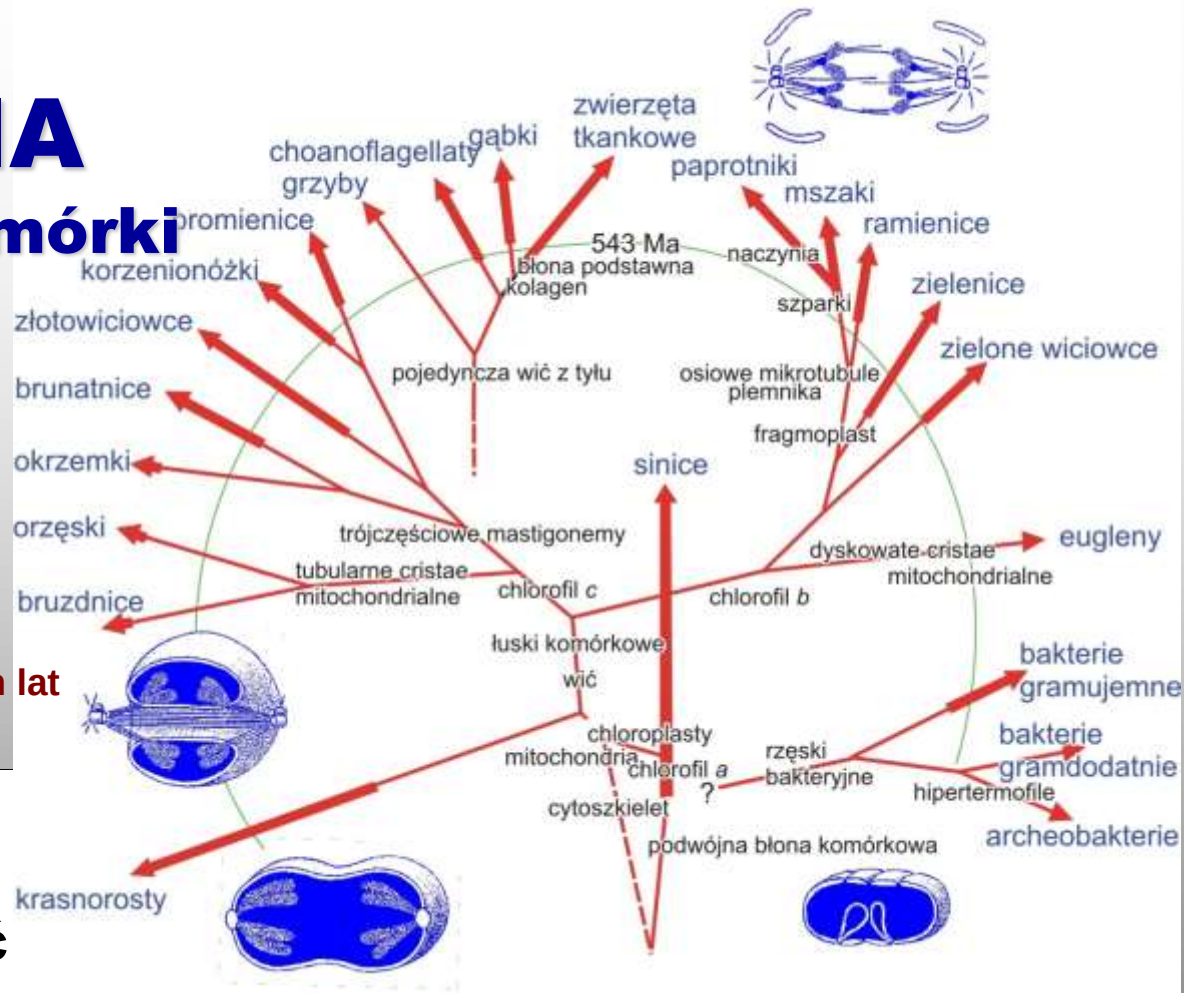
ANATOMIA

pierwotnej komórki



tetrada mejotyczna? 950 mln lat
formacja Lachanda, Syberia

- wspólny przodek eukariotów miał mitochondria i płeć
- być może również chloroplasty



przodkami chloroplastów a może i eukariotów są sinice

UBOCZNY produkt fotolizy wody

sinice 0,8 Ga
formacja Bitter Springs
Australia

heterocysta



Schopf (1980)

- wapienne budowle sinicowe dominowały w świecie prekambu
- heterocysty chronią kompleks nitrogenazy przed tlenem
- i są dowodem jego obecności



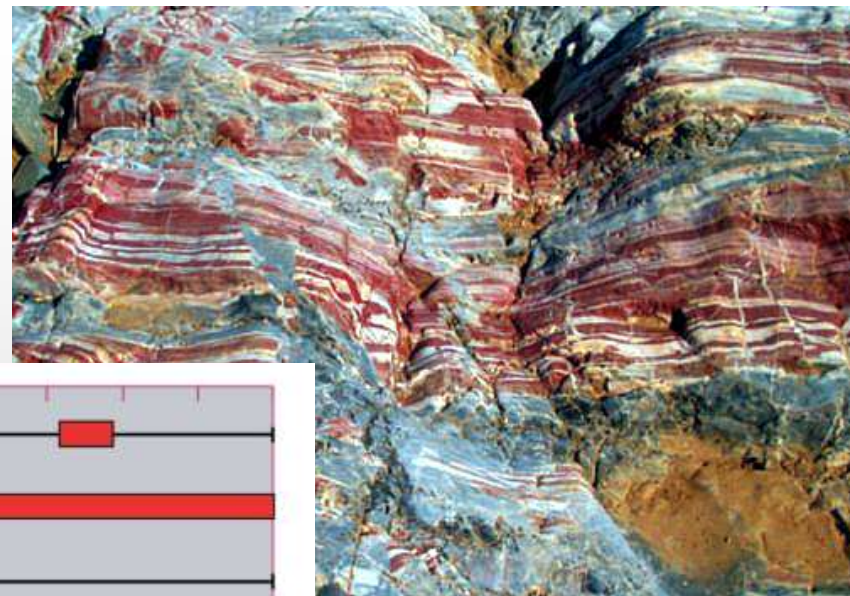
stromatolity 560 Ma
formacja Chataspyt
Syberia

sinice dały atmosferę tlenową i oddychanie

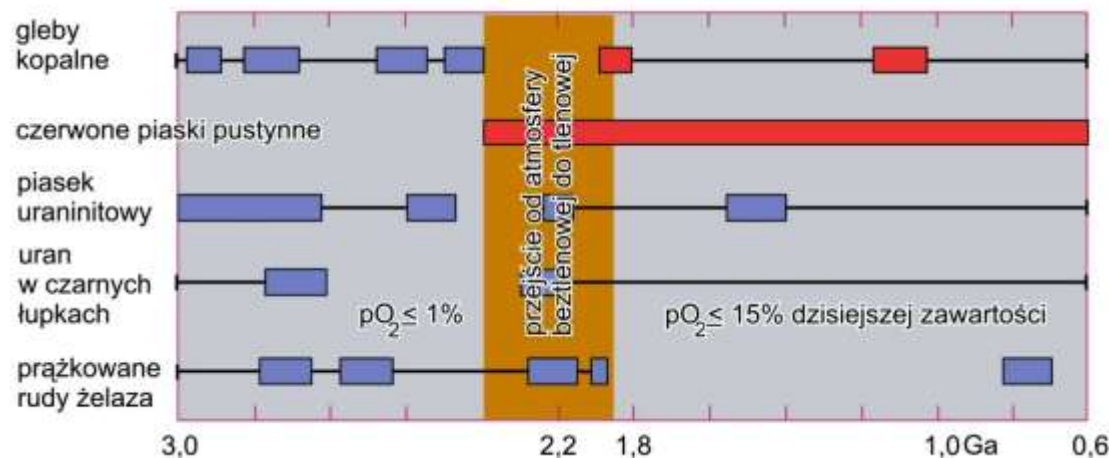


TLEN

w atmosferze

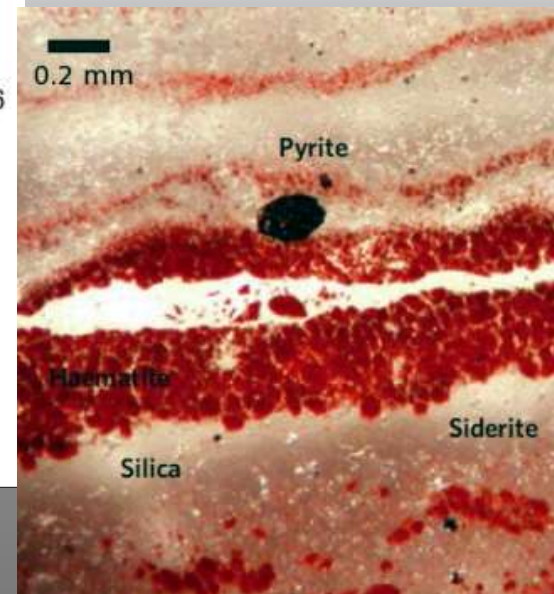


Marble Bar Chert, Australia
3,46 Ga



- przedtem piasek mógł powstawać z minerałów nieodpornych na utlenienie
- zakwity przyczyną wytrącania żelaza
- tlen toksycznym czynnikiem mutagenezy

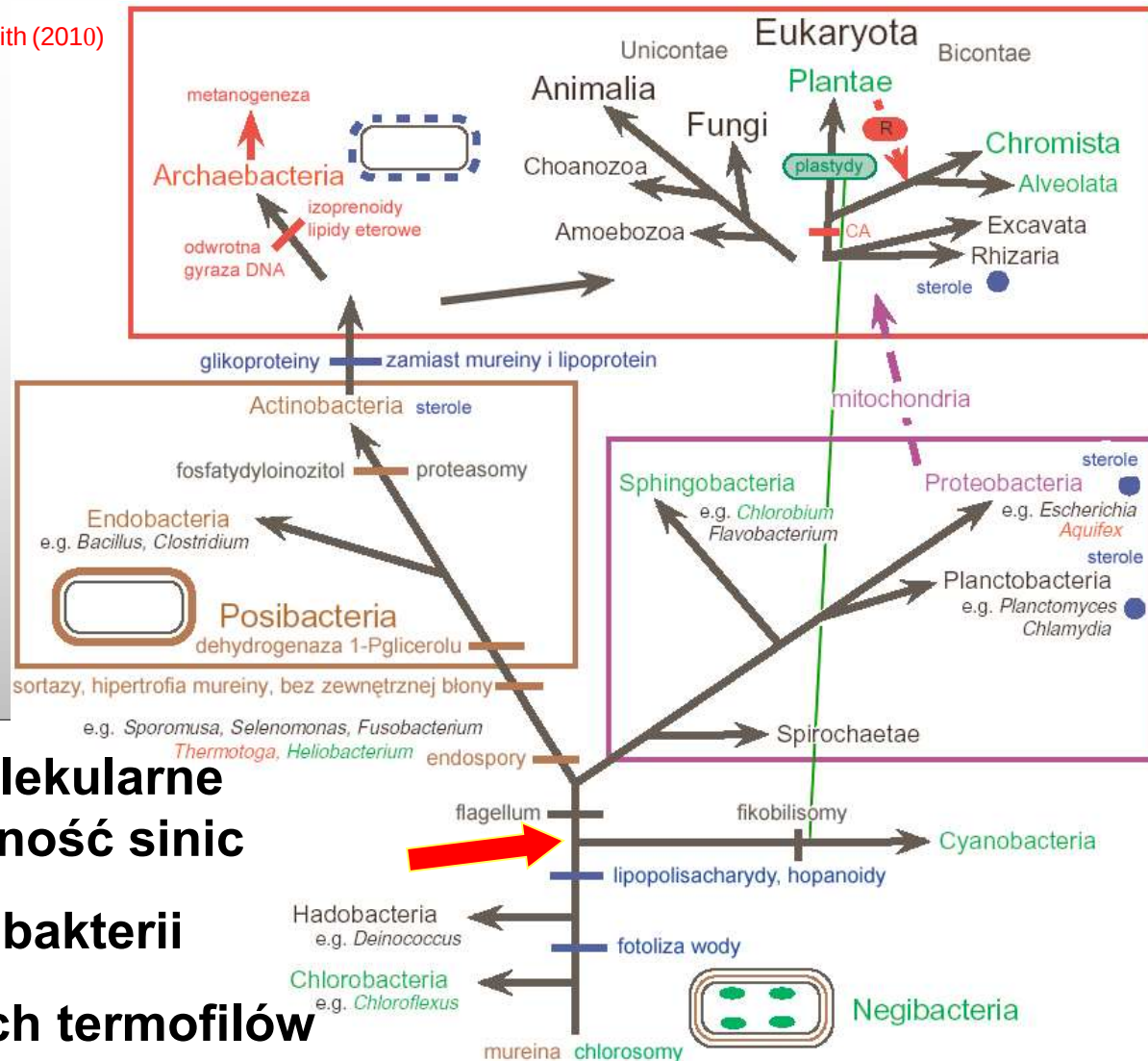
tlen w atmosferze nadał ewolucji nowy kierunek



Rowan & Jefferson (2009)

SKUTKI fotolizy wody

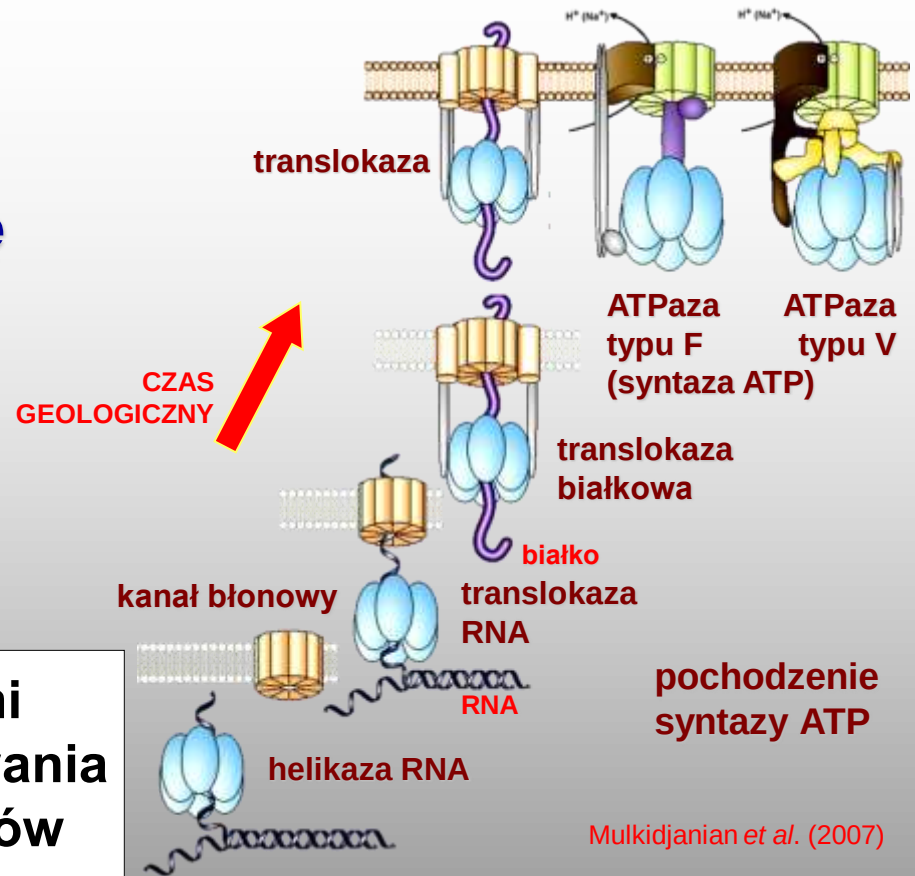
- podobieństwa molekularne wspierają pierwotność sinic
- i wtórność archeobakterii
- nie ma pierwotnych termofilów



dwie błony komórkowe zapewniają rezerwuar energii chemicznej

GRADIENT protonów przez błonę

- błona z kanałami białkowymi dała możliwość magazynowania energii w gradiencie protonów
- rotująca syntaza ATP wykorzystuje tę energię

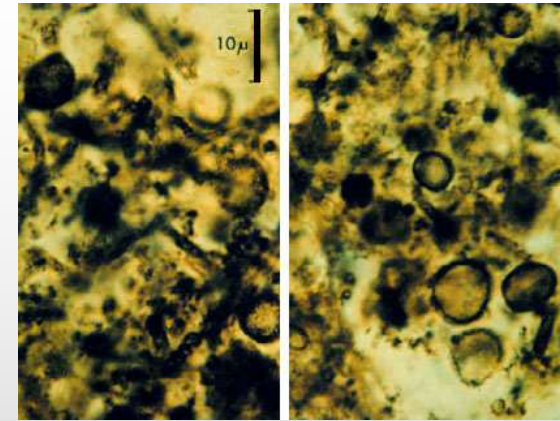


syntaza ATP z prostszych enzymów komórek sprzed LUCA

WŁAŚCIWOŚCI

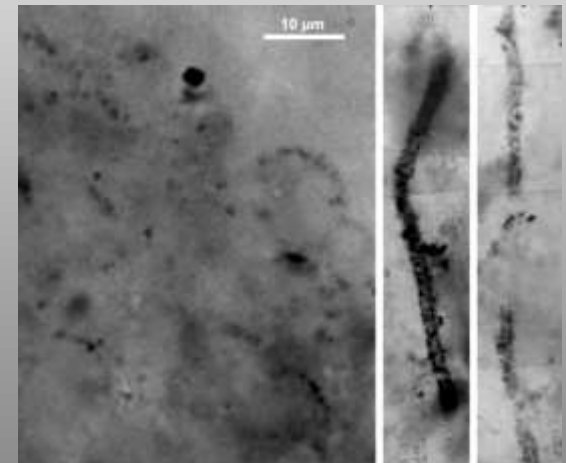
wspólnego przodka (LUCA)

- kataliza przez białka (enzymy)
- ich struktura odczytywana z mRNA
- dziedziczną informację przechowuje DNA
- wszystkie posługują się takim samym (prawie) kodem genetycznym
- wewnątrz lipidowej błony (komórki)



Gunflint, Kanada **1,9 Ga**

Campbellrand, RPA **2,5 Ga**



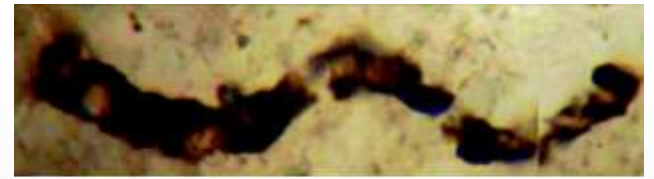
Altermann & Kaźmierczak (2003)

skamieniałe ściany komórkowe nie poprzedzają atmosfery tlenowej

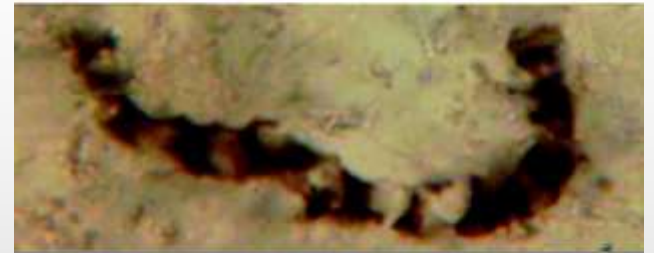
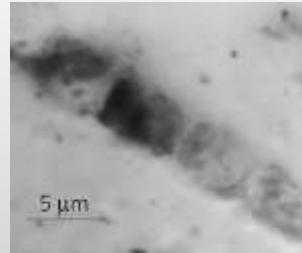
PSEUDOFOSYLIA

archaiku

Schopf (2006)



Marshall et al. (2011)



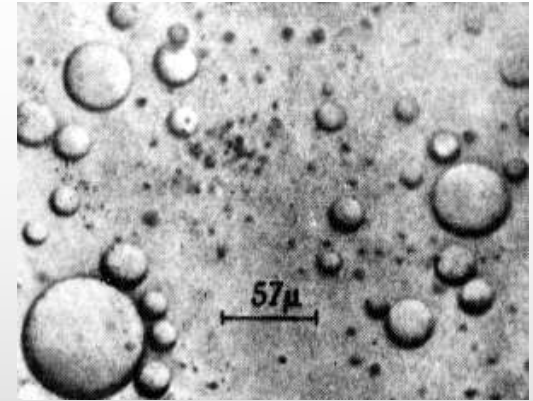
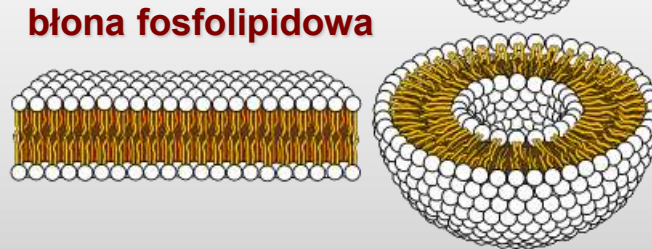
- niewątpliwe skamieniałości od 2,0 Ga
- starsze to artefakty – identyczne struktury znajdowane są w hydrotermalnych skałach o toksycznym składzie (chyba, że *hot vents*)
- wzbogacenie w ^{12}C większe w procesach abiotycznych niż w cyklu Calvinia

pseudofosylia (pęknięcia kwarcu wypełnione hematytom)

**3,4 Ga krzemień Apex
Australia**

nie wiadomo więc, kiedy powstała błona komórkowa

KOACERWATY a błona komórkowa



koacerwat

Bungenberg de Jong, H.G. & Kruyt, H.R. 1929.
Coacervation (partial miscibility in colloid systems).

Proceedings of the Royal Academy of Sciences, Amsterdam 32, 849-856.

- pęcherzyki koloidów przypominają liposomy
- idea adaptowana przez A.I. Oparina dla uzasadnienia spontanicznej genezy komórki
- ale bez białkowych kanałów błona lipidowa jest nieprzepuszczalna dla substratów życia



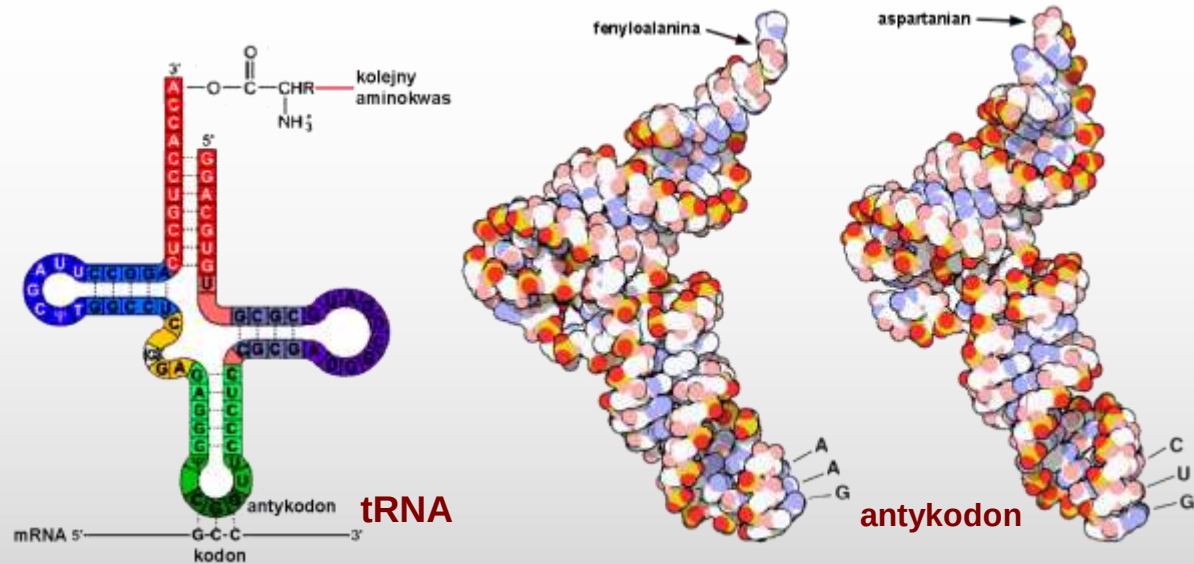
Aleksandr I. Oparin (1894-1980)

Опарин, А. И. 1924. Происхождение жизни.

zatem nie mogło być komórki przed powstaniem translacji

GENEZA

translacji



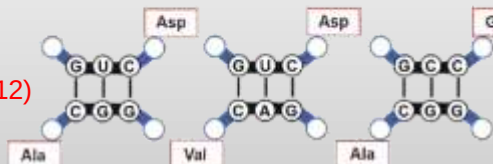
- synteza białek wymaga nośnika aminokwasów – tRNA
- zdolnego do odczytania informacji zapisanej na łańcuchu nukleotydowym – mRNA
- a także katalizy przy udziale rybosomów – rRNA
- DNA powstało jako dodatkowy nośnik dziedziczności dla zapewnienia trwałości przekazu

kluczowym aspektem translacji jest kod genetyczny

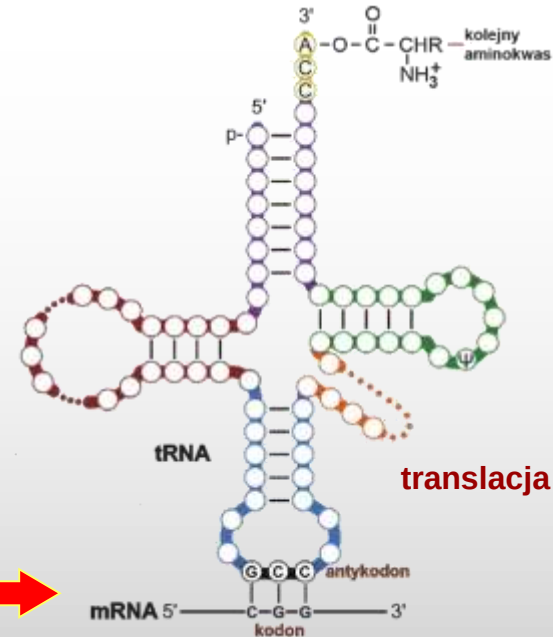
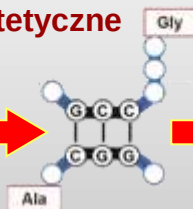
POWSTANIE kodu genetycznego

komplementarne pary antykodonów
dla substratów reakcji Sticklanda

de Vladar (2012)

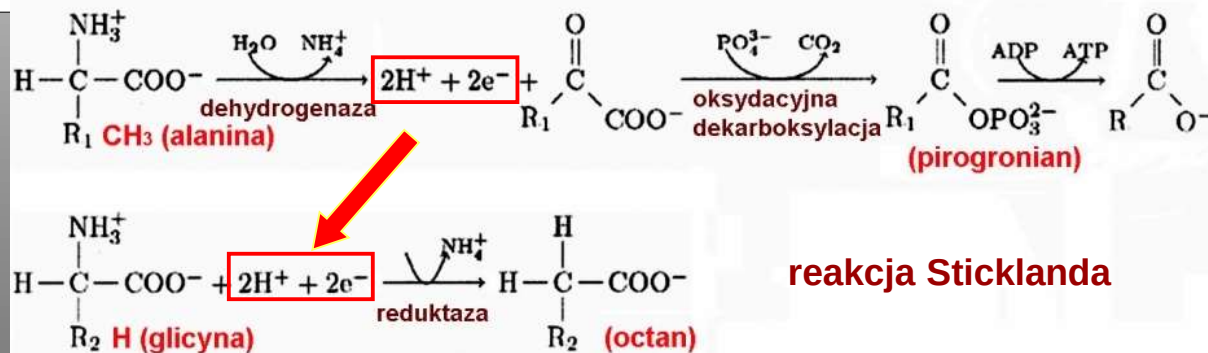


stadium
hipotetyczne



translacja

- aminokwasy pierwotnym źródłem energii (dla ATP)
- reakcja fermentacji Sticklanda par aminokwasów: jeden utleniany (np. Ala), drugi redukowany (Gly)



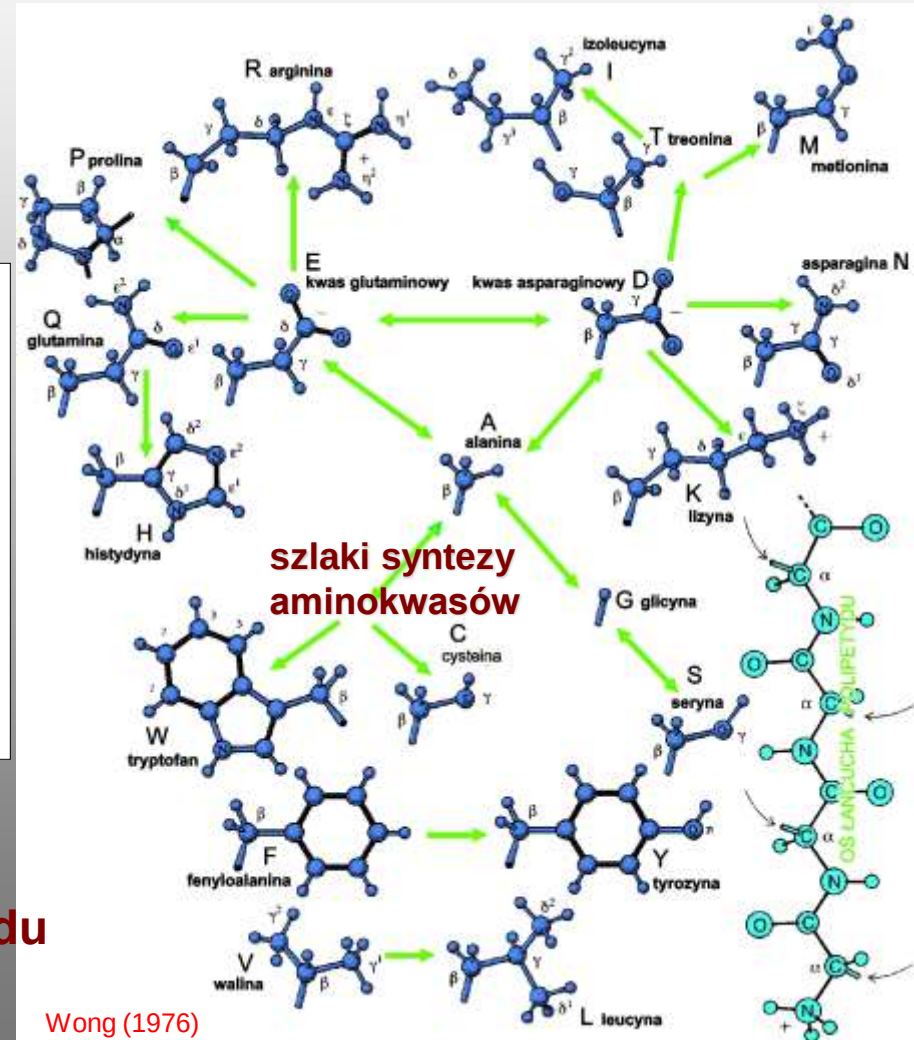
reakcja Sticklanda

czyżby kod genetyczny powstał przed białkami?

POWIĄZANIA aminokwasów

- najprostsze w centrum szlaków metabolicznych
- sugeruje to następstwo ich wprowadzania w ewolucji
- nieliczne zapewne później i niezależnie

podobnie układają się triplety kodu



EWOLUCJA

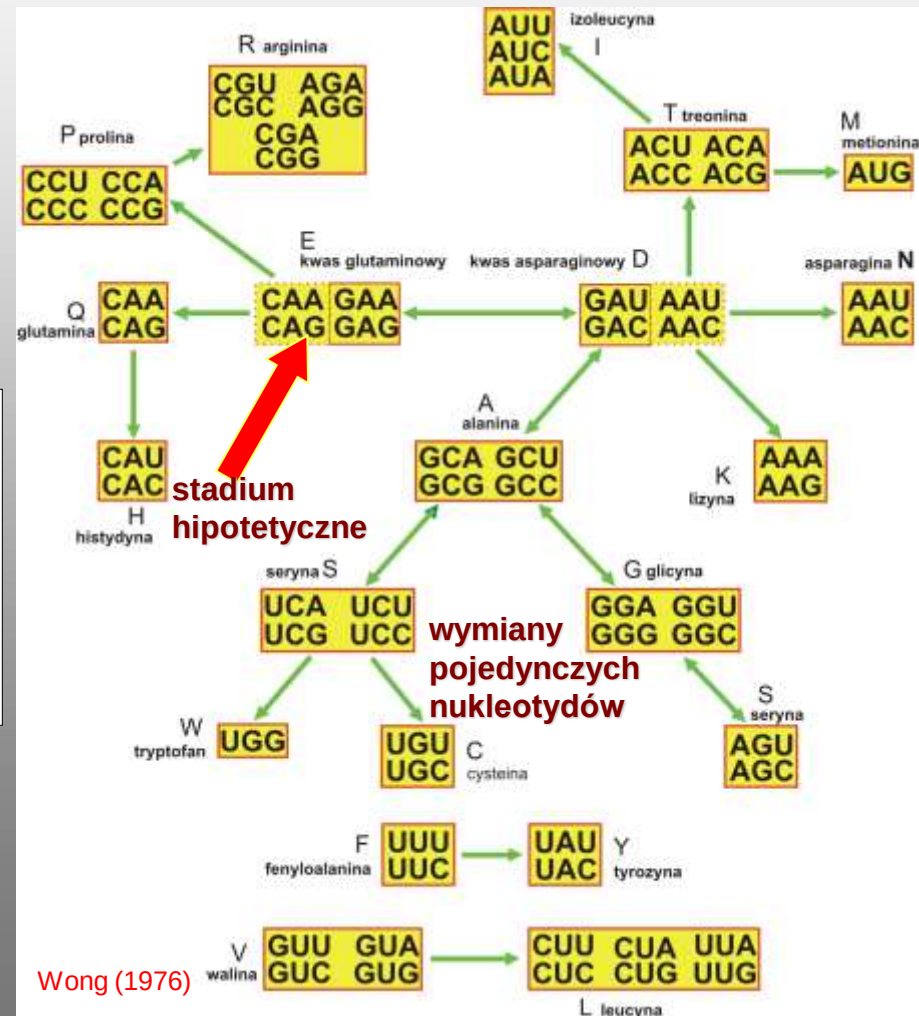
tripletów kodu genetycznego

Jeffrey Tze-fei Wong (1937-)



- ciąg powiązań z wymianą pojedynczych "liter" kodu
- wystarcza wprowadzić kilka stadiów hipotetycznych

zadziwiająca zgodność

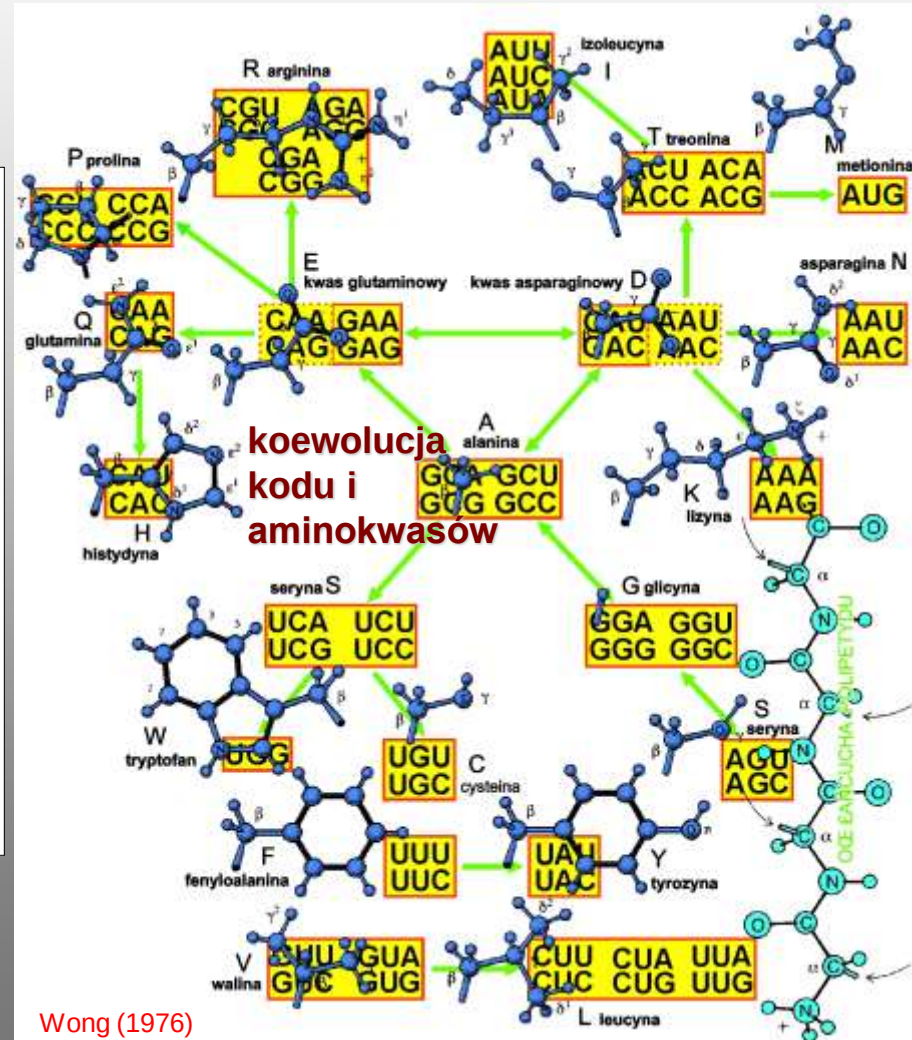


KOEWOŁUCJA

kodu genetycznego i aminokwasów

- 1976 Jeffrey Tze-fei Wong: podobieństwa liter kodu nakładają się na powiązania między aminokwasami
- na początku było zbyt mało rodzajów aminokwasów do syntezy dobrych enzymów
- nie białka były więc pierwszymi katalizatorami

zatem co?

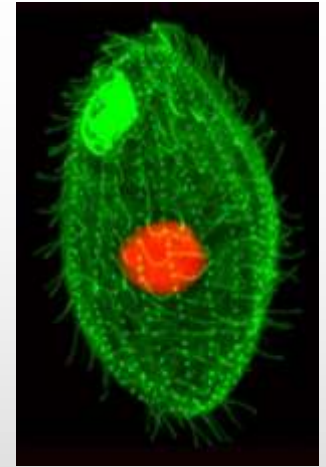


RYBOZYMY

katalityczne RNA



Thomas R. Cech (1947-)
1982 odkrycie katalitycznego RNA



Tetrahymena modelowy orzęsek

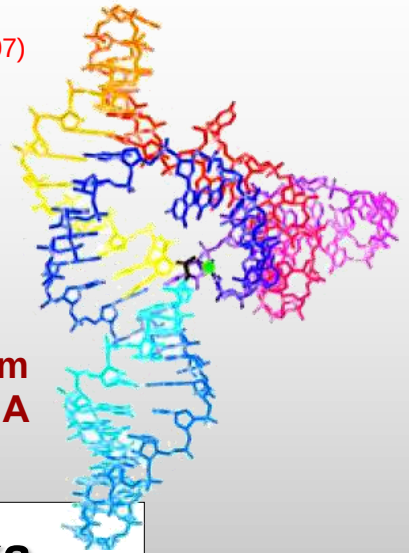
- **splicing rybosomów *Tetrahymena* autokatalizowany (a więc przez RNA) bez enzymów**
- **stopniowo coraz więcej przykładów katalitycznych i regulacyjnych funkcji RNA**

niebywałe uproszczenie koncepcji życia!

KATALIZA

powielania bez enzymów

Robertson & Scott (2007)



sztucznie wyselekcjonowany rybozym
katalizujący powielanie RNA

- RNA może wypełniać równocześnie rolę nośnika dziedziczności i katalizatora (rybozymu)
- zatem udział białek w procesach życia niekonieczny
- życie jest możliwe bez kodu genetycznego

nie było potrzeby stwarzania życia od razu w całej jego złożoności

PRAWDOPODOBIEŃSTWO

przypadkowego powstania życia

- **prawdopodobieństwo przypadkowego powstania peptydu ze 100 aminokwasów wynosi 10^{-130}**
- **a jego układu z polinukleotydem – 10^{-330}**
- **1969 Ilya Prigogine: samoorganizacja (struktury dysypatywne) – w niezrównoważonym układzie otwartym przy stałym dopływie energii**



Ilya Prigogine
Илья Р. Пригожин (1917-2003)

zbyt złożone pierwsze układy żywe byłyby zresztą nietrwałe

NIETRWAŁOŚĆ

układów autokatalitycznych



Manfred Eigen (1927-2019)

1971 koncepcja hipercykli, jako krzyżowego łączenia układów



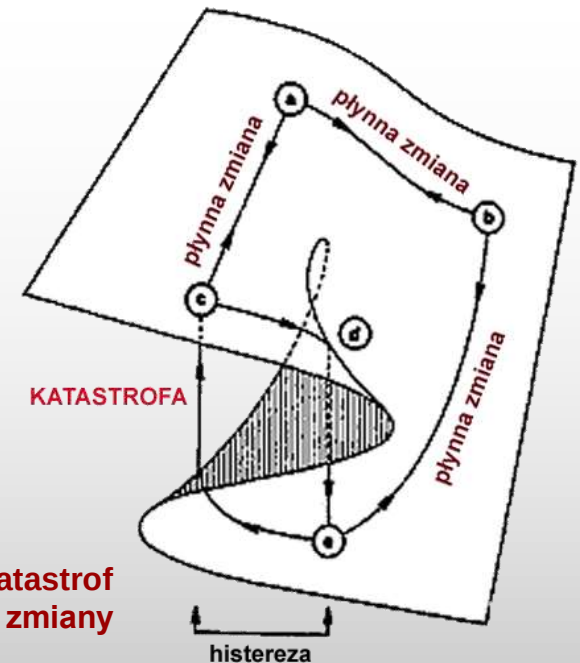
- przy niskiej efektywności autokatalizy i dziedziczenia nie ma czasu na ewolucję
- układ rozpadnie się, zanim zadziała dobór; złożoność zwiększa prawdopodobieństwo rozpadu
- krzyżowa kataliza miałaby ograniczać konkurencję między krótkimi cyklami

niezbędna właściwa proporcja między mutagenezą a selekcją

ZAGROŻENIE

katastrofą Eigena

graficzne przedstawienie teorii katastrof
jako nieciągły skutek płynnej zmiany

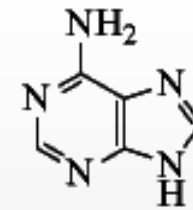
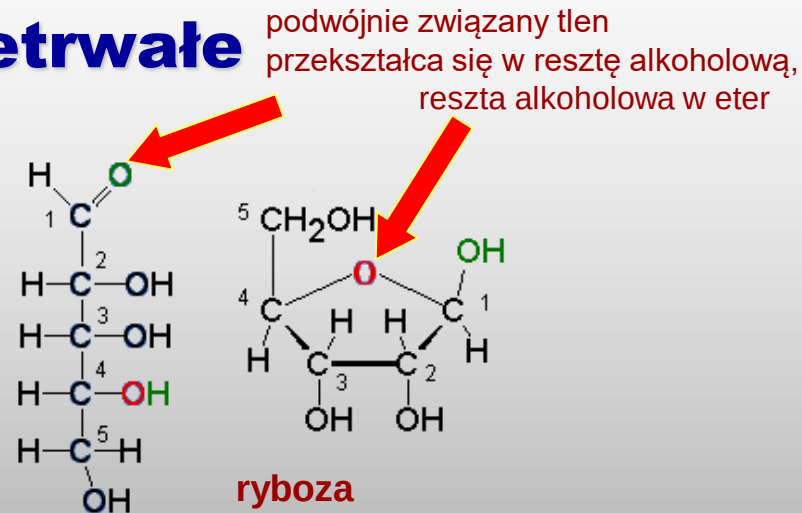


- zbyt częste mutacje uniemożliwiają trwałe wprowadzanie informacji funkcjonalnej drogą selekcji
- po przekroczeniu granic dopuszczalnej intensywności mutagenezy nastąpić musi "katastrofa Eigena"

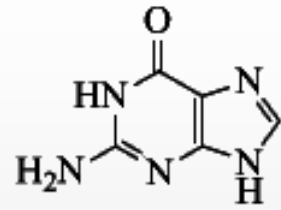
niestabilnej rybozy nie mogło być w pierwszym nośniku dziedziczności

MOLEKUŁY

życia nietrwałe



adenina **A**



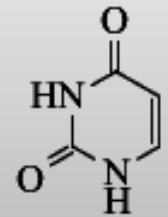
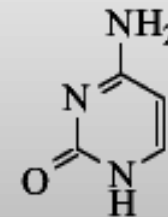
guanina **G**

puryny

cytozyna **C**

pirymidyny

uracyl **U**



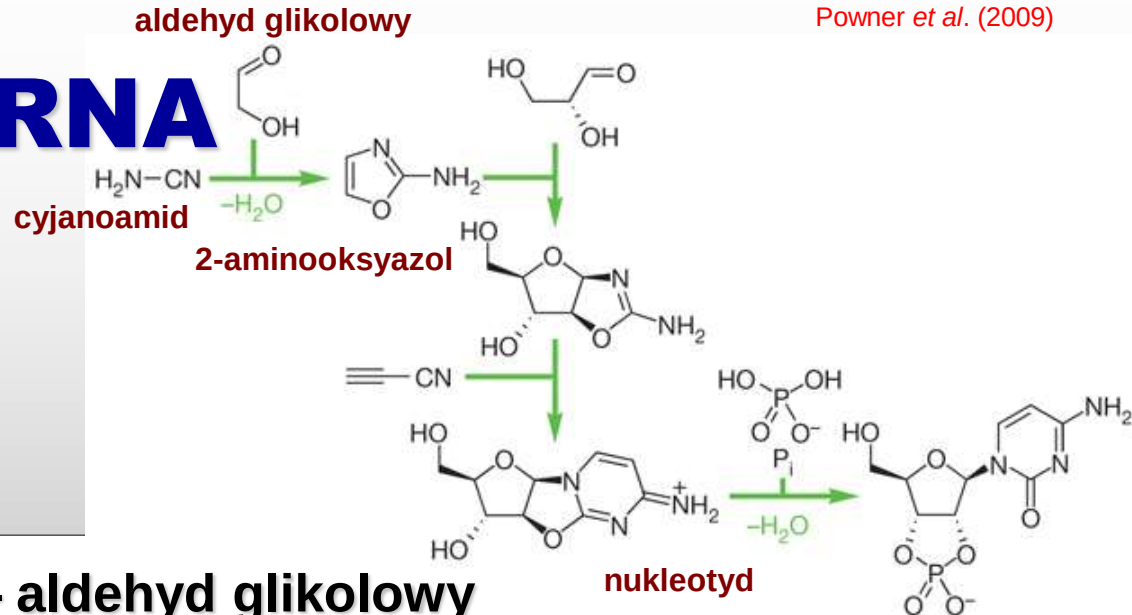
- mało efektywna autokataliza biogenezy wymagała czasu
- dla trwałości DNA uracyl zastąpiony przez tyminę
- ryboza jest nietrwała nawet jako cykliczny izomer

ale ryboza nie jest niezbędna do syntezy nukleotydów

SYNTEZA RNA

bez rybozy

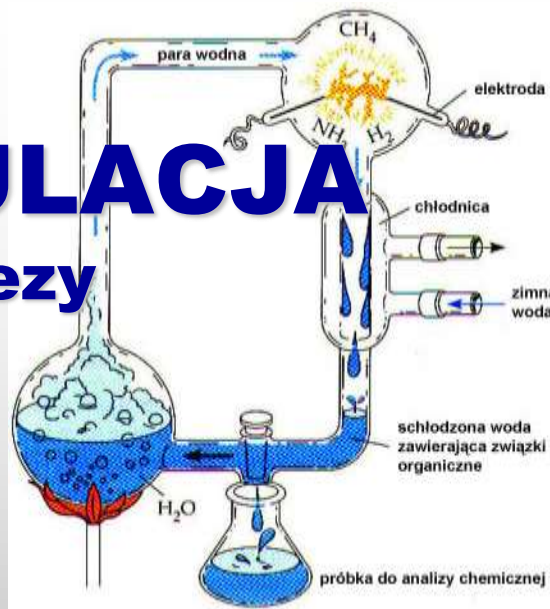
Powner et al. (2009)



- najprostszy cukier – aldehyd glikolowy
- w połączeniu z cyjanoamidem
- buforowany i katalizowany przez jony fosforanowe
- daje związek, który w sieci reakcji może utworzyć nukleotyd pirymidynowy

UV i spontaniczna destylacja mogły oczyszczać i koncentrować „zupę”

SYMULACJA abiogenezy



Stanley L. Miller (1930-2007)
1952 symulacja „pierwotnego bulionu”

- aminokwasy, pentozy i puryny mogą powstawać samorzutnie
- proste związki organiczne mogą powstawać spontanicznie w warunkach redukcyjnych, wysokiej temperatury i ciśnienia

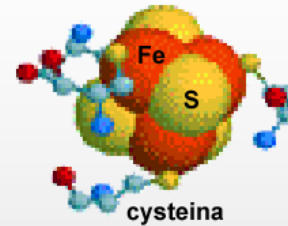
Friedrich Wöhler (1800-1882)
1828 synteza mocznika



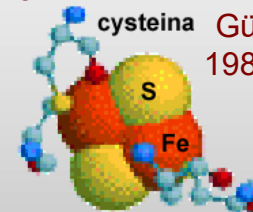
ale procesy życiowe wymagają uporządkowania

ŻYCIE na podłożu mineralnym

kompleksy FeS z cysteiną w enzymach
beztlenowego transportu elektronów



Günther Wächtershäuser (1938-)
1987 koncepcja „pierwotnej pizzy”

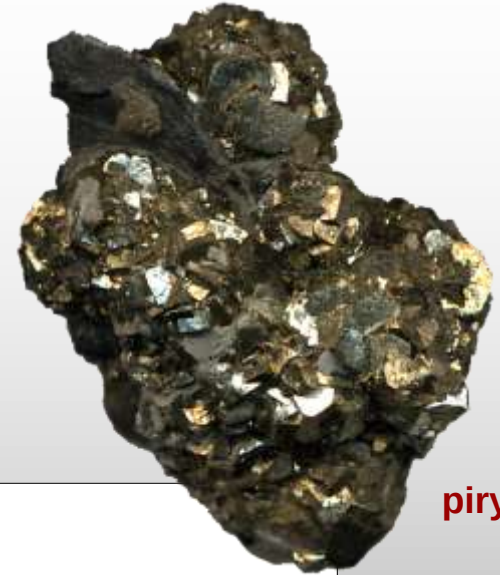


- substraty pierwotnego życia musiały być skoncentrowane
- absorpcja na powierzchni mineralnego kryształu ułatwia polimeryzację i uporządkowuje przestrzennie procesy
- być może były to glinokrzemiany (minerały ilaste), ale
- piryt (FeS_2) daje też możliwość pozyskania źródła energii

biologiczna ważność siarki (tioestry) i żelaza potwierdza rolę pirytu

CHEMOAUTOTROFIA

przedkomórkowa



piryt

- pierwszym źródłem energii do procesów biologicznych mogła być synteza pirytu
- $\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS}_2 + \text{H}_2$
- $\text{HCO}_3^- + \text{FeS} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{HCOO}^- + \text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- bilans energetyczny reakcji dodatni $\Delta G = -37,1 \text{ kJ/mol}$
- reakcja wymaga katalizy

jak dawno temu miało to być?

DATOWANIE

zdarzeń geologicznych

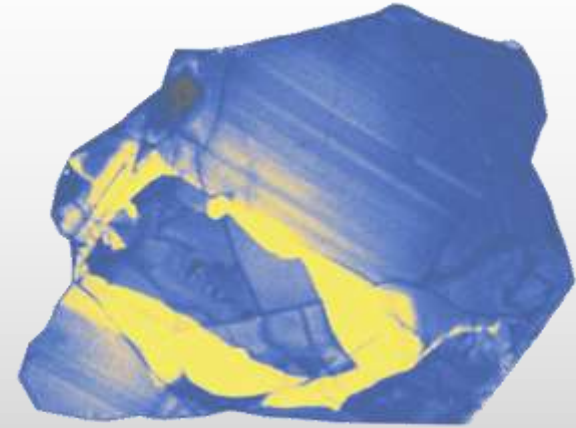


- tempo rozpadu pierwiastków promieniotwórczych umożliwia określenie wieku warstw skalnych
- np. przy znanym udziale ^{14}C w przyrodzie i okresie połowicznego rozpadu 5730 lat, datowanie do 60 ka
- ^{238}U (rozpad 4510 ka) uwieczniony w krystalizujących w magmie cyrkonach ZrSiO_4 do całej historii Ziemi
- najstarsze cyrkony (redeponowane) – 4,3 Ga
- najstarsze skały osadzone z wody – 3,8 Ga

w cyrkonach zapisana jest też informacja o środowisku

ŚRODOWISKO początków życia

najstarszy cyrkon
Jack Hills Australia
4,4 Ga
(termoluminescencja)



- stopień utlenienia ceru ($\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$) w kryształach cyrkonu 4,4 Ga wskazuje na utlenienie hydrosfery takie jak dziś
- choć bez udziału wolnego tlenu
- głównymi składnikami atmosfery były więc CO_2 , SO_2 i N_2

życie możliwe tylko w roztworze ciekłej wody

Sleep & Hessler (2006)

POCZĄTKI hydrosfery

konglomerat
z otoczkami krzemienia
grupa Moodies, Afryka Płd.
3,2 Ga

- otoczaki (z wody) w konglomeratach od 3,2 Ga
- ocean kwaśny – metale w enzymach tworzą siarczki rozpuszczalne w takim środowisku (Fe, Mn, Zn, Co, Ni)
- inne siarczki (Pb, Hg, Sn, As, Sb, Bi, Cd, Cu, Ag) są truciznami; miedź dopiero u organizmów tlenowych

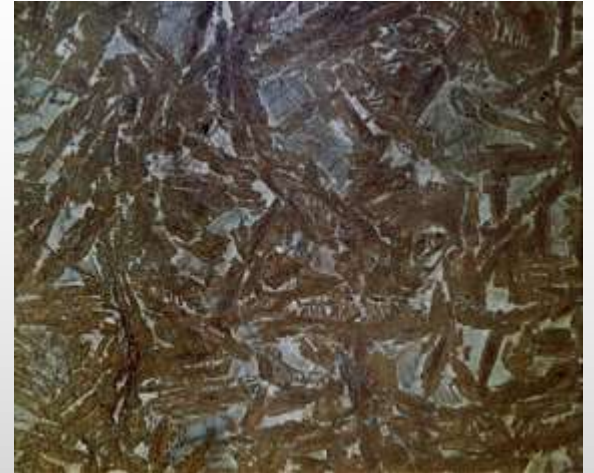
być może życie powstawało w warunkach nieaktualistycznych



ZIEMIA

bez kontynentów

zmetamorfizowany komatyt
trudno się topi, bo dużo Mg



- pierwsze stromatolity hydrotermalne
- lawy komatytowe (topnienie 1700°C – bazalt 1200°C) dowodzą intensywnego dryfu kontynentów
- późniejsze stygnięcie wyniosło kontynenty do góry
- wraz z diamentami powstałymi na głębokości 120 km

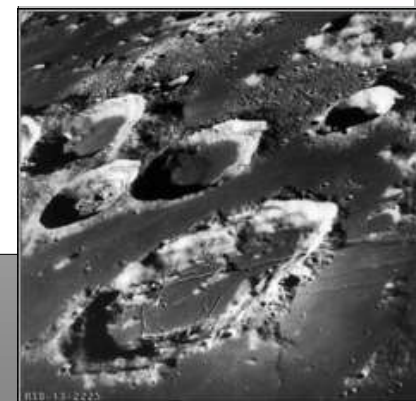
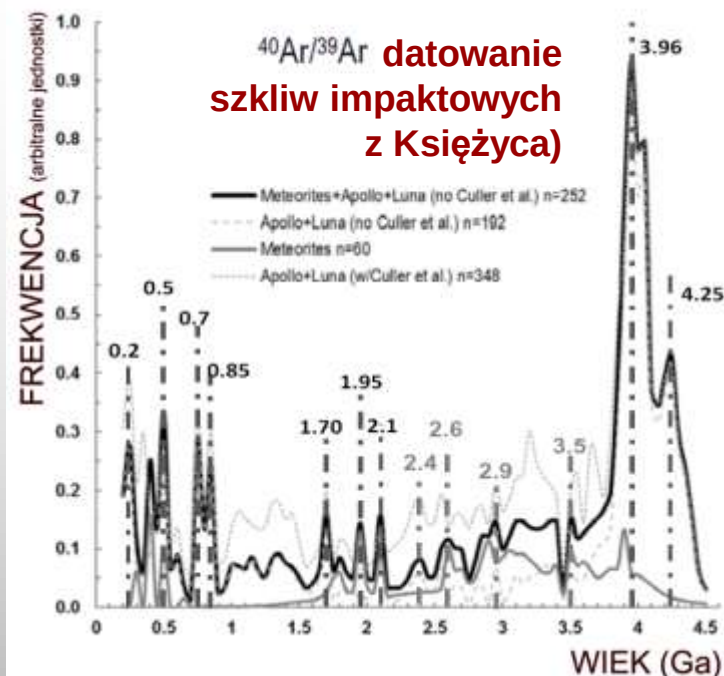
wiek meteorytów ogranicza możliwy wiek Ziemi do 4,5 mld lat

GRANICA

zapisu kopalnego



Gerald J. Wasserburg (1927-2016)
1971 koncepcja *late heavy bombardment*



- datowania kraterów na Księżycu dowodzą intensywnego bombardowania aż do 3,8 mld lat
- życie na Ziemi nie może być dawniejsze

wcześniejsze zdarzenia wymazane z zapisu

EWOLUCJA ŻYCIA NA ZIEMI

zapis kopalny

- skamieniałości dokumentują tylko ewolucję z tlenem
- dane geologiczne sporne
- teoria pochodzenia życia wciąż niekompletna

