

Powstanie i ewolucja informacji genetycznej

Literatura

- Brown, r. 18

(A)biogeneza

- Ewolucja jest właściwością organizmów żywych, mających zdolność replikacji
 - Życie = ewolucja
- Powstanie życia z materii nieożywionej nie było zjawiskiem ewolucyjnym
 - trudności z wyjaśnieniem abiogenezy nie mogą być traktowane jako zarzut wobec teorii ewolucji
 - właściwe dziedziny:
 - fizyka (teoria złożoności, teoria samoorganizacji, termodynamika)
 - chemia
 - planetologia

Co to jest “życie”

- *self-sustaining chemical system capable of Darwinian evolution* (1994, NASA)
- samopodtrzymujący się system chemiczny zdolny do ewolucji Darwinowskiej

Co to jest “życie”

- samopodtrzymujący się system chemiczny zdolny do ewolucji Darwinowskiej
- utrzymywanie organizacji (uporządkowania) wbrew gradientowi entropii, dzięki wykorzystaniu energii z zewnątrz - **metabolizm**

Co to jest “życie”

- samopodtrzymujący się system chemiczny zdolny do ewolucji Darwinowskiej
- struktura złożona z cząsteczek chemicznych

Co to jest “życie”

- samopodtrzymujący się system chemiczny zdolny do ewolucji Darwinowskiej
- replikacja informacji zapewnia zdolność do ewolucji
- replikacja generuje zmienność
- warianty w puli zmienności mają różne dostosowanie

Czym jest życie?

- Struktura
- Metabolizm
- Informacja (replikacja)

Czas i scena

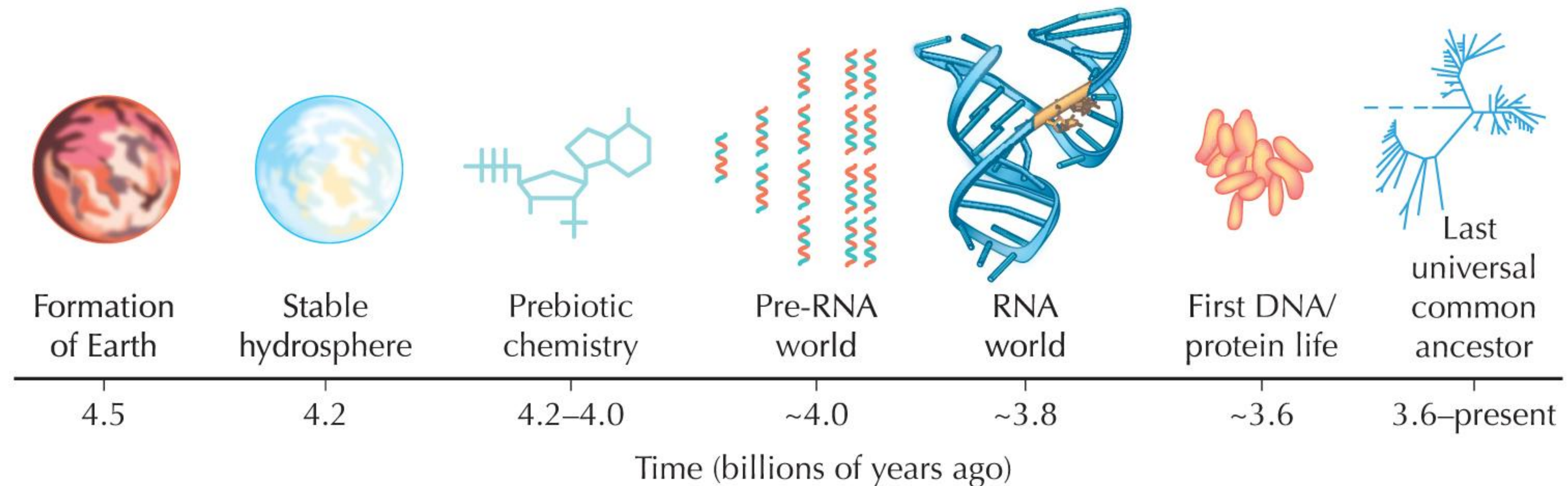


FIGURE 4.4. Steps in the origin of life.

4.4, modified from Joyce G.F., *Nature* **418**: 214–221, © 2002 Macmillan, www.nature.com

Evolution © 2007 Cold Spring Harbor Laboratory Press

Istnieją też koncepcje umieszczające część z tych etapów poza Ziemią

Co było najpierw?

- Metabolizm (Oparin, Dyson)
 - Zależny od informacji genetycznej (kodowane w DNA enzymy białkowe)
- Replikacja (Eigen)
 - Zależna od metabolizmu (replikacja DNA zależna od białek)



Etap progenota

- **Powstanie informacji**

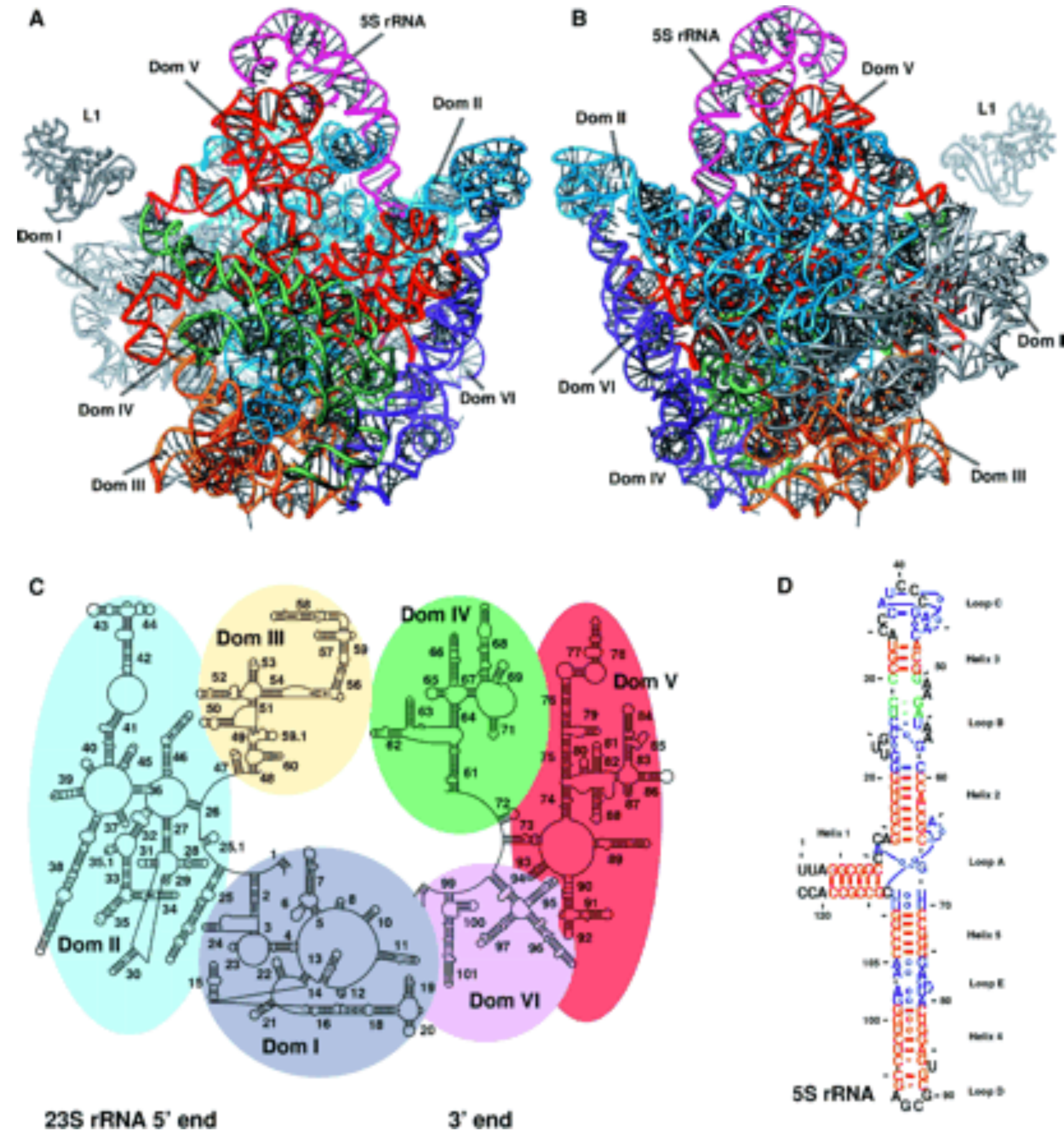
- kluczowe powstanie zdolności (samo)replikacji
- powiązanie genotypu z fenotypem – możliwość działania doboru
 - progenota

- **Powstanie metabolizmu**

- kluczowe powstanie samoorganizującej się sieci metabolicznej
- powielanie struktury nie na zasadzie replikacji matrycowej
- replikacja “wynaleziona” później

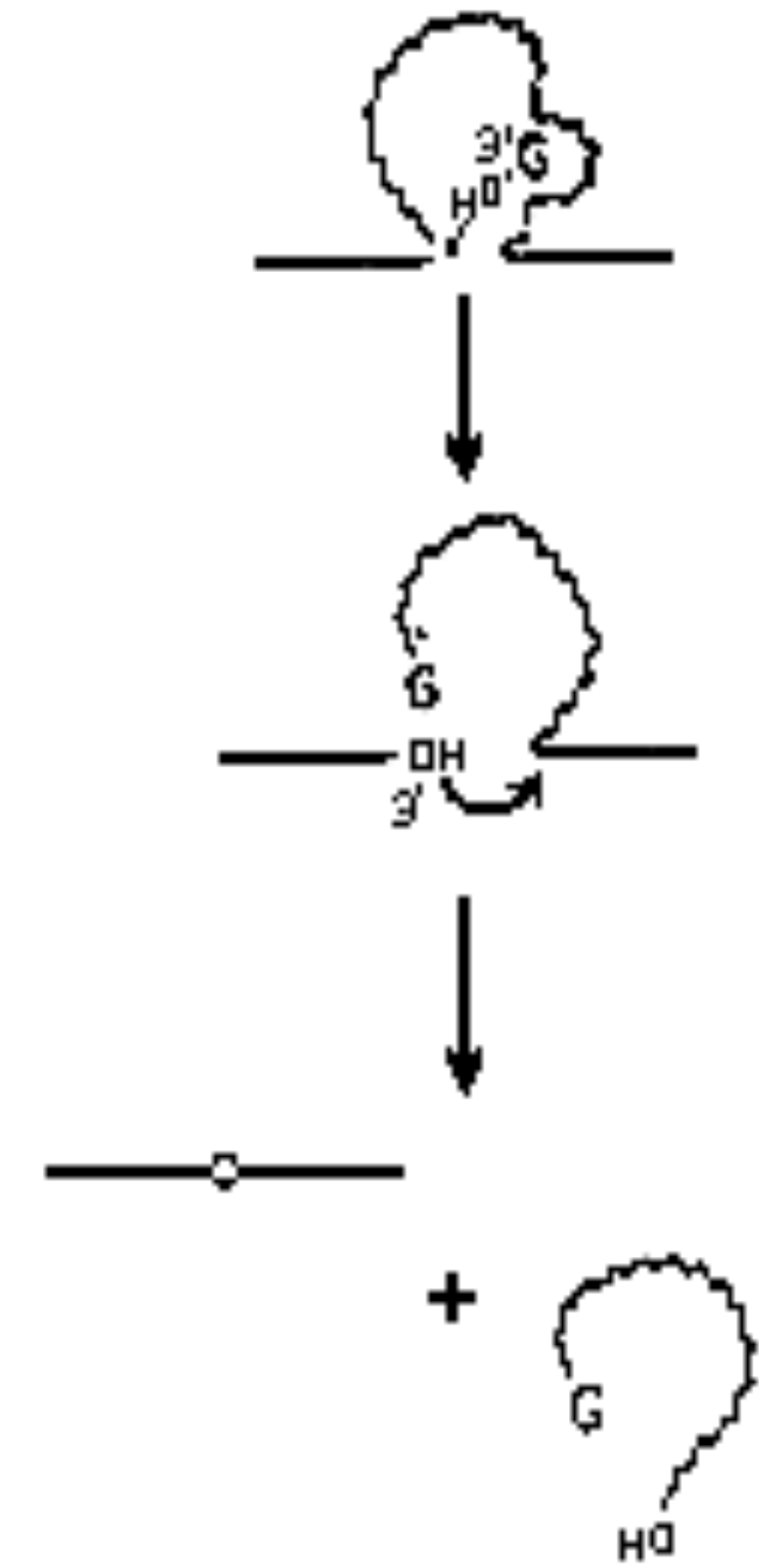
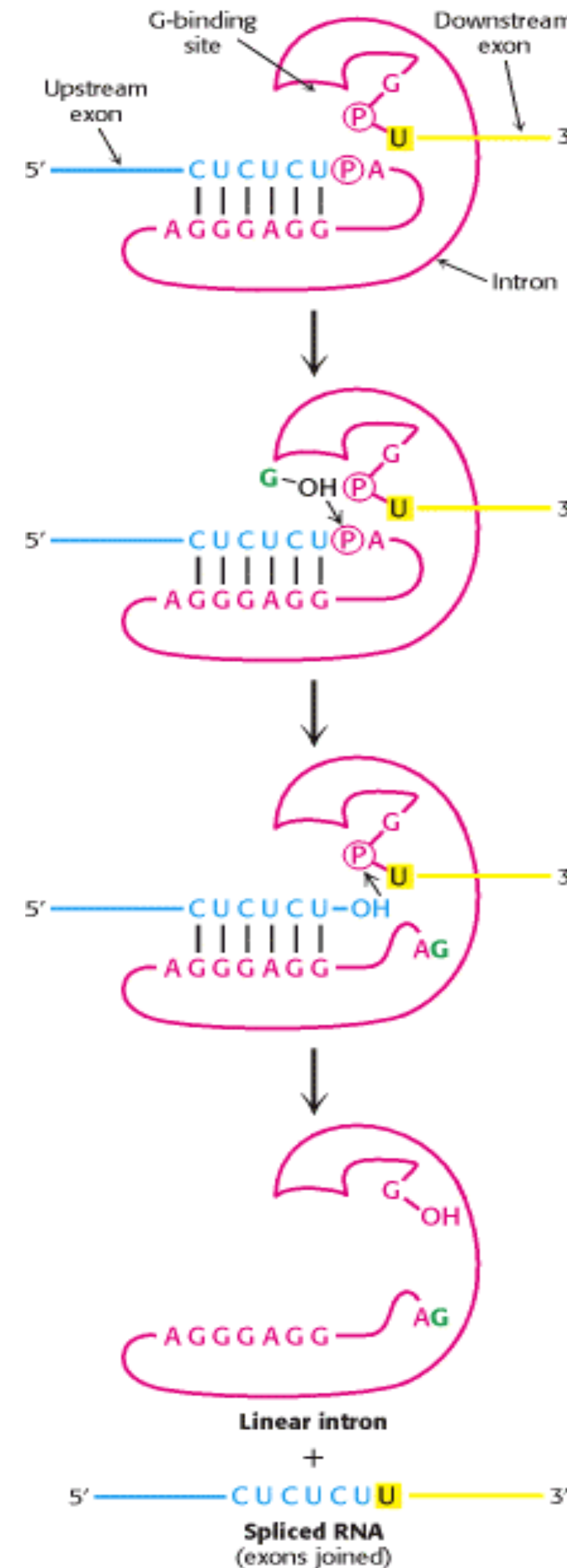
Świat RNA

- Odkrycie enzymatycznej aktywności RNA (**rybozomy**), 1982
- RNA przyjmuje różne struktury przestrzenne, jest bardziej od DNA reaktywny chemicznie
- Może zatem pełnić rolę zarówno nośnika informacji genetycznej (podlegać replikacji) jak i cząsteczki wyrażającej tę informację (enzymu)
- Można wyobrazić sobie życie oparte na RNA jako jedynej makrocząsteczce



RNA katalityczne

- Thomas Cech (1982) – intron rRNA w *Tetrahymena* sam się wycina
- autokatalityczne introny grupy I i II (głównie organelarne)



Nagroda Nobla 1989

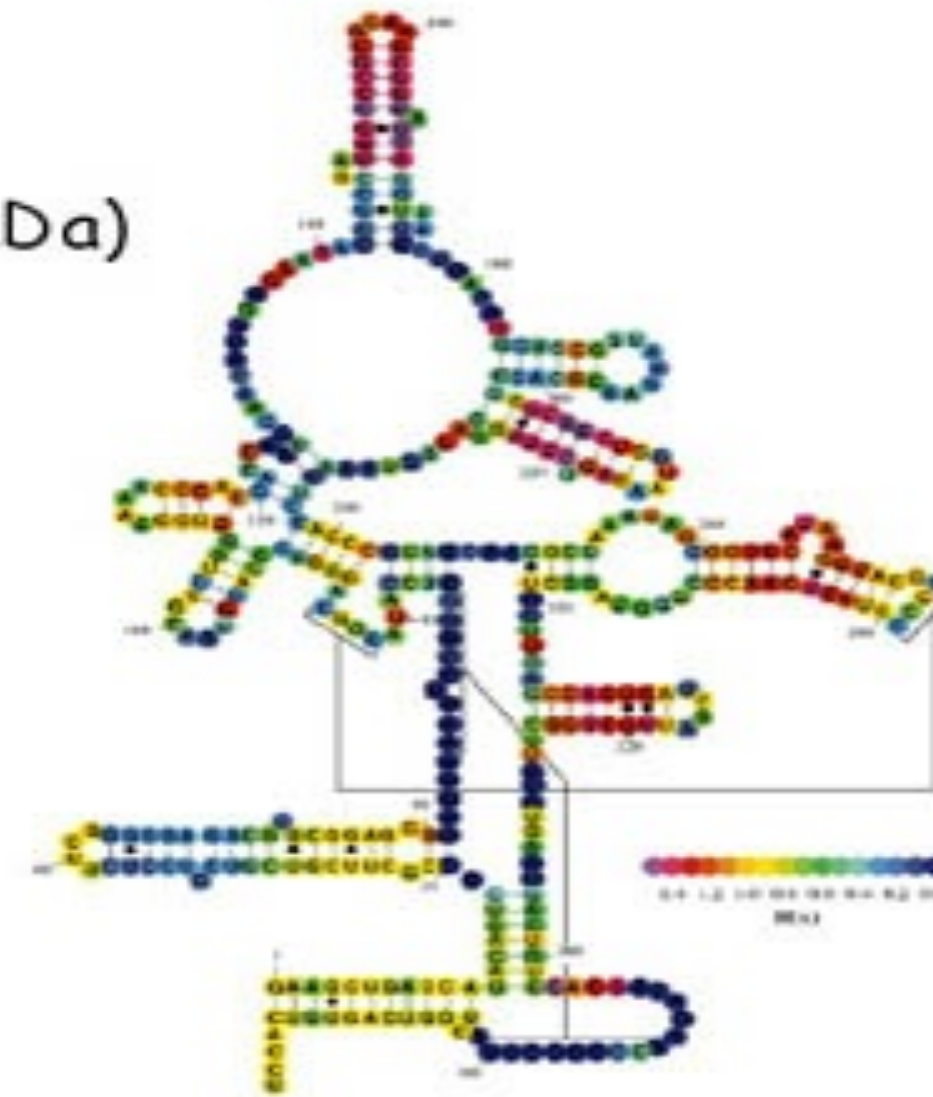
RNA katalityczne

- Sidney Altman (1983) – RNaza P bakterii (enzym tnący prekursor tRNA) składa się z białka i RNA, to RNA jest katalizatorem

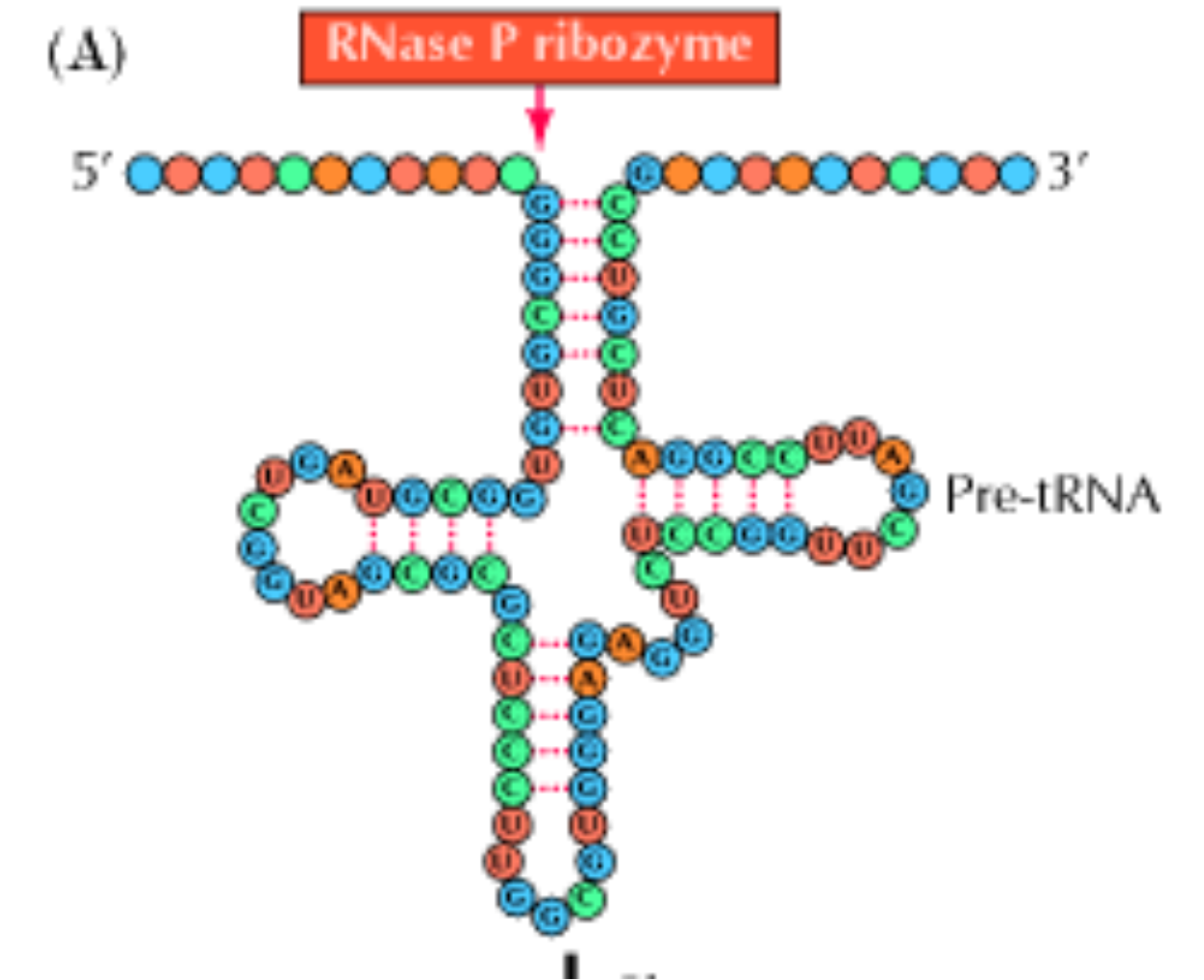
RNase P in Bacteria

1 large RNA
rnpB - 377nt (140kDa)

1 small protein
rnpA - 119aa (14kDa)

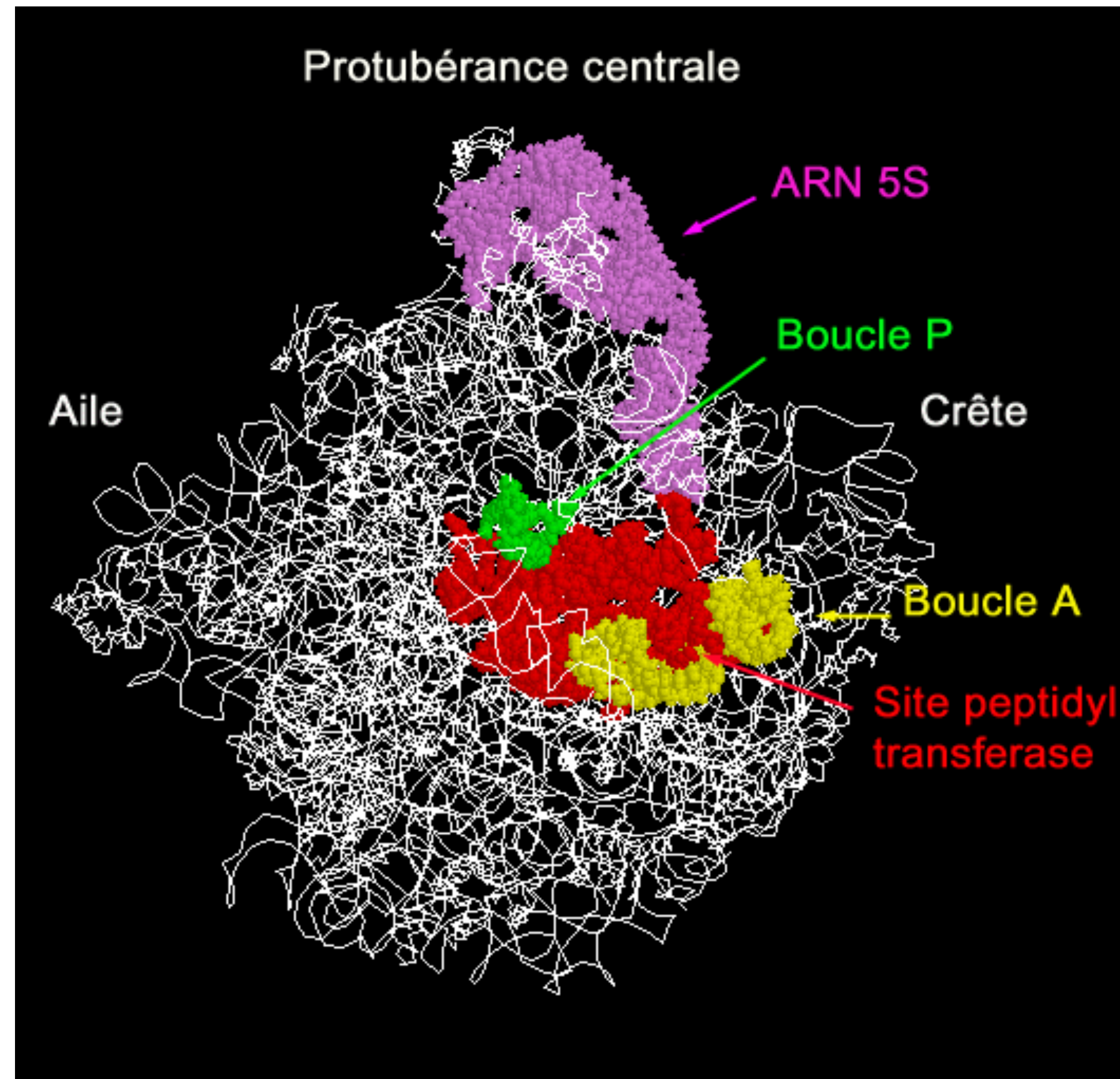
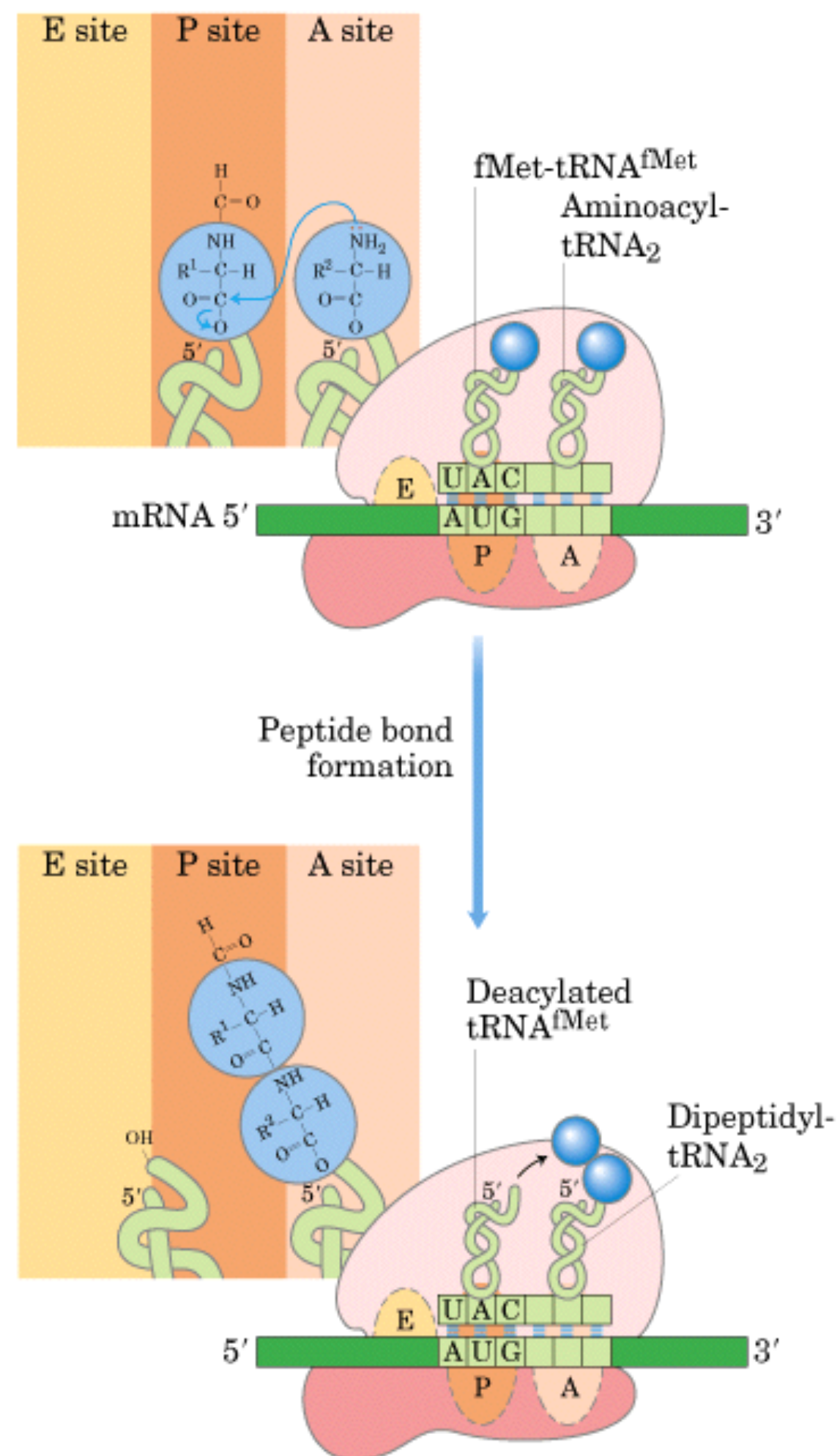


The RNA *by itself* is catalytically proficient *in vitro*



Nagroda Nobla 1989

RNA syntetyzuje białko



Aktywność peptydylotransferazy w rybosomie to rybozym

RNA wycina introny

doi:10.1038/nature12734

RNA catalyses nuclear pre-mRNA splicing

Sebastian M. Fica^{1,2*}, Nicole Tuttle^{3*}, Thaddeus Novak⁴, Nan-Sheng Li⁴, Jun Lu³, Prakash Koodathingal², Qing Dai³, Jonathan P. Staley² & Joseph A. Piccirilli^{3,4}

2013

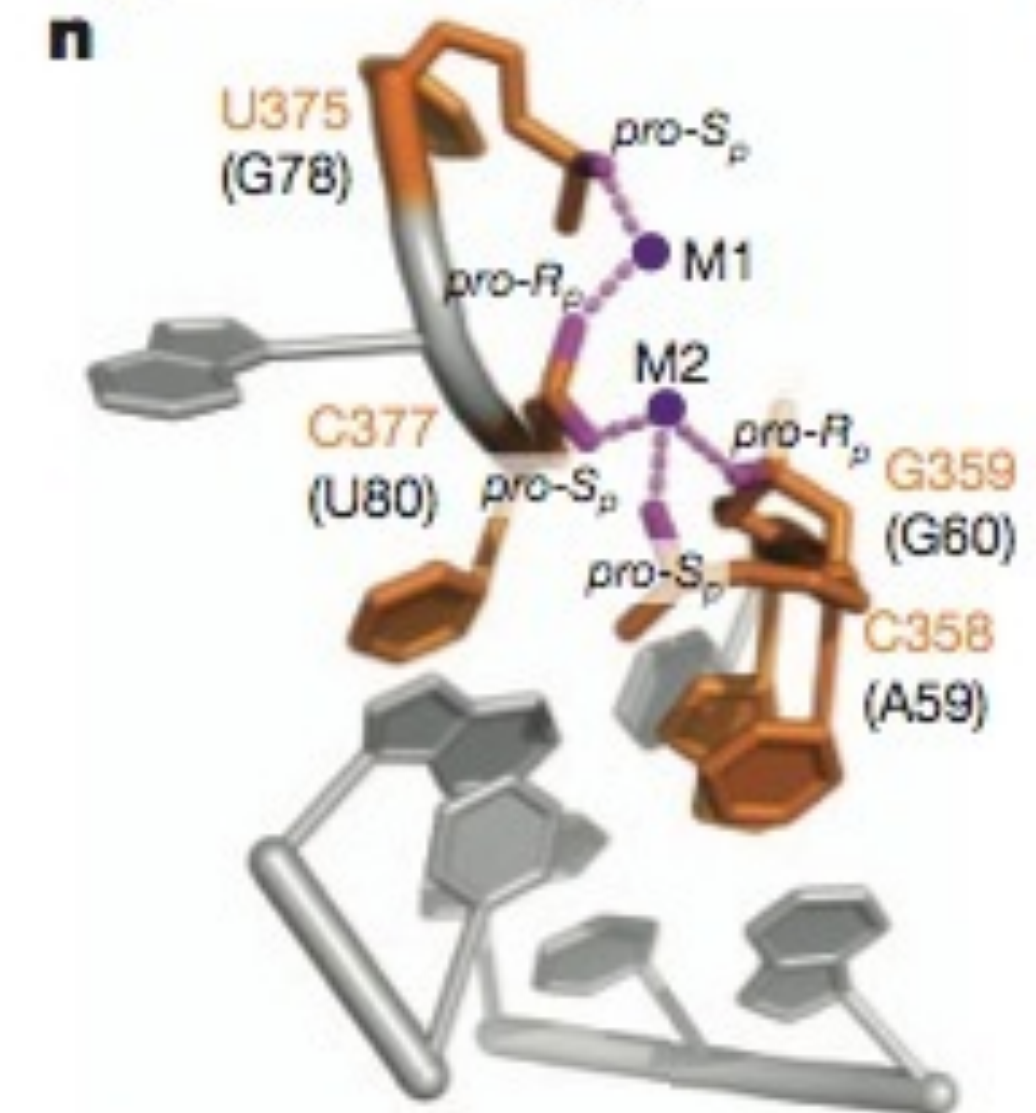
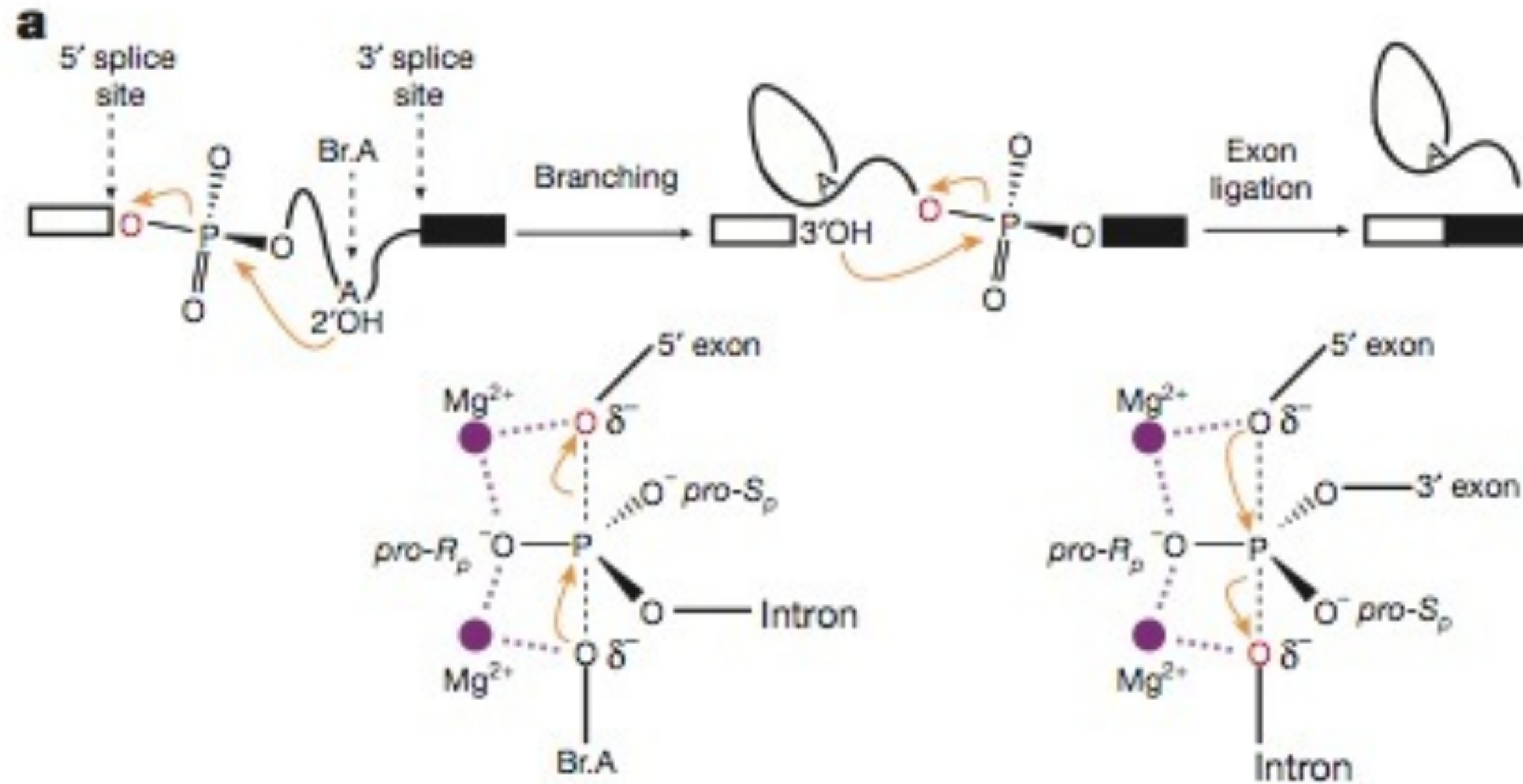


Figure 2 | U6 snRNA positions metals important for both steps of splicing.

Rybozymy w naturze

- Cięcie i obróbka RNA
 - introny grupy I i II (autokatalityczne)
 - bakteryjna RNaza P
 - spliceosom
 - rybozymy wirusów roślinnych
- Synteza białek
 - aktywność peptydylotransferazy rybosomu
- Wiele innych aktywności uzyskanych w laboratorium

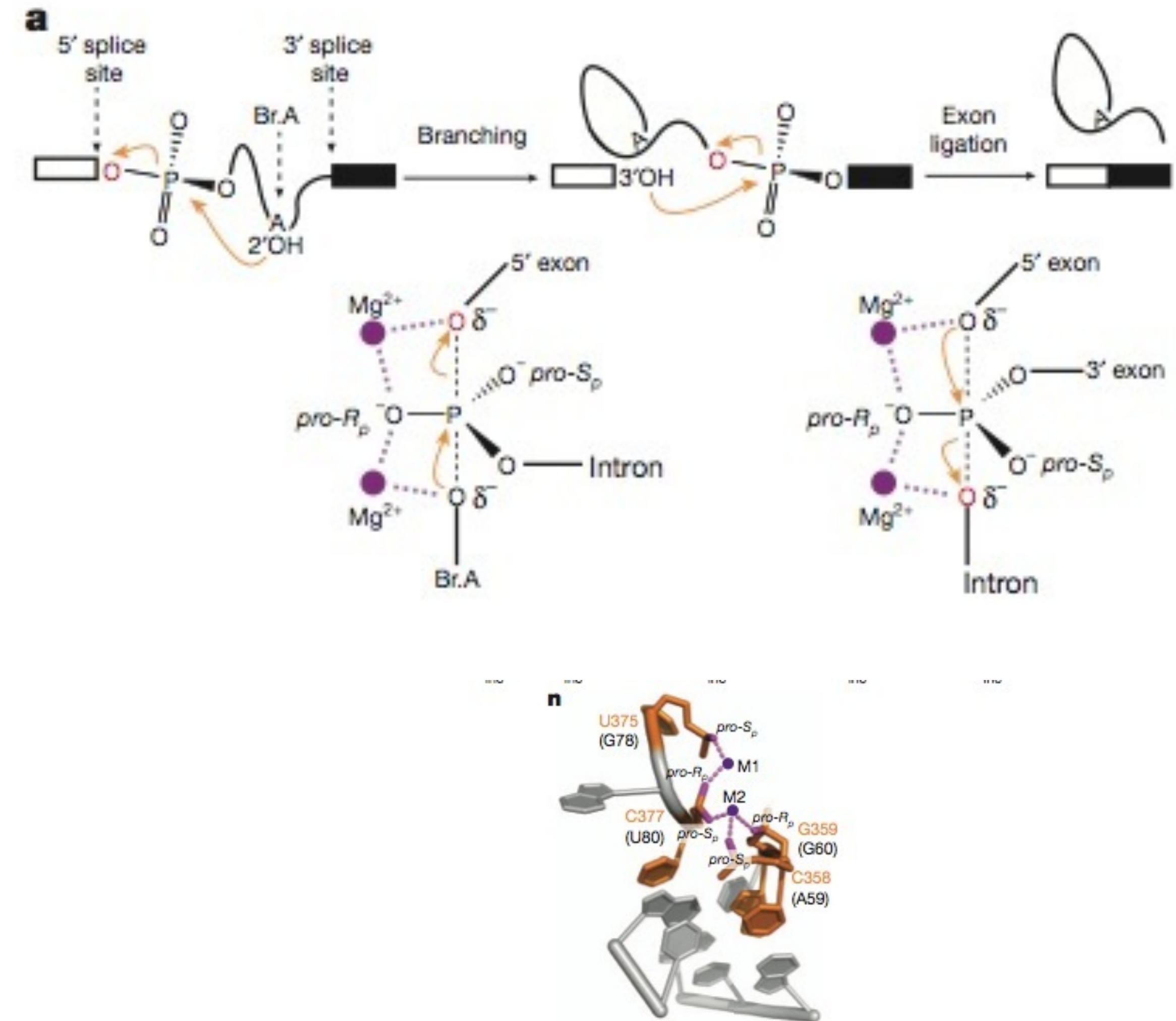


Figure 2 | U6 snRNA positions metals important for both steps of splicing.

doi:10.1038/nature12734

RNA catalyses nuclear pre-mRNA splicing

Sebastian M. Fica^{1,2*}, Nicole Tuttle^{3*}, Thaddeus Novak⁴, Nan-Sheng Li⁴, Jun Lu³, Prakash Koodathingal², Qing Dai³, Jonathan P. Staley² & Joseph A. Piccirilli^{3,4}

Co potrafią rybozomy?

- Cięcie RNA, cięcie DNA
- Ligacja (łączenie) cząsteczek RNA
- Tworzenie wiązania peptydowego
- Rybozomy selekcjonowane *in vitro* potrafią też
 - polimeryzować RNA (w tym na matrycy, ale bez samoreplikacji)
 - fosforylować RNA i DNA
 - alkilować i aminoacylować RNA
 - tworzyć i przecinać wiązania amidowe i glikozydowe
 - dołączać kationy metali do grup porfirynowych

Rybozym zdolny do syntezy RNA

- Wyselekcjonowany w laboratorium
- Wciąż nie autonomiczna replikaza

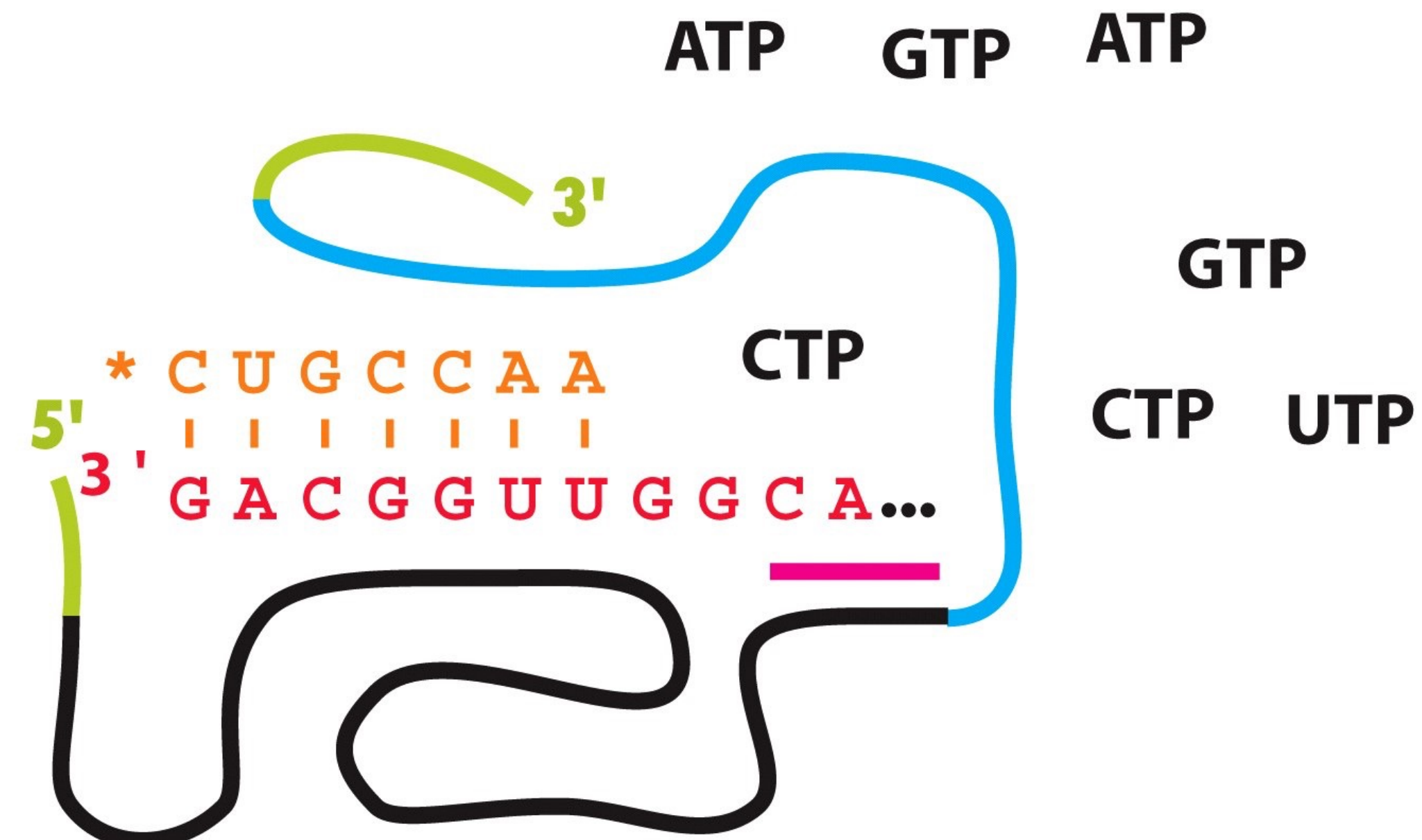


Figure 17-8a Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.



Figure 17-8b Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

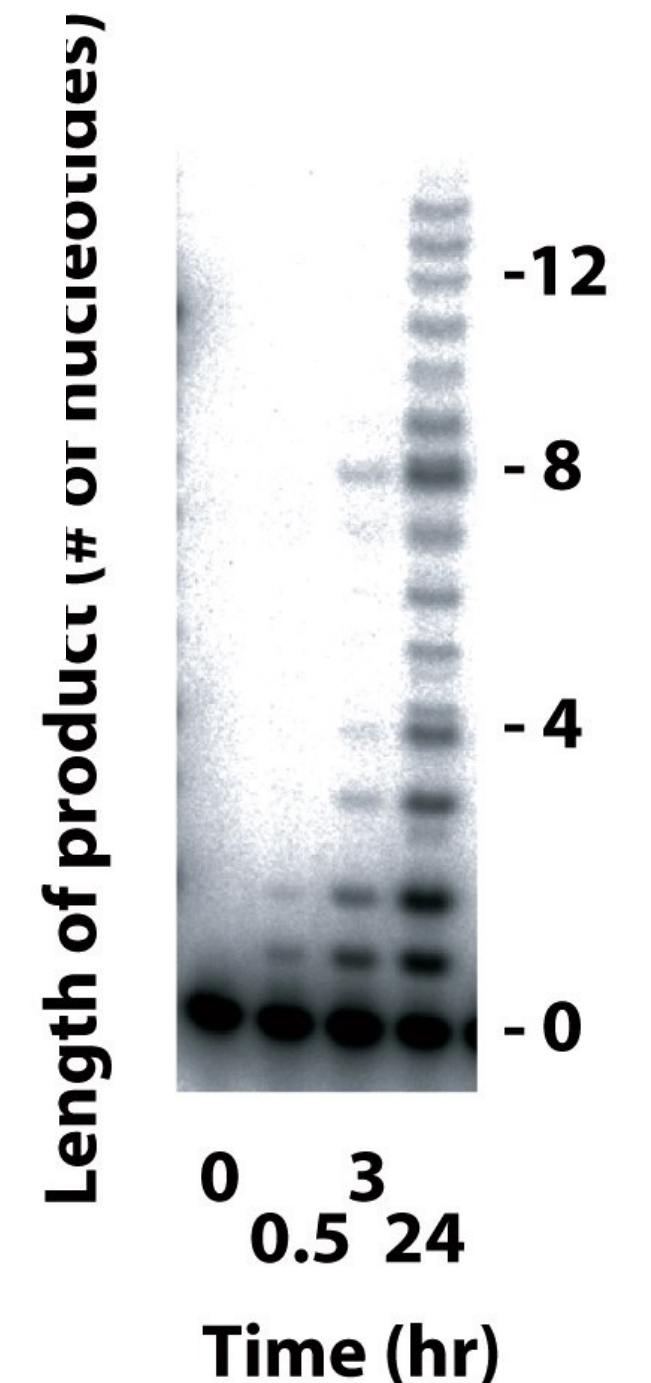


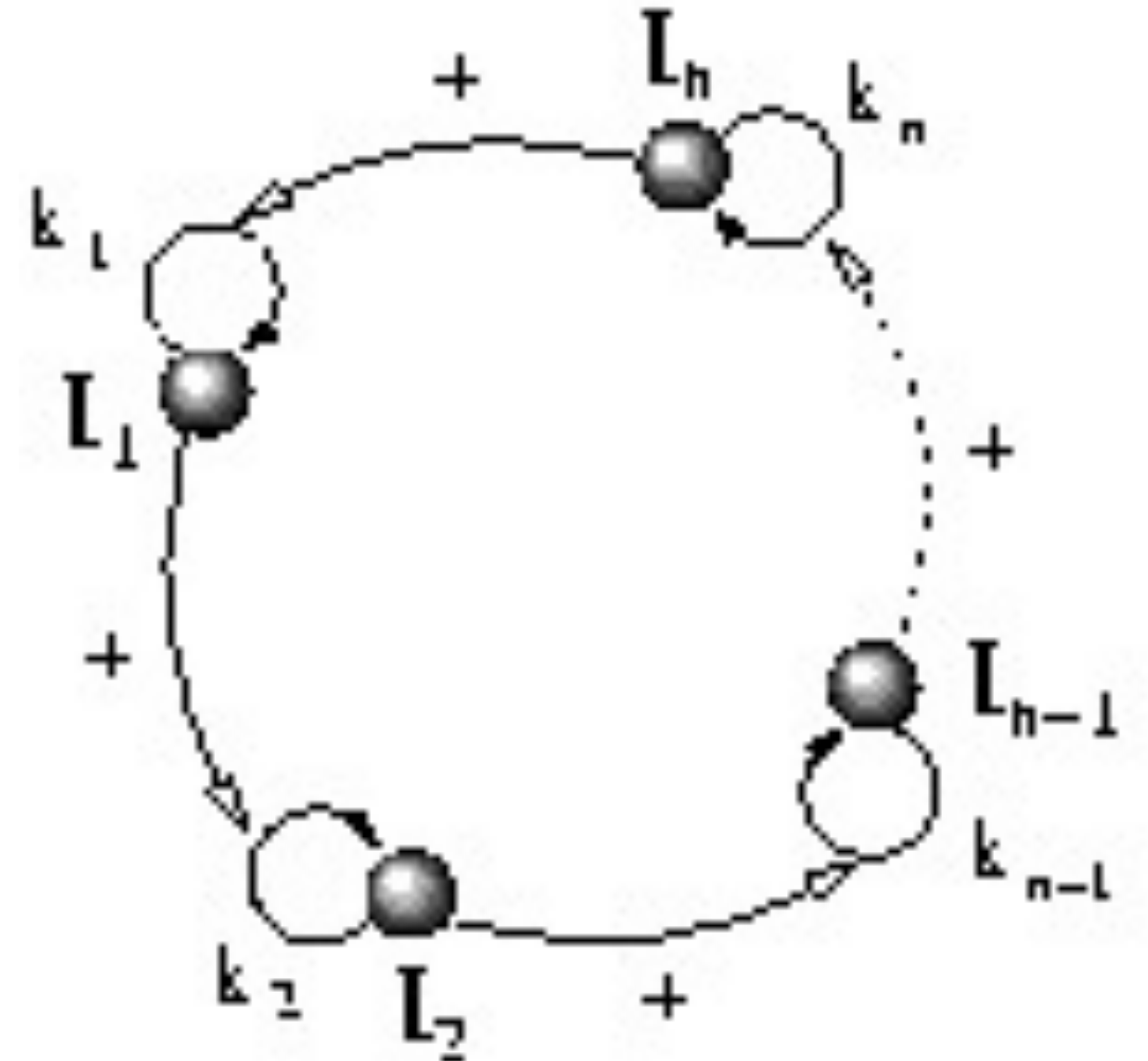
Figure 17-8c Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Dlaczego nie znaleziono jeszcze samoreplikującego się RNA?

- Liczba możliwych kombinacji sekwencji o długości:
 - 50 nt: $\sim 1 \times 10^{30}$
 - 80 nt: $\sim 1,5 \times 10^{58}$
- Dla porównania: liczba wszystkich atomów planety Ziemia: $\sim 1 \times 10^{50}$

Problemy świata RNA

- Ograniczona zdolność magazynowania informacji w pojedynczym replikatorze (ilość informacji możliwej do zakodowania jest odwrotnie proporcjonalna do częstości błędów replikacji – **granica Eigena**)
- Rozwiązanie – sieci współdziałających replikatorów (**hipercykle**)
- „Samolubne RNA” w sieci replikatorów
- rozwiązanie – wydzielenie hipercyklu błoną i specjalizacja

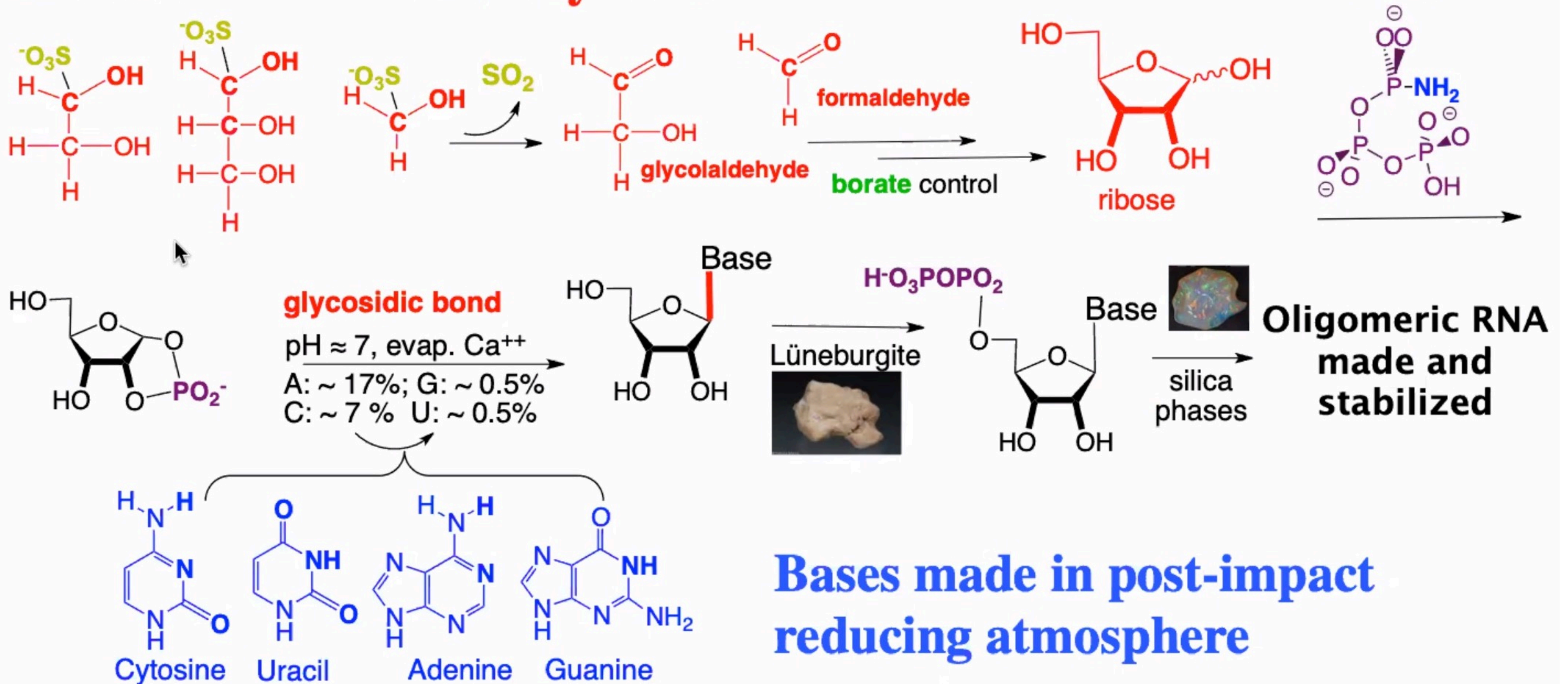


Problemy świata RNA

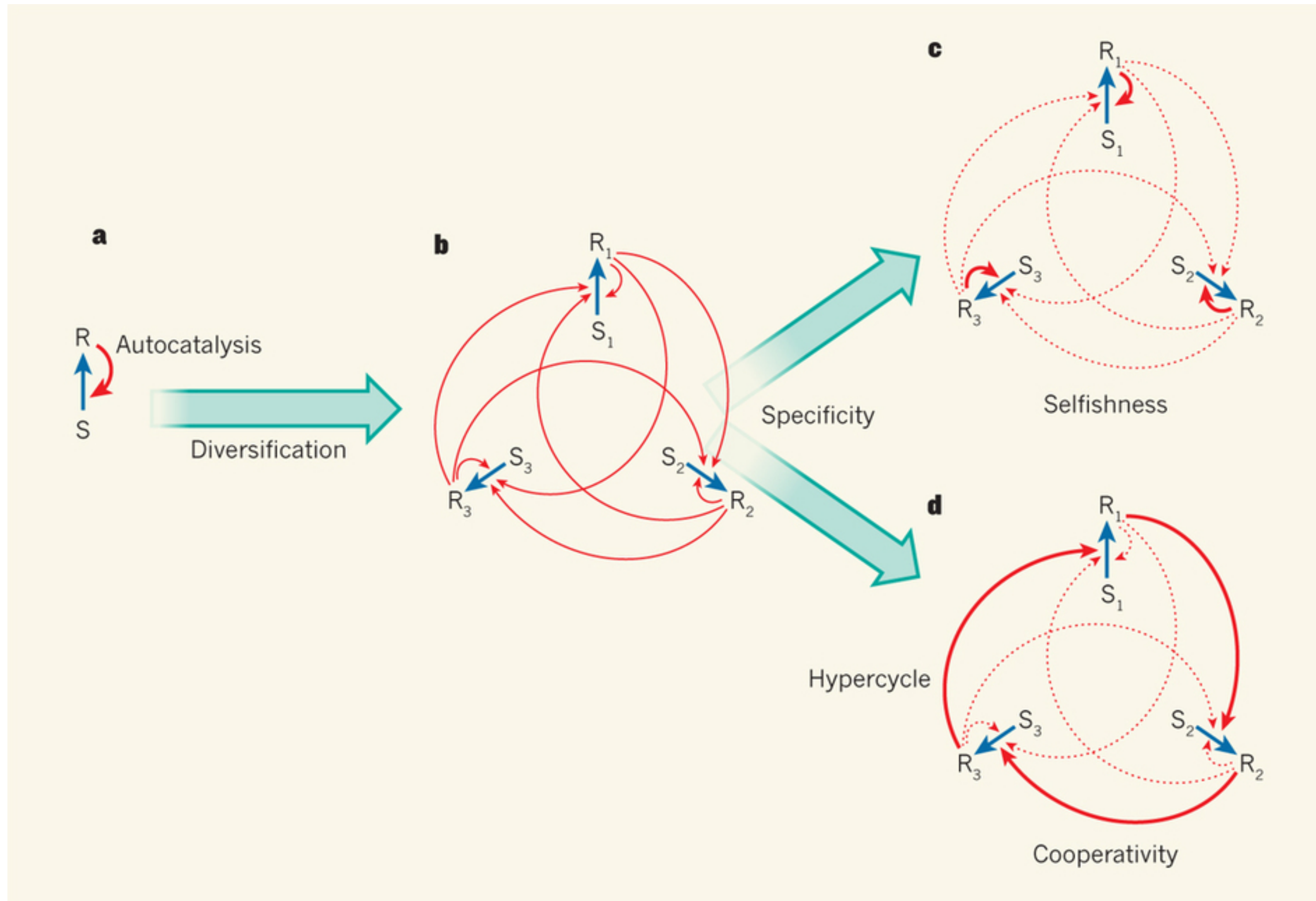
- Abiotyczna synteza RNA
 - wykazano abiotyczną syntezę prekursorów zasad azotowych, trudniej z pentozami
 - łatwiej wymodelować syntezę całych nukleotydów
 - obecnie są wiarygodne modele prebiotycznej syntezy RNA uwzględniające warunki wczesnej Ziemi

Przebieg wydarzeń w hipotezie S. Bennera

Sulfite-stabilized carbohydrates + oxidized minerals make RNA

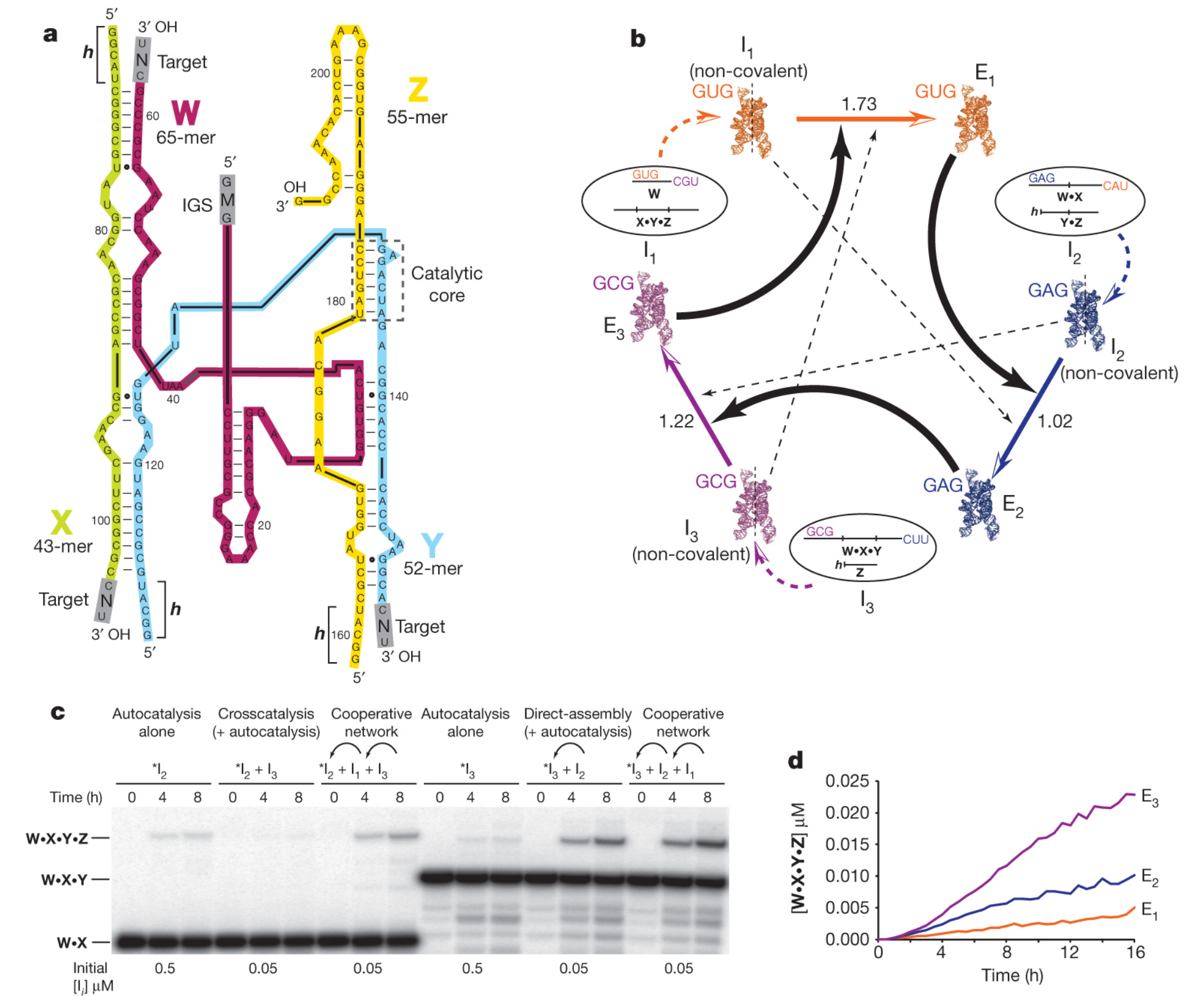


Kooperacja czy samolubność



Samorganizacja sieci RNA

- Rybozymy zdolne do katalizy ligacji innych wariantów tworzą cykle autokatalizy
- Cykl jest wydajniejszy od pojedynczych “samolubnych” rybozymów



ARTICLE

doi:10.1038/nature11549

Spontaneous network formation among cooperative RNA replicators

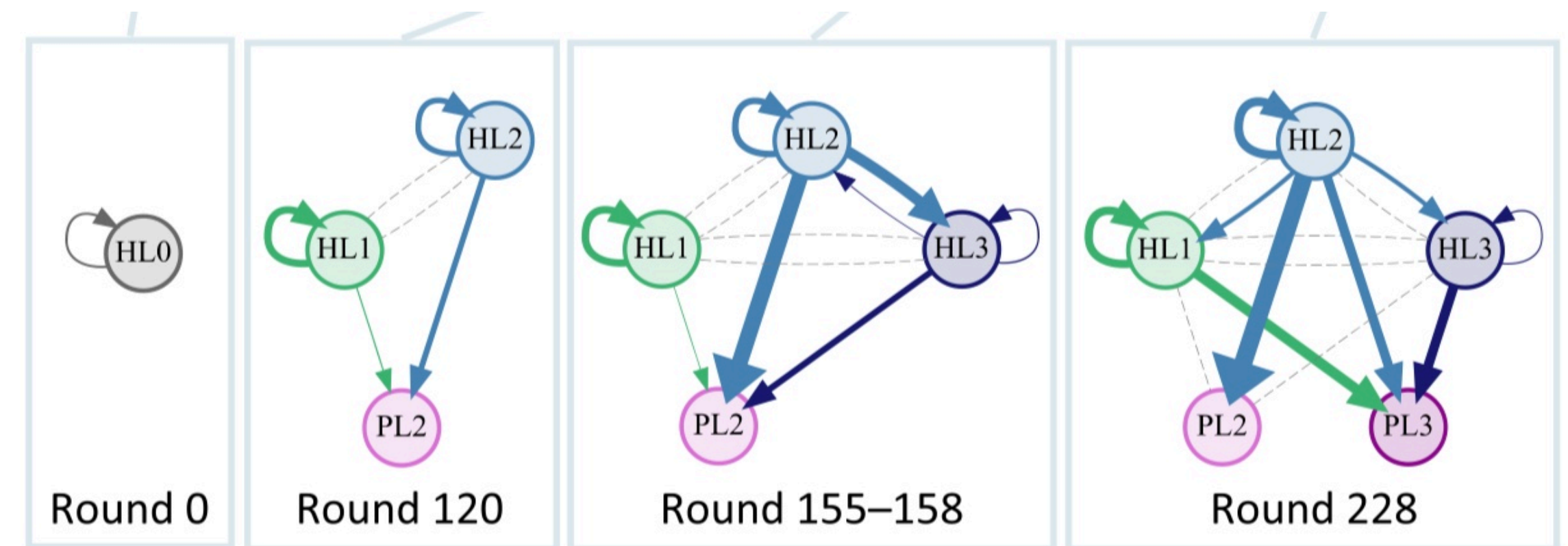
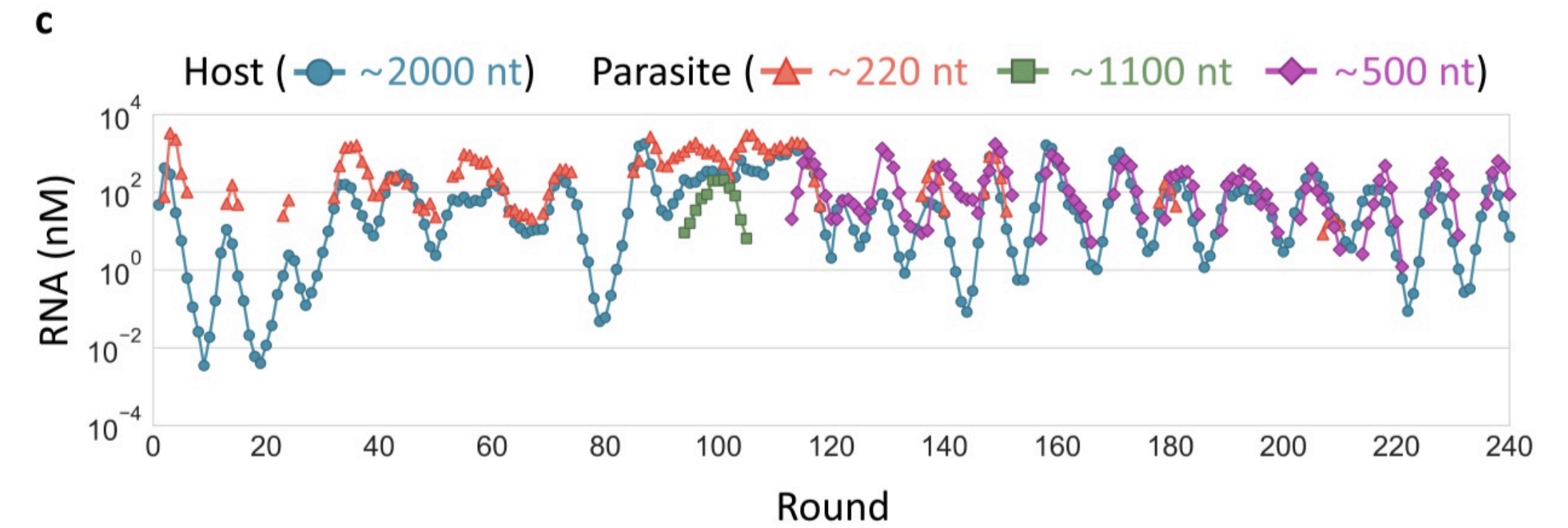
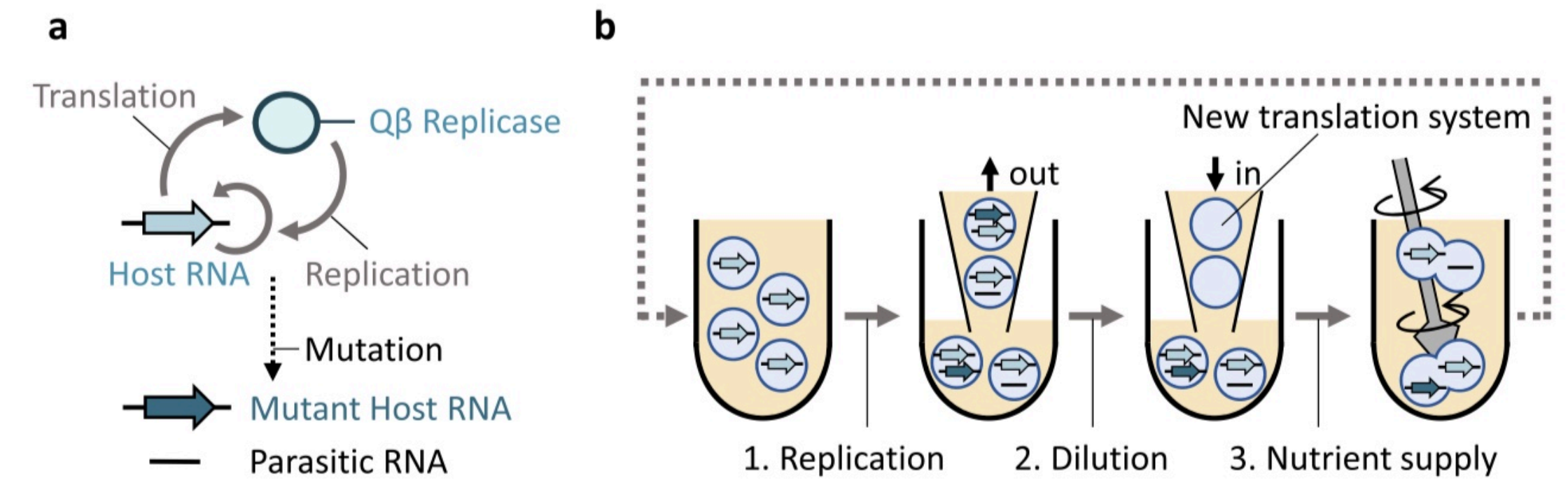
Nilesh Vaidya¹, Michael L. Manapat², Irene A. Chen^{3†}, Ramon Xulvi-Brunet³, Eric J. Hayden⁴ & Niles Lehman¹

nature

N Vaidya et al. Nature 491(7422):72-7 (2012)

Coraz więcej dowodów

- W ostatnich latach liczne eksperymenty laboratoryjne wykazują zdolność do tworzenia się sieci kooperacyjnych o rosnącej złożoności



<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29113-x>

OPEN

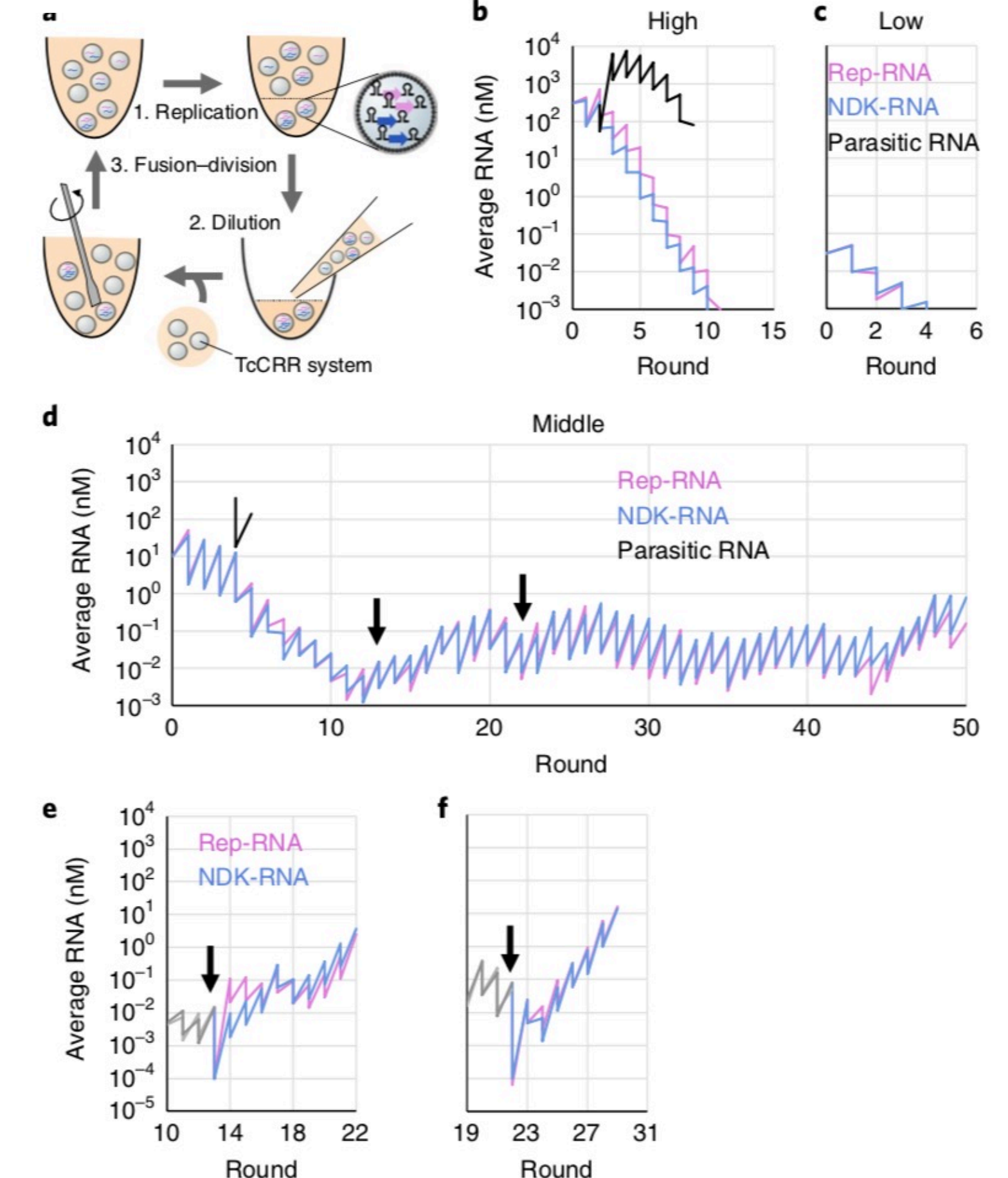
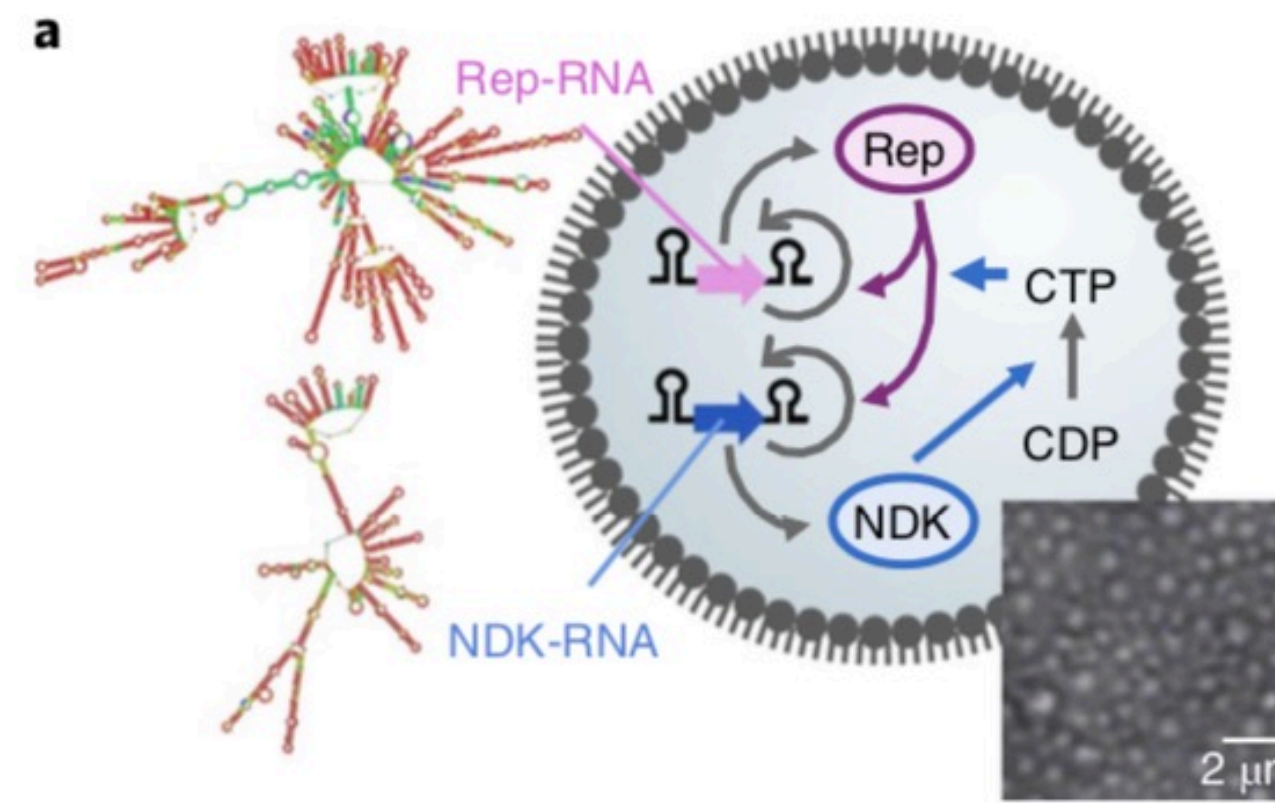
Evolutionary transition from a single RNA replicator to a multiple replicator network

Ryo Mizuuchi^{1,2}, Taro Furubayashi³ & Norikazu Ichihashi^{1,4,5}

NATURE COMMUNICATIONS | (2022)13:1460 | <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29113-x>

Ewolucja kooperacji

- Kluczem do kooperacji może być izolacja w pęcherzykach błonowych
- Eksperyment z dwoma kooperującymi rybozymami



nature ecology & evolution ARTICLES
<https://doi.org/10.1038/s41559-018-0650-z>

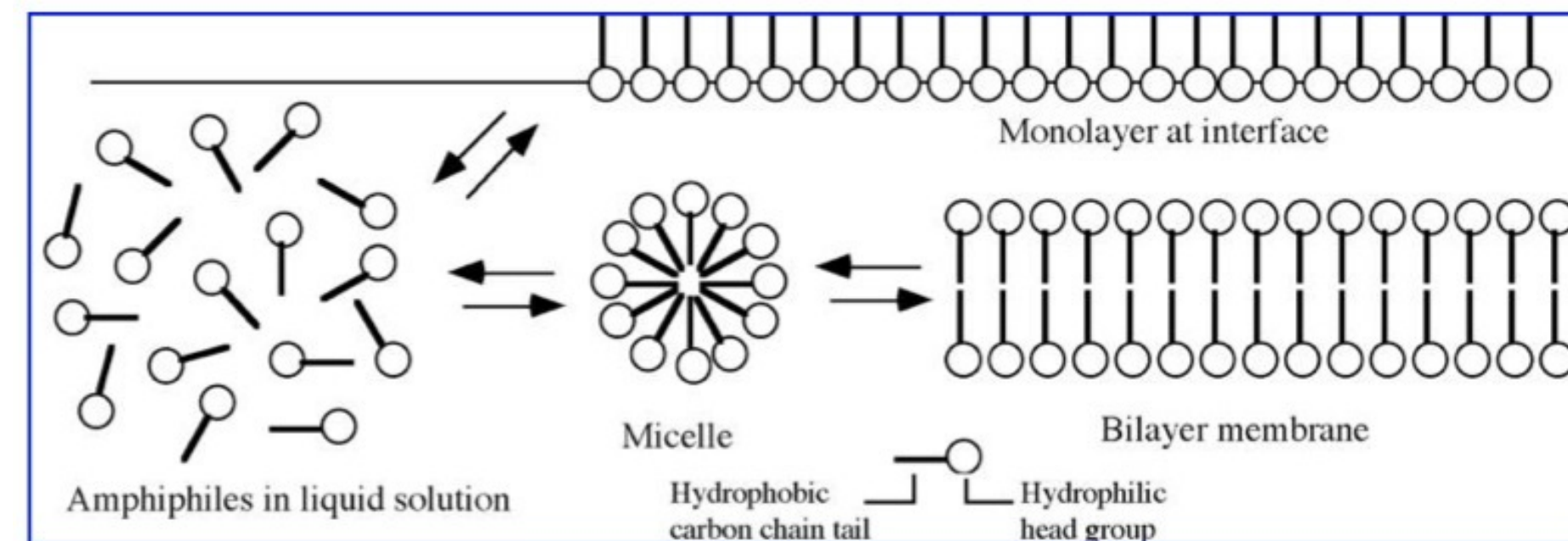
Sustainable replication and coevolution of cooperative RNAs in an artificial cell-like system

Ryo Mizuuchi¹ and Norikazu Ichihashi^{1,2*}

Published online: 27 August 2018

Powstanie błon – pierwsze prakomórki

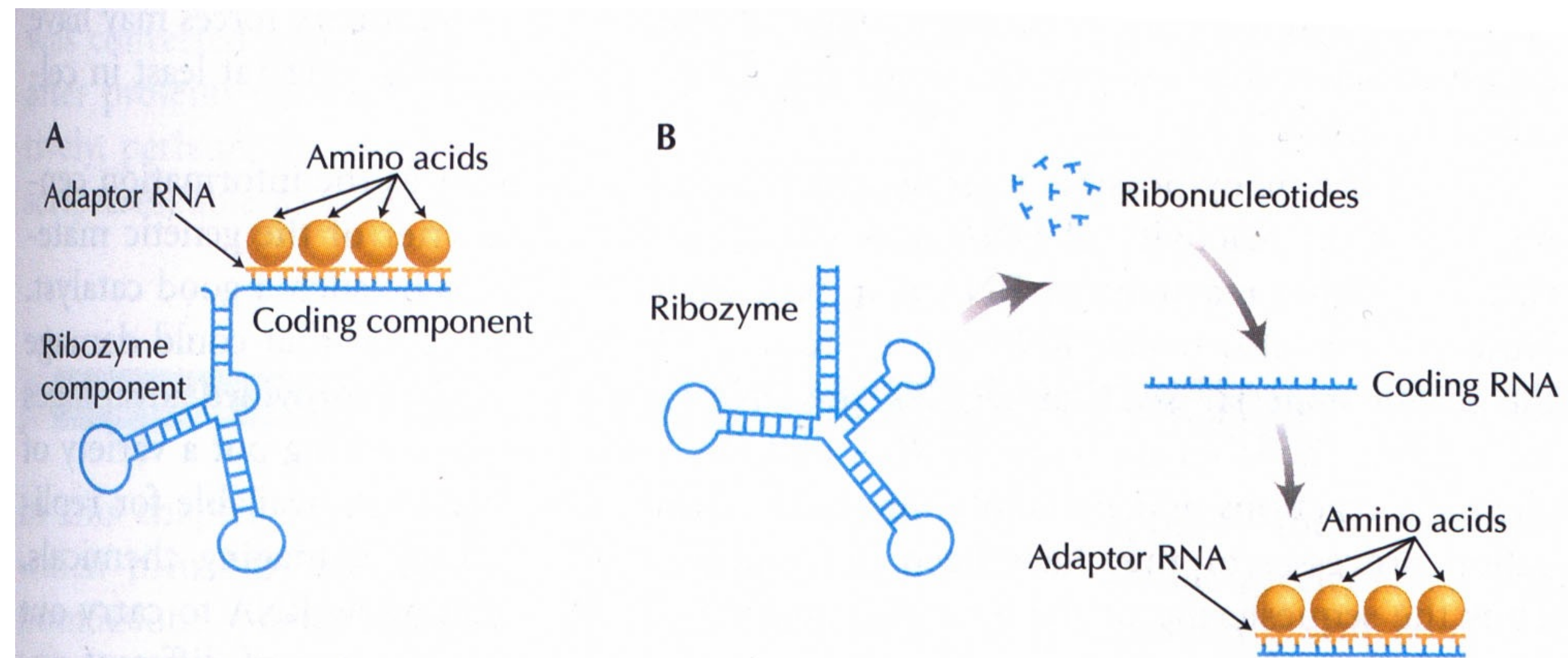
- Samoorganizacja lipidów amfipatycznych w struktury mogące otaczać prakomórki



- Takie lipidy mogły powstawać w warunkach prebiotycznych, a nawet w kosmosie
- Wyodrębnienie prakomórek błoną nastąpiło wcześnie w ewolucji

Ewolucja kodu

- Oddziaływania RNA – aminokwasy (pra-tRNA)
- rybozomy syntetyzujące
- uniwersalny rybosom pojawił się później



Aminoacylacja RNA przez prosty rybozym

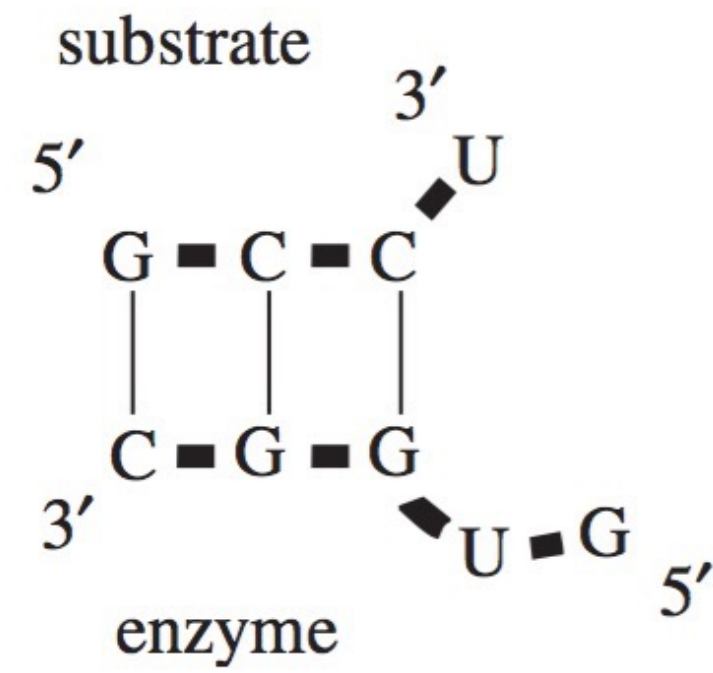
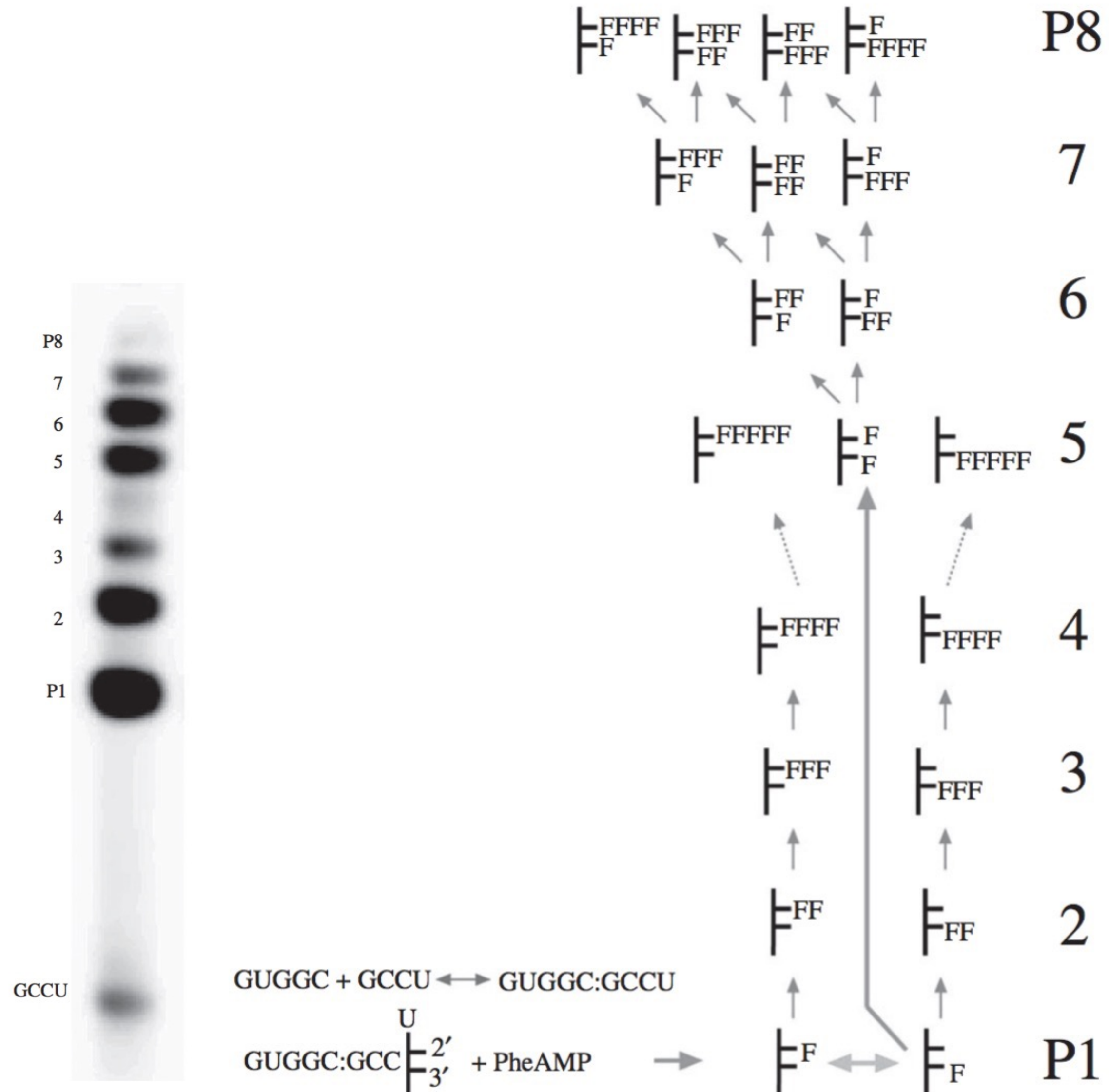


Figure 5. The minimal GCCU/GUGGC ribozyme system [10].

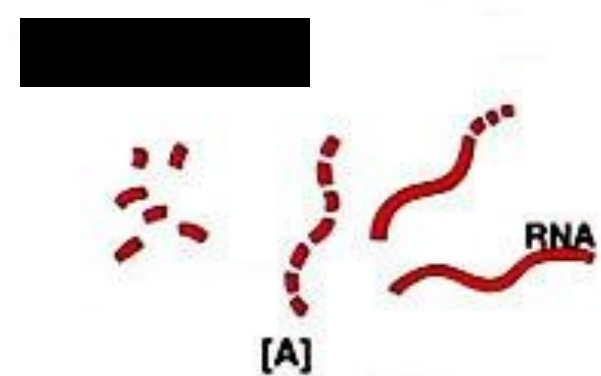


The meaning of a minuscule ribozyme

Michael Yarus

Phil. Trans. R. Soc. B 2011 **366**, doi: 10.1098/rstb.2011.0139

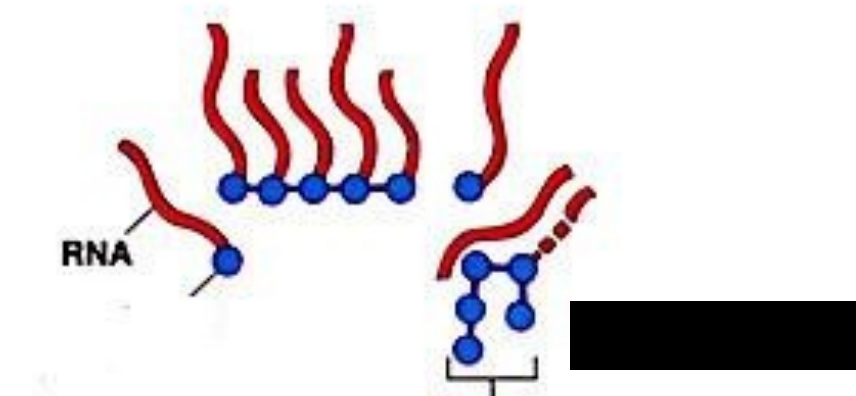
Jak powstała informacja genetyczna



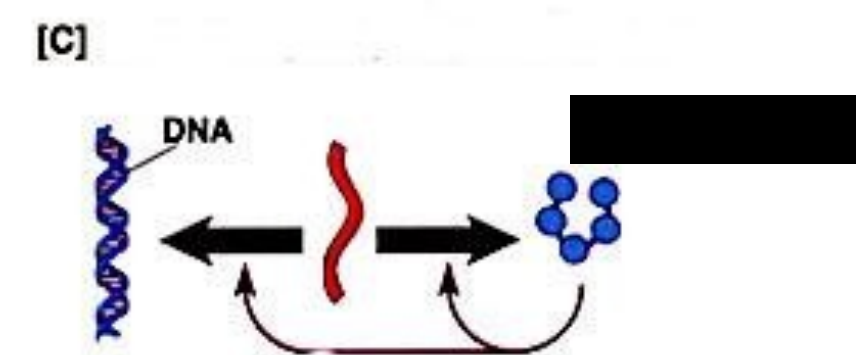
Powstają pierwsze nici RNA



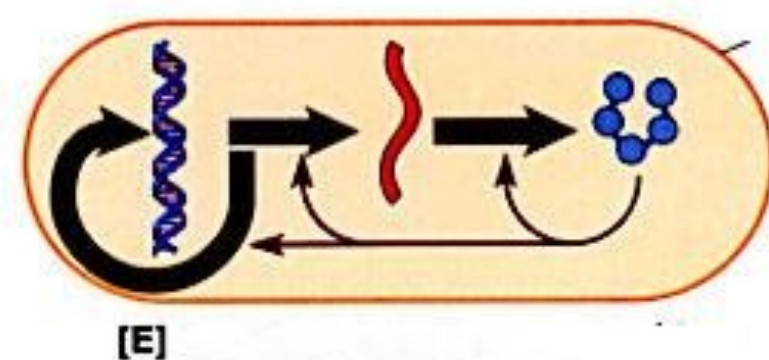
RNA replikuje RNA



RNA katalizuje reakcje z udziałem aminokwasów



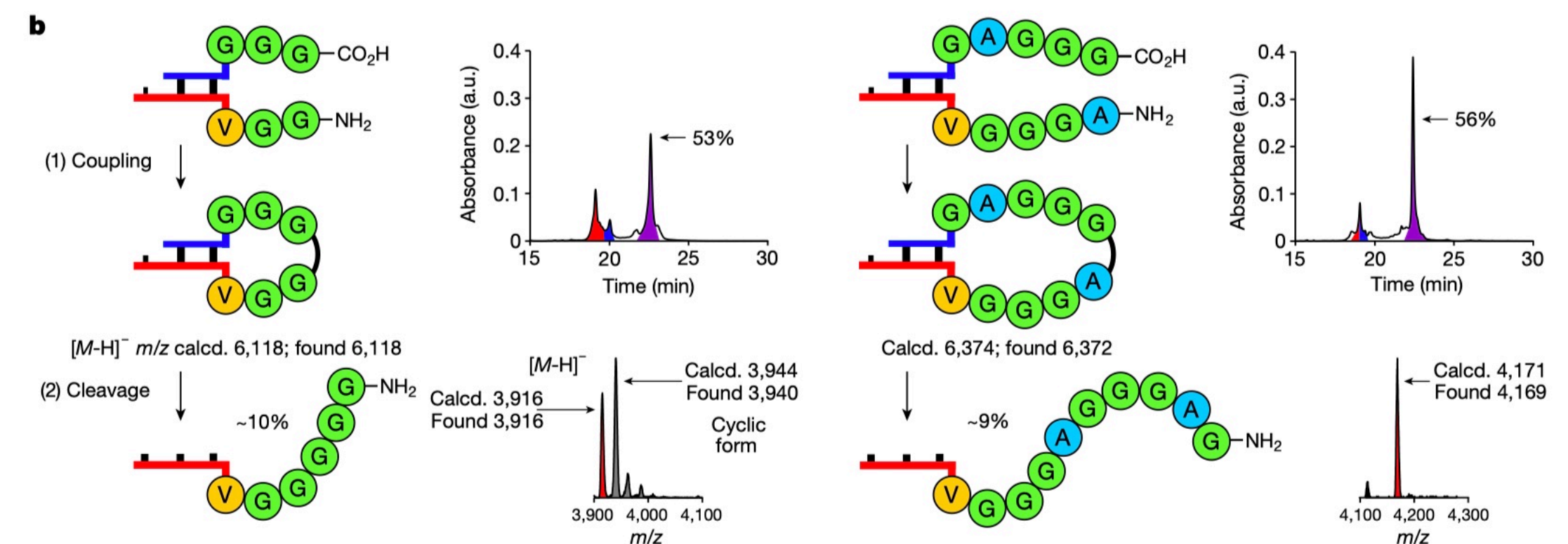
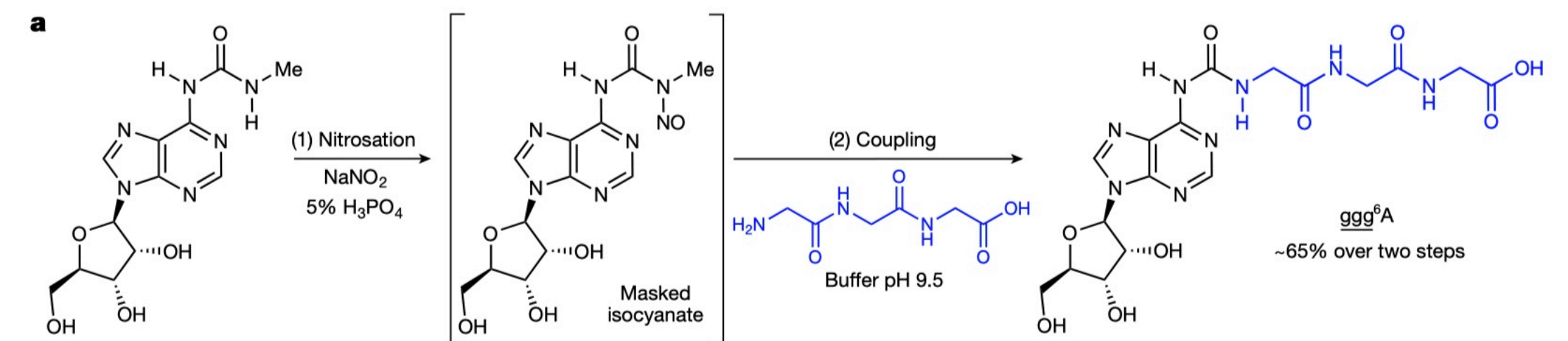
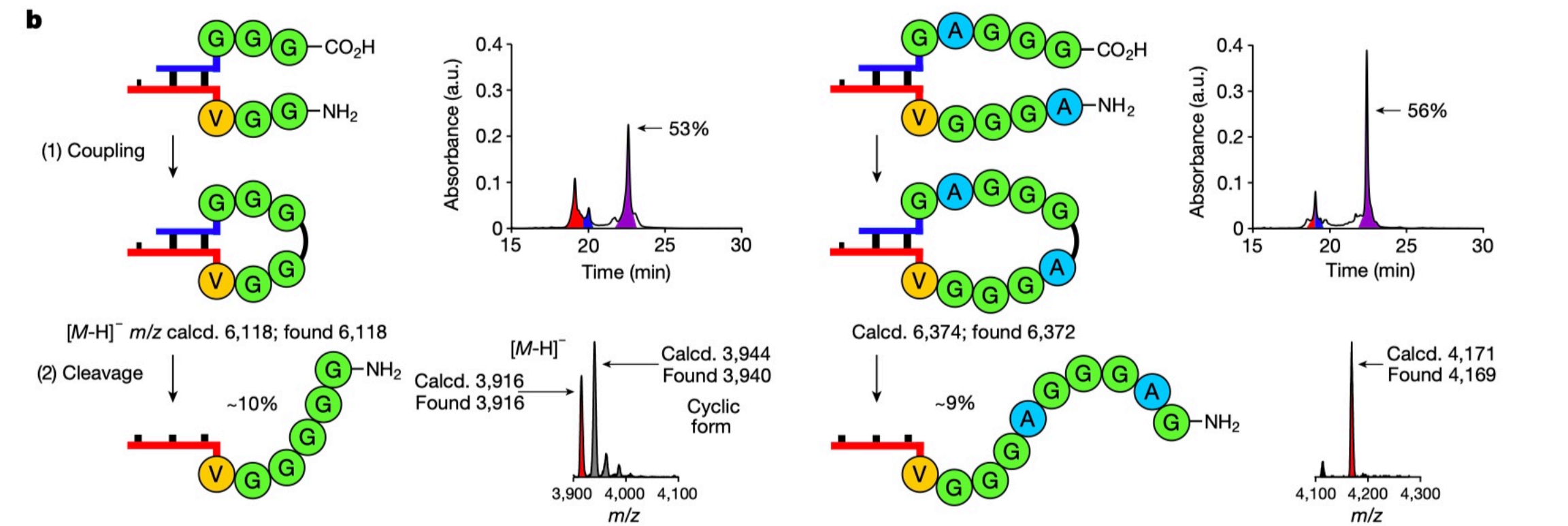
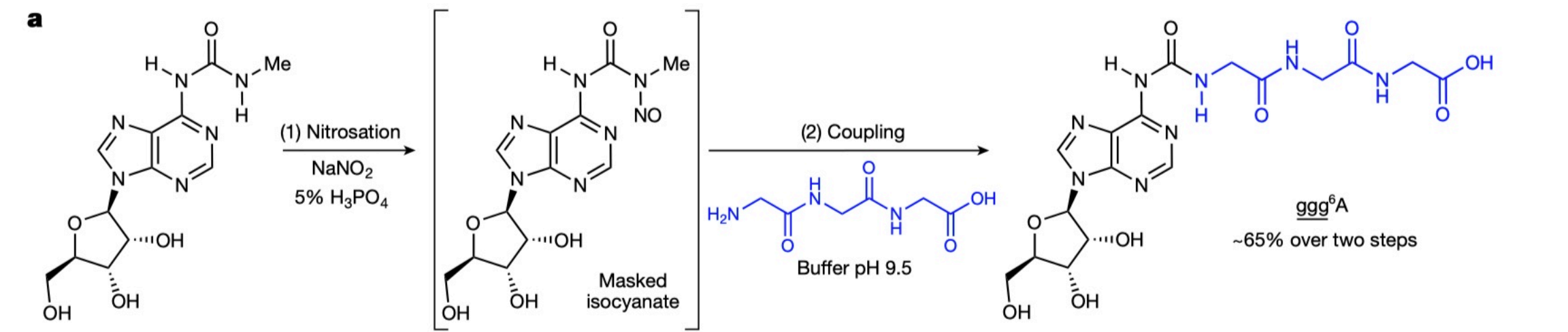
RNA katalizuje tworzenie białek i DNA



DNA przejmuje rolę materiału genetycznego

Ślady świata RNP

- Rybozymy zdolne do tworzenia krótkich peptydów
- Modyfikowane kowalencyjnie zasady azotowe w RNA (np. liczne w tRNA) mogą być reliktem świata RNA-peptydy
- Pierwsze replikatory RNA od początku mogły wykorzystywać fragmenty peptydowe



A prebiotically plausible scenario of an RNA-peptide world

Nature | Vol 605 | 12 May 2022 | 279

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04676-3>

Received: 13 July 2021

Accepted: 22 February 2022

Published online: 11 May 2022

Felix Müller^{1,2}, Luis Escobar^{1,2}, Felix Xu¹, Ewa Węgrzyn¹, Milda Nainytė¹, Tynchtyk Amatov¹, Chun-Yin Chan¹, Alexander Pichler¹ & Thomas Carell¹✉

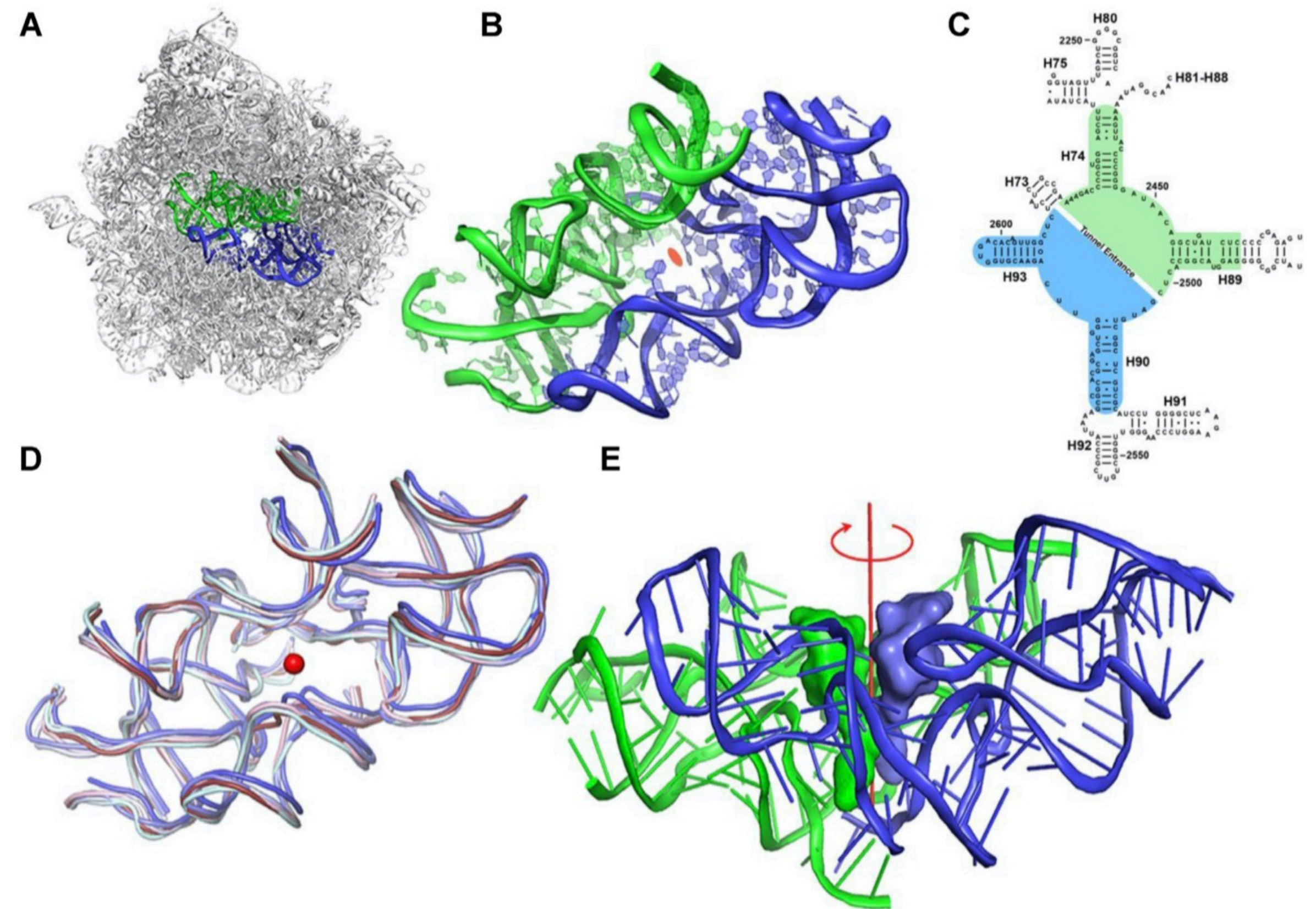
The RNA world concept¹ is one of the most fundamental pillars of the origin of life theory²⁻⁴. It predicts that life evolved from increasingly complex self-replicating RNA

Ewolucja kodu

- Pierwszy kod był mniej specyficzny
 - rozróżniane mniej aminokwasów
 - rozróżniane grupy aminokwasów
- Ewolucja przez
 - zwiększanie liczby kodowanych aminokwasów
 - zwiększanie specyficzności
- Czy kod od początku był trójkowy?
 - może wyewoluował z dwójkowego, ale z przecinkiem (trzeci nukleotyd nieznaczący)

Protorybosom

- Krótki fragment rRNA dużej podjednostki, zachowany we wszystkich rybosomach
- In vitro zdolny do tworzenia wiązań peptydowych



Published online 7 February 2022

Nucleic Acids Research, 2022, Vol. 50, No. 4 1815–1828
<https://doi.org/10.1093/nar/gkac052>

Origin of life: protoribosome forms peptide bonds and links RNA and protein dominated worlds

Tanaya Bose¹, Gil Fridkin^{1,2}, Chen Davidovich¹, Miri Krupkin¹, Nikita Dinger¹,
Alla H. Falkovich¹, Yoav Peleg³, Ilana Agmon^{4,5}, Anat Bashan¹ and Ada Yonath^{1,*}

Powstanie DNA

- We współczesnych komórkach dNTP powstają z rNTP!!
- Reduktaza rybonukleotydów
- Enzym obecny we wszystkich gałęziach drzewa życia – bardzo stary

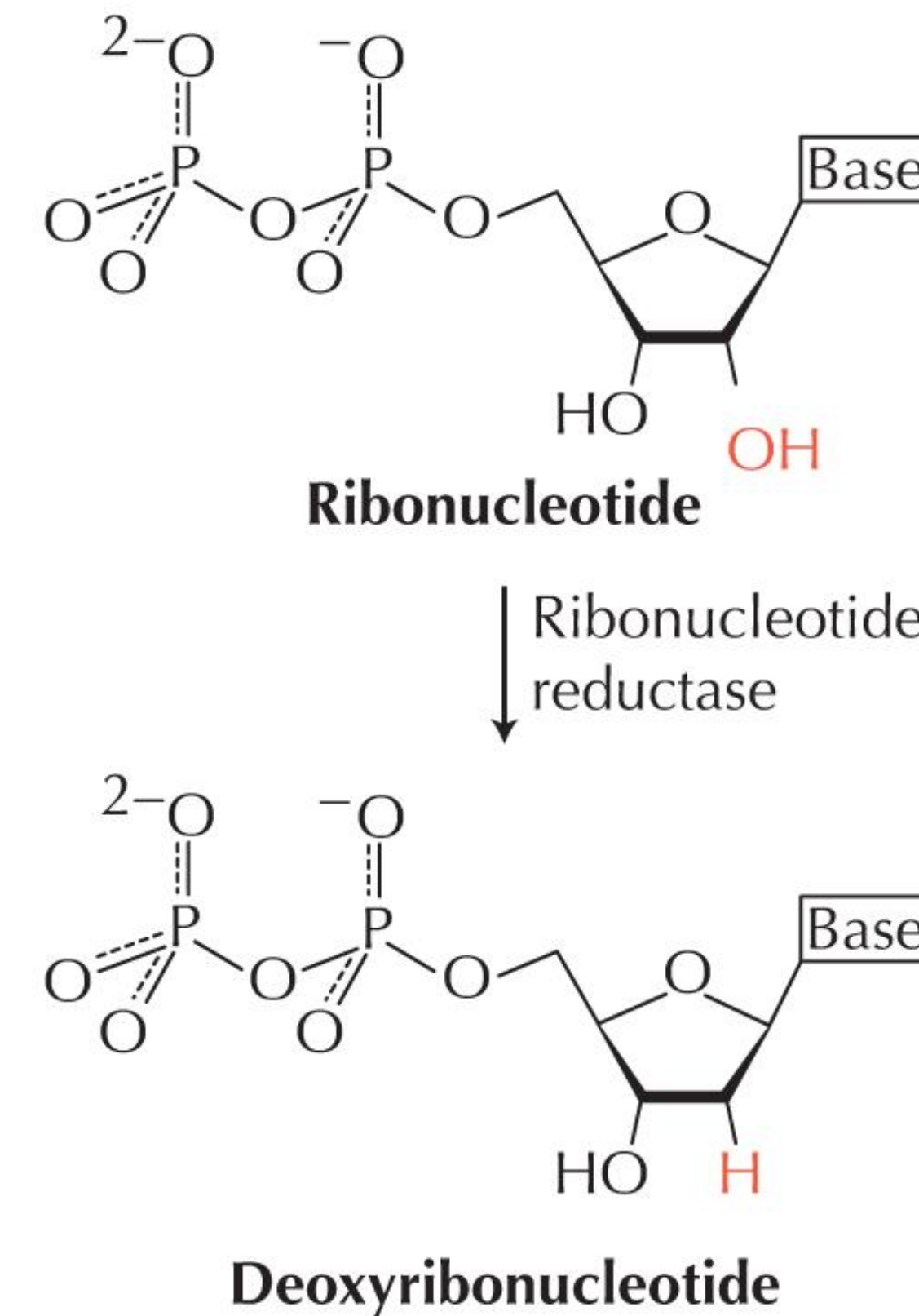


FIGURE 4.15. Ribonucleotide reductase. In modern organisms, deoxyribonucleotides are synthesized from ribonucleotides using the enzyme ribonucleotide reductase. This is consistent with deoxyribonucleotide synthesis being a more recent invention than ribonucleotide synthesis.

LUCA

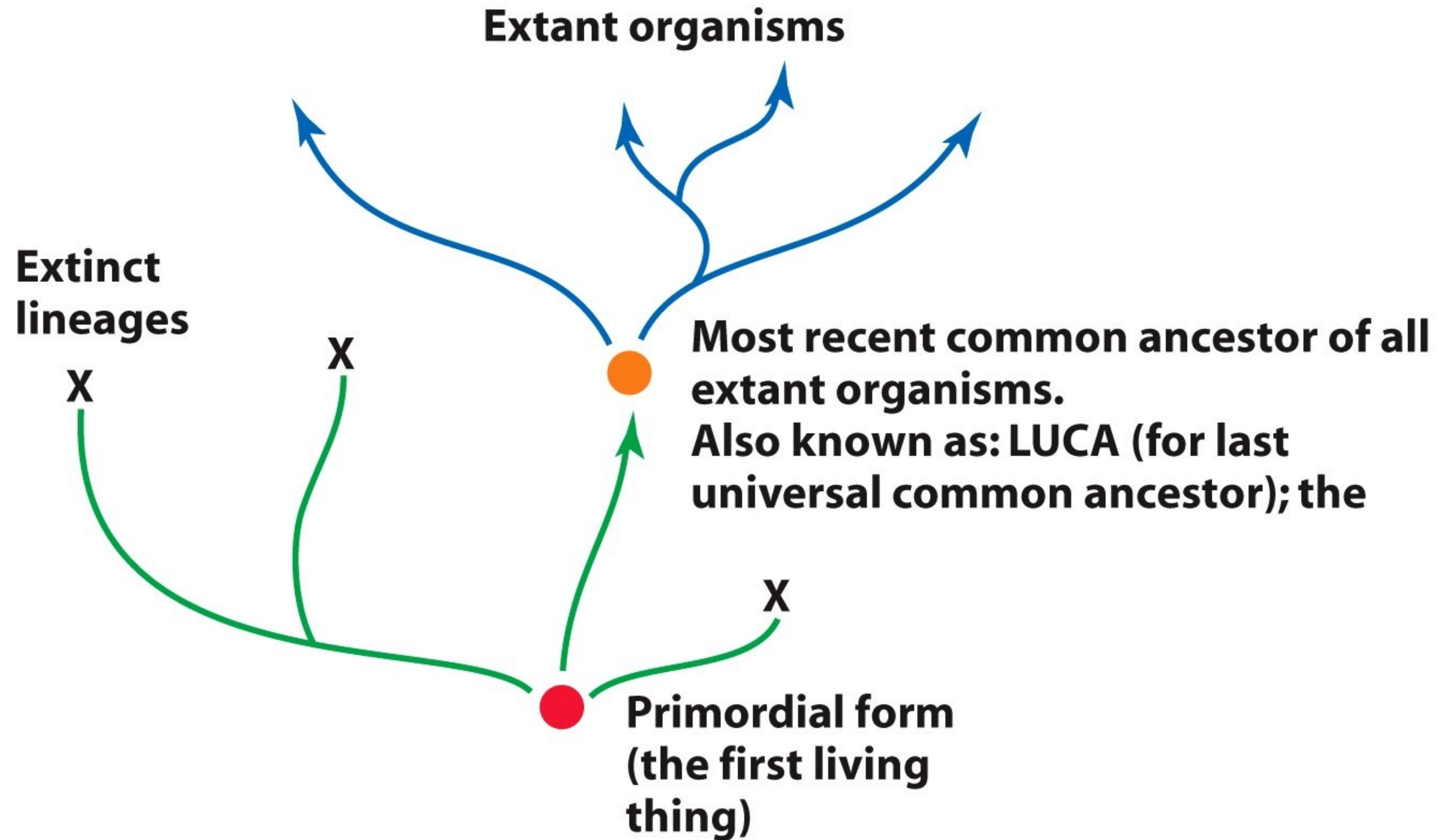


Figure 17-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Hipotezy alternatywne

- Przesunięcie niektórych etapów prehistorii życia poza Ziemię
 - kosmiczne pochodzenie prostych cząsteczek organicznych
 - kosmiczne pochodzenie życia - panspermia

Panspermia

- Pierwsze cząsteczki biologiczne, a nawet organizmy nie powstały na Ziemi
- Cząsteczki organiczne, aminokwasy w materiale kosmicznym
- Problem ustalenia warunków początkowych
 - Jeżeli nie wiemy, gdzie powstawało życie, nie mamy możliwości formułowania hipotez
- “Panspermia ukierunowana” – życie celowo “zasiane” na Ziemi przez inną cywilizację (Orgel & Crick, 1973)



Cząsteczki organiczne z kosmosu

- Meteoryt z Murchinson
- liczne związki organiczne, w tym aminokwasy
- Komety (potwierdzona obecność związków organicznych)



Figure 17-9 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

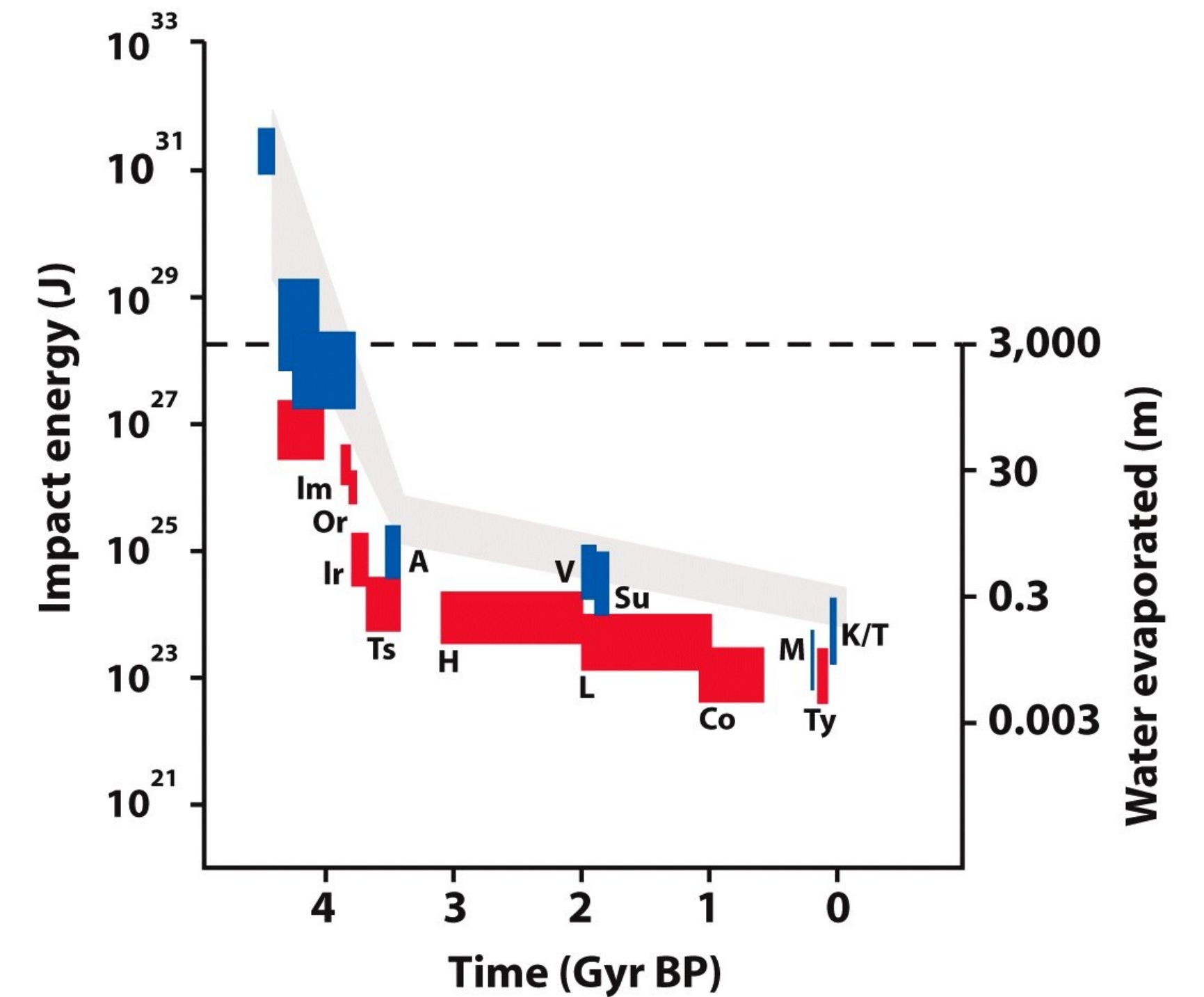


Figure 17-11 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Błony z kosmosu

- Struktury lipidowe tworzone przez ekstrakty materiału z meteorytu z Murchinson (A)
- Struktury tworzone w reakcjach fotochemicznych z materiału naśladującego lód z przestrzeni kosmicznej (B)

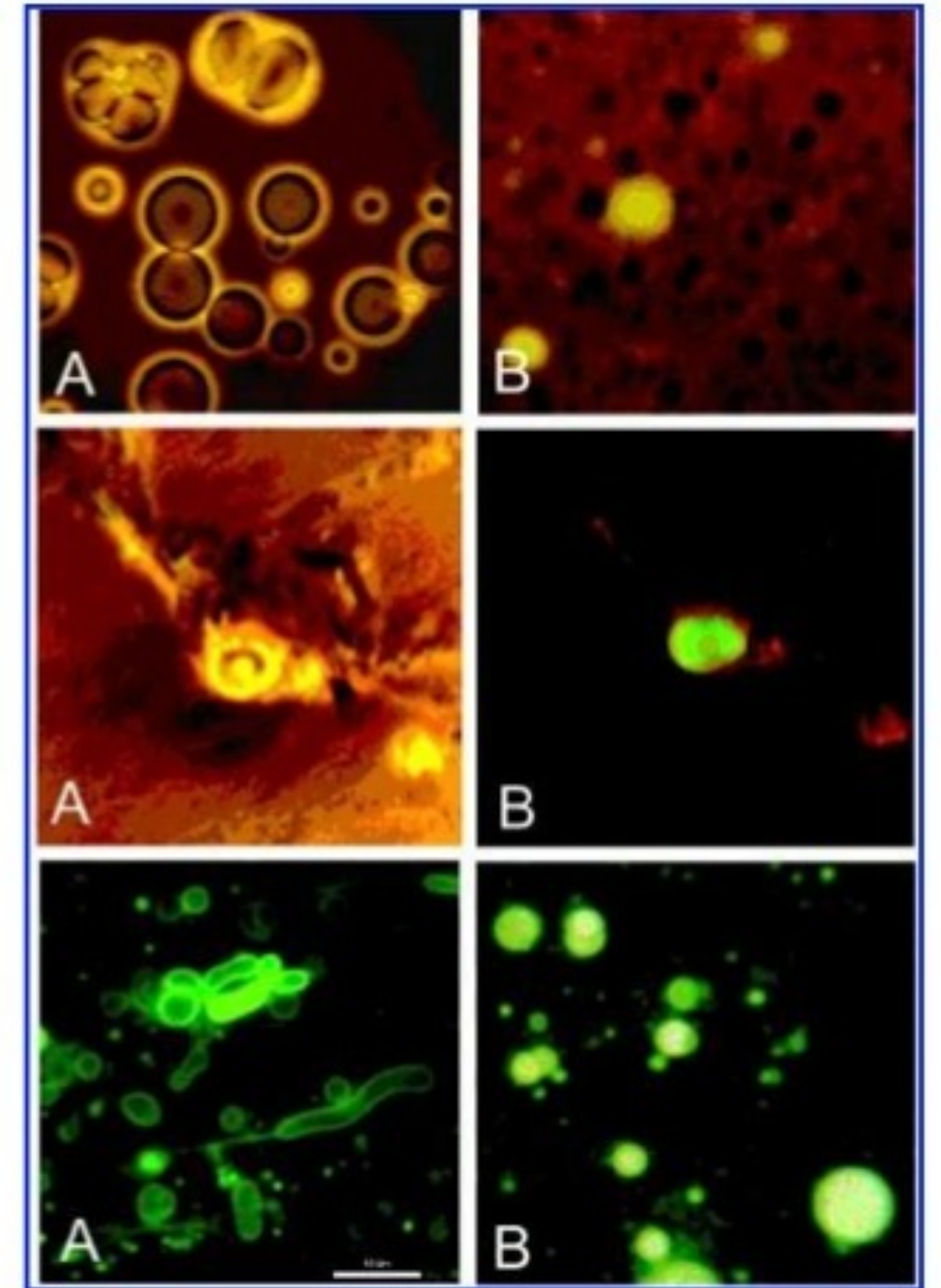
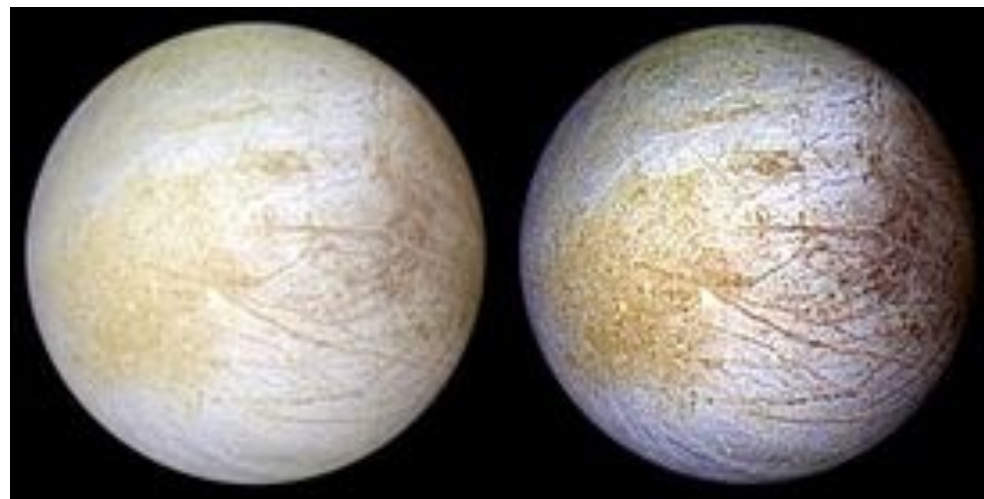


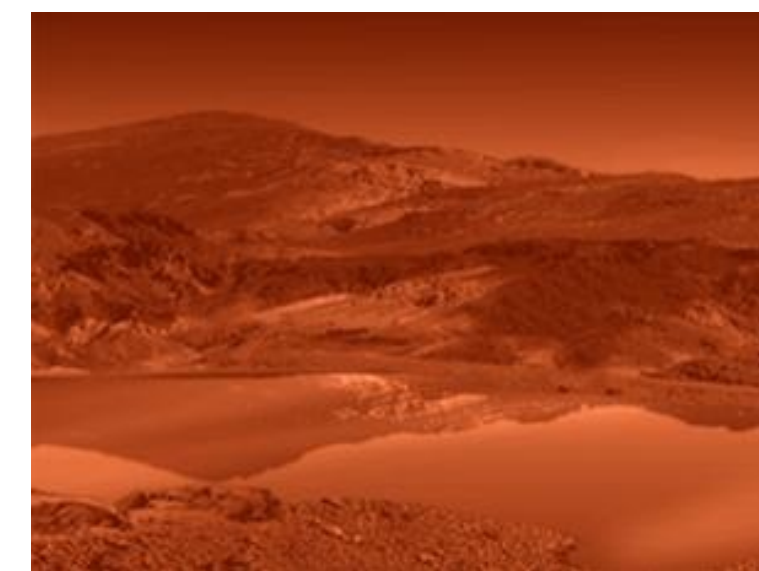
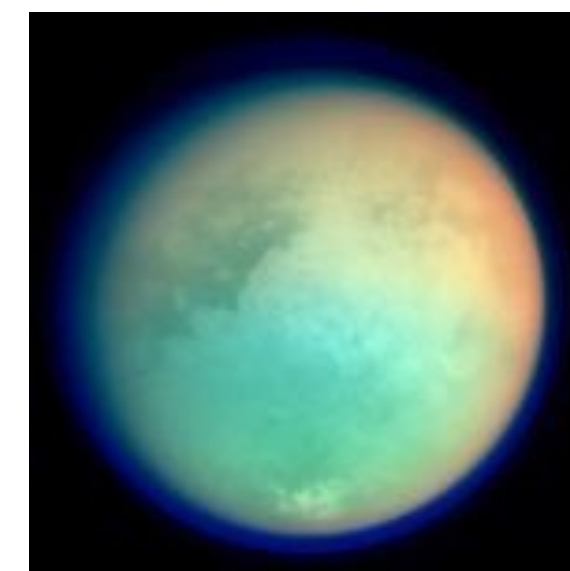
FIG. 3. Phase (A) and fluorescence (B) micrographs of membranous vesicular structures formed from a Murchison meteorite extract (Deamer, 1985; Deamer and ...)

Astrobiologia

Aby szukać życia poza Ziemią należy zrozumieć, jak powstawało na Ziemi



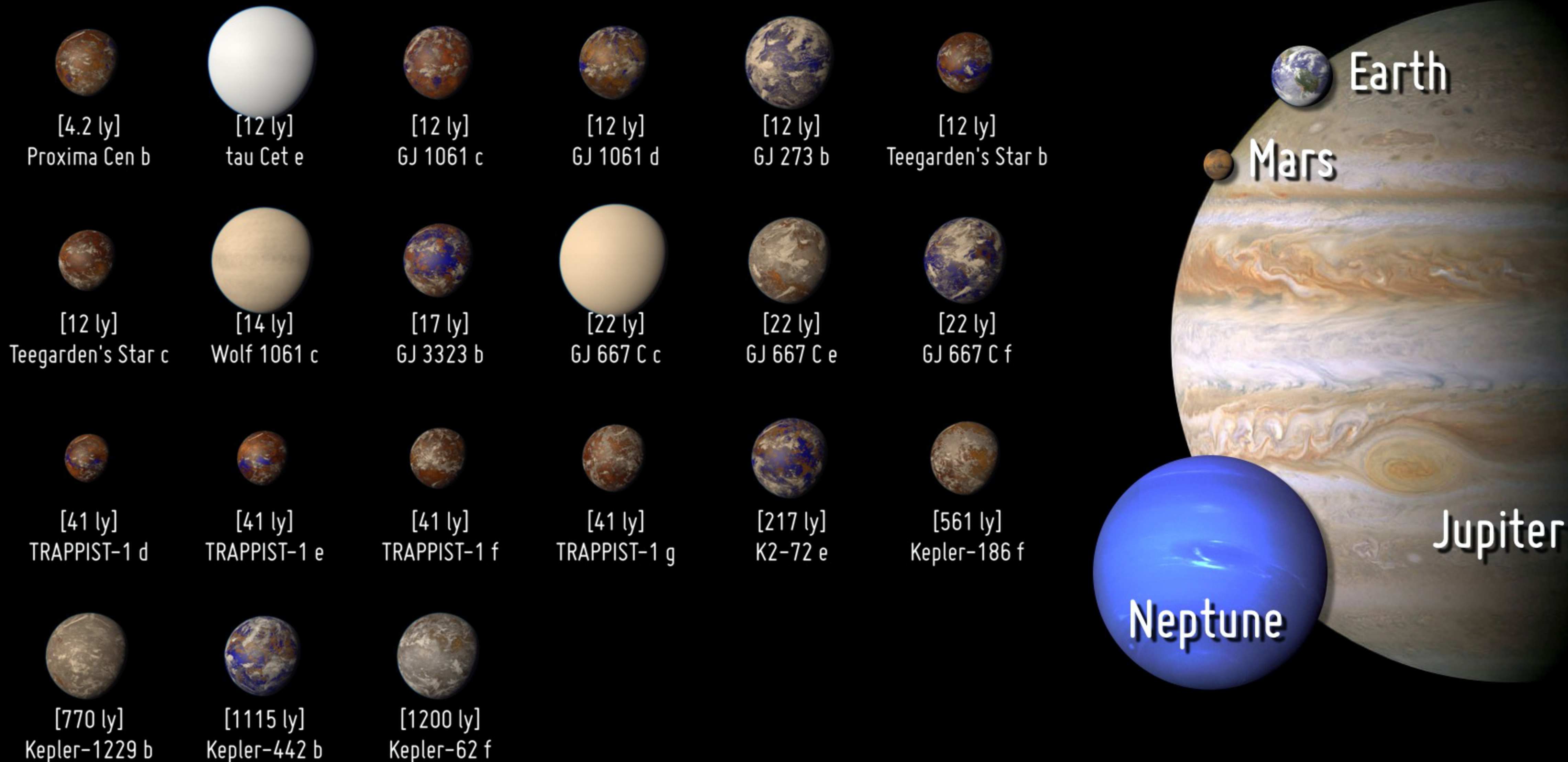
Europa (księżyc Jowisza), © Wikimedia



Tytan (księżyc Saturna), © Wikimedia, New Scientist

Potentially Habitable Exoplanets

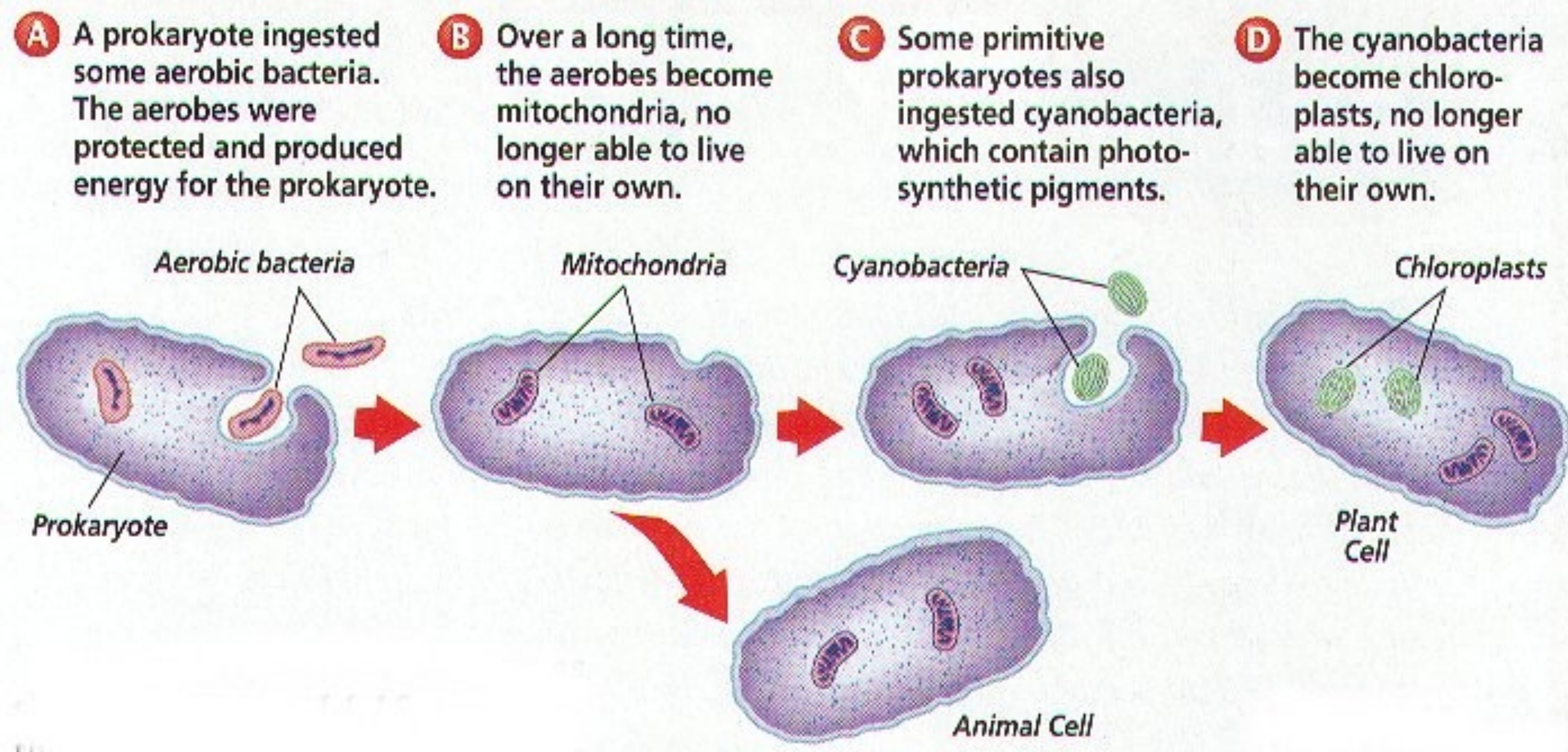
Ranked by Distance from Earth (light years)



Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) Sep 4, 2019

Powstanie komórki eukariotycznej- endosymbioza



Konstanty Miereżkowski (1855-1921)



Lynn Margulis (1938-2011)

Genomy organellarne

- Mitochondria i plastydy pochodzą od przedstawicieli Bacteria
- Gospodarz symbiozy należał do Archaea
- Genomy organellarne mają cechy genomów prokariotycznych
- Ogromna różnorodność struktury i organizacji ekspresji
- Kodują zwykle od kilku do kilkunastu (u człowieka - 13) białek, przeważnie składniki kompleksów łańcucha oddechowego/fotosyntezy oraz rRNA i tRNA
- Często dziedziczone tylko od jednego z rodziców (wyjątek: grzyby)

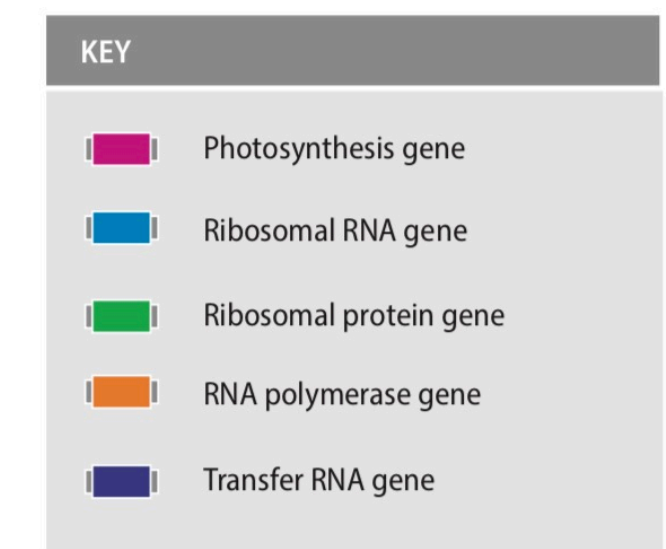
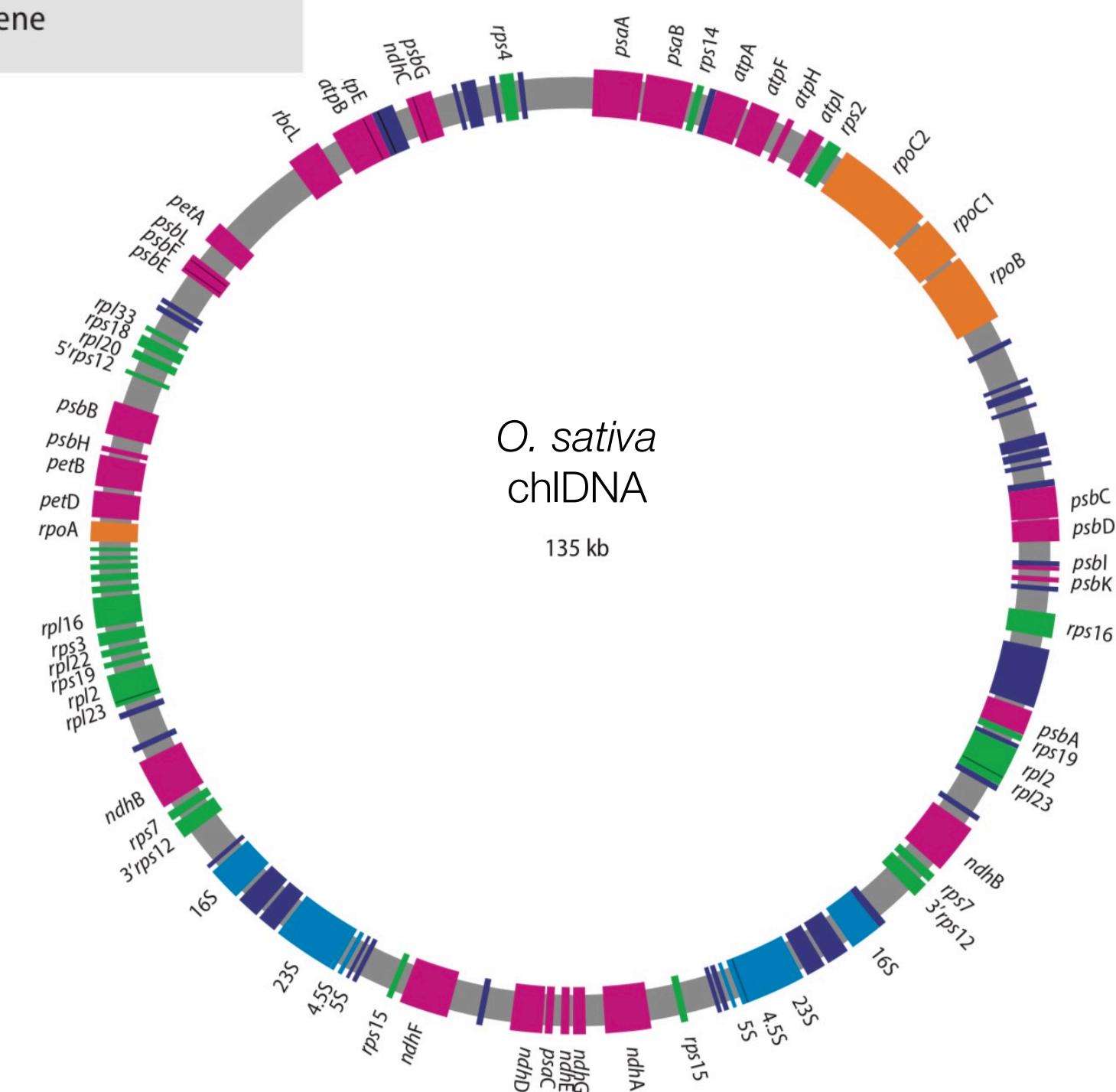
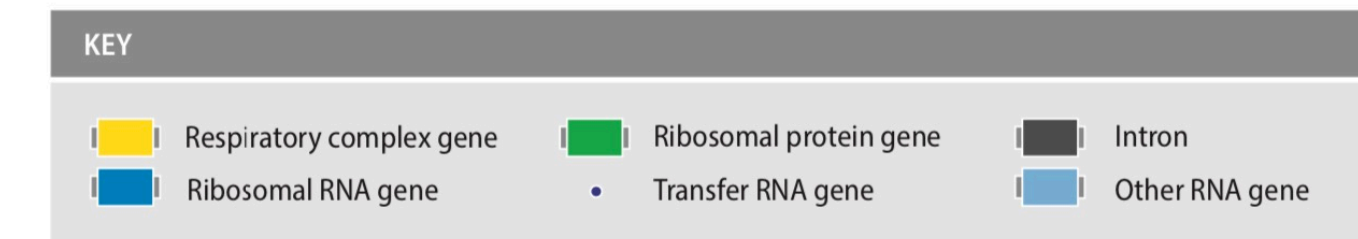
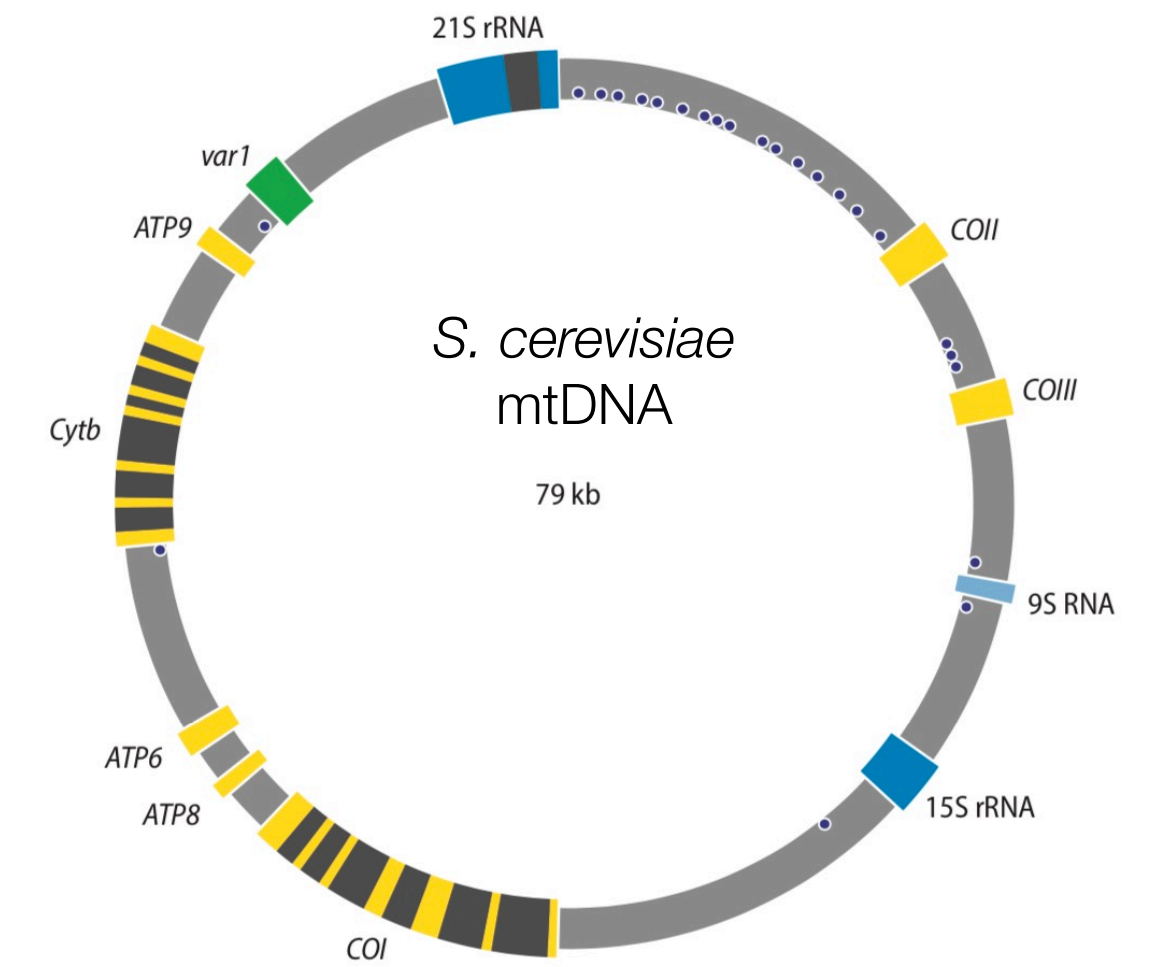
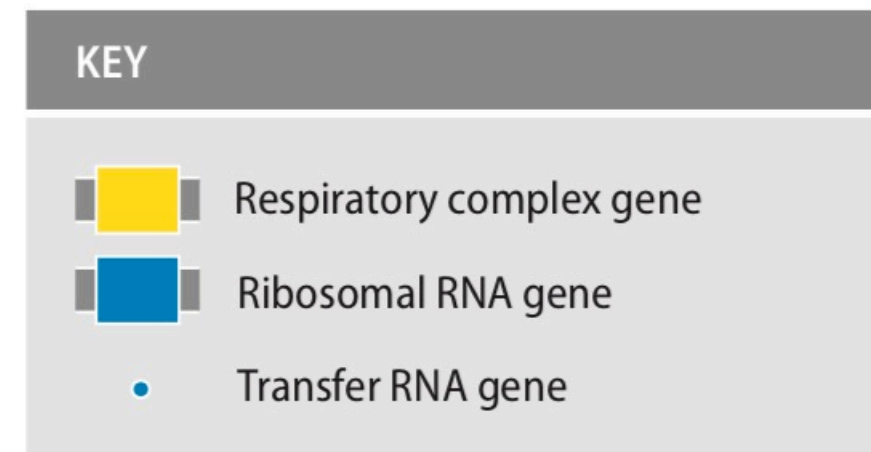
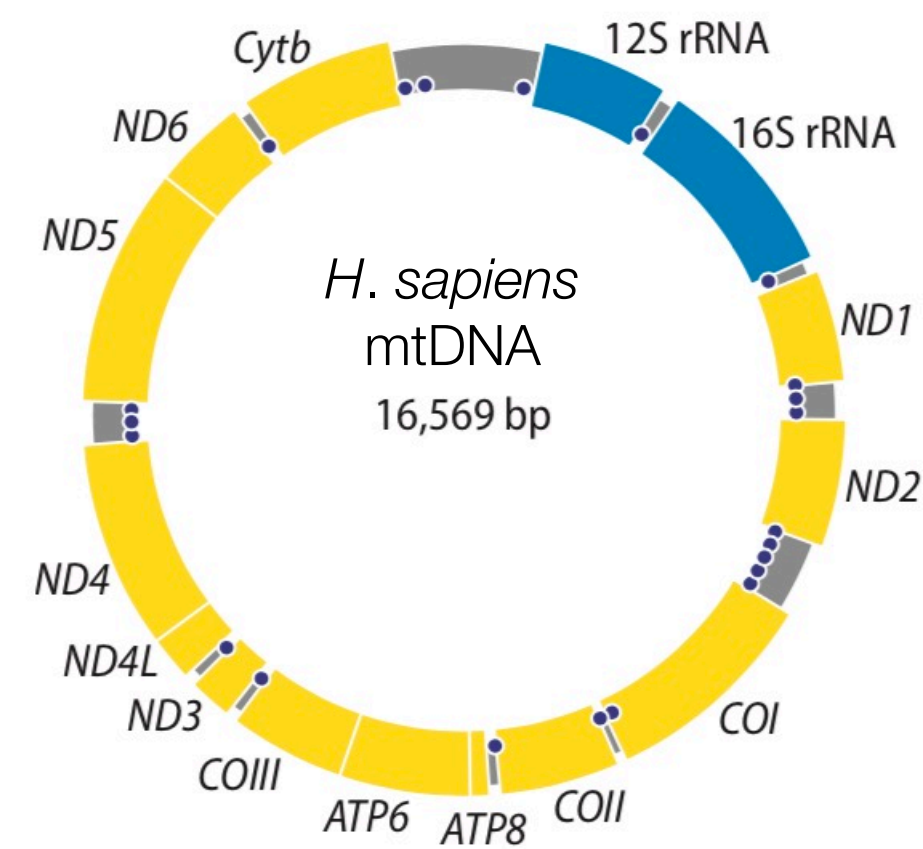
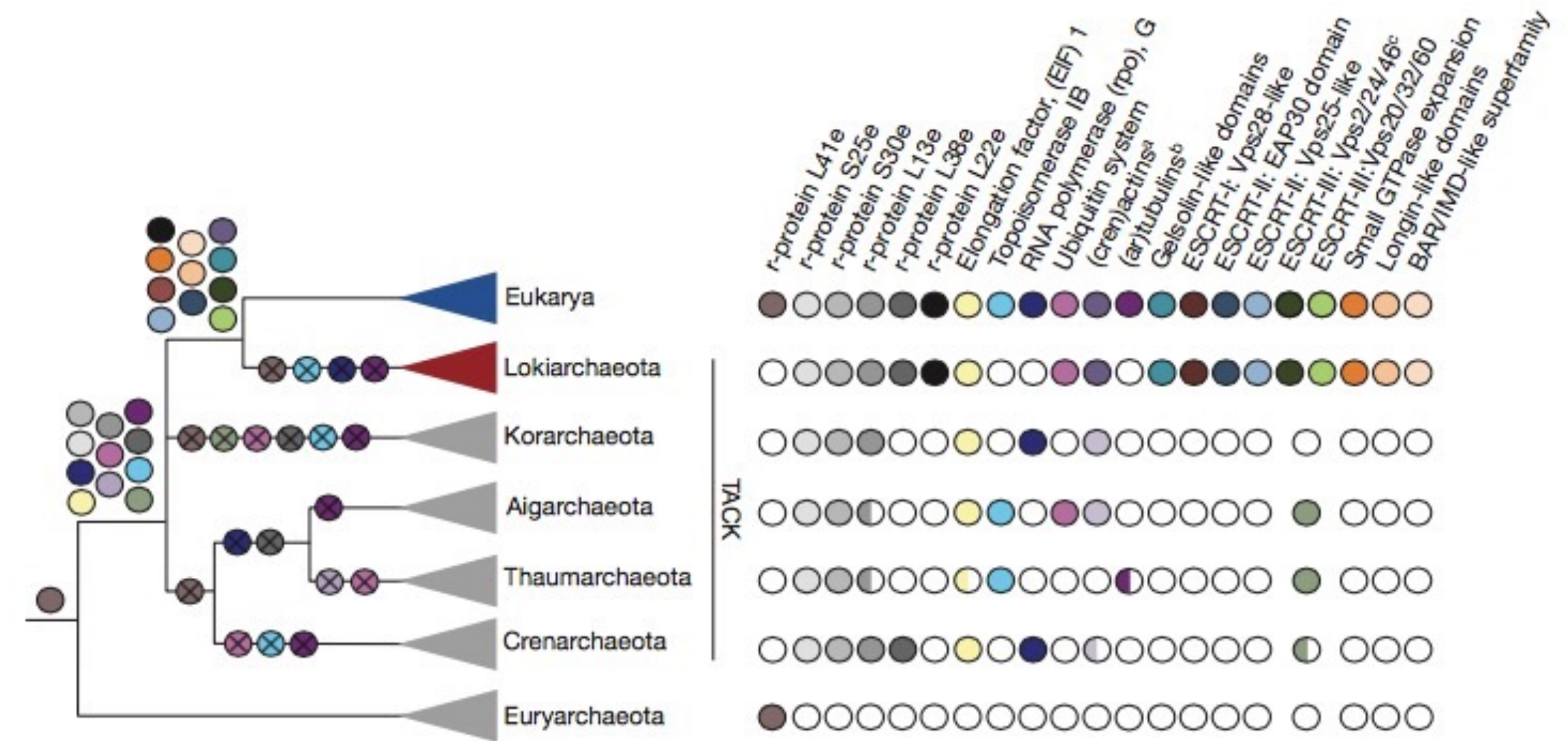


Figure 8.17 The rice chloroplast genome. Only those genes with known functions are shown. A number of the genes contain introns, which are not indicated on this map. These discontinuous genes include several for tRNAs, which is why the tRNA genes are of different lengths even though the tRNAs that they specify are all of similar size.

Gospodarz endosymbiozy był archeonem

- Lokiarcheota - monofiletyczna grupa Archaea, odkryta w badaniach metagenomicznych (2015 r.)
- Najbliżej (wtedy) spokrewniona z Eukaryota
- Posiada geny kodujące białka umożliwiające tworzenie złożonych struktur błonowych
- Tak mógł wyglądać gospodarz endosymbiozy, która dała początek Eukaryota
- W 2017 opisano więcej typów Archaea z tej gałęzi



ARTICLE

doi:10.1038/nature14447

Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes

Anja Spang^{1*}, Jimmy H. Saw^{1*}, Steffen L. Jørgensen^{2*}, Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka^{1*}, Joran Martijn¹, Anders E. Lind¹, Roel van Eijk[†], Christa Schleper^{2,3}, Lionel Guy^{1,2} & Thijs J. G. Ettema¹

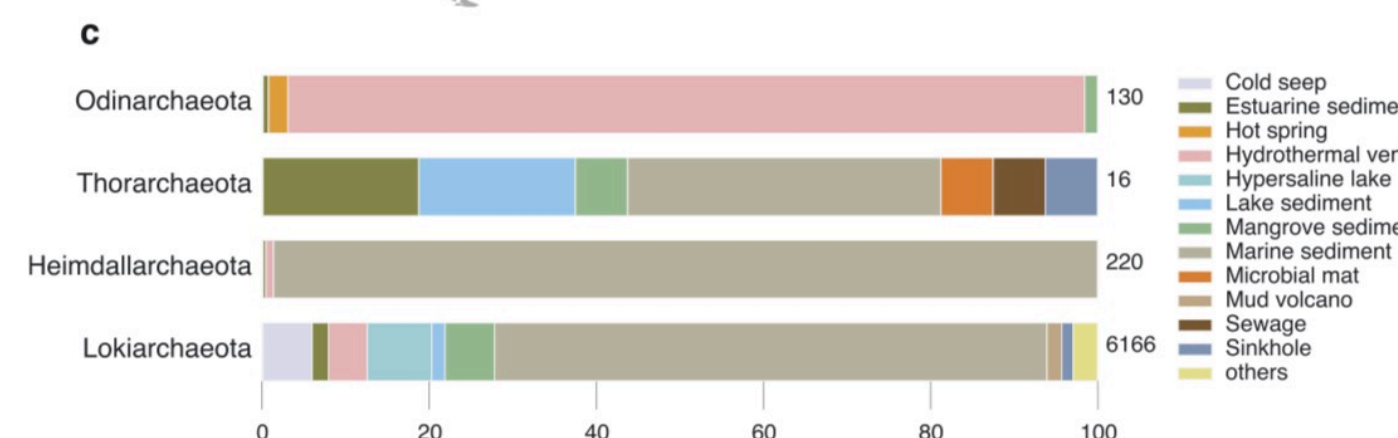
©2015 Macmillan Publishers Limited. All rights reserved



Asgard archaea illuminate the origin of eukaryotic cellular complexity

Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka^{1*}, Eva F. Caceres^{1*}, Jimmy H. Saw^{1*}, Disa Bäckström¹, Lina Juzokaite¹, Emmelien Vancaester^{††}, Kiley W. Seitz², Karthik Anantharaman³, Piotr Starnawski⁴, Kasper U. Kjeldsen⁵, Matthew B. Stott⁵, Takuro Nunoura⁶, Jillian F. Banfield³, Andreas Schramm⁴, Brett J. Baker², Anja Spang¹ & Thijs J. G. Ettema¹

© 2017 Macmillan Publishers Limited, part of Springer Nature. All rights reserved.



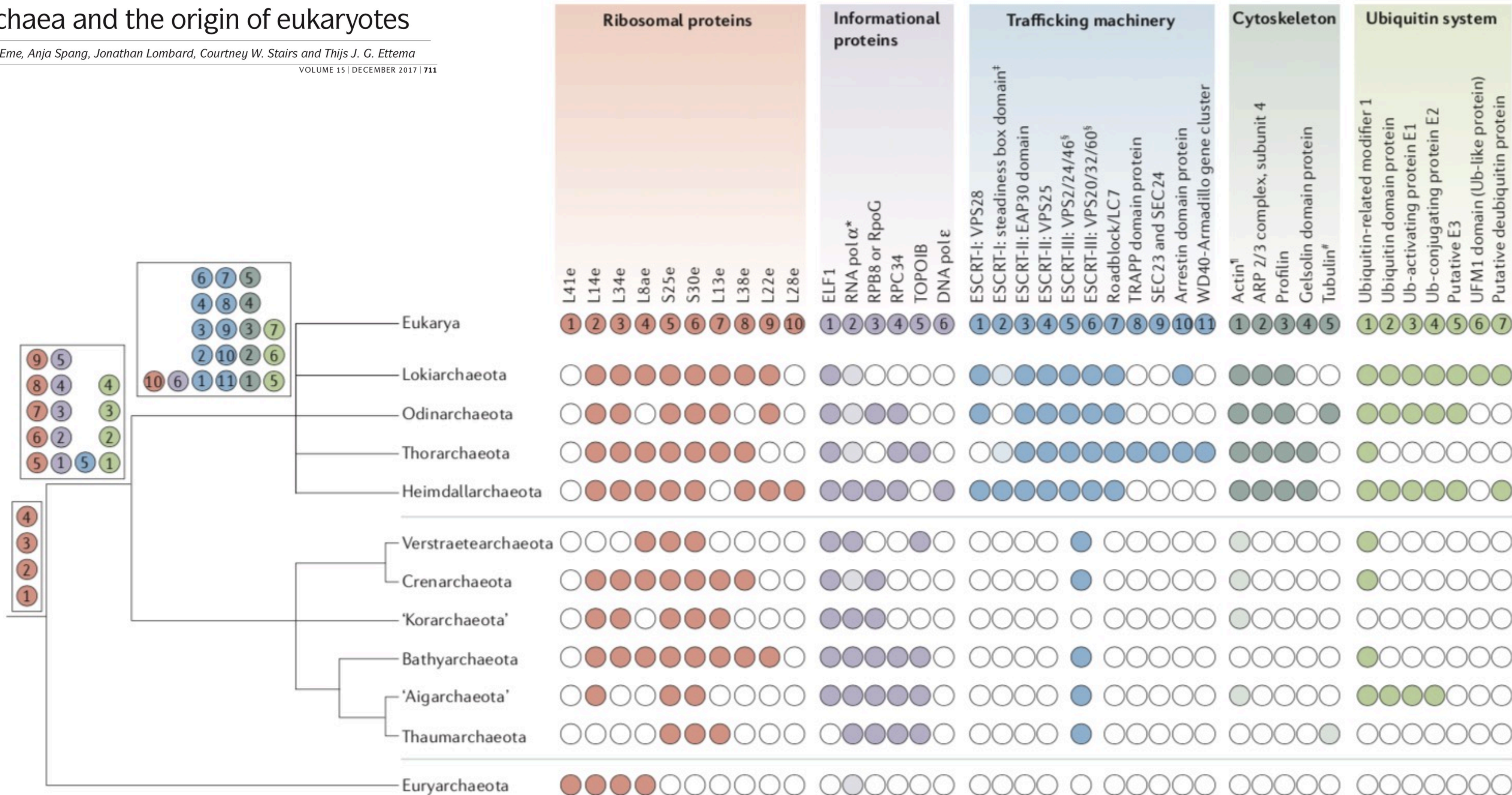
Pochodzenie typowo eukariotycznych funkcji

Archaea and the origin of eukaryotes

Laura Eme, Anja Spang, Jonathan Lombard, Courtney W. Stairs and Thijs J. G. Ettema

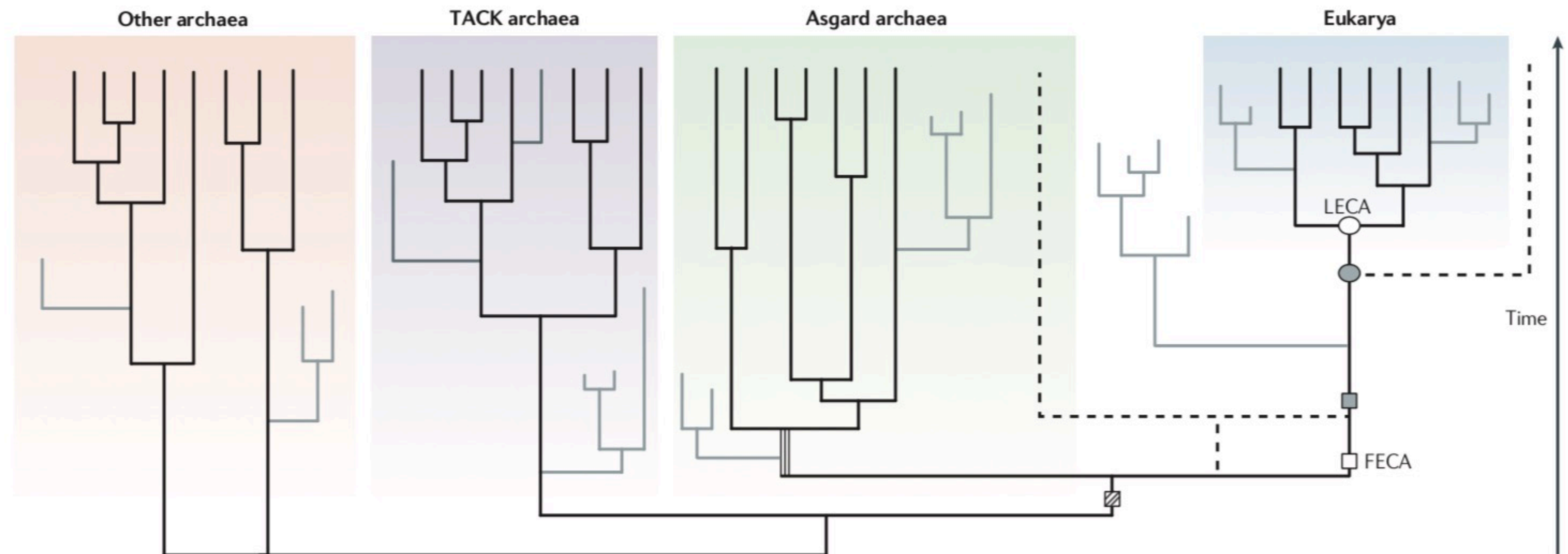
NATURE REVIEWS | MICROBIOLOGY

VOLUME 15 | DECEMBER 2017 | 711



Gospodarz symbiozy

- Był najbliższym krewnym współczesnych Archaea z grupy Asgard
- Chyba, że znajdziemy jeszcze bliższą grupę

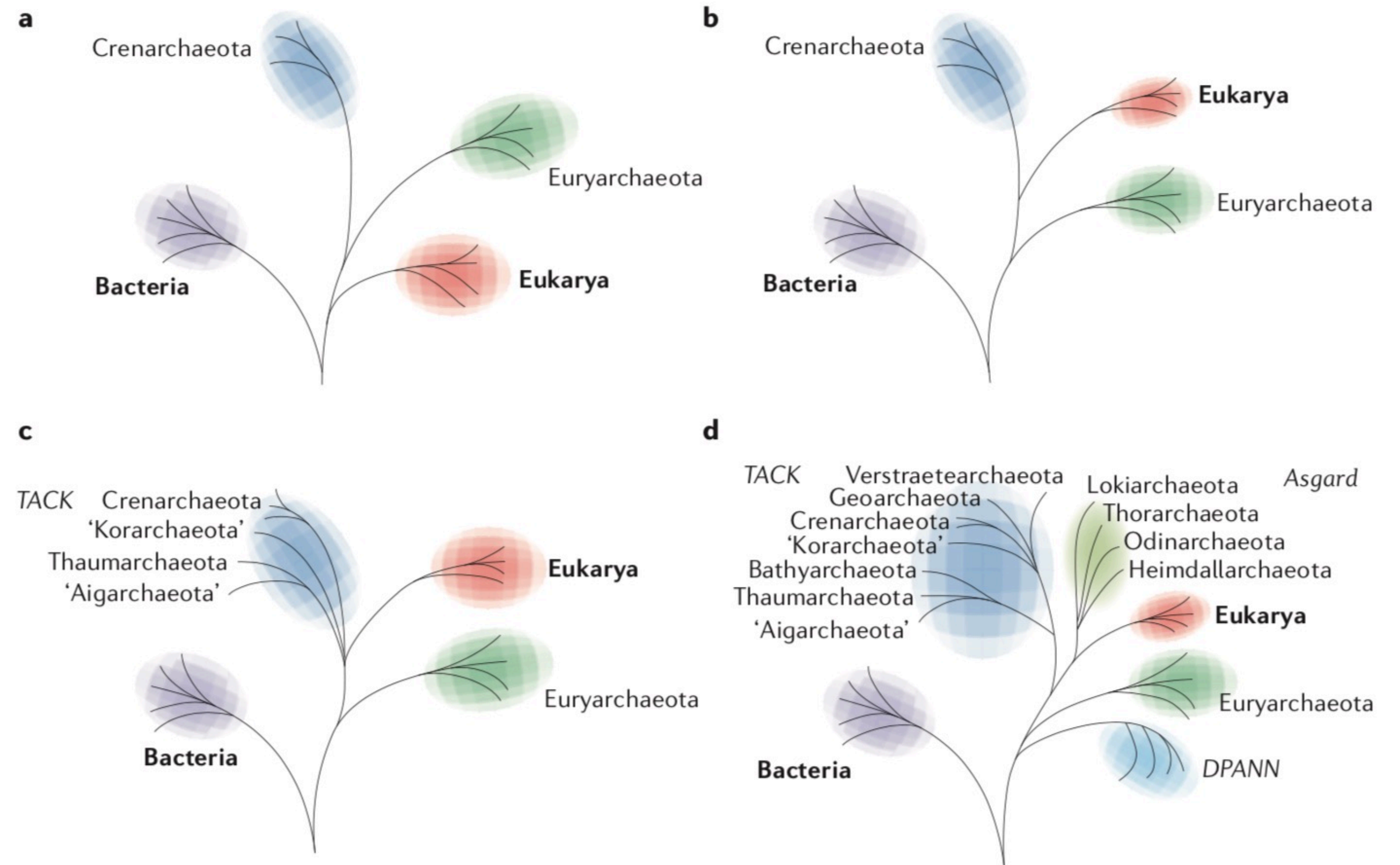


Dwie domeny życia

- **a** - drzewo Woese (1977) z modyfikacjami: 3 domeny
- **b** - dwie domeny
- **c, d** - po odkryciu nowych grup Archaea dzięki metagenomice

TACK - **T**haumarchaeota, **A**igarchaeota, **C**renarchaeota, **K**orarchaeota

DPANN - **D**iapherotrites, **P**arvarchaeota, **A**enigmarchaeota, **N**anoarchaeota, **N**anohaloarchaeota



Archaea and the origin of eukaryotes

Laura Eme, Anja Spang, Jonathan Lombard, Courtney W. Stairs and Thijs J. G. Ettema

Ewolucja genomów

Mechanizmy ewolucji

- Generujące zmienność - losowe
 - mutacje
 - rearanżacje genomu
 - horyzontalny transfer genów
- Działające na warianty wytworzone przez zmienność
 - dobór naturalny - nielosowy!
 - źródłem informacji genetycznej jest środowisko, w procesie doboru naturalnego
 - dryf genetyczny

Podobieństwo i homologia

- Homologia: podobieństwo wynikające ze wspólnego pochodzenia ewolucyjnego – cecha odziedziczona od wspólnego przodka
- vs. homoplazja – podobieństwo powstałe niezależnie, nie odziedziczone po wspólnym przodku

Podobieństwo i homologia sekwencji

- Przy dostatecznie dużym podobieństwie można założyć, że sekwencje DNA i białek są homologiczne
 - Podobne struktury przestrzenne i/lub funkcje mogą być determinowane przez różne sekwencje
 - Liczba możliwych sekwencji aminokwasowych o nietrywialnej długości jest gigantyczna
 - dla 300 aminokwasów 20^{300} , czyli $\sim 2 \times 10^{390}$
 - liczba atomów we Wszechświecie: $\sim 1 \times 10^{80}$

Podobieństwo i homologia sekwencji

- Na poziomie sekwencji praktycznie nie stwierdza się konwergencji, homoplazje są przypadkowe i dotyczą pojedynczych pozycji, a nie całych sekwencji
- Dlatego sekwencje są doskonałym narzędziem do badania filogenezy

Rozmiary genomów

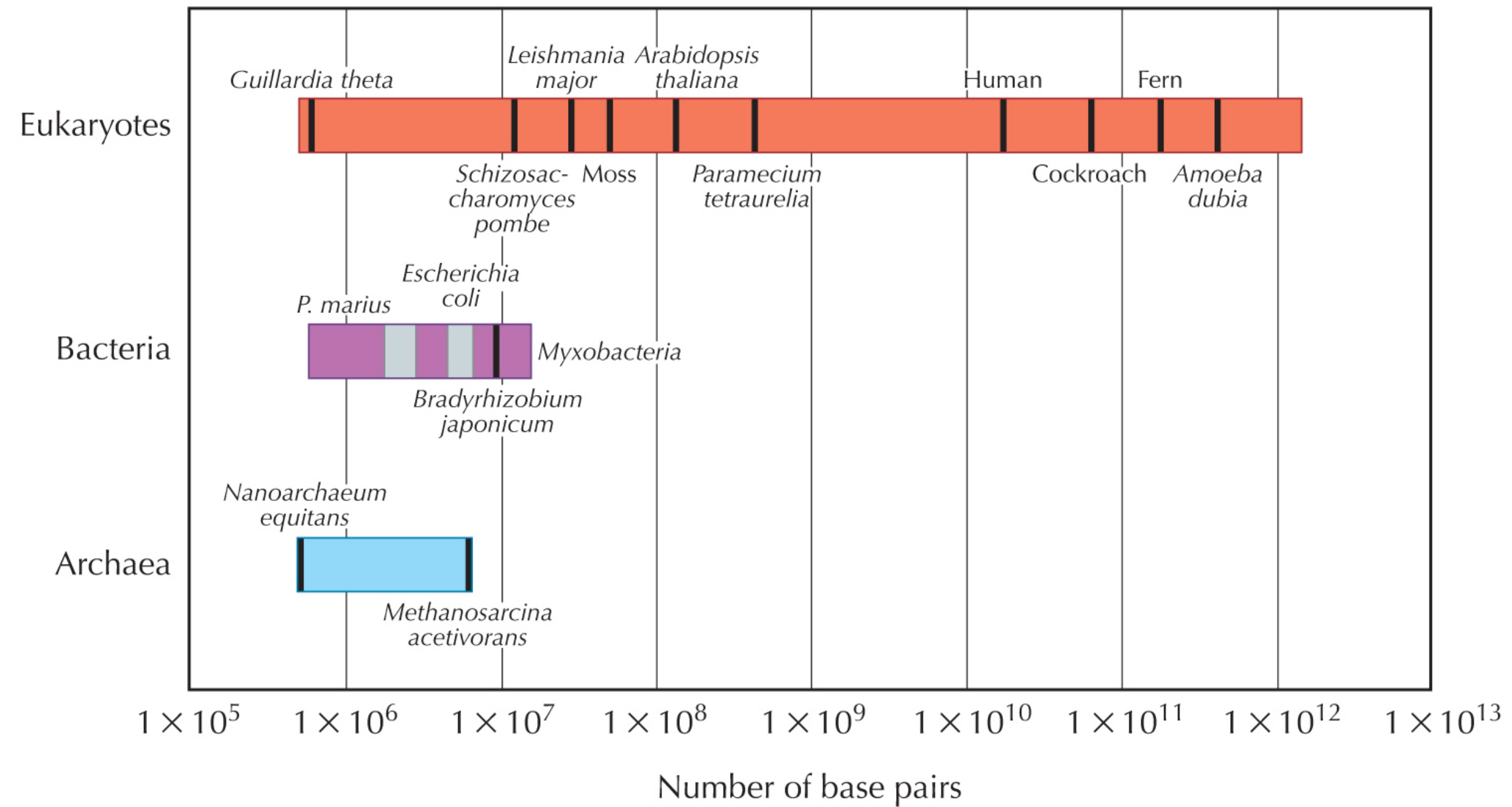


FIGURE 7.1. Genome sizes in the three domains of life. A selection of genome sizes and size ranges from specific groups of organisms is indicated.

7.1, adapted from Bentley S.D. et al., *Annu. Rev. Genet.* **38**: 771–791, © 2004 Annual Reviews, www.annualreviews.org, based on data from DOGS <http://www.cbs.dtu.dk/databases/DOGS/>

Rozmiary genomów i liczba genów

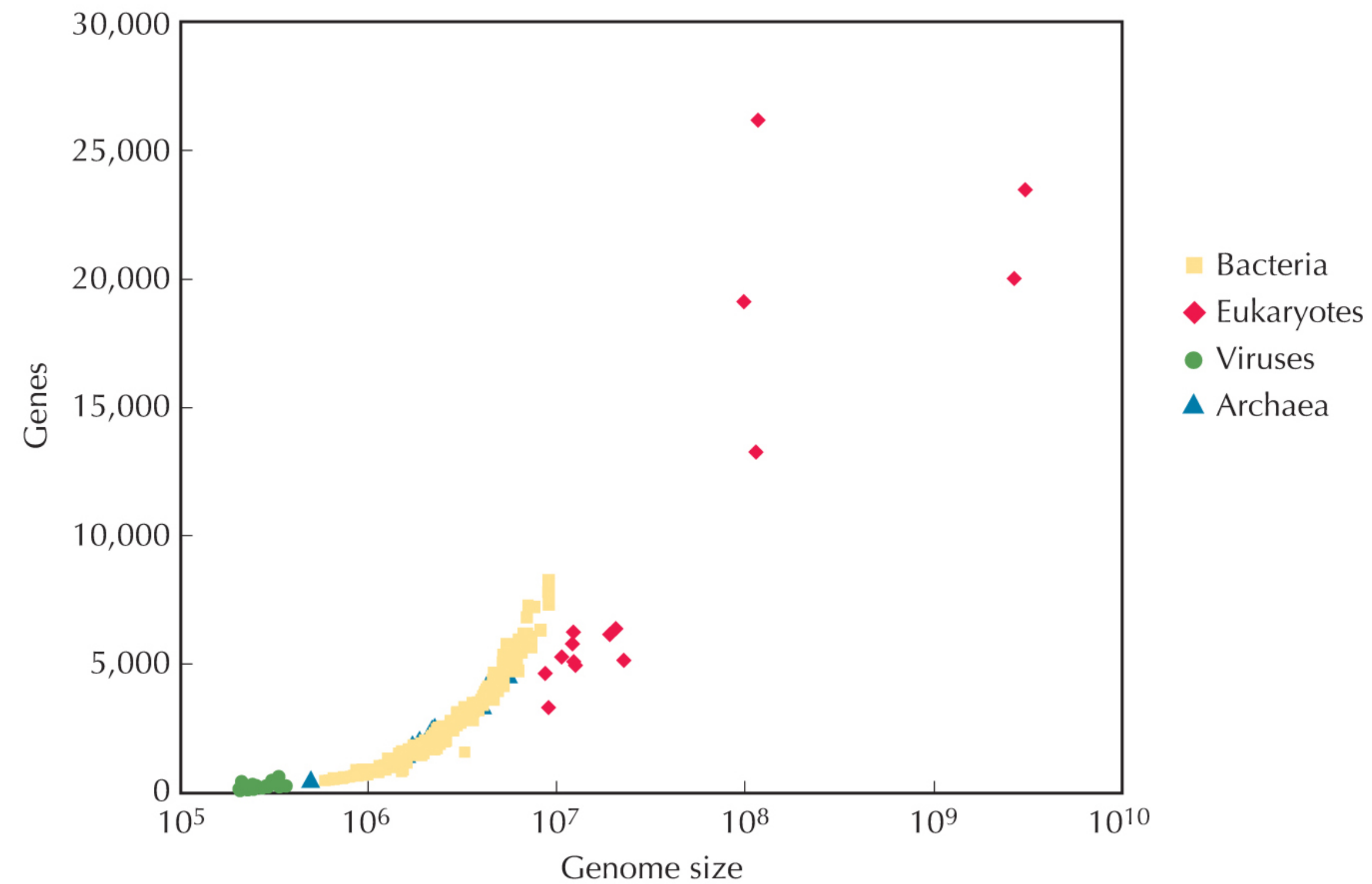


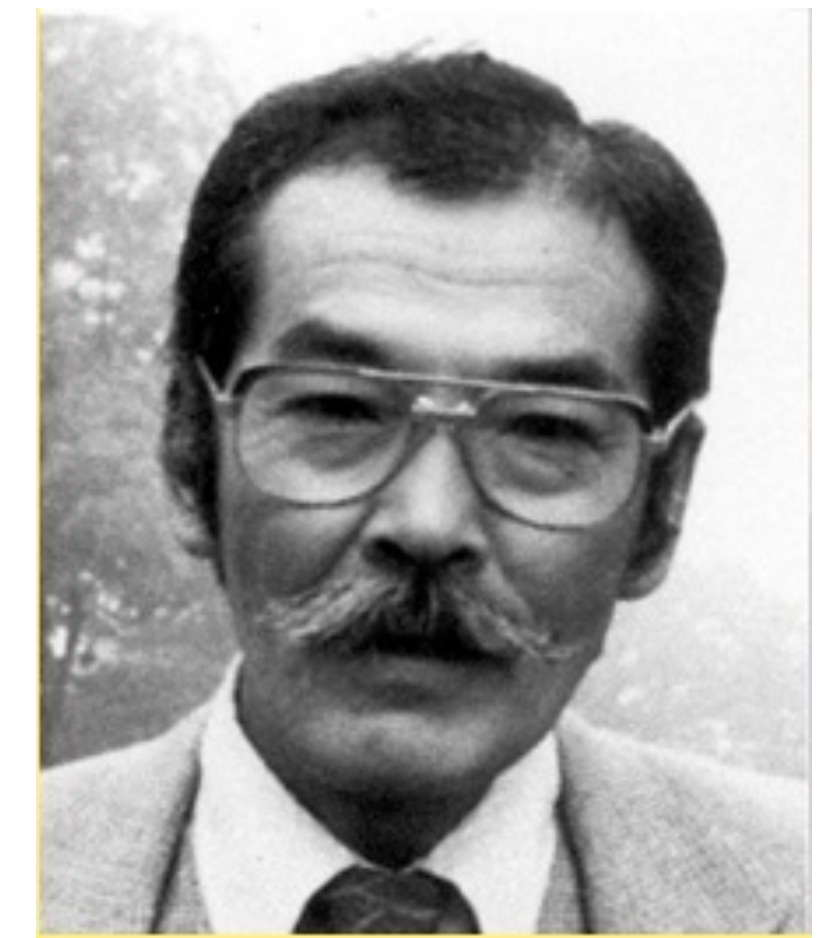
FIGURE 7.3. Genome size vs. number of protein-coding genes. The number of genes is highly correlated to genome size for bacteria, archaea, and viruses, but less so for eukaryotes. Many archaeal points (*blue triangles*) are hidden under bacterial ones (*yellow squares*).

Skąd się biorą nowe geny

- Liczba genów w trakcie ewolucji wzrasta
- Jak powstaje nowa informacja (nowe geny)?

Duplikacja jako źródło nowych genów

- Mutacje + dobór mogą zmienić funkcję genu/białka, ale wiąże się to z utratą wcześniejszej funkcji
- Hipoteza Ohno (1970) - duplikacje są jedynym sposobem powstawania nowych funkcji
 - zasadniczo prawdziwa, znane są odstępstwa, ale rzadkie
- Powstają **rodziny genów**



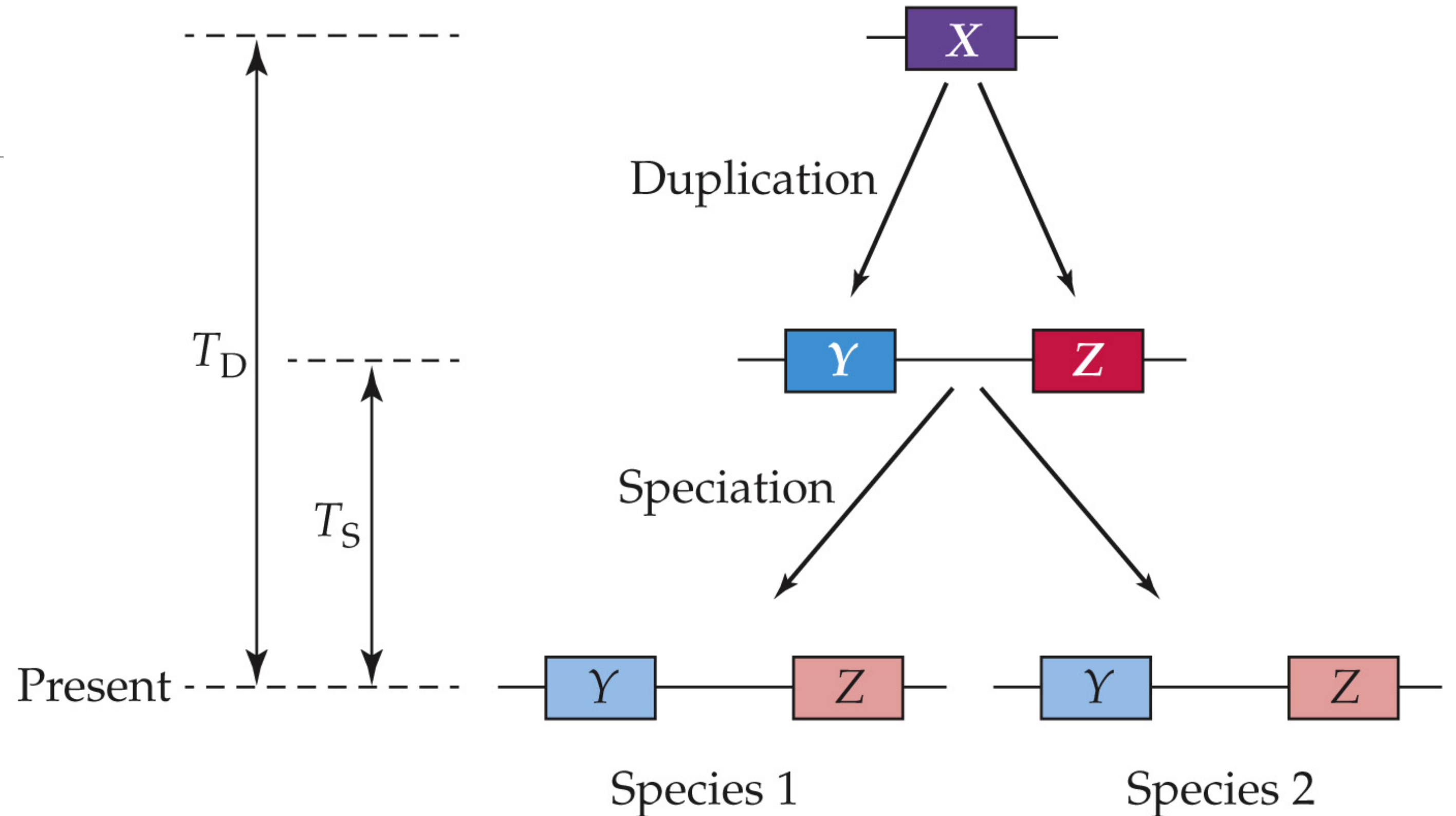
Susumu Ohno
1928 - 2000

Nowe geny powstają dzięki duplikacji DNA

- Duplikacje wewnątrz genu
- Duplikacje całych genów
- Duplikacje fragmentów (segmentalne) i całych chromosomów (aneuploidia)
- Duplikacje genomu (poliploidia)

Paralogi i ortologi

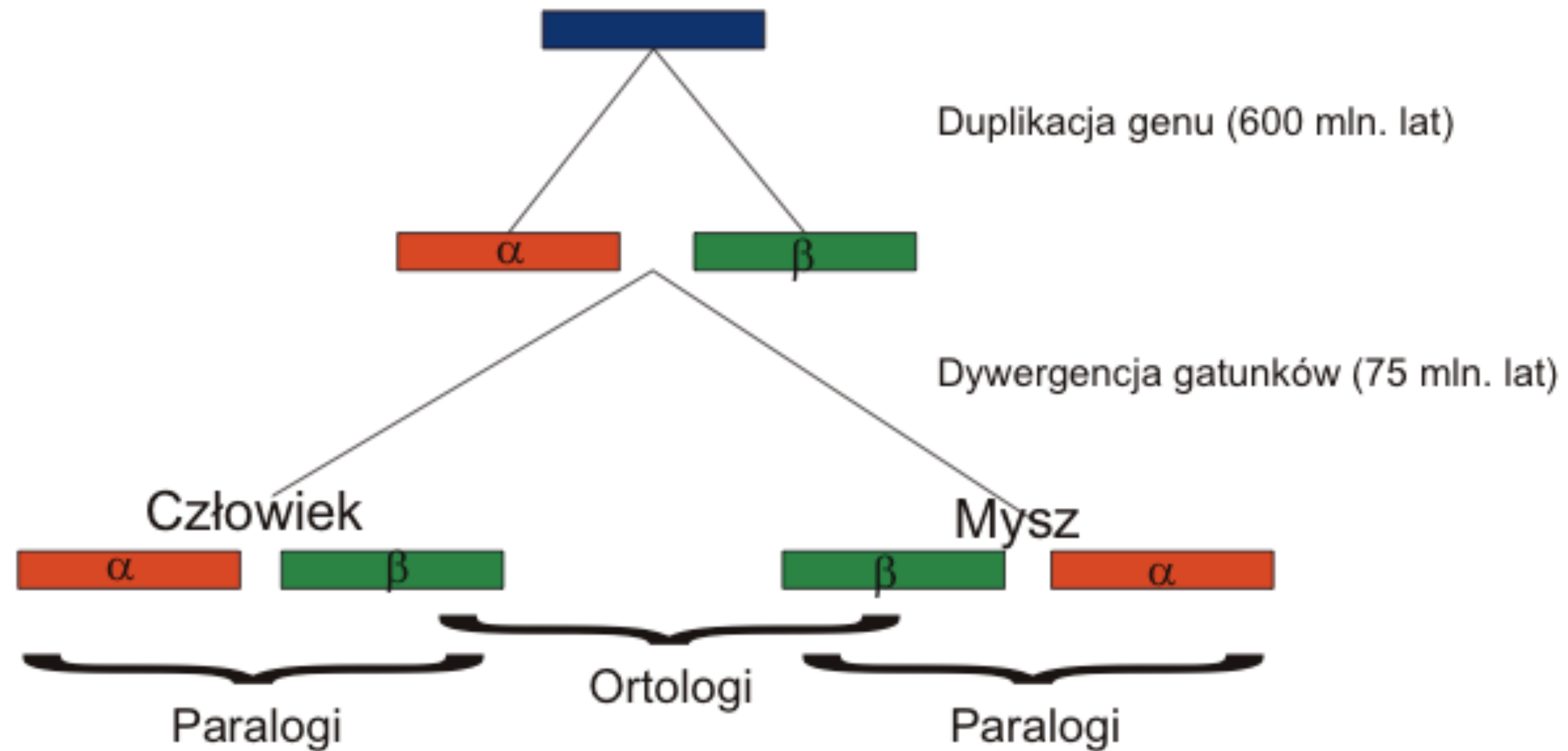
- Homologia genów: podobieństwo wynikające ze wspólnego pochodzenia
- Paralogia: homologia przez duplikację
 - np. α -globina i β -globina człowieka
- Ortologia: homologia przez specjację
 - np. α -globina człowieka i α -globina myszy



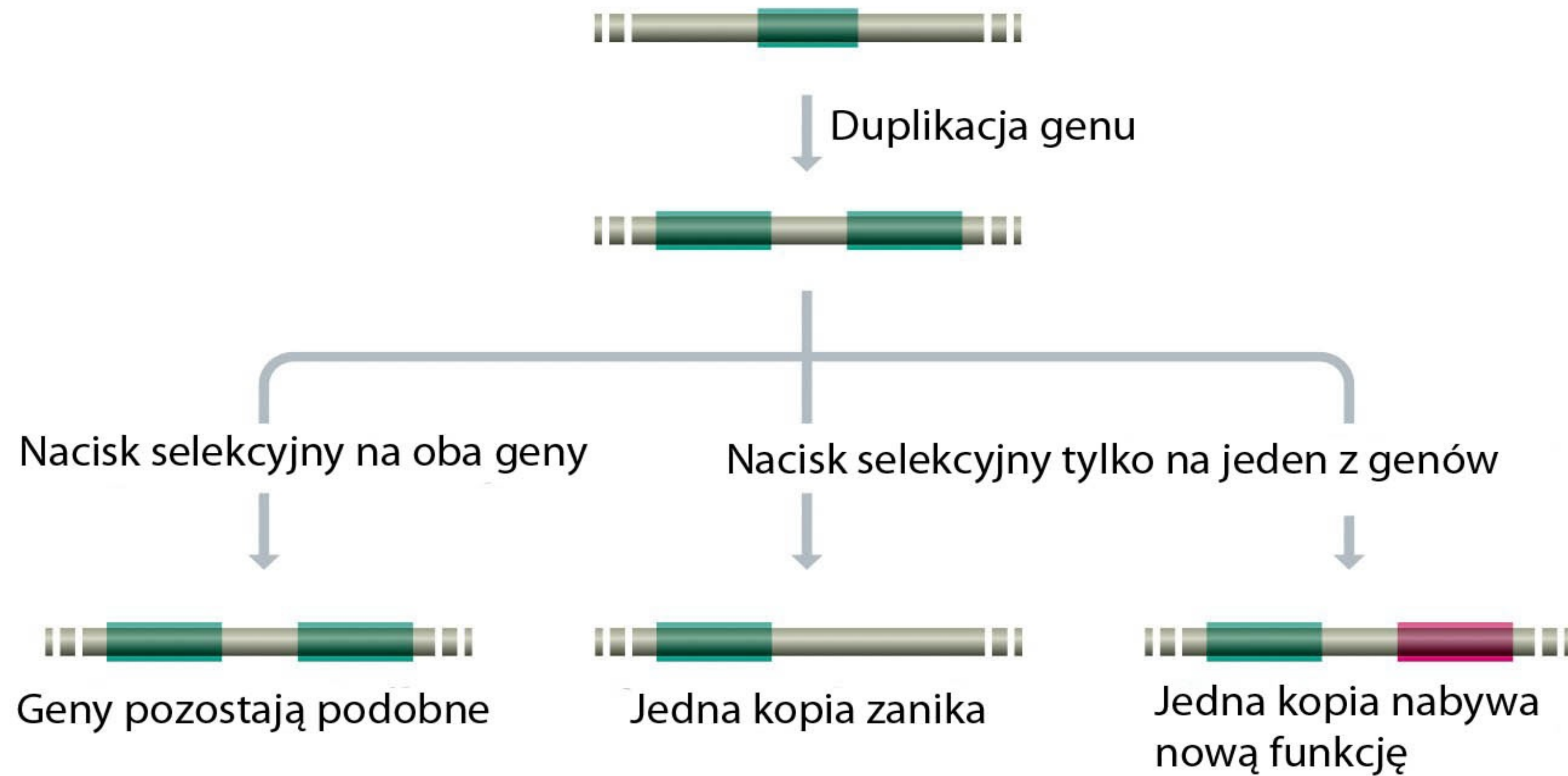
MOLECULAR AND GENOME EVOLUTION 1e, Figure 7.3
© 2016 Sinauer Associates, Inc.

Y i Z: paralogi
Y1 i Y2: ortologi

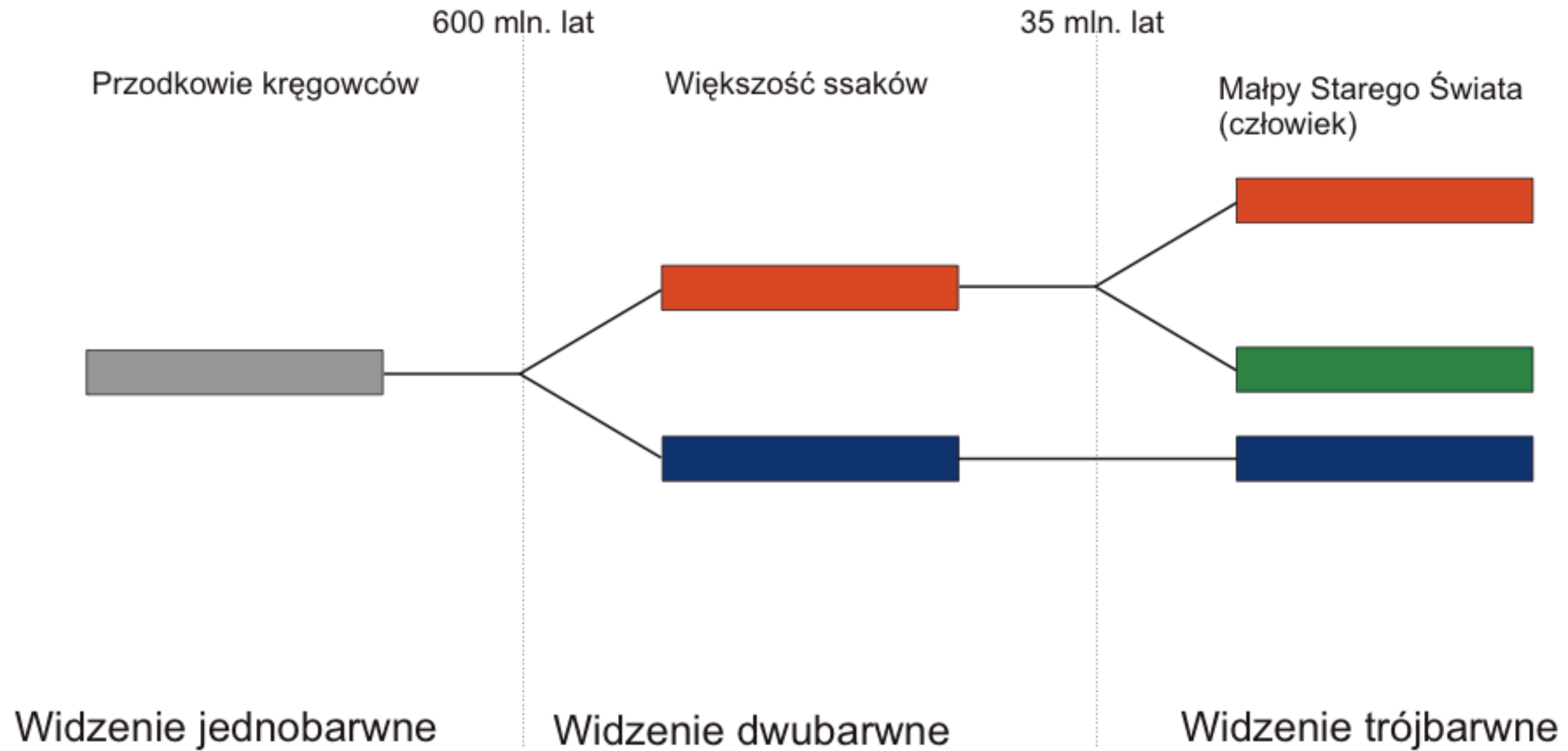
Ewolucja globin - paralogi i ortologi



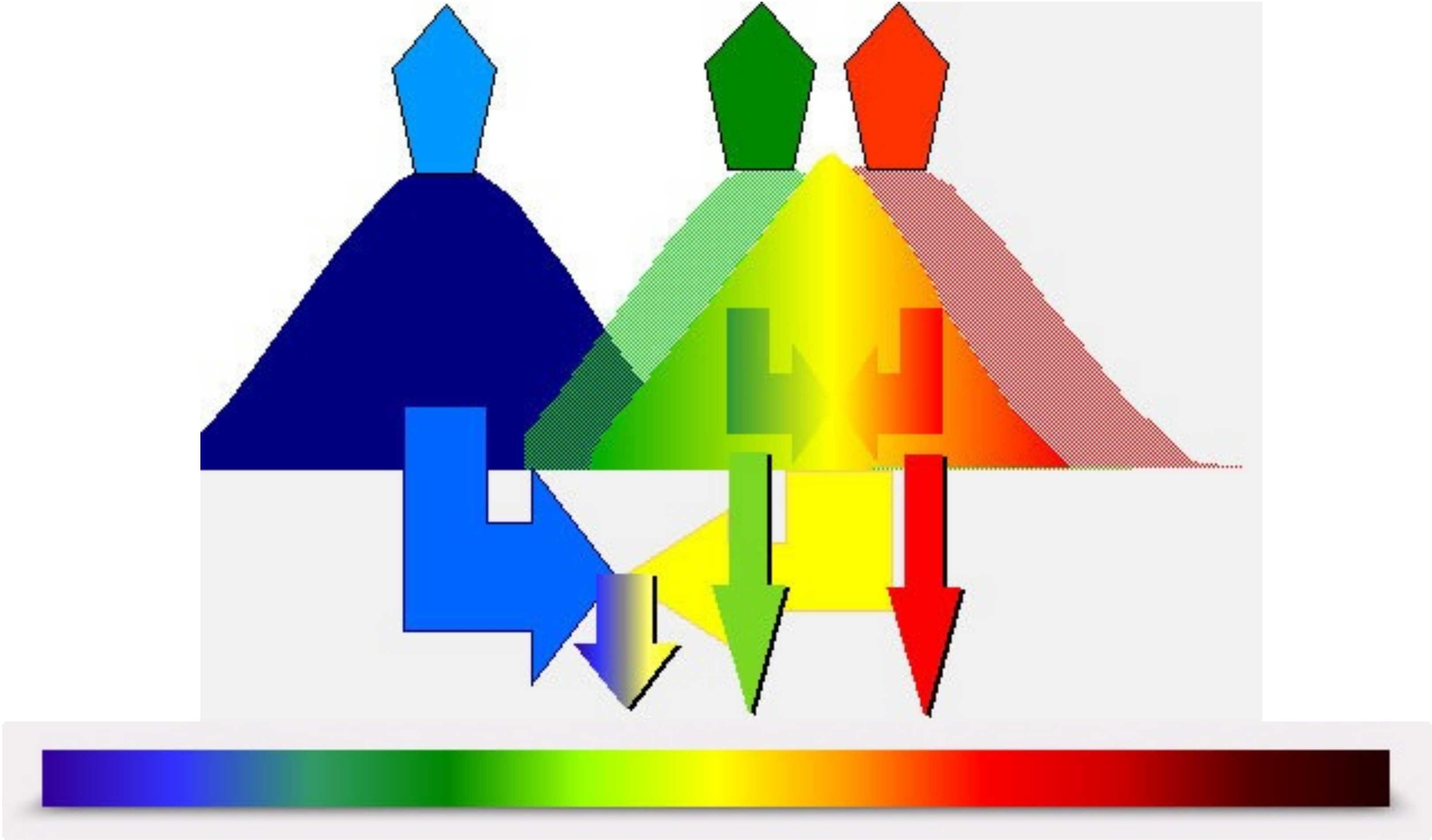
Duplikacje



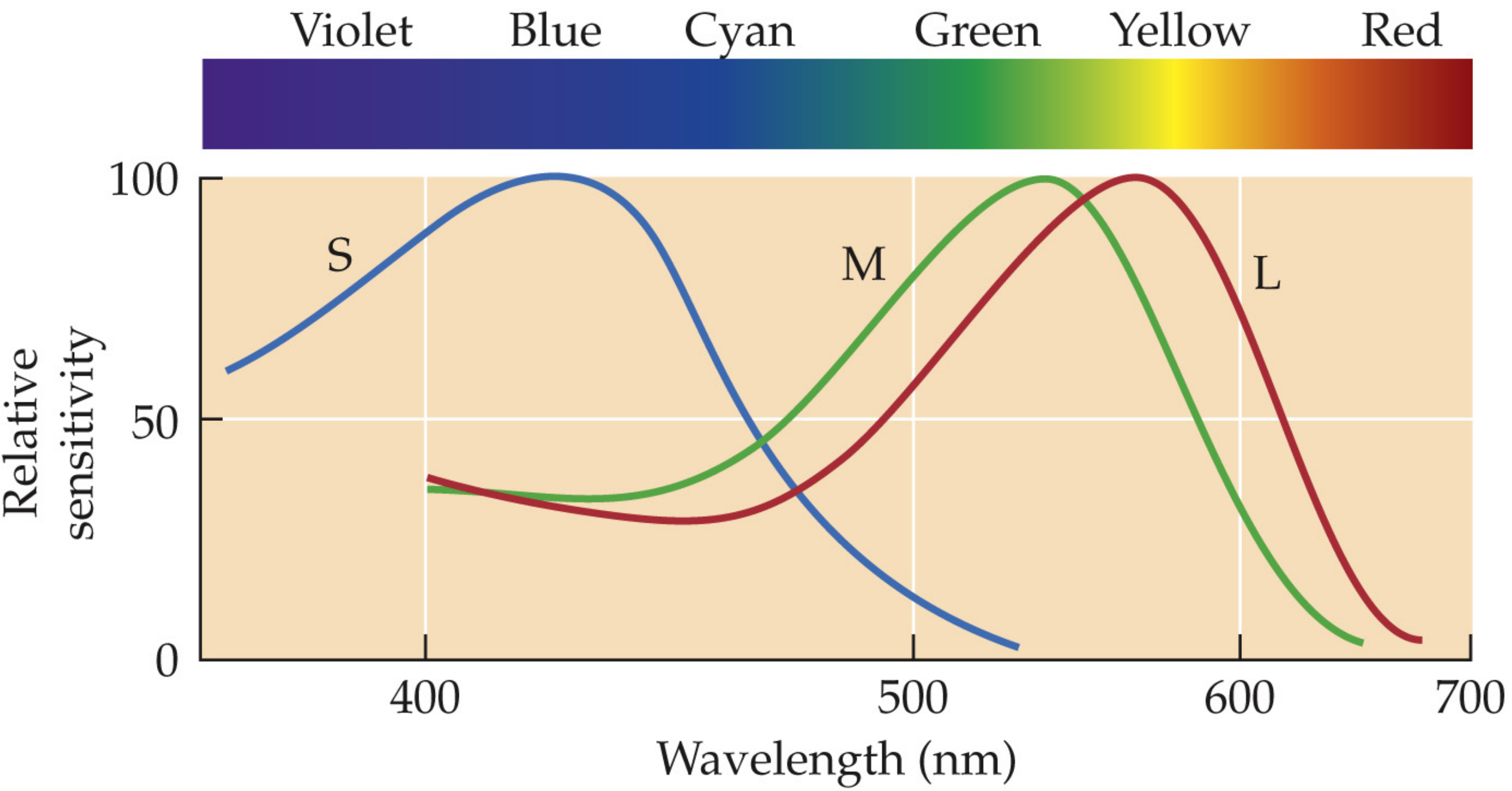
Ewolucja genów opsyn



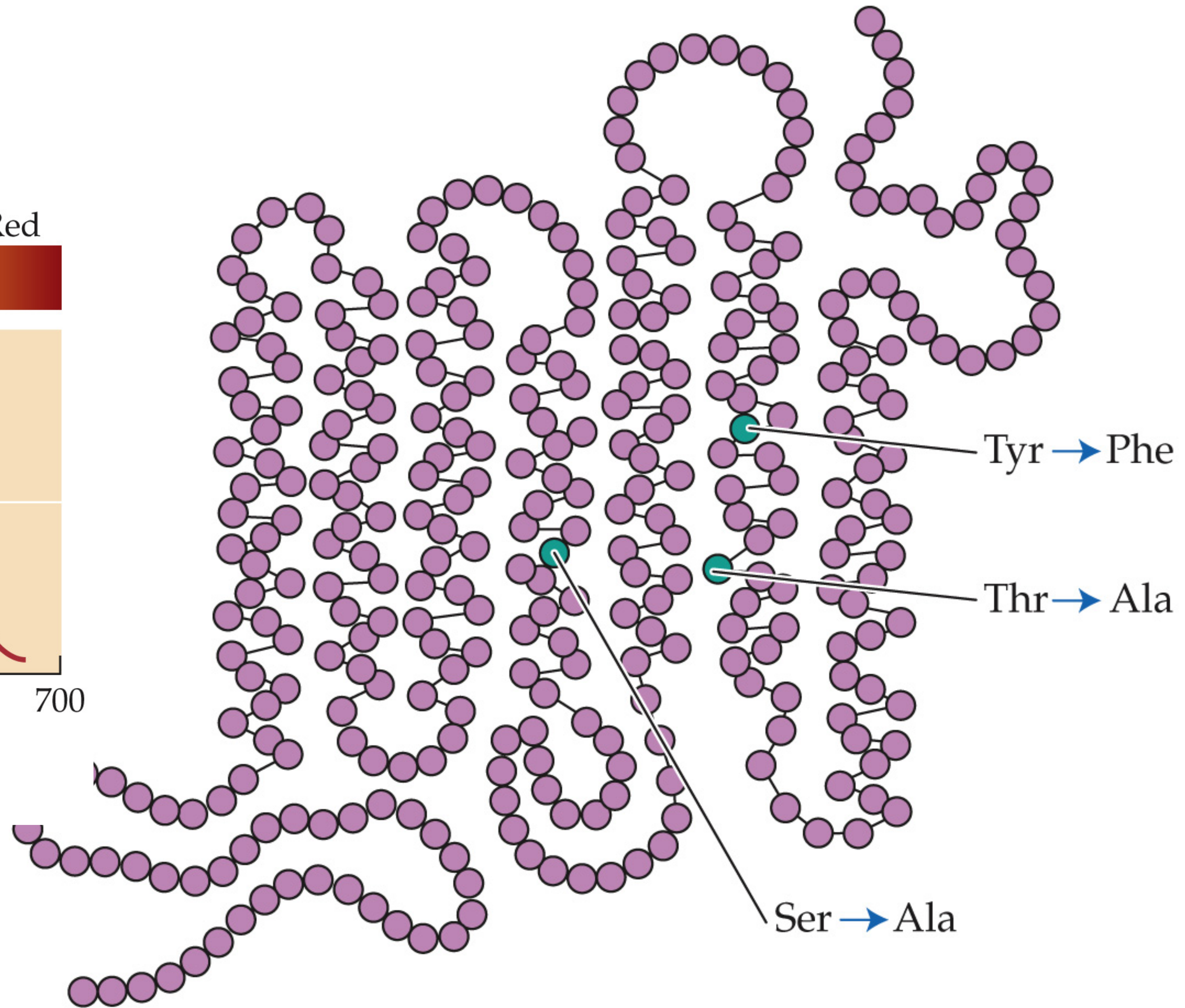
Ewolucja widzenia barw



Od zielonego do czerwonego

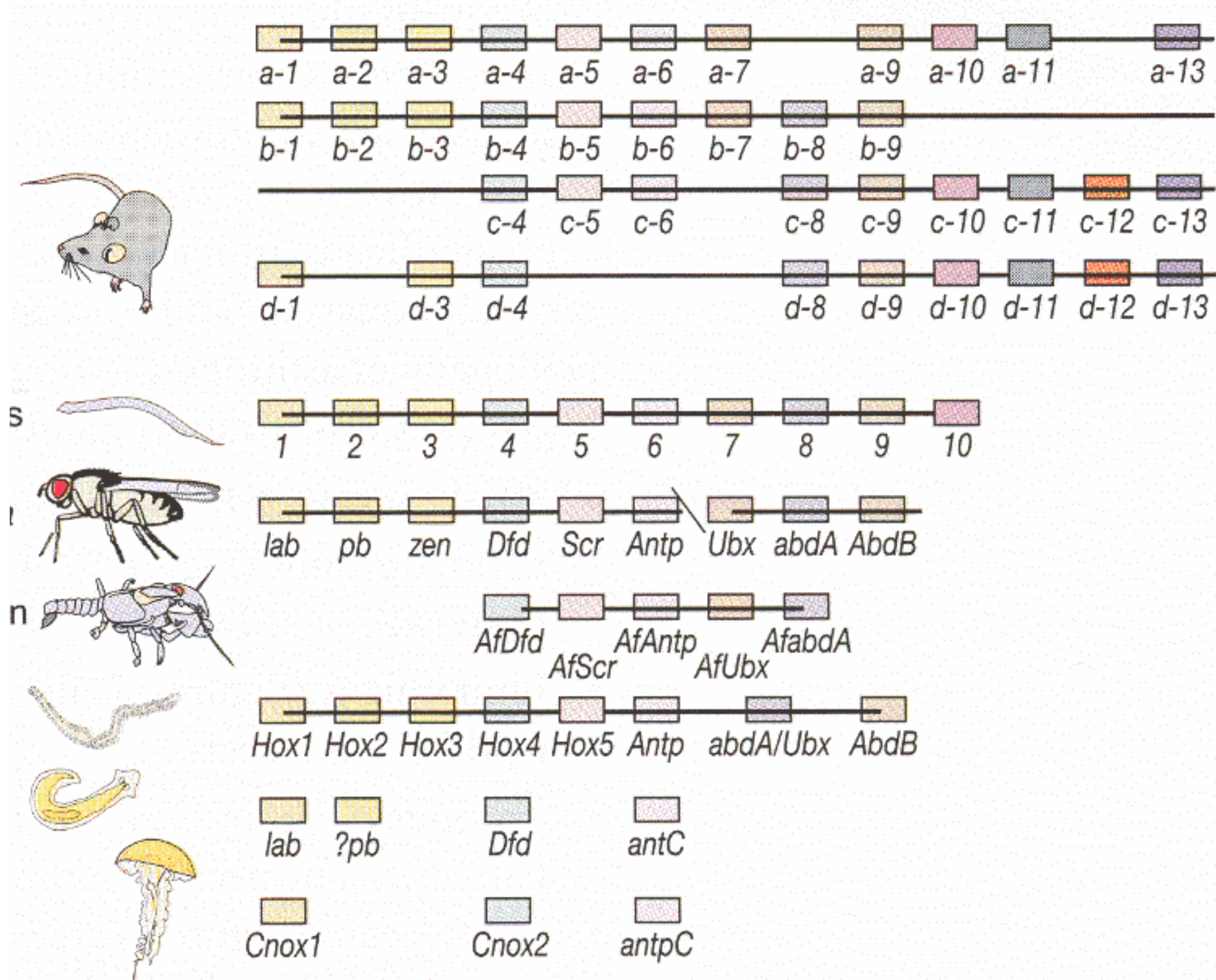


MOLECULAR AND GENOME EVOLUTION 1e, Figure 7.33
© 2016 Sinauer Associates, Inc.



MOLECULAR AND GENOME EVOLUTION 1e, Figure 7.34
© 2016 Sinauer Associates, Inc.

Geny HOX – regulatory rozwoju

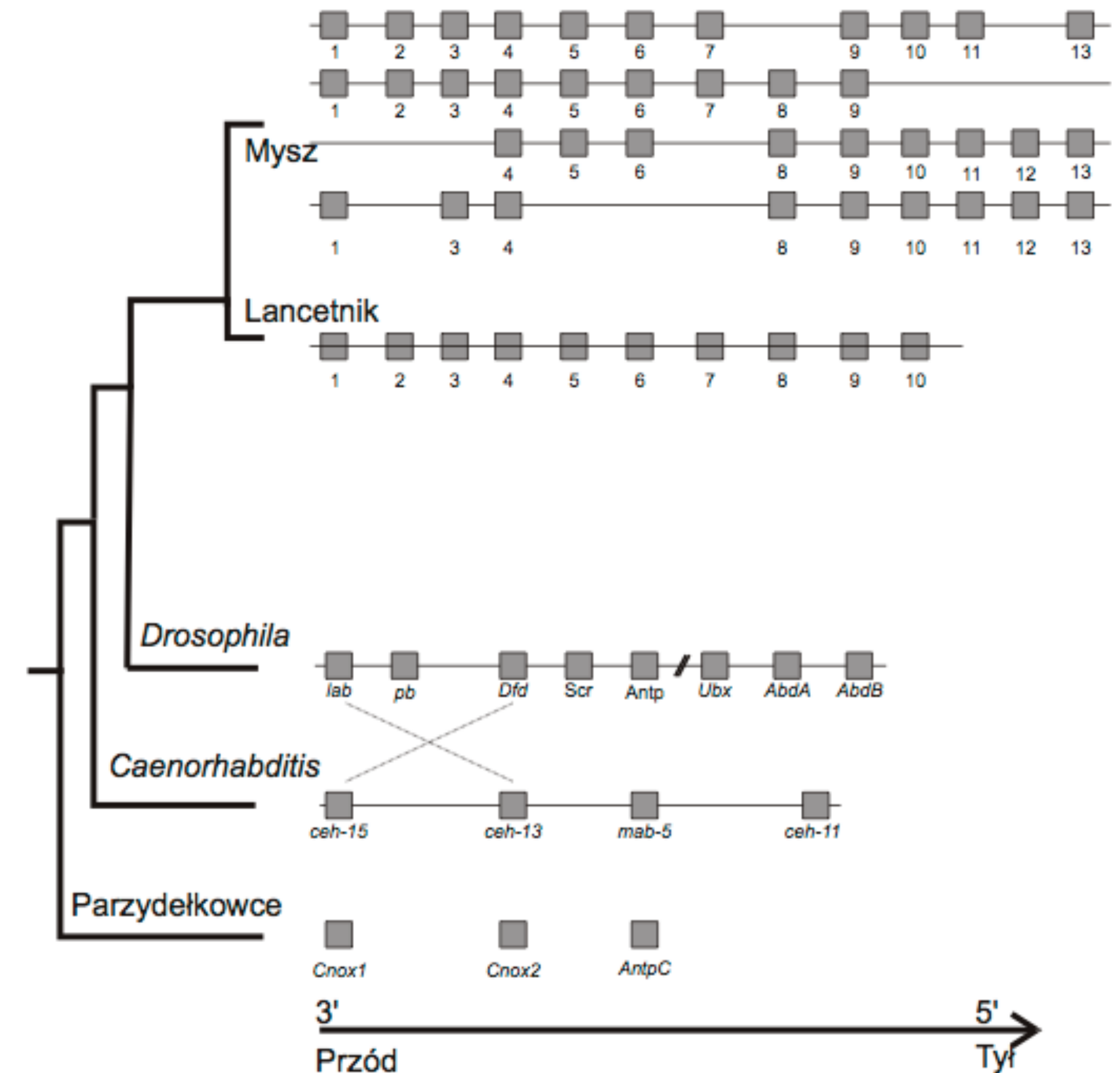


Duplikacje chromosomów i genomów

- polisomia - duplikacja pojedynczych chromosomów
 - u zwierząt zwykle letalna, u roślin niekiedy tolerowana
- poliploidia
 - autopoliploidia - duplikacja genomu, stosunkowo rzadka
 - allopoliploidia - połączenie genomów podobnych, lecz różnych gatunków
 - częsta, zwłaszcza u roślin
 - nieparzysta ploidia - niezdolność do mejozy (np. udomowione banany i inne odmiany owoców bez pestek)

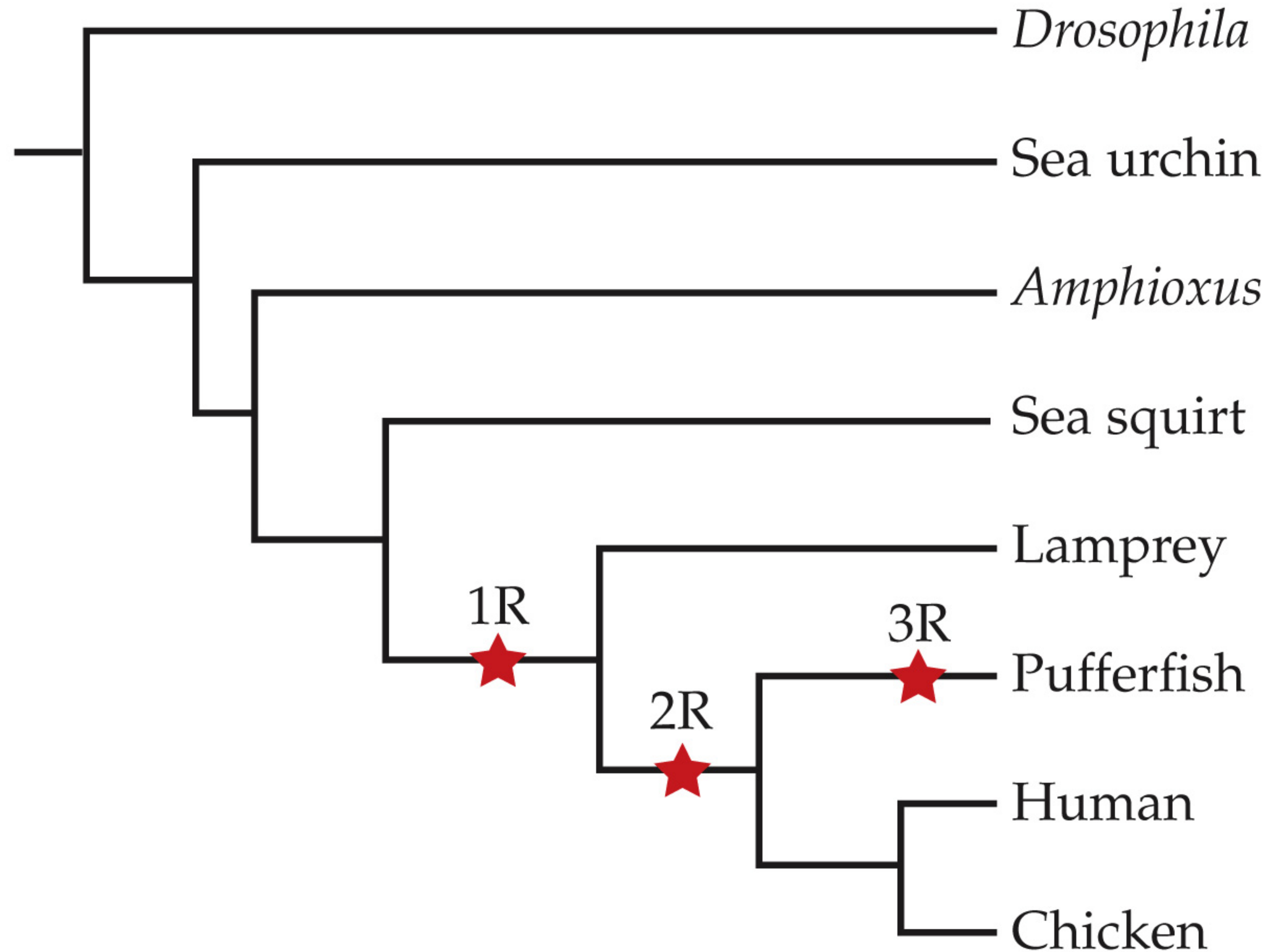
Duplikacje całych genomów

- Zmianie może ulec liczba chromosomów
- Podwojeniu może ulec cały genom
- Hipoteza 2R (hipoteza Ohno) – podwojenie genomu na początku ewolucji kręgowców
 - 2 rundy podwojenia
 - np. geny Hox

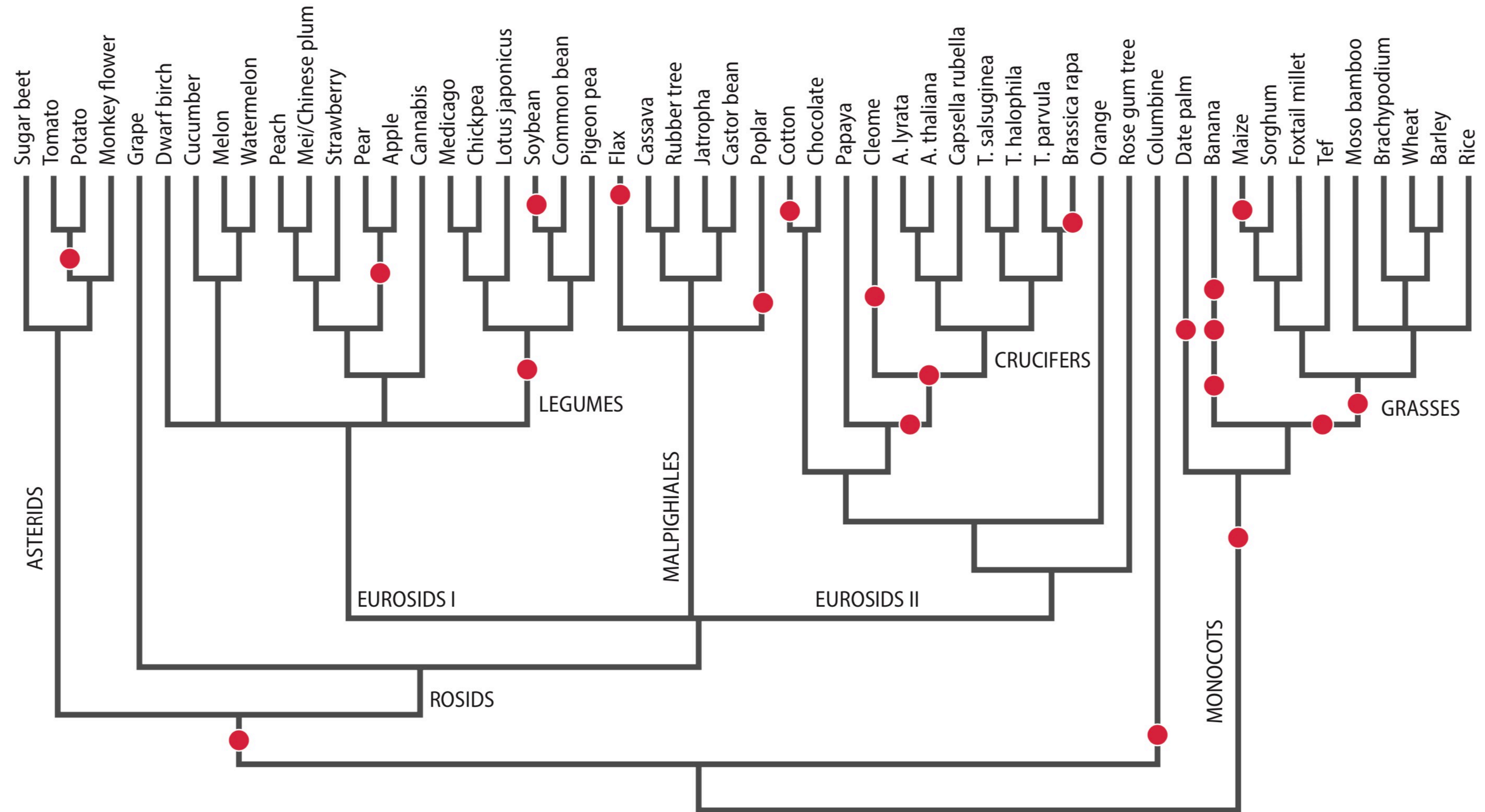


Hipoteza 2R

- Dwie duplikacje genomu w ewolucji strunowców
- Dodatkowa duplikacja u ryb

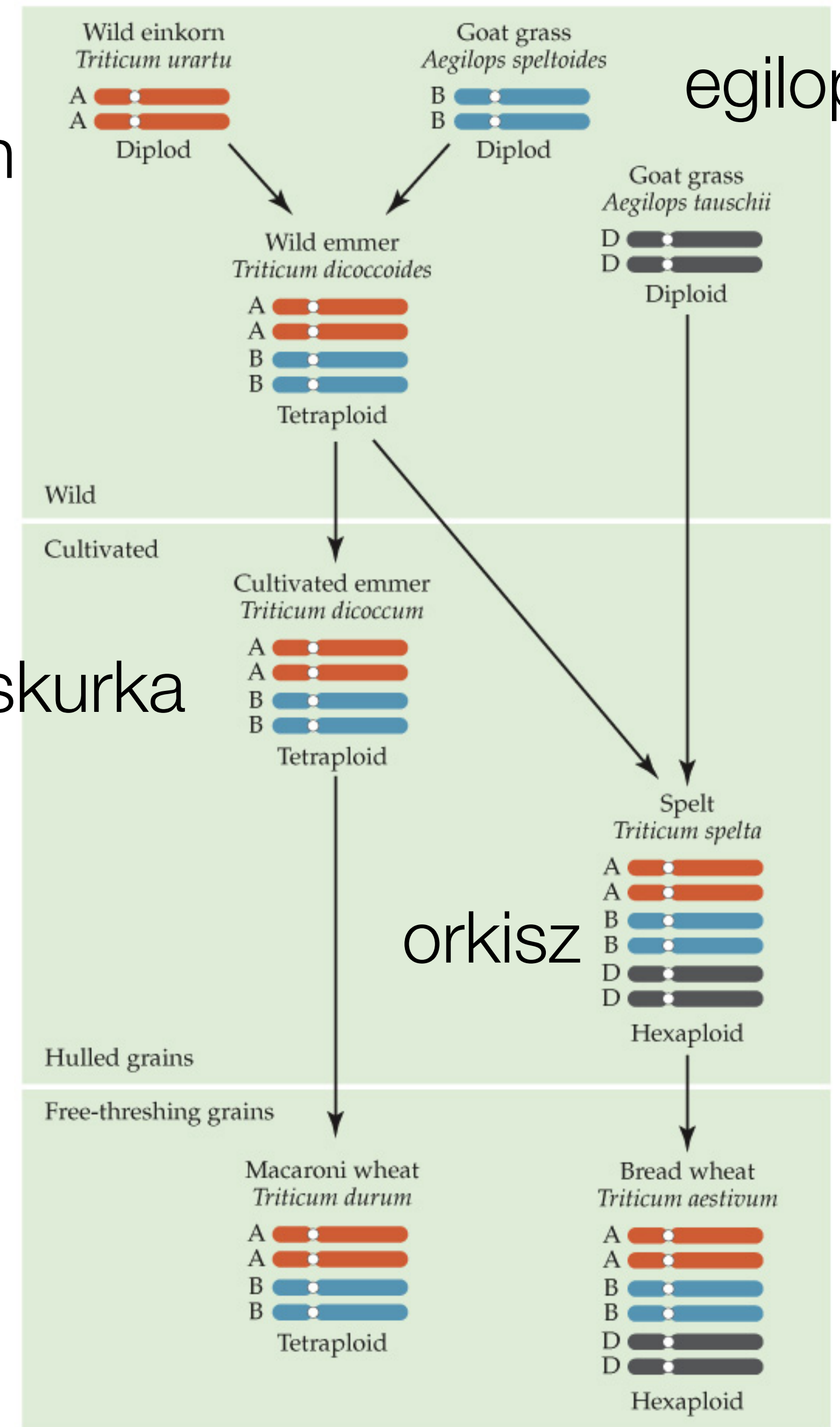


Duplikacje genomu w ewolucji roślin



Historia pszenicy

samopsza, einkorn



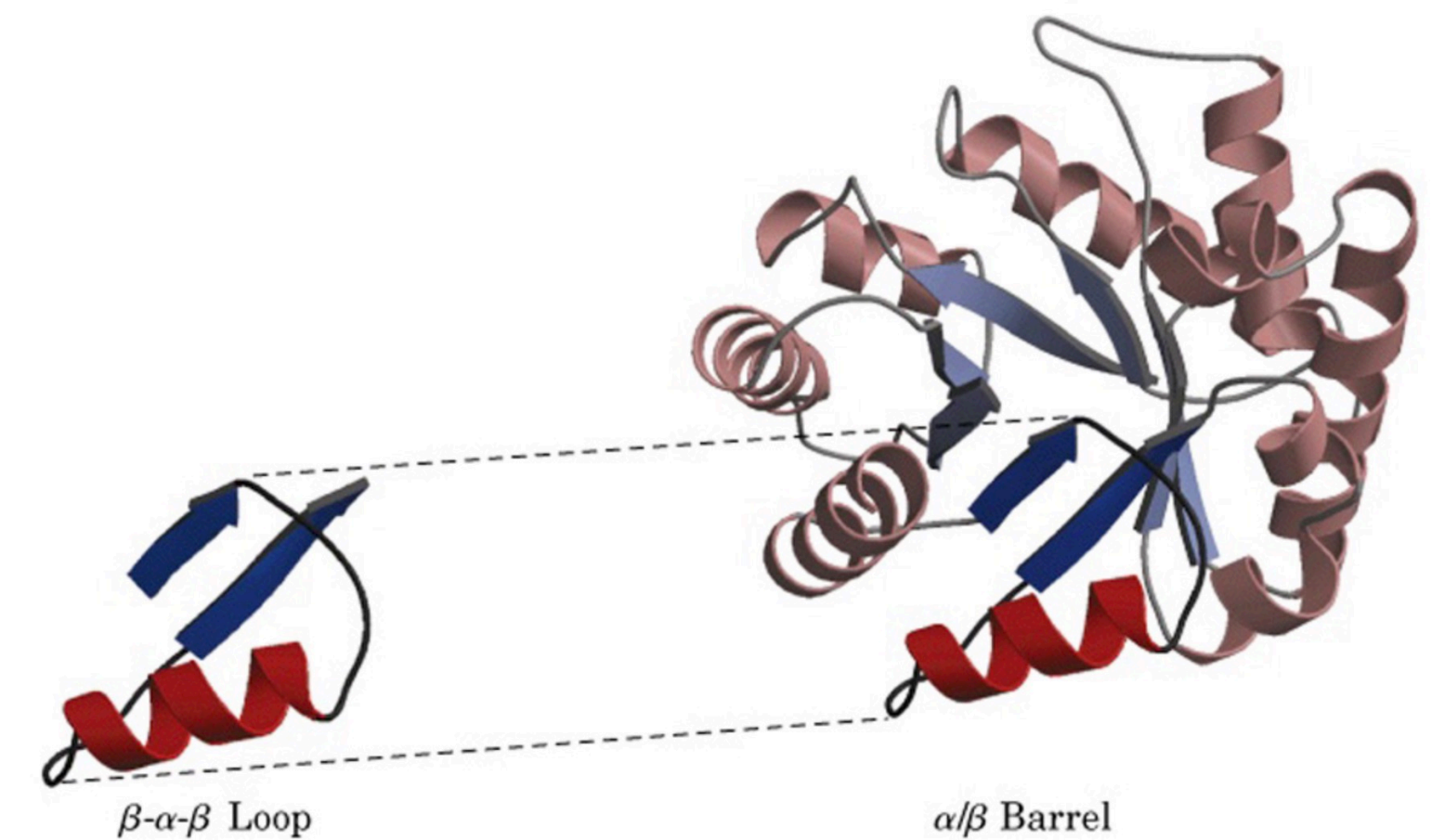
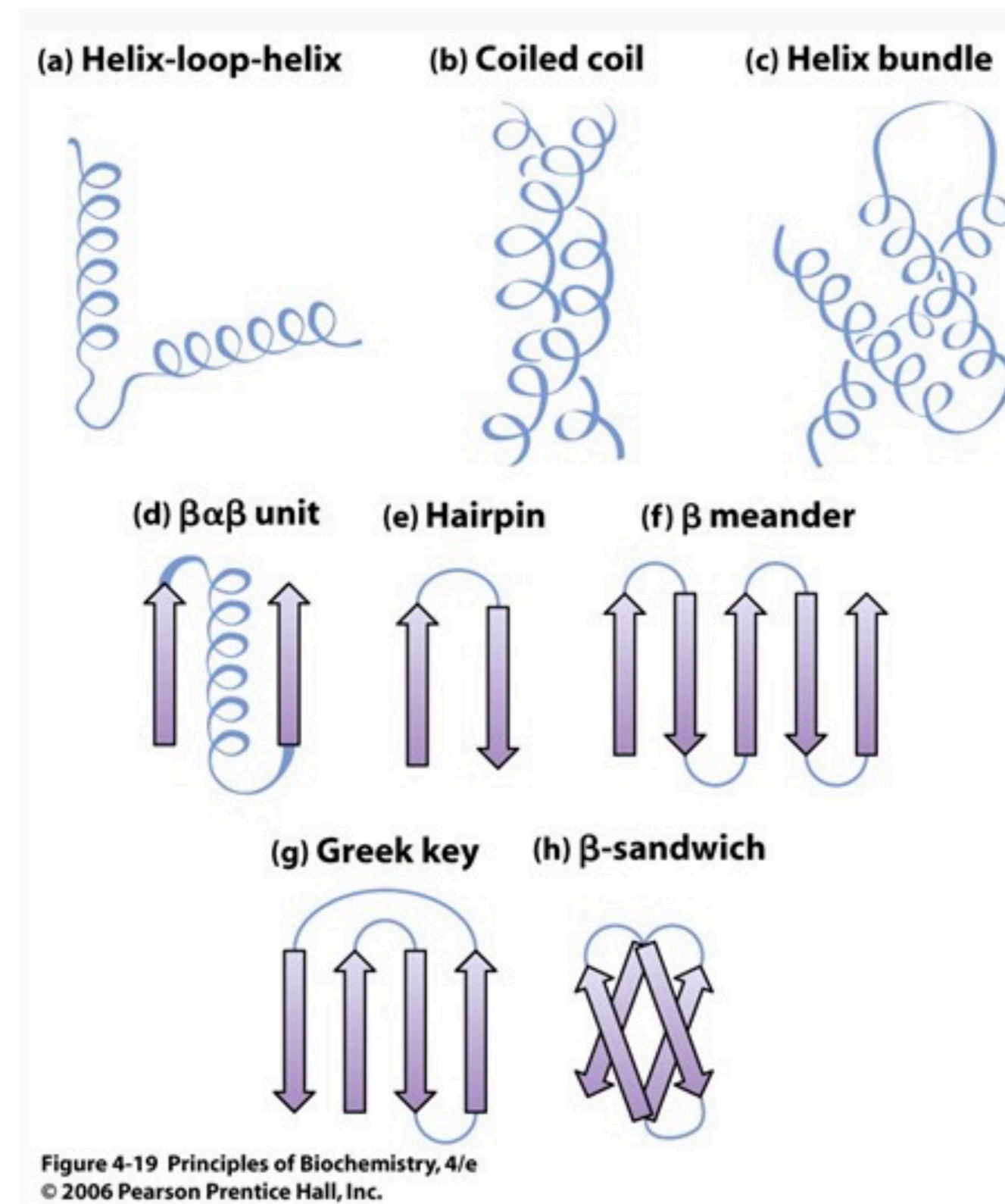
egilops

płaskurka

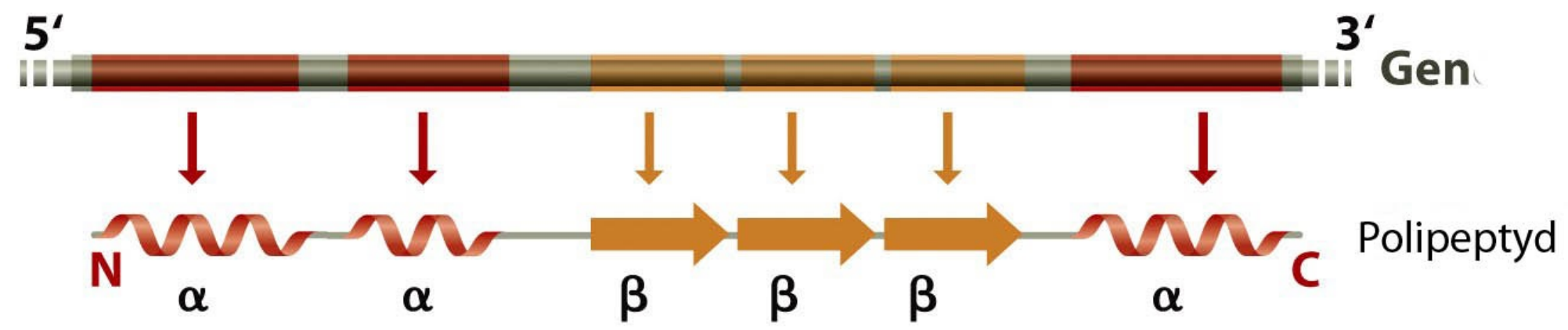
orkisz

Hierarchia i kombinatoryka

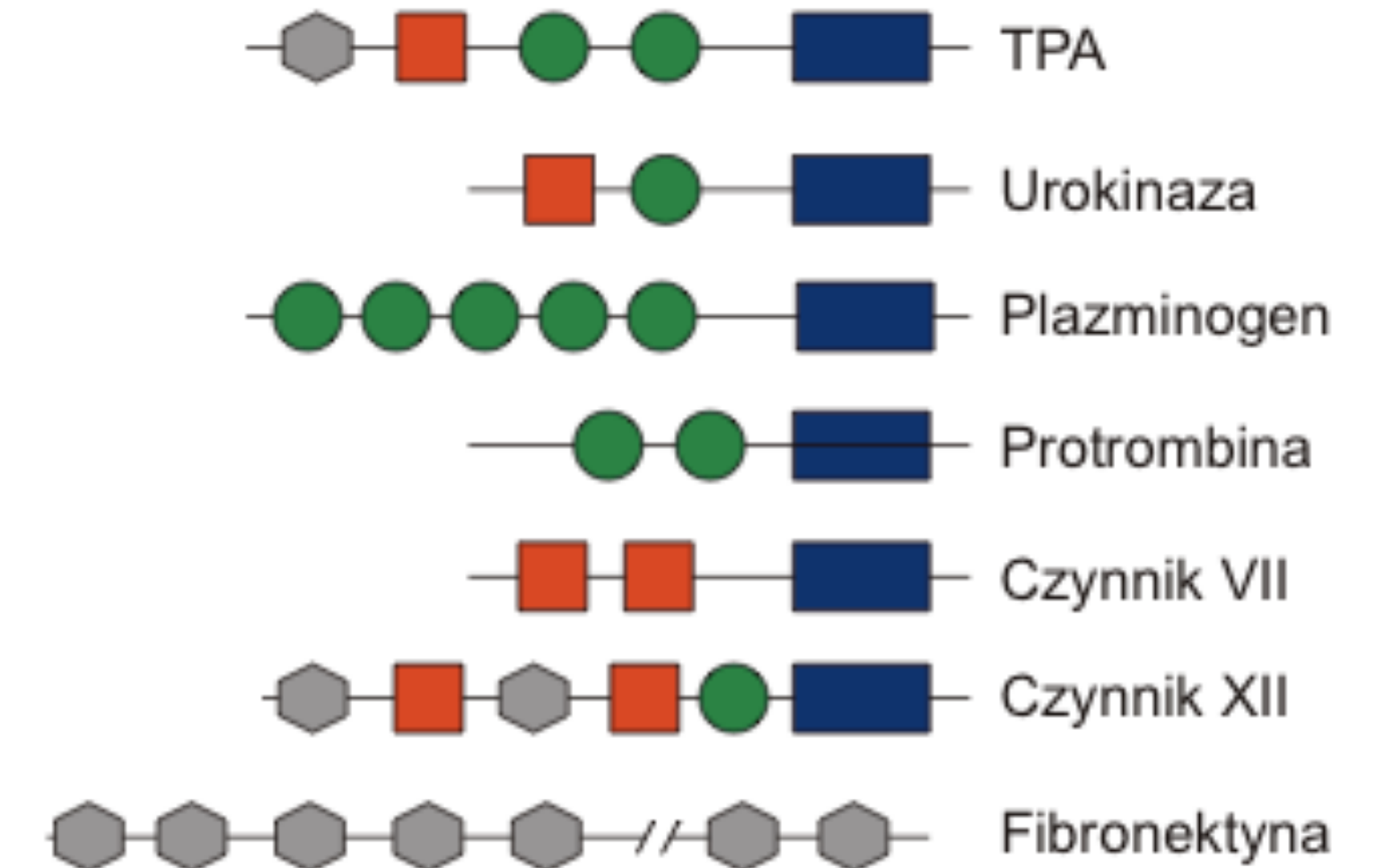
- Budowa białek ma charakter hierarchiczny
 - fałdy/motywy
 - domeny
 - białka
 - kompleksy
- Ewolucja przez duplikacje i tasowanie domen



Białka składają się z domen



T.A. Brown. Genomy III, PWN 2009



Tasowanie domen – kombinatoryka w białkach.