

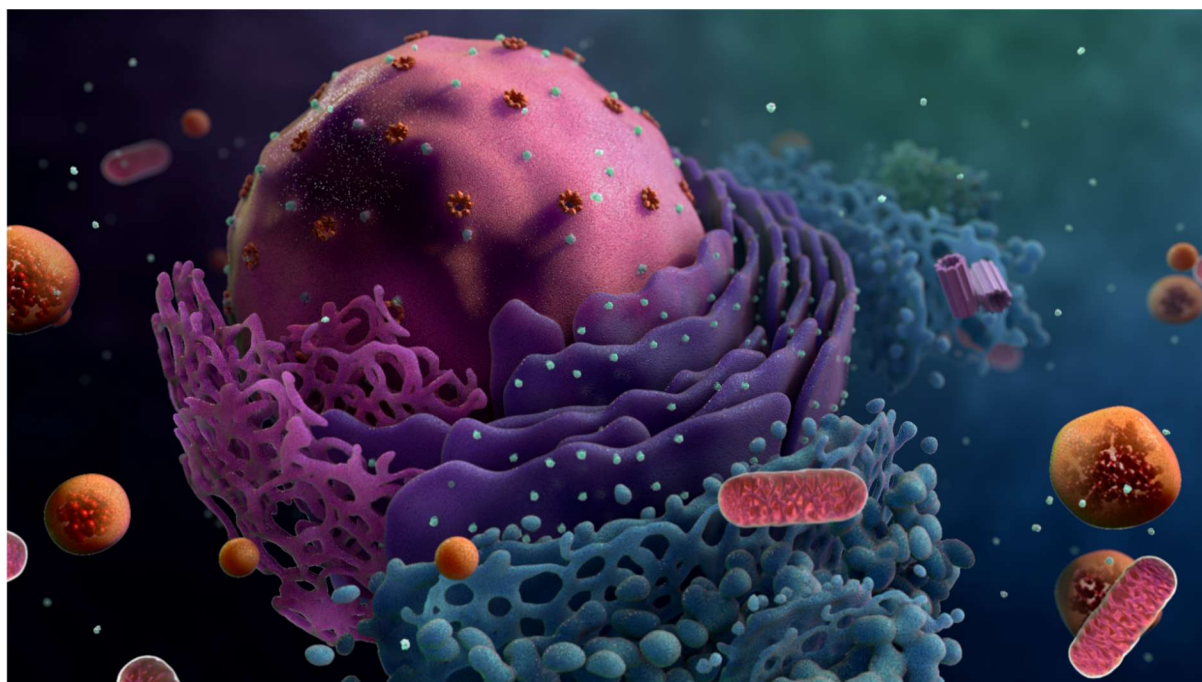
Najnowsze początki eukariota - teoria endosymbiozy



Projekt współtworzą i wspierają nas:

Powstanie komórki eukariotycznej jest uznawane za jeden z największych kroków ewolucyjnych w historii życia na Ziemi. Był to moment, w którym komórki uzyskały narzędzia tak zaawansowane, że można by to porównać do stworzenia przez ludzkość w pełni działającego, w każdych warunkach komputera kwantowego. Tak jak w przypadku narzędzi tworzonych przez człowieka wiemy, że nie powstają w sposób nagły i szybki – np. stworzenie komputera kwantowego wymaga ogromnego nakładu pracy i czasu, tak i w ewolucji proces powstania komórki eukariotycznej był niezwykle długi. Ewolucja „potrzebowała” wielu kroków, które, jak pokazują efekty, były opłacalne. Zapewne słyszeliście już coś nie coś o teorii endosymbiozy w szkole? Wszyscy uczyliśmy się, że dwie komórki prokariotyczne połączyły się i stworzyły komórkę eukariotyczną. Jednak w ciągu ostatnich kilku lat badania nad teorią endosymbiozy posunęły się znacznie do przodu. W tym opracowaniu chciałabym przedstawić najnowsze odkrycia doświadczalne związane z powstaniem komórek eukariotycznych, oraz wynikające z nich wnioski teoretyczne.

Na końcu opracowania znajduje się słowniczek, w którym zostały umieszczone wyrazy, które mogą być problematyczne. Przy każdym takim wyrazie znajduje się przypis górny⁰, który informuje o pozycji wyrazu w słowniczku.



Rys.1. Teoria endosymbiozy. Źródło: <https://www.inspark.education/biobeyond/>

Podstawy teorii

Nim przejdziemy do najnowszej formy teorii endosymbiozy warto przypomnieć sobie dlaczego pojawił się sam pomysł teorii powstania komórek eukariotycznych z komórek prokariotycznych. Jak wiemy komórki dzielimy na prokariotyczne oraz eukariotyczne. Innymi słowy: nieposiadające jądra komórkowego oraz posiadające owe jądro. Jest to podręcznikowe rozróżnienie. Warto jednak pamiętać, że komórki prokariotyczne dzielimy jeszcze na bakterie oraz archeony. O tej drugiej grupie często niewiele się mówi. Jeśli ktoś o nich słyszał, to zapewne o tym, że potrafią żyć w skrajnych warunkach. Dobrym przykładem mogą być tutaj archeony *Haloferax volcanii*, które najlepiej czują się w warunkach wysokiego zasolenia, a ich naturalnym środowiskiem jest Morze Martwe. Występują również archeony żyjące w bardzo wysokich lub niskich temperaturach, a nawet w skrajnych pH¹. Najważniejsza jest jednak inna ich cecha. Jeśli przyrzeć się ich budowie okazuje się, że posiadają one struktury, które przypominają te występujące u eukariota, a niepojawiające się u bakterii. Tutaj przechodzimy do bardzo istotnej rzeczy, mianowicie, jak bardzo eukariota różni się od komórek prokariotycznych. Najlepszym zobrazowaniem będzie tu tabela:

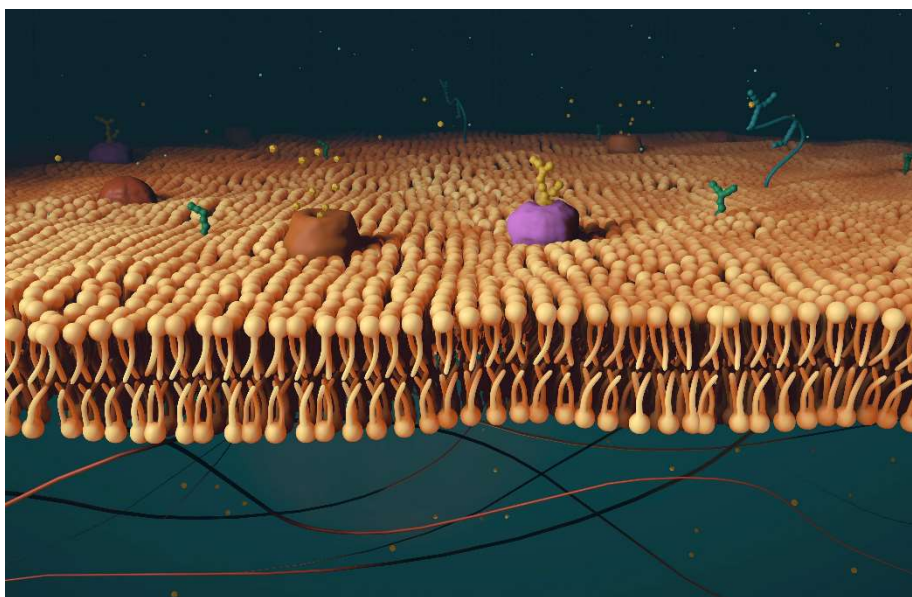
	BAKTERIE	ARCHEONY	EUKARIOTA
JĄDRO KOMÓRKOWE	BRAK	BRAK	WYSTĘPUJE
HISTONY	BRAK	WYSTĘPUJĄ	WYSTĘPUJĄ
INTRONY	BRAK	WYSTĘPUJĄ	WYSTĘPUJĄ
SEDYMENTACJA ² RYBOSOMÓW ³	70S	70S	80S
POZOSTAŁE ORGANELLA	BRAK	BRAK	WYSTĘPUJĄ
BŁONA KOMÓRKOWA	WYSTĘPUJE	WYSTĘPUJE	WYSTĘPUJE
ŚCIANA KOMÓRKOWA	WYSTĘPUJE	WYSTĘPUJE	BRAK
WARSTWA „S”	WYSTĘPUJE	WYSTĘPUJE	BRAK

Tabela 1. Porównanie budowy prokariota i eukariota

Jak widzimy bakterie oraz komórki eukariotyczne posiadają niewiele cech wspólnych, natomiast komórki archeonowe przypominają eukariota w znacznie większym stopniu. Wciąż jednak brakuje im bardzo ważnej cechy: organelli. Zazwyczaj ograniczamy się do stwierdzeń komórki „jądrowe” oraz „beźjądrowe”, powinniśmy jednak pamiętać, że nie chodzi tylko o organizację materiału genetycznego, ale o brak lub występowanie organelli w komórce w ogóle.

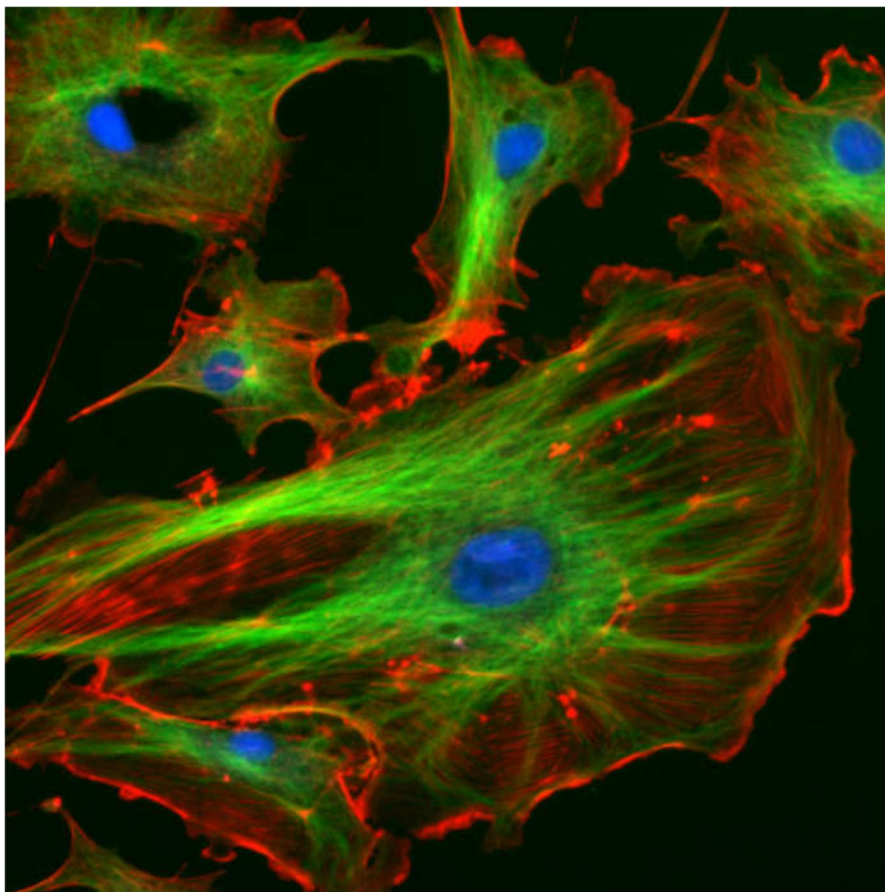
Przypomnę podstawowe organella eukariotyczne oraz cechy budowy występujące w komórkach prokariotycznych, które są kluczowe dla teorii endosymbiozy:

- błona komórkowa - występuje u wszystkich trzech typów wymienionych wcześniej komórek. Jest ona zbudowana z dwuwarstwowej lipidowej² ułożonej w taki sposób by hydrofilowe³ główki lipidów skierowane były na zewnątrz, a hydrofobowe⁴ ogony do wnętrza błony. Jej budowa określana jest jako „płynna mozaika” ze względu na występowanie w niej białek transportowych czy cząstek cholesterolu⁵, które mogą się w niej przemieszczać
- cytoszkielecik - posiadają go tylko komórki eukariotyczne, jednak u niektórych archeonów występują białka przypominające te aktynowe. Cytoszkielecik można podzielić na:
 - filamenty aktynowe występujące pod błoną komórkową - odpowiadają one za kształt komórki;

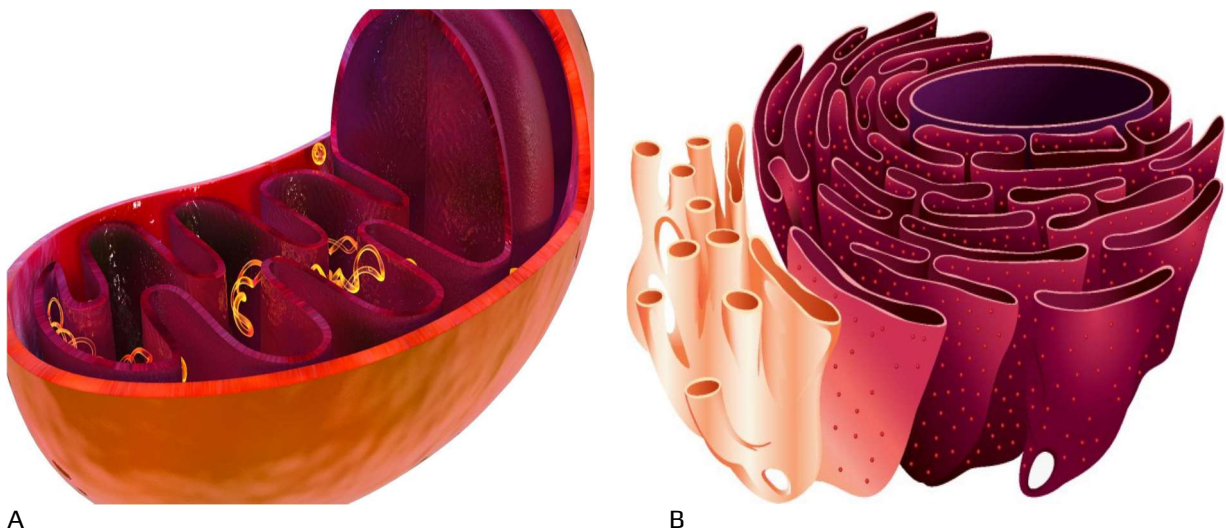


Rys. 2 Komputerowy model błony komórkowej/ źródło: Wikimedia Commons

- filamenty pośrednie tworzące sieć w całej cytoplazmie - nadają komórce sztywność i odporność na urazy mechaniczne;
- mikrotubule przyłączone jednym końcem do centrosomu⁶ - odpowiadają między innymi za transport wewnątrzkomórkowy, tworzenie wici i rzęsek oraz wrzeciona kariokinetycznego;
- mitochondrium - odpowiada za wytwarzanie energii wewnątrz komórki eukariotycznej. Jest jednym z kluczowych organellów dla teorii endosymbiozy ze względu na występowanie w nim osobnego DNA, rybosomów⁷, a także podwójnej błony;
- siateczka śródplazmatyczna - dzielimy ją na siateczkę szorstką oraz gładką. Część szorstka charakteryzuje się występowaniem na jej powierzchni dużej ilości rybosomów odpowiedzialnych za produkcję białek w komórce. Siateczka gładka natomiast nie posiada rybosomów i odpowiada za syntezę organicznych produktów niebiałkowych;



Fot. 1. Wybarwiony szkielet komórki eukariotycznej – czerwone filamenty, zielone aktynowe mikrotubule, niebieskie jądro/ źródło: Wikimedia Commons

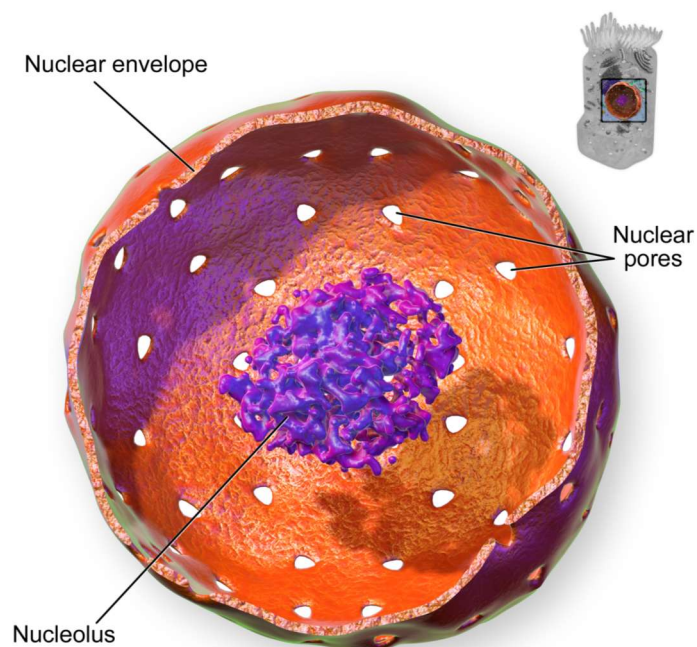


A

B

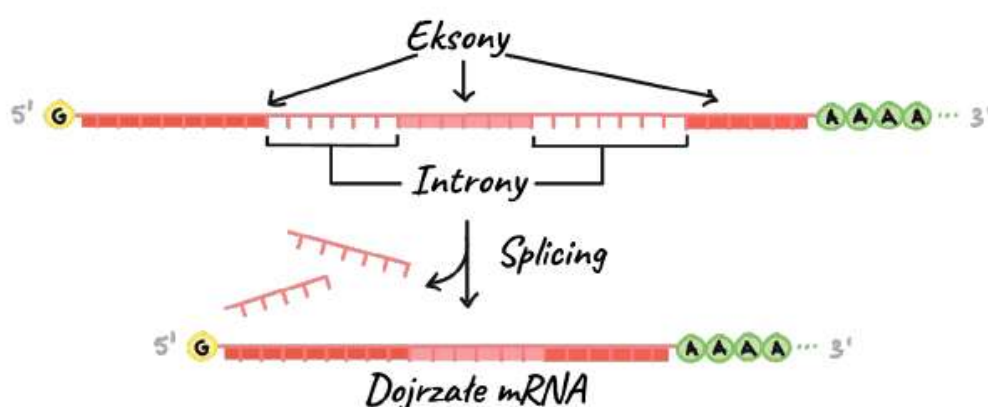
Rys. 3 Model mitochondrium (A) oraz model siateczki śródplazmatycznej szorstkiej i gładkiej (B) Na podstawie modeli: <https://apkpure.com> i <https://vivadifferences.com>

- jądro komórkowe - główne centrum dowodzenia komórki eukariotycznej. Przechowywane jest w nim DNA, a więc podstawowy nośnik informacji genetycznej w komórkach. Wewnątrz niego znajduje się także jąderko odpowiedzialne za produkcję RNA. Kontakt jądra z cytoplazmą odbywa się poprzez pory jądrowe.



Rys. 4 Komputerowy model jądra komórkowego/ źródło: Wikimedia Commons

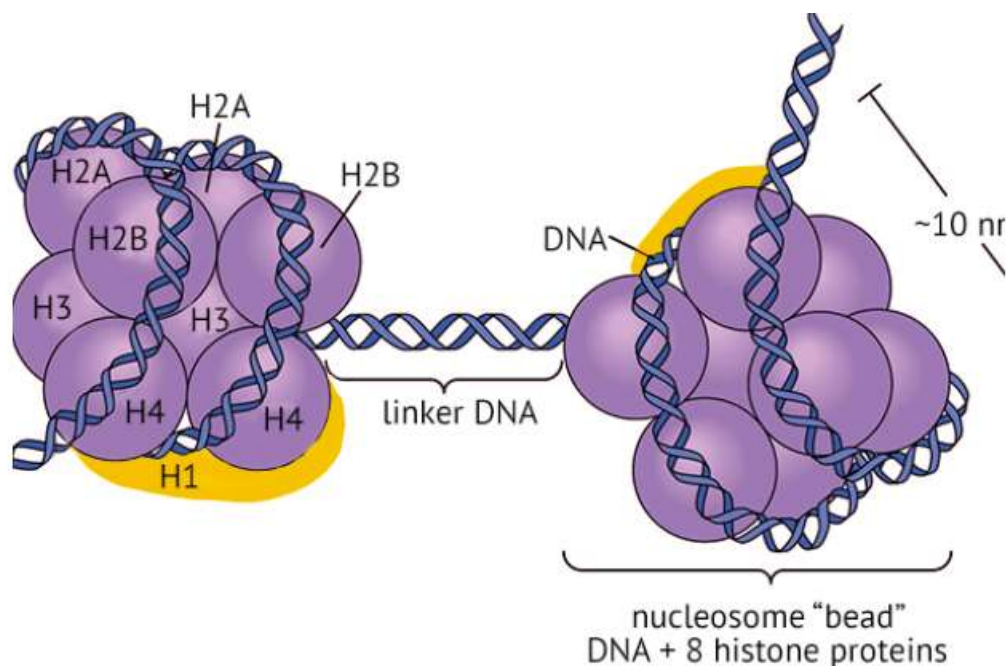
Jak wiemy, wszystkie wymienione w poprzednich punktach elementy budowy komórki, za wyjątkiem błony komórkowej, są charakterystyczne tylko i wyłącznie dla komórek eukariotycznych. Jednak poza cechami strukturalnymi mamy też inne elementy, które odróżniają bakterie, archeony oraz eukariota. Jednym z nich są introny. Jak już wspomniałam, przy krótkim omówieniu jądra komórkowego, podstawowym nośnikiem informacji genetycznej jest DNA. Jest ono przepisywane na mRNA, które następnie w rybosomach jest odczytywane i dzięki tRNA powstaje łańcuch aminokwasowy białka. Jednak niecała informacja zawarta w DNA jest przekazywana do mRNA. Komórki eukariotyczne, poza sekwencjami kodującymi geny (eksonami), posiadają również introny, które genów nie kodują, a więc nie kodują białek, ale spełniają inne ważne funkcje. Introny są jednak wycinane podczas obróbki pre-mRNA. Komórki bakteryjne nie posiadają intronów, jednak w komórkach archeonowych już owe sekwencje występują. Ponadto w komórkach eukariotycznych pełne DNA jest na tyle duże, że musi ono być upakowane.



Rys. 5. Obróbka pre-mRNA/ źródło: Khan Academy (khanacademy.org)

Jednym z poziomów upakowania jest nawinięcie nici DNA na białka zwane histonami. Odpowiadające histonom białka bakteryjne są bardzo odległe ewolucyjnie od histonów eukariota, natomiast komórki archeonowe mają w swoim proteosomie (zbiorze białek) białka przypominające te histonowe z komórek eukariotycznych. Ostatnią rzeczą wartą omówienia przy różnicach pomiędzy komórkami prokariotycznymi oraz eukariotycznymi jest występowanie warstwy S. Pojawia się

ona u wszystkich archeonów, a także u niektórych bakterii. Jest to warstwa białek oraz glikoprotein⁸ pokrywająca ścianę komórkową. Jej zadaniem jest chronienie komórki przed negatywnymi czynnikami środowiska zewnętrznego (zbyt niskie pH, bakteriofagi, itp.)



Rys. 6. Grafika przedstawiająca nukleosom, czyli nić DNA nawiniętą na 8 białek histonowych, złączonych histonem łącznikowym H1/ źródło: www.extremetech.com

Po takim omówieniu cech rozróżniających bakterie, archeony i eukariota możemy dopiero zadać sobie pytanie, skąd wziął się pomysł na teorię endosymbiozy. Kluczowe w tym wszystkim są mitochondria, ich osobne DNA oraz podwójna błona. Poznajmy więc krótką historię teorii endosymbiozy.

Trochę historii

Pierwszym, który zaproponował teorię endosymbiozy, był Konstantin Mierżekowski w roku 1905. Jego praca opierała się na obserwacjach pewnego botanika dotyczących zaskakującego podziału chloroplastów⁹, który bardzo przypominał ten występujący wśród sinic¹⁰. Później dopiero w latach 20. wrócono do tej teorii, kiedy Ivan Wallin rozszerzył ją również na mitochondria. Jednak pełnego rozpędu teoria nabrała dopiero

w latach sześćdziesiątych, a później osiemdziesiątych dzięki pracom Lynn Margulis. Stwierdziła ona, że komórki eukariotyczne najpewniej powstały ze zbiorowisk żyjących ze sobą w symbiozie komórek prokariotycznych. Dowodami na prawdziwość teorii endosymbiozy jest obecność w mitochondriach oraz chloroplastach własnego DNA oraz występowanie wokół nich podwójnej błony. Ponadto rybosomy występujące w tych organellach posiadają sedymentację¹¹ 70S, a więc charakterystyczną dla komórek prokariotycznych. Występują też inne dowody związane z obecnością w nich bakteryjnych enzymów, czy też powstawaniem nowych mitochondriów oraz chloroplastów na drodze podziału, a nie poprzez syntezę.

Model *outside-in*

Pierwsza i najbardziej popularna forma teorii endosymbiozy to model *outside-in*: świat zewnętrzny wchodzi do wnętrza komórki. O tym modelu zazwyczaj uczymy się w szkole. Możemy wyróżnić jego dwie wersje.

Pierwsza wersja zakłada udział trzech komórek:

- komórka archeonowa - gospodarz, tworzy ona później cytoplazmę komórki eukariotycznej,
- komórka bakteryjna pierwsza - tworzy mitochondrium,
- komórka bakteryjna druga - tworzy jądro komórkowe.

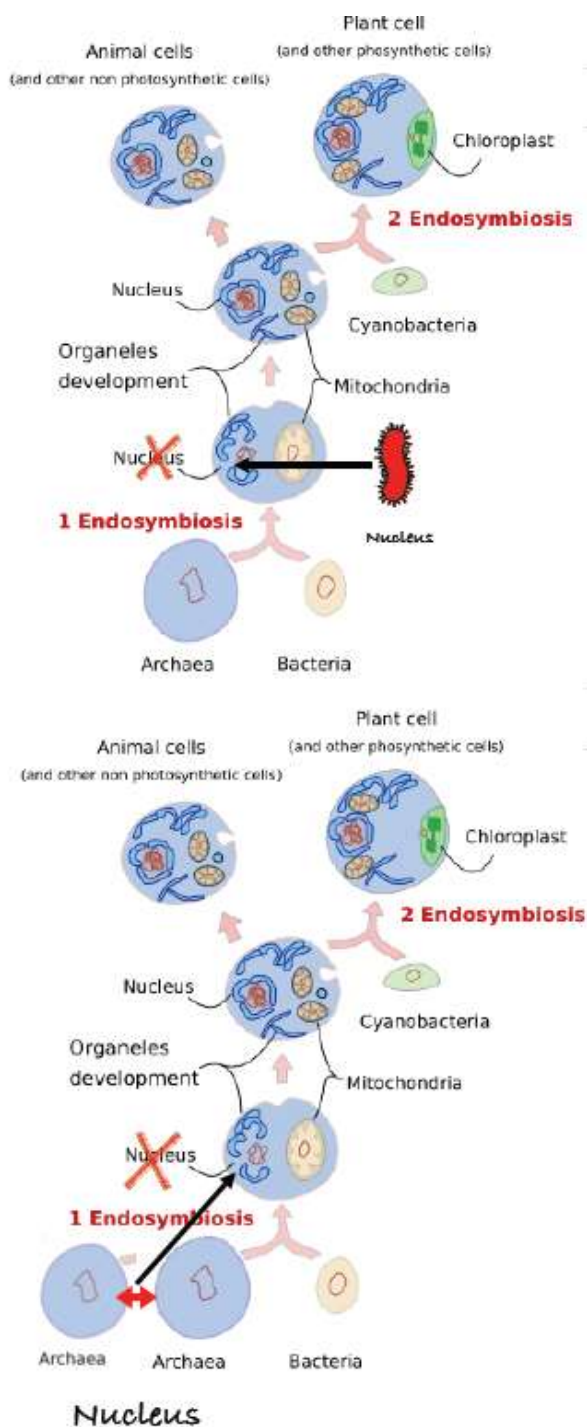
Uzyskujemy więc mieszankę trzech organizmów, z których powstaje komórka eukariotyczna posiadająca jądro komórkowe, mitochondria i prymitywne organella. Komórka roślinna, posiadająca chloroplasty, powstała na drodze ponownej endosymbiozy, gdzie pochłoniętymi organizmami, były komórki sinic (cyjanobakterii).

Druga wersja tego modelu również zakłada udział trzech komórek, z tą różnicą, że jądro komórkowe nie powstaje z obcego organizmu, a zostaje utworzone na drodze błędu podczas podziału. Pod koniec swojego podziału komórka gospodarza wchłania swoją siostrzaną komórkę. Model *outside-in* przez wiele lat był modelem najlepiej opisującym teorii endosymbiozy. Z czasem okazało się jednak, że ma on pewne błędy, a nawet braki. Pierwszy problem pojawił się, gdy badania genetyczne potwierdziły udział jedynie dwóch, a nie trzech komórek w procesie endosymbiozy. Problem ten

wciąż może ominąć druga wersja modelu - ona jednak w żaden sposób nie tłumaczy drogi powstania innych organelli.

Postanowiono więc podejść do tematu w inny sposób. A skoro coś nie działa w jedną stronę, to może warto spróbować od kompletnie odwrotnej?

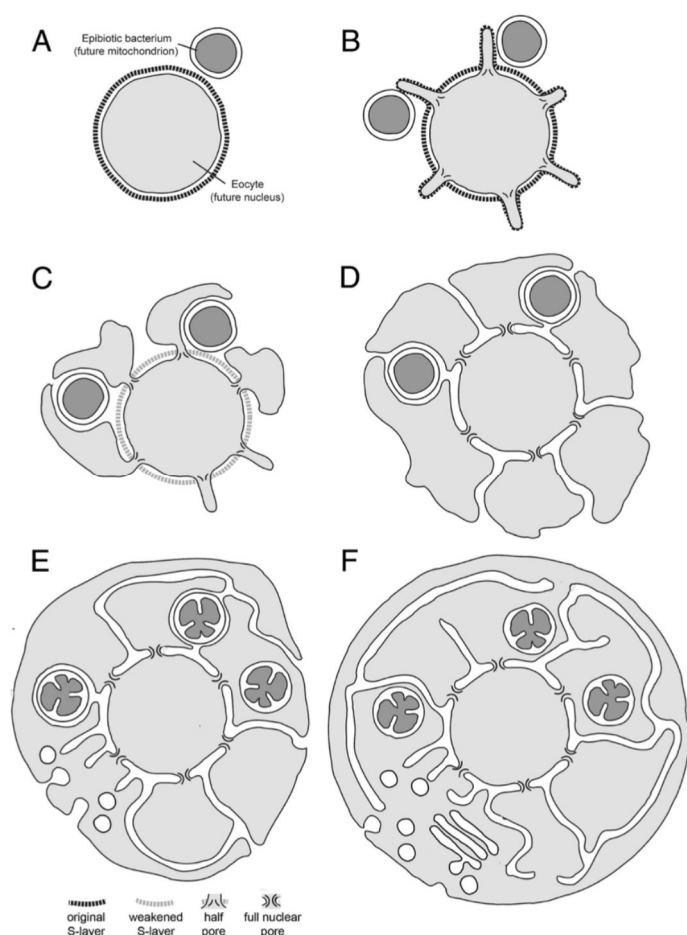
Tak powstał model *Inside-Out*.



Rys. 7. Dwie wersje modelu outside-in / źródło: <https://mmegias.webs.uvigo.es>

Model *inside-out*

Skoro podchodzimy do tematu odwrotnie, musimy założyć, że to wnętrze komórki „wyszło na zewnątrz”. W tym wypadku w procesie biorą udział dwa gatunki komórek prokariotycznych: archeonowy gospodarz oraz bakteryjny symbiont¹². Przyjmuje się, że pierwszym krokiem w procesie endosymbiozy było wytworzenie przez komórkę archeonową wypustek zewnętrznych (punkt B na rysunku), które miały na celu zwiększenie możliwości transportu substancji odżywczych pomiędzy symbiontami. Następnie wypustki te zaczęły się rozszerzać, tworząc przestrzeń cytoplazmatyczną wokół komórek bakterii (C). Kolejnym krokiem było powstanie jądra komórkowego z pierwotnej komórki archeonowej (D). Później, z przestrzeni pomiędzy cytoplazmą zaczęła powoli powstawać siateczka śródplazmatyczna (E). Warto zwrócić uwagę, że w tym punkcie komórki bakteryjne, które powoli zmieniają się w mitochondria, wciąż nie są w cytoplazmie, lecz w owej przestrzeni. Ostatni krok to „wejście” komórek bakteryjnych do cytoplazmy, a także ostateczne zamknięcie zewnętrznej błony nowopowstałej komórki, co oddzieliło ją od świata zewnętrznego (F). Nim przejdziemy do bardziej szczegółowej analizy tej teorii, powinniśmy przyjrzeć się najbardziej podstawowemu budulcowi komórki: białkom.



Rys. 8. Kolejne etapy endosymbiozy wg modelu *inside-out* / źródło: Gautam Dey, Mukund Thattai and Buzz Baum. *On the Archaeal Origins of Eukaryotes and the Challenges of Inferring Phenotype from Genotype*.

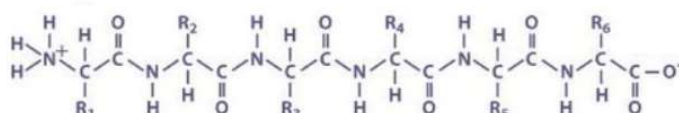
Bliskie spojrzenie na białka

Jeśli spojrzymy na średni, procentowy skład komórki, okaże się, że 70% stanowi woda, natomiast 18% to białka. Oznacza to, że białek w komórce jest więcej niż wszystkich pozostałych związków (DNA, RNA, lipidów, cukrów oraz jonów). Białka są więc podstawą komórki. Są one cegiełkami budującymi prawie każdy jej element. Są oczywiście elementy, których podstawowym budulcem są inne związki, np.: błona komórkowa, która zbudowana jest z fosfolipidów. Musimy jednak pamiętać, że wciąż występują w niej białka, które pełnią kluczowe role dla komórki (kontakt ze światem zewnętrznym). Warto wiedzieć, jak białka są zbudowane. W każdym białku możemy wyodrębnić trzy stopnie struktury, a w niektórych również czwarty stopień:

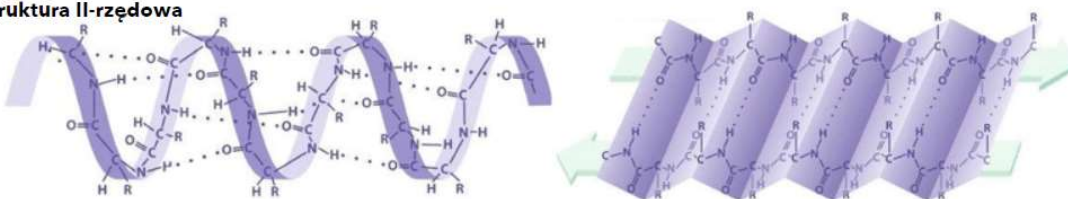
- **struktura I-rzędowa** - jest to pierwszy stopień budowy białka, czyli jego sekwencja aminokwasowa. Aminokwasy to podstawowe elementy białka. Posiadają one główny łańcuch, który zawiera grupę karboksylową (kwasową) oraz grupę aminową (zasadową). Ponad to aminokwasy posiadają łańcuchy boczne, które nadają im ich charakter (zasadowy, kwasowy, hydrofilowy, hydrofobowy itp.).
- **struktura II-rzędowa** - jest to sposób w jaki aminokwasy leżące w pobliżu układają się względem siebie poprzez tworzenie wiązań wodorowych. Mogą w ten sposób utworzyć dwa kształty: alfa-helisę lub beta-kartkę.
- **struktura III-rzędowa** - struktura ta jest stabilizowana poprzez wiązania powstające pomiędzy odległymi aminokwasami, jest ona kluczowa z punktu widzenia funkcji jakie ma pełnić białko
- **struktura IV-rzędowa** - nie występuje ona u wszystkich białek. Jest to sytuacja, w której kilka cząstek jednego białka jest ze sobą związanych, przykładem może być tutaj hemoglobina składająca się z czterech podjednostek. Informacja, która dla nas jest teraz ważna to to, że funkcje białka determinuje tak naprawdę struktura III-rzędowa. To ona warunkuje, które aminokwasy są w miejscach dostępnych dla związków znajdujących się wokół białka, a więc, które aminokwasy mogą wchodzić w reakcje z otoczeniem.

Kluczowe jest też zrozumienie, że często najważniejszy jest charakter danego aminokwasu. To znaczy: jeśli najważniejszą cechą danego aminokwasu jest jego hydrofobowość i zastąpimy go innym hydrofobowym aminokwasem to istnieje spore prawdopodobieństwo, że nie wpłynie to w żaden sposób na funkcjonowanie białka. Musimy jednak pamiętać, że jeśli mamy do czynienia z aminokwasami, które są odpowiedzialne za wiązanie białka z daną substancją (znajdują się w jego miejscu aktywnym) to często zmiana takiego aminokwasu, nawet na jeden o podobnym charakterze, może uniemożliwić funkcjonowanie całej cząstki. Z tego wynika, że dwa białka mogą pełnić identyczne funkcje, choć mogą posiadać inne sekwencje aminokwasowe. Taką sytuację nazywamy homologicznością białek. Ten termin jest dla nas ważny, by zrozumieć dalsze założenia teorii *inside-out*.

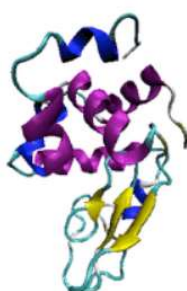
a) struktura I-rzędowa



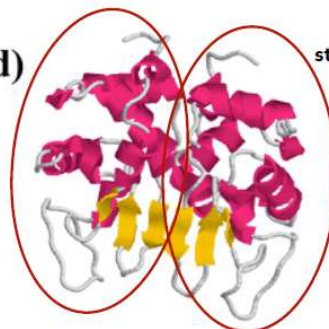
b) struktura II-rzędowa



c) struktura III-rzędowa



d) struktura IV-rzędowa



Rys. 9. Modele struktur białek I-rzędowej (a), II-rzędowej (b), III-rzędowej (c) i IV-rzędowej (d) / na podstawie https://www.researchgate.net/figure/Different-hierarchical-structures-in-proteins-a-Primary-structure-Polypeptide-chain_fig15_258020421

Analiza inside-out

Teraz możemy przejść do omawiania kolejnych etapów modelu *inside-out* w sposób odrobinę bardziej szczegółowy, by móc zrozumieć dlaczego jest to lepszy model niż dotychczasowy. Zaczniemy od podstaw procesu, a więc od zewnętrznych wypustek. To, co jednak warto podkreślić na wstępie, że mamy do czynienia z teorią dotyczącą procesu, którego nie jesteśmy w stanie przeprowadzić w laboratorium, dlatego spora część wniosków jest jedynie teoretycznymi założeniami.

1. Zewnętrzne wypustki

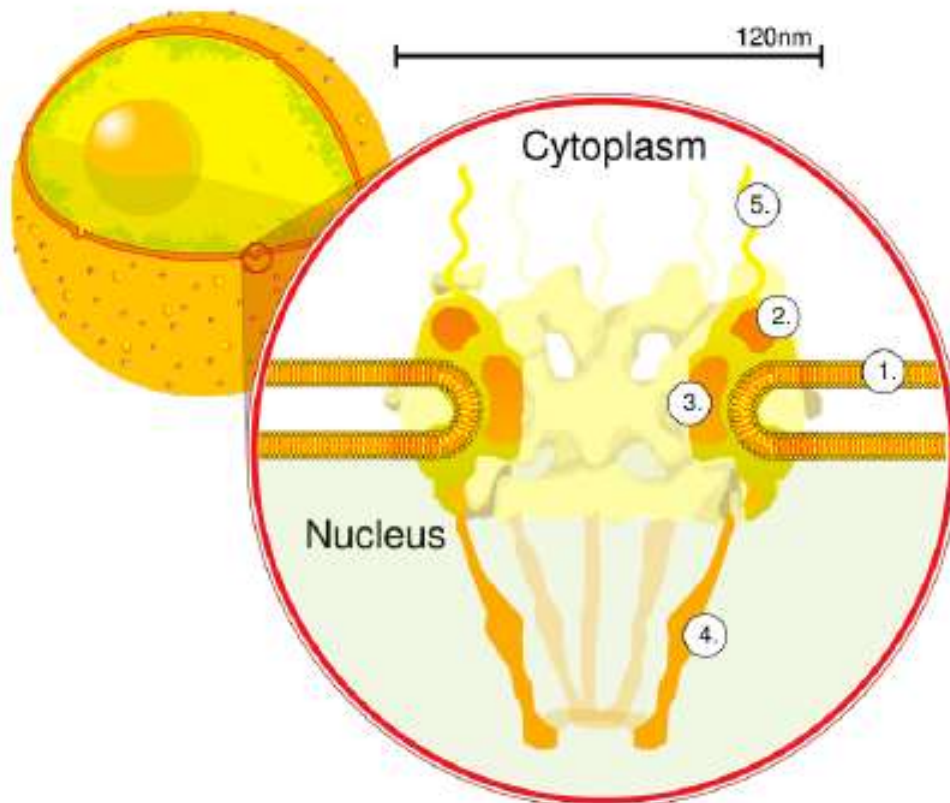
To one są pierwszym krokiem w procesie endosymbiozy, dlatego warto byłoby zrozumieć jak powstają i funkcjonują. Niestety nie wiemy jeszcze wszystkiego w tej materii, jednak zakładamy, że najprawdopodobniej stabilizacja wypustek oraz ich powstawanie było koordynowane przez białka homologiczne do tych, które aktualnie budują pory jądrowe, w komórkach eukariotycznych - białka z rodziny COPII. W wielu komórkach prokariotycznych odnajdujemy białka homologiczne do nich, szczególnie u komórek archeonowych. Wniosek ten wynika z założenia, że pierwotna komórka archeonowa zamienia się w jądro komórki eukariotycznej, a więc logicznym następstwem jest, że miejsca, w których powstały zewnętrzne wypustki, z czasem przemieniły się w pory jądrowe, które umożliwiały komunikację jądra z resztą nowopowstałej komórki.

2. Siateczka śródplazmatyczna

Model *inside-out* w sposób bardzo zgrabny tłumaczy, dlaczego siateczka śródplazmatyczna jest tak silnie złączona z jądrem komórkowym. Jest ona pozostałością po wytworzonych wypustkach. Naukowcy dysponują dowodem na potwierdzenie tej tezy: archeonowe białka modyfikujące proteiny na warstwie S są homologiczne do białek modyfikujących związki na siateczce śródplazmatycznej. Potwierdza to przypuszczenie, że powierzchnia siateczki śródplazmatycznej jest spokrewniona z powierzchnią komórki archeonowej.

3. Lipidy

Nie jest to organellum, ale ważny składnik komórki. Okazuje się, że lipidy komórek bakteryjnych oraz komórek eukariotycznych są identyczne, natomiast te archeonowe różnią się od nich budową. Lipidy są ważnym tematem, ponieważ w wielu przypadkach komórka wykorzystuje je do kontrolowania procesów zachodzących w niej. Dlaczego więc, skoro komórką gospodarza była komórka archeonowa, komórka eukariotyczna posiada inne lipidy? Najprawdopodobniej, mimo że lipidy archeonowe są bardziej odporne na skrajne warunki środowiska zewnętrznego, jednak modyfikacja błon zbudowanych z lipidów bakteryjnych jest prostsza. A więc w toku ewolucji komórki eukariotycznej przyjęły się lipidy bakteryjne, dzięki czemu mogła w prostszy sposób wytworzyć transport wewnątrzkomórkowy, który w głównej mierze polega na modyfikowaniu błon lipidowych wewnątrz komórki.



Rys. 10. Schemat budowy porów jądrowych / źródło: Wikimedia Commons

4. Mitochondria

Są one jednym z największych osiągnięć procesu endosymbiozy. Najprawdopodobniej powstały z alfa-proteobakterii¹³. Zostały one otoczone przez komórkę archeonową swoimi wypustkami w celu zwiększenia możliwości przekazywania sobie wzajemnie materiałów odżywczych. Następnie przeszły z przestrzeni powstałej między rozszerzającymi się wypustkami do wnętrza cytoplazmy komórkowej. Dowodem na ich pochodzenie od bakteryjnych komórek jest chociażby to, że posiadają własne DNA oraz rybosomy.

5. Jądro komórkowe

Powstaje ono z pierwotnej komórki archeonowej. Wiemy jednak, że DNA zawarte w jądrach komórek eukariotycznych łączy w sobie najprawdopodobniej kod genetyczny z dwóch komórek: archeonowej i bakteryjnej. To efekt tego, że na przestrzeni tysięcy DNA z mitochondriów było stopniowo transportowane do jądra komórkowego – choć, jak wiemy, nie w całości.

6. Błona komórkowa

Ostatnim krokiem w modelu inside-out było powstanie nieprzerwanej błony komórkowej. Zamknęła ona wnętrze komórki oddzielając ją od świata zewnętrznego i zapewniając możliwość utrzymywania wewnętrznej homeostazy¹⁴ komórki.

7. Podsumowanie

Poza wyżej wymienionymi elementami komórki eukariotycznej, występują jeszcze inne organella. Aparat Golgiego powstał zapewne w sposób podobny do powstania siateczki śródplazmatycznej, a cytoszkielet zapoczątkowały białka homologiczne do występujących u archeonów. Nie istnieje jeszcze w tym modelu dokładny opis, jak powstały pozostałe organella, mimo wszystko jest to jak narazie model endosymbiozy najlepiej opisujący powstawanie komórki eukariotycznej.

Jak to udowodnić?

Komórki archeonowe, które najpewniej są bezpośrednimi przodkami eukariota nazywamy protoplastami. Ich poszukiwania trwały długo i nie były proste właśnie ze względu na wymienione wcześniej czynniki. Jak zbadać coś, czego nie możemy wyhodować w laboratorium? Na pomoc naukowcom przyszła metagenomika.

Metagenomika – nowa dziedzina nauki

Jest to dziedzina nauki zajmująca się poznawaniem genotypów organizmów, których nie jesteśmy w stanie wyhodować. W dużym skrócie polega ona na pobraniu próbek ze środowiska, które nas interesuje i uzyskaniu z niej DNA wszystkich znajdujących się wewnątrz organizmów. Przy pomocy nowoczesnego oprogramowania naukowcy są w stanie rozdzielić DNA poszczególnych organizmów i stworzyć ich genotypy. Dzięki temu, choć nie możemy wyhodować komórek w laboratoriach, możemy poznać ich białka, a później próbować wytworzyć je w organizmach łatwych do hodowli (np. bakterii *E. coli*). Przy pomocy tej metody odkryto zadziwiający organizm - Loki-archeota. Archeon ten posiadał niewyobrażalną dla naukowców ilość białek homologicznych do białek eukariotycznych. Takie białka, które powinny występować jedynie w organizmach eukariotycznych, nazwano Eucariotic Signature Proteins (ESPs) - eukariotyczne białka sygnaturowe. W pierwszej chwili naukowcy stwierdzili, że otrzymany genotyp musi być błędem przy pracy, ponieważ za bardzo przypominał komórki eukariotyczne. Jednak grupa naukowców z różnych części świata postanowiła potwierdzić istnienie Loki-archeota. W tym celu pobrała próbki z różnych miejsc i wykonała niezależne badania metagenomiczne. Działania te potwierdziły istnienie Lokiego, a nawet pozwoliły odkryć pozostałe gatunki z tej rodziny: Odyn-archeota, Thor-archeota oraz Heimdall-archeota. Całej rodzinie tych archeonów nadano imię Asgard, a wszystko ze względu na to, że pierwszą komórkę Lokiego odkryto w pobliżu Zamku Lokiego (kominów hydrotermalnych w Oceanie Atlantyckim). Tak zaczęła się przygoda naukowców z rodziną Asgard, obwołaną protoplastami komórek eukariotycznych.

Ale w zasadzie kryją w sobie te komórki?

Rodzina Asgard

Najłatwiej będzie pokazać jakie homologii białek eukariotycznych posiadają członkowie tej rodziny:

- **białka N-glikozylujące** - glikozylacja to reakcja modyfikująca białka. Rozpoczyna się ona w cytoplazmie, następnie zachodzi w siateczce śródplazmatycznej, a kończona jest w Aparacie Golgiego.
- **białka biorące udział w transporcie wewnętrznym** - transport wewnętrzny w komórce eukariotycznej odbywa się pomiędzy poszczególnymi organellami, jak się okazuje Loki i jego krewni posiadają białka homologiczne do tych koordynujących transport u eukariota.
- **białka cytoszkieletowe** - prawie wszyscy członkowie tej rodziny posiadają białka przypominające w dużym stopniu te tworzące cytoszkielet komórek eukariotycznych
- **ubikwitynacja i system ESCRT** - te dwa systemy biorą udział między innymi w usuwaniu źle wytworzonych białek lub tych, które nie są już potrzebne komórce. U eukariota proces usuwania białek wiąże się z istnieniem organellów służących do degradacji białek, a także z wytwarzaniem pęcherzyków transportowych. Widzimy, że komórki te posiadają dość spore narzędzia do zarządzania bardziej skomplikowaną strukturą wewnętrzną, przypominającą tą eukariotyczną.

Gdy brak sterowników...

Czy to oznacza, że byliśmy w błędzie i istnieje możliwość, że część struktur oraz organelli powstała przed wytworzeniem się jądra w komórce? Nim odpowiem na to pytanie warto jest się także przyjrzeć temu, czego członkowie rodziny Asgard nie posiadają: **lipidowym regulatorom**.

Jak już wcześniej pisałam, lipidy są wykorzystywane przez komórkę do koordynacji zachodzących w niej procesów, chociażby transportu wewnątrzkomórkowego. Tymczasem Loki i jego kuzyni ich nie mają. Możemy to porównać do sytuacji, w której posiadamy program komputerowy, ale nie posiadamy jego sterowników. Możemy sobie zadać pytanie, które naukowcy zadają od lat: czy na podstawie

genotypu możemy poznać fenotyp? Czy znając jedynie DNA komórki, możemy się domyśleć, jak wygląda ona w środku?

Chciałabym, byście zastanowili się i odpowiedzieli na następujące pytanie: **czy archeony z rodziny Asgard posiadają organella oraz systemy (np. kontrolujące transport wewnątrzkomórkowy) podobne do tych występujących u eukariota?**

- a) Posiadają organella oraz systemy podobne do eukariotycznych
- b) Posiadają prymitywne organella i część systemów podobnych do eukariotycznych
- c) Nie posiadają ani organelli ani systemów wewnętrznej kontroli.

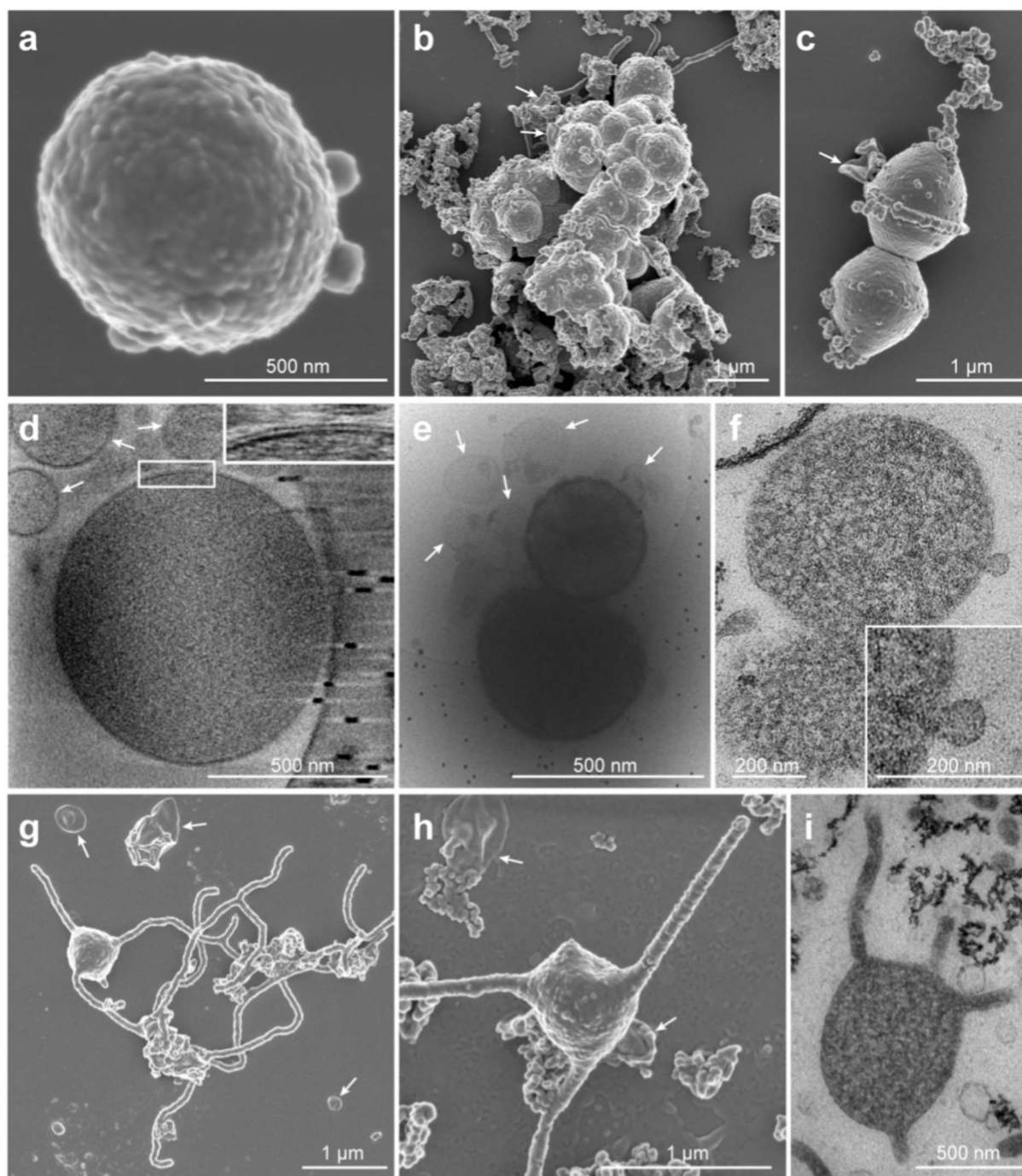
O genotypu do fenotypu

Pytanie jest trochę podchwytliwe. Sama pisałam, że nie jesteśmy w stanie w żaden sposób „zobaczyć” Lokiego czy jego kuzynów. Jak więc mam zweryfikować, która z tych odpowiedzi jest prawidłowa? Gdybyśmy zatrzymali się na stanie wiedzy z marca 2019 roku, nie mogłabym powiedzieć wam, czy mieliście rację czy nie. Trzeba jednak pamiętać, że nauka jest tworem dynamicznym, cały czas się rozwija i non stop przekraczane są kolejne granice wiedzy. Tak też się stało w tym przypadku. Na początku historii rodziny Asgard pisałam, że praktycznie niemożliwe było wyhodowanie jej członków w warunkach laboratoryjnych. Człowiek, jednak nie lubi słowa „niemożliwe” i na każdym kroku udowadnia, że jeśli tylko chcemy, wszystko jest możliwe. Pewna grupa naukowców postanowiła spróbować wyhodować te komórki. Nie było to proste. Wyhodowanie i zbadanie próbek w sposób na tyle dokładny, by móc się tym podzielić ze światem zajęło im ponad 5 lat. Okazuje się, że czas, jaki potrzebuje komórka Lokiego do jednego podziału, to prawie 20 dni. Oznacza to, że komórki te dzielą się prawie 1440 razy wolniej niż komórki *E.coli*, na których przeważnie pracuje się w laboratoriach (ich czas podziału to 20 minut). Jednak udało się uzyskać hodowlę złożoną głównie z Loki-archeota oraz jego symbionta. Ponadto udało się zrobić mu zdjęcia m.in z elektronowego mikroskopu skaningowego.

Zdjęcia dostarczają nam dwóch ważnych wniosków. Po pierwsze na zdjęciu (g) oraz (h) możemy zobaczyć, że komórka Lokiego tworzy wypustki, którymi sięga w stronę swoich symbiontów. Jest to bardzo ważna wiadomość dla nas ze względu na



opisywany wcześniej przeze mnie model endosymbiozy, dla którego tworzenie wypustek jest podstawą. I drugi wniosek: na zdjęciach (d) oraz (f) możemy zobaczyć, że komórki Loki nie posiadają nawet najmniejszych prymitywnych organelli.

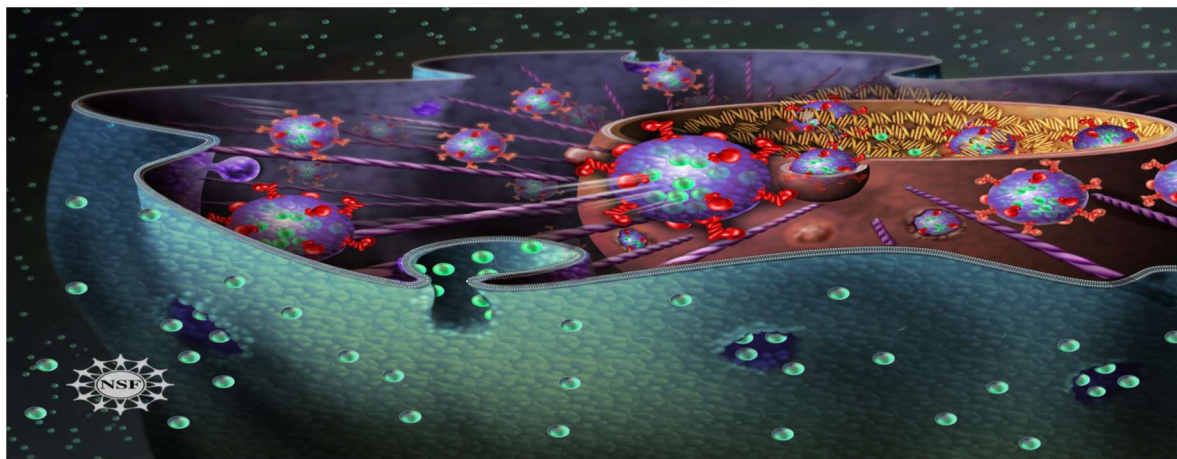


Fot. 2. Zdjęcia Loki-archeota oraz jego symbionta z elektronowego mikroskopu skaningowego / źródło: Gautam Dey, Mukund Thattai and Buzz Baum. *On the Archaeal Origins of Eukaryotes and the Challenges of Inferring Phenotype from Genotype*.

Tak więc wiemy już, że jeśli wybraliście odpowiedzi a) lub b), to nie były one poprawne. Nie powinniście się jednak martwić, ponieważ spora część naukowców również wybrała jedną z tych odpowiedzi, zanim nie zobaczyli Lokiego. Pokazuje nam to, jak daleko wciąż jesteśmy od odgadywania fenotypu na podstawie genotypu komórki.

Końcowe przemyślenia o początkach eukariota

Głównym celem tego opracowania, poza przekazaniem aktualnej wiedzy na temat teorii endosymbiozy, było pokazanie, że choć o temacie powstania komórek eukariotycznych uczymy się w szkołach od lat, nie jest to temat przestarzały, lecz wciąż żywy i ewoluujący. Tak samo jest z całą nauką: nigdy nie możemy zakładać, że coś jest tematem ostatecznie zamkniętym, ponieważ w każdej chwili możemy odkryć coś, co całkowicie zmieni nasze spojrzenie. W tym przypadku tym odkryciem była rodzina Asgard, w której istnienie naukowcy na początku nie chcieli wierzyć, jednak dzięki dogłębnym badaniom udało nam się znaleźć nowych protoplastów eukariota. Choć, jak to zwykle w nauce bywa, możliwe, że ich odkrycie dało nam więcej pytań niż odpowiedzi, chociażby: skoro nie istnieją u nich organella, to jakie funkcje pełnią tam białka, które u eukariota odpowiadają za transport wewnątrzkomórkowy lub za degradację innych białek? Na szczęście równolegle do odkryć doświadczalnych posuwa się naprzód praca teoretyczna, która cały czas musi nadążać i udoskonalać istniejące już teorie. Prace nad rodziną Asgard trwają, między innymi u nas w Polsce, w Centrum Nowych Technologii UW w Laboratorium Strukturalnej Biologii Komórki badane są białka Thorarcheota, które są homologami białek koordynujących transport wewnętrzny u eukariota.



Rys. 11 Teoria endosymbiozy / źródło: www.reddit.com

SŁOWNICZEK:

1. **pH** - jest to skala kwasowości oraz zasadowości roztworów, a więc kluczowe znaczenie ma ilości jonów H^+ , które powstają z dysocjacji (rozpuszczenia) kwasów w wodzie. Im większe pH tym bardziej kwasowy roztwór, im mniejsze tym bardziej zasadowy
2. **lipidy** - inaczej: tłuszcze. Jednym z podstawowych typów lipidów występujących w komórkach są fosfolipidy tworzące błonę komórkową, są to lipidy zawierające resztę kwasu fosforanowego związaną z zasadą azotową
3. **hydrofilowe** - skłonność cząsteczek do łączenia się z wodą
4. **hydrofobowe** - skłonność cząsteczek do odpychania od siebie cząsteczek wody
5. **cholesterol** - lipid zaliczany również do alkoholi, odpowiada za stabilizację błony komórkowej oraz inne jej własności
6. **centrosom** - struktura znajdująca się w pobliżu jądra komórkowego, wyrastają z niego mikrotubule, podczas podziału komórkowego ulega duplikacji, z obydwu centrosomu wyrasta wrzeciono kariokinetyczne, które rozdziela chromosomy pomiędzy komórki potomne
7. **rybosomy** - są to elementy zbudowane z rRNA oraz białek, odpowiadają one za syntezę białek z mRNA
8. **glikoproteiny** - białka związane z cząstkami cukrów
9. **chloroplasty** - organella występujące w komórkach roślinnych i glonów eukariotycznych, dzięki zielonym barwnikom pochłaniają energię światła słonecznego potrzebną do przeprowadzenia fotosyntezy przez roślinę
10. **sinice** - organizmy prokariotyczne, to dzięki nim na drodze drugiej endosymbiozy powstały komórki eukariotyczne zawierające chloroplasty
11. **sedymntacja** - określa prędkość poruszania się cząstek pod wpływem sił odśrodkowych w ultrawirówkach
12. **symbiont** - organizm żyjący w symbiozie (w ścisłej współpracy) z organizmem innego gatunku
13. **alfa-proteobakterie** - jedna z grup bakterii, najprawdopodobniej przodkowie eukariotycznych mitochondria
14. **homeostaza** - zdolność utrzymywania stałości warunków wewnątrz organizmu



Źródła:

- 1) Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka, Eva F. Caceres, Jimmy H. Saw, Disa Bäckström, Lina Juzokait, Emmelien Vancaester, Kiley W. Seitz, Karthik Anantharaman, Piotr Starnawski, Kasper U. Kjeldsen, Matthew B. Stott, Takuro Nunoura, Jillian F. Banfield, Andreas Schramm⁴, Brett J. Baker, Anja Spang & Thijs J. G. Ettema. 2017. *Asgard archaea illuminate the origin of eukaryotic cellular complexity*.
- 2) Gautam Dey, Mukund Thattai and Buzz Baum. *On the Archaeal Origins of Eukaryotes and the Challenges of Inferring Phenotype from Genotype*.
- 3) David A Baum and Buzz Baum, 2014, *An inside-out origin for the eukaryotic cell*
- 4) Hiroyuki Imachi , Masaru K. Nobu , Nozomi Nakahara , Yuki Morono , Miyuki, Ogawara, Yoshihiro Takaki, Yoshinori Takano, Katsuyuki Uematsu, Tetsuro Ikuta , Motoo Ito, Yohei Matsui, Masayuki Miyazaki, Kazuyoshi Murata, Yumi Saito, Sanae Sakai, Chihong Song, Eiji Tasumi, Yuko Yamanaka, Takashi amaguchi, Yoichi Kamagata, Hideyuki Tamaki and Ken Takai, *Isolation of an archaeon at the prokaryote-eukaryote interface*.

©Małgorzata Malczewska, BioCEN,
Studenckie Koło Biofizyki Molekularnej

