

# SEX A PŮVOD SMRTI

Aristoteles řekl, že příroda nesnáší prázdnotu. O dva tisíce let později tuto myšlenku zopakoval Newton. Oba se trápili tím, co vyplňuje prostor. Newton věřil, že jde o záhadnou substanci zvanou éter. Ve fyzice tato představa ve 20. století o svou pověst přišla, ale v ekologii si *horror vacui* zachoval plnou sílu. Zaplňování veškerého ekologického prostoru krásně zachycuje jeden starý rým: „Velké blechy malé maj, co ustavičně je kousaj, na těch malých menší jsou, a tak pořád blechy jdou.“ Každá myslitelná nika je obsazená a každý druh dokonale adaptovaný na svůj prostor. Všichni živočichové, rostliny i bakterie jsou sami o sobě místem k životu, džunglí příležitostí pro všechny skákající geny, viry a parazity, a to nemluvě o velkých predátorech. Všechno je možné.

Jenže není. Pouze to tak vypadá. Nekonečná mozaika života je pouze zdáním, v jehož srdci se skrývá černá díra. Je načase vypořádat se s největším paradoxem biologie: proč se veškerý život na Zemi dělí na prokaryota, která postrádají morfologickou komplexitu, a eukaryota sdílející ohromné množství specifických vlastností, jež se u prokaryot vůbec nevyskytují. Mezi oběma skupinami je propast, mezera, vzduchoprázdno, které by se přírodě mělo opravdu ošklivit. Veškerá eukaryota sdílejí víceméně všechno. Veškerá prokaryota nemají z morfologického úhlu pohledu skoro nic. Neexistuje lepší ukázka nespravedlivé biblické zásady: „Kdo má, tomu bude dáno.“

V předchozí kapitole jsme viděli, že endosymbióza mezi prokaryoty prolomila nekonečnou smyčku jednoduchosti. Pro bakterii není snadné, aby se dostala do jiné a přežívala tam po nespočet generací, známe však několik málo příkladů, takže víme, že se to stává, ač velmi vzácně. Nicméně buňka v buňce byla teprve začátek, významný okamžik v historii života, ale nic víc. Je to jen buňka v buňce. Musíme nějak zmapovat cestu od tohoto místa až ke zrození skutečné komplexity – k buňce, která nahromadila vše, co mají eukaryota společné. Začínáme u bakterií, jež téměř všechny složité znaky postrádaly, a končíme u komplexních eukaryot, buněk s jádrem, přemírou vnitřních membrán a kompartmentů, dynamickým buněčným skeletem a komplexním chováním, jako je třeba sex. Eukaryotické buňky získaly o čtyři až pět řádů větší genom i fyzické rozměry. Poslední společný předek eukaryot nahromadil všechny tyto znaky. Výchozí bod, buňku v buňce, neměl žádný z předchůdců. Neexistují žádné přežívající mezičlánky, nic dostatečného, co

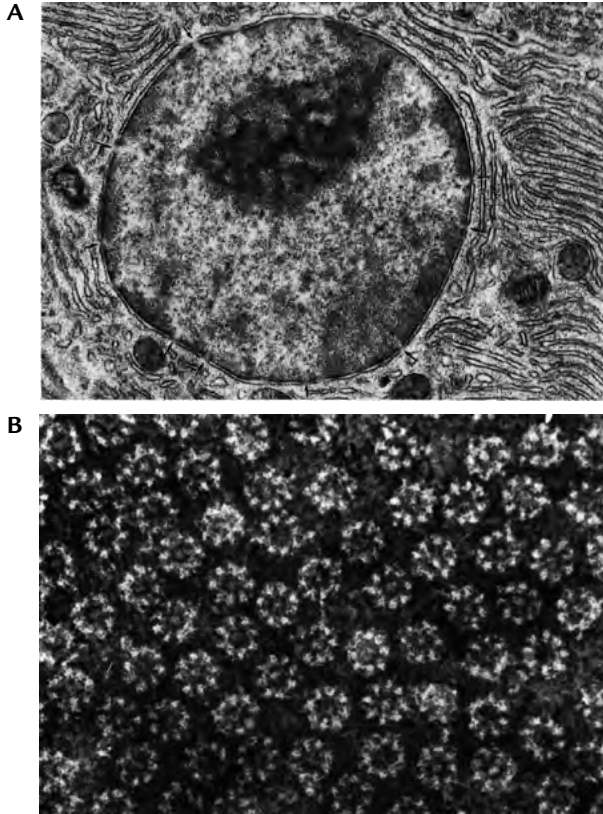
### III. KOMPLEXITA

by nám prozradilo, jak nebo proč se v evoluci jakýkoli z těchto komplexních eukaryotických znaků vyvinul.

Někdy se říká, že endosymbióza, která dala vzniknout eukaryotům, nebyla darwinistická; že to nebyl postupný sled drobných krůčků, ale náhlý skok do neznáma, vznik „nadějného monstra“. Do jisté míry je to pravda. Tvrdili jsme, že přírodní výběr působící libovolně dlouho na nekonečné populace prokaryot nikdy nevytvoří komplexní eukaryotické buňky, jediné s výjimkou situace, kdy se toho zapojí endosymbióza. Takové události nelze zachytit na klasickém rozvětřujícím se stromu života. Endosymbióza je jako opak větvení. Větve se nerozdvíhají, ale splývají. Endosymbióza je však jedinečnou událostí, evolučním okamžikem, který nedokáže vytvořit jádro nebo jakoukoli jinou archetypální eukaryotickou vlastnost. Endosymbióza uvedla do pohybu sled událostí, které jsou dokonale darwinistické v běžném smyslu toho slova.

Netvrdíme tedy, že vznik eukaryot nebyl darwinistický, nýbrž že ojedinělá endosymbióza mezi prokaryoty přetvořila selekční krajinu. Poté už všechno probíhalo v duchu Darwinovy teorie. Otázkou je, jak získání endosymbiontů změnilo směřování přírodního výběru. Stalo se to předvídatelným způsobem, který by mohl mít podobný průběh i na jiných planetách, nebo dalo odstranění energetických omezení průchod neomezené evoluci? Prozkoumáme tvrzení, že vznik přinejmenším některých univerzálních znaků eukaryot byl zapříčiněn důvěrným vztahem mezi hostitelskou buňkou a endosymbiontem a že tyto znaky jako takové jsou předvídatelné z prvotních principů. Patří mezi ně jádro, sex (pohlavní rozmnožování), dvě pohlaví i nesmrtelná zárodečná linie, původce smrtelného těla.

Začínáme-li s endosymbiózou, okamžitě to klade určitá omezení na pořadí událostí. Například jádro a membránové systémy se musely objevit až po endosymbiotické události. Určitá omezení jsou však uvalena také na rychlost, jíž se musela evoluce odehrávat. Darwinistická evoluce a gradualismus jsou snadno slučitelné, ale co to vlastně znamená „graduální“? Jednoduše že nedochází k velkým skokům do neznáma, že všechny *adaptivní* změny jsou malé a samostatné. To neplatí, pokud uvažujeme o změnách samotného genomu, jež mohou nabrat podoby velkých delecí, duplikací, transpozicí nebo náhlých přepojení v důsledku nevhodného zapnutí nebo vypnutí regulačních genů. Takové změny ale nejsou adaptivní. Podobně jako endosymbióza pouze mění výchozí bod, od něhož převezme otěže selekce. Kupříkladu tvrzení, že jen tak z ničeho nic vzniklo jádro, zaměňuje genetickou saltaci s adaptací. Jádro je dokonale adaptovaná struktura, nikoli pouhé skladiště DNA. Je složené z různých částí, například jadérka, kde se v ohromném měřítku vyrábí ribozomální RNA, dvojité jaderné membrány poseté neskonale nádhernými pórovými komplexy (obrázek 26), jež tvoří mnoho bílkovin, zakonzervovaných napříč všemi eukaryoty,



**Obr. 26:** Jaderné póry.

Klasické fotografie od průkopníka elektronové mikroskopie Dona Fawcetta. Na obrázku **A** je jasně patrná dvojitá membrána obklopující eukaryotické jádro i regulační póry označené šípkami. Tmavší místa uvnitř jádra jsou poměrně neaktivní oblasti, kde „kondenzuje“ chromatin, zatímco světlejší místa indikují aktivní transkripci. Světlejší „plochy“ blízko jaderných pórů poukazují na aktivní transport do a z jádra. Obrázek **B** zachycuje soubor jaderných pórových komplexů, jež se skládají z mnoha bílkovin sestavených tak, aby vytvářely aparát pro import a export. Hlavní bílkoviny v těchto pórech jsou zakonzervované napříč všemi eukaryoty, z čehož plyne, že jaderné póry musely být přítomné už u LECA (posledního společného předka všech eukaryot).

a elastické laminy, což je pružná bílkovinná síť přiléhající k jaderné membráně a chránící DNA před poškozením.

Podstatné je, že taková struktura je produktem přírodního výběru působícího po dlouhou dobu a že vyžaduje vypilování a zorganizování stovek samostatných bílkovin. Všechno je to čistě darwinistický proces, což ovšem neznamená nutnost pomalého průběhu z hlediska geologického času. Ve fosilním záznamu jsme zvyklí vidat dlouhá období stagnace, která jsou tu a tam přerušena periodami rychlých

### III. KOMPLEXITA

změn. Z hlediska geologického času jsou tyto změny rychlé, ale z pohledu počtu generací tomu tak nutně být nemusí – jednoduše jim nepřekáží stejná omezení, která změnám brání za normálních okolností. Jen výjimečně je přírodní výběr silou nutící ke změně. Mnohem častěji změně brání, neboť očisťuje vrcholy adaptivní krajiny od odchylek. Selektce začne působit ve prospěch změny místo stagnace pouze tehdy, když krajina projde nějakou seismickou transformací. Tehdy může pracovat překvapivě rychle. Dobrým příkladem je oko. Oči vznikly během kambriické exploze, podle všeho v průběhu několika milionů let. Proti tupému střídání epoch dlouhých stovky milionů let během skoro nekonečného prekambria mohou 2 miliony let působit jako nehorázná rychlost. Proč tak dlouhá stagnace a potom náhle překotná změna? Možná proto, že vzrostla hladina kyslíku ve vzduchu a selektce poté začala poprvé upřednostňovat velké aktivní živočichy, predátory i kořist, kteří měli oči a pevné schránky.\* Jeden slavný matematický model umožnil spočítat, jak dlouho by mohla trvat evoluce oka z primitivní světločivné skvrny jednoduchého červovitého živočicha. Za předpokladu, že životní cyklus trvá jeden rok a během jedné generace morfologická změna nepřekročí 1 %, odpověď zní, že evoluce proběhne za pouhého půl milionu let.

Jak dlouho by mohla trvat evoluce jádra? Nebo sexu? A co fagocytózy? Proč by to mělo trvat déle než oko? To je úkol do budoucna – vypočítat minimální čas nezbytný k evoluci eukaryot z prokaryot. Než bude mít cenu pustit se do takového projektu, potřebujeme vědět více o sledu souvisejících událostí. Neexistuje však žádný na první pohled zjevný důvod předpokládat, že by to mělo zabrat obrovské časové úseky měřené ve stovkách milionů let. Proč by to nemohly být 2 miliony let? Za předpokladu, že by docházelo k jednomu buněčnému dělení denně, se celkový počet generací blíží miliardě. Kolik generací je potřeba? Jakmile se uvolnily energetické brzdy, které blokovaly evoluci komplexity u prokaryot, není zřejmý žádný důvod, proč by se eukaryotické buňky nemohly vyvinout během relativně krátké doby. Ve srovnání s 3 miliardami let prokaryotické stagnace to může působit jako náhlý skok, ale jednalo se o striktně darwinistický proces.

Evoluce může probíhat rychle, to ale ještě neznamená, že tomu tak skutečně bylo. Existují ovšem pádné důvody myslet si, že evoluce eukaryot pravděpodobně proběhla rychle, neboť příroda nesnáší vzduchoprázdno. Potíž spočívá právě ve skutečnosti, že eukaryota sdílejí všechny znaky a že prokaryota žádný z nich nemají. To naznačuje nestabilitu. V 1. kapitole jsme se bavili o archezoích,

---

\* Netvrdím, že růst koncentrace kyslíku poháněl evoluci živočichů (jak jsme probrali v první kapitole), ale že umožnil aktivnější chování velkých živočichů. Toto osvobození od energetických omezení podporovalo polyfyletickou radiaci v mnoha odlišných skupinách živočichů, ale ti se vyvinuli již před kambriickou explozí, respektive před velkým nárůstem hladiny kyslíku na konci prekambria.

oněch poměrně jednoduchých jednobuněčných eukaryotech, jež byla kdysi mylně pokládána za evoluční přechodné články mezi prokaryoty a eukaryoty. Ukázalo se, že tato nesourodá skupina pochází z komplexnějších předků, kteří disponovali plným souborem eukaryotických znaků. Přesto jsou však *ekologickými* přechodnými články: obývají niku morfologické komplexity mezi prokaryoty a eukaryoty. Vyplňují vzduchoprázdno. Na velice zběžný první pohled tedy žádné vzduchoprázdno neexistuje: máme zde souvislé spektrum morfologické komplexity sahající od parazitických genetických elementů, obřích virů a bakterií přes jednoduchá eukaryota a složité buňky po mnohobuněčné organismy. Celá hrůznost vzduchoprázdna začala být patrná teprve nedávno, když vyšlo najevo, že archezoa jsou jen napodobenina.

Fakt, že archezoa nebyla konkurenčně vyhubena, znamená, že v tomto prostoru mohou prosperovat jednoduché mezičlánky. Neexistuje důvod, proč by tutéž ekologickou niku nemohly obývat skutečné evoluční přechodné články, tedy buňky, jež postrádaly třeba mitochondrie, jádro, peroxizomy, membránové systémy jako Golgiho aparát nebo endoplazmatické retikulum. Pokud se eukaryota objevovala pomalu, v průběhu desítek či stovek milionů let, muselo existovat mnoho stabilních mezičlánků, buněk, jež postrádaly různé eukaryotické znaky. Tyto přechodné články mohly obývat stejné mezilehlé niky, jež dnes zaplňují archezoa. Některé z nich by měly přežívat dodnes jako pravé evoluční mezičlánky ve vzduchoprázdnu. Jenže ono ne! Navzdory dlouhému a pečlivému hledání jsme žádné nenašli. Pokud nebyly konkurenčně vyhubeny, proč žádné z nich nepřežily? Nejspíše proto, že byly geneticky nestabilní. Nebylo moc způsobů, jak překonat prázdnotu, a většina zanikla.

To by naznačovalo, že existovala jen malá populace, což dává smysl. Velká populace je známkou evolučních úspěchů. Pokud raná eukaryota prosperovala, měla by se šířit a obsazovat nové ekologické prostory, rozrůžňovat se. Měla by být geneticky stabilní. Alespoň některá z nich by měla přežít. To se však nestalo. Zdá se tedy, že první eukaryota byla s největší pravděpodobností geneticky nestabilní a vyvinula se rychle v rámci malé populace.

Existuje ještě další důvod myslet si, že to tak muselo být. Je jím fakt, že všechna eukaryota sdílejí přesně tytéž znaky. Pomyslete, jak zvláštní to je! Všichni sdílíme s jinými lidskými bytostmi tytéž znaky, například vzpřímený postoj, tělo bez srsti, protistojný palec, velký mozek a vybavení pro jazyk, protože jsme si všichni příbuzní skrze společný původ a vzájemné rozmnožování. Sex. To je nejjednodušší definice druhu - populace vzájemně se rozmnožujících jedinců. Skupiny, jež se vzájemně nerozmnožují, se rozrůžňují (divergují) a vyvíjejí se u nich odlišné znaky - stávají se novými druhy. To se však při vzniku eukaryot nestalo. Všechna sdílejí stejný soubor základních znaků. Hodně to připomíná vzájemně se rozmnožující populaci. Sex.

### III. KOMPLEXITA

Mohl by jakýkoli jiný způsob rozmnožování dospět ke stejnému výsledku? Nezdá se. Nepohlavní rozmnožování (klonování) vede k hluboké divergenci, jelikož se v různých populacích hromadí různé mutace. Tyto mutace se v odlišných prostředích, kde poskytují rozdílné výhody či nevýhody, stávají subjektem selekce. Klonování může vytvářet identické kopie, což ale nakonec v důsledku hromadění mutací paradoxně pohání rozrůžňování populací. Naproti tomu sex (pohlavní rozmnožování) shromažďuje znaky z celé populace, neustále je promíchává a spojuje, což je přesný opak rozrůžňování. Fakt, že eukaryota sdílejí tytéž znaky, naznačuje, že se objevila ve vzájemně se rozmnožující sexuální populaci. A to nás zase vede k závěru, že jejich populace byla dostatečně malá, aby se její členové mohli vzájemně rozmnožovat. Všechny buňky z této populace, které se nemohly rozmnožovat pohlavně, zanikly. Bible měla pravdu: „Těsná je brána a úzká cesta, která vede k životu, a málokdo ji nalézá.“ (Mt 7, 14)

A co horizontální genový přenos, který je u bakterií a archeí tak běžný? Podobně jako sex obnáší i horizontální přenos genů rekombinaci a vytváří „nestabilní“ chromozomy s měnicími se kombinacemi genů. Avšak na rozdíl od sexu není horizontální genový přenos reciproční a nezahrnuje splývání buněk ani rekombinaci napříč celým genomem. Je nesystematický a jednosměrný: nekombinuje znaky v populaci, ale prohlubuje odlišnosti mezi jedinci. Vezměme si třeba *E. coli*. Jedna buňka může obsahovat asi 4 000 genů, ale „metagenom“ (celkový počet genů vyskytující se v různých kmenech *E. coli* definovaných na základě ribozomální RNA) má velikost spíše kolem 18 000 genů. Výsledkem bujícího horizontálního genového přenosu je, že se různé kmeny odlišují až polovinou svých genů, což je větší variabilita než u všech obratlovců dohromady. Zkrátka ani klonování, ani horizontální přenos genetické informace, což jsou dominantní způsoby předávání dědičné informace u bakterií a archeí, nevysvětlují záhadu uniformity eukaryot.

Před deseti lety ještě nebylo moc důkazů na podporu představy, že sex vznikl velmi brzy v evoluci eukaryot. Četné druhy, například mnohé améby a údajně hluboko se odvíjející archezoa jako giardie, se považovaly za nepohlavní. Dnes se nikomu nepodařilo přistihnout giardie in flagranti, tedy při mikrobiálním sexu. Čeho se však nedostává v přírodě, vynahradí technologie. Známe sekvenci jejich genomu. Obsahuje dokonale provozuschopné geny potřebné pro meiózu (redukční buněčné dělení sloužící k vytvoření gamet pro pohlavní rozmnožování) a struktura jejich genomu svědčí o pravidelné pohlavní rekombinaci. Totéž víceméně platí pro všechny další druhy, na něž jsme se podívali. S výjimkou druhotně nepohlavních eukaryot, která obvykle rychle vyhynou, jsou všechna známá eukaryota pohlavní. Můžeme předpokládat, že totéž platilo pro jejich společného předka. Shrnuto a podtrženo: sex se objevil v rané fázi eukaryotické evoluce a *pouze* sex v malé nestabilní populaci může vysvětlit, proč mají všechna eukaryota tolik společných znaků.

To nás přivádí k hlavní otázce této kapitoly. Přináší endosymbióza mezi dvěma prokaryoty něco, co by mohlo pohánět evoluci sexu? Rozhodně, a kromě sexu ještě mnoho dalšího.

### TAJEMSTVÍ UKRYTÉ VE STRUKTUŘE NAŠICH GENŮ

Eukaryota mají „rozkouskované geny“. Jen málo objevů 20. století přineslo větší překvapení. Rané studie věnované bakteriálním genům nás přivedly k mylnému přesvědčení, že geny jsou na našich chromozomech upořádané lineárně, jako korálky navlečené na šňůrce. Jak prohlásil genetik David Penny: „Kdybych sloužil ve výboru, který navrhl genom *E. coli*, byl bych na to celkem hrdý. V žádném případě bych se však nepřiznal k tomu, že jsem působil ve výboru, jenž navrhoval lidský genom. Dokonce ani univerzitní výbor by nedokázal něco tak zpackat.“

Co se pokazilo? V eukaryotických genech je hrozný nepořádek. Skládají se z relativně krátkých sekvencí, jež kódují kousky bílkovin, a tyto sekvence jsou přerušovány dlouhými pasážemi nekódující DNA, jež jsou známé jako introny. Každý gen (obvykle se definuje jako úsek DNA kódující bílkovinu) obsahuje zpravidla několik intronů. Introny se výrazně liší svou délkou, ale obvykle jsou výrazně delší než samotné sekvence kódující bílkovinu. Vždy se kopírují do RNA templátu, který určuje pořadí aminokyselin v bílkovině, ale poté jsou vystřiženy ještě předtím, než RNA dorazí k ribozomům: velkým, v cytoplasmě umístěným továrnám na sestavování bílkovin. Není to snadný úkol. Dosahuje se ho pomocí dalšího pozoruhodného bílkovinného nanostroje známého jako spliceozom (procesu se říká splicing či sestřih). K významu spliceozomu se brzy vrátíme. Nyní pouze poznamenejme, že celý proces představuje podivně zdoluhavý způsob, jak se s celou věcí vypořádat. Jakákoli chyba při vystřihování intronů znamená, že se ribozomy nakrmí hromadami nesmyslné RNA, kterou ribozomy přečtou a vyrobí nesmyslné bílkoviny. Ribozomy se drží byrokracie stejně jako Kafkův úředník.

Proč mají eukaryota rozkouskované geny? Má to pár výhod. Z téhož genu mohou být odlišným sestřihem poskládány různé bílkoviny, což umožňuje například rekombinační virtuozitu imunitního systému. Různé kousky bílkovin lze totiž úchvatně rekombinovat za vzniku miliard odlišných protilátek, které jsou schopné navázat se na v podstatě jakoukoli bakteriální či virovou bílkovinu, a tím uvést do pohybu vražedné stroje imunitního systému. Imunitní systém je ale pozdním vynálezem velkých, složitých živočichů. Existovala nějaká výhoda už dříve? Ford Doolittle, jeden z doyenů evoluční biologie 20. století, v 70. letech navrhl, že introny by mohly pocházet z dob samotných počátků pozemského života: tato myšlenka je známá jako hypotéza „raných intronů“. Představa je taková, že rané geny, jež postrádaly moderní sofistikované mechanismy opravy DNA, musely velmi

### III. KOMPLEXITA

rychle hromadit chyby, takže byly extrémně náchylné k mutačnímu zhroucení. Vzhledem k vysoké mutační rychlosti závisí množství nahromaděných mutací na délce DNA. Zhroucení by snad mohly vzdorovat pouze malé genomy. Odpovědí byly introny. Jak zakódovat velký počet bílkovin krátkým úsekem DNA? Stačí rekombinovat malé kousky. Je to krásná představa a stále má pár zastánců, byť sám Doolittle už mezi ně nepatří. Stejně jako všechny dobré hypotézy i tato vytvořila řadu predikcí. Naneštěstí se ukázaly jako chybné.

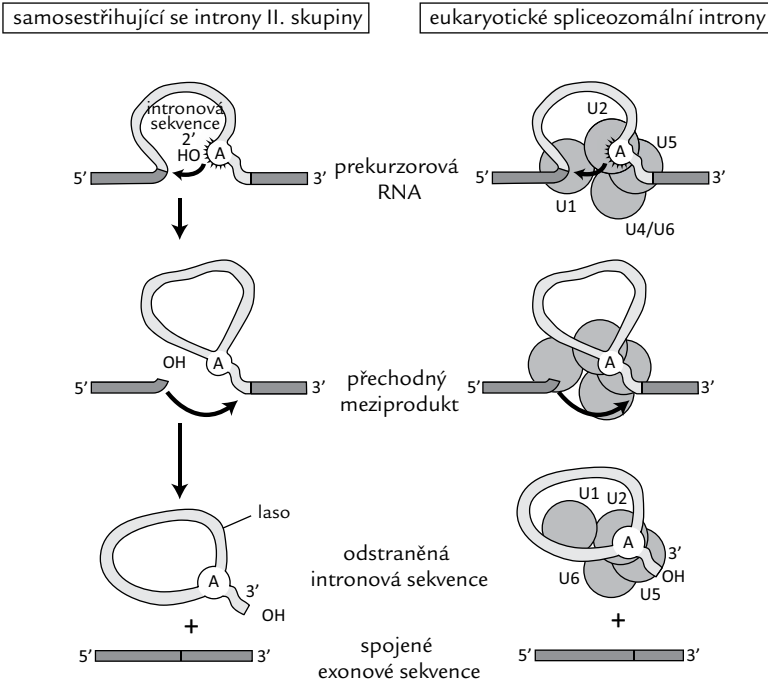
Hlavní předpovědí je, že eukaryota se musela vyvinout jako první. Pouze eukaryota mají pravé introny. Pokud byly introny ancestrálním stavem, musela být eukaryota vůbec prvními buňkami, jež předcházely bakteriím i archeím, a tyto skupiny musely introny ztratit později v důsledku selekce na zeštíhlení genomu. Z fylogenetického hlediska to nedává smysl. Moderní éra celogenomového sekvenování jasně ukazuje, že eukaryota vznikla z archeální hostitelské buňky a bakteriálního endosymbionta. Nejhlubší rozvětvení na stromu života se nachází mezi archei a bakteriemi; eukaryota vznikla až později. Tento pohled je v souladu s fosilním záznamem a energetickými faktory, o nichž jsme se bavili v minulé kapitole.

Jestliže však není přítomnost intronů ancestrálním stavem, odkud se vzaly a proč vznikly? Zdá se, že odpovědí je endosymbiont. Napsali jsme, že „pravé introny“ u bakterií nenajdeme, ale předchůdci intronů jsou téměř jistě bakteriálního původu, nebo lépe řečeno, jde o bakteriální genetické parazity, formálně nazývané „samosestříhující se mobilní introny II. skupiny“. Těmi výrazy se neznepokojte. Mobilní introny jsou pouze kousky sobecké DNA, skákající geny, jež se kopírují do genomu a zase se z něj odstraňují. I když „pouze“ není ten správný výraz. Jsou to pozoruhodné a cílevědomé stroječky. Při čtení se běžným způsobem přepíší do RNA, ale poté najednou ožijí (jak jinak to popsat?) a zformují se do podoby RNA „nůžek“. Ty vystřihují parazity z delších RNA transkriptů, minimalizují poškození hostitelské buňky a vytvářejí aktivní komplexy, které kódují reverzní transkriptázu – enzym schopný změnit RNA zpět na DNA. Tyto komplexy vloží kopie intronu zpět do genomu. Introny jsou tedy parazitické geny, které se připojují a zase vystřihují z bakteriálních genomů.

„Velké blechy malé maj, co ustavičně je kousaj...“ Kdo by si pomyslel, že genom je hotový blázelec, jenž se hemží vynalézavými parazity, kteří přicházejí a odcházejí podle libosti. Tak to ale je. Mobilní introny jsou pravděpodobně velice staré. Vyskytují se u všech tří domén života a na rozdíl od virů nikdy nemusí opouštět bezpečí hostitelské buňky. Věrně se kopírují pokaždé, když se hostitelská buňka dělí. Život se s nimi prostě naučil žít.

Bakterie se s nimi dokonce umí vypořádat docela dobře. Jak přesně, to nevíme. Může jednoduše jít o sílu selekce působící na velké populace. Bakterie se špatně umístěnými introny, které nějakým způsobem překážejí jejich genům,





**Obr. 27:** Mobilní samosestřihující se introny a spliceozom.

Eukaryotické geny se skládají z exonů (sekvence, jež kódují bílkoviny) a intronů, což jsou dlouhé nekódující sekvence, které jsou do genů vloženy a z RNA kódu se vystřihují před syntézou bílkovin. Zdá se, že introny vznikly z parazitických elementů DNA, jež se nacházejí v bakteriálních genomech (levý panel), ale v eukaryotických genech se z nich vlivem mutací staly netečné sekvence. Ty se musejí aktivně odstraňovat za pomoci spliceozomu (pravý panel). Odůvodněním této úvahy je mechanismus sestřihu zachycený na obrázku. Bakteriální parazit (levý panel) se sám vystřihuje a vytváří intronovou sekvenci kódující reverzní transkriptázu, která přeměňuje kopie parazitických genů na sekvence DNA a vkládá jejich četné kopie do bakteriálního genomu. Eukaryotický spliceozom (pravý panel) je velký bílkovinný komplex, ale jeho funkce je závislá na katalytické RNA (ribozym) v jeho centru, která využívá totožný mechanismus sestřihu. To naznačuje, že spliceozom, a tím pádem i eukaryotické introny, pochází ze samosestřihujících se mobilních intronů II. skupiny, které unikly z endosymbionta v rané fázi evoluce eukaryot.

jednoduše v selekční bitvě prohrají s buňkami, jež introny nevhodně umístěné nemají. Nebo se možná přizpůsobují samotné introny a pronikají do méně důležitých oblastí DNA, čímž tolik nenaruší rovnováhu hostitelské buňky. Oproti virům, jež mohou přežívat samostatně, a proto se tolik nestarají, jestli hostitelskou buňku zahubí, mobilní introny hynou spolu se svým hostitelem, takže působením škody nic nezískají. Nejvhodnějším slovníkem pro analýzu této

### III. KOMPLEXITA

oblasti biologie je slovník ekonomie: matematika nákladů a výnosů, věžňovo dilema, teorie her. Buď jak buď, faktem je, že mobilní introny u bakterií a archeí nejsou hojné a nenacházejí se uvnitř samotných genů (technicky to tedy vůbec nejsou introny), ale v nízké hustotě se hromadí v intergenních oblastech. Typický bakteriální genom většinou neobsahuje více než 30 mobilních intronů (mezi 4 000 genů), což je výrazný rozdíl oproti tisícům intronů u eukaryot. Malý počet intronů u bakterií odráží dlouhodobou rovnováhu mezi náklady a přínosy; je to výsledek selekce, která po mnoho generací působila na obě strany.

Tak nějak vypadala bakterie, která před 1,5 až 2 miliardami let vstoupila do endosymbiózy s archeální hostitelskou buňkou. Její nejbližší moderní obdobou je některá z  $\alpha$ -proteobakterií. Víme, že dnešní  $\alpha$ -proteobakterie obsahují málo mobilních intronů. Co však spojuje tyto starobylé genetické parazity se strukturou eukaryotických genů? Ne o mnoho víc než detaily mechanismu RNA nůžek, které vystřihují mobilní bakteriální introny, a prostá logika. O několik odstavců výše jsme se zmínili o spliceozomech, bílkovinných nanostrojích, jež vystřihují introny z našich RNA transkriptů. Spliceozom se neskládá jenom z bílkovin: v jeho centru se nacházejí přesně tytéž RNA nůžky. Ty vystřihují eukaryotické introny pomocí osobitého mechanismu, který prozrazuje jejich původ bakteriálních samosestřihujících se intronů (obrázek 27).

To je vše. Samotné genetické sekvence intronů neobsahují nic, co by naznačovalo, že pocházejí z bakterií. Nekódují bílkoviny, jako třeba reverzní transkriptázu, nevládnou a nevystřihují se samy z DNA, ani nefungují jako mobilní genetičtí paraziti. Jsou to pouze dlouhé úseky DNA, které tu sedí a nic nedělají.\* Avšak tyto mrtvé introny, chátrající v důsledku mutací, které v nich nadělaly díry pod čarou ponoru, jsou nyní zničené k nepoznání a daleko nebezpečnější než živí paraziti. Už se nedokážou samy vystřihovat. Musí je odstranit sama hostitelská buňka. Ta to dělá pomocí nůžek, jež si kdysi vyžádala od jejich živých bratranců. Spliceozom je eukaryotický stroj vycházející z bakteriálního parazita.

Podívejme se na hypotézu, kterou ve vzrušujícím článku z roku 2006 předložili Bill Martin a rusko-americký bioinformatik Eugene Koonin. Podle nich endosymbiont při vzniku eukaryot na nic netušící hostitelkou buňku vypustil přival genetických parazitů, kteří se šířili do celého genomu. Tato raná intronové

---

\* Dobře, skoro nic. Některé introny si osvojily určité funkce, například vázat transkripční faktory, a někdy jsou aktivní jako samotná RNA, přičemž zasahují do syntézy bílkovin a do transkripce ostatních genů. Zabředli jsme do polemiky, která definuje celou éru a týká se funkce nekódující DNA. Část jí nepochybně nějakou funkci má, ale osobně jsou mi názorově bližší skeptici, kteří tvrdí, že většina (lidského) genomu není aktivně omezo-  
vána svými sekvencemi, a tudíž ani neslouží účelu definovanému svou sekvencí. Prakticky vzato to znamená, že zbytek žádnou funkci nemá. Pokud bych musel hádat, řekl bych, že nějaké funkce plní snad 20 % lidského genomu a zbytek je prostě smetí. To ovšem neznamená, že smetí nemůže sloužit k jinému účelu, například vyplňovat prostor. Příroda koneckonců nesnáší vzduchoprázdno.