



Přírodovědecká fakulta **Univerzita Karlova**

Nová studie v „Science“ odhaluje tajemství barev papoušků

Tisková zpráva

Praha, 1. 11. 2024, Přírodovědecká fakulta UK

Od karnevalu v Riu de Janeiru až po miláčky pirátů: papoušci jsou pro lidi na celém světě synonymem barevnosti. Mezinárodní konsorcium vedené vědci z portugalského BIOPOLIS-CIBIO právě publikovalo studii v jednom z nejprestižnějších vědeckých časopisů Science, ve které odhalilo, jak krásné zbarvení papouščího peří vzniká. Na studii se kromě portugalských a amerických akademiků významně podíleli také tři čeští vědci. Doktor Jindřich Brejcha z katedry filosofie a dějin přírodních věd Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, který je jedním ze tří hlavních autorů studie, a dále docent Peter Mojzeš z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy a doktor Petr Maršík z České zemědělské univerzity.

Papoušci by opravdu mohli být synonymem pro barevnost, jelikož téměř všechny druhy jsou výrazně zbarvené, a to zejména červeně nebo žlutě. Zelená barva je vlastně také žlutá, ale na modrém pozadí. Už na konci 19. století bylo jasné, že barviva v peří papoušků jsou odlišná od všech ostatních červených a žlutých pigmentů vyskytujících se v peří ptáků či srsti jiných zvířat. Dostala proto svá vlastní pojmenování. Červenému pigmentu se říkalo „Araroth“ (podle papouška Ary a slova *roth* které má více vysvětlení původu, např. prolévání krve, zbarvení červené hlíny) a žlutý pigment měl označení „Psittakofulvin“ (z řeckého *psittakós* a latinského *fulvus*, tedy papoušek a žlutá). Označení psittakofulviny se nakonec vžilo pro všechny papouščí pigmenty a teprve na začátku 21. století byla odhalena jejich detailní chemická struktura. Avšak až do dnešního dne se pouze spekulovalo o tom, jak přesně žlutá a červená barva papoušků vlastně vzniká. Je snad rozdíl v uspořádání pigmentů v peří, nebo ve velikosti molekul psittakofulvinů? Nyní se ukázalo, oproti původní představě psittakofulvinů jako jedné látky, že opravdu existují dvě chemické formy těchto barviv. Jedna z nich, tzv. aldehyd, byla známa právě již od roku 2001. Druhou formu vědecký tým potvrdil ve své nové studii. Navíc nová studie odhaluje detailní molekulární mechanismus, díky kterému dochází k přeměně aldehydového psittakofulvinu na karboxylovou kyselinu. Oproti předchozím výzkumům tak nyní už víme, že papouščí pigmenty vznikají nejen spojováním krátkých 2 až 3 uhlíkových molekul proteinem polyketid syntetáza, ale i to, že primárním výsledkem syntézy není karboxylová kyselina, ale právě aldehyd, který je na karboxylovou kyselinu řízeně upravován „*To byla jedna z nesrovnalostí, která nás vedla k tomu, že musí existovat opravdu dvě formy psittakofulvinů. Předchozí molekulární studie totiž nedokázala vysvětlit, co je výsledkem syntézy, protože by to musela být jiná forma psittakofulvinu, než kterou všechny ostatní studie nacházely v peří papoušků. Zřejmě to bylo tím, že jedni si vybrali žlutého papouška, zatímco všichni před nimi studovali papouška červeného,*“ vysvětluje Jindřich Brejcha.

Modelovým druhem pro studii byl indonéský druh papouška lori, který se v přírodě vyskytuje ve dvou morfách – žlutě a červeně zbarvené, lori tmavý (*Pseudeos fuscata*). „*Naši kolegové si vybírají pro své molekulární studie modely, o kterých se ví, že jejich genom bude stejný a jediný rozdíl bude právě zodpovědný za konkrétní fenotypový znak. Pro takové studie jsou polymorfní druhy vynikající, ale u papoušků je vnitrodruhový polymorfismus bohužel vzácný,*“ vysvětluje volbu modelového druhu Jindřich Brejcha. Portugalský tým začal sekvenovat genom obou barevných variant tohoto papouška a hledat, které úseky DNA by mohly být zodpovědné za rozdíly ve zbarvení. Výsledkem bylo vytipování oblasti zodpovědné za regulaci aktivity naprosto běžného proteinu, aldehyd dehydrogenázy ALDH3A2. Aldehyd dehydrogenázy jsou rodina velice běžných proteinů, které nalézáme napříč všemi organismy. U člověka jsou například naprosto zásadní při přeměně alkoholů přes jedovaté aldehydy na neškodné karboxylové kyseliny. Dysfunkce ALDH3A2 je u člověka také zodpovědná za dědičnou kožní chorobu provázenou neurologickými symptomy, tzv. Sjögren-Larssonův syndrom.

První měření papouščího peří pomocí Ramanovy mikroskopie na Matematicko-fyzikální fakultě UK ukázalo, že červená a žlutá barva peří se zřejmě opravdu liší délkou řetězců. „*Poloha nejintenzivnějších pásů v Ramanových spektrech dobře korelovala s barvou peří i očekávanou délkou řetězců, ale na druhou stranu, jejich extrémní intenzita znemožňovala detekci slabších vibračních pásů, které by nám řekly více o jiných funkčních skupinách,*“ shrnuje tuto část experimentů docent Peter Mojzeš. Pomocí chromatografie a hmotnostní spektrometrie ale Petr Maršík s Jindřichem Brejchou našli nečekaně velkou diverzitu látek, kterou nepředpokládali. „*Díky znalosti genu nás napadlo, že se musíme se podívat i na koncové funkční skupiny molekul psittakofulvinů, a proto jsme udělali srovnání mezi červeným a žlutým peřím mnoha druhů papoušků. Pomocí separace kapalinovou chromatografií spojenou s kombinací metod hmotnostní spektrometrie s ultravysokým rozlišením a UV-Vis absorpční spektroskopie se nám podařilo prokázat přítomnost dvou funkčních skupin – aldehydické a karboxylové – a zároveň potvrdit vztah mezi funkční skupinou psittakofulvinu a barvou peří. Za peří z mnohdy velmi vzácných druhů vděčíme chovatelům, plzeňské Zoo nebo záchranné stanici pro opuštěné papoušky Laguna,*“ popisuje další postup doktor Petr Maršík z ČZU. Povedlo se tak získat vzorky například od chráněného novozélandského papouška nestor kea či peří podivného druhu papouška, trichy orlí.

Výsledky ukázaly, že pro výsledné zbarvení peří napříč všemi liniemi papoušků je zásadní rozdíl v poměru aldehydů a karboxylových kyselin. Analýza exprese genů ukázala, že v červeném peří se aldehyddehydrogenáza vytváří méně a aldehyd, který enzym přeměňuje, se v něm proto kumuluje. Naopak, ve žlutém a zeleném peří se aldehyd efektivně odbourává, protože aldehydázy je zde dostatek. Výsledkem je vyšší podíl karboxylové kyseliny v žlutém peří. Další molekulární analýzy například odhalily, že ve chvíli, kdy se peří formuje a zřejmě dochází k syntéze psittakofulvinů, je DNA v oblasti genu ALDH3A2 rozpojená, co značí, že se gen přepisuje. V neposlední řadě se pomocí sekvenování na úrovni jednotlivých buněk v tkáni podařilo ukázat, že ALDH3A2 se přepisuje přímo v buňkách, které budou tvořit peří. Toto zjištění je jeden z prvních přímých důkazů o tom, jak se pigment do peří dostává.

„*Ve chvíli, kdy jsme měli jednotlivé výsledky, zbývalo už jen nějakým jednoznačným způsobem ověřit, že náš protein opravdu dělá to, co si myslíme,*“ vysvětluje další kroky studie Jindřich Brejcha. Na experimentu s buněčnými kulturami pivních kvasinek pracovali naši vědci společně s vědeckým týmem z USA. „*Kolegové kvasinky upravili tak, že produkovaly psittakofulviny. Jenže kvasinky mají vlastní aldehydázy, a tak jsme nejdříve produkci aldehydu nepozorovali. Pokud se ale všechny aldehydázy kvasinek zablokovaly, aldehydy se objevily. Jakmile se kvasinkám zabudovala do genomu papouščí ALDH3A2, začala v nich pracovat a aldehydy štěpit na karboxylové kyseliny. Při měření jsme navíc objevili další meziprodukty*

syntetické dráhy, což doplnilo naši představu o celkové syntéze psittakofulvinů,“ popisuje konečný důkaz Jindřich Brejcha.

Podle autorů ale nejsou ještě všechna tajemství papouščího zbarvení odhalena a jejich výzkum otevírá další otázky. Jedním z nevysvětlených tajemství tak zůstává, proč vlastně papoušci vytvářejí své barvy úplně jinak než všechny ostatní organismy.



Zjednodušené znázornění hlavních bodů studie. Analýza chemického složení peří dohromady s molekulární analýzou genomu papoušků a genové exprese (bulk i single-cell) jasně ukázaly důležitou roli regulace funkce aldehyddehydrogenázy ALDH3A2 na tvorbě žluté a červené barvy. Nové je i to, že psittakofulviny se vyskytují v barevném peří ve dvou formách. V minulosti se myslelo, že existují pouze ve formě jedné. Pro červené peří je charakteristická aldehydová forma, pro žluté peří carboxy-forma. Chemické a molekulární výsledky byly potvrzeny *in vitro* experimentem za použití genetické manipulace kvasinek, kterým se podařilo replikovat syntézu a úpravu psittakofulvinů. Autorka ilustrace: Kristýna Eliášová