

Na čem pracujeme: Míchání hvězdných populací v kulových hvězdokupách díky interakcím s binárními systémy

11.11.2025 - Michal Švanda | Astronomický ústav AV ČR

Hvězdokupy se na první pohled mohou zdát klidnými a neměnnými shluky hvězd, ale ve skutečnosti v nich probíhá neustálý dynamický tanec plný těsných přiblížení hvězd, občasných kolizí a výměn energie. Nová studie vedená Václavem Pavlíkem z Oddělení galaxií ASU ukazuje, že právě tyto interakce mezi hvězdami - zejména mezi binárními a jednotlivými - mohou zásadně měnit vnitřní uspořádání hvězd v kulových hvězdokupách. Modely naznačují, že těsná přiblížení hvězd ke dvojhvězdným systémům, konkrétně hmotným binárním černým díram, napomáhají promíchávání různých populací hvězd.

Kulové hvězdokupy patří k nejstarším a nejhustším útvarům v naší Galaxii. Každá z nich obsahuje statisíce až miliony hvězd gravitačně vázaných do sféricky symetrického systému, jehož vnitřní dynamika se vyvíjí po miliardy let. Dlouho se mělo za to, že všechny hvězdy v jedné hvězdokupě vznikly zároveň z téhož plynného oblaku a mají tudíž stejné chemické složení. Postupně se však ukázalo, že téměř všechny kulové hvězdokupy obsahují alespoň dvě chemicky odlišné populace hvězd - jednu „původní“ starší (P1) a druhou „obohacenou“ mladší (P2), která nese znaky, že vznikla z materiálu obohaceného produkty jaderných reakcí předchozí generace hvězd.

Podle převládajících modelů se hvězdy druhé populace rodí v centrálních oblastech hvězdokupy. S postupem času by však měly dynamické procesy tyto hvězdy promíchat s původní populací, takže po několika miliardách let by měly být obě populace prostorově promísené. V mladých hvězdokupách by však měly být tyto dvě populace stále prostorově oddělené. Pozorování však ukazují, že některé relativně mladé hvězdokupy jsou plně promíchané, zatímco jiné stejně staré si zachovávají výrazné rozdíly: někde je P2 stále v centru, jinde naopak převládá na okraji (toto inverzní rozložení se vymyká jakýmkoliv předpokladům o vzniku hvězd P2). Tato rozmanitost naznačuje, že kromě pomalých relaxačních procesů působí v nitru hvězdokup ještě další mechanismy, které mohou rozložení populací dramaticky změnit.

Jedním z možných viníků jsou binární systémy - dvojice hmotných hvězd či spíše černých děr, které se usazují v centrální oblasti a při blízkých setkáních vyhadzují jiné hvězdy směrem do okrajových částí kupy. Představovaná práce proto zkoumá, zda by právě tento mechanismus mohl vysvětlit pozorované promíchání (či dokonce inverzi) hvězdných populací v mladých kulových hvězdokupách.

Autoři nejprve odvodili teoretické vztahy, které určují četnost těsných přiblížení, množství přenesené energie a časové škály těchto procesů. Z nich vyplynulo, že v hustých jádrech hvězdokup mohou být takové interakce velmi časté, zvláště pokud se uvažuje binární černé díry s hmotnostmi v desítkách hmotností Slunce. Každá srážka uvolňuje energii, která může „vykopnout“ některé hvězdy z centra hvězdokupy do větších vzdáleností, a tak dochází k rychlejšímu promíchávání populací.

Pro ověření těchto úvah autoři provedli rozsáhlou sadu přímých N -částicových numerických simulací, v nichž testovali vliv různých velikostí hvězdokup a různých konfigurací binárních černých děr na vývoj rozmístění hvězd P1 a P2 v hvězdokupě. Zejména si všímali, zda se budou promíchat hvězdy, které se původně koncentrovaly ve středu hvězdokupy, s hvězdami na jejím okraji. Analýza dynamického vývoje ukázala, že binární systémy skutečně působí jako „ohřívač“ jádra hvězdokupy. Při každém přiblížení k jednotlivé hvězdě předávají kinetickou energii a vystřelují ji z

centra ven. Tento proces nejen zvětšuje celkový poloměr hvězdokupy, ale i efektivně míchá hvězdy obou populací. Míra míchání přitom závisí na třech klíčových parametrech: Za prvé na hustotě hvězdokupy, protože čím je kupa hustší, tím častější mohou být blízká setkání hvězd a dvojhvězd. Za druhé na počtu binárních systémů, neboť více binárních párů znamená více interakcí za jednotku času a rychlejší míchání. A konečně jako třetí důležitý parametr se ukazuje hmotnostní poměr mezi složkami dvojděr a ostatními hvězdami – čím hmotnější jsou binární černé díry, tím větší je celkový efekt.

Modely ukázaly, že poměrně rychle se centrální P2 hvězdy rozptýlí do větších vzdáleností a v projekci (která by odpovídala pozorování z dálky) pak P1 a P2 vypadají zcela promíchaně. Radiální inverze – tedy stav, kdy by P2 převažovala na okraji a P1 v centru – se však v žádné simulaci neobjevila. Binární interakce mají tedy spíše tendenci vyrovnávat rozdíly než je obracet. Skutečně pozorované kulové hvězdokupy vykazují různé stavy hvězdných populací. Některé kupy (např. NGC 4590 nebo NGC 5904) jsou plně promíchané, jiné (např. NGC 5024, NGC 6809) si udržují centrální koncentraci P2. Výsledky práce V. Pavlíka pak ukazují, že právě kombinace několika desítek hmotných binárních systémů v kompaktním jádře dokáže reprodukovat vlastnosti pozorovaných promíchaných kup, zatímco méně husté nebo méně bohaté systémy zůstávají strukturálně diferencované.

Simulace zároveň odhalily, že binární systémy nejsou věčné: při častých interakcích se mohou rozpadat nebo navzájem vyhazovat z jádra, čímž se jejich počet časem snižuje. I přesto zůstává jejich vliv dlouhodobý – dokud v jádře přežívá jen několik hmotných párů, míchání pokračuje. Jakmile binární „motor“ zcela zanikne, hvězdokupa přechází do běžné relaxační fáze, která však probíhá na mnohem delších časových škálách.

Některé pozorované hvězdokupy však vykazují úplnou inverzi populací (např. NGC 3201 nebo NGC 6101). Autoři předepisují, že jedním z hypotetických scénářů, který by toto vysvětlil, by byla přítomnost dvojice černých děr středních hmotností, tedy stovek hmotností Slunce. Takový systém by měl mnohonásobně kratší dobu mezi interakcemi a mohl by účinněji vyhazovat centrální hvězdy ven. Současně by se takový černoděrový pár rychleji spojil vyzařováním gravitačních vln. Výsledná černá díra po spojení by byla nejspíše rychlostí až tisíce kilometrů za sekundu vymrštěna z jádra hvězdokupy. To by zastavilo zrychlené promíchávání populací a hvězdokupy by si na čas mohla uchovat radiální inverzi P1 a P2.

Práce celkově naznačuje, že dynamika binárních systémů je významným faktorem ve vývoji hvězdokup, a to zejména v počátečních fázích, kdy se ještě neprojevuje plně gravitační relaxace. Z pohledu pozorování to znamená, že rozdíly mezi strukturami mladých hvězdokup nemusejí odrážet jen jejich původní podmínky při vzniku, ale také to, kolik hmotných binárních systémů v nich přežilo a jak rychle v nich dochází k energetické výměně.

Citace práce

V. Pavlík a kol., Spatial mixing of stellar populations in globular clusters via binary-single star scattering, *Astronomy & Astrophysics* v tisku, preprint arXiv:2508.03322

<https://www.asu.cas.cz/articles/2499/19/na-cem-pracujeme-michani-hvezdnych-populaci-v-kulovych-hvezdokupach-diky-interakcim-s-binarnimi-systemy>