

Extrémy hvězdného vývoje

(v blízké hvězdokupě)

Michal Švanda

S pomocí Hubbleova kosmického dalekohledu se astronomům povedlo potvrdit současně hned dvě teoretické předpovědi týkající se teorie hvězdného vývoje: limit hnědých trpaslíků a procesy dějící se v chladnoucích atmosférách velmi starých bílých trpaslíků. To obojí pozorováním blízké kulové hvězdokupy NGC 6397. O studii referoval Harvey Richer 18. srpna na takzvané „Hot topics session“ kongresu Mezinárodní astronomické unie v Praze.

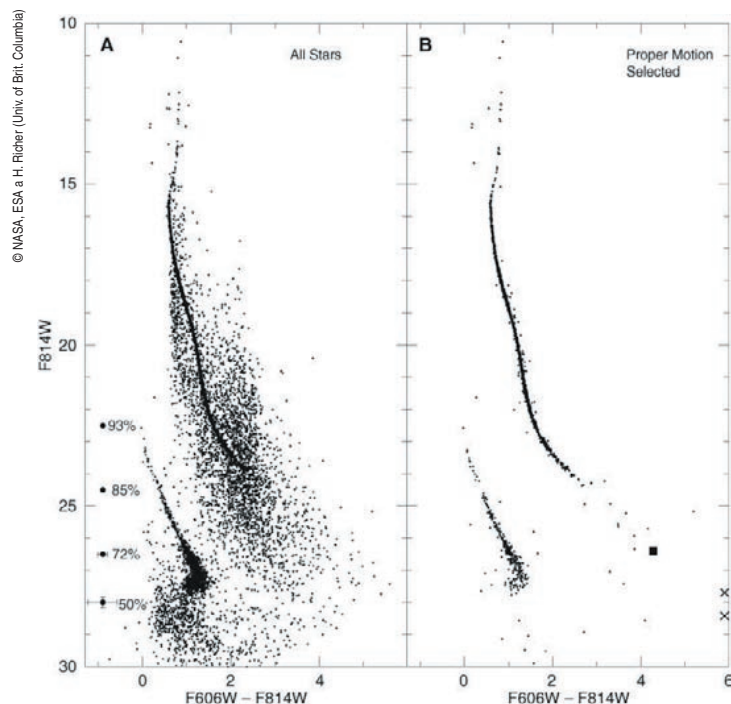
Na úvod si zopakujme, co to vlastně je kulová hvězdokupa. Jedná se o gravitačně vázané a velmi stabilní soustavy sférického tvaru, které v sobě shromažďují statisíce až miliony hvězd. Kulové hvězdokupy jsou posly z daleké minulosti. Hvězdy je tvořící patří mezi vůbec nejstarší hvězdy ve vesmíru (populace II) s věkem až 13,5 miliard let. Kulová hvězdokupa NGC 6397 je jedním z nejbližších objektů tohoto typu (vzdálenost

od Země činí nějakých 8500 světelných let) a je pozorovatelná z jižní polokoule. Hvězdokupu objevil abbé Nicolas Louis de Lacaille během pobytu na mysu Dobré naděje v letech 1751–1752. Hvězdokupy jsou obecně výborné astrofyzikální laboratoře umožňující testovat meze teorií. Pozorováním hvězd ve hvězdokupách se totiž odstraní dva volné parametry: hvězdy kupy mají od pozorovatele zhruba stejnou vzdálenost, tudíž je snadné přímo porovnávat jejich měřené jasnosti bez nutnosti korekce na modul vzdálenosti, a také mají přibližně stejný věk. Další fyzikální parametry hvězd jsou dány víceméně jejich hmotnostmi.

Studie publikovaná v čísle 313 časopisu Science byla zaměřena především na dva extrémní případy hvězdných exemplářů – vůbec nejméně hmotné hvězdy na hlavní posloupnosti a velmi staré bílé trpaslíky. Teorie hvězdného vývoje předpovídá, že pokud bude hmotnost tělesa menší než přibližně 0,08 hmotnosti Slunce (tedy

asi 80krát hmotnější než Jupiter), teplota v jádře nikdy nedosáhne hranice, za kterou je možné zapálit a dále udržovat stabilní termojadernou reakci. U takových objektů, které obecně nazýváme hnědými trpaslíky, je pomalá gravitační kontrakce jádra vcelku záhy zastavena elektronovou degenerací látky, takže jeho hustota a teplota již dále nemůže vzrůstat. Povrchová teplota hnědých trpaslíků se ustálí kolem 2000 K, zatímco v jádře může dosáhnout až třech milionů Kelvinů. Hnědí trpaslíci září především v infračervené oblasti spektra (jejich skutečná barva ale není hnědá, spíše připomíná purpurovou) a postupně velmi pomalu chladnou. Naopak objekty nad kritickou hranicí jsou schopny udržet stabilní termojadernou reakci v jádře, objeví se hlavní posloupnosti Hertzsprungova-Russelova diagramu zcela vpravo dole a jako spořiví červení trpaslíci jsou schopni spalovat svoji zásobu jaderného paliva pomalu po desítky miliard let. Hmotnostní hranice mezi hnědými a červenými trpaslíky je předpovězena jako velmi ostrá, přičemž její hodnota je jedním ze základních průběžských kamenů současné teorie hvězdného vývoje.

Na druhé straně hvězdného hmotnostního spektra jsou objekty s hmotností mezi jednou a osmi hmotnostmi Slunce. Ty již v kulových hvězdokupách patřících k naší Galaxii své jaderné palivo vyčerpaly, v předsmrtných křečích odhodily své vnější obálky a jejich elektronově degenerovaná velmi horká jádra zůstala nadále existovat jako bílí trpaslíci. Bílí trpaslíci mají v elektronově degenerované látce uložené nepředstavitelné množství tepelné energie a protože mají velmi malý povrch (jde o objekty velikostí srovnatelné se Zemí), velmi pomalu chladnou tepelným vyzařováním. Teoretické studie ukazují, že vychladnutí bílého trpaslíka do stavu, kdy ho již nelze ve vizuální oblasti prakticky pozorovat (do stádia nazvaného černý trpaslík) trvá pro hvězdy s nízkou metalicitou 6 až 11 miliard let. V Hertzsprungově-Russelově diagramu hvězdokup bílí trpaslíci tvoří tzv. chladnoucí sekvenci bílých trpaslíků, o které se očekává, že v jistém bodě náhle



Barevný diagram NGC 6397. Vlevo celkový diagram, vpravo diagram postavený pouze z hvězd, které vykazují stejný pohyb prostorem a není tudíž pochyb, že patří do hvězdokupy. Hlavní posloupnost hvězdokupy náhle končí na souřadnicích $F814W = 26$, $(F606W - F814W) = 4$. Limit hoření vodíku v jádře je označen čtverečkem.

Mgr. Michal Švanda (*1980)

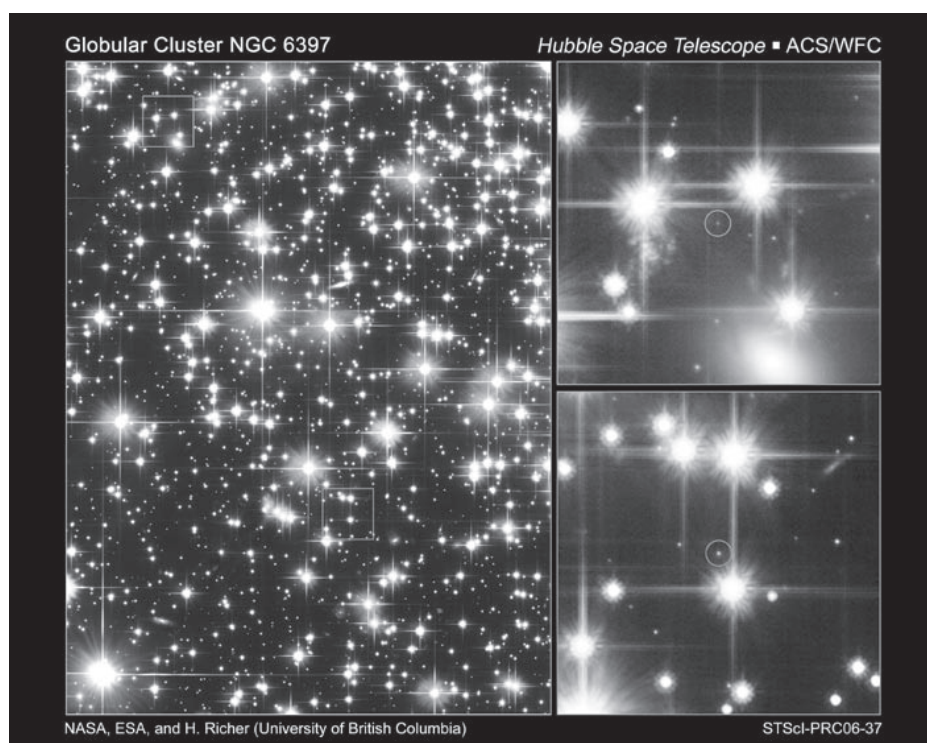
vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK, kde nyní pokračuje v doktorském studiu se zaměřením na dynamické dění ve sluneční fotosféře. Pracuje v Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově a v Astronomickém ústavu Univerzity Karlovy.
E-mail: svanda@asu.cas.cz

končí, čímž je indikován věk hvězdokupy. Chladnoucí bílý trpaslík se v barevném diagramu posouvá postupně doprava, směrem k nižším teplotám, barva trpaslíka se s věkem posouvá do červené.

Dosáhne-li teplota v atmosféře bílého trpaslíka přibližně 4000 K, začíná se v ní vytvářet molekulární vodík, který selektivně absorbuje fotony procházející atmosférou. Srážková absorpce je nejsilnější v infračervené oblasti, což způsobí, že se bílý trpaslík začne v barevném diagramu od určitého bodu pohybovat zpět doleva, jeho spektrum modrá (protože červená barva je vyžírána molekulárním vodíkem), zatímco jeho pohyb směrem dolů, k nižšímu svítivostem, dále pokračuje. V barevném diagramu by se měla v sekvenci chladnoucích vodíkových bílých trpaslíků objevit zatáčka (nebo útvar tvaru háčku) směrem k modré barvě. Srážková absorpce je předpovězena stelárními modely, její spektrální otisky byly pozorovány u několika izolovaných bílých trpaslíků, ale dosud ne jako rys barevného diagramu hvězdokupy.

Kanadsko-americký tým, který získal pozorovací čas na Hubblově kosmickém dalekohledu, zvolil dlouhou (téměř pětidenní) expozici kulové hvězdokupy NGC 6397 přístrojem Advanced Camera for Surveys ve dvou barevných filtrech s vlnovými délkami 606 a 814 nm. Studie byla zaměřena na dvě výše popsané populace hvězd. Takové pozorování rozhodně není jednoduché. Aby měl výsledek dobrý smysl, je třeba zajistit, aby zkoumané hvězdy skutečně patřily k hvězdokupě. Toho bylo docíleno porovnáním snímků se zhruba deset let starými snímky téhož objektu pořízených pomocí Wide-Field and Planetary Camera 2, z něhož byl patrný systematický pohyb hvězd společně s hvězdokupou (posun v pozici oproti nejstarším snímkům činil přibližně tři pixely, což je triviálně měřitelné). Popsaným postupem se podařilo ze vzorku odstranit hvězdy pozadí, stejně tak jako hvězdy ležící mezi námi a hvězdokupou. Rozlišení ACS/HST je dostatečné pro identifikaci jednotlivých i těch nejslabších hvězd v oblasti, kde je jejich hustota velmi vysoká.

Z pozorování astronomové zkonstruovali barevný diagram, který je ekvivalentem Herzprungova-Russelova diagramu. Na něm jsou dobře patrné dvě řady. Dominující je hlavní posloupnost hvězd, z níž v bodě odpovídající magnitudě 15,7 ve filtru 814 nm



Přibližně 29 % snímaného pole kulové hvězdokupy NGC 6397 s rozměrem 94×127". Obrázek je složen ze snímků pořízených ve dvou barevných filtrech centrováných na 606 a 814 nm. Zvětšené segmenty (oba s měřítkem 10×10") zobrazují v detailu nejslabší hvězdu spalující vodík (horní výřez) a bílého trpaslíka nacházejícího se v „modrotočivé“ zatáčce chladnoucí sekvence bílých trpaslíků.

(turn-off point) vychází posloupnost červených obrů. Zajímavým bodem hlavní posloupnosti je svítivost odpovídající hvězdné velikosti 26 ve filtru 814 nm. Zde hlavní posloupnost končí. Dále ale nelze očekávat slabší hvězdy, protože výrazně slabší hvězdy byly při stejné expozici pozorovány v jiných oblastech barevného diagramu. Znamená to, že méně hmotné hvězdy na hlavní posloupnosti v tomto diagramu prostě neexistují. Toto zdánlivé ukončení signalizuje hranici mezi hvězdami a hnědými trpaslíky. Měřený bod odpovídá hmotnosti 0,083 hmotnosti Slunce, což je velmi blízko teoretické předpovědi. Hranice je zatížena v teoretických modelech velkou chybou, protože pro objekty s hmotností blízkou kritické hranici je závislost hmotnost–svítivost velmi strmá – velmi malá změna v hmotnosti může vést k výrazné změně ve svítivosti, což je způsobeno přítomností elektronové degenerace, která zásadně zasahuje do stavových poměrů v nitru objektu na pomezí hvězd a hnědých trpaslíků.

Druhou posloupností, kterou je možné na zkonstruovaném barevném diagramu pozorovat, je chladnoucí sekvence bílých trpaslíků včetně konečné zatáčky zpět k modré barvě. Sekvence je ve vertikálním směru ukon-

čena kolem hvězdné velikosti 27,8 ve filtru 814 nm, což je bod signalizující nejstarší bílé trpaslíky s vodíkovou atmosférou vůbec a definující tak věk hvězdokupy. Je třeba dodat, že je principiálně možné v hvězdokupě odhalit ještě slabší bílé trpaslíky, ovšem s heliovou atmosférou. Helioví trpaslíci chladnou rychleji než vodíkoví a tak mohou být principiálně i méně jasní než jejich vodíkoví sourozenci. Helium nevytváří víceatomové molekuly, takže v sekvenci heliových trpaslíků se neočekává existence modrotočivé zatáčky. Existence tohoto bodu na sekvenci vodíkových trpaslíků potvrzuje platnost současných modelů a je nádhernou demonstrací práce kvantové fyziky v atmosférách těchto degenerovaných objektů.

Nejnovější pozorování s pomocí moderní techniky zatím potvrzují platnost v současnosti přijímané teorie hvězdného vývoje. V tomto případě pak dokonce ve velmi extrémních případech. Lepší data zaměřující se na hraniční oblast mezi hvězdami a hnědými trpaslíky by umožnila doladit nejistoty především ve stavové rovnici plynu na hranici úplné elektronové degenerace a rozšířit modely třeba i směrem k méně hmotným objektům, jakými jsou nejen hnědí trpaslíci, ale i plynné planety. ■