



Představa objektu CR7 – nejjasnější známé galaxie v mladém vesmíru, v níž se nacházejí hvězdy třetí populace. V jejich nitrech vznikly první těžší chemické prvky, což umožnilo existenci života

Paradox temné hmoty

Co způsobuje, že se hvězdy v galaxiích pohybují na pozorovaných dráhách? Drží je pohromadě temná hmota? Nebo vše vysvětluje modifikovaná newtonovská dynamika, která neviditelný „tmel“ nepotřebuje? Světově uznávaný astrofyzik Pavel Kroupa nám mimo jiné prozradil, proč do svých modelů existenci temné hmoty nezahrnuje

Ptala se Jana Žďárská

? Ještě než se začneme zabývat astrofyzikou, ráda bych se zeptala na vaše dětství a především na to, jak jste se ocítl až ve vzdáleném australském Perthu...

V důsledku složité politické situace jsem prožil skutečně dobrodružné dětství. Ještě tu noc, kdy došlo k invazi vojsk Varšavské smlouvy do Československa, jsme s otcem uprchli na mopedu přes hranici do Bavorska. Mně bylo tehdy necelých pět let a byl jsem pořádně vydě-

šený. Navíc jsme jeli bez maminky. Ta se za námi dostala až téměř po půl roce a ta doba byla pro mě opravdu tristní. Byl jsem sám v jiné zemi a mezi cizími lidmi, kterým jsem vůbec nerozuměl. Celkově to pro mě byl hodně nepříjemný zážitek a od té doby nemám vůbec rád zvuk motocyklu...

? Víím, že pro vás nešlo o konečnou stanici. Jak dlouho jste v Německu žili?

Německo se nám stalo náhradním domovem skoro na pět let. Žili jsme v Hesensku. Poté však můj otec geolog získal významné místo v Jihoafrické republice, kam jsme tedy odcestovali. Byla to obrovská zkušenost a úplně jiný svět. Nejvíce mě asi zaskočil všudypřítomný apartheid. Byl jsem ještě kluk a takové rozdělování společnosti jsem nechápal. Prožili jsme tam určitou dobu, ale nastal čas, kdy bylo třeba požádat o jihoafrické občanství. Pokud bychom to udělali,

Používání temné hmoty je zastaralé, observační data nám její existenci již dlouhodobě nepotvrzují

musel bych i já jako každý mladý muž v osmnácti letech nastoupit do armády a skutečně bojovat, protože tamní politická situace byla stále víc nestabilní. Raději jsme se tedy vrátili do Německa.

? V Německu jste se začal poprvé věnovat amatérskému pozorování noční oblohy. Kdo vás k němu nasměroval?

Moji rodiče vždycky hodně podporovali mé zájmy. A kdo mě k pozorování vesmíru přivedl? První impuls jsem získal v Jižní Africe, a to nejdříve z knih o planetách Sluneční soustavy a také díky astrofyzikovi a popularizátorovi astronomie Carlu Saganovi. Rád jsem sledoval jeho seriál o kosmu a chtěl jsem ho pozorovat i sám. Noční oblohu jsem ale poprvé sledoval v Göttingenu, a to otcovým dalekohledem. Pečlivě jsem si zakresloval, co jsem viděl, a poté jsem to porovnával s knihami.

Později mi rodiče koupili Newtonův reflektor o průměru 110 milimetrů a ohniskové délce 910 milimetrů, kterým jsem pozoroval planetární mlhoviny, galaxie a planety. Následně jsem si už sám



rodiče necítili bezpečně, i když se jim země moc líbila. Já jsem to tehdy tolik nevnímal. Studoval jsem střední školu a uvažoval jsem o budoucí vědecké dráze. Situace se ovšem v krátké době vyhroutil natolik, že tatínek přijal novou pracovní nabídku, která nás „zavála“ až do australského Perthu.

? Odjížděli jste dost narychlo, neměl jste ani dokončenou střední školu. Jak se vám v Perthu dařilo?

týkalo noční hvězdné oblohy: Byla to taková záře, že se při ní dalo málem číst... Musím přiznat, že na mládí strávené tam velmi rád vzpomínám.

? Věnujete se především sporným tématům – existenci temné hmoty či změně standardního kosmologického modelu. Jakých výsledků jste v této oblasti dosáhl?

Mou největší pozornost přitahuje otázka, jakým způsobem vznikají hvězdy v galaxiích – protože nám to dobře ukazuje, jak se galaxie vyvíjejí. Snažím se zjistit, odkud se bere stále nový plyn, aby se mohly tvořit další a další hvězdy. Naše vědecké výsledky ukazují, že současný kosmologický model zcela jistě není správný a že nyní žijeme ve velmi zajímavém období. Disponujeme totiž velkým množstvím dat, ale nemáme vhodnou teorii. Domnívám se, že teorie gravitace a pochopení fungování vesmíru dnes dávají obrovskou příležitost nastupujícím vědcům, aby mohli rozpracovat nové, velmi důležité a zásadní myšlenky. Moc mě těší, že se i mladí nadaní studenti mohou danou problematikou zabývat a pochopit ji.

? Zabýváte se mimo jiné modelováním vzniku a vývoje galaxií. Co se snažíte v této oblasti zjistit?

Snažíme se s co nejmenší chybou modelovat vznik a vývoj galaxií. Rádi bychom zjistili, jakým způsobem se první z nich utvářely a jak pomohly rozptýlit takzvanou kosmickou mlhu v období reionizace mladého vesmíru. Pro své modely používáme nejbližších sto galaxií, protože

„Žijeme ve velmi zajímavém období. Máme sice k dispozici spoustu dat, ale chybí nám vhodná teorie

zakoupil refraktor o průměru 60 milimetrů a ohniskové délce 900 milimetrů pro sledování Slunce. K maminčině nemalé radosti jsem si v koupelně vytvořil vlastní laboratoř, kde jsem zpracovával fotografie. Slunce jsem pozoroval velmi systematicky a denně, když svítilo, abych zachytil každou skvrnu v detailu a následně mohl hodnotit, jak se jeho povrch v čase mění.

? V té době v Evropě gradovala studená válka a v Německu panovalo výrazné politické napětí. Šlo o hlavní důvod vašeho dalšího cestování?

Můj otec snil o životě v USA, stále to však nevycházelo. Ani v Německu se přitom

Dokončil jsem dvanáct let studia, ale v Německu se studovalo třináct roků. Považuji za štěstí, že jsem v Perthu mohl nastoupit na University of Western Australia – to proto, že v Austrálii těch zmínovaných dvanáct let stačilo. Tam jsem se už výrazně věnoval studiu matematiky, fyziky a dalších přírodních věd.

? Co pro vás znamenal život v Austrálii, tak odlišný od původní vlasti? A jak vás země ovlivnila?

Austrálie je zvláštní země. Její rozloha, pobřeží, příroda – to vše mě samozřejmě jistým způsobem formovalo. Šlo skutečně o hodně odlišné prostředí a nejvíce se to

o nich máme nejvíc informací. Pracujeme převážně s daty z Velké galaxie v Andromedě a z Mléčné dráhy.

? Zajímáte se o zrod hvězd v mladých galaxiích, detailně studujete především první generaci stálic. Mohl byste nám jejich vznik a vývoj přiblížit?

Jedná se o první hvězdy, které vznikají z primordiální hmoty, vytvořené při Velkém třesku. V galaxiích se tato látka ochlazuje, shlukuje a za vysokého tlaku se formují velmi jasné svítící a hmotné stálice první generace. Odborně se nazývají hvězdami třetí populace. Poté ionizují plyn, který se tím ohřívá a dál už se neshlukuje, proto se nemohou tvořit další hvězdy. A právě popsaná situace nás velmi zajímá. Podařilo se nám totiž zjistit, že tyto hmotné stálice dokážou změnit svou kinetickou energii na potenciální, a katapultovat se tak mimo centrum galaxie, kde poté explodují. Díky tomu plyn v galaxii opět chladne a může docházet k další hvězdotvorbě. Podobný vývoj se v současné době odehrává i v mladých hvězdokupách, jako je například mlhovina v Orionu.

? Z „popela“ hvězd první generace vznikly všechny těžší prvky potřebné pro život. Jak se z původních stálic uvolnily?

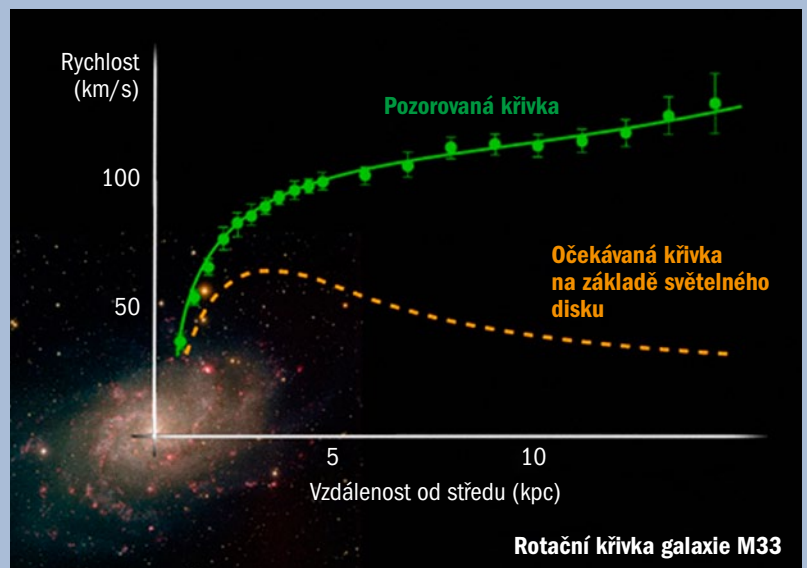
Exploze těchto superhmotných hvězd a pozdějších hmotných hvězd jsou zdrojem všech prvků těžších než železo a u mnoha důležitých elementů představují zdroj jediný. Například veškeré zlato, uran a další se syntetizovaly při výbuchu supernov před miliardami let. Supernovy tak vnášejí do mezihvězdné hmoty těžké prvky a obohacují molekulární mračna,

Vesmír bez temné substance

Modifikovaná newtonovská dynamika (zkráceně MOND) je teorie, podle níž potřebuje Newtonův gravitační zákon **upravit tak, aby odpovídal pozorovaným pohybům ve vesmíru.** Navrhl ji izraelský fyzik **Mordehai Milgrom** v roce 1983 ve snaze vysvětlit nesrovnalost v křivkách rotačních rychlostí galaxií, jak ukazují přiložený graf. MOND představuje alternativu k obecně přijímané hypotéze, že dynamiku galaxií určuje masivní a neviditelné halo temné hmoty.

Temnou hmotu můžeme pozorovat pouze nepřímo prostřednictvím jejich účinků na změny gravitace. Jedině její pomocí lze v rámci standardního

kosmologického modelu objasnit pohyb hmoty viditelné, například rychlost oběhu hvězd kolem středu galaxie. „*Newtonova i Einsteinova teorie gravitace se zakládaly na empirických datech, která měli vědci pouze pro naši Sluneční soustavu, když se ještě nezkloumaly galaxie,*“ vysvětluje Pavel Kroupa. Hypotéza MOND oproti tomu **předpokládá, že se gravitační síly v galaxiích chovají jinak, než jak je známe z našeho solárního systému.** Zejména při velmi malých zrychleních **se může gravitace dodatečnými vlivy zesílovat,** jak předpovídají Newtonovy zákony. Teorie MOND tedy nepotřebuje žádnou temnou hmotu.



” Katapultované hmotné stálice mohou explodovat daleko od dané hvězdokupy. Tím se změní chemická evoluce celé galaxie

jež se následně stávají dějištěm tvorby nových stálic. Činnost supernov významně ovlivnila i složení Sluneční soustavy, a umožnila tak zřejmě existenci života na Zemi v podobě, v jaké ho známe.

? Váš tým dospěl k zajímavému závěru, že se chemická evoluce galaxií může měnit. Jaké jsou příčiny a důsledky uvedené změny?

Jedná se o změnu momentu hybnosti a následnou migraci těchto velkých hvězd. Vyzářují totiž mnoho energie, a ohřívají tak plyn v hvězdokupě na teplotu, kdy už další stálice nevznikají, protože se plyn neshlukuje. Tyto hvězdy však mohou změnit svůj moment hybnosti při setkání s jinými těžkými stálicemi a katapultovat se tím z centra hvězdokupy do její jiné oblasti.

To pak způsobí rozmanité nelokální efekty a změnu vývoje dané galaxie, v níž uvedená hvězdokupa vznikla. Pokud se tak stane, plyn v hvězdokupě se opět ochladí, shlukuje se a nastává další hvězdotvorba. Hmotné stálice, jež se katapultovaly, mohou explodovat daleko od dané hvězdokupy, a tímto způsobem se změní chemická evoluce celé galaxie.

Trpasličí galaxie NGC 1052-DF2, která existuje bez temné hmoty, je podle Pavla Kroupy a jeho kolegů důležitým potvrzením teorie MOND



? Co uvedené zjištění znamená pro simulaci dynamiky galaxií? A jak se s touto problematikou pojí teorie temné hmoty?

Jde o poměrně komplikovanou otázku, protože hovoříme o zrodu stálic v hvězdokupách, pro jejichž fungování s temnou hmotou nepočítáme. Temná hmota se v modelech objevuje až na škálách galaxií, a pokud by existovala, ovlivňovala by směr, kterým se hvězdy pohybují, a také to, jak daleko se mohou z popisované galaxie dostat. Náš tým však o ovlivnění daného pohybu temnou hmotou již vážně neuvažuje.

? Poté se temnou hmotou zabývala i Vera Rubinová, s níž jste se osobně setkal. Jak vás její názory ovlivnily?

Potkali jsme se na konferenci v Kanadě. Bylo to neobyčejné – skutečné setkání s legendou. Vera Rubinová mi připomněla, že ze všeho nejdůležitější je právě to, co ve vesmíru pozorujeme. Hovořila o tom, že následná interpretace sledovaných jevů může být i nejasná. Může se jednat o temnou hmotu, anebo o gravitaci. Osobně si myslím, že Zwicky a Rubinová udělali jeden z největších objevů ve fyzice vůbec. Setkání

? Co si pod ní můžeme představit?

MOND, tedy modifikovaná newtonovská dynamika, navrhuje upravit Newtonovy pohybové zákony, respektive Newtonův gravitační zákon tak, aby odpovídal pozorovaným jevům a pohybům ve vesmíru. Byla navržena proto, abychom mohli lépe vysvětlit nesrovnalosti v křivkách rotačních rychlostí galaxií. Jiné vědecké týmy objasňují zmíněné rozpory existencí temné hmoty. Od původního návrhu doktora Milgroma předpověděla teorie MOND úspěšně řadu galaktických úkazů, které lze

Teorie MOND úspěšně předpověděla řadu galaktických jevů, které lze těžko vysvětlit z pohledu teorie temné hmoty

? Existenci temné hmoty předpověděl už v roce 1933 astronom Fritz Zwicky. Vysvětloval tím jakousi neznámou materii, jež drží pohromadě galaktickou kupu v souhvězdí Vlasů Bereniky...

Fritze Zwickyho vnímám jako špičkového vědce a také coby kontroverzního švýcarského astrofyzika. Některé z jeho teorií jsou dodnes uznávané, například teorie o základním problému gravitačního zrychlení, které je mnohem větší na škálách galaxií (kolem megaparseků) než ve Sluneční soustavě. V současné době se to přepisuje temné hmotě.

s touto významnou astronomkou mě významně ovlivnilo a také mě utvrdilo v přesvědčení, že náš současný výzkum jde správnou cestou.

? Jaké metody používáte při modelování vzniku a vývoje galaxií bez temné hmoty?

Dřív se pro vysvětlení fungování kosmu používala teorie newtonovské gravitace. V současné době některé vědecké týmy, včetně toho našeho, využívají pro popis vesmírných jevů teorii MOND.

těžko vysvětlit z pohledu teorie temné hmoty – každopádně lépe objasňuje jevy, jež v kosmu pozorujeme.

? Jak teorii MOND přijímají ostatní vědci? Naráží tím na skutečnost, že ve vlivných mezinárodních časopisech je často kritizována. Daří se vám oponovat?

Je to paradox. Články a studie akceptující temnou hmotu se zveřejňují velmi snadno, rychle, až přednostně, aniž bychom ji našli a problémy na galaktických škálách vyřešili. Na druhou stranu publikovat stať týkající se kritiky

existence temné hmoty je nadmíru těžké. Osobně mám s touto situací četné zkušenosti. Já ale nejsem proti temné hmotě zaujatý. Pouze si myslím, že má vědec přijímat to, co mu ukazují pozorovací data, a nikoliv to, čemu věří. Pociťuji v dané oblasti značnou předpojatost, což je ve vědě velmi nezdravé.

? Nedávno vyšel v časopise *Nature* **Astronomy** článek, podle něž teorie MOND nefunguje. Jako reakci jste zveřejnili odpověď a spolu s Univerzitou Karlovou jste vydali i tiskové prohlášení. Mohl byste nám jej přiblížit?

Ano, jedná se takřka o typický příklad. Naše skupina – tým vědců z Anglie, Švýcarska, Číny a Íránu – článek analyzovala

? Váš tým tedy modeluje vznik a vývoj galaxií bez temné hmoty. K jakým výsledkům jste dospěli?

Na základě našich výsledků se domníváme, že temná hmota buď neexistuje, nebo jí není tolik. Výsledky našich modelů a výpočtů se totiž dobře shodují s realitou. Otázka existence temné hmoty se řeší již od roku 1933 a do bádání se zapojuje velké množství štedře financovaných vědeckých týmů. Přesto se jí ani téměř po dvaceti letech hledání nepodařilo detekovat.

? Jak se k teorii temné hmoty stavějí vaši studenti, kteří nejsou zatíženi tradičním vědeckým přístupem – tedy teorií newtonovské gravitace?

” Na základě našich výsledků se domníváme, že temná hmota buď neexistuje, nebo jí není tolik

a odhalila závažné chyby ve výpočtech. Provedli jsme je správně a zjistili jsme, že se jmenované hvězdokupy v galaxii NGC 1052-DF2 chovají právě tak, jak předpokládá milgromovská dynamika. Autoři zmíněné stati totiž nezahrnuli vnější efekt pole: Je nová a newtonovská dynamika s ním nepracuje. Galaxie NGC 1052-DF2 se nachází blízko mnohem větší NGC 1052, která ji gravitačně také ovlivňuje. V *Nature* nyní vyšly naše výpočty a reakce na původní článek.

Při vyučování pracuji s tradičním modelem zkoumání vesmíru, z něž také studenti následně skládají zkoušky. Domnívám se, že je stále velmi důležité vštípit jim klasické vzdělání. Přesto s nimi rád hovořím na téma temné hmoty, které je nebývale zajímavé. Zdá se, že nám roste nová generace vědců, jež bude dbát na shodu výpočtů s pozorovanou realitou víc než současní odborníci, kteří nejsou příliš nakloněni změně. Doufám i v úpravu financování výzkumných týmů, aby pak nadějní teoretici stejně neskončili v „temné hmotě“.

? Proslul jste svým kritickým přístupem ke standardnímu kosmologickému modelu. Jsme tedy pod tíhou důkazů skutečně na cestě ke změně náhledu na vesmír jako takový?

Předpokládám, že se tato doba skutečně blíží. Jde především o to, že se vědecké výsledky zákonitě musejí

Kdo je ...

Prof. RNDr. Pavel Kroupa, Ph.D. (*1963)

Vystudoval University of Western Australia v Perthu. V roce 1988 získal stipendium Isaaca Newtona na univerzitě v Cambridge, poté v roce 1992 obdržel výzkumné stipendium na Trinity College v Cambridge, kde v roce 1992 obhájil doktorát za pojednání o rozdělení hvězd s nízkou hmotností v naší Galaxii. Habilitoval se na univerzitě v německém Kielu. Působí jako profesor na Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität v Bonnu a rovněž jako hostující profesor na Astronomickém ústavu Univerzity Karlovy v Praze. Věnuje se především otázkám vzniku a dynamiky galaxií a hvězdokup, studuje vlastnosti dvojhvězd či vícehvězdových systémů při jejich zrodu. Na základě svých dosavadních vědeckých výsledků je přesvědčen, že temná hmota neexistuje. V roce 2013 obdržel Stříbrnou pamětní medaili Senátu ČR.

shodovat s tím, co v kosmu pozorujeme. Náš tým na univerzitě v Bonnu pracuje zejména na pochopení vývoje galaxií od Velkého třesku – pokud byl – až do současnosti. Již víc než tři roky daný vývoj modelujeme bez temné hmoty. I když k výpočtům používáme různé metody, výsledky jsou s realitou srovnatelné, přestože do nich temnou hmotu nezahrnujeme. To nás, a nejen nás, inspiruje k dalším testům, abychom mohli uvedený model skutečně potvrdit, nebo vyloučit. Pokud bychom tedy pracovali s teorií neexistence temné hmoty, nefungoval by zákonitě celý současný kosmologický model. Znamenalo by to, že nemáme správný model a bude nutné vybudovat nový, odpovídající pozorované realitě. *✍*

Mgr. Jana Žďárská působí jako tajemnice Kosmologické sekce České astronomické společnosti. K astronomii ji v dětství přivedl otec, v rámci její popularizace se věnuje nejvíce rozhovorům s vědeckými osobnostmi a reportážím z astronomických akcí

Vera Rubinová zjistila, že hvězdy neobíhají kolem středu spirálních galaxií podle Keplerových zákonů. Na základě toho pak také postulovala temnou nebaryonovou hmotu

