

Autor: Pavel Brož

Datum: 07.04.2004 v 00:47

Řeč je o tajemné temné hmotě, které má být podle posledních měření v našem vesmíru kolem 23%, zatímco nám známá hmota, z níž jsme složeni my, naše planeta, celá naše sluneční soustava, a většina objektů, které můžeme přímo či nepřímo vidět, tvoří v tom samém vesmíru jenom zanedbatelná 4%. To znamená, že...

Trnité hledání slona v kupce sena

Nepochybně znáte ono úsloví o jehle, kterou je velice těžké najít v kupce sena. Pokud by vám ale někdo tvrdil, že za jistých okolností by mohlo být mnohem horší najít v té kupce sena obrovského slona, asi byste si poklepali významně na čelo a autorovi takového tvrzení věnovali maximálně několik laskavých rad směřovaných k znovunalezení jeho ztracené duševní rovnováhy. A přesto může být úloha o nalezení slona v té kupce mnohem obtížnější, než nalezení té jehly - a to za předpokladu, že slon je neviditelný, neslyšitelný, nehmatatelný, dokonce ani nesmrdí, a vlastně se projevuje jenom svou velikou hmotností, na niž usoudíme například kvůli nepřehlédnutelnému natřásání kupky a udusávání hlíny pod ní.

Nebudu už vás déle napínat, a prozradím rovnou, že řeč je o tajemné temné hmotě, které má být podle posledních měření v našem vesmíru kolem 23%, zatímco nám známá hmota, z níž jsme složeni my, naše planeta, celá naše sluneční soustava, a většina objektů, které můžeme přímo či nepřímo vidět, tvoří v tom samém vesmíru jenom zanedbatelná 4%. To znamená, že hmota, kterou známe a jejímž studiem se dosavadní fyzika zabírala, tvoří podle současných teorií i měření jen nepatrnou část veškeré hmoty ve vesmíru - mnohem větší část hmoty v něm zatím neznáme. Jinými slovy, jsme vlastně v situaci, kdy my i s veškerou námi známou formou hmoty tvoříme onu lehkou kupku sena, a nyní jsme zjistili, že spolu s námi je v této kupce zahrabaný velikánský slon. Tento slon není vidět ani slyšet a nemůžeme ho nahmatat, přesto ale můžeme na jeho přítomnost usuzovat z toho, jak díky své veliké hmotnosti gravitačně působí na naši kupku.

Ignorovaný objev neviditelného slona

Zprávy o přítomnosti temné hmoty v našem vesmíru se v poslední letech dostaly občas i do běžných novin a časopisů, které se jinak o astrofyzikálními objevy nezajímají, a i díky tomu tak vznikl dojem, že tento problém představuje docela horkou novinku na bohatě prostřeném švédském stole moderních kosmologických teorií. Opak je ale pravdou - observatorní data svědčící o existenci temné hmoty poprvé registroval už v roce 1933 švýcarsko-americký astronom Fritz Zwicky. Také je ale zároveň pravdou, že problém temné hmoty ve vesmíru byl dlouhá desetiletí astronomy ignorován, a začal být znovu brán v potaz až v sedmdesátých letech dvacátého století. O důvodu, proč tomu tak bylo, si dovolím rozvést následující vsuvku.

Mezi širokou veřejností je rozšířena představa, že vědecká obec sestává prakticky výhradně ze samých dospělých Mirků Dušínů, férových chlapců, kteří jsou sice v reálném životě poněkud nepraktičtí, ale kteří jinak tvoří veliký tým navzájem si přejících specialistů. Skutečnost je však dosti vzdálena od této idylické představy, o čemž se s překvapením dříve či později musí přesvědčit každý, kdo se byť jen okrajově seznámí s životopisy slavných vědců. Neméně často než mezi zbytkem populace je možno mezi vědci nacházet projevy nepochopitelného sobectví, arogance, zneužívání svého postavení v neprospěch jejich oponentů, a v některých případech i intrik či otevřeného despotismu.

Tak např. Henri Poincaré se po uveřejnění Einsteinových článků o speciální teorii relativity nikdy nesmířil s tím, že mimo Francii není nikde uznáván jako její objevitel, protože dílčí část výsledků získal už dříve nezávisle na Einsteinovi, a tak se postaral o to, aby žádný badatel v oblasti teorie relativity nedostal od francouzské vlády podporu. Geniální sovětský fyzik L. D. Landau nejenže soustavně ponižoval svou ženu tím, že mu musela vytvářet zázemí pro jeho před ní nijak neskrývané milostné zálety, ale neváhal použít veškerý svůj odborný vliv k profesní likvidaci svých odpůrců (kolikrát se po jejich i jeho smrti nakonec ukázalo, že to nebyli oni, ale sám veliký Landau, kdo se mýlil). Matematický král Gauss odmítl pomoci hladovějícímu norskému matematiku Abelovi prostě proto, že se mu silně nelíbil Abelův velice důležitý výsledek o nemožnosti obecného řešení algebraických rovnic vyššího než čtvrtého stupně - zlomený Skandinávec poté, co u povýšeného Gausse narazil jen na jeho zavřené dveře, se musel vrátit z Paříže domů do vlasti, kde nedlouho nato v naprosté bídě ve svých 28 letech zemřel. Ernest Lawrence, jeden ze dvou vůdců amerického vývoje atomové bomby za druhé světové války, poté, co se výslovně ujistil, že jeho podřízený, italský utečenec židovského původu, se už nemůže vrátit do Itálie, protože by tam jeho i s manželkou a dětmi čekala jistá smrt, mu obratem snížil plat ze 300 dolarů měsíčně na 116 s logickým odůvodněním, že teď už mu přece nemusí dávat tolik. A např. problematika aktivní spolupráce mnoha vědců s nacistickým či jinými despotickými režimy by sama o sobě vydala na velice tlustou knihu.

Na druhé straně by bylo velkou chybou propadnout pocitu, že vědci jsou sebrankou těch nejhorších amorálních ničemů. Existovali a existují mezi nimi také morální protiváhy oněch výše jmenovaných. Např. P. L. Kapica neváhal riskovat v období zběsilých stalinských čistek nejen své postavení, ale možná i život, když se plnou svou vahou postavil za propuštění L. D. Landaua ze stalinského lágru. Kromě toho odmítl pracovat na vývoji sovětské atomové a vodíkové bomby, díky čemuž mu sovětská moc zpečetila jeho další profesionální kariéru. Andrej Sacharov se stal jedním z nejznámějších sovětských disidentů bojujících za lidská práva v bývalém Sovětském Svazu. Za druhé světové války existovala spousta vědců, kteří aktivně pomáhali v útěku před nacistickým režimem svým židovským kolegům nebo spolupracovali v odboji, a nemálo z nich za toto zaplatilo svým životem. Jinými slovy, vědci jakožto obec nejsou ani sborem morálních andělů, ani smečkou sobeckých sociopatů - pravděpodobně mezi nimi najdeme zhruba podobné zastoupení šlechetných i odpudivých povah, jako u zbytku společnosti. Jak už asi tušíte, Fritz Zwicky nepatřil zrovna mezi ty zářné příklady s vysokým morálním kreditem, a ani se tím nijak netrápil. Právě naopak, slušnost považoval za pravidla vyhrazená pouze pro omezené a nesvobodné jedince. Kromě jiných urážek nazýval své kolegy s oblibou "sférickými bastardy". Neváhal využít své fyzické převahy k tomu, aby je hrubě šikanoval, takže např. jeho kolega Baade s ním odmítal zůstat sám v místnosti (Baademu vděčíme mj. za to, že po dlouholetém odstraňování systematických chyb v určování vzdáleností galaxií dokázal zpřesnit hodnotu Hubbleovy konstanty a tím určit stáří vesmíru na rozmezí 10 - 20 miliard let - v důsledku nepřesností prvních měření totiž původně vycházela tato hodnota na něco kolem dvou miliard let, což bylo ve zjevném rozporu s geologickými daty). Není proto divu, že tohoto kontroverzního despotu jeho okolí potrestalo tím, že ignorovalo výsledky jeho pozorování. Faktem ale zůstává, že při posuzování životního díla jakékoliv osobnosti, ať už se jedná o vědce, lékaře, politika, spisovatele či umělce, nelze jinak než posuzovat toto dílo nezávisle na morálních kvalitách jeho autora. Fritz Zwicky se nepochybně dříve či později dostane do učebnic fyziky jakožto objevitel mnohem větší části hmoty ve vesmíru, než o jaké jsme před ním věděli. Nebude to dobře ani špatně, bude to prostě tak, jak to jednoduše být musí, a pochybné stránky Zwickyho charakteru se nakonec dříve či později odsunou výhradně do paměti historiků vědy, tak, jako se tomu stalo i u mnoha jiných vědeckých velikánů.

Neviditelné řetízky vesmírných kolotočů

Přiznám se teď, že se obdivem skláním před trpělivostí vás laskavých čtenářů, kteří jste dočetli až sem, ačkoliv jste se vlastně zatím nic podstatného nedozvěděli, a prozradím vám tedy konečně něco o tom, jak vlastně onen nesnesitelný frajer Zwicky na tu temnou hmotu přišel. Zwicky léta pozoroval pohyb galaxií

v jedné blízké kupě, a zjistil, že jejich měřené rychlosti vůči sobě navzájem jsou v rozporu s teoretickými rychlostmi, jaké by tyto galaxie měly mít, pokud by jejich pohyb ovlivňovala pouze viditelná hmota v celé kupě, tj. pozorovatelná hmota zářících hvězd a mezihvězdného plynu. Rozdíl byl takový, že celková hmotnost kupy musela být asi desetkrát větší, než byla hmotnost viditelná. Současná měření dávají pro poměr neviděné (temné) a viděné hmoty v této kupě galaxií podobnou hodnotu.

Zwickyho pozorování byla něčím podobným, jako byste udělali na dálku fotografii řetízkového kolotoče, pak byste z rozmazání sedaček na ní zjistili jejich rychlost, a s překvapením zjistili, že odpovídající odstředivá síla působící na sedačky je desetkrát větší, než je pevnost na fotce viditelných řetízků. Nejspíše byste došli k závěru, že buďto jste vyfotili kolotoč zrovna v okamžiku jeho náhlého zrychlení a tedy v okamžiku, kdy se řetízky akorát začínají trhat (další snímek pořízený později by pak ukázal sedačky rozházené daleko v okolí), nebo k závěru, že kromě viditelných řetízků musí být sedačky přivázány ještě nějakými řetízky neviditelnými, které mají zhruba desetkrát větší pevnost. Zcela analogicky Zwicky přišel na to, že galaxie by z pozorované kupy za doby její existence musely už dávno uletět, pokud by byly přitahovány pouze tou gravitační silou, která odpovídá pozorovatelné hmotě v kupě. Jako přirozené vysvětlení se proto nabízelo, že kromě pozorovatelné hmoty je v kupě přítomno desetkrát více hmoty, která není vidět.

Zwicky navíc předvídal, že problém skryté hmoty ve vesmíru může být více osvětlen studiem gravitačních čoček, které jsou vytvářeny hmotnými objekty, jako jsou třeba právě galaxie, pokud tyto leží v cestě paprsku z ještě vzdálenějšího zdroje. Mezilehlá hmotná galaxie totiž svou hmotností ohne paprsky ze vzdálenějšího zdroje tak, že se tento zdroj může zobrazit i jako vícero obrazů soustředěných kolem obrazu mezilehlé galaxie. Z naměřeného ohybu paprsků je možno vypočítat hmotnost mezilehlé galaxie, která slouží jako gigantická čočka, a porovnat ji s hmotností její pozorovatelné hmoty. Tímto lze objevit, kolik hmoty v takové mezilehlé galaxii a jejím bezprostředním okolí je nepozorováno, tj. kolik tvoří onu tzv. temnou hmotu.

Metoda gravitačních čoček ale není jedinou možností, jak temnou hmotu registrovat. Dalším ze způsobů je pozorování rotací galaxií. Pokud by neexistovala v galaxiích jiná, než pozorovatelná hmota, dá se spočítat, jakou rychlostí by v nich měly obíhat hvězdy v různých vzdálenostech od centra. Zhruba řečeno se mají pohybovat obdobně, jako pozorujeme u naší sluneční soustavy - hvězdy blízké k centru galaxie mají obíhat podstatně rychleji než hvězdy vzdálené. Zákon určující závislost rychlosti planety na její vzdálenosti od centra nalezl díky svým pozorováním už Johannes Kepler, a tento zákon s příslušnými korekcemi platí i pro obíhání hvězd kolem center galaxií (korekce jsou zde nutné proto, že zatímco pro pohyb planet kolem Slunce je rozhodující pouze hmotnost Slunce, protože to tvoří 99% hmotnosti celé soustavy, tak pro oběh hvězd v galaxiích musíme vzít v potaz i působení ostatních hvězd v galaxii). Pozorování hvězd v galaxiích dává ale jiný výsledek, než vyplývá z teorie - hvězdy vzdálenější obíhají mnohem rychleji, než by jim příslušelo podle (buť modifikovaného) Keplerova zákona, a jejich pohyb je takový, jako by v prostoru celé galaxie byla rozprostřena ještě jiná hmota, než je ta, kterou pozorujeme. Také zde se dostáváme zhruba k poměru jedna ku deseti, tzn. že viditelné hmoty je jen asi desetina té, na niž usuzujeme z gravitačních účinků.

Je vesmír na obloze pohyblivým filmem, nebo jen fotomomentkou?

Bylo by možná vhodné doplnit upřesnění k výše zmíněným pozorování vzájemných pohybů galaxií nebo pozorování jejich rotací. Toto pozorování si nemůžeme představit tak, že by astronom sledoval, jak se jednotlivé galaxie na obloze pomalu pohybují nebo jak rotují. Pokud by přesně toto dělal, tak bychom si mohli být jisti, že by dozajista dříve zcepeněl, než by mohl zaregistrovat buť ten sebemenší pohyb, ba dokonce je pravděpodobné, že ani za celou dobu teoreticky možné existence observatoře by takový pohyb nemohl být zpozorován. Důvod je v tom, že ačkoliv rychlosti těchto pohybů jsou v absolutních hodnotách úctyhodné (až kolem stovek kilometrů za vteřinu), tak gigantické rozměry prostoru, v němž se tyto pohyby odehrávají, se na naši oblohu promítají prakticky jako naprosto statický snímek.

Tak například rychlost rotace Mléčné dráhy, což je malebný název pro galaxii, v níž se nacházíme (pro

odlišení od jiných bývá ta naše psána také jako Galaxie s velkým G), je zhruba něco kolem jedné otočky za čtvrt miliardy let. To znamená, že od vzniku života na Zemi se ručičky tohoto našeho kosmického budíku stihly otočit všehovšudy zhruba šestnáctkrát kolem dokola. O jednu a čtvrt otočku nazpět se zde v mělkých mořích proháněli trilobiti, a zhruba čtvrt otočky nazpět právě vymírali dinosauři. Předci člověka začali váhavě slézat ze stromů tehdy, když by hodinová ručička na těchto hodinách ukazovala asi o hodinu méně než dnes, a během celého období čtvrtohor se náš budík pootočil jen o něco více než jeden úhlový stupeň. Trochu až jako lekce člověčí představě o vlastní důležitosti působí vědomí, že za sebedelší lidský život se toto majestátní monstrum ani trošičku viditelně nepohne. Z toho plyne, že astronom by musel disponovat geny pro svou téměř nesmrtelnost, aby vůbec mohl nějaký rotační pohyb zaregistrovat. Podobné je tomu se vzájemnými pohyby galaxií vůči sobě navzájem.

Jak se tedy ale mohou tyto rychlosti naměřit? Pomůže nám světlo, tento posel hvězdných dálav, kterého blahorečí bez výjimky všichni astronomové. Paprsek světla v sobě ukrývá mnohem více informací, než je na prvý pohled zřejmé. Pohyb zdroje světla se v jím vysílaném paprsku projeví tzv. Dopplerovým posuvem, který způsobí, že světlo ze zdroje pohybujícího se směrem k nám má vyšší, a světlo ze zdroje pohybujícího se od nás naopak nižší frekvenci, než světlo ze zdroje stojícího. Podle posunu těchto frekvencí můžeme naopak zpětně vypočítat původní rychlost zdroje světla. Světlo nám kromě toho umí prozradit i složení prvků zastoupených ve zdroji. Každý prvek zanechává ve spektru světla, které se dá získat třeba rozkladem světla na optickém hranolu, charakteristické čáry. Tyto čáry v pozorovaném spektru buďto chybějí, protože jsou jim odpovídající frekvence světla během putování světelného paprsku nějakým prvkem pohlcovány, nebo naopak nadbývají, protože jsou ve zdroji světla nějakým prvkem naopak vysílány - rozlišujeme tedy tzv. absorpční a emisní spektrum.

Čáry ve spektru jsou velice podobné čárovým kódům, které známe ze spotřebního zboží. Každému prvku či sloučenině přísluší pro něj typický a s jiným prvkem nezaměnitelný čárový kód, který se dá ve spektru pozorovaného světla vyhledat. Podle intenzity toho kterého čárového kódu lze pak usoudit na množství odpovídajícího prvku ve zdroji tohoto světla (v případě emisního spektra), či naopak na množství odpovídajícího prvku v nějakém oblaku, kterým světlo ze vzdálenějšího zdroje na cestě k nám musí procházet (to je naopak případ spektra absorpčního). Z těchto informací pak můžeme usuzovat na chemické složení vzdálených hvězd, na jejich povrchovou teplotu, na jejich svítivost a odtud i na jejich velikost.

V posledních letech se dokonce z informací, které nám prozradilo spektrum ze některých hvězd, podařilo také usoudit na jejich možnou deformaci, nebo na obří skvrnu na povrchu, nebo také na složení planetárního oblaku rozprostřeného kolem hvězdy - toto všechno a mnohem více věcí nám může o svém původci a o prostředí, kterým proletěl, povědět tentýž paprsek světla, který na noční obloze vidíme jen jako maličkou žlutou tečku. Pokud se tedy někde dočtete, že astronomové pozorovali hvězdu, která je taková a maková, složená z toho či onoho a je tak či tak velká, neznamená to, že by přímo dokázali pozorovat její povrch, sledovat jeho zbarvení, skvrny na něm, jeho deformaci, nebo přímo změřit průměr té hvězdy (pro současné teleskopy jsou na to hvězdy - až na vzácné výjimky - stále příliš malilinkaté, takže měřit přímo jejich velikost nelze). Znamená to, že astronomové vyždímali všechny tyto informace právě ze spektra přicházejícího ze sledované hvězdy.

Díky těmto nedocenitelným vlastnostem světla není náš astronom odsouzen ke statisíce let dlouhému koukání do teleskopu. Namísto toho může nechat na optickém hranolu rozložit světlo přicházející k nám z různých částí sledované galaxie, a tak v relativně krátkém čase (aspoň ve srovnání s pozorovanou rychlostí pohybu galaxie na obloze) usoudit např. na rychlost její rotace nebo jejího pohybu vůči jiným galaxiím. A bez ohledu na to, že zejména v posledních letech zaznamenala astronomická technika obrovský technický pokrok, mj. i díky úspěšnému masovému nasazení CCD prvků a jiných pokročilých technologií, díky kterým je toho možné ve vesmíru objevit mnohem více než dříve, než dříve, tak spektrum světelného paprsku zůstává nadále tím nejspolehlivějším rádcem, který nám přináší ty nejkřivější informace i o jevech probíhajících miliardy světelných let od nás.

Z čeho je vlastně slon stvořen?

Vraťme se ale k naší temné hmotě. Asi nejzákladnější otázkou, kterou si vlastně ohledně ní lze položit, je z čeho je vlastně tato hmota stvořena. Tady začíná druhá, neméně zajímavá část problému. Velice rychle se ukázalo, že temná hmota nemůže být tvořena pouze nám známou látkou, která akorát nesvítí anebo která svítí hodně málo. Každé uskupení námi známé hmoty se nakonec vždycky nějak musí prozradit - buďto vyzařuje v té části spektra, která je viditelná lidským okem, nebo vyzařuje v ultrafialové oblasti, nebo naopak v infračervené, může také vysílat rádiové vlny, anebo tvrdé rentgenové záření, a ani zdroje toho nejtvrďšího ze všech, gama záření, mezi pozorovanou hmotou ve vesmíru nechybí. Zkrátka a dobře, běžná hmota se vždycky prozradí tím, že dříve či později vysílá elektromagnetické záření - a detekci elektromagnetických vln zvládá současná astronomie opravdu velice precizně (dá se dokonce říci, že je to zatím její prakticky jediný informační kanál z vesmíru, protože gravitační vlny zatím spolehlivě detekovat neumíme, a neutrinová astronomie je přes své nepochybné úspěchy stále ještě v plenkách).

Nám známá hmota má naštěstí (nejen pro astronomy, ale i pro nás) tu vlastnost, že se světlem nebo obecněji elektromagnetickým zářením velice ochotně interaguje - to znamená, že elektromagnetické vlny (a jejich speciální případ, viditelné světlo) hmota velice ochotně pohlcuje a poté naopak vysílá. Můžeme si to představit jako déšť v lese - začne-li pršet, v lese na nás nejprve padat kapky nebudou, protože je zachytávají listy či jehličí stromů. Jak ale prší delší dobu, mokneme v lese úplně stejně, jako mimo něj, protože listí na větvích je již zmáčené, a další voda z něj kape dolů na nás. Po skončení deště v lese ještě notnou dobu dokapává, jak poslední kapky kloužou z listů dolů. Stejně tak je tomu i se světlem, kterému stojí v cestě třeba mrak mezihvězdného plynu. Nejprve je světlo pohlceno - to znamená, že pozorovatel, jemuž stojí tento mrak ve výhledu, zdroj světla nevidí. Jak ale zdroj dále září, tak se mrak postupně rozehrívá, až začne sám vyzařovat - může sice vyzařovat na jiné vlnové délce, než původní zdroj, např. proto, že původní energeticky bohatá světelná kvanta z optické části spektra postupně rozmění na více energetických drobných, např. infračervených kvant, nicméně dříve nebo později se takto prozradí. A protože známe meze citlivosti našich detekčních přístrojů, tak můžeme určit horní hranici pro množství takového plynu přítomného např. v naší Galaxii.

Po pravdě řečeno je ale situace přece jen o něco komplikovanější. Výše zmíněné platí prakticky bez jakýchkoliv dalších výhrad pouze u mezihvězdném plynu. Jakmile je ale hmota kondenzována např. v prachových částicích, situace je složitější. Prachové částice mohou gravitačně kolabovat do systémů podobných naší pradávné sluneční soustavě ještě předtím, než teplota a tlak v jejím středu byly dostatečné na zapálení termojaderné reakce uvnitř takto se zrodí hvězdy. Protoplanetární soustavy ještě před tím, než se v jejich centru zrodí hvězda, září velice slabě (ve viditelném spektru prakticky vůbec, ale i v infračerveném oboru je to slabota). Proto je pro velkou část z nich velice snadné uniknout pozornosti i těch našich největších dalekohledů či radioteleskopů, s výjimkou těch protohvězd, které se nacházejí v našem relativně malém mezihvězdném okolí. Nicméně se má za to, že rychlost tvorby nových hvězd v naší Galaxii je dostatečně dobře známá - množství hvězd v Galaxii je dobře známo, a taktéž je dobře známa typická doba života toho kterého typu hvězd, a z těchto dvou údajů se už dá udělat velice slušný odhad množství ještě neviděných protohvězd. Ukazuje se, že rodící se hvězdy uvnitř svých protoplanetárních soustav nemohou být tím pravým kandidátem na temnou hmotu, protože je jich na to příliš málo.

Proč nemůže být slon z masa a kostí, jako jiní sloni

Už výše jsem uvedl, že podle posledních měření tvoří nám známá hmota ve vesmíru jenom asi 4% celkové hmoty. Skutečnost je ale ještě mnohem tristnější - v těch 4% je zahrnuta nejen svítící hmota, ale i nám známá běžná nesvítící či málo svítící hmota, pro niž máme jakýs takýs odhad její přítomnosti. Samotná svítící hmota tvoří dokonce jenom necelé jedno procento. Zhruba další jedno procento připadá na mezihvězdný plyn, a zbytek do čtyř procent je odhad hmotnosti jiných forem nesvítící hmoty. Před chvílí jsme zmínili protohvězdy, ale také jsme je záhy z našich úvah vyloučili. Jako další kandidáty je možné uvažovat černé díry, neutronové hvězdy, osamělé planety nebo hnědé trpaslíky.

Černých děr v Mléčné dráze z hlediska možného objasnění temné hmoty nikterak mnoho není, tedy aspoň těch černých děr, které mohly vzniknout gravitačním kolapsem nějaké velice macaté hvězdy. Bez ohledu na to, že jsou samy úplně černé (protože mají tak silnou gravitaci, že ani světlo z nich nemůže uniknout), tak se docela rády prozrazují díky disku mezihvězdného prachu a plynu (tzv. akrečnímu disku). V tomto disku se ještě před svým definitivním pádem do černé díry částice padajícího plynu roztáčí v divokém víru na ohromné rychlosti a díky vzájemným srážkám se zahřívají na nebývale velké teploty. Díky těmto obrovským teplotám a vysokoenergetickým srážkám částic je ale takový disk pozorovatelný jak zdroj tvrdého rentgenového záření (jak vidíme, máme zde další z příkladů, co všechno může spektrum světla, či zde obecněji elektromagnetického záření, na svého původce vycinkat). Takovéto zdroje rentgenového záření s odpovídajícími charakteristikami se v naší Mléčné dráze opravdu našly, a vlastně především díky nim dnes považujeme černé díry ve vesmíru jako relativně dobře prokázané objekty. Jenže přesto všechno se ukazuje, že černých děr hvězdných a vyšších velikostí není ani zlomek toho, kolik by bylo zapotřebí, aby mohly představovat hledanou temnou hmotu.

Jako další v pořadí přicházejí opět černé díry, ale tentokrát mnohem menší, než ty, které si mohou dovolit pořídit dostatečně mohutný a zářící akreční disk. Tak malé černé díry nemohou vzniknout gravitačním kolapsem hvězdy, protože ta by neměla dost hmotnosti, aby při svém hroucení překonala odpudivou sílu ionizované jaderné plazmy v ní obsažené. Tyto podhvězdné černé díry musely tedy být v našem vesmíru přítomny už od dob Velkého třesku. Proto se také nazývají jako primordiální. S primordiálníma černýma děrama je pravda poněkud problém, protože nikdo dnes nedokáže spolehlivě říct, kolik by jich v naší Galaxii mohlo tak asi být. Nicméně podle mnoha modelů vývoje naší Galaxie to spíše vypadá, že ani případných primordiálních černých děr moc nebude.

Další na řadě jsou neutronové hvězdy. Ty vznikly podobně jako černé díry gravitačním kolapsem dostatečně hmotné hvězdy, přesněji řečeno toho jejího zbytku, který nebyl v okázalé explozi v samém závěru života hmotné hvězdy odmrštěn do jejího okolí (tyto exploze pozorujeme jako tzv. supernovy). Přitom ale hmotnost kolabujícího zbytku nestačila k překonání tlaku neutronů a následnému vzniku černé díry. Vzniklý objekt je tvořen látkou sestávající pouze z neutronů a o hustotě, která panuje v atomových jádrech - také není divu, když stejně jako v nich jsou neutrony napasovány pěkně jeden vedle druhého. Neutronové hvězdy mají typický rozměr řádově kolem deseti kilometrů, a proto by se dalo předpokládat, že prakticky vůbec nepůjdou pozorovat. Opak je ale pravdou. Jednak i ony se v některých případech mohou prozradit zářením akrečního disku, pokud nějaký mají, a jednak neutronové hvězdy na rozdíl od černých děr mají pevný povrch (černé díry místo něj mají jen pomyslný horizont, přes který už žádná hmota včetně světla nemůže uniknout nazpět). Při kolapsu zbytku po výbuchu supernovy se neutronová hvězda stihne roztočit na obrovské rychlosti, přičemž horká látka na ní díky silnému magnetickému poli vytvoří ve směru její osy jakýsi majáček rádiového záření, které na Zemi můžeme detekovat jako neuvěřitelně pravidelné pulsy (díky nim získali tyto typy neutronových hvězd název pulsary).

Pulsarů je dnes známo velice mnoho, a je i docela věrohodně propracována teorie jejich vzniku (i když ani zde vývoj neusnul na vavřínech, v poslední době se uvažuje také o možné existenci nového typu neutronových hvězd s relativně krátkou dobou, během které mohou vyzařovat pozorovatelné záření - takový druh neutronové hvězdy se nazývá magnetar, protože disponuje mnohem silnějším magnetickým polem, než jakým disponují pulsary). Protože směry os pulsarů jsou ve vesmíru orientovány náhodně, dá se udělat rozumná extrapolace na počet těch, které nevidíme z toho důvodu, že emitují svůj zářivý kužel v jiném směru, než jsme my. Díky této extrapolaci spočteme jejich celkový počet. Jenže přitom současně zjistíme, že ani pulsary problém temné hmoty nevytrhnou.

Teoreticky můžeme uvažovat i o neutronových hvězdách, které pulsary z jakýchkoliv příčin prostě nejsou, a u těch pak samozřejmě nemůžeme až tak moc dobře vědět, kolik jich třeba v naší Galaxii je. Každopádně ale i pro ně platí hmotnostní omezení zdola - neutronové hvězdy musí být minimálně tak hmotné, jako Slunce, jinak by jejich hvězdný rodič skončil svou pouť ne jako supernova, ale jako např. bílý trpaslík, což je poslední vývojová etapa nepříliš hmotných hvězd, asi takových, jako je třeba naše Sluníčko. Bílí trpaslíci sice mohou dělat problém s pozorováním, pokud jsou velice vzdálení. Jenže i počet bílých trpaslíků jde docela věrohodně extrapolovat z počtu pozorovaných bílých trpaslíků, kteří

jsou v dosahu našich teleskopů - a opět, ani tito nemohou být onou hledanou temnou hmotou. Nepulsující neutronové hvězdy jakožto objekty o nadsluneční hmotnosti by mohly být pozorovány pomocí efektu gravitační mikročocky. Gravitační mikročocka je totéž, co gravitační čocka, ale v malém - hmotou, která ohýbá paprsky pozadí zde není velká galaxie, ale třeba právě onen málo hmotný objekt, jako je neutronová hvězda. Tento objekt kvůli své ne až tak velké gravitaci neumí ohnout světlo ze zdroje za ním až tak moc, aby se vzdálený zdroj zobrazil jako několik obrazů, jako je tomu u obyčejné gravitační čocky. Místo toho paprsky ze vzdáleného zdroje stačí jen malinko přiohnout - to ale stačí na to, aby se mírně zvětšila jasnost toho zdroje. V době před nasazením CCD prvků by byl takovýto jev prakticky nepozorovatelný, a to kvůli tomu, že astronom může pozorovat každým okamžikem jenom jeden objekt na zorném poli, a efekty gravitační mikročocky jsou velice řídké. Díky CCD prvkům (podobným, jaké jsou např. ve skenerech, ale také třeba v digitálních fotoaparátech či digitálních kamerách) ovšem nastala změna - CCD prvek dokáže současně registrovat obrovské pole hvězd na pozadí, a u všech zároveň registrovat, zda u některé nedošlo k přechodnému zjasnění.

Pozorování s vyhledáváním gravitačních mikročockek opravdu vedla k novým zásadním astronomickým objevům (např. byly objeveny úplně nové typy proměnných hvězd) - mezi mnoha jinými, původně zcela neplánovanými, bylo ale také poznání, že kompaktních nesvítících objektů o hmotnosti aspoň poloviny sluneční hmoty je v naší Galaxii velice málo, a tedy opět nemohou vysvětlit pozorovaný deficit v hmotě. Konečně se dostáváme k posledním dnes uvažovaným typům relativně malých, ale přitom kompaktních objektů, kterými jsou osamělé planety a hnědí trpaslíci. Osamělých planet nemůže být o mnoho více, než planet kroužících kolem svých mateřských hvězd, a to z toho důvodu, že nejčastěji vznikají tak, že uniknou z mateřské soustavy např. díky blízkému průchodu jiné hvězdy, která je svou gravitací vytrhne do mezihvězdného prostoru. Navíc hmotnost planet v planetárních soustavách je zanedbatelná proti hmotnosti jejich mateřských hvězd - tak například v naší sluneční soustavě činí úhrnná hmotnost všech planet jenom asi jedno procento hmotnosti Slunce. Proto osamělé planety, ač je zcela bez diskuze dnes ještě neumíme spolehlivě detekovat, můžeme z úvah o temné hmotě rovnou vyloučit. Hnědí trpaslíci jsou pro změnu nedovyvinuté hvězdy, které prostě nenasbíraly z okolí dostatečně mnoho materiálu, aby jim pak jejich hmotnost stačila k zažehnutí termojaderné reakce, kterýžto krok je jakýmsi iniciačním rituálem každé správné hvězdy (tím se tedy liší od protohvězd, u kterých je zažehnutí termojaderné reakce v centru protoplanetární soustavy pouze otázkou času). Hnědí trpaslíci proto nikdy během svého prakticky nekonečného života nezáří v optické části světla - místo něj vyzařují jen velice slabé tepelné záření, které vzniká díky zahřívání stlačovaného plynu uvnitř této nedospělé hvězdy (podobné tepelné záření je pozorovatelné u obřích planet naší sluneční soustavy, Jupitera, Saturna, Neptuna a Uranu). Někteří z hnědých trpaslíků se také dají pozorovat pomocí efektu gravitačních mikročockek, ale pouze ti větší. Typická hmotnost hnědého trpaslíka se totiž pohybuje v desítkách hmotností Jupitera, a dnešní technikou můžeme pozorovat jenom ty hmotnější z nich (anebo jinak, než pomocí efektu mikročocky, ty nejbližší z nich - tímto způsobem byl nedávno překvapivě odhalen jeden hnědý trpaslík v těsné mezihvězdném okolí naší sluneční soustavy). Hnědí trpaslíci, kteří jsou pod naší současnou pozorovací schopností, vnáší do odhadu neviděné hmoty určitou nejistotu, přes to však je na základě současných modelů velice málo pravděpodobné, že by jich bylo tolik, aby problém původu temné hmoty dokázaly vyřešit (pravděpodobnost či nepravděpodobnost samozřejmě nehraje určující roli; jak tomu nakonec bude musí definitivně určit až pozorování).

Podle všeho to tedy vypadá, že náš neviditelný slon v kupce sena nebude jen tak obyčejný slon z masa a kostí - hledaná temná hmota zřejmě nebude sestavena z částic tvořících běžnou látku, jakou známe, tedy z molekul, atomů, nebo atomových jader. Běžná látka buď velice dobře interaguje s elektromagnetickým zářením (a pak je např. prozraditelná, pokud se nachází ve formě plynu), nebo ráda vytváří kondenzované systémy, jako je prach (mimořádně, i ta tvorba prachu je způsobována nejčastěji chemickými a van der Waalovými silami, a ty jsou opět důsledkem elektromagnetické interakce) a z prachu pak vytváří systémy větší - hvězdy, protohvězdy, neutronové hvězdy, černé díry nebo hnědé trpaslíky. Každý z takovýchto systémů ale umíme více či méně úspěšně detekovat, nebo aspoň stanovit věrohodnou horní mez pro jejich četnost. Výsledek příslušných odhadů je zatím vždy ten, že s největší pravděpodobností

temná hmota není tvořena běžnou látkou.

Slon, který umí procházet zdi (aniž by ji zbořil!)

Vznikla tudíž poptávka po nějaké částici, která by měla tu vlastnost, že na rozdíl od běžné hmoty s elektromagnetickým zářením téměř neinteraguje. Taková částice musí být neutrální (jinak by interagovala s elektromagnetickým polem podobně jako s ním interagují elektrony nebo protony), dále musí mít nenulovou klidovou hmotnost (protože jen takové částice mohou působit gravitační efekty, které požadujeme), a také musí být stabilní (aby se velice rychle nerozpadala). Poslední požadavek např. vylučuje volné neutrony, které se samy o sobě rozpadají s poločasem rozpadu 16 minut (on by ale stejně vznikl u neutronů problém s tím, že pro změnu velice rádi interagují s existujícími atomovými jádry obyčejné hmoty, která by se jejich vlivem postupně destabilizovala podobně, jako se tokem neutronů destabilizují jádra těžkých prvků v štěpných reakcích). Seznam vhodných kandidátů se tedy zúžil na neutrální hmotné částice, které neinteragují dokonce ani silnou jadernou interakcí, ale mohou interagovat maximálně tzv. slabou jadernou silou. Pro takovou hledanou částici se ujala zkratka WIMP, z anglického Weakly Interacting Massive Particles.

Zná současná fyzika nějaké částice, které by mohly být těmi hledanými WIMP? Ano, takovými částicemi jsou neutrina. Neutrino je ve vesmíru docela dost, pohybují se prakticky rychlostí světla, a v každém krychlovém milimetru ve vesmíru, včetně vašich těl, je průměrně zhruba jedno. Neutrino se sice dají detekovat, ale mimořádně špatně. Z každého kvadriliónu neutrino se jich daří zachytit jenom pár. Díky jejich neobyčejné schopnosti procházet látkou, která je způsobena právě tou jejich neobyčejnou neochotou s látkou interagovat (dalo by se dokonce říct, že v našem vesmíru se bude těžko hledat k naší látce lhostejnější entita, než jsou neutrina), je zapotřebí stavět obří detektory, ve kterých jsou přítomny statisíce tun média, které jsou na neutrina nalíčeny. Přes tato enormní množství látky jsou ale detekovatelné interakce neutrino mnohem méně časté, než bychom pro jejich využití jakožto alternativního posla dějů probíhajících v mezihvězdných dálavách potřebovali. Srovnání světelné a neutrinové astronomie je tedy následující - fotonů i neutrino je ve vesmíru řádově stejně, jenže u fotonů umíme vyrábět čidla o tak velké citlivosti, že ta umí polapit skoro každý jednotlivý foton, kdežto u neutrino podobně citlivá čidla dost možná nikdy nepůjde vyrobit - z kvadriliónů neutrino jich umíme spolehlivě chytat v lepším případě jenom tisíce. Přesto všechno už stávající neutrinové detektory nemálo důležitých informací získaly.

Otázka zda neutrina mohou či nemohou úspěšně řešit problém temné hmoty ve vesmíru závisela na tom, jakou budou mít klidovou hmotnost. Dlouhou dobu se mělo za to, že neutrina mají klidovou hmotnost nulovou. Dynamická hmotnost pohybujícího se neutrino je sice na rozdíl od jeho klidové hmotnosti v každém případě nenulová - proč je tedy požadavek nulové klidové hmotnosti tak důležitý? Například z toho důvodu, že v případě nulové klidové hmoty by se neutrina podobně jako elektromagnetické vlny šířila vždy rychlostí světla, a to by zabránilo jejich shlukování v galaxiích a jejich blízkém okolí, tak, jak se podle současných pozorování má shlukovat ona temná hmota. Jinými slovy, neutrina by bez ohledu na jejich enormní výskyt ve vesmíru musela mít nenulovou klidovou hmotnost, aby pomohla astronomům vytrhnout trn z paty. Dokonce ani to nestačí, aby jejich klidová hmotnost byla pouze nenulová, ale musí být větší, než nějaká minimální hodnota, protože jinak by neutrina nedisponovala potřebnou gravitační silou, kterou přisuzujeme temné hmotě.

Nenulová klidová hmotnost neutrino by kromě toho mohla mít závažné důsledky pro otázku budoucnosti celého našeho vesmíru, protože pokud by jejich klidová hmotnost byla dostatečně velká, expanze našeho dnes rozpínajícího se vesmíru by se po nějaké době zastavila a vesmír by se začal smršťovat (zhrucení našeho milovaného rodného vesmíru se ale nemusíme obávat, protože i kdyby mělo nastat, nestalo by se tak podle všeho dříve než za řádově sto miliard let).

Obří neutrinový detektor SuperKamioke v japonské Kamioce je předním světovým pracovištěm pro výzkum neutrino. Systematické pozorování, které na něm probíhalo v několika posledních letech, výrazně pomohlo v určení klidové hmotnosti neutrino. Výsledek měření hmotnosti neutrino vyšel vpravdě

šalamounský - neutrina sice mají prokazatelně nenulovou klidovou hmotnost, ale tak malou, že nestačí ani na budoucí zastavení expanze vesmíru, ani na vysvětlení původu temné hmoty.

Protože neutrina byla jediným možným kandidátem na vysvětlení původu temné hmoty z těch částic, které současná fyzika už objevila, nezbývá nic jiného, než začít vytahovat z klobouku kandidáty, které dodnes neumíme detekovat ani tak málo, jako ta k nám tak lhostejná neutrina - jinými slovy, musíme začít spekulovat a přejít od praxe a ověřených teorií k teoriím, které dnes ještě nejsou potvrzeny experimentem. Je samozřejmé, že se tím automaticky dostáváme na dost tenký led, protože hmotu, kterou neumíme zatím nijak jinak detekovat, než pomocí jejího gravitačního působení na svítící hmotu, se takto snažíme vysvětlit za pomoci hypotetických částic, jejichž skutečné vlastnosti dnes samozřejmě vůbec neznáme.

Z experimentálně zatím neověřených teorií se nejvíce uvažuje o tzv. supersymetriích. Podle nich každá nám dnes známá částice má svého tzv. superpartnera, přičemž se respektuje pravidlo, že částice s polocelým spinem (nazývané souhrnně jako fermiony) mají za superpartnera částice s celočíselným spinem (ty zase souhrnně nazýváme jako bosony), a naopak. Supersymetrické teorie by měly být průkazné až v oblasti dostatečně obrovských energií, kdy by srážkami známých částic mohly vznikat ony částice hledané. Jako teoretický nejvhodnější kandidát připadá hypotetická částice nazývaná neutralino, což má být supersymetrický partner výše diskutovaného neutrina. Je to zároveň nejlehčí z hypotetických superpartnerů dnes známých částic - proto se pro ni používá také zkratka LSP z anglického Lightest Supersymmetric Particle. Nejlehčí supersymetrická částice ale není žádný částicový otloukánek. Neutralino je ve srovnání s dnes známými částicemi velice dobře živeným tlouštíkem - klidová hmotnost neutrina je dnes odhadována jako řádově stomiliardkrát menší, než je hmotnost protonu, kdežto neutralino má mít naopak hmotnost asi stokrát větší než proton, a možná dokonce ještě více. Na druhou stranu by neutralin mělo být nesrovnatelně méně než neutrin. Při jejich vhodném počtu by možná šlo pomocí nich problém temné hmoty objasnit.

Na vyřešení otázky existence nebo neexistence vhodných LSP si ale budeme muset počkat až do zprovoznění nového částicového urychlovače, který se jmenuje LHC (od Large Hadron Collider, tedy něco jako velký srážecí hadronů - jako hadrony nazýváme těžké částice, jako jsou např. proton a neutron). LHC je v současné době dokončován, jeho spuštění se odhaduje na rok 2007. Pokud by se předpověď neutralin potvrdila (a s nimi pravděpodobně pak celé plejády jiných částic, na jejichž detekování je zapotřebí vytvořit srážky o tak vysokých energiích, jaké současné urychlovače ještě neumí), pak by to byl zajisté veliký úspěch. Na druhou stranu by to nebylo poprvé, a už určitě ne naposled, co se astrofyzika a kosmologie provádí kromě obřích teleskopů a satelitů taky v desítky kilometrů dlouhých tunelech částicových urychlovačů.

Stejně jako neutrina, tak i ostatní možné WIMP, včetně LSP, mají s nimi tu společnou vlastnost, že s běžnou hmotou interagují velice slabě. Pokud tedy existují, není pro ně stejně jako pro neutrina žádným problémem procházet nepozorovaně také naší Zemí a dokonce i našimi těly. Vypadá to tedy tak, že náš slon v kupce sena má podobu jakéhosi ducha, který umí procházet zdí. Seno v kupce, které vidíme, slon ovlivňuje jenom svou gravitací, přitom ale toto seno jím umí procházet a naopak každá malá část slona umí bez problémů procházet oním senem. Prostě ideální partner pro vystoupení kouzelníků a iluzionistů.

A je to vůbec slon, není to třeba nosorožec?

Na definitivní potvrzení či vyvrácení teorií o možném původu temné hmoty si tedy budeme muset minimálně ještě pár let počkat. Dají se přesto ohledně ní dělat nějaké předpovědi, když ani nevíme, z čeho je složena? Dají. Astronomové např. z deformací pohybů hvězd v galaxiích a pohybů galaxií v kupách galaxií mohou usuzovat na pravděpodobné rozložení temné hmoty ve vesmíru, tzn. že se mohou pokoušet vytvářet jakési trojrozměrné mapy určující, v kterých oblastech se temná hmota nachází, a kde nikoliv. Ukazuje se, že temná hmota se aspoň zhruba seskupuje v místech, kde hmota viditelná - není tomu ale úplně vždycky, existují i náznaky toho, že v některých případech je temná hmota rozložena poněkud jinak. Tak např. u velkých galaxií se podle všeho oblak (halo) temné hmoty rozprostírá nejen v prostoru

celé galaxie, ale dokonce až daleko za její hranice. Mělo se za to, že toto je obecným pravidlem, jenže velice nedávno se ukázalo, že naopak v trpasličích galaxiích halo temné hmoty zdaleka nesahá ani k jejich okraji - to plyne z toho, že od určité vzdálenosti od centra takové trpasličí galaxie klesá oběžná rychlost hvězd již podle klasického Keplerova vzorce.

Každopádně v této otázce není nouze o všemožné pracovní hypotézy, které nemusí mít dlouhou životnost. Jedna z těch nedávných uvažuje o tom, že částice temné hmoty, mají-li dostatečně malou hmotnost, mohou při svých byť řídkých interakcích produkovat elektrony a pozitrony. Vzájemná anihilace elektronů a pozitronů pak vede k vzniku gama záření o energii, která je podle vztahu $E=mc^2$ rovna právě klidové energii elektronu, a ta činí 511 keV. Pro pozorování jevu je nejvhodnější sledování jádra naší Galaxie, protože podle současných výsledků má právě tam být temné hmoty přítomno nejvíce.

V lednu tohoto roku tým vědců, kteří zpracovávají data z družice Integral, oznámil, že právě takové záření o energii 511 keV z oblasti jádra Mléčné dráhy naměřili. Jenže kritici této hypotézy oprávněně poukazují na to, že v naší Galaxii existuje velice hodně standardních mechanismů, které mohou i bez zapojení temné hmoty uspokojivě vysvětlit vznik oněch elektron-pozitronových párů. Jinak řečeno není spor o tom, že se s největší pravděpodobností pozoruje záření, které vzniká díky řídké anihilaci elektronů a pozitronů, spor je o tom, jestli jsou tyto elektrony a pozitrony generovány částicemi temné hmoty, nebo dnes už známými mechanismy pomocí hmoty běžné. Ať už je tomu tak nebo tak, představuje objev tohoto záření další drobný kámenek do obří mozaiky, která nám dává obraz o dějích v našem hvězdném domově.

Další komplikací ohledně určování možných prostorových map temné hmoty v naší Galaxii se ukazuje to, že Mléčná dráha není nějakým extra pravidelným útvarem, protože se v její těsné blízkosti stále motají zbytky trpasličích galaxií, které byly Mléčnou dráhou gravitačně roztrhány. Někteří z těchto galaktických kostlivců byli opět nalezeni teprve před pár měsíci. V jednom návrhu astronomů starém jen několik dní se poukazuje na to, že jeden dlouhatánský cár zlikvidované trpasličí galaxie prochází jako na potvoru právě oblastí, ve které se nachází naše sluneční soustava. Protože se předpokládá, že kromě cárů viditelné hmoty vznikly během tohoto galaktického kanibalismu také souběžné cáry hmoty temné, poukazuje se na to, že např. mapování temné hmoty pomocí gama záření, které možná může (ale nemusí, jak jsme seznali výše), vznikat při jejích interakcích s běžnou hmotou, může být velice ztíženo tím, že oblast, v níž se s celou naší sluneční soustavou nacházíme, leží v jakémsi lokálním "smogu" temné hmoty. Pokud by tedy temná hmota opravdu takové záření produkovala, měli bychom do pozorovaných dat započítat vliv těch lokálních cárů temné hmoty, v nichž se s největší pravděpodobností i s celou naší sluneční soustavou motáme.

Jak vidíme, bez ohledu na podstatu temné hmoty lze usuzovat na tvar, jaký v našem okolí zaujímá. Můžeme tedy aspoň zhruba usuzovat, jestli náš slon má podobu opravdu slona, nebo jiného velkého zvířete. Toto mapování je ale pronásledováno velikými obtížemi, takže dodnes nejsou k dispozici ani nějaké stoprocentně jisté, ani stoprocentně přesné trojrozměrné mapy temné hmoty - nějaké ale už přesto existují. Jakž takž bychom pomocí nich možná dokázali rozpoznat slona od nosorožce, ale v žádném případě bychom už nerozlišili třeba slona afrického od indického. Topografie temné hmoty je stále ve svých úplných počátcích.

Kde je ale těch zbývajících 73%?

Pozornému čtenáři neušlo, že jsem na začátku uváděl procenta zastoupení běžné a temné hmoty ve vesmíru. Podle asi rok starých měření vychází, že se v něm nachází 4% běžné hmoty (z toho je asi pouhé 1% hmoty svítící, a 3% pak nesvítící nebo slabě svítící běžná hmota, jejíž možné varianty jsme si probrali výše). Celých 23% má tvořit temná hmota, pravděpodobně tvořená WIMP. A zbylých 73% ... No jo, co vlastně tvoří oněch 73% hmoty vesmíru, která jsme zatím cudně opomenuli?

Oněch 73% má podle současných teorií tvořit tzv. temná energie. No toto, říkáte si teď určitě, jako by nestačilo, že tady musíme baštit historky o hmotě, která se jako běžná hmota vůbec nechová, a teď navíc ještě nějaká temná energie navrch. Jaký je vlastně pro něco takového důvod, nestačí, že už teď máme

přenechávat rozhodující vliv ve vesmíru jiné hmotě, než je ta nám známá, a teď se nám tu cpe navíc nějaký další temný nesmysl?

Abychom lépe pochopili, proč je dobrý důvod pro takovému zavedení další entity ve vesmíru, popišme si hned zkraje, čím se vlastně má temná energie od dříve popisované temné hmoty lišit. Zásadní rozdíl je jednak ve "složení" temné energie, a jednak v mechanismu jejího pozorování. Nejprve k tomu složení. Temná energie se na rozdíl od temné hmoty neskládá z žádných částic, tj. ani z těch dnes známých, ani z těch dnes neznámých. Temná energie je energie obsažená v samotném vakuu. Možná si teď říkáte, jaká asi tak energie může být ve vakuu obsažena. Inu - může. Budeme si ale muset připomenout, co vlastně energie znamená, abychom se o ní ne bavili jako o nějakém mytickém či esoterickém pojmu.

Energie byla zavedena jakožto naprosto pragmaticky definovaná matematická veličina, která nám usnadňuje popis pohybových stavů hmoty. Přírodní zákony, které platí v našem bezprostředním okolí, nám říkají, že když nějaká hmota začne měnit svůj pohybový stav, tak tyto změny se dají popsat jako jakási neustálá fiktivní směna malých změn toho pohybu za jakési abstraktní platidlo - a tím platidlem je právě energie. Když zavěsíme nějaké těleso na laně přes kladku, tak druhý konec tohoto lana nám může pomoci při zvedání jiného tělesa - vidíme tedy, že pomocí lana můžeme provádět jakousi naturální směnu změny pohybového stavu jednoho tělesa za změnu pohybového stavu tělesa jiného. Vlastně všechny výtahy a jeřáby pracují díky tomu, že takováto směna existuje.

Lano jakožto prostředník těchto pohybových směn není platidlem univerzálním - existují pohybové změny, které pomocí něj nikam nepřevedeme. Můžeme např. pustit těžký předmět na zem, kde se zastaví. Předmět při pádu nejprve nabere rychlost, ale tu pak zase ztratí. Na první pohled to vypadá, že v těchto případech žádná směna nefunguje, zastavení tělesa při nárazu na zem vypadá jako jednoznačná ztráta pohybového stavu, nikoliv jako jeho výměna za pohyb jiný. Jenže není tomu tak. V tomto případě se opět mění pohybový stav jednoho tělesa spolu se změnou jiného pohybového stavu, akorát to není na první pohled vidět. Zastavení tělesa způsobí rozkmitání molekul látky, z níž je vytvořeno, a toto jejich rozkmitání můžeme vnímat jako zvýšenou teplotu tělesa (v reálu bychom ale na změření toho teplotního rozdílu potřebovali hodně citlivý teploměr). Tedy i v tomto případě lze uvažovat tento proces za výměnu pohybových stavů mezi různými tělesy, zde přesněji mezi součástmi tvořícími jediné těleso - uspořádaný pohyb všech molekul tělesa jedním směrem se zde změní na neuspořádaný pohyb všemi možnými směry těch samých molekul. Podobně, jako bylo již ve starověku pro účely jednodušší směny zboží s výhodou zavedeno univerzální oběživo - peníze, tak se i ve fyzice dá zavést univerzální platidlo, a tím je energie. Často je tomu v našem okolí tak, že když nějaké těleso nějakou část energie ztratí, tak přesně tuto část musí získat nějaké jiné těleso v jeho okolí, a naopak. Například pohybující se kulečnicková koule po nárazu do jiné stojící se může zastavit, ale ta dříve stojící se bude po nárazu pohybovat toutéž rychlostí, jako před ní ta koule první. Pokud vezmeme v úvahu i tření, tak to, že se koule na kulečnickovém plátně nakonec zastaví, je způsobeno postupným "utrácením" energetického kapesného této koule za tepelnou energii molekul plátna, která se během zastavování koule pomaličku zvyšuje. Energie zkrátka není nic víc a nic míň, než velice praktický lidský výmysl, který se tuze hodí - tak, jako nejsme nuceni při nákupu třeba potravin měnit tyto za jiné konkrétní předměty, které vlastněme, ale jednoduše je nakoupíme za peníze, tak stejně tak můžeme ohodnotit pohybový stav tělesa v jednotkách vhodně zavedené měny, kterou je energie, což nám velice usnadní počítání změn těchto pohybových stavů. Nicméně energie není jediným existujícím platidlem - kromě ní jsou ve fyzice používány i další specifické měny, jako jsou hybnost, moment hybnosti, elektrický náboj, a mnohé další, což jsou opět šikovně zavedené veličiny, které se v mnoha fyzikálních procesech zachovávají.

Nyní už jsme docela blízko k pochopení oné energie vakua. Musíme ale napřed zodpovědět na otázku, zda se celkové množství tohoto fyzikálního platidla - tedy energie - za všech okolností zachovává. Inu, ukazuje se, že příroda je docela opatrný byznysmen, protože prakticky ve všech známých mechanických procesech můžeme pozorovat, že platí zákon zachování energie. Kromě mechanických dějů existují ale děje i jiné, kdy do hry vstupují kromě přímého fyzikálního působení (kterými jsou např. tahy, tlaky či nárazy) také tzv. pole, jako jsou např. pole elektromagnetické či gravitační. Určitě vy sami z vlastní zkušenosti nepochybně znáte, že těleso volně puštěné z dlaně začne zvyšovat svou rychlost směrem dolů,

zkrátka jednoduše začne padat. Tak, řeknete si asi, a teď je celá ta historka o energetickém platidle na lopatkách, vždyť přece puštěné těleso samo od sebe zvyšuje svou kinetickou energii, a během tohoto procesu se zároveň nesnižuje kinetická energie jiného tělesa. Jenže není to tak jednoduché, jak to na prvý pohled vypadá. Pokud budete chtít toto těleso vrátit do výchozí polohy, budete mu muset naopak nějakou energii dodat - a přitom zjistíte, že ta energie, kterou budete muset do tělesa investovat, aby jste jej vrátili na výchozí pozici, bude přesně rovna kinetické energii, kterou zdánlivě zadarmo toto těleso získalo při svém pádu. Po mnoha a mnoha pokusech byste stejně jako fyzici došli k závěru, že ani zde se energie neztrácí - tíhové pole Země není žádným charitativním dárcem, ono pouze energii půjčuje, a když se chcete s tělesem vrátit zpět, musíte tentýž obnos zase vrátit. Energie se zde zkrátka pouze mění z jedné formy, kterou už jste znali (z energie kinetické, tedy pohybové, což je forma energie, kterou můžeme na pohybu tělesa "vidět") na formu jinou (na energii potenciální čili polohovou, což je forma energie, kterou na pohybu tělesa "vidět" nemůžeme).

Toto půjčování a vracení energie tělesu je vlastně jeden z hlavních důvodů, proč se všechna ta různá pole, jako jsou pole gravitační, elektromagnetické, či jiná, ve fyzice vůbec zavádí. Částice v takovém poli sice mění svůj pohybový stav, jenže přitom se dá ukázat, že změna tohoto stavu může být opět vysvětlena jako směna energie, tentokrát jako výměna energie kinetické za potenciální nebo naopak.

Nyní už se konečně dostáváme k oné energii vakua. Vakuum je stav, v němž nejsou přítomny žádné částice. V principu v něm ale mohou být přítomna fyzikální pole. V mezigalaktickém prostoru vždy zůstává přítomno minimálně jedno - a to pole gravitační. Toto mezigalaktické gravitační pole v závislosti na svém uspořádání může, ale taky nemusí být nositelem energie. Podle Einsteinovy obecné teorie relativity, která je dnes experimentálně velice dobře potvrzenou teorií gravitace, by tato energie gravitačního pole měla mít původ v tzv. kosmologické konstantě. Gravitační pole má totiž i běžně známou energii, která např. způsobuje notoricky gravitační přitahování těles. Toto přitahování ale klesá s rostoucí vzdáleností, a na velmi velkých mezigalaktických vzdálenostech se stává prakticky zanedbatelným - jinak řečeno, tuto běžnou energii gravitačního pole můžeme zanedbat na tak vzdálenostech, které výrazně převyšují rozměry kup galaxií (v nichž ještě, jak jsme si výše říkali, naopak běžné gravitační přitahování hraje velkou roli, vždyť právě z něj nakonec Fritz Zwicky usoudil na existenci temné hmoty).

Pokud ale je v Einsteinových rovnicích gravitačního pole přítomna tzv. kosmologická konstanta, tak je v gravitačním poli přítomna také jí odpovídající energie, která ale na rozdíl od té běžné má tu vlastnost, že její působení neklesá, ale naopak roste se vzdáleností - zatímco na vzdálenostech až do rozměrů kup galaxií je energie pocházející od kosmologické konstanty zanedbatelná, tak na vzdálenostech ještě větších už postupně začíná hrát prim. Energie pocházející z gravitačního pole, přesněji řečeno z kosmologické konstanty obsažené v rovnicích gravitačního pole, může stejně, jako energie jiných fyzikálních polí, měnit kinetickou energii galaxií. Galaxie se pak mohou ve svém pohybu zrychlovat či zpomalovat v závislosti na tom, jestli energie pocházející z kosmologické konstanty způsobuje na obřích škálách odpuzování nebo přitahování.

Čtenář patrně určitě bude vědět o rozpínání vesmíru. To objevil už v první polovině dvacátého století astronom Edwin Hubble díky objevu vzdalování dalekých galaxií (jak už jsme zjistili dříve, toto vzdalování nepozoroval tak, že by se mu vzdálené galaxie v objektivu nějak pohybovaly, ale zjistil je ze spektra dopadajícího světla, konkrétně z jeho červeného posuvu). Rychlost vzdalování galaxií je podle Hubbleova vztahu úměrná jejich vzdálenosti, a je významná až u velice vzdálených galaxií (tedy nehraje žádnou podstatnou roli v rozměrech do velikosti zhruba kup galaxií). Samotné vzdalování galaxií a tedy rozpínání vesmíru je dnes bráno za observatorně velice dobře potvrzenou záležitost.

Dlouho se ale nevědělo, jestli je Hubbleův zákon opravdu přesně lineární - tedy jestli se rychlost velmi vzdálených galaxií zvyšuje přesně přímo úměrně vzdálenosti od nás, nebo trochu rychleji, nebo naopak trochu pomaleji, než by plynulo z té přímé úměry. Tomu by odpovídalo to, že se rychlost rozpínání zrychluje, nebo naopak zpomaluje. Pokud by se rozpínání vesmíru ani nezrychlovalo, ani nezpomalovalo, pak bychom žádnou energii vakua zavádět nemuseli - dynamika vesmíru, tak, jak vyplývá z Einsteinových rovnic gravitace by umožnila rozpínání vesmíru jakousi "setrvačností". Přesněji řečeno by

za nepřítomnosti temné energie měl Hubbleův vztah striktně lineární průběh pouze v případě, kdyby ve vesmíru nebyla žádná hmota, nebo by jí bylo zanedbatelně málo - expanze vesmíru je v přítomnosti hmoty totiž přirozeně bržděna její gravitací. A protože hmota (ať už běžná, nebo tmavá) ve vesmíru nepochybně je, dalo se tedy podle všeho očekávat, že rychlost rozpínání vesmíru se musí časem zpomalovat.

Jako pěkná ukázka toho, že příroda se může řídit taky jinými pravidly, než jaká my momentálně považujeme za logická, dopadl nakonec výsledek přesného měření expanze velmi vzdálených galaxií. Tato měření byla realizována před několika lety, a ukázala, že bez ohledu na to, že nám připadalo přirozené, aby vesmír svou expanzi zpomaloval, tak ve skutečnosti galaxie při svém vzdalování svůj úprk zrychlují. To ale znamená, že něco musí působit proti gravitačnímu přitahování hmoty, něco tu hmotu na obřích vzdálenostech musí naopak odpuzovat. Kinetická energie galaxií se tedy v průběhu rozpínání zvyšuje, a tato energie se patrně bere z energie mezigalaktického gravitačního pole, konkrétně z energie kosmologické konstanty - nebo taky (pokud pouze použijeme jinou terminologii) z energie vakua. Tato lekce uštědřená od přírody nám znovu připomíná, že je to jediné experiment, který je rozhodujícím soudcem vynášejícím rozsudky nad momentálně převládajícími představami o vesmíru, nikoliv tyto představy samotné. Je to velice užitečná lekce, a je třeba si ji připomínat pokaždé, když budeme číst o nových a nových byt' sebedůmyslnějších teoretických konstrukcích, které nám budou vykreslovat ten údajně už zaručeně pravý a konečný obraz vesmíru.

Před objevem teorie relativity byly energie a hmota považovány za hrušky a jablka, které spolu nemohou být jen tak sčítány či odčítány. Díky Albertu Einsteinovi ale dnes známe veledůležitý vztah $E=mc^2$, díky kterému můžeme obě veličiny mezi sebou navzájem přepočítávat - každé hmotě náleží podle něj příslušná energie, a naopak každé energii náleží podle téhož vzorce příslušná hmota. Aplikací tohoto vzorečku na odhadované množství energie vakua pak můžeme spočítat, kolik hmoty by této energii odpovídalo. Díky tomu můžeme vyjádřit, pokud známe množství energie mezigalaktického gravitačního pole, množství "hmoty" této energii odpovídající. Po patřičném přepočtení dospějeme k oněm 73% hmoty ve vesmíru. Jako nositele temné energie jsme označili mezigalaktické pole přítomné ve vakuu. Zmínili jsme se, že zcela určitě je v mezigalaktickém prostoru vždy přítomno aspoň pole gravitační - a protože bylo takhle pěkně po ruce, tak právě jemu jsme tu do té doby bezprizorní temnou energii hodili na krk. Ve skutečnosti může být nositelem temné energie úplně jiné pole. Eventuální odpudivá energie gravitačního pole oplývá jistou nectností - během expanze vesmíru by sebemenší odchylky od té jediné optimální hodnoty vedly buď k okamžitému kolapsu vesmíru zpět do stavu, v jakém byl na začátku Velkého třesku, nebo by ho naopak rozfoukly tak rychle, že by se hmota v něm obsažená nestačila seskupit do dnes pozorovaných galaxií. Aby vznikl dnes pozorovaný vesmír, musela by hodnota temné energie pocházející z kosmologické konstanty být vyladěna s tak velkou relativní přesností, která se dá vyjádřit číslem, kde za nulou a desetinnou čárkou následuje minimálně dalších padesát nul, a až poté jednička. Zkrátka a dobře, takový vesmír by byl převelice závislým na neuvěřitelně přesném nastavení počátečních podmínek - a to je věc, která se jeví jako velice nepravděpodobná.

Podobně, jako dříve u temné hmoty, začali se tedy i u temné energie hledat alternativní možní kandidáti jakožto její možní nositelé. V této souvislosti se dnes často píše o tzv. kvintesenci, což je teoretické pole, které by mohlo mít spojitost s tzv. inflačním obdobím rozpínání vesmíru, a které netrpí těmi neduhy, jakými je sužována temná energie gravitačního pole. Je zde ale nutné si naprosto bez obalu říci, že zatímco hádání, jaké dnes neznámé částice bude možné považovat za reprezentanty temné hmoty, bylo možné označit za bruslení na tenkém ledě, tak hledání alternativních kandidátů pro temnou energii už je vyloženě lovením v kalných vodách. Na rozdíl od možných nejlehčích supersymetrických částic (LSP), u kterých existuje aspoň nějaká šance na jejich detekci v příštích několika letech, se možnost experimentálního detekování přesného druhu temné energie v příštích desítkách let nezjevuje ani v těch nejšílenějších snech žádného, byt' toho sebedovážnějšího kosmologa. U temné hmoty je navíc možno i bez znalosti toho, z čeho je vlastně složena, postupně vypracovávat např. trojrozměrné mapy jejího rozložení, kdežto u temné energie budeme moci na něco podobného - minimálně v příštích desetiletích - spolehlivě zapomenout. Rozdíl je v tom, že dynamické účinky temné hmoty je možno pozorovat na

škálách od velikosti galaxií až po rozměry řádu desítek miliónů světelných let, což je oblast dnes běžně zvládaná i menšími teleskopy, jenže dynamické účinky temné energie se dnes pozorují až na škálách o rozměrech miliard světelných let nebo větších, které jsou doménou pouze špičkových observatoří. Každopádně se nám ale náš obrázek vesmíru opět poněkud zkomplikoval. Po vesmíru se prohánějí obrovští sloni z temné hmoty, a ti tvoří 23% hmoty ve vesmíru. Slony od sebe čím dál rychleji rozfoukává gigantická temná energie, jejíž hmotový ekvivalent činí 73% veškeré hmoty vesmíru. Na slonech a díky jejich prostupnosti i uvnitř nich jsou nabalena asi 4% jakýchsi nečistot běžné hmoty - a z těchto 4% jsou utvářeny všechny nám relativně známé věci, jako jsou mezihvězdný prach a plyn, hvězdy, planety, a nakonec i my sami. Je-li tento obrázek vesmíru skutečně pravdivý, tak se holt budeme muset nějak vyrovnat s tím, že nás, reprezentanty běžné hmoty, příroda nechala hrát až třetí housle.

A co když tam nakonec žádný slon není?

Vrátíme-li se k našemu příkladu s vesmírným kolotočem, který se příliš rychle otáčí na to, aby jeho sedačky mohly být udrženy jenom těmi řetízky, které vidíme, můžeme namítnout, že existují i jiná vysvětlení než ta, že kromě viditelných existují i řetízky neviditelné. Pokud by se podařilo nalézt alternativní řešení, která by prošla sítím všech nashromážděných astronomických dat, pak bychom samozřejmě nepotřebovali žádnou temnou hmotu do úvah o skladbě vesmíru zavádět (neodstranili bychom tím ale potřebu temné energie, protože ke zrychlování velmi vzdálených galaxií prostě potřebujeme odněkud tu energii čerpat). Možná jiná vysvětlení jsou v zásadě dokonce hned dvě. Prvním z nich je samozřejmě úvaha, že viditelné řetízky držící sedačky kolotoče mají prostě mnohem větší pevnost, než předpokládáme. Pokud tuto představu přeložíme do fyzikálního jazyka, znamenalo by to, že gravitace viditelné hmoty je větší, než si myslíme. Jenže my sílu gravitace velice dobře známe, protože její účinky můžeme pozorovat ať už tady na Zemi, nebo v jejím blízkém okolí, např. ve sluneční soustavě. Pokud by gravitace byla na těchto nám dobře probádaných vzdálenostech výrazně větší, už dávno bychom na to přišli. Jediným řešením by byla možnost, že by gravitace na námi probádaných škálách klesala podle současného dobře ověřeného zákona, ale na větších vzdálenostech by se její pokles zmírnil, takže na vzdálenostech srovnatelných s rozměrem galaxií by byla výrazně větší, než plyne z Keplerova vzorce.

Je dobré připomenout, že modifikace teorie gravitace už ve fyzice jednou proběhla - bylo to tehdy, když obecná teorie relativity (zkráceně OTR) nahradila Newtonovskou teorii gravitace. Jedním z klíčových testů, které nakonec vynesly OTR do křesla dnes široce uznávané teorie, bylo vysvětlení anomálního stáčení perihelu Merkuru. Jak už zjistil Kepler, každá planeta naší sluneční soustavy obíhá kolem Slunce po své elipse, přičemž Slunce je umístěno v jednom ze dvou ohnisek této elipsy. To znamená, že jeden bod na této eliptické dráze je položen Slunci nejbližší (ten se nazývá perihelium), a jeden naopak nejdále (tomu říkáme afélium). Pokud by v naší sluneční soustavě obíhala jen jedna jediná planeta, tak by se při jejím oběhu kolem Slunce perihelium (a tím pádem ani afélium) nestácelo. Vzájemné slabé gravitační ovlivňování planet navzájem ale vede k tomu, že se perihelia jejich oběžných drah stácejí - jinými slovy, malá gravitační požd'uchování, kterými se planety při svém pohybu navzájem častují, vede k mírným otáčením elips, po kterých obíhají.

Nejznepokojivější bylo stáčení perihelu Merkuru, u kterého se ani po započtení gravitačního vlivu všech ostatních planet ve sluneční soustavě stále nedařilo vysvětlit pozorovanou hodnotu. Stáčení Merkurova perihelu bylo poprvé zjištěno už v roce 1786. Přes veškeré snahy o jeho vysvětlení a započítávání všech možných korekcí zůstával mezi pozorovanou a vypočtenou hodnotou stále dost velký rozdíl na to, než aby se dal připsat nepřesnostem v pozorování. V roce 1859 byla poprvé navržena hypotéza, která umožňovala tento rozdíl uspokojivě vysvětlit - tato hypotéza tvrdila, že Merkur je ovlivňován nějakou hmotou, která je přítomna v oblasti mezi jeho oběžnou dráhou a Sluncem.

Při rozebírání této hypotézy byly probírány podobné argumenty, jako jsme výše probírali ohledně možností, že by temná hmota v naší Galaxii mohla být hmotou obyčejnou. Pokud by hmota měla podobu např. rozptýleného plynu nebo prachu, musela by v blízkosti Slunce způsobovat nepřehlédnutelný

světelný rozptyl (podobně, jako když mlha způsobí, že místo ostře ohraničeného zdroje světla za ní vidíme jenom silně rozmazaný flek). Takový opar by ale nešel přehlédnout. Nejméně světla rozptyluje hmota soustředěná do jediného kompaktního tělesa - to znamená, že by pak mezi Merkurem a Sluncem obíhala ještě nějaká jiná, tehdy neznámá planeta, pro niž se ujal název Vulkán. Historie pozorování této hypotetické planety v druhé půli devatenáctého století je plná falešných poplachů, překvapivých zvrátů, a protirečících si konkurenčních pozorování. Nakonec se došlo k závěru, že taková planeta mezi Merkurem a Sluncem obíhat nemůže (nicméně dnes víme, že v této oblasti obíhá určitý počet malých asteroidů, které zdědili název po této hypotetické planetě - nazývají se vulkanoidy; jejich úhrnný vliv na pohyb Merkuru je však naprosto zanedbatelný).

Jedním z významných triumfů obecné teorie relativity byl ten, že stáčení perihelu Merkuru uměla vysvětlit přímo z rovnic gravitačního pole, které jsou v OTR poněkud jiné, než v Newtonově gravitaci. Nová Einsteinova teorie gravitace tedy žádnou planetu Vulkán nepotřebovala - ukázalo se tehdy, že nebylo potřeba vymýšlet neznámou hmotu mezi Merkurem a Sluncem, ale bylo zapotřebí zmodifikovat teorii gravitace. Sluší se doplnit, že OTR v žádném případě nevznikla jako účelová teorie, která by měla za cíl vysvětlit pouze jiný pohyb Merkuru, než jaký plynul ze staré teorie - vznikla jakožto výsledek téměř desetiletého strastiplného hledání logicky konzistentní teorie gravitace, která by na rozdíl od Newtonovy teorie akceptovala mj. základní postulát speciální teorie relativity, a to postulát o nejvyšší možné rychlosti ve vesmíru, kterou je rychlost světla. Newtonova teorie gravitace tento postulát porušovala tím, že se v ní gravitační působení dělo nekonečně velkou rychlostí. Einsteinova teorie kromě správné hodnoty pro stáčení perihelu Merkuru předvídala taky správnou hodnotu pro ohyb světelných paprsků hvězd při průchodu kolem Slunce (tento jev se pak mnohokrát potvrdil i při pozorování gravitačních čoček a mikročoček), dále předpověděla existenci černých děr, vliv gravitace na geometrii prostoru a na chod času, a kromě spousty dalších dnes již ověřených jevů z ní vyplývá také dnes již notoricky známé rozpínání vesmíru, které bylo později pozorováno Hubblem. Einsteinova OTR tedy představuje velice úspěšný příklad toho, jak hodně fyzikálních dějů se dá postihnout jedním matematicky velice elegantním myšlenkovým schématem.

Je vlastně ironií osudu, že tentokrát to podle všeho vypadá na přesně opačné rozřešení hádanky, kterou před nás pohyb hmoty v galaxiích staví. Na začátku dvacátého století se podařilo pohyb Merkuru vysvětlit místo přítomnosti neznámé planety modifikací teorie gravitace, jenže dnes se nám znova nějaká neznámá hmota do úvah o dynamice galaxií vrací. Nebylo by tedy možné opět nějak šikovně zmodifikovat teorii gravitace? Vždyť koneckonců už zde něco podobného bylo, tak proč by se to nemělo podařit podruhé?

Jenže rozdíl je právě v tom, že ta OTR nevznikala na objednávku astronomů - byla vymyšlena jako logicky velice konzistentní schéma, ve kterém bylo zapotřebí určit vlastně jen dvě neznámé konstanty - a to gravitační konstantu, která souvisí se starou gravitační konstantou z Newtonovy gravitace, a určuje vlastně, jakou silou se dvě tělesa na běžných vzdálenostech vlastně budou přitahovat, a pak kosmologickou konstantu, o které již taky byla řeč, a která naopak určuje odpuzování hmoty na kosmologických vzdálenostech (její vliv je naopak zanedbatelný na rozměrech o velikosti kup galaxií a menších).

Bez ohledu na to ale pokusy o další modifikaci teorie gravitace opravdu vznikly. Ukázalo se však, že neumožňují správně předpovědět právě ty pohyby galaxií, které jsou pozorovány. Teorie počítající s temnou hmotou jsou totiž už ze své podstaty flexibilnější, než jakékoliv teorie modifikující gravitaci. To si můžeme ilustrovat na příkladu, kdy máme např. dvě galaxie, ve kterých je svítící hmota rozložena téměř identicky. Jakákoliv rozumná modifikovaná teorie gravitace musí předpovídat stejné oběžné doby hvězd v obou galaxiích (protože stejné rozložení hmoty v obou musí generovat stejná gravitační pole), oproti tomu teorie uvažující temnou hmotu mají mnohem větší volnost - pokud zjistíte, že hvězdy v obou opticky identických galaxiích obíhají odlišně, vysvětlíte to velice lehce předpokladem, že v každé z nich je zkrátka jiné množství nepozorované temné hmoty, anebo že je v každé z nich ta temná hmota jinak rozložena. Porovnávání předpovědí modifikovaných teorií gravitace s pozorovanými pohyby galaxií každopádně nakonec vyznělo v jejich neprospěch.

Zmínil jsem se ale o tom, že existují hned dvě alternativní vysvětlení záhady vesmírných kolotočů - prvním z nich byla hypotéza, že na velkých vzdálenostech jsou řetízky držící sedačky silnější, než si myslíme. Tato hypotéza ale nepřežila srážku s pozorovacími daty. Druhým možným vysvětlením je to, že na velkých vzdálenostech je mnohem menší odstředivá síla působící na sedačky, než jakou předpokládáme. V tomto vysvětlení tedy opět nepotřebujeme žádná neviditelná lana držící sedačky spolu s těmi viditelnými (tedy nemusíme zavádět do úvah žádnou temnou hmotu), a ani nemusíme předpokládat, že dlouhé řetízky se začínají chovat na velkých vzdálenostech odlišně a jsou pevnější, než jsme zvyklí (tedy nemusíme ani modifikovat teorii gravitace). Musíme ale potom modifikovat zákon pro odstředivou sílu působící na sedačky na velkých vzdálenostech. Opět po přeložení do fyzikálního jazyka to znamená, že zákon síly, který nás učili už na základní škole, a který zní, že síla je rovna hmotnost krát zrychlení tělesa, bude nutné maličko modifikovat.

Tato teorie tedy nemodifikuje gravitaci, ale samotnou Newtonovu dynamiku, konkrétně její druhý zákon (pokud si vzpomínáte, tak tři Newtonovy pohybové zákony jsou v pořadí zákon setrvačnosti, zákon síly a zákon akce a reakce). Proto se taky tato teorie označuje zkratkou MOND, z anglického Modified Newtonian Dynamics. Tato teorie předpokládá, že klasický druhý Newtonův zákon platí pro výrazně větší zrychlení, než je nějaké extrémně malé zrychlení, a jakmile je naopak zrychlení dostatečně malé, začíná se projevovat více a více odchylka od klasické podoby druhého Newtonova zákona, která způsobuje, že síla působící na těleso je pak menší, než hmotnost krát zrychlení. Při oběhu jakéhokoliv tělesa kolem nějakého centra se zrychlení tělesa zmenšuje spolu s jeho vzdáleností od středu otáčení. Kritické malé zrychlení, při kterém se má druhý pohybový zákon začít výrazněji měnit od své klasické podoby, pak bylo záměrně vybráno tak, aby zhruba odpovídalo zrychlením hvězd obíhajících ve vnějších částech pozorovaných galaxií. Hodnota tohoto zrychlení vychází zhruba na desetinu nanometr, tj. 10^{-10} metrů za sekundu na druhou (to znamená, že těleso s tímto zrychlením se za jednu vteřinu pohne z klidu zhruba o polovinu velikosti atomu vodíku; pro srovnání, těleso puštěné v tíhovém poli Země se za tutéž jednu vteřinu propadne o pět metrů).

Ukazuje se, že MOND na rozdíl od teorií pokoušejících se modifikovat gravitaci relativně úspěšně kopíruje mnohá pozorovací data. Navíc umí vysvětlit i některé pozorované zákonitosti, např. tzv. Tullyův-Fisherův vztah mezi jasností galaxií a oběžnou rychlostí hvězd na jejich okrajích, nebo třeba skutečnost, že velikost rozdílu mezi pozorovanou a potřebnou hmotností, který se jinak přičítá na vrub temné hmotě, závisí na zrychlení pozorovaných soustav. Ukazuje se, že např. u spirálních galaxií je zapotřebí pro vysvětlení pozorovaného pohybu hvězd předpokládat existenci "jen" méně než desetkrát takového množství temné hmoty, ale např. u skupin malých galaxií je nutné do modelu přisypat až stokrát více temné hmoty, aby se teoretické a pozorované hodnoty dostaly do souladu. Stávající teorie uvažující temnou hmotu nemají pro tyto rozdílné nesrovnalosti žádné rozumné vysvětlení, naopak MOND právě pozorovanou závislost zcela přirozeně vysvětluje tím, že zrychlení galaxií ve skupinách malých galaxií je výrazně menší, než zrychlení hvězd ve spirálních galaxiích, a proto je v prvním případě výraznější odchylka v odstředivé síle ve srovnání se silou spočtenou podle druhého Newtonova zákona.

Bohužel, existují také data svědčící v neprospěch MOND. Tato teorie totiž velice špatně předpovídá teploty horkého plynu v galaxiích. Také selhává v případě kup, které obsahují velmi velký počet galaxií. V obou případech by se souhlas s experimentem opět musel zachraňovat předpokladem o existenci nějaké temné hmoty. Tím by byla ale popřena vlastní užitečnost této teorie, která byla vymyšlena právě proto, aby neznámá temná hmota nemusela být do astrofyzikálních úvah vůbec zaváděna.

Výtky vůči MOND přicházejí i ze stran teoretiků. MOND není žádná systémová teorie, jedná se jen o jakousi kuchařku, která byla vymyšlena na popis de facto jednoho jediného fenoménu - a to odlišného pohybu hmoty ve velkých měřítkách, než by odpovídal jejímu pohybu v gravitačním poli viděné hmoty. Takovým teoriím se říká též teorie fenomenologické - jsou to teorie, které zjednodušeně řečeno zodpovídají mnohem méně otázek PROČ, odpovídají spíše na otázky typu JAK se něco konkrétního děje. Příkladem fenomenologické teorie jsou např. Keplerovy zákony, které popisují jak se planety kolem Slunce pohybují, jenže nevysvětlují proč se tak pohybují. Naproti tomu Newtonova nebo Einsteinova teorie gravitace vysvětluje právě proč se tak pohybují - tyto teorie říkají, že je to díky gravitačnímu poli,

pro které v obou teoriích existují rovnice. Obě teorie jsou nadto mnohem obecnější než Keplerovy zákony - Newtonova teorie gravitace totiž jednotným způsobem vysvětlila kromě oběhu planet i původ zemské tíže a pohyby těles v ní, Einsteinova teorie navíc předpověděla celou škálu dějů, kterými gravitace působí nejen na pohyb těles, ale také na prostor a čas (ohýbání světelných paprsků, zpomalování času v přítomnosti gravitace, gravitační rudý posuv, existenci černých děr jakožto extrémního příkladu zborceného prostoru, a mnoho dalších).

Jiným příkladem fenomenologické teorie byl např. Bohrov model atomu. Ten řešil problém, proč se elektron při svém oběhu kolem jádra do něj nakonec nezřítí. Bohrov model postuloval existenci stabilních hladin v atomu vodíku na základě několika jednoduchých předpokladů, a z těchto předpokladů pak také dokázal vypočítat několik dalších jednoduchých charakteristik atomu vodíku. Tento model byl typickým fenomenologickým modelem, protože na všech jiných atomech než byl atom vodíku žalostně selhával, o molekulách už ani nemluvě. Jenže i zde se, jako i v případě Keplerových zákonů, podařilo časem najít vyhovující a dostatečně obecnou teorii, která původní kostrbatou fenomenologickou konstrukci uměla šikovně zaobalit - v tomto případě se jednalo o kvantovou mechaniku.

Zůstává tedy otevřená otázka, zda MOND je jenom nepovedeným myšlenkovým schématem, které bude během následujících let zcela smeteno, nebo jestli se třeba, podobně jako např. v případě toho Bohrova modelu atomu, nepodaří zakotvit tuto teorii do teorie širší, která pak logicky konzistentně vysvětlí jak dnešní dílčí soulady, tak dílčí nesoulady MOND s pozorováním. A spolu s tím zůstává stále ještě otevřená otázka, zda nakonec tu temnou hmotu budeme nezbytně muset do astrofyzikálních modelů zavést.

Jenže také teorie temné hmoty ukázala, že i ona umí obstát v boji o místo na výsluní. V posledních letech se podařilo získat nezávislé odhady na potřebné množství temné hmoty, které pocházejí jednak z numerických simulací rozložení mezgalaktického plynu, jednak už ze zmíněných pohybů galaxií a hvězd v nich, a jednak z požadavku na odpovídající vznikání struktur hmoty, jako jsou třeba galaxie a kupy galaxií, v průběhu evoluce vesmíru. Všechny tyto nezávislé odhady dávají sobě blízké hodnoty, a proto je opravdu docela dobře možné, že naši neviditelní sloni ve vesmíru existují.

Vědí vlastně ti vědci vůbec něco? A proč se teda neshodnou?

Možná vám to může připadat, že jste se právě dozvěděli, že vědci vlastně vůbec nic neví. Vždyť ta temná hmota nakonec ve vesmíru být může, ale také nemusí. Říkáte si možná - copak tohle je nějaké pořádné poznání? Inu, poznání ve smyslu nějaké stoprocentní doživotní jistoty asi určitě ne, ale poznávání zcela určitě ano. Jediné, co vědci mohou dělat, je snažit se vytvářet dobré teorie a vzápětí je testovat porovnáváním s naměřenými daty. Dobrá teorie přitom nemá žádnou garanci, že automaticky bude také teorií pravdivou. Je to podobné situaci, jako když např. učitel usoudí na důvod žákovy absence - ráno, když šel do školy, viděl, kterak obětavý chlapec doprovází svou starou babičku na prohlídku k lékaři, a tak logicky dojde k závěru, že žák třeba zrovna během písemky sedí trpělivě v čekárně. To je řekněme docela ucházející příklad dobré teorie. Pravdivost teorie je věc úplně jiná - učitelova představa asi velice rychle vezme za své, pokud mu mladší sourozenec chybějícího žáka vyzvoní, že babička se po krátké prohlídce rychle vrátila domů a brácha si pak šel dát jointa za školu. Stejně tak i vědci nemají jinou možnost, než na základě dostupných znalostí vytvářet rozumný obraz světa doufaje, že v interpretaci pozorovaných dat není nějaká rafinovaná levárna, a tento obraz potom event. upravit v okamžiku, kdy se jim podaří získat nový důvěryhodný zdroj informací, který ten podraz svých předchůdců nakonec experimentátorům bonzne.

Také si možná říkáte, proč tedy vlastně vědci nevyhlásí nějakou momentálně oficiální teorii - vždyť jaké je to mrhání časem, když všichni vědci netáhnou za jeden provaz a nevěnují se výhradně rozvíjení nějaké jedné, pokud možno nejpravděpodobnější teorii. Ono ale jednak by to nešlo, a jednak je velice dobře, že tomu tak není. Nešlo by to už kvůli těm rozporuplným na začátku zmíněným povahám vědců. Jak už jsem zmínil, vědci netvoří žádný jednotný tým, který se navzájem za všech okolností podporuje a každý se za každého postaví. Mezi vědci existuje kromě vzájemných sympatií také mnoho vzájemných antipatií až animozit - někteří vědci spolu zkrátka vychází dobře, a někteří vůbec ne, jsou to zkrátka lidé jako my,

nevědci. Ve vědě neexistuje žádná centrální autorita, která by vydávala dekrety, které teorie se momentálně mají považovat za ty jediné správné. Záleží na úvaze každého vědce zvláště, které teorii bude věřit a které ne (jiná otázka samozřejmě je, zda na své bádání sežene dost prostředků, pokud je vedení jeho ústavu nakloněno vidět tu jím preferovanou teorii jako úplně zcestnou). Díky tomu ve vědeckém světě nepanuje žádný celosvětový diktát. Situace mezi různými vědeckými ústavami je spíše podobná vztahu mezi různými stáji formule 1 - všichni chtějí dosáhnout vynikajících výsledků, a samozřejmě si přitom také konkurují.

Je to zároveň dobře, že takováto pluralita a konkurence vědeckých teorií existuje. Vylučuje se tím totiž to, aby se z vědy postupně stávalo dogma. Kromě vědců a normálních nevědci existuje také skupinka zneuznaných géniů, kteří s nekonečnou pílí vynalézají nová a nová perpetua mobile, motory na vodu, sběrače "energie vakua" (ne ale té, o níž jsme hovořili ve spojitosti s temnou energií, protože takové přístroje by z podstaty věci musely být, ehm, přece jen poněkud veliké). Tito lidé kolikrát předkládají své "alternativní" teorie, které mají odůvodnit konečnou uskutečnitelnost jejich sisyfovského úsilí. V těchto teoriích se ale místo matematických či fyzikálních veličin mnohem více vyskytují fenomény spíše sociologické povahy - jejich tvůrci argumentují dogmatismem "oficiální" vědy, rozsáhlými "spiknutími" vědců majícími údajně za cíl diskreditaci právě onoho génia, anebo tím, jak zoufale a bezvýchodně všichni vědci bloudí ve slepých uličkách, do kterých je jakousi nepochopitelnou setrvačností zavedly jejich "zastaralé" teorie, a z nichž je může vyvést jen obrácení se na tu Jedinou Pravou Teorii. Soudný čtenář si sám udělá představu, jestli věda opravdu odpovídá obrazu, jaký o ní předkládají tito nepochopení velikáni. Jediné, v čem jsou jejich nářky těchto odmítaných dobrodětů lidstva pravdivé, je to, že skuteční vědci jejich výtvorům opravdu mnoho pozornosti nevěnují. To je ale celkem dobře pochopitelné, a nejedná se o situaci panující pouze ve vědě. Zkuste si třeba představit, že byste jako laici přišli mezi techniky formule 1, a začali tvrdit, že to všichni ti lidé ve všech konkurenčních stájích dělali celou dobu úplně blbě, a že právě vy jim ukážete, jak to udělat, aby ta formule jezdila dvakrát rychleji. Budou-li hodně slušní, zeptají se vás nejprve na to, jestli něco víte třeba o motorech, a nejpozději poté, co se od vás dozví, že to nepovažujete za důležité, vás bez pardonu vyhodí.

Tento článek jsem já, nevědec (maximálně tak ještě mohu být ten, no, popelizátor . vlastně populistizátor - chci říct popularizátor), koncipoval jako pokus o takové maličké nahlédnutí do astrofyzikální kuchyně vědců. Jako potenciální čtenáře jsem předpokládal především ty z laických čtenářů, kteří normálně až tak moc nehoví běžné hantýrce fyziků, ale také třeba i ty ze středoškolských učitelů, kteří by se rádi o této problematice něco málo dozvěděli, nebo na ni aspoň získali nové pohledy. A samozřejmě je tento článek určen také studentům středních či jiných škol, kteří mají chuť si něco takového přečíst. Mým cílem především bylo, abyste vy, čtenáři, získali nejen školometskou informaci typu - vesmír je takový a makový, a je v něm tolik a tolik temné hmoty, protože to říkají samotní vědci, dokonce ti ze všech nejvědeckější - ale abyste získali představu o tom, jak se tyto na první pohled naprosto nepochopitelné fyzikální obrazy reálně rodí, a že za tvorbou těchto obrazů není žádné šílenství extravagantních profesorů s bílými plášti a rozčuchanými vousy, kteří se snaží svými teoriemi pokud možno co nejvíce šokovat laickou veřejnost, ale že jde o velice dobře pochopitelný pokus o postupné odhalování zákonitostí, které se skrývají za tím, co je možné pozorovat třeba v těch okulárech teleskopů. Pokud jste získali dojem, že zdaleka nejde o nějakou, patřičně pomazanou autoritou diktovaný a přímočarý proces, ale že se ve skutečnosti jedná o cestu mnoha omylů, pochybování a převrácení myšlenek ze všech možných stran, než se najde těch několik zdaleka ne jistých, které pak letmo proběhnou v médiích, tak pak si myslím, že jsem tímto článkem docílil přesně toho, co jsem zamýšlel :-)))

Pro ty z vás, kteří jste živí dočetli až sem (což teda nepochopím) a stále vám ze slov "temná hmota" nenaskakuje na kůži vyrážka, ještě uvádím pár zajímavých odkazů a zdrojů, z nichž jsem čerpal.

internetové odkazy:

[Highway Of WIMPs Could Be Smoking Gun For Dark Matter](#)

[Chandra probes nature of dark matter](#)

[University Of Toronto Team Maps Halos Around Galaxies](#)

[Small Galaxy Springs "Dark Matter" Surprises](#)

New Evidence For Dark Dwarf Galaxies Supports Dark Matter Theory
Galaxy Cluster Surveys May Help Explain "Dark Energy" In The Universe
"Dark Energy" Dominates The Universe
New Clues About The Nature Of Dark Energy: Einstein May Have Been Right After All
Astrophysicists Detect Cosmic Shear, Evidence of Dark Matter
Researchers Suggest That "Dark-Matter Highway" May Be Streaming Through Earth
Milan Červenka: Temná hmota ve vesmíru
Petr Kulhánek: WMAP - co víme o vesmíru v roce 2003?
MOND versus temná hmota
Jsou hnědí trpaslíci skutečně hnědí?
Jaký tvar mají hvězdy?
Horká mezgalaktická mlha jako chybějící hmota

časopisy:

Scientific American, české vydání, leden 2004: Mordehai Milgrom: Temná hmota - opravdu existuje?
Československý časopis pro fyziku, 1/2004: Masatoši Košiba: Zrození neutrinové astrofyziky
Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 2/2001: Ivan Melo: Tmavá energia, zrychlenie a plochosť vesmíru
Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 3/2003: Vladimír Wagner: Je kosmologie mytologií? aneb úvaha experimentálního fyzika o kosmologických hypotézách a modelech

knihy:

Timothy Ferris: Zpráva o stavu vesmíru; Aurora, Praha 2000
Zdeněk Horský, Zdeněk Mikulášek, Zdeněk Pokorný: Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru, Svoboda, Praha 1988
David Bodanis: $E=mc^2$ Životopis nejslavnější rovnice světa, Dokořán, Praha 2002
Abyste neřekli, že jsem vám neukázal ani jeden obrázek, tak tady můžete vidět, jak vypadá náš hvězdný domov zvaný Mléčná dráha seshora. Naše sluníčko je na něm označeno žlutým kroužkem. Máte-li přátele zdaleka, určitě jim tento plánek pošlete, aby vás správně našli (nesmíte mít mezi nimi ale takové nevděčníky, jako mám já, ti totiž při našem posledním srazu na pivu tento plánek vůbec neocenili)

Mistr Brož nikdy nezapomene ukázat, že On nevyčnívá ze skupinky zneuznaných géniů (**), 07.04.2004