

Temná hmota ve vesmíru

zpracoval: Jiří Svršek ¹

podle článku Dark Matter Telescope LSTT

Abstract

Temná hmota je hypotetická nesvítlící substance, která se nachází mezi galaxiemi ve vesmíru a ovlivňuje jejich rotaci. Jedním z problémů současné kosmologie je rozhodnout mezi otevřeným a uzavřeným modelem vesmíru. Proto se studují rozsáhlé struktury ve vesmíru, jako jsou galaxie, hvězdokupy a kupy galaxií. Aby bylo možno mezi oběma modely rozhodnout, zjišťuje se, jaká je průměrná hustota hmoty ve vesmíru a zda je menší nebo větší než kritická hustota.

¹e-mail: natura@dkozak.cz, WWW: <http://natura.baf.cz>

References

- [1] Dark Matter Telescope LSST (Large-aperture Synoptic Survey Telescope).
<http://www.dmttelescope.org/index.htm>
- [2] Large-aperture Synoptic Survey Telescope Observatory.
<http://www.lsstto.org/index.htm>
- [3] Dark Matter in the Universe: MACHOS, WIMPS and Little White Dwarfs.
<http://astro.uchicago.edu/cara/ccc/talks2001/gates.pdf>

1 Velkorozměrná struktura vesmíru a temná hmota

Měřeními rudého posuvu galaktických superkup astronomové získávají představu o trojrozměrné struktuře vesmíru. Nová měření, která zasahují do větších vzdáleností než měření původní, využívají výhod optických vláken a rostoucí automatizace. Nová analýza současných katalogů rudých posuvů poskytuje určitý důkaz, že galaktické superkupy se ve vesmíru vyskytují zhruba pravidelně ve vzdálenostech asi 120 megaparseků (asi 390 miliónů světelných let, $3,688 \cdot 10^{21}$ km). Velké superkupy galaxií v této vzdálenosti byly objeveny již dříve, avšak jejich pravidelný výskyt je novým poznatkem. Vědci se domnívají, že nová teorie bude muset vysvětlit trojrozměrnou šachovnicovou strukturu vesmíru, která vyplývá z dosud zjištěných dat o rudém posuvu ze vzdálených oblastí vesmíru. (*J. Einasto et al., Nature 9 January 1997.*)

Mezi kupami a nadkupami se nacházejí obrovské oblasti (kaverny) prakticky bez galaxií. Dosud jich bylo nalezeno kolem třiceti. Největší kaverna je v souhvězdí Honáka (Boo, *Bootes*) a má průměr 250 miliónů světelných let. Toto souhvězdí lze pozorovat v Evropě na jarním a letním nebi mezi souhvězdím Herkula (Her, *Hercules*) a Panny (Vir, *Virgo*).

Vesmír vyplněný galaxiemi má určitou pěnivou strukturu. Galaxie a jejich kupy vytvářejí vyšší koncentraci hmoty na stěnách bublin pomyslné pěny. V polovině 80. let 20. století se podařilo nalézt vlákno kup a nadkup v souhvězdí Persea (Per, *Perseus*) a Pegasa (Peg, *Pegasus*) o úhrnné délce 1,3 miliardy světelných let. Takové struktury odrážejí počáteční nehomogenity vesmíru, protože jejich rozměr je takový, že nemohly vzniknout samovolně za celou dobu existence vesmíru.

V roce 1992 pracovníci výzkumného programu COBE (*Cosmic Microwave Background Explorer*) oznámili, že objevili důkazy struktury mikrovlnného kosmického pozadí. Počátkem roku 1998 bylo dokončeno mapování celé hvězdné oblohy na různých infračervených vlnových délkách od 1 do 240 mikronů. Od získaných dat byl odečten vliv sluneční soustavy a Mléčné dráhy (samotné pochopení vlivu těchto zdrojů záření trvalo několik let) a tím způsobem byla získána mapa kosmického infračerveného záření, která představuje kumulativní hodnoty infračerveného záření ve vesmíru. Toto záření tvoří zhruba jednu polovinu až dvě třetiny veškerého záření ve vesmíru, které k nám přichází ze všech existujících hvězd. Většina světla, které je detektory zachycována, byla během své cesty rozptýlena kosmickým prachem.

Kosmické infračervené pozadí se jeví jako isotropní, tedy nebyla pozorována žádná jeho struktura na rozdíl od kosmického mikrovlnného pozadí. Neobsahuje žádnou informaci o historii vesmíru v době, kdy toto záření vzniklo. Pozorování kosmického infračerveného pozadí však může pomoci při odhadování celkového množství hvězd, které ve vesmíru vznikly, a může potvrdit podezření, že většina vznikajících hvězd byla zakryta kosmickým prachem.

Silně nehomogenní rozložení hmoty ve velkorozměrné struktuře vesmíru bylo velkým překvapením. Dříve se soudilo, že ve velkých měřítcích je rozložení galaxií poměrně homogenní. Druhým velkým překvapením bylo zjištění existence hmoty, která se neprojevuje žádným elektromagnetickým zářením.

Astronomové existenci temné nezářící hmoty tuší již od konce 30. let 20. století, kdy **Fritz Zwicky** zjistil rozpor mezi hmotnostmi galaxií odvozenými z jejich svítivosti a hmotnostmi odvozenými dynamicky z gravitačních účinků. Dynamické hmotnosti jsou soustavně 10 krát až 100 krát vyšší.

Původně se astronomové domnívali, že převážná část hmoty je soustředěna ve vyduté části galaktického disku, která sahá jen 8000 světelných let od jádra. V tomto případě by však rychlost oběhu

hvězd kolem středu Galaxie klesala mnohem rychleji, než pozorujeme. Tak je tomu např. ve Sluneční soustavě, kdy prakticky veškerá hmota je soustředěna ve Slunci a oběžná rychlost planet klesá v závislosti na jejich vzdálenosti od Slunce. Pokud by se hmota v Galaxii vyskytovala rovnoměrně, pak by Galaxie rotovala jako pevné těleso a rychlost oběhu hvězd by rostla se vzdáleností od středu Galaxie. Tak je tomu ve vyduté části galaktického disku. Avšak rychlost oběhu pomalu roste také za oběžnou dráhou Slunce kolem středu Galaxie. Nejlepším vysvětlením je existence temné skryté hmoty v okrajových částech Galaxie.

Ještě hlubší rozpor mezi zářivou a dynamickou hmotností byl zjištěn u kup galaxií, které mají asi 50 krát větší hmotnost, než plyne z pozorované svítící hmoty.

Dlouhou dobu se astronomové snažili nesoulad mezi zářivou a dynamickou hmotností vysvětlit přítomností hnědých trpaslíků, bludných planet a černých děr. Úhrnná hmotnost těchto objektů však zdaleka nedosahuje ani hmotnosti zářících hvězd.

Celkové množství baryonní hmoty (nukleony, mesony, hyperony) ve vesmíru lze odhadnout studiem nukleosyntézy při velkém třesku. Studuje se poměr hélia a vodíku v dnešním vesmíru, aby se odhadlo, kolik bylo baryonní hmoty přítomno v horké fázi vesmíru, kdy vznikla většina jader atomů hélia. Když teplota vesmíru dostatečně poklesla pod hodnotu rozdílu hmotností neutronu a protonu, zastavila se přeměna neutronů v protony. Jakmile dostatečně poklesla hustota baryonní hmoty, začala vznikat jádra atomů hélia rekombinací protonů a neutronů. Měřením poměru hélia a vodíku dnes lze tedy odhadnout nezbytnou hustotu baryonní hmoty krátce po velkém třesku a tím naopak celkové množství baryonů dnes. Ukazuje se, že je třeba 0,05 M celkové baryonní hmoty, aby bylo možno vysvětlit dnes známý poměr lehkých isotopů. Proto pouze 1/20 celkové hmoty vesmíru je tvořena baryonní látkou.

Současné nejlepší odhady celkové svítící hmoty pozorované našimi teleskopy se pohybují pouze kolem 0,01 M. Na základě odhadu svítící hmoty lze průměrnou hustotu vesmíru stanovit na 10^{-32} g/cm³, což je více než o jeden řád menší hodnota, než je kritická hustota vesmíru $5 \cdot 10^{-30}$ g/cm³. Kde se tedy nachází zbývajících 99 procent hmoty vesmíru? Vysvětlením může být skrytá hmota.

Pozorujeme zhruba 0,01 M místo 0,05 M baryonní hmoty ve vesmíru. Zbytek může být baryonní skrytá hmota v galaktických halech. Pak ovšem musí existovat nebaryonní hmota, která vysvětlí zbývajících 95 procent hmoty vesmíru.

Problém skryté hmoty zůstává zatím otevřen. Existuje několik hypotéz, co je skrytá hmota, avšak žádná z nich není dostatečně potvrzena. Aby se vysvětlila veškerá hmota ve vesmíru, je potřebné najít nejméně jednoho baryonního a jednoho nebaryonního kandidáta. Zatím existuje několik nepotvrzených možností.

1. Normální hmota, která je skryta našemu pozorování

- a. neviditelné (rádiové) galaxie
- b. hmotné kompaktní objekty v galaktickém halu (*MACHO*, *MAssive Compact Halo Objects*)

Hmotné kompaktní objekty v galaktickém halu (*MACHO*) jsou:

- planety velikosti Jupiteru a planetární materiál
- hnědí (infračervení) trpaslíci
- černí trpaslíci, neutronové hvězdy

- hvězdy s nízkou hmotností a nízkou svítivostí
- černé díry
- bílí trpaslíci (pozůstatky hvězd přibližně hmotnosti Slunce)

Astronomická pozorování dokazují, že objekty MACHO představují jen malou část temné hmoty v galaxiích. Proto musí existovat ještě jiné typy temné hmoty.

2. Neutrino s nenulovou klidovou hmotností.

Pozorování oscilace slunečních neutrin je základem důkazu, že neutrino nemá nulovou hmotnost, jak se původně předpokládalo. Oscilace neutrin může existovat pouze tehdy, pokud neutrino mají nenulovou hmotnost. Pokud mají neutrino nenulovou klidovou hmotnost, pak by přítomnost neutrin objasnila skryté hmotu vesmíru. Na druhé straně nenulová klidová hmotnost neutrin přináší nové teoretické problémy, které však otevírají zcela novou oblast fyziky elementárních částic za hranicemi platnosti Standardního modelu.

3. Exotické částice.

Exotické částice s nenulovou klidovou hmotností by úspěšně mohla řešit problém skryté hmoty vesmíru. Pro naše účely lze takové exotické částice rozdělit do dvou skupin: na skupinu částic, které jsou předpovězeny z jiných teoretických důvodů, ale mohou současně řešit problém skryté hmoty, a na skupinu určenou pouze pro řešení problému skryté hmoty.

V první skupině mohou být částice jako axiony, další neutrino (mionová, tauonová a vyšší), supersymetrické částice a další. Jejich vlastnosti plynou z teorie, která je předpovídá, ale díky očekávání jejich nenulové klidové hmotnosti by mohly řešit problém skryté hmoty.

Ve druhé skupině jsou částice teoreticky předpovězené, jejichž vlastnosti dosud nejsou specifikovány, ale předpokládá se, že by mohly mít nenulovou klidovou hmotnost. Mezi takové částice patří např. WIMPS (*Weakly Interacting Massive Particles*) a další.

Studiem temné hmoty se mimo jiné zabývá dalekohled LSST (*Large-aperture Synoptic Survey Telescope*), který umožňuje její přímé mapování nezávisle na její luminositě (svítivosti). Podrobnější informace lze nalézt na [1] nebo [2], v části "Science". V části *Dark Matter* jsou informace o temné hmotě, v části *Dark Energy* o tzv. temné energii.

Dalekohled LSST kromě výzkumu temné hmoty také analyzuje výskyt *temné energie*. Vesmír je zřejmě ovládnán novou formou energie, která vytváří odpudivou sílu a způsobuje jeho rozpínání. Přímé měření poměru tlaku a hustoty energie této "temné energie" může odhalit nejtěsnější spojení mezi prostoročasem a hmotou. Klíčovou vlastností dalekohledu LSST je jeho schopnost snímkovat rozsáhlé objemy vesmíru. Tyto snímky lze provádět buď v režimu celkových snímků oblohy nebo v režimu snímkování oblasti o rozloze 1000 čtverečných stupňů. Tímto způsobem lze změřit tvar a barvu miliard vzdálených galaxií. Dostatečná data o barvě umožňují odhadnout vzdálenost každé galaxie a tím lze odhalit fyzickou podstatu temné energie, která vyplňuje náš vesmír.

Pokud temná energie způsobuje, že v posledních 5 až 8 miliardách let se kosmologické rozpínání vesmíru zrychluje, pak se vývoj hmotných struktur (jako jsou kupy galaxií a galaxie) vyvolaný gravitačním přitahováním musí zpomalovat. Ve vesmíru vyplněném temnou energií bychom měli pozorovat relativně vyšší hmotností koncentrace temné hmoty před 5 miliardami lety vzhledem k dnešku než ve vesmíru s velmi malou nebo žádnou temnou energií. Časový vývoj hmotnostních koncentrací je citlivý vůči fyzikální podstatě samotné temné energie, tedy vzhledem ke stavové rovnici

(tlak dělený hustotou energie). Zachycení růstu hmotné struktury ve vesmíru může poskytnout dostatečně přesná data, která ve spojení s fyzikálními principy mohou přispět k vysvětlení povahy temné energie.

Dalekohled LSST detekuje koncentrace hmoty a její rozložení pomocí slabých gravitačních čoček, kdy se dráha záření ze vzdálených zářivých objektů zakřivuje kolem shluků temné hmoty. Nedávno se podařilo nalézt shluk hmoty, změřit jeho hmotnost a určit jeho polohu v trojrozměrném prostoru pomocí gravitačních čoček statistickým zakřivením vzdálených galaxií na pozadí.

Výzkumníci kombinují data získaná mapováním slabých gravitačních čoček dalekohledem LSST, data o supernovách měření rudého posuvu dalekohledem LSST a měření kosmického mikrovlnného pozadí. Tato data by měla vést k určení přesné kosmologie našeho vesmíru. Důležitějším výsledkem je testování samotných základů teorií. Pozorování dalekohledem LSST a měření kosmického mikrovlnného pozadí by mohla klást silná omezení na stavovou rovnici rozložení hmotnosti-energie ve vesmíru a bude možno rozhodnout mezi různými teoriemi: teorií s konstantní hustotou energie vakua (temná energie), teorií s proměnnou hustotou energie (kvintesence) a teorií s topologickými defekty různého druhu.

2 Slabě interagující hmotné částice

Dosavadní pozorování vesmíru ukazují následující výsledky.

- Zářící hmota ve hvězdách a v mezihvězdném plynu v galaxiích tvoří méně než 1 % veškeré hmoty vesmíru.
- Běžná baryonní hmota tvoří asi 5 % veškeré hmoty vesmíru.
- Hmota v neutrínech tvoří asi 0,4 % veškeré hmoty vesmíru.
- Celková pozorovaná a detekovaná hmota tvoří tedy 35 % veškeré hmoty vesmíru.

Chybějící hmotu by mohla tvořit chladná temná hmota, jako jsou axiony a slabě interagující hmotné částice WIMPS (*Weakly Interacting Massive Particles*).

Axiony jsou odrazem velmi elegantního řešení silného CP-problému (problému narušení kombinace nábojové symetrie a parity) v teorii kvarků (tj. v kvantové chromodynamice). Axiony by měly být částice s velmi malou hmotností asi 10^{-5} eV $\sim (10^{-10} m_e)$.

Supersymetrické teorie tvrdí, že každá částice má svého supersymetrického partnera. Například superpartnerem fotonu by mělo být fotino a supersymetrickým partnerem neutrína by mělo být neutralino s hmotností 20 GeV – 1 TeV.

Rozšířený Standardní model elementárních částic by měl obsahovat supersymetrické částice, jako jsou skvarky (partneři kvarků), sleptony (partneři leptonů), neutralina (partneři neutrin) a další.

Slabě interagující hmotné částice WIMS se hledají v urychlovačích při srážkách částic s velmi vysokou energií, přímou detekcí pomocí kryogenních detektorů (při velmi nízkých teplotách), které měří energie srážek částic WIMS s jádry atomů, a nepřímou detekcí sledováním produktů anihilace v kosmickém γ záření a neutrin s vysokými energiemi.

Axiony se hledají v laditelných mikrovlnných dutinách vystavených silným magnetickým polím.

Jak již bylo uvedeno, baryonní hmota představuje 5 % veškeré hmoty vesmíru a částice WIMPS představují asi 30 % veškeré hmoty vesmíru. Zbývající hmotu vesmíru by měla tvořit temná energie.