

Co se skrývá za temnou hmotou a temnou energií?

"Základní princip: Zkoumáte-li neznámou oblast, logicky nemůžete vědět, co v ní naleznete"

Arthur Bloch: Murphyho zákon

„Příčina je skryta, výsledek je všeobecně znám“

Ovidius

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AVČR, Řež,

FJFI ČVUT, Praha

E_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ

1. Úvod

2. Jaké jsou evidence temné hmoty?

2.1 Pohyb hvězd v Galaxii

2.2 Rentgenovské záření horkého

2.3 Čočkování – rozložení hmoty

2.4 Velkoškálová struktura

3. Co je temná hmota??

3.1 Srážka kup galaxií

3.2 Evoluce vesmíru i jeho částí

3.3 Baryonový původ temné hmoty?

3.4 Nebaryonový původ?

Pozorování srážky kup galaxií v
rentgenovém a viditelném oboru

4. Temná energie – její evidence a podstata

4.1 Průběh rozpínání vesmíru - supernov Ia typu

4.2 Zpřesňování měření průběhu rozpínání

4.3 Je kosmologická konstanta konstantou?

5. Závěr



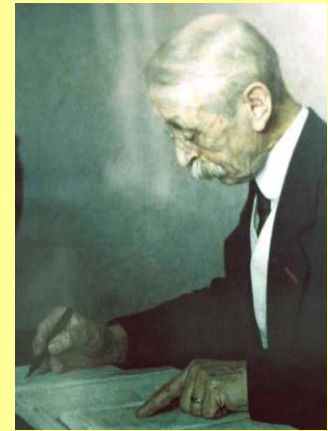
Úvod - historie

Temná (skrytá) hmota – velká část hmoty v podobě neviditelné

Počátek a hlavně třicátá léta minulého století - měření pohybu hvězd v Galaxii (**J. Kapteyn, Sir J. Jeans, J. Oort**) a galaxií v kupách (**F. Zwicky**)
→ **gravitace větší než způsobená viditelnou hmotou.**

Měření rotace řady galaxií → **potvrzování vlivu temné hmoty**

Počítačové simulace (druhá půle 20. století) → **nestabilita galaxií bez započtení sférického halo z temné hmoty**



Jacobus Kapteyn



Fritz Zwicky



Jan Van Oort

Kupa galaxií ve Vlasech Bereniky

Současný kosmologický Λ CMD model

Standardní kosmologický model založen na platnosti Standardního modelu hmoty a interakcí a obecná teorie relativity

V experimentálních datech vidíme rozdíly, které potřebují novou fyziku

Co je temná hmota a temná energie?

Fenomény, které popisují zmíněné odchylky od popisu vývoje vesmíru čistě Standardním modelem hmoty a interakcí a OTR. Možné vysvětlení:

- 1) Temná hmota – exotické částice, Temná energie – vlastnosti vakua
- 2) Vliv neznalosti popisu gravitace na velké vzdálenosti



Sestava VLT – Very Large Telescope

Pohyb objektů v gravitačním poli

Nesrovnalost mezi odhadem množství hmoty ve vesmíru na základě studia svítící hmoty a studia gravitačního vlivu hmoty (veškeré) → temná hmota – nevyzařuje ani neabsorbuje světlo, interaguje pouze gravitačně

Možnost zkoumání: 1) Studium oběžných pohybů hvězd → haló v galaxiích
galaxií → haló v galaktických kupách
kup galaxií → velkorozměrová hustota hmoty

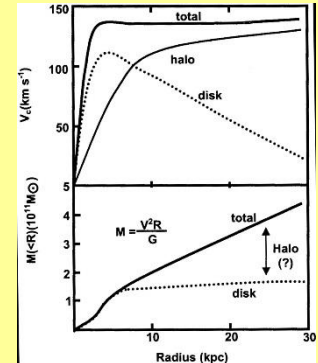
(vnější se pohybují rychleji než odpovídá pozorované hmotě)

Zjednodušený příklad - koule z konstantní hustotou:

$v^2 = G_N M(R)/R$ kde $M(R)$ je hmotnost uzavřená v kouli o poloměru R

Pro konstantní hustotu $\rho(R) = \rho$ pak máme $v^2 = (4/3)\pi \rho G_N R^2$

Vně pak máme $v^2 = G_N M/R$ kde M je celková hmotnost



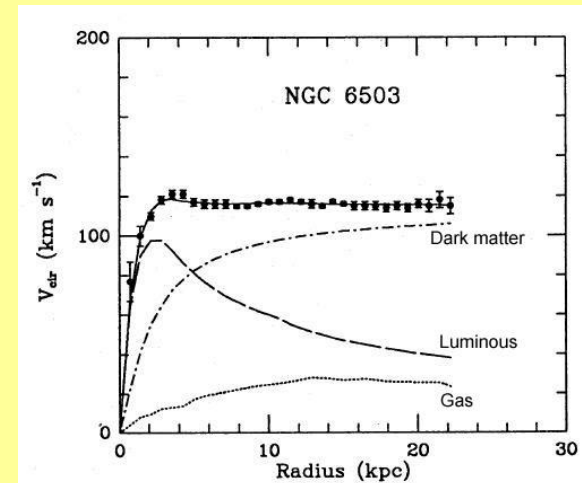
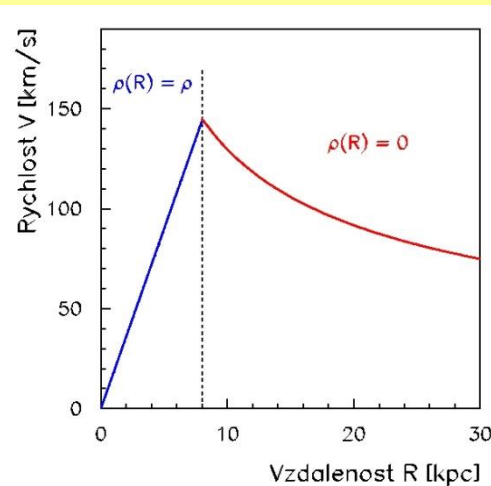
Řada rotačních křivek galaxií

→ nejméně 70 % temná hmota

Trpasličí galaxie - největší podíl temné hmoty - až přes 90 %

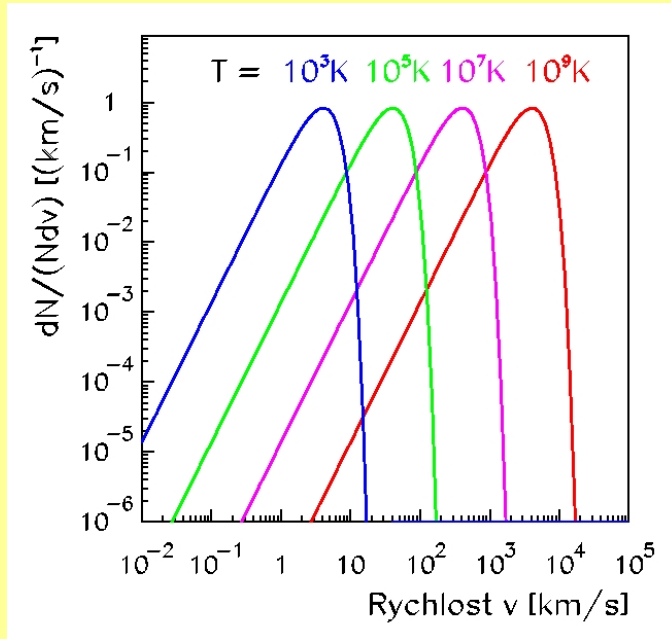
Bez temné hmoty by byly galaxie i systémy galaxií nestabilní

Zjednodušený případ (vlevo) Pozorování galaxie NGC3198 podle práce Begemana z roku 1989 (vpravo)



Rentgenové záření horkého plynu

v galaktickém halo – teplota dána rychlostí atomů – menší než úniková rychlost – rychlost je větší než by odpovídalo pozorované hmotě



Rozdělení rychlostí atomů vodíku pro různé teploty plynu

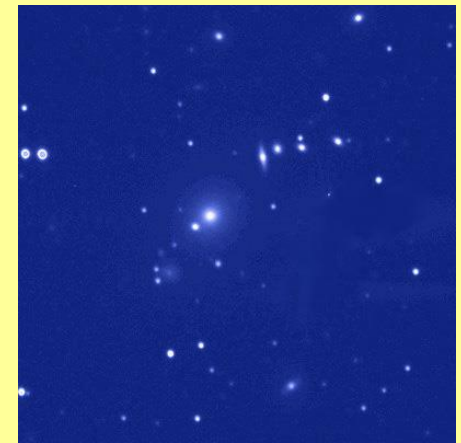
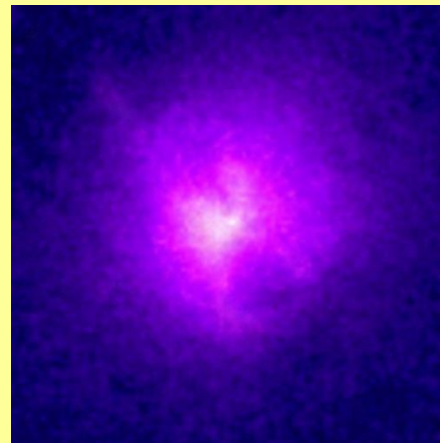
Vysoká teplota → vysoká rychlost vodíkových atomů → k udržení plynu v galaxiích (kupě galaxií) třeba více hmotnosti než je ta svítící → existuje temná hmota

Vysoká teplota plynu → vysoká kinetická energie a rychlost atomů.

Vztah mezi střední kinetickou energií jedné částice a teplotou plynu:

$$\bar{E}_K = \frac{1}{2} m \bar{v}_K^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow \bar{v}_K = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Úniková rychlost z galaxie 600 km/s



Rentgenovský a optický snímek kupy galaxií Cygnus A

Gravitační čočky

– určení hmotnosti a jejího rozložení pro kupu tvořící gravitační čočku

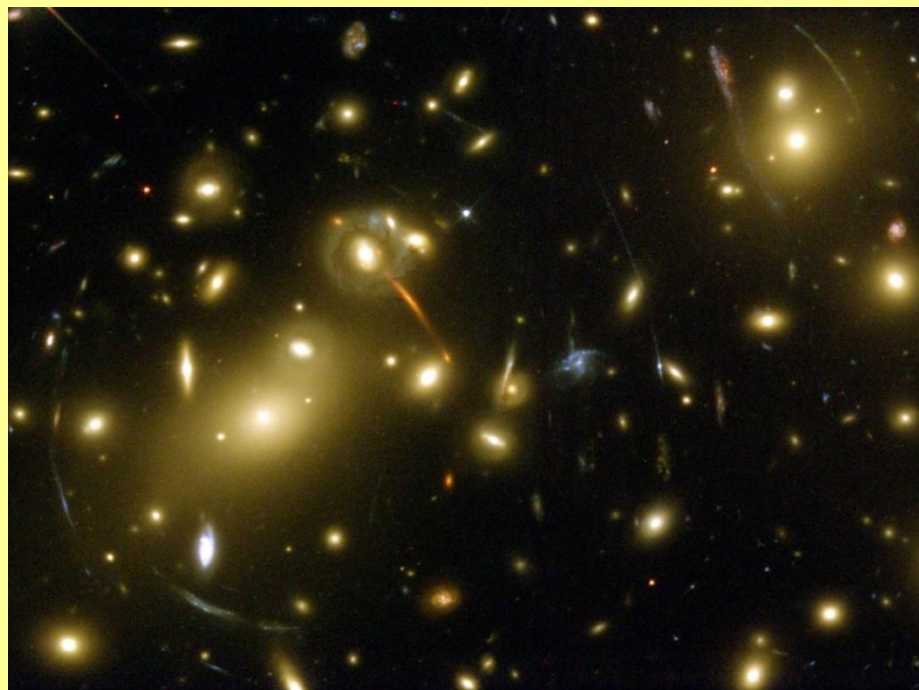
Gravitační vliv celé (i temné) hmoty galaxie nebo kupy galaxií → ovlivnění dráhy světla vzdálené galaxie za ní → gravitační čočka

Možnost určení rozložení a množství celkové hmotnosti → srovnání s rozložením svítící hmoty
→ určení podílu temné hmoty

Čím větší škála – tím větší podíl temné (skryté) hmoty V kupách galaxií nejméně 90% skrytá hmota



Gravitační vliv kupy galaxií CL 0024-1654 vytváří několikérý obraz vzdálené galaxie (modré podlouhlé útvary).



Podobný efekt gravitační čočky vytváří i kupa galaxií Abell 2218 (snímky Hubbleova teleskopu). Počet obrazů a jejich podoba závisí na rozložení hmotnosti v kupě galaxií

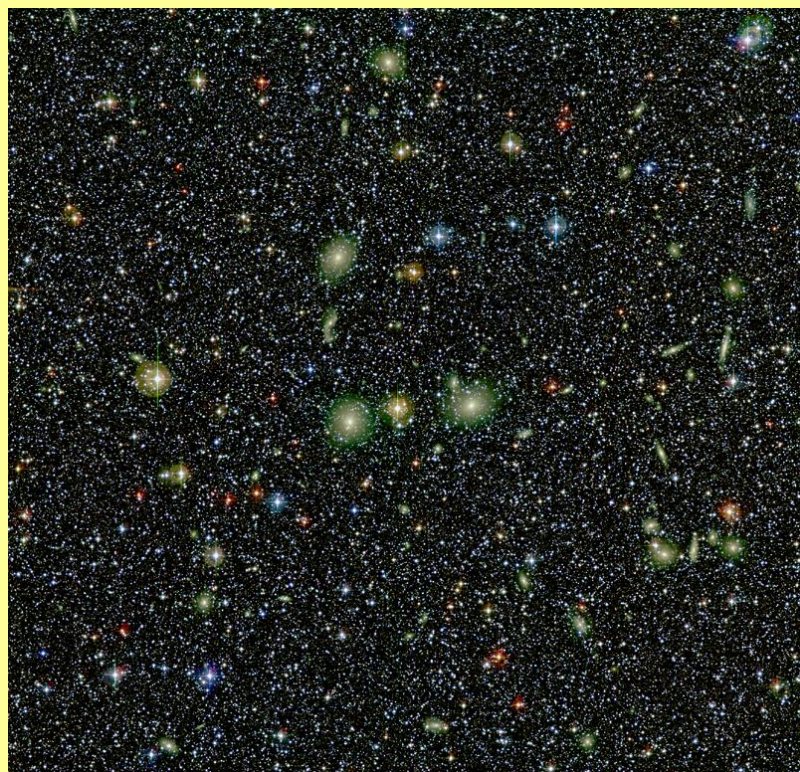
Velkoškálová struktura vesmíru a její pohyb

Pohyb místní skupiny galaxií ve směru **velké difuzní koncentrace hmoty** (galaxií) nazývané **Velký atraktor** (vzdálenost 250 mil. sv.l)

Rychlost pohybu Místní skupiny galaxií - ~ 600 km/s



Hmotnost Velkého atraktoru:
 $\sim 10^{16} M_{\odot}$ (jen desetina viditelná)



Kupa galaxií ACO 3627 ležící blízko středu Velkého Atraktoru - pole obsahuje tisíce galaxií - snímek 2.2 m dalekohledu v La Silla

Další rozsáhlé koncentrace hmoty - "lívancová", "buněčná" velkorozměrová struktura → její **gravitační vliv** naznačuje **značný podíl temné hmoty**

Velmi vzdálené galaxie
→ vzniklé krátce po
Velkém třesku →
zkoumání změn v
evoluci a struktuře
galaxií v čase



Velmi vzdálené galaxie na snímku Hubbleova teleskopu

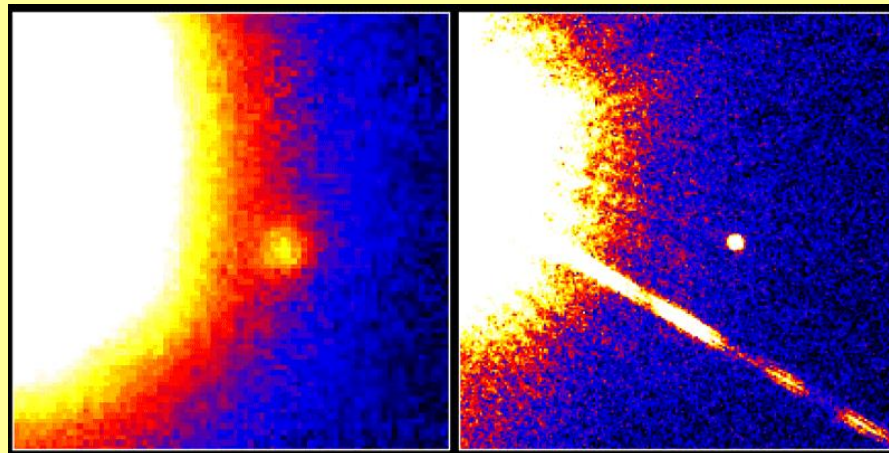
Baryonová hmota

Možný původ temné nesvítivé „hmoty“:

- 1) oblaka plynu – nesvítivá – pohlcují –
dobrá představa o rozložení**
- 2) černé díry – dobré odhady jejich počtu**
- 3) planety, hnědí trpaslíci – stále lepší
statistické pokrytí – současný lov exoplanet**



**MACHO
objekty**



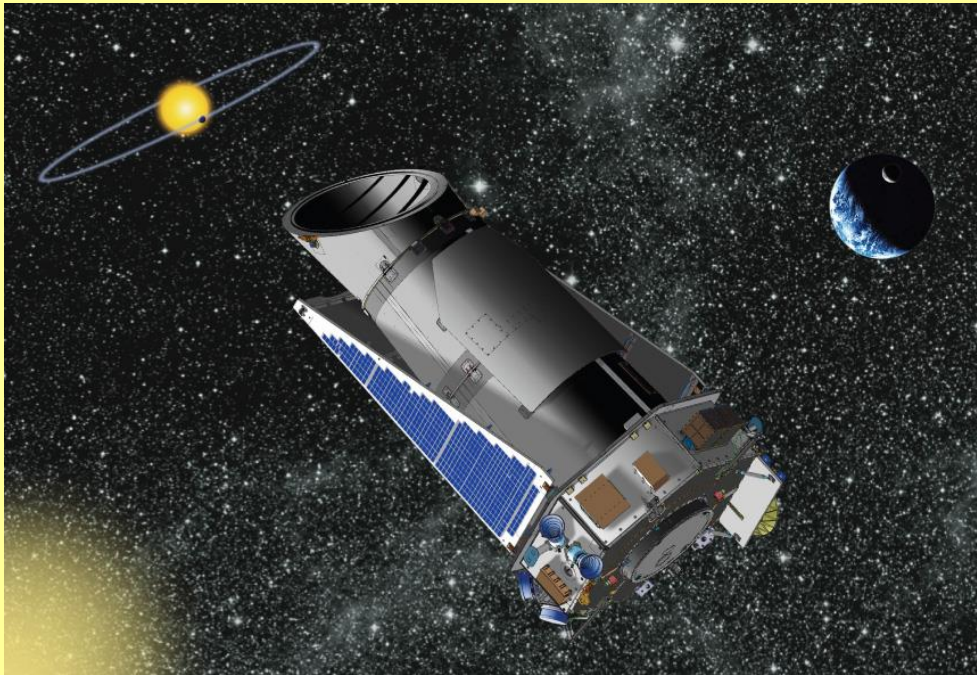
**Hnědý trpaslík Gliese 229B, objevitelský snímek
z Mt. Palomaru a snímek z Hubbleova teleskopu**

Jak testovat přítomnost popsaných objektů?

Mikročočkování – pozorování zjasnění hvězdy nebo jiného objektu, pokud před ním projde hmotný objekt (černá díra, neutronová hvězda, slabě svítící hvězda, planeta či jiný objekt)
První v roce 1989 – od té doby rychle roste statistika

Nutná statistická analýza častosti těchto jevů a určení rozložení různých typů objektů

Velká řada projektů, které se na tuto oblast zaměřovaly a zaměřují (MOA projekt, OGLE, MACHO, EROS2 – pozorovány stovky kandidátů, vyloučen větší podíl na halo v galaxii objektů od zlomků hmotnosti měsíce po hmotnost stovek Sluncí



Velice dobře se dají využít i vesmírné dalekohledy (Kepler)

Teleskop se zrcadlem 1,8 m
využívaným projektem MOA)

Nebaryonová hmota

slabě interagující elementární částice, dělí se podle rychlostí, které měly asi rok po velkém třesku:

a) horká – relativistické částice (např. neutrina)

b) chladná – těžké (pomale) částice – nejlehčí supersymetrické částice (neutralino?, ...)

hledání správné supersymetrické teorie a příslušné supersy-metrické částice

Poměrem mezi jednotlivými komponentami a jejich konkrétními vlastnostmi jsou ovlivněny:

1) Fluktuace reliktního záření

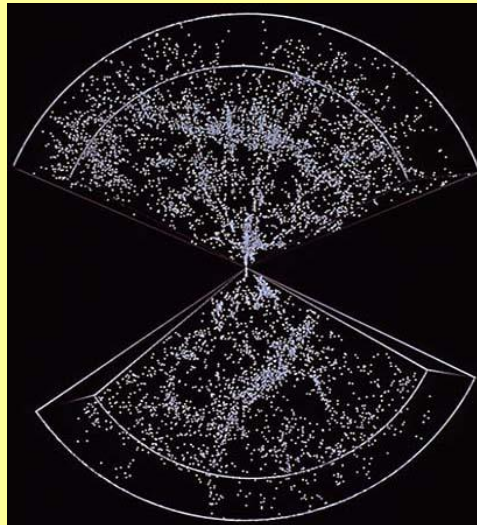
2) Velkoškálová struktura vesmíru

3) Premordiální nukleosyntéza – omezení na hustotu baryonové komponenty

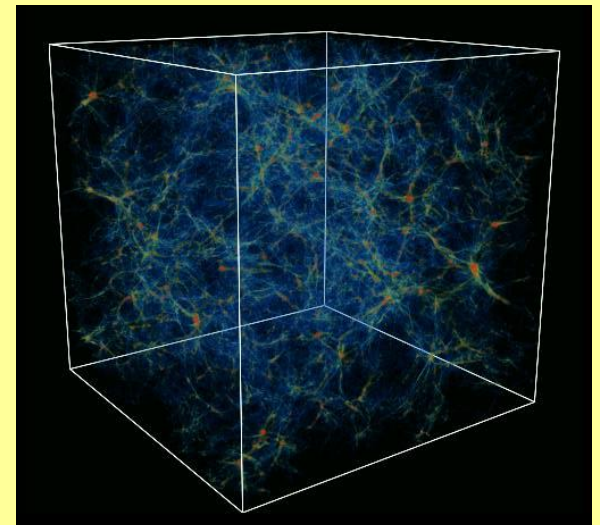
4) Průběh formování galaxií a jejich struktura

Simulace pro různé varianty částic a jejich kombinace se srovnávají s pozorovanou velkorozměrovou strukturou

Vlevo – pozorované velkorozměrové rozložení hmoty ve vesmíru, jejíž studium zahájili M. Gellerová a J. Huchra



Vpravo – simulace rozložení hmoty v kombinovaném modelu vesmíru složeného z horké a chladné temné hmoty provedená G.J. Bryanem a M.L. Normanem z University ve státě Illinois



Konečný důkaz existence temné hmoty?

Temná hmota nebo modifikace gravitační teorie?

Kupa galaxií:

1. temná hmota (pokud existuje) nejvíce
2. mezigalaktický plyn (několikanásobně méně než temné hmoty)
3. galaxie (několikanásobně méně než plynu)

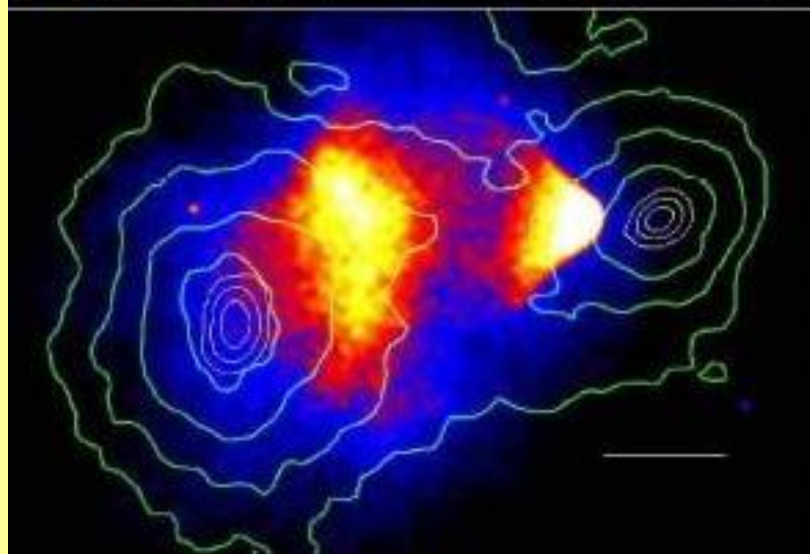
Srážka dvou kup galaxií:

1. Plyn zpomalen a zahřát třením (elmg. síla)
2. Galaxie jsou kompaktní (aerodynamické) – tření není
3. Temná hmota – pouze gravitace

Nahoře je zobrazení galaktické dvojčky 1E0657-558 **ve viditelné oblasti spektra**. Jsou vidět dvě koncentrace svítících bodů – větší nalevo a menší napravo. Modrými křížky jsou vyznačena místa maximální koncentrace dvou plynných oblaků spojených s kupami, které jsou pak dobře vidět na snímku v **rentgenové oblasti dole**.

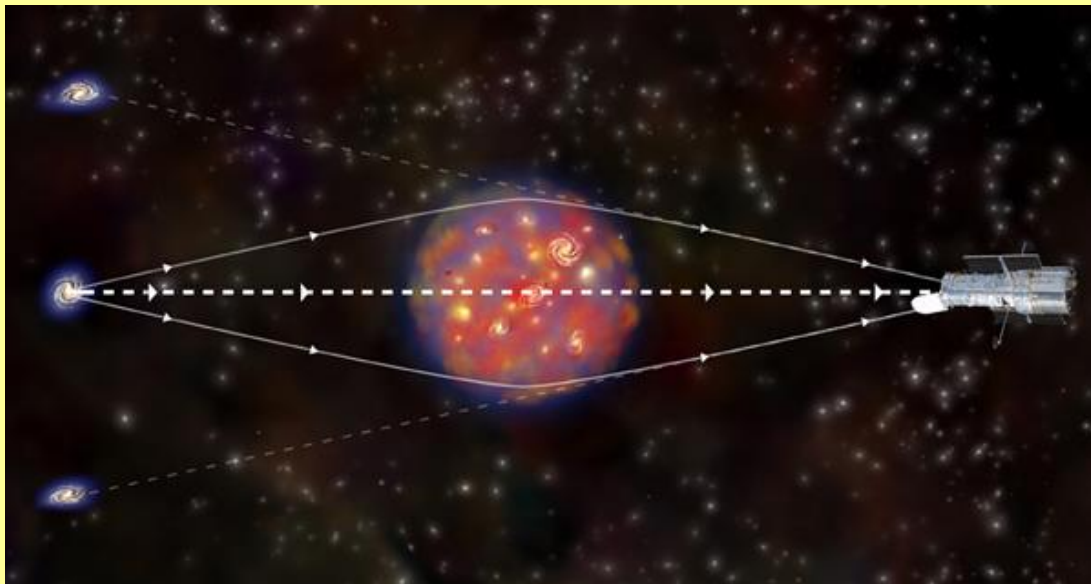
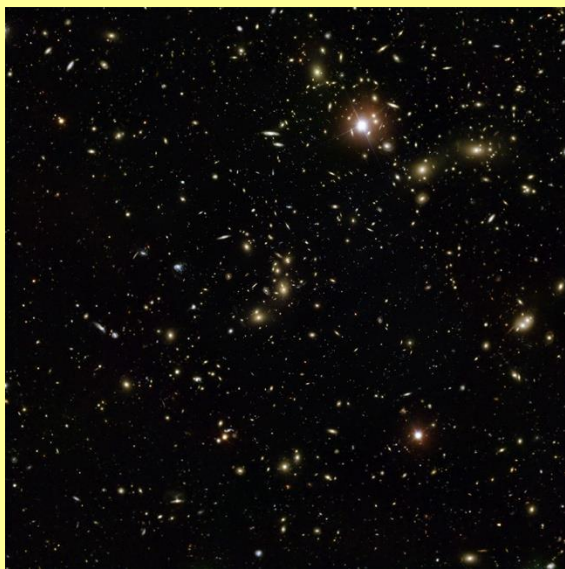
Na obou obrázcích je pak vyznačen zelenými čarami průběh intenzity gravitace. Bílá úsečka na obrázcích vpravo dole vyznačuje měřítko vzdáleností v kupě (reprezentuje 200 kpc = 652 000 světelných let)

Viditelné spektrum



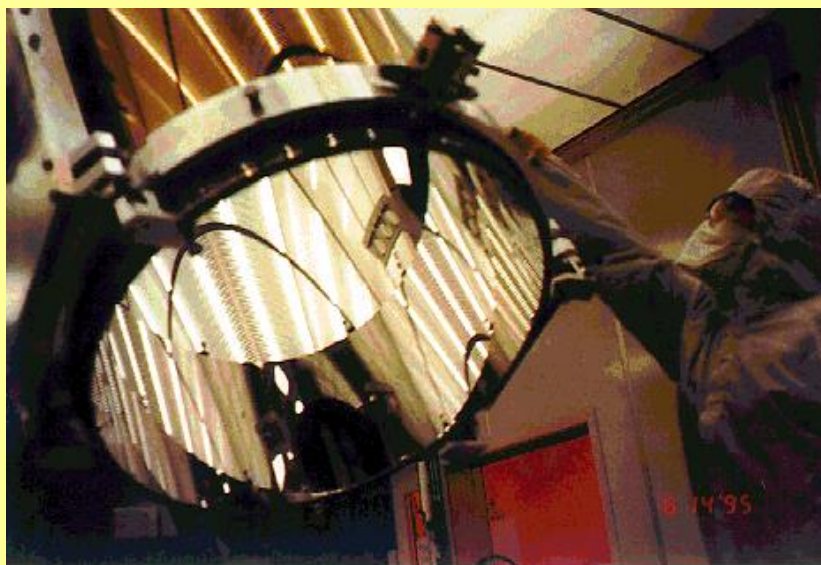
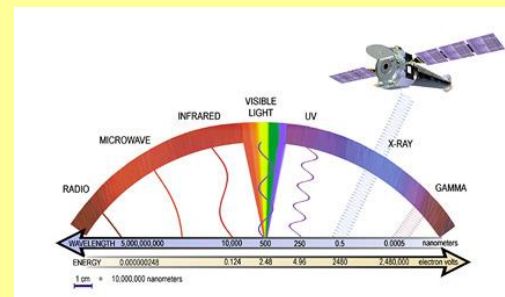
Rentgenovské spektrum

Optický obor – viditelná hmota a gravitace pomocí čočkování

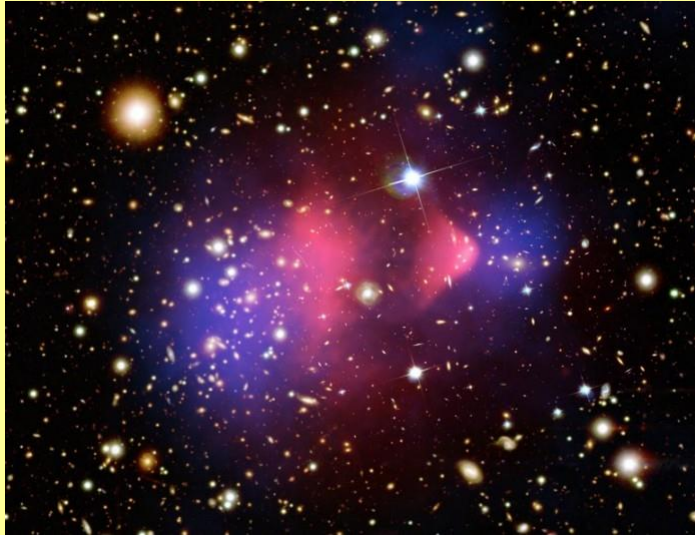


Rentgenovské zobrazení horkého plynu

Pomocí rentgenových dalekohledů se speciálním zrcadlem se pozoruje plyn extrémně ohřátý při srážce kup galaxií



Další potvrzení



Předchozí – nyní název kupy Kulka

Hmotnost 10^{15} sluncí

Ohřev plynu na 100 milionů stupňů

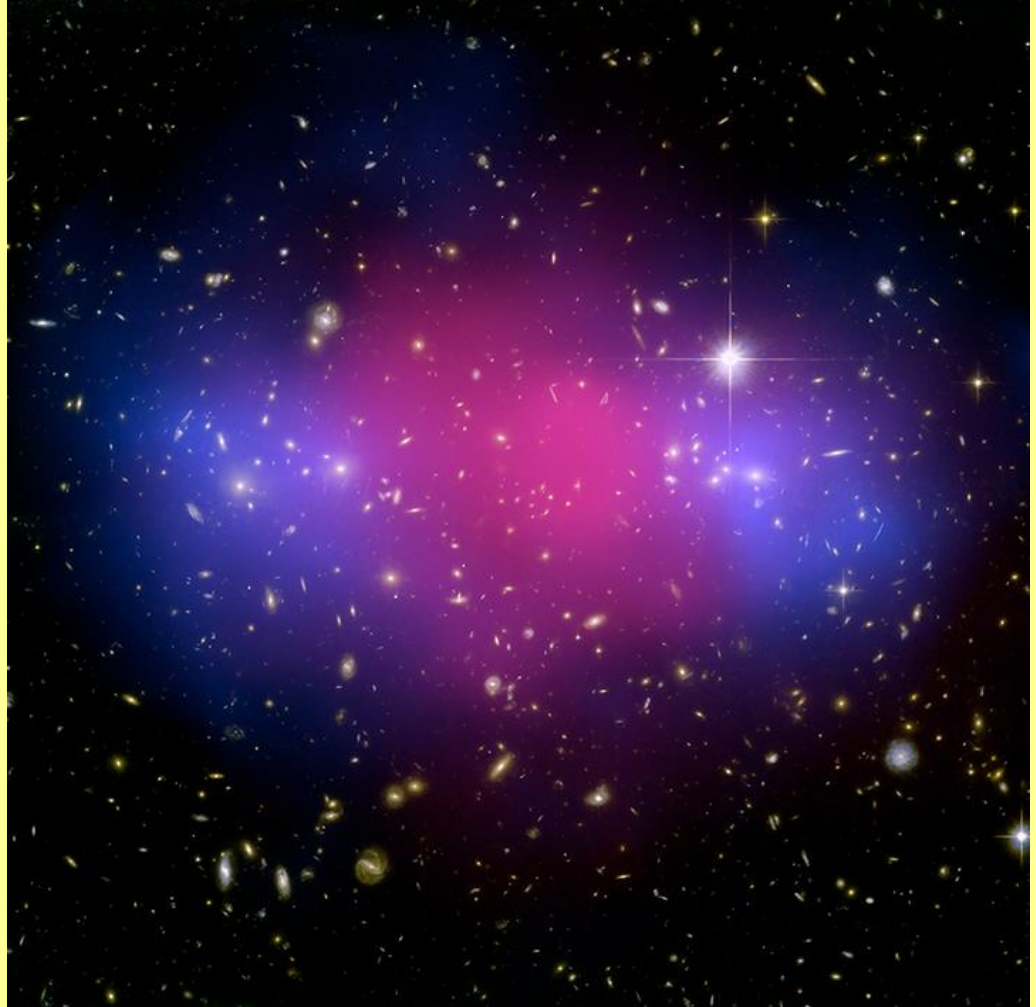
Modrá – hmotnost určená z čočkování

Fialová – horký plyn – CHANDRA

MACSJ0025.4-1222

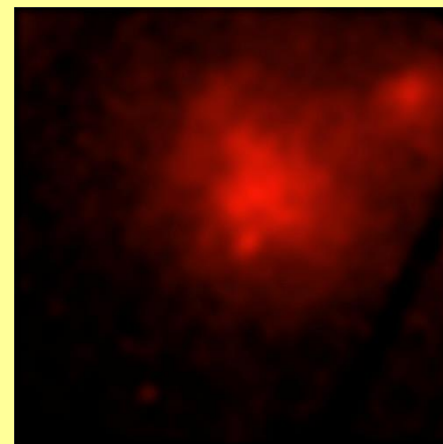
[video](#)

Vzdálenost 5,7 miliard sv.l.



Kupa galaxií Credit: X ray (NASA/CXC/Stanford/S.Allen);
Optical/Lensing(NASA/STScI/UC Santa Barbara/M.Bradac)

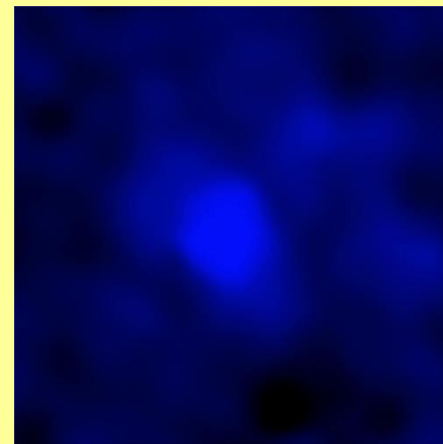
Komplikovanější srážka čtyř malých kup – Abell 2744



Rengen - plyn



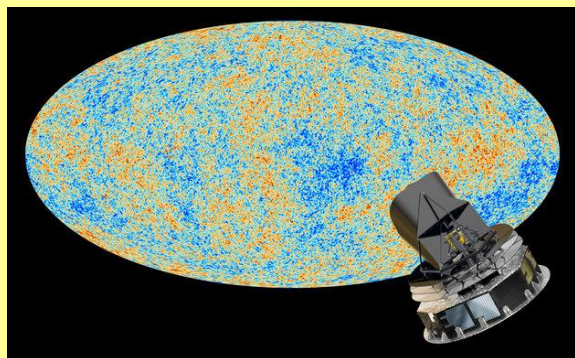
Viditelná hmota



Čočkování - gravitace

Ovlivnění počátku vývoje vesmíru

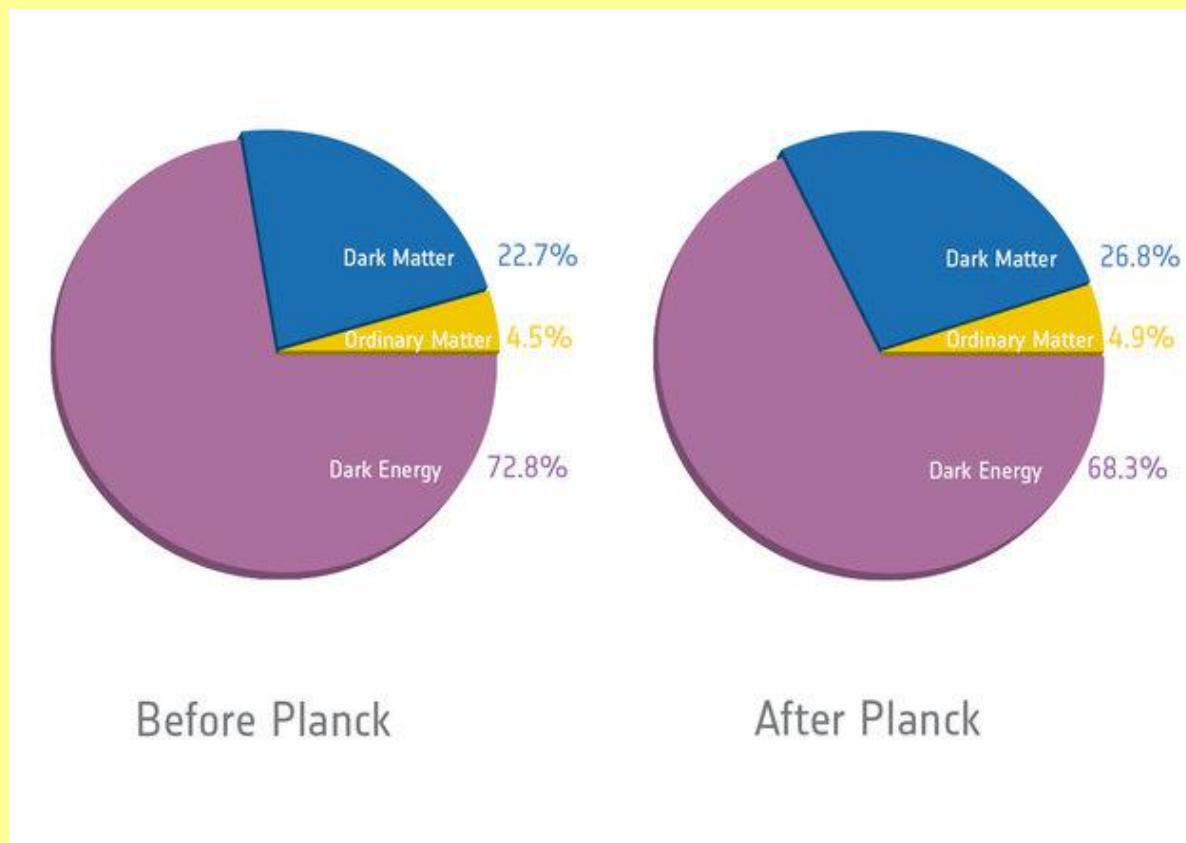
Reliktní záření



Hmota je pak tvořena:

Klasická hmota 4,9 %

Temná hmota 26,8 %

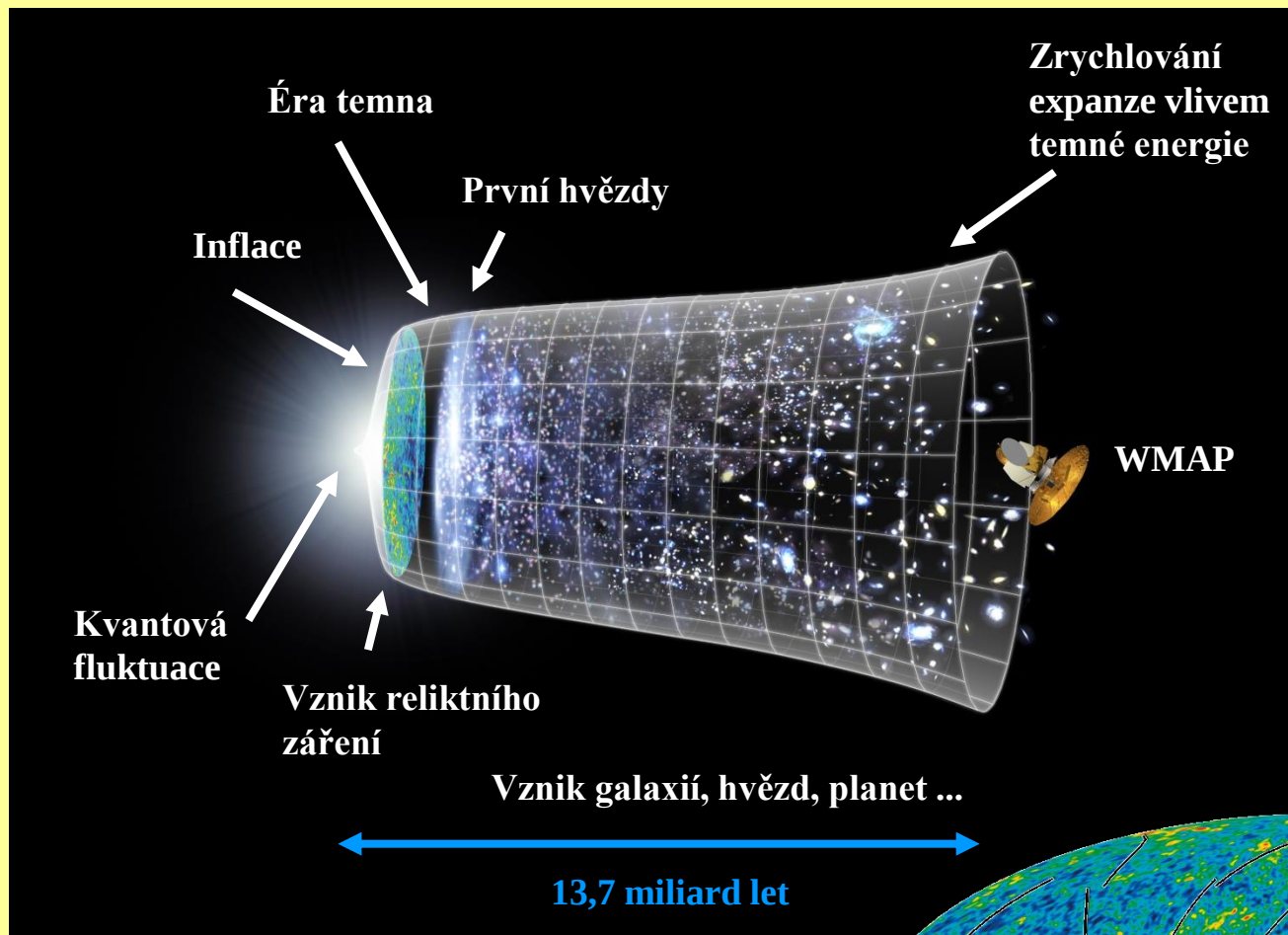


Z inflačních modelů vychází plochý vesmír - hustota hmoty

$\rho = \rho_{\text{krit}}$ a tedy poměr: $\Omega = \rho/\rho_{\text{krit}} = 1$

„Hmotou“ – vše s klidovou hmotností $m_0 > 0$ ($35 \pm 10\%$)

Energií – částice apriori relativistické $m_0 = 0$ (fotony, gravitony, ta neutrina s $m_0 = 0$, energie vakua) ($80 \pm 20\%$)



Následky čeho studovala sonda WMAP a studuje sonda Planck prostřednictvím reliktního záření studuje

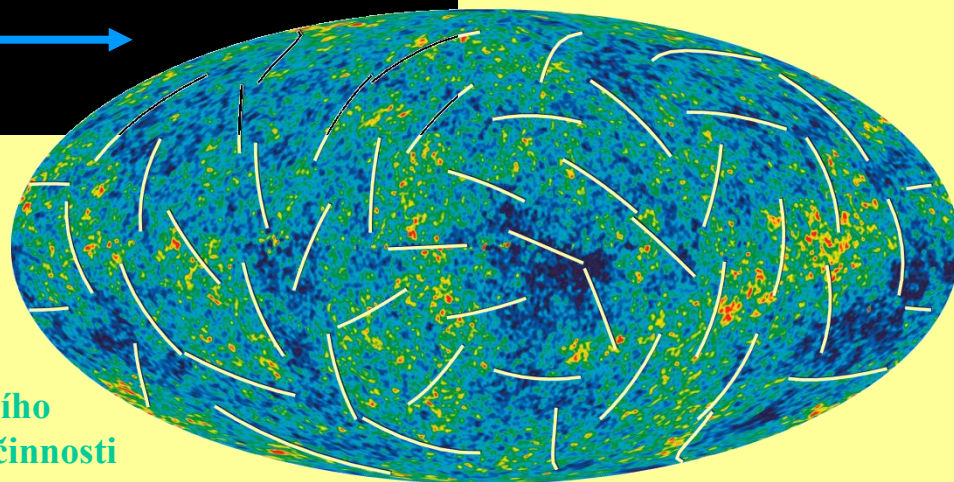


Výsledky sondy Planck

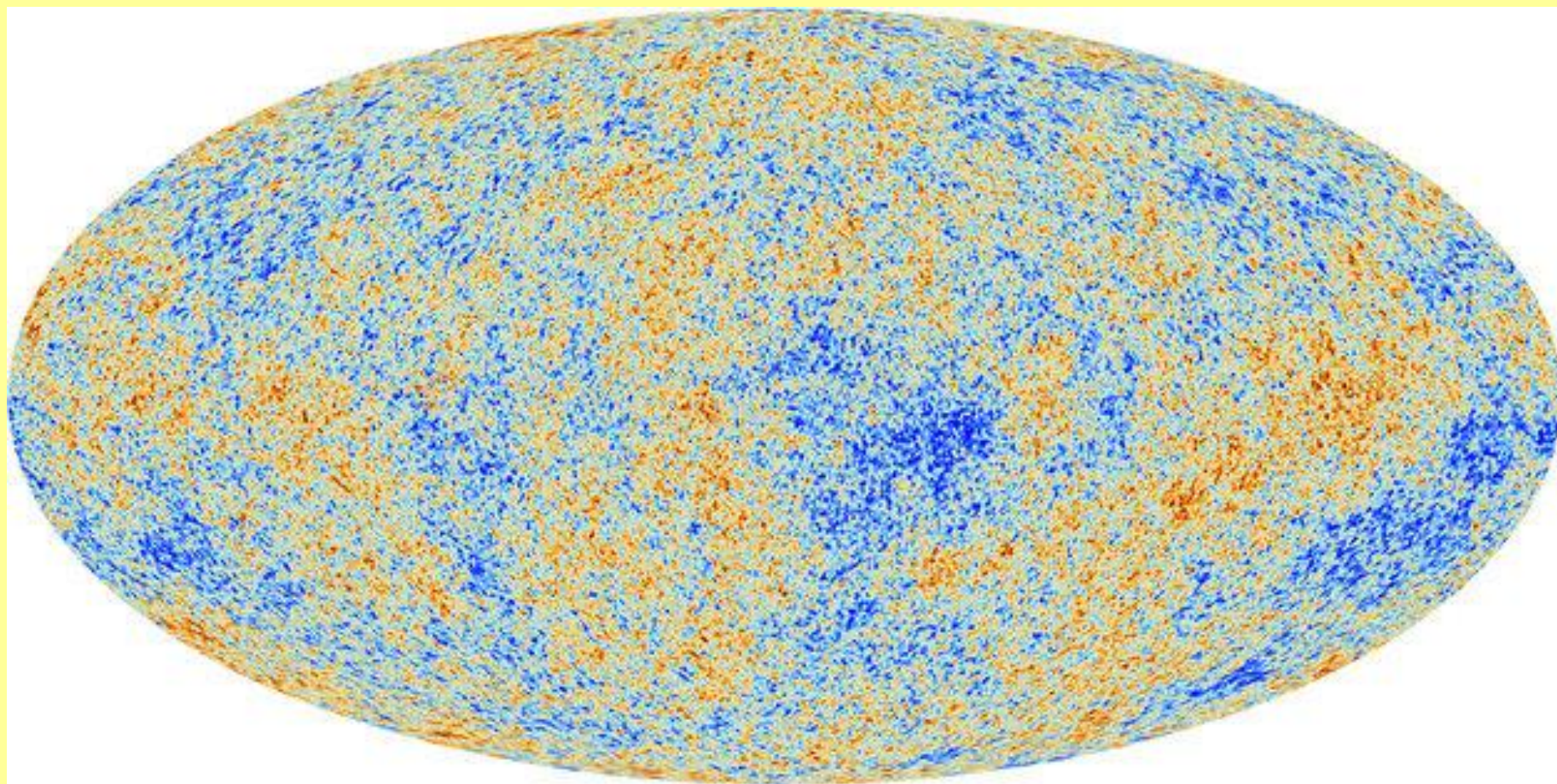


Sonda Planck

Výsledná mapa reliktního záření po třech letech činnosti sondy WMAP



Výsledná mapa reliktního mikrovlnného pozadí ze sondy Planck



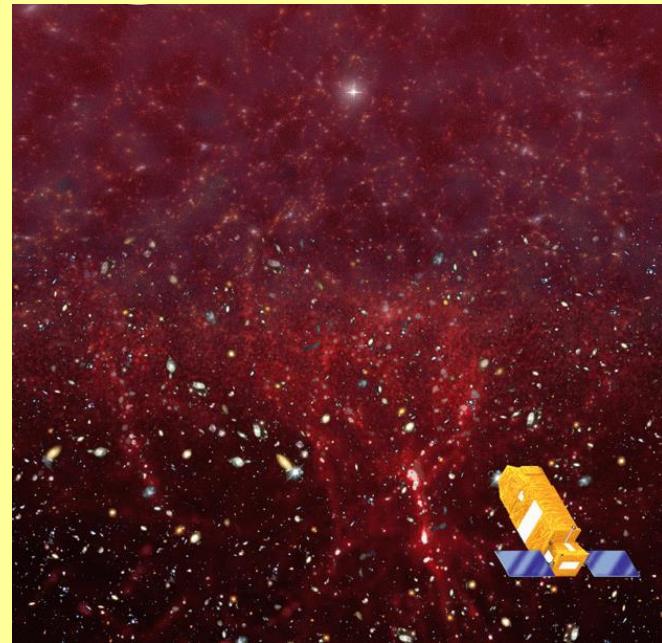
Průběh primordiální nukleosyntézy

Množství primordiálního ^4He (~25%), D, ^3H a ^3He (malé příměsi) jsou dány podílem baryonové hmoty (svítící i temné) na celkové hustotě hmoty:

Menší podíl baryonové hmoty = méně ^4He , D, ^3H a ^3He

Experimentální zastoupení ^4He a D vymezuje množství baryonové hmoty: $\Omega_b = 0,05 \pm 0,01$

Ovlivněno i existencí nebaryonových forem temné hmoty - možnost přehřátí, fluktuace z fázového přechodu od kvark-gluonového plazmatu k normální hmotě



Satelit FUSE slouží pro detekci absorpčních (neutrálního) a emisních čar (ionizovaného) H, D a He v daleké ultrafialové oblasti. (Foto NASA)

Formování galaxií a kup galaxií

Experiment (data o pozorovatelných vlastnostech a procesech):

- 1) Rozložení různých typů hmoty v galaxiích (jádro, disk, halo)
- 2) Úhlový moment galaxií
- 3) Evoluce galaxií, vlastnosti protogalaxií
- 4) Procesy při srážkách a slučování galaxií

Modelové simulace (popis těchto dat pro různé předpoklady):

- 1) Vliv různých typů temné hmoty na rychlost procesu formování galaxií
- 2) Vliv rozložení temné hmoty na stabilitu a trvání existence galaxie a rozložení její viditelné hmoty v jádru, disku a halo

Srovnávání naměřených vlastností galaxií a modelů vypočtených s různými kosmologickými parametry (mixem temné hmoty):

Formování stabilních galaxií požaduje větší množství nebaryonové chladné temné hmoty než horké. Bez jistého množství horké hmoty se však neobejde.



Různé typy galaxií:

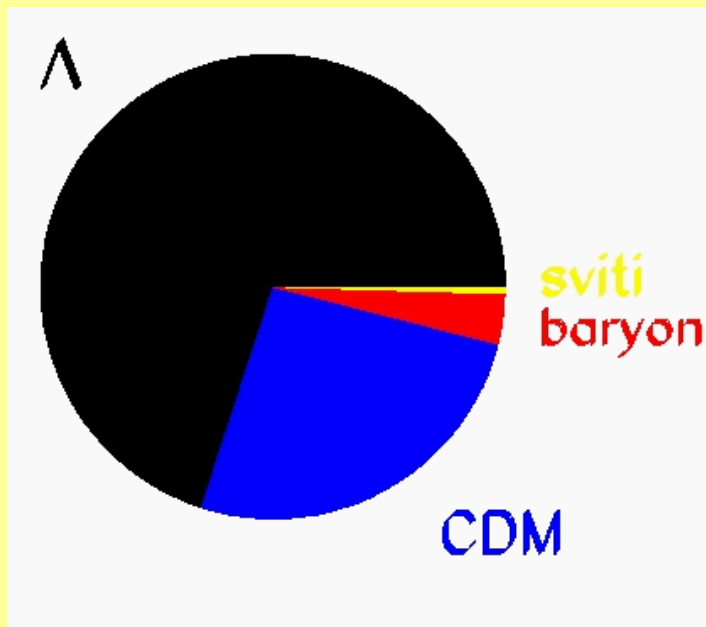
spirální (M100), spirální s příčkou (NGC1365), eliptická (M87), nepravidelná (Velký Magelanův oblak)

Co tedy temná hmota je?

Částice extrémně slabě interagující s normální hmotou – projevy hlavně gravitační

Horká temná hmota – částice s velmi malými hmotnostmi (mají relativistické rychlosti)
například neutrina, axiony ...

Chladná temná hmota – částice s většími až velmi vysokými hmotnostmi (nerelativistické rychlosti)
supersymetrické částice ...



Nejspíše více druhů (nutnost horké i chladné temné hmoty)

Co neutrina? – malá hmotnost – horká hmota

1,95 K, 2 eV střední kvadratická rychlost 5000 km/s

úniková rychlost z galaxie 600 km/s
z kupy 6000 km/s

Z kosmologických modelů limit na hmotnost neutrina
Nyní už okolo 0,05 eV, KATRIN – limita 0,5 eV

Hledání částic temné hmoty ve vesmíru

Pokud nejsou úplně stabilní → detekce sekundárních částic z rozpadu částic temné hmoty

Další možností je anihilace částic temné hmoty

- 1) hledání antičástic – pozitronů
antiprotonu
- 2) gama
- 3) neutrin

Kosmické sondy

Balóny

Pozemní observatoře

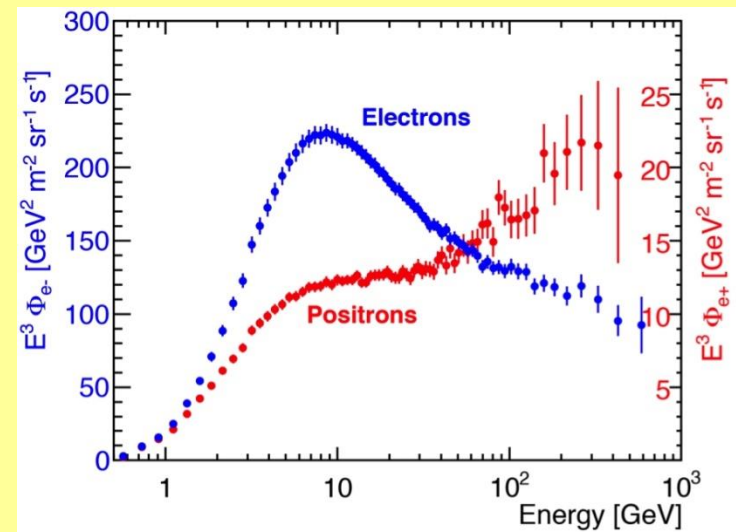
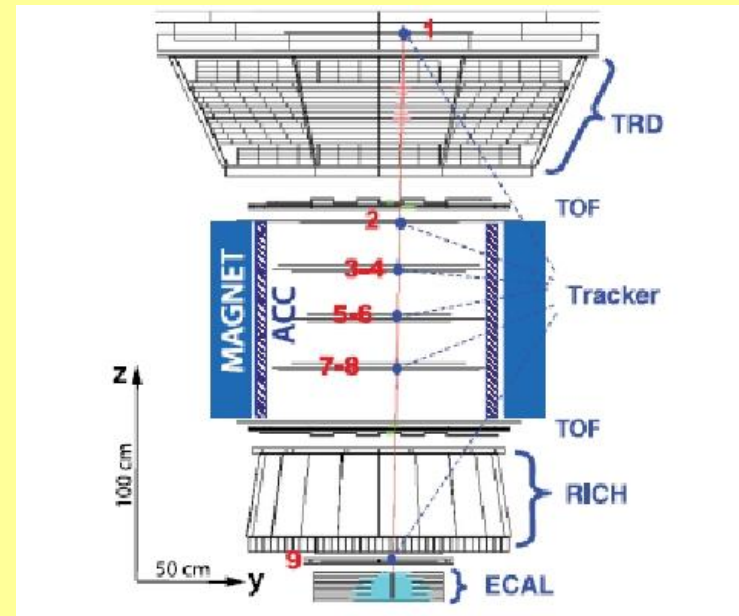


Pozorování antihmoty ve vesmíru

Spektrometr AMS na vesmírné stanici ISS.
Řízení vědeckého programu spektrometru
z laboratoře CERN

Nejnovější výsledky – pozorování poměru
mezi pozitrony a elektrony v závislosti na
energii – rozdíl mezi pozitrony a elektrony

Radikální zvětšení přesnosti a energetického
rozsahu



Nový zdroj pozitronů – možná z rozpadu či anihilace částic temné hmoty

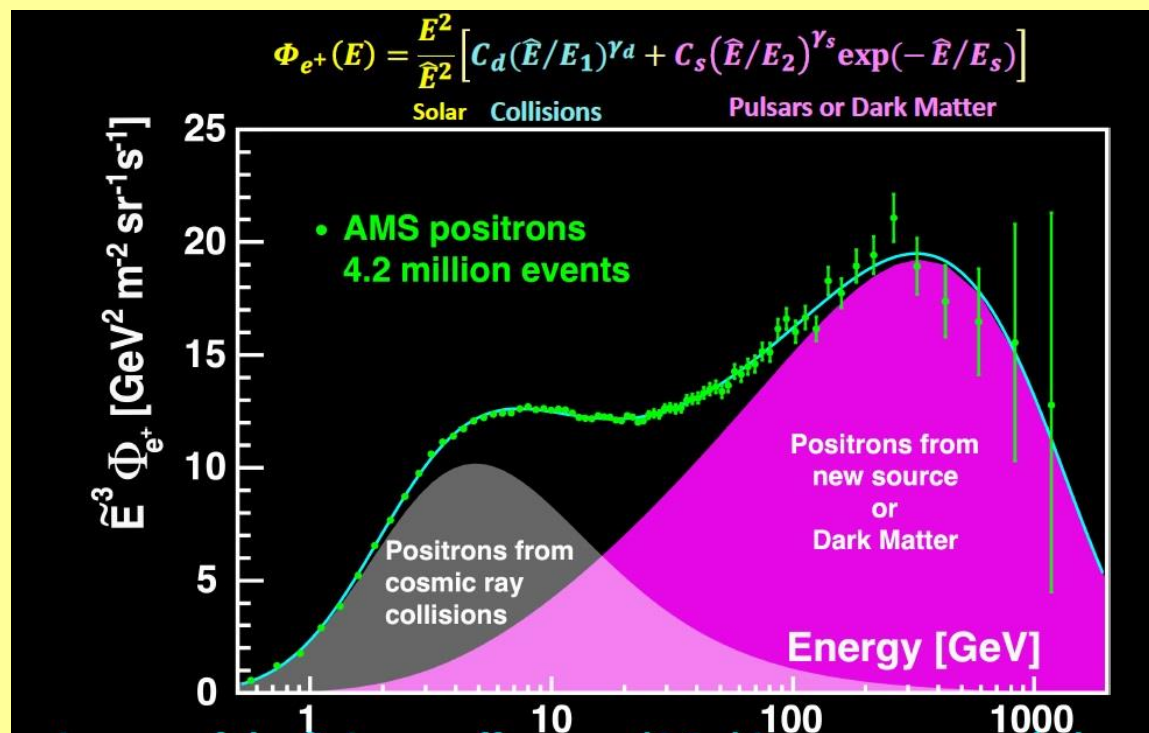
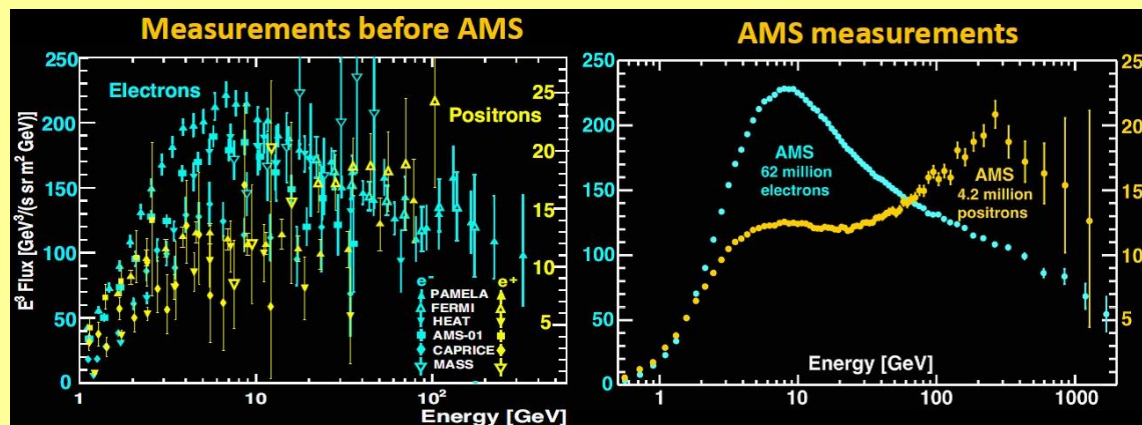
Dramatické zlepšení
přesnosti a statistiky měření
spekter elektronů a
pozitronů

Na rozdíl od protonů a
antiprotonů nejsou stejná

Může jít o nový zdroj v
podobě těles objektů ve
vesmíru (u pozitronů, které
nevznikají v takovém počtu
v předchozích zdrojích se
projeví)

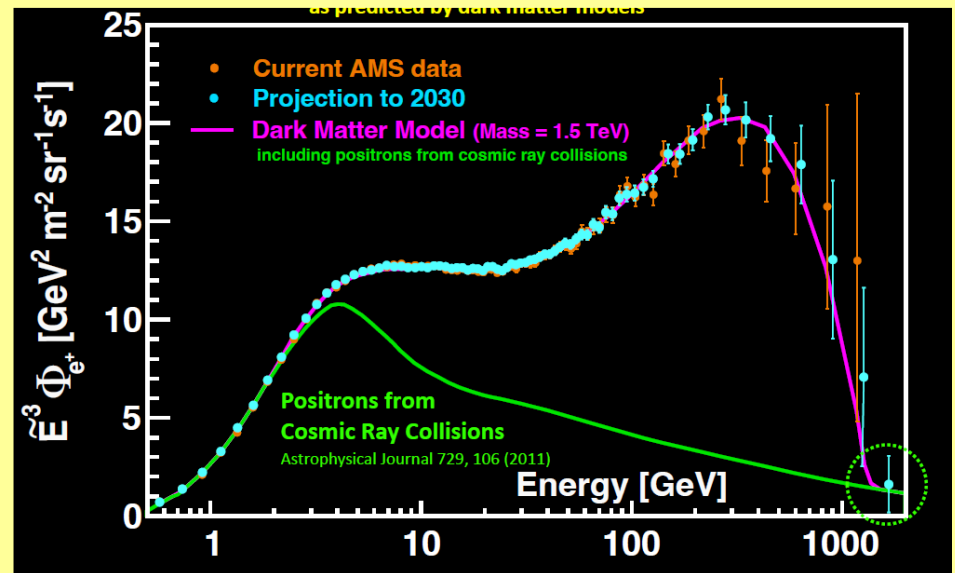
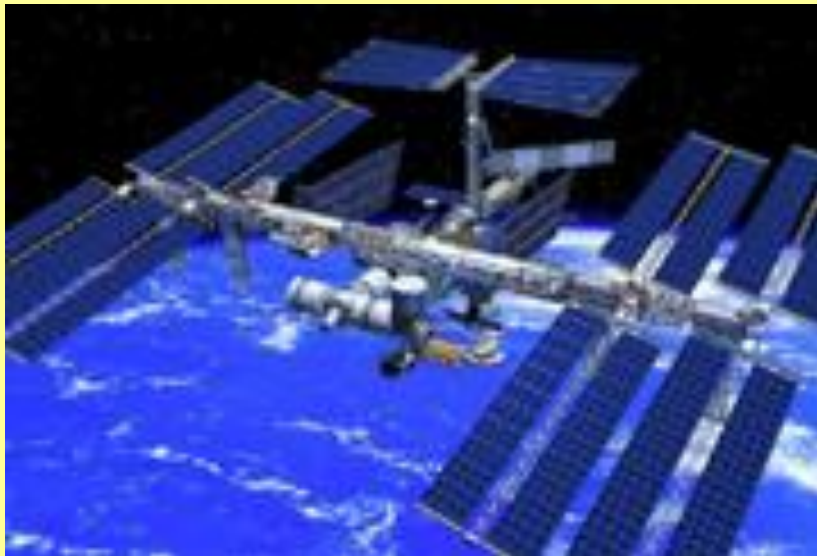
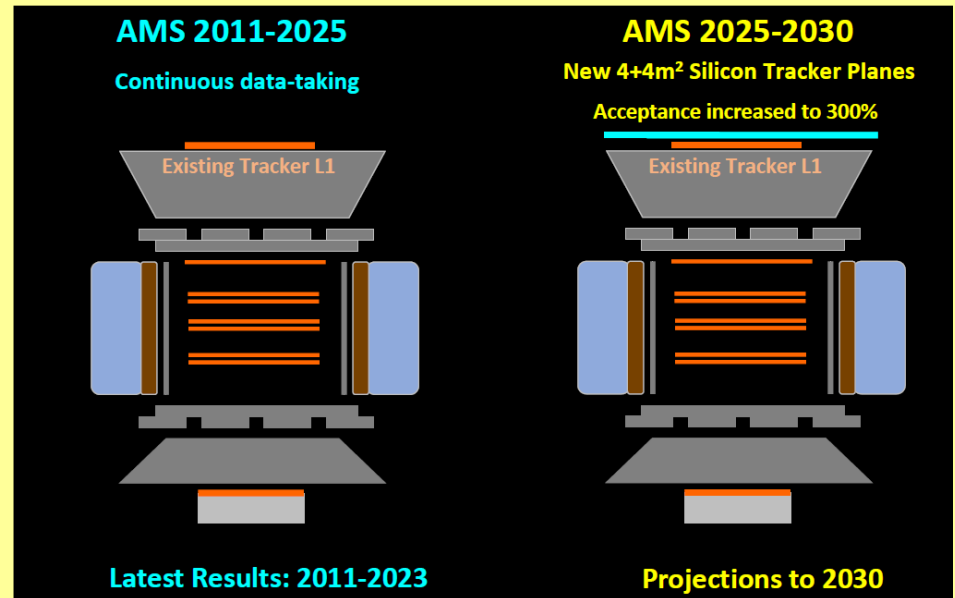
Může jít i o produkt
rozpadu či anihilace částic
temné hmoty

Jeden ze zajímavých
náznaků pro novou fyziku



Vylepšení a vyšší statistika → vyřešení otázky?

Připravuje se vylepšení spektrometru – zvětšení jeho akceptance a tím i statistiky v následujících letech jeho práce (do konce práce stanice ISS asi v roce 2030)



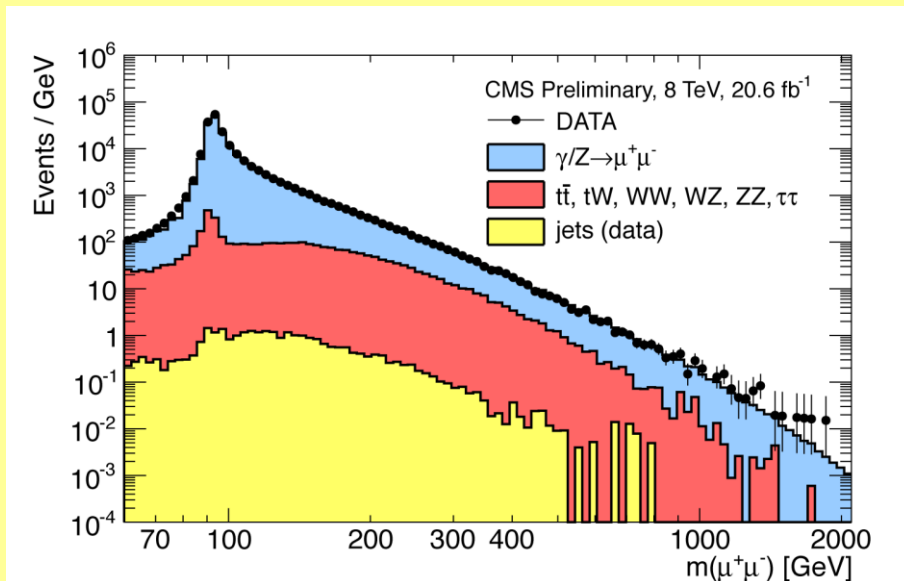
Hledání temné hmoty pomocí urychlovačů – co LHC?

Nejčastějšími kandidáty jsou supersymetrické částice

Možnost produkce těžších nabitých supersymetrických částic

Zatím extrémně přesné potvrzování standardního modelu

Extrémní hmotnost supersymetrických částic?



Dimionová produkce - CMS



Hledání temné hmoty v podzemí

Zaznamenání rozptylu těžké slabě interagující částice na jádře

Cryogenic Dark Matter Search

Polovodičové

křemíkové (citlivější pro nízké hmotnosti $\sim \text{GeV}$)

germaniové detektory (citlivější pro hmotnosti $> \text{GeV}$)

Všechny pracující při 40 mK

Pozorování 3 případů (pozadí 0,7 případů)

U křemíkových dat – velmi slabý náznak

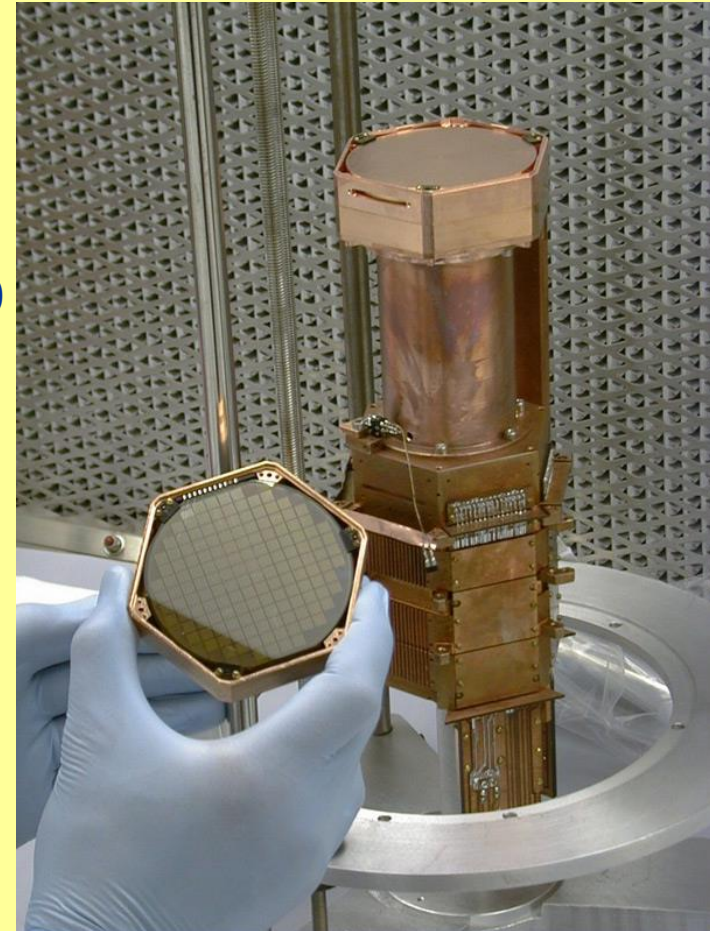
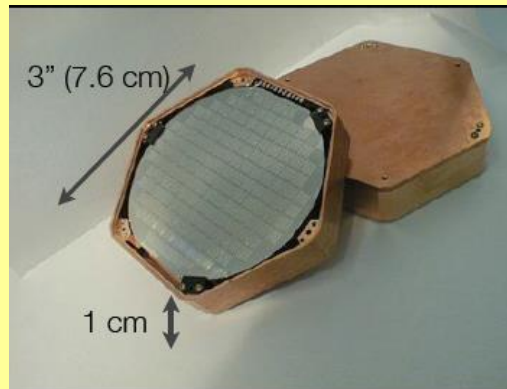
Doba měření: 140 kg·den

Parametry částice:

Hmotnost 8,6 GeV

Účinný průřez: $2 \cdot 10^{-19}$ barn

Větší statistika nepotvrdila
tento náznak



Large Underground Xenon experiment hledající temnou hmotu

lhl jeden z nejcitlivější kalorimetrický experiment

Časově projekční komora

Důležité – odlišit rozptyl neutronů

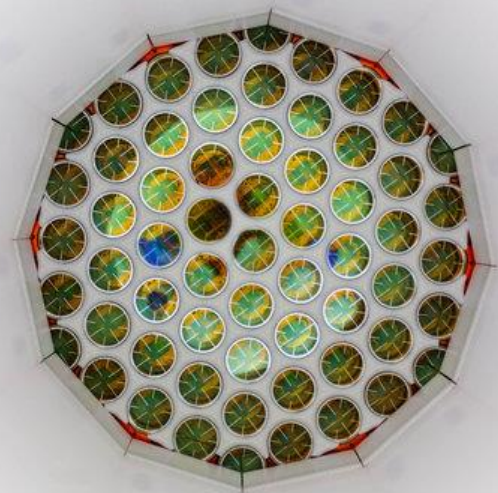
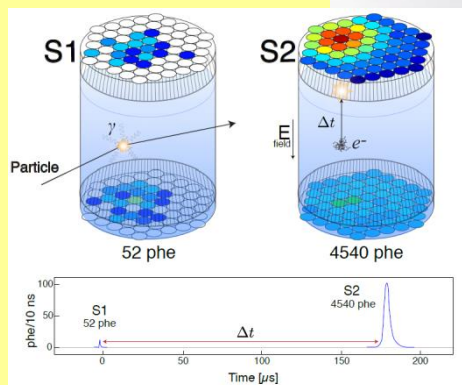
Tekutý xenon – 368 kg

Prvních 85 dní pozorování

Citlivost stačí k popření
předchozích pozorování
CDMS

Po získání dlouhodobé
statistik – výsledky 2015

Žádná evidence signálu



$T \sim -95^{\circ}\text{C}$

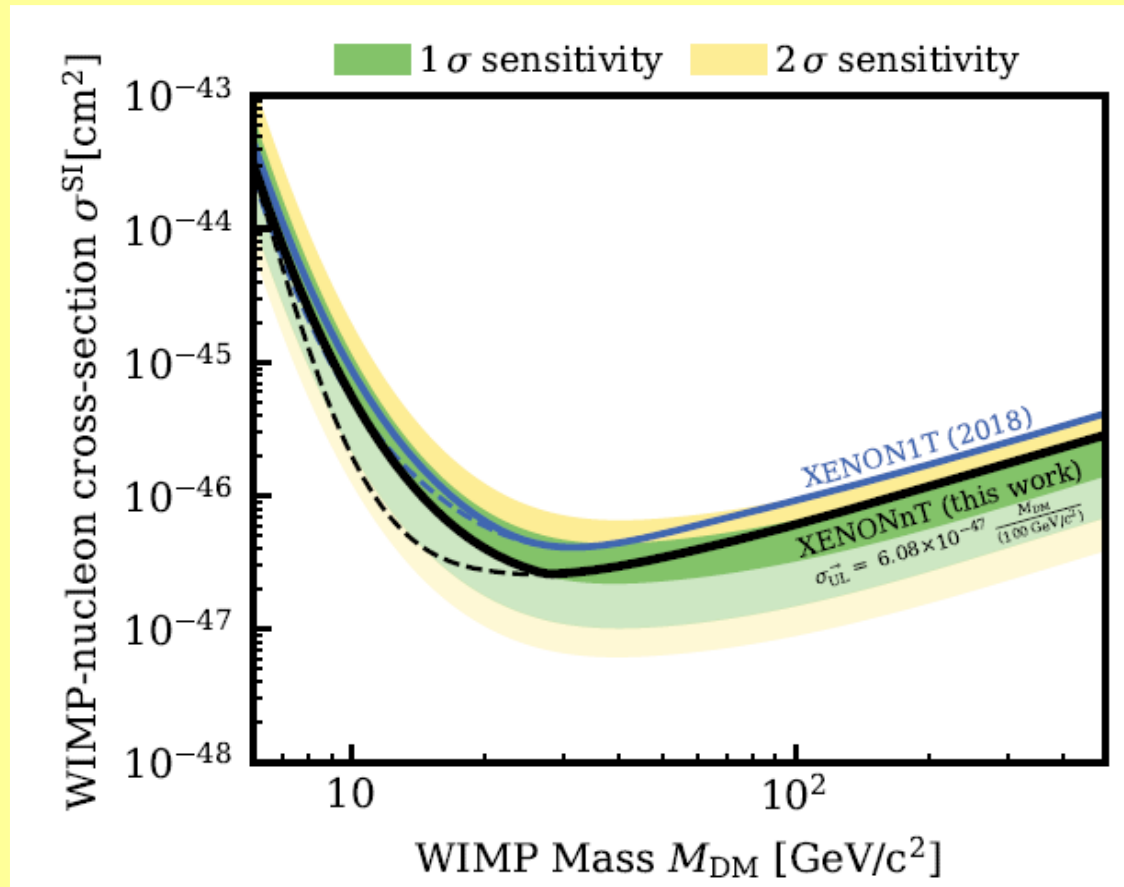


Zatím nebyla WIMP (CDMP) pozorována

Závislost pravděpodobnosti na účinném průřezu reakce a hmotnosti částice

Hmotnost jader v řádu desítek GeV – optimum detekce v tomto řádu hmotnosti
částice temné hmoty – kinetická energie dána teplotou reliktních částic CDM

Velmi náročné experimenty velmi hluboko v podzemí



XENONnT – tekutý xenon o hmotnosti 5 900 kg

Detekce scintilačního světla a elektronů z ionizace

Navazuje na XENON1T a měřit začal v roce 2021

V současné době nejcitlivější experiment

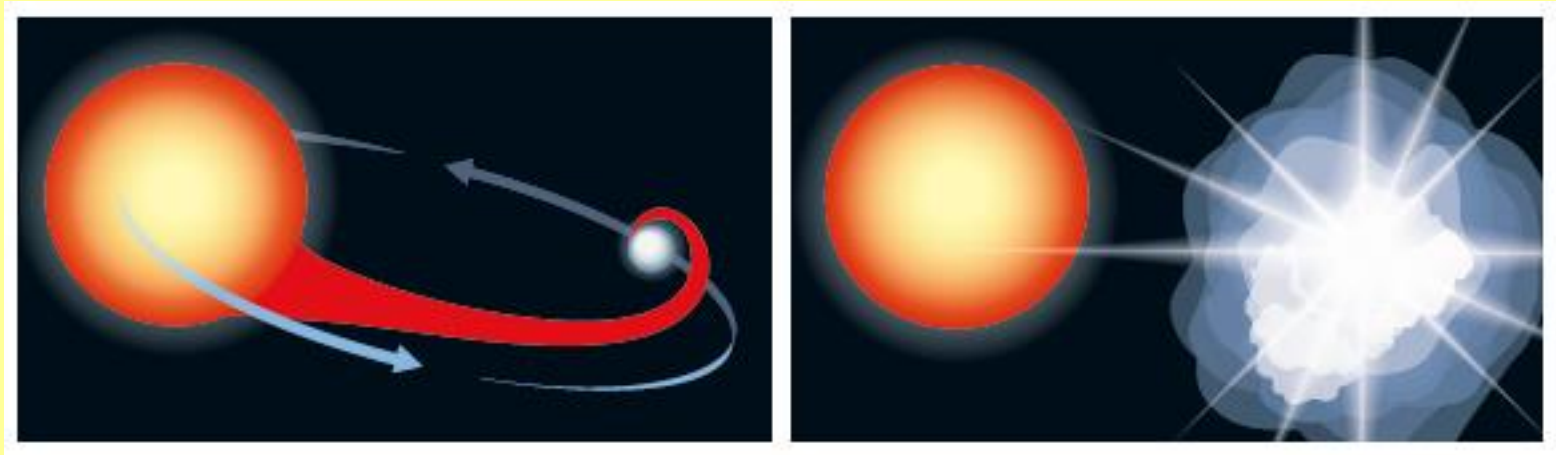
Dramatické potlačení radonového a neutronového pozadí

Nutno počítat i s pozadím z reakcí neutrin

arXiv:2303.14729v2

Supernovy 1a typu – standardní svíčky pro největší vzdálenosti

Dvojhvězda složená z rudého obra a bílého trpaslíka, přetok hmoty z rudého obra na bílého trpaslíka, při **přesně definované hmotnosti** bílého trpaslíka překročení „Chandrasekharovy“ limity, zapálení **nekontrolovaných** termojaderných reakcí a exploze supernovy 1a



V takovém případě je poměrně přesně definovaná hodnota uvolněné energie $1-2 \cdot 10^{44}$ J

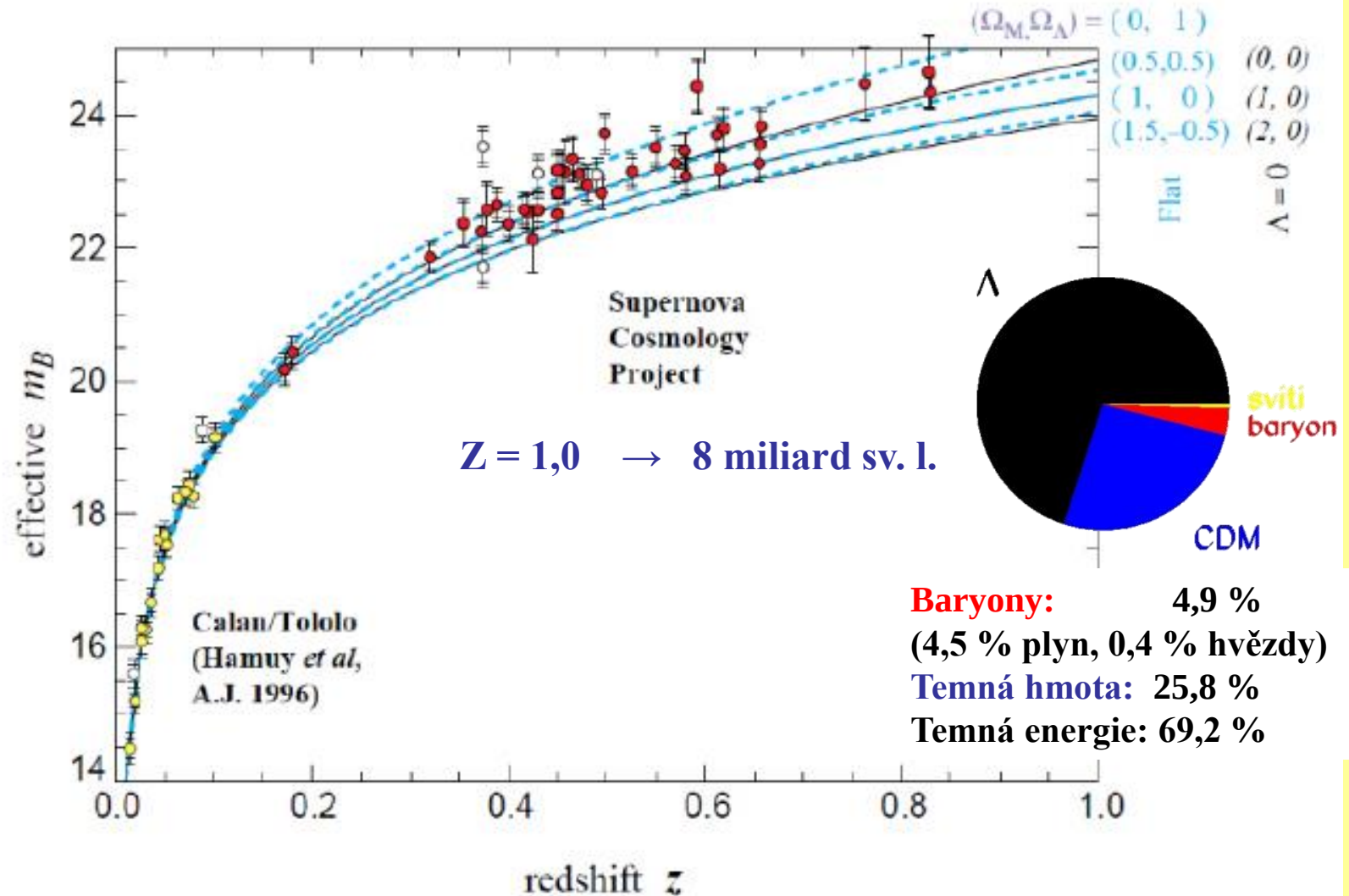
Existují i možnosti, že druhou hvězdou není rudý obr, ale jiná hvězda, včetně bílého trpaslíka. V tom případě mohou být odchylky od uvedené energie

Supernova SN 1994d v galaxii NGC 4526 a
SN 2011fe v blízké galaxii M101



Evidence temné energie – urychlování rozpínání vesmíru

Pozorování vzdálených → mladých částí vesmíru – změny rozpínání v čase
(pozorování supernov Ia → **zrychlování rozpínání** – ? **temná energie vakua** ?)



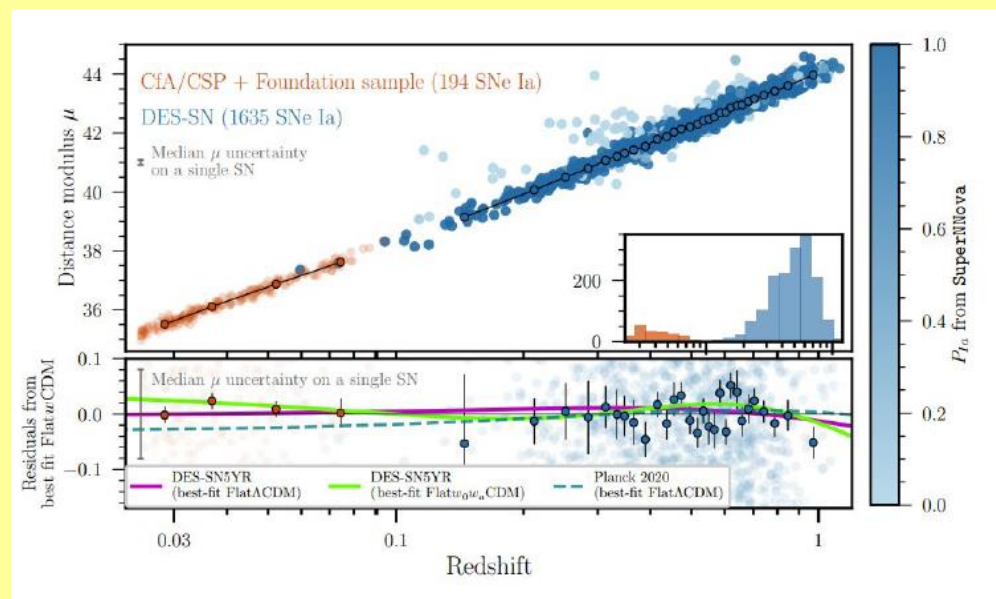
Napětí mezi Hubblovou konstantou z Λ CMD modelu a měření

- 1) Velmi přesná měření vzdálenosti pomocí supernov Ia typu v kosmologických vzdálenostech – potvrzování zrychlování rozpínání vesmíru a existence temné energie a kosmologické konstanty
- 2) Velmi přesná měření vzdálenosti pomocí supernov Ia v relativně „blízké“ vzdálenosti – určení současné velikosti Hubblový konstanty

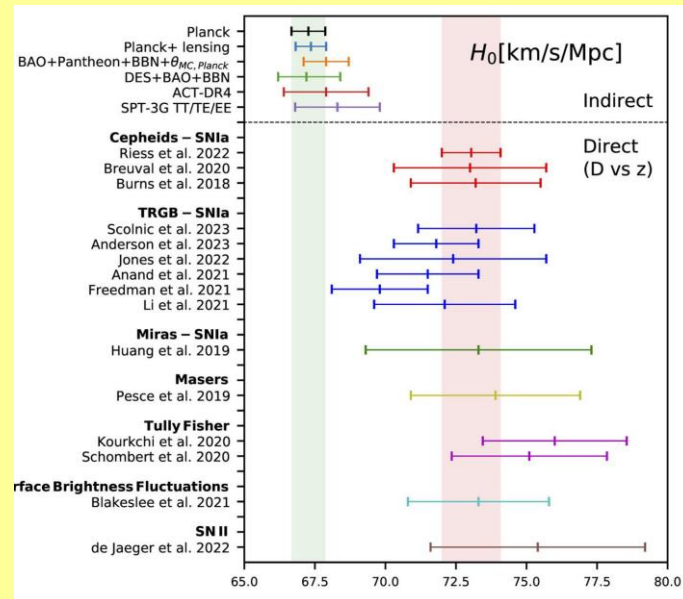
Dramatický posun ve sledování supernov Ia typu:

Spolupráce DES (Dark Energy Survey) – 2019 -2024

Spolupráce DESI (Dark Energy Spectroscopic Instruments) – 2021 – má být v provozu pět let



Určení průběhu rozpínání pomocí supernov Ia



Napětí u Hubblový konstanty

DESI – The Dark Energy Spectroscopic Instrument

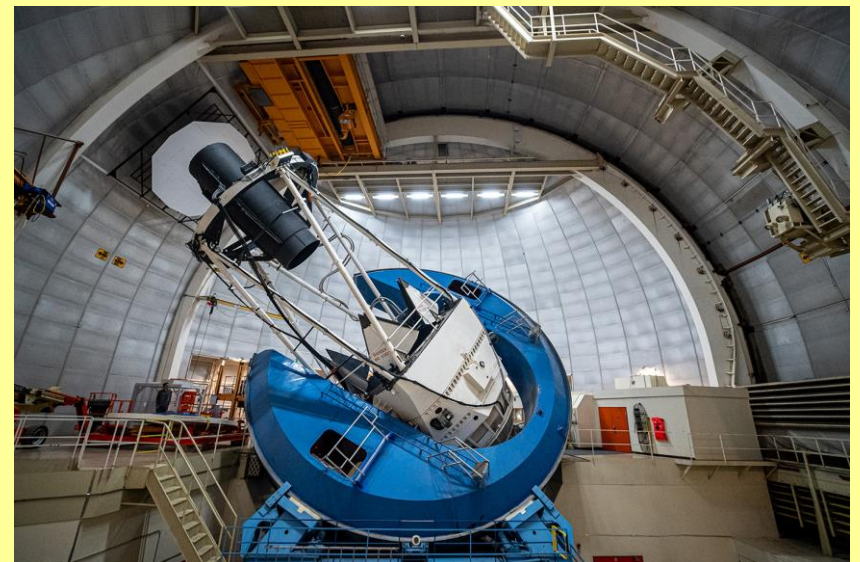
Zařízení DESI využívá teleskop Mayall o průměru 4 m na Kit Peak (nadmořská výška 2100 m)

Zaměřen na spektrometrii hvězd ve vzdálených galaxiích

Obsahuje 5000 „robotických“ oči (roboti polohující optická vlákna) a 10 spektrografů, prohlídka - 1400 deg^2 , za první rok více spektroskopických dat, než všechny předchozí experimenty dohromady

Určení spekter a přesného průběhu změn intenzity co největšího počtu supernov Ia typu umožní jejich přesné identifikace, určení jasností a vlastností

Vytvoření třírozměrné mapy velkoškálového rozložení galaxií a kvazarů (rudé posuvy), které umožní studovat tzv. baryonové akustické oscilace



K čemu je v tomto případě umělá inteligence?

Dramatický pokrok v počítačové technice umožnil rozvoj neuronových sítí a umělé inteligence

Umožňují zpracování bezprecedentního množství dat, které současné přístroje získávají

Bez nich by se také nedaly tyto přístroje efektivně využívat

Dramatický pokrok v modelování evoluce různých astrofyzikálních objektů i celého Vesmíru

Dramatický pokrok by mohly přinést kvantové počítače a využití kvantového počítání

V době stého výročí a roku kvantové fyziky dochází k dramatickým průlomům, které ovlivní i kosmologii



Současné superpočítače



IBM Quantum Systemem One

Přesné určení vzdálenosti Kupy ve Vlasech Bereniky

Klíčové pro určení průběhu rozpínání vesmíru je navázání přesného určení současné velikosti Hubblov konstanty měřené v našem „nejbližším“ okolí a určení průběhu její změny v kosmologických vzdálenostech

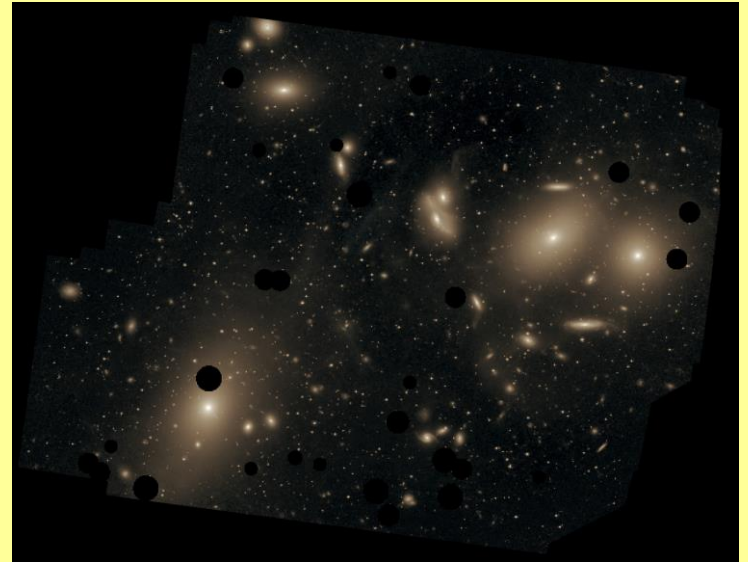
Nástrojem je co nejpřesnější určení blízkých kup galaxií, které jsou v relativně „malých kosmologických“ vzdálenostech

Kupa ve Vlasech Bereniky (Abell 1656)

Jedna z nejbližších kup galaxií
přes 1000 galaxií
střední vzdálenost 320 mil. sv. let (99 Mpc)
standardní uváděná 95 – 100 Mpc

Relativně vysoký počet pozorovaných supernov, i těch Ia typu – možnost určení vzdálenosti

Na určení vzdálenosti pomocí cefeid příliš daleko



Kupa galaxií v Panně je 70 mil. sv. l.



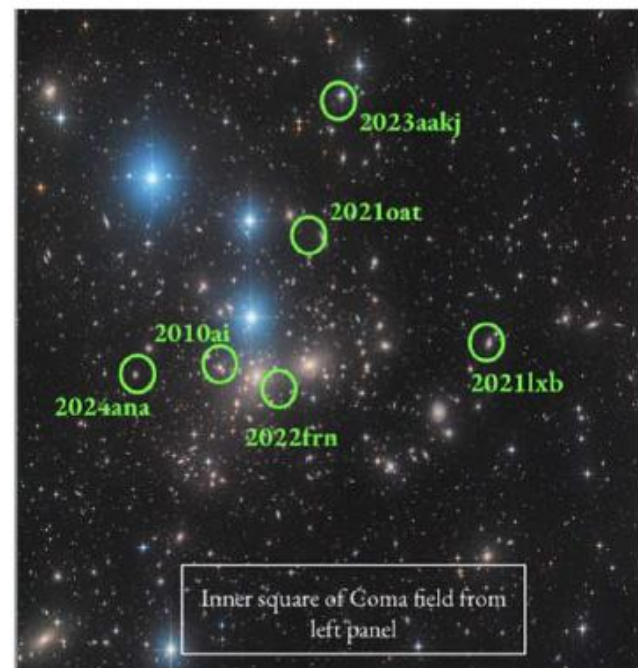
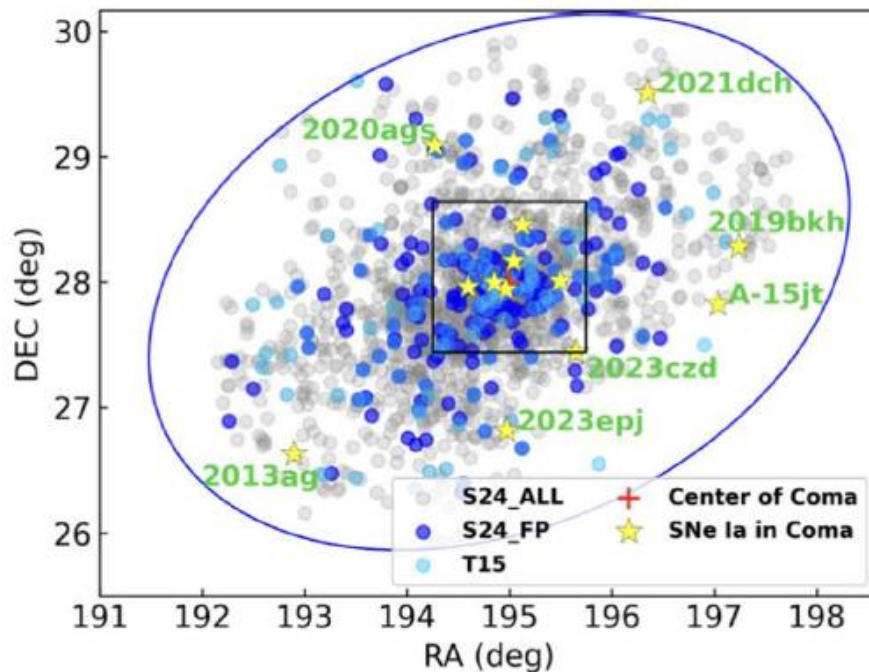
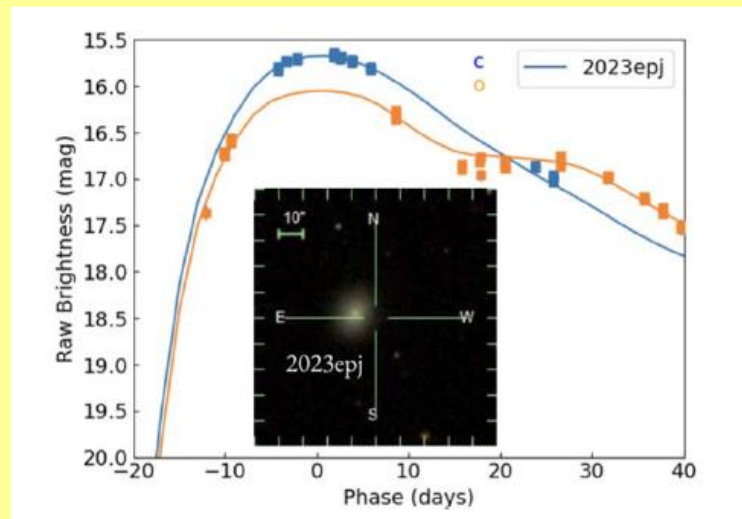
Kupa ve Vlasech Bereniky
(foto Hubbleův teleskop)

Nové určení vzdálenosti Kupy Vlasý Bereniky

D. Scolnic et al: *Astrophysical Journal Letters*
979:L9 2025 January 20

Důležité co nejpřesnější určení svítivosti v
různých spektrálních oblastech a jejich
průběh

Změna svítivosti supernovy 2023 epj ve
dvou různých spektrálních oblastech



Polohy pozorovaných supernov v Kupě Vlasý Bereniky

Prohloubení napětí mezi Λ CMD modelem a měřenou H_0

Celkově měřeno 13 supernov Ia typu

Magnituda = 15,710(22) mag

Vzdálenost $D = 98,5(22)$ Mpc

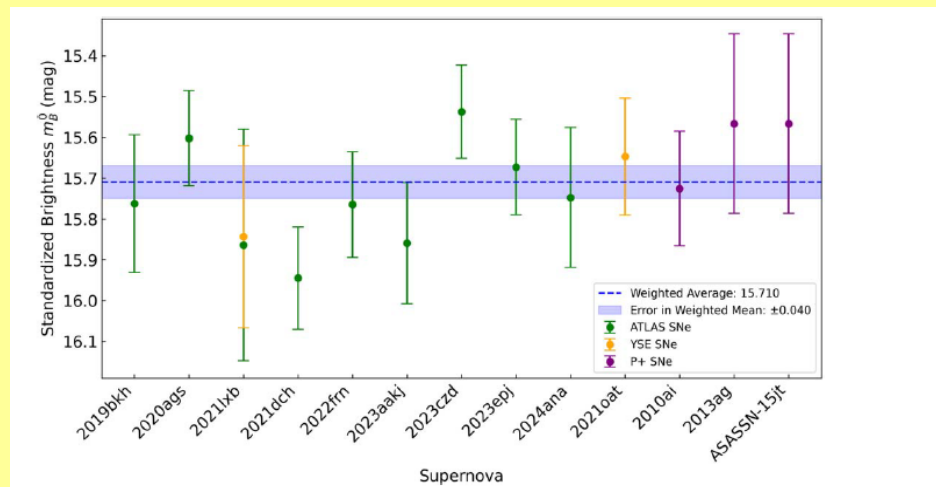
$H_0 = 76,5(22)$ km/s/Mpc

Z Λ CMD modelu $H_0 = 67,4$ km/s/Mpc

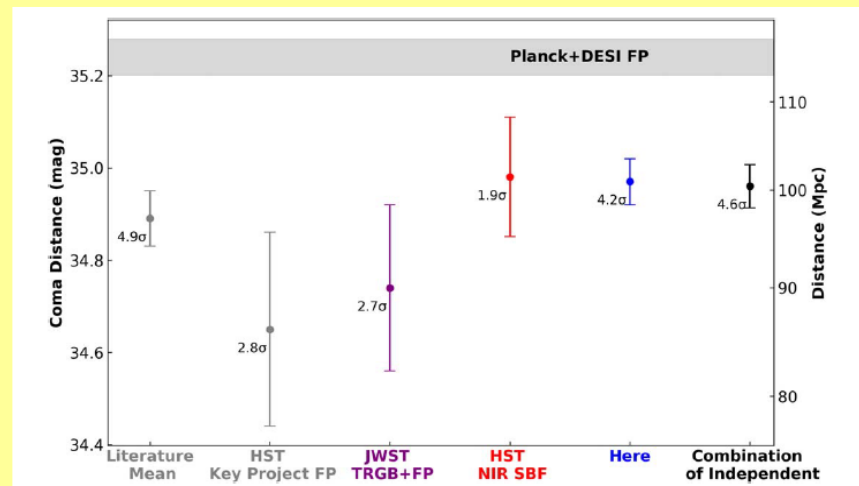
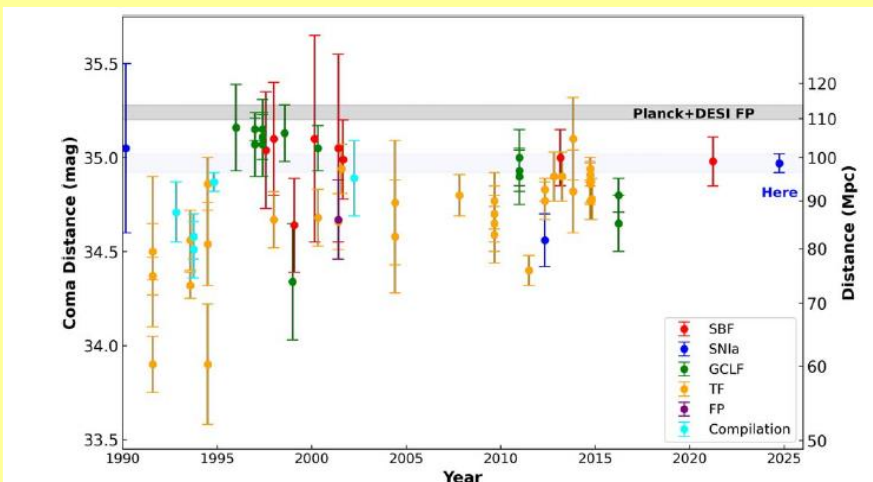
pak by $D = 111,8(18)$ Mpc

Prohlubuje se napětí z měřené Hubblovovy konstanty a té z Λ CMD modelu

Rychlejší zrychlování rozpínání vesmíru?

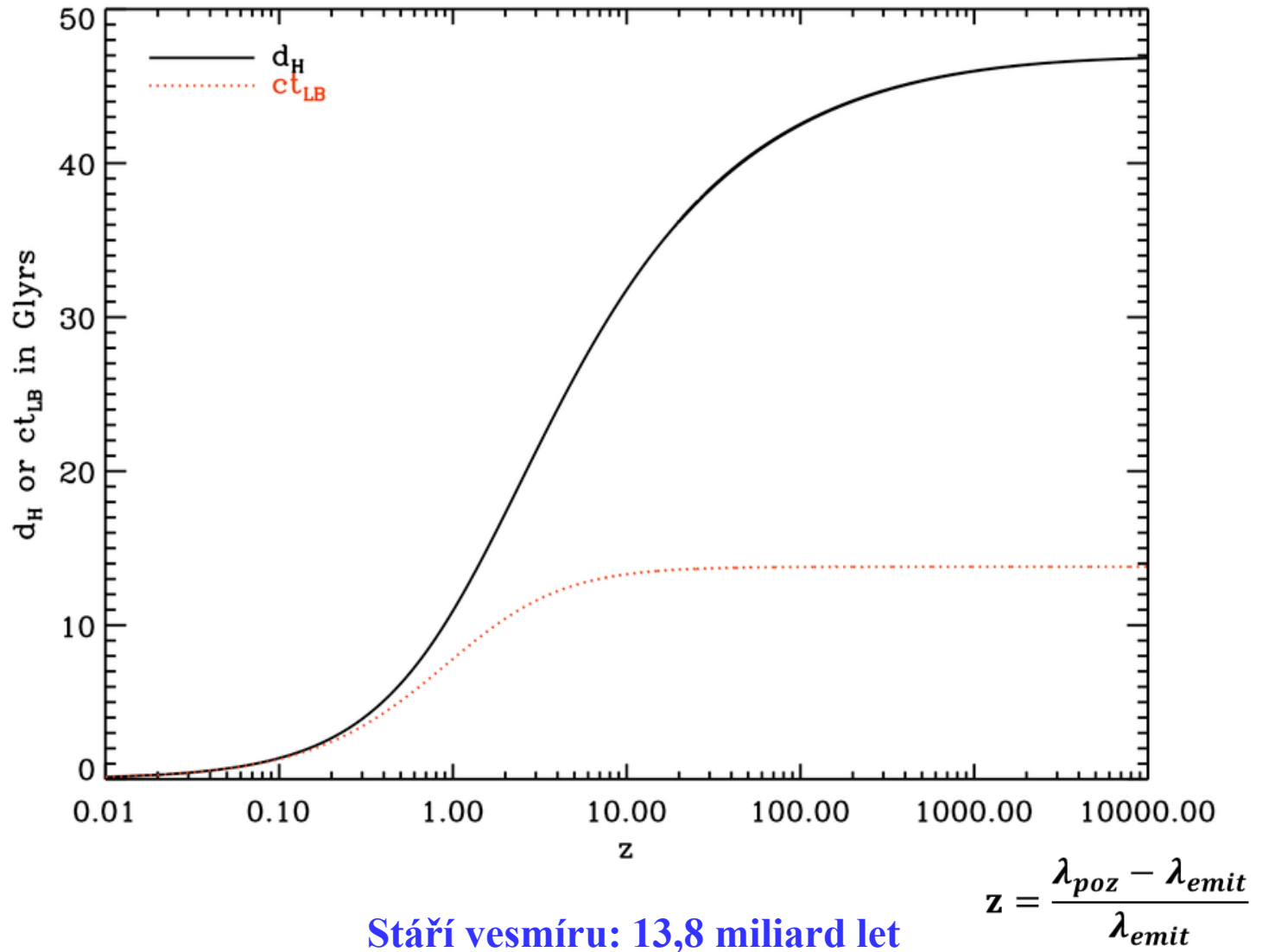


Měření jasnosti supernov Ia v kupě



Měření vzdálenosti kupy galaxií ve Vlasech Bereniky

Na základě Λ CMD modelu



Baryonové akustické oscilace

Jsou fluktuace v hustotě standardní baryonové hmoty

Vznikly v raném vesmíru a byly způsobeny akustickými hustotními vlnami, souvisí s dosahem zvukových vln v plazmatu v době rekombinace

Představuje standardní délkovou jednotku v kosmologii (rozměrové škálování)

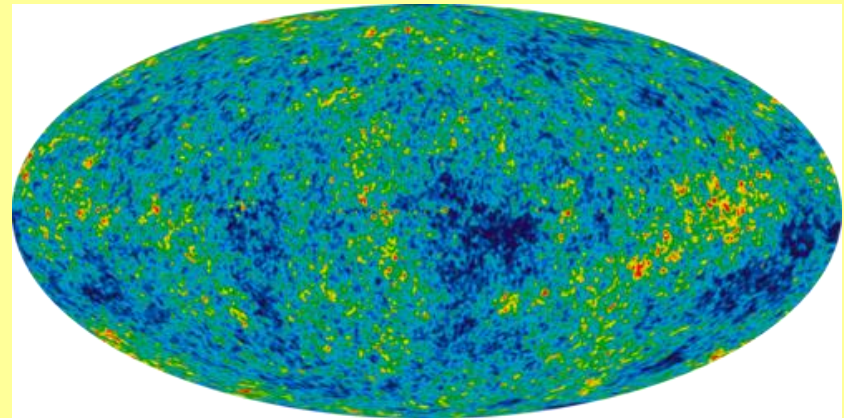
Týkají se sice baryonové hmoty, ale jsou ovlivněny vlastnostmi a množstvím temné hmoty

Místo s velkou hustotou v raném vesmíru obsahuje baryony, fotony a částice temné hmoty. Na ně působí přitažlivá gravitace a na baryony a fotony tlak interakce fotonů.

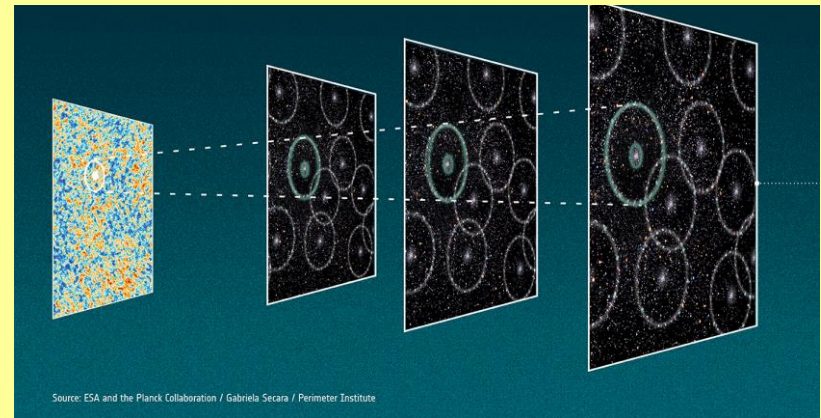
Po rekombinaci už tlak záření nepůsobí

Pak už působí pouze gravitace

Čas rekombinace – 380 000 let



Reliktní záření pochází z doby rekombinace a fluktuace z té doby lze měřit v jeho fluktuacích teploty (Data z WMAP 2012)



Změna velikostí původních fluktuací hmotnosti během rozpínání Vesmíru

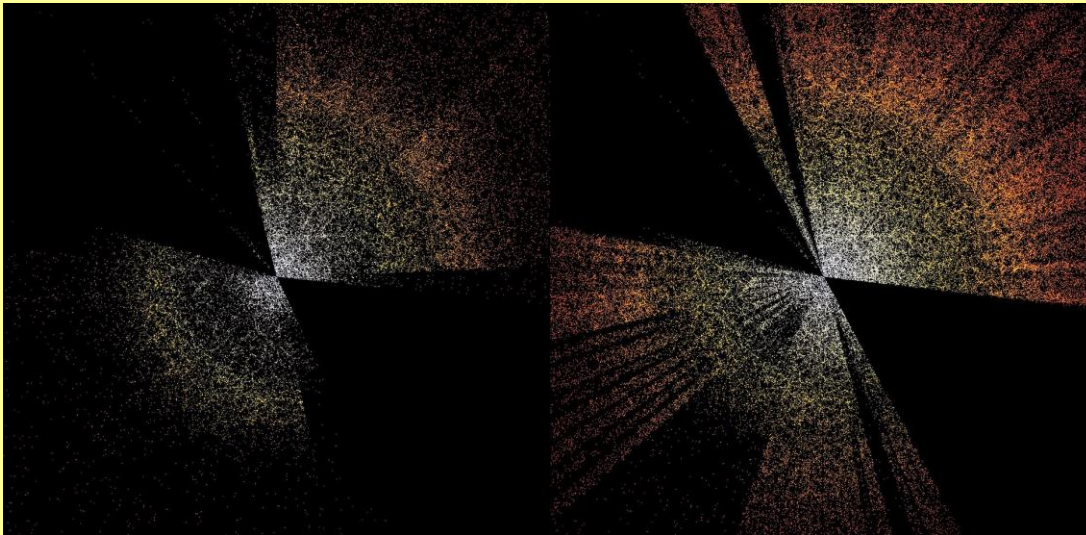
Třírozměrná mapa rozložení hmoty ve vesmíru

Dramatický pokrok díky zařízení DESI – během prvních tří let provozu pozorovalo 15 milionů galaxií a kvazarů. Celkově se předpokládá během předpokládaných 5 let provozu získání dat o 40 milionech galaxií a kvazarů.

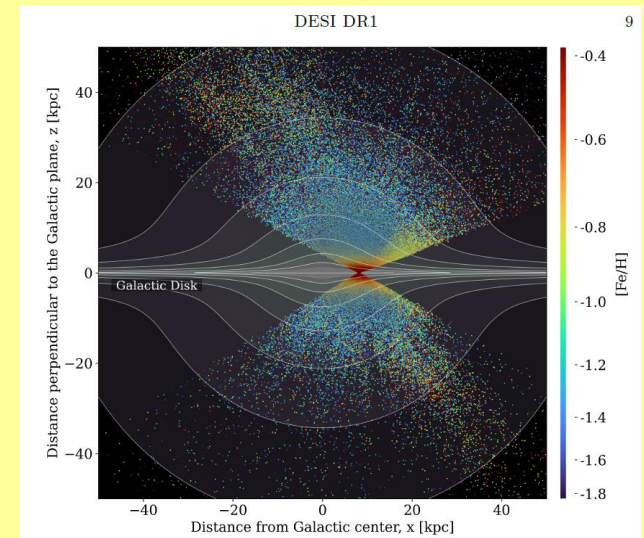
Z této mapy se získá představa o „shlukování“ objektů (hmoty) ve velkoškálové struktuře Vesmíru

Do současnosti se realizovaly dvě publikace dat DR1 a DR2, DR1 po prvním roce rudý posuv 18,7 milionů objektů, z toho 13,1 M galaxie, 1,6 M kvazary, 4 M hvězdy

Pozorované objekty a mapa pokrývají rozsah rudého posuvu $z = 0,1 - 4,2$ což odpovídá pokrytí vzdáleností od 1 miliardy až téměř ke 13 miliardám světelných let



Srovnání získaných dat ze SLOAN přehlídky (4 miliony galaxií) a prvních sedmi měsíců práce DESI (7,5 milionů galaxií)



DR1 – výsledky zobrazené s umístěním naší Galaxie

Výsledek DR1 analýzy

Vzdálenost objektu
(Comoving Gpc from
Earth) – je současná
vzdálenost, tedy pro $z = 4,0$ je to zhruba 7
Gpc a tedy 23 miliard
světelných let

Rozdělení objektů:

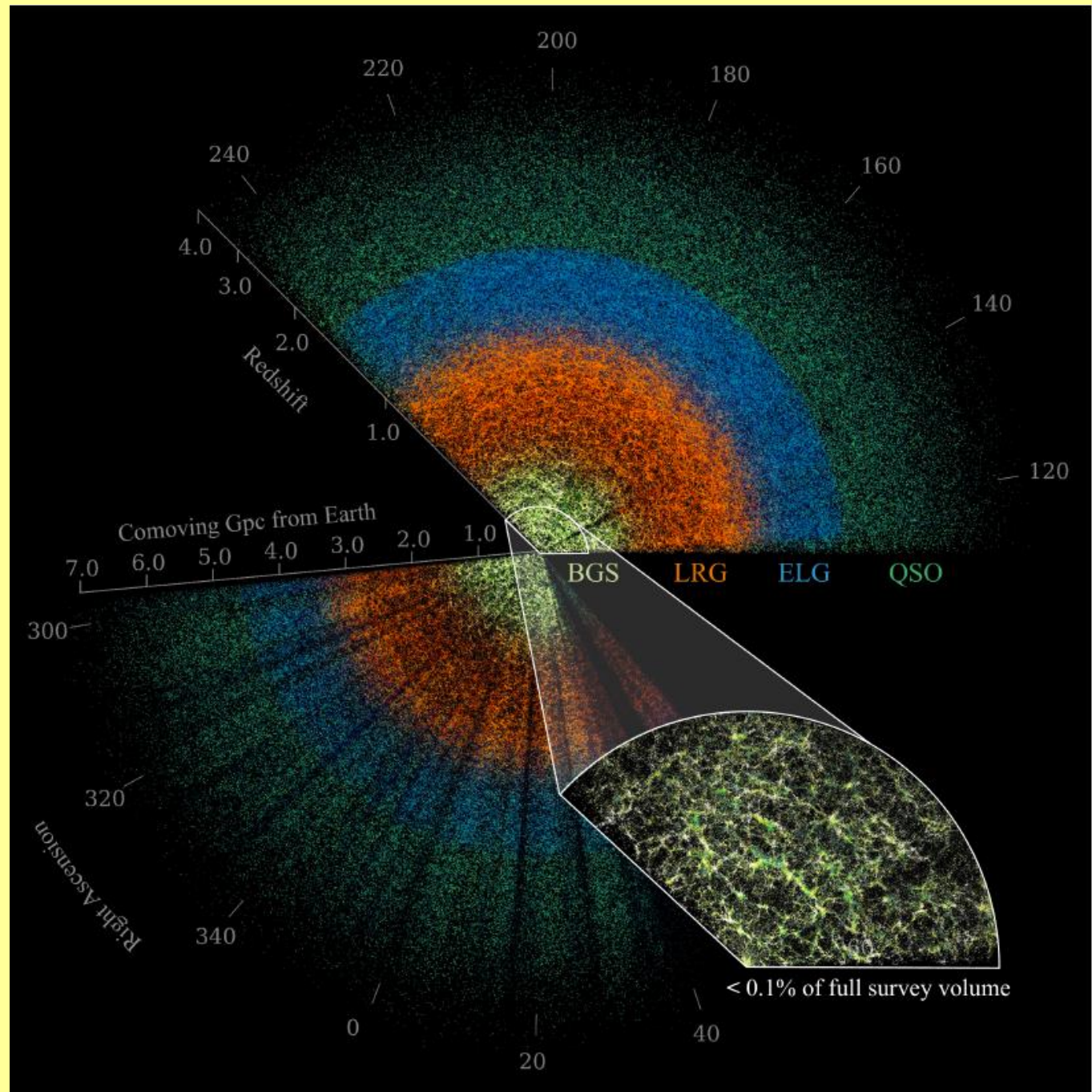
BGS – jasné galaxie

LRG – svítící
červené galaxie

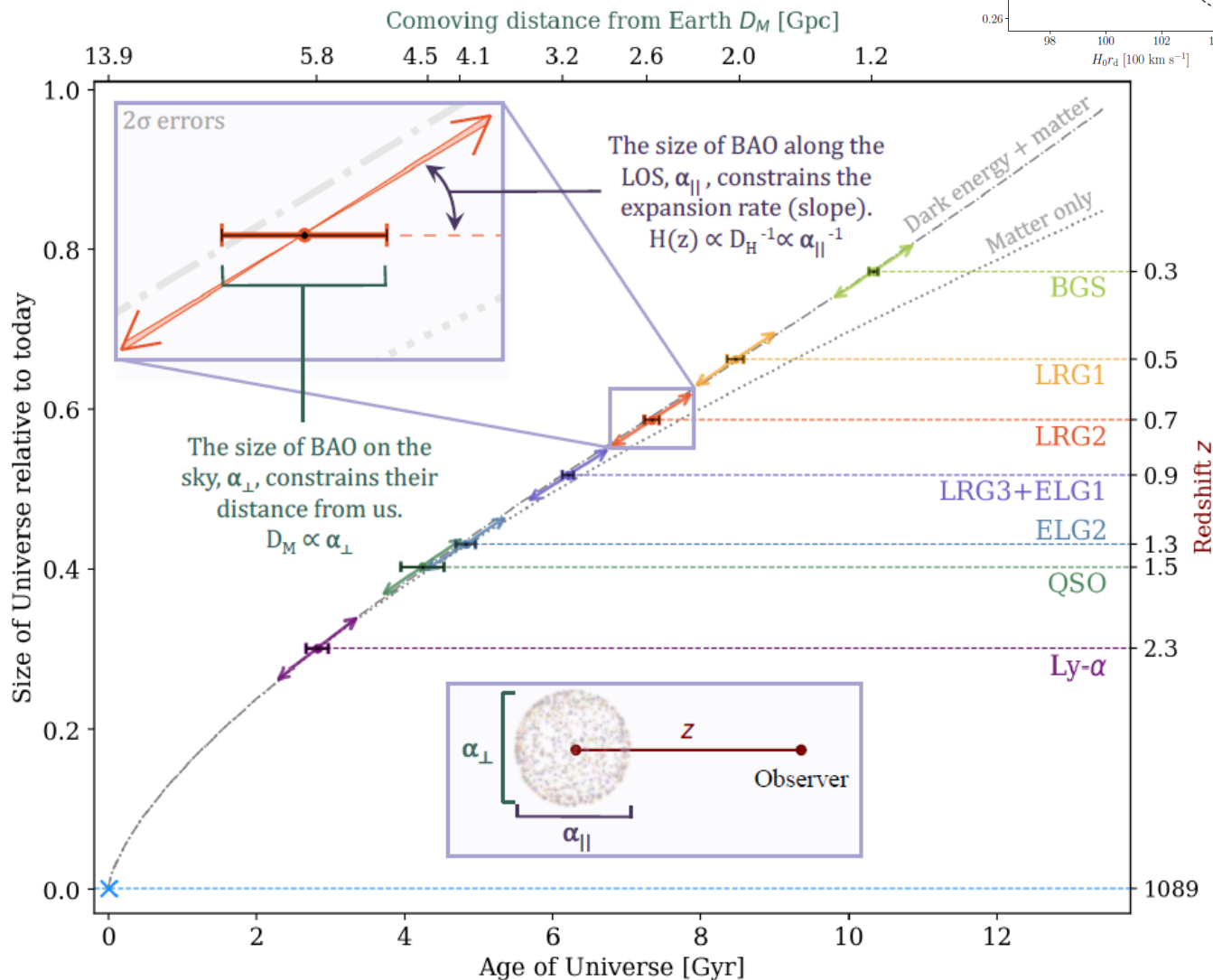
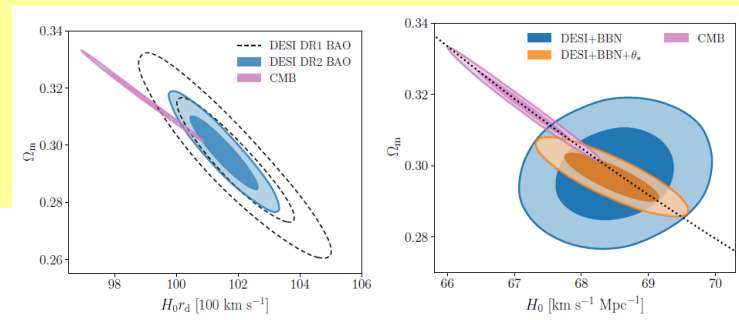
ELG – galaxie s
emisními čarami

QSO - kvazary

Nepozorované výřezy
vytváří rovina
Galaxie zakrývající
vzdálené galaxie



Pozoruje se napětí mezi určením H_0 z Λ CDM modelu a určením z dat z DESI



Z Λ CMD modelu

$H_0 = 67,4$ km/s/Mpc

Z DESI dat

$H_0 = 68,5$ km/s/Mpc

Supernovy v kupě ve Vlasech Bereniky

$H_0 = 76,5(22)$ km/s/Mpc

Náznak toho, že se kosmologická konstanta může měnit

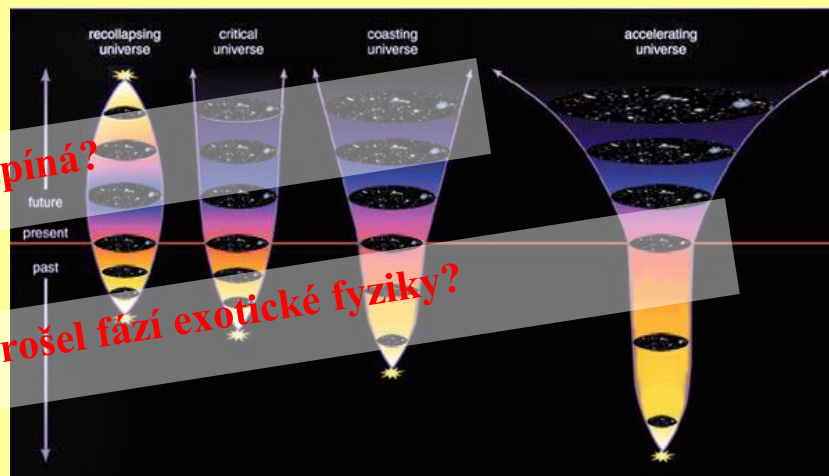
Jaké jsou alternativy a jak o nich lze rozhodnout?

Statický vesmír:

- Výzvy:** 1) Nutnost vysvětlení existence rudého posuvu
2) Nutnost vysvětlit existenci reliktního záření
3) Vysvětlit evoluci vesmíru a složení (primordiální lehké prvky)

Oscilující vesmír bez extrémně horké fáze:

- Výzvy:** 1) Nutnost vysvětlit reliktní záření (viz výše) – například jako tepelné záření mezigalaktického prachu
2) Nutnost vysvětlit změnu od smršťujícího se vesmíru na rozpínající v kontextu klasické fyziky (nejsou extrémní podmínky) bez nové fyziky
3) Vysvětlit evoluci vesmíru a složení (primordiální lehké prvky)



Závěr

- 1) Na počátku minulého století objev gravitačního vlivu neznámého jevu – temná hmota, **temná hmota i temná energie nutnou podmínkou fungování kosmologického modelu**
- 2) Gravitační působení pozorováno v řadě procesů – pohyb hvězd v Galaxii, pohyb galaxií v kupách, velkoškálová struktura, pohyb k velkému atraktoru, existence extrémně horkého plynu, čočkování a rozložení hmotnosti– **nutnost co nejpečlivějšího měření**
- 3) Jevy, které **nelze vysvětlit odlišným průběhem gravitace – srážky kup galaxií, evoluce galaxií, fluktuace reliktního záření – nutnost separace různých složek procesy s interakcí jinou než gravitace**
- 4) Co částice temné hmoty jsou? Horká či studená temná hmota (lehké či těžké částice) – supersymetrické částice? Axiony?
- 5) Lov těchto částic probíhá ve vesmíru, na zemi i v podzemí
- 6) Pozorování rozpínání vesmíru pomocí supernov Ia typu
- 7) Nejnovější pozorování ukazují na změnu „kosmologické konstanty“ v čase