

Je temná hmota skutečně temná?

Petr Kurfürst

U3V MU
2. prosinec 2025

Známý vesmír

- Řídí se zákony obecné relativity
- Existuje a rozpíná se už nejméně 13,77 miliardy let.
- Ve velkém měřítku je relativně homogenní, jak strukturou, tak chováním



Známý vesmír

- Řídí se zákony obecné relativity
- Existuje a rozpíná se už nejméně 13,77 miliardy let.
- Ve velkém měřítku je relativně homogenní, jak strukturou, tak chováním
- Je plný hmoty a energie, tedy částic...



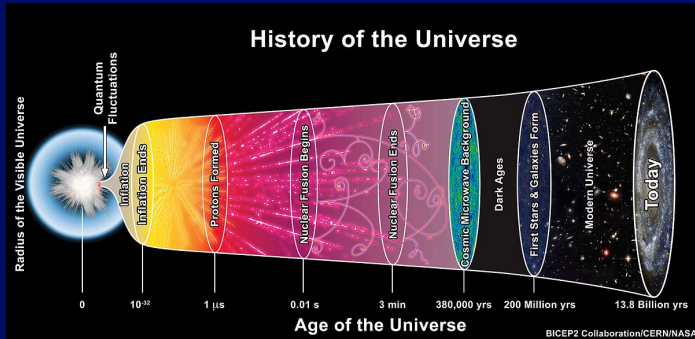
Do jaké vzdálenosti dohlédneme?

- Pokud se díváme mezi galaxie, vidíme... další a další galaxie



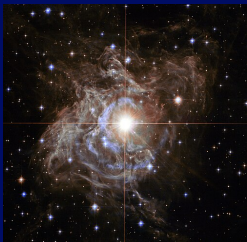
Do jaké vzdálenosti dohlédneme?

- Pokud se díváme mezi vzdálené galaxie, pozorujeme záření, které přichází z ještě větší dálky a má větší „červený posuv“
- Díváme se tak dlouho do minulosti, dokud nebude vesmír tak horký a hustý, že světlo nemůže „volně cestovat“

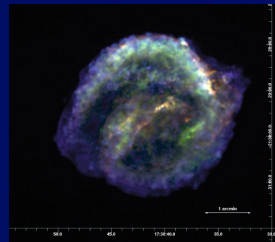
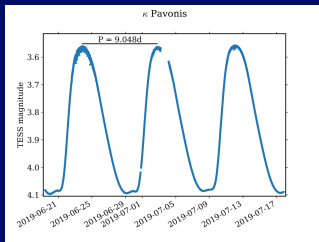


Jak zjišťujeme vzdálenosti?

- Jasnost (zářivý tok) se vzdáleností klesá, podle $\sim 1/(4\pi r^2)$
- Musíme znát svítivost (luminozitu) „na počátku“
- „Standardní svíčky“



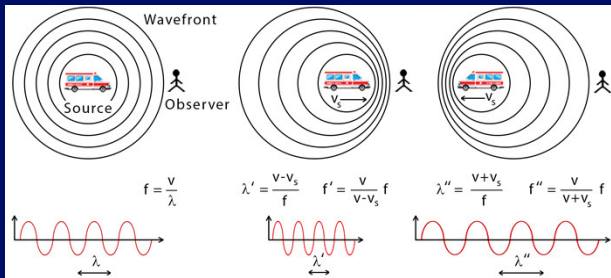
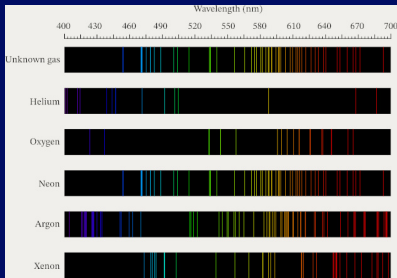
Proměnné hvězdy - Cefeidy



Supernovy typu Ia

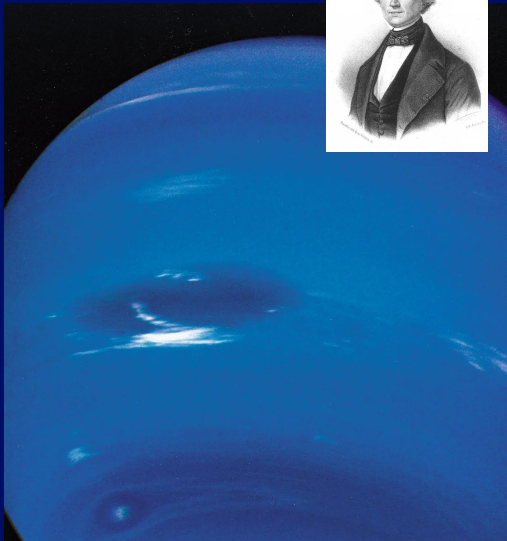
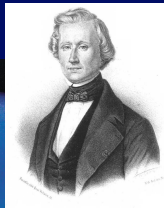
Jak měříme rychlosti?

- Něco emituje elektromagnetickou vlnu o určité frekvenci
- Pokud se zdroj vlnění vzdaluje, vlna se „natahuje“
- Musíme znát klidovou frekvenci: **atomární spektra!!**
- **Stejný efekt díky rozpínání vesmíru!!**



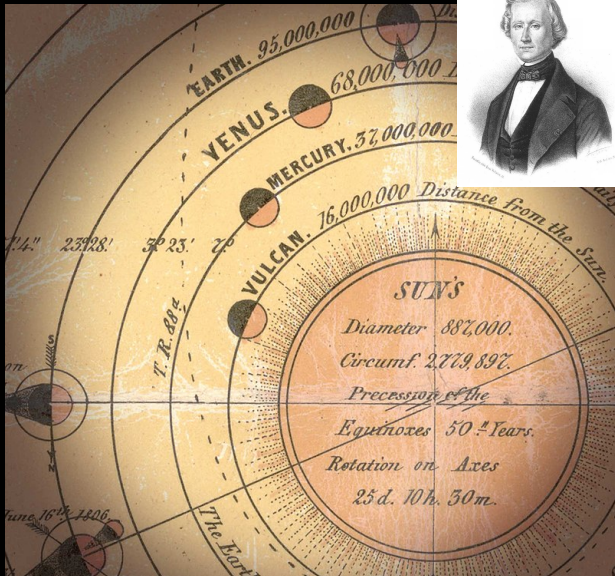
Malá odbočka k objevu Neptunu

- Koncem roku 1845 zjistil Le Verrier, že dráha Uranu se neřídí přesně Newtonovými zákony
- Domníval se, že existuje další planeta, mnoho měsíců počítal její oběžnou dráhu
- 23. září 1846 dostali astronomové v Berlíně od něj zprávu o předpokládané poloze *nové planety*, ještě tu noc ji objevili s *odchylkou cca 1 stupeň* od předpovězeného místa
- Urbain Le Verrier tak objevil planetu „špičkou pera“ !



a také k předpovědi „planety“ Vulkán

- Koncem roku 1849 si Urbain Le Verrier všimnul, že ani dráha Merkuru se neřídí přesně Newtonovými zákony
- Oznámil, že existuje ještě další planeta, dokonce uvnitř Merkurovy dráhy, kterou pojmenoval Vulkán a předpověděl její dráhu
- Následovalo mnoho pokusů o objevení nové planety, ten ale nebyl nikdy potvrzen a následovala desetiletí protichůdných údajů.

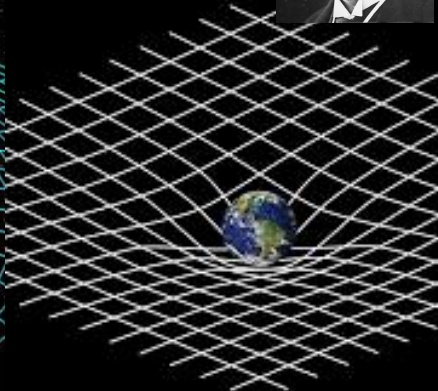
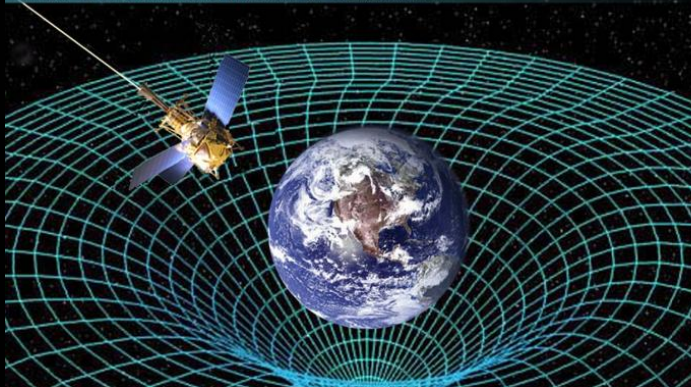


„Příběh“ gravitace

- V roce 1915 objevil Albert Einstein novou základní teorii gravitace, obecnou teorii relativity, která tento rozpor vysvětluje

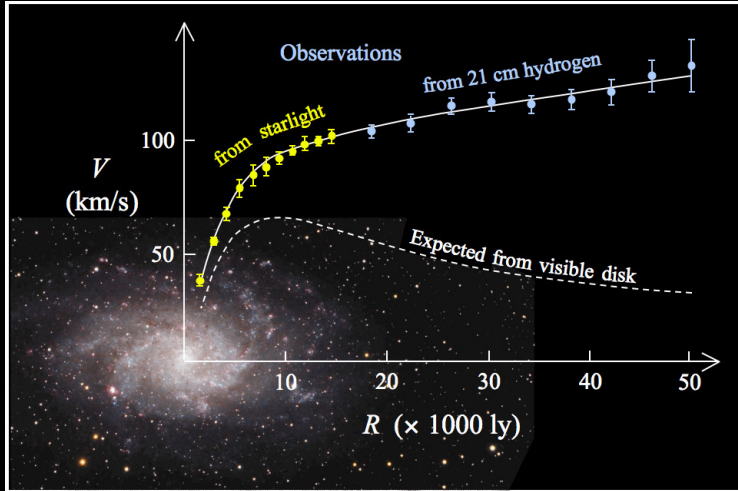


WHAT IS THE GENERAL THEORY OF RELATIVITY?

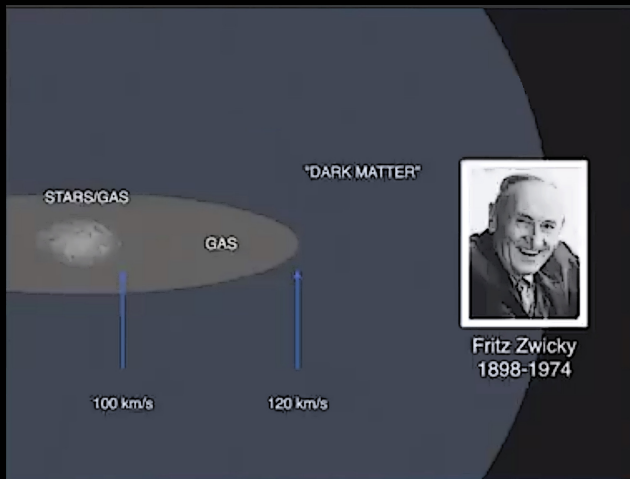


Analogie: „záhada“ chybějící hmoty

- Hvězdy a plyn v galaxiích se pohybují jako by tam byla dodatečná hmota



„Chybějící hmota“ podle známých gravitačních zákonů (Newtonova a obecné relativity)



MOND: Modified Newton gravity



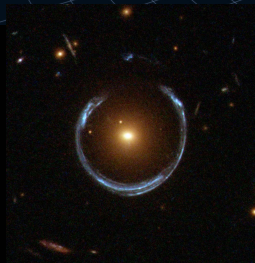
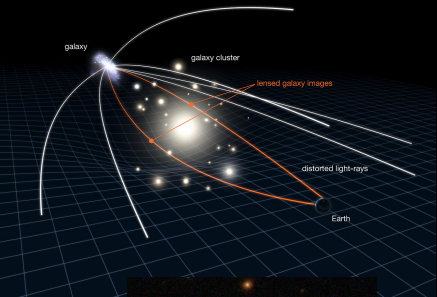
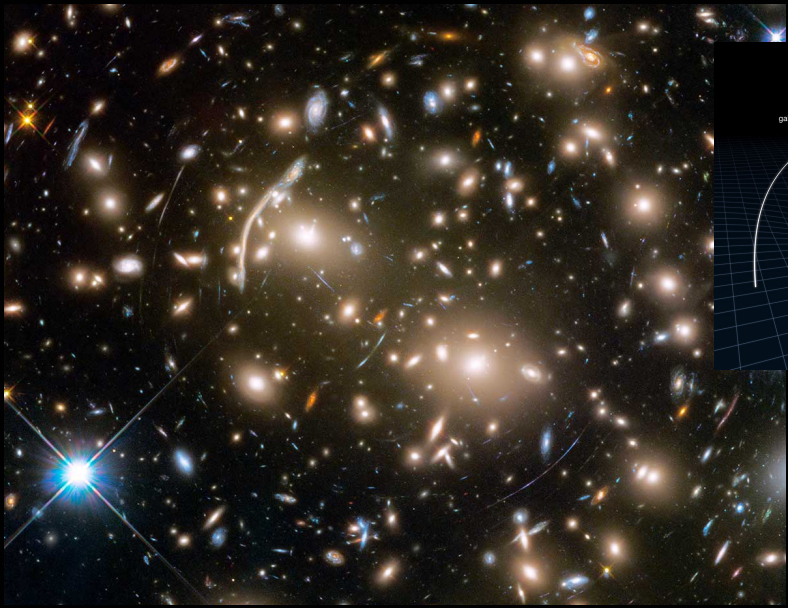
Mordechai Milgrom

Analogie s úvahami, spojenými s objevem Neptunu !



Frau Franziska Pfenninger-Zwicky

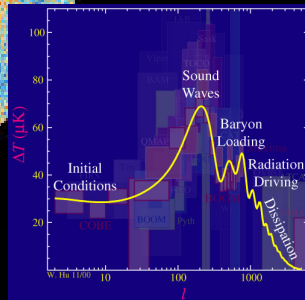
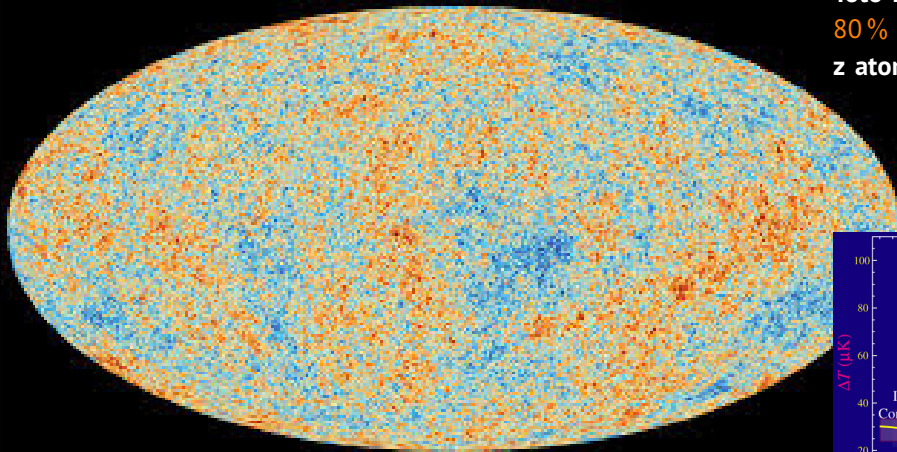
„Potvrzující“ faktor: gravitační čočkování



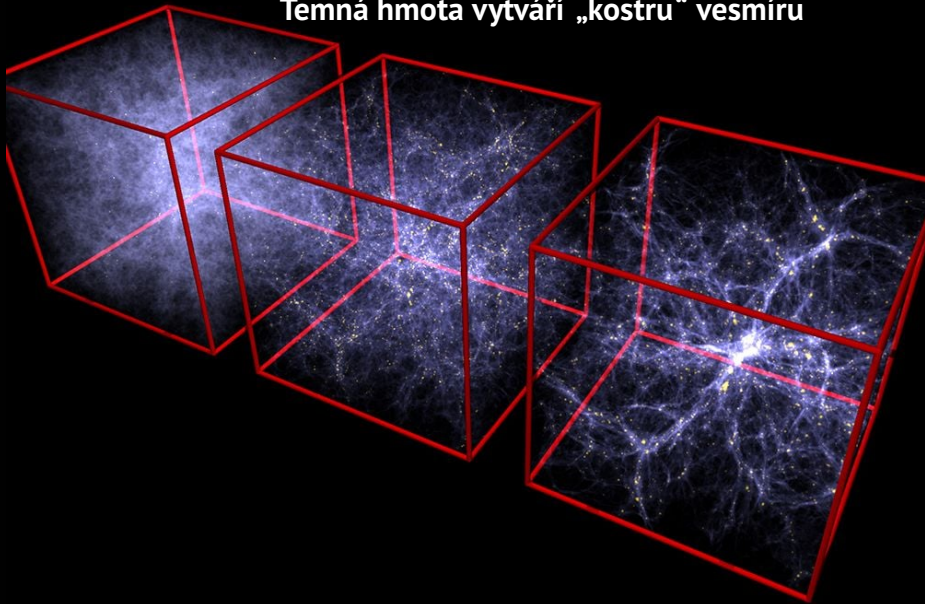
Kosmické mikrovlnné záření (CMB) „mapuje“ temnou hmotu

Toto měření říká, že
80 % hmoty se neskládá
z atomů

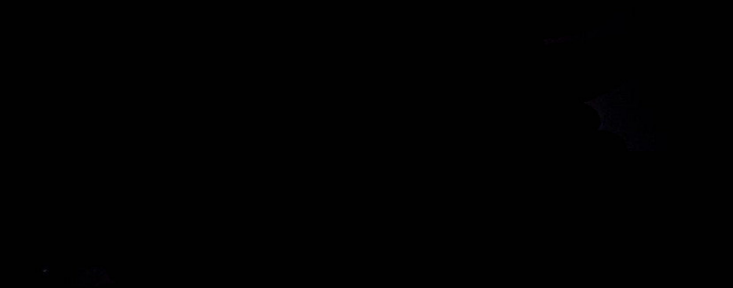
Třetí pík určuje
množství temné
hmoty



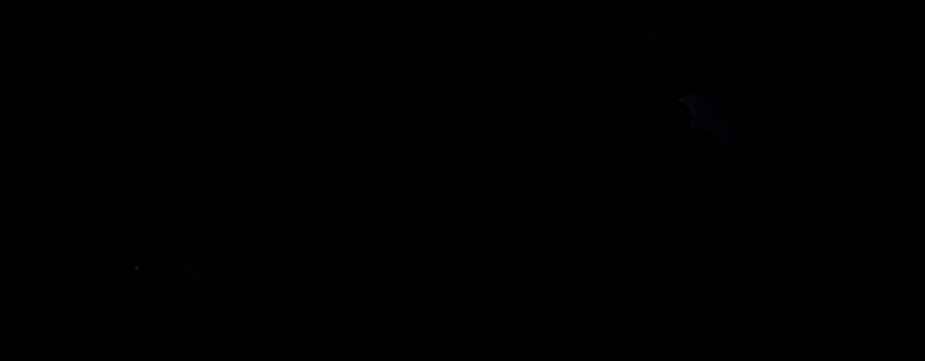
Temná hmota vytváří „kostru“ vesmíru



„Tkáň“ temné hmoty - simulace Eagle (Leiden University)



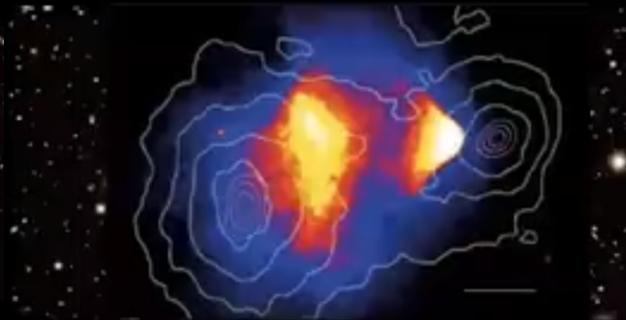
„Tkáň“ temné hmoty v hmotné kupě galaxií



Vývoj struktury hvězd v hmotné kupě galaxií



Bullet cluster - „laboratoř“ chování temné hmoty



Bullet cluster - „laboratoř“ chování temné hmoty



Co je temná hmota ?

„skály“, prach ?

nové neznámé částice ?

Co je temná hmota ?

~~„skály“, prach ?~~

nové neznámé částice ?

Standardní model elementárních částic

tři generace částic látky (fermiony)				interakce / nosiče sil (bosony)	
	I	II	III		
hmotnost náboj spin	$\approx 2,2 \text{ MeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  up	$\approx 1,28 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  charm	$\approx 173,1 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  top	0 0 1  gluon	$\approx 124,97 \text{ GeV}$ 0 0 0  higgs
	$\approx 4,7 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  down	$\approx 96 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  strange	$\approx 4,18 \text{ GeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  bottom	0 0 1  foton	
	$\approx 0,511 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$  elektron	$\approx 105,66 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$  mion	$\approx 1,7768 \text{ GeV}$ -1 $\frac{1}{2}$  tauon	$\approx 91,19 \text{ GeV}$ 0 1  Z boson	
	$< 1,0 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$  elektron. neutrino	$< 0,17 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$  mionové neutrino	$< 18,2 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$  tauonové neutrino	$\approx 80,39 \text{ GeV}$ ± 1 1  W boson	

KVARKY

LEPTONY

POLNÍ BOSONY
VEKTOROVÉ BOSONY

SKALÁRNÍ BOSONY

KVARKY

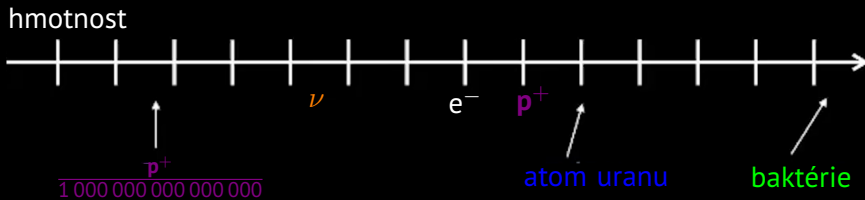
LEPTONY

POLNÍ BOSONY
VEKTOROVÉ BOSONY

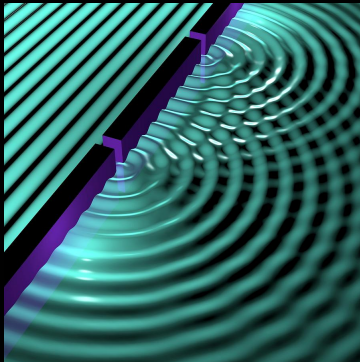
SKALÁRNÍ BOSONY

Pokud je temná hmota tvořena novou částicí...

- Jaká je její hmotnost ?
- Jak tyto částice interagují „s námi“ ?



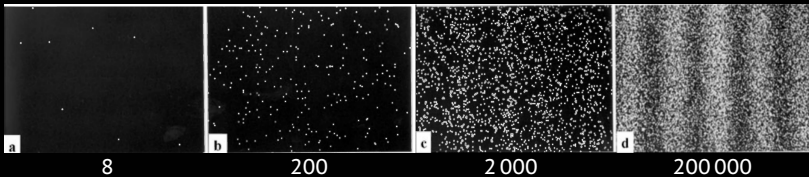
Dvouštěrbinový jev (Double-slit effect)



Světlo je vlna

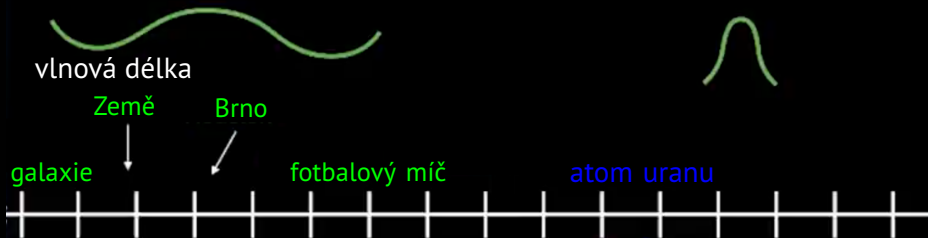


a také částice



Lehké částice se více podobají vlnám...

- „Velikost“ částice je úměrná její vlnové délce
- Čím je lehčí, tím je „větší“ (= účinný průřez)

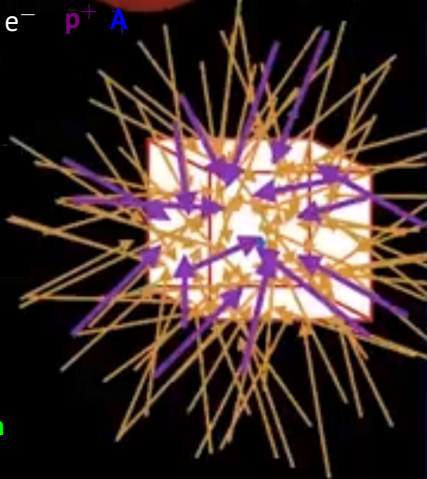


- Spodní mez hmotnosti pro temnou hmotu - cca $m_e^- / 10^{28}$

Pokud jsou částice temné hmoty „těžké“:

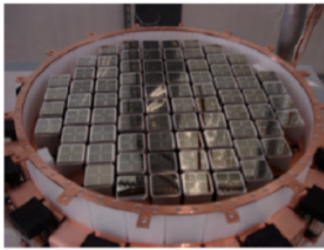
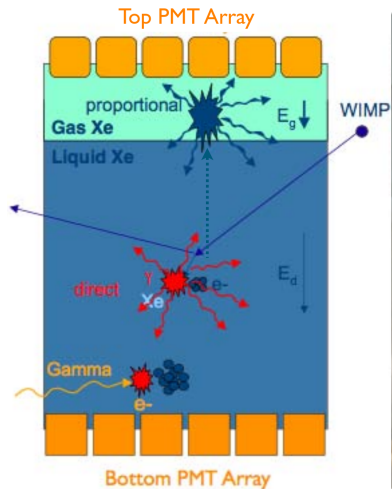


- Slabě interagující (jako neutrina)
- Hmotné a pomalé (v porovnání se světlem)
- Přezdívk: slabě interagující hmotné částice (WIMPs = *weakly interacting massive particles*)
- neutrony a alfa částice • elektrony a fotony
- temná hmota - miliardy „částic“ projdou naším tělem každou vteřinu



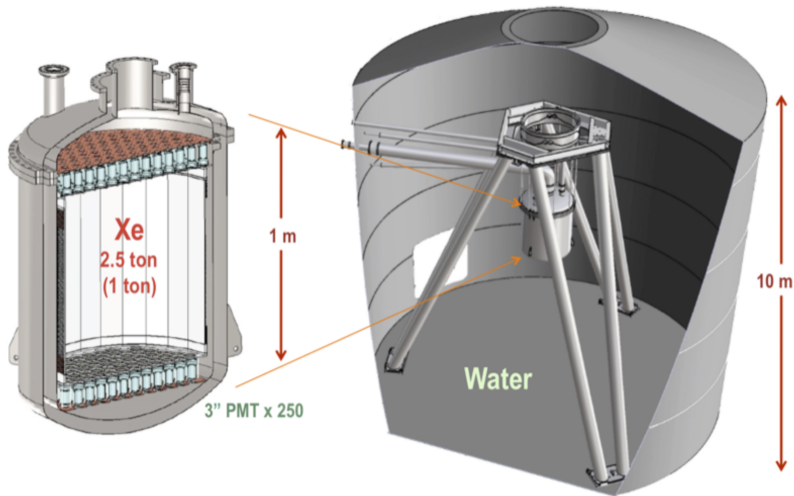
Detektor XENON v Gran Sasso v Itálii

XENON100



Detektor XENON v Gran Sasso v Itálii

XENON1T



Detektor XENON v Gran Sasso v Itálii

- spolupracující instituce

- Columbia University (USA)
- Gran Sasso National Laboratory (Italy)
- Johannes Gutenberg University Mainz (Germany)
- Max Planck Institute for Nuclear Physics, MPIK (Germany)
- National Institute for Subatomic Physics (NIKHEF) (The Netherlands)
- Rice University (USA)
- Shanghai Jiao Tong University (China)
- SubaTech (France)
- INFN and University of Bologna (Italy)
- University of California, Los Angeles (USA)
- Purdue University (USA)
- University of Coimbra (Portugal)
- University of Münster (Germany)
- University of Zürich (Switzerland)
- Weizmann Institute of Science (Israel)

- zatím bez úspěchu, jen „vylučující“ omezení

- předpokládaný účinný průřez částice WIMP v závislosti na její hmotnosti

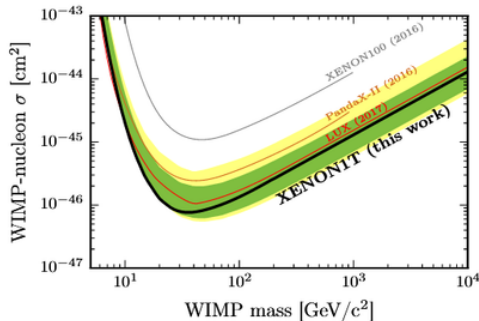
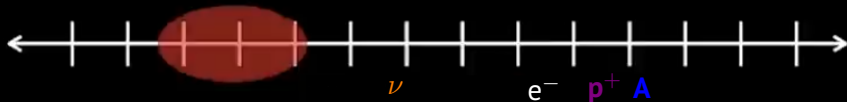
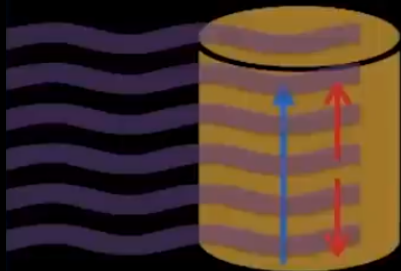


FIG. 4: The spin-independent WIMP-nucleon cross section limits as a function of WIMP mass at 90% confidence level (black) for this run of XENON1T. In green and yellow are the 1- and 2 σ sensitivity bands. Results from LUX [27] (red), PandaX-II [28] (brown), and XENON100 [23] (gray) are shown for reference.

Pokud jsou částice temné hmoty „lehké“: ADMX detektor (UWa, Seattle)



- Vlnová klubka temné hmoty, axiony, mohou interagovat s elektromagnetickým polem



- Oscilující temná hmota přemění statické magnetické pole na oscilující elektrické pole



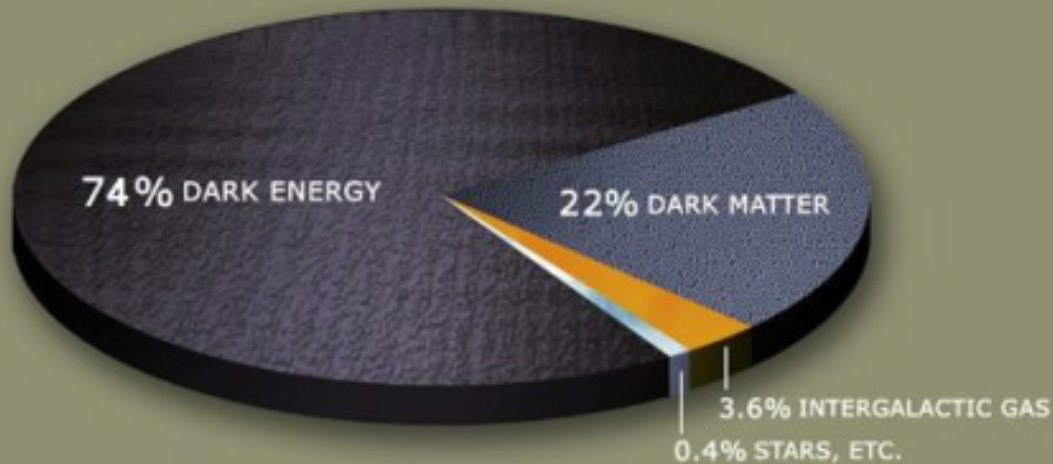
Pokud jsou částice temné hmoty „lehké“: Casper detektor (University of Mainz)



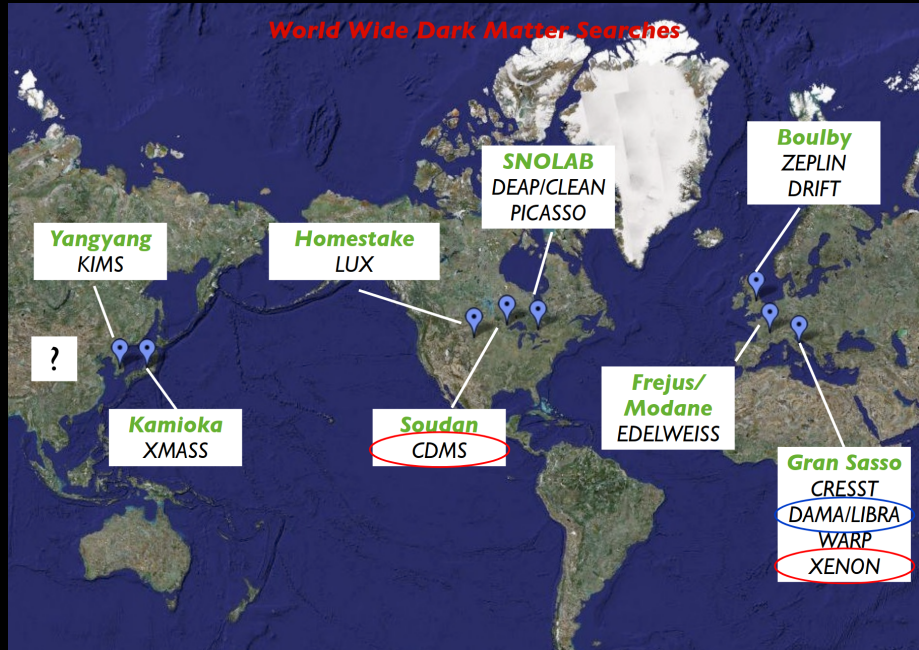
- Axiony interagují s částicemi se spinem
- Působí jako magnetická pole
- Částice se spinem účinkují jako malé magnety



Podíly jednotlivých druhů „hmoty“



World Wide Dark Matter Searches

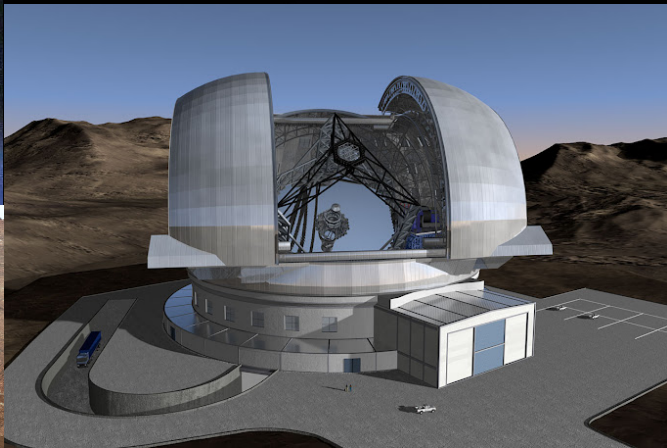
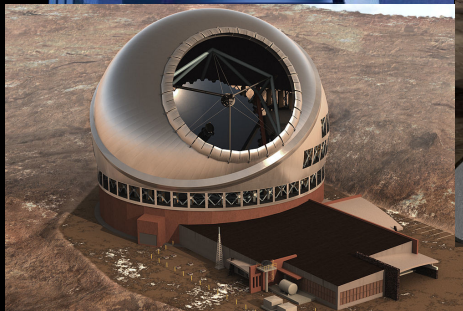
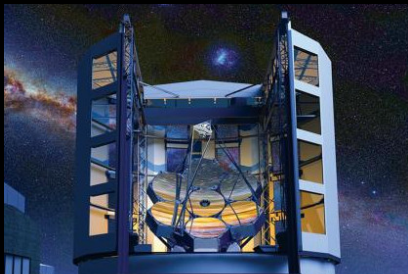


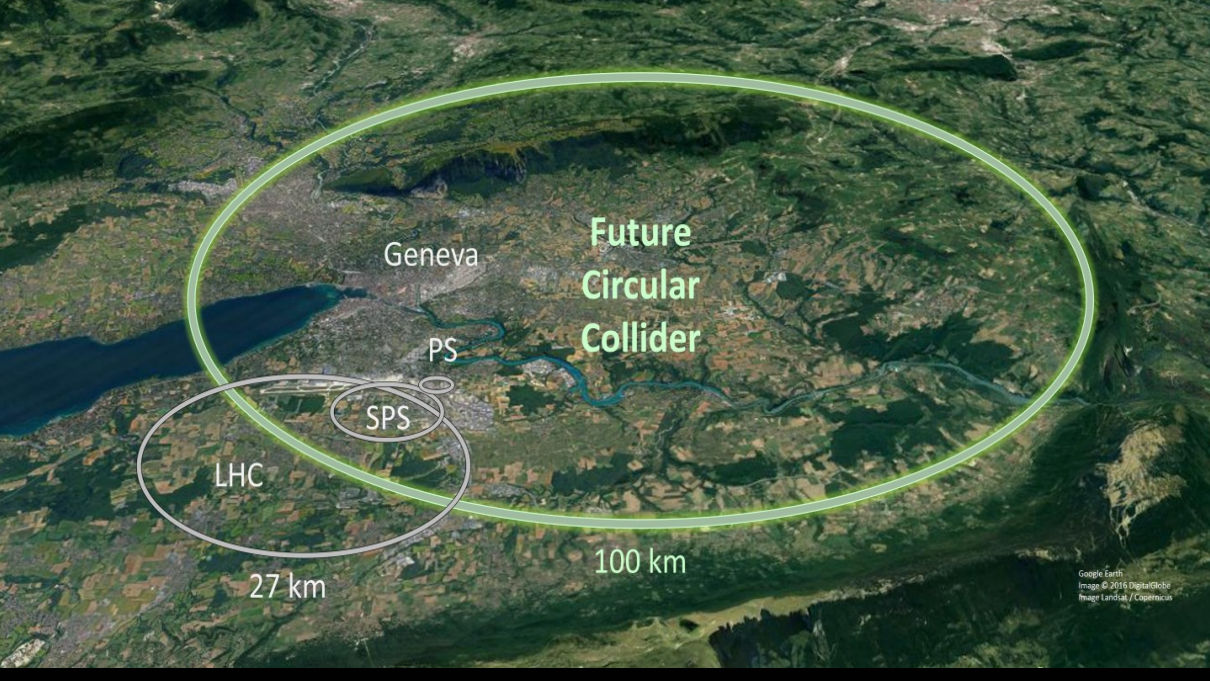
Současnost: Nová generace dalekohledů



Observatoř Vera C. Rubin - 8m dalekohled + 3200megapixelová kamera - největší digitální kamera, která byla kdy vyrobena pro optickou astronomii

Budoucnost: Nová generace “obřích” dalekohledů





Future
Circular
Collider

Geneva

PS

SPS

LHC

27 km

100 km

Děkuji za pozornost