

Fyzikální motivace experimentů na LHC

Jiří Chýla, Fyzikální ústav AV ČR

- ✚ Co to je **L**arge **H**adron **C**ollider
- ✚ jak vypadá detektor ATLAS,
- ✚ proč byl postaven LHC,
- ✚ co o mikrosvětě a velkém třesku víme,
- ✚ co se o nich domýšlíme,
- ✚ teorie všeho nebo čehokoliv?
- ✚ co bych LHC nepřál a
- ✚ na co se naopak těším.

Krátke



The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

CP symetrie

Higgs



Photo: SCANPIX

Yoichiro Nambu

🏆 1/2 of the prize



Photo: Kyodo/Reuters

Makoto Kobayashi

🏆 1/4 of the prize



Photo: Kyoto University

Toshihide Maskawa

🏆 1/4 of the prize

24. listopadu 2008

Semínář KF FJFI

Základní informace o LHC

Ženevské
jezero



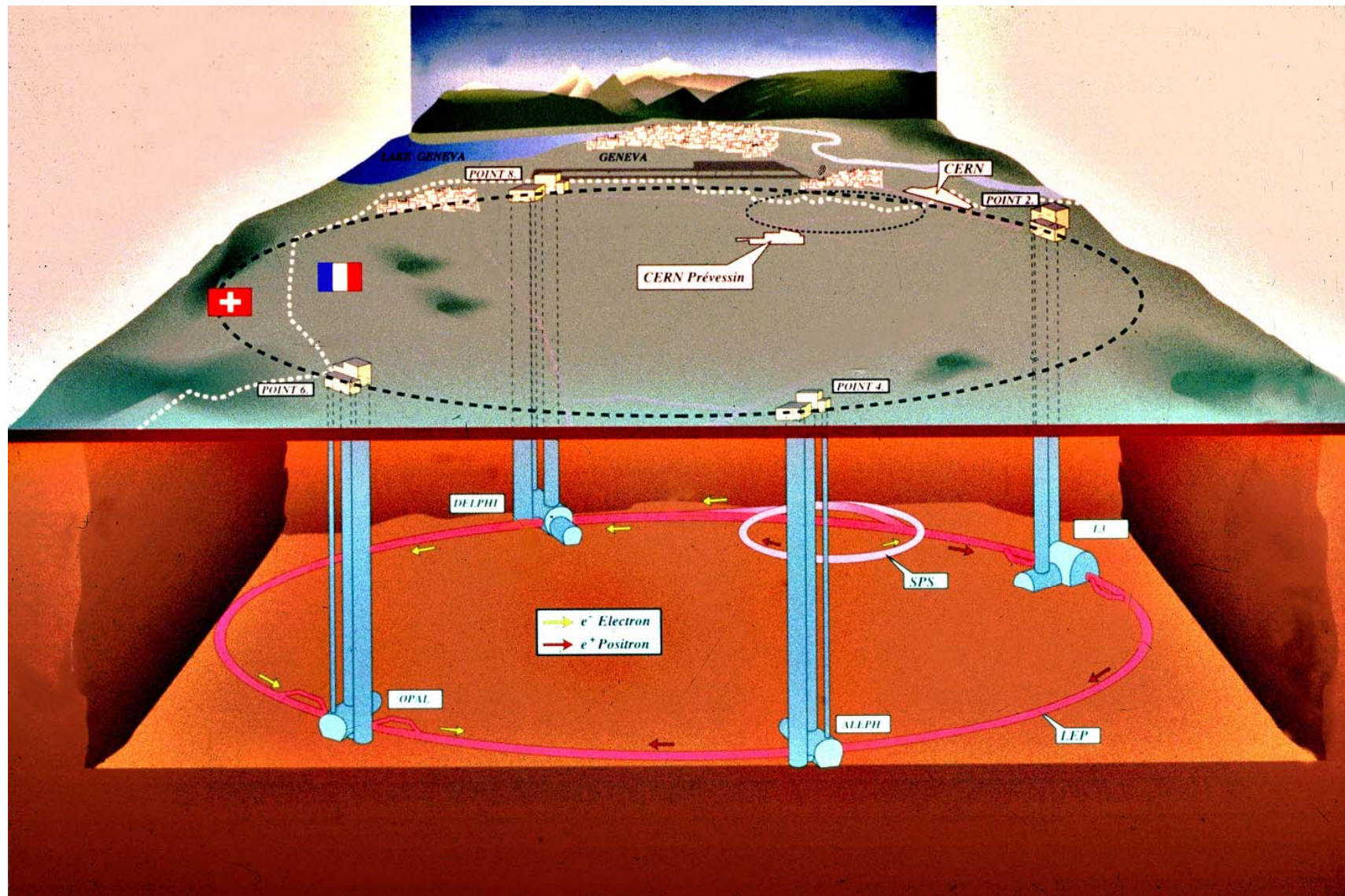
LEP/LHC

SPS

Protonový
synchrotron



Tunel LHC je 27 km dlouhý a cca 100 metrů pod zemí





24. listopadu 2008

Semínář KF FJFI

5



24. listopadu 2008

Semínář KF FJFI

6

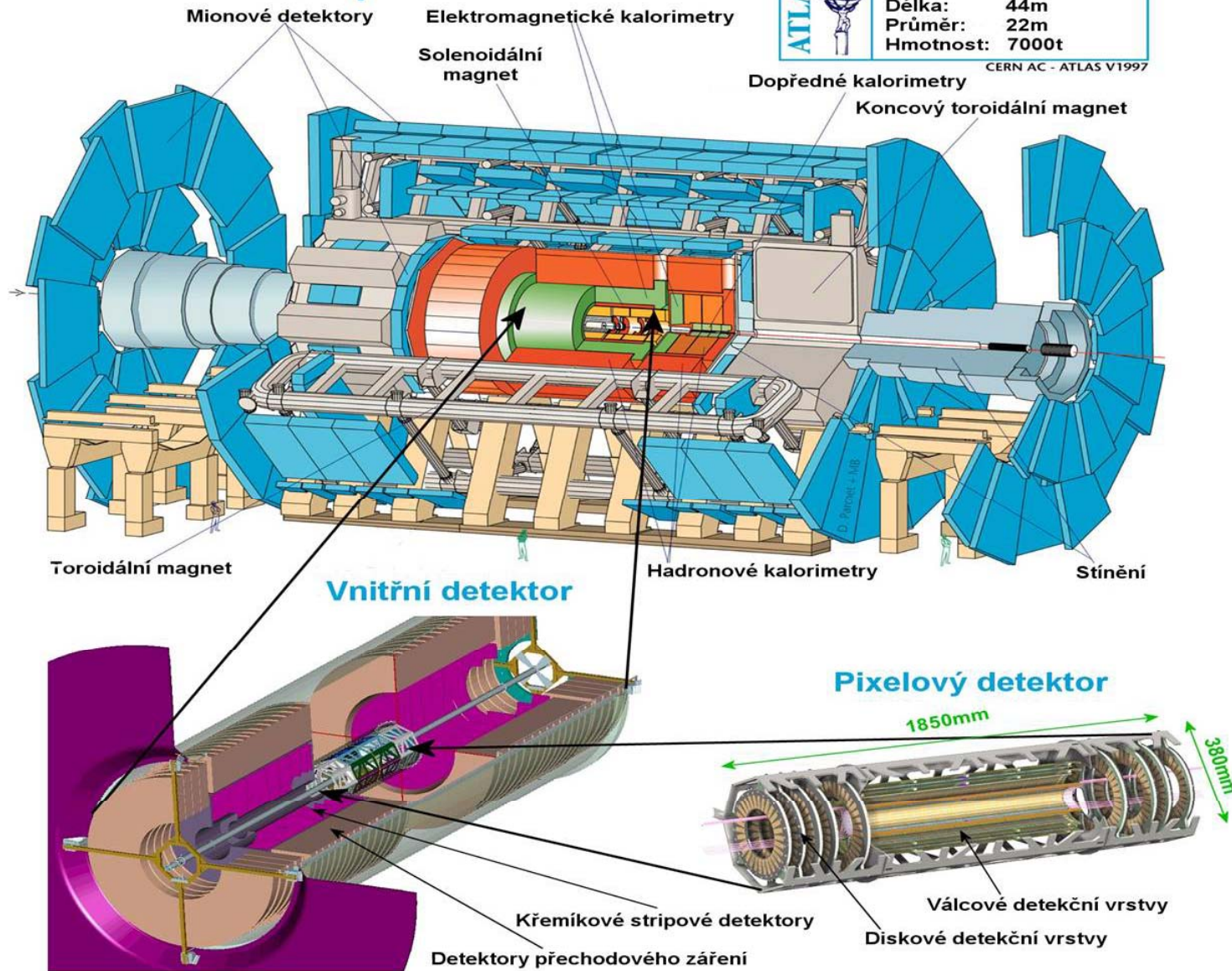
Quantity	Základní parametry LHC	number
Circumference		26 659 m
Dipole operating temperature		1.9 K (-271.3°C)
Number of magnets		9593
Number of main dipoles		1232
Number of main quadrupoles		392
Number of RF cavities		8 per beam
Nominal energy, protons		7 TeV
Nominal energy, ions		2.76 TeV/u (*)
Peak magnetic dipole field		8.33 T
Min. distance between bunches		~7 m
Design luminosity		$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam		2808
No. of protons per bunch (at start)		1.1×10^{11}
Number of turns per second		11 245
Number of collisions per second		600 million

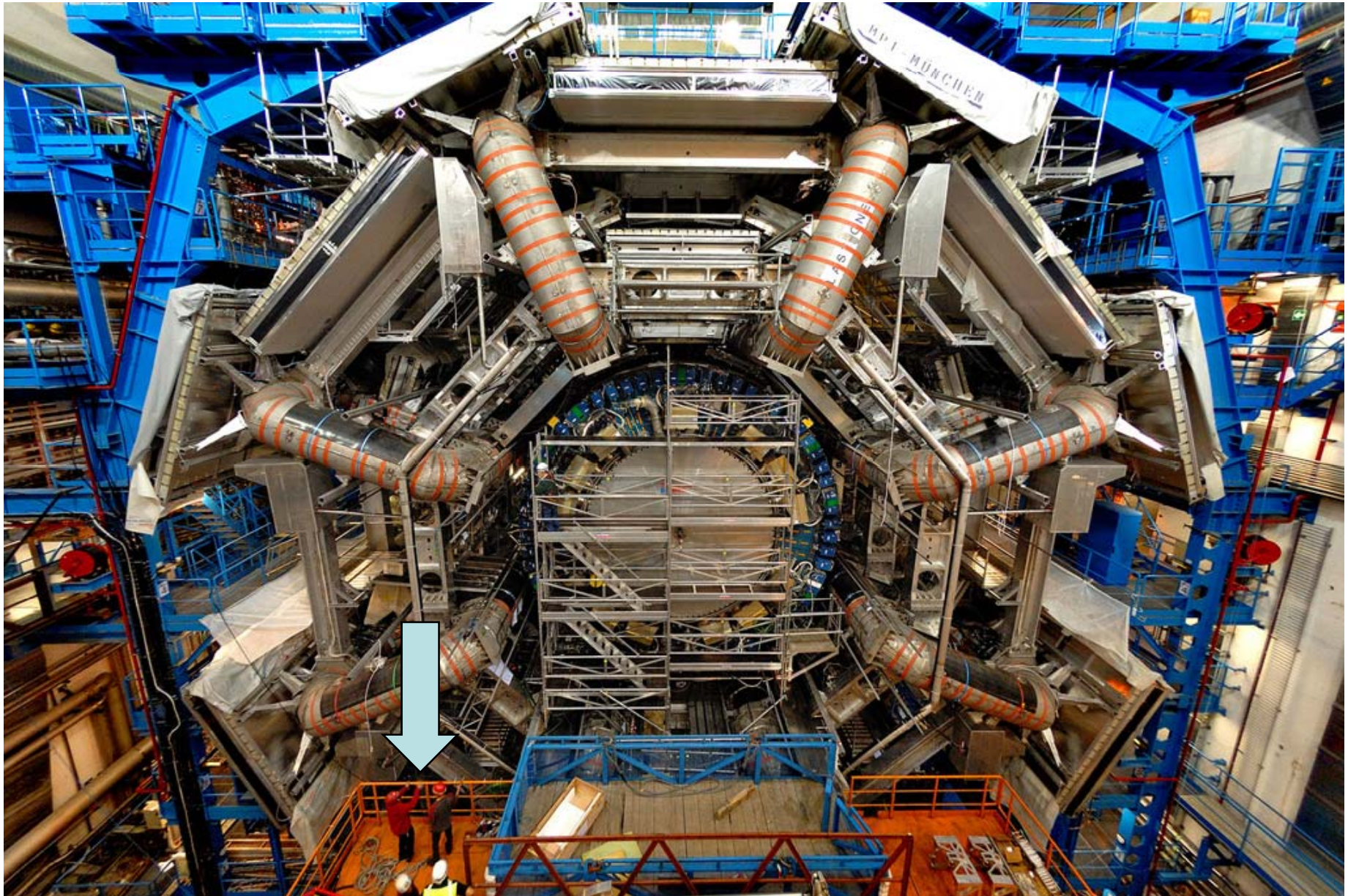
Jak vypadá detektor ATLAS

Detekční aparatura ATLAS

	Charakteristiky detektoru	
	Délka:	44m
	Průměr:	22m
	Hmotnost:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

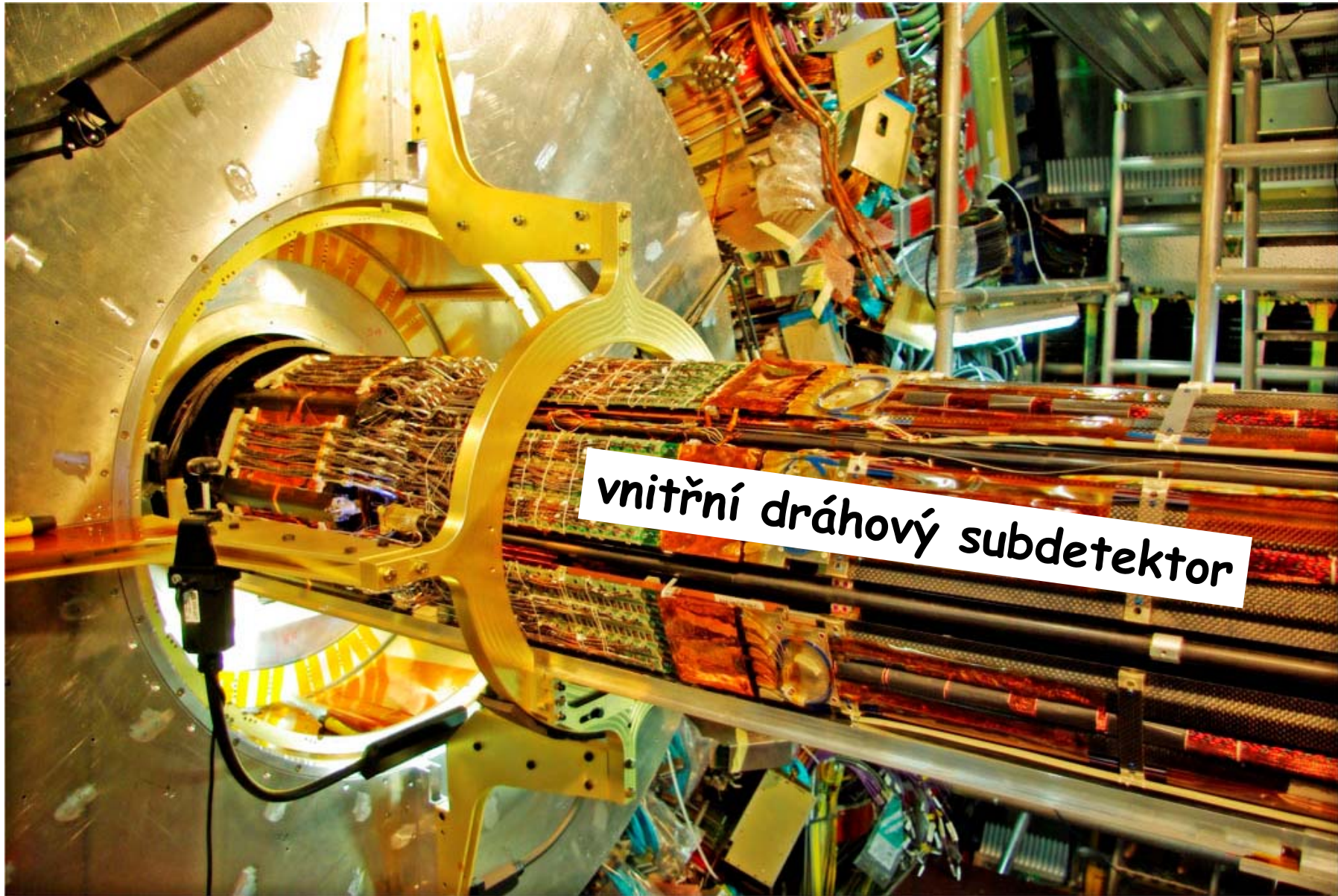




24. listopadu 2008

Semínář KF FJFI

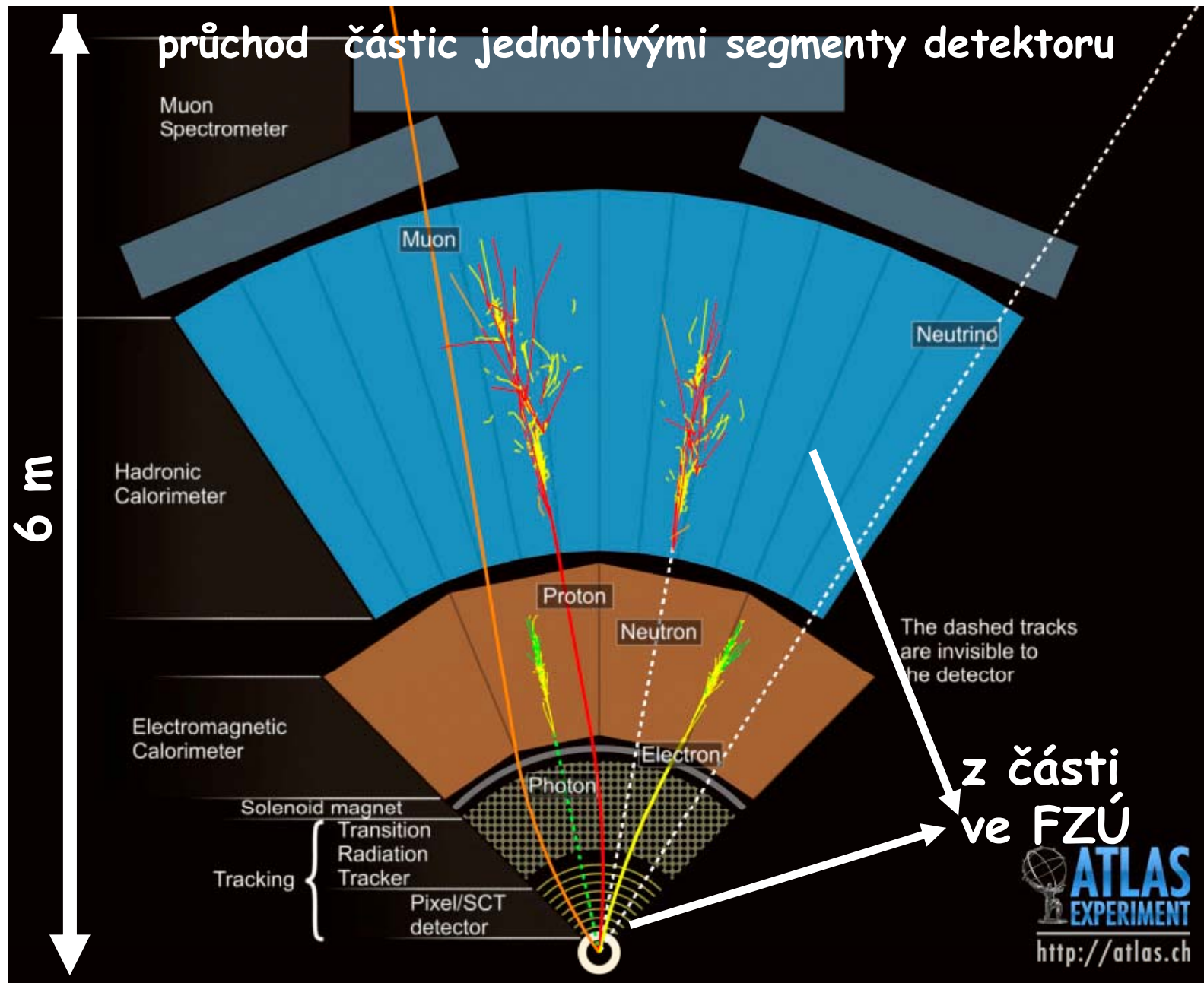
10



24. listopadu 2008

Semínář KF FJFI

11



Proč LHC?

Cílem experimentů na LHC je najít odpovědi na některé ze **základních otázek dnešní fyziky mikrosvěta:**

- jakým mechanismem získávají některé částice **klidovou hmotnost**?
- existují i **jiné základní částice a síly**, než ty, jež známe dnes a z nichž je složena „běžná“ hmota?
- jsou základními stavebními kameny hmoty **částice, nebo složitější objekty** jako jsou například **struny**?
- má prostor **více rozměrů, než ty tři**, jež jsme schopni svými smysly vnímat?

Odpovědi na tyto otázky jsou důležité i pro kosmologii, neboť je stále jasnější, že

struktura a zákonitosti mikrosvěta úzce souvisí se vznikem a ranným stádiem vývoje vesmíru.

Je tomu tak proto, že pro vývoj vesmíru těsně po velkém třesku byly rozhodující **struktury a zákonitosti**, které zkoumá fyzika částic.

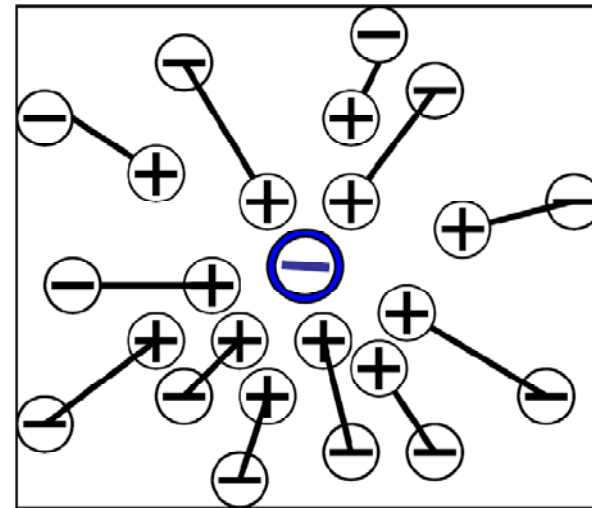
Ale i naopak: z vesmíru k nám, tak jako již mnohokrát v minulosti, může přiletět objekt, jenž bude **klíčem k hlubšímu pochopení zákonitostí mikrosvěta.**

Co o mikrosvětě víme

Základním nástrojem při popisu jevů v mikrosvětě je **kvantové teorie pole (KTP)**, jež vychází **z kvantové mechaniky a speciální teorie relativity**.

KTP je království, v němž

- káču (spin) **nelze zastavit**
- vakuum **není prázdné**
- konstanta **není konstantní**
- a kde vládne **Maestro Pauli**



Polarizace vakua vede ke klíčovému pojmu KTP, jímž je **efektivní vazbový parametr $g(r)$ příslušné síly**, jenž **závisí na vzdálenosti mezi částicemi (více později)**.

Základní dnešní znalosti zákonů mikrosvěta jsou shrnuty ve
standardním modelu

Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty

tři generace základních fermionů

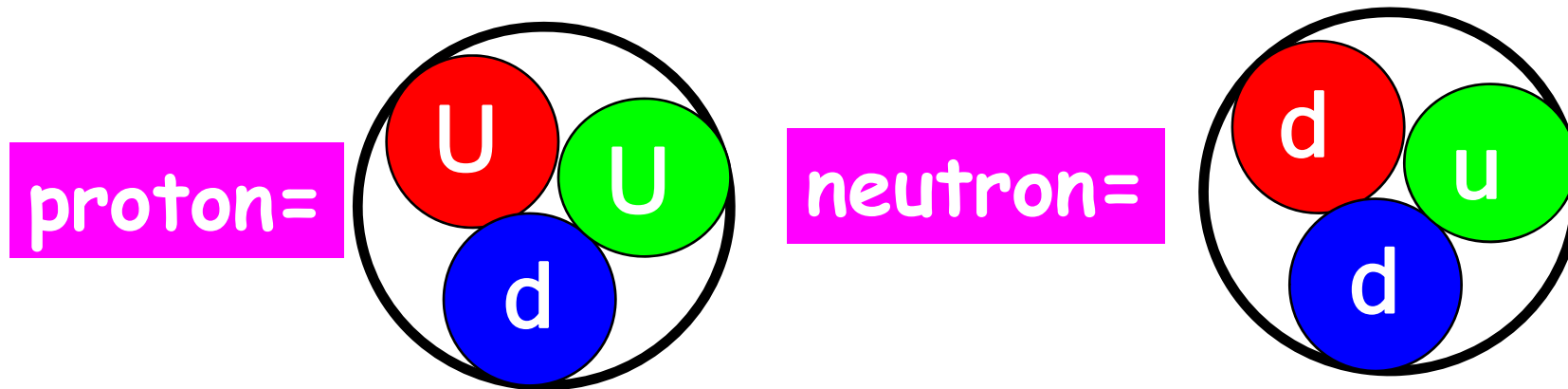
tj. částic se spinem $1/2$, jež se dále dělí na

kvarky a leptony

$Q = \frac{2}{3}$	u u u (0.3 MeV)	c c c (1.5 GeV)	t t t (175 GeV)
$Q = -\frac{1}{3}$	d d d (0.3 MeV)	s s s (0.5 GeV)	b b b (4.5 GeV)
$Q = 0$	ν_e (3 eV)	ν_μ (0.2 MeV)	ν_τ (0.2 GeV)
$Q = -1$	e^- (0.5 MeV)	μ^- (0.1 GeV)	τ^- (1.8 GeV)

hmotnost

Z **barevných kvarků** jsou složeny dobře známé částice, jako jsou například **proton a neutron**



Vše nasvědčuje tomu, že na rozdíl od leptonů

kvarky v přírodě neexistují jako volné částice

ale vždy jen **uvnitř částic**, jako jsou protony a neutrony.

Experimentální data lze pochopit jen za předpokladu, že

hadrony jsou bezbarvé kombinace kvarků.

Síly mezi kvarky a leptony

gravitační
elektromagnetické
slabé
silné.

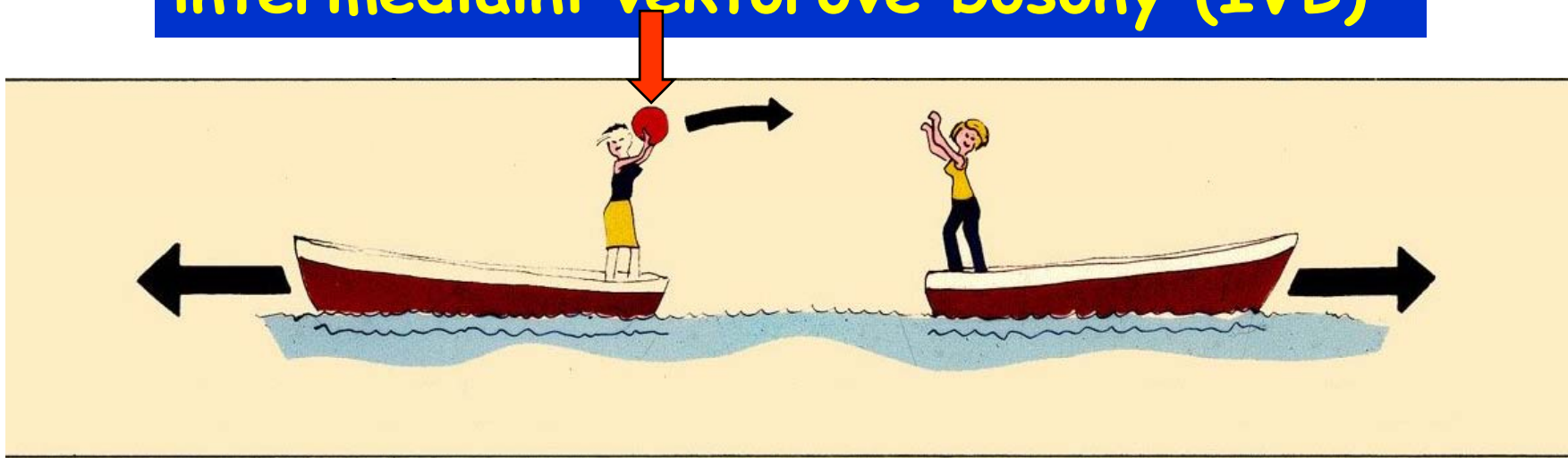
Patří do jedné třídy tzv.

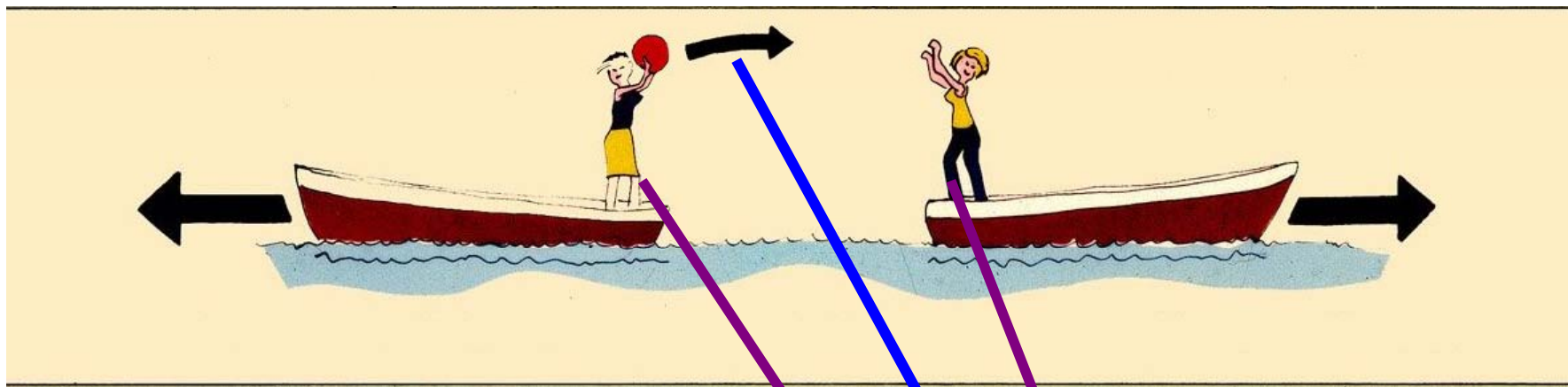
kalibračních teorií

jež představují základní rámec pro popis sil v mikrosvětě.

Mají společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí **výměny** zprostředkujících částic se spinem 1, tzv.

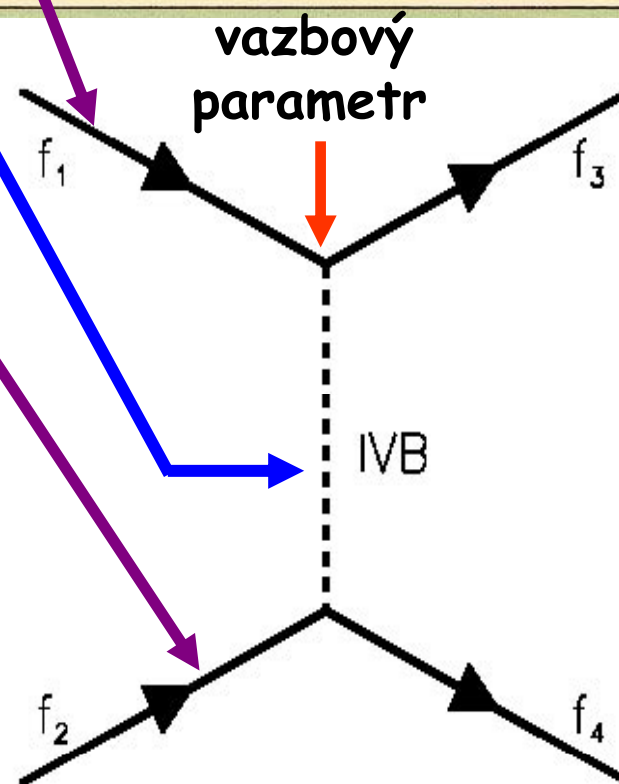
intermediální vektorové bosony (IVB)





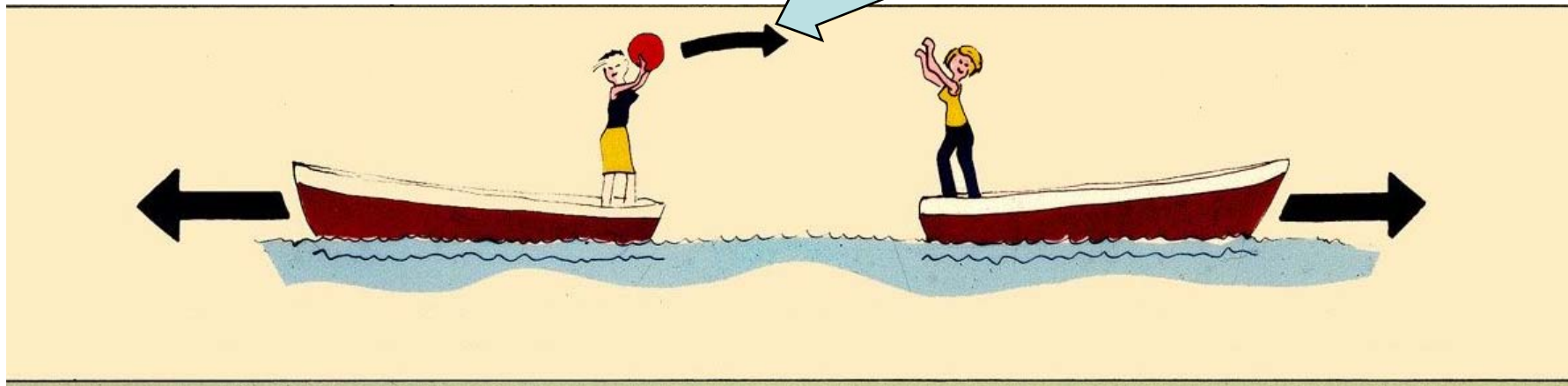
Grafickou reprezentací
výměnných sil jsou v odborných
textech Feynmanovy diagramy:

Dosah sil je nepřímo úměrný
hmotnosti příslušného IVB



Elektromagnetické síly

Foton

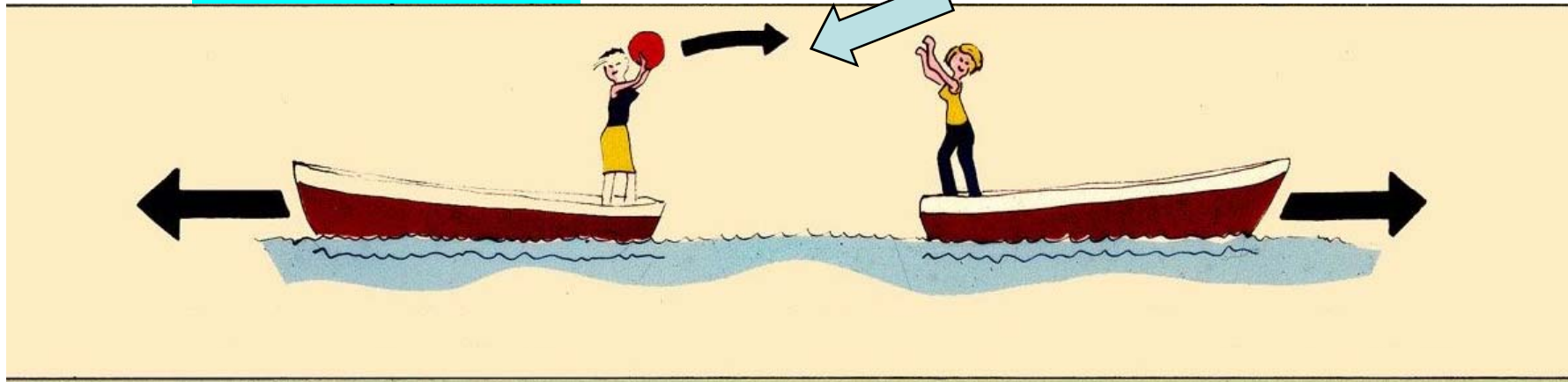


základní vlastnosti:

- působí jen na **elektricky nabité částice**
- jsou **invariantní** vůči záměnám
 - vpravo ↔ vlevo** a
 - částice ↔ antičástice**
- mají **nekonečný dosah**, foton má nulovou hmotnost
- jsou **dobře** popsány **kvantovou elektrodynamikou (QED)**
- kromě **velmi malých vzdáleností**, kde QED **nemá smysl**.

Slabé síly

bosony W^+, W^-, Z



základní vlastnosti:

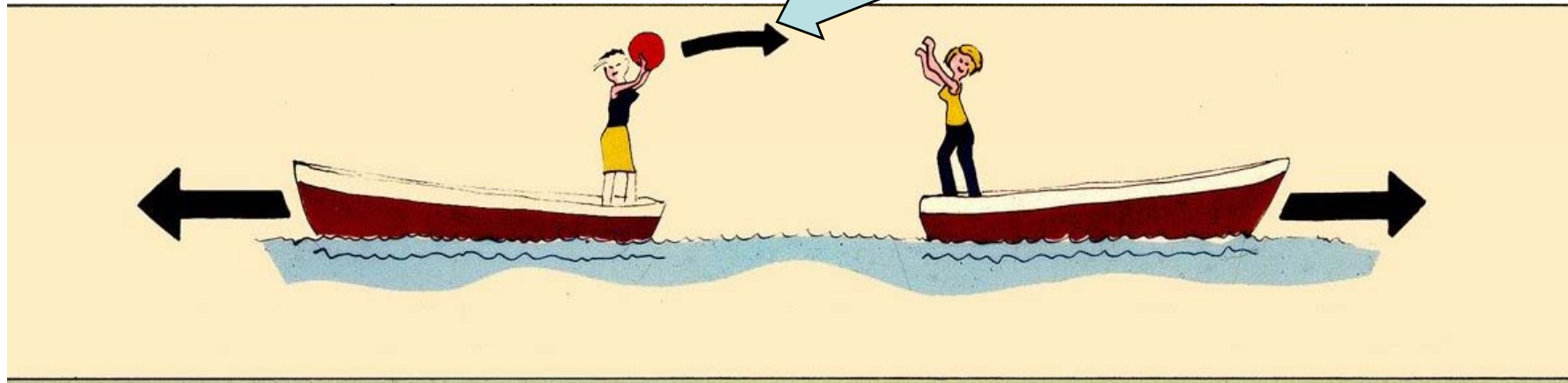
- působí na všechny kvarky a leptony
- nejsou invariantní vůči záměnám
 - vpravo \leftrightarrow vlevo a
 - částice \leftrightarrow antičástice, ani kombinaci
 - vpravo \leftrightarrow vlevo & částice \leftrightarrow antičástice
- mají **konečný** dosah, W^+, W^-, Z mají velkou hmotnost
- jsou popsány **teorií** Glashowa, Weinberga a Salama
- **IVB bosony** W^+, W^- a Z interagují sami se sebou!

Kobayashi
Maskawa



Silné síly

osm barevných gluonů



základní vlastnosti:

- působí jen na **barevné částice** tj. kvarky i gluony
- **gluony interagují sami se sebou**
- jsou **invariantní** vůči záměnám

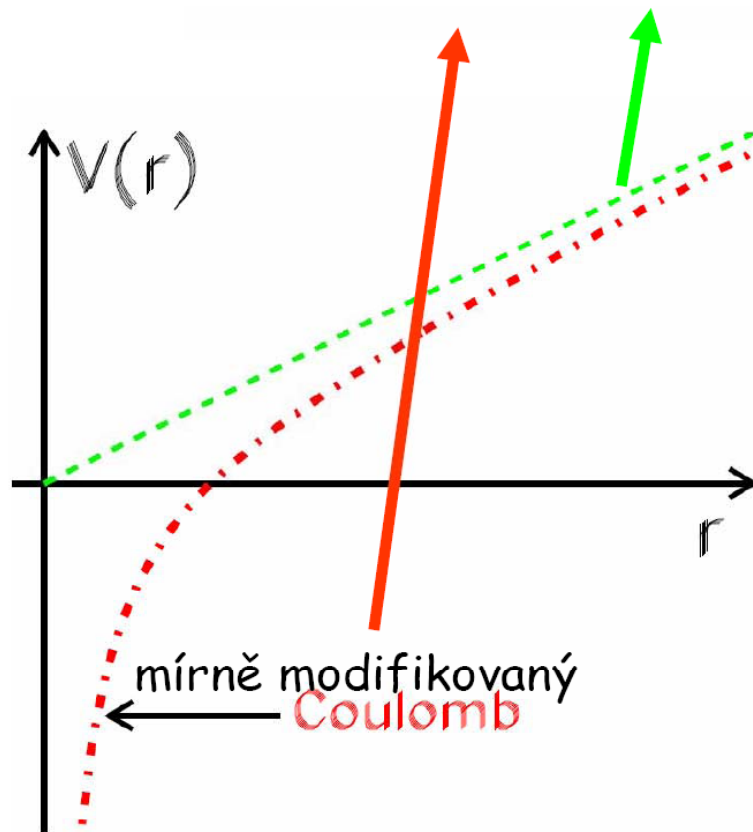
vpravo ↔ vlevo a

částice ↔ antičástice

- mají velmi neobvyklé chování na velkých vzdálenostech
- jsou popsány **kvantovou chromodynamikou (QCD)**

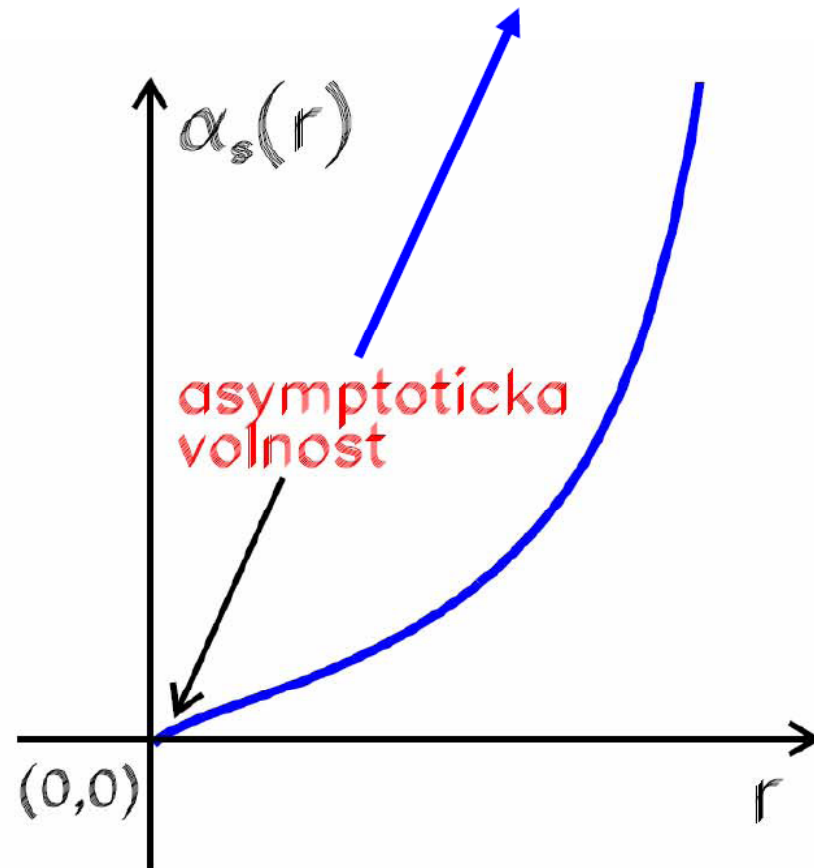
Potenciál mezi kvarky

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + \kappa r,$$

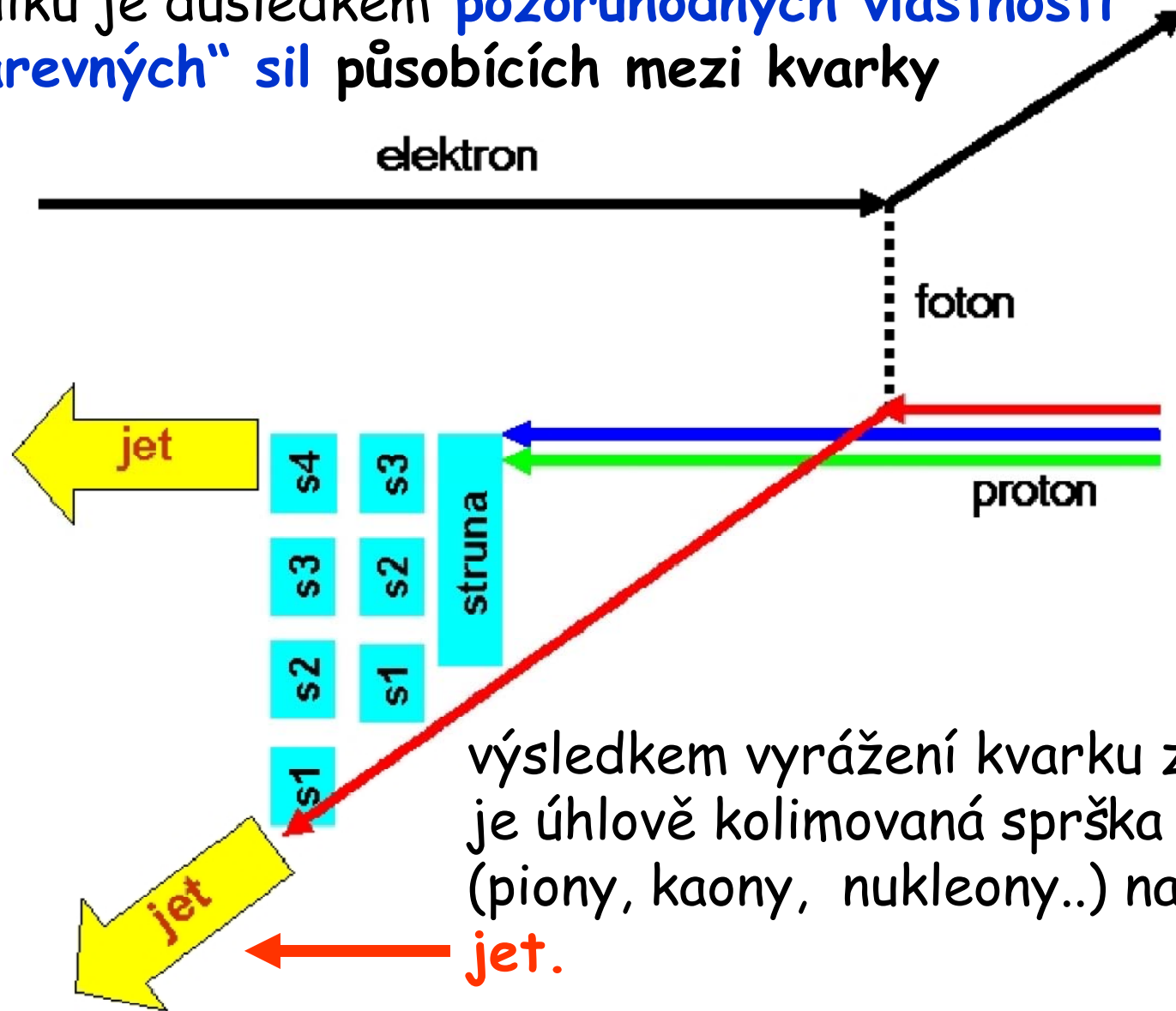


efektivní barevný náboj

$$\alpha_s(r) = \frac{g^2(r)}{4\pi} \propto \frac{1}{\ln(r_0/r)}$$



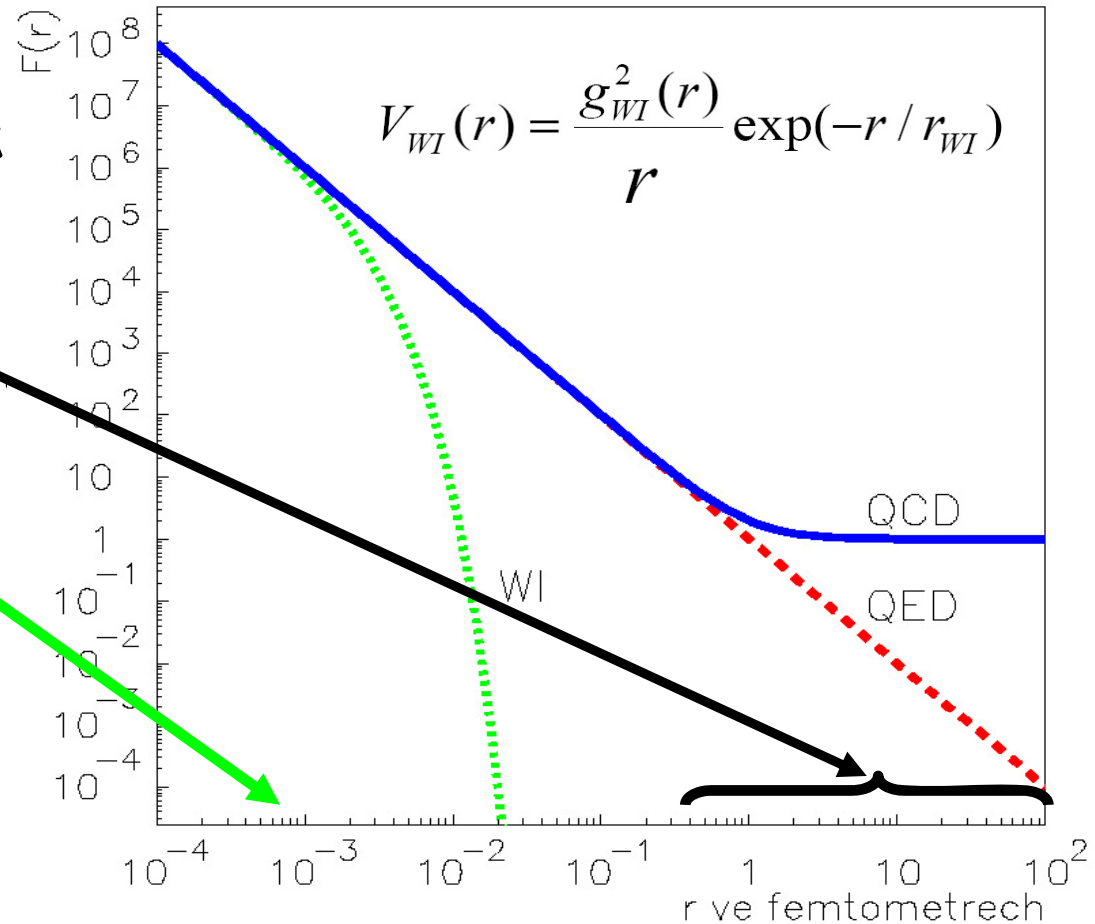
Důvod, proč nelze proton „ionizovat“ jako atom vodíku je důsledkem **pozoruhodných vlastností „barevných“ sil** působících mezi kvarky



Proč se nám zdají být různé síly tak rozdílně silné?

Protože je porovnáme na vzdálenostech mnohem větších než je poloměr protonu, tj. $r_p = 10^{-13}$ cm. Na vzdálenostech cca $r < 0.001 r_p$ jsou elektromagnetické, silné a slabé síly skoro stejně velké.

Této vzdálenosti odpovídají energie $M_{EW} \approx 100$ GeV



Srovnání závislostí elektromagnetických (čárkovaně), slabých (tečkovaně) a silných (plná čára) sil mezi dvěma kvarky či na vzdálenosti.

Síly jako celek tedy

- **nejsou** invariantní vůči **prostorové inverzi (P)**
- **nejsou** invariantní vůči **nábojové inverzi (C)**
- **ani vůči kombinované inverzi CP**
- **ale nemění kvarky na leptony**

Narušení P, C a hlavně CP invariance bylo zpočátku nevíтанé, neboť fyzikové očekávali, že **přírodní zákony jsou vůči těmto „přirozeným“ symetriím invariantní i v mikrosvětě.**

Dnes se jasné, že právě **narušení CP invariance** sil v mikrosvětě vděčíme za naši existenci, neboť bez něj by se vesmír **nemohl vyvinout do dnešní podoby.**

Standardní model je až překvapivě úspěšný při popisu jevů mikrosvěta. Je ovšem **zjevně neúplný** a jistě nepředstavuje konečnou úroveň struktury mikrosvěta a jeho zákonů neboť

- ✚ obsahuje cca **20 volných parametrů** (hmotnosti, náboje a několik dalších)
- ✚ **nesjednocuje** všechny tři síly a
- ✚ **nezahrnuje** gravitaci.

Ústřední otázka dnešního standardního modelu:

Jak vznikají klidové hmotnosti kvarků, leptonů a IVB a co způsobuje jejich rozdílné hodnoty?

Může za to Higgsův boson?

Ale pozor: klidové hmotnosti nukleonů (tj. většiny hmoty ve vesmíru) **Higgsovým mechanismem nevznikají!!!**

Higgsův mechanismus pro dělníky a mistry

Higgsovo pole ve vakuu -
projev spontánního narušení kalibrační symetrie



Jára C.

Higgsovo pole ve vakuu



se obtížně prodírá Higgsovým polem a získává tím svou klidovou „hmotnost“



fáma, že jde Jára

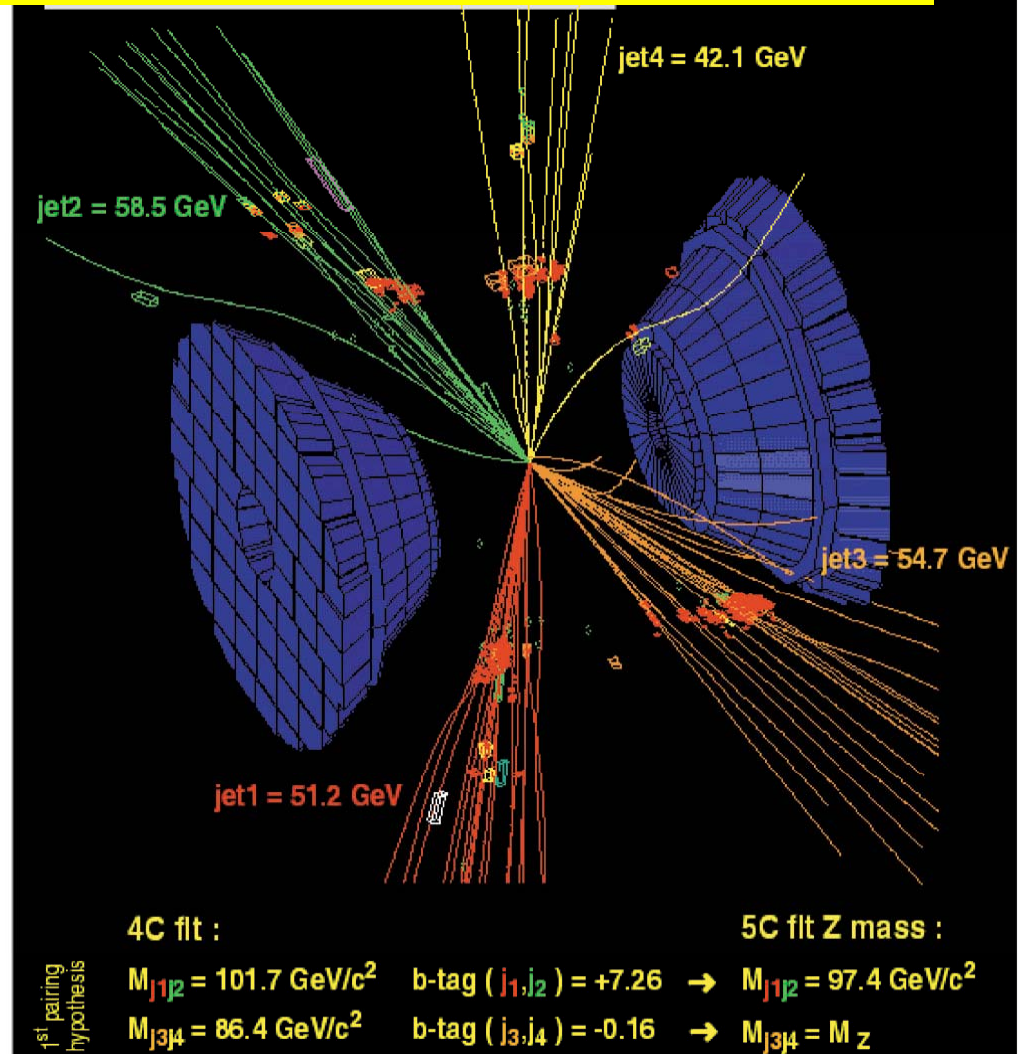
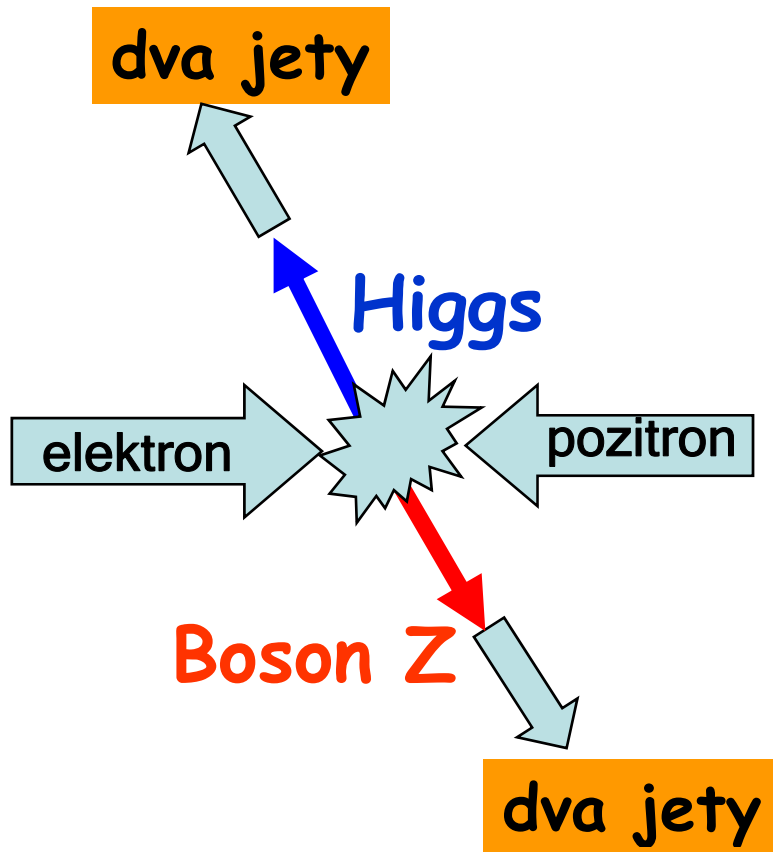


se sama „šíří“ Higgsovým polem a představuje tak analogii Higgsova bosonu



Záblesk budoucnosti: byl na LEPu viděn Higgs?

nejvhodnější proces:



Na konci provozu LEP bylo několik takových případů nalezeno, ale nebyly zcela přesvědčivé. Otázka zůstává nezodpovězena.

Co o velkém třesku víme

1927: **G. Lemaître**: vesmír vznikl při **výbuchu primordiálního atomu, prostor se rozpíná**, formuloval „**Hubbleův zákon**“ 2 roky před Hubblem.

1929: **E. Hubble**: spirální mlhoviny jsou **extragalaktické**, našel a prosadil empirický vztah (**Hubbleův zákon**) mezi rychlostí vzdalování galaxií a jejich vzdáleností.

1934: **Zwicky**: v galaxiích musí být **temná hmota**

1946: **Gamow, Alpher, Herman**: syntéza lehkých prvků v raném vesmíru, předpověď **reliktního mikrovlnného záření**

1964: **Penzias, Wilson**: objevili **reliktní mikrovlnné záření** (Nobelova cena 1978)

1992: sonda **COBE** pozorovala **anizotropii reliktního záření** (**Mather&Smoot** Nobelova cena 2006).

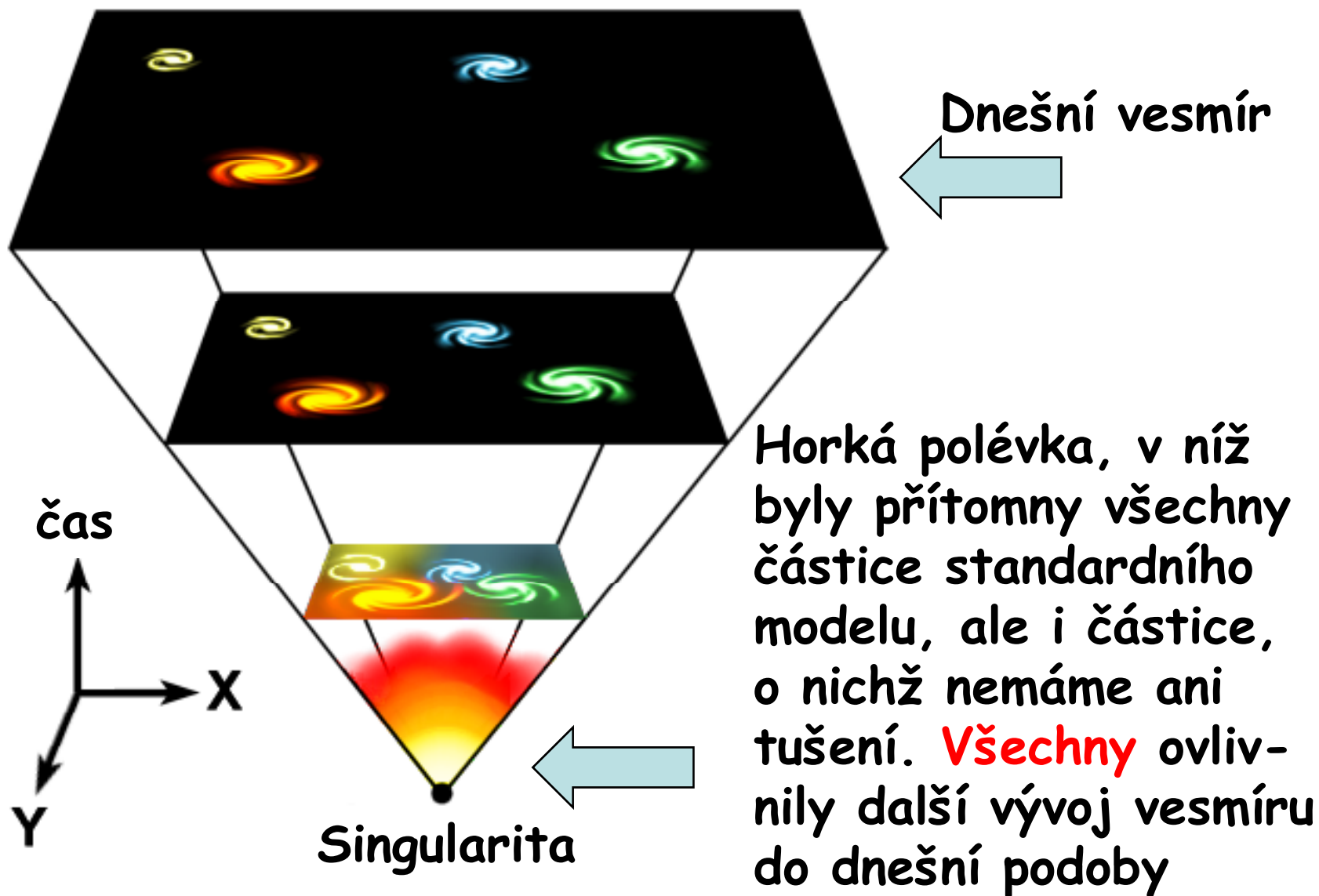
1998: expanze vesmíru **se zrychluje!!!**

Georges Lemaitre (1894 - 1966)



katolický kněz a **nedoceněný génius**, byl po **Einsteinovi**, **Fridmanovi** a **de Sitterovi** čtvrtým fyzikem, jenž aplikoval Einsteinovu obecnou teorii relativity **v kosmologii**.

Lemaitrova představa o rozpínání vesmíru:



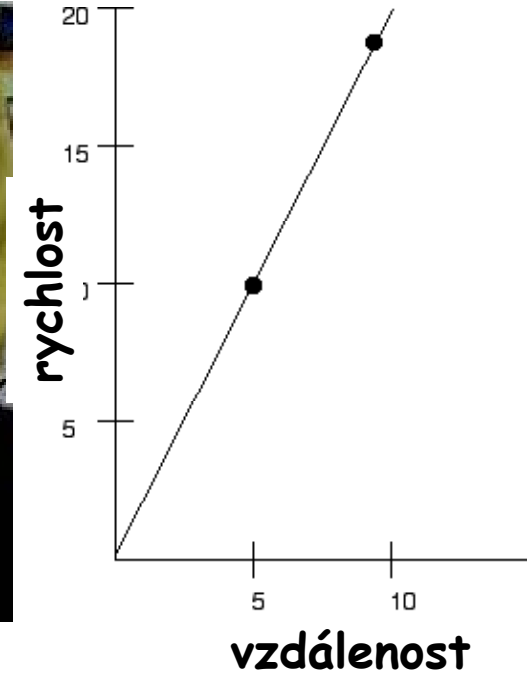
To co expanduje je sám prostor, nikoliv předměty do již existujícího prostoru. Naopak, předměty se primárně vzdalují proto, že se prostor rozpíná. Rychlost tohoto rozepínání **může být větší než rychlost světla**.

Existují tělesa, která jsou „**vázaná**“ a jež se s expanzí nerozpínají (například **Brooklyn** ve filmu **Woodyho Allena Annie Hall**). Jedině díky nim můžeme expanzi pozorovat.

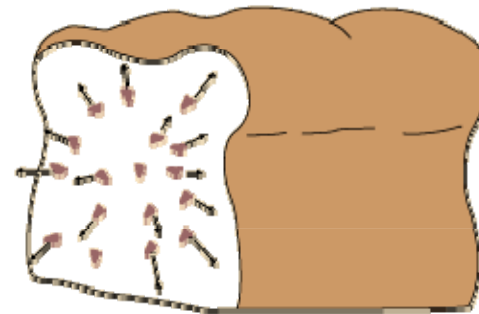
Rozpínání vesmíru definuje pro každého pozorovatele **preferovaný systém, v němž se všechny galaxie od sebe vzdalují. Takový existuje jenom jeden.**

Pohyb vůči tomuto systému **lze detegovat**. Například náš sluneční systém se vůči němu pohybuje rychlostí **370 km/sec**.

Velký třesk je velmi **netriviální hypotéza**, kterou si nelze plně představit, ale lze ji jen přiblížit různými analogiemi jako je rozpínající se míč



či kynoucí
těsto



24. listopadu 2008

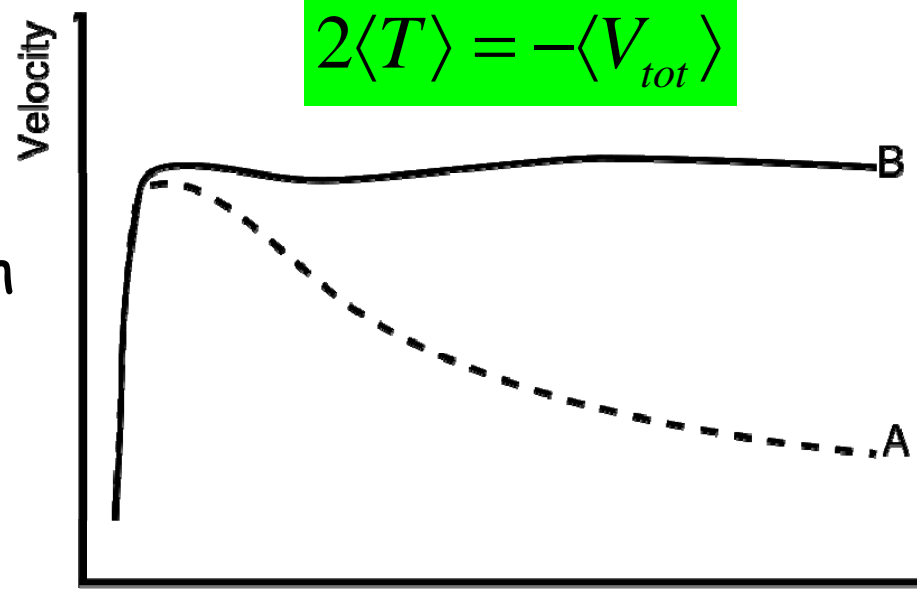
Temná hmota

Již od 30. let 20. století astronomové získávali svědectví o tom, že **ve vesmíru je více hmotnosti, než pozorujeme:**



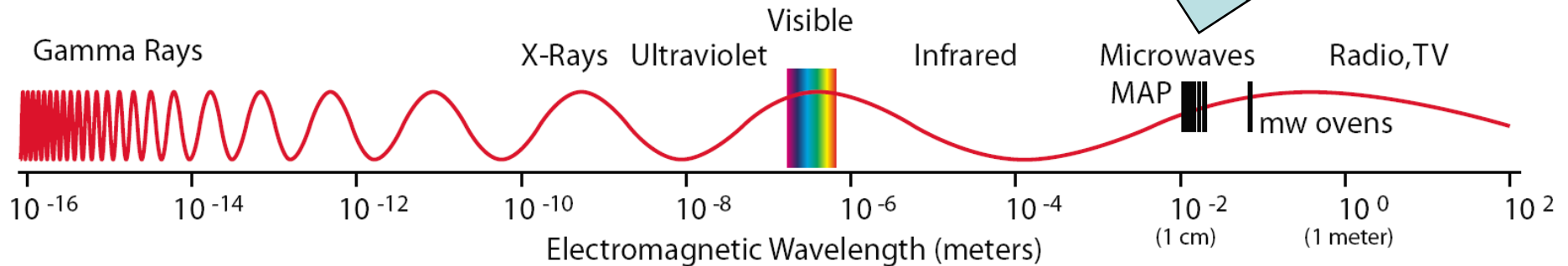
1933 Fritz Zwicky: rychlosti galaxií na okraji klastru Coma neodpovídaly viditelné hmotnosti. Pro vysvětlení pohybu galaxií bylo **třeba cca 400 krát více hmotnosti.**

1975: Vera Rubin: rotační křivky spirálních galaxií **jsou ploché až na samý okraj.**



1965: Penzias a Wilson (náhodně) objevili

mikrovlnné reliktní záření



a tím přinesli druhé a **klíčové experimentální svědec-
tví** ve prospěch **hypotézy rozpínán vesmíru**, která
se již tehdy (**Hoylem** posměšně) nazývala



Prvotní teorie velkého třesku a její problémy

- ☞ kde se vzala **převaha hmoty nad antihmotou?**
 - ☞ vesmíru je **příliš homogenní**
 - ☞ vesmír je **příliš izotropní** (hvězdy a CMB)
 - ☞ vesmír se zdá být **příliš plochý**
 - ☞ co tvoří **temnou hmotu a temnou energii?**
 - ☞ jak vznikly **nehomogenity?**
- a především: **odkud se vzala hmota a**



co a proč třesklo?

Teorie velkého třesku by se tedy měla správně nazývat

Teorie vesmíru krátce po velkém třesku

Jak vznikla ve vesmíru převaha hmoty nad antihmotou?

Na jeden **nukleon** ve vesmíru dnes připadá v cca **miliarda reliktních fotonů**, ale po **antinukleonech** není ani vidu ani slechu, i když se všeobecně předpokládá, že na počátku velkého třesku bylo hmoty a antihmoty **přesně stejně**.

Andrej Sacharov (1967):

Převaha hmoty nad antihmotou vznikla během počáteční fáze vývoje vesmíru v důsledku **tří okolností**, které tehdy charakterizovaly síly působící ve vesmíru a které způsobily, že **původně symetrický stav vesmíru přešel během miliardtiny vteřiny do stavu, v němž jsou kvarky, ale ne antikvarky.**

Tři Sacharovovy podmínky:

- nezachování baryonového čísla
- narušení CP invariance silami, které působily v počátečním stadiu vývoje vesmíru
- narušení termodynamické rovnováhy

Cronin, Fitch, Kobayashi, Maskawa

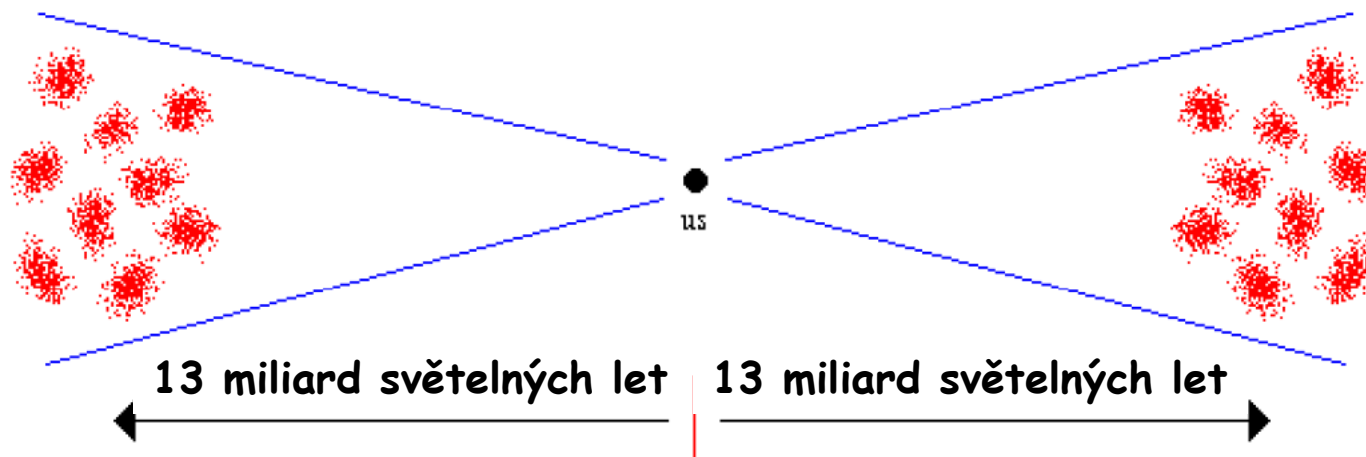
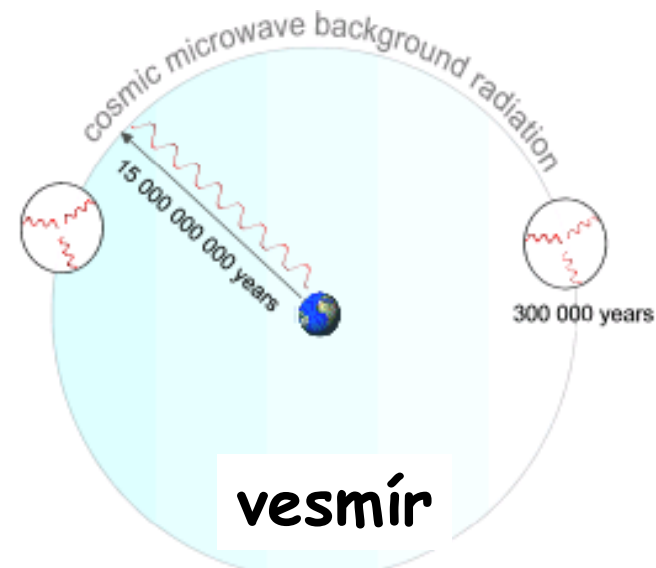
Narušení CP invariance v přírodě existuje, i když není jasné, zda ke generaci přebytku hmoty stačí.

Narušení baryonového čísla je generickým důsledkem teorií velkého sjednocení

I narušení termodynamické rovnováhy je pravděpodobně důsledkem dynamiky sil, které hrají klíčovou roli v teoriích velkého sjednocení.

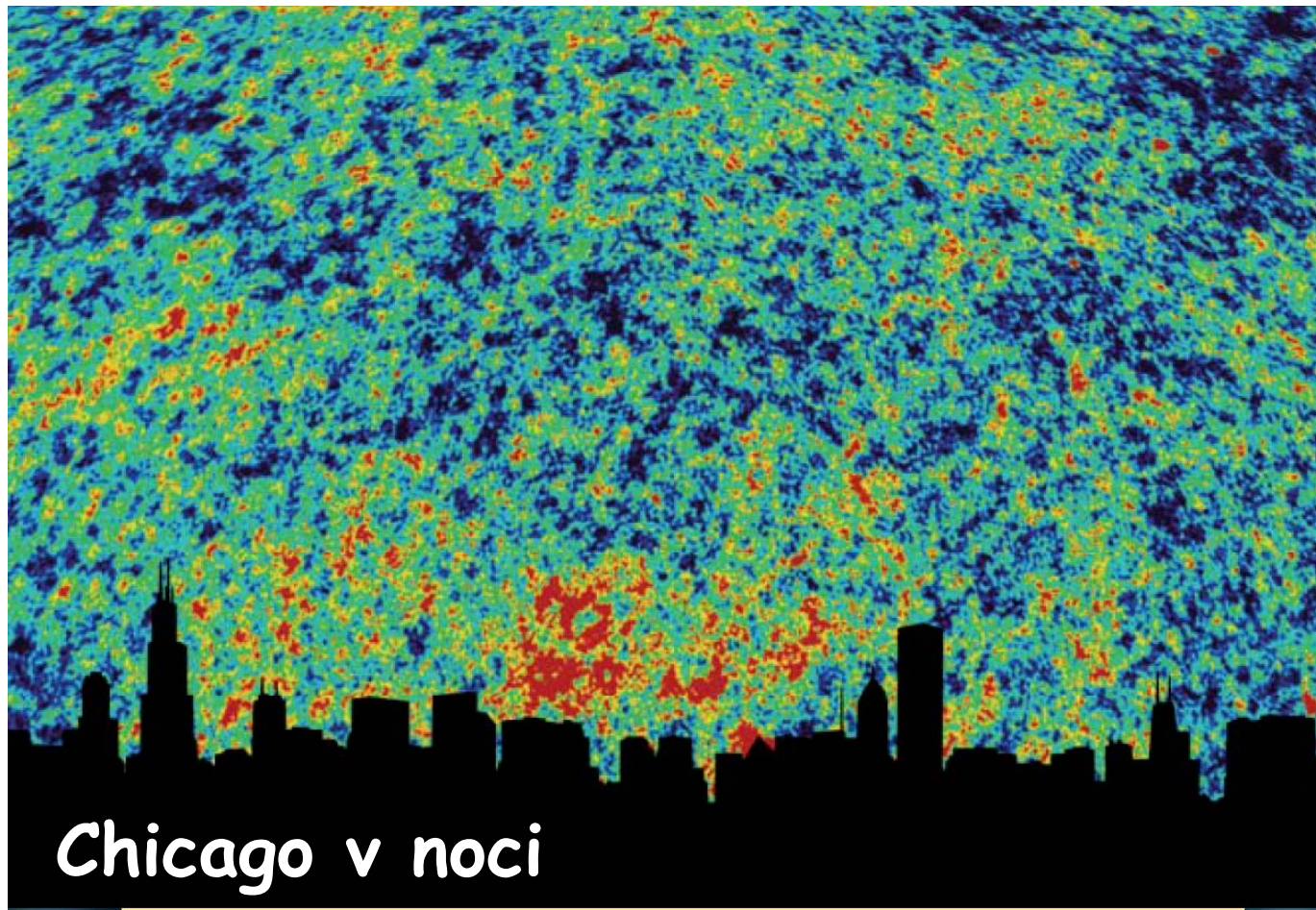
Proč je reliktní záření tak izotropní?

Reliktní záření má **téměř stejné** vlastnosti na **obou stranách oblohy** ačkoliv v době, kdy vzniklo, spolu obě oblasti **neměly podle teorie relativity komunikovat**.



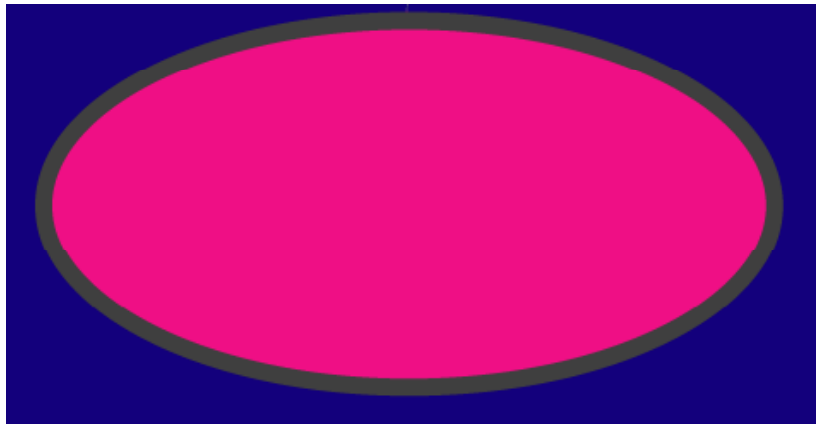
Jak se o vesmíru a jeho vývoji dozvídáme?

Dnes je hlavním zdrojem informací o vzniku i vývoji našeho vesmíru **zkoumání vlastností mikrovlnného reliktního záření.**

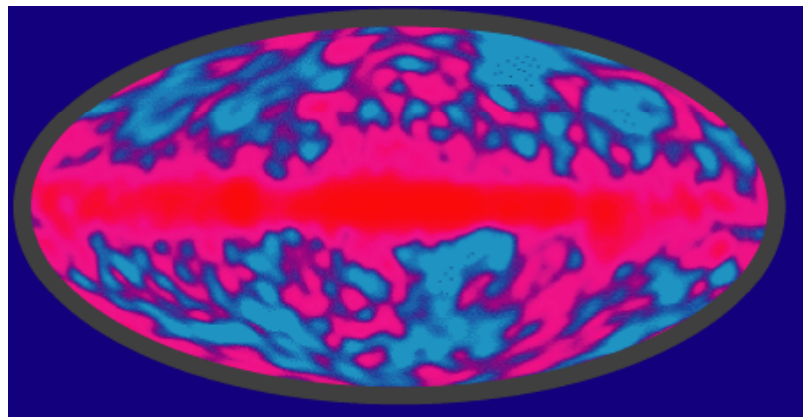
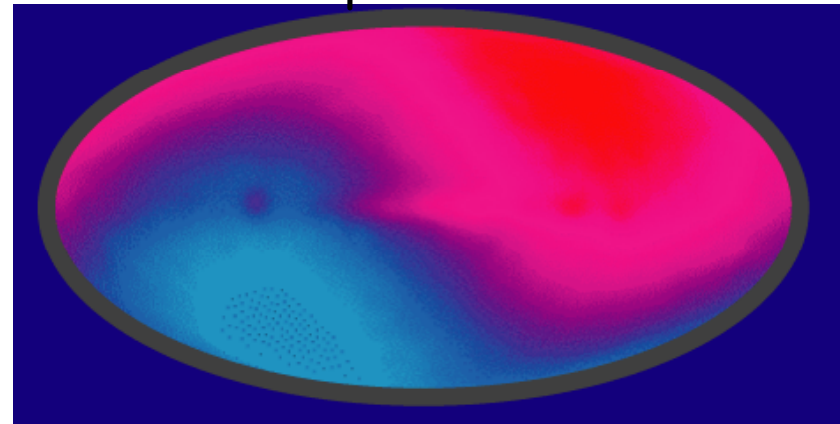


Procedura „čištění dat“ CMB ze sondy COBE

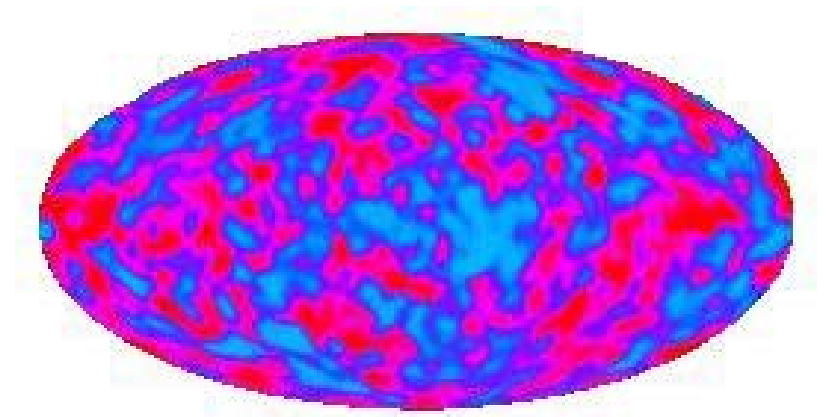
při malém rozlišení izotropní



anizotropie vlivem pohybu Země
absolutnímu prostoru

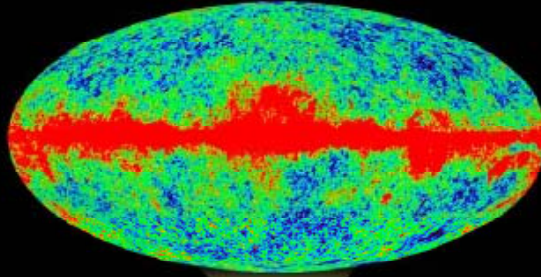


vliv záření z roviny galaktiky

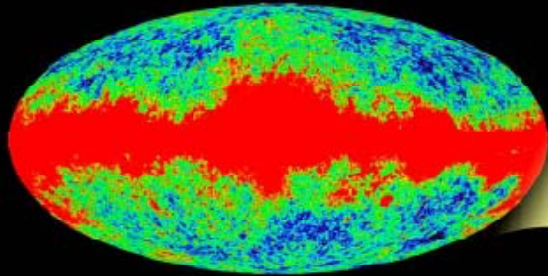


WMAP CMB Maps

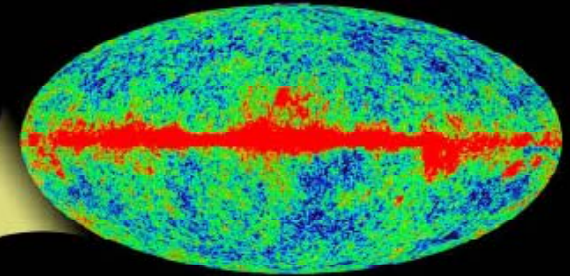
33 GHz



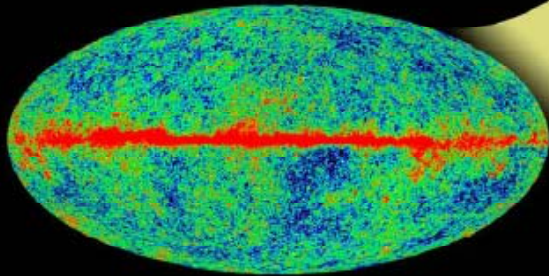
22 GHz



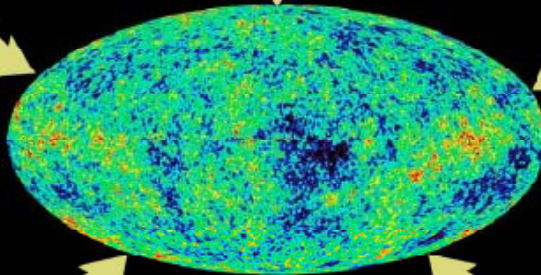
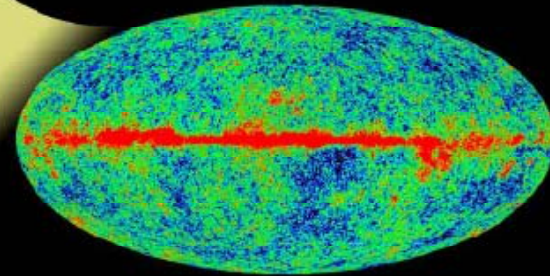
41 GHz



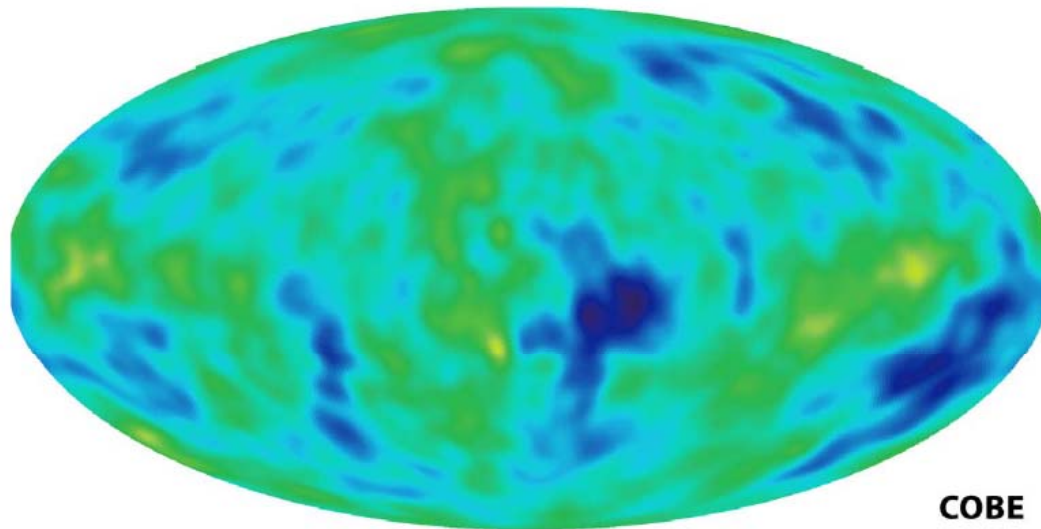
94 GHz



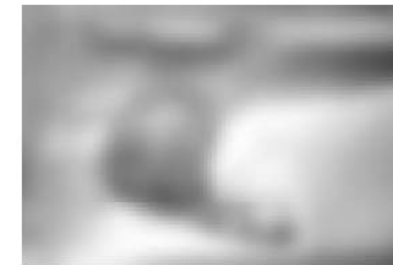
61 GHz



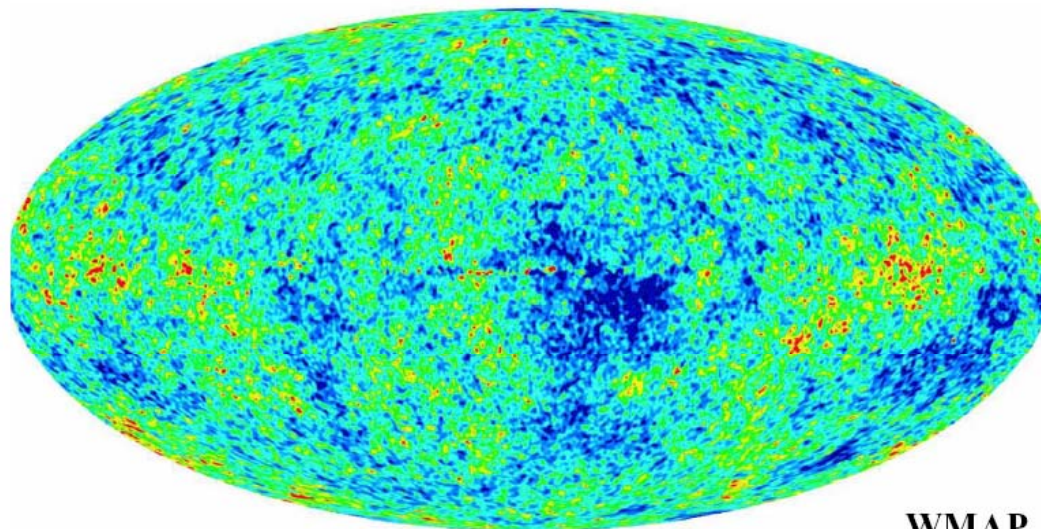
WMAP změřila anizotropii reliktního záření s relativní přesností 10^{-5} :



COBE



7°
↓
 0.2°

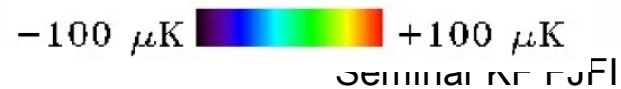


WMAP



45 times sensitivity

7



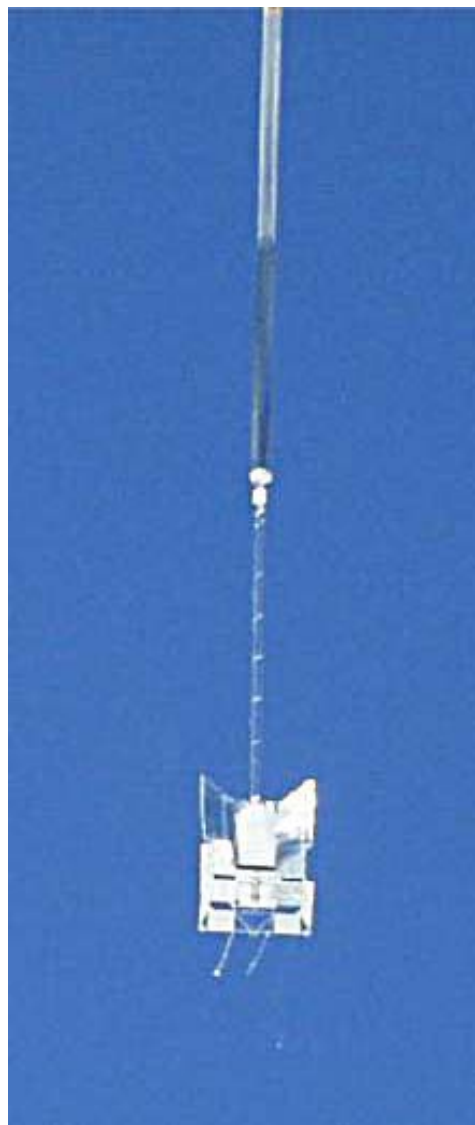
24. listopadu 2008

50

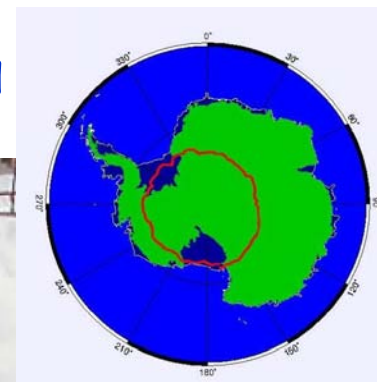
Sonda Boomerang v balónu nad Antarktidou



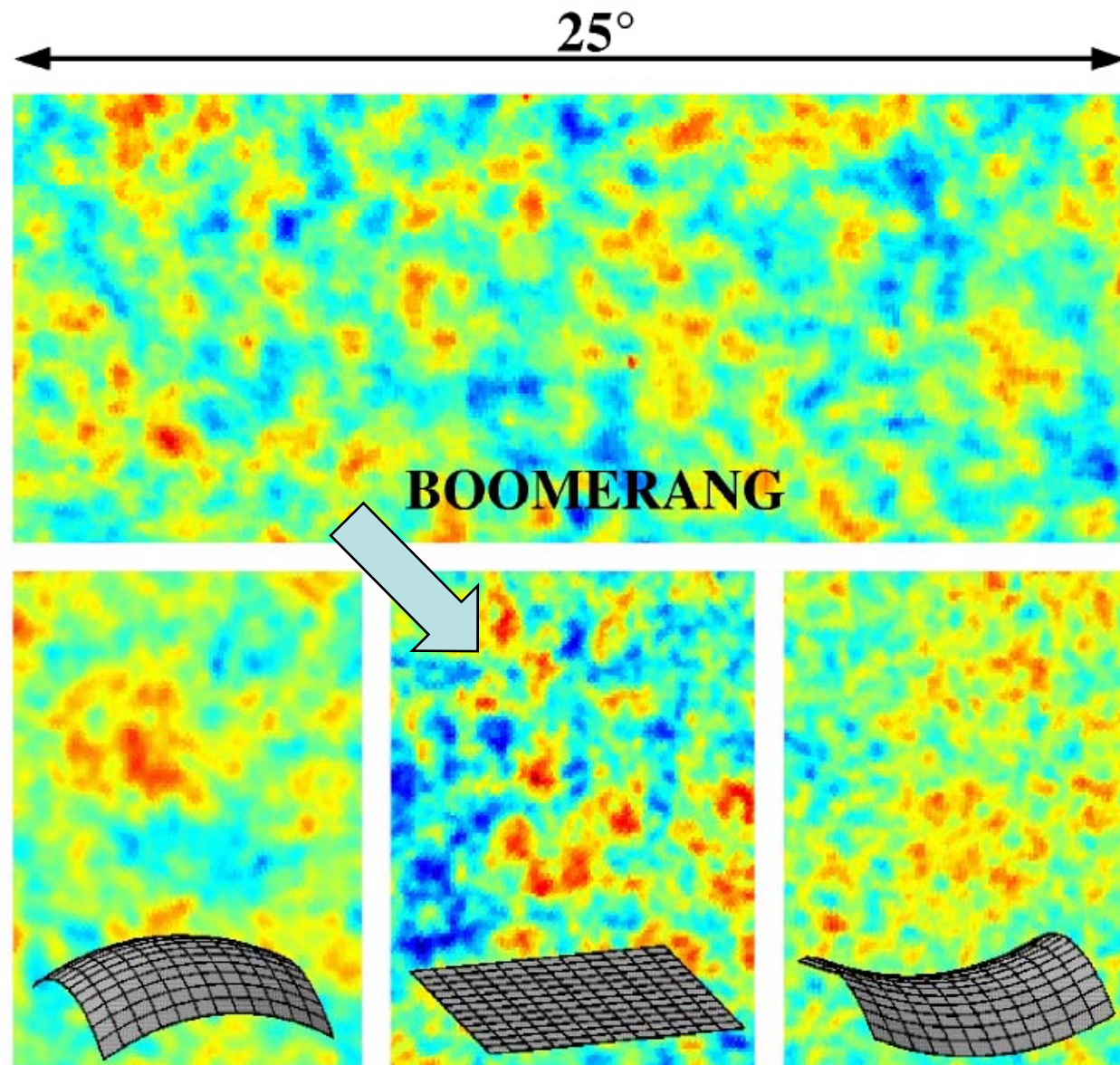
24. listopadu 2008



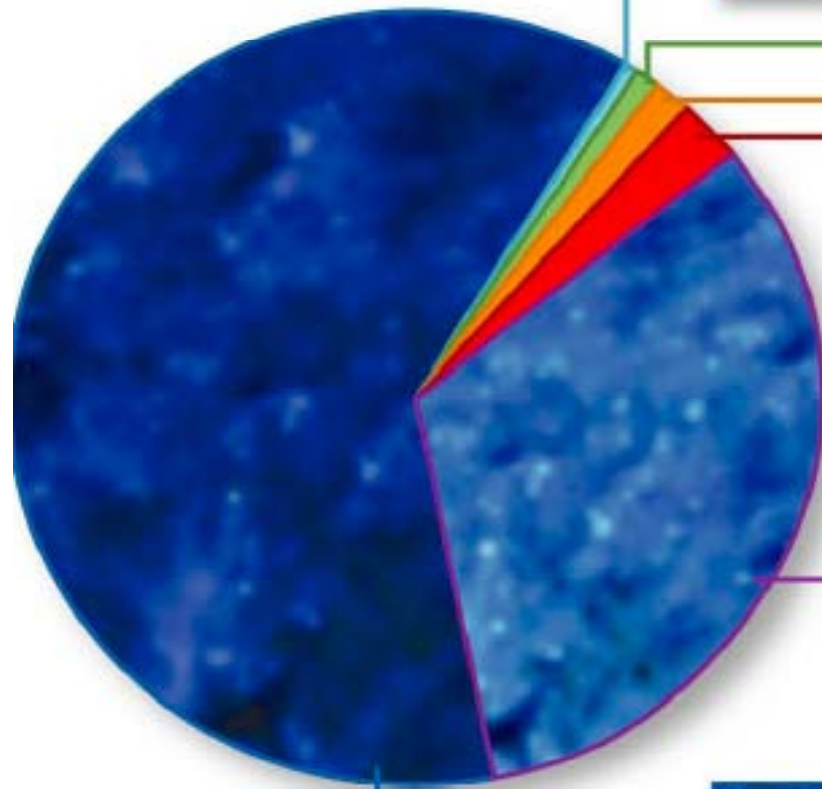
Semínář KF FJFI



Měření
anizotropie
reliktního
záření
ukazuje
na to, že
prostor
je na velkých
rozměrech
plochý



Díky jim víme, že hmota ve vesmíru je tvořena z



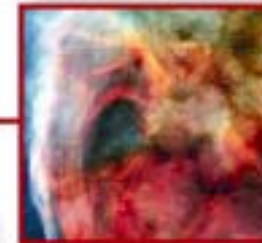
Chemical Elements:
(other than H & He) 0.03%



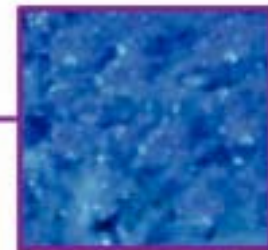
Neutrinos:
0.47%



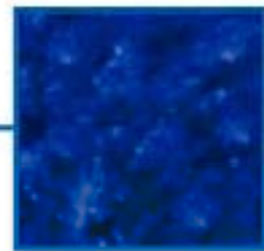
Stars:
0.5%



Free H & He:
4%



Dark Matter:
25%



Dark Energy:
70%

vakuum hraje klíčovou roli!

Za hranicemi standardního modelu

je řada myšlenek, které lze rozdělit do pěti směrů:

Kvarky a leptony nejsou základní cihly hmoty,

ale jsou sami složeny z **ještě menších částic** (preonů, rishonů apod.). Tato přirozená myšlenka je z řady důvodů stále méně přitažlivá, ale pořád stojí za to si ji klást.

Kvarky a leptony nejsou zásadně odlišné

jak tomu je z hlediska empirických zákonů zachování, ale představují jen **různé stavy jednoho fundamentálního fermionu**. Tato hypotéza ve svých důsledcích znamená, že **proton není stabilní** se zdá být téměř nevyhnutelná pro pochopení **proč je ve vesmíru přebytek hmoty** nad antimotou. Pátrání po rozpadu protonu bylo a je věnována řada experimentů, ale zatím bezúspěšně.

Ke každé částici standardního modelu existuje partner

jenž se od svého „standardního“ protějšku liší **hodnotou spinu**. Tato hypotéza tzv. **supersymetrie** bourá klíčový rys standardního modelu, jímž je **zásadní odlišnost** částic s **poločíselným** spinem (kvarků a leptonů) a částic se spinem **celočíselným** (jako jsou IVB). Po supersymetrických partnerech částic Standardního modelu se již 30 let pátrá, ale dosud **neúspěšně**. Jedna z nich je žhavým kandidátem na podstatu tzv. „**temné hmoty**“ ve vesmíru.

Základními objekty mikrosvěta nejsou částice, ale struny

Tato hypotéza poskytuje potenciální možnost **sjednotit gravitaci s ostatními třemi silami**. Původní naděje, že povede k „**teorii všeho**“, v jejímž rámci bude možné **spočítat i hodnoty zmíněných cca 20 volných parametrů** standardního modelu, však byla již opuštěna.

Fyzikální zákony „žijí“ ve více prostorových rozměrech

Tato myšlenka se ve fyzice objevila již počátkem minulého století (Kaluza a Klein) při snahách sjednotit gravitaci a elektromagnetické síly. Je i nezbytnou součástí **teorií strun**, ale v posledních deseti letech se objevila **v novém „hávu“**, jež jí činí mimořádně zajímavou z hlediska **možnosti experimentálního potvrzení**.

Jak budeme hledat Higgsův boson na LHC?

produkční procesy:

$$gg \rightarrow H$$

$$W^+W^- \rightarrow H$$

$$q\bar{q} \rightarrow W^+H, ZH$$

Nejčistší proces:

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-e^+e^-$$

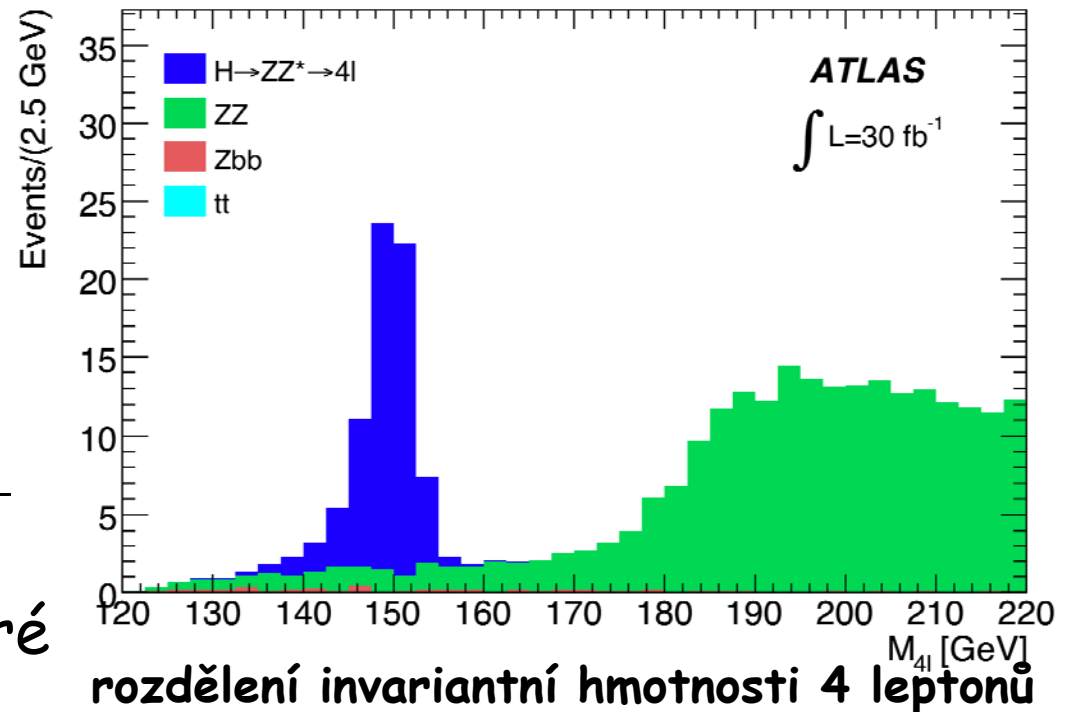
$$\text{nebo} \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$

$$\text{nebo} \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$

tj. 4 nabité leptony, které se **velmi dobře detegují**

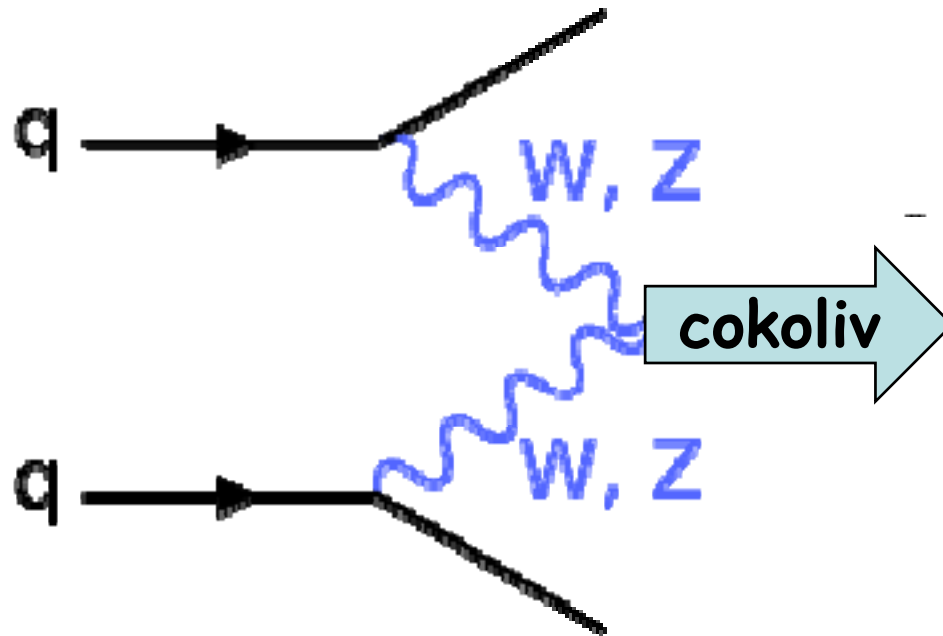
nejdůležitější módy rozpadu:

$$H \rightarrow \bar{b}b, W^+W^-, ZZ, t\bar{t}$$



Co se stane, když nebude Higgsův boson nalezen?

Nic moc, ale něco nového o slabých silách se určitě dozvíme, nejlépe právě z měření procesu



v němž budeme Higgsův boson hledat.

Teorie velkého sjednocení (GUT)

Georgi, Glashow 1974: snaha sjednotit elektromagnetické, slabé a silné síly. Opírají se o myšlenku, že

kvarky a leptony (a jejich antičástice) jedné generace jsou v jen různé stavy jednoho základního fermionu.

SU(2): duplet (n)eutron (p)roton, triplet $\pi^- \pi^0 \pi^+$

SU(5): pentuplet: $d \ d \ d \ V_e \ e^+$
dekuplet: $u \ u \ u \ \bar{u} \ \bar{u} \ \bar{u} \ \bar{d} \ \bar{d} \ \bar{d} \ e^-$

Na **velmi malých vzdálenostech $\approx 10^{-30}$ cm** se kvarky a leptony chovají stejně a přecházejí jeden na druhého prostřednictvím sil, jež na větších vzdálenostech nepůsobí.

Odkud to víme?

Z experimentálních dat a znalosti závislosti efektivních vazbových parametrů **elektromagnetických**, **slabých** a **silných** sil na vzdálenosti byly určeny tyto křivky

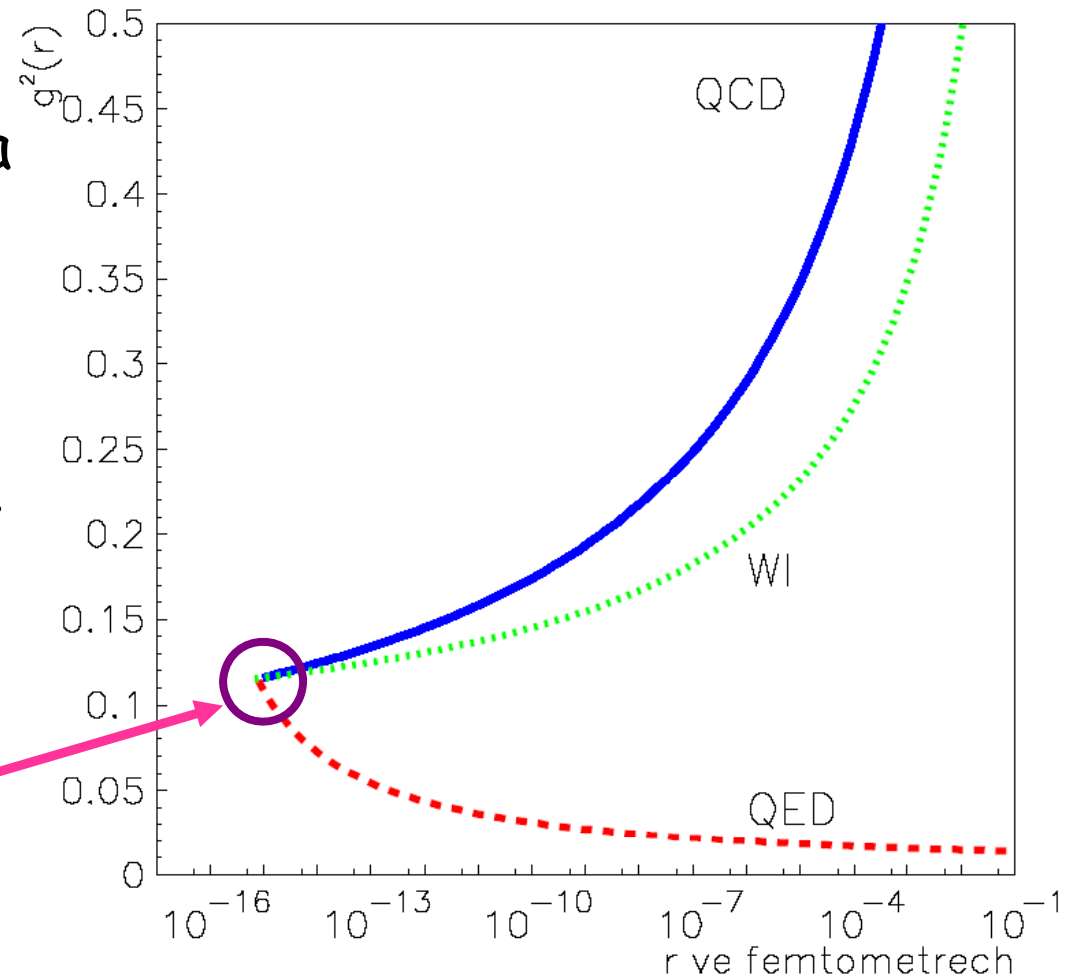
které se protínají na vzdálenosti $\approx 10^{-30}$ cm

která odpovídá energii

$$M_{GUT} \approx 10^{16} \text{ GeV}$$

V GUT jsou tedy dvě výrazně odlišné škály:

$$100 \approx M_{EW} \ll M_{GUT} \approx 10^{16} \text{ GeV}$$

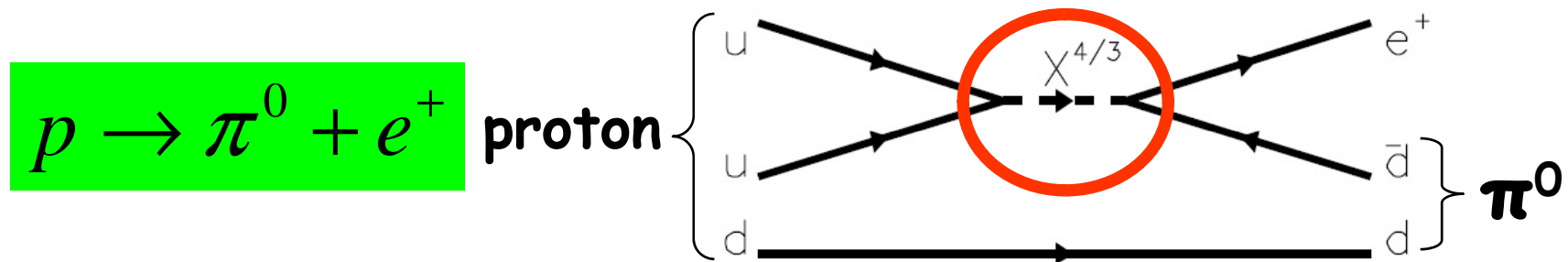


Z kvarků tak mohou vzniknout leptony či antikvarky, např.

kvark u + kvark u → pozitron + antikvark d

V takových procesech se **nezachovává baryonové číslo**, což má dramatický důsledek:

proton není stabilní, ale rozpadá se!



Hledáním rozpadu protonu se fyzikové zabývají již 30 let, **ale zatím bezúspěšně**. Byla stanovena jen dolní mez na poločas rozpadu protonu, jež činí **10³³ let** takže můžeme být klidní.

Supersymetrie (SUSY)

Ve standardním modelu je **zásadní rozdíl** mezi částicemi se spinem $\frac{1}{2}$ a 1, neboť pro **první platí Pauliho vylučovací princip** a **pro druhé nikoliv**.

1971-1974: **Golfand a Likhtman** v Moskvě, **Volkov a Akulov** v Charkově a **Wess and Zumino** v USA **objevili nový typ symetrie**, jenž

- ✚ umožnil najít **vztah mezi bosony a fermiony** a
- ✚ současně netriviálním způsobem **propojil symetrie prostoročasu a vnitřních stupňů** volnosti polí.

Otázka, zda příroda je supersymetrická, je **ústřední problém současné teorie elementárních částic** a hledání odpovědi na ní je **hlavní cíl experimentů na LHC**.

1981: **Georgi a Dimopoulos** formulovali **Minimální supersymetrický standardní model**, v němž ke každé částici standardního modelu existuje **jeden superpartner** se

- ✚ spinem o $\frac{1}{2}$ různým
- ✚ hmotností v oblasti 100-1000 GeV.

Partneři kvarků a leptonů

$Q = \frac{2}{3}$	u u u (0.3 MeV)	c c c (1.5 GeV)	t t t (175 GeV)
$Q = -\frac{1}{3}$	d d d (0.3 MeV)	s s s (0.5 GeV)	b b b (4.5 GeV)
$Q = 0$	ν_e (3 eV)	ν_μ (0.2 MeV)	ν_τ (0.2 GeV)
$Q = -1$	e^- (0.5 MeV)	μ^- (0.1 GeV)	τ^- (1.8 GeV)

tedy mají mít spin 0 a partneři **IVB spin $\frac{1}{2}$** .

Žádného supersymetrického partnera se **najít nepodařilo**, pokud existují, **musí mít hmotnost větší než 50 GeV**.

Fyzikální argumenty pro SUSY jsou dva a oba se opírají o výše zmíněnou **existenci dvou výrazně odlišných škál**

$$10^2 \text{ GeV} \approx M_{EW} \ll M_{GUT} \approx 10^{16} \text{ GeV}$$

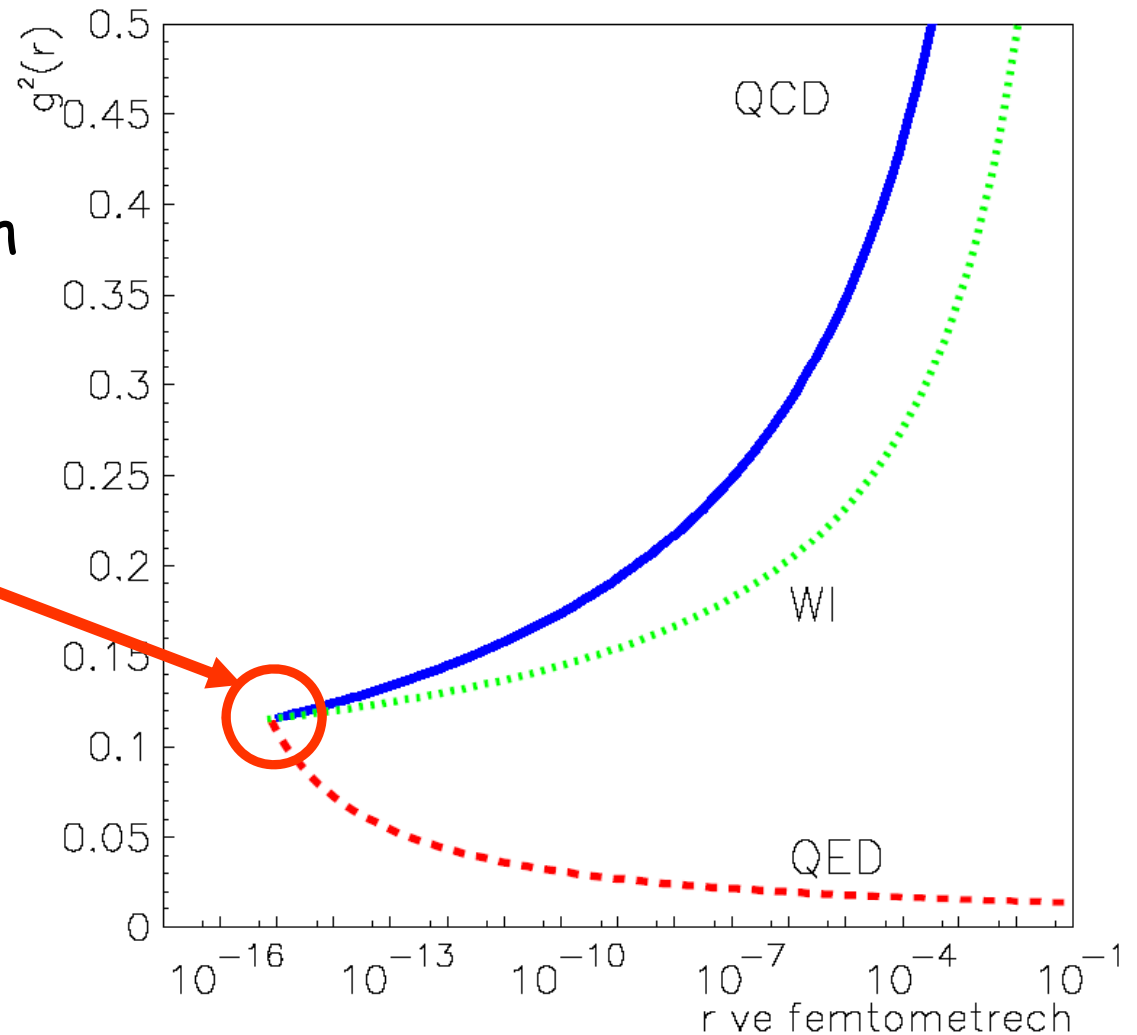
Existence supersymetrických partnerů je užitečná pro:

- ✚ zajištění **stability hmotnosti Higgsova bosonu**
- ✚ **přesnější sjednocení** elektromagnetických, slabých a silných sil **v rámci teorií velkého sjednocení**

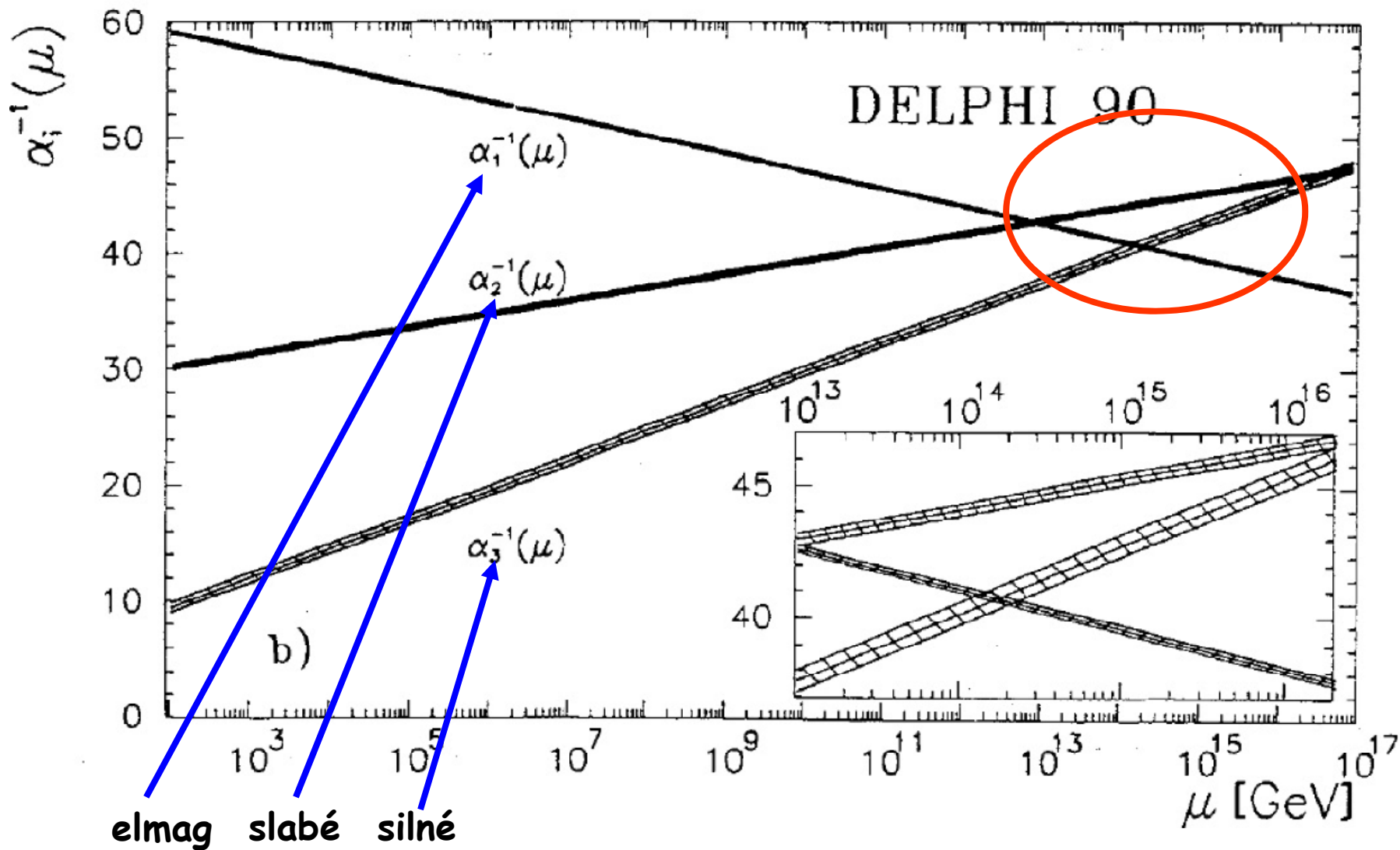
V obou případech **je možné zmíněné problémy odstranit i jinak a oba argumenty padají** v případě (viz dále), kdy v přírodě existuje **jen jedna fundamentální škála M_{EW}** .

Přesnější sjednocení sil

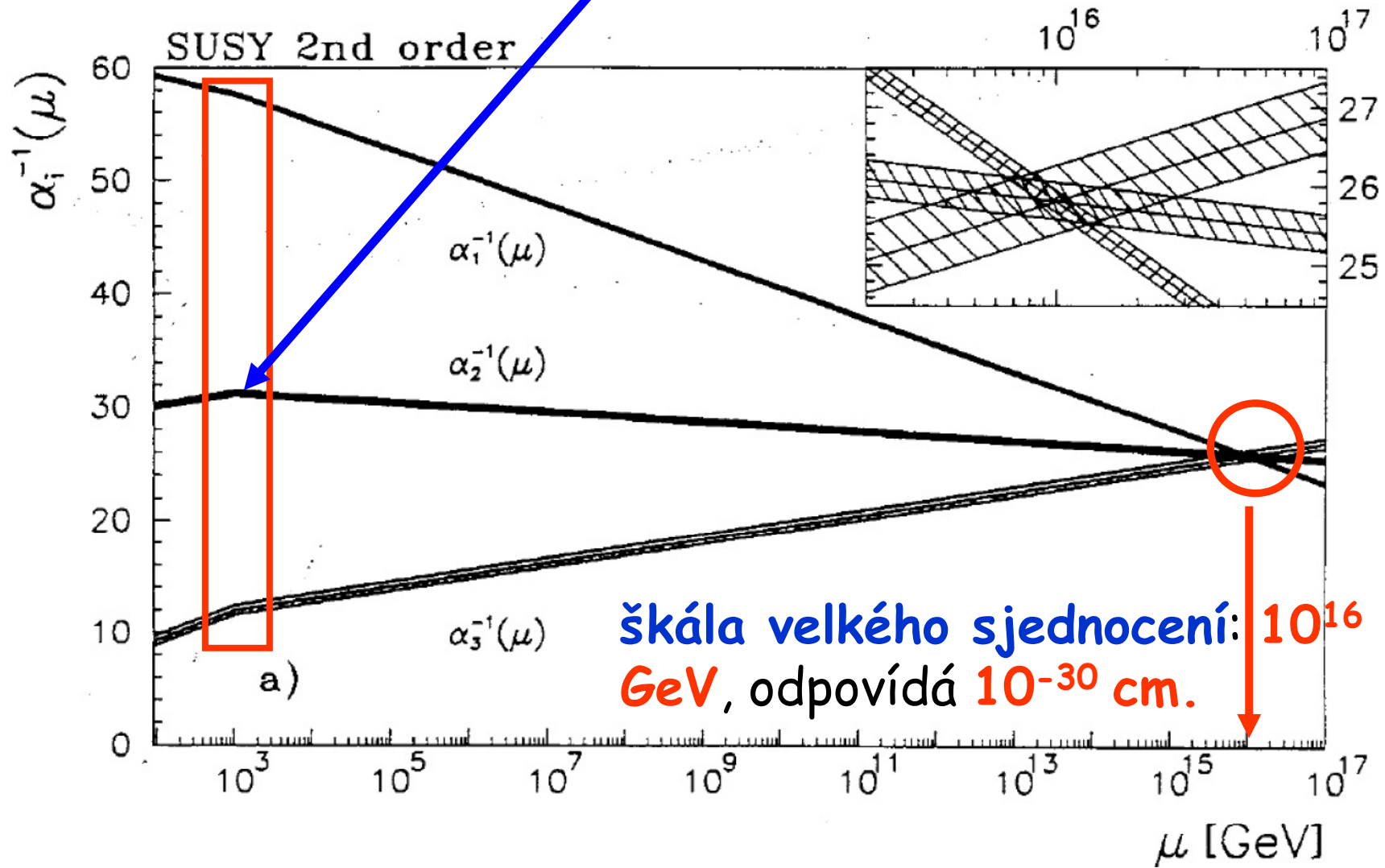
Vraťme se k obrázku
vynesme ho v proměných
 $1/x$ a $1/y$ a podívejme
se **podrobněji** na místo,
kde se křivky protínají



Dostaneme následující obrázek



započtení vlivu supersymetrických partnerů kvarků a leptonů s **hmotnostmi okolo 1000 GeV** výrazně zlepší situaci

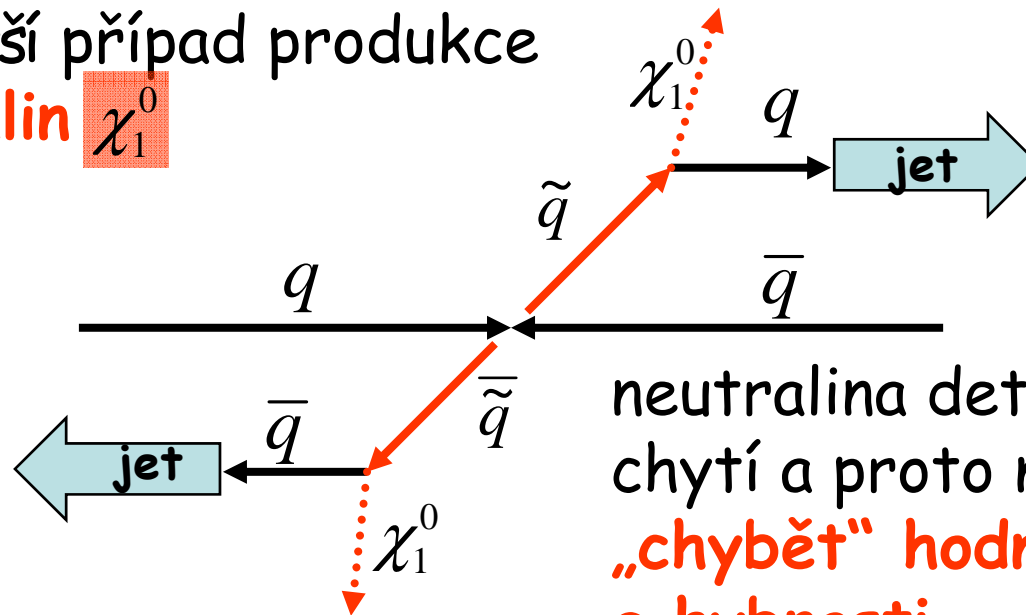


Jak hledat supersymetrické partnery na LHC?

základní charakteristiky produkčních procesů:

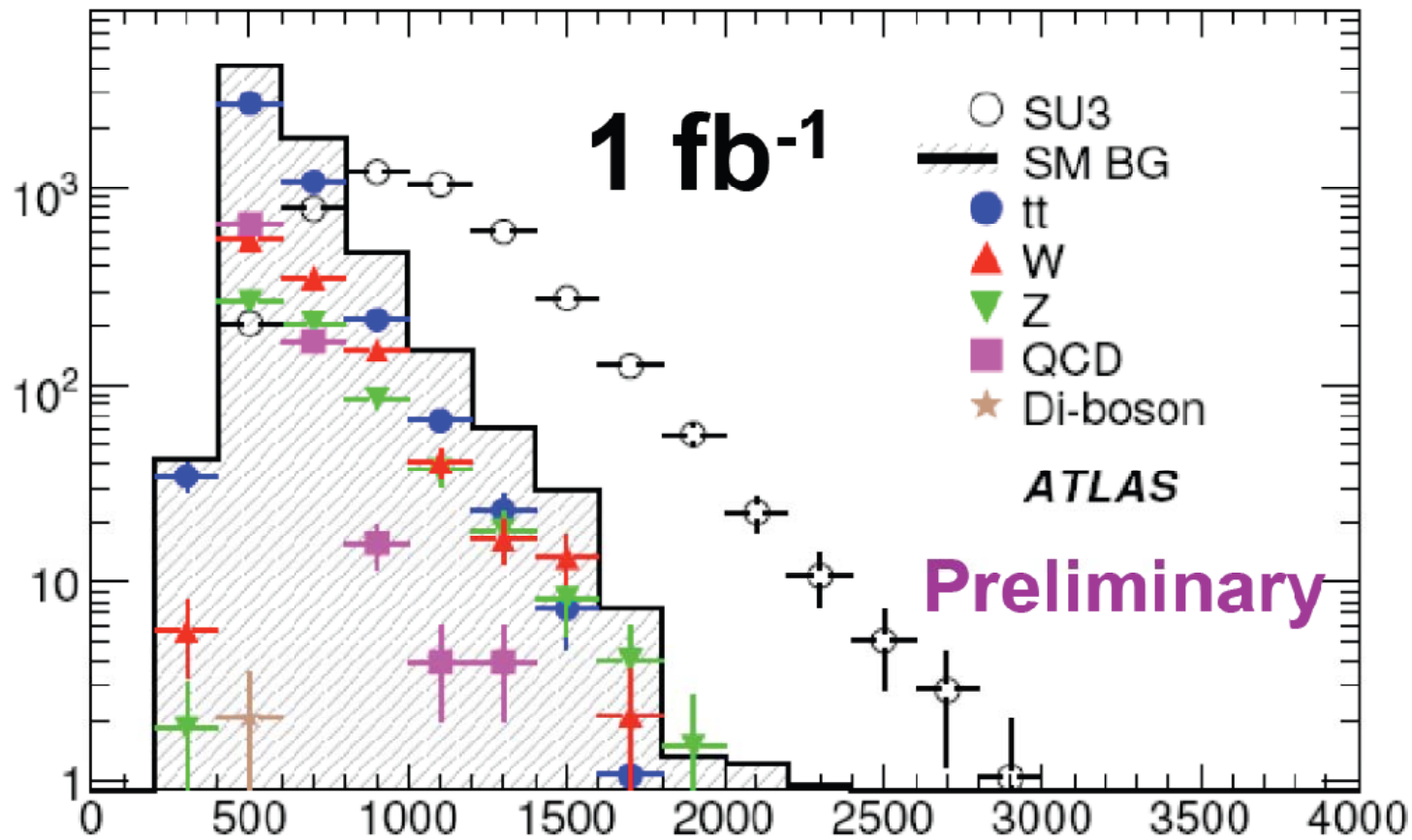
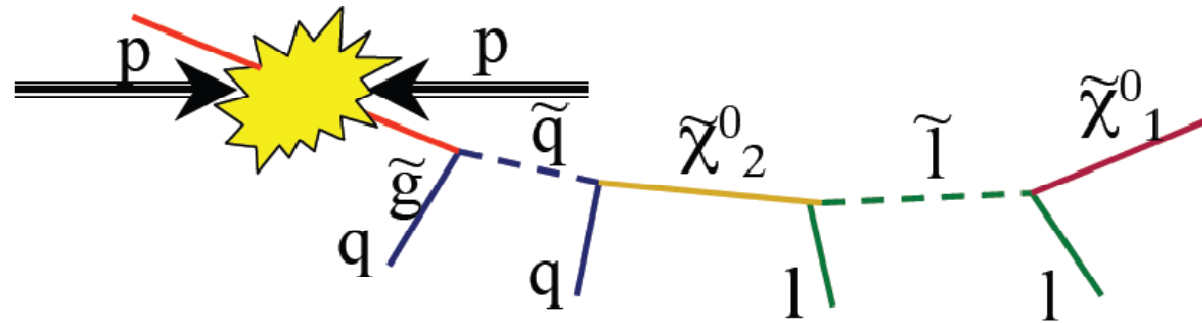
- supersymetrické částice se **produkují v párech**
- nejlehčí z nich je obvykle **částice se spinem $\frac{1}{2}$** , jež je **neutrální, stabilní a neinteraguje silnými silami**
- toto tzv. **neutralino** je proto kandidátem **na temnou hmotu**

nejjednodušší případ produkce
páru neutralin χ_1^0
a dvou jetů
na LHC

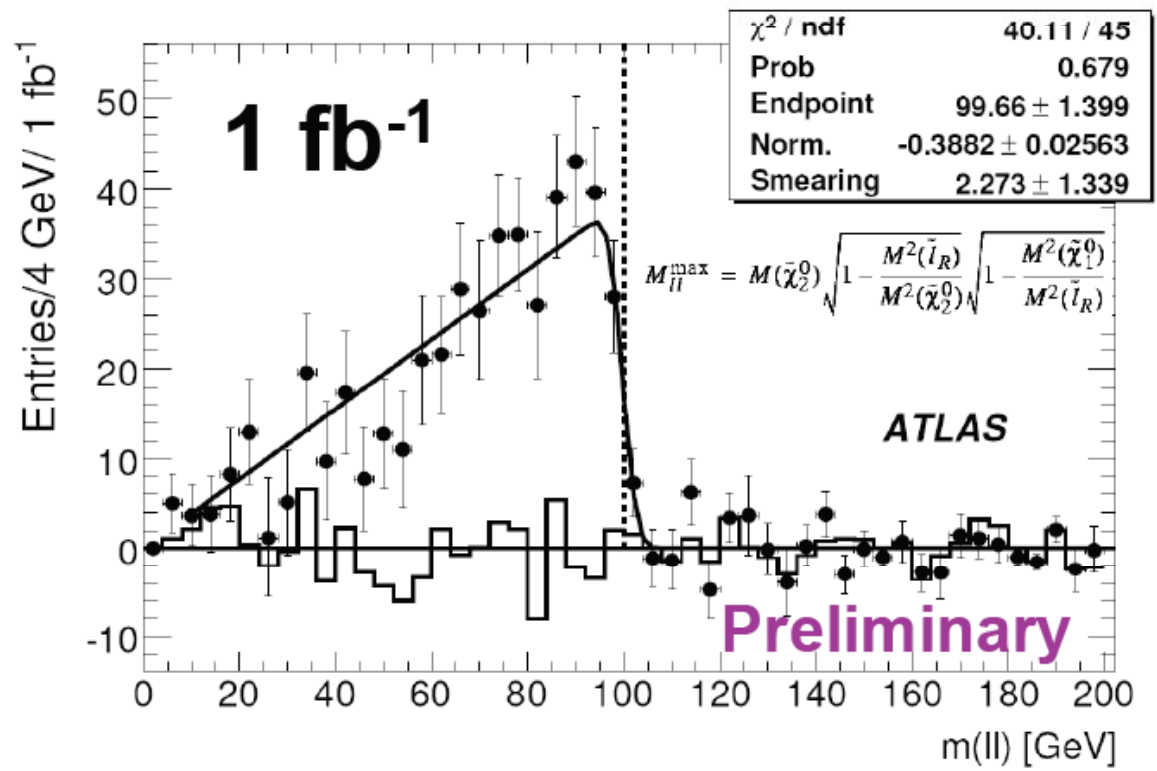
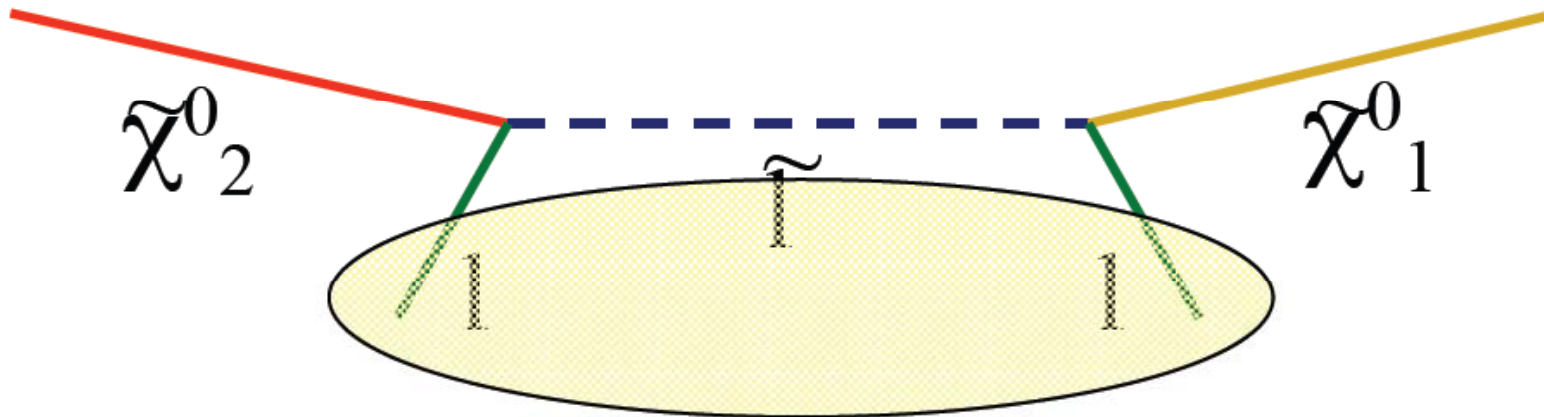


neutralina detektor nezachytí a proto nám **bude „chybět“ hodně energie a hybnosti.**

obvykle bude
jetů **více**,
například 4:



součet příčných hybností 4 jetů a chybějící příčné hybnosti



Kdo bude mít pravdu?

John Schwarz **guru strunařů**

hep-ph/0106204, “Proposed post-LEP SUSY benchmarks”

‘SUSY ... **is compellingly elegant** ... unifies matter particles with force particles ... is the only framework thought capable of connecting gravity with other interactions ... appears essential for the consistency of string theory ... and the χ^0 is an ideal candidate for cold dark matter’

nebo nositel Nobelovy ceny 1974

Burton Richter - “Assessment and Outlook”, summary talk at LP99, <http://lp99.slac.stanford.edu/db/program.asp>

“A pure social construct” (but to be fair ...)

“To the experimenters: look for supersymmetry as long as it doesn’t seriously interfere with real work (top-quark, Higgs, neutrinos, etc)”

nebylo ale již neutralino pozorováno?

AMS-01

**start z Kennedyho
vesmírného centra
na Floridě**

(May 2, 1998)

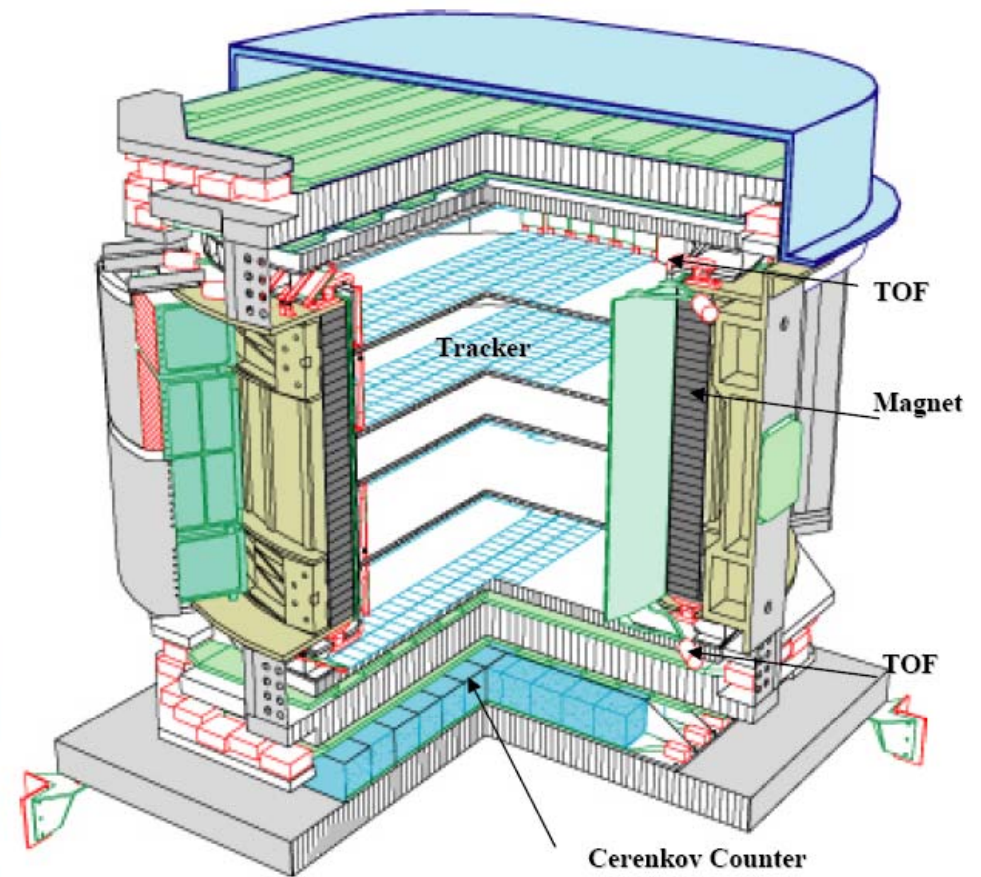


Alpha Magnetic Spectrometer - AMS-01

první let 2. června 1998 (10 dní)



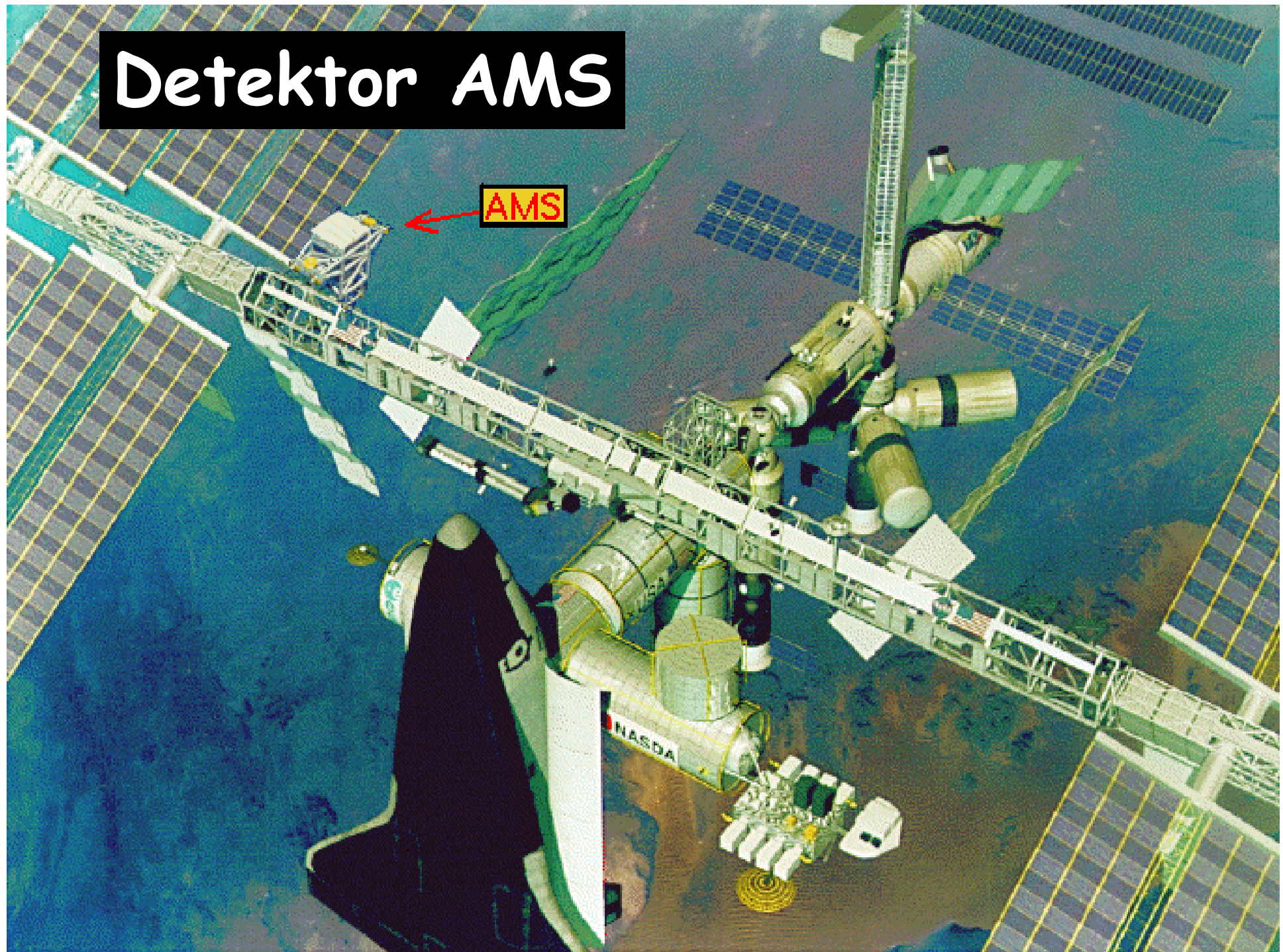
24. listopadu 2008



Semínář KF FJFI

74

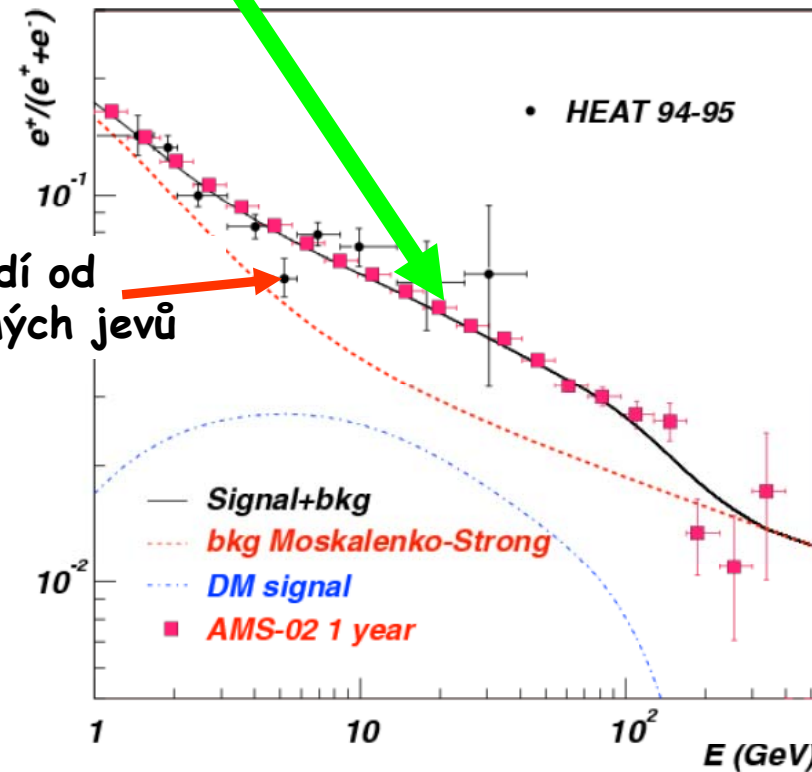
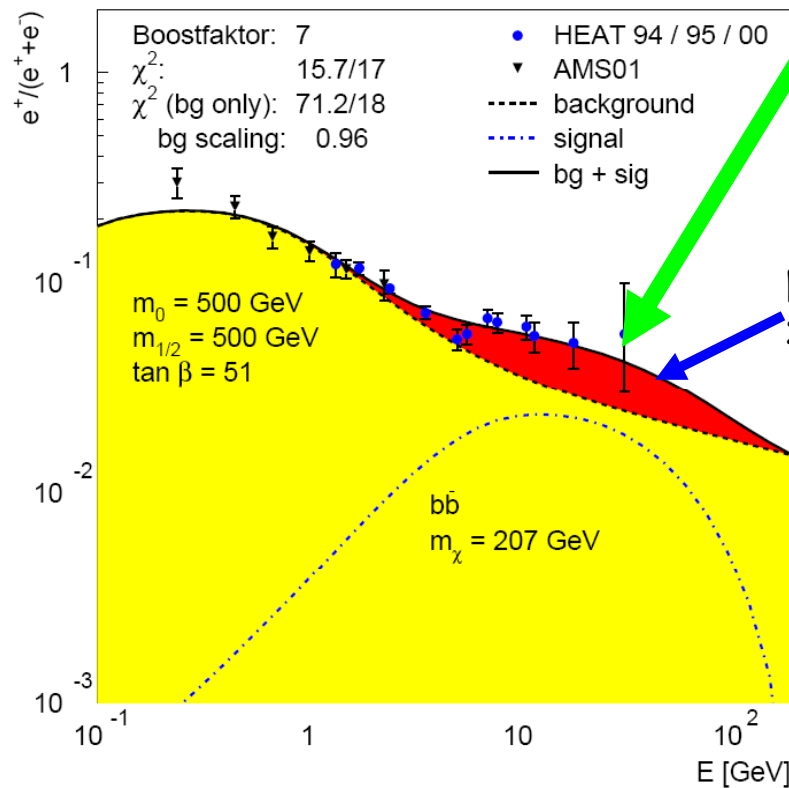
Detektor AMS



Pátrání po kandidátech na temnou hmotu

Při srážkách neutralin v kosmickém záření by měly vznikat **pozitrony a antiprotony**, které jsou jinak **velmi vzácné**.

AMS 1 a HEAT - **projev neutralin?** AMS 2 - očekávání



pozadí od známých jevů

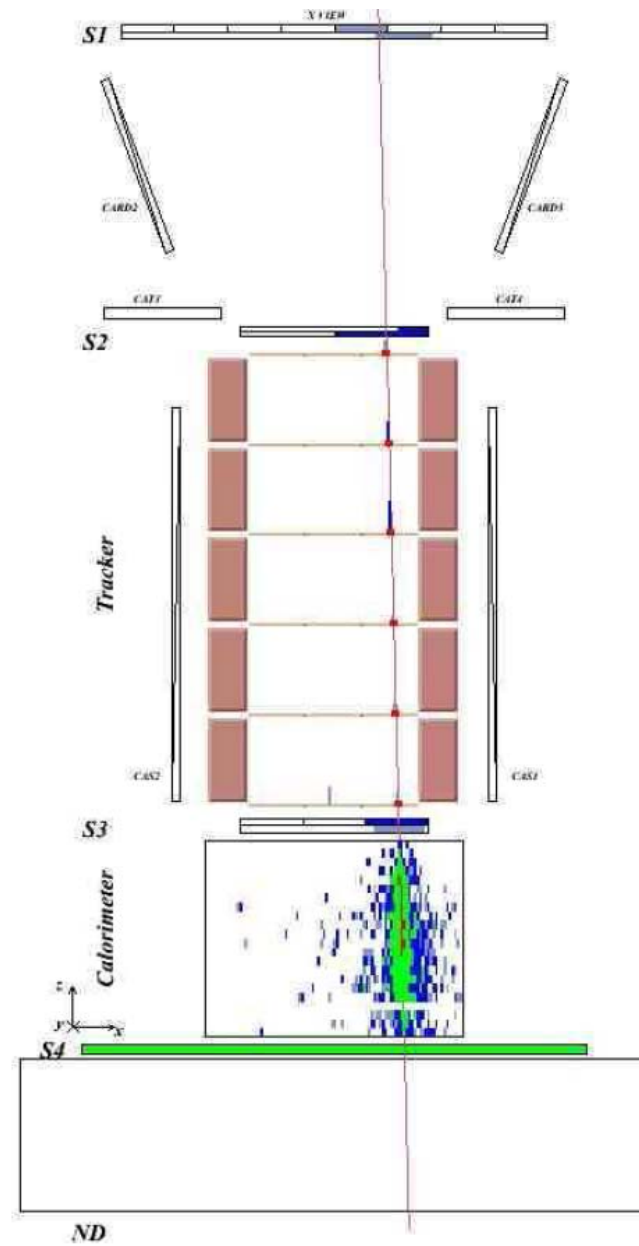
Experiment Pamela

Velmi podobný program má i experiment, jehož detektor je na ruské družici vynesené z kosmodromu Bajkonur

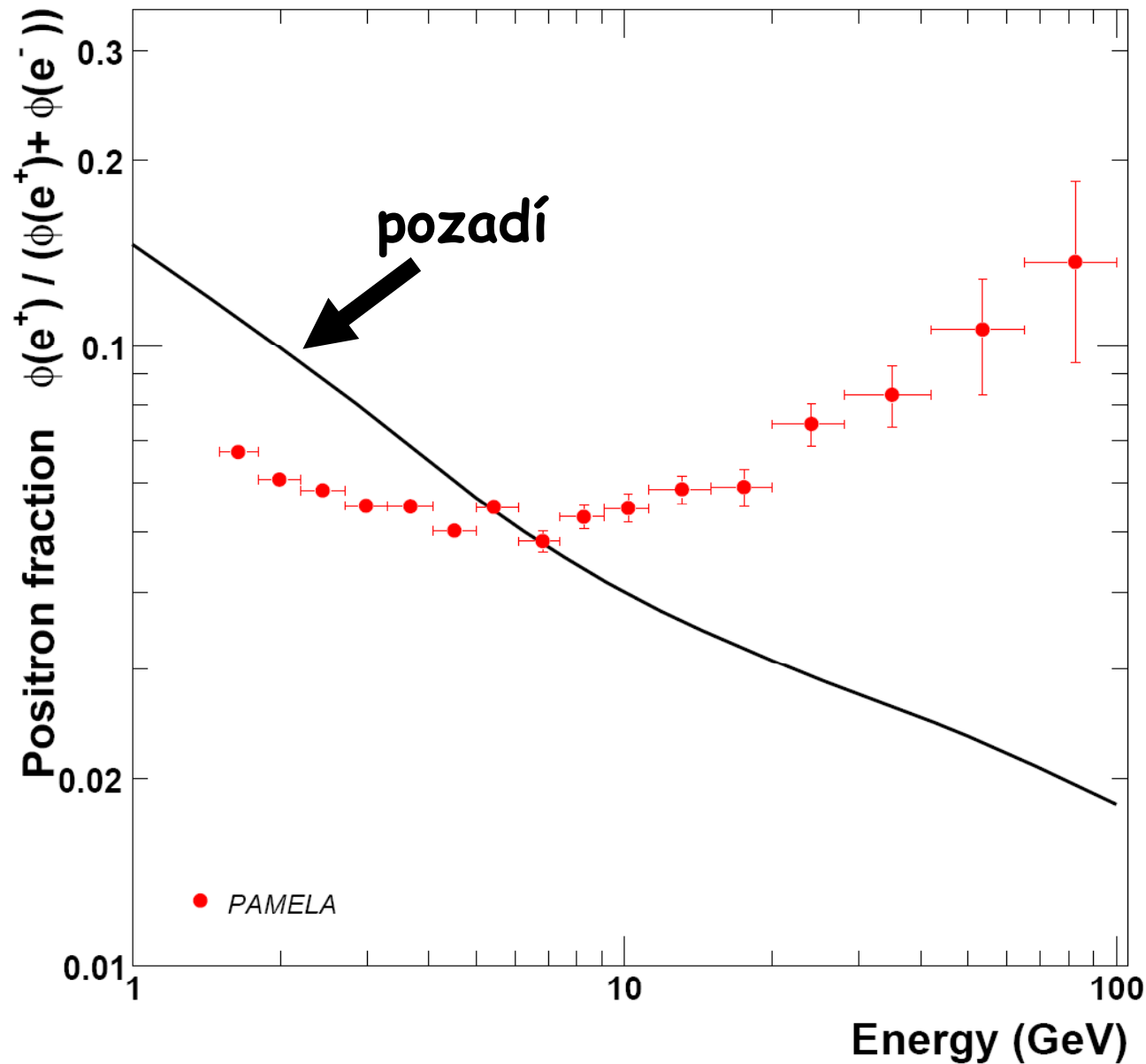
Hlavním cílem je opět detekce antihmoty všeho druhu jako signálů „nové fyziky“



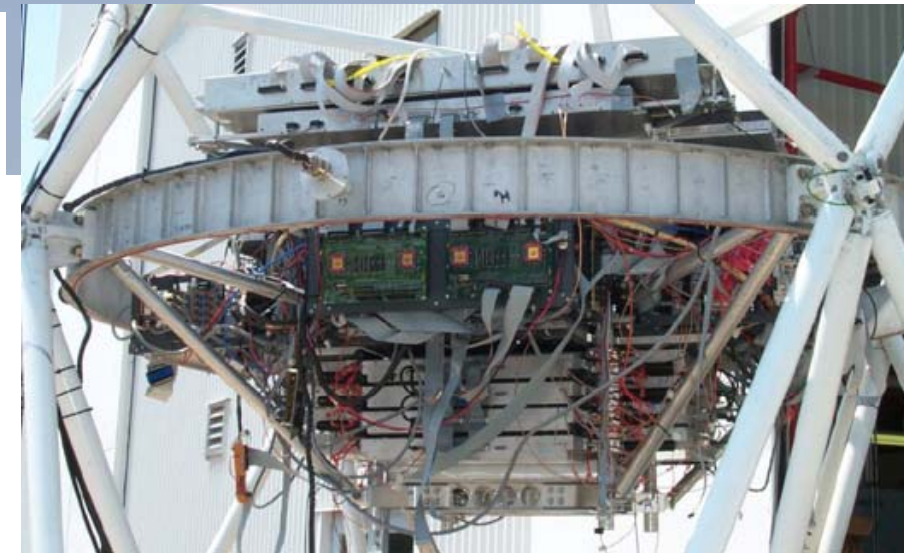
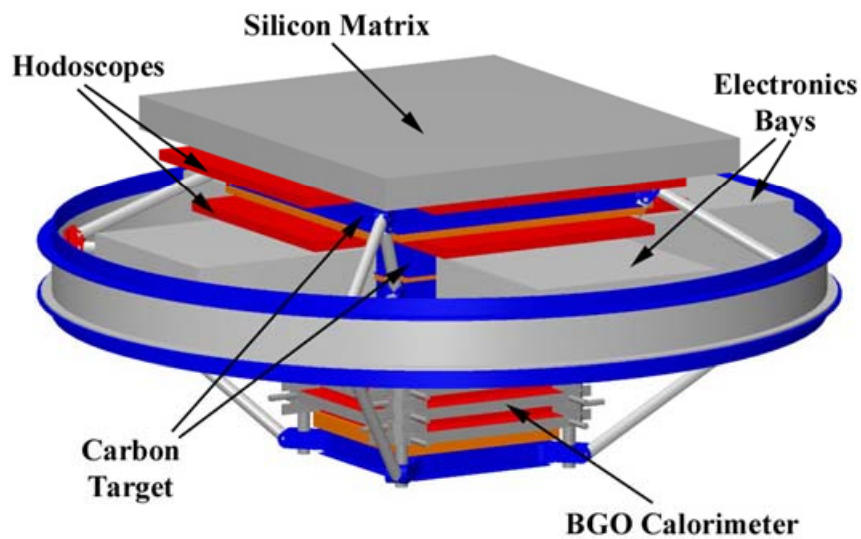
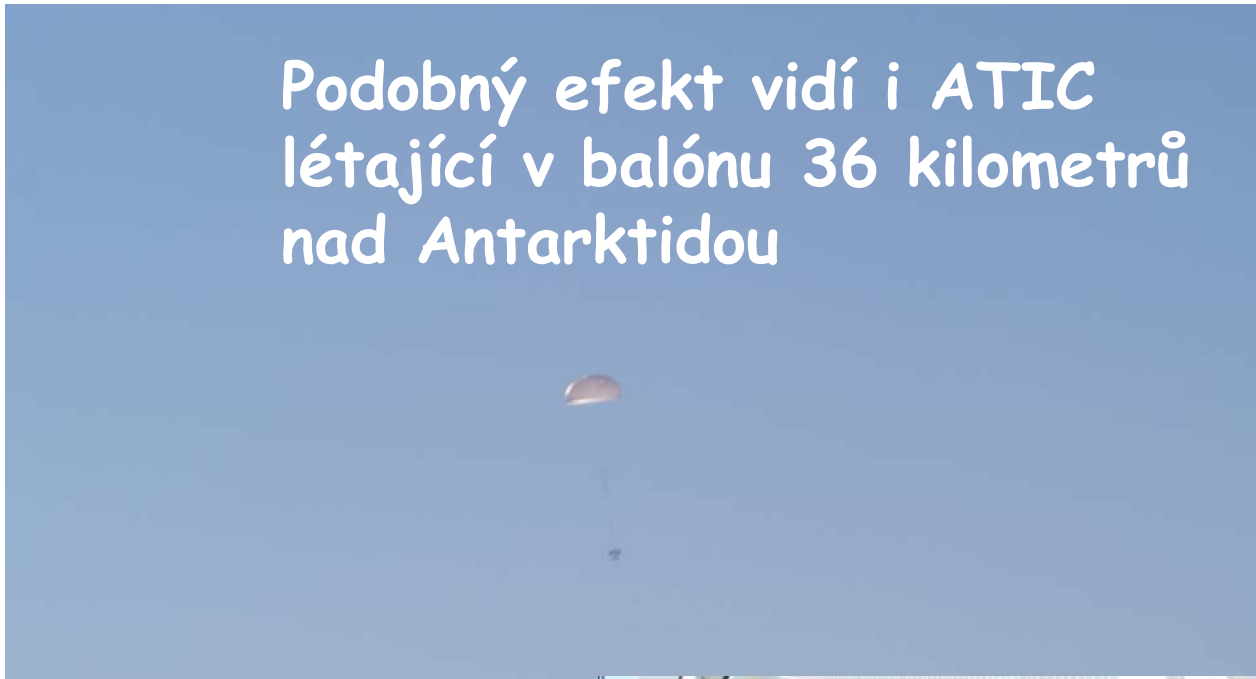
Detektor PAMELA

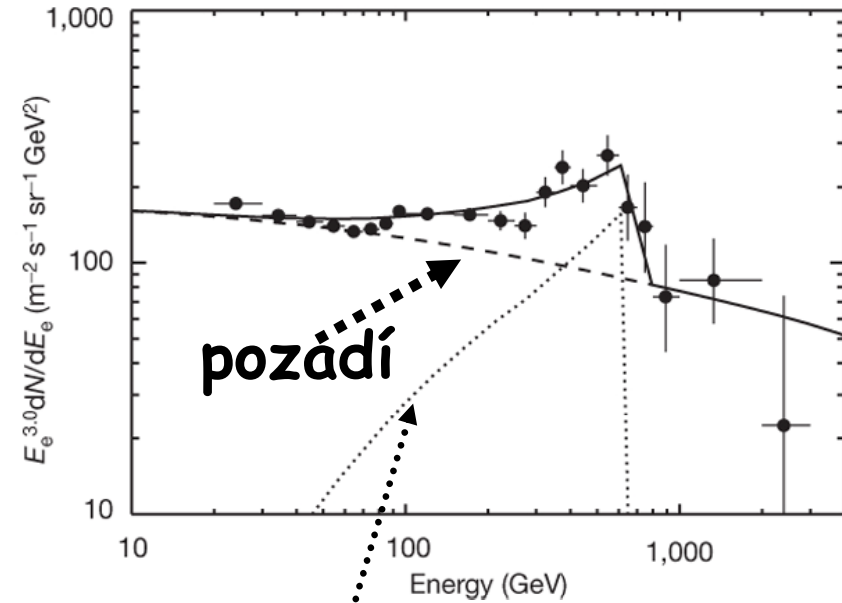
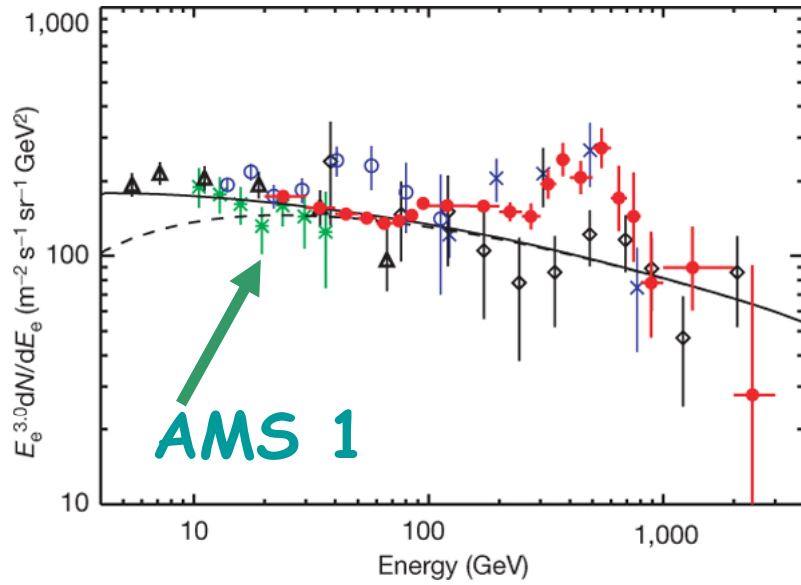


Startovní PAMELA experimentální pozadí odzkouá pozitivních pronesů



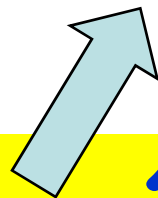
Podobný efekt vidí i ATIC
létající v balónu 36 kilometrů
nad Antarktidou





**KK částice s hmotností
620 GeV**

ale ne my!



Fyzikální zákony žijí ve
více než 3 prostorových
dimenzích, jež vnímáme

Teorie, v nichž má **prostor (ne čas!!)** více než tři rozměry mají dlouhou historii počínající dvěma pokusy propojit gravitaci a elektromagnetismus na klasické úrovni:

1914 Nordström: gravitace jako důsledek elektromagnetismu ve 5D

1921 Kaluza: elektromagnetismus jako důsledek Einsteinovy teorie gravitace v 5D

Vícerozměrný prostor je **nedílnou součástí teorie strun**, již ve 3-rozměrném prostoru **nelze konzistentně definovat**.

Hlavním cílem všech těchto teorií je **zahrnout do popisu sil v mikrosvětě gravitaci**

Během posledních 10 let se objevila řada myšlenek jak **gravitaci sjednotit s ostatními silami na klasické úrovni!**

Proč je gravitace ve srovnání s jinými silami tak slabá?

Obvyklá odpověď: protože je gravitační konstanta G_N **malá**.

Potenciály elektromagnetických a gravitačních sil mezi dvěma jednotkovými elektrickými náboji s hmotnostmi m

$$V_{QED}(r) = \frac{\alpha}{r}, \quad V_{grav}(r) = \frac{G_N m^2}{r} = \frac{m^2}{M_{PL}^2} \frac{1}{r}$$

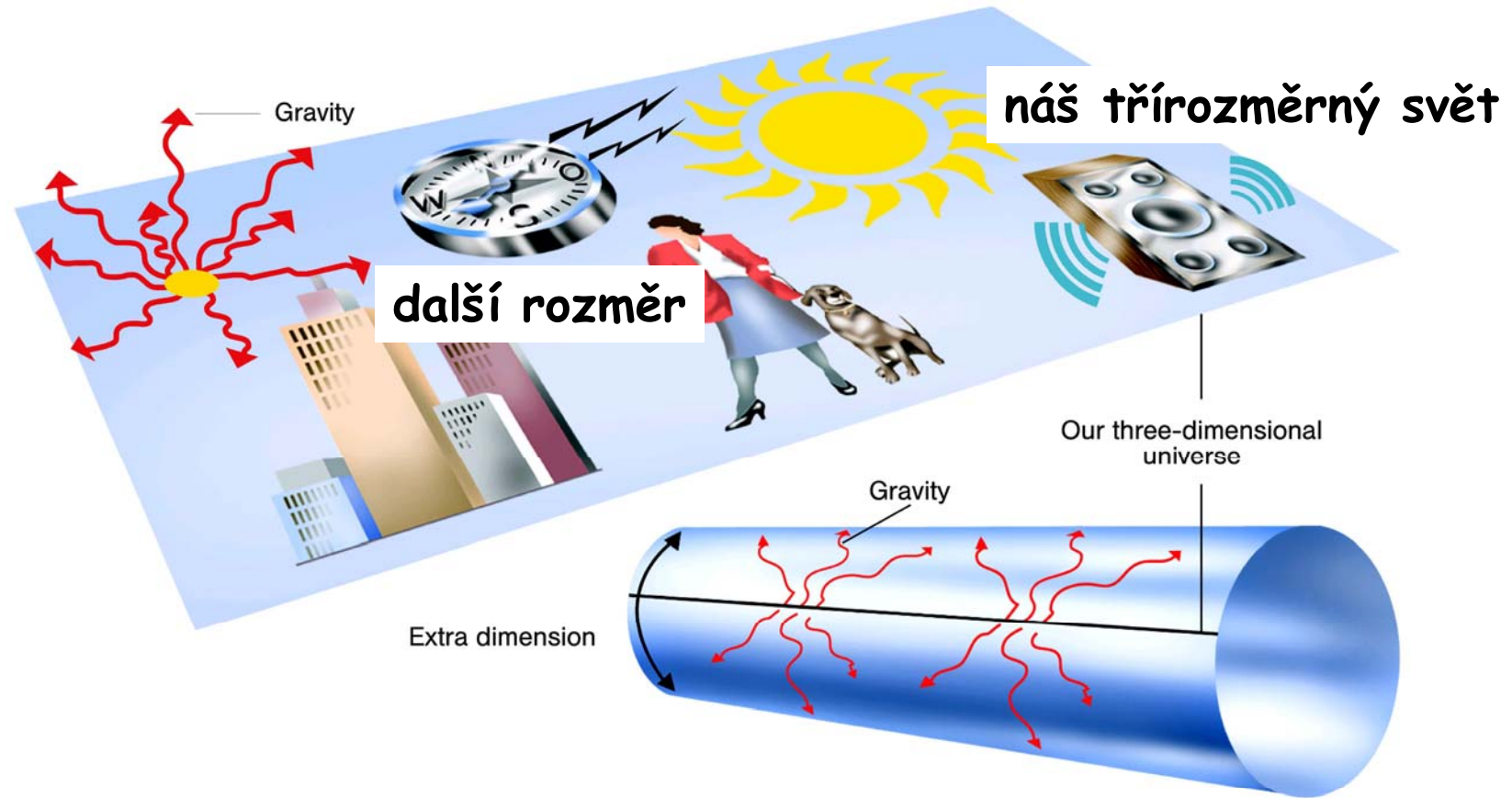
$\nearrow 1/137$

aby $V_{QED}(r) \cong V_{grav}(r)$ musí být hmotnost m

dána výrazem $m \cong \sqrt{\alpha} M_{PL} \cong 10^{18} \text{ GeV}$

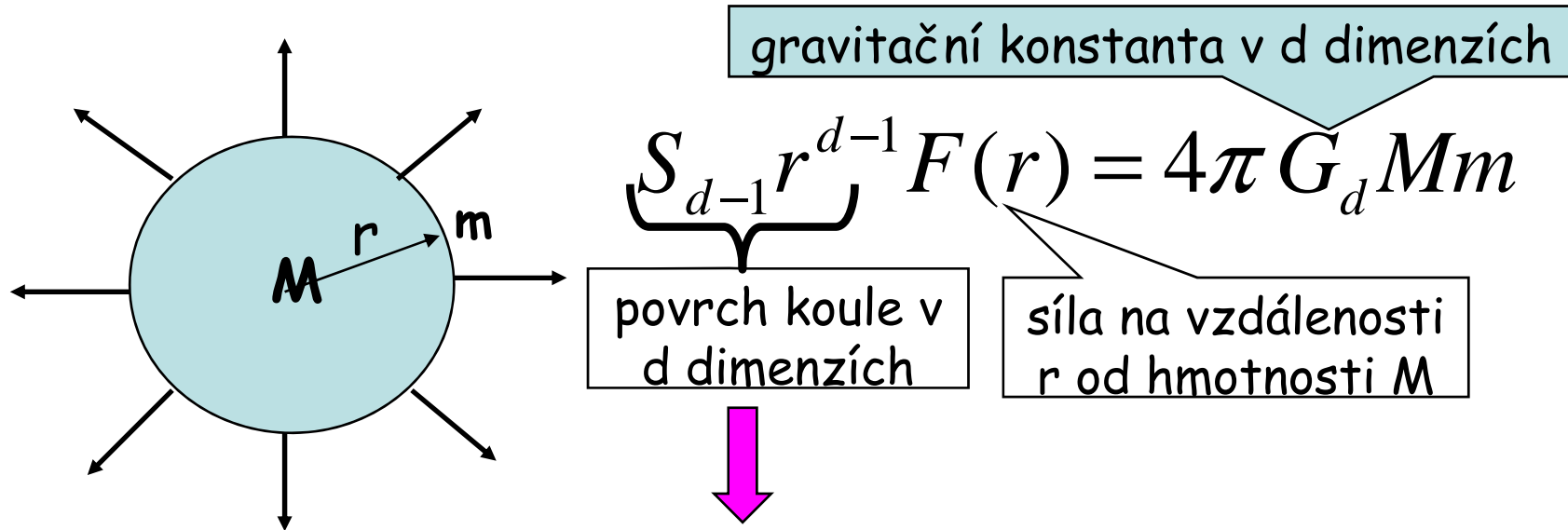
Tak těžké elementární částice v přírodě **neexistují**.

1998 Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali:
protože na rozdíl od ostatních sil i nás samotných,
gravitace „žije“ ve více prostorových dimenzích!!



Gaussův zákon v d prostorových dimenzích

Uvažujme hmotnosti M a m na vzdálenosti r od sebe



$$F(r) = A_d \frac{G_d M m}{r^{d-1}} \Rightarrow V(r) = A_d \frac{G_d M m}{r^{d-2}}, \quad d \neq 2$$

$$V(r) = A_d G_d M m \ln r, \quad d = 2$$

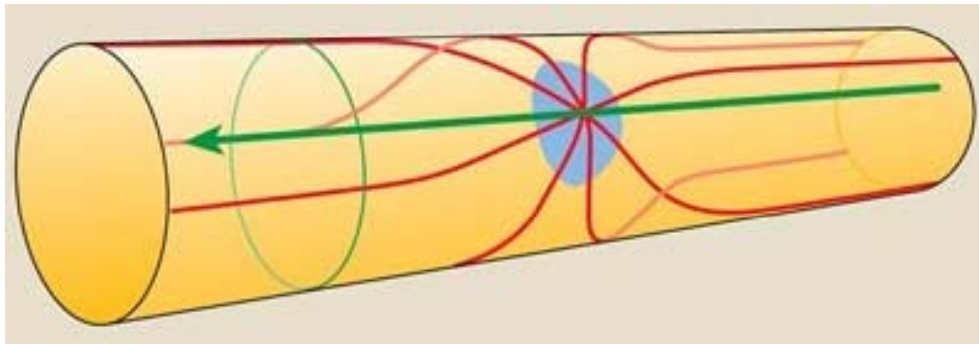
položme $d=3+n$ a přepišme předchozí ve tvaru

$$V(r) = \frac{G_n m_1 m_2}{r^{n+1}} = \frac{m_1 m_2}{M_{Pl(3+n)}^{n+2}} \frac{1}{r^{n+1}}$$

Planckova hmotnost ve 3+n dimezích, rovná ≈ 1000 GeV.

pokud je n dimenzí „svinuto“ do válců o poloměru R,

má gravitační zákon pro vzdálenosti $r \gg R$ jiný tvar:



$$V(r) \approx \frac{m_1 m_2}{M_{Pl(3+n)}^{n+2} R^n} \frac{1}{r}$$

Efektivní Planckova hmotnost ve 3 dimezích $\approx 10^{19}$ GeV

$$M_{Pl} = M_{Pl(3+n)} \left(M_{Pl(3+n)} R \right)^{n/2}$$

pak může být důsledkem velkého $R \gg 10^{-17}$ cm!

neboť tento bezrozměrný součin může být $\gg 1$

V tom případě by ovšem byla

Planckova délka

$$l_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}} = \sqrt{G_N} = 1.62 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

a

(v systému jednotek $\hbar = c = 1$)

Planckova škála hmotnosti

$$M_{Pl} = \sqrt{1/G_N} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

přelud!

Jak dobře je ověřen Newtonův gravitační zákon?

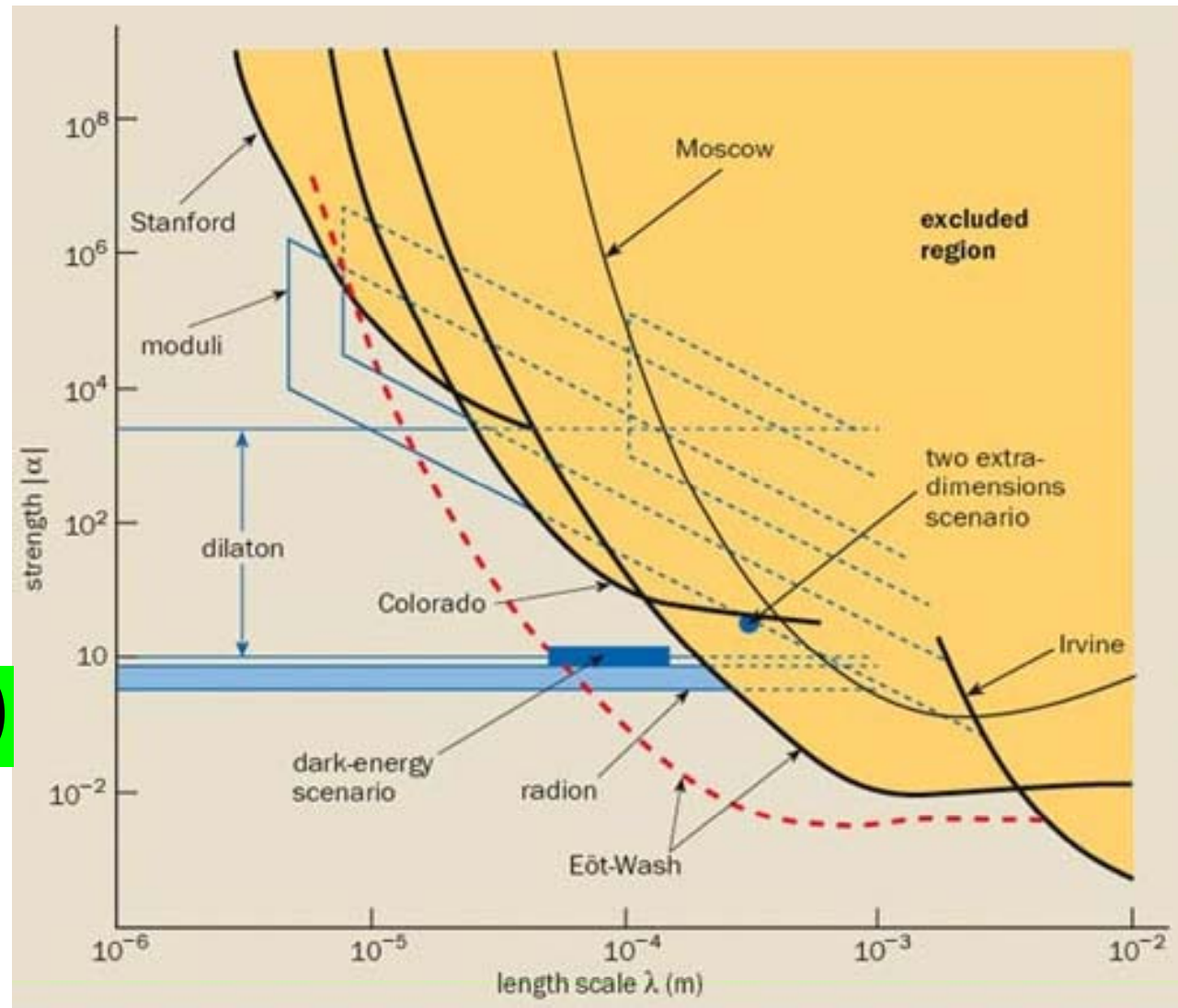
Odklon od Newtonova zákona

$$F_{grav} = \frac{G_N m_1 m_2}{r^2}$$

se standardně popisuje multiplikačním faktorem ve tvaru

$$(1 + \alpha \exp(-r/\lambda))$$

relativní dosah „nové velikost síly“

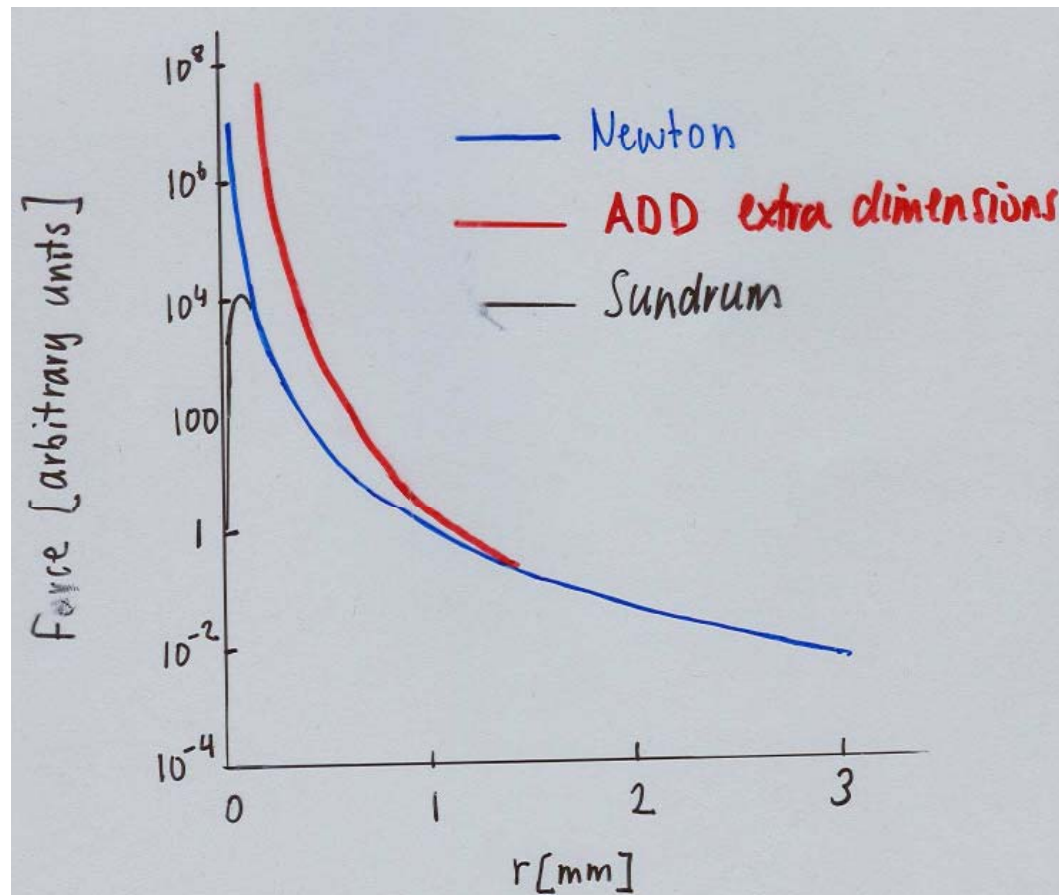


První měření gravitační síly v pozemských měřítkách provedl v roce **1798 H. Cavendish** pomocí torzních vah.

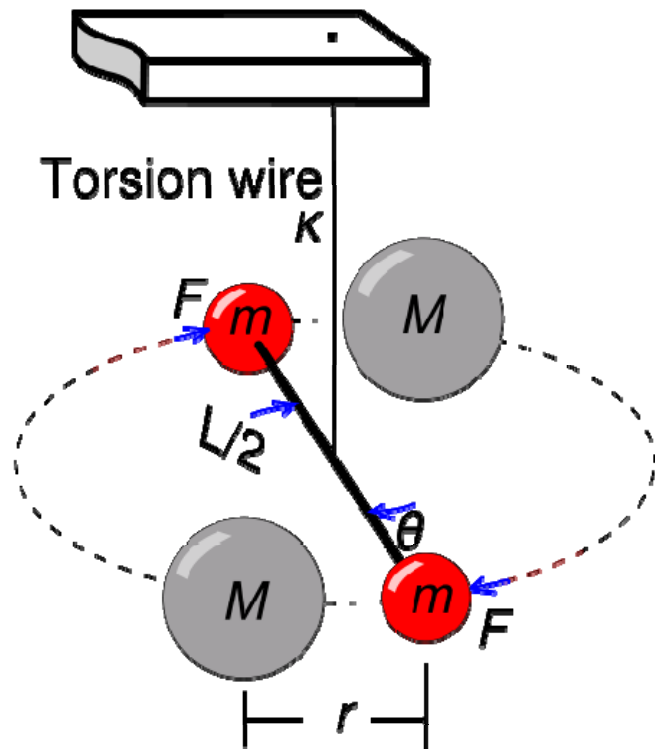


Jeho cílem bylo **změřit hustotu Země**, nikoliv gravitační konstantu, ale z jeho měření bylo snadno možné ji určit. a to s - na tu dobu úžasnou - **přesností 1%**.

Ověření gravitačního zákona na vzdálenostech **zlomku milimetru** byla v poslední době věnována velká pozornost. Pomocí moderní verze **torzních vah** byl Newtonův zákon ověřen až **na vzdálenosti 80 mikronů!**



Princip



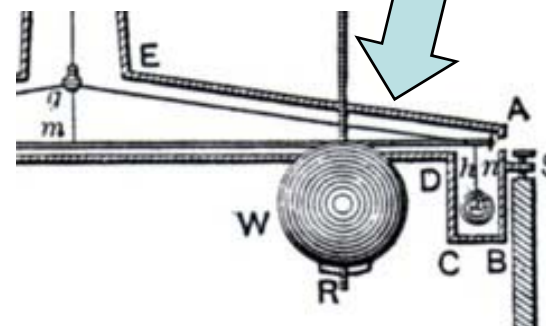
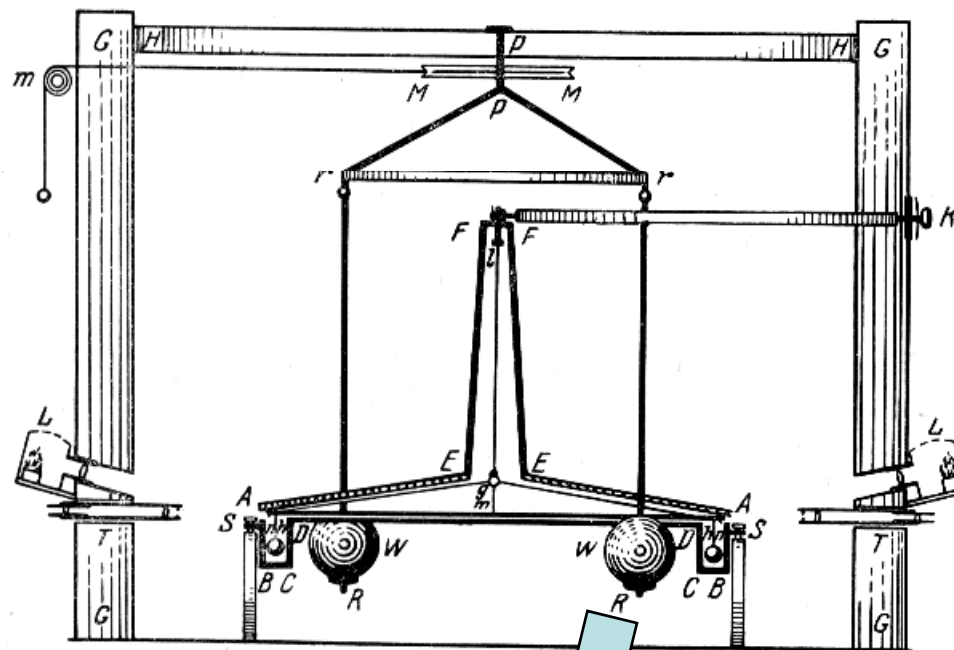
podmínka rovnováhy:

$$k\theta = LF = L \frac{GMm}{r^2}$$

torze

gravitace

Realizace



Jak lze pozorovat extra dimenze?

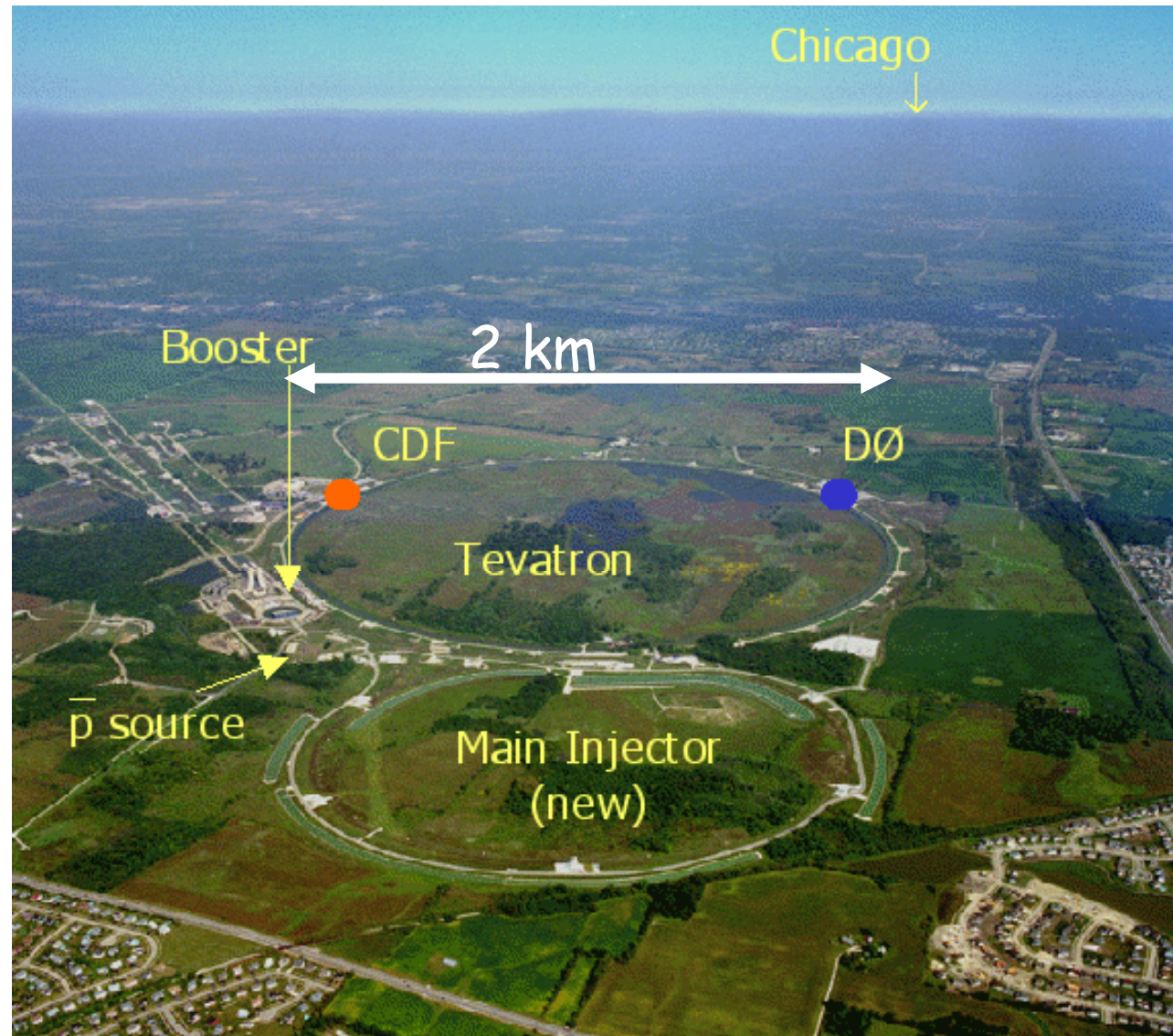
Extra **prostorové** dimenze **nebudeme nikdy schopni vnímat svými smysly** tak, jako vnímáme „naše“ tři dimenze.

Jediný způsob, jak extra dimenze „pozorovat“ je pátrat po jejich projevech ve srážkách částic v našem **třírozměrném prostoru**. Konkrétně to znamená **hledat jevy, které se vymykají naší dosavadní zkušenosti**.

Takové pátrání již probíhá na urychlovači Tevatron ve Fermiho národní laboratoři u Chicaga.

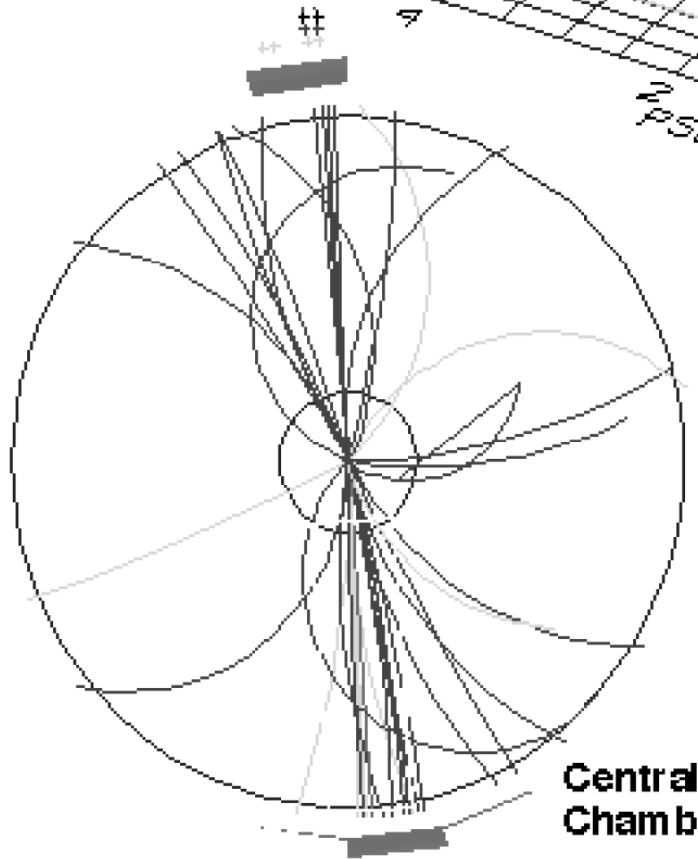
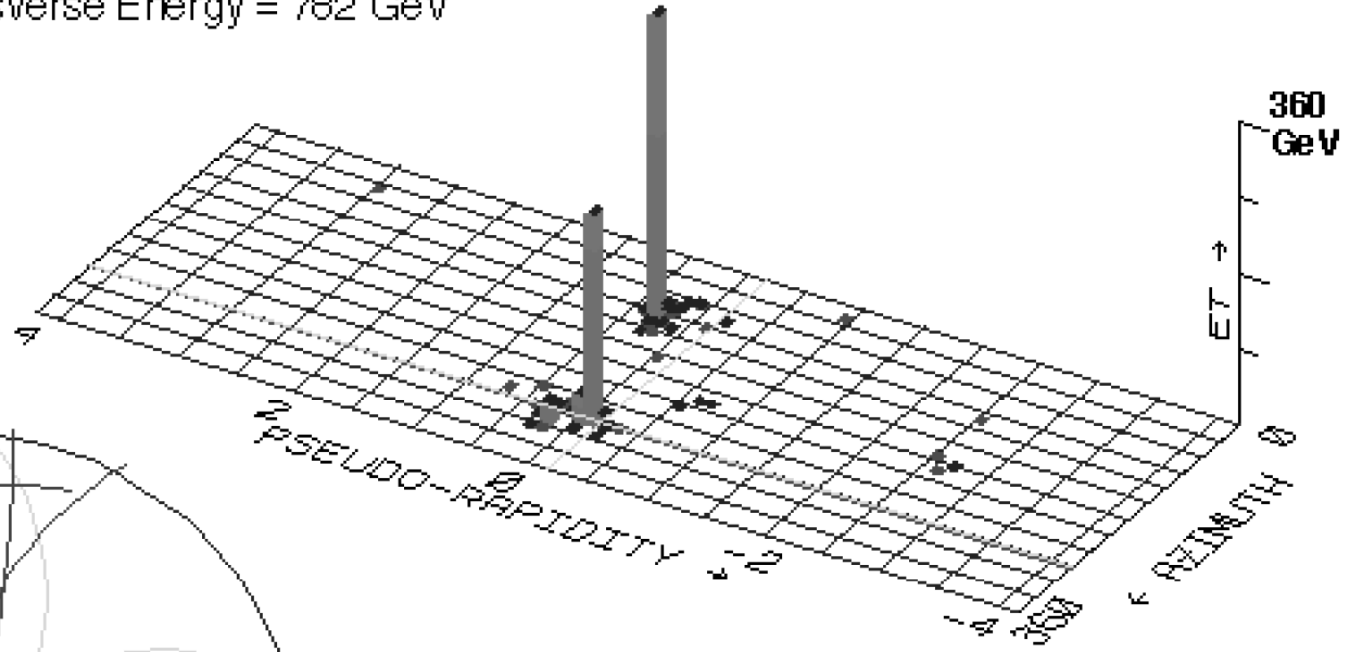
Předpokladem úspěchu je jako vždy **co nejlepší znalost „normální fyziky“**, v tomto případě konkrétně mechanismu jak ve srážkách vznikají **jety**.

Fermiho
národní
laboratoř
nedaleko
Chicaga



Sum of Transverse Energy = 782 GeV

CDF

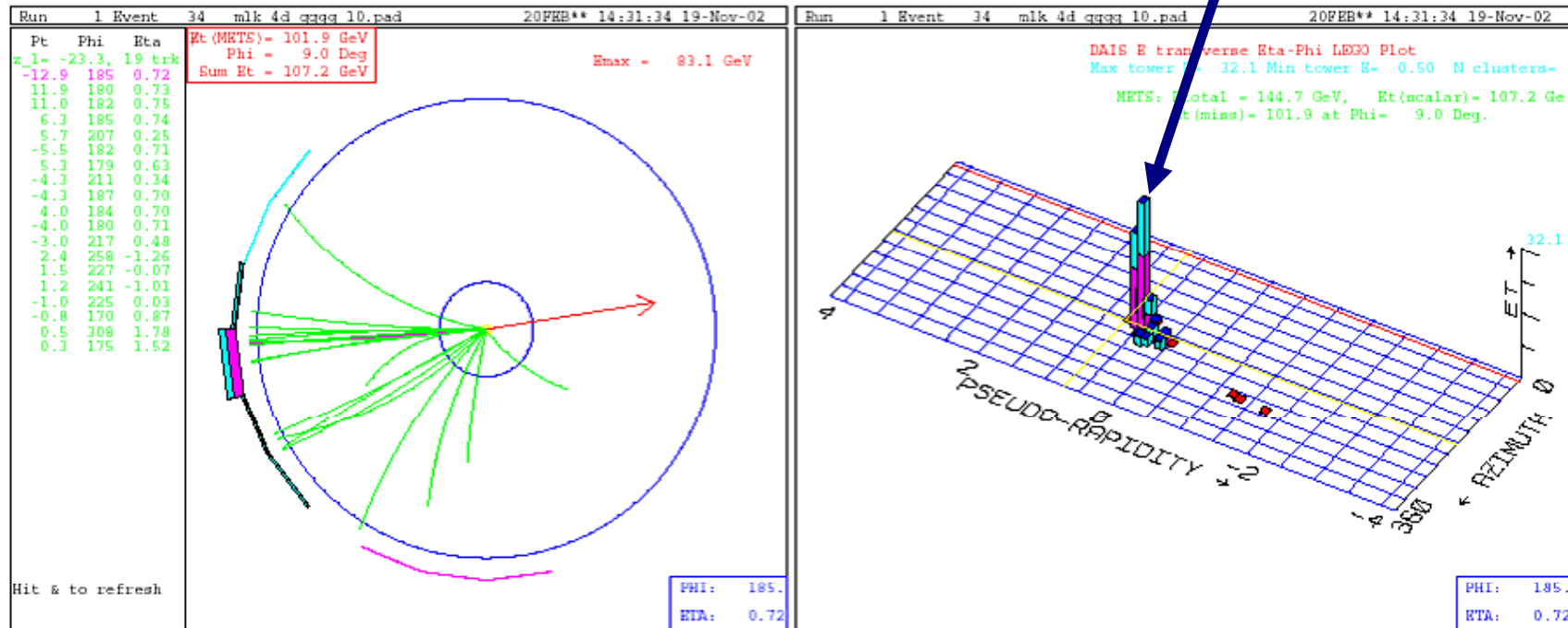


Calorimeter lego plot
Two Jets, 424 GeV and 371 GeV

V „normální“ srážce antiprotonu s protonem vzniknou dva jety s opačnými hybnostmi.

Central Tracking Chamber View

Nejdramatičtějším projevem existence extra dimenzí by bylo pozorování srážek, v nichž vznikne **jen jeden jet** a **celková energie se proto ve srážce nezachovává**

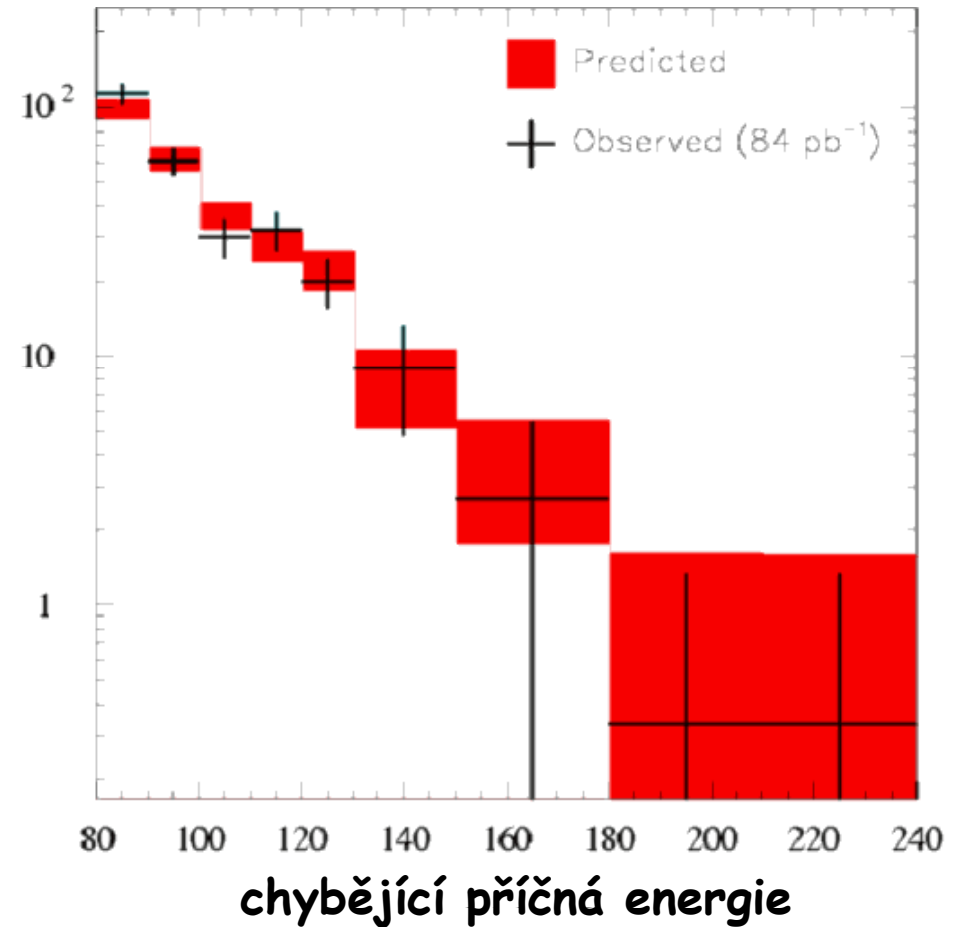
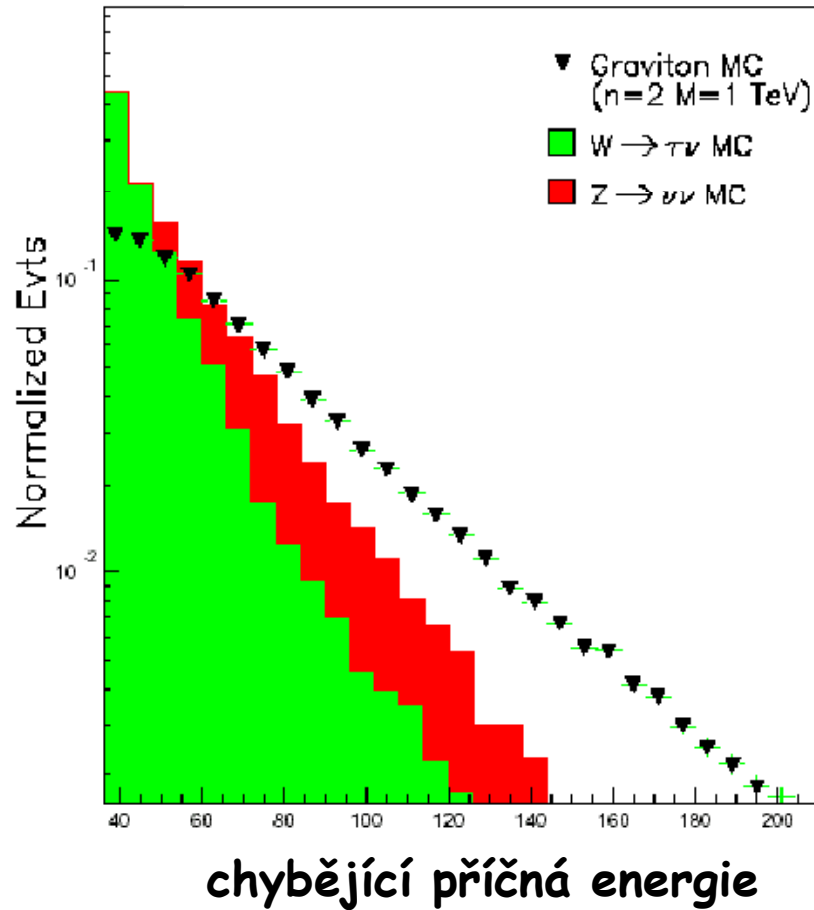


podobně jako si počátkem 20. let 20. století mysleli **Bohr a Heisenberg**, že k tomu dochází v **β -rozpadu neutronu**. Po takových srážkách se v experimentech na TEVATRONu již - **zatím bezúspěšně** - pátrá. **Pauli by měl jistě radost.**

Phys.Rev.Lett. 92 (2004) 121802

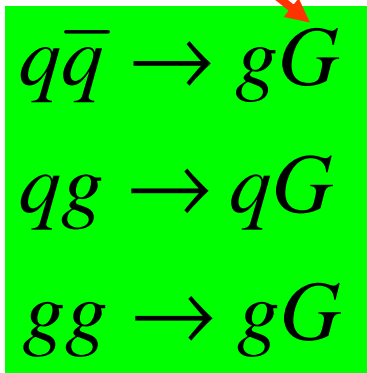
Search for Kaluza-Klein Graviton Emission in $p\bar{p}$ Collisions
at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV using the Missing Energy Signature

The CDF Collaboration

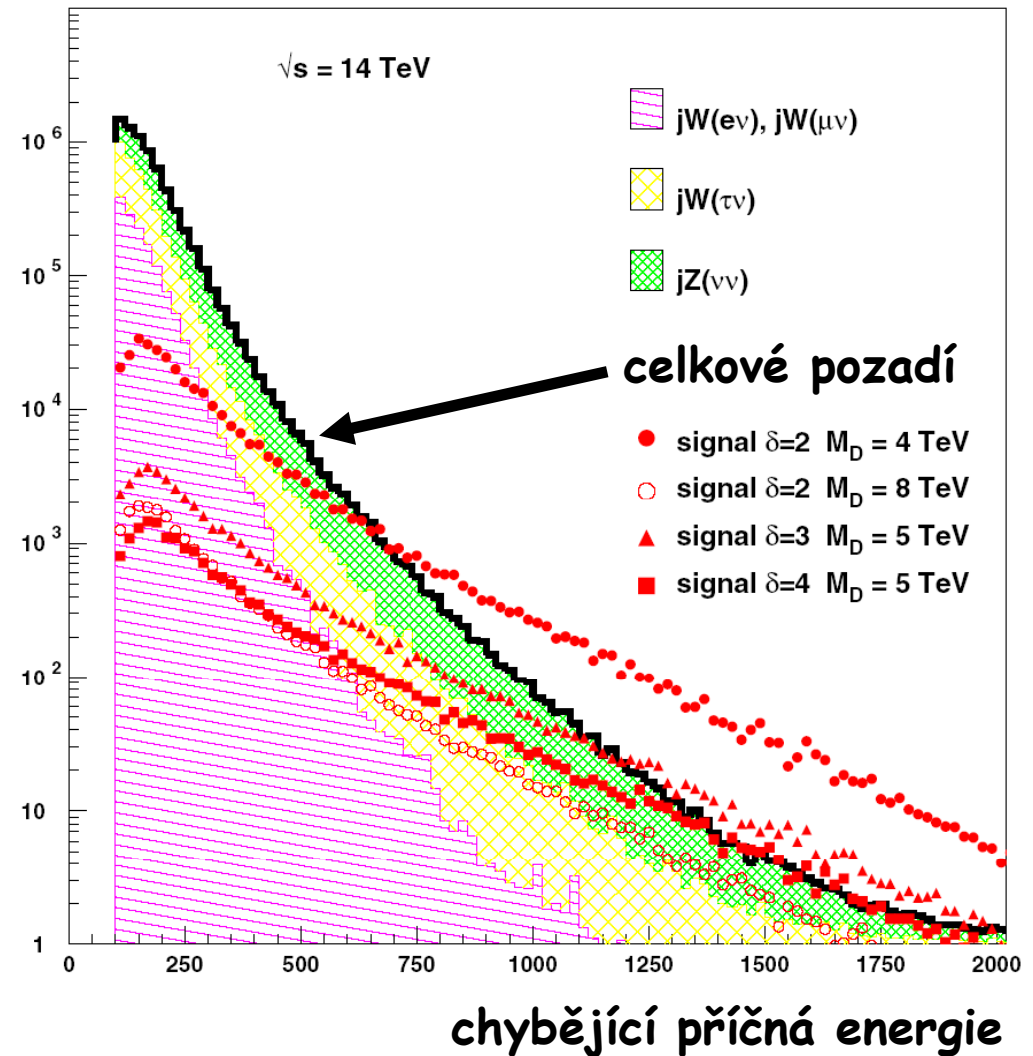


Podobně se budou hledat projevy extra dimenzí na LHC

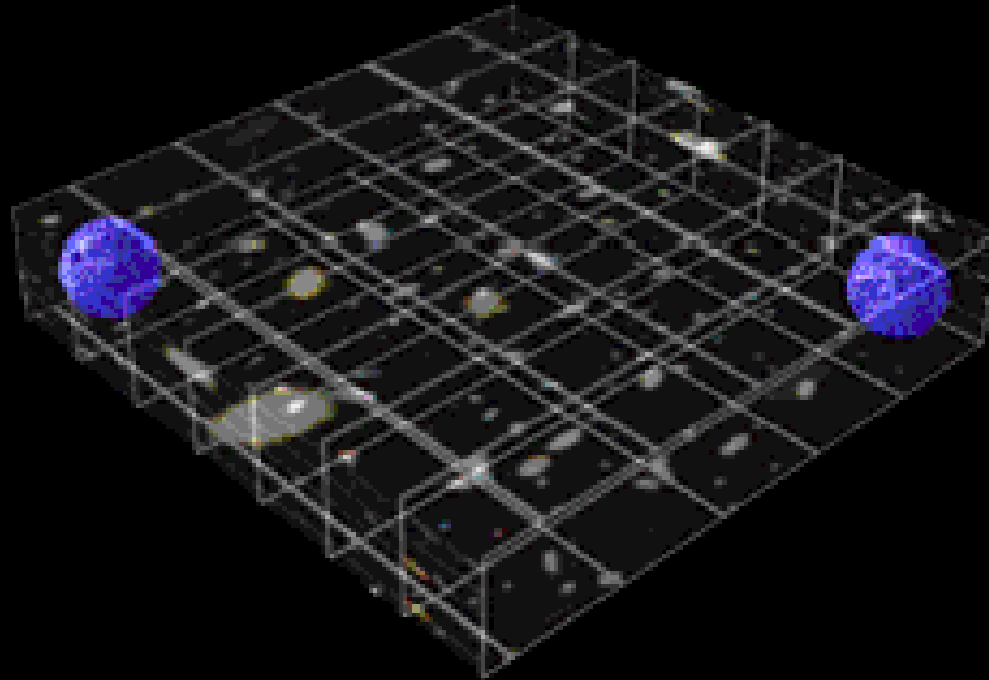
Projevy přímé **produkce gravitonu** v procesech



v nichž graviton odnese část hybnosti do extra dimenzí



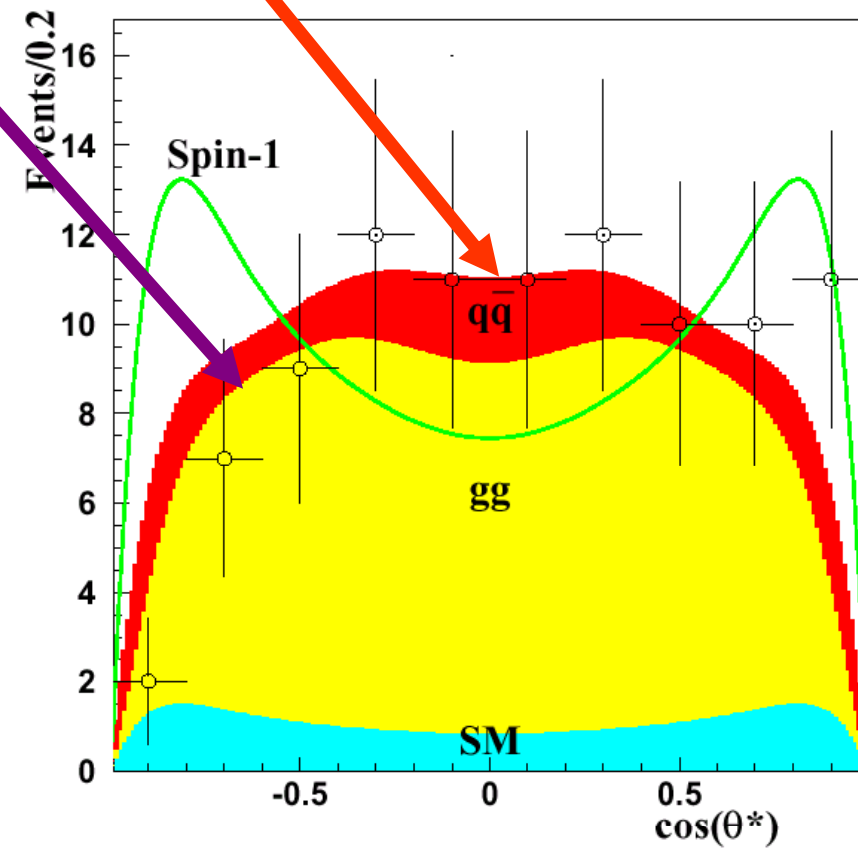
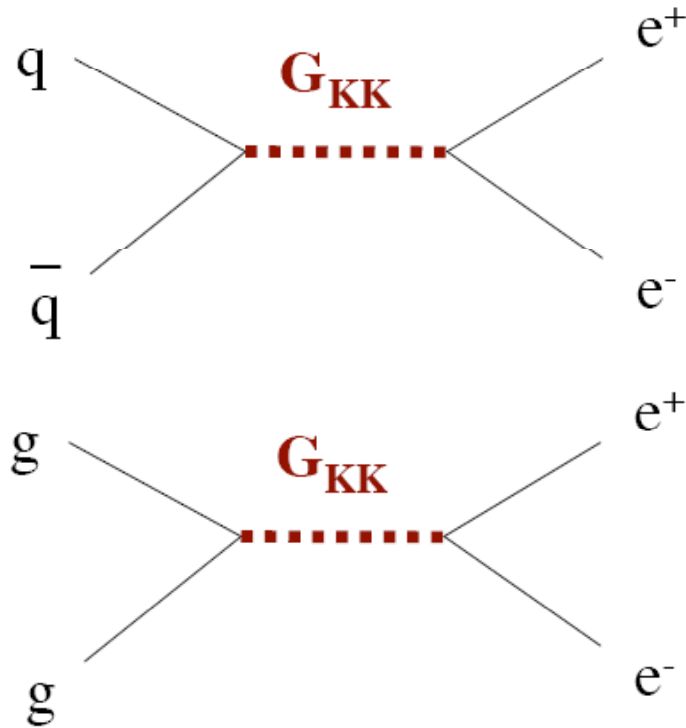
simulace srážky dvou protonů, při níž vzniknou normální částice a jeden graviton, který odnese energii do čtvrté prostorové dimenze a my proto pozorujeme nezachování hybnosti



zatím takové případy nebyly pozorovány.

Existence gravitonu také **ovlivní úhlové rozdělení páru**
elektronu a pozitronu produkovaného ve srážce

- kvarku s antikvarkem
- dvou gluonů



Struny

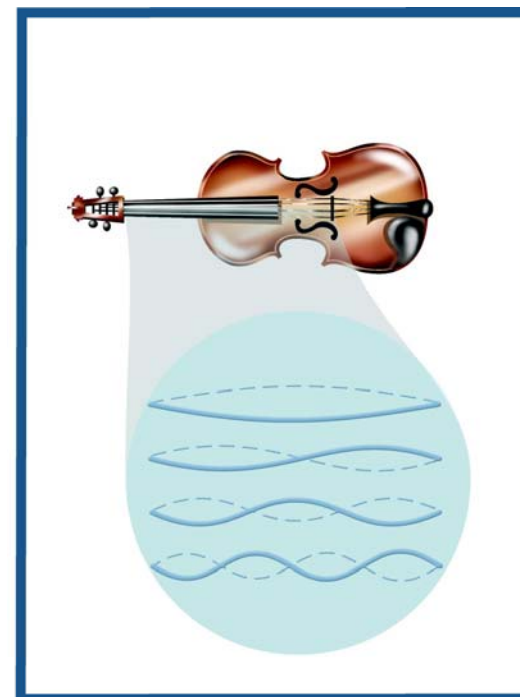
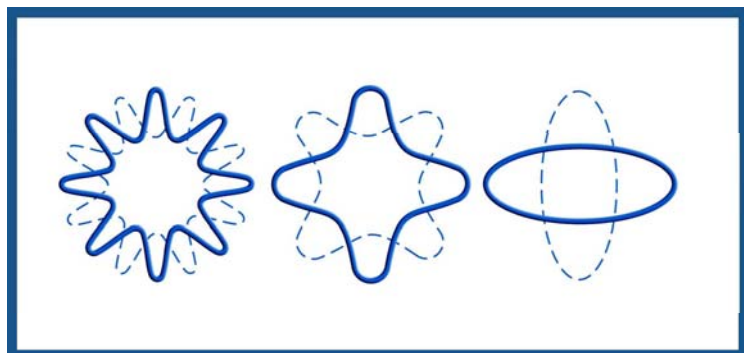
Hypotéza: základními objekty mikrosvěta nejsou bodové částice, ale struny.

Koncem 60. let se zdálo, že některé vlastnosti protonů, neutronů a mezonů lze vysvětlit, předpokládáme-li, že se chovají **jako struny ve třírozměrném prostoru o délce řádově femtometr**. Brzy se ovšem ukázalo, že **takto protony chápat nelze** a strunový model byl opuštěn.

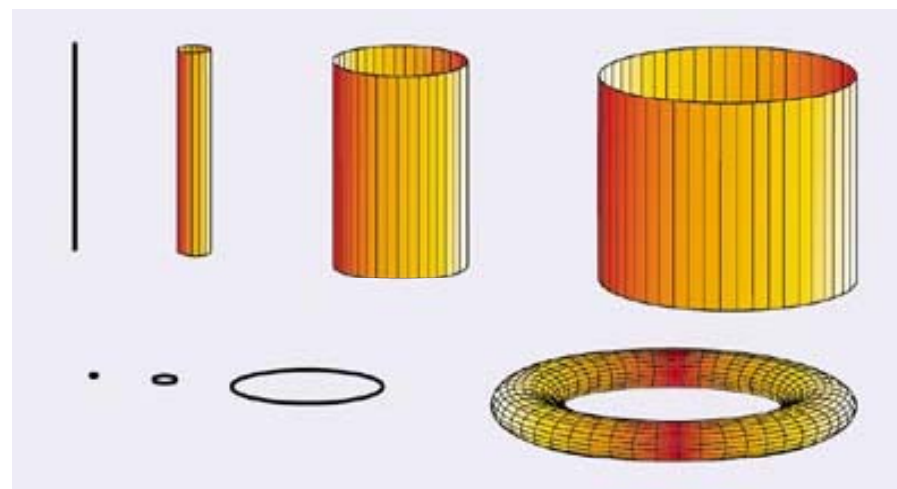
Struny se do fyziky vrátili **počátkem 80. let** ale v jiném hávu: jako součást snah **sjednotit elektromagnetické, slabé a silné síly s gravitací**.

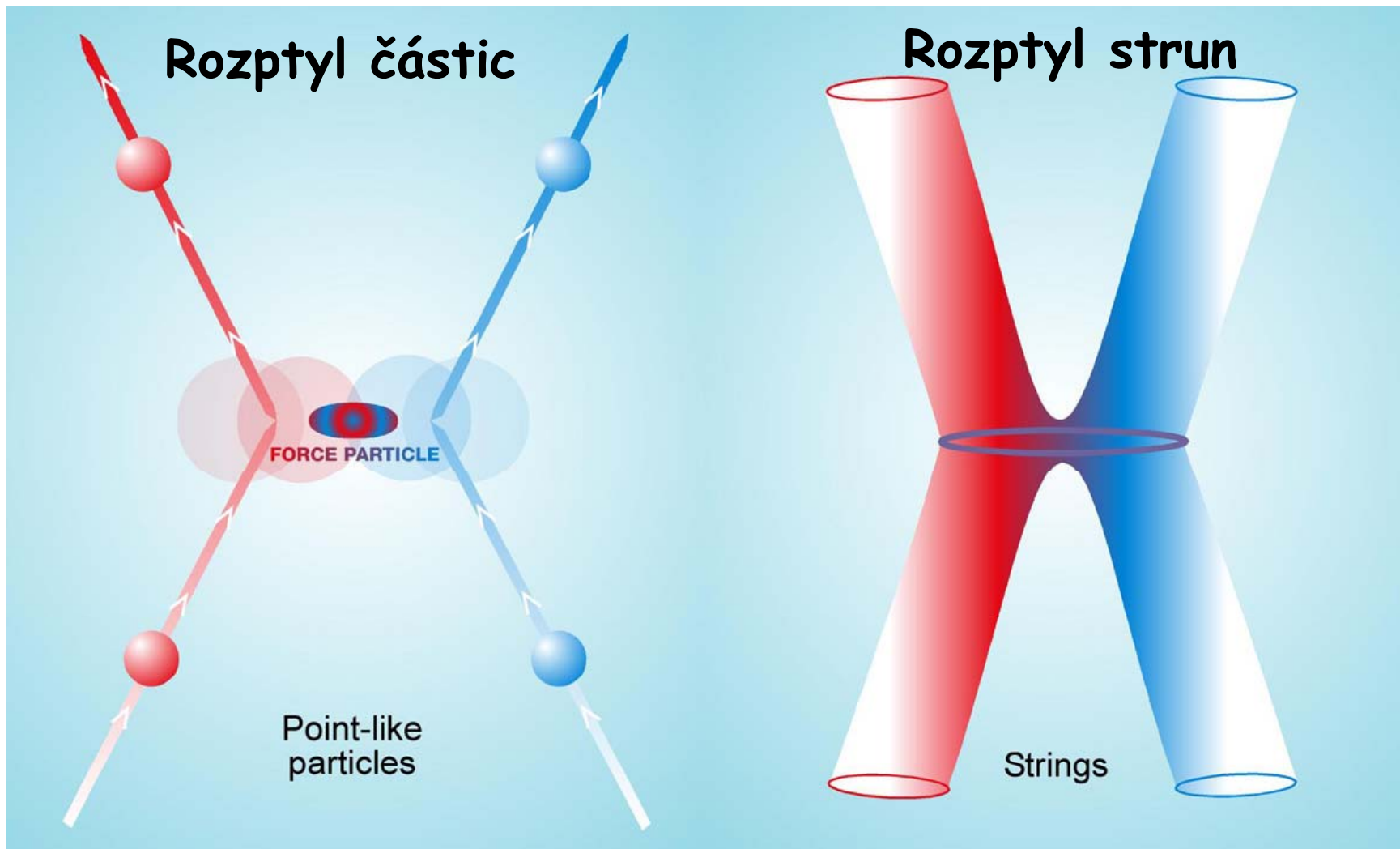
Tyto struny se však „pohybují“ **ve vícerozměrném** (obvykle 10ti) **prostorově** a měli **délku řádově 10^{-33} cm**, tj. **o 20 řádů menší** než je rozměr protonu.

Podobně jako mají **různé tóny** (tj. vibrační stavy) klasické struny **různou energii**, mají různou energii i vibrační stavy strun těchto teorií.



Struny mohou být otevřené i uzavřené a pokud se na ně díváme s malou „**rozlišovací schopností**“, **jeví se nám jako body**. Různá energie vibračních stavů struny odpovídají různým hmotnostem.

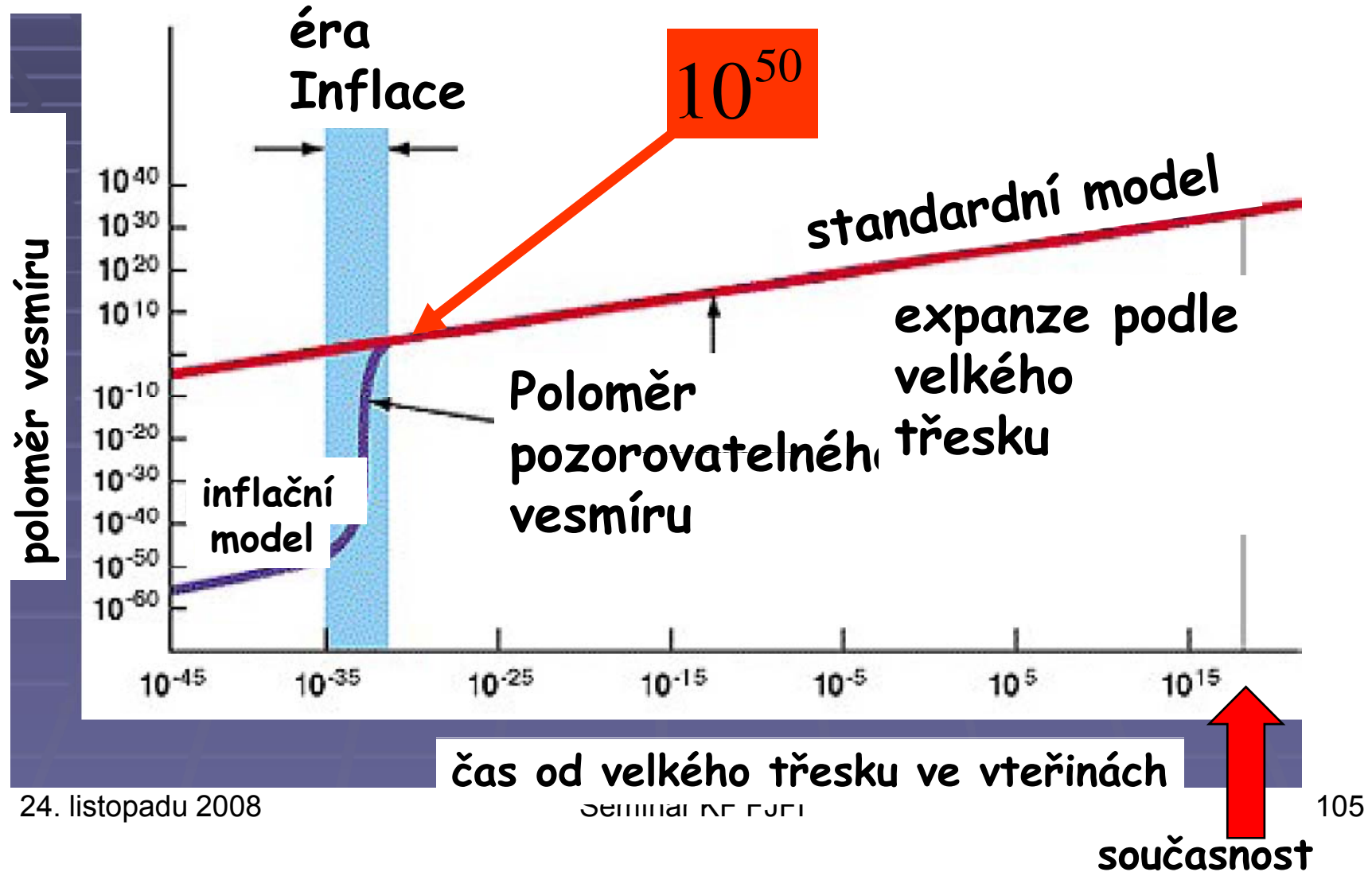




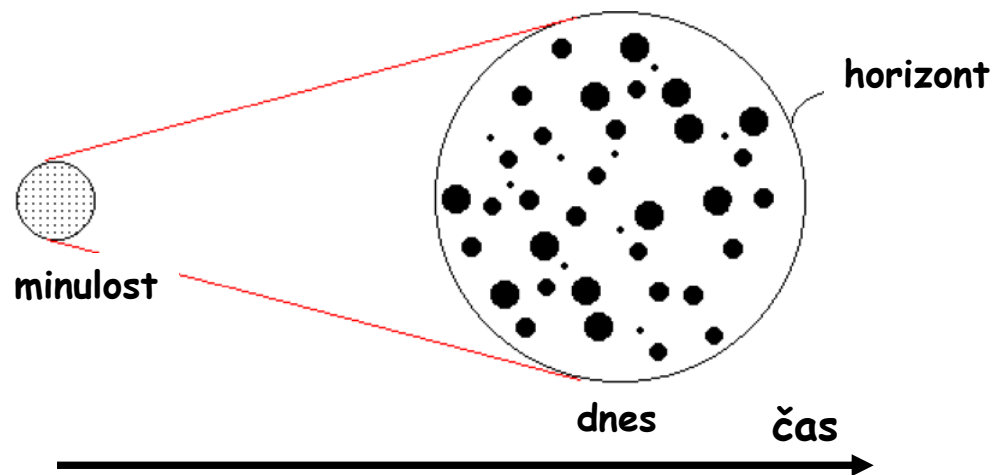
**Co se o velkém
třesku domýšlíme**

Inflační stádium vývoje vesmíru

Exponenciální expanze vesmíru, při níž během neuvěřitelně krátké doby vesmír zvětšil svou velikost faktorem

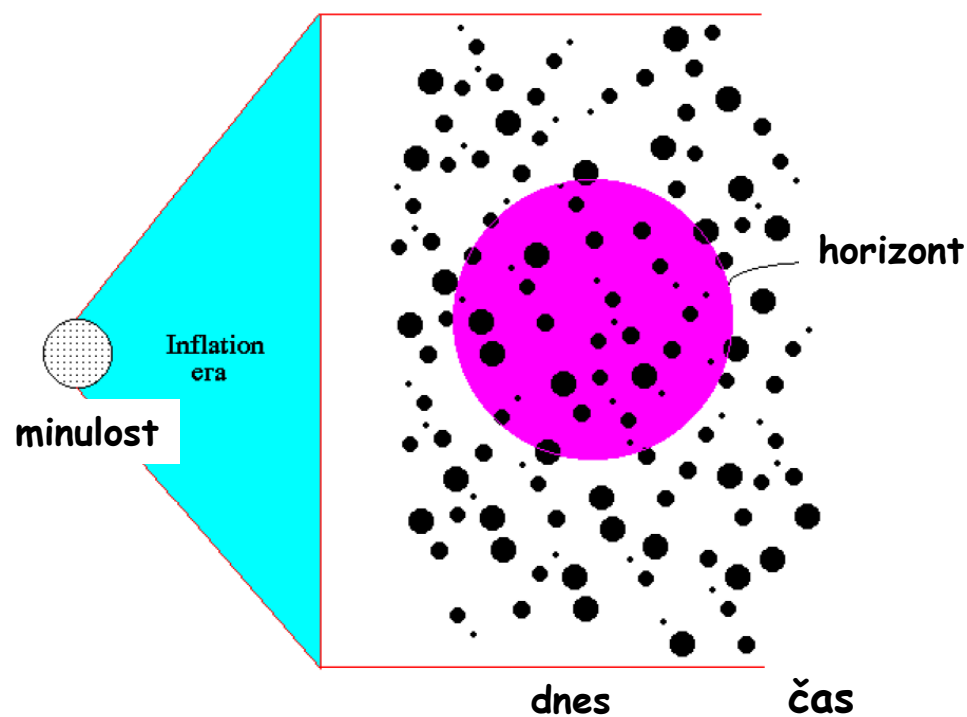


Normální expanze vesmíru
(podle Hubbleova zákona)
rychlostí **menší** než je
rychlost světla.

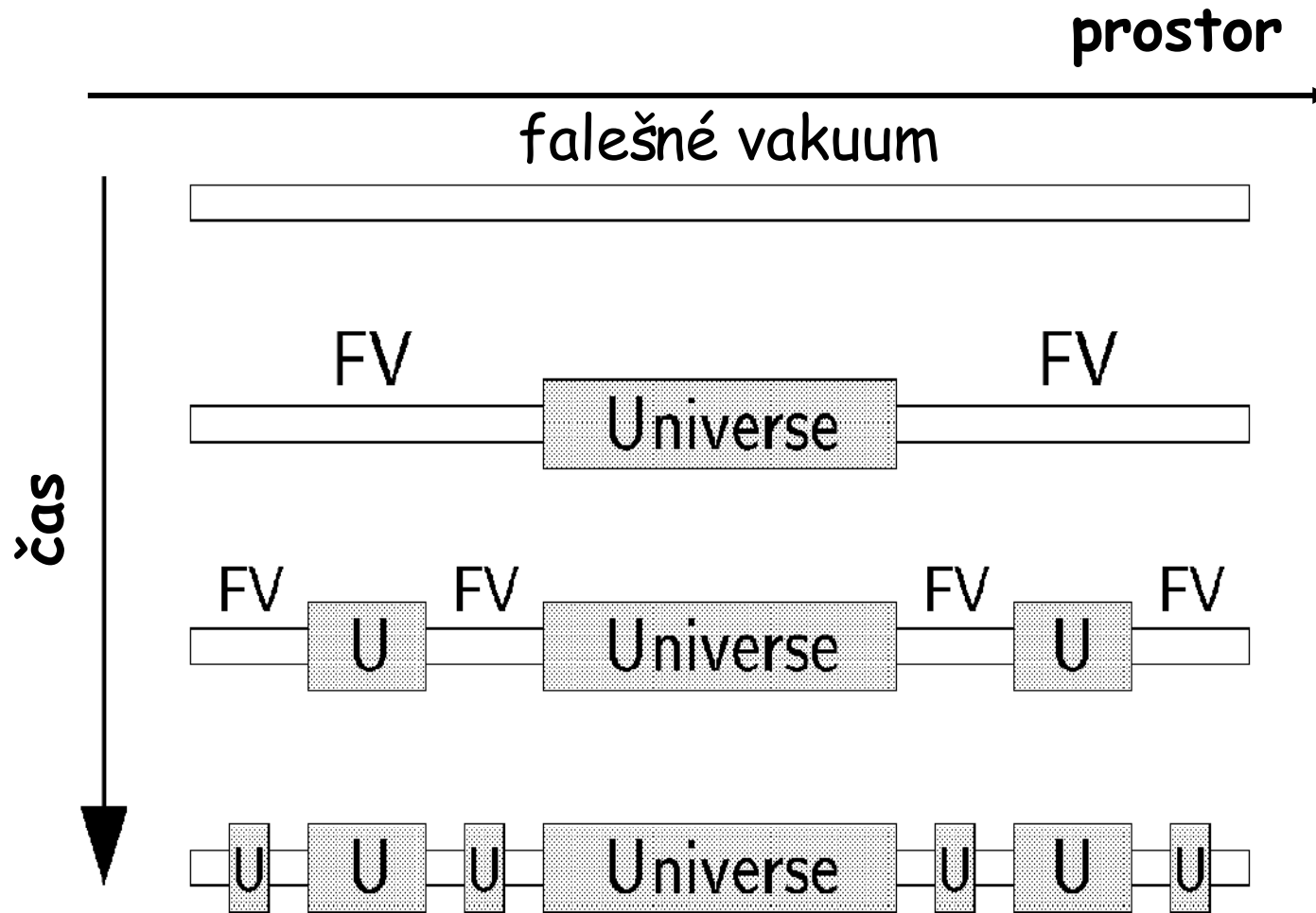


Inflační expanze vesmíru
následovaná normální
expanzí.

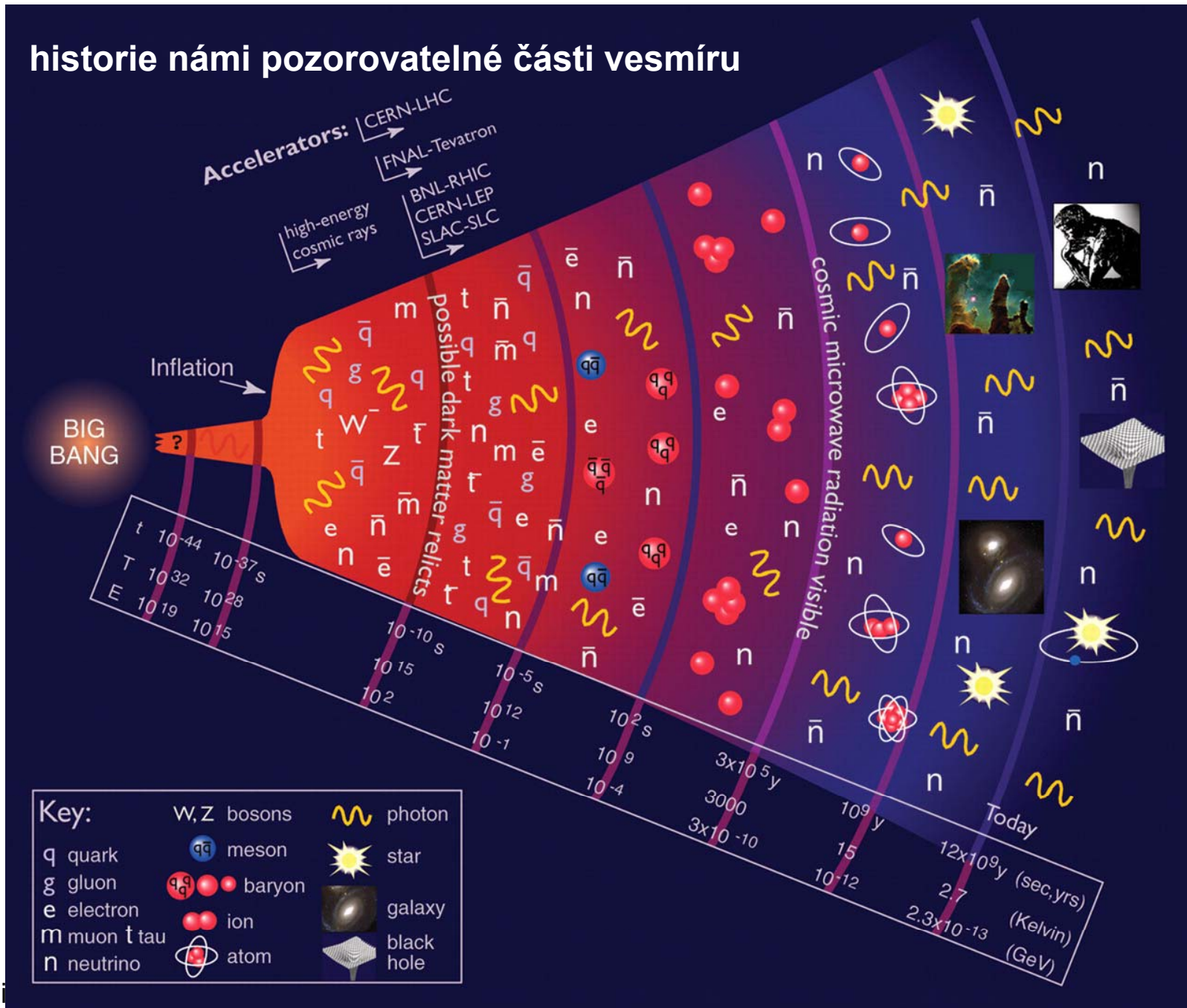
Při srovnání s inflační
expanzí se jeví normální
jako **stacionární stav**



Věčná inflace a „mnohamír“



historie námi pozorovatelné části vesmíru



Teorie ničeho?

Hypotéza mnohamíru jde ruku v ruce s poznáním, že **rovnice teorie strun mají nepředstavitelně množství řešení**

$\approx 10^{1000}$

z nichž každé odpovídá **jednomu „kapesnímu vesmíru“**

teorie věčné inflace

V každém takovém kapesním vesmíru platí **jiné fyzikální zákony** a tedy se vytvoří i **jiné fyzikální struktury**. Většina takových kapesních vesmírů je pro život, v podobě, jak ho známe, **nehostinná**.

**Triumf nebo krach moderní fyziky?
Nebo se jen změní pohled na to,
co fyzika může vysvětlit?**

Parametry každé teorie lze rozdělit na

- ✚ skutečně **základní**
- ✚ a ty, které jen **charakterizují prostředí, resp. počáteční podmínky.**

Poslední vývoj teorie strun přinesl **výraznou změnu** v pohledu na to, jakou povahu má oněch cca **20 volných parametrů** standardního modelu.

Zatímco před pár lety je strunaři slibovali spočítat:

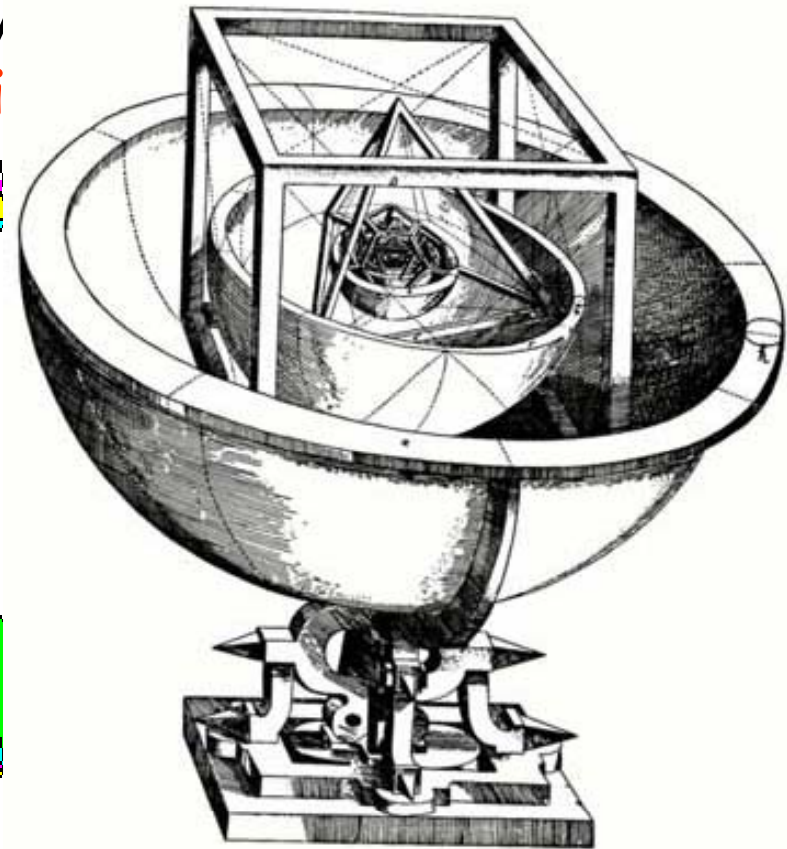
Brian Greene v *Elegantním vesmíru* píše, že „**teorie strun poskytuje rámec pro odpověď** na otázky jako např. **proč mají elektron a jiné částice ty hmotnosti, jaké mají.**“

dnes tento názor sdílí již jen pár skalních nadšenců a většina strunařů se smířila s tím, že **všechny** mají charakter prostředí a **nejsou tedy z teorie strun spočítatelné.**

Keplerův model vesmíru z roku 1596

z knihy *Mysterium Cosmographicum*. V té době bylo známo šest planet, jejichž oběžné dráhy Keplerova pět let domníval, že **poloměry** kruhových drah planet kolem Slunce **jsou základní fyzikální parametry**.

Svůj názor změnil až poté, co se seznámil s pozorováními Tychona Brahe.



Icosahedron

Dodecahedron

Co bych LHC (i sobě) nepřál

V létě roku 1979 prohlásil čerstvý nositel NC za fyziku **Sheldon Glashow** na adresu dalšího rozvoje standardního modelu tato slova:

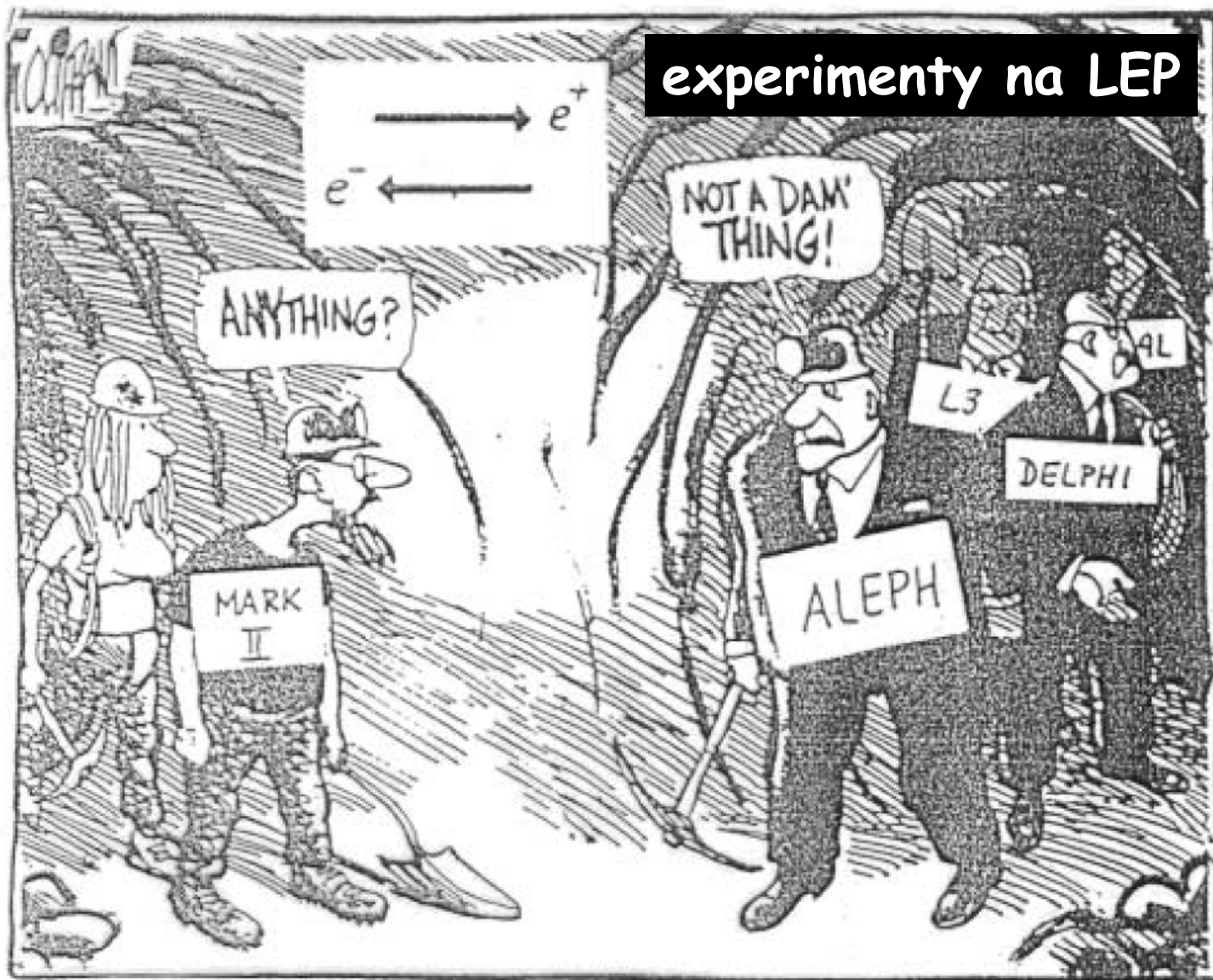
Nikdo nepochybuje o správnosti standardního modelu, **ale bylo by arogantní a nehistorické věřit**, že naše naivní extrapolace z fyziky při 2 GeV do fyziky při 200 GeV bude správná v detailech.

Ta je nejjednodušší a nejméně pravděpodobná možnost.

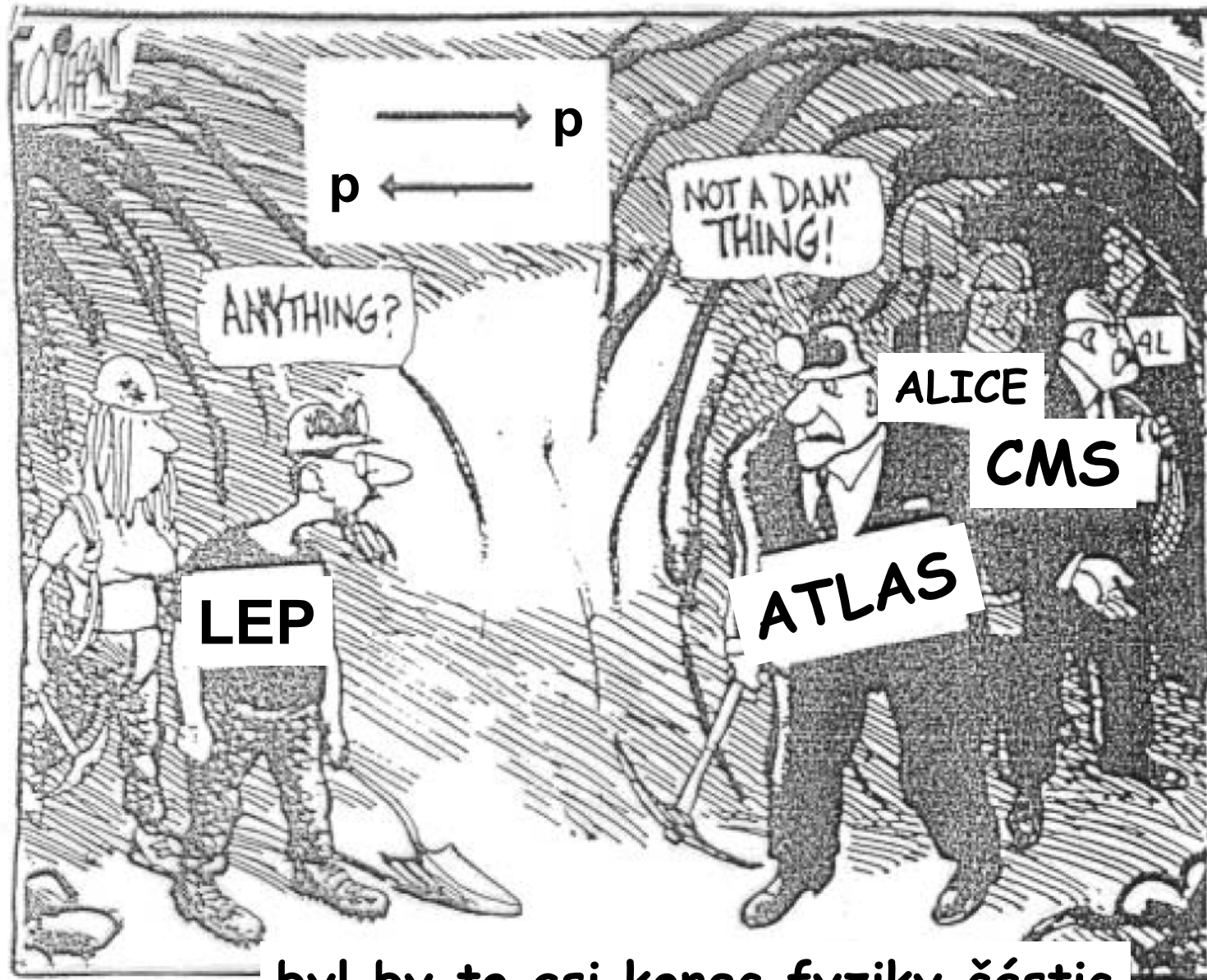
Její správnost zodpoví experimenty na LEPu a jedině tyto experimenty..... **Nejpravděpodobnější je, že narazíme na něco zcela nečekaného.**

Bohužel, Glashow se mýlil a pravdu měly noviny v Singapuru

(“taken by Dydak from a Singapore newspaper and slightly adapted”)



Kdyby se tohle opakovalo na LHC



24. listopadu 2008

byl by to asi konec fyziky částic

Na co se naopak těším

že zažijeme něco podobného jako fyzikové počátkem 20. st.

1896: Wien odvodil na základě **Boltzmanovy statistické fyziky** a předpokladu, že pohybující se atomy emitují záření o frekvenci, jež je funkcí jejich rychlosti, tvar

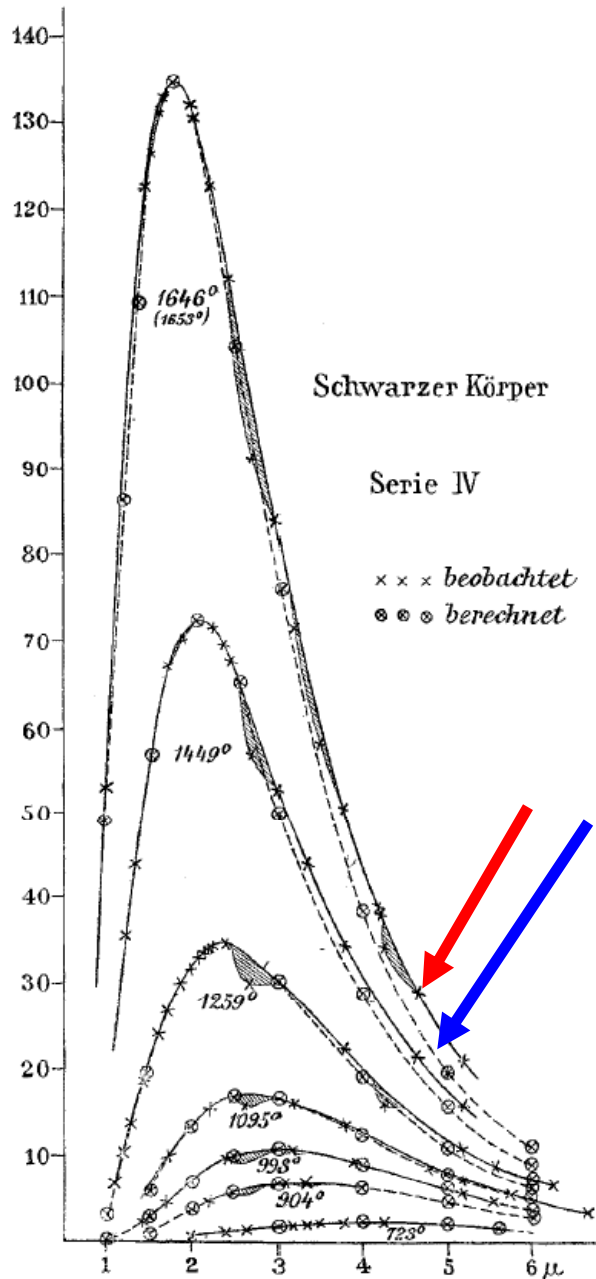
$$u(\nu, T) = \alpha \nu^3 \exp(-\beta \nu / T)$$

jenž byl potvrzen prvními přesnými měřeními Paschena.

Jeho odvození představuje názornou ilustraci toho, **jak lze chybným způsobem dospět ke správnému výsledku.**

Až do konce roku 1900 nikdo netušil, že Wienův zákon,

v sobě skrývá kvantovou fyziku!

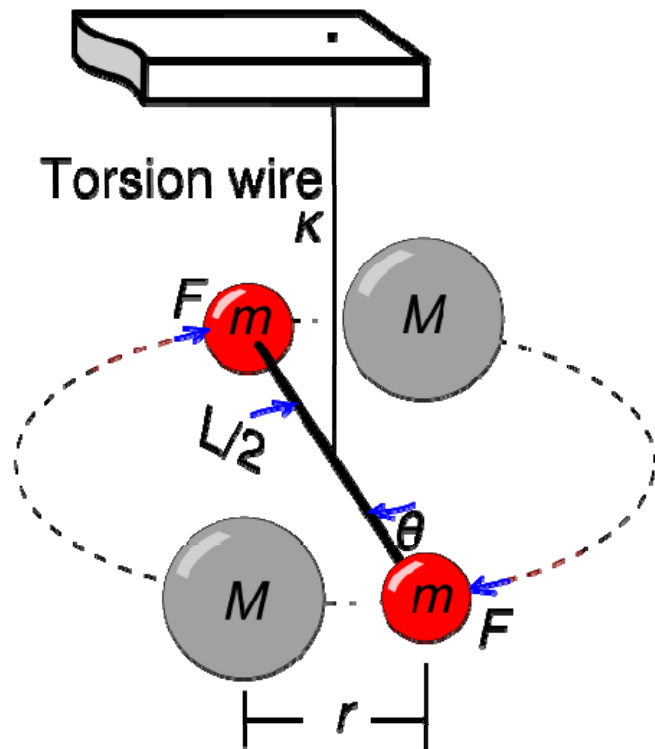


Teprve když **Lummers a Pringsheim** na jaře roku 1900 změřili spektrální hustotu záření absolutně černého tělesa a zjistili, že jejich měření **leží pro větší vlnové délky a vyšší teploty nad předpovědí Wienovy formule**, našel **Planck empirickou formuli**, jež data popisovala v celém rozsahu vlnových délek.

Pointa: Wienova formule **popisuje kvantovou povahu záření**. Kvantová teorie byla objevena tím, že bylo pozorován odklon od této formule, v oblasti, **kde platí klasické zákony**.

Konec

Princip



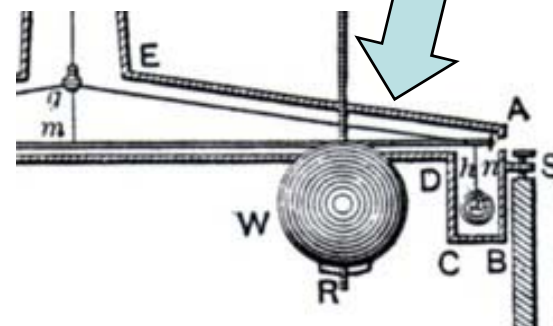
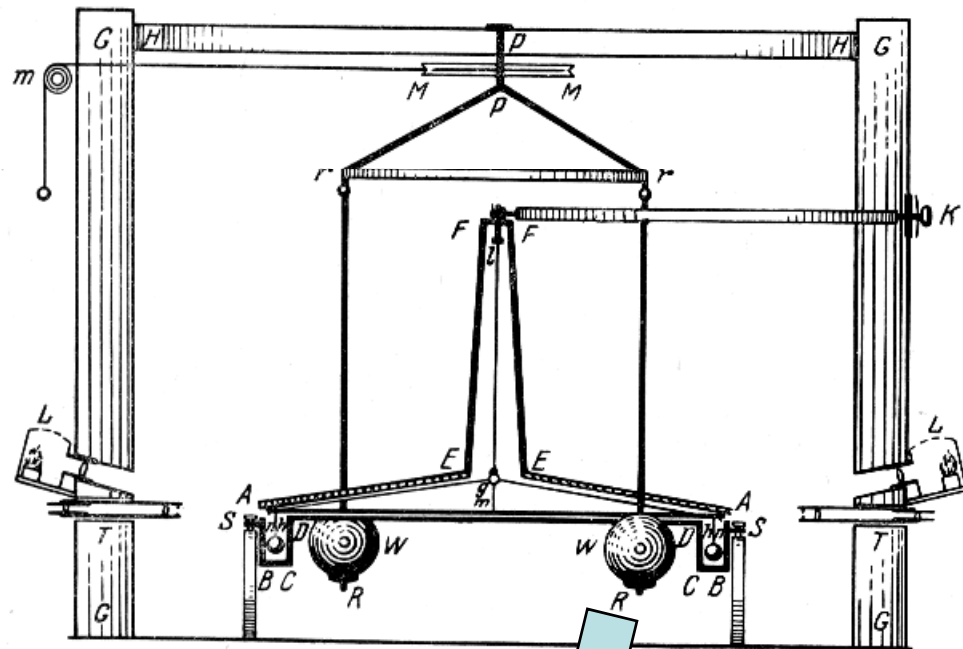
podmínka rovnováhy:

$$k\theta = LF = L \frac{GMm}{r^2}$$

torze

gravitace

Realizace



The GALPROP general electron spectrum resulting from sources across the galaxy is shown as the dashed line. The dotted curve represents the propagated electrons from the annihilation of a Kaluza–Klein particle. The dotted curve assumes an isothermal dark matter halo of 4-kpc scale height, a local dark matter density of 0.43 GeV cm^{-3} , a Kaluza–Klein mass of 620 GeV, and an annihilation cross section rate of $1 \times 10^{-23} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, which implies a boost factor of ~ 200 . The sum of these signals is the solid curve. Here the spectrum is multiplied by $E^{3.0}$ for clarity. The solid curve provides a good fit to both the magnetic spectrometer data^{30, 31} and calorimeter data^{16, 32} and reproduces all of the measurements from 20 GeV to 2 TeV, including the cut-off in the observed excess. All error bars are one standard deviation.