

Svět elementárních částic a velký třesk: záhady a souvislosti

Jiří Chýla, Fyzikální ústav AV ČR

Jeden z nejzajímavějších a nepozoruhodnějších rysů současné fyziky je stále patrnější skutečnost, 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 **právě ty struktury a zákonitosti**, jež zkoumá fyzika elementárních částic.

Ale i naopak: z vesmíru k nám může přiletět objekt, který na Zemi nebudeme nikdy schopni vytvořit a jenž bude klíčem k pochopení zákonitostí mikrosvěta.

Obsah

- Co o mikrosvětě víme: **standardní model**
- **Za hranicemi** standardního modelu
- Problémy **velkého třesku**
- Záhady:
 - jak ve vesmíru vznikla **převaha hmoty?**
 - co tvoří **temnou hmotu?**
 - co tvoří **temnou energii?**
 - je mikrosvět **supersymetrický?**
 - v **kolika rozměrech** „žijí“ fyzikální zákony?
 - co jsou **základní fyzikální objekty?**

Co o mikrosvětě víme

Základní dnešní znalosti zákonů mikrosvěta jsou shrnuty v tzv.
standardním modelu

Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty
tři generace základních fermionů

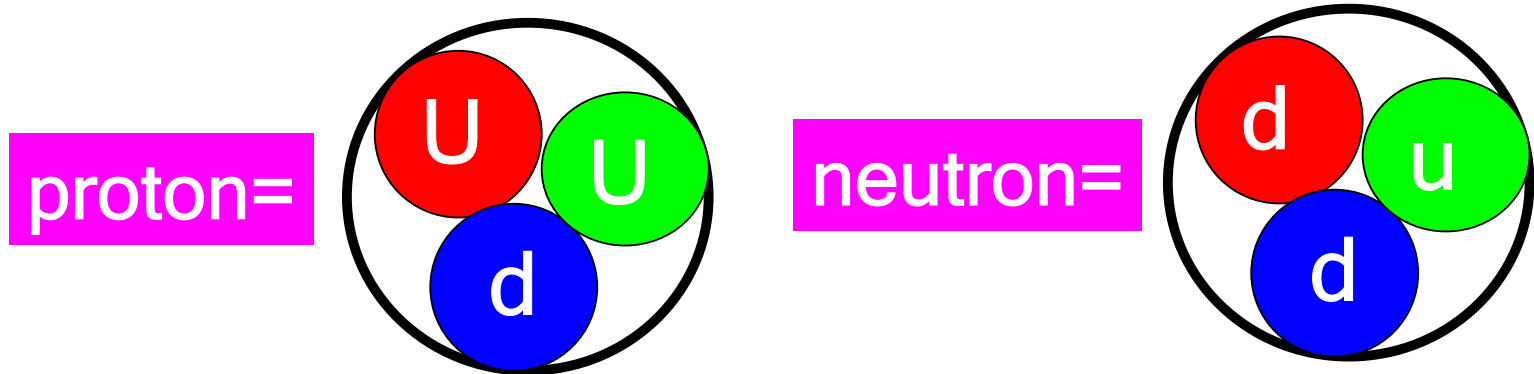
tj. částic se spinem $1/2$, jež se dále dělí na
kvarky a leptony

generace	1	2	3
kvarky	u u u d d d	c c c s s s	t t t b b b
leptony	ν_e e	ν_μ μ	ν_τ τ

Každá ze šesti „vůní“
kvarků existuje ve
třech „barvách“.

Kvarky i leptony
mají velmi
různé hmotnosti.

Z **kvarků** jsou složeny dobře známé částice jako jsou například **proton a neutron**, jež tvoří **atomová jádra**. Ta spolu s **elektrony** vytvářejí atomy.



Vše nasvědčuje tomu, že na rozdíl od leptonů

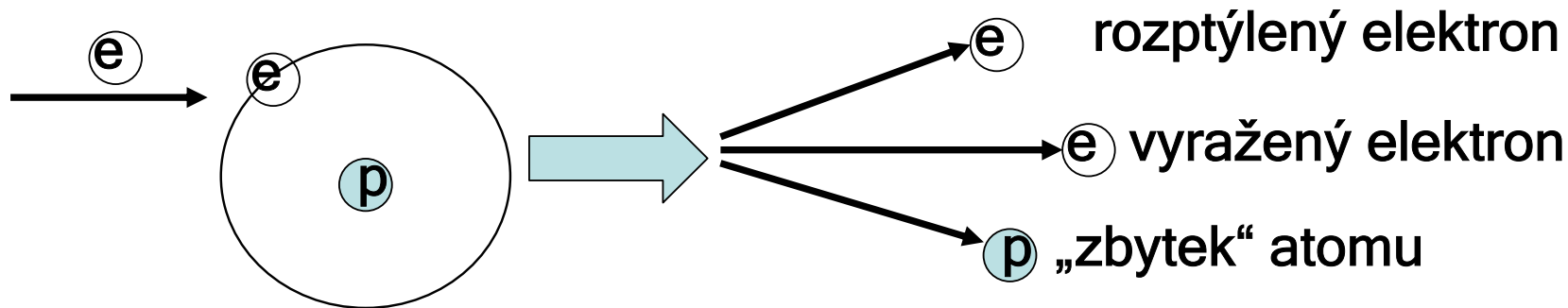
kvarky v přírodě neexistují jako volné částice

ale vždy jen uvnitř částic jako jsou protony a neutrony.

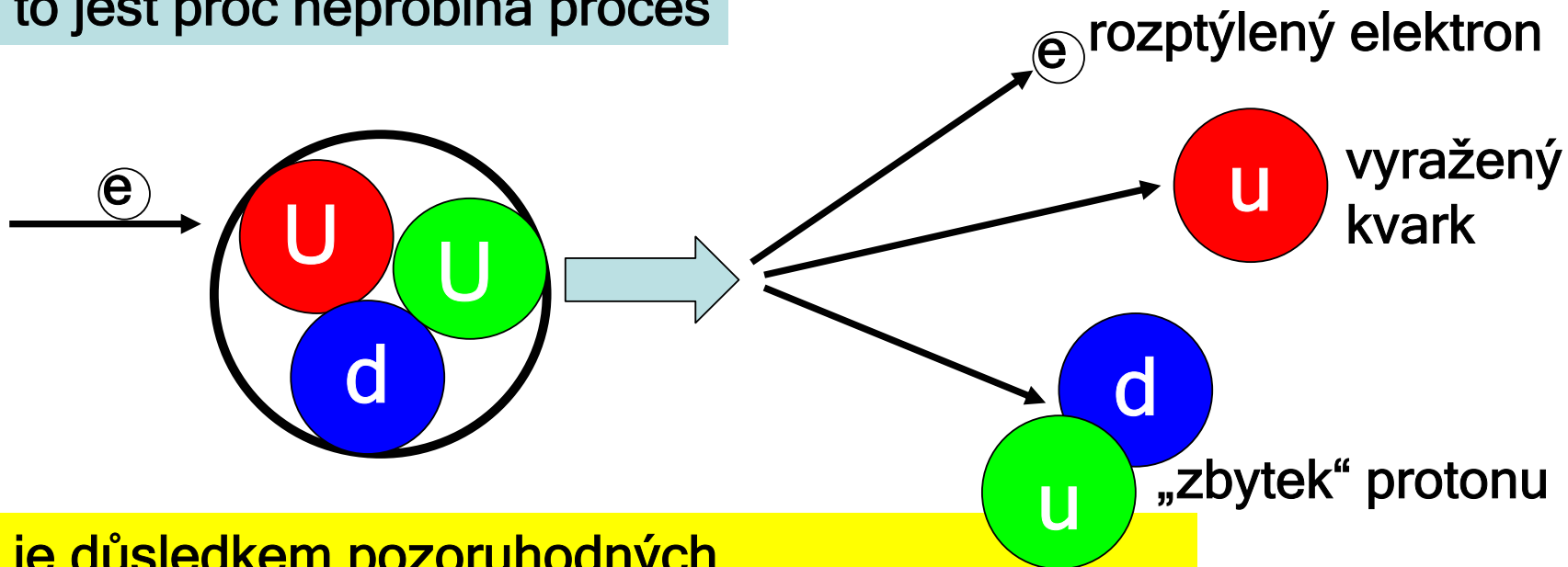
Experimentální data lze přitom pochopit jen tehdy pokud předpokládáme, že

hadrony jsou bezbarvé kombinace kvarků.

Důvod, proč nelze proton „ionizovat“ jako atom vodíku

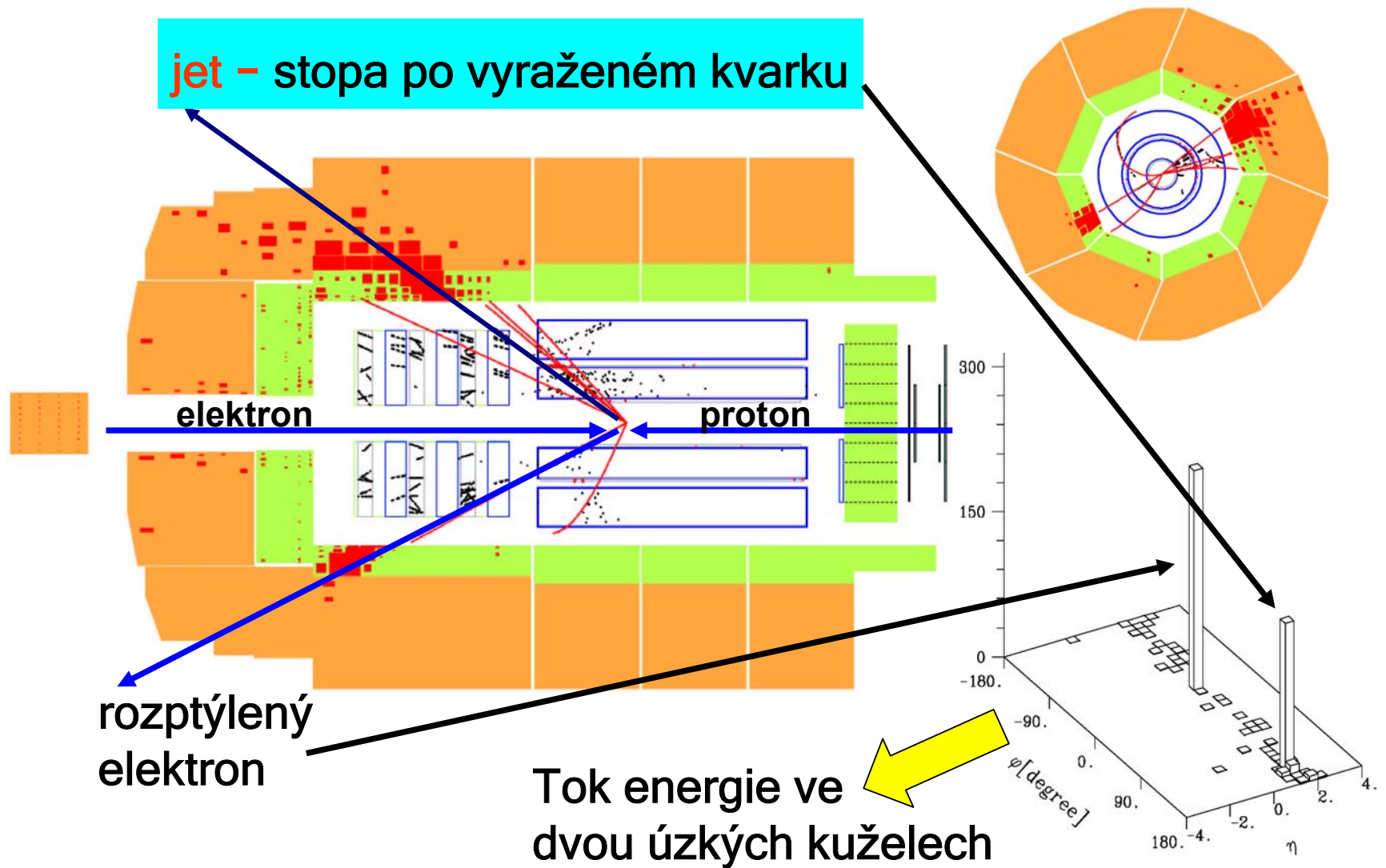


to jest proč neprobíhá proces



je důsledkem pozoruhodných vlastností „barevných“ sil působících mezi kvarky

To, co v přírodě pozorujeme jsou „stopy“ po vyraženém kvarku a „zbytku“ protonu, jimiž jsou **jety** - úhlově kolimované trysky částic.



Jety letí (zhruba) ve směru původních kvarků a nesou (zhruba) jejich energie. Měřením směrů a energií jetů se tak dozvídáme o vlastnostech kvarků a gluonů a silách mezi nimi působících.

Jety tedy hrají v dnešní době stejnou roli, jakou hráli dříve (před 20 a více lety) částice samotné.

Síly mezi kvarky a leptony

gravitační
elektromagnetické
slabé
silné.

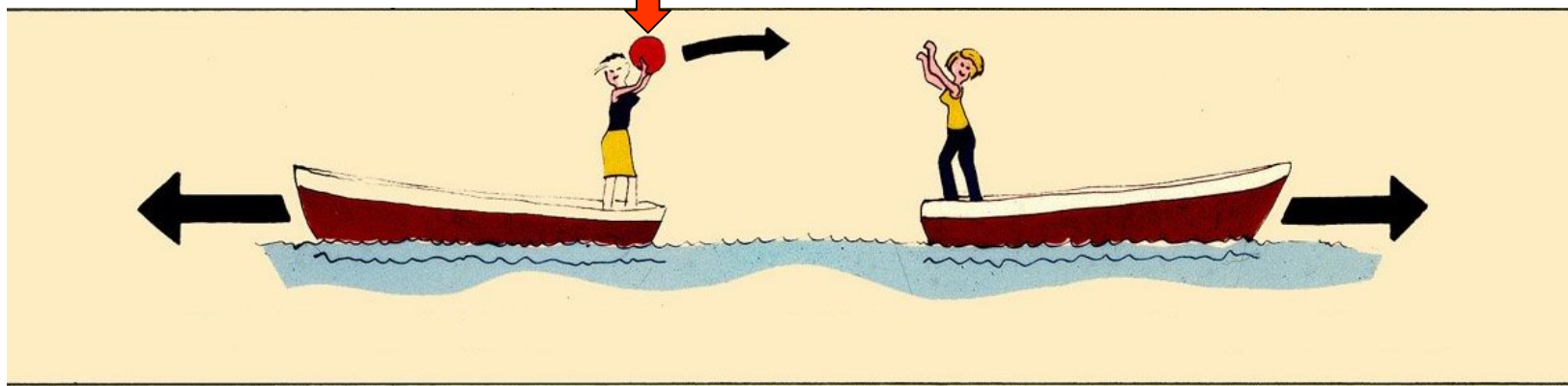
Patří do jedné třídy teorií, tzv.

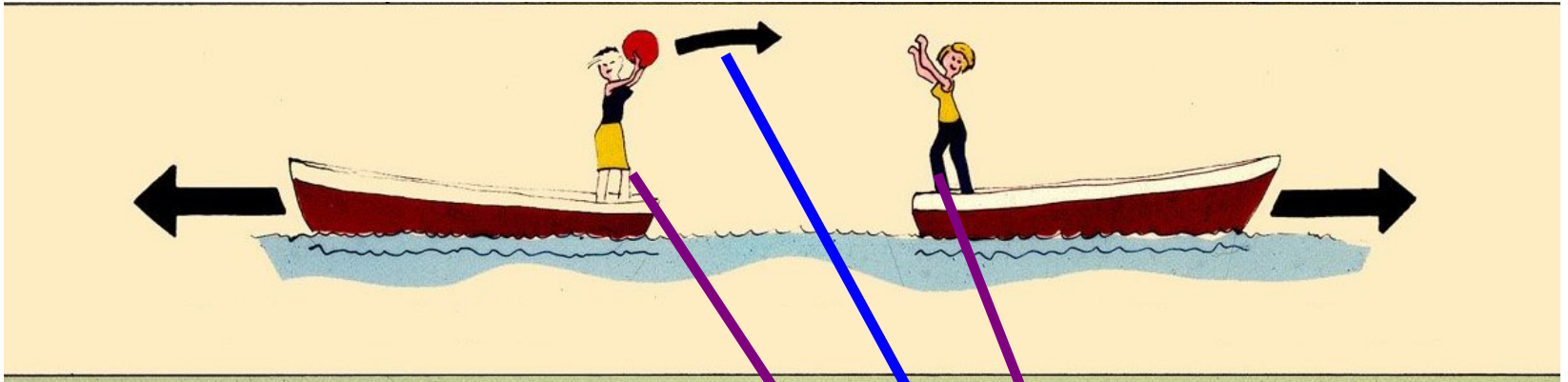
kalibračních teorií,

jež představují základní rámec pro popis sil v mikrosvětě.

Mají společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí „výměny“ zprostředkujících částic se spinem 1, zvaných

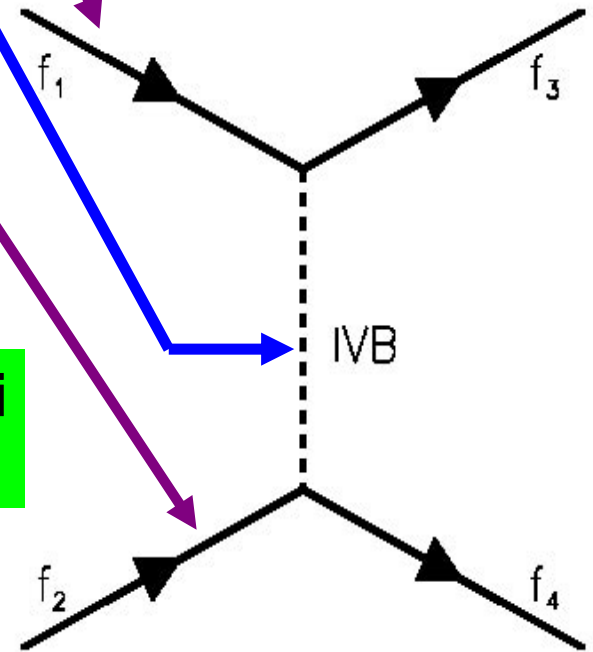
intermediální vektorové bosony (IVB)





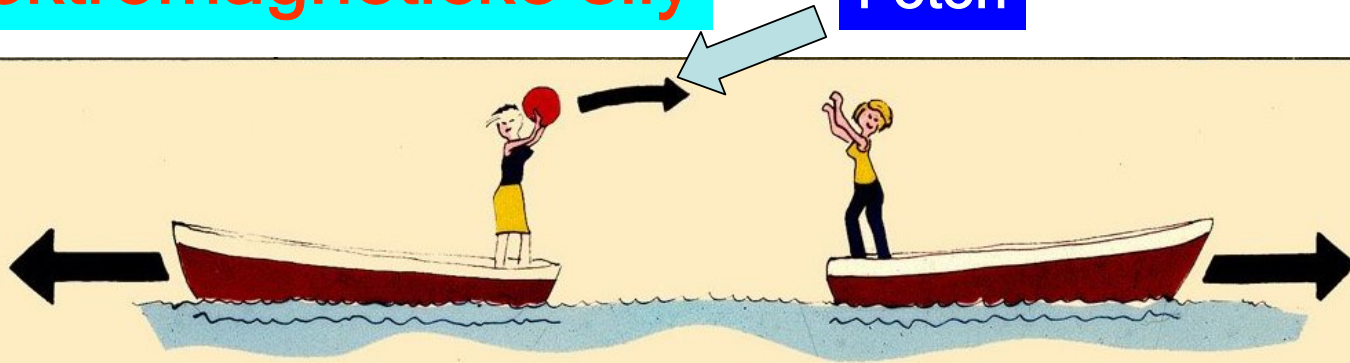
Grafickou reprezentací „výměnných“ sil jsou v odborných textech tzv. **Feynmanovy diagramy**:

Dosah sil je nepřímo úměrný hmotnosti příslušného vyměňovaného bosonu.



Elektromagnetické síly

Foton

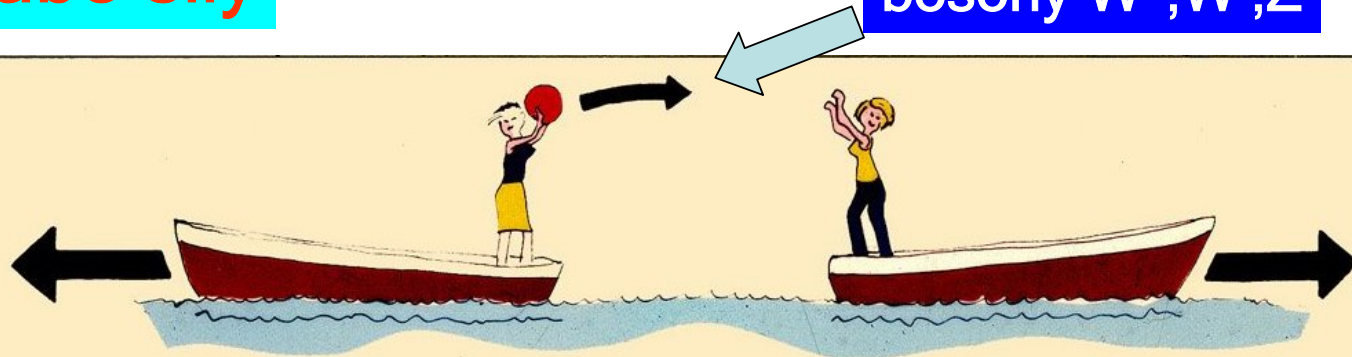


základní vlastnosti:

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

Slabé síly

bosony W^+, W^-, Z



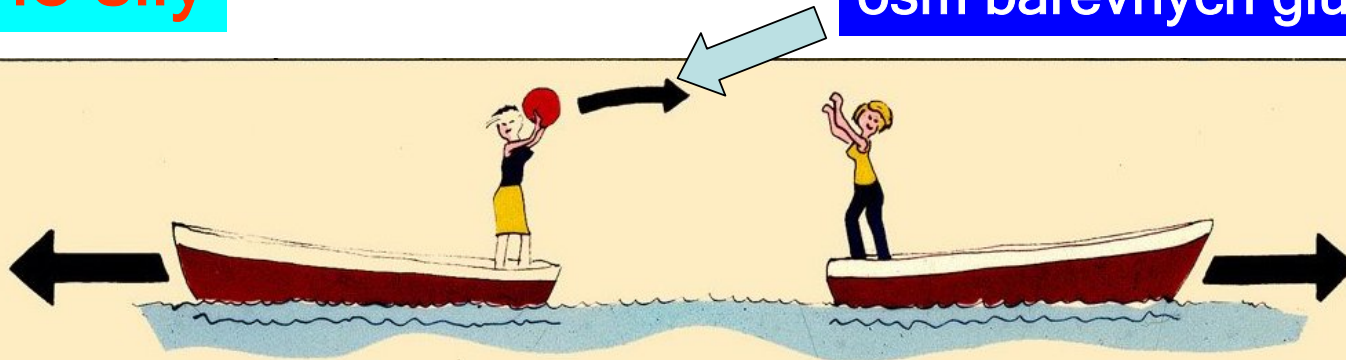
základní vlastnosti:

- 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**, neboť W^+, W^-, Z mají **velkou hmotnost**
- s **QED** jsou popsány **teorií Glashowa, Weinberga a Salama**

Bosony W^+, W^- a Z interagují sami se sebou!

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)**

za jejíž formulaci
dostali tito pánové
Nobelovu cenu

Tato teorie dokáže
vysvětlit proč kvarky
neexistují jako volné
částice a přesto má
přitom smysl hovořit
že „existují“.

Jedním z projevů jejich
existence jsou právě

jety



The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



David J. Gross

🏆 1/3 of the prize

USA

Kavli Institute for
Theoretical Physics,
University of
California
Santa Barbara, CA,
USA

b. 1941



H. David Politzer

🏆 1/3 of the prize

USA

California Institute of
Technology
Pasadena, CA, USA

b. 1949



Frank Wilczek

🏆 1/3 of the prize

USA

Massachusetts
Institute of
Technology (MIT)
Cambridge, MA, USA

b. 1951

The World's Numerical Recipe

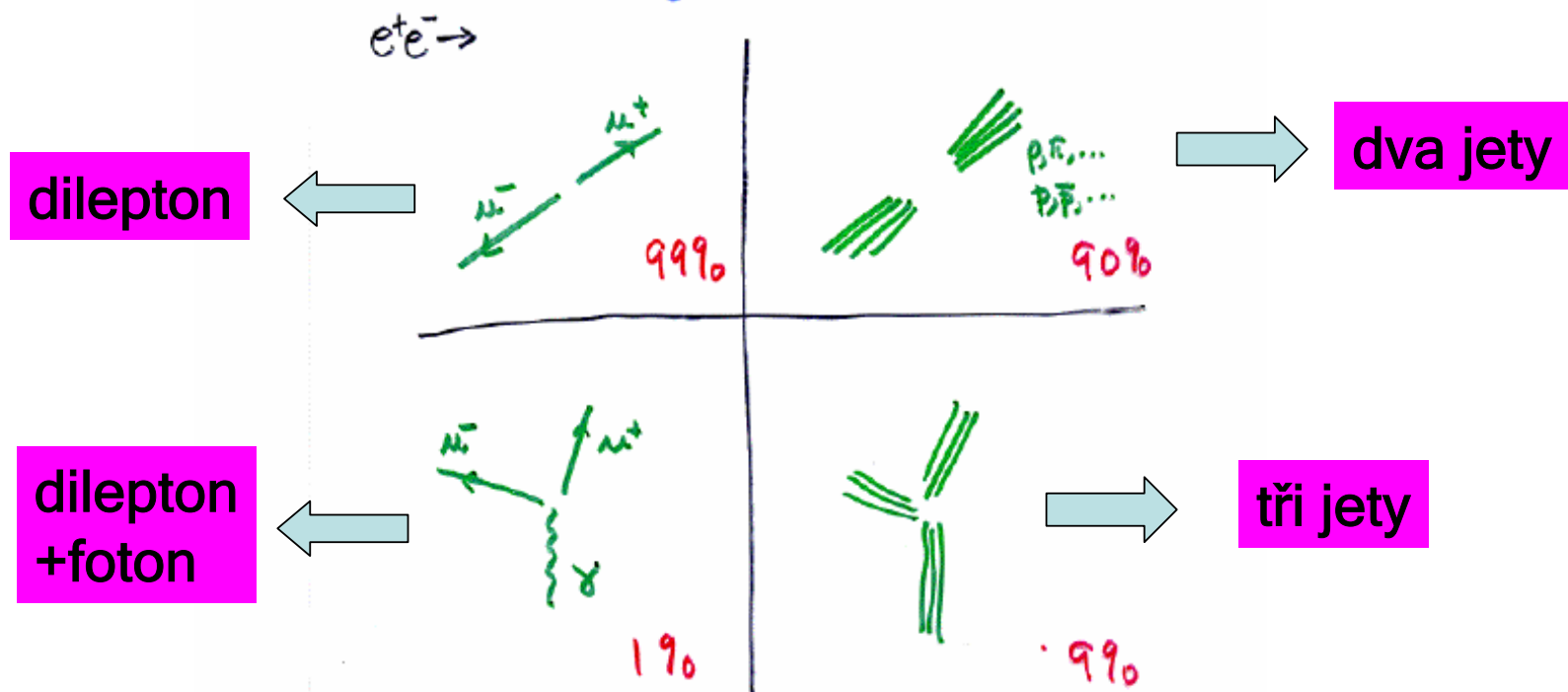


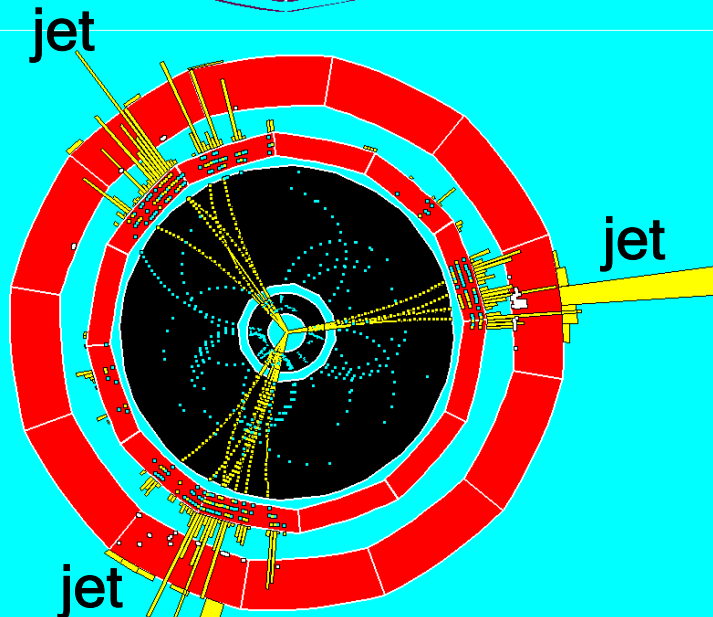
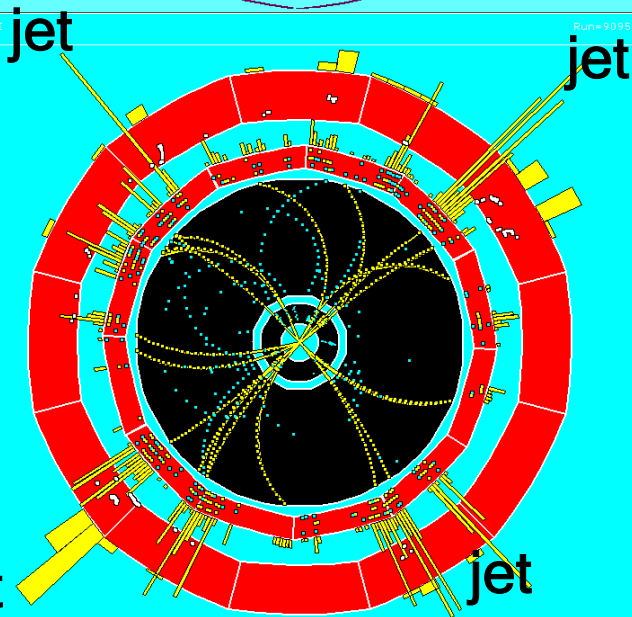
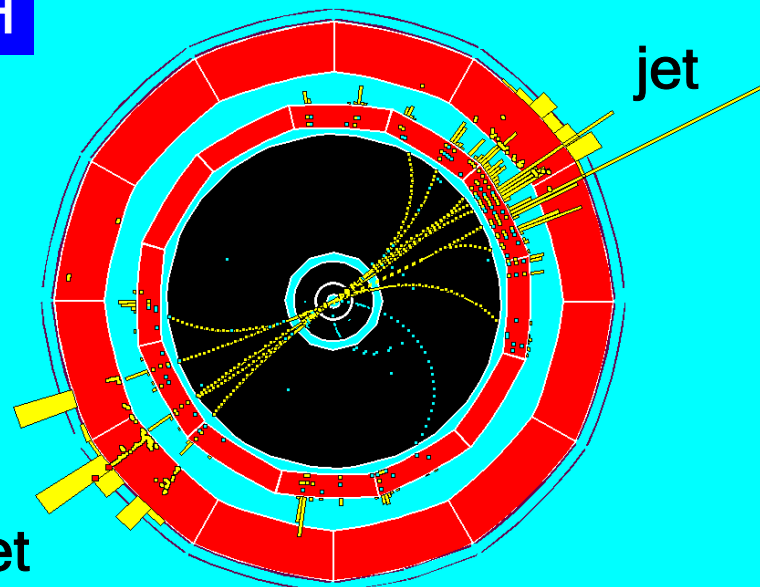
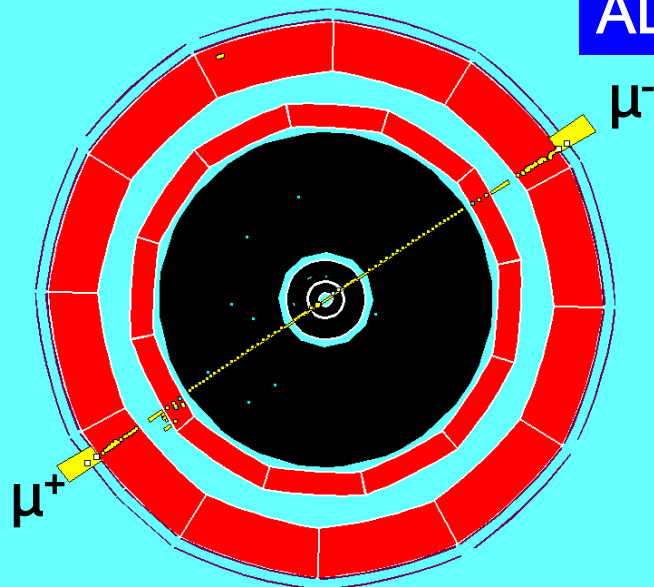
JETY, JETY, JETY

Z přednášky
F. Wilczeka

Asymptotic Freedom: Evidence

Jet Phenomenon





Za hranicemi standardního modelu

se - **zatím** - pohybují jen teoretici, kteří se nemohou dočkat nových experimentálních podnětů a kterým - **přirozeně** - vadí skutečnost, že **SM obsahuje asi 20 volných parametrů**.

Nejbližší okolí standardního modelu

- **supersymetriční partneři** „standardních“ částic (kvarků, leptonů a IVB)
- **substruktura** kvarků a leptonů

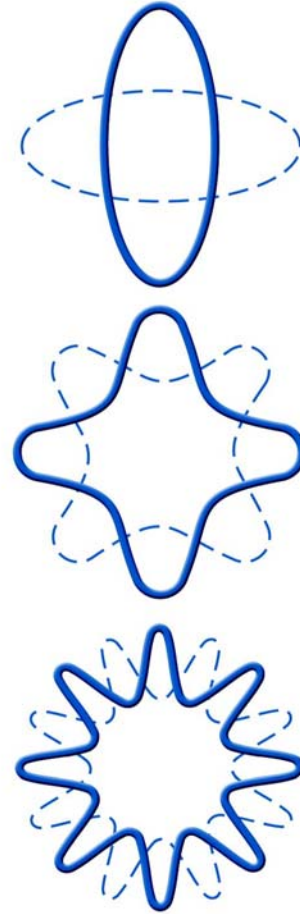
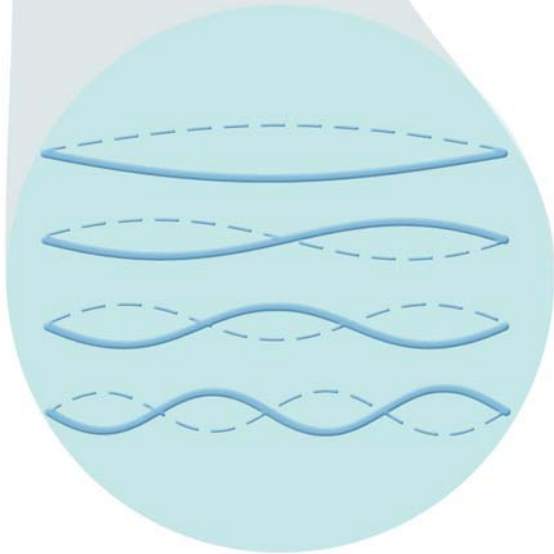
o kousek dál jsou rozšíření založené na myšlence

- **příbuznosti kvarků a leptonů**: **teorie velkého sjednocení**

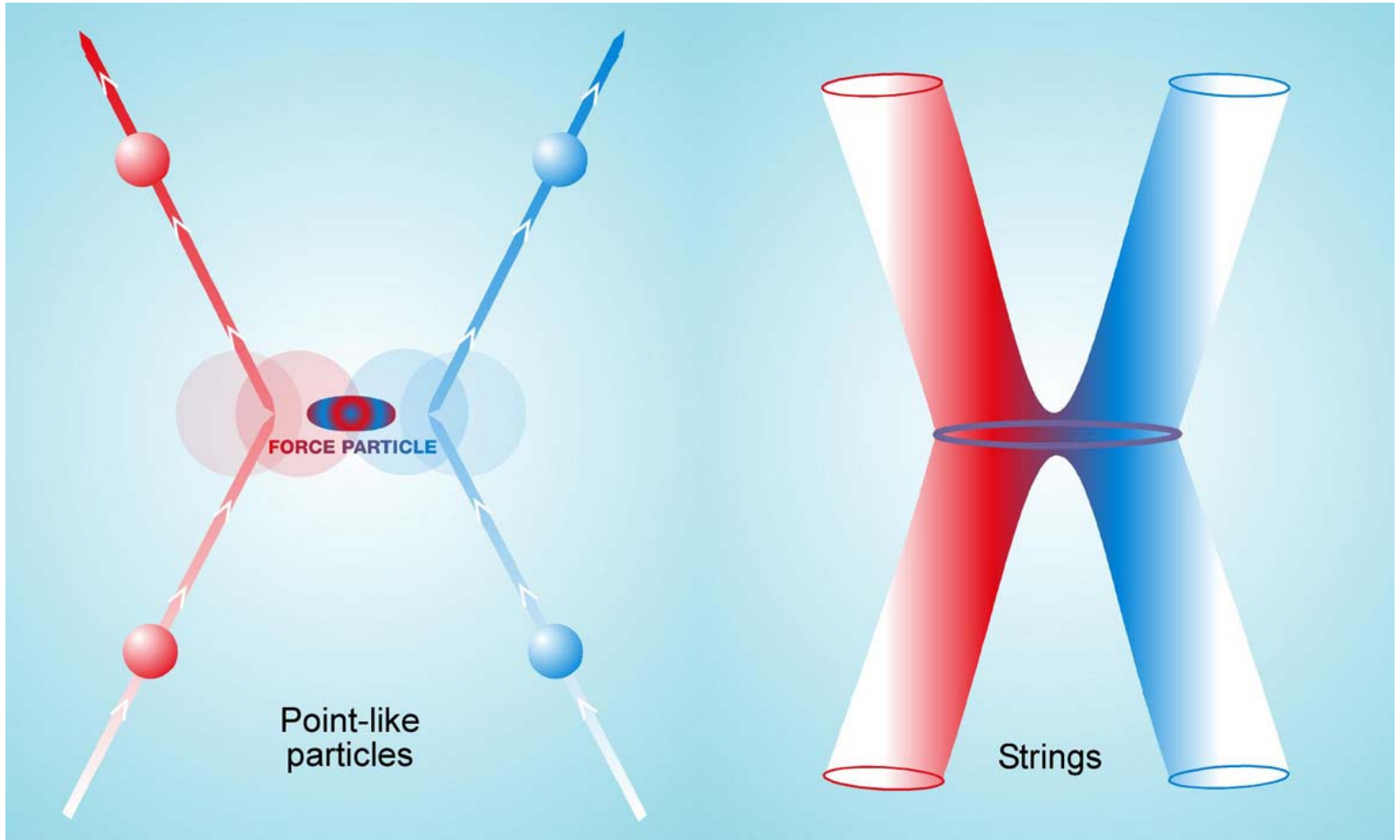
ale na obzoru jsou i zásadní novoty jako

- idea, že základními stavebními kameny hmoty nejsou částice, ale **(super)struny**
- možnost existence tzv. „**extra rozměrů**“ prostoru

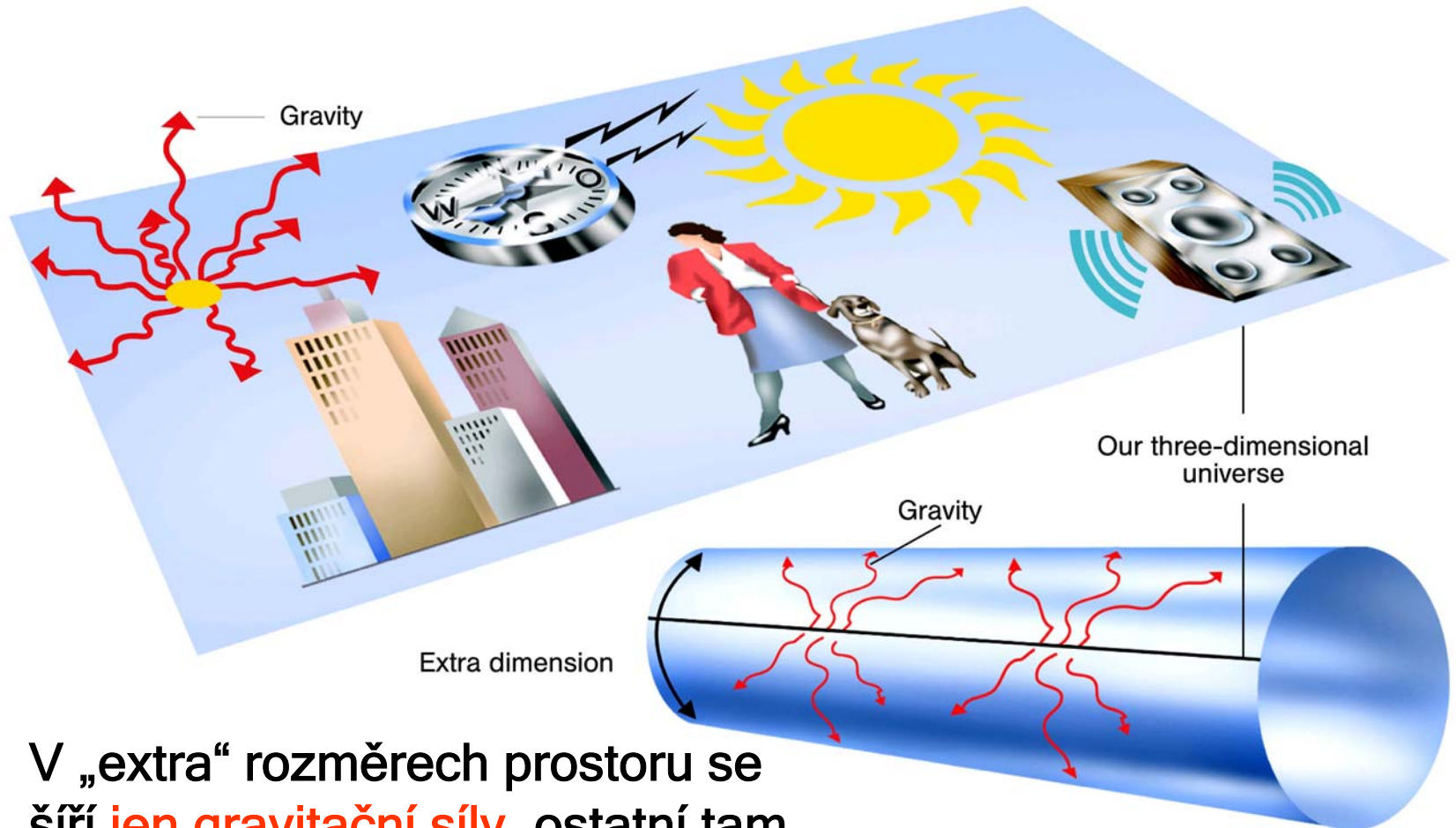
Struny



Rozptyl strun



Extra rozměry



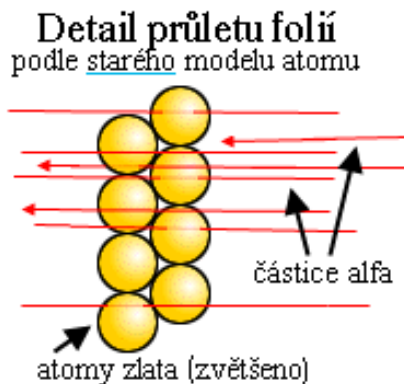
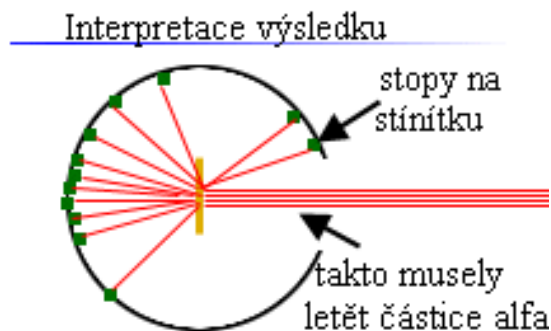
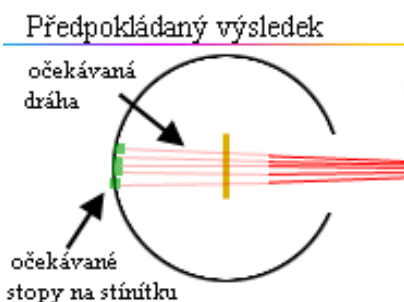
V „extra“ rozměrech prostoru se šíří **jen gravitační síly**, ostatní tam „nemohou“. Právě z tohoto důvodu jsou gravitační síly ve 3+1 rozměrech vůči ostatním silám relativně slabé.

Od Rutherforda k současnosti: jak se zkoumá mikrosvět

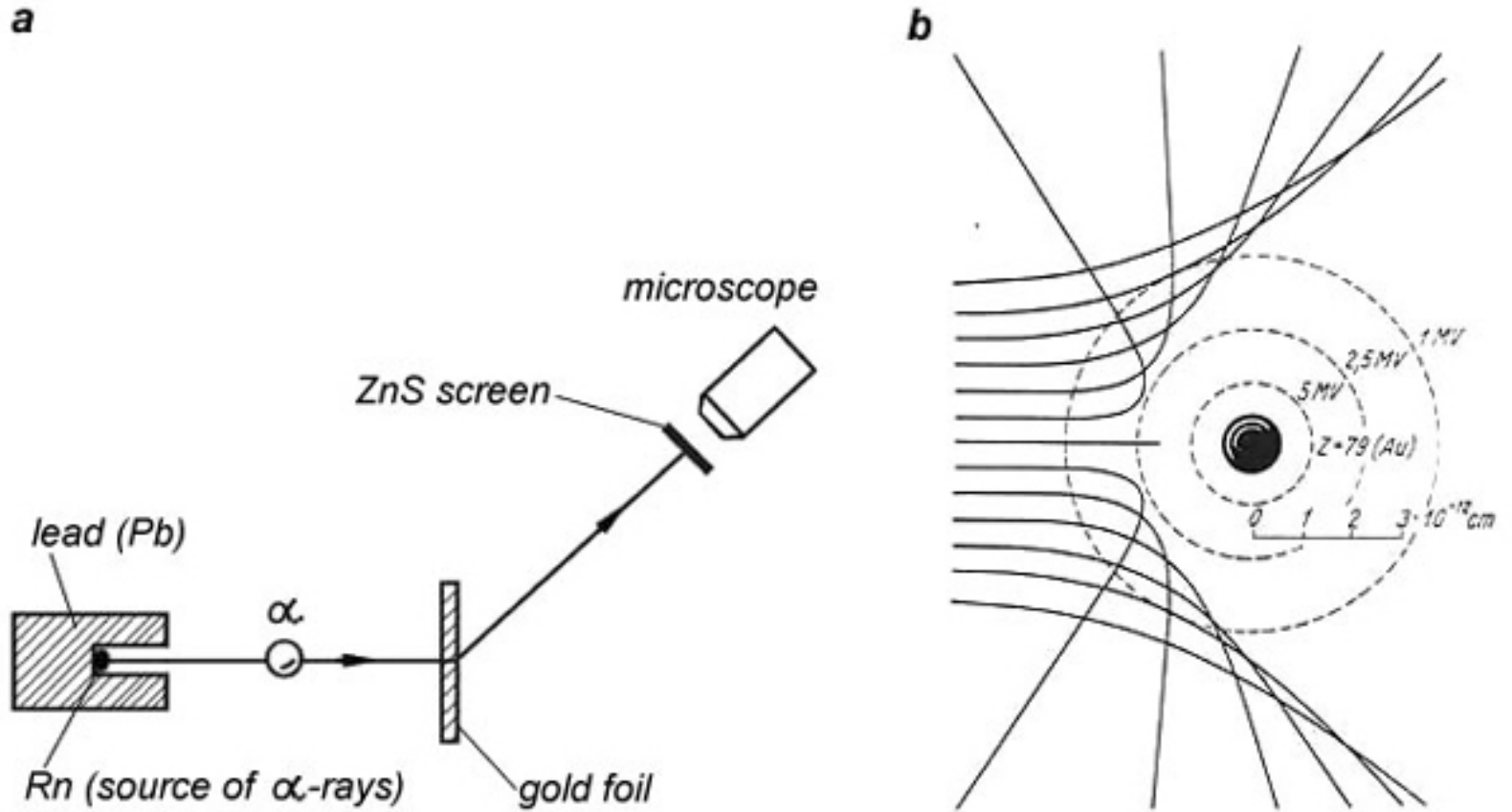


Rutherfordův objev jádra

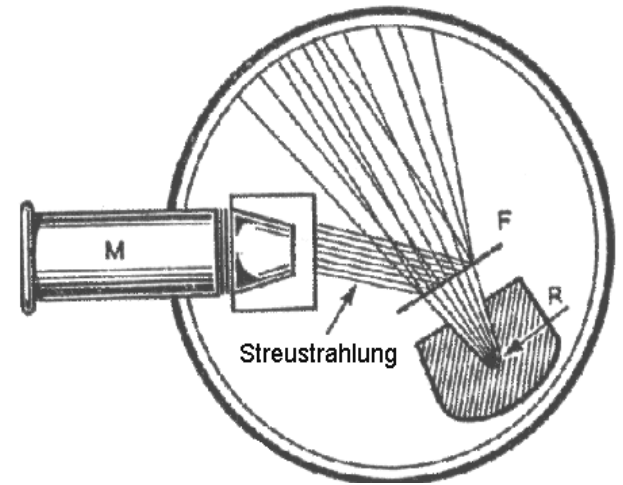
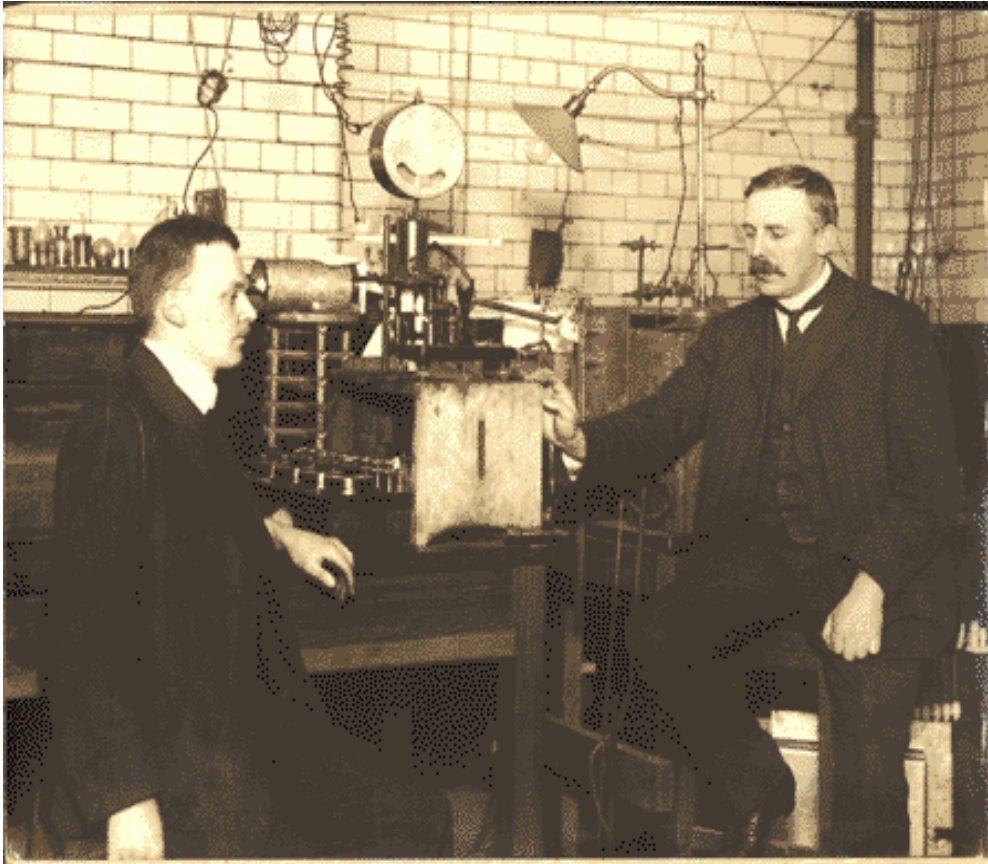
(měření provedli ovšem Geiger a Marsden)



Rutherford's experiment

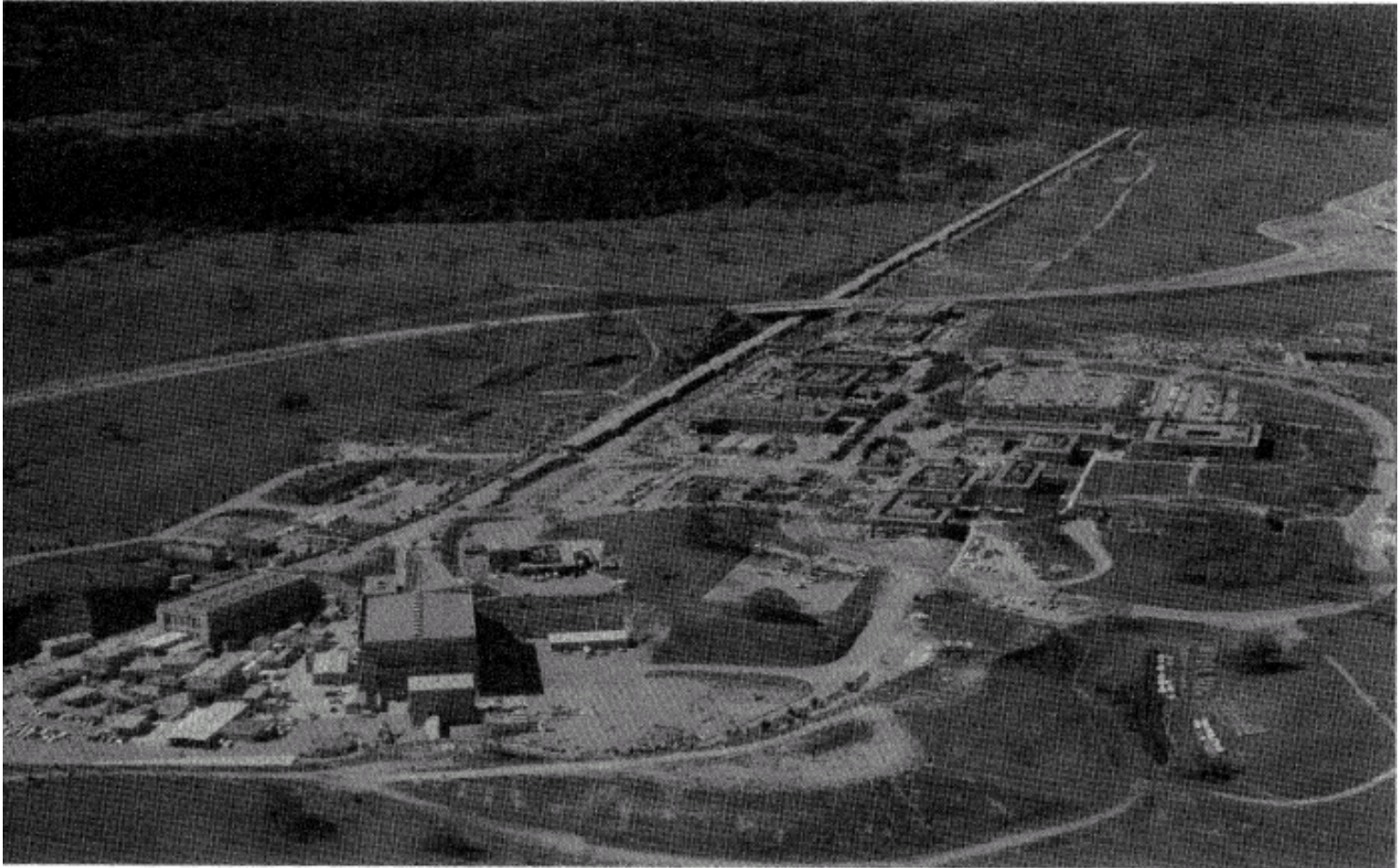


Rutherfordův experiment



Obr. 3: Vlevo: Rutherford s Marsdenem u svého zařízení, jehož schéma je znázorněno nahoře. Částic alfa vycházejících ze zdroje R se rozptýlily na zlaté fólii F a dopadaly na vrstvu ZnS na předním okénku kukátka M které se otáčelo kolem osy kolmé na rovinu obrázku a do nějž se dívaly střídavě Geiger s Marsdenem.

Srážky elektronů s protony ve SLAC



se měřily na tomto zařízení



CERN dnes

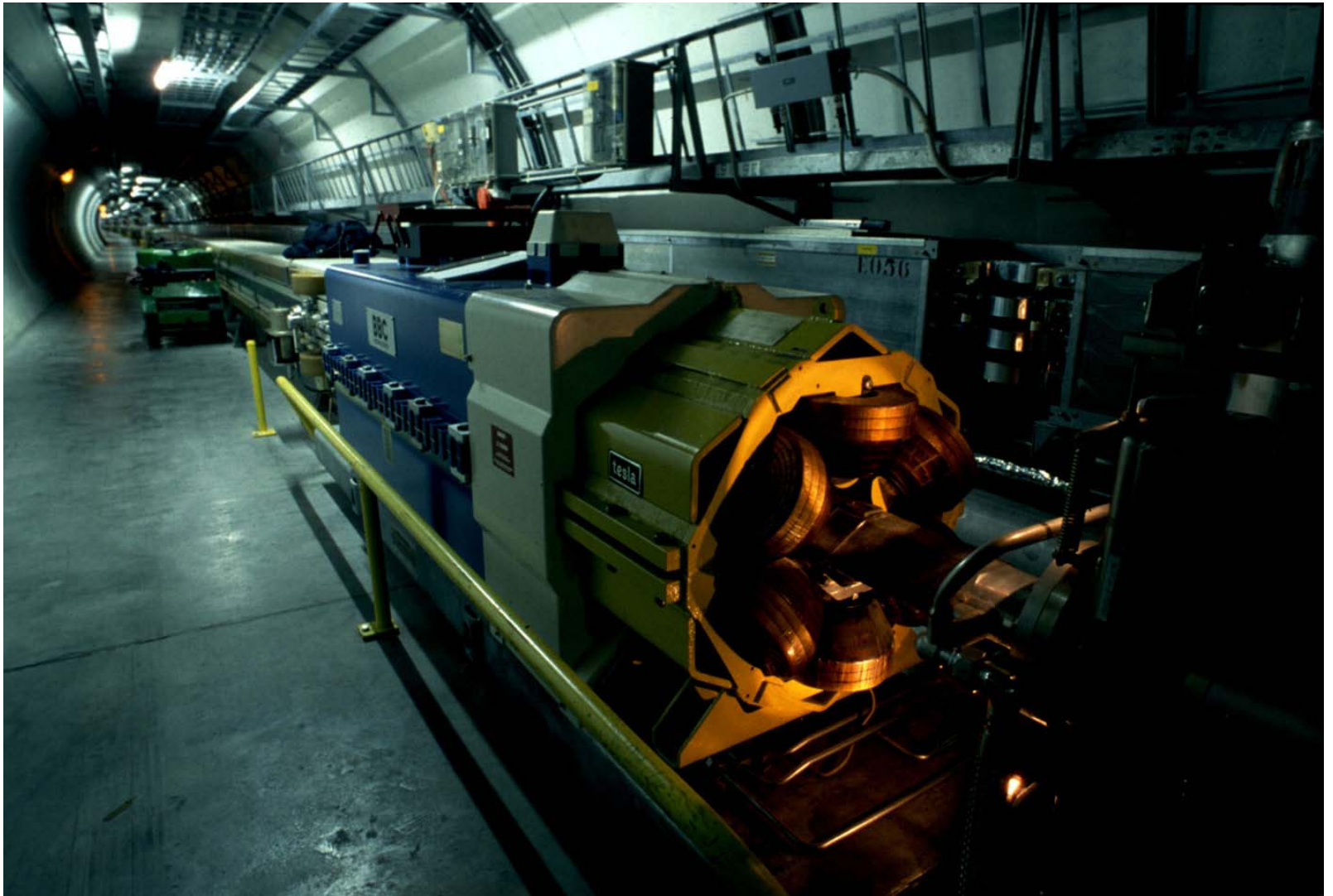
Ženevské
jezero

LEP

SPS

Protonový
synchrotron





Pro LEP byly postaveny celkem 4 detektory:

ALEPH

DELHI (i MFF a FZÚ)

L3

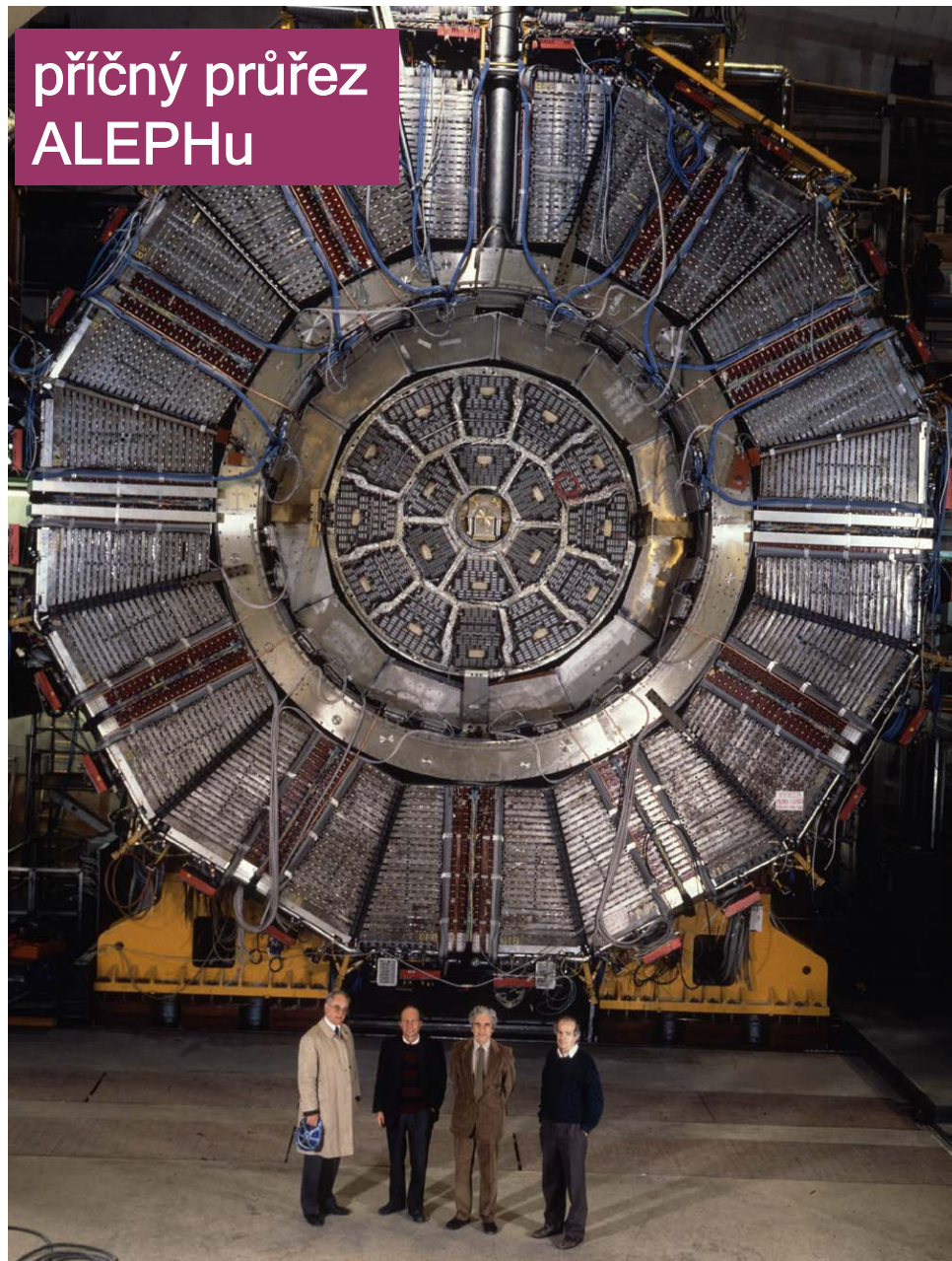
OPAL

V provozu v letech

1989-2000

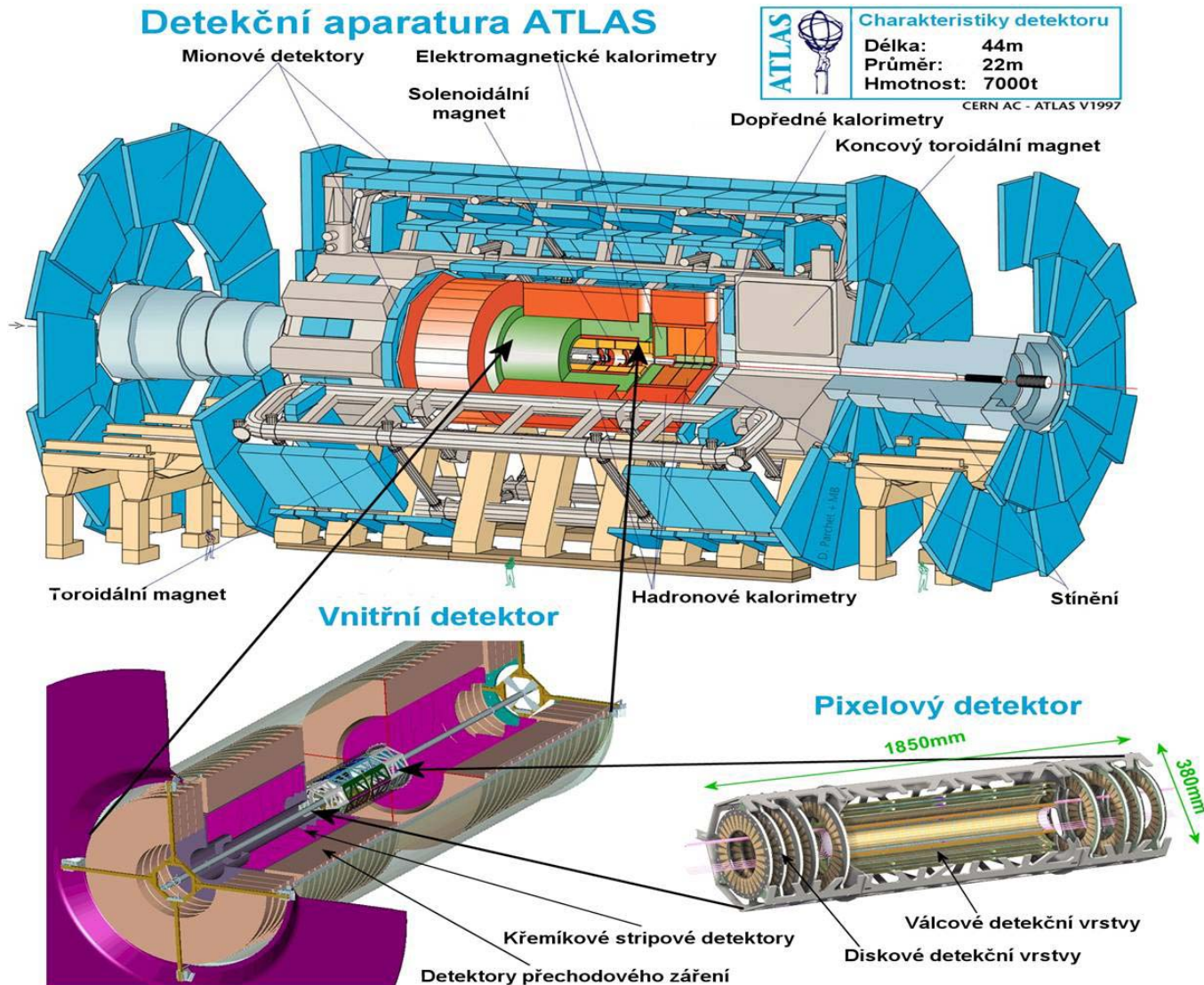
Největší přínos LEPu byla **přesnost měření.**

příčný průřez
ALEPHu



Detektor ATLAS na urychlovači LHC v CERN

Detekční aparatura ATLAS

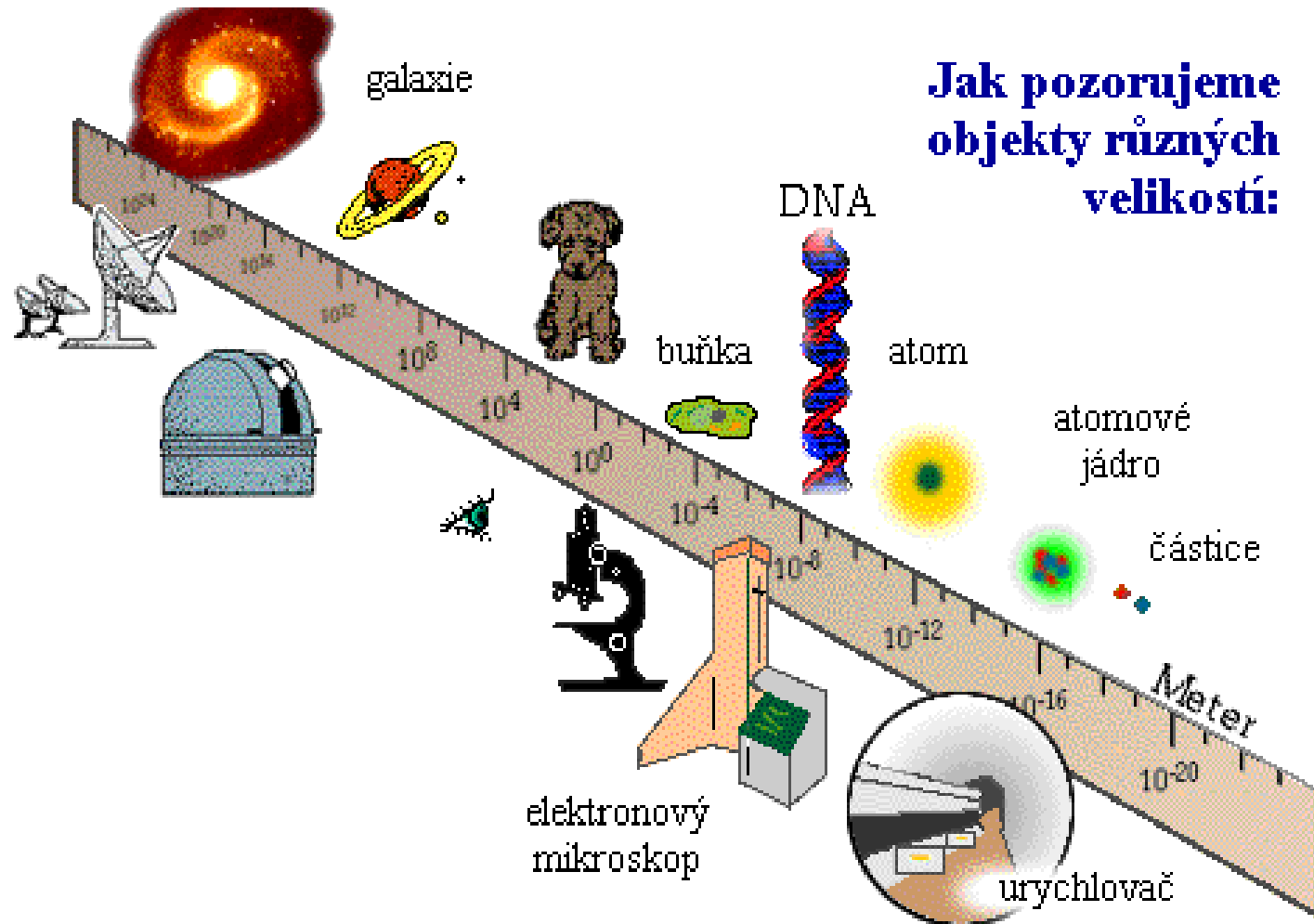


(Některé) záhady mikrosvěta a makrosvěta

- Jak ve vesmíru vznikla **převaha hmoty nad antihmotou**?
- Co tvoří **temnou energii**?
- Co tvoří **temnou hmotu**?
- Je mikrosvět **supersymetrický**?
- V **kolika rozměrech** „žijí“ fyzikální zákony?
- Co jsou **základní objekty**?

Odpovědi na tyto a další otázky hledají **společně fyzika elementárních částic a kosmologie**

Charakteristické rozměry



Jednotky

SI naprosto **nevhodný**, používají se **přírozené jednotky**

Mikrosvět:

1 fm = 10^{-15} m = poloměr protonu

1 GeV = $1.8 \cdot 10^{-25}$ kg = klidová hmotnost protonu

Makrosvět:

1 světelný rok = $3 \cdot 10^{16}$ m = vzdálenost ke hvězdám

1 parsek = 3.26 světelných let

Teplota je míra kinetické energie částic a proto je zvykem jí uvádět buď ve **stupních Kelvina** nebo ekvivalentních jednotkách energie, přičemž

$$1 \text{ K} = 0.0001 \text{ eV}$$



Velký třesk

Klíčové

okamžiky

1927: **G. Lemaître**: vesmír vznikl při **výbuchu primordiálního atomu**

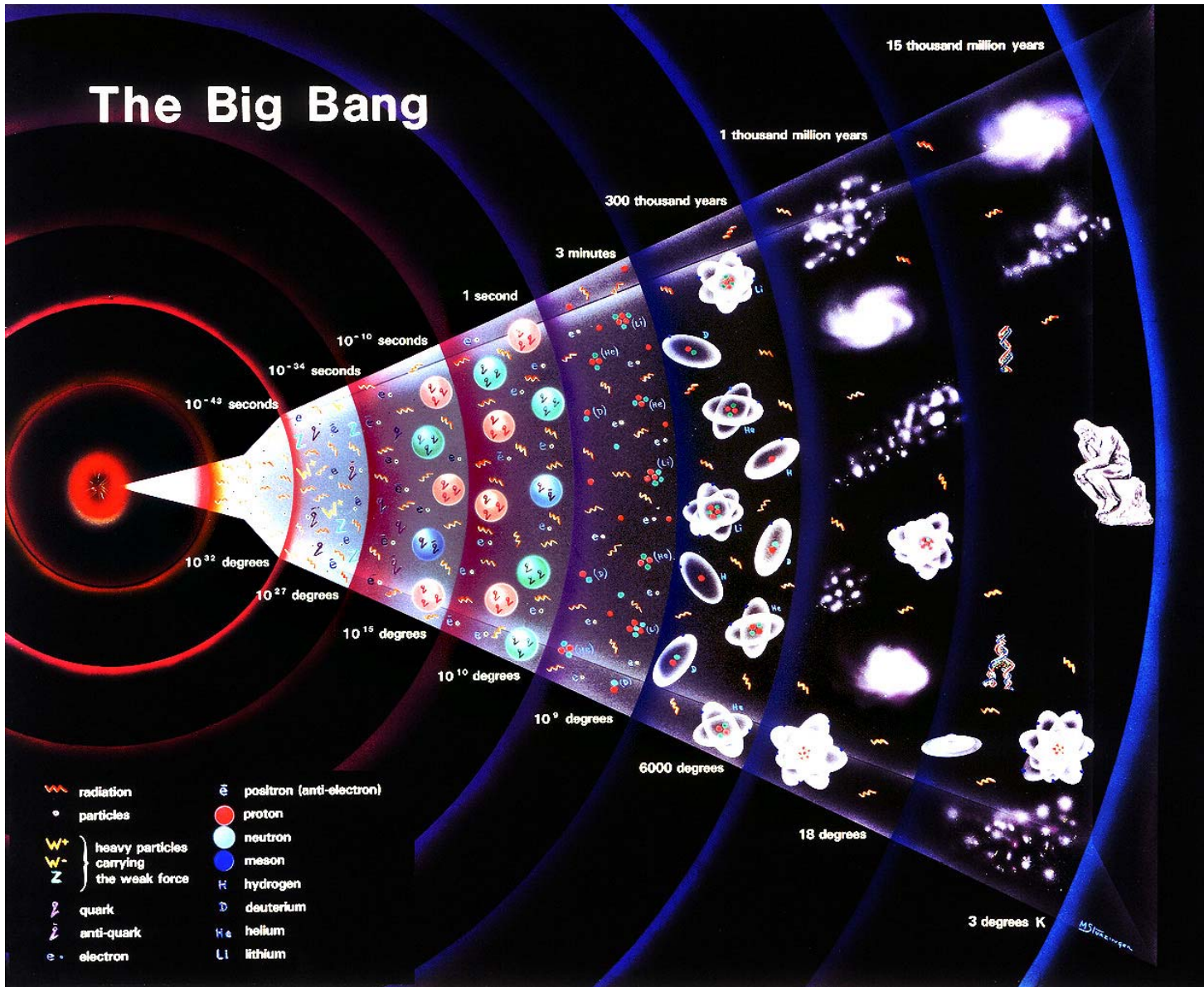
1929: **E. Hubble**: vesmír se **všude rozpíná**

1946: **G. Gamow**: základní myšlenka **velkého třesku**

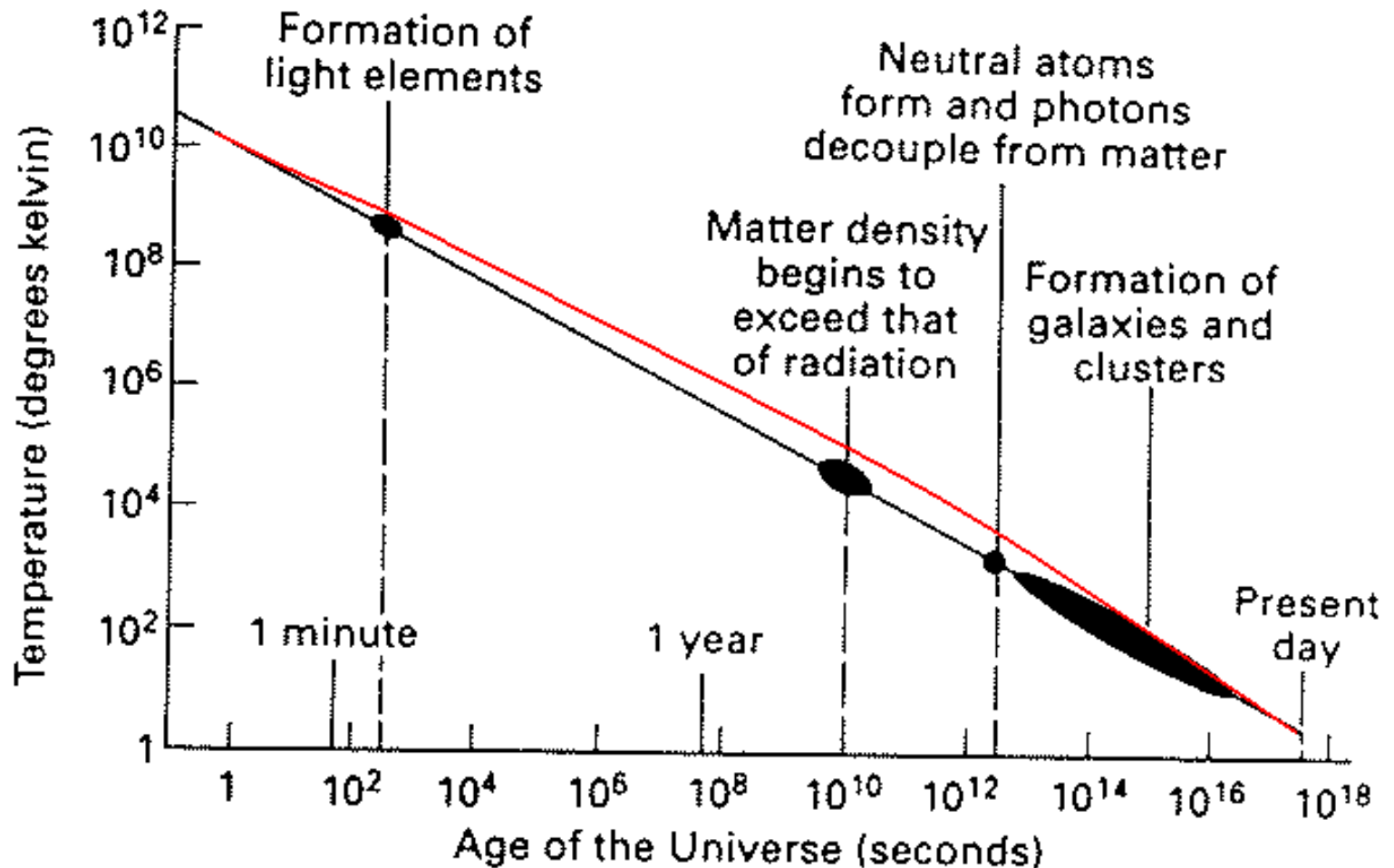
1964: objev **reliktního záření** (**Penzias a Wilson**)

1981: myšlenka **inflace** v ranném stádiu vývoje vesmíru (**Guth, Linde**)

The Big Bang



Závislost teploty vesmíru na čase od velkého třesku



Jak ve vesmíru vznikla převaha hmoty nad antihmotou?

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

Kam zmizela antihmota?

Andrej Sacharov (1967):

Narušení CP invariance slabých sil způsobilo společně s dalšími okolnostmi, že původně symetrický stav vesmíru přešel během miliardtiny vteřiny do stavu, v němž jsou kvarky, ale ne antikvarky.

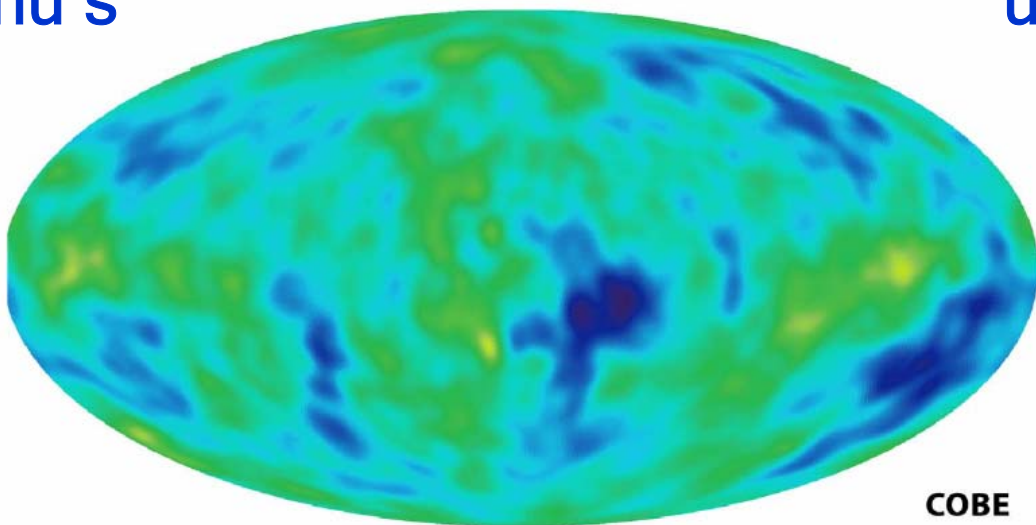
Co tvoří temnou hmotu ve vesmíru?

Řada pozorování (první již v roce 1935) svědčí o tom, že hmota, o níž víme, představuje jen **malou část** celkové hmoty ve vesmíru:

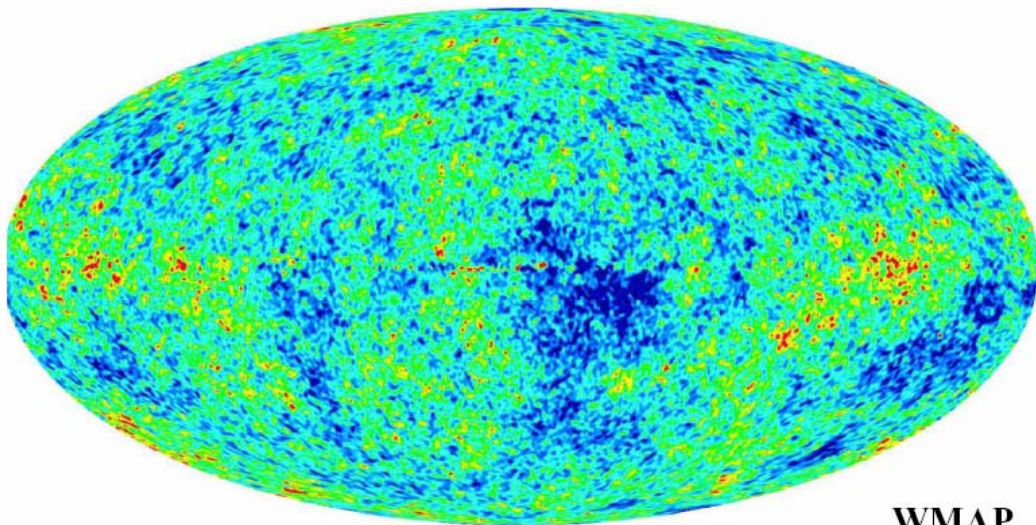
- **známá hmota** (fotony, elektrony, protony, neutrony a neutrina) **4.4%**
- **studená temná hmota**, o níž nic nevíme **23%**
- **temná energie**, o níž víme ještě méně **73%**

Nejpřesvědčivější, ale velmi **netriviální** je interpretace měření **anizotropie reliktního záření**, jež představuje efekt na úrovni jedné stotisíciny

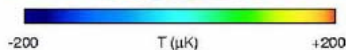
Wilkinsonova sonda změřila anizotropii reliktního zářeni fotonů s úžasnou přesností



COBE



WMAP



7°
↓
 0.2°



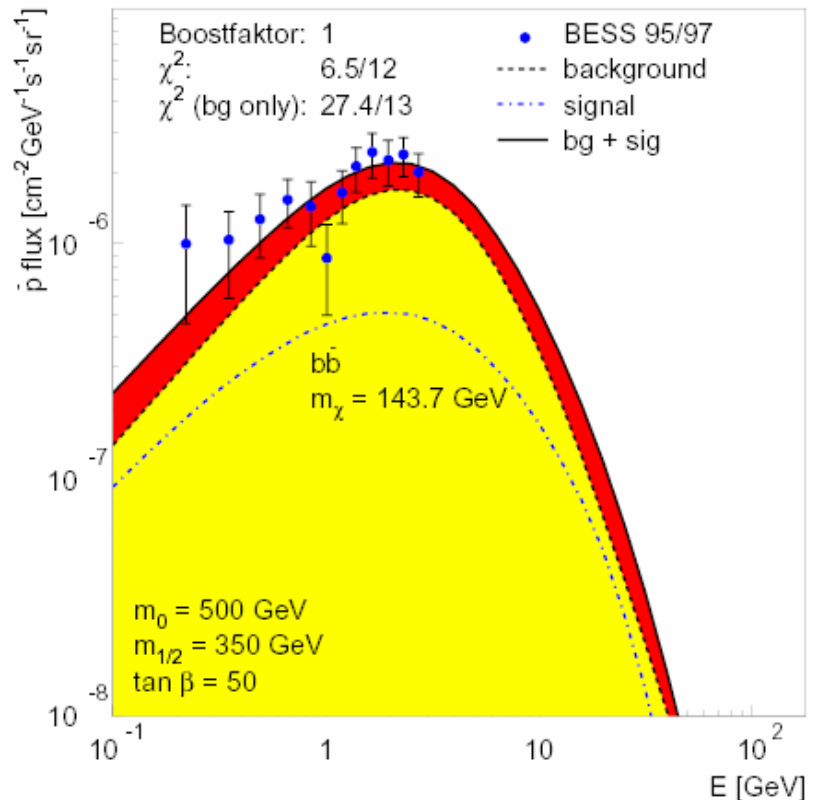
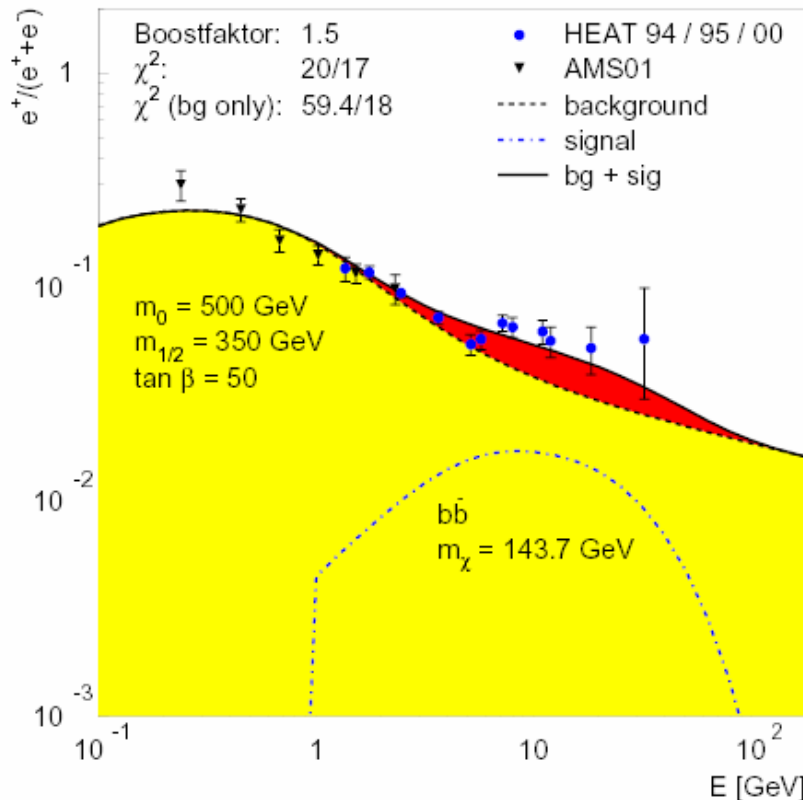
45 times sensitivity

Zižtná nabídka z mikrosvěta

temnou hmotu by mohlo tvořit neutralino, jež

- je nejlehčí, neutrální supersymetrická částice
- je fermion se spinem $1/2$
- má minimální hmotnost 50 GeV
- byla bezúspěšně hledána v experimentech na urychlovačích v Evropě i USA

Annihilation Contr. to Positrons and Antiprotons



$\tan \beta = 50$; $m_\chi^0 = 144$; GeV; $m_0 = 500$; $m_{1/2} = 350$;

AMANDA



Latest Results of AMANDA

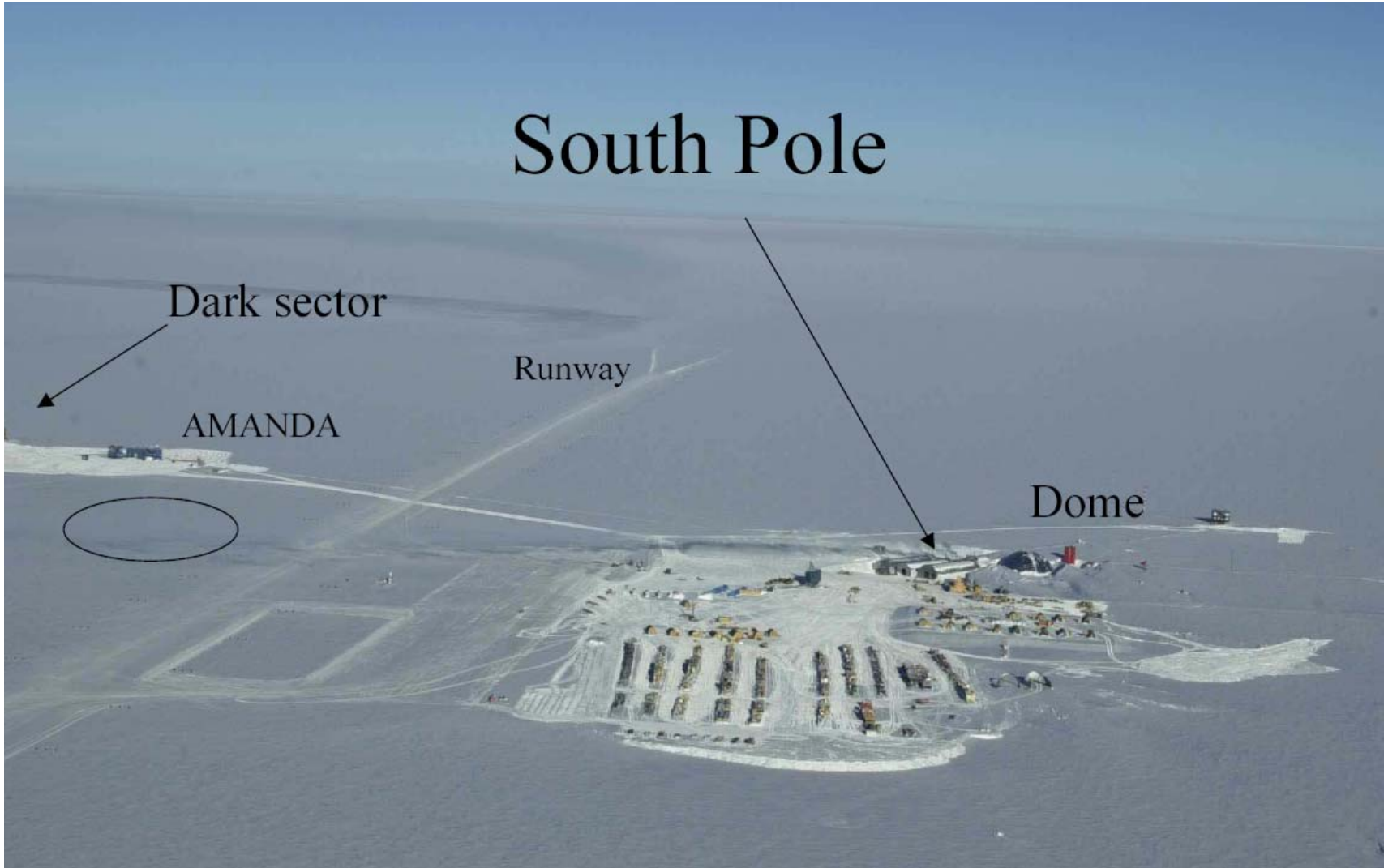
Wolfgang Rhode

Universität Dortmund

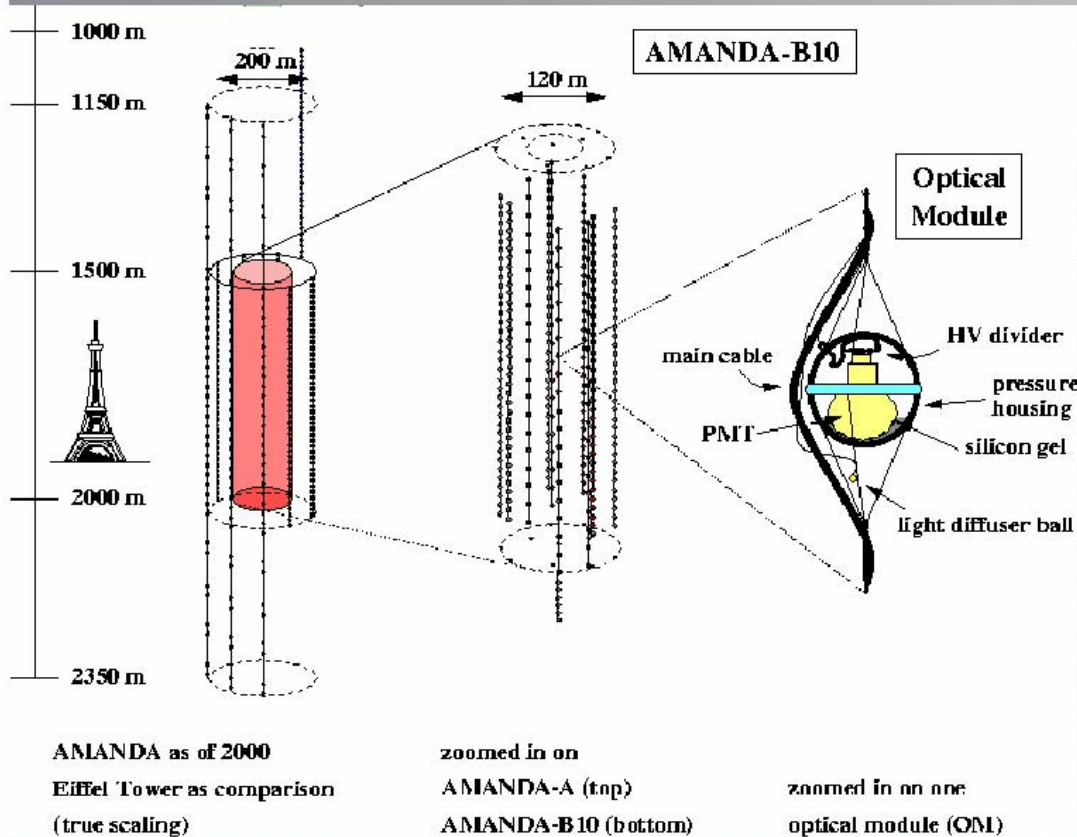
Universität Wuppertal

for the AMANDA Collaboration

South Pole



Neutrino Telescope in the Ice



1997:

AMANDA-B10

302 OMs on 10 Strings

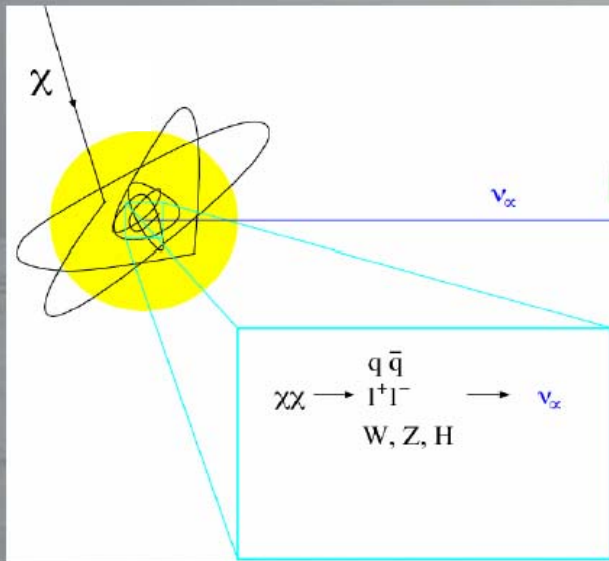
2000:

AMANDA-II

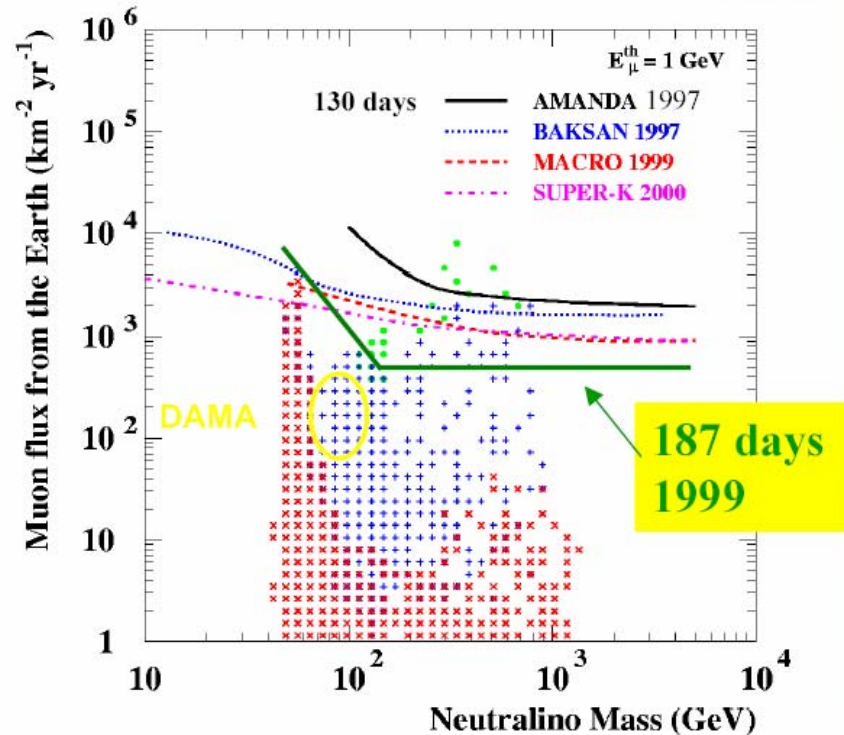
677 OMs on 19 Strings

Pátrání po neutrínech vysokých energií

Search for Muons from WIMP Annihilation in the Center of the Earth with AMANDA B10



No WIMP signal observed !



- 80 Strings
- 4800 PMTs
- 1 km³
- 2004 - 2010

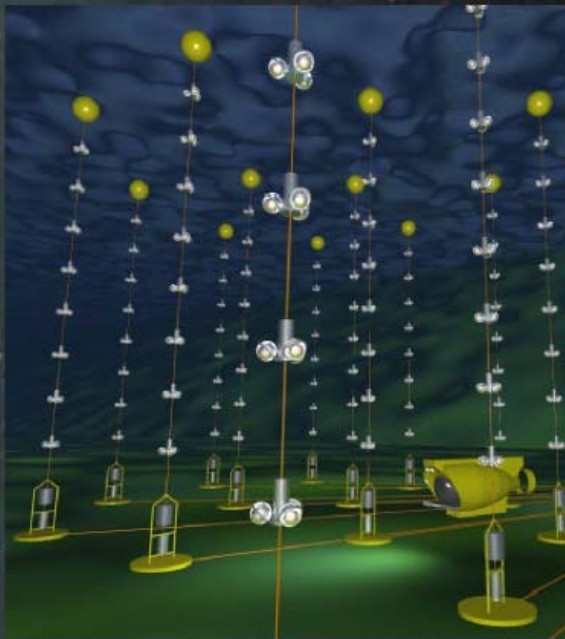
South Pole



IceCube



Prospects for dark matter searches with ANTARES

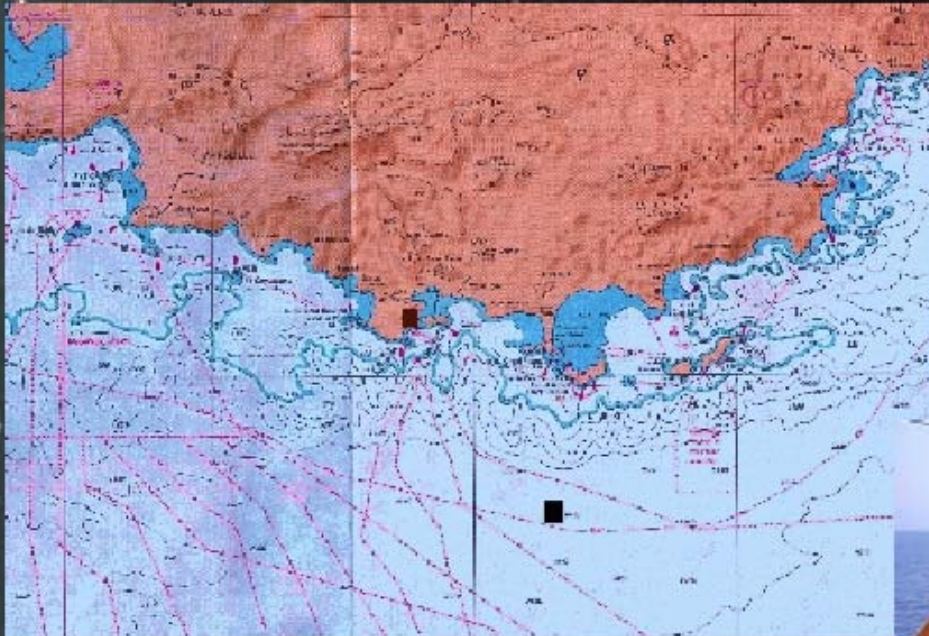


- F neutralino dark matter and neutrino telescopes
- F the ANTARES detector
- F limits on neutrinos from neutralino annihilation in the Sun
- F conclusions

Susan Cartwright
University of Sheffield
IDM2002, York, September 2–6



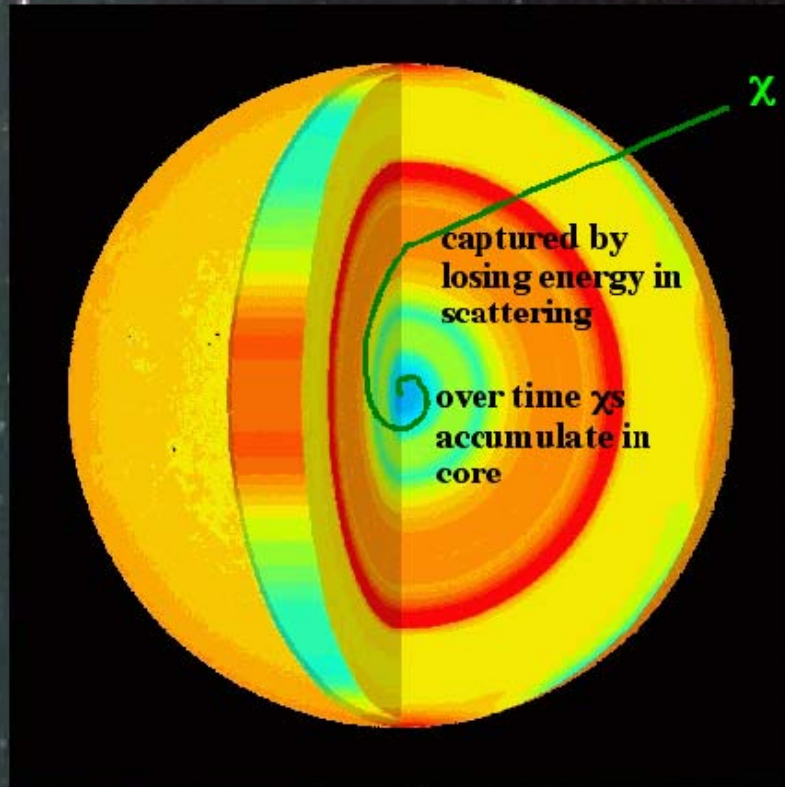
The ANTARES detector: site



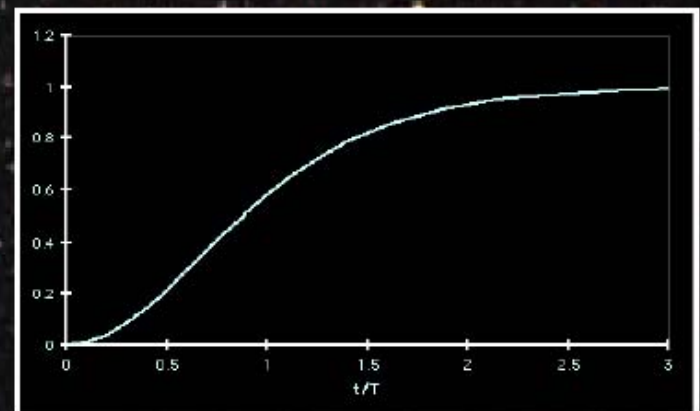
- F located off southern French coast near Toulon
- F depth 2400 m
- F water transparency and background well studied



Neutralinos in neutrino telescopes

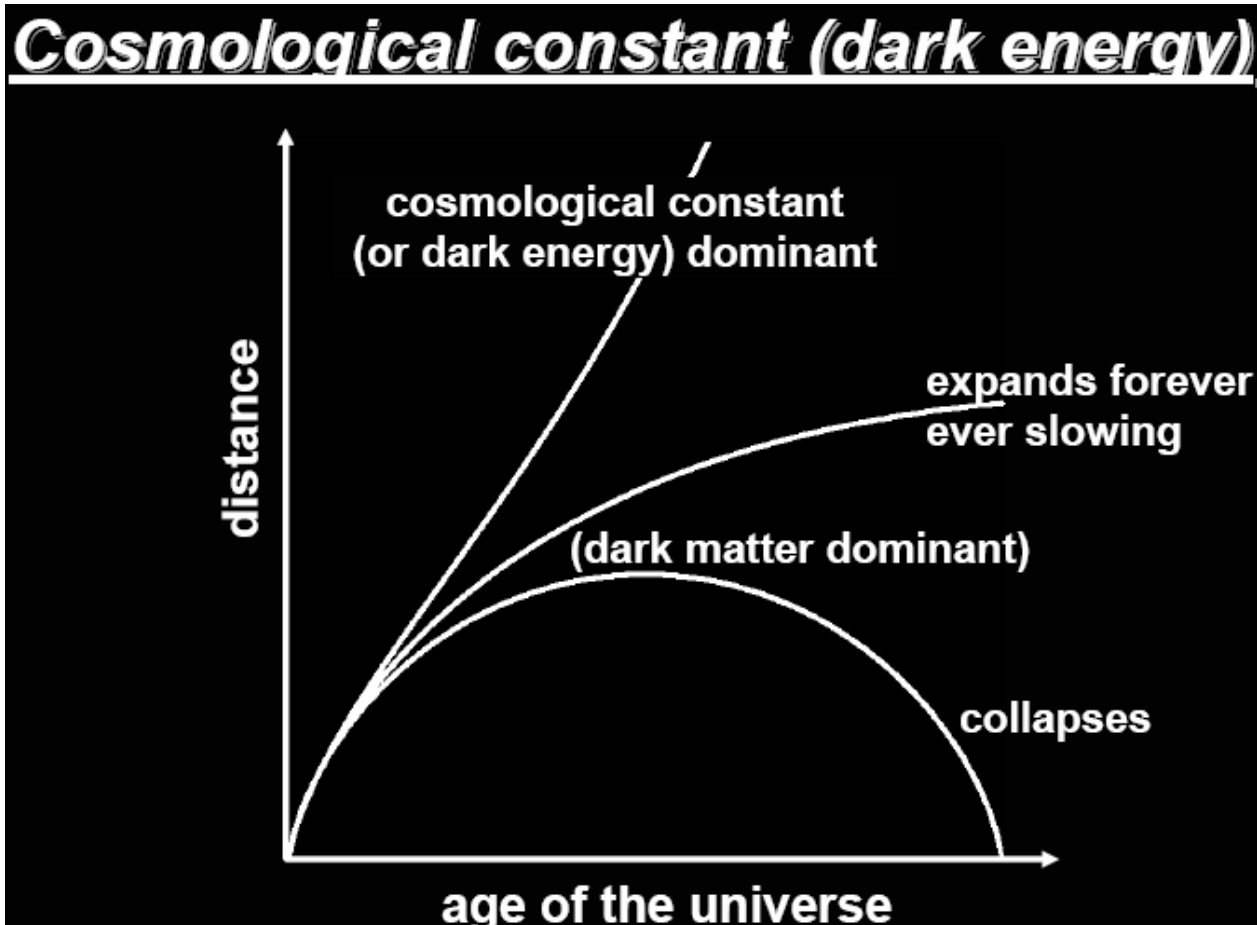


- halo neutralinos can be gravitationally captured by Sun if they lose energy through scattering
- after repeated scatters captured χ s accumulate in core
- eventually reach equilibrium concentration

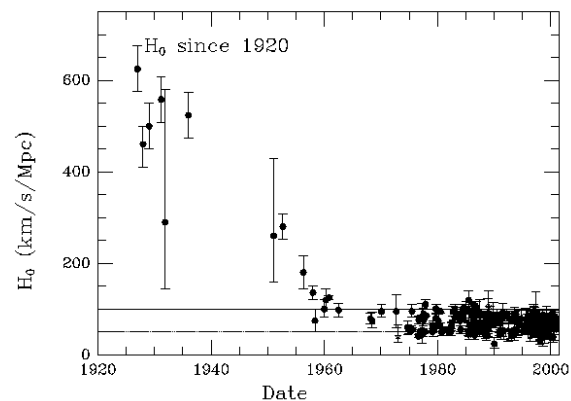
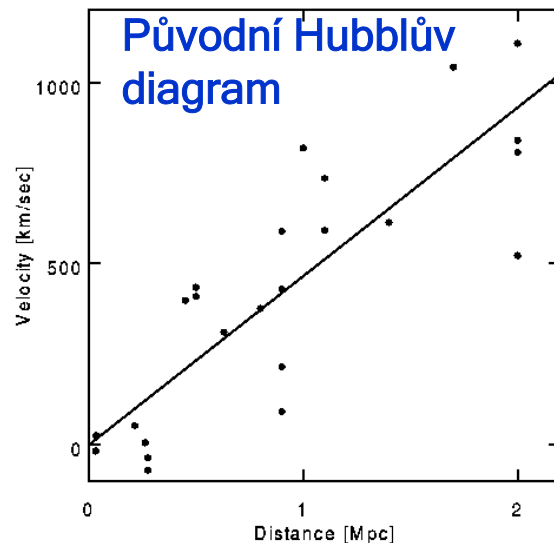
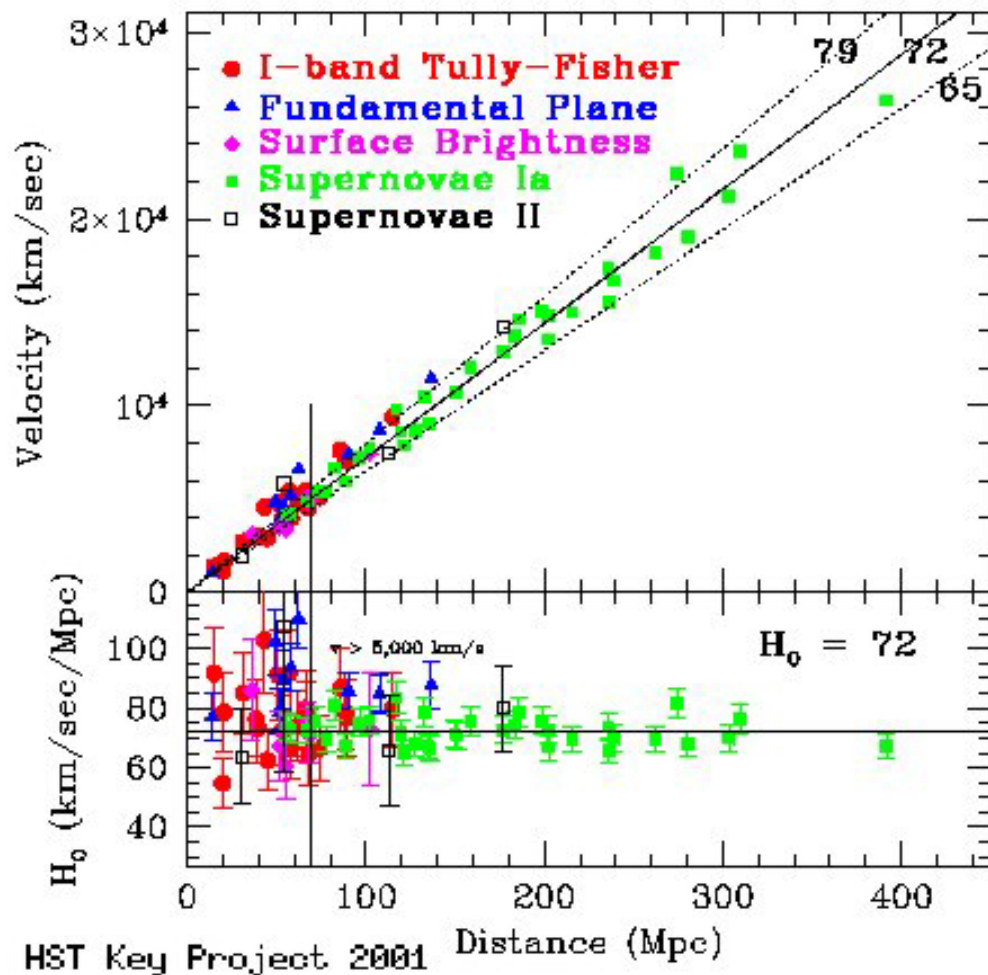


Co tvoří temnou energii ve vesmíru?

1998: překvapivé experimentální zjištění, že **rozpínání vesmíru se zrychluje**



Současná měření Hubbleovy konstanty



Copyright SAO 2001

Časový vývoj hodnoty H_0

Řešení:

- **Einsteinova kosmologická konstanta** = hustota energie **vakua**, jež způsobuje **zrychlování expanze**

Problém: potřebná experimentální hodnota **o cca 120 řádů menší**, než je teoreticky představitelné

- **Deformace prostoročasu** jež se během inflace a následujícího vývoje vesmíru rozrostly do obrovských rozměrů zahrnujících celý náš pozorovatelný vesmír.

KONEC