



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Projekt podpořený Operačním programem Přeshraniční spolupráce Slovenská republika - Česká republika 2007-2013



**TRENČIANSKY
SAMOSPRÁVNÝ
K * R * A * J**



Hvezdáreň v Partizánskom
Hvězdárna Valašské Meziříčí



Tato akce je realizována s finanční
výpomocí Zlínského kraje

Novinky z jaderné a částicové fyziky

„Pokud označíme snahu o nalezení příznaků nové fyziky pomocí urychlovače LHC jako ono pověstné hledání jehly v kupě sena, tak v současnosti jsme ve fázi, kdy teprve pracně vytváříme zmíněnou kupu sena“

Jiří Chýla

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AVČR, 250 68 Řež, E_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ, WWW: ojs.ujf.cas.cz/~wagner/

1. Úvod

2. LHC dva roky po spuštění

2.1 Horká a hustá hmota

2.2 Rychlé nabírání statistiky

2.3 Hledání Higgse a dalších částic

2.4 Rozdíl mezi hmotou a antihmotou

3. Další novinky nejen z CERNu

3.1 Superrychlá neutrína

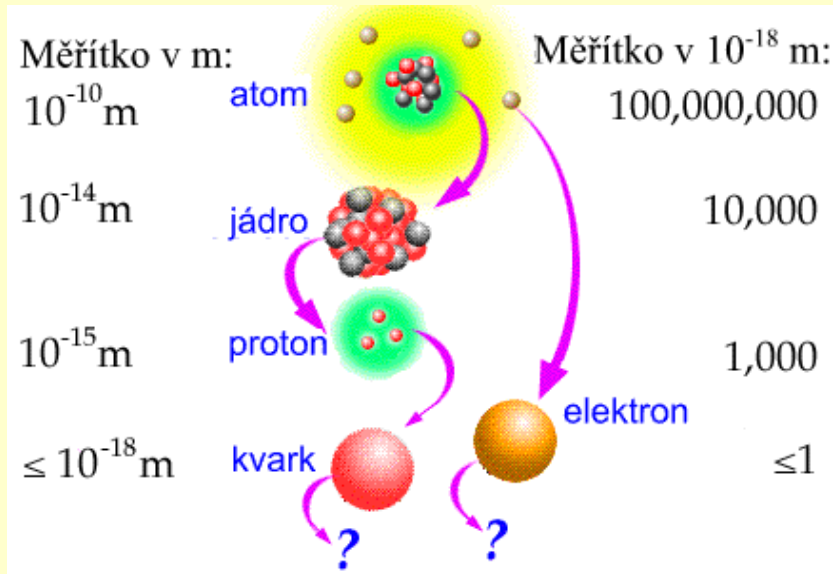
3.2 Změření posledního směšovacího úhlu v neutrinovém sektoru

3. Závěr



Složení hmoty

Hmota je složena z částic - mezi nimi působí interakce



Atomová fyzika, fyzikální chemie

Jaderná fyzika

Fyzika elementárních částic

Superstrunové teorie? (rozměr 10^{-35} m)?

Hustota vody 10^3 kg/m^3 $\xleftarrow{R_{\text{ATOM}}/R_{\text{JÁDRO}} \sim 10^5 \rightarrow V_{\text{ATOM}}/V_{\text{JÁDRO}} \sim 10^{15}}$ Hustota jádra $\sim 10^{18} \text{ kg/m}^3$

Důležité nástroje pro popis mikrosvěta:

- 1) **Speciální teorie relativity** - rychlosti blízké rychlosti světla, kinetická energie srovnatelná s klidovou
- 2) **Kvantová fyzika** - velmi malé hodnoty veličin $\rightarrow$ kvantový a pravděpodobnostní charakter, Heisenbergův princip neurčitosti

Větší detaily, energie a teploty, produkce těžších částic

Experimentální pozorování je rozhodujícím kritériem pro uznání platnosti hypotézy a její přeměnu v teorii

Stěžejní nástroj – srážka urychlených částic

1) Nárůst energie → větší detaily

Zatím největší urychlovače $E \sim 100 \text{ GeV} \rightarrow 10^{-18} \text{ m}$

2) Produkce částic s vyšší klidovou energií (hmotností)

Klidová hmotnost protonu: $\sim 1 \text{ GeV}$

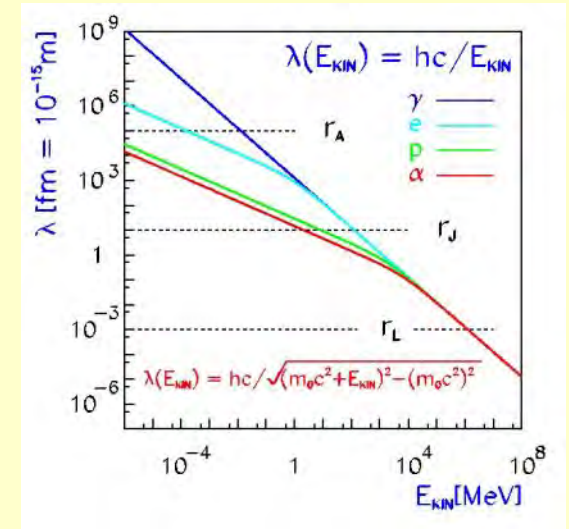
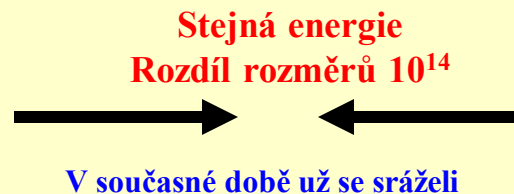
LHC – srážka protonů s energiemi 7000 GeV ($3500 \rightarrow 4000$)

Jádra olova (208 nukleonů) na každý $2700 \text{ GeV} \rightarrow 1\,123\,200 \text{ GeV} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

3) Dosažení co nejvyšších hustot a teplot

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Celkové energie už přímo makroskopické – pád $0,02 \text{ g}$ z výšky $1 \text{ m} \rightarrow$ srážka dvou menších much nebo větších komárů



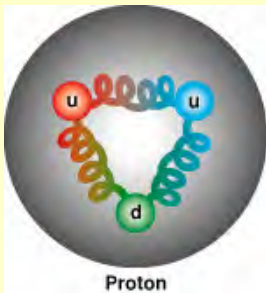
Hmotnost 1 g se stejnou rychlostí $\rightarrow 5 \cdot 10^{17} \text{ J}$ ($10\,000$ hirošimských bomb)

Standardní model

Hmota je tvořena částicemi (fermiony $s=1/2$), mezi kterými působí interakce, které jsou zprostředkovány výměnou částic (bosony $s=\text{celé číslo}$)

Tři druhy interakcí:

baryony – tři kvarky



- 1) Silná - kvantová chromodynamika (působí pouze na barevný náboj)
kvarky a z nich složené hadrony – baryony a mezony
- 2) Elektromagnetická - kvantová elektrodynamika (působí na elektrický náboj)
- 3) Slabá - elektroslabá teorie

Částice hmoty

Fermiony (spin 1/2)

Kvarky Leptony

První rodina	d	u	e^-	ν_e
Druhá rodina	s	c	μ^-	ν_μ
Třetí rodina	b	t	τ^-	ν_τ

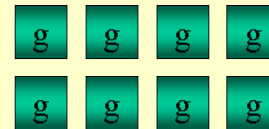
+ antičástice

tvoří běžnou hmotu za normálních podmínek

Částice interakcí

Bozony (celočíslný spin)

Silná interakce:



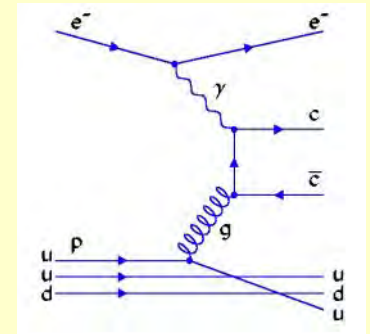
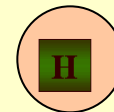
Elektromagnetická interakce:



Slabá interakce:



Higgsovo pole:



výměnný charakter interakcí

Tady je Higgs

Je spojený s generací částí hmotnosti

Gravitace stojí mimo standardní model – je velmi slabá a v mikrosvětě se neprojevuje

Velmi horká jaderná hmota – počátek našeho vesmíru

Kam se kouká LHC?

Dosažená teplota:

$$\sim 3 \times 10^{12} \text{ K}$$

(100 000krát více než v
nitru Slunce)

Dosažená hustota:

$$\sim 10^{18} \text{ kg/m}^3$$

Takové hustoty má i
hmota v nitru
supernovy a
neutronové hvězdy



$$1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$$

Kvark-gluonové plazma

$$10 \text{ } \mu\text{s} = 10^{-5} \text{ s}$$

Hadronová hmota

V pozdější fázi jen nejlehčí
baryony – proton a neutron

$$3 \text{ min} = 1,8 \cdot 10^2 \text{ s}$$

Atomová jádra – vodík, helium
a trochu těžších jader

$$400 \text{ 000 let} \sim 10^{13} \text{ s}$$

Reliktní záření



Z čeho se urychlovač skládá:

Iontový zdroj – produkce nabitých částic



Elektrostatické nebo proměnné elektrické pole – urychlení částice – urychlovací systém

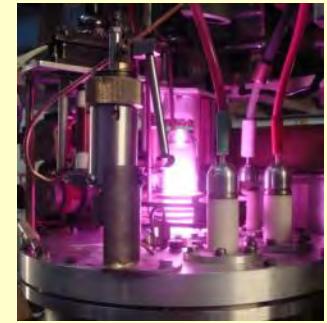
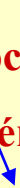
Magnetické pole – určuje dráhu částice, provádí fokusaci svazku – magnetické čočky vedou svazek a snaží se co nejvíce jej zúžit

Vakuový systém – částice se při urychlování musí pohybovat ve vysokém vakuu – nutný systém vývěv

Chlazení – supravodivé magnety potřebují heliové teploty

Radiační ochrana – zajištění bezpečnosti pomocí stínění

Řídicí systém – ovládání, řízení a kontrola práce urychlovače



Zdroj plazmy – elektrický výboj



Urychlovací prvky LHC



Kryogenní systém pro LHC



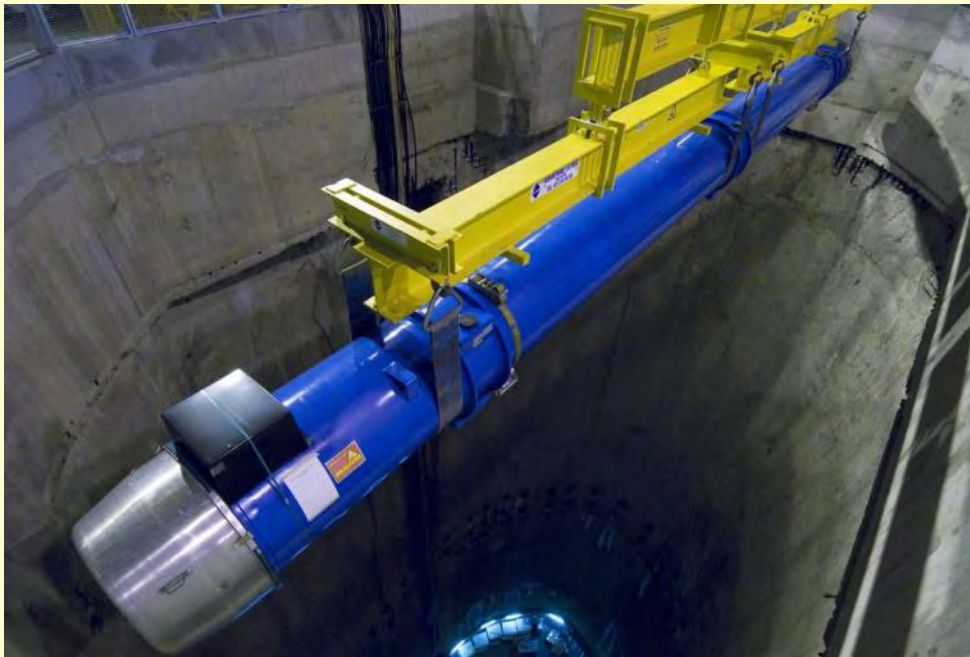
Řídicí centrum urychlovače LHC



Dipólové magnety LHC

V současnosti už dva roky funguje největší urychlovač na světě





Obvod 27 km – slušná linka metra
 - čtyři experimenty → čtyři zastávky
 → čtyři křížení dvojice rour



Spouštění magnetu do podzemního tunelu

1700 supravodivých magnetů
 z nich 1232 největších dipolových
 200 teplých magnetů

Tedy 1700 kryogenních propojení.

Tedy 50000 kryogenních svarů

200 000 m² vícevrstevné izolace

120 tun supravodivého a supratekutého helia



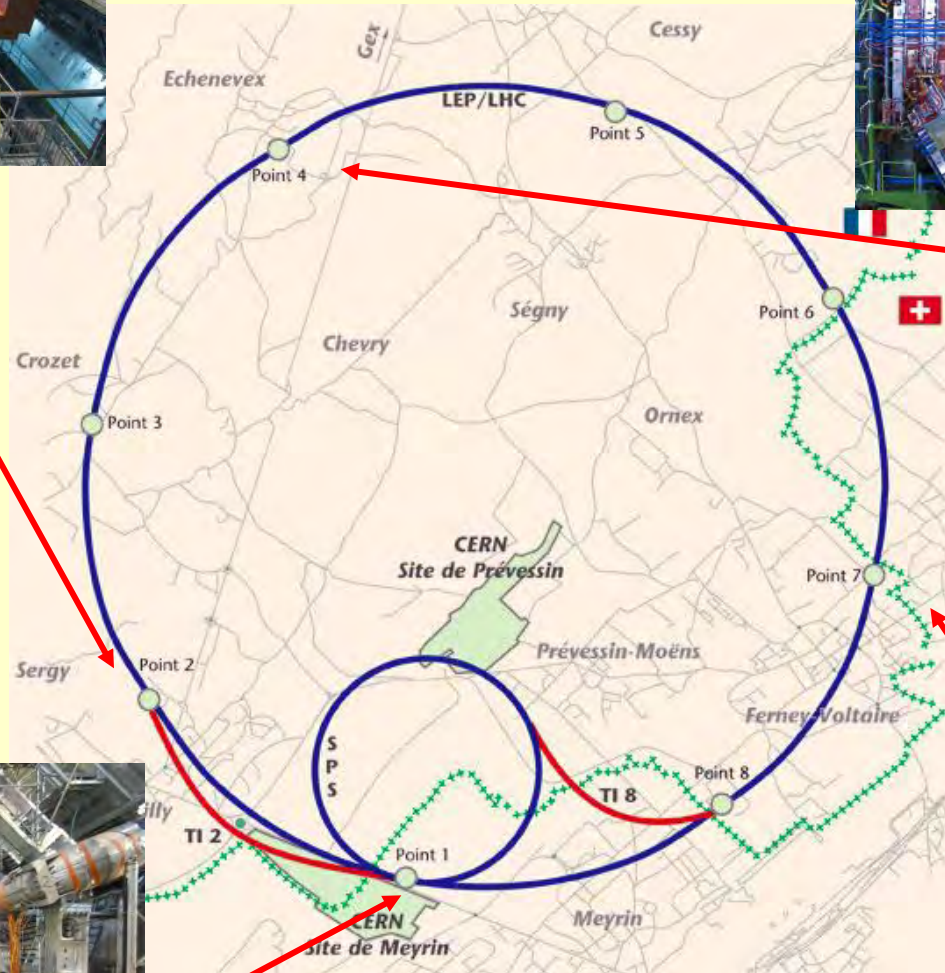
Spojovací část mezi jednotlivými sekcemi



ALICE



CMS



ATLAS



LHCb

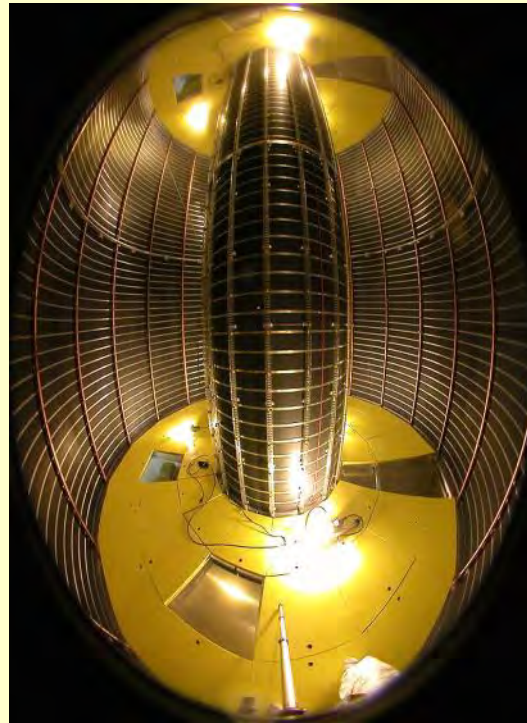
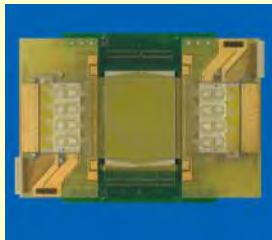
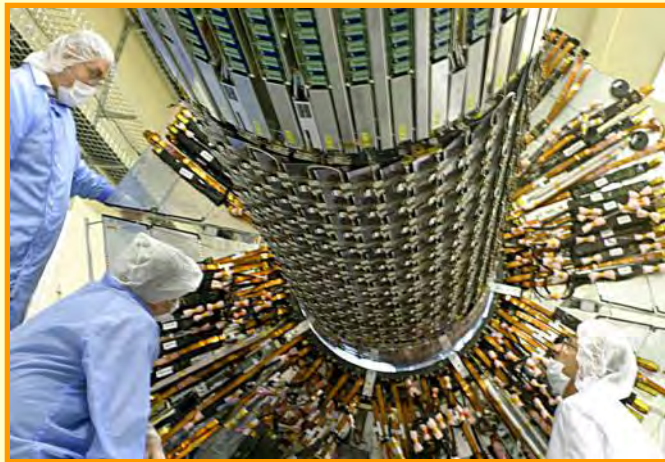


Nejen připravit hmotu z počátku vesmíru, ale i si ji prohlédnout

Máme na to detektory – a tu jsou jejich úkoly:

- 1) Zachytit co nejvíce částic a určit jejich vlastnosti
- 2) Zachytit a určit energii i těch nejenergetičtějších částic
- 3) Zachytit dráhu krátce žijících částic nebo dráhy jejich produktů rozpadu
- 4) Určit hybnosti částic
- 5) Určit náboje částic

Vnitřní dráhové detektory



Velké dráhové komory
(umístěné v magnetickém poli)

Hadronové kalorimetry



Elektromagnetické kalorimetry



!!! Velký experiment – potřeba hodně lidí !!!

Jeden z posledních snímků ALICE před letošním uzavřením jeskyně

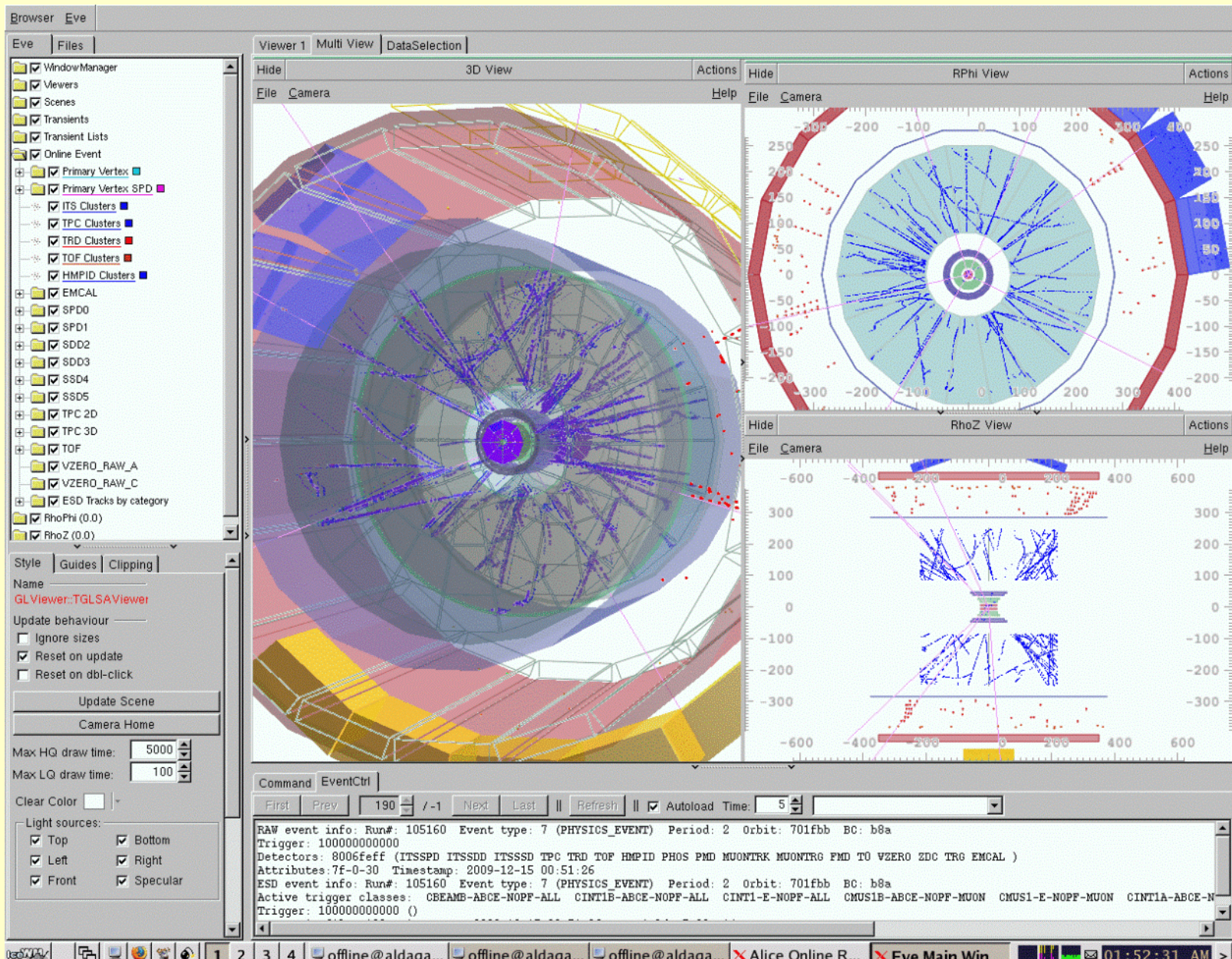


(nejmladší „fyzik“ na obrázku pochází z české ALICE komunity)

Čekání na ALICI – čekají i čeští fyzikové

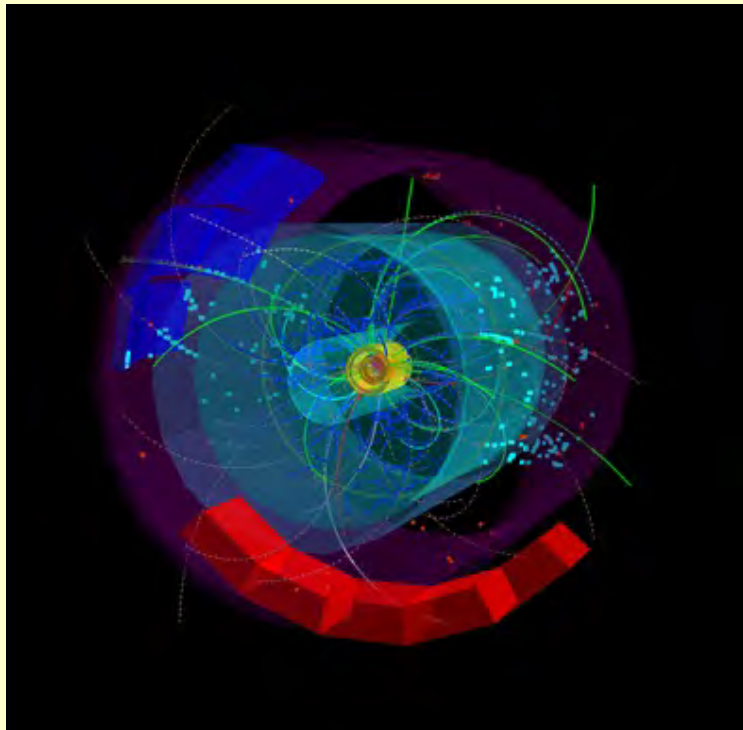
Účast našich studentů na instalaci křemíkových driftových detektorů a jejich elektroniky



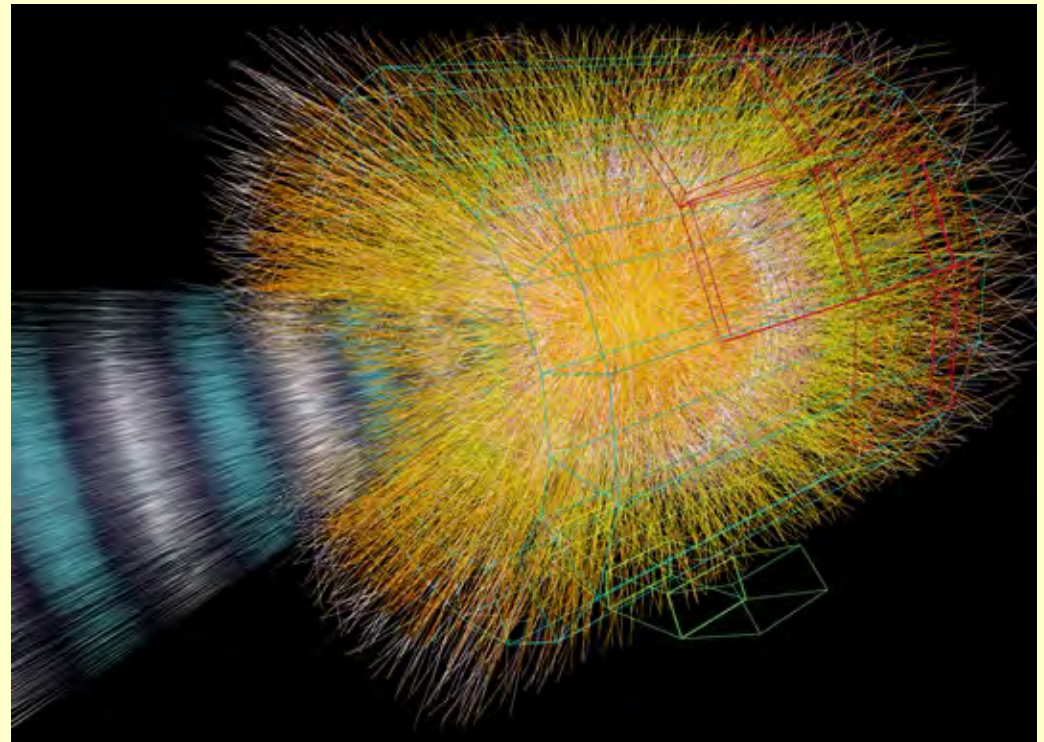


Srovnání srážek protonů a těžkých iontů

ALICE p+p srážka

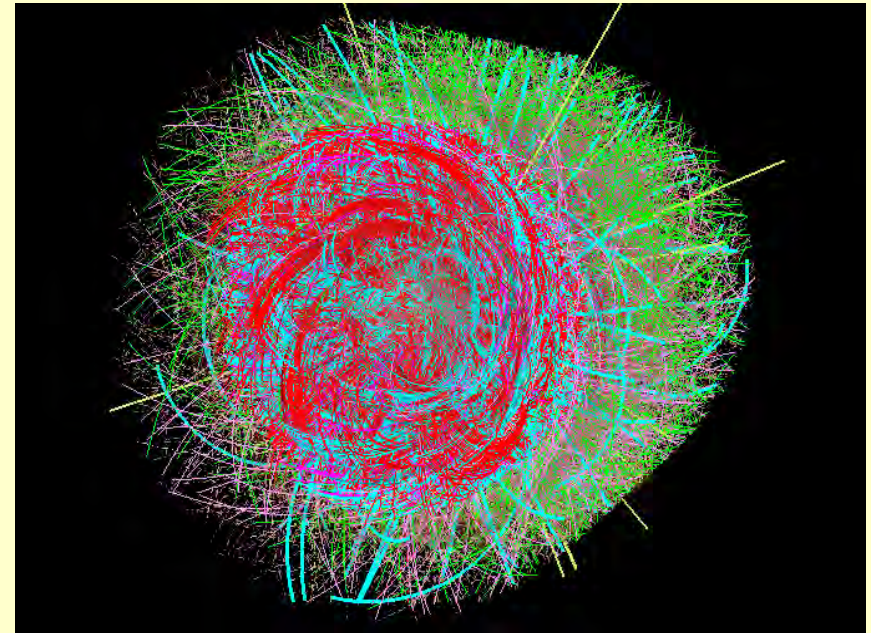
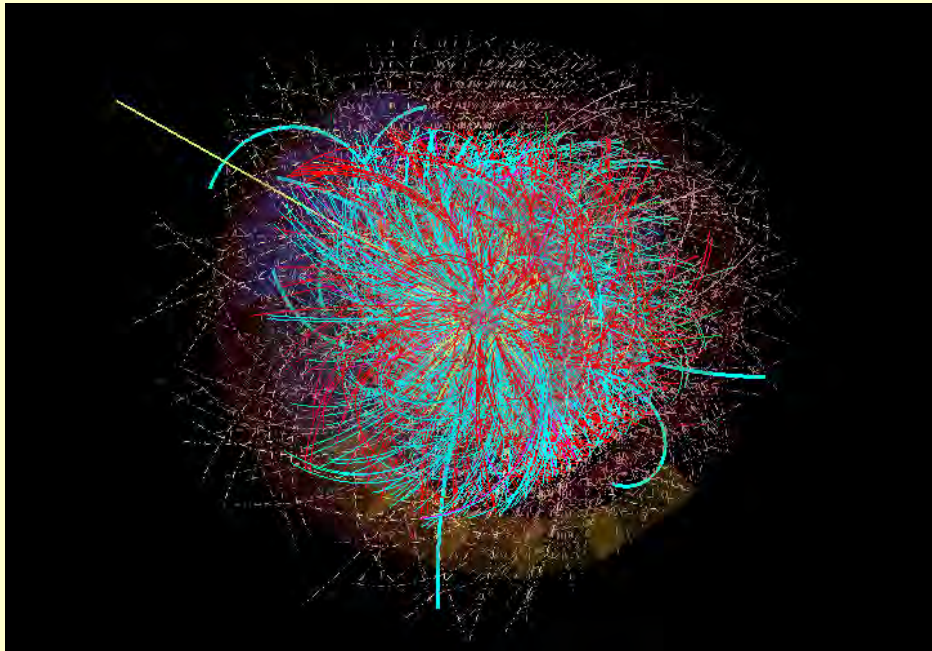
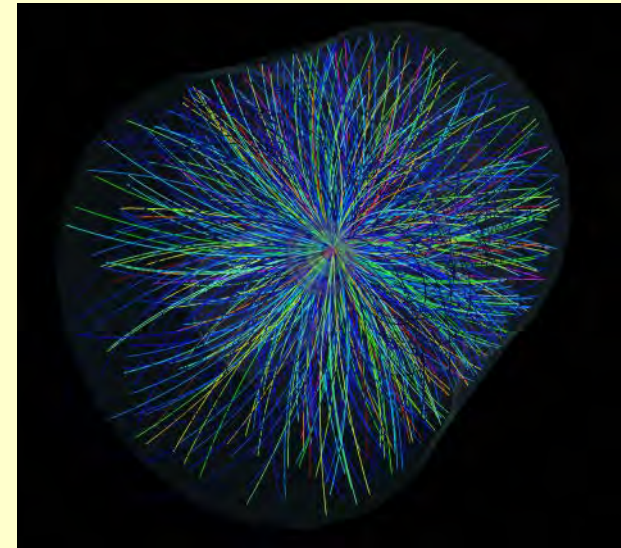
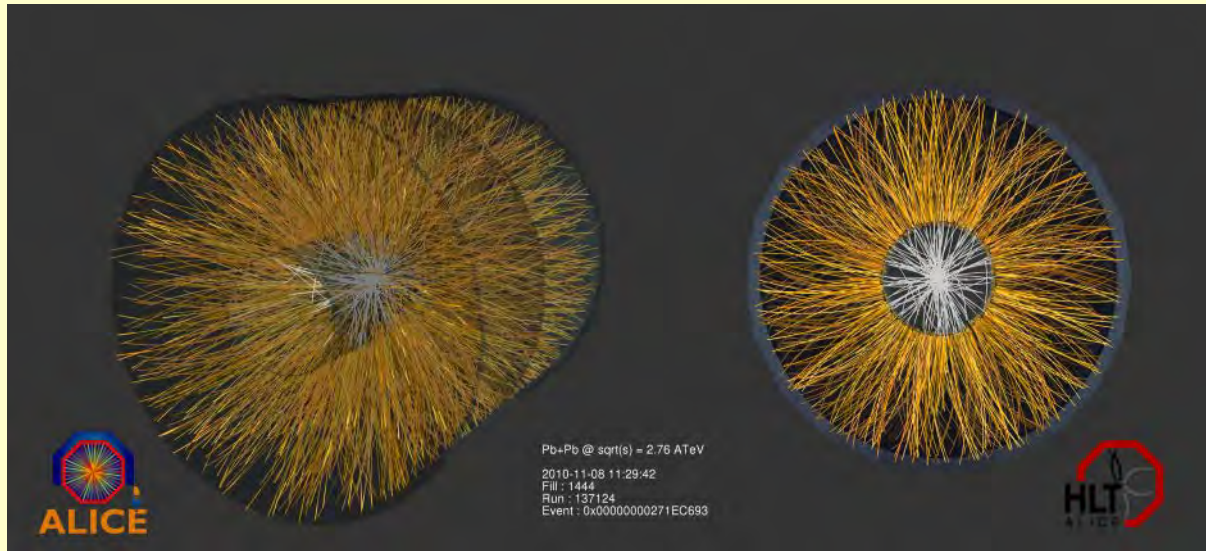


ALICE Pb+Pb



První případy srážek dvou jader olova z experimentu ALICE

(místo 10 až 100 částic se ve srážce produkuje až 10 000 částic)



Kvark-gluonové plazma – hmota velmi raného vesmíru

Studium pomocí srážek těžkých iontů

Podstatný rozdíl – doba existence

$$10 \mu\text{s} \rightarrow 10^{-22} \text{ s}$$

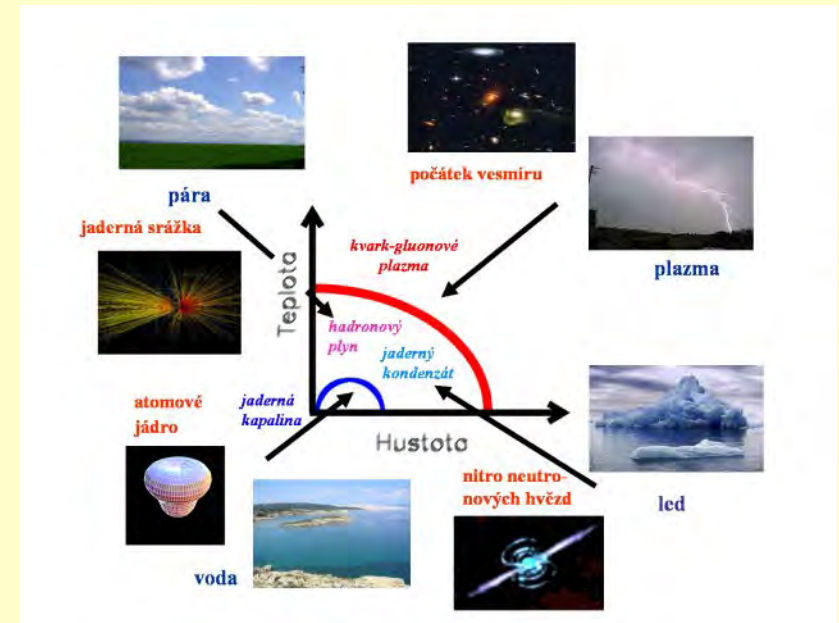
Otázka nastolení tepelné rovnováhy

Experimenty na urychlovači RHIC:

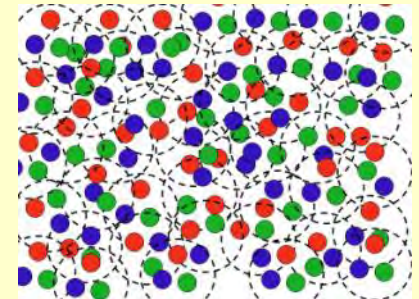
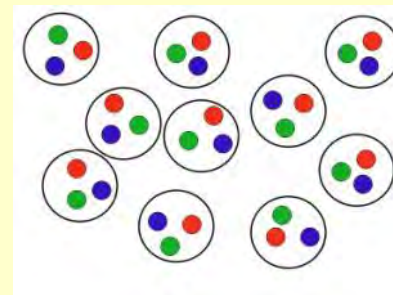
- 1) Prokázána existence QGP (pohlcení výtrysků)
- 2) Chování ideální kapaliny (sQGP)
- 3) Velmi rychlé nastolení tepelné rovnováhy



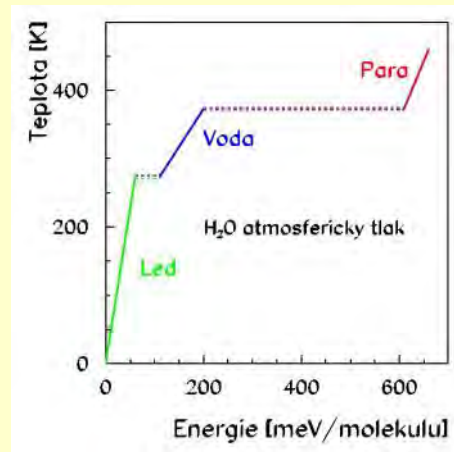
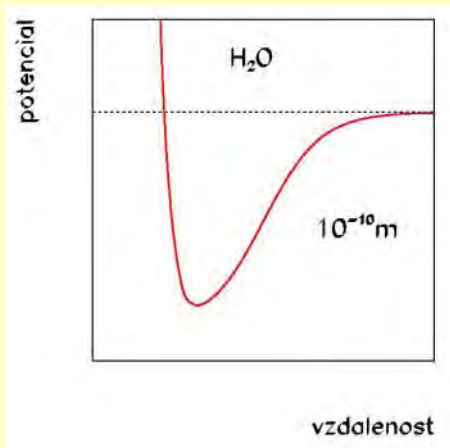
Různé fáze jaderné hmoty:



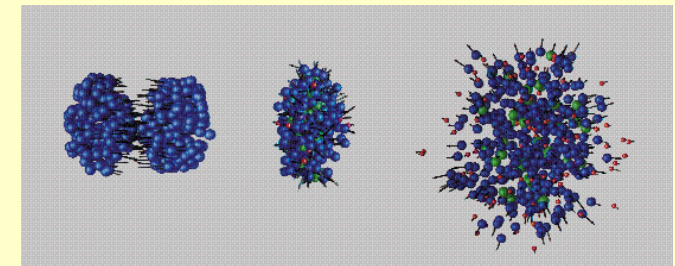
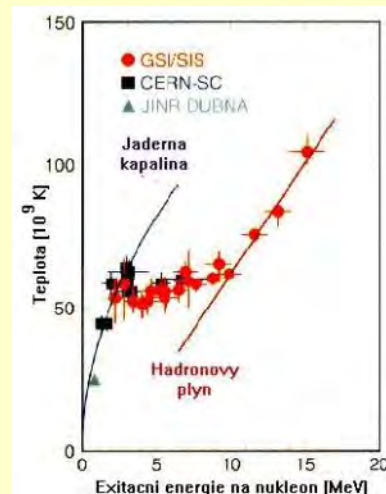
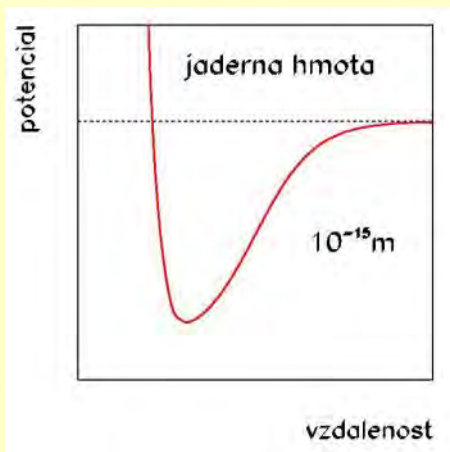
Při vysoké teplotě a hustotě energie vzniká kvark gluonové plazma



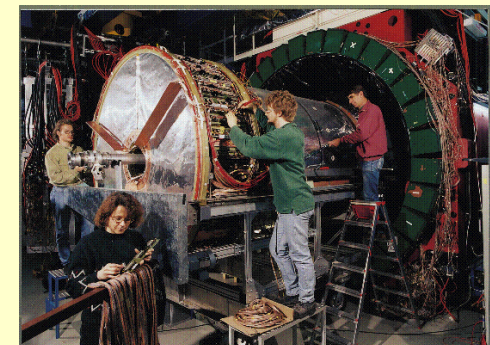
Fázový přechod jaderné kapaliny v hadronový plyn.



Ohřívání vody



Ohřívání jaderné hmoty



Fázové přechody jaderné hmoty a vody (H_2O) a tvar příslušných potenciálů

Viskozita tekutin

(inspirace vystoupením Nguyen Dinh Danga)

Odpor tekutin proti stříhovému nebo tahovému namáhání – charakterizuje vnitřní tření a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi tvořícími tekutinu

Dynamická viskozita η : [Pa·s]

Statická viskozita ν : $\nu = \eta/\rho$

Tekutost ϕ : $\phi = 1/\eta$

Tekutina	viskozita η [mPa·s]
Vzduch	0,02
Voda	1,0
Etanol	1,2
Glycerin	1 480
Med	až 10 000
Asfalt	230 000 000 000

Velmi široké rozmezí pro kapaliny

Největší viskozita – asfalt 230 miliardkrát větší než voda

Universita v Queenslandu (Austrálie)

Nejdéle běžící experiment od roku 1930

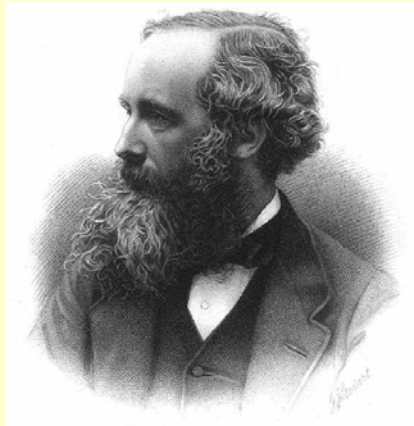
Zatím 8 kapek (poslední 2000)

Ig Nobel 2005 (John Mainstone a Thomas Parnell)



John Mainstone u svého experimentu

Z historie zkoumání viskozity



Plyn:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{l} \bar{v}.$$

Viskozita závisí na součinu:

- 1) Hustoty
- 2) Střední volné dráhy
- 3) Střední rychlosti

Hodnoty (vzduch):

- 1) Hustota = 1,3 g/l
- 2) Střední rychlost molekul = 250 m/s
- 3) Střední volná dráha = 65 nm

James Clerk Maxwell

Maxwellovi závěry o viskozitě plynů (Maxwellův zákon):

- 1) Viskozita nezávisí na změně hustoty (opačně se změní střední volná dráha) tedy i na tlaku
- 2) Závisí na teplotě (roste s ní) – protože rychlost v roste s teplotou T jako T^n , $\frac{1}{2} \leq n \leq 1$

Maxwell požádal Stockse o experimentální test, ten odpověděl, že už měřil Sabine a zjistil změnu viskozity s tlakem

(později Stocks zjistil, že závěry plynuly z implicitního předpokladu nulové viskozity při nulovém tlaku)

Maxwell nevěřil a přeměřil: $\eta = 0,0001878 (1+aT)$ pro vzduch (mezi 0,0167 ~ 1 atm)

Maxwell experimentátor musel potvrdit Maxwella teoretika



Nejnižší hodnoty viskozity

I extrémně velká viskozita, ale ne extrémně malá $\leftrightarrow$ střední volná dráha nemůže být kratší než vlnová délka

Ideální tekutina – velmi nízká viskozita, ale ne nulová

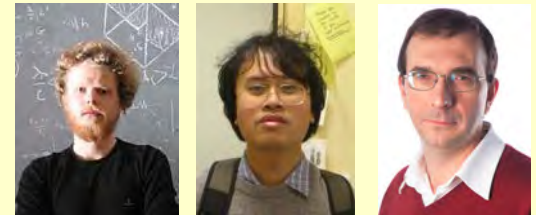
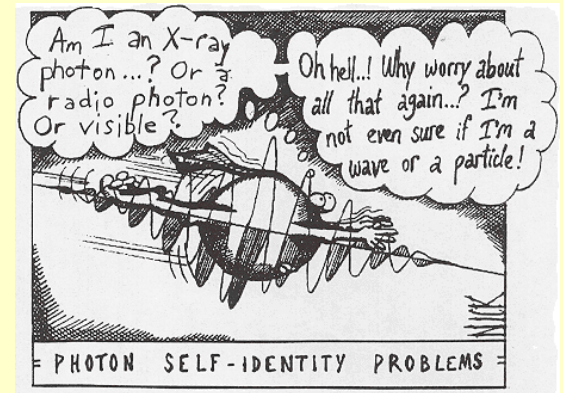
Poměr viskozity a hustoty entropie Φ : $\Phi = \eta/s$ [KSS]

Kovtunovo, Sonovo a Starinetsovo číslo

$$\text{KSS} = \frac{k_B \eta}{\hbar s}$$

Dolní hranice pro viskozitu:

$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{4\pi k_B} , \quad s = \frac{\rho}{A} S$$



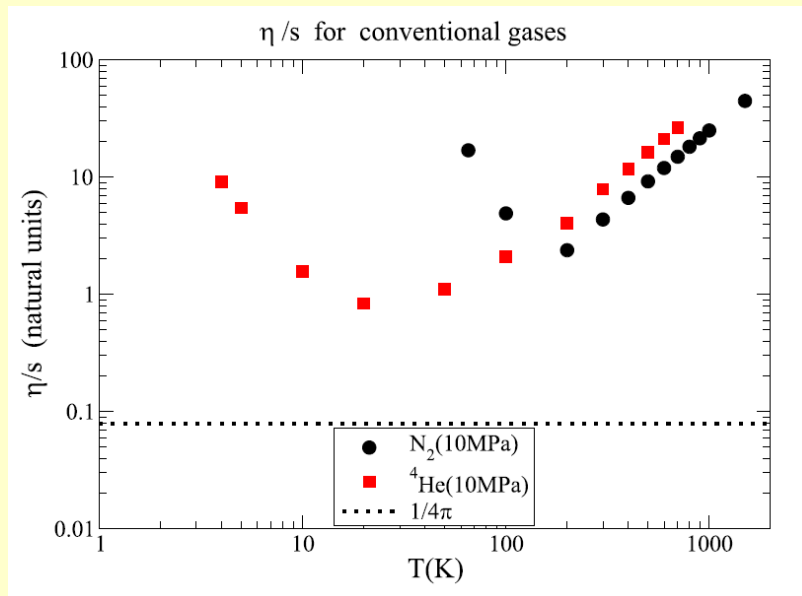
PRL 94 (2005) 111601

Gigantické dipolové rezonance (GDR):
jaderná kapalina:

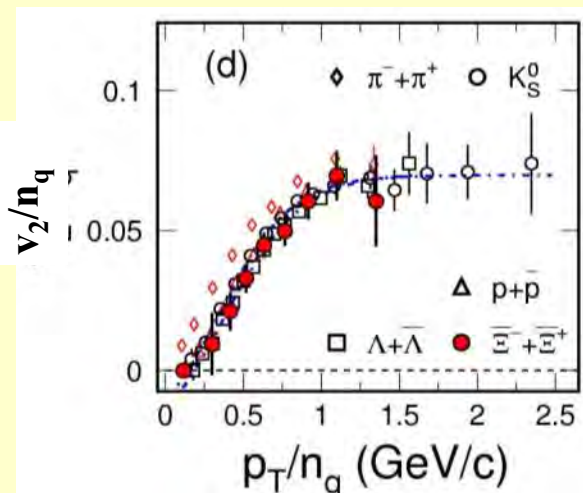
(1,3 – 4,0) KSS pro $T = 5$ MeV

QGP ($T > 175$ MeV) – ideální kapalina

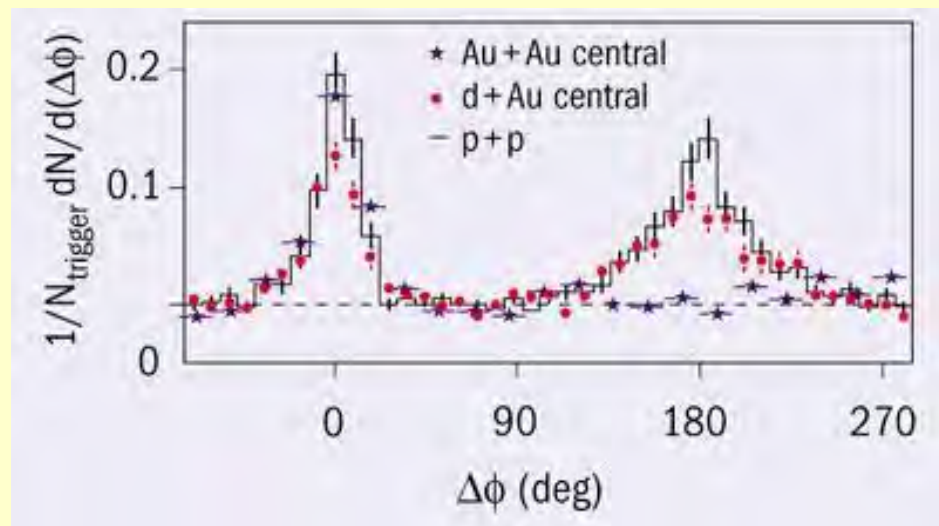
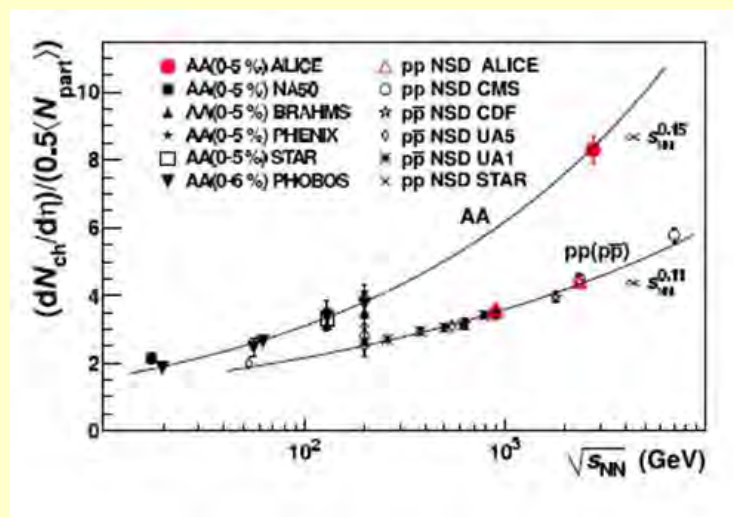
$\eta/s = (2 \sim 3)$ KSS.



Co ukázal RHIC ? - Ne ideální plyn ale ideální kapalina

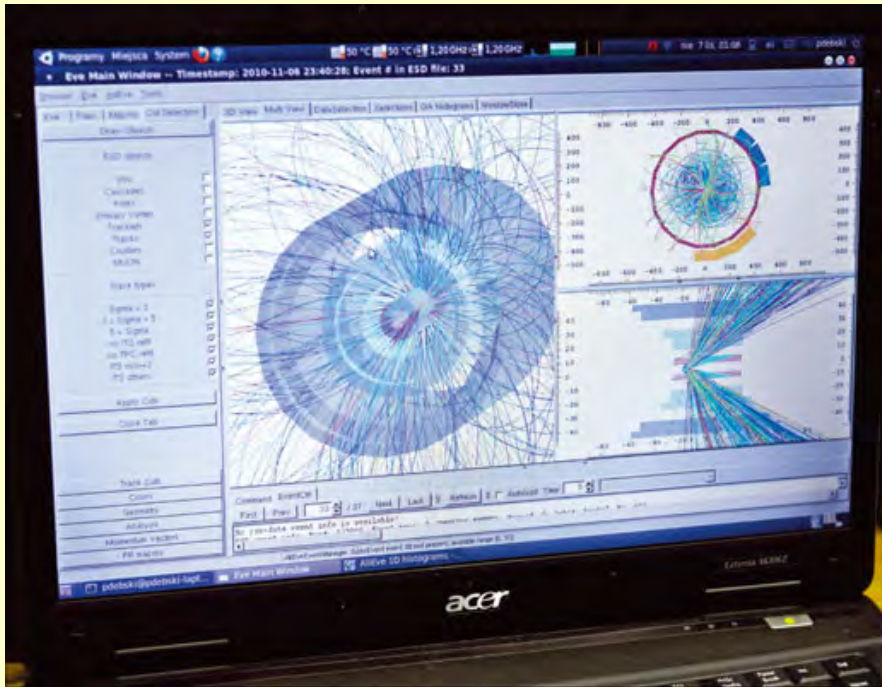


- 1) Vytvoření barevného systému uvolněných kvarků a gluonů
- 2) Silné překročení kritické teploty a hustoty energie
- 3) Nastolení tepelné rovnováhy ještě v době existence barevné fáze – kvark-gluonového plazmatu
- 4) Nejedná se o slabě interagující systém ale o silně interagující systém - ideální kapalina s minimální viskozitou



V oblasti energií urychlovač RHIC – sQGP

Jaderná hmota (kvark-gluonové plazma) je i při těchto mnohem vyšších hustotách energie ideální kapalinou

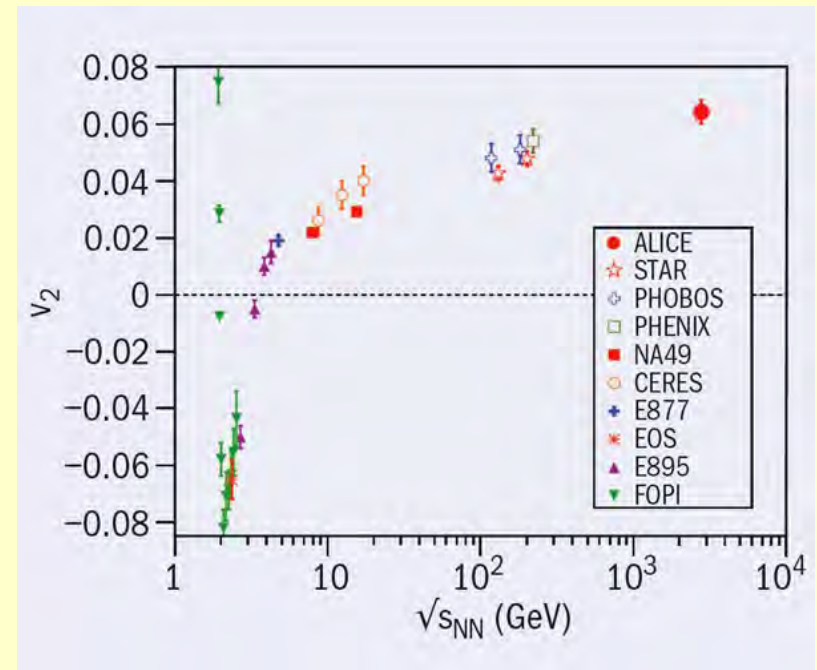


Srážka jader olova v experimentu ALICE

Podrobné studium chování kvark-gluonového plazmatu a interakci částic v něm

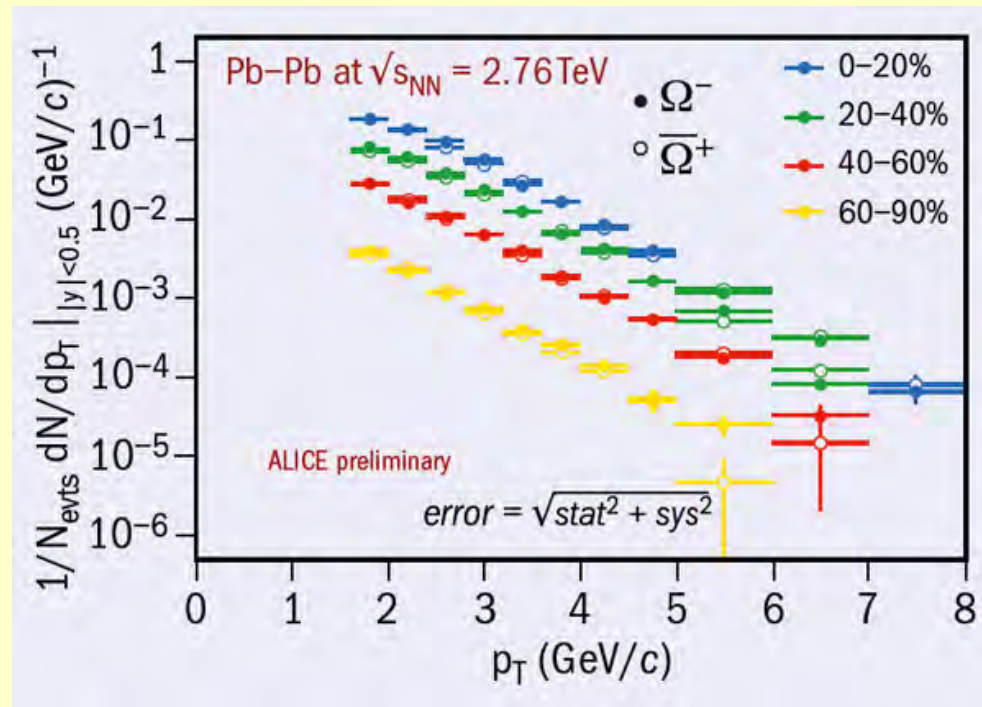
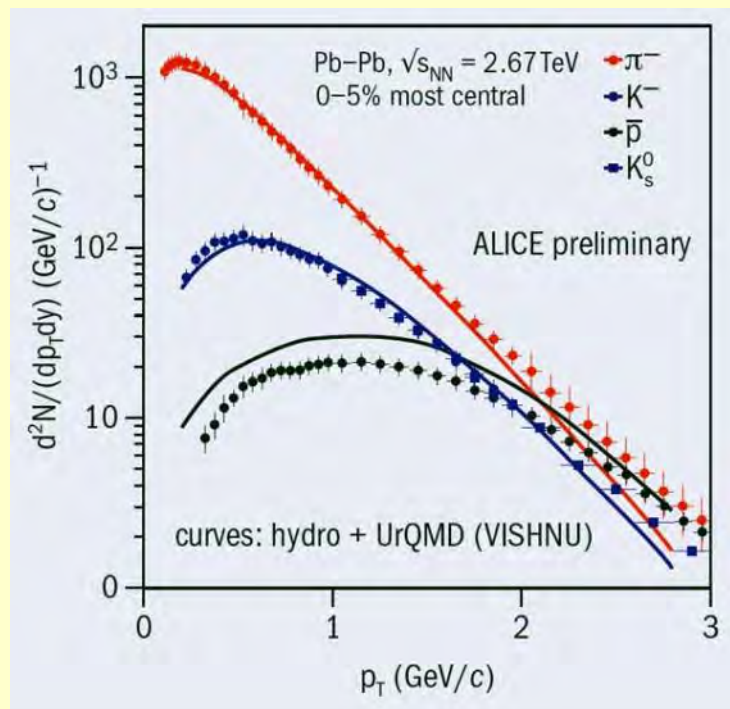
Velikost kolektivního toku stále pomalu roste

Stále se nedospělo k takové teplotě (hustotě energie) aby se změnila v „ideální plyn“

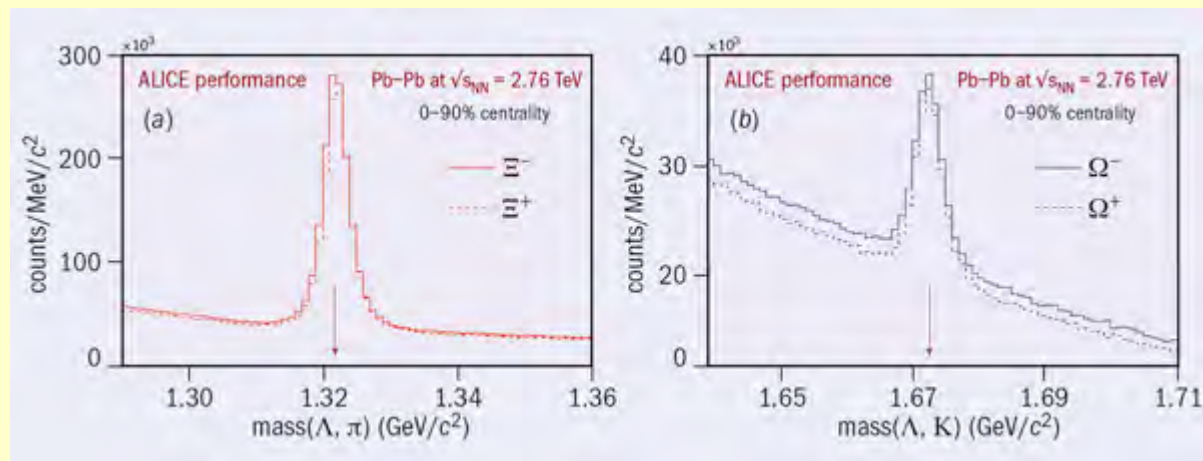


Velikost eliptického toku

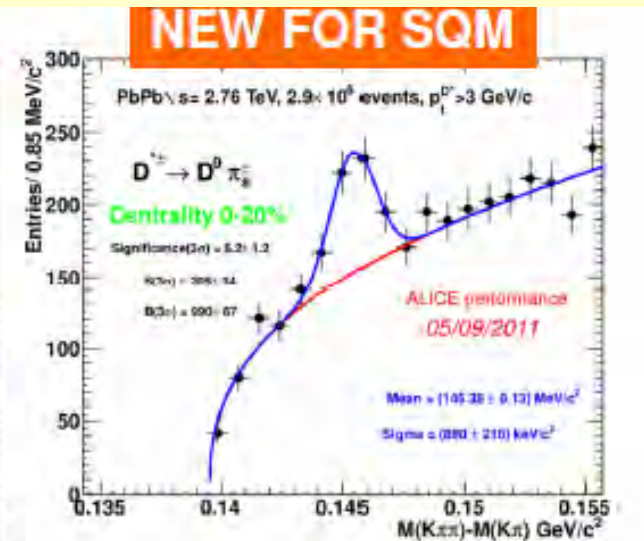
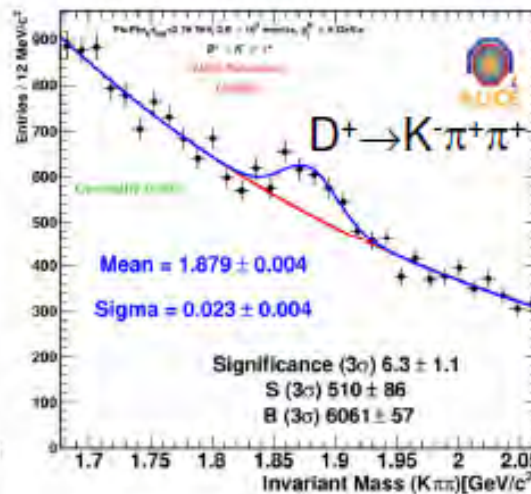
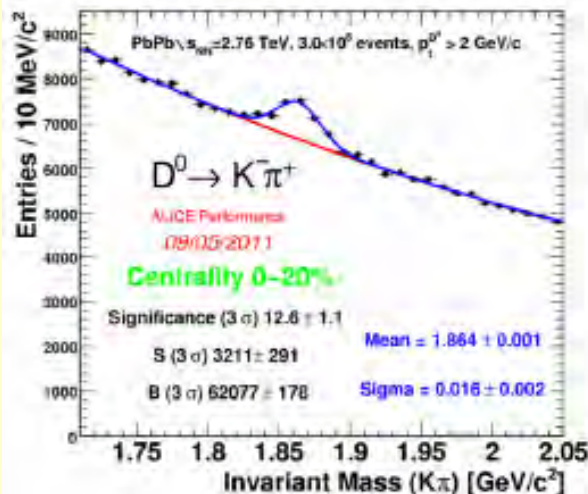
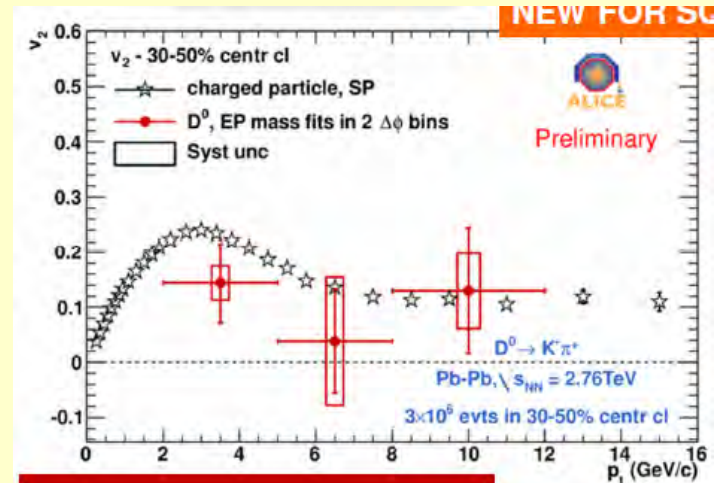
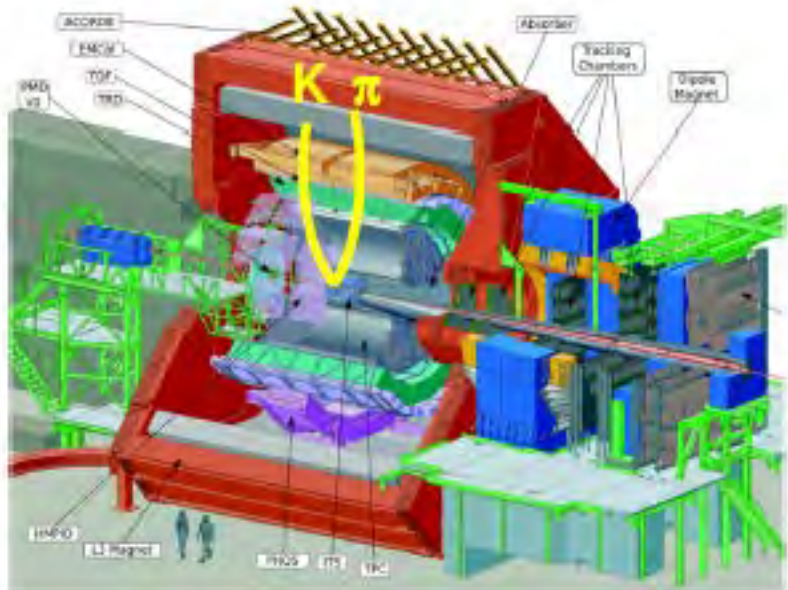
Produkce částic



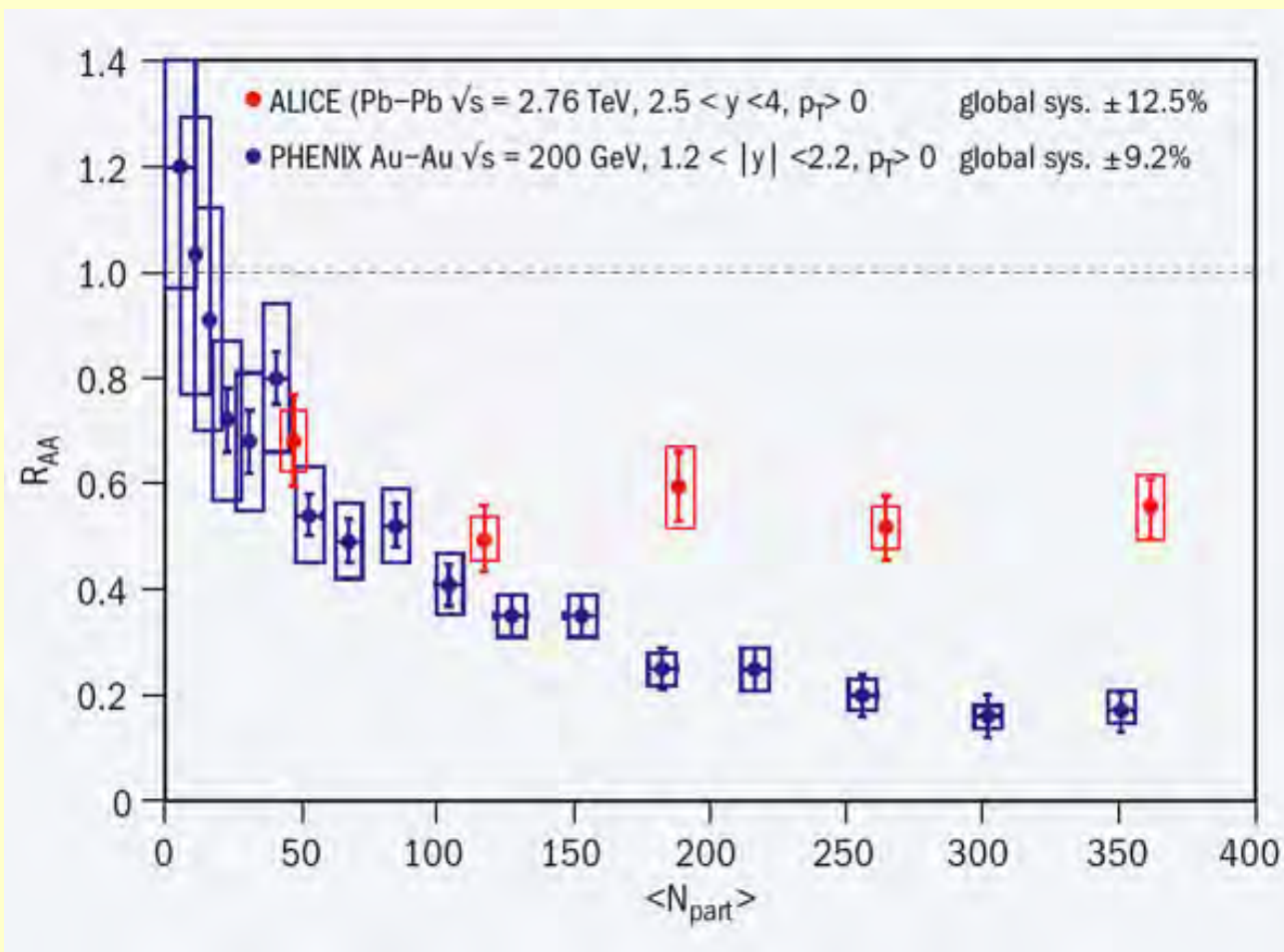
Ukázky kvality detekce a
identifikaci částic z rozpadů



Mezony s těžkými kvarky



Pozorování potlačení J/ψ mezonů v QGP



Rozpady:

$J/\psi \rightarrow e^+e^-$

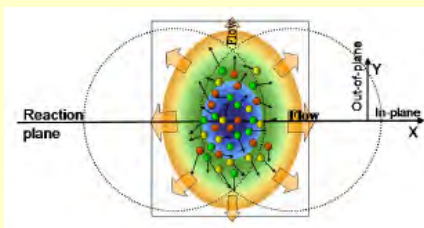
$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$

Srovnání p-p a Pb-Pb
srážek

začátek roku 2011 –
pozorování p-p
srážek při energiích
2,76 GeV.

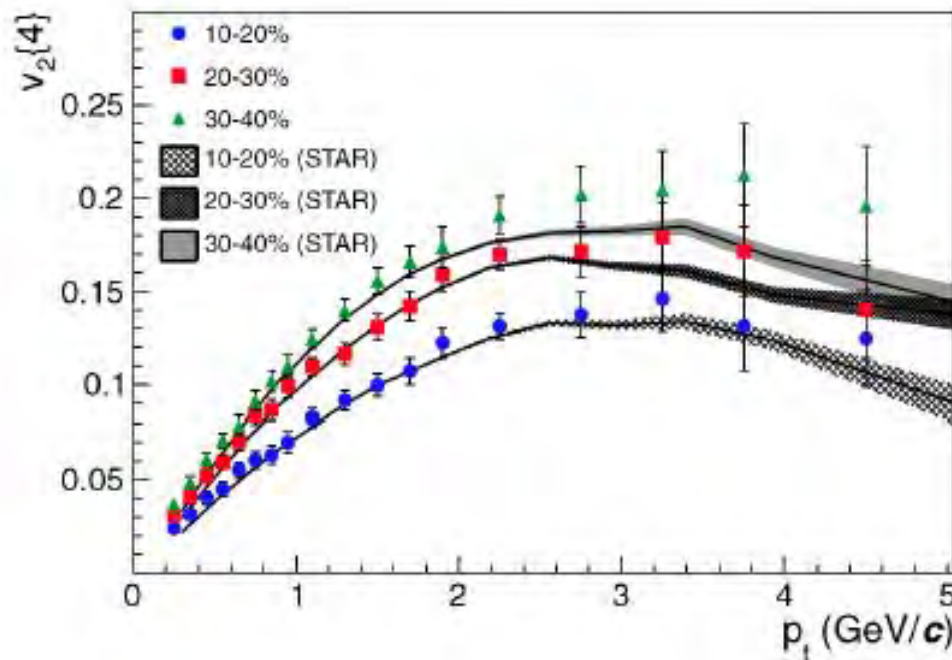
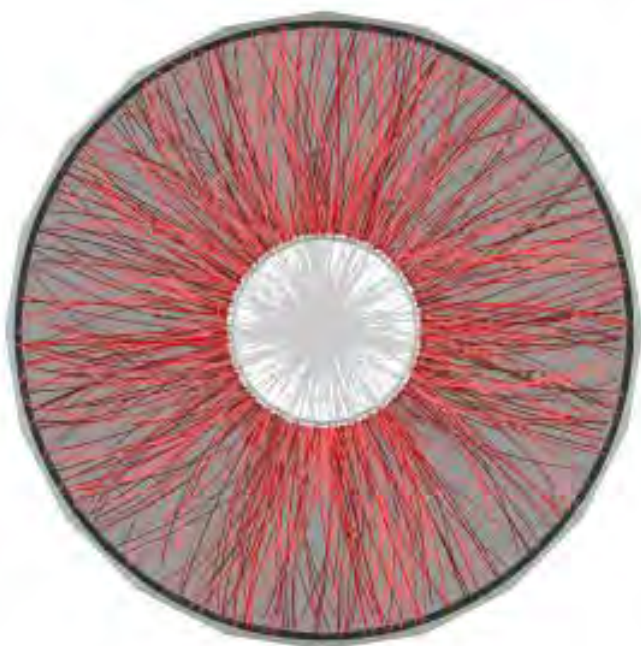
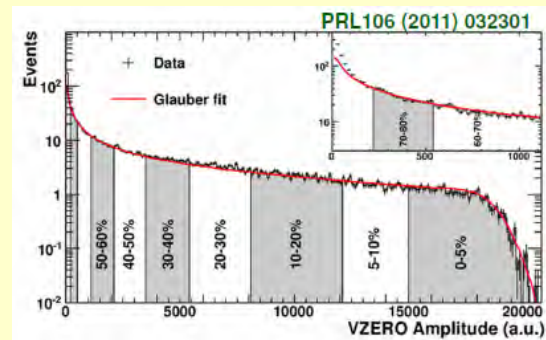
Měření polarizace
J/ψ mezonu

Menší potlačení v případě LHC je dáno vyšší teplotou a hustotou energie. To vede na velmi vysokou produkci c a anti-c párů a vyšší počet J/ψ mezonů



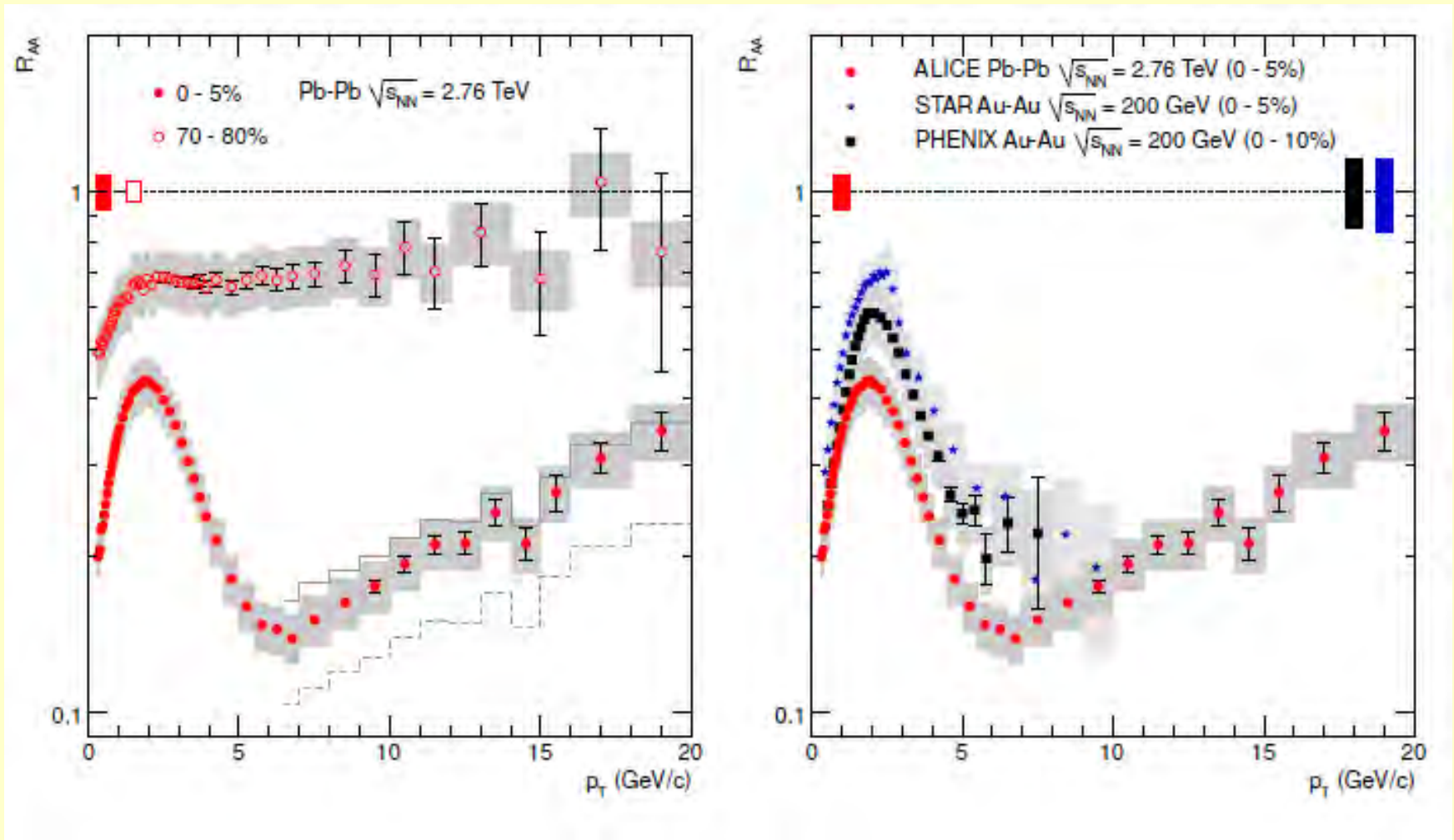
Studium kolektivních toků

$$dN/d\phi \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n(p_T) \cos [n(\phi - \psi_n)]$$



Srovnání měření získaných na RHICu (STAR) a na LHC (ALICE)

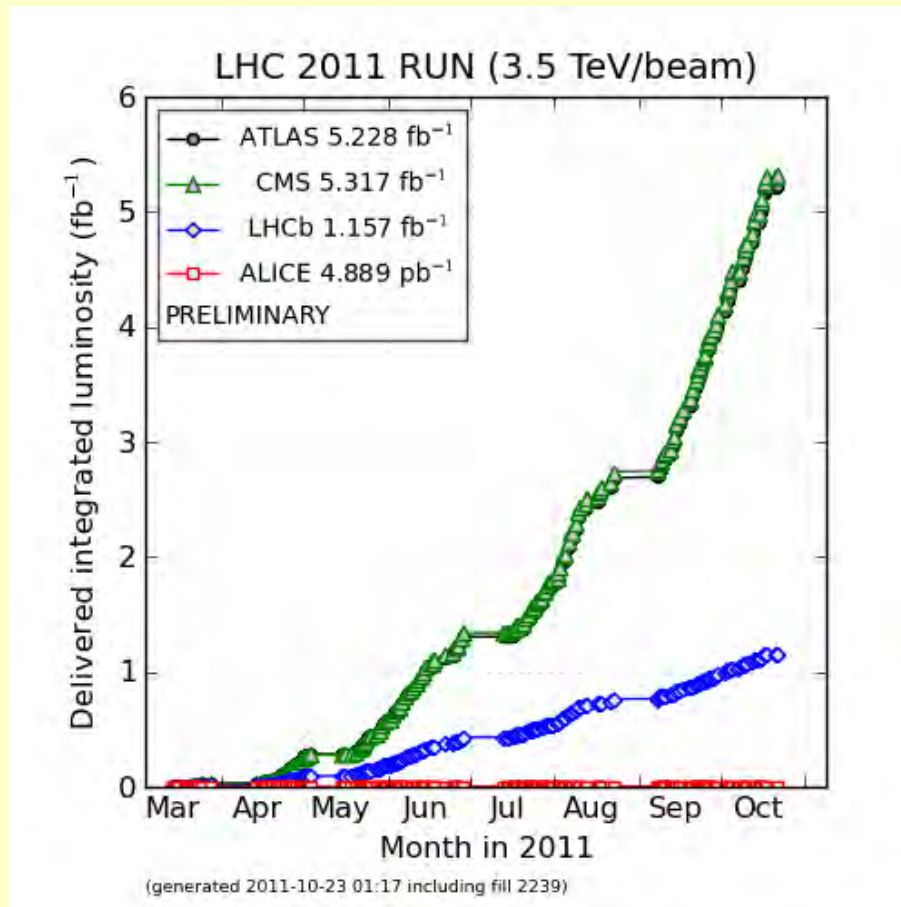
Potlačení výtrysků – zvyšuje se s centralitou srážky



!!!! QGP na LHC má velice podobné vlastnosti těm, které má QGP na RHICu !!!!

Phys. Letter B696(2011)30

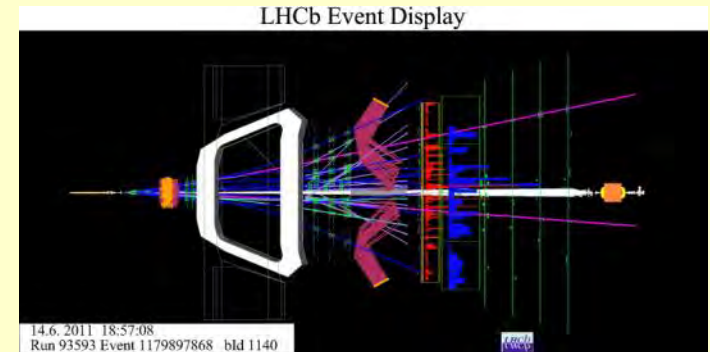
Velmi úspěšný běh urychlovače LHC během celého roku



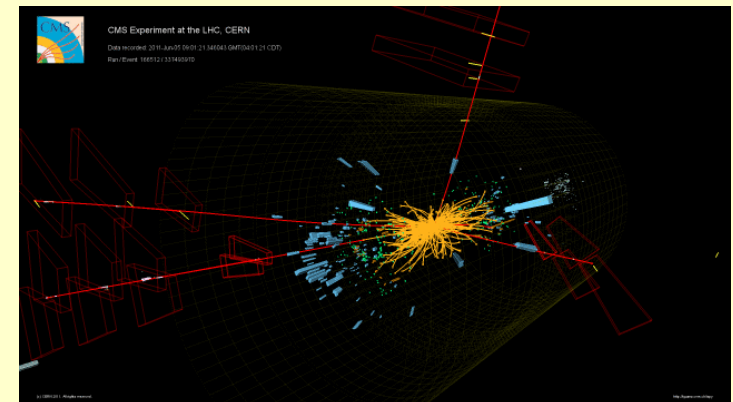
2800 shluků, 100 miliard protonů/shluk
600 milionů srážek/s

Získáno velké množství srážek, produkce velmi těžkých částic (třeba t –kvarků v nebyvalém počtu)

Higgs však stále uniká, stejně tak supersymetrické částice



Rozpad B⁰ mezonu na pár mion a antimion



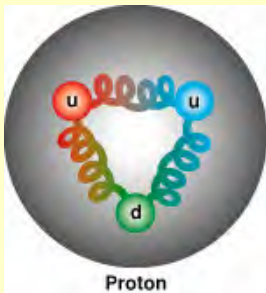
Vznik dvojice Z^0 častic a jejich rozpad na páry mionu a antimionu

Standardní model

Hmota je tvořena částicemi (fermiony $s=1/2$), mezi kterými působí interakce, které jsou zprostředkovány výměnou částic (bosony $s=\text{celé číslo}$)

Tři druhy interakcí:

baryony – tři kvarky



- 1) Silná - kvantová chromodynamika (působí pouze na kvarky a z nich složené hadrony – baryony a mezony) → barevný náboj
- 2) Elektromagnetická - kvantová elektrodynamika → elektrický náboj
- 3) Slabá - elektroslabá teorie

Částice hmoty

Fermiony (spin 1/2)

Kvarky Leptony

První rodina	d	u	e^-	ν_e
Druhá rodina	s	c	μ^-	ν_μ
Třetí rodina	b	t	τ^-	ν_τ

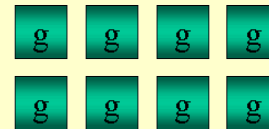
+ antičástice

tvoří běžnou hmotu za normálních podmínek

Částice interakcí

Bozony (celočíslný spin)

Silná interakce:



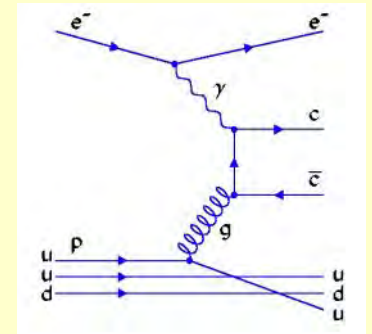
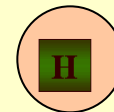
Elektromagnetická interakce:



Slabá interakce:



Higgsovo pole:



výměnný charakter interakcí

Tady je Higgs

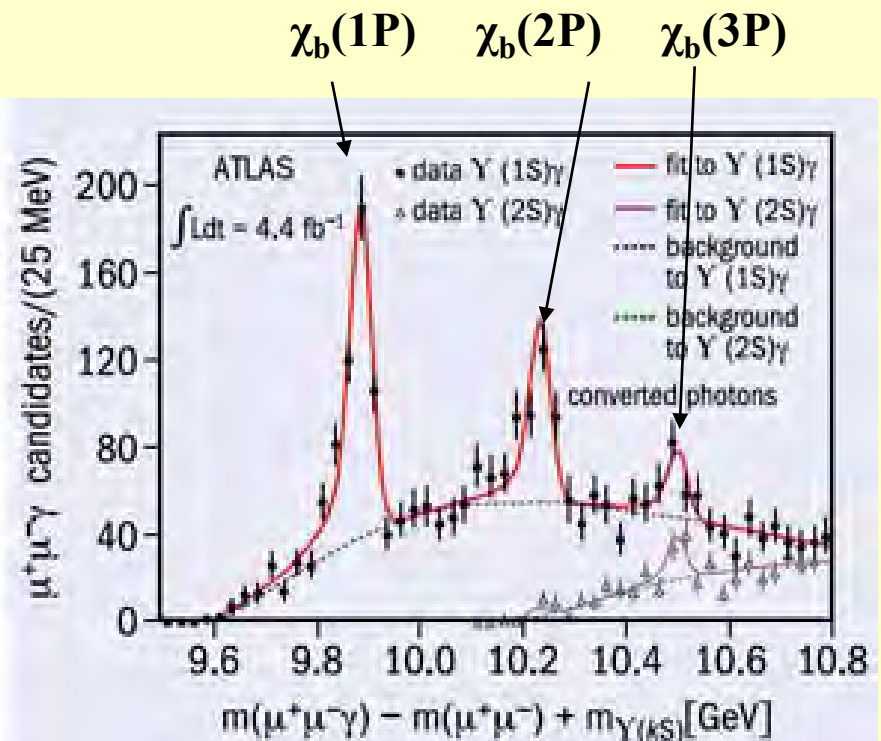
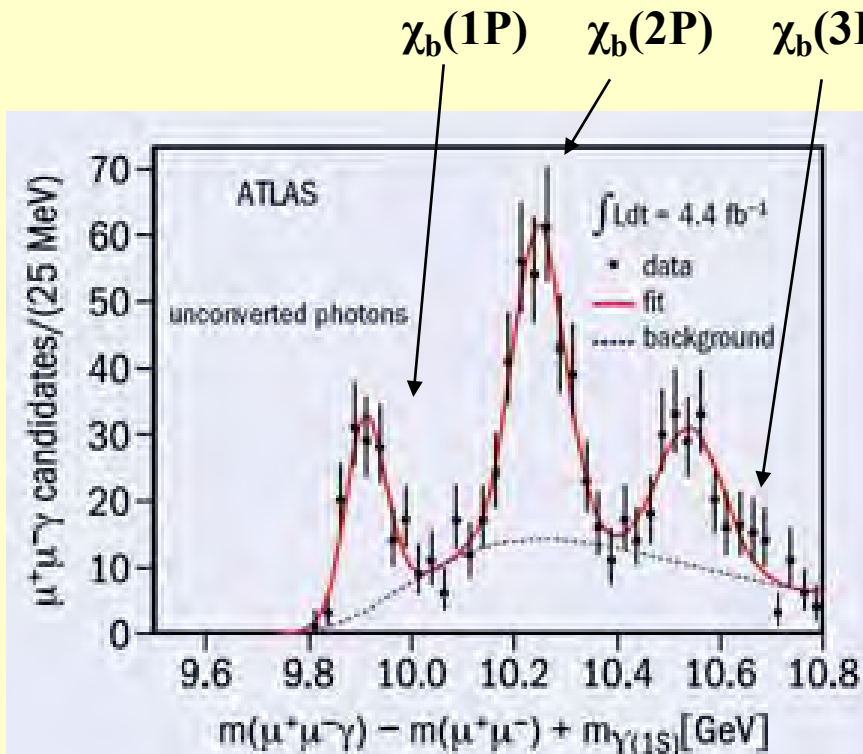
Je spojený s generací části hmotnosti

Gravitace stojí mimo standardní model – je velmi slabá a v mikrosvětě se neprojevuje

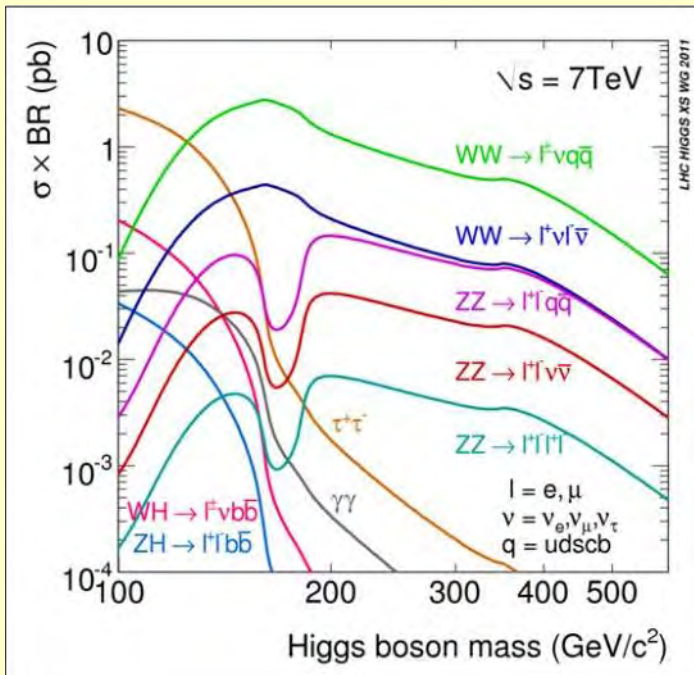
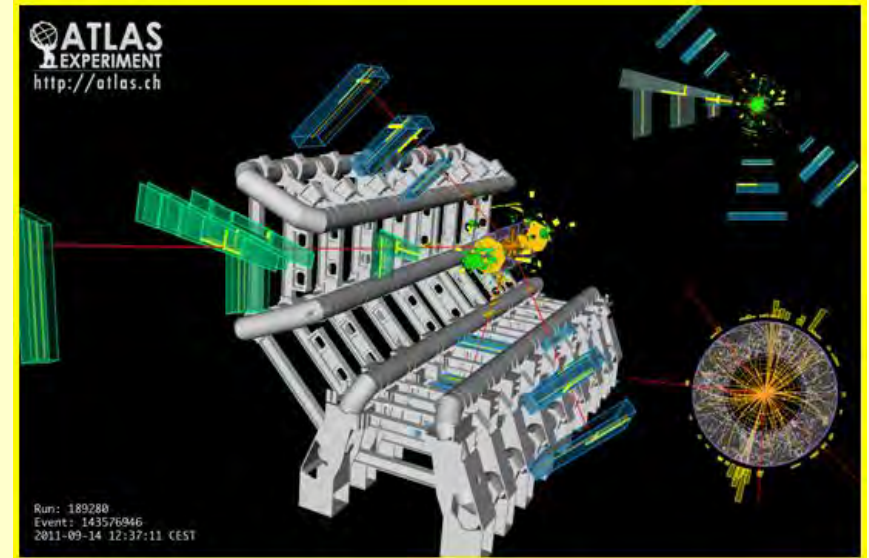
Nová částice $\chi_b(3P) = b$ anti- b

Další malý krůček ve spektroskopii hadronů

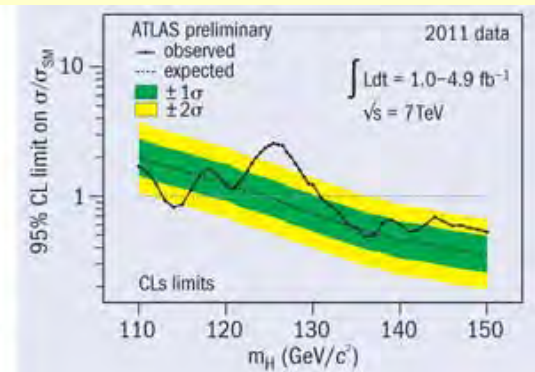
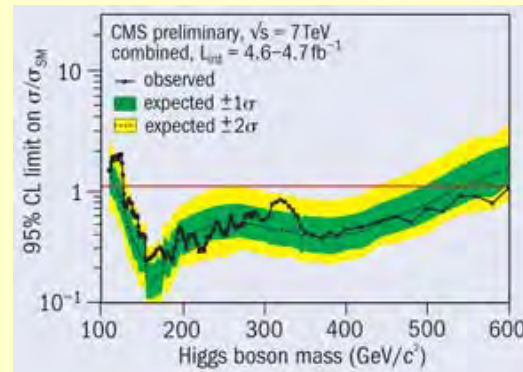
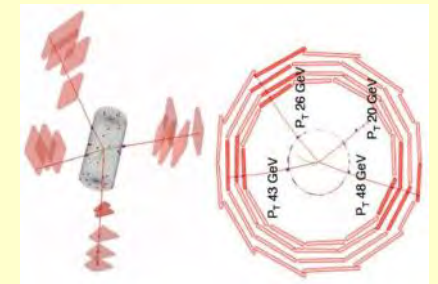
V budoucnu se dá čekat velký počet nových mezonů i baryonů (jejich excitovaných stavů)

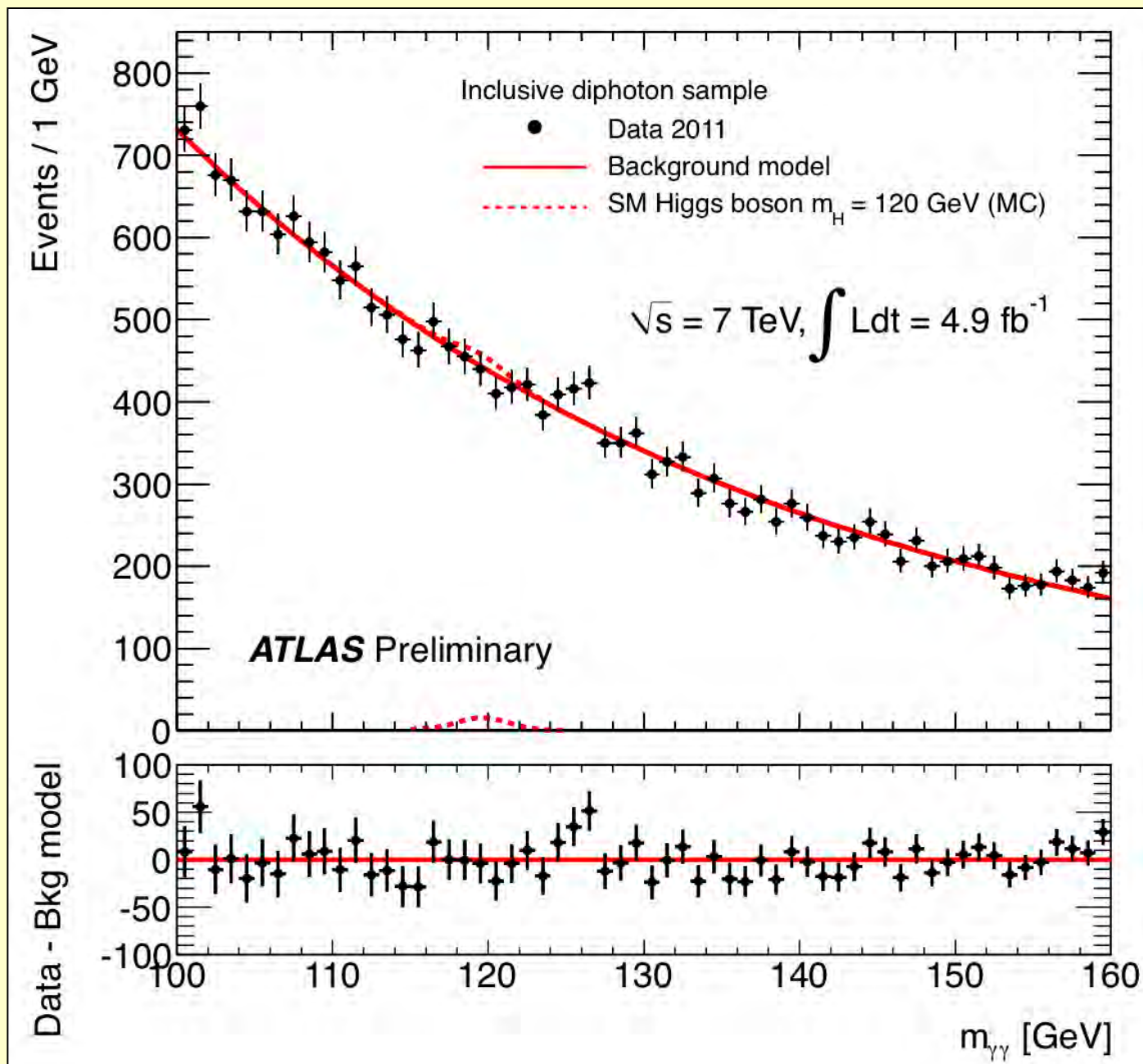


Náznaky pozorování Higgsova bosonu?

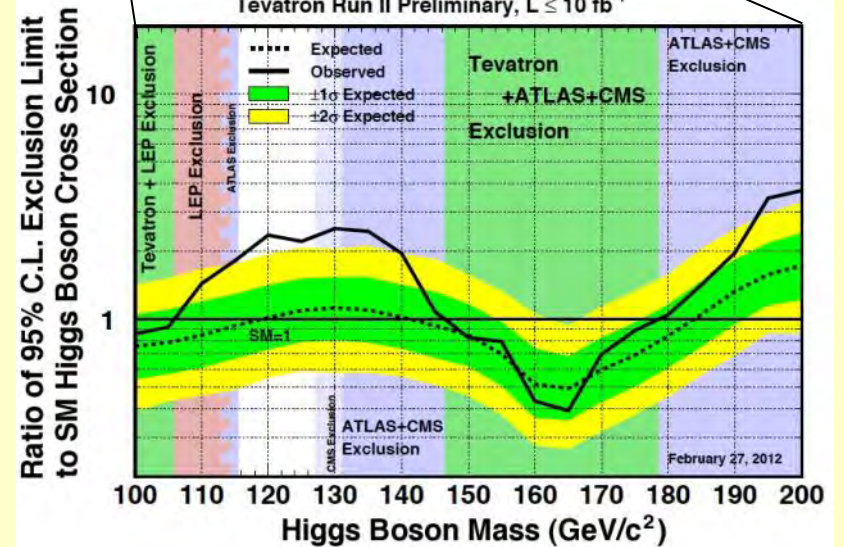
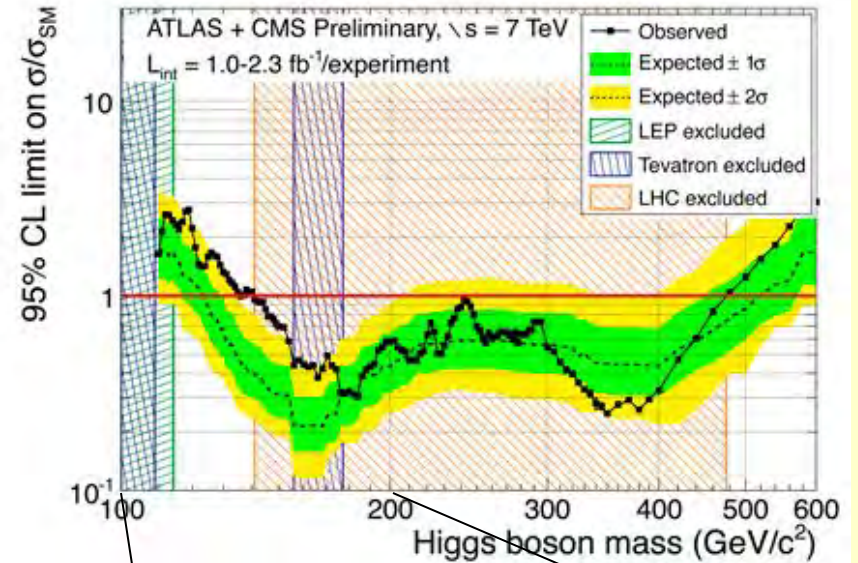
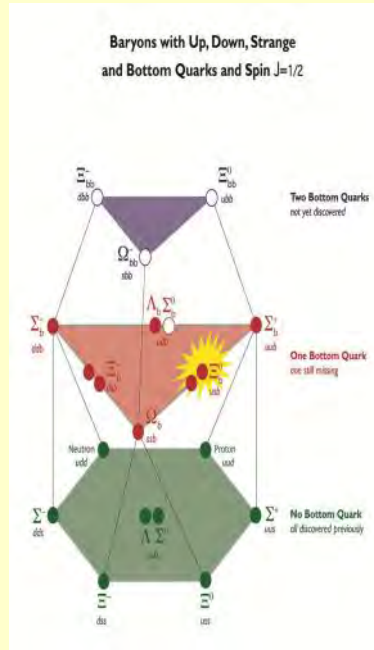
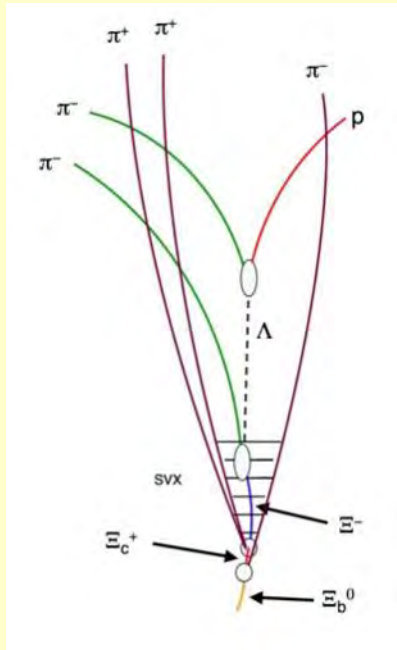


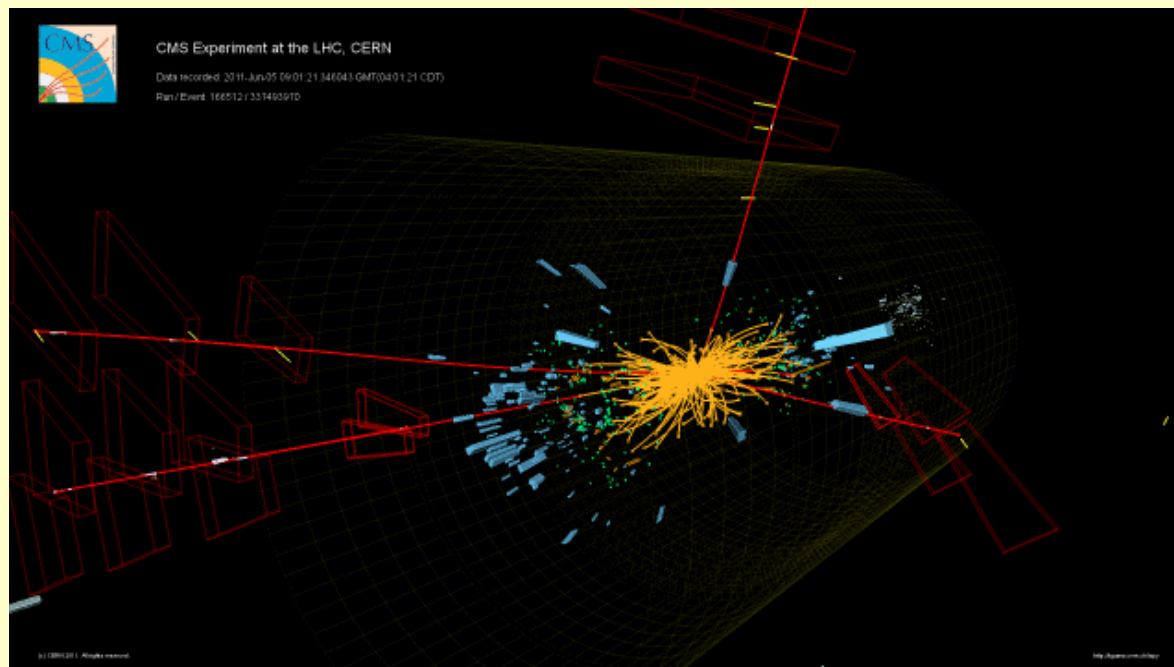
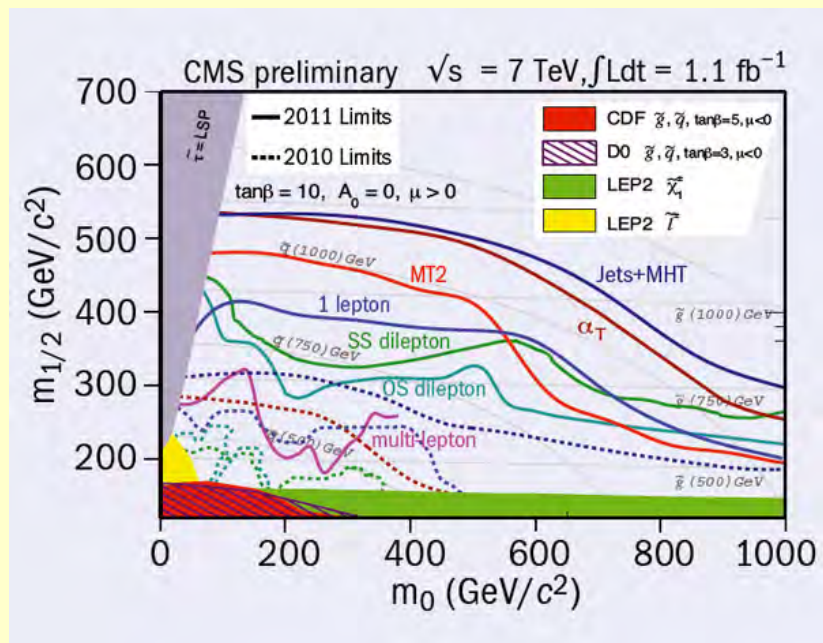
Problém s pozadím
Náznaky existence
higgse u energie 124 GeV



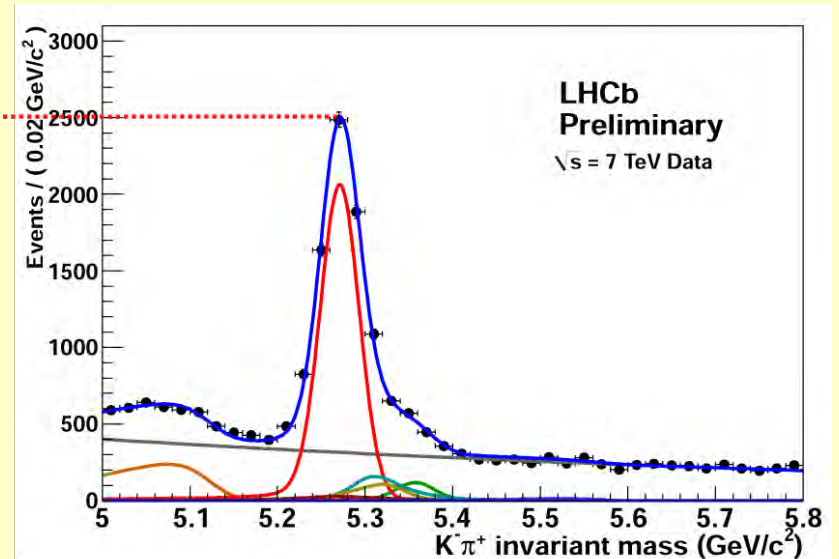
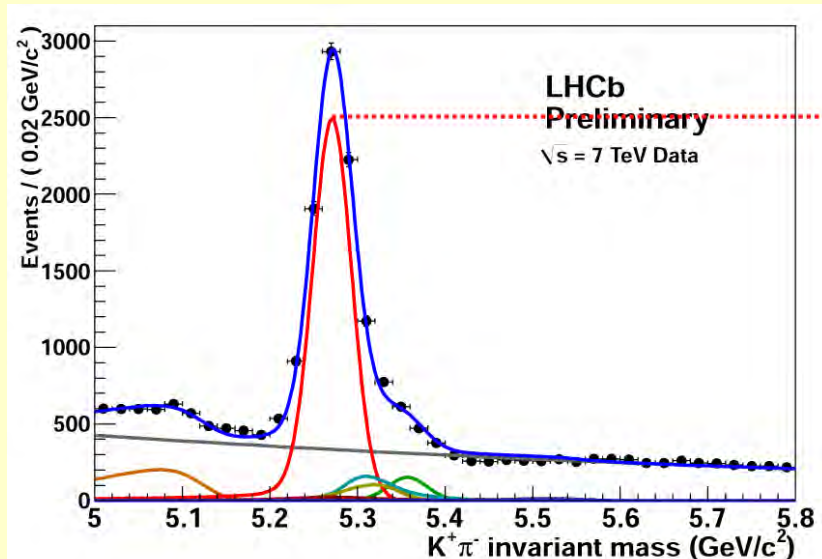


Tevatron skončil! Opravdu?

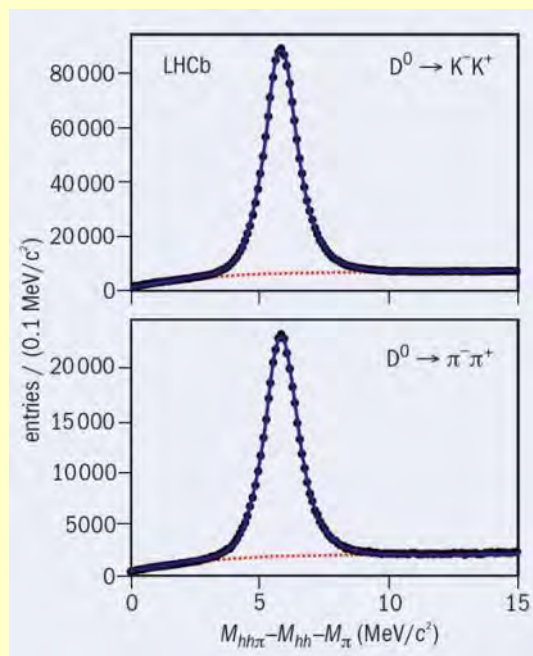
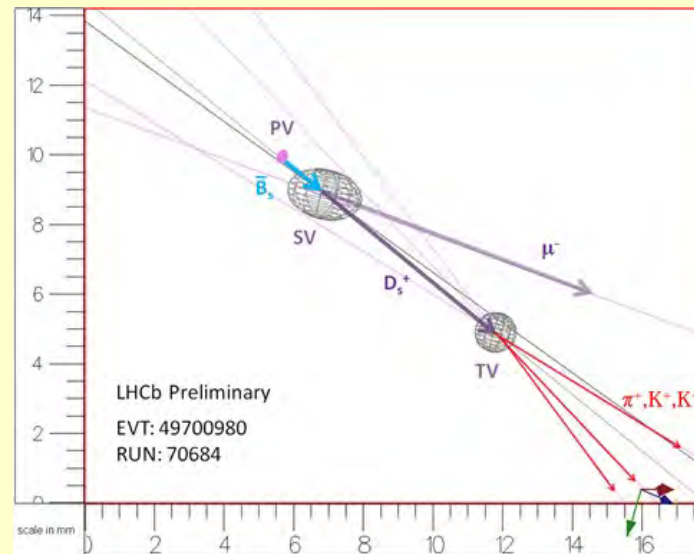




LHCb – studium rozdílu mezi hmotou a antihmotou



Rozpad B_d^0 částic a antičástic



Program na příští rok a poté

Zimní přestávka končí – start 14. března 2012 (práce v tunelu skončily 21 února)

Během ní vylepšení urychlovače i detektorů

ano

zatím ne

Přechod k vyšším energiím $3,5 \text{ TeV} \rightarrow 4,0 \text{ TeV}$, 1380 shluků $\rightarrow$ 2808 shluků

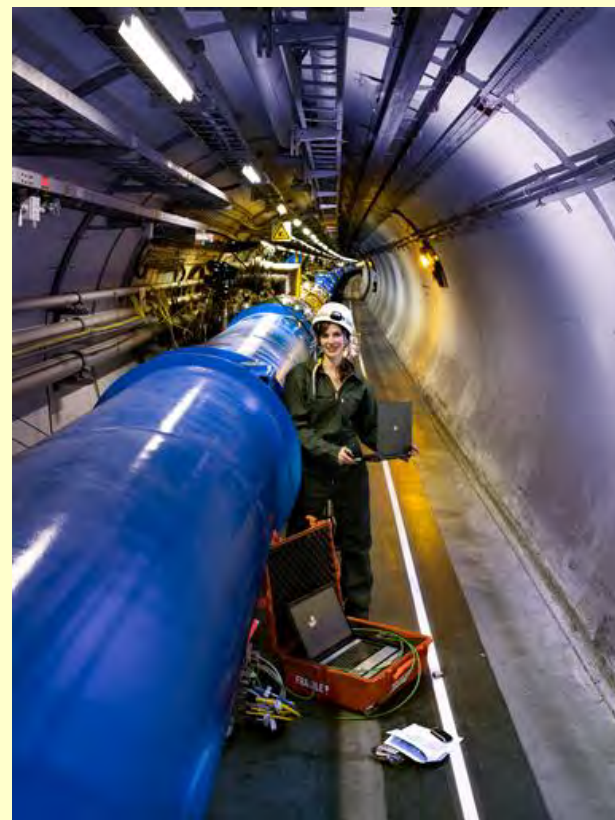
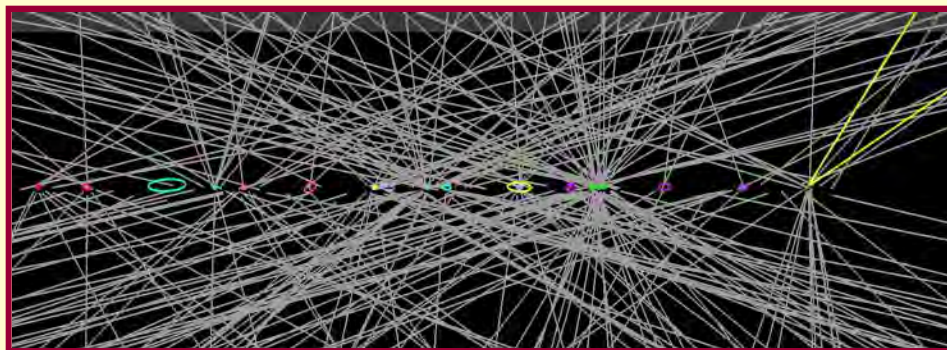
Plán pro rok 2012:

Experimentům ATLAS a CMS dodat každému
integrální luminositu 15 fb^{-1}

V roce 2013 – vylepšení a přechod na energii 7 TeV

Po roce 2020 velké vylepšení tak, aby se nabíralo
ročně 200 – 300 fb^{-1}

Později případné zvýšení energie na 16,5 TeV



Neutrina a jejich oscilace

Napadl mne zoufalý způsob, jak se vyhnout problémům se „špatnou“ statistikou jader dusíku a lithia a spojitého spektra v β -rozpadu ... možnost, že by v jádrech existovaly elektricky neutrální částice ... Hmotnost těchto „neutronů“ by ... neměla být větší než asi jedno procento hmotnosti protonu. V tomto okamžiku si netroufám tuto myšlenku publikovat



„Savannah
River Plant“

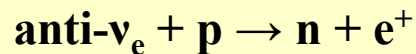
Wolfgang Pauli: Dopis účastníkům konference
fyziků v Tübingenu 14. 12. 1930

Částice – neutrální, je slabě interagující
s extrémně malou hmotností, spin 1/2

Pro potvrzení nutný intenzivní zdroj neutrin
→ reaktor

Spuštění reaktorů v 50. letech

Prokázání existence antineutrina z reaktoru: 1956



↙ ↘
Záchyt na Cd $\rightarrow \gamma$ anihilace $\rightarrow 2 \gamma$

10^{13} neutrin/cm²s detekováno 3 neutrina/hod



Fred Reines a Clyde Cowan rok 1953

Sluneční neutrína

$T = 14$ milionů K

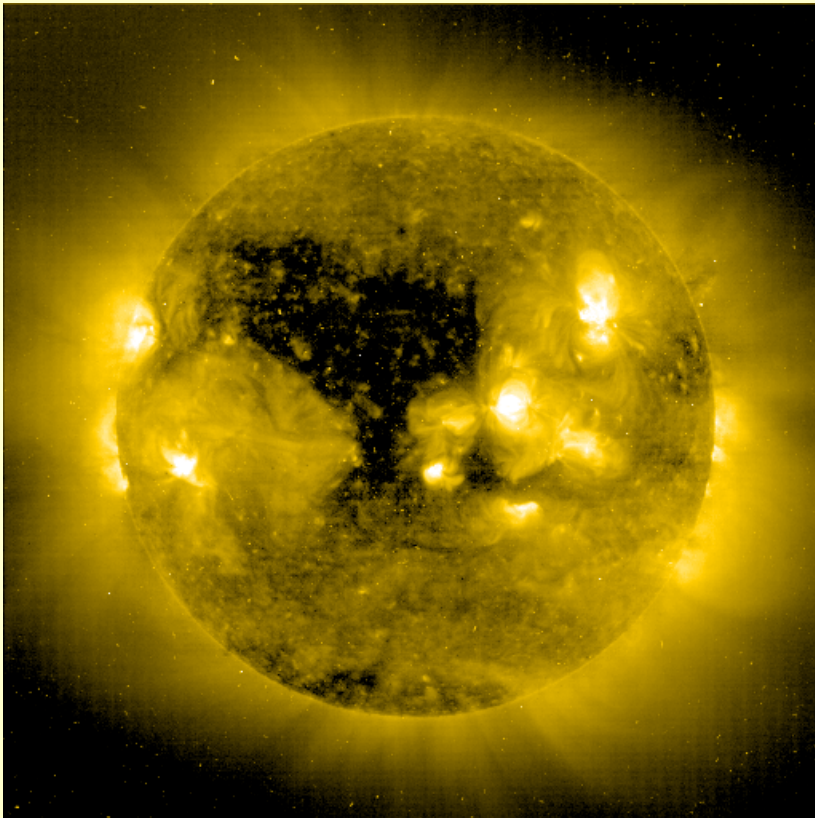
p-p cyklus 97% energie

CNO cyklus zbytek

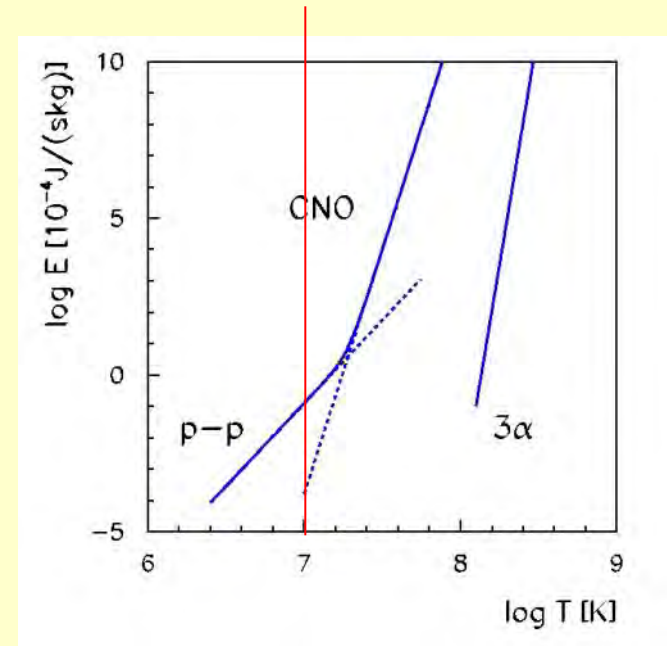
$2 \cdot 10^{38}$ neutrin/s

u Země:

100 miliard/cm²/s



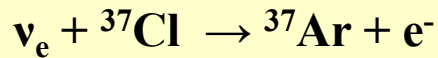
Teplota Slunce



Člověk zachytí průměrně 1 neutrino za život

Extrémní problémy s detekcí

Raymond Davis Jr. a detekce slunečních neutrin



Práh reakce 0,814 MeV

1958 - 11400 litrů chloridu uhličitého

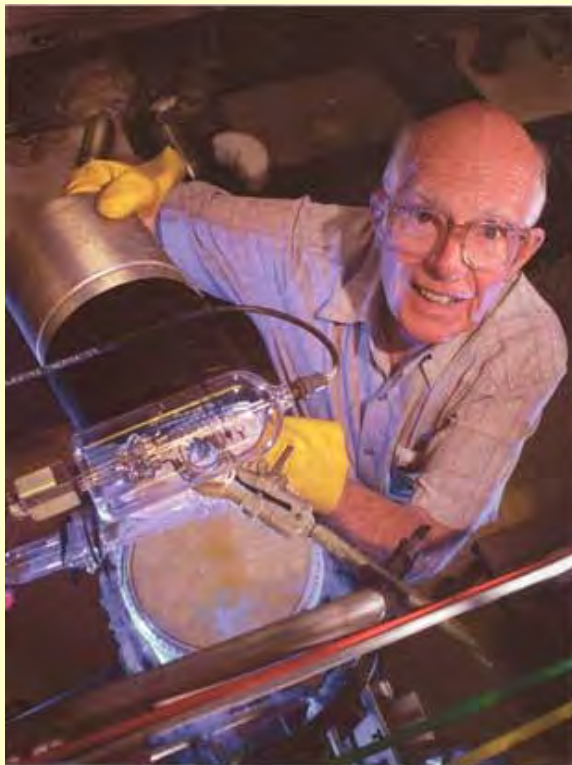
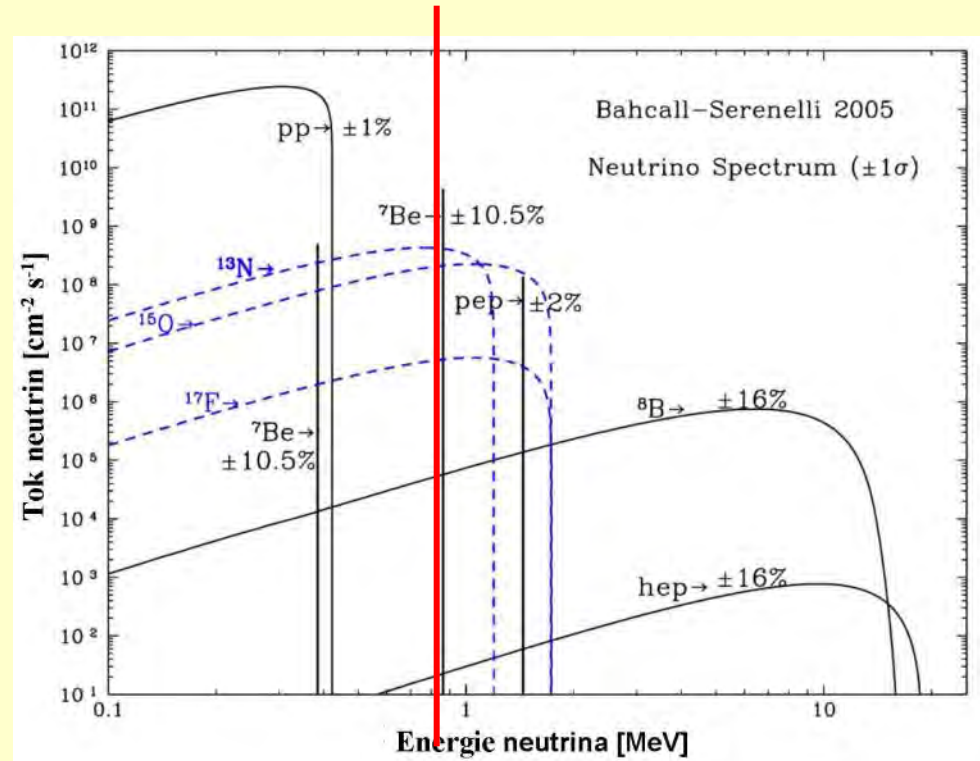


Photo courtesy of Brookhaven National Laboratory



„Libovolný experiment, který jako popisovaný nemá dostatečnou citlivost, se nemůže reálně vyslovit k otázce existence neutrina. Svůj postoj bych vysvětlil na tom, že nikdo by nenapsal vědecký článek popisující experiment, při kterém by vystoupal na vysokou horu a z toho, že nedosáhne na Měsíc, by odvodil, že Měsíc je více než dva metry od vrcholku hory.“

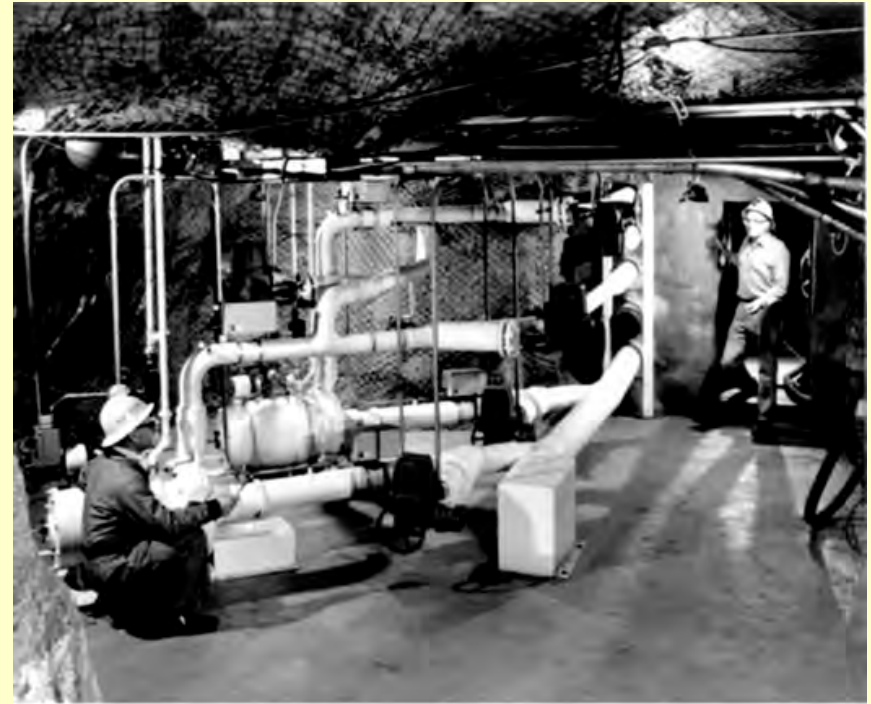
Nutné přesné sluneční modely – J. Bahcall



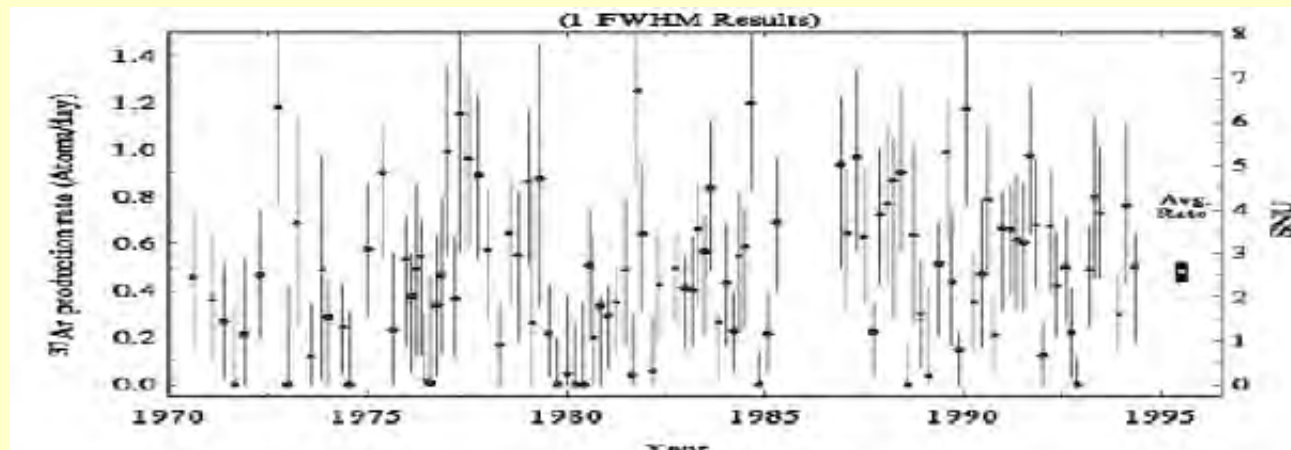
Hluboko pod zem: 1,5 km
(důl Homestake)

Pozorováno 2,5 SNU
Předpověď 8,6 SNU

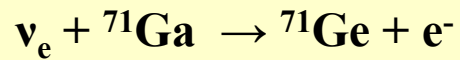
SNU = 1 reakce/ 10^{38} atomů
za den



378 000 litrů tetrachlorethenu C_2Cl_4



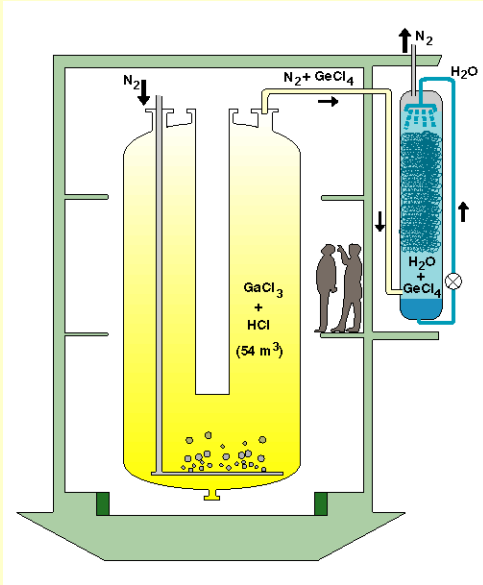
Ověření: galiový experiment (1990 - ...)



práh: 0,240 MeV

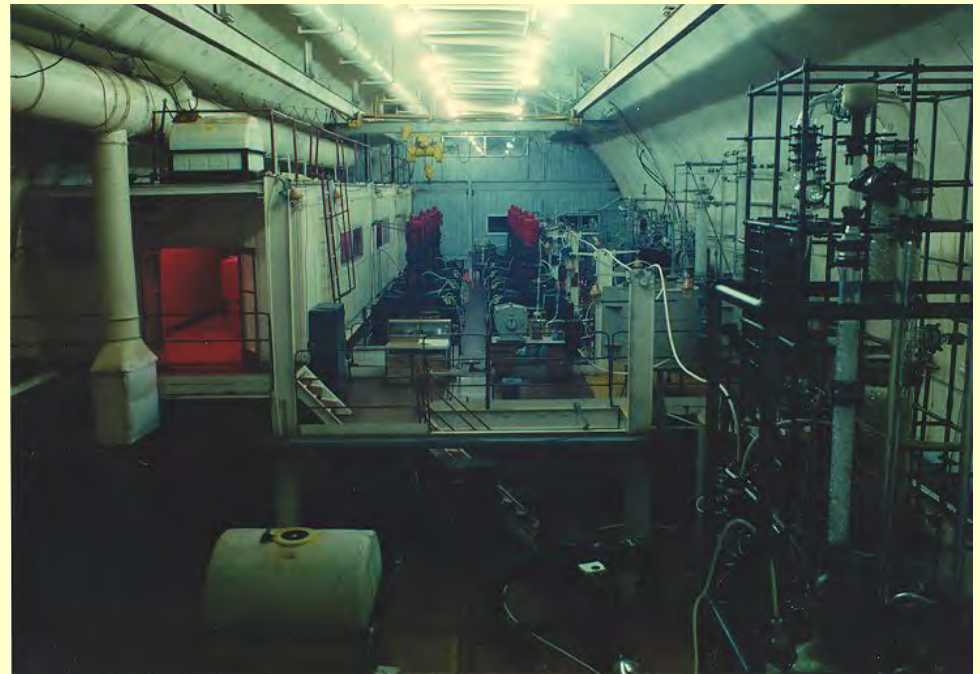
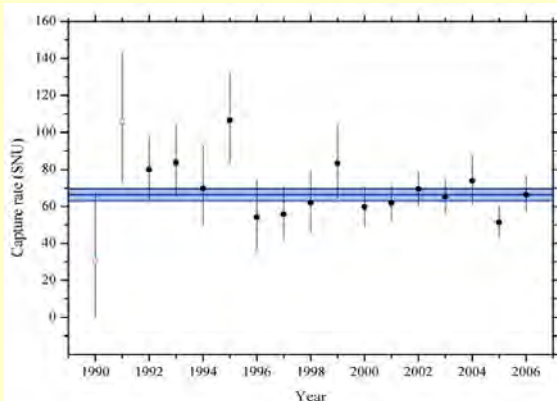
GALLEX - GNO
(Gran Sasso)
30 tun galia

Experiment: 68(7) SNU
Předpověď: 127(5) SNU



GNO skončil v roce 2006

SAGE (Baksan) 57 tun galia



Určení směru příchodu neutrin

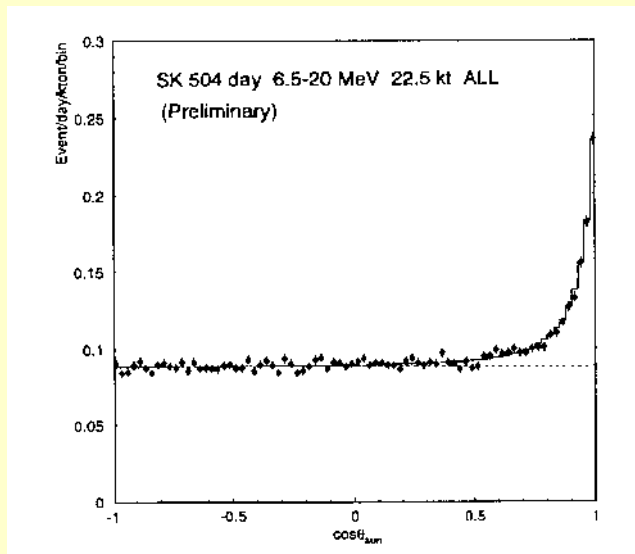
Čerenkovův detektor – nádrž vody SuperKamiokande 22 000 t – pracovní objem
50 000 t – celkový objem
11 000 fotonásobičů

Detekce pomocí rozptylu neutrin na elektronech ($n = 1,33 \rightarrow E_{\text{kin}}(e) = 0,25 \text{ MeV}$)

Práh: postupně šel od 9 do 5 MeV

Experiment: 0,47(2) SNU

Teorie: 1,00(17) SNU



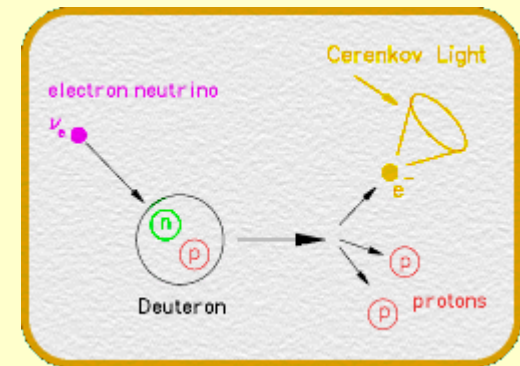
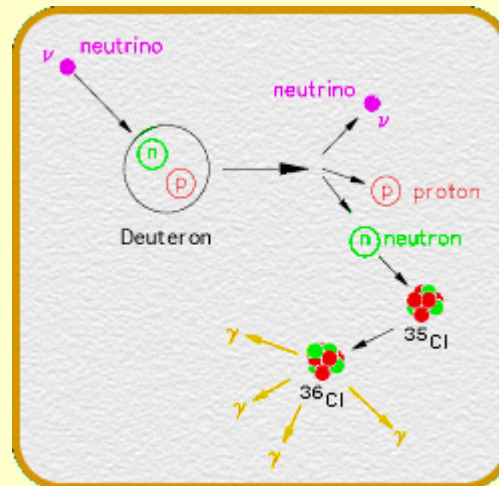
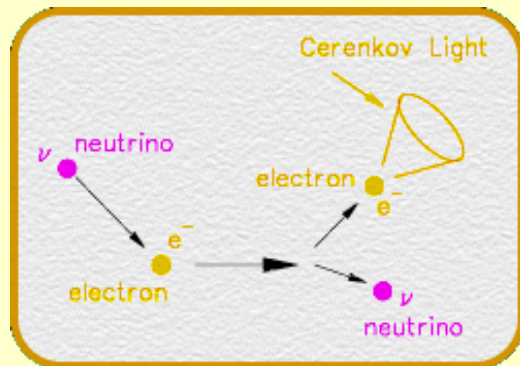
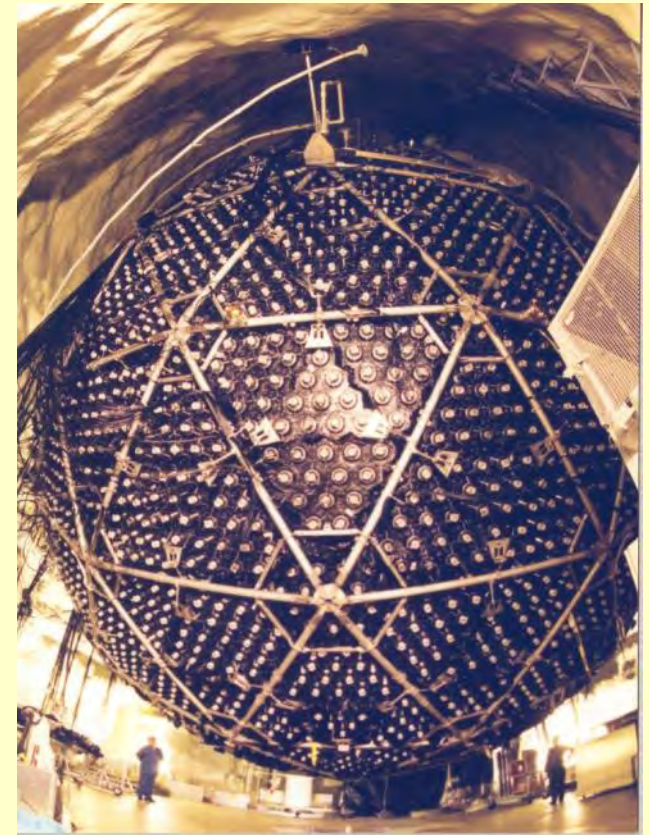
Detekce všech typů neutrin

Detektor s těžkou vodou SNO (1998)
(Sudbury Neutrino Observatory)

1000 t D_2O okolo 7000 t H_2O záznam 9500 fotonás.

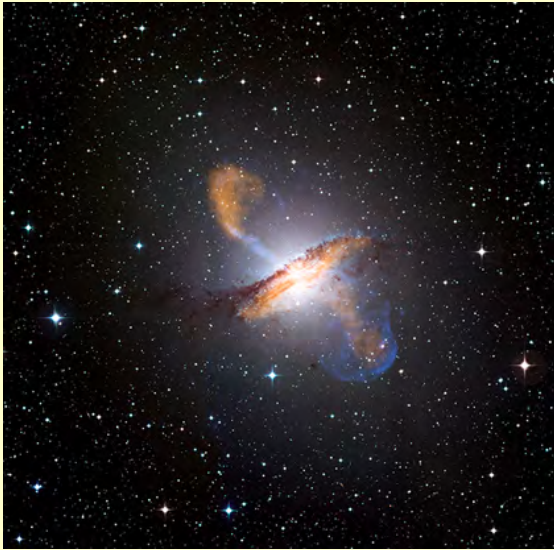
Energie potřebná k rozbití deuteronu 2,23 MeV

Elektronových neutrin – zhruba třetina
Všech neutrin - shoda s modelem Slunce



Klíčová reakce

Neutrina z kosmického záření



Primární složka – vysokoenergetické procesy

Tepelné – oblasti s extrémně vysokými teploty

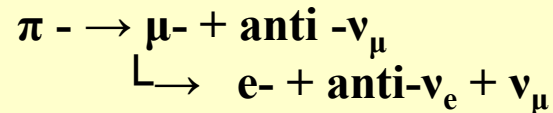
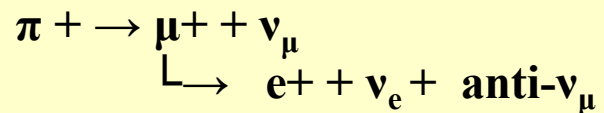
Reakce- vysokoenergetické procesy, přírodní urychlovače

Rozpad částic temné hmoty – těžké částice – vysoké energie neutrin



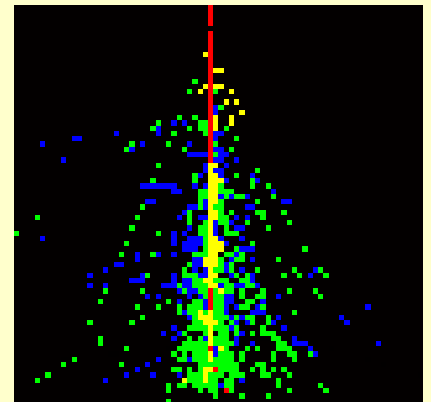
Sekundární složka:

Spousta mezonů π :

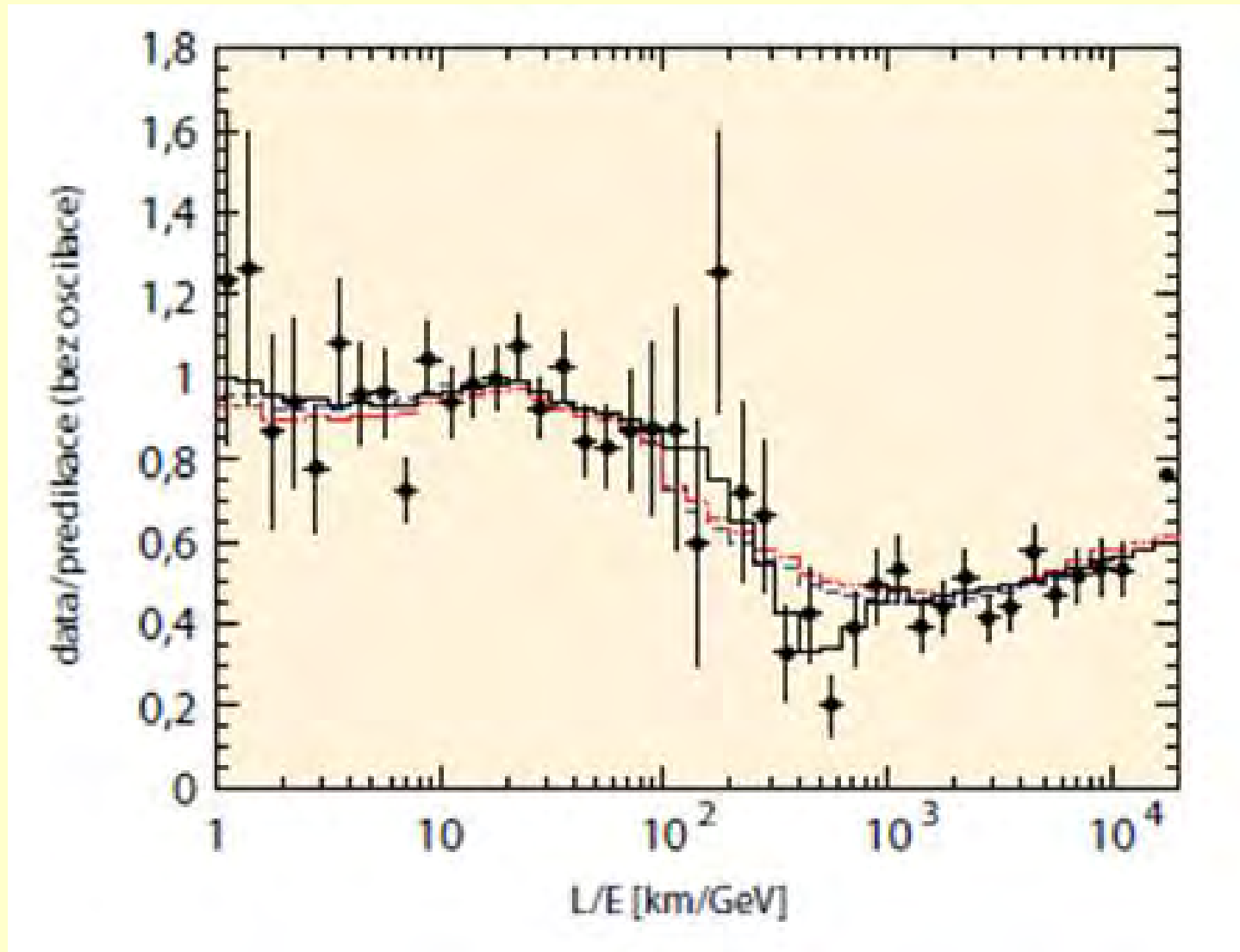


Intenzivní zdroj neutrin a antineutrin ν_μ a ν_e

poměr mezi počtem ν_μ a ν_e je $R(\nu_\mu/\nu_e) = 2$



Oscilace neutrin ze sekundárního kosmického záření



Jak se neutrino produkují pomocí urychlovače?



Urychlovací trubice SPS

Délka zařízení vytvářející neutronový svazek 1200 m

Vlastnosti svazku:

- 1) Čistá mionová neutrina (příměs antineutrin okolo 2%, elektronových neutrin méně než procento)
- 2) Střední energie 17 GeV
- 3) Průměr svazku v místě detektoru 2,8 km

- 1) Urychlení protonů pomocí PS a SPS až na energii až stovky GeV
- 2) Ve srážce s těžkým jádrem vznikají i nabitě mezony π
- 3) Pomocí magnetického pole se zformuje svazek kladně nabitých mezonů π
- 4) Kladně nabitě mezony se rozpadají na kladný (anti)mion a mionové neutrino
- 5) Miony jsou materiálem zastaveny a svazek neutrin letí směrem ke Gran Sasso



Přeprava magnetického „rohu“, který umožňuje formovat svazek nabitých mezonů π , na místo

Experiment CNGS

Studium oscilací mionového neutrina na tauonové
Měření rychlosti neutrina



CERN to Gran Sasso



Laboratoř
CERN

Zdroj neutrin

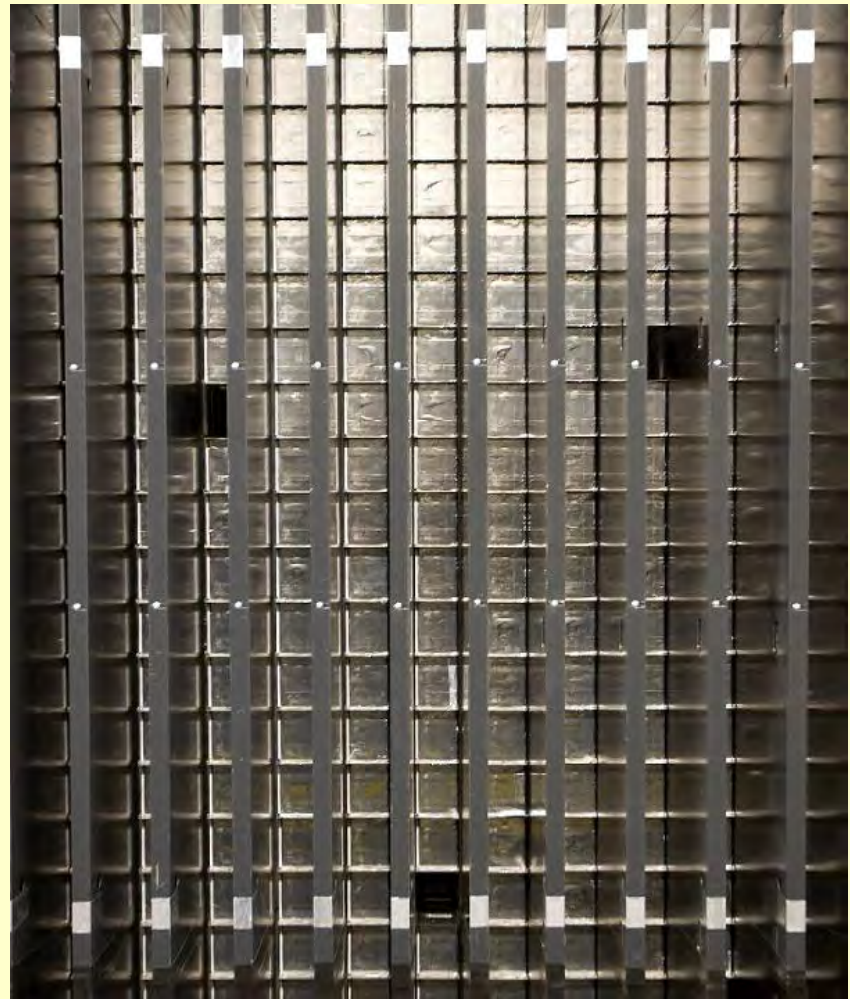


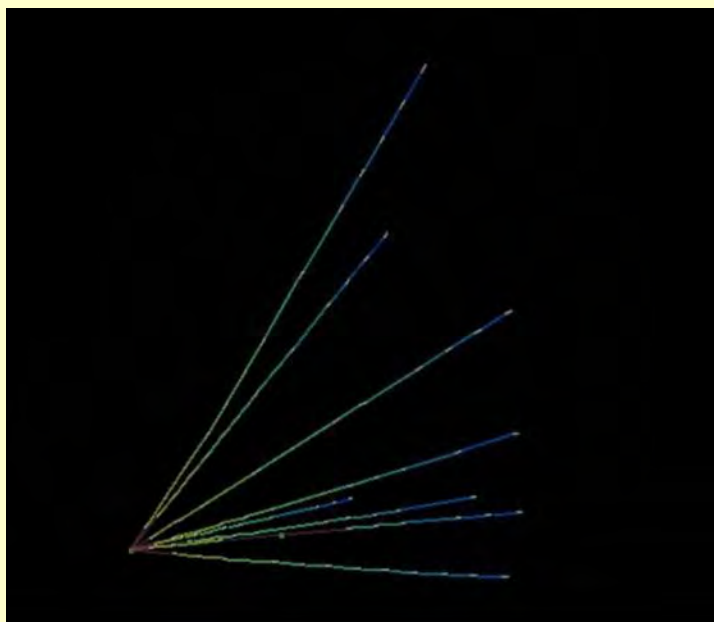
Podzemní Laboratoř
Gran Sasso

Detektor neutrin

Jak se neutrina detekují? – těžce :-)

- 1) Cihly s fotoemulzemi (150 000) – vznik a rozpad tauonu
- 2) Plastikové scintilátory – časový údaj
- 3) Magnetické spektrometry – hybnosti částic





První mion z mionového neutrina

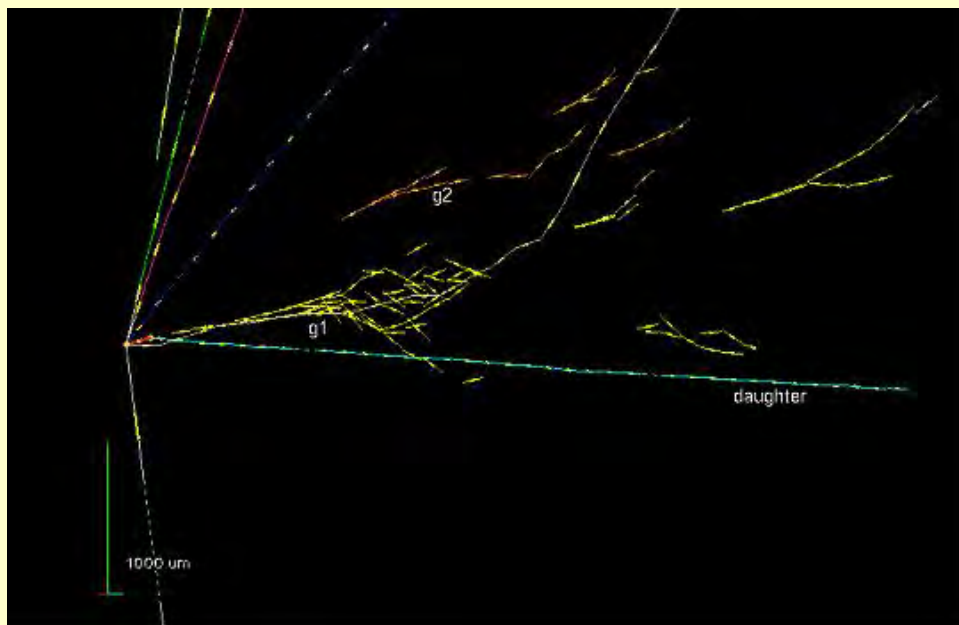
Spuštění zdroje neutrin – 2006

Dokončení systému OPERA – 2008

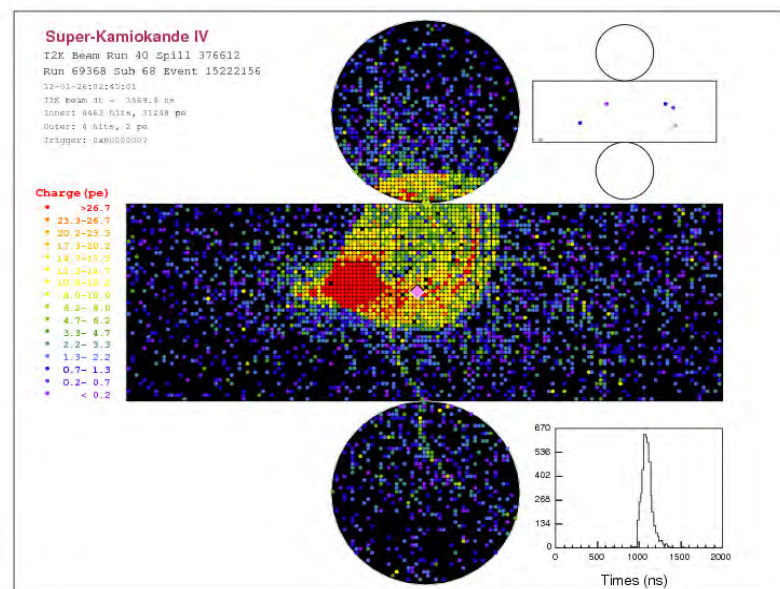
**První a zatím jediné tauonové
neutrino v roce 2010**

**Měření rychlosti neutrin – zhruba
dva roky**

**První tauon z tauonového
neutrina (květen 2010)**

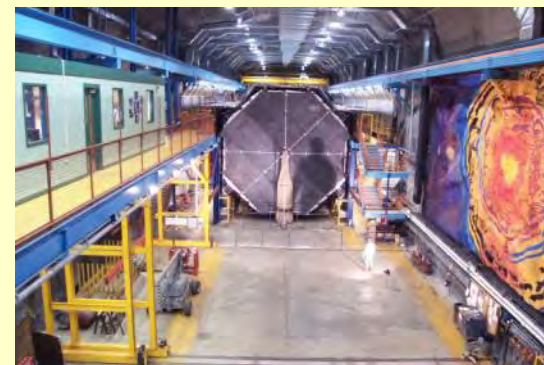
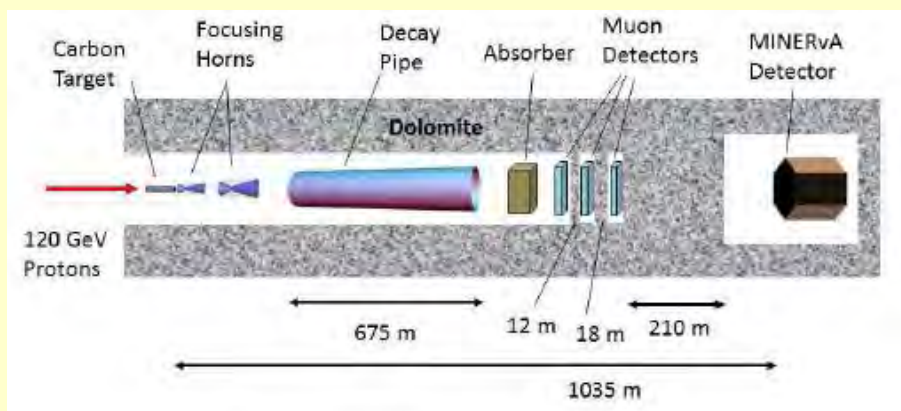


Další experimenty s oscilacemi mionových neutrin z urychlovačů

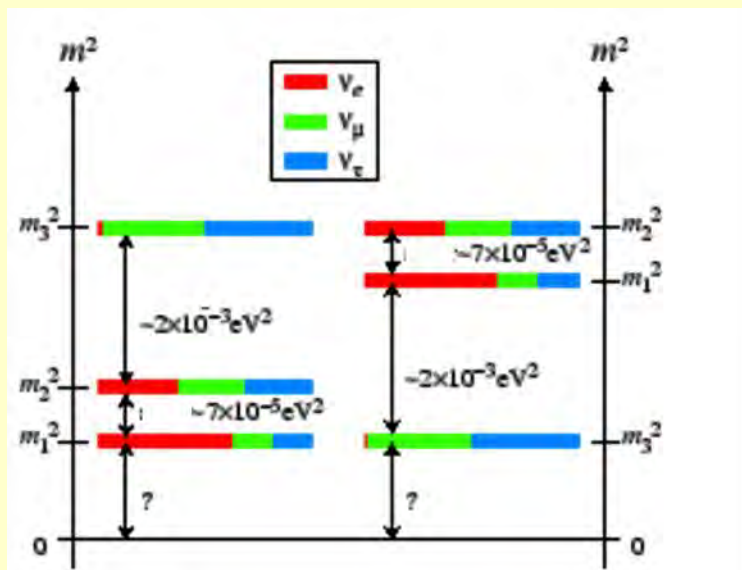


Monitor mionů pro T2K experiment První detekované neutrino po zemětřesení 3. 2 2012

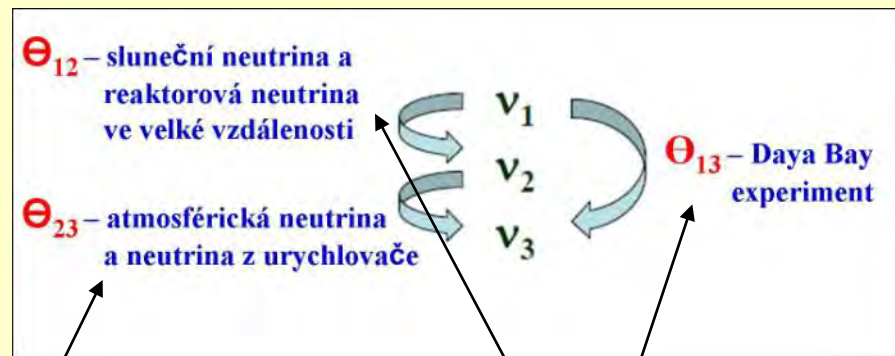
**NuMI ve
Fermilabu**



Experiment MINOS



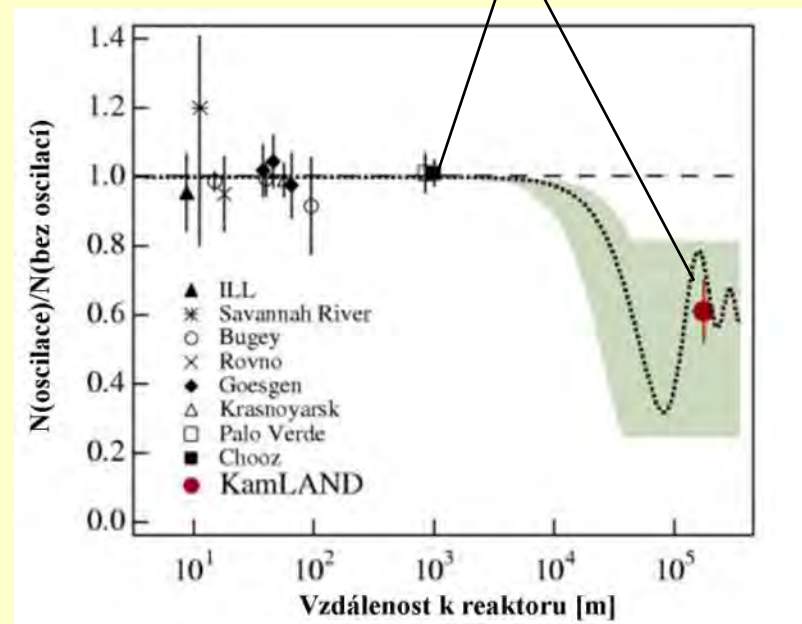
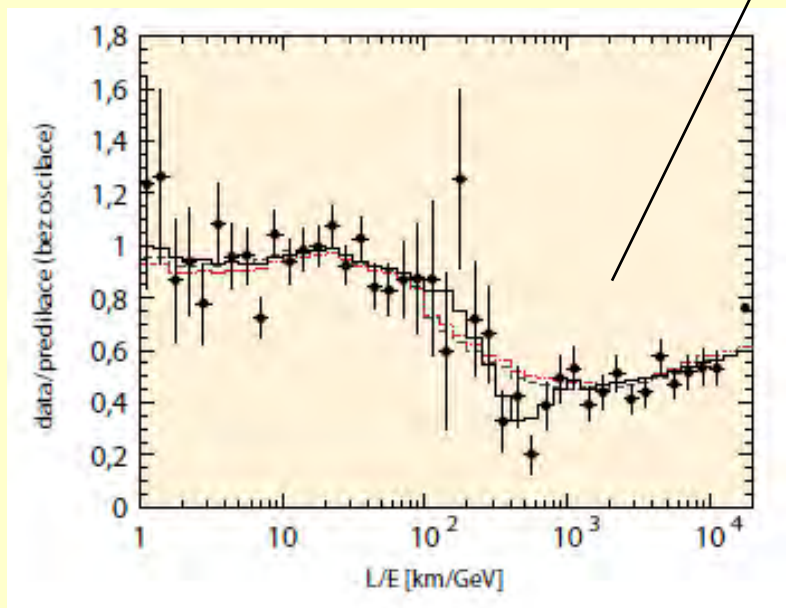
Rozdíl kvadrátů hmotností → alespoň dvě neutrina mají hmotnost



Vzdálené
Blízké

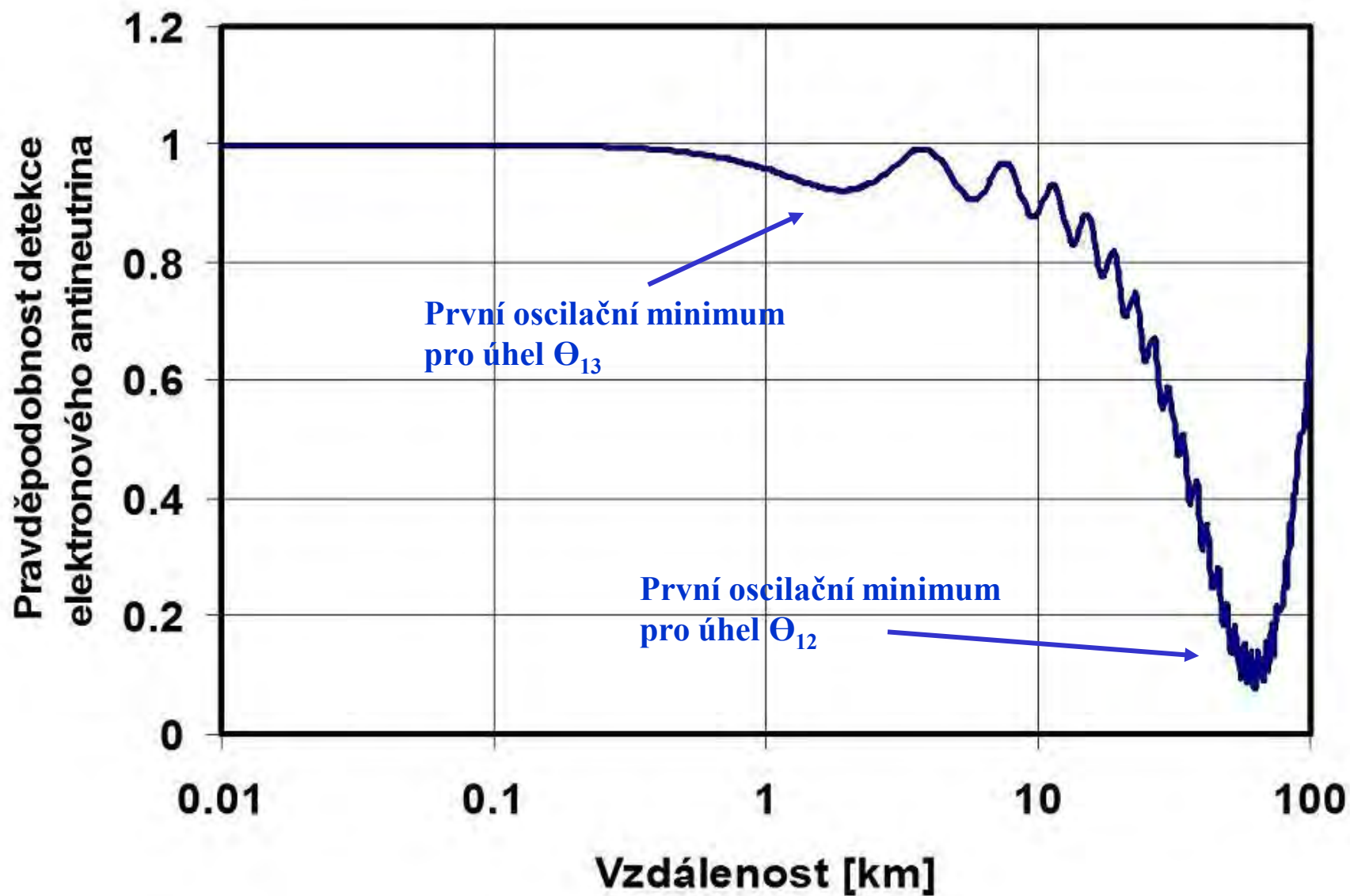
nízké energie
nízké energie

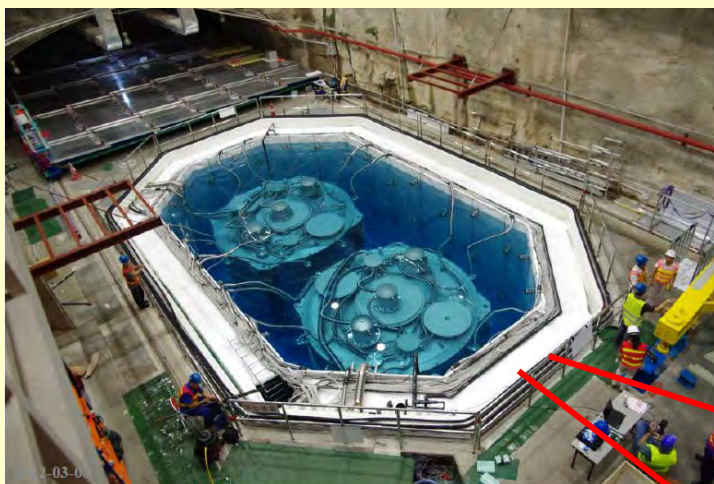
vysoké energie
vysoké energie



$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

Oscilace reaktorových neutrin



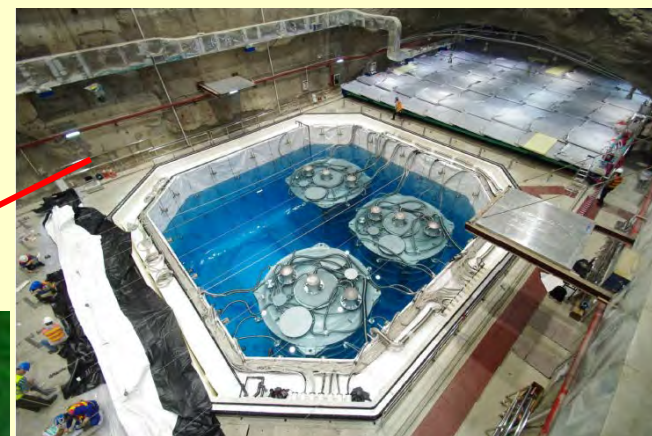


Blízke detektory

Daya Bay – 2 reaktory



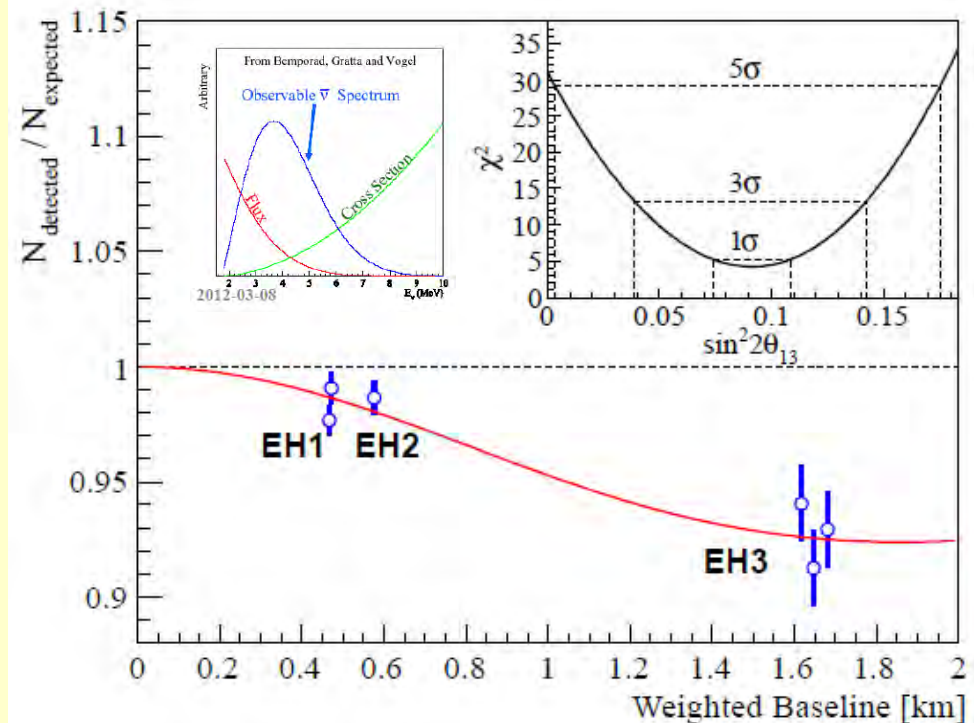
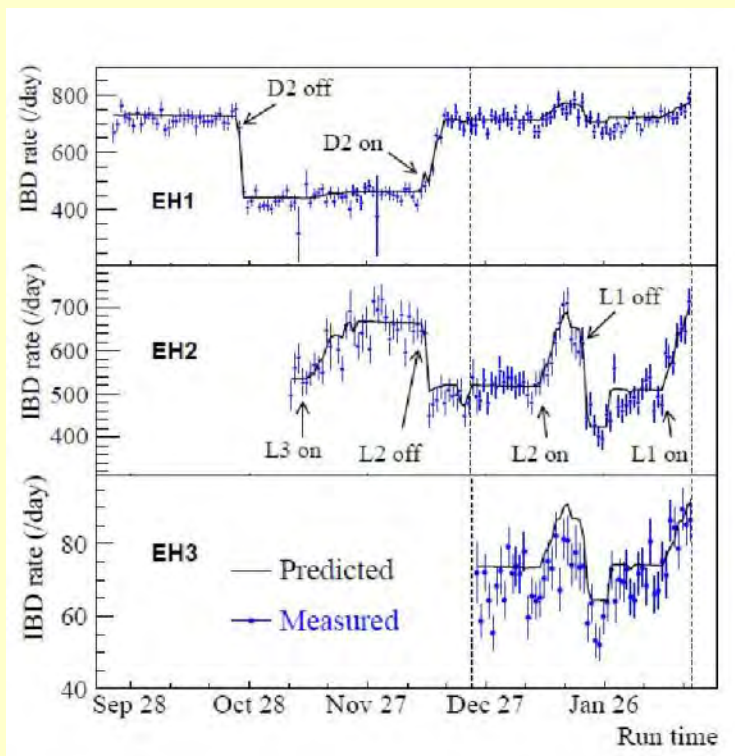
Ling Ao – 2 reaktory



Vzdálené detektory

Ling Ao II – 2 reaktory





$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$$

$$\chi^2/\text{NDF} = 4.26/4$$

$$5.2 \sigma \text{ for non-zero } \theta_{13}$$

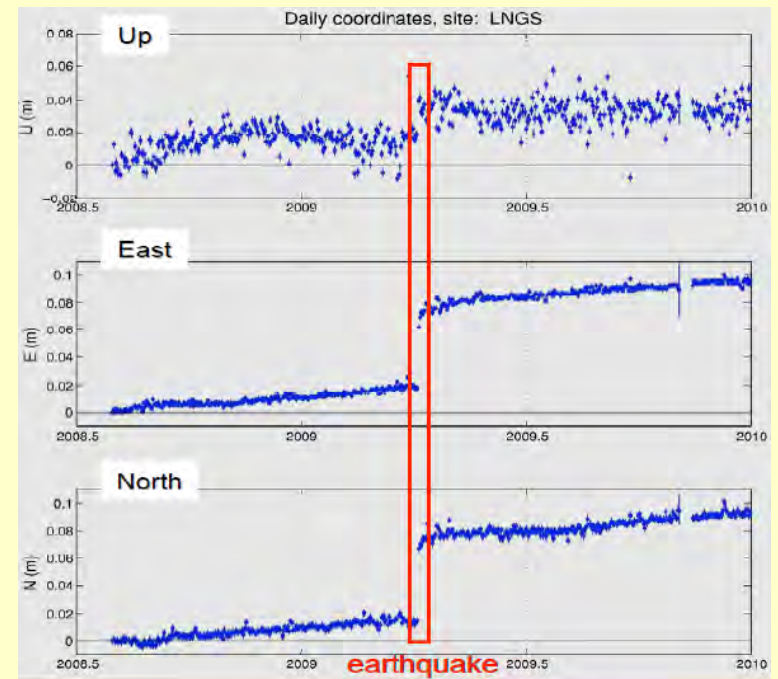
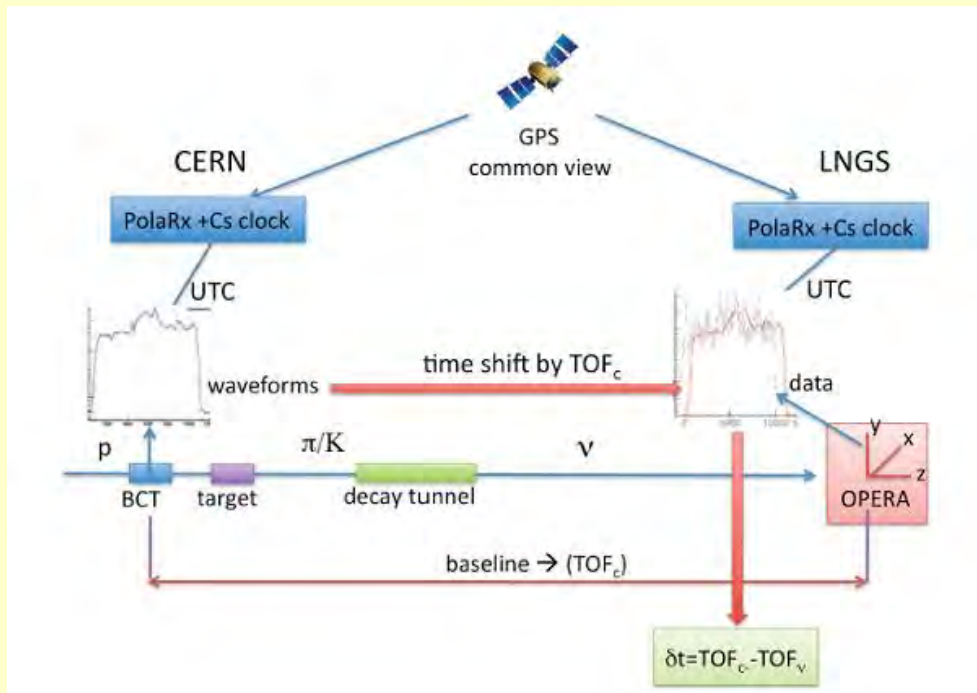
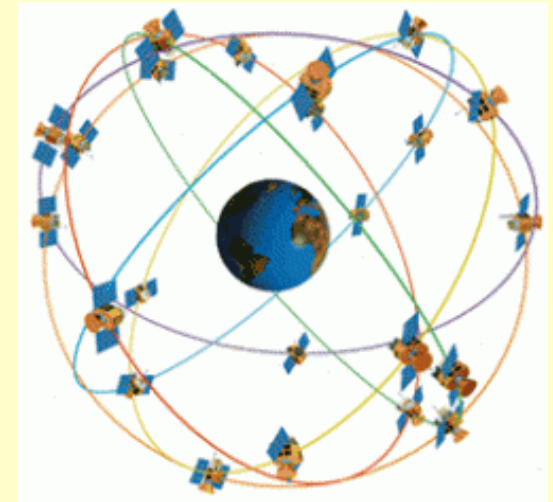
Nyní je možno měřit fázi spojenou z narušením CP a T symetrií

Určení času letu

Atomové hodiny v obou místech

Synchronizaci času i určení přesné vzdálenosti zajišťuje GPS

Nutnost velmi přesného určení umístění všech částí systému



Vliv zemětřesení v oblasti L'Aquila v roce 2009

Co se pozoruje?

Nelze přiřadit konkrétní neutrino ke konkrétnímu protonu a vzniklému mezonu π

Velký statistický soubor detekovaných neutrin $\rightarrow$ tvar neutrinového pulsu

Možnost hledat posun neutrinového pulsu vůči protonovému

Puls – délka 10 000 ns

Dva roky - 16 111 neutrin pomocí 10^{20} protonů

Přesnost určení vzdálenosti je 20 cm

Světlo 1 m znamená 3 ns

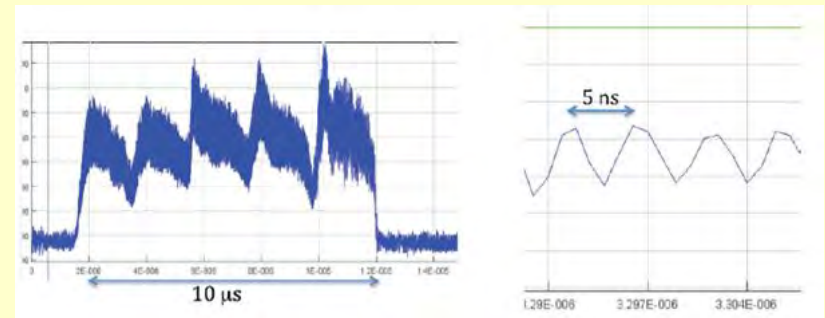
Vzdálenost 732 km $\rightarrow$ 2,43 ms

Předběžná kalibrace posun 1048,5 ns

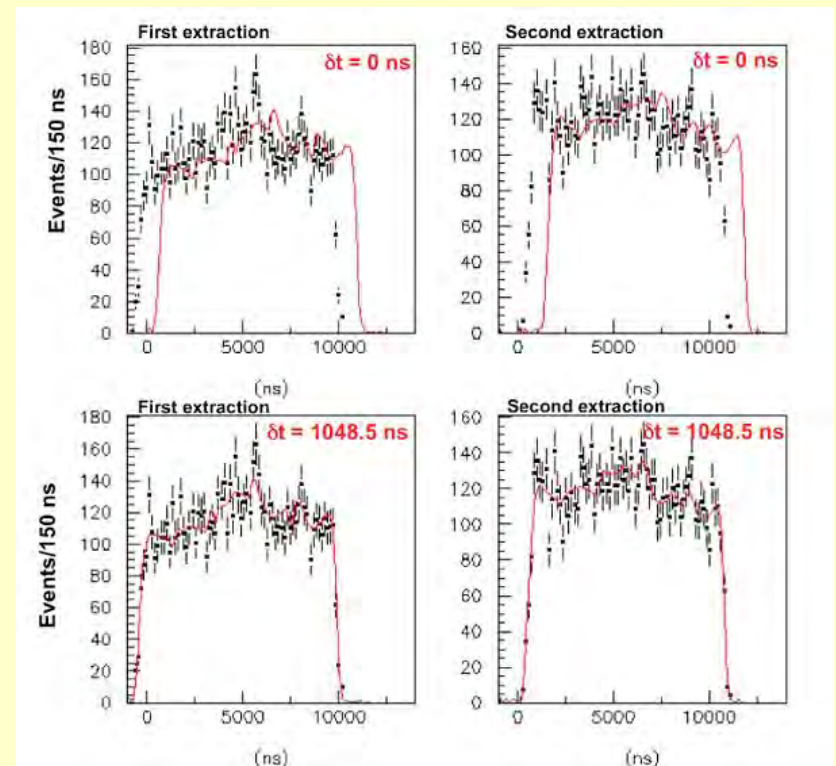
Korekce 987,8 ns

Rozdíl 60,7 ns $\pm 6,9$ ns
 $\pm 7,8$ ns

Neutrino o 2,48 tisícin procenta rychlejší

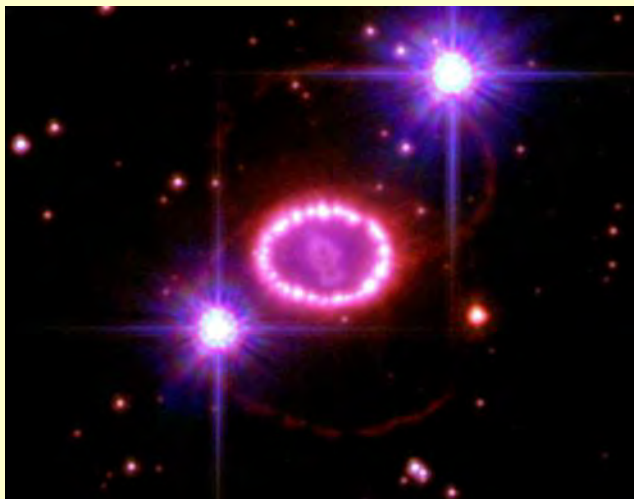


Jednotlivé pulsy svazku a jejich oscilace



Srovnání tvaru pulsu protonů a neutrin

Co říkají neutrino ze supernovy SN1987A?



Během výbuchu supernovy se produkuje zhruba 10^{58} neutrin

Vzdálenost SN1987A – 168 000 sv.let = **1,47 miliard sv.h**

Záblesk neutrin: trvání 12 s

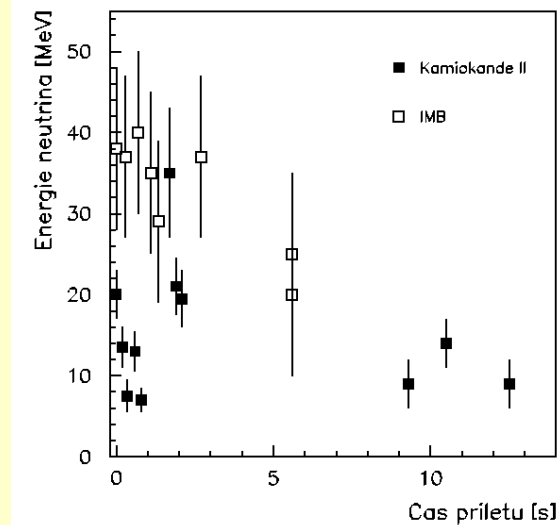
počet zachycených 24

elektronová (anti)neutrino (8 – 40 MeV)

Záblesk světla byl zaznamenán o méně než **3 h** později

Světlo se dlouho prodírá hmotou supernovy a uvidíme je jen, pokud zamíříme dalekohled správným směrem

Rozdíl mezi rychlostí světla a neutrina menší než **0,2 miliontiny procenta**



Nebyl rozdíl v přiletu neutrin s různou energií → hmotnost neutrina < 10 eV

Testovací experiment s krátkým pulzem

Zkrácení pulzů z urychlovače na 2 ns a 500 ns mezera

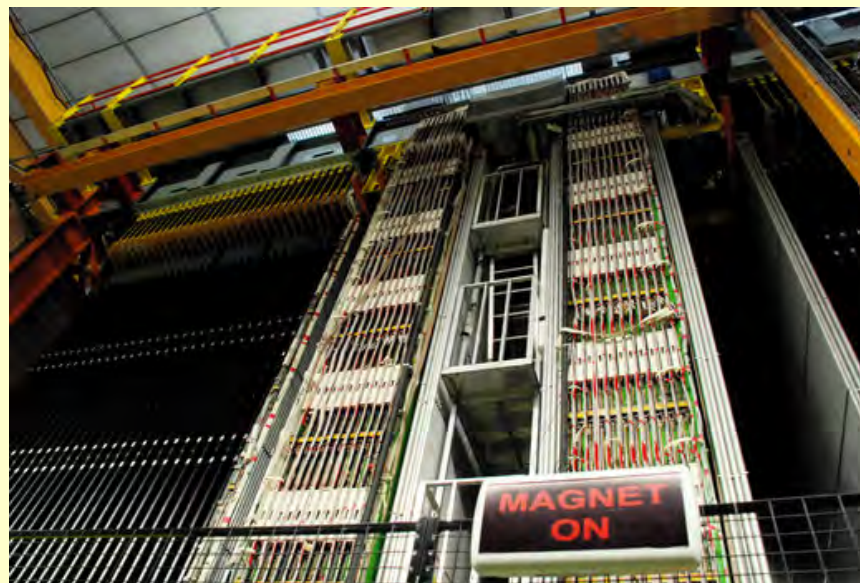
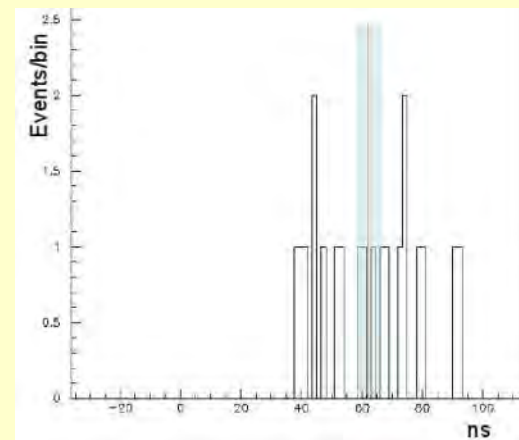
Je tak přesně definován čas, kdy neutrino vzniklo

Experiment běžel zhruba dva týdny

Jedno zachycené neutrino denně

Zhruba dvacet zachycených neutrin

Zatím pouze dva týdny, může stačit – další ozařování v květnu



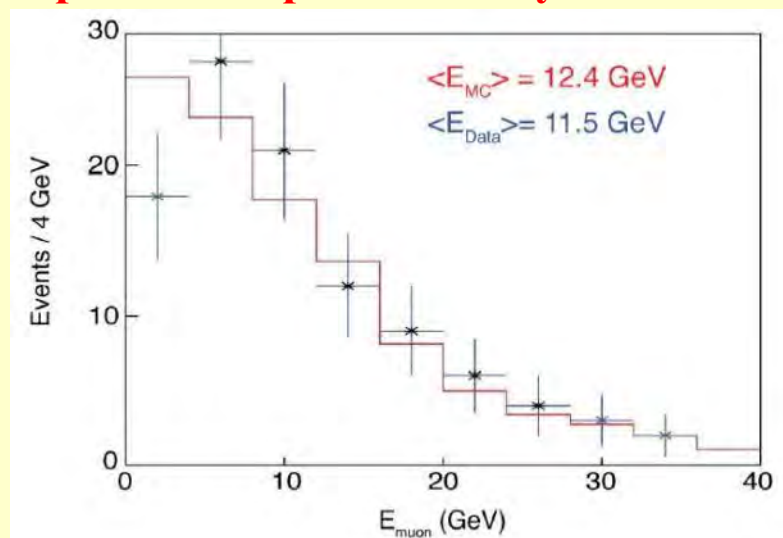
Experiment ICAROS

Také v Gran Sasso detekuje neutrína
z CERNu

Časově projekční komory s tekutým
argonem → **velmi přesné měření
energie neutrin**

Nezávislé časování a synchronizace času
Stejný pulzní režim → **sedm neutrin**

Nepozorován posun vůči rychlosti světla



Rozřešení se blíží

Experiment OPERA našel dva možné zdroje systematické chyby:

- 1) Oscilátor dodávající časové značky pro GPS synchronizaci
- 2) Optický konektor přenášející GPS signál do hlavních hodin OPERy

V květnu nový experiment s krátkými pulsy – využijí jej všechny experimenty v Gran Sasso



SPS pracuje pro neutrinovou produkci i pro LHC



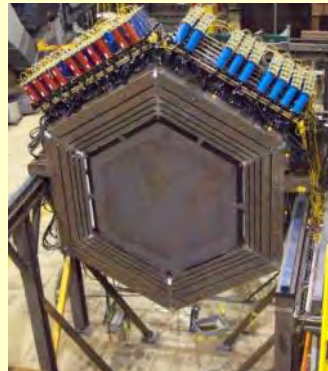
LHC odstartovalo z energií 4 TeV

Využití neutrin?

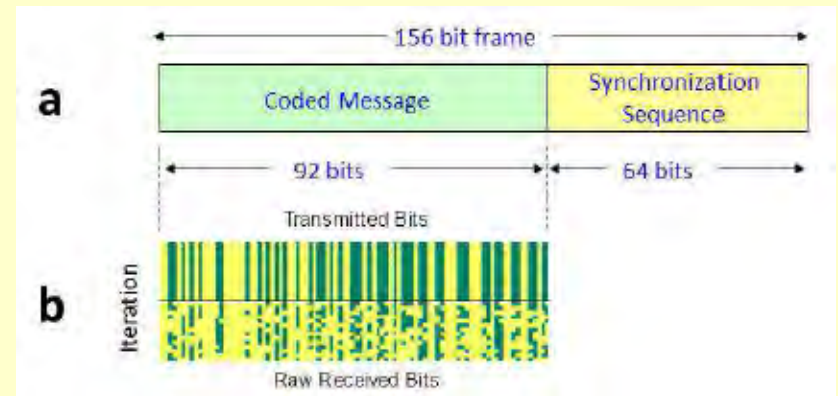
- 1) Komunikace s ponorkami
- 2) Identifikace tajných reaktorů
- 3) Rychlé spojení s protinožci
- 4) Tomografie Země a planet
- 5) Komunikace ve vesmíru v oblastech s velkou hustotou (pravděpodobnost interakce roste s energií)



Zdroj neutrin Numi



detekce Minerva



Poselství a jeho dekodování

Závěr

- 1) Intenzivní analýza získaných dat – nové informace o standardním modelu
- 2) Studium sQGP – stejné vlastnosti jako u energie urychlovače RHIC
- 3) Hledání higgse a dalších nových částic – v tomto roce se situace okolo higgse vyřeší
- 4) Nyní běží při energii 4,0 TeV, příští rok přestávka pro přechod k 7 TeV
- 5) Tevatron – koncem září skončil – největší objev t – kvark
- 6) Nové zajímavosti okolo neutrin, nadsvětelné rychlosti asi nemá, ale změřil se nejmenší ze směšovacích úhlů, první přenos informací pomocí neutrin



LHC - CERN



Fyzika neutrin