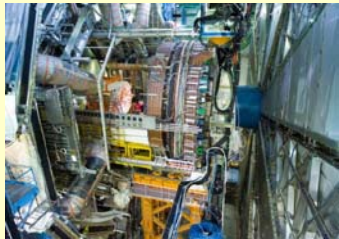


**LHC**  
není pouze

## Large Hadron Collider



ATLAS



CMS

ALICE



LHCb

**A Large Ion Collider Experiment**



# Alenka

v

**krajině velmi horké a husté jaderné hmoty  
a na počátku našeho vesmíru**



*„Díky posledním pokrokům se v ohnisku pozornosti ocitly nové záhady. ... Týkají se onoho prvního, pranepatrného zlomečku sekundy po velkém třesku, kdy vládly natolik extrémní podmínky, že fyziku, jež tehdy platila, prozatím neznáme ... Během tohoto počátečního okamžiku bylo všechno stlačeno na tak nezměrně vysokou hustotu, že se v ní kosmos a mikrosvět prolínaly v jednom.“*

Martin Rees: „Pouhých šest čísel“

**Vladimír Wagner**

Ústav jaderné fyziky AVČR, 250 68 Řež, E\_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ, WWW: [hp.ujf.cas.cz/~wagner/](http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/)

## 1. Úvod

## 2. Superhorké a superhusté stavy hmoty

2.1 Nejteplejší a nejhustší hmota  
v laboratoři

2.2 Stavová rovnice takové hmoty

2.3 Fázové přechody

## 3. Horké kvark-gluonové plazma – počátek vesmíru

3.1 Co to je a jak jej zkoumat?

3.2 Podařilo se je prokázat?

3.3 V čem se liší skutečnost od  
předpovědi?

## 4. Alenka na cestě k počátkům vesmíru

4.1 Urychlovač LHC a experiment ALICE

4.2 Jak ALICE vypadá?

## 5. Závěr

**Czech teachers program 03/2008  
CERN**

# Jak získat nejhustší a nejteplejší hmotu v laboratoři

**Proč:** Studium hmoty existující ve vesmíru  
Pochopení fundamentálních vlastností  
silných interakcí a vakua

**Jak:** Urychlovač – produkce husté a horké hmoty  
(možnost prokázal urychlovač BEVALAC)  
Experimentální zařízení – studium této hmoty

**Dosažená teplota:**  $\sim 180 \text{ MeV} = 2,1 \times 10^{12} \text{ K}$

**Dosažená hustota:**  $\sim 4 \rho_0 \sim 10^{18} \text{ kg/m}^3$

80. léta – začátek studia horké a husté hadronové hmoty

Začátek 21. století – studium kvark- gluonového plazmatu



Soustava s neutronovou hvězdou v představách malíře



Budovaný urychlovač LHC

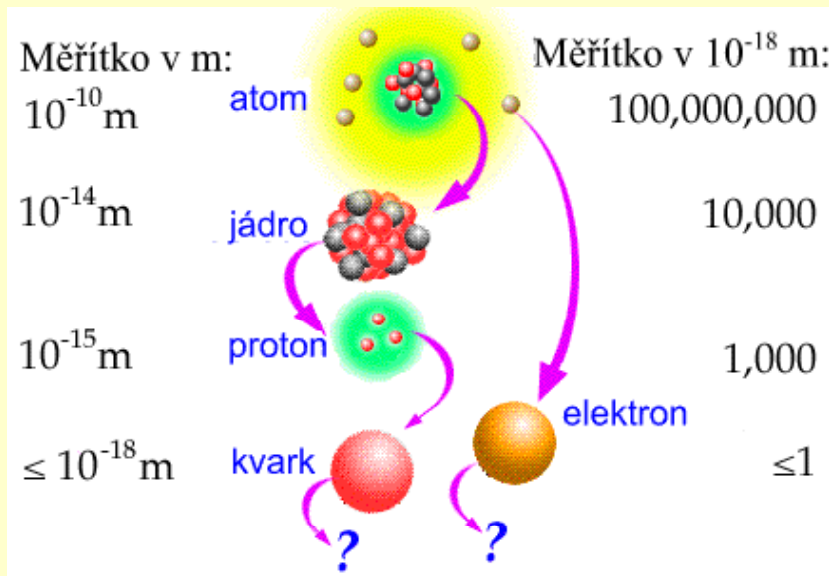


RHIC a LHC jsou kuchyně pro vaření kvark-gluonové polévky



# 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)?

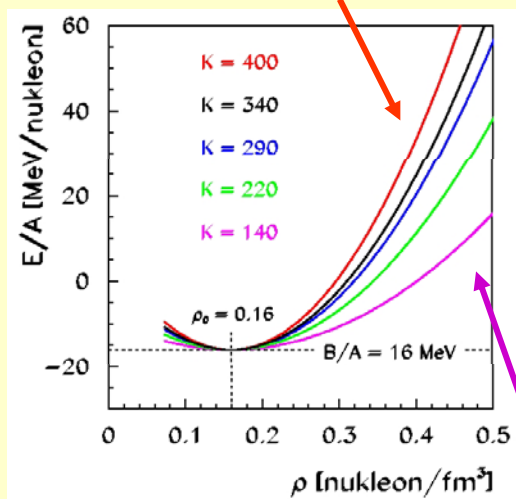
Hustota vody  $10^3 \text{ kg/m}^3$   $\xleftarrow{R_{\text{ATOM}}/R_{\text{JÁDRO}} \sim 10^5 \rightarrow V_{\text{ATOM}}/V_{\text{JÁDRO}} \sim 10^{15}}$  Hustota jádra  $\sim 10^{18} \text{ kg/m}^3$

**Důležité nástroje pro popis mikrosvěta:**

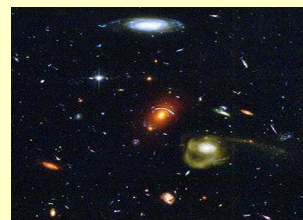
- 1) **Speciální teorie relativity** - rychlosti blízké rychlosti světla, kinetická energie srovnatelná s klidovou
- 2) **Kvantová fyzika** - velmi malé hodnoty veličin  $\rightarrow$  kvantový a pravděpodobnostní charakter, Heisenbergův princip neurčitosti

# Stavová rovnice – fáze jaderné hmoty

„tvrdá“ jako ocelová koule



pára



počátek vesmíru

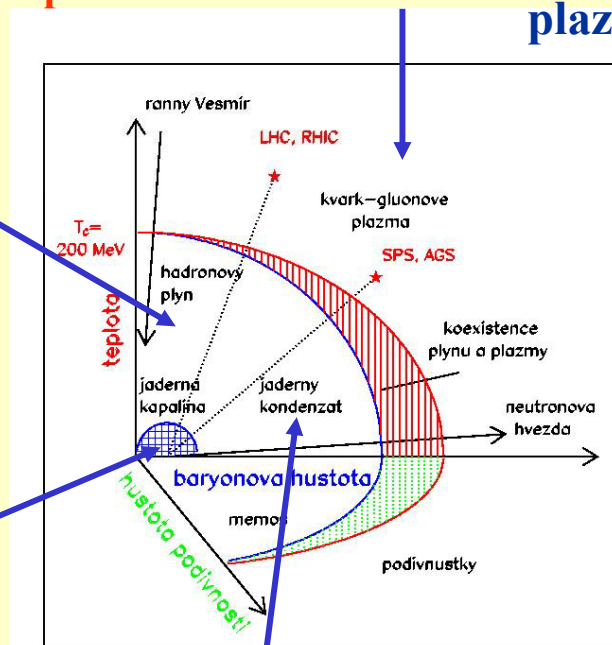
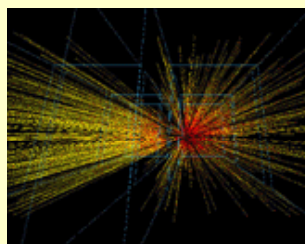


plazma

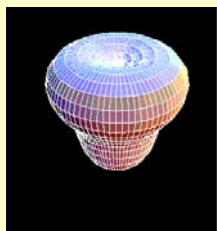
$$E/A = f(P) = f(\rho, T)$$

„měkká“ jako pružná guma

jaderná srážka

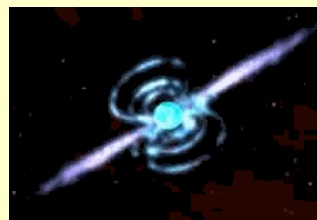


atomové jádro



voda

nitro neutro-  
nových hvězd



led



## Jak měřit teplotu?

- 1) Energetické spektrum vyzařovaných částic
- 2) Poměr mezi produkcí různých izotopů nebo částic
- 3) Spektra brzdných fotonů

## Jak určit transformovanou kinetickou energii?

- 1) Určení počtu produkovaných částic.
- 2) Ztracená kinetická energie v podélném směru
- 3) Různá centralita srážky → různá velikost přeměněné energie

## Jak měřit rychlost rozpínání a rozměr?

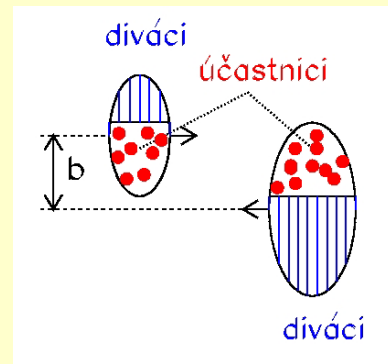
- 1) Dopplerův posuv v energetických spektrech vyzařovaných částic
- 2) Interferometrie identických částic

## Jak určit hustotu?

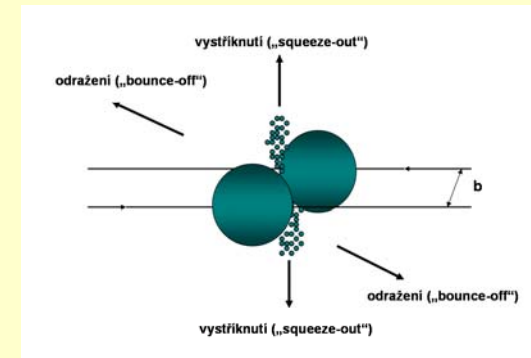
- 1) Určení rozměru a jeho změny v předchozím případě a znalost celkové hmotnosti a energie

## Jak měřit tlak?

Velikost kolektivních toků jaderné hmoty

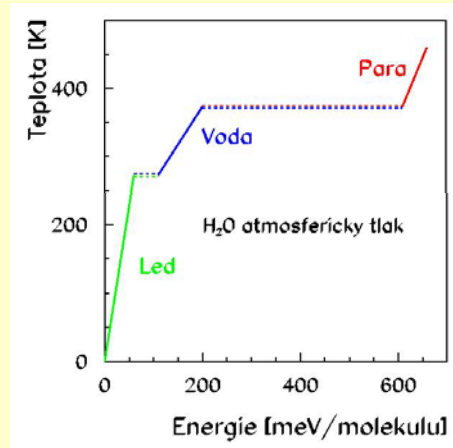
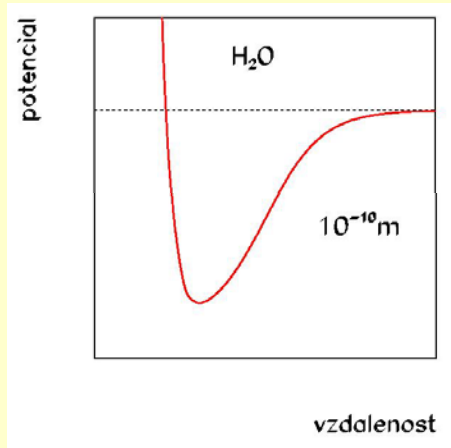


Rozdělení nukleonů při srážce

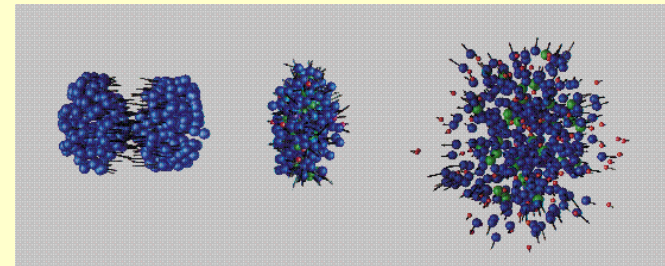
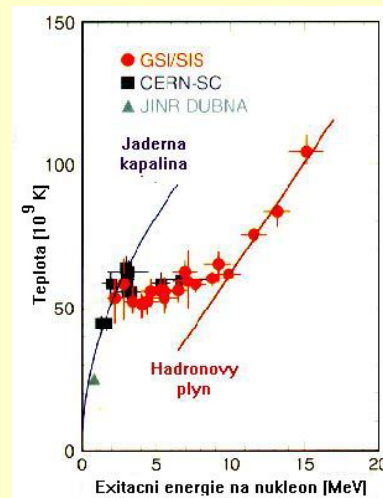
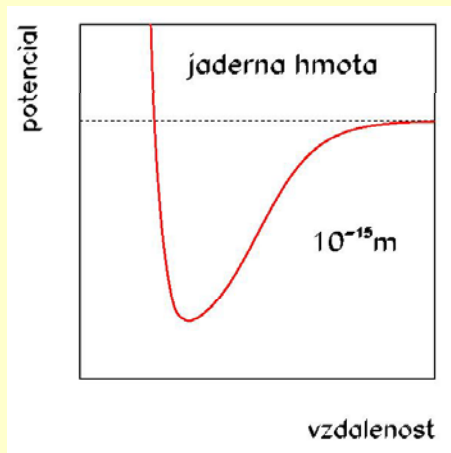


Kolektivní toky nukleonů

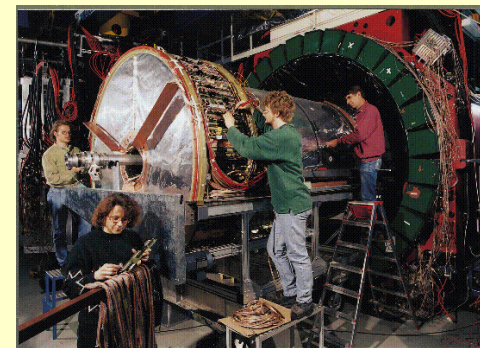
# Fázový přechod jaderné kapaliny v hadronový plyn.



Ohřívání vody

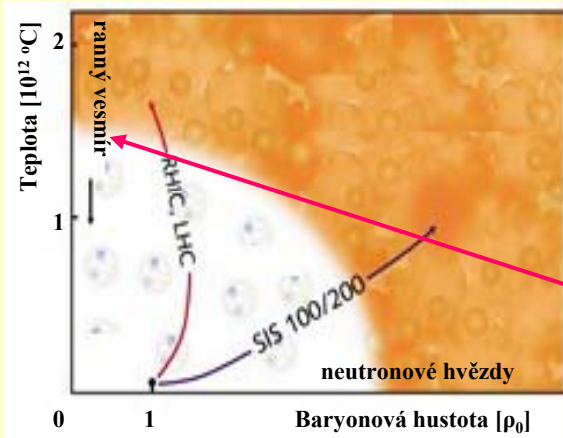


Ohřívání jaderné hmoty



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

# Velmi horká jaderná hmota – počátek našeho vesmíru



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

Kvark-gluonové plazma

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

Hadronová hmota

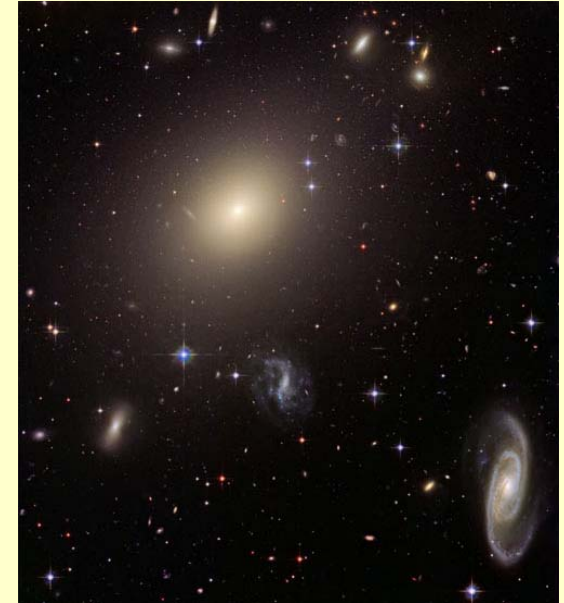
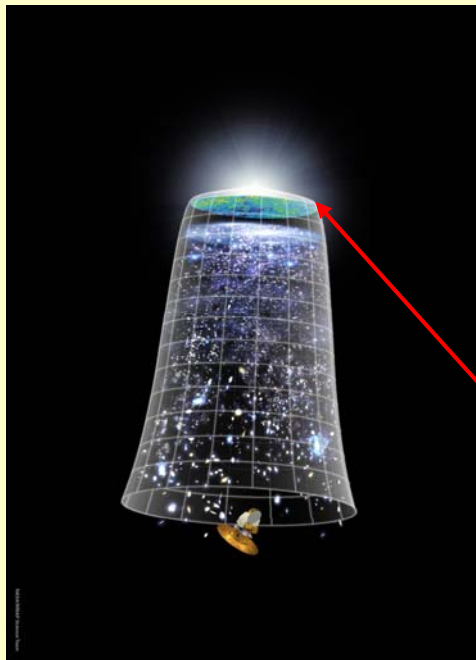
V pozdější fázi jen nejjlehčí baryony – proton a neutron

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

Atomová jádra – vodík, helium a trochu těžších jader

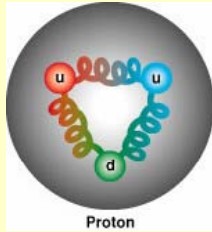
$$400 \text{ 000 let} \sim 10^{13} \text{ s}$$

Reliktní záření



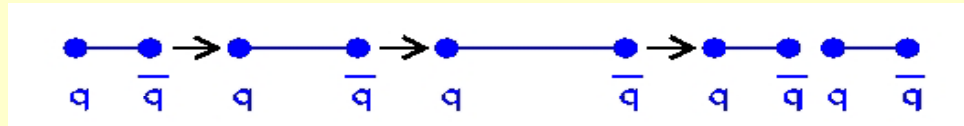


# Nová forma jaderné hmoty - kvark-gluonové plazma



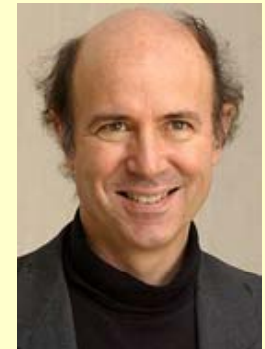
V normálním prostředí jsou barevné kvarky uvězněny v hadronech silnou interakcí zprostředkovanou gluony

Uvěznění a asymptotická volnost kvarků jsou základní vlastnosti kvantové chromodynamiky – teorie silných interakcí



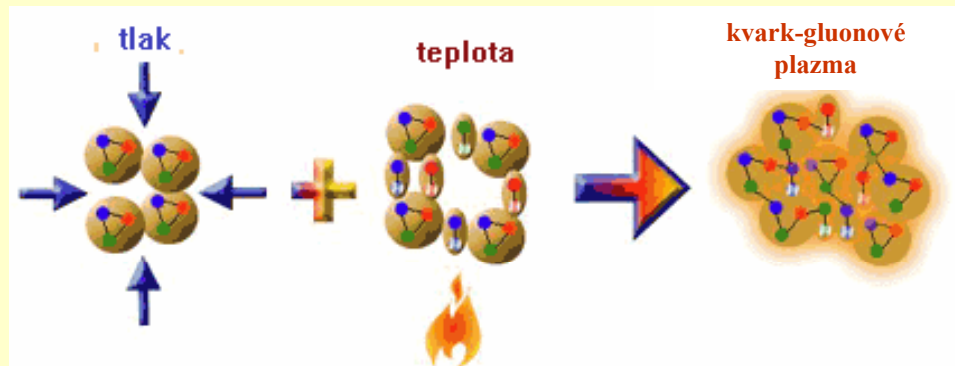
David J. Gross, H. David Politzer a Frank Wilczek – Nobelova cena za fyziku 2004 právě za studium silné interakce a roli asymptotické volnosti

Při vysoké hustotě energie, vysoké teplotě či hustotě – uvolnění kvarků z hadronů, velká hustota gluonů → kvark-gluonové plazma



Frank Wilczek

Srážky jader na urychlovači  $E_T > 10 \text{ GeV/n}$



Velký třesk v čase kratším než  $10 \mu\text{s}$

První předpověď v roce 1975, název zavedl E.V. Shuryak

1. podmínka – kvarky a gluony nejsou vázány v hadronech **NUTNÉ**
2. podmínka – nastolení termodynamické rovnováhy **NENÍ NUTNO**
3. podmínka - nastolení chirální symetrie **NENÍ NUTNO**

Hustota energie:  $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ ,  $T = 180 \text{ MeV}$  ( $2,1 \cdot 10^{12} \text{ K}$ )

hustota: charakteristický objem hadronů  $1-3 \text{ fm}^3 \leftrightarrow$  několik hadronů

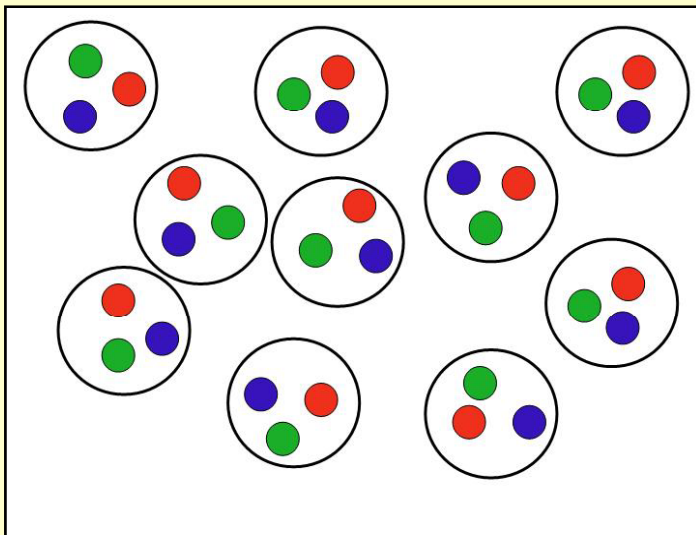
Jednotka:

$1 \text{ GeV} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$

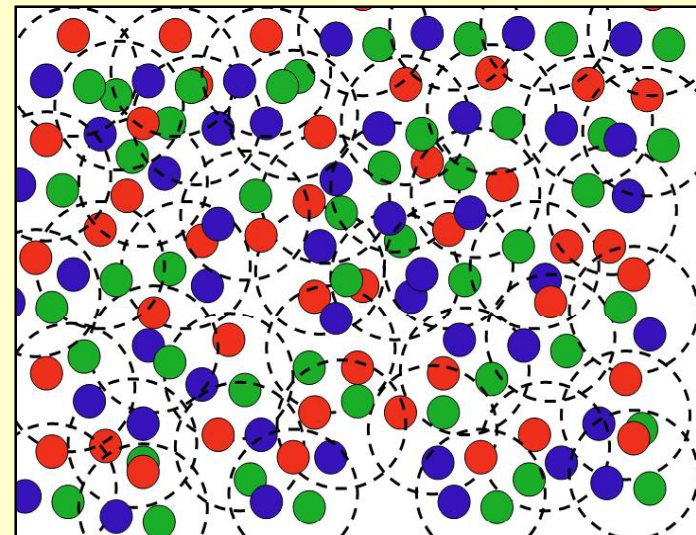
klidová hmotnost

protonu

**System složený z volných kvarků a gluonů nacházející se v termodynamické rovnováze**

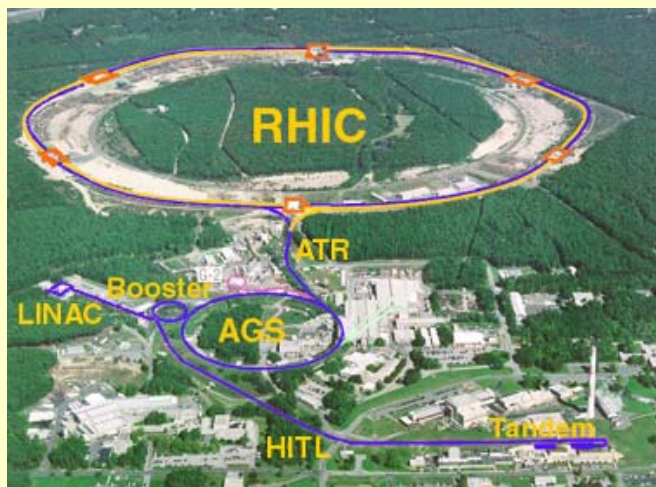


hadronová hmota

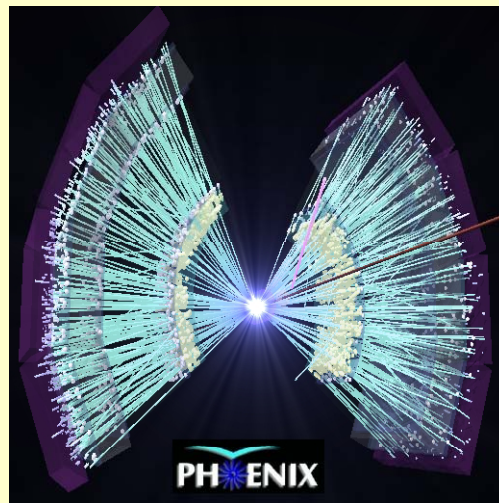


kvark-gluonové plazma

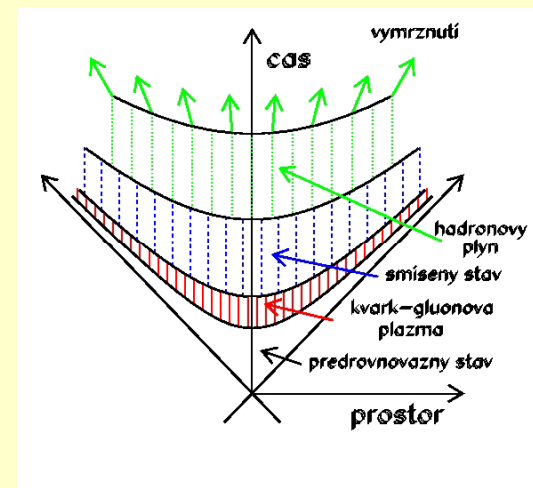
# Získání a studium kvark-gluonového plazmatu



Urychlovač RHIC



Srážka zaznamenaná urychlovačem Phoenix



Průběh srážky

Vznikají tisíce až desetitisíce částic, většinou pionů

$$1 \text{ fm}/c = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$

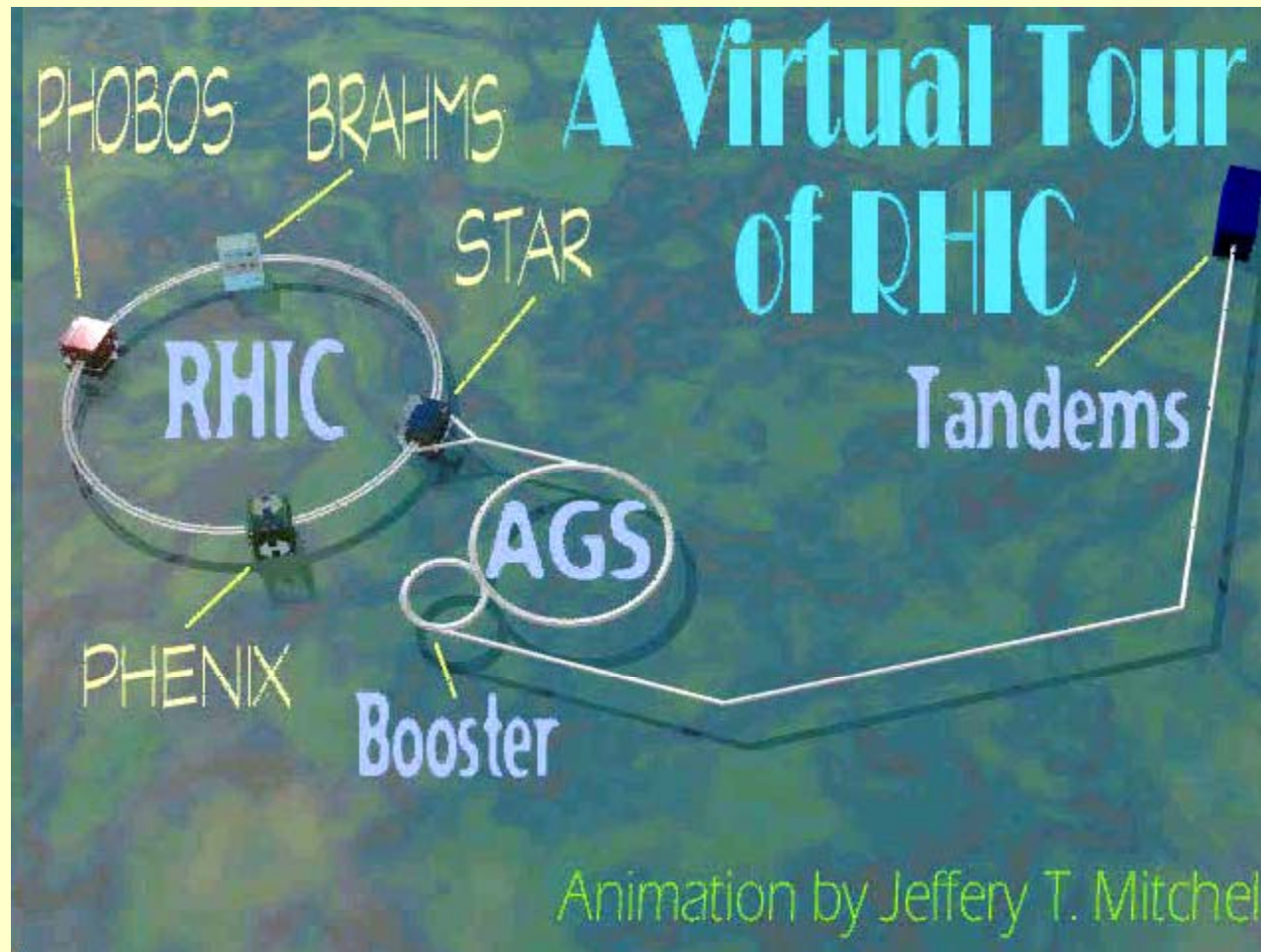
**Časový průběh srážky (pokud vznikne kvark-gluonové plazma):**

- 1) V čase  $3 \cdot 10^{-24}$  s nastolení tepelné rovnováhy rozptylem kvarků gluonů (střední volná dráha kvarků je 0,5 fm)
- 2) Systém expanduje a chladne, v  $2 \cdot 10^{-23}$  s dosáhne kritické teploty a začne hadronizace
- 3) Pro fázový přechod prvního druhu, existuje déle než  $3 \cdot 10^{-23}$  s koexistence různých fází.
- 4) Po hadronizaci systém dále expanduje až na objemy  $10^4 - 10^5 \text{ fm}^3$ , kdy dojde k „vymrznutí“

!!! Připomenutí v ranném vesmíru existovalo kvark-gluonové plazma  $10^{-5}$ s !!!

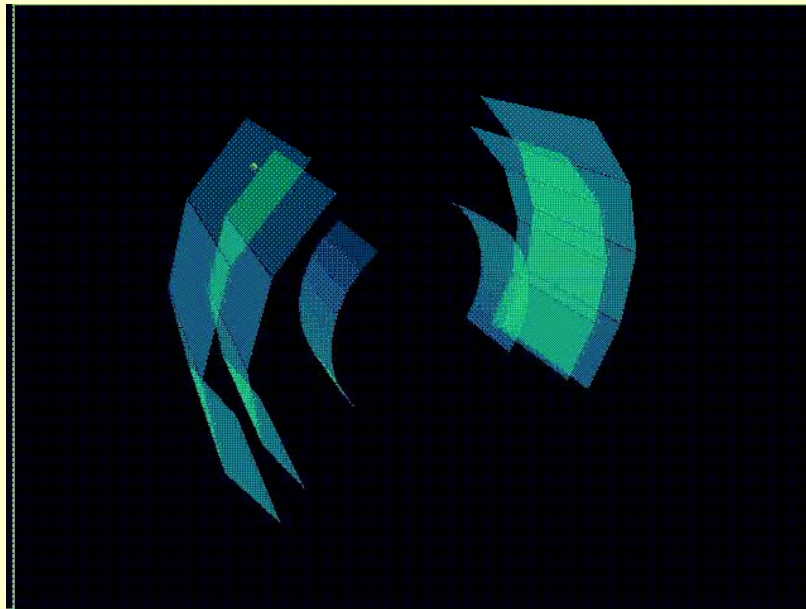


## Největší současný urychlovač těžkých jader - RHIC



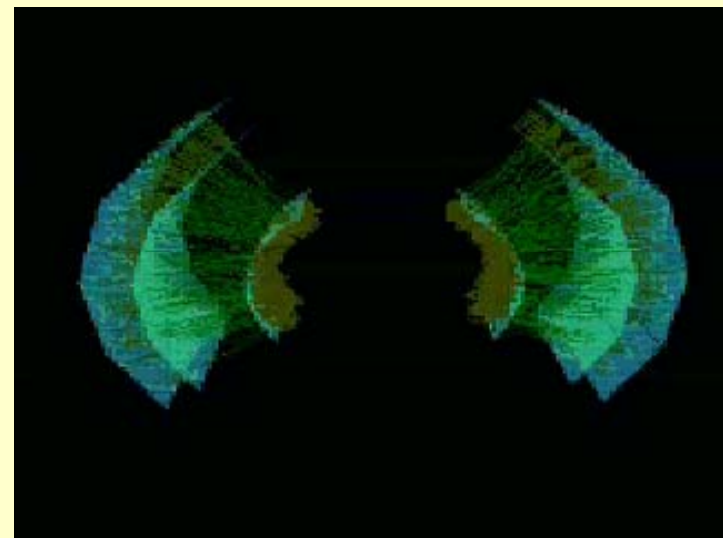


## Cesta vzniklých částic a jejich zachycení detektory experimentu Phenix

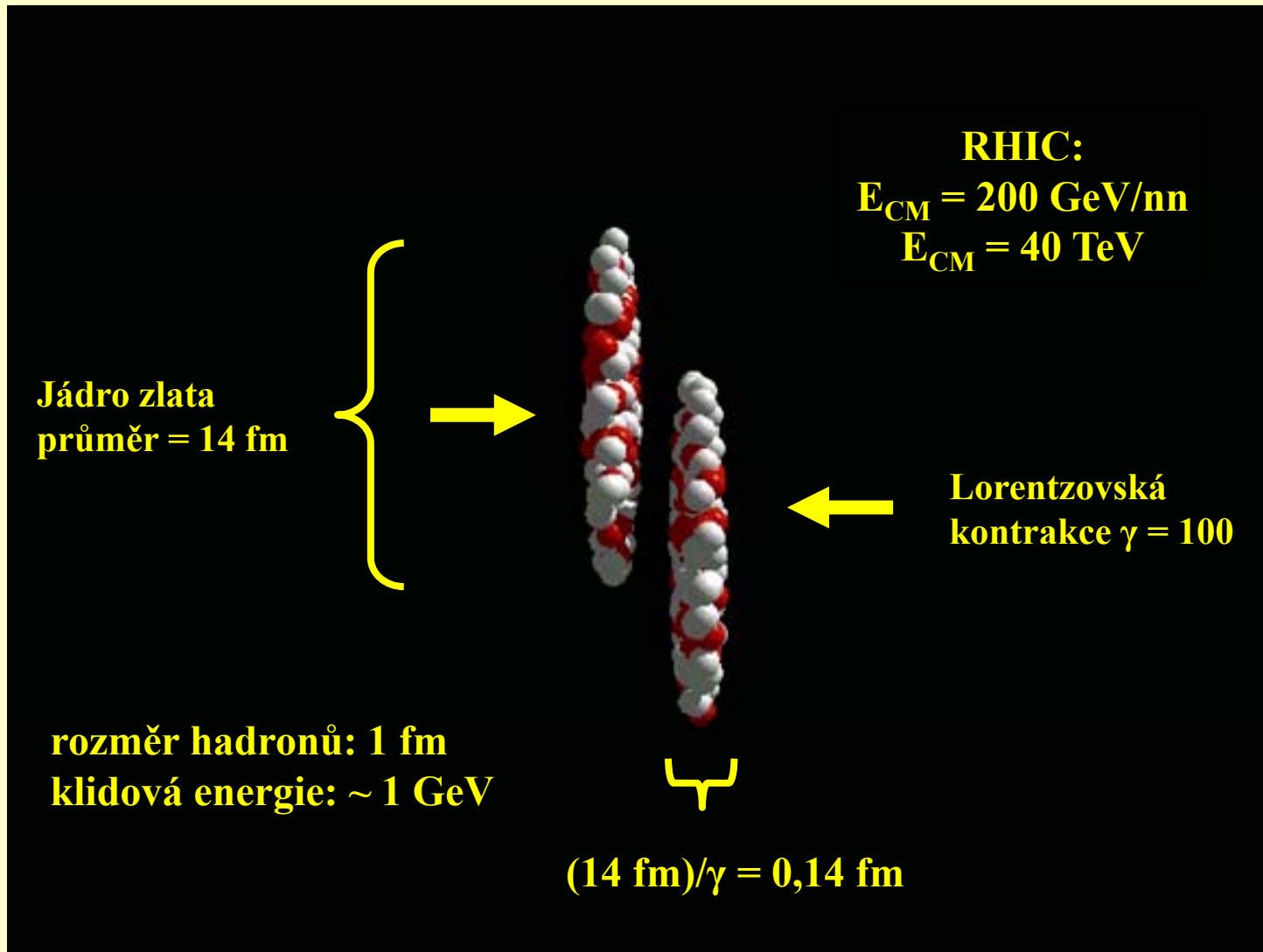


Vyznačeny dráhy detekovaných  
částic

Srážka jader zlata z pohledu  
experimentu Phenix



## Parametry srážky



# Srážky při relativistických energiích

(energie na nukleon blízká nebo několikrát větší než jeho klidové energii)

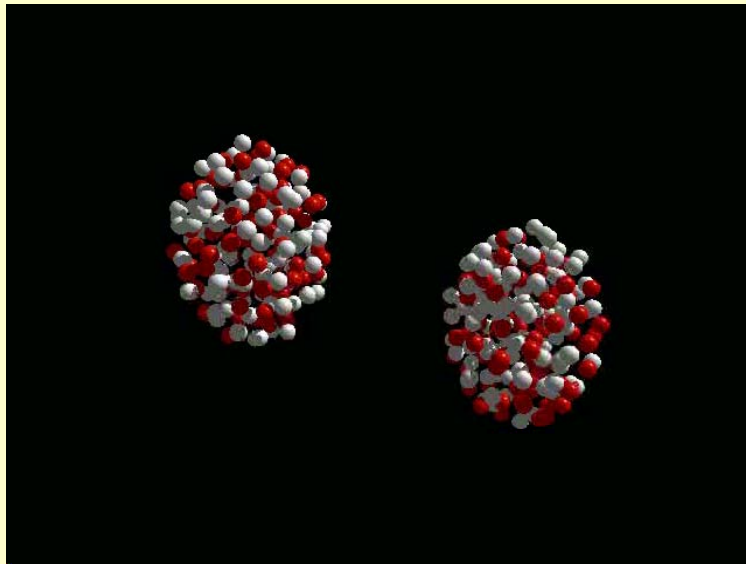
**Protony - červené**

Neutrony - bílé

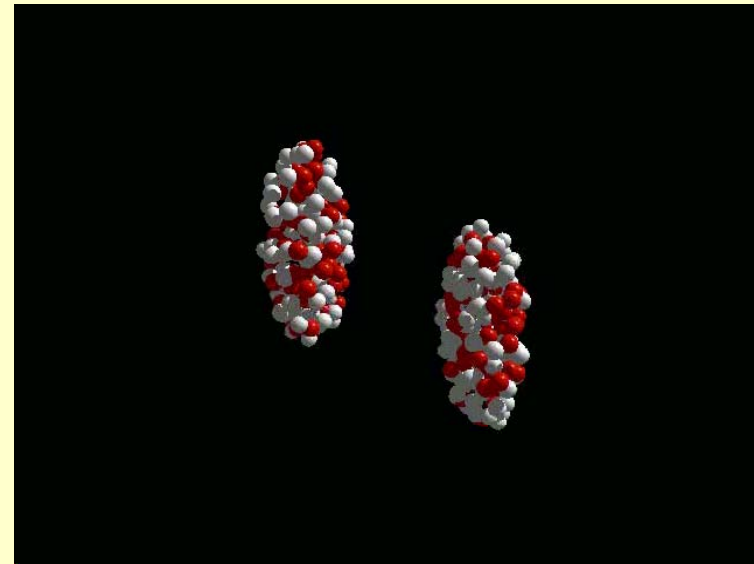
Excitované nukleony - modré

Mezony - zelené

Simulace hydrodynamického modelu  
UrQMD



**$E = 1.5 \text{ GeV/nukleon}$**



**$E = 10.6 \text{ GeV/nukleon}$**

Simulace frankfurtské skupiny WWW stránky H. Webera

# Srážky při ultrarelativistických energiích

(energie na nukleon větší než 100 GeV → vysoce převyšuje jeho klidovou energii)

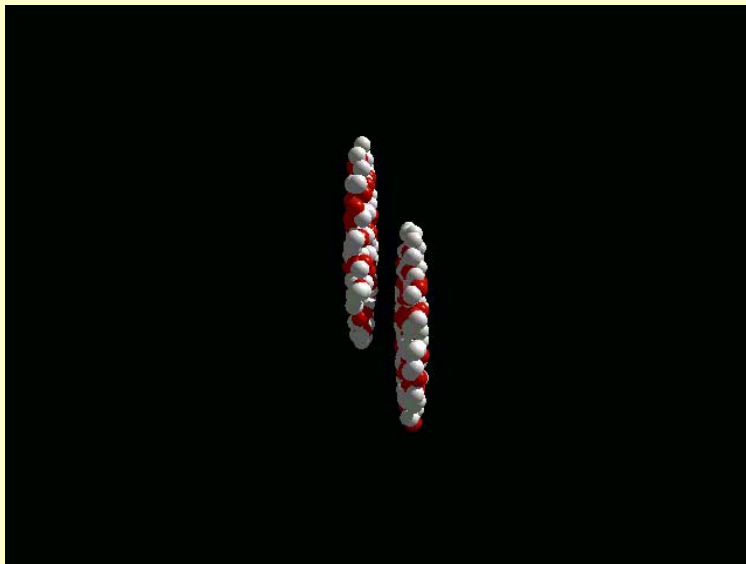
**Protony - červené**

Neutrony - bílé

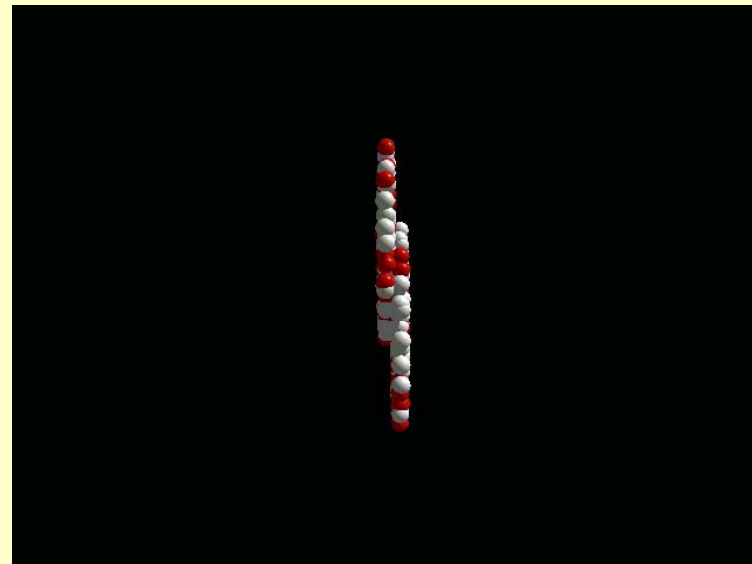
Excitované nukleony - modré

Mezony - zelené

Simulace hydrodynamického modelu  
UrQMD



**E = 200 GeV/nukleon**



**E = 5000 GeV/nukleon**

Simulace frankfurtské skupiny WWW stránky H. Webera



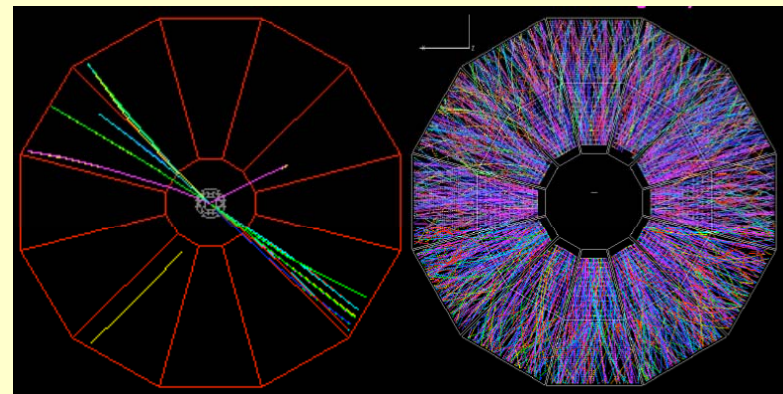
# Příznaky vzniku kvark-gluonového plazmatu:

Při srážkách vznikají tisíce částic, které je třeba zachytit a určit jejich vlastnosti

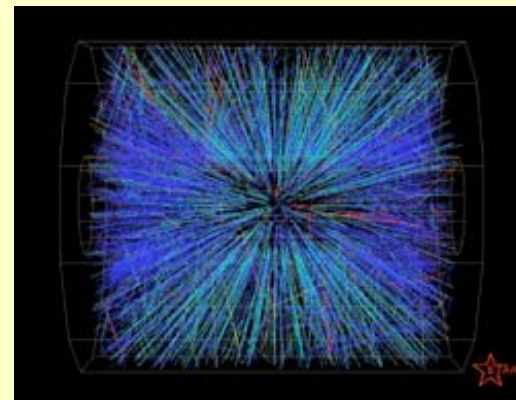
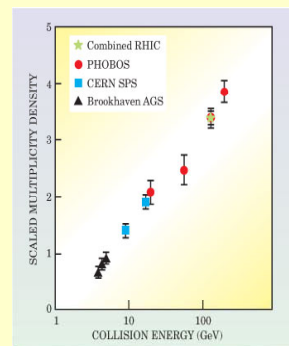
Srovnávání s tím, co dostaneme z p-p srážek po přepočtení na počet nukleonových srážek

Experimenty na RHIC hledají tyto příznaky:

- 1) Dosažení potřebné teploty a hustoty energie
- 2) Průběh expanze
- 3) Zvětšení produkce podivných částic
- 4) Potlačení produkce  $J/\psi$  mezonů
- 5) Nastolení chirální symetrie
- 6) Potlačení produkce výtrysků částic



Srovnání p-p srážky a srážky Au+Au v experimentu STAR na urychlovači RHIC



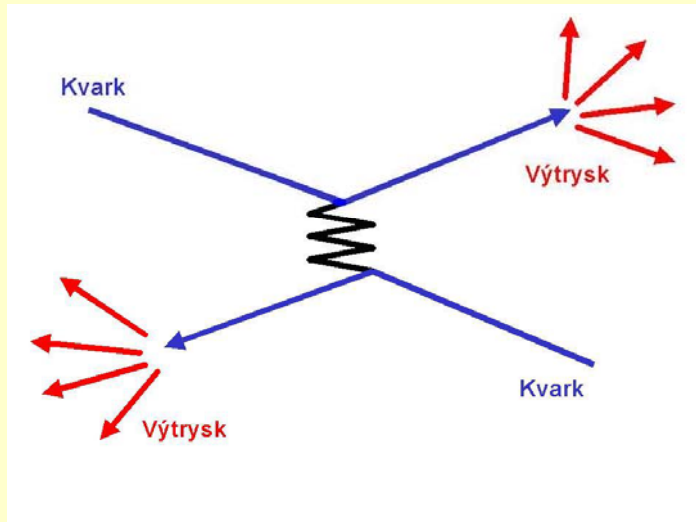
Srážka jader zlata se v experimentu STAR na urychlovači vstřícných svazků RHIC ( 100 + 100 GeV/A )

Přechod od pevného terče k vstřícným svazkům:

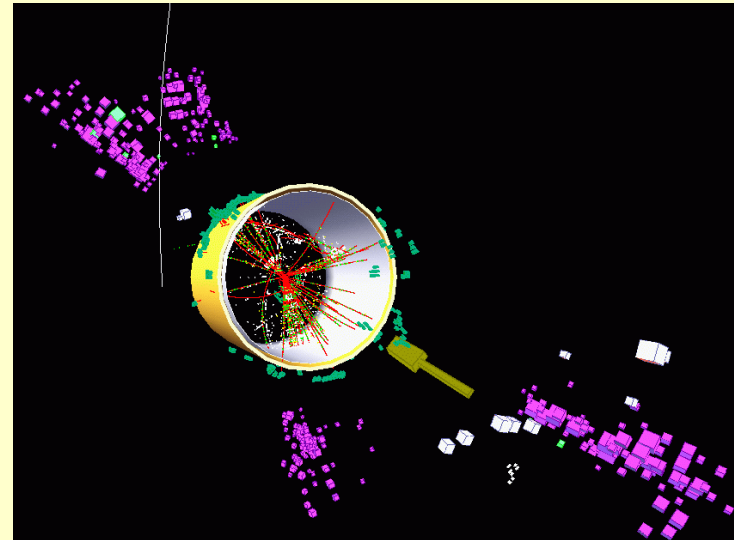
Energie dostupná v těžišti:	SPS	→	RHIC
	13 GeV/n		200 GeV/n

## Tvorba výtrysků („jetů“) – zviditelnění kvarků

Srážka kvarků s velmi vysokou energií → vznik dvojice směřovaných proudů částic interagujících silnou interakcí - "výtrysků"



Kvark s vysokou energií tvoří velké množství kvark antikvarkových párů ty následně hadronizují



Případ vzniku čtyř výtrysků pozorovaný experimentem OPAL na urychlovači LEP (Hledání Higgsovy částice)

Vzniklý výtrysk hadronů má směr a nese celkovou energii původního kvarku

# Potlačení produkce výtrysků (jet quenching)

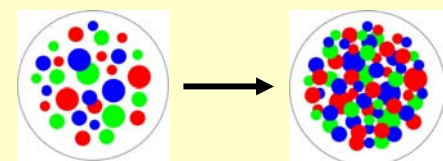
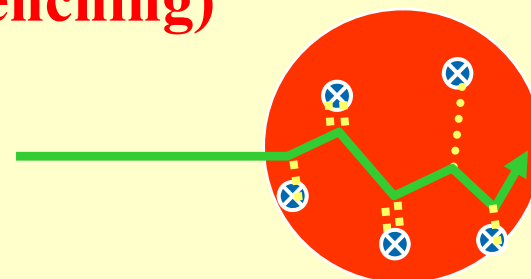
Jadro-jaderná srážka:  
produkce výtrysků je ovlivněna těmito jevy:

1) **Croninův jev** – mnohonásobný rozptyl → rozmazání příčných hybností → posun k vyšším  $p_t$  → zvětšení produkce

2) **Saturace** – velké nahuštění partonů → zmenšení nárůstu produkce výtrysku s energií

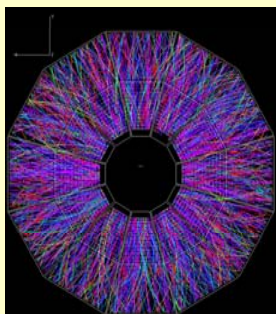
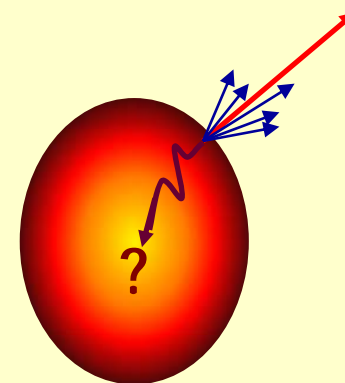
3) **Potlačení produkce výtrysků (částic s velkým  $p_t$ ) a dvojic výtrysků**

**Průchod partonů výtrysku kvark-gluonovým plazmatem (KGP) → ztráta energie a hybnosti → pohlcení výtrysku (v normální hadronové hmotě nenastává) → důkaz vzniku KGP**



nižší energie

vyšší energie



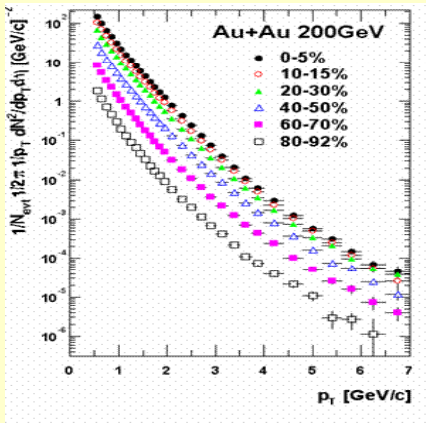
Pozorováno experimenty na urychlovači RHIC

Porovnávala se produkce výtrysků v srážkách:

- 1) d-Au - KGP nemůže vzniknout → pouze saturace a Croninův jev
- 2) Au-Au - KGP může vzniknout → i potlačení produkce

**Jen v Au-Au srážkách pozorováno potlačení produkce dvojic výtrysků → vzniká KGP**

# Potlačení částic s vysokou příčnou hybností



Výsledek experimentu:

Dramatický rozdíl chování v případě Au+Au a d+Au v závislosti na centralitě srážky

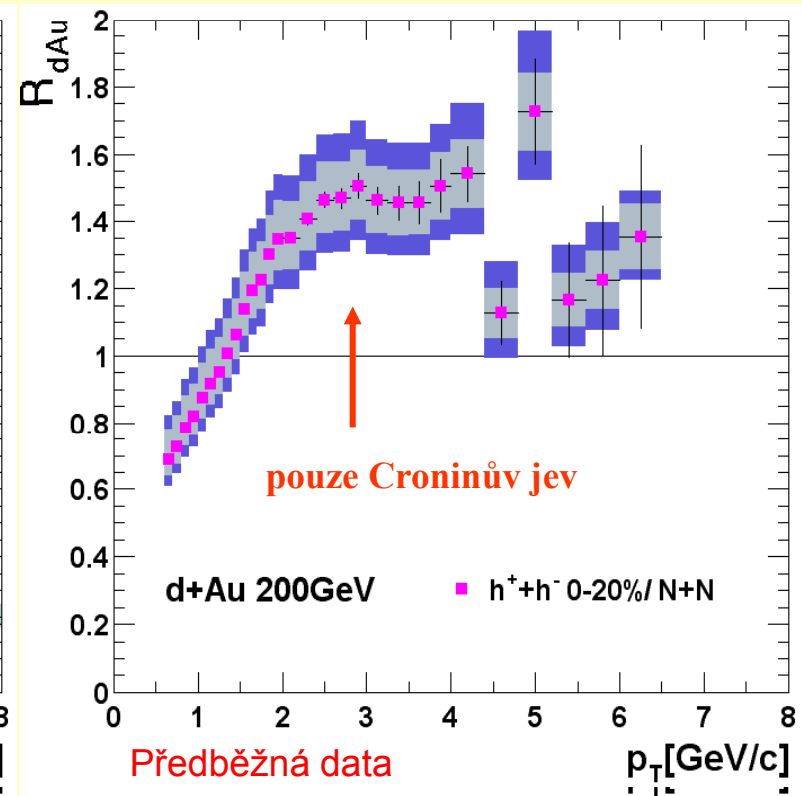
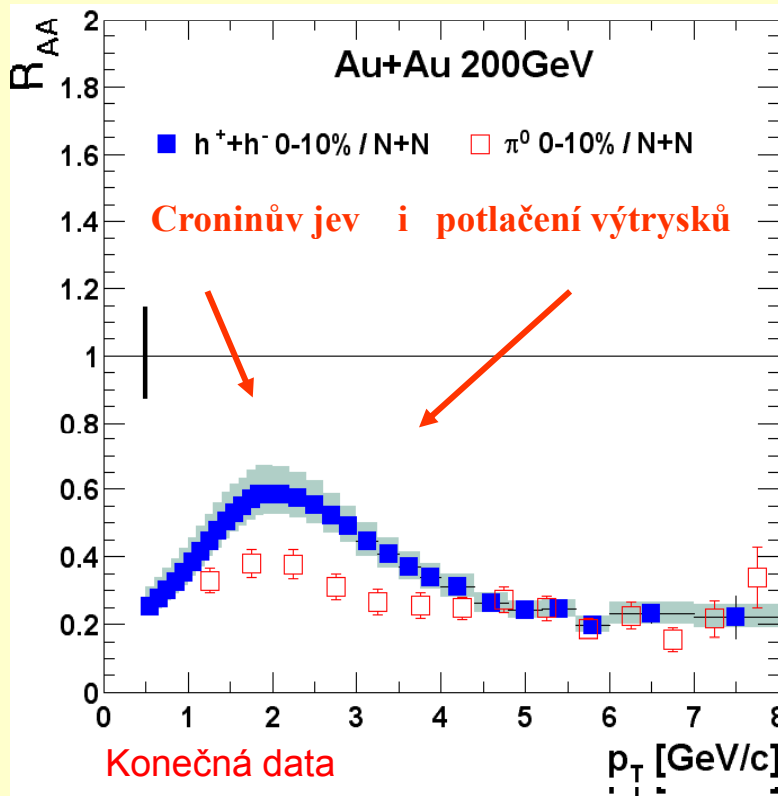
$R_{AA}$  – poměr mezi počtem změřeným a extrapolovaným z nukleon-nukleonových srážek

Au + Au experiment

d + Au kontrolní experiment



Experiment Phenix





# Co ukázal RHIC ? - Ne ideální plyn ale ideální kapalina



Vytvoření barevného systému uvolněných kvarků a gluonů

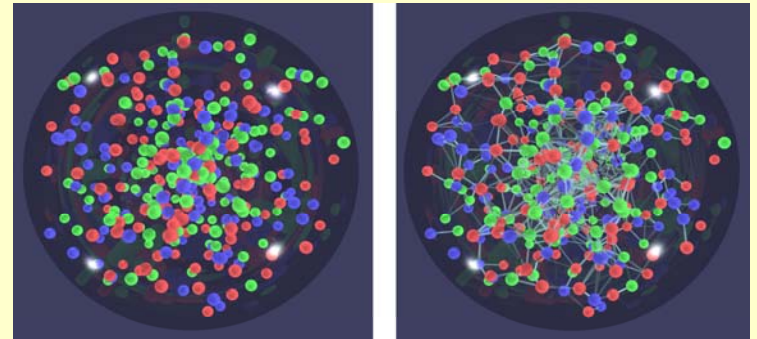
Silné překročení kritické teploty a hustoty energie

Nastolení tepelné rovnováhy ještě v době existence barevné fáze

*Více otázek než odpovědí*

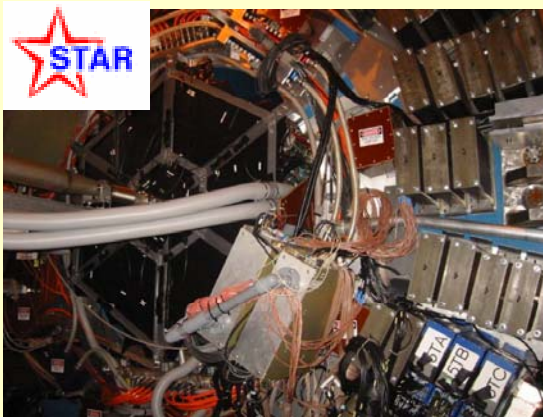
Nejedná se o slabě interagující systém ale o silně interagující systém - ideální kapalina s nulovou viskozitou

silně interagující kvark-gluonové plazma



plyn - ne

kapalina – ano !!



## Co dále? Nastupuje LHC a ALICE !

Potřebné studium vlastnosti nového stavu hmoty – její stavové rovnice pro stále vyšší teploty

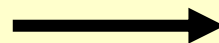
Některé vlastnosti souhlasí s původními představami o kvark-gluonovém plazmatu některé jsou bližší pojetí „kapaliny“, „plynný charakter možná při vyšších energiích

Určit druh fázového přechodu – velký význam pro průběh velkého třesku

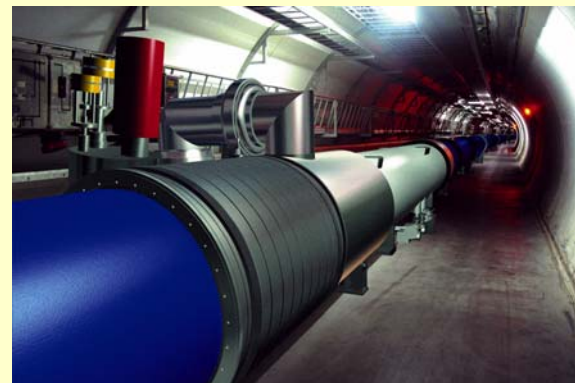
Zatím sledujeme pouze silně interagující částice (99,9 % vznikajících částic jsou hadrony), fotony a leptony pouze z sekundárních procesů → nepřímé signály – informace je částečně setřena

**už začal hon na fotony a leptony vznikající přímo v plazmě → přímé signály z kvark-gluonového plazmatu**

**RHIC 100 + 100 GeV/nukleon**



**LHC 2700 + 2700 GeV/nukleon**



# Větší urychlení – vyšší energie a teploty, větší detaily i produkce těžších částic

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

**Stěžejní nástroj – srážka urychlených částic**

**Nárůst energie → větší detaily**

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

**Produkce částic s vyšší klidovou energií (hmotností)**

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

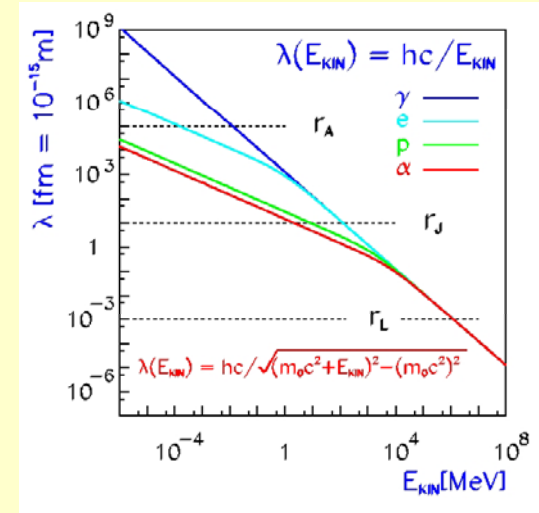
**LHC – srážka protonů s energiemi  $7000 \text{ GeV}$**

**Jádra olova (208 nukleonů) na každý  $2700 \text{ GeV} \rightarrow 1\,123\,200 \text{ GeV} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ J}$   
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**

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



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



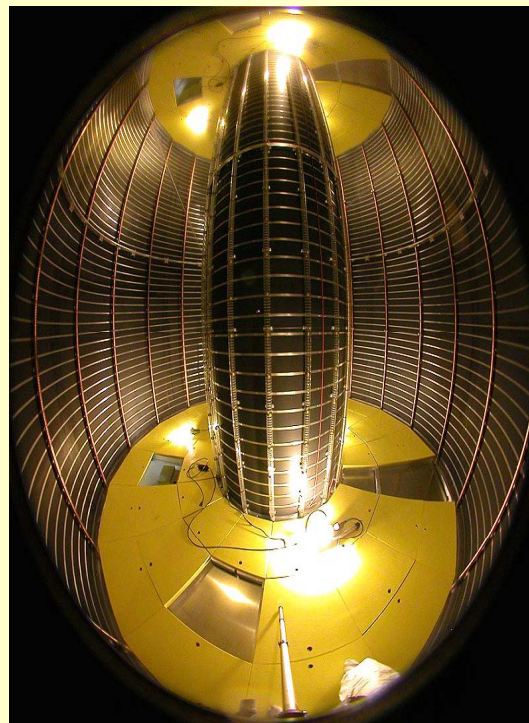
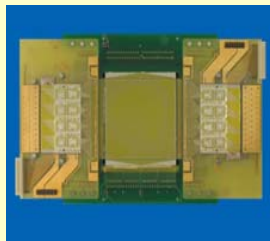
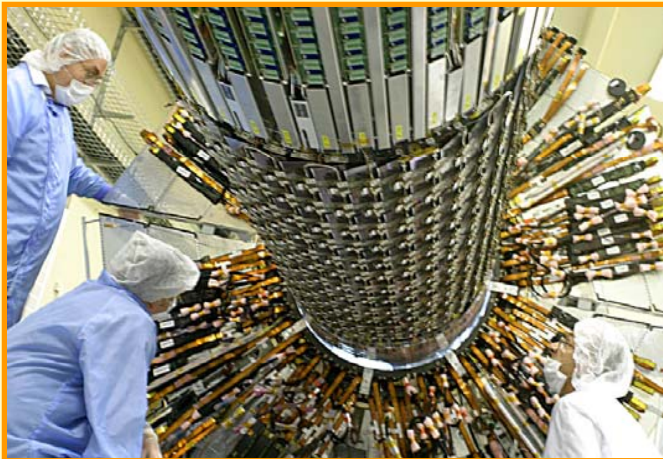


## Jak vypadá vysokoenergetický experiment – tedy i ALICE

### Úkoly:

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

### Vnitřní dráhové detektory



Velké dráhové komory  
(umístěné v magnetickém poli)



Hadronové kalorimetry



Elektromagnetické kalorimetry

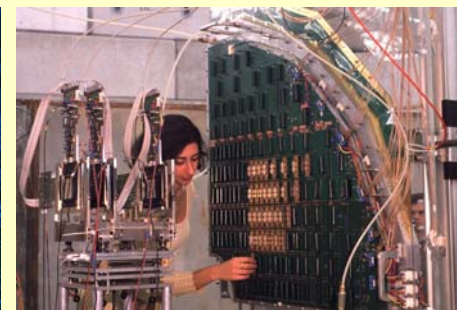
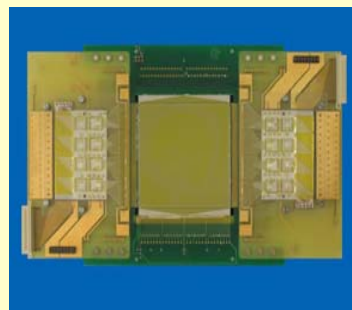
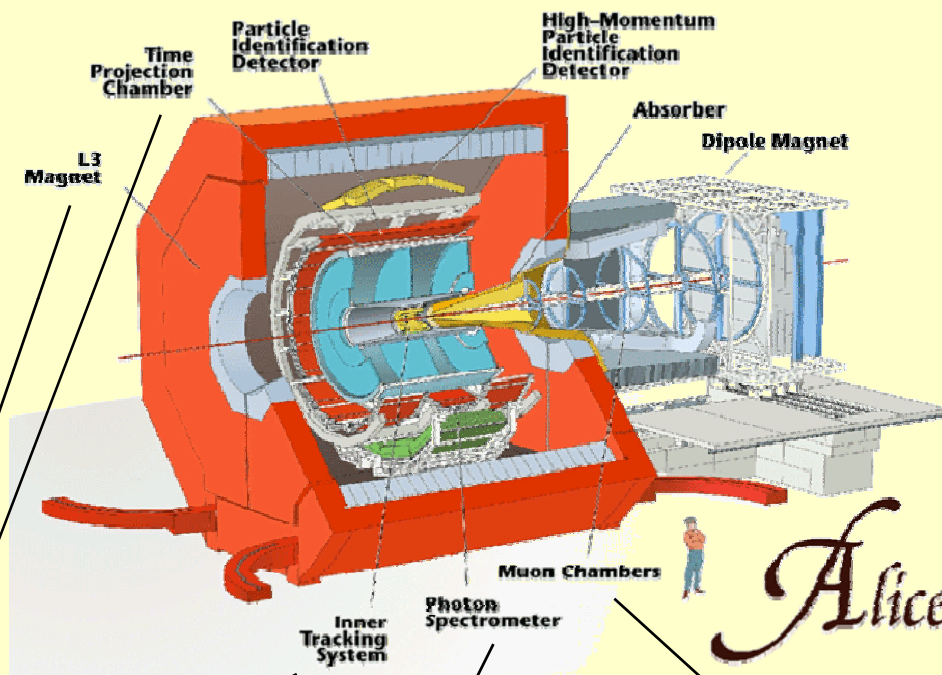
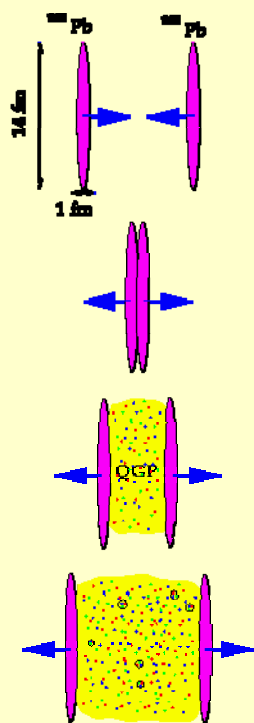


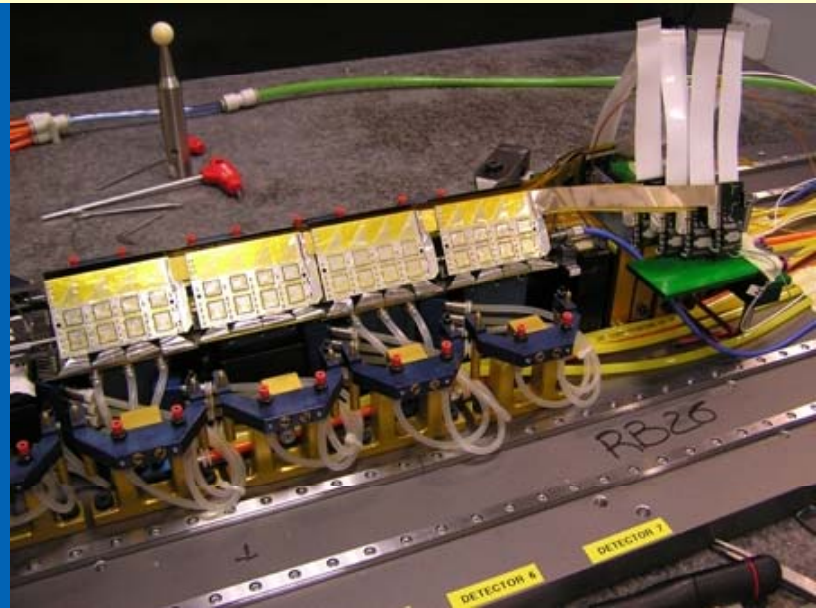
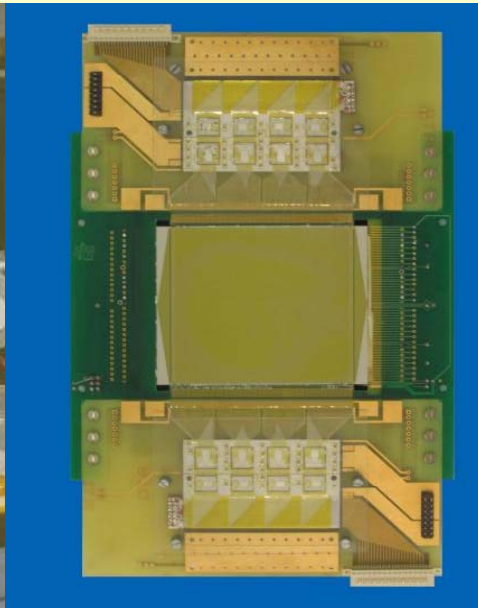
# Experiment ALICE na urychlovači LHC

Stroj na studium kvark-gluonového plazmatu

Experiment ALICE (česky Alenka) a jednotlivé detektorové systémy:

Pb – 208 nukleonů  
každý 2700 GeV  
1 123 200 GeV  
pád 0,02 g z metru  
energie letu mouchy





## Závěr

*„No dobrá,“ řekla kočka a tentokrát se ztrácela pomalounku od konečku ocasu až po škleb; ten chvíli ještě potrval, když už ostatek zmizel. „Kočku bez šklebu, to už jsem viděla kolikrát,“ pomyslíla si Alenka, „ale škleb bez kočky! Něco tak zvláštního jsem jakživ neviděla!“*

Lewis Carroll: „Alenka v Kraji divů“

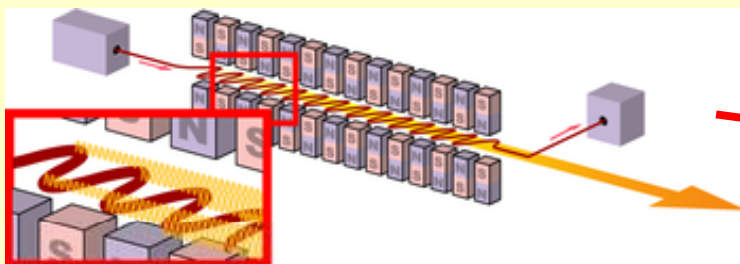
- **Srážky těžkých jader** - možnost studia i velmi horké a husté hmoty vyskytující se jinak jen ve vesmíru
- Existence úplně nového stavu hmoty – ? **silně interagující kvark-gluonového plazmatu?** – potvrzena díky RHIC v Brookhavenu
- Hlavním signálem je **potlačení produkce částic z vysokou příčnou hybností dvojic protilehlých výtrysků a potlačení J/ψ mezonů**
- **Podrobné studium jeho vlastností, fázové rovnice, charakteru fázového přechodu, stupně dosažené termodynamické rovnováhy už začalo na urychlovači RHIC a od roku 2008 na LHC (experiment ALICE)**
- Ukazuje se, že dochází k velmi rychlému nastavení termodynamické rovnováže, systém **se chová jako ideální kapalina** – studium vlastností nutné pro pochopení velmi ranných stádií vývoje našeho vesmíru (před dobou 10  $\mu$ s po počátku rozpínání)
- Kromě nepřímých signálů nesených silně interagujícími částicemi se očekává **studium přímých signálů od fotonů a leptonů**
- Účast českých fyziků z ÚJF a FÚ AVČR, příležitost i pro studenty



## A na závěr něco nízkoenergetického – LHC a „gama laser“

Využití laserů založených na volných elektronech:

Urychlovač elektronů na relativistické energie + zdroj periodického transverzálního magnetického pole (pole magnetů se střídajícími se póly – undulátor)



Linear Coherent Light Source (LCLS) - undulatorový systém

Elektrony oscilují → vznik rentgenovského záření → interakce elmg. záření s elektrony  
→ záblesk koherentního elektromagnetického záření v rentgenovské oblasti

**Vlnová délka se nastavuje energií elektronů a intenzitou magnetického pole**

Srážka s jádrem urychleným na LHC – z pohledu urychlených jader jde o laserové gama záření

### Gama laser

Možnost studovat rezonanční metodou velmi přesně doby života různých hladin v jádře

Šlo by získat velmi přesná data o důležitých astrofyzikálních reakcích

# Účinné průřezy pro ADTT systémy a astrofyziku

## Zařízení n-TOF v CERNu

**protonový svazek:**  $E_p = 20 \text{ GeV}$ ,  $\Delta t = 7 \text{ ns}$ ,  $I = 7 \cdot 10^{12}$  protonů,  $f = 0,8 \text{ Hz}$

**olověný terč – tříštivé reakce**

**neutronový svazek:** 300 n/p  $E_n = 0,1 \text{ eV} - 250 \text{ MeV}$

**vzdálenost 185 m,  $10^5$  n/puls/energetický řád**

**speciální kolimace a moderace pro různé režimy práce**

**neutronový svazek FWHM = 11,8 mm**



olověný terč - sestavování



stínění za terčem



odkláněcí magnet