

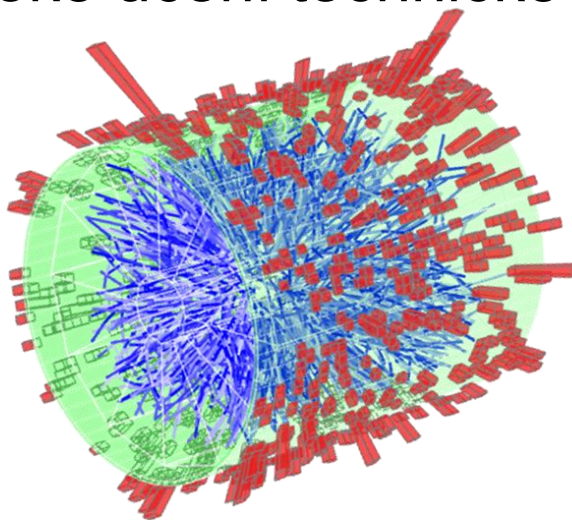
Pôvabné a krásne vône kvarkovo-gluónovej prapolievky

Jaroslav Bielčík

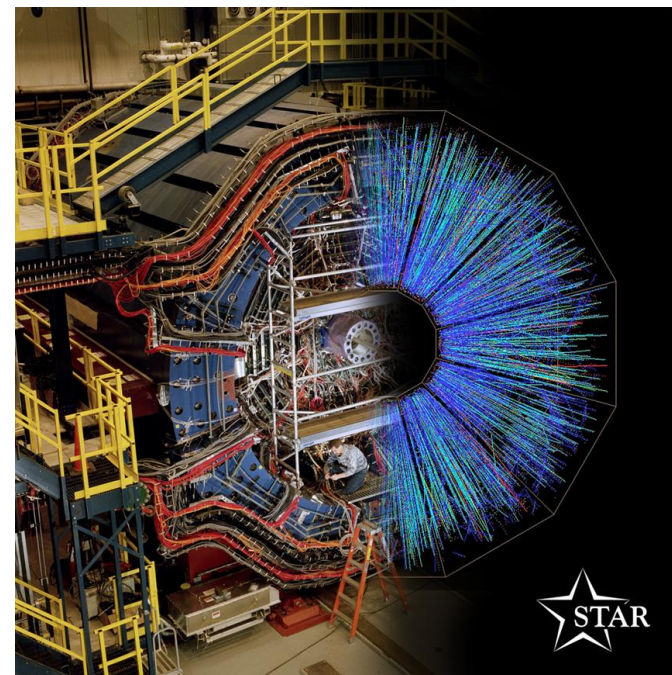
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze



urýchl'ovač, jadrá olova, zlata

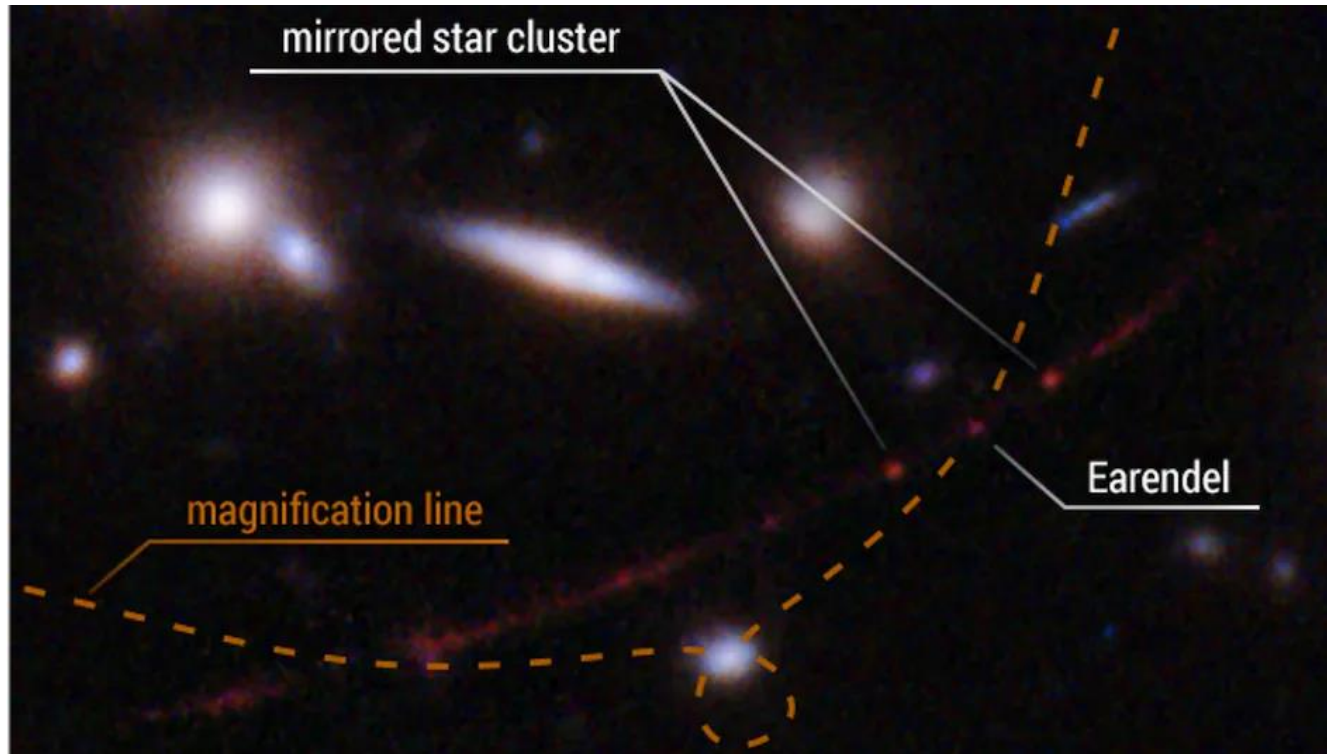


U3V 31.3.2022



Brookhavenská národní laboratoř – účast České republiky

NASA's Hubble Spots Oldest, Most Distant Star Ever Seen



<https://hubblesite.org/contents/news-releases/2022/news-2022-003>

- Hubble pozoroval najstaršiu viditeľnú hviezdu Earendel – ranná hviezda
- Hmota klastru galaxií pôsobí ako gravitačná šošovka a zosilnila signál z hviezdy
- Svetlo z hviezdy k nám cestovalo 12.9 mld rokov
- Hviezda je cca 50x väčšia ako Slnko
- Pozorujeme Vesmír vo veku 9%
- James Web telescop bude skúmať ďalšie vlastnosti

Article

A highly magnified star at redshift 6.2

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04440-y>

Received: 28 July 2021

Accepted: 20 January 2022

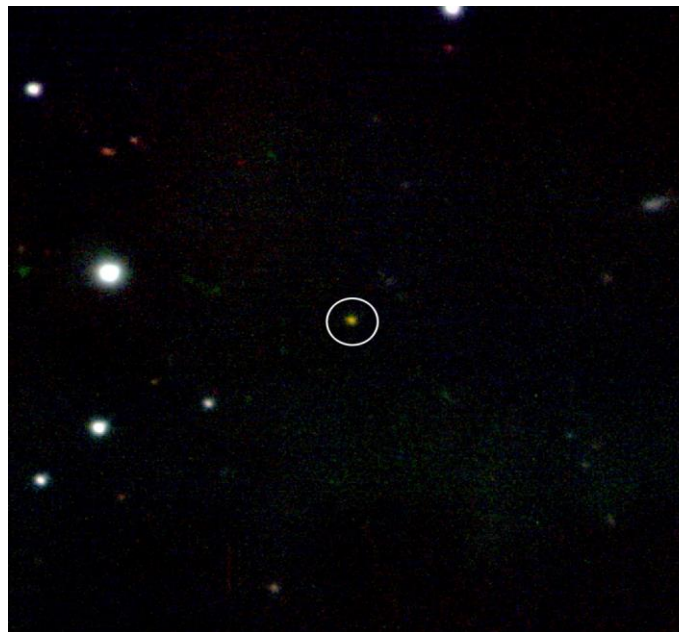
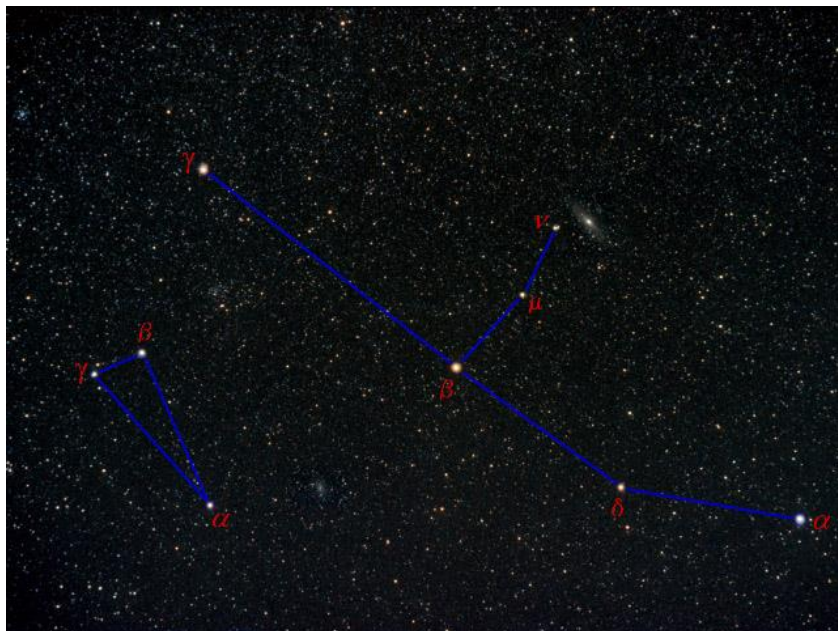
Published online: 30 March 2022

Brian Welch^{1,2}, Dan Coe^{1,2}, Jose M. Diego¹, Adi Zitrin³, Erik Zackrisson⁴, Paola Dimauro⁵, Yolanda Jiménez-Toja⁶, Patrick Kelly⁷, Guillaume Mahler^{8,9,10}, Masamune Oguri^{11,12}, F. X. Timmes¹³, Rogier Windhorst¹⁴, Michael Florin¹⁵, S. E. de Mink^{16,17}, Roberto J. Avila¹⁸, Jay Anderson¹⁹, Larry Bradley²⁰, Karan Sharon²¹, Anton Vikaeus²², Stephan McCandless²³, Marusa Bradac²⁴, Jane Rigby²⁵, Branda Frye²⁶, Sune Toft²⁷, Victoria Strait^{28,29}, Michela Trenti³⁰, Soniya Sharma³¹, Felipe Andrade-Santos³² & Tom Broadhurst^{33,34}

Nature 603, 815–818 (2022)

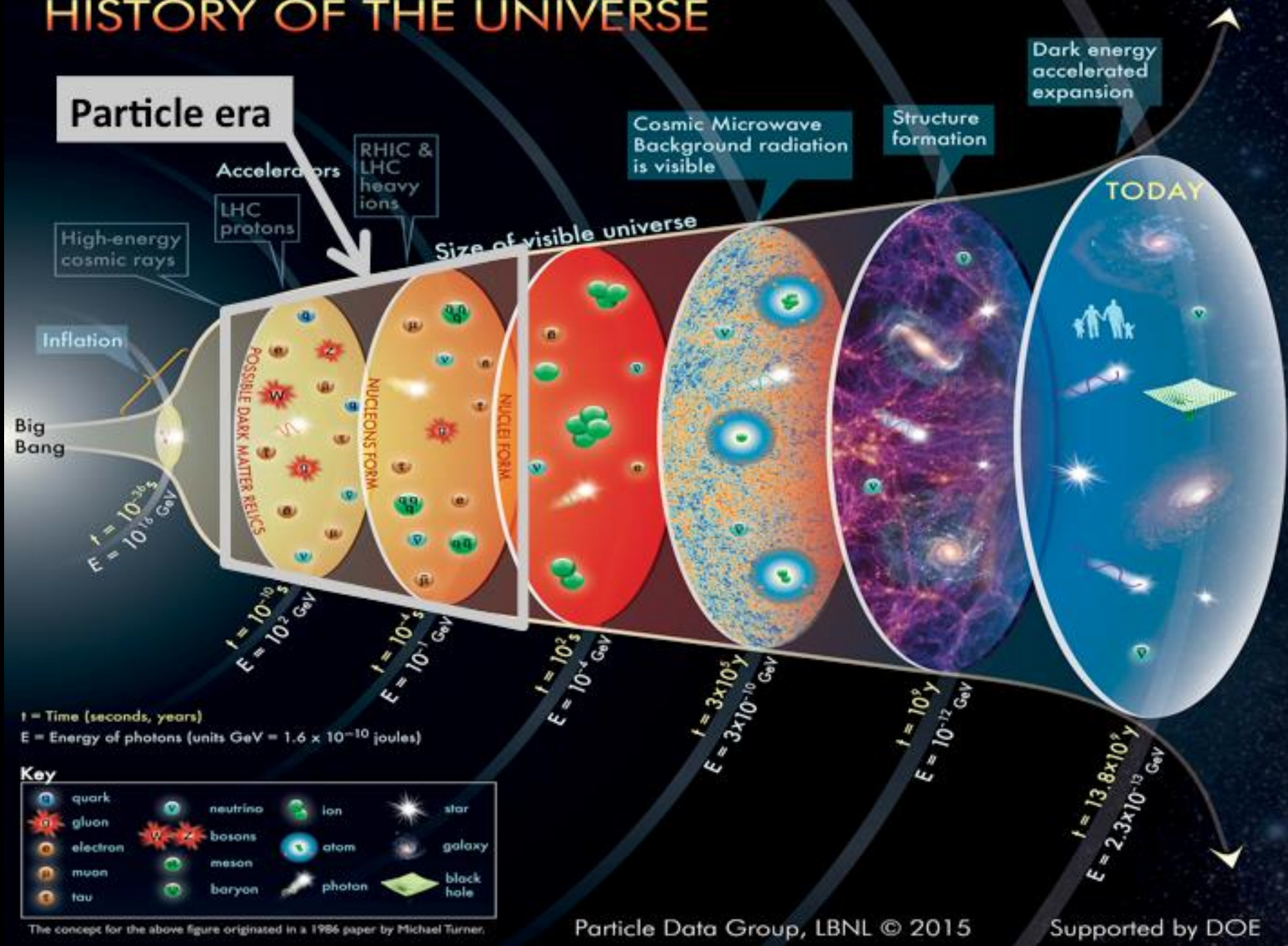
Najstarší pozorovaný objekt vo vesmíre GRB 090423

- Z väčšiny viditeľných hviezd na oblohe k nám cestuje svetlo desiatky až stovky rokov
- Z galaxie M31 v Androméde to trvá okolo 2,5 milióna rokov.

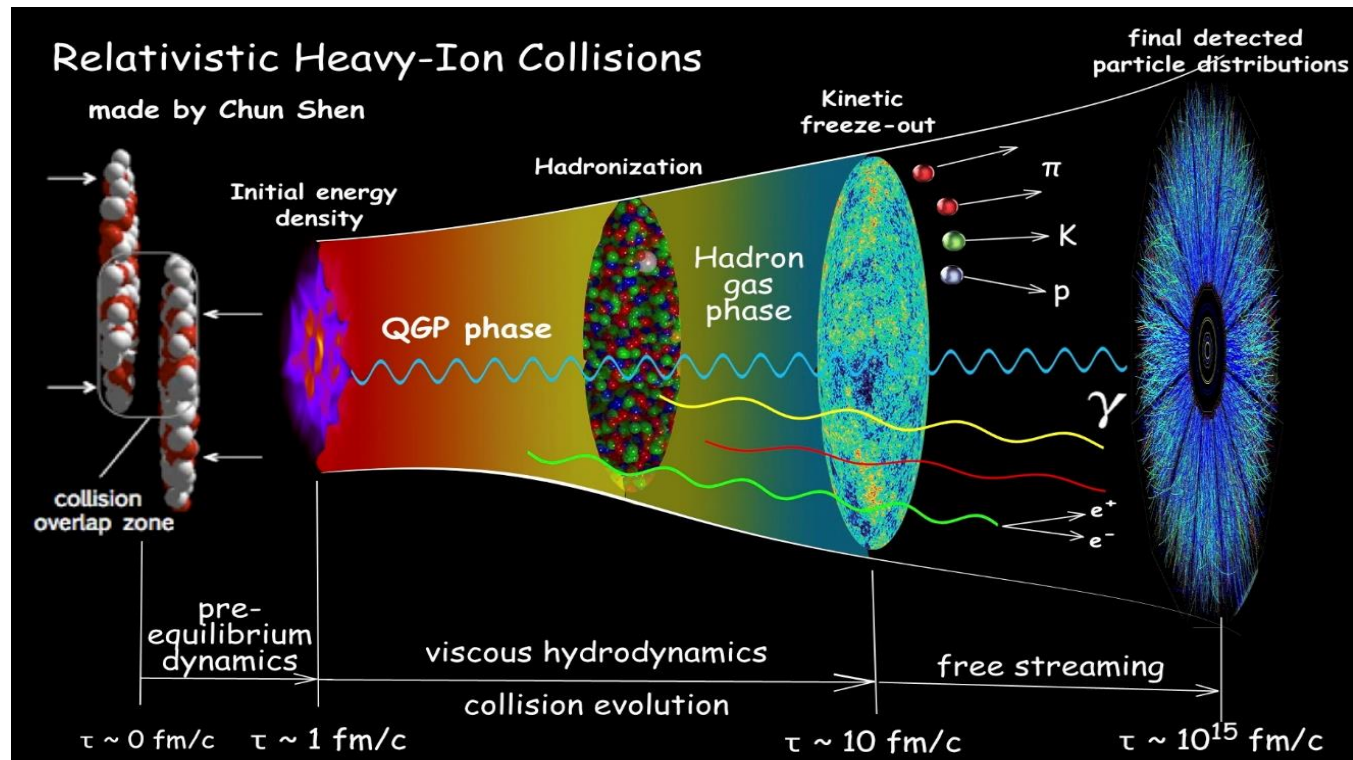


- 23. apríla 2009 kozmické observatórium Neil Gehrels Swift Observatory pozorovalo 10s gama záblesk v súhvezdí Leva.
- Záblesk je dôsledkom výbuchu spojeného s kolapsom supernovy a so vznikom čiernej diery
- Pozorovanie doteraz najstaršieho objektu vo vesmíre, zánik supernovy pred 13 miliardami rokov.
- Udalosť sa odohrala len 630 miliónov rokov po veľkom tresku.

HISTORY OF THE UNIVERSE



Horúca a hustá jadrová hmota



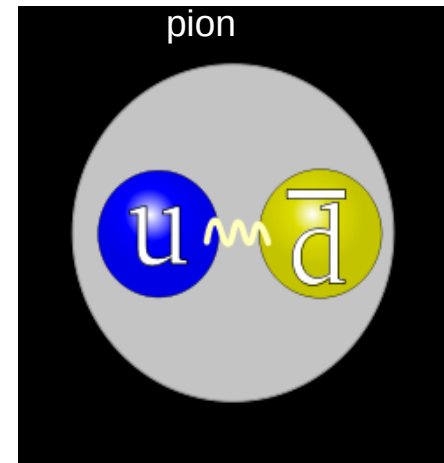
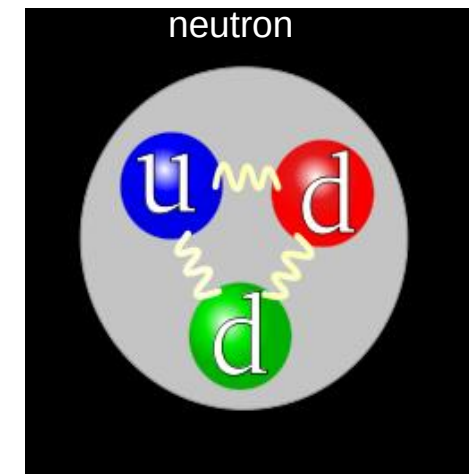
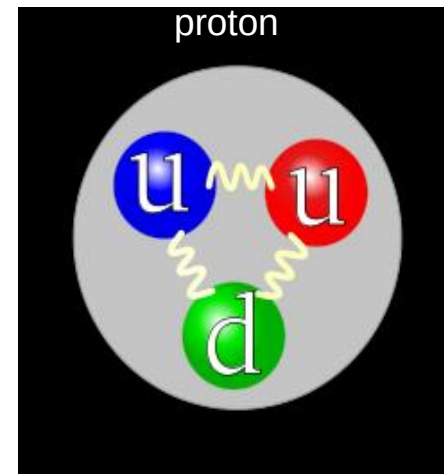
- Zrážky jadier zlata na urýchl'ovači RHIC v Brookhavenskom národnom laboratóriu v USA a olova na LHC v CERN umožňujú napodobniť prvé mikrosekundy po veľkom tresku.
- Na krátku dobu (10^{-23} s) vzniká veľmi horúca a hustá jadrová hmota, **kvarkovo-gluónová plazma** (QGP) ($T \sim 10^{12} \text{ K}$, 10 x hustejšia ako atómové jadrá). QGP má vlastnosti ideálnej kvapaliny.
- Ideálne podmienky pre štúdium vlastností silnej interakcie a fyzikálnych zákonov mikrosвета elementárnych častíc.

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3



Hadrony jsou bezbarvé
kombinace kvarků.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electri-

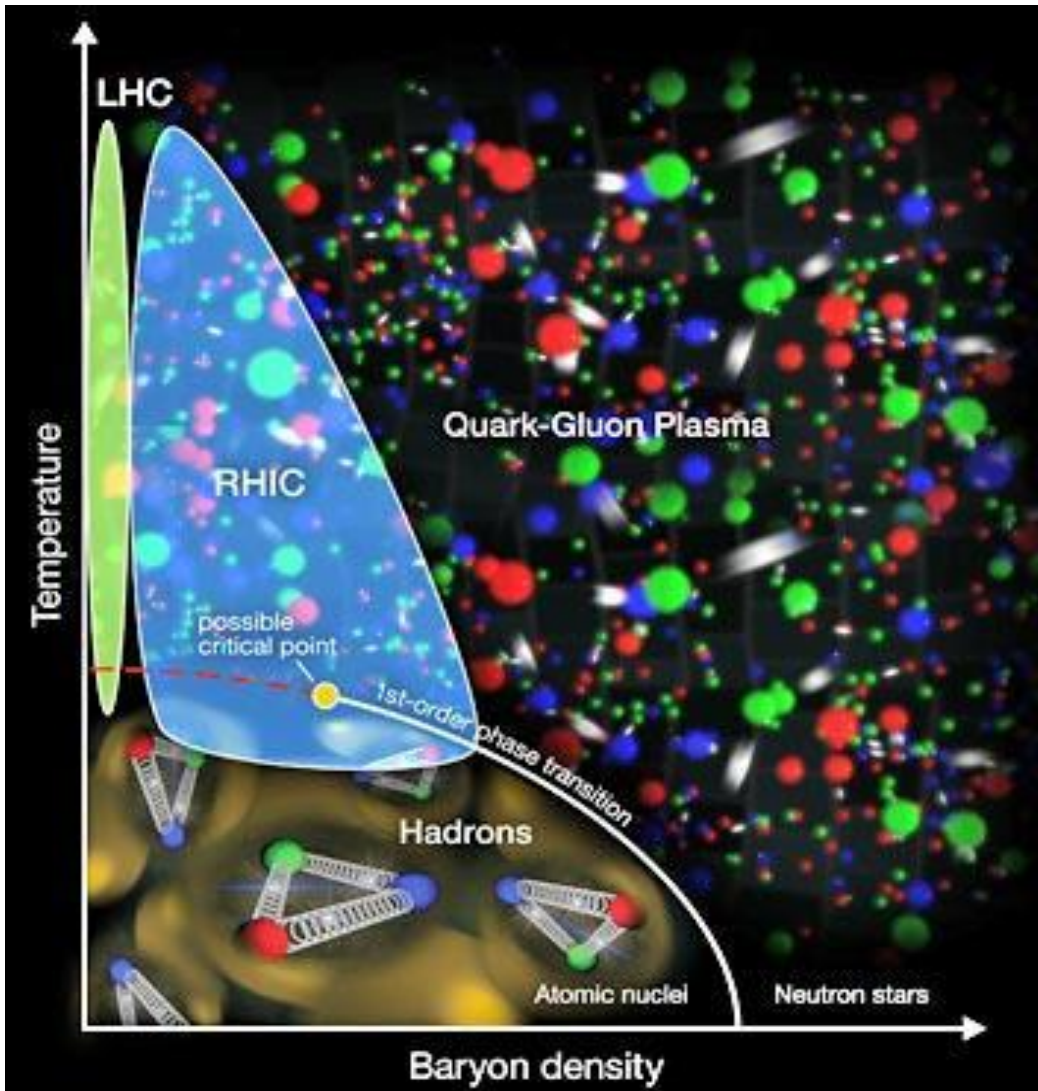
<https://pdglive.lbl.gov/Viewer.action>

najaktuálnejšie poznatky o vlastnostiach
elementárnych častíc

KATRIN: Neutrinos wiegen höchstens 0.8 eV

Nature Physics 18, 160–166 (2022) 14.2.2022

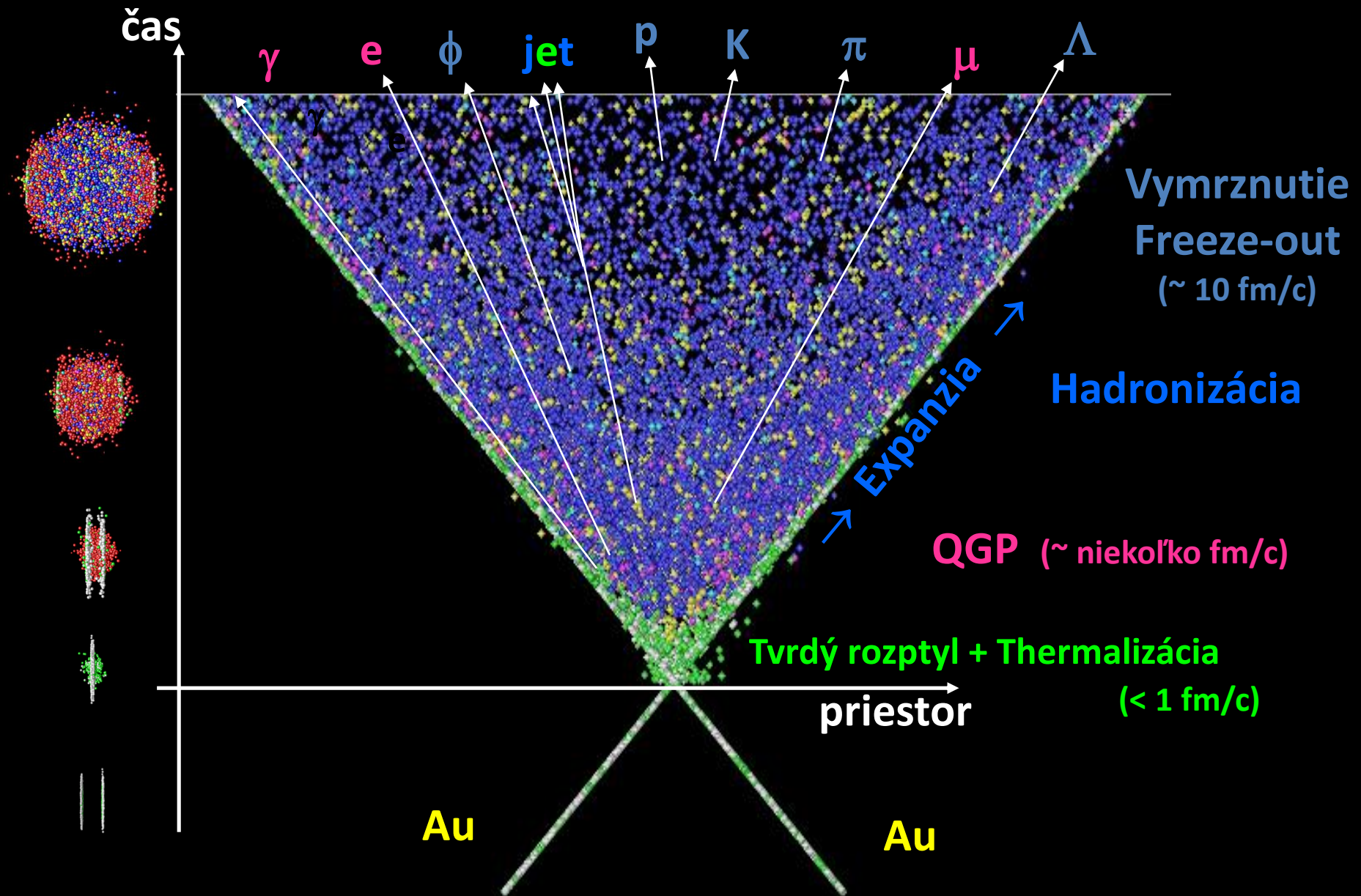
Fázový diagram jaderné hmoty



Základní cíle:

- popis nového stavu hmoty – kvarkovo-gluonové plazma (QGP)
- pochopení fázového přechodu mezi hadronovou hmotou a QGP – hledání kritického bodu (2019 – 2021)
- porozumění interakci kvarků a gluonů v QGP

Časovo-priestorový vývoj zrážky na RHIC



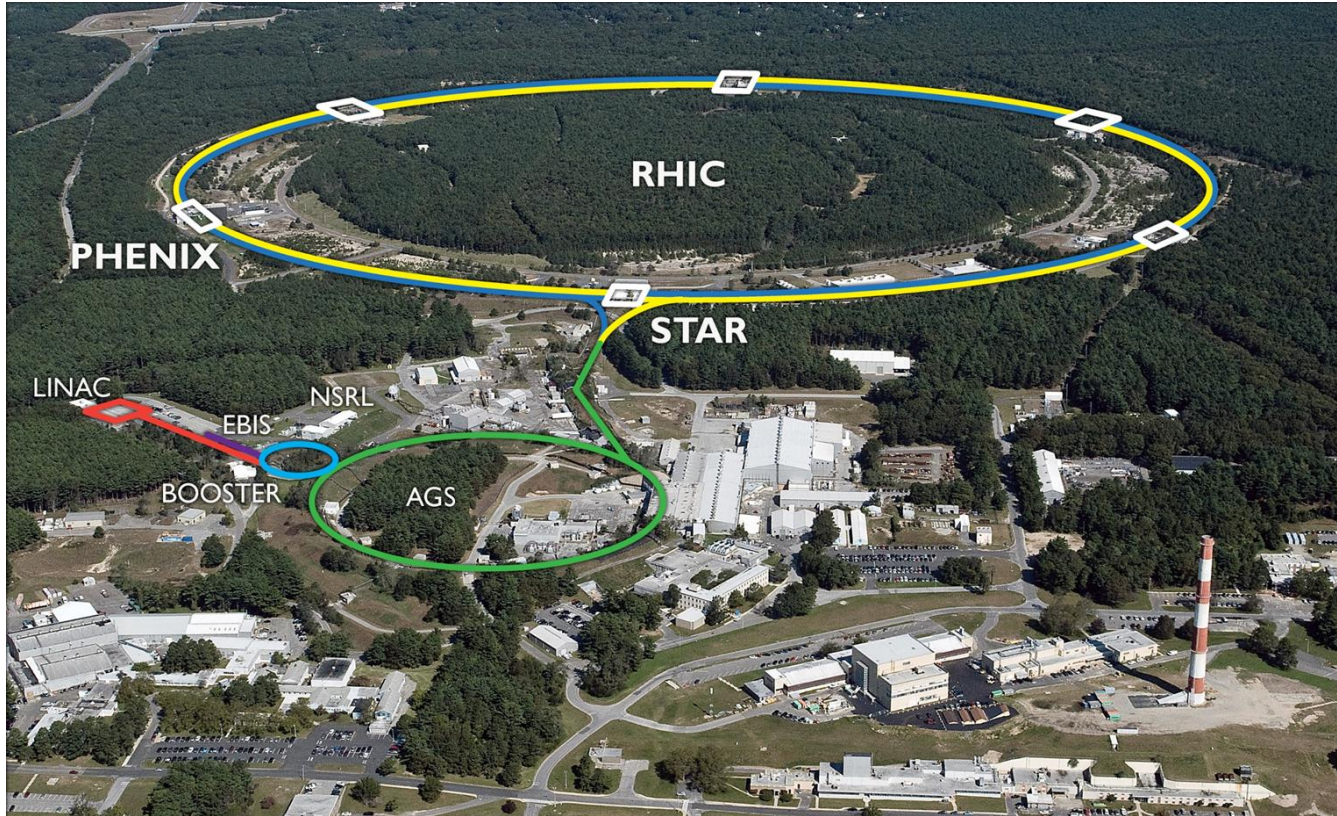
Long Island NY



Base from U.S. Geological Survey State base map, 1:100,000, 1979,
Universal Transverse Mercator projection, NAD 27, Zone 18



Brookhavenské národné laboratórium



- Jedno z najvýznamnejších svetových vedeckých centier základného a aplikovaného výzkumu v USA.
- 5 Nobelových cien za fyziku
2 Nobelové ceny za chémiu
- Urýchľovač **RHIC** – špecializovaný na jadro-jadrové zrážky
- Experiment STAR – zber dát
- Experiment sPHENIX – príprava
- Veľká infraštruktúra BNL-CZ
- Očakávaná prevádzka do 2025
- Prestavba na Electron-Ion Collider¹⁰

Hlavné skúmané systémy:

$p\uparrow+p\uparrow$, $p/d+Au$, $Cu+Cu$, $Cu+Au$, $Au+Au$, $U+U$

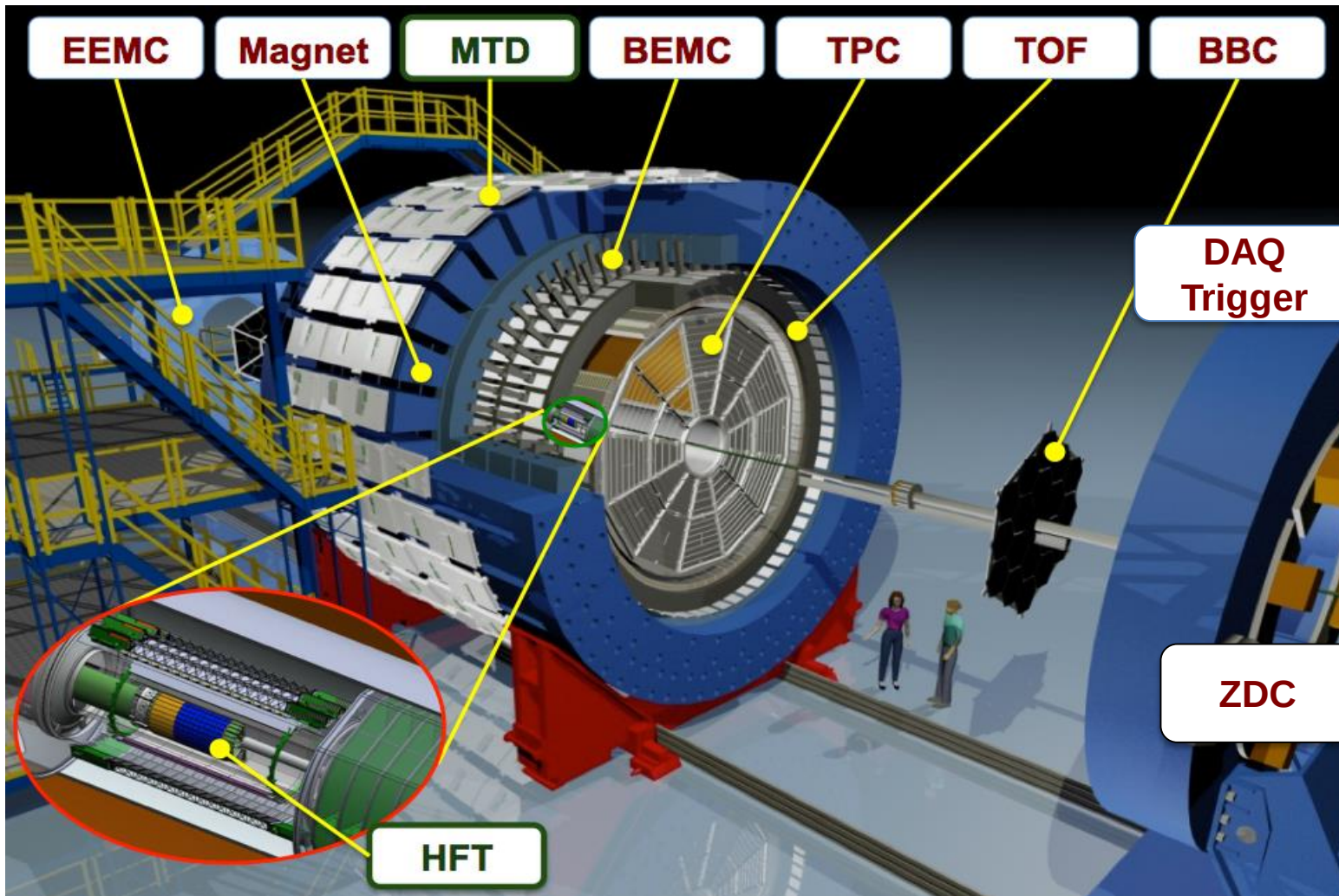
Energie

$\sqrt{s_{NN}} = 7$ až 200GeV (500 GeV)

Najväčšia luminozita $Au+Au$ 200 GeV : $155 \times 10^{26}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$

$p+p$ 200 GeV : $115 \times 10^{30}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$

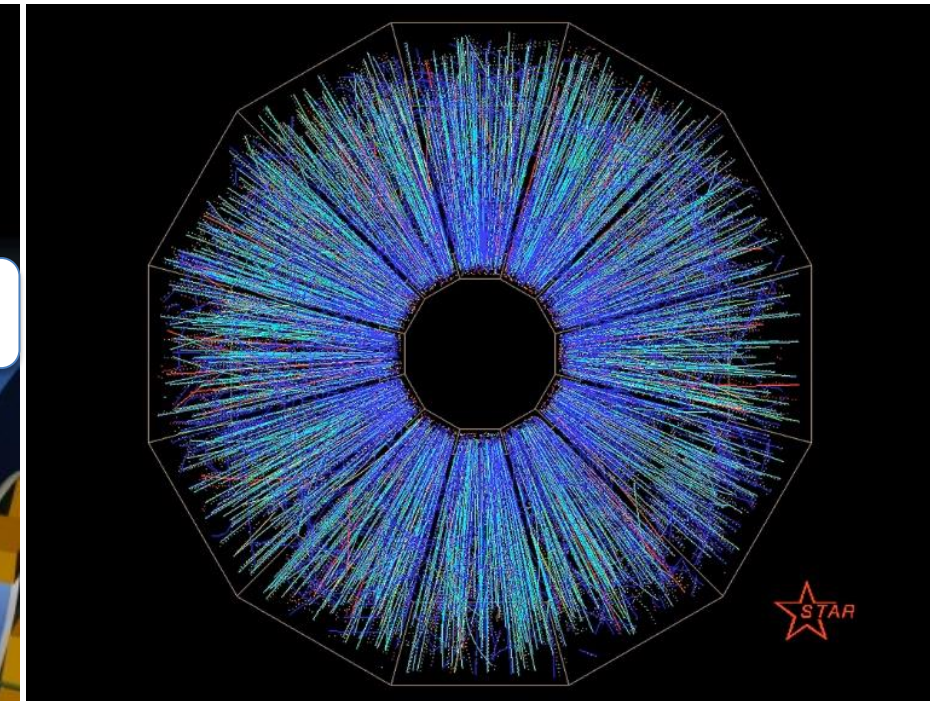
STAR experiment



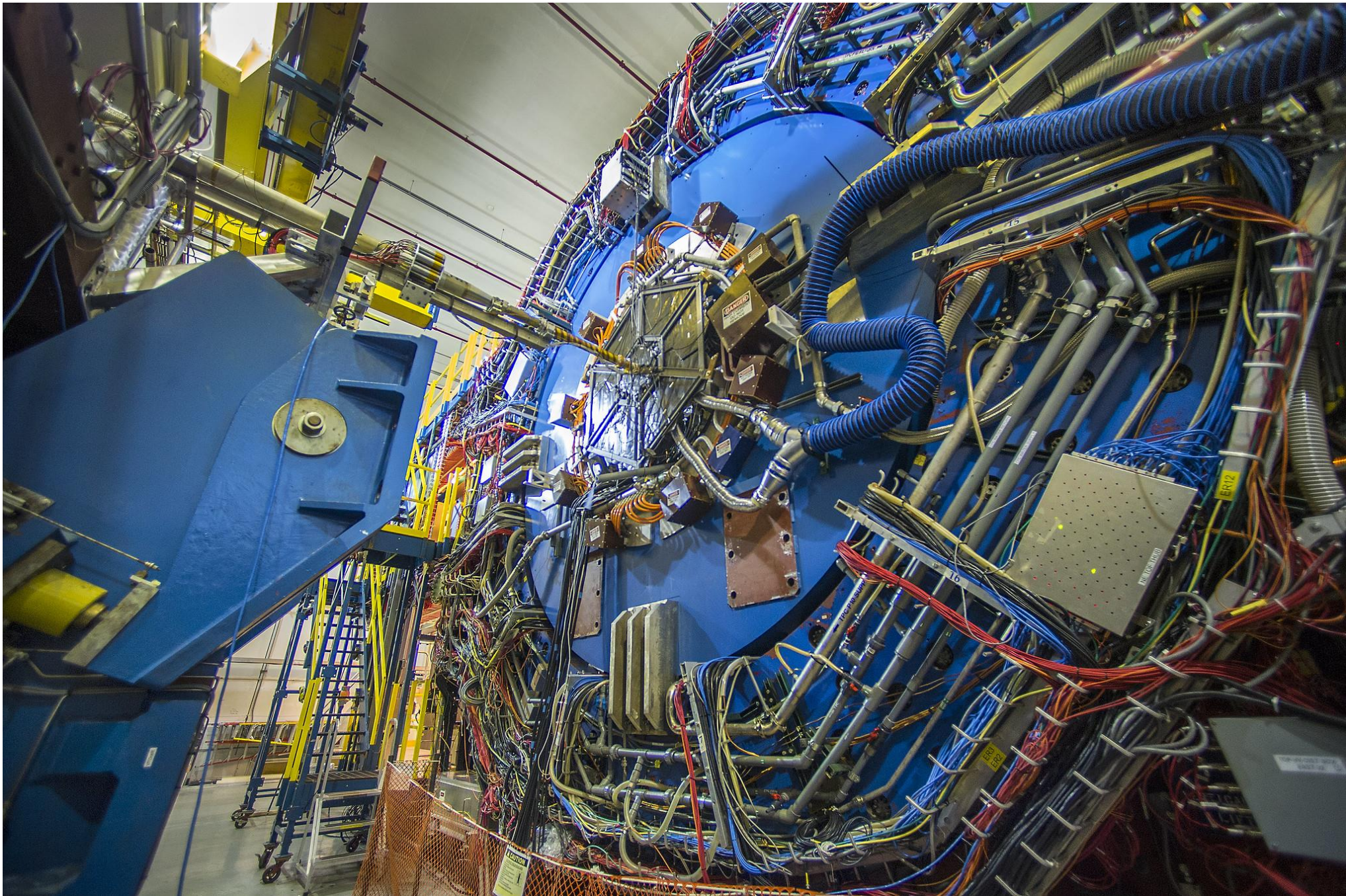
TPC/TOF/BEMC: $|\eta| < 1$

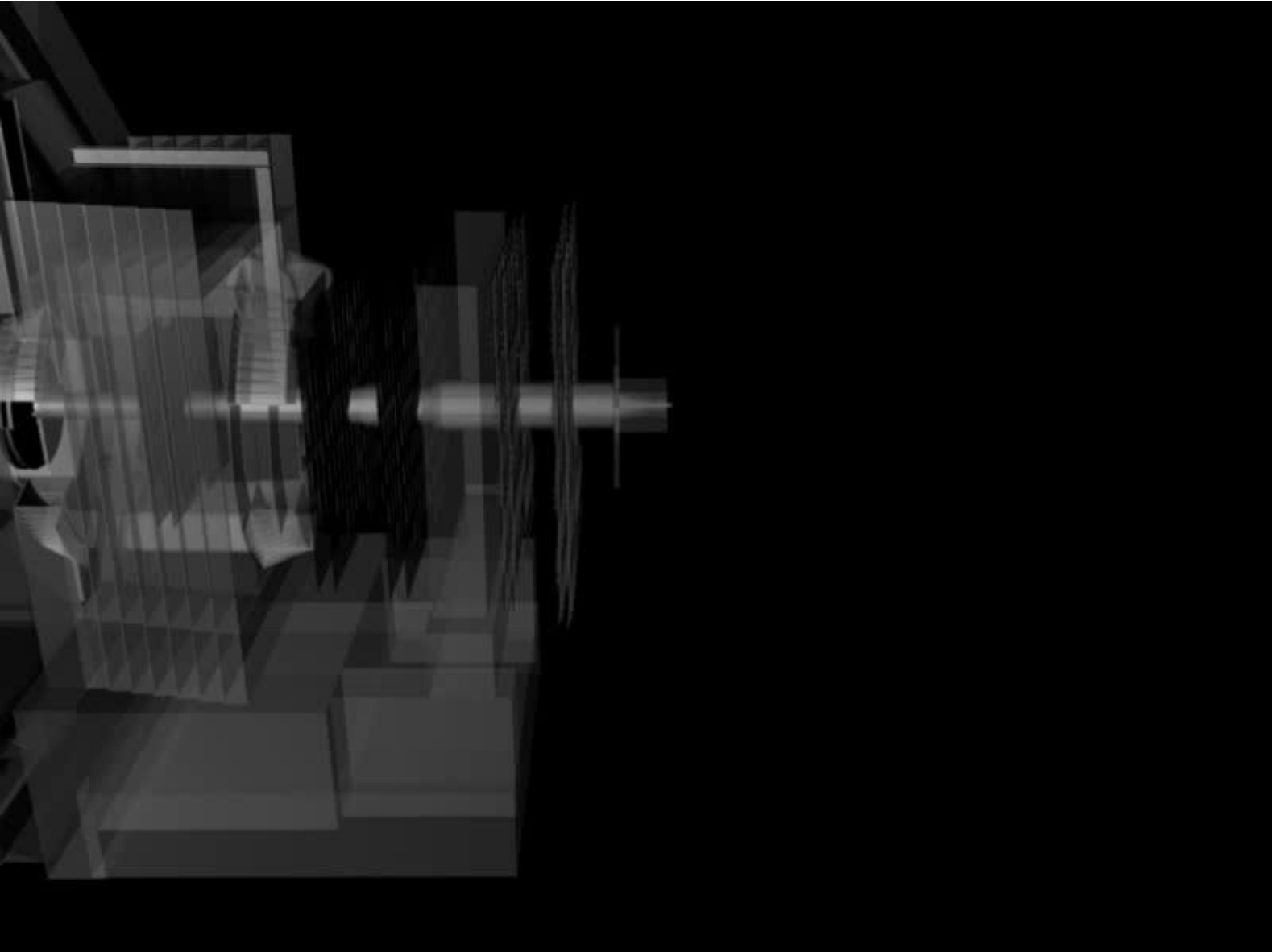
HFT: $|\eta| < 1$

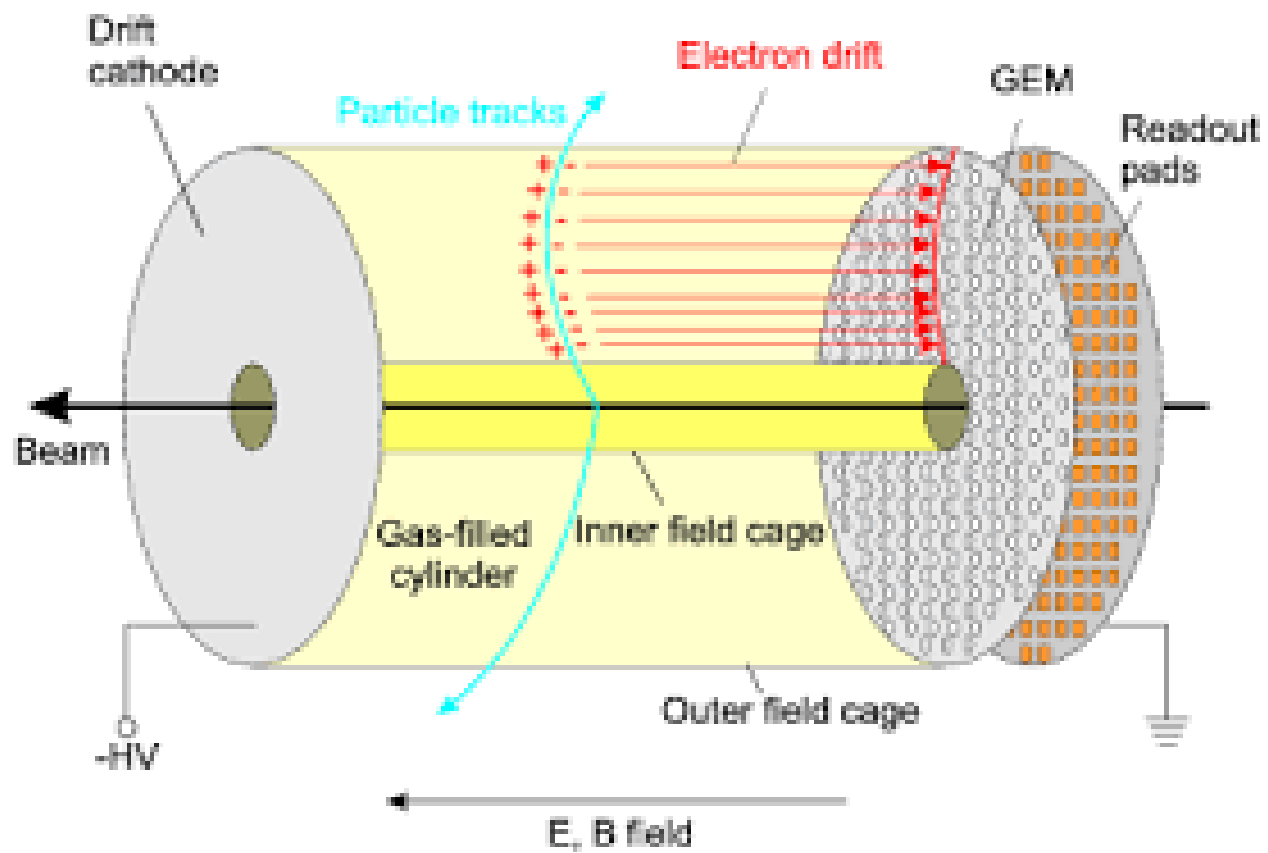
MTD: $|\eta| < 0.5$



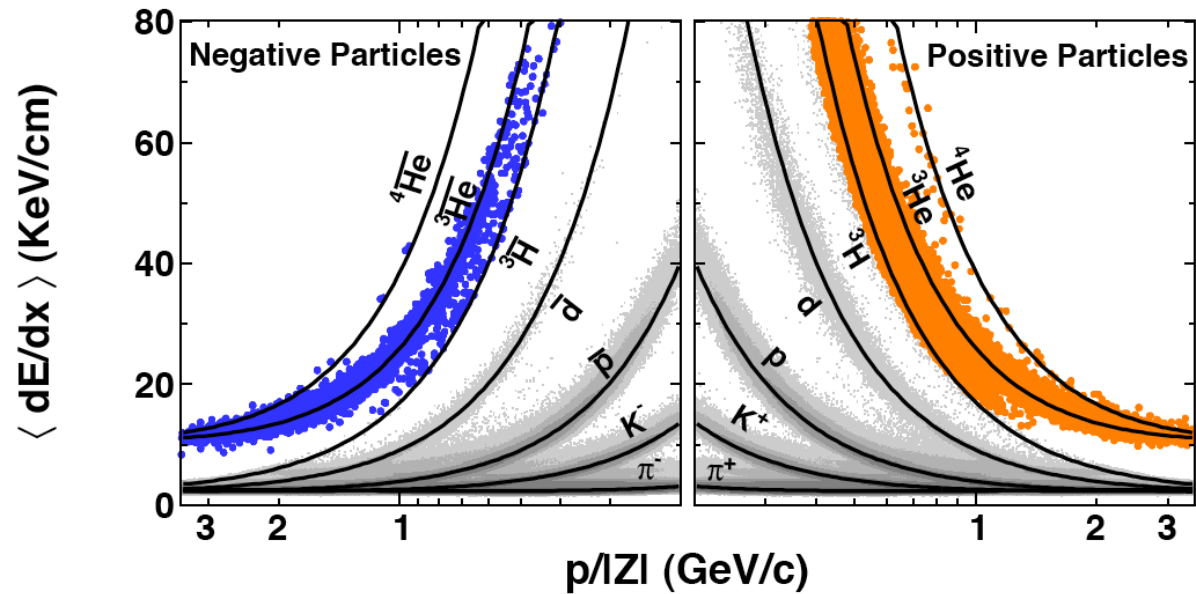
- Vzniká až 4000 nabitých hadrónov
- Zaznamenávame produkty zrážky $\sim 2\text{kHz}$
- TPC (časovo projekčná komora)
 - dráhy nabitých častíc
 - určenie hybnosti
 - identifikácia druhu častice



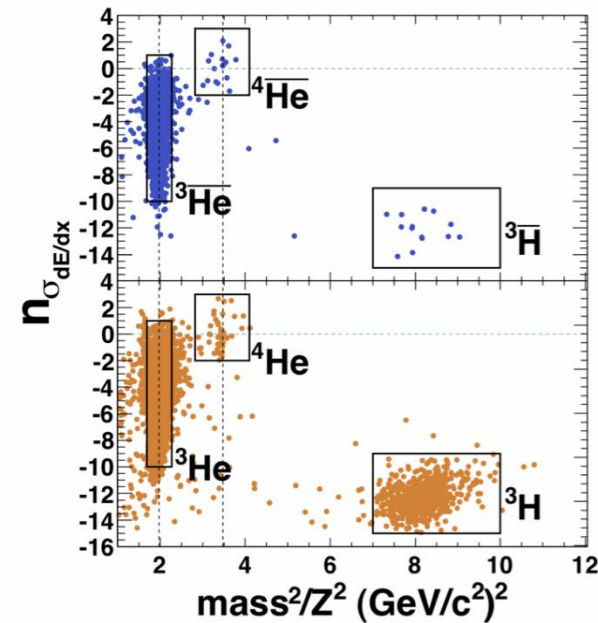




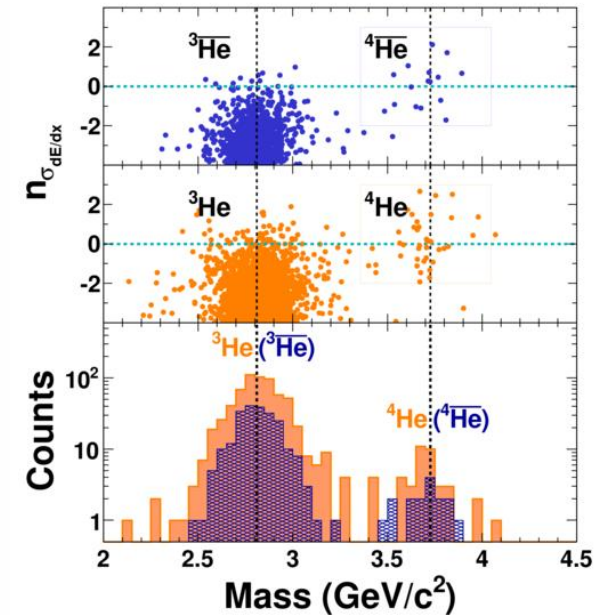
Identifikácia častíc v TPC



- Os x: *rigidita* = $p/|Z|$, os y: *ionizačné straty* dE/dx
- Výber udalostí s $|Z| = 2$
- Celkom 10^9 Au+Au zrážok
- Pri vyšších p hodnota dE/dx rôznych častíc nestačí k ich rozlíšeniu - nutná informácia z detektora doby letu TOF



kombinovaná identifikácia
častíc v TPC a TOF →



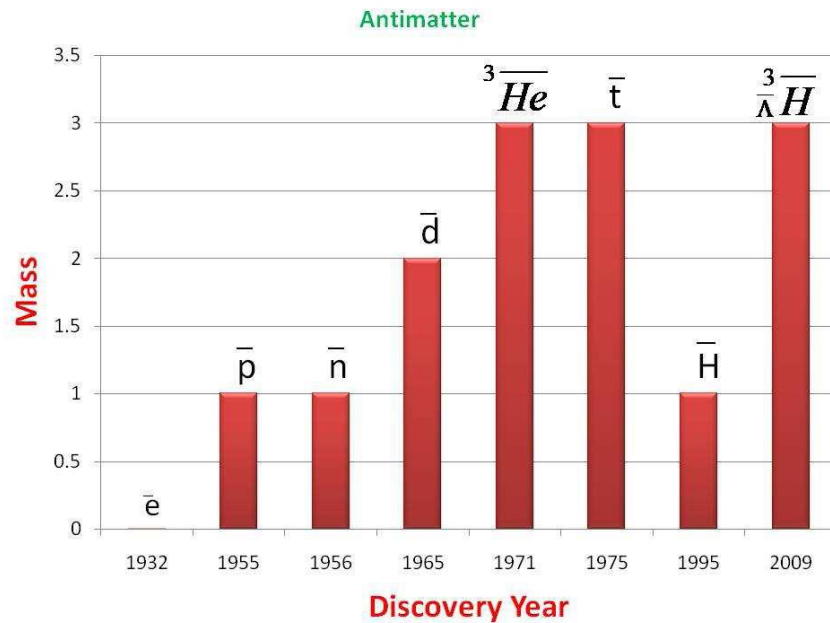
$$m^2/Z^2 = p^2/Z^2(1/\beta^2 - 1)$$

STAR pozoroval 18 jadier antihélie 4

STAR, Nature **473** (2011) 353

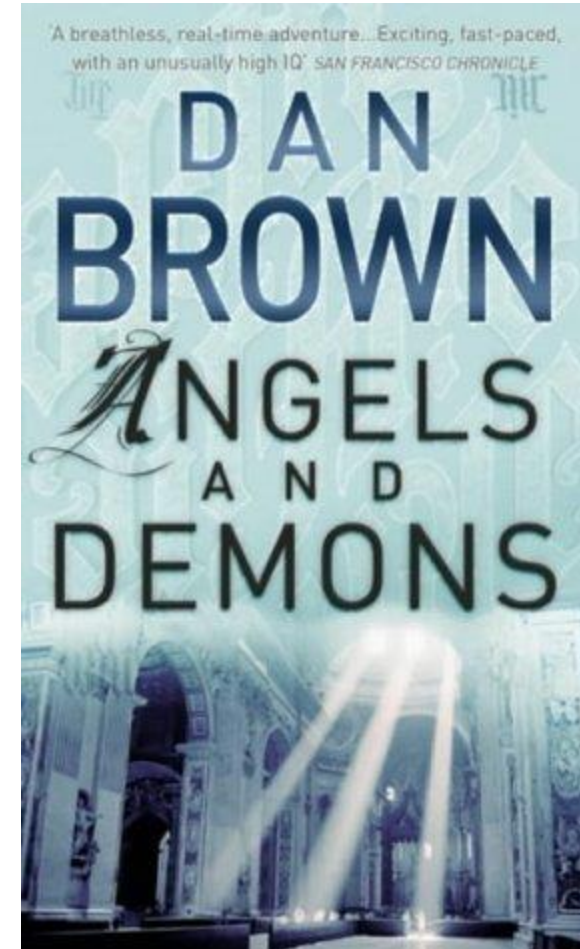
Továreň na antihmotu

- Zrážky vysokourýchlených častíc: produkcia približne rovnakého množstva hmoty a antihmoty
- Hmota anihiluje s antihmotou a uvoľní sa energia
- 1 g = 1 Hiroshima 20 ton TNT
- Avšak trvalo by 2 miliardy rokov ju vyprodukovať

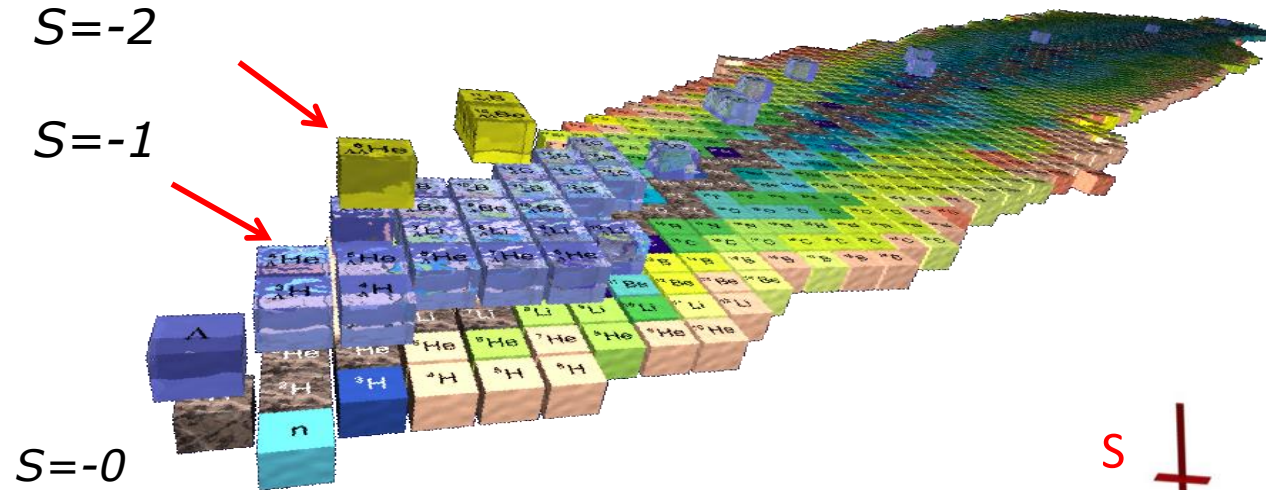


$${}^3_{\Lambda}H(n + p + \Lambda) \quad \text{STAR Science 328 (2010) 58}$$

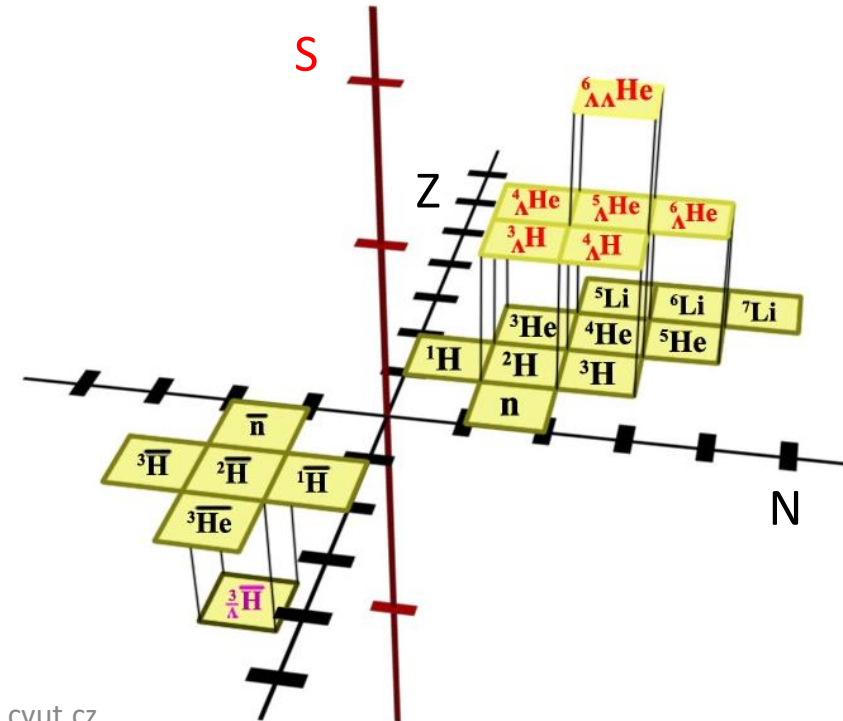
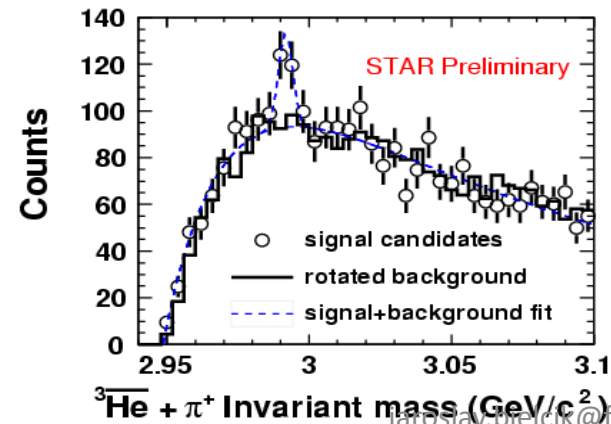
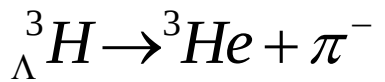
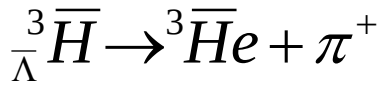
$${}^3_{\bar{\Lambda}}\bar{H}(\bar{n} + \bar{p} + \bar{\Lambda})$$



Observation of antihypertriton at STAR



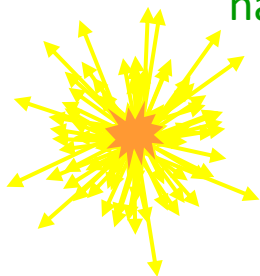
Au+Au 200 GeV



Čomu je zrážka podobná?

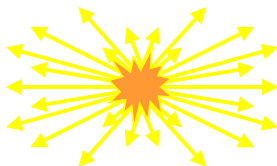
1) Súčet nezávislých p+p: :

hybnosti sú nezávislé
na reakčnej rovine

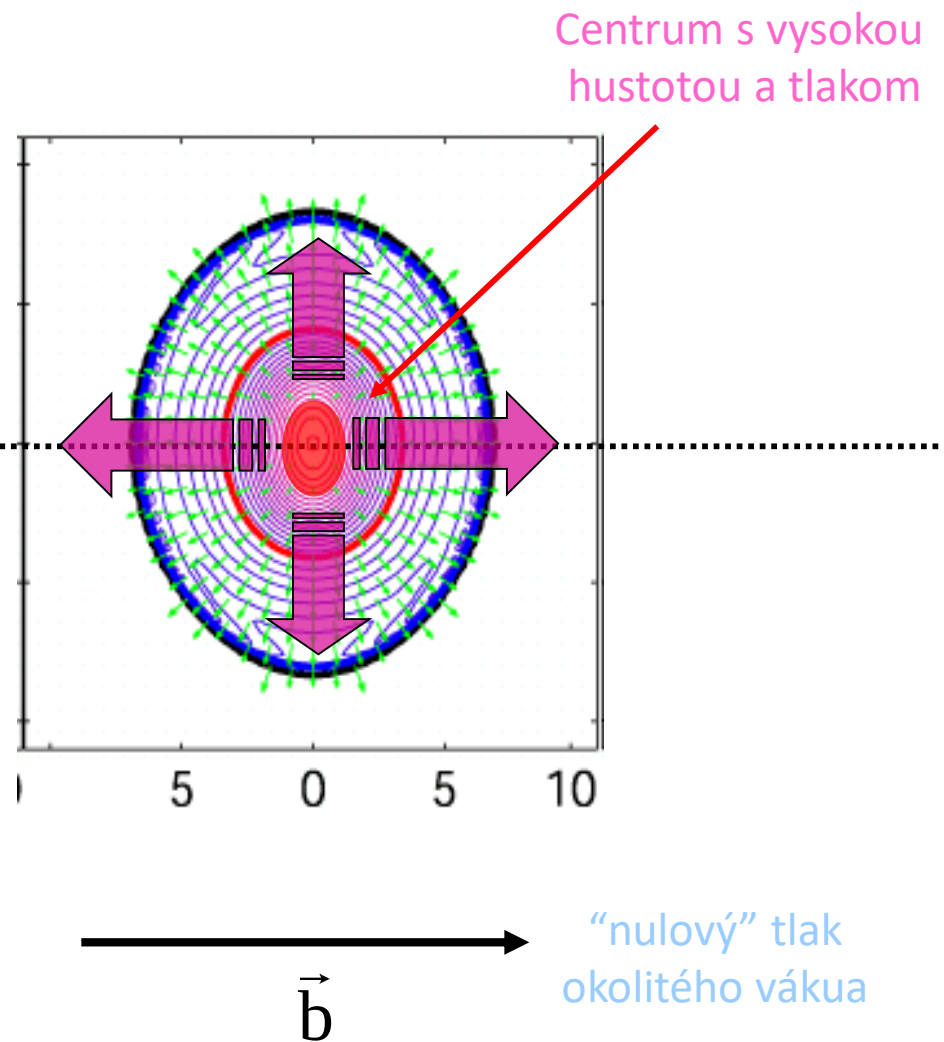


2) Vývoj ako kolektívny systém

Gradient tlaku (väčší v-rovine) tlačí hmotu
"von" → "tok"

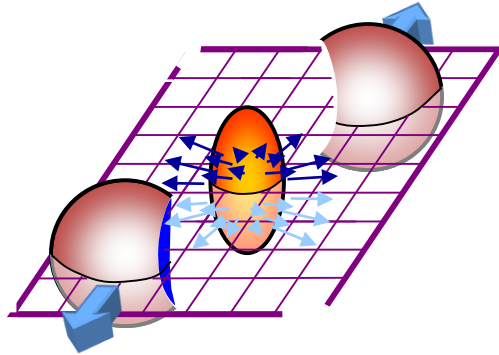


viac, rýchlejšie častice
sa pozorujú v-rovine

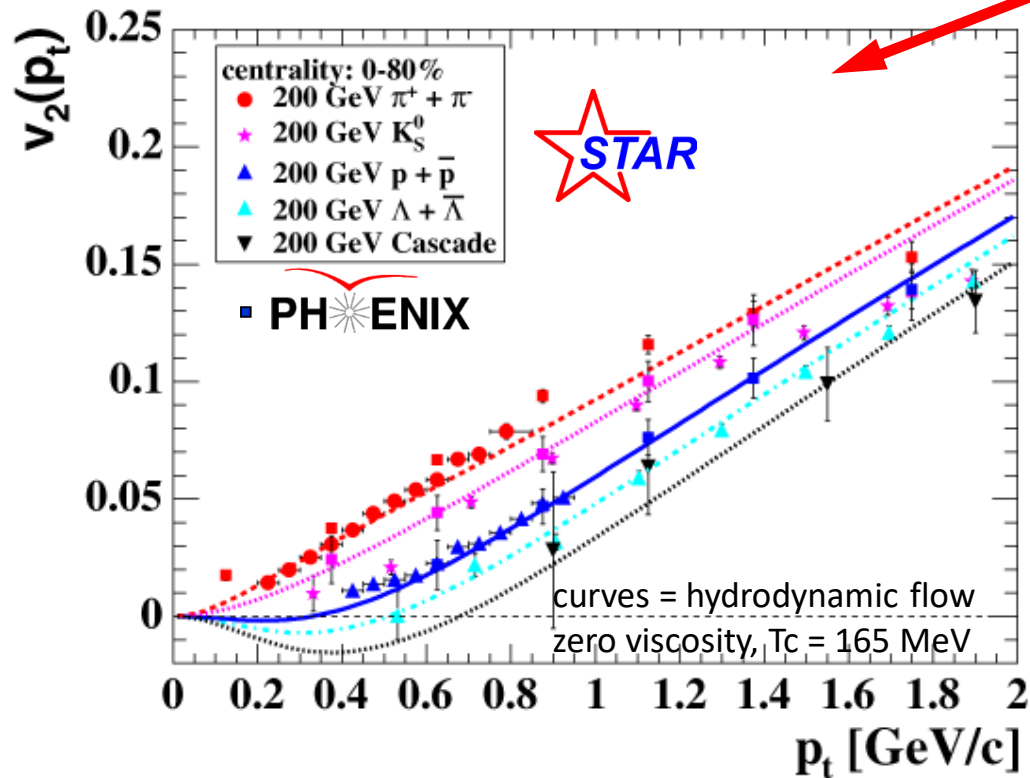




Jadrová perfektná tekutina



- Úhlová asymetria nabitých častíc:
 $dn/d\phi \sim 1 + 2 v_2(p_T) \cos(2\phi) + \dots$



Mass dependence of v_2

predpoklady:

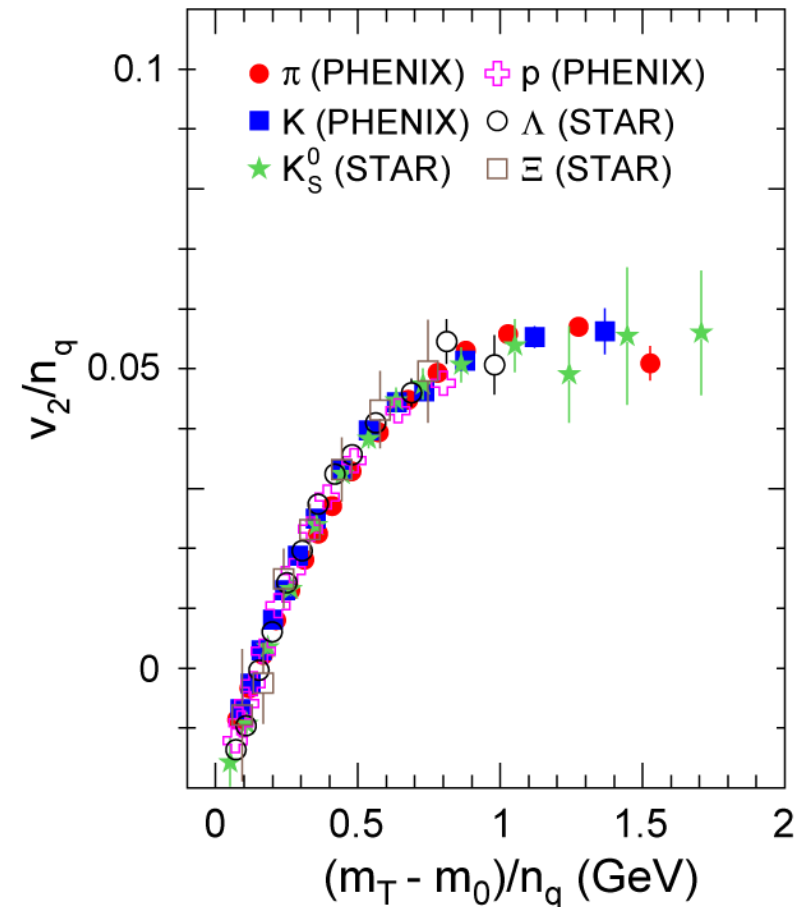
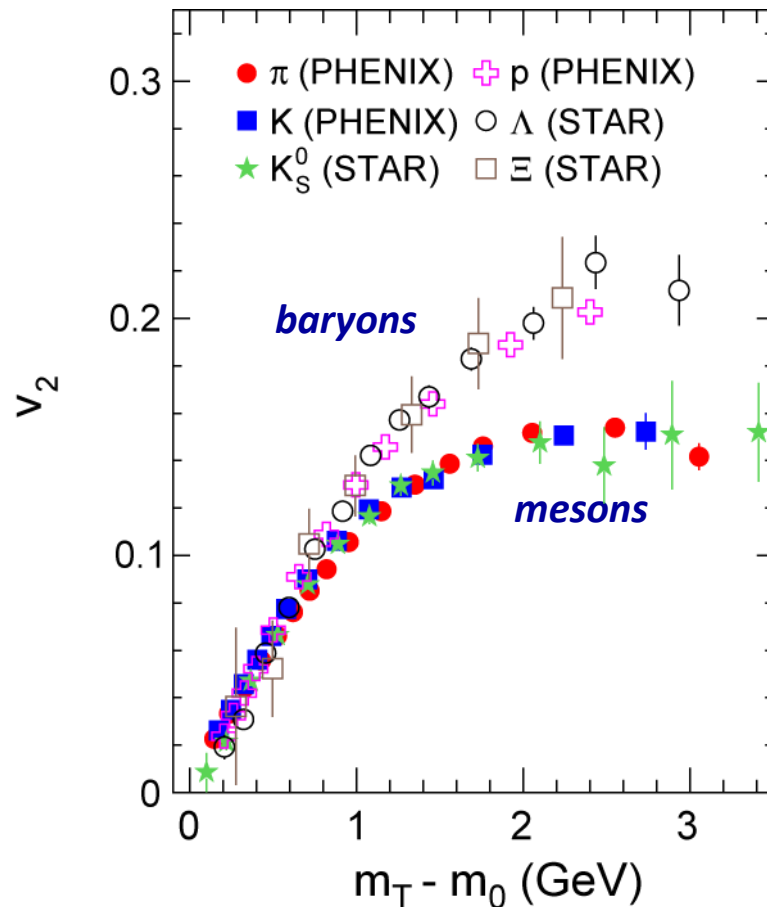
- Skorá termalizácia
(0.6 fm/c)
- Ideálna hydrodynamika
(nulová viskozita)
→ “skoro perfektná kvapalina”
- $\varepsilon \sim 25 \text{ GeV/fm}^3 (\gg \varepsilon_{\text{critical}})$
- Kvarkovo-gluónova stav. rov.

Hadronový eliptický tok odpovedá kvarkovému toku

Zložitá $v_2(p_T)$ závislosť toku pre rôzne hadróny

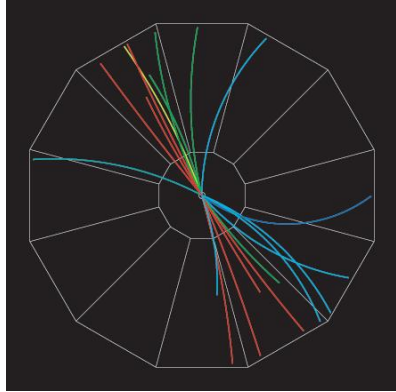
Ak tok vzniká na kvarkovej úrovni, potom čakáme *zjednodušenie*

$p_T \rightarrow p_T / n$, $v_2 \rightarrow v_2 / n$, $n = (2, 3 \text{ kvarky})$ pre (mezóny, baryóny)

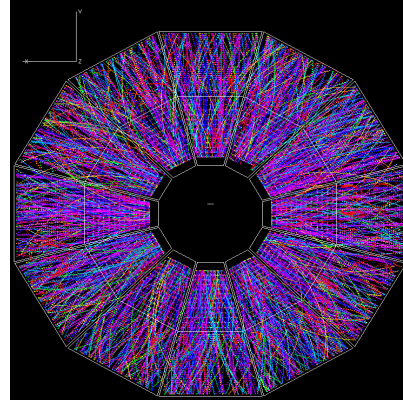


Zhášanie výtryskov častíc

p+p zrážka



Au+Au zrážka

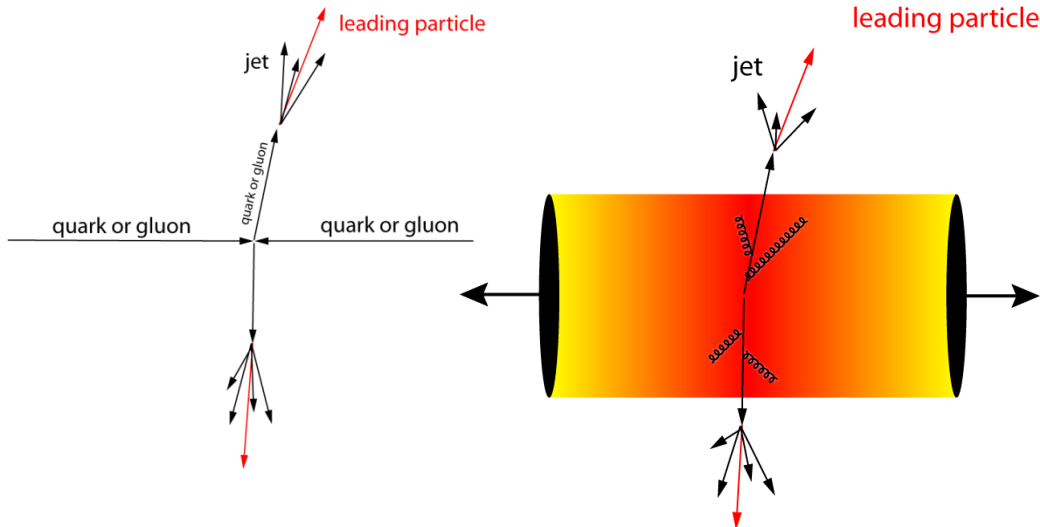


- jadrový modifikačný faktor R_{AA} :

$$R_{AA}(p_T) = \frac{Yield(A+ A)}{Yield(p + p) \times \langle N_{coll} \rangle}$$

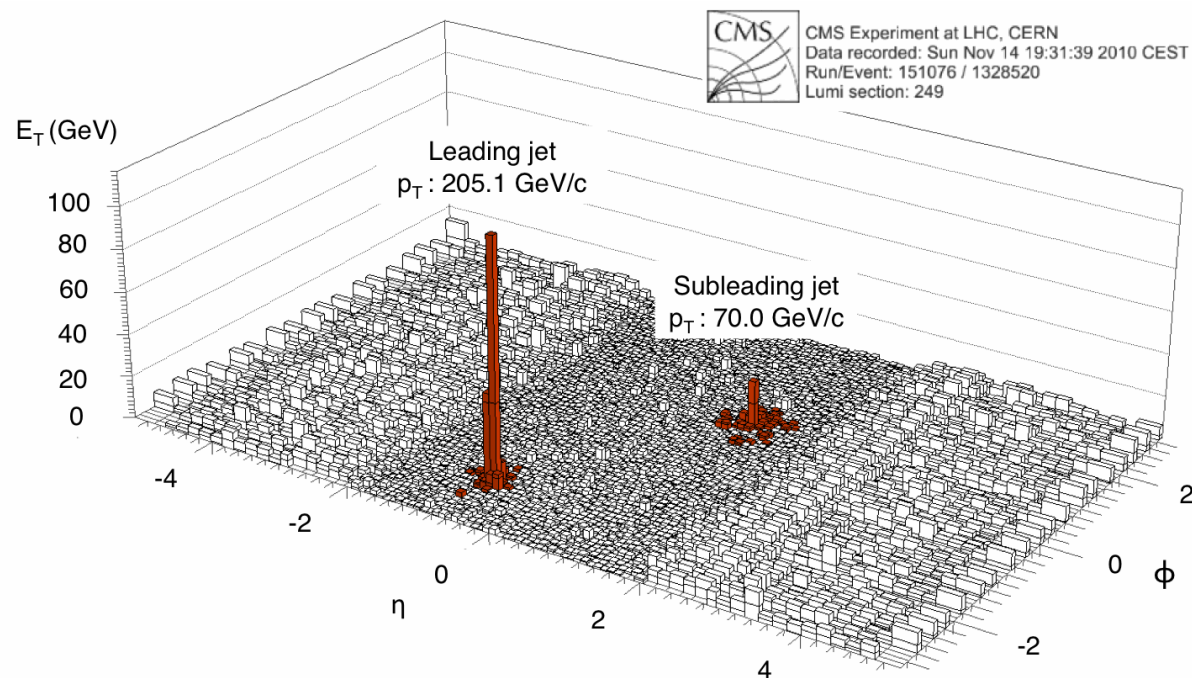
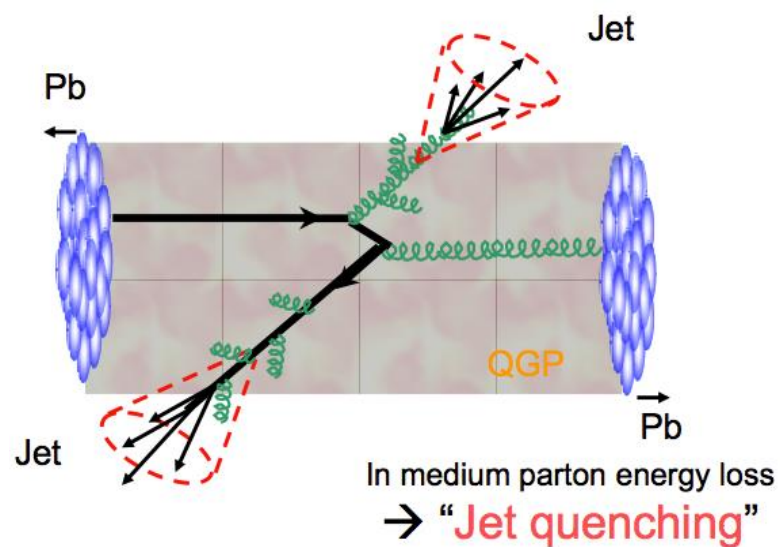
Priemerný počet n-n zrážok v Au+Au zrážke

- Žiadny vplyv jadrovej hmoty:
 $R_{AA} = 1$ pre produkciu častíc s vysokým p_T
- Potlačenie produkcie: $R_{AA} < 1$



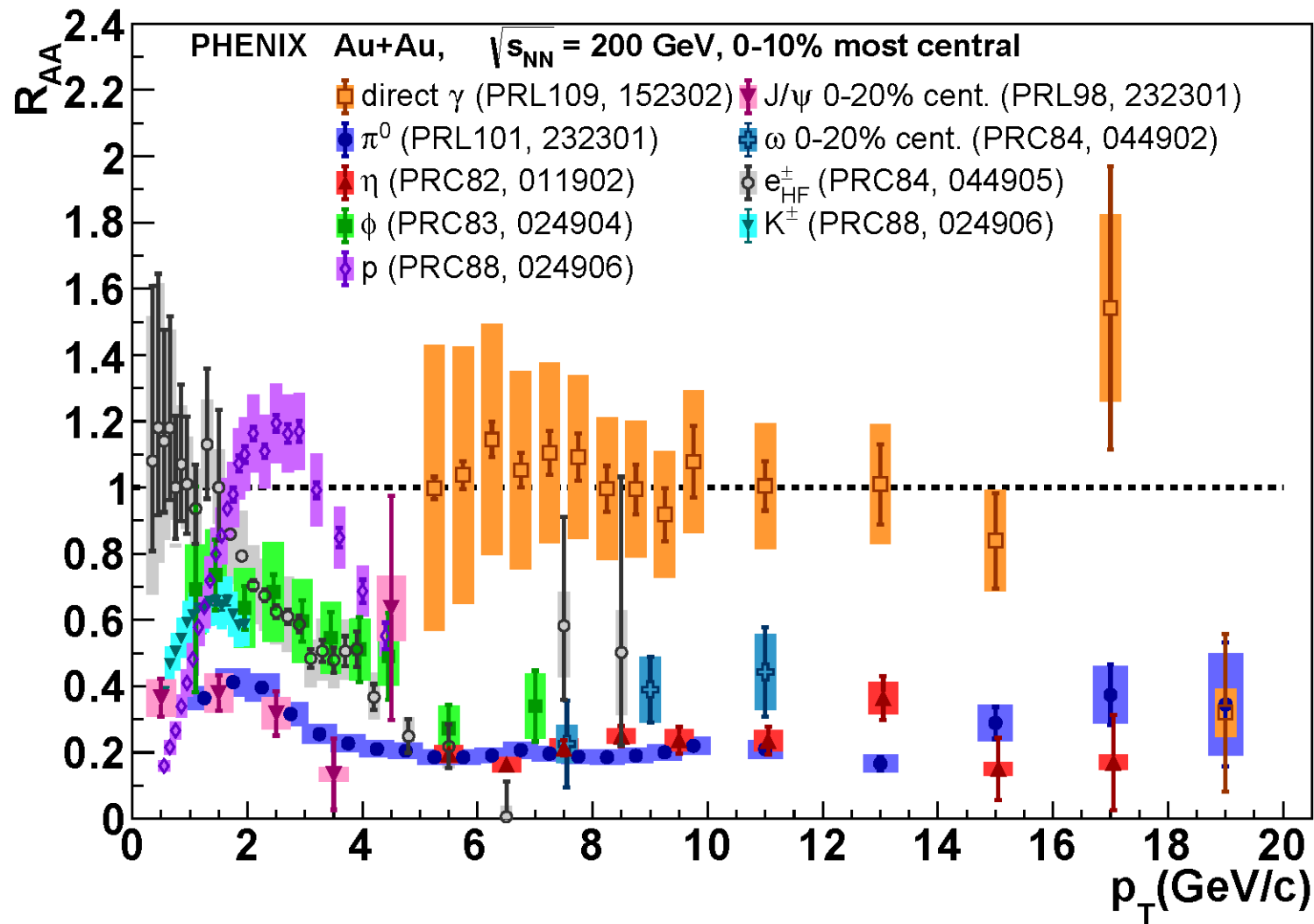
- Partóny interagujú s horúcou a hustou jadrovou hmotou, strácajú energiu
- Meranie produkcie častíc s vysokým p_T v Au+Au vzhľadom k p+p umožňuje zisťovať informácie o vlastnostiach jadrovej hmoty

Zhášanie výtryskov častíc



Dva výrazné výtrysky z jedného tvrdého rozptylu partónov
(Experiment CMS na LHC)

Produkcia častíc v zrážkach Au+Au 200 GeV



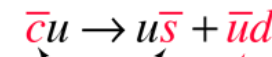
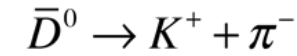
- Jadrová hmota vyprodukovaná v centrálnych Au+Au zrážkach je nepriehľadná pre tvrdé farebné partóny
→ potlačenie produkcie hadrónov s vysokým p_T
zhášanie výtryskov častíc
len QGP ich dokáže takto zbrzdiť
- Priame fotóny nie sú potlačené
neinteragujú silne

OTÁZKA:

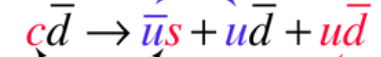
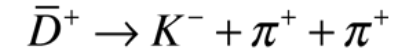
je rozdiel v stratách energie ľahkých a ťažkých partónov v QGP?

Jak najít D meson?

- Najprv musíme vybrat vhodný rozpad



weak interaction W^{*-}



weak interaction W^{*+}

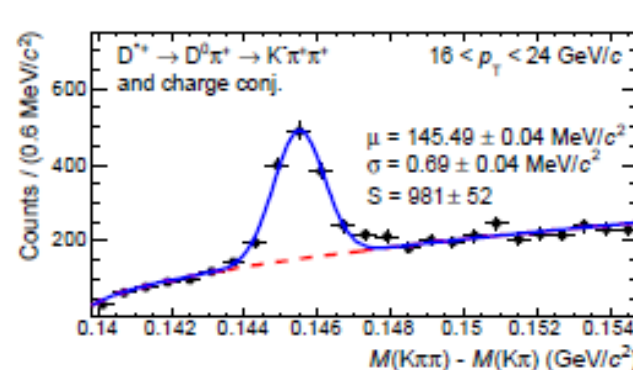
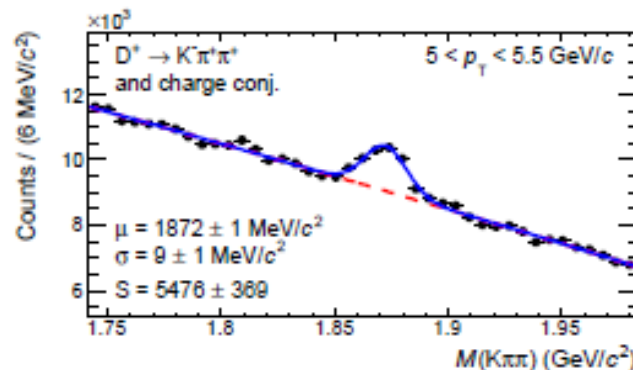
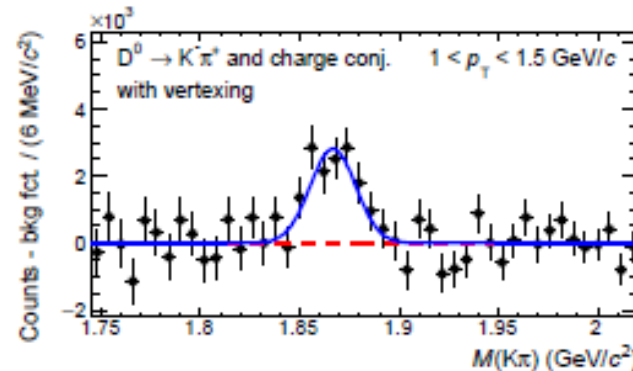
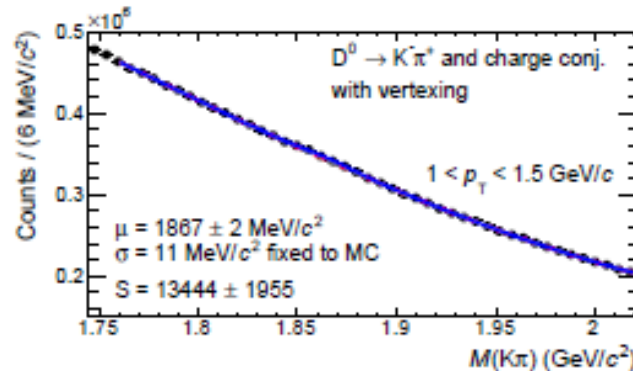
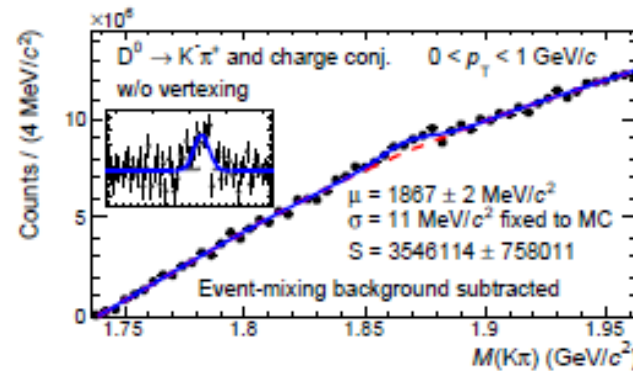
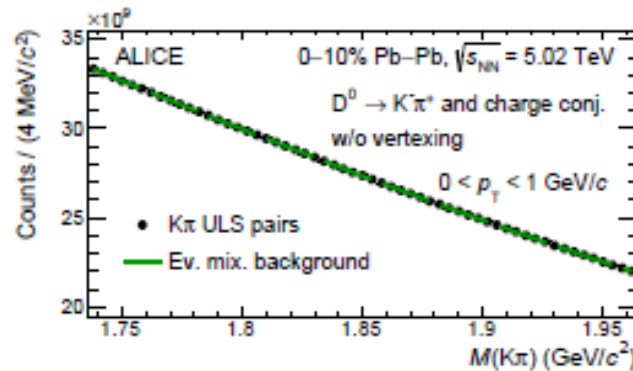
- Vyberieme vhodbe K,π páry

- Vyberieme nevhodné K,π páry

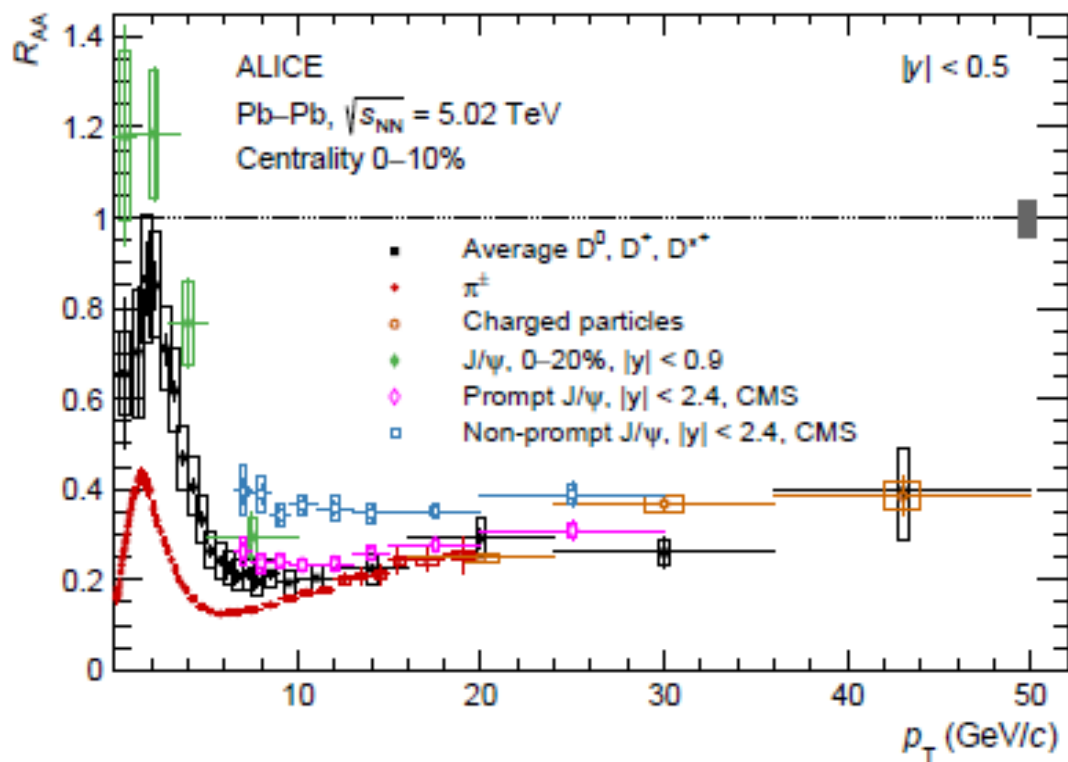
- Stanovíme hrubý výťažok

- Korigujeme výsledok na všetky straty v jednotlivých krokoch

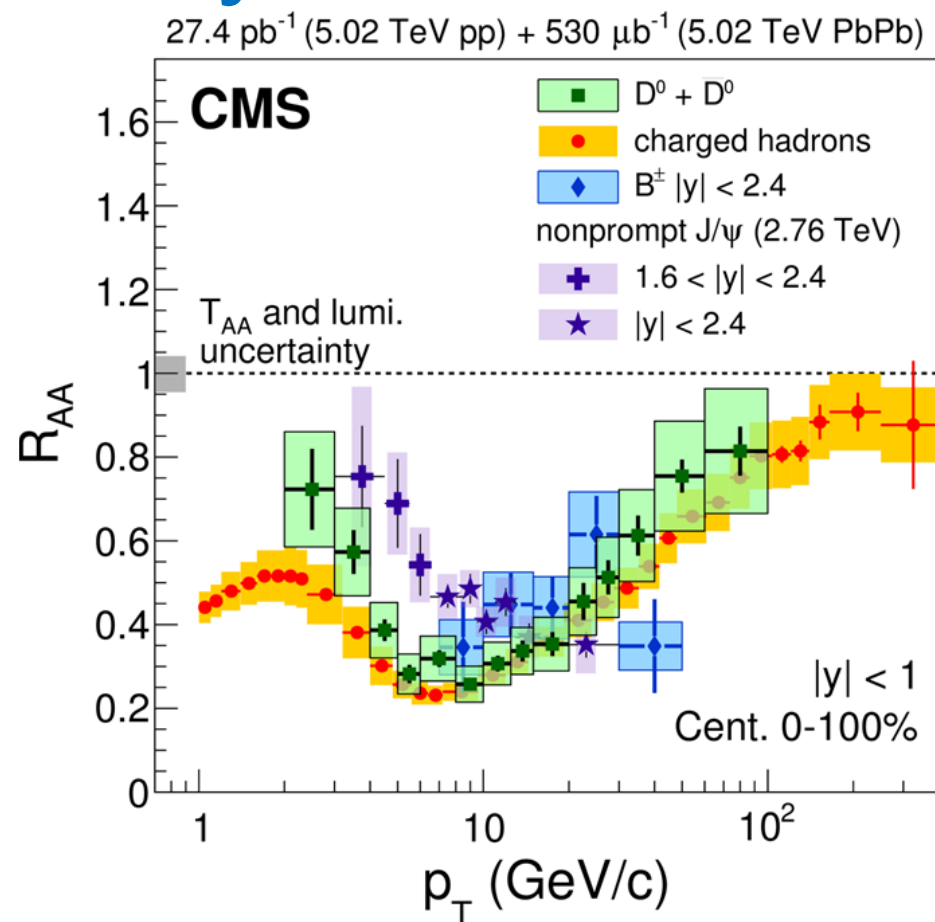
- Určíme neistotu výsledku



Produkcia krásnych kvarkov



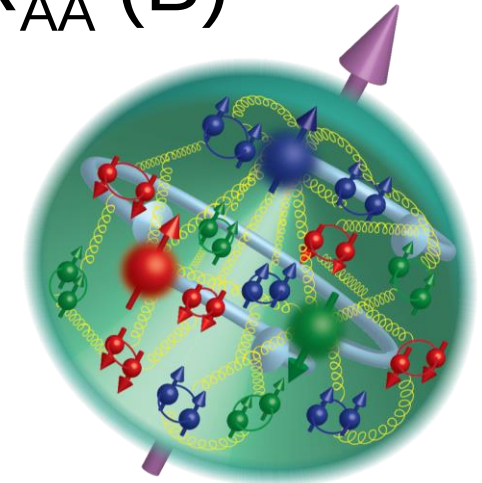
ALICE, J. High Energ. Phys. 2022, 174 (2022)



- D mesony sú potlačené menej ako pióny ale viac ako non-prompt $B \rightarrow J/\psi$
- Priame merania produkcie B na LHC ukazujú možnú hierarchiu $R_{AA}(\pi) \sim R_{AA}(D) < R_{AA}(B)$

Zhrnutie a záver

- Experiment STAR, ALICE na urýchľovači RHIC skúma horúcu a hustú jadrovú hmotu
- Produkcia častíc s vysokou hybnosťou je potlačená v centrálnych jadro-jadrových zrážkách
- Experimentálne výsledky ukazujú možnú hierarchiu v potlačení produkcie $R_{AA}(\pi) \sim R_{AA}(D) < R_{AA}(B)$
- Electron-ion collider pre skúmanie štruktúry protónu





BIG BANG STAGE IN COLORS OF OSTRAVA 13. - 16. 7. 2022 vo Světe Techniky



- 4 days of lectures, workshops and discussions
- 2 tents with experiments
- 3000 visitors for lectures and 2000 for experiments



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
OP Výzkum, vývoj a vzdělávání



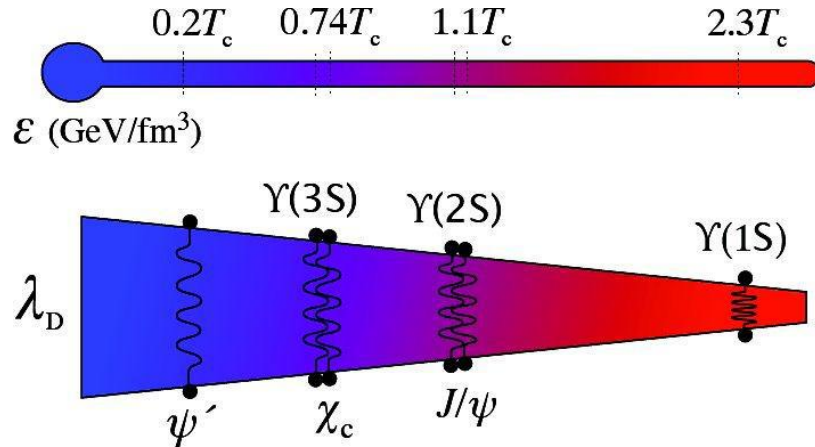
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



ČVUT
Česká vysoká
učební technická
v Praze

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu
Centrum pokročilých aplikovaných přírodních věd
reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000778 financovaného z OP VVV.

Měření teploty QGP pomocí kvarkonií



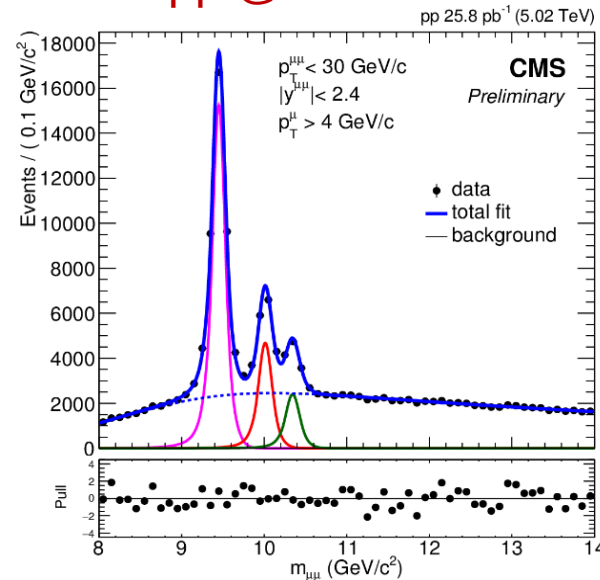
Kvarkonium: vázaný stav kvarku a jeho anti-kvarku

Charmonia: J/ψ , Ψ' , χ_c

Bottomonia: $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$

V jaderné hmotě dochází k rozpouštění vázaných stavů kvarkonií (nejpevněji jsou vázány základní stavy kvarkonií).

pp @ 5.02 TeV



Pb+Pb @ 5.02 TeV

