Predstavte si najteplejšie miesto vo Vesmíre…

Predstavte si najchladnejšie miesto vo Vesmíre…

Môžu takéto dve miesta koexistovať ?

Ireland
Belarus
Poland
Netherlands
Germany
Belgium
Luxembourg
Czechia
Slovakia
Moldova
Austria
Hungary
France
Switzerland
Romania
Slovenia
Bay of Biscay
Croatia
Bosnia and Herzegovina
Serbia
Monaco
Bulgaria
Montenegro
Kosovo
Andorra
Italy
Macedonia (FYROM)
Albania
Spain
Greece

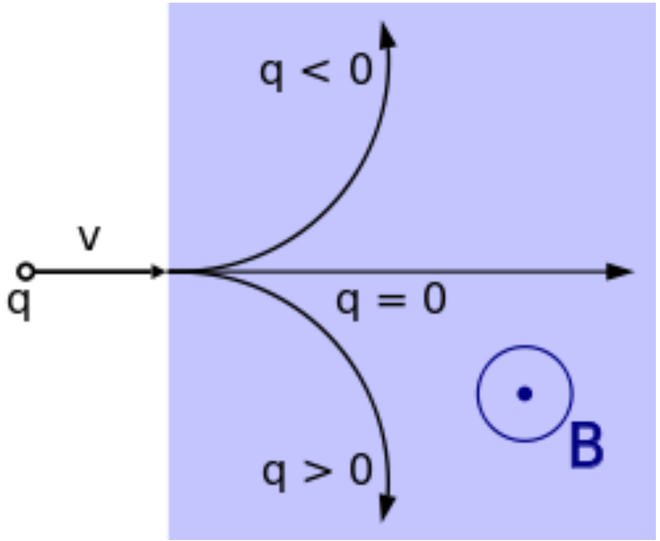
The Large Hadron Collider

Slnko:	**15 000 000 K**
Najteplejšia hviezda:	**1 000 000 000 K**
Zrážka jadier na LHC:	**5 500 000 000 000 K**

Reliktné žiarenie:	**2.7 K**
Chladenie LHC:	**1.9 K**
Boomerang nebula:	**1.0 K**
MIT (chladenie Na/K):	**0.0000005 K**

PRINCÍP URÝCHĽOVANIA

- Nabité častice sú **urýchl'ované elektrickým pol'om** a ich smer **ohýbaný magnetickým pol'om**
- Častice v LHC letia takmer rýchlosťou svetla -> **potrebujeme silné magnety** aby častice udržali na kruhovej dráhe urýchľovača



- Lorentzova sila:

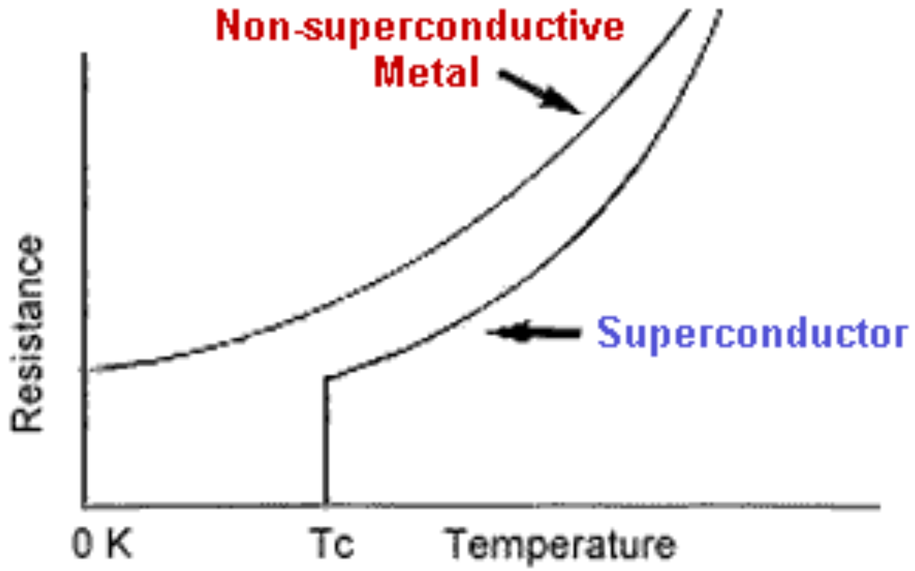
Keď častica idúca rýchlosťou **v** a nábojom **q** vstúpi do magentického poľa **B**, jej trajektória sa ohne

VEĽKÝ HADRÓNOVÝ URÝCHĽOVAČ

- Charakteristiky LHC magnetov:
- B = 8.33 T
- I = 11 850 A

- 9000 magnetov s hmotnosťou 36 000 ton
- Chladenie pomocou **120 ton tekutého hélia**
- **Všetko schladené na 1.9 K**

- **Superkonduktivita**:
  - Pri teplotách blízko absolútnej nuly materiály nemajú odpor



The Large Hadron Collider

Slnko:	**15 000 000 K**
Najteplejšia hviezda:	**1 000 000 000 K**
Zrážka jadier na LHC:	**5 500 000 000 000 K**

Reliktné žiarenie:	**2.7 K**
Chladenie LHC:	**1.9 K**
Boomerang nebula:	**1.0 K**
MIT (chladenie Na/K):	**0.0000005 K**

NAJTEPLEJŠIA DOKONALÁ KVAPALINA NA JEDNOM Z NAJCHLADNEJŠÍCH MIEST VO VESMÍRE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ ČVUT V PRAZE

KATARÍNA KŘÍŽKOVÁ GAJDOŠOVÁ
FJFI ČVUT V PRAZE

11. ČESKO-SLOVENSKÁ STUDENTSKÁ VĚDECKÁ KONFERENCE VE FYZICE
18.9.2020

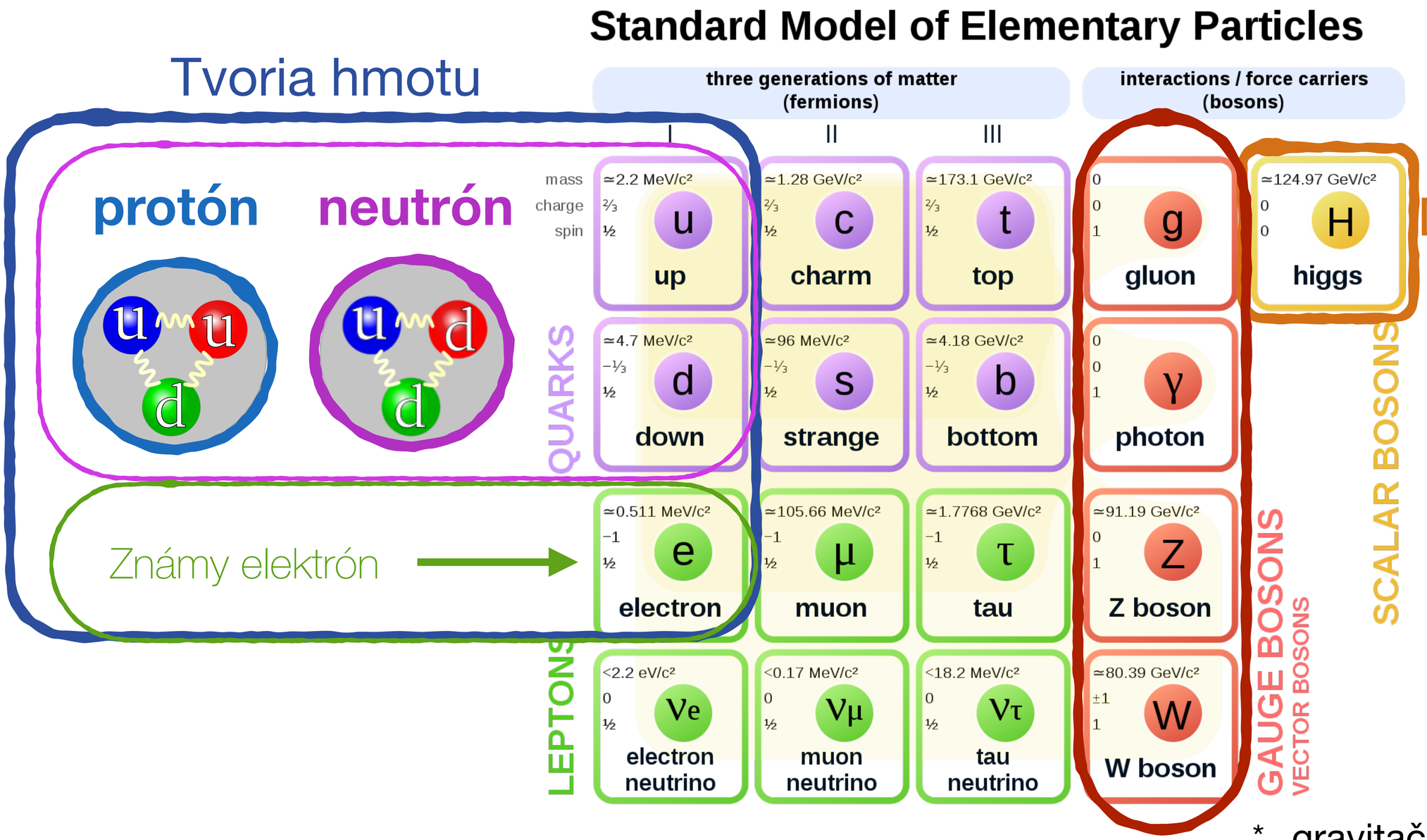
Supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under grant „International Mobility of Researchers MSCA IF III at CTU in Prague“
CZ.02.2.69/0.0/0.0/16 027/0008465

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

RÝCHLOKURZ ŠTANDARDNÝM MODELOM

Tvoria hmotu



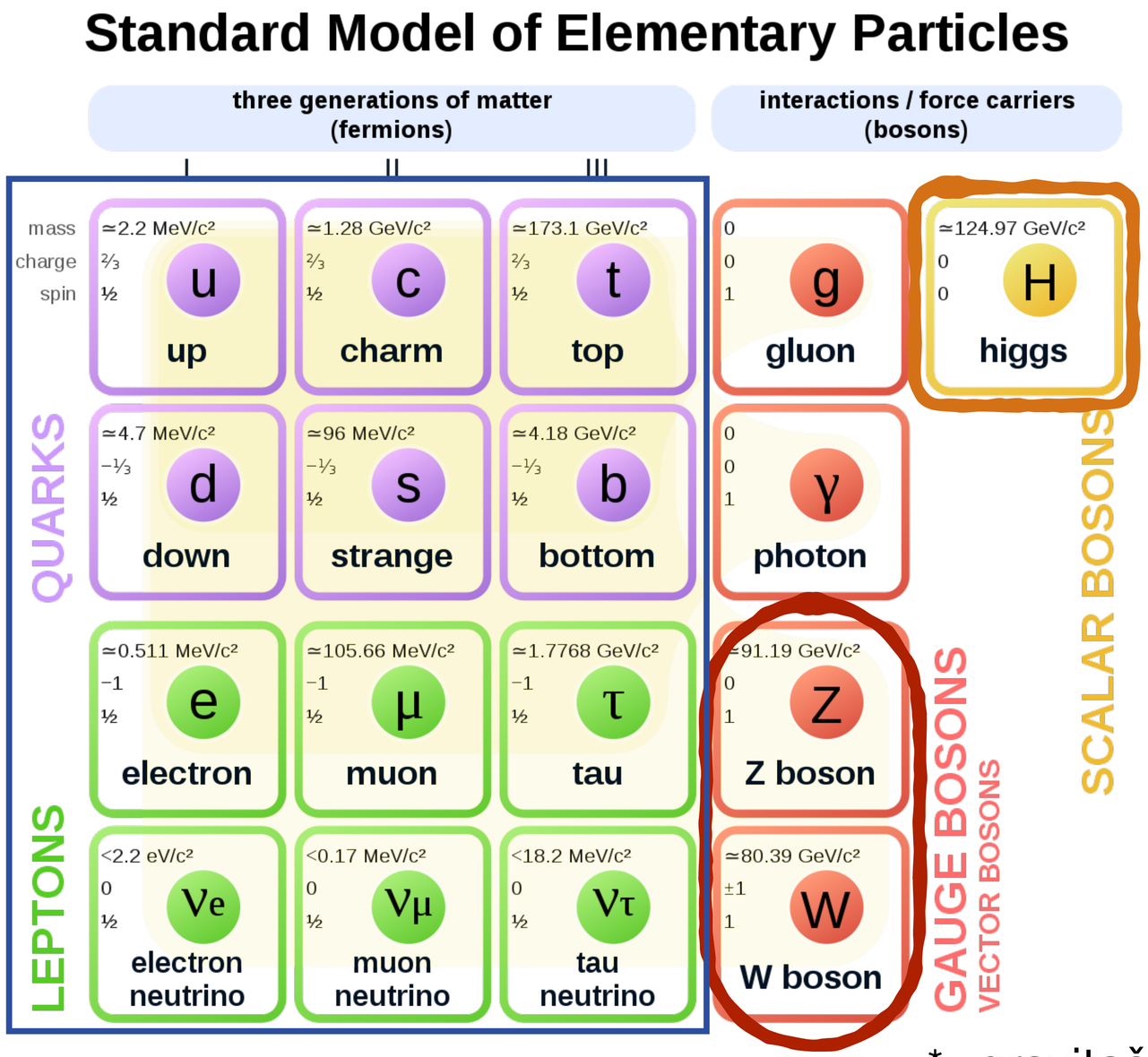
Dáva časticiam hmotnosť

Sprostredkujú interakcie

* gravitačnú silu neuvažujeme

Slabá sila

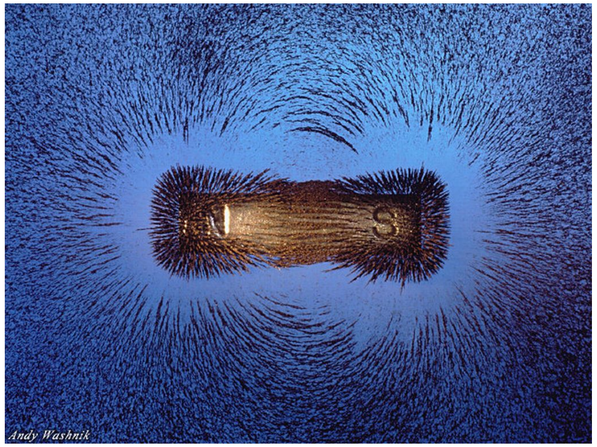
Pôsobí na všetky častice.



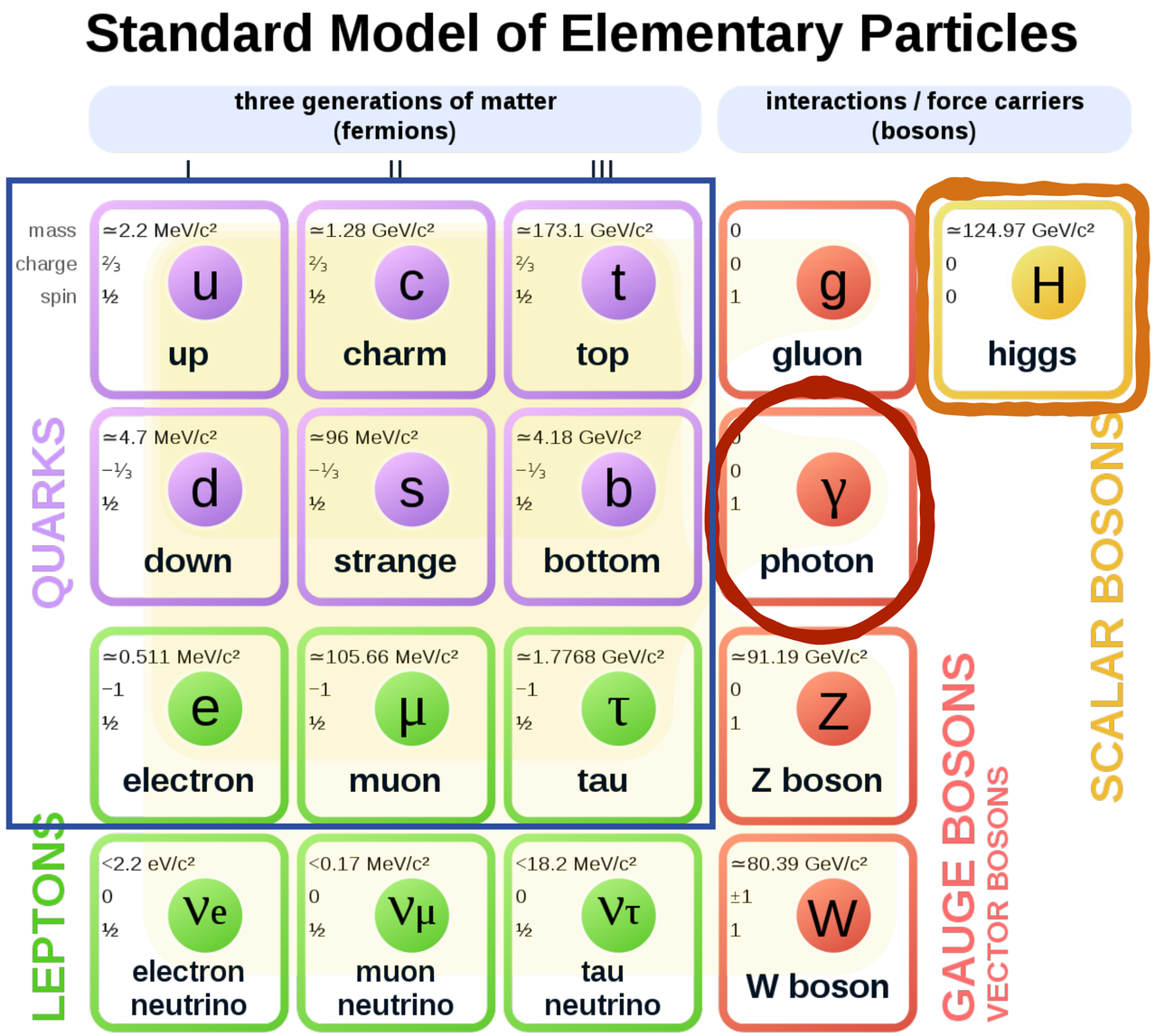
Sprostredkujú interakcie

* gravitačnú silu neuvažujeme

Elektromagnetická sila



Pôsobí na nabité častice.

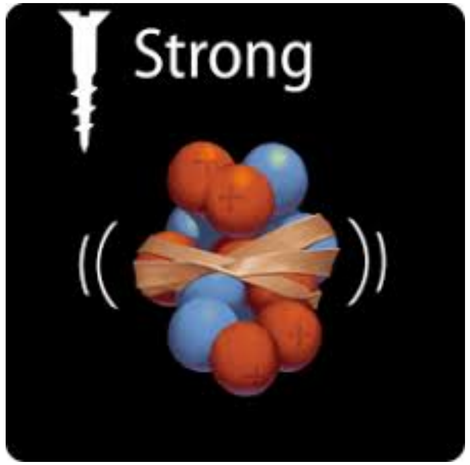


Sprostredkujú interakcie

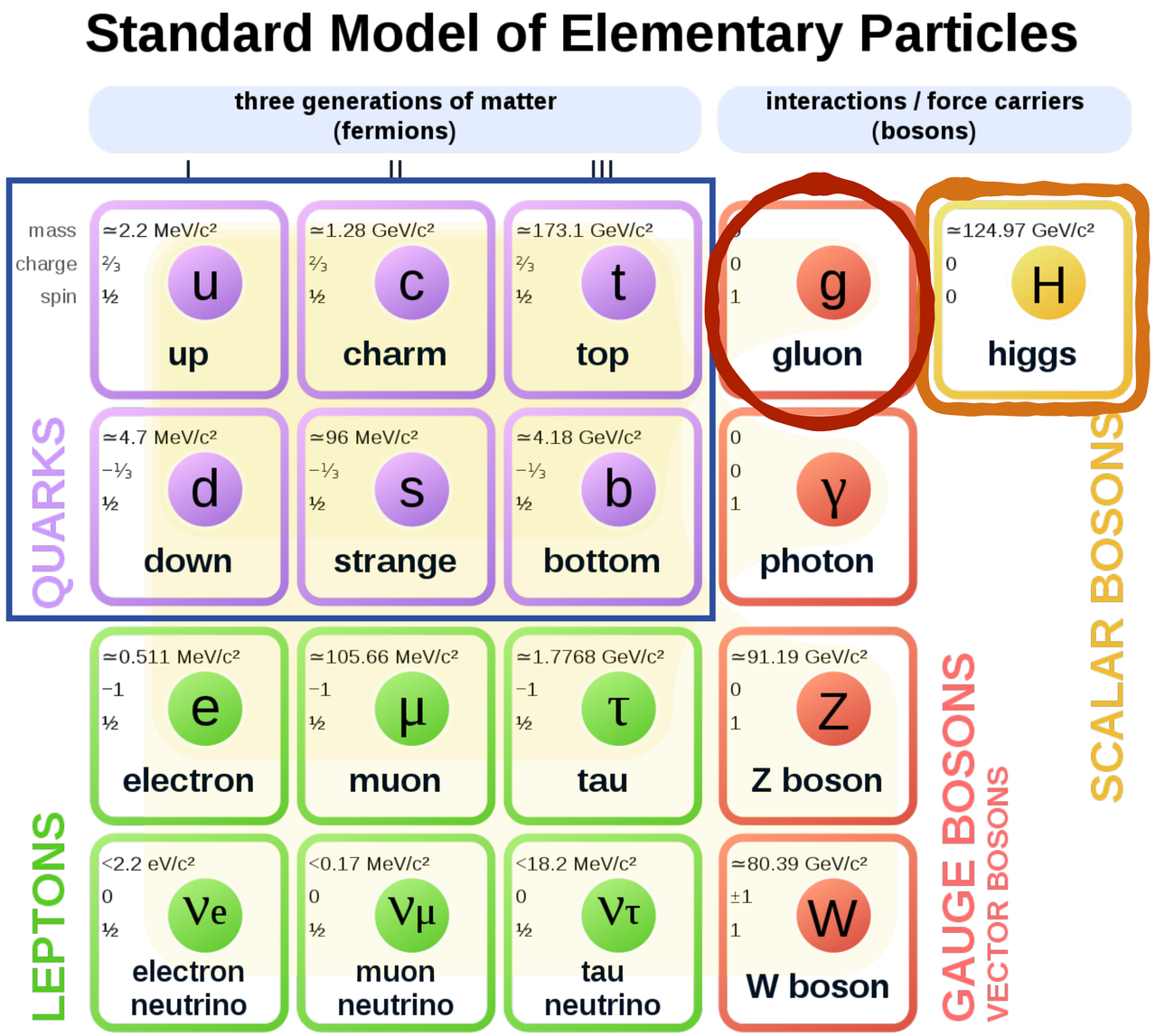
* gravitačnú silu neuvažujeme

RÝCHLOKURZ ŠTANDARDNÝM MODELOM

Silná sila



Pôsobí na kvarky.

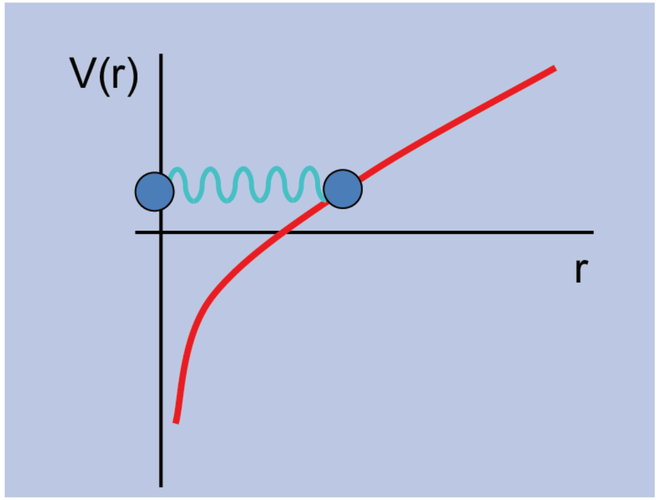


Sprostredkujú interakcie

* gravitačnú silu neuvažujeme

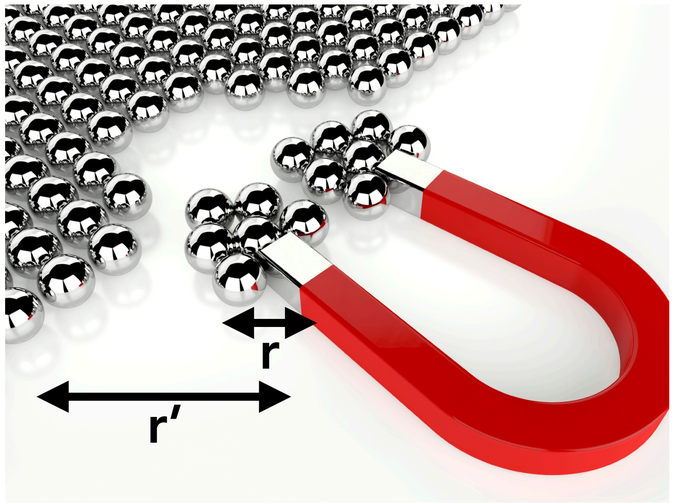
SILNÁ INTERAKCIA

- Viaže kvarky do **hadrónov** = častice zložené z bezfarebnej kombinácie kvarkov
- Zviazané **gluónom** (od slova “glue”)



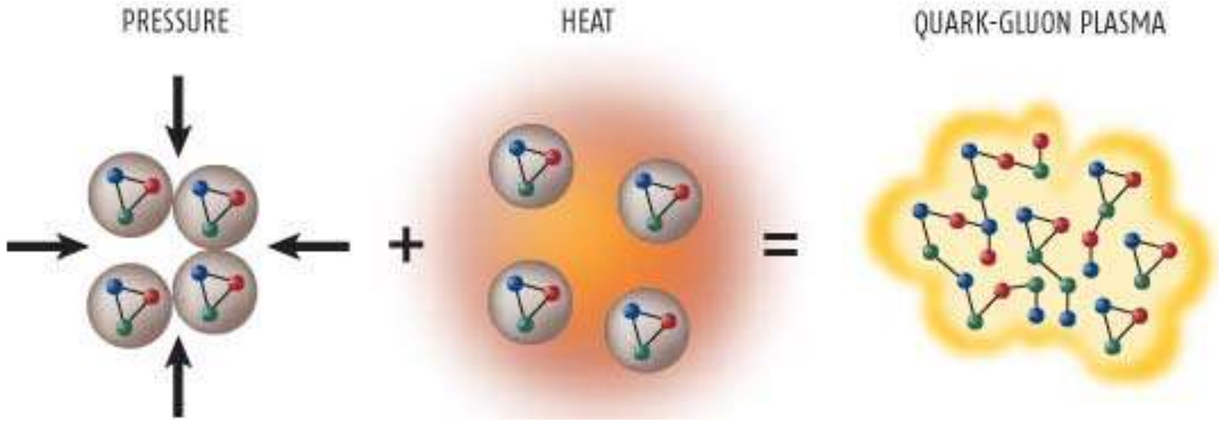
- Za normálnych podmienok silný potenciál rastie so vzdialenosťou
- Všetka hmota je vo forme hadrónov -> **nie je možné pozorovať voľné kvarky**

- Eletromagnetická interakcia
  - Čím blížšie, tým silnějšia



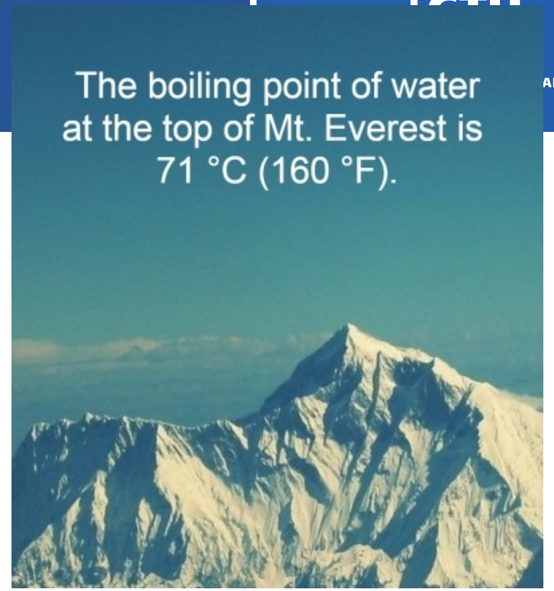
KVARK-GLUÓNOVÁ PLAZMA

- Vysoké teploty a hustoty vedú k uvoľneniu väzieb (lepidla) medzi kvarkami
- Vzniká kvark-gluónová plazma (**QGP**)



Fázový prechod: z fáze hadrónov do fáze voľných kvarkov a gluónov.

kvapalina



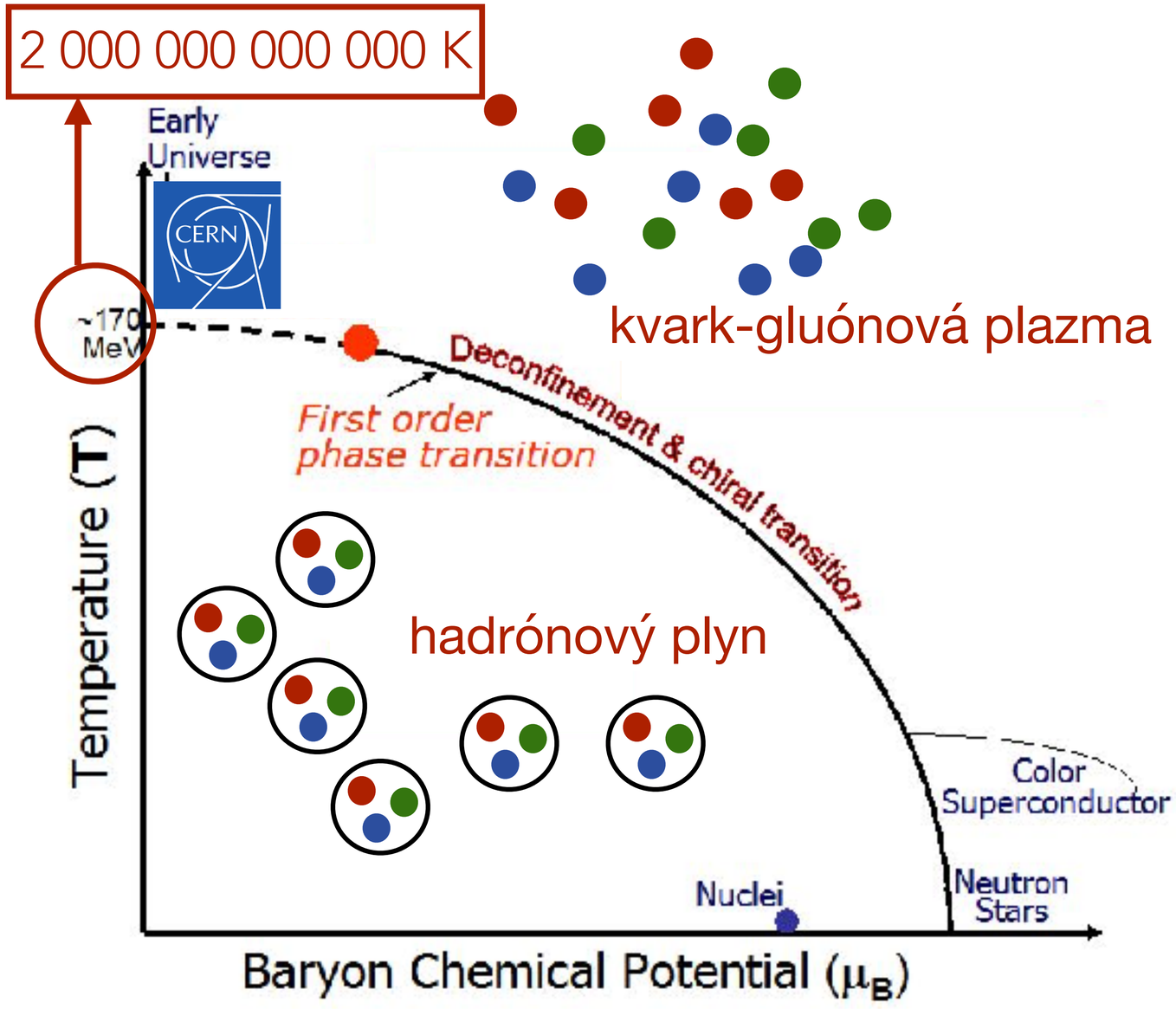
tlak

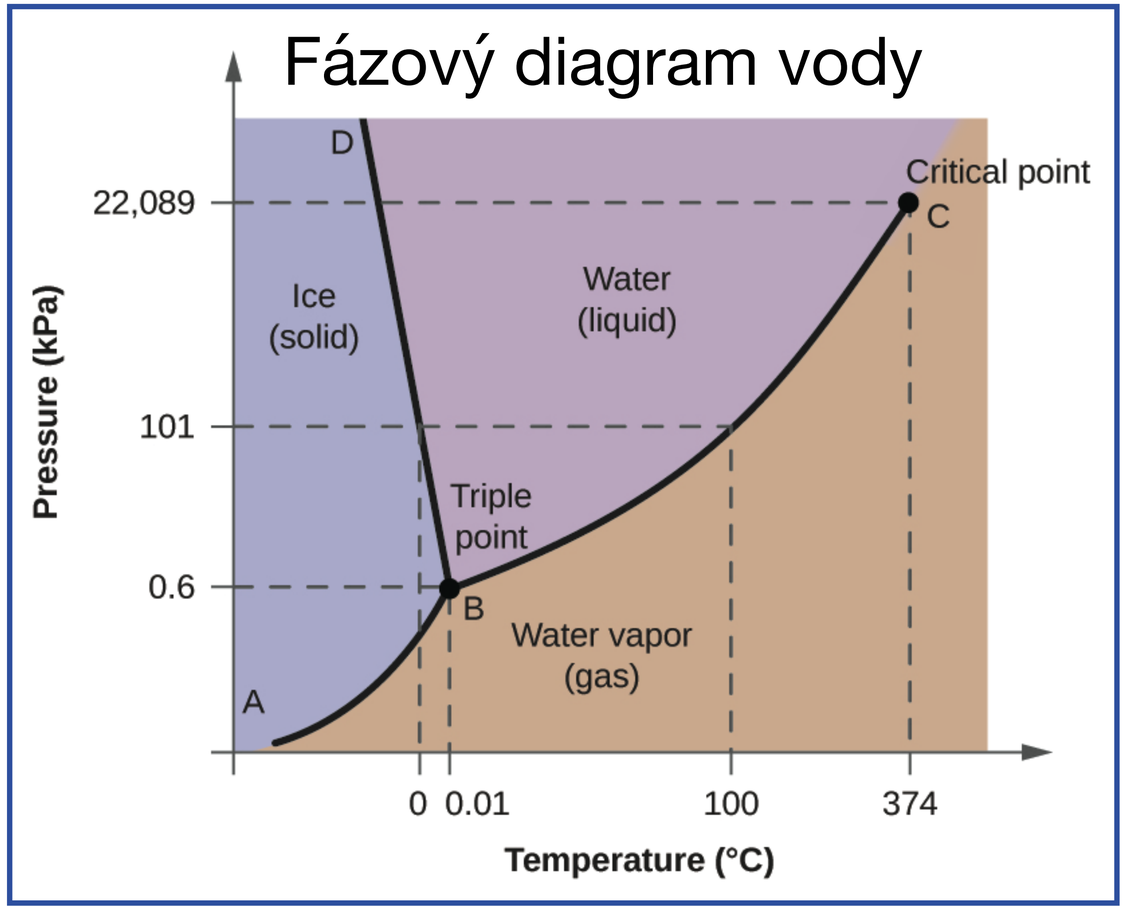
zahrievanie

Fázový prechod: z fáze vody do fáze vodnej pary.

para

FÁZOVÝ DIAGRAM JADROVEJ HMOTY

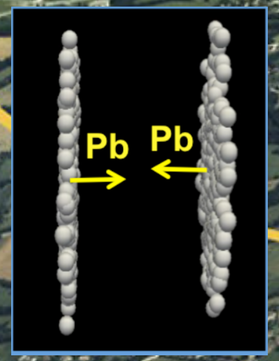




The Large Hadron Collider

Slnko:	**15 000 000 K**
Najteplejšia hviezda:	**1 000 000 000 K**
Zrážka jadier na LHC:	**5 500 000 000 000 K**

Jadrá letia takmer rýchlosťou svetla: **relativistická kontrakcia dĺžok**



Dostatočná teplota a hustota pre vytvorenie QGP

ZRÁŽKY ŤAŽKÝCH JADIER: ANALÓGIA S VESMÍROM

- Kvark-gluónová plazma existovala pri začiatkoch Vesmíru

Big Bang

↓

QGP

↓

Častice

↓

Atómy

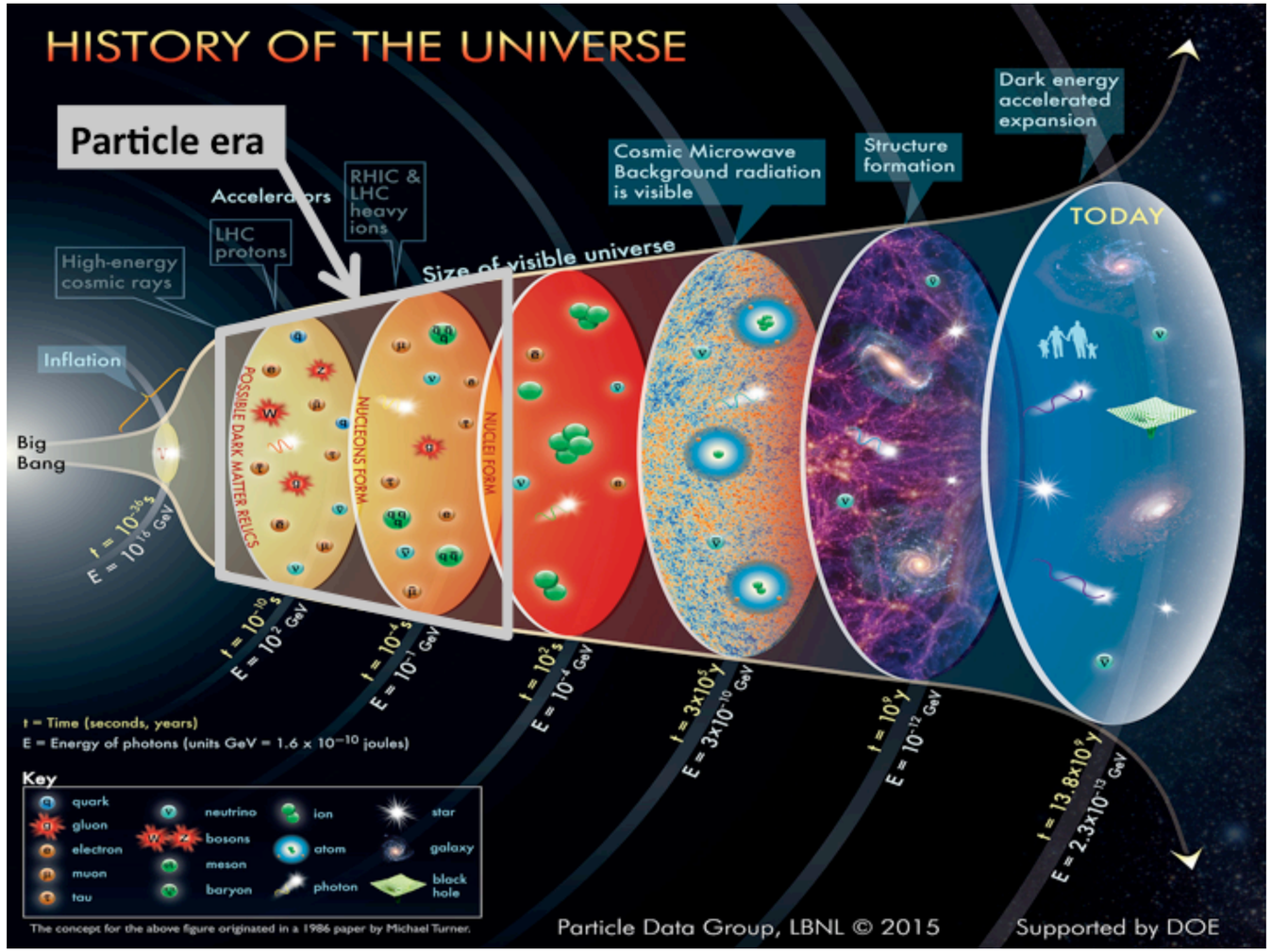
↓

Väčšie štruktúry

↓

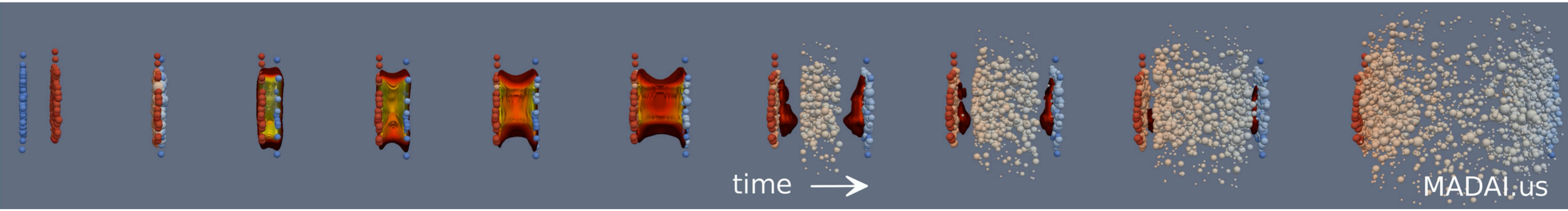
My dnes

čas



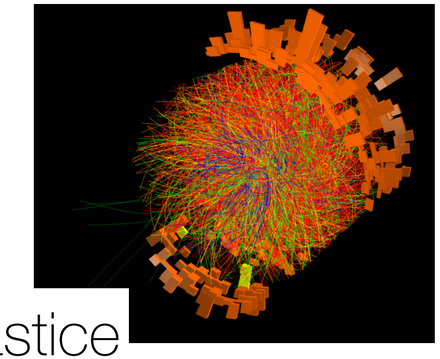
ZRÁŽKY ŤAŽKÝCH JADIER: ANALÓGIA S VESMÍROM

- Kvark-gluónová plazma existovala pri začiatkoch Vesmíru



0 s | 1×10^{-23} s | 10×10^{-23} s | 30×10^{-23} s

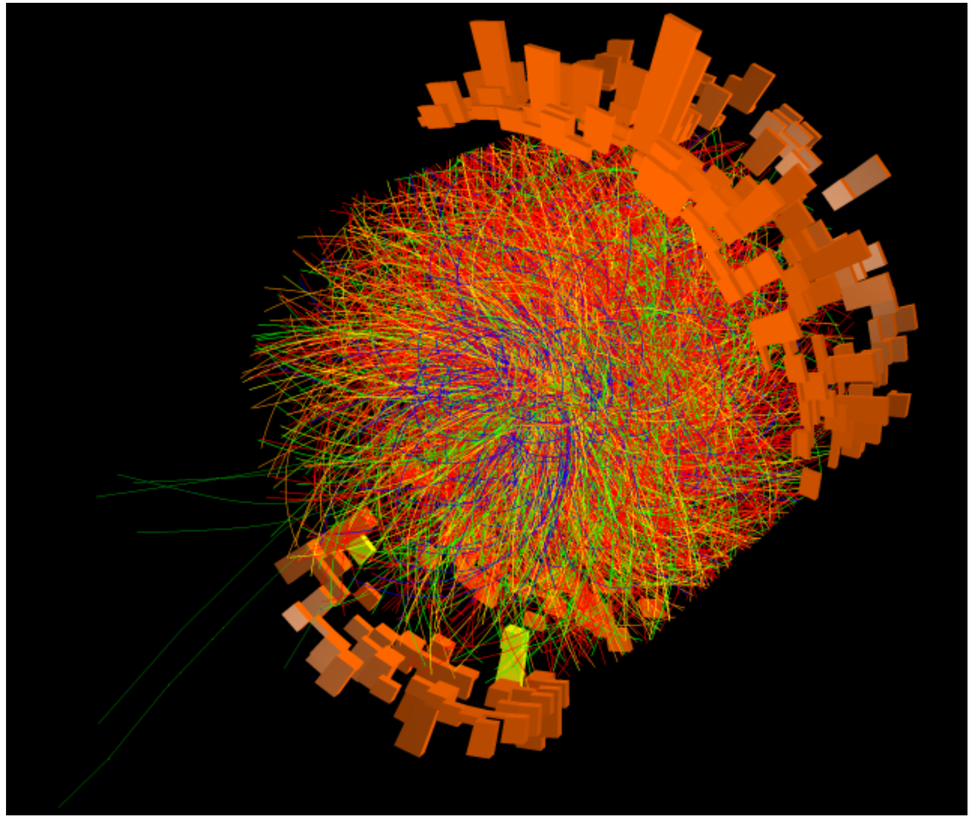
Bang → **QGP** → Hadronizácia →



Častice

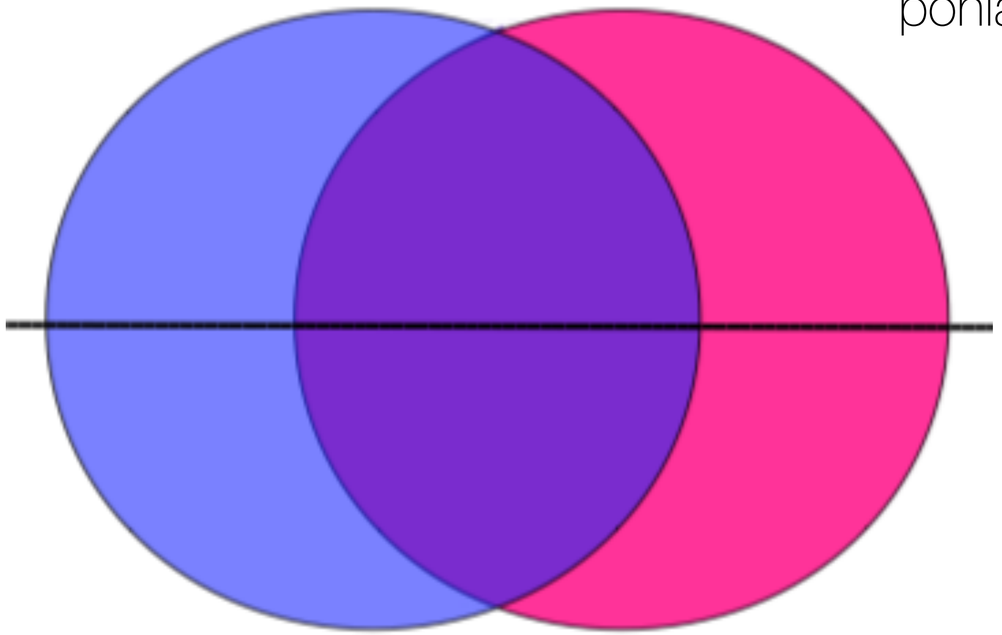
AKO SKÚMAŤ QGP?

- Fáza QGP trvá len ~ **10^{-22} s**
- Môžme skúmať len vzniknuté častice vylietavajúce z miesta zrážky
- Vlastnosti distribúcie týchto častíc nám povedia o QGP **... AKO?**



ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

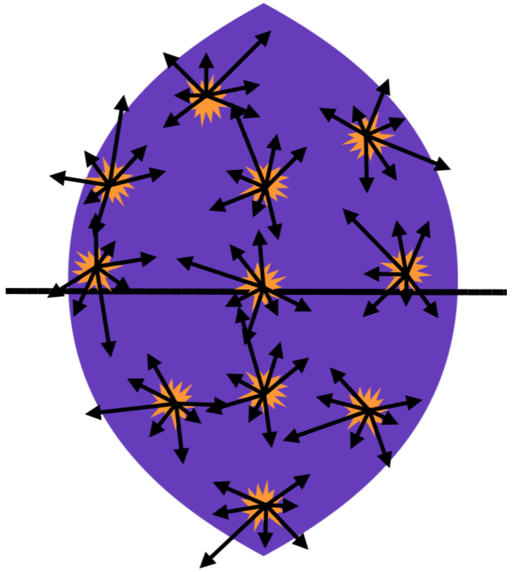


pohľad v tranzverzálnej rovine
kolmej na smer letu

Credits: Mike Lisa

ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

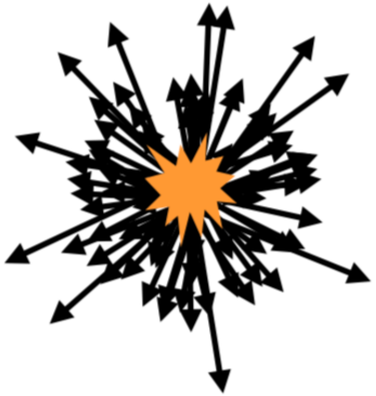


Credits: Mike Lisa

ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

- Častice sú emitované náhodne

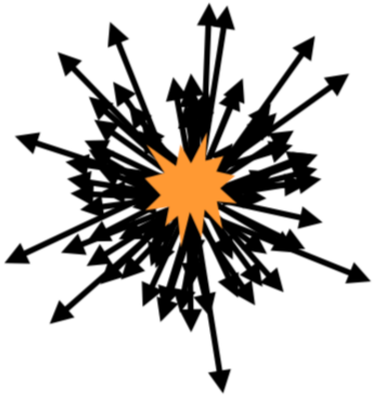


Credits: Mike Lisa

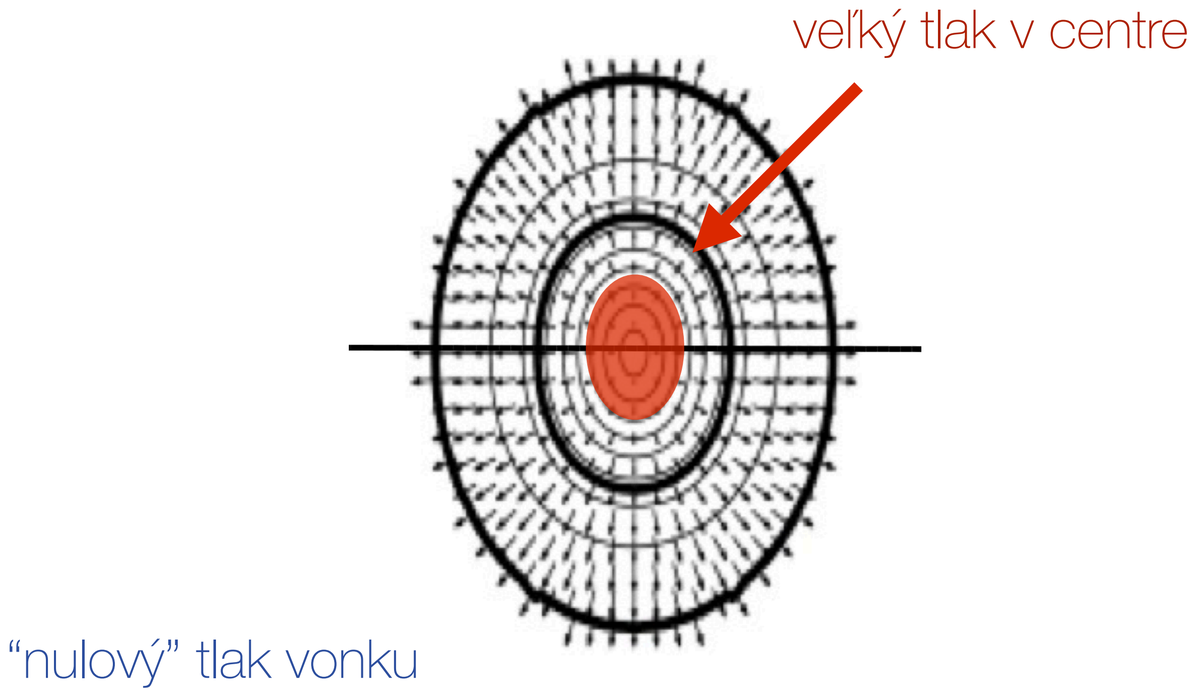
ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

- Častice sú emitované náhodne



B) Hromadná evolúcia

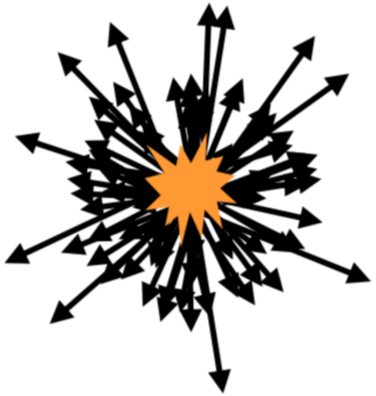


Credits: Mike Lisa

ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

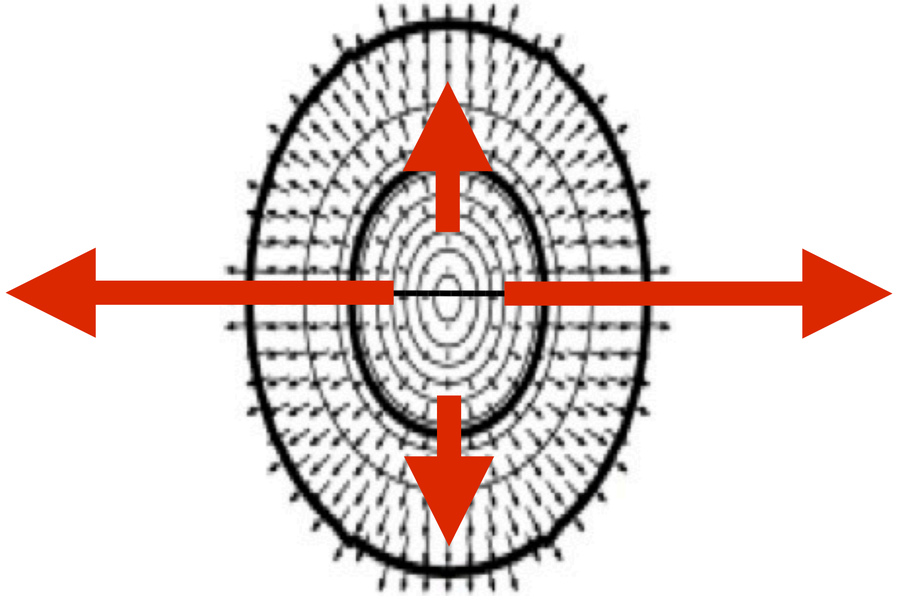
A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

- Častice sú emitované náhodne



B) Hromadná evolúcia

- Častice sú vytlačené v preferovanom smere

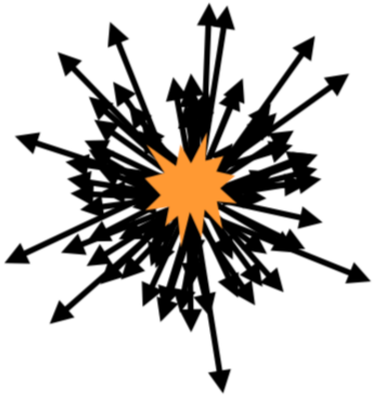


Credits: Mike Lisa

ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

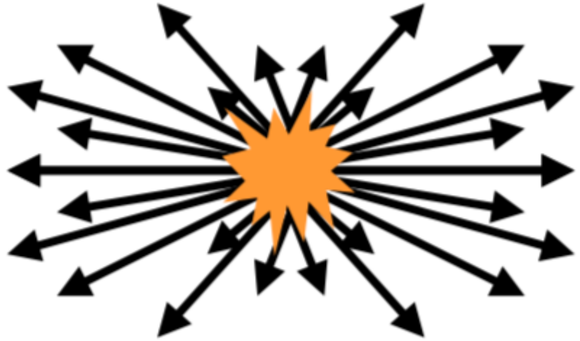
A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

- Častice sú emitované náhodne



B) Hromadná evolúcia

- Častice sú vytlačené v preferovanom smere

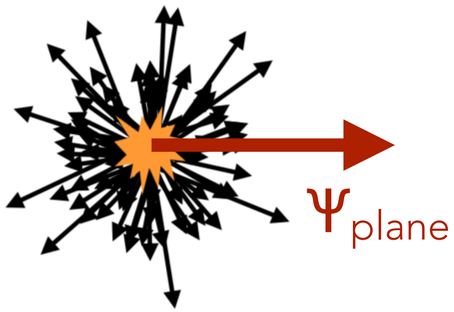


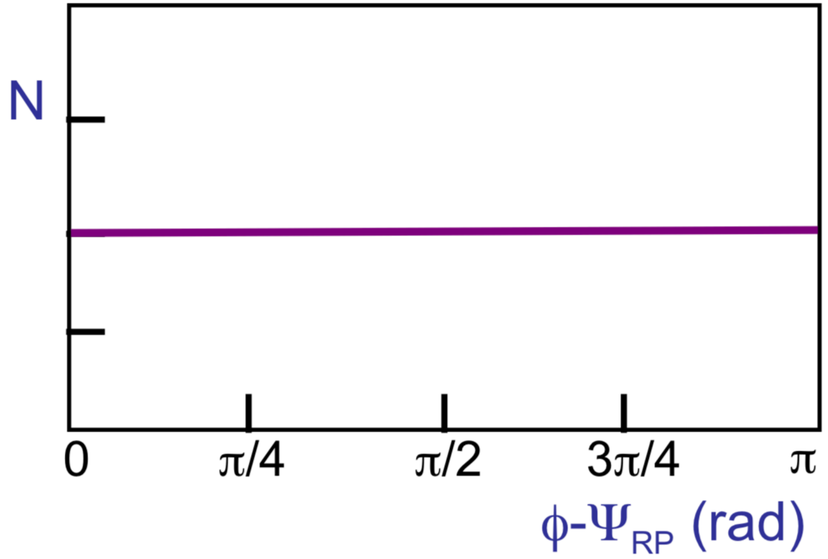
Credits: Mike Lisa

ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

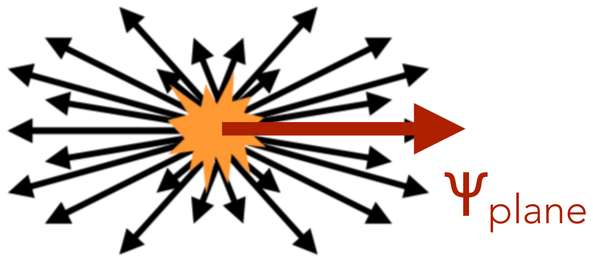
- Častice sú emitované náhodne

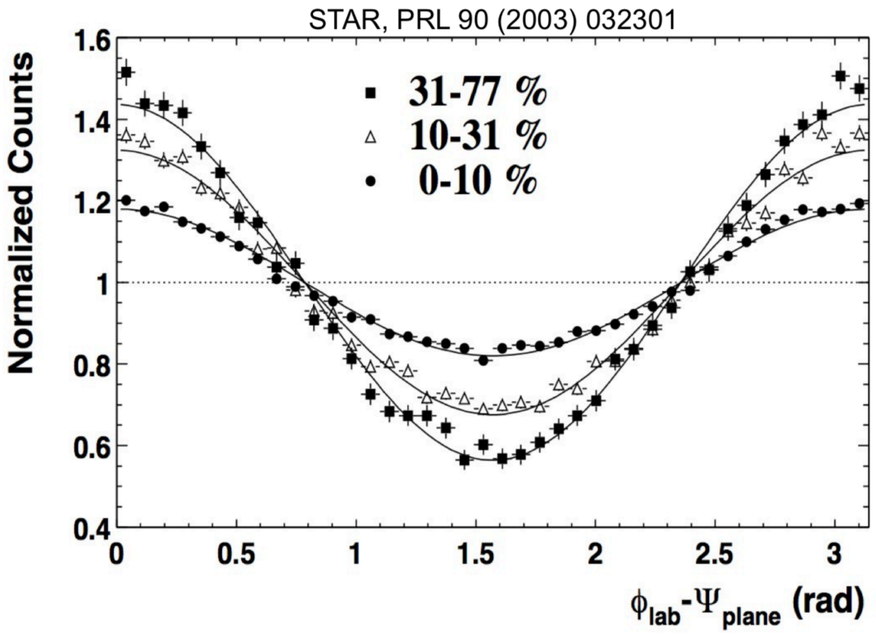




B) Hromadná evolúcia

- Častice sú vytlačené v preferovanom smere



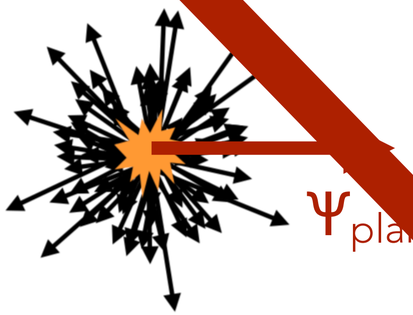


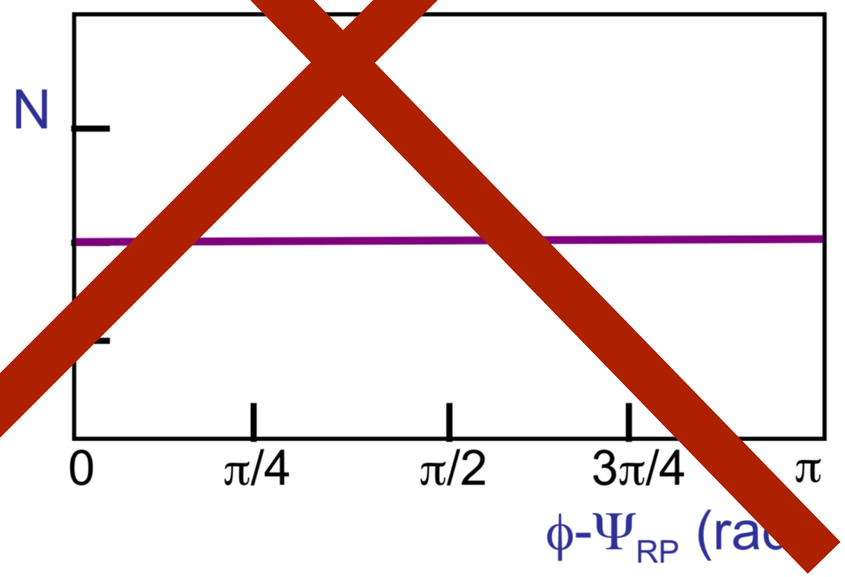
Credits: Mike Lisa

ZRÁŽKA ŤAŽKÝCH JADIER

A) Superpozícia nezávislých pp zrážok

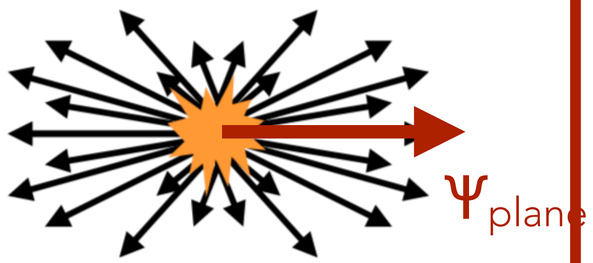
- Častice sú emitované náhodne



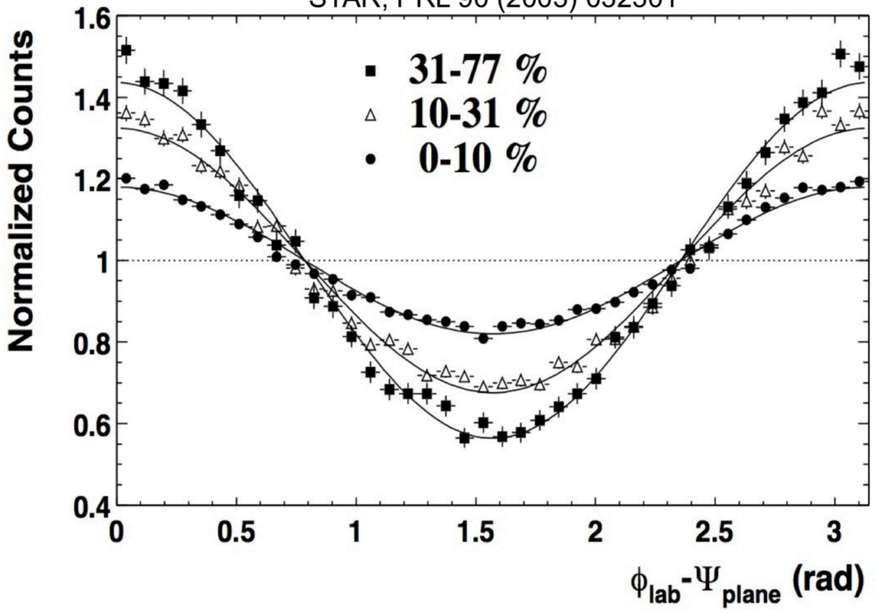


B) Hromadná evolúcia

- Častice sú vytlačené v preferovanom smere



STAR, PRL 90 (2003) 032301

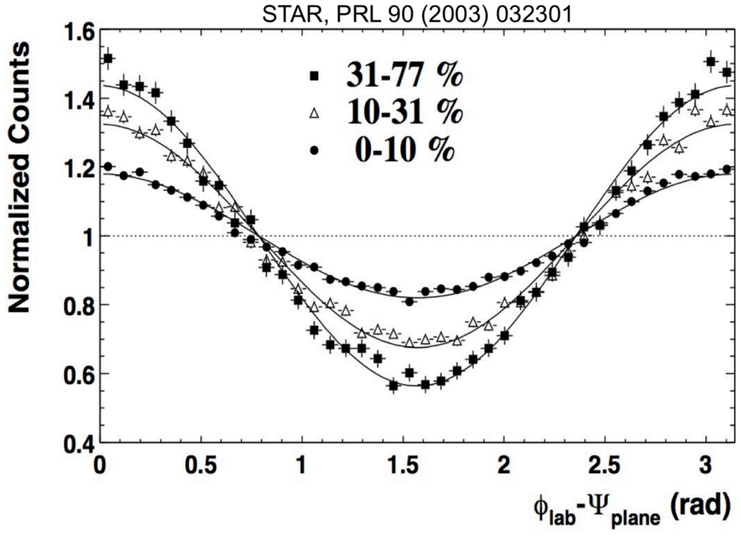


Credits: Mike Lisa

AKO KVANTIFIKOVAŤ ANIZOTROPIU ČASTÍC

- Kvark-gluónová plazma transformuje **počiatočnú priestorovú anizotropiu** na **anizotropiu v distribúcii konečných** vylietavajúcich **častíc**
- Fourierova expanzia azimutálnej distribúcie častíc:

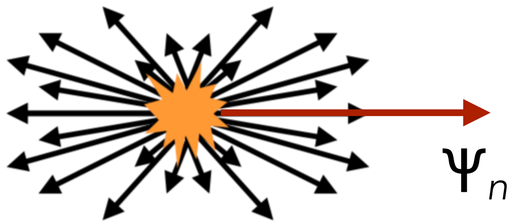
$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\varphi - \Psi_n)$$



$$v_n = \langle \cos n(\varphi - \Psi_n) \rangle$$

koeficient toku: určuje preferovaný smer častíc

rovina symetrie



AKO KVANTIFIKOVAŤ ANIZOTROPIU ČASTÍC

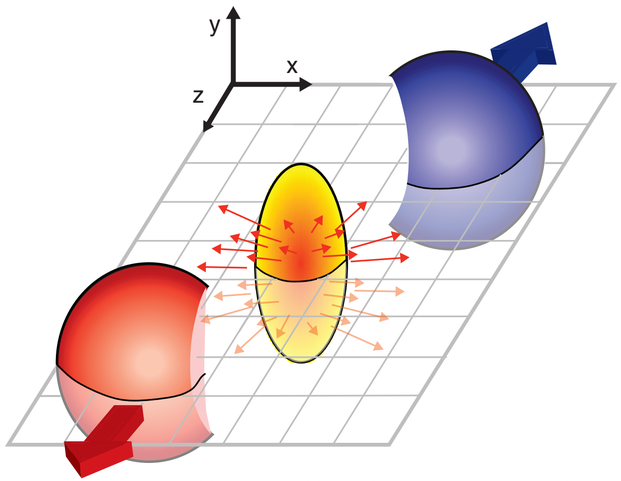
- Kvark-gluónová plazma transformuje **počiatočnú priestorovú anizotropiu** na **anizotropiu v distribúcii konečných** vylietavajúcich **častíc**
- Fourierova expanzia azimutálnej distribúcie častíc:

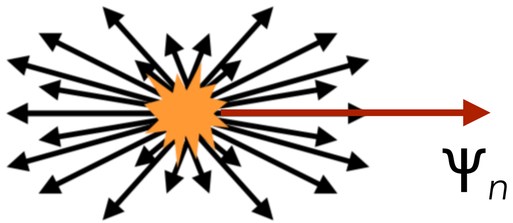
$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\varphi - \Psi_n)$$

$$v_n = \langle \cos n(\varphi - \Psi_n) \rangle$$

koeficient toku: určuje preferovaný smer častíc

rovina symetrie

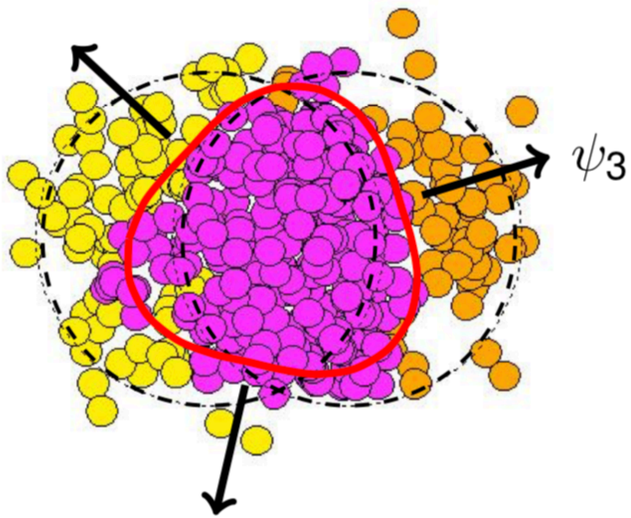




Počiatočná eliptická geometria -> veľký konečný eliptický tok $\mathbf{v_2}$

AKO KVANTIFIKOVAŤ ANIZOTROPIU ČASTÍC

- Kvark-gluónová plazma transformuje **počiatočnú priestorovú anizotropiu** na **anizotropiu v distribúcii konečných** vylietavajúcich **častíc**
- Fourierova expanzia azimutálnej distribúcie častíc:

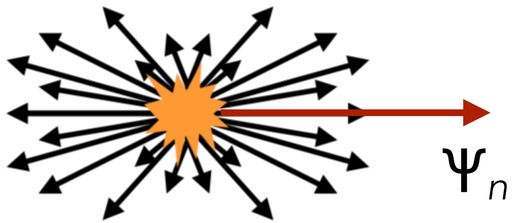


$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\varphi - \Psi_n)$$

$$v_n = \langle \cos n(\varphi - \Psi_n) \rangle$$

koeficient toku: určuje preferovaný smer častíc

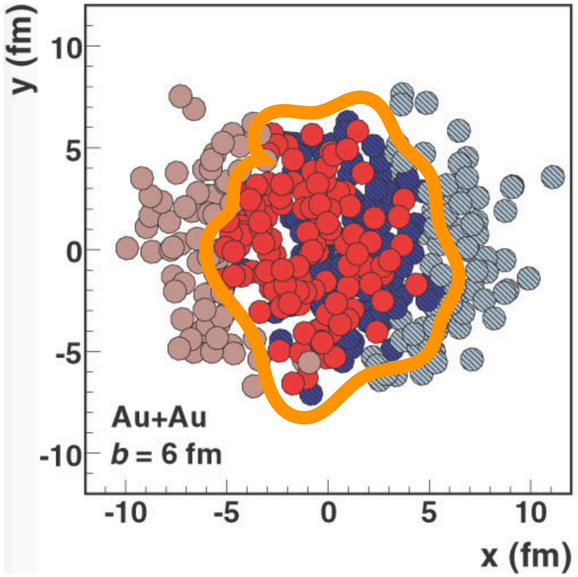
rovina symetrie



Počiatočná triangulárna geometria -> veľký konečný triangulárny tok **v_3**

AKO KVANTIFIKOVAŤ ANIZOTROPIU ČASTÍC

- Kvark-gluónová plazma transformuje **počiatočnú priestorovú anizotropiu** na **anizotropiu v distribúcii konečných** vylietavajúcich **častíc**
- Fourierova expanzia azimutálnej distribúcie častíc:

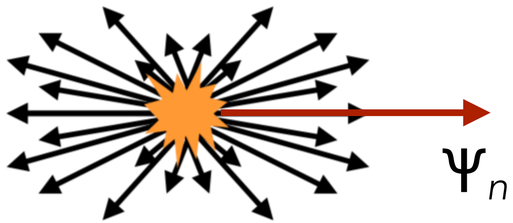


$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\varphi - \Psi_n)$$

$$v_n = \langle \cos n(\varphi - \Psi_n) \rangle$$

koeficient toku: určuje preferovaný smer častíc

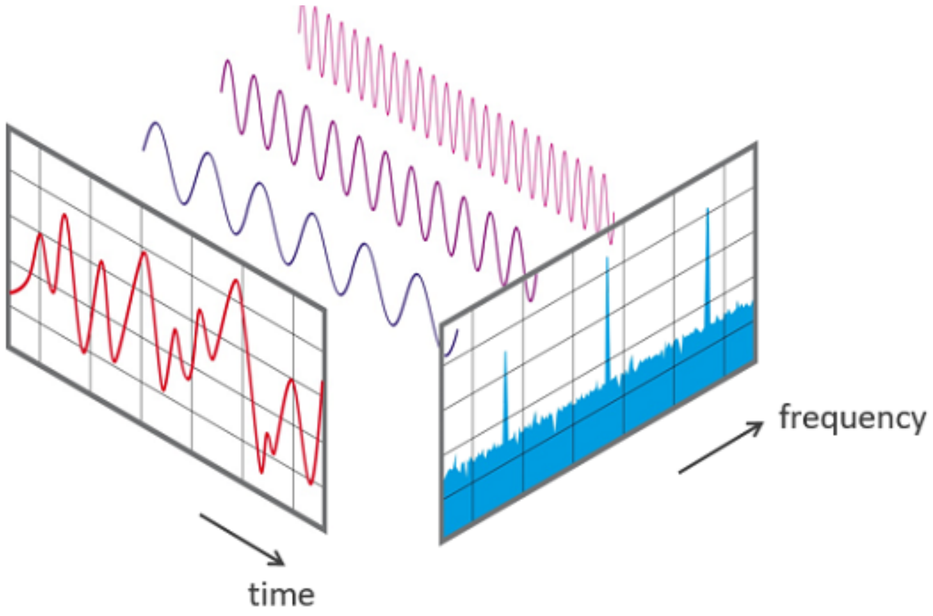
rovina symetrie



V skutočnosti máme superpozíciu rôznych harmonických módov -> v_2, v_3, v_4, ...

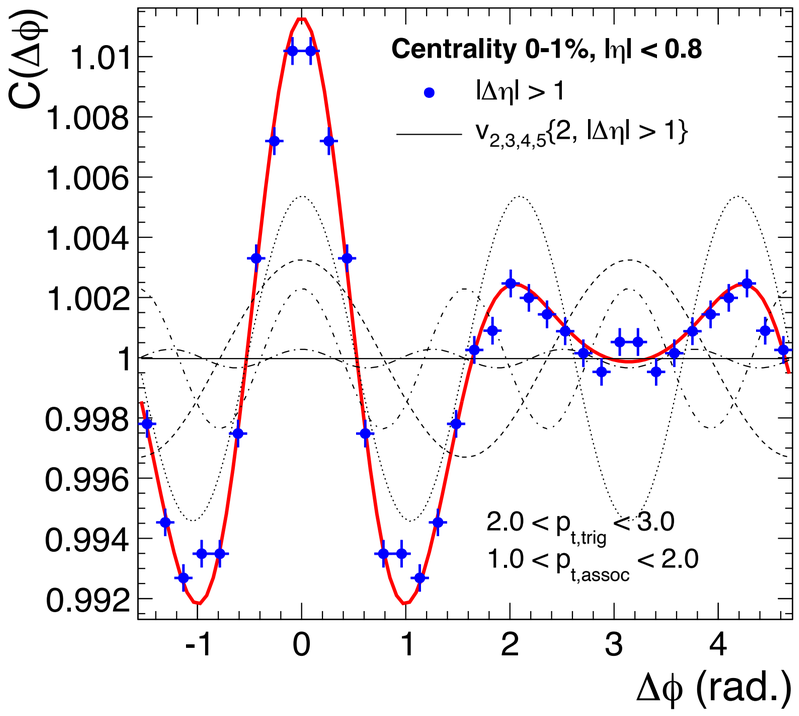
ANALÓGIA KU KOEFICIENTOM TOKU

- Signál v elektronike tiež obsahuje viacero typov vĺn
  - Tieto vlny sú výsledkom superpozície základných harmonických módov



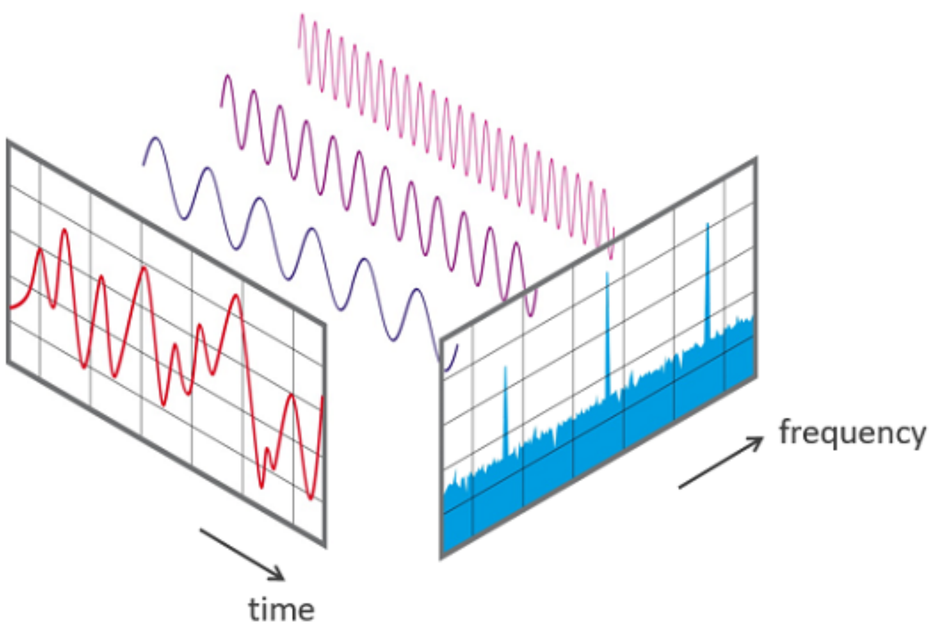
wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform#/media/File:FFT-Time-Frequency-View.png

ALICE, PRL 107, 032301 (2011)



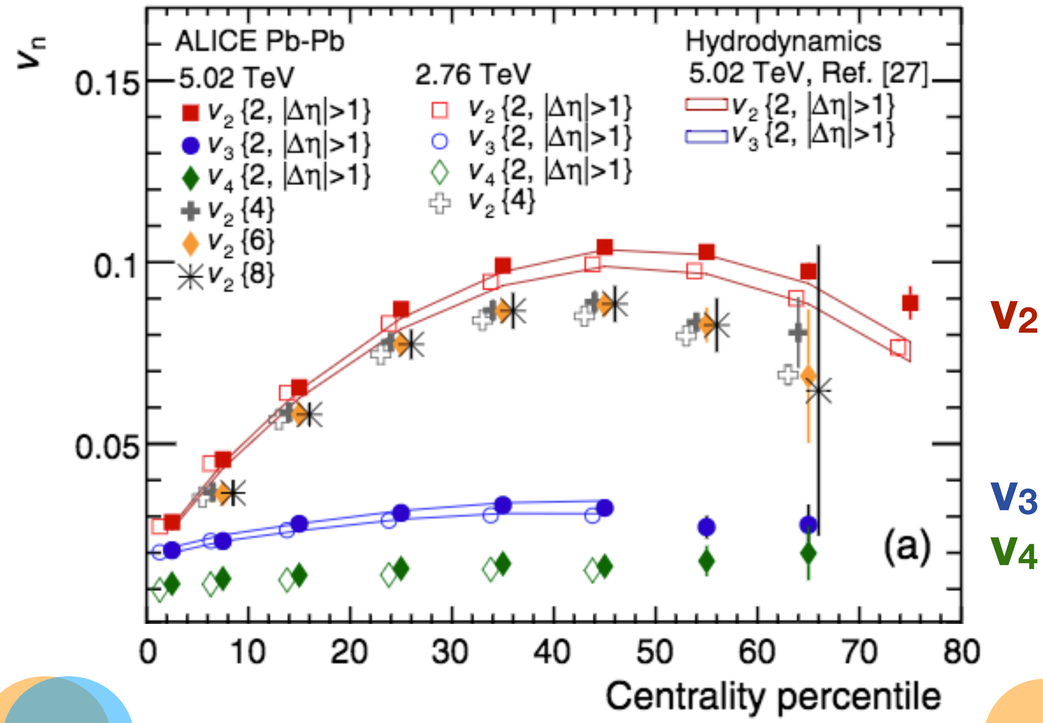
ANALÓGIA KU KOEFICIENTOM TOKU

- Signál v elektronike tiež obsahuje viacero typov vĺn
  - Tieto vlny sú výsledkom superpozície základných harmonických módov
  - Fourierova transformácia do frekvenčného režimu: amplitúda ukazuje zastúpenie základných harmoník v signále



wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform#/media/File:FFT-Time-Frequency-View.png

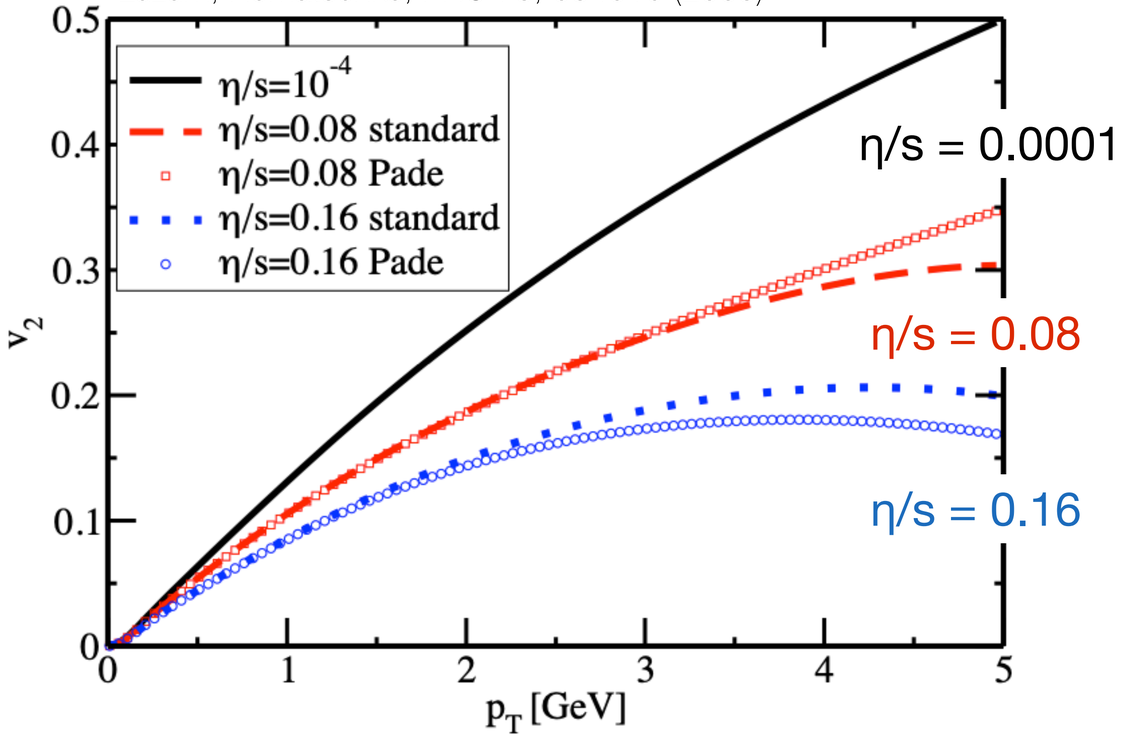
ALICE, PRL 116, 132302 (2016)

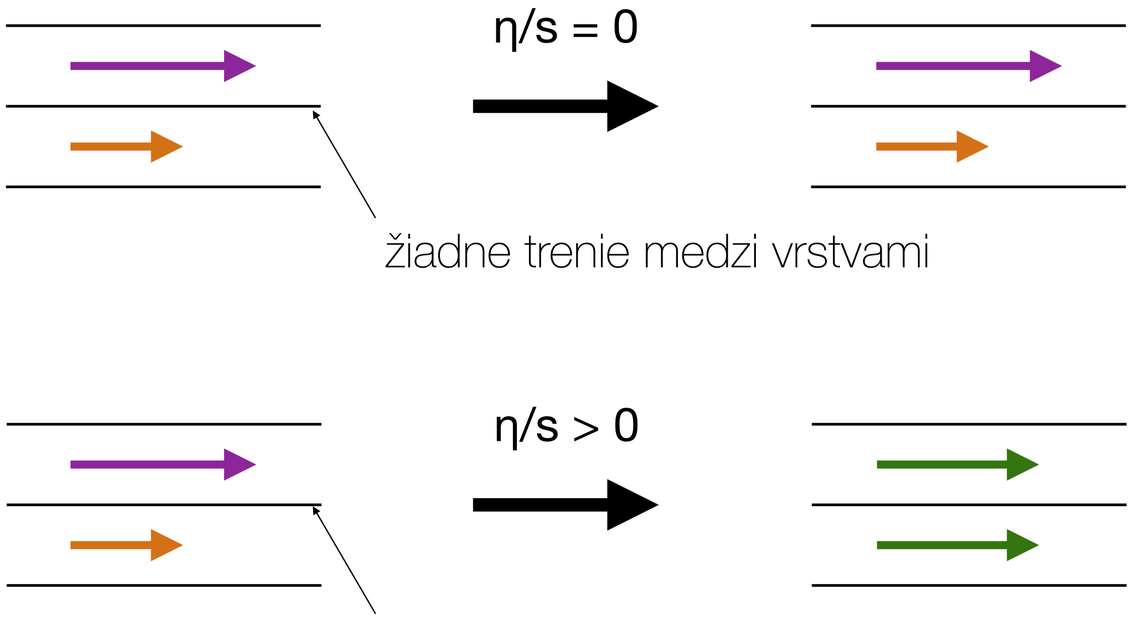


DOKONALÁ KVAPALINA

- **Hydrodynamický model**: popisuje QGP ako kvapalinu
  - Jeden z parametrov je viskozita (vydelená hustotou entropie)

Luzum, Romatschke, PRC 78, 034915 (2008)

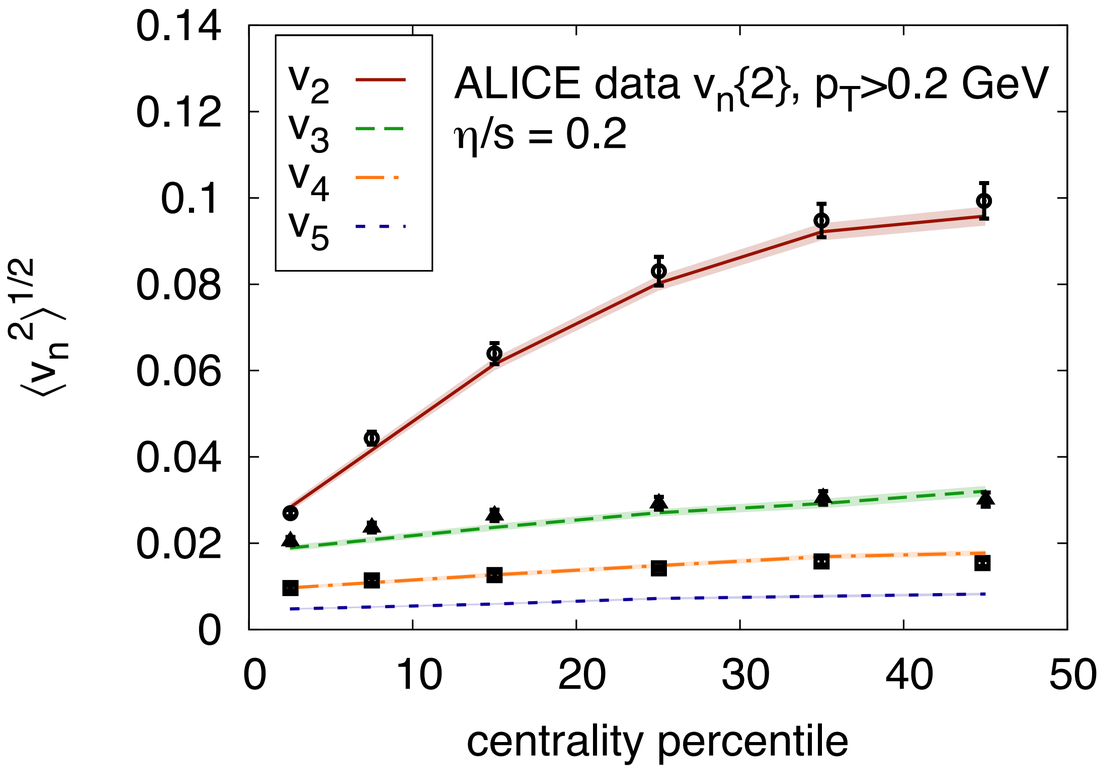




DOKONALÁ KVAPALINA

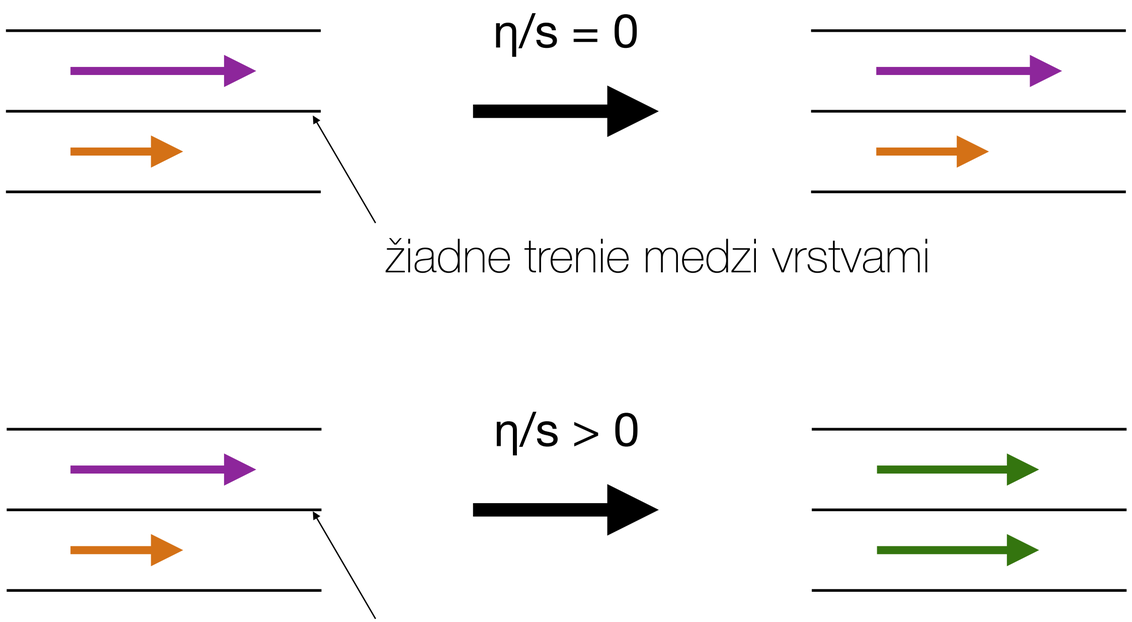
ALICE, PRL 107, 032301 (2011)

Schenke et al., PRL 110, 012302 (2013)



- Merania koeficientov toku a porovnanie s modelmi nám ukázalo, že QGP je najdokonalejšia kvapalina vo Vesmíre (ktorú poznáme)

- **Hydrodynamický model**: popisuje QGP ako kvapalinu
  - Jeden z parametrov je viskozita (vydelená hustotou entropie)



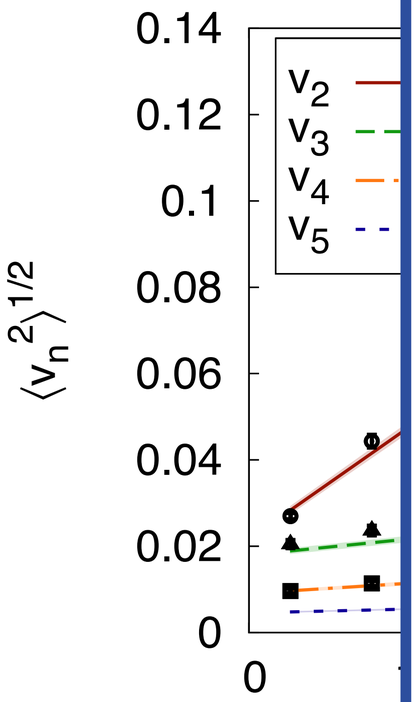
žiadne trenie medzi vrstvami

trenie medzi vrstvami spôsobí,
že vyrovná rýchlosti jednotlivých vrstiev,
a zničí eliptický tok

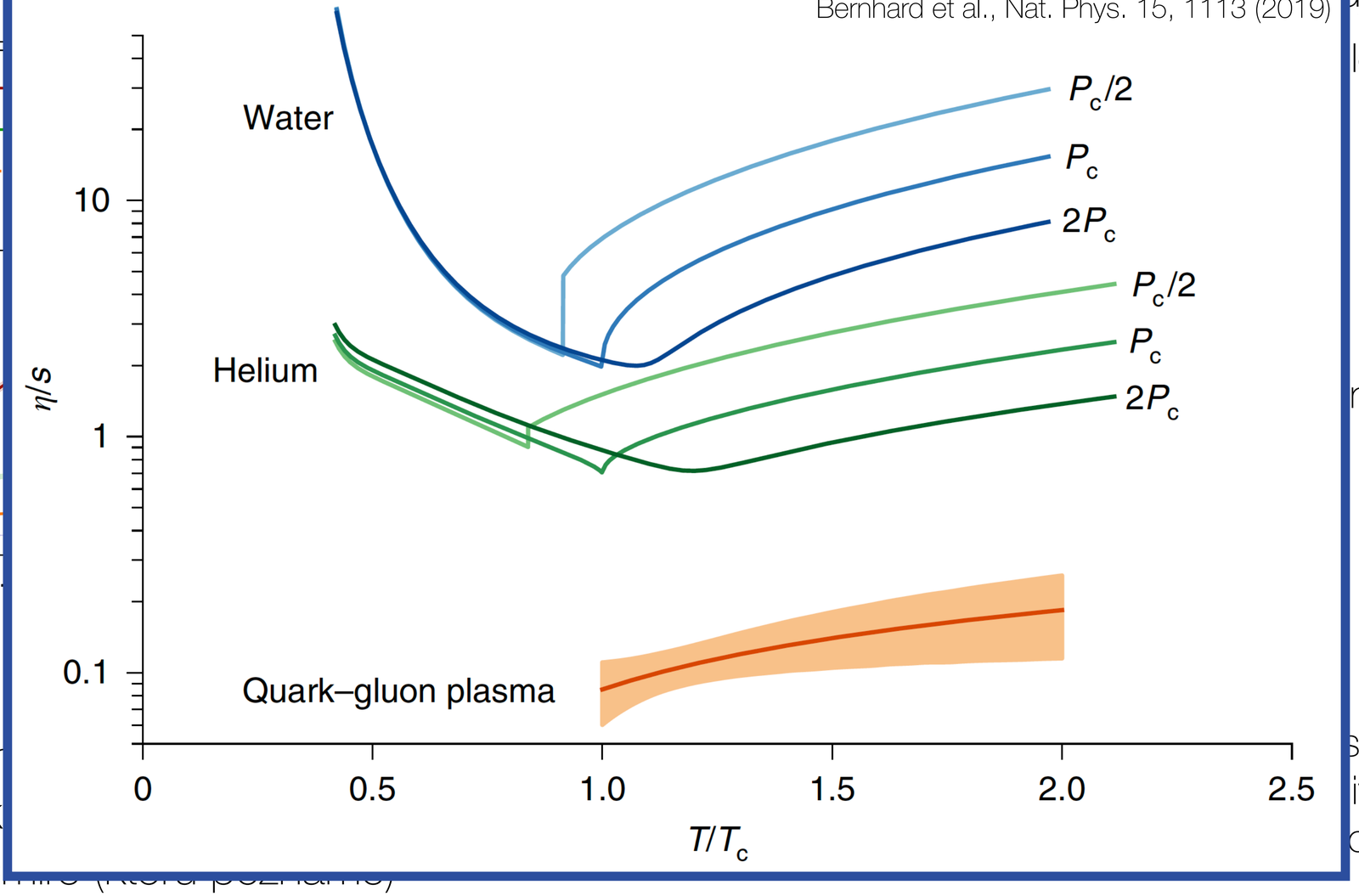
DOKONALÁ KVAPALINA

ALICE, PRL 107, 032301 (2011)

Schenke et al., PRL 110, 01

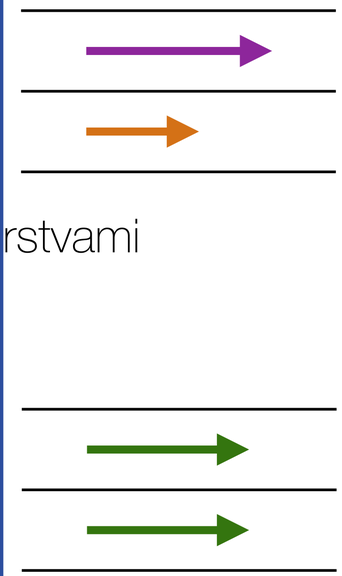


Bernhard et al., Nat. Phys. 15, 1113 (2019)



uje QGP ako kvapalinu

lená hustotou entropie)



rstvami

- Merania koeficier
  modelmi nám uk
  kvapalina vo Ves

spôsobí,
ivých vrstiev,
ok

NAJTEPLEJŠIA DOKONALÁ KVAPALINA NA JEDNOM Z NAJCHLADNEJŠÍCH MIEST VO VESMÍRE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ ČVUT V PRAZE

KATARÍNA KŘÍŽKOVÁ GAJDOŠOVÁ
FJFI ČVUT V PRAZE

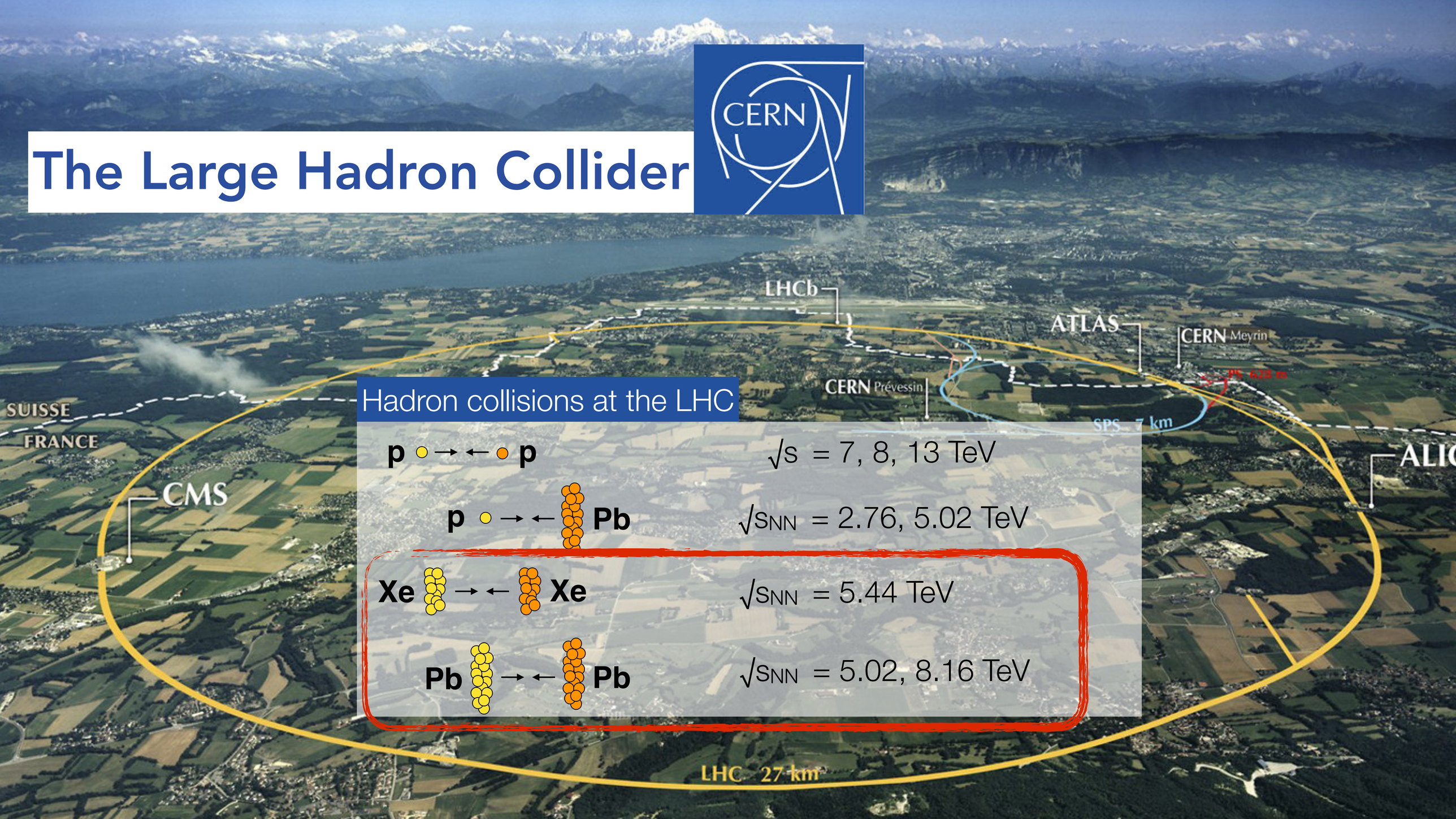
11. ČESKO-SLOVENSKÁ STUDENTSKÁ VĚDECKÁ KONFERENCE VE FYZICE
18.9.2020

Supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under grant „International Mobility of Researchers MSCA IF III at CTU in Prague“
CZ.02.2.69/0.0/0.0/16 027/0008465

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

The Large Hadron Collider



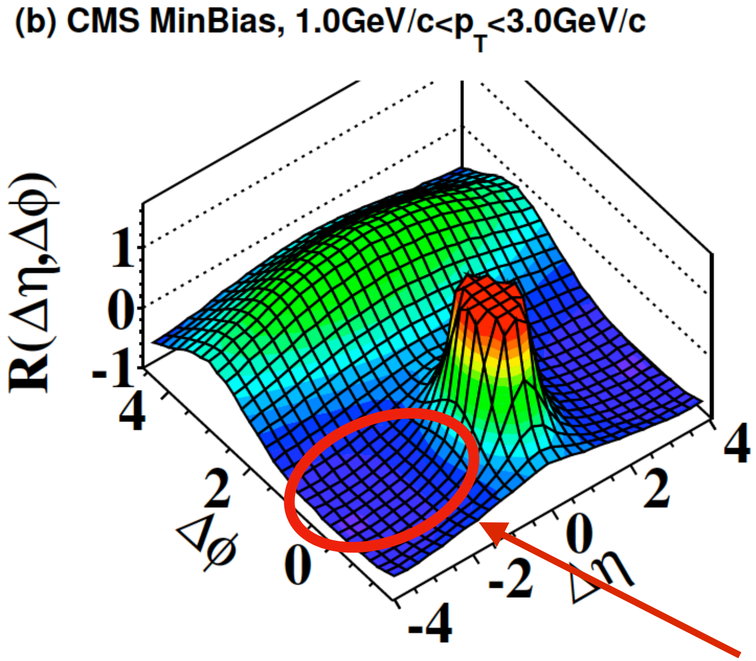
Hadron collisions at the LHC

p → ← p	$\sqrt{s}$ = 7, 8, 13 TeV
p → ← Pb	$\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76, 5.02 TeV
Xe → ← Xe	$\sqrt{s_{NN}}$ = 5.44 TeV
Pb → ← Pb	$\sqrt{s_{NN}}$ = 5.02, 8.16 TeV

MALÉ ZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY: STARÉ CHÁPANIE

- Nevytvára sa QGP
- Tieto zrážky sú použité len ako referencia k zrážkam ťažkých iónov

p → ← p

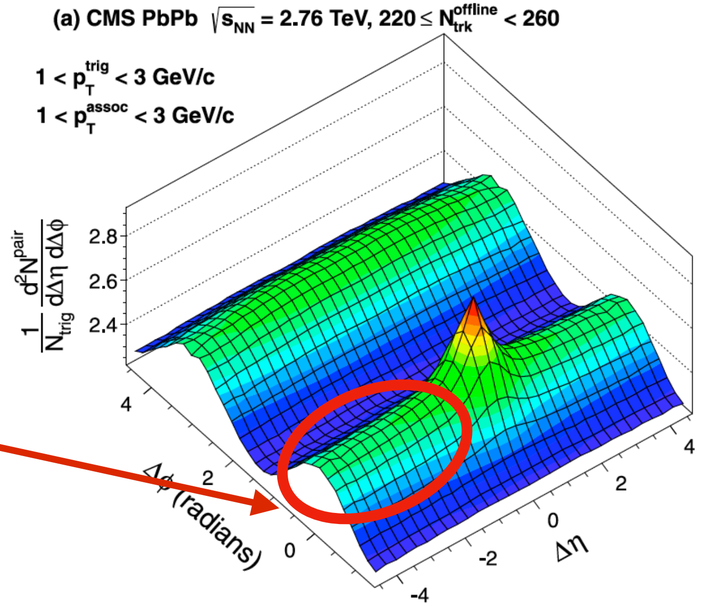


žiadna štruktúra

CMS, JHEP 09 (2010) 091

vs.

Pb → ← Pb



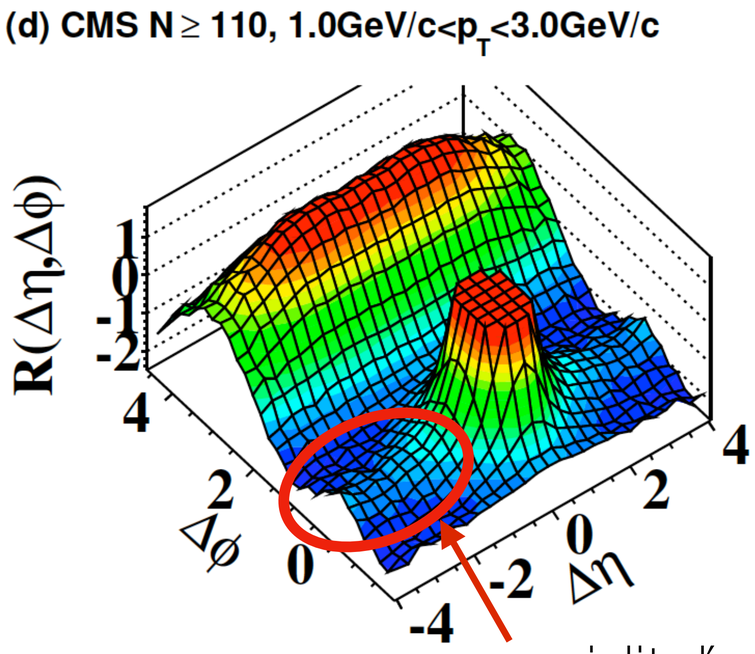
jeden z prejavov QGP

CMS, PLB 724 (2013) 213

MALÉ ZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY: “NOVÉ CHÁPANIE” ?

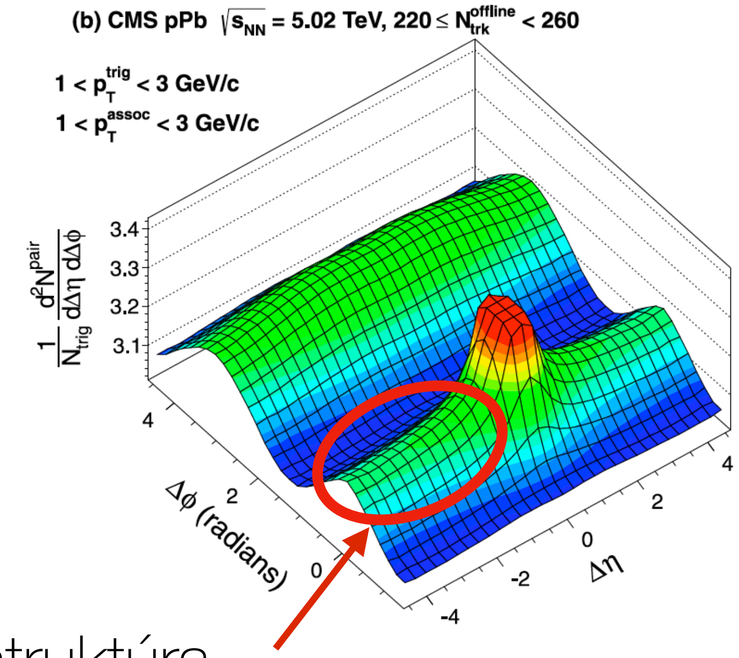
- Podobná štruktúra nájdená aj v malých zrážkových systémoch s **veľkou multiplicitou**

p → ← p



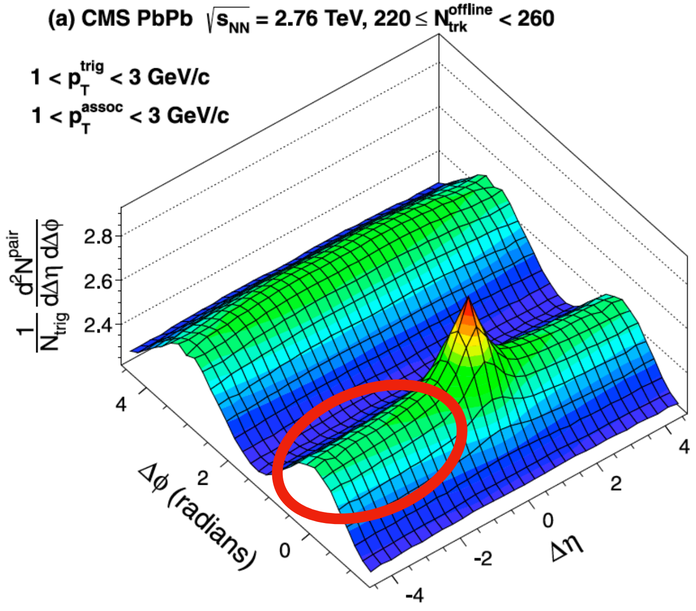
CMS, JHEP 09 (2010) 091

p → ← Pb



CMS, PLB 724 (2013) 213

Pb → ← Pb



CMS, PLB 724 (2013) 213

viditeľná štruktúra

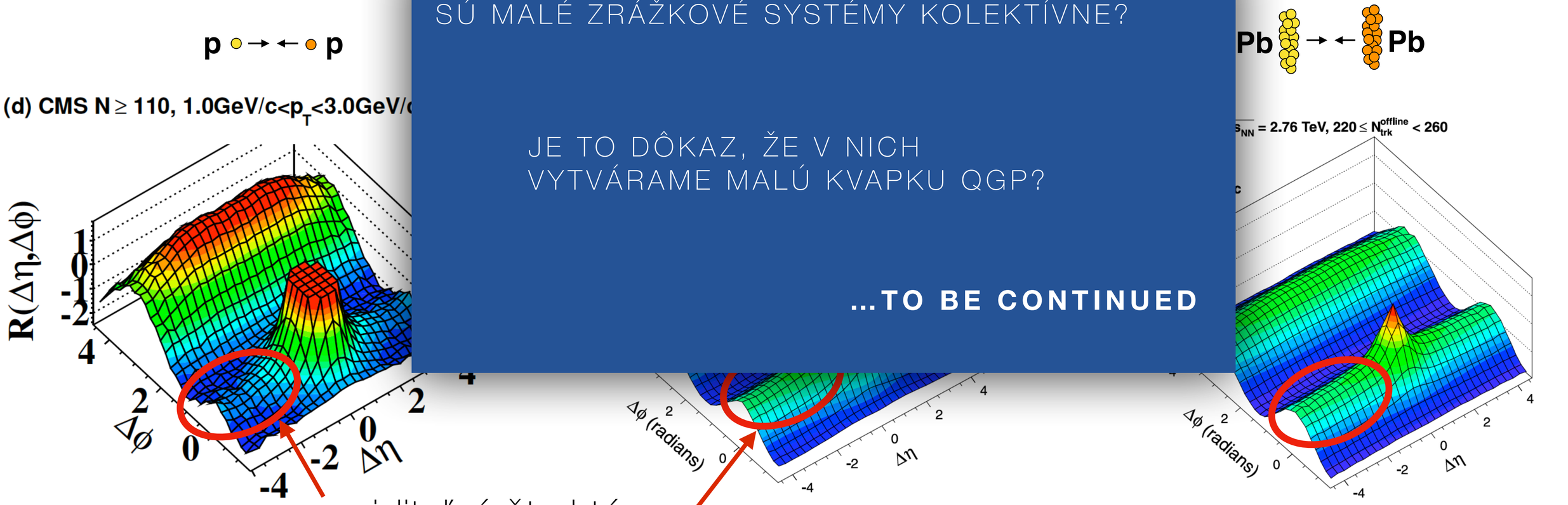
MALÉ ZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY: “NOVÉ CHÁPANIE” ?

- Podobná štruktúra nájdená aj v malých zrážkových systémoch s **veľkou multiplicitou**

SÚ MALÉ ZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY KOLEKTÍVNE?

JE TO DÔKAZ, ŽE V NICH
VYTVÁRAME MALÚ KVAPKU QGP?

...TO BE CONTINUED



viditeľná štruktúra

CMS, JHEP 09 (2010) 091

CMS, PLB 724 (2013) 213

CMS, PLB 724 (2013) 213

ZÁVER

- Úplné pochopenie systémov vznikajúcich pri ultrarelativistických hadrónových zrážkach ešte vyžaduje kus práce
- Zostaňte naladení na novinky…

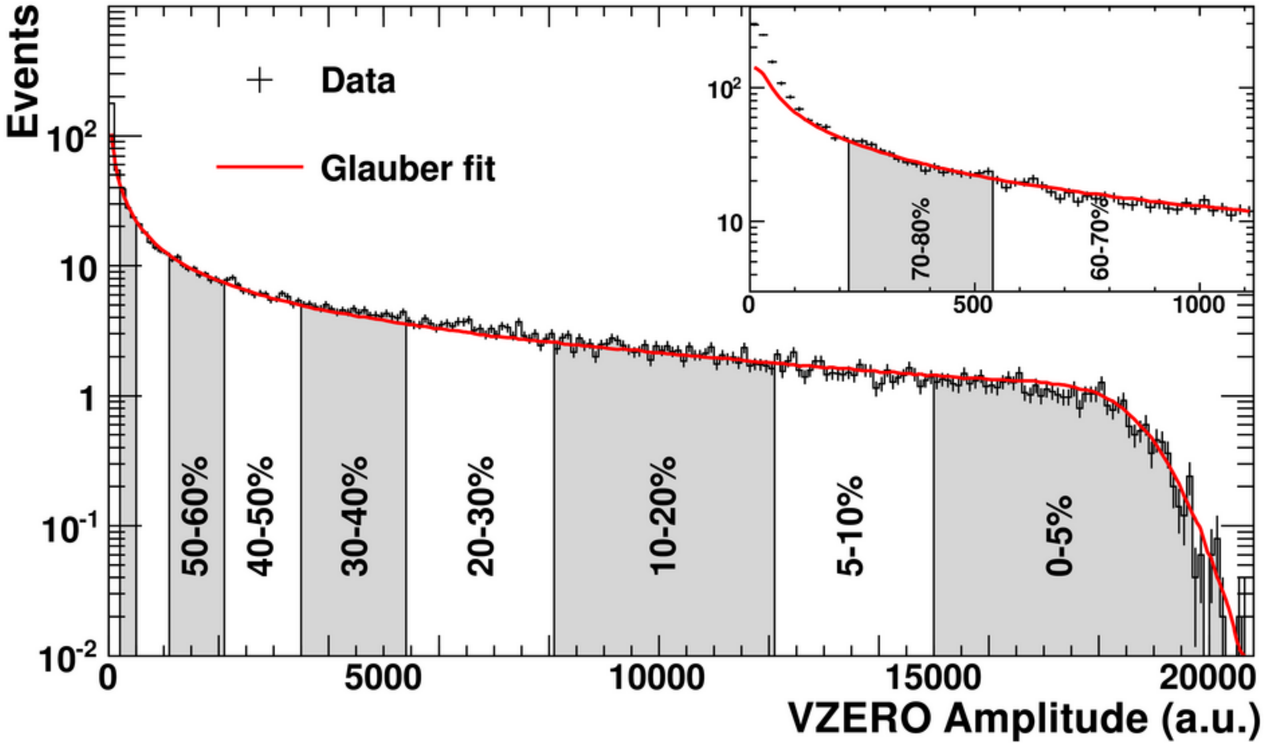
BACKUP

CENTRALITA ZRÁŽKY

- Jadrá sa môžu zraziť v rôznych konfiguráciách:

- Rôzne konfigurácie odhadujeme pomocou **centrality** zrážky
  - Veľká multiplicita -> centrálna zrážka
    - Horúcejšia, hustejšia -> **silný vplyv QGP na pozorovania**
  - Malá multiplicita -> periferálna zrážka
    - **Malý vplyv QGP na pozorovania** (ak vôbec QGP vznikne)

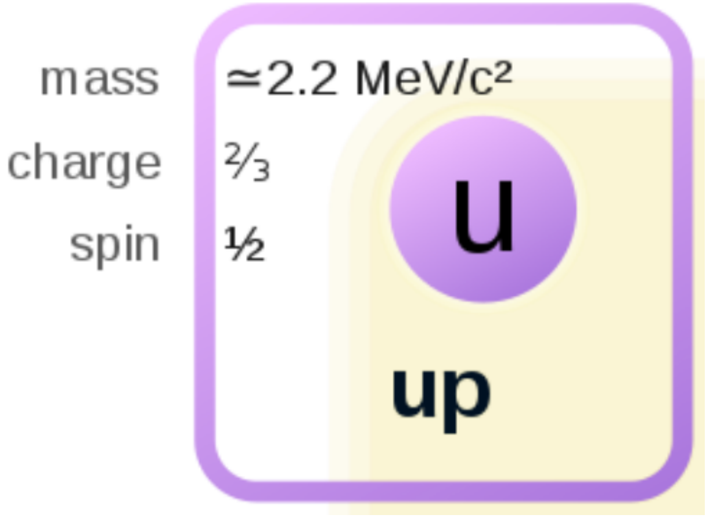
ALICE, PRL 106, 032301 (2011)



VZERO amplitúdia je priamo úmerná počtu vyprodukovaných častíc (=multiplicite)

JEDNOTKY V ČASTICOVEJ FYZIKE

- Jednotky SI sú v časticovej fyzike nepraktické (kg, J)
- **Elektronvolt (eV)** = kinetická energia 1 elektrónu ktorý prešiel potenciálom 1 V
  - 1 eV = 1.602 x 10^{-19} J
  - Pomocou eV vyjadríme aj hmotnost: 1 eV/c^2 = 1,8 x 10^{-36} kg
- Hmotnosť **u** kvarku: 2.2 MeV/c^2 = 4 x 10^{-30} kg

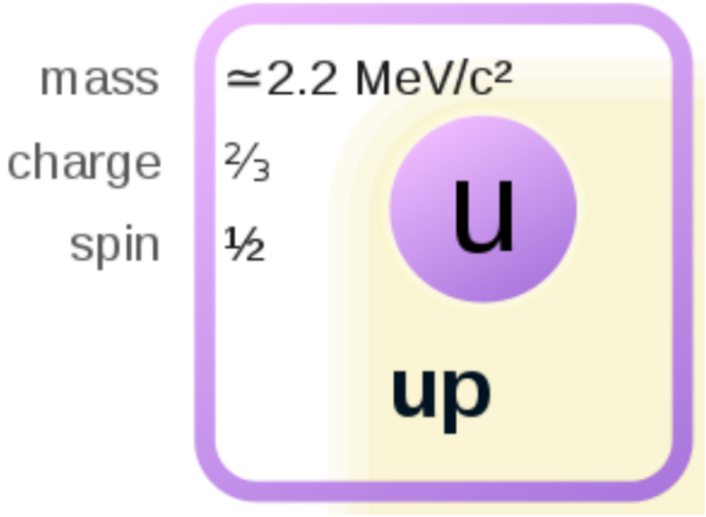


1 000 000 = 10^6 eV	1 MeV (Mega elektronvolt)
1 000 000 000 = 10^9 eV	1 GeV (Giga elektronvolt)
1 000 000 000 000 = 10^{12} eV	1 TeV (Tera elektronvolt)

1 TeV odpovedá kinetickej energii letiaceho komára.

JEDNOTKY V ČASTICOVEJ FYZIKE

- Jednotky SI sú v časticovej fyzike nepraktické (kg, J)
- **Elektronvolt (eV)** = kinetická energia 1 elektrónu ktorý prešiel potenciálom 1 V
  - 1 eV = 1.602×10^{-19} J
  - Pomocou eV vyjadríme aj hmotnost: 1 eV/c^2 = $1{,}8 \times 10^{-36}$ kg
- Hmotnosť **u** kvarku: 2.2 MeV/c^2 = 4×10^{-30} kg

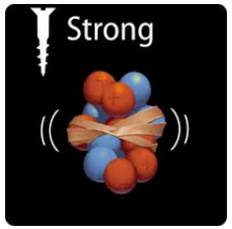


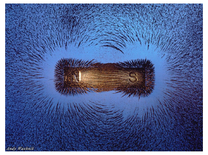
1 000 000 = 10^6 eV	1 MeV (Mega elektronvolt)
1 000 000 000 = 10^9 eV	1 GeV (Giga elektronvolt)
1 000 000 000 000 = 10^{12} eV	1 TeV (Tera elektronvolt)

10^{14} častíc v LHC pri energii 7 TeV odpovedá letiacej stíhačke.

ČO VŠETKO VIEME O INTERAKCIÁCH

- Existujú 4 druhy interakcií medzi časticami:





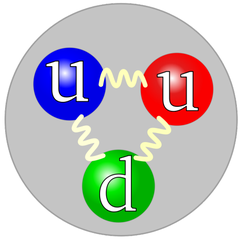
	SPROSTREDKUJÚCE ČASTICE	PÔSOBIA NA ČASTICE	SILA (RELATÍVNA)	DOSAH
SILNÁ	GLUÓNY	KVARKY GLUONY	1	10^{-15} M
ELEKTRO-MAGNETICKÁ	FOTÓN	ELEKTRICKY NABITÉ	1/137	∞
SLABÁ	W^+, W^-, Z^0	VŠETKY	10^{-6}	10^{-18} M
GRAVITAČNÁ	- (NIE JE POZOROVANÉ)	VŠETKY	10^{-39}	∞

- V časticovej fyzike gravitačnú silu neuvažujeme

SILNÁ INTERAKCIA

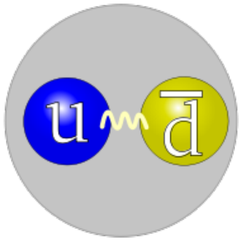
- Viaže kvarky do **hadrónov** = častice zložené z bezfarebnej kombinácie kvarkov
- Zviazané **gluónom** (od slova “glue”)

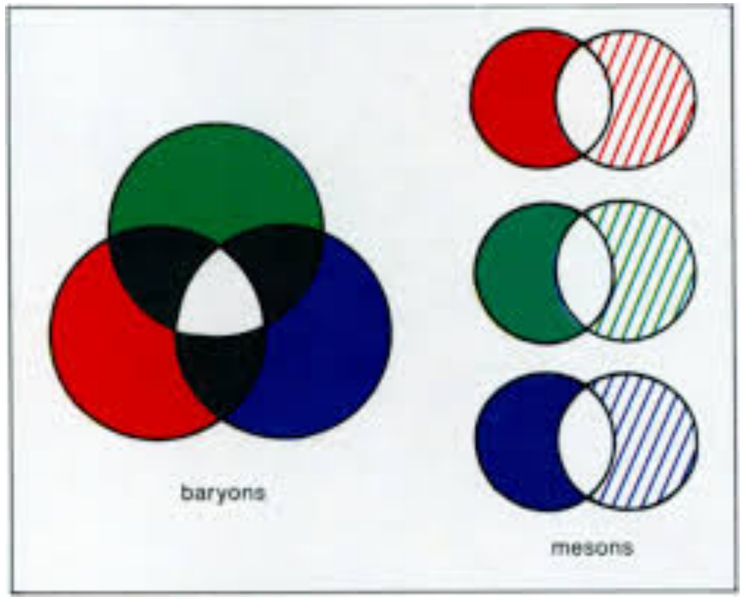
Baryóny:
- 3 kvarky
- 3 anti-kvarky



proton

Mesóny:
- kvark + anti-kvark



pion

- Popísané **kvantovou chromodynamikou (QCD)**
  - Tri základné farby: **červená**, **zelená**, **modrá**
  - Analógia svetla: r+g+b = bezfarebný výsledok
  - Farba + antifarba = bezfarebný výsledok