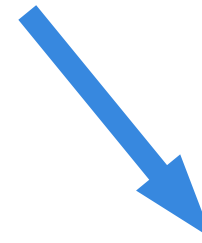
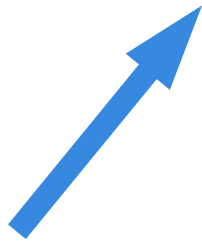


# Srážky ultra-relativistických jader na LHC

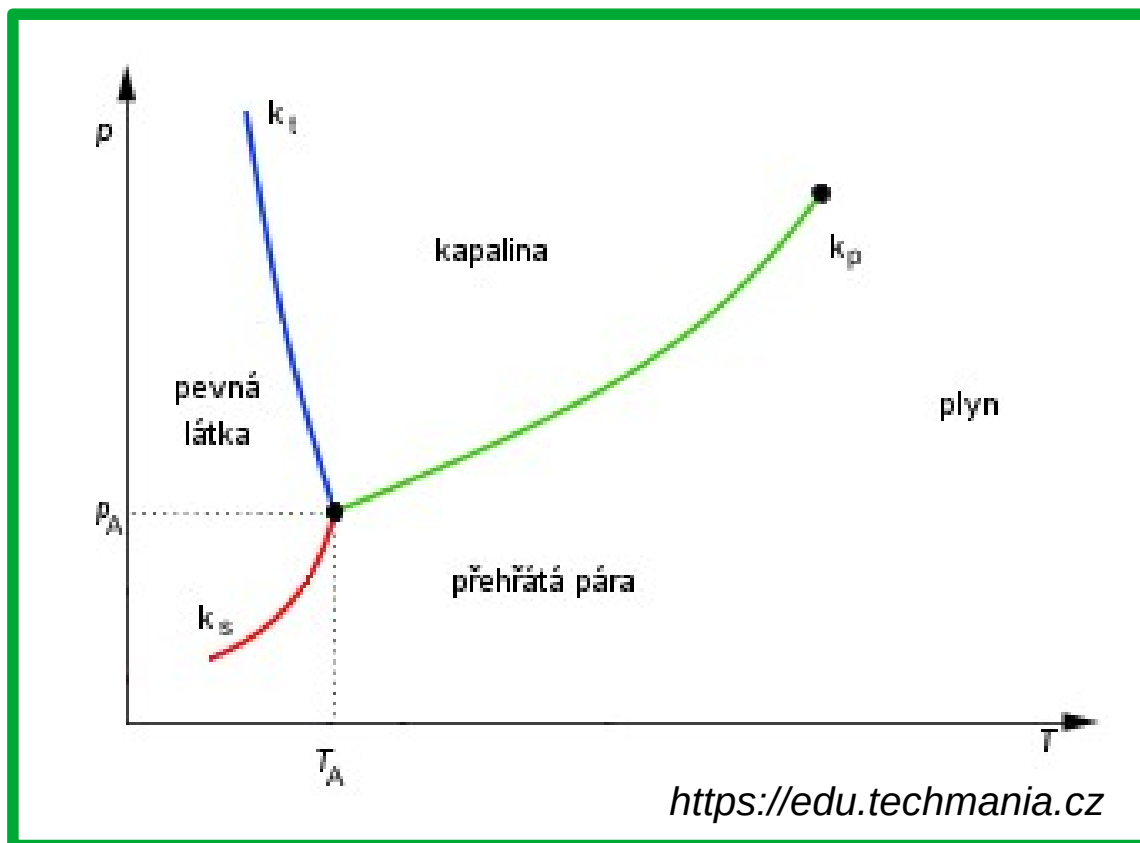
Martin Rybář

# Stav hmoty: makroskopický pohled



# Vlastnosti hmoty: makroskopický pohled

- Popis pomocí **termodynamických veličin** a **stavové rovnice**.
- **Fázový diagram**.

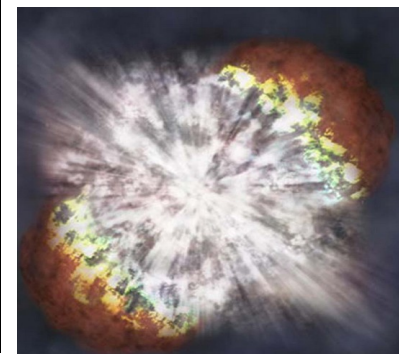
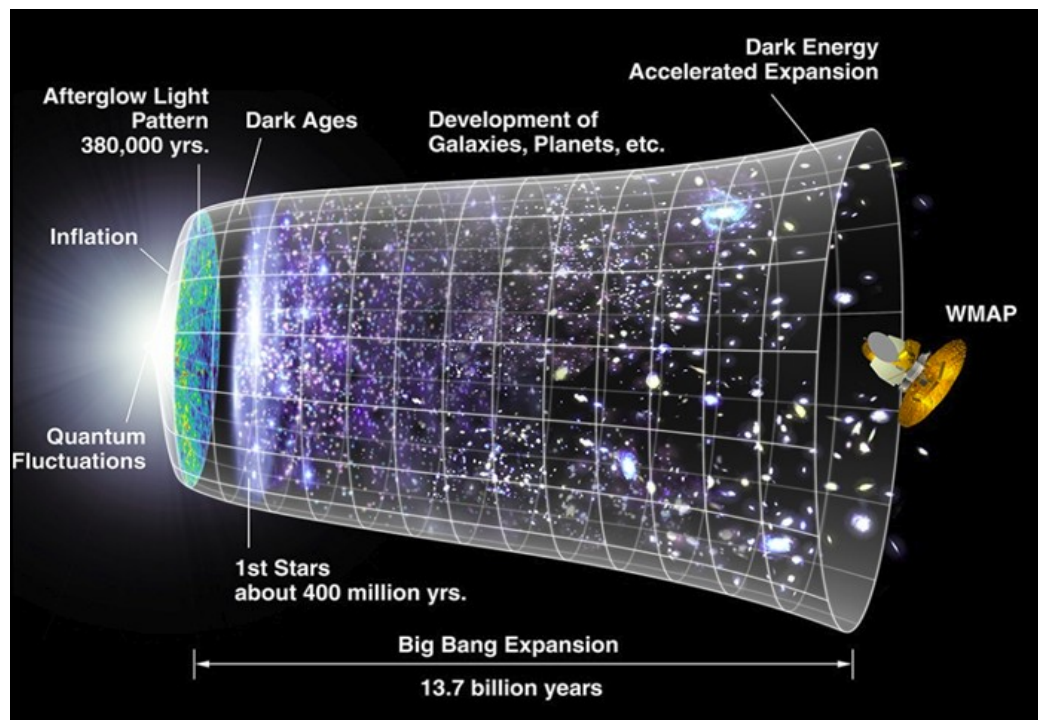


Ideální plyn:

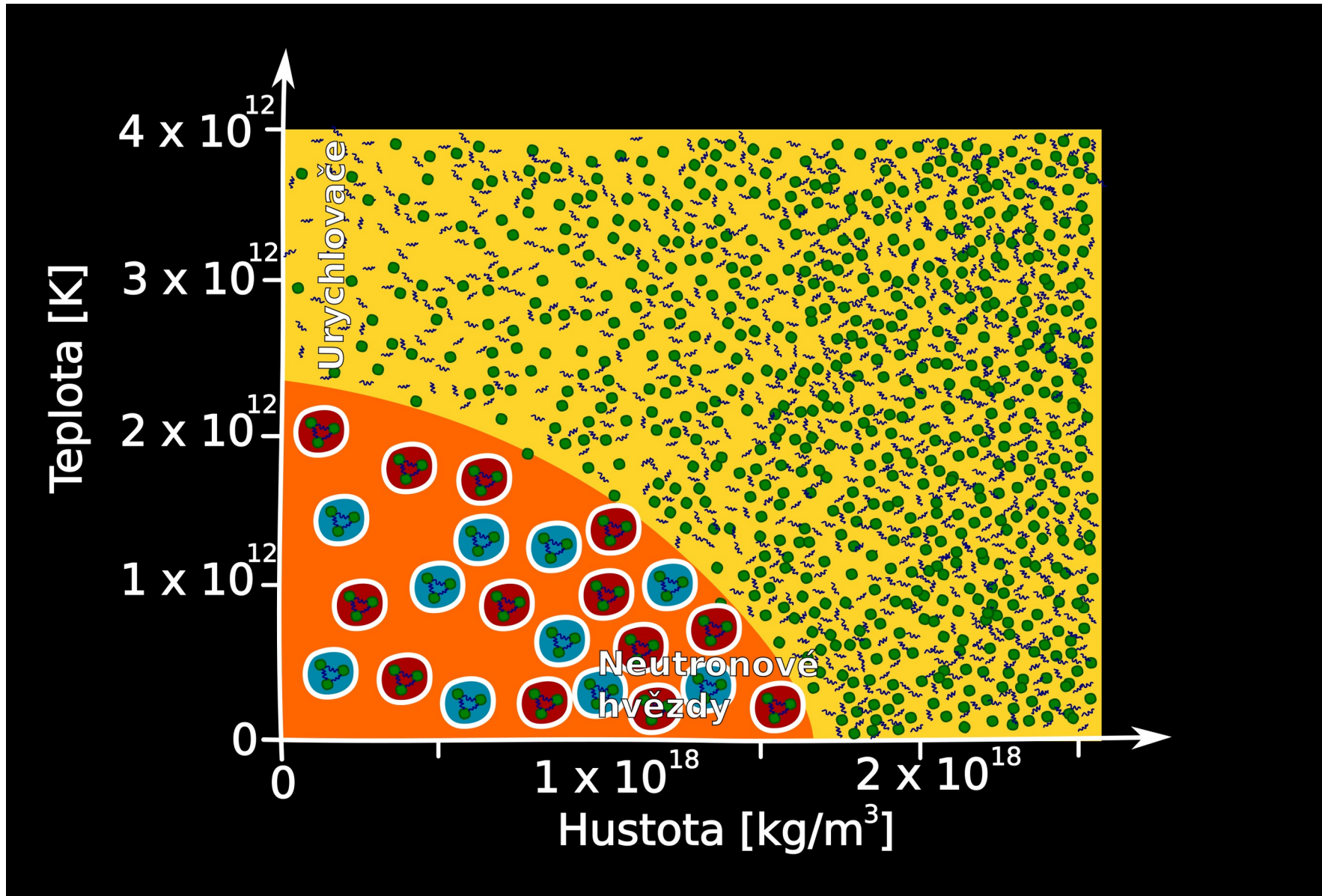
$$p = \frac{N_A n k T}{V}$$

# Hmota za extrémních podmínek

- Co se děje s hmotou při extrémním stlačování nebo zahřívání?
- Jaká byla forma hmoty krátce po velkém třesku?
- Jaké jsou vlastnosti hmoty uvnitř neutronových hvězd a dalších kompaktních objektech?
- Jaké je naše teoretické porozumění?



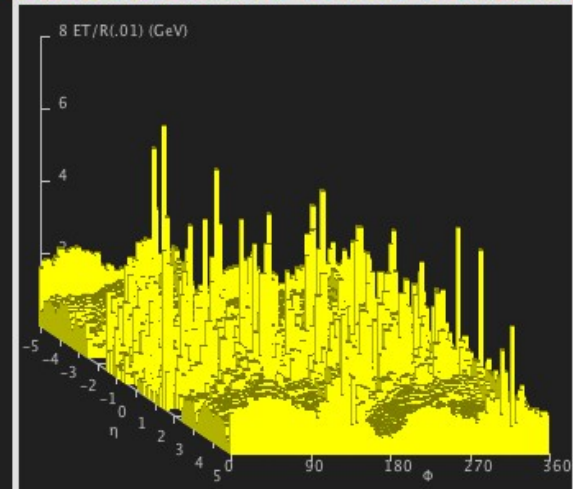
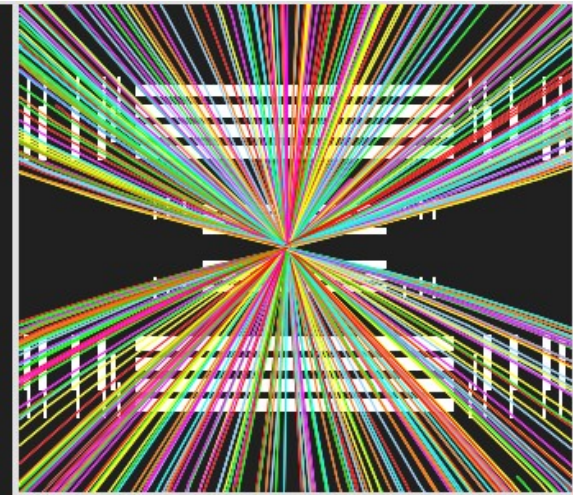
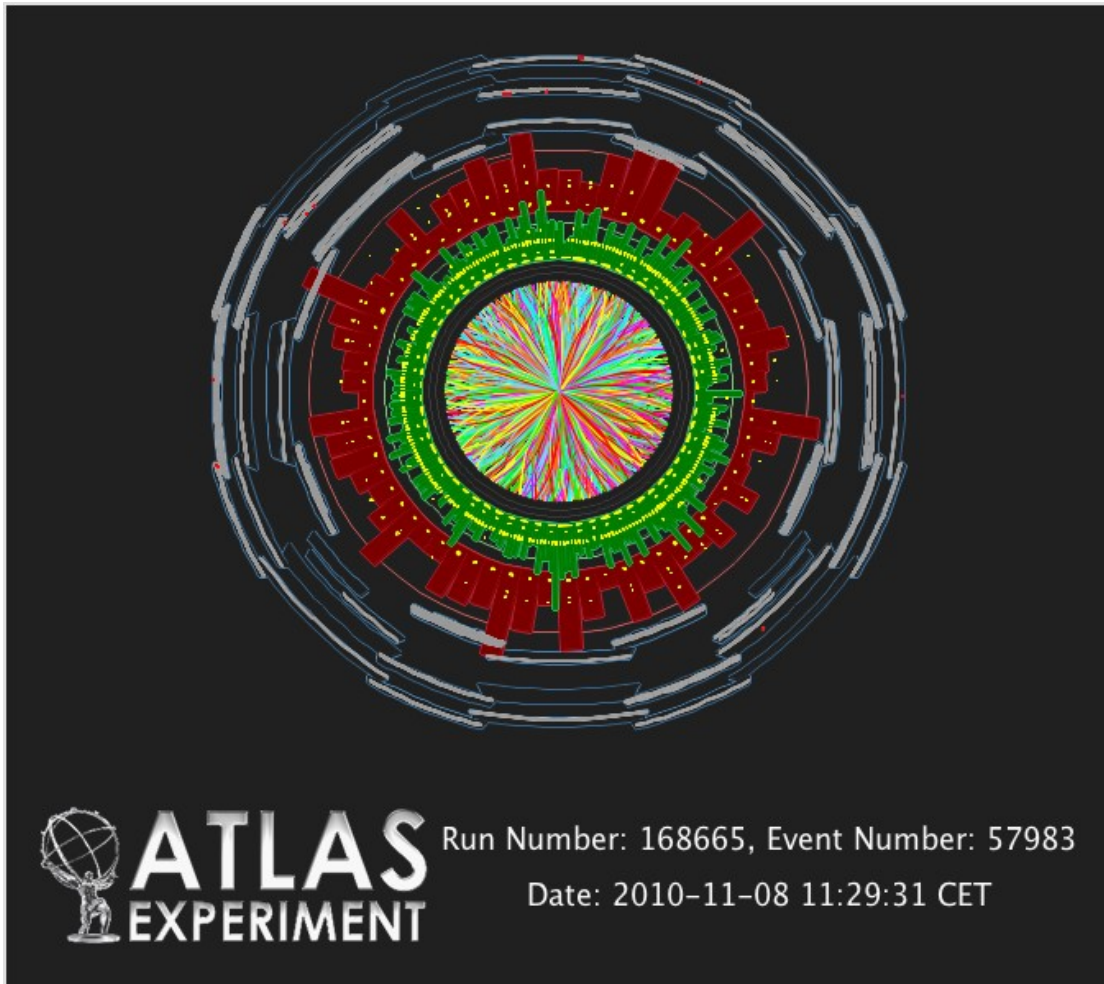
# Jak studovat v laboroři



# Co vidíme ve srážkách těžkých iontů?

**Z praktického pohledu:**

- Obrovské množství signálu



# Co vidíme ve srážkách těžkých iontů?

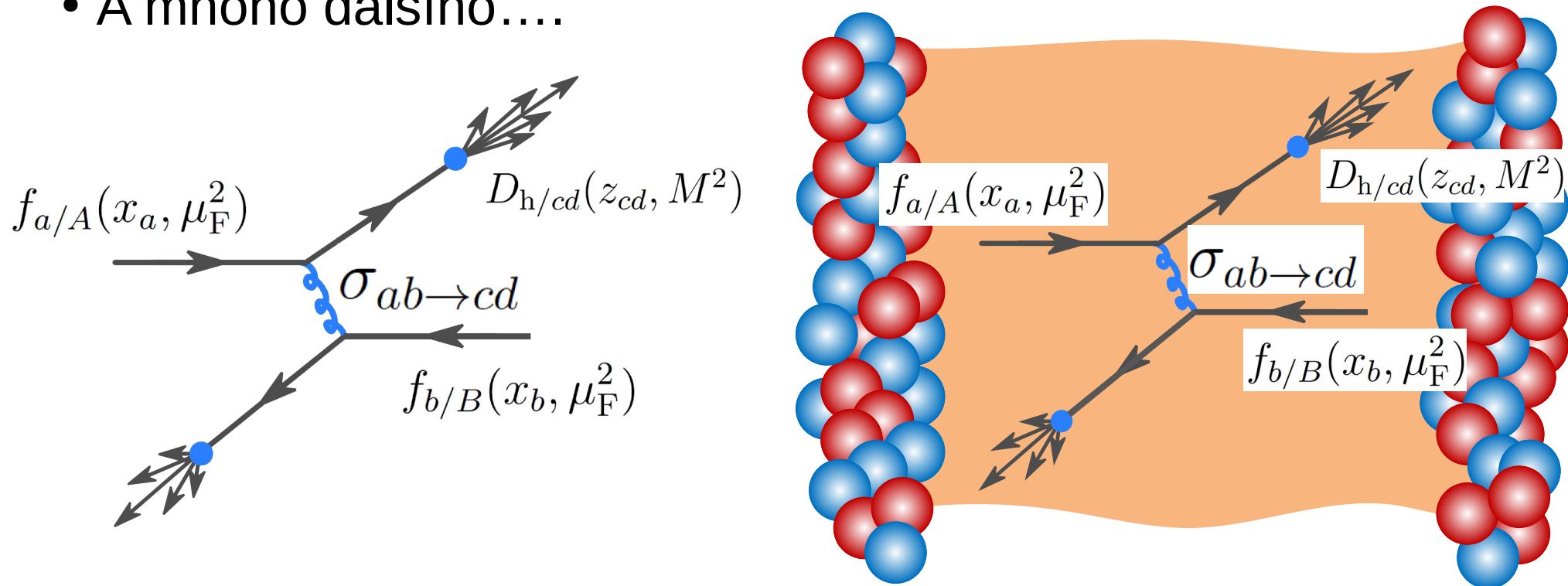
## **Z fyzikálního hlediska mnoho zajímavého**

- Změnu celkového toku částic a energie
- Změnu “chování” jetů, tzv. „zhášení jetů“
- Fotonové srážky
- A mnoho dalšího....

# Co vidíme ve srážkách těžkých iontů?

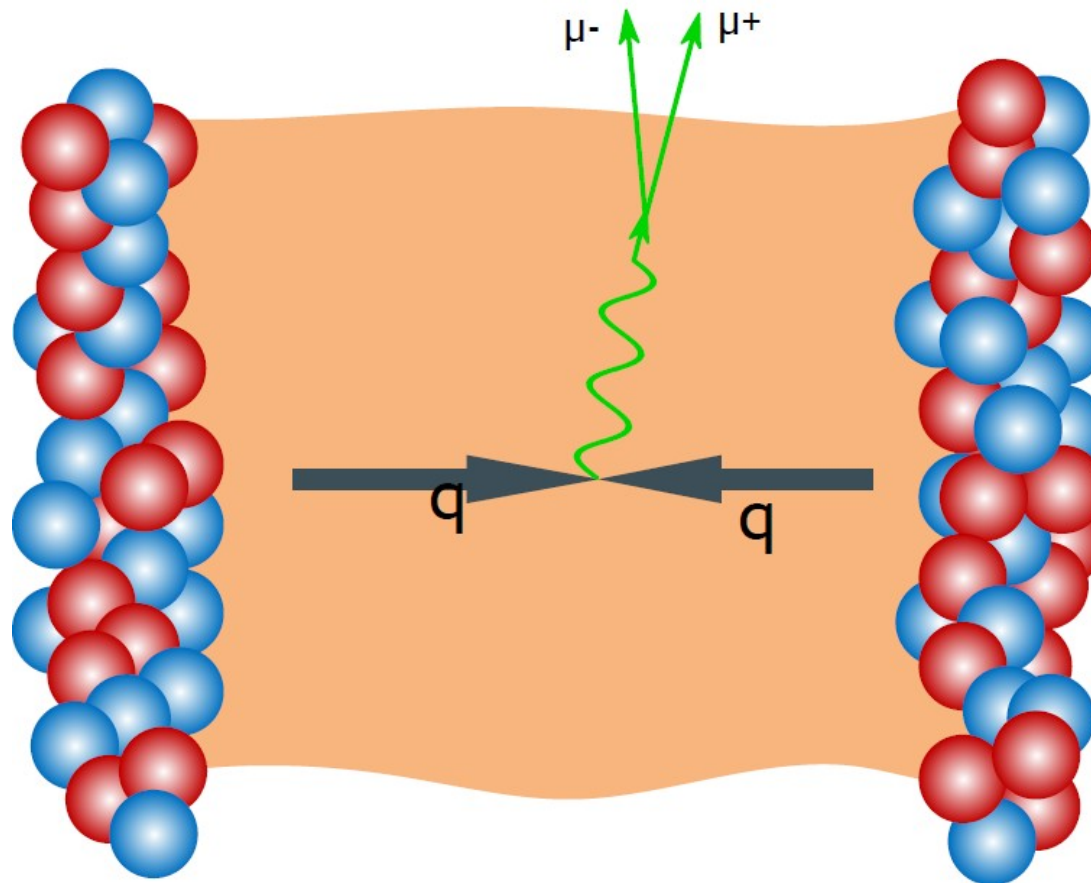
Z fyzikálního hlediska mnoho zajímavého

- Změnu celkového toku částic a energie
- Změnu “chování” jetů, tzv. „zhášení jetů“
- Fotonové srážky
- A mnoho dalšího....



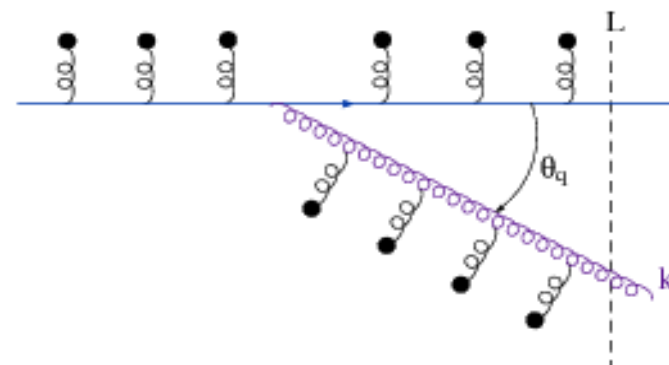
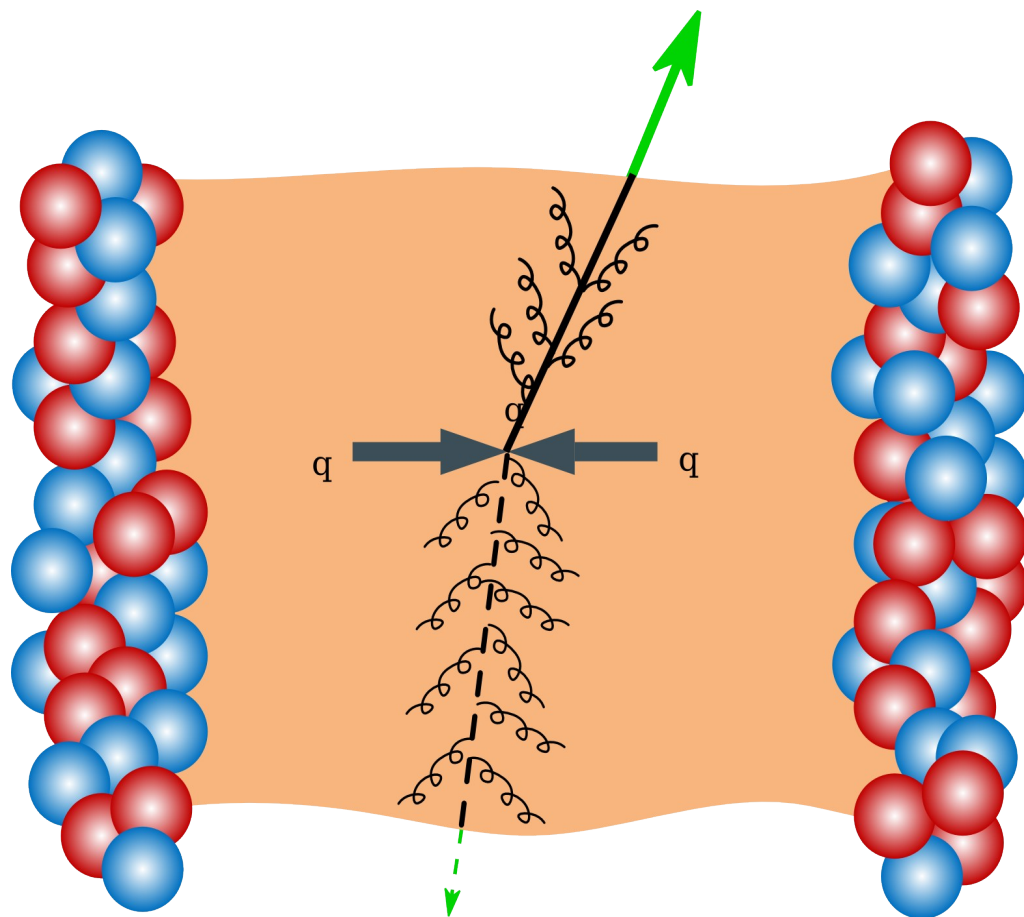


# Fotony, W a Z bosony



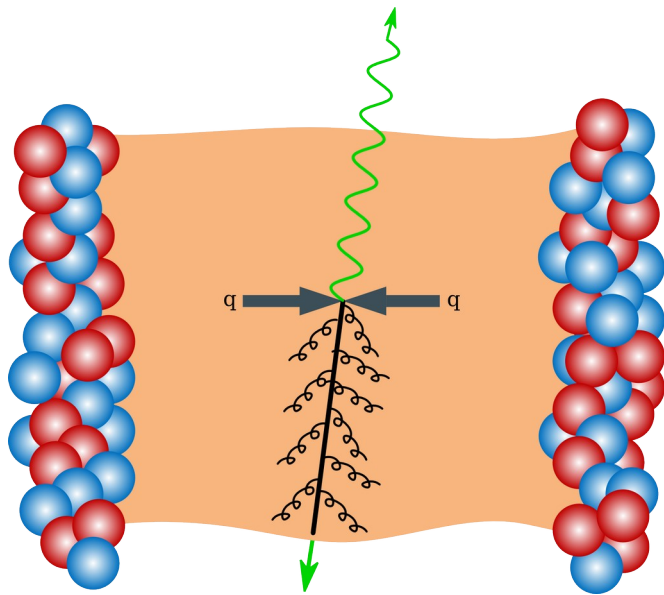
→ Standardní svíčky

# Jety



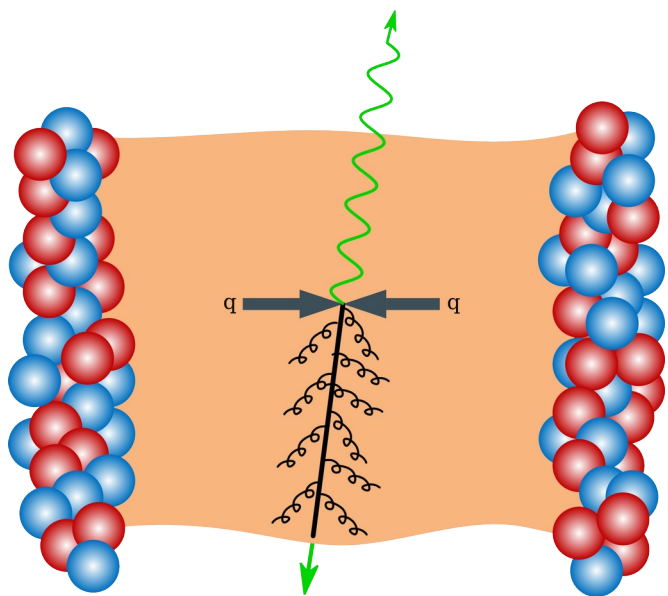
Různé teoretické přístupy pro popis zhášení jetů.

# Další „tvrdé“ procesy

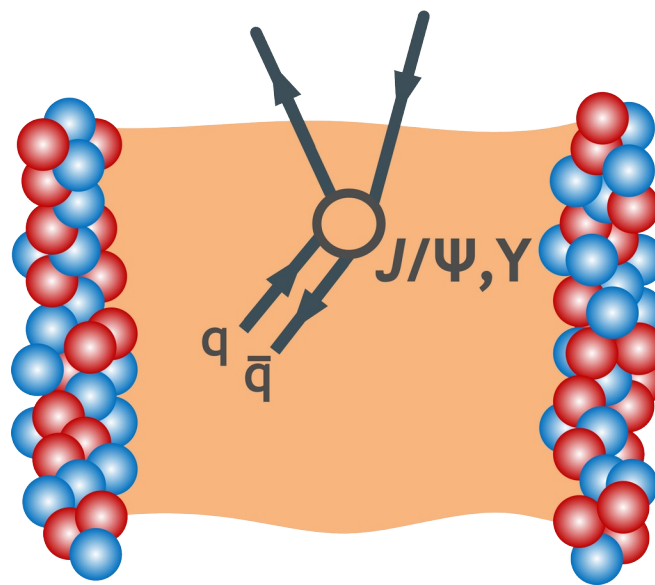


**Boson-tagované jety**

# Další „tvrdé“ procesy

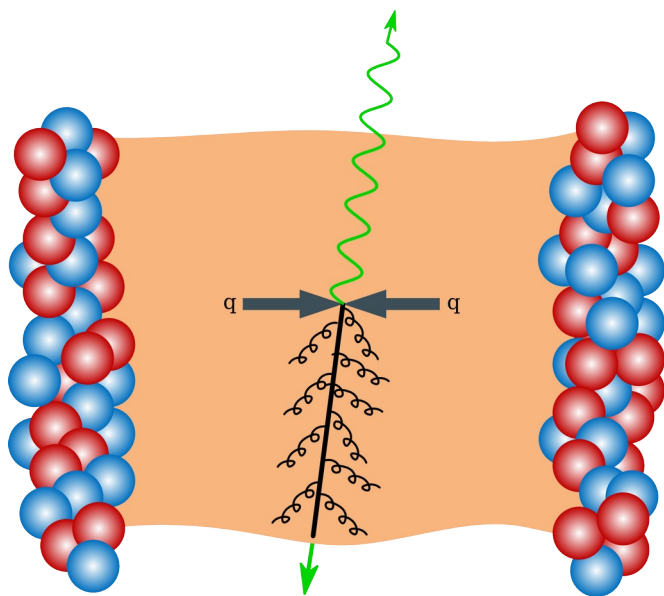


**Boson-tagované jety**

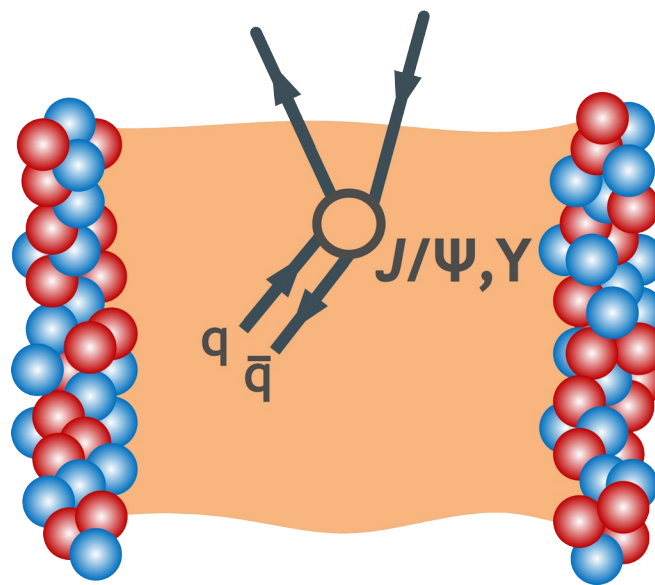


**Potlačení kvarkonií**

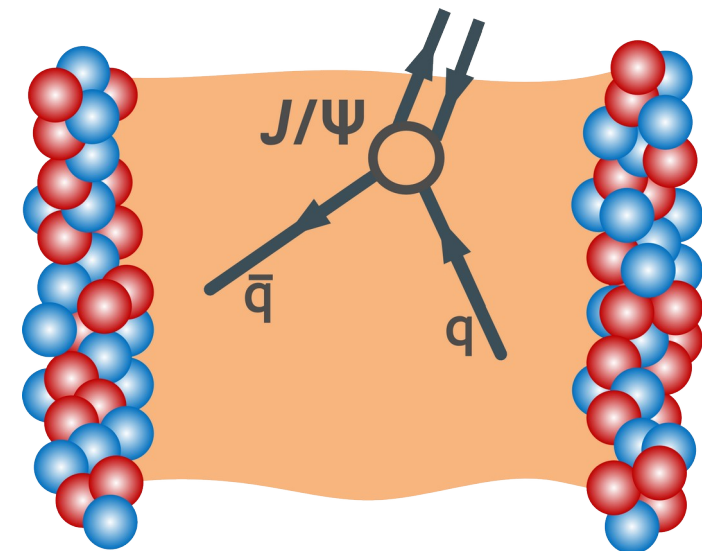
# Další „tvrdé“ procesy



Boson-tagované jety



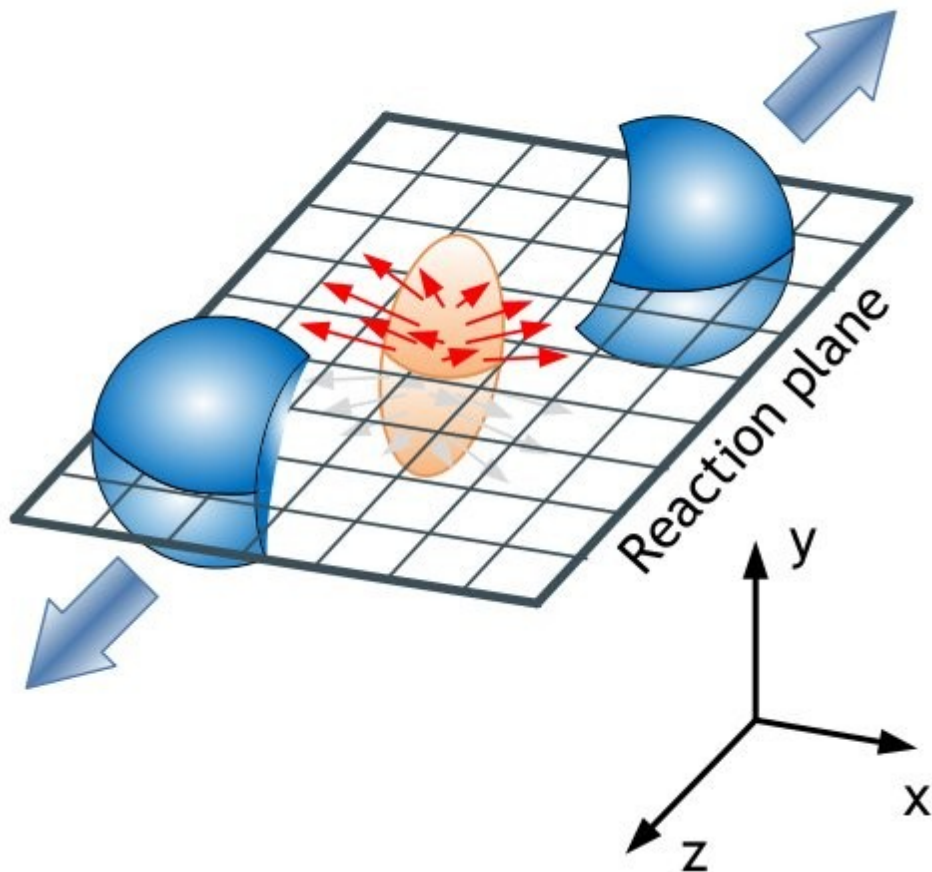
Potlačení kvarkonií



Rekombinace kvarkonií

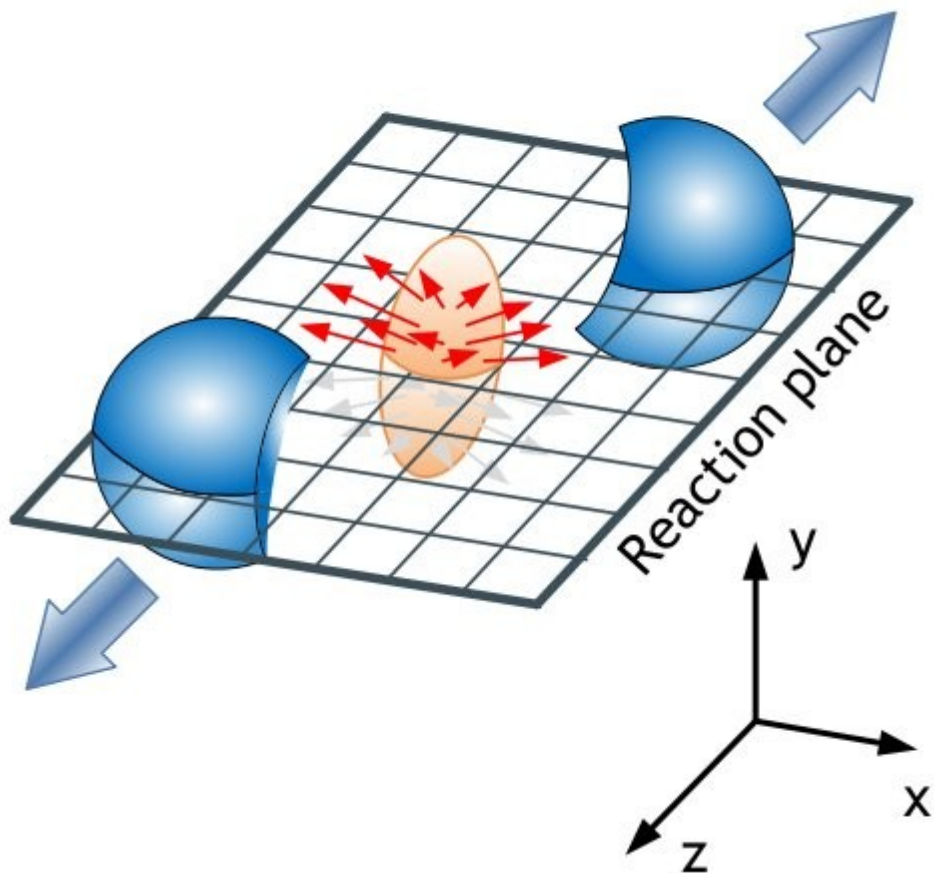
# Eliptický tok

Anizotropie oblasti překryvu

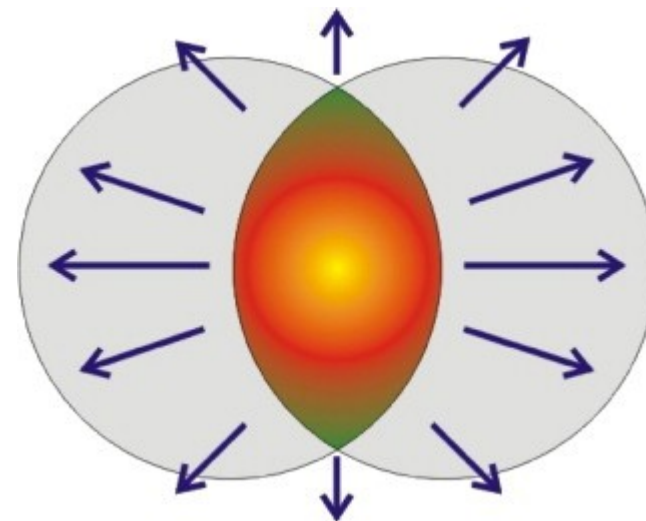


# Eliptický tok

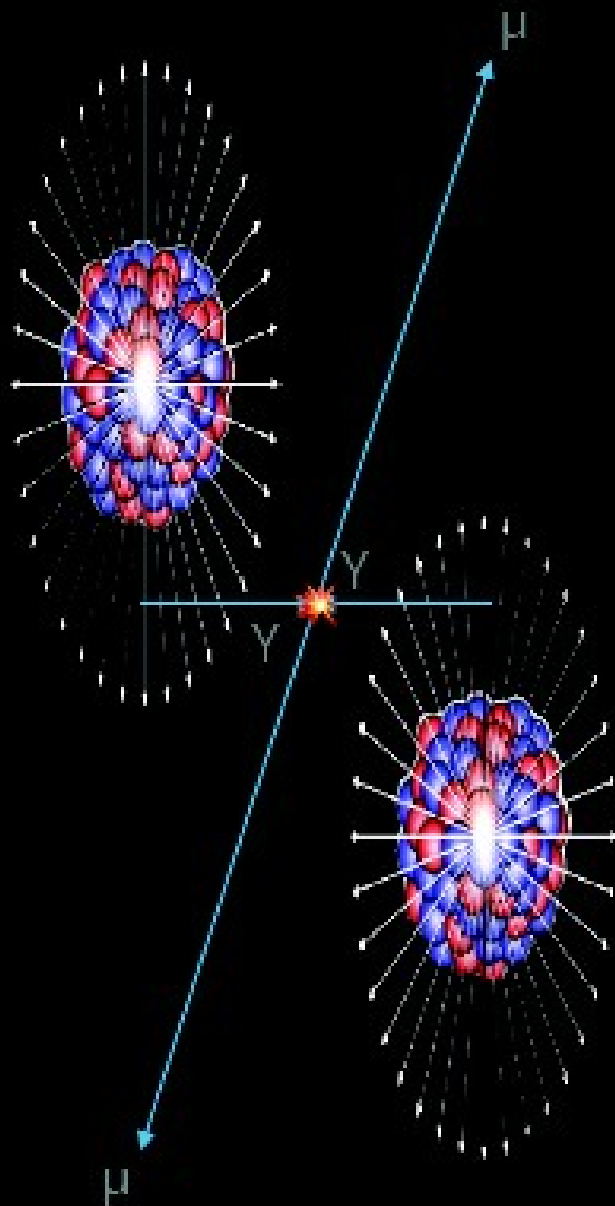
Anizotropie oblasti překryvu



Anizotropie produkce částic



# Ve srážkách jader olova...



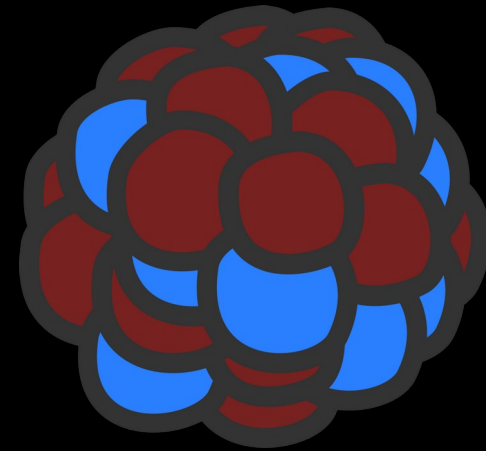
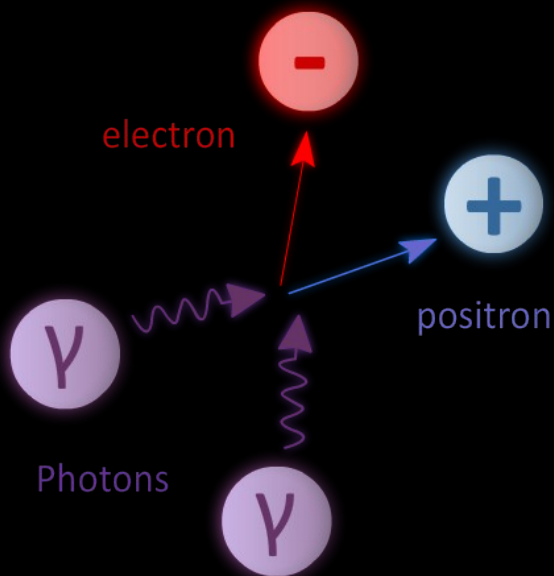
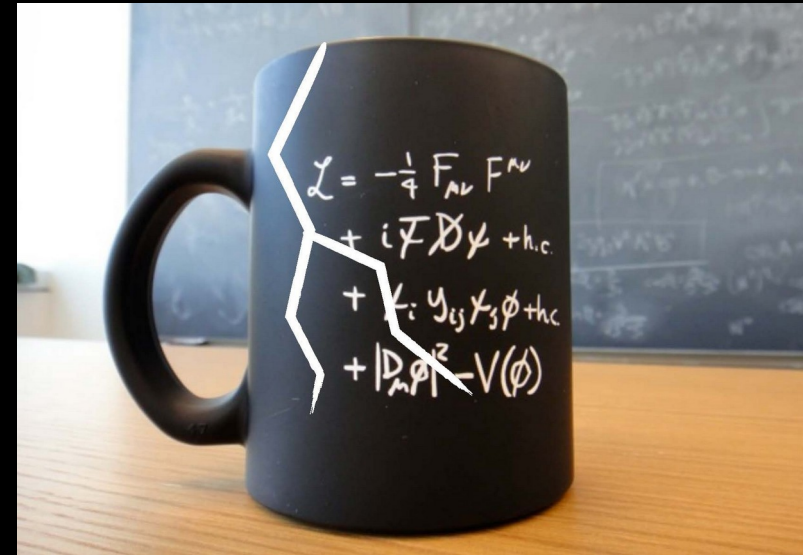
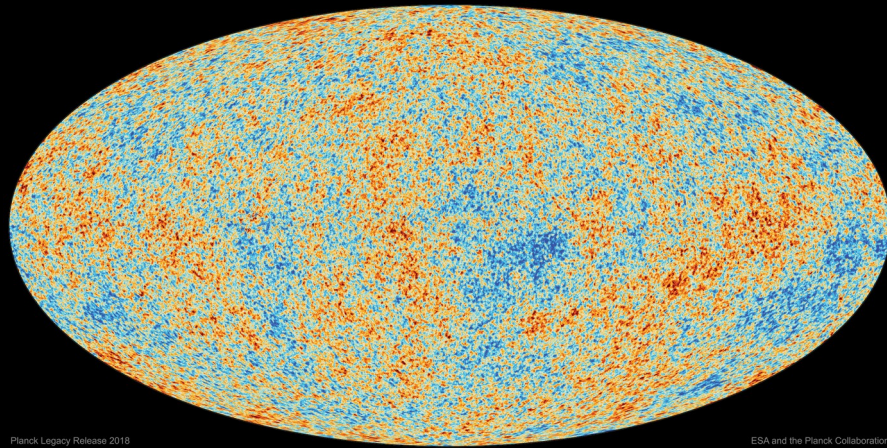
**...srážíme i světlo!**

silné fotonové toky

$\sim Z^4 = 45 \cdot 10^6$  silnější než pro proton



# Proč nás to zajímá?



Back-to-back  
dimuons

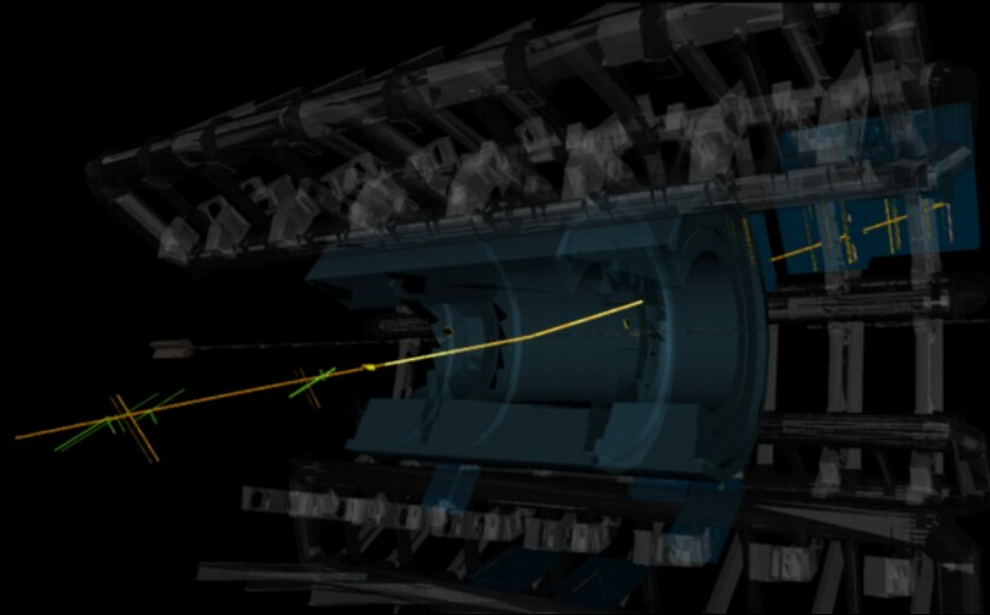


Run: 287038  
Event: 71765109  
2015-11-30 23:20:10 CEST

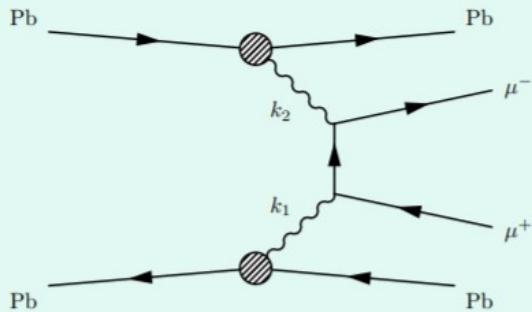
$$M_{\mu\mu} = 173 \text{ GeV}$$

$$\gamma + \gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

Dimuons UPC Pb+Pb 5.02 TeV

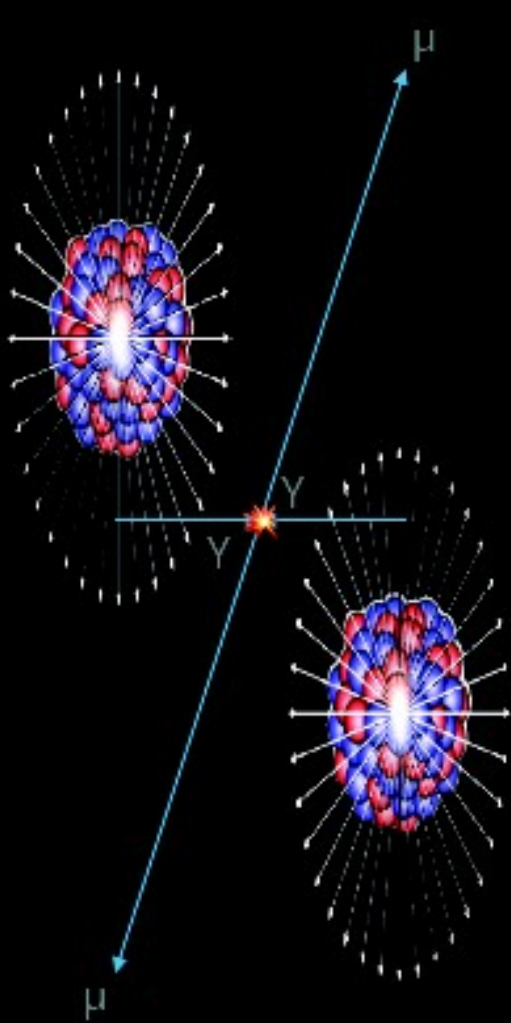


**Hmota ze světla!**

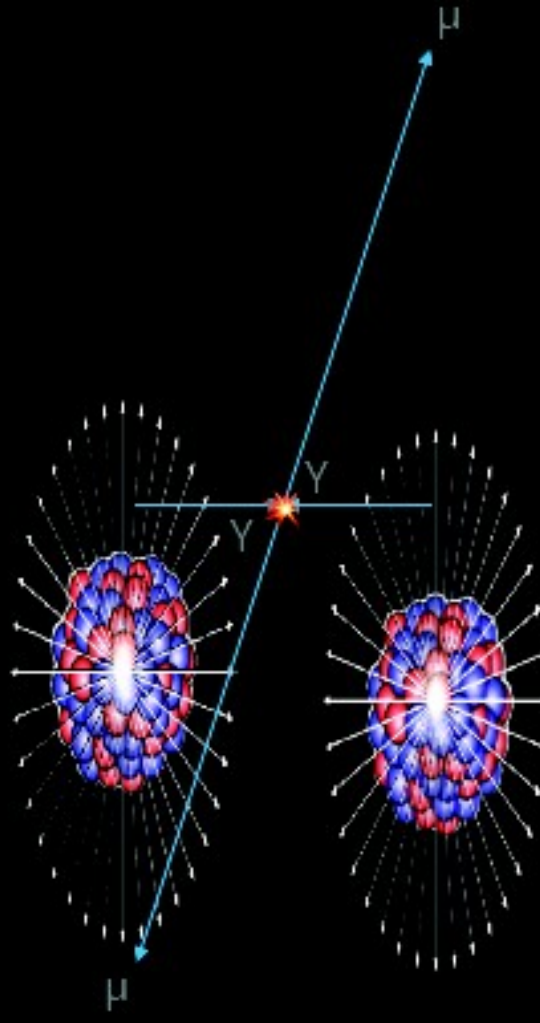


lepton pair production  
(Breit-Wheeler formula, Brodsky et al 1971)

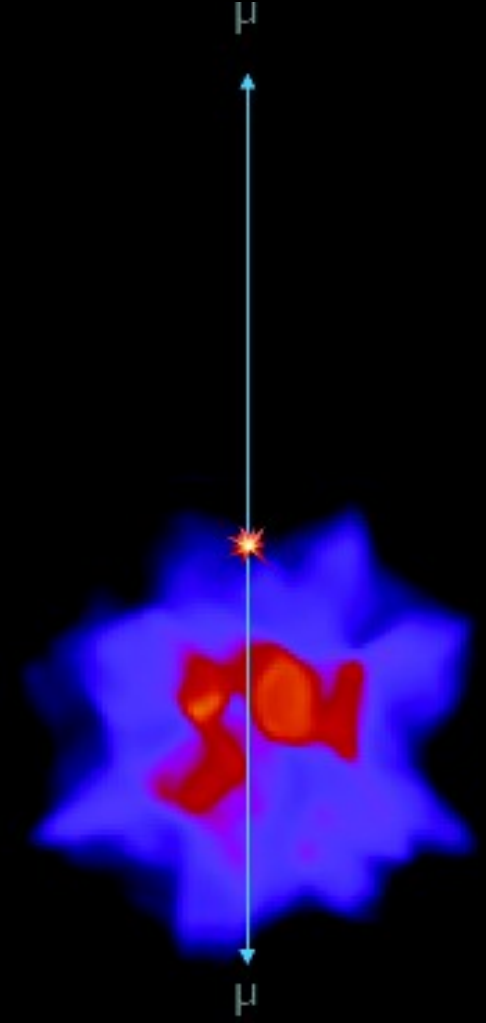
# Nové metody studia QGP



UPC srážka

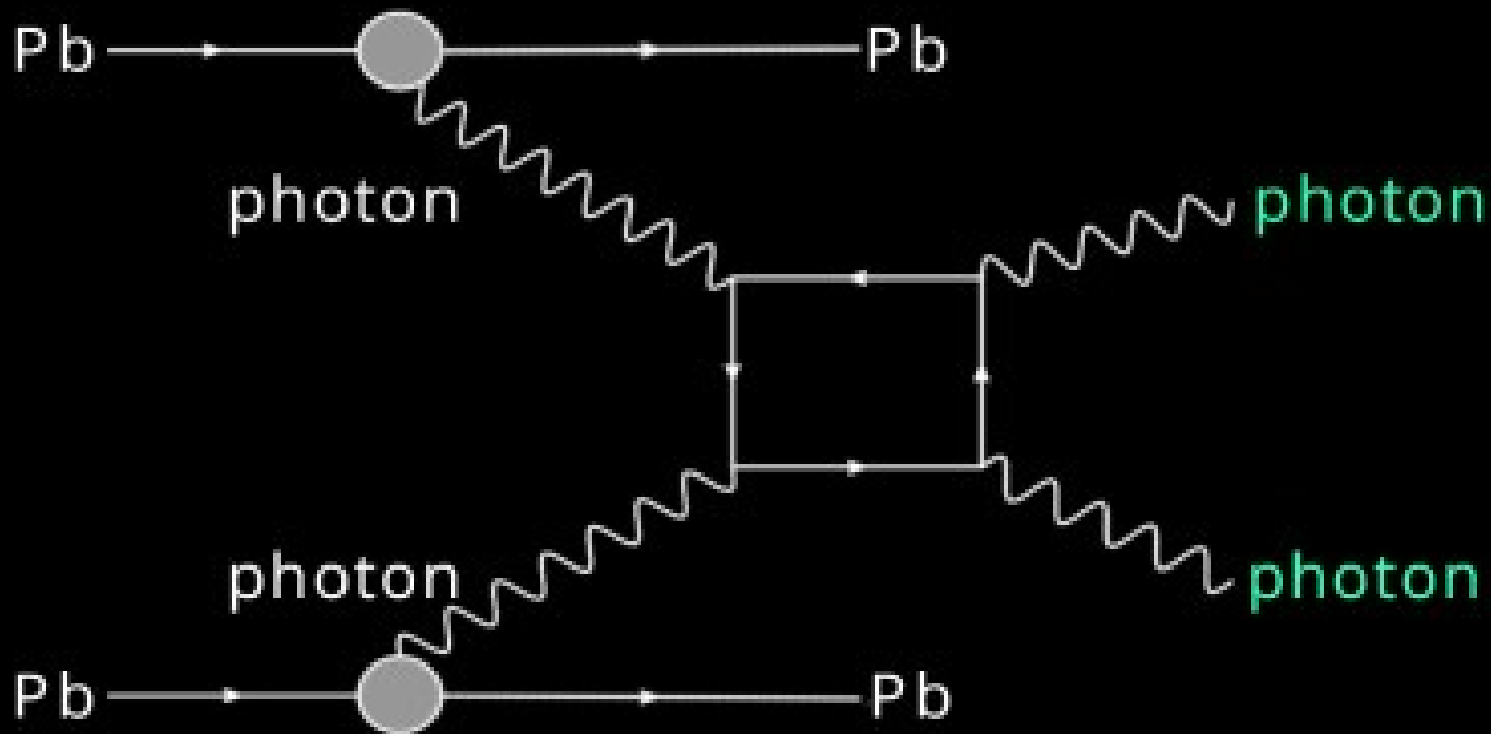


ne-UPC srážka



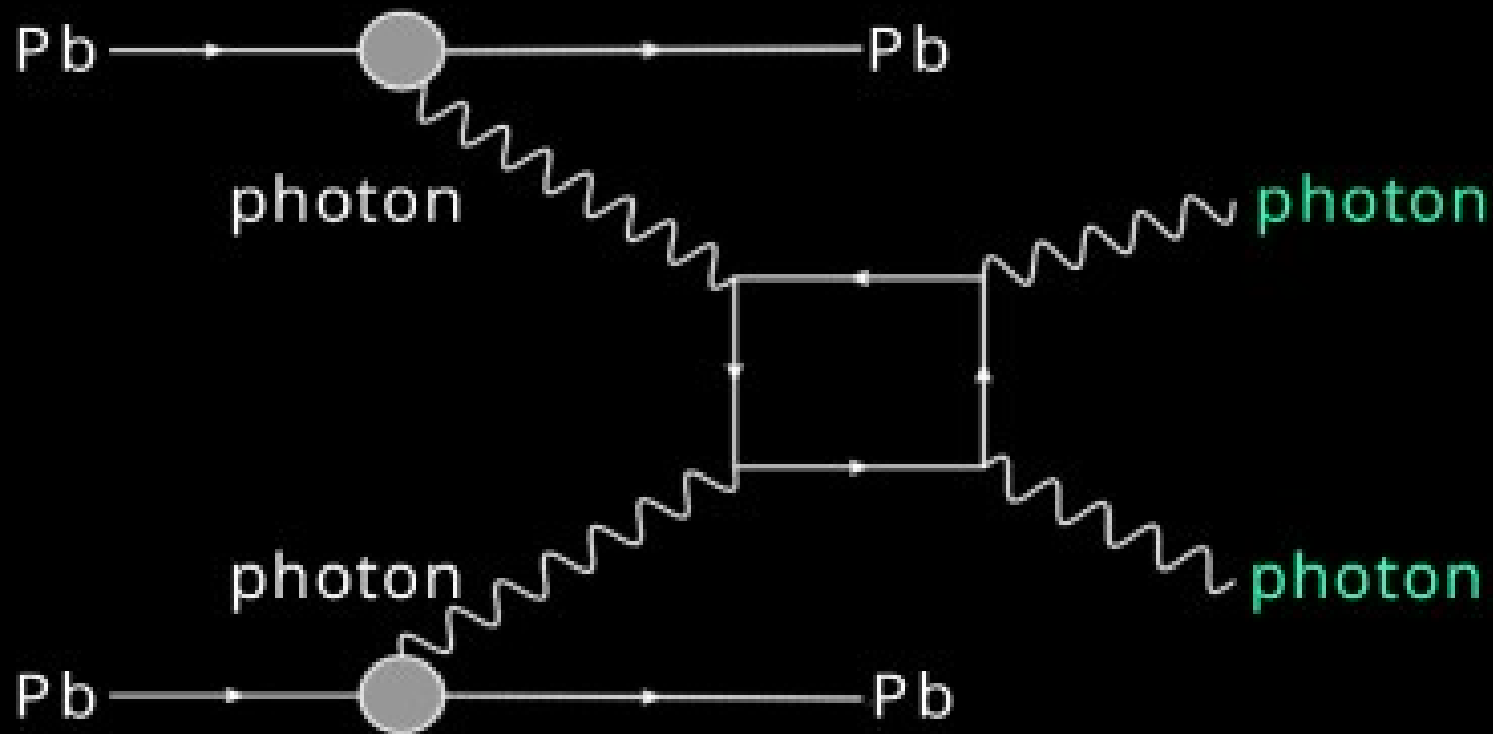
Miony penetrující  
QGP

# Rozptyl světla na světle!



**Extrémně vzácný, kvantový,  
proces!**

# Rozptyl světla na světle!

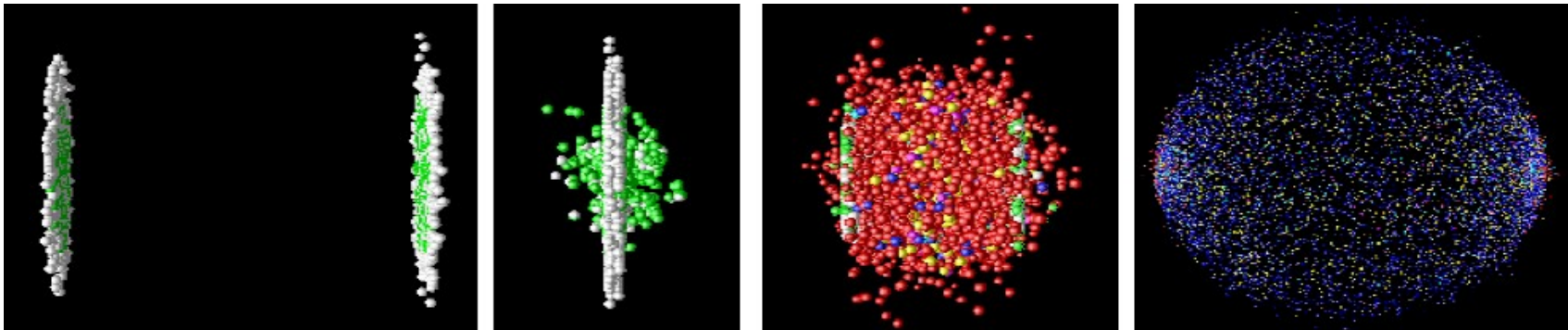


Citlivý na „fyziku za Standardní model“

# Backup

# Závěr

- Srážky těžkých iontů nejsou superpozicí mnoha  $pp$  srážek.
- Vzniká **plazma volných kvarků a gluonů**.
- Pozorujeme značné **modifikace jetů**.
  - Zkoumání těchto procesů by nám mělo umožnit lepší pochopení silné interakce.
- Ve srážkách těžkých iontů pozorujeme **anizotropní tok energie**.
  - Dobře popsány relativistickou hydrodynamikou.
  - Ověřování odvážných hypotéz a spojení s kosmologií.
- V ultra-periferálních srážkách těžkých iontů lze pozorovat **rozptyl světla na světlu a tvorbu hmoty ze světla**.



# Jak a co měříme...

- Potřebujeme dobře definovanou referenci →  $pp$  srážky.
- Často se měří **jaderný modifikační faktor**:

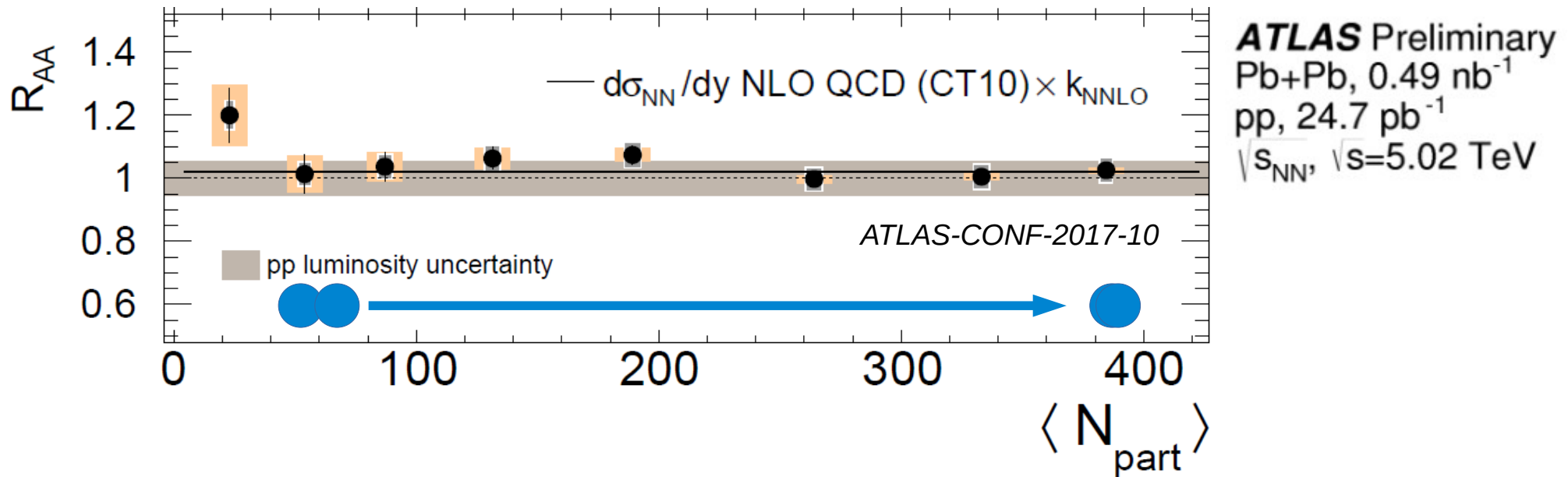
$$R_{AA} = \frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{\text{Venn diagram}}{\text{green dot}} = \frac{\text{Norm. A+A}}{pp} = \frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{\frac{dN_{AA}}{dp_T}}{\frac{dN_{pp}}{dp_T}}$$

The diagram shows two overlapping blue circles representing nuclei and a single green dot representing a proton-proton collision. The equation defines the nuclear modification factor  $R_{AA}$  as the ratio of the yield per collision in nucleus-nucleus collisions to the yield per collision in proton-proton collisions. The numerator is labeled "Norm. A+A" and the denominator is labeled "pp".



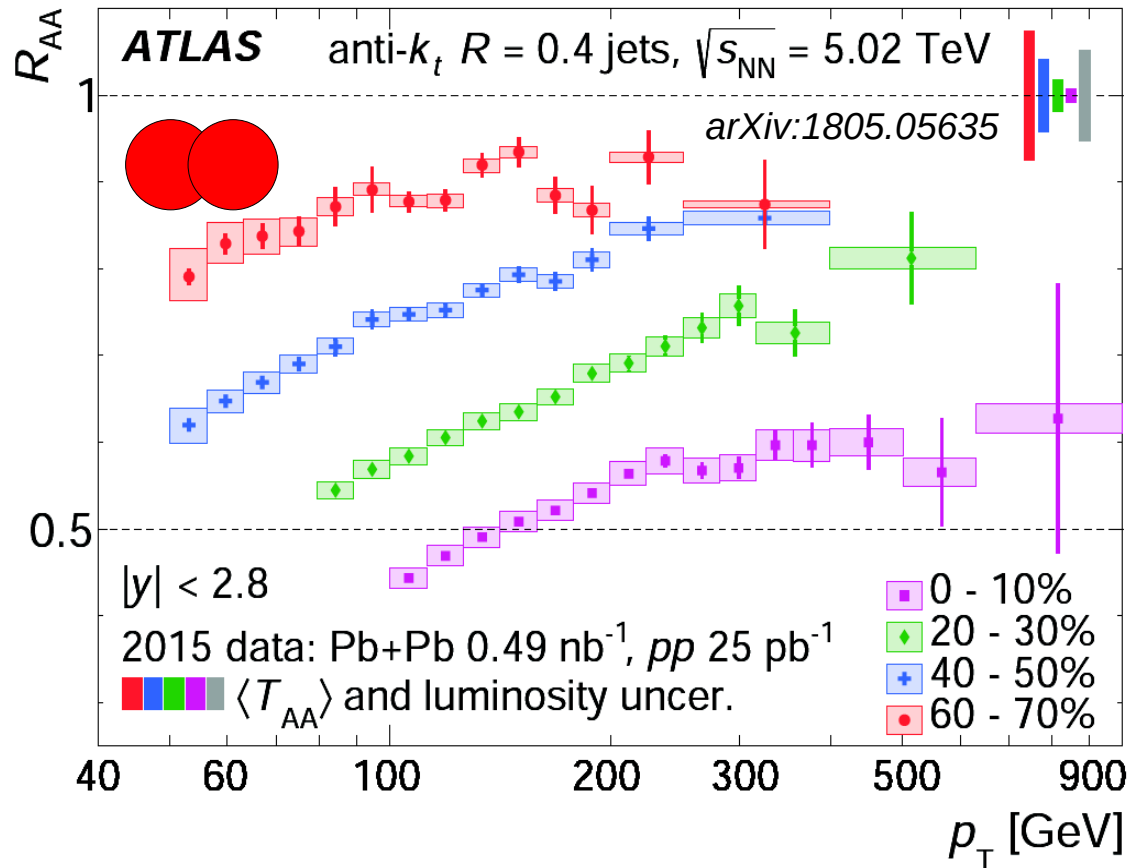
# Fotony, W a Z bosony

## Z bosony



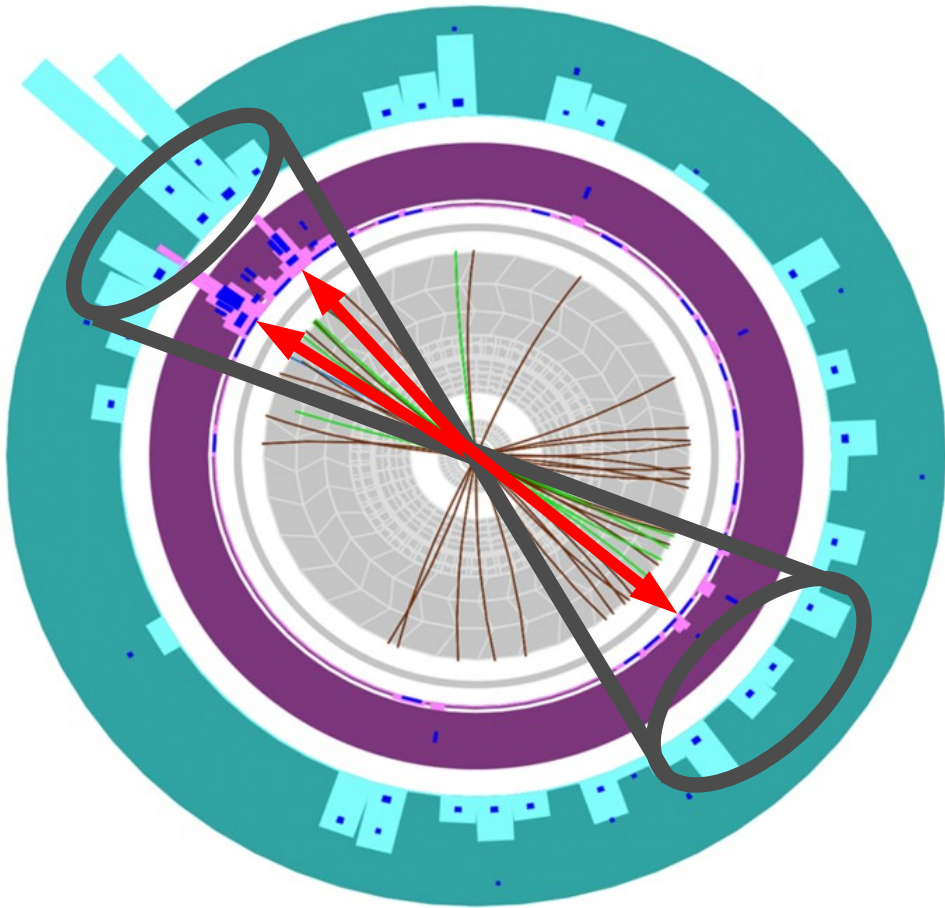
- $R_{AA} \sim 1 \rightarrow$  dle našich očekáváníí.

# Potlačení produkce jetů

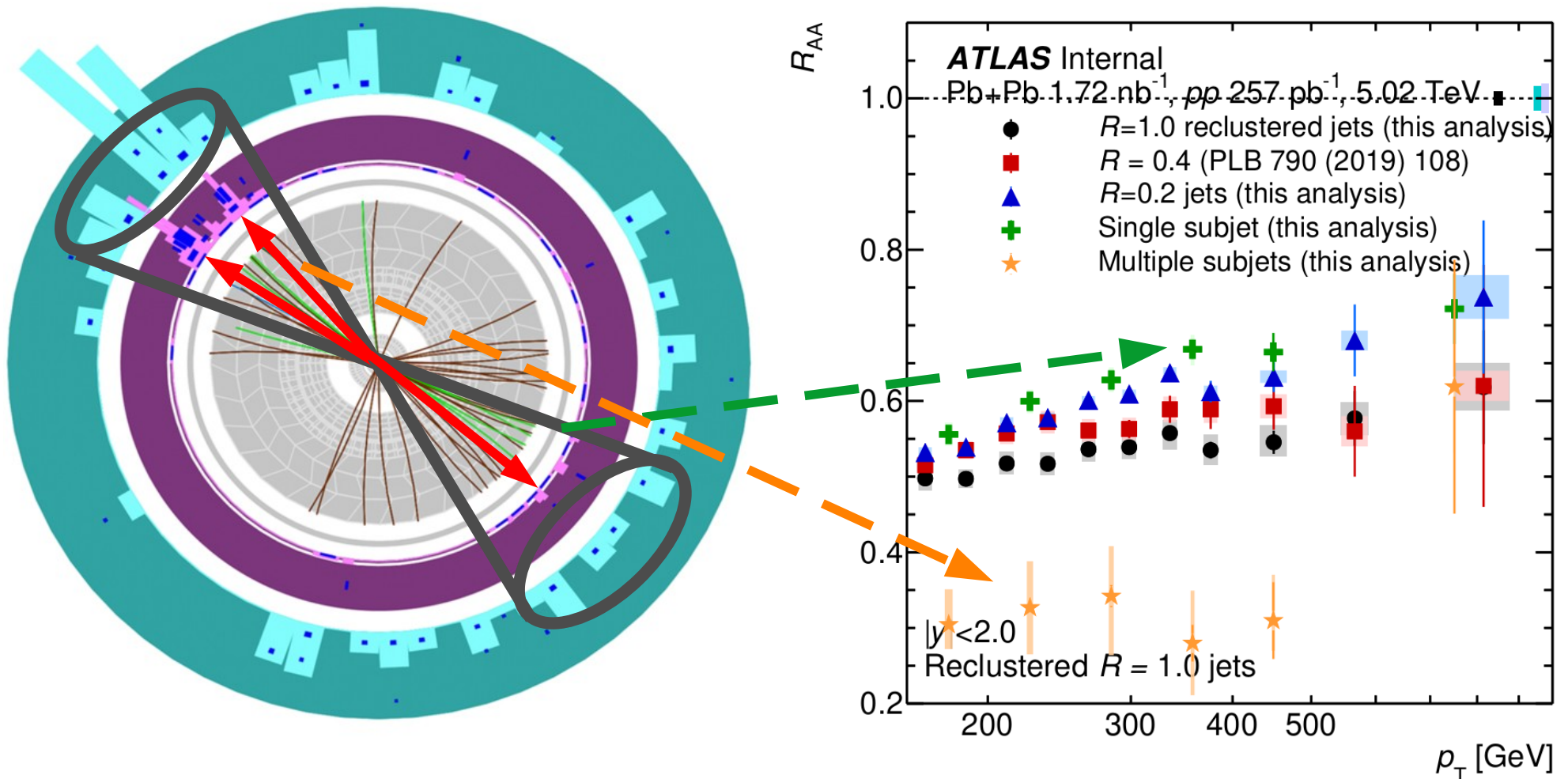


Půlka jetů chybí v centrálních srážkách

# Potlačení produkce jetů



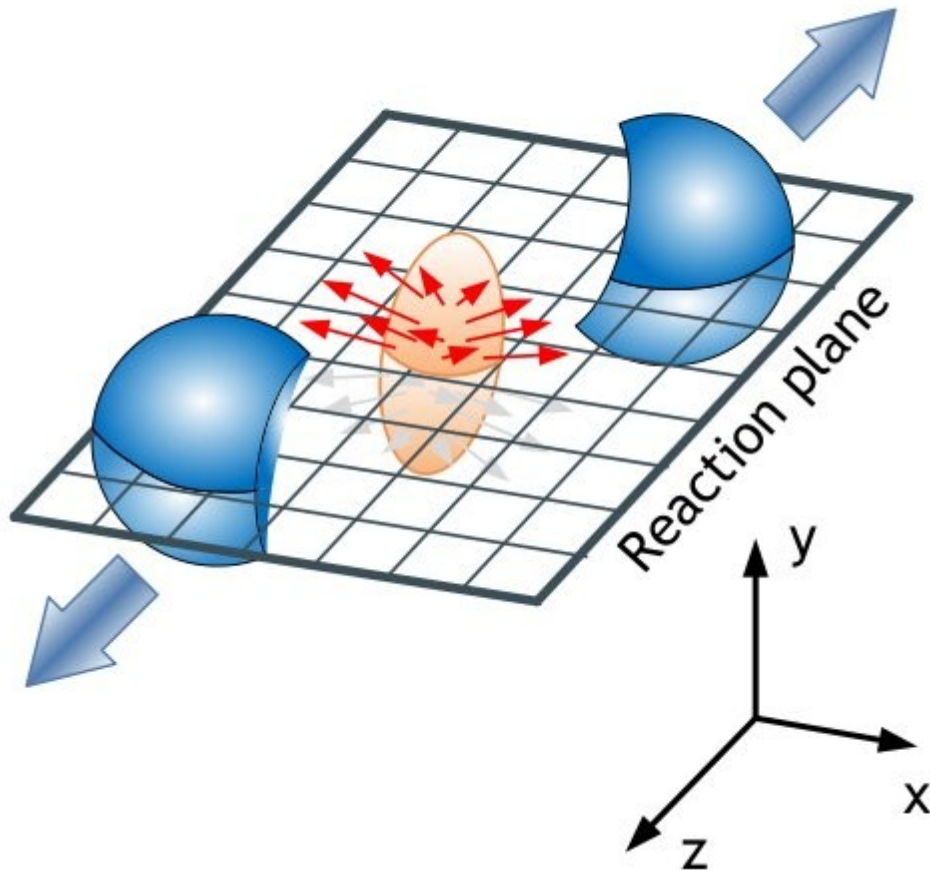
# Potlačení produkce jetů



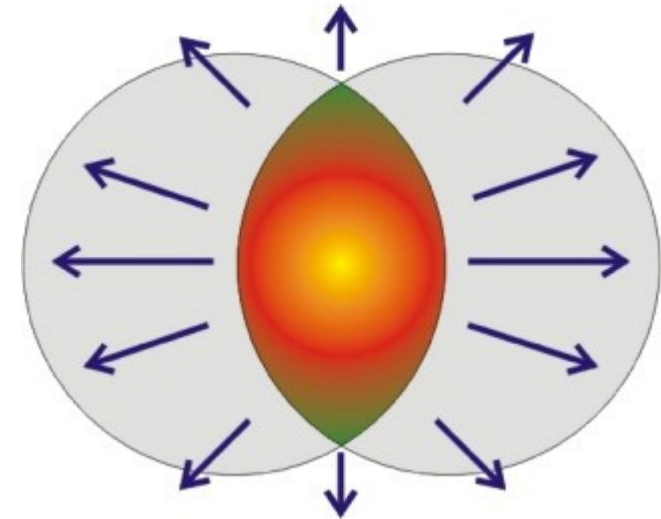
Zhášení jetů závisí na tom, jak jety vypadají...

# Eliptický tok

Anizotropie oblasti překryvu



Anizotropie produkce částic



Kvantifikace pomocí Fourierova rozvoje v  
**azimutální úhlové vzdálenosti:**

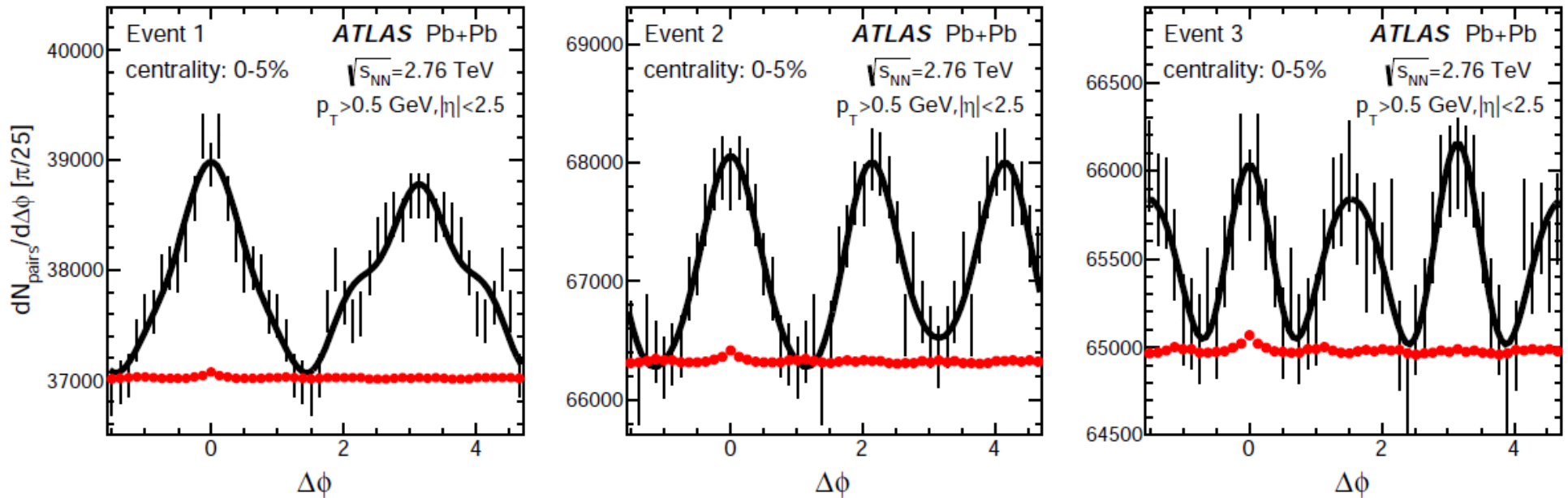
$$\frac{dN}{d\phi} = \frac{N}{2\pi} \left( 1 + \sum_n (2v_n \cos[n(\phi - \psi_n)]) \right)$$

$$v_2 = \langle \cos 2(\phi - \Phi^{RP}) \rangle$$

Eliptický tok

# Eliptický tok

Viditelný i “pouhým okem” v každé srážce zvlášť....



Kdyby byla těžko-iontová srážka prostou superpozicí mnoha *pp* srážek nebo se QGP chovala jako plyn → žádné modulace.

# Jak tomu rozumět?

Jde o ideální tekutinu a pro popis se používá **relativistická hydrodynamika**.

$0 = \frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\mu}$

$p = c_s^2 \epsilon$  (Stavová rovnice)

$\dot{\epsilon} = -(\epsilon + p) \frac{\partial u^\mu}{\partial x^\mu}$  (Dvě pohybové rovnice)

$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\epsilon + p} \left( \nabla p + \vec{v} \frac{dp}{dt} \right)$  (Zákon zachování energie a hybnosti)

$\dot{n} = -n \frac{\partial u^\mu}{\partial x^\mu}$  (Rovnice kontinuity)

Testování **kolektivní silné interakce**, zajímavých hypotéz jako je **AdS/CFT korespondence** ze strunové teorie a dalších.