

Prezentace k bakalářské práci:
Fyzika těžkých kvarků v jádro-jaderných srážkách

J. Češka

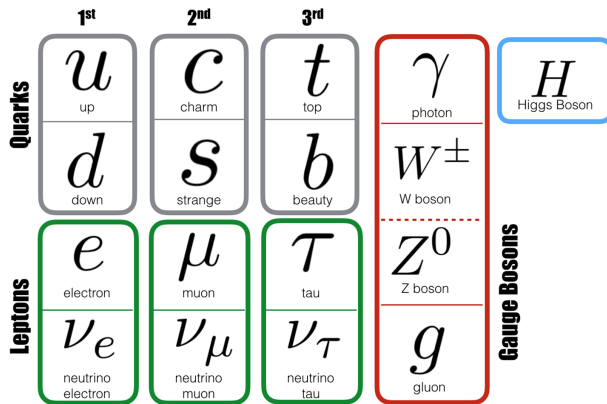
FJFI ČVUT v Praze

Zimní škola EJČF

15.1.2019

- Standardní model
- Kvark-gluonové plasma
- Srážky těžkých iontů
- Kvarkonia
- Produkce charmonií v hadronových srážkách
- Produkce charmonií v jaderných srážkách
- Potlačení produkce charmonií
- Závěr

Standardní model

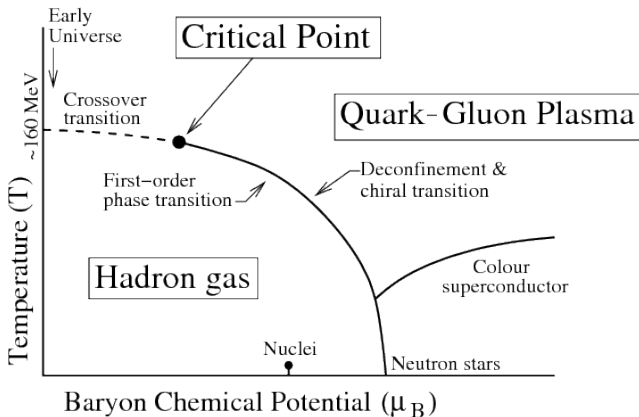


Obr. 1: Standardní model elementárních částic.

Kvark-gluonové plasma

- Kvark-gluonové plasma (QGP) je stav hmoty v kvantové chromodynamice (QCD), který existuje za extrémně vysokých teplot a/nebo hustot.
- Je tvořeno kvazi-volnými kvarky a gluony.
- Tyto částice jsou obvykle vázány v barevně neutrálních hadronech.
- Barva, nebo barevný náboj, je vlastnost kvarků a gluonů.
- Kvarky mohou mít jednu z tří různých barev (červená, zelená či modrá) a gluony mohou mít 8 kombinací barva-antibarva.

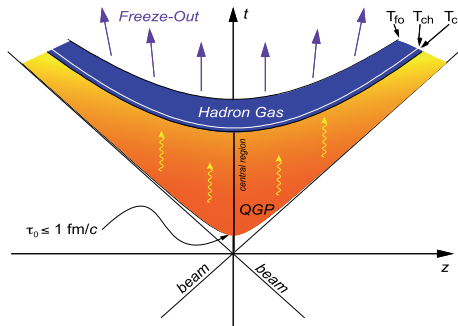
Kvark-gluonové plasma



Obr. 2: Fázový diagram QCD v proměnných teploty T a baryochemického potenciálu μ .

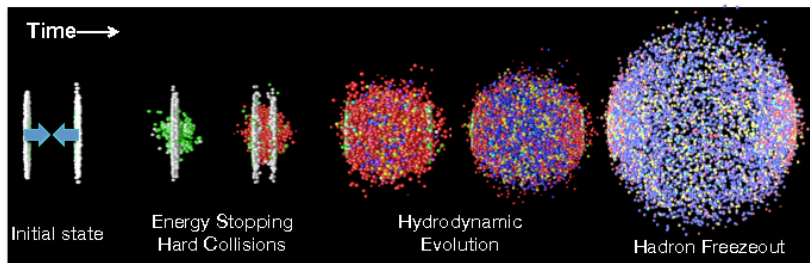
- QGP bylo přítomné za vzniku vesmíru (cca od 10^{-12} do 10^{-6} s).
- Umělé QGP je možné v laboratoři vytvořit při A+A ultrarelativistických srážkách (např. RHIC v BNL, LHC v CERN).
- Je nemožné pozorovat QGP přímo, jelikož jeho doba existence je řádově pouze 10^{-22} s.
- Avšak existují způsoby, díky kterým je možné QGP analyzovat, takzvané sondy (probes).
 - Měkké (flow, fluktuace)
 - Elektromagnetické (fotony, dileptony)
 - Tvrdé (zhášení jetů, potlačení kvarkonií)
- Tvrdost procesu závisí na přenosu hybnosti Q , kde pro tvrdé procesy $Q > 220$ MeV.

- Vývoj systému při srážkách těžkých iontů závisí na vlastním čase τ .
- Vývoj srážky se dá dobře ilustrovat na příkladě dvou Lorentzovsky kontrahovaných jader, která na sebe nalétají.
- Při uvažování jedné prostorové dimenze (z) a jedné časové dimenze (t) lze vlastní čas definovat jako $\tau \equiv \sqrt{t^2 - z^2}$.
- Region daný $t^2 - z^2 = 0$ se nazývá světelný kužel. V jádro-jaderných srážkách dochází k produkci částic v světelném kuželi s kladným časem t .



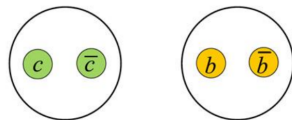
Obr. 3: Schéma srážky těžkých iontů v jedné prostorové (z) a jedné časové (t) dimenzi.

Srážky těžkých iontů



Obr. 4: Časový vývoj ultrarelativistické srážky těžkých iontů.

- Kvarkonia jsou vázané stavy těžkého kvarku a korespondujícího antikvarku ($c\bar{c}$ nebo $b\bar{b}$).
- Fakt, že vzniklý mezon má nulový půvab, resp. krásu, se nazývá 'skrytý' půvab, resp. 'skrytá' krása.



Obr. 5: Schéma charmonia a bottomonia.

- Půvabná kvarkonia, tzv. charmonia, se mohou nacházet v různých stavech; J/ψ (základní stav), χ_c a ψ' (excitované stavy).
- Taktéž krásná kvarkonia, tzv. bottomonia, tvoří různé stavy; Υ , χ_b , Υ' či χ'_b .

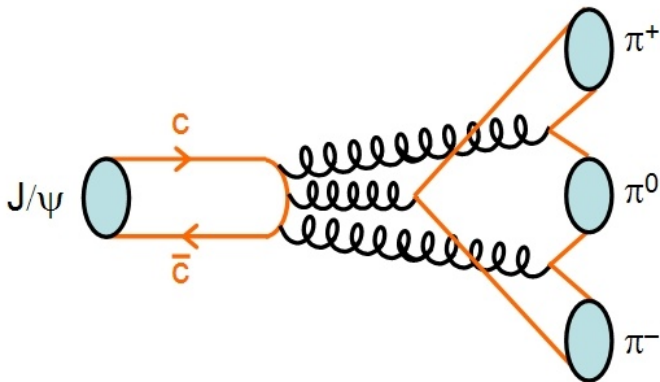
stav	J/ψ	χ_c	ψ'	Υ	χ_b	Υ'	χ'_b
hmotnost (GeV)	3.10	3.53	3.68	9.46	9.99	10.02	10.36
ΔE (GeV)	0.64	0.20	0.05	1.10	0.67	0.54	0.31
poloměr (fm)	0.25	0.36	0.45	0.14	0.22	0.28	0.34

Tab. 1: Hmotnosti, vazebné energie a poloměry nejnižších $c\bar{c}$ a $b\bar{b}$ vázaných stavů.

- Důležitou vlastností kvarkonií je, že se nerozpadají silnou interakcí na korespondující 'otevřené' mezony ($D^0 = c\bar{u}$, resp. $B^+ = u\bar{b}$).
- K potlačení silného rozpadu kvarkonií dochází především proto, že hmotnost kvarkonia je nižší než dvojnásobek hmotnosti korespondujícího 'otevřeného mezonu'.

$$m_{J/\psi} \doteq 3,1\text{GeV}/c^2 < 2m_{D^0} \doteq 2 \cdot 1,87\text{GeV}/c^2$$

$$m_{\Upsilon} \doteq 9,46\text{GeV}/c^2 < 2m_{B^+} \doteq 2 \cdot 5,28\text{GeV}/c^2$$

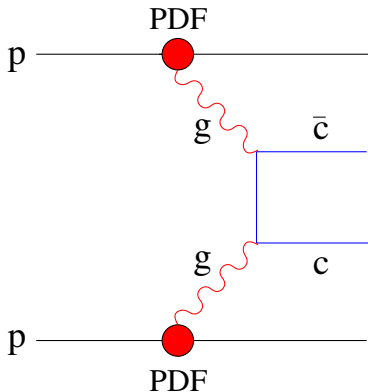


Obr. 6: Schéma silného rozpadu J/ψ na tři piony.

Produkce charmonií v hadronových srážkách

- Produkce charmonií v hadron-hadronových srážkách probíhá ve třech fázích.
- První fází je tvorba $c\bar{c}$ páru, což se díky velké $m_c \sim 1,3 \text{ GeV}$ dá považovat za tvrdý proces.
- Pro vysoké energie tvorba páru $c\bar{c}$ probíhá především gluonovou fúzí $gg \rightarrow c\bar{c}$.
- Tento nově vzniklý pár je však ve stavu barevného oktetu, musí se tedy zbavit své barevnosti, aby mohl opustit interakční zónu ve formě fyzické rezonance.
- V druhé fázi je tedy potřeba neutralizovat barevnost tohoto páru interakcí s okolním barevným polem.
- Třetí fází je už samotná fyzická rezonance.

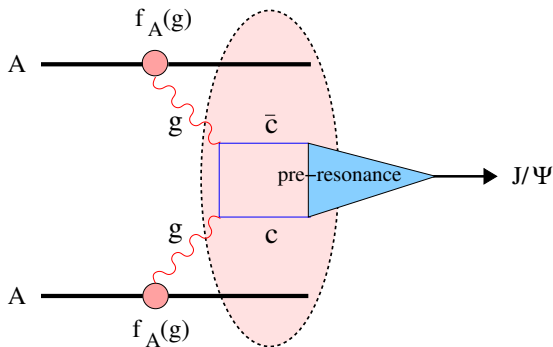
Produkce charmonií v hadronových srážkách



Obr. 7: Feynmanův diagram nejnižšího řádu pro tvorbu $c\bar{c}$ prostřednictvím gluonové fúze.

- V jádro-jaderných srážkách se do tohoto procesu zapojují další, jaderné, efekty.
 - Přítomnost jiných nukleonů v jádře může vést k snížení (shadowing) či zvýšení (antishadowing) míry produkce.
 - Nově vzniklý $c\bar{c}$ pár prochází jaderným médiem, tudíž jeho pre-rezonanční či rezonanční stav se může absorbovat pomocí interakcí s dalšími částicemi.

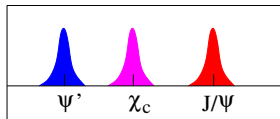
Produkce charmonií v jaderných srážkách



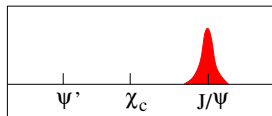
Obr. 8: Produkce J/ψ v jaderném médiu.

- Měření kvarkonií vzešlých ze srážky těžkých iontů lze využít jako způsob zjištění teploty vzniklého QGP.
- Porovnáním výtěžků jednotlivých kvarkonií je možné určit teplotní interval, ve kterém se hmota nachází.
- Toto je možné, jelikož jednotlivé stavy mají jinou teplotu, při které se rozpadají.
- Hmotnost stavu je úměrná jeho poloměru, tudíž těžší kvarkonia mající větší poloměr se rozpadají při nižších teplotách.
- V případě charmonií to tedy znamená, že při nejnižší teplotě se rozpadá stav Ψ' , následovaný stavem χ_c a nejvyšší teploty vydrží stav J/Ψ .

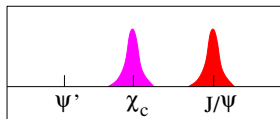
Potlačení produkce charmonií



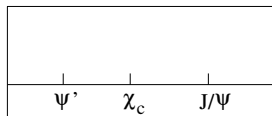
$$T < T_c$$



$$T_{\chi} < T < T_{\Psi}$$



$$T_{\Psi'} < T < T_{\chi}$$



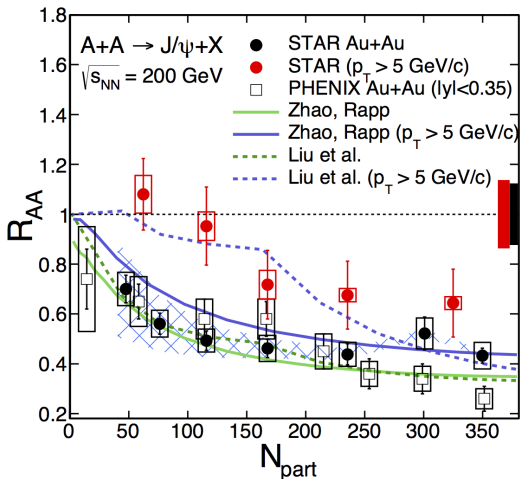
$$T > T_{\Psi}$$

Obr. 9: Ilustrace využití charmonií k určení teploty QGP.

- K potlačení produkce kvarkonií dochází v jádro-jaderných srážkách zejména pro střední rapiditu.
- Potlačení produkce se dá kvantifikovat pomocí jaderného modifikačního faktoru

$$R_{AA}(p_T) = \frac{dN^{AA}/dp_T}{\langle N_{\text{coll}} \rangle dN^{\text{PP}}/dp_T}$$

Potlačení produkce charmonií



Obr. 10: Jaderný modifikační faktor R_{AA} v závislosti na počtu participantů N_{part} .

- Téma mé bakalářské práce zní 'Fyzika těžkých kvarků v jádro-jaderných srážkách'.
- Kvarkonie se dají využít k měření vlastností těžkých kvarků.
- Po řešerši se budu zabývat shrnutím aktuálních výsledků v poli fyziky těžkých kvarků.
- Poslední část bakalářské práce se bude týkat simulace dat produkce těžkých kvarků.

- [1] SARKAR, Sourav et al. *The physics of the Quark-Gluon plasma: introductory lectures*. New York: Springer, c2010. Lecture notes in physics, 785. ISBN 978-364-2022-852