

# Mjerenje temperature kvark-gluon plazme

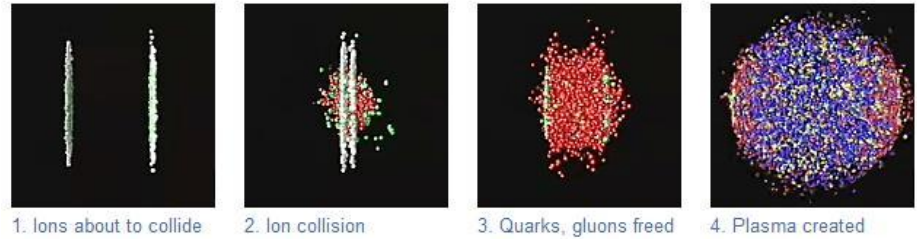
Pavla Šenjug

Mentor: doc. dr. sc. M. Makek

# Sadržaj

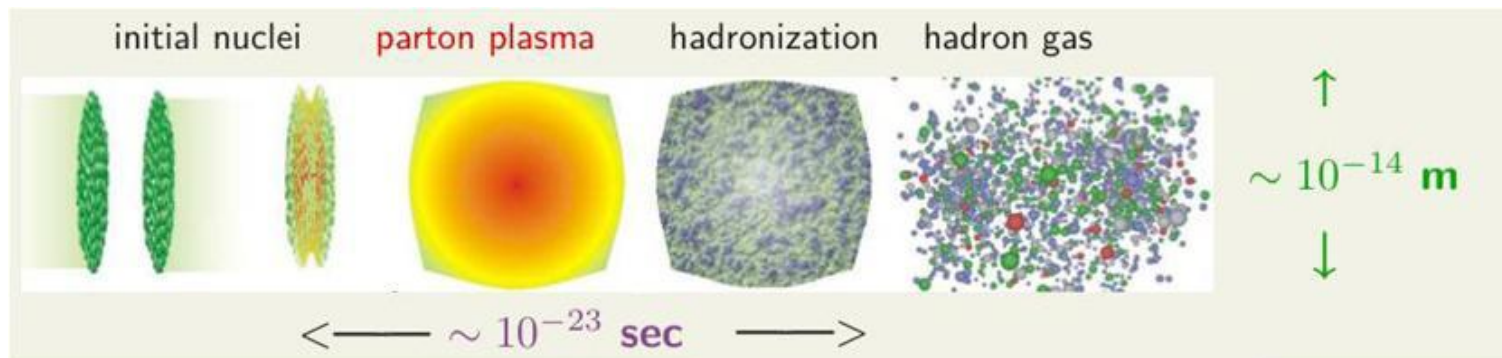
- teorijski uvod
  - QGP
  - dielektroni
- PHENIX detektor
  - centralni dio
  - HBD
- analiza podataka i rezultati
  - podaci iz 2004. i 2005.g.
  - podaci iz 2010.g.
- zaključak
- literatura

# Teorijski uvod



- Kvark–gluon plazma (QGP)

- novo stanje materije -> sudari teških iona (Au, Pb...) ubrzanih do relativističkih brzina
- slabo vezana “juha” kvarkova i gluona
- vrući gusti medij -> termalno zračenje = direktni fotoni





# Teorijski uvod

- direktni fotoni -> fotoni nastali unutar QGP
  - anihilacija kvark- antikvark  $q + \bar{q} \rightarrow \gamma + g$
  - raspršenje kvark(antikvark)-gluon  $q + g \rightarrow q + \gamma$   
 $\bar{q} + g \rightarrow \bar{q} + \gamma$
  - najbolje opisuju svojstva QGP  
 -> male interakcije s partonima unutar plazme
  - problem analize mjerenih fotona  
 -> velika pozadina nastala od raspada neutralnih mezona
- dielektoni
  - parovi elektron pozitron ( $e^+e^-$ )
  - interakcije s partonima QGP (slabije nego hadroni)

# Teorijski uvod

- dielektroni
  - svaki visokoenergetski izvor fotona može proizvoditi i virtualne fotone
    - virtualni fotoni -> niskomaseni  $e^+e^-$  parovi
  - direktni virtualni fotoni  $q + g \rightarrow q + \gamma^* \rightarrow q + e^+e^-$
  - $e^+e^-$  parovi iz drugih izvora
    - Dalitz raspad  $\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+e^-$
- veza realni fotoni  $\leftrightarrow e^+e^-$  parovi

$$\frac{d^2 N_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \cdot \frac{1}{m_{ee}} \cdot L(m_{ee}) S(m_{ee}, p_T) dN_\gamma \quad (1)$$

(vrijedi za sve izvore koji emitiraju fotone)

# Teorijski uvod

$$\frac{d^2 N_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \cdot \frac{1}{m_{ee}} \cdot L(m_{ee}) S(m_{ee}, p_T) dN_\gamma$$

$$L(m_{ee}) = \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_{ee}^2}} \cdot \left( 1 + \frac{2m_e^2}{m_{ee}^2} \right)$$

- $\alpha$  – konstanta fine strukture
- $m_{ee}$  - invarijantna masa  $e^+e^-$  para
- $m_e$  - masa elektrona
- $p_T$  - transverzalni impuls  $e^+e^-$  para
- $S(m_{ee}, p_T)$  – faktor ovisan o procesu
  - opisuje razliku između produkcije realnih i virtualnih fotona
  - za  $p_T \gg m_{ee}$   $\rightarrow S(m_{ee}, p_T) \rightarrow 1$
  - za hadronske raspade  $\rightarrow$  kinematička granica  $m_{ee} > m_h$   $S = 0$

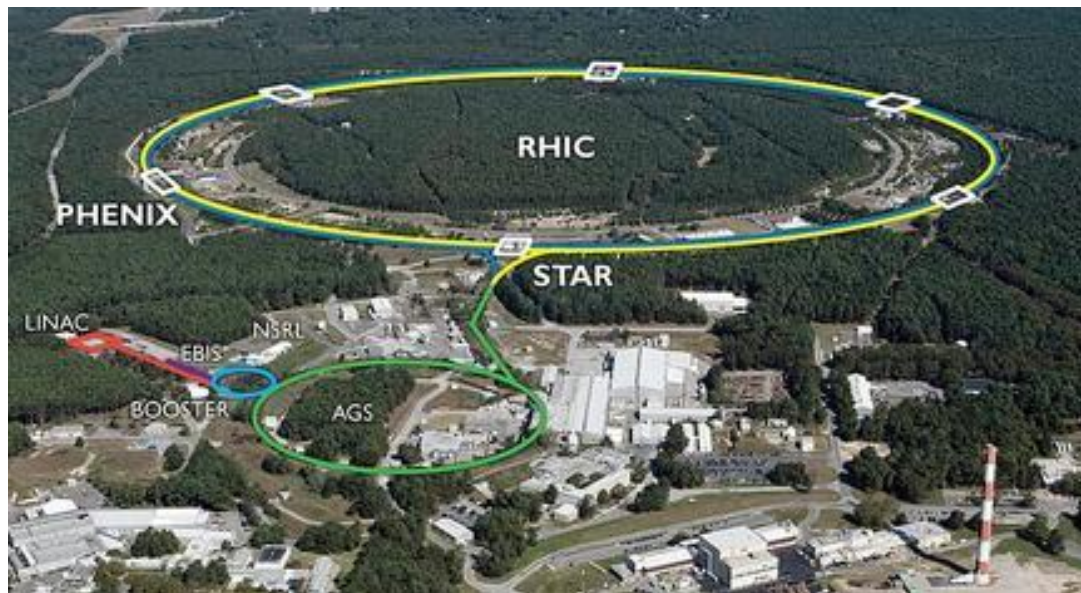
# Teorijski uvod

- razlika u vrijednosti S faktora koristi se za odvajanje signala direktnih fotona od hadronske pozadine
  - $S \approx 1$  za direktne fotone (na cijelom promatranom području  $0 < m_{ee} < 0.3 \text{ GeV}/c^2$ )
  - $S = 0$  za neutralne pione (na području  $m_{ee} > 0.135 \text{ GeV}/c^2$ )
- 80% pozadine dolazi od  $\pi^0$  raspada
  - veliko poboljšanje S/B omjera na  $m_{ee} > 0.135 \text{ GeV}/c^2$



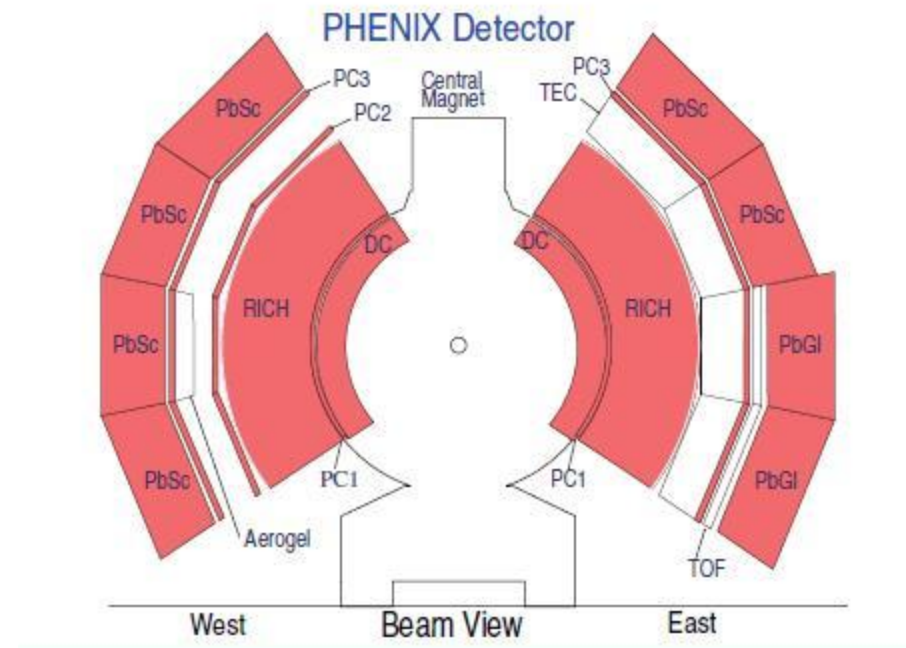
# PHENIX detektor

- jedan od detektora na RHIC-u (Relativistic Heavy Ion Collider)
- RHIC -> sudari raznih iona



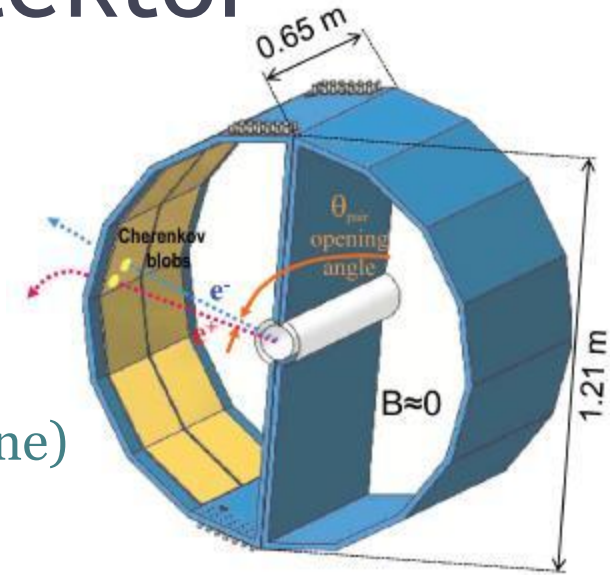
# PHENIX detektor

- dijelovi detektora važni za obrađenu analizu
- Centralni dio (Central arms)
  - CM – Central Magnet
    - > dvije koncentrične zavojnice
  - DC – Drift Chamber
    - > putanja i impuls nabijenih čestica
  - PC – Pad Chamber
    - > pozicija nabijenih čestica
  - RICH – Ring-Imaging Cherenkov Detector
    - > identificira elektrone
  - EMCal – Elektromagnetski kalorimetar
    - > energija i pozicija nabijenih i neutralnih čestica



# Nadograđeni PHENIX detektor

- Hadron Blind Detektor (HBD)
  - smještaj -> između snopa i manje zavojnice centralnog magneta ( $B \approx 0$ )
  - detektira samo elektrone (“slijep” na hadrone)
  - tip Čerenkovljevog detektora
    - elektroni/ pozitroni emitiraju fotone prolazeći kroz plinom ispunjen dio detektora
  - glavna uloga -> smanjenje kombinatorijske pozadine
    - prepoznavanje elektrona
    - odbacivanje hadronske pozadine
  - uvjet (cut) na kut otvora (*opening angle*)  $e^+e^-$  para
    - > mali kod Dalitz raspada  $\pi^0$  mezona i konverzije fotona



# Analiza i rezultati

- dva seta podataka
  - 2004. i 2005.g. PHENIX detektor
    - >  $e^+e^-$  parovi s  $m_{ee} < 0.3 \text{ GeV}/c^2$  i  $p_T < 5 \text{ GeV}/c$  kod Au+Au i p+p sudara na  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$
  - 2010.g. nadograđeni PHENIX detektor
    - >  $e^+e^-$  parovi s  $m_{ee} < 0.3 \text{ GeV}/c^2$  i  $p_T < 5 \text{ GeV}/c$  kod Au+Au sudara na  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$

# Analiza i rezultati

- detektirani elektroni/pozitroni
  - > ne može se saznati podrijetlo
- kombiniranje svih detektiranih  $e^-/e^+$  u parove  $e^+e^-$ 
  - > velika kombinatorijska pozadina
  - > oduzima se pomoću metode miješanih događaja (*mixed event technique*)
    - > kombiniranje čestica iz različitih događaja
    - > nekorelirana pozadina

# Analiza i rezultati (2004.g. i 2005.g.)

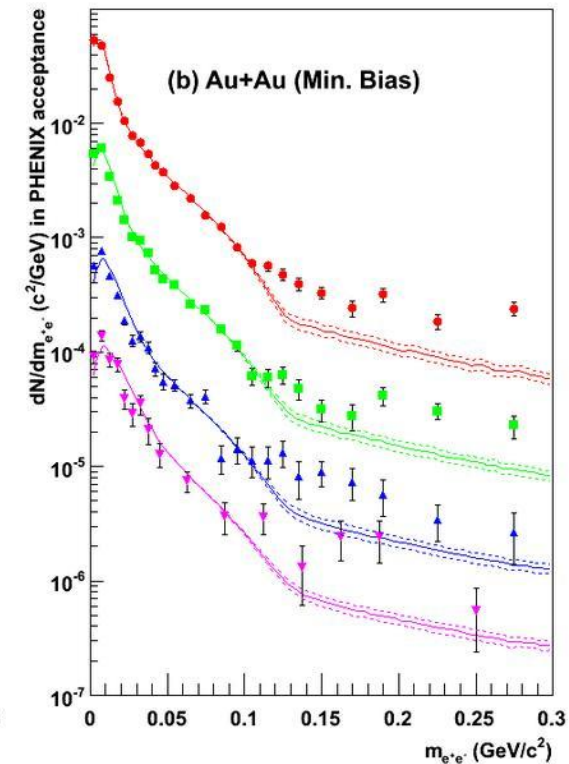
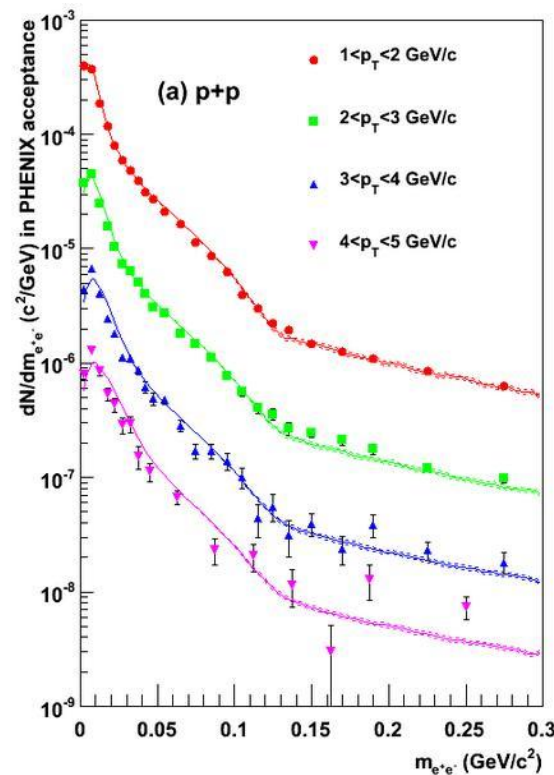
- slika: spektar invarijantne mase  $e^+e^-$  parova dobivenih u sudarima Au+Au i p+p za razne  $p_T$  binove

- p+p nema značajnijeg viška iznad koktela

- višak kod Au+Au

-> direktni fotoni iz QGP

- koktel ->  $e^+e^-$  parovi iz poznatih hadronskih raspada (Monte Carlo generator hadronskih raspada)

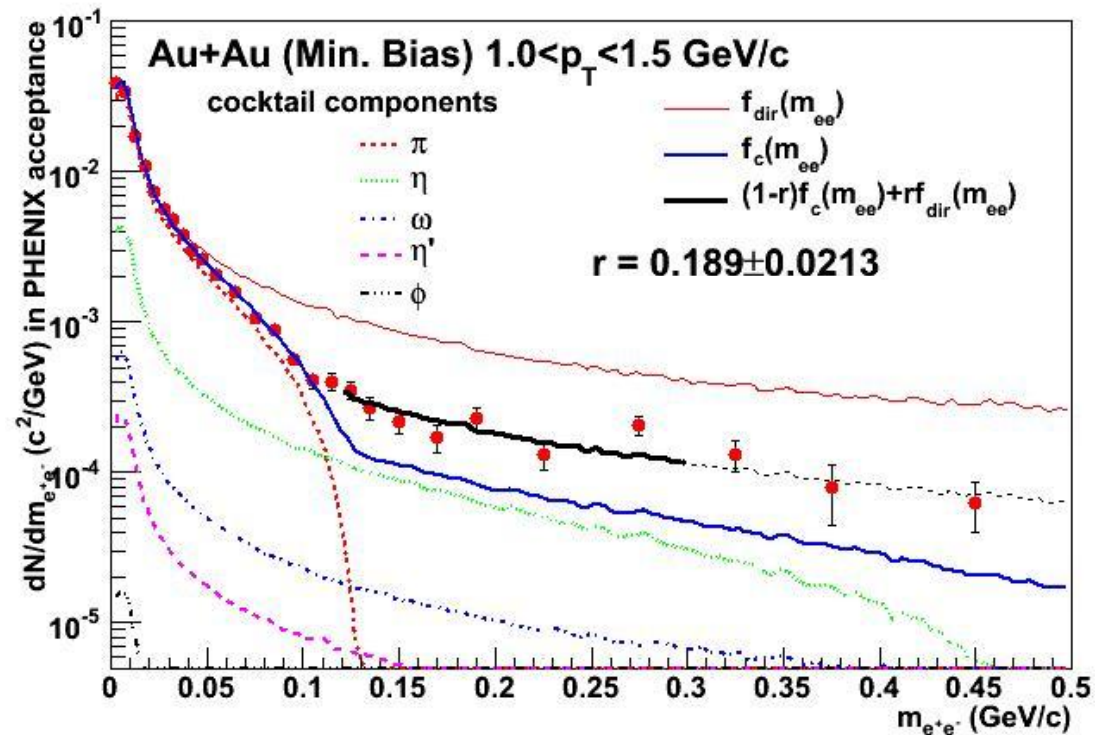


# Analiza i rezultati (2004.g. i 2005.g.)

- slika: fit funkcije  $f(m_{ee}; r) = (1-r) \cdot f_c(m_{ee}) + r \cdot f_{dir}(m_{ee})$  na spektar invarijantne mase  $e^+e^-$  parova dobivenih sudarima Au+Au za  $1.0 < p_T < 1.5 \text{ GeV}$

- $r$  – udio direktnih fotona  $N_\gamma^{dir}$  u cijelom fotonском uzorku  $N_\gamma^{incl}$

$$r = \frac{N_\gamma^{dir}}{N_\gamma^{dir} + N_\gamma^{koktel}}$$





# Analiza i rezultati (2004.g. i 2005.g.)

- dobivanje spektra direktnih fotona iz dobivenih vrijednosti parametra  $r$

$$dN_{\gamma}^{dir} = r \times dN_{\gamma}^{incl}$$

- ukupni fotonski spektar  $N_{\gamma}^{incl}$  dobiva se zasebno za svaki  $p_T$  bin pomoću spektra  $e^+e^-$  parova na masama  $m_{ee} < 0.03 \text{ GeV}/c^2$  koristeći formulu (1)
  - $m_{ee} < 0.03 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow S(m_{ee}) \approx 1$  za bilo koji izvor fotona



# Analiza i rezultati (2004.g. i 2005.g.)

- slika: spektar direktnih fotona u ovisnosti o  $p_T$

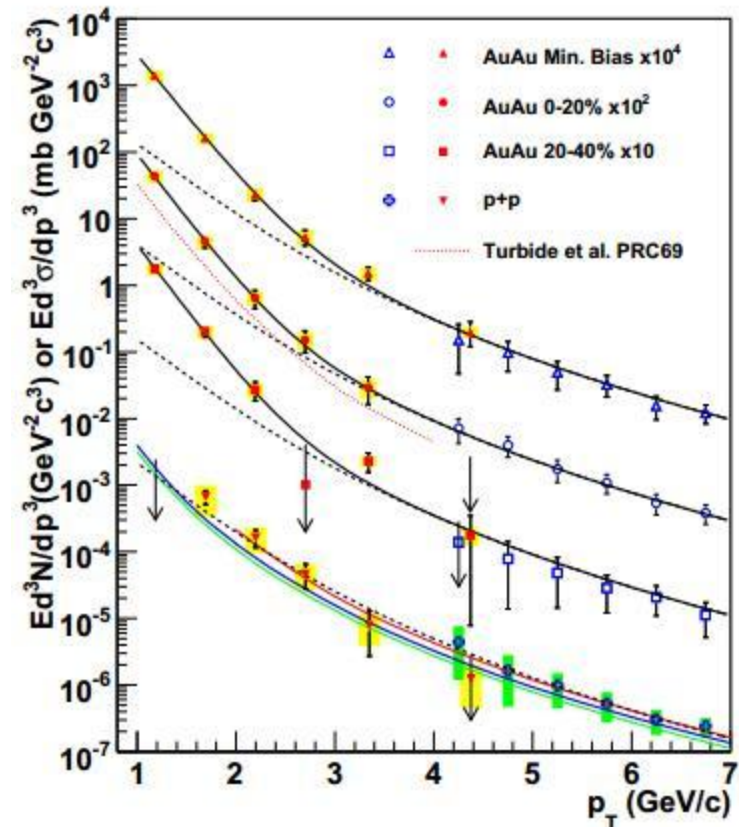
- p + p
  - dobro slaganje sa spektrom dobivenim pQCD računom

- fit funkcija  $A_{pp} \left(1 + p_T^2 / b\right)^{-n}$

- Au + Au
  - opis skaliranom fit funkcijom od p+p brojem binarnih sudara u Au+Au  
-> višak eksponencijalnog oblika na  $p_T < 2.5$  GeV/c

- fit funkcija  $A \cdot e^{-p_T/T} + T_{AA} A_{pp} \left(1 + p_T^2 / b\right)^{-n}$

-> iz fita se dobije inverzni nagib eksponencijalne funkcije (T)

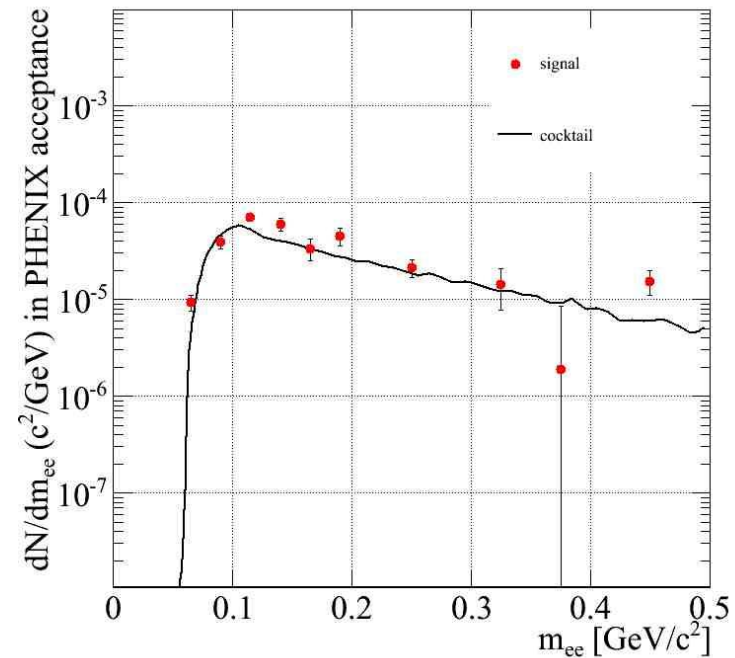
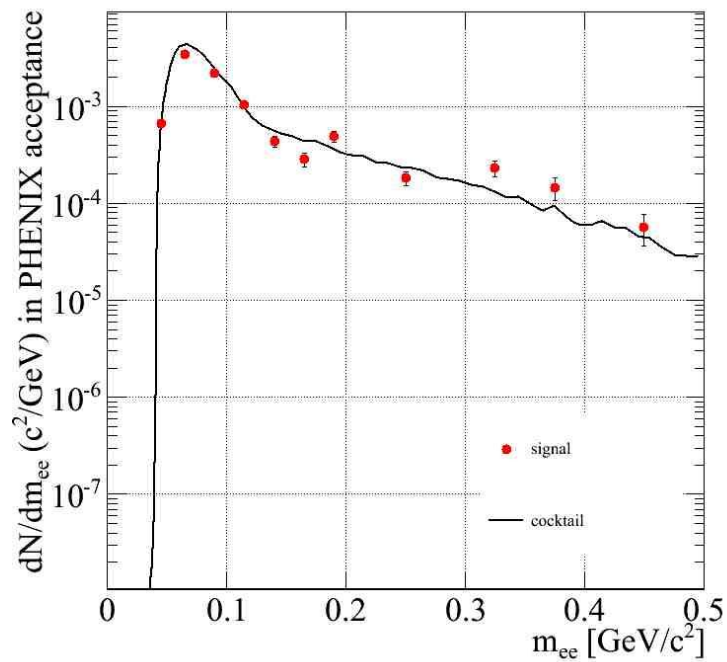


# Analiza i rezultati (2004.g. i 2005.g.)

- za centralni Au+Au  $T = 221 \pm 19^{\text{stat}} \pm 19^{\text{syst}} \text{ MeV}$
- ako višak doista dolazi od direktnih fotona  
-> postoji veza T i početne temperature QGP
- hidrodinamički modeli ->  $T_{\text{init}}$  je 1.5 do 3 puta veća od T  
-> zbog prostor-vremenske evolucije
- hidrodinamički modeli s  $T_{\text{init}}$  od 300 do 600 MeV su u kvantitativnom slaganju s dobivenim podacima  
-> crvena crtkana linija na spektru direktnih fotona za  $T_{\text{init}} = 370 \text{ MeV}$

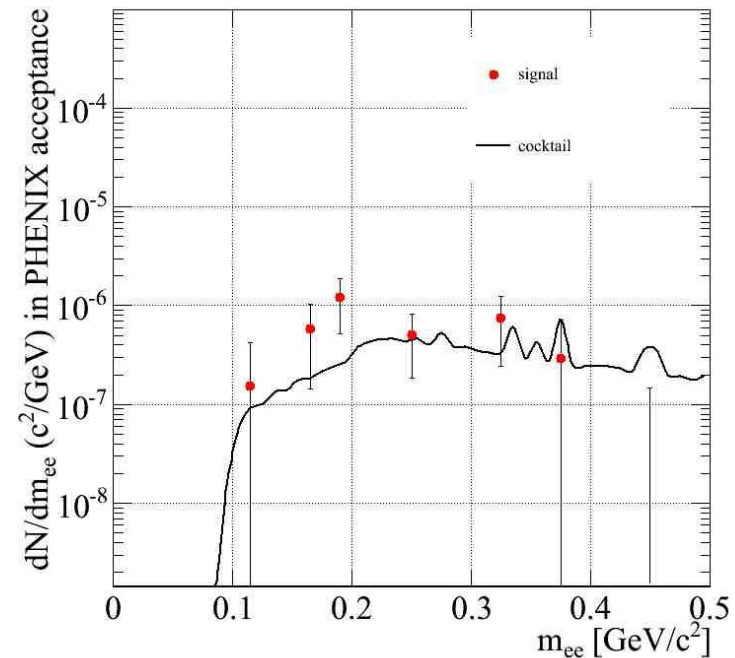
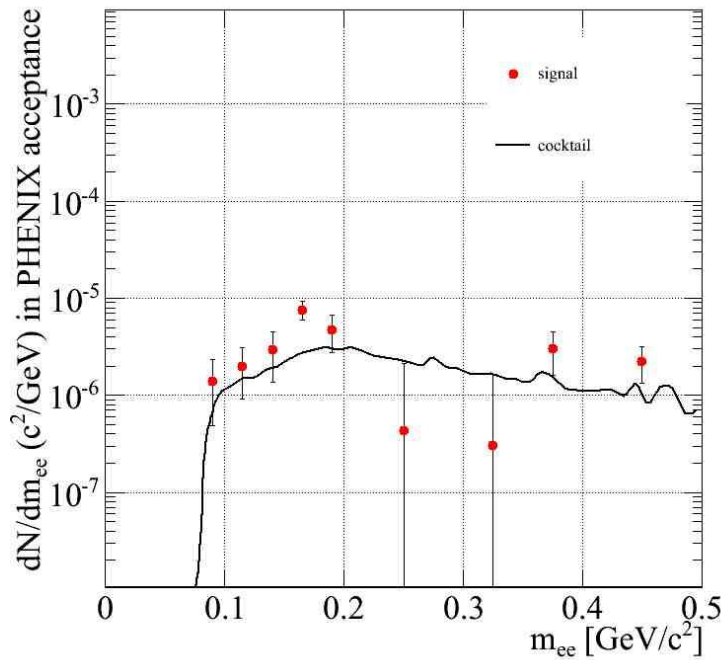
# Analiza i rezultati (2010.g.)

- slika: spektar invarijantne mase  $e^+e^-$  parova dobivenih u sudarima Au+Au za  $1 < p_T < 2$  GeV/c (lijevo) i za  $2 < p_T < 3$  GeV/c (desno)



# Analiza i rezultati (2010.g.)

- slika: spektar invarijantne mase  $e^+e^-$  parova dobivenih u sudarima Au+Au za  $3 < p_T < 4$  GeV/c (lijevo) i za  $4 < p_T < 5$  GeV/c (desno)



# Analiza i rezultati (2010.g.)

- nije primjećen očekivani višak
  - > mogući razni razlozi -> potrebna daljnja razmatranja
- dodavanje HBD
  - > smanjena kombinatorijska pozadina koja dolazi  $\pi^0$  Dalitz raspada i konverzije fotona
  - > smanjen postotak hadrona u elektronskom uzorku (bez HBD oko 25%, s HBD 5%)
- problem -> cut na kut otvora  $e^+e^-$  para
  - > smanjenje statistike na niskim masama  $e^+e^-$  parova

# Zaključak

- promatrani su spektri  $e+e^-$  parova za  $m_{ee} < 0.3$   $\text{GeV}/c^2$  i  $p_T < 5 \text{GeV}/c$  kod Au+Au i p+p sudara na  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{GeV}$  dobiveni za dva seta podataka
  - podataka dobivenih na PHENIX detektoru iz 2004.g. i 2005.g. (Au+Au i p+p )
  - podataka dobivenih na PHENIX detektoru nadograđenim s HBD, iz 2010.g.(Au+Au )

# Zaključak

- na spektrima invarijantne mase  $e+e^-$  parova dobivenih za podatke iz 2004.g. kod Au+Au sudara utvrđeno je postojanje viška iznad spektra dobivenog od hadronskih izvora
- uzimajući da višak dolazi samo od unutarnje konverzije direktnih fotona, nađen je spektar direktnih fotona.
- promatranjem spektra direktnih fotona kao funkcije transverzalnog impulsa  $p_T$  uočeno je slaganje s rezultatima dobivenim pQCD računom za p+p.
- pronađena funkcija koja dobro opisuje p+p spektar, te je skalirana za Au+Au sudare
- utvrđeno je da spektar direktnih fotona (za Au+Au ) na niskim  $p_T$  vrijednostima raste brže (i to eksponencijalno) nego p+p spektar skaliran brojem binarnih sudara  $N_{coll}$
- za inverzni nagib dobivena je vrijednost od  $T=221\text{MeV}$

# Zaključak

- Na spektrima invarijantne mase  $e^+e^-$  parova dobivenog za podatke iz 2010.g. kod Au+Au sudara nije utvrđeno je postojanje viška iznad spektra dobivenog od hadronskih izvora, pa daljnja analiza nije bila moguća.



# Literatura

- <http://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=23758>
- <http://www.phy.duke.edu/modeling-relativistic-heavy-ion-collisions>
- A. Adare et al., arXiv:0804.4168 [nucl-ex]
- A. Adare et al., arXiv:0911.0244 [nucl-ex]
- M. Makek (for the PHENIX Collaboration ) Nuclear physics. A (0375-9474) 855 (2011), 1; 265-268