



# Investigando as propriedades da matéria nuclear em colisões de íons pesados relativísticos

**Luiz Fernando Mackedanz<sup>†</sup>**

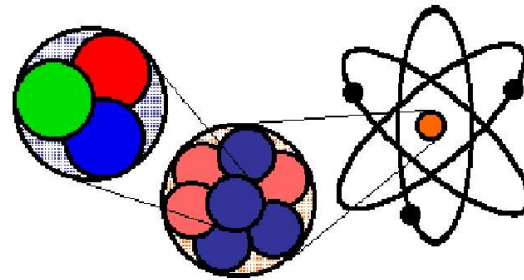
<sup>†</sup> [luiz.mackedanz@ufrgs.br](mailto:luiz.mackedanz@ufrgs.br)

Grupo de Fenomenologia de Partículas de Altas Energias (GFPAE)  
Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

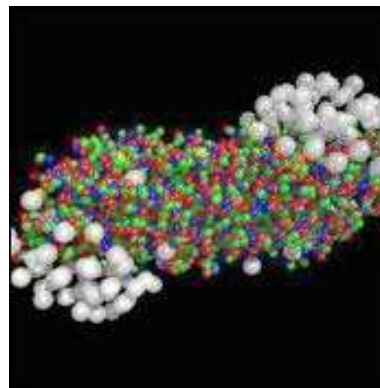


# Colisões de íons pesados - Por que estudá-las ?

- Colisões entre íons pesados se apresentam como uma ferramenta experimental para estudar as propriedades da QCD em densidades muitas vezes maiores do que a matéria nuclear comum;
- busca do conhecimento da estrutura fundamental da matéria;



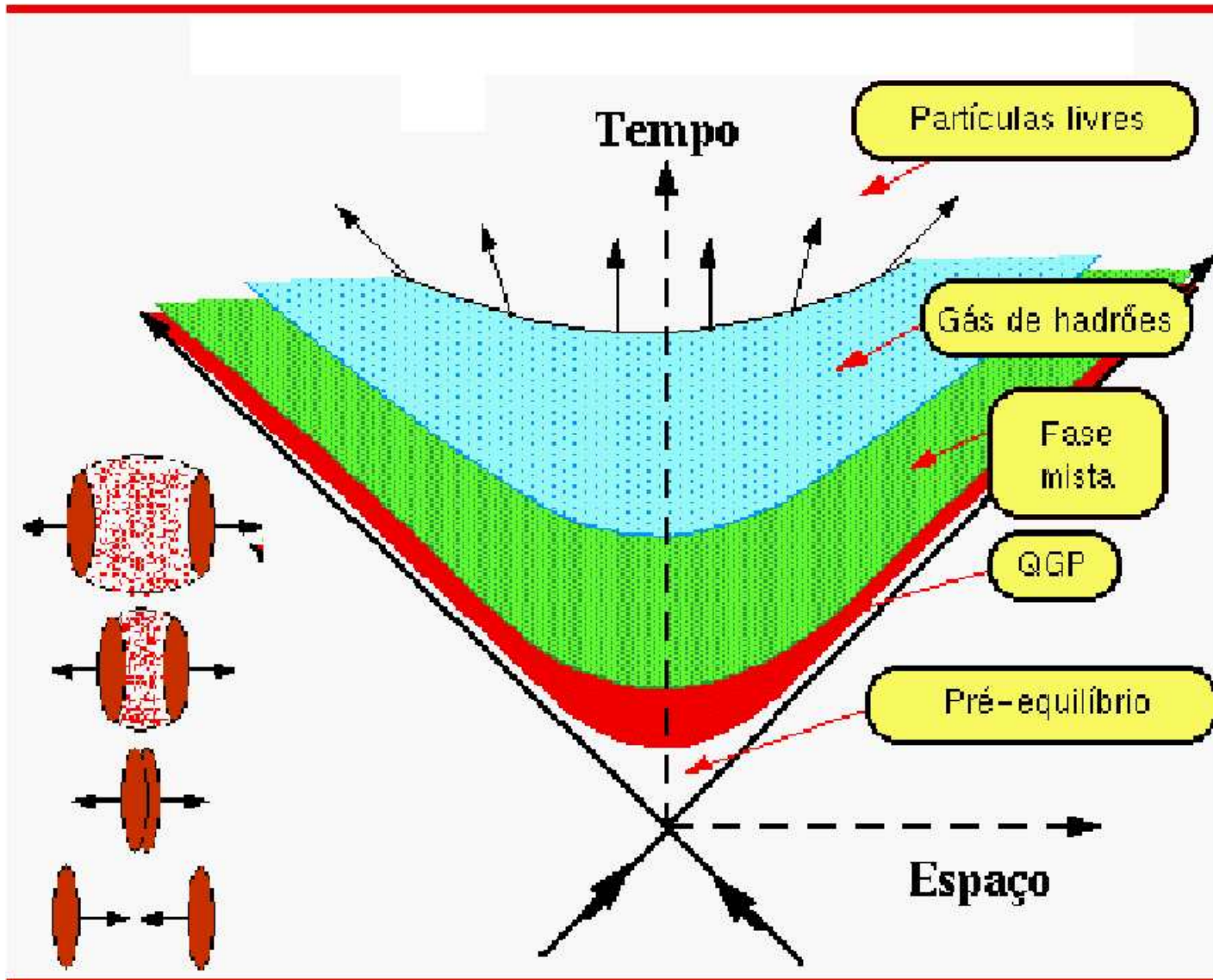
- estudo do comportamento da matéria sob condições extremas.

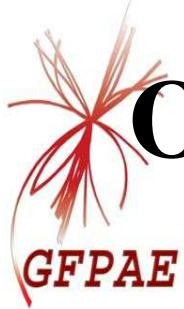


- conhecimento de aspectos cosmológicos do universo primordial;

# Evolução da colisão

## Colisões núcleo-núcleo

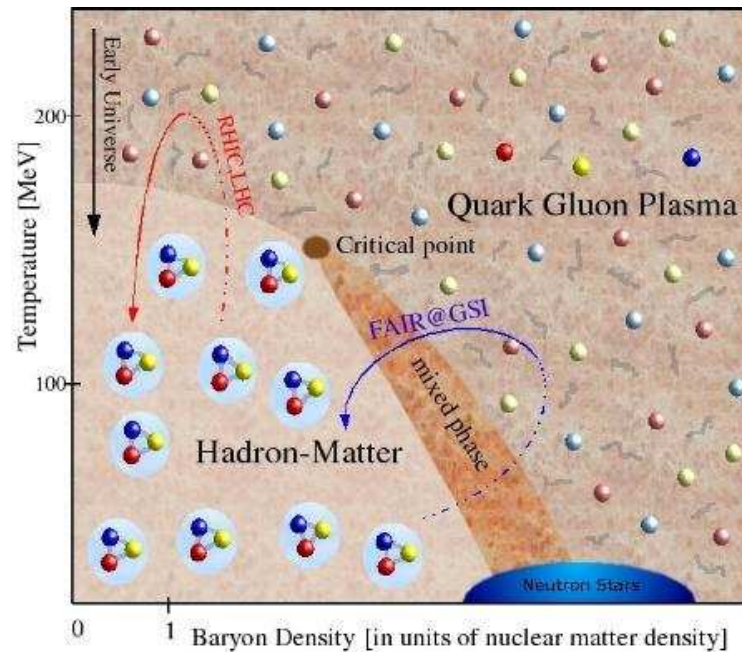




# O Plasma de Quarks e Glúons (QGP)

Quarks e glúons desconfinados ?

- Cálculos teóricos prevêem uma transição de fase em altas temperaturas



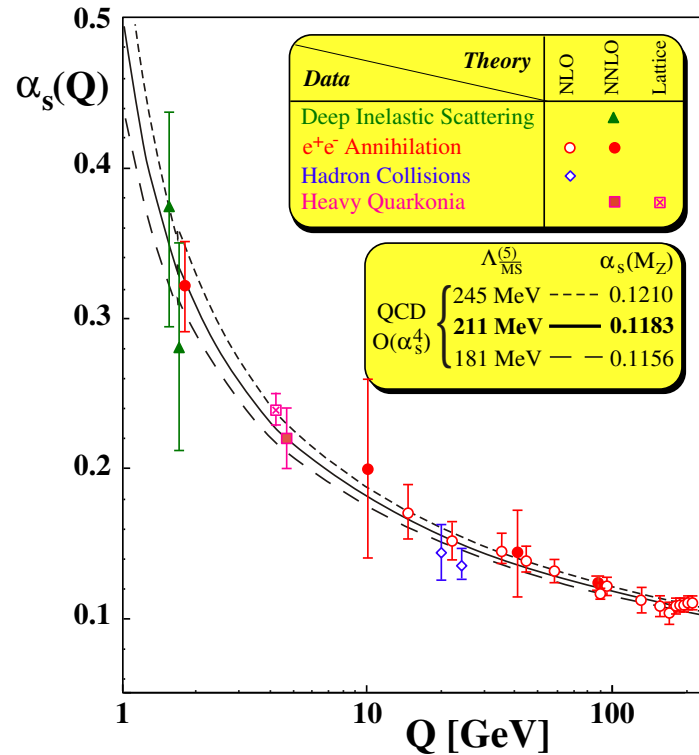
- Altas temperaturas podem ser alcançadas numa colisão nuclear





# Propriedades da QCD

Constante de acoplamento da QCD

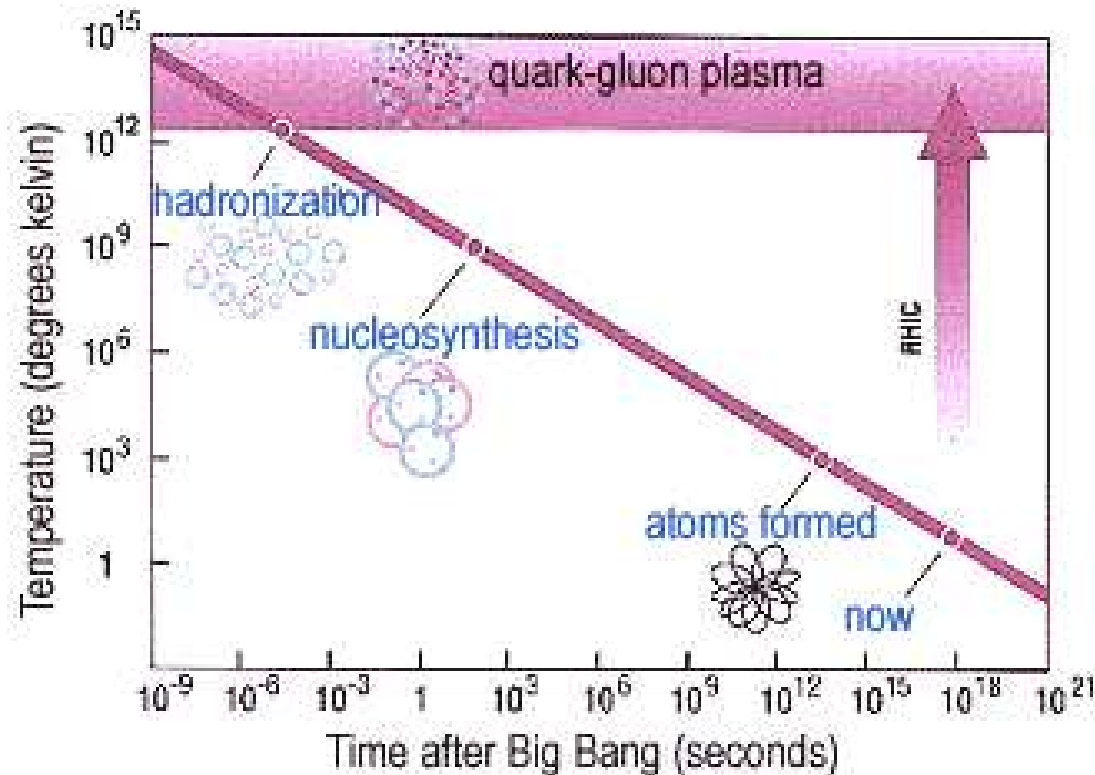


- Propriedades da QCD
  - Confinamento (grandes distâncias - pequenas transferências de momentum)
  - Liberdade Assintótica (pequenas distâncias - grandes transferências de momentum)

# Importância do QGP



Na **Cosmologia** - pode ajudar na busca do entendimento dos instantes iniciais do Universo;



- Na **Física de partículas** - pode fornecer informação sobre o comportamento da matéria sob condições extremas



# Estudando o QGP

**GFPAE**

- O Plasma de Quarks e Glúons é um estado transiente (de curta duração);
- Sua formação num processo de colisão de íons só pode ser detectada indiretamente;
- A detecção ocorre através da análise de observáveis que sejam afetados pela presença do QGP nos estágios iniciais da colisão (assinaturas);
- Uma assinatura estudada é a atenuação dos jatos produzidos na colisão - o jato interage com o meio denso (QGP) durante sua propagação, perdendo energia neste processo;
- Esta perda de energia afeta o espectro final em função do momentum transversal ( $p_{\perp}$ ) medido das partículas que alcançam o detector;
- O estudo desta perda de energia nos auxilia na determinação da matéria formada nas colisões - "tomografia" do meio nuclear.



# Perda de Energia - Mecanismos

A perda de energia total pode ser decomposta:

- **Radiativa** (bremsstrahlung de glúons)  
⇒ a partícula se propaga no meio e interage (através da interação forte) com o campo de fundo, irradiando glúons;
- **Colisional** (ou elástica)  
⇒ a partícula sofre múltiplos espalhamentos elásticos com os pártons no plasma;
- Uma estimativa realística da perda de energia elástica deve levar em conta os dois mecanismos, para uma análise mais correta dos dados de atenuação de jatos.





# Estimando a perda de energia elástica

**GFPAE** A partir da equação de Boltzmann

- Distribuição de momentum no espaço de fase

$$f(p, L) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \mathcal{W}(L)} \exp \left[ -\frac{\left( p - p_0 e^{-\int_0^L \mathcal{A}(t') dt'} \right)^2}{\mathcal{W}(L)} \right]$$

- Dispersão da distribuição

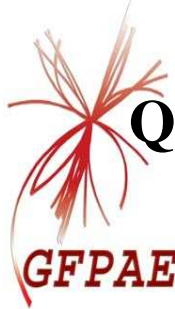
$$\mathcal{W}(L) = \left( 4 \int_0^L \mathcal{D}_F(t') \exp \left[ 2 \int^{t'} \mathcal{A}(t'') dt'' \right] dt' \right) \left[ \exp \left( -2 \int_0^L \mathcal{A}(t') dt' \right) \right]$$

- *Energia Média do párton*

$$\langle E \rangle = \int_0^\infty E f(p, L) dp$$

- *Perda Média de Energia*

$$\Delta E = \quad = \quad E - \langle E \rangle$$



# QGP em expansão → Acoplamento variável

**GFPPE**

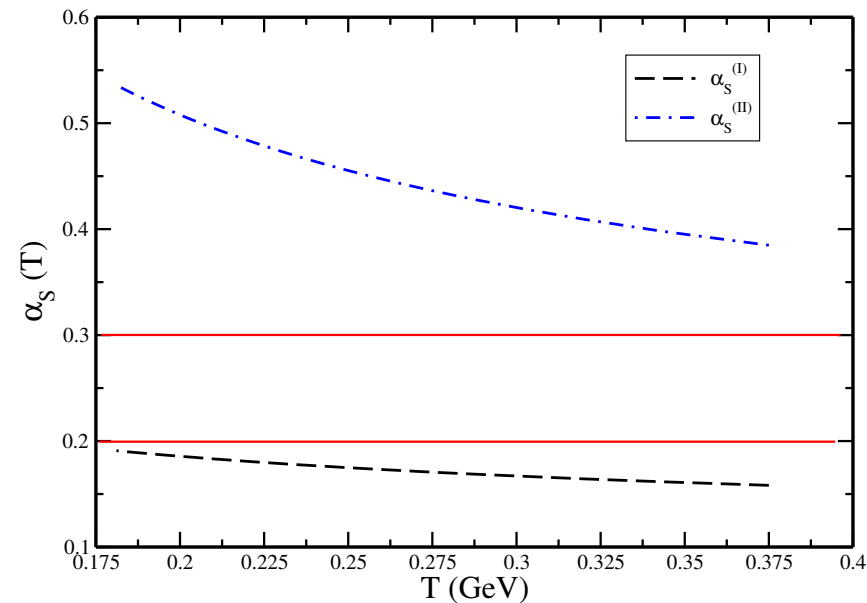
- Estudos de perda de energia assumem que as propriedades do meio e sua interação com as partículas que se propagam nele não se alteram com o tempo;
- Porém, o QGP formado nas colisões de íons pesados está em rápida expansão - isto é, não é estático - e sua temperatura diminui enquanto os pártons se propagam por ele;
- Assim, a escala onde o acoplamento é calculado (**temperatura**) muda com a evolução do sistema;
- Usamos duas prescrições em nossa análise:

⇒ QCD perturbativa

$$\alpha_s^{(I)}(T) = \frac{6\pi}{(33 - 2n_f) \ln[(19T_c/\Lambda_{\overline{MS}})(T/T_c)]}$$

⇒ QCD na rede

$$\alpha_s^{(II)}(T) = \frac{2.095}{\frac{11}{2\pi} \ln\left(\frac{Q}{\Lambda_{\overline{MS}}}\right) + \frac{51}{22\pi} \ln\left[2 \ln\left(\frac{Q}{\Lambda_{\overline{MS}}}\right)\right]}$$





# Estimando o fator de atenuação

GFPPE

**Idéia Básica** - partículas produzidas em processos núcleo-núcleo tem seu espectro em  $p_{\perp}$  modificado em relação a colisões hádron-hádron, devido à perda de energia;

$$\frac{dN^{\text{med}}}{d^2p_{\perp}} = \int d\epsilon D(\epsilon) \frac{dN^{\text{vac}}(p_{\perp} + \epsilon)}{d^2p_{\perp}} \equiv Q(p_{\perp}) \frac{dN^{\text{vac}}(p_{\perp})}{d^2p_{\perp}}$$

● Distribuição em  $p_{\perp}$  no meio

$$\frac{dN^{\text{med}}}{d^2p_{\perp}} = \frac{1}{2\pi^2 R^2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^R d^2r \frac{dN^{\text{vac}}(p_{\perp} + \Delta E)}{d^2p_{\perp}}$$

● Fator de atenuação

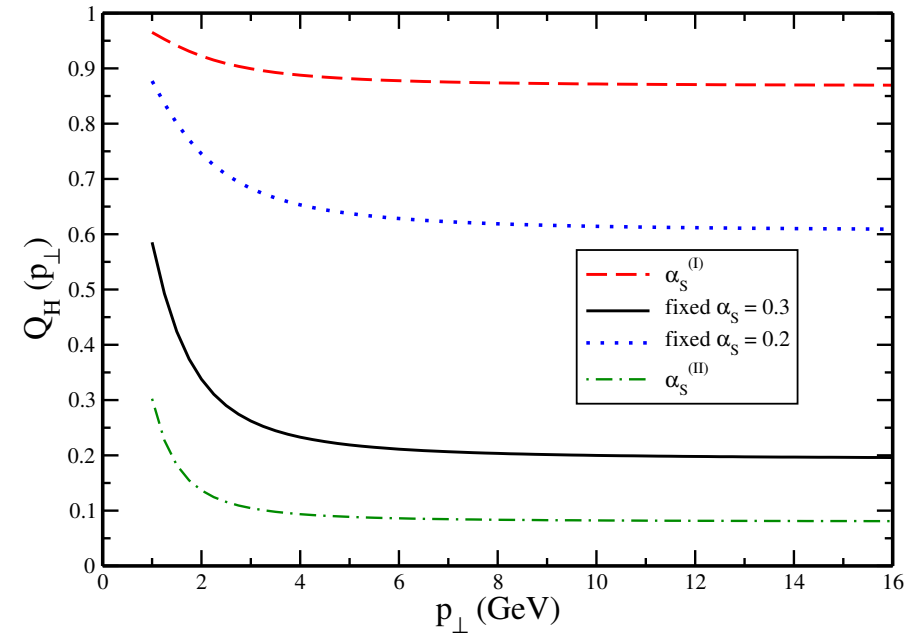
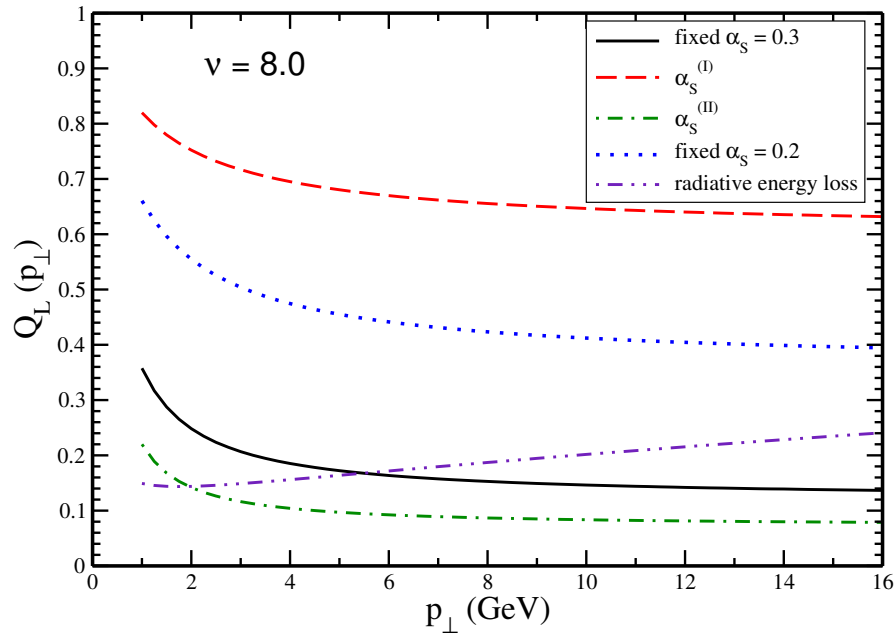
$$Q(p_{\perp}) = \frac{dN^{\text{med}}}{d^2p_{\perp}} / \frac{dN^{\text{vac}}}{d^2p_{\perp}}$$

● Geometria considerada para a expansão

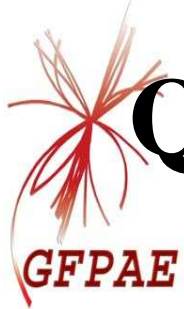
$$L(\phi) = (R^2 - r^2 \sin^2 \phi)^{1/2} - r \cos \phi$$



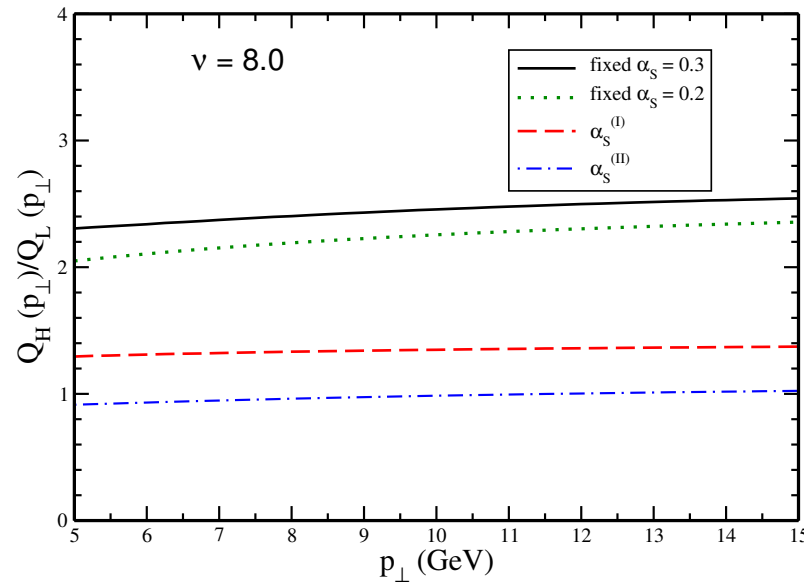
# Fator de atenuação



- Distribuições em  $p_\perp$  no vácuo parametrizadas a partir de resultados experimentais
- Perda de energia radiativa parametrizada para quarks leves



# Quantidade experimental - a razão $D/\pi$



- Para um QGP estático, um fator 2 de enaltecimento da produção de mésons  $D$  (compostos por um quark pesado - *charm*) em relação à produção de mésons  $\pi$  (compostos por apenas quarks leves) é previsto;
- Para QGP em expansão, este enaltecimento desaparece;
- Esta característica sugere que as magnitudes da perda de energia colisional para quarks leves e para o *charm* são de mesma grandeza;
- Para a perda de energia radiativa, é esperado que seja menor para os quarks *charm* do que para os quarks leves, devido a um efeito de *dead cone* (interferência destrutiva na radiação)



# Sumário

- Quantidades físicas relacionadas à perda de energia elástica são modificadas e fornecem estimativas mais realísticas quando se considera a evolução do sistema criado na colisão;
- Para quarks leves, os mecanismos radiativo e elástico de perda de energia tem a mesma ordem de magnitude para grandes valores de  $p_{\perp}$ , quando se considera valores de  $\alpha_S \geq 0.3$ ;
- Considerando o QGP em expansão, os mésons  $D$  não tem sua produção enaltecida em relação à de mésons  $\pi$ , sugerindo assim que quarks leves e o quark *charm* apresentam efeitos similares na perda de energia elástica;
- **Cálculos para perda de energia radiativa considerando a expansão do QGP são necessários para uma comparação mais completa com os dados.**