

# A Física Experimental de Altas Energias no LHC e o Quark-Gluon Plasma



UNICAMP

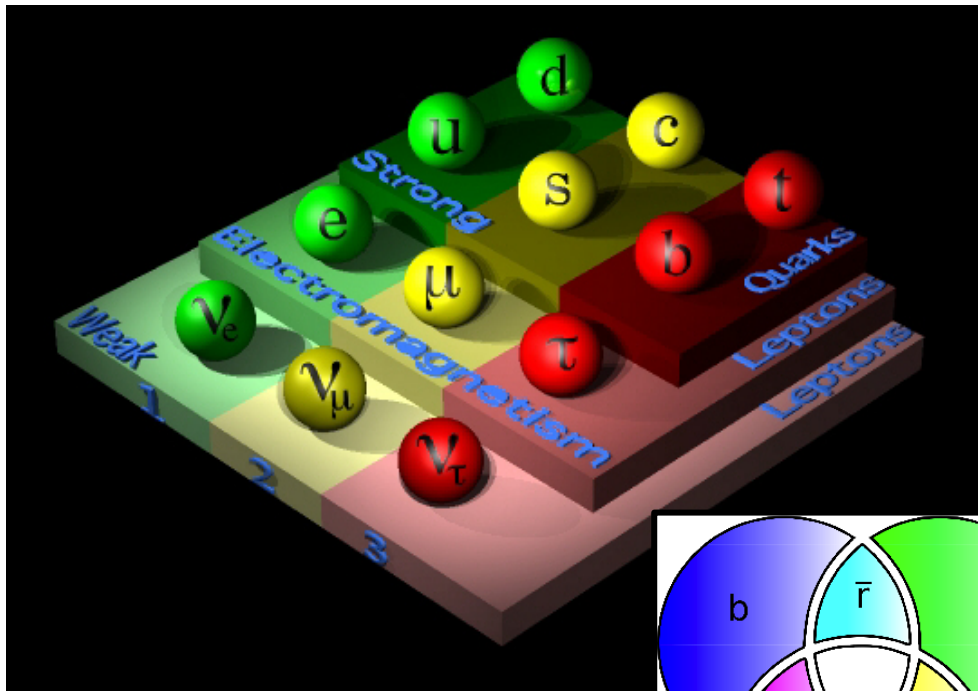
David D. Chinellato

# O que veremos hoje

- Introdução
  - O quark-gluon plasma (QGP)
  - Motivação ao estudo de colisões de íons pesados
- O Large Hadron Collider e o ALICE
- Os Sinais do Quark-Gluon Plasma
- Conclusão

O Modelo Padrão:

# Constituintes da Matéria

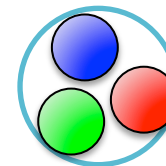
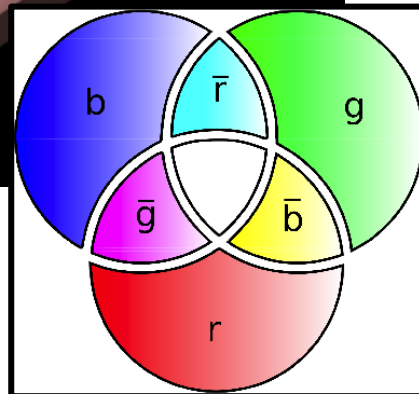


Toda a matéria observada é constituída de:

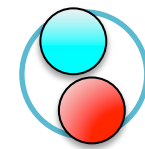
- Quarks
- Léptons

Quarks carregam carga de cor (verde, vermelho ou azul); combinações devem ser brancas!

- Mésons (cor, anticor)
- Bárions (rgb)



bárion



méson

# Interações da Matéria



Electromagnetic

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| <b>Bóson Mensageiro</b>     | fóton, $\gamma$                 |
| Interação associada         | eletromagnética                 |
| Teoria                      | eletrodinâmica quântica (QED)   |
| Grandeza Quântica Associada | carga elétrica                  |
| Partículas                  | léptons e partículas carregadas |



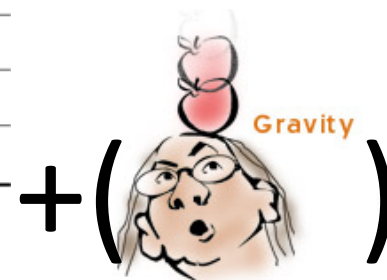
Weak

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Bóson Mensageiro</b>     | Bósons Massivos, $W^+$ , $W^-$ e $Z^0$ |
| Interação associada         | eletrofraca                            |
| Teoria                      | 'teoria eletrofraca'                   |
| Grandeza Quântica Associada | cargas elétrica e fraca                |
| Partículas                  | léptons, quarks e hádrons              |



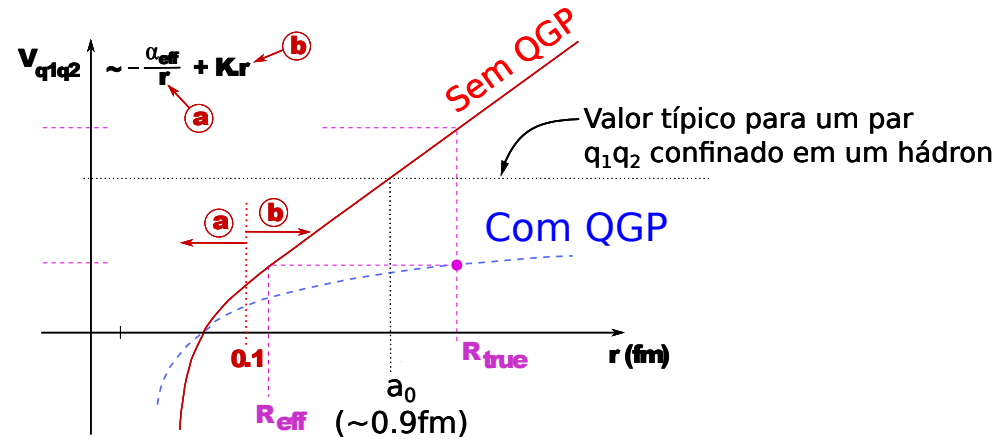
Strong

|                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| <b>Bóson Mensageiro</b>     | 8 glúons, $g$                |
| Interação associada         | forte                        |
| Teoria                      | Cromodinâmica Quântica (QCD) |
| Grandeza Quântica Associada | carga de cor                 |
| Partículas                  | quarks e glúons              |

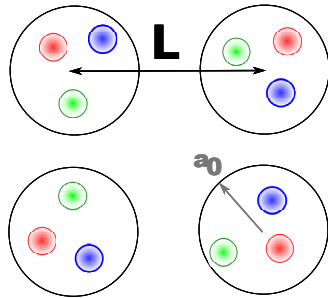


Gravity

# Um Plasma de Quarks e Glúons: QGP

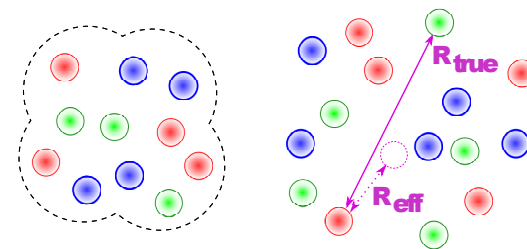


## cenário 1: Confinamento



$L$ : distância inter-hadrônica ( $\sim 1.8 \text{ fm}$ )  
 $a_0$ : raio hadrônico ( $\sim 0.9 \text{ fm}$ )  
 $\rho_0$ : densidade nuclear típica ( $\sim 0.17$  núcleon/ $\text{fm}^3$ )

## cenário 2: desconfinamento

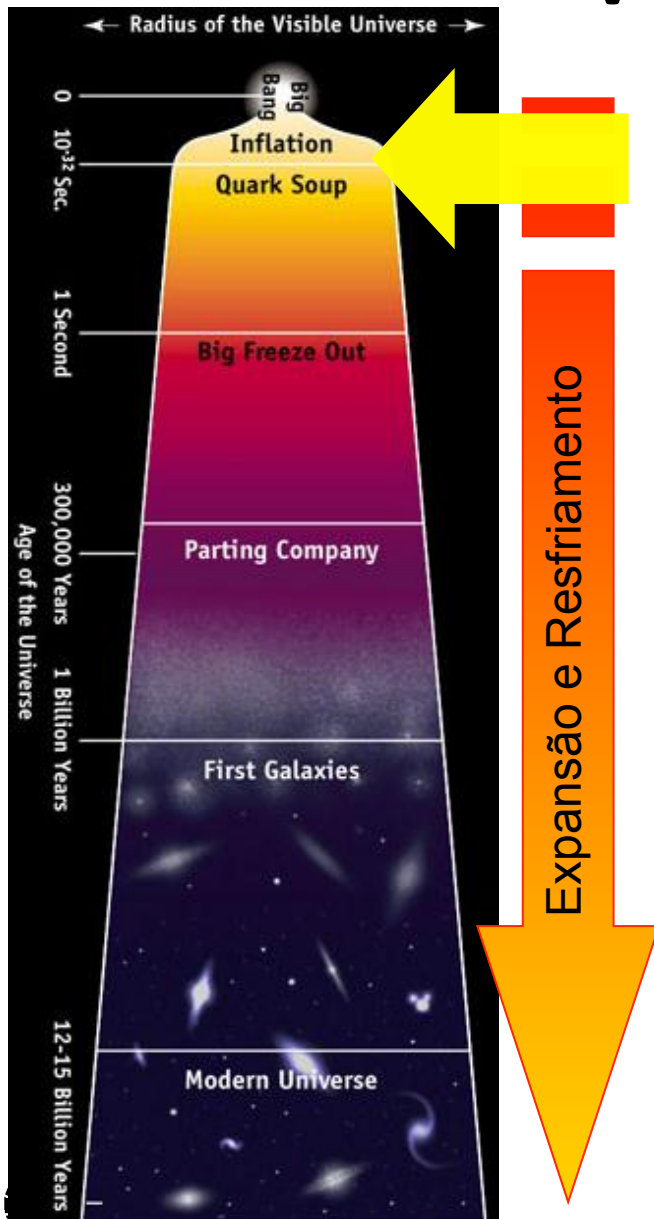


Limite crítico:  $L \sim a_0$

$$\rho_{eff} \sim (1.8/0.9)^3 \rho_0 = \sim 8\rho_0$$

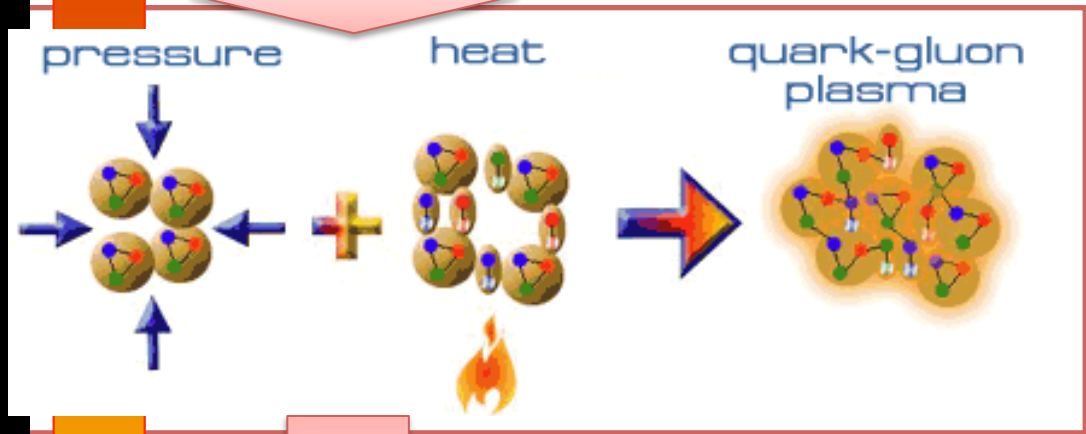
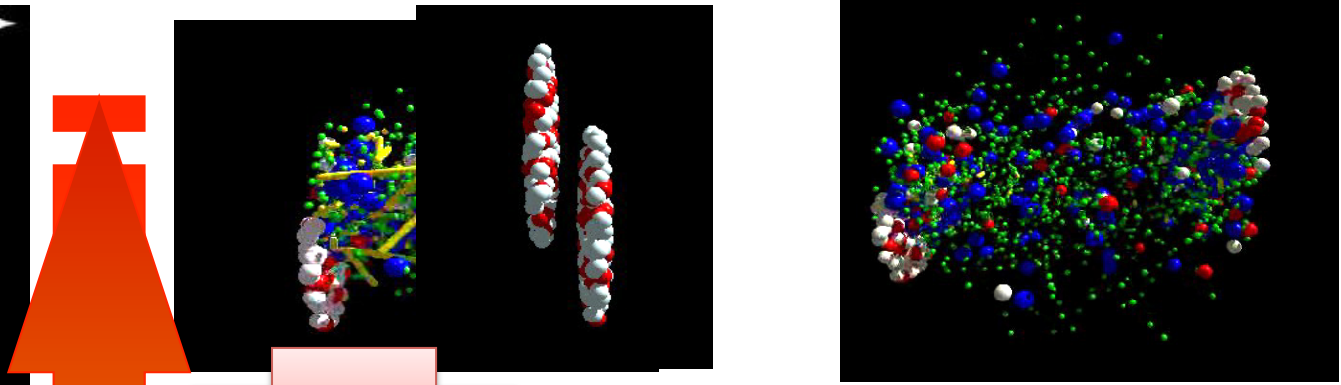
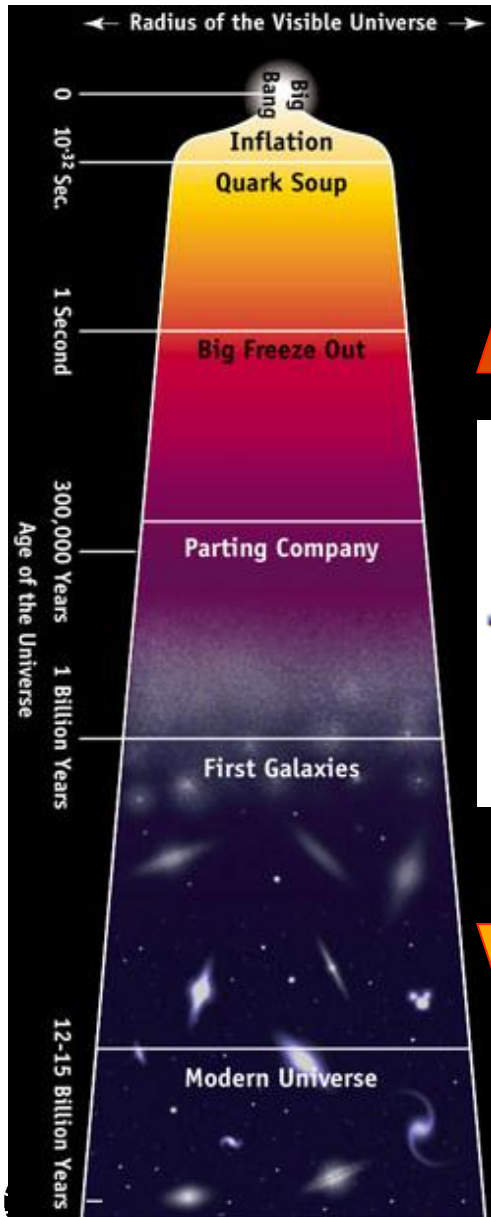
$$8\rho_0 = 1.36 \text{ núcleon}/\text{fm}^3 \sim 1.2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$$

# Voltando para o Início



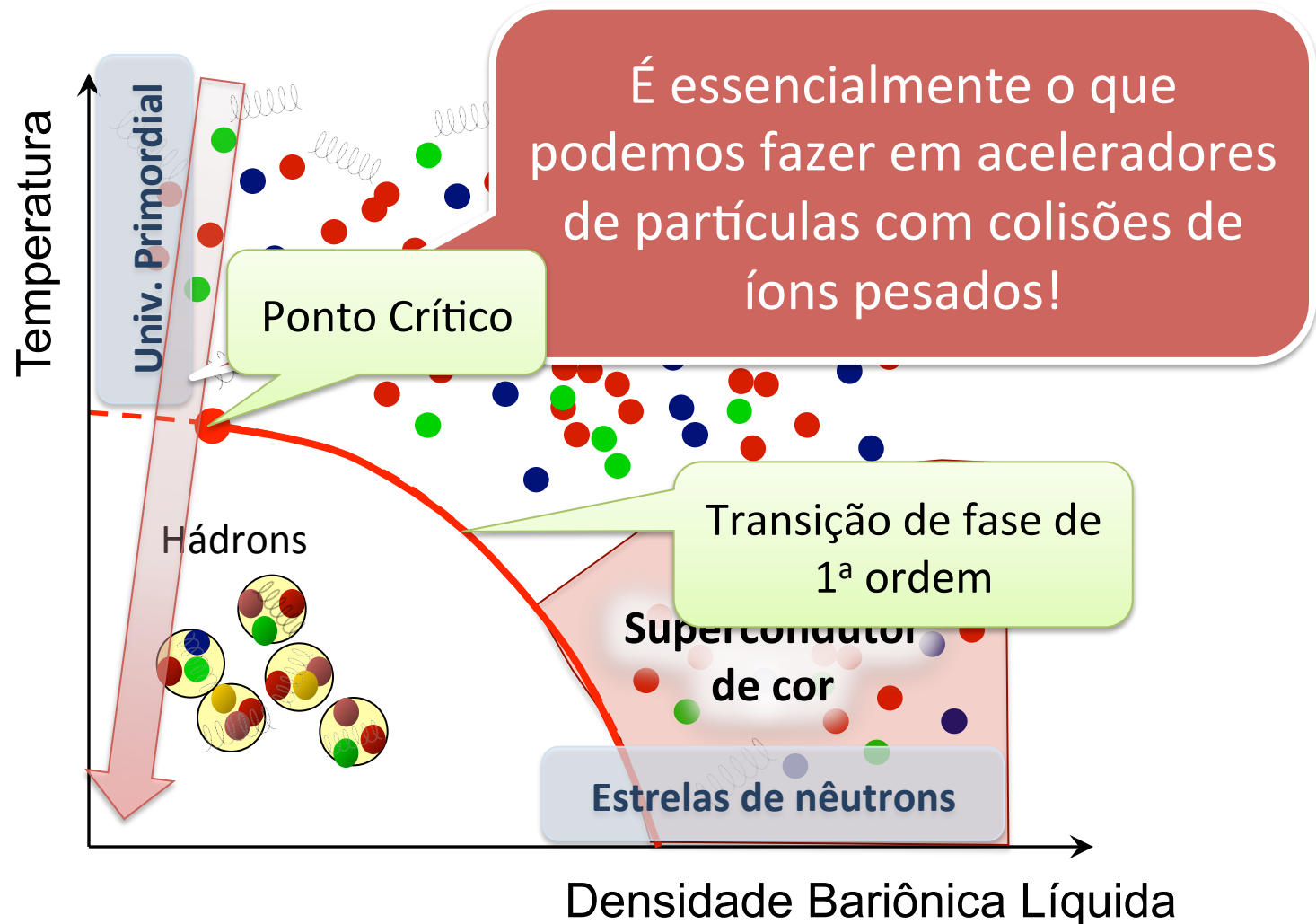
Estado inicial de densidade de energia extrema  
Série de transições de fase previstas pelo modelo padrão.

- Estado Inicial: Quark-Gluon Plasma  
Sopa de quarks e glúons livres, universo quente demais para o confinamento destes em hádrons.
  - Gás de Hádrons:  
Prótons e nêutrons livres, universo ainda quente para formação de núcleos.
  - Nucleossíntese primordial, até He.
  - Plasma EM:  
Universo ainda quente para o acoplamento dos elétrons com os núcleos para formar átomos e moléculas.
  - Unificação das forças fundamentais.
- Características Globais do nosso universo hoje estão ligadas às propriedades destas transições de fase!



Se a energia depositada for suficiente, os prótons e neutrons podem “derreter” e formar uma sopa de quarks e glúons, em um estado similar às condições logo após o Big-Bang

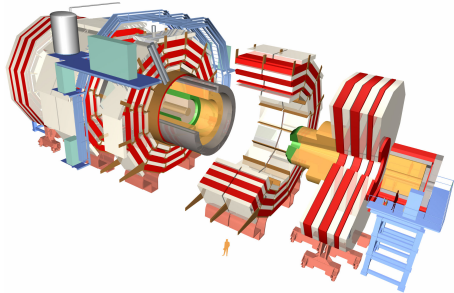
# Diagrama de Fase da QCD



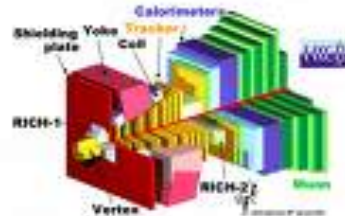


# O Large Hadron Collider (LHC)

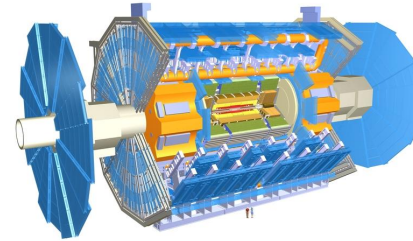
**CMS**



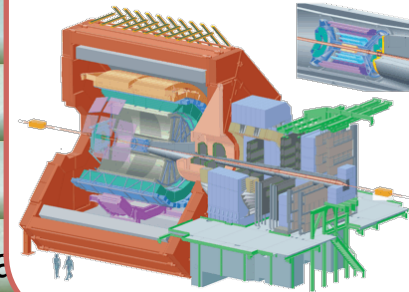
**LHCb**



**ATLAS**



**ALICE**



Orçamento total (€ 10)

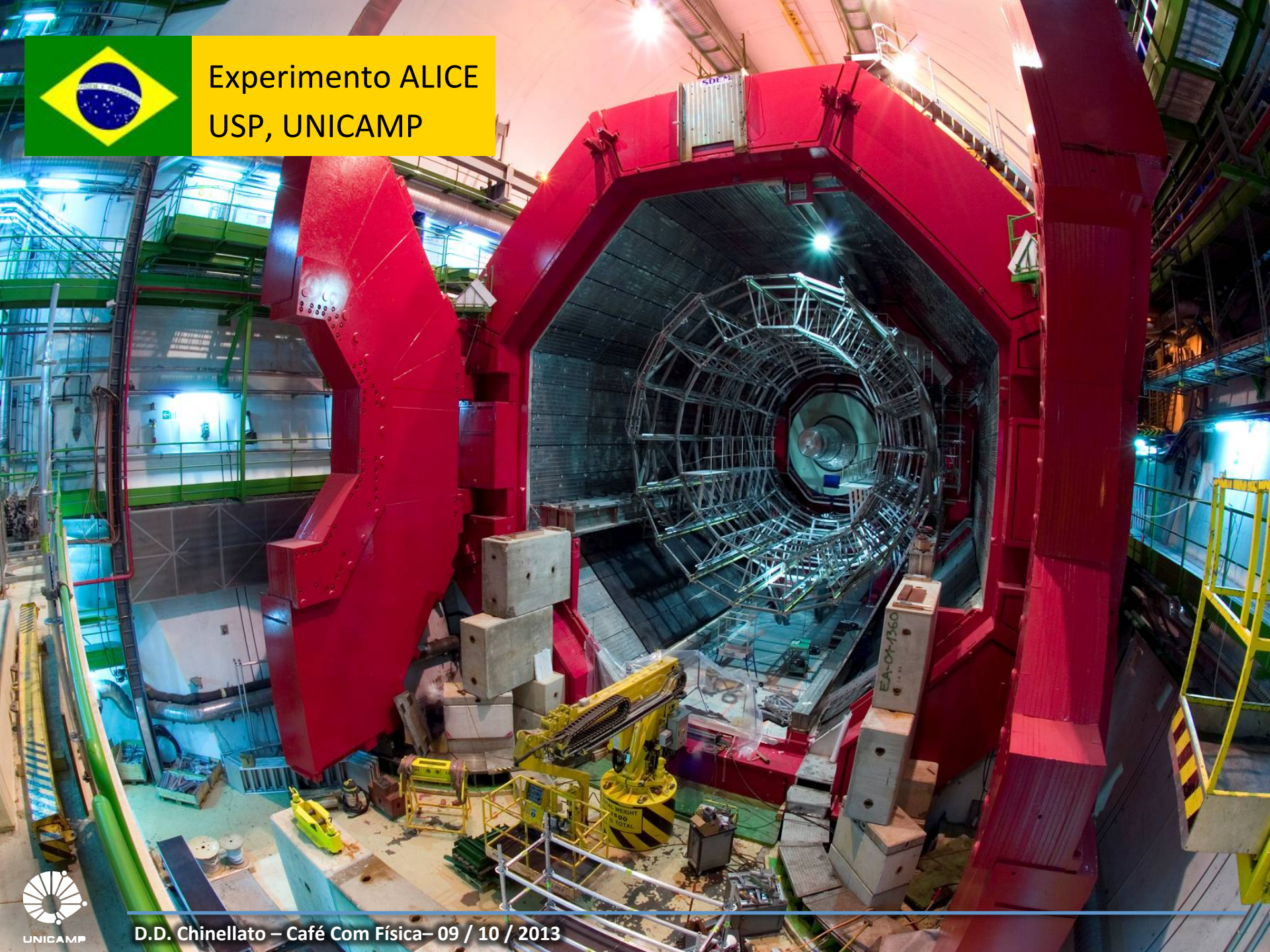
Feixes operantes

p, Pb, ...

**A Large Ion Collider Experiment:**  
Especializado em colisões de íons pesados e o estudo do quark-gluon plasma



# Experimento ALICE USP, UNICAMP



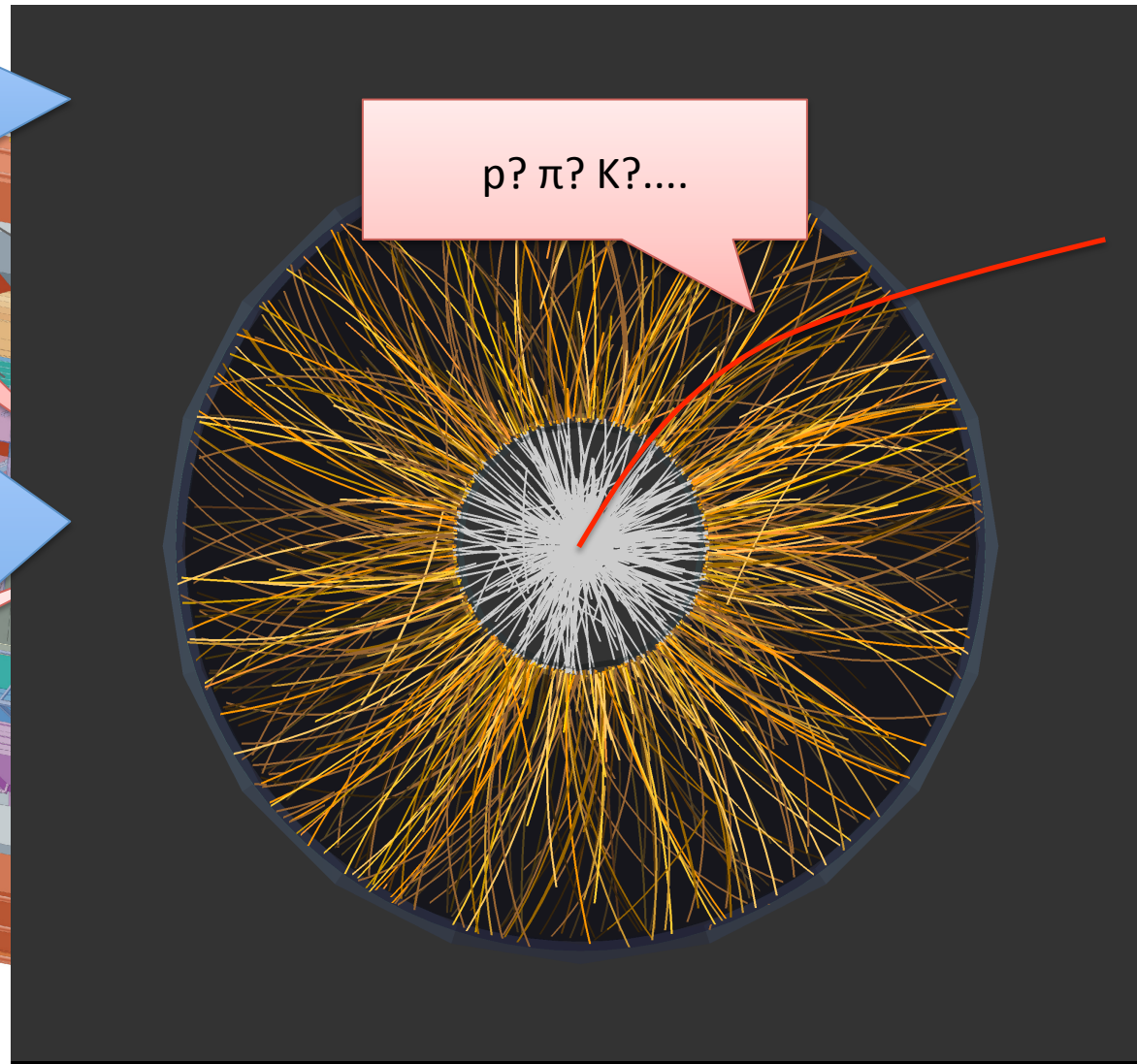
UNICAMP

# O Experimento ALICE

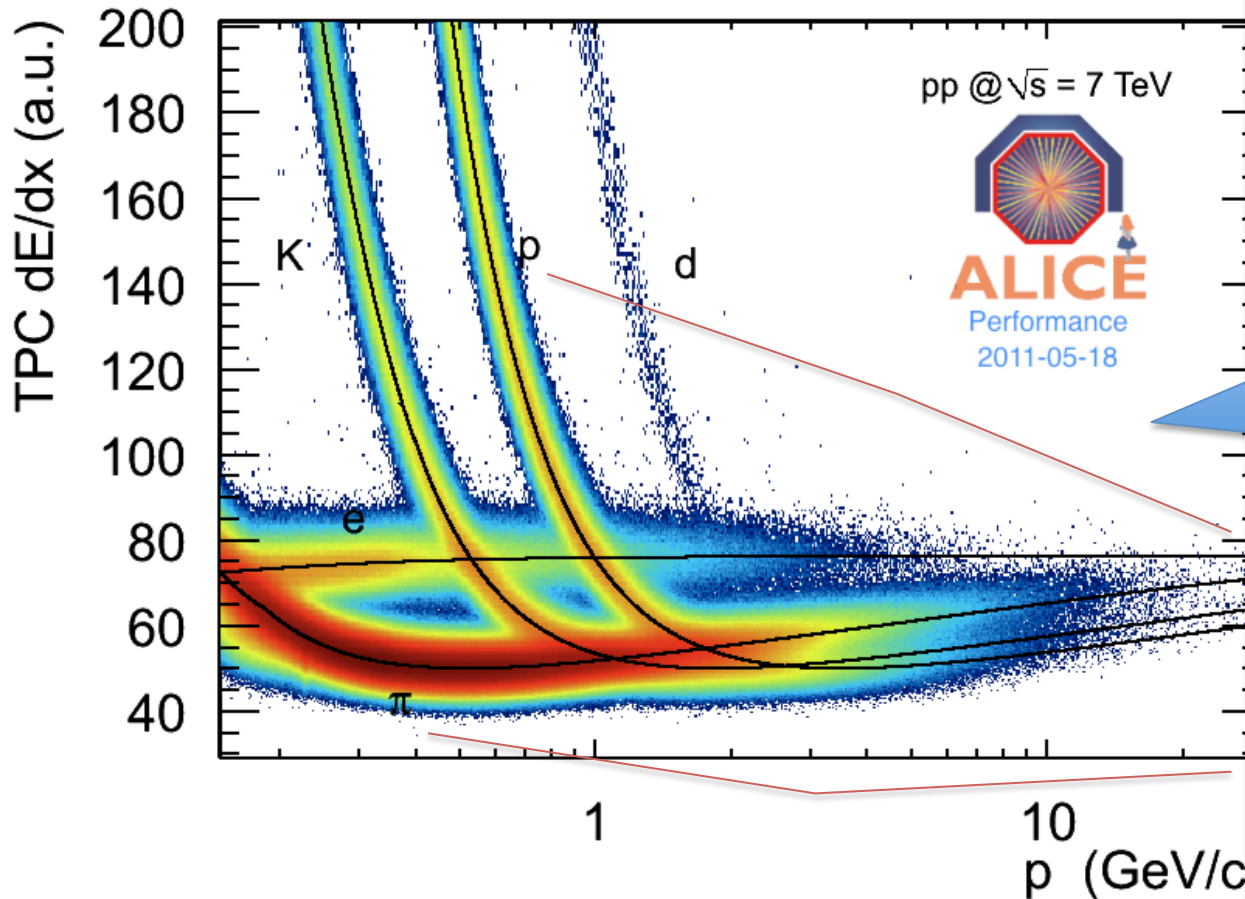
Excelente  
determinação de  
trajetórias de  
partículas carregadas

Mesmo em ambientes  
de altíssima densidade  
de partículas.

Exemplo:  
colisão Pb-Pb, com  
**1600 trajetórias**



# Uma especialidade do ALICE: Identificação de Partículas



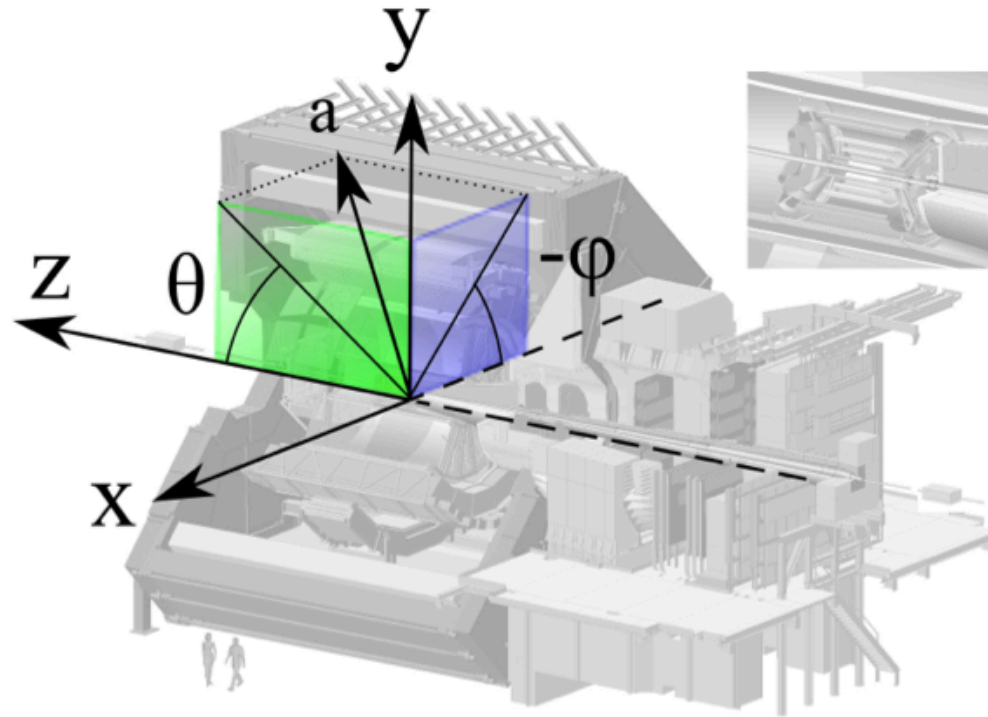
ALICE: Muitos detectores com capacidade de determinar a espécie da partícula

Exemplo: depósito de energia na TPC

**Prótons:** grande perda de energia ao atravessar o gás da TPC

**Píons:** pequena perda de energia ao atravessar o gás da TPC

# Sistemas de Coordenadas



## Variáveis Cinemáticas

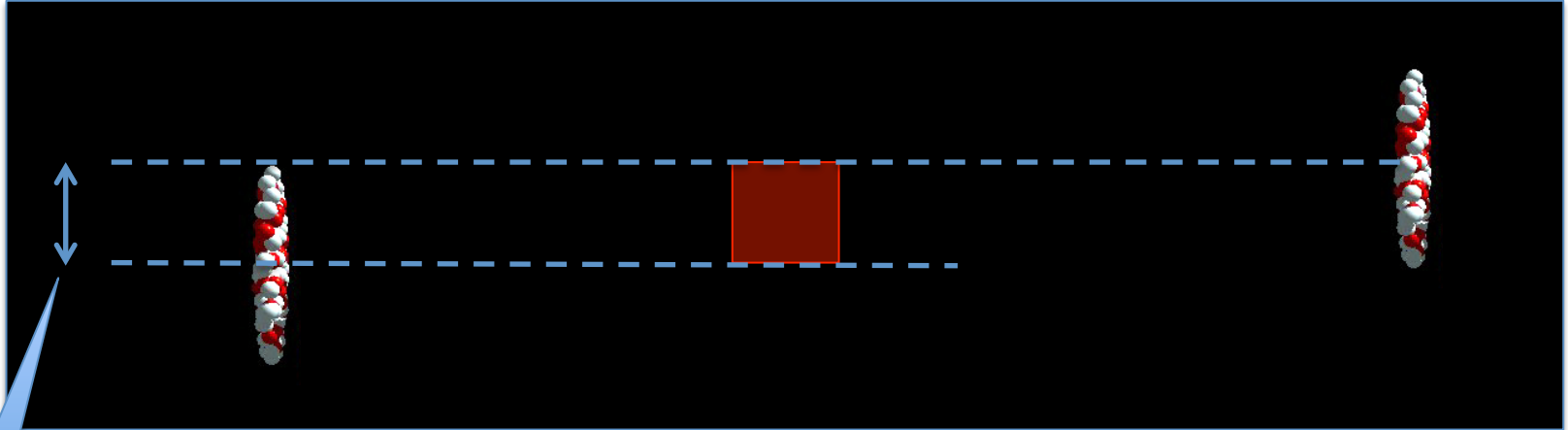
$$a = (E, p_x, p_y, p_z)$$

direção transversal

direção longitudinal

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{|\vec{p}| + p_z}{|\vec{p}| - p_z} \right) = -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + p_z}{E - p_z} \right)$$

# Olhando em Colisões nucleares



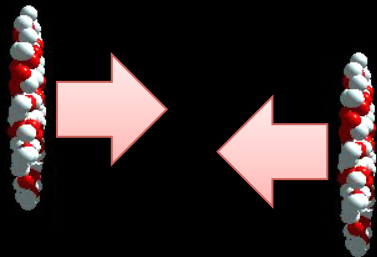
**b**

Núcleos são jogados uns contra os outros  
(são discos devido à contração de Lorentz)

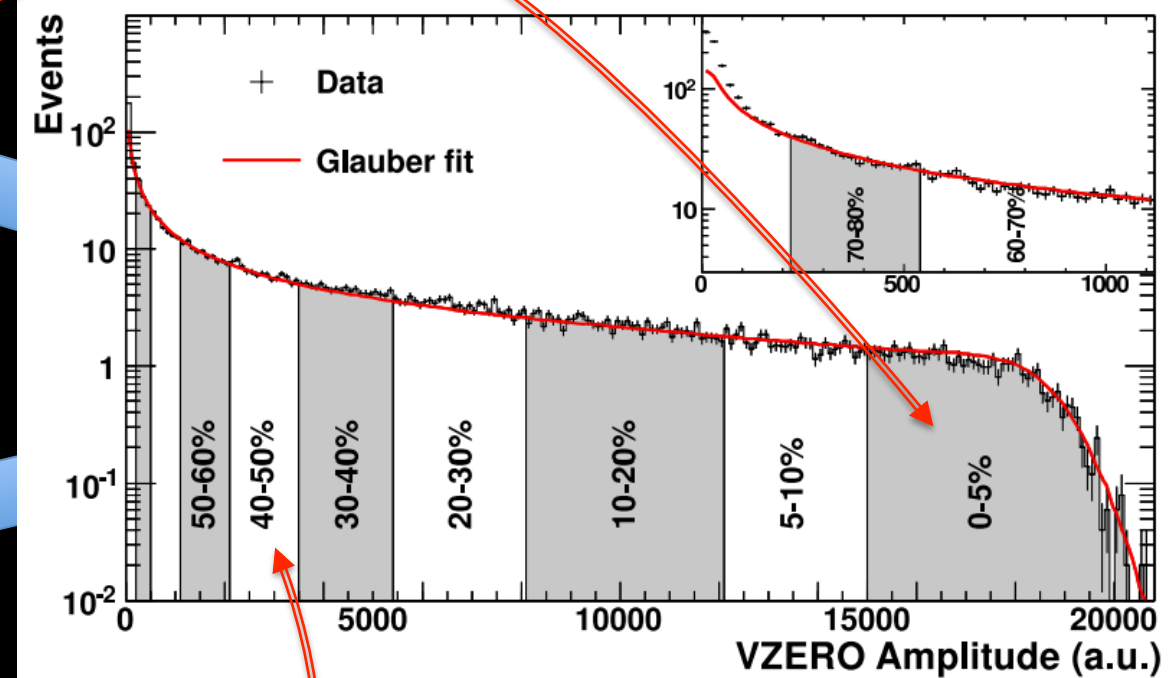
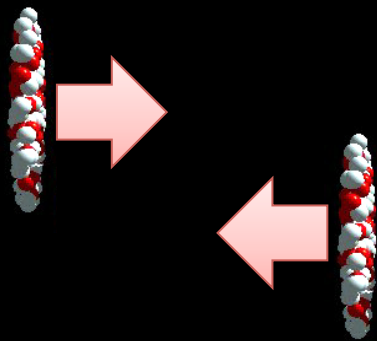
**b: parâmetro de impacto... ?**  
Na prática: feixes; às vezes temos colisões...

# Classificando Colisões: Centralidade

Colisão “Central”



Colisão “Periférica”



Número de núcleons que participam ( $N_{part}$ ) aumenta: maior energia disponível, mais partículas produzidas!

# Sinais do QGP: Alguns Exemplos



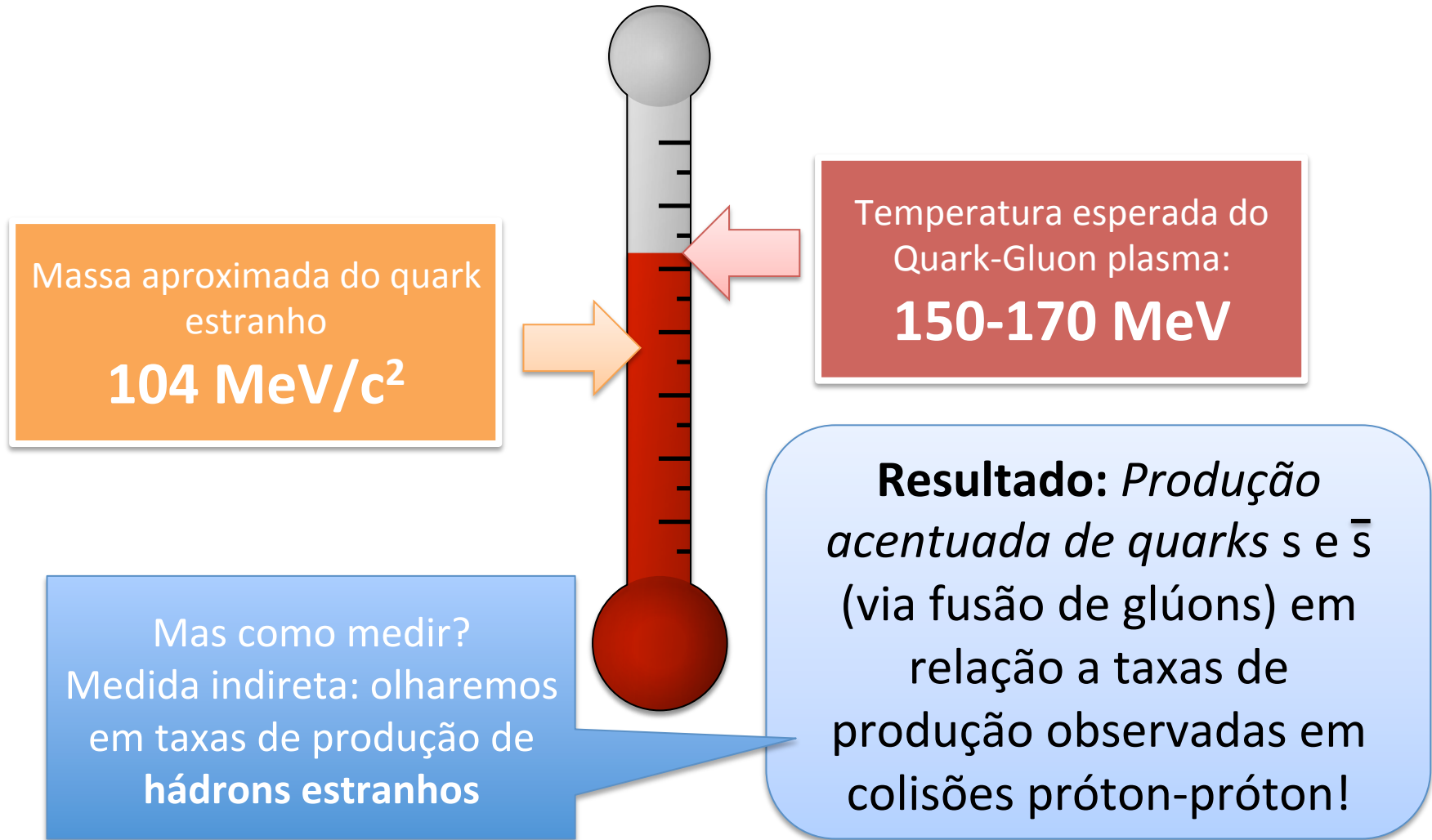
(1) Aumento da produção de Estranheza

(2) A Anomalia Bariônica

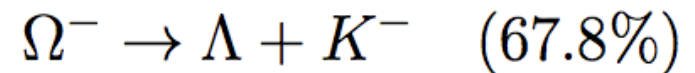
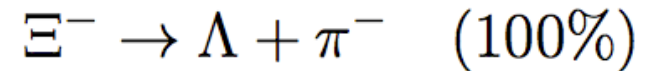
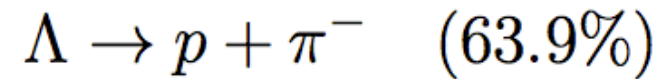
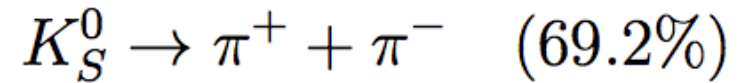
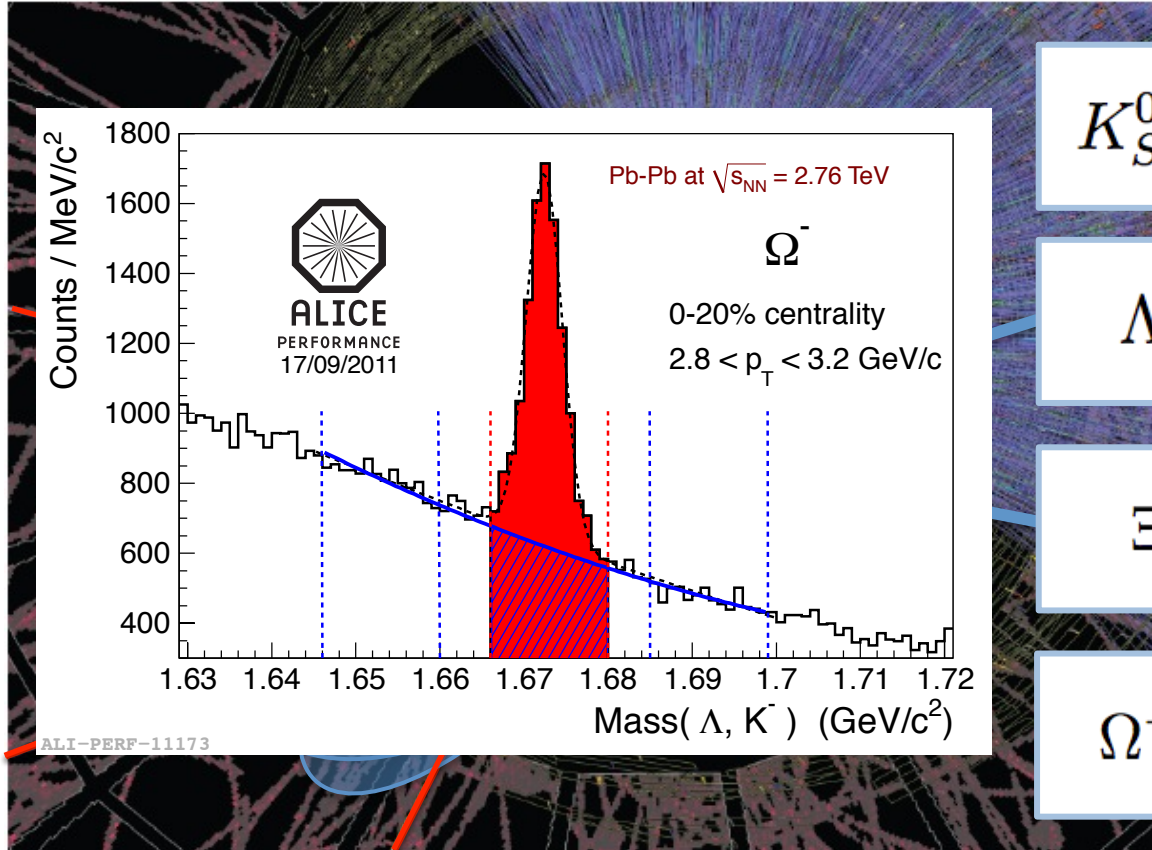
(3) Anisotropia Azimutal de Momento: O Fluxo Elíptico



# (1) Aumento da produção de estranheza



# Produção de Estranheza no ALICE

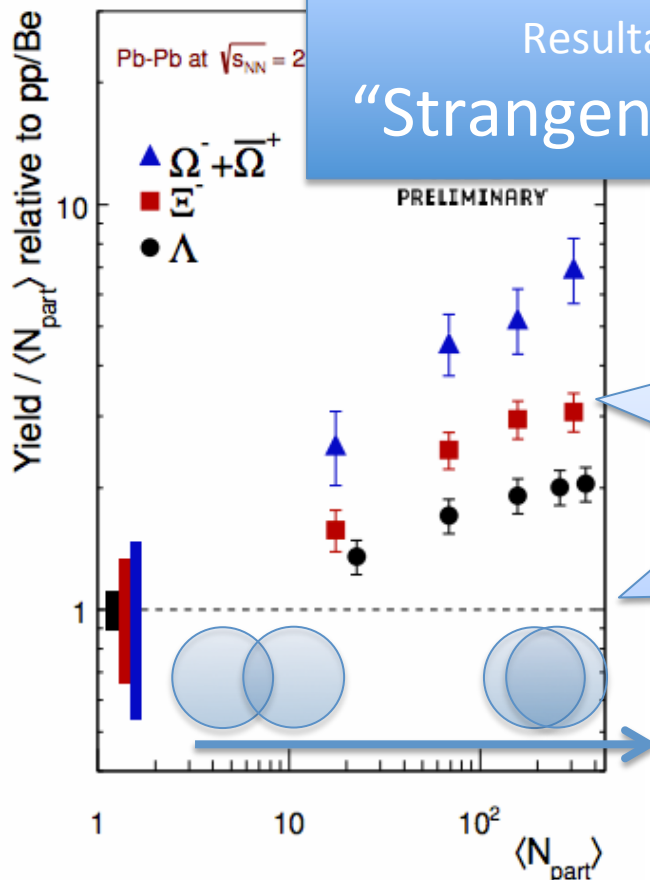


# Taxas totais de produção:

Comparação de Pb-Pb com colisões próton-próton

Cada vez que dois núcleons colidem -> Há produção de estranheza. Mas em que quantidade por núcleon?

Taxa de produção por colisão de núcleons participantes ( $N_{part}$ ): Levando em conta tamanho do sistema!



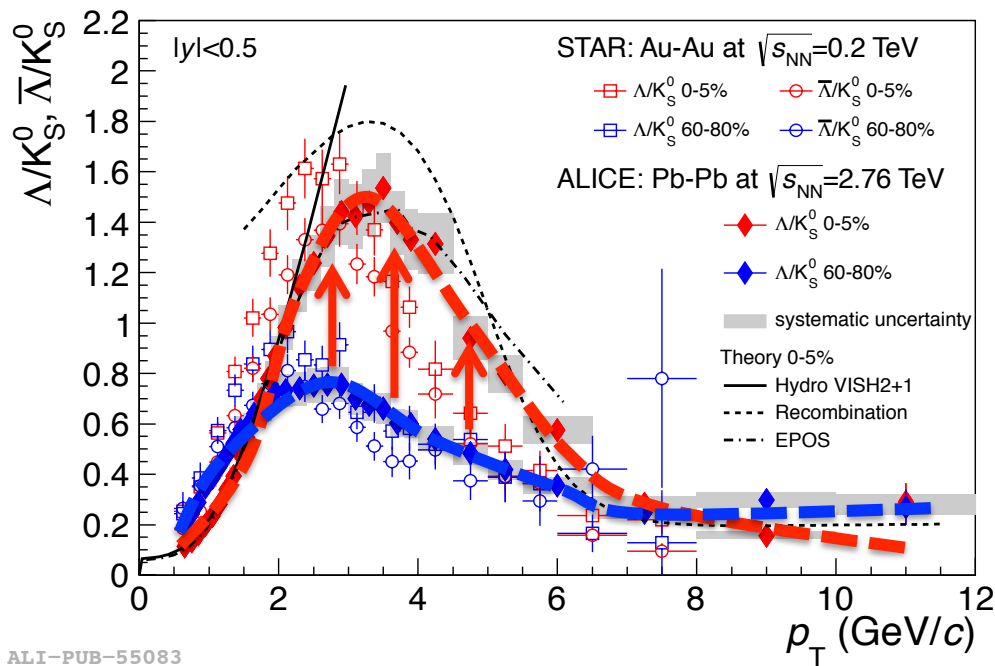
Resultado clássico da área:  
“Strangeness Enhancement”

Mas não é constante em 1: há um aumento da produção por colisão de núcleons participantes!

...e este aumento é maior para partículas com conteúdo de estranheza maior!

ALI-PREL-43104

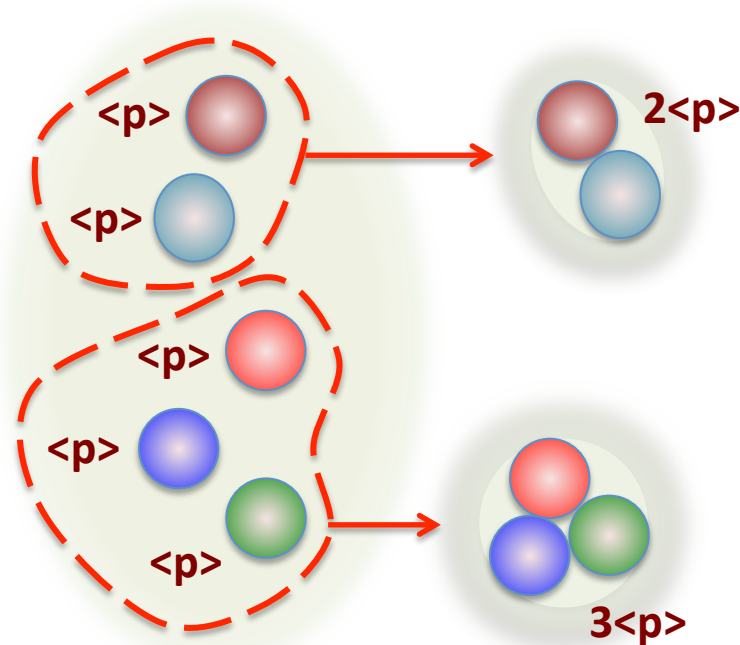
# (2) A Anomalia Bariônica



ALI-PUB-55083

Aumento da produção de Bárions em momento intermediário (2-4 GeV/c):  
 “Anomalia Bariônica”

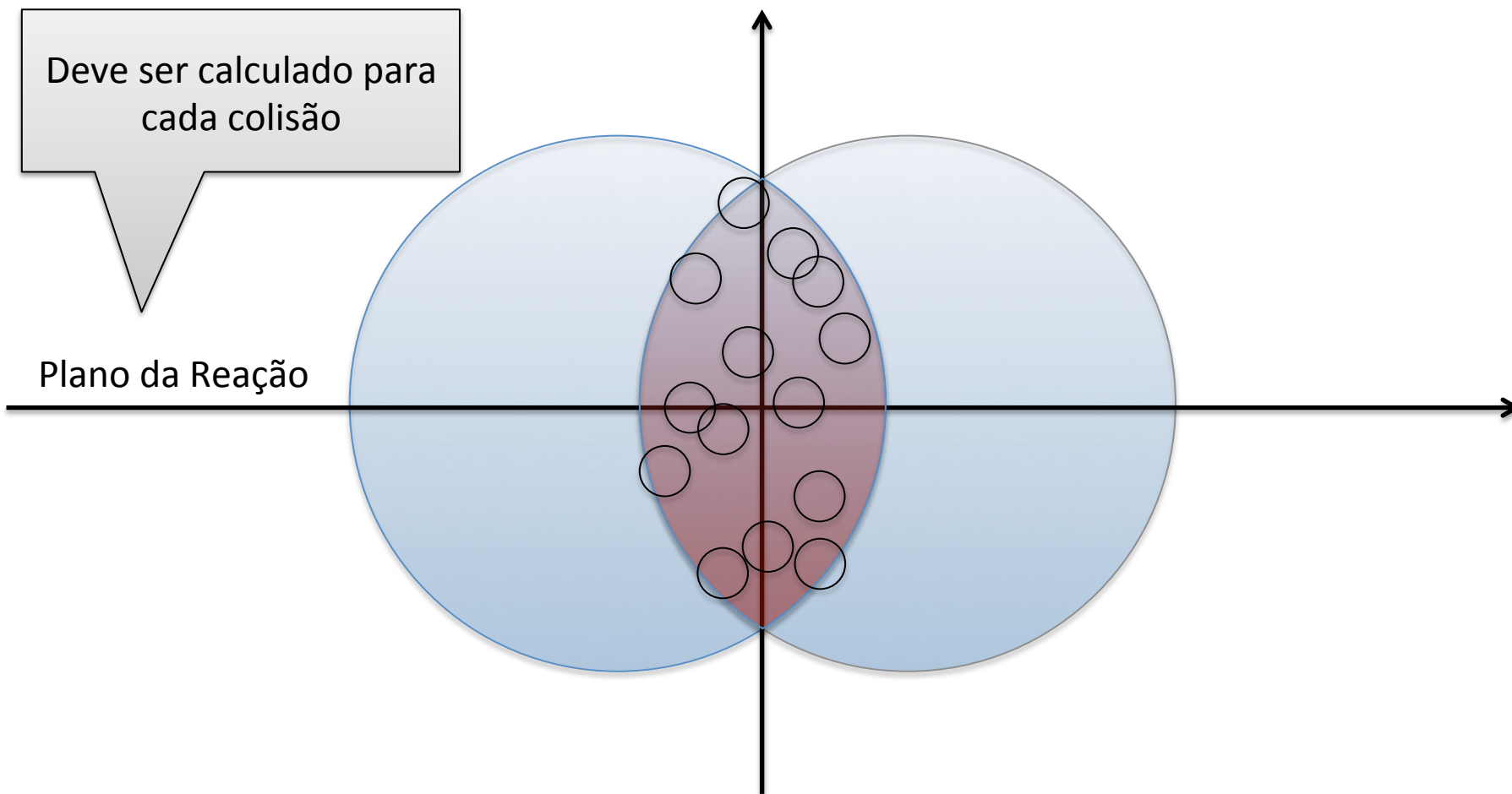
Produção de Partículas por mecanismo:  
**-> Coalescência de Pártons**



# (3) Mais um sinal: Anisotropia Azimutal

Deve ser calculado para cada colisão

Plano da Reação

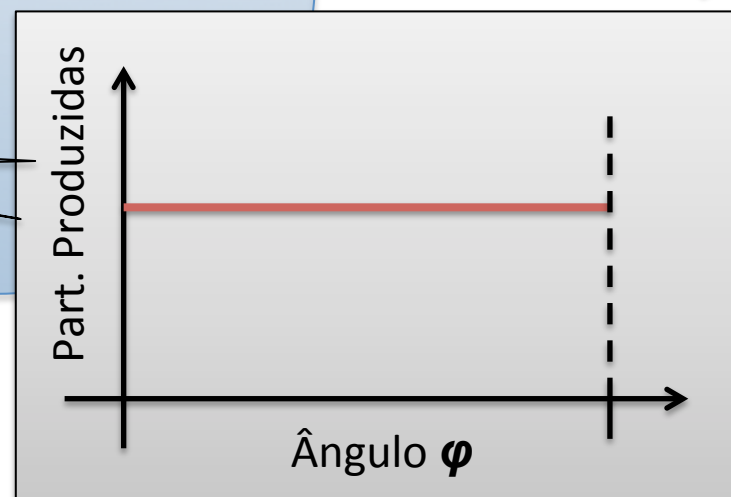
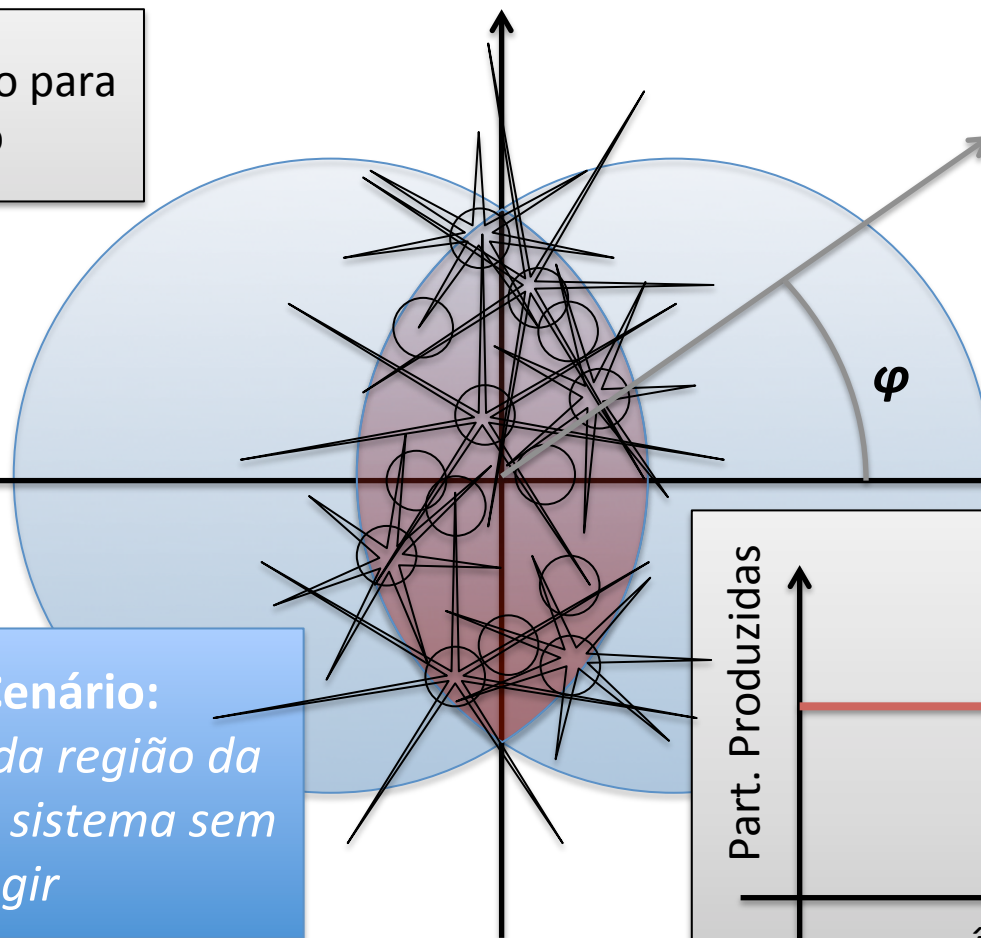


# (3) Mais um sinal: Anisotropia Azimutal

Deve ser calculado para cada colisão

Plano da Reação

**Primeiro Cenário:**  
*Produtos de cada região da colisão saem do sistema sem interagir*



# (3) Mais um sinal: Anisotropia Azimutal

Deve ser calculado para cada colisão

E é isto que é observado!

**Elliptic Flow:**  
Fluxo elíptico

Plano da Reação

$\varphi$

Maior Gradiente:

**Segundo Cenário:**

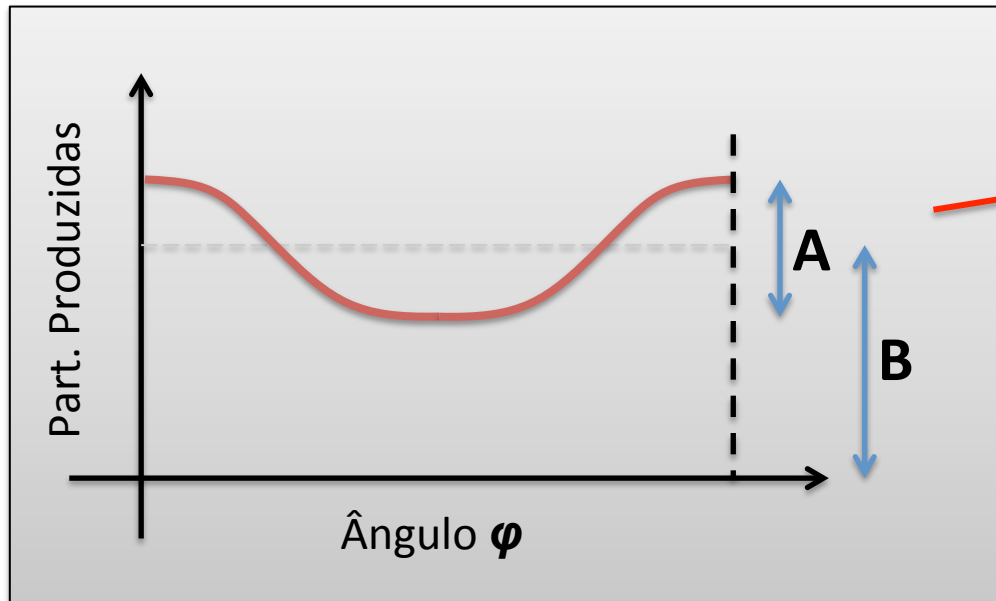
*Produtos de cada região da colisão podem interagir entre si: "Sopa de Quarks e Gluons" com comportamento coletivo*

Part. Produzidas

Ângulo  $\varphi$

# Quantificando o Fluxo Elíptico

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_t dp_t dy} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos[n(\phi - \Psi_r)] \right)$$



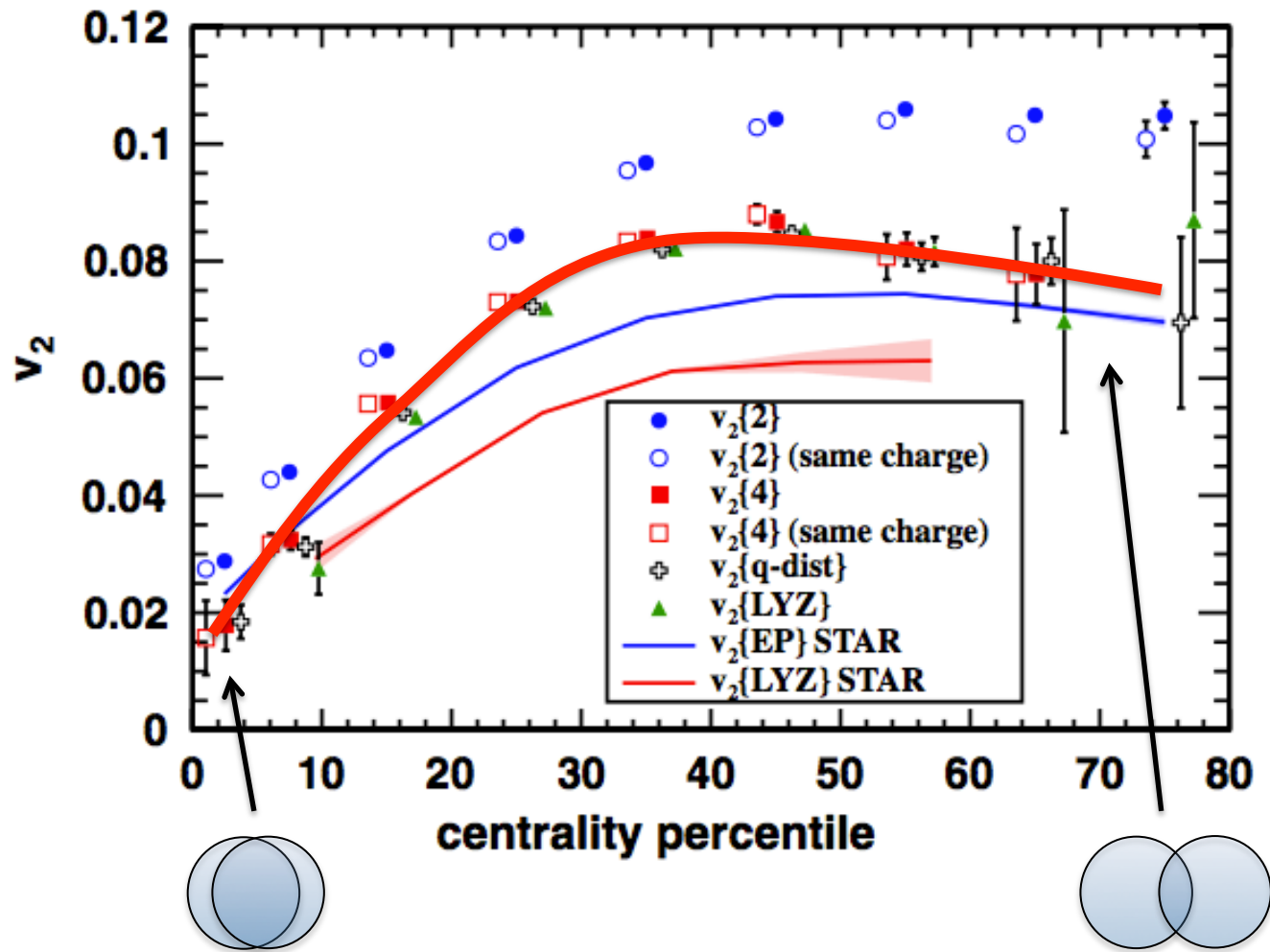
$$v_2 = A/B$$

Isto é feito de forma diferencial em momento: para cada faixa de momento transversal, há um  $v_2$



# O Fluxo elíptico no ALICE: Partículas Carregadas

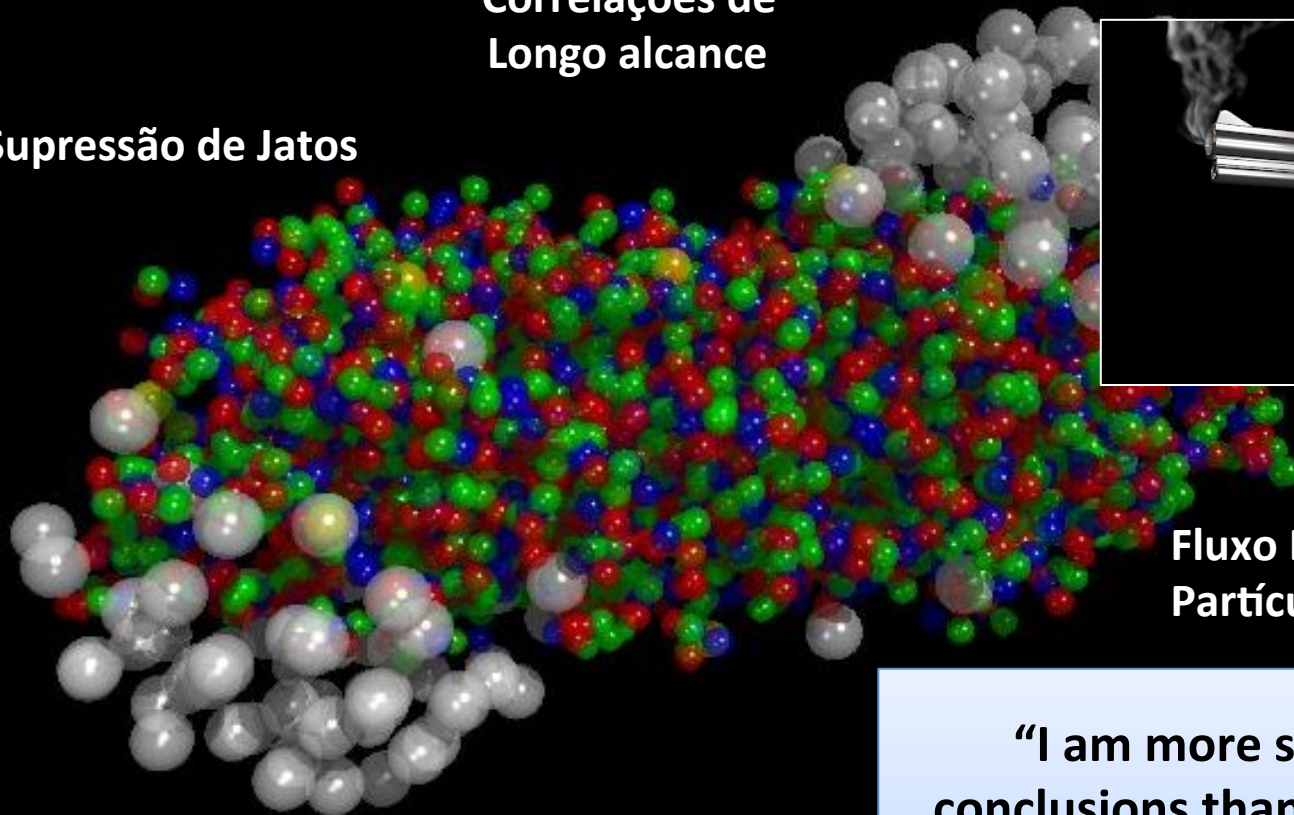
PRL 105, 252302 (2010)



# E muitos sinais a mais....

Correlações de  
Longo alcance

Supressão de Jatos



Fluxo Elíptico para  
Partículas identificadas

Produção térmica  
De partículas

“I am more sure of the  
conclusions than of any single  
argument which suggested them  
to me” – R. Feynman

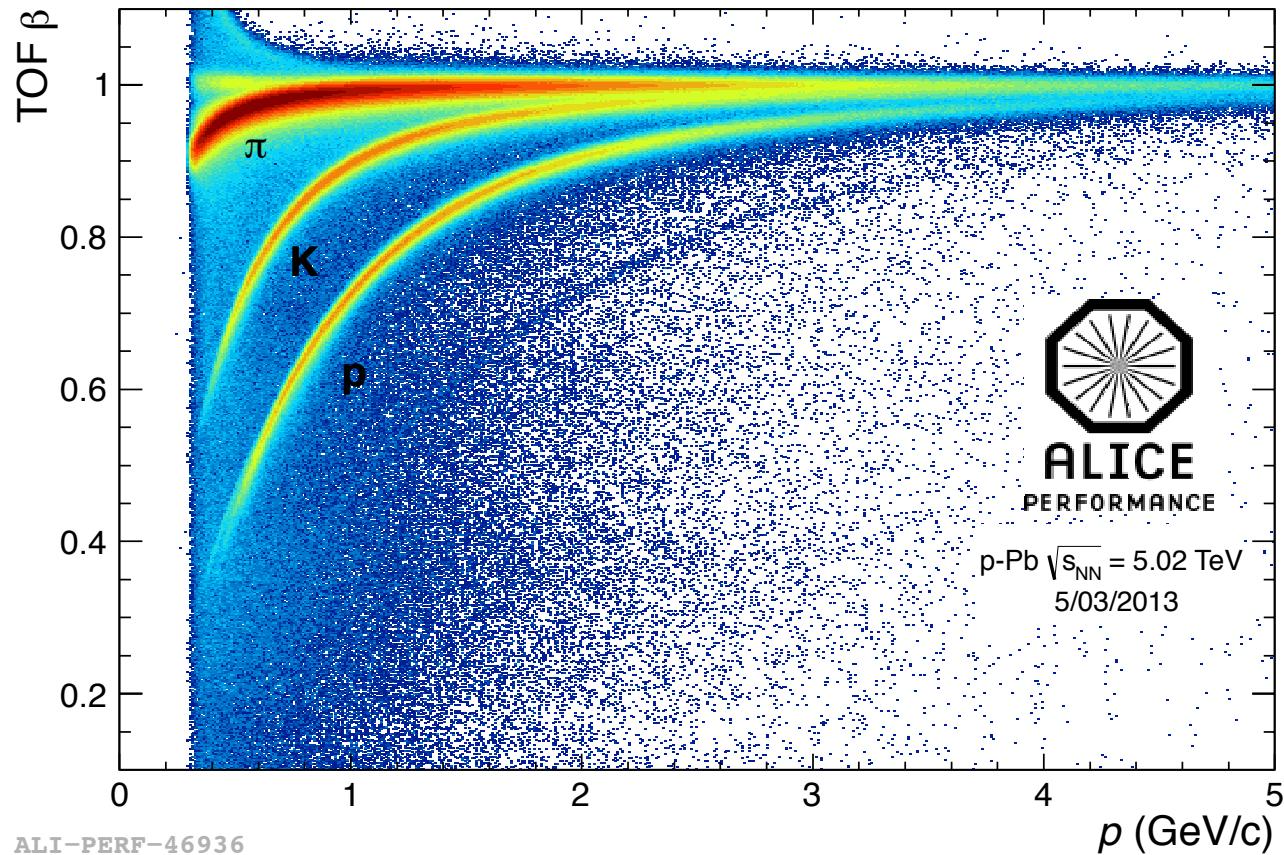
# Resumo

- Large Hadron Collider:
  - Ferramenta ideal para estudos de ponta sobre MP
- O Quark Gluon Plasma:
  - Permite vínculo com universo primordial
  - Suas propriedades: estudo de QCD
  - Muitas ferramentas: hidrodinâmica, termodinâmica, etc...
  - Estudo é desafiador!
    - Medidas indiretas

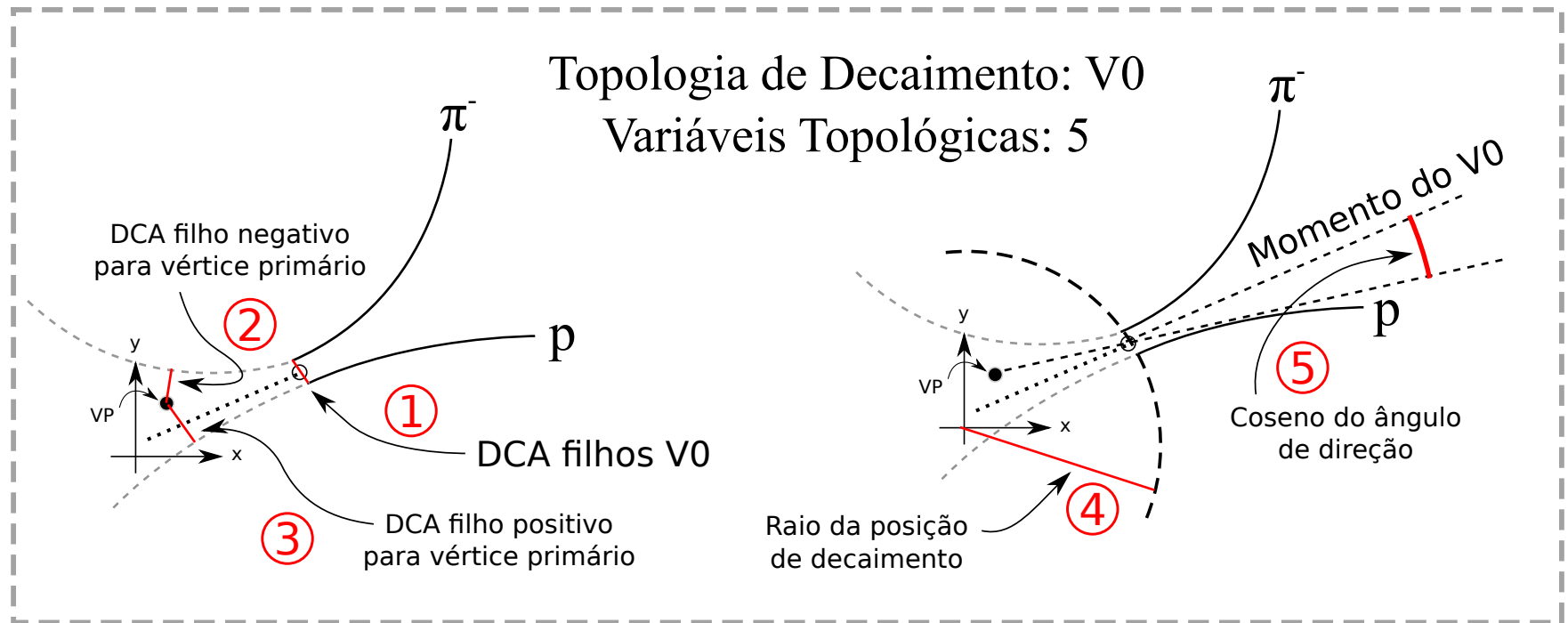
*Muito obrigado!*

# Backup

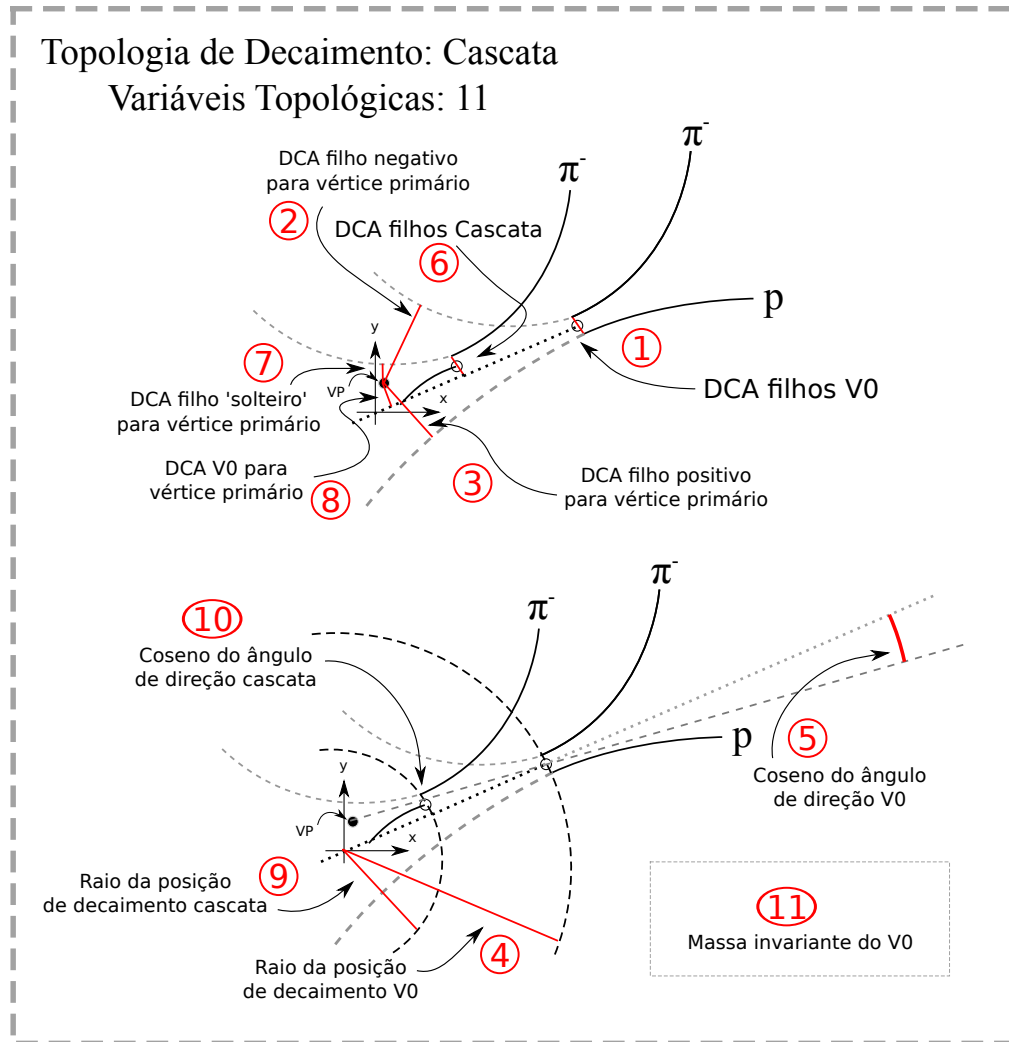
# Identificação de Partículas por TOF



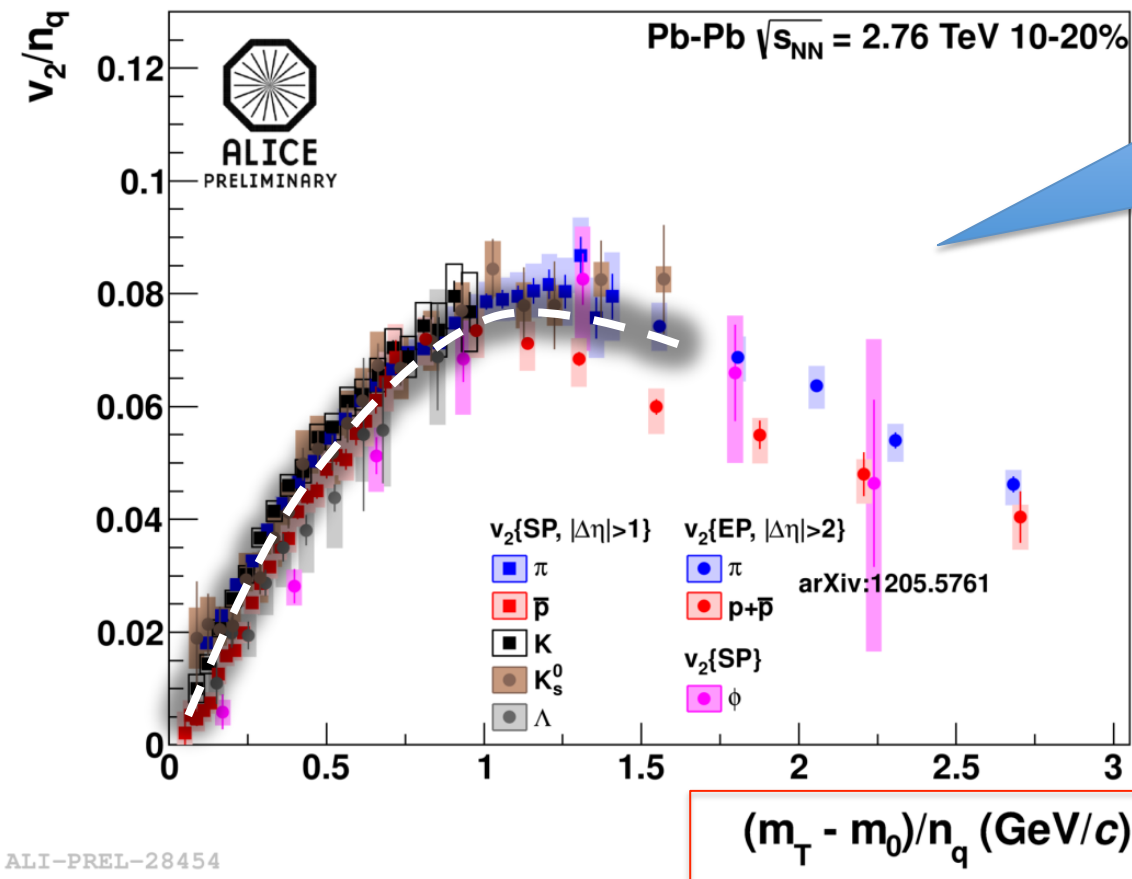
# Técnica de Reconstrução de V0s



# Técnica de Reconstrução de $\Xi$ , $\Omega$



# ALICE: Fluxo elíptico para várias espécies de partículas



Indício de Efeito partônico!

“NCQ Scaling”

(number of constituent quarks)

Massas são diferentes...

$$m_t^2 = p_t^2 + m_0^2$$

Esse efeito é partônico:  
vamos dividir pelo  
número de pártons de  
cada hádron

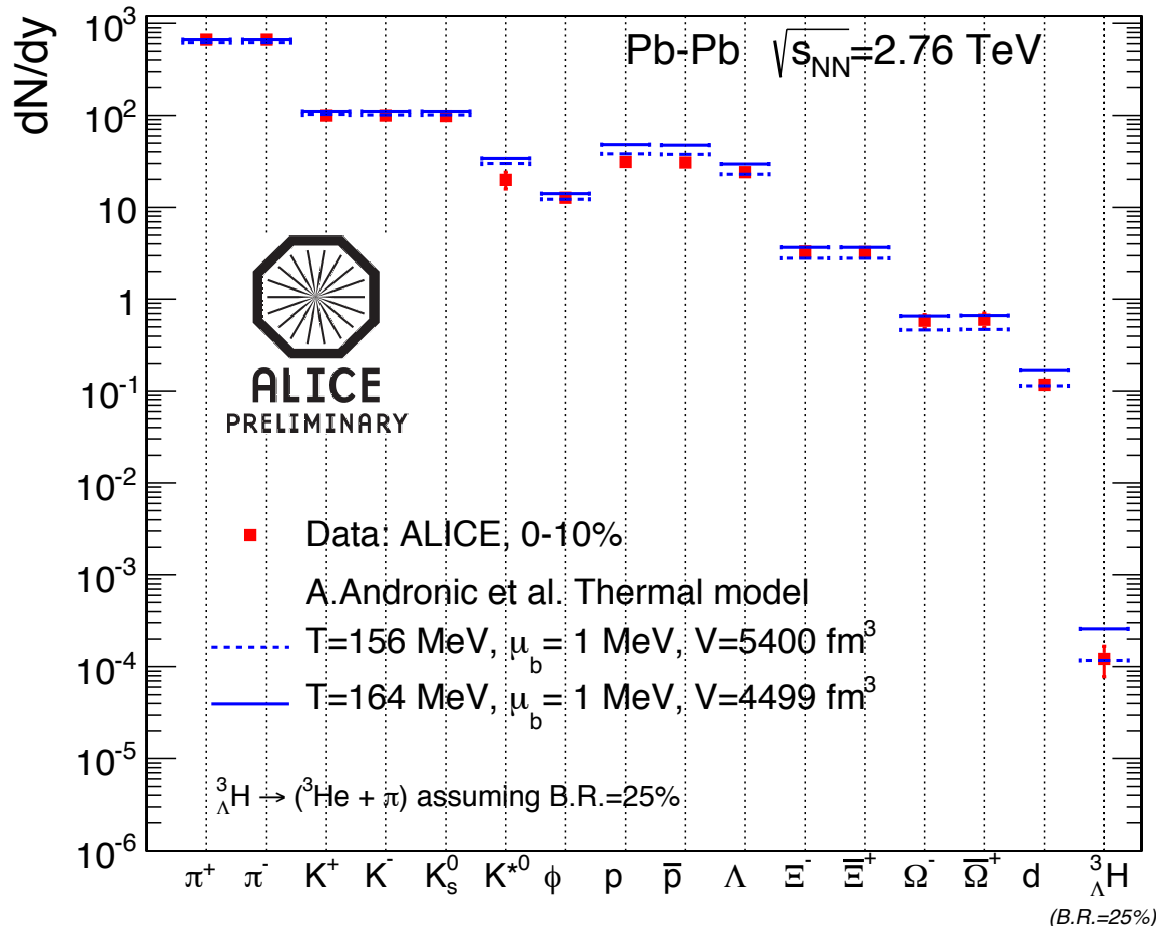
ALI-PREL-28454





Outro Sinal:

# Produção Térmica de Partículas



Idéia Fundamental:

$$N \propto \exp\left(-\frac{m_0}{\tau}\right)$$

**Dimensão de Energia:**  
**Análogo a temperatura**

ALI-PREL-59772

# Anomalia Bariônica, Extra

