

Interações Fortes e Astrofísica

Takeshi Kodama
Instituto de Física
UFRJ

Generalidade:

Competição entre duas formas

Em equilíbrio

Não equilíbrio

Formação de Estrutura

Processos Dinâmicos

Forças da Natureza:

Observável no
Mundo Macroscópico

Observável somente no
Mundo Microscópico

- Forças Eletromagnéticas
- Força Gravitacional

- Interações Fortes
(Forças Nucleares)
- Interações Fracas
(Decaimento β)

Cromodinâmica Quântica

Grande Unificação

Modelo Padrão

Interação Eletrofraca

Exemplo: Gravitação vs. Interações Fortes

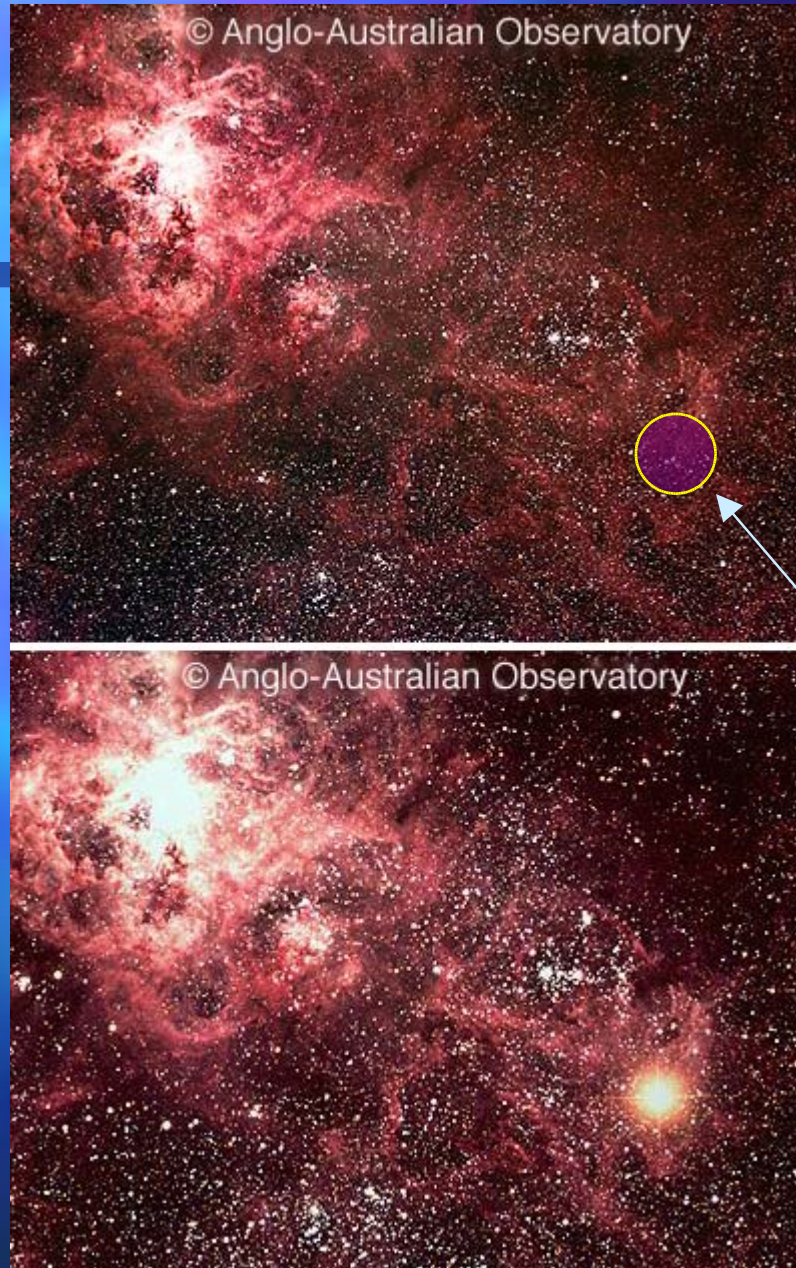


Depois

Antes

SN1987-a

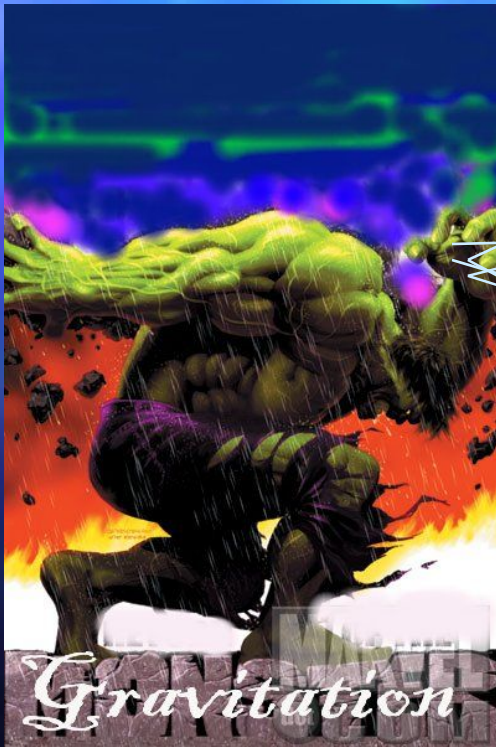
Tarantula



Conflitos no Universo



Estrelando: Força Gravitacional



Característica da força Gravitacional



- Extremamente pequena para um sistema microscópico

Mas:

- Longo Alcance
- Sempre acumulativa



Produzir grandes pressões para sistemas astrofísicos.

Antagonistas:

Forças Nucleares:



- Extremamente forte mas só nas distâncias nucleares.

Interações Fracas:



- Transformam as partículas e produzem neutrinos.

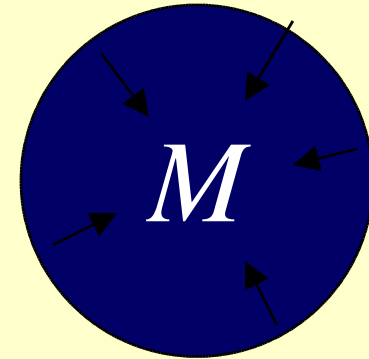
Interações Eletromagnéticas:



- Normalmente neutronizada por elétrons e portanto, substituída pela pressão de elétrons

Pressão causada pela força gravitacional

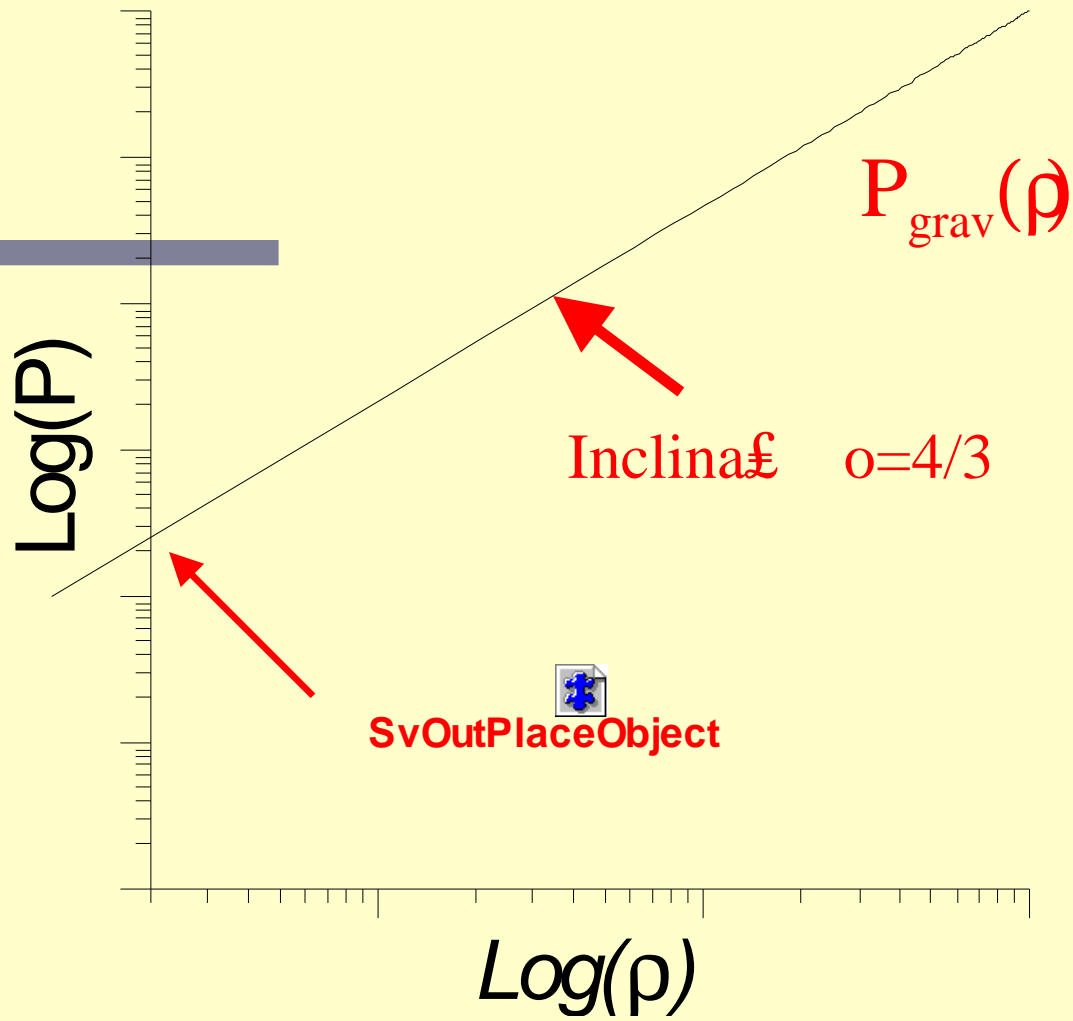
Para uma esfera homogênea de massa M :



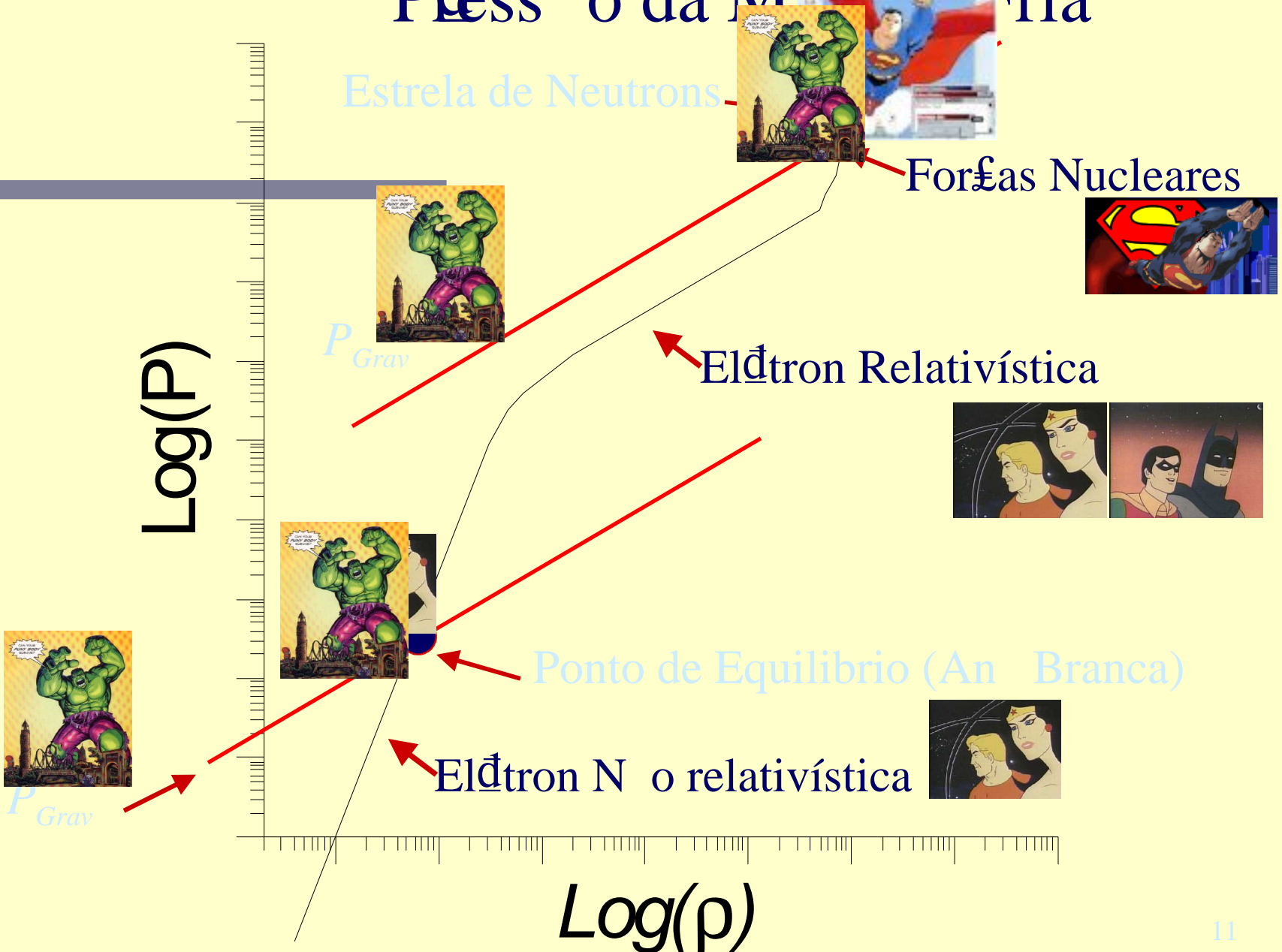
$$P_{Grav} = -\frac{dE_{Grav}}{dV}, \quad E_{Grav} = -\frac{3}{5}G \frac{M^2}{R} = -\frac{3}{5} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} G \frac{M^2}{V^{1/3}},$$



$$P_{Grav} = Const. \times M^{2/3} \rho^{4/3}.$$



Pressão da Matéria Fria

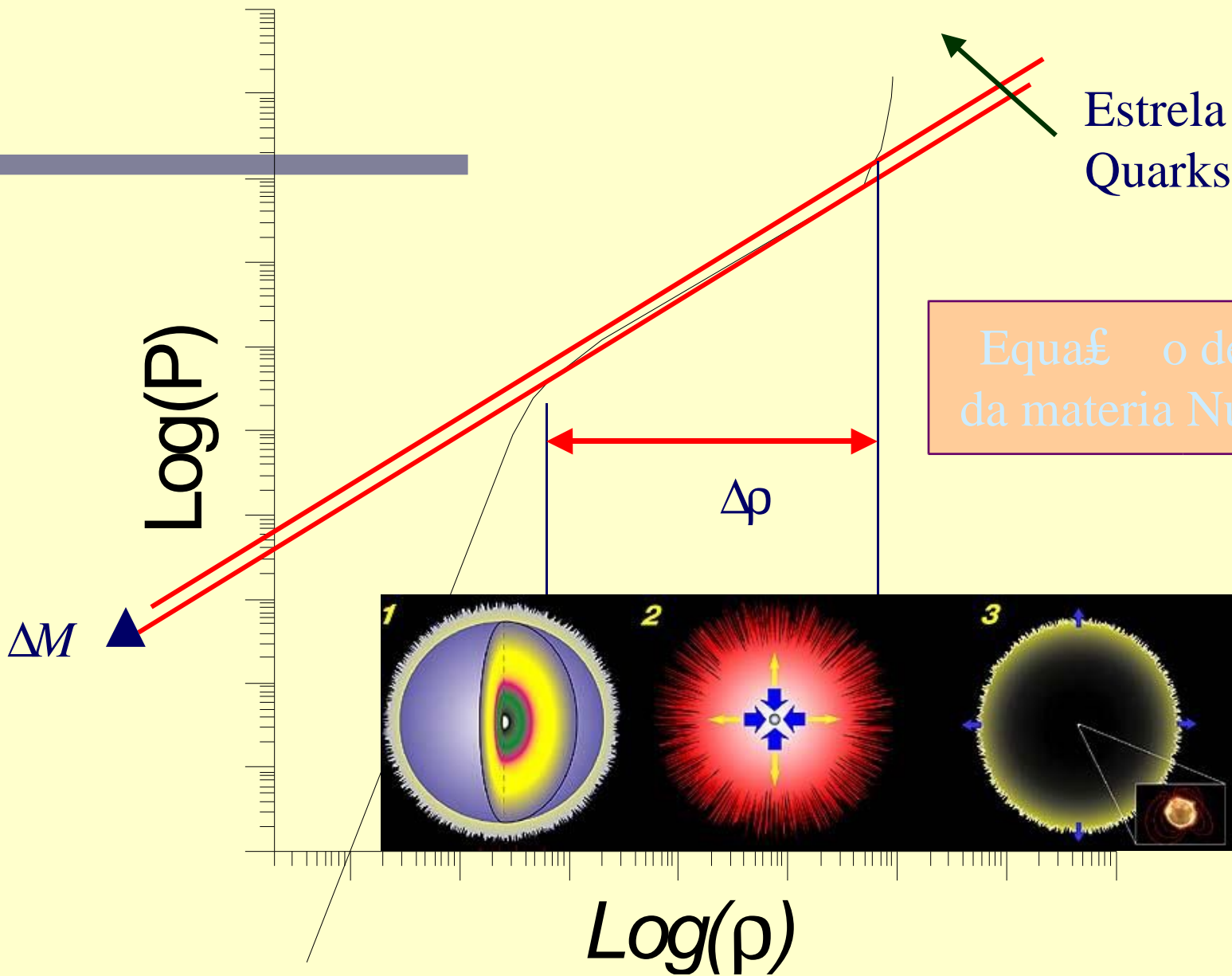


Implosão Gravitacional →

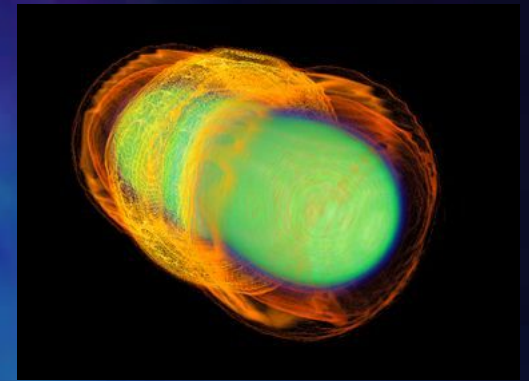
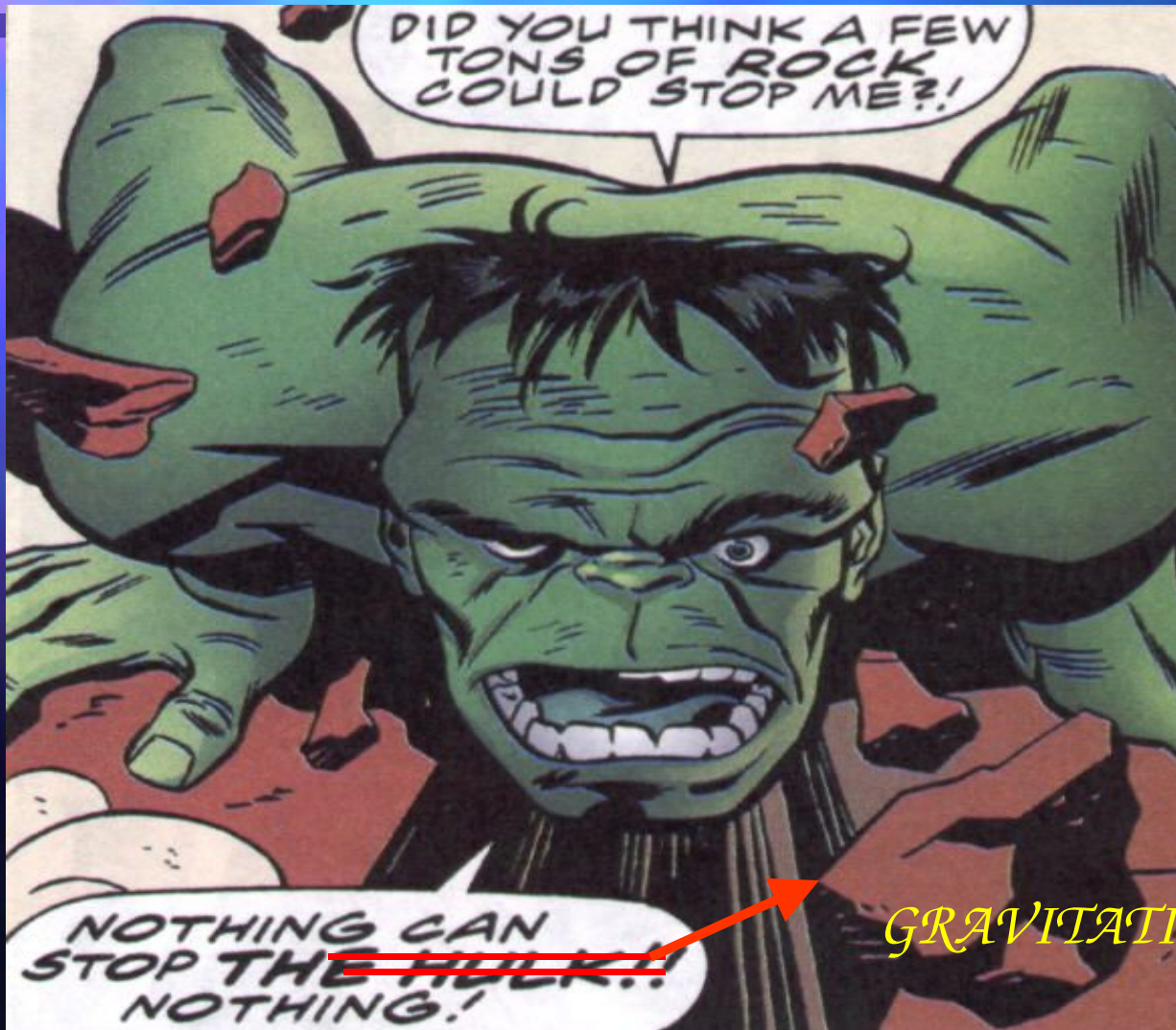
Supernovas

Estrela de Quarks ?

Equação de Estado da matéria Nuclear ??



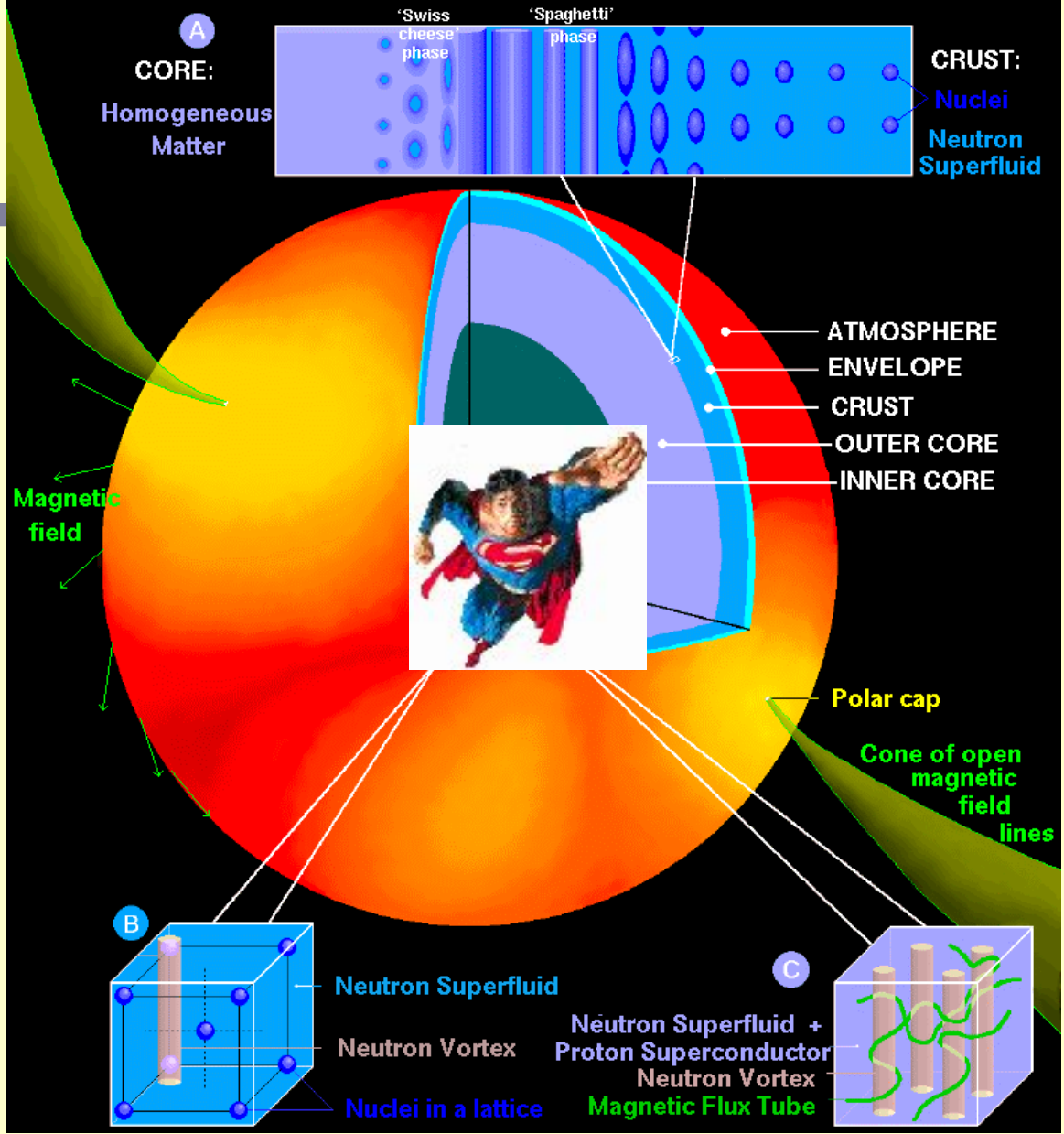
Se a massa \bar{d} ainda maior ,...



.. buracos negros

GRAVITATION

A NEUTRON STAR: SURFACE and INTERIOR

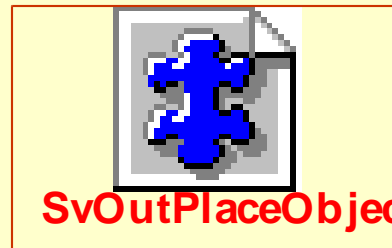


Historico de Interações Fortes

- 1947 - descoberta de pion (Yukawa-Lattes)
- '50 - descobertas de várias partículas elementares (hádrons) – modelo composto Sakata - (p, n, λ) – Uso de Teoria de Grupo para classificação de partículas ($U(3)$)
- 1961 - Gell-Mann, Ne'emann → Grupo ($SU(3)$)
- 1964 - Gell-Mann (quarks) , Zweig (aces) → Teoria de Interações Fortes em termos de teoria de Calibre – Cromodinâmica Quântica

Quarks

quarks

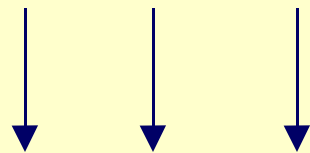


antiquarks

\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}
\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}

$\leftarrow Q_e = -2/3 \quad B = -1/3$

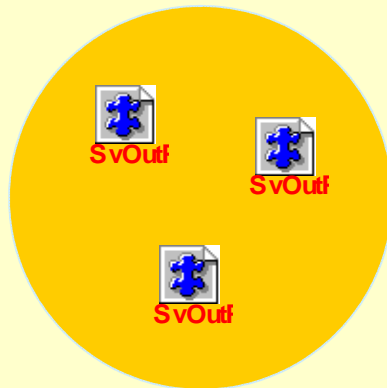
$\leftarrow Q_e = 1/3 \quad B = -1/3$



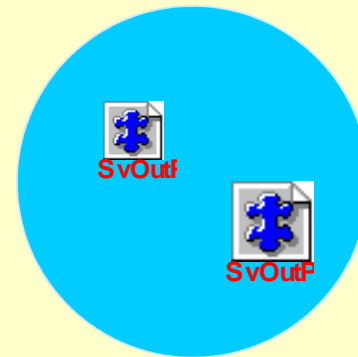
I **II** **III**

Hádrons

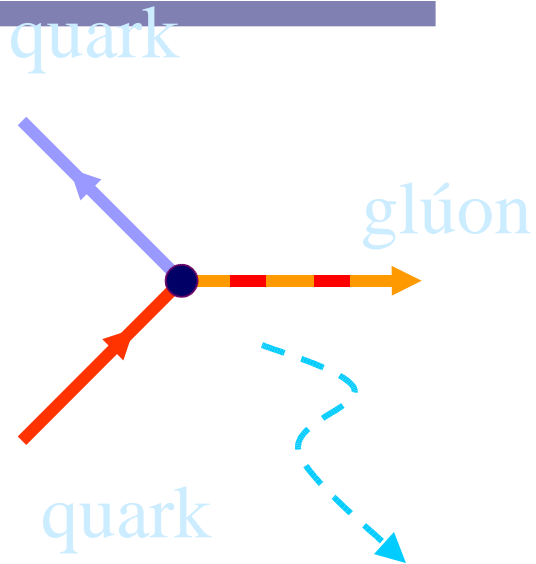
Bárions
(Protons, Neutrons..)



Mēsons
(Pions, Kaons..)



Glúons



Glúon:


SvOutPlaceObject

$$Q^2 = 18$$

A cor d conservada:

$$Q_{quark(i)} = Q_{quark(f)} + Q_{gluon}$$

Eletromagnetismo vs. Cromodinâmica Quântica

QED

QCD



Fótons

Glúons

Elétrons

Quarks

Átomos

Partículas Elementares

Forças Moleculares
(van der Waals)

Forças Nucleares



Carga Escalar

Carga Vetor (cores)

Energia de Ionização finita

Energia de Ionização infinita

Fótons não carregados

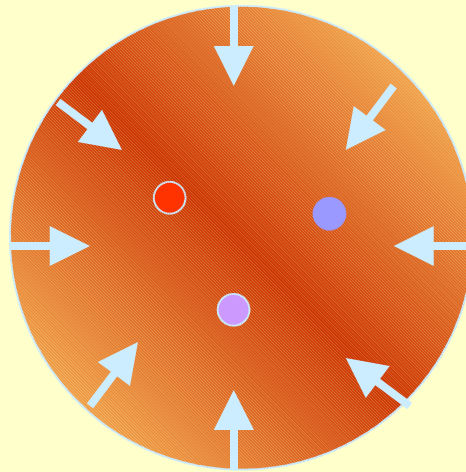
Glúons são carregados de cor

Quarks livres não são permitidos

Confinamento de Cor



Quarks cria uma bolha (vácuo de QCD) no vácuo físico

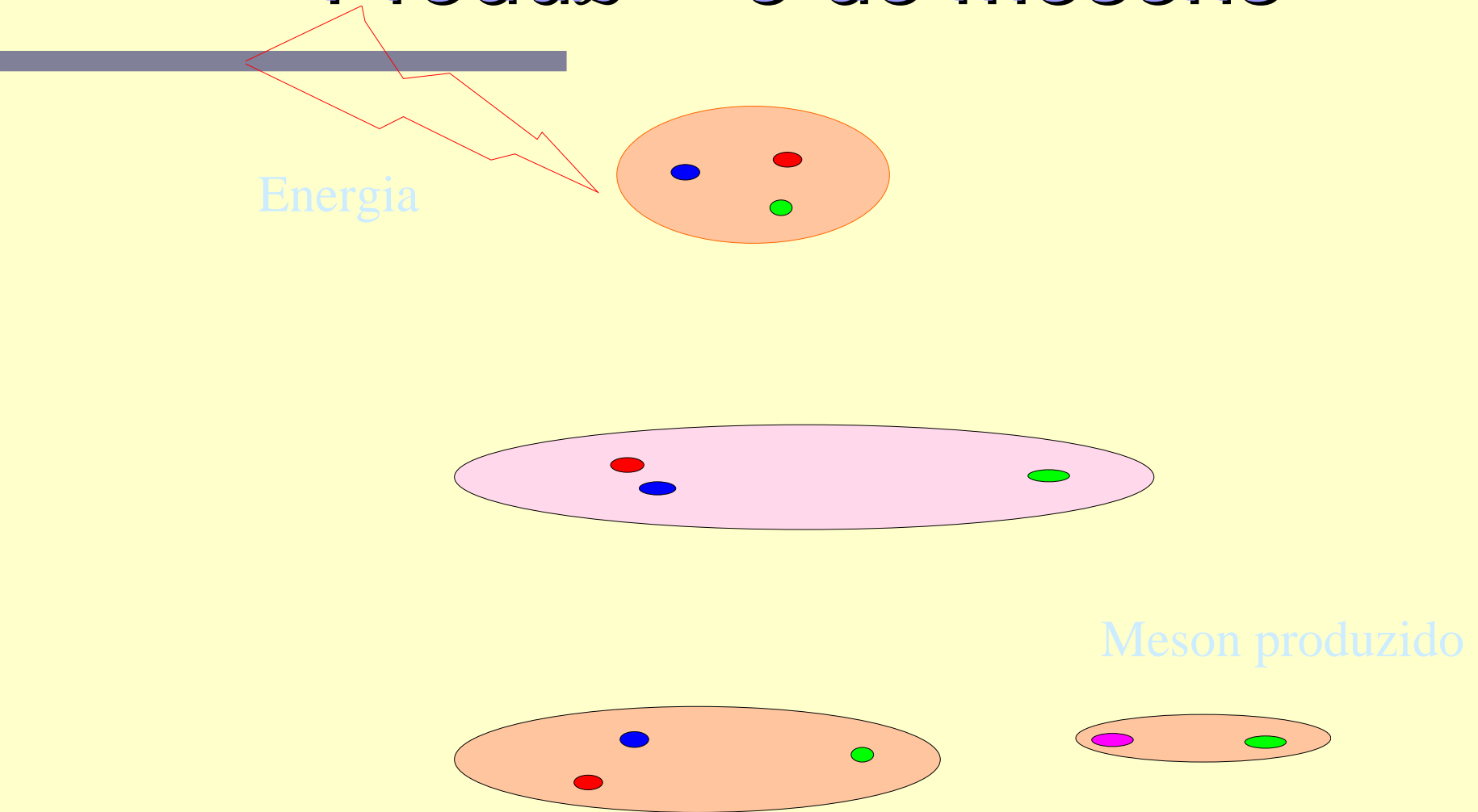


$$E_{\text{vácuo}} = B V$$

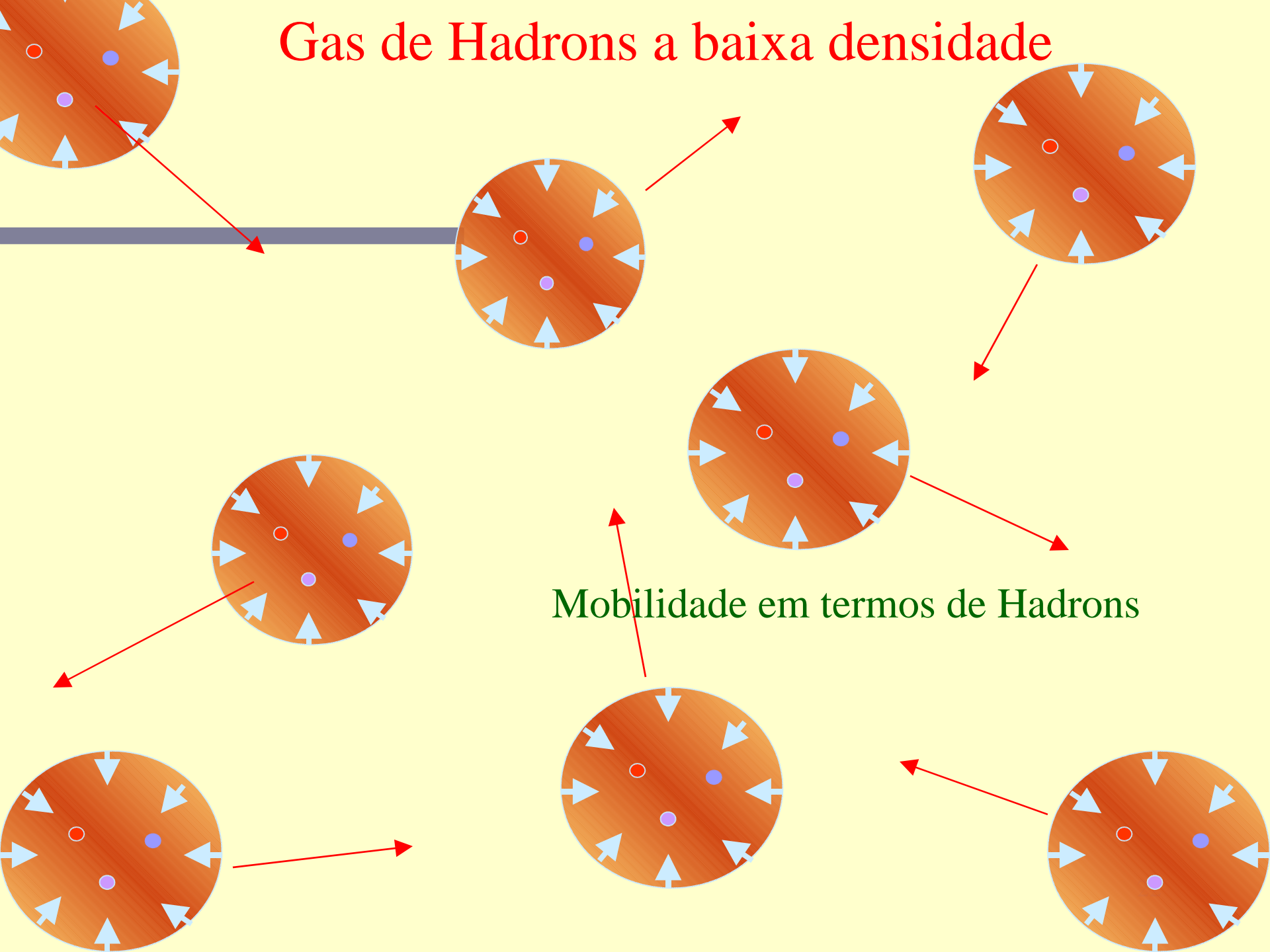
$$P_{\text{vácuo}} = -B$$

$B =$ "pressão do vácuo"

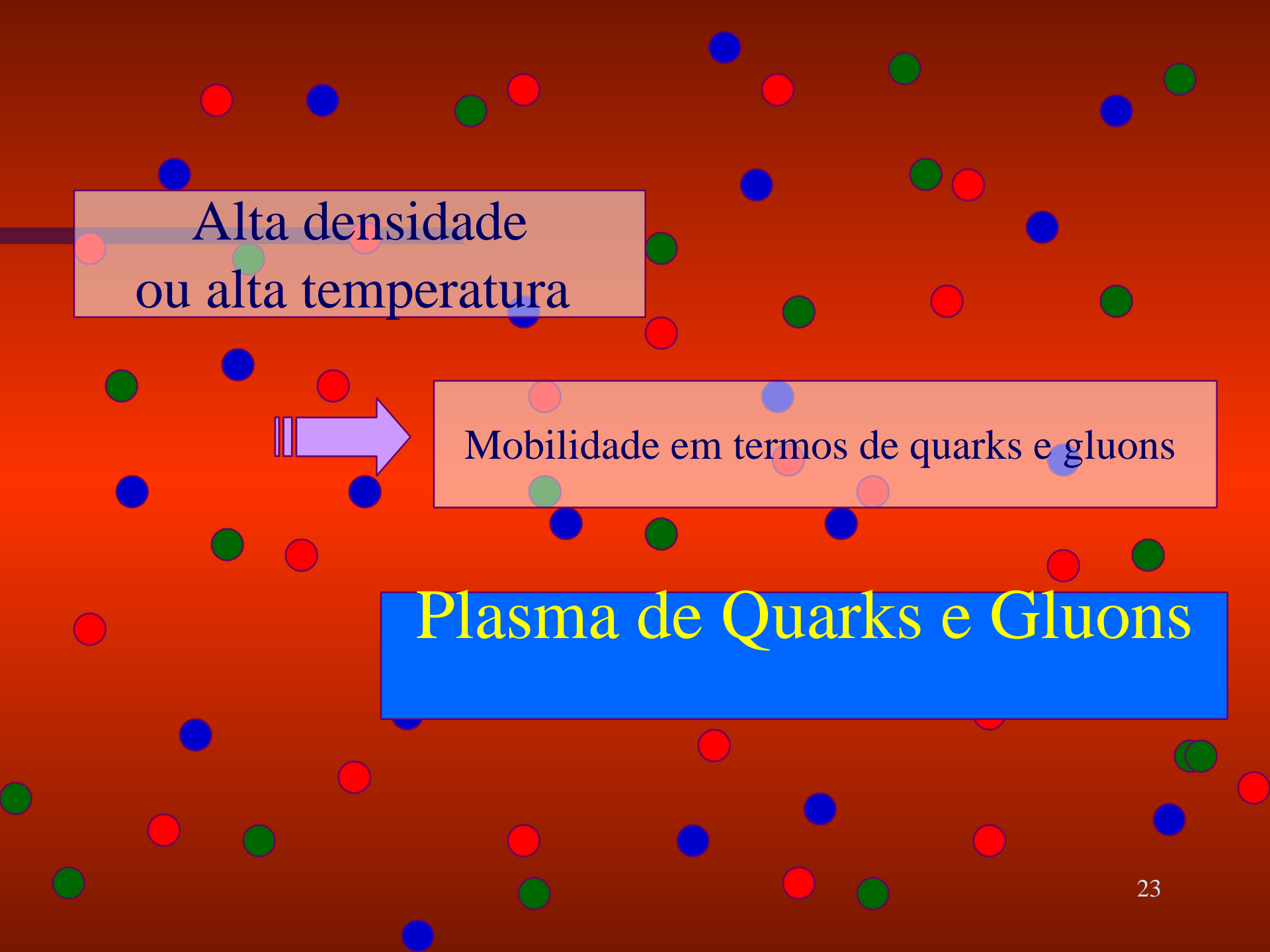
Confinamento de quarks e Produção de mesons



Gas de Hadrons a baixa densidade



Mobilidade em termos de Hadrons



Alta densidade
ou alta temperatura

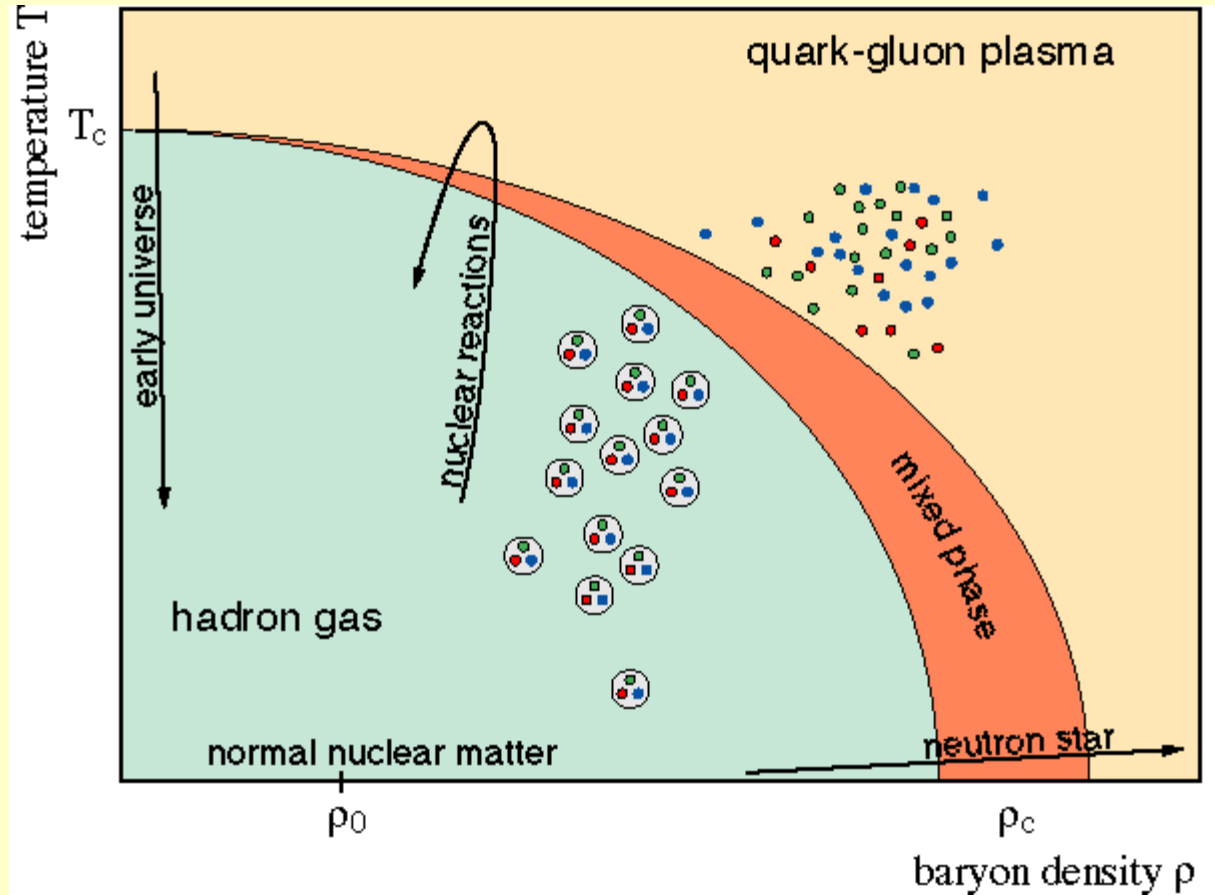


Mobilidade em termos de quarks e gluons

Plasma de Quarks e Gluons

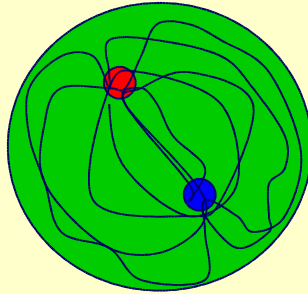
Diagrama de Fases da Matéria Nuclear

T



Uma outra vis ão de Hadron vs. Vacuum

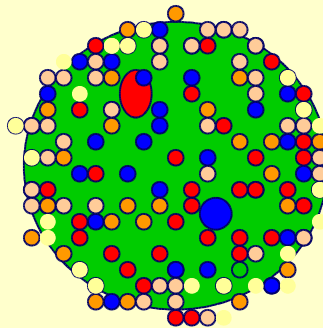
Grande Δ



Baixa Energia

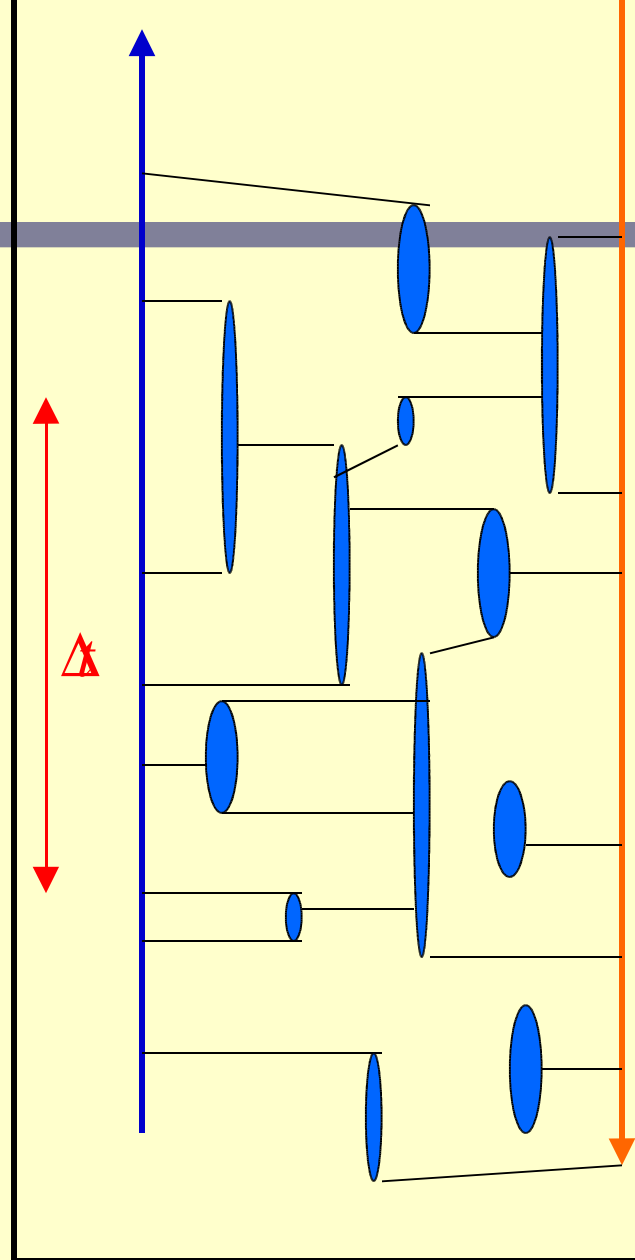


Pequeno Δ

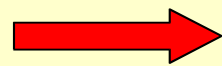


Alta Energia

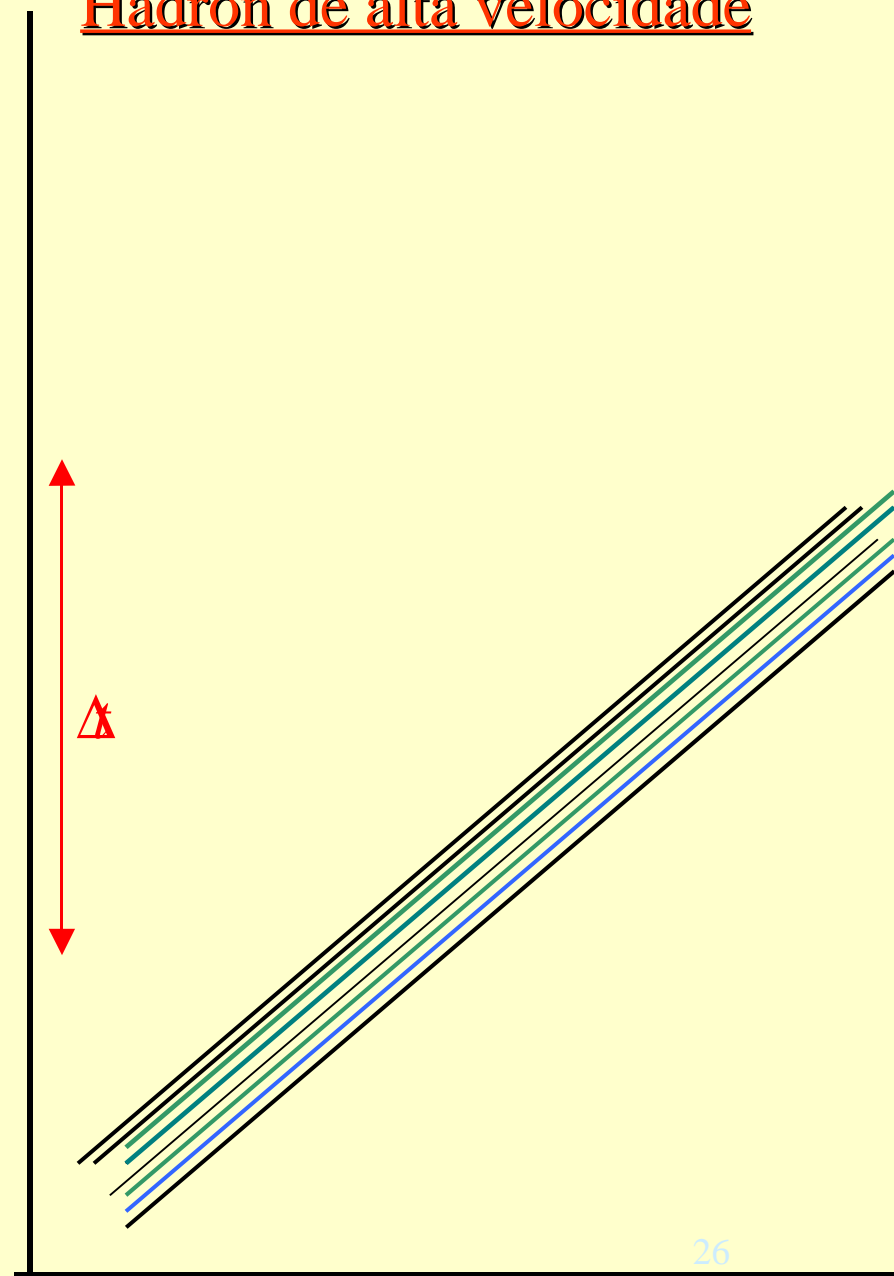
Hadron parado



Boost



Hadron de alta velocidade



t: pequeno - alta T

Estados virtuais



Graus de liberdade real

Exemple: Weizäcker-Williams Fóton Virtuais

Em QCD,

Transição de Fase para o estado Deconfinado !

Transição de fase do VACUO

→ Emerge algo qualitativamente diferentes ??

Vamos cozinhar e derreter os hadrons ...

Como cozinhar ? Precisa-se uma panela ... Ions Pesados !!

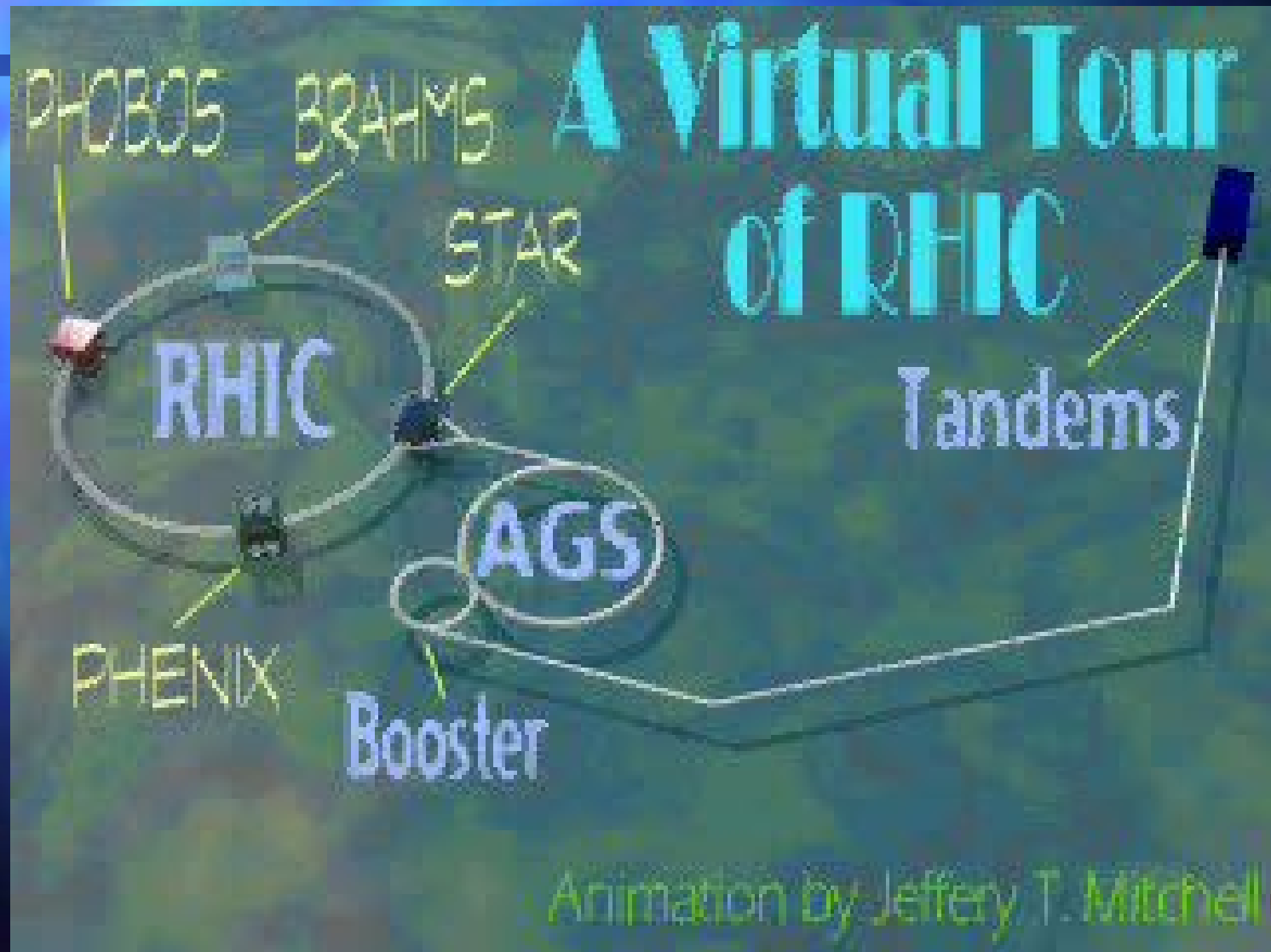
Experimentos

- Antes '70 : Colisões Nucleares eram “persona nongrata”
- '70 : p-A, h-A
- '80 : LBL, Dubna, GSI $\sqrt{s} \leq 1 \text{ GeV/A}$
- '90 : AGS (BNL) , SPS (CERN)
- 2000 : RHIC (BNL) $\sqrt{s} \leq 200 \text{ GeV/A}$
- 2007(?) : LHC (CERN) $\sqrt{s} \sim \text{TeV/A}$

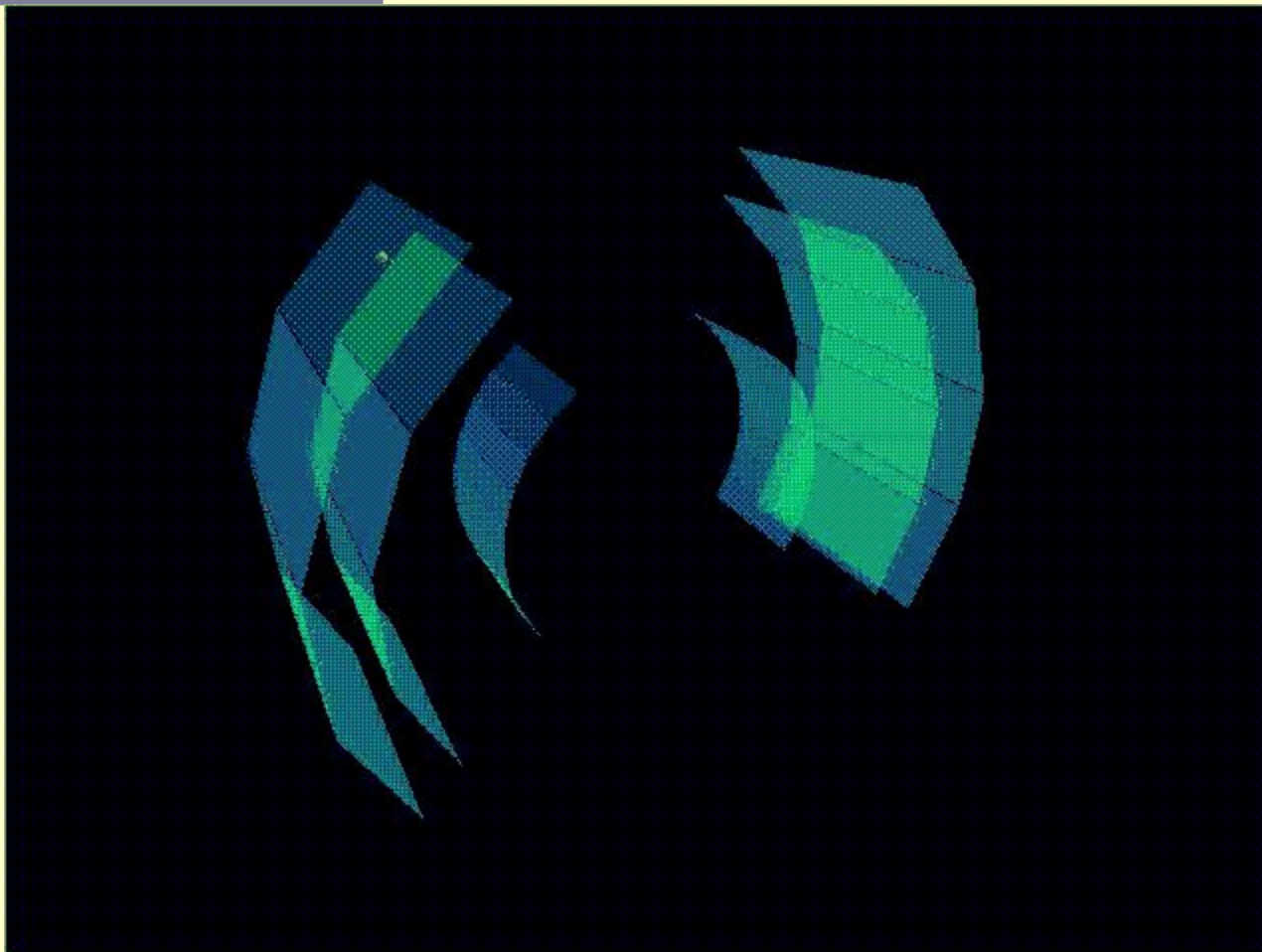
RHIC/Brookhaven



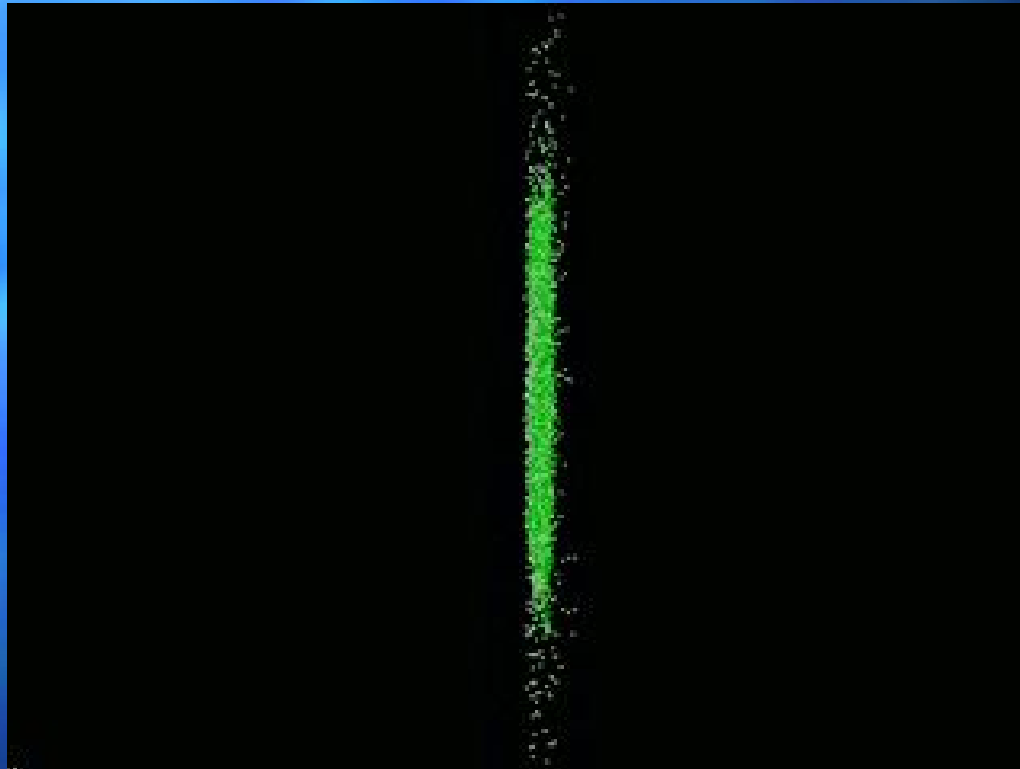
Acelerador de Ions Relativisticos - RHIC

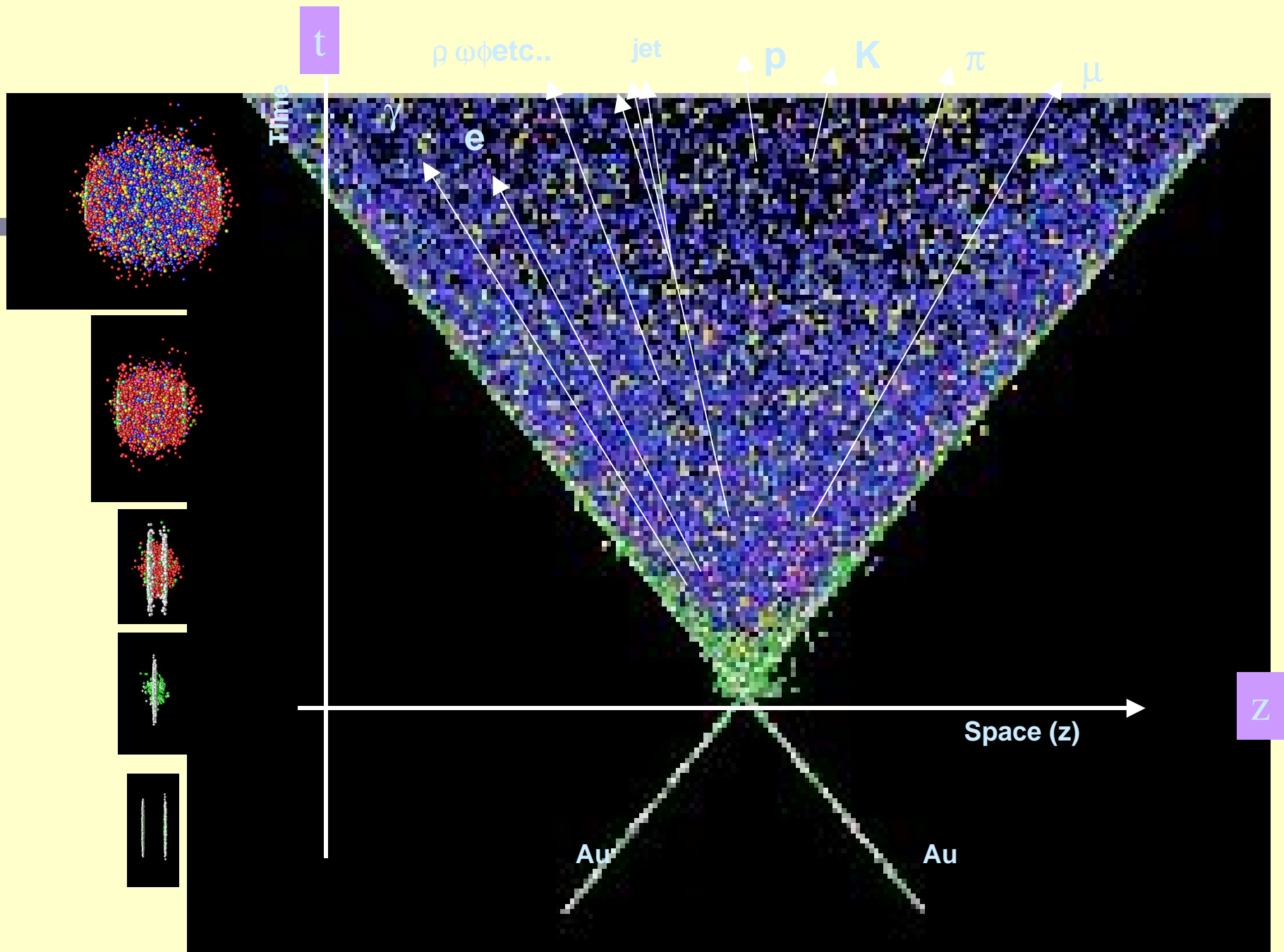


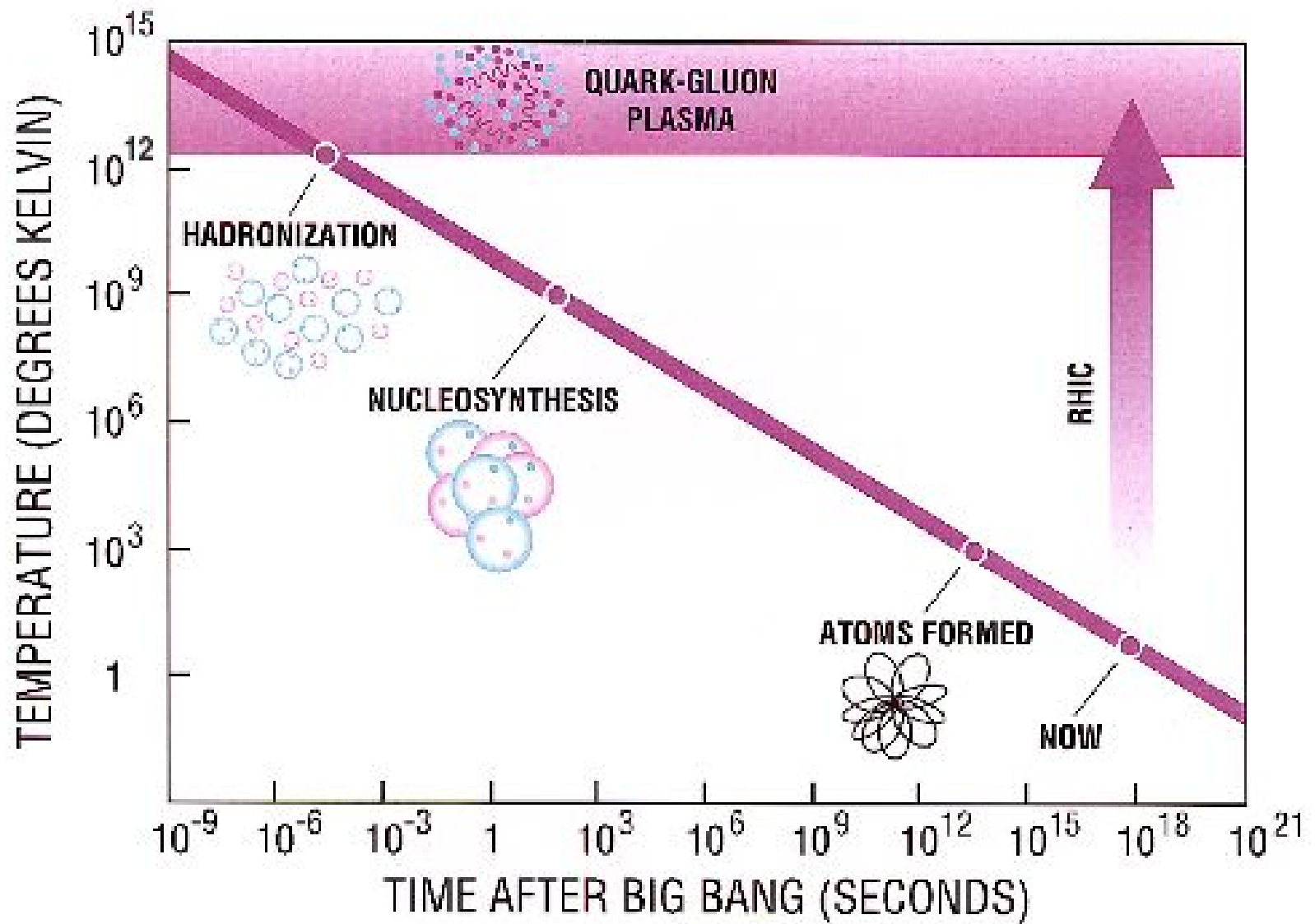
Detección de partículas



Simulação de Colisão Nuclear







Como é possível saber das propriedades do QGP derretido depois totalmente esfriado?

Algo análogo à situação como...



Lorentz Contraction

PIZZERIA QGP

*The best juicy Melted Hadronic flavors
with the famous RHIC oven (NEW!!)*



QGP Delivery



De S o Paulo ao Rio !!

Pizza Gelada !
(freezed-out hadrons)

Sinais: Indicador de Propriedades Termodinamicas

Sistema finito, tempo finito

Macroscópica (propriedades globais)

(N o perturbativa)

Equação de Estado → Reflete no Espectro (via dinâmica)

Propriedades Químicas → Enriquecimento (ou supressão) de certos sabores

Mudança de simetria → Hadronic Mass shifts, DCC

Semi-Macroscópica

Fluctuações → Origem estatística - tipo de ensemble

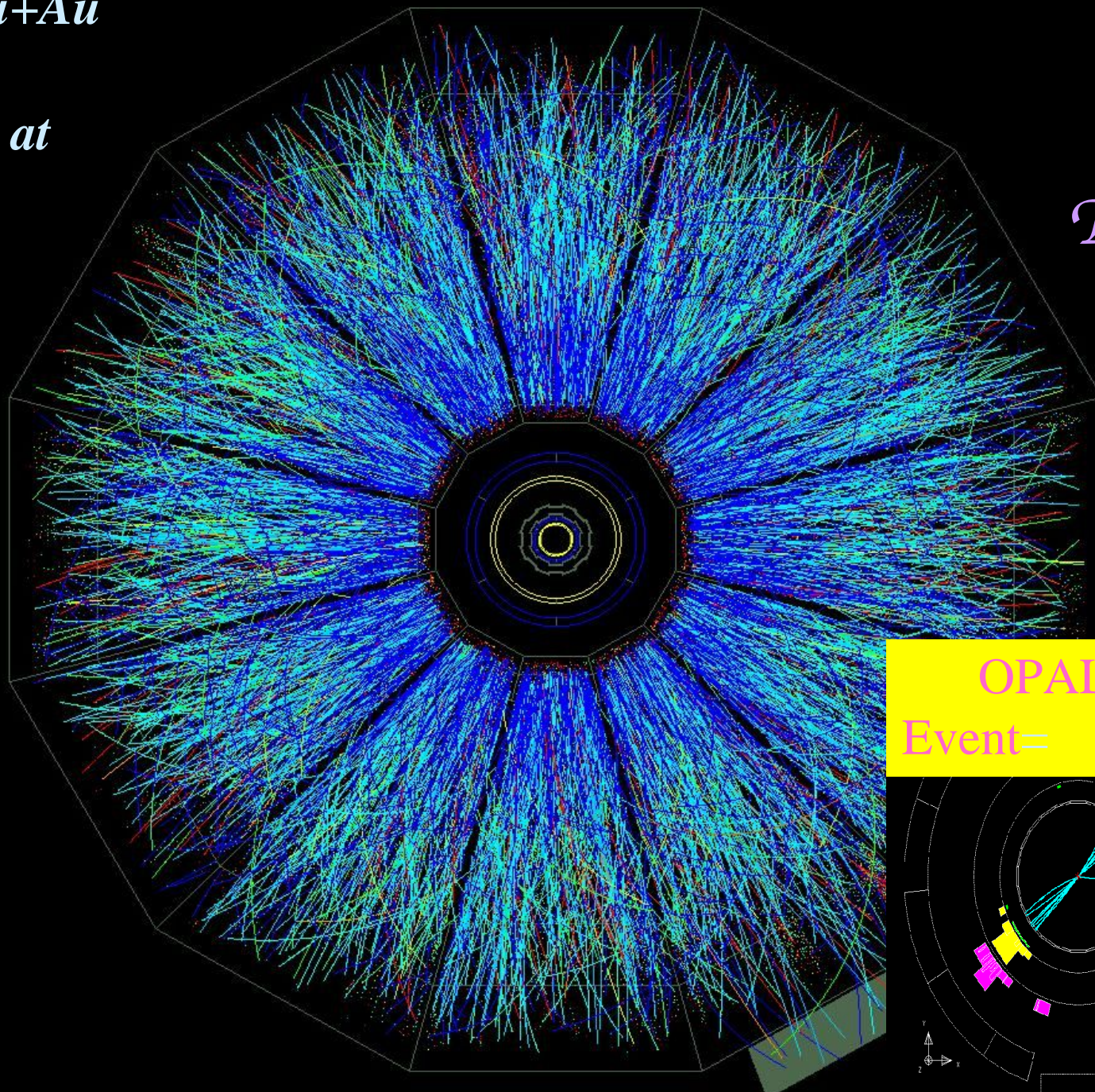
(cargas, multiplicidade,..) → Origem dinâmica - formação de domínios

Microscópica (graus de liberdades de QCD, perturbativa)

Produção de Fóton e Leptons → Dinâmica de gluons

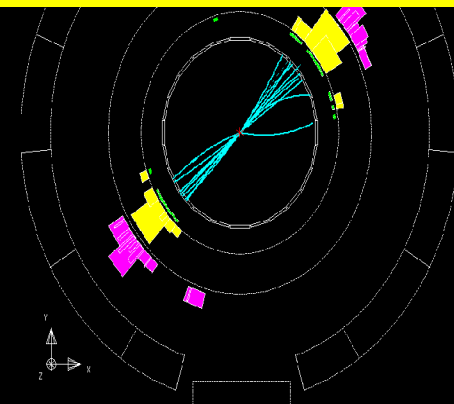
Dinâmica de Jet → Jet quenching

*STAR Au+Au
Central
Collision at
200 GeV*



TPC

OPAL Jet
Event=



Single Particle Spectra:

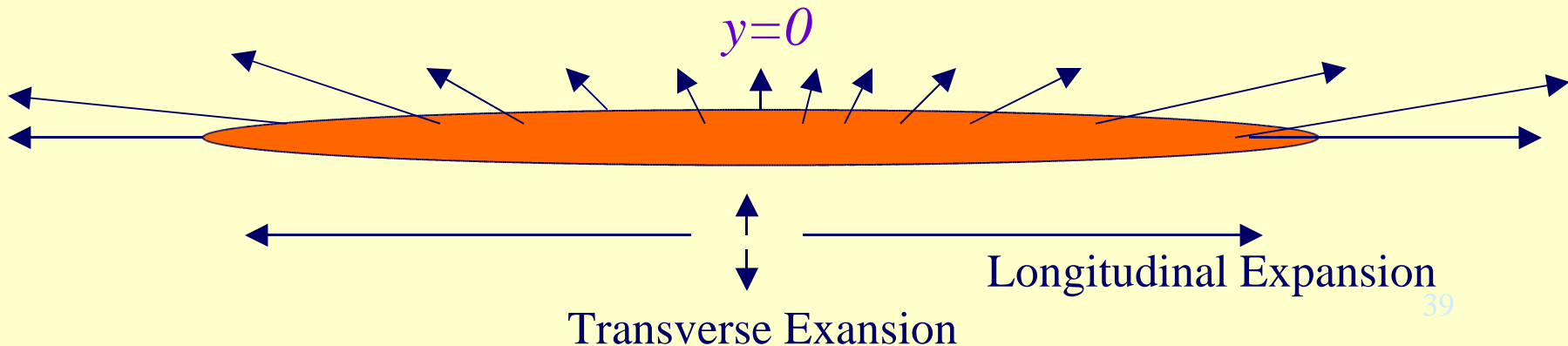


SvOutPlaceObjec

Rather: $\frac{d^3\sigma}{dydp_T^2}$ or $\frac{d^3\sigma}{d\eta dp_T^2}$

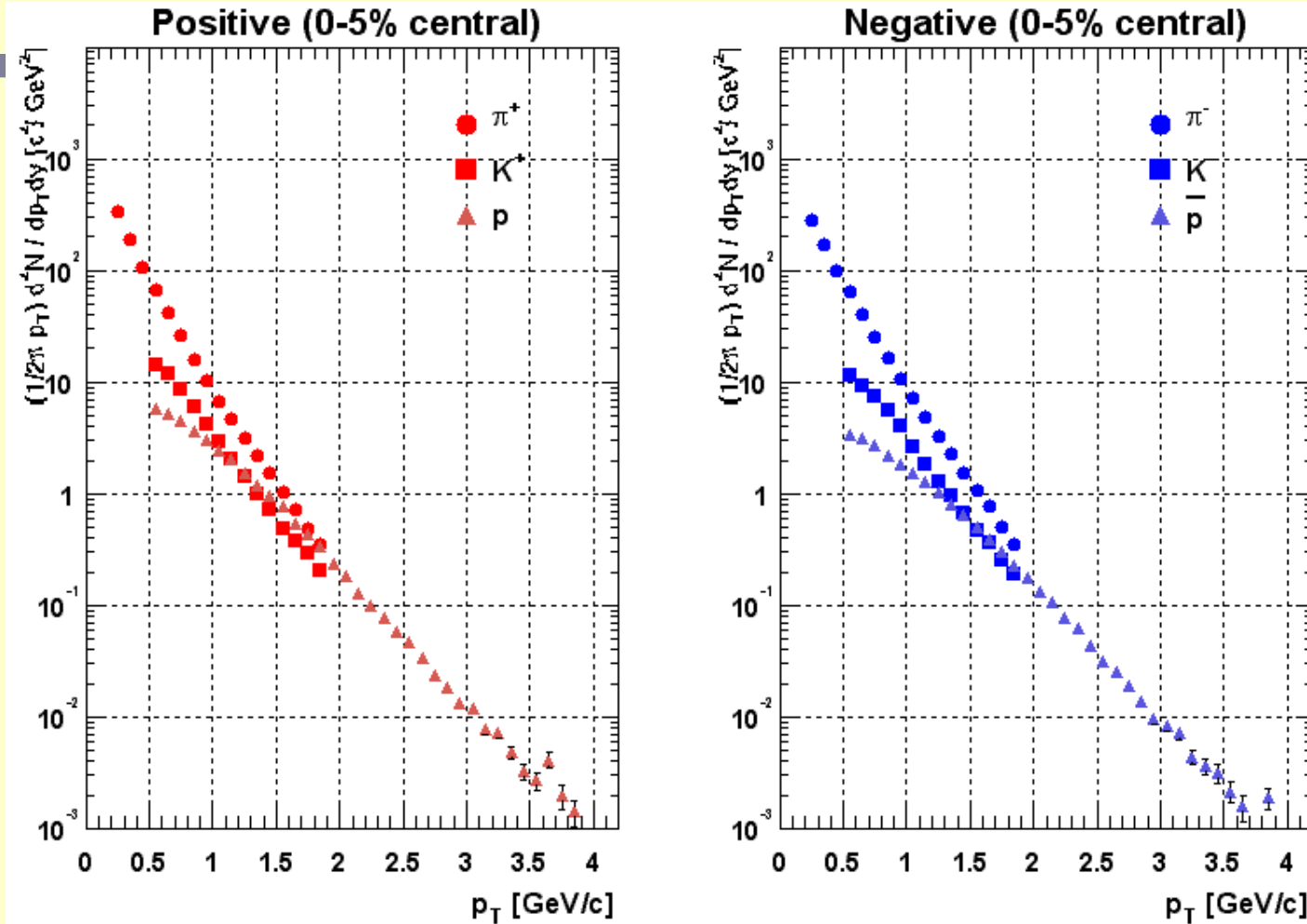
y (rapidity): $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$

η (pseudo-rapidity): $\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{p + p_z}{p - p_z} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \cos\theta}{1 - \cos\theta}$

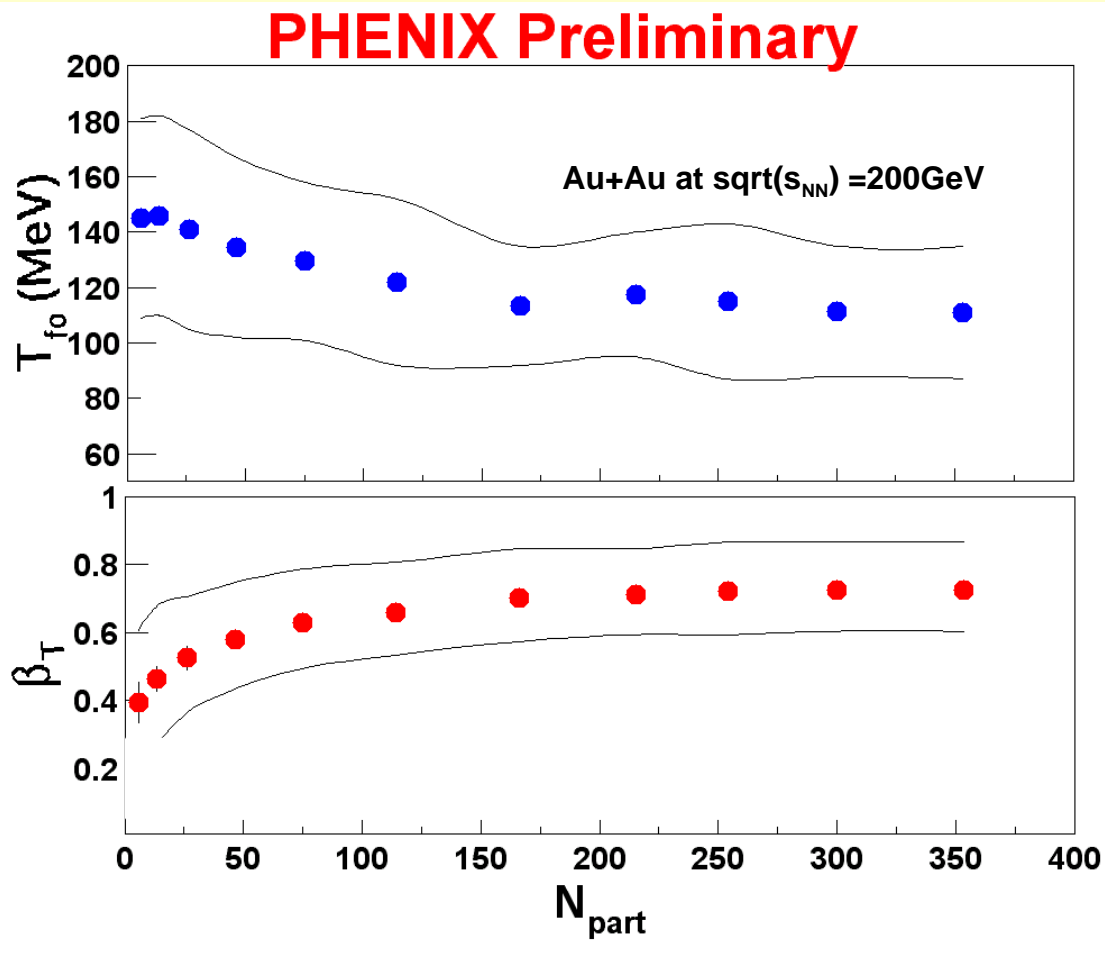


Espectro de Partículas

$$\frac{d^3\sigma}{dy dp_T^2} \text{ próximo de } y=0$$



Termico + movimiento colectivo (fluido)

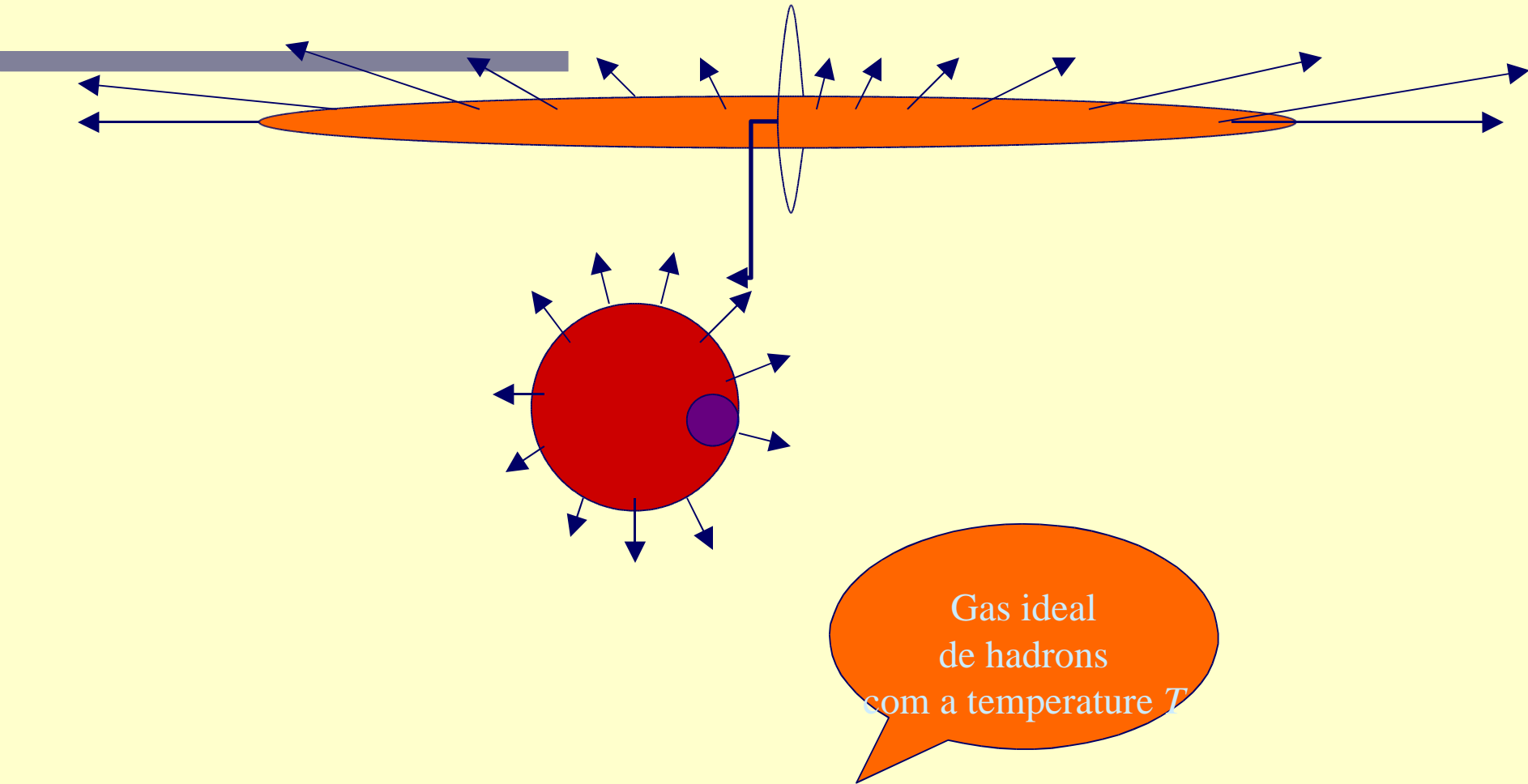


**Most central collisions
for 200 GeV data**

Freeze-out Temperature
 $T_{fo} = 110 \pm 23 \text{ MeV}$

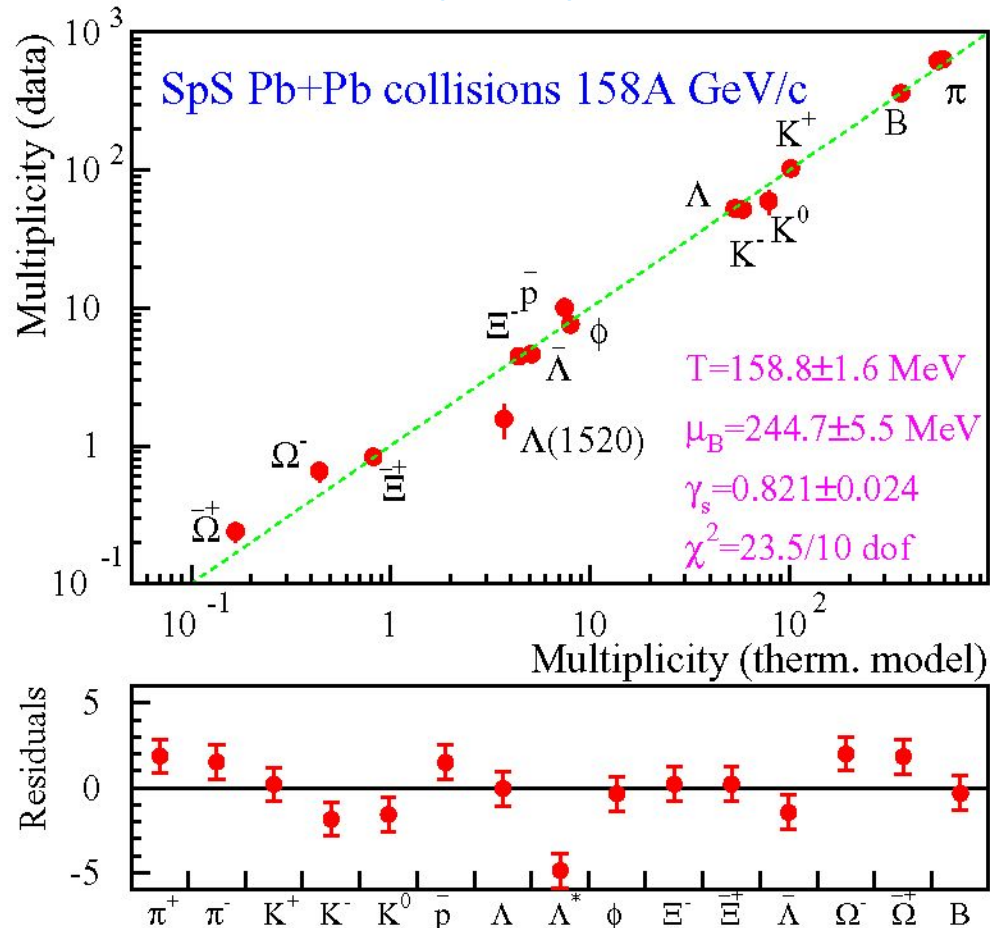
Transverse flow velocity
 $\beta_T = 0.7 \pm 0.2$

Significa:



Statistical Models: from AGS to RHIC

M. van Leeuwen (NA49)



Different implementation of statistical model (Kaneta/Nu, Beccatini, PBM et al., ...)

Fact: all work well at AGS, SPS and RHIC

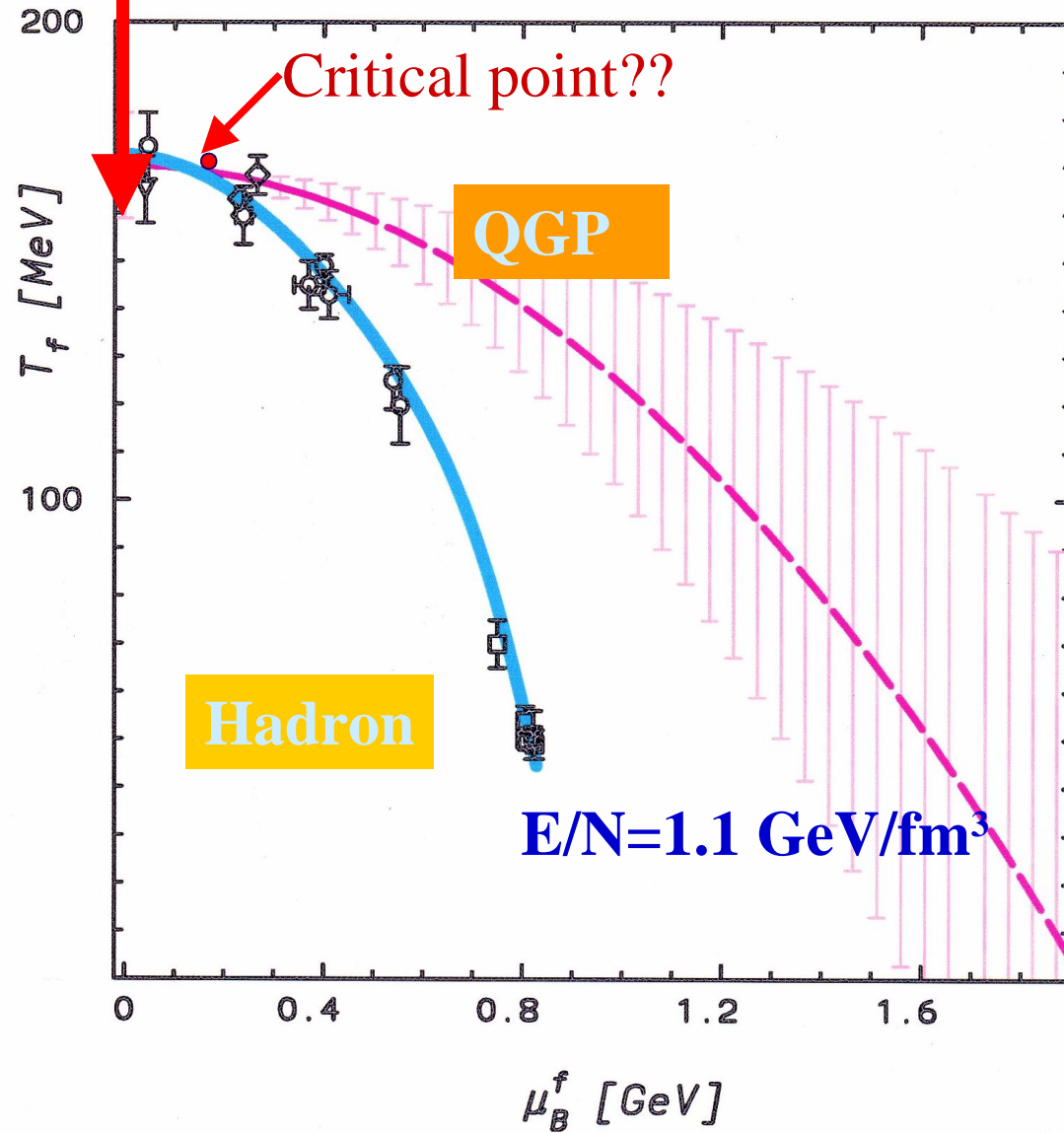
Slight variations in the models, but roughly:

	T_{ch} [MeV]	μ_B [MeV]
AGS	125	540
SPS	165	250
RHIC	175	30

All indicate the chemical equilibrium !!...

Fit by Beccatini using total yields from NA49
 hadron gas fit with partial strangeness saturation

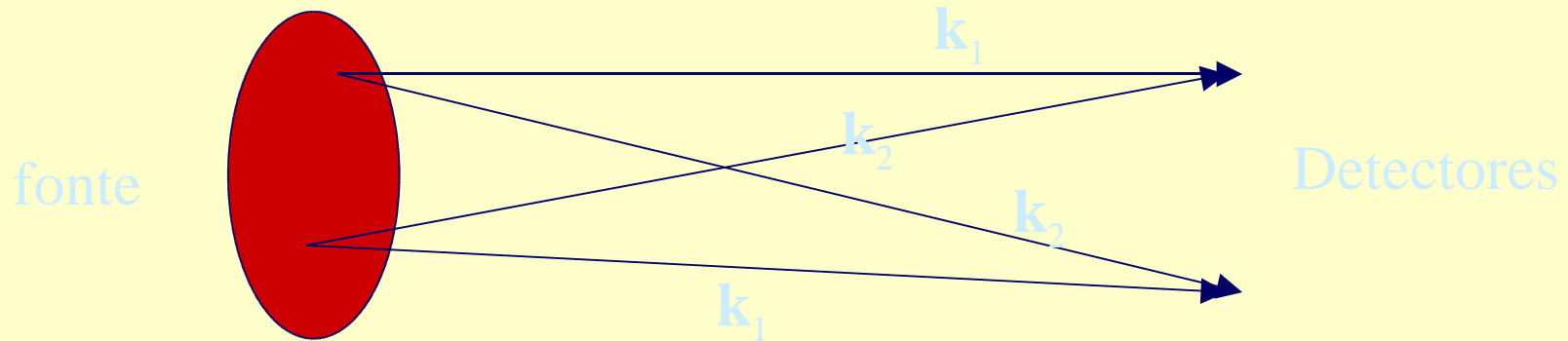
Early Universe



Aplicação do Método Astrofísico

•Hambury-Brown-Twiss (HBT) Interferometria

Medida simultanea de 2 bosons de uma fonte extensa



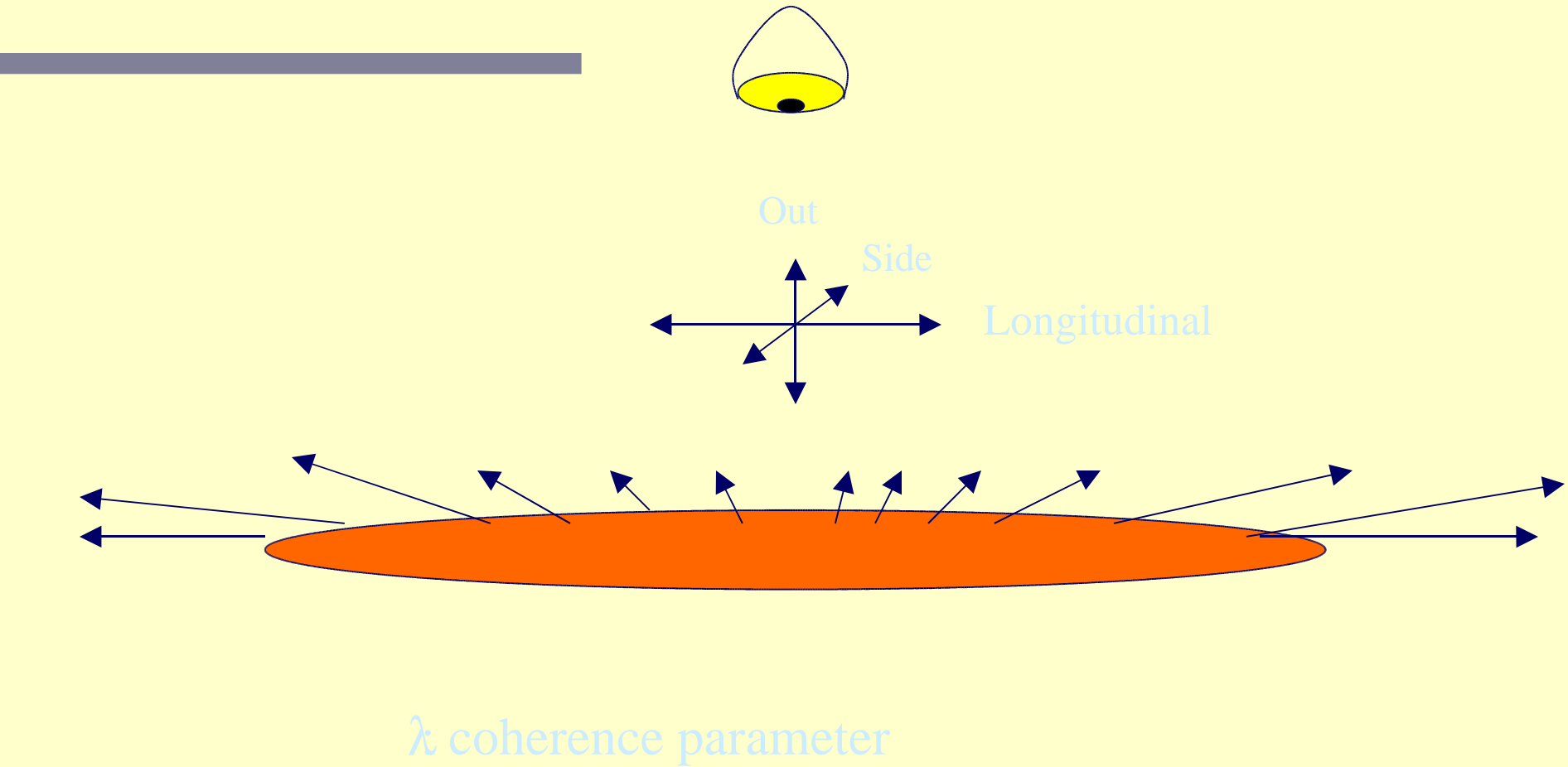
$$C_2(k_1, k_2) \equiv \frac{P_2(k_1, k_2)}{P_1(k_1)P_1(k_2)}$$

$$= 1 + |\rho_{eff}(q; k)|^2$$

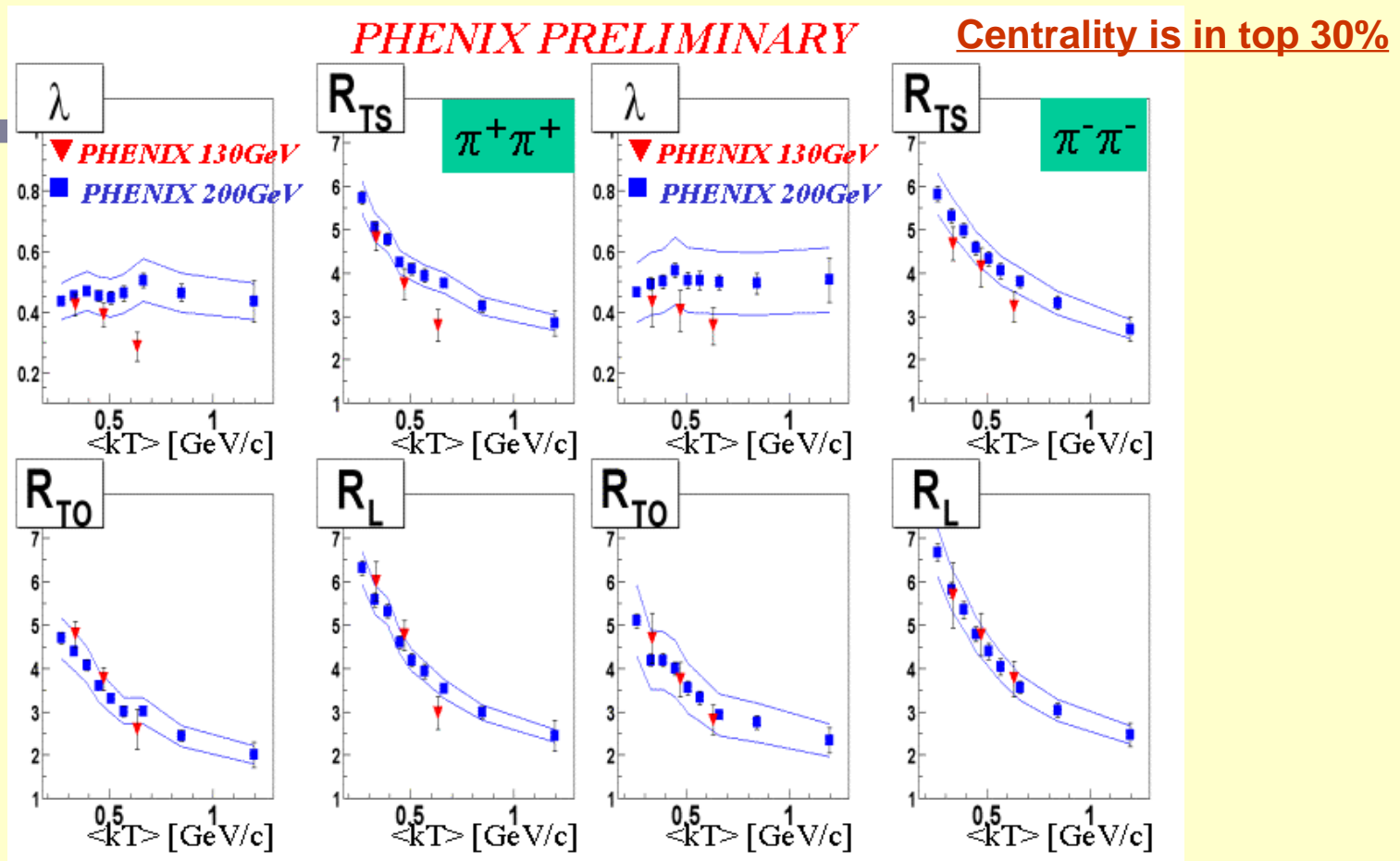
$\rho_{eff}(q, k)$: Transformada de Fourier
da fonte com

$$q = k_1 - k_2, \quad k = (k_1 + k_2)/2$$

$$C_2 = 1 + \lambda \exp\left(-R_{\text{side}}^2 q_{\text{side}}^2 - R_{\text{out}}^2 q_{\text{out}}^2 - R_{\text{long}}^2 q_{\text{long}}^2\right)$$



Dependência em k_T de R



- **Broad $\langle k_T \rangle$ range : 0.2 - 1.2 GeV/c**
 - **All R parameters decrease as a function of k_T**
 ⇒ **consistent with collective expansion picture.**
 - **Stronger k_T dependent in R_{long} have been observed.**
- k_T : average momentum of pair

Summary:

Uma boa controle sobre a geometria da colisão

QGP

Evidências

HBT-Medida de geometria da fonte

Deve ser checado.. (fluctuações)

Particle ratio, Spectros

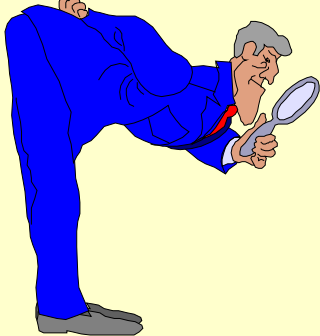
Ainda

- J/Psi
- mass shifts
- jets
- Direct Photon
- V_2

Circunstancial!

Aspectos a ser investigado :

Equilíbrio Local!



Descrição Hidrodinamica (shocks, instabilities,..)

- Gluon Saturation
- Color Condensate
- LQCD
- Higher dimension..

Critical Point?

Initial Condition?

Experimentos @ LHC

CERN/Genebra



PORQUE IONS PESADOS no LHC?

.... Salto de fator 30 em \sqrt{s} ..

Melting Flavor LHC PIZZA!

Quanto Mais Quente e Mais longa Melhor...

Coming Soon!

- 1 $\epsilon_{\text{LHC}} > \epsilon_{\text{RHIC}} > \epsilon_{\text{SPS}}$
- 2 $V_{\text{f LHC}} > V_{\text{f RHIC}} > V_{\text{f SPS}}$
- 3 $\tau_{\text{LHC}} > \tau_{\text{RHIC}} > \tau_{\text{SPS}}$

Mas Processos “Hard” !

Central collisions	SPS	RHIC	LHC
\sqrt{s} (GeV)	17	200	5500
dN_{ch}/dy	500	650	3-8 $\times 10^3$
ϵ (GeV/fm ³)	2.5	3.5	15-40
V_{f} (fm ³)	10^3	7×10^3	2×10^4
τ_{QGP} (fm/c)	<1	1.5-4.0	4-10
τ_0 (fm/c)	~ 1	~ 0.5	<0.2

