RECRIANDO O BIG BANG NO LABORATÓRIO

RECRIANDO O BIG BANG NO LABORATÓRIO 0,000001 S APÓS SEU INÍCIO

Frédérique Grassi (Instituto de Física-USP)

Não discutaremos a origem do Big Bang.

OBJETIVO MAIS PRECISO DESTA PALESTRA:

1. Ligar previsão teórica (plasma de quarks e gluons) e dados.
2. Explicitar o uso da hidrodinâmica para fazer esta ligação.

O PLASMA DE QUARKS E GLUONS

O que é que tem nesta poção mágica?

Uma pergunta mais geral:

Do que é feita a matéria?

Uma pergunta mais geral:

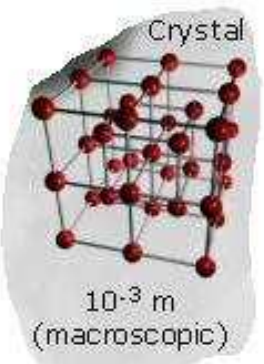
Do que é feita a matéria?

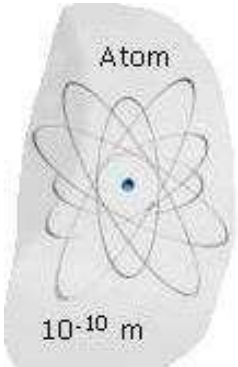
Por exemplo, do que é feito um menhir?

Uma pergunta mais geral:

Do que é feita a matéria?

Por exemplo, do que é feito um menhir?
Cristais de silício e depois ?





Os núcleons por sua vez são formados por quarks, mantidos juntos pelos gluons.

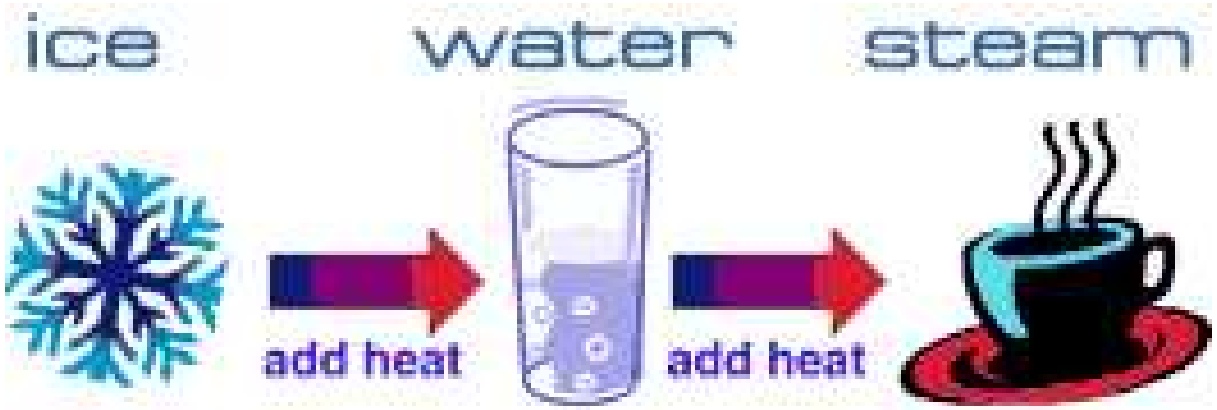
Existe 6 tipos de quarks:

Os núcleons por sua vez são formados por quarks, mantidos juntos pelos gluons.

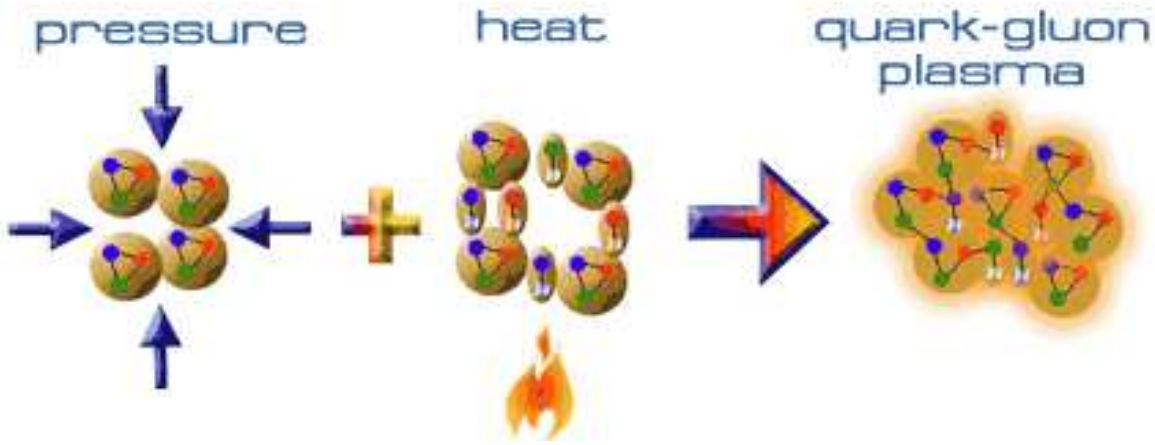
Existe 6 tipos de quarks:

“Aventura das partículas”, www.ift.unesp.br

Como obter um plasma de quarks e gluons?



Aquecendo gelo temos água, aquecendo mais, vapor.



Aquecendo ou comprimindo nucleons, podemos ter um plasma de quarks e gluons

A POSSÍVEL EXISTÊNCIA DO QGP É

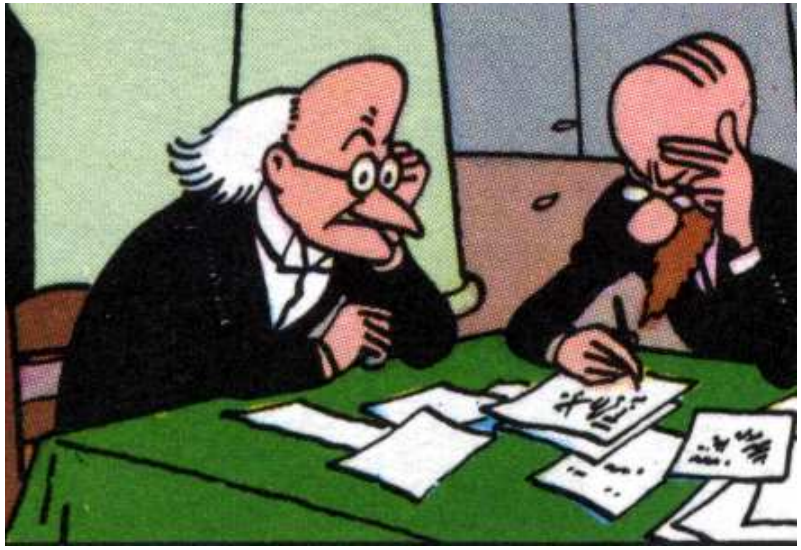
- uma previsão dos anos 70:

a grandes densidades: Collins & Perry, Phys. Rev. Lett. 34 (1975) 1356

a grandes temperaturas: Cabibbo & Parisi, Phys. Lett. B59 (1975) 67

- baseada na propriedade de liberdade assintóticada interação forte

(Prêmio Nobel de Física 2004: Gross, Politzer e Wilczek)



O QUE É LIBERDADE ASSINTÓTICA?

Para forças gravitacionais e eletromagnéticas:

$$\text{intensidade} \nearrow \text{ se distância} \searrow$$

Para a força forte:

$$\text{intensidade} \searrow \text{ se distância} \searrow$$

O QUE É LIBERDADE ASSINTÓTICA?

Para forças gravitacionais e eletromagnéticas:

intensidade $\nearrow$ se distância $\searrow$

Para a força forte:

intensidade $\searrow$ se distância $\searrow$

$\Rightarrow$ *a alta densidade*, os quarks são LIVRES

a densidade normal, os quarks são presos dentro do proton, como prisoneiros na sua cela.

Obs.: O cálculo se faz usando CromoDinâmica Quântica.
A liberdade assintótica resulta das interações dos gluons entre si.

E NA PRÁTICA COMO CRIAR O QGP?

E NA PRÁTICA COMO CRIAR O QGP?

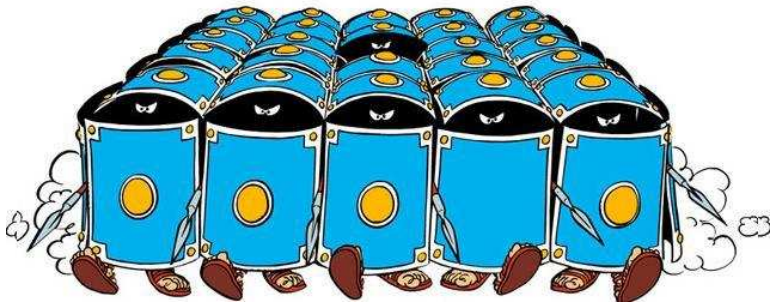
...precisamos aquecer e/ou comprimir matéria ordinária

E NA PRÁTICA COMO CRIAR O QGP?

...precisamos aquecer e/ou comprimir matéria ordinária

Ordens de grandeza

Supomos um sistema de N pions tão comprimidos que se toquem:



Densidade:

$n_\pi \sim \frac{N}{N(4/3)\pi r_\pi^3} \sim 2\,fm^{-3} > 10 \times n_{nuclear}$

com $r_\pi \sim 0,5\,fm$

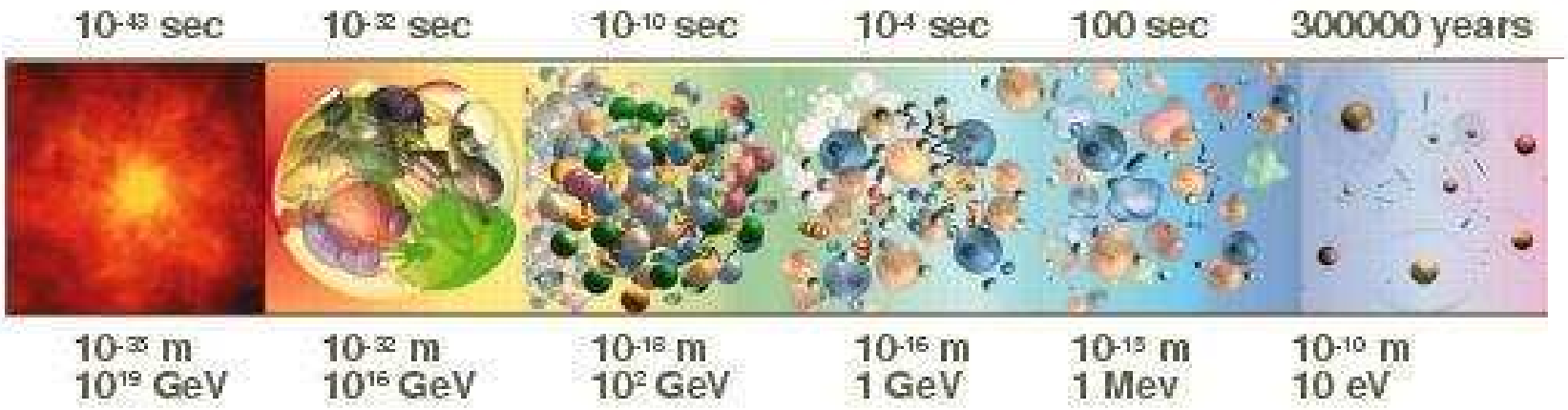
Temperatura:

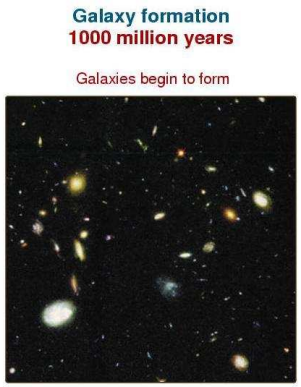
$n_\pi \sim 3.6\,T^3 \Rightarrow T \sim 160\,MeV \sim 2\,10^{12}\,K \sim 100\,000\,T_{sol}^{int.}$

(desprezando a massa dos pions)

ONDE ACHAMOS TEMPERATURAS E DENSIDADES ELEVADAS?

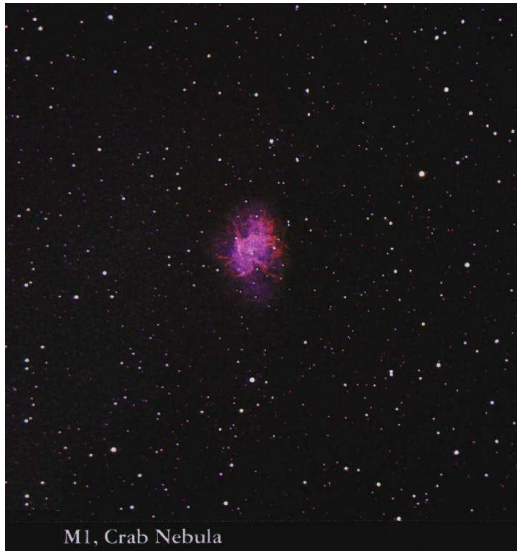
O INÍCIO DO UNIVERSO:





Após o Big Bang, o universo era muito quente e denso.
Em $t \sim 10^{-5}\,s$, $T \sim 2\,10^{12}\,K$,
$\Rightarrow$ ele passou de uma **fase de quarks e gluons** a **uma fase de hadrons**.

Estrelas densas



O QGP pode existir também no centro das estrelas de neutrons pois sua densidade central é elevada (várias vezes à da matéria nuclear ordinária).

Ordem de grandeza: massa $\sim 1,5\, M_{\odot}$, raio $\sim 10\, km$

$\Rightarrow \rho_{med} \sim 7\, 10^{14} g/cm^3$

$\Rightarrow \rho_{int} > \rho_{med} >> \rho_{nucl}$

com $\rho_{nucl} \sim \frac{A}{A(4/3)\pi r_0^3} \times m_N = 2\, 10^{14} g/cm^3$

GOSTARIAMOS DE ESTUDAR O QGP SISTEMATICAMENTE

COMO FAZER ISTO?

COLISÕES DE NÚCLEOS PESADOS A ENERGIA MUITO ALTA

A matéria fica comprimida e aquecida: acredita-se que possa aparecer (brevemente) o QGP.

Esta animação mostra uma colisão:

animação AuAu

ONDE SE FAZEM ESTAS COLISÕES?

ONDE SE FAZEM ESTAS COLISÕES?

Início	*Maquina*	*Energia do feixe GeV .A*	*Energia no CMS GeV .A*
1986	*AGS*	~ 15	~ 5
1986	*SPS*	~ 200	~ 20
2000	*RHIC*	-	~ 200
$\geq$ 2010	*LHC*	-	~ 5500

O LHC funciona mas ainda não colididiu protons na energia prevista de 14 000 GeV (no c.m.s.).

Colisão relatística: energia por nucleon $>> m_n c^2 \sim 1 GeV$.

Estas experiências envolvem centenas de físicos de todos os paises, inclusive do Brasil.

LHC_aerea.jpg (JPEG Image, 750x511 pixels) http://www.lhc-closer.es/images/image/LHC_aerea.jpg

1 of 1 08/28/2009 05:43 PM

Isto funciona?

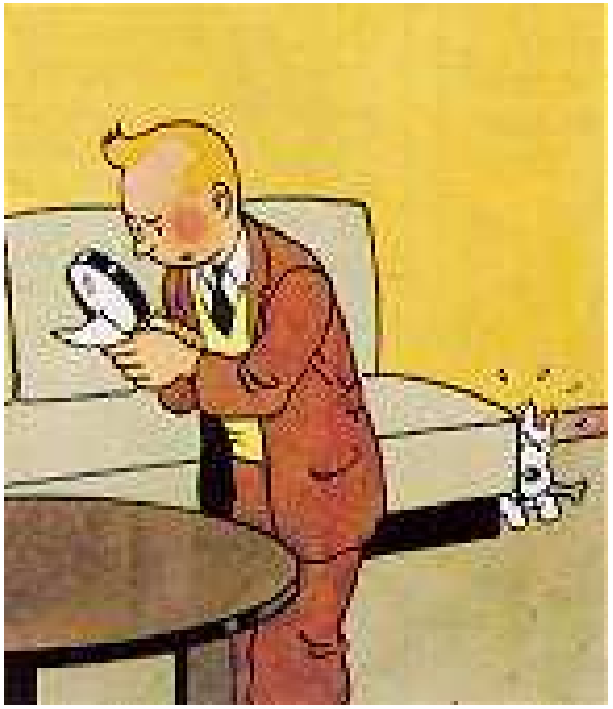
Foi criado o QGP?

O QUE OS DADOS MOSTRAM?

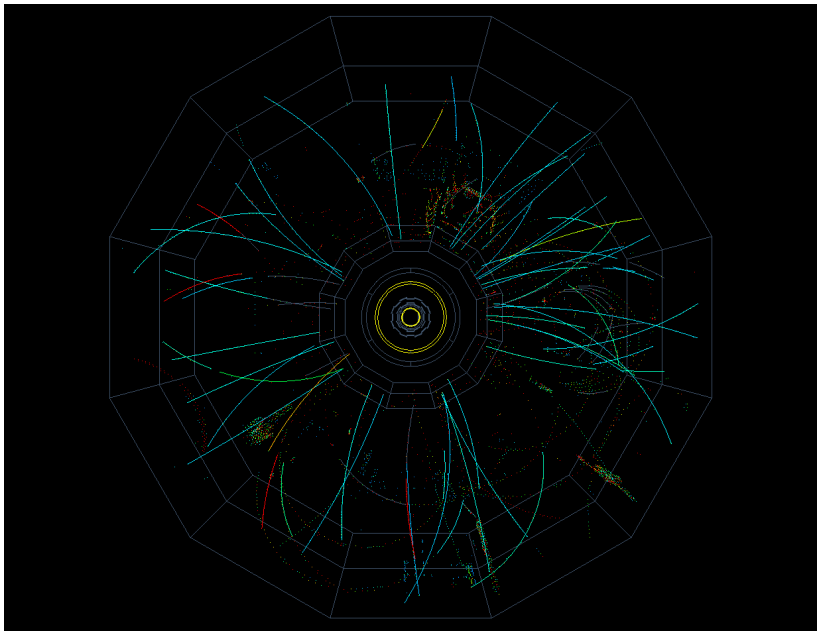
Isto funciona?
Foi criado o QGP?
O QUE OS DADOS MOSTRAM?

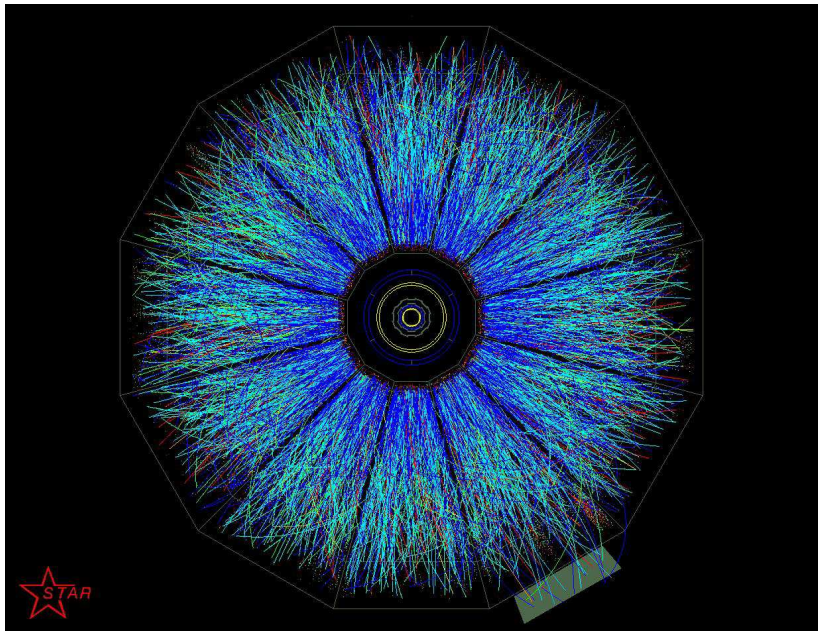
Dificuldade:
O plasma não vive muito tempo
e re-hadroniza
$\sim 0.00000000000000000001$s.
$\sim 10\, fm/c$.

Observamos os hadrons que sobraram. Com isto, temos que reconstituir o que ocorreu.



A CENA DO CRIME É ESTA:

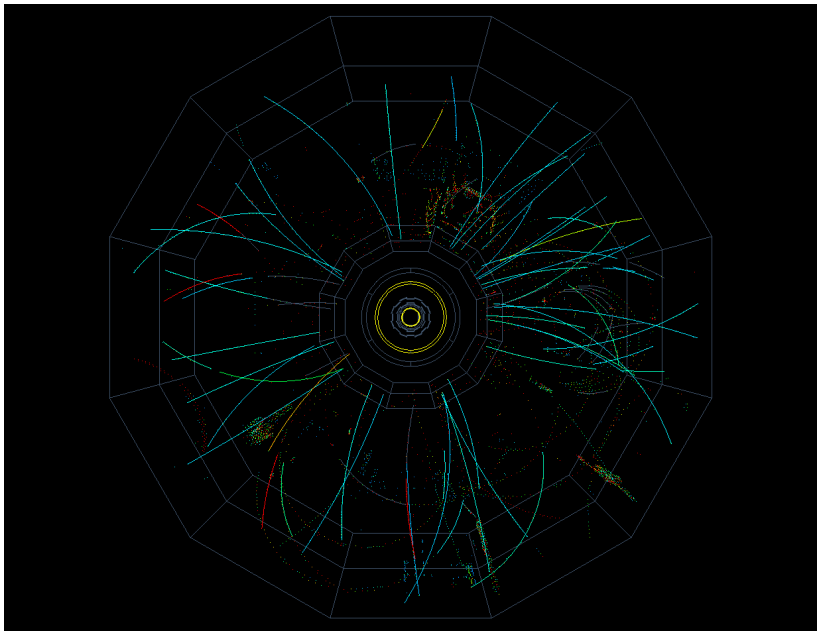


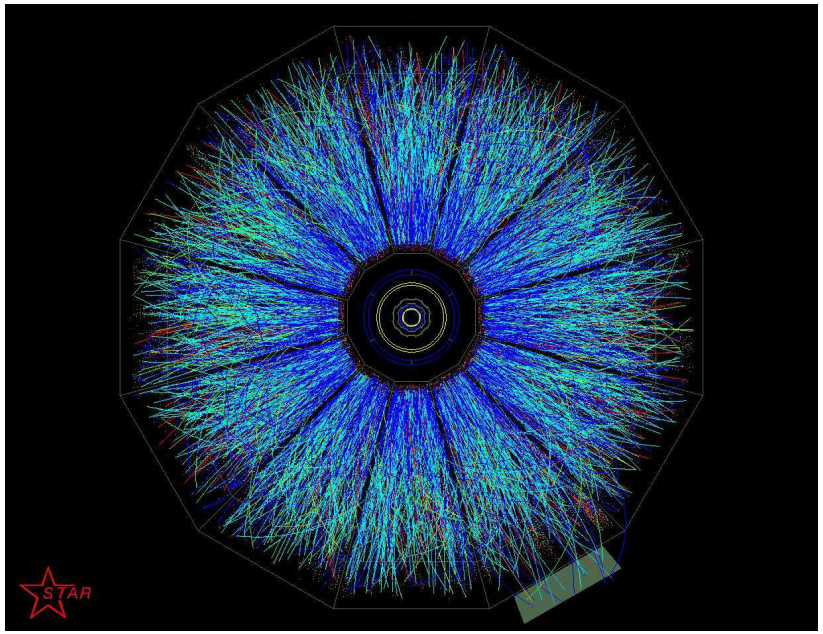


Comparação entre colisão d+Au (esq.) e Au+Au (dir.):

$\Rightarrow$ há muitas partículas num volume pequeno em Au+Au.

A CENA DO CRIME É ESTA:





Comparação entre colisão d+Au (esq.) e Au+Au (dir.):

$\Rightarrow$ há muitas partículas num volume pequeno em Au+Au.

Como reconstituir o crime?

Como “reconstituir” o que ocorreu numa colisão nuclear de alta energia:

- deve-se seguir cada partícula individualmente? (similarmente a descrever algumas moléculas de água)
- ou usar hidrodinânimica? (similarmente a descrever uma gota de água, onde temperatura, pressão, etc, são conceitos úteis)

- No AGS e SPS, ambos os enfoques pareciam possíveis,
- No RHIC a hidrodinâmica ganhou maior aceitação.

PORQUÊ?

- No AGS e SPS, ambos os enfoques pareciam possíveis,
- No RHIC a hidrodinâmica ganhou maior aceitação.

PORQUÊ?

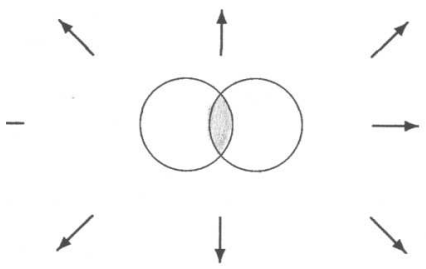
Isto em particular é devido aos dados sobre fluxo elíptico.

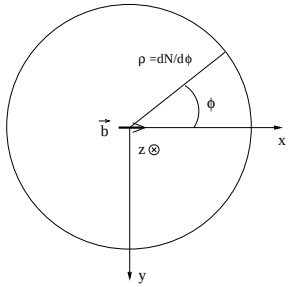
Esta animação mostra como o fluxo elíptico é gerado:

v2 em Au+Au

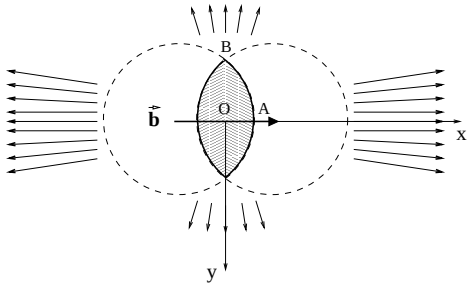
Se uma colisão núcleo-núcleo

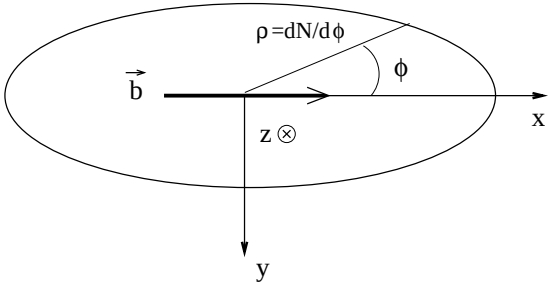
- é uma superposição de colisões nucleon-nucleon independentes
  $\Rightarrow$ a distribuição de momento dos hadrons é isotrópica





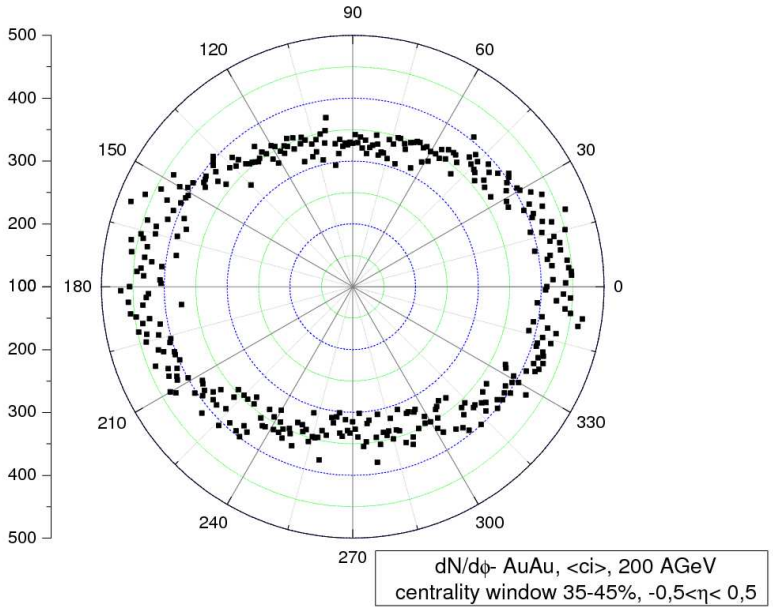
- produz matéria termalizada como na hidrodinâmica
  $\Rightarrow$ a distribuição de momento dos hadrons é alongada (maior força na direção Ox)





v_2 = medida deste alongamento.

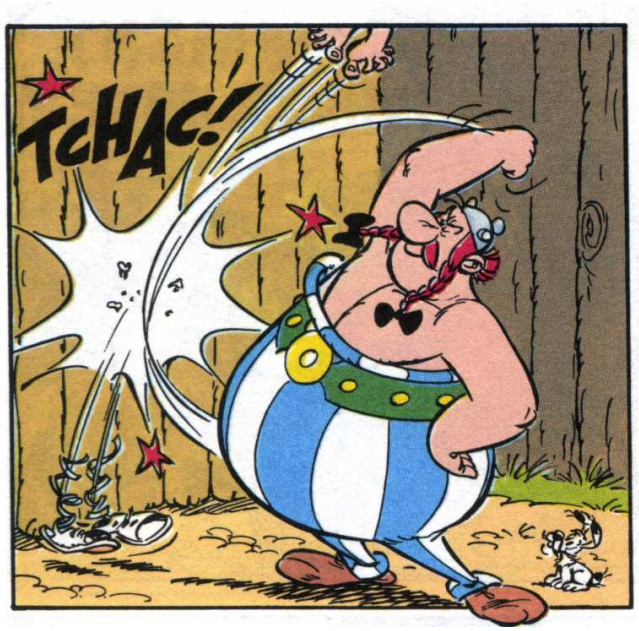
Exemplo de distribuição de momento obtida na hidrodinâmica (Arthur dos Reis, IFUSP)



Tanto o modelo hidrodinâmico como os modelos microscôpicos produzem alongamento v_2

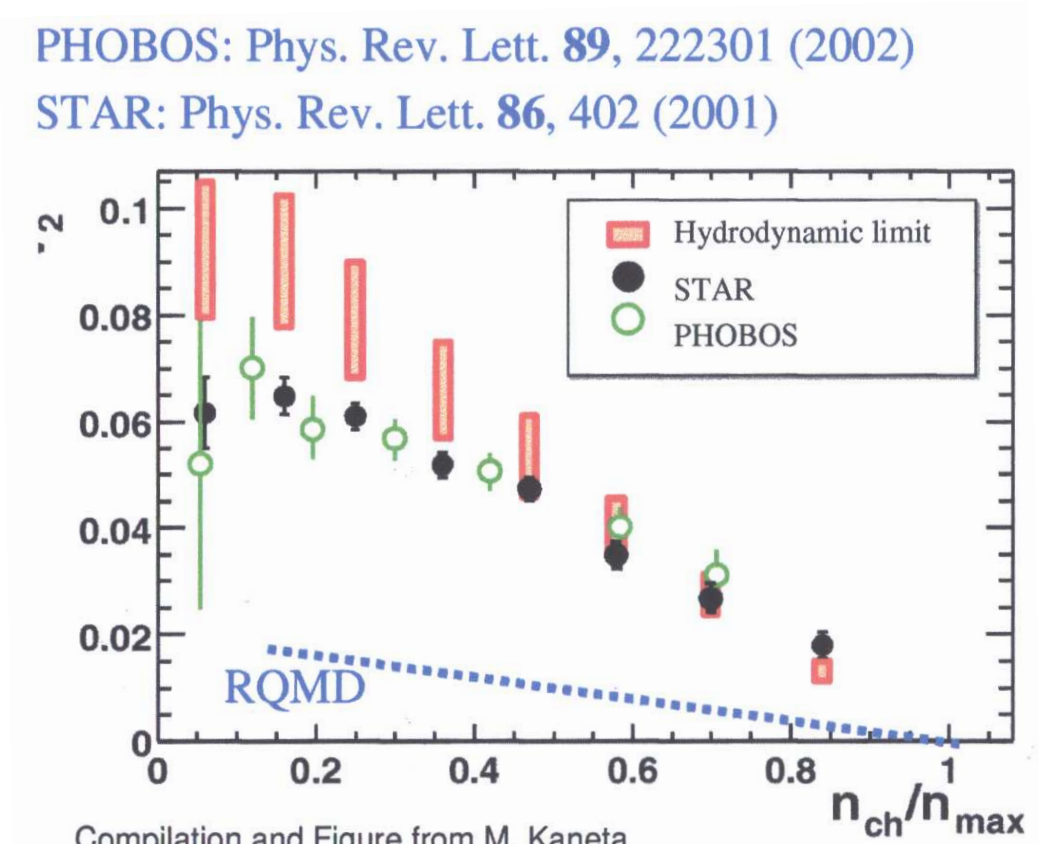
mas

o do modelo hidrodinâmico é <u>maior</u>, devido ao maior "empurrão" ao longo de Ox



UMA DESCOBERTA IMPORTANTE:

no RHIC,
modelos microscôpicos como RQMD subestimam v_2,
enquanto que
modelos hidrodinâmicos estão de acordo com os dados (até colisões semi-centrais).



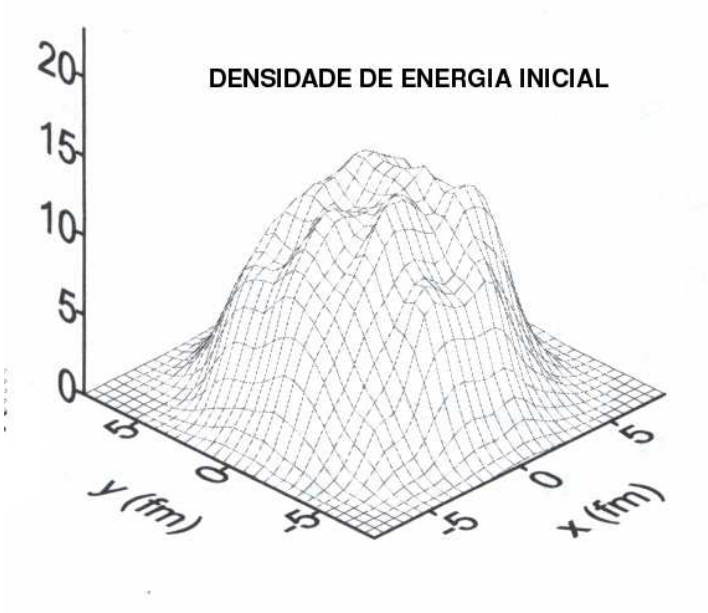
VOLTANDO NO TEMPO:

Já que a hidrodinâmica permite descrever as colisões no RHIC, podemos usá-la para voltar no tempo até o início da expansão.

Se soubermos onde está agora um carro em linha reta com velocidade constante, sabemos onde ela estava antes.

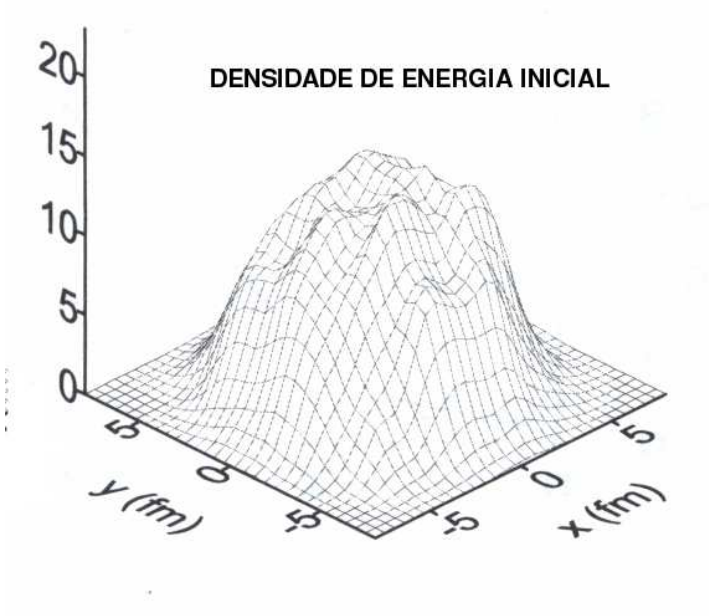
O INÍCIO DE UMA COLISÃO

Para reproduzir os dados, a densidade de energia **inicial** numa fatia transversal de matéria é tipicamente MUITO ALTA $> 10\,GeV/fm^3$ (depois, ela abaixa)



O INÍCIO DE UMA COLISÃO

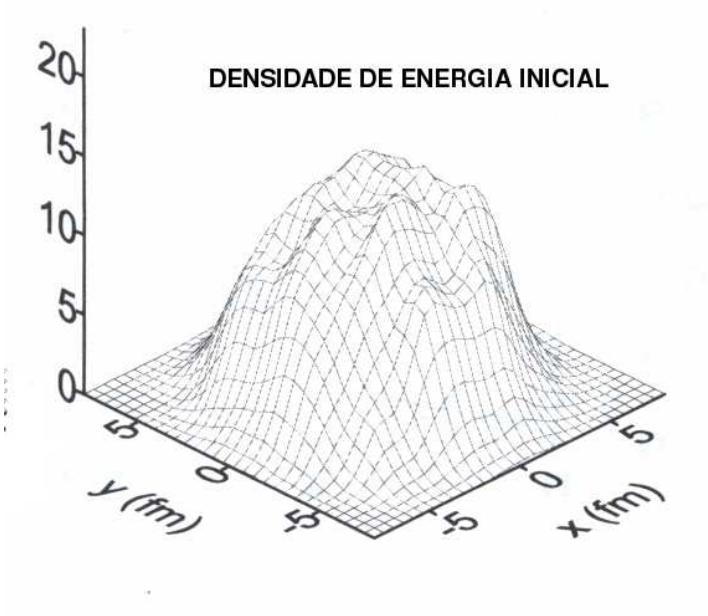
Para reproduzir os dados, a densidade de energia **inicial** numa fatia transversal de matéria é tipicamente MUITO ALTA $> 10\,GeV/fm^3$ (depois, ela abaixa)



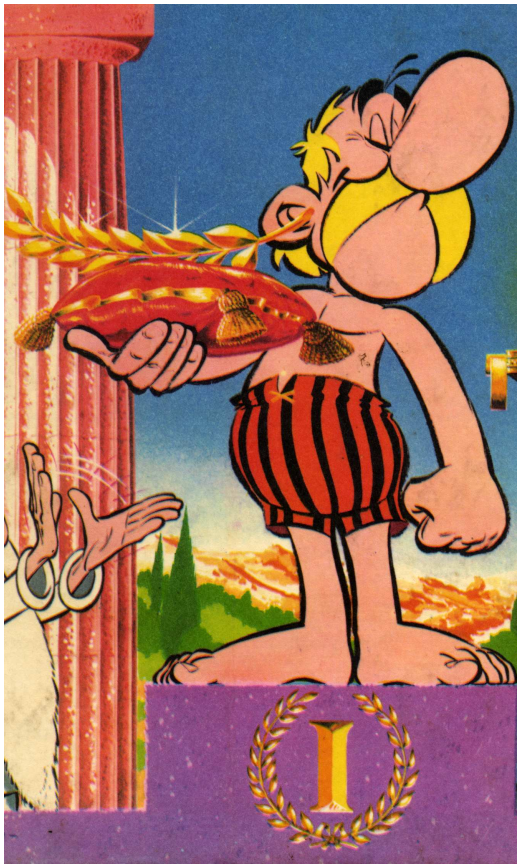
O limiar para criação do QGP é $\sim 1\,GeV/fm^3$

O INÍCIO DE UMA COLISÃO

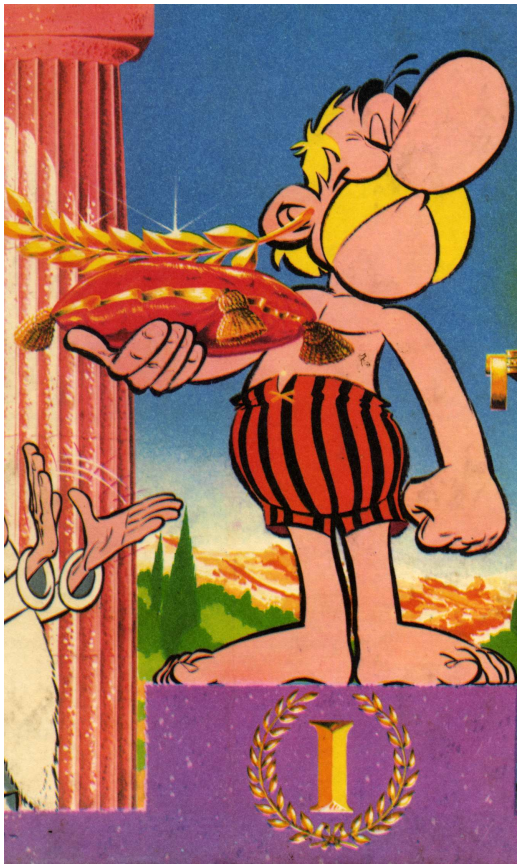
Para reproduzir os dados, a densidade de energia **inicial** numa fatia transversal de matéria é tipicamente MUITO ALTA $> 10\,GeV/fm^3$ (depois, ela abaixa)



O limiar para criação do QGP é $\sim 1\,GeV/fm^3$
CONCLUSÃO?



O QGP DEVE SER CRIADO NAS COLISOÊS DO RHIC.

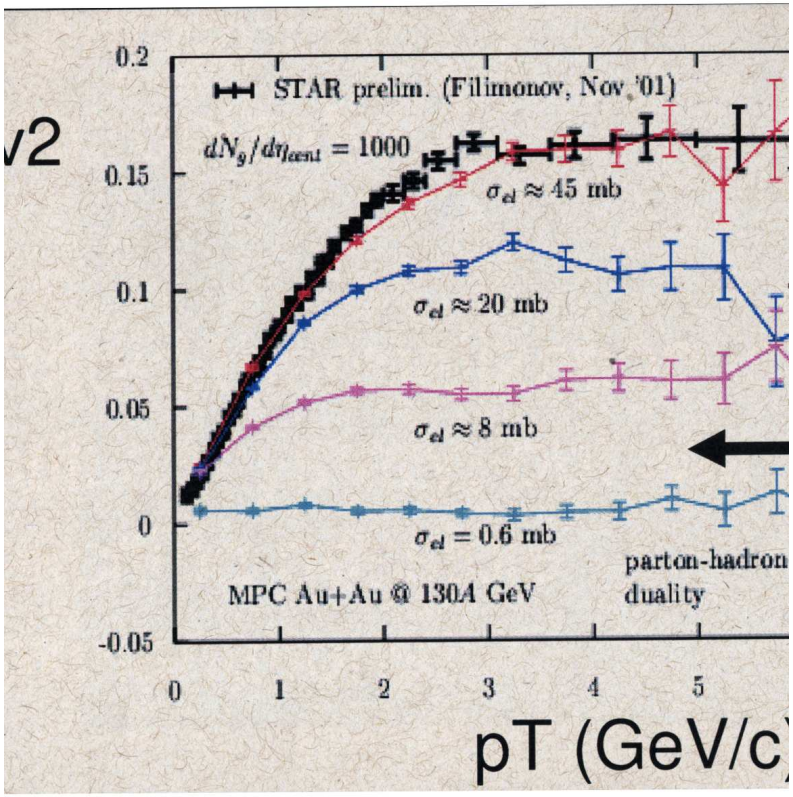


O QGP DEVE SER CRIADO NAS COLISOÊS DO RHIC.

Além do que foi mostrado aqui, existem MUITOS outros dados que apoiam estas conclusões (supressão de di-jets, estimativas de densidade de energia, estudo das abundâncias, dos espectros de momento transversal, etc)

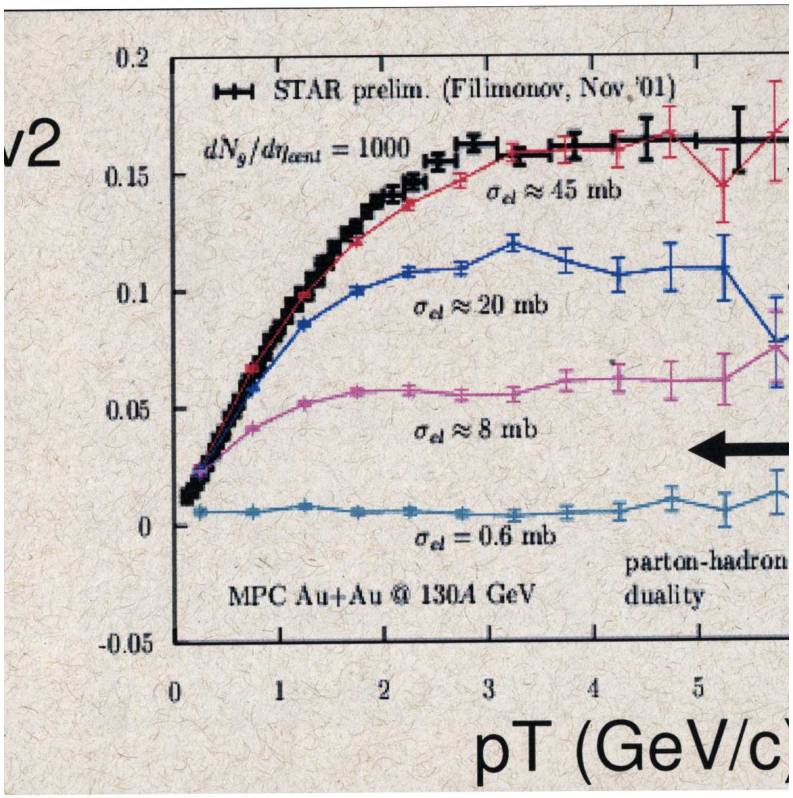
EM ADIÇÃO, DESCOBRIMOS 2 CARACTERÍSTICAS DO QGP

1) o QGP é diferente do que predito: não é um gás.
Para ter v_2, precisa ter fortes interações (σ_{el} grande na figura de Molnar e Gyulassy) entre quarks e gluons, permitindo grande v_2.



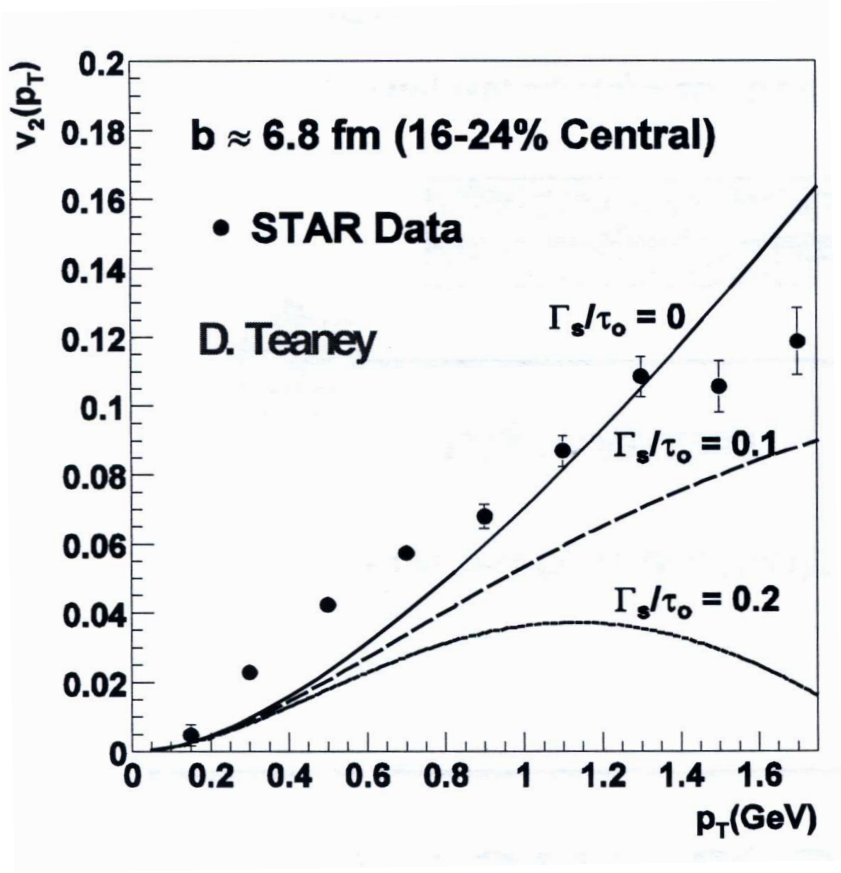
EM ADIÇÃO, DESCOBRIMOS 2 CARACTERÍSTICAS DO QGP

1) o QGP é diferente do que predito: não é um gás.
Para ter v_2, precisa ter fortes interações (σ_{el} grande na figura de Molnar e Gyulassy) entre quarks e gluons, permitindo grande v_2.



Esta matéria é chamada sQGP (strongly interacting QGP).

2) Resultados de hidrodinâmica parecem indicar que o fluido criado tem pouquíssima viscosidade (Γ_s/τ_0 pequeno e pode ser o fluido mais perfeito observado até agora.



NO FUTURO, NO LHC, IONS TAMBÉM SERÃO ACELERADOS

NO FUTURO, NO LHC, IONS TAMBÉM SERÃO ACELERADOS

Assim, poderemos estudar o QGP a densidades e temperaturas mais altas.

Para saber mais:

“The first few microseconds”, M.Riordan and W.A.Zajc, Scientific American, Maio 2006.

“What we have learned from the Relativistic Heavy Ion Collider”, T.Ludlam and L.McLerran, Physics Today, Outubro 2003.