A FÍSICA DO LHC: Conceitos teóricos e principais resultados

4ª Aula

Carla Göbel
Depto. de Física - PUC-Rio



Tópicos de Hoje

1. Aceleradores e Detectores
   - Aceleradores: Linacs e Synchrotrons
   - Colisores
   - Detectores de Partículas
2. O Colisor LHC
3. ALICE
   - O Plasma de Quarks e Glúons
   - Colisões de Íons Pesados
   - Principais Resultados

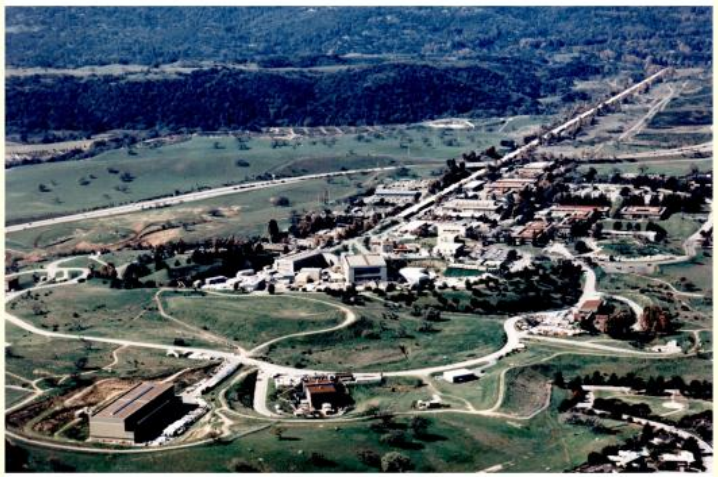
Aceleradores e Detectores

Aceleradores: Linacs e Synchrotrons

Aceleradores

- objetivo: colidir partículas a altas energias para estudar sua estrutura e/ou criar novas partículas a partir da energia e números quânticos combinados
- apenas partículas carregadas estáveis podem ser aceleradas:
  e^-, e^+, p, $\bar{p}$ + alguns íons
- dois tipos básicos de aceleradores: linear e circular

Linac em Stanford



3 km de extensão

Tevatron no Fermilab

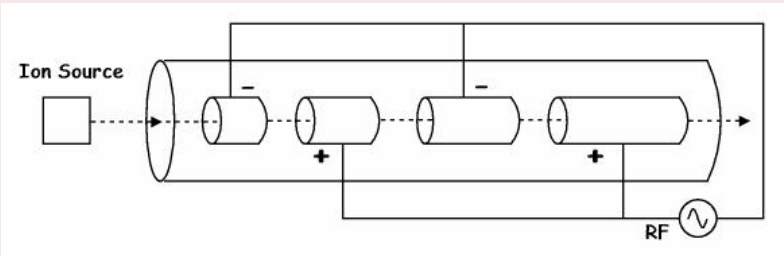


6 km de perímetro

Linacs

Proton Linac

- sucessão de câmaras de arrastro com tamanho crescente
- campo externo entre as bordas muda de sinal: próton sempre vê +V adiante, -V atrás
- alcançam energias até 20 MeV (para $\sim$ 70 m)



Electron Linac

- microondas geradas por Klystrons geram potencial acelerador
- maior Linac: no SLAC, extensão 3 km, 45 GeV
- projeto ILC: 31 km, 500 GeV

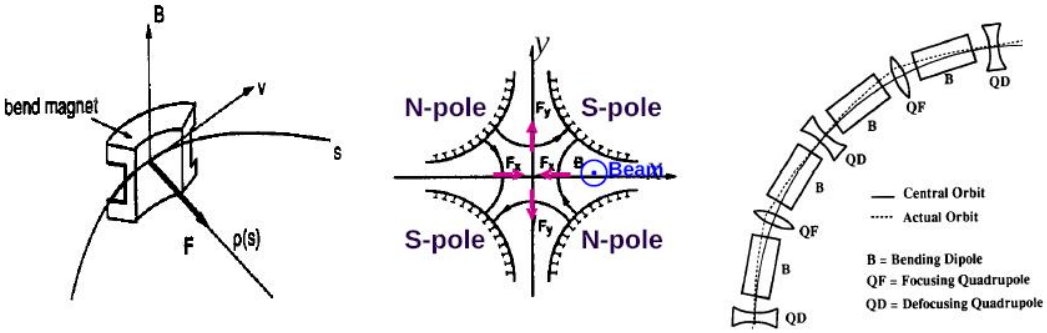


Synchrotrons

- maioria dos aceleradores hoje são cíclicos tipo Synchrotron
- problema de tamanho evitado ao fazer passar as partículas através do acelerador muitas vezes
- dipolos magnéticos mantêm as partículas em órbitas circulares

$$p = 0.3\ \mathrm{BR}\ \text{(p em GeV, B em Tesla, R em m)}$$

- feixe é mantido colimado por quadrupolos magnéticos



Colisores

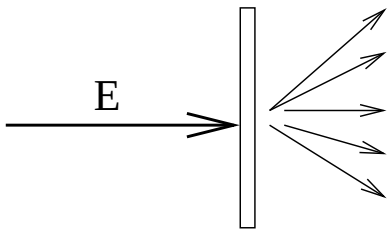
Colisores vs. Alvo Fixo

Alvo Fixo

- colisões são fáceis: alta taxa de interação, alvo estático
- preço a pagar: energia de CM disponível

$$E^* = \sqrt{2 m_{\text{target}} E_{\text{beam}}}$$

ex: próton de 450 GeV atingindo próton em repouso tem apenas 29 GeV disponível!



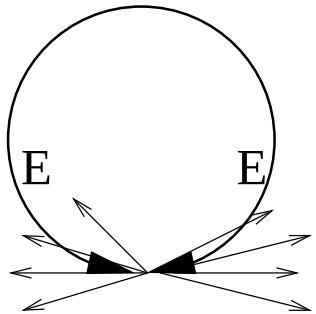
Colisor

- energia de CM disponível

$$E^* = 2 E_{\text{beam}}$$

ex: colisões próton-próton a 450 GeV dá 900 GeV!

- preço a pagar: a taxa de reação é muito menor porque o "alvo" é muito menor!
- deve ser compensado com alta luminosidade



Máquinas Circulares: elétron ou próton?

- prótons precisam mais força de deflexão dos dipolos magnéticos no anel
- elétrons perdem muito mais energia por emissão de radiação síncrotron

$$\Delta E \sim m^{-4} \Rightarrow \frac{\Delta E_e}{\Delta E_p} \sim 10^{13} \text{ !!}$$

  - para o LEP $(e^+e^-) \Rightarrow$ 2 GeV/volta
  - para o LHC $(pp) \Rightarrow$ 6 keV/volta

- para alcançar energias mais altas: colisores de prótons ou extensos linacs de elétrons!!!

colisões de elétrons	colisões de prótons
limpas: apenas e^+e^- pontuais envolvidos	sujas: próton composto e apenas qq interage
menor energia para mesmo raio	maior energia para mesmo raio
energia e^+e^- conhecida	energia qq desconhecida

Aceleradores Recentes

Máquina	Ano	Feixes	Energia(GeV)	$\mathcal{L}(\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$
SPPS (CERN)	1981	$p\bar{p}$	630-900	6×10^{30}
Tevatron (FNAL)	1987	$p\bar{p}$	1800-2000	10^{31-32}
SLC (SLAC)	1989	e^+e^-	90	10^{30}
LEP (CERN)	1989	e^+e^-	90-200	10^{31-32}
HERA (DESY)	1992	ep	300	10^{31-32}
RHIC (BNL)	2000	pp/AA	200-500	10^{32}
LHC (CERN)	2010–12	$pp/pA/AA$	7K–8K	10^{32-34}
LHC (CERN)	2015	$pp/pA/AA$	13K	10^{34}

Detectores de Partículas

Detectores de Partículas

Queremos ser capazes de detectar todas as partículas produzidas em colisões a altas energias

Devemos saber

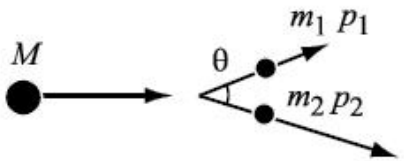
- qual foi o ponto da colisão
- trajetórias das partículas produzidas
- quais seus momenta e energias
- que tipo de partículas foram produzidas (π, K, γ, p, e, etc)
  $\Rightarrow$ as partículas observáveis são aquelas estáveis - onde estáveis significa que cruzaram os detectotes

Exemplo: partícula que decai em duas

- Queremos produzir uma nova partícula, p.e., o bóson Z^0, ou o Higgs.
- digamos que decai em duas partículas conhecidas, de massas m_1 e m_2
- desintegra-se muito rapidamente: só detectamos as partículas filhas

como saber se foi produzida ou não?

- conservação de 4-momentum relativístico (energia+momento) $\Rightarrow$ $p_A^2 = (p_1 + p_2)^2$



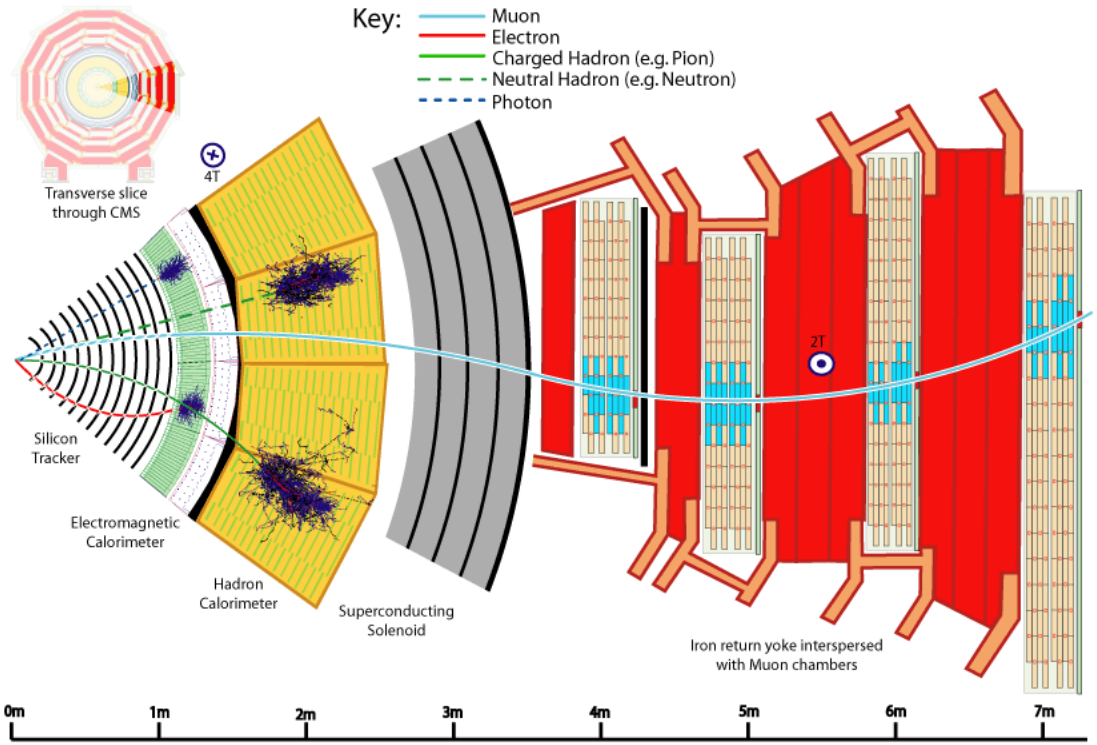
$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos\theta)$$

- para reconstruir a massa da partícula A o detector deve fornecer: medidas precisas de momenta e ângulos

Detectando as Partículas Produzidas

Um experimento típico tem os seguintes detectores:

- sistema de trajetórias: detectores de silício e câmaras de arrasto
- calorímetro eletromagnético
- calorímetro hadrônico
- câmara de múons
- muito importante: magneto para encurvar as trajetórias e medir momento
- sistema de identificação de partículas

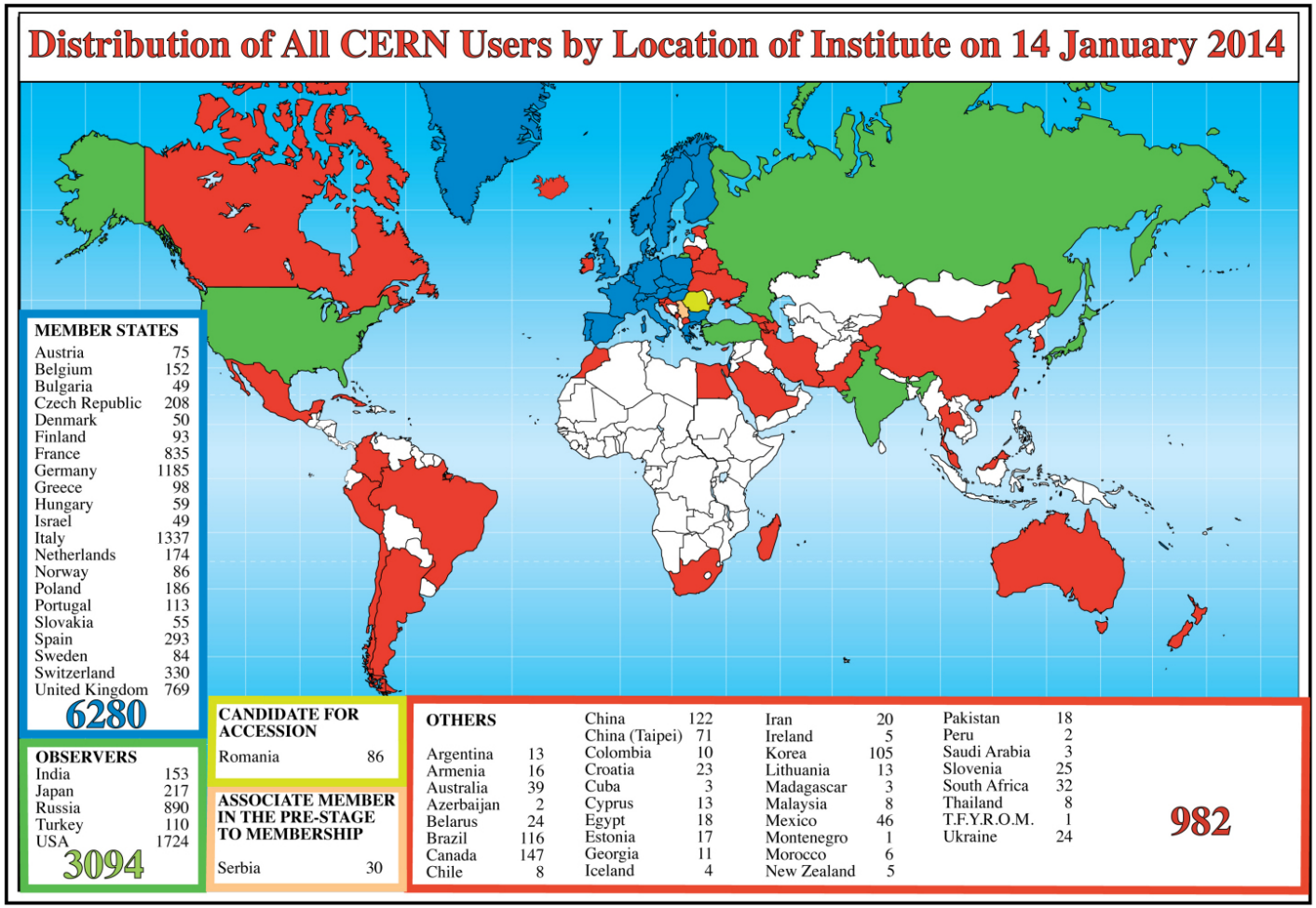


O Colisor LHC

O Programa de Física do LHC

- Descobrir ou excluir o Higgs na região de massa até 1 TeV, e determinar suas propriedades
- Busca por partículas supersimétricas até 2–3 GeV
- Busca por Dimensões Extras, se estivere na escala TeV, e mini-buracos negros?
- Estudar a Violação de CP no setor dos mésons B, Física de B
- Medidas de precisão para m_{top}, m_W, acoplamentos anômalos
- Colisões de íons pesados e busca pelo plasma de quarks e glúons
- QCD e física difrativa em um novo regime
- Busca por outros fenômenos exóticos (novos bósons de gauge, modelo Little Higgs, etc)

Os Participantes do LHC

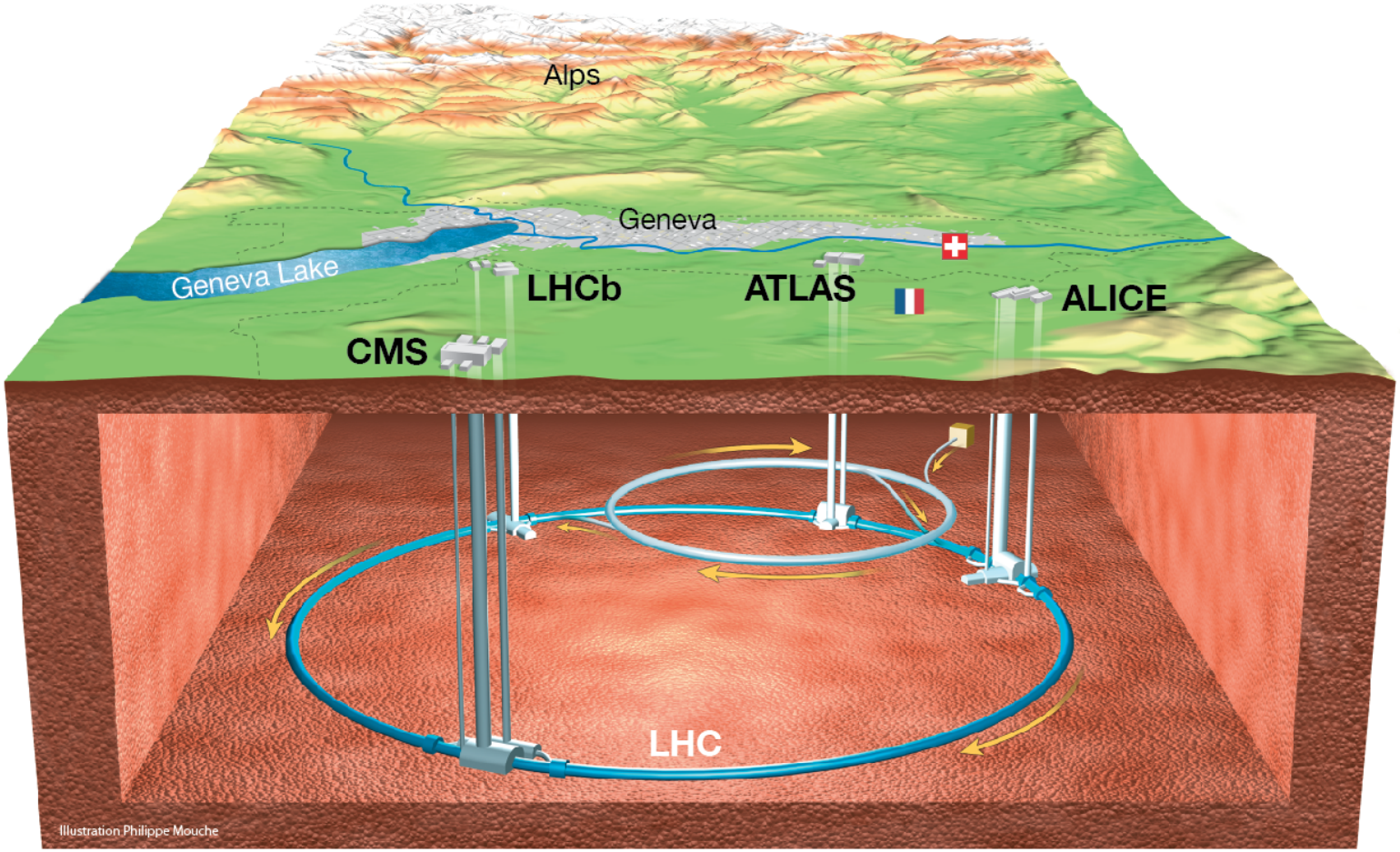


O Brasil tem participação oficial nos 4 experimentos

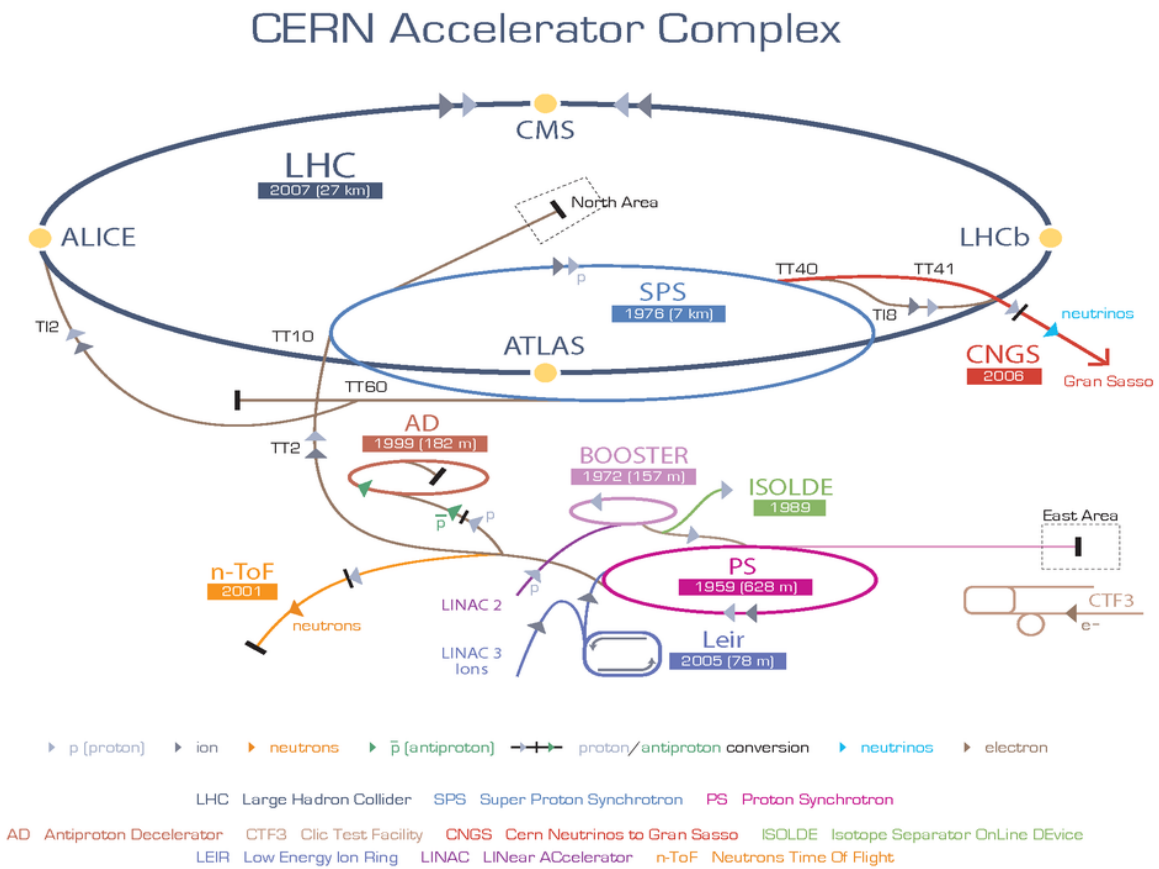
Vista aérea do LHC



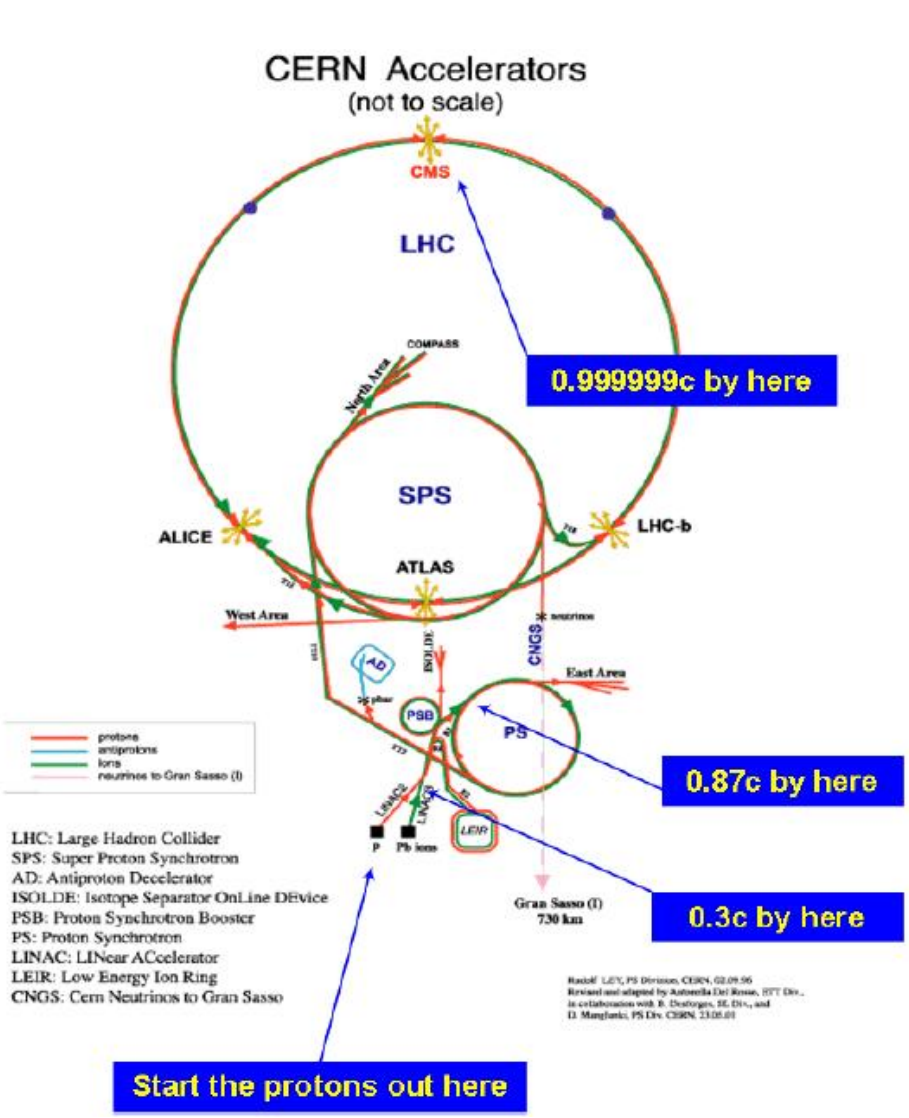
Esquema subterrâneo do LHC



A sequência de aceleradores do LHC



A sequência de aceleradores do LHC (cont.)



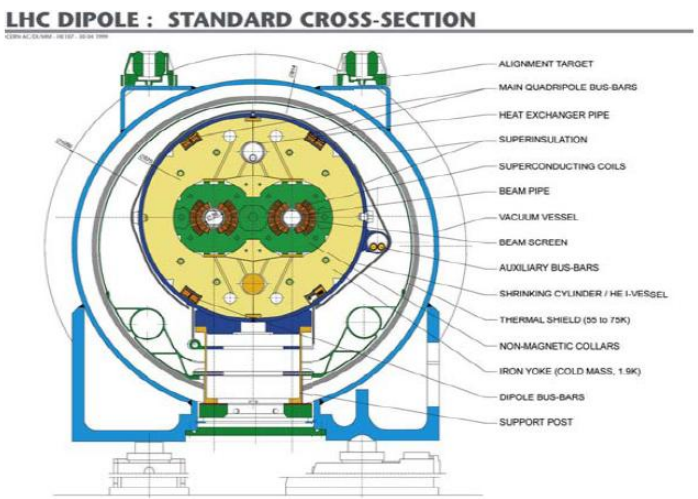


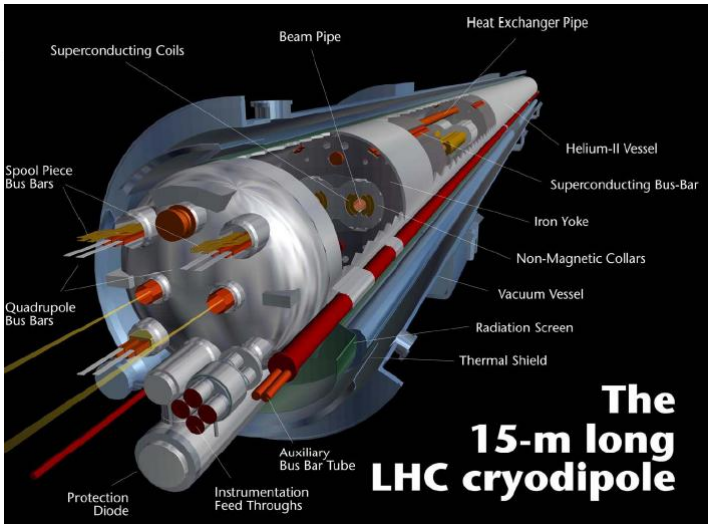
Energies:

Linac	50 MeV
PSB	1.4 GeV
PS	28 GeV
SPS	450 GeV
LHC	7 TeV

Os CrioDipolos

- No túnel de 27 km, $\sim$ 2800 m são de crio-dipolos
- Para alcançar p = 7 TeV se necessita B = 8.3 T
- Os dipolos supercondutores produzem um campo de 8.4 T - corrente 11.700 A
- energia total acumulada nos magnetos: 11GJ
- Custo: US$ 0.5 milhão cada. Necessários 1232.

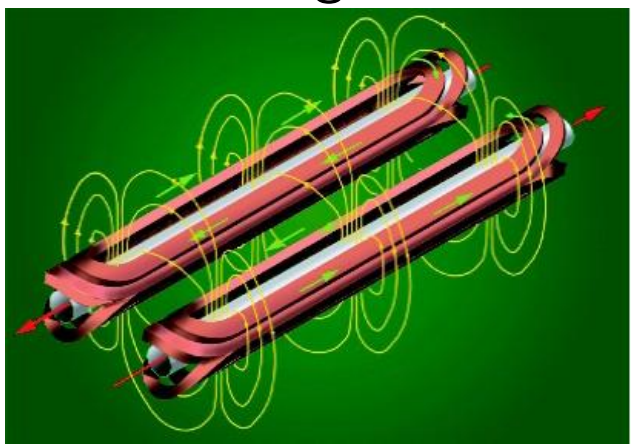


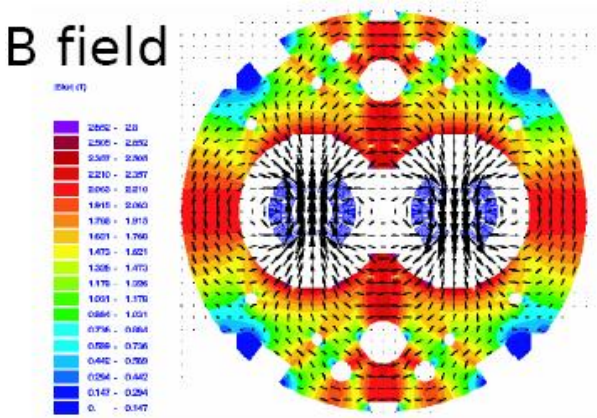


Os CrioDipolos(cont.)

- supercondutores @ banho de hélio 1.9 K @ p_{atm}
- sistema criogênico do LHC precisa de 12M litros of N líquido, 96 tons de He
- mais frio que o universo!
- o maior sistema criogênico do mundo!

desenho magneto 2 em 1





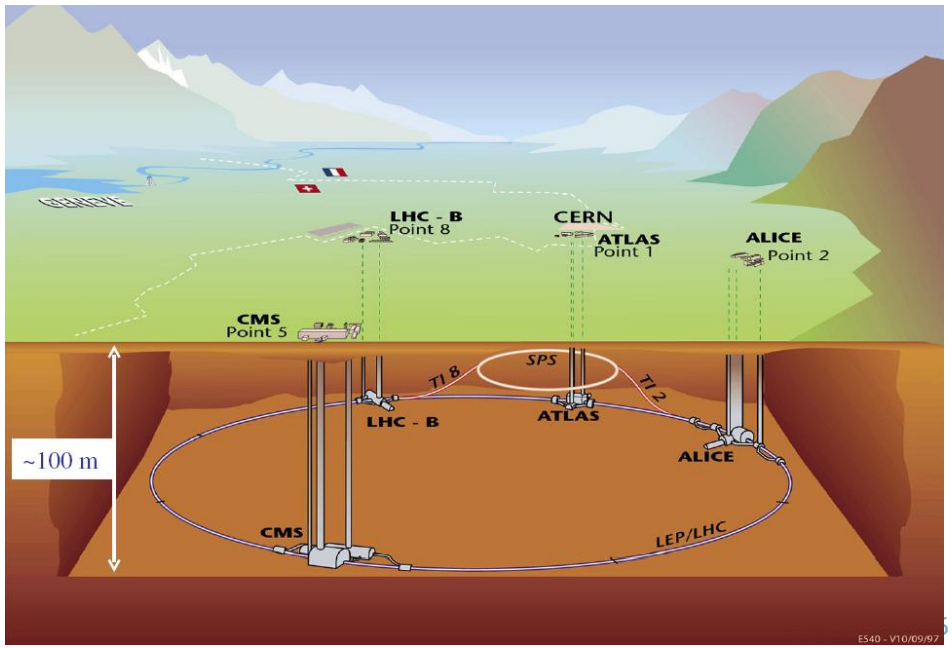
Alguns Números ...

- peso do experimento CMS: $\sim$ 13000 tons (30% mais que a Torre Eiffel)
- quantidade de cabos usados no ATLAS : $\sim$ 3000 km
- volume de dados gravados na front–end do CMS: 1 TB/s $\Rightarrow$ 10.000 Enciclopédias Britannica
- dados gravados durante o funcionamento esperado do LHC será equivalente a todas as palavras faladas pela humanidade desde seu aparecimento
- custo total máquina + experimentos: $\sim$ US$ 5 bilhões
- número total de físicos envolvidos: $\sim$ 5000

Os 4 grandes experimentos do LHC

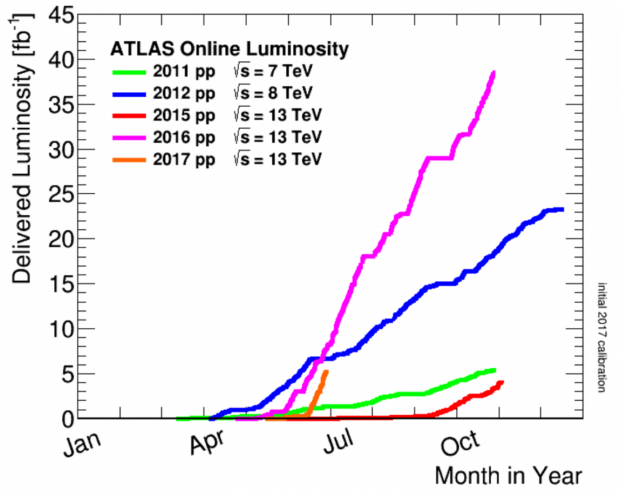
4 pontos de interação onde os detectores estão instalados:

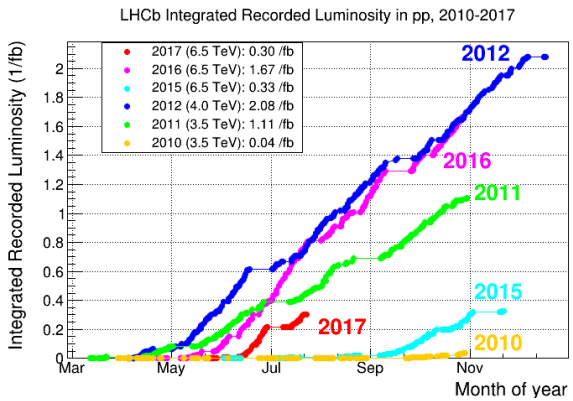
- ALICE, estudo das colisões de íons pesados
  - ⋆ estudar as propriedades da matéria nuclear a altas temperaturas e densidades
  - ⋆ busca pelo plasma de quarks e glúons
- LHCb, dedicado a física com quarks c e b
  - ⋆ medidas de precisão em Violação de CP
  - ⋆ busca de efeitos de Violação de CP além do Modelo Padrão
  - ⋆ Rare B decays and new physics
- ATLAS e CMS, em dois pontos opostos:
  - ⋆ experimentos de propósitos gerais
  - ⋆ concentram-se em física de alto p_T para busca de Higgs, SUSY, etc.



O início da tomada de dados

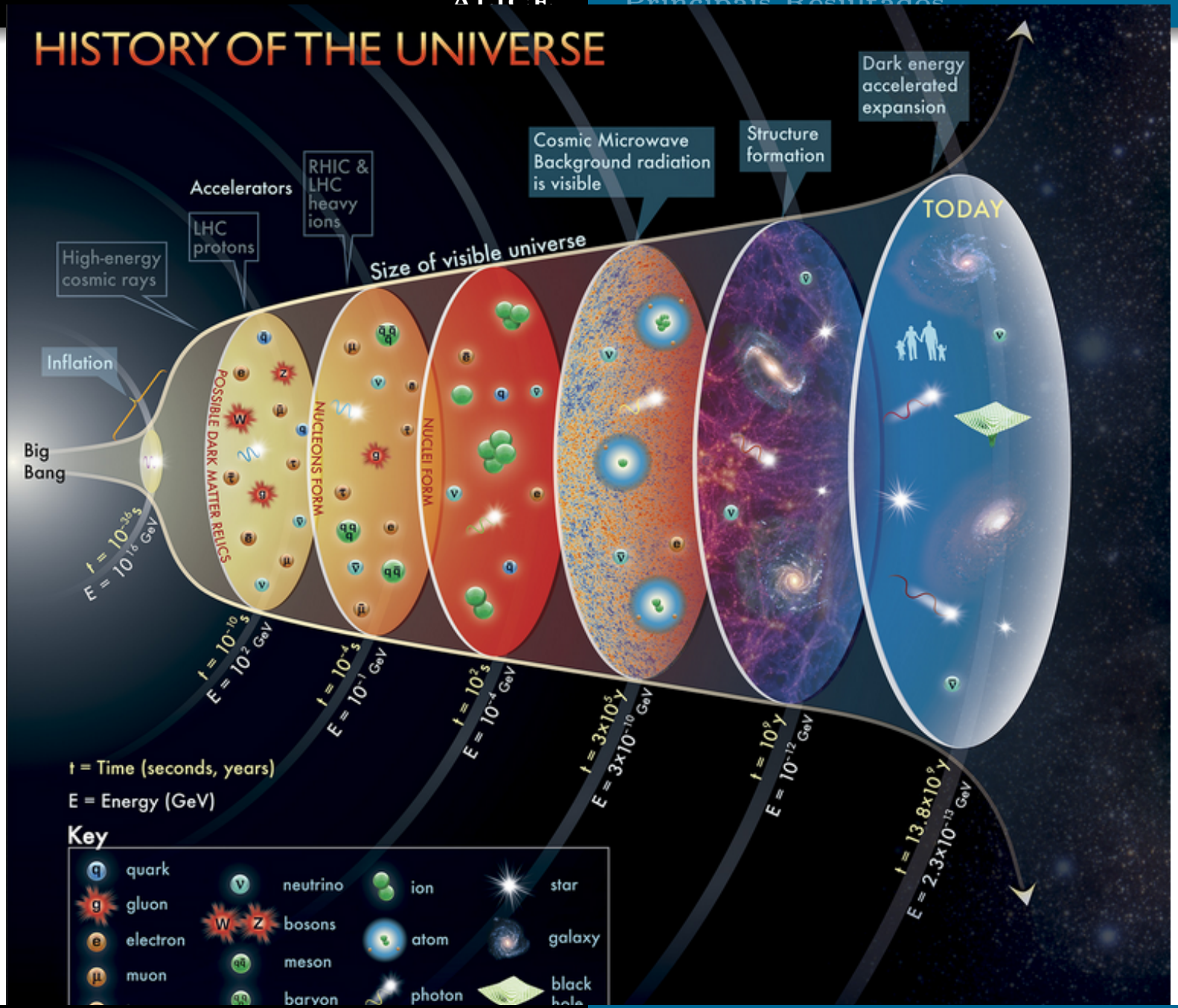
- LHC começou a rodar feixe em Set/2008, mas poucos dias depois: acidente
- Fim de 2009 $\Rightarrow$ estréia com colisões a 450+450 GeV
- Em Março de 2010, finalmente, colisões a 7 TeV
  luminosidade exponencialmente crescente no 1^o ano
- colisões a 8 TeV em 2012
- 2011–2013 $\Rightarrow$ **RUN I**
- a partir de 2015 e até 2018: colisões a 13 TeV $\Rightarrow$ **RUN II**





ALICE

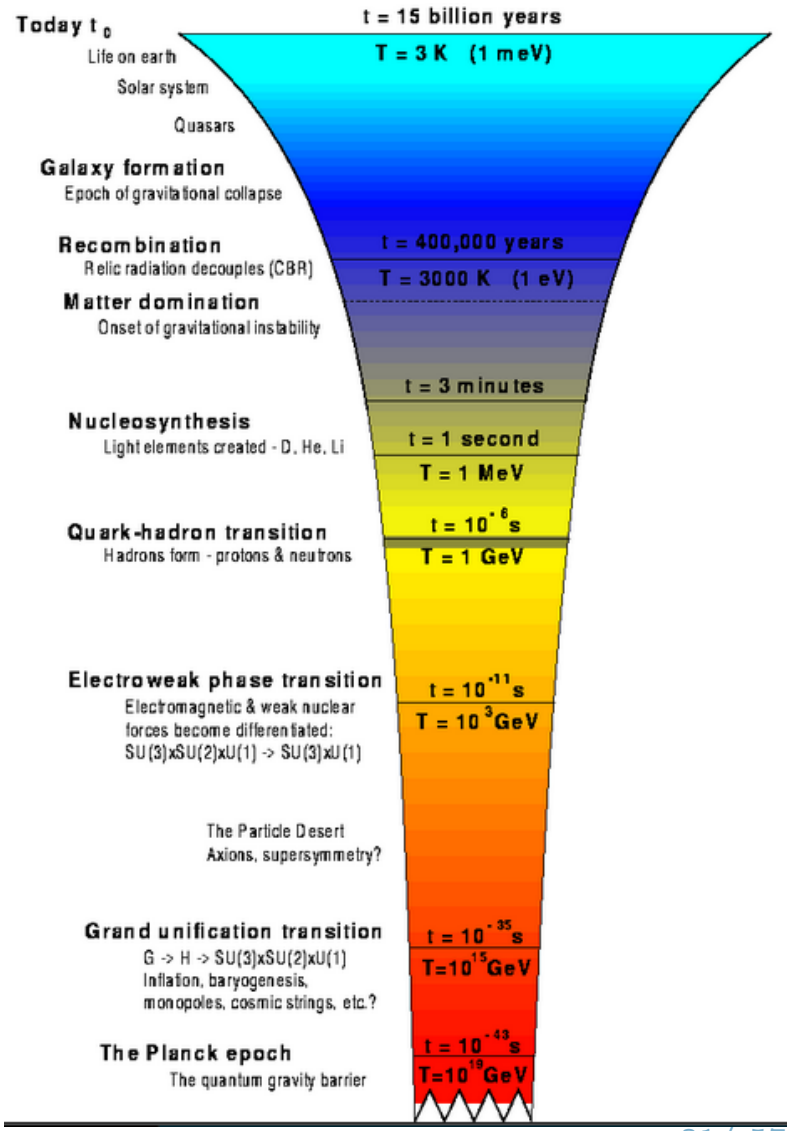
O Plasma de Quarks e Glúons


HISTORY OF THE UNIVERSE
Dark energy accelerated expansion
Cosmic Microwave Background radiation is visible
Structure formation
TODAY
Accelerators
RHIC & LHC heavy ions
LHC protons
High-energy cosmic rays
Size of visible universe
Inflation
Big Bang
POSSIBLE DARK MATTER RELICS
NUCLEONS FORM
NUCLEI FORM
t = 10^-35 s
E = 10^16 GeV
t = 10^-10 s
E = 10^2 GeV
t = 10^-4 s
E = 10^-1 GeV
t = 10^2 s
E = 10^-4 GeV
t = 3x10^5 y
E = 3x10^-10 GeV
t = 10^9 y
E = 10^-12 GeV
t = 13.8x10^9 y
E = 2.3x10^-13 GeV
t = Time (seconds, years)
E = Energy (GeV)
Key
quark
gluon
electron
muon
neutrino
bosons
meson
baryon
ion
atom
photon
star
galaxy
black

Evolução do Universo

- sopa de Quarks: quarks e glúons livres, ainda muito quente para formar hádrons
- gás de hádrons: prótons e nêutrons livres, ainda muito quente para formar núcleos
- Nucleossíntese primordial, até o He
- plasma: elétrons ainda não ligados aos núcleos
- fótons desacoplam da matéria: elétrons se ligam para formar os átomos

Universo hoje é consequência destas várias transições de fase



Física de Partículas e o Universo

Cosmologia primordial $\Leftrightarrow$ Física de Partículas

♣ colisões a altíssimas energias: reprodução de algumas das condições presentes em estágios muito primários do Universo

♣ transições de fase envolvidas em campos quânticos elementares:

- transições de fase e quebras espontâneas de simetria são conceitos centrais
- a transição de fase da QCD é a única accessível dinamicamente

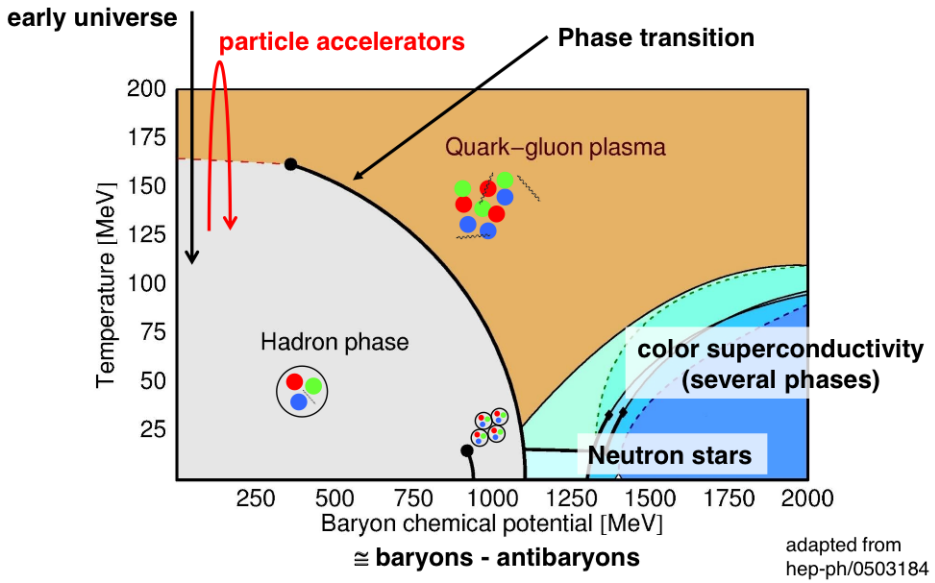
♣ Sopa de quarks e glúons: Plasma de Quarks–Glúons (PQG)

- novo estado da matéria: quarks e glúons desconfinados
- foi o estado da matéria no universo primitivo ($\sim 1 - 10\mu s$)
- pode existir no centro de estrelas de nêutrons

QCD e o PQG

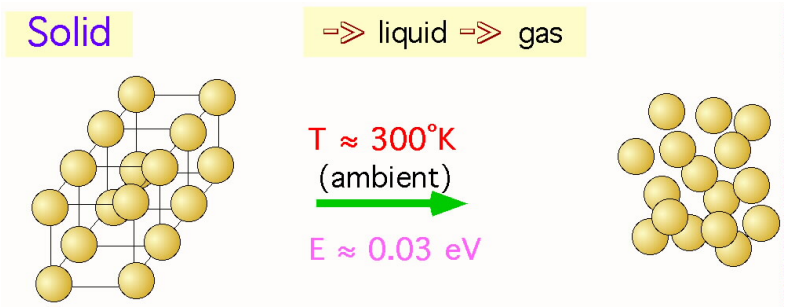
- QCD é uma teoria muito exitosa, testada a várias escalas de energia
- ... porém há questões abertas na região do regime não-perturbativo
  - confinamento
  - massas dos hádrons porque a massa do próton (938 MeV) é tão maior que a soma da massa dos quarks uud ($\sim$ 10 MeV)

- como quarks e glúons livres se comportam?
- como a matéria se comporta no regime de altas densidades e temperaturas?



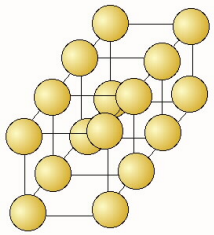
adapted from hep-ph/0503184

Derretendo a matéria ...



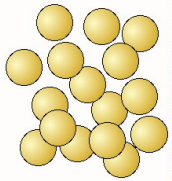
Derretendo a matéria ...

Solid ⇒ liquid ⇒ gas

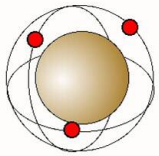


T ≈ 300°K
(ambient)

E ≈ 0.03 eV

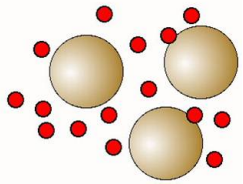


Atoms ⇒ plasma (ions, electrons)



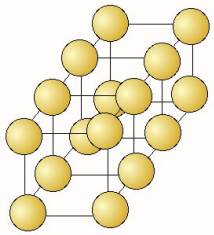
T ≈ 10.000°K
(sun surface)

E ≈ 1 eV



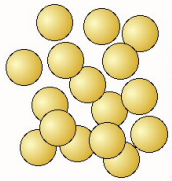
Derretendo a matéria ...

Solid ⇒ liquid ⇒ gas

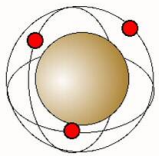


T ≈ 300°K
(ambient)

E ≈ 0.03 eV

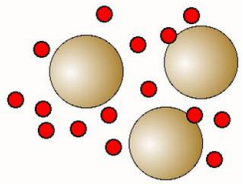


Atoms ⇒ plasma (ions, electrons)

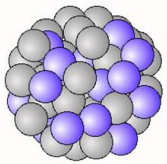


T ≈ 10.000°K
(sun surface)

E ≈ 1 eV

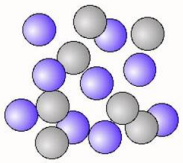


Nuclei ⇒ nucleons (protons, neutrons)



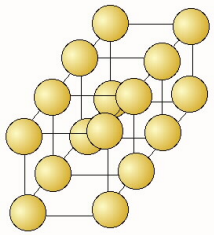
T ≈ 60x10^9°K
(supernova core)

E ≈ 5 MeV



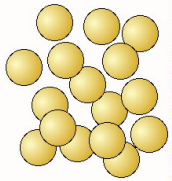
Derretendo a matéria ...

Solid ⇒ liquid ⇒ gas

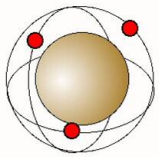


T ≈ 300°K
(ambient)

E ≈ 0.03 eV

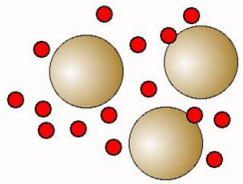


Atoms ⇒ plasma (ions, electrons)

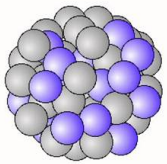


T ≈ 10.000°K
(sun surface)

E ≈ 1 eV

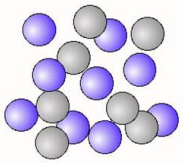


Nuclei ⇒ nucleons (protons, neutrons)

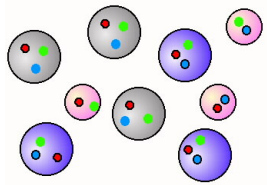


T ≈ 60×10^9°K
(supernova core)

E ≈ 5 MeV

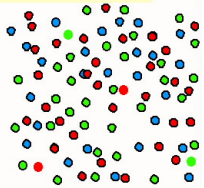


Nucleons ⇒ partons (quarks, gluons)



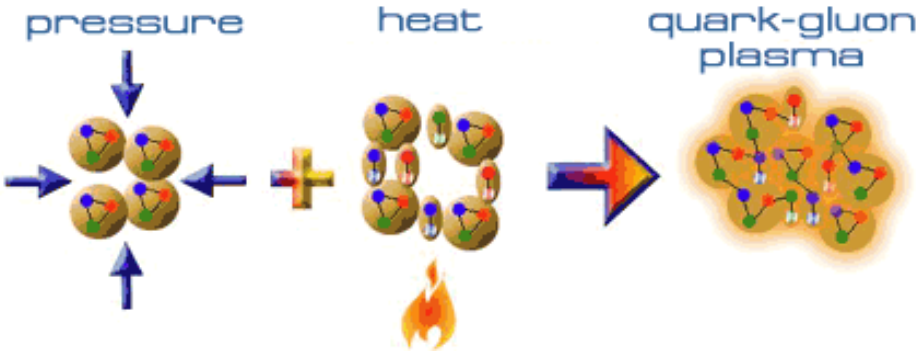
T ≈ 2×10^{12}°K
(10^5 x sun core)

E ≈ 200 MeV



Como criar o PQG no laboratório?

- precisa ter um sistema onde a energia seja suficiente para "derreter" os hádrons em uma sopa de quarks e glúons
- necessárias altas energia e densidade!!

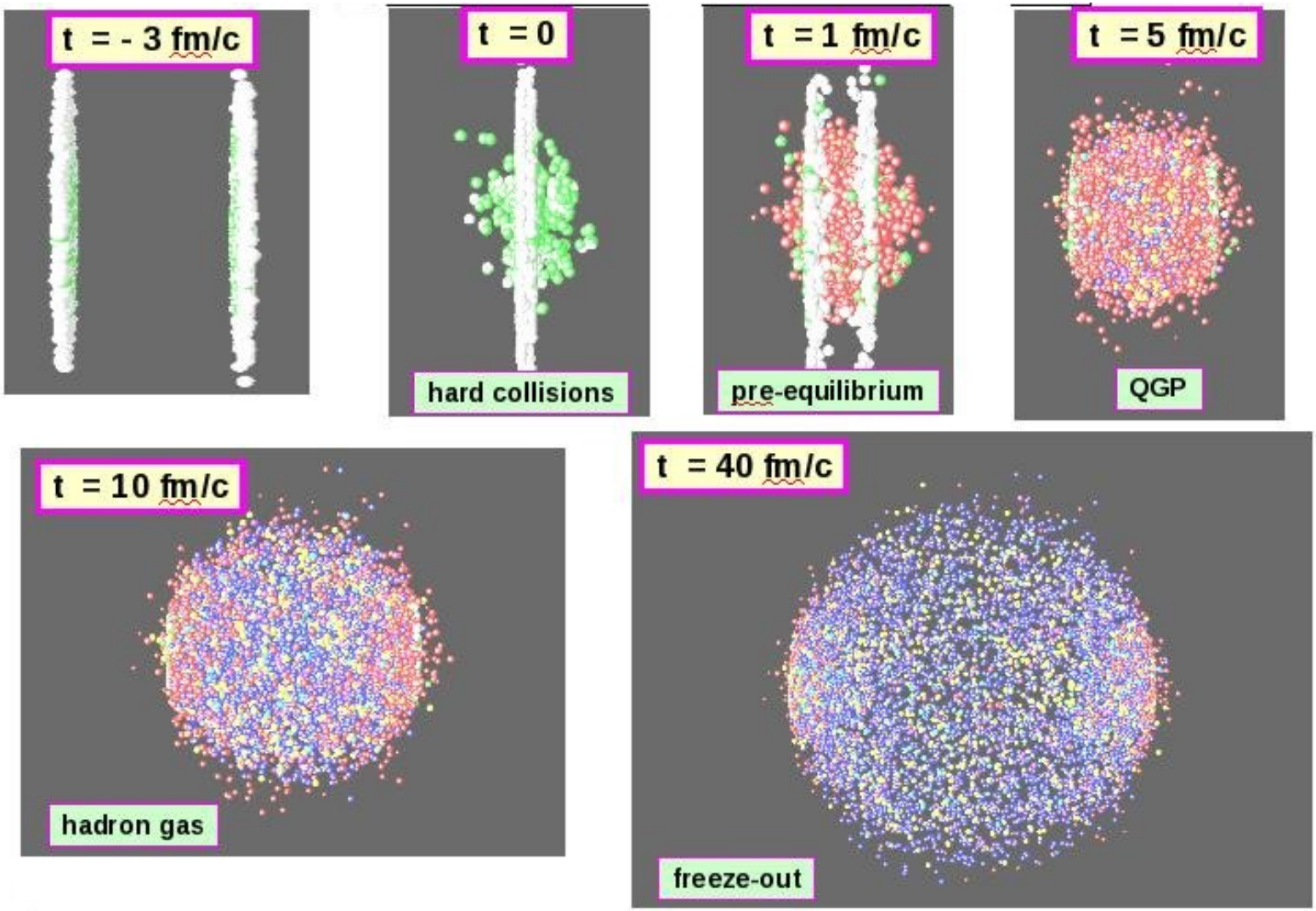


$\Rightarrow$ fazer colisões de íons pesados

- sistema inicial com mais alta densidade
- longo tempo de vida
- maior extensão espacial
- fenômeno coletivo mais forte

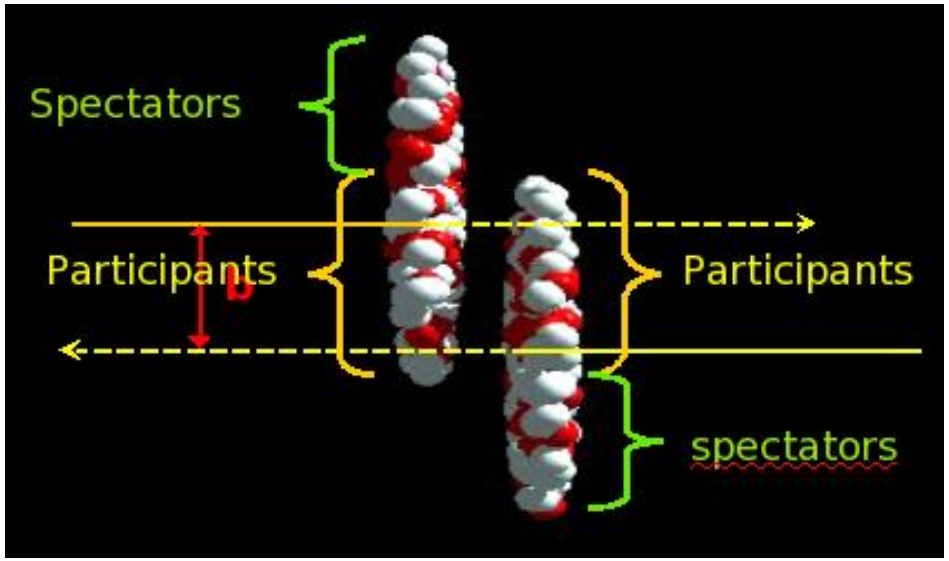
Colisões de Íons Pesados

Colisões de Íons Pesados



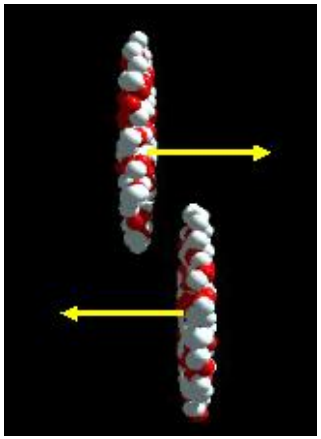
Parâmetro de Impacto e Centralidade

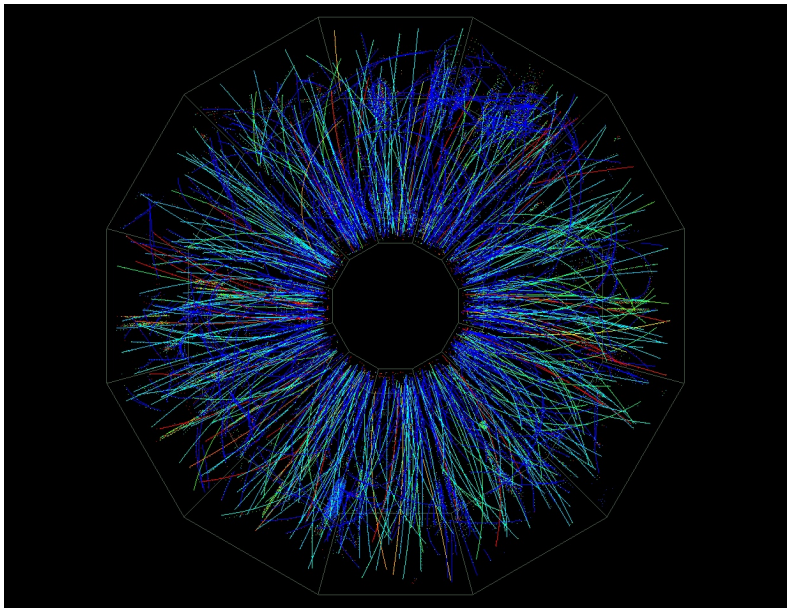
- em uma colisão de íons pesados, é importante caracterizar a reação: periférica ou central

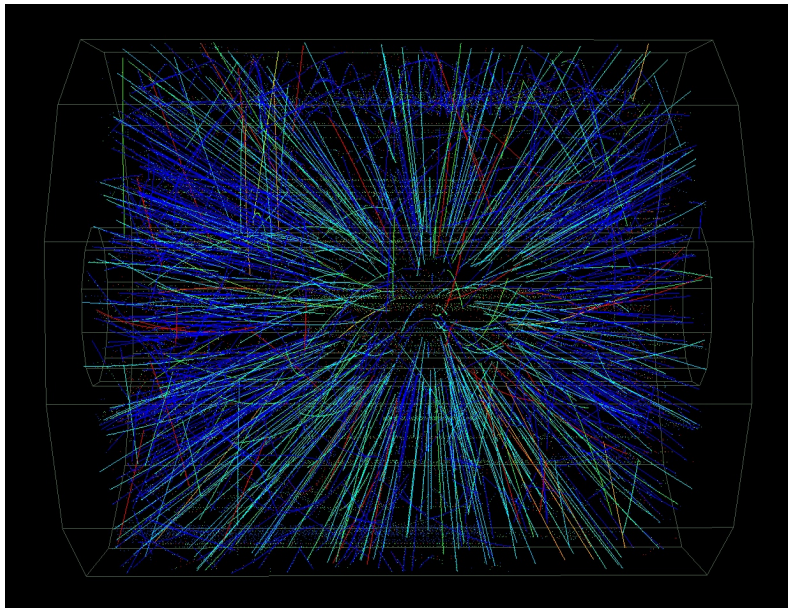


- o número de participantes ativos pode varias de 2 a 396!
- quanto menor o parâmetro de impacto, mais nucleons participam
- quanto maior o número de participantes, maior o número de partículas produzidas no estado final

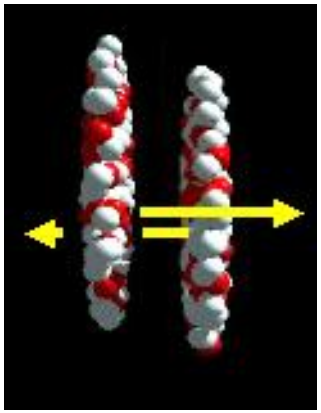
Colisão Periférica

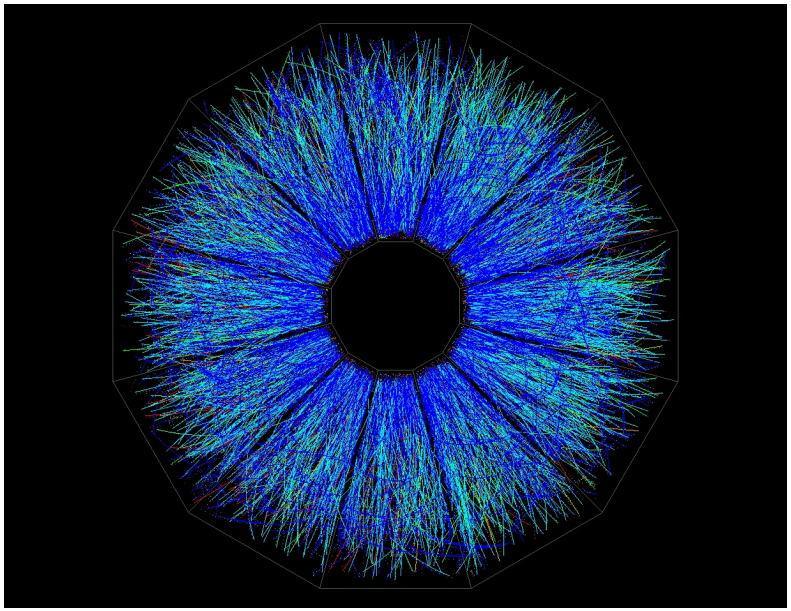


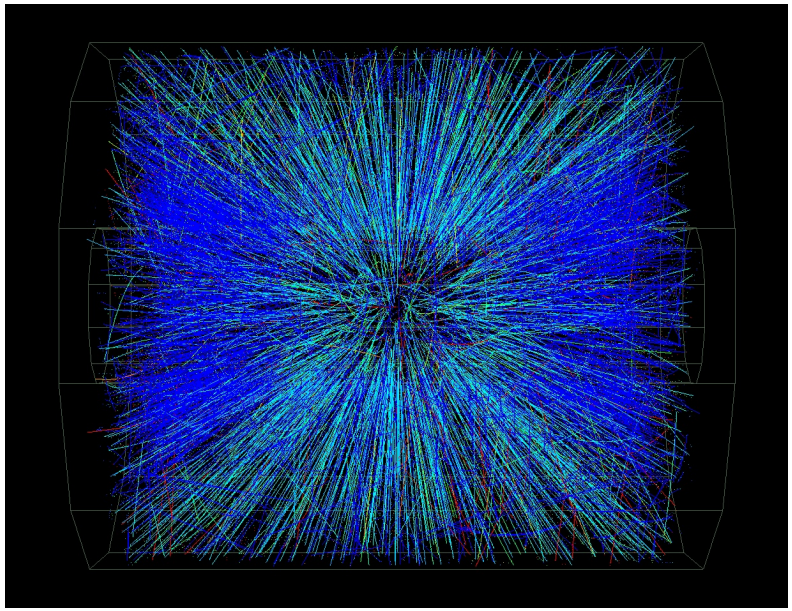




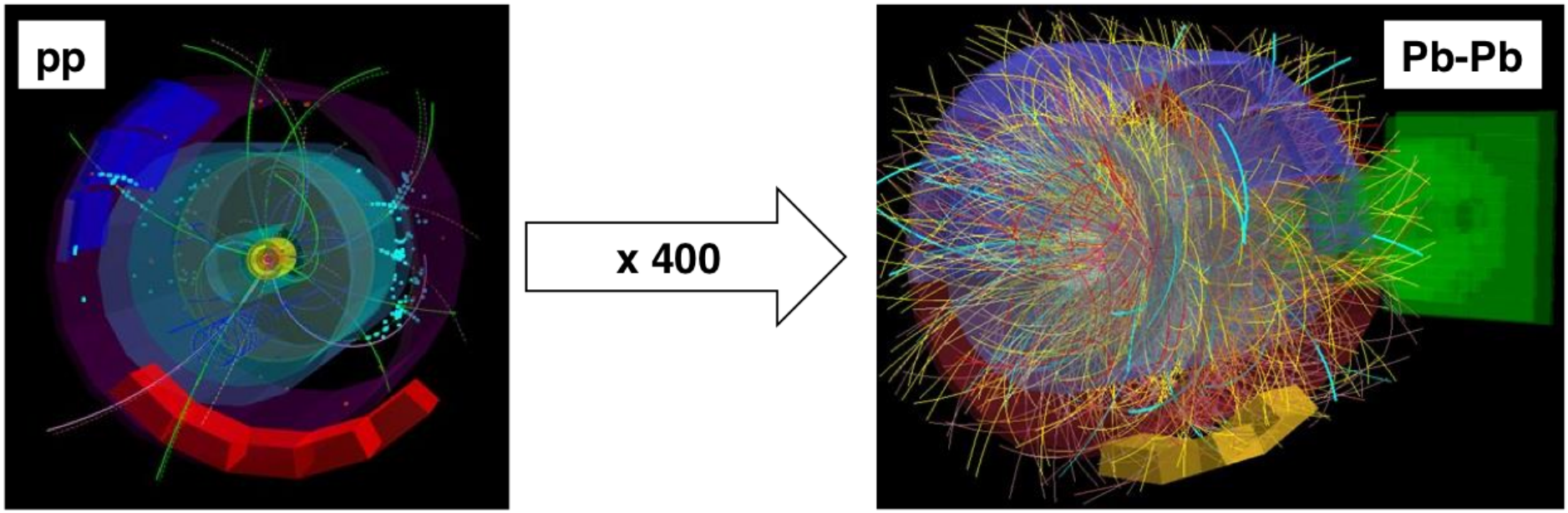
Colisão Central







Comparação pp vs PbPb



RHIC

Experimentos no BNL: STAR, PHENIX, PHOBOS, BRAHMS

- Au+Au @ $\sqrt{s} =$ $62 - 130 - 200$GeV



Da parte "soft" dos dados:

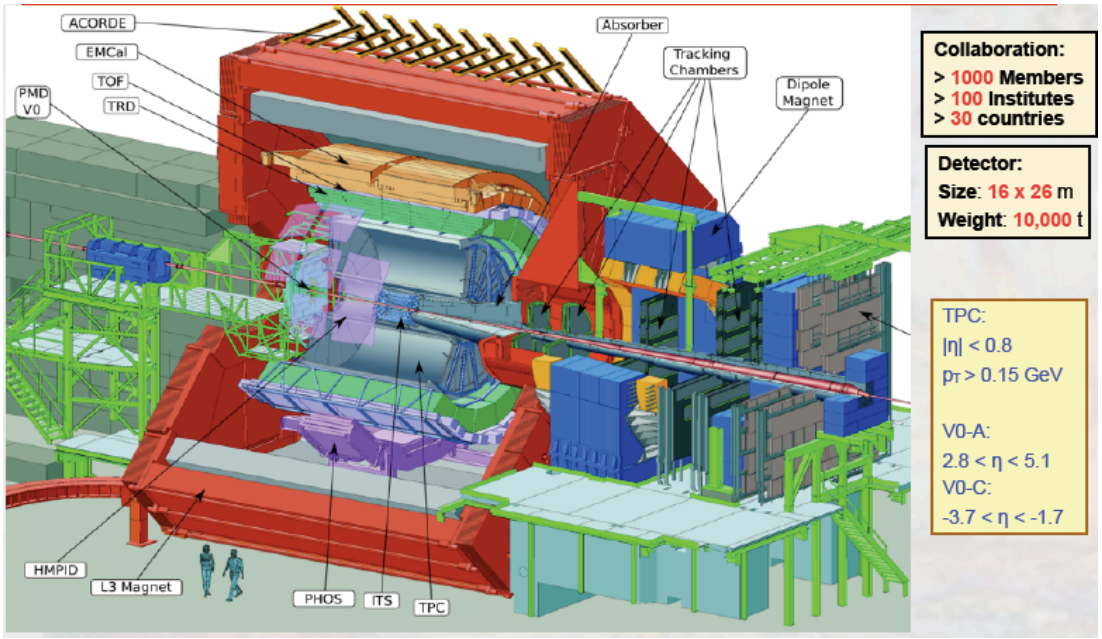
- sistema tem alta pressão, com rápida expansão e rápido equilíbrio
- temperaturas de "congelamento" químico e térmico consistentes com transição de fase
- comportamento coletivo indicando baixa viscosidade

Da parte "hard" dos dados:

- é fortemente interagente
- Jet Quenching (amortecimento de jatos)

Muitas assinaturas qualitativas e quantitativas de graus de liberdade partônicos confirmando um estado desconfinado de quarks e glúons altamente interagente: se comporta como líquido perfeito (e não gás ideal)

ALICE - Íons Pesados no LHC



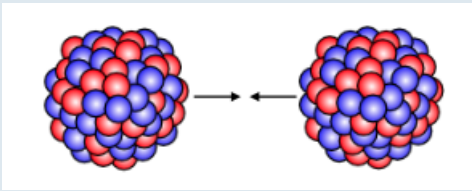
- confirmar interpretações anteriores ao testar predições/extrapolações para o LHC: líquido ideal
- há transição de fase do PQG fortemente interagente para PQG ideal?
- será o estado inicial dominado por ainda outro tipo de estado da matéria (estado quântico mais denso) ?

ATLAS, CMS & LHCb também têm programa de íons pesados

Condições das tomadas de dados

Pb-Pb

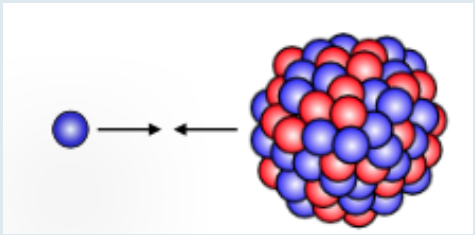
$\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.0$ TeV



criar e caracterizar o PQG

p-Pb

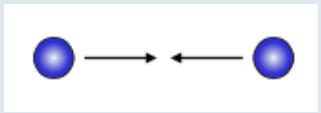
$\sqrt{s_{NN}} = 5.0, 8.0$TeV



experimento de controle - efeitos de matéria "fria"

p-p

$\sqrt{s} = 2.76, 5, 7, 8$TeV

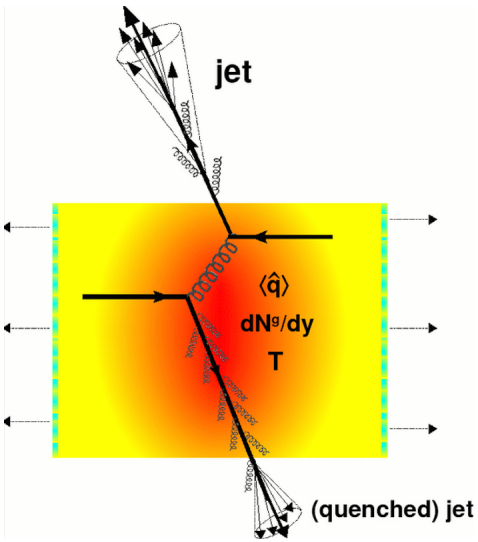


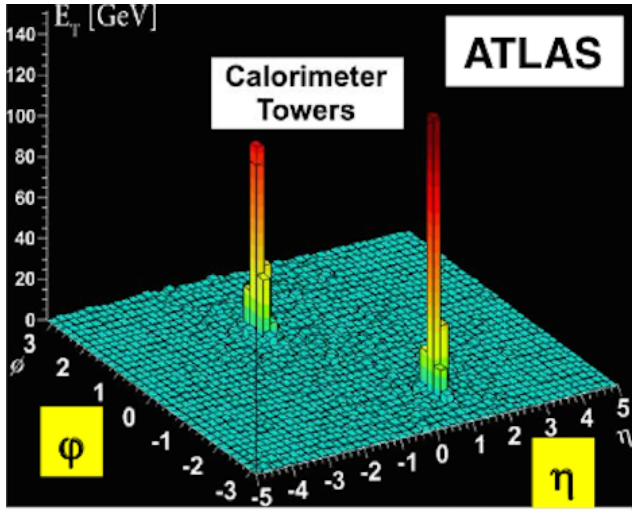
referência

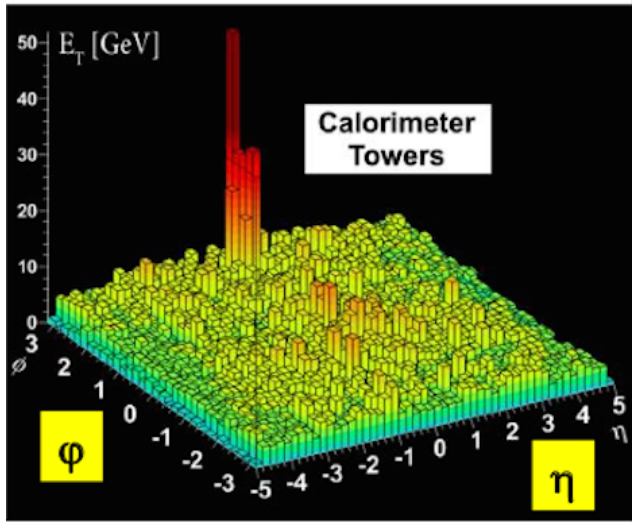
Principais Resultados

Jet Quenching

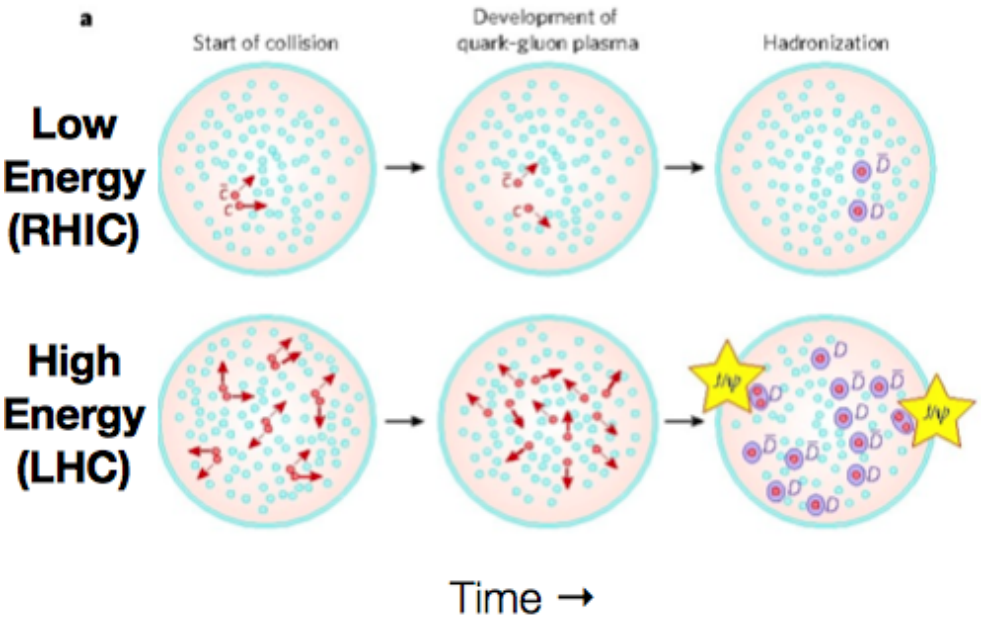
- Jet Quenching: supressão de produção de jatos em colisões centrais
- QGP: alta densidade de quarks e glúons ⇒ quark/glúon atravessando sente campos de cor
- perdas de energia por colisões (espalhamentos elásticos, baixo momento)
- perdas de energia radiativas (espalhamentos inelásticos, alto momento; bremsstralung de glúons!)

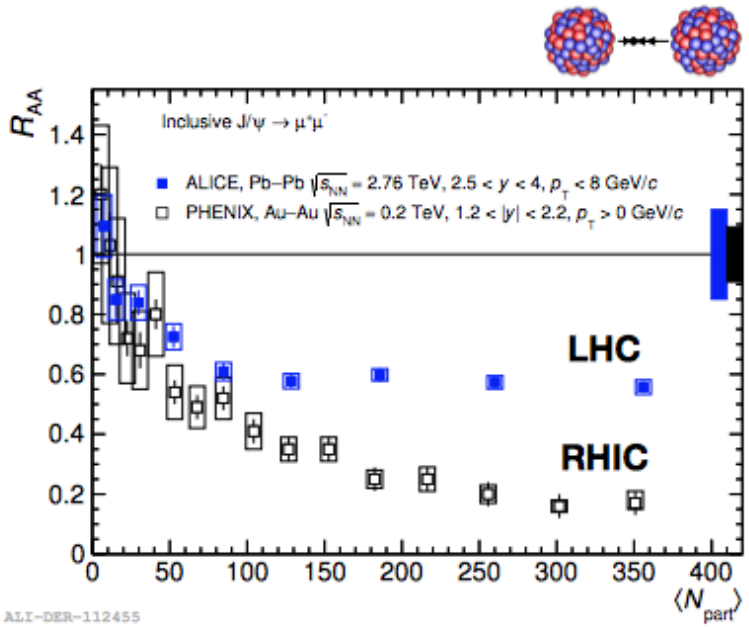






Suppressão de J/ψ





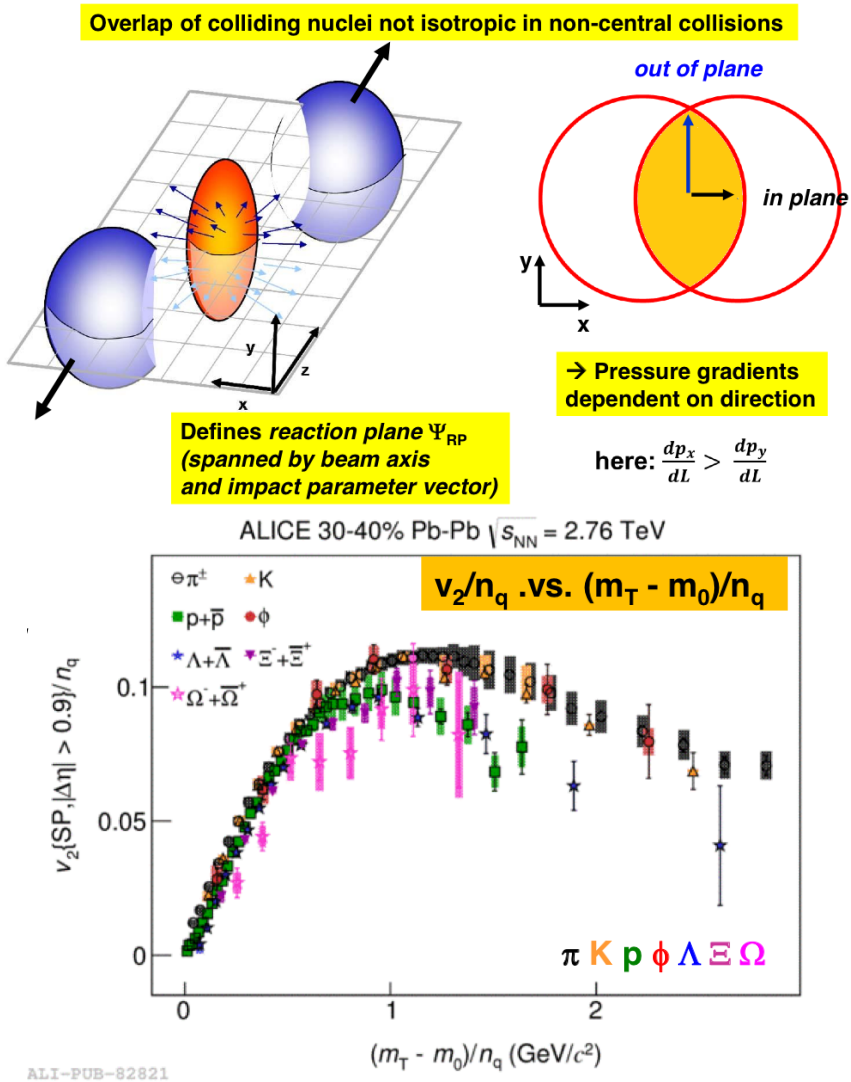
- J/ψ - par $c\bar{c}$ ligado a uma distância $\sim$ 0.5fm
- dentro do meio do QGP a ligação pode ser blindada pelo enorme número de cargas de cor

- a ligação do J/ψ se "desfaz" $\Rightarrow$ supressão
- mas no LHC tem regeneração !

A supressão de estados é um "termômetro do QPG": quanto menor a energia de ligação , maior a supressão

Fluxo Elíptico

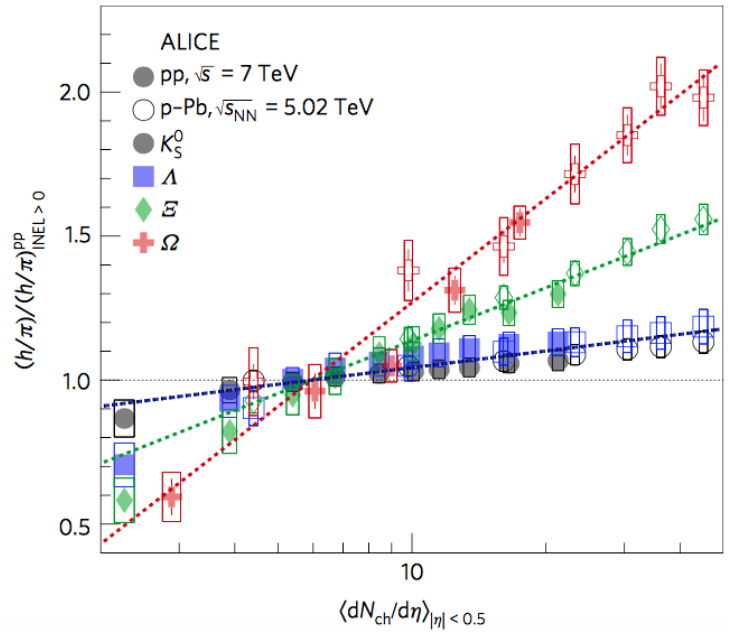
- gradiente de pressão maior no plano
- pressão empurra os pártons pro plano
- anisotropria espacial gera anisotropia de momento $\Rightarrow$ partículas mais rápidas no plano!
- observável: v_2 (2^o coef. Fourier da asimetria azimutal) [e até v_6]
- informação sobre equação de estado e propriedades de transporte da matéria
- revela que a matéria densa e quente criada na colisão se comporta como fluido não viscoso



Uma surpresa: p-p com alta multiplicidade

- A produção aumentanda de hádrons estranhos é uma característica conhecida no ambiente do plasma de quarks e glúons
- objetivo: comparar a produção de hádrons estranhos $K^0_S, \Lambda, \bar{\Lambda}$, e multi-estranhos $\Xi^+, \Xi^-, \Omega^-, \Omega^+$ em colisões p-p com alta multiplicidade com aquelas em p-Pb e Pb-Pb

- o que se vê é também um aumento de produção em p-p com alta multuplicidade!
- compatível com colisões Pb-Pb
- Modelos não consideram isto!
- Novo paradigma

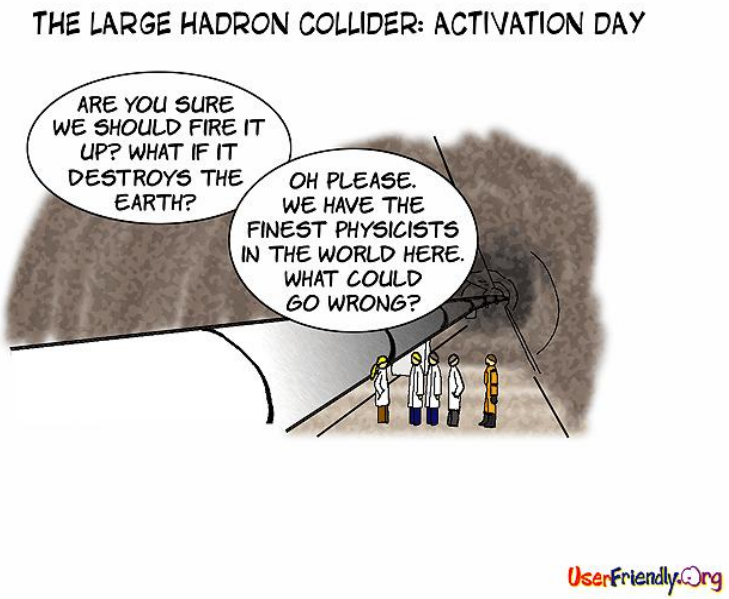


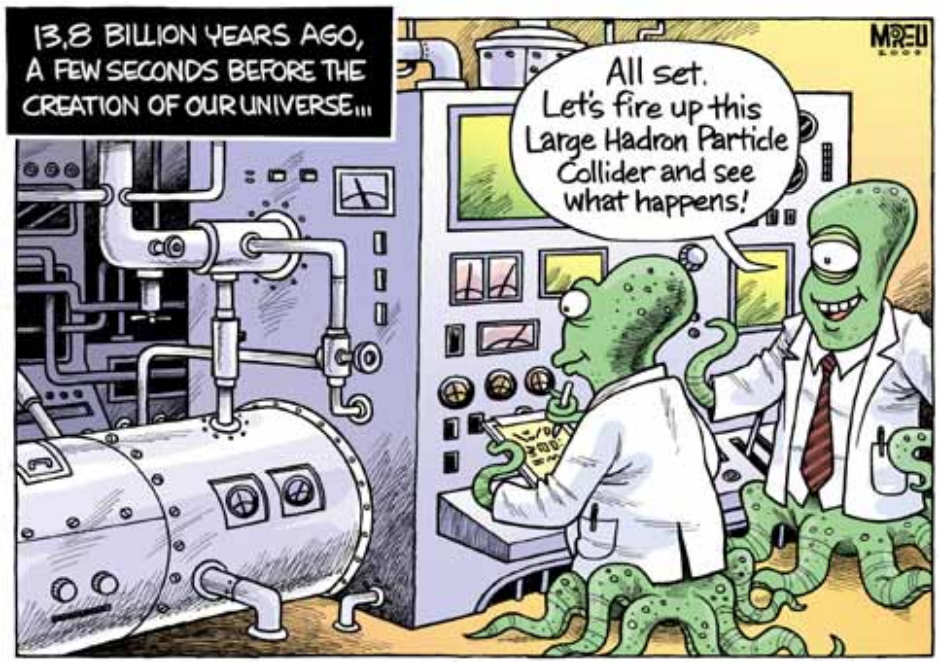
Colisões com Íons Pesados no LHC: Conclusões

- meio denso "colorido" fortemente acoplado é produzido em colisões de íons pesados
- produção de algumas partículas fortemente suprimida
- matéria criada está em equilíbrio térmico local
- produção de partículas é descrita por modelos estatísticos
- observações recentes em colisões p-p e p-Pb mostram evidência da criação de QGP em sistemas pequenos!!
- a expansão é descrita por hidrodinâmica de "líquido perfeito"

Backup

Início "inicial": Setembro de 2008





Alguns dias depois ..... O Acidente no LHC

- Em 19/09/2008, durante o aumento da potência elétrica nos imãs de dipolo principais
  - Uma ligação elétrica com problemas
  - Rápido super-aquecimento dos magnetos
  - Vazamento de hélio liquido devido a pressão
  - Alguns quadrupolos foram arrancados do lugar
- Reparo:
  - Precisou-se esperar vários dias para acessar o local
  - Diagnóstico cuidadoso, para evitar que ocorra novamente
- Reinício somente no fim de 2009 em novas condições ....

O Acidente no LHC

