Interações Fortes em Condições Extremas

Eduardo S. Fraga

Instituto de Física

Universidade Federal do Rio de Janeiro

First Lecture

★ Very basic discussion and motivation on matter under extreme conditions

★ Basic ingredients and thermodynamic requirements

★ Qualitative discussion on symmetries, phases and phase transitions

★ Extreme conditions in particle physics, nuclear physics and astrophysics

★ Final discussion with time for a lot of general questions!

★ Next lecture will be tougher. :-)

Second Lecture

★ First question you should ask: WHY??
- Motivation and some disturbing facts

✳ Collective effects x "fundamental" physics

★ Second question you should ask: WHERE??
- Accelerator experiments, astro, early universe

✳ My focus: the EoS

★ Third question you should ask: HOW??
- Theory, models, etc

Third Lecture

★ Introduction and motivation

★ Evidence for quarks, gluons & color

★ The QCD Lagrangian

★ Asymptotic freedom & the vacuum of QCD

★ Effective field theory basic recipe

★ Summary

Fourth Lecture

★ Drawing the QCD phase diagrams

★ Phase transitions in QCD: how?

★ A very simple framework: the bag model

★ Symmetries in the QCD action: general picture

★ SU(Nc), Z(Nc) and Polyakov loops

★ Adding massless quarks (chiral symmetry)

★ Summary

Fifth Lecture

- ★ Finite T x finite μ: pQCD, lattice, sign problem, etc
- ★ Nuclear EoS: relativistic and non-relativistic (brief)
- ★ pQCD at nonzero T and μ (brief)
- ★ Cold pQCD at high density for massless quarks
- ★ Nonzero mass effects
- ★ Compact stars and QCD at high density
- ★ Summary

Plano - Lecture 1

- Que tipo de perguntas gostaríamos de responder e o que esperamos aprender com isso [Para onde vamos? Por quê?]
- Do que precisamos para estudar a matéria em condições extremas? [De "um monte de matéria", de altas temperaturas, altas densidades, etc. - meio em equilíbrio termodinâmico em condições extremas!]
- Fases da matéria, parâmetros de controle e transições de fase; simetria, estrutura [A água como exemplo ilustrativo]
- Condições extremas em Física de Partículas hoje (e no passado remoto...) - o plasma de quarks e gluons [Onde? Como?]
- Comentários finais

Perguntas

A investigação sobre a matéria em "condições extremas" visa a entender a natureza e a estrutura íntima da matéria e suas interações fundamentais.

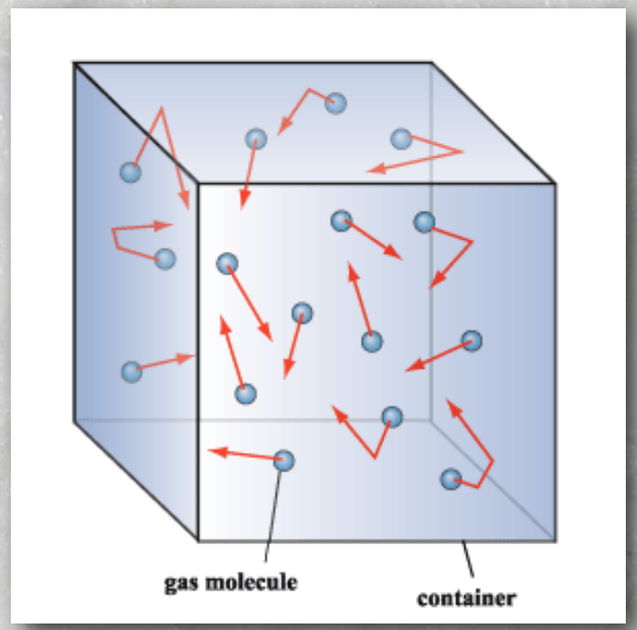
Mas também pode ser colocada, em parte, como a tentativa de responder a duas perguntas infantis:

- O que acontece quando aquecemos mais e mais a matéria?
- O que acontece quando pressionamos mais e mais a matéria?

Para isso, precisamos de "um monte de matéria". Pois temos que elevar sua temperatura e densidade, conceitos "macroscópicos".

Implícito aos conceitos de temperatura, pressão, densidade, etc. existe a idéia de um sistema de MUITAS partículas microscópicas. Nele podemos realizar médias e definir tais quantidades macroscópicas.

A temperatura, e.g., está relacionada à energia cinética média das partículas, ou seja, é uma medida da energia associada ao seu "movimento em média".



[Contextual Physics]

Paradoxalmente, em geral é mais fácil descrevermos um sistema com trilhões de partículas do que um sistema com algumas partículas (uma é fácil, duas reduzem-se a uma "efetiva", mas a partir de 3 complica... Porém, descrever muitíssimas torna-se simples novamente!)

Por que? Porque métodos estatísticos tornam-se cada vez mais eficientes e precisos!

Logo, precisamos de "um monte de matéria", MUITAS partículas. Então, será que precisamos de sistemas enormes na escala humana?

Não necessariamente... E, aqui, estaremos interessados em sistemas geralmente MUITO pequenos. Para termos uma ideia do enorme universo existente no mundo submicroscópico, consideremos um exemplo de comparação de escalas bem concreto:



[Olhares]



[Cronômetro]

$$V_{areia} \approx L \cdot d \cdot h$$
$$V_{grao} \approx a^3$$

$$V_{areia} \approx N \cdot V_{grao} \implies N \approx \frac{L \cdot d \cdot h}{a^3}$$

$$L \approx 8 \text{ km} \quad \text{(na verdade, do Leme ao Leblon!)}$$
$$d \approx 200 \text{ m}$$
$$h \approx 10 \text{ m} \implies N \approx 10^{17}$$
$$a \approx 0,5 \text{ mm}$$

Quantos grãos de areia existem na praia de Copacabana?



Quantos "átomos" existem em um grão de areia?



[Olhares]

$$V_{atomos} \approx \frac{4}{3}\pi(10\mathring{A})^3 \approx 10^{-27} \text{ m}^3$$

$$n \approx \frac{a^3}{V_{atomos}} \implies n \approx 10^{17} \text{ !!!!}$$

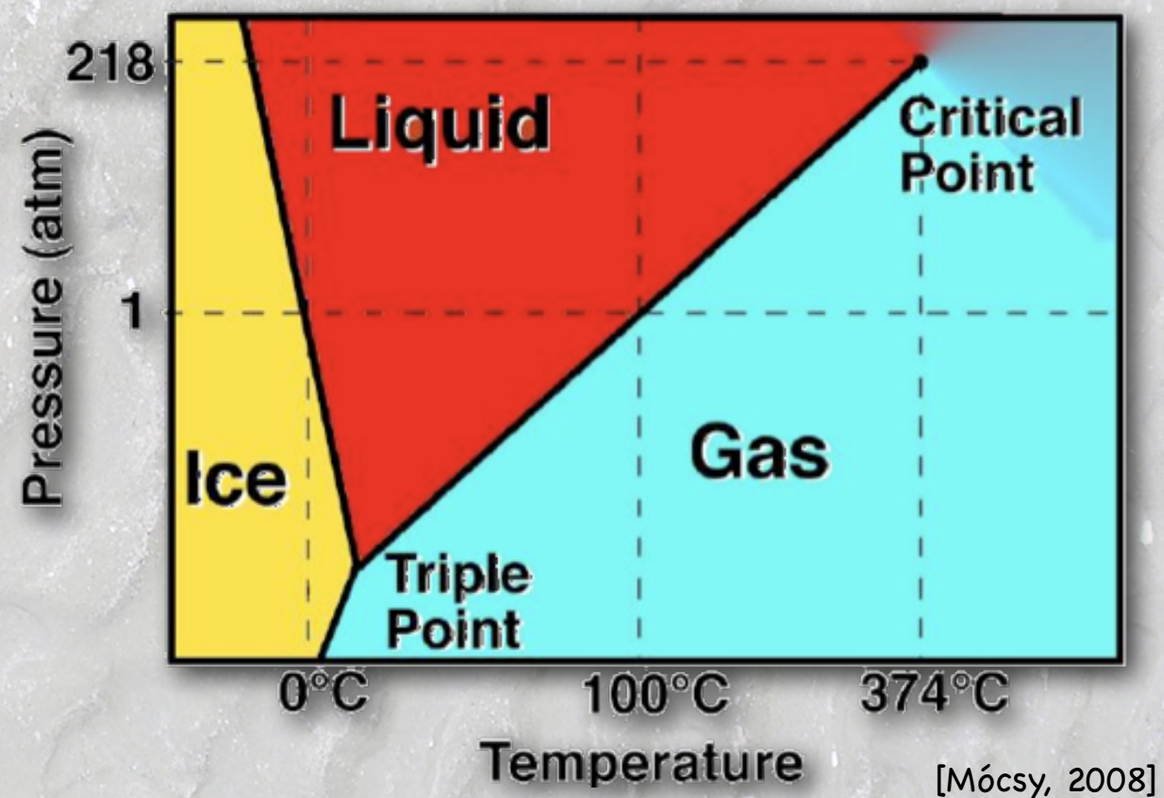
N.B.: Para definirmos temperatura, etc precisamos de um sistema com muitas partículas, mas não necessariamente "grande"!

Fases, parâmetros de controle e transições de fase [Ex.: água]

Três fases em uma só imagem:



Diagrama de fases da água



[Mócsy, 2008]

Variando parâmetros de controle (T, P, V, etc), podemos gerar transições de fase:



[APS]



[Cirellio]



[Cybernet]



[Curious Cat]

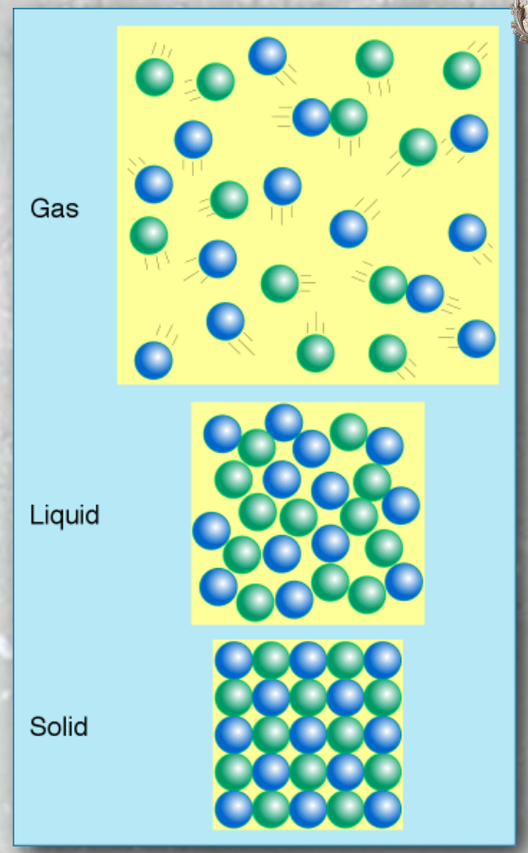
Simetria, estrutura, transições de fase, etc



[Wikipedia]

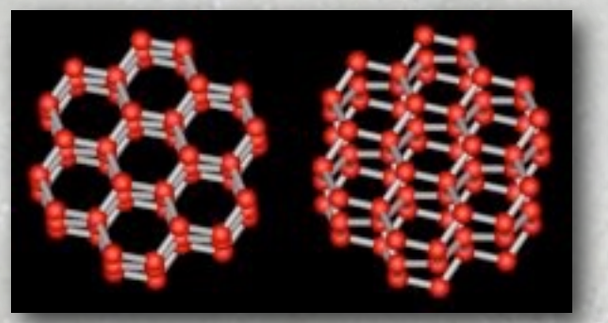


[NPL UK]



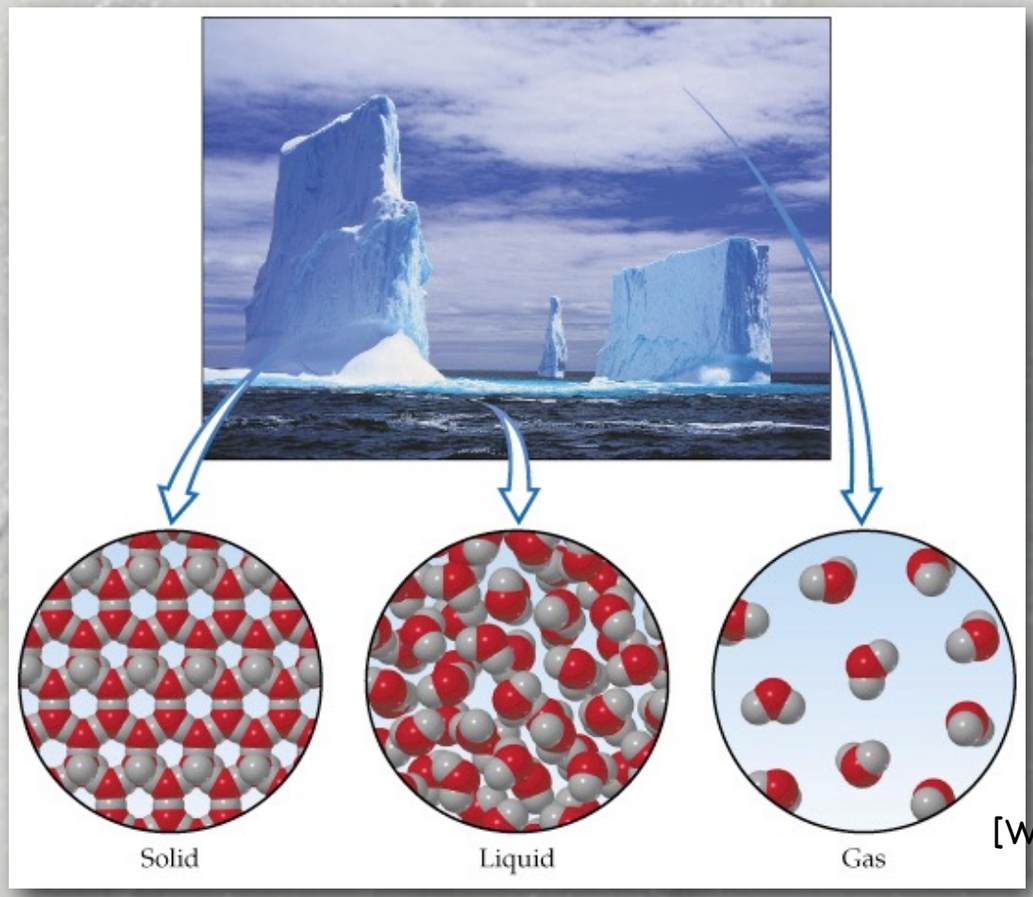
[CW Post]





[Libbrecht, Caltech]

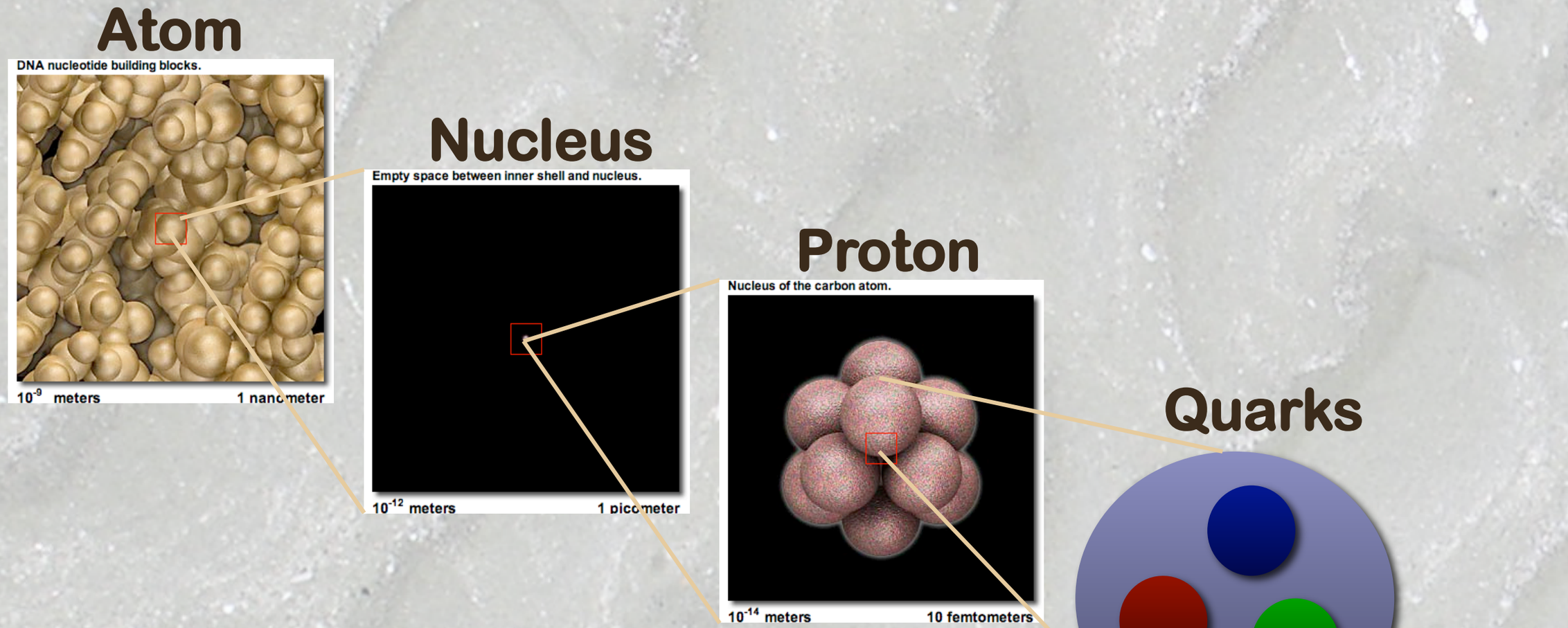
Mesmos "tijolos" básicos (H_2O), mas com diferenças em simetria, intensidade de interação, arranjo estrutural, resistência, etc.



[WPS Prenhall]

O mesmo se aplica a outras "substâncias" e podemos quebrar estruturas de matéria volumétrica ("um monte de matéria") usando condições extremas.

Mas o que nos interessa aqui são transições de fase na matéria subnuclear!

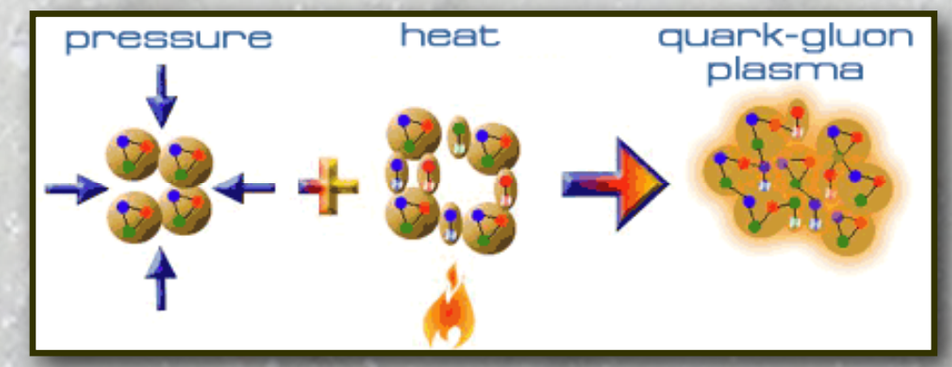


[Mócsy, 2008]

Próton, quarks, glúons e confinamento de cor

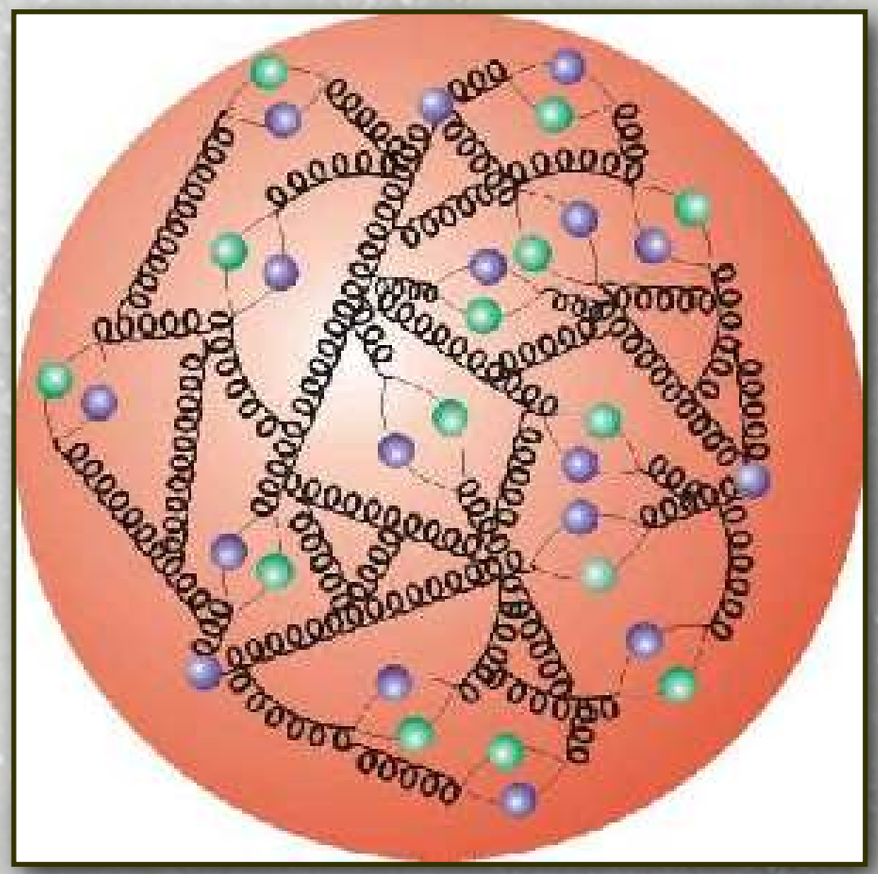


Novas fases!



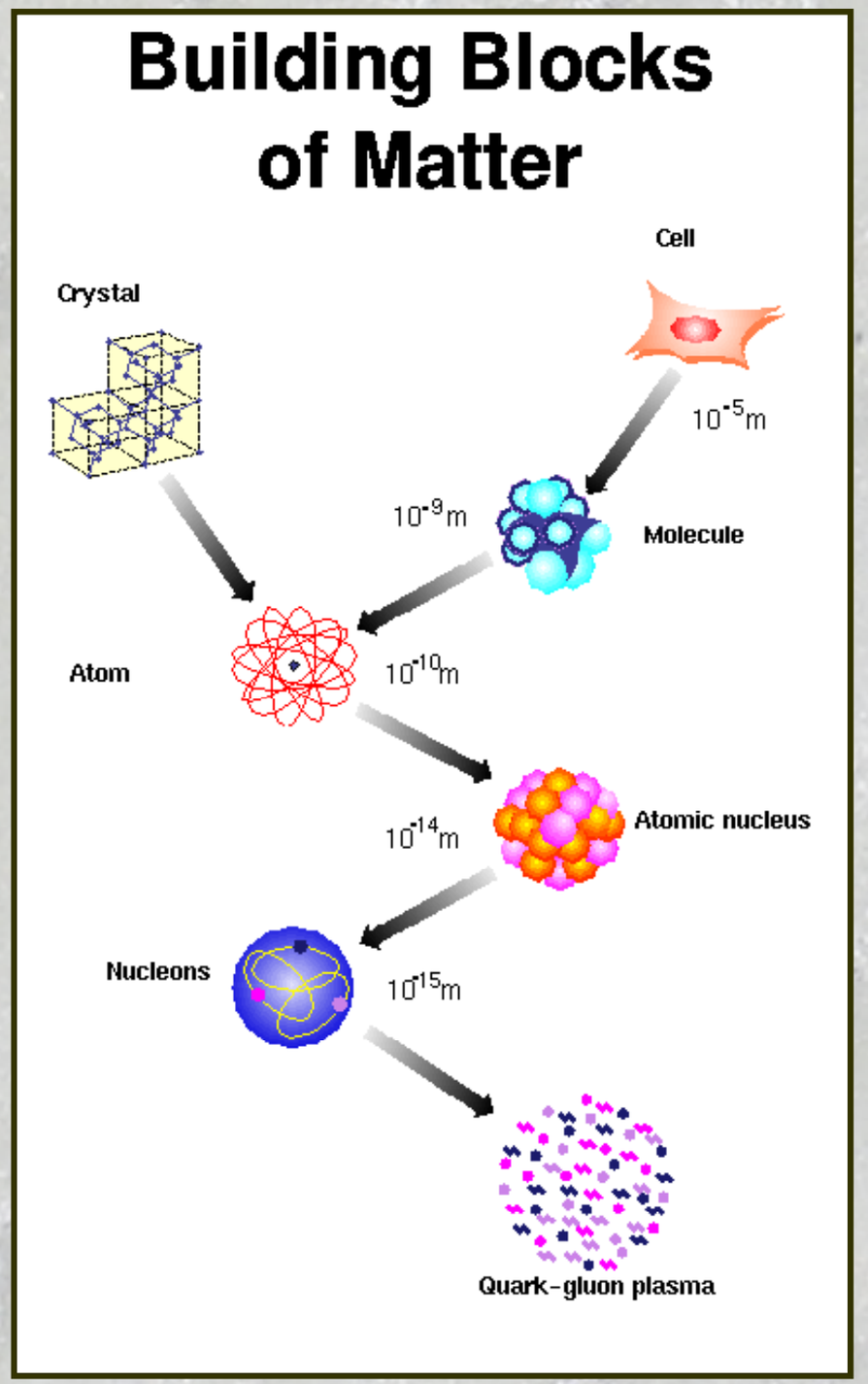
[RHIC]

Na verdade, uma imagem melhor do próton seria:



(Univ. Oxford)

Como "libertar" seu conteúdo (gerando uma transição de fase) ?

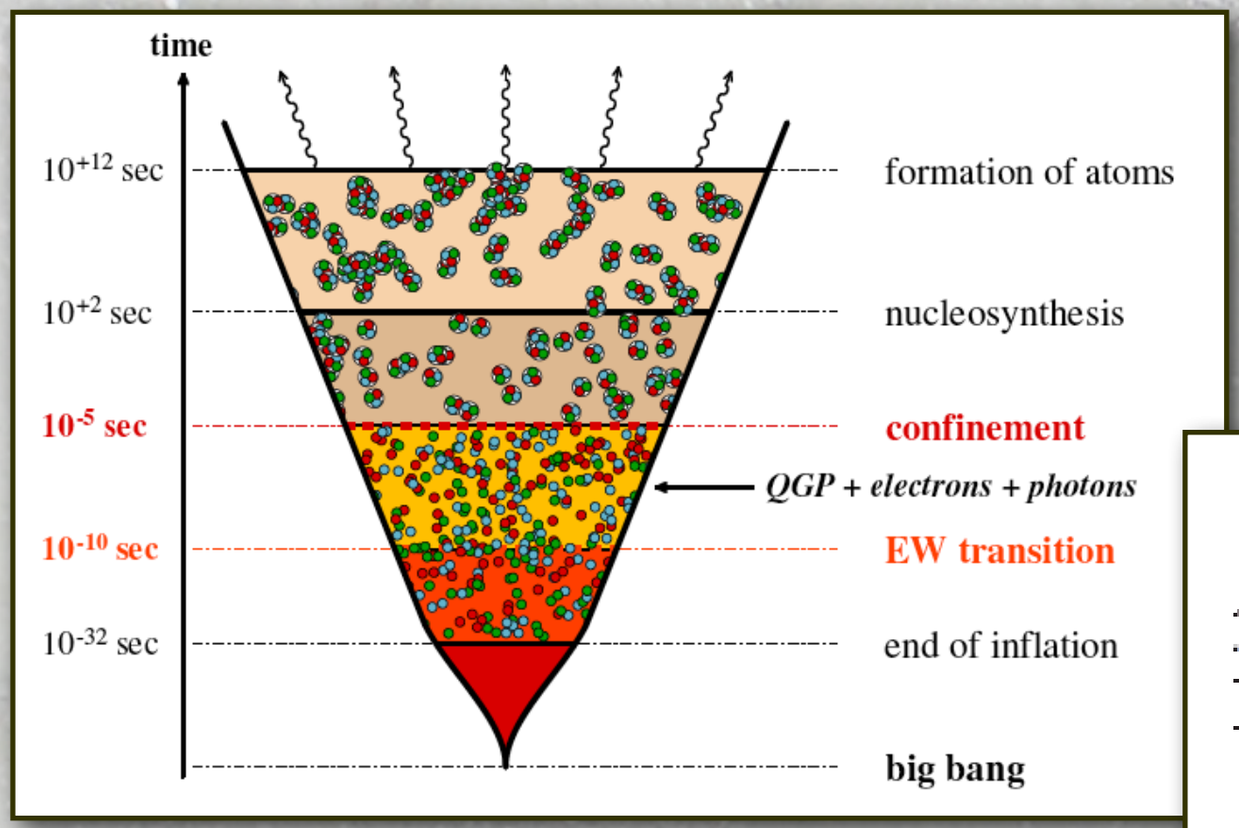


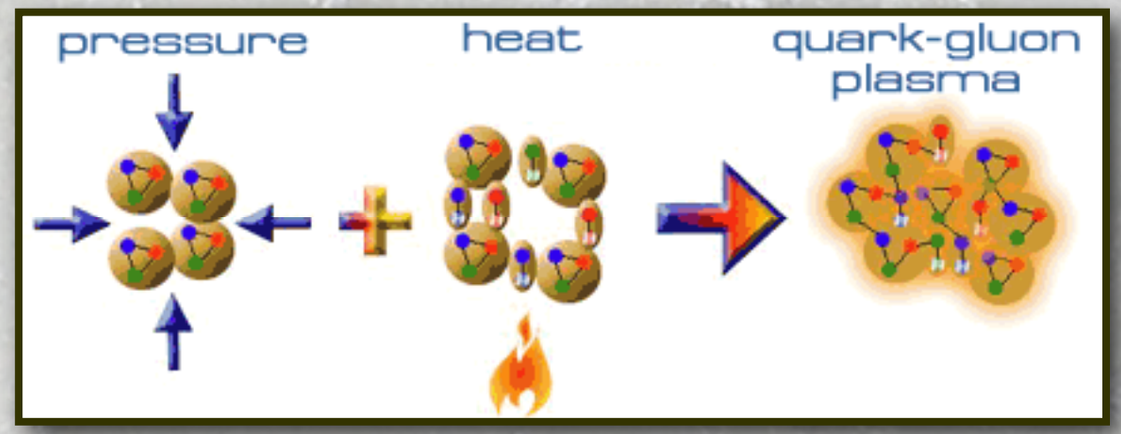
(M. Lahanas)

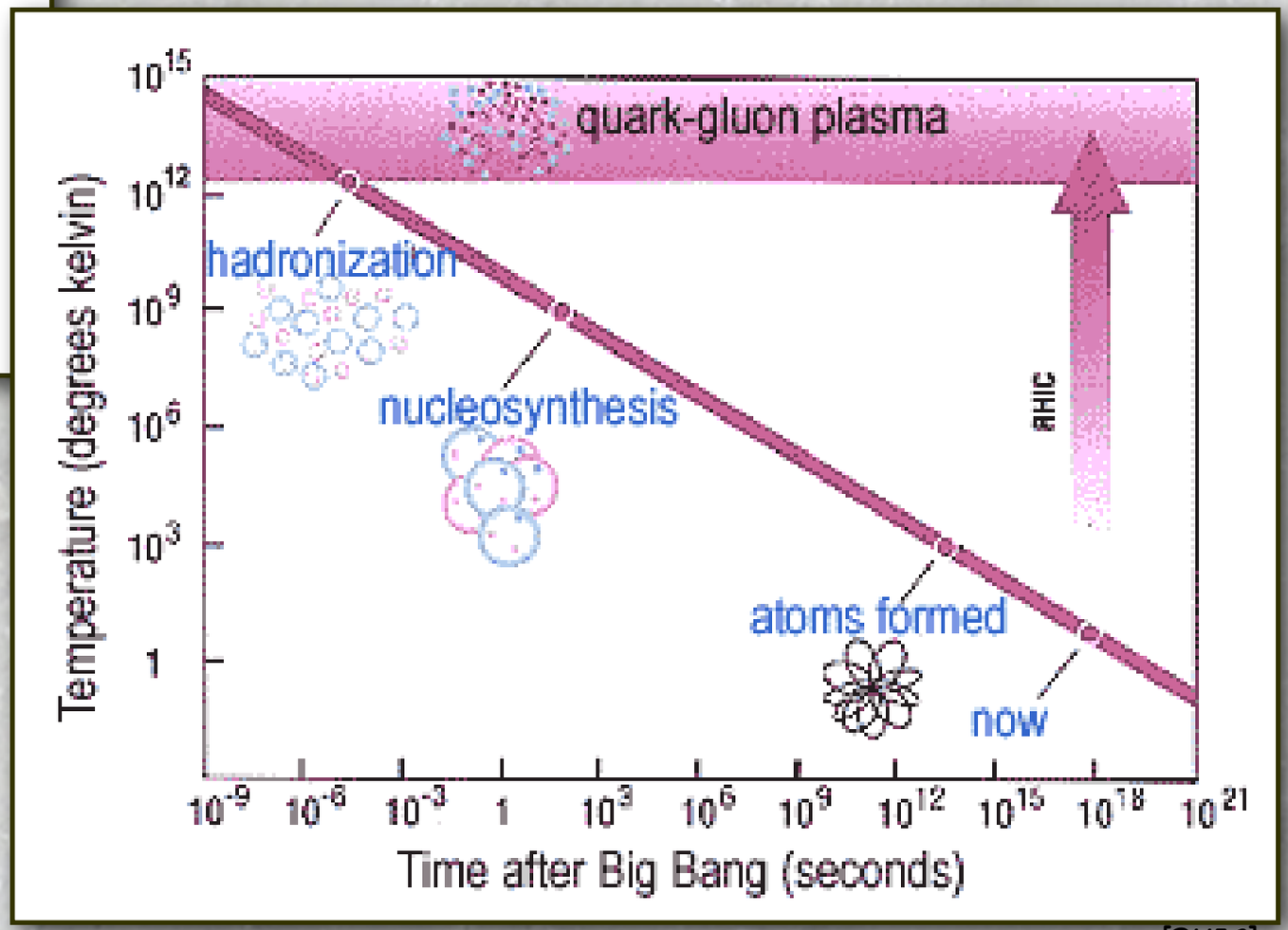
Precisamos levá-lo a uma situação na qual a interação que confina o seu conteúdo seja mais fraca -> altas densidades de energia -> precisamos aumentar a temperatura e/ou a densidade!

Onde encontramos tais condições extremas?

No universo primordial:



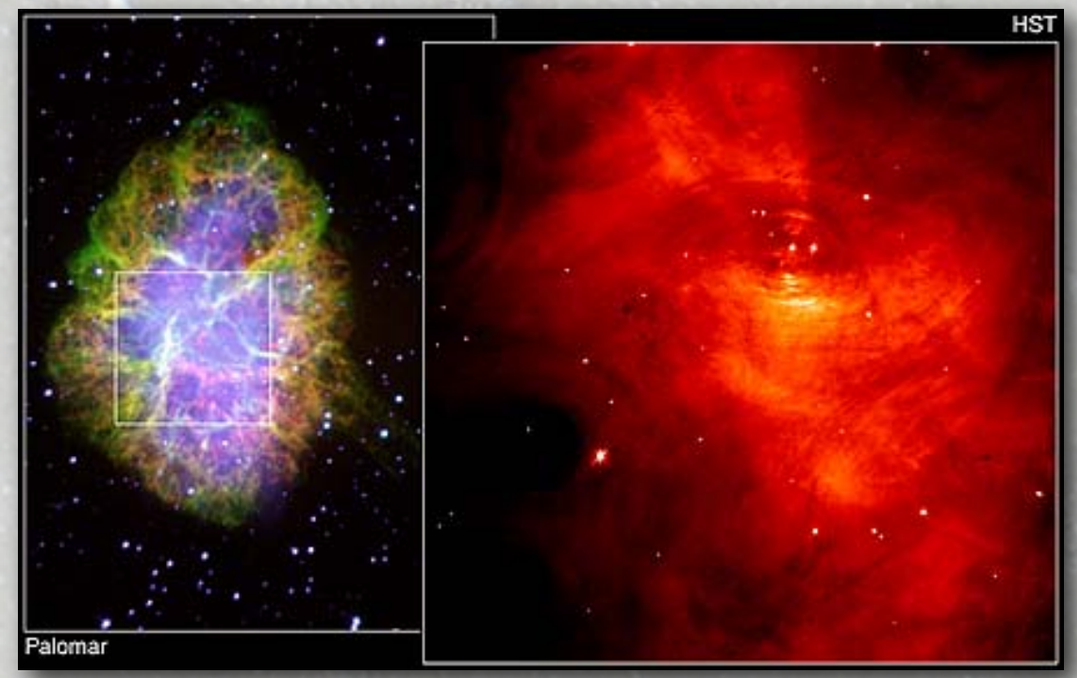




[RHIC]

As formas de matéria nas condições mais extremas de temperatura que se pode imaginar ocorreram na história primitiva do universo!

Em estrelas compactas:



[NASA]

Alguns números:

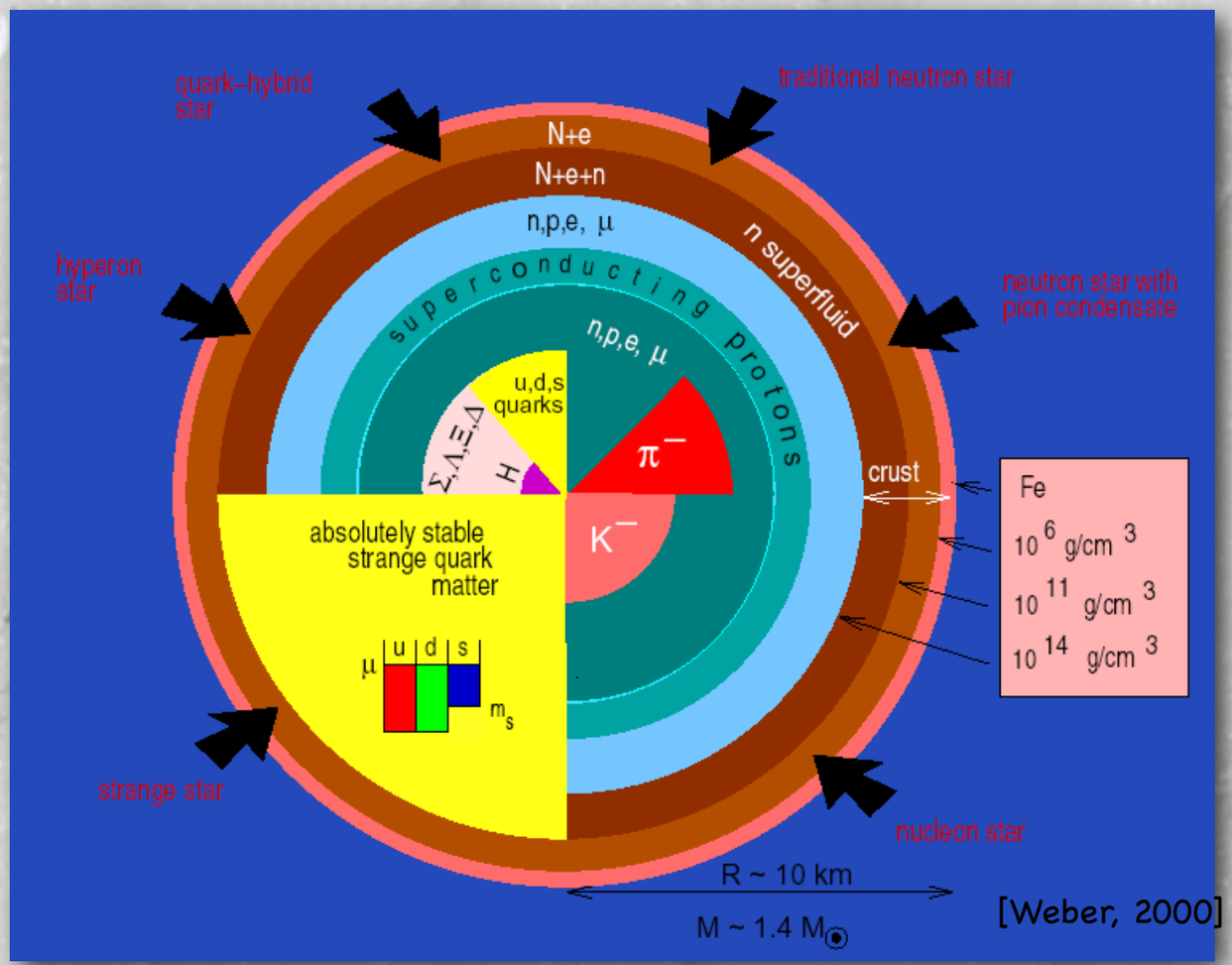
$n_0 = 3 \times 10^{14}$ g/cm^3 = 0.16 fm^{-3} (saturação nuclear)

$n_{core} \approx (4 - 15)\, n_0$ $[\langle n_{Terra} \rangle \approx 5.5$ g/cm$^3]$

M ≈ (1 - 2) massas solares $[M_S \approx 2 \times 10^{33}$ g]

R ≈ (8 - 16) Km $[R_S \approx 7 \times 10^5$ km]

A altíssimas densidades temos uma riquíssima estrutura de fases, com novos arranjos de matéria subnuclear e efeitos de supercondutividade, superfluidez, etc., com todas as partículas fundamentais desempenhando papéis relevantes!



[Weber, 2000]

No laboratório? Como?

Cientistas também já foram crianças. Meninos, por exemplo, brincam geralmente de carrinho desde cedo...

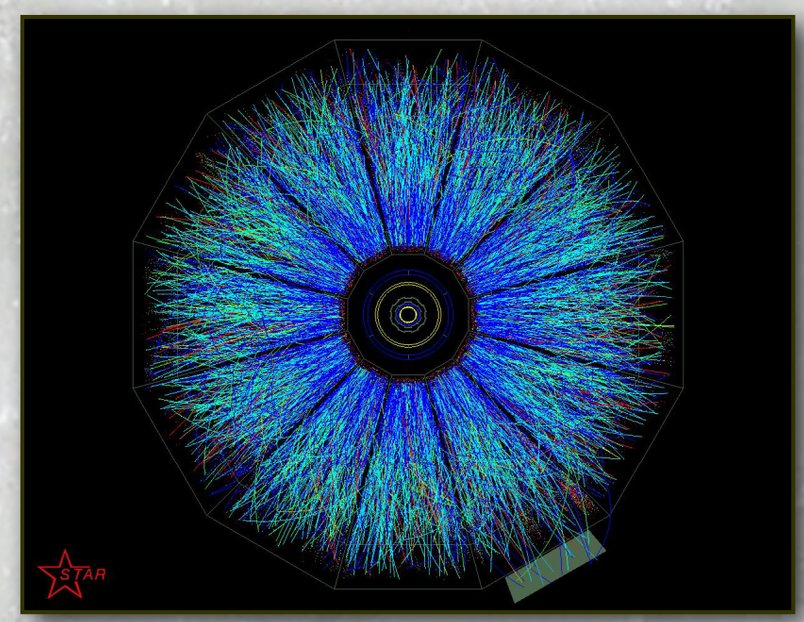


Depois, por curiosidade (para ver o que tem dentro e como funcionam) ou por simples espírito violento, passam a destruir os carrinhos...



Os curiosos podem se tornar ótimos físicos experimentais de partículas com "brinquedos sensacionais"!

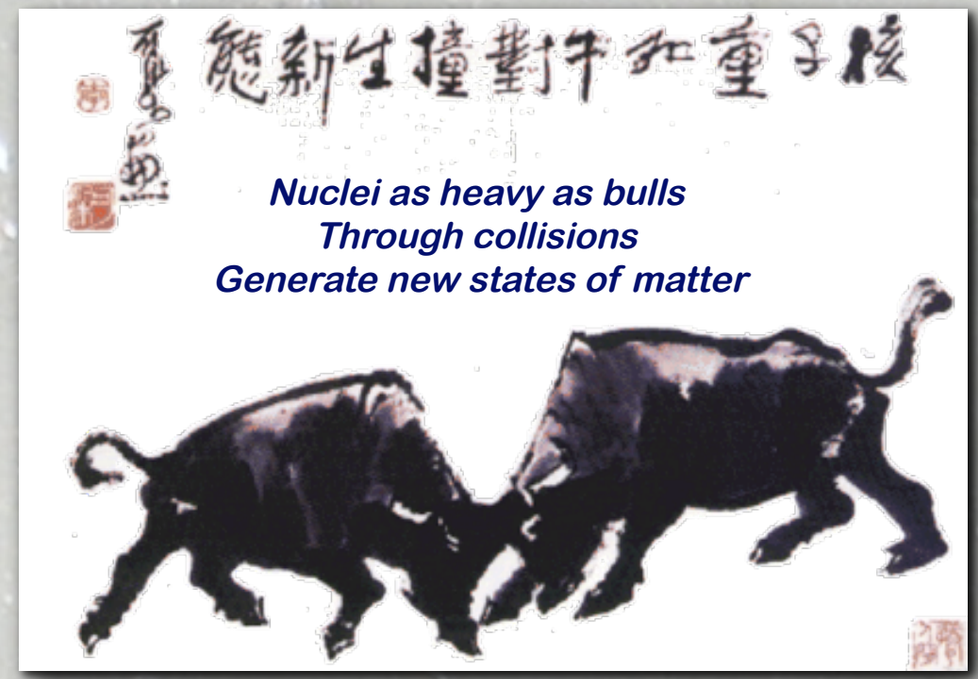




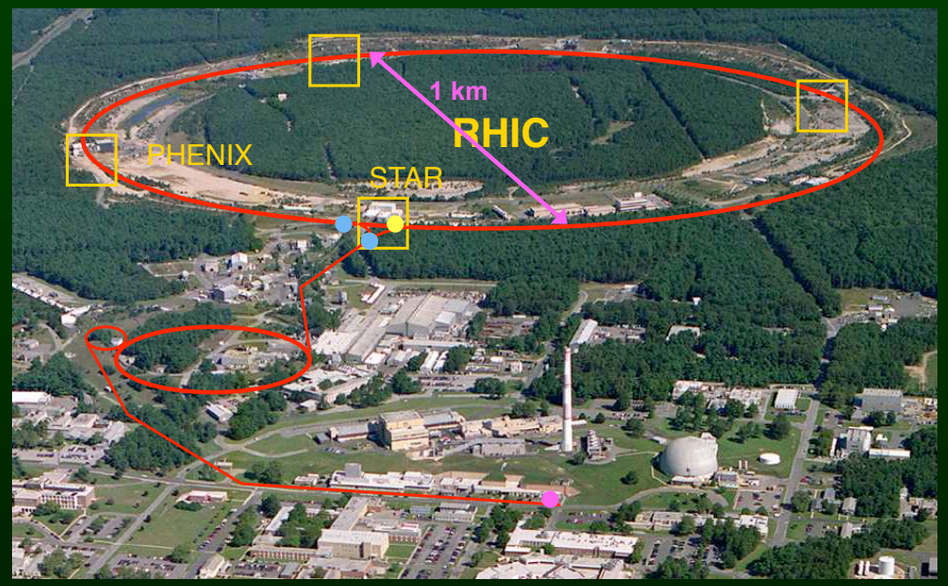
[RHIC]

Colisões de íons pesados ultrarelativísticos:

Sugestão de T.D. Lee em 1974!

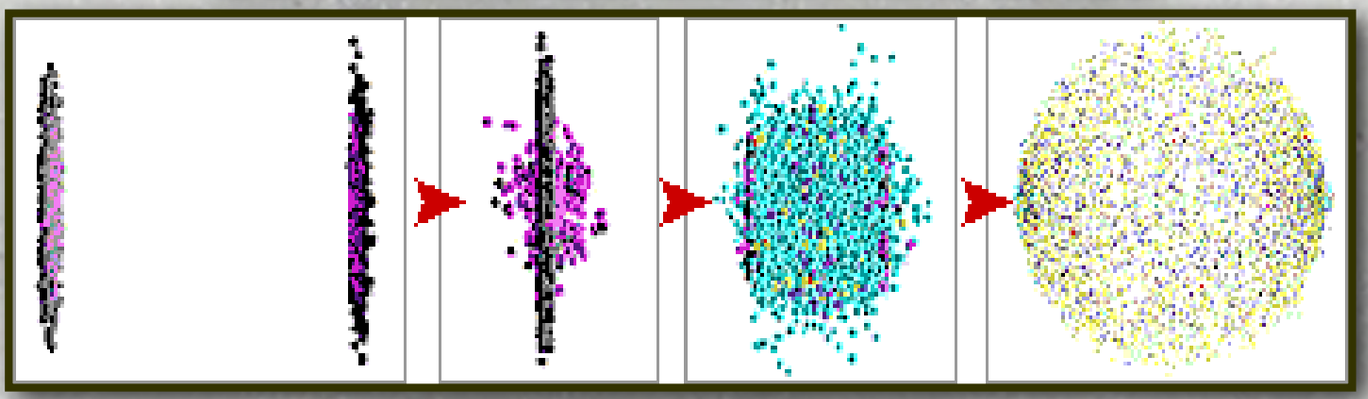


Relativistic Heavy Ion Collider RHIC @ BNL

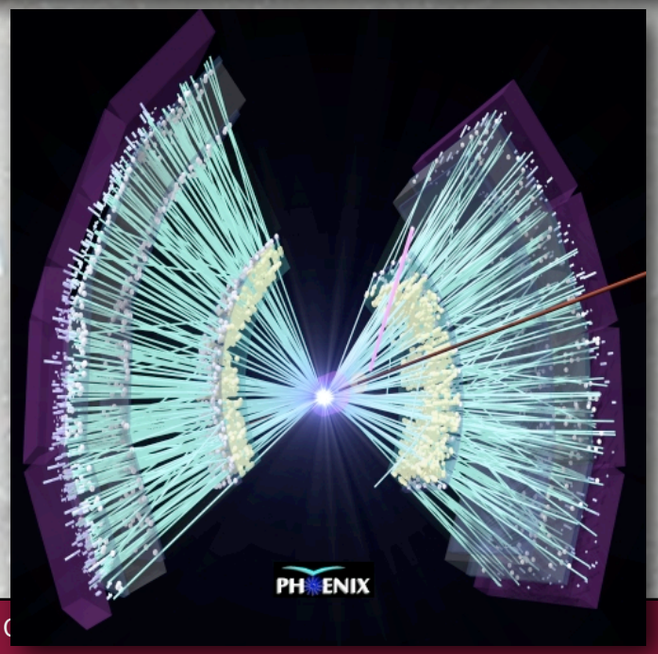


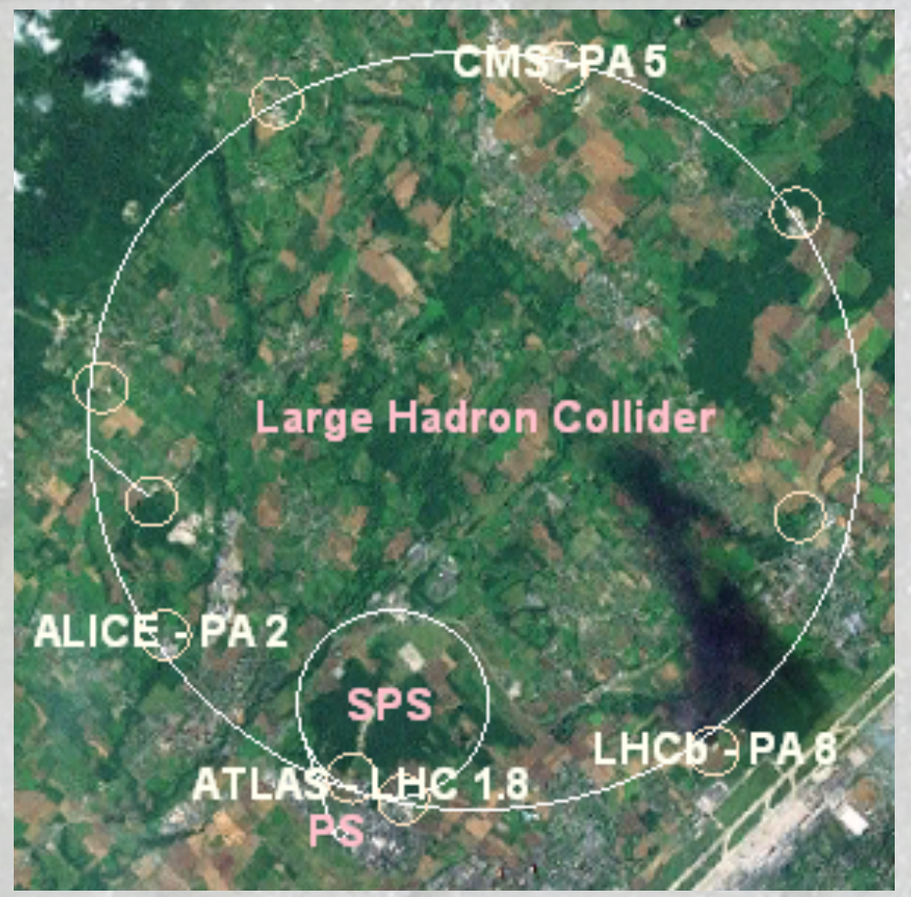
3 km ring — animation by Mike Lisa

major international enterprise: thousands of scientists and engineers

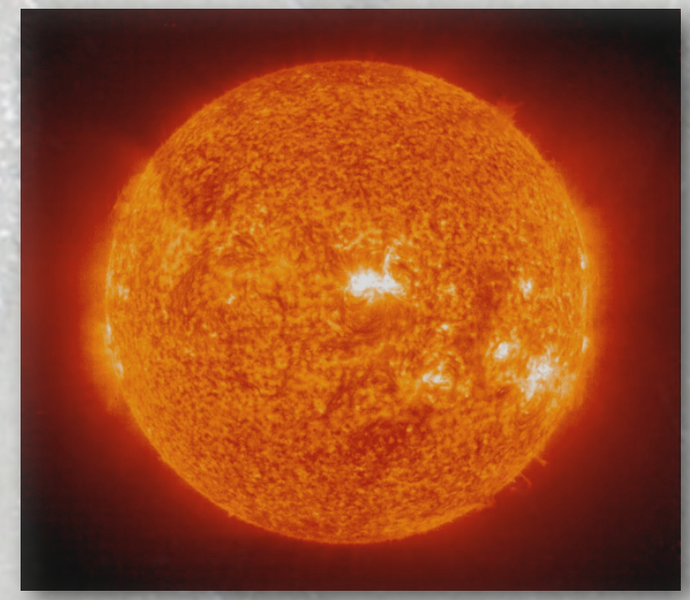


[RHIC]

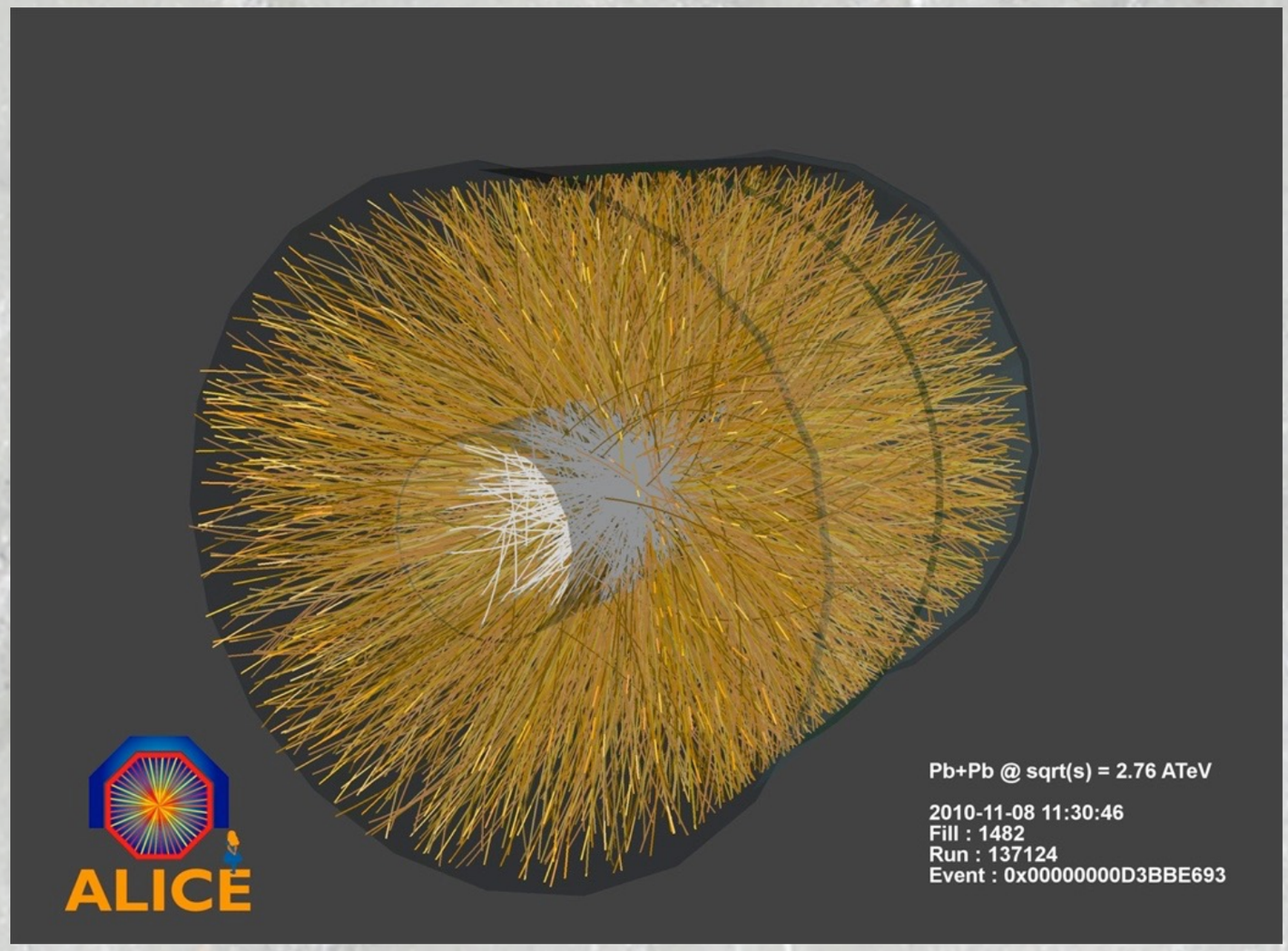


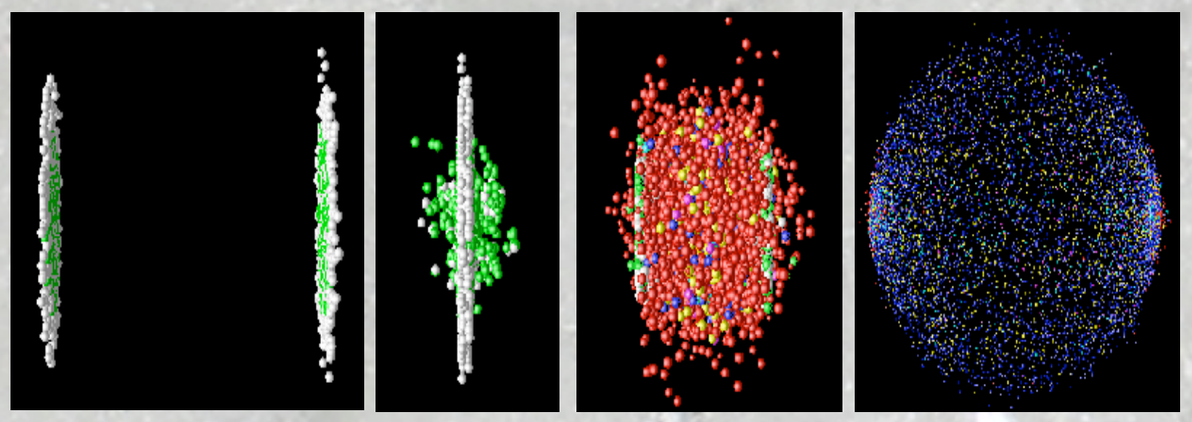


Alguns números:



$T_{core} \sim 10^7$ K



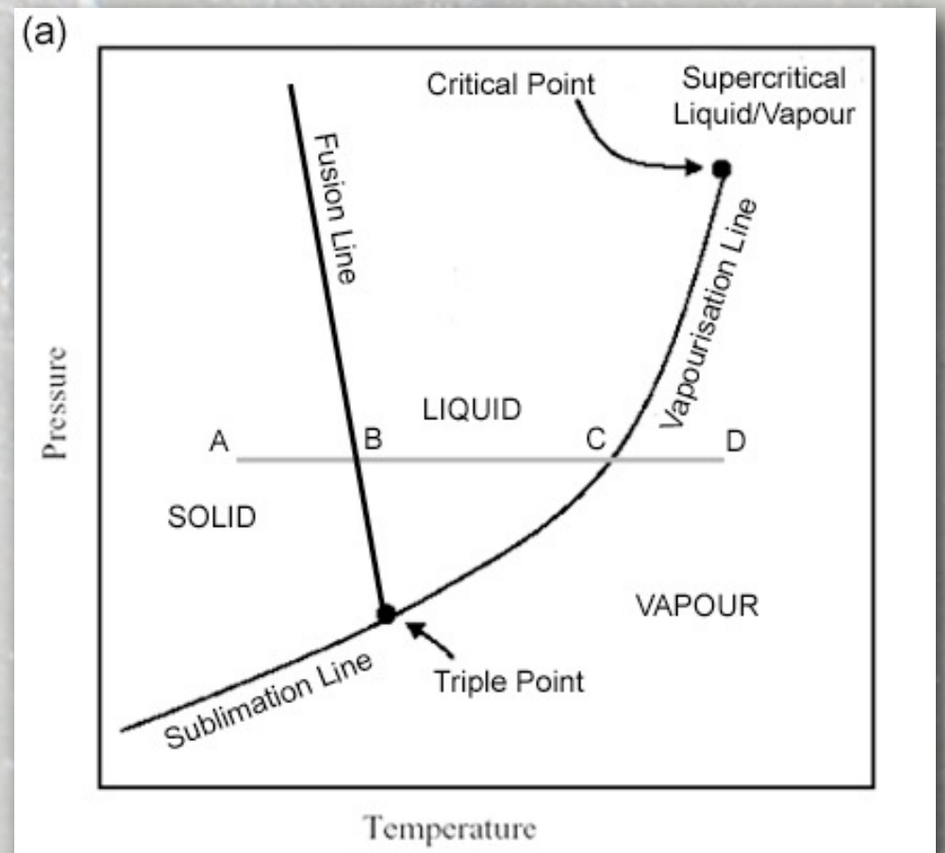


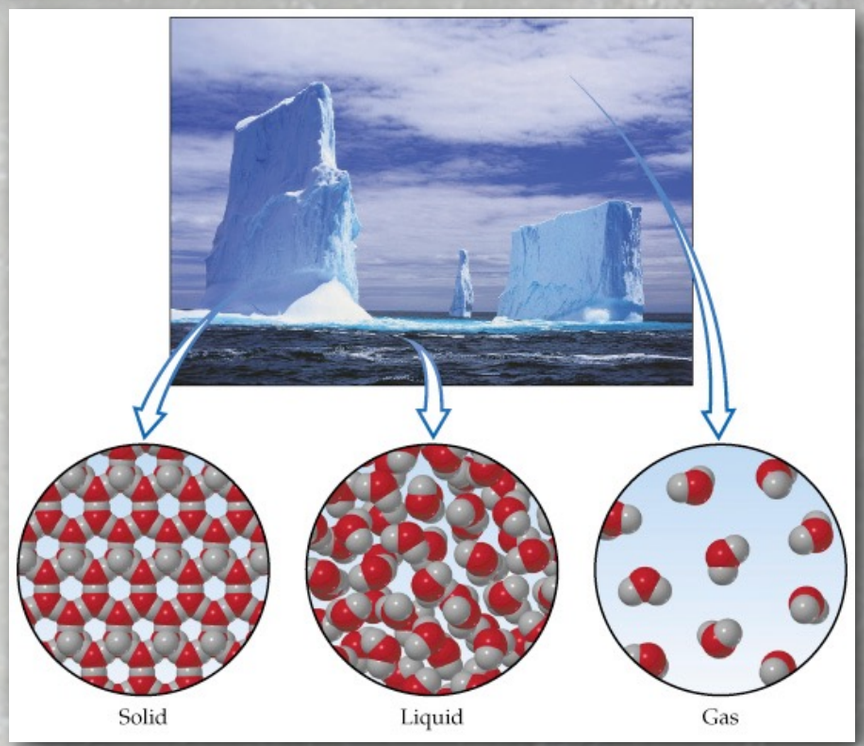
$T \sim 200$ MeV $\sim 10^{12}$ K

$v_{feixe} \sim 0.99995\ c \sim 300.000$ km/s

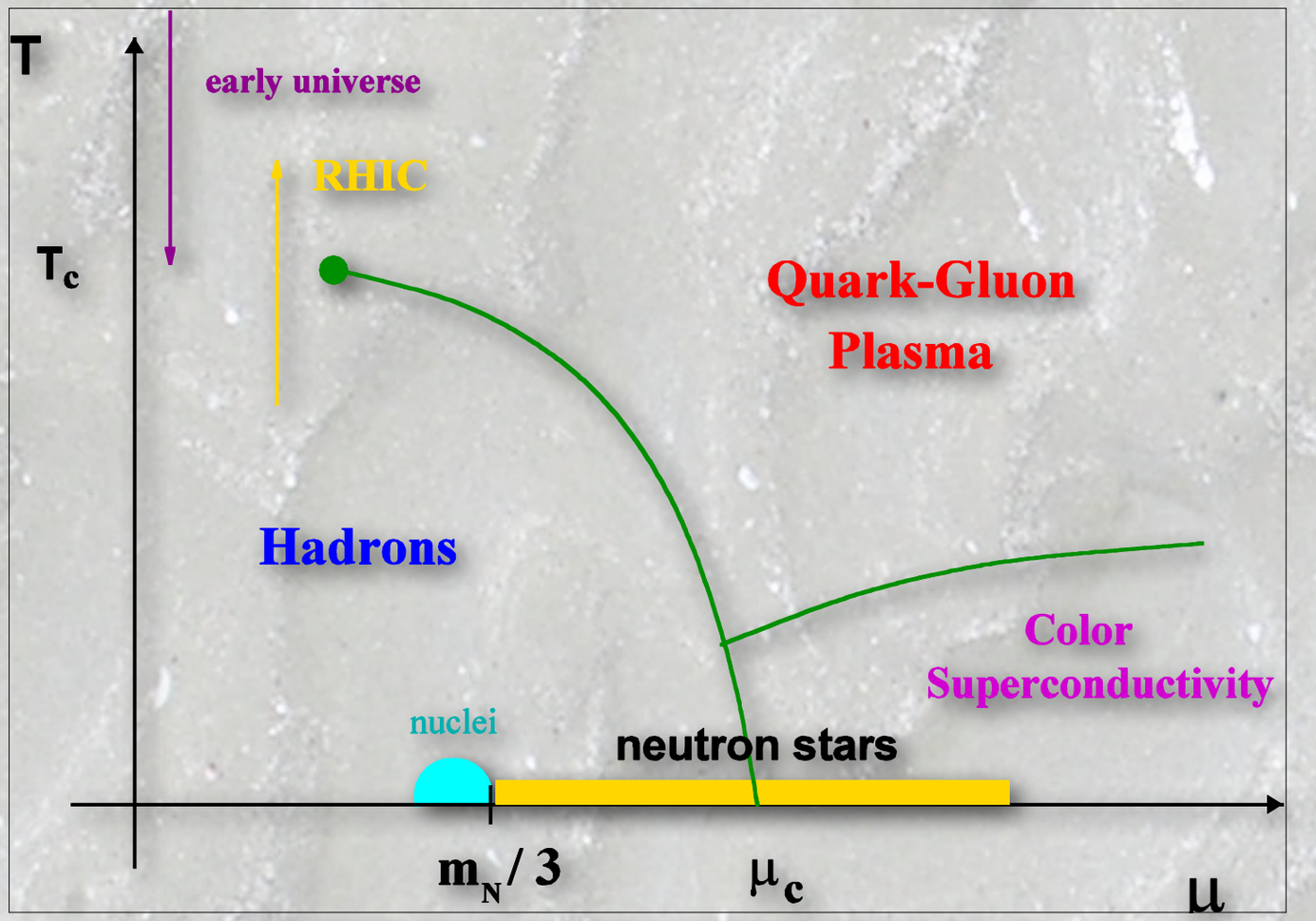
Condições extremas!!

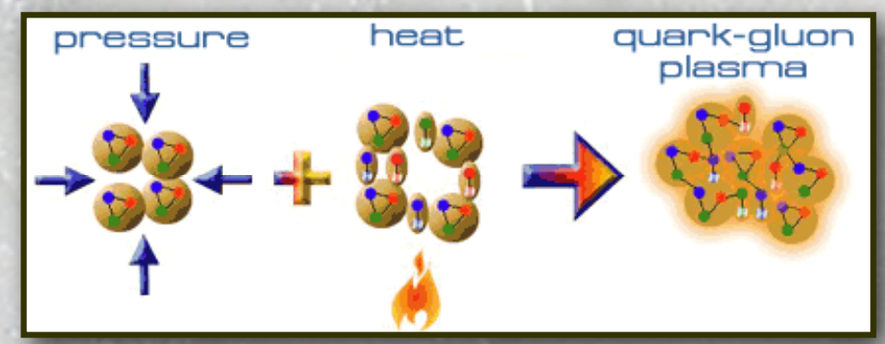
Diagrama de fases da água

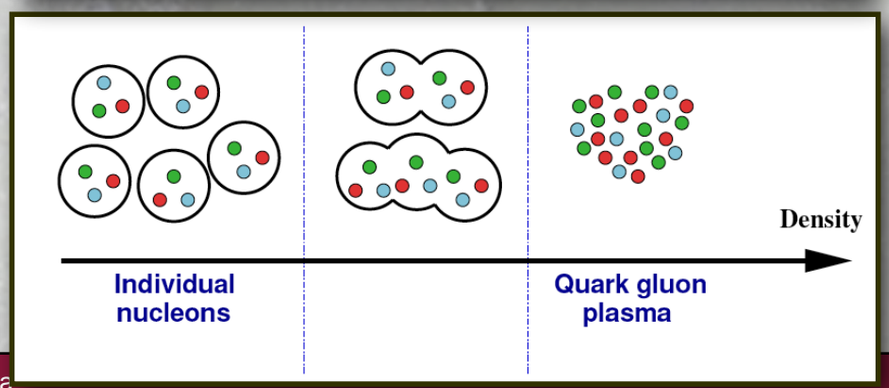




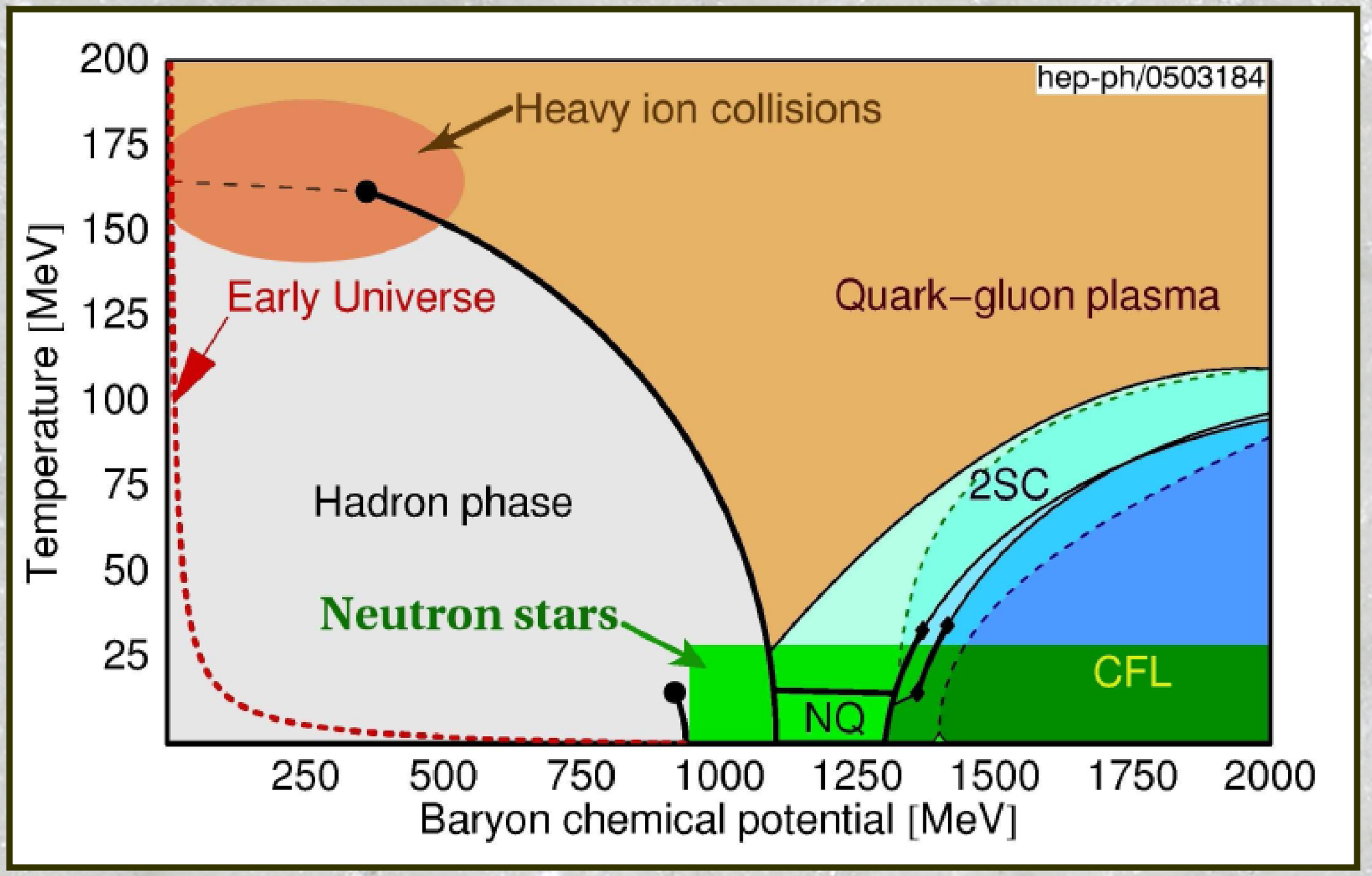
"Cartoon" do diagrama de fases das interações fortes







Na realidade, o diagrama de fases é bem mais complicado:



Comentários Finais

- O diagrama de fases das interações fortes ainda esconde muitos segredos... Muito trabalho para os teóricos...

- Esta é uma área ampla e entusiasmante, conectada à Física de Partículas (QCD, EW, ...), à Física Nuclear de Altas Energias (RHIC, LHC), à Astrofísica (estrelas compactas), à Cosmologia (universo primordial), à Mecânica Estatística (transições de fase), etc.

- RHIC data + LHC data + astro data + Lattice QCD -> muitas questões abertas e desafiadoras ainda por vir!

- Muitos cálculos interessantes misturando uma matemática sofisticada a uma rica fenomenologia!

Second Lecture

★ First question you should ask: WHY??
- Motivation and some disturbing facts

✳ Collective effects x "fundamental" physics

★ Second question you should ask: WHERE??
- Accelerator experiments, astro, early universe

✳ My focus: the EoS

★ Third question you should ask: HOW??
- Theory, models, etc