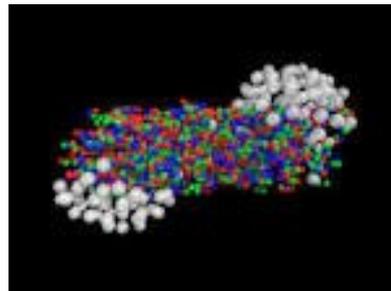


Il Plasma di Quark e Gluoni: un nuovo stato della materia tutto da studiare

Sergio Scopetta

Dipartimento di Fisica e Geologia, UniPG e INFN, Perugia

La Fisica incontra gli studenti delle superiori
Gennaio 2017



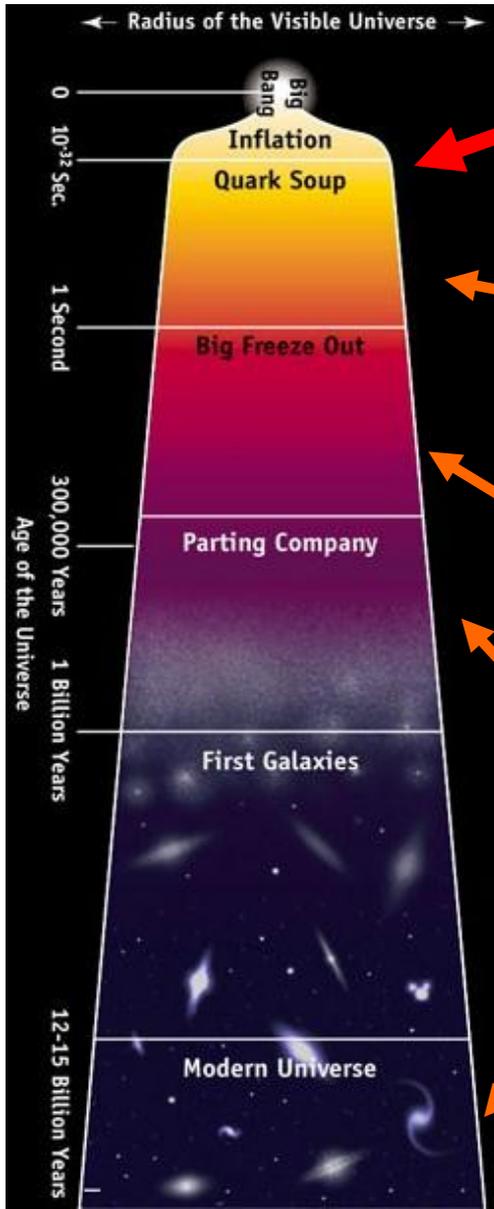
“Divulgazione”: una sfida difficile...

- Consiglio di A. Einstein:

“make things as simple as possible, but not more”



Da dove veniamo?



Too hot for quarks to bind!!!
Standard Model (N/P) Physics

Quark-
Gluon
Plasma??

Too hot for nuclei to bind
Nuclear/Particle (N/P) Physics

Hadron
Gas

**Nucleosynthesis builds nuclei up
to He**

Nuclear Force...Nuclear Physics

**Universe too hot for electrons to
bind**

E-M...Atomic (Plasma) Physics

E/M
Plasma

Today's Cold Universe

**Gravity...Newtonian/General
Relativity**

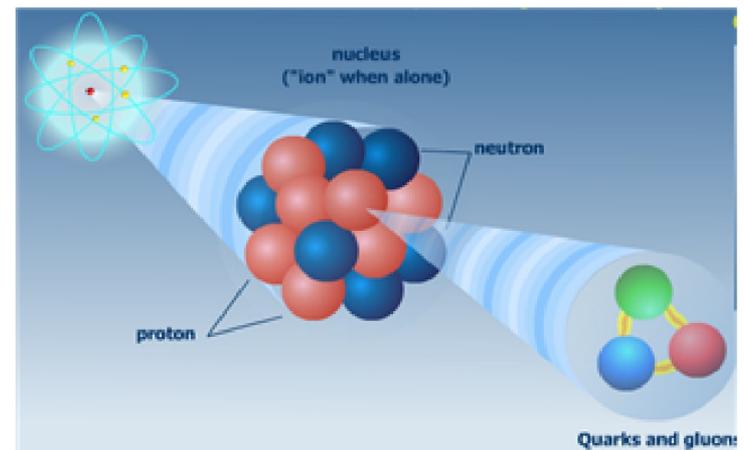
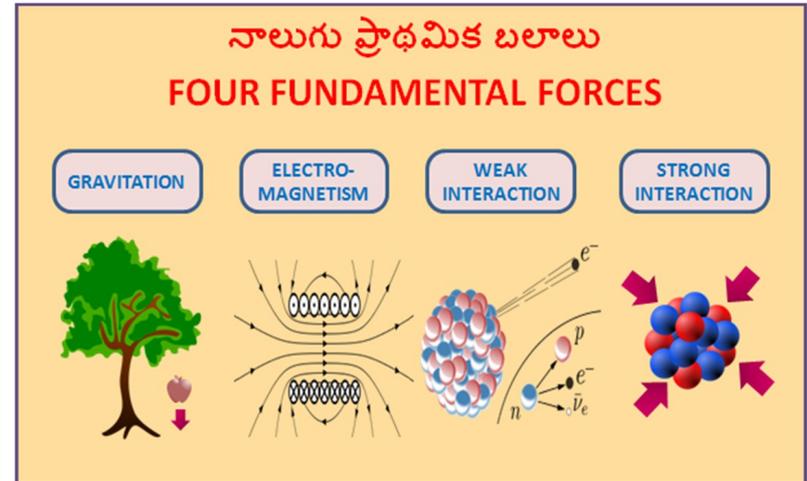
Solid
Liquid
Gas

Sommario

- Plasma di quark e gluoni (QGP):
cosa sono i quark e i gluoni?
Cosa è un plasma?
Stati della materia e transizioni di fase
- Il plasma di quark e gluoni:
importanza di studiarlo, difficoltà nel produrlo:
gli esperimenti in corso
- A che punto siamo:
QGP: il più “perfetto” dei materiali conosciuti
- Prospettive

Quark e Gluoni

- Parliamo di interazioni nucleari forti;
- Le interazioni nucleari forti, a livello microscopico, dovute allo scambio di (8 diversi) “gluoni” tra (3 diversi) “quark” (“rossi, verdi e blu”)
- La teoria che le descrive: “Cromodinamica Quantistica (QCD)”



QED

VS

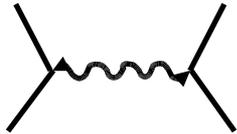
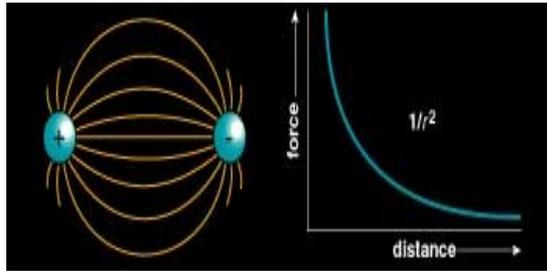
QCD

Interazioni elettromagnetiche

Particelle scambiate (fotoni) sono neutre

Flusso non confinato

$U(r) \propto 1/r$ e $F(r) \propto 1/r^2$

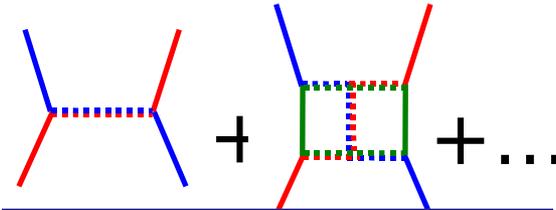
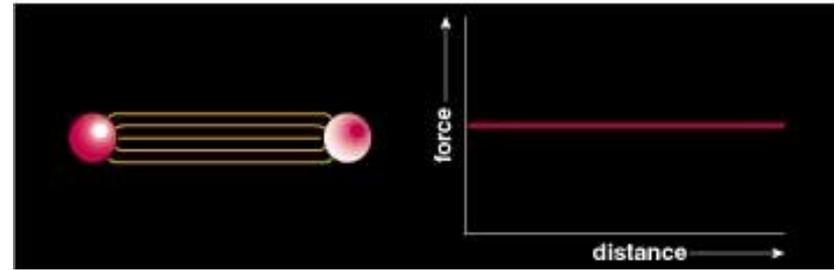


Interazioni nucleari forti

Particelle scambiate (gluoni) hanno carica di "colore"

Flusso confinato

$U(r) \propto r$ e $F(r) = \text{costante}$



The Nobel Prize in Physics 1965

"for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles"



Sin-Itiro Tomonaga



Julian Schwinger



Richard P. Feynman



The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



David J. Gross



H. David Politzer



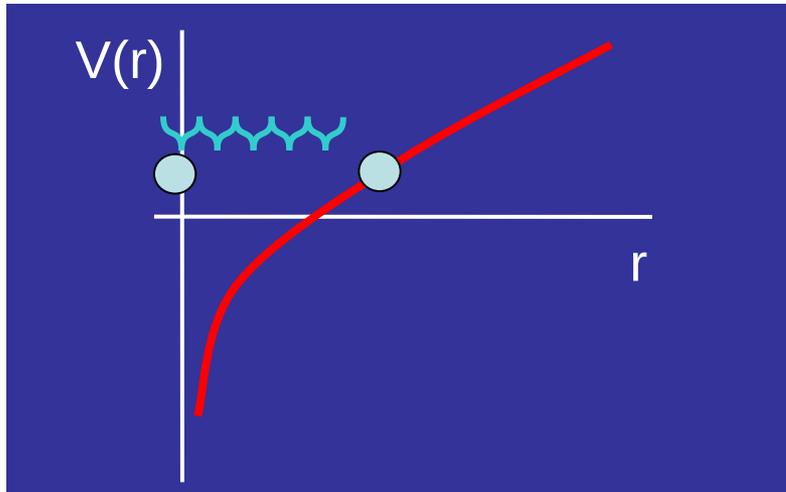
Frank Wilczek

I misteri della QCD

CONFINAMENTO:

quark isolati sono invisibili.

QCD è una teoria confinante, con un potenziale:

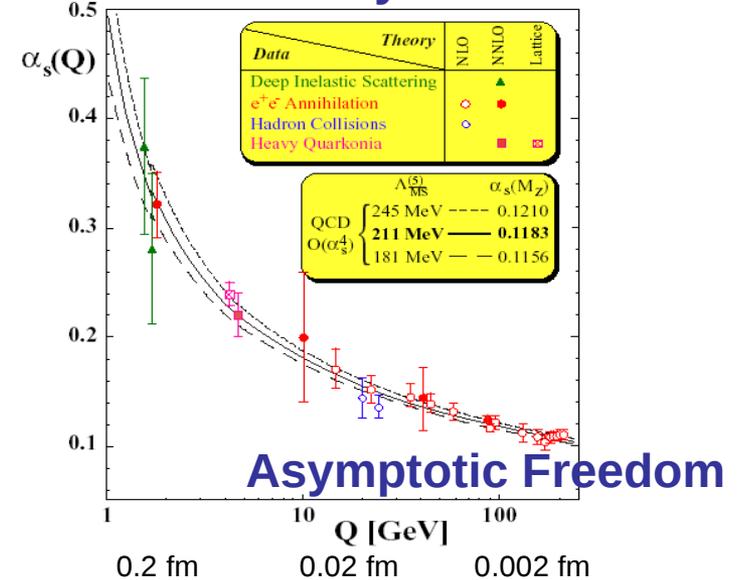


$$V = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

“Coulomb” “Confining”

Ma è LIBERA a distanze brevi!:

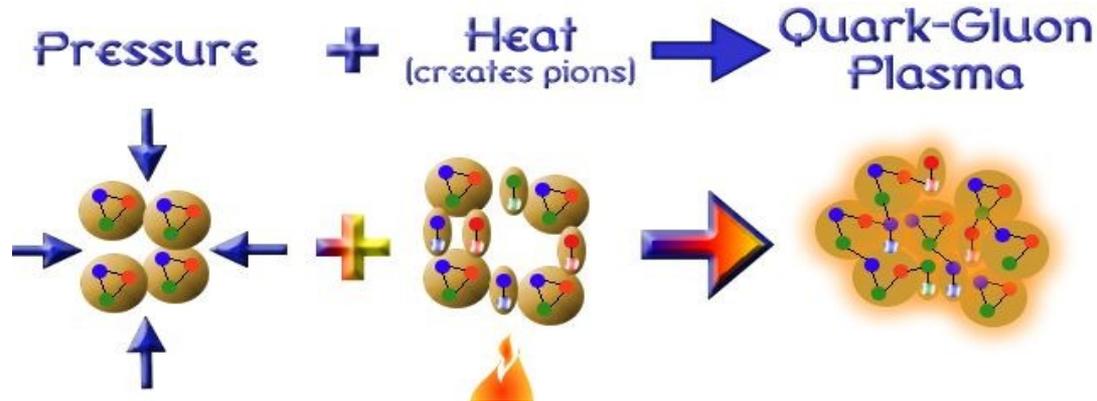
Infrared Slavery



Quando i quark sono vicini, il potenziale è diverso, l'interazione è debole, i quark sono quasi liberi e i calcoli diventano semplici!

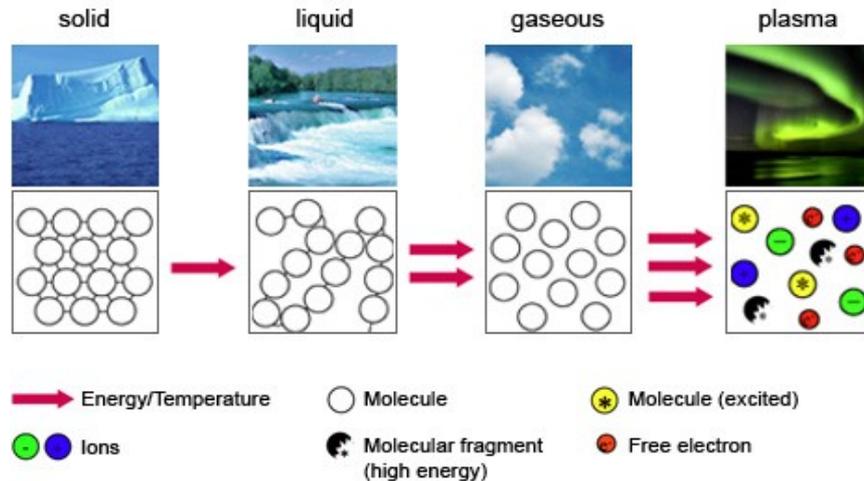
Quark colorati, confinati in “adroni”, bianchi

...Il plasma di quark e gluoni



- Ad elevate pressioni e temperature (energia), i quark e i gluoni all'interno degli adroni sono così vicini che le interazioni tra loro diventano deboli: si forma un nuovo stato della materia: il QGP
- Una vecchia previsione (anche italiana: Collins e Perry (1975); Cabibbo e Parisi (1975))
- Un difficile test sperimentale (ancora in corso!)

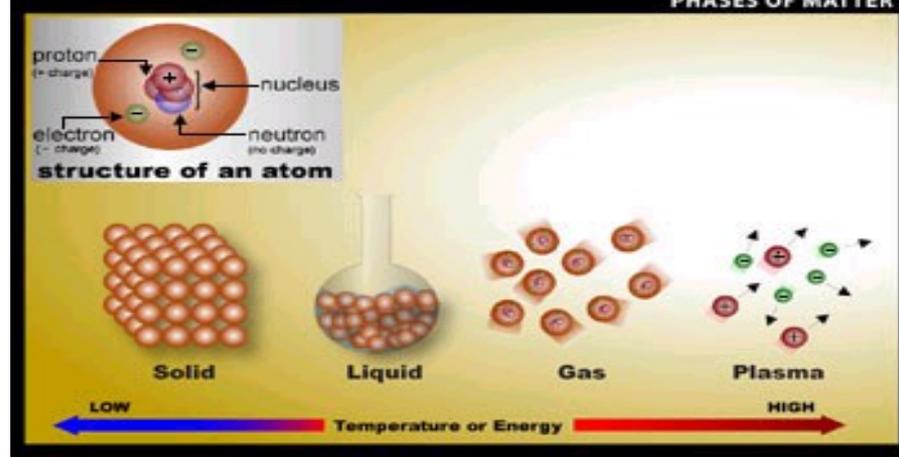
Ma... Cos'è un plasma?



- Il “quarto” stato della materia!
- In realtà gli stati conosciuti sono SETTE: solido, liquido, gassoso, plasma (ionosfera, stelle, reattori nucleari a fusione... ma anche televisori...), condensato di Bose Einstein (verso gli $0 \text{ }^\circ\text{K}$...), materia fermionica degenere (stelle di neutroni...) e QGP, appunto...

Phases of Matter

- **Solid-**
 - atoms or molecules vibrate in place
 - constant shape, constant volume.
- **Liquid-**
 - molecules flow, but do not disperse
 - indefinite shape, constant volume
- **Gas-**
 - molecules diffuse and disperse readily
 - indefinite shape, indefinite volume



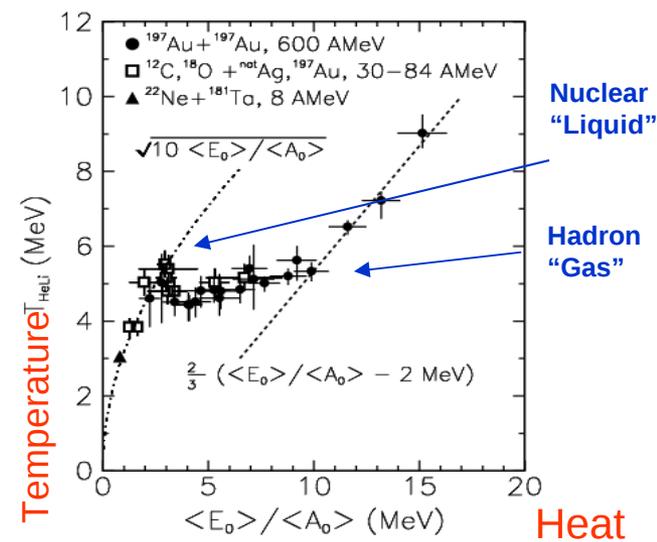
- electrons, protons, and neutrons are still intact
- quarks still bound

What's Next?

Melt the Proton into a Quark-Gluon Plasma

EM Plasma

- exists only at temperatures above ~6,000K (if equilibrium is required)
- exists in the sun and around lightning bolts
- electrons separate from nuclei
- atoms disassemble and are weakly interacting

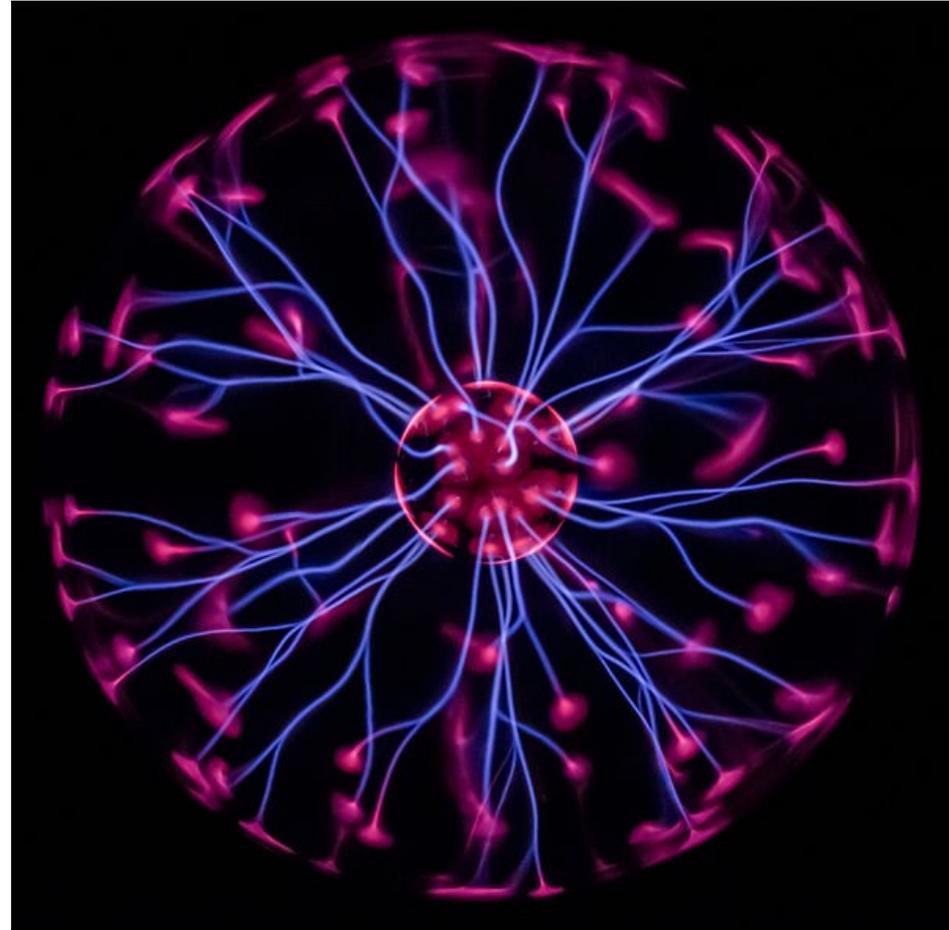


Proprietà dei plasmi (tutti)

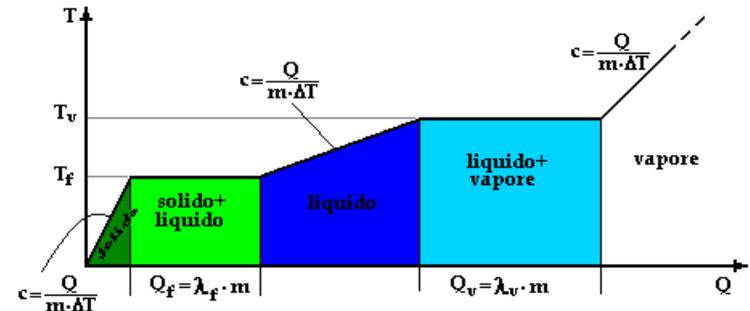
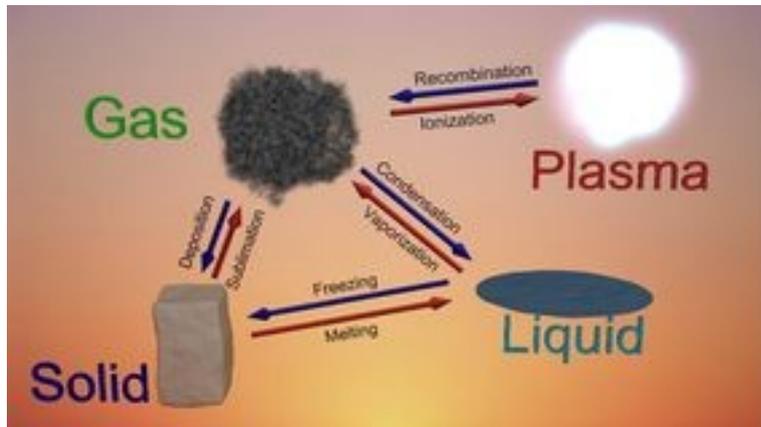
4° stato della materia:

Gas ionizzato, macroscopicamente neutro

- comportamento collettivo: singoli componenti perdono la loro identità
- Interazioni tra cariche nel plasma
 - Producono agglomerati di dimensioni tipiche (lunghezza di Debye) , λ_D
 - particelle in questi agglomerati si schermano a vicenda
→ dimensioni del plasma $> \lambda_D$
 - Il plasma “normale” è elettromagnetico (elettroni + ioni)
- Il plasma di quark e gluoni interagisce attraverso le interazioni forti
 - Forze di colore, non EM
 - Particelle scambiate: gluoni, non γ

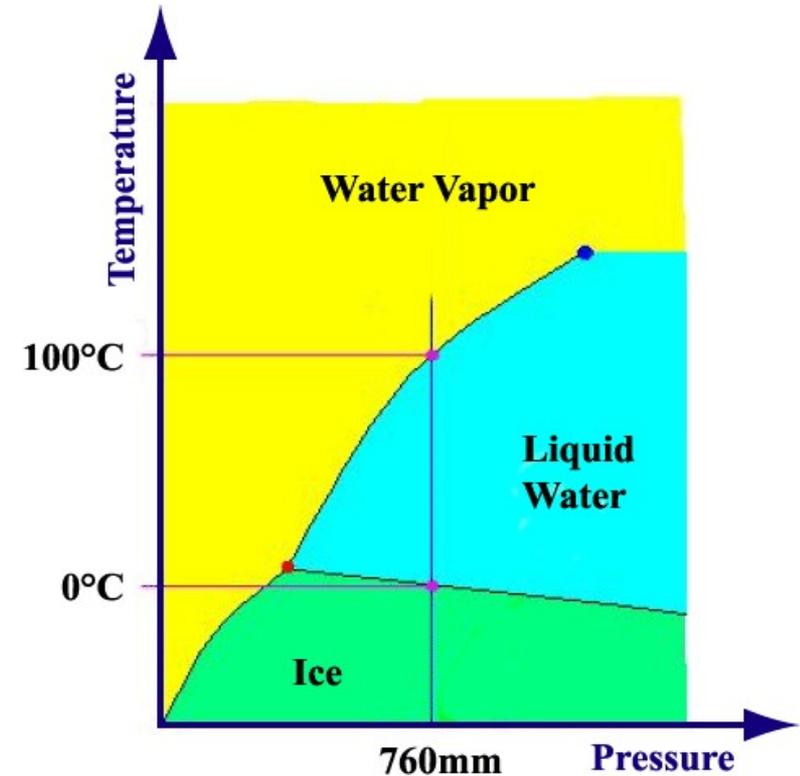
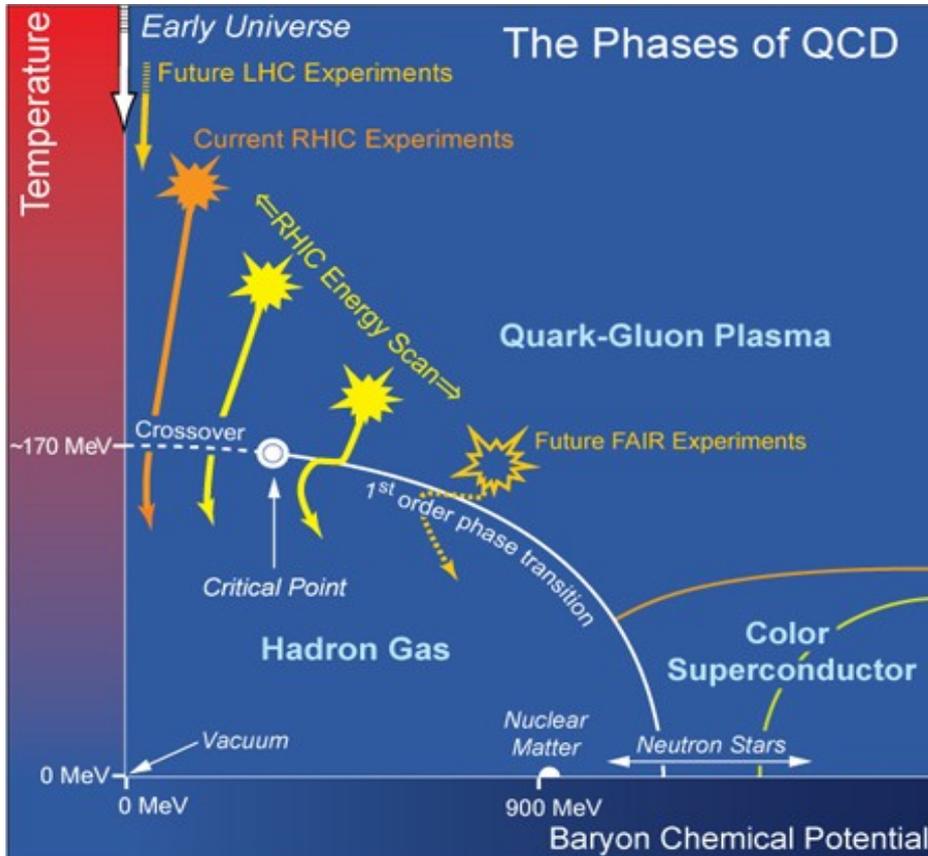


Da una fase all'altra...



- Transizioni di fase caratterizzate da brusche variazioni delle proprietà termodinamiche del materiale
- Per parlare di termodinamica: necessarie molte particelle in equilibrio
- Transizioni di fase: di vario tipo. Per noi: con calore latente e coesistenza di fasi (1° ordine) o senza (2° ordine).
- Sfida: osservare la formazione del QGP studiando la transizione di fase da QGP a gas di adroni

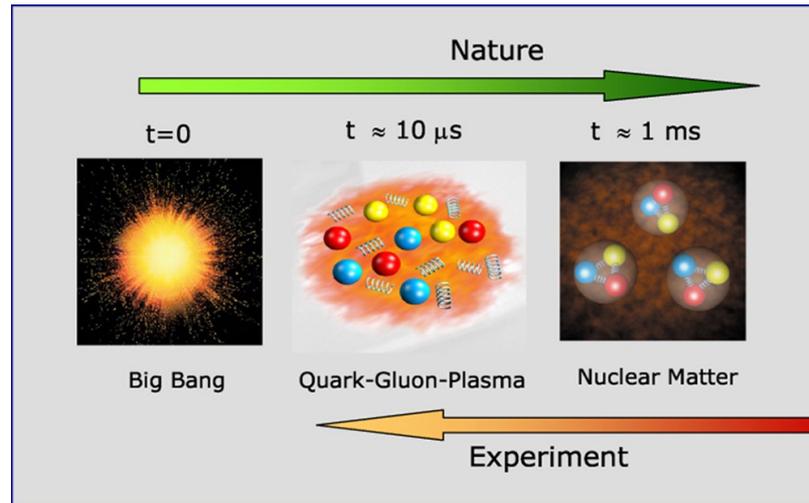
“Diagramma di fase” della QCD



- QGP in laboratorio
 - creare QGP come transizione da gas di adroni
 - Verificare l'esistenza del QGP
 - Studiare le proprietà del QGP
 - Transizione? Punto critico?

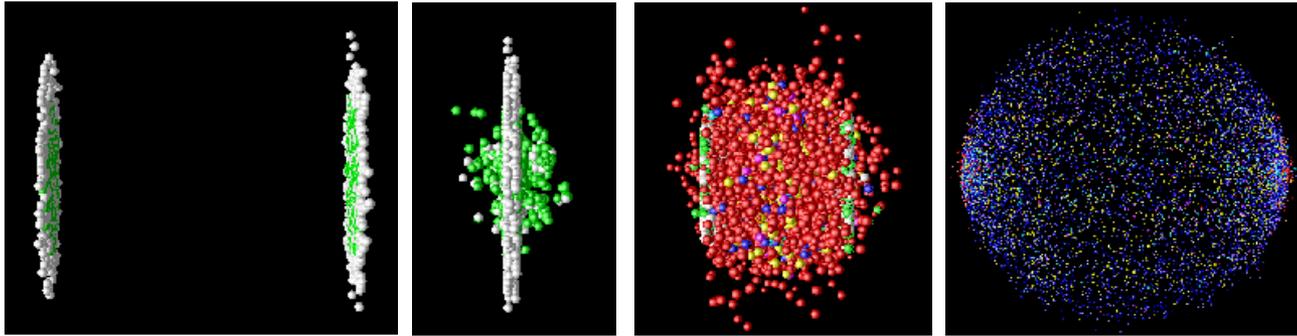
- QGP in Cosmologia e Astrofisica
 - Universo primordiale: $t < 10^{-6}$ seconds
 - Forse, all'interno di stelle di neutroni

Importanza dello studio del QGP

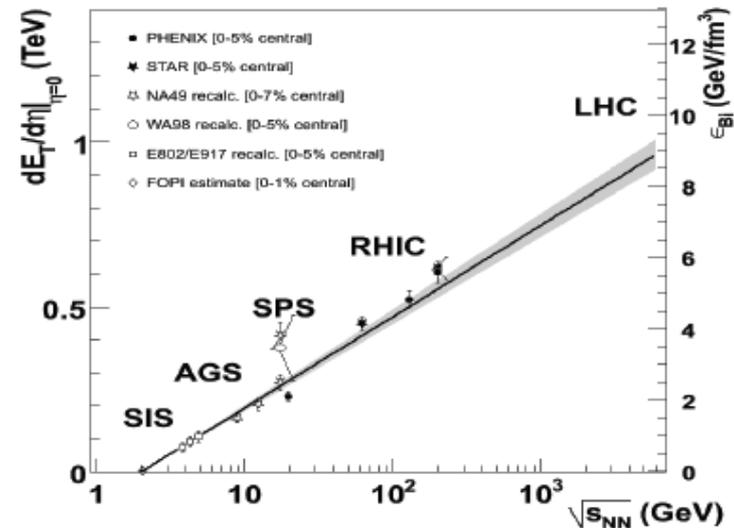
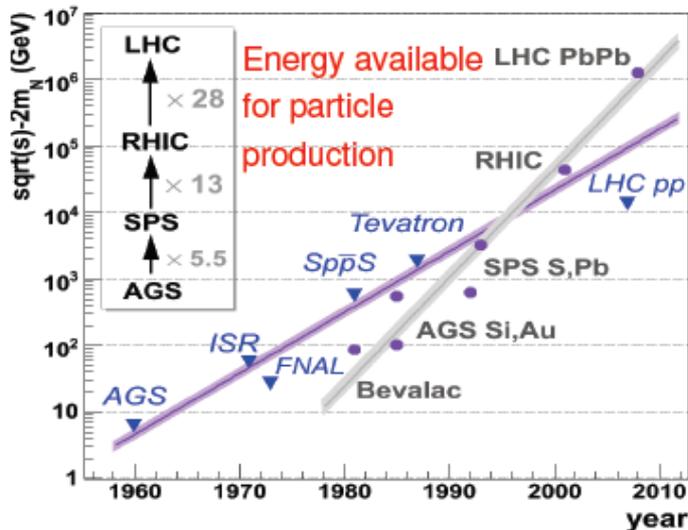


- Se aumento l'energia vado indietro nel tempo...
- Se la transizione è del primo o del secondo ordine, cambia l'evoluzione dell'universo
- Sfida: servono densità elevate, dimensioni “grandi”, durata “grande”: nuove macchine! RHIC, LHC, FAIR... Temperatura corrispondente a un' energia di 150 MeV per particella (temperatura ambiente, 300 °K, corrisponde a 0.025 eV...)

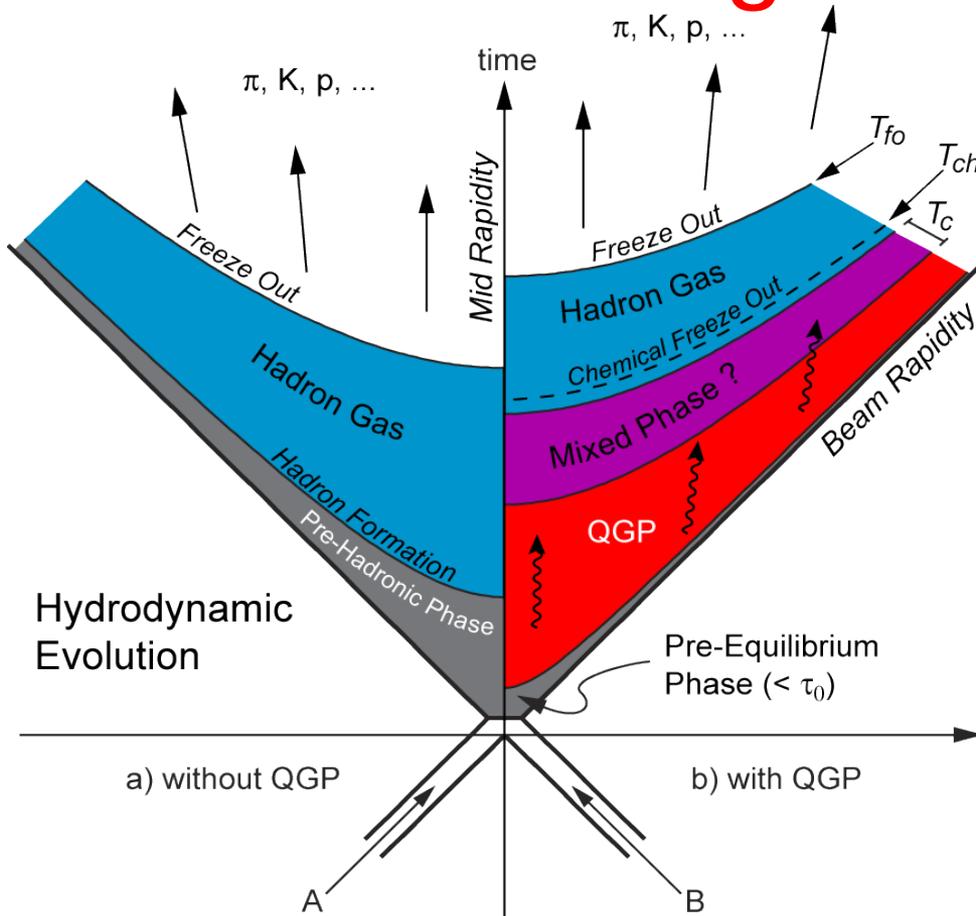
QGP in collisioni di "ioni pesanti"



- Necessario concentrare molta energia in una regione di spazio relativamente grande (ho bisogno di molti quark e gluoni). Molti quark e gluoni se ho molti protoni e neutroni: nuclei grandi (Pb)
- Ho bisogno di alte densità: se i nuclei hanno molta energia, sono molto veloci, sono relativistici, piuttosto che sfere somiglierebbero a dischi: altissime densità per una collisione centrale!



II “Little Bang” in laboratorio



- Collisioni nucleo-nucleo

- RHIC: $\sqrt{s}=200\text{GeV}$
- LHC: $\sqrt{s}=5.5\text{TeV}$

QGP formato in una regione piccola (10^{-14}m) per un breve tempo (10^{-23}s)

- Esiste una fase mista?
- Studio del raffreddamento

• dinamica: trovare effetti dovuti a diverse fasi del processo

• Esperimento RHIC, NY, USA

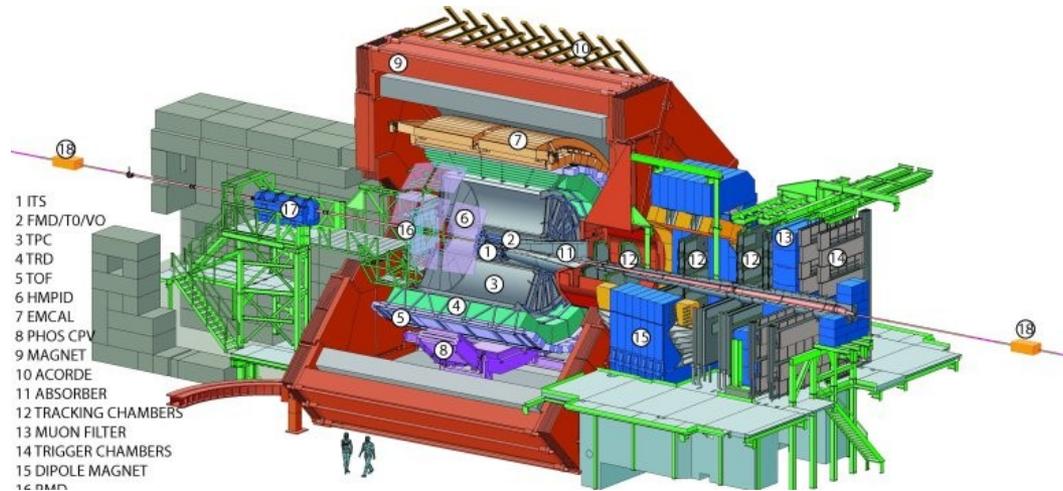


- 2 counter-circulating rings, 3.8 km circumference

- Top energies (each beam):

- 100 GeV/nucleon Au-Au.
- 250 GeV polarized p-p.
- Mixed Species (e.g. d-Au)

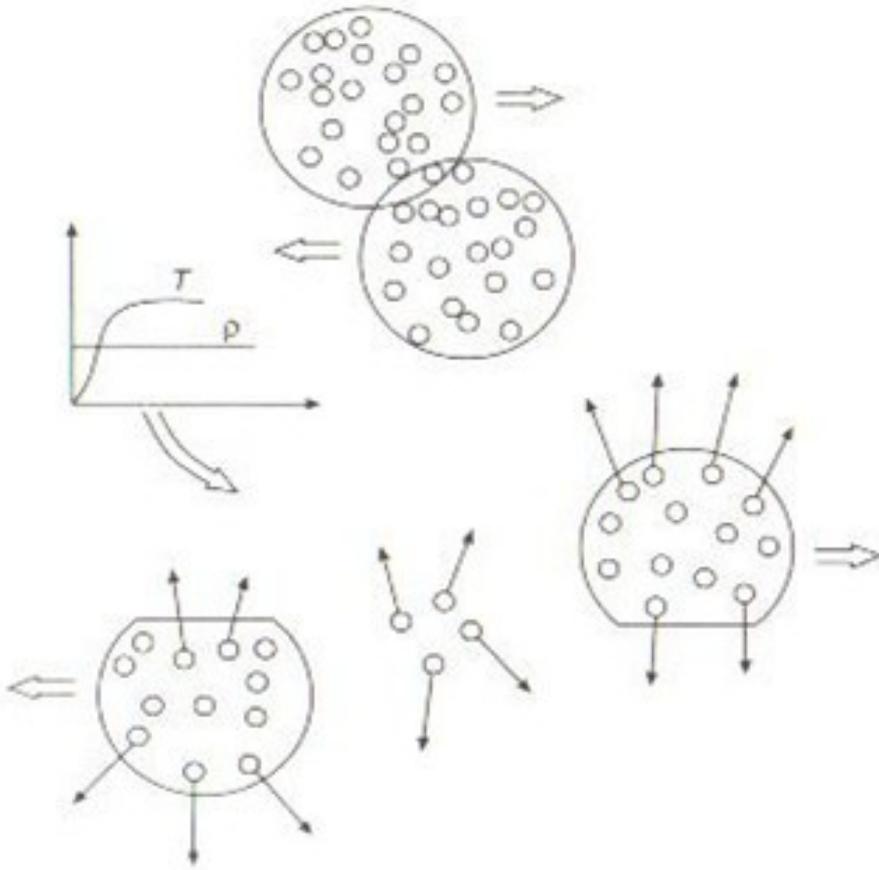
ALICE, CERN, Ginevra



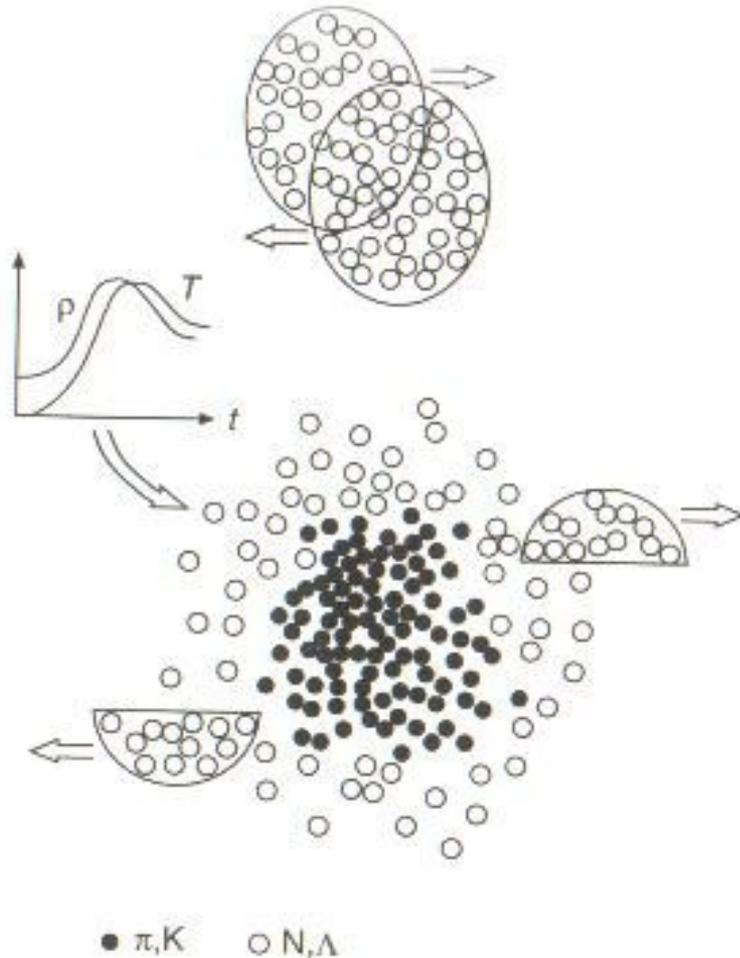
- Uno dei 4 grandi esperimenti ad LHC
- In grado di accelerare nuclei di Pb
- Massima densità di energia possibile oggi

Collisioni “periferiche”: gas di adroni

- In urti non centrali, pochi quark e gluoni coinvolti
- Bassa densità nella regione di interazione
- Il plasma non si forma
- Atteso anche in collisioni di nuclei leggeri con nuclei pesanti (deuterio-oro)

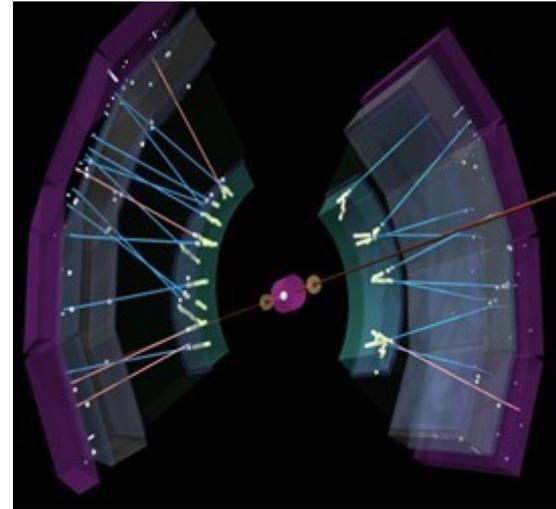
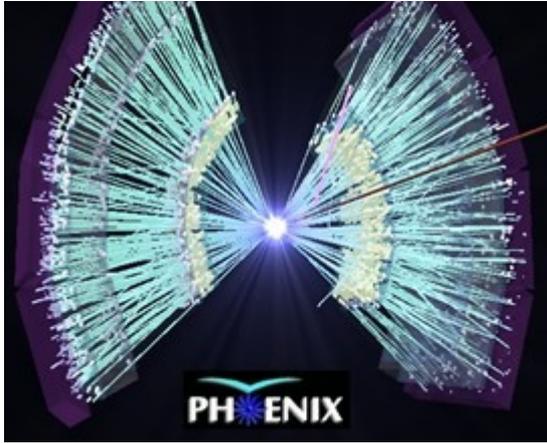


Collisioni centrali: QGP plasma?



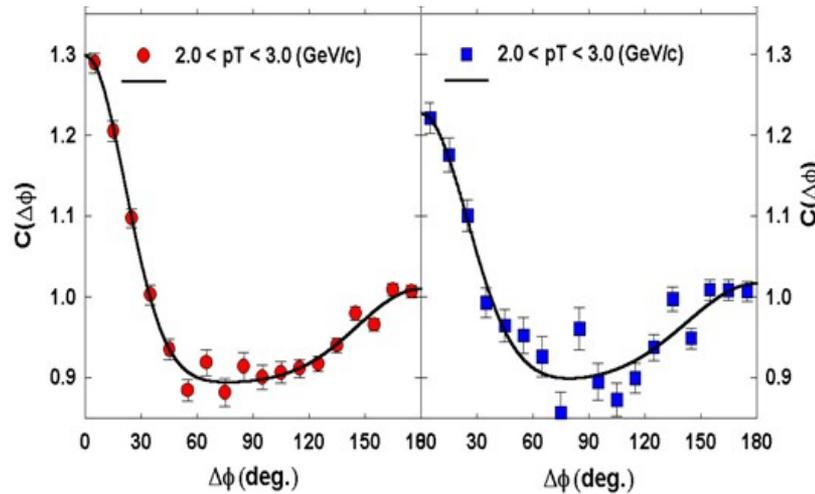
- Collisioni centrali tra nuclei di Au @RHIC
- Massimo numero di particelle coinvolte
- Atteso QGP!
- A maggior ragione atteso @ LHC in collisioni Pb-Pb

Stato degli esperimenti @ RHIC



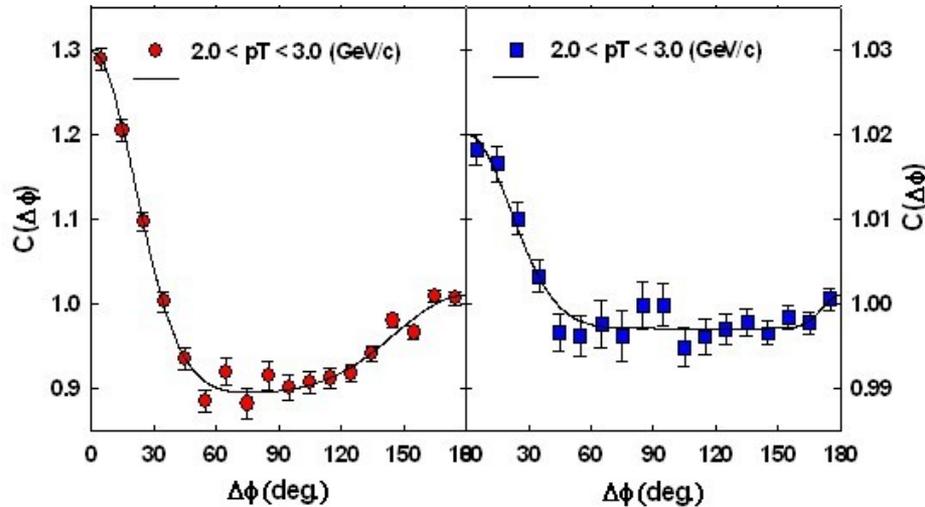
- Simulazione di un evento Au-Au ad alta densità (a sinistra)
- Simulazione di un evento deuterio-Oro a bassa densità (a destra): il deuterio è il nucleo più leggero, la formazione di QGP non è attesa

Stato degli esperimenti @ RHIC



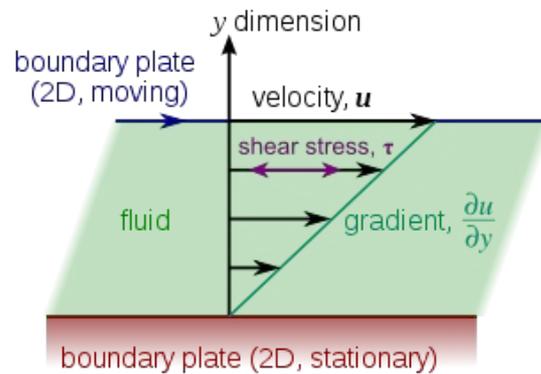
- La distribuzione angolare finale dei prodotti della reazione non cambia da d-Au (sinistra), reazione nella quale non si forma QGP, a Au-Au periferico (a destra)... Tutto consistente con le previsioni...

Stato degli esperimenti @ RHIC



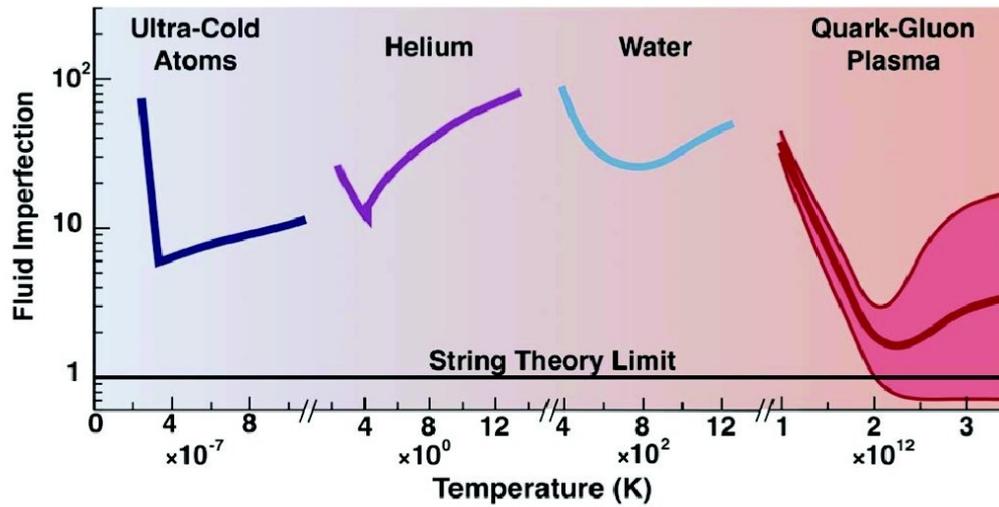
- La distribuzione angolare finale dei prodotti della reazione CAMBIA da d-Au (sinistra), reazione nella quale non si forma QGP, a Au-Au CENTRALE (a destra)...
- Consistente con la previsione di formazione di QGP!
Pistola fumante?

Proprietà del QGP: viscosità (di taglio)



- Viscosità (di taglio): come varia la velocità del fluido in profondità, se c'è una sollecitazione longitudinale su uno strato di fluido...
- Fluido ideale: NON varia (quasi, a meno di un effetto quantistico)

QGP: il fluido perfetto!



- L'Elio superfluido era il materiale perfetto negli anni '30 del secolo scorso (Nobel a Kapitsa, 1972, e Landau, 1968)
- Gli atomi ultra-freddi erano il materiale perfetto all'inizio del secolo (Nobel a Ketterle e Cornell, 2001)
- L'acqua... Che c'entra l'acqua?
- QGP: il materiale perfetto di oggi! Ma guardate l'errore sperimentale...

Conclusioni e prospettive

- ... Quando c'è un errore sperimentale che non consente di trarre conclusioni certe, l'unico modo di procedere è fare esperimenti più precisi
- Come avrete un po' capito, gli esperimenti sono complicati e l'analisi dei dati è ardua
- Per sapere se il QGP è un fluido ideale perfetto e tante altre cose ancora a cui non ho accennato, dovremo aspettare qualche anno di misure a RHIC, ALICE, FAIR...
- I dati di cui disponiamo oggi sarebbero sembrati miracolosi qualche anno fa. Tra qualche anno, avremo dati spettacolari.
La risposta, chissà, in un prossimo seminario

Per ora, basta così....

- Come diceva Enrico Fermi:

“Se un seminario dura tre quarti d'ora, nel primo quarto d'ora ascoltano tutti, nel secondo quarto d'ora, solo gli specialisti, nel terzo quarto d'ora... Non ascolta neanche chi parla!”

- Domande:

ora, oppure a:

sergio.scopetta@pg.infn.it



To Summarize

The
hottest **$T \sim 300\text{-}600 \text{ MeV}$**
densest **$\varepsilon_i \sim 30\text{-}60 \varepsilon_0$**
matter **(thermal yields)**
ever studied in the laboratory
flows **large “elliptic” flow**
as a (nearly) perfect fluid
with systematic patterns consistent with
quark degrees of freedom **valence quark scaling**
and a viscosity to entropy density ratio
lower (?) than any other known fluid
with a value near (?) *a conjectured quantum*
bound **$\eta/s \sim (2\text{-}3) / 4\pi$**

The new frontier ...

"It's still the last frontier you might say. We're still out here dancing on the edge of the world." (Lawrence Ferlinghetti)

Central collisions	SPS	RHIC	LHC
\sqrt{s} (GeV)	17	200	5500
dN_{ch}/dy	430	700	$1-3 \times 10^3$
ε (GeV/fm ³)	3	5-10	15- 60
V_f (fm ³)	10^3	7×10^3	2×10^4
T / T_c	> 1	2	3-4

• LHC

- hotter, larger, longer-lived QGP \rightarrow wQGP?
- Hard Probes
 - Hard parton quenching $\rightarrow \varepsilon$
 - Quarkonia and photons $\rightarrow T$
 - jet fragmentation function $\rightarrow \gamma / Z^0 + \text{jet}$
- Probe unexplored small-x region with heavy quarks at low p_T and/or forward y
- $dN_{ch}/d\eta$ (p+p @ LHC) $\sim dN_{ch}/d\eta$ (Cu+Cu @ RHIC)
 \rightarrow pp-QGP?

• RHIC upgrades (STAR/PHENIX)

Quantitative analysis of **sQGP**
 New regions in the phase-space

• e-RHIC: electron – ion collider

- Momentum distribution of **gluons $G(x, Q^2)$**

- Space-time distributions of gluons in matter

- Interaction of fast probes with gluonic medium?

- Role of color neutral excitations

• FAIR

Search for the **critical point**