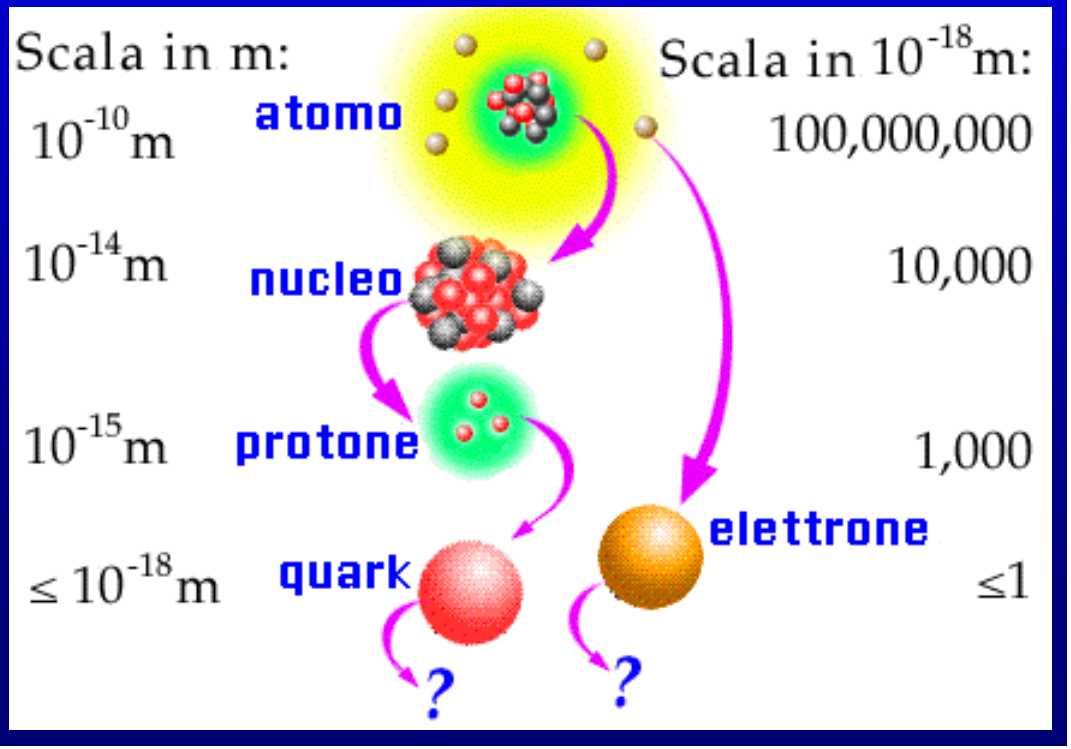
Il quark-gluon plasma

- Che cos' è ?
- Dove si trova ?
- Perchè è interessante ?
- Si può produrre ?
- Come si può osservare ?



I quark

- Per quel che ne sappiamo oggi, sì !
- Ne esistono con 6 sapori diversi
- Non tutti sono ingredienti del QGP

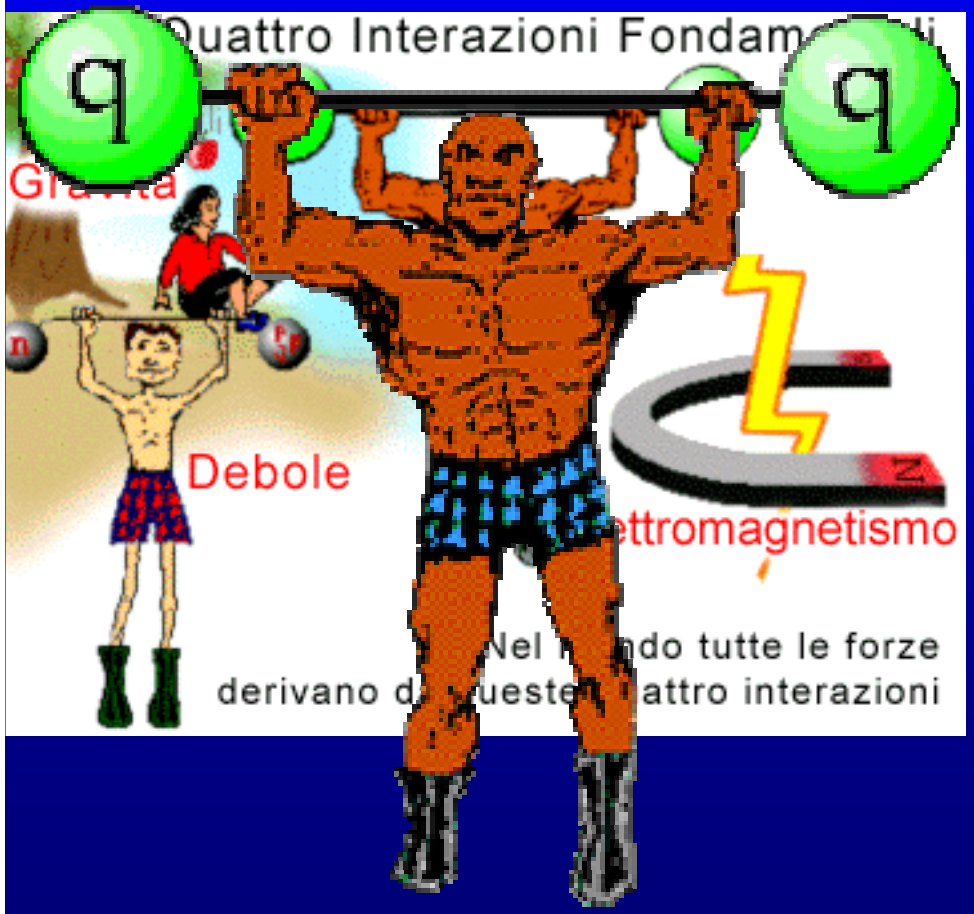
Sapore	Massa (GeV/c^2)	Carica elettrica
u up	.005	+2/3
d down	.01	-1/3
c charm	1.5	+2/3
s strange	0.2	-1/3
t top	180	+2/3
b bottom	4.7	-1/3

- Protone (p): uud
- Neutrone (n): udd

➔Importante! Esistono anche gli antiquark

I gluoni

- Le particelle elementari sono soggette alle 4 interazioni fondamentali



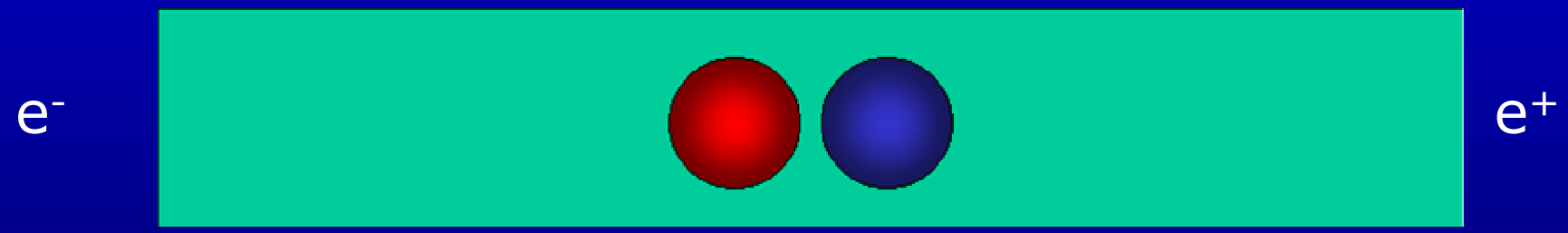
- In particolare i quark sono soggetti all'interazione forte

- Sappiamo che l'interazione forte è mediata da particelle dette gluoni

Come interagiscono i quark e i gluoni ?

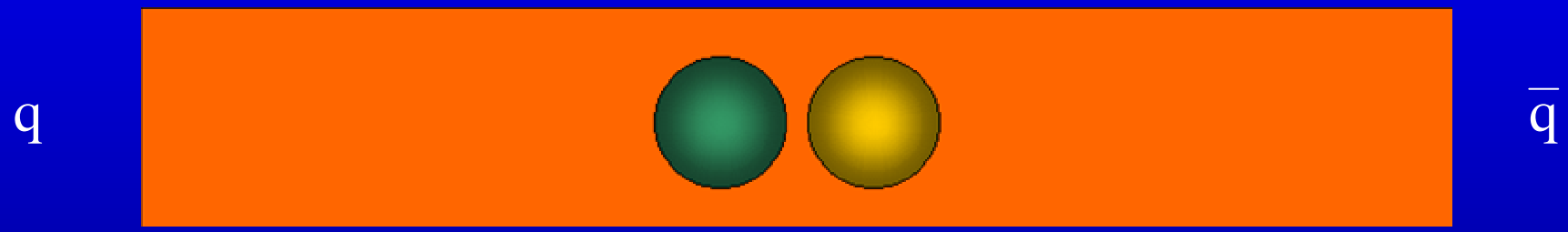
- Per capirlo partiamo dall'interazione elettromagnetica
- Particelle cariche si attraggono (respingono)

- La forza dell'interazione decresce all'allontanarsi delle particelle (come il quadrato della distanza fra esse)



Come interagiscono i quark e i gluoni ?

- Per l'interazione forte avviene un fenomeno completamente diverso !
- La forza che tiene insieme i quark, dovuta allo scambio di gluoni, cresce con la distanza



- Per quanti "sforzi"si facciano non si riescono a "liberare" i quark
- Nessuno ha mai osservato un quark libero

- Tutte le particelle note sono fatte di:
- 3 quark o antiquark (barioni)
- una coppia quark – antiquark (mesoni)

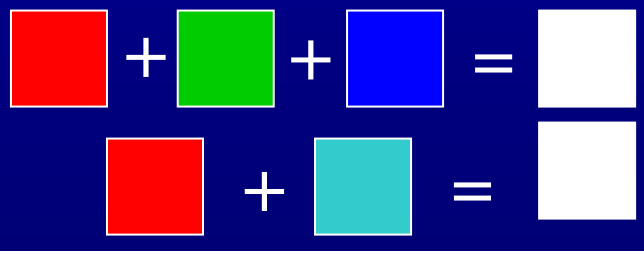
I quark e i gluoni sono colorati

Interazione e.m. → particelle con carica elettrica

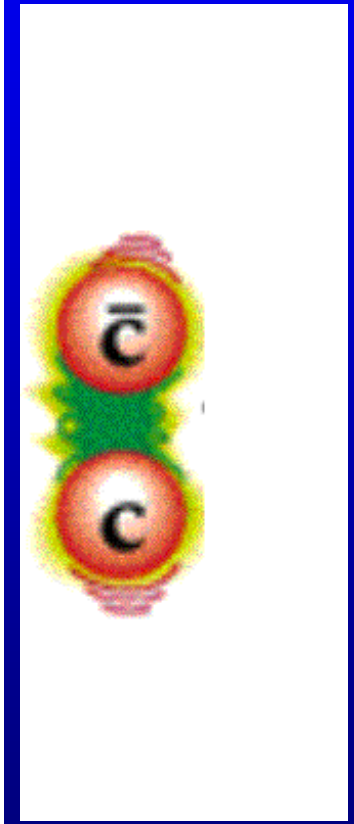
Interazione forte → particelle con carica di colore (anticolore)

- Ogni tipo di quark può esistere in 3 colori diversi
- Esistono 8 gluoni diversi (portano colore e anticolore)

Le particelle che misuriamo (barioni, mesoni) sono di colore neutro



Cosa accade se si cerca di “separare” due quarks?



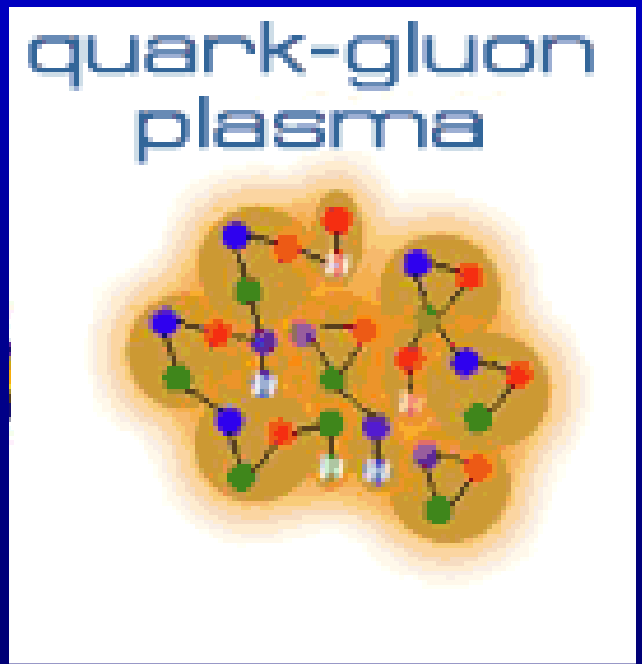
- Se uno dei quark di un adrone viene allontanato dai suoi compagni, il campo di forza di colore "si allunga" (come un elastico) per mantenere il legame.
- L'energia del campo di forza di colore cresce quanto più vengono allontanati i quark tra loro.
- A un certo punto, è più economico, dal punto di vista energetico, che il campo di forza di colore si “spezzi” e liberi energia che si converta nella massa di due nuovi quark
- Al posto dell'adrone di partenza col campo "allungato", possono formarsi due nuovi adroni, e il campo di forza può "rilassarsi".

Il plasma di quark e gluoni

- La forza che tiene insieme I quark cresce con la distanza, ma a distanze piccole diventa relativamente debole

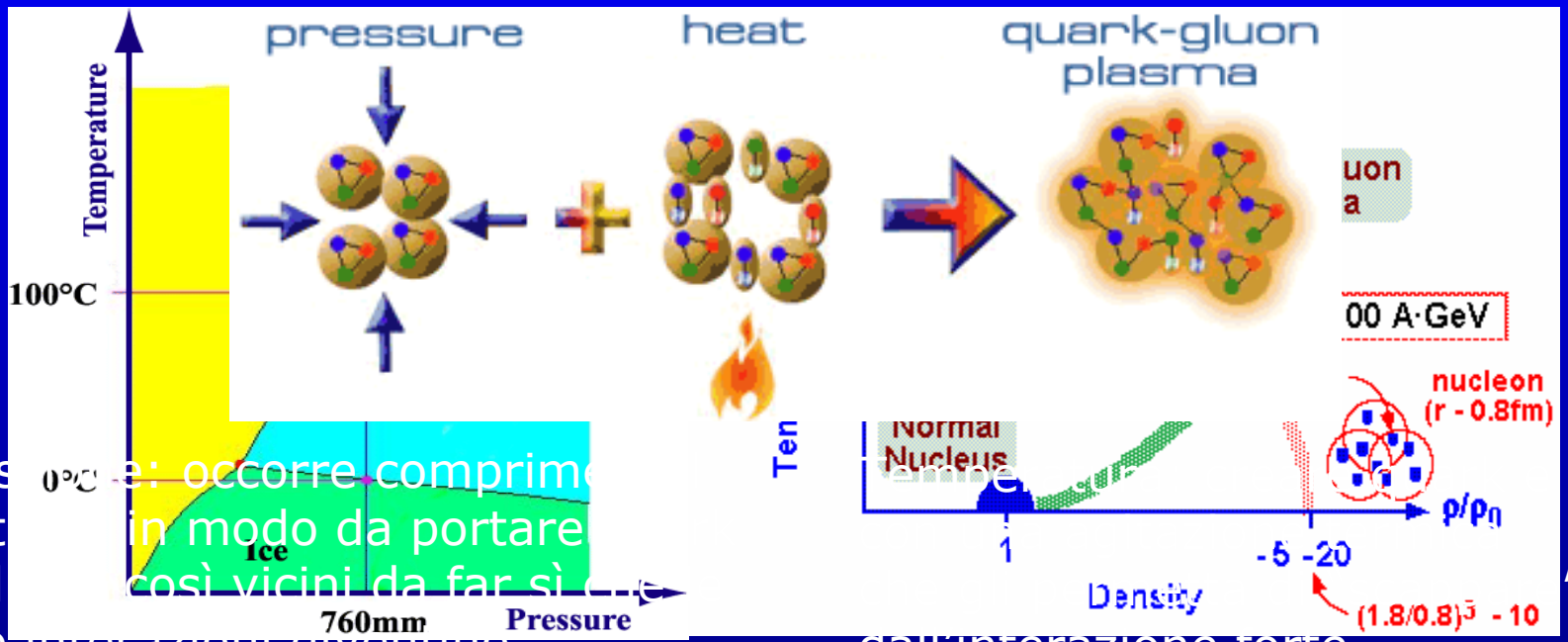
- Se riusciamo a mettere molto vicini un gran numero di quark e gluoni otterremo una zona in cui quark e gluoni possono "circolare" liberamente, contrariamente a quello che fanno di solito

- Ovvero avremo un gas di quark e gluoni colorati: **Il quark-gluon plasma !**



Come fare in pratica ?

- Occorre indurre una transizione di fase verso il plasma
- Come? Applicando calore e pressione



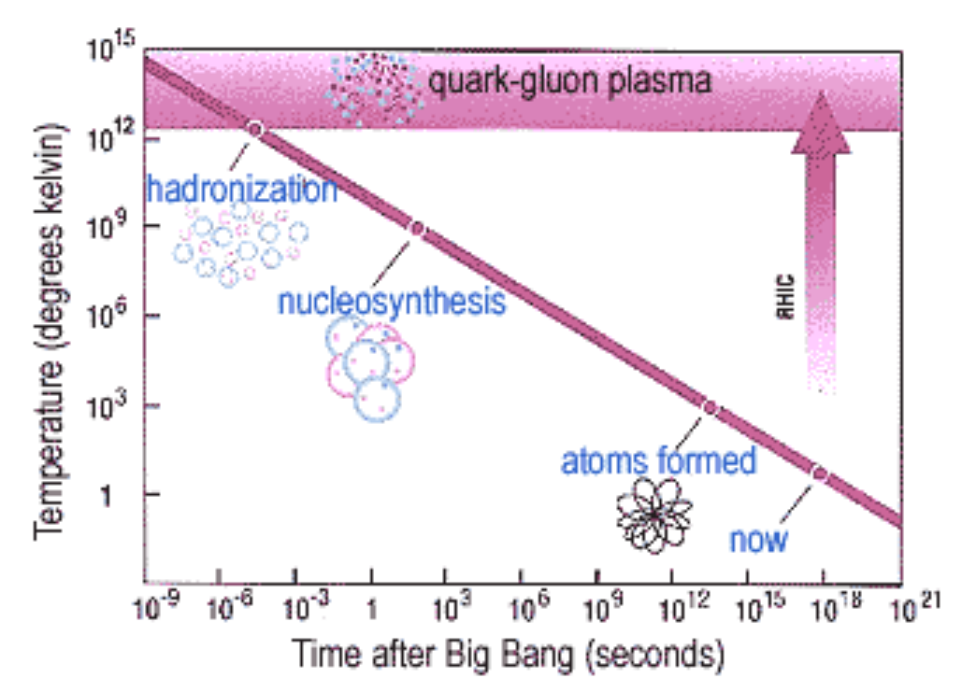
Pres e: occorre comprim gluoni
Sist in modo da portare
e gl così vicini da far sì ”
loro interazioni diventino dall'interazione forte
sufficientemente deboli

L'analogia dell' acqua

Esiste da qualche parte il QGP ?

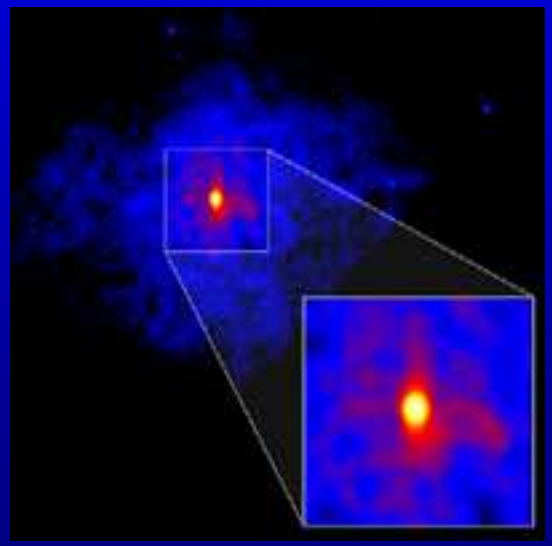
- All'inizio dei tempi, subito dopo il Big Bang
- Rapida espansione/raffreddamento
- Dopo circa 1μs
  - Transizione di fase
  - Appaiono le particelle che conosciamo

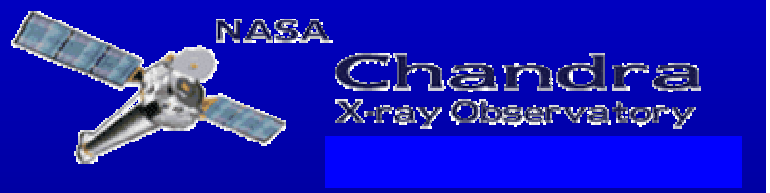
Molto lontano nel tempo (15.000.000.000 anni)



Esiste da qualche parte il QGP ?

- Esistono delle stelle che, alla fine della loro vita, collassano in oggetti piccoli (~10 km) ed estremamente densi, le stelle di neutroni
- La pressione è così alta che probabilmente al loro interno si trovano zone in cui è presente il QGP
- Ipotesi affascinante ma difficile da verificare





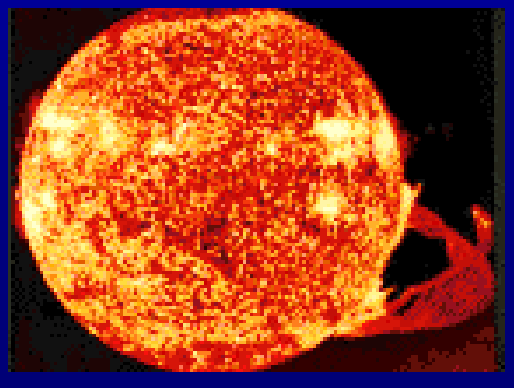
From NASA press release 02-65
April 10, 2002

"….Chandra's observations of RX J1856.5-3754 and 3C58 suggest that the matter in these stars is even denser than nuclear matter found on Earth. This raises the possibility these stars are composed of pure quarks or contain crystals of sub-nuclear particles that normally have only a fleeting existence following high-energy collisions.

Possiamo creare il QGP?

- Se fossimo capaci di creare in laboratorio una certa quantità di QGP potremmo:
  - Capire meglio l'universo delle origini e come si sono formate le particelle che riempiono l'universo
  - Capire meglio come funziona il meccanismo del confinamento dei quark che è alla base della struttura dei protoni e dei neutroni che formano la materia ordinaria

- Possiamo usare gli acceleratori !
- Scegliamo nuclei pesanti (molti protoni e neutroni → molti quark e gluoni)
- Acceleriamoli a velocità relativistiche e facciamoli collidere
- Possiamo creare una zona "calda" e "densa" nella quale riproduciamo i valori di temperatura necessari per formare il QGP

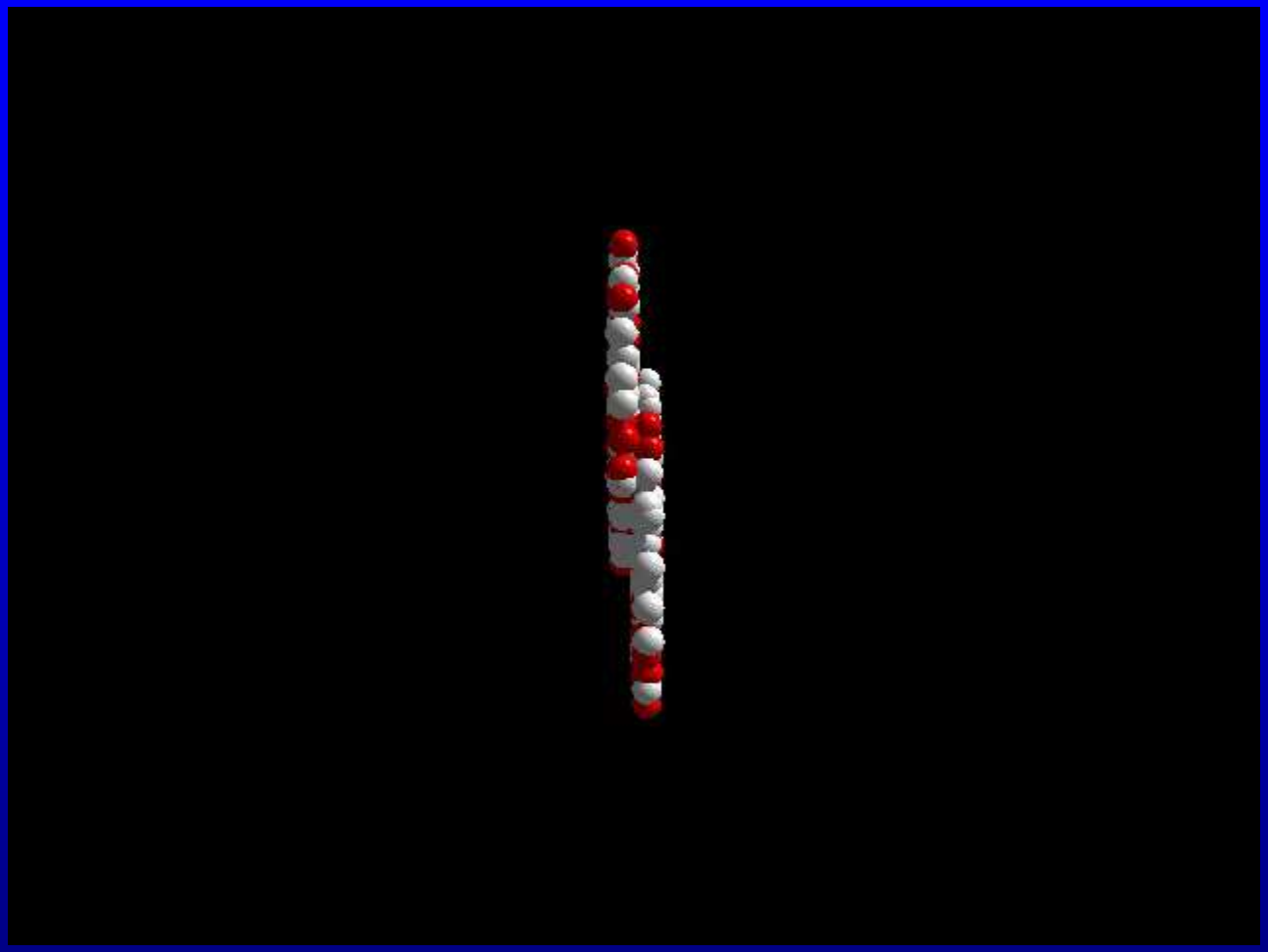


- Qual è la temperatura necessaria ?
- Almeno 1.000.000.000.000 (mille miliardi) ^{o}C
- Più di 10.000 volte la temperatura al centro del Sole

Dove si può creare il QGP ?

- **AGS** : 1986 - 2000
  - Si and Au beams ; up to 14.6 A GeV
  - only hadronic variables
- **RHIC** : 2000 - ?
  - Au beams ; up to $\sqrt{s}$ = 200 GeV
  - 4 experiments
- **SPS** : 1986 - 2003
  - O, S and Pb beams ; up to 200 A GeV
  - hadrons, photons and dileptons
- **LHC** : 2007 - ?
  - Pb beams ; up to $\sqrt{s}$ = 5.5 TeV
  - ALICE and CMS experiments

Cosa accade ?



Lo studio sperimentale delle interazioni di nuclei pesanti è molto complesso. Perchè ?

Problemi

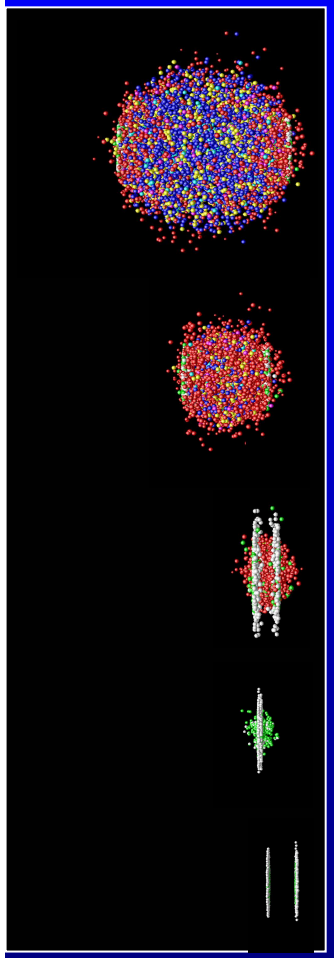
Tecnici

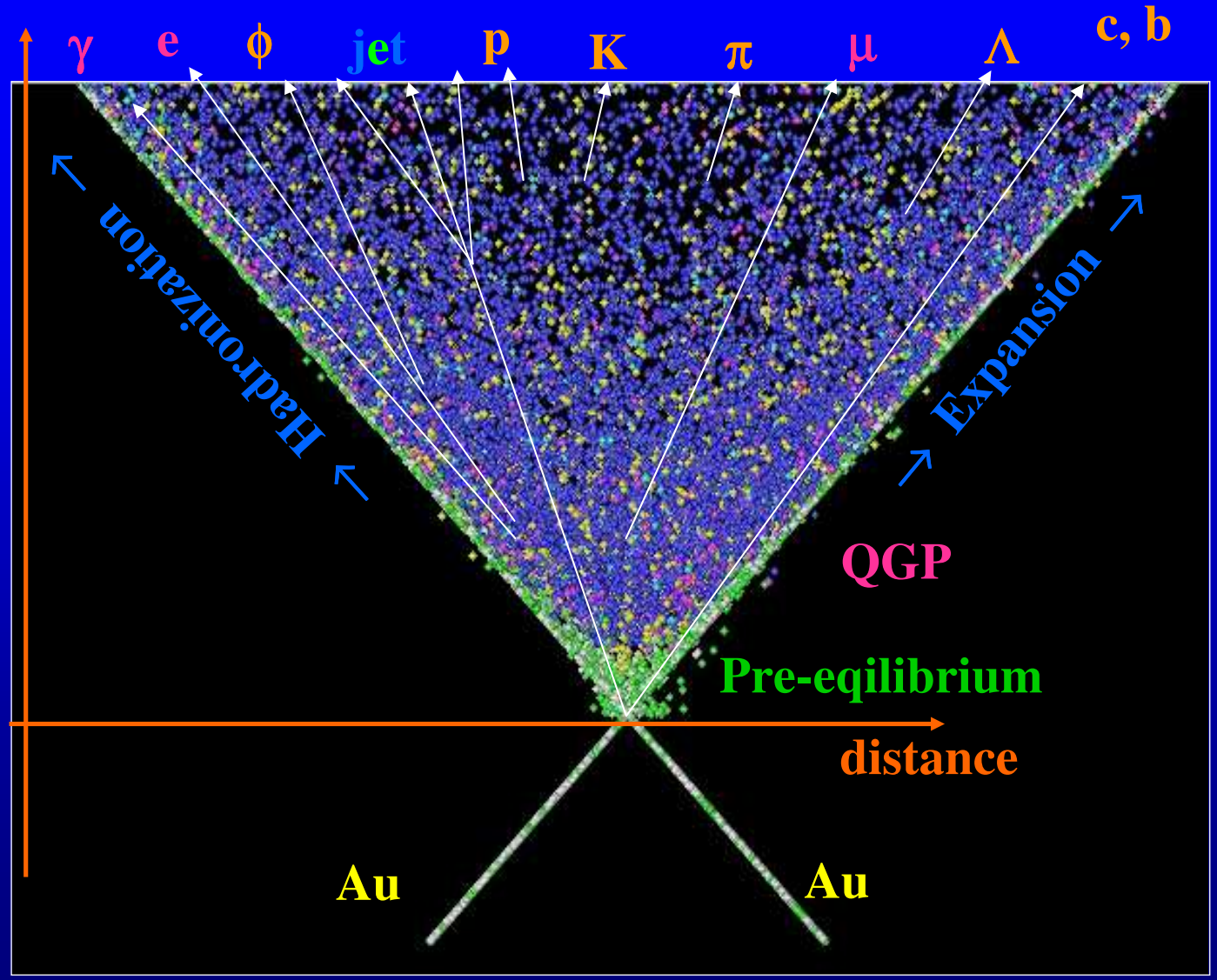
- Un'interazione PbPb all'energia di LHC produce migliaia di particelle
- Notevoli difficoltà tecniche per progetto/realizzazione rivelatori

Concettuali

- Le particelle che "vediamo"nei nostri rivelatori NON SONO i quark e i gluoni del Quark-Gluon Plasma.
- Il QGP ha vita effimera (10^{-21} s !).
- l'espansione e il raffreddamento fanno sì che si abbia una transizione verso particelle "ordinarie" (non colorate), che, dopo una fase relaativamente più lunga di interazioni reciproche, "volano" verso i rivelatori

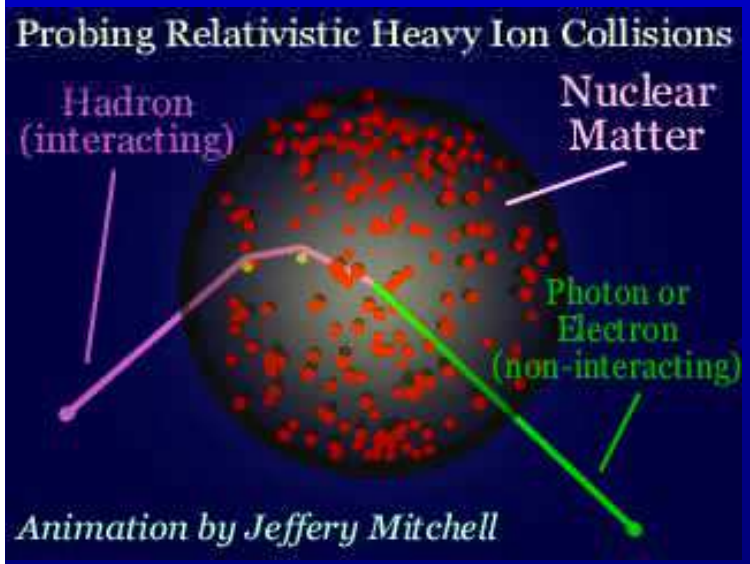
Storia di una collisione





Quali sono le particelle più interessanti ?

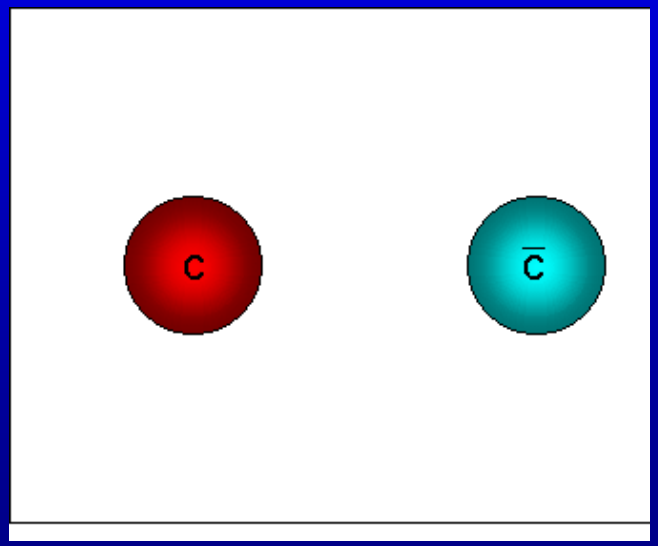
- Quelle che sono state prodotte nei primi istanti
  ➡ Hanno "visto" il QGP !
- Quelle che reinteragiscono debolmente nella fase finale
  ➡ Il messaggio che portano non viene "confuso"



- Le particelle ideali sono quelle che sono insensibili all'interazione forte
  - Fotoni
  - Leptoni (elettroni, muoni)

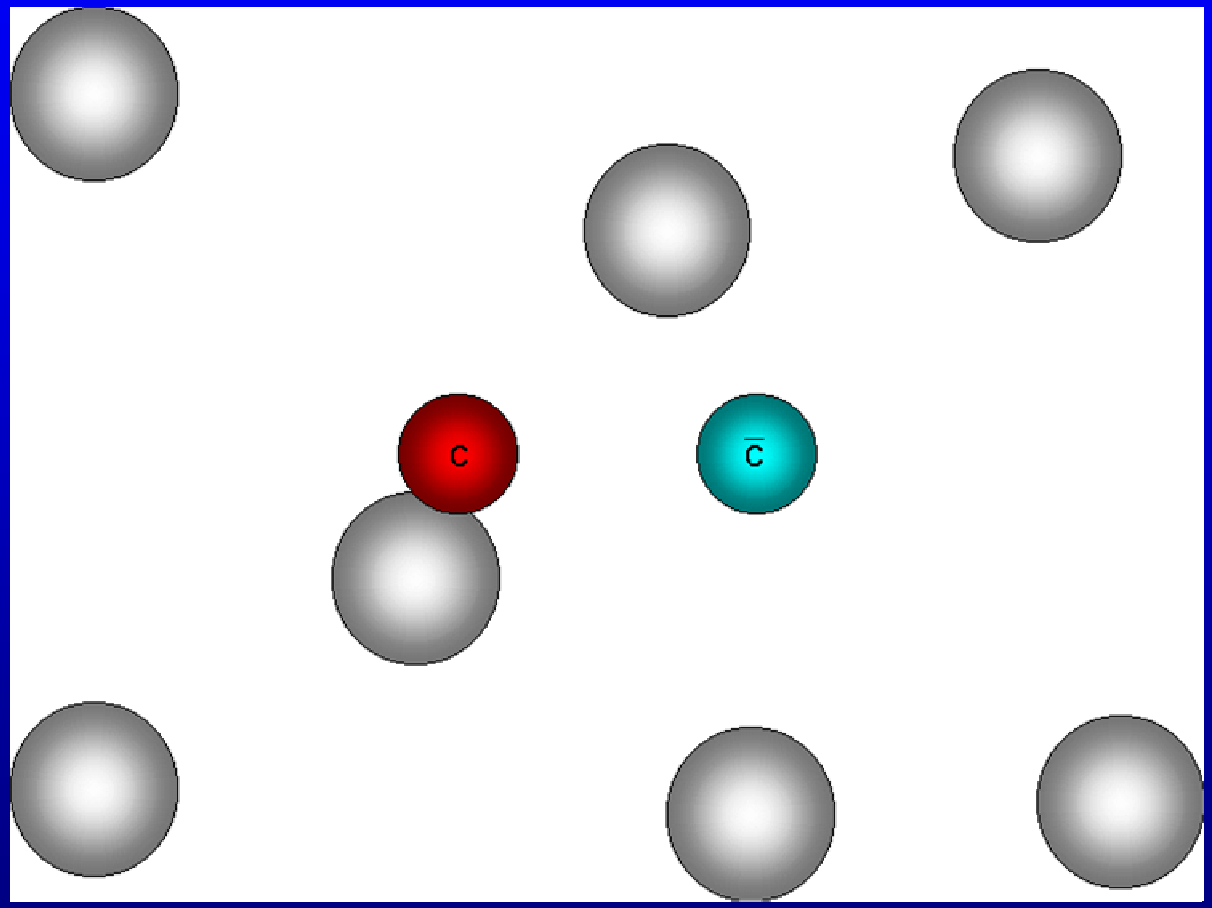
Un caso particolare: la soppressione della J/ψ

- È una particella (mesone) formata da un quark c e dall' antiquark $\bar{c}$, legati dall' interazione forte



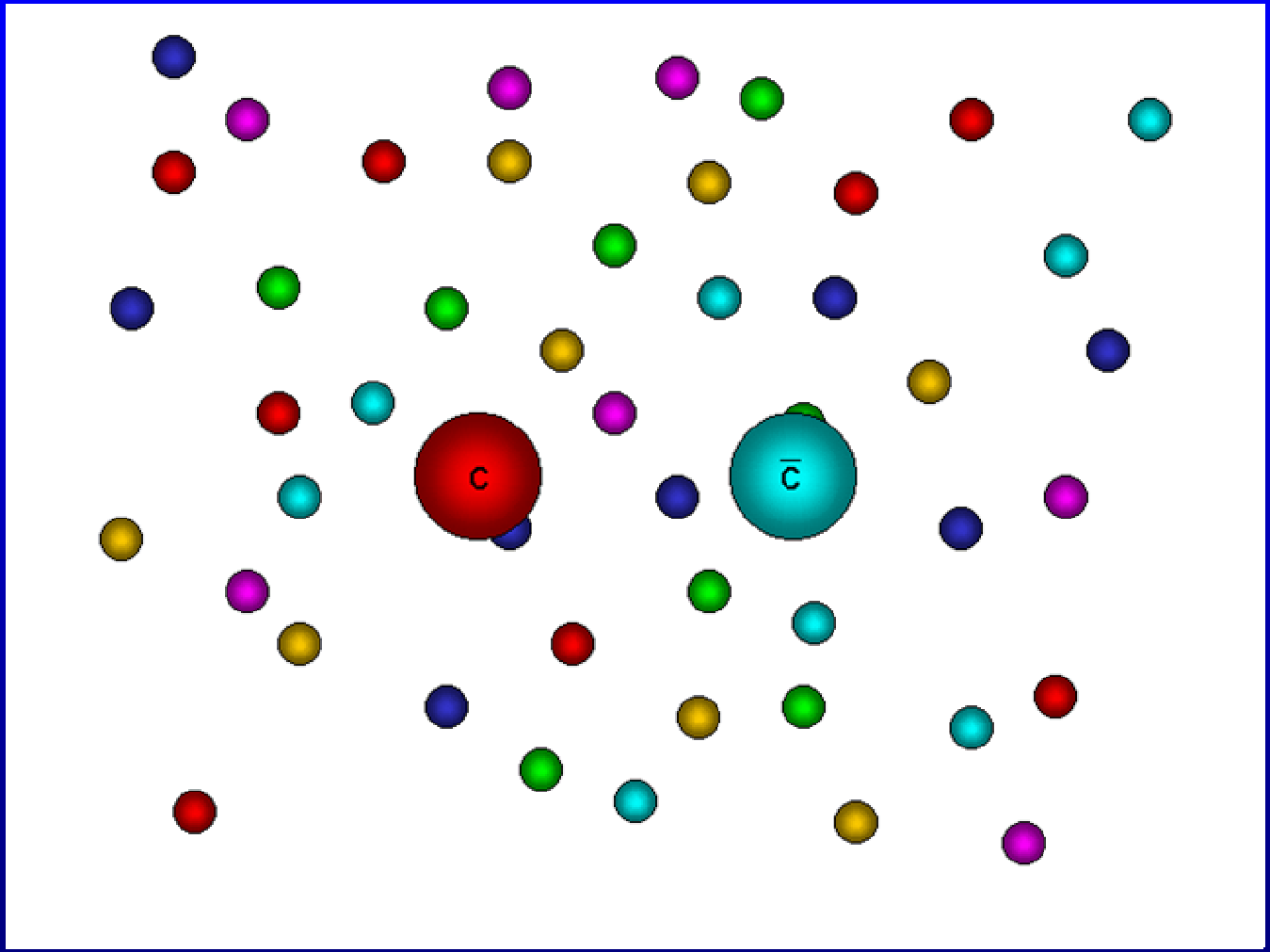
- Può decadere, dopo una vita media "lunga" in una coppia di muoni
- I muoni sono leptoni, dunque non interagiscono fortemente con l'ambiente circostante

La J/ψ immersa in un ambiente"incolore"



- Le particelle usuali, essendo di colore "neutro" non interagiscono in modo sufficientemente energico da influenzare la coppia $c\bar{c}$

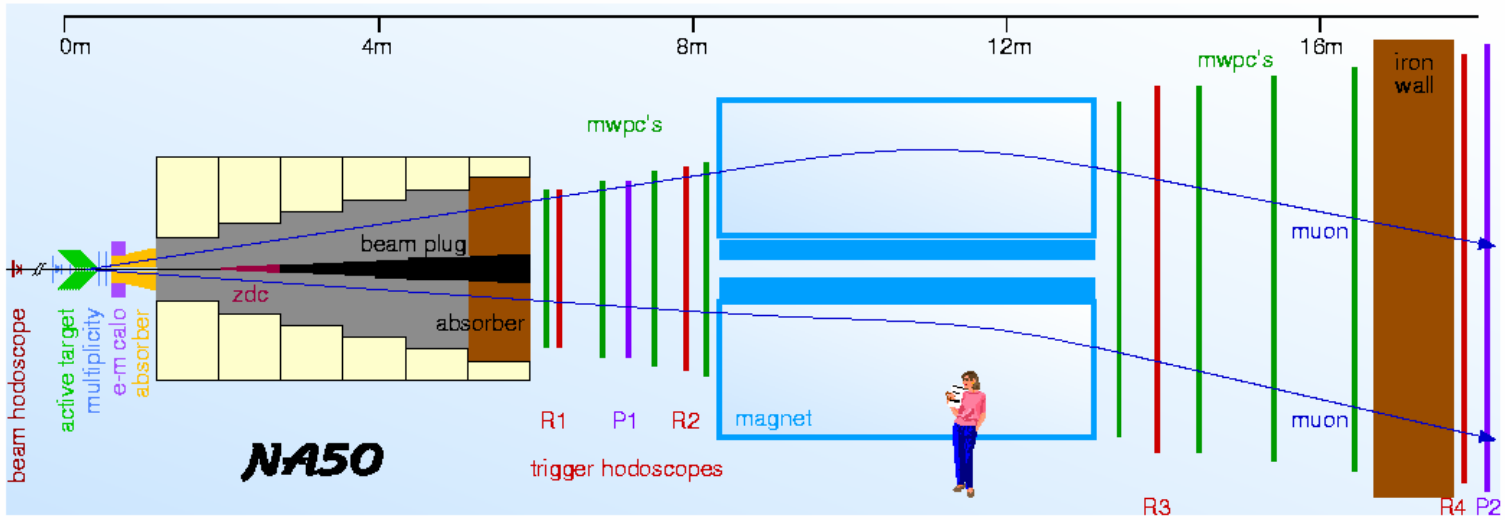
La J/ψ immersa in un ambiente "colorato"



- Un ambiente "colorato" come il QGP può rompere il legame tra quark c e $\bar{c}$ e distruggere la J/ψ

Questa misura è stata fatta

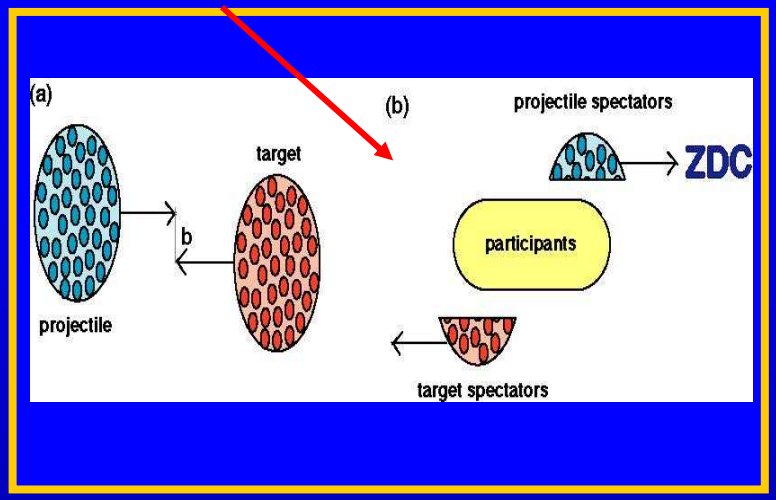
SPS, CERN 1994-2000



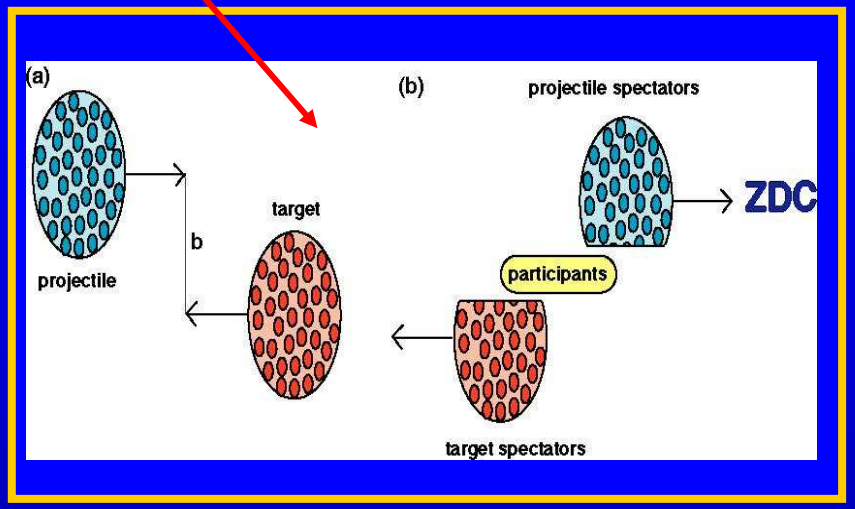
- La sezione di Torino ha progettato e costruito due dei rivelatori usati nell'esperimento per la misura della centralità
  - Calorimetro a zero gradi
  - Rivelatore di molteplicità adronica

La centralità

Collisione centrale

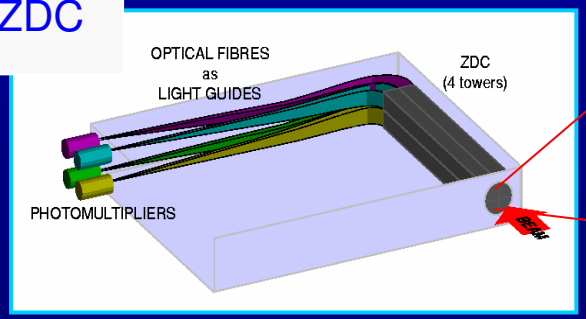


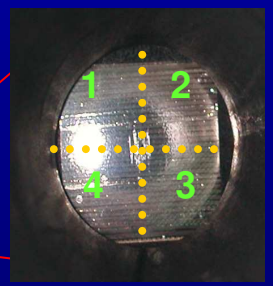
Collisione periferica



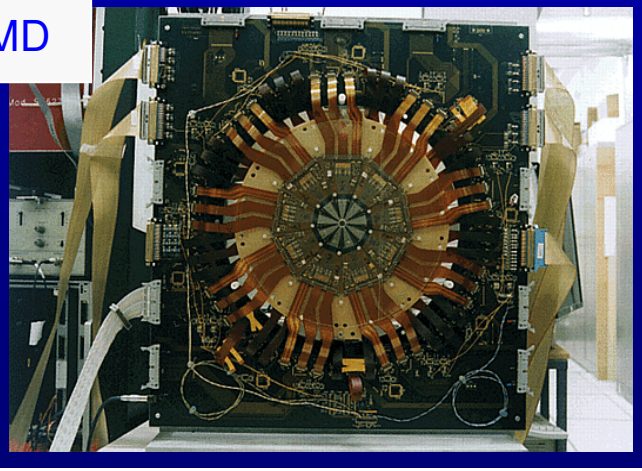
- Le collisioni centrali coinvolgono un maggior numero di protoni e neutroni e creano condizioni più favorevoli alla formazione del QGP

ZDC

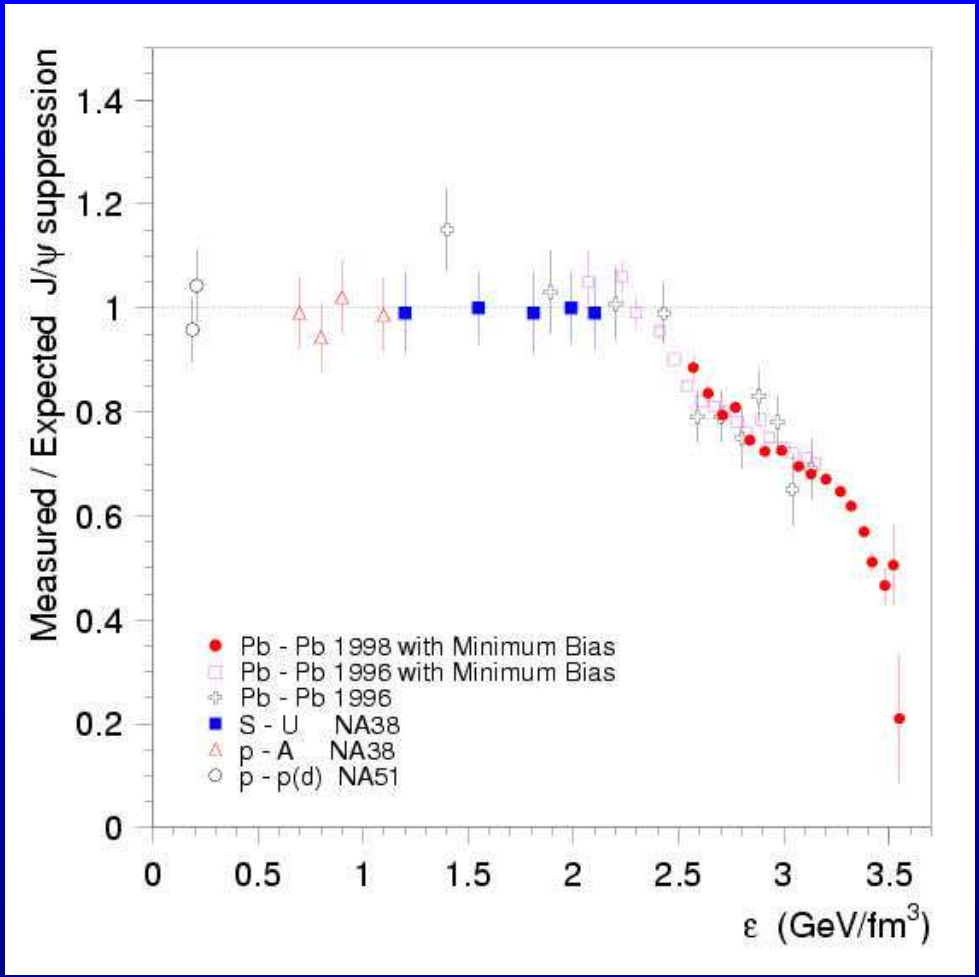




MD



Il risultato di NA50



- In collisioni Pb-Pb centrali, la produzione di J/ψ è dimezzata rispetto al previsto

È stato osservato un segnale della produzione del QGP!

Verso energie più elevate

- Una componente notevole della Sezione di Torino è impegnata nella progettazione e realizzazione di ALICE, l'esperimento che, a partire dal 2007, studierà collisioni PbPb all'LHC (E = 2.7 TeV/nucleone)
- Perchè un esperimento con ioni pesanti a LHC ?

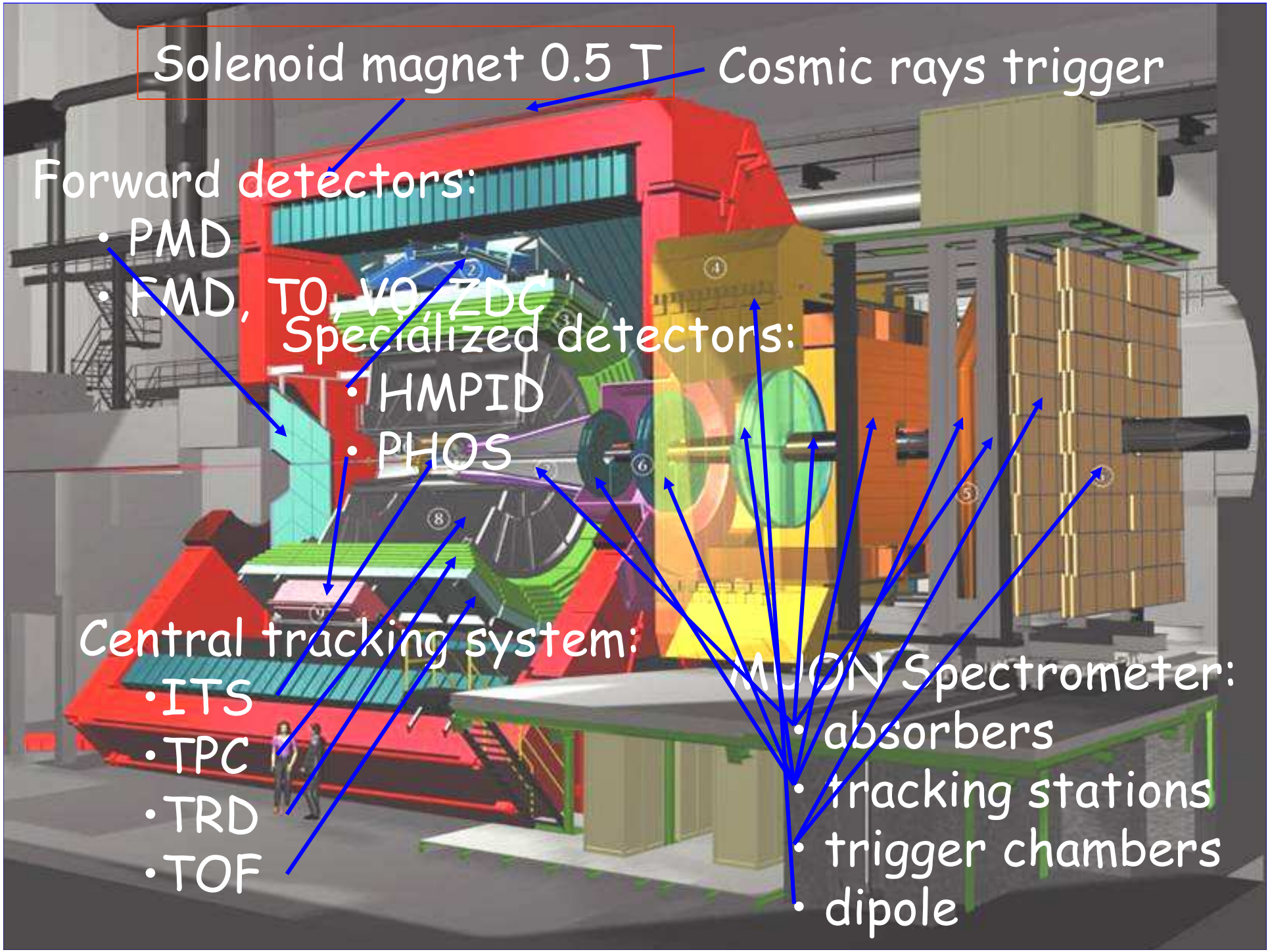
Verso il QGP "ideale"

- Gli esperimenti condotti finora hanno permesso solo di "affacciarsi" per un breve istante verso il QGP

Parameter		SPS	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$	[GeV]	17	200	5500
dN_{gluons}/dy		$\simeq 450$	$\simeq 1200$	$\simeq 5000$
dN_{ch}/dy		400	650	$\simeq 3000$
Initial temperature	[MeV]	200	350	> 600
Energy density	[GeV/fm^3]	3	25	120
Freeze-out volume	[fm^3]	few 10^3	few 10^4	few 10^5
Life-time	[fm/c]	< 2	2-4	> 10

- Alle energie di LHC si potrà ottenere un plasma
  - Più caldo
  - A vita più lunga
  - Su una zona più estesa

La possibilità di creare il QGP è già stata dimostrata
Il suo studio vero e proprio deve ancora iniziare

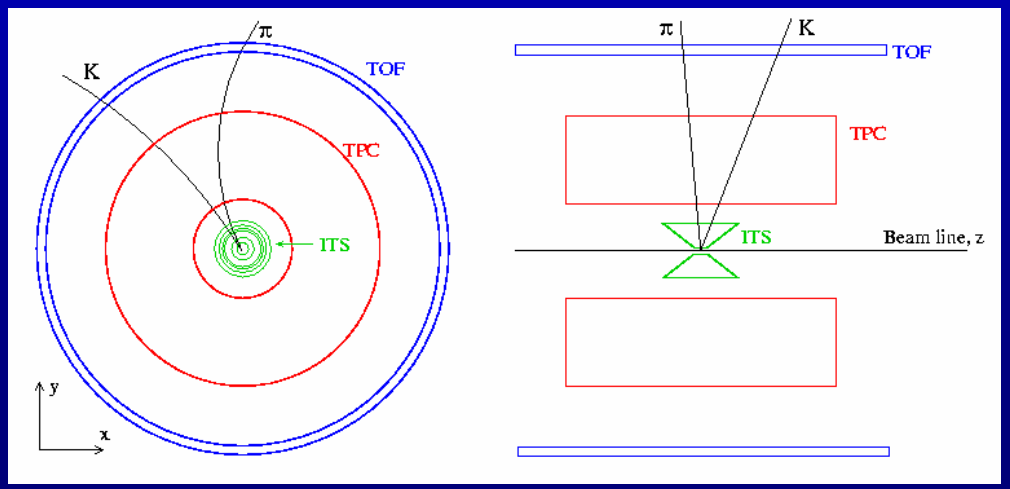

Solenoid magnet 0.5 T
Cosmic rays trigger
Forward detectors:
• PMD
• FMD, T0, V0, ZDC
Specialized detectors:
• HMPID
• PHOS
Central tracking system:
• ITS
• TPC
• TRD
• TOF
MUON Spectrometer:
• absorbers
• tracking stations
• trigger chambers
• dipole

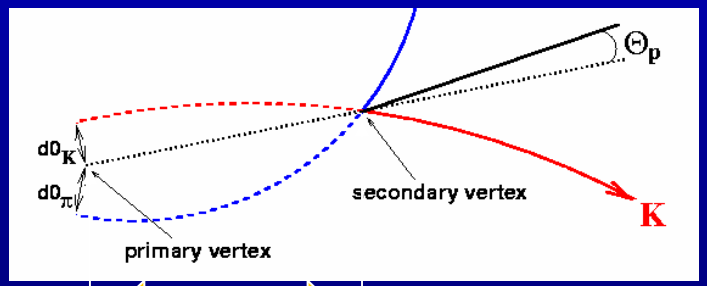
Torino e il QGP (1)

- Dopo aver partecipato al progetto, alla costruzione e all'analisi dei dati dell'esperimento NA50 all'SPS, la sezione è impegnata su più fronti nella progettazione di ALICE

Inner Tracking System ITS (SDD)

- Individuazione del vertice principale della collisione
- Rivelazione dei vertici secondari (decadimento mesoni D, B)





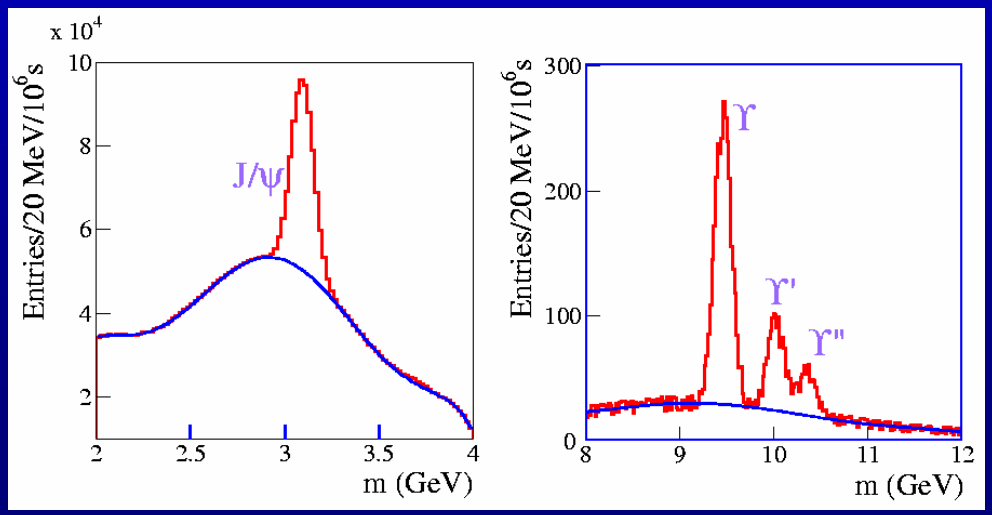
~ 100 μm

Torino e il QGP (2)

Muon arm trigger

- La produzione di muoni "interessanti" (alto momento trasverso, possono venire dal decadimento della J/ψ o della ϒ) è un fenomeno relativamente raro

- Due "muri" di RPC individuano rapidamente questi eventi e fanno scattare (trigger) l'acquisizione dei dati



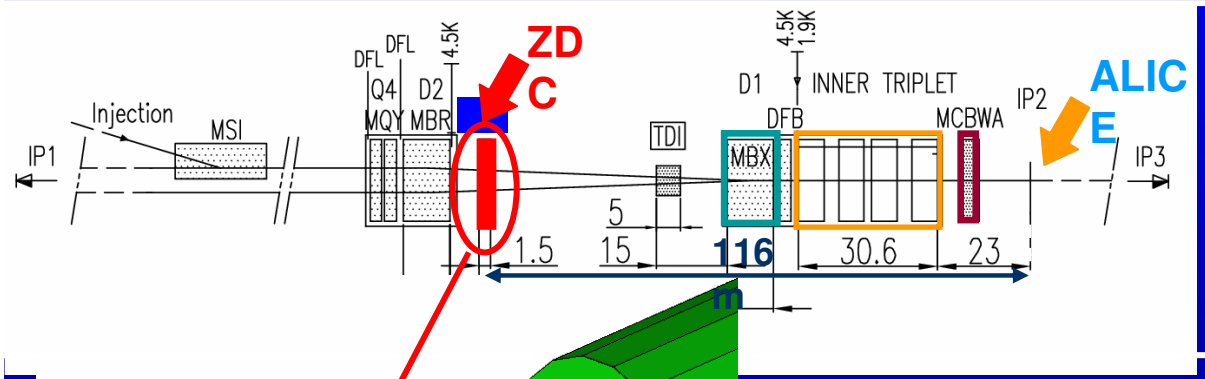
Eventi/anno

system	state	B ($\times 10^3$)	S ($\times 10^3$)	S/B	$S/\sqrt{S+B}$
Pb+Pb	J/ψ	320	230	0.72	310
	ψ'	150	4.6	0.03	12
	Υ	0.25	1.8	7.1	39
	Υ'	0.22	0.54	2.5	19
	Υ''	0.18	0.26	1.5	12

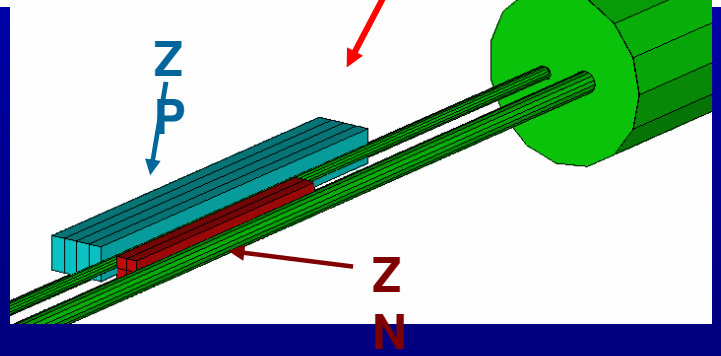
Torino e il QGP (3)

Zero Degree Calorimeter(s) ZDC

- Come agli esperimenti ad energie più basse, è necessario misurare la centralità delle collisioni

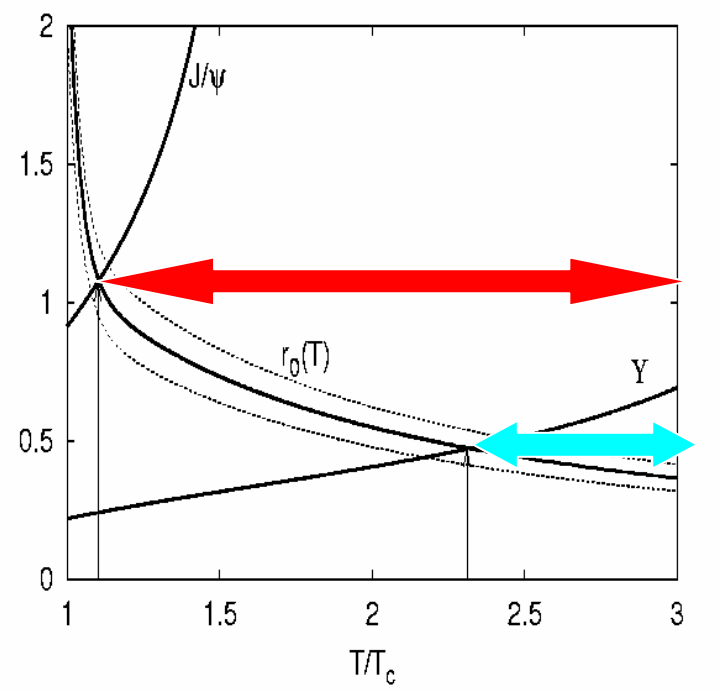


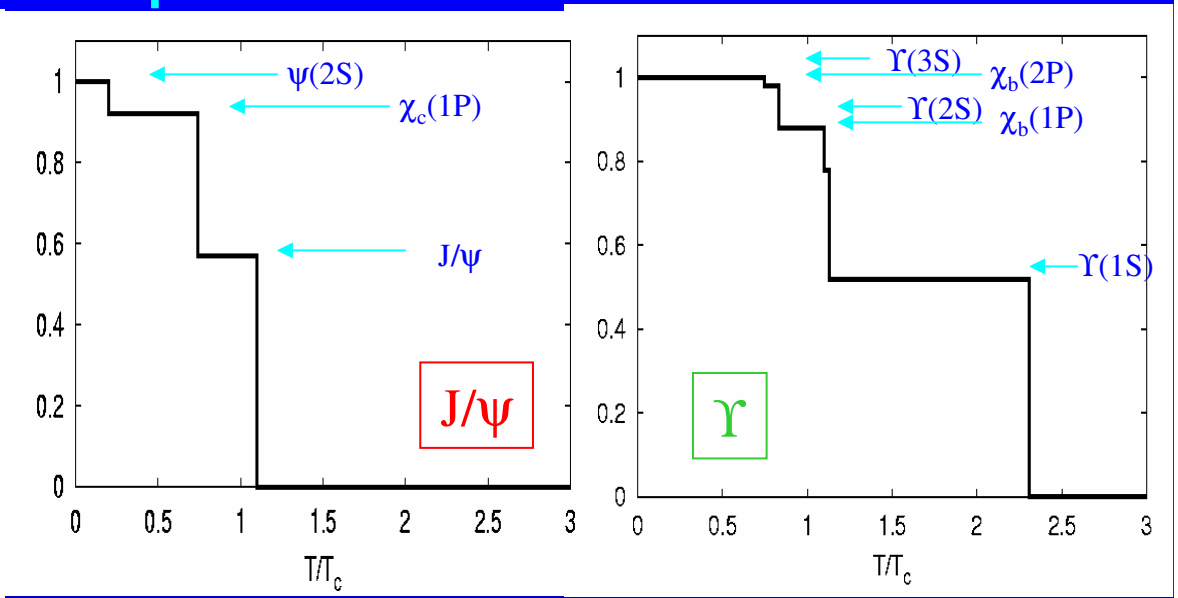
- Dipole to compensate the field of the dimuon arm dipole
- Quadrupole triplet to focalize ion beams
- Dipole to separate beams



- In un collider è difficile posizionare un oggetto sull'asse del fascio (si interromperebbe la circolazione del fascio stesso)
- Soluzione: gli oggetti vanno posti a valle del punto di separazione dei fasci

Esempio: soppressione della J/ψ e della ϒ





- $T/T_c = 1 \rightarrow$ temperatura minima di formazione del QGP

- Più è alta la temperatura più i quark legati c e $\bar{c}$ (b e $\bar{b}$) si allontanano

- Sopra una certa temperatura (diversa per i vari stati di quark legati) in presenza di QGP si rompe il legame

Esistono molti "tipi" di stati legati $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$
Ognuno ha una sua temperatura di dissociazione

Abbiamo a disposizione un "termometro" del QGP

Per finire

- In un certo senso il QGP è l'antenato (cosmologico) dei nuclei atomici di cui è composto il mondo che oggi ci circonda
- Sappiamo che riempiva l'universo pochi istanti dopo la sua formazione
- Con gli strumenti oggi disponibili alla fisica delle alte energie (accelerazione e collisione di ioni pesanti ultrarelativistici) possiamo "ricreare" in laboratorio un' immagine di questi momenti lontani nel tempo
- Gli sviluppi tecnici più recenti nel campo dei rivelatori permettono di analizzare quantitativamente tali collisioni

- Fine ultimo: capire meglio l'origine, ma anche la struttura attuale (confinamento) della natura