#### Il QGP in laboratorio: collisioni di ioni pesanti



- Nelle lezioni precedenti:
  - QCD ad elevate temperature e densità
  - Fasi della materia in interazione forte
    - Gas adronico
    - Plasma di Quark e Gluoni (QGP)
  - Transizioni di fase
    - 1° ordine, 2° ordine, cross-over



#### Quale tool possiamo usare ?



- Vogliamo creare un sistema
  - esteso spazialmente
  - a vita lunga

di materia in interazione forte (i.e. quark e gluoni)

- Perchè (e quanto) esteso spazialmente ?
  - Vogliamo usare variabili di tipo macroscopico
  - Dimensioni molto più grandi della scala delle interazioni forti (~ 1 fm)
  - Molte particelle (>> 1)
- Perchè (e quanto) a vita lunga ?
  - Vogliamo usare il linguaggio della termodinamica
  - Il sistema deve raggiungere l' equilibrio termico ( $\tau >> 1 \text{ fm/c}$ )
- Inoltre
  - Vogliamo raggiungere densità di energia sufficienti per la transizione di fase. Se  $T_c = 170$  MeV, quanto vale  $\epsilon_c$ ?

#### Densità di energia critica



$$\varepsilon_{c} = \left\{ 2_{f} \cdot 2_{s} \cdot 2_{q} \cdot 3_{c} \cdot \frac{7}{8} + 2_{p} \cdot 8_{c} \right\} \frac{\pi^{2}}{30} \frac{4}{c} \sigma T^{4}$$
gradi di libertà
quark+gluoni costante di Stefan-Boltzmann
$$= 5.67 \cdot 10^{8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

 $T = 1/k \cdot 170 \text{ MeV} = 1/(8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV } \text{K}^{-1}) \cdot 170 \cdot 10^{6} \text{ eV} \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ K}$ 

Si ottiene

$$\varepsilon_{c} \approx 1.5 \cdot 10^{35} \frac{J}{m^{3}} = 1.5 \cdot 10^{35} \cdot \frac{6.24 \cdot 10^{9} \text{ GeV}}{10^{45} \text{ fm}^{3}} \approx 0.9 \frac{\text{GeV}}{\text{fm}^{3}}$$



#### Come ottenere $\varepsilon \sim 1$ GeV/fm<sup>3</sup>?



Vogliamo ottenere, su un volume il più esteso possibile:

- un sistema a molte particelle fortemente interagenti
- una densità di energia di (almeno) 1 GeV/fm<sup>3</sup>

Collisioni di tipo e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>, o anche pp, non sono sufficienti



Anche ad energie nel centro di massa di svariate centinaia di GeV, si producono poche decine di particelle per collisione



Occorre far collidere sistemi di maggiori dimensioni

## Collisioni pp a LHC

a.a. 2014



- Anche alle energie raggiungibili a LHC la molteplicita' massima non e' maggiore di ~100 particelle cariche
- Tuttavia, sono stati osservati recentemente in collisioni pp alcuni fenomeni che sembrano legati alla formazione di un sistema fortemente interagente

#### Collisioni nucleari



- Le collisioni di nuclei (pesanti) possono in linea di principio portare alla creazione di un sistema con le caratteristiche richieste
- Si vuole ottenere un sistema sufficientemente caldo e denso per studiare la transizione di fase
- Idealmente, il sistema creato
  - Raggiunge lo stato di QGP
  - Si raffredda ed espande
  - Attraversa la regione della transizione di fase e ritorna nella fase adronica

Come possiamo, in un esperimento che studia collisioni di ioni, ottenere informazioni sulla fase del QGP ?



## (Alcuni) problemi





• Qual è l' energia più adatta allo studio della transizione di fase ?

• Nel progettare un esperimento che studia collisioni nucleari, quali sono i parametri critici di cui tenere conto ?

 Anche se si ottiene il QGP, sicuramente non si osserveranno negli esperimenti quark e gluoni liberi ! Le particelle (adroni) che riveleremo nei nostri apparati sono "sensibili" alla fase di QGP ?

## Fasci di ioni (breve storia)



- Lo studio della transizione di fase richiede energie (nel centro di massa) di svariati GeV/nucleone
- Negli anni '80, quando questo campo di studi iniziò a svilupparsi, vennero modificati apparati già esistenti in due dei più importanti laboratori dedicati allo studio della fisica delle particelle, BNL e CERN



# Macchine a bersaglio fisso (1)





- AGS (Alternating Gradient Synchrotron)
  - in funzione dal 1960
  - fasci di protoni a 33 GeV
- 3 premi Nobel
  - Ting (1976), scoperta della J/ $\psi$
  - Cronin e Fitch (1980) CP violation
  - Lederman, Schwartz, Steinberger (1988), scoperta del  $v_{\mu}$

Usato per accelerare ioni dal 1986 al 2000 (e poi come iniettore per RHIC)

Fasci di Si e Au fino a 14.6 AGeV

Ricordare: la massima energia per nucleone è sempre minore che per i protoni di un fattore Z/A (i neutroni non sentono il campo elettrico!)

# Macchine a bersaglio fisso (2)



#### Qualche dettaglio in più



#### Intensità di fascio e efficienze



Table 1.3.1: Nominal intensities and efficiencies

Accelerator	Output	Output	Effic.	Pb ions per	Pb ions per	Comments
(or element)	β	Т	η	PS cycle <sup>1</sup>	SPS cycle1	
ECR Source	0.0023	2.5 keV/u		7.13 109	2.85 1010	80µAe, 400µs Pb <sup>28+</sup>
RFQ	0.023	250 keV/u	0.9			
IH Linac	0.094	4.2 MeV/u	0.9	5.78 10 <sup>9</sup>	2.31 1010	65µАс Рь <sup>28+</sup>
Stripper foil			0.16	9.25 10 <sup>8</sup>	3.70 10 <sup>9</sup>	$Pb^{28+} => Pb^{53+} (20\mu Ae)$
						stripping loss
PSB injection			0.4			Multiturn injection,
						4 * 18 turns
Acceler. (h=10)	0.421	95.4 MeV/u	0.6	2.22 10 <sup>8</sup>	8.88 10 <sup>8</sup>	RF capture, vacuum
PS injection			0.95			Including PSB-PS
	1					transfer
						(2 bunches => 1
						bucket)
Acceler.(h=20)	0.984	4.25 GeV/u	0.7	1.48 10 <sup>5</sup>	5.91 108	Vacuum
Stripping			1.0		[	$Pb^{53+} => Pb^{82+}$
SPS injection	ĺ		0.95			Including PS-SPS
						transfer
Acceleration	~1	177 GeV/u	0.7		3.93 108	

<sup>1</sup>Source, RFQ, IH Linac , PSB: all one cycle per PS cycle. Four PS cycles per SPS cycle.

Ogni "step" nel processo di accelerazione comporta perdite più o meno rilevanti. Efficienza globale  $\sim 0.14\%$  !

# Prima sezione (sorgente $\rightarrow$ LINAC)



Sorgente: ECR (electron-cyclotron resonance)



- Un "forno a microonde" produce un gas di atomi di Pb, che si vuole ionizzare per ottenere un plasma
- Plasma confinato in una "bottiglia magnetica" (solenoide + sestupolo)
- Irradiato con microonde ad alta frequenza (14.5 GHz)
- Gli elettroni attraversano una zona dove B=0.52 T

• $\omega_{cycl}^{e} = eB/m_{e} = \omega_{RF}$ 

• Elettroni accelerati in modo risonante

• Urti successivi di questi elettroni ionizzano ulteriormente il plasma

Si ottengono impulsi (10 Hz) di 400  $\mu$ s di 100 $\mu$ Ae (Pb<sup>25+</sup> - Pb<sup>28+</sup>)

#### Frequenza di ciclotrone





• Bilanciamento tra forza centripeta e forza esercitata dal campo magnetico

 $evB = \frac{mv^2}{r}$  (v<<c)  $Br = \frac{mv}{e}$  (rigidità magnetica)

Frequenza di rivoluzione non dipende dall' energia

$$f = \frac{v}{2\pi r} = \frac{v}{2\pi} \frac{eB}{mv} = \frac{eB}{2\pi m}$$

#### Linea di trasporto a bassa energia





# Accelerazione e trasporto a energia intermedia (1)



- LINAC1 accelerava senza difficoltà deutoni e alfa
- Usato nella prima fase di esperimenti con ioni (anni '80) per accelerare  $O^{6+}$  e  $S^{12+}$ , grazie ad un upgrade delle RF (+33%)
- Per ioni pesanti (Z/A minore) non si riesce ad aumentare ancora la RF



 LINAC3 (0.25 → 4.2 MeV/c)
 → costruito per il fascio di ioni Pb negli anni '90

3 tanks separati  $L_{tot} \sim 8 \text{ fm}$ 



# Accelerazione e trasporto a energia intermedia (2)



Stripper Foglio di rame (0.5 – 1 μm)



Pb<sup>28+</sup>→ Pb<sup>53+</sup> (selezionati nello spettrometro a valle)

Corrente passa da 65  $\mu Ae$  a 20  $\mu Ae$ 

#### Problemi di vuoto





- All 'ingresso degli acceleratori circolari (PSB, PS) abbiamo a che fare con ioni non completamente strippati
- Reazioni di scambio carica tra le molecole del gas residuo e lo ione, che può catturare uno (o più) elettroni → perdita della particella
  - Occorre mantenere pressioni minori di ~  $10^{-9}$  Torr per i gas più pesanti dell' idrogeno (essenzialmente H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO)

(1 atm = 760 Torr = 1013.25 hPa)

Occorre un miglioramento di un fattore ~ 7 al PSB

• Il problema diventa meno importante al crescere dell' energia

#### PSB e PS





- 4 sincrotroni "impilati" (R = 25 m)
- 10 bunch per sincro accelerati da 4.2 a 95.4 MeV/nucleone (ioni Pb<sup>58+</sup>)

Trasferimento al PS

- Accelerazione nel PS su 4 cicli di 1.2 s (20 bunch/ciclo, PSB bunches raggruppati a 2 a 2)
- Piccola parte di un superciclo di 19.2 s, usato per accelerare vari tipi di particelle
- Da 0.095 GeV/c a 5.09 GeV/c (ioni Pb<sup>58+</sup>)

# Stripping finale e SPS

- All' uscita del PS, Cu stripper (~ 1 mm)
- Accelerazione finale da 5.09 GeV/c a 158 GeV/c
- 4 gruppi di ioni (ognuno di 20 bunch) iniettati a intervalli di 1.2 s
- Vengono estratti circa 4.10<sup>8</sup> ioni Pb/ciclo (in protoni 3.10<sup>13</sup>)

80% alla linea ad alta intensità



(NA50)



 $Pb^{53+} \rightarrow Pb^{2}$ 

Con l' avvento di LHC  $\rightarrow$  iniettore per il collider (vedi dopo)

#### Da bersaglio fisso a collider (1)



- Acceleratore elettrostatico  $\rightarrow \beta = 0.05$
- Differenza di potenziale: 15 MV
- Lunghezza: 24 m
- Usato dalla NASA per testare i componenti di Mars PathFinder (radiation damage)

# Da bersaglio fisso a collider (2) all 2014/2015





### Da bersaglio fisso a collider (4)





#### Collider - problemi



 I collider di ioni pesanti presentano problemi supplementari rispetto agli acceleratori tradizionali, legati alla vita media dei fasci che collidono



#### Collider - quenching



Gli ioni che acquistano un elettrone, hanno un rapporto Z/A diverso da quello che permette loro di continuare a circolare nella macchina

Se finiscono sui magneti superconduttori possono portare ad un riscaldamento "locale"  $\rightarrow$  il magnete diventa "resistivo" in un punto

Occorre allora, in tempi << 1 s



Rivelare il fenomeno

Forzare la transizione a condizione resistiva su tutto il magnete (riscaldandolo leggermente)

Spegnere il magnete

Fare un "dump" del fascio (720 MJ da dissipare in 89 ms !)



#### Sezione d' urto Pb-Pb



- Per studiare l' eventuale produzione di QGP, occorre ottenere interazioni Pb-Pb adroniche
- Geometria della collisione governata dal parametro di impatto (b)



#### Interazioni Pb-Pb adroniche

• La sezione d'urto adronica p-p cresce solo logaritmicamente con ve



La sezione d' urto adronica ione-ione viene spesso approssimata come

 $\sigma_{in}^{PbPb} = 640 \text{ fm}^2 = 6.4 \text{ barn}$ 

 $\sigma_{in} = \pi r_0^2 (A_a^{1/3} + A_b^{1/3} - \delta)^2$ (r<sub>0</sub> = 1.35 fm,  $\delta$  = 1.1 fm)



#### **EMD** cross-section



(Weizsacker-Williams)

$$n(E_{\gamma}) = \frac{2\alpha Z_t^2}{\pi \beta^2 E_{\gamma}} \Big( x K_0(x) K_1(x) - \frac{\beta^2}{2} x^2 (K_1^2(x) - K_0^2(x)) \Big). \qquad \text{with} \qquad x = E_{\gamma} b_{\min} / (\gamma \beta \hbar c),$$



#### Dissociazione vs A-A





• Forte dipendenza da Z dei processi elettromagnetici "dannosi"

#### Risultati a LHC

 $\sigma^{mEMD}$ 

σ<sup>had</sup>

GSEMD





Numero di neutroni rimossi dal nucleo di Pb per effetto delle interazioni ultraperiferiche

Enorme sezione d' urto e.m. rispetto ai valori di sezione d'urto adronica!

DATA

 $(5.5 \pm 0.2 \text{ stat.} +0.7 -0.3 \text{ syst.}) \text{ b}$ 

 $(7.5 \pm 0.2 \text{ stat.}^{+0.9}_{-0.4} \text{ syst.}) \text{ b}$ 

DATA

(185.7 ± 0,2 stat. +22.6 syst.) b

-11.1

#### Altri effetti deleteri...



 Un altro fenomeno che limita la vita media (e la luminosità) dei fasci ai collider è l' intra-beam scattering (Coulomb scattering di particelle all' interno del bunch)

- Aumenta le taglie longitudinale e trasversale del fascio, con perdita di qualità del medesimo
- Effetto proporzionale a  $N \times Z \times A$  (N = particelle/bunch)
- Infine, soprattutto alle basse energie  $\rightarrow$  effetti di carica spaziale
- Ciascuna particella sente l'effetto della carica spaziale dell'insieme delle altre particelle del bunch
- L' effetto è più importante alle basse energie (va come  $1/\gamma^2$ )
- Influenza la prima fase di accelerazione (non si possono ottenere bunch molto "densi")

Questi effetti sono meno importanti al collider rispetto ai precedenti

#### Luminosità ad un collider di ioni (LHC)





$$\mathscr{L} = f N_{\rm b} \frac{N^2}{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} F \ ,$$

- f : frequenza rivoluzione
- N<sub>b</sub> : numero bunches
- N<sup>•</sup>: particelle/bunch
- $\sigma_i$ : dimensioni trasverse fasci
- F : fatt.di riduzione (crossing angle) ~ 0.8 (varia con  $\sigma_l$  /  $\sigma_t$  )

Luminosità media

$$\langle \mathscr{L} \rangle(t) = \frac{1}{t + T_{\rm f}} \int_{t_{\rm per-up}}^{t} {\rm d}t' \mathscr{L}(t')$$

Assumendo  $T_f$  (filling) = 3 h  $t_{set-up}$  = 20 min