

Il Plasma di Quark e Gluoni e la Fisica con Ioni Pesanti ad ATLAS

Claudio Gatti

LNF - INFN, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy

Abstract

In questo articolo si da una breve introduzione divulgativa sulla fisica del plasma di quark e gluoni. Viene poi spiegato come è prodotto questo stato della materia mediante l'urto tra ioni pesanti. Infine, vengono discussi alcuni dei risultati più rilevanti dell'esperimento ATLAS.

Il Plasma di Quark e Gluoni



E' noto che dei cubetti di ghiaccio a temperatura ambiente si sciolgono in acqua che a sua volta, scaldata fino all'ebollizione, diventa vapore. Questi processi di trasformazione di materia da solida a liquida fino a gassosa si chiamano *transizioni di fase*. Nelle transizioni di fase cambia lo stato di aggregazione della materia.

Mano a mano che un sistema si scalda aumenta la vibrazione delle molecole che lo compongono. Quando la vibrazione diventa grande abbastanza da superare la forza intermolecolare che tiene insieme le molecole, il sistema cambia stato. Nell'acqua la forza intermolecolare è dovuta all'attrazione elettrica tra zone cariche positivamente e negativamente. Questa polarizzazione di carica è a sua volta dovuta agli elettroni che rimangono più tempo attorno all'atomo di ossigeno che ai due di idrogeno, rendendo il primo carico negativamente e gli altri due carichi positivamente. Questo eccesso spaziale di cariche positive e negative fa sì che le molecole di acqua tendano ad attrarsi tra loro (legame "idrogeno", cfr. Figura 1).

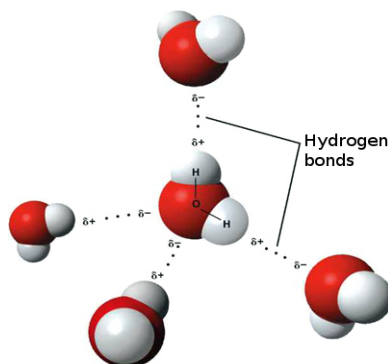


Figura 1: Legame "idrogeno" tra molecole d'acqua.

Quando però due molecole si avvicinano troppo, le loro nuvole elettroniche vengono in contatto e tendono a respingersi, rendendo la forza totale repulsiva. A maggiori distanze invece prevale la forza attrattiva tra le cariche opposte. Infine a distanze ancora più grandi, poiché le molecole sono globalmente neutre, le forze si annullano (Figura 2).

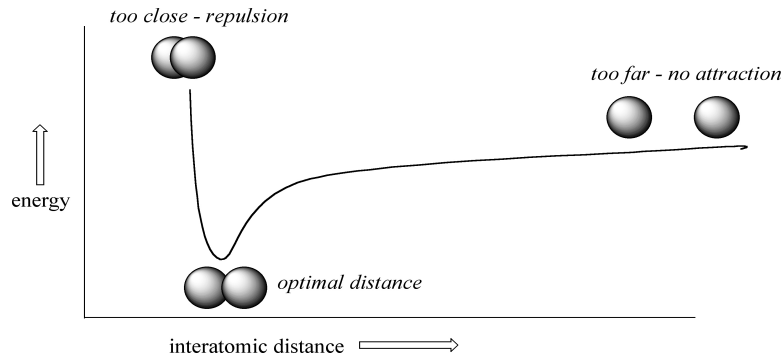


Figura 2: Buca di potenziale creata dalla forza intermolecolare. Il sistema tende ad andare verso il minimo della buca.

In natura esistono altri stati della materia. Il 99% della materia nell'Universo si trova nello stato di plasma, cioè di un gas ionizzato dove gli atomi si sono separati in ioni positivi ed elettroni negativi.

Un altro esempio di un nuovo tipo di aggregazione, o fase, della materia è esistito nel primo microsecondo dopo il Big Bang e viene oggi ricreato solo negli scontri tra atomi agli acceleratori come LHC. Si tratta del plasma di quark e gluoni (QGP).

I quark sono le particelle che compongono i nucleoni, protoni e neutroni, e sono tenuti insieme dalla forza *forte* mediante lo scambio di *gluoni*. I quark hanno tre tipi di carica forte (detta *colore*) così come in natura esistono due tipi di carica elettrica, positiva e negativa. Mettendo insieme le tre cariche forti si ottiene un sistema globalmente neutro analogamente a quanto succede mettendo insieme una carica positiva e una negativa. Protoni e neutroni sono infatti costituiti da tre quark di carica forte diversa, quindi globalmente neutri. Se proviamo a separare i quark all'interno di un protone questi risentono di una forza attrattiva e tendono a tornare insieme. Al contrario del legame idrogeno dell'acqua, più aumentiamo la distanza maggiore sarà la forza di richiamo tra i quark (Figura 3). Questo almeno finché i gluoni che tengono insieme i quark si "spezzano" producendo coppie di quark e anti-quark.

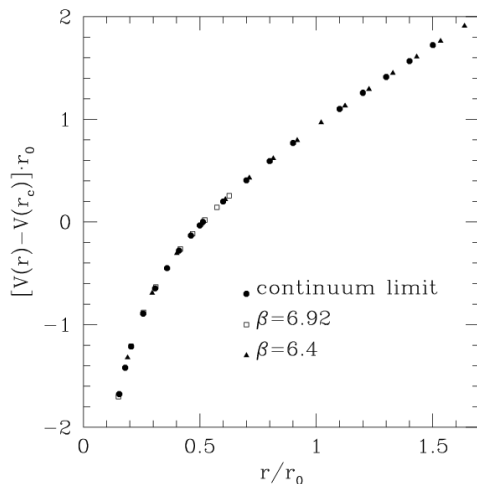


Figura 3: Buca di potenziale dovuta all'interazione forte. La forza di richiamo aumenta sempre al crescere della distanza.

All'estremo opposto, più i quark si avvicinano tra loro, minore diventa la forza che esercitano l'un l'altro. Infatti la carica forte (α_s) non è costante ma varia al variare dell'energia (μ) dei gluoni scambiati tra i quark. Ad alte energie (figura 4) la carica forte diventa sempre più piccola. A piccole distanze, i quark si possono scambiare solo gluoni di lunghezza d'onda λ più corta della loro distanza e quindi di alta energia ($\mu \sim 1/\lambda$).

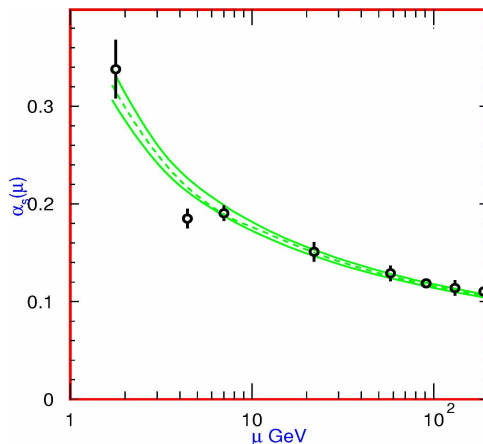


Figura 4: La carica forte (α_s) decresce all'aumentare dell'energia (μ) del gluone scambiato tra i quark.

Ne segue allora una minore intensità dell'interazione. Tale proprietà delle interazioni forti è chiamata "libertà asintotica". Si tratta di una differenza notevole rispetto all'interazione intermolecolare che invece tende a diventare repulsiva a piccole distanze.

Consideriamo ora un gas di nucleoni (Figura 5), ognuno composto da tre quark legati. Immaginiamo di poter comprimere questo gas fino a far avvicinare tra loro i nucleoni. In un primo momento otterremo una stato di materia simile al nucleo di una atomo o ad una stella di neutroni.

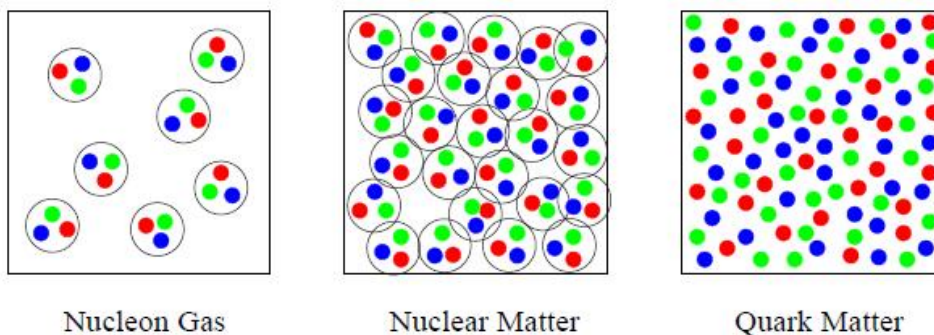


Figura 5: Raffigurazione di tre diversi tipi di aggregazione della materia.

Continuando la compressione i nucleoni cominciano a fondersi permettendo ai quark e ai gluoni di saltare liberamente da un nucleone all'altro. Ha inizio una transizione verso un nuovo tipo di aggregazione della materia: una transizione di fase verso il QGP. La transizione finisce quando tutti i nuclei si sono fusi. Ora i quark sono così vicini che le interazioni tra loro sono debolissime e si comportano quasi come particelle libere.

Collisioni di ioni pesanti a LHC

Una delle domande cui vogliono rispondere i fisici riguarda il comportamento della materia ad alta densità ($\sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$) e temperatura ($\sim 10^{12} \text{ K}$). Normalmente la materia nucleare ha una densità di energia pari a $0.15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$. Ad esempio, un protone ha massa pari ad $\sim 1 \text{ GeV}$ ed un raggio di $\sim 1 \text{ fm}$ (1 fm, o femtometro cioè 10^{-15} m) corrispondenti ad una densità di energia di circa $0.3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$.

Tali condizioni di densità e temperatura si potevano trovare nel nostro Universo nel primo microsecondo dopo il Big Bang, o forse, al centro delle stelle di neutroni.

Per ricreare un tale stato in laboratorio in una regione abbastanza estesa da permetterne lo studio, i fisici fanno collidere tra loro ioni di piombo ad alta energia. Nella figura in alto sono mostrati due momenti della collisione: sulla sinistra si vedono i due nuclei di piombo un attimo prima dello scontro, schiacciati nella direzione del moto dalla contrazione relativistica; sulla destra appena dopo l'urto. Parte dei nucleoni non prendono parte all'urto (gli spettatori) e continuano il loro cammino indisturbati. I nucleoni partecipanti, al contrario, formano un sistema caldo e denso che poi si espande e raffredda come nell'Universo primordiale. Durante la sua evoluzione il sistema attraversa diverse densità e temperature ed eventualmente ha delle transizioni di fase. A LHC si raggiunge una densità di circa $15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$, più di dieci volte la densità all'interno di un protone.

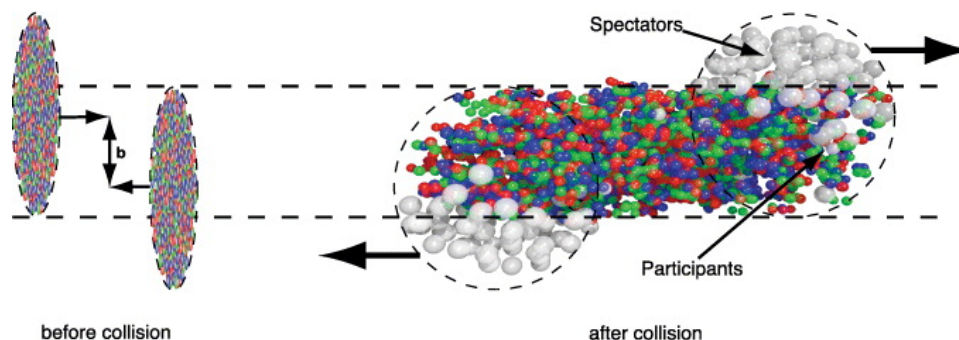


Figura 6: Collisione tra ioni pesanti, prima e dopo l'urto.

Durante l'espansione, in un tempo pari a circa $1 \text{ fm}/c$ (c è la velocità della luce pari a 300 mila chilometri al secondo), quark e gluoni fanno in tempo ad interagire e a scambiarsi energia, in modo da rendere la temperatura nel mezzo omogenea. Raggiunto l'equilibrio termico si ha la fase del QGP.

Con l'espansione il sistema si raffredda, quark e gluoni si legano in stati di carica forte (colore)

nulla, cioè particelle, dette adroni, come protoni, neutroni e mesoni π e K. Questo processo, detto *adronizzazione*, avviene ad un tempo pari a circa 10 fm/c dopo la collisione. Il gas di adroni così formato continua ad espandersi. Le particelle interagiscono tra loro per ulteriori 10 fm/c, finché la densità non è così bassa da rendere gli urti improbabili. A 20 fm/c dalla collisione iniziale le particelle non interagiscono più e si ha il cosiddetto *freeze-out*. Queste viaggiano quindi indisturbate finché non raggiungono il rivelatore di particelle che ne misura la posizione di passaggio e la velocità. L'insieme di queste misure costituisce una immagine dell'ultimo attimo di esistenza dello stato di materia caldo e denso che si era formato nell'urto tra ioni. Dal numero e dal tipo di particelle osservato, dalla loro energia e direzione, si ottengono svariate informazioni utili per capire come si è comportata la materia in quel breve attimo in cui si è formato il QGP.

I Risultati di ATLAS

Uno degli effetti più evidenti della formazione del QGP nelle collisioni tra ioni pesanti è il cosiddetto *jet-quenching*. Un jet è un fascio collimato di adroni (particelle formate da quark). Quando un partone (quark o gluone) si allontana dal punto in cui ha subito un urto, risente della forza di richiamo dovuta alla sua carica forte (colore). Per poter sfuggire, il partone deve poter "spezzare" i gluoni che lo tengono legato. Questo processo di frammentazione porta alla formazione di diverse particelle adroniche che si allontanano lungo la direzione del partone formando appunto un jet. Se però, lungo il suo cammino, il partone attraversa materia densa come il QGP, esso perde energia negli urti con il mezzo attraversato e il processo di frammentazione subisce uno spegnimento (quenching).

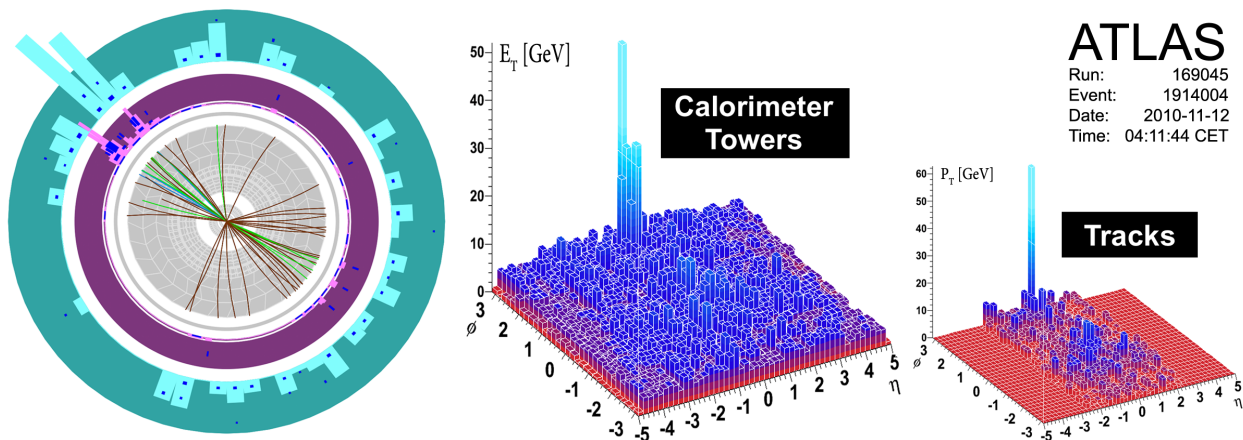


Figura 7: Evento di jet singolo osservato da ATLAS.

Così, mentre in un normale urto tra protoni si formano tipicamente due jet di adroni con energia simile e direzione opposta, in un urto tra ioni di piombo uno o entrambi i jet

potrebbero essere "spenti" dal QGP. Nel caso ci sia lo spegnimento di un solo jet, si osserva un evento *asimmetrico* come quello riportato in Figura 7 osservato da ATLAS: un jet energetico e ben collimato da una parte e una miriade di particelle di bassa energia e non collimate dalla parte opposta, residuo della mancata formazione del secondo jet ([Phys. Rev. Lett. 105 2010](#)).

Un altro effetto importante è legato all'alta temperatura del QGP. Questo può essere così caldo da "sciogliere" particelle composte da un quark e un anti-quark legati insieme. Quark e anti-quark legati insieme formano particelle dette *mesoni*. Per alcuni mesoni questo legame è più forte mentre in altri è più debole. Se la temperatura è abbastanza alta i legami più deboli si rompono, o non si formano affatto, provocando la scomparsa di alcuni particolari mesoni, in particolare quelli formati da charm e anti-charm, come la J/Psi.

ATLAS ha effettivamente misurato una diminuzione della probabilità con cui mesoni charm e anti-charm sono prodotti negli urti tra ioni piombo. Per fare ciò, si sono confrontati urti tra ioni che si prendono di "striscio" (detti periferici) con urti in cui gli ioni si prendono in pieno (detti centrali). Più gli urti sono centrali, maggiore è la zona di sovrapposizione e più grande è la regione dove si forma il QGP. Per urti periferici non ci aspettiamo grossi effetti di soppressione mentre nel caso di urti centrali si. Questo è quello che osserva ATLAS, come riportato nella Figura 8, dove la frequenza con cui si formano particelle J/Psi, normalizzata al numero di urti tra nucleoni, è mostrata in funzione della centralità dell'urto. Al valore 100 corrisponde la massima centralità. La frequenza di produzione è posta uguale a 1 per valori più periferici. Si vede chiaramente che all'aumentare della centralità dell'urto la probabilità di produrre j/psi è fortemente soppressa ([Phys. Lett. B697 2011](#)).

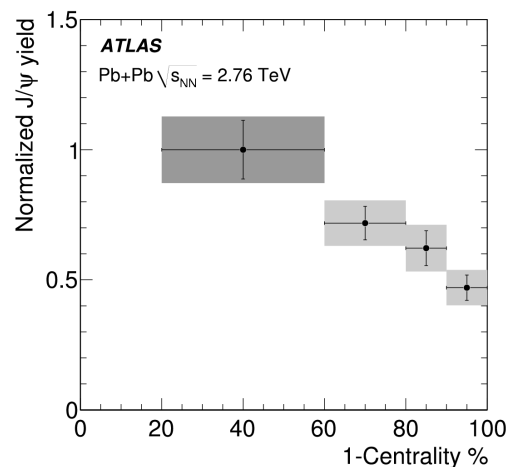


Figura 8: Frequenza di produzione di particelle J/Psi al variare della centralità dell'urto. La frequenza è normalizzata ad 1 per urti periferici. Nell'articolo da cui è presa la figura la "Centrality" è uguale a 1 per urti periferici e 0 per urti centrali, il contrario quindi di come è usato il termine "centralità" in questo testo.

Al contrario, la produzione di particelle che non hanno interazioni forti e per cui il plasma è trasparente, come fotoni o mediatori della forza debole W e Z, non deve subire variazioni. Anche questo aspetto è stato verificato dalle misure di ATLAS.

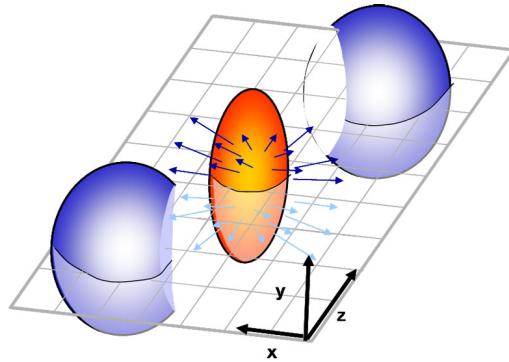


Figura 9: Regione a forma di mandorla dove si forma il QGP.

Nell'introduzione abbiamo detto che ad alte densità e temperature l'interazione forte diventa molto debole fino a portare al deconfinamento di quark e gluoni in un unico gas di particelle poco interagenti. Questa visione però va parzialmente rivista a causa di un fenomeno osservato che va sotto il nome di "flusso ellittico" (o trasverso) ed è legato alla presenza di moti collettivi tra le particelle del QGP, quindi alla presenza di interazioni non nulle.

Quando due ioni si urtano la regione dove si forma il QGP ha una forma a mandorla (si veda figura a lato). Se le particelle del QGP non interagissero, esse si allontanerebbero dal punto di collisione senza disturbarsi, portando ad una distribuzione isotropa, cioè uguale in tutte le direzioni. Al contrario, se le particelle interagiscono tra loro, urtandosi, si genera una pressione che le spinge verso l'esterno della regione di QGP. In particolare, le particelle tendono ad uscire ortogonalmente alla superficie che contiene il QGP. Se questa superficie è sferica, la distribuzione di particelle osservata è ancora isotropa. Ma se la superficie è a forma di mandorla, escono più particelle dal lato lungo che da quello corto, producendo una distribuzione anisotropa, con le particelle dirette prevalentemente lungo il piano della collisione (x-z nella Figura 9).

Nella Figura 10 ([Phys. Lett. B707 2012](#)) è riportata la distribuzione del numero di particelle osservate al variare dell'angolo sul piano trasverso (x-y) tra la particella ed il piano della collisione (x-z), per urti centrali e urti periferici. Per urti centrali, la regione di QGP è quasi sferica e l'anisotropia osservata è piccola. Per urti sempre meno centrali, si vede una ondulazione nel numero di particelle osservate in funzione dell'angolo col piano di collisione, fino ad una variazione massima per urti semi-centrali (indicati con 40-50% di centralità in figura). Infine, per urti molto periferici non si ha più formazione di QGP e l'anisotropia è piccola.

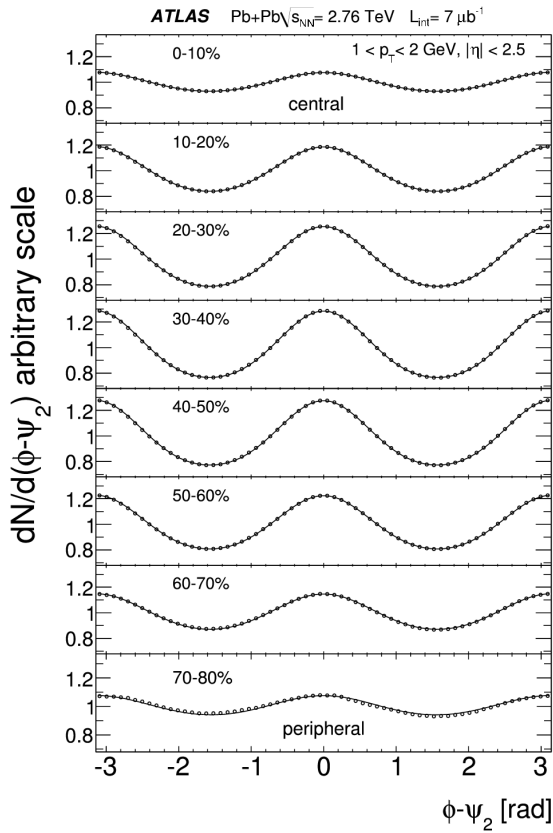


Figura 10: Distribuzione del numero di particelle osservate al variare dell'angolo nel piano trasverso (x - y) tra la particella e il piano della collisione (x - z), per diversi valori della centralità.

La presenza di un'anisotropia come anticipato è dovuta ad un effetto di pressione nel QGP. Per questo motivo il QGP viene descritto come un liquido, combinando insieme le leggi dell'idrodinamica e delle interazioni tra nucleoni. Questo approccio sta producendo nuove previsioni quantitative che vengono confrontate con i dati sperimentali raccolti a LHC, permettendo una conoscenza molto profonda di questo nuovo stato di aggregazione della materia che dominava l'Universo nel suo primo microsecondo di vita.