

**Q**uark **M**atter

# LA FISICA DEI QUARK THE PHYSICS OF QUARK



di **Tiziano Virgili**  
Dipartimento di Fisica e INFN  
Università di Salerno

*Tiziano Virgili è un fisico, ricercatore presso l'Università di Salerno e associato all'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). Nato a Roma nel 1964, ha conseguito il diploma di Laurea e di Dottorato presso l'Università di Roma «La Sapienza». Dal 2001 lavora stabilmente presso l'Università di Salerno.*

*Fin dal 1988 si occupa della fisica degli «ioni pesanti», alla quale ha contribuito partecipando a numerosi esperimenti. È membro attivo della collaborazione internazionale ALICE dal 1994. Attualmente sta preparando un testo di introduzione alla fisica delle interazioni forti, che può essere anche utilizzato come introduzione alla fisica esplorata dall'esperimento ALICE.*

*L'autore desidera ringraziare (in ordine casuale) Panagiotis Charitos, Julie Hadre, Despina Hatzifotiadou, Mario Di Vita, Pasquale Di Nezza, Salvatore De Pasquale, Francesca Cuicchio e Bernardo Amoruso per il loro prezioso aiuto e supporto.*

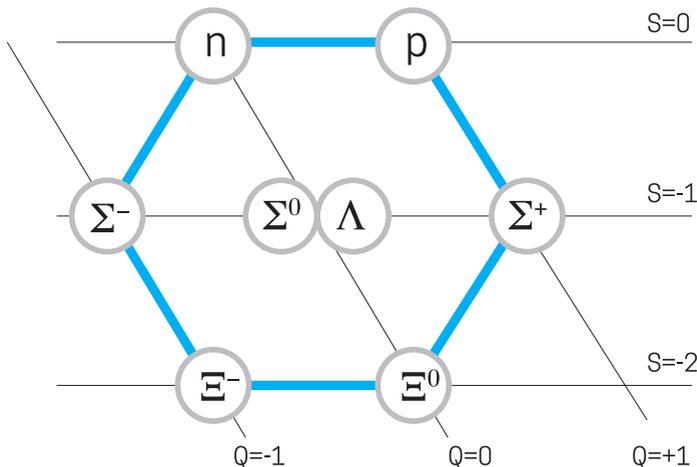


# INTRODUZIONE

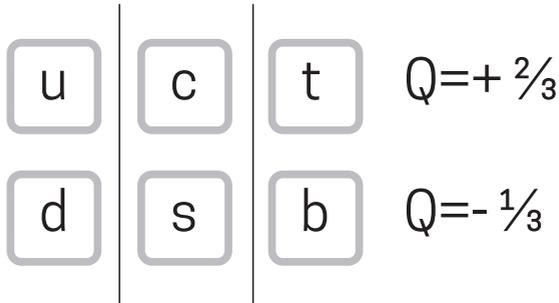
**Di cosa è fatta la materia?** Gli elementi chimici con i quali si costruiscono tutte le possibili forme di materia sono costituiti da atomi, che a loro volta sono costituiti da elettroni, neutroni e protoni. La gran parte della massa degli atomi (circa il 99,98%) è concentrata nel nucleo, composto da neutroni e protoni. Gli elettroni sono particelle «elementari», vale a dire che ad oggi non è stato possibile rivelare una loro qualsiasi struttura interna. D'altra parte ci sono evidenze sperimentali e argomenti teorici che mostrano come protoni e neutroni siano in realtà particelle composte, formate da «Quark». Secondo le nostre attuali conoscenze, le particelle fondamentali che costituiscono l'intero Universo sono rappresentate da elettroni (più particelle simili, tutte note come «leptoni») e quark. Nel seguito verranno descritte la principali proprietà dei quark e delle loro interazioni. ■

## GRUPPI DI PARTICELLE

La scoperta di un'enorme varietà di particelle ha condotto i fisici a pensare che dovessero esistere particelle ancora più fondamentali, mattoni con i quali costruire la complessità osservata. Il punto principale è stato l'osservazione che tutte le particelle note potessero essere disposte secondo particolari configurazioni, note come ottetti e decupletti - un esempio è illustrato in figura - :



Questa caratteristica può essere spiegata facilmente con l'ipotesi che i Barioni (particelle come protoni e neutroni) siano costituiti da tre quark: "up", "down" e "strange". Per costruire tutte le particelle osservate sono necessarie tre coppie di quark, come mostrato nella figura seguente. I quark nella fila superiore e inferiore hanno carica elettrica rispettivamente pari a  $+ 2/3$  e  $- 1/3$  (dove l'unità corrisponde alla carica elettrica del protone).



Il primo doppietto è composto dai quark "up" e "down" («su» e «giù»). Sono i più leggeri tra i quark, con una massa pari a pochi  $MeV/c^2$  (\*). Un protone è costituito da due quark up e un quark down mentre un neutrone è costituito da un quark up e due quark down. Variando le combinazioni è possibile ottenere un gran numero di nuove particelle, tuttavia queste non sono stabili. I quark pesanti infatti tendono a decadere nei quark più leggeri (cioè si «trasformano» in un altro quark), per cui tutte queste nuove particelle decadono in un tempo molto breve. Protoni e neutroni (\*\*\*) sono i soli barioni stabili.

Gli altri doppietti includono i seguenti «sapori» di quark: charm (incanto) – strange (strano); top (superiore) – bottom (inferiore).

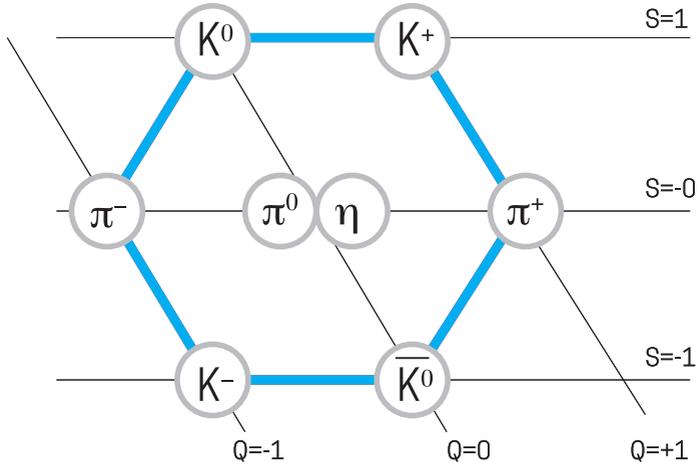
Ogni nuovo «sapore» produce un'intera famiglia di nuove particelle; per esempio il barione «Lambda» è composto dai tre quark 'up', 'down' e 'strange' (per cui la carica elettrica totale è zero). Le cosiddette particelle «strane» sono almeno in parte composte da quark «strani», e così via per gli altri sapori.

Oltre ai quark esistono tre doppietti di «antiquark», con i quali si costruiscono le «antiparticelle». Per esempio, un antiprotone è costituito da due antiquark 'up' e un antiquark 'down'. Si noti che per gli antiquark le cariche elettriche sono invertite: un



antiquark up ha  $q = -2/3$  e un antiquark down ha  $q = +1/3$ , per cui la carica totale dell'antiprotone è  $-1$ .

Un diverso tipo di particelle che possono essere formate con i quark sono i 'Mesoni' (con una massa intermedia tra i 'Barioni' pesanti e i 'Leptoni' leggeri). Essi sono composti da un quark e un antiquark. Per esempio, un pione positivo ( $\pi^+$ ) è composto di un quark up e un antiquark down. L'ottetto formato con i quark piú leggeri (up, down e strange) è illustrato nella seguente figura:



(\*) Un MeV (Mega elettron-Volt) corrisponde all'energia di  $1.6 \times 10^{-13}$  Joule o a una massa di  $1.8 \times 10^{-27}$  g.

(\*\*) Questo è vero solo per neutroni presenti nel nucleo. Un neutrone libero decade con una vita media di circa 10 min. ■

## EVIDENZA SPERIMENTALE

L'idea dei quark ha origine dalle simmetrie, degli ottetti e decupletti menzionati prima, tuttavia l'attuale modello contiene molto altro. E' stato infatti osservato sperimentalmente che particelle come il protone e il neutrone possiedono una struttura interna, ossia sono costituite da particelle piú 'piccole', originariamente chiamate «partoni». ■

## PARTICELLE ELEMENTARI

I fisici descrivono tutte le proprietà delle particelle note in quello che è noto come "Modello Standard", dove le particelle elementari sono divise in due gruppi: quark e leptoni. Quest'ultimo gruppo consiste di tre doppietti, proprio come i tre doppietti dei quark. Il primo doppietto corrisponde alla coppia elettrone - neutrino (o 'neutrino elettronico'), il secondo e terzo corrispondono a particelle più pesanti: il muone ( $\mu$ ), il tauone ( $\tau$ ), e i loro rispettivi neutrini. Tutte queste particelle hanno una corrispondente antiparticella, con la stessa massa della particella, ma con alcune proprietà (numeri quantici) come la carica elettrica invertite. Per esempio, un antielettrone (o positrone) ha carica positiva; un antineutrino non ha carica elettrica (come il neutrino) ma 'numero leptonico' negativo. Questa è una quantità che si conserva in tutte le interazioni. In altre parole il numero leptonico di un sistema chiuso rimane costante. La quantità corrispondente per i barioni è noto come 'numero barionico': vale  $1/3$  per i quark e  $-1/3$  per gli antiquark, in modo che il numero barionico  $B$  di un protone sia  $B=1$ , e  $-1$  per un antiprotone.

Tra i numeri quantici associati alle particelle elementari un ruolo speciale è rappresentato dallo "spin". Come indicato dal nome ('rotazione', in inglese), questo numero descrive le proprietà di rotazione delle particelle. Esse possono essere divise in due grandi gruppi: particelle con spin intero ( $0, 1, 2, \dots$ ) e particelle con spin semintero ( $1/2, 3/2, \dots$ ). Le prime sono dette «bosoni», le seconde «fermioni» dai nomi di Bose e Fermi. E' un fatto che tutte le particelle (e antiparticelle) elementari abbiano  $\text{spin}=1/2$ . Queste particelle possono combinarsi per formare particelle con spin intero (per esempio una coppia di quark up - anti-down produce un pione positivo ( $\pi^+$ ) che ha spin zero.

Esistono poi particelle 'speciali' chiamate bosoni di gauge con spin intero; esse sono i mediatori delle interazioni tra le particelle. Per esempio l'interazione elettromagnetica può essere descritta come lo scambio di uno o più fotoni da parte di particelle cariche. La tabella seguente riassume i componenti elementari presenti nel Modello Standard. ■



Quarks	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	$\gamma$ photon	Gauge Bosons
Leptons	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ taun	Z Z boson	
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ taun neutrino	W W boson	

## INTERAZIONI FORTI E DEBOLI

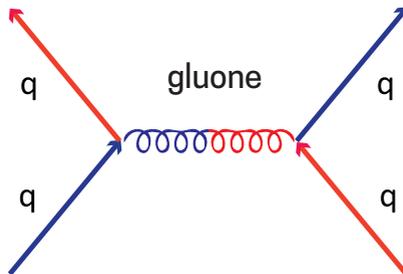
Come interagiscono i quark tra di loro? Oltre all'interazione elettromagnetica, dovuta alla carica elettrica e a quella gravitazionale, dovuta alla massa, esistono altre due importanti forze: la 'debole' e la 'forte'. Come suggerito dal nome, l'intensità della prima è molto piccola rispetto alla seconda. Infatti il solo effetto dell'interazione debole è quello di trasformare un quark di un tipo (sapore) in un altro. Questo processo è proibito dalle interazioni forti, per cui il sapore è conservato da questa interazione. Ad esempio un quark strano non può trasformarsi (decadere) in un altro tipo di quark per interazione forte, perché questo violerebbe il principio di 'conservazione della stranezza'. D'altra parte questo decadimento è permesso dalle interazioni deboli, per cui un quark "s" può trasformarsi in un quark "u" or "d". In questo processo sono coinvolti anche i leptoni. La diversa intensità della forza si riflette anche nel 'tempo di interazione' che è completamente diverso nei due casi: un decadimento debole è circa  $10^{12}$  volte più lungo che uno forte. Il legame tra quark è completamente dovuto all'interazione forte: la forza è così intensa che non





speciali particelle note come ‘gluoni’ (da ‘glue’, colla in inglese), e questo è il meccanismo alla base delle interazioni forti.

I colori vennero originariamente introdotti per spiegare alcuni fatti che apparentemente violavano alcune leggi fisiche fondamentali (principio di Pauli). In seguito misure sperimentali confermarono che i quark possiedono questi ulteriori gradi di libertà, corrispondenti appunto ai tre colori. Nel caso dell’interazione elettromagnetica esiste un unico tipo di carica, che può assumere due valori di base (“+” o “-”). A livello microscopico le cariche interagiscono scambiandosi un ‘mediatore’, noto come ‘fotone’. Un fotone non ha carica elettrica, ed è privo di massa. A livello macroscopico un numero enorme di fotoni produce le onde elettromagnetiche, ossia la luce, le microonde, i raggi X,... Nelle interazioni forti esistono più ‘cariche’ simbolicamente identificate con i tre colori (e anti-colori), e i mediatori sono detti gluoni. Il seguente schema illustra un esempio di scambio rosso / blu tra quark.

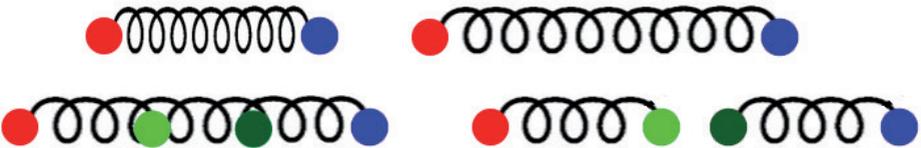


Un meccanismo simile vale anche per l’interazione tipo quark / anti-quark. I gluoni possono anche interagire tra di loro (essendo essi stessi dotati di carica di colore) e per questo motivo le interazioni forti risultano molto più complesse di quelle elettromagnetiche. ■

## CONFINAMENTO

Perché i quark sono confinati negli adroni? La teoria del ‘colore’, o Cromo-Dinamica Quantistica (QCD) fornisce un modo per descrivere questo confinamento, ed è per questo che è attualmente la teoria più accreditata.

L'effetto di base viene dai gluoni: la loro presenza modifica l'interazione per cui la forza cresce sempre di più all'aumentare della distanza tra quark proprio come la forza tra due palline collegate da una molla. Al crescere della distanza la forza aumenta sempre di più, e per poter separare le due palline occorrerebbe un'energia così grande per cui verrebbe generata una nuova coppia quark - antiquark, e alla fine dunque si formerebbero due nuove combinazioni come illustrato nella figura sottostante. E' interessante notare che il confinamento può anche essere connesso alla 'simmetria di colore'. Difatti tutti i barioni e i mesoni sono di colore neutro: la somma rosso + verde + blu produce un oggetto senza colore (barione), come pure la somma rosso - anti-rosso, o verde - anti-verde etc. che appare in un mesone. Queste sono le sole combinazioni permesse per avere oggetti di colore neutro. Se un singolo quark potesse essere isolato si avrebbe una violazione della simmetria, e si osserverebbe un oggetto 'colorato'. ■



## DECONFINAMENTO

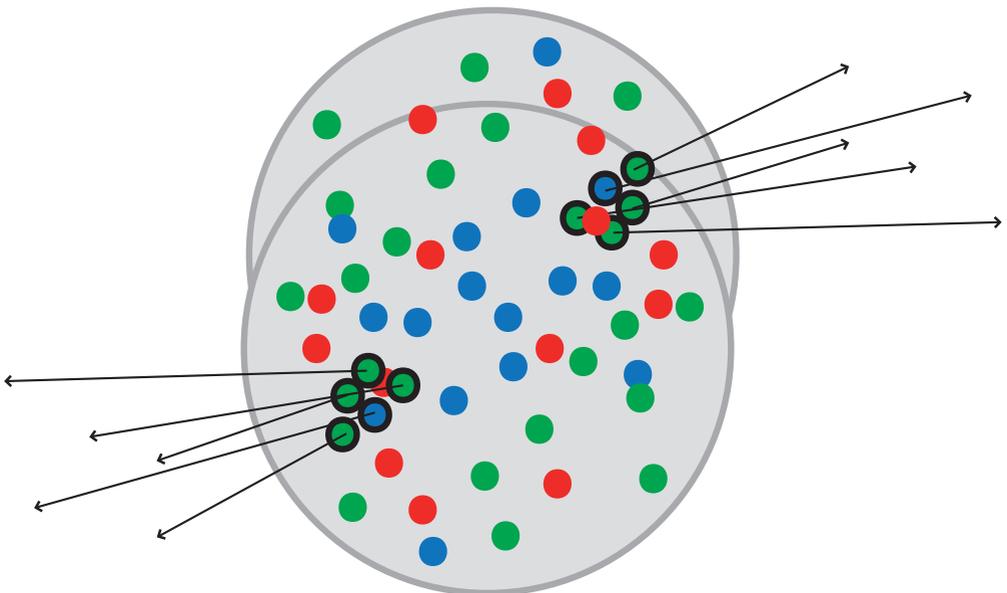
Dalla precedente discussione sembrerebbe dunque impossibile osservare quark liberi, esiste però una possibilità permessa dalla QCD. Come abbiamo visto, la forza tra quark aumenta con la distanza e diminuisce quando essi si avvicinano. In linea di principio quindi se si avvicinano i quark sufficientemente, l'interazione diviene sempre più debole, fino a che i quark diventano 'liberi'. Questa condizione corrisponde ad una vera e propria transizione di fase (come la transizione acqua - ghiaccio); questo stato della materia è detto 'Quark-Gluon-Plasma' (QGP). Secondo il modello questo accade quando la densità o la temperatura del sistema superano una fissata soglia: barioni e mesoni allora si 'sciolgono' in questa sorta di 'zuppa primordiale' di quark e gluoni. Questa era appunto la condizione dell'Universo appena

dopo il Big Bang; il QGP è stato il primo stato nel quale si è dunque presentata la materia. Con il passare del tempo il sistema evolve e come ogni gas tende ad espandersi e di conseguenza a raffreddarsi.

Quando la temperatura scende al di sotto del valore critico si produce una transizione di fase inversa ossia i quark iniziano a formare stati legati creando barioni e mesoni. Nell'Universo primordiale questa transizione avvenne appena  $10^{-6}$  secondi dopo il Big Bang. ■

## IL QUARK - GLUON PLASMA

Come discusso nel capitolo precedente, il Quark-Gluon Plasma si forma quando la densità o la temperatura del sistema superano un valore critico. In questo caso i quark non sono più legati insieme e possono muoversi liberamente interagendo con un gran numero di quark e gluoni mentre si muovono nel plasma. In questo processo essi perdono parte della loro energia iniziale producendo nuove particelle. In qualche caso particelle particolarmente energetiche possono 'sfuggire' alla regione del plasma producendo un getto ("jet") di nuove particelle, come illustrato nella figura seguente:



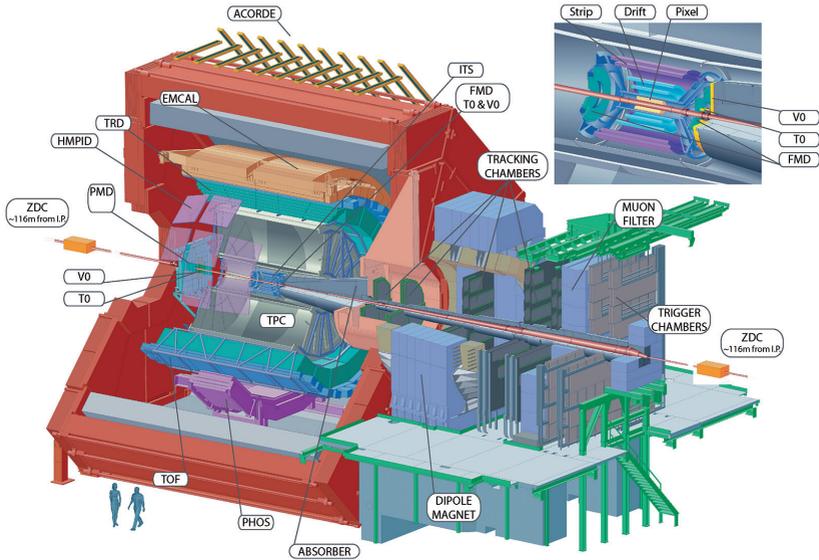
La maggior parte dei quark tuttavia rimane nella regione di plasma, mostrando un comportamento collettivo come le particelle in un fluido. Dopo la compressione iniziale dunque il QGP si espande come un “flusso” (flow) di materia, e la sua temperatura diminuisce. Quando la temperatura arriva al valore critico si ha una transizione di fase inversa, e il plasma ritorna nello stato adronico. Tutti i quark e i gluoni prodotti nel plasma vanno a produrre le particelle ‘finali’, ossia le particelle (leptoni, mesoni e barioni) che osserviamo con i nostri rivelatori. ■

## L'ESPERIMENTO ALICE

Per riprodurre in laboratorio questo nuovo stato della materia i quark devono essere compressi quanto più possibile. Ciò può essere realizzato mediante collisioni di altissima energia tra due nuclei pesanti, come ad esempio oro o piombo. Ad LHC (Large Hadron Collider), il più grande acceleratore del mondo situato al CERN (vicino Ginevra) i nuclei sono accelerati ad un'energia di circa 3 TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ) per ciascun «nucleone» (sono detti nucleoni i costituenti del nucleo, ossia i protoni e i neutroni), corrispondente a un'energia totale di circa 2000 TeV. A queste fantastiche energie anche i nucleoni vengono ‘frantumati’ e i quark interni vengono a trovarsi nella condizione di produzione di QGP, come già illustrato. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) è un esperimento dedicato appunto allo studio di queste collisioni e della fisica corrispondente.

Il rivelatore ALICE è mostrato in tutte le sue componenti nella figura seguente, dove ogni elemento ha un ruolo specifico nella misura delle particelle prodotte nelle collisioni. L'asse orizzontale del rivelatore coincide con la ‘beam line’, ossia la linea del fascio dove le particelle girano nell'acceleratore in opposte direzioni. L'interazione avviene al centro del rivelatore, in modo che pressoché tutte le particelle prodotte possano essere rivelate dall'apparato sperimentale di ALICE. In caso di interazioni nucleo-nucleo non tutti i nucleoni (protoni e neutroni) partecipano all'interazione: una frazione di essi prosegue lungo la direzione del fascio. Questa frazione dipende dal parametro d'impatto, vale a dire dalla minima distanza dei centri dei nuclei.

Una descrizione accurata dell'esperimento può essere trovata all'indirizzo:  
<http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>



## Generalità

Prima di tutto è necessario conoscere le 'condizioni iniziali', ossia quanto è stata intensa la collisione: questo viene fatto misurando i nucleoni che non hanno interagito mediante un rivelatore speciale (ZDC) posto a 116 metri di distanza e misurando con altri rivelatori (FMD, V0 e TO) il numero di particelle prodotte nella collisione e la loro distribuzione spaziale. Il rivelatore TO misura con grande precisione anche l'istante della collisione.

## Ricostruzione delle particelle

Una serie di rivelatori cilindrici (dall'interno verso l'esterno: ITS, TPC, TOF, TRD) misura il massimo numero possibile di punti del passaggio di ogni particella carica, in modo che la loro traiettoria sia ricostruibile. I rivelatori sono immersi

in un campo magnetico (prodotto dall'enorme magnete rosso) che curva le traiettorie della particelle: dalla misura della curvatura è possibile determinare il loro impulso (il prodotto massa  $\times$  velocità). Particelle generate dal decadimento di altre particelle possono essere identificate osservando che esse non nascono dal punto di interazione originale (il 'vertice principale' dell'evento), ma da un punto spazialmente separato, la cui distanza dipende dal tempo di vita della particella che è decaduta.

## Identificazione della particelle

ALICE vuole anche determinare l'identità di ogni particella, ossia se si tratti di un elettrone, un protone e così via. In aggiunta ai precedenti rivelatori, se ne utilizzano altri più specializzati: il TOF misura con una precisione inferiore al decimo di miliardesimo di secondo il tempo che ogni particella impiega a viaggiare dal vertice principale al punto dove esso si trova, in modo da determinarne la velocità; l'HMPID misura le configurazioni di luce generate da particelle velocissime e il TRD misura la radiazione che si produce quando particelle veloci attraversano diversi materiali, permettendo così l'identificazione degli elettroni. I muoni sono misurati sfruttando la proprietà di penetrare la materia più facilmente delle altre particelle: un grosso assorbitore ferma tutte le altre particelle e i muoni vengono così misurati da un particolare gruppo di rivelatori: lo spettrometro per muoni.

## Catturando i fotoni

I fotoni (particelle di luce), come la luce emessa da un oggetto caldo, ci danno informazioni sulla temperatura del sistema. Per misurarli sono necessari appositi rivelatori: i cristalli del PHOS, densi come il piombo e trasparenti come il vetro li misurano con fantastica precisione in una regione limitata, mentre il PMD e in particolare l'EMCal misurano fotoni in un'ampia area. L'EMCal (calorimetro elettromagnetico) misura anche gruppi di particelle ("jets") che mantengono memoria della prime fasi dell'interazione.



## ALCUNI RISULTATI

L'esperimento ALICE ci mostra un chiaro quadro del QGP e delle sue proprietà.

### Molteplicità

La molteplicità, ossia il numero totale di particelle prodotte nella collisione, ci dice molto circa come i quark e i gluoni dei nuclei incidenti si siano trasformati nelle particelle osservate nei rivelatori (pioni, kaoni, etc.); inoltre ci dà indicazioni sulla densità di energia e la temperatura raggiunta nell'interazione. Il numero delle particelle è correlato alla distanza dei centri dei nuclei collidenti (parametro d'impatto). La molteplicità delle particelle cariche (rapportata al numero di nucleoni) misurata da ALICE per le collisioni più centrali mostra che il sistema creato ad LHC ha una temperatura molto maggiore di quella necessaria per creare lo stato di Quark-Gluon-Plasma.

### Un liquido perfetto a LHC

Una quantità interessante usata per studiare il **Quark Gluon Plasma** è il 'flow' (flusso): esso fornisce informazioni dirette sulle proprietà della materia creata in collisioni di nuclei pesanti. La sua entità dipende dalla viscosità della materia. Un fluido "perfetto" è caratterizzato da una viscosità prossima allo zero, mentre un fluido denso come il miele ha una viscosità molto elevata. Misure del flow hanno mostrato che la materia creata nelle collisioni di nuclei pesanti fluisce come un liquido con pochissima viscosità. In altri termini, l'universo primordiale si comportava come un liquido perfetto.

### Le dimensioni della 'palla di fuoco'

Una tecnica nota come interferometria Bose-Einstein o HBT permette di determinare le dimensioni della 'palla di fuoco' creata nelle collisioni di nuclei pesanti. Il momento della massima emissione di particelle risulta essere 10 fm/c (1 fm è la dimensione del protone, 1 fm/c è il tempo impiegato dalla luce a coprire quella distanza). La conclusione è che la 'palla di fuoco' prodotta ad LHC presenta tutte le caratteristiche del Quark Gluon Plasma.

## UNO SGUARDO ALLA TAVOLA DELLE PARTICELLE

In questa sezione sono presentate le principali proprietà di alcune particelle.

**Neutrino:** è la più leggera tra le particelle elementari. Esistono tre specie di neutrino, associate ai tre leptoni carichi. Essi interagiscono solo tramite interazione debole, per cui la probabilità di interazione è molto piccola.

**Fotone:** è il mediatore della forza elettromagnetica. Non ha carica né massa. L'antifotone coincide col fotone (ossia non ha una antiparticella).

**Elettrone:** è la più leggera particella carica.

**Muone:** come l'elettrone, è un leptone. Costituisce la maggiore componente dei raggi cosmici al livello del mare.

**Pione:** è la più comune delle particelle prodotte in interazioni forti. Esistono tre tipi di pioni, con carica positiva, negativa e nulla. Il pione neutro ha una vita media molto breve (circa  $10^{-16}$ s) rispetto al  $\pi^+$  e al  $\pi^-$  (circa  $10^{-8}$ s). Questo è dovuto al fatto che il decadimento è dovuto all'interazione elettromagnetica, che è molto più forte rispetto a quella debole responsabile del decadimento dei pioni carichi.

**Protone:** è il più leggero tra i barioni (particelle composte da tre quark). È uno dei blocchi che formano la materia ordinaria, con neutroni ed elettroni.

**Neutrone:** è il barione più leggero dopo il protone. Non ha carica elettrica.

**Kaone:** è un mesone (come il pione), con un numero quantico speciale noto come "stranezza". Esistono quattro tipi di Kaoni: due sono carichi ( $K^+$ ,  $K^-$ ) e due neutri ( $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ).

**Lambda:** è un barione (come il protone e il neutrone) con stranezza (come i kaoni). È il più leggero degli "iperoni", che includono anche  $\Sigma$ ,  $\Xi$  e  $\Omega$ .

**D:** è un mesone con numero quantico noto come 'charm'. Esistono quattro tipi di mesoni D: due sono carichi ( $D^+$ ,  $D^-$ ) e due neutri ( $D^0$ ,  $\bar{D}^0$ ).

**J/ $\Psi$ :** è una «risonanza», ossia una particella che decade per interazione forte. Per questa ragione la sua vita media è estremamente breve (circa  $10^{-23}$ s).

$\eta$  : è una risonanza che generalmente decade in fotoni o in tre pioni.





## LA FISICA DEI QUARK

*Tiziano Virgili is a physicist, researcher in the University of Salerno and associated to the INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). Born in Rome in 1964, he obtained his diploma in Physics from the University of Rome “La Sapienza” and in 1994 the title of PhD in Physics from the same University. Since 2001 he is a senior researcher at the University of Salerno.*

*He has been in the “heavy ion” field since 1988 and he is a member of the ALICE experiment since 1994. He is currently working on a textbook on strong interactions that could also be used as a good introduction to the physics covered by ALICE.*

*The author wishes to thank (in random order) Panagiotis Charitos, Julie Hadre, Despina Hatzifotiadou, Mario Di Vita, Pasquale Di Nezza, Salvatore De Pasquale, Francesca Cuicchio and Bernardo Amoruso for their valuable help and warm support.*



# INTRODUCTION

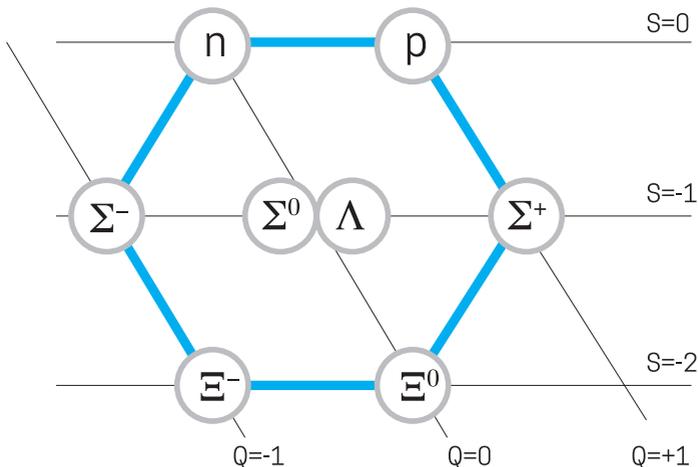
**What is matter made of?** All chemical elements from which all forms of matter are built are composed of atoms, which in turn are composed of electrons, neutrons and protons. Most of the mass of the atoms (about 99.98%) is concentrated in the nucleus, which is made of protons and neutrons.

Electrons appear to be “elementary particles”, i.e. we cannot see any further inner structure. On the other hand, there are both theoretical arguments and experimental evidence that protons and neutrons are indeed particles composed of “Quarks”. According to our present knowledge, the fundamental particles from which the universe is made are represented by electrons (plus other similar particles known as “leptons”) and quarks.

In the following we will describe the main properties of quarks and their interactions. ■

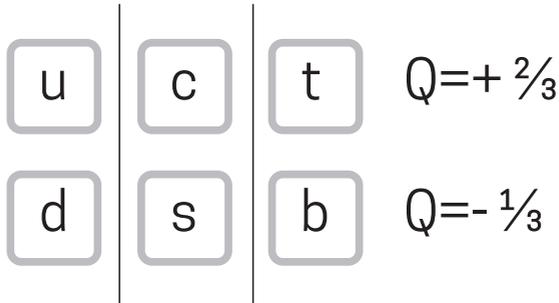
## GROUPS OF PARTICLES

The discovery of a huge variety of particles led physicists to believe that more fundamental particles should exist, from which all the observed complexity results. The main point was the fact that all the particles could be arranged according to special configuration, namely octets and decouplet (an example is presented in the following figure).





This feature can be explained in an easy way with the hypothesis that Baryons (particles like protons and neutrons) are indeed constituted by three quarks : "up", "down" and "strange". To build all the observed particles, three couples of quarks are needed, as shown in the next figure. Quarks in the upper and lower lines have electric charge  $+2/3$  and  $-1/3$  respectively (where the unit corresponds to the electric charge of the proton).



The first doublet is composed of the quarks "up" and "down". They are the most light among quarks, with an effective mass of the order of few MeV/c<sup>2(\*)</sup>. A proton is made of two up quarks and one down quark, whereas a neutron is composed of one up quark and two down quarks. By varying the combinations a lot of new particles can be produced, however they are not stable. Heavier quarks indeed decay into lighter quarks (i.e. they "transform" into another quark), so all these new particles decay in very short time. Protons and neutrons(\*\*) are the only stable baryons.

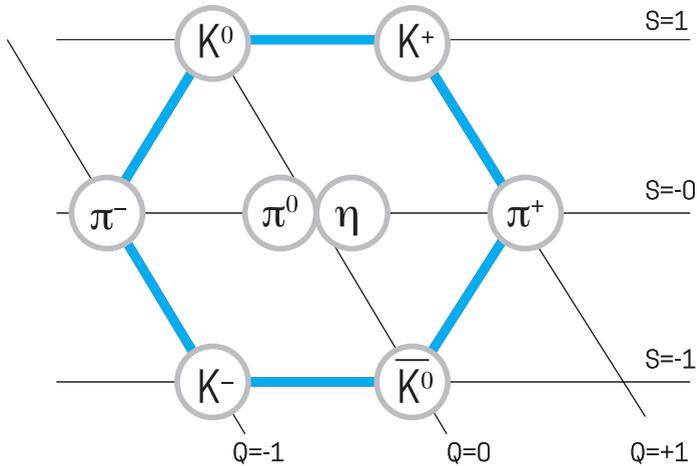
The other doublets include the following "flavors" of quarks:

charm – strange; top – bottom. Each quark "flavor" produces a full set of new particles; for instance the "Lambda" particle is composed of the quarks "up", "down" and "strange" (so the total electric charge is zero). The so called strange particles are at least partially composed of strange quarks; charmed particles are at least partially composed of charmed quarks and so on.

In addition to quarks there are also three doublets of "antiquarks", from which antiparticles are made. For instance, an antiproton is made of two "up" antiquark and one "down" antiquark. Note that for antiquarks the electric charges are inverted: antiquark up has  $q = -2/3$ , whereas antiquark down has  $q = +1/3$ , so that

the total charge of the antiproton is  $-1$ .

A different kind of particles that can be formed with quarks are “Mesons” (with an intermediate mass between “Baryons” and “Leptons”). They are composed of a quark and an antiquark, of the same or different flavours. For instance, a positive pion ( $\pi^+$ ) is composed of an up quark and a down antiquark. The basic octet (made by the up, down and strange quarks) is shown in the next figure.



(\*) a MeV (Mega electron Volt) corresponds to the energy of  $1.6 \times 10^{-13}$  Joule or a mass of  $1.8 \times 10^{-27}$ g.

(\*\*) This is true for neutrons bound in the nucleus only. A free neutron will decay after an average time of about 10 min. ■

## EXPERIMENTAL EVIDENCE

The idea of quarks originates from the observed symmetries, however in the present model there is more than that. From experimental point of view, an internal structure of heavy particles such as protons and neutrons was indeed observed, i.e. these particles look like they are composed of smaller particles, which were originally called “partons”. As a first approximation, partons can be identified with the “constituent” quarks, as in the theoretical model. ■

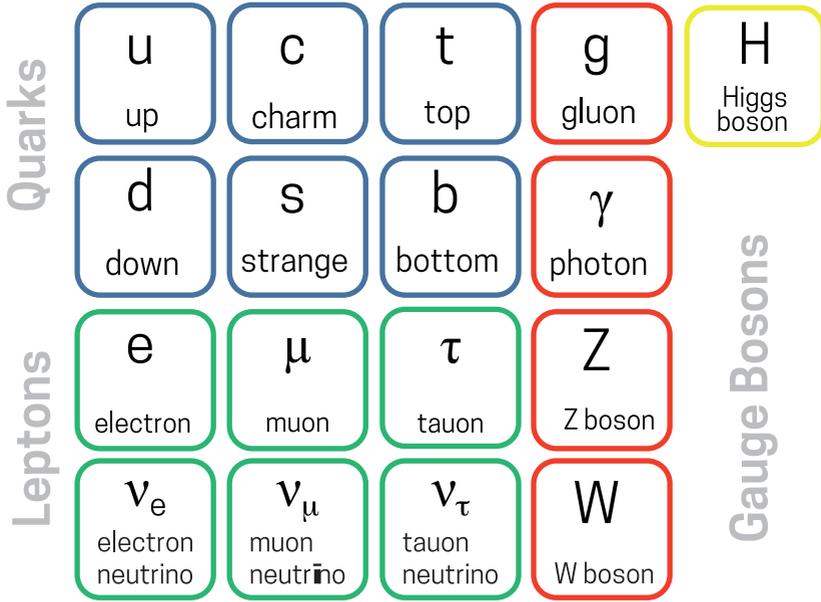


## ELEMENTARY PARTICLES

Physicists describe all the properties of the known particles with the so-called "Standard Model", where elementary particles are divided in two groups: quarks and leptons. This last group consists of three doublets, just like the three quark doublets. The first doublet corresponds to the couple electron – neutrino ("electronic neutrino"). The second and third doublet correspond to heavier particles: the muon ( $\mu$ ) and the tauon ( $\tau$ ) and their respective neutrinos. In addition, all these particles have a corresponding antiparticle. The antiparticle has the same mass, but some properties (quantum numbers) such as the electric charge are inverted. For instance, the anti-electron (positron) has positive electric charge; the anti-neutrino has zero electric charge (as the neutrino) but negative "lepton number". This is a quantity which is always conserved in all interactions i.e. in a closed system the leptonic number remains constant. The corresponding quantity for quarks is known as "baryonic number": it holds  $1/3$  for a quark and  $-1/3$  for antiquark, in such a way that a proton has baryon number  $B=1$  and an antiproton has  $B=-1$ .

Among the quantum numbers associated to elementary particles, special relevance is assigned to the "spin". As suggested by the name, this quantum number describe the "rotation properties" of the particles. All particles can be divided into two groups: particles with integer spin (0, 1, 2, ...), and particles with half integer spin ( $1/2$ ,  $3/2$  and so on). The first are called "bosons", the second "fermions", from the names of Bose and Fermi. It results that all elementary particles (both particles and antiparticles) are fermions, with  $\text{spin}=1/2$ . These particles can combine together to form particles with integer spin (for example the couple of quarks up – anti-down produces a positive pion ( $\pi^+$ ) which has zero spin.

In addition, in the model there are some "special particles" called "gauge bosons", with integer spin; they are the mediators of the interactions among particles. For instance, the electromagnetic interaction can be described by the exchange of one or more "photons" by charged particles. The following table summarize the elementary components of the Standard Model. ■

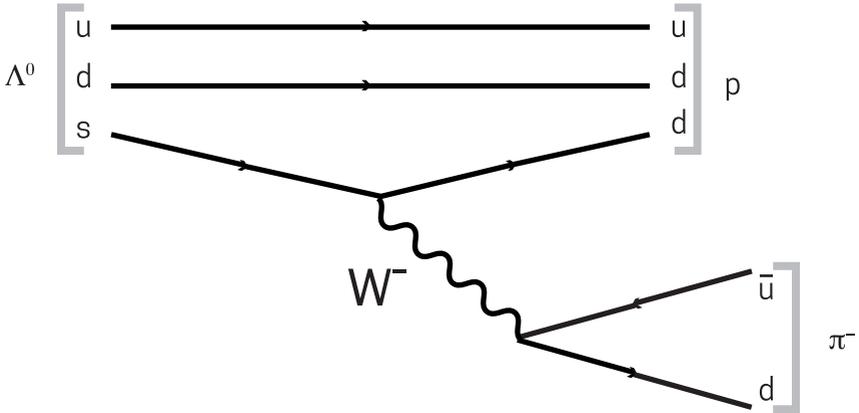


## STRONG AND WEAK INTERACTIONS

How do quarks interact with each other? Beside the electromagnetic interaction (due to the electric charge) and the gravitational interaction (due to the mass), there are two important forces, the “weak” and the “strong” interactions. As suggested by the name, the intensity of the first one is very low compared to the “strong”. Indeed, the only effect of weak interaction is to transform one quark from one flavour to another. This process is forbidden by the strong interaction, or in other words, flavours are conserved by this interaction. So, a strange quark cannot transform (decay) in other quarks by strong interaction, as this would violate the conservation of “strangeness”. On the other hand, this decay is allowed by weak interactions, so the quark “s” can transform in a quark “u” or “d”. In the process some leptons are also involved as well. The different interaction intensity is also reflected on the “time of interaction”, which is completely different in the two cases: a “weak” decay is more than  $10^{12}$  times longer than a strong decay.



The binding of quarks together is totally due to the strong interaction. The force is so strong that it is not possible to separate a single quark from Baryons or Mesons. From an experimental point of view, no isolate quarks have been ever observed, so we say that they are “confined” into Hadrons. (Hadrons=Baryons or Mesons). The following picture illustrates the weak decays of  $\Lambda$  baryon, where the quark “s” transforms into a quark u (plus a doublet d u ), forming a proton plus a negative pion.



The particle  $W^-$ , the mediator of the weak interaction, is very heavy (more than 80 times the mass of a proton), and this implies that the range of the interaction is very small. As we have seen any interaction is “mediate” by some particles, known as “Gauge Bosons”. A large mass corresponds to a very short interaction range, whereas zero mass corresponds to infinite range as in the case of the electromagnetic interaction mediate by the photon. ■

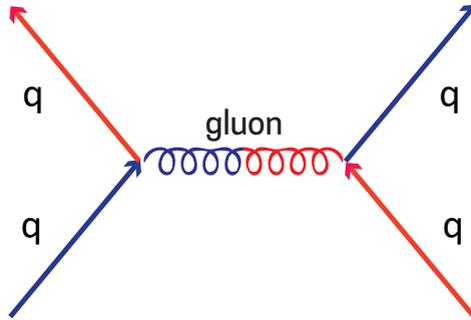
## COLOURS

In addition to “flavour”, quarks are characterized by “colours”. There are three colours (symbolically red, green, blue) and correspondingly three anti-colours (anti-red etc.). Quarks can change their colour by exchanging particles known as “gluons” (from “glue”), and this is the basic mechanism for strong interactions.

Colours were at first introduced to justify some facts that apparently violated some basic physical laws (like the Pauli principle). Later, experimental measurements confirmed that quarks have three additional internal degree of

freedom, corresponding to the three colours. In the case of the electromagnetic interaction, there is just one type of charge, which can have two basic values (“+” or “-”). At microscopic level, charges interact by exchanging a “mediator” known as “photon”. A photon does not have electric charge, moreover is massless. At macroscopic level, a huge number of photons produces electromagnetic waves, as light, microwaves, X rays,...

In strong interactions there are more “charges”, symbolically identified with the three colours (and the corresponding anti-colours), and the mediators are the gluons. For this reason, quarks can change their colours when exchanging a gluon. The following scheme illustrates as an example the exchange red – blue between two quarks.



A similar mechanism holds for quark anti-quark interactions. Moreover, gluons can also interact with each other (as they carry colour charge). So, the strong interactions are indeed much more complicated than the electromagnetic ones. ■

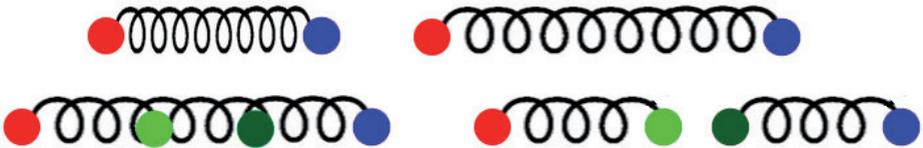
## CONFINEMENT

Why are quarks confined in hadrons? The “colour theory”, or Quantum Chromo-Dynamics (QCD) provides a way to describe confinement, and for this reason is the most qualified among the possible theories.

The basic effect comes again from gluons: their presence modifies the interaction so that the force grows more and more with the quarks distance just as the force between two balls connected by a spring. As the distance increases, the force become so strong that the energy needed to separate the balls should



be so large that it would create a new quark - antiquark pair. At the end two new combinations would be formed as shown in the figure below. It is interesting to note that confinement can be also connected with “colour symmetry”. Indeed, all baryons and mesons are colour neutral: the sum red + blue + green gives indeed an object without colour (baryon), as well as the sum red + anti-red or blue + anti-blue or green + anti-green (meson). These are the only combinations allowed in order to have neutral objects. If a single quark could be isolated, then we should have a violation of this symmetry, and observe a “coloured” quark. ■

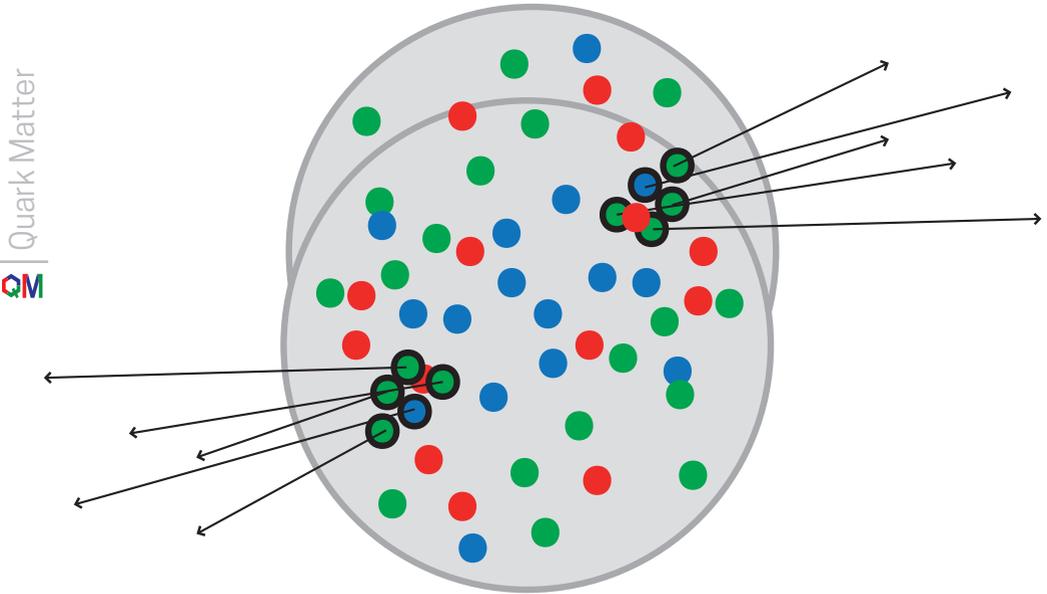


## DECONFINEMENT

From the previous discussion, it looks like it is not possible to observe “free” quarks. However, there is a possibility which is allowed by QCD. As we have seen, the force between quarks increases with the distance. Conversely, this force becomes lower when they are closer. So, in principle, if one could bring the quarks closer, the interactions would become weaker, until quarks become “free”. This condition corresponds to a true state transition (like the transition ice-water), and the new state of matter is called “Quark-Gluon Plasma” (QGP). According to the models, this transition happens when the density or the temperature of the system exceed some threshold: baryons and mesons will “melt” in this “primordial soup”, made of a huge number of quarks and gluons. This was the condition of our Universe just after the Big Bang, the QGP was the first state of matter. As far as the system evolves, it expands (as any free gas), and the temperature decreases. When the temperature goes under the critical value, an inverse state transition occurs, and the plasma start to “hadronize”, i.e. quarks become bonded together to create baryons and mesons. The hadronization in the primordial universe happened just  $10^{-6}$  seconds after the Big Bang. ■

# THE QUARK - GLUON PLASMA

As discussed in the previous chapter, the Quark - Gluon Plasma (QGP) is formed when the density or the temperature of the system exceed some critical value. In this case quarks are no more bound together and can move freely in the medium interacting with a large number of quarks and gluons while going through the plasma. In this process they lose their initial energy in many collisions creating new elementary particles. In some cases very energetic particles can “escape” from the plasma region. In this case they produce a “jet” of new particles, as illustrated in the figure below:



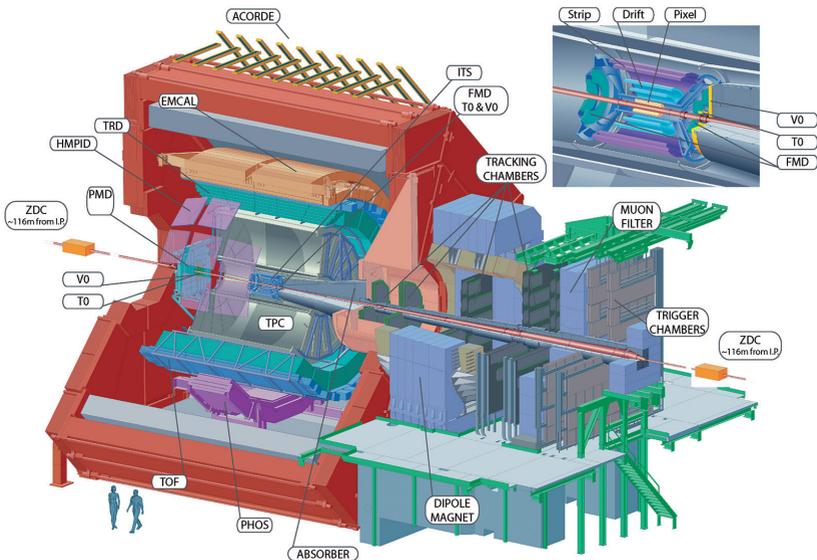
The “bulk” of the quarks however remains in the plasma region, showing a collective behaviour, just like particles in a fluid. After the initial compression, the QGP expands like a “flow” of matter, and its temperature decreases. When the temperature is close to the critical value, an inverse phase transition occurs, and the plasma goes back to the hadron state. All the quarks and gluons produced in the plasma will produce the “final” particles, i.e. the particles that we observe with our detectors. ■



# THE ALICE EXPERIMENT

As we have seen, in order to reproduce in the laboratory this new state of matter, quarks have to be compressed as much as possible. This can be realized in very high energy collisions between two heavy nuclei, such as lead, or gold. At LHC (Large Hadron Collider) nuclei are accelerated at an energy of about 5 TeV for each nucleon ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ), corresponding to a total energy of about 2000 TeV. At such fantastic energies the nucleons are “crushed”, and the quarks inside then become in the condition to produce the QGP, as discussed previously. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) is devoted to the study of such collisions and the corresponding physics; a full description of the experiment can be found here: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>

The ALICE detector is shown with all its components in the figure below, where each element has some specific role in the measurement of the particles produced in the collisions. The horizontal axis of the detector coincides with the beam line, i.e. the vacuum pipe where the particles (protons or heavy nuclei) run in the accelerator, from opposite directions. The interactions happen in the center of the detector, in such a way that almost all produced particles can be detected by the ALICE apparatus. In case of nucleus-nucleus collision, generally not all the nucleons (protons and neutrons) participate to the interaction: a fraction of them just go straight along the beam line, depending on the distance between the nuclei centers (impact parameter). ■



## The overview

First one needs to know the “initial conditions”, namely how powerful the collision was: this is done by measuring the remnants of the colliding nuclei in detectors made of high density materials located about 116 meters from the interaction point on both sides of ALICE (the ZDCs) and by measuring with the FMD, V0 and T0 the number of particles produced in the collision and their spatial distribution. T0 also measures with high precision, the time of the collision. ■

## Tracking particles

An ensemble of cylindrical detectors (from inside out: ITS, TPC, TOF, TRD) measures at many points the passage of each particle carrying an electric charge, so that its trajectory is precisely known. The ALICE tracking detectors are embedded in a magnetic field (produced by the huge red magnet) bending the trajectories of the particles: from the curvature of the tracks one can find their momentum (the product mass  $\times$  velocity). Particles which are generated by the decay of other particles can be identified by seeing that they do not originate from the point where the interaction has taken place (the main “vertex” of the event) but rather from a point whose distance depends on the particle mean lifetime. ■

## The particles' identity

ALICE also wants to know the identity of each particle, whether it is an electron, a proton, a kaon or a pion. In addition to the information given by the previous detectors, more specialized detectors are needed: the TOF measures, with a precision better than a tenth of a billionth of a second, the time that each particle takes to travel from the vertex to reach it, so that one can measure its speed, while the HMPID measures the faint light patterns generated by fast particles and the TRD measures the electromagnetic radiation very fast particles emit when crossing different materials, thus allowing to identify electrons. Muons are measured by exploiting the fact that they penetrate matter more easily than most other particles: a very thick and complex absorber stops all other particles and muons are measured by a dedicated set of detectors: the muon spectrometer. ■



## Catching photons

Photons (particles of light), like the light emitted from a hot object, tell us about the temperature of the system. To measure them, dedicated detectors are necessary: the crystals of the PHOS, which are as dense as lead and as transparent as glass, measure them with fantastic precision in a limited region, while the PMD and in particular the EMCal measure photons over a very wide area. The EMCal also measures groups of particles (called “jets”) which have a memory of the early phases of the event. ■

## SOME RESULTS

The ALICE experiment is now providing a clear picture of the QGP and its properties, as it will be shown in the following

### Multiplicity

The multiplicity, that is, the total number of particles produced in a collision, tells us a lot about how the quarks and gluons of the incoming nuclei transform into particles (pions, kaons etc) observed in the detectors; also about the energy density reached within the collision and the temperature of the fireball. The number of generated particles is correlated with the distance between the centres of the colliding nuclei (impact parameter). The charged particle multiplicity per colliding nucleon pair measured by ALICE for the most central collisions. This shows that the system created at LHC has a temperature much larger than what is necessary to produce the Quark Gluon Plasma state. ■

### A Perfect Liquid at the LHC

An interesting observable used for the study of the Quark Gluon Plasma is the flow: it provides direct information on the properties of matter created in heavy-ion collisions. Its magnitude depends strongly on the friction in the created matter. A perfect fluid has friction close to zero, whereas a thick liquid such as honey has large friction. Measurements of the flow had revealed that the hot matter created in heavy ion collisions flows like a fluid with little friction. In other words, the early Universe was equivalent to a perfect liquid. ■

## The size of the fireball

A technique known as Bose-Einstein or HBT Interferometry allows us to measure the size and lifetime of the fireball created in heavy-ion collisions. The time when the emission of particles reaches its maximum is found to be about 10 fm/c (1 fm is the size of the proton, 1 fm/c is the time for light to cover this distance). The conclusion is that at LHC the fireball formed in heavy ion collisions is hotter shows all the signatures of the Quark Gluon Plasma. ■



## A LOOK AT THE PARTICLES TABLE

In this section the main properties of the particles used in the cards of the game are presented.

**Neutrino:** is the lightest among the elementary particles. There are three species of neutrino, associated to the three charged leptons. They are sensitive to the weak force only, so the probability of interaction is very low.

**Photon:** is the mediator of the electromagnetic interaction. It has no charge and no mass. “Anti-photons” coincide with photons (i.e. it doesn’t have antiparticle).

**Electron:** is the lightest charged particle.

**Muon:** like the electron, it is a lepton. It constitutes the largest component of the cosmic rays at the sea level.

**Pion:** is the most common particle produced in hadronic interactions. There are three kinds of pions, with positive, negative and neutral charge. The neutral pion has a very short lifetime (about  $10^{-16}$ s) compared to  $\pi^+$  and  $\pi^-$ . This is due to the fact that the decay is due to the electromagnetic interaction, which is much stronger than the weak interaction, responsible for the charged pions decay.

**Proton:** is the lightest among the baryons (particles composed of three quarks). It is one of the building blocks of our common matter, with neutrons and electrons.

**Neutron:** is the lightest baryon after the proton. It doesn’t have electric charge.

**Kaon:** is a meson (like the pion), with a special quantum number known as “strangeness”. There are four species of Kaons: two are charged ( $K^+$ ,  $K^-$ ) and two are neutral ( $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ).

**Lambda:** is a baryon (like proton and neutron) with strangeness (as for the kaons). It is the lightest of the “hyperons”, which also included  $\Sigma$ ,  $\Xi$  and  $\Omega$ .

**D:** is a meson with a quantum number known as ‘charm’. There are four species of D mesons: two are charged ( $D^+$ ,  $D^-$ ) and two are neutral ( $D^0$ ,  $\bar{D}^0$ ).

**J/ $\psi$ :** is a «resonance», i.e. a particle which decays by the strong interaction. For this reason its lifetime is very short (about  $10^{-23}$ s).

$\eta$  : is another resonance, which usually decays in three pions. ■ ■ ■

