

IL QUARK



Per Quark non si intende il famoso personaggio della serie televisiva “Star Trek: Deep Space Nine” ma piuttosto la componente elementare che costituisce la materia che ci circonda.

Nel corso della storia inizialmente si è ritenuto che fossero gli atomi la struttura fondamentale della materia; ad essi sono poi seguiti gli elettroni, i neutroni ed i protoni ma da allora la fisica è stata in grado di compiere ulteriori ed importanti scoperte, soprattutto se si considerano quelle effettuate nell'ultimo secolo in cui il vertiginoso progresso tecnologico ha permesso esperimenti e studi sempre più accurati e complessi.

La teoria dei quark è il frutto degli anni di continui esperimenti ed osservazioni eseguiti indipendentemente al California Institute of Technology (Caltech) ed al CERN di Ginevra, in seguito ai quali i fisici statunitensi Murray Gell-Mann e George Zweig avanzarono nel 1964 l'ipotesi che la grande varietà di adroni potesse essere riconducibile alla diversa combinazione di un piccolo numero di costituenti fondamentali, i quark.

Secondo Murray Gell-Mann, la dizione del nome *quark* gli è stata suggerita da una frase senza senso contenuta nel romanzo *Finnegans Wake* di James Joyce, che egli stava leggendo al tempo della scoperta:

*Three quarks for Muster Mark!
Sure he has not got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.*

James Joyce, Finnegans Wake

Sul finire degli anni sessanta l'ipotesi di Gell-Mann e Zweig venne confermata dagli studi condotti presso lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), dove elettroni ad alta energia vennero sparati contro protoni e neutroni. La distribuzione energetica e angolare degli elettroni diffusi indicava infatti che alcuni di essi urtavano contro oggetti puntiformi ed elettricamente carichi, contenuti all'interno dei protoni e dei neutroni.

IL MODELLO STANDARD

Proprio a partire dalle scoperte avvenute negli anni sessanta si cominciò ad elaborare la teoria quantistica conosciuta col nome di Modello Standard, che viene spesso considerato come la maggior conquista della fisica delle particelle teorica e che rappresenta anche l'attuale classificazione delle particelle finora conosciute.

Il modello descrive tutti i costituenti della materia fisica e tutte le interazioni fondamentali ad oggi noti, ad eccezione della gravità, ed ha avuto straordinarie verifiche sperimentali con la previsione di particelle effettivamente scoperte negli anni seguenti e verificate da tutti gli esperimenti realizzati fino ad ora in particolare con le misure di precisione effettuate al LEP del CERN.

Secondo lo stesso Modello Standard esistono due tipologie di particelle che si distinguono in fermioni e bosoni.

I fermioni furono chiamati così in onore del fisico italiano Enrico Fermi che assieme all'inglese Paul Dirac formulò l'equazione della statistica antisimmetrica Fermi-Dirac alla quale essi obbediscono. Inoltre i fermioni si distinguono dai bosoni per il fatto di avere spin semi-intero e di obbedire al principio di esclusione di Pauli secondo il quale un singolo stato quantico non può essere occupato da più di un fermione.

I bosoni, che invece obbediscono alla statistica di Bose-Einstein, possiedono spin intero e sono liberi di affollare in gran numero uno stesso stato quantico. Un esempio pratico

relativo ai fotoni (che sono una classe di bosoni) è il laser, che è infatti capace di emettere un fascio di luce coerente, ovvero con tutte le particelle allo stesso stato di eccitazione.

La proprietà di obbedire o meno al principio di esclusione di Pauli si traduce perciò nel fatto che i bosoni e i fermioni presentano proprietà diverse di simmetria sotto lo scambio di due particelle: un sistema composto di particelle identiche della classe bosonica si trova sempre in uno stato globale completamente simmetrico sotto lo scambio di due particelle. Un sistema composto di fermioni identici, al contrario, si trova sempre in uno stato antisimmetrico sotto lo scambio di due fermioni.

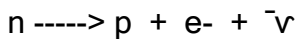
Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV ⁰
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

Quark singoli non sono mai stati osservati e si ritiene che non possano esistere tuttavia si la ricerca oggi si concentra piuttosto sulla ricerca di adroni di cinque quark (pentaquark), finora solo teorizzati.

Attraverso i quark è possibile anche spiegare il decadimento radioattivo. E' stato osservato infatti che i quark di tipo up (up, charm, top) possono divenire quark di tipo down (down, strange, bottom) e viceversa, attraverso l'interazione debole ed in particolare tramite l'emissione o l'assorbimento di un bosone W. Ad esempio in un decadimento di tipo B-, un neutrone decade in un protone, un elettrone ed un antineutrino;



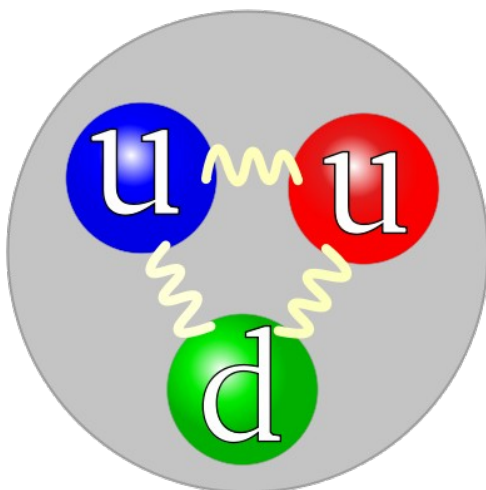
In termini di quark, l'adrone udd trasformandosi in un adrone uud emette un bosone W che decade in un elettrone ed un antineutrino.



Sebbene il processo di decadimento sia uguale per tutti i quark è stato osservato che essi hanno una tendenza a trasformarsi in quark della stessa generazione. Questa tendenza si esprime in "matrice CKM" (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) secondo la seguente tabella.

$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,974 & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & 0,973 & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & 0,999 \end{bmatrix},$$

Dove V_{xy} rappresenta la tendenza di un quark "x" a decadere in un quark "y". Più il valore è prossimo a 1 maggiore sarà la tendenza a quella trasformazione.



Un' altra caratteristica dei quark è il colore di carica. Sembra infatti che i quark non abbiano semplicemente 2 tipi di carica (+ e -) come accade nell'elettromagnetismo ma che abbia tre tipologie di carica (sei se si considerano gli anticolori) espresse con colori diversi: rosso, blu, verde. Il disegno accanto mostra infatti due quark up di colore diverso. La loro carica è la stessa (2/3 per tutti i quark up), ciò che cambia è il tipo di carica che può essere cambiato soltanto dai gluoni (particelle bosoniche). A proposito è bene ricordare che i quark sono fermioni ed in quanto tali rispondono al principio di esclusione di Pauli, perciò nello stesso adrone non si potranno mai trovare quark dello stesso colore di carica. Gli stessi gluoni che operano il

cambiamento del colore di carica sono anche i responsabili della forza nucleare forte che tiene uniti i quark dello stesso adrone e che, come effetto secondario, tiene unito anche il nucleo di protoni e neutroni senza interferire sui neutroni. Infatti si dice che la FNF agisce

sulle cariche barioniche (ovvero le cariche dei quark contenuti nei barioni) con una forza enorme che aumenta all'aumentare della distanza tra i quark.

PROPRIETÀ DEI SAPORI DEI QUARK

Nome	Simbolo	Massa (MeV/c ²)*	<i>J</i>	<i>B</i>	<i>Q</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>B'</i>	Antiparticella	Simbolo
<i>Prima generazione</i>												
Up	u	da 1,7 a 3,3	1/2	+ 1/3	+ 2/3	+1/2	0	0	0	0	Antiup	\bar{u}
Down	d	da 4,1 a 5,8	1/2	+1/3	-1/3	-1/2	0	0	0	0	Antidown	\bar{d}
<i>Seconda generazione</i>												
Charm	c	1270 ⁺⁷⁰ -90	1/2	+1/3	+2/3	0	$\frac{+}{1}$	0	0	0	Anticharm	\bar{c}
Strange	s	101 ⁺²⁹ -21	1/2	+1/3	-1/3	0	0	-1	0	0	Antistrange	\bar{s}
<i>Terza generazione</i>												
Top	t	172000 ± 1300	1/2	+1/3	+2/3	0	0	0	+1	0	Antitop	\bar{t}
Bottom	b	4190 ⁺¹⁸⁰ -60	1/2	+1/3	-1/3	0	0	0	0	-1	Antibottom	\bar{b}

Dove:

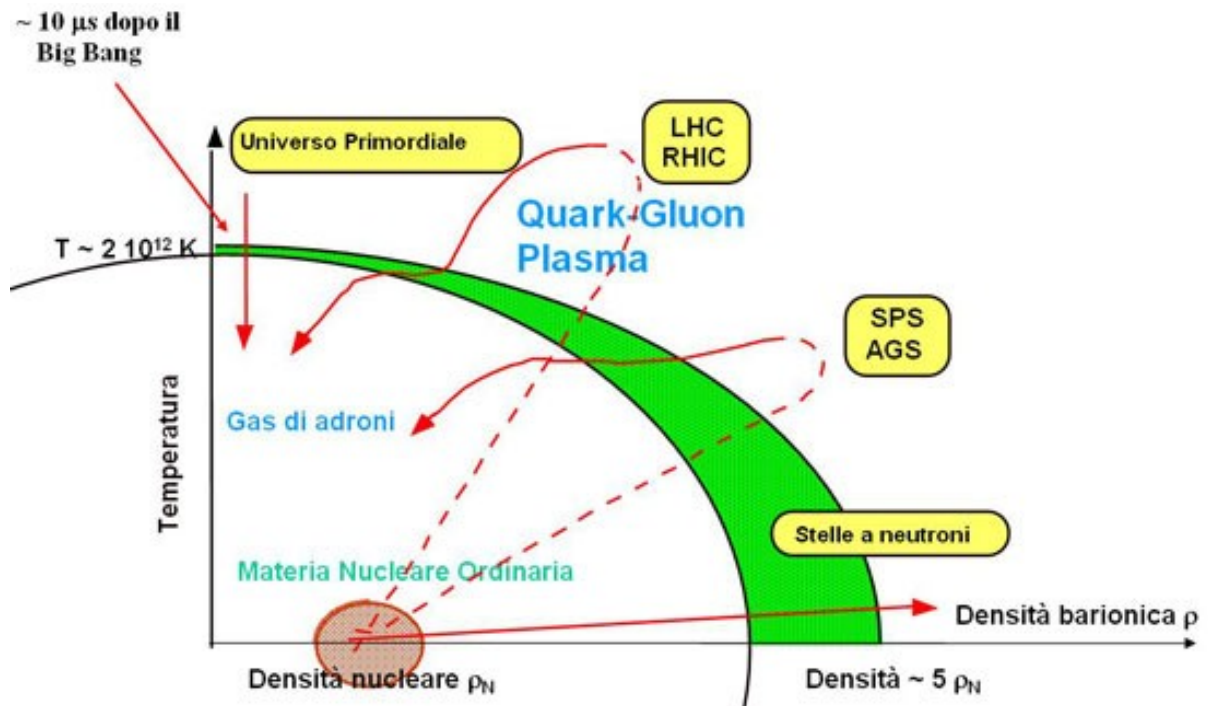
- J* = momento angolare totale
- B* = numero barionico
- Q* = carica elettrica
- B* = isospin
- C* = charm
- S* = stranezza
- T* = topness
- B'* = bottomness

* Notazioni come 4190 +180-60 denotano l'incertezza di misura. Nel caso del quark top, il primo valore è l'incertezza statistica in natura, il secondo rappresenta l'errore sistematico.

II QUARK GLUON PLASMA

Una delle ultime sfide della fisica nonché importante oggetto di studio è il raggiungimento del QGP, il Quark Gluon Plasma, ovvero un nuovo stato della materia, previsto dal Modello Standard, in cui al raggiungimento di condizione elevatissime di temperatura e densità di barioni, i quark non sono più necessariamente legati tra loro. Un modo di creare un'alta densità barionica consiste nell'ammassare protoni e neutroni in uno spazio piccolissimo. Continuando ad aggiungere protoni e neutroni, questi iniziano a compenetrarsi e i quark di un protone si avvicinano molto ai quark di un altro protone o di un neutrone. Aumentando la densità di materia si giunge ad un punto in cui i legami tra i quark all'interno di un protone si confondono con quelli di un altro e quindi si spezzano. A questo punto i quark e i gluoni non appartengono più a un singolo protone o neutrone ma sono liberi di muoversi nella zona ad alta densità formando il QGP.

Un altro modo di produrre la transizione di fase da materia ordinaria a QGP consiste nel portare un insieme di adroni ad altissime temperature. In questa situazione gli adroni e di conseguenza i quark al loro interno acquistano un'energia cinetica tale da vincere la forza forte che in condizioni normali li mantiene confinati. I quark e i gluoni sono così liberi di muoversi nella zona di altissima temperatura. Si forma il QGP. Situazioni intermedie con alte densità barioniche ed alte temperature possono ugualmente condurre alla transizione di fase con creazione di QGP.

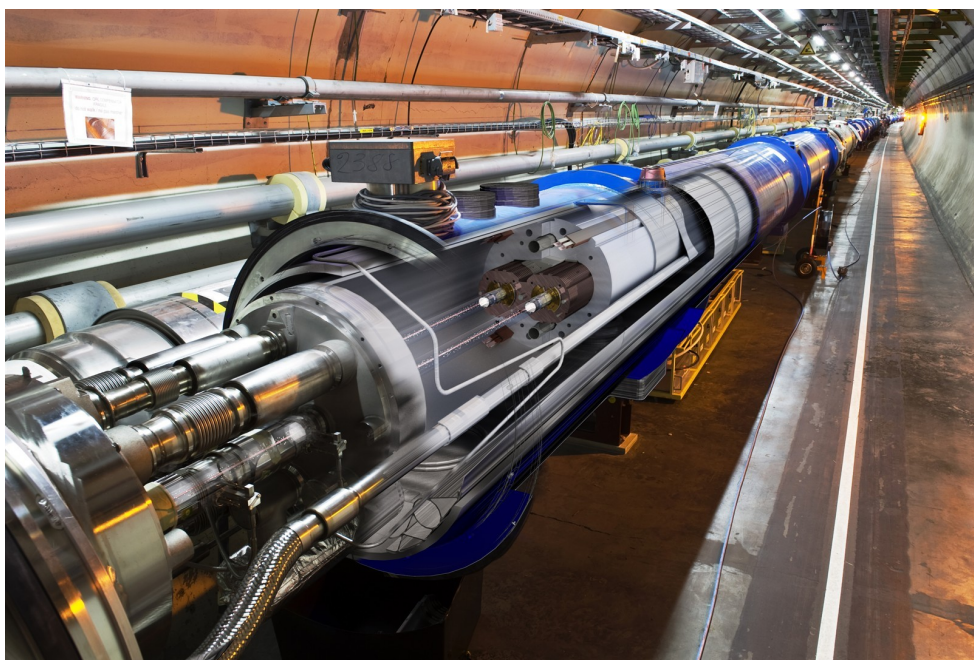


La temperatura necessaria allo stato QGP (fascia verde nel disegno soprastante) a bassa densità è quasi $2 \cdot 10^{12}$ K! Se si considera che la temperatura interna al Sole è di circa 10^8 K, o che $5\rho_n$ equivale a 5 volte la densità del nucleo atomico, si può facilmente capire quanto siano difficili da raggiungere tali condizioni. In natura però questi altissimi valori di temperatura sono stati raggiunti pochi istanti (10^{-6} s) dopo il Big Bang. Attualmente si pensa possa esistere anche uno stato di QGP a temperature basse ma densità barioniche altissime ($\rho \sim 3 \cdot 10^{14}$ gr/cm³) nel nucleo delle stelle a neutroni.

Esperimenti per il raggiungimento del QGP sono stati svolti sia presso il Brookhaven National Laboratory's Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) di Long Island sia presso il CERN LHC (Large Hadron Collider) di Ginevra attraverso l'accelerazione e lo scontro di ioni di oro o piombo con forze anche superiori ai 1100 TeV ($1\text{TeV}=1,6022 \cdot 10^{-7}$ J) raggiungendo così al momento dell'impatto densità di circa 6000 volte quella del nucleo.

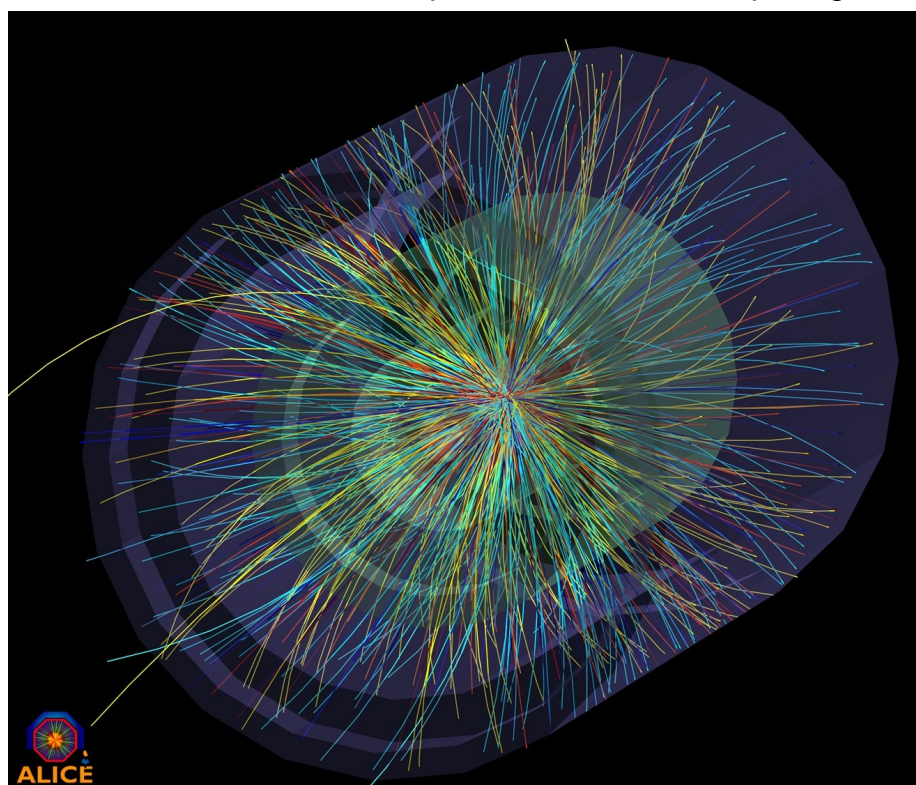


RHIC, Long Island



LHC, Ginevra

Quella sottostante è una riproduzione dello scontro avvenuto tra due ioni Pb rilevato dal centro Alice del LHC di Ginevra durante il quale si è formato del quark gluon plasma.



Bibliografia:

<http://www.fisicaparticelle.altervista.org/quark.html>

<http://orbiterchspaceneeds.blogspot.it/2011/05/lhc-experiments-present-new-results-at.html>

http://www.treccani.it/scuola/in_aula/fisica/particelle_cosmo_mente/donini.html

<http://scienzapertutti.Inf.infn.it>

<http://www.google.it/imghp>

<http://www.wikipedia.org>