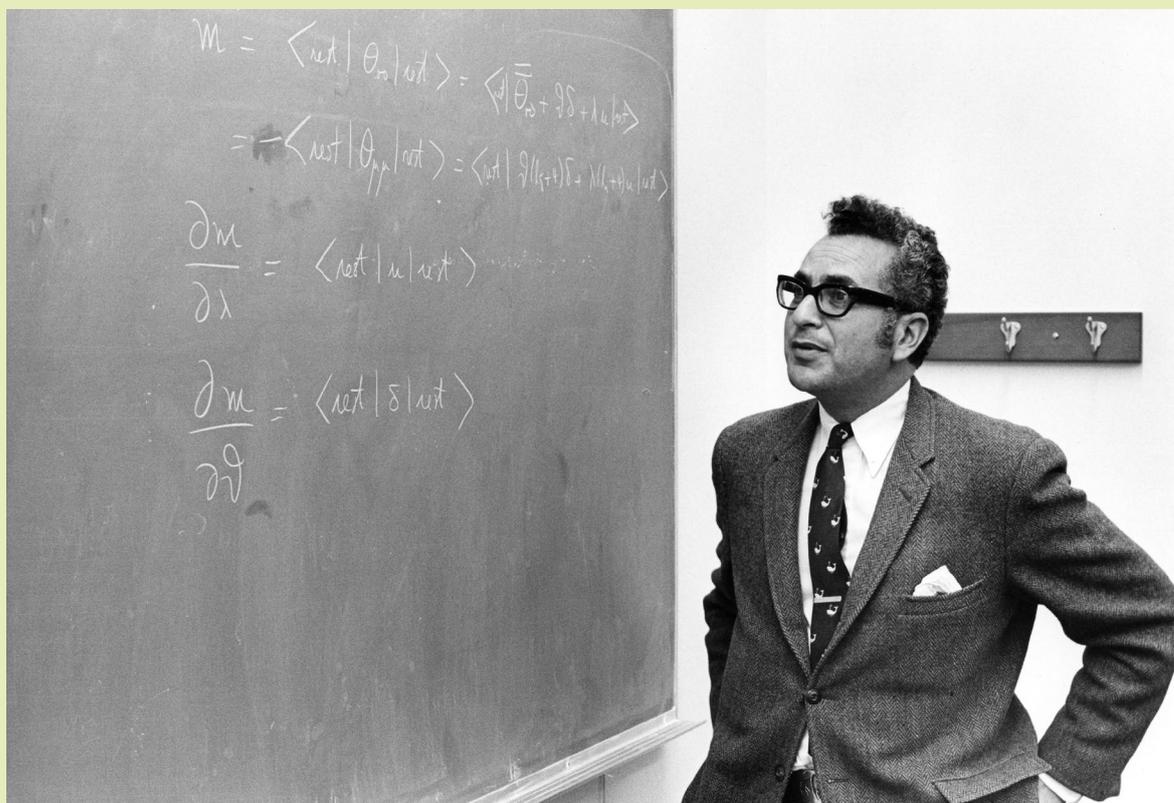


# More quarks for Muster Mark!

## Breve viaggio nella materia esotica

di Marco Pappagallo

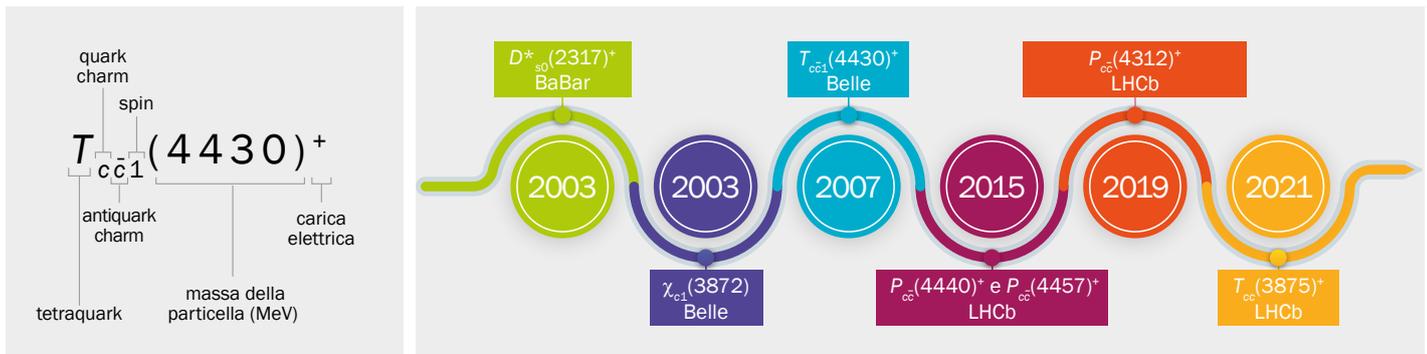


a.  
Murray Gell-Mann ha vinto il premio Nobel per la fisica nel 1969 per gli studi sulle particelle elementari, in particolare sulla teoria dei quark

Nel modello standard delle particelle elementari (vd. p. 9, ndr), le particelle che possono interagire tramite l'interazione forte sono gli adroni, suddivisi in mesoni e barioni, a seconda che siano costituiti da una coppia quark-antiquark o da tre quark rispettivamente. Ma possono esistere stati con più quark?

L'ipotesi fu presa subito in considerazione, già da Murray Gell-Mann e George Zweig nel 1964, autori del modello a quark, che ipotizzarono l'esistenza di

stati come per esempio il "tetraquark" (due quark e due antiquark) o il "pentaquark" (quattro quark e un antiquark). La definizione di mesoni e barioni può quindi essere generalizzata: i mesoni sono stati aventi lo stesso numero di quark e antiquark, mentre i barioni stati in cui la differenza tra il numero di quark e antiquark è un multiplo di tre. Per decenni i fisici hanno invano cercato adroni fuori dalle "solite" configurazioni, a tal punto che la loro esistenza era



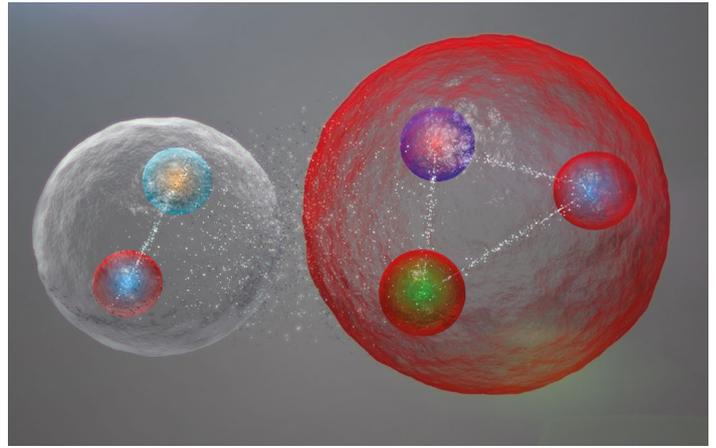
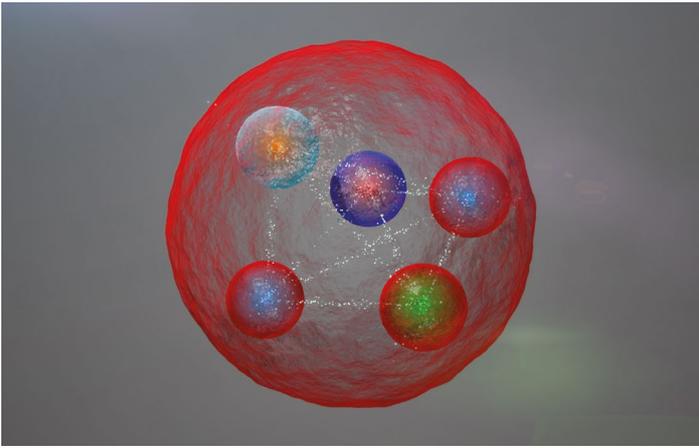
b.

A sinistra: il nome assegnato agli adroni esotici rispecchia le loro caratteristiche fondamentali. Consideriamo ad esempio l'adrone  $T_{cc1}^{(4430)+}$ : la "T" sta a indicare che si tratta di un tetraquark (per i pentaquark si usa la P), la "c" indica la presenza di un quark charm ( $\bar{c}$  per gli antiquark) e 1 è lo spin. Il numero tra parentesi indica la massa della particella in unità di megaelettronvolt (MeV). Infine, il segno "+" indica una carica elettrica positiva (come quella del protone). A destra, l'anno e l'esperimento in cui sono stati scoperti alcuni adroni esotici.

stata messa in discussione. Questo è il motivo per cui oggi ci si riferisce a questi stati come adroni "esotici", in contrapposizione agli adroni "convenzionali", osservati fino a quel momento. Nel 2003 l'inaspettata scoperta di due nuovi adroni ha riaperto il dibattito nella comunità scientifica: si tratta dei mesoni  $D_{s0}^{*}(2317)^+$  (per una spiegazione della lettura dei nomi vd. fig. b) e  $X(3872)$ . L'uso del simbolo "X" per quest'ultimo mesone ha un'origine storica, in quanto riflette le caratteristiche inaspettate che questo adrone ha presentato sin dalla sua scoperta, rendendo misteriosa la sua natura. A seguito della misura di alcune sue proprietà, questo mesone è stato rinominato  $\chi_{c1}(3872)$ . Ma perché tanto clamore per questi adroni? Per capirlo facciamo un passo indietro: la maggior parte degli adroni sono instabili e decadono dando origine ad altri adroni. Siccome l'interazione forte conserva il sapore dei quark, lo studio dei prodotti del decadimento permette di comprendere quali quark sono contenuti nella particella che decade. Il decadimento del mesone  $\chi_{c1}(3872)$  rivelava la presenza di un quark charm e un antiquark charm al suo interno. L'ipotesi più semplice era che fosse un mesone convenzionale. Tuttavia, la sua massa e il suo tempo di vita non erano compatibili con la possibilità di identificarlo con nessun mesone predetto dai modelli teorici. L'osservazione successiva di altri mesoni con caratteristiche simili faceva così ipotizzare che i modelli non fossero abbastanza accurati oppure che ci si trovava di fronte a una nuova famiglia di mesoni composti da quattro quark: i tetraquark! A complicare lo scenario vi è la possibilità che gli adroni siano in realtà una combinazione quantistica di diverse configurazioni di quark

e che quindi manifestino proprietà esotiche o convenzionali a seconda del processo studiato. Non è quindi sorprendente che dopo due decenni dalla scoperta del mesone  $\chi_{c1}(3872)$  non si sia ancora giunti a un consenso unanime sulla sua natura. E questo non è l'unico mesone a rimanere misterioso: ci sono risultati sperimentali che suggeriscono che persino il protone possa non essere un barione puramente a tre quark e abbia un contributo di pentaquark.

Il suggello all'esistenza di adroni esotici è arrivato grazie alla scoperta di particelle che non possono essere spiegate in uno scenario convenzionale: fra le tante ricordiamo i tetraquark  $T_{cc1}^{(4430)+}$ , altrimenti noto come  $Z_c(4430)^+$ , e  $T_{cc}(3875)^+$  e il pentaquark  $P_{cc}^{(4312)+}$ . Per esempio, dal decadimento del mesone  $T_{cc}(3875)^+$  si deduce la presenza al suo interno di due quark charm. La definizione di mesone impone quindi che ci sia un uguale numero di antiquark (cioè due), portando il numero totale di quark costituenti a quattro. L'osservazione dei primi adroni esotici è stata accompagnata dal tentativo di comprendere come i quark fossero legati al loro interno. La comprensione dei meccanismi di legame permette di estendere la nostra conoscenza della cromodinamica quantistica, la teoria fisica che descrive l'interazione forte. Sono stati proposti diversi modelli per gli adroni esotici, probabilmente i più popolari sono l'adrone "molecolare" e l'adrone "compatto". Nel "modello molecolare", l'adrone è uno stato debolmente legato tra due mesoni convenzionali per i tetraquark, e un mesone e un barione per i pentaquark, tenuti insieme dall'interazione forte residua, un meccanismo del tutto analogo a



**c.**

A sinistra, rappresentazione artistica di un pentaquark secondo il modello compatto, che prevede che il pentaquark sia uno stato composto da cinque quark saldamente legati fra di loro. A destra è rappresentato un pentaquark secondo il modello molecolare, per il quale il pentaquark è uno stato formato da un mesone (formato da un quark e un antiquark) e un barione (formato da tre quark) debolmente legati.

quello che lega i protoni e neutroni all'interno dei nuclei atomici. Il "deuterone" è un esempio di molecola adronica composta da un protone e un neutrone. Caratteristica peculiare di questi sistemi è che la loro massa è leggermente inferiore alla somma delle masse degli adroni costituenti. Tale caratteristica è propria di vari adroni, come  $\chi_{c1}(3872)$ ,  $D_{s0}^*(2317)^+$ ,  $P_{cc}^-(4312)^+$ ,  $T_{cc}^+(3875)^+$ , ma non è una caratteristica universale di tutti gli adroni esotici osservati. Uno scenario alternativo è proposto dal "modello compatto", che assume che i quattro (o cinque) quark costituenti siano saldamente legati fra di loro e confinati in spazio ridotto, in contrasto alle molecole adroniche che hanno una dimensione più estesa. Un'altra differenza fra i due modelli è che il modello compatto prevede uno spettro di adroni esotici molto più popolato rispetto al modello molecolare. Infatti, in quest'ultimo non tutte le combinazioni di adroni convenzionali possono dare origine a una molecola. Ad esempio, due adroni, entrambi con carica positiva, non potrebbero legarsi a formare una molecola in quanto la forza repulsiva coulombiana prevarrebbe sulla interazione forte e ne impedirebbe il legame. I quark potrebbero non essere gli unici mattoni fondamentali nella formazione degli adroni. Infatti la cromodinamica quantistica prevede che un gluone possa legarsi a una coppia

quark-antiquark o a tre quark per formare rispettivamente mesoni e barioni "ibridi". I gluoni possono anche legarsi fra di loro a formare stati, chiamati "glueball", che non hanno quark. L'identificazione di questi stati è difficile, in quanto la maggior parte di essi presentano caratteristiche simili a quelle degli adroni convenzionali. Pertanto alcuni di loro potrebbero essere già stati scoperti, ma classificati erroneamente come adroni convenzionali.

La ricerca di nuovi stati esotici e lo studio delle loro proprietà proseguiranno negli anni futuri per verificare se gli adroni esotici possano essere classificati in multipletti di sapore, analogamente agli adroni convenzionali. Inoltre, la conferma dell'esistenza di adroni ibridi potrebbe arrivare attraverso la scoperta di mesoni ibridi caratterizzati da combinazioni di numeri quantici non permessi per i mesoni convenzionali formati da una coppia quark-antiquark. Sebbene l'esistenza di adroni esotici sia stata accertata, siamo ancora lontani da comprendere a pieno come i quark interagiscono all'interno degli adroni. Pertanto la caccia a nuove particelle, come *glueball*, hexaquark, ecc., riserverà ancora inaspettate e affascinanti scoperte!

#### Biografia

**Marco Pappagallo** è professore associato presso il Dipartimento Interateneo di Fisica dell'Università di Bari. Lavora nell'ambito della spettroscopia adronica alla ricerca di nuovi stati convenzionali ed esotici. Ha partecipato all'esperimento BaBar al laboratorio SLAC (USA) ed è attualmente membro della collaborazione LHCb al CERN, di cui è stato *deputy physics coordinator* dal 2020 al 2022.