

# Risolvere il puzzle della crisi di rotazione del protone e del raggio: un nuovo modello di protone a forma di fungo

Nader Butto

Ricercatore indipendente, Petah Tikva, Israele.

DOI: [10.4236/jhepgc.2025.113062](https://doi.org/10.4236/jhepgc.2025.113062) Visualizzazioni

## Riassunto

Il protone, un elemento fondamentale dei nuclei atomici, è stato a lungo oggetto di intense indagini nella fisica delle particelle. Composta da due quark up e un quark down, la struttura interna del protone continua a sfidare la nostra comprensione della sua massa, spin e raggio di carica. Mentre i modelli tradizionali descrivono il protone come un'entità quasi sferica, recenti anomalie sperimentali e intuizioni teoriche suggeriscono una geometria interna più complessa. Questo articolo introduce un nuovo modello in cui il protone è concettualizzato come avente una forma simile a un fungo, formata dalla disposizione dinamica e dalla rotazione dei suoi quark costituenti e dal movimento a spirale dei gluoni. In questo modello, i due quark up ruotano attorno a un asse centrale definito dal quark down, formando una struttura tridimensionale asimmetrica a cappia. I gluoni, che mediano la forza forte, sono reinterpretati come bracci a spirale che emergono dalla dinamica del vortice, collegando simultaneamente i quark e contribuendo al momento (quantità di moto) angolare orbitale essenziale per spiegare lo spin totale del protone. Questa configurazione non solo risolve la crisi di spin del protone di lunga data, incorporando gli spin intrinseci dei quark, il moto orbitale dei quark e il momento angolare dei gluoni, ma fornisce anche una spiegazione coerente per il puzzle del raggio del protone, collegando la distribuzione della carica alla geometria rotazionale. Inoltre, l'eccesso di massa del protone rispetto alla somma delle sue masse di quark è affrontato attraverso l'energia immagazzinata nei campi rotazionali dei vortici quark-gluoni. Integrando la meccanica dei vortici, la cromodinamica quantistica e i dati osservativi, questo modello offre un quadro unificato e intuitivo per comprendere il funzionamento interno del protone. Esso riconcilia le discrepanze tra i risultati sperimentali e i modelli tradizionali e apre nuove strade per esplorare la natura geometrica e dinamica della materia subatomica.

## Parole chiave

[Struttura interna del protone](#), [Teoria del vortice di quark](#), [Protone a forma di fungo](#), [Crisi di spin del protone](#), [Puzzle del raggio del protone](#), [Momento angolare del gluone](#), [Dinamica del vortice](#), [Cromodinamica quantistica \(QCD\)](#), [Vuoto superfluido](#), [Puzzle della massa del protone](#)

## 1. Introduzione

---

Il protone, una pietra miliare della struttura atomica, ha affascinato i fisici per oltre un secolo. Originariamente concepito come una semplice particella indivisibile, la vera complessità del protone è stata gradualmente svelata attraverso progressi teorici e scoperte sperimentali. Oggi si sa che il protone non è una particella fondamentale, ma piuttosto un oggetto composito costituito da costituenti più piccoli chiamati quark, legati insieme dalla forza forte, che è mediata dai gluoni.

Il viaggio verso la comprensione della struttura interna del protone è iniziato con lo sviluppo della meccanica quantistica e successivamente della cromodinamica quantistica (QCD), che ha fornito il quadro per descrivere le interazioni all'interno del protone. Il modello a quark, proposto indipendentemente da Murray Gell-Mann e George Zweig nel 1964 [1] [2], ha rivoluzionato la nostra comprensione suggerendo che i protoni sono composti da tre quark: due quark up e un quark down. Questi quark sono tenuti insieme da gluoni, che sono i portatori di forza dell'interazione forte descritta dalla QCD. L'evidenza sperimentale della struttura a quark dei protoni è arrivata attraverso esperimenti di scattering anelastico profondo condotti alla fine degli anni '60 e all'inizio degli anni '70 presso lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) [3].

In questi esperimenti, gli elettroni sono stati sparati contro protoni ad alte energie e i modelli di scattering hanno rivelato che il protone conteneva costituenti puntiformi, i quark. Questi esperimenti fornirono la prima prova diretta che i protoni non erano particelle fondamentali, ma avevano una struttura interna.

Ulteriori esplorazioni della struttura interna del protone sono state condotte attraverso collisioni di particelle ad alta energia, come quelle eseguite al CERN e al Fermilab [4].

Questi esperimenti hanno rivelato che quando i protoni vengono fatti scontrare insieme a energie estremamente elevate, producono "getti" di particelle. Questi getti sono interpretati come frammenti di quark e gluoni, fornendo ulteriori informazioni sulla struttura quark-gluone del protone [5].

Nel corso del tempo, sono stati sviluppati diversi modelli per descrivere la distribuzione di quark e gluoni all'interno del protone. Il modello Parton, introdotto da Richard Feynman negli anni '60, tratta quark e gluoni come particelle puntiformi (partoni) che trasportano frazioni del momento del protone. Questo modello è stato determinante nell'interpretazione dei risultati dello scattering anelastico profondo e di altri esperimenti ad alta energia.

Un'altra area di studio intenso è stata la struttura di spin del protone. Gli esperimenti hanno dimostrato che lo spin dei quark contribuisce solo per circa il 30% allo spin totale del protone, suggerendo che i gluoni e il momento angolare orbitale dei quark devono svolgere un ruolo significativo. Questa scoperta ha portato a quella che è nota come la "crisi dello spin del protone", sfidando i fisici a indagare ulteriormente le fonti dello spin del protone [6].

Il raggio di carica del protone è un altro aspetto della sua struttura interna che ha lasciato perplessi gli scienziati. Le discrepanze nelle misure ottenute dallo scattering elettrone-protone rispetto a quelle derivate dallo spostamento di Lamb nell'idrogeno muonico hanno scatenato quello che ora è noto come il "puzzle del raggio del protone" [7]. Queste diverse misurazioni suggeriscono che la nostra comprensione della struttura spaziale del protone potrebbe aver bisogno di una revisione.

In questo articolo, approfondiamo la struttura interna del protone, sintetizzando i quadri teorici e le prove sperimentali che hanno plasmato la nostra attuale comprensione. Esploreremo la dinamica quark-gluone all'interno del protone, discuteremo le tecniche sperimentali che hanno rivelato la sua struttura interna e affronteremo e risolveremo gli enigmi in corso che continuano a sfidare i fisici di oggi.

## 2. Il modello a quark e la cromodinamica quantistica (QCD)

---

Il modello a quark è un quadro fondamentale della fisica delle particelle che spiega la composizione degli adroni, inclusi protoni e neutroni, che sono elementi costitutivi essenziali dei nuclei atomici. Secondo questo modello, protoni e neutroni, noti collettivamente come nucleoni, sono composti da tre quark ciascuno. In particolare, un protone è costituito da due quark up (u) e un quark down (d), mentre un neutrone è costituito da due quark down e un quark up. Questi quark sono tenuti insieme dalla forza forte, una delle quattro forze fondamentali della natura, mediata da particelle chiamate gluoni.

I gluoni sono particelle elementari prive di massa che agiscono come particelle di scambio, o portatori di forza, per l'interazione forte, nota anche come forza del colore. In questo contesto, il termine "colore" si riferisce a una proprietà utilizzata nella cromodinamica quantistica (QCD) per descrivere la carica trasportata da quark e gluoni, piuttosto che a un colore visivo. I quark sono disponibili in tre "colori" - rosso, verde e blu - e i gluoni portano una combinazione di questi colori, assicurando che i quark all'interno di un protone o neutrone si combinino sempre per formare una particella di colore neutro (bianco).

L'autointerazione dei gluoni, una caratteristica unica della QCD, porta alla natura non lineare e altamente complessa della forza forte. A differenza della forza elettromagnetica, che si indebolisce con l'aumentare della distanza, la forza forte diventa più forte man mano che i quark si allontanano, un fenomeno noto come "libertà asintotica". Ciò significa che a distanze molto brevi, i quark si comportano quasi come particelle libere, ma all'aumentare della distanza, la forza che li riporta insieme diventa più forte, impedendo efficacemente ai quark di essere isolati.

All'interno del protone, i quark interagiscono costantemente tramite scambio di gluoni. Queste interazioni sono responsabili della maggior parte della massa del protone. Infatti, la maggior parte della massa del protone non deriva dalla somma delle masse dei quark ma dall'energia associata al campo di forza forte creato dai gluoni. Secondo l'equazione di Einstein,  $E = mc^2$ , questa energia contribuisce in modo significativo alla massa complessiva del protone.

La QCD spiega anche la natura dinamica e fluttuante della struttura interna del protone. Il protone non è un'entità statica; piuttosto, è una massa ribollente di quark, antiquark e gluoni. Oltre ai tre quark "di valenza" che definiscono i numeri quantici del protone, ci sono numerosi quark e gluoni "marini" che entrano ed escono costantemente dall'esistenza a causa delle fluttuazioni quantistiche. Questi quark e gluoni marini svolgono un ruolo significativo nelle proprietà del protone, incluso il suo spin e la distribuzione della carica.

Tuttavia, mentre la QCD è la teoria più consolidata che descrive l'interazione forte, ha dei limiti che la rendono insufficiente da sola per una comprensione completa della struttura interna del protone. La QCD è una teoria altamente complessa e non lineare. I calcoli che coinvolgono la forza forte a basse energie, dove i quark sono confinati all'interno dei protoni, sono notoriamente difficili. Questi calcoli spesso richiedono sofisticate tecniche computazionali come la QCD su reticolo, che discretizza lo spazio-tempo in una griglia. Nonostante questi sforzi, alcuni aspetti della struttura del protone rimangono difficili da calcolare con precisione.

Inoltre, la QCD, sebbene matematicamente rigorosa, non sempre fornisce un'immagine intuitiva di come quark e gluoni diano origine alle proprietà osservabili del protone, come la sua massa, lo spin e il raggio di carica. Teorie o modelli complementari, come la teoria del vortice di quark [8], offrono prospettive alternative che potrebbero essere più facili da concettualizzare e con cui lavorare. Il puzzle della massa del protone, la discrepanza tra la massa effettiva del protone e la somma delle masse dei suoi quark costituenti, rimane un problema significativo. Mentre la QCD spiega che la maggior parte della massa del protone deriva dall'energia della forza forte, non risolve completamente questo enigma in un modo facilmente accessibile, spingendo la necessità di modelli alternativi che potrebbero catturare meglio le dinamiche coinvolte.

Inoltre, la QCD è asintoticamente libera, il che significa che i quark si comportano come particelle libere a energie estremamente elevate. Tuttavia, nel regime di accoppiamento forte, in cui i quark sono legati insieme in protoni, la teoria diventa estremamente complessa e il meccanismo di confinamento non è completamente compreso. Questa limitazione suggerisce il valore potenziale di ulteriori teorie in grado di affrontare questi aspetti in modo più diretto.

Date queste sfide, lo sviluppo di teorie complementari come la teoria del vortice di quark è importante. Questa teoria offre una nuova prospettiva sulla struttura interna del protone, fornendo potenzialmente una spiegazione più intuitiva e accessibile per la sua massa, spin e distribuzione di carica. Mentre continuiamo a esplorare la natura fondamentale della materia, avere un insieme diversificato di strumenti teorici sarà cruciale per scoprire le verità più profonde sui quark, i gluoni e il tessuto stesso dell'universo.

### 3. Il Modello del Vortice di Quark: un nuovo approccio

---

Il Modello del Vortice di Quark introduce un nuovo modo di pensare alle particelle elementari come gli elettroni [9] e i quark [10], vedendole non come particelle puntiformi ma come vortici all'interno di un vuoto superfluido. Questo vuoto superfluido, che pervade l'universo, può essere pensato come un fluido quantistico che esisteva anche prima del big bang. In questo modello, i quark sono vortici stabili e localizzati all'interno di questo fluido quantistico e le loro proprietà, come la massa, la carica e lo spin, derivano dalla dinamica di questi vortici.

Così, il quark può essere concettualizzato come un vortice circolare irrotazionale all'interno di un mezzo superfluido privo di attrito, con linee di flusso concentriche formate dal vuoto primordiale durante il Big Bang. Questo modello prevede che il quark abbia linee di flusso concentriche, dove la velocità di rotazione del superfluido è al suo massimo al centro del vortice e diminuisce gradualmente man mano che ci si sposta verso l'esterno. Questa diminuzione della velocità continua fino a raggiungere i confini del vortice, dove il gradiente di pressione svanisce e il flusso diventa laminare e privo di attrito.

La natura priva di attrito del flusso implica che il movimento del vortice del quark è indistruttibile e non può essere creato di nuovo, il che significa una struttura stabile e persistente. Affinché questa stabilità sia mantenuta, la regione centrale del vortice del quark, nota come punto di aspirazione negativo, deve possedere energia sufficiente per accelerare le particelle virtuali, come i fotoni virtuali, fino alla velocità della luce. Se l'energia in questo punto centrale è insufficiente, la struttura a vortice del quark non rimarrebbe stabile, minando così l'integrità del quark all'interno di questo modello.

## 4. Il ruolo dei gluoni nella teoria del vortice di quark

---

Nel contesto del modello a vortice in cui i quark sono concettualizzati come vortici circolari all'interno di un mezzo superfluido, i gluoni possono essere reinterpretati come i bracci a spirale di questi vortici di quark. Tradizionalmente, i gluoni sono intesi come i portatori di forza responsabili dell'interazione forte che lega insieme i quark. Tuttavia, all'interno di questa struttura del vortice, i gluoni potrebbero essere visti come estensioni naturali della dinamica rotazionale del vortice piuttosto che come entità separate.

Se l'interazione forte è completamente descritta dalla fluidodinamica del vortice di quark, la necessità di gluoni come particelle distinte potrebbe essere riconsiderata. L'interazione tra quark potrebbe derivare direttamente dalla vicinanza e dalla sovrapposizione dei loro vortici, rendendo superfluo lo scambio mediato di particelle, come i gluoni.

Il movimento rotatorio all'interno di ciascun vortice, combinato con i gradienti di pressione associati e la distribuzione dell'energia, potrebbe intrinsecamente spiegare le forze attrattive tra i quark. Ciò eliminerebbe la necessità di una particella aggiuntiva come il gluone per mediare queste forze. I bracci a spirale, concettualizzati come campi di gluoni, avrebbero quindi svolto un ruolo cruciale nel mantenere la stabilità e la struttura del vortice di quark. Collegando varie parti del vortice, questi bracci a spirale contribuiscono alla coerenza e alla stabilità complessiva del moto rotatorio del quark, assicurando la persistenza del vortice.

In questo modello, il vortice di quark è caratterizzato dalla sua natura stabile e priva di attrito, risultato delle sue proprietà intrinseche. L'assenza di attrito significa che il movimento del vortice è indistruttibile e non richiede forze esterne, come quelle tradizionalmente fornite dai gluoni, per sostenere la sua stabilità. La dinamica interna del vortice, in particolare in termini di distribuzione dell'energia, potrebbe essere sufficiente a mantenere la stabilità dei quark e a governare le interazioni tra i quark.

Inoltre, come estensioni del vortice, i gluoni potrebbero anche svolgere un ruolo nel bilanciare l'energia rotazionale attraverso il vortice, assicurando che il movimento del quark rimanga stabile e che l'energia non sia concentrata in un'area, il che potrebbe potenzialmente destabilizzare il vortice. Quando i quark interagiscono, i loro vortici possono intrecciarsi, con i bracci a spirale (o gluoni) che facilitano lo scambio di forze e informazioni tra i quark, collegando efficacemente i loro vortici in modo dinamico e complesso.

Questo modello a vortice offre un modo visivo e dinamico per comprendere i gluoni all'interno di una struttura superfluida, fornendo una prospettiva unica sul loro ruolo nelle interazioni dei quark e nella forza forte. Potrebbe potenzialmente unificare la descrizione dei quark e delle forze tra di loro in un unico quadro. Se i bracci a spirale del vortice derivano naturalmente dalla dinamica rotazionale del quark, queste caratteristiche potrebbero fornire una spiegazione naturale per la forza forte. In questa prospettiva, ciò che è tradizionalmente inteso come forza forte nella cromodinamica quantistica (QCD) potrebbe essere una proprietà emergente della dinamica dei vortici, rendendo i gluoni un concetto ridondante o non necessario.

La teoria del vortice di quark offre quindi un modello semplificato della fisica delle particelle, riducendo il numero di particelle fondamentali e le interazioni che devono essere considerate. Spiegando le interazioni dei quark attraverso la sola dinamica dei vortici, questa teoria evita le complessità associate allo scambio di gluoni, come la carica di colore, il confinamento e altri aspetti intricati della QCD.

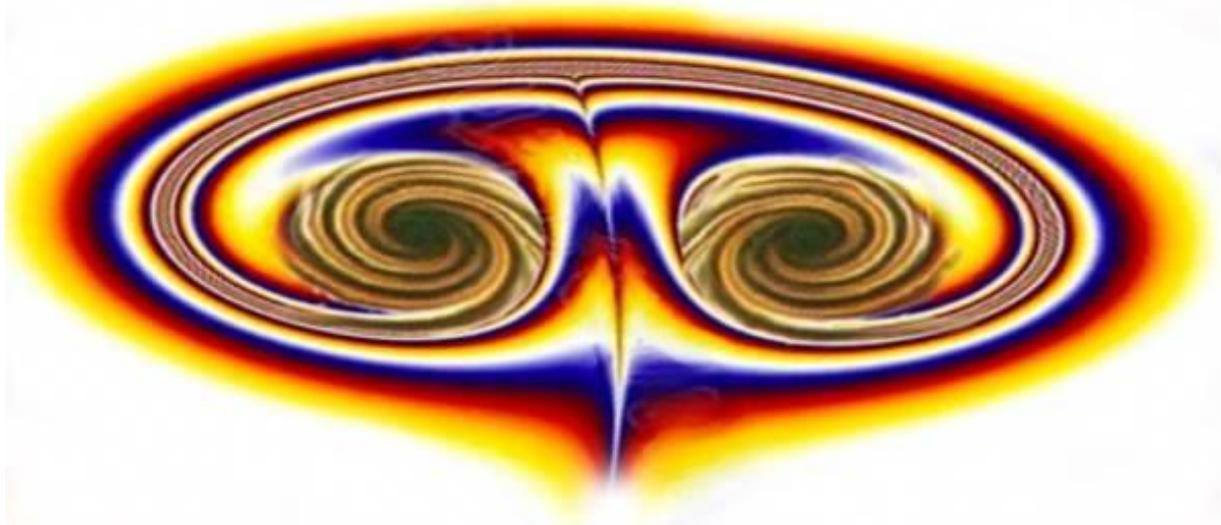
In sintesi, la teoria del vortice di quark spiega potenzialmente l'interazione forte e il confinamento dei quark attraverso la dinamica interna dei vortici di quark e dei loro bracci a spirale, che corrispondono ai gluoni. La teoria si basa sulle proprietà intrinseche del vortice, come la stabilità, la distribuzione dell'energia e la dinamica rotazionale, per svolgere i ruoli tradizionalmente attribuiti ai gluoni nel modello standard. Questo approccio potrebbe offrire una comprensione più unificata e più semplice delle interazioni dei quark all'interno di un quadro superfluido.

## 5. La struttura del mesone

---

Il mesone, una particella subatomica fondamentale, è tradizionalmente composto da un quark e da un antiquark legati insieme dalla forza forte. Nell'ambito della cromodinamica quantistica (QCD), questa forza è mediata dai gluoni. Tuttavia, la teoria del vortice di quark fornisce una nuova reinterpretazione della struttura dei mesoni, sostituendo l'immagine convenzionale di quark-antiquark con la dinamica di coppie di vortici controrotanti all'interno di un vuoto superfluido.

In questa teoria, i mesoni sono visualizzati come coppie di vortici legati, due strutture di vortici localizzate che ruotano in direzioni opposte. Questa opposizione nel movimento rotatorio crea un gradiente di pressione nel fluido quantistico circostante, che attira naturalmente i vortici insieme, formando una struttura mesonica stabile, anche se temporanea (**Figura 1**).



**Figura 1.** Un'illustrazione artistica, dove la parte superiore mostra il quark e l'antiquark che vengono attratti l'uno verso l'altro a causa delle loro rotazioni opposte. Nella parte inferiore dell'illustrazione, il quark e l'antiquark sono mostrati mentre provano repulsione a causa dell'allineamento parallelo dei loro bracci a spirale.

Questo aspetto dell'interazione si allinea con la comprensione tradizionale che i quark sono legati insieme da una delle forze più forti in natura. Tuttavia, la teoria del vortice di quark aggiunge un nuovo livello di interpretazione attribuendo questa attrazione alla fluidodinamica dei vortici di quark.

Mentre l'attrazione tra vortici rotatori opposti lega il quark e l'antiquark, la struttura del mesone mostra anche un'instabilità intrinseca. Nella parte inferiore dell'illustrazione, il quark e l'antiquark sono mostrati mentre sperimentano repulsione a causa dell'allineamento parallelo dei loro bracci a spirale, che nel contesto della teoria del vortice di quark, potrebbe essere considerato analogo ai campi di gluoni.

Questa forza repulsiva si verifica quando le strutture vorticose del quark e dell'antiquark si allineano in parallelo, portando a un conflitto all'interno della struttura del mesone. Questa repulsione interna è un fattore chiave che contribuisce all'instabilità dei mesoni. A differenza dei protoni e dei neutroni, che sono stabili a causa della loro struttura, i mesoni sono noti per avere tempi di vita finiti. Questa instabilità alla fine si traduce nel decadimento dei mesoni in altre particelle.

Un altro aspetto cruciale dell'instabilità dei mesoni è il fatto che quark e antiquark sono le antiparticelle l'uno dell'altro. Quando entrano in stretto contatto, c'è la tendenza ad annientarsi a vicenda. Questo processo di annientamento è una ragione fondamentale per cui i mesoni, nonostante siano tenuti insieme dalla forza forte, non hanno una durata di vita indefinita. L'interazione tra i quark e i vortici di antiquark, unita alla loro natura di antiparticelle, assicura che i mesoni alla fine decadano in altre particelle più stabili.

## 6. Il quadro matematico per il calcolo della forza forte

---

Comprendere le proprietà del protone attraverso un rigoroso formalismo matematico è fondamentale per collegare le previsioni teoriche con le osservazioni empiriche. Applicando i principi della cromodinamica quantistica (QCD) e sfruttando il nuovo concetto di quark come vortici superfluidi, miriamo a derivare espressioni precise per la forza forte che agisce tra i quark.

Questo sottocapitolo presenta derivazioni che dimostrano come la teoria del vortice di quark fornisca un quadro coerente per comprendere le proprietà fondamentali del protone. La capacità di questa teoria di prevedere e descrivere con precisione l'interazione forte, la distribuzione di carica e la massa del protone sarà esaminata in dettaglio in un articolo separato, offrendo una potenziale conferma della validità della teoria. Deviazioni o accordi con i dati sperimentali possono far luce sull'accuratezza di questo approccio.

L'attrazione tra due quark up dipende dalla distanza tra loro secondo l'equazione:

$$F_{\text{strong}} = \frac{4}{3} \alpha_s \frac{\hbar c}{r^2}$$

dove

- $F_{\text{strong}}$ : è la forza forte tra i due quark.
- $\alpha_s$ : è la costante di accoppiamento forte, un numero adimensionale che caratterizza la forza dell'interazione forte [11].
- $\hbar$ : è la costante di Planck ridotta.
- $c$ : è la velocità della luce nel vuoto.
- $r$ : è la distanza tra i due quark.

Questa forza deriva da un potenziale simile a quello di Coulomb scalato dall'invariante di Casimir  $C_F = 4/3$  del gruppo di colori SU(3), un risultato ben consolidato nella QCD.

Questo è derivato differenziando il potenziale di tipo Coulomb della QCD:

$$V(r) = -\frac{4}{3}\alpha_s \frac{hc}{r} \Rightarrow F(r) = -\frac{dV}{dr} = \frac{4}{3}\alpha_s \frac{hc}{r^2}$$

Questa equazione può essere intesa come una formula che descrive l'energia e il momento in un sistema in cui le interazioni forti, simili alla dinamica dei vortici, sono in gioco.

Sostituendo  $\frac{h}{2\pi}$  l'equazione diventa:

$$F_{\text{strong}} = \frac{4}{3}\alpha_s \frac{hc}{2\pi r^2}$$

Nella dinamica dei vortici, l'energia relativa a un filamento di vortice è spesso collegata alla circolazione  $\Gamma$  e al raggio di curvatura  $r$ . Il termine  $\frac{hc}{r}$  assomiglia al momento di una particella con lunghezza d'onda  $r$  che viaggia alla velocità  $c$ , collegando la forza al moto della particella.

Nel nostro approccio basato sul vortice, reinterpretiamo la forza utilizzando l'energia e la geometria del vortice. Consideriamo la lunghezza d'onda di Compton  $\lambda = 2\pi r$  come la circonferenza di un vortice di quark, e mettiamo in relazione la costante di Planck con la circolazione del vortice come mostrato in un precedente articolo [12]:

$$h = 2\pi r c m$$

Sostituendo questo nella forma simile alla QCD e semplificando si ottiene:

$$F_{\text{strong}} = \frac{4}{3}\alpha_s \frac{hc}{2\pi r^2} = \frac{4}{3}\alpha_s \frac{mc^2}{2\pi r}$$

Questa formulazione suggerisce che la forza forte è proporzionale all'energia a riposo  $mc^2$  distribuita lungo la circonferenza del vortice, con il prefattore  $\frac{4}{3}\alpha_s$  che riflette un accoppiamento tra la struttura del vuoto e l'efficienza di confinamento.

In particolare, la forza forte può essere interpretata non semplicemente come un'interazione diretta tra particelle, ma come un fenomeno emergente derivante dalla pressione esercitata dalla dinamica del vuoto. Nel contesto del movimento a vortice, l'energia confinata all'interno di un raggio finito crea un campo di pressione localizzato, che può guidare la forza responsabile del confinamento dei quark. Questo concetto si collega naturalmente alla classica formula della pressione di trascinamento utilizzata in fluidodinamica:

$$P = \frac{1}{2}\rho c^2 C_D$$

dove:

- $P$  ha lo stesso valore numerico di  $G$ , cioè  $6,67384 \pm 0,00080 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$  [13].
- $\rho$  è la densità di vuoto  $\rho \approx 9.53 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$  [8].
- $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- $C_D$  è il coefficiente di resistenza aerodinamica  $\approx 0.1556$ .

Sostituendo questi valori, troviamo:

$$P \approx 6.673 \times 10^{-11} \text{ Pa}$$

Questo valore è numericamente identico alla costante gravitazionale  $G$ , anche se le loro dimensioni fisiche differiscono. Mentre la pressione è definita come forza per unità di area e  $G$  descrive l'interazione gravitazionale per unità di massa e distanza, l'equivalenza numerica suggerisce una connessione più profonda tra il tessuto dello spazio e le forze mediate dal vuoto [13].

In questo contesto, la resistenza offerta dal vuoto al movimento dei quark - modellata in modo analogo a una forza di resistenza - è quantificata da un coefficiente di resistenza adimensionale  $C_D$ , mentre l'efficienza effettiva del trasferimento di energia durante il confinamento del vortice è rappresentata da un fattore  $\eta$ .

Empiricamente, se prendiamo:

$$C_D \approx 0.156, \eta \approx 0.758$$

Questo risultato coincide notevolmente con il valore medio noto della costante di accoppiamento forte  $\alpha_s \approx 0,118$  alla scala di energia di 1 GeV in cromodinamica quantistica (QCD).

Questo valore è coerente con la recente misurazione di CMS dalla produzione di W e Z inclusiva a:  $\sqrt{s} = 7 \text{ and } 8 \text{ TeV}$

$$\alpha_s(m_Z) = 0.1175 - 0.0028 + 0.0025 \text{ (CMS Collaboration, 2019) [14]}$$

La riorganizzazione dà:

Questa concordanza numerica suggerisce che:

$$\alpha_s = C_D \cdot \eta$$

o equivalente:

$$C_D = \frac{4}{3} \alpha_s$$

Questo parallelo supporta l'ipotesi che sia la forza forte che la gravità possano originare dalla stessa struttura sottostante del vuoto, governata dalla dinamica dei vortici e dai processi di trasferimento di energia. Una tale visione unificante apre la porta alla reinterpretazione delle interazioni fondamentali come fenomeni emergenti modellati dal flusso e dalla resistenza del mezzo vuoto.

Sulla base di questa interpretazione, proponiamo che la costante di accoppiamento forte  $a_s$  possa non essere una costante fondamentale, ma piuttosto un parametro emergente derivato dalle proprietà di resistenza del vuoto.

Questa relazione indica che la forza dell'interazione forte può essere intesa come una misura dell'efficienza con cui il mezzo del vuoto trasferisce energia attraverso il confinamento indotto dalla resistenza. In questa prospettiva, il modello a vortice sostituisce l'origine della carica di colore di  $a_s$  nella QCD con un meccanismo più geometrico e fisico basato sulla struttura del vortice, sul movimento e sulla dissipazione dell'energia.

Radiciando  $a_s$  nelle proprietà fluido-simili del vuoto, colleghiamo la fisica delle particelle ad alta energia con la fluidodinamica classica, suggerendo che il confinamento e la forza forte possono essere manifestazioni macroscopiche del comportamento del vortice in un vuoto strutturato.

La costante di accoppiamento forte  $a_s$  non è quindi trattata come una costante fondamentale, ma piuttosto come un parametro emergente che quantifica l'efficienza con cui la resistenza del vuoto, rappresentata da  $C_D$  si trasforma in una forza attrattiva tra quark all'interno di un vuoto confinato simile a un superfluido.

Identificando questo valore del coefficiente di resistenza aerodinamica con  $a_s$ , il modello propone un collegamento diretto tra la forza nucleare forte e la dinamica del vuoto, suggerendo un meccanismo comune alla base delle interazioni forti e gravitazionali. In questa prospettiva,  $a_s$  diventa una misura scalata della pressione di resistenza del vuoto, e il fattore  $4/3$  sorge naturalmente come il rapporto di trasferimento di energia efficace all'interno della struttura confinata, definendo la forza di interazione tra i quark attraverso la meccanica del movimento del vortice nel mezzo del vuoto.

Questa equivalenza implica una profonda relazione tra la forza forte nella meccanica quantistica e gli effetti gravitazionali, supportando l'idea che queste interazioni fondamentali possano condividere un meccanismo sottostante comune. Interpretando queste forze e costanti attraverso la struttura della dinamica dei vortici, forniamo un ponte tra la meccanica quantistica e la cosmologia, offrendo una prospettiva unificata che collega il comportamento delle particelle subatomiche alle forze universali su larga scala.

Calcoliamo ora l'entità di questa forza per un quark up:

- $m_u \approx 4.1 \times 10^{-30} \text{ kg}$
- $r \approx 0.87 \times 10^{-15} \text{ m.}$
- $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- $a_s \approx 0.118.$

$$F_{\text{strong}} = \frac{4}{3} \cdot 0.118 \cdot \frac{(4.1 \times 10^{-30})(9 \times 10^{16})}{2\pi \cdot 0.87 \times 10^{-15}} \approx 0.106 \times 10^2 \text{ N}$$

Questo risultato si colloca ben all'interno dell'entità attesa della forza forte su scale femtometriche e supera di gran lunga le forze elettromagnetiche e gravitazionali che agiscono alla stessa distanza. Ciò conferma la predominanza dell'interazione forte in condizioni di confinamento, coerentemente con le previsioni della QCD.

## 7. Risolvere il puzzle del raggio del protone

---

Il conflitto del raggio del protone è un problema significativo nella fisica della struttura del protone, derivante da discrepanze nelle misurazioni del raggio del protone utilizzando elettroni rispetto ai muoni. Recenti indagini sperimentali hanno approfondito e contemporaneamente complicato la nostra comprensione della struttura del protone. Il protone, a lungo considerato una semplice particella puntiforme, ha rivelato complessità inaspettate quando il suo raggio di carica è stato esaminato con crescente precisione.

Una serie di esperimenti condotti presso l'Istituto Paul Scherrer in Svizzera ha portato questo problema alla ribalta. Il Dr. Jan Bernauer e il Dr. Randolph Pohl hanno condotto attività di ricerca indipendenti volte a misurare il raggio di carica del protone utilizzando diverse metodologie, ognuna delle quali ha fornito informazioni cruciali sulla natura fondamentale del protone.

L'approccio del Dr. Bernauer si basava sulla diffusione diretta di elettroni da nuclei di idrogeno, un metodo che è stato una pietra miliare della fisica delle particelle per decenni. Bombardando atomi di idrogeno con elettroni e analizzando i modelli di scattering, il team di Bernauer ha determinato che il raggio di carica del protone è compreso tra  $0,878 \pm 0,005$  fm [15] [16].

Questa misurazione precisa, sebbene coerente con alcuni risultati precedenti, contribuisce a un corpo di lavoro che supporta e sfida i nostri attuali modelli teorici.

Nel frattempo, l'approccio del Dr. Pohl, utilizzando i muoni ed esaminando lo spostamento di Lamb nell'idrogeno muonico, ha trovato un raggio di  $0,8409 \pm 0,0004$  fm [17].

Questa discrepanza del  $\sim 4\%$  tra le due misurazioni, anche se apparentemente piccola, è sostanziale nella fisica subatomica. Solleva interrogativi sull'accuratezza dei modelli esistenti come GUT e l'elettrodinamica quantistica (QED). I fisici Ingo Sick e Dirk Trautmann suggeriscono che potremmo non comprendere appieno le implicazioni di ogni configurazione sperimentale, indicando che i nostri modelli attuali potrebbero aver bisogno di essere rivisitati o perfezionati.

Questa divergenza sottolinea una discrepanza significativa, indicando che la nostra comprensione della struttura del protone non è ancora completa e richiede ulteriori indagini per riconciliare queste differenze [18].

La discrepanza tra queste misurazioni e altre che utilizzano l'idrogeno muonico ha suscitato un notevole dibattito all'interno della comunità scientifica, portando a quello che è noto come il "puzzle del raggio del protone".

Il nostro modello, che concettualizza il protone come una struttura 3D simile a un fungo formata da una specifica configurazione spaziale di tre quark, offre una nuova

interpretazione: il raggio che determina la forza non è un confine geometrico statico ma un parametro dinamico definito dall'interazione tra i quark, in particolare la forza forte che agisce tra i due quark up. In questo modello, il raggio osservato corrisponde alla distanza nella parte più larga della struttura del protone, dove i quark up interagiscono tramite forze mediate dai gluoni. La relazione tra raggio e forza è data da:

$$r = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\alpha_s \hbar c}{F_{\text{strong}}}}$$

dove

- $\alpha_s$  è la costante di accoppiamento forte,  $0,1183 \pm 0,0009$  [19].
- $\hbar$  è la costante di Planck ridotta ( $1.0545718 \times 10^{-34}$  Js).
- $c$  è la velocità della luce ( $2.998 \times 10^8$  m/s).
- $r$  è la distanza tra i quark.

La forza tra i quark all'interno di un mesone può variare da circa  $10^3$  a  $10^4$  Newton quando i quark sono vicini tra loro. Prenderemo un valore da qualche parte nel mezzo:

$$F_{\text{strong}} \approx 7.052 \times 10^3 \text{ N}$$

Questo intervallo è paragonabile alle forze che si trovano in altre strutture adroniche come protoni e neutroni [20].

$$r = \sqrt{3/4 \alpha_s \hbar c / F_{\text{strong}}} \approx 0.8409 \text{ fm}$$

Questo calcolo suggerisce che il raggio del protone è di circa  $0.8409 \times 10^{-15}$  m.

Se assumiamo che la forza tra i quark sia  $6.47 \times 10^3$  Newton, che è anche nell'intervallo accettato, il raggio del protone sarà quello misurato con il metodo di Bernauer 0,878 (fm).

Ciò suggerisce che il raggio misurato dipende dall'entità della forza forte al momento dell'interazione, che a sua volta può variare in base a come viene sondato il protone, evidenziando un aspetto dinamico della struttura del protone piuttosto che una dimensione geometrica fissa.

È improbabile che queste discrepanze siano legate a variazioni della forza forte; piuttosto, possono essere dovute all'angolo con cui il protone viene colpito durante la misurazione. Il momento e le distribuzioni spaziali di quark e gluoni all'interno del protone sono correlate con il suo spin. Ad esempio, la distribuzione spaziale dei quark in un protone polarizzato trasversalmente risulta essere distorta nel piano trasversale [21] [22].

Questa analisi rivela che l'equazione della forza forte è più di una semplice descrizione matematica delle interazioni dei quark; Incarna un'analogia fisica più profonda, tracciando parallelismi tra la cromodinamica quantistica e la dinamica dei vortici. Interpretando le particelle elementari come vortici, l'equazione non solo tiene conto della forza forte tra i quark, ma offre anche una prospettiva unificata in cui le costanti fondamentali e le leggi di

forza sono espressioni delle strutture vorticose sottostanti. Questo approccio arricchisce la nostra comprensione dell'interazione forte, evidenziando come i principi della dinamica dei vortici possano illuminare le intricate forze in gioco all'interno del regno quantistico.

## 8. La struttura del protone

---

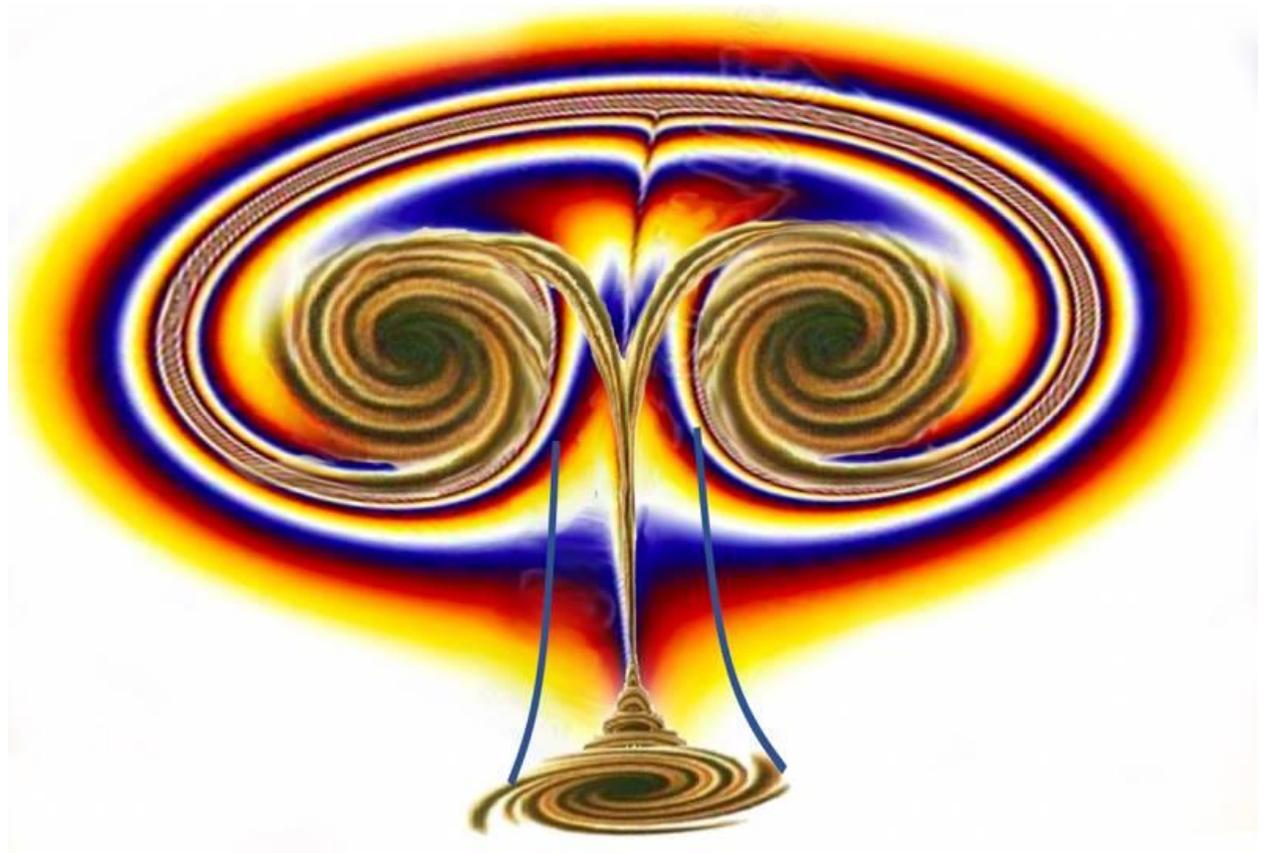
Il protone, un costituente fondamentale dei nuclei atomici, è stato a lungo oggetto di intensi studi nella fisica delle particelle. Sebbene il protone sia una delle particelle più conosciute nell'universo, la sua struttura interna rimane un argomento di ricerca complesso e in evoluzione.

I protoni sono composti da tre quark di valenza, due quark up e un quark down, tenuti insieme dalla forza forte, mediata dai gluoni. Questa semplice immagine, tuttavia, smentisce la complessa dinamica quantistica all'interno del protone. Il mare di quark virtuali, antiquark e gluoni che momentaneamente compaiono e scompaiono dall'esistenza all'interno del protone contribuiscono alle sue proprietà, come la sua massa e spin.

Recenti esperimenti con collisori di particelle ad alta energia, come il Large Hadron Collider (LHC) del CERN, hanno permesso ai fisici di sondare la struttura interna del protone con una precisione senza precedenti. Questi esperimenti hanno rivelato che la distribuzione di quark e gluoni all'interno del protone è più complessa di quanto si pensasse in precedenza. Ad esempio, l'esperimento LHCb al CERN ha fornito prove che la distribuzione del momento tra i quark e i gluoni non è uniforme ma varia significativamente, a seconda della scala di energia alla quale il protone viene sondato [23].

Per spiegare la complessità intrinseca della struttura del protone, la teoria del vortice di quark offre una nuova prospettiva.

Secondo questa teoria, la stabilizzazione di particelle come protoni e neutroni, che sono barioni, è radicata nella dinamica dei vortici di quark. Mentre i mesoni, che consistono di soli due quark, sono intrinsecamente instabili, l'introduzione di un terzo quark in barioni come protoni e neutroni porta a una configurazione più stabile (**Figura 2**).



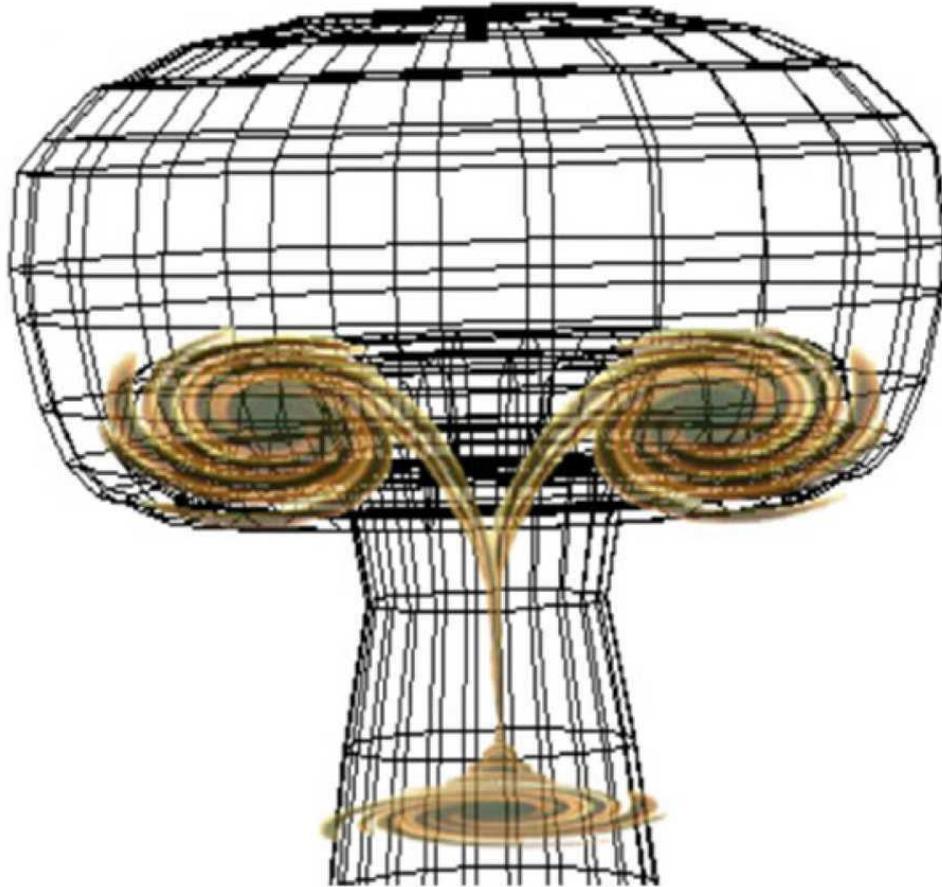
**Figura 2.** La struttura dei tre quark collegati tra loro, due up e uno down (uud), il prolungamento dei bracci a spirale del vortice di quark (gluoni) che collegano le tre parti insieme sono parte integrante dei quark.

Mentre i mesoni sono intrinsecamente instabili, l'introduzione di un terzo quark, come si vede nei barioni come protoni e neutroni, può stabilizzare la struttura della particella. Questa stabilizzazione si ottiene attraverso l'alterata dinamica dei vortici quando è presente un terzo quark. La stabilità è legata a due aspetti principali: la struttura a triangolo e la struttura 3d.

In un triangolo, qualsiasi forza applicata a un vertice viene distribuita sui due lati adiacenti, creando un equilibrio di forze. Questa distribuzione garantisce che la struttura rimanga stabile e non collassi. Ad esempio, in ingegneria, i triangoli vengono utilizzati nelle capriate e nelle strutture perché le forze sono efficacemente distribuite, riducendo al minimo il rischio di deformazione o collasso.

Il secondo aspetto è la formazione della struttura 3D.

Il vortice del quark d ruota alla velocità della luce, quando si connette ai due quark up ruotano nella stessa direzione e alla stessa velocità del quark down creando una struttura compatta 3D simile a un fungo (**Figura 3**).



**Figura 3.** Struttura a fungo del protone, il quark inferiore si trova a un piano di rotazione di 90 gradi rispetto al piano di rotazione del quark e dell'antiquark.

Il cappuccio del protone è generalmente rotondo e convesso, come un ombrello o una cupola, e può essere approssimato come un emisfero quando si calcola il suo volume. Il gambo è tipicamente cilindrico, con un raggio corrispondente al raggio del quark  $d$  e una lunghezza equivalente al diametro del quark. Questa forma è particolarmente rilevante quando si calcola il volume dello stelo, che è fondamentale per determinare la massa del protone.

Se visto nel suo insieme, il protone ha un aspetto equilibrato e simmetrico, con il cappuccio posizionato in cima allo stelo.

Le intuizioni della teoria dei vortici di quark forniscono una spiegazione convincente per la stabilità dei barioni rispetto ai mesoni. La teoria suggerisce che la dinamica interna dei vortici di quark, in particolare l'influenza di un terzo quark, sono sufficienti a mantenere la stabilità dei barioni senza richiedere forze o entità aggiuntive.

## 9. Struttura interna del protone

---

Lo studio della struttura interna del protone è fondamentale per la nostra comprensione della fisica delle particelle, specialmente nel contesto degli esperimenti condotti al Large Hadron Collider (LHC). Al centro di questo studio ci sono le funzioni di distribuzione dei partoni (PDF), che descrivono come il momento del protone è distribuita tra i quark e i gluoni che lo costituiscono, noti collettivamente come partoni. Comprendere i PDF è

fondamentale perché forniscono il quadro necessario per prevedere e interpretare gli esiti delle collisioni ad alta energia all'LHC, dove i protoni interagiscono con grandi trasferimenti di momento [23].

Le funzioni di distribuzione dei partoni non sono solo costrutti matematici astratti; Sono fondamentali per l'analisi dei dati sperimentali nella fisica delle particelle. Quando i protoni si scontrano ad alte energie, come accade nell'LHC, le interazioni tra i quark e i gluoni all'interno di questi protoni determinano i tipi di particelle prodotte e la dinamica della loro produzione. I PDF codificano essenzialmente la probabilità di trovare un tipo specifico di partone (come un quark o un gluone) che trasporta una certa frazione della momento del protone a una data scala di energia. Queste funzioni sono cruciali per fare previsioni accurate nella fisica delle particelle perché influenzano direttamente le sezioni d'urto e altre quantità osservabili nelle collisioni protone-protone.

Tuttavia, nonostante la loro importanza, i PDF non sono semplici da calcolare dai primi principi a causa della natura complessa e non perturbativa della cromodinamica quantistica (QCD) su scale a bassa energia. Invece, sono determinati empiricamente attraverso l'adattamento ai dati sperimentali, rendendoli un ponte essenziale tra teoria ed esperimento. La determinazione accurata dei PDF è quindi una pietra miliare della moderna fisica delle particelle, che consente agli scienziati di fare previsioni precise sui risultati degli esperimenti e di cercare nuovi fenomeni oltre il Modello Standard. Pertanto, una buona conoscenza della struttura del protone è essenziale per la misurazione accurata di molte grandezze fisiche. ATLAS ha ben dimostrato l'importanza di questo settore per il lavoro presente e futuro [24].

In questo articolo, la visione tradizionale della struttura interna del protone, in cui si pensa che i partoni siano distribuiti uniformemente all'interno del protone, è stata messa in discussione da un nuovo modello teorico. Il modello a fungo, che si basa sul modello a vortice di quark, offre una nuova prospettiva su come quark e gluoni sono distribuiti all'interno del protone. A differenza della visione tradizionale, che tende a trattare il protone come una miscela relativamente omogenea di quark e gluoni, il modello a fungo suggerisce che questi partoni possono formare strutture simili a vortici all'interno del protone. Queste strutture potrebbero creare regioni di densità variabile, risultando in una forma a "fungo" in cui le regioni più dense si trovano attorno ai bordi e le aree meno dense sono presenti al centro (**Figura 4**).



**Figura 4.** Questa immagine mostra un fungo affettato verticalmente, rivelando una struttura interna caratterizzata da strati radiali distinti, distribuzione della massa asimmetrica e una regione cava centrale.

La struttura interna dei protoni e dei neutroni può essere compresa usando un'analogia con la distribuzione di densità osservata in un fungo. Proprio come un fungo ha uno stelo denso e un cappello meno denso, la densità all'interno di protoni e neutroni non è uniforme.

Il nucleo, simile al gambo di un fungo, è il luogo in cui si concentra la maggior parte della massa e dell'energia. Questa regione centrale è spesso indicata come il "nucleo di quark", dove i quark sono tenuti insieme dalla forza forte mediata dai gluoni.

Intorno a questo nucleo denso c'è un'area più diffusa, analoga al cappello del fungo. Questa regione rappresenta le parti esterne del protone o del neutrone, dove la densità è inferiore. Qui, il campo di gluoni e i quark marini (coppie quark-antiquark che vengono costantemente create e annichilate) contribuiscono alla struttura ma con meno intensità che nel nucleo.

Questa distribuzione di densità riflette il modo in cui la massa e l'energia non sono distribuite uniformemente su tutto il protone o neutrone, ma invece concentrate verso il centro, diminuendo verso i bordi, proprio come la densità del materiale dallo stelo al cappuccio di un fungo.

Le implicazioni del modello a fungo per la nostra comprensione dei PDF sono profonde. Fornendo un'immagine più dettagliata e dinamica di come i partoni sono distribuiti all'interno del protone, il modello potrebbe portare a PDF più accurati. Questo, a sua volta,

migliorerebbe la precisione delle previsioni per le collisioni ad alta energia all'LHC. I modelli tradizionali possono trascurare sottili variazioni nelle densità dei partoni, in particolare a diverse frazioni di momento e scale di energia. Il modello a fungo, con la sua attenzione ai vortici di quark, offre una comprensione più sfumata di queste distribuzioni, rivelando potenzialmente variazioni che potrebbero essere critiche per l'interpretazione dei dati sperimentali.

## 10. Rotazione del protone e geometria del vortice interno

---

La crisi dello spin del protone è emersa quando i dati sperimentali hanno rivelato che gli spin dei quark rappresentano solo il 30% circa dello spin totale del protone. Le attuali spiegazioni basate sulla QCD coinvolgono contributi aggiuntivi dallo spin del gluone e dal momento angolare orbitale quark/gluone. Nel nostro modello basato su vortici, il protone è visualizzato come una struttura geometricamente asimmetrica con un asse centrale a vortice (come uno stelo) e componenti a spirale (come un tappo).

## 11. La crisi della rotazione del protone risolta

---

Per decenni, i fisici hanno cercato di capire le sue proprietà, in particolare il suo spin, una forma di momento angolare intrinseco. Tuttavia, alla fine degli anni '80, è emersa la "crisi dello spin del protone", che ha scosso le fondamenta della fisica delle particelle. La crisi sorse quando si scoprì che lo spin del protone non poteva essere completamente spiegato dagli spin dei suoi quark costituenti, come si era tradizionalmente supposto.

In risposta a questo enigma, sono state proposte varie teorie per spiegare la rotazione mancante. Una delle idee più intriganti è il concetto di una struttura interna del protone a forma di fungo, che potrebbe fornire un nuovo modo per risolvere la crisi di spin del protone.

Nel modello convenzionale, il protone è composto da tre quark: due quark up e un quark down. Questi quark sono legati insieme dalla forza forte, mediata da particelle chiamate gluoni. I quark possiedono una proprietà chiamata spin, che è una forma di momento angolare intrinseco. Inizialmente, si credeva che lo spin del protone (che è  $1/2$ ) fosse semplicemente la somma degli spin dei suoi tre quark. Tuttavia, gli esperimenti condotti alla fine degli anni '80 dalla European Muon Collaboration (EMC) hanno rivelato che gli spin dei quark contribuiscono solo per circa il 30% allo spin totale del protone. Questo risultato inaspettato ha scatenato la crisi dello spin del protone, portando i fisici a cercare altre fonti dello spin del protone.

I modelli tradizionali, che trattavano il protone come un oggetto sferico relativamente semplice, hanno faticato a fornire una spiegazione completa. In risposta a questa sfida, proponiamo una nuova teoria: il protone potrebbe possedere una struttura interna a forma di fungo, che potrebbe offrire una nuova prospettiva sulla risoluzione della crisi di spin del protone.

Lo spin risultante del protone è una complessa interazione tra gli spin intrinseci dei quark, il loro momento angolare orbitale e i contributi dei gluoni.

Il momento angolare del protone indica che c'è una vera e propria rotazione interna (spin) che gli conferisce la sua massa a riposo. Il momento angolare è una misura della quantità di rotazione di un oggetto, considerando la sua massa, forma e velocità di rotazione. Lo spin è un componente chiave del momento angolare e, nel contesto delle particelle

elementari, è una proprietà intrinseca che non cambia indipendentemente dall'ambiente della particella. Pertanto, nella meccanica quantistica, il momento angolare è quantizzato, il che significa che può assumere solo determinati valori discreti.

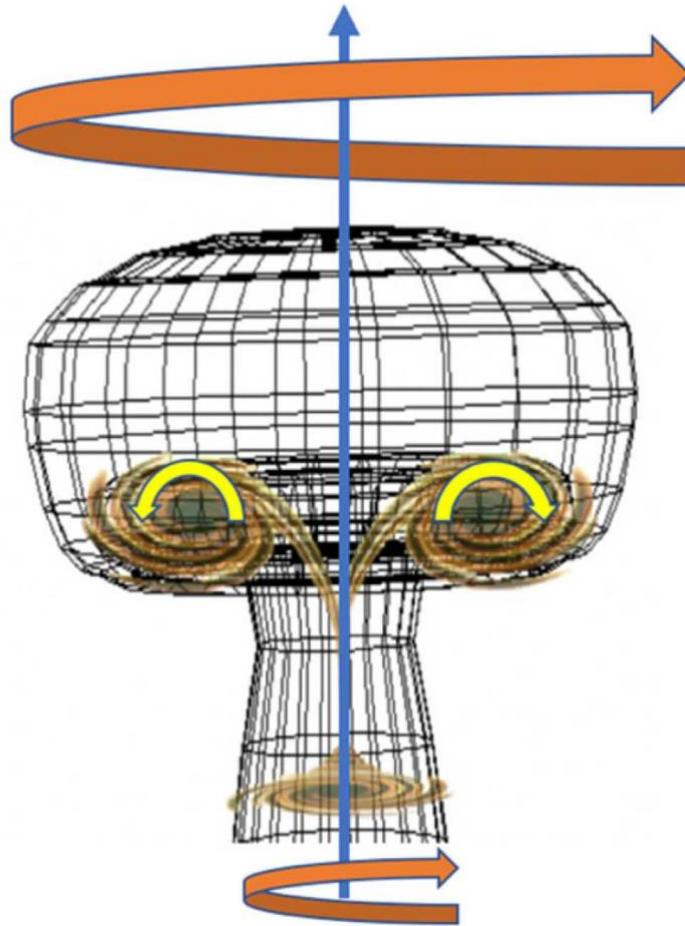
In meccanica quantistica, lo spin è una proprietà fondamentale delle particelle che possono essere rappresentate da un vettore. La lunghezza di questo vettore di spin è misurata in unità della costante di Planck ridotta, indicata come  $\hbar$ . Per i quark, una misura della componente del vettore di spin lungo qualsiasi asse può produrre solo due valori possibili:  $+\hbar/2$  o  $-\hbar/2$ . Questa quantizzazione dei valori di spin è il motivo per cui i quark sono classificati come particelle di spin  $-1/2$ . Poiché il segno indica la direzione, tendiamo a chiamarli "spin-up" e "spin-down".

Per risolvere la crisi dello spin del protone, la teoria del protone a forma di fungo postula che la composizione interna del protone sia asimmetrica, con regioni che assomigliano al cappuccio e allo stelo di un fungo. Queste regioni distinte contribuiscono in modo diverso allo spin complessivo del protone, offrendo una potenziale soluzione al problema dello spin mancante.

Secondo la teoria dei vortici un elettrone, una particella elementare, ha uno spin di  $1/2$ , che riflette il fatto che il vortice centrale dell'elettrone deve subire due rotazioni complete (720 gradi) per tornare al suo stato originale [25].

La stessa cosa avviene con i quark. Al fine di mantenere una rotazione stabile, il vortice dovrebbe completare  $2\pi r$ , 360 gradi, il che consente il tempo minimo necessario per esistere  $t = 2\pi r/c$ .

I due quark up ruotano in direzioni opposte, in senso orario e antiorario, sugli assi y e x. Mentre il quark d ha un senso orario. Rotazione sugli assi z e x. Oltre agli spin intrinseci dei quark up, essi ruotano nella stessa direzione di rotazione del quark d creando un ulteriore momento angolare dei due quark up e dei loro bracci a spirale (gluoni) (**Figura 5**).



**Figura 5.** Questo diagramma illustra l'origine geometrica e dinamica proposta dello spin del protone secondo il modello basato sul vortice. I due quark up mostrano orientamenti di spin intrinseci opposti: uno con spin  $+1/2\hbar$  (in senso orario, freccia gialla) e l'altro con spin  $-1/2\hbar$  (in senso antiorario, freccia gialla). Il quark down (freccia arancione inferiore) contribuisce con uno spin di  $+1/2\hbar$  attraverso la propria rotazione del vortice in senso orario. Oltre ai loro spin intrinseci, i due quark up ruotano collettivamente attorno all'asse del quark down. Questo moto rotatorio rappresenta il momento angolare trasportato dai gluoni, che mediano la forza forte e legano i quark. Questo contributo è illustrato dalla freccia arancione superiore e corrisponde alla componente di spin dei gluoni. Complessivamente, lo spin totale del protone emerge dalla somma degli spin intrinseci dei quark e del momento angolare orbitale mediato dai gluoni, offrendo una risoluzione fisicamente coerente al puzzle dello spin del protone.

Il tempo necessario ad ogni quark per completare una rotazione completa del vortice è dato da:

$$t = 2\pi r/c ,$$

dove  $r$  è il raggio di rotazione e  $c$  è la velocità della luce. Se il raggio di rotazione dei quark up e delle spirali gluoniche ad essi associate è approssimativamente la metà del raggio del protone (*i.e.*,  $r_q \approx 0.435 \times 10^{-15} \text{ m}$ ), allora il tempo richiesto per una rotazione completa attorno a un quark up è approssimativamente:

$$t_q \approx 8.81 \times 10^{-24} \text{ s}$$

$$t_q \approx 8.81 \times 10^{-24} \text{ s}$$

Al contrario, assumendo un raggio del protone di  $r_p \approx 0.87 \times 10^{-15} \text{ m}$ , il tempo richiesto per una rotazione completa dell'intero protone è:

$$t_p \approx 1.76 \times 10^{-23} \text{ s}$$

Ciò significa che durante ogni rotazione completa del protone, i vortici interni del quark up eseguono circa due cicli completi. Questi cicli interni contribuiscono con un ulteriore momento angolare.

In questo modello, lo spin totale del protone emerge da quattro contributi distinti:

- 1)  $+1/2\hbar$ —Rotazione intrinseca in senso orario di un quark up (freccia gialla).
- 2)  $-1/2\hbar$ —Spin intrinseco in senso antiorario del secondo quark up (freccia gialla).
- 3)  $+1/2\hbar$ —Rotazione intrinseca in senso orario del quark down (freccia arancione inferiore).
- 4)  $+1/2\hbar$ —Momento angolare collettivo di entrambi i quark up che ruotano attorno all'asse del quark down (freccia arancione superiore), interpretato come il momento angolare trasportato dai gluoni.

La quarta componente, spesso non considerata nelle tradizionali sommatorie di spin dei quark, rappresenta lo spin dei gluoni o, più precisamente, il momento angolare orbitale derivante dall'accoppiamento mediato dai gluoni tra i quark. Le traiettorie a forma di spirale dei gluoni agiscono come filamenti di legame, aggiungendo un movimento rotatorio coerente attorno all'asse centrale del vortice del protone.

I dati sperimentali (EMC, COMPASS, RHIC) confermano che solo  $\sim 30\%$  dello spin del protone deriva dallo spin intrinseco del quark. Questo modello basato su vortici si allinea con i risultati della QCD attribuendo:

- $\sim 30\%$  allo spin intrinseco del quark.
- $\sim 30\% \sim 40\%$  al momento angolare orbitale dal moto rotatorio dei quark (specialmente i quark up attorno al quark d).
- Il resto del momento angolare dei gluoni, qui rappresentato come la co-rotazione a spirale dei quark mediata dai gluoni.

Questa immagine composita risolve la crisi dello spin del protone integrando il momento angolare intrinseco, orbitale e gluone in un modello geometrico e dinamico unificato. La struttura interna a forma di fungo fornisce sia l'asimmetria che la topologia rotazionale necessarie per spiegare come il protone, una particella di spin-1/2, esibisca una struttura della momento angolare interno così ricca.

## 12. Conclusioni

---

La struttura interna del protone, un tempo ritenuta semplice e sferica, rivela una composizione molto più intricata e dinamica. L'introduzione della teoria del vortice di quark e del modello a fungo fornisce un quadro trasformativo che affronta le sfide critiche della moderna fisica delle particelle, vale a dire, la crisi di spin del protone, il puzzle del raggio del protone e, potenzialmente, il puzzle della massa del protone, la cui risoluzione completa sarà presentata in un prossimo articolo.

Modellando i quark come vortici stabili all'interno di un vuoto superfluido privo di attrito e riconcettualizzando i gluoni come bracci a spirale di questi vortici, la teoria spiega naturalmente lo spin del protone, la sua geometria interna asimmetrica e la distribuzione della carica. La struttura a forma di fungo, risultante dall'allineamento rotazionale dei due quark up attorno all'asse del quark down, introduce una base topologica e dinamica per comprendere il momento angolare interno e la sua manifestazione come spin osservato.

Inoltre, questo modello interpreta il contributo dei gluoni non solo come scambio di campo, ma come il momento angolare orbitale rotazionale, parte integrante delle proprietà osservate del protone. In questo contesto, la dinamica dei gluoni è vista come un comportamento intrinseco del vortice piuttosto che come mediatori esterni, offrendo una spiegazione più unificata del confinamento, dello spin e della generazione di massa.

Sebbene la teoria del vortice di quark affronti qualitativamente il puzzle della massa del protone attribuendo la massa all'energia rotazionale confinata dei vortici, il suo formalismo quantitativo sarà sviluppato in dettaglio in una futura pubblicazione. Lì, esploreremo come la curvatura del vortice, la resistenza e la tensione del superfluido contribuiscono alla massa effettiva osservata nei nucleoni.

Per far progredire questo modello, è necessario condurre ulteriori ricerche per:

- Sviluppare il formalismo matematico per collegare la curvatura del vortice e la resistenza del superfluido con le proprietà osservabili del protone.
- Eseguire simulazioni numeriche per testare le previsioni rispetto alla QCD su reticolo e ai dati di scattering.
- Condurre la convalida sperimentale attraverso la tomografia protonica, gli osservabili di polarizzazione e gli studi sull'idrogeno muonico.
- Estendere il quadro per descrivere l'instabilità dei mesoni, il legame nucleare e i sistemi multiquark.
- Esplorare la connessione tra la struttura del vuoto, la quantizzazione dell'energia e le teorie di unificazione, collegando il comportamento del vortice alle costanti cosmologiche e ai fenomeni gravitazionali.

In sintesi, la teoria del vortice di quark e il modello a fungo forniscono una visione ricca e basata sulla geometria della struttura subatomica, in grado di riconciliare le discrepanze di spin, raggio di carica e potenzialmente massa. Man mano che gli strumenti teorici e la precisione sperimentale si evolvono, questi modelli possono fungere da ponte tra la QCD e

una comprensione più intuitiva e unificata della materia e del vuoto, segnando un nuovo capitolo nella fisica del protone e oltre.

## Conflitti di interessi

L'autore dichiara di non avere conflitti di interessi inerenti la pubblicazione di questo articolo

## Riferimenti bibliografici

- [1] Gell-Mann, M. (1964) A Schematic Model of Baryons and Mesons. *Physics Letters*, 8, 214-215.  
[https://doi.org/10.1016/s0031-9163\(64\)92001-3](https://doi.org/10.1016/s0031-9163(64)92001-3)
- [2] Zweig, G. (1964) An SU (3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking. CERN Report No. 8419/TH.412.
- [3] Feynman, R.P. (1972) Photon-Hadron Interactions. W. A. Benjamin.
- [4] Ellis, J. and Stirling, W.J. (1996) Jets in High-Energy Hadronic Collisions. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 46, 439-475.
- [5] Friedman, J.I., Kendall, H.W. and Taylor, R.E. (1991) Deep Inelastic Scattering: Acknowledging the Contributions of Electrons and Neutrinos to Probing the Nucleon Structure. *Reviews of Modern Physics*, 63, 573-597.
- [6] Ashman, J., Badelek, B., Baum, G., Beaufays, J., Bee, C.P., Benchouk, C., *et al.* (1988) A Measurement of the Spin Asymmetry and Determination of the Structure Function G1 in Deep Inelastic Muon-Proton Scattering. *Physics Letters B*, 206, 364-370.  
[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(88\)91523-7](https://doi.org/10.1016/0370-2693(88)91523-7)
- [7] Pohl, R., Antognini, A., Nez, F., Amaro, F.D., Biraben, F., Cardoso, J.M.R., *et al.* (2010) The Size of the Proton. *Nature*, 466, 213-216.  
<https://doi.org/10.1038/nature09250>
- [8] Butto, N. (2024) Unraveling the Quantum Web: The Vortex Theory of Mass and Matter Formation. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 10, 1195-1225.  
<https://doi.org/10.4236/jhepgc.2024.103072>
- [9] Butto, N. (2020) Electron Shape and Structure: A New Vortex Theory. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 6, 340-352.  
<https://doi.org/10.4236/jhepgc.2020.63027>
- [10] Butto, N. (2024) A New Theory Exploring the Internal Structure of Quarks. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 10, 1713-1733.  
<https://doi.org/10.4236/jhepgc.2024.104097>
- [11] Peskin, M.E. and Schroeder, D.V. (1995) An Introduction to Quantum Field Theory. Addison-Wesley.
- [12] Butto, N. (2021) The Origin and Nature of the Planck Constant. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 7, 324-332.  
<https://doi.org/10.4236/jhepgc.2021.71016>
- [13] Butto, N. (2020) New Mechanism and Analytical Formula for Understanding the Gravity Constant G. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 6, 357-367.
- [14] Sirunyan, A.M., Tumasyan, A., Adam, W., *et al.* (2020) Determination of the Strong Coupling Constant  $\alpha_s(m_z)$  from Measurements of Inclusive W<sup>±</sup> and Z Boson Production Cross-Sections in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2020, Article

18.

[https://doi.org/10.1007/jhep06\(2020\)018](https://doi.org/10.1007/jhep06(2020)018)

- [15] Prat, J., Hogan, C., Chang, C. and Frieman, J. (2021) Vacuum Energy Density Measured from Cosmological Data. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2022, Article 15.  
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/06/015>
- [16] Mohr, P.J., Taylor, B.N. and Newell, D.B. (2012) CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2010. *Reviews of Modern Physics*, 84, 1527-1605.  
<https://doi.org/10.1103/revmodphys.84.1527>
- [17] Gabrielse, G. (2013) The Standard Model's Greatest Triumph. *Physics Today*, 66, 64-65.  
<https://doi.org/10.1063/pt.3.2223>
- [18] Bernauer, J.C. and Pohl, R. (2014) The Proton Radius Problem. *Scientific American*, 310, 32-39.  
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican0214-32>
- [19] ATLAS Collaboration (2023) A Precise Determination of the Strong-Coupling Constant from the Recoil of Z Bosons with the ATLAS experiment at  $\sqrt{s} = 8$  TeV.
- [20] Sick, I. and Trautmann, D. (2014) Proton Root-Mean-Square Radii and Electron Scattering. *Physical Review C*, 89, Article 012201.  
<https://doi.org/10.1103/physrevc.89.012201>
- [21] Bali, G.S. (2000) QCD Forces and Heavy Quark Bound States. *Physics Reports*, 343, 1-136.  
[https://doi.org/10.1016/s0370-1573\(00\)00079-x](https://doi.org/10.1016/s0370-1573(00)00079-x)
- [22] Chakrabarti, D., Mondal, C. and Mukherjee, A. (2015) Gravitational Form Factors and Transverse Spin Sum Rule in a Light Front Quark-Diquark Model in AdS/QCD. *Physical Review D*, 91, Article 114026.  
<https://doi.org/10.1103/physrevd.91.114026>
- [23] Khalek, R.A., Bailey, S., Gao, J., Harland-Lang, L. and Rojo, J. (2019) Probing Proton Structure at the Large Hadron Electron Collider. *SciPost Physics*, 7, Article 51.  
<https://doi.org/10.21468/scipostphys.7.4.051>
- [24] Bussey, P.J. (2016) ATLAS Measurements Sensitive to the Proton Structure. *EPJ Web of Conferences*, 120, Article 08002.  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201612008002>
- [25] Butto, N. (2021) A New Theory for the Essence and Origin of Electron Spin. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 7, 1459-1471.  
<https://doi.org/10.4236/jhepgc.2021.74088>