

L'enigma dello spin del nucleone

Franco Bradamante

Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Trieste e
Sezione INFN di Trieste

Enzo De Sanctis

Laboratori Nazionali di Frascati

Lo spin delle particelle, scoperto 75 anni fa, gioca un ruolo fondamentale nella nostra comprensione della struttura di atomi e nuclei. L'elettrone si comporta come un punto materiale mentre protone e neutrone sono sistemi complessi ancora non completamente conosciuti e si comportano come uno spumeggiante ed agitato mare di particelle virtuali - i quark e i gluoni - in continua creazione e annichilazione. Come in questo caos si formi lo spin dei nucleoni è ancora un enigma.

La seconda metà del secolo XX ha visto una straordinaria crescita del numero delle cosiddette particelle elementari, ed in parallelo un'evoluzione profonda dei concetti che stanno alla base della loro classificazione e della descrizione delle loro interazioni. Ciononostante una posizione di tutto rilievo è ancora occupata dalle particelle che sono i "costituenti" della materia che ci circonda: l'elettrone, il protone, ed il partner neutro di quest'ultimo, il neutrone¹.

Essendo dotati di massa ed avendo dimensioni estremamente ridotte², i nucleoni sono una realizzazione abbastanza fedele della nozione classica di punto materiale. Essi inoltre possiedono un'altra proprietà molto particolare: lo *spin* o "momento angolare innato". Questo è una proprietà intrinseca che insieme alla massa ed alla carica elettrica, definisce i segni particolari da scrivere nella "carta d'identità" della particella.

Lo spin è un puro concetto quantistico difficile da visualizzare. In un modello classico spesso usato, si pensa che esso derivi da una rotazione della particella intorno ad un suo asse. Questa immagine classica della pallina rotante è molto comoda, ma del tutto inadeguata a descrivere correttamente lo spin; essa deve essere integrata dalla considerazione che nel mondo microscopico è possibile solamente una direzione per l'asse di rotazione. Lo spin, inoltre, può assumere soltanto valori interi o seminteri di una grandezza fondamentale, il cosiddetto *quanto di azione di Plank*. In questa unità, elettroni e nucleoni hanno spin 1/2 e possono presentarsi in natura in due stati possibili, corrispondenti alle due

¹ Come è noto, gli atomi sono formati da nuclei, costituiti da protoni e neutroni, genericamente chiamati *nucleoni*, intorno ai quali orbitano gli elettroni.

² I nucleoni hanno dimensioni dell'ordine di 10^{-13} cm. A questa grandezza è stato dato il nome di 1 fermi in onore di Enrico Fermi, premio Nobel per la fisica nel 1938.

possibili orientazioni che lo spin può assumere in un campo magnetico esterno. Questa proprietà ha conseguenze profonde in tutti i processi fisici. Lo spin dell'elettrone determina la distribuzione degli elettroni negli orbitali atomici e quindi gioca una funzione preminente nei processi chimici; lo spin del protone e del neutrone svolge un ruolo essenziale nella struttura dei nuclei.

L'importanza dello spin può essere intuita se si osserva che la teoria sviluppata per descrivere la dinamica delle particelle dotate di spin, utilizzando la meccanica quantistica e la teoria della relatività, è sfociata nella scoperta di una nuova simmetria nella natura, la *simmetria materia-antimateria*. Questo è stato il grande merito di P.A.M. Dirac, che nel 1928, soltanto tre anni dopo la scoperta dello spin dell'elettrone, scrisse la celebre equazione che porta il suo nome, che descrive correttamente tutte le proprietà "osservabili" di una particella con spin $1/2$. La conferma sperimentale della validità delle previsioni di Dirac venne nel 1932 con la scoperta dell'anti-elettrone, meglio noto come positrone. La teoria di Dirac e la sua riformulazione in termini della cosiddetta *teoria di campo quantizzato* sono oggi universalmente accettate nella fisica delle particelle e, nel caso dei fenomeni elettromagnetici, permettono di descrivere tutti i fenomeni osservati con una precisione assolutamente stupefacente.

Un'altra prova della importanza dello spin è che l'equazione di Dirac fornisce anche un criterio per decidere se una particella è *elementare*. Se la particella ha carica elettrica la teoria di Dirac predice che essa abbia un momento magnetico, direttamente proporzionale alla sua carica ed inversamente proporzionale alla sua massa. Tale momento magnetico può essere misurato dall'interazione della particella in un campo magnetico esterno: nel caso dell'elettrone l'accordo con la previsione della teoria è perfetto. Il fatto stupefacente è che non viene ipotizzata alcuna dimensione per la particella: il momento magnetico previsto da Dirac si riferisce ad una particella rigorosamente priva di dimensioni, il "punto materiale" della fisica classica. Questo aspetto della teoria di Dirac è sicuramente uno dei più affascinanti e la sua realizzazione in natura è una delle scoperte più importanti della fisica moderna.

Al contrario degli elettroni, i nucleoni, pur essendo particelle di spin $1/2$ e pur presentando la stessa simmetria materia-antimateria³, non sono particelle di Dirac, nel senso che il loro momento magnetico non è quello previsto dalla teoria, bensì circa tre volte più grande nel caso del protone e due volte più grande, ma con segno opposto, nel caso del neutrone. I nucleoni pertanto non sono particelle "elementari", cioè puntiformi, e devono essere costituiti da altre particelle. Ciò è stato confermato da esperimenti effettuati nel corso degli ultimi 80 anni che hanno mostrato che il nucleone è un sistema complesso e ancora non completamente conosciuto, costituito da uno spumeggiante ed agitato mare di particelle "virtuali" in continua creazione e annichilazione.

³ L'antiprotone è stato scoperto nel 1955 da quattro fisici tra cui Emilio Segré, premio Nobel per la fisica nel 1959. Alla scoperta dell'antiprotone è subito seguita quella dell'antineutrone grazie al contributo di Oreste Piccioni.

L'evoluzione delle nostre conoscenze sulla struttura del nucleone è rappresentata in Fig. 1. In una "fotografia" a bassa risoluzione, come quella scattata nel 1919 da E. Rutherford effettuando la prima reazione nucleare artificiale, il protone appare come una palla del diametro di circa 2 fermi, con carica elettrica⁴ pari a +1 e spin 1/2. Un significativo passo in avanti si verificò negli anni '60 con la formulazione del *modello a quark*, in base al quale il protone e il neutrone sono particelle composte, formate da tre quark di due tipi, oggi detti *quark di valenza*, il quark *up* e il quark *down*. Il protone è costituito da due quark up e un quark down, il neutrone da un quark up e due quark down⁵.

Negli anni '70 è stata sviluppata la *cromodinamica quantistica*, la teoria che descrive i quark e le loro interazioni: essa ci dice che i quark possiedono una *carica di colore* che è la sorgente della forza che li tiene insieme mediante lo scambio di altre particelle chiamate *gluoni*. Anche questo elegante modello di tre palline rigide (i quark di valenza) collegate da molle (i gluoni) è ben presto apparso inadeguato a descrivere il nucleone. Da "fotografie" di risoluzione ancora migliore è apparso che i gluoni scambiati tra i quark di valenza si dividono spontaneamente in altri gluoni o coppie quark-antiquark, creando un gran numero di particelle evanescenti che formano il cosiddetto *mare di quark e gluoni*. La conoscenza delle proprietà di questo mare è essenziale per descrivere la massa, la struttura e lo spin del nucleone, e le sue interazioni con altre particelle.

Nel modello a tre quark, si pensava di poter derivare tutte le proprietà "statiche" dei nucleoni (massa, carica elettrica, spin e momento magnetico) ipotizzando che i quark fossero particelle elementari, cioè particelle di Dirac, con spin 1/2 e massa circa 1/3 della massa dei nucleoni. Per esempio la carica elettrica di un protone è la somma delle cariche frazionarie dei quark: $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$. Analogamente si procede per il calcolo del suo spin: gli spin di due quark di valenza sono orientati in direzione opposta e quindi si elidono e lo spin del terzo quark determina completamente lo spin risultante del nucleone. Inoltre i valori di massa e carica elettrica dei quark permettono di calcolare con stupefacente precisione i momenti magnetici dei nucleoni.

Nel 1987 questa semplice descrizione è stata messa in dubbio dai risultati di una misura, effettuata nel laboratorio europeo CERN di Ginevra dalla *European Muon Collaboration* (EMC), che ha mostrato che il contributo dei quark è soltanto una piccola frazione (inferiore al 30%) dello spin del protone. La comunità

⁴ Il protone e l'elettrone hanno carica elettrica esattamente uguale e opposta, pari ad una unità di carica elementare.

⁵ Complessivamente sono stati identificati sei tipi di quark che si differenziano per una qualità chiamata fantasiosamente "sapore". In ordine di massa crescente sono i quark *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom*, *top* indicati rispettivamente con le lettere *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, *t*. Essi hanno carica elettrica pari a una frazione esatta della carica elementare: i quark *d*, *s*, *b* hanno carica -1/3, mentre i quark *u*, *c*, *t* hanno carica +2/3.

scientifica si è trovata improvvisamente di fronte a un rompicapo, usualmente indicato col termine "crisi dello spin", che sembrò mettere in discussione il *modello standard*, che è la teoria più accreditata delle particelle elementari e delle loro interazioni. Altri esperimenti, effettuati in seguito al CERN dalla *Spin Muon Collaboration* (SMC), nel laboratorio SLAC in California e dalla collaborazione HERMES nel laboratorio DESY di Amburgo, hanno confermato questo risultato e hanno mostrato che anche nel caso dello spin del neutrone il contributo dei quark è troppo piccolo. Per risolvere questo problema sono state avanzate due ipotesi: parte del contributo mancante dello spin del nucleone potrebbe venire dai gluoni e parte dal momento angolare orbitale dei quark e dei gluoni (vedi Fig. 2). Sebbene il panico generato dalla "crisi dello spin" al suo apparire sia oggi in gran parte svanito grazie a queste possibili soluzioni, dal punto di vista sperimentale l'enigma della struttura di spin del nucleone non è ancora risolto: occorre infatti verificare queste ipotesi e misurare il valore dei vari contributi. Dal punto di vista della teoria, è necessario capire come sia possibile conciliare l'immagine complessa del nucleone che risulta dalle "fotografie" ad alta risoluzione con il semplice modello statico basato su tre quark di valenza che caratterizzano le proprietà delle particelle.

Lo studio della struttura del nucleone ha posto gli scienziati di fronte ad un problema del tutto nuovo: i quark ed i gluoni non possono essere isolati da altri quark e gluoni e quindi non possono essere osservati nel loro stato fondamentale. Il nucleone si comporta pertanto come una palla opaca il cui interno è inesplorabile in modo diretto. Per studiare l'interno di questa palla, si esegue un "esperimento di urto" sparando molti proiettili attraverso di essa. Elettroni e muoni (una sorta di elettroni con massa 200 volte più grande) sono eccellenti proiettili per questi esperimenti perché sono puntiformi e privi di struttura. Se i proiettili attraversano il bersaglio senza essere deviati, probabilmente all'interno non c'è niente, se invece si scopre che alcuni proiettili vengono deviati vuol dire che all'interno c'è qualcosa di rigido. Il numero di proiettili deviati dà una misura delle dimensioni della particella bersaglio, mentre gli angoli ai quali i proiettili rimbalzano danno informazioni sulla sua forma. Misurando con precisione la deflessione e l'energia persa dai proiettili nelle collisioni si può costruire un quadro della distribuzione globale di carica elettrica e del momento magnetico del nucleone, della sua deformabilità in presenza di campi elettrici o magnetici esterni e di come le cariche elettriche trasportate dai quark sono distribuite al suo interno.

Per "mettere a fuoco" regioni sempre più piccole del bersaglio si studiano gli urti prodotti da proiettili sempre più energetici ed il nostro progresso verso l'estremamente piccolo è stato scandito dalla realizzazione di acceleratori di particelle di energia sempre maggiore. L'analisi sperimentale della struttura di spin del nucleone richiede l'uso di proiettili e bersagli polarizzati, ossia costituiti da particelle i cui spin siano tutti allineati nella stessa direzione. In questo caso si sfrutta il fatto ben noto dall'esperienza quotidiana che il risultato di un urto tra due palle in rotazione dipende da come esse stanno ruotando. Come la traiettoria di una palla da biliardo può essere modificata da un tiro "ad effetto",

anche nell'urto tra un elettrone e un nucleone polarizzati la traiettoria del proiettile può essere influenzata dagli spin delle particelle coinvolte.

Elettroni e muoni polarizzati interagiscono soltanto con quark che possiedono una ben determinata direzione dello spin, precisamente con i quark che hanno lo spin allineato nel verso opposto. Dalle deflessioni dei proiettili si può stimare quanti quark nel bersaglio hanno spin diretto secondo quella particolare orientazione. Quando la polarizzazione del bersaglio o dei proiettili viene invertita, questi interagiscono con quark differenti (Fig. 3) e conseguentemente cambiano le distribuzioni dell'angolo di deflessione e dell'energia trasferita al bersaglio. Le misure eseguite con due opposte polarizzazioni del bersaglio o del proiettile rivelano la differenza tra i quark con spin parallelo e quelli con spin antiparallelo allo spin del nucleone. Inoltre i quark urtati sono estratti dal nucleone e formano altre particelle, che possono essere rivelate negli esperimenti. A seconda della direzione di polarizzazione dei quark nel nucleone bersaglio si ottengono distribuzioni diverse delle variabili di queste particelle. Il contributo dei vari sapori dei quark allo spin del nucleone può essere determinato identificando il tipo di particelle prodotte. Con altre misure si ottengono anche informazioni sul contributo del momento angolare orbitale dei quark e dei gluoni.

Il contributo dei gruppi italiani

I ricercatori dell'INFN hanno partecipato negli anni passati agli esperimenti EMC e SMC e contribuiscono in modo rilevante alle ricerche oggi condotte dalle collaborazioni HERMES e COMPASS rispettivamente presso il laboratorio DESY ad Amburgo ed il CERN a Ginevra.

L'esperimento HERMES (HERa MEasurement of nucleon Spin) ha preso dati con diversi bersagli e con diversa orientazione dello spin del bersaglio dal 1996 al 2005. L'esperimento ha studiato in un modo innovativo la diffusione elettrone-nucleone utilizzando il fascio di elettroni di 27 GeV circolanti nell'anello di accumulazione HERA. Questo è parzialmente polarizzato e attraversa 47 000 volte al secondo un cilindretto di 40 cm di lunghezza contenente un gas puro di atomi polarizzati di idrogeno, di deuterio o elio-3. L'uso di bersagli gassosi puri, ossia non contaminati dalla presenza di altri atomi non polarizzati, consente misure molto accurate. Lo spettrometro HERMES (Fig. 4) è costituito da un dipolo magnetico a grande accettazione angolare che consente di rivelare, insieme con l'elettrone diffuso, anche le altre particelle prodotte negli urti. L'analisi di queste particelle fornisce informazioni sul contributo allo spin dovuto ai vari sapori dei quark. HERMES è una collaborazione internazionale di 190 fisici provenienti da 31 Istituti. Nell'esperimento sono attivi gruppi dei Laboratori Nazionali di Frascati, delle Sezioni di Bari e di Ferrara e del Gruppo Collegato di Sanità.

COMPASS (COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) è un nuovo esperimento che è entrato in funzione al CERN nell'estate del 2002. L'acronimo, "bussola" in inglese, è stato scelto perché si spera di ottenere indicazioni sulla giusta direzione da seguire per svelare l'enigma dello spin del nucleone. La collaborazione internazionale comprende 200 fisici, di una trentina di istituti, tra cui le sezioni di Torino e di Trieste. L'esperimento utilizza il fascio di muoni polarizzati di 200 GeV del CERN ed un bersaglio di protoni polarizzati che, per le sue dimensioni, è unico al mondo. Per polarizzare i protoni del bersaglio è necessario tenerlo immerso in un campo magnetico molto intenso (2.5 Tesla) e a temperature prossime allo zero assoluto (0.05 K). L'apparato sperimentale, di cui si può vedere un'immagine "artistica" in Fig. 5, è un classico spettrometro magnetico a due stadi, posti uno dopo l'altro. Come mostrato dalla sagoma della persona in figura, lo spettrometro si sviluppa su una lunghezza di quasi 100 metri. L'esperimento ha preso dati con un bersaglio di deuterio polarizzato negli anni 2002, 2003 e 2004. Nel 2006 la presa dati riprenderà con deuterio polarizzato, per poi continuare con idrogeno polarizzato fino al 2010.

L'analisi dei dati raccolti da HERMES e da COMPASS è tutt'ora in corso, come pure l'interpretazione teorica dei risultati.

Le prospettive future

HERMES e COMPASS rappresentano il massimo impegno oggi in questa linea di ricerca. I risultati scientifici di questi esperimenti permetteranno di progredire notevolmente nella conoscenza del nucleone e ripagheranno ampiamente i ricercatori degli anni dedicati a questo lavoro e dei cospicui investimenti fatti. Essi tuttavia non permetteranno di risolvere completamente l'enigma della struttura di spin del nucleone. Le conoscenze teoriche odierne suggeriscono infatti che per una descrizione completa dei nucleoni è necessario determinare le cosiddette *funzioni di struttura generalizzate*. Per questo scopo occorre studiare processi molto rari che richiedono acceleratori di elettroni di alta energia e soprattutto di altissima "luminosità", circa 10 000 volte superiore a quella attuale. Progetti di acceleratori con le prestazioni richieste sono oggetto di studio dei fisici europei e americani. ELFE (Electron Laboratory For Europe) è la risposta della comunità scientifica europea all'esigenza di perseguire questa indagine nei prossimi venti anni con un acceleratore dedicato e unico al mondo. Il nuovo acceleratore potrebbe essere realizzato al CERN, utilizzando alcune sofisticate apparecchiature rese disponibili dalla chiusura del grande anello per elettroni e positroni LEP, oppure a DESY, utilizzando l'anello HERA come secondo stadio di un acceleratore lineare superconduttore di alta intensità. Se uno di questi progetti sarà realizzato, sarà possibile scattare nuove affascinanti "fotografie" per mettere a fuoco i dettagli dell'enigmatico spin del nucleone.

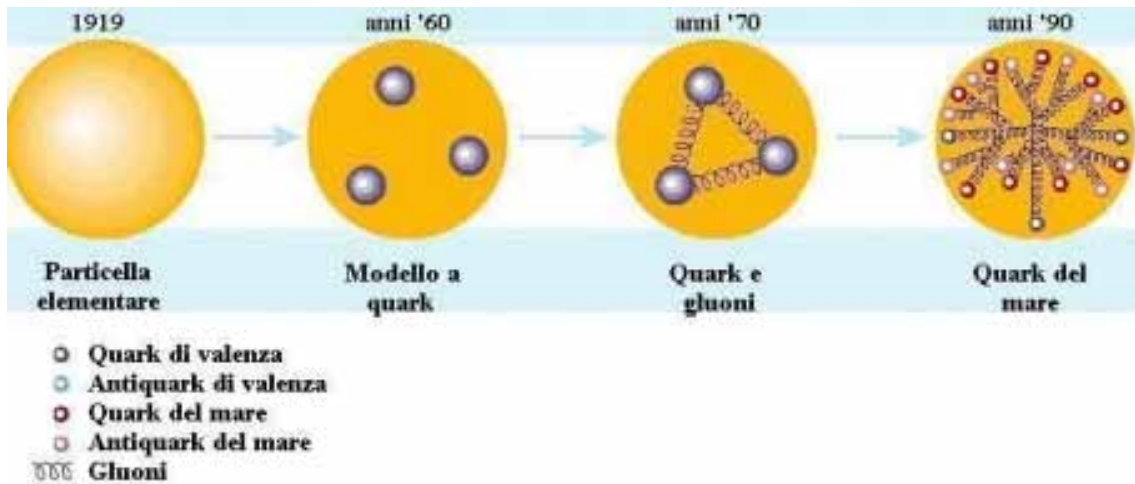


Fig. 1 Quattro istantanee del protone a diversa risoluzione, corrispondenti all'evoluzione della conoscenza della sua struttura negli ultimi 80 anni

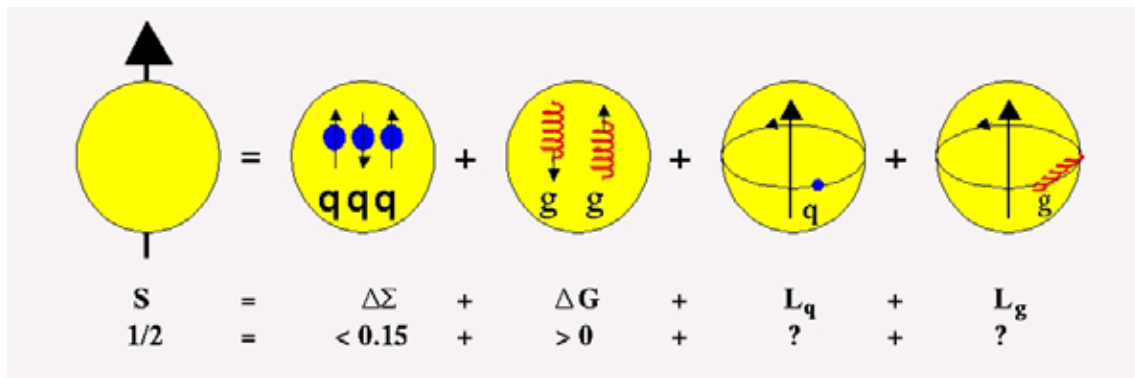


Fig. 2. I contributi dei costituenti elementari allo spin S del protone. Esperimenti effettuati al CERN, SLAC e DESY hanno mostrato un risultato inatteso: i quark e gli antiquark danno insieme un contributo $\Delta\Sigma$ inferiore al 30%. Previsioni teoriche basate sui più recenti risultati indicano che il contributo dei gluoni ΔG è grande e positivo. Se gli spin dei quark e dei gluoni insieme non sono in grado di rendere conto dello spin del nucleone, l'unica possibilità è l'esistenza di un moto orbitale dei quark e dei gluoni. Questi contributi (L_q e L_g) non sono ancora noti: gli esperimenti HERMES e COMPASS forniranno misure più dettagliate nei prossimi anni

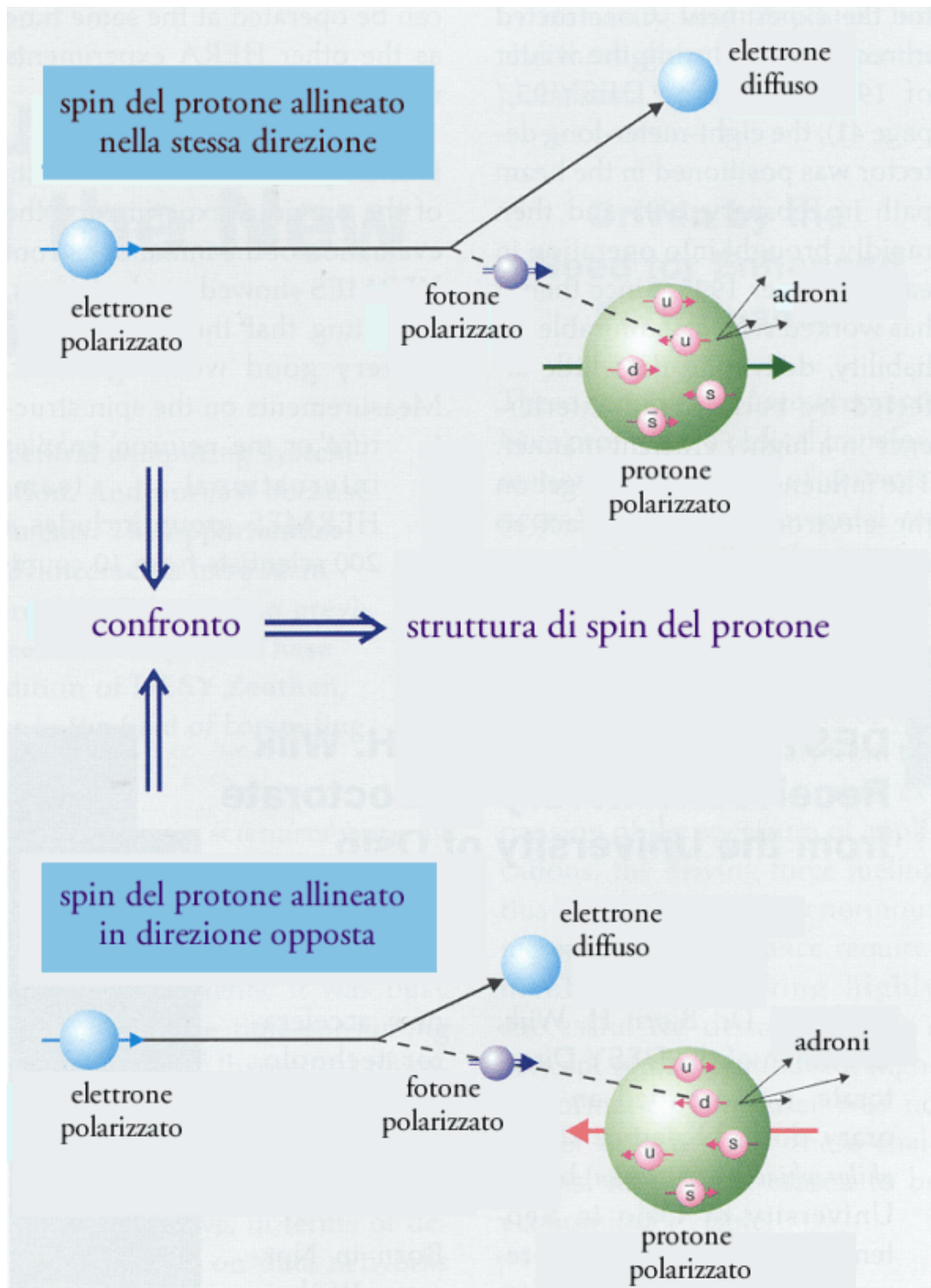


Fig. 3. Rappresentazione di un evento nell'esperimento HERMES: un elettrone con polarizzazione longitudinale urta un bersaglio di idrogeno gassoso i cui nuclei sono polarizzati longitudinalmente. L'elettrone emette un fotone polarizzato che viene assorbito da uno dei quark del protone. Questo assorbimento può avvenire solamente da parte di un quark con spin orientato in direzione opposta a quella del fotone. Dal confronto tra i risultati della misure effettuate con due opposte polarizzazioni del bersaglio si può determinare il contributo dello spin dei quark allo spin del protone



Fig. 4. Fotografia dello spettrometro HERMES installato sull'anello di accumulazione HERA. In alto a destra è visibile il tubo a vuoto all'interno del quale circola il fascio di elettroni polarizzati. Al centro sono visibili il bersaglio polarizzato e il dipolo magnetico (azzurro). A valle del dipolo sono visibili alcuni rivelatori di tracciamento e di identificazione delle particelle

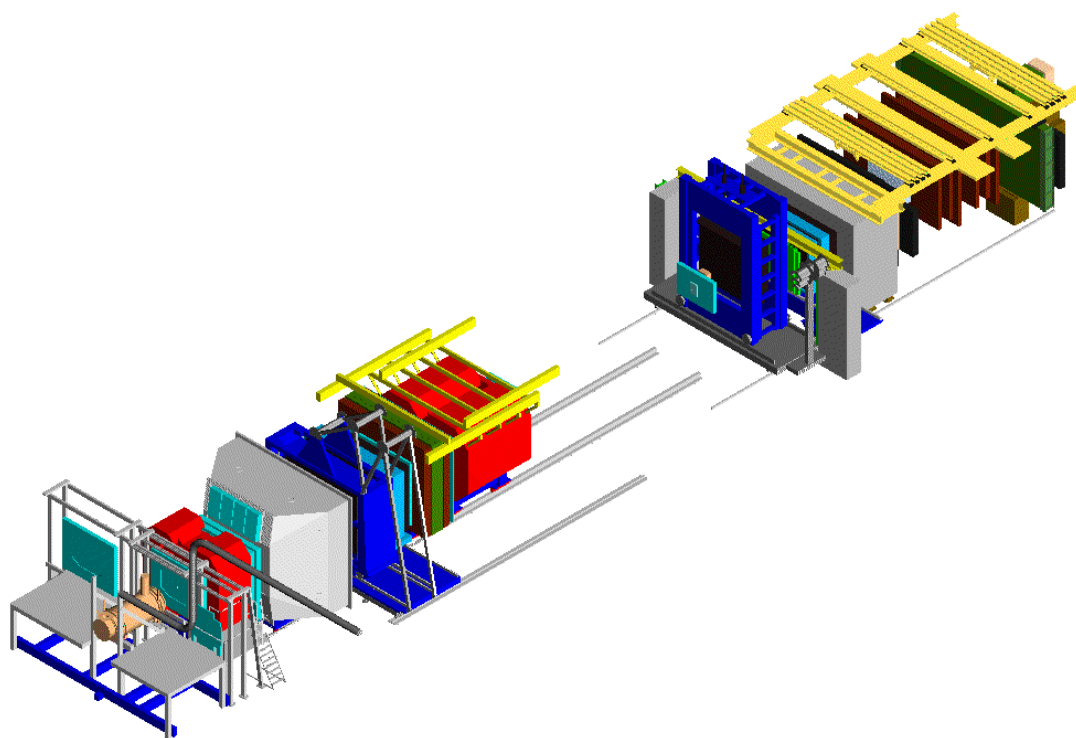


Fig. 5. Visione "artistica" dello spettrometro COMPASS, che si sviluppa su una lunghezza di quasi 100 metri