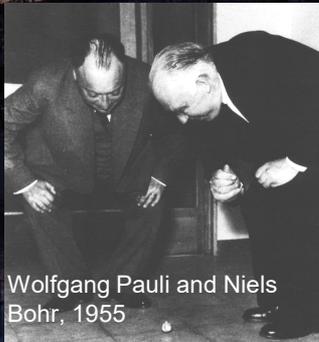


Alla ricerca dello spin del protone



Wolfgang Pauli and Niels
Bohr, 1955

Andrea Bressan
University of Trieste and INFN

Lo Spin

- Rappresenta una proprietà intrinseca (in particolare un momento angolare intrinseco) delle particelle elementari. Leptoni, quark ...
- Lo spin di una particella si «accoppia» allegramente con altri momenti angolari, sia intrinseci che orbitali, con effetti sorprendenti.

Nell'ambito delle interazioni forti pioni, spin 0, e mesoni ρ , spin 1, hanno lo stesso contenuto in quark ma i secondi hanno una massa 5 volte maggiore

- Allo spin delle particelle cariche è associato un momento di dipolo magnetico, ad esempio per l'elettrone

$$\vec{\mu}_e = -g\mu_B \frac{\vec{S}}{\hbar} \quad \text{con} \quad \mu_B = e \frac{\hbar}{2m_e} = 9.274009994(57) \times 10^{-24} \text{ J/T}$$

- Protone e neutrone (neutro) hanno un momento di dipolo magnetico anomalo, 2.79 e $-1.82 \mu_N$ rispettivamente, a causa della loro natura non elementare

Lo spin relativistico

- Lo spin 4-dimensionale, nel sistema a riposo della particella è un oggetto con componenti solo spaziali

$$s^\mu = (0, \vec{s})$$

- In un sistema di riferimento che si muove con velocità $\vec{\beta}$ compare una componente temporale

$$s'^\mu = \left(\gamma \vec{\beta} \cdot \vec{s}, \vec{s} + \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} (\vec{\beta} \cdot \vec{s}) \vec{\beta} \right)$$

- Non è la trasformazione di un 4-impulso, infatti si trasforma come un tensore (allo stesso modo del momento angolare) e questa è la rappresentazione della sua densità

$$s'^\mu = \frac{1}{2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} L_{\nu\rho} \beta_\sigma$$

Lo spin relativistico (non proprio univoco)

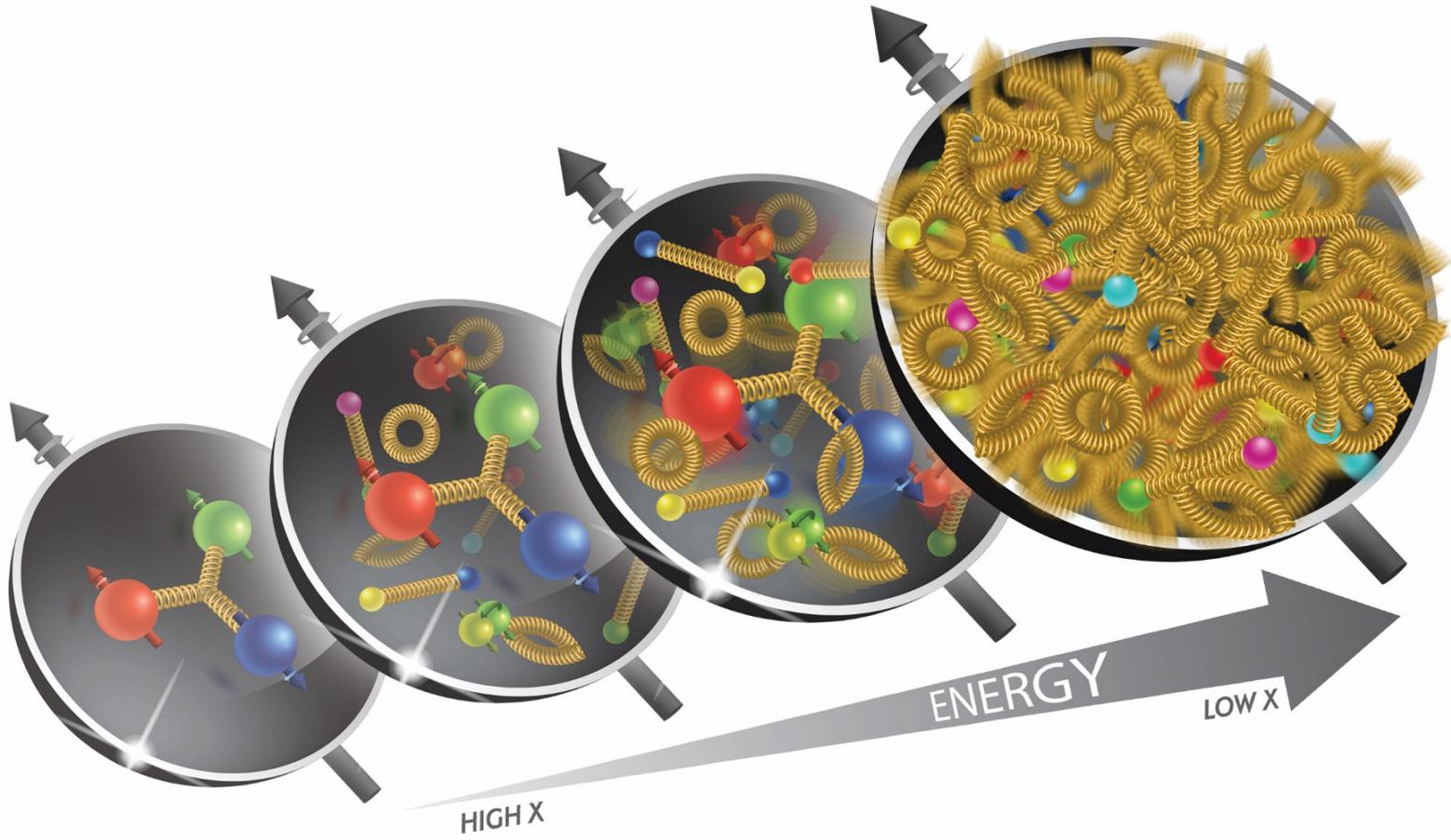
New J. Phys. **16** (2014) 043012

H Bauke *et al*

Table 1. Definitions and commutation properties of various relativistic spin operators.

Operator name	Definition	$[\hat{H}_0, \hat{S}]$ = 0?	$[\hat{S}_i, \hat{S}_j]$ = $i\epsilon_{i,j,k}\hat{S}_k$?	Eigenvalues = $\pm 1/2$?
Pauli [30–32]	$\hat{S}_P = \frac{1}{2}\hat{\Sigma}$	no	yes	yes
Foldy– Wouthuysen [33–37]	$\hat{S}_{FW} = \frac{1}{2}\hat{\Sigma} + \frac{i\beta}{2\hat{p}_0}\hat{p} \times \alpha - \frac{\hat{p} \times (\hat{\Sigma} \times \hat{p})}{2\hat{p}_0(\hat{p}_0 + m_0c)}$	yes	yes	yes
Czachor [38]	$\hat{S}_{Cz} = \frac{m_0^2c^2}{2\hat{p}_0^2}\hat{\Sigma} + \frac{im_0c\beta}{2\hat{p}_0^2}\hat{p} \times \alpha + \frac{\hat{p} \cdot \hat{\Sigma}}{2\hat{p}_0^2}\hat{p}$	yes	no	no
Frenkel [39–41]	$\hat{S}_F = \frac{1}{2}\hat{\Sigma} + \frac{i\beta}{2m_0c}\hat{p} \times \alpha$	yes	no	no
Chakrabarti [42–48]	$\hat{S}_{Ch} = \frac{1}{2}\hat{\Sigma} + \frac{i}{2m_0c}\alpha \times \hat{p} + \frac{\hat{p} \times (\hat{\Sigma} \times \hat{p})}{2m_0c(m_0c + \hat{p}_0)}$	no	yes	yes
Pryce [47, 49–52]	$\hat{S}_{Pr} = \frac{1}{2}\beta\hat{\Sigma} + \frac{1}{2}\hat{\Sigma} \cdot \hat{p}(1 - \beta)\frac{\hat{p}}{\hat{p}^2}$	yes	yes	yes
Fradkin–Good [46, 53]	$\hat{S}_{FG} = \frac{1}{2}\beta\hat{\Sigma} + \frac{1}{2}\hat{\Sigma} \cdot \hat{p}\left(\frac{\hat{H}_0}{c\hat{p}_0} - \beta\right)\frac{\hat{p}}{\hat{p}^2}$	yes	no	yes

La struttura di spin del protone



Italia all'avanguardia nell'Electron-Ion Collider

Il numero degli scienziati italiani che lavorano al progetto di questo nuovo collisore è secondo solo a quello degli statunitensi, e coinvolge una dozzina di università pubbliche e l'Istituto nazionale di fisica nucleare

Un risultato che alle Olimpiadi ci farebbe inorgogliare: secondi solo agli Stati Uniti. Questi sono i numeri del coinvolgimento italiano nell'impresa Electron-Ion Collider, descritta nell'articolo di Abhay Deshpande e Rikutaru Yoshida. Per ora l'Electron-Ion Collider, o EIC, è solo un progetto, ma raccoglie già una comunità di più di 850 scienziati, organizzati in un gruppo di lavoro, l'EIC User Group. L'Italia è presente con più di 80 ricercatori e docenti, afferenti a 12 atenei pubblici e all'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN), l'ente pubblico demandato a sostenere la ricerca italiana in fisica nucleare e delle particelle. Solo gli Stati Uniti hanno un numero di partecipanti superiore. L'EIC potrebbe diventare l'acceleratore di particelle più potente al mondo dopo il Large Hadron Collider del CERN di Ginevra. Sarebbe l'unico acceleratore con questa potenza ad avere la capacità di sondare con altissima precisione la materia nucleare in stati molto ricchi di informazione (in gergo «polarizzati», oppure in condizioni di «saturazione»). Inoltre potrebbe essere l'unico nuovo acceleratore di particelle costruito nel prossimo decennio, e sarà sicuramente il maggior progetto statunitense nel campo della fisica nucleare. L'Italia ha l'interesse, le competenze e la voglia di partecipare con entusiasmo a questa avventura.

Una massima priorità

L'idea di realizzare un collisore di elettroni e ioni per studiare la struttura interna di protoni e neutroni ha radici lontane. L'unico collisore protone-elettrone mai realizzato è stato l'Hadron-Elektron-Ringanlage (HERA), al Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) di Amburgo, che ha funzionato fino al 2007. Fin dalla fine degli anni novanta sono state avanzate proposte di «polarizzare» gli spin dei protoni circolanti, ovvero di orientarli in modo coerente. Tra il 2005 e il 2010 si è discusso senza successo di realizzare un anello di elettroni polarizzati all'interno del complesso della Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR), attualmente in costruzione a Darmstadt, in Germania. Questi auspici della comunità scientifica si stanno ora realizzando, speriamo, con l'EIC, grazie alla forte spinta statunitense e al supporto internazionale che è riuscita a raccogliere.

Negli anni scorsi il gruppo di lavoro ha formulato innanzitutto la proposta di realizzare il collisore, identificando gli obiettivi scientifici che ne giustificano la costruzione. E poi riuscito a convincere tutta la comunità dei fisici nucleari statunitensi, che ha riconosciuto l'EIC come «massima priorità» nel suo ultimo documento di programmazione strategica pluriennale, e la comunità scientifica più ampia, rappresentata dalle National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, che di recente hanno pubblicato una valutazione positiva sul progetto con lusinghieri commenti. Ora bisogna convincere il governo federale e il Congresso degli Stati Uniti a finanziare il progetto. Una prima decisione in merito è attesa nei prossimi mesi: sarà l'inizio concreto del progetto, con i primi importanti finanziamenti.

La costruzione dell'EIC dovrebbe iniziare entro i prossimi cinque anni, il funzionamento dovrebbe cominciare nel 2030 e proseguire per anni, aprendo nuove prospettive per un'intera generazione di giovani fisici.



Un Ingegnere del Brookhaven National Laboratory lavora alle LEReC, sezioni di raffreddamento per elettroni del Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC). La tecnologia delle LEReC potrebbe essere applicata all'Electron-Ion Collider.

I ricercatori italiani hanno dato e continueranno a dare contributi su molti fronti: innanzitutto, la definizione degli obiettivi generali, ben illustrati nell'articolo di Deshpande e Yoshida. Nel 2011 una dozzina di italiani hanno firmato il primo documento in cui è stato sviluppato il cosiddetto «Science Case» del collisore, cioè la definizione degli aspetti più importanti da investigare per giungere alla comprensione della struttura interna dei nuclei.

In pratica e in teoria

I ricercatori sperimentali porteranno la loro esperienza, fondamentale nel successo di esperimenti nei laboratori DESY in Germania, CERN in Svizzera, Jefferson Lab negli Stati Uniti. Le competenze che saranno inserite nel progetto sono relative sia alle complesse tecniche di analisi (software) necessarie in esperimenti del genere sia alla realizzazione di rivelatori con tecnologie all'avanguardia sviluppate in Italia. Il progetto EIC-NET, finanziato dall'INFN, raccoglie gruppi di fisici sperimentali a Torino, Padova, Bologna, Ferrara, Genova, Trieste, Roma, Frascati, Bari e Catania. Per Silvia Dalla Torre, dirigente di ricerca all'INFN, sezione di Trieste, e responsabile di EIC-NET, «il coinvolgimento dei fisici italiani che studiano la struttura del protone è una naturale continuazione di un convinto impegno scientifico. Molti di noi sono attivi in questo campo già da anni. Oggi la nostra partecipazione è formalizzata grazie al supporto dell'INFN. Sarà quindi possibile, per i fisici italiani, contribuire in maniera sostanziale a questo progetto di scoperta scientifica».

I ricercatori teorici italiani sono impegnati nello studio della distribuzione tridimensionale dei costituenti interni del protone (quark e gluoni). Da anni sono tra i pionieri a livello mondiale nella ricostruzione di queste mappe tridimensionali. Sono organizzati nel progetto National Initiative on PHysics of hAdrons (NINPHA) dell'INFN, coordinato da Mariaelena Boglione, professore associato all'Università di Torino, e il team comprende i gruppi di Torino, Cagliari, Genova, Roma, Perugia e Pavia. «L'EIC sarà letteralmente una miniera di informazioni, che ci aiuterà a comprendere alcuni tra i più affascinanti misteri della fisica subnucleare, come l'origine della massa e dello spin del protone», ha dichiarato Barbara Pasquini, professore associato all'Università di Pavia.

Nei prossimi anni proseguirà l'attività di ricerca e sviluppo sui rivelatori che verranno usati nell'EIC, mentre è in atto già da anni una proficua collaborazione tra sperimentali e teorici per ottimizzare l'analisi dei dati, testimoniata dalla partecipazione a progetti comuni di ricerca italiani e, soprattutto, europei. Oltre ad avere una fondamentale importanza per la comprensione dei costituenti della materia, l'EIC porterà a risultati utili anche per altri settori della fisica, e a ricadute tecnologiche e applicazioni in campi diversi, tra cui quello medico.

«L'Italia ha dato contributi rilevanti alla fisica nucleare negli Stati Uniti, fin dalla sua nascita per opera di Enrico Fermi. Il coinvolgimento in un grande progetto negli Stati Uniti sarà un'importante occasione per rafforzare la dimensione globale della ricerca scientifica italiana. L'INFN sarà in prima linea», ha detto Eugenio Nappi, vicepresidente dell'INFN.

Alessandro Bacchetta,
professore associato, Università degli Studi di Pavia e INFN - Pavia
Andrea Bressan,
professore associato, Università degli Studi di Trieste e INFN - Trieste,
vicepresidente dell'Institutional Board dell'EIC User Group
Marco Radici,
primo ricercatore INFN - Pavia, membro dello Steering Committee
e dell'Institutional Board dell'EIC User Group