

# le Scienze

Agosto 2019  
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

## Mediterraneo tropicale

Il riscaldamento globale favorisce l'arrivo di specie aliene, alterando habitat e biodiversità dei nostri mari



9 0 6 1 2  
POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003  
CONV. L. 46/2004 ART. 1, C. 1, DCB - ROMA  
RIVISTA MENSILE - NUMERO 612 - 1 AGOSTO 2019  
9 770035 808000

### Intelligenza artificiale

Possiamo insegnare alle macchine a essere creative?

### Fisica

Il mistero della massa di protoni e neutroni

### Neuroscienze

I meccanismi cerebrali dei comportamenti violenti



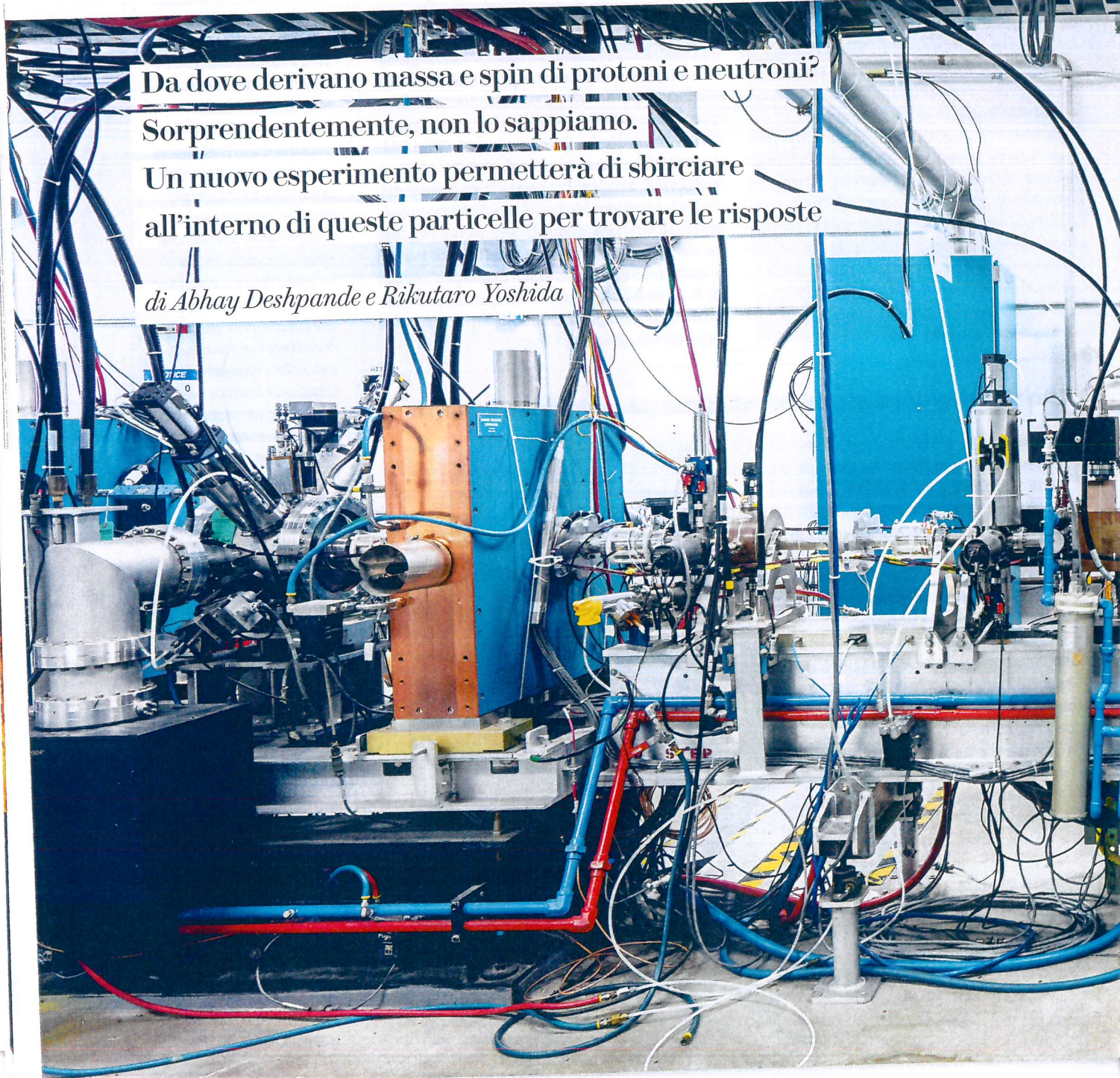
FISICA NUCLEARE

# Nelle profondità dell'atomo

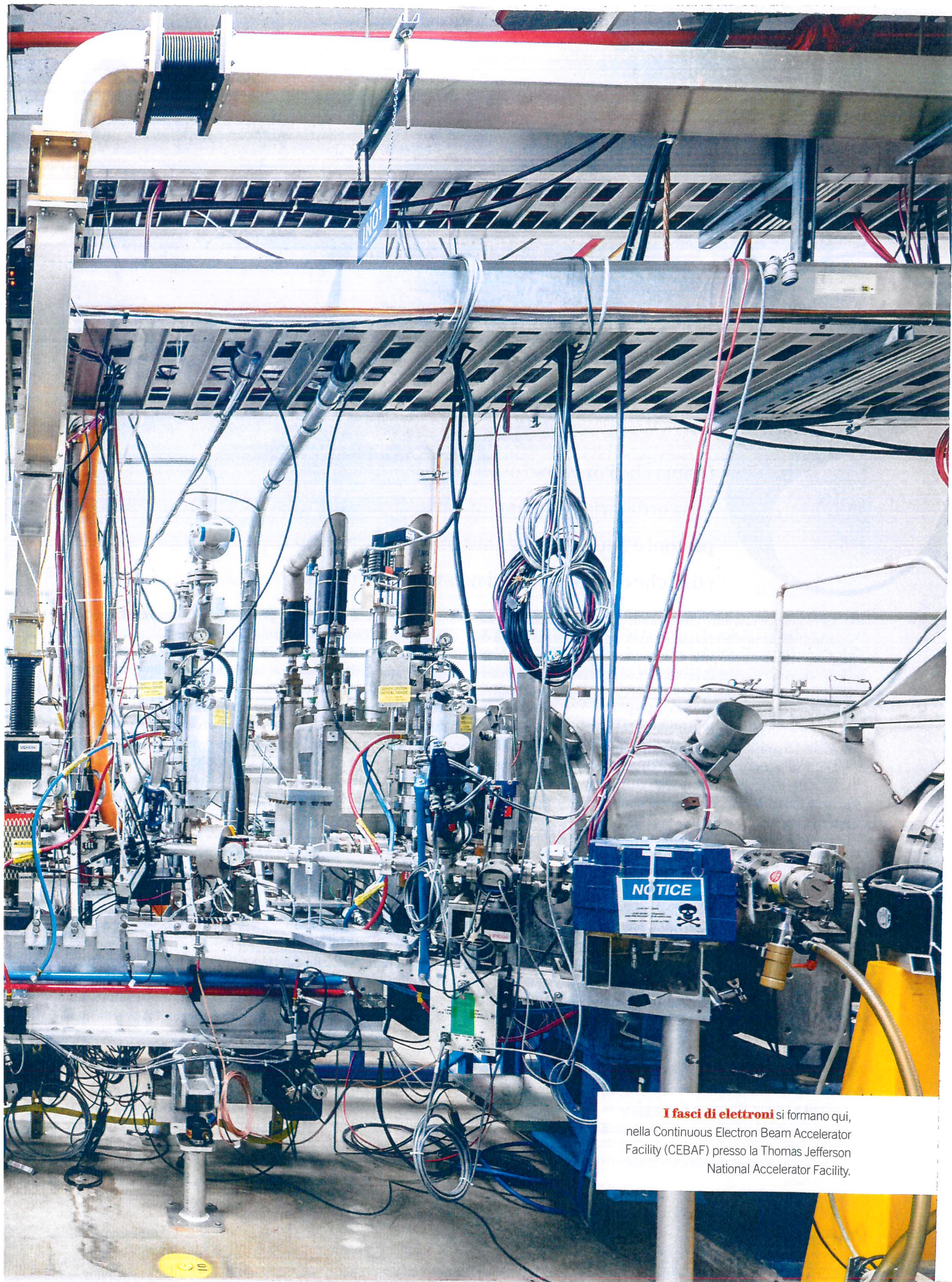
Da dove derivano massa e spin di protoni e neutroni?  
Sorprensivamente, non lo sappiamo.

Un nuovo esperimento permetterà di sbirciare  
all'interno di queste particelle per trovare le risposte

*di Abhay Deshpande e Rikutarō Yoshida*







**I fasci di elettroni** si formano qui, nella Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) presso la Thomas Jefferson National Accelerator Facility.



**Abhay Deshpande** è professore di fisica alla Stony Brook University e direttore e fondatore del Center for Frontiers in Nuclear Science, che ha come obiettivo lo sviluppo scientifico e la promozione dell'Electron-Ion Collider (EIC).



**Rikutarō Yoshida** è *principal investigator* alla Thomas Jefferson National Accelerator Facility. È anche direttore dell'EIC Center del laboratorio, che contribuisce a promuovere il programma scientifico del futuro esperimento.



# S

i stima che l'universo osservabile contenga circa  $10^{53}$  chilogrammi di materia ordinaria e la maggior parte di questa massa è formata da circa  $10^{80}$  protoni e neutroni (che, insieme agli elettroni, compongono gli atomi). Ma cos'è che dà ai protoni e ai neutroni la loro massa?

La risposta è tutt'altro che semplice. Protoni e neutroni sono costituiti da particelle chiamate quark e da particelle leganti dette gluoni. I gluoni sono privi di massa, mentre la somma delle masse dei quark all'interno di protoni e neutroni (detti collettivamente «nucleoni») costituisce circa il 2 per cento della massa totale dei nucleoni. Da dove viene il resto, allora?

E non è l'unico mistero di questi componenti atomici fondamentali. Lo spin dei nucleoni è altrettanto inspiegabile: non è derivabile in termini dello spin dei quark al loro interno. Oggi gli scienziati ritengono che spin, massa e altre proprietà dei nucleoni derivino dalle complesse interazioni tra quark e gluoni al loro interno, ma come questo accada di preciso ci sfugge. Attualmente la teoria non può dirci più di tanto, perché le interazioni di quark e gluoni sono descritte da una teoria, la cromodinamica quantistica (QCD), in cui è diabolicamente difficile svolgere i calcoli.

Per progredire ci servono nuovi dati sperimentali, ed è qui che entra in gioco l'Electron-Ion Collider (EIC). A differenza di altri collisori, come il Large Hadron Collider del CERN vicino a Ginevra o il Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) negli Stati Uniti, che fanno collidere particelle composite come protoni e ioni, l'EIC provocherebbe collisioni fra elettroni, che non hanno una struttura interna, e protoni e neutroni, diventando così una specie di microscopio che permetterà per la prima volta di scrutare l'interno di queste particelle.

L'EIC è una delle massime priorità della fisica nucleare statunitense, e dovrebbe essere costruito o presso il Brookhaven National Laboratory, a Long Island, o presso la Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Lab), a Newport News, in Virginia, due importanti laboratori di fisica negli Stati Uniti. Se sarà approvato, il collisore potrebbe iniziare a registrare dati intorno al 2030; sarà in grado di vedere come spin e massa dei singoli quark e gluoni, nonché l'energia del loro movimento collettivo, si combinano in modo da generare spin e massa di protoni e neutroni. Dovrebbe riuscire a rispondere anche ad altre domande: per esempio se quark e gluoni siano raggruppati o diffusi all'interno dei nucleoni, a che velocità si muovano e quale ruolo svolgano queste interazioni nel tenere i nucleoni uniti tra loro nei nuclei. Le misurazioni dell'EIC porteranno una mole di informazioni sul modo in cui i costituenti di base della materia interagiscono l'uno con l'altro per formare l'universo visibile. Cinquant'anni dopo la scoperta del quark, siamo finalmente in procinto di svelarne i misteri.

### Fenomeni emergenti

Ormai è ragionevolmente chiaro il modo in cui gli oggetti sono composti dagli atomi e quello in cui le loro caratteristiche macroscopiche derivano dalle caratteristiche degli atomi al loro interno, e anzi gran parte della nostra vita moderna dipende da quello che sappiamo su atomi, elettroni ed elettromagnetismo: è que-

### IN BREVE

**Da dove derivano massa e spin di protoni e neutroni?** Sorprendentemente, non possiamo dire di saperlo.

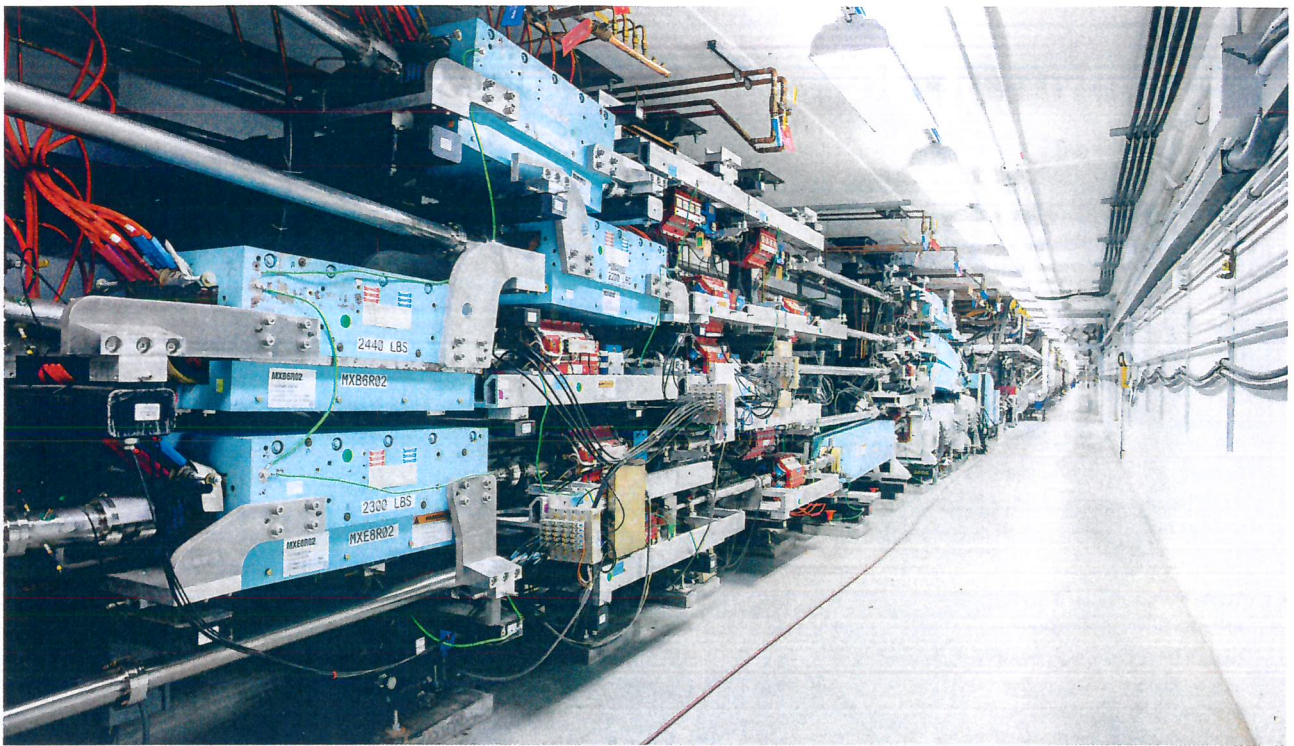
**In qualche modo gli ingredienti di queste**

particelle – quark e gluoni – si combinano in complesse interazioni che producono le proprietà dei protoni e dei neutroni.

**Per capire come,** i fisici vogliono costruire un

collisore di elettroni e ioni che disintegrerà protoni e nuclei atomici usando gli elettroni, in modo da fornire immagini tridimensionali dell'interno dei nuclei.





**I magneti di dipolo** (in azzurro) contribuiscono a dirigere i fasci di elettroni mentre accelerano attorno al circuito della CERN.

sta conoscenza che fa funzionare le nostre automobili e i nostri *smartphone*. Ma allora perché non capiamo come i nucleoni siano composti da quark e gluoni? Prima di tutto, i quark sono almeno 10.000 volte più piccoli di un protone, quindi non c'è un modo semplice per studiarli. Inoltre le caratteristiche dei nucleoni derivano dal comportamento collettivo di quark e gluoni: sono, di fatto, fenomeni emergenti, il risultato di molti agenti complessi le cui interazioni sono troppo elaborate per permetterci oggi di comprenderle appieno.

La teoria che descrive queste interazioni, la cromodinamica quantistica, fu sviluppata tra la fine degli anni sessanta e l'inizio degli anni settanta, e fa parte della teoria generale della fisica delle particelle chiamata modello standard, che descrive le forze conosciute dell'universo (tranne la gravità). La forza elettromagnetica tra particelle elettricamente cariche ha come mediatori i fotoni, le particelle della luce; analogamente, ci dice la QCD, l'interazione forte - la forza che tiene insieme i nucleoni - è mediata dai gluoni. Il corrispondente della carica coinvolto nell'interazione forte è detto «colore» (da cui «cromodinamica»). I quark portano la carica di colore e interagiscono tra loro scambiandosi i gluoni, ma a differenza dell'elettromagnetismo, in cui i fotoni stessi non hanno carica elettrica, qui anche i gluoni sono dotati di carica di colore. Quindi i gluoni interagiscono con altri gluoni scambiandosi ulteriori gluoni, e questa differenza ha conseguenze profonde. Questo circuito di interazioni è il motivo per cui la QCD è spesso troppo complicata da calcolare.

La QCD differisce da altre teorie più familiari anche perché l'interazione forte diventa meno intensa via via che i quark si avvicinano (nell'elettromagnetismo è vero l'opposto, e la forza si indebolisce all'allontanarsi delle particelle cariche). A distanze abbastanza ridotte all'interno del nucleone, i quark sono sottoposti a una forza così lieve che si comportano come se fossero liberi.

Grazie alla scoperta di questa strana conseguenza della QCD i fisici David Gross, H. David Politzer e Frank Wilczek hanno ricevuto nel 2004 il premio Nobel per la fisica. Quando i quark si allontanano l'uno dall'altro, la forza tra di loro cresce rapidamente e diventa così intensa che i quark finiscono «confinati» all'interno del nucleone: è il motivo per cui non troveremo mai un quark o un gluone da solo al di fuori di un protone o un neutrone. È possibile calcolare le interazioni della QCD purché i quark siano vicini e interagiscano debolmente l'uno con l'altro; quando sono più distanti, invece, a distanze vicine al raggio del protone, la forza diventa troppo intensa e la teoria diventa troppo complessa per essere utile.

Per capire ulteriormente il funzionamento quantistico dell'interazione forte abbiamo bisogno di più informazioni. Quello che sappiamo dei fenomeni atomici, per esempio, non è venuto solo dallo studio degli atomi e delle loro interazioni, ma anche dallo studio dei fenomeni emergenti che appaiono al di sopra di questi blocchi costitutivi fondamentali. Non sarebbe stato possibile costruire la biologia molecolare dalla sola conoscenza dei suoi fondamenti, gli atomi e l'elettromagnetismo; il momento «eureka» è giunto quando è stata scoperta la struttura a doppia elica del DNA. Quello che ci serve per progredire nel mondo dei quark e dei gluoni è guardare all'interno del nucleo.

### «Vedere» gli atomi

Nella prima parte del XX secolo i fisici scoprirono come «vedere» gli atomi attraverso un processo chiamato diffrazione ai raggi X. Puntando un fascio di raggi X su un campione e studiando lo schema di interferenza che risulta quando i raggi attraversano il materiale, è possibile vedere la struttura cristallina degli atomi del materiale. Il motivo per cui questa tecnologia funziona è che

*continua a p. 34*

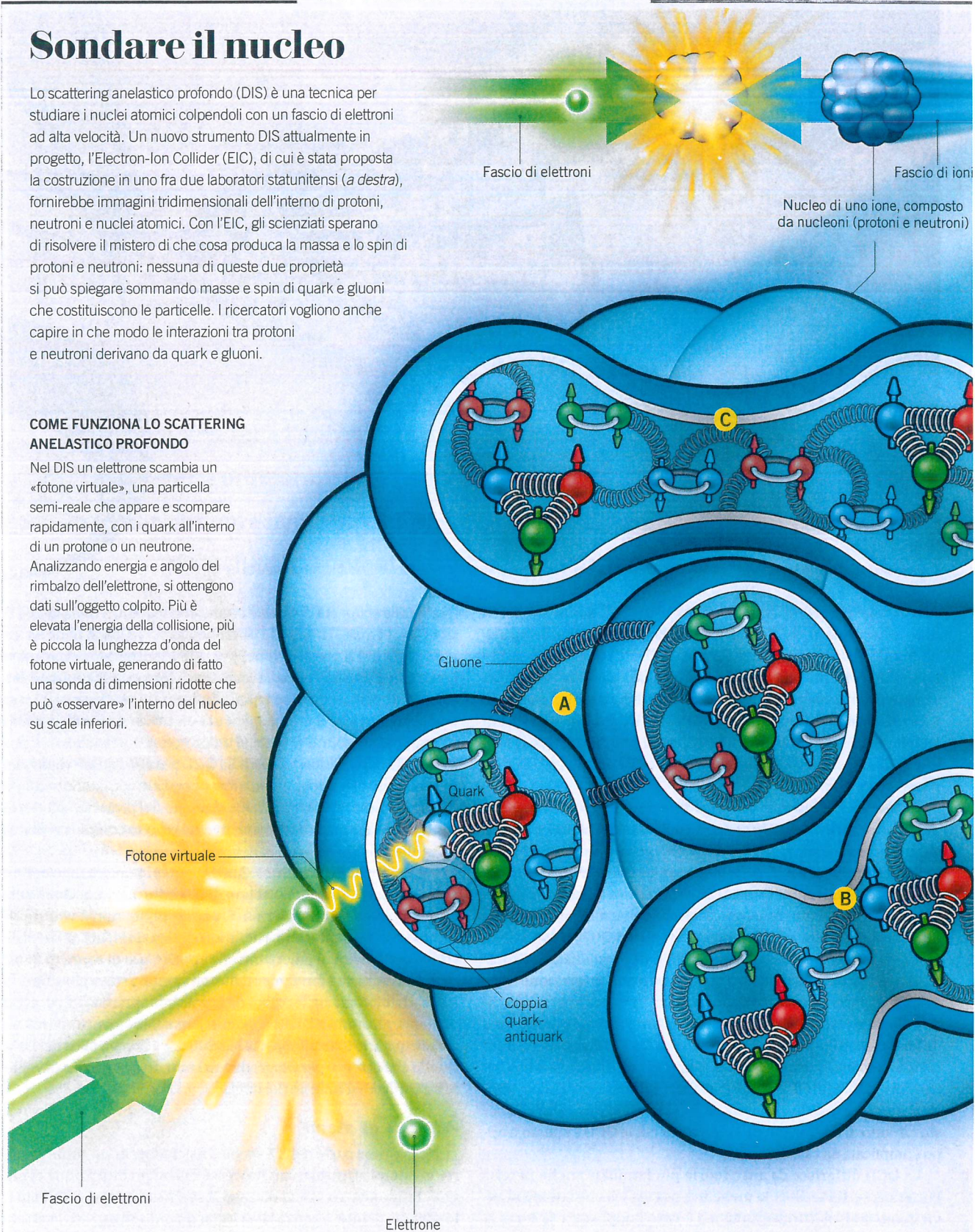


## Sondare il nucleo

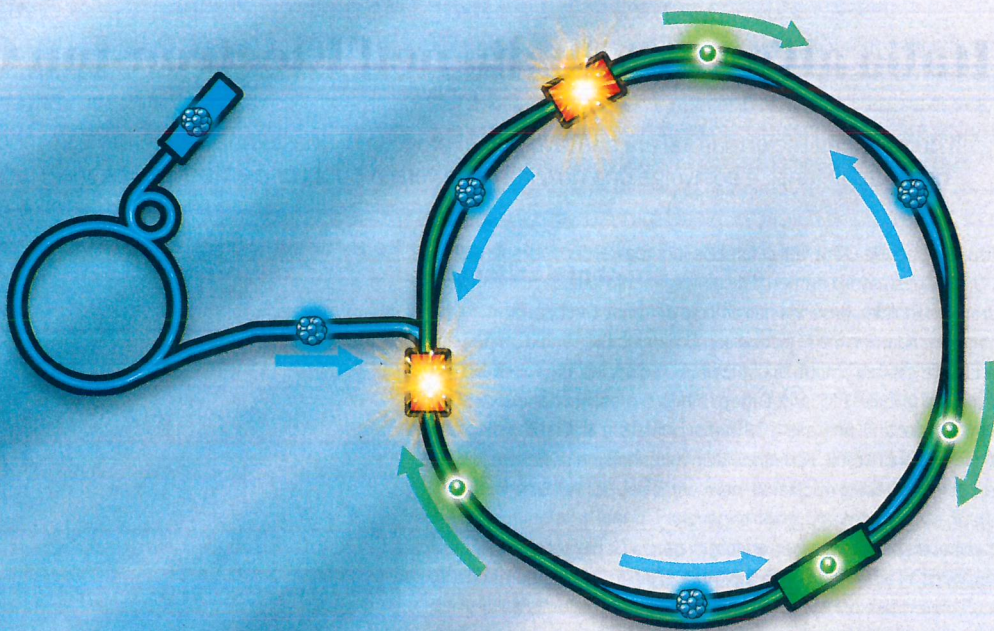
Lo scattering anelastico profondo (DIS) è una tecnica per studiare i nuclei atomici colpendoli con un fascio di elettroni ad alta velocità. Un nuovo strumento DIS attualmente in progetto, l'Electron-Ion Collider (EIC), di cui è stata proposta la costruzione in uno fra due laboratori statunitensi (a destra), fornirebbe immagini tridimensionali dell'interno di protoni, neutroni e nuclei atomici. Con l'EIC, gli scienziati sperano di risolvere il mistero di che cosa produca la massa e lo spin di protoni e neutroni: nessuna di queste due proprietà si può spiegare sommando masse e spin di quark e gluoni che costituiscono le particelle. I ricercatori vogliono anche capire in che modo le interazioni tra protoni e neutroni derivano da quark e gluoni.

### COME FUNZIONA LO SCATTERING ANELASTICO PROFONDO

Nel DIS un elettrone scambia un «fotone virtuale», una particella semi-reale che appare e scompare rapidamente, con i quark all'interno di un protone o un neutrone. Analizzando energia e angolo del rimbalzo dell'elettrone, si ottengono dati sull'oggetto colpito. Più è elevata l'energia della collisione, più è piccola la lunghezza d'onda del fotone virtuale, generando di fatto una sonda di dimensioni ridotte che può «osservare» l'interno del nucleo su scale inferiori.

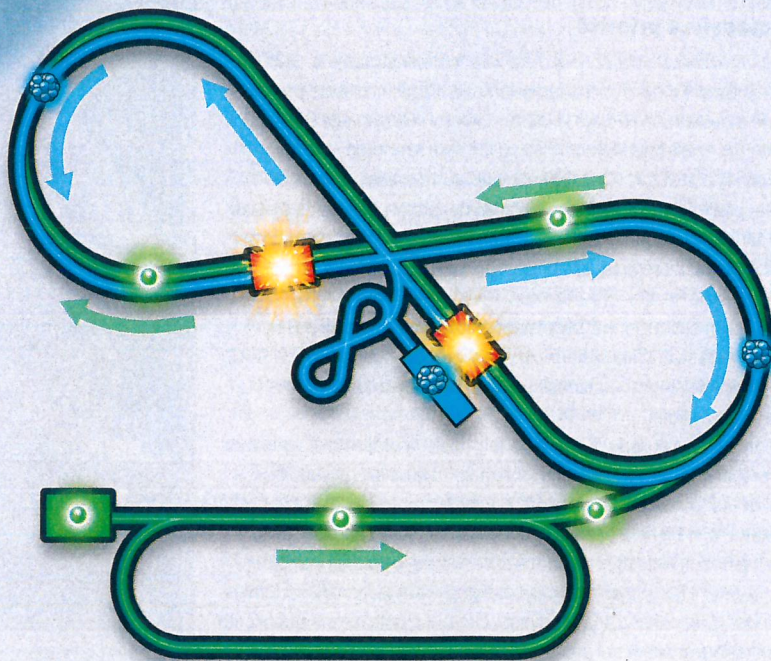






#### IPOTESI DI STRUTTURA A BROOKHAVEN

Un progetto prevede di costruire l'EIC al Brookhaven Lab di Long Island, usando il Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) a forma di anello, già esistente, che per ora fa collidere protoni e nuclei pesanti. Aggiungendo all'interno della galleria del RHIC un nuovo acceleratore di elettroni, sarebbe possibile far collidere elettroni e ioni in due o tre punti (*mostrati come lamp*) lungo il circuito.



#### IPOTESI DI STRUTTURA AL JEFFERSON LAB

In un'altra opzione si amplierebbe la Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF, *l'anello verde in basso*), un acceleratore di elettroni recentemente migliorato, presso la Thomas Jefferson National Accelerator Facility di Newport News, in Virginia. Il fascio di elettroni sarebbe instradato un «anello» a forma di 8, mentre verrebbe aggiunto un nuovo acceleratore di ioni (*in azzurro*) nella direzione opposta. Le collisioni tra i due fasci si verificherebbero in due punti.

Gli scienziati si chiedono se un protone e un neutrone, per esempio, possano a volte condividere gluoni tra loro (A) o preferiscano formare coppie come in (B) o interagiscano scambiandosi coppie quark-antiquark (C).



## 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 Rikutarō 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.

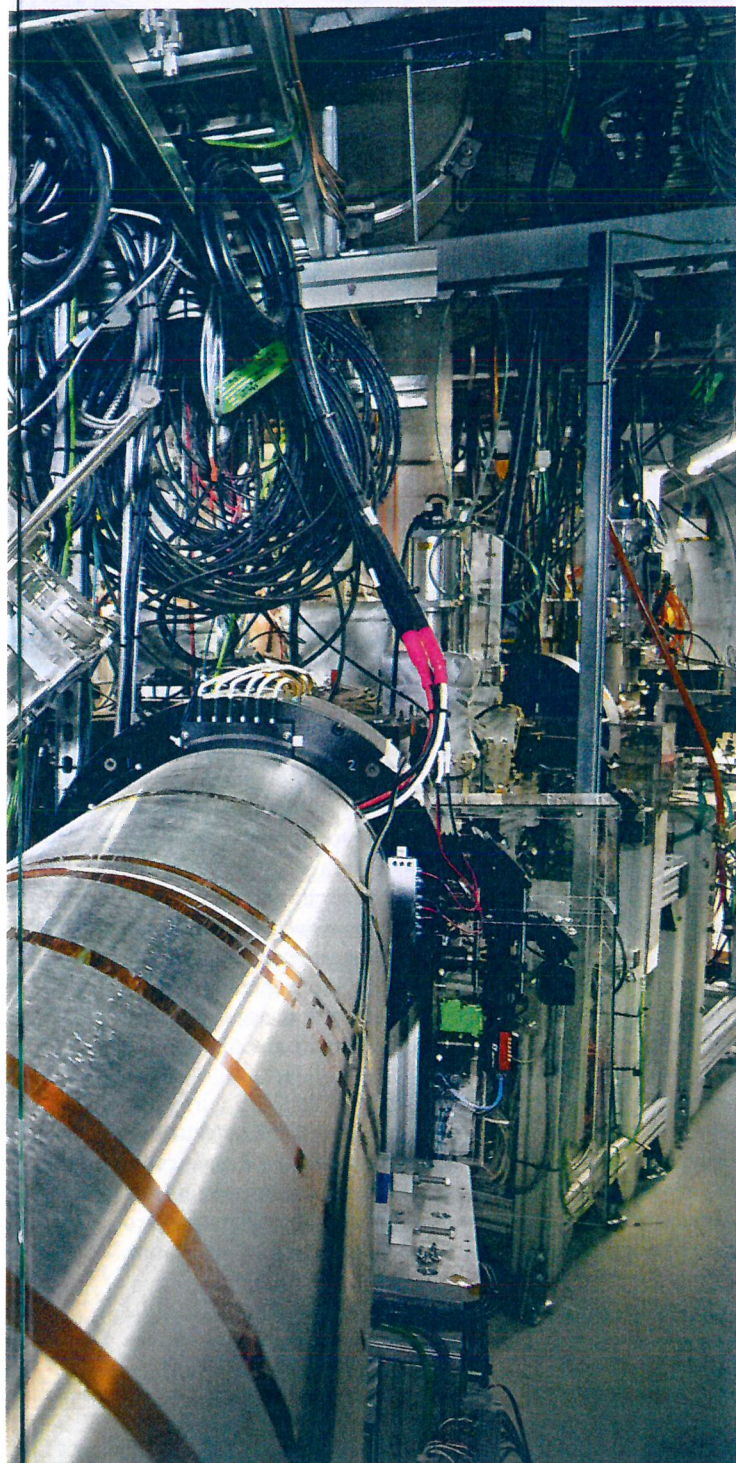
Negli anni scorsi il gruppo di lavoro ha formulato la proposta di realizzare il collisore, identificando gli obiettivi scientifici che ne giustificano la costruzione. È poi riuscito a convincere tutta la comunità dei fisici nucleari statunitensi, che ha riconosciuto l'EIC come «massima priorità» nel 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 italiani 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 simili 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 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*