

HANNO COLLABORATO A QUESTO
NUMERO:

F. Barranco, G. Benedek, A. Bettini,
A. Bracco, P. Campana, M. Carusi,
F. Ceccarelli, S. Dalla Torre,
S. Degl'Innocenti, A. Diaspro, T. Døssing,
L. Fallani, M. Focaccia, M. Gatti,
M. Giudici, G. Grosso, R.-D. Heuer,
M. Inguscio, C. Joas, S. Linguerri,
V. Lodigiani, F. Mantovani, A. Masiero,
C. Meroni, P. Milani, R. Osellame,
M. Nicodemi, G. Paoloni, G. Peruzzi,
V. Pettinacci, G. Potel, B. Ricci, M. Ripani,
F. Sciarrino, A. Stocchi, S. Stringari,
G. Tiana, J. P. Toennies, E. Vigezzi,
F. Villante

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 38 • N. 5 settembre-ottobre 2022 • N. 6 novembre-dicembre 2022

DIRETTORE RESPONSABILE
Angela Bracco

VICEDIRETTORE
Luisa Cifarelli

COMITATO SCIENTIFICO
G. Benedek, A. Bettini,
S. Croci, S. Falciano, F. Ferroni,
G. Grosso, E. Iarocci, R. Nania,
R. A. Ricci, C. Spinella

SOMMARIO

3 EDITORIALE

A. Bracco

IN EVIDENZA

5 The Higgs discovery at 10

R.-D. Heuer

9 Niels Bohr (1885-1962), one of the architects of modern physics

G. Peruzzi

SCIENZA IN PRIMO PIANO

25 The Electron-Ion Collider project

S. Dalla Torre

35 Theoretical spectroscopy: unravelling electronic correlations for materials design

M. Gatti

43 Quantum advantage with a programmable photonic processor, available now on the cloud

F. Sciarrino

FISICA E...

45 Mechanics in experimental research: drivers for the processes of the future

V. Pettinacci

PERCORSI

52 IJCLab: a new European laboratory

A. Stocchi

FISICA IN ERBA

59 STEAM for everyone

V. Lodigiani, M. Carusi

FISICA E INNOVAZIONE TECNOLOGICA

62 Femtosecond laser writing of integrated photonic circuits

F. Ceccarelli, R. Osellame

IL NOSTRO MONDO

69 Cerimonia Inaugurale 108° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica

73 The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2022

G. Benedek, J. P. Toennies

75 SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2022

M. Nicodemi

77 Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa

A. Bettini

News

78 Il Premio Nobel per la Fisica 2022

L. Fallani, M. Inguscio

80 RECENSIONI(*)

IN RICORDO DI(*)

80 Raffaella Simili (G. Paoloni, S. Linguerri, M. Focaccia)

Giovanni Fiorentini (F. Mantovani,
S. Degl'Innocenti, B. Ricci, F. Villante)

Laura Cantù (A. Diaspro)

Fabrizio Murtas (P. Campana)

81 Laura Perini (C. Meroni)

Emilio Doni (G. Grosso)

Valery Rubakov (A. Masiero)

Ricardo Americo Broglia (F. Barranco,
E. Vigezzi, T. Døssing, P. Milani, G. Potel,
G. Tiana, C. Joas)

Lev Pitaevskii (S. Stringari, M. Inguscio)

83 SCELTI PER VOI

85 ANNUNCI

88 INDICI DI VOLUME 38

(*) Il testo completo è pubblicato online:

www.sif.it/riviste/sif/sag/recensioni

www.sif.it/riviste/sif/sag/ricordo

MODALITÀ DI ISCRIZIONE ALLA SIF

Per iscriversi occorre presentare domanda di associazione con un breve curriculum scientifico e l'indicazione di due Soci presentatori.

La domanda di associazione può essere fatta online (oppure scaricando l'apposito modulo di associazione, pubblicato anche in questo fascicolo) all'indirizzo: <http://www.sif.it/associazione>.

La domanda verrà poi esaminata ed eventualmente approvata dal Consiglio di Presidenza.

Il pagamento della quota sociale, nei modi sotto indicati, dovrà avvenire dopo aver ricevuto comunicazione della accettazione a Socio.

RINNOVO QUOTE SOCIALI

Il rinnovo della quota sociale può essere effettuato:

- Online nell'Area Soci del sito web della SIF; in questo caso si utilizza la carta di credito, con collegamento diretto e sicuro al sito della Banca Nazionale del Lavoro (BNL).
Ricordiamo che l'Area Soci è un'area protetta per accedere alla quale occorre utilizzare username e password che vengono inviati a tutti i Soci. (Per accedere agli altri servizi disponibili nell'Area Soci occorre essere Soci in regola).
- Seguendo le modalità pubblicate in rete all'indirizzo:
<http://www.sif.it/associazione>.
In caso si desideri procedere anche in questo caso con la carta di credito, ricordarsi di usare l'apposito modulo debitamente compilato in tutte le sue parti.
- È anche possibile rinnovare l'associazione alla European Physical Society (EPS) attraverso le rispettive società nazionali. I Soci che desiderano pagare la propria quota di associazione all'EPS tramite la SIF possono farlo con le modalità di cui sopra. Le quote di associazione all'EPS sono pubblicate in ultima pagina e in rete allo stesso indirizzo sopraindicato.

HOW TO BECOME A SIF MEMBER

To apply for membership an application form must be filled in, including a brief scientific curriculum and the signatures of two introducing Members.

The application can be filled in online or downloading the application form at the following address:

<http://en.sif.it/association>.

The application form will be examined and eventually approved by the Council. Applicants will have to pay the membership dues, as indicated in the form, only after having been informed by the Society about the acceptance of their application.

MEMBERSHIP RENEWAL

Those who wish to renew membership, may pay dues by one of the following terms of payment:

- Online by credit card through direct connection with the bank (BNL). This service can be accessed through the Members Area of the SIF website.
We remind you that the Members Area is secured and can be accessed only through the username and password supplied to Members.
- By cheque or credit card filling the payment form published on the web at the address:
<http://en.sif.it/association>.
In case you wish to use the credit card also in this case, make sure to fill in the form in all its parts.
- It is also possible to renew the association to the European Physical Society (EPS) through the respective national societies. Members who wish to pay the EPS association fee through SIF can do so according to the instructions above. The EPS association fees are available on the SIF website at the above-indicated address.



Cari Soci, Cari Lettori,

come di consueto con l'editoriale de IL NUOVO SAGGIATORE di fine anno desidero portare alla vostra attenzione alcune delle attività SIF negli ultimi quattro mesi che considero essere tra quelle più salienti.

Senza dubbio il nostro Congresso Nazionale, il 108°, ha richiesto molto lavoro a partire dalla sua preparazione ma ci ha anche dato molte soddisfazioni. Nell'anno in cui la Società Italiana di Fisica celebra i suoi 125 anni il Congresso Nazionale è tornato in presenza a Milano dopo le ultime due edizioni online per la pandemia. Il Congresso si è tenuto dal 12 al 16 settembre presso il Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli" dell'Università degli Studi di Milano Statale e ha avuto circa 750 partecipanti. Questa è la seconda volta nella sua storia che il Congresso della SIF si svolge a Milano, e per la sua realizzazione sono state coinvolte anche l'Università degli Studi di Milano-Bicocca e il Politecnico di Milano.

Un dettagliato resoconto della Cerimonia Inaugurale lo troverete, come di consueto, in questo numero de IL NUOVO SAGGIATORE.

Il programma scientifico è stato come sempre ricco di belle relazioni. Ha incluso 10 Relazioni Generali plenarie, circa 150 Relazioni su invito parallele e oltre 500 Comunicazioni che si sono articolate nelle tradizionali 7 Sezioni riguardanti le diverse tematiche di ricerca in fisica. Tra le comunicazioni ne abbiamo selezionate circa il 30% che saranno pubblicate sui fascicoli de IL NUOVO CIMENTO dedicati a questo Congresso.

I lavori della Sezione Giovani, organizzata in collaborazione con l'Associazione Italiana Studenti di Fisica (AISF) e con il Progetto Young Minds della Società Europea di Fisica (EPS), si sono tenuti, invece, nella mattinata di giovedì 15 settembre presso l'Auditorium Pascoli del Politecnico di Milano. Sono state inoltre organizzate due sessioni particolari, una voluta dalla Società Italiana di Spettroscopia Neutronica (SISN) e l'altra dalla ALiOe (Associazione Laureati in Ottica e Optometria). Quest'ultima è stata organizzata dai Presidenti dei Corsi di Laurea in Ottica e Optometria delle Università di Milano-Bicocca, Roma Tre e Firenze con il supporto di tutti i colleghi Presidenti delle altre sedi. I numerosi lavori presentati in questa sessione saranno pubblicati in un fascicolo speciale de IL NUOVO CIMENTO.

Un momento particolarmente significativo per la Statale di Milano e il suo Dipartimento di Fisica è stato quello del 16 settembre. Il Congresso Nazionale della SIF ha ospitato, infatti, presso il Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli" la cerimonia di riconoscimento a Sito Storico della Società Europea di Fisica dell'istituzione nata nel 1924 come Istituto di Fisica Complementare diretto da Aldo Pontremoli. L'Istituto di Fisica Complementare fu il primo istituto di fisica costituito alla fondazione dell'Ateneo di Milano. Grazie alla direzione di Pontremoli, l'istituto si caratterizzò fin da subito per l'estrema modernità delle linee di ricerca. I laboratori di ricerca furono attrezzati da Pontremoli per gli studi spettroscopici e radiologici. Questi laboratori furono tra i più importanti in Italia in particolare per gli stretti legami con il mondo medico e industriale. Dopo la tragica scomparsa di Pontremoli durante la spedizione polare del 1928 del dirigibile Italia, l'Istituto di Fisica Complementare continuò le sue attività. Queste furono ulteriormente potenziate dall'arrivo a Milano di Giovanni Polvani, che è stato Presidente della SIF e fondatore della Scuola Internazionale di Fisica "Enrico Fermi" a Varenna. A Pontremoli è stato anche dedicato un evento speciale all'interno del Festival della Scienza a Genova, dove aspetti storici e scientifici della spedizione con il dirigibile Italia sono stati illustrati mettendo in evidenza sia l'importanza sia l'attualità della ricerca scientifica al Polo Nord.

Sempre a Milano il 27 ottobre 2022 la SIF ha organizzato con l'Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere, l'evento "Passion for Earth". I relatori dei vari seminari hanno evidenziato molto bene quanto le tecniche geofisiche e geochimiche siano state notevolmente affinate negli ultimi anni e abbiano utilizzato in sinergia strumenti informatici, geologici, fisici e chimici. Questi sviluppi tecnici hanno permesso di conoscere meglio la struttura statica e dinamica della Terra. In particolare, le misure dei geoneutrini, la muografia, la tomografia dei neutrini hanno avuto e avranno anche in futuro un notevole impatto nell'ambito della geoscienza.

Ma la SIF in questi quattro mesi non si è concentrata solo su congressi e seminari, ha anche fatto sentire la sua voce su importanti questioni riguardanti la didattica e la ricerca.

Per la didattica, la Commissione Permanente della SIF sta seguendo le riforme in

quest'ambito che incideranno nell'Università. La Legge 79 interviene infatti su due punti cruciali, la ridefinizione dei nuovi Gruppi Scientifici-Disciplinari, ai quali i "vecchi" SSD devono essere ricondotti, e la modifica alla definizione dei compiti didattici dei docenti universitari.

Per quanto riguarda la ricerca, in occasione dell'insediamento del nuovo Governo molte delle principali società scientifiche, che rappresentano migliaia di docenti universitari e ricercatori del Paese, hanno ritenuto doveroso far pervenire alla nuova Ministra dell'Università e della Ricerca Anna Maria Bernini una lettera congiuntamente firmata sul tema della ricerca. La lettera innanzi tutto mette in evidenza l'impegno di queste società, tra cui la SIF, ad affermare la ricerca italiana nel contesto internazionale, a valorizzarne i risultati, a qualificare l'insegnamento universitario e avvicinarlo alle esigenze dei giovani e del Paese. Le società firmatarie della lettera hanno seguito con grande interesse il lavoro svolto dal Tavolo Tecnico per la Strategia Italiana in tema di ricerca fondamentale e danno il loro forte appoggio al documento pubblicato nel luglio 2022 e reperibile sul sito web del MUR¹.

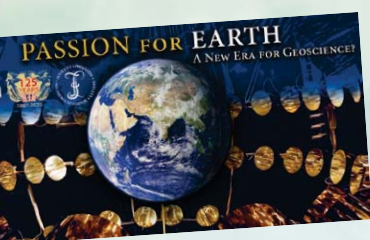
Ci si augura ora che a partire dal prossimo bilancio dello Stato, la nuova Ministra possa tener conto delle proposte avanzate per il finanziamento della ricerca in Italia. Sappiamo bene che oggi è urgente risolvere molti problemi riguardanti cambiamento climatico, crisi energetica, lotta alle pandemie, nucleare e computer quantistici, e quindi non si può prescindere dal ruolo chiave che la scienza deve giocare.

Su questi importanti temi, ovvero il rinnovamento della didattica e l'aumento delle risorse per la ricerca, dovremo impegnarci fortemente anche nei prossimi mesi. Siamo decisamente pronti a farlo.

A voi tutti i miei più sinceri e sentiti auguri per il 2023!

Presidente SIF

¹ <https://www.mur.gov.it/it/news/martedi-19072022/strategia-italiana-la-ricerca-fondamentale-ecco-la-proposta-oltre-il-pnrr>



Dear Members, Dear Readers,

as usual with the end-of-year editorial of *IL NUOVO SAGGIATORE* I would like to bring to your attention some of the most relevant SIF activities of the last four months.

Undoubtedly our National Congress, the 108th, has required a lot of work starting from its preparation but provided us also with a widespread sense of satisfaction.

In the year in which the Italian Physical Society celebrates its 125th anniversary, the National Congress was held in person again after being virtual for the last two years due to the pandemic. In fact, the 108th SIF Congress was held in Milan from 12 to 16 September at the Department of Physics "Aldo Pontremoli" of the State University of Milan (Statale) and had around 750 participants. This is the second time that Milan hosts the SIF Congress, and the University of Milano-Bicocca and the Milan Polytechnic were also involved in its organization.

A detailed report of the Opening Ceremony of SIF Congress can be found in this issue of *IL NUOVO SAGGIATORE*.

As always, the scientific programme was full of interesting talks. It included 10 plenary General Talks, about 150 parallel Invited Talks and over 500 Communications that were divided into the traditional 7 Sections covering the different research topics in physics. We have selected about 30% of the communications that will be published in the *IL NUOVO CIMENTO* issues dedicated to this Congress.

The so-called Youth Section, organised in collaboration with the Italian Association of Physics Students (AISF) and the Young Minds Project of the European Physical Society (EPS), was held in the morning of Thursday 15 September at the Auditorium Pascoli of the Milan Polytechnic. Two special sessions were also organised, one in collaboration with the Italian Society of Neutron Spectroscopy (SISN) and the other in collaboration with ALOeO (Association of Graduates in Optics and Optometry). This last session was organized by the responsables for the Degree in Optics and Optometry of the Universities of Milano-Bicocca, Roma Tre and Florence with the support of all their corresponding colleagues in other universities. A special issue of *IL NUOVO CIMENTO* is planned to be produced that will contain the presentations given in Milan.

A particularly significant moment for the University of Milan and its Physics Department took place on 16 September. The National Congress of the Italian Physical Society hosted, in fact, at the "Aldo Pontremoli" Department of Physics, the ceremony for the distinction as a Historic Site of the European Physical Society of the institution born in 1924 as the Institute of Complementary Physics directed by Aldo Pontremoli. The Institute of Complementary Physics was the first physics institute established at the foundation of the University of Milan. Thanks to Pontremoli's direction, the institute was immediately characterised by its extremely modern lines of research. The research laboratories were equipped by Pontremoli for spectroscopic and radiological studies. These laboratories were among the most important in Italy due to their close links with the medical and industrial world. After Pontremoli's tragic death during the 1928 polar expedition of the Italia airship, the Institute of Complementary Physics continued its activities. These were further enhanced by the arrival in Milan of Giovanni Polvani, who was President of the SIF and founder of the "Enrico Fermi" International School of Physics in Varenna. A special event was also dedicated to Pontremoli within the Science Festival in Genoa, where historical and scientific aspects of the expedition with the Italia airship were illustrated, highlighting both the importance and the topicality of scientific research at the North Pole.

Again in Milan on 27 October 2022, the SIF organized the "Passion for Earth" event with the Lombard Institute, Academy of Sciences and Letters. The speakers of the various seminars have very well highlighted how the geophysical and geochemical techniques have been remarkable, refined in recent years and have used IT, geological, physical and chemical tools in synergy. These technical developments have made it possible to better understand the static and dynamic structure of the Earth. In particular, the measurements of geoneutrinos, muography and neutrino tomography have had and will also have a significant impact in the field of geoscience in the future.

In these four months SIF has not only concentrated its efforts on congresses and seminars but has also gone on record on important issues concerning teaching and research.

As regards teaching, the SIF Permanent

Education Commission is following the reforms in this area that will affect the University. In fact, there is a new law which deals with two crucial points: the redefinition of the new Scientific-Disciplinary Groups, and the modification to the definition of the teaching duties of university professors.

As far as research is concerned, on the occasion of the settlement of the new Government, many of the main scientific societies, which represent thousands of university professors and researchers in the country, felt that it was their duty to send a jointly signed letter to the new Minister for University and Research Anna Maria Bernini on the needs of research. First of all, the letter highlights the commitment of these societies, including SIF, to affirm Italian research in the international context, to enhance its results, to qualify university teaching and bring it closer to the needs of young people and of the country. The new Minister is informed that the societies that signed the letter have followed with great interest the work carried out by the Technical Table for Italian Strategy on fundamental research and give their strong support to the document published in July 2022 on the web site of the Ministry¹. It is now hoped that, starting with the next round of budget, the new Minister will be able to take into account the work done by the experts and will implement their proposals as concerns research funding in Italy.

We are well aware that today it is urgent to solve many problems about climate change, energy crisis, fight against pandemics, nuclear power and quantum computers and therefore we cannot ignore the key role that science must play.

On these important issues, *i.e.* teaching reforms and the increase of research resources, we will have to commit ourselves strongly in the coming months as well. We are definitely ready to do that.

To you all my most sincere and heartfelt wishes for 2023!

Angela Bracco
SIF President

¹ <https://www.mur.gov.it/it/news/martedi-19072022/strategia-italiana-la-ricerca-fondamentale-ecco-la-proposta-oltre-il-pnrr>

THE HIGGS DISCOVERY AT 10

CELEBRATING THE FUTURE OF PARTICLE PHYSICS

ROLF-DIETER HEUER

President of the SESAME (Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East) Council

Former Director-General of CERN (European Organization for Nuclear Research)



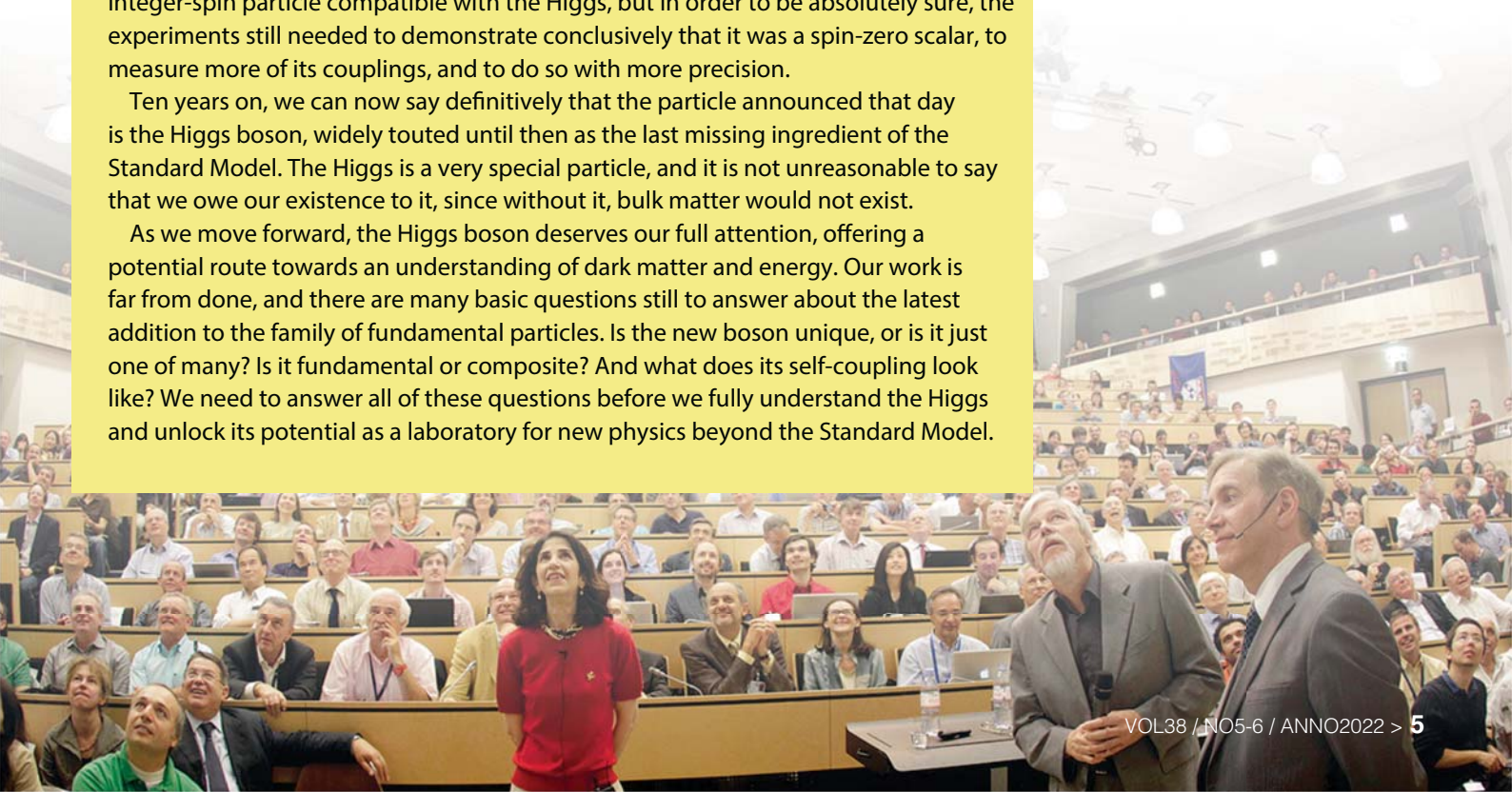
years
HIGGS boson
discovery

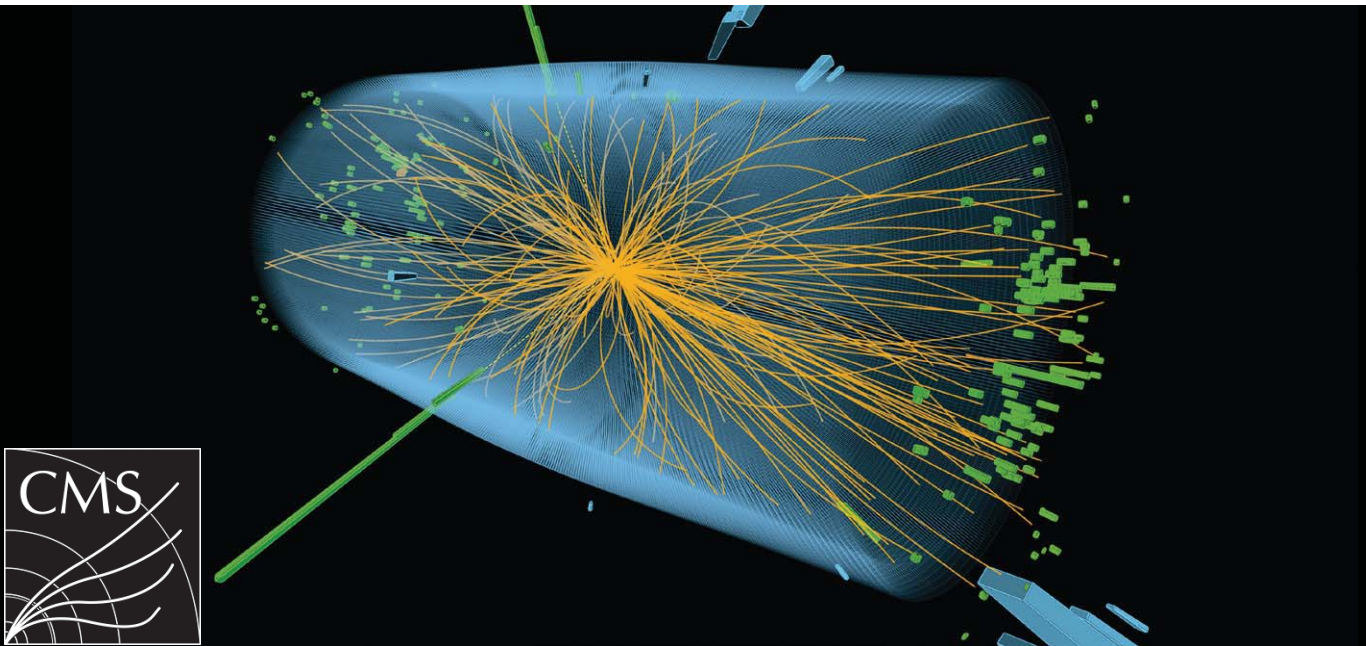
It had taken 48 years, but on 4 July 2012, Fabiola Gianotti and Joe Incandela, the spokespersons of the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider (LHC), stood up in front of a packed CERN auditorium, along with hundreds of thousands of people watching around the world, to announce the discovery of a Higgs-like particle. As master of ceremonies, I concluded with the words "I think we have it", but deep in my heart, I knew we had announced a momentous discovery that day.

Fabiola and Joe had been absolutely correct to use the term Higgs-like. What the two experiments had observed was fully compatible with the decay of a new integer-spin particle compatible with the Higgs, but in order to be absolutely sure, the experiments still needed to demonstrate conclusively that it was a spin-zero scalar, to measure more of its couplings, and to do so with more precision.

Ten years on, we can now say definitively that the particle announced that day is the Higgs boson, widely touted until then as the last missing ingredient of the Standard Model. The Higgs is a very special particle, and it is not unreasonable to say that we owe our existence to it, since without it, bulk matter would not exist.

As we move forward, the Higgs boson deserves our full attention, offering a potential route towards an understanding of dark matter and energy. Our work is far from done, and there are many basic questions still to answer about the latest addition to the family of fundamental particles. Is the new boson unique, or is it just one of many? Is it fundamental or composite? And what does its self-coupling look like? We need to answer all of these questions before we fully understand the Higgs and unlock its potential as a laboratory for new physics beyond the Standard Model.





At the 2012 symposium, Peter Higgs and François Englert sat side by side in the CERN auditorium. A year later, they would share the Nobel Prize in Physics – Englert’s co-author, Robert Brout, having passed away just one year before the discovery. Higgs famously wiped a tear from his eye as the announcement was made, and went on to say that it was remarkable that the particle had been found in his lifetime. It was a sentiment that many of the older ones of us in the room could identify with: for physicists of my generation, the Brout-Englert-Higgs (BEH) mechanism has been a constant presence, and its experimental unveiling undoubtedly a highlight of my career. I was still a teenager when Brout, Englert, and, independently, Higgs published their papers in 1964, followed shortly by that of Gerry Guralnik, Carl Hagen and Tom Kibble. The symposium was also a very special moment for all young scientists in the room whose excitement one could almost touch: not everybody can experience such a moment.

I have to confess that those papers made little impression until much later! However, by the time it came to doing physics at the Large Electron Positron collider, LEP, Brout, Englert and Higgs were centre stage. LEP was built to put the Standard Model to a rigorous test through precision studies of the weak vector bosons, W and Z, but since the mass of the Higgs boson was largely unconstrained, we all held out hopes that it might make its first appearance in our detectors.

By the turn of the century, when LEP was due to switch off, a raft of precision measurements of the W and Z, along with many other electroweak parameters, had put the Standard Model on solid experimental ground. The LEP experiments had also helped to put limits on the possible mass range for

the Higgs boson, indicating that it might still be in reach of LEP. They even went so far as to suggest that the most likely place for it to be was just above the highest energy that had already been explored. We had no choice but to push LEP’s collision energy as high as it would go. It was an exciting time, but nothing conclusive appeared. LEP was retired, and in 2001, the focus of the Higgs search crossed the Atlantic as Fermilab’s Tevatron began its Run II, further constraining the mass range available for the Higgs. The lower bound, however, remained 114 GeV as set by LEP, right up to the moment the discovery was announced by ATLAS and CMS. With a mass of 125 GeV, the Higgs is surprisingly light, but it was nevertheless out of reach of both LEP and the Tevatron. We did not know at the time, of course, but the Higgs was always going to be the LHC’s to discover.

Before moving on to look at what has happened in the 10 years since July 2012, let me first take a short look back on the months leading up to this seminal discovery. It is important to have two independent experiments to crosscheck each other and to confirm results. Many fluctuations often appear when starting data taking and analysis. Although they usually disappear with increasing statistics, on this occasion, some remained, and with slightly increasing significance, although they were not always in the same places for both experiments. This was the situation at the summer conference in 2011. Eyebrows were raised, but none of the fluctuations seen by either experiment came close to a signal that could be interpreted as evidence. Despite a nascent sense of anticipation, we had to explain to an expectant media that we needed more data.

As time went on, we raised the energy of the LHC from 7

to 8 TeV, and increased the collision rate. The experiments duly collected more data. Over the following months most of the fluctuations did indeed disappear, but one developed into a real signal in both experiments, and it was at the same mass value. It was clear that we were nearing a discovery. The reaction from the scientists and from the media and from society as a whole was overwhelming for a discovery of this nature. To find on the front page of so many of the world's respected daily newspapers an informed discussion of the importance of five standard deviations was certainly a first for me.

Ten years on

Ten years on from the discovery, on 4 July this year, CERN organised a full-day symposium to take stock of what we have learned, and look forward to what the future of Higgs research holds. I had the honour of opening that symposium, and it is a sign of the times that I did so while self-isolating in a Turkish hotel room as I recovered from COVID. That did not, however, prevent me from enjoying a range of fascinating talks.

In the decade since the discovery, we have not only confirmed that it is indeed the particle predicted by Brout, Englert and Higgs in 1964, but we have also defined its mass to high precision, and measured many of its couplings to other Standard Model particles. As we gather more data, and measure Higgs parameters in ever finer detail, the Higgs remains one of the best laboratories we have to open the door to physics beyond the Standard Model. A recently-published Fermilab measurement of the W boson's mass demonstrates the importance of tying down every free parameter in the Standard Model as precisely as possible. The better each parameter is measured experimentally, the tighter the others are constrained and the greater the chance of precision measurements leading to new physics. As the LHC's Run 3 gets underway, with higher beam energies than ever before opening up potential new windows on discovery, I am excited by the prospect of new insights into the Higgs. With the High-Luminosity LHC to follow, the best years of Higgs physics at the LHC are still ahead of us.

The LHC has a research programme mapped out until around 2040, with a major luminosity upgrade scheduled to come on stream in 2029. The Higgs will provide a rich seam of physics for many years to come, and if we are to reveal all of its secrets, we are likely to need a more powerful machine to follow the LHC. The Higgs self-coupling, for example, will need higher energies for a complete measurement, and the question of Higgs compositeness might not be addressed at the LHC alone.

In the meantime, the study of rare processes, often a good way to unveil new physics, is growing in importance as the data accumulates. The LHCb experiment has shown that it can measure processes so rare that they happen only a handful of times in a billion particle decays. In doing so, they have made measurements that appear to be slightly at odds with the Standard Model – leaving particle physicists cautiously excited and hungry for more data.

The Higgs is not the only discovery the LHC has chalked up to date. A raft of new exotic mesons, for example, have been found, as well as multi-quark states whose discovery required as much patience as the Higgs itself. QCD, the theory of strong interactions, allows for bound states of four and five quarks, as well as the familiar baryons and mesons, made up of three and two, respectively. LHCb discovered the first pentaquark in 2015, and although tetraquark candidates had been seen before, the experiment's discovery of several new ones has strengthened QCD.

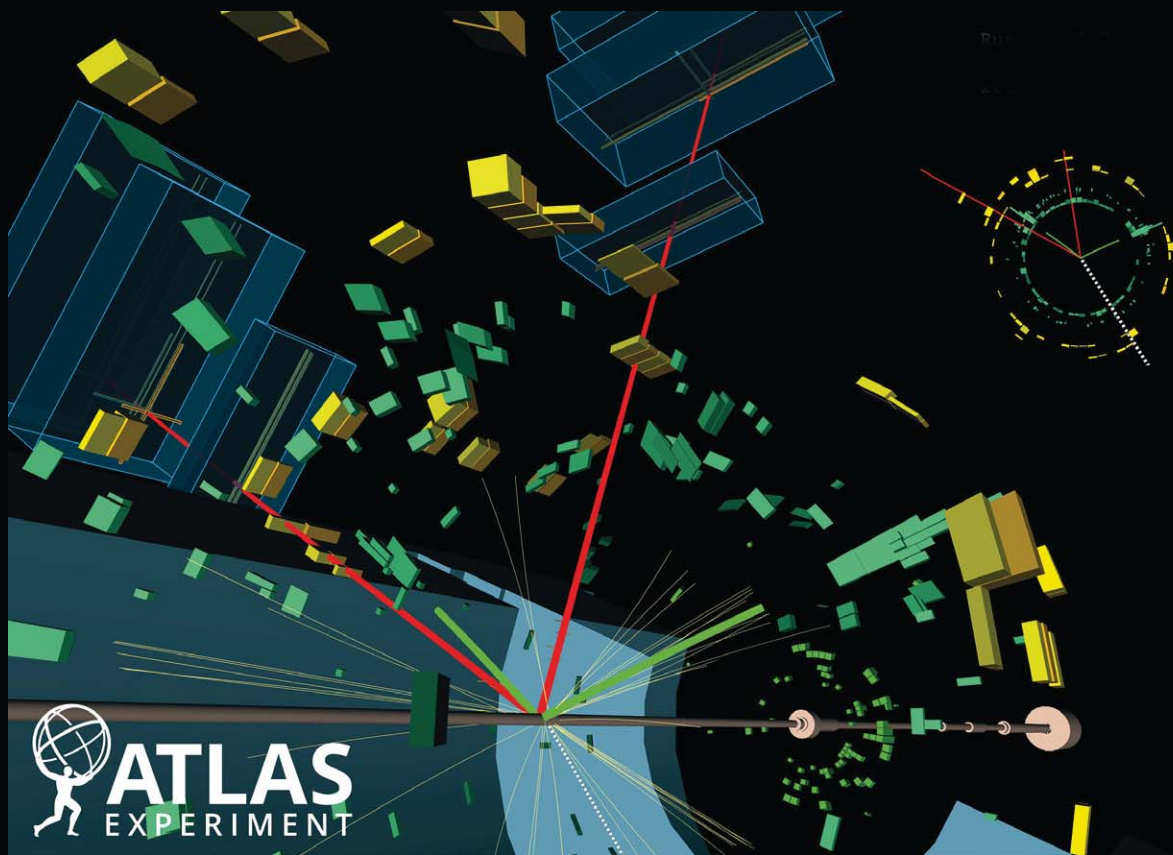
When the LHC started up, proponents of a theory known as supersymmetry, SUSY for short, were hoping that evidence for it would be the first significant result the LHC experiments would reveal, but that was not to be. One of the things that makes many SUSY models so exciting is that SUSY particles remaining in the universe today would be stable, making them a strong candidate for Dark Matter.

Physics beyond the Standard Model is proving elusive, however. LHC results show that the simplest SUSY models are not valid, and are in fact incompatible with the mass of the Higgs boson as measured. SUSY is not yet down and out, but it is on the ropes. In the light of what we have learned already from the LHC it is looking increasingly tenuous, and many new theoretical ideas are emerging to fill the gap.

There is no shortage of candidates for the kind of facility that may be used to probe these new theories and take particle physics beyond the LHC. In the US, Fermilab is transforming itself into a neutrino research laboratory, and in exchange for US contributions to the LHC's high luminosity upgrade, CERN is building neutrino detectors for Fermilab. Transatlantic collaboration has always been important, and is as much so today as ever.

For the longer term, there are plans afoot that could lead to new colliders being built in China and Japan, while in Europe, CERN is involved in several ongoing accelerator R&D projects: the Compact Linear Collider, CLIC; the Future Circular Collider, FCC; a muon collider; and a very long-term R&D programme for a proton-driven plasma wakefield accelerator, AWAKE.

Particle physics is an internationally-coordinated field of research. Europe's rolling strategy for particle physics is



developed in consultation with physicists from around the world. The most recent European strategy cycle concluded in 2020 with a recommendation to the CERN Council that the High-Luminosity LHC should be fully exploited as a first priority, while at the same time investigating the feasibility of a potential future energy-frontier machine with a circumference of around 100 km. Now underway, the FCC feasibility study will examine environmental, technical, geological and financial issues before delivering its conclusions to the CERN Council in 2025.

I am often asked why it took so long to go from theory to discovery. The answer is a lesson in the scientific method, and what I like to call the virtuous circle of basic research, applied research and innovation. In 1964 three theorists proposed a solution to a problem: why the range of the electromagnetic interaction is so different to that of the weak interaction. They drew on Bardeen, Cooper and Schrieffer's work on superconductivity, and their efforts received little attention – not only from the teenage me! It took a decade for the theoretical framework to evolve, and for the Standard

Model to mature. When it did, the Brout-Englert-Higgs mechanism found favour, and searching for the boson became an important priority. Then we needed the technology. The theory did not predict the boson's mass, so we had no idea what kind of accelerator we would need to build. As time went on basic research fed into applied research, and new tools became available, through innovation, for particle physicists to use. By the time we got to the LHC, virtue had turned full circle. Superconductivity had developed to the point at which it would allow us to build a machine guaranteed to put the 1964 theory to the test: either the boson would be found, or something else would have to appear in its place.

As so often happens in science one generation's fundamental advances give rise to the next generation's innovation, which in turn provides tools for future fundamental research. It is the virtuous circle at the core of human advancement. The Higgs celebration at CERN on 4 July 2022 gave tantalising hints of where the next step on our voyage of discovery might lie, and I cannot wait to see where it takes us next.



Rolf-Dieter Heuer

Rolf-Dieter Heuer started his career as research scientist at the University of Heidelberg and later as staff member at CERN. In 1998, he was appointed to a chair at the University of Hamburg and in 2004 he became research director for particle and astroparticle physics at the DESY laboratory. He has been CERN Director-General from 2009 to 2015, then President of the German Physical Society, and chaired the European Commission's Group of Chief Scientific Advisors until 2020. Presently he is President of the Council of SESAME (Synchrotron-Light for Experimental Science and Applications in the Middle East).

NIELS BOHR (1885-1962), ONE OF THE ARCHITECTS OF MODERN PHYSICS

GIULIO PERUZZI

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova, Padova, Italia

Niels Bohr died sixty years ago. He was one of the architects of modern physics and one of the leading figures of the reorganisation of research that led to the birth of the so-called Big Science. To commemorate him, we retrace his scientific and human biography. This offers many insights into the world we live in and into the role that science can play in promoting freedom and peace among people.

NIELS BOHR (1885-1962), UNO DEGLI ARCHITETTI DELLA FISICA MODERNA

1 Introduzione

Sessant'anni fa, il 18 novembre del 1962, moriva Niels Bohr. Bohr (fig. 1) è ben noto come l'autore del primo modello quantistico di atomo, ma in realtà i suoi contributi scientifici vanno ben al di là di questo, e coinvolgono gli sviluppi della fisica atomica e delle interazioni tra fisica, chimica e biologia. D'altra parte Bohr si trova al centro di un vasto movimento di riorganizzazione della ricerca dal quale emerge tra gli anni 1930 e 1950 una nuova figura di scienziato che alle competenze del ricercatore deve unire quelle del coordinatore di gruppi di ricerca sempre più numerosi, e quelle dell'amministratore che deve reperire finanziamenti sempre più ingenti. Ebbene Bohr è stato uno dei primi a interpretare il nuovo ruolo del ricercatore, insieme scienziato, amministratore e politico, diventando uno dei protagonisti della nascita della cosiddetta Big Science.

Significativo a questo proposito è l'incipit del discorso pronunciato da Victor F. Weisskopf al CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), di cui era allora direttore generale, nel corso di una cerimonia svoltasi il 23 novembre 1962 in memoria di Bohr:

«Siamo qui riuniti per rendere omaggio a Niels Bohr. Niels Bohr è il simbolo, l'origine e il principale architetto del nostro lavoro. È stato tramite lui, per mezzo di lui e con lui che tutto ciò su cui il nostro lavoro e la nostra esistenza si basa è stato creato. Era un grande uomo. Ma che cosa è la grandezza?



Fig. 1 Niels Bohr (circa 1920) (Nobel Foundation Archive).

Un grande uomo è uno che crea una nuova epoca, un nuovo modo di pensare, ed è certo che lui e la sua vita corrispondono a questa definizione. L'influsso di ciò che lui ha iniziato è visibile in ogni aspetto della nostra vita. La scienza moderna ha dato nuova forma al nostro mondo. Essa è diventata il fattore determinante del nostro pensiero, della nostra cultura, perfino della politica, e determina la direzione nella quale il genere umano si muoverà nei prossimi decenni»¹.

Le parole di Weisskopf sono una chiara testimonianza del credito culturale e politico che Bohr si era guadagnato. Va tuttavia notato un fatto. L'opera di Bohr fu un importante punto di riferimento, sia per la sua generazione, sia per quella successiva, cioè per le due generazioni di fisici provenienti da diversi paesi che riuscirono a dare ordine a un nuovo vasto dominio di fenomeni, prima con la "vecchia teoria dei quanti" tra il 1900 e il 1925, e poi con la meccanica quantistica dopo il 1925. In seguito però la memoria della sua grande influenza sugli sviluppi della fisica del XX secolo si andò via via affievolendo. Un destino toccato a Bohr come a molti altri grandi scienziati del passato. Eppure, ripercorrendo la vita di questi personaggi, ci si accorge della ricchezza dei loro contributi e della lungimiranza delle loro riflessioni. Si scopre così che molte delle idee e delle teorie, che oggi vengono affermate senza ricordarne la provenienza, sono in realtà il frutto di un faticoso lavoro svolto in un determinato contesto da persone che si sono poste certe domande. È purtroppo diffusa la tendenza, consolidata dai manuali, a considerare rilevante la teoria finale e marginali i vari passaggi che a essa hanno portato. Al contrario, per afferrare davvero il significato e gli eventuali limiti di una nuova teoria è di fondamentale importanza ripercorrere il cammino di chi quella teoria ha proposto per la prima volta. Come vedremo, il caso di Bohr è in questo senso paradigmatico.

2 Formazione e primi contributi scientifici

Niels Henrik David, figlio di Ellen Adler e Christian Bohr, nasce il 7 ottobre del 1885 a Copenhagen. Sua madre proveniva da una facoltosa famiglia ebraica, mentre il padre era un importante fisiologo. I coniugi Adler-Bohr ebbero altri due figli, Jenny nel 1883, che si laureerà in storia e insegnerà nelle scuole danesi, e Harald nel 1887, destinato a diventare un importante matematico (fig. 2).

L'influsso del padre sulla formazione giovanile dei figli fu sicuramente importante. Christian, nel 1881 e nel 1883,

lavorò a Lipsia nel laboratorio del grande fisiologo tedesco Carl Ludwig. Ludwig, insieme a Hermann von Helmholtz, Emil Du Bois-Reymond e Ernst Wilhelm von Brücke, aveva costituito a Berlino, verso la fine degli anni 1840, una sorta di circolo "anti-vitalista". Proprio questo gruppo di Berlino fu tra gli ispiratori della reazione di una parte della comunità scientifica ai metodi e alle idee della *Naturphilosophie*, uno dei movimenti culturali legati al romanticismo e alla filosofia idealistica ampiamente diffuso in Germania nella prima metà dell'Ottocento.

La *Naturphilosophie* aveva rappresentato la ribellione contro l'ingenua interpretazione meccanicistica dei fenomeni organici complessi propria dei newtoniani dell'epoca: per i *Naturphilosophen* ridurre tutti i fenomeni e i processi del mondo organico a movimenti e forze era inaccettabile. Ma i progressi nel campo della fisica, della chimica e delle scienze biomediche avrebbero poi permesso, nel corso dell'Ottocento, di acquisire elementi tali da dare nuovo vigore alle posizioni di chi riteneva che le scienze della vita ponessero problemi solo quantitativamente diversi da quelli delle scienze fisiche e chimiche. Proprio i componenti del gruppo di Berlino furono tra quelli che, in aperta polemica con i movimenti romantici, sostennero con maggiore autorevolezza che i fenomeni della vita potessero essere interpretati come manifestazioni di leggi fisiche e chimiche.

Christian Bohr assunse posizioni diverse da quelle strettamente riduzionistiche, ma il suo incontro con Ludwig fu rilevante nel formare la sua sensibilità per la controversia tra teorie vitalistiche (o finalistiche) e teorie meccanicistiche. Tali questioni erano state più volte discusse da Christian insieme a un gruppo di amici che si ritrovava regolarmente a casa ora dell'uno, ora dell'altro. Di questo gruppo, dai caratteri spiccatamente interdisciplinari, facevano parte il filosofo Harald Høffding, il fisico Christian Christiansen – entrambi futuri docenti di Niels all'Università – e il filologo Vilhelm Thomsen. Sia Niels sia Harald partecipavano a queste riunioni, e non v'è dubbio che l'approccio del padre a quei problemi influì sul modo in cui Niels avrebbe trattato, anni dopo, i rapporti tra la fisica e la biologia.

Quel che Niels Bohr ricava dall'insegnamento di Christian e dalle discussioni a cui assiste è che, se le nozioni utilizzate nella descrizione della natura sono definite in modo accorto, il conflitto tra meccanicismo e finalismo si stempera. Nella fase matura delle sue riflessioni, Niels arriverà a concludere, in linea con le posizioni espresse da Christian, che queste due forme di descrizione possono convivere completandosi a vicenda. Alcuni degli elementi di epistemologia della biologia ricorrenti nelle discussioni a casa dei Bohr possono sicuramente gettare luce su quel principio di complementarità che nel 1927 verrà introdotto da Niels in ambito fisico e che in seguito verrà da lui applicato anche ad altri settori della cultura.

¹ Cinque mesi dopo la morte di Niels Bohr la *American Physical Society* organizza un incontro commemorativo in suo onore. Gli interventi di J. Rud Nielsen, Felix Bloch, Aage Bohr, John Wheeler e Léon Rosenfeld, ai quali viene aggiunto quello di Victor Weisskopf tenuto al CERN qualche mese prima, vengono pubblicati su *Physics Today* [1].

I giovani danesi che volevano proseguire gli studi universitari potevano scegliere tra l'Università di Copenhagen e il Polytekniske Løreanstalt. Niels opta per l'Università dove entra nel 1903, scegliendo l'indirizzo di studi incentrato sulla fisica.

Punto di riferimento universitario di Niels è Christiansen, uno degli amici di suo padre, che lo avvierà allo studio della tensione superficiale dei liquidi, da un lato, e delle teorie dell'elettrone dall'altro. Proprio per i contributi nel primo campo Bohr vincerà, prima di laurearsi, un prestigioso riconoscimento danese nel 1907, mentre il secondo campo sarà oggetto dei suoi studi per la laurea e il dottorato. Sia la tesi di laurea del 1909 sia quella di dottorato del 1911 riguardano infatti gli *Studi sulla teoria elettronica dei metalli*: è qui che Bohr acquista la consapevolezza che per affrontare la descrizione di fenomeni fisici alla scala atomica è necessario introdurre delle modifiche all'elettromagnetismo classico alla luce della nuova ipotesi dei quanti.

3 L'atomo di Bohr

Terminati gli studi, Bohr ottiene dalla Fondazione Carlsberg una borsa postdottorato per trascorrere un anno all'estero. Decide quindi di recarsi nell'ottobre del 1911 a Cambridge con la speranza di proseguire le sue indagini sulla teoria dei metalli sotto la guida di J. J. Thomson, allora direttore del Cavendish Laboratory. Thomson è infatti una delle massime autorità nel campo: ha vinto il premio Nobel per la fisica nel 1906 come "riconoscimento dei grandi meriti delle sue ricerche teoriche e sperimentali sulla conduzione dell'elettricità da parte dei gas" e nella sua *Nobel lecture* ha parlato della sua scoperta di quello che oggi chiamiamo elettrone e che lui si ostina, per ragioni su cui non ci soffermiamo qui, a chiamare corpuscolo. L'interazione tra Bohr e Thomson non sarà però delle migliori e nel marzo del 1912 Bohr si sposta a Manchester dove inizia a lavorare con Ernest Rutherford (fig. 3).

Frutto delle ricerche condotte a Manchester e proseguite al suo ritorno in Danimarca nel luglio del 1912 è la proposta del primo modello quantistico di atomo. Il modello viene descritto nella prima parte di un articolo pubblicato nel 1913 in tre parti (la prima a luglio, la seconda a settembre e la terza a novembre) nel volume 26, sesta serie del *Philosophical Magazine* con



Fig. 2 Christian Bohr ed Ellen Adler con i tre figli: Niels è il bimbo in alto a destra. Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.



Fig. 3 Bohr e Rutherford a un pic-nic nei pressi di Cambridge. Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.

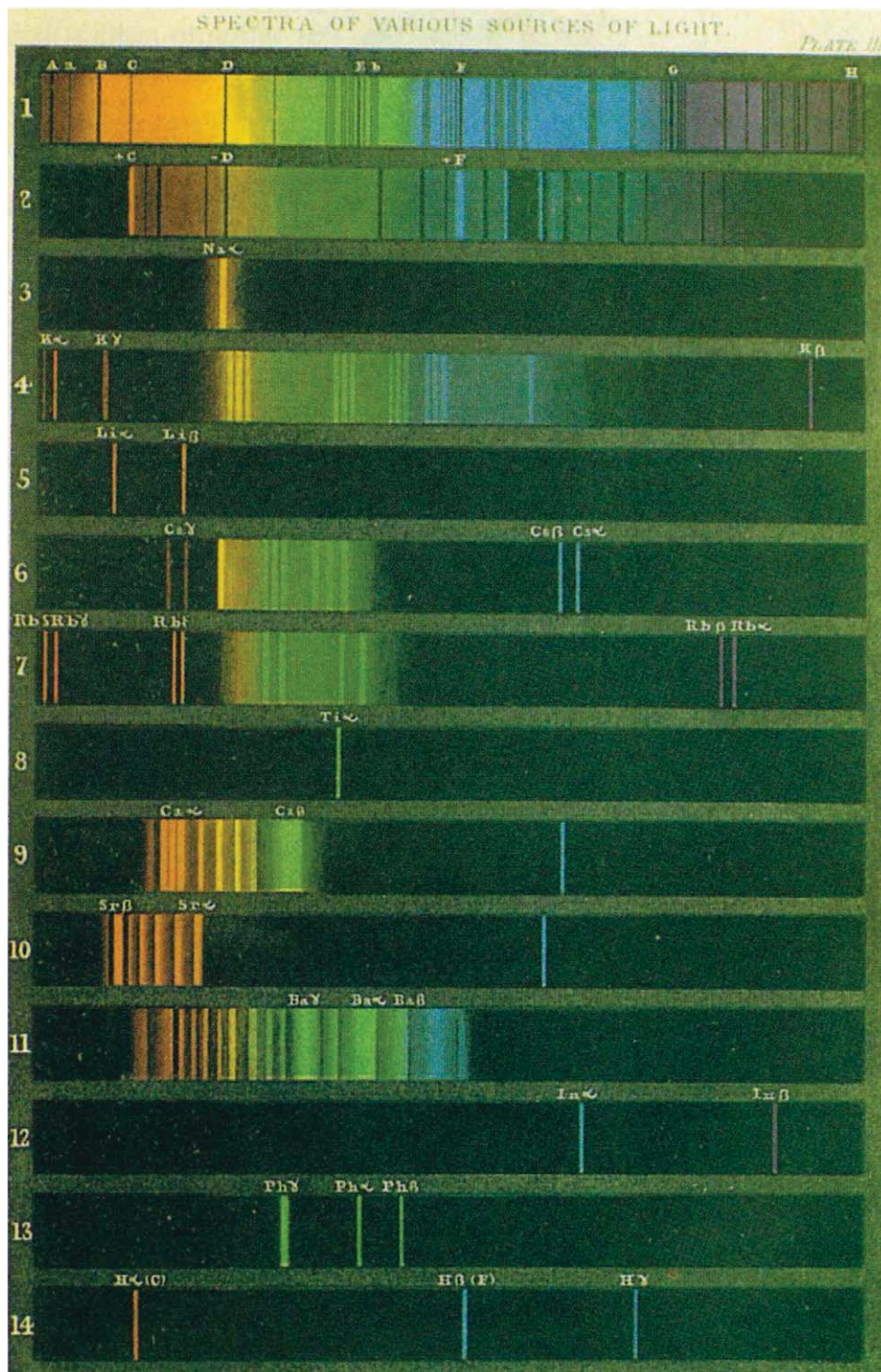


Fig. 4 Spettri di diverse sorgenti luminose (illustrazione tratta da un volume di fine Ottocento). Sono riportati, dall'alto in basso, gli spettri del Sole, della corona solare, del potassio, del litio, del cesio, del rubidio, del tallio, del calcio, dello stronzio, del bario, dell'indio, del fosforo e dell'idrogeno.

l'ambizioso titolo *"Sulla costituzione di atomi e molecole"*: in realtà il modello si applica solo all'idrogeno (un solo elettrone intorno al nucleo) e agli atomi idrogenoidi (cioè gli atomi ionizzati, con un solo elettrone che orbita intorno al nucleo di carica positiva). Il lavoro di Bohr è legato a una serie di progressi sperimentali e teorici, fatti in particolare a partire dalla seconda metà dell'Ottocento, che sintetizziamo brevemente.

La rinascita dell'atomismo tra Settecento e Ottocento avviene inizialmente nell'ambito della neonata chimica moderna, ma che nel corso dell'Ottocento coinvolge un numero crescente di settori della fisica. Intorno al 1860, Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen fanno alcune scoperte che inaugurano la spettroscopia: le loro esperienze mettono definitivamente in evidenza che ogni elemento della tavola periodica emette e assorbe solo certi colori, cioè solo radiazione elettromagnetica di certe lunghezze d'onda o frequenze. Questi spettri di colori (fig. 4) diventano in qualche modo la carta di identità degli elementi chimici, un potente strumento di indagine per individuare la composizione chimica degli oggetti materiali sulla Terra, e per lo studio della composizione chimica di oggetti celesti, come le stelle. Ma perché l'emissione e l'assorbimento avvengono solo per particolari colori? Si comincia a pensare negli ultimi decenni dell'Ottocento che l'atomo, etimologicamente "indivisibile", sia in realtà costituito da cariche oscillanti che emettono e assorbono radiazione elettromagnetica. Non è però chiaro perché lo facciano solo per insiemi discreti di frequenze. Quando nel 1897 J. J. Thomson scopre l'elettrone, una particella elettricamente carica di massa almeno mille volte più piccola del più piccolo atomo della tavola periodica (l'idrogeno), l'idea che si fa strada è che siano proprio gli elettroni dentro l'atomo a muoversi in modo tale da giustificare le evidenze spettroscopiche. Non solo, negli stessi anni vengono scoperte nuove radiazioni, i raggi X (Wilhelm Roentgen, 1895) e la radioattività (Antoine Henri Becquerel, 1896), che probabilmente hanno qualcosa che fare con la costituzione atomica della materia.

Pochi anni dopo, nel 1900, Max Planck introduce nell'ambito delle sue ricerche sulla radiazione di corpo nero la prima teoria che afferma che gli scambi tra radiazione (considerata classicamente continua) e materia (composta da ipotetici oscillatori carichi elettricamente) avvengano per quanti discreti di energia, multipli del quanto elementare di energia $E = h\nu$. Saranno le ricerche successive, dovute in particolare ai contributi di Einstein tra il 1905 e il 1909, a dimostrare che i risultati ottenuti da Planck possono essere pienamente giustificati solo ammettendo che anche la radiazione elettromagnetica è costituita da quanti discreti, che dal 1926 saranno chiamati fotoni. La storia del fotone è affascinante ma esula da questa trattazione, basti qui osservare che la comunità scientifica ci metterà del tempo ad accettare la loro esistenza. Solo dopo la scoperta di Arthur H. Compton del 1922 dell'effetto che porta il suo nome, e dopo ulteriori verifiche sperimentali condotte in particolare nel 1925 da Walther Bothe e Hans W. Geiger e, indipendentemente, da Compton e Alfred W. Simon l'esistenza del fotone sarà definitivamente acquisita.

Nel frattempo, a partire in particolare dalla scoperta dell'elettrone, avevano preso le mosse le prime proposte di modelli atomici. È noto a tutti il cosiddetto "modello a panettone", di cui parla Kelvin nel 1902 e che viene sviluppato da J. J. Thomson tra il 1903 e il 1904: questo modello prevedeva una carica positiva diffusa dentro la quale erano collocati gli elettroni, in moto su orbite concentriche. Thomson era riuscito a dimostrare che il suo modello, pur basato sull'elettromagnetismo classico che prevede perdite di energia per cariche in moto accelerato, risultava stabile e permetteva una prima spiegazione della tavola periodica degli elementi. Rimaneva però il problema di giustificare le proprietà spettroscopiche. Era possibile unire l'idea di Planck di quanti discreti di energia con quelle del modello a panettone per ottenere una comprensione delle evidenze spettroscopiche e, più in generale, dei caratteri dell'interazione radiazione materia? Primi tentativi in questo senso furono fatti intorno al 1910 da Arthur Erich Haas. Tuttavia nel 1911 Ernst Rutherford, grazie ai risultati di esperimenti di collisione di particelle α su sottili lamine d'oro condotti dai suoi collaboratori Hans Geiger e Ernest Marsden, arriva alla conclusione che il modello a panettone non è corretto: l'atomo è costituito da un nucleo di carica positiva di dimensioni piccole rispetto a quelle dell'atomo intorno al quale orbitano gli elettroni. Tuttavia, come osserva Bohr nell'introduzione alla sua trilogia, mentre il modello atomico di Thomson può essere dimostrato stabile nell'ambito dell'elettromagnetismo classico, ciò non avviene per quello di Rutherford. La sfida, a questo punto, è quella di costruire un modello atomico che cerchi di ricomporre in modo consistente i vari risultati sperimentali, e in particolare quelli relativi alle evidenze spettroscopiche.

Bohr a Manchester parte da qui. «Si pensava – ricorda Bohr in un'intervista del 1962 [2] – che [gli spettri] fossero meravigliosi, ma che non fosse possibile fare molti progressi in quel campo. Era come osservare l'ala di una farfalla, con la regolarità del disegno e i suoi bei colori: nessuno penserebbe di poter gettare le basi della biologia partendo dalla colorazione dell'ala di una farfalla». E invece proprio gli spettri degli elementi gli danno la chiave per aprire definitivamente la porta d'accesso ai segreti dell'atomo.

Il moto di un elettrone che ruota intorno al nucleo positivo è accelerato e quindi, secondo l'elettromagnetismo classico, dovrebbe perdere progressivamente energia irradiando, e cadere in un moto a spirale sul nucleo, in contrasto con quello che si osserva. D'altra parte Bohr è già convinto da tempo dei limiti di applicazione dell'elettromagnetismo classico su scala atomica. Nel primo articolo della trilogia osserva infatti che «esperimenti relativi a diversi fenomeni come i calori specifici, l'effetto fotoelettrico, i raggi X ecc.» sembrano tutti indicare la necessità di introdurre nelle leggi che descrivono i moti degli elettroni la costante h di Planck, una quantità estranea all'elettrodinamica classica. È tramite h , insieme alla massa m e la carica e dell'elettrone, che Bohr può fissare le grandezze che caratterizzano i moti degli elettroni sulle orbite nel modello atomico di Rutherford. Ipotizza infatti che gli elettroni si muovano su orbite ellittiche stazionarie con energia fissata. Queste costituiscono un insieme discreto di orbite stazionarie in ognuna delle quali l'energia è individuata da un numero quantico intero n : $n=1$ individua lo "stato fondamentale", cioè quello più vicino al nucleo, mentre $n=2, n=3, \dots$, individuano stati di energia via via crescente, chiamati «stati eccitati». Il calcolo dei valori delle energie E_n , dei semiassi maggiori delle ellissi a_n e delle frequenze ν_n delle orbite stazionarie viene fatto applicando «l'usuale meccanica» (essenzialmente l'equilibrio tra l'attrazione elettrostatica elettrone-nucleo e la forza centrifuga) e ipotizzando che $E_n \propto nh\nu_n$, in analogia con la proposta di Planck. Bohr arriva così a esprimere in particolare l'energia dei vari livelli nella forma $E_n = (4\pi^2 me^4)/(2n^2 h^2)$.

Alla fine del paragrafo, Bohr enuncia quali siano le principali assunzioni da lui utilizzate per arrivare alle formule di E_n , ν_n e a_n :

- «(1) Che l'equilibrio dinamico dei sistemi negli stati stazionari può essere discusso con l'aiuto della usuale meccanica, mentre il passaggio dei sistemi tra due diversi stati stazionari non può essere trattato su questa base.
- (2) Che quest'ultimo processo è seguito dall'emissione [o dall'assorbimento] di una radiazione *omogenea*, per la quale la relazione tra frequenza e quantità di energia emessa è quella data dalla teoria di Planck [$E_n - E_p = h\nu_{np}$].»

Nell'elaborazione del modello gioca un ruolo essenziale la formula di Balmer generalizzata per le righe dello spettro dell'atomo di idrogeno. Modelli quantistici di atomo, per

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.
[SIXTH SERIES.]

JULY 1913.

I. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*
By N. BOHR, Dr. phil. Copenhagen*.

Introduction.

IN order to explain the results of experiments on scattering of α rays by matter Prof. Rutherford† has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the nucleus is assumed to be the seat of the essential part of the mass of the atom, and to have linear dimensions exceedingly small compared with the linear dimensions of the whole atom. The number of electrons in an atom is deduced to be approximately equal to half the atomic weight. Great interest is to be attributed to this atom-model; for, as Rutherford has shown, the assumption of the existence of nuclei, as those in question, seems to be necessary in order to account for the results of the experiments on large angle scattering of the α rays‡.

In an attempt to explain some of the properties of matter on the basis of this atom-model we meet, however, with difficulties of a serious nature arising from the apparent

* Communicated by Prof. E. Rutherford, F.R.S.

† E. Rutherford, Phil. Mag. xxi. p. 669 (1911).

‡ See also Geiger and Marsden, Phil. Mag. April 1913.

Fig. 5 Il frontespizio del primo articolo della trilogia di Bohr "On the Constitution of Atoms and Molecules" del luglio 1913.



Fig. 6 Henry Moseley nei primi mesi del 1913. I suoi lavori sono da Rutherford considerati di importanza paragonabile a quelli che hanno portato Mendeleev alla scoperta della tavola periodica.

il modello di Thomson e per quello di Rutherford, erano infatti già stati presentati tra il 1910 e il 1912: le frequenze di emissione erano state ricavate semplicemente calcolando in modo classico l'energia E di un elettrone orbitante in una sfera di carica positiva o intorno a un nucleo, e uguagliando E a multipli di $h\nu$. Tuttavia la serie di Balmer generalizzata prevede che le frequenze emesse o assorbite siano la differenza di due termini:

$$\nu_{np} = cR (1/n^2 - 1/p^2),$$

dove c è la velocità della luce, R è la costante di Rydberg, e n, p sono numeri interi con n sempre minore di p (cioè $n = 1, 2, \dots$, mentre $p = 2, 3, \dots$), in particolare la serie di Balmer, come osserva Bohr, è quella ottenuta per $n = 2$. L'emissione o l'assorbimento non riguardano quindi l'energia dell'elettrone in una certa orbita ma il "salto" da un livello di energia a un altro. È l'uovo di Colombo per Bohr: avendo già a disposizione l'espressione per l'energia degli elettroni negli stati stazionari, Bohr può immediatamente ricavare la formula di Balmer generalizzata, nella quale la costante di Rydberg R per l'atomo di idrogeno è data da $R = (2\pi^2 me^4)/(h^3 c)$ in funzione della velocità della luce c , della costante h di Planck e della massa m e della carica e dell'elettrone (per un elemento di numero atomico Z , basta sostituire e^4 con $Z^2 e^4$). Dando a c, m, e e h i valori sperimentali dell'epoca, Bohr ottiene $cR = 3,1 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}$, da confrontare con il valore $3,29 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}$ ottenuto da misure spettroscopiche. Ne conclude che: «l'accordo tra il valore teorico e quello osservato è all'interno dell'incertezza dovuta agli errori di misura delle costanti che compaiono nell'espressione del valore teorico». È un passo importante per le future ricerche sperimentali e teoriche (fig. 5).

Il modello, per quanto semplice e frutto di ipotesi azzardate che mescolano fisica classica e quantistica, spiega in modo sorprendente lo spettro dell'atomo di idrogeno e degli atomi idrogenoidi. Inoltre, sempre nella trilogia del 1913, Bohr fornisce anche una prima spiegazione dei raggi X prodotti da elettroni orbitanti, e dei raggi β provenienti dal nucleo.

Due osservazioni possono chiarire quanto decisiva risultò all'epoca la proposta di Bohr [3, 4]. La prima riguarda il fatto che nell'atomo di Thomson la carica positiva, interpretata come una reazione dello spazio vuoto alla presenza degli elettroni, è priva di massa, per cui tutta la massa dell'atomo viene dalla massa degli elettroni. Un atomo di peso atomico A deve quindi contenere un numero di elettroni circa 2000 volte A : quindi l'idrogeno ($A = 1$) avrebbe circa 2000 elettroni. Una simile conclusione si dimostra errata già nel 1906 sulla base di esperimenti condotti al Cavendish: il numero di elettroni contenuti in un atomo è dello stesso ordine del peso atomico dell'elemento e nel caso dell'idrogeno è

compreso tra 1 e 2. A partire dal 1911 si consolida l'idea che l'atomo di un generico elemento chimico sia costituito da un certo numero Z (numero atomico) di elettroni di carica $-e$, e da un piccolo corpo centrale di carica $+Ze$, nel quale è concentrata quasi tutta la massa atomica. L'affermazione che sia Z e non A a indicare la posizione dei diversi elementi nella tavola periodica è all'epoca ancora controversa: verrà proposta nel 1913 da Antonius Johannes van den Broek e definitivamente verificata sperimentalmente tra il 1913 e il 1914 da Henry Moseley (fig. 6), uno dei collaboratori di Rutherford a Manchester. L'atomo di Bohr costituisce il primo modello quantizzato che cerca di spiegare come le usuali caratteristiche chimiche e fisiche degli elementi emergano dalle proprietà del sistema di Z elettroni orbitanti intorno al nucleo.

La seconda osservazione concerne la composizione del nucleo atomico e la radioattività. All'epoca non si conoscono ancora né il protone (scoperto nel 1919), né il neutrone (scoperto nel 1932); non si esclude, anzi si ipotizza la presenza di elettroni nel nucleo (un'ipotesi abbandonata solo negli anni Trenta grazie alla teoria di Fermi del decadimento β). Sull'origine nucleare dei raggi α , almeno tra i fautori del modello atomico di Rutherford, c'era generale consenso: le cariche positive infatti si trovavano solo nel nucleo e quindi solo da lì potevano provenire. Per i raggi β , invece, la questione è controversa e, ancora nell'autunno del 1912, Rutherford ipotizza un legame tra raggi β ed espulsione di elettroni orbitanti intorno al nucleo. Bohr invece nella trilogia del 1913 conclude che il decadimento β derivi da elettroni emessi dal nucleo.

4 Sviluppi successivi dell'atomo di Bohr e spiegazione della tavola periodica degli elementi

Nel luglio del 1913, Bohr ottiene dall'Università di Copenhagen la nomina a docente di fisica per gli studenti di medicina. L'incarico però gli lascia poco tempo per la ricerca e gli preclude la possibilità di formare studenti che possano lavorare con lui. Così nel marzo del 1914 chiede all'Università di istituire una cattedra di fisica teorica.

Nel maggio dello stesso anno, Rutherford offre a Bohr un posto di docente all'Università di Manchester. Bohr accetta immediatamente e, con qualche ritardo dovuto all'inizio della prima guerra mondiale, arriverà a Manchester insieme alla moglie nell'ottobre del 1914. L'idea è quella di rimanere a Manchester solo un anno, sperando che nel frattempo venga istituita la cattedra di fisica teorica a Copenhagen. Ma la guerra rallenta l'iter d'istituzione della cattedra, e i coniugi Bohr rimarranno a Manchester fino al luglio del 1916.

Come cittadino di uno stato neutrale, Bohr non può partecipare a nessuna delle attività di ricerca legate alla guerra svolte dal gruppo di Rutherford. Ha quindi

la possibilità di dedicarsi a tempo pieno ai suoi studi e all'insegnamento, anche se non può certo rimanere indifferente al nuovo clima creato dalla guerra. Questa esperienza susciterà in lui una serie di riflessioni più generali sui rapporti tra scienza e guerra, che lo prepareranno ad affrontare la ben diversa situazione nella quale si troverà nel corso del secondo conflitto mondiale.

Negli anni trascorsi a Manchester Bohr si impegna nel raffinamento del suo modello atomico facendo tesoro di una serie di nuovi risultati sperimentali, dei quali elenchiamo brevemente i principali. Dopo alcune osservazioni preliminari fatte a partire dal 1887, i progressi compiuti dall'indagine spettroscopica portano nel 1914 alla conclusione che la formula di Balmer non è esatta: le righe ordinarie dello spettro dell'atomo di idrogeno sono in realtà costituite da doppietti o multipletti di righe, manifestano cioè quella che verrà in seguito chiamata "struttura fine". Più o meno nello stesso torno di tempo, nel novembre del 1913, Stark annuncia una sua fondamentale scoperta: l'azione di un campo elettrostatico sull'atomo d'idrogeno determina uno sdoppiamento delle righe della serie di Balmer. Questo effetto, scoperto indipendentemente nello stesso anno anche da Antonino Lo Surdo, è da allora noto come effetto Stark. Un effetto simile era già stato osservato da Pieter Zeeman nel 1896 nel caso dell'applicazione di un campo magnetico esterno alle righe spettrali di un atomo di sodio (oggi noto come effetto Zeeman normale) e, per campi magnetici intensi, da Thomas Preston nel 1897 (oggi noto come effetto Zeeman anomalo). In altri termini in presenza di campi elettrici o magnetici le righe degli spettri atomici si dividono in due o più righe.

Bohr, sollecitato da questi risultati, avvia una serie di ricerche nelle quali comincia ad applicare al suo modello di atomo la relatività ristretta. In assenza però di una rigorosa formalizzazione della teoria, Bohr conduce i suoi calcoli mescolando le equazioni note della dinamica classica e relativistica con le ipotesi quantistiche, e utilizzando in modo accorto principi euristici più o meno fondati. Tra questi menzioniamo in particolare "il principio di analogia" o "principio di corrispondenza" secondo il quale, come già osservato da Einstein nel 1909 nelle sue ricerche sui rapporti tra quanti del campo elettromagnetico ed elettrodinamica classica [5], nel limite delle basse frequenze (cioè nel limite di n grandi) il comportamento quantistico lascia il posto a quello classico.

A partire dai contributi pionieristici di Bohr nel settore, molti altri ricercatori si cimentano con i problemi della spiegazione della struttura fine e degli effetti Stark e Zeeman. Tra questi ci limitiamo a citare solo alcuni nomi. Innanzi tutto quello di Arnold Sommerfeld (fig. 7) che nel 1916, partendo dai lavori di Bohr, ricava la corretta espressione della struttura fine delle righe dello spettro dell'atomo di idrogeno, introducendo



Fig. 7 Arnold Sommerfeld insieme a Bohr nel 1917.
Crediti: Emilio Segrè Visual Archives.

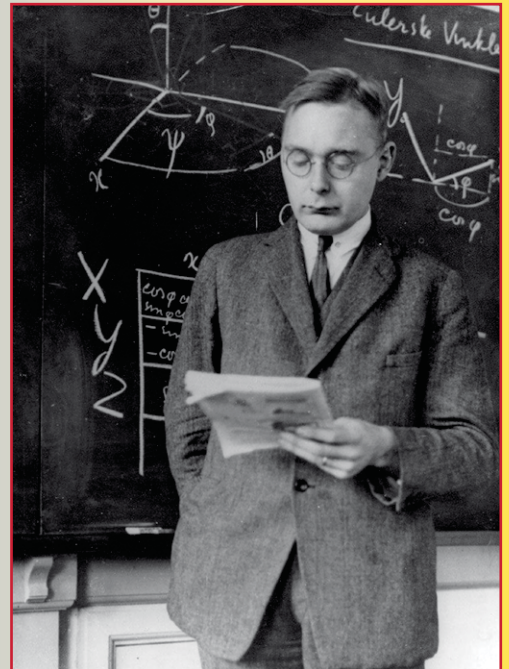


Fig. 8 Hendrik Anthony Kramers che dal 1916 al 1926 sarà il principale collaboratore di Bohr.

oltre al numero quantico principale n un nuovo numero quantico "azimutale" k (legato al momento angolare l dalla relazione $k=l+1$) e un terzo numero quantico m (poi identificato con la proiezione del momento angolare l lungo una direzione fissata). L'approccio di Sommerfeld si basa sull'applicazione, nell'ambito della descrizione quantistica dell'atomo, di alcuni metodi matematici eleganti e generali (i cosiddetti "integrali di fase"), mutuati dalla trattazione della dinamica dei sistemi periodici nell'ambito della meccanica analitica classica. È così che Sommerfeld riesce a trattare le orbite ellittiche giustificando l'introduzione dei nuovi numeri quantici. Inoltre è il primo a esprimere compiutamente la correzione relativistica al moto dell'elettrone. È in questo lavoro di Sommerfeld che comparirà per la prima volta quella che oggi è nota come costante di struttura fine $\alpha = (2\pi e^2)/(hc)$, dove e è la carica dell'elettrone, h è la costante di Planck e c la velocità della luce.

Nello stesso anno, indipendentemente, Paul Sophus Epstein, collaboratore di Sommerfeld, e Karl Schwarzschild propongono

una spiegazione dell'effetto Stark. La formula ottenuta da Epstein e Schwarzschild, che esprime i valori dell'energia dei diversi livelli in funzione di n , k e m , verrà ulteriormente estesa da Bohr e dal suo collaboratore Hendrik Anton Kramers negli anni 1918-1919, ricorrendo al principio di corrispondenza. Tutti questi successi, ancorché parziali, sono ottenuti nell'ambito della vecchia teoria dei quanti nella quale si parla ancora di orbite classiche degli elettroni, ancorché contrassegnate dai tre numeri quantici.

Nei due fecondi anni passati a Manchester, oltre agli articoli che daranno impulso ai lavori sulla struttura fine, sull'effetto Stark e sull'effetto Zeeman (normale e anormale), Bohr comincia ad abbozzare il progetto che lo porterà nel 1922 alla spiegazione della tavola periodica, il punto di sintesi più alto della vecchia teoria dei quanti alla vigilia della meccanica quantistica.

Nel frattempo, nel maggio del 1916, viene ufficialmente istituita la cattedra di fisica teorica, e nel luglio dello stesso anno Bohr rientra in Danimarca insieme alla moglie come professore

di fisica teorica. Nell'autunno del 1916 si verificano due eventi importanti nella vita di Bohr: la nascita del primo figlio, Christian Albert, e l'incontro con Kramers (fig. 8). Christian Albert sarà il primo dei sei figli che i coniugi Bohr avranno tra il 1916 e il 1927: seguiranno Hans, Erik, Aage (premio Nobel per la fisica nel 1975), Ernest e Harald. Se la nascita del figlio segna l'inizio di una nuova stagione nella vita privata di Niels e Margrethe, l'incontro con Kramers è l'inizio di una nuova fase nella vita scientifica di Bohr. La collaborazione di Bohr con Kramers, infatti, si rivelerà negli anni successivi decisiva sia per gli sviluppi delle ricerche di Bohr sia per la scoperta della meccanica quantistica. Kramers, che si è appena laureato a Leida studiando con Lorentz e Ehrenfest, chiede di poter proseguire i suoi studi di dottorato sotto la supervisione di Bohr; alla fine lavoreranno insieme, più o meno ininterrottamente fino al 1926, quando Kramers tornerà in Olanda chiamato sulla cattedra di fisica dell'Università di Utrecht.

L'arrivo di Kramers e l'inizio dell'attività di insegnamento diretta alla

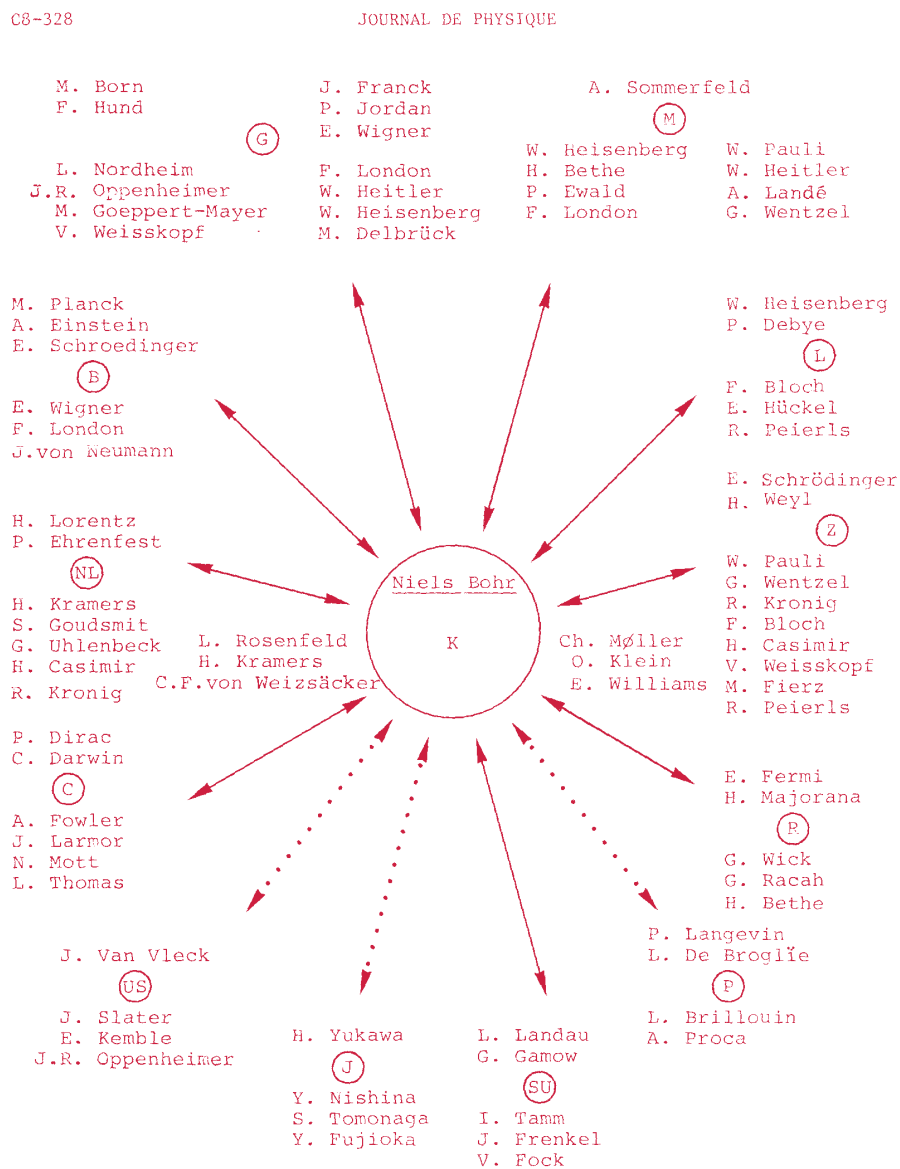
formazione di giovani fisici pongono a Bohr il problema di trovare spazi adeguati per la ricerca. Lo studio a sua disposizione al Løseanstalt si dimostra ben presto insufficiente, e l'assenza di un laboratorio attrezzato è in aperto contrasto col suo modo di concepire la ricerca nell'ambito della fisica atomica. Per queste ragioni, dall'aprile del 1917 Bohr si adopera per la fondazione di un Istituto di fisica teorica, in cui vengano create le condizioni per la crescita e lo sviluppo di questo campo in Danimarca. Fin dall'inizio Bohr concepisce l'Istituto come un centro di ricerca dove l'attività teorica deve svolgersi a stretto contatto con quella sperimentale.

Questa impostazione, ribadita da Bohr al momento dell'inaugurazione ufficiale dell'*Institut for Teoretisk Fysik*, il 3 marzo 1921, ispirerà non solo l'organizzazione dell'attività di ricerca dell'Istituto e dell'annesso laboratorio, ma più in generale anche tutte le azioni da lui condotte per istituire nuovi centri di ricerca, in Danimarca e in Europa, a partire dal secondo dopoguerra.

Nel giro di pochi anni l'Istituto di fisica teorica di Copenhagen (chiamato dal 1965 Istituto Niels Bohr) diventerà il principale punto di riferimento nel passaggio dalla vecchia teoria dei quanti alla meccanica quantistica. Come scrive Weisskopf, in un suo intervento al Congresso internazionale sulla storia della fisica delle particelle tenutosi a Parigi nel luglio del 1982: «La scoperta della meccanica quantistica fu il risultato degli sforzi di molti scienziati, al contrario della teoria della relatività. Ma ci fu un centro di questo sviluppo: *Copenhagen*, con Niels Bohr come figura guida. A Copenhagen, quasi ogni anno, si tenne una conferenza, e sempre a Copenhagen molti dei più attivi fisici teorici trascorsero periodi di tempo più o meno lunghi, presentando le loro idee in forma ancora incompleta a Niels Bohr e con lui discutendole. Molte delle idee fondamentali della meccanica quantistica sono state messe a fuoco proprio nel corso di quelle

discussioni con Bohr, molte più di quanto la letteratura sembri indicare: Bohr, infatti, solo raramente ha messo il suo nome sugli articoli. È questa la ragione per cui nella figura (fig. 9) le più

importanti scuole di fisica teorica che hanno contribuito alla teoria quantistica sono rappresentate in cerchio intorno a quella di Copenhagen» [6].



Schools of theoretical physics in the years of the foundation of QM

Abbreviations

G - Göttingen, M - Munich, L - Leipzig, Z - Zurich, R - Rome, P - Paris, SU - USSR, J - Japan, US - USA, C - Cambridge (UK), NL - Holland, B - Berlin, K - Copenhagen.

Fig. 9 Schema, presentato da Weisskopf in [6], dell'influenza esercitata da Bohr sulle scuole di fisica teorica che hanno contribuito alla nascita e ai primi sviluppi della teoria quantistica.

5 Dalla vecchia teoria dei quanti alla meccanica quantistica

Nonostante gli impegni di politica accademica, tra il 1917 e il 1918 Bohr farà notevoli progressi nella comprensione della struttura dell'atomo. Le sue ricerche prendono le mosse da un suo articolo di rassegna delle applicazioni della teoria dei quanti ai sistemi periodici, scritto a Manchester nell'aprile del 1916 ma non pubblicato. La revisione e l'ampliamento di questo articolo costituiscono l'argomento della memoria che Bohr pubblica in tre parti, le prime due nel 1918 e la terza nel 1922, dal titolo *Sulla teoria quantistica degli spettri di righe*. Bohr pone alla base della sua trattazione due principi: il principio di corrispondenza e il principio di costruzione [3, 4]. Il primo è ora applicato a elettroni che non si muovono più su orbite complanari, ma su orbite inclinate le une rispetto alle altre, a formare una sorta di nuvola o guscio sferico le cui dimensioni sono fissate da n . Il secondo principio consiste nella proposta di Bohr che la struttura di un atomo di numero atomico Z possa essere vista come il risultato della successiva aggiunta degli Z elettroni, uno alla volta, al nucleo inizialmente privo di elettroni orbitanti. Questo "principio di costruzione" si basa sull'ipotesi che i numeri quantici degli elettroni già presenti nell'atomo in formazione non vengano alterati dall'aggiunta di un nuovo elettrone (fig. 10).

Una volta completata la costruzione dell'atomo è necessario tenere conto del fatto che quando gli elettroni

più esterni si muovono su orbite ellittiche possono penetrare nel guscio sferico formato dalle orbite degli elettroni più interni. Tale "effetto di penetrazione delle orbite" nella zona centrale dell'atomo fa pensare, osserva Bohr, che l'elettrone, quando si trova all'interno del guscio sferico centrale si muova su un'orbita molto simile a quella esterna, ma con numero quantico principale diverso. L'idea delle orbite penetranti viene proposta da Bohr nel dicembre del 1920 e avanzata indipendentemente da Schrödinger in un articolo del gennaio del 1921. Tuttavia Bohr è il primo ad applicarla sistematicamente a tutti gli elementi della tavola periodica. Su queste basi Bohr è in grado di spiegare le deviazioni osservate nella successione degli elementi nella tavola periodica nel caso degli elementi di transizione: per ragioni di stabilità dell'atomo, prima si riempiono gli stati corrispondenti a orbite ellittiche con n maggiore e poi si riempiono gli stati dell'orbita circolare con n minore. La particolare somiglianza delle proprietà chimico fisiche dei lantanidi (Z superiori a 57), che insieme al lantanio, l'ittrio e lo scandio, costituiscono le "terre rare", è dovuta al fatto che tutti questi hanno tre elettroni di valenza, mentre i vari elettroni successivamente aggiunti vanno ad occupare le orbite rimaste vuote con $n=4$. Da qui Bohr conclude che i lantanidi dovrebbero essere 14 (all'epoca se ne conoscono solo 13, il promezio con $Z=61$ sarà scoperto solo nel 1947), e che l'elemento sconosciuto con $Z=72$ non dovrebbe essere una terra rara ma un elemento

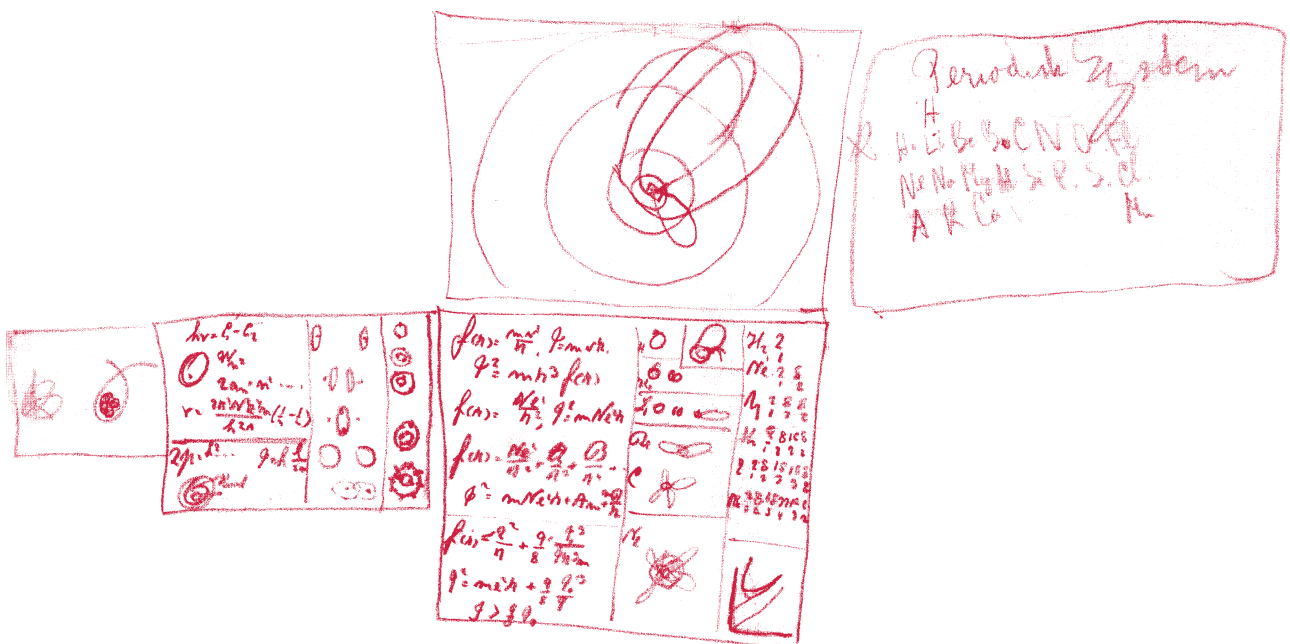


Fig. 10 Una pagina degli appunti di Bohr risalente agli anni 1920-21 dove affronta il problema delle orbite degli elettroni per spiegare l'ordinamento degli elementi nella tavola periodica. Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.

affine allo zirconio ($Z=40$). Bohr inoltre osserva che un'irregolarità analoga a quella dei lantanidi si riscontra subito dopo l'attinio ($Z=89$), ed ipotizza quindi l'esistenza di un secondo gruppo di "terre rare", i cosiddetti attinidi, comprendente l'uranio e tutta una serie di elementi transuranici, all'epoca ancora sconosciuti (alcuni sarebbero stati scoperti a partire dagli anni 1940). Una prima clamorosa verifica dell'interpretazione di Bohr della tavola periodica arriva da George de Hevesy e Dirk Coster, entrambi in quegli anni a Copenhagen, che scoprono l'elemento 72 e la sua affinità con lo zirconio. Al nuovo elemento, la cui scoperta verrà comunicata a Bohr che si trova a Stoccolma per il conferimento del premio Nobel, verrà attribuito il nome di *afnium*, dal nome latino *Hafniae* di Copenhagen.

L'introduzione da parte di Pauli tra gennaio e febbraio del 1925 di un quarto numero quantico s dell'elettrone a due valori seminteri (quello che in seguito verrà chiamato spin dell'elettrone, scoperto nell'ottobre del 1925 da George E. Uhlenbeck e Samuel A. Goudsmit) e del principio di esclusione permettono di arrivare in maniera più diretta, e senza far ricorso al principio di corrispondenza, all'interpretazione della tavola periodica data da Bohr. Siamo ormai alle soglie della meccanica quantistica: nel luglio del 1925 infatti Heisenberg (fig. 11) introdurrà un primo abbozzo di quella che è oggi nota come meccanica delle matrici e nel gennaio del 1926 Schrödinger pubblica la prima delle quattro parti dell'articolo che inaugura la meccanica ondulatoria. L'equivalenza predittiva delle due teorie verrà dimostrata nel marzo del 1926 da Schrödinger.

Tra il 1926 e il 1927 molti degli artefici della meccanica quantistica passano qualche tempo all'Istituto di Copenhagen. Bohr ha così occasione di discutere, a più riprese, dei problemi dell'interpretazione della nuova teoria



Fig. 11 La famiglia Bohr insieme a Heisenberg durante il suo primo soggiorno a Copenhagen (circa 1924). Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.

con Dirac, Heisenberg, Schrödinger, Pauli e molti altri. Frutto di quelle discussioni saranno la scoperta delle *relazioni di indeterminazione* da parte di Heisenberg, pubblicate in un articolo nel marzo del 1927, e l'introduzione del *principio di complementarità*, proposto da Bohr per la prima volta nella sua relazione al Congresso per il centenario voltiano, svoltosi a Como nel settembre del 1927.

Bohr arriva alla formulazione del *principio di complementarità*, una sorta di fondamento "filosofico" delle relazioni di indeterminazione, riflettendo sul dualismo tra onda e corpuscolo alla ricerca di una risposta alla domanda: perché la nuova teoria è stata formulata in due modi matematicamente e concettualmente così diversi (la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria) eppure predittivamente equivalenti?

I tratti salienti del principio di complementarità possono essere desunti dal suo intervento al Congresso

di Como (vedi vol. 1 in [7]). «La nostra interpretazione dei dati sperimentali – scrive Bohr – si basa essenzialmente sui concetti classici», è per questo che ci poniamo il problema se un elettrone sia un'onda o un corpuscolo. Nel caso classico, però, la relazione tra oggetto osservato e strumento di misura può essere, almeno in linea di principio, controllata perfettamente, e quindi, se l'elettrone è un corpuscolo non è un'onda, o viceversa: in altre parole il fisico classico è in grado di dedurre dal risultato della misura che una delle due descrizioni è errata. Nel caso quantistico invece «una realtà indipendente nel senso fisico usuale [classico] del termine non può essere attribuita né al fenomeno né agli strumenti di misura», quindi il fisico quantistico ne deduce che l'elettrone è un'onda o un corpuscolo a seconda dello strumento di misura utilizzato. Per evitare i presunti paradossi legati al dualismo onda-corpuscolo bisogna tener presente il nuovo nesso che la teoria

quantistica introduce tra oggetto e strumento di misura. Questa situazione è chiamata da Bohr *complementarità* ed espressa nel seguente principio: «La natura stessa della teoria quantistica ci obbliga a considerare l'attribuzione di coordinate spazio-temporali [propria del comportamento corpuscolare] e l'enunciato di causalità [proprio del comportamento ondulatorio], l'unione dei quali caratterizza le teorie classiche, come aspetti complementari, ma mutuamente esclusivi della descrizione». Per ottenere «una generalizzazione naturale del modo classico di descrivere le cose», conclude Bohr, è necessario considerare l'insieme delle rappresentazioni mutuamente esclusive dei fenomeni.

Bohr spera di incontrare Einstein al Congresso di Como per discutere con lui la sua nuova interpretazione della meccanica quantistica. Einstein però non è presente a Como, ma i due hanno l'opportunità di incontrarsi un mese dopo, nell'ottobre del 1927, a Bruxelles al V Congresso Solvay (fig. 12).

Inizia in quell'occasione quello che è oggi conosciuto come "il dibattito Einstein-Bohr". In una prima fase, segnata dal V Congresso Solvay e dal successivo VI Congresso Solvay dell'ottobre del 1930, la discussione tra i due scienziati si incentra sull'analisi di esperimenti mentali che Einstein propone con l'intento di dimostrare l'inconsistenza della

meccanica quantistica. Nella fase successiva, Einstein sembra essersi convinto della consistenza della teoria e cerca di dimostrare che essa non fornisce una descrizione completa dei fenomeni fisici; questa fase culmina nella pubblicazione del 1935 sul *Physical Review* dell'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen dal titolo *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, al quale segue la replica di Bohr contenuta in un articolo con lo stesso titolo [8]. Questi due articoli del 1935 concludono il dibattito pubblico tra Einstein e Bohr. Ciò non toglie che, a più riprese, specie nei periodi di permanenza di Bohr all'*Institute for Advanced Studies* di Princeton (nel 1939, nel 1948 e nel 1954), i due abbiano ancora occasione di confrontarsi sui problemi interpretativi della meccanica quantistica.

Negli interventi di Einstein e Bohr, che si trovano nella raccolta curata da P. A. Schilpp nel 1949 [9], i due protagonisti ricostruiscono in prima persona le fasi salienti attraversate dal dibattito e le idee che lo hanno animato. Qui ci limitiamo soltanto ad alcune riflessioni generali. L'immagine più diffusa nella letteratura è quella che contrappone un Einstein arroccato su posizioni anacronistiche a un Bohr mentore della nuova fisica. Tuttavia una contrapposizione siffatta finisce per semplificare troppo i termini del dibattito.

Einstein non si oppone alla meccanica quantistica in



Fig. 12 V Congresso Solvay, 1927. In piedi: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, J. E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. Fowler, L. Brillouin. Seduti seconda fila: P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A. H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr. Seduti davanti: I. Langmuir, M. Planck, M. Skłodowska-Curie, H. A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch.-E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson.

quanto tale, ma piuttosto all'idea di considerarla l'ultima risposta nell'ambito dei fenomeni microfisici. Secondo Einstein deve esistere una teoria più generale della quale la meccanica quantistica è solo il livello fenomenologico, un po' come la termodinamica è il livello fenomenologico della meccanica statistica nell'ambito delle teorie classiche. In altri termini, come la meccanica statistica spiega le leggi della termodinamica riducendole a quelle causali della dinamica newtoniana di grandi numeri di particelle, così deve esistere una teoria che spieghi le leggi della meccanica quantistica. Nella teoria più generale il ruolo svolto dallo strumento di misura non deve essere più considerato inanalizzabile, come pretende Bohr, ma deve trovare una sua precisa descrizione matematica e fisica.

Un altro punto che differenzia la posizione di Einstein da quella di Bohr riguarda il progresso della conoscenza fisica. Per Einstein una teoria più generale deve poter essere formulata in modo logicamente chiuso, cioè indipendente da una teoria meno generale che ne costituisce un caso limite. Einstein ovviamente pensa alle teorie della relatività (ristretta e generale). Queste teorie, a suo avviso, rappresentano un passo avanti rispetto alla meccanica classica perché permettono di trattare un dominio di fenomeni più ampio sulla base di principi fondamentali loro propri. Per questo le equazioni che esprimono la relatività possono essere formulate senza riferimento a quelle della meccanica classica. La meccanica classica, tuttavia, può essere ricavata dalle teorie relativistiche come una descrizione approssimata dei fenomeni, un'approssimazione tanto migliore quanto più piccole sono le velocità in gioco rispetto alla velocità della luce, e quanto più deboli sono i campi gravitazionali.

A differenza di quanto avviene nelle teorie della relatività, la formulazione dei principi fondamentali della meccanica quantistica è, secondo Bohr, intrinsecamente impossibile senza ricorrere alla meccanica classica. La meccanica quantistica, infatti, pur contenendo la meccanica classica come buona approssimazione dei fenomeni quando le azioni in gioco sono molto più grandi del quanto d'azione h , ha bisogno della meccanica classica per la sua stessa fondazione, come dimostra la necessità di usare oggetti classici (gli strumenti di misura) per ottenere informazioni dal mondo microfisico. Per Einstein questa singolarità della meccanica quantistica è da considerarsi solo come un carattere provvisorio che dovrà essere superato con l'avvento di una nuova e più completa teoria, mentre per Bohr è perfettamente in linea con la sua concezione di progresso della conoscenza scientifica.

In questo senso, per Bohr il principio di complementarità non è solo la chiave interpretativa della meccanica quantistica, ma un principio generale della conoscenza umana [7], il punto di approdo di una serie di riflessioni da lui avviate fin dall'epoca in cui assisteva alle discussioni del

circolo di amici di suo padre. Un esempio significativo delle idee di Bohr si trova nel suo intervento dal titolo *Luce e vita*, tenuto nell'agosto del 1932 a Copenhagen al Congresso di elioterapia, dove applica la complementarità alla biologia (vedi vol. 2 in [7]). In esso Bohr sostiene l'esistenza di «una mutua esclusione tra aspetti tipici della vita come la conservazione o la generazione degli individui, da una parte, e la suddivisione necessaria ad ogni analisi fisica dall'altra. Proprio per questo essenziale carattere di complementarità, il concetto di fine, che è estraneo all'analisi meccanica, trova un certo campo di applicazione in biologia». Per inciso, è proprio l'interesse suscitato da questa relazione a determinare una delle prime "conversioni" di un fisico, Max Delbrück (fig. 13) premio Nobel per la medicina nel 1969, alle scienze biomediche.

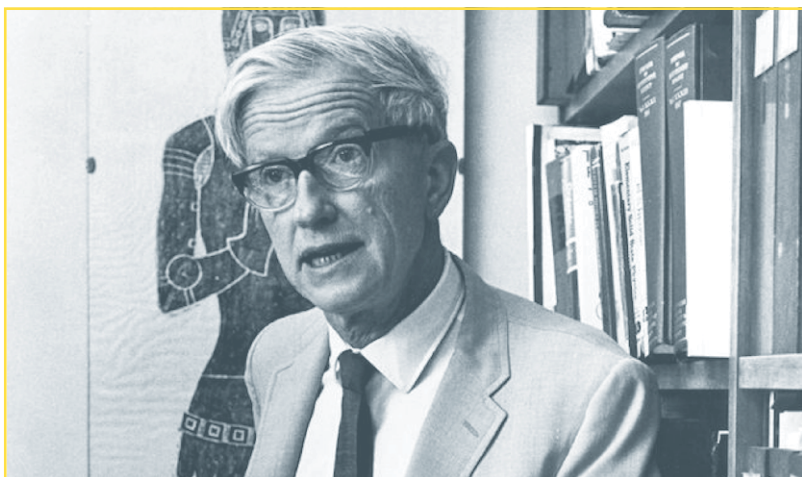


Fig. 13 Max Delbrück, premio Nobel per la medicina nel 1969, uno dei primi fisici a rivolgere i suoi interessi scientifici alle scienze della vita. Crediti: Caltech Archives.

6 Dalla fisica del nucleo all'impegno politico

Nell'estate del 1932 la famiglia Bohr si sposta a Carlsberg nell'Aeresbolig, la "Residenza onoraria delle birrerie Carlsberg" dove Niels abiterà per il resto dei suoi giorni.

Dalla metà degli anni Trenta a Copenhagen, come in molti altri centri di ricerca, l'indagine fisica viene indirizzata verso il nuovo settore della fisica nucleare. Anche in questo settore i contributi di Bohr e della sua scuola saranno rilevanti.

Uno dei problemi centrali dell'epoca riguarda le caratteristiche dell'assorbimento dei neutroni da parte del nucleo: come dar conto del fatto, sperimentalmente osservato, che il neutrone ha un'alta probabilità di essere "catturato" dal nucleo solo per particolari valori della sua energia che costituiscono una sequenza discreta di "energie risonanti"?

Tra il 1935 e il 1936 Bohr affronta questo problema proponendo un modello che visualizza il nucleo utilizzando un'analogia classica, ripresa dai suoi lavori giovanili sulla tensione superficiale dei liquidi. Il nucleo è concepito da Bohr come un insieme di neutroni e protoni tenuti insieme da forze a corta distanza, il cui comportamento è simile a quello delle molecole che formano una *goccia di liquido*. L'energia di un neutrone che urta il nucleo viene immediatamente distribuita all'intero sistema, con il risultato che nessuna particella avrà abbastanza energia per uscire dal nucleo. Il neutrone catturato forma con il nucleo originale un "nucleo composto" in uno stato di alta eccitazione. Lo stato eccitato del nucleo composto sarà soggetto a decadimento non appena una qualche fluttuazione casuale nella distribuzione di energia al suo interno concentrerà abbastanza energia su una o più particelle al suo interno causandone la fuoriuscita con un processo analogo all'evaporazione in una goccia di liquido surriscaldato. Ovviamente, la densità dei possibili stati del nucleo composto cresce col crescere dell'energia e questo spiega l'assenza di effetti di risonanza per neutroni veloci e la loro presenza nel caso di neutroni lenti.

Bohr pubblica le sue idee nel 1936 in un articolo su *Nature* dal titolo "Neutron Capture and Nuclear Constitution", essenzialmente qualitativo. Sulla linea del modello di Bohr, ma con un approccio completamente diverso e più generale, anche Gregory Breit e Eugene Wigner risolvono la questione pubblicando nello stesso anno sul *Physical Review* un articolo dal titolo "Capture of Slow Neutrons", dove arrivano all'espressione della sezione d'urto in vicinanza dell'energia di risonanza nelle reazioni nucleari. Il modello a goccia manterrà a lungo il suo potere euristico e sarà ulteriormente sviluppato da Bohr, tra il

1936 e il 1939, in collaborazione prima con Fritz Kalckar, poi con Rudolf Peierls e George Placzek, e infine con John Wheeler.

Queste ricerche di Bohr, in particolare quelle svolte con Wheeler nel 1939, hanno che fare con nuove evidenze sperimentali provenienti dalle indagini sulla produzione di radioisotopi artificiali e dalle loro applicazioni. Infatti, tra il 1934 e il 1939, a partire dalle esperienze condotte a Roma dal gruppo di Fermi (fig. 14), si diffonde l'utilizzo sistematico di fasci di neutroni

come strumento di sviluppo della fisica nucleare.

Si ottengono così importanti risultati in almeno tre settori di ricerca, nei quali l'Istituto di Copenhagen risulta all'avanguardia. Il primo è la definitiva conferma dell'esistenza di elementi transuranici, ipotizzati per la prima volta da Bohr. Il secondo settore riguarda lo sviluppo delle tecniche di tracciamento mediante isotopi radioattivi applicate in ambito biomedico, che in questa fase è merito quasi esclusivo del gruppo che a Copenhagen lavora



Fig. 14 I "ragazzi di via Panisperna": da sinistra, Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Enrico Fermi. Crediti: Emilio Segrè Visual Archives, Segrè Collection.

sotto la supervisione di de Hevesy. Il terzo settore è quello inaugurato dalla scoperta della fissione nucleare, su cui vale la pena soffermarsi. Fino al 1938 non si erano mai osservate nelle reazioni nucleari variazioni del numero atomico superiori a 2. Ma a dicembre del 1938 Otto Hahn e Fritz Strassman, proseguendo ricerche avviate con Lise Meitner, osservano che nel bombardamento dell'uranio ($Z=92$) con neutroni si sono prodotti isotopi del bario ($Z=56$). Essi comunicano subito i loro risultati alla Meitner, costretta a emigrare in Svezia a causa delle leggi naziste sulla razza.

Sulla base del modello a goccia di Bohr, la Meitner e Otto Frisch concludono, in un articolo pubblicato a febbraio su *Nature* [10], che il movimento collettivo delle particelle che costituiscono il nucleo possa essere perturbato così violentemente dall'aggiunta di energia, da determinare una divisione della goccia originaria in due gocce più piccole. In quei mesi Bohr si trova negli Stati Uniti e pubblica insieme a Wheeler un lavoro che costituisce la prima analisi teorica del meccanismo di fissione proposto da Frisch e Meitner.

Dagli Stati Uniti Bohr torna a Copenhagen pochi mesi prima dell'occupazione tedesca della Danimarca, che avverrà il 9 aprile del 1940. I rapporti internazionali che negli anni ha intrattenuto con scienziati provenienti da vari paesi, il grande prestigio di cui gode, l'indubbia competenza nell'ambito della fisica nucleare e le sue capacità organizzative fanno sì che da più parti gli giungano sollecitazioni a impegnarsi in progetti scientifici a scopo militare. Probabilmente il primo a tentare di coinvolgere Bohr in questo senso è Heisenberg, che va a trovarlo a Copenhagen nel settembre del 1941. Anche se il ruolo sostenuto da Heisenberg nel progetto di costruzione di armi nucleari da parte

tedesca continua a rimanere a tutt'oggi controverso, certo è, come scrive Pais, che «le relazioni tra Bohr e Heisenberg, dopo la guerra, non furono più così strette come ai vecchi tempi» [3]. Nei due anni successivi la situazione in Danimarca peggiora e il 29 settembre del 1943 Bohr lascia il suo paese e raggiunge l'Inghilterra.

Arrivato in Inghilterra, Bohr si rende conto che le ricerche miranti alla costruzione delle armi nucleari sono molto più avanzate di quanto avesse immaginato. Sebbene prenda parte, sia in Inghilterra sia negli Stati Uniti, alle discussioni sui problemi fisici legati allo sviluppo delle armi nucleari (trascorre tra l'altro alcuni periodi nel laboratorio segreto di Los Alamos), la sua principale preoccupazione in quel periodo è di sensibilizzare scienziati e uomini di governo riguardo alle implicazioni politiche e umane delle nuove armi. Ecco perché in quegli anni Bohr si prodiga per convincere Roosevelt e Churchill a stabilire subito contatti con l'Unione Sovietica per creare le premesse per una mutua cooperazione tra Ovest e Est necessaria a garantire la pace futura.

Le sue idee vengono apprezzate da molti scienziati, compreso Oppenheimer che all'epoca dirigeva il laboratorio di Los Alamos, ma i suoi sforzi per convincere i Capi di Stato si risolvono in un fallimento e i successivi sviluppi non fanno che confermare le sue più buie previsioni. Nonostante ciò, anche dopo il suo rientro in Danimarca il 25 agosto del 1945, Bohr continua a impegnarsi, sia nella politica sia nella scienza, nel tentativo di concretizzare il suo ideale di una cooperazione pacifica tra i popoli.

Sul piano politico il suo intervento più significativo è la *Lettera aperta alle Nazioni Unite* del 9 giugno 1950 [11]. In essa Bohr sostiene che le armi nucleari creano una situazione di pericolo mai incontrata prima dall'umanità. Ma proprio perché minacciano ugualmente

tutte le nazioni, esse offrono un'opportunità unica per raggiungere un universale accordo a non farne uso, da cui può scaturire un'era di pace duratura. «Qualunque garanzia – scrive Bohr – che il progresso delle scienze sia usato solo a beneficio del genere umano presuppone lo stesso tipo di atteggiamento di quello richiesto per realizzare la cooperazione tra le nazioni in tutti i settori della cultura. [...] Oggi infatti è più necessario che mai rendersi pienamente conto dei doveri e delle responsabilità che l'essere cittadini del mondo comporta. [...] Il fine da porre sopra ogni altro è quello di un mondo aperto, nel quale ciascuna nazione possa affermarsi solo nei limiti in cui sia in grado di contribuire alla cultura comune e di aiutare le altre grazie alla propria esperienza e alle proprie risorse», un mondo nel quale «sono rimossi gli ostacoli alla libera informazione reciproca e al libero scambio».

La lettera di Bohr, che suona oggi particolarmente attuale, non ha all'epoca particolari effetti. Diversa fortuna hanno invece le sue iniziative dirette a favorire la collaborazione internazionale in ambito scientifico. Coerentemente alle motivazioni che l'hanno spinto a fondare l'Istituto di Copenhagen, Bohr si impegna, dai primi anni Cinquanta in poi, nella realizzazione di centri internazionali di ricerca nei quali fisici teorici e sperimentali provenienti da diversi paesi abbiano occasione di lavorare insieme, assecondando almeno sul versante scientifico la sua utopia di un "mondo aperto". Non a caso Bohr promuove, insieme a Pierre Auger ed Edoardo Amaldi, l'accordo firmato il 15 febbraio del 1952 per la nascita del CERN a Ginevra, la cui divisione teorica viene provvisoriamente ospitata dall'Istituto di Copenhagen fino al 1957: è di fatto il primo atto concreto di una cooperazione europea tra nazioni che uscivano da due guerre

mondiali, con tragedie inenarrabili che le avevano viste schierate su fronti opposti. Bohr è anche uno dei promotori della costituzione nel settembre del 1957 del *Nordisk Institut for Theoretisk Atomfysik*, noto ancora oggi con l'acronimo *Nordita*, che riunisce Danimarca, Finlandia, Islanda, Norvegia e Svezia, con l'intento di formare giovani fisici teorici provenienti da vari paesi. Ed infine, l'ultima iniziativa di Bohr sarà la fondazione del Laboratorio Nazionale di Risø finalizzato originariamente a promuovere l'uso pacifico dell'energia atomica per il bene della comunità, e inaugurato il 6 giugno del 1958.

C'è un filo rosso che percorre tutta la vita di Bohr ed è la convinzione che la scienza, e in generale la cultura, siano gli strumenti essenziali per costruire ponti tra i popoli e le nazioni, per salvaguardare la loro feconda complementarità (fig. 15), per costruire una convivenza pacifica. Una convinzione che dovremmo oggi più che mai condividere con lui.



Fig. 15 Stemma di Bohr con il motto *contraria sunt complementa* e il simbolo dello Yin-Yang ripreso dalla cultura cinese. Dallo stemma conservato al Frederiksborg Castle, in Danimarca.

Bibliografia

- [1] *Physics Today*, 16 (1963) 21.
- [2] T. S. Kuhn, J. L. Heilbron, Paul Forman, Lini Allen, "Sources for History of Quantum Physics. An Inventory and Report", *Memoirs of the vol. 68* (The American Philosophical Society, Philadelphia) 1967.
- [3] A. Pais, "Niels Bohr's Times, in physics, philosophy and polity" (Clarendon Press, Oxford) 1991 (tr. it. "Il danese tranquillo. Niels Bohr un fisico e il suo tempo 1885-1962" (Bollati Boringhieri, Torino) 1993).
- [4] G. Peruzzi, "Niels Bohr. Dall'alba della fisica atomica alla Big Science", "I grandi della scienza", *Le Scienze*, n. 23, 2001.
- [5] E. Bellone (a cura di), "Albert Einstein. Opere scelte" (Bollati Boringhieri, Torino) 1988.
- [6] V. F. Weisskopf, "The places where quantum mechanics was born", *J. Phys. Colloq.*, 43, N. C8 (Décembre 1982) 325.
- [7] *The Philosophical Writings of Niels Bohr* (Ox Bow Press, Woodbridge, Connecticut) voll. 1-3 (1987) vol. 4 (1998).
- [8] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Phys. Rev.*, 47 (1935) 777; N. Bohr, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Phys. Rev.*, 48 (1935) 696.
- [9] P. A. Schilpp (a cura di), "Albert Einstein: Philosopher-Scientist", *Library of Living Philosophers* (Evanston, Ill.) 1949 (tr. it. "Albert Einstein scienziato e filosofo" (Einaudi, Torino) 1958).
- [10] L. Meitner, O. R. Frisch, "Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction", *Nature*, 143 (1939) 239.
- [11] N. Bohr, "For an open world", *Bull. At. Sci.*, 6 (1950) 213.



Giulio Peruzzi

Professore di storia della scienza e della tecnica al Dipartimento di fisica e astronomia (DFA) dell'Università di Padova, conduce dagli anni 1990 ricerche in storia della fisica, fondamenti della meccanica quantistica e filosofia della fisica. Svolge inoltre attività di divulgazione scientifica collaborando a riviste e trasmissioni radio e televisive, e come curatore di mostre e musei. Attualmente è vice-direttore del DFA e Direttore del master di comunicazione delle scienze. È socio corrispondente dell'Accademia Galileiana di Scienze Lettere ed Arti di Padova. Nel 2017 ha vinto il premio per la storia della fisica della Società Italiana di Fisica.

THE ELECTRON-ION COLLIDER PROJECT

A LABORATORY FOR THE ULTIMATE UNDERSTANDING OF QUANTUM CHROMODYNAMICS (QCD) AND FOR THE PROGRESS OF EXPERIMENTAL TECHNOLOGIES IN HIGH-ENERGY NUCLEAR PHYSICS

SILVIA DALLA TORRE

INFN-Sezione di Trieste, Trieste, Italy

The non-elementary nature of the proton has been known for almost 90 years; further experimental evidence of the proton structure has been acquired since then. The experimental and theoretical progress in the hadronic field resulted in the formulation of Quantum ChromoDynamics more than 50 years ago. Nevertheless, key questions remain persistently unanswered. They concern the comprehensive understanding of the nucleons and the nuclear matter, and the dynamics of the nuclear force. The Electron-Ion Collider under construction in USA is the facility designed for the ultimate exploration of the nucleons and the nuclear matter thanks to the high center-of-mass energy, the large luminosity, and the polarization of its beams. This scientific progress can be made possible overcoming the technological challenges posed by the accelerator ensemble and the experimental detectors.

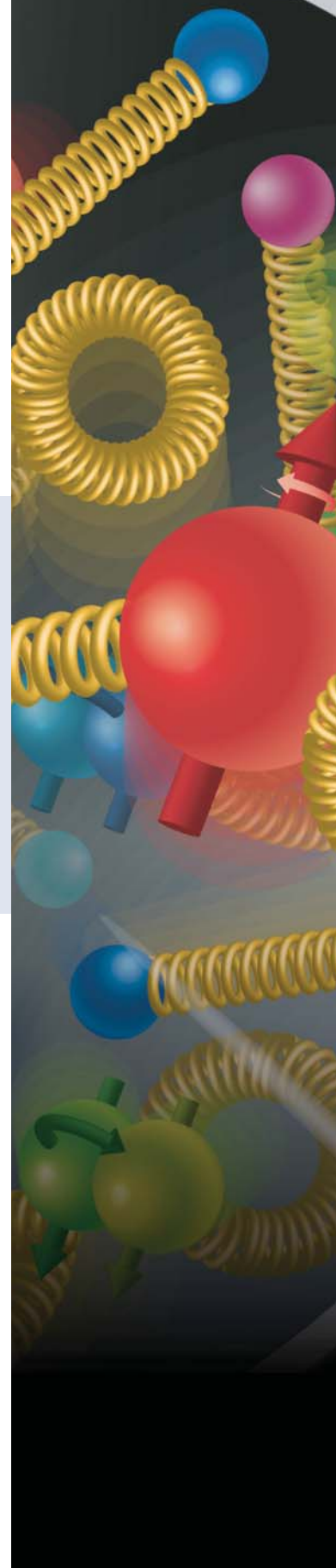
1 Introduction

On 9 January 2020, breaking news was published on the official web site of the US Department of Energy announcing the *approval of the Electron-Ion Collider Project* and the selection of Brookhaven National Laboratory (BNL) as the site for the new accelerator facility. This approval was made possible thanks to the long-term coherent effort of the US high-energy nuclear physics community, also supported by large international contributions. Some crucial milestones to this result are the dedicated white paper “The Next QCD Frontier: Understanding the glue that binds us all” [1] in its 2012 and 2014 versions, the priority ranking

of the EIC project within the 2015 Long Range planning for nuclear science [2], the extremely positive report by the US National Academy of Science, Engineering, Medicine published in Summer 2018 (NAS report [3]) and the EIC User Group [4] promoting and supporting the EIC and its science. In 2020 the User Group has revised the detector requirements for the whole physics scope at EIC and this gigantic work has been summarized in the three volumes of the EIC Yellow Report [5]. Presently, the EIC User Group includes more than 1300 scientists with wide international participation.

The need of a high-energy electron-hadron collider for the scientific progress in the field of hadronic physics and the comprehensive

* E-mail: silvia.dallatorre@ts.infn.it



understanding of the nuclear matter and the nuclear force, also known as strong force, is widely recognized within the nuclear and subnuclear community. In the input document to the European Particle Physics Strategy Upgrade dedicated to “The DIS and Related Subjects Strategy Document: Fundamental Science from Lepton-Hadron Scattering” written in 2018 [6], six potential projects of electron-hadron collider are mentioned. Presently, while the perspectives of five of them are uncertain or negative, the EIC is approved and approaching the construction phase. The interested international community is clustering around it.

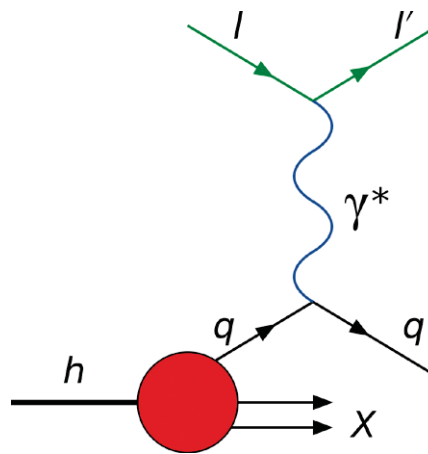


Fig. 1 Deep Inelastic Scattering of a lepton (l) on a hadron (h), at leading order in perturbative expansion. The virtual photon (γ^*) knocks a quark (q) out of the hadron.

2 Historical background and physics scope

The nucleons, namely the proton and the neutron, are the components of the atomic nuclei and are accounting for almost the whole mass of the objects around us. Nevertheless, these particles that are so present in our everyday life still hide unrevealed mysteries. The challenge of understanding in a comprehensive way their intrinsic nature fascinates the scientists. It is a long story.

In 1933, the measurement of the anomalous magnetic moment of the proton made it evident that, contrary to the electron, the proton is not an elementary Dirac fermion. In the fifties of the twentieth century, its finite size was measured. At the beginning of the sixties, hadron spectroscopy considerations suggested the introduction of the *quarks*, entities of an SU(3) symmetry group (M. Gell-Mann and G. Zweig). The need of another degree of freedom to avoid Pauli principle violation resulted in the introduction of an additional SU(3) gauge degree of freedom: the *colour charge* (O. W. Greenberg, M. Y. Han, Y. Nambu). In parallel to the theoretical progress, a deeper experimental

understanding was made possible thanks to a major technological step forward: towards the end of the sixties a 20 GeV electron beam became available at SLAC, USA complemented by a fine-resolution spectrometer. High-energy electrons could further resolve the proton structure initiating the experimental approach known as *Deep Inelastic Scattering (DIS)*, illustrated at leading order in perturbative expansion in [fig. 1](#). With reference to this figure, the couple of kinematic parameters most largely used to define a DIS event can be introduced. They are Q^2 , namely the absolute value of the squared module of the four-momentum of the virtual photon and *Bjorken-x*, interpreted as the fraction of the hadron momentum carried by the struck q ; this approximation is rigorously valid in the Lorentz frame, where hadron and quark masses can be neglected. The detection of the scattered electrons provided evidence that the scattering is off point-like entities inside the proton, the *partons*, as named by Richard Feynman. The debate concerning the identification of the quarks, introduced as mathematical entities, with the experimentally observed partons impassioned the community. This

identification is nowadays widely recognized. All these theoretical and experimental contributions resulted in the formulation of the *Quantum Chromodynamics (QCD)*, a non-abelian field theory, presently regarded as the theory describing the nuclear force dynamics. The QCD vector gauge bosons are the *gluons*, carrying colour charge. QCD dynamics is complex, characterized by colour confinement (coloured objects cannot be isolated, namely all observed hadrons are colour singlets) and asymptotic freedom (the interactions between quarks and gluons become weaker and weaker as the energy scale increases and the corresponding length scale decreases). Part of the dynamical effects can be perturbatively calculated (perturbative QCD), while the non-perturbative aspects are attacked by different approaches, among them phenomenological models and lattice calculations. This complexity implies a *long-term learning curve*.

Further progress, namely moving towards a systematic exploration of the nucleon structure, required higher energies: this was made available starting in the late seventies, by the *muon beam at CERN SPS*, with beam

energies up to 200 GeV, using as probe a lepton different from the electron, namely the muon. This beam line is still active with improved beam intensity. Also, in the nineties, the energy of the *SLAC electron beam* was raised up to 45 GeV. In the same years, *HERA at Desy*, the first electron-proton collider, started operation pushing the center-of-mass energy reach well above 100 GeV. HERA provided physics in the period 1992-2007. The result of this experimental effort is a wide exploration of the collinear aspects of the nucleon structure and the confirmation of the perturbative QCD predictions (fig. 2).

In parallel, the access to other degrees of freedom started. At the CERN muon beam, the *nuclear effects*, present when the nucleons are embedded in nuclei, were studied. The *spin effects* were explored thanks to the use of solid-state polarized targets at CERN and at SLAC, and an internal polarized jet target at HERA. A more comprehensive exploration of the nucleon structure requires moving beyond merely collinear effects, resulting in new challenges for the experimental approach, namely the detection not only of the scattered leptons, but also of other particles in the final

state, initiating the *Semi-Inclusive DIS (SIDIS)* measurements, which require *wide-acceptance spectrometers* and larger scattering rates, namely *increased experiment luminosity*. The new frontier also challenges the theoretical assessment of QCD, deeply penetrating the non-perturbative regime. A first generation of SIDIS experiments started, at CERN with *COMPASS* and at DESY with *HERMES*, then complemented by measurements at the *Jefferson Laboratory*, where electrons beams of extremely high luminosity are available, even if at lower energy.

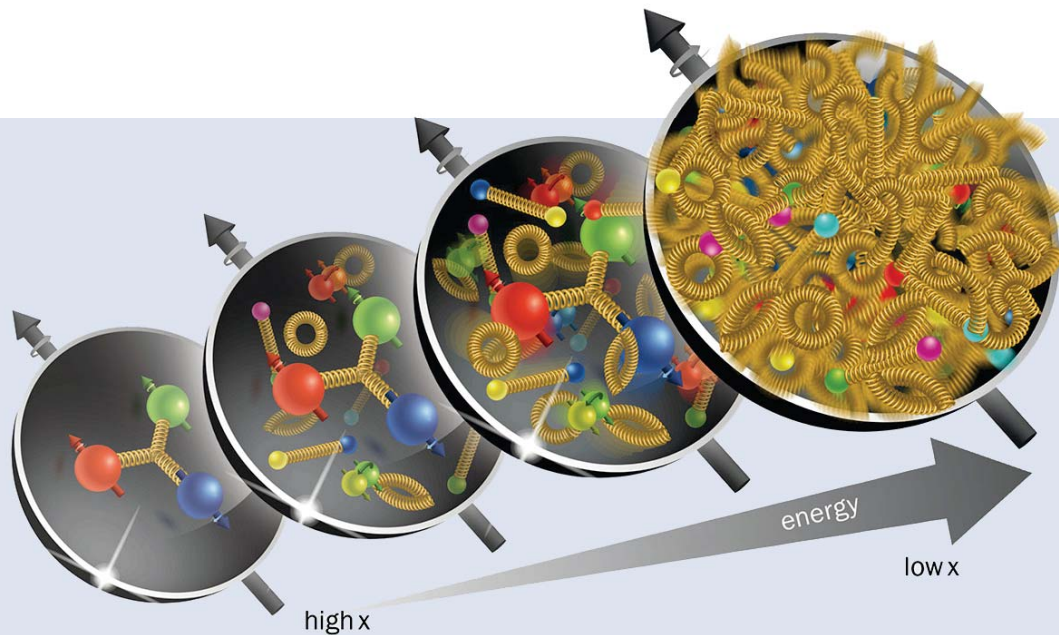


Fig. 2 Artistic view presenting the deeper and deeper insight of the proton structure provided by increasing the centre-of-mass energy in Deep Inelastic Scattering. At higher energy, smaller and smaller Bjorken- x phase-space becomes accessible (courtesy of BNL Media & Communications).

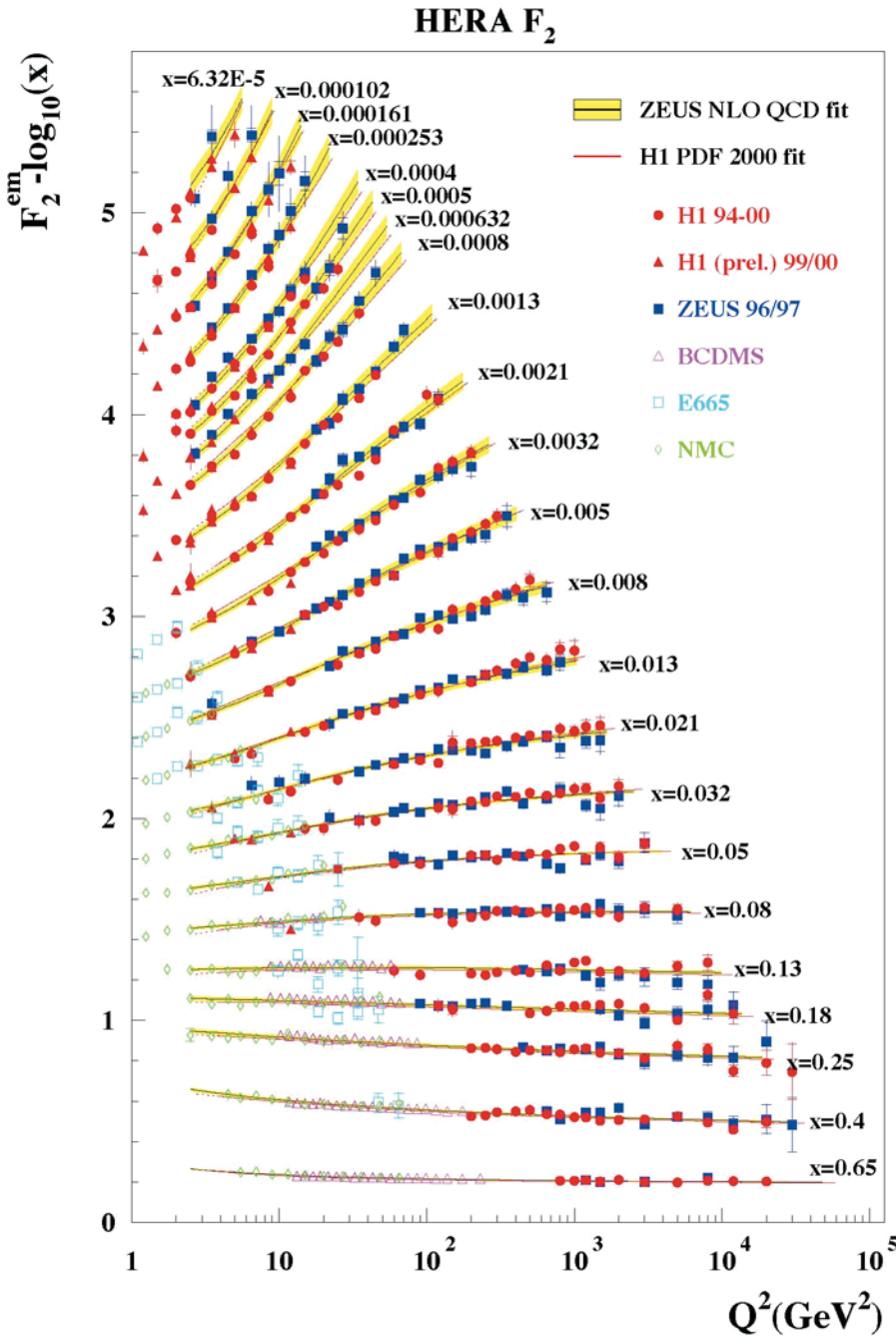


Fig. 3 The proton structure function, F_2 , as a function of the virtuality of the exchanged photon at different values of x measured at HERA and fixed target experiments [7].

The *unpolarized proton structure function* is known with fine precision in an astonishing wide phase-space (fig. 3), even if specific kinematical regions are not deeply explored. For instance, the quark distribution functions are poorly known at very small Bjorken- x and the gluon distribution functions need further exploration both at small and large x .

The *polarization degrees of freedom* enlarge the exploration domain and can be described with seven more independent structure functions (fig. 4). The measurements related to the longitudinal helicity have been performed since the eighties of the last century and the present picture is rich, even if it does not have the same fine resolution and completeness as that of the unpolarized structure function. These measurements have also initiated the so-called “spin crisis”. In fact, following these measurements only about 30% of the proton spins is accounted for by the quarks. More recent semi-inclusive measurements indicate that another about 40% can be related to the gluon contribution. The remaining should arise from the dynamics, namely the orbital angular momentum, whose exploration is one of the goals of the EIC.

The six structure functions related to the transverse polarization are in an initial explorative phase and they will largely benefit from the high luminosity foreseen at the EIC.

Another privileged field of studies at the EIC is that related to the *origin of the proton mass*, where the quark mass contributes for only about 1% and the large majority of the mass is generated by the QCD dynamics via mechanisms to be understood and explained. The determination of the gravitational gluonic form factors through Deeply Virtual Meson Production (DVMP) on nucleons is one of the privileged approaches considered at the EIC.

leading twist		quark operator		
		unpolarized [U]	longitudinal [L]	transverse [T]
target polarization	U	$f_1 = \text{unpolarized}$		$h_1^\perp = \text{Boer-Mulders}$
	L		$g_1 = \text{helicity}$	$h_{1L}^\perp = \text{worm gear 1}$
	T	$f_{1T}^\perp = \text{Sivers}$	$g_{1T} = \text{worm gear 2}$	$h_1 = \text{transversity}$ $h_{1T}^\perp = \text{pretzelosity}$
	TENSOR	$f_{1LL}(x, k_T^2)$ $f_{1LT}(x, k_T^2)$ $f_{1TT}(x, k_T^2)$	$g_{1TT}(x, k_T^2)$ $g_{1LT}(x, k_T^2)$	$h_{1LL}^\perp(x, k_T^2)$ $h_{1TT}, h_{1TT}^\perp$ $h_{1LT}, h_{1LT}^\perp$

Fig. 4 The complete set of the eight independent nucleon structure functions; U: unpolarized; L: longitudinally polarized; T: transversely polarized. For completeness, also the tensor functions are reported.

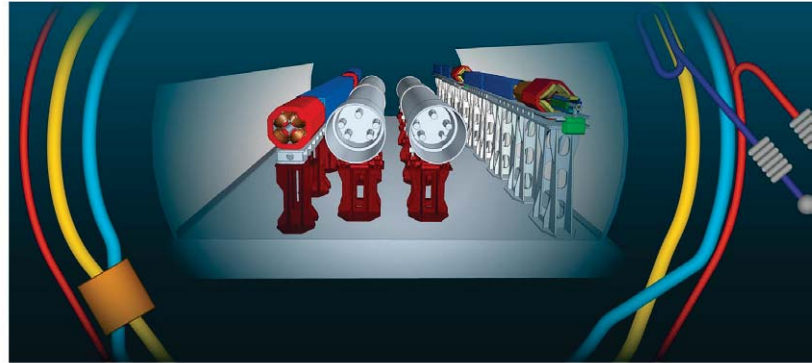
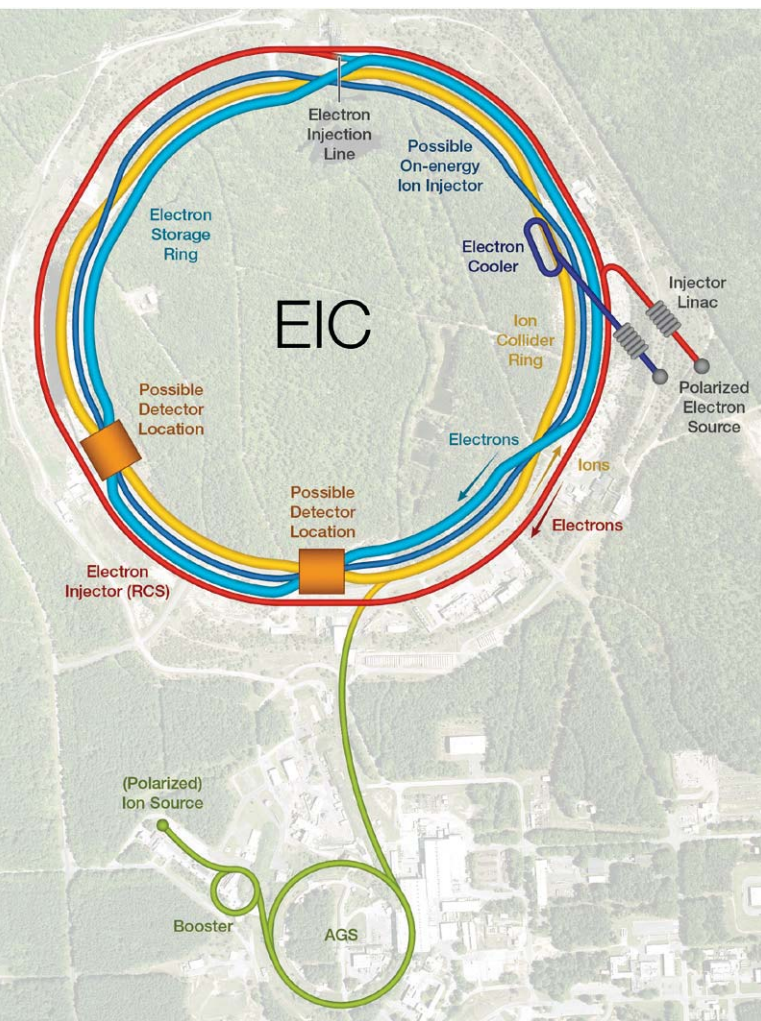
In the nuclear sector, the first electron-ion collider will offer unique opportunities for *studies of gluons in nuclei*, giving the concrete opportunity to study the collinear parton distributions in nuclei, the gluon saturation at small Bjorken- x , the properties of the cold nuclear matter and the description of the fragmentation and hadronization processes.

The takeaway messages of this historical summary and overview of the EIC physics scope are self-evident. On one side, the ultimate exploration of the QCD world, aiming at revealing all its secrets, requires high center-of-mass energy, high luminosity, polarization degrees of freedom, wide coverage of the scattered particle phase-space, and scattering off a large variety of nuclear species. The EIC is designed to match all these requirements. On the other side, the scope of the new facility is to provide an answer to all the persisting open questions in the field of QCD. They clearly appear from the analysis of the present level of understanding of the nucleon and nuclear matter. They have been summarized in the NAS report: the complete assessment of the nucleon spin structure, the origin of the nucleon mass, and the evolution of the quark and gluon sea in nuclei, which includes the predicted gluon saturation at small Bjorken- x , presently still lacking experimental evidence.

3 The EIC project

The EIC project has been approved in December 2019 by signing the Critical Decision 0 (CD0, mission needed), as anticipated in the Introduction. The project is progressing accordingly to its aggressive schedule: a second milestone, namely Critical Decision 1 (CD1, completion of the project definition phase) was reached in June 2021. The project completion, that will be marked by the Critical Decision 4, is scheduled in the first years after 2030. The project includes the collider, whose main characteristic are recalled in the following and a detector able to deliver the whole physics scope as presented in the white paper [1] and NAS report [3]. The design of the collider includes two interaction regions; a second detector can be instrumented later.

The EIC (fig. 5) will be the first *collider* with electron beams scattered off *protons and nuclei up to the highest masses*, namely up to uranium, and the first collider with *highly polarized electron and light nucleus beams*, where average polarization at the 70% level is expected. Its design is characterized by *large luminosity*, up to $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for electron-proton scattering and the possibility to span *a wide range of centre-of-mass energies*, from 20 to 141 GeV. It will take advantage of important elements of the ion-



- spanning a wide kinematical range
 - **ECM: 20 – 141 GeV**
- High luminosity
 - up to $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- **highly polarized e (~ 70%) beams**
- **highly polarized light A (~70%) beams**
- wide variety of ions: from H to U
- **Number of interaction regions: up to 2**

Fig. 5 Left: the schematic overview of the EIC Collider; the yellow and light blue rings are the storage rings of the present RHIC collider; the EIC storage rings will be the yellow one (from RHIC used for ions) and the new dark blue (for the electrons); the red ring represents the rapid-cycling synchrotron for electron acceleration. The two interaction regions are also shown (courtesy of BNL Media & Communications). Right, top: the cutaway of the EIC tunnel; in grey the existing RHIC storage rings, in colours the new electron storage ring and the synchrotron for electron acceleration (courtesy of BNL Media & Communications). Right, bottom: The main design parameters of EIC.



ion collider RHIC in operation at BNL. In particular, the civil engineering including the tunnel, the ion storage ring, being one of the two in use for RHIC, and of the whole complex of the hadron sources, including ions and polarized protons, and the acceleration chain are already available at BNL. The electron complex is new: this includes the polarized source, the pre-acceleration stages, a fast-cycling synchrotron for the electron acceleration with a dedicated design in order to preserve the beam polarization while accelerating, and the electron storage ring. High luminosity is obtained with a variety of dedicated ingredients in the collider design, as the many bunches of both colliding beams and the high current of the electron beam. Two of them are frontier elements. The beam *crab-crossing* scheme will attempt a crossing angle never so large: 25 mrad. The phase-space of the ion beams will be reduced making use of the *Coherent Electron Cooling* (CEC, [8]), whose key technological element is a high-gain Free Electron Laser (FEL). The proof of principle is on-going at BNL. Another specific characteristic of the accelerator complex is the high integration level between the accelerator and the detector, as needed for the request of hermeticity, a major one coming from the physics programme.

The project includes a *detector* capable to cope with the whole EIC physics scope as presented in [1] and [3] by inclusive, semi-inclusive and exclusive measurements. The detection of the scattered electron, its identification and discriminating from hadrons, and the fine measurement of its kinematical parameters are key for the pure inclusive measurements and central for semi-inclusive and exclusive studies. Semi-inclusive measurements need complete azimuthal coverage, excellent identification of the hadron

species and excellent vertex resolution. Exclusive channels impose hermeticity with wide coverage in Mandelstam t -variable and the detection of the fragments from the nuclear breakup, including neutral ones. These requirements, when translated to detector design, result in the need of a well-equipped central detector sitting in the interaction region, where a space approximately 10 m long is available, and in the instrumentation of the small-angle regions, indicatively covering angles below 2° , in the forward and backward directions, with detectors situated along the collider beam lines (fig. 6).

In the *central detector*, a superconducting solenoid provides the magnetic field for momentum analysis. As apparent in fig. 6, the central detector is organized in barrel, forward and backward regions. The detection system includes, for each of the three regions, tracking, particle identification devices and electromagnetic and hadron calorimetry. The *far forward* devices are dedicated to very small-angle tracking and calorimetry with capabilities for gamma and neutron detection. The main installation of the *far backward* region is dedicated to luminosity measurement and monitoring by bremsstrahlung process measured with dedicated electromagnetic calorimeter devices. The design of the detector has evolved over time resulting, in 2020, in the reference detector described in [5]. Further detector evolution was presented in the Proposals for Detectors at the Electron-Ion Collider submitted in December 2021 and the community is presently working to evolve from one of the proposed detector, the ECCE detector, taking advantage of the strengths also present in the other proposals, towards an optimized baseline detector. As an example of the central

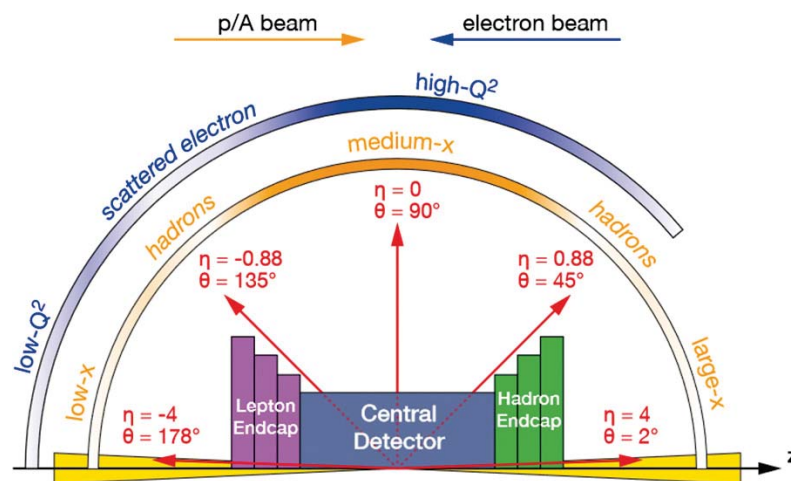


Fig. 6 A schematic showing how hadrons and the scattered lepton for different $x - Q_2$ are distributed over the detector pseudorapidity and angular coverage (courtesy of the EIC User Group).

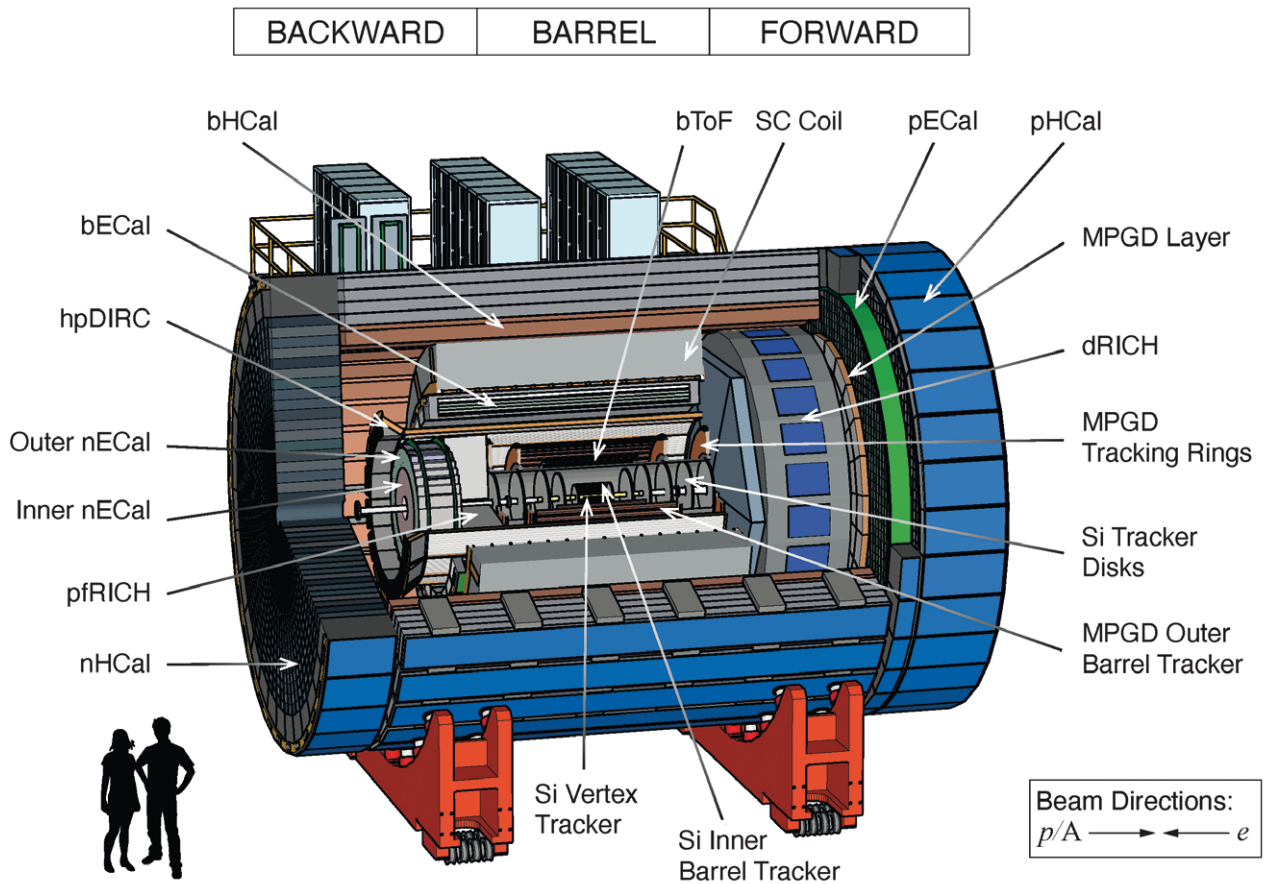


Fig. 7 Crosscut view of the ATHENA central detector (courtesy of the ATHENA Collaboration).

detector concepts, the one developed within the ATHENA collaboration is presented in [fig. 7](#).

In the following, some highlights of the proposed detector elements are illustrated, focusing on the most innovative approaches.

The tracking system includes detectors by MicroPatternGaseous Detector (MPGD) technologies and silicon tracking. Dedicated simulation exercises confirm that the tracking and, therefore, momentum and vertex resolution is largely dependent on the material budget. The sensors selected for the Si tracking are thin, *low material and low power consumption* MAPS in 65 nm technology, under development for the upgrade of the LHC experiment ALICE. The starting point are the MAPS sensors ALPIDE [9], while the path to the thinner flexible MAPS is ongoing [10]. The thin sensors, also allowing for curved arrangement, the very low power consumption and the possibility of large-size sensors make it possible to design extremely low material vertex layers with only 0.05% radiation length per layer, where the most internal one is located at a few cm from the beam pipe. The same sensors in smaller-size version for cost

considerations are considered for the surrounding layers, where they would require a more traditional mechanical arrangement, corresponding to a material budget of 0.2–0.5 radiation length per layer.

A hybrid electromagnetic calorimeter with imaging layers instruments the barrel in the ATHENA proposal. Its design uses light-collecting calorimetry based on SciFi embedded in Pb and imaging calorimetry based on the monolithic silicon sensors AstroPix. The imaging of particle showers is achieved by six layers of imaging silicon sensors interleaved with five SciFi/Pb layers, followed by a thick layer of SciFi/Pb calorimeter resulting in a total radiation thickness of about 20 radiation lengths. The barrel is composed of 12 staves.

It is a design with the capability to detect scattered and secondary electrons and separate them from pions, to detect and reconstruct full kinematic information for photons, and provide sufficient spatial resolution to identify neutral pions from neutral pion decay at high momenta.

Particle identification requires multiple technologies to address the physics goals, because of the globally wide momentum range to be covered and the different

momentum ranges of the hadrons produces at different rapidities. Measurements of Cherenkov radiation provide the greatest momentum reach, but they are limited in their low-momentum reach. Therefore, at the lowest momenta, a time-of-flight approach is foreseen based on AC-LGAD sensors. The set of Cherenkov devices includes a dual radiator RICH in the forward region utilizing aerogel and gas radiators focused by mirrors, a high-performance DIRC in the central region, and an aerogel RICH in the backward region, for which two designs have been considered, both aiming to high resolution: either a proximity focusing RICH with long proximity gap or a focusing RICH where focalization is provided by Fresnel lenses situated between the aerogel and the photosensors. The *photosensors*, sitting in regions where there is intense magnetic field, represent a major challenge. Moreover, in particular for the DIRC, fine time resolution is requested. Two families of sensors are considered. SiPMs, so far, have never been used in a Cherenkov counter used in experiments because of the high dark count rate, that increases with radiation damage and can only be partially limited by operating them at low temperature. This feature can represent a severe limitation for Cherenkov applications, because, on the one hand, single photons have to be detected and, on the other hand, the dark signals are indistinguishable from the single photon ones. The effects of the radiation damage can be reduced with thermal annealing protocols. A robust R&D programme is ongoing to access the performances of SiPMs in single photon detection including irradiation and recovery by annealing. The option of *in situ* annealing by reversed bias is also part of these studies. SiPMs from different producers are included in these studies. SiPMs are the baseline choice for the dual RICH and the aerogel RICH. Commercially available MCP-PMTs are the baseline sensors for the DIRC. Larger size MCP devices, known as LAPPD, under development in collaboration between academia and industry, are an appealing alternative and the EIC community is involved in the development R&D.

The accelerator and detector efforts are complemented by *polarimetry* requirements. Rapid, precise beam polarization

measurements will be crucial for meeting the goals of the EIC physics program as the uncertainty in the polarization propagates directly into the uncertainty for relevant observables as asymmetries. The basic requirements for beam polarimetry are non-destructive with minimal impact on the beam lifetime, uncertainty at the 1% level, the capacity of measuring the beam polarization for each bunch in the ring with rapid, quasi-online analysis in order to provide timely feedback for accelerator setting up. The *electron beam polarimetry* will be based on the well-established Compton polarimeter techniques, where the polarized electrons scatter from 100% circularly polarized laser photons. This approach offers the advantage that both longitudinal and transversal polarizations are measured. A Møller polarimeter is also considered: it could serve as a reasonable fallback, albeit with reduced precision and a larger impact on the beamline design. *Hadron polarimetry* has been successfully performed on RHIC polarized proton beams for nearly two decades. Through continual development a relative systematic uncertainty $< 1.5\%$ was achieved for the most recent RHIC polarized proton run. As the only hadron polarimeter system at a high energy collider it is the natural starting point for hadron polarimetry at the EIC. Hadron polarization will be measured via a transverse single-spin left-right asymmetry in the pp interaction on targets by plastic material (H-C composition), where the experimental challenge is the control of the background events. A novel approach with the measurement of asymmetry of forward scattered neutron in the scattering of polarized protons off high-Z targets is under consideration.

4 Summarizing

The ultimate understanding of the QCD, the theory describing the world around us, requires a dedicated facility. Several collider projects have been suggested over the years in various world regions. Among them, the US EIC is now an approved project under realization that will start delivering physics in about ten years from now.

The physics scope is wide, covering all the major open questions in the field of QCD, which include the nucleon spin puzzle and, more in general, the three-dimensional structure of the nucleons, the origin of the nucleon mass, which arises from the QCD dynamics and the evolution of the parton distributions in high-density nuclear matter, also to verify the QCD predictions of gluon saturation at small Bjorken- x .

A strong and motivated community of scientists, experimentalists, theoreticians and accelerator experts has supported the project since more than a decade and is presently actively at work to realize the project itself.

The EIC is also a technological challenge. Considering the accelerator complex, the realization of the large-angle beam crab crossing and of the coherent electron cooling of the ion

beams are two major examples of frontier developments. The detector has specific requirements, some of them different from those needed at other collider facilities as the low material budget to preserve the fine resolution in measuring the parameters of the scattered electron, the demanding requests to the particle identification system and the detector hermeticity. These challenges are faced considering up-to-date technologies and frontier solutions supported by a robust and focused detector R&D programme dedicated to the specific requirements of the experiments at the EIC. Therefore, the EIC is not only a project for the progress of fundamental science, but also a laboratory to develop frontier technologies in the domains of particle accelerators and ionizing particle detectors.

Bibliography

- [1] A. Accardi et al., “Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier: Understanding the glue that binds us all”, *Eur. Phys. J. A*, 52 (2016) 268.
- [2] A. Aprahamian et al., “Reaching for the horizon: The 2015 long range plan for nuclear science”, DOE/NSF Nuclear Science Advisory Panel Report (2015), <http://www.osti.gov/biblio/1296778>.
- [3] G. Baym et al., “An Assessment of U.S.-Based Electron-Ion Collider Science”, 2018, <https://www.nap.edu/read/25171>.
- [4] Electron-Ion Collider User Group, <http://www.eicug.org/>.
- [5] R. Abdul Khalek et al., “Science Requirements and Detector Concepts for the Electron-Ion Collider: EIC Yellow Report”, 2021 arXiv:2103.
- [6] A. Caldwell et al., The “DIS and Related Subjects” Strategy Document: Fundamental Science from Lepton-Hadron Scattering, input to the EPPSU, <https://indico.cern.ch/event/765096/contributions/3295746/attachments/1785271/2906291/dis-related-subjects-submitted.pdf>.
- [7] H. Abramovitz et al. (H1 and ZEUS Collaborations), “Combination of Measurements of Inclusive Deep Inelastic $e\pm p$ Scattering Cross Sections and QCD Analysis of HERA Data”, *Eur. Phys. J. C*, 75 (2015) 580.
- [8] V. N. Litvinenko, Y. S. Derbenev, “Coherent Electron Cooling”, *Phys. Rev. Lett.*, 102 (2009) 114801.
- [9] G. Aglieri Rinella (ALICE Collaboration), “The ALPIDE pixel sensor chip for the upgrade of the ALICE Inner Tracking System”, *Nucl. Instrum. Methods A*, 845 (2017) 583.
- [10] G. Aglieri Rinella et al. (Alice ITS project), “First demonstration of in-beam performance of bent Monolithic Active Pixel Sensors”, *Nucl. Instrum. Methods A*, 1028 (2022) 166280.



Silvia Dalla Torre

Silvia Dalla Torre, research director at INFN-Sezione di Trieste, has a life-long research experience in hadron physics in experiments at Saclay-Saturne II, CERN-LEAR, CERN-SPS and, presently, contributing to the design of the experimental programme at the EIC, the collider under construction at BNL, USA; in this context, she has been spokesperson of the ATHENA Collaboration, which proposed a detector for the experimental programme at the EIC. She has a wide experience in ionizing particle counters, particularly in the domain of gaseous detectors, Cherenkov imaging counters and photon detectors. She served in national and international scientific committees (CERN SPSC, CERN LHCC, INFN CSN 1, ECFA Detector Panel, ECFA Detector R&D Roadmap Panel), she led several research projects (coordination of the COMPASS RICH project; spokesperson of the RD51 Collaboration devoted to MPGD; coordination of work packages within five European projects, the most recent one being AIDAinnova). She has also served within INFN management as Director of INFN-Sezione di Trieste and member of the INFN Directorate Board.

THEORETICAL SPECTROSCOPY: UNRAVELLING ELECTRONIC CORRELATIONS FOR MATERIALS DESIGN

MATTEO GATTI*

*LSI, CNRS, CEA/DRF/IRAMIS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France
European Theoretical Spectroscopy Facility (ETSF)
Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Gif-sur-Yvette, France*

Computational materials design has established itself as a new research paradigm to speed up the identification and optimization of materials properties. The key to materials understanding and discovery, including the possibility to uncover new states of matter, is an accurate and reliable description of the effects of electron interactions in the excitation spectra measured by modern spectroscopies. At the same time, interacting many-electron systems continue to represent one of the great intellectual challenges in physics today. Here we outline some prominent strategies to address this challenge, by the example of the identification of genuine signatures of electron correlation in photoemission spectra.

1 Spectroscopy and the “music” of materials

As our eyes need light to see shapes and colours, spectroscopy can tell us about the behaviour of electrons in materials, disclosing the extremely rich variety of their properties. In a spectroscopy experiment, a sample is perturbed by an external probe, such as a photon or an electron. In the standard setup, the sample is initially in its ground state and the perturbation is weak enough so that the sample is not altered by the experiment. As a result of the interaction with the probe, the sample gets excited, reacting to the external perturbation: its response can be measured, delivering precious information about its characteristic excitations. The outcome of the experiment usually has the form of a spectrum: a collection of peaks, encoding the possible excitation energies of the material, which defines its properties. Quantum mechanics gives us the keys to decode the measured spectra and to make the best use of the great deal of information that they carry. It allows us to explain existing materials properties and to predict new ones.

As we strike a bell to hear its sound, spectroscopy reveals the “music” of materials: a complex symphony where many different instruments are played at the same time. The goal of spectroscopy is to identify the instruments and the notes played by this orchestra. It allows us to transcribe the music into a score, and, possibly, to recombine different sounds into new symphonies that may be played again by nature.

* E-mail: matteo.gatti@polytechnique.fr

2 Why do we care? The dream and the challenge

Understanding and mastering the interaction of light with matter is a crucial step in order to chase the dream of designing new materials with tailored properties. This holds true both for traditional spectroscopies, where new materials are interrogated by light beams on their properties, and for advanced experiments, where strong coupling with light is used to steer materials to provide properties on demand, or even to realise new states of matter.

The usefulness of the research domain on the electronic structure of materials can be hardly overestimated. New materials are more and more demanded to better perform specific functions in a very large variety of technological domains. For example, materials advances are urgently needed to obtain more efficient solar cells for energy conversion and storage, or to build faster and less consuming optoelectronic devices. Indeed, materials discovery plays a key role to attain the Sustainable Development Goals of the United Nations' 2030 Agenda, and the International Year of Basic Sciences for Sustainable Development [1] that we are celebrating precisely highlights the crucial importance of fundamental science to respond to humankind's needs.

On the other hand, the theoretical description of excited states of matter, as those measured by spectroscopy experiments, is rooted into the search for effective solutions of a quantum many-electron problem, which poses a great intellectual challenge on its own. The electronic structure of materials is the result of the interactions among many particles. In principle, the origin of the extremely rich variety of materials properties is rather simple, and well known: essentially, just atoms from the periodic table, located at different positions, and the Coulomb interaction. Like the DNA for the human genome, those remarkably simple ingredients represent the cornerstone of the "materials genome" [2]. However, even the idealised

picture of solids as perfect crystals at 0 K (made of positively charged, massive ions at rest and interacting electrons wandering in the crystalline field) represents a quantum many-body problem: a prominent example of a complex system. Indeed, two important aspects of interacting many-electron systems are emergence and high sensitivity to control parameters, such as temperature, pressure, or doping. The fact that a water molecule is different from the O and H atoms it is built of, or that the interface between two insulators can be metallic [3], and that two sheets of graphene stacked together at a slightly twisted angle can be superconducting [4], are three simple illustrations of the basic principle that the whole is different from the sum of its parts. Collective behaviours, phase transitions with drastic changes, or spontaneous symmetry breakings, are all noteworthy examples of the manifestation of the complexity of interacting many-electron systems. This implies that, in order to describe, explain, and predict materials properties, very often the centre of interest needs to be shifted from the characteristics of the elementary constituents to the role of the inter-relations among them. One can even imagine to exploit the effect itself of the interaction between particles in order to devise new functional materials. For example, excitonics is a new research field that aims to replace electrons (or holes) with excitons, *i.e.* interacting electron-hole pairs, as more efficient carriers to realise faster and more compact optoelectronic devices [5].

Spectroscopy investigations of many-electron systems combine the question of unravelling the effects of interactions together with the need for an accurate description of the physical process at the basis of a specific experiment. The rest of this contribution will propose some thoughts on possible strategies to address the interacting many-electron problem (underlining concepts that can be shared also in other contexts), and will focus on the prototypical example of the signatures of electron correlation in photoemission spectra.

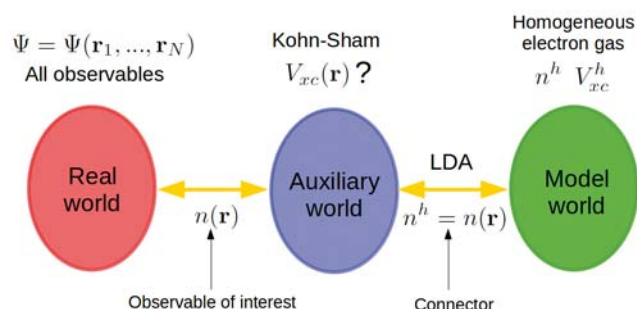


Fig. 1 Conceptual strategy of density functional theory depicted as a “multiverse theory”. DFT replaces the many-body wavefunction $\Psi(r_1, \dots, r_N)$ with the ground-state density $n(r)$ as the observable of interest in the real, many-body world. It builds an auxiliary (Kohn-Sham) world that exactly targets $n(r)$ (and in principle nothing else), where the exchange-correlation part $V_{xc}(r)$ of the effective potential is however unknown. Finally, it introduces

a third, simplified, model world: the homogeneous electron gas where V_{xc}^h is calculated accurately (once for all) as a function of the homogeneous density n^h . The model results are imported through a prescription (which we call “connector” [7]): in the case of the LDA the connector is the local density $n(r)$ itself. This very successful strategy is analogously used in other contexts and a source of inspiration for possible generalisations.

3 Strategies to find our way out of the many-body labyrinth

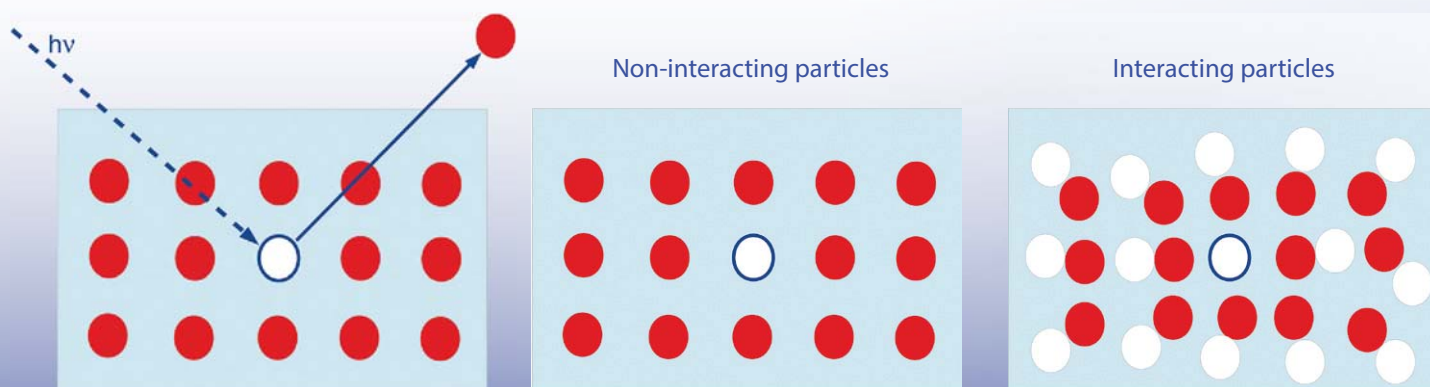
Quantum mechanics tells us that a system of N electrons (embedded in the static potential due to the positive ions, at 0 K) is described by the wavefunction $\Psi(x_1, \dots, x_N)$, solution of an N -body Schrödinger equation. Ψ depends conjointly on the position and spin coordinates $x_i = (r_i, \sigma_i)$ of each, indistinguishable, electron: this dependence cannot be factorised in such a way that Ψ would depend separately on each of them (Ψ could thus take the form of a Slater determinant, as in the Hartree-Fock approximation). In other words, as a result of the Coulomb interaction, electrons are correlated. In an extended system when N is large, the direct calculation and the storage of the whole Ψ is impractical (or even impossible). However, most importantly, at the end this is not even needed. Indeed, we are usually interested in observables, which are obtained as expectation values of specific operators. Mathematically, observables are the result of integration over most of the degrees of freedom of Ψ : its detailed information over the N electrons is traced out. Powerful Quantum Monte Carlo (QMC) methods show that a stochastic evaluation of these complex integrals can be indeed performed with great accuracy.

Much effort in modern theory of many-electron systems is devoted to rewriting basic quantum mechanics equations in such a way that one can calculate only what is needed, allowing at the same time for a much clearer interpretation of the results. A successful strategy followed by many approaches is to introduce alternative (often called auxiliary) N -body systems, with effective particles and effective interactions between them (and sometimes with no interaction at all). This choice also represents an important paradigm shift. We move from the difficult search of approximate solutions of a known, very complicated, Schrödinger equation to the (not always easy) development of approximations of (in practice) unknown equations that

are simpler and can be exactly (or almost exactly) solved.

The massive success of density functional theory (DFT), with thousands of applications in very different domains, is a clear demonstration that this is indeed a rewarding strategy. DFT is an exact reformulation of quantum mechanics, and another many-body theory of a collective variable: the ground-state electron density $n(r)$. DFT takes a synthetic point of view and can be also called a minimum information theory, as it identifies $n(r)$ as the simplest quantity that in principle one needs to know in order to calculate observables. The big advantage is that, in contrast to Ψ , the number of arguments of the function $n(r)$ is always only one, independently of the number N of electrons. The density is therefore also called a “reduced quantity”.

In this context, the genius idea of Kohn and Sham [6] was twofold (see fig. 1). First, they introduced an auxiliary system of non-interacting particles that, by construction, has the same density as the original interacting many-electron system. In this way, they realised a mean-field scheme that is exact for one selected observable: the density (but not for anything else). Second, they showed that the unknown effective potential in which the auxiliary Kohn-Sham electrons live can be approximated by introducing another, simpler, model system (in their case it was the homogeneous electron gas). The unknown potential is imported, thanks to a simple prescription (now we call it a “connector” [7]), from the model where it can be evaluated much more easily. The local density approximation (LDA) of DFT was born, which has been later refined (notably by making use of known exact constraints on the objects to approximate [8, 9]). The great popularity of the method is due to the fact that the difficult portion of the interaction contributions has been calculated, once for all, in the model (for the LDA, by accurate QMC methods [10]), and the model results can be reused with a simple recipe, over and over again, by any researcher, in principle for any material.



We can certainly learn from this very successful strategy, and also try to generalise it along several directions [7]. However, despite the ingenious conceptual leap, and the spectacular progress that has been made possible, Kohn-Sham DFT also has intrinsic limitations (as anything else). Mathematically, in traditional quantum mechanics observables are (known) functionals of Ψ : within DFT they become different functionals in terms of n . However, for most observables these density functionals are not known or cannot be easily approximated. In particular, the Kohn-Sham system itself does not have a direct connection with the elementary excitations of the real many-electron system, which are the focus of theoretical spectroscopy. Therefore, very often we are still obliged to look for alternatives.

In order to keep a direct connection with excitation spectra measured by spectroscopy experiments, it is convenient to make use of dynamical (*i.e.*, frequency-dependent) correlation functions, which are another kind of reduced quantities. Notable examples are response functions, which correlate the change of an observable with the perturbation that has caused it, and Green's functions, which describe the propagation of additional particles interacting with all the others (Green's functions are therefore also called propagators). In particular, the one-particle Green's function G is the propagation amplitude for one additional electron (or hole) between two space, time, and spin coordinates. In an orbital basis, it is the complex dynamical matrix $G(\omega)$. It is a more expensive object to calculate than the density $n(r)$. However, with respect to DFT, more observables are known as functionals of G . Notably, the spectral function is simply $A(\omega) = (1/\pi) |\text{Im } G(\omega)|$: its peaks correspond to the one-particle excitations such

as electron addition and removal energies measured by photoemission spectroscopy.

As other correlation functions, the one-particle Green's function can be obtained, in principle exactly, as a solution of a Dyson equation:

$$(1) \quad G(\omega) = G_0(\omega) + G_0(\omega) \Sigma(\omega) G(\omega).$$

Dyson equations always share the same structure. The first term on the right-hand side is an initial approximation, which one can afford to calculate explicitly. In this case, G_0 can be the non-interacting Green's function or the propagator of a quasiparticle, *i.e.*, a particle that feels (or, as often said, "is dressed by") the interactions with the other electrons. The kernel in the second term of the equation, in this case the complex and dynamical self-energy $\Sigma(\omega)$, takes into account the remaining couplings with the rest of the many-electron system: it is generally unknown and has to be approximated. The kernel modifies the one-particle excitations in G with respect to the initial G_0 , and the non-linearity of the equation can also change their number. The important result is that the many-electron system is recast into a set of elementary excitations and couplings between them.

As in other computational schemes, differently known as embedding, partitioning or downfolding, where one is interested only in a part of a system and treats the remainder in an effective way, the frequency dependence of $\Sigma(\omega)$ replaces the need to deal explicitly with the many-electron excitations, when the target are only the one-electron excitations contained in G . Thus, by analogy with the Kohn-Sham scheme, the approximation strategy based on Dyson equations can be also understood to lead to auxiliary

Fig. 2 What happens when a hole is created in a many-electron system? Left panel: in a photoemission experiment an electronic system absorbs a photon and its energy is used to emit an electron, whose kinetic energy is measured at the detector. A hole with a positive charge is left in the electronic system. Middle panel: without interactions: the remaining

electrons do not perceive the hole, and nothing happens. Right panel: with Coulomb interactions: the remaining electrons rearrange themselves to react for the presence of the positive charge: their polarization leads to screening, which is the key physical process taken into account by Hedin's GW approximation [11].

systems with dynamical and complex effective potentials (or kernels) describing couplings between effective particles or excitations.

An important advantage of the structure of Dyson equations is that eq. (1) can be equivalently rewritten as an infinite series:

$$(2) \ G(\omega) = G_0(\omega) + G_0(\omega)\Sigma(\omega)G_0(\omega) + G_0(\omega)\Sigma(\omega)G_0(\omega)\Sigma(\omega)G_0(\omega) + \dots$$

This expansion shows that it is generally advantageous to approximate the kernel of the Dyson equation with respect to a direct approximation of the target correlation function itself: through the infinite resummation in eq. (2), a low-order approximation of the kernel can produce a higher-level correlation function. Alternative expansions to Dyson equations are also possible that share the same resummation spirit: for example, in the cumulant expansion approximation, $G(\tau)$ (which is the Fourier transform from ω to time difference τ) has an exponential representation $G(\tau) = G_0(\tau)e^{C(\tau)}$, where approximations are then done on the cumulant function $C(\tau)$.

Different approaches are followed to approximate the kernels of Dyson equations. For example, in dynamical mean field theory, similarly to the LDA, the self-energy is imported from a model (in this case, an Anderson impurity model). In approximations of many-body perturbation theory, instead, a selection of the most important couplings is made, on the basis of some physical criterion. In the following, we will see how the dielectric screening of the Coulomb interaction is the key physical mechanism to explain the excitation spectra of many extended materials, the simple metal aluminium will be their representative example.

4 A theorist's view on photoemission

In a photoemission experiment (see [fig. 2](#)), one removes (or adds, in the case of inverse photoemission) one electron from a many-electron system and observes the reaction of all other electrons. The measurement of the electron removal (and addition) energies determines the electronic structure of materials and can reveal the effects of the Coulomb interaction between the electrons.

If one takes a book from a well stocked bookshelf, the other books would not move much. Similarly, without Coulomb interaction, the electron removal energy would directly correspond to the single-particle energy level that the removed electron was occupying in the many-electron system, with the other electrons not perceiving its absence (see [fig. 2](#), middle panel). If, instead, one removes a book from the bottom of a disordered pile, the other books could fall down, and the pile could even collapse. Similarly, taking into account the Coulomb interaction, the removal of an electron creates a hole with a positive charge that induces a rearrangement of all other electrons (see [fig. 2](#), right panel). As a result, the measured electron removal energy will be different with respect to the non-interacting case. This polarisation effect, which can be visualised as the creation of multiple electron-hole pairs (also called a "polarisation cloud"), suggests the definition of a quasiparticle: a hole together with the rearrangement of the surrounding electrons. Quasiparticles are said to be "renormalised": their properties are different from "bare" particles and their interaction is also weaker, as the electron polarisation screens the Coulomb interaction.

The celebrated Hedin's GW approximation (GWA) [11] to the self-energy corrects the Hartree-Fock approximation (so it

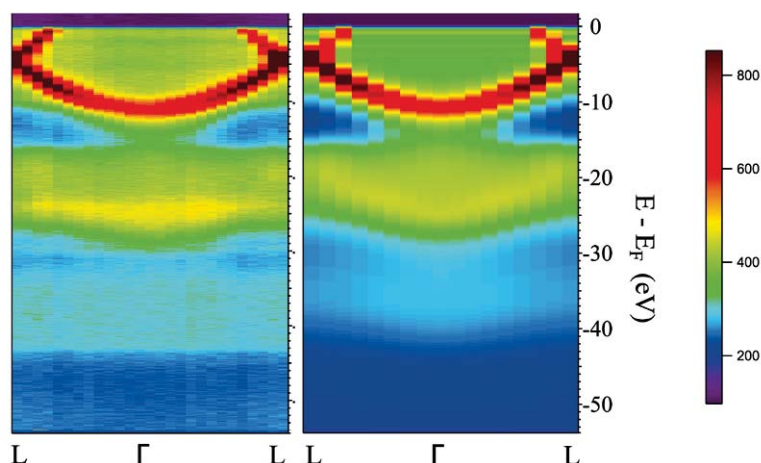


Fig. 3 Angle-resolved photoemission spectrum of aluminium, with the binding energy of the electrons in the crystal on the vertical axis and their wavevector on the horizontal axis. Left panel: measurement at the Swiss Light Source at 624 eV photon energy and, right panel: simulation based on Green's function theory, including the contributions from the photoemission process itself. Adapted from [12].

includes correlation effects) by precisely taking into account the dielectric screening in materials. The GWA replaces the Coulomb interaction v by the dynamically screened Coulomb $W(\omega) = v + v\chi(\omega)v$, where $\chi(\omega)$ is the density response function. The resulting self-energy is $\Sigma = iGW$, whence its name. For the rest, the GWA makes two main approximations: it assumes that the polarisation is made of non-interacting electron-hole pairs ($\chi(\omega)$ is calculated at the level of the so-called random-phase approximation) and treats the interaction between the additional charge and the polarization charge at the classical (Hartree) level (so, for example, it neglects coupling with spin excitations).

Whereas Kohn-Sham particles are not individually measurable, quasiparticles have a direct link with experiments, which allows for physical insight and facilitates the development of approximations. The GWA is nowadays the state-of-the-art approximation to calculate quasiparticle properties in a wide range of materials, where dielectric screening is the key physical process. In particular, quasiparticle energies define the band structures of crystalline materials. They are the main peaks in angle-resolved photoemission (ARPES) spectra, where they are measured as a function of their wavevector. As an example, [fig. 3](#) (left panel) shows the measured ARPES spectra of aluminium [12]. The sharp peaks dispersing between ~ -11 eV binding energy and the Fermi energy, set at 0 eV, correspond to the parabolic valence band of aluminium.

Calculations in materials science are very often limited to these quasiparticle band structures. However, quasiparticles are not the only features in the one-particle excitation spectra. A hole in the many-electron system acts as a perturbation that can also induce additional excitations. Notable examples are plasmons (or magnons), collective excitations of the electronic charge (or spin). Therefore, photoemission spectroscopy is like watching a drop falling on a surface of water, when concentric ripples are formed

on the surface around the falling point of the drop. Indeed, in addition to quasiparticle peaks, photoemission spectra in [fig. 3](#) (left panel) also display satellites (or “side-bands”), which have an energy distance from the quasiparticle band equal to a multiple of ~ 15 eV, *i.e.* the energy needed to create a plasmon excitation in aluminium.

While plasmon satellites in core level spectra have been known for a long time, for the valence excitations measured by ARPES, satellites are much less explored. To describe these plasmon satellites in the spectral function $A(\omega)$, including their shape dispersion, recently the GWA to the self-energy has been successfully combined with the cumulant expansion of the Green's function in a wide range of materials, from simple metals to transition-metal oxides like SrVO_3 or TiO_2 [13, 14, 15].

Plasmon satellites are genuine many-body effects that cannot, by definition, be interpreted within a quasiparticle picture and, therefore, carry information complementary to the band structure, featuring distinct length- and time-scales from the quasiparticles. They are the result of the dynamical screening of the Coulomb interaction and, in fact, a dynamical kernel is needed in order to produce satellites in the spectral function. Therefore, satellites reflect the strength of electronic correlation in materials. Here, we have reached the important conclusion that these dynamical correlation effects can be understood as a coupling of excitations, in this case the coupling between a hole and a collective plasmon excitation (similar photoemission satellites can be also due to coupling with other neutral excitations like excitons, magnons, phonons, photons, etc.).

Moreover, [fig. 4](#) shows that the calculated spectral function is actually only a small part of a photoemission spectrum. This clearly exemplifies the need to calculate what is really measured in experiments in order to obtain deeper understanding. Besides capturing correlation effects in the spectral function, an accurate description of

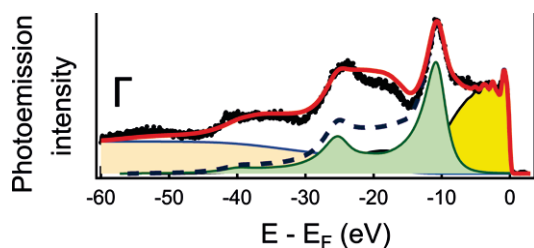


Fig. 4 Comparison between experiment and theory at the Γ point (corresponding to vertical cuts from the two panels of fig. 3): the calculated spectral function $A(\omega)$ (light green area), giving (intrinsic) correlation effects of the material, is only a small part of the measured photoemission spectrum (black dots). To reach a quantitative understanding, one has to accurately describe the photoemission process itself. The total theoretical spectrum (red

line) also includes contributions from inelastic scattering of the photoelectron ("extrinsic" and "interference" effects), thermal atomic vibrations that destroy wavevector selectivity (Debye-Waller effect, giving the wavevector-integrated yellow area), and the background from secondary electrons (light brown area). This allows the detection of a non-dispersing satellite around ~ 20 eV due to electron interactions and atomic vibrations. Adapted from [12].

the photoemission event itself is also necessary. This is, in part, still an open problem, and here we can delineate a few of its sides. First of all, while photoemission spectra strongly depend on the energy of the photon impinging on the sample, spectral functions, by definition, do not. In the latter, one missing piece of information is the probability for an electron (called the "photoelectron") to escape from the sample (in practice, it is an optical transition that can be calculated as a matrix element of the photon-matter interaction). Moreover, the photoelectron can also inelastically scatter on its way out from the sample, losing a fraction of its energy. In its interactions with other electrons, it can induce additional plasmons, which also contribute to the plasmon satellites in the measured spectra. These additional contributions are called "extrinsic" effects, to distinguish them from the "intrinsic" plasmon satellites in the spectral function. And, since intrinsic and extrinsic processes are quantum phenomena, there are also "interference" effects between them. Another important aspect in the measured spectra in fig. 3 and fig. 4 is the thermal motion of the atoms (in the so-called Debye-Waller effect), which acts against the wavevector selectivity of ARPES, giving a contribution to the spectra that is integrated over all the wavevectors.

Only by taking into account the effects of the interactions, at the same time, in the spectral function and in the photoemission process, it has been possible to reach a quantitative agreement between experiment and theory (see fig. 3 right panel), even for the simple case of aluminium. The outcome has been the suggestion for a strategy to extract from the spectra precise information about correlation strength in materials and the detection of a new kind of satellite that is due both to electron-electron interaction and the atomic vibrations. This also shows, once more, the crucial importance of collaboration (in this case between theory and experiment), combining complementary competences in order to solve problems.

5 Conclusions and outlook

We have taken here a short exploration journey through the fascinating many-electron world. Electronic interactions make many-electron systems intriguing and challenging at the same time. They influence excitation spectra in quantitative and often even qualitative ways. In order to make full use of the information in the measured spectra, one needs both to accurately describe the interaction between the probe and the sample, and to be able to interpret signatures of electronic correlation in the spectra.

We have outlined some central concepts and strategies in many-body theories, and we have used a simple example to illustrate how a tight interplay between theory and experiment is essential to reach a deeper understanding. Those considerations can be similarly extended to other materials, spectroscopies, and contexts.

Theory has a very important role to play when it bridges different experiments and creates new synergies between experimentalists. For example, the view of dynamical correlation as the coupling between different excitations suggests the idea to study them separately. Referring again to our illustrative example, plasmon excitations that characterise the dielectric screening of materials can be accurately investigated by electron energy loss and inelastic X-ray scattering spectroscopies, which can be efficiently coupled with information from photoemission. Plasmons have their own interest as central objects in the research field of plasmonics [16]. Moreover, as in a virtuous circle, energy loss spectra themselves feature dynamical correlation signatures such as double plasmons and double excitations (or multiplets) that pose new challenges to theory [17, 18].

New discoveries and technological progress continuously open up new horizons, indicating new goals to reach and suggesting new roads to explore. The list of examples here can be endless: the development of extreme brilliant (fourth-generation) synchrotron sources is now allowing

for improved spatial resolution and better exploitation of coherent phenomena; free-electron lasers can be now used for the investigation of ultrafast phenomena at the nanoscale; efficient artificial intelligence algorithms can be combined with physical insight for the design of better approximations and the discovery of novel materials; the advent of quantum computing will offer a revolutionary platform to benefit from the development of functional theories, and so on. All this just signifies that interacting many-electron systems will certainly continue to keep us busy for a very long time, in an intellectual endeavour that is constantly renewed.

References

- [1] <https://www.iybsssd2022.org>
- [2] See, e.g., J. J. de Pablo et al., "New frontiers for the materials genome initiative", *npj Comput. Mater.*, 5 (2019) 41.
- [3] A. Ohtomo, H. Y. Hwang, "A high-mobility electron gas at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterointerface", *Nature*, 427 (2004) 423.
- [4] Y. Cao et al., "Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices", *Nature*, 556 (2018) 43.
- [5] N. P. D. Sawaya et al., "Excitonics: A Set of Gates for Molecular Exciton Processing and Signaling", *ACS Nano*, 12 (2018) 6410.
- [6] W. Kohn, L. J. Sham, "Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects", *Phys. Rev.*, 140 (1965) A1133.
- [7] M. Vanzini et al., "Connector theory for reusing model results to determine materials properties", *npj Comput. Mater.*, 8 (2022) 98.
- [8] J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, "Generalized Gradient Approximation Made Simple", *Phys. Rev. Lett.*, 77 (1996) 3865.
- [9] J. Sun, A. Ruzsinszky, J. P. Perdew, "Strongly Constrained and Appropriately Normed Semilocal Density Functional", *Phys. Rev. Lett.*, 115 (2015) 036402.
- [10] D. M. Ceperley, B. J. Alder, "Ground state of the electron gas by a stochastic method", *Phys. Rev. Lett.*, 45 (1980) 566.
- [11] L. Hedin, "New Method for Calculating the One-Particle Green's Function with Application to the Electron-Gas Problem", *Phys. Rev.*, 139 (1965) A796.
- [12] J. S. Zhou et al., "Unraveling intrinsic correlation effects with angle-resolved photoemission spectroscopy", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 117 (2020) 28596.
- [13] F. Aryasetiawan, L. Hedin, K. Karlsson, "Multiple Plasmon Satellites in Na and Al Spectral Functions from Ab Initio Cumulant Expansion", *Phys. Rev. Lett.*, 77 (1996) 2268.

Acknowledgements

The present article is based on a contribution presented at the session "Fisica della materia" organised by Matteo Paris at the 107th Congress of the Società Italiana di Fisica. Many stimulating discussions with members and friends of the Palaiseau Theoretical Spectroscopy Group are gratefully acknowledged.

- [14] M. Gatti, M. Guzzo, "Dynamical screening in correlated metals: Spectral properties of SrVO_3 in the GW approximation and beyond", *Phys. Rev. B*, 87 (2013) 155147.
- [15] C. Verdi, F. Caruso, F. Giustino, "Origin of the crossover from polarons to Fermi liquids in transition metal oxides", *Nat. Commun.*, 8 (2017) 15769.
- [16] S. A. Maier, "Plasmonics: Fundamentals And Applications" (Springer-Verlag, New York, USA) 2007.
- [17] C. Sternemann et al., "Correlation-Induced Double-Plasmon Excitation in Simple Metals Studied by Inelastic X-Ray Scattering", *Phys. Rev. Lett.*, 95 (2005) 157401.
- [18] B. C. Larson et al., "Nonresonant Inelastic X-Ray Scattering and Energy-Resolved Wannier Function Investigation of d-d Excitations in NiO and CoO", *Phys. Rev. Lett.*, 99 (2007) 026401.

Further readings

- W. Kohn, Nobel Lecture: "Electronic structure of matter: wave functions and density functionals", *Rev. Mod. Phys.*, 71 (1999) 1253.
- L. Hedin, "On correlation effects in electron spectroscopies and the GW approximation", *J. Phys.: Condens. Matter*, 11 (1999) R489.
- G. Onida, L. Reining, A. Rubio, "Electronic excitations: density-functional versus many-body Green's-function approaches", *Rev. Mod. Phys.*, 74 (2002) 601.
- R. M. Martin, L. Reining, D. M. Ceperley, "Interacting Electrons: Theory and Computational Approaches" (Cambridge University Press, Cambridge) 2016.
- G. Stefanucci, R. van Leeuwen, "Nonequilibrium Many-Body Theory of Quantum Systems: A Modern Introduction" (Cambridge University Press, Cambridge) 2013.
- F. Bechstedt, "Many-Body Approach to Electronic Excitations: Concepts and Applications" (Springer, Berlin) 2014.



Matteo Gatti

Matteo Gatti is a CNRS researcher at the Laboratoire des Solides Irradiés of the Ecole Polytechnique in Palaiseau (France), Research team leader of the European Theoretical Spectroscopy Facility (ETSF), and Associated researcher at the Synchrotron SOLEIL. His research activities are devoted to the development of theoretical and numerical approaches for the calculation of many-body effects in electronic spectra of materials, in a strong synergy with experiments. A wide range of applications, from photovoltaics to cultural heritage, often combine fundamental questions and technological interest.

QUANTUM ADVANTAGE WITH A PROGRAMMABLE PHOTONIC PROCESSOR, AVAILABLE NOW ON THE CLOUD

FABIO SCIARRINO

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia

Gaussian Boson Sampling is a non-universal model for quantum computing inspired by the original formulation of the Boson Sampling problem. Nowadays, it represents a paradigmatic quantum platform to reach the quantum advantage regime in a specific computational model. Indeed, thanks to the implementation in photonics-based processors, the latest Gaussian Boson Sampling experiments have reached a level of complexity where the quantum apparatus has solved the task faster than currently up-to-date classical strategies. Very recently, the Canadian startup Xanadu reported in *Nature* the demonstration of the quantum computational advantage using the Borealis device, a photonic processor that offers dynamic programmability on all implemented logic gates.

QUANTUM ADVANTAGE CON UN PROCESSORE FOTONICO PROGRAMMABILE, DISPONIBILE ADESSO SU CLOUD

Sin dalla prima proposta di un paradigma computazionale basato sulle regole della meccanica quantistica, un notevole sforzo di ricerca è stato dedicato all'identificazione dei sistemi fisici più adatti e delle migliori strategie per implementare un computer quantistico scalabile e universale. Tuttavia la realizzazione di un computer quantistico universale in grado di surclassare un computer tradizionale rappresenta, con le tecnologie attuali, una sfida ancora aperta. La comunità scientifica ha quindi identificato, come obiettivo intermedio verso un computer quantistico universale, la realizzazione di una piattaforma tecnologica in grado di superare qualsiasi dispositivo classico nella risoluzione di uno specifico problema computazionale (anche privo di applicazioni pratiche). Tale scenario è stato denominato "quantum supremacy/quantum advantage" (<https://www.nature.com/articles/%20d41586-019-03781-0>). Negli ultimi anni si sono seguite prevalentemente due strategie per dimostrare il regime di quantum advantage: 1) il Random Quantum Circuit e 2) il Boson Sampling (<https://www.nature.com/articles/nature23458>).

1) Il Random Quantum Circuit si basa sulla misura degli stati di uscita (ovvero nel campionamento della distribuzione di probabilità associata) generati da un circuito quantistico random, ed è stato implementato nel 2019 da Google con il processore quantistico *Sycamore* basato su 53 qubit superconduttori (<https://www.nature.com/articles/%20s41586-019-1666-5>). Tuttavia successivi miglioramenti nella simulazione classica dello stesso processo hanno aperto un ampio dibattito scientifico sulla effettiva dimostrazione della supremazia quantistica fornita da Google. In particolare nelle ultime settimane ricercatori

in Cina hanno eseguito il medesimo calcolo in poche ore con normali processori. Secondo le loro predizioni un supercomputer potrebbe quindi battere *Sycamore* in maniera definitiva. Questi risultati dimostrano la necessità di ulteriori sviluppi tecnologici per dimostrare il vantaggio quantistico sperimentale. (<https://www.science.org/content/article/ordinary-computers-can-beat-google-s-quantum-computer-after-all>).

2) Il Boson Sampling (BS) è considerato un altro approccio promettente per ottenere un inequivocabile vantaggio computazionale. Il Boson Sampling consiste nel campionamento dalla distribuzione di bosoni indistinguibili non interagenti che si sono propagati mediante una trasformazione unitaria casuale (fig. 1). La difficoltà nella simulazione di tale sistema è strettamente connessa agli effetti di interferenza quantistica dovuti all'indistinguibilità delle particelle (<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/advanced-photonics/volume-1/issue-03/034001/Photonic-implementation-of-boson-sampling-a-review/10.1117/1.AP.1.3.034001.full?SSO=1>). Alla fine del 2020, il gruppo di ricerca di Jan Wei Pan in Cina ha raggiunto per la prima volta il regime di quantum advantage con una piattaforma fotonica (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe8770>) sfruttando lo schema del Gaussian Boson Sampling, una variante del protocollo iniziale. Tuttavia questa prima dimostrazione aveva alcuni limiti nella programmabilità del dispositivo e nell'effettiva superiorità rispetto ad un calcolatore classico. Molto recentemente, la startup canadese Xanadu ha pubblicato su *Nature* la dimostrazione del vantaggio computazionale quantistico utilizzando il dispositivo *Borealis*, un processore fotonico che offre una programmabilità dinamica su tutte le porte logiche implementate. *Borealis* si basa anch'esso sul Gaussian Boson Sampling (GBS) e utilizza una particolare architettura con time-multiplexing di impulsi ottici e

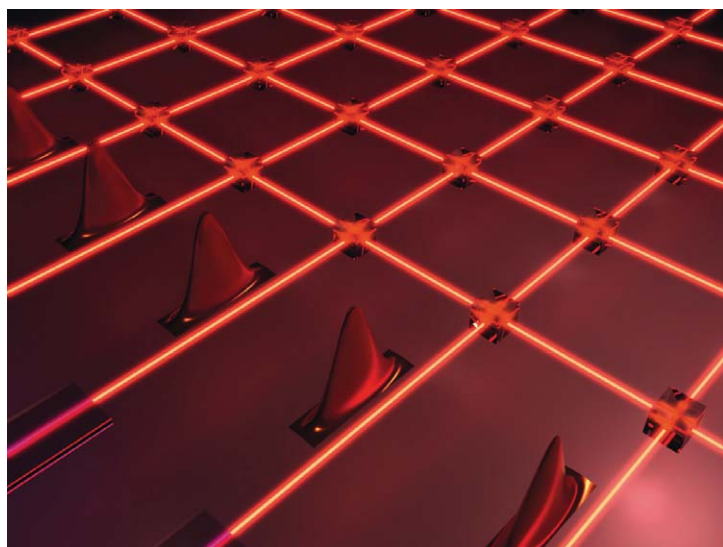


Fig. 1 Singoli fotoni che interferiscono in un array di beamsplitters.

rivelatori photon-number-resolving. Secondo le previsioni degli autori ci vorrebbero più di 9000 anni perché i migliori algoritmi e supercomputer disponibili producano un singolo campione dalla distribuzione programmata, mentre *Borealis* richiede solo 36 μ s (<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04725-x>). *Borealis* è adesso disponibile su cloud per sperimentare in maniera aperta le proprie potenzialità e limiti (<https://www.xanadu.ai/products/borealis>). Una questione ancora in via di definizione è la possibilità di sfruttare il GBS per compiti computazionali con ricadute pratiche di rilievo. Chiaramente bisognerà aspettare diversi mesi per vedere se il claim di quantum advantage resisterà ai diversi tentativi di simulare lo stesso processo con supercomputers classici, analogamente a quanto successo con *Sycamore*. È questo un settore di ricerca in rapida evoluzione che richiede ulteriori progressi sia teorici che tecnologici.



Fabio Sciarrino

Fabio Sciarrino è Professore Ordinario presso il Dipartimento di Fisica dell'Università La Sapienza di Roma e Senior Research Fellow presso la Scuola Internazionale di Studi Avanzati Sapienza, SSAS. È Principal Investigator del Quantum Information Lab, Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma. Le sue principali competenze sono l'ottica quantistica sperimentale, il calcolo e l'informazione quantistica e i fondamenti della meccanica quantistica. Negli ultimi anni la sua attività di ricerca si è concentrata sull'implementazione di protocolli di informazione quantistica tramite circuiti fotonici integrati, con particolare interesse per il Boson Sampling, un modello computazionale non universale con caratteristiche promettenti per raggiungere il regime di quantum advantage.

MECHANICS IN EXPERIMENTAL RESEARCH: DRIVERS FOR THE PROCESSES OF THE FUTURE

VALERIO PETTINACCI

INFN – Sezione di Roma 1, Rome, Italy

Often in the collective imagination when people talk about technological innovation, they immediately refer to mechanical parts with futuristic designs and previously unattained performance. Taking a tour (even a virtual one) at the mechanical divisions of cutting-edge research institutions is like opening a window to technical studies and workshops of the future.

1 Introduction

Mechanics over the past decade has been the subject of a major innovation push. Advanced manufacturing technologies are now being integrated alongside traditional solutions in an increasingly modern and digitized environment, with great advantages in terms of efficiency and production quality. These innovations catalyze pioneering activities in science, with important spillovers from an industrial perspective. Riding on the rampant digitization of processes, they find fertile ground within modern, vertical and operational public research institutions such as INFN (the Italian National Institute for Nuclear Physics)¹, that absorbs and integrates innovative skills and technologies. Furthermore INFN is also engaged in the training of young generations, disseminating strategic skills for jobs in the industry of the future.

2 Overlapping design and production in research: an exportable model in industry

In order to look to the future of mechanics, the main question is the starting point: how to produce perfect mechanical components in the shortest possible time? This secret wish is actually the dream of every engineering office manager, mechanical designer or shop floor operator. In recent decades, technology, supported by the bursting push to digitize every aspect of life, including mechanics, has made great strides in this direction. When people talk about digital reality, they probably cannot even fully comprehend how much everyday life is permeated by it in every context. The world of mechanics is no exception in any way: both the design and production phases can be followed by any interested person on an ordinary smartphone – step by step – from concept design to finished product and quality control. The production chain itself has significantly compressed lead times thanks

¹ <https://home.infn.it/en/>



Fig. 1 INFN Gran Sasso mechanical workshop (courtesy of Donato Orlandi, INFN-LNGS).

to increasingly high-performance machinery. In the field of nuclear physics experimental research, mentioning the specific example of INFN – always at the forefront of this field – the operating divisions in mechanical engineering are rapidly absorbing these innovations, investing heavily in both the software and hardware segments. Usually, in the research context, within realization processes there is a tendency to focus great attention on the preliminary design phase through the use of multiphysics Finite Element Method (FEM) simulations, also considering the severe operating conditions for which individual objects are often designed (just think of the thermal and mechanical stresses to which a part may be subjected at an interaction point in a particle accelerator such as CERN's LHC² in Geneva from a thermal and magnetic standpoint, or inside a cryostat in a vacuum). In this way, the risk of component failure in the production process or in the validation and testing process is minimized, resulting in a further reduction in the time of the prototyping phase. In fact, the most advanced

FEM software, thanks to the continuous development of the elements in which reality is discretized, guarantees increasingly accurate predictions regarding the behavior of products from a thermomechanical point of view with the possibility of eviscerating every property: from simple structural strength to vibration response, from the ability to dissipate heat at steady state to the analysis of temperature trends during transients, from the possibility of simulating composite materials to the simulation of growth processes inside a 3D printer or the verification of the behavior of a fluid inside a volume. Of course these are major investments, but they manage to provide a lasting benefit in the medium and long term as they help ensure a reliable executive design and fabrication process. In the specifics of executive design, the increasing use of PLM (Product Lifecycle Management) tools makes the component design and verification phase increasingly compressed and efficient. Designers, engineers and technicians have now access to all the information from every step in a product's workflow, while retaining the ability to act only on the segment they

² <https://home.cern/>

are responsible for. For this reason, all major distributors of mechanical CAD3D software have already released PLM work platforms, which are constantly evolving and updating to meet the increasingly specific needs of designers. Research institutions, as mentioned, are at the forefront and are going even further: for example, in the case of INFN's Gran Sasso National Laboratories³, the Mechanics Division led by Donato Orlandi (in [fig. 1](#) a top view of the Mechanical Workshop) is even aiming at standardizing not only the design but also the production phase through machining on Computerized Numerical Control (CNC) machines, using a single platform that is able to link CAD/CAM (Computer Aided Design and Computer Aided Machining).

All this results in an extremely streamlined process where time spent on meetings and supervision is extremely optimized and where, most importantly, the margin of error is also drastically reduced. Such a production scheme is considered with great interest by industry, which – in the field of technology transfer – is entering into supply contracts and carrying out collaborative research activities with laboratories, which are seen as an ideal training ground for the mechanics of the future. This is made possible by the inherent orientation of the staff to the R&D phase, and the recondite need to understand and characterize each step of a design or production phase, given the stringent specifications mandatory to be competitive in the international context of developing particle detectors or accelerators (INFN's core business). In this scheme, it should be emphasized that the figures of designers and production technicians are increasingly interconnected: the common daily work is based on a continuous and fruitful exchange of ideas. Even through extremely informal briefings, performed for example in front of a coffee, countless innovative solutions have been conceived for complex problems. The spheres of expertise of design technicians and machine operators, much more overlapping and intersecting with respect to the past, enable to understand needs and discuss proposals from the first workflow interface. Industries, for their part, look with great interest at this working model within the aforementioned collaborations (based, of course, on common goals of applied research) because they are able to access to relatively quickly state-of-the-art services, equipped with extremely expensive instrumentation, modernly organized, and staffed with highly trained and specialized personnel. In this way they are able to better assess the actual feasibility of a production process, starting with the costs to be incurred, so that they can better assess the eventual market impact of a product.

³ <https://www.lngs.infn.it/it>

3 Technology transfer of excellence in advanced mechanics: the example of INFN

Considering the major technological challenges facing applied mechanics in experimental research, it is extremely important to remain constantly updated with respect to the most innovative solutions emerging from the industrial design and machining landscape. Analyzing the in-depth study published by the “Automazione News” portal⁴, focused on the digitization of the manufacturing sector and the Industry 4.0 plan, it emerges clearly that there are certain thematic cornerstones on which the industrial world focuses its attention. Among them, particular attention should be paid to two thematic areas of great impact on the world of mechanics and capable of redefining the guidelines of the future in terms of both production and quality control: internet of things (well known as IoT technology), additive manufacturing and virtual reality. INFN is also investing heavily in instrumentation and staff training on these issues, with the goal of remaining at the forefront of technology and being an ideal partner for industries interested in exploring these new technologies that can revolutionize the product workflow. When we talk about IoT technology, we mean the connection to the Internet of everyday objects and, in this specific case, all the equipment that contributes to the production of an item within a mechanical workshop. An interesting example is given within the RedHat website⁵, where the case of a heavy machining machine – composed of subsystems subject to heavy duty cycles and to mechanical wear – is analyzed. These subsystems, more prone to breakdowns and malfunctions with respect to other components, can be equipped with sensors that can monitor their functionality in real time, providing data both to the personnel involved (on board the machine, in the design phase, etc.) who further increase their skills, and to the company that manufactures the machinery by providing useful information for the improvement of the machine itself. This is therefore referred to as intelligent machinery, digitized and interconnected with all those involved in its use. From this point of view, in particular, additive manufacturing (AM) represents a perfect example of an intelligent and internet-connected process, thanks to several control equipment on board of a 3D printer that can provide real

⁴ “Industria 4.0 - Persone e soluzioni al centro della nuova Rivoluzione Digitale”, Gruppo Editoriale Tecniche Nuove Spa con contributo di COMARCH SRL. <https://www.automazionenews.it/persone-e-soluzioni-al-centro-della-rivoluzione-digitale-scarica-il-white-paper-gratuito/>

⁵ <https://www.redhat.com/it/topics/internet-of-things/what-is-iot>

time feedback about ongoing production, for all people involved in the process, giving them live information and regardless of their geographical location on the globe. AM guarantees a very wide range of processable materials: from polymers to composites, from ceramics to metals. The different technologies combined with each other make it possible to produce, within the same production step, objects that immediately encapsulate different functionalities, dramatically lowering costs and production time, eliminating the assembly steps of the different components: for example, one can 3D print a support directly with integrated printed circuits, or a flange with an already integrated elastomeric gasket. These capabilities make it possible to experiment and prototype visionary solutions in very little time and cost compared to normal pre-production. As far as mass production is concerned, the advantage is maintained distinctly over production based on machining for components of sizes compatible with the print volumes of machines with more established technologies (*i.e.*, in most cases). This advantage, on the other hand, is lost in the case of large objects, or objects of simple shape with limited processing required, or in the case of processing based on cold deformation where, similarly to 3D printing, there is virtually no material waste

and close to 100 percent utilization but with significantly lower production costs. It is clear from this picture that additive manufacturing is exploited to the best of its ability and unleashes its full innovative capacity only when combined with a different way of thinking and designing parts, *i.e.* thinking precisely in an additive way. This implies the ability to design single parts, for example, that represent the synthesis of multiple parts generally made with traditional technologies and then assembled, or of simply impossible geometries (such as cooling systems based on internal channels with paths optimized through finite-element simulations). This capability, in the INFN case, results from years of investment not only in the facilities but also in the people who have now developed an inclination to use these new solutions quite naturally, on equal terms with more traditional technologies. Collaboration with similar research realities is a great opportunity for private companies to learn, in an extremely efficient way, the potential of 3D printing and all the more advanced solutions related to it, such as, for example, optical scans for dimensional quality control of manufactured parts or the massive usage of FEM software. More in detail, the hi-resolution scanning is another perfect example of the extent to which modern, highly digitized technologies



Fig. 2 INFN Gran Sasso 3D Lab with optical scanner detail (courtesy of Donato Orlandi, INFN-LNGS).

can optimize the time and performance of an equally delicate phase of mechanical production, namely, dimensional quality control for the validation of the different mechanical parts. Structured blue light stereoscopic scanners, by means of a calibrated projection of different patterns of lights and the detection of their deformation once the object to be measured is illuminated using the principle of triangulation, are able to three-dimensionally reconstruct the part with centesimal accuracy and in extremely short times by generating files that can be imported into any dimensional analysis software in both textual and graphical formats (from *.ascii to *.stl). These files are ideal for immediate comparative checking of the three-dimensional model against the nominal model, and the for the possibility to quickly observe maps and distributions of construction discrepancies. Moreover, this process, in highly digitized contexts such as the mechanical division of INFN Gran Sasso National Laboratories (in [fig. 2](#) the stereoscopic scanner and the AM Lab of LNGS are represented) allows for an unprecedented verticality of the manufacturing and parts validation process.

Of course, such solutions are already present and established in heavy industry and mass production (just think of automotive where every part is automatically analyzed by anthropomorphic robots equipped with laser heads). However, mechanical departments such as the one mentioned above, whose example primarily benefits companies involved in technology transfer projects that can analyze tools and procedures very closely, are capable of conveying and disseminating ideas and production models that are largely within the reach of the most advanced small-and medium-sized companies, even in terms of the economic investment required. Especially in times like the current one, with an unfavorable international economic situation that would tend to discourage investment, the opportunity to try out these new methodologies and instrumentation is extremely valuable for SMEs (Small and Medium Enterprises) in the sector, which are able to better assess the risks and benefits of any action aimed at improving the machine fleet or production workflow. The whole reasoning, as mentioned, is not only about the hardware part but also about the software aspect with regard to design and production. Talking about modeling and discretization of mechanical systems (whether parts or assemblies), hence finite-element modelling, nowadays we are no longer limited to modeling thermo-mechanical or dynamic behaviors of a structure under operating conditions, but we get to verify the quality and reliability of the production process of the systems themselves such as, for example, metal 3D printing with Laser Powder Bed Fusion (LPBF) technology. By means of these simulations, it is possible to evaluate, based on the geometry and process parameters set on the machinery, any

possible dimensional defect issues related, for example, to excess or deficient heat deposition (necessary for investment casting) in some specific areas of the part and at what level of the accretion process. Again, the cost of one of the available platforms to carry out such simulations, including the absolutely necessary personnel training, is completely paid off by the time and material savings that possible print job collapses could result in the process. It is not by chance that additive manufacturing is mentioned several times as a unit of measurement of the level of innovation and evolution of a production process; precisely because it allows to massively gain the benefits of the digitization of the production world, both in the prototyping phase and in the production and quality control phases, as extensively described. INFN, through a collaboration between the Gran Sasso National Laboratories and the Rome Section, has created a diffuse hub called HAMMER⁶ (Hub for Additive Manufacturing Materials Engineering and Research) aimed precisely at playing the role of technology transfer as well as production for the needs of the institution. This hub is a typical example of the role that research institutes play in disseminating expertise, and it is active since 2018 in both collaborative or contract research activities for companies and in training activities for outsiders interested in learning about the basic principles for running a rapid prototyping or additive manufacturing laboratory, where the mechanics of the future is integrated organically with current production realities and already established technologies. As part of the collaboration with Rome, the patenting procedure for an innovative metal alloy for LPBF processes has been initiated, and in general a technological network has been created that can stimulate innovative activities in collaboration with other research institutions and private companies.

Another virtuous example of an advanced laboratory dedicated to advanced applied research and technology transfer of excellence is DIAM (Developments and Innovations on Additive Manufacturing)⁷, a hub established by Adriano Pepato at the Padua section of INFN. The group is settled in Padua since 2016 and it is intended to carry out scientific and technological research on the L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) technology. The research themes of the group concern the entire workflow process, starting with the design of new metal alloys specifically tuned for this manufacturing process. The research then involves the tuning of the processing parameters of 3D printers, the characterization of the printed parts, and the optimization of the post-process operations, such as heat treating and

⁶ <https://hammer.lngs.infn.it/>

⁷ <https://www.pd.infn.it/eng/diam/>



Fig. 3 Machines of the Padua AM facility (courtesy of Adriano Pepato, INFN Padua).

surface finishing. Finally, the results obtained from the experimental research are used to manufacture prototypes with innovative designs using topology optimization and design for assembly. The laboratory is equipped with three L-PBF machines (see [fig. 3](#)) and can rely on several post-process facilities, such as an electrical discharge machine, an inert gas oven and a CMM facility Zeiss ACCURA MASS. State-of-the-art technologies and high-quality research have led to the involvement of the research group on several international and national projects, such as the DTT project, the I.FAST project, and the SPES project. A research network with the most pertinent departments of DII of Padua have been settled (Mechanical, Metallurgy, Material Technology, Applied Thermodynamics and Heat Transfer), to cover all the expertise and instrumentations for a complete characterization of the R&D processes.

Similarly, in Genoa, another hub, created through the collaboration between the local INFN section and the University^{8,9}, was recently inaugurated with the same purposes, under the leadership of Cecilia Rossi (see [fig. 4](#)). The AM machine and all complementary facilities were bought in

2022 and are now in the commissioning phase. The machine is jointly managed by INFN-Genoa and the Genoa University and will be soon part of the INFN AM network in order to grow the network potentiality, by developing new expertise.

4 Disseminating knowledge: collaboration with the national education system

The great challenge of the future is not only to disseminate technologies and job skills, but also to properly train the technicians and engineers of the future, who today attend colleges and universities. In fact, the possibility of incorporating and performing most of the innovation that public research institutions convey into the productive fabric depends crucially on the training and attitude, especially of the younger generation, to enter into a new paradigm of work, much more integrated and inclusive, in which the individual divisions of a productive reality are no longer compartmentalized but rapidly and continuously confront all the other directly interconnected divisions in order to quickly obtain all kinds of feedback with respect to the quality of a mechanical production process. Collaboration with universities for joint doctoral and dissertation programs focused on the current needs of industry plays a key role in this regard. Equally important are collaborations with

⁸ https://www.ge.infn.it/wordpress/?page_id=19557

⁹ <https://www.difi.unige.it/it/ricerca/>



Fig. 4 INFN Genoa Additive Manufacturing lab (courtesy of Cecilia Rossi, INFN Genoa).

secondary school technical institutes, as in the case of the so-called Pathways for Transversal Skills and Orientation (PCTO) provided for in Italian regulations and to which greater weight should be given, since they are determined to produce professional figures ready to work in the now highly digitized and globalized working context of mechanics. Fortunately, technologies such as 3D printing or the mentioned optical scanning, which are increasingly in

wide use in the industrial world, turn out to be stimulating the curiosity of even the youngest (hobby and gaming applications as well); this factor needs to be exploited by technical institutes to train the minds of the people who will have to run the industry of tomorrow, knowing that INFN and other institutions will continue to be at their side and be committed to the cultural, scientific and technological progress of the society around them.



Valerio Pettinacci

Valerio Pettinacci, born, raised and trained in Terni, Italy, is a Materials Engineer operating for about 15 years in the field of mechanical design for experimental apparatus dedicated to nuclear physics research in global international contexts. He currently holds the position of head of the Mechanical Design Service at the Rome Section of the National Institute of Nuclear Physics (INFN) where he coordinates activities related to the Section projects, monitoring the evolving world of mechanics to integrate cutting-edge technologies necessary to maintain the high level of performance required by the challenges coming from the tasks followed.

IJCLAB: A NEW EUROPEAN LABORATORY

ACHILLE STOCCHI
IJCLab, Orsay, France



Gathering around 750 people together, IJCLab is centered on the “physics of the two infinities” and their applications. This is featured by the laboratory’s strengths in well-established disciplines as well as in emerging fields and interface activities. This laboratory has the ability, the vocation, and the ambition to make a global impact on a large range of scientific and technical topics undertaken by leading large-scale projects at the national and international levels. It also spurs and supports projects on smaller scales and shorter cycles, which can arise depending on recent scientific events and/or technical breakthroughs. Because of its size and the vast range of fields it covers, IJCLab is one of the top five European laboratories in the “physics of the two infinities”.

1 Introduction: IJCLab in a nutshell

The “Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie” (Laboratory of the Physics of the two infinities Irène Joliot-Curie) or “IJCLab” was created on 1st January 2020. This laboratory is a joint research unit of CNRS (Centre National de Recherche Scientifique), Université Paris-Saclay and Université de Paris, located on the Orsay campus 30 kilometres south of Paris. It results from the merger of five laboratories (CSNSM, IMNC, IPN, LAL, and LPT)¹.

The laboratory has the name of Irene Joliot Curie, an outstanding scientist who received the Nobel Prize in 1935 for the discovery of induced radioactivity and artificial radioactivity, together with her husband, Frédéric Joliot-Curie. She was the driving force behind the creation of the Orsay Campus and the creation of its first laboratory (IPN) in 1956 – later followed by the LAL – in order to start researches in nuclear and particle physics with large instruments and accelerators.

Among the 750 IJCLab members, there are about 230

researchers, 350 engineers and technicians, and 120 PhD students.

IJCLab has a budget of about 70M€ (including about 40M€ of salary).

IJCLab is centred on the “physics of the two infinities” (High-Energy Physics, Nuclear Physics, Astrophysics and Cosmology) and their applications (Energy and Environment and Interface Life Sciences and Physics) with also strong poles on Theoretical Physics and on Accelerator R&D and construction. In IJCLab half of the personnel is technical staff with wide technical skills/expertise. Is the mainstay of the laboratory for designing, drawing and building instruments. The presence of a vast set of research infrastructures and technological platforms (in particular Andromède, ALTO, Laserix, SCALP, and Supratech) is also an essential feature of IJCLab. IJCLab is completed with services (administration, support, transverse activities) which provide vital support to these scientific and technical activities.

Finally, this laboratory is situated at the heart of a scientific cluster recognized at the global level related to two universities (Université Paris-Saclay and Université de Paris). This puts IJCLab in an exceptionally favorable environment for teaching, training, transfer of knowledge, and dissemination activities.

¹ CSNSM: Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière, IPN: Institut de Physique Nucléaire, IMNC: Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie, LAL: Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, LPT: Laboratoire de Physique Théorique.

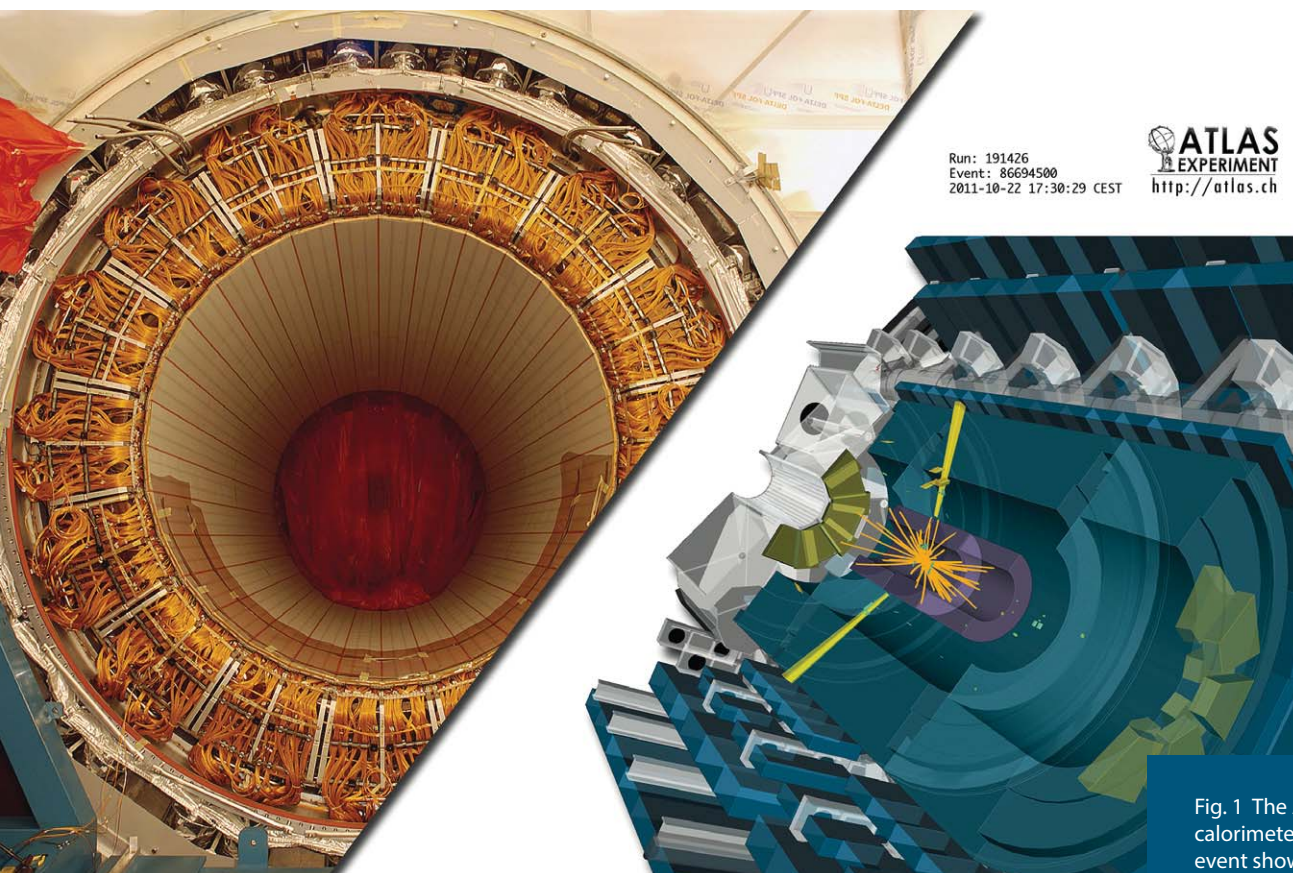


Fig. 1 The ATLAS electromagnetic calorimeter (top left) and an event showing the Higgs boson decaying into two photons (bottom right). Credits: CERN.

2 The researches at IJCLab

Many topics are explored in particle physics, including the study of the Standard Model and beyond, by working on experiments aimed at increasing energy in the center of mass and/or luminosity/intensity. The researches carried out in high energy physics concern the search for new particles beyond the Standard Model, the understating of the origin of the mass, the elucidation of the asymmetry between matter and antimatter, the nucleon structure and the study of the quark gluon plasma. For answering these questions, we have a strong involvement on many projects. We are involved in three out of four of the main experiments at LHC (the proton-proton Large Hadron Collider) at CERN. For the three experiments we have a contributed to the construction of some detectors and we are still involved in the upgrade of some parts of the detectors and in the conception of new ones for the new phase when LHC will operate at higher luminosity. We are thus involved in improvements of the tracking system and in the calorimetry upgrade for the ATLAS detector (fig. 1), in the upgrade of the electronics and in the construction of a new detector for measuring the luminosity for LHCb and finally in the renovation of the muon detector and its electronic for the ALICE detector. For all these experiments we are also strongly involved in the data

analysis. We are mainly involved in the measurements of the characteristic of the Higgs boson (which was discovered 10 year ago), by studying the mass, the spin and its couplings to other particles by measuring its production and decay rates. In addition, we are looking for the presence of a new physics beyond the Standard Model, by searching for new particles (for instance supersymmetric particles) and by measuring precisely some rare decay rates which could be eventually found not correctly predicted by the Standard Model.

We have also some important contributions to the experiment BELLE II which is taking place at KEK (High Energy Accelerator Research Organization) in Tsukuba, Japan. Belle II is the first super B-Factory experiment, designed to measure the signals for CP violation (matter-antimatter asymmetries) and to make precise measurements of weak interaction parameters and search for New Physics by precisely measuring some rare decays.

We are also involved in experiments to study the structure of nucleons at the Jefferson Lab (JLab) in the USA and the effects of the nuclear environment on the properties of hadrons with experiment at Helmholtz Centre for Heavy Ion Research (GSI) in Germany.

As far as neutrino physics is concerned, many questions remain opened on mixing and CP violation, masses and the

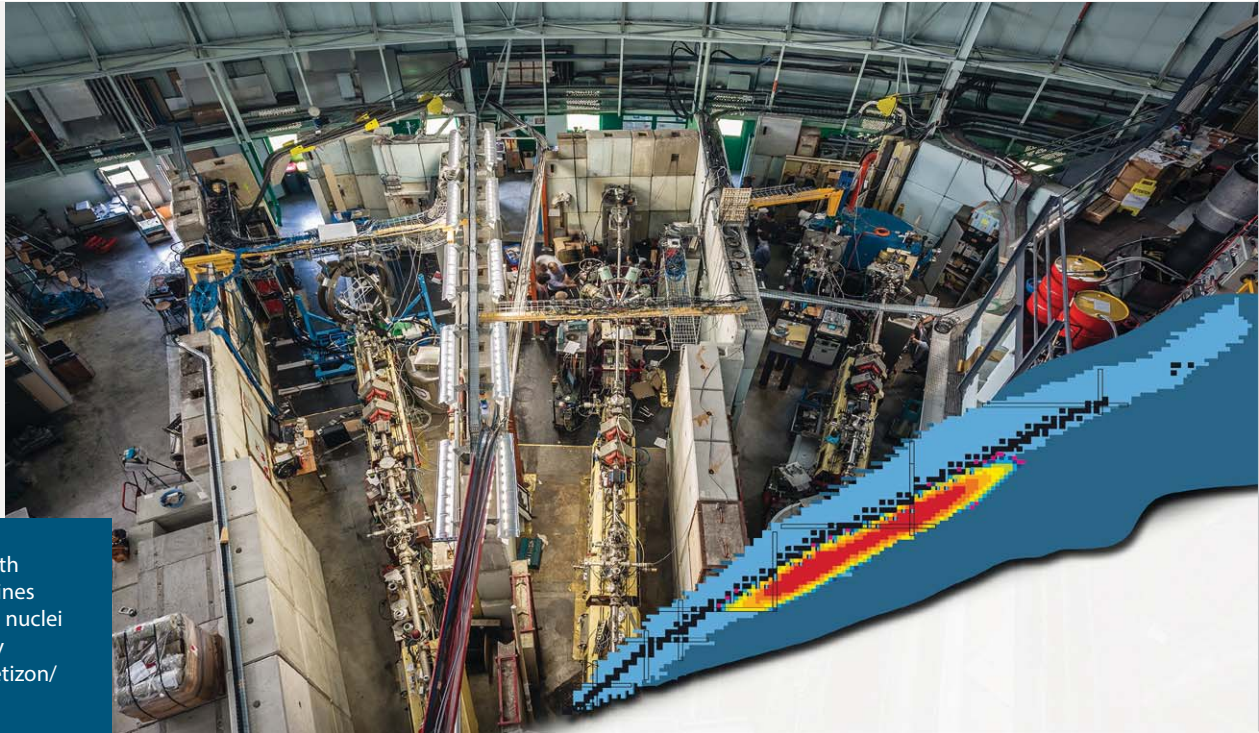


Fig. 2 The ALTO platform with the different experimental lines seen from top (top left). The nuclei chart and the stability valley (bottom right). Credits: L. Petizon/ CNRS/IJCLab.

nature of neutrinos (Majorana or Dirac). For answering these questions, IJCLab is involved in an international effort aiming at the construction of a future neutrino factory in the US. The experiment DUNE will allow studying the mixing and the *CP* violation in the neutrino sector. It will consist of two neutrino detectors placed in the neutrino beam produced at Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois. One detector will record particle interactions near the source of the beam, at the Fermilab. A second, very large, detector will be installed at the Sanford Underground Research Laboratory in Lead, South Dakota, 1300 kilometers downstream of the source.

A second activity in the neutrino physics is the study of the extremely rare double-beta decay processes, and in particular looking for evidence of neutrinoless double beta decay. This is a rare type of radioactive decay which has been predicted, but has never been observed. If this process were seen, it would prove that neutrinos were their own antiparticles, which could be a clue to the matter-antimatter asymmetry in the universe. For that, IJCLab is participating in a collaboration (CUPID-Mo) developing new detectors, the scintillating bolometers based on crystal enriched in ^{100}Mo .

In nuclear physics the main themes of research are on the complexity of nuclear structure arising from the interaction between nucleons, on the limits to nuclear stability, on the production of chemical elements in the Universe and on the properties of nuclei and matter with strong interaction at high energy (shortly after the Big Bang, catastrophic cosmic events, compact stellar objects, ...). IJCLab's nuclear physics community constitutes the largest nuclear physics community in France and one of the largest in Europe. One of the main characteristics of this community is the strong involvement in the design, construction, and exploitation of state-of-the-art equipment at national and international facilities with excellent scientific production in many laboratories all over the world ². A special mention for the IJCLab platform ALTO in the Orsay Campus (fig. 2). The ALTO research platform includes two accelerators that are unique in France: a 15 MV Tandem electrostatic accelerator for accelerating stable beams from proton to aggregates, and an electron linear accelerator

² ALTO (IJCLab), GANIL (Caen), ISOLDE (CERN), JINR (Russia), JYFL (Finland), RIKEN (Japan), LNL (Italy), with Agata and LNS (Italy), TRIUMF (Canada), and ANL (Argonne-US).

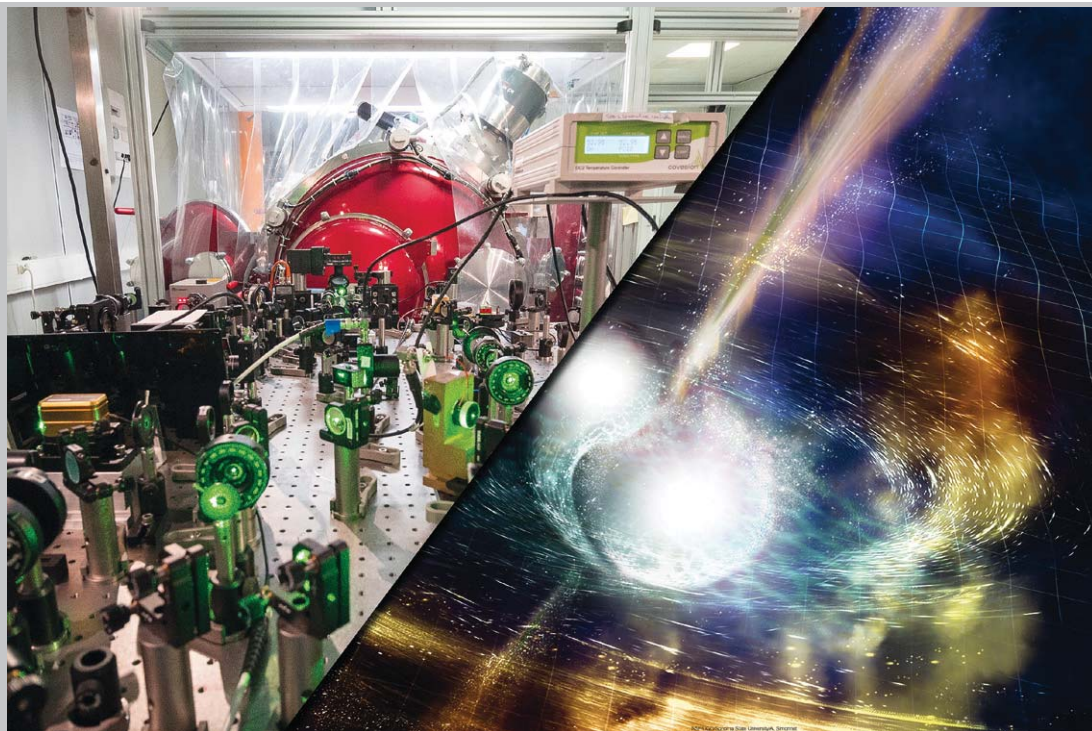


Fig. 3 The experimental laser setup in CALVA Platform at IJCLab (top left) and artistic view of a coalescence of a black hole and a neutron star (bottom right). Credits: IJCLab, NSF/LIGO/Sonoma State University/Aurore Simonnet.

for producing radioactive beams by photofission. These machines are associated with a wide variety of experimental devices on 10 physics lines. The diversity of the beams produced allows nuclear physics, astrophysics and multidisciplinary studies to be carried out. The accelerators operate 4000 hours per year, for 30 experiments per year. ALTO hosts teams representing 250 researchers from all horizons, and operates 24/7. ALTO has unique features: it provides rare energy beams such as ^3He and ^{14}C , which is unique in France, and is also the only facility in the world delivering low-energy neutron-rich beams from uranium photofission. Needless to say that the results from ALTO platforms are complementary to those obtained in the national Platform GANIL and also that ALTO it is an excellent test bench for instruments to be installed in GANIL.

We are also involved in studying violent phenomena of the Universe with natural links with high-energy physics. In astroparticles, we are studying the astrophysical events (high-energy cosmic rays, black holes merger, general relativity, ...). One of the main activities of the laboratory is the search for gravitational waves. This search was coronated with the observation of the first signal of a gravitational wave from the coalescence of two black holes. Since then, several other similar events have been observed including signal coming from neutron stars. We are, since the beginning, contributing to the construction and the operation of the Virgo/LIGO³ interferometers (fig. 3) and we are now involved in their upgrade and we start our implication on future experiments (and in particular to the experiment call Einstein Telescope).

We have several activities and experiment aiming at the detection and research of the origin of very high energy cosmic rays (Pierre Auger Observatory in Argentina), as well as the observation of the sky in X-rays or gamma rays in a range of photon energies from the keV to the GeV (with some space programme experiment – SVOM, eASTROGAM, ComCube –) up to several hundreds of TeV (Cherenkov Telescope Array (CTA) in La Palma (Canary islands)). All in all, these experiments allow important tests of fundamental physics: (modified) Gravity, Lorentz Invariance.

³ The Virgo detector is located in Cascina (near Pisa), Italy; LIGO detectors are based on USA in Hanford (WA), Livingston (LA).



Fig. 4 The machine ThomX at IJCLab. Credits: P. Dumas/CNRS.

In cosmology, which aims to study the origin, nature, structure and evolution of the Universe, there are two main research themes in IJCLab. The first theme consists in studying the dark components of the Universe – dark energy and dark matter – through the observation of large structures, thanks to optical surveys (Vera Rubin Observatory) or by mapping cosmic matter distribution in radio, through the observation of the 21 cm radiation of neutral atomic hydrogen. The second theme concerns the understanding of the primordial Universe, its inflation phase and its evolution, through the search for primordial gravitational waves via measurements of the cosmic microwave background at large and small scales (the experiments we are working on are LiteBird, Simons Observatory and preparation to CMB-S4). The teams are, among others, strongly involved in the phenomenological interpretation of these data (reionization, neutrinos, supersymmetric inflation).

In accelerators physics the research themes are: laser/plasma acceleration, Compton sources, and electron/laser interaction studies; the physics of the instrumentation/diagnostic and beam manipulation for machine design and beam dynamics as well as conventional and “advanced” beam diagnostics; the design and implementation activities of the RF structures of an accelerator; the studies on vacuum and ultra-dynamics vacuum and on materials/surfaces and layer deposition. We are participating in the conception and the construction of several experiments. We are giving an important contribution to the construction of the European

Spallation Source ERIC (ESS), a facility based on the world’s most powerful pulsed neutron source under construction in Lund, Sweden with a strong contribution in cavities and cryomodules. We are giving also an important participation in the project Myrrha (Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications), a research infrastructure in Mol, Belgium, aiming at constructing the first research reactor driven by particle accelerators. At IJCLab we also construct local machines. ThomX (fig. 4) is a machine that generates packets of electrons, accelerates them and makes them interact with light to create X-rays. Thus, ThomX is a demonstrator of a compact high-flux X-ray source generated by the inverse Compton effect. Such rays are used in many fields, from medicine (radiography, radiotherapy, etc.) to the study of crystals (crystallography) to the 3D reconstruction of objects or the study of viruses. We are contributing to some international machines: at FermiLab with the proton accelerator for the neutrino factory (PIP II) and several activities for the Future Colliders at CERN or in other world sites (LHC, SuperKEKB, FCC, ILC, ...). Increasing activities are going on for two projects proposing innovative accelerating concepts. First, a project aiming at the construction of a 10 Hz laser-plasma accelerator test facility aiming to achieve reliability and control comparable to conventional RF accelerator standards. Second, the construction of PERLE, a compact three-pass Electron Recovery Linac (ERL) machine based on Superconductive RF technology, targeting the 10 MW beam power regime.

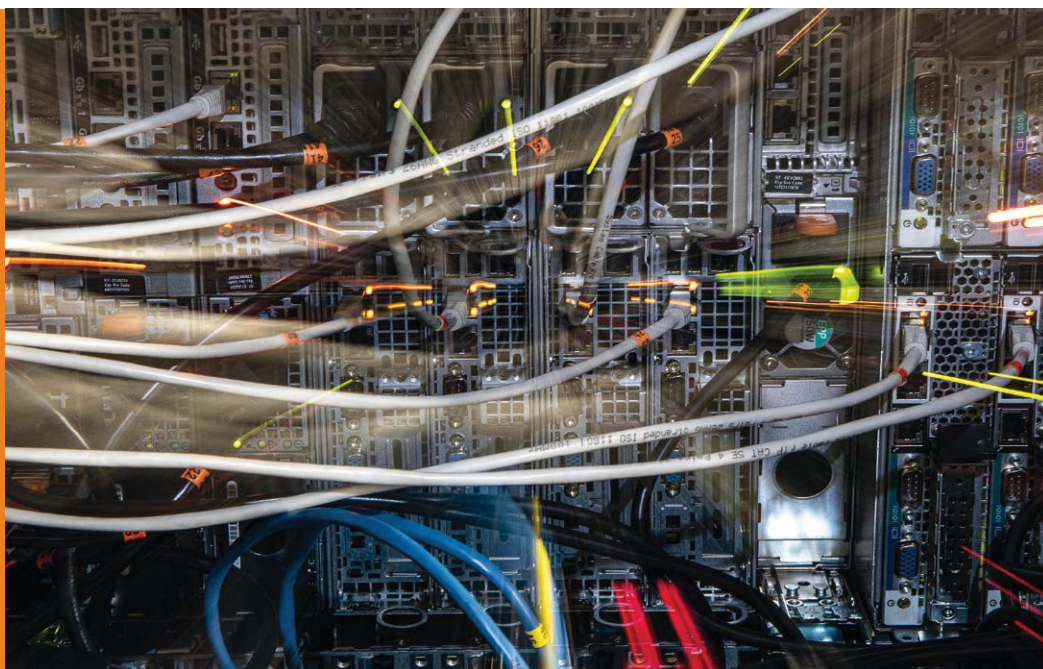


Fig. 5 Artistic view of the crates and cables of the computing room – Virtual Data – at IJCLab. Credits: P. Dumas/CNRS Photothèque.

IJCLab hosts a large department of theoretical physics. This department is transverse to the research fields of the laboratory, with many cross-links among theoreticians as well as with experimentalists. It covers a broad range of activities, including the study of the Universe, the Standard Model (SM) of particle physics and of possible scenarios beyond it, nuclear physics, mathematical physics and statistical physics.

We also cover major scientific and societal issues related to nuclear energy from an academic point of view, but also with forays into industrial applications, with an interplay between chemistry and physics. The main themes of the department are strongly related to the nuclear fuel cycle from the front-end to the back-end: nuclear scenarios and systems, study of fission and material and irradiation. The platform SCALP plays a very important role in the scientific research of the pole; the presence of a radiochemistry laboratory provides important and unique technical support in France with, in particular, the fundamental chemistry of the f elements and the chemistry of molten salt.

We have dedicated activities in Health Physics with the ambition of interdisciplinary research bringing together physicists, biologists and physicians to propose novel instrumental, methodological and theoretical approaches to improve exploration and understanding of living organisms and strengthen the diagnosis and treatment of diseases. New projects on these different research fields are in operation. As far as the targeted radiotherapies are concerned, new

projects have started, which span from the development of a dedicated dosimetry to the production of new radionuclides (using existing platforms SCALP/SIDONIE and ALTO); on the other hand, another ambitious instrumental project consisting in participating in national and international initiatives of TOF-PET imaging (<100 ps), aiming to reach highest sensitivity and spatial resolution and to operate in fully-3D mode, is foreseen.

3 Technical activities, skills and platforms at IJCLab

The backbone of this laboratory is the technical staff, which brings together technical services with a high degree of expertise, organized around a vast variety of skills: electronics, computing and IT, instrumentation, mechanics, cryogenic, vacuum, optics, This corresponds to a unique potential for the design, development, and exploitation of the instruments required to take up the scientific challenges of the coming decades (in accelerator and detector physics), enabling IJCLab to be recognized as a “builder laboratory”. While ensuring the continuity of projects, the pole is constantly nurtured by the new challenges of fundamental research. It is a necessary condition for maintaining the creativity and technicality of its staff. The laboratory operates following a matrix structure with a close proximity between the technical teams and the research groups. It brings together extremely varied job profiles and it has the ability to combine versatility and specialization and make them coexist harmoniously.

Platforms are of great importance at IJCLab, whether they are scientific or technological. The platforms at IJCLab are numerous and vary greatly in size and interaction with the outside world. Some are essential tools to develop the scientific and technological activities of the laboratory, others, which are recognized as “user facilities”, constitute a major point of attraction for external collaborators.

The main infrastructures are ALTO, used for nuclear physics with a 15 MV Tandem (from proton to aggregates) and a electron linac for radioactive beam; the Andromede platform providing beams of several MeV protons, multicharged atomic ions, gold molecules and nanoparticles for nuclear, health physics and irradiation; the SCALP platform consists of various irradiation/ion implantation and analysis (RBS, PIXE, PIGE, MET, ...) equipment. The coupling of the Transmission Electron Microscope (TEM) with the accelerator machines is unique in the world due to the diversity of elements and energies that it allows to accelerate *in situ* in the TEM. SCALP is thus used for energy, nuclear materials, health physics, irradiation physics and chemistry communities; SUPRATECH for R&D on the superconducting cavities (prepare, package, assemble and test of the superconducting RF cavities); the LaserIX a laser platform with coherent, intense, brief (50 fs to 10 ps) sources in near-infrared (800 nm) and Extreme Ultra Violet (30 to 90 eV). Other small platforms are worth mentioning, like the Virtual Data Center (fig. 5) and advanced computing resources infrastructure based on Cloud and several platforms for the detector's characterization and production.

4 IJCLab into the universities environment

Last but not least, this laboratory is located at the heart of the internationally recognized scientific cluster Université Paris-Saclay and is linked to two universities (Université Paris-Saclay and Université de Paris). This places IJCLab in an exceptionally favorable environment for teaching, training,

knowledge transfer and scientific outreach activities. JCLab is a “student place” in symbiosis with its university environment. Training and education are absolute priority for IJCLab, for which we are implementing a coherent, concerted and proactive policy beyond existing actions.

We have a central position in the Université Paris-Saclay through the activities/responsibilities in teaching (Bachelor's, Master's and Internships), training and knowledge dissemination. We are increasing the technical teaching and the use of the research platforms as teaching platforms. The idea is to become more and more a pole of attraction for training through research by means of science and technology. We benefit also from the important positioning with the Université Paris Cité, especially in the field of health physics.

More than 120 PhD students are present in IJCLab. We strongly promote the fact that the doctorate is the ultimate means of being trained by research and for research.

We are active in the participation and creation of international/national schools. The latest examples are the schools created in Ukraine and Palestine.

5 Conclusions

IJCLab has been created for contributing to projects at all stages: proposal, design, construction, operation, data analysis, theory and for playing a major role in the conception, design and construction of current and future accelerators. In IJCLab we develop and operate research infrastructures and technological platforms supporting the researches areas as well as original research in health physics and energy. We also aim at promoting the development of new technologies for science for the benefit of society and thus supporting national and European industrial competitiveness. Last but not least we are a “student place”, welcoming students that our laboratory trains through and for research in the heart of a world-class academic environment.



Achille Stocchi

Achille Stocchi is born in Venice, Italy, on April 21, 1963. He is a researcher in Particle Physics and has worked on several experiments at CERN (DELPHI at LEP, LHCb at LHC, UA9 at SPS), Stanford (Babar), Frascati (accelerators, SuperB) and in phenomenology (UTFit), publishing more than 1000 articles and presenting the results at about 80 conferences/seminars. He has covered several responsibilities: spokesperson, physics coordinator, national and international project coordinator. He has directed 8 PhD theses. He is currently Professor at the University of Paris-Saclay, and has created new Masters (NPAC) and Doctoral School as well as international annual schools (Ukraine, Palestine). He has a members of project/position and participating in several evaluation, selection committees. In 2021 he has been elected member of the Academy of Sciences in Ukraine. He was director of the LAL (Linear Accelerator Laboratory) (CNRS/Paris-Saclay) (350 people) during 8 years (2011–2018) and he is now the Director of IJCLab (750 people), the new laboratory born in 2020 from the merging of five laboratories in Orsay.

STEAM FOR EVERYONE

VITTORIA LODIGIANI, MARGHERITA CARUSI

Il Cielo Itinerante, Italia

The non-profit organization Il Cielo Itinerante aims at bringing disadvantaged children in conditions of education fragility closer to the study of STEAM disciplines (Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics) through scientific dissemination. The association's main programme was "Italia Brilla", a tour from north to south Italy designed to reach as many boys and girls as possible and awaken their curiosity and passion for scientific subjects. With the support of Samantha Cristoforetti, Il Cielo Itinerante has developed innovative space laboratories with the goal of showing the sky to as many children as possible by means of a professional telescope. We hope that by doing so, we will be able to break down the barriers that stand between them and a bright and full-of-opportunity future.

a cura di R. Nania

STEAM PER TUTTI

1 L'associazione

Il Cielo Itinerante è un'associazione italiana non-profit nata nel febbraio 2021 per iniziativa di Ersilia Vaudo, Chief Diversity Officer dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), Alessia Mosca, già Europarlamentare e Membro del CdA di Crédit Agricole, Giovanna dell'Erba, Notaio in Roma e Giulia Morando, Policy Analyst all'OCSE, con l'obiettivo di avvicinare allo studio delle materie STEM i bambini e le bambine in situazioni di povertà educativa e/o di disagio sociale, sperimentando metodi formativi innovativi, sia negli ambiti di intervento sia nelle modalità operative.

Il dato di partenza che ha spinto le fondatrici a lanciare questo progetto riguarda proprio l'apprendimento delle materie STEAM, in particolar modo la matematica, in cui l'Italia dimostra di avere un allarmante gap. Il nostro Paese si trova agli ultimi posti tra i paesi europei nei test di scienze – dopo di noi solo Slovacchia e Grecia – con uno dei cali maggiori negli ultimi anni tra i paesi OCSE¹.

Eppure, sono ormai dimostrati gli innumerevoli benefici che scaturiscono dall'apprendimento della matematica: dallo sviluppo cognitivo e metacognitivo degli individui, a illimitate applicazioni pratiche nella vita quotidiana, l'apprendimento della matematica aiuta lo sviluppo della creatività e del pensiero critico, competenze trasversali ed essenziali nel mondo di oggi. La matematica è un abilitatore di futuro, è il linguaggio della scienza ed una delle competenze fondamentali per un futuro inclusivo ed una sana democrazia. L'esposizione dei bambini

alla matematica e allo spazio sporcandosi le mani con esperimenti e laboratori scientifici e osservando il cielo offre loro l'opportunità di avvicinarsi a queste materie con una più grande curiosità, incoraggiando al tempo stesso una proiezione di sé stessi al di là del contesto socio-economico di provenienza.

Da qui, ispirandosi al progetto "The Travelling Telescope" di Susan Murabana, partita con un pulmino e un telescopio per mostrare le stelle ai bambini e alle bambine di moltissimi villaggi kenyoti, nasce Il Cielo Itinerante proprio con l'obiettivo di *Portare il cielo dove non arriva*.

2 Cosa facciamo?

Il viaggio de Il Cielo Itinerante è iniziato nell'estate del 2021, quando il nostro team di divulgatori scientifici ha iniziato ad attraversare l'Italia munito di quattro telescopi a bordo di un pullmino con l'intento di permettere a più bambini possibili di vivere un'esperienza indimenticabile.

Il Cielo Itinerante propone attività laboratoriali incentrate sulla vita nello spazio, in onore della sua collaborazione con l'astronauta Samantha Cristoforetti, e osservazioni guidate del cielo con telescopi professionali con il supporto di astronomi professionisti dell'INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica). Per l'associazione, parlare di spazio in età giovanile è uno strumento per affascinare e avvicinare alla scienza in maniera innovativa. I laboratori proposti dal Cielo, infatti, fanno comprendere ai bambini che la matematica, la scienza e la tecnologia svolgono un ruolo essenziale non soltanto nello spazio, ma anche nella loro vita. Durante le tappe del tour "Italia Brilla", i bambini/e sono diventati "Astronauti per un giorno" e hanno vissuto in prima persona

¹ Elaborazione openpolis - Con i Bambini su dati Ocse-Pisa (ultimo aggiornamento: lunedì 2 Dicembre 2019).



Fig. 1 Centro spaziale “Giuseppe Colombo” di Matera.

il processo di selezione per diventare astronauti con test di memoria visiva e di orientamento, test motori, attività di problem-solving e lavoro di squadra. Inoltre, si sono messi alla prova con la costruzione di un lanciatore spaziale in carta per capire i principi base di fisica che si nascondono dietro al lancio di un razzo. La parte più suggestiva ed emozionante di ogni serata per bambini e genitori presenti è stata l'osservazione di luna, costellazioni e galassie con telescopi sofisticati. Si sono osservati da vicino il satellite, le stelle e in alcune occasioni è stato possibile anche localizzare la ISS (Stazione Spaziale Internazionale) che, proprio durante la parte osservativa della serata, passava sopra di noi.

3 Le attività passate

In soli due anni, Il Cielo Itinerante ha raggiunto più di 60 comuni italiani e coinvolto oltre 2000 tra bambini e bambine con laboratori, esperimenti, eventi artistici e sessioni di osservazione del cielo. Il tour che ha attraversato il nostro Paese ha permesso all'associazione di approfondire anche il tema delle disuguaglianze che esistono nel nostro territorio. Il pullmino de Il Cielo Itinerante si è fermato in piccoli comuni che presentano condizioni penalizzanti rispetto al resto d'Italia, ma anche nei quartieri più svantaggiati delle grandi metropoli come Milano, Roma, Torino, Verona, Genova, Napoli e Brindisi, tutte aree dove si riscontra una progressiva diminuzione di strutture e servizi fondamentali per lo sviluppo e la crescita del tessuto urbano.

Grazie alla speciale collaborazione con l'Istituto di Ricerca Ipsos, durante il tour “Italia Brilla - Costellazione 2022” sono stati raccolti preziosi dati per lo sviluppo di un'indagine conoscitiva riguardante le attitudini, le opinioni e i punti di vista degli adolescenti inerenti al ruolo che la scienza ha nella loro vita e nel loro futuro. A partire da questa prima ricerca e raccolta dati, Il Cielo Itinerante ha l'ambizione di modellare un'azione di policy volta alla riduzione delle disuguaglianze che abbiamo riscontrato durante il nostro viaggio. Non per ultimo, l'obiettivo finale che ci prefiggiamo è quello di realizzare un cambiamento reale a lungo termine che coinvolga il futuro di tanti bambini.

La coronazione del tour di quest'anno è avvenuta con la tappa

svoltasi al Centro Spaziale “Giuseppe Colombo” di Matera (fig. 1). Oltre ai nostri laboratori, i bambini presenti hanno potuto visitare il centro ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e seguire una lezione sugli effetti della microgravità sul corpo umano. L'evento che in pochi dimenticheranno è l'incredibile incontro con l'astronauta Samantha Cristoforetti (fig. 2). Attraverso una stazione radioamatore, gli studenti si sono collegati direttamente con l'equipaggio a bordo della Stazione Spaziale Internazionale e hanno sottoposto all'astronauta domande e curiosità riguardo alla vita spaziale. Per i bambini, i professori e i giornalisti presenti è stata un'emozione indimenticabile, una di quelle esperienze che si ricordano per tutta la vita.

Oltre alle molteplici attività sul territorio, Il Cielo Itinerante ha intrapreso un programma di engagement digitale congiunto con ESA (Agenzia Spaziale Europea) e ASI (Agenzia Spaziale Italiana) per raggiungere quei bambini/e che l'associazione non è riuscita ad incontrare in presenza durante il tour, al fine di creare una community attiva che si arricchisca nel tempo. Ogni giovedì, Samantha Cristoforetti in persona ha lanciato sul profilo Instagram dell'associazione i “Quiz dallo Spazio” per informare riguardo alla vita nello spazio ed incentivare adulti e bambini ad interessarsi sempre più a ciò che accade nella stazione spaziale.

Tra gli ultimi e speciali eventi organizzati insieme a Samantha Cristoforetti, Il Cielo Itinerante ha aperto un collegamento diretto in videoconferenza con la Comandante della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) per un saluto dallo spazio prima del suo rientro sulla Terra. Ad accogliere l'astronauta erano presenti personalità di grande rilievo tra cui il sindaco di Milano, Giuseppe Sala, direttamente dalla Triennale di Milano, sede dell'evento; e il sindaco di Napoli, Gaetano Manfredi, in collegamento dal rione Forcella di Napoli. La calorosa accoglienza è stata poi portata avanti dai bambini di Milano e Napoli, che, curiosi della vita nello spazio, hanno posto molteplici domande alla Comandante. Tra i temi più affrontati, le modalità di gestione della vita quotidiana all'interno della Stazione Spaziale, lo smaltimento dei rifiuti nello spazio, le difficoltà motorie incontrate sulla terra dopo mesi trascorsi in assenza di gravità, il lavoro svolto e consigli sul miglior percorso di studi da intraprendere per diventare astronauta.

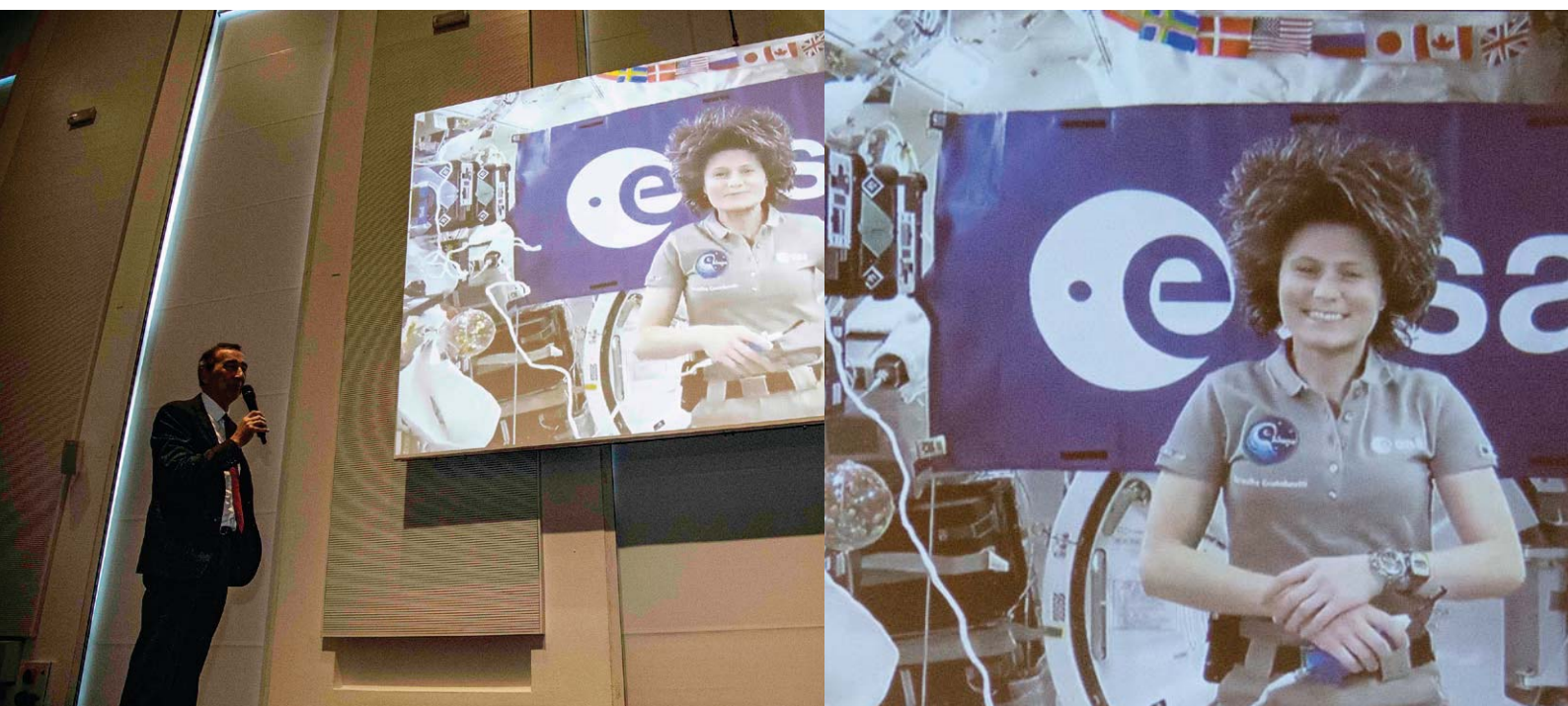


Fig. 2 Samantha Cristoforetti in collegamento dallo spazio.

AstroSamantha ha risposto ai quesiti dei piccoli intervistatori, intrattenendo il pubblico anche con delle dimostrazioni divertenti e pratiche, in particolar modo la reazione dell'acqua all'assenza di gravità e come fluttuano dei cioccolatini all'interno di una sfera trasparente. L'evento, oltre che di grande coinvolgimento per il pubblico presente, è stato di forte ispirazione per i bambini che con ammirazione ascoltavano gli incitamenti di Samantha Cristoforetti a coltivare i propri sogni.

4 I progetti futuri

Il progetto "on the ground" de Il Cielo Itinerante continua anche quest'anno per trasmettere a sempre più bambine e bambini la passione per lo spazio. Sono però tantissime le novità in arrivo che permetteranno a Il Cielo Itinerante di sviluppare nuovi progetti e ampliare il proprio pubblico. Con le nuove attività di ricerca e formazione, in aggiunta alle

attività sul territorio, l'associazione ambisce a creare un circolo virtuoso a favore della promozione delle materie STEAM.

Combattere le disuguaglianze, superare i limiti socio-economici e i preconcetti di genere imposti dalla società sono i primi passi verso l'attuazione di un cambiamento reale che influenzerà il futuro di tanti bambini e offrirà loro la possibilità di immaginare nuove prospettive. L'associazione Il Cielo Itinerante è convinta che, nel secolo del progresso tecnologico e in un Paese dove l'ascensore sociale è in discesa, fornire a ciascuno gli strumenti necessari per apprendere e comprendere le discipline scientifiche costituisca un fattore essenziale per la costruzione di una società più democratica. Aderire ai valori promossi da Il Cielo Itinerante e puntare sulle materie scientifiche non significa dunque voler formare scienziati e fisici, ma dare ad ognuno la libertà di poter scegliere ed essere ciò che vuole.

Vittoria Lodigiani

Vittoria Lodigiani si laurea in International Relations and Global Affairs all'Università Cattolica di Milano. Motivata da un forte interesse per l'ambito diplomatico, decide di intraprendere un'esperienza all'estero e proseguire i suoi studi con il percorso specialistico in European and International Public Policy alla London School of Economics and Political Science. Con diverse esperienze di volontariato alle spalle, tra cui Fondazione Rava ed Angeli per un Giorno, in supporto di bambini in situazioni di necessità, entra a far parte del team come Junior Project Manager.



Margherita Carusi

Margherita si laurea in Ingegneria Gestionale presso il Politecnico di Milano e, dopo un'esperienza in una società di consulenza strategica, approfondisce i suoi studi come fellow dell'MBA (Master in Business Administration) promosso dal Collège des Ingénieurs tra Parigi, Monaco e Torino. È tra le co-fondatrici di Officine Italia, associazione di giovani professionisti uniti dall'ambizioso progetto di costruire un Paese più lungimirante e inclusivo, ed è Consigliere nel Municipio 1 di Milano, dove ricopre il ruolo di Presidente della Commissione Cultura & Commercio.



FEMTOSECOND LASER WRITING OF INTEGRATED PHOTONIC CIRCUITS

FRANCESCO CECCARELLI*, ROBERTO OSELLAME

Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN)-CNR, Milan, Italy

Integrated photonics is gaining a relevant role in many applications due to its intrinsic stability, scalability, and compactness. Femtosecond laser writing of integrated photonic circuits is a relatively recent microfabrication technology that is rapidly becoming a valid alternative to more consolidated approaches based on photolithography. Here, we provide an introduction of the technique and we describe the possibility to produce general purpose and programmable processors. In addition, we discuss the use of this technology to manufacture application-specific devices that take full advantage of its unique properties for relevant fields such as quantum technologies and astrophotonics.

a cura di S. Falciano e C. Spinella

1 Integrated photonics

Photonics is a key enabling technology that is ubiquitous in today's society. It is heavily employed in information communication due to the large bandwidth, immunity to electromagnetic interference and long distance range it can achieve [1]. It is also an important tool for sensing, allowing remote, distributed and/or harsh environment measurements [2]. It is obviously a key ingredient for devices related to vision and imaging [3], and it is also explored as a powerful platform for computing, both classical and quantum [4, 5]. To address all these applications in real-world conditions, the use of discrete and bulk components is not viable to produce compact devices with a high degree of complexity and thus we have to rely on integrated photonics (fig. 1). Integrated photonic devices are realized by fabricating all the components on a monolithic substrate in which light is guided inside transparent circuits (named waveguides) that enable its manipulation. With an analogy to concepts that may be more familiar to the general public, the electric cable that brings the signal to your electronic device (e.g. the ethernet cable) is the analog of the optical fiber in photonics, whose main scope is the transport of information, while the electronic microprocessor that encodes, retrieves or transforms information is the analog of the integrated photonic circuits, made of several interconnected optical waveguides.

The fabrication of integrated photonic circuits is a well-established and vast field [6]. Many standard technologies are available for this task. Many of them try to leverage on CMOS-compatible processes, i.e. they try to exploit the same facilities that are used for the creation of microelectronic transistors. These technologies are capable of creating integrated photonic circuits in silicon or derived materials (e.g. silicon

nitride). From the economic point of view this is clearly a big advantage as a large quantity of devices could be produced at a reduced cost. However, this is also the reason why integrated photonics is not yet as widespread as it could be. In fact, these large foundries have no interest in developing processes for small batches of products and this complicates the uptake of integrated photonics in new fields or niche applications. In addition, standard microfabrication technologies for integrated photonic circuit production, all rely on photolithography, where a circuit layout, engraved in a mask, is transferred to the surface of the transparent substrate with a sequence of steps encompassing illumination of a photoresist through the mask and selective etching of the exposed regions. This kind of process is very efficient in producing a large volume of replicas of the same device. However, it is very expensive and time consuming for the development of new devices. This adds to the previous motivation on why integrated photonics is not used in many applications where it could provide an added value. In conclusion, there is a significant space for a microfabrication technology capable of producing integrated photonic circuits in small/medium series with rapid and cost-effective prototyping capabilities. This technology exists and it is direct writing with ultrashort laser pulses or femtosecond laser waveguide writing (FLWW).

The possibility to produce optical waveguides by focusing ultrashort pulses (in the order of a few hundreds of femtoseconds, i.e. a duration that compares to a second as the second compares to the age of the universe) was first discovered in 1996 [7]. In these last twenty years, this technique has developed significantly and it is now a reliable, industrial-grade microfabrication tool employed by an ever-increasing number of companies. In the next section we will briefly review the main characteristics of this technology, emphasizing the multiple advantages it provides with respect to the standard alternatives.

*E-mail: francesco.ceccarelli@cnr.it

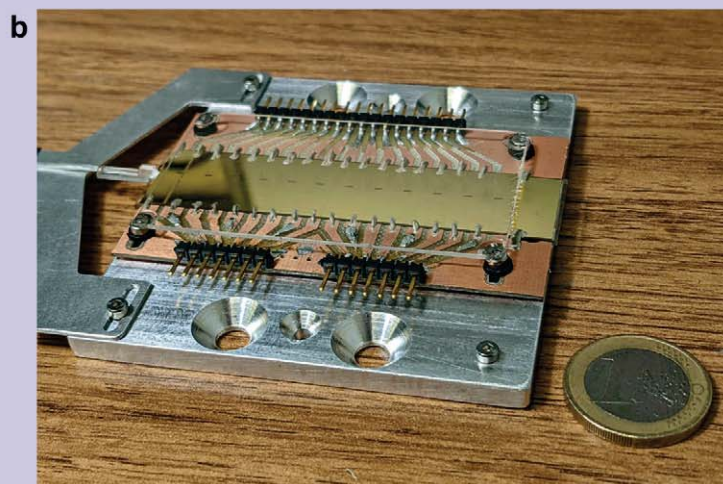
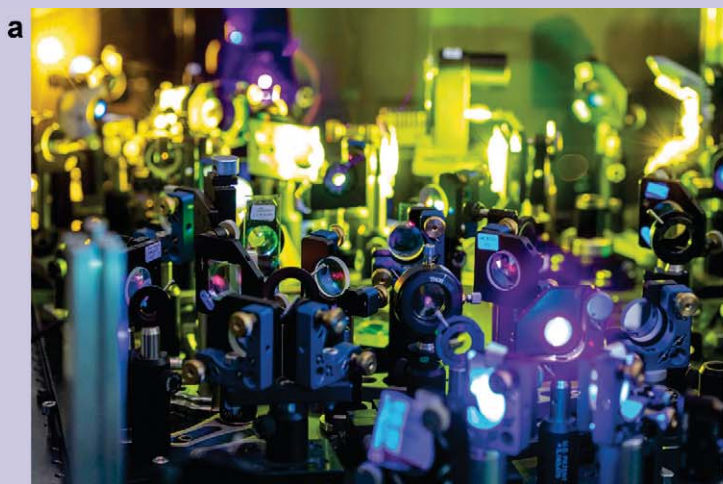


Fig. 1 Comparison between discrete and integrated optics. a) Optical setup based on bulk components such as lenses and mirrors. Courtesy

of Maurizio Contran (Politecnico di Milano) and Cristian Manzoni (IFN-CNR). b) Integrated photonic device encompassing 15 programmable

optical interferometers accessible by the user through optical and electrical connectors (authors' own work).

2 Femtosecond laser writing in transparent materials

A transparent material is by definition a substrate that does not absorb the impinging light. In more physical terms, this is equivalent to saying that the energy of each impinging photon is not sufficient to bridge the material bandgap. Hence, without any electronic transition to trigger, the photon does not interact with the material. However, when ultrashort pulses are focused inside the transparent material many photons arrive at the same point at approximately the same time, which makes the event of a nonlinear absorption very likely. By nonlinear absorption we mean all those phenomena in which multiple photons collaborate to interact with the material and are then absorbed. An example of one of those nonlinear processes is multiphoton absorption, where an electronic transition is triggered by the simultaneous absorption of multiple photons that can match the transition energy by summing up all their energies. It is clear that nonlinear absorption is highly dependent on light intensity (that is proportional to the number of photons per unit time and unit surface), for this reason absorption only happens at the laser focus, while it becomes negligible as soon as the beam diverges. This mechanism creates a very localized structural change of the transparent material right at the beam focus. By suitably tuning the irradiation parameters, one can produce a very gentle modification causing a local refractive index increase without perturbing the other properties of the material. As depicted in fig. 2a, the translation of the laser beam focus with respect to the substrate results in the creation of arbitrary circuits that can confine and guide light [8].

FLWW of photonic circuits has a clear drawback, which is the serial nature of the process. This means that it may be less suitable for very large volume production of devices with respect to photolithographic approaches. Nevertheless, the simplicity of the process and the very high writing speed that can be achieved (several cm/s), make this

solution very attractive also for medium to large scale production. Another important limitation of the process is that the refractive index increase that can be obtained is limited (comparable to that of an optical fiber). This is much lower than what can be obtained in, *e.g.*, silicon photonics, where the index change is achieved by stacking very different materials like silicon and silica. The consequence of this fact is that miniaturization of the devices is less extreme with FLWW. On the other hand, this technology has many unique advantages. The most evident one is the capability to produce circuit layouts in three dimensions and not just two-dimensional as with standard photolithographic processes. Completely new classes of device topologies, such as 3D waveguide arrays (fig. 2b and c), are thus becoming accessible [9, 10]. In addition, FLWW can produce waveguide structures in very different materials, from glasses to crystals, and thus it is rather straightforward to produce multimaterial devices [11]. Finally, the similar characteristics of a laser written waveguide with respect to those of an optical fiber make fiber coupling of laser written devices extremely low loss [12].

It is worth mentioning that FLWW is just one of the multiple tasks that can be accomplished by the interaction of ultrashort laser pulses with transparent materials [8]. An additional example is water-assisted laser ablation [13] that allows the ultraprecise removal of transparent material resulting in a 3D microstructuring of the substrate (fig. 2a). FLWW and laser ablation can be combined to provide devices with better performances. In the following section, we will discuss an important device that has been recently demonstrated by exploiting a combination of the previous laser processes: the universal programmable photonic processor [14]. This device, fully programmable by the end user, will become an important building block in more complex photonic systems, with a role similar to that of field-programmable gate arrays (FPGAs) in electronic systems.

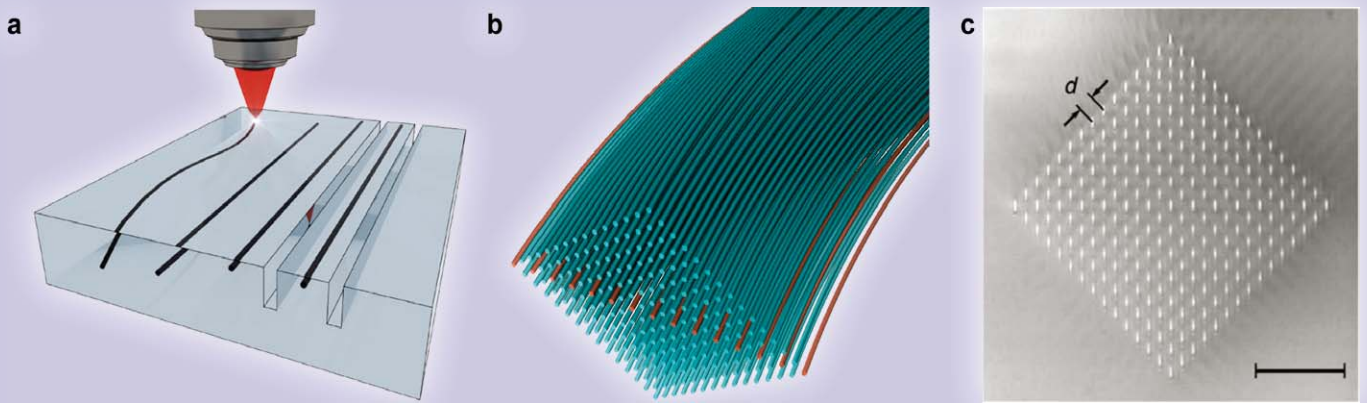


Fig. 2 The unique features of FLWW integrated photonic devices. a) Artwork representing two important capabilities of the FLWW platform: waveguide writing extending in three dimensions

and laser ablation of microstructures (in this case microtrenches). Reproduced under terms of the CC-BY license from [25]. b) Artwork depicting a 3D waveguide array inscribed by FLWW. Adapted

from [9]. c) Microscope image of the cross section of the same array (scale bar is 100 μm , waveguide pitch is $d=19 \mu\text{m}$). Adapted from [9].

3 Programmable photonic processors

Let us now consider a photonic circuit that acts on a given set of N input optical signals E_{in} by transforming them in a set of N output optical signals E_{out} . If we consider only linear phenomena with no attenuation (i.e. no photon losses) we can model the behavior of this device as follows:

$$(1) \quad E_{\text{out}} = U E_{\text{in}},$$

where $E_{\text{in}}, E_{\text{out}} \in \mathbb{C}^N$ and $U \in U(N)$ is a unitary matrix whose elements are also complex values characterized by a modulus and an argument. As a relevant example, let us start by considering the simple case of $N=2$, in which U is a 2×2 matrix that can be universally expressed as:

$$(2) \quad U = \begin{bmatrix} e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ e^{i\phi} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix},$$

where ϕ and θ are arbitrary angles so that $\phi \in [0, 2\pi]$ and $\theta \in [0, \pi]$. Beyond the mathematical formulation, what is important is the physical meaning of these two quantities. Indeed, following the bulk optics implementation proposed in fig. 3a, this matrix can be seen as the cascade of a first transformation, which acts on the two optical signals as a phase shift ϕ , and a second transformation, which acts on the two optical signals as a beam splitter featuring a power reflectivity $\sin^2(\theta/2)$. Translating this description into the language of integrated photonics, a universal 2×2 transformation can be implemented by resorting to a Mach-Zehnder interferometer (MZI) as the one depicted in fig. 3b. In this configuration, after acquiring a phase delay ϕ , the light entering the first input is initially split in two equal parts by a balanced directional coupler (i.e. a 50/50 beam splitter based on two evanescent-wave coupled waveguides) and then recombined by a second balanced directional coupler. Depending on the relative phase difference θ acquired along the two internal paths, the second directional coupler will reflect the light with the same power reflectivity law as the beam splitter of fig. 3a, thus in agreement with the transformation U (eq. (2)). Obviously, dual considerations can be made also for the second input.

Among the qualities of integrated photonic circuits, the possibility of dynamically reconfiguring the optical transformation U implemented

by the device is something that is well appreciated, if not even required, in many applications [15]. Therefore, the angles ϕ and θ are typically intended as variables that can be decided even at run-time. In other words, the device depicted in fig. 3b can be regarded as a programmable photonic processor able to implement any arbitrary unitary transformation on a set of two optical signals. Generally speaking, programmability is introduced in integrated photonic circuits by relying on different physical mechanisms and techniques, however in FLWW circuits the gold standard is the use of thermo-optic phase shifters [16]. An electrical circuit is fabricated on the surface of the photonic device and, more specifically, resistive microheaters are patterned on the waveguides whose optical properties need to be reconfigured. By dissipating electrical power through the microheaters, it is possible to locally heat up the waveguide and, in turn, to have a reversible modification of the refractive index of the material. The final effect is a phase shift on the optical path targeted by the microheater. In order to implement effectively this technique in FLWW devices, a few design considerations must be made [17]. First of all, waveguides must be fabricated as shallow as possible (depth $< 30 \mu\text{m}$ from the surface) in order to guarantee a decent thermal coupling between the microheaters and the optical circuit. Secondly, thermally insulating structures must be employed in order to guide the heat diffusion towards the target waveguide, thus decreasing the power consumption of the device and limiting the crosstalk with other waveguides fabricated in the same substrate. Examples of insulating structures are microtrenches (fig. 3c) that are realized by 3D water-assisted laser ablation.

Such concepts can be extended in a straightforward way to produce processors able to manipulate N optical signals. In order to do that, the 2×2 MZI can be employed as the basic cell for a more complex interferometric network: a MZI mesh [15]. Different planar MZI mesh layouts have been demonstrated to be universal and, among the most important, the square one (fig. 3d) is worth mentioning [18]. The state of the art today is represented by the programmable photonic processors based on silicon nitride waveguides provided by the Dutch company QuiX and fabricated through the planar process provided by Lionix, world-renowned top-level fabrication facility. Such circuits are able to operate on $N=20$ optical inputs/outputs (i.e. optical modes) with light

between 900 and 1550 nm, photon losses of about 3 dB and an average fidelity of the implemented optical operation $> 97.4\%$ [19, 20]. On the other hand, photonic processors manufactured through a FLWW process have been demonstrated only up to 6 optical modes [21], however with a performance that is currently comparable to the state of the art and, in addition, with the fundamental advantage of being rapid, cost-effective and easily tailorable even to visible light with no detrimental effects on the performance. Moreover, FLWW photonic processors that feature insulating structures can claim also a total amount of power dissipation that can be orders of magnitude lower with respect to the silicon nitride technology, an advantage that cannot be ignored from a long-term scaling perspective.

Speaking of scaling, this is actually one of the hot topics of this fascinating field. The research on FLWW circuits is currently directed towards increasing the number of optical modes by keeping the same length of the circuit and, in turn, the same attenuation/losses. Indeed, this is particularly important in fields like quantum optics, in which the information is carried by individual photons and optical amplification is intrinsically not possible. If we consider a square MZI mesh, it is trivial to demonstrate that the optical length L of a square MZI mesh can be expressed as

$$(3) \quad L = L_{\text{MZI}} N,$$

where L_{MZI} is the length of each MZI cell. It is evident from eq. (3) that optical length (*i.e.* photon losses) and complexity scale proportionally. A first strategy currently employed to face this problem is working on the compactness of the MZI cell, namely on L_{MZI} , both in terms of optical and electrical circuit. On the other hand, an orthogonal strategy relies instead on leveraging the unique 3D capabilities of the FLWW platform in order to completely change the waveguide layout of the photonic processor and, thus, achieve a more favorable scaling of the circuit length L as a function of the number N of optical modes. In particular, two main limits of the square mesh have been identified and addressed: first, the fact that the interference happens only in well-defined positions of the circuits (*i.e.* the directional couplers) and, secondly, the fact that the circuit (and thus the optical interaction) extends over only one plane. The novel layout proposed by Hoch *et al.* [22] goes exactly in this direction by taking advantage of a 3D continuously coupled FLWW waveguide array (fig. 3e). First, thanks to the continuous optical coupling, the interference between the optical modes is distributed over the whole length of the circuit, with no dead space. Secondly, the 3D arrangement guarantees the most efficient interaction among the modes and, in particular, the triangular lattice (fig. 3e) chosen for the cross section of the array results in the best possible packing efficiency. All these features give a key contribution on the maximization of the

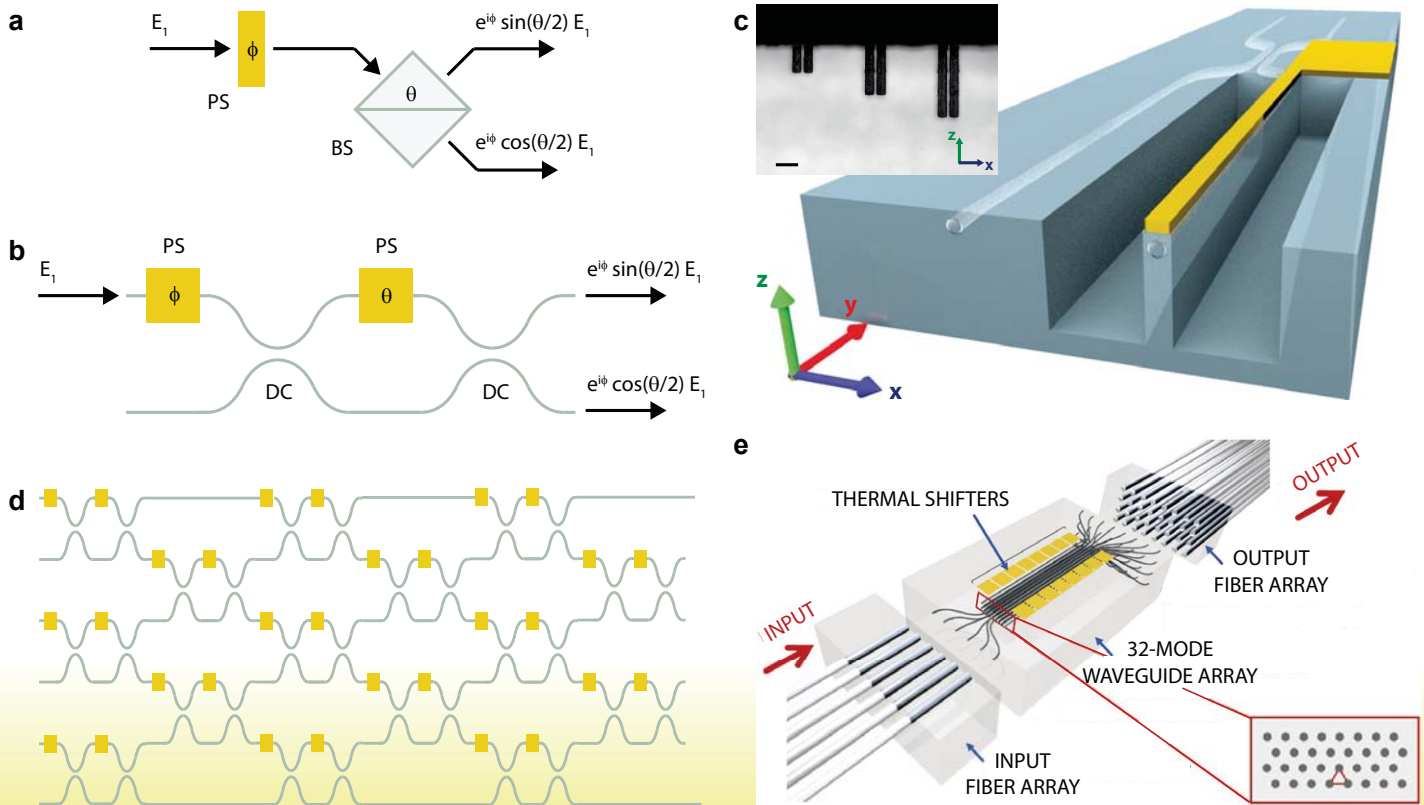


Fig. 3 Programmable photonic processors and their implementation through FLWW.

a) Implementation of a 2×2 processor through bulk components: a phase shifter (PS) and a beam splitter (BS). b) Implementation of a 2×2 processor through an integrated MZI encompassing waveguides, phase shifters (PSs) and directional couplers (DCs). c) 3D cross section of a FLWW

2×2 processor. Microtrenches are exploited to reduce power consumption and crosstalk. Inset: microscope picture of microtrenches ranging from 150 to 450 μm depth (scale bar is 150 μm). Adapted under terms of the CC-BY license from [17]. d) Square MZI mesh proposed by Clements *et al.* [18] in order to implement $N \times N$ photonic processors based on integrated

components. e) 32-mode programmable photonic processor based on a 3D continuously coupled FLWW waveguide array and on microheaters fabricated on top of the device. Fiber arrays are employed to inject and collect light from the circuit. As depicted in the red rectangle, waveguides are arranged in a triangular lattice. Adapted under terms of the CC-BY license from [22].

optical interaction per unit length and, thanks to them, the scaling rule reported by eq. (3) now reads:

$$(4) \quad L = C\sqrt{N},$$

where C is a coefficient that depends essentially on the strength of the optical coupling within the array. Programmability can be introduced relying again on thermo-optic phase shifters fabricated on the surface of the device and, currently, a 32-mode programmable processor featuring 18 microheaters (fig. 3e) has been already demonstrated and exploited in the applications thanks to its large reconfigurability [22] and low losses (3.5 dB). However, further work is needed to fully exploit this powerful approach. Just to make an example, a control algorithm that allows the end user to program the processor and implement an arbitrary unitary transformation is still missing. In particular, this point has been successfully addressed for discretely coupled MZI meshes, but for the continuously coupled arrays a black-box approach based on machine learning currently represents the most promising way to demonstrate full control of these promising devices.

4 Applications

FLWW has very diversified applications. It can provide integrated optical sensing in lab-on-a-chip for biophotonic analysis [23] or photonic interconnects for telecom applications, where planar lightwave circuits need to interface with multicore/multimode fibers [24]. Here, we will focus on two recent and very promising fields where FLWW can play a major role thanks to its unique properties: quantum technologies [25] and astrophotonics [26].

Quantum technologies are nowadays promising to revolutionize the way we acquire, manipulate, and transmit the information. Although the development of quantum technologies has been driven by different applications, the development of a large-scale quantum computation platform is considered by all the Holy Grail of the field. The large effort concentrated around this goal is motivated by the promise of an algorithmic advantage in problems that are today considered intractable by classical (super)computers like the simulation of certain chemical reactions for drug design and discovery. Despite the humongous advances reported in the last years, the achievement of such a revolutionary milestone still looks far from our reach and it is very likely that this goal will not be attained even for the next ten years. As a

result, the research in the field moved its attention on an intermediate, yet fundamental, step like the achievement of the regime of quantum advantage, *i.e.* the experimental proof of a quantum device able to perform a specific computational task that is currently not possible to address with classical computers in a reasonable time. In this scenario, Aaronson and Arkhipov proposed in 2013 [27] a computational problem that consists of sampling the probability distribution of n identical bosons scattered through a linear interferometer featuring N input/output modes. Such a problem is called boson sampling. Under the absence of any special structure for the interferometer (*i.e.* the unitary transformation must be chosen “randomly”), boson sampling is strongly believed to be an intractable problem for classical computers [27].

Although this problem regards in general any bosonic particle, since the beginning the photonic implementation of boson sampling (fig. 4a) was considered the most promising approach for achieving the level of complexity required to challenge and eventually outperform a classical computer [28]. Indeed, although not universal, a photonic boson sampling setup can be implemented by using far fewer physical resources than a universal quantum computing platform. This made it the ideal candidate for demonstrating the quantum advantage in the near term. In this framework, FLWW photonic circuits have been pivotal in attaining the first experimental demonstrations of boson sampling [29, 30]. Today, the quantum advantage regime has been achieved in different works [31–33] and some of them have taken advantage of photonic boson sampling setups [32, 33].

Although integrated photonic processors represent a natural way to realize an N -mode interferometer, an integrated implementation of boson sampling capable of reaching the quantum advantage is still missing. The reason is that, in order to effectively implement a large-scale experiment, it is not only necessary to increase the number of modes of the device, but it is also important to keep the photon losses as low as possible, otherwise the complexity of the process could be jeopardized. However, as we have already mentioned in sect. 3, scaling the number of modes and keeping low losses at the same time is not trivial in an integrated processor. An important step towards the solution of this issue was the demonstration of the 3D photonic processor fabricated by FLWW and already presented in sect. 3 (fig. 3e). For the first time, an integrated processor achieved a number of modes as high as 32, along with total photon losses as low as 3.5 dB. Moreover, a set of 18 thermal phase shifters enabled

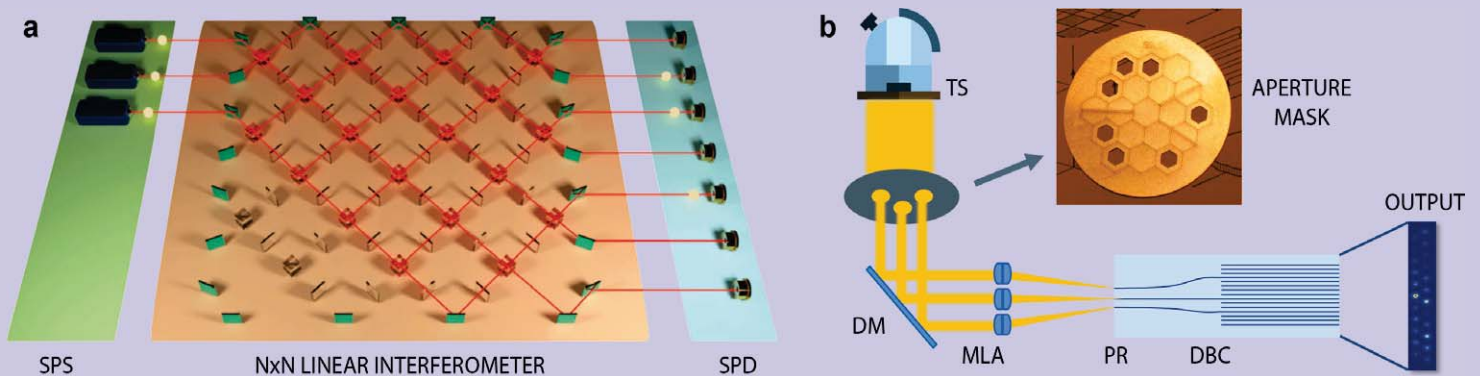


Fig. 4 Applications of FLWW integrated circuits. a) Conceptual scheme of a photonic boson sampling experiment encompassing single-photon sources (SPSs), an N -mode optical interferometer and single-photon detectors

(SPDs). Adapted under terms of the CC-BY license from [28]. b) Conceptual scheme of the aperture masking interferometric setup exploited at William Herschel Telescope in 2019 for celestial observation [38]: telescope (TS), deformable

mirror (DM), microlens array (MLA), pupil remapper (PR) and discrete beam combiner (DBC). For the sake of simplicity, the input beams are only 3 and the fan-out region of the circuit has been omitted.

a high degree of reconfigurability, which is important to evaluate the effective randomness of the platform. Although universality was not fully demonstrated, with this device we successfully showed the implementation of a large set of random transformations and, then, we implemented and validated 3- and 4-photon boson sampling experiments, demonstrating the feasibility of using such a processor for future large-scale computational systems [22].

The second example of application field where FLWW is having and will have an important role is astrophotonics. The field of astrophotonics promises to improve the observation of celestial objects and phenomena by interfacing integrated photonic circuits with telescopes [34]. Coupling the collected light into single-mode waveguides provides spatial filtering that, combined with the stable and controlled interaction between different waveguides, can produce interference effects with greater visibility and easier scalability than bulk optical interferometers [35]. This results in an enhancement of the angular resolution in imaging astronomical objects. To this aim, FLWW in glass has several specific advantages. First, it is rather straightforward to optimize the writing process in order to have single-mode waveguides at any wavelength in the transparency window of the material, with the possibility of performing observations in the whole visible and near-infrared range with very good performances in terms of insertion losses and reproducibility. Second, laser written waveguides show very low birefringence, thus all devices are polarization transparent, *i.e.* their optical performance does not depend on the polarization state of the input light. This allows one to maximize the available signal by analyzing all the faint celestial light, since no polarization filtering at the device input is required. Finally, the 3D capabilities of FLWW are very important for stable and compact pupil remapping (*i.e.* reorganizing the signals collected in different points of the telescope pupil to arrange them in different ways) and efficient beam combining.

A technique benefitting from these features is aperture masking interferometry [36]. In this framework, the light imaged on the telescope pupil plane is sampled, by means of a mask or a segmented mirror, in some sparse points, whose interference pattern is then analyzed for reconstructing the original image. This technique provides enhanced resolution and robustness to atmospheric aberrations if compared to classical imaging, and for this reason it is widely used when studying far astronomical objects [37]. Integrated optical waveguides can be used to sample and remap the signal, routing it to a multimode integrated interferometer. Such an interferometer is typically complex and difficult to scale for a large number of sampling points. For this reason, a new type of device, named discrete beam combiner (DBC), has been proposed and realized as a scalable interferometer. This intrinsically 3D element is based on a continuously-coupled waveguide array arranged in a triangular lattice. The fabrication of the DBC has been accomplished with FLWW in borosilicate glass for operation at 1550 nm. The device has been tested on-sky at the William Herschel Telescope in 2019 [38]. The reported circuit (fig. 4b) was composed of a 4-input

DBC with 23 waveguides, followed by a fan-out region reformatting the output modes in a linear configuration for further spectral dispersion and analysis. The interferometer was preceded by a length-matched pupil remapper, necessary to route the 4 selected sub-apertures of the telescope pupil into the proper interferometer inputs. Notably, the device has shown a polarization-insensitive behavior, thus enabling the analysis of all the collected light, without polarization filtering.

Another relevant application of the DBC component is represented by the interferometric combination of the light beams collected by different telescopes, with the purpose of increasing the angular resolution of the observation creating a synthetic aperture that equals the distance of the telescopes and not the actual aperture of each of them. To perform this task, complex interferometers are typically used, based on the pairwise interaction of all the beams [39]. However, this is hardly scalable to a large number of telescopes. A DBC produced by FLWW has been characterized in the laboratory, showing its capability to simultaneously combine 6 different signals in the *J* band (around 1300 nm), potentially coming from 6 different telescopes [40].

5 Conclusion and perspectives

In the last forty years, thanks to the development of important photonic technologies like the laser or the optical fiber, we have witnessed a true revolution in fields as diverse as medicine, industrial material processing and telecommunications. Now, it is time to move the implementation of all the photonic components we know to a fully integrated platform in order to unlock the true potential of many groundbreaking applications. However, it is not clear at the moment if, similarly to what happened for the electronic circuits and the CMOS technology, we will have a winning integrated platform also for the photonic circuits. As a matter of fact, different technologies are currently establishing in the field for the implementation of specialized tasks and, as a result, hybrid integrated platforms are now gaining a lot of attention from those applications requiring a thorough optimization of the entire photonic system, *i.e.* from the light source to the optical circuit and, eventually, to the detection. Our vision is that FLWW will play a paramount role in such a scenario thanks to the possibility of interfacing different photonic components in a very efficient fashion (*i.e.* with very low photon losses) and thanks to its flexibility in adapting photonic circuits to different situations. FLWW optical interconnects are already an industrial reality and now other applications like quantum and astrophotonics are blossoming and establishing thanks also to the high value of this fabrication platform. Throughout this article, we have reported examples of FLWW devices with unique features that have been already exploited with success in the aforementioned applications. However, we believe that the number of applications in which FLWW devices can be key is much larger and, as a natural consequence, we envision that in the next years this technology will finally prove itself as one of the most prominent integrated platforms of the entire photonic landscape.

References

- [1] G. P. Agrawal, *"Fiber-optic communication systems"* (John Wiley & Sons Ltd) 2010.
- [2] J. L. Santos, F. Farahi, *"Handbook of optical sensors"* (CRC Press) 2014.
- [3] J. Nakamura, *"Image sensors and signal processing for digital still cameras"* (CRC Press) 2017.
- [4] D. R. Solli, B. Jalali, *"Analog optical computing"*, *Nat. Photon.*, 9 (2015) 704.
- [5] T. Rudolph, *"Why I am optimistic about the silicon-photonics route to quantum computing"*, *APL Photon.*, 2 (2017) 030901.
- [6] L. Thylén, L. Wosinski, *"Integrated photonics in the 21st century"*, *Photon. Res.*, 2 (2014) 75.
- [7] K. M. Davis *et al.*, *"Writing waveguides in glass with a femtosecond laser"*, *Opt. Lett.*, 21 (1996) 1729.
- [8] R. R. Gattass, E. Mazur, *"Femtosecond laser micromachining in transparent materials"*, *Nat. Photon.*, 2 (2008) 219.
- [9] G. Corrielli *et al.*, *"Fractional Bloch oscillations in photonic lattices"*, *Nat. Commun.*, 4 (2013) 1555.
- [10] A. Crespi *et al.*, *"Dynamic band collapse in photonic graphene"*, *New J. Phys.*, 15 (2013) 013012.

- [11] S. Atzeni et al., "Integrated sources of entangled photons at the telecom wavelength in femtosecond-laser-written circuits", *Optica*, 5 (2018) 311.
- [12] Y. Nasu, M. Kohtoku, Y. Hibino, "Low-loss waveguides written with a femtosecond laser for flexible interconnection in a planar light-wave circuit", *Opt. Lett.*, 30 (2005) 723.
- [13] Y. Li, S. Qu, "Water-assisted femtosecond laser ablation for fabricating three-dimensional microfluidic chips", *Curr. Appl. Phys.*, 13 (2013) 1292.
- [14] N. C. Harris et al., "Linear programmable nanophotonic processors", *Optica*, 5 (2018) 1623.
- [15] W. Bogaerts et al., "Programmable photonic circuits", *Nature*, 586 (2020) 207.
- [16] F. Flamini et al., "Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining", *Light Sci. Appl.*, 4 (2015) e354.
- [17] F. Ceccarelli et al., "Low power reconfigurability and reduced crosstalk in integrated photonic circuits fabricated by femtosecond laser micromachining", *Laser Photon. Rev.*, 14 (2020) 2000024.
- [18] W. R. Clements et al., "Optimal design for universal multiport interferometers", *Optica*, 3 (2016) 1460.
- [19] C. Taballione et al., "20-Mode universal quantum photonic processor", arXiv:2203.01801 (2022).
- [20] M. de Goede et al., "High fidelity 12-mode quantum photonic processor operating at InGaAs quantum dot wavelength", arXiv:2204.05768 (2022).
- [21] C. Pentangelo et al., "Universal photonic processors fabricated by femtosecond laser writing", *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies*, XXVI. Vol. 12004 (2022).
- [22] F. Hoch et al., "Reconfigurable continuously-coupled 3D photonic circuit for Boson Sampling experiments", *npj Quantum Information*, 8 (2022) 55.
- [23] R. Memeo et al., "Automatic imaging of *Drosophila* embryos with light sheet fluorescence microscopy on chip", *J. of Biophoton.*, 14 (2021) e202000396.
- [24] R. S. Luis et al., "1.2 Pb/s throughput transmission using a 160 μ m cladding, 4-core, 3-mode fiber", *J. of Lightwave Technol.*, 37 (2019) 1798.
- [25] G. Corrielli, A. Crespi, R. Osellame, "Femtosecond laser micromachining for integrated quantum photonics", *Nanophotonics*, 10 (2021) 3789.
- [26] R. R. Thomson, A. K. Kar, J. Allington-Smith, "Ultrafast laser inscription: an enabling technology for astrophotonics", *Opt. Express*, 17 (2009) 1963.
- [27] S. Aaronson, A. Arkhipov, "The computational complexity of linear optics", *Proceedings of the forty-third annual ACM symposium on Theory of computing* (2011).
- [28] D. J. Brod et al., "Photonic implementation of boson sampling: a review", *Adv. Photon.*, 1 (2019) 034001.
- [29] M. Tillmann et al., "Experimental boson sampling", *Nat. Photon.*, 7 (2013) 540.
- [30] A. Crespi et al., "Integrated multimode interferometers with arbitrary designs for photonic boson sampling", *Nat. Photon.*, 7 (2013) 545.
- [31] F. Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor", *Nature*, 574 (2019) 505.
- [32] H.-S. Zhong et al., "Quantum computational advantage using photons", *Science*, 370 (2020) 1460.
- [33] L. S. Madsen et al., "Quantum computational advantage with a programmable photonic processor", *Nature*, 606 (2022) 75.
- [34] J. Bland-Hawthorn, P. Kern, "Astrophotonics: a new era for astronomical instruments", *Opt. Express*, 17 (2009) 1880.
- [35] S. Gillessen et al., "GRAVITY: a four telescope beam combiner instrument for the VLTI", *Optical and Infrared Interferometry II*, Vol. 7734 (2010).
- [36] P. G. Tuthill, "The unlikely rise of masking interferometry: leading the way with 19th century technology", *Optical and Infrared Interferometry III*, Vol. 8445 (2012).
- [37] P. G. Tuthill, J. D. Monnier, W. C. Danchi, "Aperture masking interferometry on the Keck I Telescope: new results from the diffraction limit", *Interferometry in Optical Astronomy*, Vol. 4006 (2000).
- [38] A. S. Nayak et al., "First stellar photons for an integrated optics discrete beam combiner at the William Herschel Telescope", *Appl. Opt.*, 60 (2021) D129.
- [39] J.-B. Le Bouquin et al., "PIONIER: a 4-telescope visitor instrument at VLTI", *Astron. Astrophys.*, 535 (2011) A67.
- [40] E. Pedretti et al., "A six-apertures discrete beam combiners for J-band interferometry", *Optical and Infrared Interferometry and Imaging VI*, Vol. 10701 (2018).



Francesco Ceccarelli

Francesco Ceccarelli received the Master's Degree (summa cum laude) in Electronics Engineering from the Politecnico di Milano (Italy) in 2014 and the Ph.D. (with honors) in Information Technology from the same university in 2018, with a dissertation on custom-technology single-photon avalanche diode arrays. Since 2020 he is permanent researcher at the Institute for Photonics and Nanotechnologies (IFN) of the Italian National Research Council (CNR), working on the development of programmable integrated optical circuits for photonic quantum information processing.



Roberto Osellame

Roberto Osellame is a Director of Research at the Institute for Photonics and Nanotechnologies (IFN) of the Italian National Research Council (CNR), and a Contract Professor at the Politecnico di Milano. He received his Ph.D. in Physics from the Politecnico di Torino (Italy) in 2000. His research interests focus on microfabrication of integrated photonic devices for such diverse applications as quantum technologies, lab-on-a-chip, and optical communications. He is a Fellow of the Optical Society of America.

CERIMONIA INAUGURALE 108° CONGRESSO NAZIONALE DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

12 SETTEMBRE 2022

Cerimonia Inaugurale del Congresso al Salone Pio XII, presso la Casa Cardinale Ildefonso Schuster, Milano. Da sinistra: Giovanni Onida, Elio Franzini, Angela Bracco, Anna Scavuzzo, Giovanna Iannantuoni, Chiara Meroni.

La Cerimonia Inaugurale del 108° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica si è svolta finalmente quest'anno in presenza a Milano presso la Casa Cardinale Ildefonso Schuster nel Salone Pio XII.

La Presidente Bracco sottolinea che questo è davvero un Congresso speciale: perché ha luogo nell'anno in cui la SIF celebra i suoi 125 anni di vita; perché torna a svolgersi in presenza dopo due anni di congressi per via telematica; perché Milano in passato ha ospitato il Congresso SIF solo una volta, nel 2001 all'Università di Milano Bicocca, e perché Milano è stata la sede di un importante Presidente SIF, Giovanni Polvani (Presidente SIF 1947-1961), che è stato anche il fondatore nel 1953 della prestigiosa Scuola Internazionale di Fisica "Enrico Fermi" a Varenna, la quale si tiene tutt'ora con grande successo. È anche speciale perché il Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli", sede del Congresso, è stato riconosciuto per il ruolo di Aldo Pontremoli come Sito Storico della Società Europea di Fisica con una cerimonia a questo dedicata durante la settimana congressuale.

Il Congresso Nazionale della SIF è un momento d'incontro molto significativo per la comunità dei fisici italiani, che permettere di presentare e discutere i progressi fatti e di scambiarsi idee nelle varie aree di ricerca. Il Congresso vede la partecipazione di molti giovani e questo per la SIF è davvero importante: ospita ancora una volta i lavori

della Sezione Giovani, organizzata in collaborazione con l'Associazione Italiana Studenti di Fisica (AISF) e con il Progetto Young Minds della Società Europea di Fisica (EPS).

Il programma scientifico è come sempre ricco di belle presentazioni, con 10 Relazioni Generali plenarie, circa 150 Relazioni su Invito parallele e oltre 500 Comunicazioni che si sono articolate nelle tradizionali 7 Sezioni riguardanti le diverse tematiche di ricerca in fisica.

Inoltre sono previste due sessioni speciali, una in collaborazione con la Società Italiana di Spettroscopia Neutronica (SISN) e l'altra focalizzata sulla presentazione di numerosi lavori da parte di un nutrito gruppo di ottici e optometristi.

Gli eventi sociali del Congresso, tutti gratuiti per gli iscritti, sono organizzati al Giardino Botanico dell'Università degli Studi, al Museo della Scienza e della Tecnologia "Leonardo da Vinci" e nell'Aula Magna dell'Università dove si è svolto anche uno speciale concerto di musica classica.

Come per lo scorso anno, dei fascicoli de IL NUOVO CIMENTO saranno dedicati al Congresso e includeranno un certo numero di Comunicazioni selezionate tra le numerose pervenute. Per questo la Presidente ringrazia anticipatamente sia coloro che aiuteranno nella scelta, sia coloro che scriveranno gli

articoli basati sulle loro Comunicazioni.

La Presidente ha quindi l'onore e il piacere di dare la parola alle illustri Autorità venute a dare il loro saluto alla comunità dei fisici italiani riuniti a Milano: Anna Scavuzzo, Vice Sindaco e Assessora all'Istruzione del Comune di Milano; Elio Franzini, Magnifico Rettore dell'Università degli Studi di Milano; Giovanna Iannantuoni, Magnifica Rettrice dell'Università degli Studi di Milano Bicocca; Chiara Meroni, in rappresentanza del Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Antonio Zoccoli, e infine Giovanni Onida, Direttore del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano e Presidente del Comitato Organizzatore del Congresso.

Si avvia quindi la Cerimonia di proclamazione dei premi. Si inizia con l'annuncio dei diplomi e medaglie ai **SOCI BENEMERITI** della Società Italiana di Fisica, colleghi che hanno onorato la Società e la Scienza con i loro contributi e che sono:

- Massimo CAPACCIOLI, Università di Napoli e INAF, Socio Benemerito per i suoi importanti studi di dinamica ed evoluzione dei sistemi stellari e di cosmologia osservativa e per la sua collaborazione con la SIF.

- Umberto DOSSELLI, INFN, Sezione di Padova, Socio Benemerito per i suoi importanti studi nell'ambito delle particelle elementari e per il suo supporto alla SIF.

- Anna DI CIACCIO, Università di Roma Tor Vergata e INFN, Socia Benemerita per le sue ricerche sperimentali di alto livello nell'ambito delle particelle elementari e per il suo forte impegno per la SIF.

- Angela OLEANDRI, SIF, Bologna, Socia Benemerita per il suo forte impegno e grande dedizione negli anni alle attività editoriali della SIF, ben riconosciute anche in ambito internazionale.



Angela Oleandri, Socia Benemerita 2022.

- Corrado SPINELLA, CNR, Roma, Socio Benemerito per la sua attività scientifica di alto livello nell'ambito della scienza e la tecnologia dei materiali per la microelettronica, e per la sua collaborazione con la SIF.

La Cerimonia prosegue con l'assegnazione dei **Premi per le Migliori Comunicazioni** presentate lo scorso anno al 107° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, che si è tenuto in via telematica dal 13 al 17 settembre 2021.

I Premi per le Migliori Comunicazioni sono congiuntamente offerti da IL NUOVO CIMENTO e da THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL e si riferiscono alle varie Sezioni parallele del Congresso. Di seguito i primi e secondi migliori premiati con i titoli delle loro comunicazioni; i primi ricevono un diploma e un piccolo premio in denaro e i secondi un diploma.

- Per la Sezione di **Fisica Nucleare e Subnucleare**, il Primo Premio ex aequo va a Francesca ERCOLESSI, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna: "Study of strangeness production in pp as a function of the charged particle multiplicity and the effective energy with ALICE at the LHC"; e a Irene ZANON, INFN, Laboratori Nazionali di Legnaro e Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università di Ferrara: "Testing

ab-initio calculations in ^{20}O via lifetime measurements". Il Secondo Premio ex aequo va a Riccardo Nunzio PILATO, Dipartimento di Fisica, Università di Pisa e INFN, Sezione di Pisa: "The MUonE experiment"; e a Fabio RISITANO, INFN, Sezione di Catania e Dipartimento MIFT, Università di Messina: "Studio simulativo di produzione di fasci radioattivi presso FRAISE (LNS)".

- Per la Sezione di **Fisica della Materia**, il Primo Premio ex aequo va a Lucia VIGLIOTTI, Dipartimento di Fisica, Università di Genova: "4 π -periodic AC current through helical Josephson junctions"; e a Massimo FRIGERIO, Dipartimento di Fisica, Università di Milano e INFN, Sezione di Milano: "Generalized continuous-time quantum walks and how to exploit them". Il Secondo Premio ex aequo va a Giuseppe PUCCI, CNR, Istituto di Nanotecnologia, Rende, CS e Department of Mathematics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA: "Hydrodynamic spin lattices"; e a Matteo VERDI, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna: "Lead-halide perovskites thin-film for direct X-ray detection".

- Per la Sezione di **Astrofisica**, il Primo Premio va a Giuseppe MATTEUCCI, Dipartimento di Fisica, Università di Napoli "Federico II": "La Time Projection Chamber (TPC) ad argon in doppia fase di ReD". Il Secondo Premio va a Luisa SPALLINO, INFN, Laboratori Nazionali di Frascati: "Cryogenic vacuum issues affecting mirrors of future gravitational wave observatories".

- Per la Sezione di **Geofisica e Fisica dell'Ambiente**, il Primo Premio va a Eleonora AMATO, INGV, Sezione di Catania, Osservatorio Etneo e Dipartimento di Matematica e Informatica, Università di Palermo: "Machine learning approach for mapping lava flows from space". Il Secondo Premio va Federica TORRISI, INGV, Sezione di Catania, Osservatorio Etneo e Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e Informatica, Università di Catania: "Retrieval of volcanic ash cloud properties using msg-seviri and machine learning techniques".

- Per la Sezione di **Biofisica e Fisica Medica**, il Primo Premio va a Gaia DELLEPIANE, Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza", ENEA, Casaccia Research Centre, Roma e ENEA, Department of Fusion and Technologies for Nuclear Safety and Security, Frascati, Roma: "Activity measurements of ^{64}Cu sample activated by 14 MeV neutron beam". Il Secondo Premio va a Mariacristina GUARRERA, INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania: "A preliminary study on the prototype of PRAGUE detector, a device designed to acquire the Percentage Depth-Dose distribution of proton beams".

- Per la Sezione **Fisica Applicata, Acceleratori e Beni Culturali**, il Primo Premio ex aequo va a Edoardo VICENTINI, CNR, Istituto di Fotonica e nanotecnologie, Milano: "High-resolution direct-comb spectrometer at 2.4 μm " e a Ilaria

VAGNILUCA, CNR, Istituto nazionale di Ottica, Firenze e Dipartimento di Fisica, Università di Napoli "Federico II": "Quantum communication in Florence: Recent achievements and future perspectives". Il Secondo Premio ex aequo va a Martina SCOTTI, Dipartimento di Fisica, Università di Milano: "Il ruolo dello xylene orange e del ferro-ammonio-solfato nella risposta dosimetrica di gel di Fricke a base di PVA-GTA"; e a Marcella MARRA, Dipartimento di Matematica e Fisica, Università del Salento e INFN, Sezione di Lecce: "Coupling PLD-grown isotopically enriched boron with semiconductor and scintillator detectors".

- Per la Sezione **Didattica e Storia della Fisica**, il Primo Premio va a Christian FERRARIS, Università di Pavia: "Sulle spalle dei giganti: Un'esperienza di PCTO su Guido da Vigevano". Il Secondo Premio va a LORENZO MIANI, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna: "Highlighting interdisciplinarity between physics and mathematics in historical papers on special relativity: Design of blended activities for pre-service teachers".

La Cerimonia prosegue con i **PREMI DI OPEROSITÀ SCIENTIFICA**.

I premi sono di due tipi e sono riservati ai giovani laureati in Fisica rispettivamente dopo il maggio 2015 e il maggio 2019. Questi premi sono solitamente intitolati ai passati Presidenti o Consiglieri della Società Italiana di Fisica.

Per i laureati dopo il maggio 2015:

- Il **Premio "Giuseppe Franco Bassani"**, Presidente SIF dal 1999 al 2007, Direttore SNS dal 1995 al 1999, va a Pietro FERRERO, laureato presso l'Università di Pisa, attualmente dottorando presso l'Università di Oxford.

- Il **Premio "Pio Picchi"**, Consigliere SIF dal 1974 al 1982, Vice Presidente della SIF dal 1983 al 1991, va a Edoardo VITAGLIANO, laureato presso l'Università di Napoli "Federico II", attualmente post-doc presso l'Università della California.

- Il **Premio "Giovanni Polvani"**, Presidente SIF dal 1947 al 1961, fondatore della Scuola di Varenna nel 1953, va a Valeria GRISONI, laureata presso l'Università di Trieste, attualmente assegnista di ricerca presso l'Università di Bologna.

Per i laureati dopo il maggio 2019:

- Il **Premio "Ida Ortalli"**, Consigliere SIF dal 1983 al 1994 e primo Consigliere donna, va a Francesca ERCOLESSI, laureata presso l'Università di Bologna, attualmente dottoranda presso la stessa università.

- Il **Premio "Quirino Majorana"**, Presidente SIF dal 1926 al 1946, va a Duilio DE SANTIS, laureato presso l'Università di Palermo, attualmente dottorando presso la stessa università.

- Il **Premio "Giuliano Toraldo di Francia"**, Presidente SIF dal 1968 al 1973, va a Giulio BIAGIONI, laureato presso l'Università di Firenze, attualmente dottorando presso la stessa università.

La Cerimonia continua poi con una serie di premi intitolati a fisici scomparsi, finanziati dalle rispettive famiglie, o da amici, associazioni o fondazioni.

- Il **PREMIO "GIULIANO PREPARATA" PER LA FISICA TEORICA** (fenomenologia delle particelle elementari, onde gravitazionali, fisica dei neutrini e struttura della materia), assegnato grazie al Contributo dell'Associazione per la Fondazione "Giuliano Preparata" fondata dalla moglie Emilia Campochiaro, va a Pierluca CARENZA, laureato presso l'Università di Bari, attualmente post-doc presso l'Oskar Klein Centre della Stockholm University, "per i suoi rilevanti contributi allo studio della produzione di assioni da supernove, con un'originale accurata trattazione della sottostante dinamica nucleare".

- Il **PREMIO SIF-SoNS "NEUTRONS MATTER"**, bandito dalla Società Italiana di Fisica congiuntamente all'Associazione School of Neutron Scattering Francesco Paolo Ricci, per un giovane laureato in Fisica, che abbia svolto significative attività nella scienza dei neutroni e nelle sue applicazioni, va a Chiara MAGNI, laureata presso l'Università di Pavia, attualmente application specialist presso Emme Esse Milano, "per i suoi contributi multidisciplinari e innovativi nel settore della Boron Neutron Capture Therapy".

- Il **PREMIO "SERGIO PANIZZA E GABRIELE GALIMBERTI"** assegnato per iniziativa e con il contributo della Società Laser Optronica di Milano va a Davide PIERANGELI, laureato presso l'Università di Roma "La Sapienza", attualmente ricercatore presso l'Istituto dei Sistemi Complessi del CNR, "per i suoi importanti contributi alla fotonica non lineare tramite esperimenti di propagazione ottica in materiali fotorifrattivi".

- La **BORSA "ETTORE PANCINI" PER LA FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE**, assegnata grazie al contributo spontaneo di Roberto Mazzola del CNR di Portici, va a Saverio MARIANI, laureato presso l'Università di Firenze, attualmente assegnista di ricerca presso l'INFN, Sezione di Firenze, "per aver dimostrato che sarà possibile operare allo stesso tempo il rivelatore LHCb in modalità collisore e a bersaglio fisso, estendendo notevolmente gli obiettivi di fisica perseguibili".

- Il **PREMIO PER LA COMUNICAZIONE SCIENTIFICA** va a Chiara BADIA, Carmelo EVOLI e Fernando FERRONI, Gran Sasso Science Institute (GSSI), L'Aquila, "per la realizzazione del podcast SIDECAR a cura del GSSI, un interessante e contemporaneo esempio di diffusione della cultura scientifica, attraverso colloqui basati sulla curiosità e la voglia di approfondire, tipiche del fare ricerca, tra esperti di discipline diverse, alla ricerca di una strada comune, di

possibili deviazioni, di incroci e di risposte alle domande sui temi di grande attualità".

- Il **PREMIO PER LA DIDATTICA O LA STORIA DELLA FISICA** è assegnato quest'anno per la Storia e va a Adele LA RANA, Università di Verona e a Paolo ROSSI, Università di Pisa, "per l'ideazione e realizzazione dei volumi *I fisici italiani*, una serie speciale del *GIORNALE DI FISICA*, dizionario biografico degli studiosi italiani che a vario titolo si sono occupati di fisica, a partire dal Rinascimento e fino a tutto il ventesimo secolo".

- Il **PREMIO "LAURA BASSI" PER LE DONNE NELLA FISICA** è stato istituito dalla Società Italiana di Fisica su proposta del Comitato Pari Opportunità per valorizzare la presenza femminile nel mondo della Fisica e della Scienza, e al fine di promuovere la carriera delle ricercatrici di talento. Il Premio è destinato a laureate in Fisica che si siano particolarmente distinte negli ultimi 5 anni con le loro ricerche. La vincitrice è Donatella LUCCHESI, Università di Padova, "per la sua attività nell'ambito del progetto del Muon Collider e nell'ambito del calcolo per gli esperimenti LHC, in cui ha ricoperto ruoli di responsabilità nazionale ed internazionale".

La Cerimonia si avvia alla conclusione con la proclamazione dei premi internazionali.

- Il **PREMIO "FRIEDEL-VOLTERRA"** è stato istituito per onorare le figure di Vito Volterra e Jacques Friedel, e il loro straordinario

talento nella Fisica, dalla Società Italiana di Fisica (SIF) insieme alla Société Française de Physique (SFP). Il Premio è destinato a un fisico attivo nella collaborazione italo-francese, in riconoscimento di risultati rilevanti del suo lavoro di ricerca in Fisica negli ultimi 10 anni. Oltre a commemorare i due insigni scienziati, accomunati da alcuni aspetti delle loro ricerche, il Premio ha lo scopo di rinforzare i rapporti tra le due Società. Il Premio è conferito annualmente ed è alternativamente bandito dall'una o dall'altra Società.

A Milano vengono premiati due vincitori: quello del 2019 che a causa della pandemia non ha potuto partecipare a nessuna Cerimonia in presenza e quello del 2021. Partecipa alla premiazione il Presidente della SFP Guy Wormser.

Il vincitore dell'edizione 2019 del Premio Friedel-Volterra è stato selezionato dal Consiglio della SIF tra una serie di candidati presentati dall'Award Committee della SFP. Il Premio 2019 è assegnato a Cristiano CIUTI, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université de Paris, "for the outstanding contributions in light-matter interaction and quantum electrodynamics in cavity (ultra-strong coupling regime)".

Il vincitore dell'edizione 2021 del Premio Friedel-Volterra è stato selezionato dal Consiglio della SIF tra una serie di candidati presentati dall'Award Committee della SFP e va a Marino MARSÌ, Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Saclay, "for his breakthrough results on electronic properties and ultrafast dynamics of quantum materials".



Marino Marsi, Premio "Friedel-Volterra" 2021.



Mario Nicodemi, Premio "Giuseppe Occhialini" 2022.



Giorgio Benedek, vincitore del Premio "Enrico Fermi" 2022.

Infine, è annunciato il vincitore del Premio Friedel-Volterra 2022 che verrà premiato in Francia nei prossimi mesi e che è Pasquale Dario SERPICO, LAPTh, Université Grenoble Alpes, Annecy, "for seminal and extremely diverse contributions to the theory and phenomenology of phenomena in particle cosmology and high-energy astroparticle physics".

- Il PREMIO "GIUSEPPE OCCHIALINI" è stato congiuntamente istituito dalla Società di Fisica (IOP – Institute of Physics) del Regno Unito e dalla Società Italiana di Fisica (SIF) nel 2007, in occasione del centenario della nascita di Giuseppe Occhialini, allo scopo di commemorare la figura dell'insigne scienziato e di consolidare le relazioni tra le due Società. Il Premio è annuale e viene alternativamente conferito da una delle due Società a un fisico selezionato a partire da una lista di candidati proposti dall'altra. Quest'anno il vincitore è stato selezionato dall'Award Committee dell'IOP a partire da una rosa di candidati

sottoposta dal Consiglio di Presidenza SIF. Il Premio va a Mario NICODEMI, Università di Napoli "Federico II", "for his innovative, fundamental contributions at the frontier between physics, biology and genetics to understand the mechanisms of chromosome folding and their role in gene regulation in health and disease".

A conclusione della Cerimonia viene conferito il prestigioso PREMIO "ENRICO FERMI" DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA. Il Premio è stato istituito nel 2001, in occasione del centenario della nascita del grande fisico italiano, per onorarne la memoria e legare il suo illustre nome alla Società Italiana di Fisica. Il Premio è assegnato a uno o più Soci che abbiano particolarmente onorato la Fisica con le loro scoperte, selezionati da una Commissione costituita da un rappresentante del CNR, dell'INAF, dell'INFN, dell'INGV, dell'INRiM e del Consiglio SIF e presieduta dal Presidente della SIF. La medaglia che accompagna il Premio è una fedele riproduzione del medaglione

in bronzo, opera di Giannino Castiglioni, posto nell'aula magna di Villa Monastero (Varenna) nel 1954, quando l'aula e la Scuola Internazionale di Fisica della SIF vennero intitolate a Enrico Fermi.

Partecipano alla Cerimonia di Milano anche alcuni vincitori delle passate edizioni del Premio che non avevano potuto stringere la mano alla Presidente Angela Bracco negli anni della pandemia: due dei vincitori del Premio 2020, Sandro DE SILVESTRI e Giovanni MANA, e una delle vincitrici del Premio 2021, Patrizia CARAVEO.

Il Premio "Enrico Fermi" 2022 è assegnato congiuntamente a Giorgio BENEDEK, Università di Milano Bicocca, e a Jan Peter TOENNIES, Max-Planck-Institut, Göttingen, "per i loro studi pionieristici, sperimentali (JPT) e teorici (GB), degli effetti dinamici alla scala atomica sulla superficie dei solidi tramite lo sviluppo della spettroscopia ad alta risoluzione basata sulla diffusione di atomi di elio".

Le relazioni di Giorgio Benedek e Jan Peter Toennies, e di Mario Nicodemi sono riportate nelle pagine seguenti.

THE ITALIAN PHYSICAL SOCIETY “ENRICO FERMI” PRIZE AND MEDAL 2022

The “Enrico Fermi” Prize of the Italian Physical Society has been awarded starting from 2001, to commemorate the great scientist on the occasion of the centenary of his birth. The Prize and Medal are yearly awarded to Members of the Society who particularly honoured physics with their discoveries. A Selection Commission made of experts appointed by SIF (Società Italiana di Fisica), CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica), INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), INGV (Istituto Nazionale di Geofisica), INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) selects the winner(s) from a list of candidates proposed by the community. The proposal is submitted to the Council of the SIF for final approval.



The 2022 “Enrico Fermi” Prize and Medal have been jointly awarded to Giorgio BENEDEK and Jan Peter TOENNIES for pioneering experimental (JPT) and theoretical (GB) studies of the atomic-scale dynamics at solid surfaces through the development of high-resolution helium-atom scattering spectroscopy.

Helium-atom scattering: fishing for bosons in the Fermi sea

Lord Rayleigh’s explanation (1885) of the seismic long-wave component as due to waves travelling at the surface of an elastic solid is viewed as a founding step in surface science. Due to their linear dispersion, the decay length of Rayleigh waves (RWs) scales with their surface wavelength, so that RW theory exactly holds on the atomic scale of a semi-infinite elastic solid [1]. Otto Stern in 1929 with his helium-atom scattering (HAS) experiments from a crystal surface filled two needs with one deed: proving the quantum particle-wave duality for atoms and the ordered structure of crystal surfaces.

More than fifty years ago, the pioneering theoretical work by Cabrera, Celli and Manson [2] proved that inelastic HAS could provide information on the dynamics of solid surfaces, much in the same way as thermal neutron scattering already did for bulk crystalline solids. The surface dynamical structure was, however, expected to be far more complicated than the bulk one, due to the coexistence of surface localized phonons, surface resonances and the surface-projected bulk phonon density. It was a lucky circumstance that we (hereafter GB and JPT) met in 1973 at the International School of Physics “Enrico Fermi” of the Italian Physical Society in Varenna (fig. 1).



Fig. 1 Participants of the LVIII Course of the International School of Physics “Enrico Fermi” of the Italian Physical Society, in 1973 at Varenna, Lake Como, Italy. Among the lecturers were Nicolas Cabrera (1), Vittorio Celli (2), the authors JPT (3) and GB (4), Giovanni Boato (5), who pioneered HAS spectroscopy in Genoa with Paolo Cantini (6) and the theoretical support of Andrea Levi (7), and Bob Schrieffer (8), who received the Nobel Prize just a few months before. Behind him is Javier Solana (9), Cabrera’s student, who eventually became NATO Secretary General (1995–1999). From [3].

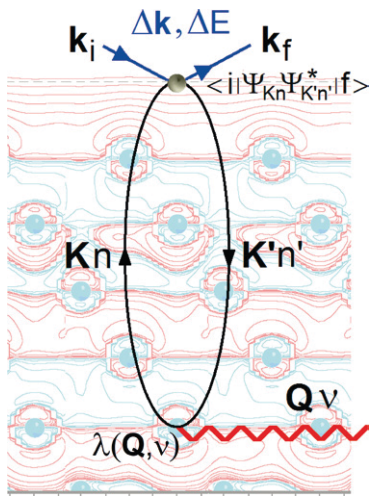


Fig. 2 Fishing for bosons in the Fermi sea: An incoming He atom of momentum $\hbar\mathbf{k}_i$ is inelastically scattered by a dynamic oscillation of the surface electron density [red (light blue) contour lines: density increase (decrease); blue spheres: atom cores] into the final state of momentum $\hbar\mathbf{k}_f$, creating a virtual electron-hole pair, where an electron is excited from a surface state of parallel wavevector $\mathbf{K}$ and band index n to the state $\mathbf{K}'$, n' via the transition matrix $T_{\mathbf{k}_f, \mathbf{k}_i}$. The electron-hole pair recombines by creating a phonon of wavevector $\mathbf{Q} = \mathbf{K}' - \mathbf{K}$ and branch index ν , via the electron-phonon (e-ph) coupling $\lambda(\mathbf{Q}, \nu)$. It is mostly only through the surface electron density oscillation induced by the motion of the atom cores via the e-ph coupling that the probe He atom can excite a surface phonon. The phonon can be created at a depth beneath the surface corresponding to the large e-ph interaction range (*quantum sonar effect*) [1, 9, 11].

In that occasion GB presented the first prediction of surface phonon spectra as they should be observed by inelastic HAS [3], while JPT, newly appointed as a director at the Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen, was conceiving a supersonic He-beam spectrometer with a spectacular resolution of less than 0.5 meV [4]. This marked soon after the start of high-resolution momentum-resolved spectroscopy of surface dynamics on the atomic scale [5-7]. The continuous feedback between experiment and theory enabled us in a few years [8] to extend HAS spectroscopy, now in use in many laboratories worldwide, to all kinds of solid surfaces and adsorbates (about 300 systems studied to date [1]). Actually, around the corner there were many more needs fulfilled than envisaged by Stern! Unlike thermal neutrons and X-rays, thermal neutral He atoms only tickle the surface ~ 0.3 nm away from the first atomic plane (fig. 2), and exchange energy and momentum with the metal atoms only through the interposed electrons. Thus phonons are detected via the electron-phonon (e-ph) interaction, and not just at the surface, but possibly as deep beneath the surface as is the range of that interaction [9]. This sort of *quantum sonar* allows for the direct measurement of the e-ph coupling strength for each individual phonon (*mode- λ spectroscopy*) [8], and for ultimately answering the question about phonon-mediated pairing in two-dimensional (2D) superconductors: who's doing the job? [9, 10].

The venerable Debye-Waller (DW) factor, by which Piet Debye in 1913 and Ivar Waller, in his 1923 thesis, correctly attributed the attenuation of Roentgen rays to thermal vibrations, can also be applied to HAS from conducting surfaces. Presently this concept allows for a direct

measurement of the e-ph mass-enhancement factor λ , which is a basic parameter for conducting materials [11]. Moreover, frequently selfish surface electrons, when hit by a He atom, may however also keep for themselves the received energy and momentum, in the form of collective surface electron excitations in the THz domain, such as acoustic surface plasmons, charge-density-wave phasons and amplitons. The basic concepts, developments and recent advances in He-atom spectroscopies of surface phonon and other excitations have now been collected, with a vast literature, in ref. [1].

We believe we have complied with the commitment made half-a-century ago in Varenna under the aegis of Enrico Fermi, which eventually strengthened a still running collaboration and a close lasting friendship. However, these achievements would not have been possible without the collaboration of innumerable colleagues and students, both experimental and theoretical, whose invaluable contribution we acknowledge here with the highest gratitude. Last but not least, we are deeply grateful to the Alexander von Humboldt Foundation for supporting our long collaboration through the Forschungspreis and the reinvention programs.

Giorgio Benedek
Università di Milano-Bicocca
Donostia International Physics Center

J. Peter Toennies
Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen

References

- [1] G. Benedek, J. P. Toennies, "Atomic-Scale Dynamics at Surfaces" (Springer) 2018.
- [2] N. Cabrera, V. Celli, J. R. Manson, *Phys. Rev. Lett.*, 22 (1969) 346; J. R. Manson, V. Celli, *Surf. Sci.*, 24 (1971) 495.
- [3] G. Benedek, *Surface Lattice Dynamics*, in: *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course LVIII, "Dynamic Aspects of Surface Physics"*, edited by F. O. Goodman (SIF; Editrice Compositori, Bologna) 1974, pp. 605-631.
- [4] J. P. Toennies, K. Winkelmann, *J. Chem. Phys.*, 66 (1977) 3965.
- [5] G. Brusdeylins, R. B. Doak, J. P. Toennies, *Phys. Rev. Lett.*, 44 (1980) 1417; 46 (1981) 437; *Phys. Rev. B*, 27 (1983) 3662.
- [6] G. Benedek, G. Brusdeylins, R. B. Doak, J. P. Toennies, "The Spectroscopy of Surface Phonons by Inelastic Atom Scattering", *J. Phys. (Paris)*, 42, C6 (1981) 793.
- [7] G. Benedek, U. Valbusa (Editors), "Dynamics of Gas-Surface Interaction" (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg) 1982.
- [8] G. Benedek, J. P. Toennies, *Helium Atom Scattering Spectroscopy of Surface Phonons: Genesis and Achievements*, in: "Surface Science: The First Thirty Years", edited by C. B. Duke (North Holland, Amsterdam) 1994.
- [9] I. Yu. Sklyadneva, G. Benedek, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, R. Heid, K.-P. Bohnen, J. P. Toennies, "Mode-Selected Electron-Phonon Coupling in Superconducting Pb Nanofilms Determined from He Atom Scattering", *Phys. Rev. Lett.*, 107 (2011) 095502.
- [10] G. Benedek, J. R. Manson, S. Miret-Artés, A. Ruckhofer, W. E. Ernst, A. Tamtögl, J. P. Toennies, "Measuring the Electron-Phonon Interaction in Two-Dimensional Superconductors with He Atom Scattering", *Condens. Matter*, 5 (2020) 79.
- [11] J. R. Manson, G. Benedek, S. Miret-Artés, "Atom scattering as a probe of the surface electron-phonon interaction at conducting surfaces", *Surf. Sci. Rep.*, 77 (2022) 100552.

SIF-IOP “GIUSEPPE OCCHIALINI” PRIZE AND MEDAL 2022

The “Giuseppe Occhialini” Prize has been promoted jointly by the Italian Physical Society (SIF) and the British Institute of Physics (IOP) in 2007 on the occasion of the Centenary of the birth of Giuseppe (Beppo) Occhialini, with the aim to commemorate the eminent scientist, who worked in England and Italy, as well as to strengthen the relationship between the two societies. The award is made alternately by the Councils of one of the two societies to a physicist selected from a list of nominees submitted by the other. The award is made for distinguished work carried out within the 10 years preceding the award. The award is to be made to physicists in alternating years who work in Italy (even dated years) or the UK or Ireland (odd dated years).



The 2022 Occhialini Prize has been awarded to Mario NICODEMI: “For his innovative, fundamental contributions at the frontier between physics, biology and genetics to understand the mechanisms of chromosome folding and their role in gene regulation in health and disease”.

Phase transitions shape the structure of chromosomes and regulate the genome in the nucleus of cells

Molecular biology made impressive scientific advances in the last decades based on new technologies that provide quantitative experimental data to profile the behaviour of single cells at the molecular level. The wealth and complexity of such data naturally require the use of fundamental models and advanced analysis tools to be understood, so to shed light on the very functioning of life. The idea is encapsulated in a visionary statement by Richard Feynman (who in the late 1950s and early 1960s had himself devoted to genetics in Max Delbrück’s lab at Caltech) in his Lectures on Physics [1]: “certainly no subject or field is making more progress [...] at the present moment, than biology, and if we were to name the most powerful assumption [...] to understand life, it is that all things are made of atoms, and that everything that living things do can be understood in terms of [...] atoms”. The sentence illustrates the ambitious project of explaining biological phenomena from the fundamental principles of physics, as done for other many-body systems in nature, from ferromagnets to superconductors in condensed matter, to neutron stars in astrophysics, and far beyond. The frontier between molecular biology and theoretical physics has, thus, become a strategic research field, for its profound scientific implications and its huge potential impact in biomedicine.

The completion in 2001 of the *Human Genome Project*, for instance, made available the sequence (the string of ATCG letters, named *bases*) of the human DNA and the list of our genes, which are comparatively short segments dispersed along chromosomes (covering less than 2% of the entire DNA). However, the fundamental question of how the system works remained unanswered. Why is a gene active in certain tissues and not in others? Why does an oncogene, that has been silent for decades, suddenly activate leading to cancer?

In recent years it has been discovered that genes, to control their state of activity, establish physical contacts with remote regulatory regions along the DNA, up to millions of bases away (fig. 1). The result is a complex architecture where our 20000 genes are brought together with their specific regulators in an extraordinary example of self-organisation [2–6]. In other words, the three-dimensional (3D) structure of our genome defines its activity and, therefore, determines the fate of a cell by setting the genes to be activated or silenced. These discoveries have radically changed our view of DNA: not only we have to decipher its linear base sequence but, to understand how it works, we must reconstruct its complex 3D structure, *i.e.*, the way it folds in the space of the cell nucleus.

Here theoretical physics naturally meets biology because chromosomes are ultimately polymers. My research group, for example, investigates with Statistical Mechanics



approaches the physical mechanisms that shape chromosome folding, and bring genes into contact with their regulators [7–11]. We also contributed to develop, with our collaborators, new methods to measure and characterise chromosome conformations and their functions [4, 12, 13]. We introduced the idea, later experimentally confirmed, that the structure of chromosomes is determined by phase transitions that occur in the cell nucleus, involving the DNA polymer and a variety of molecular factors with which it interacts. *Coil-globule* transitions coordinate, for instance, contacts between specific remote sequences [7–9], while *phase separations* are used to isolate distinct genomic regions

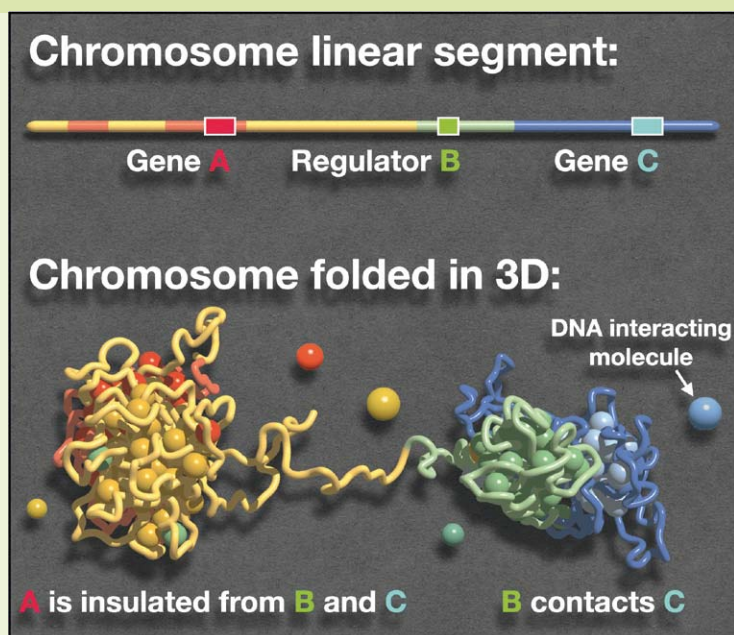


Fig. 1 Phase transitions, such as globule phase separations, fold the linear genome in a complex 3D structure, a process functional to guide genes (in the figure, A and C) to contact their specific remote DNA regulators (B) to control transcription.

that should not interact [8, 10]. *Active processes* play a role too, for example, to form specific regulatory loops [2, 11]. In the cell, sustained by just the thermal bath, phase transitions appear to be robust and reversible organizational mechanisms to control conformational changes, not requiring fine tuning of parameters as the system only needs to establish, say, an above threshold concentration of DNA interacting molecules (such as *Transcription Factors*). That can explain how simple cell strategies of up-regulation of *Transcription Factors* associated genes can spontaneously guide the self-assembly of complex conformations.

As we begin to understand the organising

principles that determine chromosome architecture and control gene activity, we can predict through physics how the entire genome folds and the impact of perturbations. For example, we can make sense of how a vast number of mutations that do not affect gene integrity do lead to genetic diseases, such as congenital disorders or cancer [14]. By combining physics and genetics we showed that those mutations can alter the 3D structure of the genome and rewire the network of contacts between genes and regulators, thus inducing incorrect activations or repressions [9, 15, 16].

Those discoveries are part of the much broader scientific revolution taking place at

the frontier between life and hard sciences. The ideal project summarised in Feynman's sentence is being materialized in recent years because of the experimental advances made in molecular biology and the conceptual progresses resulting also from the use of fundamental theories and models from physics. The ambition is to comprehend the very foundations of life and, while considering ethical issues, revolutionise biomedicine and clinical applications for the generations to come.

Mario Nicodemi
Università di Napoli

References

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *"The Feynman Lectures on Physics"* (Addison-Wesley) 1964, revised edition 2005.
- [2] J. Dekker, L. Mirny, *"The 3D Genome as Moderator of Chromosomal Communication"*, *Cell*, 164 (2016) 1110.
- [3] J. R. Dixon, D. U. Gorkin, B. Ren, *"Chromatin Domains: The Unit of Chromosome Organization"*, *Mol. Cell*, 62 (2016) 668.
- [4] R. Beagrie, A. Scialdone et al., *"Complex multi-enhancer contacts captured by Genome Architecture Mapping (GAM), a novel ligation-free approach"*, *Nature*, 543 (2017) 519.
- [5] Y. M. Sigal, R. Zhou, X. Zhuang, *"Visualizing and discovering cellular structures with super-resolution microscopy"*, *Science*, 361 (2018) 880.
- [6] E. H. Finn, T. Misteli, *"Molecular basis and biological function of variability in spatial genome organization"*, *Science*, 365 (2019) eaaw9498.
- [7] M. Barbieri et al., *"Complexity of chromatin folding is captured by the strings and binders switch model"*, *PNAS*, 109 (2012) 16173.
- [8] M. Barbieri et al., *"Active and poised promoter states drive folding of the extended HoxB locus in mouse embryonic stem cells"*, *Nature Struct. Mol. Biol.*, 24 (2017) 515.
- [9] S. Bianco et al., *"Polymer Physics Predicts the Effects of Structural Variants on Chromatin Architecture"*, *Nature Genetics*, 50 (2018) 662.
- [10] M. Conte et al., *"Polymer physics indicates chromatin folding variability across single-cells results from state degeneracy in phase-separation"*, *Nature Commun.*, 11 (2020) 3289.
- [11] M. Conte et al., *"Loop-extrusion and polymer phase-separation can co-exist at the single-molecule level to shape chromatin folding"*, *Nature Commun.*, 13 (2022) 4070.
- [12] L. Fiorillo, F. Musella et al., *"Comparison of the Hi-C, GAM and SPRITE methods using polymer models of chromatin"*, *Nature Methods*, 18 (2021) 482.
- [13] W. Winick-Ng et al., *"Cell-type specialization is encoded by specific chromatin topologies"*, *Nature*, 599 (2021) 684.
- [14] M. Spielmann, D. G. Lupianez, S. Mundlos, *"Structural variation in the 3D genome"*, *Nature Rev. Genet.*, 19 (2018) 453.
- [15] B. K. Kragestein et al., *"Dynamic 3D chromatin architecture contributes to enhancer specificity and limb morphogenesis"*, *Nature Genet.*, 50 (2018) 1463.
- [16] G. I. Dellino et al., *"Release of stalled RNA-Polymerase II at specific loci and chromatin domains favors spontaneous DNA double strand breaks formation and predicts cancer translocations"*, *Nature Genet.*, 51 (2019) 1011.

IL NOSTRO MONDO

IL NUOVO CIMENTO 150, 100, 50 ANNI FA

a cura di A. Bettini

150 ANNI FA

Francesco Rossetti (1833-1884) nacque a Trento e qui compì gli studi liceali, per proseguire quelli universitari in matematica, fisica e ingegneria a Padova e a Vienna. Ne 1864 fece un viaggio di studio in Germania. Con l'entrata del Veneto nel Regno d'Italia nel 1866, gli fu assegnata a Padova la nuova cattedra di "Fisica sperimentale". In precedenza esisteva un "Gabinetto di fisica", dedicato all'insegnamento con esperimenti dimostrativi. Rossetti creò un vero "Istituto di Fisica", nel Palazzo del Bo, dotato, sull'esempio di quelli tedeschi che aveva visitato, di una biblioteca con le riviste più importanti, di strumentazione per la ricerca, di laboratori e nuovi spazi per la didattica. Ottimo ricercatore sperimentale contribuì con studi di ottica, dilatazione termica dell'acqua, elettrostatica e delle scariche elettriche. Per questi studi utilizzò una macchina di Holtz, un generatore elettrostatico a disco rotante provvisto di spinterometro. Questo articolo è il terzo, dopo Il Nuovo Cimento V-VI, pp. 407-417 e Il Nuovo Cimento VII-VIII, pp. 22-32. Gli esperimenti furono fatti collegando in parallelo ai due rami dello spinterometro reofori portati a contatto con le facce di condensatori piani. Questi erano una lamina di vetro con fogli di stagnola come armature sulle facce. Dopo averli descritti, osserva che:

Da "Di una curiosa ed elegante esperienza elettrica" di F. Rossetti, Il Nuovo Cimento, Serie II, Vol. VII-VIII (1872) 33.

curiosissimi sono gli effetti, che ottengono da una lamina munita di una sola armatura. [...]

Se il reoforo negativo comunica colla faccia della lamina munita di armatura, e il reoforo positivo appoggia sulla faccia nuda, allora si hanno successivamente gli effetti rappresentati dalla fig.1 e fig. 2 (*crescendo la "distanza esplosiva" dello spinterometro e quindi la tensione di picco*). [...]

Le figure 3 e 4 rappresentano le apparenze, che si manifestano allorché è l'asticeiuola che funziona da reoforo negativo quella che poggia sul centro della faccia nuda, mentre l'altra è in contatto col centro dell'armature metallica. (Fig. 5 per distanza esplosiva ancora maggiore)



100 ANNI FA

Eligio Perucca (1890-1965) tenne la cattedra di Fisica sperimentale al Politecnico di Torino dal 1923 e fu autore di un famoso trattato di "Fisica generale e sperimentale" (1931). Diede contributi all'ottica, all'elettrostatica e alla metrologia (elettrometro di Perucca). Qui analizza un risultato di Sellerio, dimostrando che le incertezze sperimentali erano maggiori dell'effetto trovato. Un calcolo teorico indica l'ordine di grandezza aspettato. Propone in conclusione un metodo potenzialmente sensibile.

Da "Sull'influenza di un campo elettrico sulla tensione superficiale" di E. Perucca, Il Nuovo Cimento, Serie VI, Vol. 23 (1922) 191.

In sostanza il Sellerio pone un contagocce tra i piatti di un condensatore piano; il peso delle gocce è diverso secondo che il condensatore è carico o scarico, dunque la tensione superficiale, funzione del peso della goccia, è a sua volta diversa secondo che la superficie dielettrico-aria è in un campo elettrico o no. [...]

Se dunque esiste una variazione di tensione superficiale per effetto del campo elettrico, essa è ancor celata dagli errori sperimentali, che in questo genere di misure sono piuttosto notevoli. [...]

Mi pare che la fig. 2 indichi a sufficienza il principio del metodo: una variazione di tensione superficiale del dielettrico della goccia, tenuta nel foro *a b* della lastra *c d*, quando cambi segno col mutar direzione del campo, deve produrre un mutamento di curvatura di segno opposto sulle due facce della goccia.

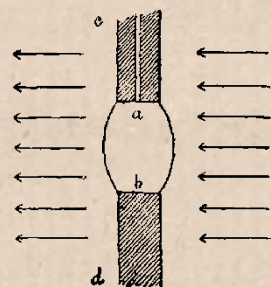


Fig. 2.

50 ANNI FA

La scoperta di P. Kusch nel 1947 che il $g-2$ dell'elettrone non è nullo (anomalia magnetica) è all'origine dell'elettrodinamica quantistica. Da allora, le anomalie dell'elettrone e del mu hanno fornito test di alta precisione, crescente nel tempo, della QED, con un parallelo procedere di quella sperimentale (attualmente 0.24 ppb per a_e e 0.35 ppm per a_μ) e del calcolo teorico (con calcolo sul reticolo per il contributo QCD). Questo lavoro teorico di 50 anni fa calcola analiticamente due contributi al sesto ordine dello sviluppo perturbativo.

Da "A contribution to sixth-order electron and muon anomalies – II" di R. Barbieri, M. Caffo, E. Remiddi, Lett. Nuovo Cimento, 5 (1972) 709.

Continuing previous work [...], we have evaluated, analytically, the sixth-order contributions to the electron and muon anomalous gyromagnetic ratios a_e and a_μ from the Feynman graphs of Figs. 1, 2 (*omessa*) [...]. The graphs involve the second-order vacuum polarization tensor corresponding to an electron loop.

IL PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2022



Alain Aspect, John Clauser e Anton Zeilinger, Premi Nobel 2022 per la Fisica. Crediti: © The Nobel Foundation, © Nobel Media.

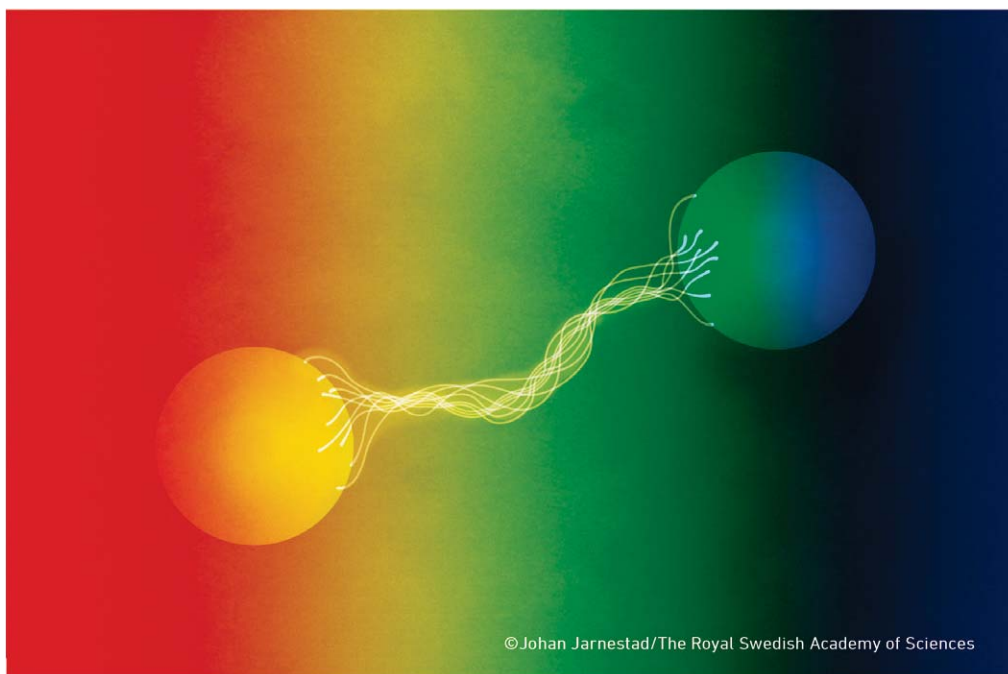
Il Premio Nobel per la Fisica del 2022 è stato assegnato a tre scienziati che hanno dato un contributo fondamentale alla comprensione della meccanica quantistica, la scienza che descrive il comportamento del mondo microscopico. Grazie ai loro esperimenti, condotti a partire dagli anni '70 dello scorso secolo, Alain Aspect, John Clauser e Anton Zeilinger sono riusciti a dimostrare la realtà dell'*entanglement*, una delle conseguenze più inafferrabili della meccanica quantistica, ma al tempo stesso il suo tratto più distintivo. Quando due particelle sono in uno stato *entangled*, ogni azione compiuta sull'una ha una conseguenza immediata sullo stato dell'altra, anche se queste si trovano a distanze grandissime tanto da non poter interagire tra loro. Se lancissimo in aria due "monete quantistiche" entangled, in due località opposte sulla superficie terrestre, queste cadrebbero a terra mostrando sempre la stessa faccia (il 50% dei casi testa-testa e il restante 50% croce-croce). Oppure cadrebbero sempre con facce opposte (50% testa-croce e 50% croce-testa), a seconda del tipo di entanglement che le lega.

Il dibattito sull'esistenza dell'entanglement e sul suo reale significato si è protratto per più di 50 anni, dagli albori della meccanica quantistica fino agli anni '80 del secolo scorso. Tra gli "oppositori" più famosi del concetto di entanglement ricordiamo Albert Einstein, che lo individuò come un aspetto paradossale della meccanica quantistica, e in un famoso articolo del 1935 con Boris Podolski e Nathan Rosen muoveva da questa considerazione per concludere che la meccanica quantistica fosse una teoria inadeguata a dare una descrizione completa della realtà. Un contributo fondamentale al dibattito venne dal fisico britannico John S. Bell, che nel 1964 individuò delle relazioni tra quantità misurabili (le cosiddette "disuguaglianze di Bell") che, se misurate sperimentalmente, avrebbero potuto portare a una risposta alla domanda sulla realtà dell'entanglement. L'esistenza dell'entanglement è stata dimostrata proprio grazie agli esperimenti realizzati dai tre fisici sperimentali, che

hanno sviluppato delle metodologie ottiche innovative per studiare le correlazioni quantistiche tra particelle di luce, i cosiddetti *fotoni*. Dopo gli esperimenti pionieristici di Clauser negli anni '70, è stato Aspect nel 1982 a dimostrare la realtà dell'entanglement al di là di ogni ragionevole dubbio, e più di recente Zeilinger ne ha mostrato alcune applicazioni spettacolari. Fra queste c'è quella del teletrasporto quantistico di informazione, dove fondamentale è stato il contributo dato dal nostro Francesco De Martini e dalla sua scuola romana.

Questo Premio Nobel, anche se arrivato a quarant'anni di distanza dall'esperimento di Aspect, è estremamente attuale. Nelle motivazioni per il conferimento del premio, destinato a quegli scienziati che grazie al loro lavoro hanno portato un "beneficio all'umanità", il Comitato Nobel ha riconosciuto l'importanza della scoperta per lo sviluppo sperimentale della scienza dell'informazione quantistica. Ed è proprio sulla capacità di manipolare l'entanglement che si basa la "seconda" rivoluzione quantistica in cui stiamo vivendo. La comunità scientifica internazionale è al lavoro sullo sviluppo di nuovi dispositivi che, non soltanto si basano su effetti quantistici per il loro funzionamento (com'è il caso del transistor, protagonista della "prima" rivoluzione quantistica), ma sfruttano la natura quantistica dell'informazione, codificata non più in bit classici, ma in bit quantistici, i cosiddetti *qubit*. È proprio grazie all'entanglement che stiamo costruendo computer quantistici in grado di effettuare calcoli con prestazioni esponenzialmente maggiori dei computer classici, dispositivi ottici per comunicazioni quantistiche ultrasicure, nuovi sensori quantistici in grado di misurare variazioni piccolissime di grandezze fisiche, per imaging, monitoraggio ambientale, diagnostica bio-medica, e molto altro.

La comunità scientifica mondiale è al lavoro nell'ambito di importanti programmi di finanziamento sovranazionali (come l'iniziativa Quantum Flagship dell'Unione Europea, partita nel 2018 con un finanziamento



decennale di 1 miliardo di euro), ma anche con l'interessamento diretto delle grandi aziende IT (Google, IBM, ...), che nell'ultimo decennio hanno moltiplicato gli investimenti nel settore. L'Italia gioca un ruolo da protagonista in molti ambiti, a partire dalla ricerca portata avanti con i fotoni per applicazioni di informazione e comunicazione quantistica, fino allo sviluppo di nuovi dispositivi per la simulazione e il calcolo basati su sistemi atomici. Un forte potenziamento di queste attività arriva ora grazie alle nuove opportunità di finanziamento che vengono dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, tra le quali figurano la creazione del Centro Nazionale in High-Performance Computing, Big Data e Quantum Computing, con piattaforme basate su atomi, ioni, fotoni e superconduttori, il Partenariato Università-Enti-Imprese che porterà

alla creazione dell'Istituto Nazionale per le Scienze e le Tecnologie Quantistiche, e la realizzazione dell'Infrastruttura nazionale di ricerca I-PHOQS del CNR per la fotonica e le scienze quantistiche, che integra queste iniziative e le proietta verso il futuro.

Concludiamo sottolineando come queste frontiere della tecnologia nascano dalla ricerca di base, dalla curiosità intellettuale che ha mosso Aspect, Clauser e Zeilinger a dare una spiegazione a quegli aspetti così paradossali della teoria quantistica. Con questo premio ancora una volta il Comitato Nobel ci ricorda l'importanza della ricerca curiosity-driven, che – come per l'invenzione del laser sessant'anni fa – può fornire soluzioni a problemi che ancora non conosciamo, e aprire così direzioni radicalmente nuove nello sviluppo della tecnologia.

Leonardo Fallani – Professore Associato di Fisica della Materia del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Firenze e ricercatore del LENS e dell'Istituto Nazionale di Ottica del CNR. La sua attività di ricerca è nell'ambito della fisica atomica, ottica e molecolare e nello sviluppo di simulatori e calcolatori quantistici basati sul controllo ottico di atomi.



Massimo Inguscio – Professore Emerito di Fisica della Materia dell'Università Campus Bio-medico di Roma, Direttore dell'area "Quantum Science and Technology" del LENS e associato all'Istituto Nazionale di Ottica del CNR. La sua attività di ricerca è nel campo della fisica atomica, ottica e molecolare e nello sviluppo di tecnologie quantistiche. Già presidente del CNR e dell'INRIM, è socio di numerose Accademie, tra cui l'Accademia Nazionale dei Lincei, l'Accademia delle Scienze di Torino e l'Accademia Europaea.

RECENSIONI



LUCA ROMANO

L'AVVOCATO DELL'ATOMO
IN DIFESA DELL'ENERGIA NUCLEARE

Le terre. Fazi, 2022

pp. 394, € 20,00
ebook: € 9,99

Recensione di
A. Bettini

Pubblicata online
11 ottobre 2022



EDOARDO AMALDI

DA VIA PANISPERNA ALL'AMERICA
I FISICI ITALIANI E LA SECONDA GUERRA MONDIALE

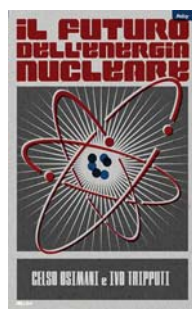
nuova edizione, a cura di Giovanni Battimelli, Michelangelo De Maria, Adele La Rana, premessa di Ugo Amaldi

Editori Riuniti, 2022

pp. 336, € 19,90

Recensione di
M. Focaccia

Pubblicata online
18 ottobre 2022



CELSE OSIMANI, IVO TRIPPUTI

IL FUTURO DELL'ENERGIA NUCLEARE

IBL Libri, 2022

pp. 182, € 20,00

Recensione di
M. Ripani

Pubblicata online
17 novembre 2022



ROBERTO BATTISTON

L'ALFABETO DELLA NATURA

Rizzoli, 2022

pp. 264, € 18,50

Recensione di
M. Giudici

Pubblicata online
5 dicembre 2022

IN RICORDO DI

Raffaella Simili



Bologna, 16 ottobre 1945 -
Bologna, 10 agosto 2022

Giovanni Paoloni, Sandra
Linguerrì, Miriam Focaccia

Pubblicato online
30 agosto 2022

Giovanni Fiorentini



Seravezza (LU), 22 febbraio 1948 -
Seravezza (LU), 18 giugno 2022

Fabio Mantovani, Scilla
Degl'Innocenti, Barbara Ricci,
Francesco Villante

Pubblicato online
5 settembre 2022

Laura Cantù



Monza, 16 ottobre 1958 -
Cremona, 5 agosto 2022

Alberto Diaspro

Pubblicato online
22 settembre 2022

Fabrizio Murtas



Roma, 2 marzo 1962 -
Cagliari, 25 agosto 2022

Pierluigi Campana

Pubblicato online
11 ottobre 2022

Laura Perini



Milano, 23 agosto 1952 -
Milano, 24 agosto 2022

Chiara Meroni

Pubblicato online
14 ottobre 2022

Emilio Doni



Sarzana (SP), 26 febbraio 1943 -
La Spezia, 2 settembre 2022

Giuseppe Grosso

Pubblicato online
28 ottobre 2022

Valery Rubakov



Mosca (RUS), 16 febbraio 1955 -
Sarov (RUS), 18 ottobre 2022

Antonio Masiero

Pubblicato online
11 novembre 2022

Ricardo Americo Broglia



Cordoba (ARG), 16 settembre
1939 - Milano, 4 ottobre 2022

Francisco Barranco, Enrico
Vigezzi, Thomas Døssing,
Paolo Milani, Gregory Potel,
Guido Tiana, Christian Joas

Pubblicato online
19 dicembre 2022

Lev Petrovich Pitaevskii



© UniTrento ph. Roberto Bernardinatti

Saratov (RUS), 18 gennaio 1933 -
Rovereto, 23 agosto 2022

Lev Petrovich Pitaevskii è stato insignito del Premio "Enrico Fermi" della Società Italiana di Fisica nel 2018

Lev Petrovich Pitaevskii è stato un membro autorevole della prestigiosa scuola di Landau (fig. 1), co-autore degli ultimi volumi del corso di Fisica Teorica di Landau-Lifshitz, nonché autore di lavori importanti sulla teoria delle forze di van der Waals, sullo spettro di eccitazione dell'elio superfluido, sulla fisica dei plasmi e dei gas bosonici. Il suo contributo fondamentale alla teoria dei condensati di Bose-Einstein, nota come Teoria di Gross-Pitaevskii, è attualmente l'oggetto di sistematiche attività di ricerca teorica e sperimentale in centinaia di laboratori in diversi paesi del mondo.

Lev Pitaevskii a Mosca

Dopo aver superato gli esami del cosiddetto "Minimo Teorico" stabilito da Landau, Lev Pitaevskii fu accolto come studente di

dottorato nel Dipartimento di Fisica Teorica dell'Institute of Physical Problems di Mosca, diretto da P.L. Kapitza. Il suo relatore fu E.M. Lifshitz.

Fin dall'inizio i suoi interessi si focalizzarono sulla teoria della superfluidità e in collaborazione con V.L. Ginzburg sviluppò una teoria dei superfluidi, in analogia con la teoria di Landau-Ginzburg sulla superconduttività. Studiò anche i fenomeni di soglia esibiti dallo spettro di eccitazione, sopra il minimo rotonico. Nello stesso periodo L.P. lavorò con Igor Dzyaloshinskii alla generalizzazione delle forze di Casimir e Lifshitz. Dopo la difesa della tesi di dottorato e un breve periodo trascorso in un centro di ricerca vicino a Mosca, L.P. fu invitato da Kapitza a lavorare nel campo della fisica dei plasmi presso l'Institute of Physical Problems. Scrisse vari articoli collaborando con

Alex Gurevich, in particolare sulla propagazione delle onde d'urto in assenza di dissipazione.

Nel 1961 Lev Pitaevskii risolse il problema della struttura delle oscillazioni di un vortice in un gas diluito bosonico, formulando un'equazione che descrive la dipendenza temporale e spaziale di un condensato di Bose-Einstein. Nello stesso anno un lavoro simile fu pubblicato da Eugene Gross. La teoria corrispondente è ora chiamata teoria di Gross-Pitaevskii.

Negli anni seguenti L.P. completò con Eugene Lifshitz e Vladimir Berestetskii la stesura degli ultimi volumi del Corso di Fisica Teorica di Landau-Lifshitz: Volume 4 (*Relativistic Quantum Theory and Quantum Electrodynamics*), Volume 9 (*Statistical Physics, Part 2: Theory of the Condensed State*) e Volume 10 (*Physical Kinetics*).

Lev Pitaevskii in Italia

Ho incontrato Lev per la prima volta nel 1988, quando fui invitato da Eugene Baskin a visitare il Kapitza Institute (il vecchio Institute of Physical Problems) a Mosca. Ricordo ancora la mia emozione quando Lev mi offrì una tazza di tè nel suo ufficio, che era stato in passato l'ufficio di Landau. L'anno seguente Lev partecipò a un meeting a Trento sui "Clusters of Quantum Liquids" e fu così che avviammo una prima collaborazione sulla superfluidità dei clusters di elio. Nel periodo 1989-1998 Lev visitò frequentemente l'Università di Trento, sviluppando nuove collaborazioni scientifiche, tra le quali mi fa piacere ricordare la generalizzazione del teorema di Hohenberg-Mermin-Wagner a temperatura zero. Dopo la prima realizzazione sperimentale della condensazione di Bose-Einstein (BEC) del 1995, gli interessi scientifici di Lev Pitaevskii e del gruppo di Trento si focalizzarono sul settore emergente dei gas atomici ultrafreddi, dove l'equazione di Gross-Pitaevskii si rivelò subito uno strumento di fondamentale efficacia per descrivere le proprietà di equilibrio e di non equilibrio di questi sistemi (per dare un'idea dell'impatto scientifico di quest'equazione basta ricordare che il nome della teoria di Gross-Pitaevskii compare esplicitamente nel titolo di centinaia di articoli scientifici). Nel 1999 Lev Pitaevskii e il team di Trento (Franco Dalfovo, Stefano Giorgini, Sandro Stringari) pubblicarono l'articolo di rassegna "Theory of Bose-Einstein Condensation in trapped gases", una delle pubblicazioni più citate nel settore. Nel 1998, dopo alcuni anni trascorsi al Technion Institute di Haifa (Israele), Lev Pitaevskii fu chiamato come professore presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento, dove si trasferì in maniera permanente, insieme alla moglie Luba. Come spesso amava ricordare, l'Italia era diventata la sua seconda patria.

La produzione scientifica di Lev Pitaevskii si sviluppò ulteriormente negli anni seguenti (circa 100 articoli pubblicati su riviste internazionali), anche grazie a collaborazioni nazionali e internazionali, stimolando nuove attività sperimentali e teoriche. Argomenti

rilevanti di queste ricerche riguardano: la struttura dei condensati di Bose-Einstein vicino alla superficie, lo *shift* della temperatura critica nelle trappole armoniche, la scoperta di una simmetria nascosta dei condensati in due dimensioni in trappole armoniche, i fenomeni di interferenza nello spazio dei momenti, la propagazione del *second sound* nei gas di Fermi fortemente interagenti, la dipendenza dalla temperatura della forza di Casimir-Polder, la fase supersolida nei gas bosonici con accoppiamento di spin-orbita, le proprietà dei solitoni magnetici nelle miscele binarie, etc.

Lev Pitaevskii ha ricevuto numerosi premi e riconoscimenti durante la sua carriera. Tra quelli ottenuti più recentemente vanno ricordati: il Premio "Enrico Fermi" e il Premio "Pomeranchuk" nel 2018, il Senior BEC Award nel 2019 e il Premio "Lars Onsager" nel 2021. La stima e il riconoscimento del suo alto profilo scientifico e umano sono testimoniati anche dai numerosissimi messaggi e tributi ricevuti dopo la sua scomparsa. Ora Lev riposa in pace nel cimitero di Trento. In considerazione del suo profondo legame con il Centro BEC di Trento, questo è stato rinominato "Pitaevskii Center on Bose-Einstein Condensation".

Sandro Stringari
Pitaevskii Center on Bose-Einstein Condensation
Dipartimento di Fisica, Università di Trento
CNR - Istituto Nazionale di Ottica

"Dear Massimo, Thank you for your kind congratulations. It is a big pleasure for me to receive the Fermi Prize. I admire this great man all my life. And I am glad that the Italian community appreciates my contributions". Queste le parole con cui Lev P. Pitaevskii nel 2018 esprimeva la sua soddisfazione per il conferimento del premio Fermi della Società Italiana di Fisica: uno stile asciutto ed essenziale che lo caratterizzava in ogni discussione, lasciando sempre intuire una profonda umanità ed una lunga storia passata, anche davanti ad una zuppa russa a casa sua a Trento con la moglie Luba. La comunità italiana

dei fisici atomici sperimentali ha enormemente beneficiato dall'interazione con questo grande teorico – Sandro Stringari ha il merito di averlo portato in Italia – proprio nel momento in cui la realizzazione della condensazione di Bose-Einstein ha aperto nuove vie, all'inizio misteriose, in un'intersecazione tra atomi quasi allo zero assoluto e fluidi quantistici. Da subito negli esperimenti al LENS di Firenze potemmo analizzare quantitativamente il comportamento di un condensato di atomi di rubidio in espansione da un reticolo di luce – con Chiara Fort, Francesco Cataliotti, Francesco Minardi tra gli altri – in stretta collaborazione con i trentini Lev, Sandro Stringari e Paolo Pedri. La teoria di Gross-Pitaevskii è stata ed è la guida per una impressionante varietà di esperimenti con i condensati di Bose-Einstein. Nella foto (fig. 2) Lev appare attorniato dai docenti (sei di loro premiati col Nobel) del corso che a Varenna fu tenuto nel 1998. Mi piace qui tornare a Fermi che Lev ricordava nel suo messaggio. Una ventina di anni fa, con Giovanni Modugno e Giacomo Roati tra gli altri, avevamo prodotto un gas degenere di atomi fermionici di potassio al LENS ancora su quella collina di Arcetri dove nel 1926 aveva avuto inizio la nuova statistica quantistica. Chiacchierando nel verde di quei luoghi con Lev e Sandro potemmo investigare la possibilità di utilizzare gli esperimenti per misure di forze a distanza micrometrica e, chissà dell'effetto Casimir. Avemmo conferma della vastità della cultura di Lev quando anni dopo Leonardo Fallani nel suo laboratorio riuscì ad analizzare la dinamica di isotopi fermionici di itterbio, questa volta a molte componenti di spin, confinati in una sola dimensione. Il lavoro teorico di Lev fu da guida luminosa per seguire le novità nelle "breathing oscillations". Mi si lasci chiudere dicendo che il "respiro" di Lev è stato a tutto tondo e continuerà ad alitare nella nostra fisica e nei nostri pensieri.

Massimo Inguscio
Università Campus Bio-Medico di Roma
LENS, Firenze
CNR - Istituto Nazionale di Ottica



Fig. 1 Theory Group all'Institute of Physical Problems (Mosca, 1956). Lev Pitaevskii è il secondo da sinistra in piedi. Crediti: Archivi del Kapitza Institute of Physical Problems, Russian Academy of Sciences.



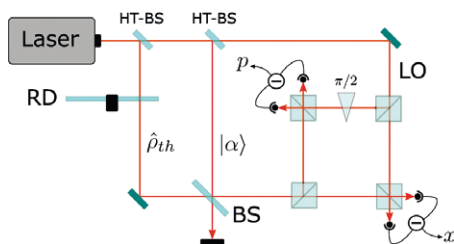
Fig. 2 Scuola Internazionale di Fisica "Enrico Fermi", Corso CXL "Bose-Einstein Condensation in Atomic Gases" (Varenna, 1998).

REVERSIBILITÀ NELLO SPAZIO DELLE FASI QUANTISTICO

Classicamente la reversibilità a livello microscopico corrisponde alla simmetria per inversione del tempo della traiettoria nello spazio delle fasi. L'irreversibilità macroscopica sorge dalla somma sui cammini possibili, con conseguente perdita della coerenza temporale. A livello quantistico le proprietà dello spazio delle fasi sono modificate dal principio di indeterminazione (energia-tempo) e così quelle della micro-reversibilità. M. Bellini e collaboratori hanno derivato la relazione tra le probabilità della traiettoria e della sua invertita nel tempo di un sistema quantistico in interazione con un bagno termico e dimostrato sperimentalmente la natura della reversibilità quantistica microscopica.

M. Bellini et al., *Demonstrating quantum microscopic reversibility using coherent states of light*, Phys. Rev. Lett., 129 (2022) 170604.

In this Letter, we establish a method to explore the difference between quantum and classical theory of microscopic reversibility on a very basic level and demonstrate it using a quantum optical setup. In the experiment, an initial coherent state of light interacts with a thermal field, and the resulting mixed state is then measured on a coherent basis. The measured statistics clearly follow the quantum version of microscopic reversibility.



Schema semplificato del dispositivo sperimentale per testare il teorema delle fluttuazioni quantistiche. Figura riprodotta con permesso da: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.170604>, © 2022 American Physical Society.

ELICHE DI NEUTRONI

Un'onda di luce può essere "strutturata" a portare un momento angolare orbitale, l , che compare nel fattore $e^{i\phi l}$ della funzione d'onda, con ϕ angolo azimutale attorno alla direzione di propagazione. Il fronte d'onda è elicoidale. D. Sarenac e collaboratori sono ora riusciti, per la prima volta, a realizzare un fascio elicoidale di neutroni.

D. Sarenac et al., *Experimental realization of neutron helical waves*, Sci. Adv., 8 (46) (2022) eadd2022.

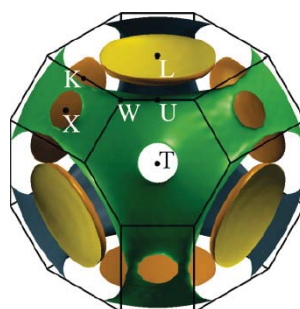
Methods of preparation and analysis of structured waves of light, electrons, and atoms have been advancing rapidly. Despite the proven power of neutrons for material characterization and studies of fundamental physics, neutron science has not been able to fully integrate these techniques because of small transverse coherence lengths, the relatively poor resolution of spatial detectors, and low fluence rates. Here, we demonstrate methods that are practical with the existing technologies and show the experimental achievement of neutron helical wavefronts that carry well-defined orbital angular momentum values. We discuss possible applications and extensions to spin-orbit correlations and material characterization techniques.

NUOVE IDEE SUL PIÙ VECCHIO SUPERCONDUTTORE

Nel 1911 H. Kamerlingh Onnes scopriva la superconduttività nel mercurio, e nel 1957 Bardeen, Cooper e Schrieffer formulavano la teoria, ma sino ad oggi non si era in grado di capire nei dettagli, a livello microscopico, il fenomeno e calcolarne la temperatura critica. Ricercatori dell'Università di L'Aquila e altri istituti sono ora riusciti a prevederne un valore vicino a quello sperimentale (differendone di meno del 2.5%).

C. Tresca et al., *Why mercury is a superconductor*, Phys. Rev. B, 106 (2022) L180501.

Despite being the oldest known superconductor, solid mercury is mysteriously absent from all current computational databases of superconductors. We present a critical study of its superconducting properties based on state-of-the-art superconducting density functional theory. Our calculations reveal numerous anomalies in electronic and lattice properties, which can mostly be handled, with due care, by modern *ab initio* techniques.



La superficie di Fermi del α -Hg dal calcolo completamente relativistico. Figura riprodotta con permesso da: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.L180501>, © 2022 American Physical Society.

ENTANGLEMENT QUANTISTICO SU SCALA GLOBALE

Il premio Nobel 2022 è stato assegnato a A. Zeilinger per il "teletrasporto quantistico", cioè lo spostamento di uno stato quantico da un sistema ad un altro distanti tra loro. La meccanica quantistica si manifesta così a scala macroscopica. Oltre all'aspetto di fisica fondamentale, il fenomeno ha applicazioni, in particolare per crittografare le telecomunicazioni con distribuzione quantistica della chiave (QKD). Su scala globale però non lo si può fare su fibra ottica. Infatti, per conservare l'entanglement non si può amplificare, e assorbimento e diffusione limitano la distanza a poche centinaia di chilometri. Il problema fu superato usando un satellite per connettere diverse stazioni sulla terra. La gran parte del tragitto dei fotoni è praticamente nel vuoto, tranne la decina di chilometri in atmosfera, e l'informazione sulla fase è conservata. Il gruppo cinese guidato da Jian-Wei Pan ha sviluppato tutti gli elementi della tecnologia, con il satellite Micius, dal nome di un filosofo del IV secolo a.C., lanciato nel 2016. Quest'articolo di rivista presenta un panorama completo della storia, dello stato dell'arte e delle prospettive per il futuro. Riporto dalle conclusioni.

C.-Y. Lu et al., *Micius quantum experiments in space*, Rev. Mod. Phys., 94 (2022) 035001.

Although [we showed] that the Micius satellite greatly enhances the scale and capability of quantum experiments in space, Micius marks only the beginning. For the Chinese quantum satellite plans, there are two goals in the next five to ten years. The first is to develop three to five small LEO satellites dedicated to QKD missions, which will provide more practical and efficient QKD services. The second goal is to develop a medium-Earth-orbit-to-geosynchronous-orbit (GEO) quantum science satellite that involves several ambitious scientific objectives.



Il satellite Micius e tre stazioni a terra collegate (Graz, Nanshan, and Xinglong). Crediti: University of Science and Technology of China.

a cura di A. Bettini

PASSION FOR KNOWLEDGE THE MAGIC OF GLASS

On the occasion of the International Year of Glass (IYOG2022)

16 DECEMBER 2022 | FROM 9.00 AM TO 19.00 PM

SALA ULISSE, ACCADEMIA DELLE SCIENZE

VIA ZAMBONI 31, BOLOGNA, ITALY



For information: sif@sif.it

Webcast will be available – Courtesy of INFN Multimedia Group

EPS Prizes, Awards and Distinctions Call for nominations

EPS Early Career Prizes



EPS Emmy Noether Distinction 2022

Nominate now!



For Women
in Science



L'Oréal-UNESCO
For Women in Science
International Awards



CONCORSO PER L'ANNO SCOLASTICO 2022/2023

DONNE E RICERCA IN FISICA: TRA STEREOTIPI DI GENERE E PROFESSIONI DEL FUTURO

GENERA.LNGS.INFN.IT

DONNERICERCA@LISTS.INFN.IT



RIVOLTO AGLI STUDENTI E STUDENTESSE DEGLI ISTITUTI SECONDARI DI II GRADO

ADESIONE ENTRO: 17 FEBBRAIO 2023



SPRINGER NATURE



IPAC₂₃

14th International Particle
Accelerator Conference

IPAC
'23

7 - 12 May 2023
Venice, Italy

REGISTRATIONS AND ABSTRACT SUBMISSIONS
FROM OCTOBER 2022

ipac23.org





<https://animma.com/>

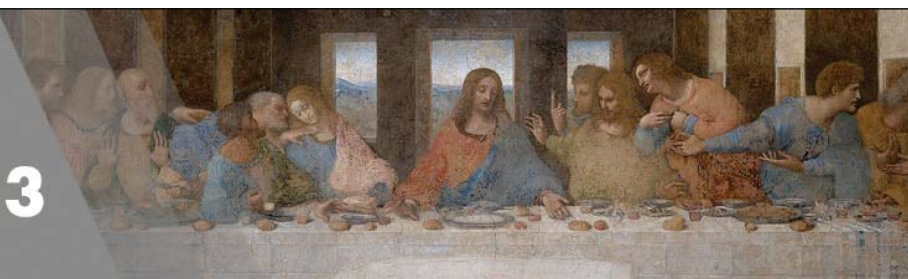


CERN
openlab

Applications open for
2023 CERN openlab summer student programme



CMD30
FisMat 2023



<https://eventi.cnism.it/cmd30-fismat>

INDICI DEL VOLUME 38

INDICE PER FASCICOLI

Numero 1/2, 2022

Editoriale/Editorial

A. Bracco	3
125 anni fa nasceva la Società Italiana di Fisica	
M. Focaccia	5
The discovery of the electron: J. J. Thomson 1897	
N. Robotti	7
Einstein Telescope	
M. Punturo	21
Medical isotopes at TRIUMF	
C. Hoehr, V. Radchenko, P. Schaffer	32
Glass: a ubiquitous material	
G. C. Righini	43
Measuring time to understand the Universe	
G. Cerretto, M. Sellone, S. Cavallero	53
From Earth to space: passive radiative heat dissipation systems	
A. Cannavale, M. Pugliese, V. Maiorano, G. Gigli	60
Programma della Scuola estiva "Enrico Fermi" di Varenna	69
IYBSSD 2022	70
Passion for Science	71
108° Congresso Nazionale	72
Premi della SIF	73
Claudio Villi and the reform of INFN	
A. Pascolini	77
Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa	
A. Bettini	86
Recensioni(*)	88
In ricordo di(*)	
Liana Martinelli (A. Di Lieto, G. Grosso)	88
Giampiero Paffuti (P. Rossi)	88
Silvia Limentani (A. Bettini)	88
Giovanni Morchio (S. Albeverio, A. Michelangeli)	88
Sandro Squarcia (M. G. Taiuti)	88
Scelti per voi (A. Bettini)	89
Annunci	90

Numero 3/4, 2022

Editoriale/Editorial

A. Bracco	3
Galilei's last disciple	
A. Bettini	7
JUNO experiment	
L. Votano	18
Theory of terahertz photodetection in bilayer graphene	
A. Tomadin	30
The symmetry breaking idea for quantum devices:	
The pump and the phase battery	
R. Citro, O. Durante, C. Guarcello	37
Guido Horn d'Arturo: Forefather of active-optics multi-mirror telescopes	
F. Bònoli	49

(*) Il testo completo delle recensioni e dei necrologi è pubblicato solo nella versione online (www.sif.it/riviste/sif/sag)

Live physics for schools

C. Collà Ruvolo, F. Scianitti, A. Greco, F. Mazzotta, C. Peduto	65
Optical spectroscopy for quality inspection in bottling and agrifood fields	
L. Cocola, M. Fedel, L. Poletto	73
108° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica	81
Programma Generale	82
Elezioni delle cariche sociali SIF per il triennio 2023-2025	84
The Erice Subnuclear Physics School reopens its doors	
L. Cifarelli	85
Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa	
A. Bettini	87
Premio L'Oréal-UNESCO 2022 per le Donne e la Scienza	
L. Votano	88
Recensioni(*)	89
In ricordo di(*)	
Benedetto D'Ettorre Piazzoli (R. Santonico, G. Di Sciascio)	89
Luigi Satta (A. Tabocchini, G. Simone, S. Falciano)	89
Sergio Rosati (S. Fantoni, A. Kievsky, L. E. Marcucci, M. Viviani)	89
Ferdinando Amman (E. Iarocci)	89
Scelti per voi (A. Bettini)	90

Numero 5/6, 2022

Editoriale/Editorial

A. Bracco	3
The Higgs discovery at 10	
R.-D. Heuer	5
Niels Bohr (1885-1962), one of the architects of modern physics	
G. Peruzzi	9
The Electron-Ion Collider project	
S. Dalla Torre	25
Theoretical spectroscopy: unravelling electronic correlations for materials design	
M. Gatti	35
Quantum advantage with a programmable photonic processor, available now on the cloud	
F. Sciarrino	43
Mechanics in experimental research: drivers for the processes of the future	
V. Pettinacci	45
IJCLab: a new European laboratory	
A. Stocchi	52
STEAM for everyone	
V. Lodigiani, M. Carusi	59
Femtosecond laser writing of integrated photonic circuits	
F. Ceccarelli, R. Osellame	62
Cerimonia Inaugurale	
108° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica	69
The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2022	
G. Benedek, J. P. Toennies	73
SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2022	
M. Nicodemi	75
Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa	
A. Bettini	77
Il Premio Nobel per la Fisica 2022	
L. Fallani, M. Inguscio	78
Recensioni(*)	80
In ricordo di(*)	
Raffaella Simili (G. Paoloni, S. Linguerri, M. Focaccia)	80
Giovanni Fiorentini (F. Mantovani, S. Degl'Innocenti,	

B. Ricci, F. Villante)	80
Laura Cantù (A. Diaspro)	80
Fabrizio Murtas (P. Campana)	80
Laura Perini (C. Meroni)	81
Emilio Doni (G. Grosso)	81
Valery Rubakov (A. Masiero)	81
Ricardo Americo Broglia (F. Barranco, E. Vigezzi, T. Døssing, P. Milani, G. Potel, G. Tiana, C. Joas)	81
Lev Pitaevskii (S. Stringari, M. Inguscio)	81
Scelti per voi (A. Bettini)	83
Annunci	85
Indici di volume 38	88

INDICE PER AUTORI

A

Albeverio S., Michelangeli A.	
In ricordo di(*) Giovanni Morchio	38:1/2, 88

B

Barranco F., Vigezzi E., Døssing T., Milani P., Potel G., Tiana G., Joas C.	
In ricordo di(*) Ricardo Americo Broglia	38:5/6, 81
Benedek G., Toennies J. P.	
The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2022	38:5/6, 73
Bettini A.	
In ricordo di(*) Silvia Limentani	38:1/2, 88
Bettini A.	
Galilei's last disciple	38:3/4, 7
Bönoli F.	
Guido Horn d'Arturo: Forefather of active-optics multi-mirror telescopes	38:3/4, 49

C

Campana P.	
In ricordo di(*) Fabrizio Murtas	38:5/6, 80
Cannavale A., Pugliese M., Maiorano V., Gigli G.	
From Earth to space: passive radiative heat dissipation systems	38:1/2, 60
Carusi M. (vedi Lodigiani V.)	
Cavallero S. (vedi Cerretto G.)	
Ceccarelli F., Osellame R.	
Femtosecond laser writing of integrated photonic circuits	38:5/6, 62
Cerretto G., Sellone M., Cavallero S.	
Measuring time to understand the Universe	38:1/2, 53
Cifarelli L.	
The Erice Subnuclear Physics School reopens its doors	38:3/4, 85
Citro R., Durante O., Guarcello C.	
The symmetry breaking idea for quantum devices: The pump and the phase battery	38:3/4, 37
Cocola L., Fedel M., Poletto L.	
Optical spectroscopy for quality inspection in bottling and agrifood fields	38:3/4, 73
Collà Ruvo C., Scianitti F., Greco A., Mazzotta F., Peduto C.	
Live physics for schools	38:3/4, 65

D

Dalla Torre S.	
The Electron-Ion Collider project	38:5/6, 25
Degl'Innocenti S. (vedi Mantovani F.)	
Diaspro A.	
In ricordo di(*) Laura Cantù	38:5/6, 80
Di Lieto A., Grosso G.	
In ricordo di(*) Liana Martinelli	38:1/2, 88
Di Sciascio G. (vedi Santonico R.)	
Døssing T. (vedi Barranco F.)	
Durante O. (vedi Citro R.)	

F

Falciano S. (vedi Tabocchini A.)	
Fallani L., Inguscio M.	
Il Premio Nobel per la Fisica 2022	38:5/6, 78
Fantoni S., Kievsky A., Marcucci L. E., Viviani M.	
In ricordo di(*) Sergio Rosati	38:3/4, 89
Fedel M. (vedi Cocola L.)	
Focaccia M.	
125 anni fa nasceva la Società Italiana di Fisica	38:1/2, 5
Focaccia M. (vedi Paoloni G.)	

G

Gatti M.	
Theoretical spectroscopy: unravelling electronic correlations for materials design	38:5/6, 35
Gigli G. (vedi Cannavale A.)	
Greco A. (vedi Collà Ruvo C.)	
Grosso G. (vedi Di Lieto A.)	
Grosso G.	
In ricordo di(*) Emilio Doni	38:5/6, 81
Grosso G.	
In ricordo di(*) Emilio Doni	38:5/6, 81
Guarcello C. (vedi Citro R.)	

H

Heuer R.-D.	
The Higgs discovery at 10	38:5/6, 5
Hoehr C., Radchenko V., Schaffer P.	
Medical isotopes at TRIUMF	38:1/2, 32

I

Iarocci E.	
In ricordo di(*) Ferdinando Amman	38:3/4, 89
Inguscio M. (vedi Fallani L.)	
Inguscio M. (vedi Stringari S.)	

J

Joas C. (vedi Barranco F.)	
----------------------------	--

K

Kievsky A. (vedi Fantoni S.)	
------------------------------	--

L

Linguetti S. (vedi Paoloni G.)	
Lodigiani V., Carusi M.	
STEAM for everyone	38:5/6, 59

M

Maiorano V. (vedi Cannavale A.)	
Mantovani F., Degl'Innocenti S., Ricci B., Villante F.	

In ricordo di() Giovanni Fiorentini* 38:5/6, 80
 Marucci L. E. (vedi Fantoni S.)
 Masiero A.
In ricordo di() Valery Rubakov* 38:5/6, 81
 Mazzotta F. (vedi Collà Ruvolo C.)
 Meroni C.
In ricordo di() Laura Perini* 38:5/6, 81
 Michelangeli A. (vedi Albeverio S.)
 Milani P. (vedi Barranco F.)

N
 Nicodemi M.
SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2022 38:5/6, 75

O
 Osellame R. (vedi Ceccarelli F.)

P
 Paoloni G., Linguerrì S., Focaccia M.
In ricordo di() Raffaella Simili* 38:5/6, 80
 Pascolini A.
Claudio Villi and the reform of INFN 38:1/2, 77
 Peduto C. (vedi Collà Ruvolo C.)
 Peruzzi G.
Niels Bohr (1885-1962), one of the architects of modern physics 38:5/6, 9
 Pettinacci V.
Mechanics in experimental research: drivers for the processes of the future 38:5/6, 45
 Poletto L. (vedi Cocola L.)
 Potel G. (vedi Barranco F.)
 Pugliese M. (vedi Cannavale A.)
 Punturo M.
Einstein Telescope 38:1/2, 21

R
 Radchenko V. (vedi C. Hoehr)
 Ricci B. (vedi Mantovani F.)
 Righini G. C.
Glass: a ubiquitous material 38:1/2, 43
 Robotti N.
The discovery of the electron: J. J. Thomson 1897 38:1/2, 7
 Rossi P.
In ricordo di() Giampiero Paffuti* 38:1/2, 88

S
 Santonico R., Di Sciascio G.
In ricordo di() Benedetto D'Etterre Piazzoli* 38:3/4, 89
 Schaffer P. (vedi C. Hoehr)
 Scianitti F. (vedi Collà Ruvolo C.)
 Sciarrino F.
Quantum advantage with a programmable photonic processor, available now on the cloud 38:5/6, 43
 Sellone M. (vedi Cerretto G.)
 Simone G. (vedi Tabocchini A.)
 Stocchi A.
IJCLab: a new European laboratory 38:5/6, 52
 Stringari S., Inguscio M.
In ricordo di() Lev Pitaevskii* 38:5/6, 81

T
 Tabocchini A., Simone G., Falciano S.
In ricordo di() Luigi Satta* 38:3/4, 89
 Taiuti M. G.
In ricordo di() Sandro Squarcia* 38:1/2, 88
 Tiana G. (vedi Barranco F.)
 Toennies J. P. (vedi Benedek G.)
 Tomadin A.
Theory of terahertz photodetection in bilayer graphene 38:3/4, 30

V
 Vigezzi E. (vedi Barranco F.)
 Villante F. (vedi Mantovani F.)
 Viviani M. (vedi Fantoni S.)
 Votano L.
JUNO experiment 38:3/4, 18
 Votano L.
Premio L'Oréal-UNESCO 2022 per le Donne e la Scienza 38:3/4, 88

INDICE PER RUBRICHE

IN EVIDENZA
Galilei's last disciple
 A. Bettini 38:3/4, 7
Niels Bohr (1885-1962), one of the architects of modern physics
 G. Peruzzi 38:5/6, 9
The discovery of the electron: J. J. Thomson 1897
 N. Robotti 38:1/2, 7
The Higgs discovery at 10
 R.-D. Heuer 38:5/6, 5

SCIENZA IN PRIMO PIANO
Einstein Telescope
 M. Punturo 38:1/2, 21
JUNO experiment
 L. Votano 38:3/4, 18
Quantum advantage with a programmable photonic processor, available now on the cloud
 F. Sciarrino 38:5/6, 43
The Electron-Ion Collider project
 S. Dalla Torre 38:5/6, 25
Theoretical spectroscopy: unravelling electronic correlations for materials design
 M. Gatti 38:5/6, 35
Theory of terahertz photodetection in bilayer graphene
 A. Tomadin 38:3/4, 30

FISICA E...
Mechanics in experimental research: drivers for the processes of the future
 V. Pettinacci 38:5/6, 45
Medical isotopes at TRIUMF
 C. Hoehr, V. Radchenko, P. Schaffer 38:1/2, 32
The symmetry breaking idea for quantum devices: The pump and the phase battery
 R. Citro, O. Durante, C. Guarcello 38:3/4, 37

PERCORSI

Glass: a ubiquitous material

G. C. Righini 38:1/2, 43

Guido Horn d'Arturo: Forefather of active-optics multi-mirror telescopes

F. Bònoli 38:3/4, 49

IJCLab: a new European laboratory

A. Stocchi 38:5/6, 52

FISICA IN ERBA

Live physics for schools

C. Collà Ruvolo, F. Scianitti, A. Greco, F. Mazzotta, C. Peduto 38:3/4, 65

Measuring time to understand the Universe

G. Cerretto, M. Sellone, S. Cavallero 38:1/2, 53

STEAM for everyone

V. Lodigiani, M. Carusi 38:5/6, 59

FISICA E INNOVAZIONE TECNOLOGICA

Femtosecond laser writing of integrated photonic circuits

F. Ceccarelli, R. Osellame 38:5/6, 62

From Earth to space: passive radiative heat dissipation systems

A. Cannavale, M. Pugliese, V. Maiorano, G. Gigli 38:1/2, 60

Optical spectroscopy for quality inspection in bottling and agrifood fields

L. Cocola, M. Fedel, L. Poletto 38:3/4, 73

IL NOSTRO MONDO

Claudio Villi and the reform of INFN

A. Pascolini 38:1/2, 77

The Erice Subnuclear Physics School reopens its doors

L. Cifarelli 38:3/4, 85

Suole e Congressi SIF

Programma della Scuola estiva "Enrico Fermi" di Varenna

IYBSSD 2022 38:1/2, 69

Passion for Science 38:1/2, 70

108° Congresso Nazionale 38:1/2, 71

Premi della SIF 38:1/2, 72

108° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 38:1/2, 73

Programma Generale 38:3/4, 81

Elezioni delle cariche sociali SIF per il triennio 2023-2025 38:3/4, 82

Cerimonia Inaugurale 108° Congresso Nazionale 38:3/4, 84

della Società Italiana di Fisica 38:5/6, 69

The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2022

G. Benedek, J. P. Toennies 38:5/6, 73

SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2022

M. Nicodemi 38:5/6, 75

Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa

A. Bettini 38:1/2, 86

38:3/4, 87

38:5/6, 77

News

Premio L'Oréal-UNESCO 2022 per le Donne e la Scienza

L. Votano 38:3/4, 88

Il Premio Nobel per la Fisica 2022

L. Fallani, M. Inguscio 38:5/6, 78

Recensioni(*)

A Random Walk in Physics

recensito da R. Livi 38:1/2, 88

Chiralità

recensito da G. Benedek, G. Caglioti 38:3/4, 89

Dai Quark alle Galassie

recensito da F. Vissani 38:3/4, 89

Da via Panisperna all'America

recensito da M. Focaccia 38:5/6, 80

Il futuro dell'energia nucleare

M. Ripani 38:5/6, 80

L'alfabeto della Natura

recensito da M. Giudici 38:5/6, 80

L'avvocato dell'atomo

A. Bettini 38:5/6, 80

Molecules in Superfluid Helium Nanodroplets

recensito da G. Benedek 38:3/4, 89

Saving the Starry Night

recensito da G. Benedek 38:1/2, 86

In ricordo di(*)

Giovanni Morchio (S. Albeverio, A. Michelangeli) 38:1/2, 88

Liana Martinelli (A. Di Lieto, G. Grosso) 38:1/2, 88

Giampiero Paffuti (P. Rossi) 38:1/2, 88

Silvia Limentani (A. Bettini) 38:1/2, 88

Sandro Squarcia (M. G. Taiuti) 38:1/2, 88

Benedetto D'Ettore Piazzoli (R. Santonico, G. Di Sciascio) 38:3/4, 89

Sergio Rosati (S. Fantoni, A. Kievsky, L. E. Marcucci, M. Viviani) 38:3/4, 89

Luigi Satta (A. Tabocchini, G. Simone, S. Falciano) 38:3/4, 89

Ferdinando Amman (Enzo Iarocci) 38:3/4, 89

Giovanni Fiorentini (F. Mantovani, S. Degl'Innocenti, B. Ricci, F. Villante) 38:5/6, 80

Laura Cantù (A. Diaspro) 38:5/6, 80

Raffaella Simili (G. Paoloni, S. Linguerrì, M. Focaccia) 38:5/6, 80

Lev Petrovich Pitaevskii (S. Stringari, M. Inguscio) 38:5/6, 81

Laura Perini (C. Meroni) 38:5/6, 81

Fabio Murtas (P. Campana) 38:5/6, 80

Emilio Doni (G. Grosso) 38:5/6, 81

Ricardo Americo Broglia (F. Barranco, E. Vigezzi, T. Døssing, P. Milani, G. Potel, G. Tiana, C. Joas) 38:5/6, 81

Valery Rubakov (A. Masiero) 38:5/6, 81

SCELTI PER VOI

Ragni aeronauti - Transizione di fasi nelle funi -

Canestri e cristalli - Ponte di roccia - Ponte di ghiaccio 38:1/2, 89

Colori iridescenti - La danza delle alghe nella luce -

Immagini 3D - Immagini nell'estremo ultravioletto 38:3/4, 90

Reversibilità nello spazio delle fasi quantistico -

Eliche di neutroni - Nuove idee sul più vecchio

superconduttore - Entanglement quantistico su scala

globale 38:5/6, 83

physicsworld | jobs

Discover what's out there

Take the next step in your career
with *Physics World Jobs*.

physicsworld.com/jobs



physicsworld

careers

**Career opportunities
for those with a background in
physics and related subjects**

Brought to you by *Physics World*, this
bumper-sized book is packed with helpful
careers advice, real-life case studies, as well
as an extensive employer directory.

Read the 2022 edition online at
physicsworld.com/careers



DOMANDA DI ISCRIZIONE alla SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

ITALIAN PHYSICAL SOCIETY MEMBERSHIP APPLICATION FORM

Nome _____
Name

Cognome _____
Surname

Luogo e data di nascita _____
Place and date of birth

Nazionalità _____
Nationality

a Istituto o Ente di appartenenza _____
Affiliation

b Indirizzo privato _____
Home address

Indirizzo e-mail _____
E-mail

Breve curriculum (titolo di studio, attività didattica e scientifica): _____
Brief scientific curriculum:

Indirizzo a cui inviare il Bollettino della Società e la corrispondenza:
Address where Bulletin and Society communications are to be sent:

a

b

Firme leggibili dei Soci Presentatori (*)
Signatures of two introducing Members

Nomi in stampatello e indirizzi e-mail
Names in block letters and e-mail addresses

1) _____

2) _____

- | | |
|---|-----------------------------------|
| ☐ Socio INDIVIDUALE
INDIVIDUAL Member | € 50,00 ☐ |
| ☐ Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni (pagamento annuale)
JUNIOR Member under 30 (one year payment) | € 30,00 ☐ |
| ☐ Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni (pagamento triennale)
JUNIOR Member under 30 (three year payment) | € 75,00 ☐ |
| ☐ Socio SENIOR al di sopra dei 70 anni
SENIOR Member over 70 | € 40,00 ☐ |
| ☐ Socio INDIVIDUALE anche membro di altre associazioni scientifiche italiane relative alla fisica (*)
INDIVIDUAL Member also member of other Italian scientific associations (*) | € 40,00 ☐ |
| ☐ Socio COLLETTIVO
COLLECTIVE Member | € 300,00 ☐ |
| ☐ Socio SOSTENITORE (a partire da)
SPONSORING Member (starting from) | € 350,00 ☐ |

La quota di iscrizione dovrà essere pagata dopo aver ricevuto comunicazione dell'accettazione della domanda. ()*
Applicants will have to pay the membership dues only AFTER having been informed by the Society of the acceptance of their application. ()*

(*) Informazioni: <https://www.sif.it/associazione>

(*) Information: <https://en.sif.it/association>

Data _____
Date

Firma _____
Signature

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del D.Lgs. 196/2003
I hereby authorize the treatment of my personal data according to the privacy law D.Lgs. 196/2003
sì /yes ☐ no ☐

Società Italiana di Fisica
Via Saragozza 12 - 40123 Bologna
Tel. 051331554 - Fax 051581340 - e-mail: sif@sif.it - internet: <https://www.sif.it>

SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Per diventare Socio SIF:

Informazioni: <https://www.sif.it/associazione>

Quote sociali della Società Italiana di Fisica

- | | | |
|--|----------|--------------------------|
| ☐ Socio Individuale | € 50,00 | ☐ |
| ☐ Socio Junior al di sotto dei 30 anni (pagamento annuale) | € 30,00 | ☐ |
| ☐ Socio Junior al di sotto dei 30 anni (pagamento triennale) | € 75,00 | ☐ |
| ☐ Socio Senior al di sopra dei 70 anni | € 40,00 | ☐ |
| ☐ Socio Individuale anche membro di altra associazione scientifica italiana relativa alla fisica (*) | € 40,00 | ☐ |
| ☐ Socio Collettivo | € 300,00 | ☐ |
| ☐ Socio Sostenitore (a partire da) | € 350,00 | ☐ |
| ☐ Socio Invitato (*) - primo anno di pagamento (quota SIF) | € 15,00 | ☐ |
| ☐ Socio Invitato (*) - primo anno di pagamento (quota SIF+EPS) | € 25,00 | ☐ |

(*) Informazioni: <https://www.sif.it/associazione>

Per diventare Socio EPS:

Informazioni: <https://www.eps.org/subscribe>

Quote sociali della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

- | | | |
|--|---------|--------------------------|
| ☐ Socio | | |
| ☐ Socio al di sotto dei 30 anni | € 27,50 | ☐ |
| ☐ Socio in pensione | € 20,00 | ☐ |
| ☐ Studente | € 20,00 | ☐ |
| ☐ Insegnante (pre-universitario) | € 20,00 | ☐ |
| | € 20,00 | ☐ |

Modalità di pagamento della quota sociale alla SIF:

- ☐ online a mezzo carta di credito, tramite collegamento diretto e sicuro (POS) con la banca BNL, attraverso l'Area Soci del sito web della Società Italiana di Fisica
- ☐ a mezzo bonifico:
BancoPosta, IBAN IT14 G076 0102 4000 0001 9197 409 (dall'estero BIC/SWIFT BPPIITRRXXX)
intestato a: Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.
- ☐ a mezzo versamento sul c/c postale n. 19197409
intestato a: Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.
- ☐ a mezzo carta di credito, tramite la Società Italiana di Fisica, compilando e spedendo il modulo sottostante (**)

(**) In questo caso sono escluse le carte Diners e American Express.

Compilare e spedire a : **Società Italiana di Fisica – Via Saragozza 12 – 40123 Bologna – fax 051 581340**

Il sottoscritto: _____

Nato a: _____ il _____

Residente a: _____

Via: _____ n. _____

Documento di riconoscimento: _____ n. _____

Rilasciato da: _____ il _____

Titolare carta di credito **VISA** n. _____

Scadenza _____

Titolare carta di credito **MASTERCARD** n. _____

Scadenza _____

AUTORIZZA

La Società Italiana di Fisica

A prelevare dalla carta di credito sopra descritta

L'importo di € _____ (_____)
(importo in cifre) (importo in lettere)

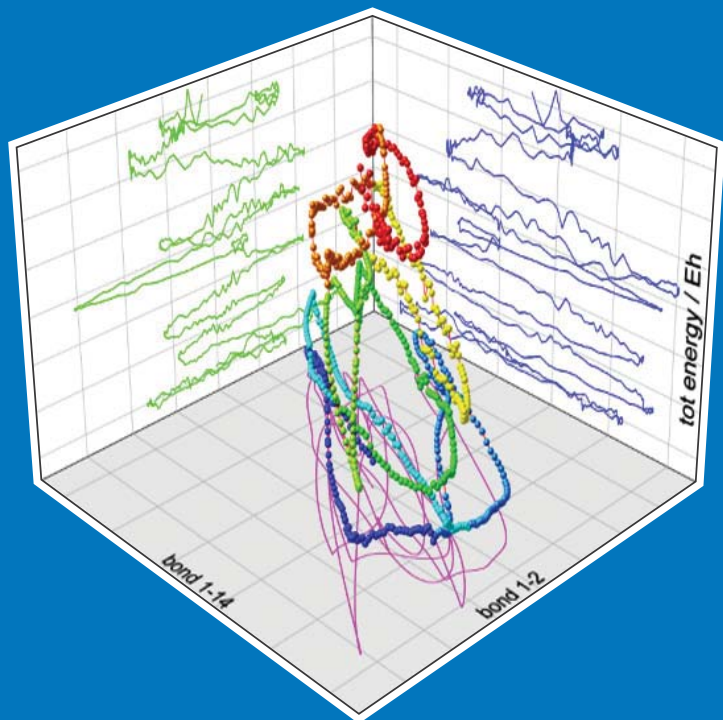
per il rinnovo della quota sociale per l'anno _____

Data _____

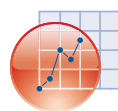
Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del D.Lgs. 196/2003

sì ☐ no ☐

Firma



www.adalta.it/OriginPro ►



ORIGIN PRO®

Il miglior software per l'Analisi di dati
e la Grafica scientifica

I ricercatori necessitano di strumenti di analisi e di grafica molto potenti e intuitivi che possano interagire con i loro dati e creare report personalizzati.

Origin Pro è sviluppato per soddisfare le necessità di scienziati e tecnici fornendo la più ampia gamma di strumenti per:

- Importare, interrogare, connettere
- Rappresentare, esaminare
- Ridurre, sintetizzare, analizzare
- Pubblicare, presentare



WOLFRAM TECHNOLOGIES

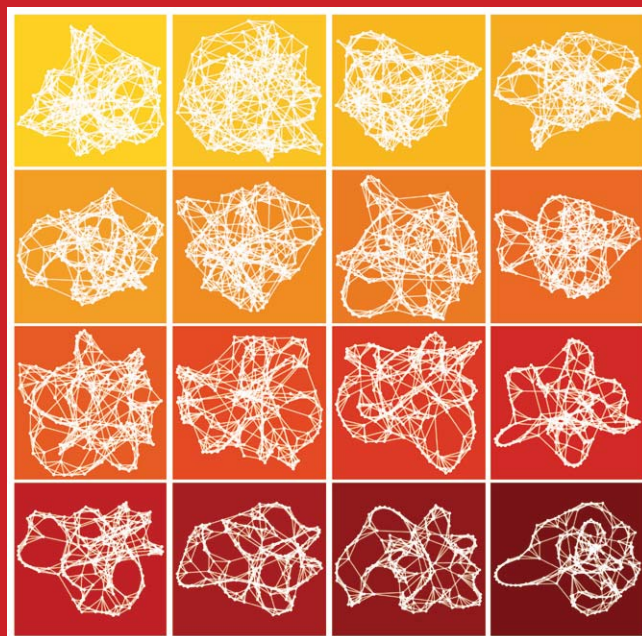
La soluzione definitiva per
la ricerca e lo sviluppo

Le Tecnologie Wolfram offrono un ambiente di sviluppo in cui la computazione è pienamente integrata nell'intero flusso di lavoro.

La punta di diamante dei software Wolfram è Mathematica che dal 1988 è rinomato per essere il miglior programma al mondo per ogni tipo di calcolo.

Mathematica guida l'utilizzatore dall'idea iniziale fino allo sviluppo di soluzioni che siano individuali o su larga scala.

Mathematica integra la più grande collezione al mondo di algoritmi, capacità di calcolo ad alte prestazioni e un potente motore di visualizzazione in un sistema coerente e semplice da usare.



www.adalta.it/Wolfram ►

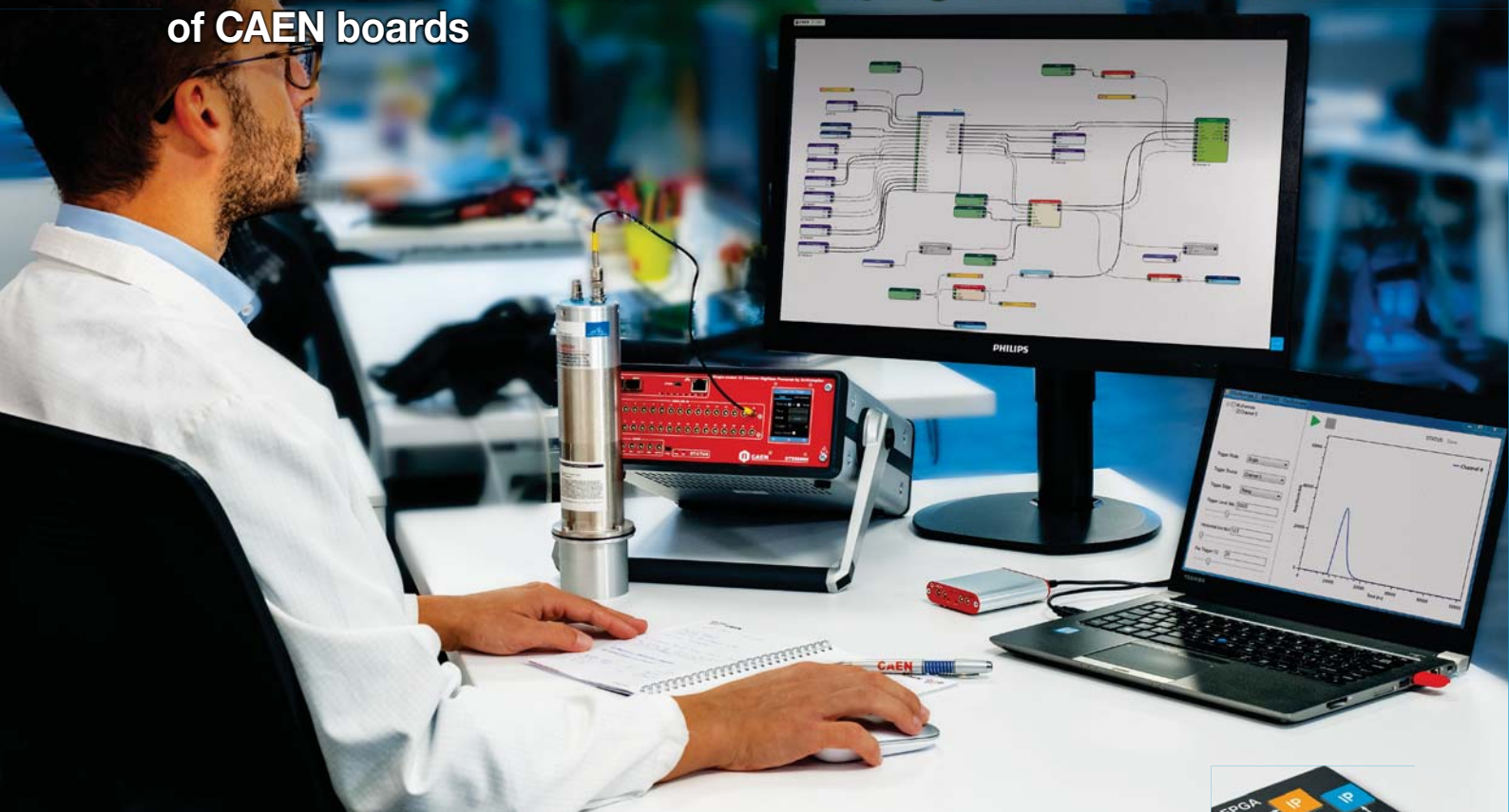
ADALTA
SOFTWARE PER L'INNOVAZIONE

0575.333297 | www.adalta.it



Sci-Compiler (Scientific Firmware Compiler)

A unique graphical software tool to program the Open FPGA of CAEN boards



Just Drag&Drop Virtual Instruments and Wires!



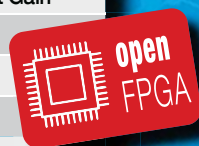
The Sci-Compiler is an innovative approach to modern readout system development. With an **intuitive user interface based on block diagrams**, it tremendously accelerates the generation of custom firmwares and related software libraries.

A new approach, even for non-expert FPGA users! More than 100 built-in blocks are available to implement a wide variety of Nuclear Physics applications.

Sci-Compiler supports the following Open FPGA CAEN boards:

DT2740 - VX2740 - V2740 64 Ch. 16 bit 125 MS/s Digitizer single-ended or differential inputs
DT2745 - VX2745 - V2745 64 Ch. 16-bit 125MS/s Digitizer with Programmable Input Gain
R5560 128 Ch. 14-bit @125 MS/s Digitizer with differential inputs
R5560SE 128 Ch. 14-bit @125 MS/s Digitizer with single-ended inputs
DT5560SE 32 Ch. 14-bit @125 MS/s Digitizer with single-ended inputs
DT5495 - V2495 Programmable Logic Units
DT5550 Programmable 32-channel Sequencer and Readout System (User Programmable FPGA)
DT5550W Weeroc ASICs DAQ Development system
Sci-Compiler SMART Kit / SP5650 Open FPGA Kit (DT1260)

DT: Desktop / VX: VME64X / V: VME64 / R: Rack



WANT TO START?



Evaluate the Sci-Compiler software with the **Sci-Compiler Smart Kit!**

Do you need to teach FPGA programming?
Have a look at the **SP5650 Open FPGA Kit**



www.caen.it

Small details... Great differences