HANNO COLLABORATO A QUESTO NUMERO:

R. W. Assmann, S. Barlini, G. Bellini, A. Bettini, A. Bracco, R. Caruso, I. Chinnici, L. Cifarelli, M. Ferrario, M. Focaccia, D. Haidt, G. La Rana, T. Marchi, A. Marino, C. Musio, A. D. Polosa, S. Ragazzi, R. A. Ricci, G. C. Righini, V. D. Shiltsev, E. V. Shiltseva, R. Simili, G. Stefani, C. Viappiani

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 36 • N. 3 maggio-giugno 2020 • N. 4 luglio-agosto 2020

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

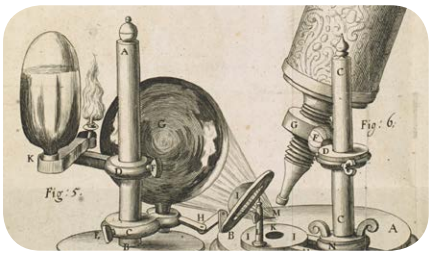
3 EDITORIALE
A. Bracco

IN EVIDENZA

5 **50 years with the GIM mechanism**
A. D. Polosa

SCIENZA IN PRIMO PIANO

17 **Amazing glass marbles**
G. C. Righini



30 **Visualizing elusive quantum-mechanical concepts through multi-ionization experiments**
G. Stefani

FISICA E...

41 **Accelerating the future**
M. Ferrario, R. W. Assmann

PERCORSI

51 **Dmitrii Ivanovich Mendeleev (1834-1907): The Periodic Table and beyond**
V. D. Shiltsev, E. V. Shiltseva

65 **Thus was established the Italian Astronomical Society**
I. Chinnici

IL NOSTRO MONDO

77 **106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica**

78 **Programma Generale**

80 **Introducing the Italian Society of Pure and Applied Biophysics - SIBPA**
C. Viappiani, C. Musio

84 **Young Minds, a key for the future**
R. Caruso, A. Marino

89 **Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa**
A. Bettini

90 INTERVISTA A
Massimo Inguscio
L. Cifarelli

News

91 **A chair for Laura Bassi. Bologna 1732**
M. Focaccia, R. Simili

RECENSIONI(*)

92 L. Cifarelli (Editor)
Scientific Papers of Ettore Majorana - A new expanded edition
(D. Haidt)

IN RICORDO DI(*)

93 **Antonino Pullia** (G. Bellini, S. Ragazzi)
94 **Aldo Covello** (G. La Rana, R. A. Ricci)
Mario Bruno (T. Marchi, S. Barlini)

95 SCELTI PER VOI

96 ANNUNCI

(*) Il testo completo è pubblicato online:
www.sif.it/riviste/sif/sag/recensioni
www.sif.it/riviste/sif/sag/ricordo

IL NUOVO SAGGIATORE - BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA VIENE INVIATO GRATUITAMENTE AI SOCI

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 disponibli 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.

EDITORIALE / EDITORIAL

Cari soci e cari lettori,

consultando la nostra pagina web e SIF Prima Pagina, potete ben capire che, nonostante le difficoltà legate al lock-down per il COVID-19, la SIF ha portato avanti con il solito grande impegno le sue diverse attività e anche tutti i Consigli di Presidenza si sono tenuti regolarmente negli ultimi mesi, ovviamente via video. Quindi questo editoriale vi informa molto brevemente su alcuni dei punti salienti delle attività svolte.

Le ultime novità sui collegamenti internazionali della SIF riguardano la firma di un accordo di collaborazione con la Japan Physical Society e la partecipazione da parte mia e di Luisa Cifarelli ad una riunione del comitato CISA ("Committee on International Scientific Affairs") dell'American Physical Society. Ricordo che i nostri legami con APS sono particolari in quanto Luisa Cifarelli è anche attualmente la presidente del Forum on International Physics (FIP) dell'APS. Alla riunione CISA è stato fatto il punto sulle iniziative e attività in corso volte a rafforzare l'interazione tra ricercatori e istituzioni in diverse regioni del mondo al fine di facilitare l'accesso all'informazione scientifica e al suo scambio. Tra i progetti recentemente realizzati, c'è anche la African Physics Newsletter (`https://www.primapagina.sif.it/article/982`) per la quale è stato richiesto aiuto alle società di fisica europee per aumentarne la diffusione e ampliarne i contenuti.

Come società associata all'European Physical Society abbiamo partecipato alla votazione del nuovo presidente e dei membri dell'Executive Committee di EPS, votazione che ha avuto luogo in occasione dell'ultima riunione del Council. L'elezione ha decretato Luc Bergé (CEA, Francia) come nuovo presidente eletto al quale diamo il nostro caldo benvenuto. Nella sua presentazione Luc Bergé ha messo in evidenza la sua seria intenzione di rafforzare la cooperazione con le società nazionali. La SIF appare nel suo elenco delle società nazionali molto attive con le quali collaborazioni più fattive gioveranno sicuramente all'EPS. Le elezioni per il comitato esecutivo hanno dato un risultato molto positivo per l'Italia che risulta essere ben rappresentata. Infatti è stato rieletto Eugenio Nappi (INFN, Bari) ed è stata eletta al suo primo mandato Roberta Caruso dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, ben nota in ambito EPS per aver presieduto molto bene il comitato Young Minds. A entrambi le nostre congratulazioni e auguri di buon lavoro.

Il docufilm "Una cattedra per Laura Bassi. Bologna 1732" ideato da Raffaella Simili e Miriam Focaccia, per la regia di Alessandro Scillitani, a cui ha dato un importante contributo anche Luisa Cifarelli, è stato trasmesso su RAI Storia il 12 maggio. Questo progetto di alta diffusione della cultura scientifica, nato dagli studi di un gruppo di storici della scienza dell'Ateneo bolognese, è stato reso possibile grazie al contributo che ha visto coinvolti, oltre all'Accademia delle Scienze e l'Università di Bologna, il Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi di Roma, la Sezione di Bologna dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, e, ultima ma non ultima, proprio la Società Italiana di Fisica. Una versione con sottotitoli in inglese è in preparazione. Per una breve descrizione del docufilm si rimanda all'articolo di Miriam Focaccia e Raffaella Simili in questo numero.

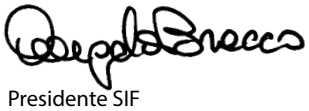
Per l'editoria vorrei evidenziare che è stato pubblicato il libro *Scientific Papers of Ettore Majorana – A New Expanded Edition* (curato da Luisa Cifarelli, e prodotto da SIF-Springer Nature) e la sua recensione è proprio in questo numero. Inoltre il volume *Laura Bassi – The World's First Woman Professor in Natural Philosophy* (SIF-Springer Nature) è nelle fasi finali di produzione. Siamo anche molto soddisfatti sia del successo della rivista EPJ Plus che quest'anno ha visto crescere ulteriormente il suo Impact Factor (ora 3.228) che della collaborazione con Springer Nature per la Rivista del Nuovo Cimento. Infatti da gennaio 2020, da quando gli *alerts* sono inviati anche da Springer, il numero di download per la RNC dei primi 6 mesi di quest'anno è quasi il doppio di quello dell'intero 2019.

Abbiamo formato un gruppo di lavoro per preparare il Congresso SIF 2020 su una piattaforma digitale e che quindi sta interagendo con la società commerciale che ha la professionalità adeguata per i nostri scopi. Questo gruppo di lavoro si occupa in particolare dei contenuti, della scelta delle immagini, dei programmi, dei CV dei relatori delle sedute plenarie e altro. Il CPO (Comitato Pari Opportunità) presieduto da Sara Pirrone ha fatto inoltre un' interessante proposta, ben accettata dal Consiglio di Presidenza, di associare a ogni aula virtuale anche una foto di una scienziata, non attualmente in vita, che ha lavorato nel campo di ricerca della corrispondente sezione. Per quanto riguarda la sottomissione dei sunti per le comunicazioni siamo lieti di constatare che c'è stato un aumento di circa il 20% rispetto al 2019. L'idea di avere rispetto allo scorso anno un fascicolo aggiuntivo de Il Nuovo Cimento C per comunicazioni selezionate si è dimostrata vincente e ha attratto in particolare i più giovani che con questo congresso hanno la possibilità di presentare i loro lavori di ricerca. Quest'anno la cancellazione di molte conferenze ha diminuito notevolmente la possibilità di presentare relazioni e quindi il congresso SIF sembra essere apprezzato anche per coprire questo deficit.

Ci siamo impegnati a garantire la nostra presenza, e in alcuni casi a contribuire con relazioni, a eventi organizzati da altre società e fondazioni con le quali abbiamo già solidi legami di collaborazione. Infatti abbiamo:
1) partecipato alla consegna dei premi della società FAST (a cui siamo associati) per progetti scientifici nelle scuole superiori;
2) partecipato presiedendo o coordinando tavoli di discussioni relativi alla fisica, chimica e matematica, del Convegno CRUI GEO (Napoli, 15-17 giugno 2020) su "Professione Insegnante: quali strategie per la formazione? "; 3) dato dei contributi, con due nostre relazioni, al Festival della Luce organizzato dalla Fondazione Alessandro Volta di Como, quest'anno dedicato al Sole. Tutte le attività qui menzionate, sulle quali intendiamo ritornare a parlare più in dettaglio successivamente, hanno avuto una buona diffusione da parte della stampa.

Infine voglio sottolineare che abbiamo potenziato la nostra presenza sui social networks in quanto la SIF è ora presente anche sui canali Twitter e Linkedin. Questo grazie al prezioso lavoro del nostro consigliere Antigone Marino. Con questa aumentata visibilità nei social networks contiamo di rafforzare i nostri rapporti con la comunità dei fisici e fornire un servizio migliore.

Concludo esprimendo un desiderio, sicuramente comune a tutti voi, che è quello di continuare a lavorare in futuro così alacremente, o anche più, ma anche stringendoci al più presto la mano!



Presidente SIF

Dear members and dear readers,

by consulting our web page and SIF Prima Pagina, you can realise that, despite the difficulties related to the lock-down for COVID-19, the SIF has carried out its various activities with the usual great commitment, and also all our meetings of the management board were held regularly in the past months, obviously via video. So this editorial informs you very briefly about some of the highlights of the activities.

The latest news on the international connections of SIF concern the signing of a collaboration agreement with the Japanese Physical Society and the participation by Luisa Cifarelli and myself in the CISA ("Committee on International Scientific Affairs") meeting of the American Physical Society. I remind you that our relationships with APS are of importance as Luisa Cifarelli is also currently the president of the APS Forum on International Physics (FIP). At the CISA meeting a review was made of the ongoing initiatives and activities aimed at strengthening the interaction between researchers and institutions in different regions of the world in order to facilitate access to scientific information and its exchange. Among the recently completed projects, there is also the African Physics Newsletter (`https://www.primapagina.sif.it/article/982`) for which help has been requested to the national physical societies in Europe to increase its dissemination and expand its content.

As a learned society associated with the European Physical Society, we participated in the vote of the new president and members of the Executive Committee of EPS, a vote that took place at the last meeting of the EPS Council. The election decreed Luc Bergé (CEA, France) as the new elected president and we warmly welcome him. In his presentation Luc Bergé highlighted his serious intention to strengthen cooperation with national societies. SIF appears in his list of very active national societies with which more effective collaborations will be certainly beneficial to EPS. The elections for the executive committee gave a very positive result for Italy which is well represented. In fact, Eugenio Nappi (INFN, Bari) was re-elected and Roberta Caruso of the University of Naples Federico II, well known by EPS for having chaired the Young Minds committee, was elected in her first term. To both our congratulations and best wishes.

The docufilm "A Chair for Laura Bassi. Bologna 1732" realised by Raffaella Simili and Miriam Focaccia, directed by Alessandro Scillitani, and to which Luisa Cifarelli also made an important contribution, was broadcast on RAI Storia on 12 May. The project, born from the studies of a group of historians of science from the University of Bologna, was made possible thanks to the contribution that involved, in addition to the Academy of Sciences and the University of Bologna, the Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi", Rome, the Bologna Section of the National Institute of Nuclear Physics, and, last but not least, the Italian Physical Society. A version of the docufilm with English subtitles is in preparation. A brief description of the docufilm is given in the article of Miriam Focaccia e Raffaella Simili in this issue.

Within our editorial activities, I would like to inform that the book *Scientific Papers of Ettore Majorana - A New Expanded Edition* (edited by Luisa Cifarelli, SIF-Springer Nature) has been published and its review is in this issue. In addition, the volume *Laura Bassi - The World's First Woman Professor in Natural Philosophy* (SIF-Springer Nature) is in the final stages of production. We are also very satisfied with the success of the EPJ Plus journal, which this year has seen another increase of its Impact Factor (now 3.228), and for the excellent collaboration with Springer Nature for the Rivista del Nuovo Cimento. In fact, since January 2020, when the alerts started to be also sent also by Springer, the number of download of the issues of the RNC in the first 6 months of this year was about twice as much as that of the entire year 2019.

We have formed a working group to prepare the SIF 2020 Congress on a digital platform and which is therefore interacting with the commercial company that provides the appropriate professionalism for our purposes. This working group deals in particular with the content and choice of images, programs, CV of the speakers of the plenary sessions and more. The CPO (Committee for Equal Opportunities) chaired by Sara Pirrone made an interesting and well accepted proposal, to associate to each virtual classroom also a photo of a female scientist, not currently alive, who worked in the research field of the corresponding session. As for the submission of abstracts for communications, we are pleased to note that there is an increase in submission of about 20% compared to 2019. The idea of having, as compared with last year, an additional issue of the Il Nuovo Cimento C has proved to be successful and has attracted in particular more young people who can present their research works. The cancellation of many conferences this year has significantly reduced the possibility of giving talks and therefore the SIF congress seems to be appreciated also to cover this deficit.

We were engaged in participating, and in contributing with reports, in events organized by other societies and foundations with which we already have collaborative ties. In fact, we participated in the delivery of the FAST prizes for scientific projects in high schools, we participated in chairing and summarising discussion tables at the CRUI GEO Conference (Naples, 15-17 June 2020) on "Teacher Profession: what strategies for training? ". We also made contributions, with two short reports, to the Festival of Light organised by the Alessandro Volta Foundation in Como, this year devoted to the Sun. All the activities mentioned here, on which we might return with more details later on, have had a good dissemination by the press. Finally, I would like to inform you that we have enhanced our presence on social networks since the SIF is now also present on the Twitter and Linkedin channels. This is thanks to the precious work of Antigone Marino. With this increased visibility in social networks, we hope to strengthen our relationships with the community of physicists and to provide a better service.

I conclude by expressing my desire, certainly common to all of you, to continue in the future to work hard, but also to shake hands as soon as possible!

Angela Bracco
SIF President

50 YEARS WITH THE GIM MECHANISM

ANTONIO DAVIDE POLOSA
Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia

The title of this article is taken from the name of the conference that should have been held in Rome, at Sapienza University, in April 2020, canceled due to the health emergency. We intended to make a written report of what we learned directly from the protagonists of the discovery whose 50th anniversary occurs this year. While waiting to reorganize the event in 2021, we offer the reader a brief illustration, for non-specialists, of the GIM mechanism, from the famous result of Sheldon Glashow, John Iliopoulos and Luciano Maiani.

50 ANNI DEL MECCANISMO GIM

Argomenti di questa importanza [1] non vanno considerati come di stretta competenza di un campo altamente specializzato, quale è la moderna fisica teorica delle particelle elementari. In altre parole, il meccanismo GIM non appartiene al bagaglio di "technicalities" per specialisti ma è una scoperta di fisica fondamentale, parte della migliore teoria che abbiamo, il Modello Standard delle particelle elementari, come lo sono l'angolo di mixing di Cabibbo [2] e il meccanismo di rottura spontanea della simmetria, di Nambu, Goldstone e Jona-Lasinio [3].

Nel 2012 il CERN ha annunciato la scoperta sperimentale del bosone di Higgs, la particella mancante per completare lo schema della teoria unificata elettrodebole. Quanto segue è un tentativo di mostrare il ruolo che ha avuto il meccanismo GIM nell'innescare la catena di conseguenze logiche che hanno portato al Modello Standard nella sua forma attuale.

Per fare una rassegna di questo genere è difficile decidere cosa dare per scontato e quali aspetti necessitino di maggiori commenti, ma c'è una semplificazione, che è conseguenza della portata scientifica dell'argomento che si vuole trattare. Spesso i progressi profondi sono più facili da raccontare dei, seppur essenziali, avanzamenti tecnici o dei vari passaggi interlocutori che mantengono in moto la comunità scientifica.

L'articolo GIM è apparso nel 1970. La teoria "V-A" delle interazioni deboli [4] era già consolidata da tempo, come pure l'angolo di Cabibbo, di cui parleremo. I primi passi nella costruzione di una teoria unificata delle interazioni deboli ed elettromagnetiche erano stati compiuti da Glashow [5], seguendo delle idee iniziali di Schwinger [6], e da Weinberg [7] e Salam [8] che avevano proposto un modello di unificazione "elettrodebole" nel settore dei leptoni. In questo schema mancavano gli adroni.

Gli adroni sono particelle composte soggette all'interazione forte. Sappiamo che sono costituiti dai quark, particelle subnucleari dotate di un tipo di carica, chiamata colore, e di carica elettrica frazionaria. All'epoca dell'articolo di GIM i quark non erano comunemente accettati. Molti fra i teorici più brillanti del mondo non credevano alla loro esistenza e erano dediti allo studio di un programma chiamato teoria della matrice-*S* analitica, che si estinse, (quasi) del tutto, solo dopo la scoperta della J/ψ nel 1974. Molti fra gli studiosi della matrice-*S* confluirono nella teoria delle stringhe. Possiamo dire che il meccanismo GIM, la "libertà asintotica" e quanto imparato dalla scoperta sperimentale della J/ψ rivoluzionarono la fisica delle particelle elementari riportandola nel territorio della teoria quantistica dei campi. Iniziamo questa discussione dal modello a tre quark.

1 Quark e leptoni

I quark up (u) e down (d) sono i costituenti della materia nucleare. Si distinguono per il numero quantico noto come isospin I_3. Il valore di I_3 del quark u è $I_3(u)=+1/2$ mentre per il down $I_3(d)=-1/2$. Per registrare questa differenza, i due quark possono essere disposti in un "doppietto", la cui parte alta corrisponde convenzionalmente a $I_3=+1/2$ e quella bassa a $I_3=-1/2$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L . \tag{1}$$

Nella teoria quantistica dei campi, le particelle, a differenza dei campi, non sono enti permanenti, e possono essere *create* e *distrutte*. Il quark d può essere distrutto e un quark u può essere creato al suo posto. Questo equivale ad una transizione all'interno del doppietto precedente. Data la differenza di carica elettrica fra le due particelle − il down ha carica −1/3 mentre l'up ha +2/3, in unità del valore assoluto della carica dell'elettrone − è necessario che un elettrone venga prodotto assieme al quark up in modo da conservare la carica elettrica: $+2/3-1=-1/3$. Nella moderna teoria delle interazioni deboli, le transizioni da d a u (e viceversa) sono descritte dalla emissione dei bosoni vettoriali, a spin 1, che prendono il nome di W^-. La particella W^- decade istantaneamente in un elettrone e in un antineutrino. Questo è il meccanismo alla base del decadimento β del neutrone e del decadimento dei pioni π carichi.

Il pedice L, posto alla base del doppietto in (1), serve a ricordare che l'interazione debole seleziona le particelle con *chiralità* sinistrorsa, o "*Left*", come discende dalla teoria V-A. Per i leptoni, si introduce ugualmente un doppietto di isospin: per l'elettrone e il suo neutrino abbiamo

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e^- \end{pmatrix}_L .$$

Questo stabilisce la corrispondenza fra leptoni e quark che è alla base della teoria moderna delle particelle elementari.

Per illustrare brevemente l'importanza della chiralità con un esempio, ricordiamo che nel decadimento del pione positivo $\pi^+\to e^+\nu$ il neutrino viene scelto dalla interazione debole con chiralità L mentre al positrone spetta la chiralità R (l'antiparticella prende la chiralità opposta). Guardiamo questo decadimento nel sistema di riposo del pione. Positrone e neutrino volano via in direzioni opposte per conservare il tri-momento nullo del pione, l'uno con chiralità R e l'altro con L. Tuttavia la chiralità[1] corrisponde, nella approssimazione in cui si possa mettere a zero la massa dei fermioni, al valore dello spin nella direzione del moto, anche noto come *elicità*. Siccome il pione pesa 140 MeV, mentre l'elettrone solo 0.5 MeV e il neutrino O(eV), è una buona approssimazione trascurare la loro massa. L'equivalenza elicità/chiralità comporta che R corrisponda al caso in cui lo spin è orientato lungo la direzione di volo e L al caso opposto. Siccome positrone e neutrino, che hanno entrambi spin 1/2, viaggiano spalla a spalla, vorrà dire che la proiezione totale dello spin è ±1 (a seconda di come si orienta l'asse lungo il quale e^+ e ν rinculano). Ma questo risultato non è consistente, perchè il pione ha spin 0 e il momento angolare deve conservarsi. Quindi il decadimento sarebbe proibito dalla conservazione del momento angolare[2], fintanto che si considera l'approssimazione in cui il positrone è privo di massa. Dalla piccola massa del positrone segue un piccolo rate di decadimento $\pi^+\to e^+\nu$.

Le particelle elementari hanno dunque sia una componente *left* che una *right*, e c'è una ampiezza di probabilità proporzionale alla massa di passare dall'una all'altra. Le componenti left sono in doppietti di isospin, come (1). L'elettrone *right,* come pure u_R e d_R, non hanno isospin, e non c'è evidenza di un neutrino *right*[3]. Quindi si tiene traccia della chiralità perchè un elettrone o un quark che intervengono in un processo debole devono essere di tipo L, anche se c'è una ampiezza finita, e proporzionale alla massa, che la chiralità si trasformi da L in R.

[1] La chiralità è l'autovalore della matrice di Dirac γ_5. Per una particella senza massa, l'equazione di Dirac nello spazio dei momenti è $\gamma^\mu p_\mu \Psi=0$. Se la particella si muove lungo l'asse z abbiamo dunque $\gamma^0\Psi=\gamma^3\Psi$. L'elicità h, ovvero la proiezione dello spin nella direzione del moto è data dall'operatore $h=i\gamma^1\gamma^2=\mathrm{diag}(\sigma_3,\sigma_3)$ con $h\Psi=\pm1\Psi$. Dunque $h\Psi=i\gamma^1\gamma^2\Psi=i(\gamma^0)^2\gamma^1\gamma^2\Psi=i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^0\Psi=i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3\Psi=\gamma^5\Psi$.

[2] Tuttavia, la piccola massa del positrone funziona come un debole accoppiamento fra le componenti R e L. Questo permette di dare al positrone chiralità L e rendere possibile il decadimento, al prezzo di un *rate* molto basso.

[3] Oppure di un antineutrino *left*.

2 L'angolo di Cabibbo

Le particelle contenute nel doppietto in (1) non sono sufficienti per spiegare il comportamento degli adroni con stranezza − quelli contenenti il quark *strange* (*s*) − che cominciavano a proliferare negli esperimenti degli anni cinquanta e sessanta noti come kaoni e iperoni.

Il quark *s* ha la stessa carica del quark *d*, ovvero −1/3. Secondo la teoria di Cabibbo, il quark strano non sta per conto suo: si deve generalizzare la struttura della (1) per includerlo. Al posto del campo del quark *d*, bisogna utilizzare una opportuna *combinazione lineare* dei campi dei quark *d* e *s* descritta dal parametro θ, noto come angolo di Cabibbo

$$\begin{pmatrix} u \\ d\cos\theta + s\sin\theta \end{pmatrix}_L \tag{2}$$

che sperimentalmente si trova essere tale che $\sin\theta \sim 1/5$.

I processi in cui si conserva la stranezza, nei quali il numero di quark *s* è lo stesso in entrambi i membri della reazione (per esempio 0 come nella trasformazione $d \to u$), hanno ampiezze proporzionali a $\cos\theta$, mentre quelli in cui *s* viene distrutto a favore di *u* sono proporzionali a $\sin\theta$. Questo è quanto possiamo leggere nella ipotesi (2). Quindi i processi elementari con cambiamento di stranezza sono meno probabili per un fattore $\tan^2\theta \sim 1/19$ rispetto a quelli che conservano la stranezza: una importante conseguenza della ipotesi (2). Prendiamo la transizione $d \to u$ per esempio. Nella formulazione lagrangiana della teoria delle interazioni deboli compare un termine di interazione del tipo[4]

$$\mathcal{L}_I = gW^\mu J_\mu ,$$

dove il campo vettoriale delle particelle cariche[5] $W^\pm$ si "accoppia" all'operatore corrente che descrive matematicamente il processo di distruzione di un quark e di creazione di un quark con emissione (assorbimento) di un $W^-(W^+)$

$$J_\mu = \cos\theta\, \bar{u}\gamma_\mu(1-\gamma_5)d = \cos\theta\, \bar{u}_L\gamma_\mu d_L ,$$

dove abbiamo incluso l'angolo di Cabibbo come indicato dalla (2).

L'idea di Cabibbo di descrivere la fenomenologia dei decadimenti di mesoni e barioni "strani" in questo modo era in accordo con molti dati allora noti, ma confliggeva nettamente con alcuni, in particolare con un evento di decadimento di iperone in camera a bolle. Tuttavia, la teoria gli deve essere sembrata più convincente dei dati stessi, e la pubblicò nel 1962. Più tardi si scoprì che i dati in disaccordo erano sbagliati, confermando che (2) fosse la strada corretta da seguire. Si narra che un ruolo nel rafforzare questa convinzione sia stato svolto dall'amico Paolo Franzini, che stava lavorando sulla analisi sperimentale di decadimenti di adroni con stranezza. Franzini non trovava gli eventi avversi alle conclusioni di Cabibbo. Gell-Mann, che evidentemente non aveva uno sperimentale di fiducia con le stesse informazoni, chiese anni dopo a Cabibbo "e tu come lo sapevi che quei dati erano sbagliati?". È cosa nota che Gell-Mann e Levy [9] avessero scritto una formula per il mescolamento fra *d* e *s* due anni prima di Cabibbo, ma evidentemente non erano sufficientemente convinti che quella fosse la maniera di descrivere la fenomenologia delle particelle strane[6] come invece emerge dal lavoro di Cabibbo. John Iliopoulos ebbe a commentare che "il lavoro di Cabibbo è uno di quei rari casi in cui non cambieresti una frase, nonostante siano intercorsi decenni dalla sua pubblicazione".

[4] Nella teoria lagrangiana dell'elettromagnetismo, l'interazione fra le cariche elettriche e il campo elettromagnetico A_μ è dello stesso tipo $\mathcal{L}_I = eA^\mu j_\mu$ dove $j_\mu = \rho dx_\mu/dt$, con ρ pari alla densità di carica elettrica.

[5] Scoperte da Carlo Rubbia al CERN nel 1983 e predette da Glashow più di venti anni prima.

[6] Altrimenti non avrebbero relegato la formula del mescolamento in una "footnote".

3 Correnti neutre

Come sa chi conosce già la fine della storia, questo è il momento di introdurre le correnti neutre. Nella formulazione del doppietto (2), oltre alle transizioni cariche $d \to u$ e $s \to u$, ci sarebbe anche una transizione "orizzontale" in cui il quark s è sostituito da un quark d. Questa è una transizione neutra che oggi sappiamo essere mediata dal bosone vettoriale Z^0, introdotto da Glashow nella sua prima proposta di teoria unificata elettrodebole. Tuttavia le correnti neutre non erano nella corde di tutti, e lo stesso Cabibbo non se ne preoccupava più di tanto. Le interazioni deboli, seppure nella versione trovata da Feynman e Gell-Mann, erano, per i più, delle interazioni di corrente carica, come nella teoria di Fermi.

Nel caso della transizione $s \to d$, l'ampiezza di probabilità suggerita dalla (2) è proporzionale a $\sin\theta\cos\theta$, quindi di nuovo a $\sin\theta$, data la piccolezza dell'angolo di Cabibbo. Però questo comporta la indesiderata conclusione che il decadimento[7]

$$\bar{K}^0 \to \mu^+\mu^-$$

è ben più grande di quanto misurato sperimentalmente. Volendo rappresentare questo processo con un diagramma a quark, abbiamo fig. 1.

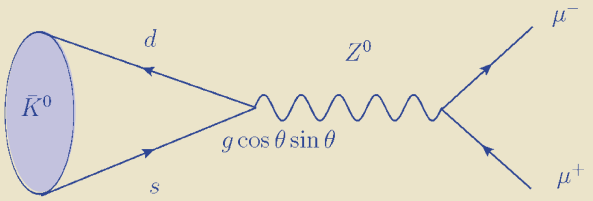


Fig. 1 Decadimento del kaone neutro in muoni.

Il processo di decadimento in questione sarebbe atteso a un *rate* simile a quello del decadimento del $K^+ \to \mu^+\nu_\mu$, cosa in ampia contraddizione con l'osservazione sperimentale: il *rate* del neutro è ordini di grandezza soppresso rispetto a quello del carico (5.5×10^{-8} volte più piccolo).

La maniera con cui si eludeva questo argomento era semplicemente quella di assumere che le correnti neutre non esistessero e che tuttalpiù si sarebbe dovuto individuare una tecnica per azzerarle nella teoria. In altre parole, non si aveva la sensazione che per eliminare le correnti neutre ci sarebbe stato bisogno di "nuova fisica"'. Il meccansimo GIM fa questo: risolve un problema fenomenologico con l'introduzione di nuova fisica. La fisica teorica è colma di tentativi fatti con questa filosofia. Meno frequenti sono i successi.
Una forte scossa venne dal lavoro di Ioffe e Shabalin [10], nel 1968. Semplificando la discussione, da questo articolo emergeva che si sarebbe anche potuto trovare il modo di eliminare il problema delle correnti neutre all'ordine più basso della teoria delle perturbazioni, ma queste sarebbero rientrate in processi a "loop" come quello in fig. 2.

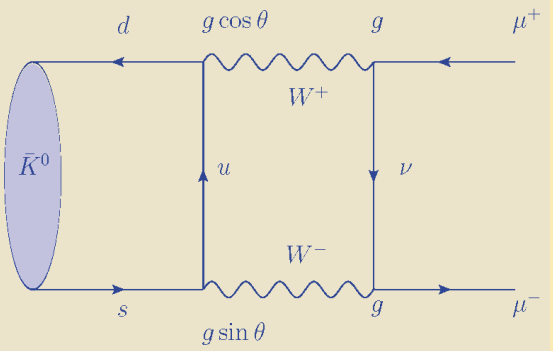


Fig. 2 Decadimento, a un loop, del kaone neutro in muoni.

Questa è una ampiezza *divergente*, ovvero infinita, se non si prendono delle misure drastiche per curarla. In altre parole, non si sa calcolare questa ampiezza, ma certo non si può assumere che sia trascurabilmente piccola.

In questo diagramma si possono individuare due "loop": uno che coinvolge il kaone e uno che comprende solo il "box" con i fermioni e i bosoni vettoriali intermedi *W*. Sia q il quadrimomento che corre in quest'ultimo con valori arbitrari. A ognuno degli infiniti impulsi possibili

[7] Similmente si avrebbe un *rate* troppo grande per le oscillazioni K^0-$\bar{K}^0$.

corrisponde un valore della ampiezza. Abbiamo qundi infinite ampiezze indistinguibili. Una per ogni valore delle componenti di q. Bisogna tenerle in conto tutte, sommandole. Questo equivale a fare un integrale su tutte e quattro le componenti di q. Se la funzione integranda fosse 1, avremmo il risultato Λ^4, dove Λ è il valore più grande che può essere assunto dall'estremo di integrazione sul modulo del momento, euclideo. Ma visto che tutti i valori di q sono permessi, Λ è infinito, da cui la divergenza.

Il loop che coinvolge il kaone viene rinormalizzato dalle interazioni forti, ovvero risulta finito. Si racconta che Steven Weinberg avesse delle riserve sulla calcolabilità di questo processo proprio a causa dei diagrammi a loop e del ruolo delle interazioni forti nel loro calcolo. Come notato di recente da Frank Wilczeck, in un seminario proprio sul meccanismo GIM, "*taking loops seriously was especially bold, since even the tree diagrams were insecure*".

Torniamo alla stima del grado di divergenza del diagramma precedente. I vettori W, essendo virtuali, possono avere tutte le polarizzazioni possibili, e quindi bisogna sommarle. Per stabilire il grado di divergenza, consideriamo solo il termine più divergente, prendendo a numeratore dei propagatori il termine longitudinale dalla somma sulle polarizzazioni. L'ampiezza risulta proporzionale a

$$\mathcal{A} \sim g^4 sc \int \mathrm{d}^4 q \frac{(q^\mu q^\nu)^2}{m_w^4 (q^2 - m_w^2)^2} \frac{1}{(\gamma^\mu q_\mu - m)^2} \sim sc\, G_F^2 \Lambda^2$$

(contando le potenze di q: d=4+4−4−2=2) dove "sc" sta per $\sin\theta\cos\theta$ e $g^2/m_W^2 \sim G_F$, la costante di Fermi. In questa formula, Λ è il cut-off ultravioletto che si pone come valore massimo che q può assumere, "regolarizzando" l'integrale. La massa m è riferita alla massa dei quark/neutrini nel loop.

Per mantenere il *rate* (proporzionale al quadrato della ampiezza) entro i valori sperimentali, occorrerebbe richiedere che

$$\Lambda \lesssim 3\ \mathrm{GeV}.$$

Per essere un cut-off ultravioletto si tratta di un numero piuttosto basso − come dire che c'era nuova fisica dietro l'angolo ma nessuno se ne era accorto[8]. Il ruolo del cut-off è proprio questo. La necessità di introdurne uno, come nel caso precedente, è sintomo del fatto che non si conoscono le regole dinamiche che intervengono a scale di energia superiori a Λ.

4 Il meccanismo GIM

La soluzione di Glashow, Iliopoulos e Maiani (GIM) al problema di dover introdurre un cut-off arbitario (e particolarmente basso) consiste nell'ottenere la piccola ampiezza di transizione, richiesta dalla osservazione, con un meccanismo dinamico, senza cut-off. Per fare questo, è sufficiente introdurre un nuovo quark, il charm (c), sul quale Glashow e Björken [11] avevano già ragionato, sebbene con risultati fenomenologici inconcludenti. Vediamo come.

Per tenere conto del quark c, bisogna teorizzare l'esistenza di un nuovo doppietto, simile a quello in (2), in cui il charm occupa la stessa posizione del quark u (isospin +1/2, stessa carica elettrica +2/3). Si assume inoltre che siano possibili transizioni fra il charm e i quark s e d, nella stessa misura in cui sono possibili le transizioni fra u e i quark s e d. Tuttavia, la combinazione lineare dei campi d ed s deve essere scelta opportunamente, in modo tale da annullare, come vedremo, le correnti neutre con cambiamento di stranezza. La proposta di GIM è la seguente:

$$\begin{pmatrix} c \\ -d\sin\theta + s\cos\theta \end{pmatrix}_L \tag{3}$$

che confrontiamo con il doppietto (2) di Cabibbo

$$\begin{pmatrix} u \\ d\cos\theta + s\sin\theta \end{pmatrix}_L . \tag{2}$$

[8] Uno studio dettagliato delle correnti neutre con cambiamento di stranezza fu fatto in [16] giungendo a una stima del valore della massa del charm attorno a $m_c \simeq 1.5$ GeV.

Per capire come la (3) permetta, insieme alla (2), di annullare le correnti neutre con cambiamento di stranezza, ripartiamo dalla teoria a tre quark di Cabibbo e dalla corrente debole carica che si accoppia al W (emette W^- o assorbe W^+)

$$J_\mu^- = \bar{u}_L \gamma_\mu (d_L \cos\theta + s_L \sin\theta) \quad , \tag{4}$$

il cui primo termine interviene nel decadimento β del neutrone di cui abbiamo parlato sopra. Scriviamo (4) nella forma più compatta

$$J_\mu^- = \bar{q}_L \gamma_\mu C q_L \tag{5}$$

introducendo la matrice C tale che

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{con} \quad q = \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Per ottenere la corrente con passaggio di carica opposto, si deve prendere l'hermitiana coniugata di (5). Per le note regole di hermitiana coniugazione, questa è data da

$$J_\mu^+ = \bar{q}_L \gamma_\mu C^\dagger q_L \tag{7}$$

e descrive le transizioni da $u \to d$ o da $u \to s$, con emissione/assorbimento di W. Queste sono pesate, rispettivamente, da $\cos\theta$ e $\sin\theta$, come nel caso di J^-. La matrice hermitiana coniugata $C^\dagger$ corrisponde alla trasposta della matrice C definita nella (6).

Allo stesso modo nel quale C e $C^\dagger$, individuano J^- e J^+, usando l'analogia con la teoria del momento angolare[9] in meccanica quantistica (l'algebra di $SU(2)$), desumiamo che il commutatore $[C^\dagger, C]$ sia associato alla corrente neutra[10] J_3

$$J_{3\mu} = \bar{q}_L \gamma_\mu [C^\dagger, C] q_L \tag{8}$$

e che le correnti J^+, J^- e J_3 formino un'algebra di $SU(2)$.

Il commutatore $[C^\dagger, C]$, che si calcola dal prodotto $C^\dagger C - C C^\dagger$, è

$$[C^\dagger, C] = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2\theta & \cos\theta\sin\theta \\ 0 & \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix}. \tag{9}$$

I termini fuori dalla diagonale sono legati proprio alle correnti neutre con cambiamento di stranezza, altamente indesiderate. Per sopprimerle bisogna trovare uno schema in cui questi termini siano assenti.

Con la introduzione del nuovo quark c, come suggerito da GIM, sostituiamo

$$q = \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} u \\ c \\ d \\ s \end{pmatrix}, \tag{10}$$

in cui la disposizione dei quark è tutt'altro che casuale. Questa modifica comporta che anche la matrice C vada sostituita con una matrice 4×4, che chiamiamo M, data da

$$M \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{0} & R(\theta) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \tag{11}$$

dove $R(\theta)$ è una ordinaria matrice ortogonale di rotazione

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix},$$

mentre con il simbolo $\mathbf{0}$ si intende una matrice di zeri, 2×2. La struttura di $R(\theta)$ rispecchia le combinazioni lineari scelte nelle componenti basse dei doppietti (2) e (3). Infatti, svolgendo il prodotto riga per colonna $M \cdot q$ (dove q è quello introdotto in (10)), e sostituendolo al posto del prodotto $C \cdot q$ nella (5), seguono proprio le *due* correnti cariche

$$J_\mu^- = \bar{u}_L \gamma_\mu (d_L \cos\theta + s_L \sin\theta), \tag{5}$$

già nota, la (5), e la nuova

$$J_\mu^- = \bar{c}_L \gamma_\mu (-d_L \sin\theta + s_L \cos\theta), \tag{5'}$$

come prescritto dalla (3). A questa conclusione saremmo potuti arrivare direttamente dalla definizione stessa del doppietto in (3), senza bisogno di passare dalla matrice 4×4 che abbiamo chiamato M. Il significato di M emerge chiaramente quando si vuole costruire la corrente neutra.

Costruiamo dunque la corrente neutra. Al posto di $[C^\dagger, C]$ si prenda $[M^\dagger, M]$. La corrente neutra J_3 che ne deriva, come è facile provare usando l'ortogonalità di R ($R^T R = R R^T = 1$), *non ha termini fuori dalla diagonale*. Questo significa che non sono possibili transizioni neutre con cambiamento del *flavor dei quark,* all'ordine più basso della teoria delle perturbazioni. Come mostrato da Ioffe e Shabalin però, bisognava ancora tenere sotto controllo le correnti con cambiamento di stranezza che derivano dalle correzioni quantistiche. A questo punto, solo queste possono spiegare come mai il *rate* del kaone in muoni è piccolo, ma non nullo.

[9] Ricordiamo che $J^\pm \equiv J_1 \pm i J_2$.

[10] A parte un fattore 1/2 da $[J^+, J^-] = 2J_3$, che non cambia le conclusioni che vogliamo raggiungere.

5 Fluttuazioni quantistiche

Il piccolo *rate* dei kaoni neutri in muoni misurato può essere spiegato studiando proprio le correzioni quantistiche e aggiungendo alla ampiezza di Ioffe e Shabalin, riportata sopra, una seconda ampiezza, come nello schema dato dai diagrammi[11] in fig. 3.

Oltre al quark up dobbiamo tenere conto del charm. Stesso spin isotopico e carica. Abbiamo dunque due *alternative*: quella che passa per il quark *u* (a sinistra, già vista in precedenza) e quella che invece passa per il quark *c* (a destra). Le due alternative sono indistinguibili perchè i quark diversi, *c* e *u*, entrano solo come particelle virtuali. Bisogna pertanto sommare le ampiezze, e osservare che i segni che compaiono accanto agli accoppiamenti, dettati da (2) e (3), mostrano che se i quark *c* e *u*, oltre ad avere la stessa carica, avessero la stessa massa, si realizzerebbe una perfetta cancellazione che riporterebbe a zero il rate di decadimento – un'interferenza distruttiva. Il *rate* sarebbe quindi zero all'ordine più basso della teoria delle perturbazioni, e zero anche all'ordine successivo (in contraddizione con l'osservazione). L'introduzione del quark charm fornisce un meccanismo di cancellazione fra le due ampiezze che elimina la necessità di un cut-off: basta che i *coupling* siano presi con i segni giusti, come in (3). Inoltre non è affatto detto che il *charm* abbia la stessa massa del quark *up e* l'interferenza distruttiva potrebbe essere solo parziale.

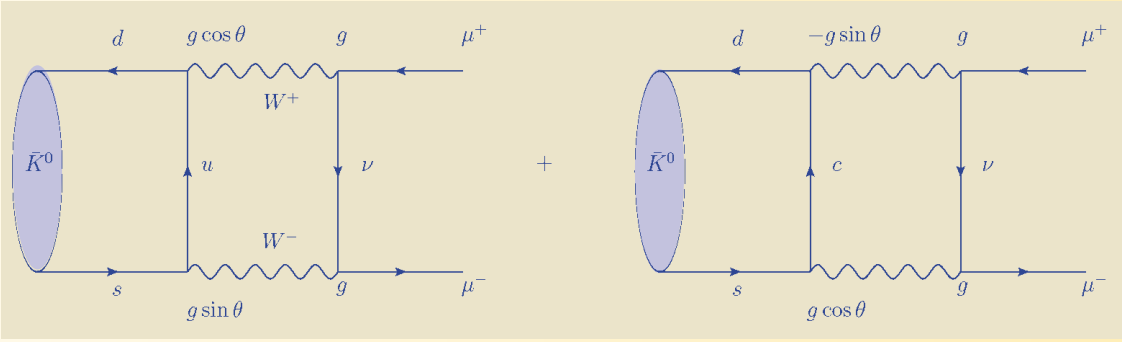


Fig. 3 Le due ampiezze che interferiscono nel decadimento del kaone neutro in muoni.

Nel mondo reale infatti, *u, d, s* hanno masse diverse e ci si può aspettare che anche *c* abbia massa diversa. Le masse dei quark, come pure l'angolo di Cabibbo, in realtà non sono calcolabili teoricamente, per quanto ne sappiamo oggi, ma sono parametri del modello standard, conclusione alla quale si giunse di lì a poco.

Prendiamo la differenza di massa $m_c - m_u$ come il parametro che rende incompleta la cancellazione.

Il calcolo del *rate* vero e proprio, espresso dalle due ampiezze date sopra, non è facile, richiede di dare un significato alle masse dei quark legati in un mesone e varie altre complicazioni. Tuttavia, possiamo fare una stima sostituendo nella ampiezza $\mathcal{A} \sim G_F^2 \Lambda^2$ il cut-off Λ, relativo alla ampiezza con il solo quark up, con Δm. Entrambi, Λ e Δm fanno la stessa cosa, portare il *rate* al valore sperimentale. Il cut-off è semplicemente *ad hoc*, mentre il meccanismo GIM offre la spiegazione di quali siano i processi microscopici che rendono piccolo il *rate* di decadimento in questione. Per GIM se $\Delta m = 0$, anche il *rate* è nullo. Scambiando dunque Λ con Δm si trova

$$\Delta m \lesssim 3\ \text{GeV}\,. \tag{14}$$

Questa è una predizione brillantemente confermata dalla scoperta dello stato legato $c\bar{c}$, meglio noto come J/ψ, a 3.1 GeV di massa! Quindi, effettivamente, la nuova fisica era proprio dietro l'angolo.

[11] Dalla teoria di Cabibbo erano passati otto anni e Glashow, Iliopolous e Maiani avevano girato attorno a questi problemi molte volte. Fra le varie cose fatte, Cabibbo e Maiani, seguendo una convinzione condivisa da Gatto, avevano variamente elucubrato sulla possibilità che l'angolo potesse essere determinato teoricamente portando a un altro livello la comprensione delle correnti neutre. L'idea di GIM sorpassò tutti questi tentativi.

6 La J/ψ

La J/ψ è solo lo stato fondamentale di una torre di eccitazioni radiali e orbitali che costituiscono uno spettro molto studiato e conosciuto. Da una quindicina d'anni a questa parte, il "charmonio" è tornato di grande interesse con la scoperta della $X(3872)$, una risonanza anomala che di sicuro contiene $c\bar{c}$, ma che decade violando l'isospin come non ci si aspetta da un charmonio standard. La discussione sulla natura multiquark di questa particella si protrae da tempo.

La J/ψ si presenta anch'essa con una peculiarità sorprendente. Ha una larghezza totale incredibilmente stretta per un adrone così pesante. Questa è in buona misura la firma della libertà asintotica – una proprietà fondamentale delle interazioni forti. Il decadimento in adroni della J/ψ (fig. 4) deve passare attraverso la distruzione del charm in uno stato a più gluoni, che infine si convertono in adroni comuni.

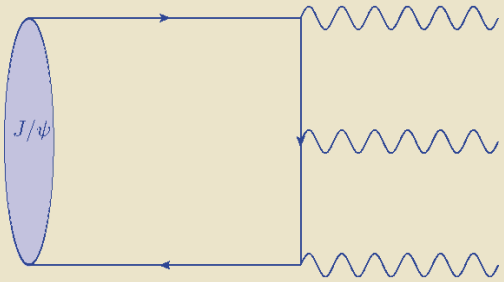


Fig. 4 Decadimento adronico della J/ψ.

Il minimo numero di gluoni permesso è tre! (due andrebbero anche bene per conservare il 4-momento, ma non portano i numeri quantici giusti – la coniugazione di carica deve essere −1, dato che tale è la coniugazione di carica della J/ψ). Tre gluoni richiedono che l'ampiezza sia cubica nel coupling forte e quindi che la probabilità di decadimento sia cubica in α_s. Ma, come si è trovato, c'è una differenza di scala di energia nell'ordine dei GeV quando compaiono particelle con charm, e $\alpha_s(\mu)$ cambia con la scala μ diventando ≈ 0.3 alla massa del charm. Questa è dovuto alla libertà asintotica scoperta da Gross, Wilczeck e Politzer [12, 13], e indipendentemente discussa da 't Hooft: $\alpha_s(\mu)$ diminuisce al crescere di μ.

La scoperta sperimentale della risonanza J/ψ stimolò una gran quantità di lavori teorici sulla interpretazione del risultato, di gran lunga superiore a quelli sperimentali, come illustrato nella vignetta di Jackson, dove si gioca sull'accostamento dei picchi della J/ψ e della $\psi(2S)$ (una ricorrenza radiale del charmonio). Capire che la J/ψ fosse proprio lo stato legato del nuovo quark charm che dava luogo al meccanismo GIM non era una cosa ovvia neanche per chi aveva fatto GIM. Come fa un adrone con una massa così grande a decadere per interazione forte in adroni con un *rate* così piccolo come quello misurato? Non è un caso che Politzer, uno dei tre che avevano scoperto la libertà asintotica, fosse anche uno dei firmatari dell'articolo che

per primo propose l'interpretazione corretta della J/ψ. Sperimentali come Ting e Richter si limitavano a presentare con grande precisione i dati, senza lasciare entrare nei loro lavori alcuna interpretazione, nè loro nè di terzi, come invece sembra accadere sempre più spesso. Questo lasciava campo libero ai teorici di montare quella montagna di lavori che vediamo nella vignetta di Jackson.

Ricapitolando: il quark charm doveva apparire a una massa attorno a pochi GeV, e questo è quello che è successo. I mesoni e i barioni con un solo quark charm sono stati osservati, quali i mesoni D e il barione Λ_c. Questi decadono secondo la prescrizione nella (3): il decadimento $c \to s$ (Cabibbo favorito) è molto più frequente di quello $c \to d$ (Cabibbo soppresso). Grazie al meccanismo GIM le correnti neutre con cambiamento di stranezza non sono più un problema e la conferma del charm ottenuta con la J/ψ è anche la prova, indiretta, della libertà asintotica. Inoltre emerge una corrispondenza stretta tra quark e leptoni, con una "generazione" leggera

$$u,\ d,\ \nu_e,\ e^-$$

e una generazione pesante

$$c,\ s,\ \nu_\mu,\ \mu^-.$$

Con la scoperta del leptone τ, questa simmetria quark-leptoni venne momentaneamente compromessa, per essere poi ripristinata con la scoperta dei quark *beauty* (*b*), nel 1977, e del *top* (*t*), nel 1995, entrambi a Fermilab.

Gli argomenti che abbiamo ripercorso fino a qui sono radicati nel modo di pensare delle fisica teorica delle particelle elementari moderna e si possono trovare, in forme analoghe, in altri contesti. Si pensi alle correzioni quantistiche alla massa del bosone di Higgs. Queste non possono essere più grandi della massa stessa misurata m_H

$$G_F f(m_W,\ m_Z,\ m_t,\ m_H)\Lambda^2 \lesssim m_H^2,$$

dove Λ è il cut-off ultravioletto oltre il quale ci si può attendere fenomeni di nuova fisica mentre la funzione f delle masse, che si calcola nel Modello Standard, ha dimensione di massa M^2. Un bosone di Higgs da ≈100 GeV richiede che

$$\Lambda \approx O(1)\ \text{TeV},$$

come dire che ci deve essere nuova fisica al TeV, usando lo stesso modo di ragionare che portava a ritenere che il cut-off di Ioffe e Shabalin stava indicando nuova fisica a 3 GeV – la fisica del charm! Se si usasse un cut-off molto più alto si dovrebbe presupporre una cancellazione molto fine nel calcolo di f, al punto da definirla "innaturale". La Supersimmetria protegge la massa di uno scalare come l'Higgs mettendola in relazione alla massa fermionica[12]. Per una Supersimmetria non realizzata esattamente, il valore del cut-off Λ va preso dalla massa della particella supersimmetrica più leggera.

Questo solo per ricordare che il meccanismo GIM rappresenta anche una lezione di metodo in fisica teorica delle particelle, vista l'onnipresenza di ragionamenti da esso ispirati.

7 La terza generazione

Con la scoperta della nuova generazione di quark e leptoni

$$t,\ b,\ \nu_\tau,\ \tau$$

noti come *top, beauty, neutrino-τ e τ,* per fare spazio ai due nuovi quark, è necessaria una riformulazione dello schema. Oltre al mescolamento di Cabibbo dei quark *d, s* ci si può aspettare un mescolamento anche con il quark di uguale carica elettrica *b*: questo porterebbe naturalmente a tre angoli di mescolamento. Di primo acchito potremmo scrivere, ricalcando quanto fatto fino ad ora,

$$\begin{pmatrix} u \\ dV_{ud} + sV_{us} + bV_{ub} \end{pmatrix}_L$$

e similmente

$$\begin{pmatrix} c \\ dV_{cd} + sV_{cs} + bV_{cb} \end{pmatrix}_L,$$

$$\begin{pmatrix} t \\ dV_{td} + sV_{ts} + bV_{tb} \end{pmatrix}_L,$$

generalizzando quanto già elaborato da Cabibbo e GIM, al caso a 6-quark. Questa formulazione è antecedente alla scoperta sperimentale vera e propria dei quark *t, b*. La teoria, ancora una volta, stava precorrendo i tempi.

In altri termini, possiamo osservare che la matrice bidimensionale R contenuta in (11) vada sostituita con una nuova matrice, 3×3, che chiameremo V, seguendo la notazione appena introdotta. Con V possiamo scrivere le correnti cariche come

$$J_\mu = (\bar{u}\,\bar{c}\,\bar{t})_L \gamma_\mu V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L \tag{15}$$

da usare al posto di

$$J_\mu = (\bar{u}\,\bar{c})_L \gamma_\mu R \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}_L \tag{16}$$

[12] La massa del bosone di Higgs risulta dell'ordine del cut-off perchè nella teoria standard non c'è modo di "aumentare" la simmetria azzerando la massa di uno scalare.

che corrisponde alle due correnti cariche (5) e (5′) ottenute precedentemente.

Nel passare dal caso della rotazione bidimensionale alle tre dimensioni, viene da pensare ai tre angoli di Eulero, al posto del singolo angolo di Cabibbo presente nella matrice di GIM. Tuttavia la matrice *V* più generale deve essere unitaria invece che reale, visto che i campi left (e quelli right) possono essere gratuitamente ridefiniti da trasformazioni unitarie[13]. Questa osservazione dovrebbe valere parimenti per la matrice *R*, che invece abbiamo scritto nella forma di una matrice di rotazione reale nel piano. Se in luogo di *R* avessimo pensato a una matrice *U* unitaria 2×2, avremmo potuto osservare che una forma generale di matrice unitaria 2×2 (a determinate unitario) è ottenuta attraverso gli angoli di Eulero α, β, γ come in[14]

$$U = e^{-i\gamma\sigma_3/2} e^{-i\beta\sigma_2/2} e^{-i\alpha\sigma_3/2}, \qquad (17)$$

che realizza una successione di rotazioni intorno a *z, y, z*.

Il primo e l'ultimo fattore esponenziale possono essere assorbiti in ridefinizioni delle fasi dei campi dei quark. Il fattore centrale corrisponde a

$$U = R(\beta/2)$$

con *R* definita come in (11).

Come spiegato nella nota 14, *U* realizza una rotazione intorno a *y* di un angolo β. Si tratta adesso di generalizzare questo ragionamento al caso 3×3 per verificare se è ancora possibile eliminare le fasi complesse.

8 CKM

Ripensiamo la (17) con generatori 3×3. Le matrici di Pauli vanno sostituite da quelle di Gell-Mann, e gli angoli passano dai tre α, β, γ agli otto $\alpha_1 \ldots \alpha_8$

$$V = e^{-i\alpha_1\lambda^3} e^{-i\alpha_2\lambda^8} U e^{-i\alpha_3\lambda^3} e^{-i\alpha_4\lambda^8}. \qquad (18)$$

Qui abbiamo introdotto la matrice unitaria *U* al posto di $e^{-i\beta\sigma_2/2}$, e abbiamo utilizzato le due matrici diagonali λ^3, λ^8, in sostituzione dell'unica matrice diagonale, σ_3, di Pauli. In questo modo abbiamo impiegato quattro degli otto parametri a disposizione per definire la generica *V*. Quindi restano quattro parametri reali a definire la matrice *U*. Quello che si scopre è che *U* può essere espressa nella forma di un prodotto di tre matrici ortogonali di rotazione, determinate da tre angoli distinti, e di una matrice diagonale che comporta un fattore di fase ineliminabile dalla ridefinizione dei campi dei quark (vedi Box 1).

A questa conclusione sulla forma più generale *V* in (18) giunsero Kobayashi e Maskawa [14], costruendo quella che oggi viene chiamata matrice CKM da Cabbibbo-Kobayashi-Maskawa. Questo avvenne ancora prima della scoperta del τ. L'articolo di KM, del 1973, rimase a lungo una curiosità che pochi conoscevano. Maiani, che non era al corrente di questo lavoro, nel 1976, ispirato dalla scoperta del leptone τ, arrivò alla stessa conclusione [15] di Kobayashi e Maskawa.

A causa della fase complessa ineliminabile le interazioni di gauge possono violare il "*time-reversal*", e quindi *CP*. Il percorso da *M* a *V*, per quanto non affatto ovvio, era stato tracciato da GIM, che portava dalla teoria di Cabibbo alla teoria con quattro quark.

La scoperta della matrice CKM è valsa il premio Nobel a Kobayashi e Maskawa.

L'importanza della osservazione di KM sta tutta nella presenza della fase ineliminabile $e^{i\delta}$. Si sa infatti che la combinazione delle simmetrie discrete *C* e *P*, nota come *CP* è una simmetria solo se tutte le masse e i coupling sono reali[15]. Nel modello con quattro quark, usato in GIM, non ci sono violazioni di *CP*. Nel modello a sei (o più) quark, *possono* esserci violazioni di *CP*, fintanto che $\delta \neq 0$. Questo è infatti quello che si è scoperto sperimentalmente.

Da qui in poi ci sono cinquant'anni di fisica del flavor, un campo altamente specializzato sia dal punto di vista della fisica sperimentale che di quella teorica. Ricordiamo le misure decisive su *CP* fatte dall'esperimento BaBar, a SLAC-Stanford, con l'importante contributo italiano, non a caso.

Per motivi ignoti, gli elementi della matrice CKM che connettono la terza generazione alle prime due sono molto piccoli. Questo è il caso di V_{ub}, V_{cb}, V_{ts}, V_{td}: la fisica delle prime due generazioni è molto poco condizionata da quella della terza. Il mondo dell'angolo di Cabibbo e del meccanismo GIM funzionano bene indipendentemente dalla terza generazione. Al contrario gli elementi diagonali, quelli che determinano i decadimenti all'interno delle singole generazioni ($d \to u$, $c \to s$, $t \to b$) della matrice di CKM sono circa pari a 1.

[13] Senza conseguenze sui termini cinetici della lagrangiana e nel modo opportuno al fine di rendere i termini di massa reali, positivi e diagonali.

[14] Se si prende un generico vettore in tre dimensioni con componenti $x=(x_1, x_2, x_3)$ e lo si riscrive in forma di matrice prendendo il prodotto $\tilde{x} = \sum_{i=1}^{3} x_i \sigma_i$ si vede che l'operazione $e^{-i\alpha\sigma_3/2} \cdot \tilde{x} \cdot e^{+i\alpha\sigma_3/2}$ è equivalente a una rotazione di angolo α intorno all'asse *z* delle componenti del vettore *x*. Similmente se si applica la *U* in (17).

[15] Questo lo si può desumere più facilmente se si ricorda che in meccanica quantistica l'operatore di inversione temporale *T* contiene l'operatore di complessa coniugazione. Inoltre in una teoria dei campi quantizzati locale, vale il teorema *CPT*. Se *T* è violata, lo è *CP*.

Box 1

KM

Abbiamo già usato i generatori λ^3, λ^8, quindi seguendo l'analogia con (17), accogliamo il suggerimento di ricorrere ai restanti per costruire la U. Le matrici $\lambda^2, -\lambda^5, \lambda^7$ corrispondono alla rappresentazione aggiunta di $SU(2)$, e quindi generano rotazioni in tre dimensioni. Ci vogliono tre angoli per individuare una di queste generiche rotazioni. Quindi, seguendo il metodo di Eulero, possiamo supporre che U risulti dal prodotto di tre matrici ortogonali R_1, R_2, R_3, che corrispondano a rotazioni, intorno ad assi da definire, con angoli $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ rispettivamente, e di una restante matrice A determinata dall'ultimo parametro reale rimasto.

Prendiamo U nella forma

$$U = R_1 \widetilde{U} R_3 \,, \tag{19}$$

con R_1 ed R_3 corrispondenti a angoli diversi θ_1 e θ_3 e con

$$R_1(\theta_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ 0 & -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{pmatrix} = e^{i\theta_1\lambda^7}, \; R_3(\theta_3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ 0 & -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{pmatrix} = e^{i\theta_3\lambda^7}.$$

La matrice $\widetilde{U}$ deve risultare dal prodotto della restante matrice di rotazione

$$R_2(\theta_2) = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = e^{i\theta_2\lambda^2}$$

e di una matrice A derivante da uno o più dei generatori che non abbiamo ancora usato: rimangono $\lambda^1, \lambda^4, \lambda^6$. Le matrici costruite con questi tre contengono tutte l'unità immaginaria e facendo i prodotti con R_1, R_2 ed R_3 le espressioni diventano rapidamente complicate. Il problema che abbiamo è sempre quello di capire se si possano eliminare tutte le fasi come fatto nel caso della matrice GIM, e sarebbe ideale trovare una forma diagonale per A che si possa portare fuori dal prodotto (19) ed eliminare con le fasi dei quark.

Le matrici $\lambda^1, \lambda^4, \lambda^6$, che quando esponenziate non portano a matrici diagonali, appartengono rispettivamente alle tre distinte sottoalgebre $SU(2)$ contenute in $SU(3)$. Queste sono $(\lambda^1, \lambda^2, \lambda^3)$, $(\lambda^4, \lambda^5, 1/2(\sqrt{3}\lambda^8 + \lambda^3))$, e infine $(\lambda^6, \lambda^7, 1/2(\sqrt{3}\lambda^8 - \lambda^3))$. Invece che costruire la matrice A con i generatori $\lambda^1, \lambda^4, \lambda^6$, un'altra opzione è quella di ricorrere ai tre generatori diagonali λ^3, $1/2(\sqrt{3}\lambda^8 + \lambda^3)$, $1/2(\sqrt{3}\lambda^8 - \lambda^3)$, lasciando fuori il primo, che abbiamo già usato. Possiamo dunque richiedere che A sia espressa dai due generatori indipendenti $1/2(\sqrt{3}\lambda^8 + \lambda^3)$, $1/2(\sqrt{3}\lambda^8 - \lambda^3)$ e il solo parametro reale rimasto, α, come nella matrice

$$A = e^{i\alpha 1/2(\sqrt{3}\lambda^8 + \lambda^3)} \cdot e^{i\alpha 1/2(\sqrt{3}\lambda^8 - \lambda^3)} = \begin{pmatrix} e^{i\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2i\alpha} \end{pmatrix}.$$

Notiamo che A commuta con R_2 ma non commuta nè con R_1 nè con R_3, e quindi, nonostante la forma favorevole con fasi sulla diagonale, non può essere portata fuori dalla espressione $R_1 \widetilde{U} R_3$ e riassorbita dai quark. Posto $\alpha = -\delta/3$, e mettendo in evidenza il fattore $e^{-i\delta/3}$, che viene riassorbito, resta

$$\widetilde{U} = A \cdot R_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix}$$

con la fase $e^{i\delta}$ imbrigliata irrimediabilmente nella matrice $V = R_1 \widetilde{U} R_3$.

Per concludere vediamo cosa succede alle correnti neutre nella teoria a sei quark. Seguiamo quanto fatto per il meccanismo GIM e sostituiamo (10) in modo da includere i due nuovi quark *b, t* come in

$$q = \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \\ d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

Riscriviamo inoltre la (15) nella forma seguente, in cui la matrice che avevamo chiamato M viene sostituita dalla matrice M' che invece che contenere la matrice ortogonale $R(\theta)$ bidimensionale, come nel meccanismo GIM, contiene la matrice unitaria $V(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \delta)$ tridimensionale (con **0** intendiamo blocchi di matrici di zeri 3×3)

$$J_\mu = \bar{q}_L \gamma_\mu \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{0} & V \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}}_{M'} q_L .$$

Esattamente come succede nel caso del meccanismo GIM, data l'unitarietà della matrice V, ovvero $V^\dagger V = V V^\dagger = 1$, la corrente neutra costruita dal commutatore $[M'^\dagger, M']$ non ha termini fuori-diagonale, ovvero correnti neutre con cambiamento di flavor.

Ricordo bene Raoul Gatto parlare della matrice di CKM come di "un pò di trigonometria". Questa frase è simile a quella che Sidney Coleman usava per Glashow, con qualche nota diversa: "sa solo diagonalizzare matrici 2×2, ma lui sa quali". Sappiamo tutti che non è una questione di tecniche o formalismi da alti prelati. Il punto è azzeccarci, e questo succede di rado. Raccontare una storia di questo tipo, anche molto meglio di come posso aver fatto in questo spazio, sfortunatamente dice poco di quest'*arte*. Però c'è una cosa che potrei riportare per diretta conoscenza. Chi, per comprovati motivi, ne è padrone, pensa senza inutili complicazioni ed è mosso dai soli pregiudizi che vengono dall'intuizione. Buon compleanno a GIM e speriamo di fare questa conferenza nel 2021, senza Covid.

Ringraziamenti

Ringrazio con piacere Fabio Maltoni e Gianluca Cavoto per diverse osservazioni sul testo. Ringrazio Sandro Bettini, che mi ha fatto sudare con la chiralità, e naturalmente Luciano Maiani, da cui derivano molte delle storie raccontate. Come si dice in questi casi, e qui è particolarmente vero, se ci sono imprecisioni o fraintendimenti, la responsabilità è solo mia. Ringrazio infine i miei co-organizzatori della conferenza su GIM: R. Bonciani, G. Cavoto, D. del Re, M. Nardecchia, M. Papinutto, S. Rahatlou.

Bibliografia

[1] S. L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani, *Phys. Rev. D*, 2 (1970) 1285.
[2] N. Cabibbo, *Phys. Rev. Lett.*, 10 (1963) 531.
[3] Y. Nambu, G. Jona-Lasinio, *Phys. Rev.,* 122 (1961) 345; J. Goldstone, *Nuovo Cimento,* 19 (1961) 154.
[4] E. C. G. Sudarshan, R. E. Marshak, *Phys. Rev.*, 109 (1958) 1860, and *Proceedings of the International Conference on "Mesons and Recently Discovered Particles"*, Padova - Venezia, 22-28 September 1957 (Società Italiana di Fisica, 1958); R. P. Feynman, M. Gell-Mann, *Phys. Rev.,* 109 (1958) 193; S. S. Gerstein, Ya. B. Zeldovich, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 29 (1955) 698 (*JETP,* 2 (1956) 576).
[5] S. L. Glashow, *Nucl. Phys.*, 22 (1961) 579.
[6] J. Schwinger, *Ann. Phys.,* 2 (1958) 407.
[7] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, 19 (1967) 1264.
[8] A. Salam, in "*Elementary Particle Theory, Proceedings of the Nobel Symposium 1968"*, edited by N. Svartholm (Lerum Sweden) 1968, pp. 367-377.
[9] M. Gell-Mann, M. Levy, *Nuovo Cimento*, 16 (1960) 705.
[10] B. L. Ioffe, E. P. Shabalin, *Yad. Fiz.,* 6 (1968) 828 (*Soviet J. Nucl. Phys.* 6 (1968) 603).
[11] J. D. Bjorken, S. L. Glashow, *Phys. Lett.,* 11 (1964) 255.
[12] D. Gross, F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.,* 30 (1973) 1343.
[13] H. D. Politzer, *Phys. Rev. Lett.,* 30 (1973) 1346.
[14] M. Kobayashi, T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.,* 49 (1973) 652.
[15] L. Maiani, *Phys. Lett. B,* 62 (1976) 183.
[16] M. K. Gaillard, B. W. Lee, *Phys. Rev. D,* 10 (1974) 897; M. K. Gaillard, B. W. Lee, J. L. Rosner, *Rev. Mod. Phys.,* 47 (1975) 277.

Antonio Davide Polosa

Professore di Fisica Teorica presso l'Università Sapienza, di Roma. È stato ricercatore INFN e professore associato presso la stessa Università a partire dal 2005. In precedenza ha avuto dei contratti post-doc fra cui al CERN e all'Università di Helsinki. Si è laureato presso l'Università di Bari, dove ha anche conseguito il titolo di dottore di ricerca nell'anno accademico 1999/2000.

AMAZING GLASS MARBLES

GIANCARLO C. RIGHINI
Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara, CNR, Firenze, Italia

Glass marbles have been known since thousands of years as ornamental objects and pieces for board and street games. What may be less well known is that glass spheres have played and still play a ubiquitous role in science and technology. Millimeter-size glass spheres have allowed van Leeuwenhoek in the XVII century to fabricate simple microscopes capable of hundred-times magnification and to discover many biological structures; in the last century, they have been widely employed in optical communication systems for laser-to-fiber or fiber-to-detector coupling. Micrometer-size and nanometer-size glass spheres find now application in several fields, from petrol drilling to construction industry, from cosmetics to road signals, from solar cells to hydrogen storage and nuclear fusion. Limiting ourselves to the photonics field, glass microspheres have allowed in the last decades the easy development of whispering-gallery-mode resonators and thus of very many microsensors and microlasers. And they also are the fundamental item in microsphere-assisted microscopy, capable of super-resolution imaging (likely down to $\lambda/17$, well below the diffraction limit of $\lambda/2$).

MERAVIGLIOSE BIGLIE DI VETRO

Negli anni '50-'60 del secolo scorso per chi andava al mare in una località con la spiaggia sabbiosa era facile vedere bambini e ragazzi che giocavano con le biglie di vetro, gareggiando in piste tracciate in qualche modo nella sabbia. Per le piste più larghe, il metodo più semplice di realizzarle consisteva nel trascinare un compagno di giochi tenendolo per i piedi. Le piste dovevano anche essere tenute umide, altrimenti le biglie, a causa del loro peso, finivano per sprofondare nella sabbia; per questo, più tardi, le biglie di vetro furono quasi totalmente sostituite da quelle, molto più leggere, di plastica.

Molti altri sono stati, e sono tuttora, i giochi possibili con le biglie, conosciuti fin dall'antichità e degni di citazioni artistiche e letterarie, come la raffigurazione dei bambini che giocano con biglie nel quadro di Peter Bruegel il Vecchio (fig. 1), o il gioco fantastico, dalle regole esoteriche, che è l'oggetto del libro *Il giuoco delle perle di vetro* (*Das Glasperlenspiel*) di Herman Hesse.

Fig. 1 Particolare da "Giochi di bambini", Pieter Bruegel il Vecchio, Olio su tela, 1560. Kunst Historisches Museum, Wien.

Naturalmente, sia le dimensioni che i materiali delle biglie potevano essere i più differenti, dalla semplice argilla alla terracotta, al legno o all'osso, ma le biglie di vetro sono sempre state tra le più pregiate, usate anche per monili; numerosi scavi archeologici hanno portato alla luce palline di vetro, di forma sferica o quasi sferica, spesso forate per farne collane. È con il termine "perle di vetro" che si indicano i primi manufatti realizzati con il vetro nell'antichità, secondo una tecnica artigianale: uno dei più antichi di questi manufatti risale a circa il 2000 a.C., ed è esposto a Berlino, allo Staatliche Museen's Antikensammlung (Collection of Classical Antiquities).

Dal punto di vista tecnologico, non è chiaro quando sia stato messo a punto un processo affidabile e ripetibile per la produzione di perle di vetro. Facendo riferimento a Venezia, uno dei più importanti centri di lavorazione del vetro fin dal Medioevo, il più antico documento attestante la fabbricazione del vetro è del 983, e solo nel 1338 è documentata l'esistenza di grani da rosario in vetro, "paternostri de vitro", perle create per scopo religioso e che poi, a seguito di scambi commerciali, assunsero anche funzioni monetarie. Qualche secolo più tardi, era divenuto comune produrre sfere di vetro di qualche millimetro di diametro versando il vetro fuso in stampi e poi levigandolo manualmente con polveri abrasive oppure sfruttando la tensione superficiale del vetro fuso per ottenere sfere di forma molto accurata. La tecnica varia a seconda delle dimensioni volute: per sfere con diametro di qualche centimetro si può scaldare l'estremità di una bacchetta di vetro con una fiamma, ruotando il polso avanti e indietro in modo che il vetro si rammollisca e sotto l'effetto della tensione superficiale assuma una forma sferica. Per sfere più piccole, di qualche millimetro o meno, si rende necessario iniziare riducendo le dimensioni della bacchetta: questa viene scaldata su una fiamma e, quando rammollita, viene tirata da entrambe le estremità, in modo da ottenere un filo di vetro. All'estremità del filo tagliato, con la stessa procedura descritta sopra, si può ottenere una piccola sfera. Quest'ultima tecnica, con qualche modifica, viene usata ancora oggi per produrre in laboratorio microsfere di altissima qualità, come vedremo meglio nel seguito. Unico inconveniente di questo procedimento è che la sfera non è libera, ma rimane attaccata a uno stelo e, anche tagliando lo stelo, la base

della bacchetta (o del filo) rimane visibile. Tuttavia, per molte applicazioni scientifiche, come vedremo, questa non è affatto una limitazione; anzi, lo stelo permette di maneggiare meglio una sferetta di vetro di piccole dimensioni.

Lasciando da parte i giochi o l'uso decorativo, si può scoprire che le biglie di vetro di piccole dimensioni, da qualche millimetro fino ad arrivare alla scala nanometrica, hanno ben altre, quasi impensabili, applicazioni in campo scientifico e tecnologico: dall'estrazione del petrolio all'edilizia, dalle celle solari ai cosmetici, dai segnali stradali alla fusione nucleare [1]. Qui vengono presentati alcuni esempi di applicazione, iniziando con l'uso di sfere millimetriche di vetro nel microscopio semplice di van Leeuwenhoek e continuando con le sfere micrometriche per lo sviluppo di microrisonatori a modi di galleria e dei relativi dispositivi ottici (microsensori e microlaser), per finire con l'uso di microsfere di vetro nei microscopi ottici a super-risoluzione.

1 Telescopio e microscopio. Le biglie di vetro: dal microscopio semplice di Antoni van Leeuwenhoek al microscopio a super-risoluzione assistito da microsfera

La fine del XVI secolo e l'inizio del XVII sono stati un periodo di grande importanza per lo sviluppo degli strumenti di osservazione ottica della natura, dalla scala microscopica a quella planetaria, e, più in generale, del metodo scientifico. È in questo periodo, infatti, che si svilupparono le invenzioni del microscopio e del telescopio: per entrambi gli strumenti è difficile attribuire la paternità, in qualche modo condivisa tra artigiani (occhialai) olandesi e Galileo Galilei; è certo che fu quest'ultimo a capirne appieno l'importanza e ad ottenere strumenti di grande qualità.

In Europa, il primo documento scritto riguardante le lenti in vetro risale al 1284, e la loro produzione era in gran parte opera di maestri vetrai veneti e fiorentini. Nel 1500 esistevano in molti paesi maestri occhialai, abili artigiani, che cominciarono anche a pensare come mettere insieme due lenti per ingrandire maggiormente gli oggetti vicini o quelli lontani. E proprio uno di questi occhialai, olandese, Hans Lipperhey (o Lippershey) fu tra i primi a costruire un cannocchiale. La cosa è testimoniata dal fatto che nel 1608 egli si recò a l'Aia, sede degli Stati Generali, per presentare l'invenzione al conte Maurizio di Nassau e ottenere un brevetto. Brevetto che però non gli fu concesso perché quasi contemporaneamente altri artigiani, come James Metius (noto anche come Jacob Adrianzoon) e Zacharias Jansen (o Jannsen), ne rivendicavano la priorità. Da notare che sia Lipperhey che Jansen lavoravano a Middelburg, capoluogo della provincia della Zelandia. In ogni caso, la notizia arrivò anche a Galileo, che fu capace di perfezionarlo e soprattutto di pensare a esplorare il cielo. Così, nell'agosto 1609, Galileo presentò il cannocchiale al Doge di Venezia, e nel 1610 pubblicò il *Sidereus Nuncius*, che apre una nuova era nella conoscenza del nostro sistema solare, e della scienza in generale.

La storia del microscopio è ovviamente legata a quella del cannocchiale e agli stessi artigiani olandesi. Anche qui, però, le notizie non sono precise; alcuni ritengono che il primo microscopio composto, cioè formato da due lenti o sistemi di lenti, possa essere stato fabbricato da Hans e Zacharias Jannsen (padre e figlio) nel 1595. Il prototipo, di lunghezza intorno a 40 cm e formato da tre tubi che scorrevano uno dentro l'altro, sarebbe stato capace di fornire non più di dieci ingrandimenti e sarebbe poi stato perfezionato dal figlio Johannes Zachariassen (che cercò di rivendicare al padre l'invenzione sia del microscopio che del telescopio). Anche in questo caso, Galilei, avuta notizia dello strumento, ne mise a punto, intorno al 1624, una versione migliorata che chiamò *occhialino*. Proprio nel settembre 1624 Galilei inviò a Federico Cesi, duca di Acquasparta e co-fondatore, nel 1603, dell'Accademia dei Lincei, un esemplare del suo strumento. Nella lettera che lo accompagnava, Galilei scrisse: *Invio a V. E. un occhialino per veder da vicino le cose minime, del quale spero che ella sia per prendersi gusto e trattenimento non piccolo, chè così accade a me. Io ho contemplato moltissimi animalucci con infinita ammirazione: tra i quali la pulce è orribilissima, la zanzara e la tignuola sono bellissimi. Insomma ci è da contemplare inifinitamente la grandezza della natura, e quanto sottilmente ella lavora, e con quanta indicibil diligenza* [2]. Cesi, insieme all'altro linceo Francesco Stelluti, iniziò subito a utilizzare il *microscopio* (definizione suggerita da un ulteriore linceo, Johannes Faber, in una lettera inviata a Cesi il 13 aprile 1625) per studiare gli insetti, e nel 1626 fece pubblicare un'opera, l'*Apiarium*, e una tavola incisa, la *Melissographia*, che possono essere considerate il primo trattato entomologico che faceva uso dei particolari anatomici ricavati da osservazioni microscopiche [3].

Quasi quaranta anni più tardi, nel 1660, Marcello Malpighi, oggi riconosciuto come padre dell'anatomia microscopica, osservando al microscopio il mesentere della rana, scoprì i capillari sanguigni; pochi anni dopo, faceva seguire la scoperta della struttura polmonare (1661) e dei globuli rossi del sangue (1665). In quello stesso 1665, Robert Hooke, che aveva anche compiuto osservazioni astronomiche, pubblicava *Micrographia* [4], nella cui prefazione scriveva: *The next care to be taken, in respect of the Senses, is a supplying of their infirmities with* Instruments*, and, as it were, the adding of* artificial Organs *to the* natural*; this in one of them has been of late years accomplisht with prodigious benefit to all sorts of useful knowledge, by the invention of Optical Glasses. By the means of* Telescopes*, there is nothing so* far distant *but may be represented to our view; and by the help of* Microscopes*,*

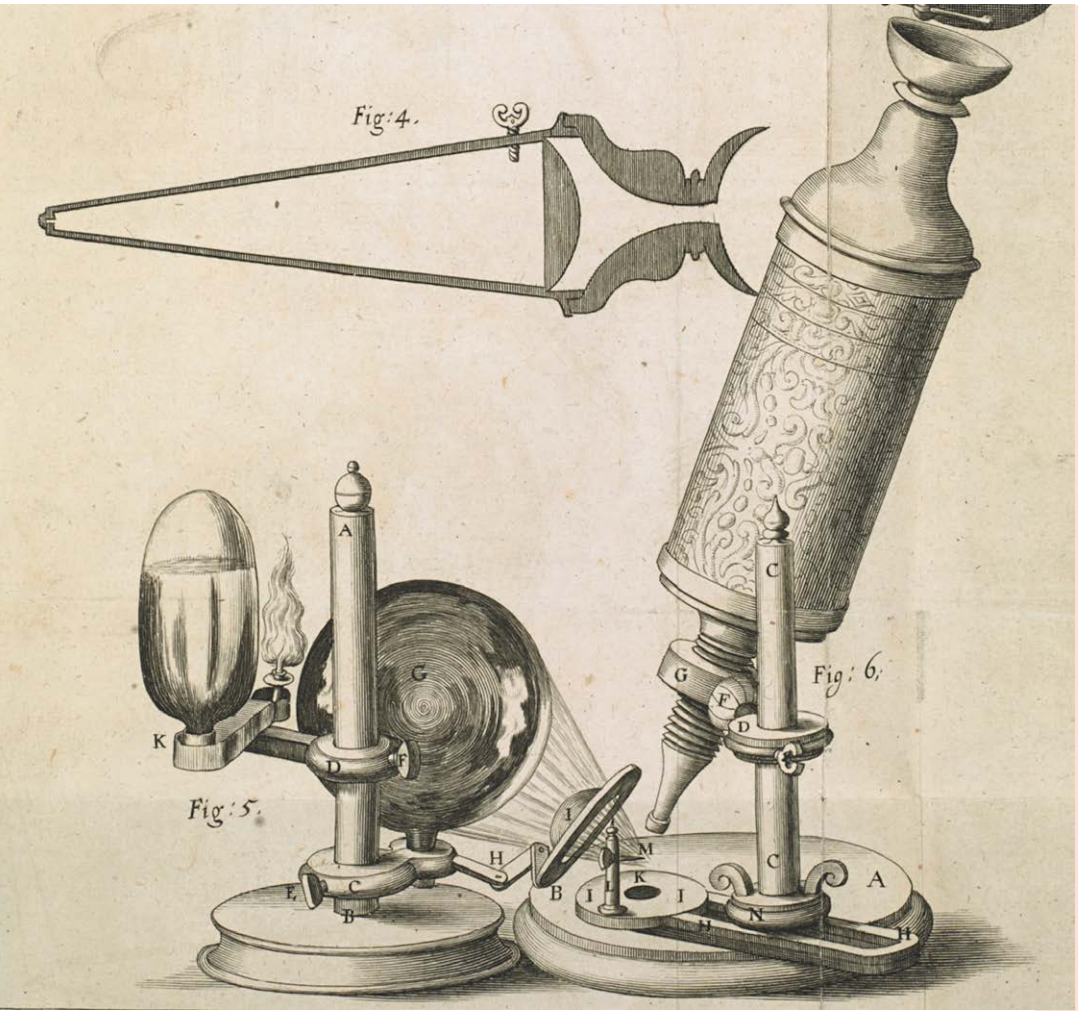


Fig. 2 Dettaglio dell'illustrazione *Scheme 1*, adattata dal testo *Micrographia* di Robert Hooke [4].

there is nothing so small*, as to escape our inquiry; hence there is a new visible World discovered to the understanding.* La fig. 2 mostra una delle illustrazioni (*Scheme 1*) del libro, comprendente la sezione del tubo di ottone in cui vengono fissate le due lenti piano-convesse (*Fig. 4* nella Tavola), il sistema di illuminazione dell'oggetto da osservare (*Fig. 5*), e il microscopio stesso (*Fig. 6*).

Hooke dà una descrizione abbastanza dettagliata del microscopio e del suo funzionamento, lamentando la difficoltà di ottenere immagini nitide e luminose, dovute alla piccola apertura dell'obbiettivo del microscopio, alla non perfetta forma delle lenti, e alla scarsa illuminazione dell'oggetto. Tutto ciò limita il potere di ingrandimento del microscopio a meno di 30×.

Ma pochi anni dopo, ecco che un altro olandese, Antoni van Leeuwenhoek, ebbe l'idea di abbandonare l'uso del microscopio composto e di utilizzare un microscopio semplice (fig. 3), basato su una singola lente, costituita da una minuscola sfera di vetro! van Leeuwenhoek (1632–1723) era un impiegato e mercante di stoffe, ma appassionato di microscopia e di scienze naturali. Il suo strumento, di uso più scomodo e privo della possibilità di regolare l'ingrandimento, poteva sembrare un passo indietro rispetto ai microscopi composti, ma in realtà costituiva una vera rivoluzione, permettendo di ottenere ingrandimenti di diverse centinaia di volte.

Il segreto del suo microscopio stava proprio nella qualità delle sfere di vetro, con diametro da uno a qualche millimetro, che egli stesso fabbricava, e che nessun suo contemporaneo riuscì a uguagliare.

A partire dagli anni '70 del XVII secolo (iniziò nel 1673 a scrivere alla Royal Society di Londra, e continuò per quasi 50 anni, descrivendo le sue osservazioni naturalistiche e biologiche), van Leeuwenhoek produsse decine (qualcuno dice centinaia) di microscopi [6, 7]: erano strumenti estremamente semplici, come si vede in fig. 3, in cui la pallina di vetro era

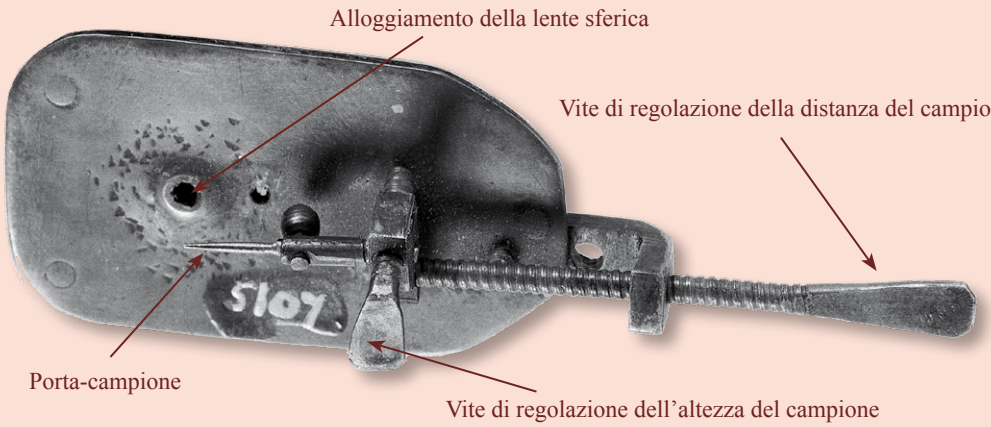


Fig. 3 Facsimile del microscopio semplice di van Leeuwenhoek. Il campione da osservare doveva essere posto sulla punta dell'ago in testa alla vite. Adattata da [5].

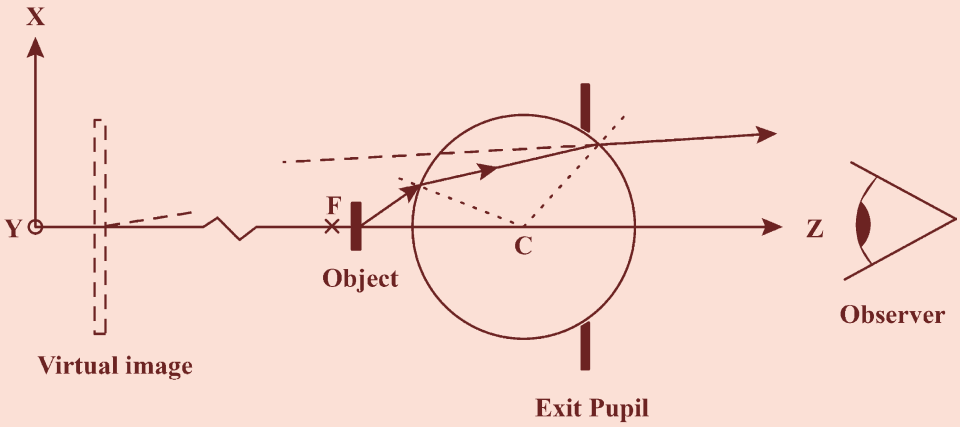


Fig. 4 Schema ottico del microscopio semplice di van Leeuwenhoek. L'osservatore vede comodamente l'immagine virtuale ingrandita se pone l'occhio a poca distanza dalla pupilla di uscita. Riadattata con permesso da [6], © 1999 The Optical Society.

montata fra due piastre di ottone forate e tenute insieme da rivetti, mentre il campione da osservare era sistemato sulla punta di una vite, che poteva muoversi in modo da avvicinare il campione alla lente. Una seconda vite permetteva di alzare o abbassare la posizione del campione. Le dimensioni dello strumento, che doveva essere tenuto in mano e molto vicino all'occhio, erano tipicamente circa 2,5 cm di larghezza e 5 cm di lunghezza (fino a un massimo di 10 cm). Misure effettuate su un suo microscopio conservato al Museo di Utrecht hanno confermato un ingrandimento di 275 volte e una risoluzione intorno a 1 micron, nonostante la lente apparisse graffiata [6].

La fig. 4 mostra lo schema ottico del microscopio. Oltre alla qualità della lente, l'altro fattore fondamentale per ottenere immagini di alta qualità è di ridurre il diametro della pupilla di uscita; questo consente di ridurre gli effetti dell'aberrazione sferica e di quella cromatica. Infatti, l'alloggiamento della sferetta nel microscopio, anche per la necessità di trattenerla saldamente, è fatto in modo che solo una porzione della superficie sferica sia visibile.

Se si considera una sfera di raggio 1 mm, lavorata in un vetro comune così che si può assumere il valore 1,5 per il suo indice di rifrazione, il fuoco parassiale *F* si trova a una distanza di 1,5 mm dal centro della sfera *C*, ovvero a 0,5 mm dal suo bordo. Ponendo l'oggetto a brevissima distanza dal fuoco parassiale *F*, diciamo 20 μm a destra di *F*, e usando una pupilla di uscita di diametro 0,5 mm, l'immagine virtuale si posiziona a 316 mm a sinistra di *C* e può essere vista, con un ingrandimento di circa 200 volte, ponendo l'occhio il più vicino possibile alla pupilla d'uscita.

Le simulazioni effettuate usando tracciamento dei raggi ottici e calcoli diffrattivi hanno confermato che un microscopio di questo tipo riesce a lavorare vicino al limite per diffrazione su un campo di vista di almeno 20 μm, offrendo una risoluzione intorno ai 2 μm [6].

Grazie a strumenti di questo tipo, van Leeuwenhoek descrisse, in circa 190 lettere inviate alla Royal Society, numerose scoperte, tra cui la struttura del cristallino dell'occhio, la presenza di microrganismi unicellulari, dei batteri e degli spermatozoi. È quindi con buona ragione che viene considerato il padre della microbiologia. Alcune di queste scoperte, però, furono viste con qualche dubbio dai suoi contemporanei, e solo dopo la metà del 1800 la microscopia moderna poté darne piena conferma.

Molti, allora e anche oggi, si sono chiesti come avesse potuto van Leeuwenhoek ottenere delle sfere di vetro così piccole e così perfette; era stata avanzata anche l'ipotesi

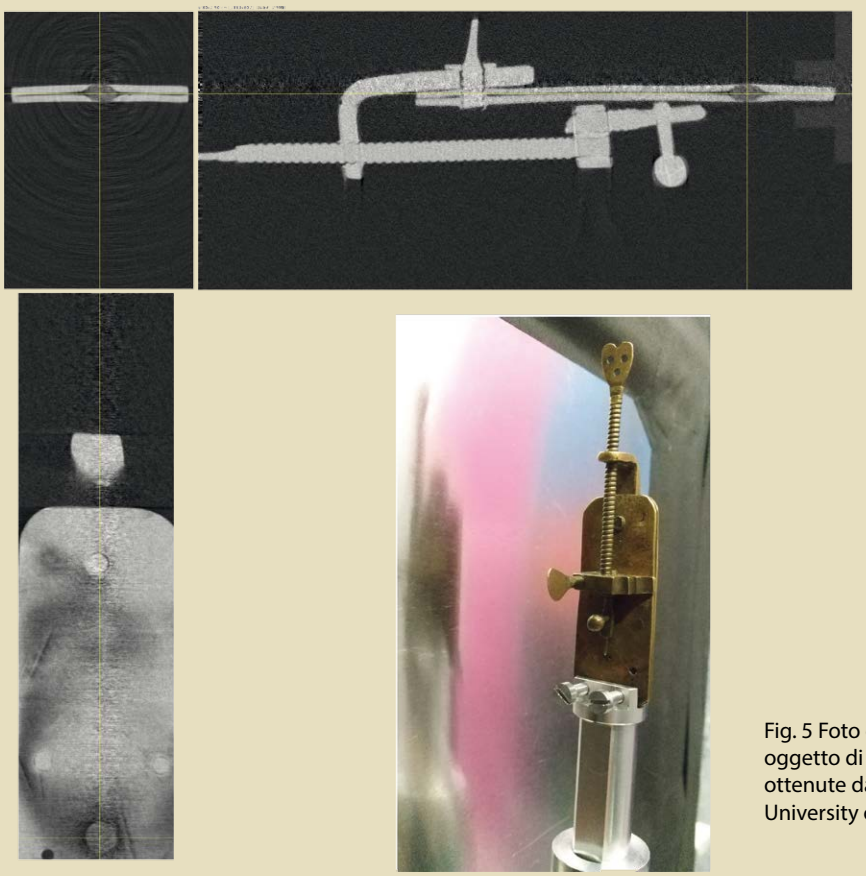


Fig. 5 Foto del microscopio di van Leeuwenhoek oggetto di indagine, e immagini di sezioni ortogonali ottenute dalla tomografia neutronica. Credito: Delft University of Technology (TU Delft).

che le sfere non fossero state prodotte per lavorazione ottica, con polveri abrasive di diametro sempre più fine, ma per soffiatura del vetro (sembra che lui stesso ne avesse accennato a un gruppo di nobili tedeschi nel 1711). Questo dubbio è stato sciolto nel 2018, grazie alle indagini svolte da un gruppo di ricercatori della Delft University of Technology (TU Delft), in collaborazione con il curatore del Rijksmuseum Boerhaave in Leida, che conserva quattro degli undici microscopi di van Leeuwenhoek di cui si conosce l'esistenza. Data la preziosità degli oggetti, non era pensabile smontarli (le due lamine di metallo che costituiscono la struttura del microscopio sono rivettate), e quindi la lente intera non era accessibile per nessun test. Hanno allora pensato di usare la tomografia neutronica, sfruttando il reattore nucleare a vasca (*pool-type*) da 2 MW che viene usato nel Reactor Institute Delft come sorgente di neutroni e positroni per ricerca. In questo caso è stato usato un fascio di neutroni, e sono state registrate quasi 500 immagini in trasmissione mentre l'oggetto veniva ruotato di 180 gradi per 24 ore, consentendo così di ricostruire al calcolatore anche una immagine tridimensionale. La fig. 5 mostra la foto dell'esemplare di microscopio sottoposto a indagine e le immagini di sezioni ortogonali XYZ ottenute dalla tomografia neutronica. La lente appare chiaramente di vetro pieno, quindi ottenuta per lavorazione ottica (*grinding and polishing*) e non per soffiatura; dalle immagini, invece, non è possibile apprezzare la sfericità della lente.

Ma le meravigliose proprietà di una semplice pallina di vetro nel campo della microscopia non sono finite qui. Fino almeno agli anni 1980, le immagini prese a un microscopio non potevano avere risoluzione migliore di 200 nm, perché questo era il limite imposto dalla diffrazione della luce (dell'ordine di $\lambda/2$) quando si sfruttava l'intensità del campo lontano (*far field*). Cercando di aggirare questo limite, una delle idee dei ricercatori è stata di sfruttare le onde evanescenti, come nel microscopio ottico a scansione in campo vicino (SNOM - *Scanning near-field optical microscope*). L'altro approccio è invece quello di sfruttare tutte le informazioni possibili, in un microscopio "multi-messaggero" [8].

Il funzionamento di un microscopio SNOM è basato su una sonda ottica nanometrica (generalmente una punta di una fibra ottica affilata) posta quasi a contatto del campione: la sonda può dunque raccogliere la luce dal campione tramite interazione con l'onda evanescente e quindi con una risoluzione spaziale dell'ordine della decina di nanometri. Lo svantaggio di un microscopio SNOM sta nella scarsa luminosità e nella lentezza di acquisizione dati.

Un notevole passo avanti, anche in termini di semplicità e minor costo del sistema rispetto a uno SNOM, è stato

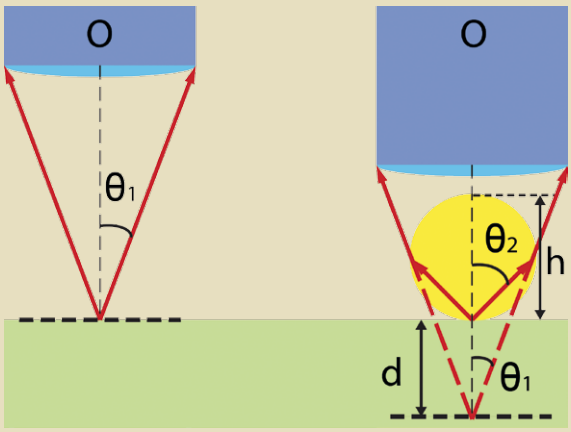


Fig. 6 Schema (non in scala) di un microscopio normale (a sinistra) e di un microscopio assistito da microsfera (a destra). O indica il normale obiettivo del microscopio, la linea a tratteggio largo il piano immagine dell'obbiettivo. L'uso della microsfera porta ad un aumento sia dell'ingrandimento che dell'apertura numerica.

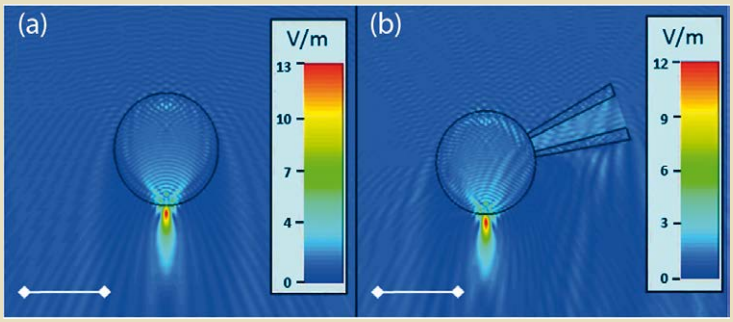


Fig. 7 Simulazione numerica della distribuzione di campo elettrico di una microsfera di silice con diametro ≈ 6,1 μm illuminata da luce monocromatica a 600 nm, che evidenzia la formazione del *photonic jet*: la presenza della pipetta usata per la manipolazione della microsfera (b) non altera in maniera significativa il *photonic jet* rispetto al caso della sola microsfera (a). La barra di scala indica 5 μm. Riprodotta da [10].

fatto nel 2000, con la pubblicazione di un articolo in cui, volendo trovare un sistema efficiente per la pulizia di una superficie con il laser (*laser cleaning*), fu utilizzata una microsfera trasparente e fu visto che, anche per un diametro paragonabile alla lunghezza d'onda del laser, la sferetta agiva come lente, con una macchia focale inferiore a 100 nm e intensità della luce nel campo vicino anche due ordini di grandezza maggiore rispetto all'intensità del fascio laser incidente [9]. Da qui a utilizzare una microsfera come lente addizionale di un microscopio il passo fu breve (si veda fig. 6). La microsfera produce uno spot focale più piccolo della lunghezza d'onda e trasforma una immagine di campo vicino dell'oggetto in contatto (una particella o struttura nanometrica) in una immagine virtuale non affetta da diffrazione e visibile mettendo a fuoco l'obbiettivo del microscopio. La risoluzione ottenibile dipende dal raggio e indice di rifrazione della sfera, e può essere migliore di 50 nm, cioè circa $\lambda/10$ (con la previsione di poter arrivare addirittura fino a $\lambda/17$) [10].

Di solito, il funzionamento di una lente sferica viene analizzato usando l'ottica geometrica o, in maniera più rigorosa, la teoria vettoriale della diffrazione; se però la sfera è dello stesso ordine di grandezza o minore di λ, nemmeno la teoria della diffrazione è sufficiente e occorre utilizzare le teorie sulla diffusione della luce (*scattering*) da particelle sferiche. Considerando la teoria dello scattering di Rayleigh (particelle più piccole di λ), risulta che il campo elettromagnetico diffuso è asimmetrico, come emesso da un dipolo; usando la teoria di Mie (particelle dell'ordine di λ), risulta che il campo vicino alla superficie opposta della sfera rispetto alla luce incidente ha una struttura a getto (*jet-like*). Numerosi lavori teorici hanno approfondito l'argomento, e la distribuzione del campo è ormai comunemente nota come getto fotonico (*photonic jet*). Un interessante lavoro di rassegna, con una ricca bibliografia, è stato pubblicato nel 2017 dallo stesso gruppo dell'articolo precedente [11].

La fig. 7 (a) evidenzia la forma del *photonic jet* del campo elettromagnetico calcolato per una microsfera di silice di circa 6 μm di diametro, illuminata da radiazione con $\lambda = 0{,}6$ μm. Per rendere facile il posizionamento della microsfera, è stato suggerito di usare una micropipetta posizionata su attuatori nanometrici che, usando l'aspirazione, può agganciare e tenere bloccata la sferetta mentre la muove [10]. La simulazione in fig. 7(b) mostra che la presenza della micropipetta altera molto poco la distribuzione di campo. La super-risoluzione, comunque, non può essere solo correlata al diametro minimo del *photonic jet*, ma, per essere interpretata correttamente, deve tener conto dell'interazione della luce con il campione [11].

2 Biglie di vetro micrometriche, risonatori a modi di galleria e microsensori

Il passaggio dall'ottica alla fotonica, avvenuto gradualmente dopo la scoperta del laser e la diffusione delle fibre ottiche in vetro, ha comportato, in moltissimi casi, anche il passaggio delle dimensioni dei componenti e dispositivi ottici dalla scala dei cm a quella dei mm e, successivamente, a quella micrometrica e submicrometrica.

Anche per le nostre biglie di vetro, all'inizio la dimensione millimetrica (come nel microscopio di van Leeuwenhoek) si è dimostrata utile per l'accoppiamento della luce da diodo laser a fibra ottica, da fibra a fotodiodo, e tra fibre. Una singola sfera può essere infatti usata per collimare il fascio in uscita da un diodo laser o focalizzare su un rivelatore il fascio in uscita da una fibra, mentre un sistema di due sfere può essere usato per l'accoppiamento tra due fibre, essendo in grado di creare una immagine parassiale quasi perfetta.

Una vera rivoluzione è avvenuta, però, con lo studio dei risonatori a modi di galleria (*whispering gallery mode, WGM*) e lo sviluppo di microrisonatori sferici per ricerche sia di tipo fondamentale che applicato.

La ricerca sui risonatori a modi di galleria, in realtà, è iniziata ben prima dell'avvento della fotonica e su scala dimensionale molto maggiore. La scoperta è dovuta a John William Strutt (Lord Rayleigh), che osservò un fenomeno di risonanza acustica in una struttura a simmetria circolare: la galleria posta nella cupola della cattedrale di San Paolo a Londra. Nell'articolo pubblicato a inizio 1900 anticipò l'idea che lo stesso fenomeno potesse accadere per le onde luminose e che interessanti applicazioni potessero derivare dal confinamento delle onde elettromagnetiche in un volume molto limitato [12]. Una importante conferma sperimentale arrivò nel 1961, con l'osservazione, da parte di Garrett *et al.* dell'emissione stimolata in modi di galleria sulla superficie di sfere di 1 o 2 mm di diametro di fluoruro di calcio drogato con samario [13].

I risonatori ottici hanno assunto, a partire dagli anni '60, un ruolo di grandissima importanza come elementi fondamentali della struttura di un laser. La tendenza alla miniaturizzazione in fotonica ha portato a passare dai classici risonatori con due specchi, introdotti nel 1897 da Charles Fabry e Alfred Pérot, a strutture basate su reticoli di diffrazione o a microrisonatori a modi di galleria (o microrisonatori WGM). Questi ultimi, oltre alla miniaturizzazione (la dimensione tipica è dell'ordine di decine di micron, fino a un massimo di qualche decimo di millimetro), offrono il vantaggio di poter raggiungere fattori di qualità $Q = \lambda/\Delta\lambda$ (dove λ è la lunghezza d'onda di risonanza e $\Delta\lambda$ è la larghezza della riga di risonanza) fino a 10^{11}, a fronte di un valore teorico intorno a 10^5 e un valore pratico dell'ordine di qualche migliaio per i risonatori Fabry-Pérot. Valori elevati di Q corrispondono a densità di energia molto alta (fino a GW/cm^2), a righe di risonanza molto strette (<100 KHz a 1550 nm, cioè alla principale lunghezza d'onda usata nelle comunicazioni in fibra ottica) e un tempo di estinzione del segnale risonante (*cavity ringdown*) molto lungo: tutte caratteristiche di enorme interesse per applicazioni nel campo dei laser, delle comunicazioni ottiche e a radiofrequenza, dell'ottica quantistica, e della sensoristica.

Nella maggior parte dei casi, la condizione fondamentale per un microrisonatore WGM è di possedere simmetria circolare, così che sia possibile mantenere la radiazione elettromagnetica confinata al suo interno mediante una successione di riflessioni totali, come è schematizzato nella fig. 8(a) per una sezione dell'oggetto, che quindi può essere una sfera piena, una sfera cava (bolla), un cilindro pieno (per es., una fibra ottica), un cilindro cavo (per es., un capillare), un toroide o anche una struttura piana (un anello). Strutture a goccia o a bottiglia sono anch'esse capaci di sostenere modi di propagazione a galleria.

Naturalmente, una descrizione completa dei modi di propagazione può essere ottenuta solo utilizzando le equazioni di Maxwell con le opportune condizioni al contorno, piuttosto che il semplice modello geometrico della propagazione per raggi [14]. Tuttavia, l'ottica geometrica consente di calcolare rapidamente l'equazione fondamentale che lega il raggio del microrisonatore e il suo indice di rifrazione alla lunghezza d'onda di risonanza. Riferiamoci a una sfera, di cui la fig. 8(a) rappresenta un piano equatoriale: la condizione di riflessione totale all'interno della sfera impone che l'angolo di incidenza i del raggio sia maggiore dell'angolo critico $i_c = \arcsin(N^{-1})$, dove N è l'indice di rifrazione del materiale costituente la sfera stessa. Ammettendo che il raggio della sfera a sia molto maggiore della lunghezza d'onda di lavoro λ e che i raggi luminosi siano incidenti quasi tangenzialmente alla superficie (cioè $i \approx \pi/2$), la condizione di risonanza impone

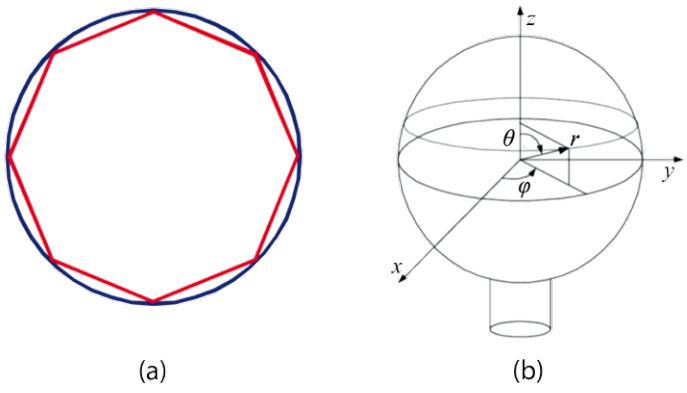


Fig. 8 (a) Sezione equatoriale di un generico microrisonatore a modi di galleria. (b) Microrisonatore sferico con stelo costituito dalla fibra ottica su cui è stato fabbricato. Riprodotta da [10].

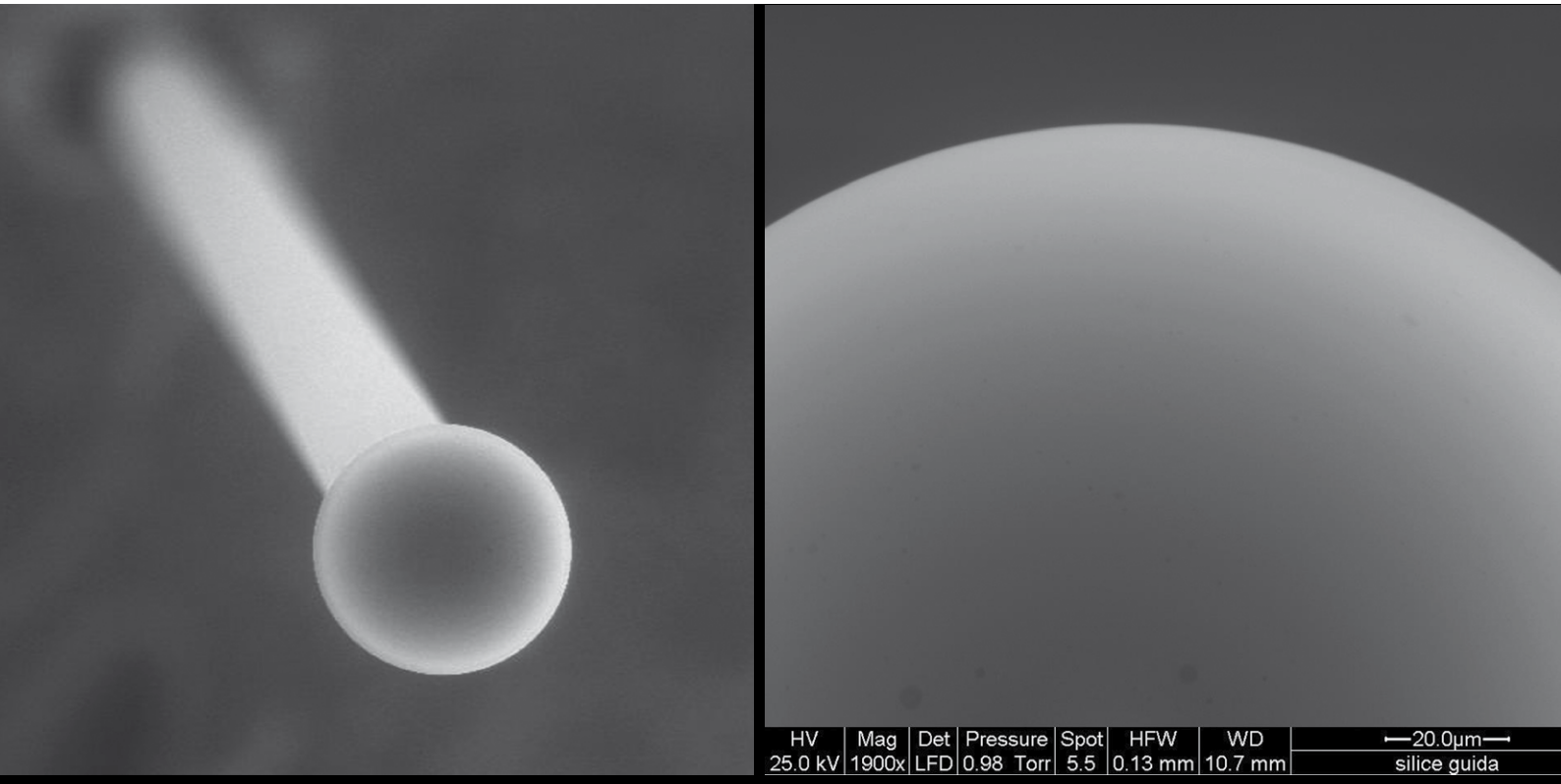


Fig. 9 Immagini ottenute al microscopio elettronico a scansione di una microsfera di silice con diametro circa 200 µm: a sinistra, la microsfera con lo stelo costituito dalla fibra ottica di cui è stata fusa l'estremità; a destra, l'immagine con ingrandimento 1900× mostra in maniera evidente la perfetta qualità della superficie.

che la luce ritorni in fase dopo ogni giro, ovvero che la lunghezza del cammino ottico (cioè approssimativamente la lunghezza della circonferenza moltiplicata per l'indice di rifrazione) sia un multiplo intero ℓ della lunghezza d'onda; in altre parole: $2\,\pi\,N\,a = \ell\,\lambda$. Da questa semplice relazione deriva una conseguenza importantissima per l'applicazione dei microrisonatori, e in particolare delle microsfere, nel campo della sensoristica: ogni variazione del raggio o dell'indice di rifrazione superficiale della microsfera dà luogo a una variazione della lunghezza d'onda di risonanza: $\Delta\lambda/\lambda = \Delta a/a + \Delta N/N$.

Prima di illustrare alcuni esempi di applicazione dei microrisonatori sferici in fotonica, vediamo come possono essere fabbricati. Il vetro è il materiale ideale, in quanto dielettrico e, potenzialmente, con assorbimento della luce bassissimo, tanto nella banda visibile e vicino infrarosso quanto nel medio infrarosso: in quest'ultimo caso si usano vetri privi di ossidi, come i calcogenuri (arseniuri, solfuri, …) o gli alogenuri (fluoruri, fluorozirconati …). La maniera ottimale per produrre microsfere con altissimo fattore di qualità Q è di partire da un vetro ultrapuro, come la silice (SiO_2) che costituisce il nucleo delle fibre ottiche per telecomunicazioni, e di fondere appunto l'estremità di una fibra ottica sfruttando la tensione superficiale per ottenere una forma sferica perfetta. Per rendere riproducibile il sistema di fabbricazione ed evitare asimmetrie dovute all'effetto della forza di gravità, la fibra viene tenuta in verticale e il riscaldamento non viene prodotto da una fiamma ma da archi elettrici, come quelli generati nelle giuntatrici commerciali di fibre ottiche. Le sfere così prodotte, con diametro che può arrivare a circa il doppio del diametro della fibra ottica, cioè intorno ai 250 µm, rimangono attaccate a uno stelo (la fibra ottica), che esclude la possibilità di lanciare i modi di galleria soltanto in una piccola frazione della superficie sferica, ma che d'altra parte offre il vantaggio di poter maneggiare la sfera in maniera più semplice. Le immagini prese al microscopio elettronico a scansione (fig. 9) mettono in evidenza la perfetta qualità della superficie sferica.

Se invece si desidera fabbricare delle sferette "intere", sono utilizzati principalmente due metodi: a) far colare gocce di vetro fuso su una piattaforma ruotante (il diametro della sfera dipenderà dalla grandezza della goccia e dalla velocità di rotazione della base); b) far cadere polvere di vetro, ottenuta triturando il vetro in particelle con la dimensione media voluta, in una "torcia al plasma", cioè un reattore cilindrico verticale in cui le particelle di vetro vengono fuse, durante

la caduta, da un getto di plasma che può raggiungere temperature anche superiori a 2000 °C (il punto di fusione della silice pura è 1726 °C). Grazie alla tensione superficiale e al veloce raffreddamento al contatto del recipiente metallico posto sotto alla torcia, si ottengono biglie di vetro con dimensioni da qualche decina di micron fino a qualche millimetro, che possono poi essere selezionate osservandole con un microscopio ottico.

Un punto essenziale per l'utilizzazione di un microrisonatore è l'eccitazione dei modi WGM, cioè l'accoppiamento della luce da una sorgente esterna (un laser). Il sistema più efficiente è rappresentato dal trasferimento di energia per onda evanescente tra i modi guidati di una struttura esterna e i modi WGM del risonatore; la struttura esterna, nella maggior parte dei casi, è una fibra ottica, che viene opportunamente assottigliata (*tapered*) fino a pochi micron di diametro e portata quasi a contatto con la microsfera, come è schematizzato in fig. 10. La figura presenta, in maniera semplificata, lo schema del sistema di misura di un sensore WGM: la luce da un laser accordabile viene inviata in una fibra ottica e da questa, nella zona rastremata, trasferita parzialmente alla superficie del risonatore. Un rivelatore posto all'altra estremità della fibra vedrà quindi una diminuzione dell'intensità del segnale trasmesso in corrispondenza alla lunghezza d'onda di risonanza. Misurando tale lunghezza d'onda e la larghezza $\delta\lambda$ della riga si può calcolare il fattore di qualità della sfera $Q = \lambda/\delta\lambda$. Se il valore di Q è abbastanza elevato (almeno 10^6), si può procedere alla realizzazione del sensore; lo schema di fig. 10 si riferisce a un sensore di particelle o di un elemento biologico (*analyte*) [15, 16].

Quando l'analita si attacca alla superficie della sfera, ne cambia sia il raggio che l'indice di rifrazione e quindi induce, come visto sopra, uno spostamento della lunghezza d'onda di risonanza (*shift* $\Delta\lambda$), che viene misurato con un analizzatore di spettro e visualizzato all'oscilloscopio. Se la misura viene fatta in un liquido, nel quale l'analita è presente in una data concentrazione, lo *shift* varierà nel tempo via via che altre particelle o molecole si attaccano alla superficie, fino a raggiungere la saturazione una volta che la superficie della sfera sia tutta occupata; il diagramma che ne risulta (sensogramma) è schematizzato in fig. 10 nello schermo in alto a sinistra.

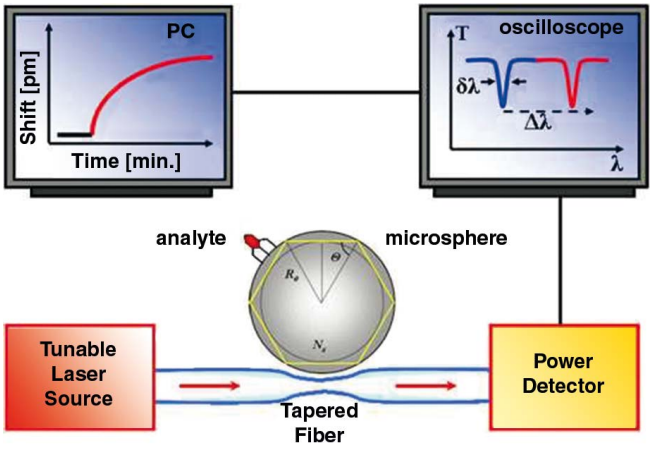


Fig. 10 Schema del sistema di misura del fattore di qualità di un microrisonatore e del suo impiego come sensore. Lo schermo a sinistra mostra un tipico "sensogramma", cioè la risposta del sensore nel tempo. Riprodotta con permesso da [16].

La fig. 11 presenta in maniera più dettagliata lo schema dell'apparato di misura, in cui appaiono i microscopi necessari per controllare, in due piani, la posizione reciproca di fibra e microsfera (che può essere mossa tramite attuatori piezoelettrici) e il sistema microfluidico necessario per rifornire la vaschetta nella quale viene effettuata la misura. Per dare un'indicazione della sensibilità di un sensore di questo tipo, una microsfera di silice ($N \approx 1{,}46$) di diametro ≈ 78 mm si è dimostrata capace di rivelare un singolo virione dell'influenza *A*, con diametro ≈ 100 nm [17]; nanoparticelle di dimensioni inferiori possono essere rilevate riducendo ulteriormente il diametro della microsfera di silice e/o usando vetri ad alto indice di rifrazione, come i vetri telluriti ($N \approx 1{,}85$), con i quali si può prevedere di arrivare a rivelare particelle di dimensioni poco superiori a 10 nm.

I microrisonatori possono così essere vantaggiosamente utilizzati per sviluppare biosensori di affinità, che sfruttano le capacità di una data molecola di legarsi specificamente all'elemento di bio-riconoscimento (biorecettore).
A tale scopo, la superficie della microsfera deve essere funzionalizzata, cioè modificata chimicamente (ad esempio, silanizzata) e ricoperta dal biorecettore (che può essere un anticorpo, un enzima, la streptavidina, o un aptamero – una piccola molecola oligonucleotidica sintetizzata); gli analiti corrispondenti sono un antigene, un aminoacido, la biotina o una proteina biotinilata, e proteine o anche strutture cellulari. Tutta questa procedura viene eseguita deponendo sulla superficie sferica strati sottili (dell'ordine di 10–100 nm) e uniformi, che devono avere un basso assorbimento della radiazione laser, in modo da non far diminuire sensibilmente il fattore di qualità del microrisonatore/biosensore.

Lo sviluppo di biosensori basati su microrisonatori WGM, non soltanto sferici ma anche toroidali o ad anello, che possono essere più facilmente integrabili in dispositivi ottici su supporto piano, ha fatto grandi progressi negli ultimi due decenni, dimostrando capacità di rivelare singole molecole ed elementi biologici nanometrici (virus, ribosomi, proteine come l'interleuchina 2 e la streptavidina, eccetera) fino ad arrivare alla scala micrometrica, con la potenzialità di rivelare batteri come *Helicobacter hepaticus*, un batterio a spirale lungo da 1,5 a 5 μm [18].

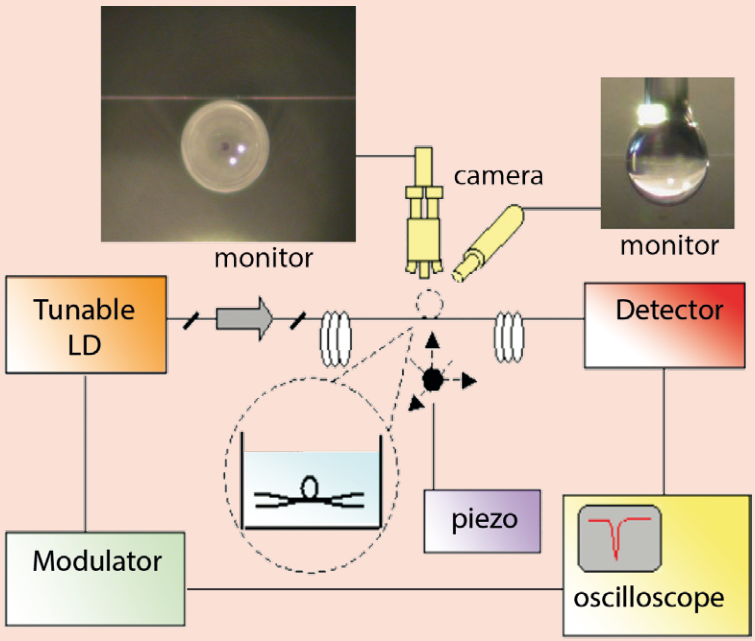


Fig. 11 Schema più dettagliato del sistema di misura di un biosensore basato su microrisonatore WGM. La microsfera e la fibra di accoppiamento sono immersi in una soluzione, la cui composizione e flusso sono controllati da un sistema con pompa peristaltica.

3 Biglie in vetro contenente terre rare e microlaser

Come si è detto in precedenza, l'osservazione di emissione laser da una sfera millimetrica risale al 1961, ma non ebbe subito un grande impatto scientifico e applicativo, in parte per le difficoltà sperimentali (la sfera era ottenuta dalla lavorazione ottica di un cristallo di fluoruro di calcio, e nell'esperimento era immersa in un dewar con idrogeno liquido, a circa –252 °C, e pompata da una lampada flash), e in parte perché era un periodo di grande evoluzione, con lo sviluppo di nuovi laser a gas, a stato solido e, soprattutto, a semiconduttore. Tuttavia è importante ricordarlo, perché quel lavoro dimostrò che un microrisonatore sferico può combinare in maniera semplicissima i due elementi fondamentali per la realizzazione di un laser: la cavità risonante e il materiale attivo. In altre parole, è sufficiente scegliere opportunamente il materiale di cui è fatta la sfera per poter realizzare un microlaser. Nella seconda metà degli anni 1980 seguirono alcune nuove dimostrazioni, sia usando goccioline polimeriche drogate con coloranti, con dimensioni tra 40 e 60 μm, sia usando una sfera di 5 mm ottenuta mediante lavorazione ottica di un cristallo Nd:YAG: in quest'ultimo caso la potenza di soglia per l'emissione laser a 1,064 μm era di circa 100 mW (il laser di pompa era un laser a colorante operante a 0,81 μm).

La rivoluzione per i microlaser sferici arrivò con l'utilizzazione di vetri luminescenti contenenti ioni di terre rare (lantanidi), che rendevano molto più semplice la produzione di questi componenti. Due articoli, pubblicati entrambi nel 1996 [19, 20], aprirono la strada ad un settore di ricerca molto interessante, dimostrando l'emissione laser intorno a 1,1 μm da sferette di vetro contenenti Nd: in un caso, la sfera con diametro 150 μm era composta da una matrice in vetro fluorozirconato contenente NdF_3 ed era ottenuta versando un sottile rivolo di vetro fuso in azoto liquido, così da avere un rapidissimo raffreddamento [19]; nell'altro caso, invece, le microsfere con diametro da 50 a 100 μm erano prodotte per fusione dell'estremità di una fibra di silice contenente Nd_2O_3 [20]. La rugosità superficiale estremamente bassa e l'omogeneità del materiale fanno si che, come per le microsfere "passive", il fattore di qualità *Q* di questi risonatori sia molto alto, essendo limitato solo dall'assorbimento intrinseco del materiale, e quindi siano possibili larghezze di riga di emissione inferiori a 100 kHz.

Il grande vantaggio dei vetri drogati con terre rare è che, grazie alla varietà dei livelli energetici di tali elementi, è possibile ottenere emissione luminosa in una banda di lunghezze d'onda che va dal vicino ultravioletto fino al medio infrarosso. Uno degli elementi più usati in fotonica è l'erbio,

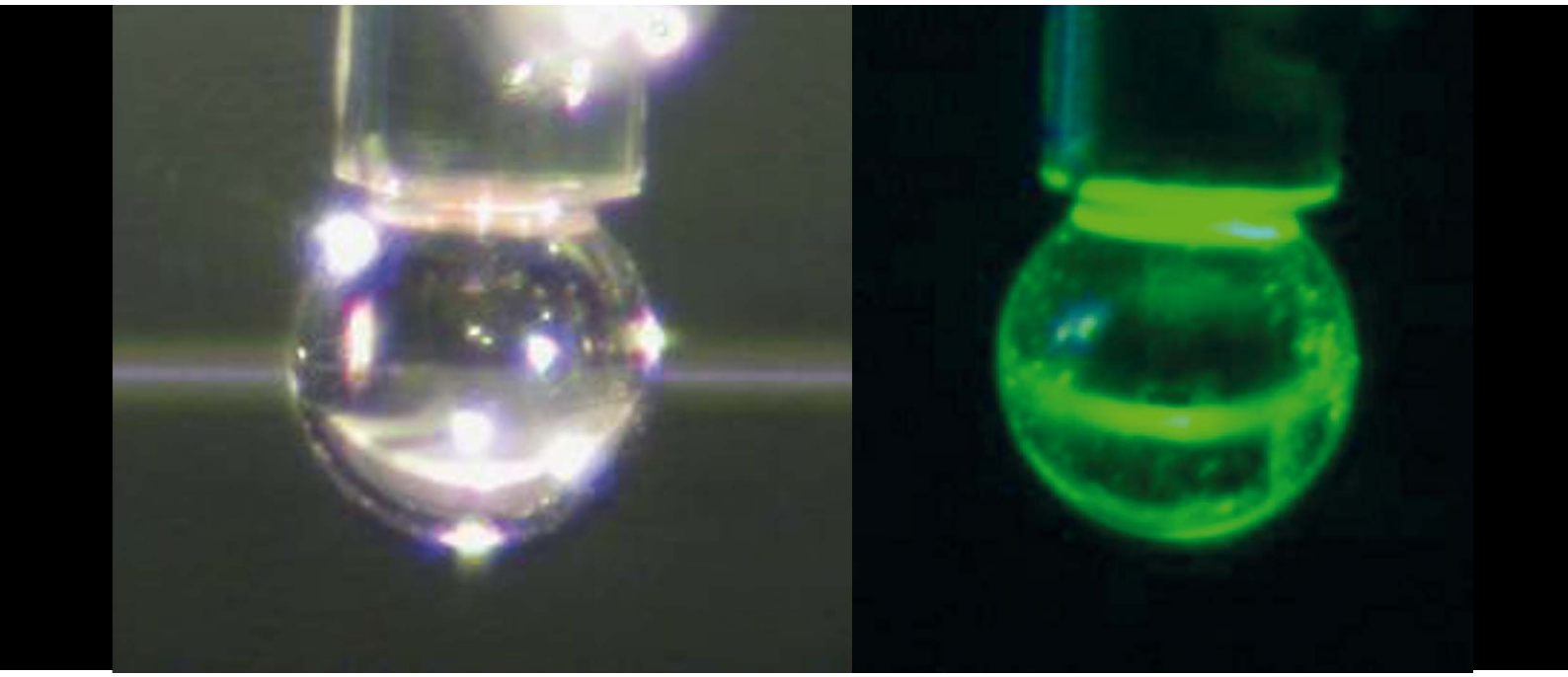


Fig. 12 Foto di una microsfera di raggio circa 250 μm ottenuta con il metodo della torcia al plasma e incollata sopra l'estremità di una fibra ottica. L'immagine a sinistra è ottenuta illuminando con luce bianca, quella a destra iniettando luce da un laser a 980 nm. Nella foto di sinistra si vede anche la fibra di accoppiamento, mentre a destra si vede il fascio dei modi WGM e la luce diffusa verde dovuta all'effetto di *upconversion* dell'erbio, causato da una alta potenza di pompaggio.

data la sua capacità di emettere intorno a 1,5 μm, cioè nella banda utilizzata nei sistemi di comunicazione in fibra ottica poiché corrisponde alle minime perdite di propagazione delle fibre stesse. Gli amplificatori ottici realizzati con fibre ottiche drogate con Er sono ormai parte integrante di ogni sistema in fibra per lunghe distanze, in quanto permettono di rigenerare il segnale ottico trasmesso. Naturalmente, la disponibilità di fibre drogate con erbio ha reso facile la realizzazione di microlaser sferici a partire da tali fibre, e numerosi lavori sono stati pubblicati su questi dispositivi. Unico inconveniente è che la concentrazione di erbio nelle fibre disponibili è abbastanza bassa (tipicamente tra 100 e 1000 parti per milione); se si vogliono concentrazioni più alte (ad es. 5000 o 10000 ppm), è necessario prima sintetizzare un vetro *ad hoc*, o attraverso la tecnica classica di fusione dei componenti o attraverso il processo chimico di *sol-gel* in cui si parte da una soluzione contenente composti metallorganici precursori.

Diversi accorgimenti devono essere adottati per ottimizzare le prestazioni di questi vetri e dei corrispondenti laser [21]: la concentrazione degli ioni di terre rare non può essere elevata a piacere perché altrimenti si innescano processi di trasferimento di energia tra gli ioni e si ha una diminuzione (*quenching*) della fotoluminescenza; anche la potenza del laser di pompa deve essere limitata per evitare fenomeni di assorbimento a due fotoni da parte degli ioni, che poi rilassano allo stato fondamentale emettendo fotoni di maggiore energia rispetto ai fotoni incidenti (fenomeno di *upconversion*). Nel caso degli ioni Er pompati nel vicino infrarosso (980 nm), l'*upconversion* si manifesta con l'emissione di luce verde (520 o 540 nm), evidente in fig. 12.

La potenza del fascio emesso da questi microlaser è comunque bassa, tipicamente dai μW ai mW, ma la potenza di pompaggio di soglia è anch'essa molto bassa, la riga di emissione è molto stretta, e la densità di potenza all'interno dei modi WGM è estremamente alta, così da permettere esperimenti di ottica nonlineare e di elettrodinamica quantistica in cavità. La sensibilità dei risonatori WGM alle variazioni del mezzo esterno rendono anche i microlaser adatti allo sviluppo di efficienti sensori.

4 Conclusioni

La genialità e l'ingegnosità di alcuni ricercatori e scienziati ha fatto anche di oggetti apparentemente molto semplici come le biglie di vetro utilissimi strumenti per la ricerca scientifica e lo studio della natura. Un filo lungo più di

due secoli lega le osservazioni microbiologiche di van Leeuwenhoek ai microsensori biologici e ambientali dei nostri giorni. Un'altra area da esplorare con attenzione sarebbe, poi, quella delle applicazioni tecnologiche, dove sono le proprietà meccaniche e termiche delle micro- e nano-sfere di vetro, piene o vuote (microbolle), a rivestire un ruolo fondamentale.

E, nello stesso tempo, rimane ancora la nostalgia per i giochi con le biglie sulla spiaggia o in giardino….

Ringraziamenti

Ringrazio la SIF e Giuseppe Grosso per avermi dato l'opportunità di scrivere questo articolo. Un sincero ringraziamento a tutti i miei colleghi presso IFAC CNR e IFN CNR con i quali ho avuto il piacere di lavorare per anni sui microrisonatori (e su altri argomenti), e un grazie particolare a Stefano Varas (IFN) alla cui competenza ricorro quando incontro problemi grafici e informatici.

Bibliografia

[1] G. C. Righini (Editor), *"Glass Micro- and Nanospheres. Physics and Applications"* (Jenny Stanford Publishing, Singapore) 2020 e riferimenti al suo interno.

[2] G. Galilei, "*Lettera a Federico Cesi*", in G. Gabrieli, "*Il carteggio Linceo*" (Accademia Nazionale dei Lincei, Roma)1996, pp. 942-943.

[3] F. Cesi, *"Apiarium" e "Melissographia"*, edizione critica digitale, `https://brunelleschi.imss.fi.it/apiarium/index.asp`

[4] R. Hooke, "*Micrographia, or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses, with observations and inquiries thereupon*" (Printed by Jo. Martyn and Ja. Allestry, printers to the Royal Society, London, 1665). Testo disponibile in rete: `https://www.gutenberg.org/ebooks/15491`

[5] `https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Facsimile_of_the_Leeuwenhoek_microscope_in_Utrecht_University_Wellcome_M0005632.jpg`

[6] M. Mansuripur, *"The Van Leeuwenhoek Microscope", Opt. Photon. News*, October 1999, pp. 39-42.

[7] A. J. M. Wollman, R. Nudd, E. G. Hedlund, M. C. Leake, *"From Animaculum to single molecules: 300 years of the light microscope", Open Biol.,* 5 (2015) 150019.

[8] A. Diaspro, *"Liquitopy® - addressing a new paradigm in optical microscopy", Il Nuovo Saggiatore,* Vol. 35, No. 1-2 (2019) p. 21.

[9] B. S. Luk'yanchuk, Y. W. Zheng, Y. F. Lu, *"Laser cleaning of solid surface: optical resonance and near-field effects", Proc. SPIE*, 4065 (2000) 576.

[10] L. A. Krivitsky, J. J. Wang, Z. Wang, B. Luk'yanchuk, "*Locomotion of microspheres for super-resolution imaging", Sci. Rep.*, 3 (2013) 1.

[11] B. S. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Domínguez, I. Minin, O. Minin, Z. Wang, *"Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow", Opt. Mater. Express,* 7 (2017) 1820.

[12] Lord Rayleigh, *"The problem of whispering gallery", Sci. Pap.,* 5 (1912) 617.

[13] C. G. B. Garrett, W. Kaiser, W. L. Bond, *"Stimulated Emission into Optical Whispering Modes of Spheres", Phys. Rev.,* 124 (1961) 1807.

[14] G. Righini, Y. Dumeige, P. Féron, M. Ferrari, G. Nunzi Conti, S. Soria, D. Ristic, *"Whispering gallery mode microresonators: Fundamentals and applications", Riv. Nuovo Cimento,* 34 (2011) 435.

[15] G. C. Righini, S. Soria, *"Biosensing by WGM Microspherical Resonators", Sensors,* 16 (2016) 905.

[16] S. Berneschi, F. Baldini, A. Barucci, F. Cosi, D. Farnesi, A. Giannetti, *et al., "Biosensing with Microresonators and Fibre Nanotips", IEEE Proc. ICTON 2013*, paper We.B2.4.

[17] F. Vollmer, S. Arnold, D. Keng, *"Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode", Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.,* 105 (2008) 20701.

[18] M. E. Anderson, E. C. O'Brien, E. N. Grayek, J. K. Hermansen, H. K. Hunt, *"The Detection of Helicobacter hepaticus Using Whispering-Gallery Mode Microcavity Optical Sensors", Biosensors* 5, (2015) 562.

[19] K. Miura, K. Tanaka, K. Hirao, *"Laser Oscillation of a Nd^{3+}-Doped Fluoride Glass Microsphere", J. Mater. Sci. Lett.,* 15 (1996) 1854.

[20] V. S. Sandoghdar, F. Treussart, J. Hare, V. Lefèvre-Seguin, J. M. Raimond, S. Haroche, *"Very low threshold whispering-gallery-mode microsphere laser", Phys. Rev. A,* 54 (1996) 1777.

[21] D. Ristić, S. Berneschi, M. Camerini, D. Farnesi *et al., "Photoluminescence and lasing in whispering gallery mode glass microspherical resonators", J. Lumin.,* 170 (2016) 755.

Giancarlo C. Righini

Laureato in Fisica all'Università di Firenze, ha percorso quasi tutta la sua carriera scientifica nel CNR, rivestendo anche i ruoli di direttore del Gruppo Nazionale di Elettronica Quantistica e Plasmi e del Dipartimento Materiali e Dispositivi. È stato anche direttore del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi. Attualmente è associato all'Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara (IFAC CNR). Co-fondatore e già presidente della Società Italiana di Ottica e Fotonica, è stato anche vicepresidente della International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) e della International Commission on Optics (ICO). I suoi interessi scientifici sono sempre stati nei campi dell'ottica e della fotonica, con particolare interesse per l'ottica integrata e i materiali vetrosi, pubblicando oltre 600 lavori. È socio benemerito della SIF e *fellow* di EOS, OSA e SPIE.

VISUALIZING ELUSIVE QUANTUM-MECHANICAL CONCEPTS THROUGH MULTI-IONIZATION EXPERIMENTS

G. STEFANI
Dipartimento di Scienze, Università di Roma Tre, Rome, Italy
CNR-ISM, Monterotondo Scalo (RM), Italy

Experiments on one-photon absorption two-electron emission in solids are reviewed in order to highlight their capability to put on sound experimental grounds some of the more widely used models for electron-electron correlation. Double Photoemission (DPE) and Auger Photoelectron Coincidence Experiments (APECS) give experimental validation to concepts that might be considered as pure mental abstraction, such as the exchange-correlation hole, the exchange-correlation energy and the one- or two-step ionization mechanism.

1 Introduction: the elusive electron-electron exchange-correlation energy and related models

Quantum mechanics has revolutionized the interpretation of the world: from neutron stars, to simple metals, to DNA strand breaks. On its reliability are based many of the technologies that we have nowadays at our disposal in fields as different as electronics, magnetism, solar cells and cryptography, to name a few. In spite of these unquestionable successes, after over a century there are fundamental problems still waiting for a solution. Among them, one nut hard to crack is the correlated motion of electrons in an external field. In the Hamiltonian of a system as simple as two electrons moving in the central Coulomb potential, *i.e.* the He atom, there is a term that still is not possible to treat exactly: the electron correlation due to electron-electron Coulomb-exchange interactions. In many-electron materials, that are the specific object of this paper, it is this term, hard to deal with, that determines chemical and physical properties. Among them, some are technologically relevant as, for example, high-temperature superconductivity, colossal magnetoresistence, self-assembly and magnetism.

A variety of models have been, and still are being, developed in order to overcome the difficulties of the theory while retaining the complexity of the many-body interaction effects.

In the mid '60s Hohenberg and Kohn and then Kohn and Sham put the basis for a theory that became the cornerstone for modern theoretical and computational approaches, whose essential ideas are that: a) every observable quantity of a quantum system can be calculated from the density of the system; b) the density of particles interacting with each other can be calculated as the density of an auxiliary system of non-interacting particles; c) the total energy, from which many system's properties can be calculated, is a functional of the density, whose form is universal, with a term indeed related to the exchange-correlation interaction. It is known as the Density Functional Theory (DFT) and accounts for the ground state only.

While DFT and its extension to the time domain (TDDFT), developed to describe excited states, are both exact in principle, their accuracies in practice are limited by the approximations for the exchange-correlation contribution to the total-energy functional and the corresponding interaction term in TDDFT. These approximations move from the local density approximation, in which the solid is considered locally as a uniform electron gas (LDA-DFT), to semi-local and semi-empirical functionals which deal with better description of the exchange. In practice, an adiabatic (*i.e.* time-averaged) interaction approximation is made to construct the exchange-correlation term of contemporary

applied TDDFT, meaning that excitations are described in a theory where the density at time *t* is not influenced by the density at previous times and relies, practically always, on a local approximation of the density. Several "Beyond DFT" theories have been developed in the last decades that greatly improve the description of the ground and excited states of a system, but rely on a perturbative approach that in most cases has a DFT starting point, inheriting several limitations of the latter.

A key question is whether the approximations adopted by the theories, that are crucial to describe highly correlated systems, are only mental abstractions or can actually lead to detectable features in experiments. In spite of the large number of experiments of ever increasing finesse so far performed, answering this question is still one of the most demanding tasks of the solid state experimental physics. This is because effects due to correlation remain rather elusive for spectroscopies such as photoemission, electron energy loss, Auger, etc., whose spectral response is primarily determined by independent quasi-particle behaviour. Conversely, correlation is related to the interplay of at least two active electrons, that has marginal influence on the response of this class of conventional spectroscopies [1]. Hence the effort devoted in the past 30 years to developing a new class of experiments whose spectral response carries evident signs of the correlated behaviour of electron pairs.

The idea that a photoemission event could affect more than one electron of the target was in embryo already in a 1905 Einstein's paper: "*However, we will not exclude the possibility that the electrons absorb only a part of the energy of the light quanta*" [2]. It is spontaneous to exploit the ejection of more than one electron upon absorption of a single photon to gain knowledge about electron correlation. For this purpose, photoionization reactions whose final state features two valence holes and two unbound electrons in the continuum must be used: in short, photoionization events in which a single photon strikes the target and two electrons are ejected (1 photon-in, 2 e-out). It is exactly through interaction of these holes and electron pairs that the correlation shapes the cross-section of double photoemission, thus providing an experimental reference to assess the goodness of the theories.

2 The mechanisms of multiple ionization

The archetypal processes by which a single photon ($h\nu$) is absorbed by a target (A) and creates doubly ionized final states ($A^{++}(v^{-1}v^{-1})$) are:

$$\textit{the direct valence double photoionization: } h\nu + A \rightarrow A^{++}(v^{-1}v^{-1}) + e_1 + e_2 \text{ and}$$
$$\textit{the core hole Auger decay: } h\nu + A \rightarrow A^{+}(c^{-1}) + e_1 \rightarrow A^{++}(v^{-1}v^{-1}) + e_1 + e_2.$$

In both cases, the Coulomb interaction between valence electrons (v) is responsible either for the direct promotion of the valence electrons pair ($e_{1,2}$) to the continuum (DPE) or for the core-hole (c^{-1}) autoionizing decay with emission of an Auger electron (e_2) paired to the core photoelectron (e_1) (APECS) [1]. It is to be noted that the two processes share a similar, often identical, final doubly charged ionic state. Independently of the interaction mechanism, it is exactly through these doubly ionized states that are unravelled electron correlation effects otherwise undisclosed. In both cases, the experiment implies detecting in coincidence two free electrons ($e_{1,2}$) and in measuring their energy or linear momentum.

High photon energy (several keV) DPE experiments on solids were firstly proposed in the late 1970s [3] to investigate electron correlation in the ground state. Then, using the He atom as a test bed, it was shown that even at intermediate photon energies (few hundred eV) the DPE cross-section factorizes in such a way that from the distribution in energy of

the electron pairs the spectral density of the two-particle Green's function can be derived, therefore providing a spectroscopy of the doubly ionized states [4]. Later it was argued that even at low photon energies (tens of eV) DPE provides detailed information on correlation in solids [5]. Evidence of the influence of correlation on the DPE spectrum was also predicted in the case of semiconductors and nanostructures such as quantum dots [6] and the correlated behaviour of the electron pair was predicted to influence the diffraction from the crystal lattice [7,8]. All of these theoretical results established DPE as a suitable tool to study electron correlation and many-body effects at large in solids.

When the energy of the photon exceeds the core ionization threshold, DPE is no more the only channel to generate doubly ionized states, because the APECS channel is open [1]. Also in this case, the most complete way to study the process is to detect in time coincidence the Auger-photoelectron pair and to analyze the two partners in energy and in ejection angle (AR-APECS). The feasibility of the APECS experiment was first demonstrated in the late 1970s [9, 10].

While in DPE the fraction of photon energy that exceeds the double ionization threshold is continuously shared between the two final electrons, in APECS the energetics of the final electron pair is mostly determined by the core-hole lifetime as compared to the electron-electron Coulomb interaction time. For long enough lifetime [11] the energy of the core-hole intermediate state is well defined and the so-called "two step model" is adequate; *i.e.* core ionization and Auger auto ionization are treated as fully independent processes. As a consequence, the kinetic energy of the two final electrons will be uniquely defined and readily identifiable: the photoelectron energy is determined by the balance of the photon energy and the core state binding energy; the Auger energy is determined by the difference in total energy between the core-hole and the final two valence-hole state. On the contrary, for short enough lifetime, the energy of the core-hole is ill defined and the energy conservation holds for the initially neutral and the final doubly ionized states only. Under these circumstances, Auger and core ionization are no more independent processes and the generation of the correlated electron pairs must be described beyond the independent particle scheme, considering photoemission and Auger decay as a unitary coherent process. Consequently, the final electron pair shares continuously the excess energy and the process becomes similar to a DPE that proceeds through an intermediate core excited resonant state [12]. In this latter case, a "one-step model" must be used to describe the APECS process; the intermediate state becomes virtual and spans over all excited states, including the continuum, and the Coulomb operator, responsible for the Auger decay, acts on the complete many-body system involving both final electrons.

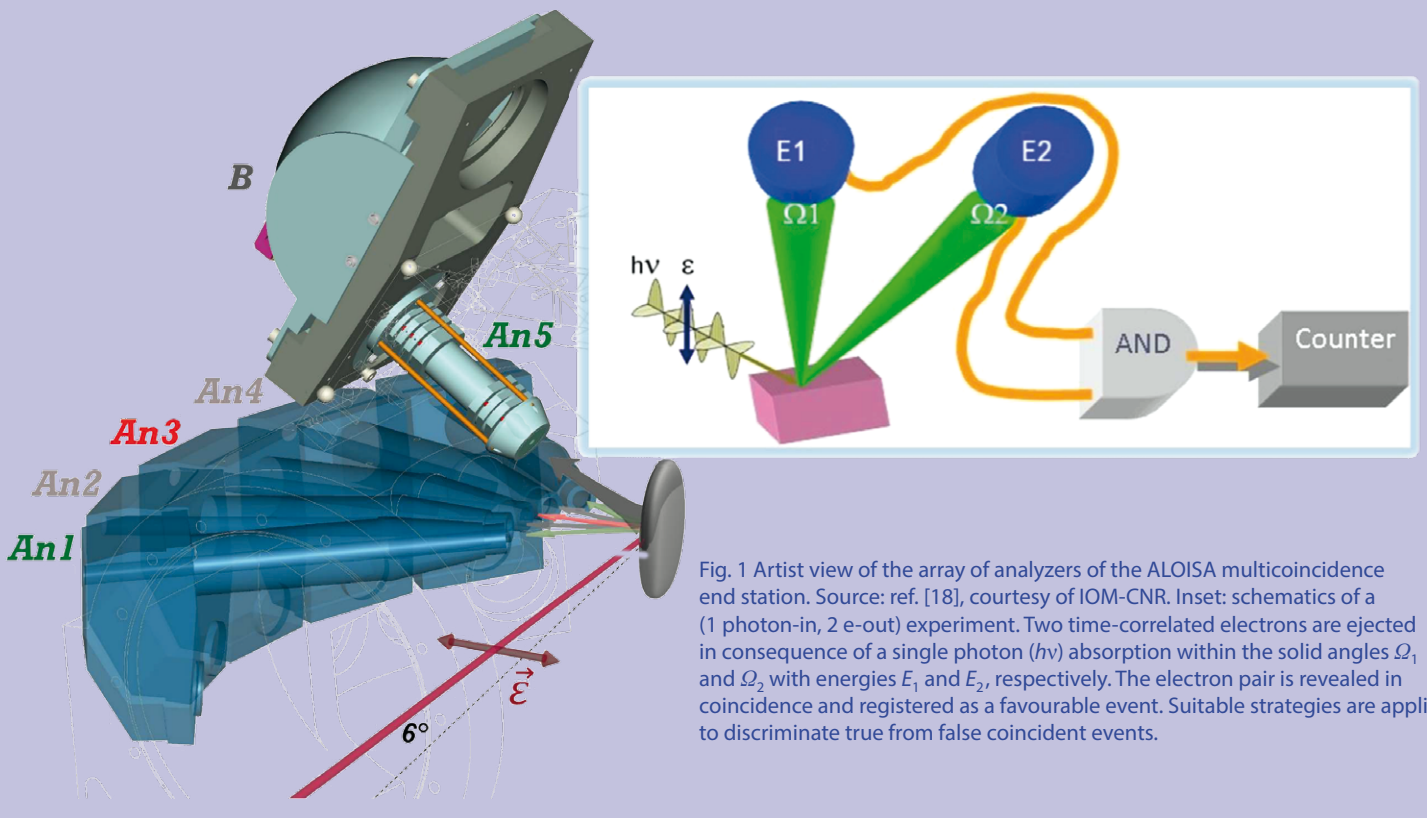


Fig. 1 Artist view of the array of analyzers of the ALOISA multicoincidence end station. Source: ref. [18], courtesy of IOM-CNR. Inset: schematics of a (1 photon-in, 2 e-out) experiment. Two time-correlated electrons are ejected in consequence of a single photon ($h\nu$) absorption within the solid angles Ω_1 and Ω_2 with energies E_1 and E_2, respectively. The electron pair is revealed in coincidence and registered as a favourable event. Suitable strategies are applied to discriminate true from false coincident events.

3 Instrumentation for multiple ionization experiments

The scheme of principle for experiments on solids based on two-electron emission via single-photon absorption is shown in the inset of fig. 1. A monochromatic beam of photons with controlled polarization ε impinges onto the sample surface. The two final electrons are detected within the solid angles Ω_1 and Ω_2 and selected in the energies E_1 and E_2 by the electron spectrometers. The electronic signals generated by the detectors are fed to a coincidence circuitry correlating them in time in order to discriminate pairs generated in the same ionization event (true coincidences) from those generated in independent events (false) [13]. To see a wide application of this method we must wait for the end of the past century [14] while conventional photoemission spectroscopy had already flourished in the 1960's.

The challenge for double photoemission experiments lies in the smallness of the multiply differential cross-section that is at least three orders of magnitude smaller than the conventional single photoemission one. Furthermore, the need to reveal two coincident electrons decreases the luminosity of a coincidence apparatus by additional orders of magnitude with respect to a photoemission one. This handicap has been partially overcome on the one hand by the advent of high brilliance, tuneable and polarization controlled lasers and third-generation synchrotron radiation sources, and on the other hand by the development of setups that allow the simultaneous detection of many pairs of electrons at various energies and in a wide solid angle. Multicoincidence spectrometers have been realized in different ways in the United States [15], Germany [16], Japan [17] and Italy. The latter, used here as a prototypical example of multicoincidence spectrometer, is the end station of the ALOISA beamline at the ELETTRA synchrotron radiation facility [18], that is pictorially sketched in fig. 1. Six hemispherical analyzers are hosted inside an ultra-high vacuum chamber and can be independently tuned on either one of the E_1 or E_2 energies, thus allowing to simultaneously collect a plurality of coincidence spectra. The electron spectrometers are mounted on two independently rotatable frames (analyzers A and analyzer B) thus providing ample flexibility in setting them with respect to the experiment quantization axes: the electric vector ε of the linearly polarized light beam, and the sample surface normal.

The output of the experiment is efficiently represented by a tridimensional plot of the coincidence count rate *versus* the kinetic energies E_1 and E_2: in short the 2D energy spectrum. It is to be kept in mind that in the dipole approximation and in the absence of electron-electron interaction the probability for generation of electron pairs is zero. Hence, a 2D energy spectrum, such as the one depicted in fig. 2, is primarily modulated by correlation effects. APECS and DPE events are expected to display markedly different features that in essence can be reduced to the ones sketched with white ellipses in fig. 2. For DPE the single-step model holds, the energy in excess of the double ionisation threshold determines the sum energy $E_{sum} = E_1 + E_2$ and is continuously shared between the pair. The coincidence events are then expected to be distributed as a ridge of coincidence counts at constant E_{sum} as indicated by the long white ellipse in fig. 2. The width Γ_1 of the ridge is linked to the lifetime of the two-hole final state. For the two-step model, appropriate for the APECS events, the coincidence rate is expected to be localized only in areas where E_1 and E_2 assume the well specific photoelectron and Auger values (E_{pe}, E_{Au}), like in the twin white ellipses in fig. 2. Also in this case E_{sum} is a constant but the width Γ_2 is now related to the core-hole lifetime. In both cases, DPE and APECS, the energy balance between photon energy and E_{sum} is an observable related to the energy of the doubly ionized state ($E(A^{++}(v^{-1}v^{-1}))$ through the relation

$$E_{sum} = h\nu - [E(A) - E(A^{++}(v^{-1}v^{-1}))].$$

Summing up all the coincidence events characterized by an identical E_{sum} it is then possible to measure a binding energy spectrum of the doubly ionized final states, which is not achievable by conventional photoemission.

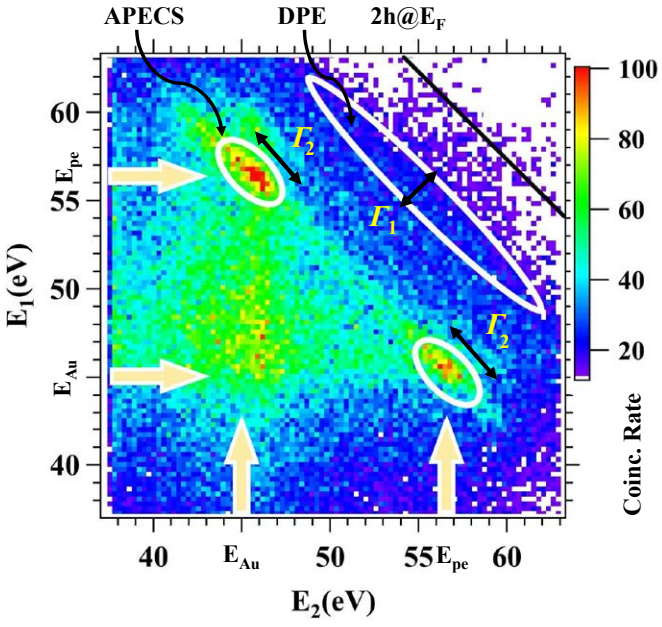


Fig. 2 Typical 2D intensity distributions (in false colour) of electron pairs in a (1 photon-in 2 e-out) experiment. The data are relative to a Cu(001) surface excited by linearly polarized 125 eV photons. 2h@E_F, DPE and APECS label, respectively, double-ionization events originated at the Fermi level, directly at the 3*d* states and, most intense, core-resonant processes. E_{pe}, E_{Au} label the 3*p* photoelectron and the $M_{2,3}$VV Auger energies, respectively. See the text for further details. Source: ref. [19]. Reprinted with permission, © 2010 IOP Publishing Ltd.

The correctness of this schematism is demonstrated by the results of an experiment conducted on a Cu surface with 125 eV photons, that are also shown in false colour in fig. 2 [19].

The spectrum displays an onset at states with two holes in the Fermi level ($^{2h}E_F$ full line in fig. 2). The increase in coincidence rate inside the white ellipse labelled DPE corresponds to states with two holes in the localized Cu 3*d* band. This feature is correctly described by DPE and shows an almost even distribution of probability of the E_1 and E_2 energies.

This is not the case for the sharp structures in the twin ellipses. It is easily verifiable that those peaks of intensity happen when E_1 and E_2 correspond to a 3*p* photoelectron and to a $M_{2,3}$VV Auger. In addition, there is a continuum of coincidence rate underlying these two APECS structures, extending all along the diagonal at E_{sum} constant, that conversely can be explained only an a DPE framework. These findings provide evidence for inadequacy of a sharp distinction between the two aforementioned mechanisms of creating correlated electron pairs and for the need of a unitary description of the electron pair generation in terms of a double photoemission that resonates at the core ionization energies [12].

It is the aim of the following sections to exploit the features induced by correlation in the double photoionization cross section in order to discuss value and limitation of the approximations widely used in describing quantum-mechanical properties of highly correlated solids.

4 The exchange-correlation hole

The so-called exchange correlation hole (XC_{hole}) is a model widely adopted in condensed matter in order to embed in theories the correlation effects due to exchange and Coulomb interactions. In essence, it assumes that in an otherwise uniform gas of electrons, each one of them is surrounded by a sphere of depleted probability of finding a second electron, *i.e.* of depleted charge density. The pair correlation function yields the probability of finding a second electron at a given distance from the first one. Taking into account electron correlation, this function turns out to vanish at short distances and tends to one starting from distances of few Ångstroms. It thus establishes a sphere of reduced probability that represents the XC_{hole} in the direct space. The question to be answered is whether the XC_{hole} is a computational artifice or it is liable to experimental testing.

There is a close connection between the XC_{hole} and the angular distribution of the electron pair in a DPE event. This occurs because in any scattering process, features of the target charge distribution in direct space do appear as features of the scattered particles probability distribution in the conjugate momentum space. Therefore, a depletion of charge density in the target should modulate the pair probability in the DPE angular distribution as well.

This "hand waving" reasoning was put on firmer grounds by a DFT calculation of the DPE cross section performed for a Cu surface, that takes explicitly into account mutual exchange and Coulomb interaction between the two electrons involved in the photoemission [6]. The DPE intensity, *i.e.* the probability of detecting electron pairs, is reported in a 2D representation in fig. 3. The calculation is carried out at a photon energy of 42.4 eV and equal electron energies of 16 eV. One electron is directed along the direction normal to the surface (fig. 3a) and at 30° from it (fig. 3b), while the second electron angle is varied and the double photoemission intensity is plotted versus its momentum components parallel to the surface. From the distribution represented in false colour, the presence of a circular zone of depleted probability is evident whose centroid coincides with the direction of the fixed in angle electron (white dot in fig. 3a and b), followed by a ridge of maximum whose radius is related to the XC_{hole} radius.

These predictions make a good account of an experiment conducted on a Cu surface under similar experimental conditions, with 50 eV photons and energies of 23 eV for one electron and of 12 eV for the other. Parallel detection of electron pairs with different momentum (direction of flight) was obtained by the use of time-of-flight spectrometers with wide accepted solid angles [20]. The results of the experiment are shown in fig. 3c-f. The fast electron was detected at –1rad off-normal (fig. 3c) or 1rad off-normal (fig. 3e) within the solid angle marked by the vertical dashed lines. The slow electron spanned over the full solid angle accepted by the experiment (in the figures Θ and Φ are the electron take-off angles). In panels c and e the intensity for correlated emission of electron pairs is reported in false colour and a zone of depleted probability is evident surrounding the direction of the fast electron (indicated with the white dot). This effect is even more evident if the coincident events are summed along Φ and reported as a function of Θ, as in fig. 3d and 3f. In both cases, the coincidence rate displays a clear minimum in correspondence to the fast electron ejection angle and a ridge of intensity for electrons emitted at ~1.2 radians away from each other, in agreement with the predictions.

Hence, the reduced probability of finding electron pairs with small relative momentum implies a very low number of strongly interacting electrons within a sphere of a few Ångstroms radius. In other words, the depletion of coincidence rate measured as a function of the ejection angles, *i.e.* in the momentum space, reflects the existence of a XC_{hole} in the direct space.

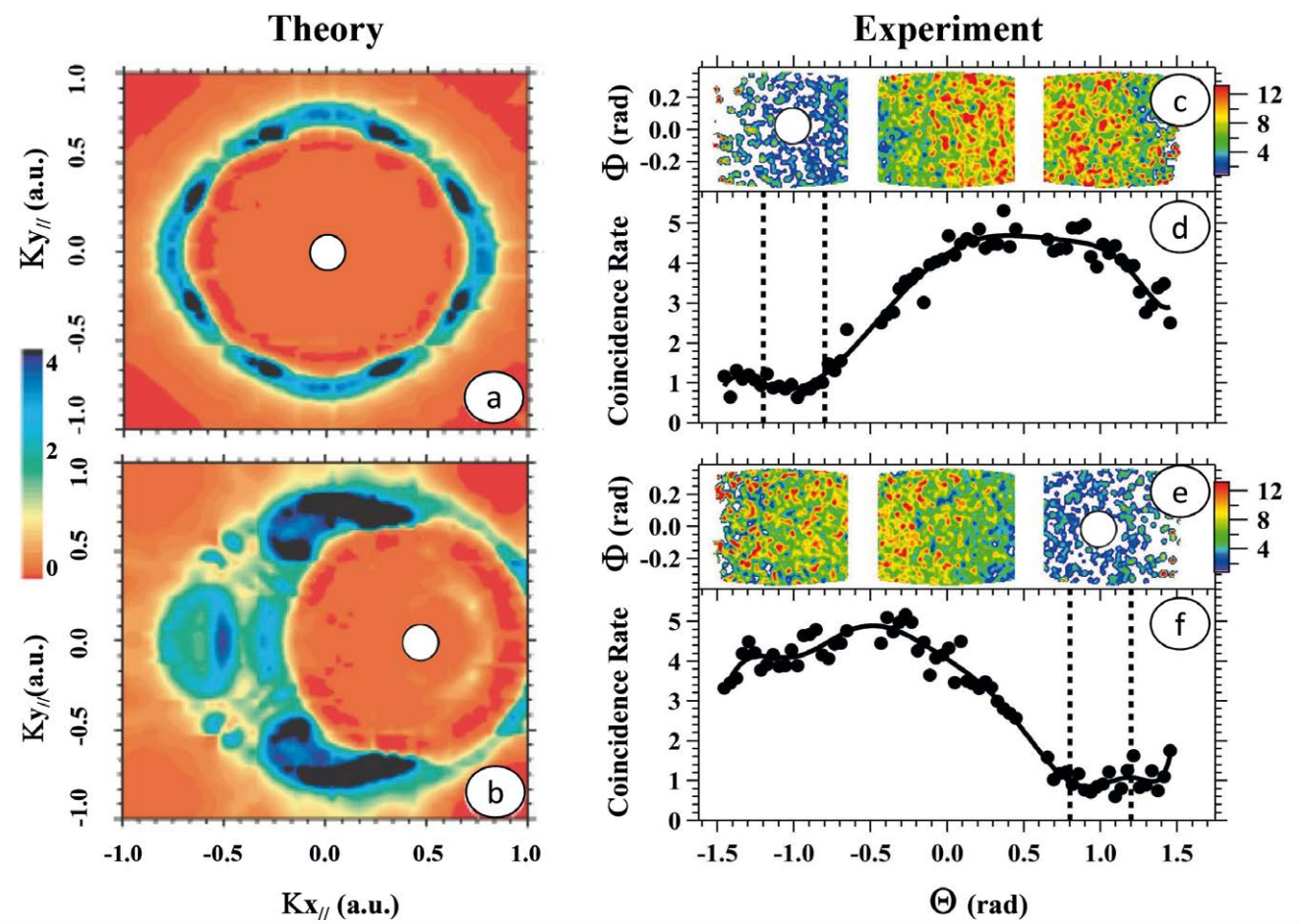


Fig. 3 Angular distribution of DPE intensity from a Cu surface. Theoretical results for $h\nu = 42.2$ eV, $E_1=E_2=16$ eV are shown in false colour for one electron (white dot) fixed at the surface normal (panel a) and at 30° from normal (panel b) [6]. Results of an experiment performed on the same metal, at $h\nu = 50$ eV, $E_1 = 12$ eV and $E_2=23$ eV are shown by the 2D angular distributions in panels c and e. The fast electron is detected within the solid angle indicated by the dashed lines. The line scans in panels d and f show the integral along the variable Φ of the DPE intensities of panels c and e. The solid lines are guides to the eye. The reduced probability of detecting electron pairs with small relative momentum is evidence for the existence of XC_{hole}. Source: ref. [20]. Reprinted with permission from https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.257604 © 2007 American Physical Society.

5 The core relaxation dynamics

In recent years, much attention shifted from understanding the behaviour of strongly correlated solids in equilibrium to their behaviour when suddenly excited out of equilibrium. In a wide variety of time-resolved experiments a many-body system is rapidly driven out of equilibrium and then its electronic structure is investigated. Among them are the successful pump-probe experiments, that were made possible by the availability of extremely intense and ultrashort (femto- or pico-seconds) light pulses. Ultra-short light pulses are not the only possible experimental approaches at our disposal. Upon core ionization, the charge rearrangement gives rise to a dynamical screening of the hole whose time scale (from atto- to femto-seconds) depends on the strength of the interaction. Charge screening happening on different time scale influences differently the photoemission and Auger energy spectra. For this reason APECS experiments could give access, through energy selection rather than time selection, to the fast relaxation dynamics of the fermionic gas in a solid.

When the two step (quasi-particle) model collapses, the core-hole state is not any more a true "stationary" state, then the one-step model is more appropriate and both photoelectron and Auger spectra become so broad in energy that the distinction between the two is fuzzy. Under these conditions, the energy distribution of the final electrons of an APECS experiment resembles a DPE distribution resonant through a virtual core hole state rather than a pure APECS one.

The Ag 4*p* photoemission peak is fairly broad, while the 3*d* is rather sharp. Hence, Ag is a good candidate to induce, through ionization of different core levels, either fast or

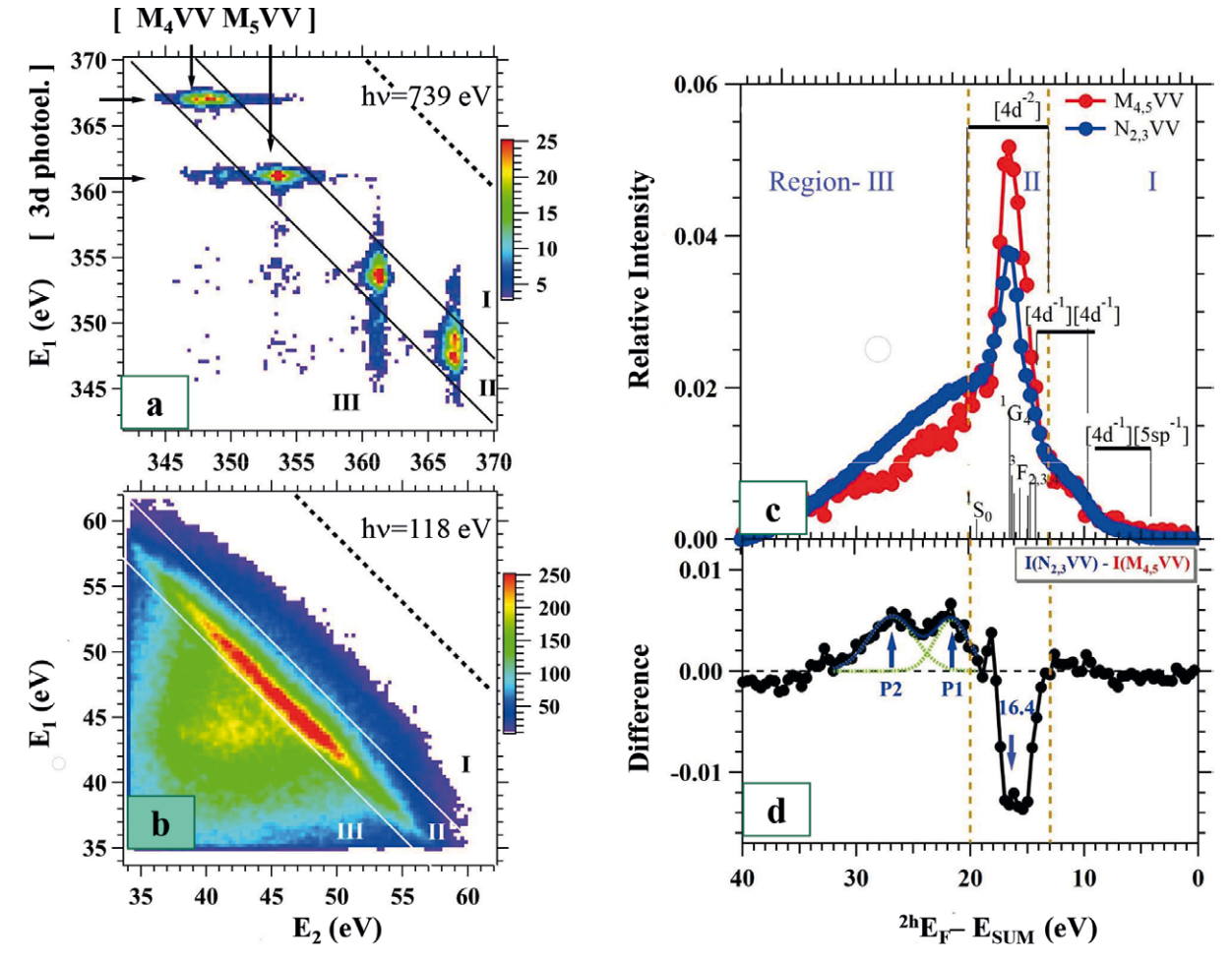


Fig. 4 The 2D energy distributions of photoelectron pairs probability from a silver surface with photon energies 739 eV and 118 eV in panel a) and b), respectively. The dotted lines indicate events with two holes at the Fermi level ($^{2h}E_F$). In both a) and b) panels the solid diagonal lines confine regions where E_{sum} ranges from 13 to 20 eV below $^{2h}E_F$. In panel c) is reported the sum along E_{sum} constant of the 2D energy distribution of panel a) (red dots) and panel b) (blue dots) normalized to the same area. In panel d) is the difference of the spectra that highlights the presence of satellite states, P1 and P2, due to ultrafast, core ionization (see text for details). Source: ref. [21]. Reprinted with permission from https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.267603 © 2014 American Physical Society.

slow screening effects within the same valence band. This possibility was exploited by an experimental study on Ag that features a 3*d* photoemission peak (binding energy 378 and 372 eV for 3/2 and 5/2 spin-orbit components) that is only 0.3 eV wide (long-lived core state), while the 4*p* (binding energy 64 and 58 eV for 1/2 and 3/2 spin orbit) is 13 eV wide (short-lived core state). Energy spectra were recorded for electron pairs associated to the processes $4p^{-1} \rightarrow 4d^{-1}4d^{-1}$ and $3d^{-1} \rightarrow 4d^{-1}4d^{-1}$, that have identical final states but sharply different intermediate core-hole lifetime [21]. The 2D energy distributions for the aforementioned 3*d* and 4*p* double ionization are reported in fig. 4a and b, respectively. While for the 3*d* ionization electron pairs are found only at well-defined energies of the Auger and photoelectron (the four intensity maxima in region II of fig. 4a), in the case of 4*p* a continuous sharing of energies is measured (the intensity ridge of region II of fig. 4b). It is therefore evident that the $3d^{-1} \rightarrow 4d^{-1}4d^{-1}$ proceeds via a two-step process, while the $4p^{-1} \rightarrow 4d^{-1}4d^{-1}$ proceeds via a single-step one. To compare the two cases, it is convenient to project the coincidence rate on the variable $E_{sum} = (E_1 + E_2)$, that is related to the binding energy of $4d^{-1}4d^{-1}$ states, measured in relation to the binding energy of the state with two holes at the Fermi level ($^{2h}E_F$), see fig. 4c.

It is evident that the two spectra share the same pattern of final states in region II (two valence holes in the same atomic site) and in region I (holes in different sites): a same multiplet of quasi-atomic, strongly correlated, states dominated by the $^1G\ ^3F$ [22]. Taking into account the difference of the spectra, normalized at the same total area, reported in fig. 4d, clearly emerges that for the 4*p* ionizations there is a transfer of transition strength from the relaxed region II to the unrelaxed single and double interband excitations of region III (peaks P1 and P2 of fig. 4d). This is because the $4p^{-1}$ state is degenerate in energy with the $4d^{-2}4f$ and fast fluctuation between the two happens. The fluctuation time is of the order of tens of attoseconds, as deduced from the width of the energy distribution of the final electrons, tens of eV in the case of $4p^{-1} \rightarrow 4d^{-1}4d^{-1}$ (see fig. 4b).

In conclusion, by the APECS experiment we learn notions about the dynamical screening of core holes happening on the attosecond time scale, not obtained by conventional Auger and photoelectron spectroscopy. Core-resonant double photoemission is a powerful tool to investigate ultrafast charge screening dynamics that is relevant to modelling the transport of hot electrons in solids.

6 The exchange-correlation energy

To accurately describe the electronic structure of strongly correlated solids, careful control must be gained of the correlation energy *U* whose knowledge is crucial in order to perform reliable calculations beyond mean-field approximations. The Auger line shape has always been considered to be very sensitive to correlation. Cini and Sawatzky's work (CS) [23, 24] evidenced that the Auger line shape, simply determined by the autoconvolution of the valence band Density Of States (SC-DOS) in the absence of correlation, is profoundly modified if the correlation energy *U* is taken into account. In their models, as *U* increases and becomes comparable to the valence bandwidth *W*, the Auger line shape changes from an almost featureless SC-DOS to a sharp atomic-like structure determined by two-hole resonances in the Auger final state [23, 24]. Hence, the Auger spectrum is the ideal candidate to provide evidence of concreteness and value of *U*, as clearly shown in fig. 5 where the Auger profile, calculated for the majority band of a thin iron film deposited on a copper surface [25], evolves from purely band-like when *U*=0 (black dashed line) to strongly atomic-like when *U*=8 eV (red line).

Unfortunately, in most cases Auger spectra originating from different core holes do overlap, partially or totally, in energy thus hampering the possibility to derive unique information on *U* from their line shape. This drawback is overcome if the Auger electron is measured in coincidence with a specific photoelectron in an APECS experiment.

Provided the two-step model holds, by these experiments a different Auger profile is measured for each specific and well defined core hole. This claim is exemplified by a paradigmatic study on S atoms adsorbed on the Cu(100) surface [26]. The result is depicted in the 2D energy distribution of the coincidences shown in fig. 6a. The energy chosen for the photon allowed both the L_2 and L_3 photoelectrons and the L_2VV and L_3VV Auger to fall into the energy window accepted by the spectrometer. Using the notions deduced from fig. 2 about the pair generation mechanism, it is immediately clear that the distribution of coincident events is typical of APECS processes, and therefore the experiment can be interpreted in the framework of the two-step model. Selecting only events characterized by an identical photoelectron, the overlap in energy of the Auger spectra is erased on physical basis. Selecting pairs with one of the energies equal to the L_3 photoelectron, the pure L_3VV spectral line (bright ridges of high coincidence rate inside the white rectangles in fig. 6) is measured, and the result is reported in the linear energy graph of fig. 6b. Unlike conventional Auger spectroscopy, the APECS spectrum shows several features that can be interpreted with the help of theoretical predictions. The sulfur L_3VV line shape has been predicted computing within an LDA-DFT approximation the SC-DOS in the presence of a Cu surface, and then applying the CS model for different *U*. The results obtained for three *U* values (0, 0.3 and 0.4 eV) are reported, convoluted with the experimental broadening, in fig. 6b together with the experimental spectrum [26]. The first observation is that from the onset, and down to an energy of 145 eV, the APECS line shape is well reproduced by the model

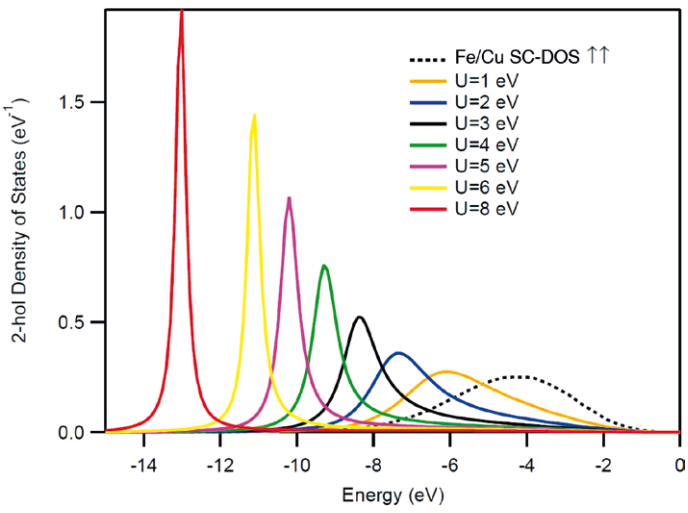


Fig. 5 The Auger line shape computed for the iron majority band in the absence of exchange-correlation effects (*U*=0 black dotted line). The correlation is accounted for by the Cini-Sawatzky model and computed for different values of *U*. The spectrum evolves with increasing *U* from pure band-like at *U*=0 to sharper transitions at lower energies due to hole-hole resonant states [25].

with U=0.3 eV. This is a clear evidence of the APECS capability to give direct experimental access to the U value, even in case of moderate correlation energy as the present one. The second observation is that the low-energy side of spectrum (E<145 eV) corresponds to final states with two holes located below the bottom of the valence band. The peak appearing at about 143 eV in the experiment-theory difference (fig. 6c) is sharp with respect to the two-hole final state spectrum and so extrinsic excitations, such as energy losses suffered by the electrons while leaving the target, are to be ruled out. The structure is to be interpreted as Auger intrinsic satellites, perhaps due to extra hole creation within the autoionization process, also resulting from correlation in the valence band and not accounted for by the CS model.

It can therefore be concluded that by two-step APECS it is possible to associate the theoretical parameter U with observables experimentally quantifiable.

7 The spin-dependent exchange-correlation energy

The magnetic properties of solids are explained in terms of exchange interactions, that split the valence band into "majority" and "minority" spin bands unevenly populated, thus giving rise to spin polarization, *i.e.* magnetization. APECS experiments resolved in the ejection angles of the electron pair (AR-APECS) have disclosed a spin dependence of the exchange-correlation term U.

Let us consider an AR-APECS event initiated by a linearly polarized photon where the photoelectron is detected along a direction aligned with the light polarization vector. Only the subset of core-hole states with magnetic quantum number m_l=0 is selected. By detecting in coincidence the subsequent Auger electron, it is possible to focus on autoionizing events that originate not from a statistical population of core-hole states but from a given subset, hence from an aligned core state. By selecting in angle the Auger, a further constraint is imposed on the m_l of the Auger wave function. Taking into account these discriminations and the selection rules valid for photoemission and Auger processes, a propensity rule for the creation of specific final states with two valence holes is established [27]. According to these propensity rules, when both the final electrons are aligned with the light polarization (AA geometry) low-spin final states are preferentially populated. On the contrary, when only the photoelectron is aligned and the Auger is not (AN geometry), high-spin final states are preferentially accessed. In practice, AR-APECS measurements are selective in the total spin of the final state without having to perform an experimentally inefficient spin selection on the detected electrons, as it is done in the conventional spin-selected spectroscopies.

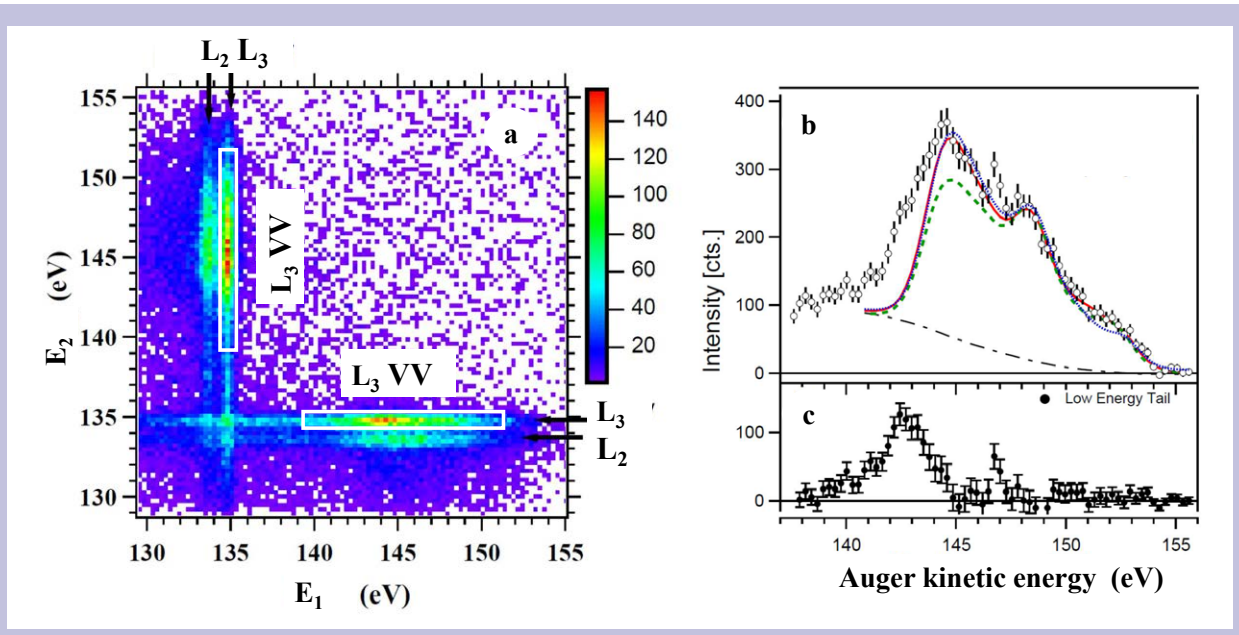


Fig. 6 (a) 2D energy spectrum of *e-e* coincidences from S atoms deposited on a Cu surface. The distribution clearly supports the hypothesis that the process is purely of APECS type. The black arrows indicate the $2p_{1/2}$ (L_2) or $2p_{3/2}$ (L_3) photoelectron energies. Inside the two white rectangles is the energy distribution of L_3VV Auger coincident with the $2p_{3/2}$ photoelectrons. (b) Linear energy distribution of the L_3VV Auger derived from the highlighted zones in panel a. Fits to the line shape are generated by the Cini-Sawatzky model calculated for: U=0 eV non-interacting particles (green dashed line); U=0.3 eV that provides the best fit to the experimental data (red solid line), and U=0.4 eV (blue dotted line). A Shirley-type integral background (black dash-dotted line) is also shown. (c) Difference between the experiment and the CS best predicted spectrum. Source: ref. [26]. Reprinted with permission © 2015 IOP Publishing Ltd.

In the following, selected findings are reported from an AR-APECS study on a ferromagnetic Fe film deposited on a Cu substrate [28]. The conventional $M_{2,3}$VV Auger spectrum of iron is a featureless band-like structure. It does not bear any direct information on the correlations that instead are expected to be important in magnetic systems. The same spectrum was measured in coincidence with the Fe 3*p* photoionization line and in two geometries, and the fits to the experiment are shown by dashed lines in fig. 7. The results are now much more interesting in as much as different line shapes are obtained in different geometrical conditions. Precisely, when the experiment was conducted in AN geometry (green dashed line), an additional peak clearly rises at an energy of 38 eV, well below the position of the main structure of the spectrum at 43 eV, that is present in both AN and AA (red dashed line) geometries. Referring to the propensity rules mentioned above, it is conceivable to attribute the two structures to high-spin and low-spin final states, respectively. This qualitative interpretation was put on solid quantitative footing by modelling the AR-APECS line shape taking into account all the allowed final spin configurations in which the system can be left. The electronic structure of an iron film deposited on Cu was calculated within a LDA-DFT approach [28].

If *U* is not taken into account, the model predicts the energy feature at 43 eV but not the one at 38 eV. To reproduce the transition observed at 38 eV, the single-particle SC-DOS must be replaced by an interacting two-hole DOS, as proposed by Cini and Sawatzky [23, 24] (green and red continuous line in fig. 7). In particular, for the calculation to reproduce the experiment, the correlation term *U* must be 2.7 eV for the two holes in the majority band and 0 eV in all other cases. Having introduced the spin dependence of the exchange-correlation, the full spectrum is described by the model in all geometries. The meaning is that different on-site electron-electron interactions exist in the same system, depending on the spin of the electron pair, and the hole-hole interaction is stronger when two majority spins are involved. This should influence photoemission and spin-dependent transport properties predictions for other magnetic systems as well.

8 Perspectives

The present concise overview of the double photoemission experiments on solids, performed with a coincidence technique, shows that these methods allow direct verification of the principal models used in describing the correlated properties of solid. In particular, it is possible to obtain in a direct experimental way information on: existence and extension of the exchange-correlation hole; strength of the exchange and correlation interactions; dynamical screening effects on tens of attoseconds scale; spin dependence of exchange-correlation in magnetic materials.

These are concepts introduced by quantum-mechanical models and the fact that they are directly connected to experimentally detectable effects provides a sort of exchange-correlation imaging. All this is of paramount relevance in modelling both microscopic and macroscopic properties of highly correlated solids.

These experiments, however, have still a yield of counts that is too low to be proposed as routine spectroscopies for material characterization. However, It should be borne in mind that, over the past 30 years, the time needed to perform a campaign of such measurements has decreased from a few weeks to a few hours. Such a progress is certainly due to the fast development of the synchrotron radiation and laser characteristics, but mainly to the impetuous development of parallel detection of the photoelectrons pairs, and to the remarkable increase in the throughput of the electron analyzers. A good example is the bursting of time-of-flight methods at the scene of electron spectroscopies.
It must ultimately be considered that so far these spectroscopies have mostly been achievable at large synchrotron radiation facilities. However, due to the rapid development of UV and soft X-ray lasers, the realization of efficient on-campus experiments has been already reported [29] and multionization spectroscopies are expected to be carried out in the future at academic or even industrial laboratories.

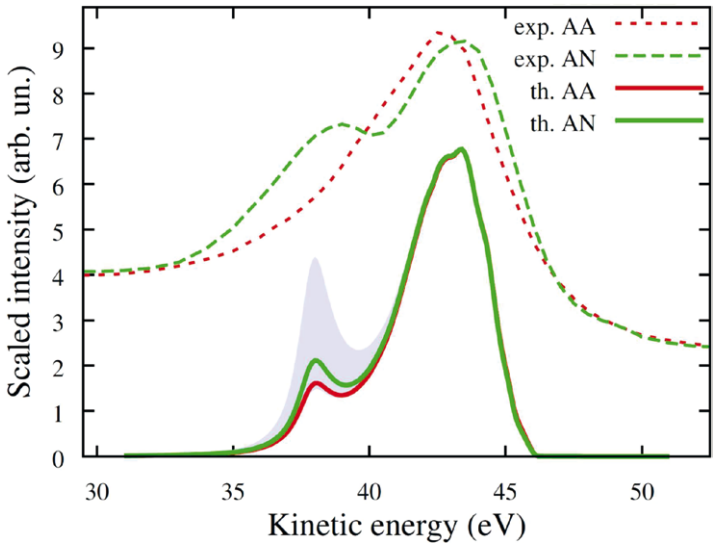


Fig. 7 Fits to experimental AR-APECS Fe $M_{2,3}$VV Auger spectra from a Fe layer on a Cu surface taken in AA (dashed red line) and AN (dashed green line) geometry. The red (green) solid line is the AR-APECS lineshape computed by the CS model in AA (AN) geometry. The grey peak is the prediction for electrons 90° apart (not achieved in the experiment). Source: ref. [28]. Reprinted with permission from https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.126401 © 2012 American Physical Society.

Acknowledgments

The ideas presented are the result of a fruitful cooperation with a number of colleagues. It is impractical to mention all of them but it is just impossible not to mention R. A. Bartynski, J. Berakdar, M. Cini, G. DiFilippo, R. Gotter, S. Iacobucci, J. Kirshner, A. Ruocco, F. O. Schumann. A special mention is deserved to F. Da Pieve and F. Offi for also critically reading the manuscript. Partial financial support from PRIN 2015 NEWLI: NEW Light on transient states in condensed matter by advanced photon-electron spectroscopies, Protocol: 2015CL3APH is gratefully acknowledged.

Bibliography

[1] H. Lüth in "*Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films*", Panel III and XI, "*Graduate Texts in Physics*", fifth edition (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg) 2010. ISBN 978-3-319-10756-1
[2] A. Einstein, *Ann. Phys.* (*Berlin*), 322 (1905) 132. https://doi.org/10.1002/andp.19053220607
[3] V. G. Neudachin, N. P. Yudin, F. A. Zhivopistsev, *Phys. Status Solidi* (*b*), 95 (1979) 39. https://doi.org/10.1002/pssb.2220950104
[4] N. P. Yudin, A. V. Pavlitchenkov, V. G. Neudatchin, *Z. Phys. A*, 320 (1985) 565. https://doi.org/10.1007/BF0141185
[5] V. G. Levin *et al.*, *J. Phys. B. At. Mol. Phys.*, 17 (1984) 1525. https://doi.org/10.1088/0022-3700/17/8/01
[6] N. Fominykh *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 89 (2002) 086402. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.08640.
[7] N. Fominykh, J. Berakdar, *Surf. Sci.*, 482 (2001) 618. https://doi.org/10.1016/S0039-6028(00)01023-2
[8] N. Fominykh *et al.*, *Surf. Sci.*, 507–510 (2002) 229. https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)01217-7
[9] H. W. Haak, G. A. Sawatzky, T. D. Thomas, *Phys. Rev. Lett.*, 41 (1978) 1825. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.41.1825
[10] H. W. Haak, G. A. Sawatzky, T. D. Thomas, *Rev. Sci. Instrum.*, 55 (1984) 696. https://doi.org/10.1063/1.1137823.
[11] O. Gunnarsson, K. Schönhammer, *Phys. Rev. B*, 22 (1980) 3710. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.22.3710
[12] G. Stefani *et al.*, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, 127 (2002) 1. https://doi.org/10.1016/S0368-2048(02)00166-4.
[13] L. Bonolis, arXiv:1106.1365.
[14] L. Avaldi, G. Stefani, "*Direct and resonant double photoionization: from atoms to solids*", *Fragmentation Processes: Topics in Atomic and Molecular Physics,* edited by C. Whelan (Cambridge University Press, Cambridge) 2012. https://doi.org/10.1017/CBO9781139017572
[15] E. Jensen *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, 63 (1992) 3013. https://doi.org/10.1063/1.1142602
[16] M. Huth *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 104 (2014) 061602. https://doi.org/10.1063/1.4864274
[17] E. Kobayashi, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, 80 (2009) 043303. https://doi.org/10.1063/1.3116442
[18] R. Gotter *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A,* 467-468 (2001) 1468. http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00721-5
[19] G. van Riessen *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter*, 22 (2010) 092201. https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/9/092201
[20] F. O. Schumann, C. Winkler, J. Kirschner, *Phys. Rev. Lett.*, 98 (2007) 257604. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.257604
[21] Z. Wei *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 267603. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.267603
[22] P. Weightman *et al.*, *Phys. Rev. B*, 36 (1987) 9098. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.36.9098
[23] M. Cini, *Solid State Commun.*, 24 (1976) 681. https://doi.org/10.1016/0038-1098(77)90390-8
[24] G. A. Sawatzky *et al., Phys. Rev. Lett.*, 39 (1977) 504. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.39.504
[25] Fe/Cu DOS was derived from ref. [28]; the Auger lineshapes are calculated by formula 14 of ref. [23] and are due to Adriano Verna courtesy.
[26] G. Di Filippo *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter*, 27 (2015) 085003. https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/8/085003
[27] R. Gotter *et al.*, *Phys. Rev. B*, 79 (2009) 075108. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.075108
[28] R. Gotter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 109 (2012) 126401. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.126401
[29] C. T. Chiang *et al.*, *Prog. Surf. Sci.,* 95 (2020) 100572. https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2020.100572

Giovanni Stefani

Giovanni Stefani is a former Full Professor of Experimental Physics at the Università Roma Tre and, at present, Senior Associate at ISM-CNR. His primary field of expertise is the electronic structure of correlated systems probed by coincidence spectroscopies. He and co-workers have greatly contributed to developing spectroscopies such as the (e,2e), the (γ,2e) and the Angle Resolved Auger Photoelectron Coincidence Spectroscopy (AR-APECS) thus shading more light on the correlated behaviour of electron pairs in various aggregation states of matter. He and co-workers discovered a dichroic effect in AR-APECS relevant to comprehension of magnetism at the atomic scale. His early scientific activity was devoted to atoms and molecules, while in the second part of the career his interests widened including clean metal surfaces and overlayers, thus contributing to strengthening interdisciplinary links between atomic and solid state physics. His work has been always at the cutting edge of what is technologically achievable. For his pioneering work in electron coincidence spectroscopies he has been elected Fellow of the American Physical Society. He has served as Chairman of the Board of Directors of a few scientific bodies, Conferences and Symposia, Synchrotron Radiation Users' Committee and Secretary of a section of the EPS Atomic and Molecular Division.

ACCELERATING THE FUTURE

ADVANCED ACCELERATOR TECHNOLOGIES FOR THE NEXT-GENERATION FACILITIES

MASSIMO FERRARIO[1], RALPH WOLFGANG ASSMANN[2]
[1] *INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati (RM), Italy*
[2] *DESY, Hamburg, Germany*

Recent years have seen spectacular progress in the development of innovative acceleration methods that are not based on traditional RF accelerating structures. These novel developments are at the interface of laser, plasma and accelerator physics and may potentially lead to much more compact and cost-effective accelerator facilities. While primarily focusing on the ability to accelerate charged particles with much larger gradients than traditional RF, these new techniques have yet to demonstrate comparable performances to RF in terms of both beam parameters and reproducibility. To guide the developments beyond the necessary basic R&D and concept validations, a common understanding and definition of required performance and beam parameters for an operational user facility is now needed. These innovative user facilities can include "table-top" light sources, medical accelerators, industrial accelerators or even high-energy colliders. This paper will review the most promising developments in new acceleration methods and will present the status of on-going projects including the Italian EuPRAXIA@SPARC_LAB project.

1 Introduction

Advancement in particle physics has historically been linked with the availability of particle beams of ever increasing energy or intensity. For more than three decades the collision energy in particle colliders has increased exponentially in time as described by the so-called Livingston plot. A recent version [1] of the Livingston plot is shown in fig. 1. It includes achievements with conventional and novel accelerators and indicates the present plans beyond 2014. It is seen that particle accelerators are a remarkable success story with beam energies having increased by 5–8 orders of magnitude since the first RF-based accelerators in the 1920s. However, it is also evident that the exponential increase of beam energy with time has levelled off in conventional accelerators since the 1980s. Limits in conventional accelerators arise from technical limitations (*e.g.* maximum fields in super-conducting magnets for hadron machines, synchrotron power losses in lepton machines, breakdown effects at metallic walls of RF cavities in linear machines) but also practical issues like size and cost. This limitation has serious implications for future scientific use of accelerators such as TeV colliders, as it implies machines that may reach many 10's of km in length and cost in excess of €10 billion.

To overcome such limitations, a vigorous worldwide effort is on going aimed at the development of high field superconducting magnets, of muon colliders and of novel high-gradient acceleration techniques.

In order to afford the energy needed to excite high-gradient accelerators, their operating wavelength must be reduced, from the RF to the THz spectral range and even down to optical wavelength. This presents distinct challenges in power generation, requiring new paradigma in the excitation of accelerating waves and in the beam time structure.

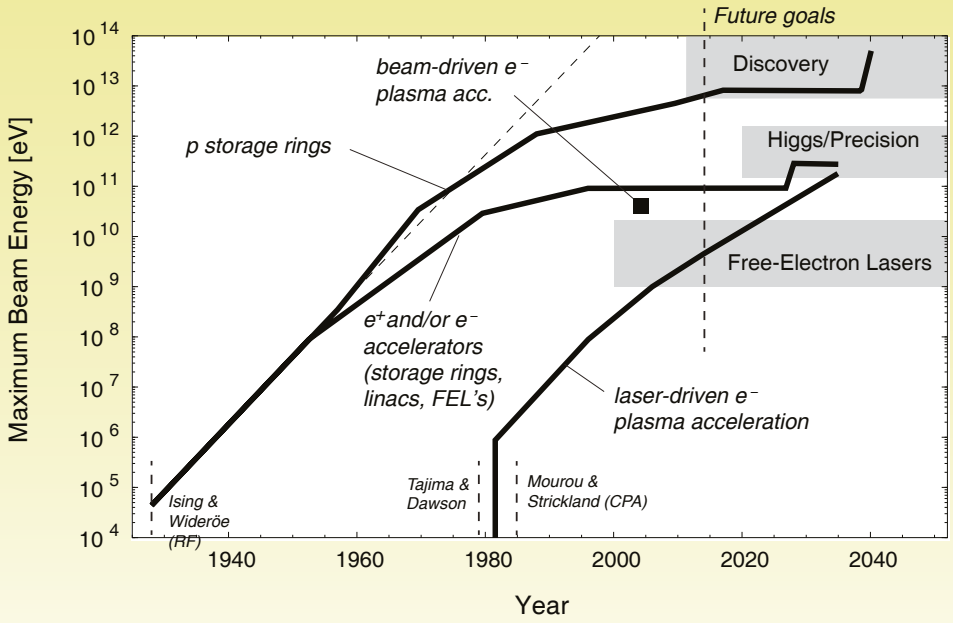


Fig. 1 Updated Livingston plot for accelerators [1], showing the maximum reach in beam energy *versus* time. Grey bands visualize accelerator applications. The left fork shows the progress in conventional accelerators from the first ideas in the 1920s. This main fork splits into two lines for electron/positron machines and for proton accelerators. A new fork of laser-driven plasma accelerators has emerged in 1980, reaching multi-GeV energies by now. Beam-driven plasma acceleration results are indicated by the square point. Vertical dashed lines indicate future goals for the various technologies.

In recent times a new technology emerged, based on the revolutionary proposal of plasma accelerators by Tajima and Dawson in 1979 [2], and the invention of amplified chirped short (~ fs) optical pulses (CPA) by Mourou and Strickland in mid 1980s [3], both awarded the Nobel Prize in Physics in 2018 for the invention of CPA techniques. Plasma-based concepts presently offer not only the high beam energies shown in fig. 1, but also the highest accelerating gradient compared to other novel acceleration techniques like high-frequency metallic RF structures or dielectric structures. To proceed towards high-energy physics (HEP) applications, however, one must demonstrate progress in beam quality and control. Advances in understanding limitations on accelerating gradient go beyond linear colliders; compact and cost-effective accelerators can be used in applications such as inverse Compton scattering gamma-ray sources, free-electron lasers, medical linacs, all may benefit from larger accelerating gradients.

This paper will review the most promising developments in new high gradient acceleration methods for linear machines, namely high-frequency metallic RF structures, dielectric structures and plasma-based accelerating modules, and will present the status of on-going projects including the EU project EuPRAXIA.

2 Metallic structures

Conventional normal conducting RF particle accelerators consist of metallic (copper) corrugated waveguides that can support the propagation of an electromagnetic wave with a longitudinal (accelerating) field component. Charged particles, propagating on the axis of the RF structure and synchronous with the RF wave propagation, can gain kinetic energy at the expenses of the electromagnetic stored energy. RF structures are driven by high-power microwaves generators (Klystrons) and have recently shown the capability to achieve accelerating fields up to 120 MV/m at X-band frequency [4]. A significant progress if compared to the long-lasting *S*-band SLAC type structure that is typically limited to 20 MV/m. To exploit this new technology, a European design study has been recently funded, the H2020 XLS-CompactLight Project [5], which aims at designing the next

generation of compact X-rays free-electron lasers and to investigate all the possible applications of compact high-gradient X-band structures. The X-band successful progress has been achieved after an R&D effort performed mainly at SLAC [6] and CERN [4] towards the understanding of breakdown physics and improved fabrication processes. An electric breakdown event (or discharge) is in fact the main limitation in a metallic structure to achieve high gradient. The discharge event occurs from the surface melting over a macroscopic area in a high *E*-field region of the structure wall. A plasma forms over the molten area, bombarding the surface with an intense ion current producing consistent changes in the structure shape with crater formations in the copper surface and vacuum breakdown, thus limiting the maximum operating accelerating field.

The breakdown rate (BDR) is one of the main quantitative requirements characterizing high gradient performance of the linac. The CLIC linear collider requires RF breakdown probability to be less than 3×10^{-7}/pulse/m for an accelerating gradient of 100 MV/m operating with a 180 ns long RF pulse. As a result of the R&D effort, 11.4 GHz Traveling Wave (TW) accelerating structures can today run at BDR of about 10^{-6}/pulse/m at gradients up to 120 MV/m and ~200 ns pulse length [4]. This result scaled to a 180 ns RF long pulse is consistent with the CLIC requirement.

The pulse length τ_{RF} is one of the key parameters to achieve high gradient [7]. It has been experimentally demonstrated that the maximum achievable accelerating gradient for a fixed BDR scales like $\tau_{RF}^{-1/6}$. Beam time structure, accelerating structure length and filling time together with the available RF peak power set the minimal acceptable RF pulse length τ_{RF}. One possibility to reduce the RF peak power is to lower the pulse energy required for the same *E*-field in the structure by adopting structures operating at higher RF frequency, hence with a reduced volume to fill with energy. In this way the stored energy scales with RF frequency like f^{-3} leading to a considerable reduction of the required input peak power. On the other hand, one has to face additional limitations related to fabrication tolerances and beam instability due to enhanced wake fields effects in corrugated structures. In fact any discontinuity in the accelerating structure boundaries produces an electromagnetic disturbance induced by the beam current, called wake field. Wake fields can have both transverse and longitudinal field components that might back-interact with the beam itself causing energy spread and/or off-axis deflection and eventually beam loss. Nevertheless, corrugated structure boundaries are necessary to keep the phase velocity of the accelerating field synchronous with the speed of the particle beams, *i.e.* less than the speed of light, a condition that is impossible to satisfy in a smooth waveguide. Since the intensity of the transverse wake field is inversely proportional to the third power of the structure aperture and linearly increases with the beam offset with respect to the structure symmetry axis, higher RF frequency structures are more subject to beam instabilities than lower-frequency structures. The advantage of using high-frequency structures to achieve higher gradient is consequently limited by possible beam quality degradation due to wake field effects.

Nevertheless very promising results have been achieved in this direction at SLAC at the FACET facility where RF breakdown and beam deflection studies have been performed with a 140 GHz RF structure [8], see fig. 2. Since

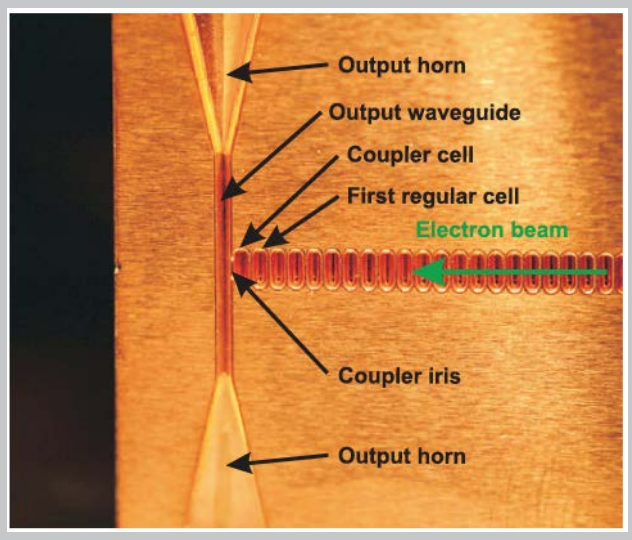


Fig. 2 The mm-wave traveling wave accelerating structure with detail of the output part, including coupler and output waveguides [8].

there was not access to RF generators at that frequency, the structure has been excited by an ultra-relativistic electron beam exciting a longitudinal wake field with a component at the frequency of the accelerating mode. The maximum achieved accelerating gradient was 300 MV/m with a peak surface electric field of 1.5 GV/m and a pulse length of about 2.4 ns.

Another interesting approach to increase electric fields in copper cavities is to cool them down to temperatures below 77 K [9], where the RF surface resistance, coefficient of thermal expansion and crystal mobility decrease, while the thermal conductivity and hardness increase, all of which can contribute to reduce the BDR. Recent studies show that an X-band structure can be conditioned up to an accelerating gradient of 250 MV/m at 45 K and a breakdown rate of 2×10^{-4}/pulse/m. So far for this breakdown rate, the cryogenic structure has the largest reported accelerating gradient.

A combination of short RF pulses, cryogenic and high-frequency operation will probably lead to additional significant progress of high-gradient RF metallic structure in the next decade. Nevertheless it is unlike to expect gradient in the range of GV/m with high-frequency metallic structures because of the additional limitations related to fabrication tolerances and beam instability due to enhanced wake fields effects in corrugated structures, as discussed above.

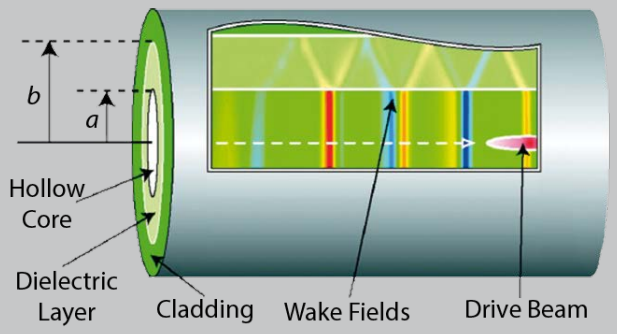


Fig. 3 Conceptual drawing of the dielectric wake field accelerator (DWA) [12], $a = 50$ μm, $b = 162$ μm.

3 Dielectric structures

As discussed in the previous section both the increase in operational frequency and reduction in pulse length play a role in increasing the breakdown limit. To overcome the limitations imposed by the small corrugated structures, necessary to keep the phase velocity synchronous with the particle velocity but producing enhanced wake field effects, one can consider a simpler circular metallic waveguide filled by a dielectric liner that allows matching the phase velocity of the wave to the speed of particles.

Using optical generation techniques, one can have very short THz pulses (<100 ps) generated by picosecond lasers readily available at high average power. This approach has been adopted by the AXSIS collaboration [10] that has recently reported experimental demonstration of electron acceleration using the axial component of an optically generated 10 μJ THz pulse centred at 0.45 THz propagating in a fused silica capillary waveguide [11]. A maximum energy gain of 7 keV has been observed in a 3 mm long structure of 400 mm inner diameter. Using more intense THz sources (~10 mJ) the AXSIS collaboration expects to achieve ~GV/m accelerating gradients in the near future.

Breakdown limits in similar dielectric structures have been investigated at FACET where a Dielectric Wakefield Acceleration scheme (DWA) is under investigation. In the DWA scheme two bunches are injected in a dielectric-filled waveguide so that the first high-charge bunch excites a wake field that can be used to accelerate a collinear trailing lower charge bunch, see fig. 3. First measurements of the breakdown threshold in a dielectric structure, subjected to GV/m wake fields produced by short (30–330 fs) 28.5 GeV electron bunches, have been made at FACET [12].

Fused silica capillaries of 100 mm inner diameter were exposed to a range of bunch lengths, allowing surface dielectric fields up to 27 GV/m to be generated. The onset of breakdown was observed to occur when the peak electric field at the dielectric surface would reach ~13.8 GV/m. In a more recent

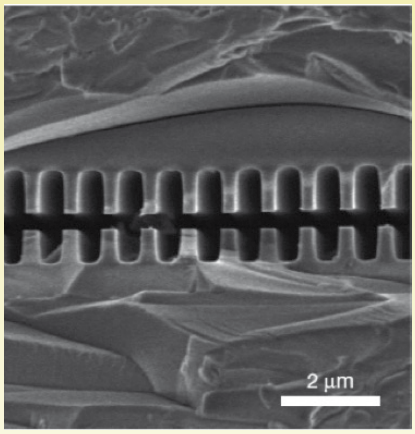


Fig. 4 Scanning electron microscope image of the longitudinal cross-section of a DLA structure [14].

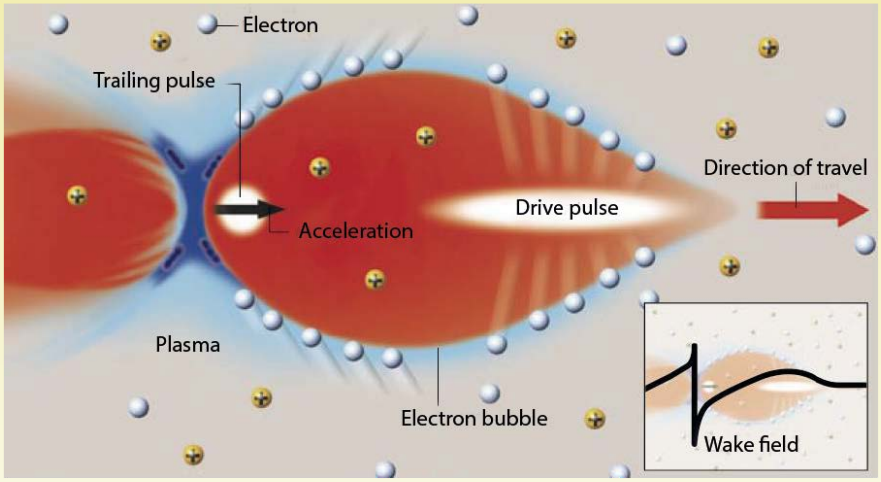


Fig. 5 Conceptual drawing of the plasma wake field accelerator [16].

experiment, accelerating gradients of about 1.3 GV/m have also been measured in a 15 cm long dielectric structure [13].

The use of infrared lasers to power optical-scale lithographically fabricated dielectric structures, which is referred to as dielectric laser acceleration (DLA), is another developing area in advanced acceleration techniques. This accelerating structure consists of two opposing binary gratings, separated by a vacuum gap where the electron beam travels perpendicular to the grating rulings, see fig. 4. To generate the required accelerating fields, being the dielectric material transparent to the optical radiation, a linearly polarized laser pulse is incident on the structure perpendicular to both the electron beam direction of propagation and the plane of the gratings. The structure essentially acts as a longitudinally periodic phase mask, where each grating pillar imparts a π-phase shift on the electric field. As a result, electrons launched at the correct optical phase remain phase-synchronous and experience a net energy gain. In this configuration gradients beyond 250 MV/m in acceleration tests of electrons in a DLA have been measured [14].

More advanced designs based on photonic band gap structures are currently under investigation and are extensively discussed in [15].

Dielectric structures are a very promising option to achieve gradients above GV/m but more experimental data on operational breakdown rates and with accelerated beams are needed before deriving realistic conclusions on the possibility of achieving high-energy and high-quality beams with this technology.

4 Plasma structures

Plasma-based accelerators replace the metallic or dielectric walls of the accelerating structures with an ionized gas, or plasma, see fig. 5 [16].

Plasma accelerator relies on a wake field excited by a driving pulse to provide the accelerating force. The drive pulse, which can be a short pulse of either a laser (LWFA [2]) or an electron beam (PWFA [17]), blows the electrons in an ionized gas, or plasma, outward, leaving behind a region of positive charge. Along the axis where the beam propagates, the electric field causes a trailing pulse of electrons injected near the rear of the bubble to undergo a very strong forward acceleration. This use of plasma to generate

accelerating field allows avoiding metallic or dielectric structure damage problems due to breakdown encountered in high-gradient operation since the outer "walls" of the plasma are already "melted".

Plasma accelerators have been tested with active lengths ranging from the mm to the meter scale. Accelerating gradients up to 160 GV/m have been demonstrated in experiments [18]. A number of advanced accelerator facilities are in operation or under construction in Europe (AWAKE [19], FLASH_Forward [20], SPARC_LAB [21], SINBAD [22]) and in Asia [23], complementing the two large R&D facilities that are currently spearheading advanced accelerator research in the U.S.: FACET at SLAC, which is dedicated to PWFA studies and BELLA at LBNL, which leads the field of LWFA.

Three fundamental milestones have been recently achieved:

- At BELLA, multi-GeV electron beams with energy up to 7.8 GeV, 6% rms energy spread, 5 pC charge, and 0.2 mrad rms divergence have been produced from a 20 cm long laser-heated capillary discharge waveguide with a plasma density near to 3×10^{17} cm^{-3}, powered by 850 TW laser pulses [24].
- At FACET (PWFA), acceleration of about 74 pC of charge contained in the core of the trailing bunch in an accelerating gradient of about 4.4 GV/m has been demonstrated. The core electrons gained about 1.6 GeV of energy per particle, with a final energy spread as low as 0.7%, and an energy transfer efficiency from the wake to the bunch that can exceed 50% [25].
- More recently at FACET, using a nonlinear plasma wake driven by a single positron bunch, a substantial number of positrons has been accelerated and guided over a meter-scale plasma, in a unique and unexpected new collective regime [26].

To proceed towards high-energy physics (HEP) applications, however, one must demonstrate progress in beam quality and control. Indeed, for any variant of plasma wake field accelerator to be practical as a linear collider, a range feasibility and practicality issues must be resolved in the context of an integrated system test. Plasma accelerators, like standard accelerator modules, must be capable of being staged in a series of segments. Both PWFA and LWFA approaches must demonstrate simultaneous electron and positron acceleration with stable focusing in plasma and transport lines with performance consistent with preserving electron and positron beam quality. Both must demonstrate timing, pointing, and focusing control that fulfil the demands of high-luminosity operation required by a lepton collider. Finally, both must demonstrate that single-and multi-bunch plasma instabilities can be overcome with operation at the tens of kHz repetition rate required for high luminosity. Beyond the feasibility issues are practical questions related to overall cost, efficiency, and reliability.

To this end, new initiatives are now arising, such as the EuPRAXIA [27, 28] program, which seeks, through intermediate application goals, to push plasma accelerators from an exciting concept to a mature approach. It is in fact widely accepted by the international scientific community that a fundamental milestone towards the realization of a plasma-driven future linear collider will be the integration of a high-gradient accelerating plasma modules in a short-wavelength Free Electron Laser (FEL) user facility. The capability of producing the required high-quality beams and the operational reliability of the plasma accelerator modules will be certainly certified when such an advanced radiation source is able to drive external user experiments. The realization of such a new generation light source thus serves as a required stepping stone for HEP energy applications and it is a promising new tool for photon science in its own right. The Italian accelerator community, in the framework of the European initiative EuPRAXIA, is now giving an important contribution in this direction with the recently established project named EuPRAXIA@SPARC_LAB [29, 30] under design at the INFN Laboratori Nazionali di Frascati (LNF). The main characteristics of the project are described in the next section.

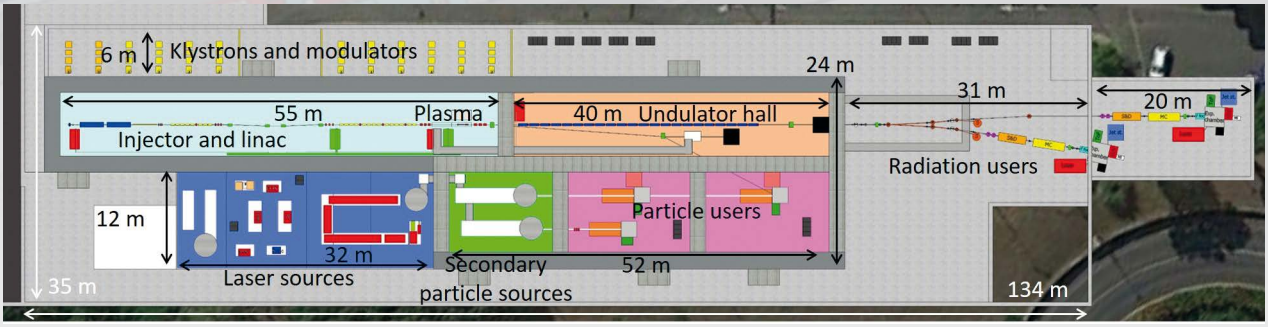


Fig. 6 Layout of the EuPRAXIA@SPARC_LAB infrastructure.

5 The EuPRAXIA@SPARC_LAB design study

The EuPRAXIA@SPARC_LAB facility is a unique combination of a high brightness GeV-range electron beam generated in an X-band RF linac, and a 0.5 PW-class laser system. The infrastructure will be of top-class quality, user-oriented and at the forefront of new acceleration technologies. EuPRAXIA@SPARC_LAB is in fact conceived as an innovative and evolutionary tool for multi-disciplinary investigations in a wide field of scientific, technological and industrial applications. It could be progressively extended to be a high-brightness "particles and photons beams factory": it will be eventually able to produce electrons, photons (from THz to gamma rays), neutrons, protons and positrons, that will be available for a wide national and international scientific community interested in taking profit from advanced particle and radiation sources. The layout of the EuPRAXIA@SPARC_LAB infrastructure is schematically shown in fig. 6.

From left to right one can see a 55 m long tunnel hosting a high-brightness 150 MeV *S*-band RF photoinjector equipped with a hybrid compressor scheme based on both velocity bunching and magnetic chicane. The energy boost from 150 MeV up to a maximum of 1 GeV will be provided by a chain of high-gradient X-band RF cavities. At the linac exit a 5 m long plasma accelerator section will be installed, which includes the plasma module (~0.5 m long) and the required matching and diagnostics sections. In the downstream tunnel a 40 m long undulator hall is shown, where the undulator chain will be installed. Further downstream after a 31 m long photon diagnostic section the users hall is shown. Additional radiation sources as THz and gamma-ray Compton sources are foreseen in the other shown beam lines. The upper room is dedicated to klystrons and modulators to drive the X-band linac. In the lower light-blue room the 300 TW FLAME laser will be installed [31] eventually upgraded up to 500 TW. The plasma accelerator module can be driven in this layout either by an electron bunch driver (PWFA scheme) or by the FLAME laser itself (LWFA scheme). A staged configuration of both PWFA and LWFA schemes will also be possible in order to boost the final beam energy in excess of 5 GeV. In addition FLAME is supposed to drive plasma targets in the green room in order to drive electron and secondary-particle sources that will be available to users in the downstream 30 m long user area.

One of the most innovative devices of the project is the plasma accelerating module, in one of its possible configurations [32], see fig. 7.

It consists of a 10 cm long, 0.5 mm diameter capillary tube in which the plasma is produced by a high voltage discharge in hydrogen. Another fundamental component included in the design is the X-band accelerating technology adopted for the 1 GeV RF drive linac. It is a very interesting option because it allows reducing the overall drive linac length, taking profit of the high-gradient operation of the X-band accelerating structures. In addition it will allow implementing at LNF in the next 2 years the frontiers of high-gradient RF technology. This technology has already shown its usefulness for medical and industrial applications but it is also another possible technological option for compact radiation sources and for the future Linear Collider, as discussed in the previous sections.

In the PWFA scenario driven by a single electron bunch, the maximum possible energy gain for a trailing bunch is less than twice the incoming driver energy (transformer ratio $R=2$). In this regime a driver bunch energy of 600 MeV is enough to accelerate the witness bunch up to 1 GeV. A method to increase the energy gain is the so-called *ramped bunch train* and consists of using a train of 4 or more

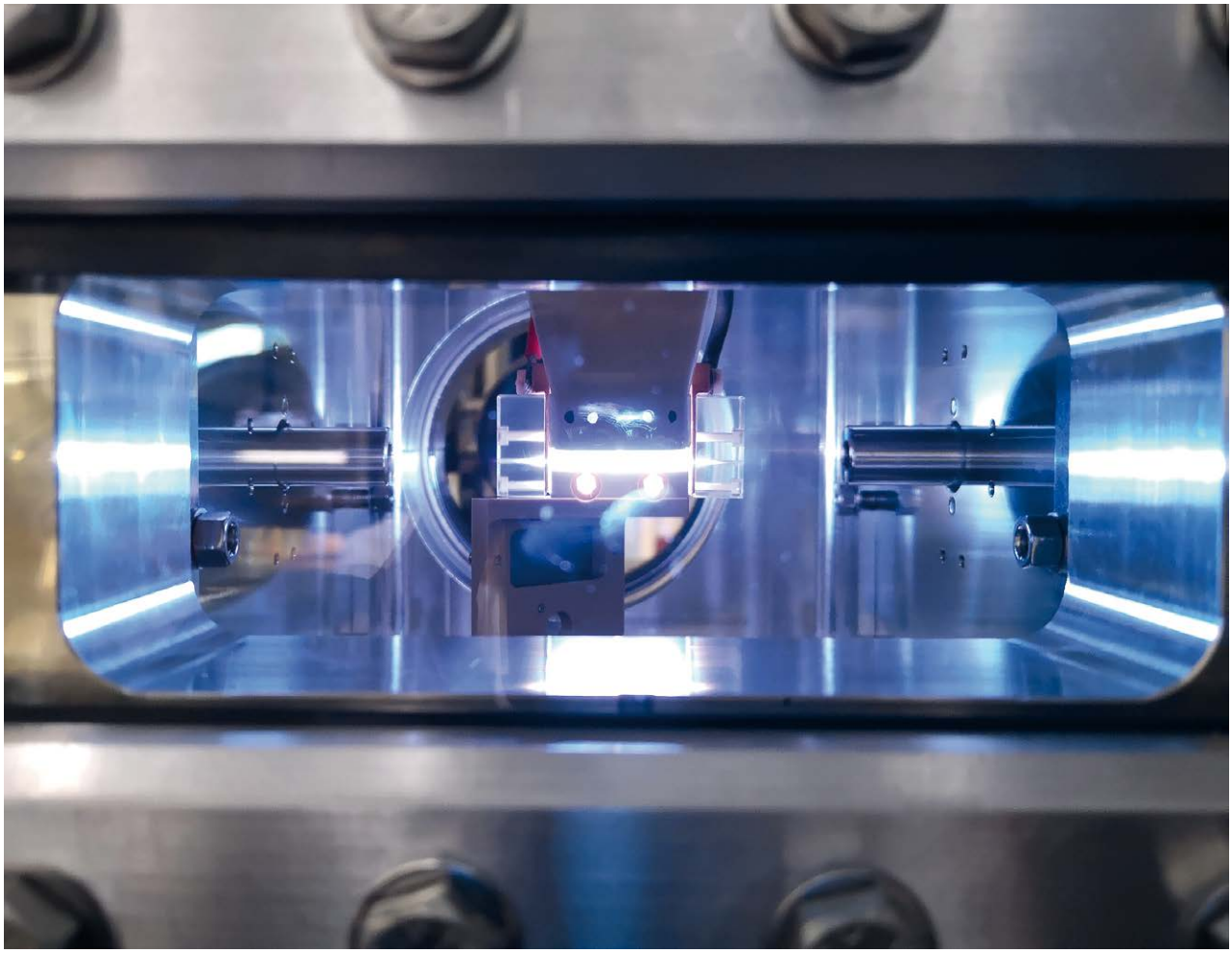


Fig. 7 Plasma discharge capillary prototype currently used at the SPARC_LAB facility.

equidistant bunches, wherein the charge increases along the train producing an accelerating field resulting in a higher transformer ratio. For this application, it is essential to create trains of high-brightness tens of femtosecond-long microbunches with stable and adjustable length, charge and spacing. Considerable efforts are now ongoing worldwide to produce the required bunch train configurations. The method we will use to achieve the required bunch train quality is based on the *Laser Comb Technique* [33] that has been tested with the SPARC_LAB photoinjector [34]. Higher witness bunch energy will thus be accessible when the comb technique is implemented. With a transformer ratio > 4 the 5 GeV threshold will be achievable with a 1 GeV driver bunch energy, thus exploiting the full energy provided by the X-band linac.

In the LWFA scenario the 0.5 PW upgrade of the FLAME laser is a necessary step to keep the FLAME laser in the group of leading installations and further establish expertise on advanced laser sciences. High-energy staging in combination with high-brightness beam external injection will be the main applications of the upgraded FLAME system, leading to multi-GeV high-brightness electron beam production as required by the final EuPRAXIA goals.

To support our design in both plasma acceleration options (PWFA and LWFA), we have performed Start To End Simulations with promising results, as discussed in [30]. The reported performances show that our FEL design, driven by a plasma accelerator in SASE configuration, is expected to meet the challenging requests for the new generation synchrotron radiation sources by a 30 pC electron bunch. We have investigated also the possibility to drive the FEL with higher charge/bunch *i.e.* up to 200 pC, in order to produce a larger number of photons as required by some application. This is possible in a conventional configuration driven by the X-band linac alone without using the plasma module.

The experimental activity will be initially focused on the realization of plasma-driven short-wavelength FEL with one user beam line. This goal is already quite challenging but it is affordable by the EuPRAXIA@SPARC_LAB collaboration and will provide an interesting FEL radiation spectrum in the so-called "water window". The first foreseen FEL operational mode is based on the Self Amplification of Spontaneous Radiation (SASE) mechanism with tapered undulators. More advanced schemes like Seeded and Higher Harmonic Generation configurations will be also investigated. The users end station, called EX-TRIM (Eupraxia X-ray Time Resolved coherent IMaging), will be designed and built to allow performing a wide class of experiments using the schematic apparatus discussed in [30]. As specific example of EuPRAXIA@SPARC_LAB applications, it is worth remarking that the FEL radiation in the soft X-ray spectrum opens possibilities for novel imaging methodologies and time-resolved studies in material science, biology and medicine, along with non-linear optics applications.

In addition, the upgrade of the FLAME laser system to 0.5 PW power will enable new regimes of plasma-based particle accelerators and will enable to access the region of high electromagnetic fields of non-linear and quantum electrodynamics (QED) where new fundamental physics processes and promising new radiation emission mechanisms can be explored.

Together with the driving motivation to candidate LNF to host the EuPRAXIA facility, the realization of the EuPRAXIA@SPARC_LAB infrastructure at the LNF will allow INFN to consolidate a strong scientific, technological and industrial role in a competing international context. A national multi-purpose facility, along the scientific applications discussed, not only paves the road for a strong role for the Italian contribution to the European EuPRAXIA, but also to possible future large HEP international projects. We are confident that this project will represent a further step forward in the mainstream of a long lasting history of success in particle accelerators development in Frascati.

6 Conclusions

Accelerator-based high-energy physics will at some point become practically limited by the size and cost of the proposed e^+e^- colliders for the energy frontier. Novel acceleration techniques and plasma-based, high-gradient accelerators open the realistic vision of very compact accelerators for scientific, commercial and medical applications. The R&D now concentrates on beam quality, stability, staging and continuous operation. These are necessary steps towards various technological applications. To this end, pilot users facilities are planned in the near future. A major milestone is an operational, 1 GeV compact accelerator. This unit could become a stage in a high-energy accelerator.

The progress in advanced accelerators will benefit also from strong synergy with general advances in technology, for example in the laser [35] and/or high-gradient RF structures industry.

To accomplish the final dream of a compact and cost-effective accelerator, a parallel effort should be addressed also in the development of compact devices such as beam focusing and manipulations elements, diagnostics components and eventually short-period undulators [36].

Advanced accelerator science and technology is certainly an exciting and fast growing field of research that stimulates the interest of an increasing number of young scientists and research institutes. We are confident that in the near future a large number of our dreams will come true.

Acknowledgements

Suggestions and discussions with: E. Gschwendtner, W. Leemans, D. Alesini, B. Spataro, A. Mostacci, A. Cianchi, E. Chiadroni, C. Vaccarezza and the EuPRAXIA, XLS, BELLA, FLASH_Foward, SINBAD, AWAKE, AXSIS and EuPRAXIA@SPARC_LAB collaborations have been greatly appreciated. This work was partially supported by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme under grant agreement No. 653782 (EuPRAXIA) and under grant agreement No 777431 (XLS).

References

[1] R. W. Aßmann, J. Grebenyuk, "*Accelerator Physics Challenges towards a Plasma Accelerator with Usable Beam Quality*", in *Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14), Dresden, Germany, Jun. 2014*, pp. 961-964. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-TUOBB01

[2] T. Tajima, J. M. Dawson, "*Laser electron accelerator*", *Phys. Rev. Lett.*, 43 (1979) 267.

[3] D. Strickland, G. Mourou, "*Compression of amplified chirped optical pulses*", *Opt. Commun.*, 55 (1985) 447.

[4] T. Argyropoulos *et al.*, "*Design, fabrication, and high-gradient testing of an X-band, traveling-wave accelerating structure milled from copper halves*", *Phys. Rev. Accel. Beams,* 21 (2018) 061001.

[5] G. D'Auria *et al.*, "*The CompactLight Design Study Project*", *Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May 2019,* paper TUPRB032.

[6] V. A. Dolgashev, Y. Higashi, T. Higo, C. D. Nantista, S. G. Tantawi, "*RF Breakdown in Normal Conducting Single-cell Structures*", in *Proc. 21st Particle Accelerator Conf. (PAC'05), Knoxville, TN, USA, May 2005*, paper ROAC007.

[7] A. Grudiev *et al.*, "*New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures*" *Phys. Rev. Accel. Beams,* 12 (2009) 102001.

[8] M. Dal Forno *et al.*, "*rf breakdown tests of mm-wave metallic accelerating structures*", *Phys. Rev. Accel. Beams,* 19 (2016) 011301.

[9] A. D. Cahill *et al.*, "*High gradient experiments with X-band cryogenic copper accelerating cavities*", *Phys. Rev. Accel. Beams,* 21 (2018) 102002.

[10] F. X. Kärtner *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A*, 24 (2016) 829.

[11] E. A. Nanni *et al.*, *Nat. Commun.*, 6 (2015) 8486.

[12] M. C. Thompson, *Phys. Rev. Lett.*, 100 (2008) 214801.

[13] B. D. O'Shea *et al.*, *Nat. Commun.*, 7 (2016) 12763.

[14] E. A. Peralta *et al.*, *Nature,* 503 (2013) 91.

[15] R. Joel England *et al.*, *Rev. Mod. Phys*, 86 (2014) 1337.

[16] C. Joshi, "*Plasma accelerators*", *Sci. Am.,* Feb. 2006, 40.

[17] P. Chen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 54 (1985) 693.

[18] D. Gordon *et al.*, "*Observation of Electron Energies Beyond the Linear Dephasing Limit from a Laser-Excited Relativistic Plasma Wave*", *Phys. Rev. Lett.*, 80 (1998) 2133.

[19] M. Turner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 122 (2019) 054801.

[20] A. Aschikhin *et al. Nucl. Instrum. Methods A*, 175 (2016) 806.

[21] M Ferrario *et al.*, "*SPARC_LAB present and future*". *Nucl. Instrum. Methods B,* 309 (2013) 183.

[22] R. Assmann *et al.*, "*SINBAD - A Proposal for a Dedicated Accelerator Research Facility at DESY*", *Proc. IPAC'14, Dresden, Germany*.

[23] J. Hua, "*Experimental Demonstration of External Injection From a Linac into a LWFA with ~100% Capture Efficiency*", *Proc. IPAC'19, Melbourne, Australia, May 2019*, paper WEZZPLS1.

[24] A. J. Gonsalves *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 122 (2019) 084801.

[25] M. Litos *et al.*, "*High-efficiency acceleration of an electron beam in a plasma wakefield accelerator*", *Nature*, 515 (2014) 92.

[26] S. Corde *et al.*, "*Multi-gigaelectronvolt acceleration of positrons in a self-loaded plasma wakefield*", *Nature*, 524 (2015) 442.

[27] P. A. Walker *et al.*, "*Facility Considerations for a European Plasma Accelerator Infrastructure (EuPRAXIA)*", *Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May 2019,* paper THPGW025.

[28] http://www.eupraxia-project.eu/eupraxia-conceptual-design-report.html

[29] M. Ferrario *et al.*, "*EUPRAXIA@SPARC_LAB design study towards a compact FEL facility at LNF*", *Nucl. Instrum. Methods A*, 909 (2018) 134.

[30] http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=INFN-18-03-LNF.pdf

[31] F. Bisesto *et al.*, "*The FLAME laser at SPARC_LAB, proposal*", *Nucl. Instrum. Methods A*, 909 (2018) 452.

[32] A. Zigler *et al.*, *Phys. Rev. A,* 35 (1987) 4446.

[33] M. Ferrario, M. Boscolo *et al.*, *Int. J. Mod. Phys. B,* 21 (2007) 415.

[34] M. Ferrario *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 637 (2011) S43.

[35] L. A. Gizzi *et al.*, "*Lasers for Novel Accelerators*", *Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May 2019,* paper FRYPLM2.

[36] J. Harrison *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams,* 15 (2012) 070703.

Massimo Ferrario

Massimo Ferrario has got his degree in physics at the University of Milan with a thesis on the FEL theory. He is currently Leading Scientist at INFN and coordinator of the SPARC_LAB facility at the Frascati INFN Laboratories. In the last 20 years he has been working in the field of high brightness photoinjectors, free electron lasers and advanced acceleration concepts including plasma accelerators. He has been collaborating in the design of the LCLS and TESLA X_FEL injectors. In the framework of the EUPRAXIA H2020 Design study he has been co-task leader of the Work Package "Plasma Beam Driven Design Study". He has been co-chair of the 4 workshops (2019-2017-2015-2013) "European Advanced Accelerator Concepts" together with Dr. R. Assmann. He is a member of the CERN Accelerator School (CAS) and the United State Particle Accelerator School (USPAS) where he has given several lectures about the Physics of High Brightness Beams and Advanced Accelerator Concepts. He is also teaching "High Brightness Beam Physics" at the University of Roma "La Sapienza" for the Accelerator Physics PhD program.

Ralph Assmann

Ralph Assmann is working as Leading Scientist for accelerator research and development at DESY in Germany. He has studied at the universities of Bonn and Munich and holds a Doctorate degree in Physics. Initially doing research at the high energy physics ALEPH experiment, he moved towards accelerator physics when working on the precise energy calibration of the particle beams in the LEP collider at CERN. Over the last 30 years he has become an expert in particle beams, spin polarisation, collimation, collider design, beam operation and high gradient acceleration technologies. He was project leader for the LHC collimation systems and member of the LHC machine coordinator team. Ralph Assmann has held positions at the Max Planck Institute for Physics, SLAC, Stanford University, CERN and DESY. Since 2011 he has coordinated the European Network for Novel Accelerators in the EuCARD and ARIES projects and has led the Horizon2020 Design Study EuPRAXIA for a European Plasma Accelerator facility. Ralph Assmann will chair the Accelerator Group of the European Physical Society from 2020 to 2023.

DMITRII IVANOVICH MENDELEEV (1834-1907): THE PERIODIC TABLE AND BEYOND

VLADIMIR D. SHILTSEV[1], ELIZAVETA V. SHILTSEVA[2]
[1] *Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL,USA*
[2] *University of Illinois in Urbana-Champaign, Champaign, IL, USA*

The periodic law of chemical elements is one of the most significant achievements in science. It was discovered by Dmitrii Mendeleev in 1869, and 2019, the year of its 150th anniversary, was proclaimed the "International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019)" by the United Nations General Assembly and UNESCO. In this article we briefly outline Mendeleev's path to the discovery and present a broader perspective of his views and research, including less known accomplishments such as theory and investigations of solutions, studies of gases, and the discovery of supercritical fluids. We also find very instructive some "delusions of genius", his path to fame, and consider several myths, broadly circulating in media and widely accepted by the public.

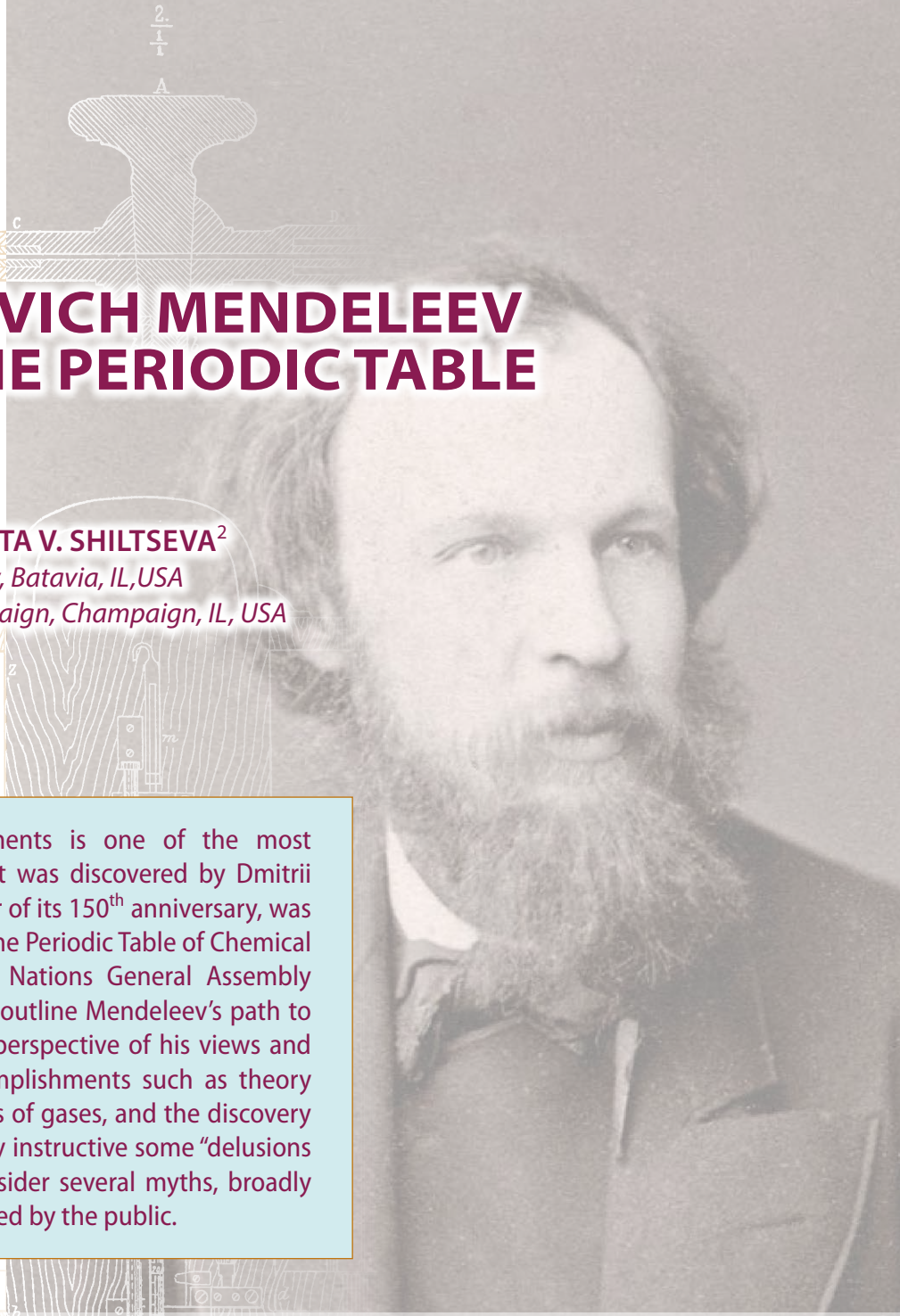


Fig. 1 Dmitrii Mendeleev in 1869, the year he formulated the periodic law.

1 2019 - International Year of the Periodic Table

Last year, both the general public and the international scientific community had a remarkable opportunity to look back to the year 1869, when Dmitrii Mendeleev – see fig. 1 – first proposed the periodic system of the elements, a framework that has truly become a common language for science. In December of 2017, the United Nations General Assembly proclaimed 2019 as "the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019) to enhance global awareness of, and to increase education in, the basic sciences..." to be led by the United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO) [1].

Mendeleev's table offered a natural classification of the known elements, and his periodic law enabled him to predict those that were missing, along with their physical and chemical properties. His system also paved the way for many other discoveries such as those of the noble gases by William Ramsay and Lord Rayleigh (1904 Nobel Prize in Chemistry) and the first radioactive elements by Marie Curie, along with her husband Pierre (1903 Nobel Prize in Physics, 1911 Nobel Prize in Chemistry).

Since the mid-20th century, accelerators have started to play a major role in filling in the periodic table as we know it now. All but two trans-uranium elements, from neptunium (93) to oganesson (118, the last element of nowadays' table), have been discovered at cyclotron accelerator facilities in the US, USSR/Russia, Germany, and Japan. The 1951 Nobel Prize in Physics went to Glen Seaborg and Edwin McMillan for the

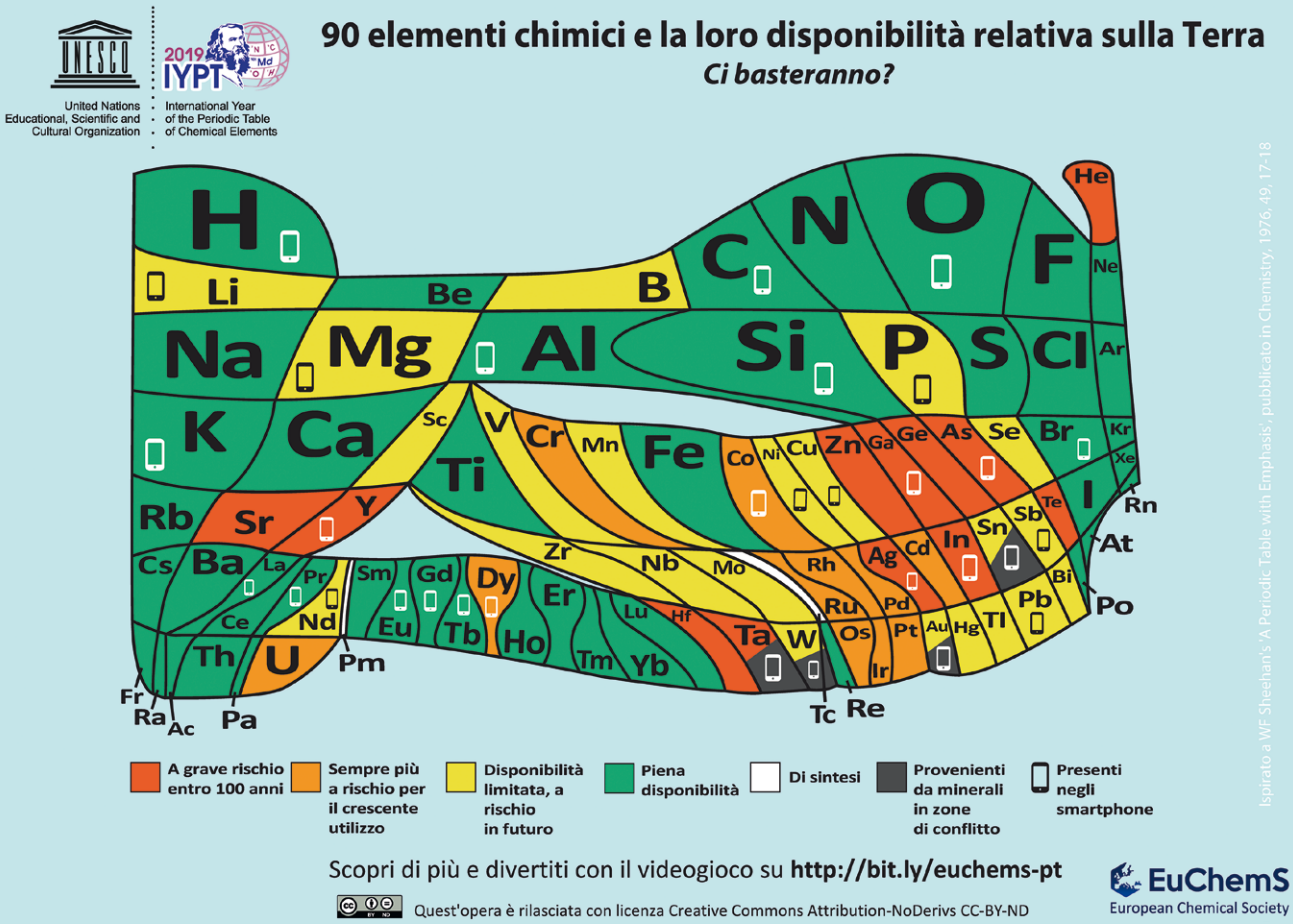


Fig. 2 The Periodic Table presentation developed by the European Chemical Society reflects elements scarcity – "How much is there? Is that enough?" – by color and size of elements boxes [3].

discovery of transuranic elements, while Ernest O. Lawrence, a pioneer of modern particle accelerators, won the Nobel Prize in Physics in 1939 for his invention of the cyclotron.

In recognition of the 150th anniversary, *Nature, Science* and the *Physical Review* journals have published special issues and article series on various aspects of these discoveries, many of which are available free to read at the journals websites [2].

The IYPT2019 web site has an impressive map of hundreds of events and celebrations world-wide, organized by various universities, associations, organizations, and institutions. For example, Fermilab and CERN have celebrated the IYPT, organized colloquia, seminars and lectures on the Periodic Law, its history and influence. On September 12, 2019, the President of the European Physical Society (EPS) Petra Rudolf inaugurated the Mendeleev Museum-Archive, at the University of Saint Petersburg as EPS Historic Site and formally unveiled a commemorating plaque in a ceremony attended by many scientists, chemists and physicists, members of EPS and APS. The European Chemical Society had marked the IYPT with a new look of the Periodic Table that reflects elements scarcity depicted in fig. 2.

Many IYPT commemorating events took place in Italy. Besides several talks and seminars in various institutions, such as the INFN Ferrara and the INFN Padova, the 2019 *Festival della Scienza* in Genova (October 24 – November 4), a very popular annual public science event, was organized under the main theme of "The Elements" to celebrate the IYPT2019. On November 6 and 7, 2019, the Italian Physical Society (SIF) in collaboration with the Italian Chemical Society (SCI) organized the "Passion for Science: New Elements and New Materials" International Symposium on the occasion of the IYPT2019 [4].

The IYPT celebrations all came to a close at a ceremony in Tokyo on December 5, 2019. Attendees were treated to presentations from representatives of the International Union of Pure and Applied Chemistry and the International Union of Pure and Applied Physics, scientists involved in the discovery of new elements, and observations on what lies in the future for the periodic table.

2 Mendeleev and his periodic law

Mendeleev's life and his path toward the periodic law are well studied and reflected in many publications (see, *e.g.*, refs. [5–8]). Below we give only a short summary and present only either most basic or less known facts of his biography and research.

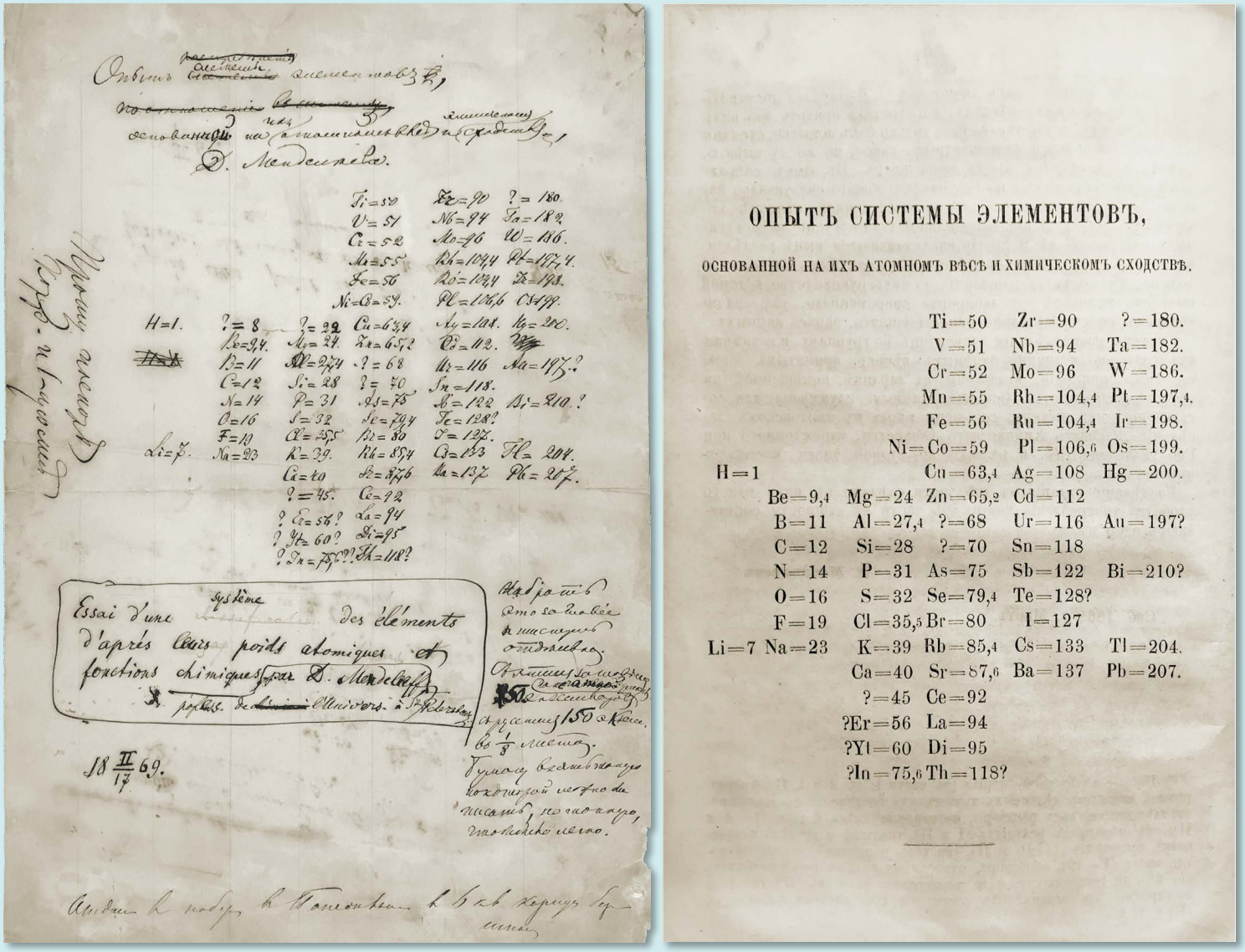
Mendeleev was born in 1834 in the small Siberian town of Tobolsk some 2300 km North-East of Moscow as the last of 11 surviving children of Ivan Mendeleev, a director of the local gymnasium, and Mariya Kornileva. His father became blind shortly after Dmitrii's birth and died in 1847. After an unsuccessful attempt to support the family operating a small glass factory, his mother took Dmitrii to St. Petersburg in 1848, where he enrolled in the Main Pedagogical Institute, graduating from it in 1855. Despite significant health problems and hardships after the death of his mother in 1850, Mendeleev received a master's degree in chemistry in 1856 and began to conduct research in organic chemistry. Starting in 1859, a Russian government fellowship supported his 22-month study abroad at the University of Heidelberg. Instead of working closely with the prominent chemists of the university, including Robert Bunsen (now widely known for the "Bunsen burner") and Emil Erlenmeyer (known for the namesake chemical flask), Mendeleev set up a laboratory in his own apartment to study the molecular mechanics of surface tension. Participation in the 1860 International Chemistry Congress in Karlsruhe, championed by the Italian chemist Stanislao Cannizzaro, allowed him to take part in the discussions on crucial issues such as atomic weights, chemical symbols, and chemical formulas, as well as to meet and establish contacts with many of Europe's leading chemists.

In 1861 Mendeleev returned to St. Petersburg, where he became Professor of chemistry at the Technological Institute in 1864. After the defense of his doctoral dissertation in 1865 he was appointed Professor of chemical technology at the University of St. Petersburg (now St. Petersburg State University), where he later became Professor of general chemistry (1867) and continued to teach until 1890. From 1893 to his death in 1907, Mendeleev was Director of the Chief Bureau of Weights and Measures, and also worked as a consultant on a broad variety of business, research and state projects.

The turning point toward the discovery of the periodic law of chemical elements was the need in logical systematization of elements for the textbook "Osnovy Khimii" (*The Principles of Chemistry*), which later became a classic, running through 13 editions in Russia (including 5 posthumous ones in the USSR) and many translations into English, German and French [9]. As Mendeleev began to teach inorganic chemistry, he could not find a textbook that met his needs and set out to write his own. Mendeleev's initial approach was encyclopedic and already the first volume was over 500 pages long while addressing only 8 of 63 then known elements – carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, the halogen elements (chlorine and its analogs). The second volume was to cover the 51 remaining elements – Li, Na, K, Rb, alkali metals, etc. – and was under threat of becoming too big for students to read and comprehend. In search of providing a concise guiding principle, Mendeleev first discovered a similarity in the variation of properties of halogens and alkalis in the progression of atomic weights – *i.e.*, the two groups of dissimilar elements – and he wondered if other groups of elements exhibited similar properties. Soon he established that the order of atomic weights could be used not only to arrange the elements within each group but also to arrange the groups themselves. Thus, in his effort to make sense of the extensive knowledge that already existed of the chemical and physical properties of the chemical elements and their compounds, Mendeleev discovered the periodic law: "… elements, arranged according to the value of their atomic weights, present a clear periodicity of properties."

There were many contradicting timelines of the discovery and its publications in the science history literature over the past century. The most widely accepted claim is that the discovery of the Periodic Law was published by Mendeleev on February 17 (Julian (Russian) calendar; March 1, Gregorian (European) calendar), 1869 is not exactly correct. The most comprehensive critical study of all historical and bibliographical data and previously unknown archival documents and unaccounted historical records has been undertaken recently in ref. [10] and established the chronological sequence of the discovery's publication which starts with the final manuscript of the *Attempt at a System of the Elements Based on Their Atomic Weight and Chemical Affinity* (fig. 3 left) being submitted to publisher on February 17 (March 1), 1869, the very first publication of the Periodic Table was in the 2nd print of the 1st volume of the *Principle of Chemistry* (fig. 3 right) on March 14/15 (26/27), 1869, shortly followed by printing of 150 one-pagers in Russian and 50 in French on March 17/20 (March 29/April 1) which were sent by Mendeleev to his many colleagues in Russia and Europe. Then the first publication followed abroad [11], in German, dated April 5/7 (17/19) and the first appearance in the Russian scientific periodical *Journal of Russian Chemical Society* in mid-May 1869 [12]. The first brief public communication of the Periodic Law was made by Mendeleev's colleague Nikolai Menshutkin at the meeting of the *Russian Chemical Society* on March 6 (18), 1869 [5].

The original form of the Table shown in fig. 3 did consist of six columns each of 2 to 19 elements. To make it look like the modern periodic table we know, one has to rotate it 90° clockwise, and flip left to right, that was soon done by



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ,

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti=50	Zr=90	?=180.
		V=51	Nb=94	Ta=182.
		Cr=52	Mo=96	W=186.
		Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4.
		Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
		Ni=Co=59	Pl=106,6	Os=199.
H=1		Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Fig. 3 "Опыт системы элементов… *Essai d'une système des éléments d'après leurs poids atomiques et fonctions chimiques par D. Mendeleeff, professeur de l'Université à Saint-Pétersbourg*", the first formulation of Mendeleev's first periodic law of elements dated Feb. 17 (Julian (Russian) calendar; March 1 Gregorian (European) calendar). Left: the handwritten manuscript as sent to publication. Right: the first published version in the 2nd print of the 1st edition of Mendeleev's "*Principles of Chemistry*".

Mendeleev himself in subsequent publications. Of course, the modern table has 118 elements *versus* 63 in the 1869 version and its modern day understanding – formed after the establishment of the quantum theory in 1920's – emphasizes the periodicity of the properties of elements according to their number (*i.e.*, the number of electrons, rather than the atomic weight). Naturally, the original table did not have the groups for lanthanoids and actinoids as well as for noble gases – they were all introduced later – and had incorrect weights and/or placements of nine heavy-metal elements, compared to current ones (Yt, Rh, Pt, Os, Hg, Au, Tl, Pb), due to incomplete knowledge of those times. What made Mendeleev's system a distinct difference from earlier attempts of de Chancourtoiss (1862), Odling (1864), Meyer (1864), Newlands (1864), and Hincrichs (1867) are: i) its completeness, as it included all 63 known elements without exclusions; and ii) its general assumption of it being a law of nature and, therefore, its predictive power – so, Mendeleev took the liberty of changing the accepted atomic weights of some elements and foreseeing still undiscovered elements and their chemical and physical properties – see those marked as "?=45" (named by him as *eka-boron*, "eka" meaning one spot down in the table, or scandium, discovered in 1879), "?=68" (*eka-aluminium*, or gallium, 1875, atomic weight 69.7), "?=70" (*eka-silicon*, or germanium,

1886, atomic weight 72.6), "?=180" (hafnium, 1923) and *eka-manganese* (technetium-99, unstable element, 1937). One can refer to the vast literature on the history of these discoveries, the remarkable story of the gallium density being more accurately predicted by Mendeleev than Lecock de Bois Baudodran's initial experimental results, and how gradually the periodic law and the table became the framework for a great part of chemical theory (see, *e.g.*, ref. [13]). By the time Mendeleev died in 1907, William Ramsay (1852–1916), discoverer of inert gases, and Bohuslav Brauner (1855–1935) carried out two very notable refinements of the periodic table, such as the addition of a new group of elements for entering inert gases, and of a special group for rare-earth elements.

3 Other major scientific activities

One striking feature of Mendeleev's long career is the diversity of his activities. The range of his research can be gleaned from the table of contents of his *Complete Works* [14]: Vol. I: Ph.D. and Master theses (3 articles, 348 pages); Vol. II: Periodic law (7, 518); Vol. III: The study of aqueous solutions by specific gravity (11, 467); Vol. IV: Solutions (13, 560); Vol. V: Fluids (16, 310); Vol. VI: Gases (17, 692); Vol. VII: Geophysics and hydrodynamics (25, 468); Vol. VIII: Organic chemistry (29, 664).; Vol. IX: Gunpowder (34, 313); Vol. X: Oil (36, 830); Vol. XI: Fuel (40, 584); Vol. XII: Metallurgy (42, 1094); Vols. XIII and XIV: *The Principles of Chemistry* (105, 1792); Vol. XV: "Theoretical Knowledge" and notes (62, 646); Vol. XVI: Agriculture and processing of agricultural products (68, 480); Vol. XVII: Technology (70, 858); Vols. XVIII-XXI: Economics (318, 2514); Vol. XXII: Metrology (86, 366); Vol. XXIII: Public education and higher education (93, 385); Vol. XXIV: General topics (96, 462); Vol. XXV: Supplementary materials (98, 804).

Below we briefly present some (not all) of his most notable scientific accomplishments.

Chemistry. About a third of more than a thousand Mendeleev's articles, books and brochures are essentially on all sections of chemistry – the theoretical foundations of chemistry, inorganic, organic, physical chemistry, all areas of chemical technology of those times from metallurgy and energy to agricultural chemistry, chemistry of bakery, cheese making, winemaking, etc. In 1891 Mendeleev had invented *pyrocollodion*, a kind of smokeless powder based on nitrocellulose, free from the drawbacks of the existing French and English gun powders (chemical inhomogeneity, inability to be used in large-caliber guns, limited storage time, etc.). This work had been commissioned by the Russian Navy, however they failed to organize its manufacturing due to bureaucratic mismanagement and, during the 1st World War, Russians had to buy the same type of gunpower in vast amounts from the United States.

Physics. Throughout his career Mendeleev conducted a broad research in the field of physical chemistry, mostly focused on understanding molecular interactions in gases and liquids via record-precision measurements of their basic properties such as density, thermal expansion, surface tension, etc. In 1860, while on internship in Heidelberg, he studied the temperature dependence of surface tension coefficients of various liquids and carried out numerous experiments with capillaries. It was known that the so-called capillary coefficient $a^2=hr$ (where r is the radius of capillary and h is the meniscus elevation within it) relates to the surface tension coefficient σ – an indicator of intermolecular interaction – as $a^2=2\sigma/(g\rho)$, where g is the acceleration of gravity and ρ is the liquid density. Mendeleev discovered that above a certain temperature – named by him as "*absolute boiling point*" – the surface tension becomes zero, cohesion and heat of vaporization become equal to zero and the liquid changes to vapor, irrespective of the pressure and volume. Inversely, below that point any gas in a container can be condensed to a liquid solely by the application of pressure. The phenomenon since then was widely used for liquification of gases such as air, oxygen, nitrogen, helium, etc. Eight years later, T. Andrews independently studied the compressibility of carbon dioxide and determined that the temperature of 30.9 °C is the lowest at which CO_2 can still be compressed to liquid by application of pressure (74 atm) and coined the term "critical temperature" – which is commonly used now, despite the deeper meaning of Mendeleev's "*absolute boiling point*" [15].

Less profound but of methodological value is what we now call the *Clapeyron-Mendeleev equation*. In 1834 B. P. E. Clapeyron found a relation between the physical quantities defining the state of an ideal gas: the gas pressure P, the volume of the gas V, and the absolute temperature $PV = BT$, where the proportionality coefficient B depends on the mass of the gas. In 1874 Dmitrii Mendeleev re-formulated the equation of state of an ideal gas to the modern textbook form by using Avogadro's law (according to which gases contain the same number of molecules N at the same values of P, V, and T), that is $PV = (M/\mu)RT$ or $PV = NkT$, where N is the number of gas particles and k is Boltzmann's constant.

Metrology. Despite his theoretical inclinations to search for deep foundational reasons of various phenomena, Mendeleev was a skillful and innovative master of physics and chemistry lab experiments. He is known for the invention of a differential pressure barometer, a pycnometer (a device to measure the density of fluids), for many improvements of pressure probes, one-arm weights, vacuum pumps for gases, instruments for determining alcohol concentration (spiritometers), etc. In 1890, Mendeleev had to resign from his chair at the St. Petersburg University because he supported protests of democratic students, and soon was

appointed director of the Central Bureau of Weights and Measures (see fig. 4). He took part in the preparation of the state law "On Measures and Weights" adopted in 1899, which introduced a new system of Russian basic units – pound for mass, *arshin* for length, etc., and ratios were established between arshin and meter, pound and kilogram and founded an extensive state-wide calibration method.

In 1898 Mendeleev published a fundamental work in the field of metrology "Experimental study of the fluctuation of weights". To expand the knowledge of the magnitude and nature of gravity, he turned to studies with pendula and built one hanging in a 23 m high tower through a 15 m deep well, all temperature stabilized. In 1898 he instigated state and church commissions aiming to switch from the outdated Julian calendar (at that time it differed from the Gregorian one by 13 days) but failed.

Economics. Since the late 1880's Mendeleev had been engaged as a consultant to the Russian Cabinet of Ministers on a broad spectrum of economics and technology issues. He was one of the most active initiators of the taxation and tariff reforms undertaken by the government at that time. He published numerous articles and reports on economics (4 volumes in *Complete Works*, more than 2500 pages) and sometimes valued his fundamental *Tolkovii Tarif* (*Explicit Tariff, or Study on the Development of Russian Industry in Connection with its General Customs Tariff of 1891*) over his *Principles of Chemistry*. The former indeed offers a very impressive analysis of Russian economy, a comparative study of the economic policies of several countries – most notably, England – over several centuries, vast factual material and, most importantly, the main principles of economic instruments (such as taxes and tariffs) which can lead a country to prosperity. Favoring enlightened modern autocracy, he considered bourgeois democracy a hypocritical cover for the power of capital and argued that in Russia the market must necessarily be combined with the active role of the state in the economy. Mendeleev considered the national economy as a complex in which agriculture, industry, transport, science, culture, education, the church, the armed forces, etc. are proportionally developed and harmoniously combined and called to overcome the dominant unilateral approaches to economic development. He advised to process agricultural products locally, advised not to export grain, but instead the cattle grown with that grain, not grapes, but wine, and so on.

He opposed monopolies, enriched by price gouging, suppressing competition and inhibiting technological progress. At the same time, Mendeleev justified and proposed mainly economic methods to control unjustified capitalist profits – through combined capital, state-owned monopolies and cooperative enterprises. He saw the ideal enterprise where the owner would be a participant in all its aspects, knew every employee, and all the workers would be interested in the results of the common work.

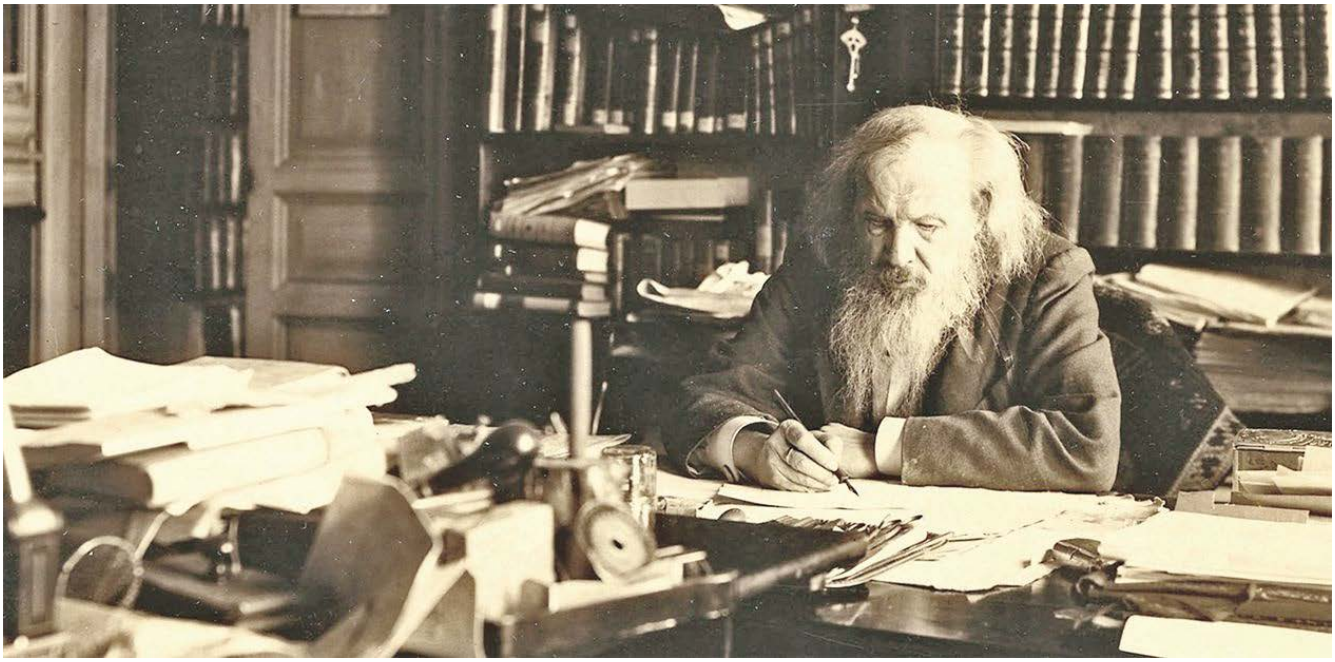
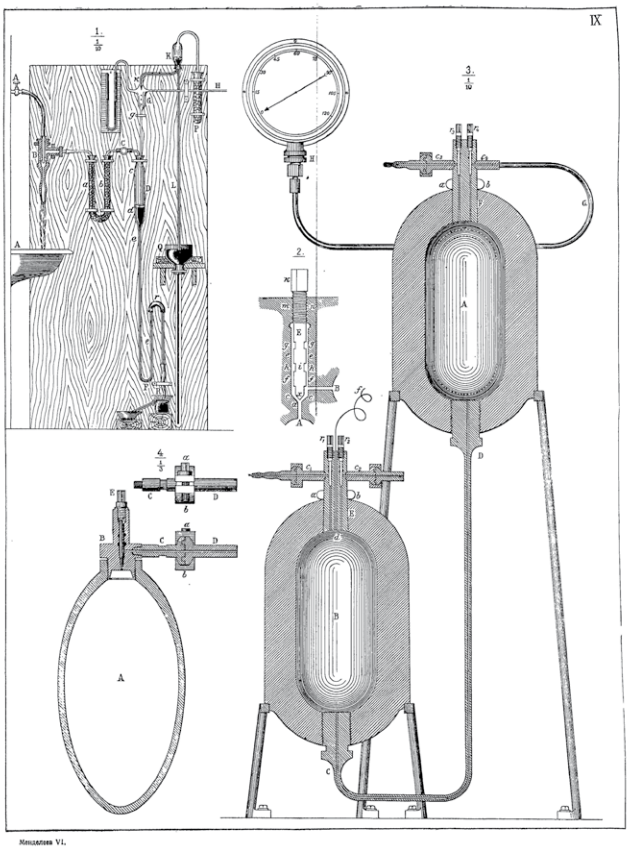


Fig. 4 Dmitrii Mendeleev in his office as Director of the Chief Bureau of Weights and Measures (1897).



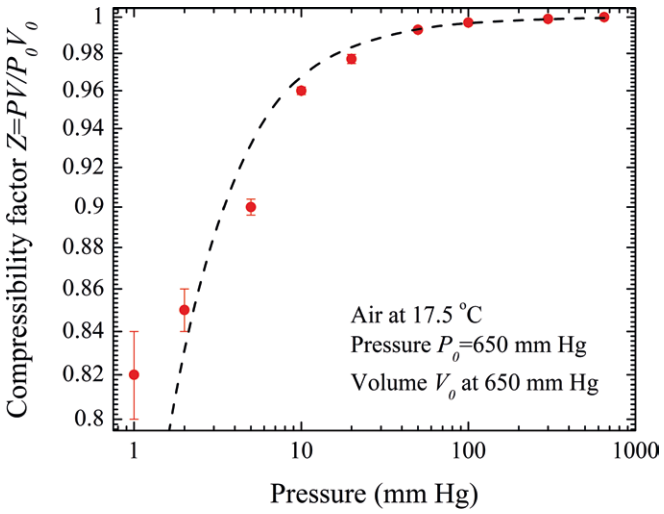


Fig. 5 Mendeleev's experimental studies of rarified gases. Left: laboratory equipment; right: preliminary data on deviations from the Boyle-Mariotte law at low air pressure; red points: measurements in the range of 650 to 1 mm Hg [18]; dashed line: expected results under the assumption of possible pressure underestimate of 0.3 mm Hg.

4 "Nothing is as instructive as delusions of a genius"

Russian physicist and Nobel laureate Pyotr Kapitza once wrote that "Nothing is as instructive as delusions of a genius" [16]. Mendeleev offered several remarkable examples of such "delusions".

All his scientific life Mendeleev warned against excessive enthusiasm for atomism – "… Atoms do offer simplicity of conception, but give no confidence" (in the 1906 edition of the *Principles of Chemistry*) – and did not fully believe in the atomic theory. He strictly delimited the concepts of an "element" and of a "simple body" and built precisely a system of chemical elements, and not of simple bodies. To him an element was the smallest materially homogeneous "weighty substance with the sum of its own properties" entering into particles (molecules) of bodies and he classified "elementary individuals", the nature of which was determined by their atomic weight. Such formulation of the problem allowed Mendeleev to create the periodic system, but prevented him from foreseeing a modularity in the atomic structure and accepting the discovery of radioactivity, electrons, and many major achievements of science of the late XIX-early XX centuries. He reproached the modern scientific thought because it "got entangled in ions and electrons".

Naturally, Mendeleev sought to understand the physical causes of the phenomenon of periodicity and believed that explaining the nature of periodicity "is possible only in the sense of a dynamic representation that can and must first of all explain the very concept of weight". Hence his interest in the question of "the cause of weight and attraction", as well as in the properties of the medium transmitting light and gravity, *i.e.*, luminous ether. He reasoned that the existence of ether would manifest itself in the additional term $f(P)$ to gas compressivity $PV = NkT(1+f(P))$ which grows at low pressures when the properties of an "ordinary" substance would cease to mask the properties of ether [17]. In his laboratory notebook of 1874 he wrote "Air has some density at zero pressure – and that is ether!". In 1874-75 he had undertaken the

search for the so-called "positive deviations" from the Boyle-Mariotte law in highly rarefied gases (assuming d(*PV*)/d*P* >0) and seemingly observed them in several gases at pressures 650-100 mm Hg and below (see fig. 5). Such deviations were not subsequently confirmed and modern science does not know any deviations from the ideal-gas compressivity except those at modest to high pressures which generally follow the van der Waals equation. Mendeleev's experimental setup for these studies was very sophisticated and expensive it was lavishly supported by the Imperial Russian Technical Society (RTO). As the results were hard to reproduce or explain without suspicion of an error in the pressure measurements (see fig. 5 right panel), Mendeleev had published only a detailed description of the instruments and methods and other experimental results obtained at high pressures. Very quickly after the death of his chief laboratory assistant Mikhail Kirpichev in 1875, Mendeleev wrapped up and finished the program. He continued thinking about ether and its relation to the periodic system and, *e.g.* in the 1905 brochure "An attempt at a chemical understanding of the world ether" the symbol *x* for ether was inserted in the periodic table's zeroth group and zeroth raw, above the noble gases, with its weight estimated out of cosmological arguments to be between $9.6 \cdot 10^{-7}$ a.m.u. and $5.3 \cdot 10^{-11}$ a.m.u. Neither that *element x*, nor another new *element y* of the same group, the so-called *coronium* with mass 0.4 a.m.u. or less, could not hold their place in the Table. In line with the ether search and considerations, Mendeleev developed a theory of upper atmosphere and took a widely publicized balloon flight on August 7, 1887 in order to observe a solar eclipse – he rose to a height of 3800 m and flew some 100 km.

Mendeleev also studied the origin of petroleum and concluded that hydrocarbons are abiogenic and form deep within the Earth via the reaction of water with iron carbide: "The main fact to note is that petroleum was born in the depths of the earth, and it is only there that we must seek its origin in" [19]. The abiogenetic model was later further supported by many, including V. Vernadsky, but nowadays it is generally not well accepted by the scientific community which mostly stands by increasingly sophisticated biogenetic models of the formation of hydrocarbon deposits in nature.

5 Mendeleev and Italy

Mendeleev's connections with Italy were very broad. He greatly appreciated the foundational works of Amedeo Avogadro (1776–1856) and Stanislao Cannizzaro (1826–1910) – the former for his contribution to molecular theory (the Avogadro number), the latter for his influential role in the atomic-weight deliberations of the Karlsruhe Congress in 1860, which Mendeleev often mentioned as the major event that led him to the discovery of the relations between atomic weights and chemical properties. Mendeleev simply adored Italy, its people and culture. He traveled there at least on six different occasions in 1860 (twice), 1864, 1879, 1881, and 1904 and visited Rome, Genoa, Bologna, Venice, Palermo, Catania, Naples, Aosta, Chiavenna, Menaggio, Porlezza, Ivrea, Arona, Como, Bellagio, Turin, Novara, Bergamo, Padua, Brescia, Verona, Milan, Pisa, Florence, Civitavecchia, Albano, Anacapri, Castellammare, Sorrento, Messina, Canicattì, Caltanissetta, Agrigento, Bolzano among others (see fig. 6, top panel). On November 12, 1860 Mendeleev saw Giuseppe Garibaldi in Naples and later reflected in his letter to family and friends:"*…How proud must be the country which can produce people like Garibaldi!*". His companion on that travel in the Fall of 1860 was Alexander Borodin (1833–1887) – his close friend, a fellow chemist student in Heidelberg (see fig. 6, left panel) and future professor of chemistry and internationally renowned composer of the "Prince Igor" opera and other jewels of world's musical culture. The beginning of the trip to South Italy was accompanied by a small curious incident, the story of which from the words of Mendeleev was written down by his chemistry student and future academician Vyacheslav Tishchenko (1861–1941) [20]: "In that year, the fight for freedom between Italy and Austria for the independence of Italy was still ongoing. On the Austrian border, near Verona, a rigorous check of those passing through was conducted. When it came time for us, we were detained and sent to a separate room. Why, for what purpose, we could not understand. I was left alone, but Borodin was ordered to fully strip. Not sensing anything serious, A. P. [Borodin] got quickly undressed and even performed an entrechat in jest. He was thoroughly examined, and then we were released. We sat down in a train car. We had just crossed the border as Italians riding with us ran to us, shaking hands, thanking us for something, started treating us to wine. At first, we could not understand why. Turns out, that Borodin looked like an Italian politician after whom the Austrians were vigilantly searching for. A. P. distracted them, and the Italian, riding in the same train car, safely escaped arrest." The name of the Italian revolutionary has not been solidly identified yet, though some suggest that could be either Nino Bixio (1821–1873) Garibaldi's lieutenant, one of the most prominent figures in the Italian unification – see fig. 6, right panel, or other younger (closer to Borodin's age) military commanders such as Giuseppe Missori (1829–1911) and Giovanni Chirassi (1832–1866) [21].

Mendeleev's other trip to Italy in 1881 happened during his deep mid-life crisis. First, in November of 1880, despite being already quite a famous researcher in Russia and abroad, he was not elected to the St. Petersburg Academy of Sciences. The main reasons for that are thought to be the fierce factional fights in the Academy, Mendeleev's rough character created him many enemies and the borderline nature of his

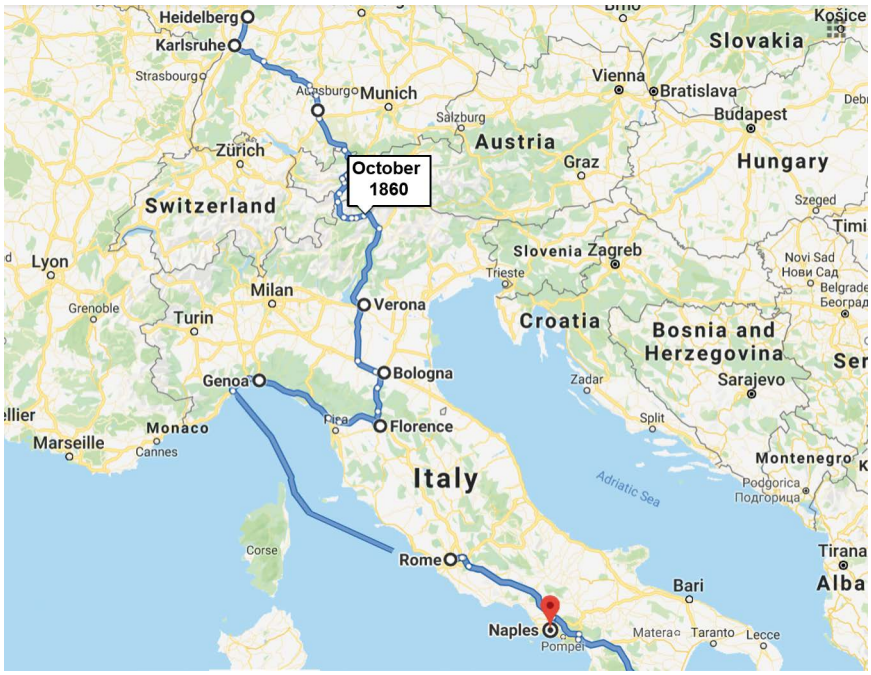


Fig. 6 Top: the 1860 route of Mendeleev and Borodin in Italy; left: Alexander Porfierievich Borodin (1833–1887); right: Nino Bixio (1821–1873).

periodic law on the junction of physics and chemistry (the academic opening he applied for was in the division of chemistry and technology). His almost two-decade long marriage to Feozva Lescheva (1828–1905) was also falling apart despite Mendeleev's immense love to his children – his son Vladimir (1865–1898) who became a Navy officer and daughter Olga (1868–1950), future famous Soviet expert in thoroughbred hunting dogs. The 46-year-old professor fell in passionate love with a beautiful 20-year-old art student Anna Popova (1860–1942). Attempts to stop the passion included a long fight for Feozva's agreement and church permission to divorce and Anna's escape to Rome but all in vain. In the end, Dmitrii Ivanovich obtained permission to divorce, got a break from teaching in St. Petersburg university, and left for Italy. In March 1881 he united with Anna in Rome and they had a honeymoon trip over to Naples, Capri, and Florence followed by Paris and Spain. Mendeleevs returned to Russia in May 1881 and finally settled for church wedding in April next year (that was somewhat scandalous as their Orthodox priest agreed to wed them against the conditions of the divorce set by the Church authorities, which allowed Mendeleev to remarry only after some 7 years,

being very handsomely bribed by the groom, which led to the priest's eventual discharge from priesthood). The couple had four children: daughter Lubov' (the name for *love* in Russian, 1881–1939) future actress and wife of one of the most famous Russian poets, Alexander Blok (1880–1921), son Ivan (1883–1936), who became an experimental physicist and philosopher, and twins Maria (1886–1952), future director of Mendeleev's museum-archive in Leningrad/St. Petersburg, and Vasily (1886–1922), a military engineer of tanks and airplanes. Seemingly no direct descendants of Mendeleev are alive nowadays.

6 Recipe for genius : breakthroughs, recognitions and myths

Mendeleev is among the most referenced names of Russian science, along with the "father of Russian science", polymath and natural philospher Mikhail Lomonosov (1711–1765) [22], Nobel laureates Ivan Pavlov (1849–1936), pioneer in understanding physiological reflex mechanisms, and Lev Landau (1908–1968), a theoretical physicist, and biogeochemist Vladimir Vernadasky (1863–1943) – see the quantitative analysis in fig. 1 of ref. [23]. Among those, Mendeleev is most closely compared as a personality and a scientist to Lomonosov: both were of humble roots and came from remote parts of North-East Russia, both got broad recognition in physical chemistry and had fierce temper, both were polymaths and tirelessly worked on educational initiatives, such as the establishment of new universities in Moscow and Tomsk, respectively, and other matters of importance for Russia. Even some of their specific scientific interests were identical – they both worked on solutions, on the physics of liquids in capillaries, on the technology and physics of glasses, on economics problems, and they both dreamed and planned expeditions to the Arctic. At the end of their lives, they both tried to better understand gravity and built large pendula for careful observations.

As noted above, Mendeleev was not elected to full membership of the St. Petersburg Academy, never sought that honour again and remained its corresponding member. Michael Gordin considers the non-election scandal as arguably one of the most influential events that propelled Mendeleev to true national-wide fame in Russia [6]. For several following years Russian advanced society, newspapers and journals commented on such obvious injustice, blaming foreigners (many voting Academy members, all Russian citizens, had German-like surnames) and effectively appealing to nationalistic senses. That and the broad spectrum of Mendeleev's involvements in Russian economic, scientific and state affairs made him extremely popular, and that popularity was further amplified during Soviet times, when Mendeleev was rightfully considered as "…the brilliant son of a great nation". Nowadays the scientist's namesakes include a city, a lunar crater and a volcano on one of Kuril islands, numerous streets and squares, the Tyumen International airport, the Russian Chemical Society, the Moscow's Russian University of Chemical Technology and four other higher education institutes. More than two dozen Mendeleev monuments and bas-reliefs have been erected in Russia, Ukraine, Azerbaijan. In 1962 the USSR (now Russian) Academy of Sciences established the D. I. Mendeleev Gold Medal for outstanding scientific work in the field of chemical science and technology.

The list of Mendeleev's scientific accolades catalogues memberships in 121 academies, institutions and societies including 50 foreign ones, such as an honorary doctor degree in the *Accademia delle Scienze di Torino* (1893), foreign membership in *Accademia dei Lincei* (1893) and *Società Italiana di Scienze Naturali* (1901), foreign corresponding membership in *Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna* (1901) (see fig. 7) and the 1882 Davy medal, the 1889 Faraday medal and the 1905 Copley medal from British learned societies [5]. In 1905, Mendeleev was elected member of the Royal Swedish Academy of Sciences and nominated for the Nobel Prize in Chemistry. While that year he did not get it due to confusion over how recent the recognized discovery should be (the periodic system was almost half a century old by that time), the following year the Nobel Committee for Chemistry voted 4:1 to recommend the Swedish Academy to award him the prize but surprisingly he did not get it. The details of that gross injustice can be found in Ulf Lagerkvist's book [24] and reveal how a fierce opposition by the lone critic Peter Klason, who pushed for another candidate, resulted in unordinary expansion of the Committee by four additional members and a new vote of 4:5 against the Russian. Some believe that such a development was due to a back-stage intervention by the Swedish chemist Svante Arrhenius, who had himself won the prize in 1903 for the theory of electrolytic dissociation, which Mendeleev had been an outspoken critic of for a long time. Two additional nominations the following year were in vain as Mendeleev died of pneumonia on January 20, 1907.

Mendeleev championed involvement of women in science and experimental labs. After his death, one of his most talented lab assistants, Olga Ozarovskaya, had become a famous folklorist and country's leading theater theorist and critic, and left very vivid memoirs of her assistantship years with Mendeleev [25]. Mendeleev tireless campaign against "mediumistic phenomena" and "spirits" received wide publicity in society and notably contributed to the establishment of the authority of science in the 19th century Russia augmented by his lifelong commitment to writing numerous articles on popular science and technology for journals and encyclopedias such as, *e.g.* the *Brockhaus*

Academia Scientiarum
Instituti Bononiensis.

Quod ad graviorum disciplinarum incrementum, et hujusce Civitatis dignitatem pertinebat, Societate nostra Aloysio Ferdinando Marsilio Com. auctore a Senatu Bononiensi in has Aedes recepta, et a Benedicto XIIII. Pont. Max. ad majus communis Patriae decus honoribus, praemiisque aucta, quae scientiarum studiis provehendis impensam operam navaret, ad publicam utilitatem, et ad Societatis ejusdem ornamentum conferre duximus, si Te quoque Demetrie Mendeleeff Vir Praeclarissime, cujus ingenium nobis perspectum, et doctrina longe probata est, in numerum Sodalium easdem disciplinas nobiscum Communicantium cooptaremus. Itaque litteras hasce cooptationis tuae testes libenti animo ad Te mittimus, Tibique Coetus nostri splendorem curae vehementer fore non dubitamus.

Dat. Bononiae ex Aedibus Instituti Die 27 Mensis Januarii Anni 1901

Praeses.

Hieronymus Cocconi Ab Actis.

Fig. 7 Mendeleev's diploma of foreign corresponding membership in *Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna* (1901) from the collection of the D. I. Mendeleev Archive-Museum in St. Petersburg University.

Fig. 8 "Mendeleev's Dream" monument inauguration on October 5, 2017 in St. Petersburg's Murino district.

Enzyklopädie and a series of publications entitled *Biblioteka promyshlennykh znaniy* ("Library of Industrial Knowledge").

Characteristics for geniuses, Mendeleev's name is associated with wide-spread myths. One of them claims that the periodic table came to him while in sleep (see fig. 8). The only documented evidence for that are the memoirs of a personal friend of Mendeleev, geologist and corresponding member of St. Petersburg Academy professor Alexander Inostrantsev (1843–1919). He wrote [26] "… Once, I, using the current placate mood of D.I. [Dmitrii Ivanovich], asked him a question, which pushed him towards his famous discovery. To this, he answered that he already suspected for a while the known bond of elements between themselves and that he thought long and hard on this. Throughout the last months before the discovery, Mendeleev used up a large amount of paper with the goal of finding a table form for his law, but nothing worked. Lately, he again began to work hard on this issue and, based on his story, was even close, but still, in the end, nothing worked. Just before the discovery of the law, Mendeleev had spent his time working on his elusive periodic table the entire night until morning, yet, nothing worked. Frustrated, he stopped working and, with a great longing for sleep, went straight to sleep on a couch in his office, fully clothed. In his dreams, he saw a clearly expressed periodic table, that later had been printed. Even in his sleep, his excitement was so great, that he instantly woke up and quickly sketched the periodic table on the first piece of paper he found lying on his desk. I bring up this story of Mendeleev because I see in it one of the best examples of the psychological impact of hard work on the brain of a person." There are two caveats, though – firstly, Inostrantsev's manuscript was written after Mendeleev's death, and secondly, Mendeleev himself never communicated such a story and usually cited long and hard work toward the periodic system, with initial considerations of the problem traced to as early as decade and a half before the discovery – in his 1855 candidate (graduation from the State Pedagogical Institute) dissertation "Isomorphism in light of relation of crystal form to chemical composition" and his master's degree dissertation on specific volumes, which involved the study of the relations between various properties of chemical substances.

The myth of him being the inventor of Russian vodka (see fig. 9 left panel) is quite peculiar as Mendeleev himself did not drink vodka out of fear of becoming an alcoholic like one of his elder brothers and preferred red Georgian wine. Still, such a myth became wide-spread in the early part of the 20th century, when many in Russia wanted to add legitimacy to any possible piece of national culture. Other people, while accepting the fact that vodka existed several hundred years before Mendeleev, have perpetuated the legend that the famous chemist set the standard for vodka as a mix of 40% ethanol and 60% water. That myth has percolated through TV shows, literature, and even scholarly books, such as William Pokhlebkin's 1991 "*History of Vodka*" [27]. It has also spread overseas along with the product and nowadays it is easy to find in liquor stores worldwide colorfully labeled bottles that proclaim, "In 1894, Dmitri Mendeleev, the greatest scientist in all Russia, received the decree to set the Imperial quality standard for Russian vodka and the 'Russian Standard' was born." *Russian Standard* is, of course, a brand of vodka, but the bottle's description makes the claim that there is something scientific about that standard as well. As an apex of this popular myth, January 31 – the day of the presentation and defense by Mendeleev of his 1865 doctoral dissertation entitled "A discourse on the compounds of alcohol and water"– is widely celebrated by many Russians as the "official vodka birthday" (see fig. 9 right panel).

This myth, like vodka, has two parts of truth and three parts of "water". Indeed, in his PhD dissertation, Mendeleev sought to learn about the interaction of molecules by making precise $O(10^{-4})$ measurements of the density $\rho(C)$ and thermal expansion of a mix of ethanol and water at various concentrations C. His outstandingly careful and experimentally inventive and advanced measurements led him to conclude that solutions are products of solutes and solvents combined into relatively stable chemical compounds. He argued that the points at which the second derivative $d^2\rho(C)/dC^2$ changes its value are indicative of stable molecular interactions. For example, for the ethyl alcohol solution in water he found three such stable compounds: when one molecule of spirit C_2H_5OH binds with three molecules of water H_2O at $C=46.0\%$ by weight or 53% by volume (corresponding to the mix volume contraction of about 2%); 1:12 at $C=17.56\%$ and 3:1 at $C=88.46\%$ (see fig. 10 left panel). Nowhere in his dissertation did he argue that vodka that is 40% alcohol by volume ($C=34\%$ by weight) is somehow optimal.

It is true that Mendeleev, as both a strong proponent of state-supported industrial development and a scientific expert on alcohol rectification, took part in the Russian government commission dedicated to introducing an efficient excise tax on alcohol and other consumer goods. By the early 1900s, the taxes he helped to implement were bringing in about a quarter of the country's revenue. But again, Mendeleev's work with the commission was not about the best way to mix vodka.

Notably, the 40/60 or about mixture of alcohol and water shows several remarkable properties. At room temperature, the mixture is three times as viscous as either of its constituent components. And vodka out of the freezer is 2.5 times as viscous as it is at room temperature – that's why connoisseurs strongly advise drinking vodka very cold to fully enjoy its smoothness. In addition, a bottle of vodka left in a

Fig. 9 Illustrations to popular myth of Mendeleev being the father of Russian vodka: caricature by Vladimir Moltchanov and "Happy Birthday, Vodka!" greeting card from newspaper "Crimean Telegraph" No. 215 of January 18, 2013.

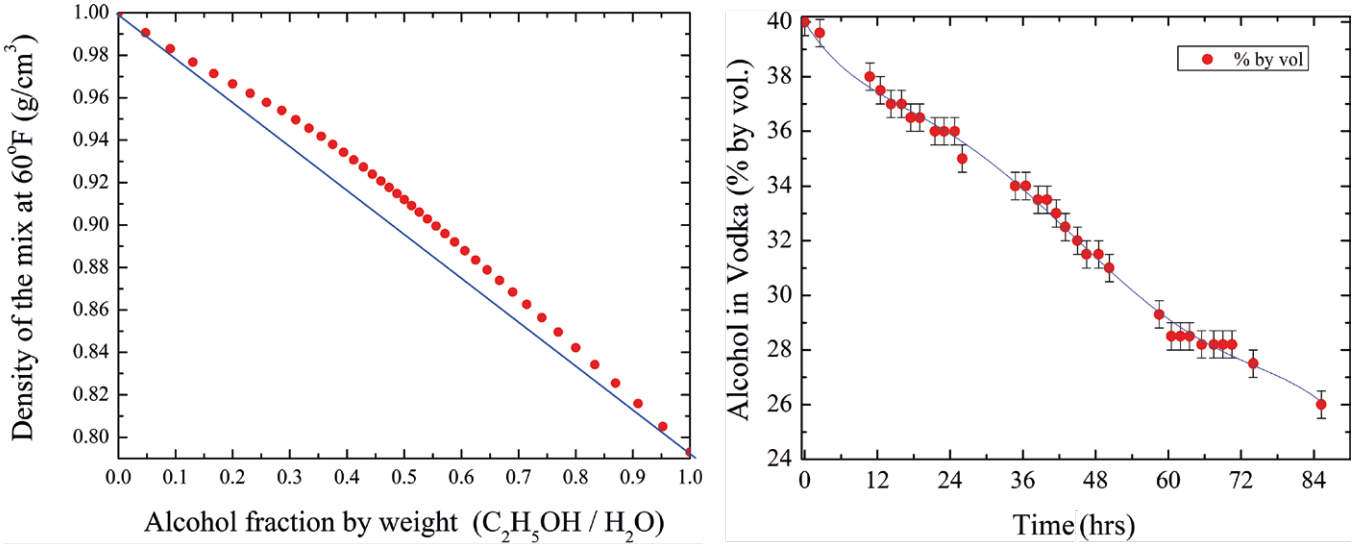


Fig. 10 Physical properties of the ethyl alcohol solution in water: Left: in his 1865 doctoral dissertation "A discourse on the compounds of alcohol and water" Mendeleev meticulously studied the physical properties of the solution, including the volume contraction phenomenon; red dots are the data, straight blue line indicates expectations in the absence of molecular interactions. Right: a simple experiment with a shot glass of vodka left untouched demonstrates that alcohol and water in vodka do not evaporate at the same rate [27].

freezer will not burst: alcohol acts as an antifreeze, allowing the mixture to stay liquid down to approximately –25°C. Vodka is also potent enough that at room temperature its fumes can be set on fire – a phenomenon that has been used as a simple check of alcohol content since the 15th century to prevent barkeeps from watering vodka down. A similar standard for vodka instituted by Russia in the early 19th century required that no more than half the initial volume of liquid must remain after burning as reflected in its then common second name of "polugar" (half-burned).

Another popular myth holds that you can pour vodka into an open glass at room temperature and enjoy it days later because the alcohol and water evaporate at the same rate. Vodka actually does not have such a property. After conducting simple home measurements with an optical spiritometer, we found that after about two days of standing at room temperature under normal conditions, the strength of vodka in a glass is reduced from 40% to 30% (fig. 10, right panel) [28].

To conclude, it is fair to say that Mendeleev's major discovery is among the topmost scientific breakthroughs which shaped our understanding of the Universe. Summing up various encyclopedia articles and the history of science reviews, it is usually listed among "top ten" over the five centuries of modern science, such as: i) Copernican heliocentric system; ii) Galileo's natural philosophy and telescope; iii) Newtons' gravity and infinitesimal calculus (with Leibnitz); iv) Lavoisier's principles of chemistry; v) Darwinian evolution; vi) Mendeleev's periodic system; vii) Einstein's relativity; viii) quantum mechanics and physics of Plank, Bohr and Heisenberg *et al.*; ix) Watson and Crick's genetic coding mechanism; x) computers and the internet. One can foresee further revolutionary advances this century, too – from artificial forms of life and conscience to teleportation and communication with extra-terrestrial intellect – but according to Richard Gott's argument for longevity of observables [29], it is safe to assume that Mendeleev's name will light up for at least another 150 years.

Acknowledgments

Authors are thankful to those who organized and took active part in various IYPT2019 events, including Chris Stoughton, Reidar Hahn, Chris Quigg, Christopher Beard and Lisa Lopez (all – Fermilab), Olga Zunde, Andrei Tolstikov and Vladimir Novoselov (Tyumen), Igor Dmitriev (St. Petersburg), Michael Gordin (Princeton), Frank Zimmermann, Lucio Rossi and Michael Benedikt (CERN), Stefania Vecchi (Ferrara), Marco Pallavicini (Genova), Tommaso Dorigo and Donatella Lucchesi (Padova). Special thanks to Luisa Cifarelli and Aldo Roda (Bologna) who provided a unique opportunity to visit the Bologna Academy archives and access Mendeleev's correspondence.

References

[1] UN General Assembly Resolution 72/228 (Dec. 20, 2017) https://undocs.org/A/RES/72/228 see also https://iypt2019.org/

[2] https://www.nature.com/collections/jihfiafacg *Science,* 363 Special Issue 6426 (2019), https://journals.aps.org/prl/transuranium-elements-and-the-physical-review

[3] https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/

[4] https://www.aps.org/publications/apsnews/updates/iypt.cfm

[5] R. Dobrotin, N. Karpilo, L. Kerova, D. Trifonov, *Chronicle of the Life and Works of D.I. Mendeleev* (Nauka Publisher, Leningrad) 1984.

[6] M. Gordin, *Well Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table* (Basic Books, New York) 2004.

[7] B. Bensaude-Vincent, *"Dmitri Mendeleev",* https://www.britannica.com/biography/Dmitri-Mendeleev

[8] G. Villani, "*Mendeleev - La Tavola Periodica degli Elementi"* (Grandangolo Scienza - Corriere della Sera) 2017.

[9] D. I. Mendeleev, *Osnovi Khimii* (8 Russian editions, St. Petersburg) 1868-1906; *Principles of Chemistry*, 1st English ed., translation by G. Kamensky (Longmans, Green & Co, London and New York) 1891; *Principes de chimie*, 1st French translation by E. Achkinasi, H. Carrion (Bernard Tignol, Paris) 1895-1896; *Grundlagen der chemie*, 1st German translation by L. Jawein, A. Thillot, H. Carrion (Carl Ricker, St. Petersburg) 1891.

[10] P. Druzhinin, *The Riddle of the Periodic Table. The History of the Publication of the D.I. Mendeleev's Discovery of the Periodic Law* (Novoe Literaturnoe Obozrenie, Moscow) 2019.

[11] D. Mendeleeff, *"Versuche eines Systems der Elemente nach ihren Atomgewichten und chemischen Functionen", J. Prakt. Chem.* (1869) 251.

[12] D. Mendeleev, *"Correlation of Properties of Elements with Atomic Weight", J. Russ. Chem. Soc.*, I/5 (1869) 60.

[13] M. Kaji, H. Kragh, G. Palló (Editors), *Early Responses to the Periodic System* (Oxford University Press, USA) 2015.

[14] D. I. Mendeleev, *Complete Works (Polnoe Sobranie Sochinenii, PSS)*, 25 vols. (USSR Academy of Sciences, Moscow and Leningrad) 1934-1954.

[15] Y. Tovbin, *"Absolute Boiling Temperature" and "Critical Temperature", Russ. J. Phys. Chem.,* 83 (2009) 1643.

[16] P. Kapitza, *"Lomonosov and World Science," Sov. Phys. Usp,.* 8 (1966) 720.

[17] D. Mendeleev, *"Mendeleef's Researches on Mariotte's Law", Nature,* 15 (1877) 498.

[18] D. Mendeleev, *"On Elasticity of Gases", PSS,* 6 (1875) 551.

[19] D. Mendeleev, "*L'Origine du pétrole", Revue Scientifique, 2e Ser.,* VIII (1877) 409.

[20] M. Mladentsev, V. Tischenko, "*Dmitrii Ivanovich Mendeleev*", vol.1 (USSR Academy of Sciences, Moscow) 174.

[21] G. Trevelyan, *Garibaldi and the Making of Italy: June-November, 1860* (Longmans and Green, London) 1919; also M. Staglieno, *Nino Bixio* (Rizzoli, Milan) 1973.

[22] R. Crease, V. Shiltsev, *"Mikhail Lomonosov (1711-1765): Scientist in Politically Turbulent Times", Il Nuovo Saggiatore,* 33, No 5-6 (2017) 43.

[23] V. Shiltsev, *"On a New Edition of the Collected Works of M V Lomonosov", Phys. Usp.,* 56 (2013) 738.

[24] U. Lagerkvist, *The Periodic Table and a Missed Nobel Prize* (World Scientific, Singapore) 2012.

[25] O. Ozarovskaya, "*The Great Chemist*" (Molodaya Gvardiya, Moscow-Leningrad) 1932.

[26] A. Inostrantsev, "*D. I. Mendeleev in Memoirs of Conteporaries",* edited by A. Makarenya *et al.* (Atomizdat, Moscow) 1973 pp. 26-33.

[27] V. Pokhlebkin, "*History of Vodka*" (Inter-Verso, Moskow) 1991.

[28] V. Shiltsev, E. Shiltseva, "*Mendeleev and Vodka: Synergy of Science and Myth*", *Science First Hands,* 3 (2019) 80.

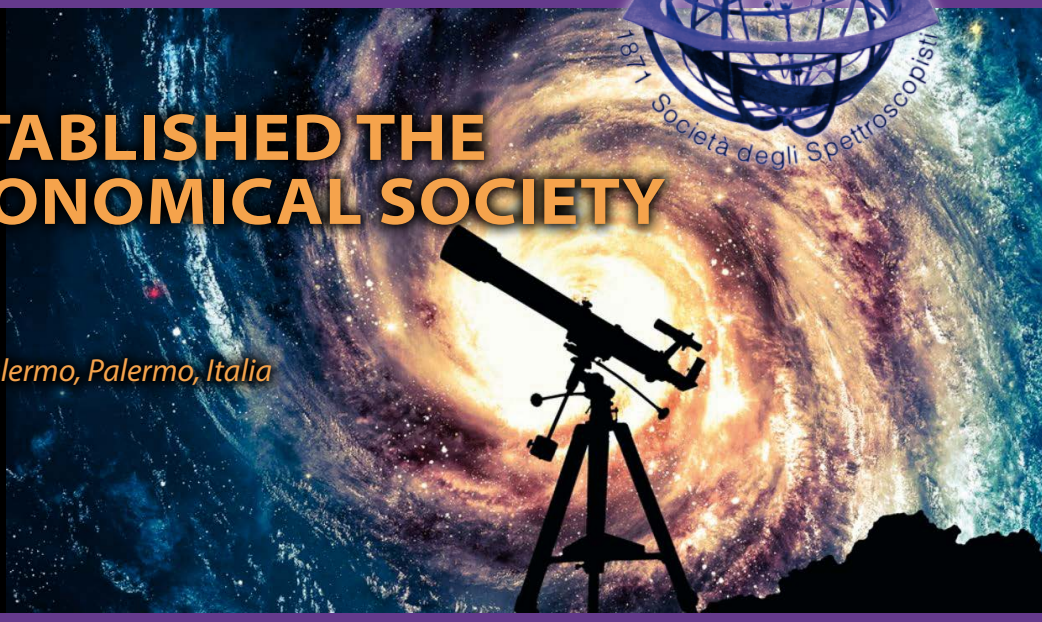
[29] K. R. Gott, *"Implications of the Copernican Principle for Our Future Prospects", Nature, 3*63 (1993) 315.

Vladimir Shiltsev

Vladimir Shiltsev is a Distinguished Scientist at the Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois. He led the Tevatron collider department and the Fermilab Accelerator Physics Center from 2001 to 2018. He is a Fellow of the American Physical Society (APS), Fellow of AAAS, Fellow of IEEE, winner of the 2004 European Accelerator Prize, the 2015 APS R. H. Siemann Prize and the 2018 APS Outstanding Referee Award, the 2016 Gamow Prize (RASA-USA), and the 2019 Nishikawa IPAC/ACFA Prize. He authored many articles on the history of Russian science in *Physics Today*, *Physics in Perspective*, *Science First Hands*, and other popular publications.

Elizaveta Shiltseva

Elizaveta (Liza) Shiltseva is a second year Honors Student at the University of Illinois Urbana-Champaign (USA), specializing in integrative biology and chemistry. Her hobby is history of science and religion.



THUS WAS ESTABLISHED THE ITALIAN ASTRONOMICAL SOCIETY

ILEANA CHINNICI
INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo, Palermo, Italia

A hundred years ago, on January 7th 1920, the Italian Astronomical Society was established in Rome. This was the result of a process of transformation of the old Italian Spectroscopic Society, active from 1871, into a national astronomical society. The Italian Spectroscopic Society had lost its initial purposes at the turn of the century, after the death of its founders, and its transformation was hence debated inside the Italian astronomical community. The process was accelerated and completed under the impulse of the International Astronomical Union, created after the World War I.

COSÌ NACQUE LA SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

1 Introduzione

Cent'anni fa, il 7 gennaio 1920, in una sala della Reale Accademia dei Lincei in Roma veniva fondata la Società Astronomica Italiana (SAIt), la principale società scientifica nazionale che oggi rappresenta l'astronomia nelle sue varie componenti, professionale, didattica, amatoriale.

Il percorso che condusse a questa fondazione fu lungo e complesso, e anche abbastanza sotterraneo. La necessità di avere un proprio corpo istituzionale affiorò qua e là, nella comunità astronomica italiana, fin dagli anni successivi all'Unità. In particolare, già alla fine dell'Ottocento, si coglieva l'esigenza di provvedere ad una adeguata diffusione della cultura astronomica, in risposta alla necessità di creare un bacino di reclutamento per i giovani astronomi:

… l'astronomia italiana è in condizione da non poter mettere in campo che un manipolo, prezioso in vero, di valenti generali e ufficiali, muniti di qualche fucile di nuovo modello, mentre altre nazioni muovono alla conquista della terra promessa con eserciti disciplinati, numerosi e sostenuti dalle più potenti artiglierie …

Se vogliamo sotto tale aspetto metterci alla pari con le altre nazioni, bisognerà che noi pure ci formiamo il nostro esercito astronomico, ben diretto e proporzionatamente numeroso ed equipaggiato […]. Ma dove reclutare cotesto esercito […] se non in mezzo ad una popolazione astronomica, la quale da noi manca e che bisogna procurar di fare ad ogni costo. I mezzi per farla sono la scuola, il libro, l'effemeride [1].

Il percorso si snodò inoltre attraverso un periodo storico particolarmente delicato, segnato dal primo conflitto mondiale. Paradossalmente, la nascita della SAIt fu accelerata dagli eventi post-bellici, e costituì una risposta alle esigenze di cooperazione internazionale che scaturirono dal desiderio di prevenire simili future tragedie.

La SAIt, infatti, nacque dalle ceneri della Società degli Spettroscopisti Italiani e ne costituì la trasformazione, a lungo ventilata e discussa, soprattutto dopo la nascita dell'International Astronomical Union, di cui alcuni dei fautori di questa trasformazione furono protagonisti.

2 La Società degli Spettroscopisti Italiani

Istituita nel 1871, con un preciso programma scientifico riguardante lo studio comparato e continuato dei fenomeni della fotosfera e della cromosfera solare (macchie, facole, protuberanze, ecc.), la Società degli Spettroscopisti Italiani (fig. 1) aveva contribuito in modo significativo al passaggio epocale che aveva portato alla nascita dell'astrofisica [2]. In particolare, le *Memorie* della Società, avevano raccolto e veicolato i risultati di una comunità scientifica internazionale in formazione, offrendo uno spazio specifico di diffusione e di confronto, tanto da fare di esse la prima rivista di astrofisica mai realizzata (fig. 2), e quasi una sorta di antesignana del celebre *The Astrophysical Journal* [3].

Nell'ultimo quarto del XIX secolo, gli astronomi italiani erano stati tra i primi ad introdurre la fotografia e la spettroscopia in campo astronomico, con risultati di alto valore scientifico. Il principale esempio è costituito dalla classificazione spettrale delle stelle, proposta da padre Angelo Secchi (1818–1878) negli anni 1867–1869, che fu alla base delle successive classificazioni, formulate ad Harvard College Observatory, negli Stati Uniti, sul finire del secolo, da cui derivano quelle tuttora in uso [4].

Proprio Padre Secchi, gesuita direttore dell'Osservatorio del Collegio Romano, insieme a Pietro Tacchini (1838–1905), astronomo aggiunto presso l'Osservatorio di Palermo, furono i promotori della fondazione della suddetta Società degli Spettroscopisti Italiani; essa vide anche la partecipazione iniziale di Giuseppe Lorenzoni (1843–1914) e Arminio Nobile (1838–1897), astronomi rispettivamente presso gli Osservatori di Padova e Capodimonte, e di Lorenzo Respighi (1824–1889), direttore dell'Osservatorio del Campidoglio in Roma [5].

Caratterizzata da una impronta fortemente interdisciplinare, la Società intendeva raggruppare non solo astronomi, ma anche fisici e chimici, interessati allo sviluppo

SOCIETÀ DEGLI SPETTROSCOPISTI ITALIANI

Il Signor Prof.r Comm.e Lorenzo Respighi
è inscritto fra i membri nazionali della Società degli
Spettroscopisti Italiani

ROMA, li 8 Dicembre 1888

IL DIRETTORE
Pietro Tacchini

Fig. 1 Diploma della Società degli Spettroscopisti Italiani; ASOR.

MEMORIE
DELLA
SOCIETÀ DEGLI SPETTROSCOPISTI ITALIANI
RACCOLTE E PUBBLICATE
PER CURA DEL PROF. P. TACCHINI

VOLUME I. — ANNO 1872.

PALERMO
STABILIMENTO TIPOGRAFICO LAO
premiato con diverse medaglie
via Celso, 31.
1872.

Fig. 2 Primo numero delle *Memorie*; BOAP.

della spettroscopia e alle sue applicazioni. Questa impronta fu certamente voluta da Secchi e Tacchini, i quali provenivano da una formazione non strettamente astronomica (Secchi era fisico, Tacchini ingegnere), e quindi più aperta alle "contaminazioni" con altre scienze. Questa visione non fu però pienamente compresa e condivisa dal resto della comunità astronomica italiana, che in parte avversò o semplicemente ignorò il percorso tracciato dalla Società, chiudendosi in un atteggiamento conservativo, peraltro diffuso anche in gran parte dell'astronomia europea di allora [6].

Nonostante i contrasti, nel giro di qualche decennio la Società, presieduta a vita da Pietro Tacchini, arrivò a vantare una trentina di illustri soci italiani, tra cui il fisico Pietro Blaserna (1838–1918) ed il chimico Raffaello Nasini (1854–1931), e altrettanti soci stranieri, annoverando tra le proprie fila i nomi dei principali astrofisici dell'epoca.

3 Segnali di trasformazione

Con la Prima Guerra Mondiale, la Società subì profondi cambiamenti, che riflettevano lo stato dell'astronomia italiana dell'epoca, decisamente in declino dopo la morte dei pionieri dell'astrofisica.

Tacchini ed i suoi colleghi non riuscirono, infatti, ad impedire che, dopo i primi successi della nascente astrofisica, l'astronomia italiana ripiegasse verso studi più tradizionali. Il motivo di questo ripiego è da ricercare nell'intrecciarsi di diversi elementi; ne elenchiamo qui alcuni:

1) La mancata applicazione del decreto Bonghi (1876), che avrebbe dovuto eseguire una riforma degli Osservatori Astronomici italiani [7], distinguendoli in due classi (Osservatori di ricerca e Osservatori universitari). Tale mancata applicazione, dovuta alla caduta del Governo Minghetti e alla discontinuità con la sinistra di Depretis, portò al perdurare del mantenimento di ben dieci Osservatori nazionali, ereditati dalla situazione pre-unitaria, con conseguente dispersione di risorse.
2) La scarsità di risorse finanziarie, che all'indomani del processo unitario, con un Paese che doveva affrontare emergenze non banali sul piano dell'istruzione (da notare che la piaga dell'analfabetismo interessava il 78% della popolazione, con punte del 91% nel meridione), erano evidentemente limitate; in campo astronomico, esse furono principalmente investite nell'acquisto di un grande telescopio per l'Osservatorio di Brera [8], lasciando altri Osservatori a dibattersi per anni tra problemi di personale insufficiente, di strumenti obsoleti, di sedi cittadine ormai divenute inappropriate [9].
3) La formazione degli astronomi, tradizionalmente centrata sulla meccanica celeste, che poco o nulla si adattò ai cambiamenti introdotti dall'astrofisica.

Alcuni tentativi di rimediare a questi elementi sfavorevoli furono effettuati dallo stesso Tacchini, negli ultimi anni della sua carriera scientifica, e da Annibale Riccò (1844–1919) (fig. 3), che può considerarsi il suo principale erede scientifico.

Questi tentativi si concretizzarono nella fondazione del primo Osservatorio Astrofisico italiano [10], realizzato a Catania nel 1880, fortemente voluto da Tacchini e diretto da Riccò, e nell'istituzione della cattedra di Astrofisica, tenuta dallo stesso Riccò, presso l'Università di Catania nel 1890.

L'impatto di queste iniziative sulla comunità scientifica italiana, tuttavia, non fu quello atteso. Peraltro, l'Osservatorio di Catania, sul finire del secolo, fu coinvolto nel grande progetto internazionale di mappatura fotografica del cielo noto come *Carte du Ciel* [11], che assorbì un tempo eccessivamente prolungato e consistenti risorse umane ed economiche, rallentando lo sviluppo degli studi astrofisici in quella sede.

Anche il progetto di Tacchini di dedicare un monumento scientifico a padre Secchi, attraverso la realizzazione di un grande telescopio solare, non ebbe il successo sperato. Malgrado la considerevole somma raccolta mediante una pubblica sottoscrizione, lanciata nel decennio successivo alla morte di Secchi, sia per motivi interni al Comitato promotore, sia per lo scarso interesse della maggior parte della comunità astronomica nazionale, il telescopio non venne mai realizzato [12].

Nel 1905, con la morte di Tacchini, che era stato affiancato negli ultimi anni da Riccò, venne

Fig. 3 Ritratto di Annibale Riccò; ASOP.

costituito un Consiglio di Presidenza, formato dallo stesso Riccò (che ne assunse la Presidenza), dal fisico Pietro Blaserna e dall'astronomo Elia Millosevich (1848–1919). È un segnale eloquente, che dice la debolezza della comunità astronomica italiana, incapace di esprimere un leader, ma dice allo stesso tempo l'intenzione di mantenere il carattere interdisciplinare della Società, grazie alla presenza di Blaserna.

4 Altre società astronomiche italiane

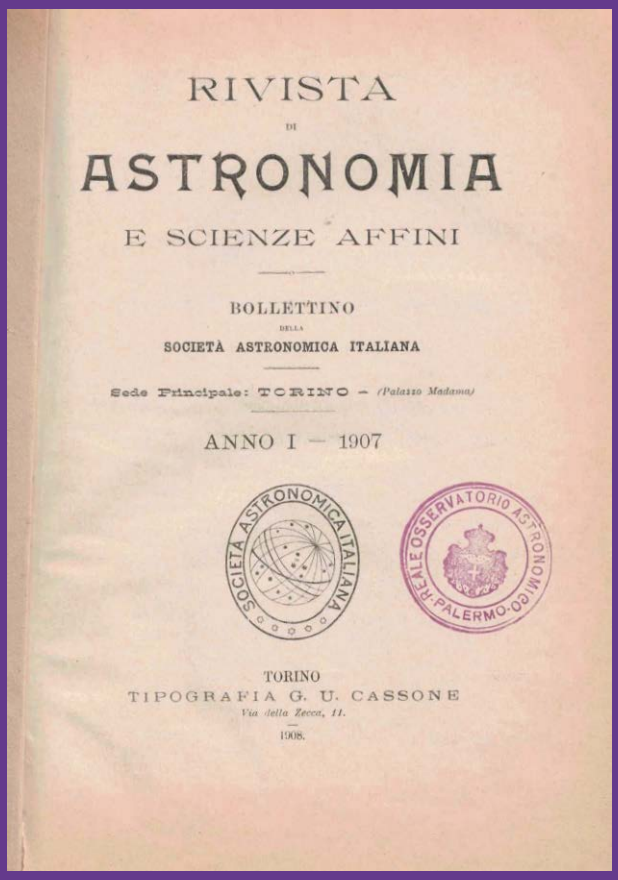
Altro segnale della debolezza intrinseca della comunità astronomica italiana fu la sua frammentazione in varie aggregazioni di carattere divulgativo, di breve vita. Esse nacquero, in parte, sulla falsariga delle società astronomiche d'Oltralpe (nel 1887 era stata fondata la *Société Astronomique de France* per promuovere lo sviluppo e la pratica dell'astronomia), e in parte, come già detto, in risposta all'esigenza di colmare una lacuna nel campo della divulgazione e formare nuove generazioni di astronomi.

Uno tra i divulgatori più attivi in Italia agli inizi del XX secolo fu Giovanni Boccardi (1859–1936), controversa figura di prete e astronomo, che nel 1906 fondò la prima Società Astronomica Italiana (SAI) [13]. La SAI pubblicò un eccellente periodico, la *Rivista di Astronomia e Scienze Affini* (fig. 4), fino al 1914; poi, i noti eventi bellici – e non solo, come vedremo più avanti – ne interruppero la pubblicazione.

A Boccardi succedeva, nel 1909, come Presidente della Società, Vincenzo Cerulli (1859–1927) (di cui diremo oltre), il quale così descriveva gli scopi della Società:

> … *ha per scopo precipuo, oltre la sana e ben intesa divulgazione delle scoperte astronomiche, anche l'avvicinamento degli amatori di Urania ai Maestri delle Specole italiane, affinché quelli possano godere di un insegnamento diretto, anziché di quello solito, di seconda mano, che si trova nelle riviste popolari, ordinariamente redatte da persone poco competenti* [14].

La Società avrebbe "dovuto nutrire nel suo seno una vera scuola di astronomi" e non "solo aver cura dei dilettanti, ma anche di quelli che si propongono di diventare astronomi di professione" [14]. In qualche modo, quindi, essa si proponeva di fare da collante tra i cultori di astronomia a vario titolo e la comunità astronomica professionale, di cui quindi cercava l'appoggio.


RIVISTA
DI
ASTRONOMIA
E SCIENZE AFFINI

BOLLETTINO
DELLA
SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

Sede Principale: TORINO – (Palazzo Madama)

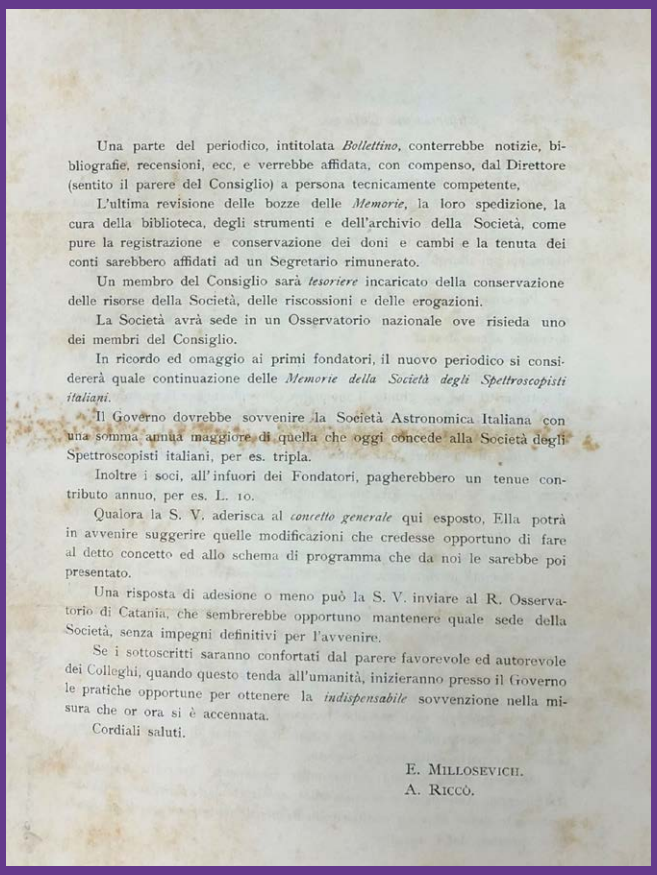
ANNO I — 1907

SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

R. OSSERVATORIO ASTRONOMICO PALERMO

TORINO
TIPOGRAFIA G. U. CASSONE
Via della Zecca, 11.
1908.

Fig. 4 Primo numero della *Rivista*; BOAP.


Una parte del periodico, intitolata *Bollettino*, conterrebbe notizie, bibliografie, recensioni, ecc, e verrebbe affidata, con compenso, dal Direttore (sentito il parere del Consiglio) a persona tecnicamente competente.

L'ultima revisione delle bozze delle *Memorie*, la loro spedizione, la cura della biblioteca, degli strumenti e dell'archivio della Società, come pure la registrazione e conservazione dei doni e cambi e la tenuta dei conti sarebbero affidati ad un Segretario rimunerato.

Un membro del Consiglio sarà *tesoriere* incaricato della conservazione delle risorse della Società, delle riscossioni e delle erogazioni.

La Società avrà sede in un Osservatorio nazionale ove risieda uno dei membri del Consiglio.

In ricordo ed omaggio ai primi fondatori, il nuovo periodico si considererà quale continuazione delle *Memorie della Società degli Spettroscopisti italiani*.

Il Governo dovrebbe sovvenire la Società Astronomica Italiana con una somma annua maggiore di quella che oggi concede alla Società degli Spettroscopisti italiani, per es. tripla.

Inoltre i soci, all'infuori dei Fondatori, pagherebbero un tenue contributo annuo, per es. L. 10.

Qualora la S. V. aderisca al *concetto generale* qui esposto, Ella potrà in avvenire suggerire quelle modificazioni che credesse opportuno di fare al detto concetto ed allo schema di programma che da noi le sarebbe poi presentato.

Una risposta di adesione o meno può la S. V. inviare al R. Osservatorio di Catania, che sembrerebbe opportuno mantenere quale sede della Società, senza impegni definitivi per l'avvenire.

Se i sottoscritti saranno confortati dal parere favorevole ed autorevole dei Colleghi, quando questo tenda all'umanità, inizieranno presso il Governo le pratiche opportune per ottenere la *indispensabile* sovvenzione nella misura che or ora si è accennata.

Cordiali saluti.

E. Millosevich.
A. Riccò.

Fig. 5 Seconda pagina della circolare a firma Riccò-Millosevich; ASOC.

L'anno successivo, tuttavia, la stessa Società andava incontro ad una grave crisi interna, che portava Boccardi a lasciare la SAI e a fondare *Urania*, un'altra società astronomica, con una propria rivista, *Saggi di Astronomia Popolare*, sempre a cura di Boccardi. La SAI andò avanti sotto la direzione di Cerulli, che grazie ad una intensa campagna pro adesioni presso gli astronomi, nel 1911 poteva affermare:

La Società Astronomica Italiana appare ormai a tutti come una cosa seria degna dell'appoggio degli astronomi […] le adesioni degli astronomi sono per noi il più prezioso incoraggiamento … [15].

Cerulli fu rieletto per un secondo mandato, ma nel 1913, a seguito di un contrasto divenuto insanabile col Consiglio della Società (che sostanzialmente riguardava il controllo delle pubblicazioni), preferì dimettersi, determinando così di fatto la fine della Società. Prima delle dimissioni, era stato lanciato un referendum tra i soci, per spostare la stampa della *Rivista* da Torino (dove ancora troppo ingombrante era l'influenza di Boccardi) a Roma dove, con l'apporto degli astronomi professionisti, sarebbe diventata "un organo dell'astronomia italiana […] un organo di coltura, un periodico serio, capace di interessare gli astronomi" [16].

L'esito del referendum fu deludente: pochi soci, infatti, vi parteciparono. Così Cerulli interpretava questo insuccesso:

Ciò vuol dire non già sfiducia in chicchessia, ma apatia. Quel referendum ha avuto soprattutto lo scopo di appurare quanta dose di indifferentismo, al riguardo della Società, si trova in mezzo a noi … [17].

Da qui, la decisione di dimettersi. Il futuro, tuttavia, gli avrebbe riservato una nuova, e ancor più importante, opportunità.

5 Nascita dell'International Astronomical Union (IAU): la svolta

L'immane catastrofe della Grande Guerra aggravò la situazione generale, anche per l'elevato costo del disastroso conflitto bellico, in termini di perdite umane e finanziarie. La comunità scientifica reagì a questo disastro, impegnandosi a promuovere la cooperazione internazionale, attraverso una serie di conferenze preparatorie interalleate, tenutesi a Londra dal 9 al 13 ottobre e a Parigi dal 26 al 29 novembre 1918. Queste portarono, nel luglio 1919 a Bruxelles, alla nascita dell'International Research Council, in cui l'influente matematico italiano Vito Volterra (1860–1940) (uno dei pochi matematici membri della Società degli Spettroscopisti, già Presidente della Società Italiana di Fisica e futuro artefice del Consiglio Nazionale delle Ricerche) figurava tra i tre Vice Presidenti dell'Executive Committee.

Contestualmente, veniva istituita l'International Astronomical Union, con lo scopo di facilitare le relazioni tra astronomi di diversi paesi e la loro collaborazione, per promuovere ovunque lo studio dell'astronomia. È dunque in questo contesto che si esplicita finalmente l'idea di trasformare la Società degli Spettroscopisti Italiani in Società Astronomica Italiana.

Nell'aprile 1919, infatti, i due membri superstiti del Consiglio di Presidenza della Società (Blaserna era morto nel 1918 e, significativamente, non era stato sostituito), inviarono un'importante circolare ai soci (fig. 5). In questo prezioso documento, recentemente venuto alla luce presso l'Osservatorio di Capodimonte, Riccò e Millosevich, partendo dalla constatazione che in Italia l'unica Società di carattere astronomico in vita in quel momento era la Società degli Spettroscopisti italiani, dopo aver affermato l'opportunità che anche l'Italia avesse una propria Società astronomica nazionale, similmente alle altre nazioni, formularono la seguente proposta, interpellando il parere dei soci:

Considerando […] che attualmente un Comitato interalleato si sta occupando della riorganizzazione delle Associazioni scientifiche, è sembrato ai sottoscritti che sia giunto il momento conveniente per la trasformazione della Società degli Spettroscopisti italiani in Società astronomica italiana, a partire dal 1920 [18].

Nella circolare si leggeva inoltre:

La Società Astronomica Italiana dovrebbe essere del tipo della Royal Astronomical Society di Londra e altre consimili estere […] e perciò i membri che la comporranno sarebbero in prevalenza cultori degli studi astronomici … [18].

In questa trasformazione, il prezzo da pagare era quindi ovviamente la perdita della componente interdisciplinare: la società cercava infatti di darsi un'identità più definita, che la configurasse inequivocabilmente come espressione dell'astronomia italiana.

I membri della Società degli Spettroscopisti sarebbero quindi diventati soci fondatori della nuova Società e cinque di essi avrebbero costituito un Consiglio di Presidenza. Uno dei membri del Consiglio avrebbe avuto funzione di tesoriere ed un altro di direttore delle *Memorie,* organo della nuova società, a cui affiancare un *Bollettino*, con un redattore retribuito e scelto dal Consiglio. Anche il Segretario sarebbe stato remunerato. Fissata una quota annua di associazione, la nuova Società avrebbe dovuto comunque essere sostenuta da un contributo ministeriale, pari al triplo di quello erogato alla Società degli Spettroscopisti italiani.

La proposta fu evidentemente accolta con favore dai soci, tanto da ritenersi "approvata per il gran numero di adesioni" [19], ma è ragionevole pensare che da più parti sia

stato richiesto di poterne discutere in assemblea.

Intanto, nel luglio 1919, Riccò partecipava per l'Italia alla prima riunione dell'Executive Committee a Bruxelles, essendo così testimone diretto e promotore della nascita dell'IAU. Non era un caso: l'IAU infatti prendeva le mosse dalla Commissione Permanente per la *Carte du Ciel*, che aveva già costituito un'estesa rete internazionale per la collaborazione al progetto, e di cui Riccò già faceva parte, in qualità di Direttore di un Osservatorio partecipante (l'unico per l'Italia). Nella fase di fondazione dell'IAU, l'Italia voleva essere tra i protagonisti dell'avvio della nuova istituzione – e infatti Riccò invitò ufficialmente l'IAU a tenere la sua prima Assemblea Generale a Roma [20].

6 L'azzeramento dei vertici

L'invito venne formulato appena in tempo: verso la fine di settembre del 1919, infatti, Riccò moriva, stroncato dalla malaria, mentre, già ammalato, si trovava a Roma per presiedere la riunione di una commissione ministeriale.

Millosevich (fig. 6), trovatosi improvvisamente solo alla guida di questa delicata operazione di transizione, accusò il colpo. Pensò quindi di chiedere l'aiuto di colleghi più giovani, in particolare di Azeglio Bemporad (1875–1945), direttore dell'Osservatorio di Capodimonte, che invitò a far parte del Consiglio di Presidenza che avrebbe dovuto guidare la trasformazione. Così gli scrisse nell'ottobre dello stesso anno:

… io la prego vivamente di accettare di far parte con me del Consiglio di Presidenza della Soc[ietà] e di sostituire nella direzione delle pubblicazioni il Riccò. Io sono assai vecchio e non posso occuparmi che del mio Osservatorio e dell'Acc[ademia] dei Lincei [di cui era stato riconfermato segretario della classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, n.d.r.]*, che mi dà gravi cure e preoccupazioni …* [21].

Per ricostituire il Consiglio, occorreva però un terzo membro; Millosevich confidò a Bemporad un nome, quello del fisico Antonio Garbasso (1871–1933):

… un terzo membro potrebbe (in confidenza) essere Garbasso, ma di ciò parleremo; come pure dobbiamo parlare della trasformazione della Soc[ietà] degli Spettr[oscopisti] in Soc[ietà] astr[onomica] ital[iana]. Per ora corrono tempi tristissimi; ho fatto qualche assaggio, ma bisogna attendere ore più liete per avere una contribuzione di almeno 6000 lire all'anno … [21].

La proposta presenza di Garbasso nel Consiglio di Presidenza (come successore di Blaserna, in linea con la tradizione di avere un fisico) era certamente dettata tanto da motivi di convenienza politica che da ragioni scientifiche: Garbasso, vicino alle ideologie fasciste, aveva fondato a Firenze un importante laboratorio di ottica e meccanica di precisione (che poi diventerà l'Istituto Nazionale di Ottica) ed era uno degli scienziati italiani politicamente più influenti, in quel momento.

Nella lettera di Millosevich compare anche il nome di quello che poi diventerà il primo Presidente della nuova società:

Ella, a proposito della sopradetta trasformazione, accenna al nome del caro mio amico V[incenzo] Cerulli; è un prezioso elemento scientifico … [21].

Cerulli, grazie alla sua attività nella SAI, godeva di una certa popolarità tra gli astronomi, e probabilmente aveva compreso che, in questa fase di trasformazione, poteva esserci spazio per lui nella nuova società. Laureato in fisica, ma privo di una formazione accademica in campo astronomico, Cerulli aveva creato il suo proprio osservatorio privato di Collurania, a Teramo, ma forse per affrancarsi dall'essere considerato comunque un astronomo amatoriale, aveva avviato una collaborazione con Millosevich, all'Osservatorio del Collegio Romano, probabilmente quindi anche mirata ad ottenere una legittimazione scientifica ed un riconoscimento personale.

La lettera di Millosevich a Bemporad si concludeva con un allargamento dell'orizzonte temporale, viste le scarse risorse governative disponibili in quel momento (siamo nell'immediato primo dopoguerra) per la trasformazione della Società:

…. anche su ciò potremo discorrere avendo noi davanti molto tempo, perché, le ripeto, che oggidì di diminuzioni nelle contribuzioni da parte del governo si può temere, ma di aumento è vano e anche poco patriottico pensare [21].

Millosevich, in realtà, non ebbe davanti molto tempo, come sperava; *l'impressione ricevuta per l'inopinata catastrofe di Riccò* [21], per sua stessa ammissione, lo aveva segnato. Meno di quindici giorni dopo aver scritto a Bemporad, anch'egli veniva a mancare: l'intero Consiglio di Presidenza della Società degli Spettroscopisti Italiani risultava così azzerato dai decessi ravvicinati dei suoi membri.

7 La nascita della SAIt

In qualche modo, tuttavia, con quest'ultima lettera, Millosevich lasciava ad Azeglio Bemporad (fig. 7) l'eredità morale di portare avanti il processo in corso. Questi pensò quindi di mobilitare la comunità astronomica italiana per evitare la dissoluzione della prestigiosa Società degli Spettroscopisti, e accelerare il passaggio all'auspicata Società Astronomica Italiana. Lo si evince chiaramente da una lettera di Bemporad a Filippo Angelitti (1856–1931), direttore dell'Osservatorio Astronomico di Palermo – ma probabilmente inviata anche ad altri direttori – nella quale si legge:

La morte del Prof. Riccò, seguita a così breve distanza da

quella del compianto Prof. Millosevich, ha lasciato larghi vuoti nei posti che i due così degnamente occupavano in molte Commissioni della Unione Astronomica Internazionale, ha privato la Società degli Spettroscopisti Italiani di tutto il consiglio di Direzione, ha troncato gli inizi di lavoro per la costituzione di una Società Astronomica Italiana di cui il primo annunzio era già stato dato dal Prof. Millosevich, per mezzo di una circolare a stampa, alcuni mesi or sono.

È dovere di tutti gli astronomi italiani, ed in pari tempo il migliore omaggio che possiamo rendere alla memoria dei due illustri scomparsi, salvare dal totale dissolvimento l'istituzione che ha dato vita per quasi mezzo secolo all'unico periodico astronomico pubblicato in lingua italiana e cercare di creare accanto a questa un organismo che colleghi in più feconda collaborazione di quanto non accadesse in passato le forze disperse nelle nostre specole; è dovere nostro infine rispondere all'appello che ci viene diretto dalla Unione Astronomica Internazionale per una partecipazione attiva ai lavori delle varie Commissioni.

Per sollecitare la soluzione di questi non facili compiti è sembrata opportuna ad alcuni colleghi una intesa fra gli astronomi che potranno trovarsi a Roma nei giorni 6 e 7 dell'anno prossimo o in altri giorni da fissare di comune accordo [22].

I protagonisti di una volta non c'erano più, ed era necessario serrare le fila, soprattutto di fronte ad altre comunità scientifiche nazionali più numerose e meglio organizzate, come quella dei matematici e dei fisici, che già da febbraio stavano lavorando alla costituzione del futuro Consiglio Nazionale delle Ricerche [23].

Gli spettroscopisti, inoltre, non costituivano più la maggioranza del corpo sociale, ormai rappresentata dagli astronomi, che necessitavano d'altronde di un proprio spazio e di un organo accademico nazionale che desse loro visibilità, alla pari delle società astronomiche estere, di antica fondazione. Dignità e prestigio della categoria – e della nazione, che aveva aderito all'Intesa vincitrice del conflitto, ma a caro prezzo – richiedevano una svolta, determinata dal contesto e dagli eventi storici.

Nel cambio del nome c'era certamente inoltre anche questo desiderio di voltare pagina, tipico del dopoguerra; un desiderio di ripartire, di rinnovarsi, di ricominciare, dopo il male assoluto della guerra.

Alfonso Di Legge (1847–1938), successore di Millosevich alla direzione dell'Osservatorio del Collegio Romano, venne sollecitato da Bemporad a prendere l'iniziativa; Di Legge convocò pertanto una riunione da tenersi il 7 gennaio a Roma, presso l'Accademia dei Lincei, *che discuta e fissi il modo più spedito e più sicuro, per mandare ad effetto la trasformazione della Società degli Spettroscopisti Italiani in Associazione italiana d'Astronomia …* [24].

Inoltre, seguendo una linea che stava emergendo anche all'estero, la piccola comunità degli astronomi italiani cercò di far causa comune coi geodeti ed i geofisici, coi quali si era creata una rete grazie al Servizio Internazionale delle Latitudini [25]. Per questo, Antonio Abetti (1846–1928), direttore dell'Osservatorio di Arcetri, propose di invitare alcuni loro rappresentanti alla riunione di Roma [26], suggerendo gli influenti nomi dei già menzionati Vito Volterra e Antonio Garbasso, e del fisico Antonio Ròiti (1843–1921), già membri della Società degli Spettroscopisti Italiani. Non a caso, anche l'International Union for Geodesy and Geophysics – altra emanazione dell'International Research Council – nata nel luglio 1919 a Bruxelles, terrà poi contemporaneamente all'IAU la propria prima assemblea a Roma nel 1922 [27].

Nel corso della riunione si stabilì di istituire un Comitato che avrebbe formulato lo Statuto della nuova società. Il Comitato, che di fatto costituì il primo Consiglio Direttivo, era composto da Vincenzo Cerulli (fig. 8), nel ruolo di presidente, dai già citati Garbasso e Volterra, e dagli astronomi Azeglio Bemporad ed Emilio Bianchi (1875–1941). Sulla presidenza di Cerulli, la cui candidatura era stata sostenuta da Bemporad, vi fu ampia convergenza da parte della comunità astronomica nazionale, che aveva espresso il proprio consenso anche sugli altri nomi poi scelti come componenti del Comitato [28].

In occasione della riunione del 7 gennaio – considerata come l'ultima della Società degli Spettroscopisti Italiani – furono anche prese alcune iniziative significative, come la

Fig. 6 Ritratto di Elia Millosevich; BOAP.

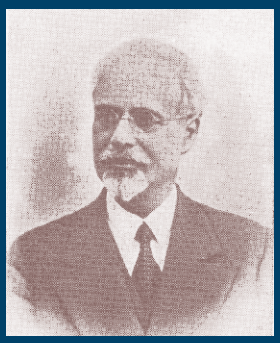


Fig. 7 Ritratto di Azeglio Bemporad; BOAP.

Fig. 8 Ritratto di Vincenzo Cerulli; BOAP.

petizione al Ministero competente affinché si provvedesse all'assegnazione delle posizioni direttoriali vacanti mediante pubblico concorso, come richiesto dai giovani astronomi [29].

Tre giorni dopo la riunione di Roma, Garbasso aveva già compilato una bozza di statuto [30], che venne poi sottoposta ai soci per approvazione: la nuova Società prendeva vita (fig. 9).

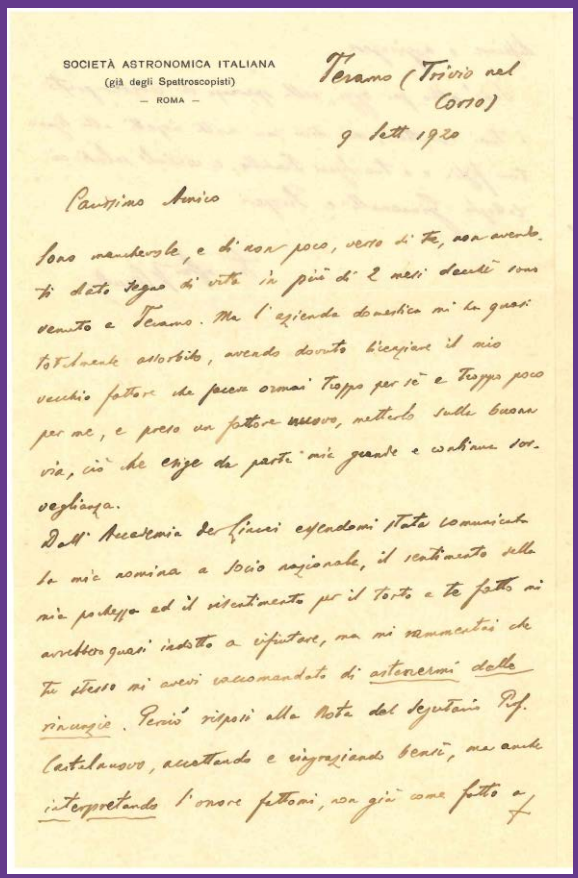
8 L'avvio della Società

Il primo statuto, come pure la linea editoriale delle *Memorie*, divenute dal 1920 in poi *Memorie della Società Astronomica Italiana*, furono fortemente improntati dall'atteggiamento di ripiegamento che caratterizzò la comunità astronomica nazionale di quel periodo. Lo statuto, infatti, limitò a 30 il numero di soci onorari, esclusivamente stranieri, a fronte di 100 membri effettivi, prevedendo invece un numero illimitato di membri associati: un segnale di chiusura verso l'estero, e di sostanziale disinteresse per quanto avveniva fuori dai confini nazionali (p. 38 in [31]). Analogamente, la linea editoriale, dettata dal presidente Cerulli, non solo escluse i lavori di ricerca, ma si propose di fare delle *Memorie* (fig. 10) un organo di critica delle scoperte altrui; per quanto sollecitato a correggere il tiro su questo punto ([31], *ibid.*), Cerulli non modificò questa linea, se non nel senso di includere i lavori di osservazioni, e non limitarsi all'esame dei soli lavori teorici.

In quello stesso anno, Cerulli elaborò anche un "Regolamento finanziario" delle *Memorie*, che prevedeva un contributo economico da parte degli autori; la pubblicazione delle *Memorie*, infatti, sembrava opportuno che avesse una cadenza trimestrale, ma la sovvenzione governativa non era sufficiente a coprire le spese di stampa che per un solo numero annuale [32]. Su suggerimento di Di Legge, si decise di esentare dal pagamento gli autori stranieri [33], nel tentativo di incoraggiarli.

Primo segretario-cassiere (stipendiato dalla Società) fu Pio Emanuelli (1889–1946), già collaboratore della Specola Vaticana, e in seguito molto attivo nel campo della divulgazione astronomica. È da segnalare che l'esplorazione del fondo archivistico che di lui si conserva presso la Domus Galilaeana di Pisa potrebbe fornire ulteriori elementi per lo studio dei primi anni di vita della Società.

Prima sede (ancora provvisoria nel 1927) della Società fu una stanza dell'Osservatorio del Collegio Romano [34],


SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA
(già degli Spettroscopisti)
— ROMA —

Teramo (Trivio nel Corso)
9 Sett 1920

Carissimo Amico

Sono manchevole, e di non poco, verso di te, non avendo-
ti dato segno di vita in più di 2 mesi dacchè sono
venuto a Teramo. Ma l'azienda domestica mi ha quasi
totalmente assorbito, avendo dovuto licenziare il mio
vecchio fattore che faceva ormai troppo per sè e troppo poco
per me, e preso un fattore nuovo, metterlo sulla buona
via, ciò che esige da parte mia grande e continua sor-
veglianza.
Dall'Accademia dei Lincei essendomi stata comunicata
la mia nomina a socio nazionale, il sentimento della
mia pochezza ed il risentimento per il torto a te fatto mi
avrebbero quasi indotto a rifiutare, ma mi rammentai che
tu stesso mi avevi raccomandato di astenermi dalle
rinunzie. Perciò risposi alla Nota del Segretario Prof.
Castelnuovo, accettando e ringraziando bensì, ma anche
interpretando l'onore fattomi, non già come fatto a

Fig. 9 Pagina di una lettera di Cerulli a Di Legge su carta intestata della Società; ASOP.

TERZA SERIE

VOL. I (1920) - N. 1

MEMORIE
DELLA
SOCIETÀ
ASTRONOMICA
ITALIANA
(già degli SPETTROSCOPISTI)

Sommario:

V. Cerulli, Prefazione, p. 3 – Verbale della seduta del 7 gennaio 1920, p. 5 – Statuto della Società, p. 7 – J. G. Hagen, Via Lattea e Via Nubila, p. 9 – G. Abetti, Esperienze fotografiche con il prisma-obiettivo Merz-Secchi, p. 15 – G. Armellini, Sul potenziale galattico, p. 24 – A. Bemporad, Variabilità di 32 Geminorum, p. 29 – E. Bianchi, La doppia spettroscopica κ Bootis, p. 31 – E. Bianchi ed E. Padova, Le variazioni di luce del pianeta «(44) Nisa», p. 39 – A. Prosperi, Sopra alcune misure del diametro solare, p. 66 – G. Zappa, Riflessioni sulle stelle giganti e nane nell'evoluzione stellare, p. 73 – G. Bemporad, Necrologia, p. 77 – Notizie, p. 79.

ROMA
TIPOGRAFIA DELL'UNIONE EDITRICE
Via Federico Cesi, 45

Fig. 10 Primo numero delle *Memorie* SAIt; BOAP.

Fig. 11 Prima Assemblea dell'IAU, https://www.media.inaf.it/2019/05/13/lincei-iau-sait/

concessa in attesa che il Ministero assegnasse un locale nello stesso stabile (in realtà, con la nuova presidenza, la sede fu poi trasferita a Milano).

Inevitabilmente, la nuova società astronomica italiana si trovò subito in conflitto con la società Urania di Boccardi, che intanto si era guadagnato credibilità all'estero (grazie al suo contributo nei lavori della *Carte du Ciel*), ed aveva lanciato una campagna di adesioni ad Urania. Così Cerulli metteva in guardia l'illustre senatore astronomo Giovanni Celoria (1842–1920), decano dell'astronomia italiana:

Avendo saputo […] che s'è osato mandar anche a Lei l'invito ad associarsi alla cosidetta "Urania" di Torino, mi affretto ad avvertirLa che quella sedicente Società ed il miserevole fascicoletto mensile da essa edito, sono organi dello pseudo-astronomo di Pino [Torinese] e non meritano quindi nessun incoraggiamento da parte nostra. Il detto Signore si è atteggiato in passato a rappresentante dell'Astronomia Italiana, ed è riuscito […] ad ingannare sul proprio conto i Baillaud e i Lallemand [Benjamin Baillaud (1848–1934), presidente dell'IAU, e Charles Lallemand (1857–1938), presidente dell'IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics)] [35].

In realtà, dopo la morte di Riccò, era stato Antonio Abetti ad essere cooptato al suo posto, quale rappresentante della astronomia italiana, nell'Executive Committee dell'IAU, e questi lavorava alacremente per preparare la prima Assemblea Generale di quest'ultima a Roma [36]. A nome della R. Accademia dei Lincei, Volterra nel 1921 confermò l'invito formulato da Riccò e, nel maggio 1922, si tenne a Roma, in una sala dell'Accademia dei Lincei, la prima Assemblea dell'IAU (fig. 11), che vide nel nuovo Executive Committee, per il successivo triennio, la presenza del Presidente della SAIt, Cerulli, tra i cinque Vice-Presidenti dell'IAU: un importante riconoscimento per la giovane Società Astronomica Italiana.

Fig. 12 Ritratto di Emilio Bianchi; BOAP.

A prova del perdurare delle difficoltà economiche dell'astronomia italiana e delle scarse risorse disponibili, va menzionato il delicato incidente diplomatico che vide coinvolta l'Italia. Il 27 marzo 1922, a pochi mesi dall'Assemblea, Emilio Bianchi lanciava un appello, segnalando:

… l'Italia si trova in una posizione alquanto critica nel seno dell'Unione astronomica internazionale; in quanto che, a differenza di tutti gli altri Stati aderenti, ancora non ha pagata la sua quota d'adesione all'Unione stessa pel 1921; quota ammontante a franchi 12.000, cioè a circa 20.000 lire [37].

Per ovviare all'emergenza, il governo si impegnò a versare la metà della quota, mentre il resto sarebbe stato versato dagli Osservatori, in maniera proporzionale alle risorse annualmente assegnate dal Ministero: un espediente che permise all'Italia di salvare la propria reputazione internazionale.

9 Modifiche allo Statuto

Morto Cerulli nel 1927, il bilancio della sua Presidenza della SAIt non apparve particolarmente felice. In sette anni di Presidenza, furono pubblicati solo tre volumi delle *Memorie*, mentre il numero di soci, al 1925, era di appena 60 unità.

Successore di Cerulli fu Bianchi (fig. 12), che diede invece una svolta energica alla SAIt. Bianchi prese due importanti provvedimenti, e cioè modificare la linea editoriale delle *Memorie*, aprendole a qualsiasi tipo di contributo scientifico serio, e modificare lo Statuto, eliminando la distinzione tra effettivi e associati e le limitazioni di numero, e allargando così, di fatto, la base della Società (p. 29 in [31]).

Il nuovo Statuto fu elaborato da Bianchi con Giorgio Abetti (1882−1982) e Giovanni Silva (1882−1957), rispettivamente direttori degli osservatori di Arcetri e Padova, e fu approvato nel 1930. Gli effetti positivi non mancarono: le *Memorie* iniziarono ad essere pubblicate regolarmente con cadenza biennale, e a contenere articoli di buon livello scientifico, redatti sia da astronomi professionisti, sia da astronomi amatoriali di tutto rispetto. Il numero di soci, inoltre, crebbe fino a stabilizzarsi intorno alle 120-130 unità per tutto il ventennio successivo.

Nel 1937 si avviò l'iter perché la Società diventasse Ente Morale e si provvide ad una revisione dello Statuto per conformarsi alle nuove disposizioni di legge relative alle società scientifiche. Fu un'operazione lunga e complessa, che durò due anni; nel 1939, con R. D. 10 giugno n. 1299, la SAIt fu eretta Ente Morale, con sede a Milano, e fu approvato il nuovo Statuto, che prevedeva l'adozione di un Regolamento approvato dal Ministero per l'Educazione nazionale. L'entrata dell'Italia nella Seconda Guerra Mondiale rallentò, come era ovvio, l'elaborazione del Regolamento, che fu approvato nel maggio del 1943, sotto la presidenza di Giorgio Abetti (fig. 13), succeduto a Bianchi. Per fronteggiare la grave crisi attraversata della Società in quegli anni, Abetti fece appello a tutta la comunità astronomica italiana, invitandola a sostenere quella che doveva essere l'istituzione erede della tradizione degli spettroscopisti italiani:

Non sembra possibile che esistano in Italia soltanto 98 persone affiliate ad un sodalizio, il quale ha una storia ed una produzione scientifica che non possono essere dimenticate, né possono finire. […] La nostra Società non può mancare di raggiungere subito un incremento notevole ad altamente desiderabile, continuando a progredire sulla via iniziata, con tanto decoro per la nazione ed utilità per la scienza, dal Padre Angelo Secchi e da Pietro Tacchini … (p. 30 in [31]).

Fig. 13 Ritratto di Giorgio Abetti; BOAP.

La ripresa, nel Dopoguerra, fu lenta e faticosa, ma portò ad un progressivo consolidamento della Società e delle *Memorie*. Lo Statuto del 1939 rimase in vigore per oltre cinquant'anni; venne poi rinnovato e approvato dal Ministero nel 1993, con un nuovo Regolamento approvato dai soci nel 1995.

10 Uno sguardo ai tempi recenti

Non è questa la sede per ricostruire in dettaglio la storia della SAIt fino ai giorni nostri. Tuttavia, vale la pena di menzionare che, alle *Memorie della SAIt*, si affiancò nel 1975 il *Giornale di Astronomia* (fig. 14), rivolto principalmente a docenti, studenti e cultori dell'astronomia, con il fine dichiarato di *svolgere un'opera di utilità sociale, promuovendo la diffusione della cultura scientifica nel nostro Paese* [38]. Trovava così attuazione un'istanza sentita da molto tempo, quella cioè di poter disporre di un bollettino di informazione e divulgazione astronomica qualificata. Una prima risposta a questa istanza era stata, nel 1931, la fondazione della rivista *Coelum*, diretta da Guido Horn-D'Arturo (1879–1967), nata sotto gli auspici della SAIt, ma non sua emanazione diretta (p. 31 in [31]).

Fig. 14 Primo numero del *Giornale*; BOAP.

In tempi recenti, dal 1998 al 2005, il *Giornale di Astronomia* è stato pubblicato anche in lingua araba, proprio nell'intento di svolgere un compito divulgativo sempre più ampio e di essere veicolo di conoscenze astronomiche anche in altre culture. Oggi il *Giornale* è un'apprezzata rivista in cui confluiscono contributi interdisciplinari di carattere generale culturale su temi astronomici.

Negli anni, la SAIt ha visto un impegno crescente nel campo della didattica e della divulgazione, tanto da farne un interlocutore autorevole nelle opportune sedi ministeriali, grazie alla significativa componente di insegnanti. Ad essi la SAIt ha offerto da anni un'opportunità di formazione attraverso l'organizzazione di scuole estive. Con l'apporto degli enti locali, nel 2004 ha inoltre ottenuto, attraverso la sezione di Reggio Calabria, la realizzazione e la gestione del planetario Pythagoras, da allora particolarmente attivo nell'organizzazione di eventi didattici e divulgativi.

Più complesso è stato il rapporto con la componente degli astrofili, con alterne vicende, dovute alla nascita di associazioni amatoriali locali, poi confluite in organismi nazionali ed internazionali. Con gli astrofili non sono mancati momenti di fruttuosa collaborazione, di dialogo e di scambio: in alcune tematiche infatti, quali l'inquinamento luminoso o la divulgazione, gli astrofili hanno dato (e danno tutt'ora) un apporto essenziale [39].

Le *Memorie* hanno continuato ad essere un'importante rivista scientifica, che ha offerto la possibilità di pubblicare numerosi atti di convegni scientifici nazionali ed internazionali, e si preparano ora ad una trasformazione digitale, divenuta quanto mai necessaria per rispondere alle esigenze dei nostri tempi.

Tutti questi elementi hanno dato oggi una connotazione specifica alla SAIt, che quest'anno ricorda il centenario della sua fondazione, facendone un attore importante nella valorizzazione della cultura astronomica in Italia.

Ringraziamenti

L'autrice esprime un particolare ringraziamento ai colleghi Mauro Gargano (INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte), Donatella Randazzo (INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo) e Marco Ferrucci (INAF-Osservatorio Astronomico di Roma) per il reperimento dei documenti archivistici citati nell'articolo.

Abbreviazioni

ASOC = Archivio Storico INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, Napoli;
ASOP = Archivio Storico INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo;
ASOR = Archivio Storico INAF-Osservatorio Astronomico di Roma, Monte Porzio Catone (Roma);
BOAP = Biblioteca INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo.

Bibliografia

[1] G. Lorenzoni a P. Tacchini, Padova, 28 marzo 1874; Fondo Tacchini, Archivio CREA-CMA, Roma.
[2] I. Chinnici, "*The 'Società degli Spettroscopisti Italiani': birth and evolution*", *Ann. Sci.,* 65 (2008) 393.
[3] I. Chinnici, "*La Società degli Spettroscopisti Italiani e la fondazione di 'The Astrophysical Journal' nelle lettere di G. E. Hale a P. Tacchini*", *Atti del XVI Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Como, 1996*, a cura di P. Tucci, Como, 1997, pp. 299-321.
[4] D. Sobel, "*The Glass Universe. How the ladies of the Harvard Observatory took the Measure of the Stars"* (Viking, New York) 2016.
[5] V. Zanini, S. Zaggia, "*Una società italiana per l'astrofisica*" in "*Starlight. La nascita dell'astrofisica in Italia"*, a cura di I. Chinnici (Arte'm, Napoli) pp. 104-111.
[6] A. J. Meadows, "*The new astronomy*" in *The General History of Astronomy*, edited by O. Gingerich, *Volume 4. Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950: Part A.* (Cambridge University Press, Cambridge)1984, pp. 59-72.
[7] F. Poppi, F. Bònoli, I. Chinnici, "*Il progetto Tacchini e la riforma degli Osservatori italiani*", in "*Cento anni di astronomia in Italia 1860-1960"*, *Atti dei Convegni Lincei*, vol. 217 (Bardi Editore, Roma) 2005, pp. 123-171.
[8] P. Tacchini, "*Rapporto a S. E. il Ministro della Pubblica Istruzione sugli Osservatorii visitati in America e considerazioni sull'astronomia pratica in Italia e sulla meteorologia*", in "*Eclissi totali di Sole"* (Roma) 1888, pp. 109-113.
[9] I. Chinnici, "*Per una storia istituzionale degli Osservatori Astronomici in Italia*", *Giornale di Astronomia,* 41 (2015) 11.
[10] I. Chinnici, C. Blanco, "*L'Etna e le stelle. La nascita dell'Osservatorio Astrofisico di Catania*", in *Atti del XXXIII Convegno annuale della Società di Storici della Fisica e dell'Astronomia, Acireale, 4-7 settembre 2013*, a cura di L. Fregonese, I. Gambaro (Pavia University Press) 2016, pp. 67-83.
[11] I. Chinnici, "*Il contributo dell'Italia all'impresa della Carte du Ciel*", *Giornale di Astronomia,* 3 (1995) 11.
[12] F. Bònoli, A. Mandrino, "*Il mai realizzato 'Monumento ad Angelo Secchi' a Reggio Emilia*", *Bollettino Storico Reggiano,* 170, anno LI, fasc. 3 (2019) 5-37.
[13] V. Calabrese, "*An Early Italian Astronomical Society founded in Turin in1906*", *Memorie della Società Astronomica Italiana,* 66 (1995) 769.
[14] V. Cerulli ad A. Di Legge, Roma, 4 nov. 1909, ASOR.
[15] V. Cerulli ad A. Di Legge, Roma, 30 mar. 1911, ASOR.
[16] V. Cerulli ad A. Di Legge, Roma, 3 ago. 1913, ASOR.
[17] V. Cerulli a G. Armellini, Roma, 24 ott. 1913, ASOR.
[18] A. Riccò, E. Millosevich, "Circolare ai soci", aprile 1919, ASOC.
[19] A. Di Legge ad A. Bemporad, Roma, 29 dicembre 1919, ASOC.
[20] A. Blaauw, "*History of the IAU. The birth and first half-century of the IAU"* (Springer, Dordrecht) 1994, p. 69.
[21] E. Millosevich ad A. Bemporad, Roma, 18 ott. 1919, ASOC.
[22] A. Bemporad a F. Angelitti, 19/12/1919, ASOP.
[23] R. Simili, G. Paoloni, "*Per una storia del Consiglio Nazionale delle Ricerche"* (Laterza) 2001, p. 41.
[24] A. Di Legge a A. Bemporad, Roma, 29 dic. 1919, ASOC.
[25] J. Höpfer, "*The International Latitude Service – A historical review, from the beginning to its foundation in 1899 and the period until 1922*", *Surv. Geophys.,* 21 (2000) 521.
[26] A. Bemporad a F. Angelitti, 26 dic. 1919, ASOP.
[27] A. Blaauw, "*History of the IAU. The birth and first half-century of the IAU"* (Springer, Dordrecht) 1994, pp. 62-68.
[28] M. Gargano, "*È tempo di risollevare le sorti dell'Astronomia Italiana*", *Giornale di Astronomia,* 46 (2020) 59.
[29] A. Di Legge e V. Cerulli, circolare, 11 feb. 1920, ASOP.
[30] A. Bemporad a F. Porro, Napoli, 10 gen. 1920, ASOC.
[31] Vedi G. Foderà Serio, "*Dalla Società degli Spettroscopisti alla Società Astronomica Italiana*" in *L'Astronomia in Italia,* a cura di F. Bònoli (Arte Tipografica Editrice, Napoli) 1998, p. 28.
[32] V. Cerulli ad A. Di Legge, Teramo, 9 set. 1920, ASOR.
[33] V. Cerulli ad A. Di Legge, Teramo, 7 ott. 1920, ASOR.
[34] V. Cerulli a G. Armellini, Roma, 19 nov. 1927, ASOR.
[35] V. Cerulli a G. Celoria; in V. Cerulli ad A. Di Legge, Roma, 13 apr. 1920, ASOR.
[36] V. Zanini, M. Gargano, A. Gasperini, "*Italian Astronomers in the IAU: the contribution and role of Italian astronomers from the foundation to the Second World War*", in "*Under One Sky: the IAU Centenary Symposium", Proceedings IAU Symposium, no. 349,* edited by C. Sterken, J. Hearnshaw, D. Valls-Gabaud (Cambridge University Press) 2019, pp. 248-255.
[37] E. Bianchi a F. Angelitti, Milano, 27 mar. 1922, ASOP.
[38] M. Rigutti, "*Editoriale*", *Giornale di Astronomia,* 1 (1975) 1.
[39] F. Bònoli (a cura di), "*L'Astronomia in Italia"* (Arte Tipografica Editrice, Napoli) 1998, pp. 121-131.

Ileana Chinnici

Ileana Chinnici è ricercatrice astronoma presso l'Osservatorio Astronomico di Palermo, struttura che fa parte dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF). Laureata in Fisica, si occupa di ricerca nel settore della storia dell'astronomia, in particolare dello sviluppo dell'astrofisica nel XIX secolo. È responsabile scientifico del Museo dell'Osservatorio e ne ha studiato le collezioni di strumenti storici. Ha esplorato vari fondi d'archivio di interesse astronomico, dalla corrispondenza sulla *Carte du Ciel,* conservata presso l'Observatoire de Paris, al fondo "Angelo Secchi" della P. Università Gregoriana. È autrice di numerosi libri ed articoli su riviste specializzate, ed ha curato alcune mostre storico-scientifiche di carattere nazionale.

106° CONGRESSO NAZIONALE
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

IN MODALITÀ VIRTUALE

14-18 SETTEMBRE **2020**

ANGELA BRACCO
Presidente

EUGENIO COCCIA
Vice Presidente

SALVATORE DE PASQUALE
Segretario Cassiere

https://www.sif.it/attivita/congresso/106 more info:

PROGRAMMA GENERALE DEL CONGRESSO

https://congresso.sif.it/

Lunedì 14 Settembre

9:30–11:00 Cerimonia di Inaugurazione, Introduzione del Presidente, Proclamazione dei vincitori dei Premi SIF

- Premio "Enrico Fermi"
- Premio "Giuseppe Occhialini" SIF-IOP (Institute of Physics)
- Premio "Friedel-Volterra" SIF-SFP (Société Française de Physique)
- Premio per la Didattica o Storia della Fisica
- Premio per la Comunicazione Scientifica
- Borsa "Ettore Pancini"
- Premio "Sergio Panizza e Gabriele Galimberti"
- Premio "Piero Brovetto"
- Premio "Giuliano Preparata"
- Premio SIF-SoNS "Neutrons Matter"
- Premio "Vincenzo Ferraro"
- Premi per giovani laureati in Fisica dopo il maggio 2013 e dopo il maggio 2017
- Premi per le Migliori Comunicazioni al 105° Congresso Nazionale della SIF - L'Aquila 2019
- Soci Benemeriti SIF

11:00–11:50 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare)
M. Cobal (Università di Udine e INFN, Gruppo Collegato di Udine)
I più recenti risultati al Large Hadron Collider.

11:50–12:40 Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia)
A. Cavalleri (Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter, Hamburg, Germany and Department of Physics, University of Oxford, UK)
Nonlinear optical control in solids and photo-induced superconductivity.

14:30–17:00 Relazioni su invito

Martedì 15 Settembre

9:30–12:00 Relazioni su invito

15:00–15:50 Relazione Generale Sezione III (Astrofisica)
M. Colpi (Dipartimento di Fisica, Università di Milano Bicocca)
The black holes and neutron stars of the gravitational universe.

15:50–16:40 Relazione Generale Sezione V (Biofisica e fisica medica)
A. Diaspro (Dipartimento di Fisica, DIFILAB, Università di Genova e Dipartimento di Nanofisica, CHT, Istituto Italiano di Tecnologia, Genova)
Microscopia ottica alla nanoscala della macchina biologica.

16:40–18:30 Assemblea Generale dei Soci della SIF

Ordine del giorno:

1) Approvazione dell'ordine del giorno.
2) Approvazione del verbale dell'Assemblea Generale dei Soci del 24 settembre 2019.
3) Relazione del Presidente.
4) Relazioni del Collegio dei Revisori dei Conti e approvazione dei bilanci consuntivi 2019.
5) Ratifica e nomina dei Revisori dei Conti.
6) Discussione e approvazione della Relazione del Presidente.
7) La SIF e i social media.
8) Il Comitato Pari Opportunità (CPO) della SIF.
9) Varie ed eventuali.

PROGRAMMA GENERALE DEL CONGRESSO

Mercoledì 16 Settembre

9:30–12:00 Relazioni su invito

12:00–12:50 Relazione Generale Sezione VI (Fisica applicata, beni culturali e acceleratori)
F. Taccetti (INFN, Sezione di Firenze)
The MACHINA project.

14:00–14:50 Relazione Generale Sezione IV (Geofisica e fisica dell'ambiente)
A. Bonaccorso (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania, Osservatorio Etneo)
Etna volcano: An extraordinary active natural laboratory for observing and studying eruptive processes.

15:00–17:00 Relazioni su invito

Giovedì 17 Settembre

9:30–12:00 Relazioni su invito

15:00–15:50 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare)
A. Di Pietro (INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania)
Nuclear structure and dynamics with light exotic beams.

15:50–16:40 Relazione Generale Sezione VII (Didattica e storia della fisica)
R. Iliffe (Faculty of History, University of Oxford, UK)
Isaac Newton's Principia Mathematica: The creation of a revolutionary science.

Venerdì 18 Settembre

9:30–12:00 Relazioni su invito

12:00–12:50 Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia)
L. de Arcangelis (Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania "Luigi Vanvitelli", Caserta)
From complexity to universality and back: Time-energy correlations as a hallmark of different processes.

14:00–14:50 Relazione Generale Sezione VI (Fisica applicata, beni culturali e acceleratori)
M. Ferrario (INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, RM)
From dreams to reality: Opportunities and perspectives of the EuPRAXIA@SPARC_LAB project.

INTRODUCING THE ITALIAN SOCIETY OF PURE AND APPLIED BIOPHYSICS – SIBPA

CRISTIANO VIAPPIANI[1(*)], CARLO MUSIO[2(**)]

[1]Dipartimento di Scienze Matematiche, Fisiche e Informatiche, Università di Parma, Parma, Italy

[2]Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biofisica, Unità di Trento, Trento, Italy

The "Società Italiana di Biofisica Pura e Applicata" – Italian Society of Pure and Applied Biophysics (SIBPA), is a non-profit scientific association founded in 1973.

In keeping with its mission, over the years SIBPA has steadily increased its efforts in the dissemination and promotion of biophysics, in the organization of outreach initiatives, and in the support of young biophysicists.

Biophysics is the science that applies the theoretical approaches and the experimental methods of physics to understand how biological systems work. Biophysics has been instrumental in understanding how life's molecules are made and function, how cell constituents move and work, and how complex systems in our bodies (brain, circulation, immune system) behave. Biophysics is an exciting and lively scientific field in which scientists from many disciplines, including physics, use their skills to explore and develop new tools to understand how biology works, throughout life. An important contribution of biophysicists to modern biology is the perspective that biological processes can be understood from the interactions among and within the constituent molecules, and thus the behavior of biological systems can be predicted from physical principles.

Interdisciplinary by nature, the Society gathers scientists from the whole country, working in biophysics either at university laboratories or research institutions such as the National Research Council (CNR) or the Italian Institute of Technology (IIT).

SIBPA is the oldest biophysics association in Italy and is the only Italian biophysical society to have a national representation in IUPAB (International Union of Pure and Applied Biophysics, `http://iupab.org/`) and in EBSA (European Biophysical Societies Association, `http://ebsa.org`).

The Society is administered by an Executive Board, made up of the President, eight members elected by the Assembly and an additional Councilor in the person of the last President in office before the current one.

The website of the Society is located at: `http://www.sibpa.it/`.

According to its statute, the mission of SIBPA comprises the following tasks:

- promote entities with the same purposes and operating in the third sector;
- carry out specific scientific and technical studies on issues of considerable importance for biophysics in general;
- promote and encourage education, training and updating initiatives of the individual associated operators;
- promote and encourage dissemination initiatives aimed at increasing the knowledge of biophysics, both in Italy and abroad;
- promote meetings, conferences and seminars of a technical-scientific nature, on problems relating to biophysics;
- promote the connection between research and development in the field of biophysics, at Italian and foreign universities and research bodies;
- foster the development of a network of relationships with other associations of a scientific nature relating to biophysics and other professional categories operating in the biophysics field;
- establish scholarships and assign prizes to young researchers in the field of research in biophysics.

(*) SIBPA President, e-mail: `cristiano.viappiani@unipr.it`
(**) SIBPA Past-President, e-mail: `carlo.musio@cnr.it`

1 A (very) brief history of SIBPA

SIBPA was founded in 1973 in Parma, based on an incorporation deed signed by a group of young scientists: Paolo Cavatorta, Pier Raimondo Crippa, Roberto Favilla, Giorgio Montagnoli and Arnaldo Vecli.

SIBPA rooted its origins from the tireless and inspired action of Antonio Borsellino (at the time Full Professor of Theoretical Physics at the University of Genova) who was in 1961 the co-founder of the International Union of Pure and Applied Biophysics (IUPAB) which held the "first" International Congress on Biophysics in Stockholm, Sweden, from July 31st to August 4th 1961, on the initiative of the International Union of Experimental and Theoretical Physics. This was the first meeting gathering biophysicists from around the world. The Stockholm Congress topics included: 1) mathematical modeling of biophysical phenomena; 2) new methods in biophysics (laser technology and others); 3) membrane biophysics and 4) vital problems of the molecular bases of virus replication.

Indeed, as early as 1959, Professor Antonino Borsellino organized a series of "Conferences on Biophysics and Biochemistry" in Genoa and, in 1963, the first Italian National Congress of Biophysics in Rome. In 1960 Borsellino also promoted the creation of the Italian Society for Pure and Applied Biophysics, which was finally established only in 1973 with Borsellino as its first President.

In the same years, Borsellino gathered and boosted scientific realities spread throughout the national territory, mostly afferent to the National Group of Cybernetics and Biophysics (GNCB), Gruppo Nazionale Cibernetica e Biofisica, of the Italian National Research Council (CNR).

The GNCB-CNR was a fruitful initiative (heir in turn of the forerunner CNR "Impresa Cibernetica" born in the early '60s), established at the end of '60s, to promote and fund interdisciplinary research. It grouped young and senior scientists belonging to the newborn CNR Italian Institutions working on cybernetics and biophysics, such as the CNR Lab of Cybernetics and Biophysics (dir. Guido Palmieri) in Camogli (GE), the CNR Lab of Cybernetics (dir. Eduardo Caianiello) in Arco Felice (NA), the

Fig. 1 Top: the current SIBPA logo. Bottom: the cover page of the proceedings of the first meeting of SIBPA held in Camogli in 1973.

Lab for the Study of the physical properties of Biomolecules and Cells (dir. Alessandro Checcucci) in Pisa, and academic centers like the Institute of Physics of the University of Parma (Arnaldo Vecli), the CISE of the University of Milan (Ivo De Lotto). Other institutions were affiliated along the years to GNCB which was dismissed at the end of the '90s; among brilliant GNCB directors we like to remember Carlo Frediani and Arnaldo Vecli.

The main topics introduced and supported by GNCB included the elaboration of the information in living organisms, the cybernetics of artificial systems, the physical properties of the biological systems, the bio-cybernetic models and the human-machine interactions. All those research themes represent still today the bricks of modern biophysics and the interdisciplinary scientific research.

To stress the continuity of aims and action between GNCB and SIBPA, we emphasize that the last GNCB national congress was held on 1972 in Casciana Terme (Pisa) and the first SIBPA National meeting was held in Camogli (Genova, fig. 1), where Antonio Borsellino was elected as the first SIBPA President in 1973. The names of the Presidents and the Councilors of SIBPA are reported in the SIBPA web site at: `http://www.sibpa.it/index.php/overview`.

Historical hints and data for this brief account are taken from refs. [1–3].

2 Educational initiatives

Since its first edition in 1997, the International School of Pure and Applied Biophysics, held yearly in Venice in the magnificent location of Palazzo Franchetti and organized jointly with the Venetian Institute for Sciences, Humanities and Arts (IVSLA), has been one of the main events for SIBPA.

The School has become an international asset of the Society, and every year it gathers graduate students and young postdoctoral fellows coming from different countries. Each year the school proposes a state-of-the-art description of topics at the forefront of current biophysical research, with lectures delivered by renown scientists and, in some cases, proposing also practical, hands-on laboratory experiences. A fruitful collaboration with companies and with consortia of scientists on EC-funded projects has helped keeping the level of the school very high. The palette of the themes explored by the School is very broad as can be easily appreciated by looking at the titles of the last four editions: "Time resolved methods in biophysics", "Intracellular ion channels and transporters in plant and animal cells", "Emerging Tools in Biomechanics: from tissues down to single molecules", "Applications of X-rays and Neutron Scattering in Biology".

SIBPA is also involved in the organization of other educational events. These include the International School on Nanoscale Optical Microscopy, which is also held in Venice at the IVSLA premises, and the NIC@IIT advanced practical workshop/school, held on a yearly basis at the Italian Institute of Technology headquarters in Genova. Besides these schools held on a regular basis, SIBPA collaborates also to the organization of other single edition schools, an example of which is the school "Molecule in(ter)action: from in vitro to zebrafish" recently held in Palermo.

SIBPA regularly offers merit-based scholarships to young scientists for participation in conferences organized by EBSA, the American Biophysical Society and for participation in the biennial SIBPA congress. It is worth noting that the number of applications is always quite high and unfortunately sometimes it exceeds the capability of the budget of the Society.

3 Scientific meetings

Every other year, SIBPA organizes a National Congress, whose topics range from molecular biophysics to cellular and sensory biophysics. Frontier themes and applications such as nanobiophysics and advanced microscopies have been recently added. In order to expand the network of interactions, the Society tries to select invited and keynote speakers also outside its members, a strategy that has led to the involvement of new members in the activities of the society and fostered scientific collaborations. Accordingly, extracting

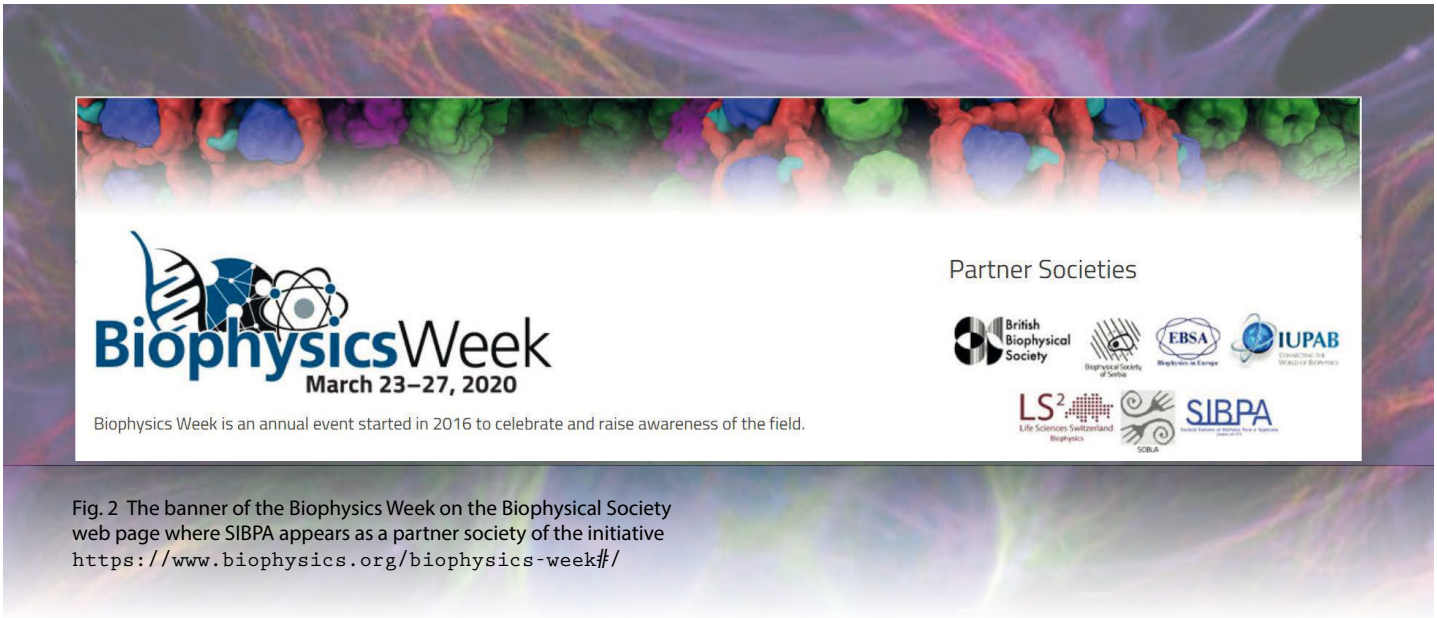


Fig. 2 The banner of the Biophysics Week on the Biophysical Society web page where SIBPA appears as a partner society of the initiative https://www.biophysics.org/biophysics-week#/

from the SIBPA congress programs of the past twenty years, we like to mention the following outstanding scientists (apologies for involuntary forgetfulness): Stefan Hell (Nobel Prize in Chemistry 2014), James Barber, Carlos Bustamante, Ernesto Carafoli, Franco Conti, Enrico Di Cera, Alberto Diaspro, Enrico Gratton, Georg Nagel, Gerd Ulrich Nienhaus, Maria Garcia-Parajo, and Tullio Pozzan.

This year the XXV edition of the National Congress will be held in Parma, and is part of the events organized within Parma 2020, Italian Capital of Culture. The Congress, originally planned to take place from July 7 to July 9 in the Aula Magna of the University of Parma, has been delayed due to the current COVID-19 pandemic. The new dates will be announced soon.

SIBPA fosters interaction with other scientific societies in the organization of scientific meetings, workshops, and schools. The Society undertakes actions to favor joint meetings, in the belief that cross fertilization between related scientific areas can boost scientific progress. In this perspective, the 2020 SIBPA congress is organized jointly with the Italian Photobiology Society, with the goal of facilitating interactions between scientists working in these strictly related areas.

4 International partnerships

SIBPA is actively involved in the organization of the EBSA meetings, also by supporting participation of young scientists through several fellowships that are assigned on a merit-based ground. SIBPA contributes also to the ordinary management of EBSA through the participation of one of his members as a counselor of the EBSA Executive Committee. Among those, Giuliano Colombetti in the past and Mauro Dalla Serra, currently. Alberto Diaspro served as EBSA President for the term 2009-2013.

SIBPA contributes to the management of the IUPAB activities through the presence of one of its members in the IUPAB Council (Giuseppe Zucchelli) and the delegate of the CNR adhering body (Michael Pusch). The interaction of SIBPA with IUPAB is also lively, as demonstrated by the involvement of SIBPA members in the organization of the next in 20th IUPAB Congress to be held in Foz do Iguaçu, Brazil, October 26 - 30, 2020, and the satellite educational event "Applications of X-Rays and Neutron Scattering in Biology" in São Paulo.

The Society is part of the steering committee of the Regional Biophysics Conference, a biannual international conference gathering scientists from biophysical societies of several countries from central-eastern Europe. The 2020 edition will be held in Pecs (Hungary) https://rbc2020.hu/.

SIBPA is also engaged in other international scientific events such as the recent meeting "Membrane Biophysics of Exo-Endocytosis: from Model Systems to Cells", held in Nice, France, and the workshop "Nanoengineering for Mechanobiology", held yearly in Camogli, Italy.

5 National partnerships

SIBPA is a stable scientific co-organizer of the "Convegno Nazionale Sensori", CNS (four editions until now) together with other national societies, such as Associazione Italiana dei Gruppi di Misure Elettriche ed Elettroniche (GMEE), Associazione Italiana dei Gruppi di Misure Meccaniche e Termiche (GMMT), l'Associazione Italiana Sensori e Microsistemi (AISEM), Associazione italiana "Ambient Assisted Living" (AitAAL), Società Italiana di Ottica e Fotonica (SIOF), Società Chimica Italiana (SCI), Società Italiana di FotoBiologia (SIFB), Associazione Società Italiana di Elettronica (SIE) and Associazione NanoItaly.

SIBPA plays an active role in the steering committee of the conference series Biophysics@Rome held in Rome, this year in its third edition.

SIBPA has been often involved in the organization of international conferences from Italian organizers, just to mention the most important: Workshop Advances in Brillouin Light Scattering, Perugia, 2018; 4th Workshop on Expression, Structure and Function of Membrane Proteins, Firenze, 2015.

6 Expanding the collaborations of SIBPA – the agreement with the Italian Physical Society

Given its small size, SIBPA aims at increasing the number and the extent of collaborations with other scientific societies that are active on similar or related fields. The most recent agreement signed by SIBPA is with the Italian Physical Society (SIF), a framework that means to increase interactions between the two societies and improve the communication in the mutual interest of their members. The agreement intends to encourage the scientific contacts between members of the two societies, and the planning of common initiatives. Special attention is given to the activities involving young members and the wish is that joint projects devoted to them be realized, also through assignment of specific fellowships.

7 SIBPA awards

During its national congress, SIBPA awards prizes to students for the best Master's

Degree and Doctoral thesis in the biophysical field. The prize for the best Master's Degree Thesis is named in memory of Dr. Gianfranco Menestrina, an outstanding biophysicist who died prematurely in 2004, at the time heading the CNR Biophysics Institute in Trento. He made fundamental contributions in the field of membrane permeabilization by pore-forming molecules. The prize for the best Ph.D. Thesis is named in memory of Professor Antonio Borsellino, one of the founders of Italian Biophysics, first president of SIBPA and founder of the Institute of Cybernetics and biophysics of CNR in Camogli, Italy.

Finally, since 2016, during the biennial congress the prize "Marina Diana Mercurio - SIBPA", supported by the Associazione Marina Diana Mercurio and its president, Settimo Termini, is awarded to a scientist who has obtained outstanding scientific contributions by following innovative paths that overcome disciplinary divisions and are chosen according to "a human use of human beings" (citing Norbert Wiener). The awardees of the past two editions of the prizes are: the chemical biophysicist Enrico Di Cera (St. Louis University), the historian of cybernetics Leone Montagnini (Biblioteche di Roma) and the biophysicist Francesco Lenci (CNR Institute of Biophysics, Pisa).

8 SIBPA Publications

Since 2007, the selected proceedings of the SIBPA congresses were published in special issues of JCR peer-reviewed journals. The 2006, 2008, and 2010 editions have been published in the *European Biophysics Journal* (Springer), while the remaining editions until 2018 have appeared in *Biophysical Chemistry* (Elsevier). The complete list of the special issues of the last SIBPA Congresses is available at: `http://www.sibpa.it/index.php/publications-of-sibpa`.

Finally, a monthly newsletter collects the initiatives organized by SIBPA and provides members with useful information about positions in biophysics available in Italy and abroad, upcoming meetings and schools, and other announcements that may be of interest to scientists working in the field.

9 Outreach initiatives

Among its duties, SIBPA is actively involved in outreach activities. The Biophysics Week is one of them, a yearly initiative of the American Biophysical Society, now in its fifth edition, intended to disseminate the concepts behind research in biophysics. SIBPA is a partner society of the Biophysics Week (fig. 2), and in collaboration with CNR it coordinates events held across the country and organized by scientists working in the field, not necessarily members of the society.

Among outreach activities, SIBPA has consolidated – starting from the former collaborations in 2013 and 2015 editions – its involvement in the Science Festival of Genova, becoming an official cultural partner since 2016. Projects presented by SIBPA have mostly concentrated on the proposal of lectures, and/or series of conferences under a common theme, delivered by eminent scientists, with the aim of introducing the biophysical sciences to a general audience of non-expert, ordinary citizens.

References

[1] "*50 anni di Biofisica in Italia - Passato e presente di una ricerca di frontiera*" (Dossier), *Sapere,* vol. 3 (Dedalo ed.) 2004.

[2] D. Giacomazza, F. Gambale, "*Proceedings of the XX congress of the Italian Society for Pure and Applied Biophysics (SIBPA)*" Arcidosso (Gr), Italy, September 2010, *Eur. Biophys. J.,* 40 (2011) 1203.

[3] R. Cordeschi, "*La cibernetica*", *Enciclopedia Treccani*, `http://www.treccani.it/enciclopedia/la-cibernetica_%28Il-Contributo-italiano-alla-storia-del-Pensiero:-Scienze%29/`.

Cristiano Viappiani

Cristiano Viappiani graduated in physics and received his PhD in physics from the University of Parma. CV is Full Professor of Applied Physics (SSD FIS/07), at the Department of Mathematical, Physical and Computer Sciences, University of Parma. CV has taught at the University of Parma, in specialist schools and abroad (Erasmus LLP). Since 2000 CV is member of the Doctoral Studies Committee in Physics, which he chaired (2014–2018). Director of the Doctoral School in Science and Technology (2016–2018). CV serves as President of Comitato Scientifico di Area Scienze Fisiche (Comitato 02). Since January 2020 he is vice-chair of the Department. CV conducts research in collaboration with several Italian and foreign research groups (USA, Germany, UK, Belgium, Spain, Argentina). Associate Editor to *Photochemical & Photobiological Sciences* and *Scientific Reports*. Since 1991, CV has been a member of the American Biophysical Society. He is a member of the European Society for Photobiology (ESP), for which he serves in the Education and Training committee. Since 2016, he is serving as President of the Italian Society for Pure and Applied Biophysics (SIBPA). The research of CV has been focused on the development and application of techniques based on nanosecond pulsed laser for the characterization of structural and functional dynamics of proteins and photoinduced processes in photosensitive molecules.

Carlo Musio

Carlo Musio received his degree in Biological Sciences (neurophysiological path) from the University of Pisa at the Dept. of Animal and Human Behavioral Sciences (now Dept. of Biology), working on the neuronal basis of behavior in *Aplysia*. Being awardee of a CNR Research Fellowship in Biophysics (equated to PhD), in 1989 he moved to the CNR Institute of Cybernetics "Eduardo Caianiello" (ICIB-CNR, now ISASI), Pozzuoli (NA), to carry out researches on *Hydra* photoreception. From 1994 to 2011 at ICIB-CNR he got tenured positions until the permanent one as CNR Research Scientist, held at present. There he has covered responsibility positions, *e.g.* PI, Head of "Commessa". On 2011 he moved to the CNR Institute of Biophysics, Trento (IBF-CNR), to establish and lead a research lab on photosensory biophysics and electrophysiology of natural/hybrid neurosystems in physiological/pathological conditions. From 2012 to 2016 he has been President of SIBPA, serving it now as Past-President. Till today he is: Associate Editor of *Photochemistry and Photobiology* (Wiley-Blackwell) the official journal of the American Society for Photobiology (since 2011); Advisory Editor of *Biophysical Chemistry* (Elsevier) (since 2016); Appointed Member of the Scientific Advisory Board (SAB) of the European Society for Photobiology (ESP) (since 2010). In 2019 he was elected as Representative of the Research Staff (national) in the Scientific Council of the CNR Dept. of Physical Sciences and Technologies of Matter (DSFTM).

YOUNG MINDS, A KEY FOR THE FUTURE

ROBERTA CARUSO[1], ANTIGONE MARINO[2]

[1] *Dipartimento di Fisica, Università di Napoli Federico II, Napoli, Italia*

[2] *CNR-ISASI, c/o Dipartimento di Fisica, Università di Napoli Federico II, Napoli, Italia*

Young Minds (YM) is a program by the European Physical Society (EPS) born ten years ago. The then EPS president, Maciej Kolwas of the Polish Academy of Sciences' Physics Institute, bet on the creation of a network of young physicists that would extend throughout Europe. The initial core was composed just of four young physicists clusters. Ten years later, the numbers of Young Minds are clear: with over 60 sections in 30 countries, one can undoubtedly speak of a successful experiment. Among all the participating countries, Italy features six YM sections, the highest number of sections for a single country.

YOUNG MINDS, UNA CHIAVE PER IL FUTURO

Young Minds (YM) è un progetto della European Physical Society (EPS) nato ormai dieci anni fa. L'allora presidente EPS, Maciej Kolwas dell'Istituto di Fisica dell'Accademia delle Scienze Polacca, decise di scommettere sulla creazione di un network di giovani che fosse esteso a tutta Europa. Dieci anni dopo, i numeri di Young Minds parlano chiaro: con oltre 60 *section* in 30 paesi si può parlare a pieno titolo di esperimento riuscito.

L'idea nasceva dalla necessità di coinvolgere maggiormente i giovani, che poco erano rappresentati nello spettro dei membri della società. Ci si rese subito conto che il problema principale era che molti giovani non erano neanche a conoscenza dell'esistenza dell'EPS e che i benefit che quest'ultima offriva erano per la maggior parte rivolti a un pubblico più adulto, ovvero in uno stato della carriera professionale più avanzato. Così nel febbraio del 2010 si riunì un comitato misto composto da tre giovani e tre senior, quello che poi si sarebbe chiamato *YM Action Committee*, che analizzò le possibili azioni da intraprendere e stilò una proposta di progetto che fu poi approvata dal comitato esecutivo dell'EPS. La proposta suggeriva la creazione di gruppi studenteschi locali, chiamati *section*, affiliati ad un'istituzione accademica o di ricerca, che portassero avanti delle attività di promozione della fisica supportate economicamente dall'EPS. Per poter partecipare al progetto il primo passo è tutt'oggi la creazione della *section*: bastano cinque giovani fisici per cominciare, siano essi studenti triennali, magistrali, dottorandi o post doc. Nella compilazione della richiesta bisogna sempre indicare un *Faculty Advisor*, ovvero un mentore dell'istituzione ospitante, che ha il compito di supervisionare e supportare a livello locale le attività del gruppo. Ci si chiese all'epoca quali potessero essere le attività da supportare, e ci si rese conto dell'importanza di investire su un ventaglio di attività il più ampio possibile, per due motivi: il primo è che la professione del fisico richiede sempre di più delle capacità trasversali alla scienza, che vanno dalla gestione all'abilità a comunicare a diversi livelli e a diversi interlocutori; il secondo è che, anche per i giovani, a differenti età corrispondono differenti esigenze. Un esempio semplice: uno studente magistrale ha una padronanza del lessico scientifico sicuramente meno spiccata di un dottorando, così come un dottorando ha una necessità di formazione più specifica, legata al suo settore di ricerca. Questo fa sì che mediamente uno studente magistrale sia più interessato a portare avanti attività di divulgazione sulla fisica di base, mentre un dottorando in generale preferirà dedicarsi ad attività che lo aiutino a formare una rete di contatti all'interno del suo ambito di ricerca. Fu così che si identificarono tre tipologie principali: l'*outreach*, ovvero attività di divulgazione e comunicazione della scienza rivolti a un pubblico vasto ed eterogeneo, il *professional development*, ovvero tutte quelle attività legate allo sviluppo di specifiche abilità professionali o all'esplorazione di diverse prospettive di carriera e il *networking*, ovvero le attività che hanno come scopo la creazione di una rete scientifica e professionale a livello locale, nazionale ed europeo. Ogni *section* può fare richiesta ogni anno per ricevere un supporto economico dall'EPS per realizzare progetti in una di queste aree tematiche. I progetti sottomessi vengono revisionati dall'*Action Committee*, e se approvati vengono finanziati per un massimo di mille euro.

A parte qualche rara eccezione, il problema del coinvolgimento dei giovani nelle società di fisica nazionali è diffuso in tutti i paesi. È per questo che sin da subito fu deciso che per poter partecipare al progetto YM non fosse necessario essere iscritto all'EPS, ma bastasse in alternativa essere membro di una delle sue società nazionali affiliate. Sebbene l'interesse dell'EPS fosse incrementare il numero di soci giovani, questa azione fu intrapresa per marcare la natura di federazione dell'EPS, e per assicurarsi che anche a livello nazionale le società patrocinassero o sostenessero il progetto. Già nel giugno del 2010 YM fu presentato al Consiglio di Presidenza della SIF, per essere poi presentato a settembre al

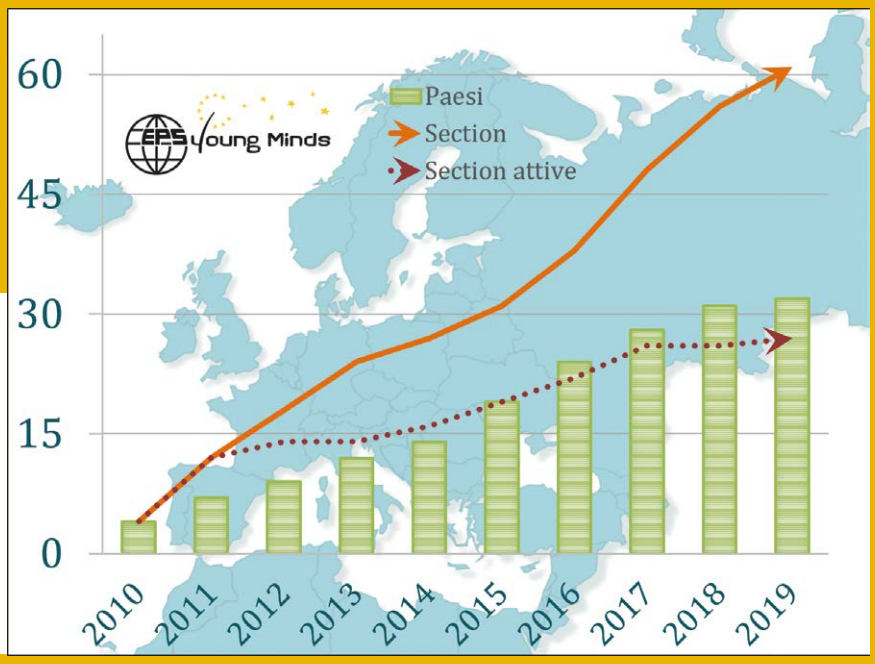


Fig. 1 Evoluzione del progetto YM. Le barre verdi indicano il numero di paesi in cui sono presenti sezioni YM. Le frecce mostrano il numero di sezioni. La linea continua indica il numero totale di sezioni all'anno, mentre la linea tratteggiata mostra il numero di sezioni attive, definite come sezioni che hanno richiesto sovvenzioni o hanno partecipato alla conferenza annuale del programma in un determinato anno.

Fig. 2 Seminario di Alessandro Farini (CNR-INO) durante il workshop "Luce, Colore e Visione" organizzato dalla *section* YM di Napoli nel maggio 2018 nella monumentale chiesa del Monastero dei Santi Marcellino e Festo dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Congresso Nazionale che si tenne sempre a Bologna. Il patrocinio e il supporto della SIF hanno fatto sì che l'Italia sia oggi il paese con il più alto numero di *section* attive, a Milano, Trieste, Roma, Napoli, Cosenza, Messina e Catania.

Il grafico in fig. 1 mostra la crescita di YM in questi anni. Il successo di questa derivata positiva è dovuto a diversi fattori. Tra i primi c'è sicuramente la risposta data al progetto dalle società di fisica nazionali. Il secondo fattore è quello geografico: nella prima fase del progetto quasi tutte le sezioni si trovavano in Europa centrale, ma negli ultimi anni il progetto si è esteso all'Europa orientale, fino ad affacciarsi sul Mediterraneo. Questa ampia distribuzione riflette lo spirito internazionale di YM e dell'EPS.

Come già accennato, YM dispone di un budget annuale per supportare le attività proposte dalle *section*. Queste comprendono seminari, workshop (fig. 2), attività di divulgazione scientifica presso scuole o eventi pubblici (fig. 3), programmi a

Fig. 3 Giancarlo Artiano, presidente della *section* YM di Napoli nel 2016, spiega a un gruppo di bambini la fisica della bicicletta, durante l'evento di divulgazione di piazza "Futuro Remoto".

Fig. 4 Visita ai laboratori del CERN durante il primo YM *Leadership Meeting*, nel maggio 2011.

Fig. 5 Ecco dove sono ora alcuni degli ex membri YM italiani a cui abbiamo sottoposto il questionario: (A) Michela Florinda Picardi, attualmente research associate al King's College of London; (B) Ciro Riccio, ricercatore presso Stony Brook University (NY); (C) Lucio Rossi, consulente indipendente nella progettazione di infrastrutture hardware e software per il controllo e il monitoraggio delle strutture civili tramite sensori in fibra ottica. (D) Marina Corradini, ricercatrice CNRS presso l'*Institut de Physique du Globe de Paris*.

supporto degli studenti di fisica durante gli studi (fig. 4), e visite presso industrie. Parte di queste attività sono gestite in collaborazione con le divisioni e i gruppi dell'EPS. Solo nel 2019, YM ha supportato queste e altre attività con un numero totale di 89 borse. Si conta che dal 2010 ad oggi il progetto abbia finanziato più di 500 attività. I membri YM imparano così a gestire un progetto, a strutturarlo, promuoverlo, realizzarlo e alla fine relazionarne le spese e la valutazione finale, proprio come avviene nella ricerca scientifica per i progetti nazionali o europei.

Ogni anno le *section* YM vengono invitate a partecipare con un loro delegato al *Leadership Meeting*, il congresso annuale del progetto (fig. 4). Questo è ospitato a rotazione da una delle *section*, che si cimentano così anche nell'organizzazione di un evento internazionale che vede la partecipazione di 50-70 persone. In questa occasione, ogni gruppo presenta le attività svolte nell'anno, e una di queste viene premiata con il *Best Activity Award,* sponsorizzato da *EPL-Europhysics Letters*, a ulteriore dimostrazione dell'interesse della comunità internazionale per il progetto e per le nuove generazioni di scienziati. Il primo meeting si tenne al CERN a Ginevra nel 2011. Il 2020 sarà il primo anno in cui il congresso viene rimandato, a causa dell'emergenza mondiale per la diffusione del COVID-19.

Per celebrare il traguardo dei dieci anni di YM ci è sembrato appropriato analizzare l'impatto di YM sulle carriere di coloro che vi hanno preso parte tra il 2010 e il 2015 (fig. 5). I risvolti positivi del far parte di questo network interessano vari momenti della carriera di un fisico, e vanno dai vantaggi immediati a quelli a lungo termine, noi scegliamo di concentrare la nostra attenzione su questi ultimi, a dieci anni dalla creazione del progetto. Il nostro campione è composto per l'84% da ex-membri che hanno intrapreso il loro percorso quando erano ancora studenti triennali o magistrali, e per il restante 16% da ex-membri che si sono avvicinati alle attività di YM da dottorandi. Questa composizione del campione mostra che almeno all'inizio YM è stato un forte catalizzatore soprattutto per gli studenti più giovani, probabilmente grazie al ventaglio delle possibilità offerte, altrimenti inaccessibili a studenti così giovani. Basti pensare al networking locale e internazionale e alla possibilità di partecipare a seminari e conferenze sugli argomenti più recenti e attuali della fisica contemporanea, ma anche alla possibilità di esplorare fin da subito carriere alternative al percorso accademico. Nella fig. 6 è riportata l'attuale posizione lavorativa dei partecipanti all'indagine, ed è chiaro come le strade intraprese dagli intervistati, pur restando legate al mondo della scienza e della ricerca, siano distribuite tra vari ambiti.

Dal sondaggio risulta chiaro che non soltanto YM ha avuto un impatto positivo sulle loro carriere, ma ha anche avuto successo nell'incoraggiare la partecipazione attiva in enti come l'EPS e le società di fisica nazionali.

Come si vede dalla fig. 7, il 50% degli intervistati giudica che YM li abbia incoraggiati a prendere parte alle attività di EPS e delle società di fisica nazionali, mentre in totale solo

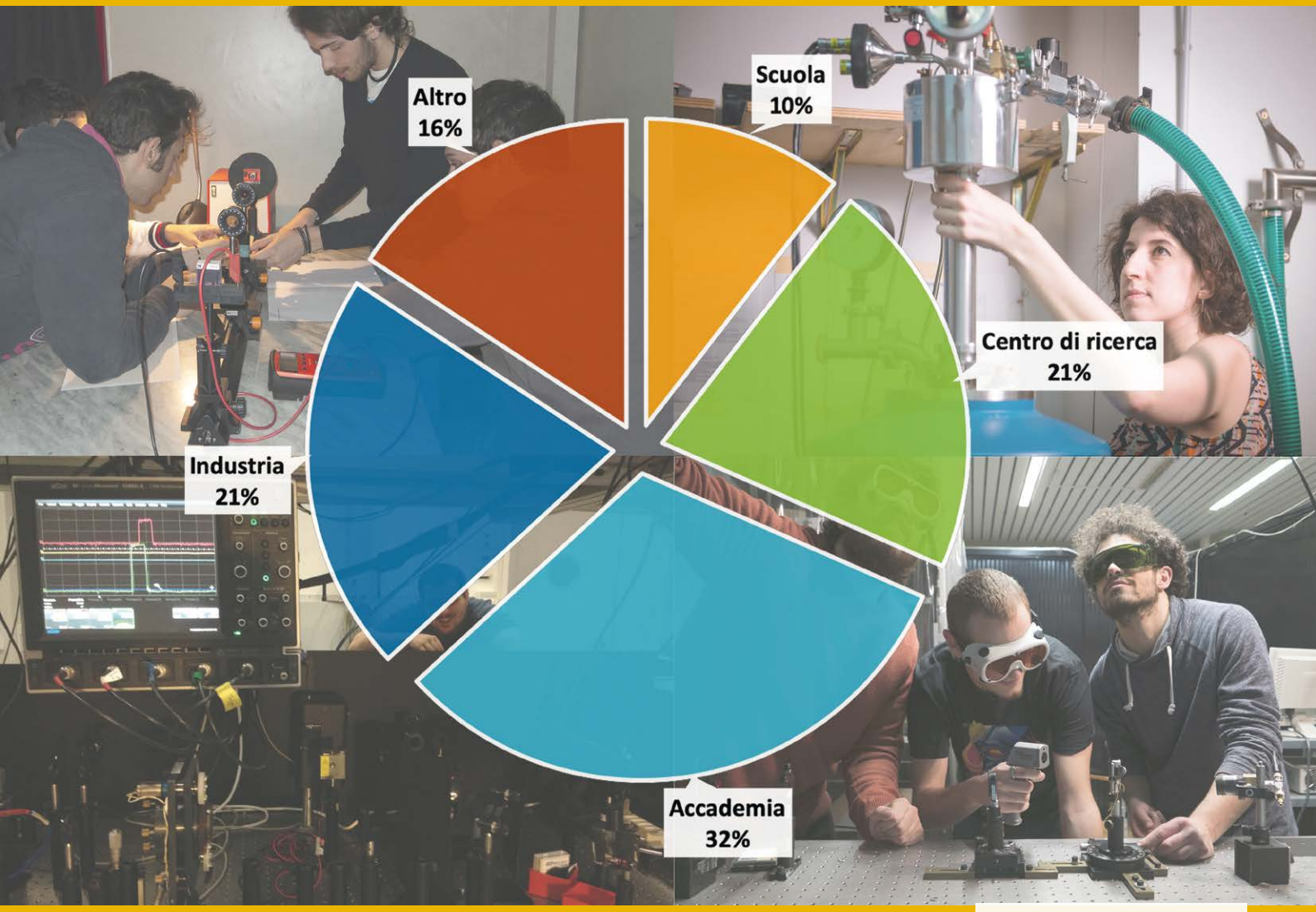


Fig. 6 Attuale occupazione degli ex membri YM che hanno partecipato all'indagine.

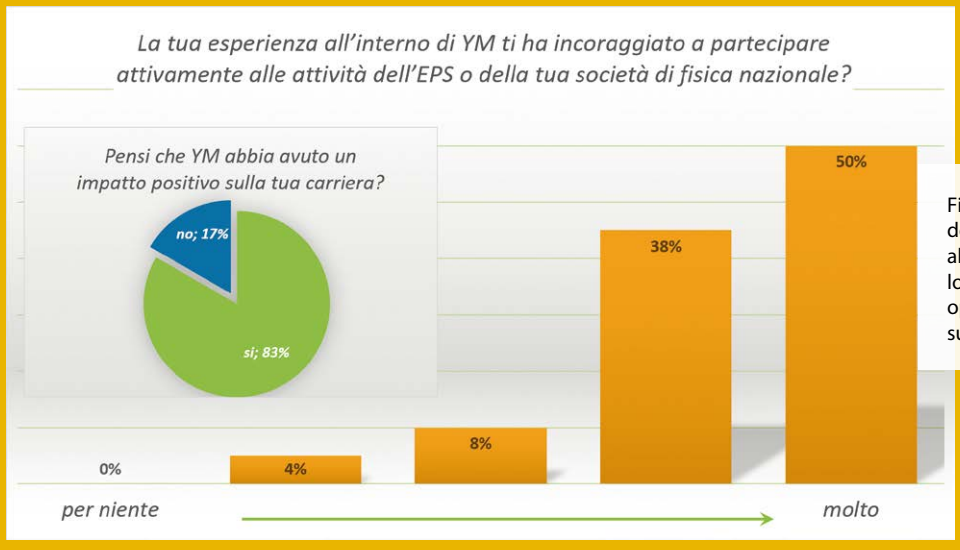


Fig. 7 Livello di coinvolgimento dei partecipanti al sondaggio all'interno di EPS e/o della loro società nazionale. Inset: opinione sull'impatto di YM sulla propria carriera.

il 12% ritiene che YM abbia avuto un ruolo marginale nel proprio coinvolgimento in senso più ampio. Nell'inset della figura notiamo che addirittura l'83% degli intervistati afferma che YM ha avuto un impatto positivo sulla propria carriera. Crediamo che questo sia un risultato importante, che va nella direzione della creazione di una rete di giovani professionisti fortemente motivati e attivi. Inoltre, questo ci sembra indicare che il ruolo di YM sia stato fondamentale nell'acquisizione della consapevolezza che la professione del fisico va oltre il lavoro in laboratorio e al computer, e che la partecipazione attiva all'interno di una comunità è fondamentale per una carriera di successo.

Dal sondaggio emerge anche che YM ha giocato un ruolo chiave nella crescita dei suoi membri, favorendo e supportando l'acquisizione di specifiche abilità, tra cui spicca lo sviluppo della propria abilità di *leadership* e della capacità di saper parlare in pubblico. Una *leadership* che non va intesa in senso strettamente autoritario di comando, ma in senso più generale come la capacità di prendere l'iniziativa e gestire con successo un progetto a cui partecipano più persone, sia esso piccolo o grande. Emerge esplicitamente come YM abbia giocato un ruolo fondamentale anche nel promuovere lo scambio culturale e favorire il networking. Soprattutto queste ultime due caratteristiche validano l'impegno profuso da EPS e dalle società nazionali che, come la SIF, hanno creduto nel progetto fin dal principio: nell'epoca della connessione e della globalizzazione, la consapevolezza del valore di quello che non è direttamente alla nostra portata è cruciale per comprendere appieno l'evolversi della società e della scienza, e per essere in grado di adattarsi ad esso. Tutto questo assume un valore ancora maggiore se pensiamo che la maggior parte degli intervistati si è iscritto a YM nei loro anni da studenti (triennali o magistrali). Queste abilità, quindi, sono state affinate a uno stadio molto precoce delle loro carriere, facendo sì almeno in principio, che i membri di YM potessero essere avvantaggiati nelle fasi successive della loro carriera, avendo avuto la possibilità di entrare in contatto con un ambiente internazionale in anticipo rispetto ai loro colleghi.

Abbiamo poi chiesto ai partecipanti al sondaggio di raccontarci quale o quali delle attività a cui hanno partecipato durante il loro periodo come membri YM si sono poi rivelate più utili. Le attività che hanno riscosso maggior successo sono quelle di divulgazione, seguite a ruota dal *Leadership Meeting*. Dal sondaggio emerge che le attività di divulgazione – uno dei pilastri del progetto – hanno giocato un ruolo fondamentale nello sviluppo di una spiccata capacità di comunicazione. Imparare ad essere "efficaci" durante un progetto di divulgazione è un processo a vari step, che si possono imparare solo sul campo: il primo passo è imparare a rielaborare il proprio sapere scientifico per adattarlo al pubblico, pur mantenendo la correttezza nell'esposizione. In secondo luogo, la partecipazione ad attività di divulgazione permette di imparare a modulare l'approccio, il linguaggio e l'atteggiamento in base allo scopo e all'interlocutore. È chiaro come queste capacità risultino poi spendibili in altri contesti, nell'ambito della comunicazione scientifica a congressi e convegni e in qualsiasi altro contesto sia richiesto saper presentare e presentarsi in maniera efficace e appropriata. L'altra attività che dal sondaggio risulta essere stata cruciale per la carriera degli ex-membri è la partecipazione al meeting annuale a cui sono invitati rappresentanti da tutte le *section*, il *Leadership Meeting*. La possibilità di poter espandere il proprio network di contatti è infatti centrale in questo evento, e richiama un altro dei pilastri su cui si fonda YM, ovvero il networking. Una parte importante del *Leadership Meeting* è dedicata al terzo e ultimo pilastro di YM, ovvero il *professional development*; ed è per la combinazione di networking e professional development che il *Leadership Meeting* risulta essere una delle attività di maggiore impatto sulle carriere dei membri del progetto.

Infine, ci sembra importante citare come la totalità degli intervistati non esiterebbe a suggerire agli attuali studenti di partecipare a programmi rivolti ai giovani come YM. In 10 anni il mondo è cambiato, e così anche la visione di YM. La diffusione dei social media, la sempre più forte digitalizzazione dell'informazione e del networking hanno consolidato YM come rete, come comunità di giovani fisici, aiutando a colmare lacune e favorendo lo scambio scientifico e culturale, e l'impatto che il progetto ha avuto sui suoi ex-membri si conferma estremamente positivo, come auspicato dai suoi fondatori. YM è come un catalizzatore, che dà spazio a idee e consente ai suoi membri di crescere professionalmente e di prepararsi alla professione di fisico. Il mondo della ricerca e in generale la società in cui viviamo evolvono a un ritmo velocissimo e in direzioni imprevedibili. Il nostro augurio per YM è che possa restare fedele al suo spirito di spazio di crescita e aggregazione, adeguandosi alle sfide che in futuro si presenteranno.

Roberta Caruso

Roberta Caruso è post-doc presso l'Università di Napoli Federico II. Si occupa principalmente della caratterizzazione a basse temperature delle proprietà di trasporto e della dinamica di fase di dispositivi Josephson ibridi. Attualmente i suoi interessi scientifici includono anche sensori e rivelatori basati su superconduttori, interfacce fra ossidi e applicazioni di dispositivi basati sull'effetto Josephson nel campo della quantum computation. È membro del progetto YM dal 2010, essendo stata uno dei membri fondatori della *section* dell'Università di Napoli. Ha fatto parte dell'Action Committee dal 2015 e dal 2018 è stata Chair del progetto fino a maggio 2020. Attualmente è membro dell'Executive Committee di EPS.

Antigone Marino

Antigone Marino è ricercatrice presso l'Istituto di Scienze Applicate e Sistemi Intelligenti del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Le sue attività di ricerca sono concentrate sullo studio dell'ottica della materia soffice applicata alle telecomunicazioni, con un interesse particolare per le tecnologie dei cristalli liquidi. È responsabile del laboratorio di Soft Matter del Dipartimento di Fisica dell'Università di Napoli Federico II. È stata tra i fondatori del progetto YM, facendo parte dell'Action Committee dal 2010 al 2016, e essendo Chair nel triennio 2013-2016. Attualmente è membro del Consiglio di Presidenza della SIF.

L'archivio storico de Il Nuovo Cimento è disponibile per i Soci all'url:
https://members.sif.it

IL NUOVO CIMENTO 150, 100, 50 ANNI FA

150 ANNI FA

Ho già ricordato in questa rubrica (Vol. 30 n. 1/2, p. 67, 2014) l'articolo di Pacinotti (1841–1912) sulla sua "macchinetta", funzionante sia come generatore di f.e.m. sia come motore. Cinque anni più tardi, ora a Bologna, ne mostrava al pubblico il funzionamento. Egli non coprì l'invenzione da brevetto, e ci fu un belga che tentò di appropriarsene. Polvani, celebrando il centenario dell'invenzione, dirà: *"Egli l'ha inventata, l'ha costruita, ne ha riconosciuto la reversibilità, l'ha sperimentata quantitativamente, ne ha cercato di fare la teoria matematica, ne ha preconizzato l'impiego per il trasporto dell'energia a grandi distanze, e infine … ha mostrato per primo con pubblico sperimento eseguito nel 1869, a Bologna, la possibilità di detto trasporto".*

da "Sopra una piccola macchina dinamo-elettrica; alcuni ragguagli ed esperimenti del dott. Antonio Pacinotti", di A. Pacinotti, Il Nuovo Cimento, Serie II, Tomo III (1870) 127.

Forse ai lettori del Nuovo Cimento alcun poco potrà piacere il conoscere che anche fra noi venne costruita una macchina dinamo-elettrica di dimensioni adattate alla forza motrice di un uomo. Essa fu ordinata fino dal 1867 da mio Padre per conto del Gabinetto di Fisica Tecnologica dell'Università di Pisa e venne costruita con la mia direzione dal Meccanico dell'Istituto Tecnico di Bologna […] Nella esposizione di Bologna la macchina dinamo-elettrica era in comunicazione con un piccolo motore elettromagnetico collocato all'altro estremo del banco, e bastava girare un poco la macchina per veder funzionare il motore. Così era messa in evidenza una trasmissione di movimento assai curiosa, ma che dal lato economico non presenterebbe convenienza in applicazione in grande.

QUI
SULLE RIVE DEL MINCIO
AGLI ALBORI DEL NAZIONALE RISCATTO
TRA LE ASPRE FATICHE DI GUERRA
DURANTE LA CAMPAGNA DEL 1859
IL SERGENTE VOLONTARIO
ANTONIO PACINOTTI
DIVINAVA L'ANELLO ELETTROMAGNETICO
CHE TRASFORMANDO L'ENERGIA MECCANICA
IN ENERGIA ELETTRICA
A CORRENTE CONTINUA
APPORTAVA PROGRESSO E CIVILTÀ
NEL MONDO
GOITO
NEL CENTENARIO DI S. MARTINO E SOLFERINO
PERCHÉ L'UMANITÀ SI RICORDI

Lapide scoperta sul luogo nel centenario.

Il Padre, Luigi Pacinotti, fu, con Matteucci e Mossotti, uno dei fondatori della grande scuola di fisica di Pisa, patriota e Capitano del Battaglione Toscano nel 1848 a Curtatone e Montanara. E volontario nella seconda guerra di indipendenza sarà Antonio, ancora studente, a combattere a Goito (S. Martino e Solferino), pensando a come migliorare il prototipo di "macchinetta" che aveva costruito nel laboratorio del padre.

100 ANNI FA

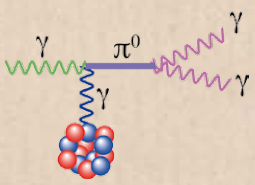
Allievo di Pacinotti a Bologna fu Augusto Righi (1850–1920), che gli succedette sulla cattedra quando questi la lasciò nel 1873. Sono degli ultimi anni della sua vita (1919–20) quattro memorie, di cui questa è la terza, sull'analisi dell'esperimento di Michelson. Dopo un ventennio, Righi ancora non voleva "accettare" la relatività del tempo e delle distanze, *che sono profondamente radicati nella nostra psiche*. Ancora pensava all'etere e alla contrazione come fosse un fenomeno fisico, *un corpo che si muove nell'etere si accorcia nel senso del movimento*; ipotesi *che trova giustificazione nella teoria elettrica della materia*. In queste analisi pensa di prevedere l'assenza di spostamento delle frange in ottica classica, senza trasformazioni di Lorentz. L'idea di partenza è sottile e corretta. Il fronte d'onda non raggiunge contemporaneamente tutto lo specchio se questo non è ad esso normale e se è in moto. Nel tempo in cui lo illumina progressivamente da un lato all'altro lo specchio ha arretrato di un certo tratto e di conseguenza appare come fosse ruotato di un certo angolo ω, dipendente dalla sua velocità. La legge della riflessione da specchi in moto è $r=i+2\,\omega$. Il calcolo di ω è immediato, ma laborioso quello successivo, e Righi lo sbaglia. A trovare gli errori, cosa certo non facile, riuscì Giorgio Valle (*Il Nuovo Cimento,* 2 (1925) 39). Quello principale fu di trascurare che anche la lente che crea l'onda piana in ingresso è in moto.

Da "Sulle basi sperimentali della teoria della relatività" di A. Righi, Il Nuovo Cimento, 19 (1920) 142.

Gli è che tenendo conto nel debito modo della deviazioni dei raggi riflessi prodotte della traslazione terrestre, accade che queste deviazioni modificano la differenza di fase allorché si passa dall'una all'altra della due orientazioni, in modo da compensare l'effetto prodotto delle variazioni, prodotte dalla traslazione, sulle lunghezze di cammino percorso dai raggi interferenti.

50 ANNI FA

Storicamente, la misura della vita media del $\pi^0 \to 2\gamma$ ha presentato problemi perché è troppo breve ($< 10^{-16}$ s) per ottenerla dalla lunghezza di volo tra produzione e decadimento, e troppo lunga per una misura della larghezza di risonanza (ordine degli eV). Il gruppo di Pisa e Bonn sfruttò l'effetto Primakoff, cioè la fotoproduzione di π^0, vedi figura, nel campo Coulombiano di nuclei, sostanzialmente l'inverso del decadimento prima all'elettrosincrotrone di Frascati (1965) e poi a energia più alta a DESY.



Da "A new measurement of the π^0 lifetime through the Primakoff effect in nuclei" di G. Bellettini, C. Bemporad, P. L. Braccini, L. Foà *et al.*, Il Nuovo Cimento, 66 A (1970) 243.

A new measurement of the π^0 lifetime through the Primakoff effect on nuclei was performed at DESY. The π^0 photoproduction at small angles was measured on four elements (C, Zn, Ag, Pb) at two energies (1.5 GeV and 2.0 GeV). The final result for the lifetime is $\tau=(0.56 \pm 0.06)10^{-16}$ s.

a cura di Alessandro Bettini

INTERVISTA A
MASSIMO INGUSCIO

Crediti: Archivio Storico Istituto Luigi Sturzo, Fondo fotografico "Il Popolo", Serie Partito, Congresso di Napoli novembre 1947, fasc. 2, n. 4828.

GUSTAVO COLONNETTI E IL CNR

In occasione del 96° anniversario del CNR, Lei ha ricordato all'Accademia dei Lincei, che fu la prima sede del CNR all'atto della sua fondazione, la figura di Gustavo Colonnetti. Perché Colonnetti?

Perché Gustavo Colonnetti è stato un illustre accademico dei Lincei e un importante presidente del Consiglio Nazionale delle Ricerche in un periodo cruciale per la Storia della Repubblica. Egli è uno dei tanti testimoni delle sinergie che ci sono sempre state tra l'Accademia Nazionale dei Lincei e il CNR in 96 anni di storia, a cominciare dalla sua fondazione ad opera di Vito Volterra, primo presidente del CNR e già presidente dell'Accademia dei Lincei nonché della Società Italiana di Fisica.

La figura di Colonnetti è un po' legata a quella di Vito Volterra. Nel 1922 a soli 36 anni Colonnetti fu il più giovane direttore, allora equivalente a rettore, del Politecnico di Torino che era stato fondato anche a seguito del lavoro istitutivo proprio di Vito Volterra che aveva avuto un ruolo da protagonista in seno alla Regia Commissione appositamente istituita. Colonnetti avrebbe lasciato la direzione dopo soli 3 anni per la sua mancata adesione al partito fascista e la sua carriera di professore universitario, prima di meccanica e poi di scienza delle costruzioni, risentì in vario modo del clima creato dal regime. Nel 1941, pur non essendo ebreo, avrebbe lasciato il posto di professore al Politecnico per spostarsi in Svizzera, a Losanna in qualità di *visiting professor* all'*Ecole des Ingénieurs*. A Losanna la gran parte del suo lavoro fu rivolta alla creazione e alla direzione dei campi universitari per internati militari italiani.

Ed è proprio dalla Svizzera, via Lione, che nel dicembre del 1944 un aereo militare riporta gli esuli in patria, a Roma: tra questi Gustavo Colonnetti e la moglie Laura e il futuro secondo Presidente della Repubblica Luigi Einaudi con la moglie.

Di lì a poco il Consiglio dei Ministri delibera la momentanea trasformazione del Consiglio Nazionale delle Ricerche in "Centro di consulenza tecnica del Governo per i problemi della ricostruzione" e nomina suo presidente proprio Gustavo Colonnetti. Nell'acronimo CNR, la "R" di Ricerca era dunque intesa come Ricostruzione: è con la ricerca e con la politica della ricerca che si produce progresso, benessere, democrazia e si costruisce il futuro.

Torniamo nel dopoguerra al CNR e alla fisica.

Colonnetti avrebbe ricoperto la carica di presidente del CNR fino al 1956 al compimento dei suoi 70 anni. Per ricostruire e rendere operativo il CNR in tempi brevi Colonnetti fa emanare il Decreto Luogotenenziale con il quale l'ente diviene organo dello Stato alle dipendenze della Presidenza del Consiglio dei Ministri, con personalità giuridica autonoma, e con funzione di rappresentanza della comunità scientifica nazionale. Colonnetti avvia così una riorganizzazione profonda dell'ente per adeguarlo alle nuove sfide. Infatti, costituisce nuovi centri di studio, ad esempio il Centro di studio per gli ioni veloci a Padova, seme iniziale dell'importante avventura nella fisica dei plasmi.

A Roma Colonnetti istituisce un Centro di studio per la Fisica Nucleare che è il primo tassello di quell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare che sarebbe nato nel 1951 avendo come primo presidente Gilberto Bernardini e poi Edoardo Amaldi, allora direttore del Centro di Fisica Nucleare del CNR.

Con Colonnetti presidente, il CNR ha garantito il primo contributo finanziario al futuro CERN di Ginevra, alla cui attività sono legati i nomi di tanti illustri Lincei: Edoardo Amaldi, Gilberto Bernardini, Giorgio Salvini, Luigi Radicati, Emilio Picasso, Nicola Cabibbo, Italo Mannelli, Milla Baldo Ceolin, Gabriele Veneziano … Ora il CERN è diretto da Fabiola Gianotti e in precedenza lo è stato da altri due Italiani, Carlo Rubbia e Luciano Maiani, quest'ultimo mio illustre predecessore come presidente del CNR.

Continuando con la riorganizzazione, Colonnetti avrebbe poi fondato a Torino l'Istituto Dinamometrico, dando importanza alla scienza delle misure in Italia, istituto che insieme all'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, sarebbe poi diventato l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica per me motivo di personale coinvolgimento, poiché ho avuto l'onore di esserne stato presidente, subito prima della mia nomina a presidente del CNR.

Colonnetti, grande organizzatore della scienza, diede anche un essenziale contributo alla nostra Costituzione, ce lo ricorda?

Colonnetti, insieme a Umberto Nobile e Giuseppe Firrao, che ne fu relatore in Assemblea, sostenne la necessità di integrare il testo dell'art. 9, uno dei più originali della nostra Costituzione, voluto inizialmente da Concetto Marchesi e Aldo Moro per assicurare la tutela dei beni culturali alla Repubblica, aggiungendo "*e la ricerca scientifica e tecnica*" allo "*sviluppo della cultura*" e alla "*tutela del paesaggio e del patrimonio storico e artistico*". All'epoca questi temi sembravano temi distinti. Oggi sappiamo che per un'Italia prospera, sicura e all'avanguardia nel mondo questi sono temi completamente interconnessi. Abbiamo bisogno dello sviluppo scientifico per vivere meglio in modo più democratico, più sicuro, più salutare in questo nostro pianeta, nelle nostre città, nelle nostre campagne.

È di tutta evidenza che quella strategia vincente di sinergia tra università, ricerca pubblica e industria è validissima ancor oggi, con la chiara precondizione che alla base di tutto il progresso resta "*… quell'insaziabile imperativo dello spirito che è teso verso la conquista di sempre nuovi orizzonti*", come scritto allora nell'illustrazione dell'emendamento alla Costituzione. La spinta fondamentale risiede

cioè nella curiosità e, nella gran parte dei casi, la distinzione tra ricerca fondamentale e applicata risulta artificiosa e sicuramente contingente: la ricerca può essere solo di buona o cattiva qualità.

Qual è oggi l'eredità di Colonnetti per il CNR?

Il CNR ha operato una ridefinizione strategica della propria missione attraverso una programmazione articolata su macro obiettivi coerenti con le grandi sfide del Paese: cambiamenti climatici, bioeconomia, tutela e valorizzazione del patrimonio culturale, diagnosi e cura delle malattie neurovegetative e delle malattie rare, well being and active aging, intelligenza artificiale e sue applicazioni, mobilità sostenibile, studio e tutela dell'ambiente marino e costiero. Su questi obiettivi strategici il CNR ha fatto convergere le migliori competenze scientifiche e tecnologiche con una visione innovativa, fortemente multidisciplinare e strettamente connessa con il sistema universitario per valorizzare le risorse evitando dispersioni e duplicazioni.

Questi macro obiettivi hanno guidato le scelte di investimento dell'ente in termini di infrastrutture di ricerca e di reclutamento del personale, hanno favorito numerose azioni di riorganizzazione scientifica con una visione nazionale strategicamente declinata con le realtà territoriali anche per favorire specifiche filiere tecnologiche e con una speciale attenzione rivolta al Mezzogiorno e alla valorizzazione delle sue eccellenze scientifiche.

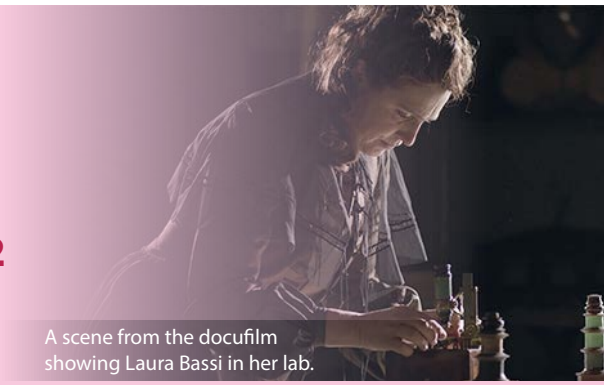
La riorganizzazione scientifica dell'ente è andata di pari passo a una importante riorganizzazione amministrativa e a politiche di sano contenimento della spesa che hanno consentito di operare in situazioni di finanziamenti che erano, e che continuano ad essere, difficili. Anche qui forse non c'è nulla di nuovo, e a testimonianza vorrei riprendere ancora una volta le parole di Colonnetti, che in una intervista radiofonica del dicembre del 1946 lamenta la scarsità di fondi destinati alla ricerca, derivante, lui sostiene, non dalle ristrettezze economiche o da volontà politica, ma "*soprattutto per l'incomprensione degli organi preposti alla tutela delle finanze dello Stato. I quali sembrano non rendersi conto né dell'importanza né dell'urgenza di questa nostra attività*".

Sono parole queste di estrema attualità che mi permettono di ricordare Gustavo Colonnetti come uno splendido esempio di energie e cultura al servizio delle istituzioni. Questo è stato un dato costante durante tutta la storia del CNR.

L. Cifarelli
Presidente Onorario SIF

NEWS

A CHAIR FOR LAURA BASSI. BOLOGNA 1732



A scene from the docufilm showing Laura Bassi in her lab.

"A chair for Laura Bassi. Bologna 1732" is the docufilm, conceived by Raffaella Simili and Miriam Focaccia, directed by Alessandro Scillitani, which illustrates in an extremely lively way the life of Laura Bassi, retracing her story with an original and innovative formula.

"*Extraordinary woman*" begins Raffaella Simili in introducing her, while Luisa Cifarelli defines her a "*role model*". Bassi was indeed the first woman in the world to hold a university chair, and this happened in Bologna in 1732.

Laura Bassi (1711–1778) graduated in Bologna in the year 1732. The same year she became, the first woman ever, a member of the Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna (Academy of Sciences of the Institute of Bologna) and obtained, as already said, a professorship at the University in Filosofia Universa (Experimental Physics).

In 1745 Pope Benedict XIV established for her a supernumerary twenty-fifth position, in addition to the twenty-four positions reserved for the Benedictine Academicians: a special élite of scholars within the Academy of Sciences, chosen among the most illustrious and renowned scientists of the period. Her fame soon crossed the borders of Bologna and Laura became an essential point of reference in the whole Republic of Letters of the time, as one of the main experts in Newtonian physics. In 1776, crowning her long and brilliant career, she obtained, this time at the Istituto delle Scienze of the Academy, the chair of Experimental Physics.

Laura was not only a scientist, but also a wife and a mother. In 1738 she married the doctor and colleague Giuseppe Veratti. The couple had eight children. She died in 1778 and was buried in the Corpus Domini church, close to the tomb of Luigi Galvani, future father of animal electricity.

This project was born from the experience and in-depth studies of a group of historians of science of the University of Bologna. It was implemented thanks to the favourable institutional context and the generous contribution of a number of institutions: in addition to the Accademia delle Scienze and the University of Bologna, the Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi of Rome, the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Bologna, and, last but not least, the Società Italiana di Fisica. This initiative of dissemination and communication of scientific culture proposes Laura Bassi as the primacy of eighteenth-century science.

A symbol also chosen by the Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale which named after "Laura Bassi" the first Italian icebreaker ship, inaugurated at the end of September 2019 in the harbour of Trieste, and sailed from there for its first Antarctic explorations.

The docufilm narrates through a dynamic and creative screenplay, that alternates historical reconstructions, interviews with experts, animations, readings of original documents, poetic sequences, the most significant moments of scientific as well as familiar Laura Bassi's life. Besides, the city of Bologna is one of the docufilm protagonists with some shooting of the Archiginnasio, the Istituto delle Scienze, Palazzo d'Accursio and the streets of the town to which Laura Bassi has given prestige.

In conclusion, this project made current and attractive the image of this exceptional woman, as well as highlighting her legacy and pioneering role within the new experimental science. The première of the documentary was broadcasted on Tuesday, 12 May 2020 on the Italian television channel Rai Storia, within the series "Italiani" conducted by Paolo Mieli.

M. Focaccia, R. Simili
Università di Bologna

RECENSIONI

Roberto Casalbuoni, Daniele Dominici, Giuseppe Pelosi

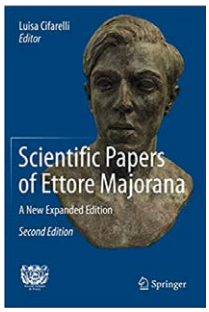
Enrico Fermi a Firenze
Le «Lezioni di Meccanica Razionale» al biennio propedeutico agli studi di Ingegneria: 1924-1926

Firenze University Press, Firenze, 2019

pp. 408, € 21,90

Pubblicata online
28 maggio 2020

Recensione di
G. C. Righini



Luisa Cifarelli (Editor)

Scientific Papers of Ettore Majorana
A New Expanded Edition

SIF - Springer, 2020

pp. X + 188, € 114,39
ISBN 978-3-030-23508-6

e-book: € 93,08
ISBN 978-3-030-23509-3

Pubblicata online
13 luglio 2020

The Italian Physical Society has edited the scientific papers by Ettore Majorana. The present New Expanded Edition contains the original papers translated into English and each commented by an expert of the field. In addition there are biographical notes provided by Guerra and Robotti and three essays by Zichichi, Bettini and Benedek.

The book is of great value, since it shows how our Standard Model began as seen by Majorana as a witness from 1928 until his disappearance in 1938. When Majorana started his carrier as physicist in 1928 only the gravitational and the electromagnetic forces were known. The puzzling results of beta-decay experiments challenged unconventional solutions. Within a few years the foundation of two novel forces was established: the weak force and the strong force. Pauli postulated a new particle, the neutrino, in addition to the three then known elementary particles, the photon, the electron and the proton. The discovery of the neutron opened a way out of the unsatisfactory and problematic concept of a nucleus being composed of protons and electrons. Fermi proposed a theory of beta decay explained as the decay of a neutron into a proton and an electron-neutrino pair laying the fundament for the future studies of weak interactions. Heisenberg got inspired to view the proton and the neutron as equivalent partners of what we call today the nucleon. This marks the beginning of the new field of strong interactions. The discovery of the positron was a triumph of Dirac's theory and indicated a way out of his hole theory.

Majorana started his career in this extremely exciting atmosphere as part of a community of brilliant young physicists, such as Fermi, Dirac, Heisenberg and many others, all about the same age. He left only a handful of papers, but what a legacy! Zichichi's article pays homage to Majorana. He highlights aspects in the oeuvre and includes notes on the enigmatic disappearance. The reports on recollections of Oppenheimer, Segrè, Wick, Pontecorvo elucidate the personality of Majorana.
A lecture about *Dirac and Majorana Neutrinos* was delivered by John Bell in the 1st course of the 1963 Subnuclear Physics School at Erice.

Each of Majorana's papers contains fundamental and original ideas. The two papers of 1933 and 1937 show his outstanding contribution to the newly developing fields of strong and weak interactions.

The discovery of the neutron was the breakthrough to understand the structure of nuclei. Majorana immediately recognized the importance and developed his ideas about the forces acting between the nucleons. He passed several months at the Theoretical Institute of Physics at Leipzig, where Heisenberg was working. They had intensive discussions. Heisenberg liked Majorana's approach.

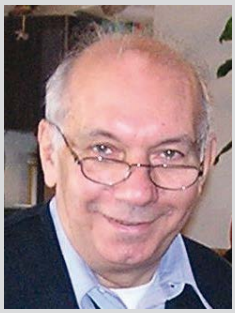
In studying the Dirac equation of electrons and positrons Majorana discovered an elegant choice of the gamma-matrices, today called *the Majorana representation*, where all coefficients are real. Majorana noticed then that an intriguing situation occurs when he applied his formalism to a neutral massive fermion, since there is, in his own words, *now no need to assume the existence of antineutrons or antineutrinos*. This observation inspired many theoretical analyses, in particular after the discovery of parity violation. Once the neutrino was discovered the crucial question became whether it is of Dirac or Majorana nature. This issue is still open. The article by Bettini describes in detail an experiment dedicated to the search for neutrinoless double beta decay with the strong hope to get a *yes or no answer*.

Majorana fermions entered the huge field of condensed matter physics. The article by Benedek gives an overview of the status and prospects.

Majorana leaves us a rich legacy. The reader will find in this book deep insights and stimulation.

Dieter Haidt
DESY, Hamburg

Antonino Pullia



Milano, 1 maggio 1935 -
Milano, 14 aprile 2020

Antonino Pullia è stato insignito del Premio "Enrico Fermi" della Società Italiana di Fisica nel 2011

Antonino Pullia, Tonino per i famigliari e per gli amici, l'ho conosciuto da sempre: abbiamo fatto lo stesso liceo, nella stessa classe, e studiato insieme giorno e notte per preparare l'esame di maturità. Poi ci siamo rincontrati a Fisica.

Tonino è nato a Milano, dove ha svolto i suoi studi: dopo aver frequentato il liceo classico al Berchet, si è iscritto alla Facoltà di Ingegneria del Politecnico. Però, una volta terminato il biennio, ha preso la decisione che avrebbe determinato la sua vita: si è trasferito da Ingegneria a Fisica. Aveva infatti nel frattempo capito che il mondo della fisica era affascinante e che lo intrigava molto di più dell'ingegneria. Si è così laureato in Fisica, con una tesi di chimica fisica.

Tuttavia Tonino era insoddisfatto, voleva lavorare su temi più fondamentali. Ne parlammo e io gli consigliai di andare a discuterne con Ettore Fiorini, che allora era il coordinatore di un gruppetto di fisica delle particelle, del quale facevo parte anch'io. Per la fisica delle particelle era quello un periodo singolare e pieno di futuro, di transizione fra la fine del lavoro con i raggi cosmici, con presa dati in alta montagna, e l'inizio della ricerca con gli acceleratori. A Milano il gran capo della fisica delle particelle era Giuseppe "Beppo" Occhialini, che in quegli anni lavorava ancora con le emulsioni nucleari, essendone stato praticamente l'inventore. Tonino entrò così nel nostro gruppo.

L'Istituto di Fisica di Milano aveva la propria sede in via Saldini, nel cosiddetto Palazzo delle Scienze che ospitava anche i matematici e i chimici. Lo spazio era scarso per tutti e mal distribuito. A Fisica si era costretti a lavorare in gabbiotti costruiti negli ampi corridoi, e la parte sperimentale era ospitata nel seminterrato. Mi ricordo che Tonino in quel periodo (eravamo nel 1960) lavorava tutto solo in un cunicolo delle cantine per rimettere in funzione una camera a nebbia, costruita da Carlo Succi.

In quei primi anni, lui, come me, venne inquadrato come assistente straordinario di Giovanni Polvani, allora direttore dell'Istituto.

Nei primi anni '60 ci trasferimmo in via Celoria, non nell'attuale Istituto di Fisica, che allora non esisteva ancora, ma in una palazzina ad un piano (una nuova costruzione, chiamata il "capannone") dove, sotto la direzione e guida di Occhialini, si era spostata tutta la fisica sperimentale di particelle elementari. Il nostro gruppetto, sempre coordinato da Fiorini, ebbe in quel periodo un'attività molto intensa perché stavamo sviluppando metodi di analisi e di misura dei fotogrammi di camera a bolle. Avevamo una collaborazione con André Lagarrigue, che con il suo gruppo a l'Ecole Normale Supérieure, a Parigi, aveva costruito una delle prime camere a bolle a liquido pesante, BP3. L'argomento principale di studio di quel periodo erano le interazioni forti: eravamo più o meno all'inizio della saga delle cosiddette "risonanze", particelle che decadono in tempi brevissimi in modo forte. Io e Tonino lavoravamo molto insieme facendo la staffetta ai tavoli di scanning e discutendo sull'interpretazione di quello che vedevamo.

Agli inizi degli anni '60 una studentessa di fisica, che aveva chiesto la tesi a Fiorini, svolse con noi il lavoro sui fotogrammi di BP3: era Paola Terzi che nel 1962 divenne la moglie di Tonino. Insieme Tonino e Paola hanno trascorso ben 58 anni di una vita veramente condivisa; molto spesso dove c'era Tonino, si incontrava anche Paola.

Occhialini era molto presente in Istituto e le nostre interazioni con lui erano quotidiane; tutti noi lo ammiravamo e provavamo affetto per lui, ma spesso ci lasciava sconcertati per i suoi modi originali e per le sue uscite, talvolta sibilline. È rimasta famosa la reazione di Occhialini alla comunicazione, datagli dallo stesso Tonino, che era prossimo a sposarsi: "O fai il fisico o fai il patriarca" gli aveva risposto, lasciandolo ovviamente sconcertato. Un'altra volta Ettore era venuto da noi tra il divertito e l'imbarazzato: Occhialini gli aveva chiesto di mandargli in studio Bellia (evidentemente una crasi fra Bellini e Pullia) e Ettore era ovviamente in dubbio su chi inviargli, se uno solo di noi o ambedue.

Le strade mie e di Tonino si divisero nel 1967. Infatti, io, dopo un anno passato a Parigi a lavorare a l'Ecole Normale Supérieure, lasciai la camera a bolle per esperimenti con rivelatori elettronici, mentre Tonino continuò a lavorare con BP3 e, successivamente, con la grande camera a bolle, Gargamelle, una camera di 2 m × 4.8 m, costruita anch'essa da un gruppo guidato da Lagarrigue. Gargamelle, esposta ad un fascio di neutrini al CERN, era riempita di freon, un liquido pesante che faceva aumentare la probabilità che i neutrini interagissero con la materia. L'analisi dei fotogrammi veniva fatta sia a Milano sia al CERN, a Ginevra, dove Tonino tra il 1972 e il '73 visse un anno con la famiglia. Anzi, per un certo periodo, proprio nei primi anni '70, molti milanesi dovettero trasferirsi al CERN, dato che a Milano l'Istituto di Fisica era diventato molto spesso inaccessibile: erano gli anni duri della contestazione studentesca italiana.

Fra il 1973 e il 1976 furono osservati in Gargamelle interazioni di neutrini che vennero interpretati come interazioni di corrente neutra debole; questa fu una grande scoperta che portò all'assegnazione del Premio Nobel a Salam, Glashow e Weinberg, che ne avevano predetto l'esistenza. In questa scoperta un ruolo importante lo ebbe proprio il Pullia perché fu fra i primi a interpretare le interazioni osservate come eventi di corrente neutra. Questa scoperta fu premiata nel 2009 dalla Società Europea di Fisica, che conferì a ciascun membro di quella collaborazione un diploma. Più tardi, nel 2011, Antonino Pullia e Dieter Haidt furono premiati dalla Società Italiana di Fisica (SIF) con il premio Fermi, il maggior premio di fisica italiano, deciso dai maggiori enti italiani di ricerca scientifica in collaborazione con la SIF, con la seguente motivazione: "per il loro fondamentale contributo congiunto nella scoperta delle correnti deboli neutre con la camera a bolle Gargamelle al CERN".

Alla fine degli anni '70 Ettore Fiorini e Tonino fecero il primo esperimento sul decadimento doppio beta con un rivelatore al Germanio, sviluppato all'Euratom di Ispra. Per schermarsi dai raggi cosmici il rivelatore fu installato a Torino in un rifugio antiaereo della seconda guerra mondiale e poi portato sotto il tunnel del Monte Bianco.

Qui termina la mia rievocazione e, prima di passare il testimone a Stefano Ragazzi che ha collaborato con Tonino dagli anni '80 in poi, vorrei dire qualcosa sulle sua qualità di scienziato. Era profondamente appassionato alla ricerca, cui dedicava il massimo delle sue forze; conosceva molto bene la fisica; aveva infine quello che io chiamo "senso fisico", qualità molto importante per uno sperimentale, che rende capace cioè di intuire, al di là di tutti i controlli, se un nuovo risultato possa avere qualche baco e quindi se è necessario procedere con ulteriori test prima di annunciarlo pubblicamente.

Con Tonino non ho più lavorato dalla fine degli anni ‘60 in poi, ma ho continuato a frequentarlo al di fuori dell’ambiente di lavoro, anche con le reciproche famiglie. Mi sento quindi di aggiungere un commento sulle sue qualità umane; a parte la non comune intelligenza, era fantasioso, dotato di uno spiccato senso dell’umorismo e, soprattutto, comprensivo e tollerante delle debolezze altrui.

Gianpaolo Bellini
INFN, Sezione di Milano e
Università di Milano

Sentii pronunciare per la prima volta il nome di Tonino Pullia da Ettore Fiorini quando andai a restituirgli due tesi che mi aveva dato da leggere per definire l’ambito della mia. Una era sulla ricerca di violazione di parità in reazioni nucleari, l’altra su fisica di neutrini con Gargamelle al PS. Eravamo alla fine degli anni ‘70.

Quando espressi la mia preferenza per i neutrini, Ettore disse immediatamente “dobbiamo parlarne con Pullia”, e si affrettò a informarsi da Alba, l’anziana segretaria del gruppo, su dove fosse Tonino. Accertato che Tonino non era a Milano, Ettore Fiorini mi fissò un appuntamento per un altro giorno, spiegandomi che “il poveretto” da quando aveva vinto una cattedra a Bari era sempre di corsa tra Bari, Milano e il CERN.

Tonino era Spokesman di WA14, l’esperimento che si stava preparando al CERN con la camera a bolle Gargamelle sul fascio di neutrini dell’SPS.

L’incontro con Tonino ed Ettore fu istruttivo, convennero che l’argomento della mia tesi sarebbe stato lo studio di eventi con di-muoni; questo mi avrebbe costretto a prendere confidenza con un nuovo strumento, l’identificatore di muoni, era importante che qualcuno del gruppo lo conoscesse bene, e poi avrei avuto non pochi dati da analizzare. Si richiedeva la conoscenza approfondita di un nuovo strumento per produrre un solido risultato dall’analisi dei dati. Purtroppo, a causa di qualche settimana di ritardo del fascio, mancarono i dati per la mia tesi. Tonino non ebbe nulla da obiettare a che la tesi potesse contenere solo una parte strumentale e una parte di fisica preliminare all’analisi, ma non apprezzò che un ultimo capitolo, di poche pagine, elencasse pochi eventi. Tonino non amava gli show, pretendeva la sostanza. In quella ricerca non si doveva dimostrare l’esistenza di un fenomeno nuovo, si doveva produrre un’analisi significativa per la comprensione del fenomeno; per lui sarebbe stato meglio omettere quell’ultimo capitolo in attesa di dati che sarebbero arrivati successivamente.

La vita di Gargamelle all’SPS fu breve. Ettore Fiorini diresse il gruppo verso NUSEX, un esperimento per la ricerca del decadimento del protone condotto al Garage 17, nel traforo del Monte Bianco. Tonino vi partecipò con dedizione e attenzione, ma si intuiva che la sua mente era rivolta ad altro. E cos’altro fu presto chiaro: Tonino era convinto che LEP avrebbe offerto un’opportunità di ricerca straordinaria e non gli riuscì difficile convincere buona parte del gruppo.

LEP avrebbe prodotto grandi quantità di dati con cui si sarebbero potuti approfondire molti aspetti di fisica. Ma per Tonino non era solo importante l’accesso ai dati, per lui era fondamentale avere il controllo sui dati, sulla loro origine e sulla loro qualità, quindi la profonda conoscenza dell’apparato strumentale. Per questo scelse le componenti dell’apparato alla cui realizzazione avremmo contribuito, guidati dai nostri preminenti interessi di fisica.

Sul finire degli anni ‘90, con l’avvicinarsi della conclusione delle ricerche con LEP, esplorammo diverse possibilità di misure rivolte alle oscillazioni di neutrini. Tonino, insieme ad altri, propose con grande convinzione una misura, con un fascio di neutrini prodotto dal PS del CERN, volta a chiarire la cosiddetta “LSND anomaly”. La proposta non venne accettata. Ho spesso avuto la sensazione che Tonino considerasse questa un’offesa, non una sconfitta. Riteneva scientificamente infondati, non ragionevoli, gli argomenti opposti. Tonino era insofferente verso argomentazioni scientificamente sbagliate, lo offendevano e lo irritavano.

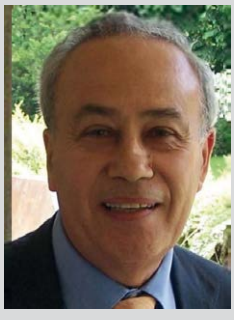
Non so quanto questo episodio abbia contribuito ad allentare i suoi rapporti con le ricerche al CERN, sicuramente la sua partecipazione alle ricerche con LHC non vide la convinzione e l’entusiasmo degli anni di LEP.

Negli ultimi anni Tonino si è dedicato allo sviluppo di una tecnica originale per la ricerca di materia oscura tipo WIMP. Ha avuto per questo un forte supporto dall’INFN, purtroppo non è stato sostenuto altrettanto bene dalla sua salute.

Antonino Pullia è stato direttore della sezione INFN di Milano e successivamente di quella di Milano-Bicocca; ha ricoperto la carica di Direttore di Dipartimento di Fisica all’Università di Milano-Bicocca, e infine è stato direttore del dottorato di ricerca in ambedue le università.

Stefano Ragazzi
INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso e
Università di Milano-Bicocca

Aldo Covello



Napoli, 3 gennaio 1951 -
Napoli, 30 marzo 2020

G. La Rana, R. A. Ricci

Pubblicato online
21 maggio 2020

Mauro Bruno

Palermo, 23 agosto1946 -
Bologna, 4 novembre 2019

T. Marchi, S. Barlini

Pubblicato online
22 maggio 2020

SCELTI PER VOI

LIVELLI ATOMICI DEL π^-

Atomi in cui un elettrone è sostituito da un μ^- sono noti da tempo. Ma, se a sostituire l'elettrone è un π^- le difficoltà di studiare la spettroscopia dell'atomo mesico crescono perché la vita media del mesone è di soli 26 ns. I livelli atomici possono essere sondati con impulsi LASER di frazioni di nanosecondo. Sono stati pubblicati i risultati di un esperimento su di un fascio di π^- da 83 a 87 MeV/c dal ciclotrone di 590 MeV del Paul Scherrer Institute, che possono aprire la strada all'uso di tecniche di ottica quantistica allo studio dei pioni.

Masaki Hori *et al., Laser spectroscopy of pionic helium atoms*, Nature, 581 (2020) 37.

Metastable pionic helium (π^4He^+) is a hypothetical three-body atom composed of a ^{4}He nucleus, an electron and a π^- occupying a Rydberg state of large principal ($n\approx16$) and orbital angular momentum ($l\approx n-1$) quantum numbers. The π^4He^+ atom is predicted to have an anomalously long nanosecond-scale lifetime, which could allow laser spectroscopy to be carried out. Its atomic structure is unique owing to the absence of hyperfine interactions between the spin-0 π^- and the ^{4}He nucleus. Here we synthesize π^4He^+ in a superfluid-helium target and excite the transition $(n,l)=(17,16)\rightarrow(17,15)$ of the π^--occupied π^4He^+ orbital at a near-infrared resonance frequency of 183,760 GHz. The laser initiates electromagnetic cascade processes that end with the nucleus absorbing the π^- and undergoing fission. The detection of emerging neutron, proton and deuteron fragments signals the laser-induced resonance in the atom, thereby confirming the presence of π^4He^+.

ONDE EVANESCENTI DI SPIN

In ogni fenomeno ondoso, alla superficie di separazione tra due mezzi, in condizioni di riflessione totale, esiste nel mezzo proibito, in vicinanza della superficie, un'onda di ampiezza decrescente allontanandosene, che si annulla a profondità dell'ordine della lunghezza d'onda, l'onda evanescente. Questa è stata ora osservata per onde di spin di frequenze del GHz con distanze di penetrazione di nanometri.

M. Dabrowski *et al., Coherent Transfer of Spin Angular Momentum by Evanescent Spin Waves within Antiferromagnetic NiO*, Phys. Rev. Lett., 124 (2020) 217201.

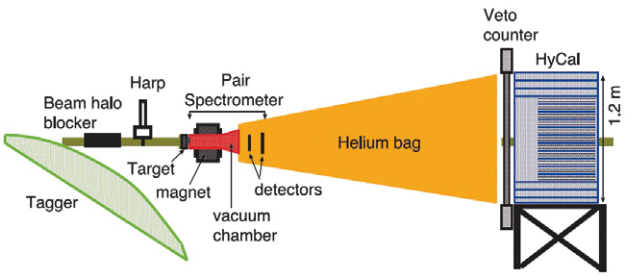
It has been demonstrated that ac spin current of GHz frequency can efficiently propagate through epitaxial NiO layers of different thickness at room temperature. The ac spin current is enhanced for NiO thicknesses less than 6 nm. The results show that the propagation of spin current through NiO layers is mediated by evanescent antiferromagnetic spin wave modes of GHz frequency rather than THz frequency magnons.

VITA DEL π^0

Anomalia è quando una simmetria classica è rotta a livello quantistico. L'anno scorso, ho ricordato in "150 100 50 anni fa" (35 (2019) n.1/2, p. 85), la pubblicazione su Il Nuovo Cimento della scoperta di Bell e Jackiw di come la rottura quantistica della simmetria chirale associata con la terza componente dell'isospin della corrente assiale determini la vita media del π^0 (anomalia ABJ). Nella stessa rubrica, in questo numero, ho ricordato le misure della vita media, tramite effetto Primakoff, del 1965 a Frascati e del 1970 a DESY, accurata al 10%. Il decadimento π^0 è un fondamentale test di QCD, perché nella sua teoria compaiono, oltre alla necessità del "colore" dei quark, i meccanismi delle rotture spontanea ed esplicita della cromodinamica. Negli ultimi 50 anni il progresso teorico ha portato a previsioni con la precisione dell'1%. Il programma del Jefferson Lab, che dispone di un avanzato acceleratore di elettroni e di un fascio marcato (tagged) di fotoni (la misura dell'energia dell'elettrone diffuso dà quella del fotone), include quindi test di precisione, in particolare con l'esperimento PrimEx. Questo ha ora pubblicato i risultati finali misurando la vita media del π^0 all'1.5%.

I. Larin *et al., Precision measurement of the neutral pion lifetime*, Science, 368 (2020) 506.

We precisely measured the decay width Γ of the $\pi^0\rightarrow\gamma\gamma$ process. The differential cross sections for π^0 photoproduction at forward angles were measured on two targets, ^{12}C and ^{28}Si, yielding $\Gamma(\pi^0\rightarrow\gamma\gamma)=7.798\pm0.056(\text{stat.})\pm0.109(\text{syst.})$ eV, where stat. denotes the statistical uncertainty and syst. the systematic uncertainty. We combined the results of this and an earlier experiment to generate a weighted average of $\Gamma(\pi^0\rightarrow\gamma\gamma)=7.802\pm0.052(\text{stat.})\pm0.105(\text{syst.})$ eV. Our final result has a total uncertainty of 1.50% and confirms the prediction based on the chiral anomaly in quantum chromodynamics.



Schema dell'esperimento PrimEx II. Reprinted with permission from AAAS.

IL SOLE NEGLI ALBERI

I neutroni secondari da interazioni nell'atmosfera di protoni dal sole producono ^{14}C dall'azoto tramite la reazione $^{14}N(n,p)^{14}C$. Gli alberi, che si cibano di CO_2, ci conservano la storia dell'abbondanza di ^{14}C nei loro anelli, anno per anno, o anche meglio, come in questo lavoro. Fusa Miyake e collaboratori hanno scoperto un episodio di attività solare estrema (SPE) avvenuto nel 660 AC, con datazioni in un tronco di cedro scavato dalle pendici del vulcano Choukai.

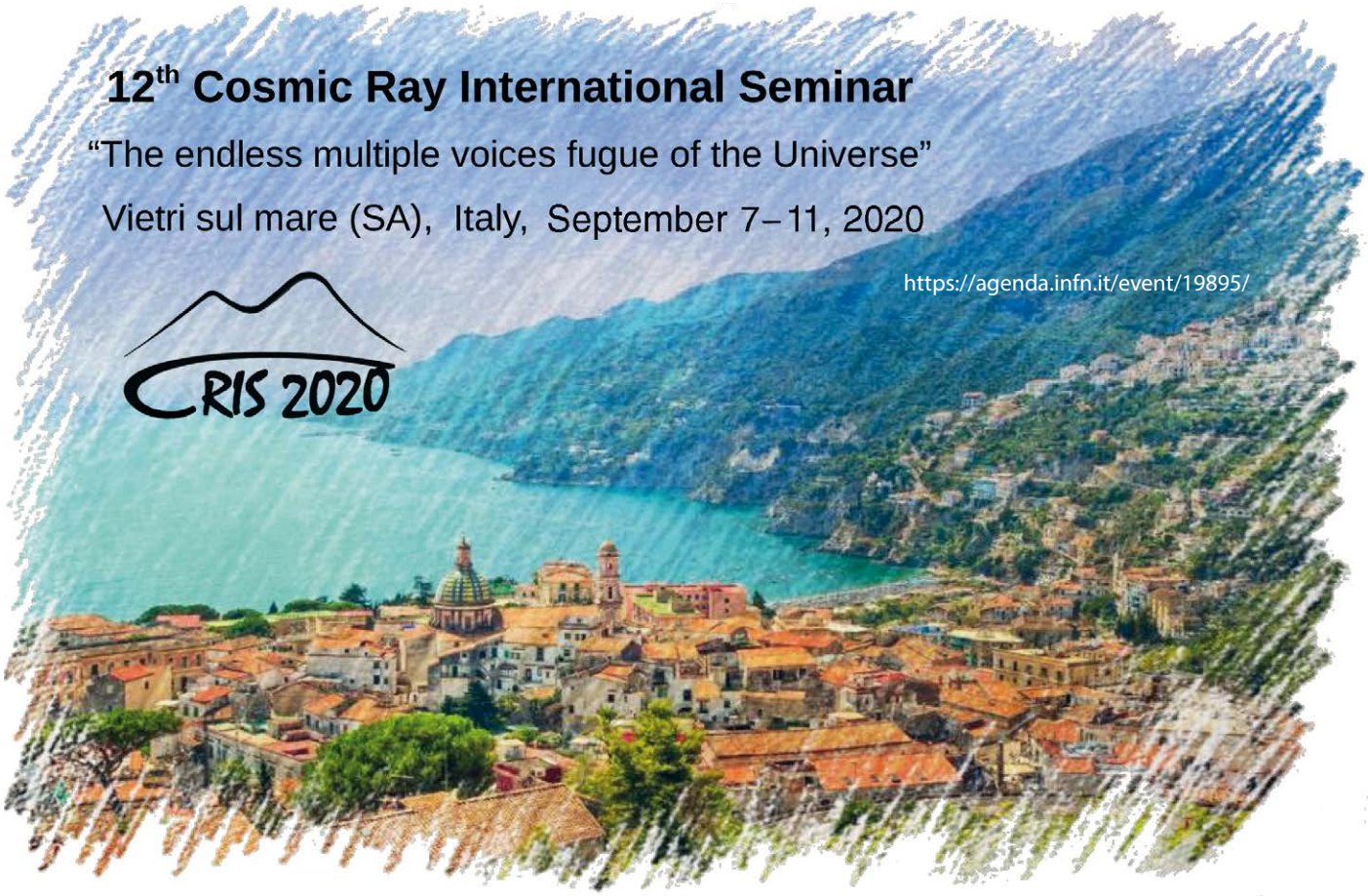
H. Sakurai *et al., Prolonged production of ^{14}C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings*, Sci. Rep., 10 (2020) 660.

In this study, to elucidate the rapid increase in ^{14}C concentrations in tree rings around 660 BCE, we have precisely measured the ^{14}C concentrations of earlywoods and latewoods inside the annual rings of Japanese cedar for the period 669–633 BCE. Based on the feature of ^{14}C production rate calculated from the fine measured profile of the ^{14}C concentrations, we found that the ^{14}C rapid increase occurred within 665–663.5 BCE, and that duration of ^{14}C production describing the event is distributed from one month to 41 months. The possibility of occurrence of consecutive SPEs over up to three years is offered.

Il Cedro di Choukai-Jindai da Sakurai *et al.* © 2020 Springer-Nature.

a cura di Alessandro Bettini

ANNUNCI


12th Cosmic Ray International Seminar
"The endless multiple voices fugue of the Universe"
Vietri sul mare (SA), Italy, September 7–11, 2020
https://agenda.infn.it/event/19895/
CRIS 2020

XXIII SIGRAV Conference
Urbino 21-25 Sept 20
SIGRAV
https://eventi.uniurb.it/sigrav2020/

IX International Geant4 School

October 5 - 9, 2020

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy

ISODARCO

since 1966 – Italian Pugwash Group

INTERNATIONAL SCHOOL ON DISARMAMENT AND RESEARCH ON CONFLICTS

60th Course

ADVANCING TECHNOLOGY, NUCLEAR WEAPONS SECURITY AND INTERNATIONAL STABILITY

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

A bumper-sized book with helpful careers advice, real-life case studies, as well as an extensive employer directory.

Download the free Physics World app today!

Available on the iPhone App Store

GET IT ON Google play

Read online at **physicsworld.com/careers**

DOMANDA DI ISCRIZIONE alla SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA
ITALIAN PHYSICAL SOCIETY MEMBERSHIP APPLICATION FORM 2020

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: a b
Address where Bullettin and Society communications are to be sent:

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 2020-2021-2022) JUNIOR Member under 30 (three year payment 2020-2021-2022)	€ 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 2020 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 2020-2021-2022)	€ 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 2020 della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

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

Data _____

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

sì ☐ no ☐

_____
Firma

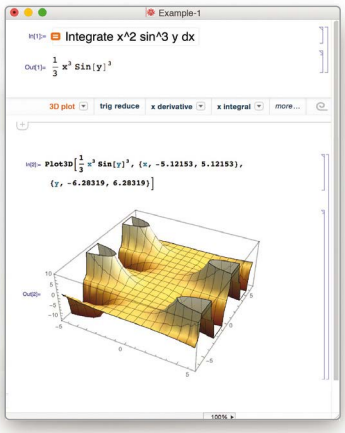
WOLFRAM MATHEMATICA

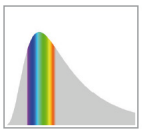
La soluzione definitiva per la ricerca

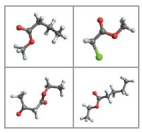
Partecipa ai seminari gratuiti!

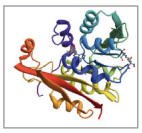
Mathematica integra la più grande collezione al mondo di algoritmi, capacità di calcolo ad alte prestazioni e un potente motore di visualizzazione in un sistema coerente e semplice da usare; ciò rende estremamente intuitivo, veloce ed economico il processo di creazione di modelli di calcolo personalizzati e per questo rappresenta lo strumento ideale per la ricerca di base ed applicata in ogni settore.

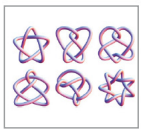
Mathematica ha accesso alle vastissime risorse di conoscenza Wolfram, che includono dati continuamente aggiornati e gratuiti in migliaia di differenti domini: fisica, chimica, biologia, matematica, ecc...Tutti i dati in Mathematica sono immediatamente calcolabili.



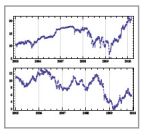

Physics data

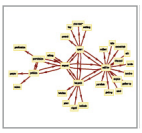

Chemical data


Biological & genomic data


Mathematical data

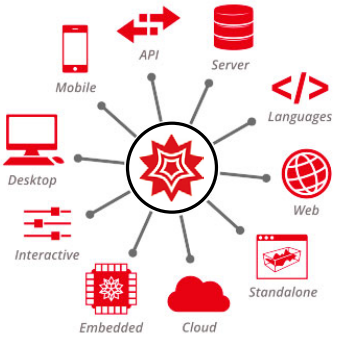
Geographic data


Current & historical financial data


Linguistic data

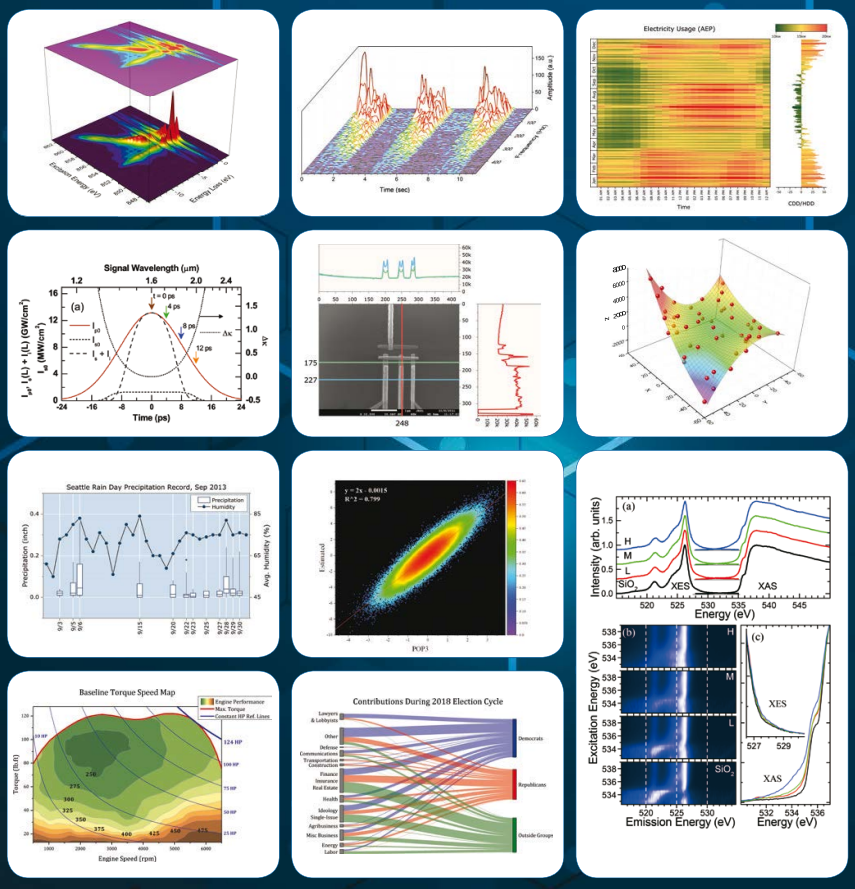
MATHEMATICA ONLINE

Il sistema Mathematica nell'ambiente cloud



Mathematica Online offre nel cloud la potenza di Mathematica e la versatilità dei Wolfram Notebook.
Consente di calcolare, visualizzare, programmare e creare documenti interattivi direttamente nel browser Web, senza richiedere installazione o configurazione; inoltre gli strumenti di collaborazione integrati permettono di condividere facilmente i propri progetti con colleghi in tutto il mondo.

ADALTA Distributore unico per l'Italia di Wolfram **www.adalta.it/Wolfram ▷**



ORIGINPRO® 2020b

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

Oltre 50 nuove funzionalità e applicazioni!

Origin Pro è lo strumento preferito da tecnici e scienziati per ottimizzare al meglio i dati:

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

Oltre 500.000 utenti registrati in tutto il mondo:

- Oltre 6.000 Aziende, di cui 20+ Fortune Global 500
- Oltre 6.500 Colleges e Università
- Oltre 3.000 Agenzie Governative e Laboratori di Ricerca

OriginLab®

25+ years serving the scientific and engineering community.

ADALTA Distributore unico per l'Italia di OriginLab **www.adalta.it/Origin ▷**

Lock-in Amplifier

… e molto altro, da DC a 600 MHz

a partire da

EUR 5.500

Ogni strumento include

- Analizzatore di spettro
- Oscilloscopio con FFT
- Acquisizione di immagini
- Interfaccia per Python, MATLAB®, .NET, C e LabVIEW®

Opzioni

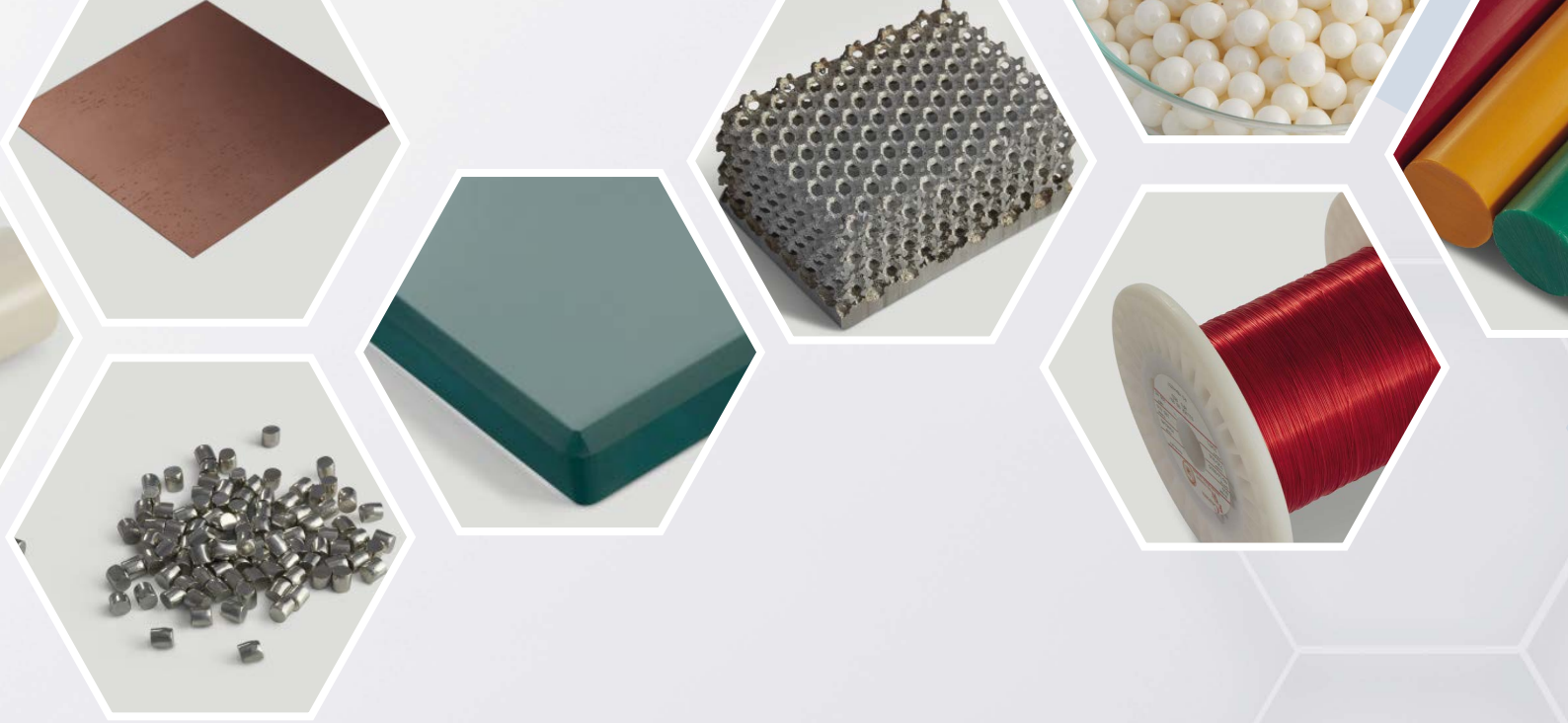
- AWG
- Analizzatori d'impedenza
- Boxcar PWA
- Controllore PID PLL

Applicazioni tipiche

- **Spettroscopia:** laser impulsati, THz, chopper, optical phase locking (oPLL)
- **Imaging:** AFM, sonde Kelvin, CARS, SRS, SNOM
- **Ricerca quantistica:** trappole ioniche, cQED, QDot, NV centers
- **Sensori:** MEMS, NEMS, giroscopi, sensori fotoacustici

Scopri più dettagli su
www.zhinst.com

Zurich Instruments



GoodFellow

Your global supplier for materials

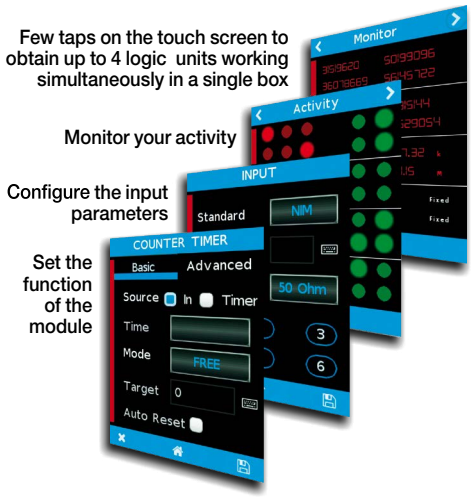
Rappresentata in Italia da PRODOTTIGIANNI
Our competence, your value.

www.ricerca.it | ricerca.assistenza@prodottigianni.com | 800 832 027

COINCIDENCE/
LOGIC/
TRIGGER UNITS

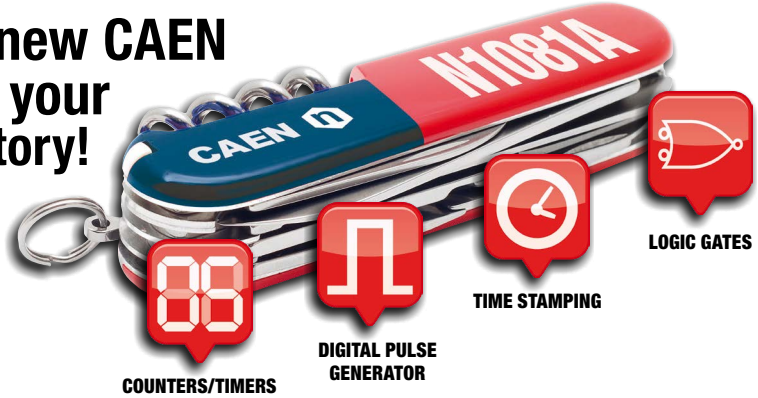
CAEN Electronic Instrumentation

The N1081A is a laboratory tool that incorporates in a single NIM module the most common functionalities that you need to enhance the logic capabilities of your experiment



- Wide range of user-selectable functionalities: Logic functions, Counting, Timing, digital pulse generator
- 4 independent sections, each with: 6 NIM/TTL input - 4 NIM/TTL output
- Configuration and control via touch screen display or remotely via web interface
- User-friendly widgets to configure each section, monitor real-time output data and access the online help

A new CAEN Tool in your Laboratory!



www.caen.it
Small details… Great differences