HANNO COLLABORATO A QUESTO NUMERO:

B. Ancarani, L. Andreani, R. Bacchi, S. Bardelli, V. Barone, G. Bellini, G. Benedek, E. Bertozzi, A. Bettini, A. Bracco, M. Branchesi, G. Caglioti, L. Cifarelli, E. Coccia, E. Dalla Bontà, S. De Silvestri, R. D'Souza, G. Gionti, G. Mana, A. Mennella, G. Pizzella, P. Randaccio, C. Riccardi, R. A. Ricci, G. C. Righini, M. Rinaldi, P. Tavella, C. Tuniz, P. Vitulo, D. S. Wiersma, A. Zichichi

IL NUOVO SAGGIATORE
BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 36 • N. 5 settembre-ottobre 2020 • N. 6 novembre-dicembre 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

5 **In memoria di Roberto Habel**
R. A. Ricci

IN EVIDENZA

7 **1960: The laser era begins**
G. C. Righini

SCIENZA IN PRIMO PIANO

17 **Why and how the Sun and the stars shine**
G. Bellini

FISICA E...

31 **Developing relevant measurement science and technology: The new system of units and the future of metrology**
D. S. Wiersma

PERCORSI

41 **The Specola Vaticana**
R. D'Souza, G. Gionti

51 **Augusto Righi and the intuition of the experiment**
E. Bertozzi

IL NOSTRO MONDO

61 **Cerimonia Inaugurale 106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica**

65 **The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2020**
S. De Silvestri, P. Tavella, G. Mana

70 **SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2020**
M. Branchesi

71 **I Fisici Italiani: un dizionario per cinque secoli di fisica**
B. Ancarani

72 **Facing the anthropocene**
C. Tuniz

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

News

82 **Il Premio Nobel per la Fisica 2020**
M. Rinaldi, E. Dalla Bontà

88 RECENSIONI(*)

89 IN RICORDO DI(*)
Horst Wenninger (A. Zichichi, A. Bettini, L. Cifarelli)
Nicolò D'Amico (E. Coccia)
Sergio Ratti (G. Bellini, C. Riccardi, P. Vitulo, L. Andreani)
Giorgio Trenta (R. A. Ricci)

90 SCELTI PER VOI

91 ANNUNCI

94 INDICI DI VOLUME 36

(*) 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, Cari Lettori,

come di consuetudine per l'ultimo editoriale dell'anno, anch'io intendo qui riportarvi alcuni commenti sulle attività svolte dalla SIF in questo mio primo anno di presidenza. È inutile ricordare che questo è stato purtroppo un anno "molto diverso" in quanto la pandemia del COVID-19 ha cambiato molto la vita di tutti noi e quindi anche della SIF e delle sue attività. In ogni caso, anche se con modalità diverse, il personale SIF e tutti noi abbiamo lavorato molto, spinti dal desiderio di andare avanti seguendo nel migliore dei modi la nostra missione. In particolare, per quanto riguarda l'editoria, l'attività è stata molto produttiva e ha seguito molto bene, nonostante l'uso della modalità "smart working", i piani precedentemente stabiliti. Inoltre come ben sapete, in quest'ambito la SIF, considerando che la navigazione su internet si è intensificata nei vari *lock down*, ha arricchito le sue offerte di lettura (o di visione per i filmati) dal proprio sito web.

Al contrario delle attività editoriali, le altre attività SIF hanno invece subito o cancellazioni o sono state condotte sfruttando gli strumenti telematici, che hanno permesso di perseguire totalmente o in parte gli obiettivi previsti. Per quanto riguarda le riunioni internazionali, organizzate da EPS, EPJ, APS e altri, la SIF ha sempre partecipato attivamente a tutte quelle in cui era richiesta la sua presenza. Tuttavia, ci è mancato molto lo scambio di idee e di impressioni informali che solitamente hanno luogo durante le pause caffè o le cene. Questo perché spesso è proprio attraverso questo scambio di informazioni che nascono idee nuove e si rafforzano le collaborazioni. Uno dei punti spesso in agenda in queste riunioni telematiche è stato la presentazione delle esperienze di lavoro in questo difficile periodo.

Abbiamo fatto sentire la nostra voce su questioni riguardanti la didattica e il finanziamento della ricerca. Per la didattica la SIF ha inviato, all'Agenzia Nazionale di Valutazione del Sistema Universitario e della Ricerca e al Consiglio Universitario Nazionale, una lettera sulla revisione delle classi di laurea. L'obiettivo è di sostenere la richiesta che tutti i settori scientifici disciplinari siano considerati tutti indistinguibili per le attività formative negli ambiti di base della "Classe di Laurea".

Per quanto riguarda la ricerca abbiamo sostenuto un appello sul suo finanziamento, partito da un intervento di Ugo Amaldi alla Consulta scientifica del Cortile dei Gentili, presieduta da Giuliano Amato. In quell'occasione è stato presentato un piano per rilanciare la ricerca di base e applicata, piano inteso a costruire una società più resiliente e che consentirebbe alle imprese di offrire professioni oggi impensabili. In questo contesto è importante ricordare un recente studio, commissionato dalla European Physical Society (`https://cdn.ymaws.com/www.eps.org/resource/resmgr/policy/eps_pp_physics_ecov5_full.pdf`), che stima che l'output economico delle industrie che usano le competenze sviluppate nell'ambito della ricerca e sviluppo (R&D) in fisica ammonta al 12% del totale per l'Unione Europea, cifra superiore ad alcuni settori ritenuti comunemente molto redditizi.

Abbiamo anche scritto una lettera, in parallelo ad un'altra da parte della EPS, ai nostri parlamentari europei per sollecitarli ad aumentare il finanziamento al programma Erasmus e alla ricerca in Horizon Europe. Inoltre, Luisa Cifarelli ed io siamo state invitate a firmare una lettera promossa da Luciano Maiani, apparsa sul Corriere della Sera il 2 ottobre, in cui si argomentano alcune solide motivazioni per dare un forte sostegno alla ricerca con l'utilizzo del Recovery Plan. A questa lettera è seguito un breve incontro per via telematica con il Presidente Conte e il Ministro Manfredi per illustrare quanto la ricerca abbia bisogno di finanziamenti maggiori e dell'assunzione di giovani ricercatori (`https://www.sif.it/news/812`).

Le cancellazioni nel 2020 dei corsi programmati della International School of Physics "Enrico Fermi" di Varenna ha implicato il loro spostamento al 2021, anno in cui si terrà anche la sesta edizione della "Joint EPS-SIF International School on Energy". Si sta pensando di utilizzare una modalità ibrida per queste scuole il prossimo anno, visto le condizioni attuali che ci fanno pensare alla impossibilità di tornare presto a comportarci come prima del COVID-19.

Per finire con una nota positiva ho lasciato come ultimo punto le mie riflessione sul nostro Congresso Nazionale del 2020. Questo perché questa nostra sfida di organizzarlo per via telematica ha dato dei risultati molto soddisfacenti.

La veste grafica della nostra piattaforma digitale è stata progettata per essere il più aderente possibile al formato del nostro Congresso. Voglio sottolineare che il Comitato Pari Opportunità (CPO) della SIF è stato molto attivo nella preparazione di questa piattaforma con due iniziative. Una è stata quella di dedicare le sette aule virtuali a sette scienziate donne e l'altra è stata quella di mettere a disposizione nel sito i video di parecchie interviste su come si è vissuto il periodo di COVID-19. Anche alcuni nostri sponsors, tra cui EPJ ma anche CAEN, hanno contribuito con dei video e altro materiale. Sulla pagina web della SIF è possibile reperire tutto quanto riguarda questo congresso incluso le relazioni presentate.

Ho parlato di sfida in quanto abbiamo gestito telematicamente lo svolgimento di 7 sezioni parallele, dell'Assemblea dei Soci e la consegna dei numerosi premi, tra cui il prestigioso Premio Fermi. Tutto questo presentava infatti delle incognite e ha richiesto un impegno molto diverso rispetto al passato. Il risultato è stato sorprendente e di soddisfazione infatti si sono avute più di 1400 registrazioni al Congresso, numero da confrontare con i circa 500 iscritti ai congressi in presenza. Sono state date 10 relazioni generali e 220 relazioni su invito, tutto questo con 135 ore di streaming. Abbiamo avuto anche tre relatori stranieri, all'interno della sezione organizzata congiuntamente con AISF (Associazione Italiana Studenti di Fisica), a parlarci di storia della fisica, di editoria scientifica e del futuro della ricerca in particelle elementari.

Anche le comunicazioni sono state molto numerose, circa 600, e tra queste circa 200 sono state selezionate per essere pubblicate su tre fascicoli de Il Nuovo Cimento dedicati al Congresso. Questa scelta è stata fatta prima di tutto per dare un segnale di riconoscenza all'entusiasmo mostrato dai partecipanti ma anche per tenerci un bel ricordo di questo "eccezionale" congresso. Il 107° Congresso SIF è previsto a Milano nel periodo 13-17 settembre 2021.

Il bilancio dell'anno, considerando in particolare le condizioni al contorno dettate dalla situazione attuale, è tutto sommato abbastanza soddisfacente. Ci sono mancati, come è ben comprensibile, i contatti diretti con la gente. Nel mio caso, avrei anche voluto trascorrere più tempo in presidenza e questo mi avrebbe permesso di apprezzare meglio e più da vicino la grande professionalità e il forte impegno del nostro personale.

A voi tutti i miei più sinceri e sentiti auguri per il 2021, che sia un anno veramente molto diverso dal 2020!

Presidente SIF

Dear SIF Members, Dear Readers,

as usual for the last editorial of the year, I also intend to express here some comments on the activities carried out by SIF in my first year of presidency. We are all aware that 2020 has been unfortunately a "very different" year since the COVID-19 pandemic has greatly changed the life of all of us and thus also that of SIF and its activities. In any case, although in different ways, the SIF staff and all of us have worked hard, driven by the desire to move forward following our mission in the best possible way. In particular, this activity has been very productive and has followed very well the usual plans, despite the use of "smart working". Furthermore, considering that internet navigation has intensified during lock down, the SIF has enriched its offers for reading (or viewing movies) from its website.

Unlike publishing activities, the other SIF activities were either cancelled or conducted using telematic tools, which have made it possible to pursue all or part of the intended objectives. As for the international meetings, organized by EPS, EPJ, APS and others, SIF has always participated actively in all those in which its presence was required. However, we have greatly missed the informal exchange of ideas and discussions that usually take place during coffee breaks or dinners. This is because very often through this exchange of information new ideas come up and collaborations are strengthened. One of the items occurring often in the agendas of these online meetings was the presentation of the work experiences during this difficult period.

We have raised our voice on issues related to education and to research funding. Concerning education, SIF sent a letter on the revision of the teaching organization to the National Evaluation Agency of Research and University and to the National University Council. The goal is to support the request that all sectors should be considered at the same level for education in the basic areas of the university degrees.

As far as research is concerned, we supported an appeal for its funding, which started with a presentation given by Ugo Amaldi at the scientific council of the Cortile dei Gentili, chaired by Giuliano Amato. On that occasion, a plan was presented to relaunch basic and applied research, a plan intended to build a more resilient society and which will allow industry to offer jobs that are unthinkable today. In this context it is important to recall a recent study, commissioned by the European Physical Society (`https://cdn.ymaws.com/www.eps.org/resource/resmgr/policy/eps_pp_physics_ecov5_full.pdf`), which points out that the economic output of industries that use the skills developed in research and development (R&D) in physics amounts to 12% of the total in EU, a figure higher than for some other sectors commonly considered very productive.

We also wrote a letter, in parallel with another one by EPS, to the Italian members of the European Parliament to urge them to increase funding for the Erasmus program and for research in Horizon Europe. Furthermore, Luisa Cifarelli and I were invited by Luciano Maiani to sign a letter, appeared in Corriere della Sera on October 2, giving solid reasons to strongly support research within the Recovery Plan. This letter was followed by a brief telematic meeting with the President Conte and Minister Manfredi to illustrate that research needs more funding and recruitment of young researchers (`https://www.sif.it/news/812`).

The cancellations in 2020 of the scheduled courses of the International School of Physics "Enrico Fermi" in Varenna implied their postponement to 2021, the year in which the sixth edition of the "Joint EPS-SIF International School on Energy" will also be held. We are thinking of using a hybrid mode for these schools next year, given the current conditions indicating the impossibility of returning soon to behave as before COVID-19.

To finish with a positive note, I left as a last point the comments on our National Congress of 2020. This is because our challenge of organizing it telematically has given very satisfactory results.

The graphic design of our digital platform was laid down to be as close as possible to the format of our congress. I want to underline that the SIF Equal Opportunities Committee (CPO) was very active in the preparation of this platform with two initiatives. One was to dedicate the seven virtual classrooms to seven female scientists and the other was to make videos of several interviews, available on the site, on how the COVID-19 period was experienced. Some of our sponsors, including EPJ, but also CAEN, have also contributed with videos and other material. On the SIF web page it is possible to find everything about this congress, including all presentations.

I used the word challenge since we managed to run telematically 7 parallel sections, the Annual Meeting of the SIF members, and the delivery of numerous awards, including the prestigious Fermi Award. In fact, all this had some unknowns and required commitments very different from those in the past. The result at the end was surprising and satisfying as there were more than 1400 registrations to the Congress, a number to be compared with the approximately 500 registered at the congresses in the other years. There were 10 plenary talks and 220 invited parallel talks, all with 135 hours of streaming. We also had three foreign speakers in the section organized jointly with AISF (Italian Association of Physics Students) on the history of physics, on scientific publishing and on the future of the elementary particle physics.

The short contributions were also very numerous, about 600, and among these about 200 were selected to be published in three issues of the Il Nuovo Cimento, dedicated to the Congress. This choice was made first of all to give a sign of gratitude to the enthusiasm shown by the participants but also to keep a good memory of this "exceptional" congress. The 107th Congress of SIF is scheduled in Milan in the period 13-17 September 2021.

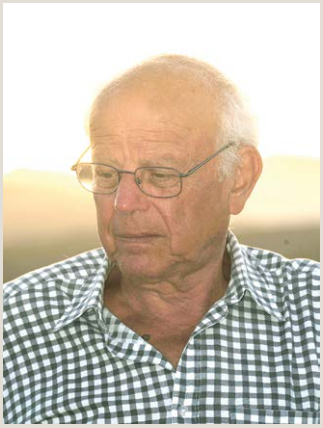
The general outcome of the year, considering the boundary conditions dictated by the current situation, is all in all quite satisfactory. We missed direct contact with people. In my case, I would also have liked to spend more time at the SIF headquarter and this would have allowed me to appreciate better and more closely the great professionalism and strong commitment of our staff.

To you all my most sincere and heartfelt wishes for 2021, may it be a very different year from 2020!

Angela Bracco
SIF President

Roberto Habel

Roma, 7 ottobre 1931 – San Teodoro (SS), 6 dicembre 2020



Nel dicembre di quest'anno è venuto a mancare il Professor Roberto Habel, Consigliere della Società Italiana di Fisica dal 1983 al 1994 e dal 1999 al 2007. Lascia nella SIF un profondo cordoglio.
Figura di notevole presenza e di profonda cultura tecnico-scientifica operò in vari settori della ricerca in Italia negli ultimi 3 decenni del secolo scorso, dagli esperimenti per la realizzazione di antenne per la ricerca di onde gravitazionali, alla analisi in remoto di inquinamenti ambientali, allo studio della radioattività ambientale e relativa divulgazione nelle scuole.

La notizia è giunta inaspettata. La notte del 6 dicembre si è spento Roberto Habel a seguito di un breve malore a San Teodoro (Sassari) dov'era da diversi mesi con la moglie Giuseppina. Aveva avuto problemi di salute all'inizio di questo anno ma se ne era rimesso apparentemente manifestando come suo solito il suo spirito simpatico e aperto a rapporti e comunicazioni affettuose e loquaci. Solo qualche giorno prima ci eravamo sentiti per telefono – ci sentivamo quasi ogni decina di giorni ("ciao Presidone", così era uso spesso interpellarmi) – scambiandoci le notizie e i commenti in questi ultimi tempi non sempre commendevoli e talvolta arguti sulle vicende di questo "annus horribilis" marcato da un virus subdolo sicario inviato da una natura tutt'altro che benigna e malamente affrontato da manifeste debolezze umane.

Scompare con lui un amico carissimo e un protagonista delle vicende scientifiche, sociali e culturali della comunità dei fisici italiani, cui ha dato contributi preziosi di indubbie capacità sperimentali e sano pragmatismo nell'affrontare i diversi problemi.

Di origini mitteleuropee da parte paterna (il padre era ungherese di Buda ed era rimasto in Italia dopo la fine della Grande Guerra che lo aveva visto fatto prigioniero degli italiani di cui però si fece concittadino rimanendo a Roma, a prigionia finita, e sposando una romana da cui ebbe due figli Gigliola e Roberto). Per questo io lo apostrofavo a volte con qualche battuta scherzosa di "austro-ungarico". Lui era tuttavia un romano doc di accento e di spirito. Tutt'altro che esibizionista ma fermo e sicuro nelle sue opinioni e nelle sue prese di posizione. L'essere franco e aperto tuttavia non gli impediva di essere spesso abbastanza schivo e di ridurre veramente all'osso la descrizione delle sue attività e dell'importanza delle stesse. Prova ne sia il fatto che, con i suoi figli ed alcuni suoi amici, tra i quali in particolare Orlando Ciaffoni, siamo riusciti a trovare le tracce di un possibile curriculum che, in realtà, è di grande rilevo. Egli stesso racconta di aver compiuto gli studi liceali presso il Collegio Santa Maria di Roma, di essersi laureato in Fisica presso La Sapienza e di essere "*entrato nel 1957 presso l'allora CNRN a far parte del gruppo che, sotto la guida di Giorgio Salvini, ha realizzato in Italia il primo grande acceleratore di particelle, l'Elettrosincrotrone da 1 GeV, contribuendo alla realizzazione del sistema di vuoto della macchina*". Impegnandosi poi, dopo l'entrata in funzione dell'acceleratore, nella parte tecnologica (optoelettronica per la realizzazione di rivelatori) fino a dare origine ad un Laboratorio Tecnologie di cui divenne responsabile ottenendo riconoscimenti sia dagli ambienti scientifici sia da quelli industriali, ed essere nominato consigliere scientifico del Dipartimento TIB dell'ENEA.

Nell'ottobre del 1987 è risultato vincitore di concorso per professore universitario di prima fascia prendendo servizio presso l'Università di Cagliari, ivi chiamato per iniziativa di Mario Ladu. Da allora la Sardegna divenne la sua seconda patria, se così si può dire (Pinni, così chiamava la moglie, è sarda di origine, sorella di Gianpaolo Murtas presso il quale Roberto l'aveva incontrata) e lascio parlare Paolo Randaccio che illustra in modo oltremodo efficace e comprensivo l'avventura cagliaritana di Roberto. Ne viene fuori una figura di notevole presenza e cultura tecnico-scientifica di rilevante impatto negli ambienti cui prestava la sua collaborazione. In effetti val la pensa di ricordare come a Frascati era divenuto una specie di jolly indispensabile per affrontare problemi tecnologici di non poco conto. Un esempio si trova nel periodo in cui si formò il Gruppo "Solidi di Roma" promosso da Gianfranco Chiarotti e Franco Bassani da quando negli anni '70 il tema della ricerca con la radiazione di sincrotrone si era spostato dagli atomi ai sistemi solidi. Roberto entrò a far parte del gruppo di ricerca e nel suo laboratorio si realizzarono i "flakes" nanometrici autosostenuti di carbonio e ossido di alluminio. Inoltre Roberto collaborò con A. Bianconi ed E. Burattini alla costruzione e al montaggio delle nuove linee di fascio di araldite. Tutte modifiche necessarie per la conversione della macchina.

Di queste sue doti diede prova per esempio anche negli esperimenti per la ricerca di onde gravitazionali con antenne, come racconta

Guido Pizzella e nel gruppo ROG lavorando insieme con Eugenio Coccia (è Eugenio stesso che me lo ricorda) sui trasduttori per le antenne gravitazionale al CERN e a Frascati. Personalmente mi preme ricordare, come egli stesso fa rilevare nel suo sobrio curriculum, la sua partecipazione alla collaborazione SIF-ENEA coordinata da Carlo Rubbia e da me, per la costituzione di un gruppo di studio internazionale (in particolare con colleghi tedeschi di Darmstadt, allo scopo di esaminare la fattibilità della proposta, avanzata da Rubbia, di un programma di Fusione a Confinamento Inerziale mediante ioni pesanti (alternativa al Confinamento Magnetico).

Roberto (Robbi per la famiglia e gli amici) è stato per anni un attivo adepto della SIF. Socio dal 1982, membro del Consiglio per 4 trienni dal 1983 al 1994 durante la mia presidenza e per altri tre dal 1999 al 2007 sotto la presidenza di Franco Bassani, ha portato contributi notevoli all'organizzazione e alle iniziative culturali e sociali della Società, in particolare nei rapporti con l'AIF e con le organizzazioni scolastiche. L'iniziativa relativa alla fusione, ad esempio, seguiva i risultati della nota Conferenza della SIF del 1987 su: "Energia, Sviluppo, Ambiente", alla cui organizzazione Roberto aveva collaborato e di cui, insieme con Stiptich, ha curato la pubblicazione nella collana dei "Rendiconti di Conferenze".

Per quanto riguarda le iniziative scolastiche è sufficiente citare quanto ne esemplifica Ritangela Bacchi nel suo commosso intervento.

Il progetto "Radioattività Ambientale" faceva parte delle iniziative promosse dalla SIF per l'anno mondiale della Fisica (2005) (coordinatori e rappresentanti ufficiali nell'ambito deli programmi internazionali dell'EPS, R. A. Ricci e R. Habel). Tali programmi e l'evoluzione delle varie iniziative sono descritti nell'editoriale a firma mia e di Roberto de *Il Nuovo Saggiatore*, Vol. 22 (2006) N. 3-4 con prospettive per il futuro tra cui alcune di rilievo derivanti dalle campagne nazionali organizzate da Roberto. In questo tipo di attività con impegno diretto sul campo Roberto era impareggiabile e rappresentava pienamente la figura di "fisico operaio" che a me capita a volte di richiamare in contrapposizione a quella di "fisico da salotto".

Queste sue qualità, insieme con una visione realistica dell'importanza dei problemi lo portarono ad aderire all'Associazione "Galileo 2001" per la libertà e la dignità della Scienza di cui fu valido collaboratore occupandosi in particolare del sito web. Inoltre negli anni 2000-2001 ha dato il suo contributo in sede istituzionale come membro del Comitato scientifico dell'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente) nel periodo in cui ne fui io Commissario.

Roberto lasciò il Consiglio della SIF nel 2007 ma fu ancora, come sempre, assiduo ai Congressi Nazionali anche per una particolare affezione non solo alla parte istituzionale e scientifica ma agli aspetti sociali, in particolare alle assemblee generali e ai programmi d'incontro e di escursione culturale (concerti, cene e gite sociali che sono sempre state motivi di importante riscontro di vita comunitaria). Mi vengono alla mente inoltre i programmi per accompagnatori che vedevano sempre presenti Pinni Habel con Carla Focardi, a volte anche con mia moglie Claudine. Con i Focardi, gli Habel avevano un rapporto di grande amicizia e questo aveva portato Roberto a condividere per un certo tempo i tentativi sperimentali di Sergio ed altri per verificare la riproduzione di effetti di "fusione nucleare fredda" (il famoso, esperimento di Fleischmann e Pons del 1989). Com'è noto non vi furono effetti duraturi riscontrabili nelle molteplici e varie verifiche tentate nel seguito da vari laboratori e il pragmatismo di Roberto lo portò ad abbandonare tale sconcertante impresa.

L'accostamento a Sergio Focardi è dovuto anche perché, insieme con Pio Picchi e Andrea Taroni, condivisero il rapporto simpatico e affettuoso ma pieno di mutuo rispetto e di grande collaborazione con lo staff della SIF. Essi inoltre erano, per me almeno, i superstiti di una specie di vecchia guardia degli anni '80 della SIF, ormai tutti scomparsi.

Negli anni seguenti Robbi è stato ancora presente in collaborazioni importanti di largo respiro quale, nell'ambito di un gruppo di supporto Frascati-Cagliari con O. Ciaffoni, M. Cordelli e I. Trasatti, l'esperimento NEMO dell'INFN avente lo scopo di realizzare un prototipo di telescopio Cherenkov sottomarino per la rivelazione di neutrini di altissima energia (il famoso km cubo, sito prescelto al largo di Capo Passero, in Sicilia, a 3500 metri di profondità). Qui Roberto portò la sua esperienza tecnologica a supporto della realizzazione di sensori per dati oceanografici (PORFIDO) e per misure di attenuazione di lunghezze d'onda di luce in acqua di mare (NERONE) necessarie per l'uso di moduli ottici.

Come si vede, anche se non eccessivamente appariscente, la sua attività fu senz'altro di prim'ordine, e certamente condivisa con la sua "caratura" umana che lo ha sempre portato a dare grande importanza agli affetti familiari e ai rapporti di amicizia. Rapporti che non erano certo di forma ma di sostanza.

Per questo il cordoglio per la sua perdita è grande così come l'abbraccio a Pinni e ai figli Cristina, Alessandro, Carolina, Emanuela e ai numerosi nipoti. Addio Robbi!

Renato Angelo Ricci
INFN, Laboratori Nazionali di Legnaro
Presidente Onorario SIF

I ricordi di P. Randaccio, G. Pizzella e R. Bacchi si trovano online:
`https://www.sif.it/riviste/sif/sag/ricordo/habel`

© 2020 HRL Laboratories, LLC, with permission

1960: THE LASER ERA BEGINS

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

On 16 May 1960, in the Hughes Research Laboratories in California, the first laser – a pulsed ruby laser – was fired by Ted Maiman and collaborators, and a coherent red-light beam @ 694.3 nm wavelength came out from the new device, opening a new era in the fields of optics and electronics. Here, a very short review is presented of the events in the 20th century that, starting from the Planck and Einstein theories, led to the discoveries of masers and lasers. As Charles Townes, one of the protagonists of that history, said: "Something like the laser development does not come from an isolated idea, but from a scientific milieu, curiosity, struggles and puzzles, and from many different people."

60 ANNI FA INIZIAVA LA STORIA DEL LASER

Sessanta anni fa, il 16 maggio 1960, l'accensione del primo laser ad opera di Theodore Maiman e del suo collaboratore Irnee D'Haenens [1] nei laboratori della Hughes Research Lab a Malibu, in California, segnò un punto di arrivo degli sviluppi teorici e sperimentali che dall'inizio del XX secolo avevano progressivamente fatto chiarezza sui fenomeni di assorbimento ed emissione di fotoni da parte di un materiale. "*Something like the laser development does not come from an isolated idea, but from a scientific milieu, curiosity, struggles and puzzles, and from many different people*" ha sottolineato anche uno dei grandi protagonisti della storia del laser, Charles Townes, nell'introduzione al suo libro autobiografico "*How the laser happened: adventures of a scientist*" [2].

L'obbiettivo di questo breve articolo è di ripercorrere velocemente gli anni del secolo scorso, e in particolare il ventennio 1940-1960, in cui molti scienziati lavorarono su quegli aspetti teorici e tecnologici che portarono alla dimostrazione sperimentale del funzionamento del laser. Funzionamento che qui non è approfondito, e per il quale si rimandano gli interessati alla lettura di uno dei moltissimi testi scientifici dedicati.

Il punto di partenza è indubbiamente il lavoro pubblicato da Albert Einstein "Zur Quantentheorie der Strahlung" (*On the quantum theory of radiation*), apparso nel 1916 negli atti della Società di Fisica di Zurigo e nel 1917 su *Physikalische Zeitschrift* [3]. Nella prima parte dell'articolo, Einstein presenta un modo nuovo ed elegante di ottenere la legge di Planck (sulla quantizzazione dell'energia elettromagnetica emessa da un corpo) e introduce per la prima volta il concetto di emissione stimolata, aggiungendolo ai già familiari concetti di emissione spontanea e di assorbimento indotto: proprio questo fenomeno sarà, più avanti, utilizzato per teorizzare il funzionamento del laser. Da notare, come curiosità, che Einstein

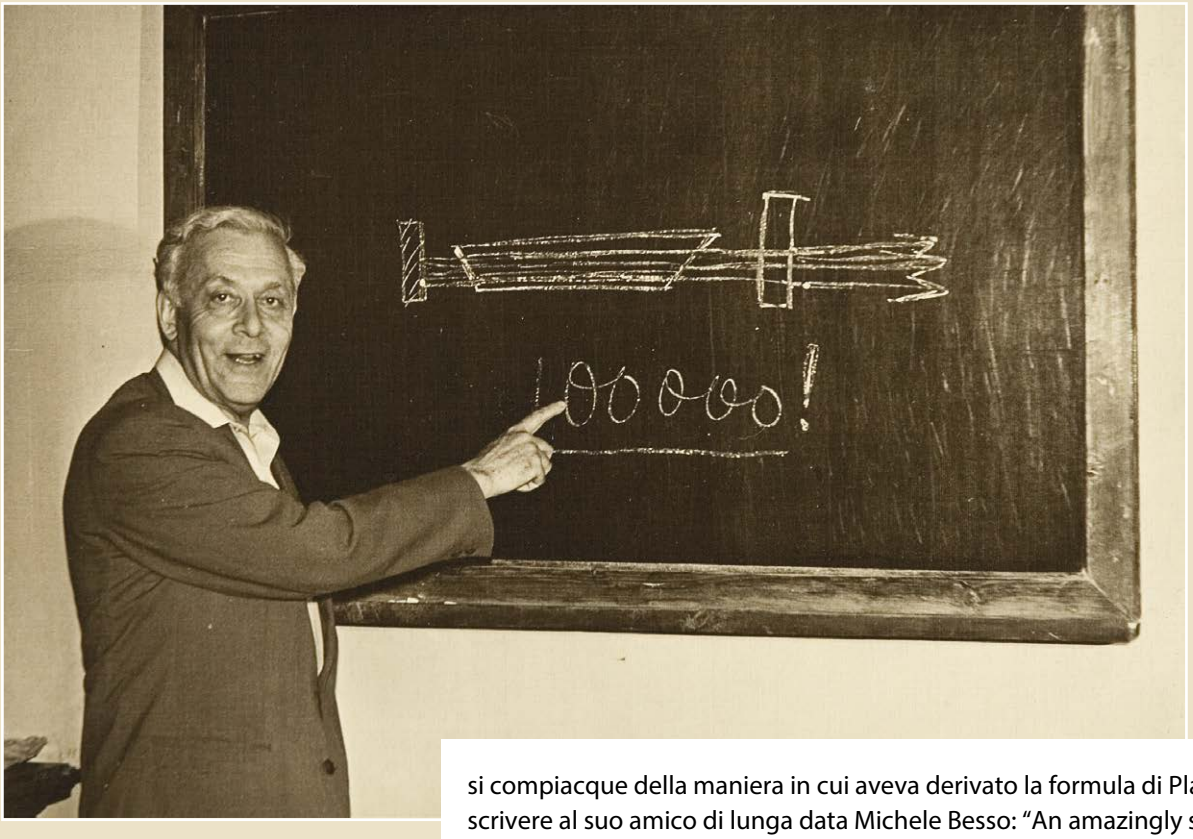


Fig. 1 Valentin Fabrikant (intorno al 1960). Riprodotta da [5] con il permesso dell'autrice.

si compiacque della maniera in cui aveva derivato la formula di Planck, tanto da scrivere al suo amico di lunga data Michele Besso: "An amazingly simple derivation of Planck's formula, I should like to say *the* derivation" [4].

1 L'emissione stimolata (o assorbimento negativo)

Probabilmente un motivo per cui il fenomeno dell'emissione stimolata (cioè del processo per cui un fotone, interagendo con un atomo che ha elettroni in uno stato di alta energia, induce uno di questi elettroni a decadere a un livello di energia più bassa emettendo un fotone supplementare con fase, frequenza, polarizzazione e direzione uguali a quelli del fotone incidente) non suscitò subito grande interesse fu che, in base alla legge di distribuzione di Boltzmann dell'energia (che lo stesso Einstein aveva utilizzato nei suoi lavori), esiste una probabilità molto bassa di avere, all'equilibrio termico, un numero elevato di atomi nello stato eccitato e maggiore di quelli nello stato fondamentale (la cosiddetta "inversione di popolazione"). Era quindi logico ritenere che l'effetto di emissione stimolata (o di "assorbimento negativo", come veniva spesso chiamato), anche se ottenuto, fosse quantitativamente trascurabile. Negli anni '20 del XX secolo diversi fisici, anche di grandissimo livello, come il tedesco Rudolf W. Ladenburg (1882-1952), l'olandese Hendrik A. Kramer (1894-1952), gli inglesi Paul A. M. Dirac (1902-1984; premio Nobel per la fisica nel 1933) e Edward A. Milne (1896-1950), gli americani John A. Van Vleck (1899-1980; premio Nobel per la fisica nel 1977) e Richard C. Tolman (1881-1948), discussero nei loro lavori il fenomeno dell'assorbimento negativo, senza tuttavia intravederne applicazioni pratiche. Anche Ladenburg, che, intorno al 1928 aveva dato una prova sperimentale, sia pure indiretta, dell'emissione stimolata in un gas, non andò oltre.

Una pietra che avrebbe potuto essere importante per un più veloce sviluppo del laser come dispositivo in grado di amplificare una radiazione ottica fu posta negli anni 1939-1940 da un fisico russo, Valentin A. Fabrikant (fig. 1), il quale nel 1939 sottopose al Lebedev Institute in Mosca una tesi "dottorale" per

conseguire una qualifica equivalente a professore ordinario, che fu poi pubblicata nel 1940 negli Atti del Vserossiysky Elektrotekhnichesky Institut (VEI – Istituto Elettrotecnico di tutte le Russie), a cui Fabrikant afferiva [6]. Il titolo della tesi era "The emission mechanism of a gas discharge", e una sezione era intitolata "On experimental evidence for the existence of negative absorption"; lì, Fabrikant osservò che era possibile scegliere le condizioni per ottenere l'inversione di popolazione tra i livelli eccitati di un gas e il livello fondamentale, forzando il sistema fuori dell'equilibrio termico, e concluse "*In such experiments, we will obtain the intensity of output radiation exceeding that of the incident, so we may speak about direct experimental proof of the existence of negative absorption*."

Purtroppo, i dati e le conclusioni di questa parte della tesi non ebbero alcuna ripercussione in Unione Sovietica; anzi, è da notare che lo stesso Fabrikant, almeno sul momento, ne sottovalutò enormemente la portata, tanto è vero che nel quinto capitolo della tesi, in cui riassumeva i principali risultati, non citò l'assorbimento negativo [5]. Tuttavia, non dimenticò l'argomento e, alla fine della guerra, nel 1945, riprese il lavoro sperimentale presso il Laboratorio delle nuove sorgenti di luce del VEI, cercando di utilizzare l'emissione stimolata per ottenere amplificazione ottica. I risultati ottenuti con i collaboratori M. M. Vudynsky and F. A. Butaeva li portarono a sottomettere, nel 1951, una richiesta di brevetto dal titolo "Metodo per l'amplificazione di radiazione elettromagnetica (bande d'onda ultravioletta, visibile, infrarossa e radio)". Come possibile mezzo attivo indicarono vapori di cesio con impurità, e proposero sia il pompaggio ottico che quello da scarica elettrica nel gas. Il brevetto, però, rimase coperto dal segreto di stato fino al 1958, e solo nel 1959 divenne di pubblico dominio con la pubblicazione nel Bollettino delle invenzioni. Nel frattempo, però, molte altre idee erano nate e si erano sviluppate nei paesi occidentali, e in particolare negli Stati Uniti, per cui il contributo originale di Fabrikant è rimasto a lungo in ombra e rivalutato solo recentemente. Rimane soltanto da dire che negli studi ed esperimenti di Fabrikant non emerse mai l'idea di inserire l'amplificatore ottico in una cavità risonante (passo necessario per ottenere l'azione laser), anche se nella domanda di brevetto appare questa dichiarazione, che potrebbe essere considerata un passo verso l'uso di un risonatore: "*Amplification coefficient increases abruptly with increasing layer thickness L, therefore it is profitable to use recurrent beam propagation through the same layer*" [5].

L'esistenza di processi per l'inversione di popolazione tra livelli di energia in un atomo e quindi per l'assorbimento negativo veniva intanto confermata anche in esperimenti di assorbimento magnetico nucleare; esiste, ad esempio, un breve articolo di Edward M. Purcell e Robert V. Pound su *Physical Review* nel 1951, con la prova sperimentale di emissione stimolata di onde radio a 50 kHz. Anche in questo caso, nessuno pensò di andare oltre e utilizzare il metodo di inversione di popolazione per sviluppare un dispositivo amplificatore; certamente un limite del metodo di Purcell e Pound era di creare solo inversioni transienti.

2 Il MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Negli stessi anni '50, intanto, molti fisici e ingegneri elettronici, approfittando del surplus post-bellico di apparati radar di alta precisione, in particolare in Inghilterra e negli Stati Uniti, stavano approfondendo gli studi sui dispositivi a microonde e sull'interazione microonde-materia. (Nota: Il termine microonde (microwaves) per la radiazione elettromagnetica con frequenze intorno a 10^9–10^{10} Hz era comparso per la prima volta in un articolo del 1932 di Nello Carrara, che allora lavorava presso il Regio Istituto Elettrotecnico e delle Comunicazioni, all'interno dell'Accademia Navale di Livorno [7].)

Negli Stati Uniti, un grosso supporto a queste ricerche venne dato dai finanziamenti militari, mirati allo sviluppo della neonata elettronica allo stato solido (il primo prototipo funzionante del transistor era stato realizzato nel dicembre 1947), di apparati radar (sorgenti e rivelatori) leggeri e compatti, e di sistemi di comunicazione sicuri a breve raggio. Per avere un'idea degli investimenti, tra il 1948 e il 1956 il bilancio del Dipartimento della difesa (DoD) per la ricerca e sviluppo (includendo le infrastrutture per R&D) passò da 590 milioni di dollari a 2,6 miliardi [8]. Fu così che vennero a sovrapporsi gli interessi dei militari e dei ricercatori: in entrambi i casi, l'obiettivo era scendere a lunghezze d'onda millimetriche e sub-millimetriche, che potevano garantire una riduzione delle dimensioni dei dispositivi e una più elevata risoluzione spettroscopica. In campo scientifico, due pionieri della spettroscopia molecolare a microonde furono Walter Gordy presso la Duke University, a Durham, NC, e Charles H. Townes presso la Columbia University a New York City.

Townes, che aveva iniziato lavorando nei Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) su sistemi radar e spettroscopia a microonde, nel 1948 passò a insegnare alla Columbia University e nel 1950 divenne il direttore del Columbia Radiation Laboratory, che già si occupava di onde millimetriche. Una difficoltà negli esperimenti era legata alla poca disponibilità di sorgenti con ottime caratteristiche a lunghezza d'onda millimetrica. Townes ebbe due idee vincenti: utilizzare le molecole stesse per emettere la radiazione alla lunghezza d'onda voluta, e inserire le molecole in una cavità risonante. Così, insieme ai suoi collaboratori James Gordon e Herbert Zeiger, iniziò progettando di lavorare a 0,5 mm di lunghezza d'onda

con ammoniaca deuterata; presto, però, passò a 1,25 cm sfruttando l'emissione dell'ammoniaca gassosa perché a tale lunghezza d'onda era più facile costruire una cavità risonante efficiente e anche reperire tutti i componenti necessari. Il gruppo ottenne i risultati sperati, che furono pubblicati nel 1954 in una lettera su *Physical Review* [9] e nel 1955 in un articolo, sempre su *Physical Review*, che per la prima volta vide apparire l'acronimo maser – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation [10]. In questo secondo articolo Townes e colleghi, nel proporre il nuovo dispositivo, citarono, sia pure di sfuggita, una "independent proposal" di N. G. Basov e A. M. Prokhorov, pubblicata nel 1954 [11].

In Russia, infatti, Basov e Prokhorov erano arrivati, in maniera del tutto indipendente, alla stessa concezione del dispositivo oscillatore-amplificatore, che loro avevano chiamato "molecular generator". A differenza di Townes e di altri ricercatori americani, Basov e Prokhorov non erano stati motivati o influenzati dalla ricerca sui radar, ma avevano iniziato a lavorare sulla spettroscopia a radiofrequenza dietro suggerimento di S. I. Vavilov, fondatore e allora direttore dell'Istituto Lebedev [12]. La ricerca di un metodo per aumentare l'intensità delle righe di assorbimento, e quindi la risoluzione spettroscopica, li aveva portati già nel 1952 a mettere a punto la descrizione teorica di un sistema oscillatore in cui un fascio molecolare (come esempio avevano scelto il fluoruro di cesio) veniva iniettato in un risonatore, e a presentarla a una conferenza sulla spettroscopia a radiofrequenza. La conferenza, però, era "All-Soviet-Union", cioè con la partecipazione dei soli scienziati sovietici, e quei risultati rimasero ignorati in Occidente. Continuando il loro lavoro teorico, Basov e Prokhorov, in un lavoro sulla rivista *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* (*ZETF*) apparso nel febbraio 1955, proposero il modello a tre livelli per ottenere l'inversione di popolazione con pompaggio da un campo ad alta frequenza [13]. È da notare che proprio in quell'anno la casa editrice russa Nauka (Science) decise di pubblicare anche la traduzione inglese della rivista *ZETF*, poi nota come *JETP* (*J. Exp. Theor. Phys.*), e il lavoro di Basov e Prokhorov comparve, tradotto, nel primo volume in inglese di *JETP* [14].

A questo punto, il lavoro del gruppo russo comincia ad essere noto, e nell'aprile 1955 avviene anche un contatto personale tra Prokhorov e Townes, in occasione di una conferenza della Faraday Society a Cambridge, dove Townes ricorda che ebbero una interessante discussione [15]. Così, poco dopo, anche il gruppo di Prokhorov realizza un prototipo di maser usando l'ammoniaca, e non il fluoruro di cesio come inizialmente previsto.

In tema di risultati raggiunti indipendentemente (almeno così fu dichiarato), il sistema di inversione di popolazione a tre livelli, che sarà poi fondamentale per lo sviluppo del primo laser, fu concepito anche da Nicolaas Bloembergen, il cui articolo apparve su *Physical Review* nel 1956 [16], quindi dopo il lavoro russo. Sta di fatto che dopo il 1955 anche altri gruppi, sia negli Stati Uniti che in Russia, svilupparono i maser, sia a gas che a stato solido, e i cristalli di rubino (chimicamente, un ossido di alluminio contenente cromo) si rivelarono particolarmente efficienti come materiale attivo. L'applicazione più famosa dei maser a rubino rimane quella di A. Penzies e R. W. Wilson, che nel 1965 rivelarono la radiazione cosmica di fondo a circa 3 K usando un maser alla lunghezza d'onda di 7,35 cm, raffreddato alla temperatura dell'elio liquido, come amplificatore a microonde a bassissimo rumore: scoperta che valse loro il premio Nobel per la fisica nel 1978.

3 La strada verso il LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Torniamo al percorso di avvicinamento al laser: dopo la diffusione dei maser, i tempi erano maturi per pensare a realizzare un dispositivo analogo che emettesse a frequenze ottiche. Nel 1957, Townes, che era consulente dei Bell Labs sui maser, discusse con Arthur L. Schawlow, che lavorava ai Bell Labs ed era anche suo cognato, la propria idea di realizzare un maser ottico usando vapori di tallio posti in una "scatola" con pareti di vetro ed eccitati con una lampada al tallio. Schawlow ebbe l'idea di sostituire la cavità a parallelepipedo con una più semplice cavità a specchi piani paralleli (un risonatore Fabry-Pérot) che però avrebbe anche permesso di selezionare solo i modi che viaggiavano lungo l'asse della cavità. Dopo ulteriori discussioni e approfondimenti, il 30 luglio 1958 Schawlow e Townes decisero di presentare una richiesta di brevetto per conto della Bell Telephone Laboratories, intitolato "Masers and maser communication systems", il cui testo iniziava così: *This invention relates to the generation and amplification of infrared, visible, and ultraviolet waves, and more particularly to the generation and amplification of such waves by means of devices including media in which the stimulated emission of radiation occurs; devices of this type are now generally termed "masers"* [17]. Lo schema del laser presentato nel brevetto è mostrato in fig. 2.

Successivamente, sottomisero un articolo con la loro proposta teorica alla rivista *Physical Review*; quell'articolo fondamentale, con il titolo "Infrared and optical masers", apparve nel dicembre 1958 [18]. Naturalmente si misero a lavorare anche sperimentalmente, e iniziarono cercando di realizzare un laser che utilizzava come mezzo attivo i vapori di potassio, che potevano essere eccitati da una lampada al potassio oppure con una scarica elettrica; non ottennero però risultati positivi, in un caso perché l'intensità della lampada era troppo bassa e nell'altro perché era comunque bassa la riflettività degli specchi della cavità Fabry-Pérot. Da notare

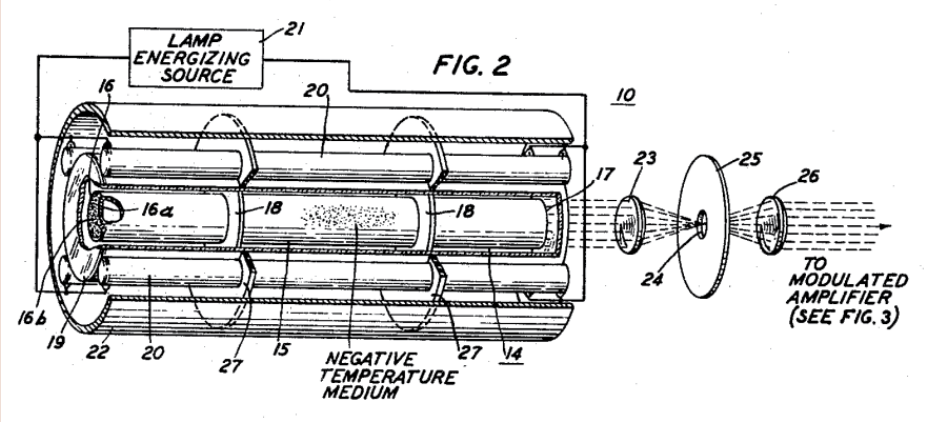
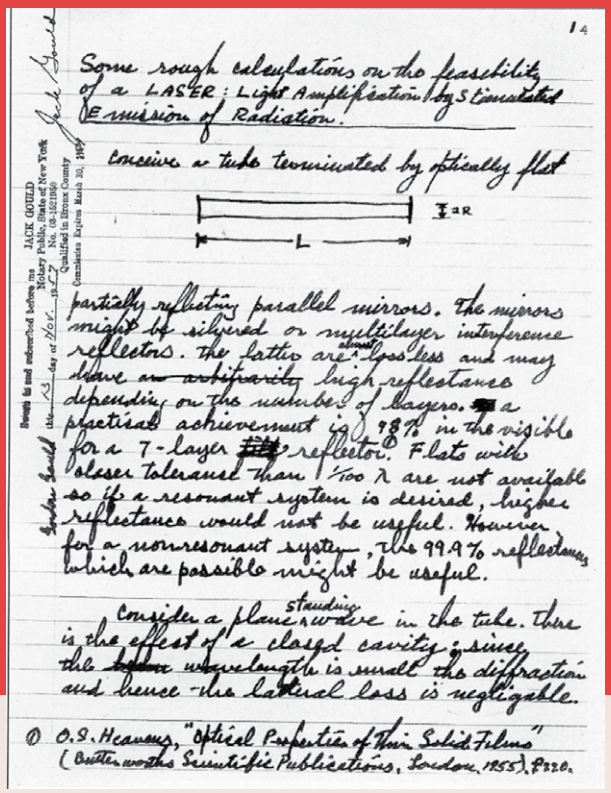


Fig. 2 Schema del laser nel brevetto US 2,929,922 depositato da Schawlow e Townes nel 1958. Il mezzo attivo (indicato come mezzo a temperature negativa, cioè capace di emissione stimolata) è un gas, contenuto in un cilindro trasparente (15) chiuso alle estremità da due facce piane parallele (16, 17). Come mezzo attivo, nel brevetto viene suggerito un gas (vapori di metalli alcalini o cloruri di terre rare), e l'eccitazione energetica avviene tramite lampade cilindriche (20) poste all'interno di un tubo cilindrico riflettente internamente (22). Il sistema di lenti e diaframma (23-26) è previsto per selezionare angolarmente un particolare modo di propagazione della cavità. Riprodotta da [17].


14

Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Consider a tube terminated by optically flat

R R

L

partially reflecting parallel mirrors. The mirrors might be silvered or multilayer interference reflectors. The latter are almost lossless and may have an arbitrarily high reflectance depending on the number of layers. A practical achievement is 98% in the visible for a 7-layer reflector. Flats with closer tolerance than λ/100 λ are not available so if a resonant system is desired, higher reflectance would not be useful. However for a nonresonant system, the 99.9% reflectance which are possible might be useful.

Consider a plane standing wave in the tube. There is the effect of a closed cavity, since the wavelength is small the diffraction and hence the lateral loss is negligable.

① O.S. Heavens, "Optical Properties of Thin Solid Films" (Butterworths Scientific Publications, London, 1955), p220.

Fig. 3 Copia della prima pagina del quaderno di laboratorio di Gordon Gould notarizzato il 13 novembre 1957. Nell'intestazione appare documentato per la prima volta il nome laser per il dispositivo fino ad allora chiamato maser ottico.

che anche Prokhorov aveva suggerito l'uso di un risonatore con specchi piani e paralleli, ma rimanendo nell'ambito dei maser, in un lavoro pubblicato nello stesso anno, a giugno 1958 [19].

Tornando un poco indietro, nel 1956 Townes era entrato in contatto con uno studente della Columbia University, Gordon Gould, che lavorava ad una tesi di dottorato con un altro docente e utilizzava potenti lampade al tallio per studiare le proprietà ottiche di vapori di tallio eccitati mediante pompaggio ottico. Townes ricorda [15] di avere chiesto a Gould informazioni sulle caratteristiche delle lampade al tallio e di avergli dato notizie sul progetto di maser ottico a cui stava lavorando. Gould, da parte sua, non cita Townes come fonte di informazioni utili e anzi ricorda che Townes stesso l'aveva invitato a dare un seminario sull'uso del pompaggio ottico in un maser [20]. Sta di fatto che, nel 1957, Gould riuscì a definire meglio il proprio progetto di un maser ottico e ritenne opportuno documentarne la priorità; così, si affrettò a far firmare dal proprietario di una drogheria, Jack Gould (curiosamente, con lo stesso cognome), che fungeva anche da notaio pubblico, le pagine del proprio quaderno di laboratorio, che iniziavano con il titolo "Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". La fig. 3 mostra la prima

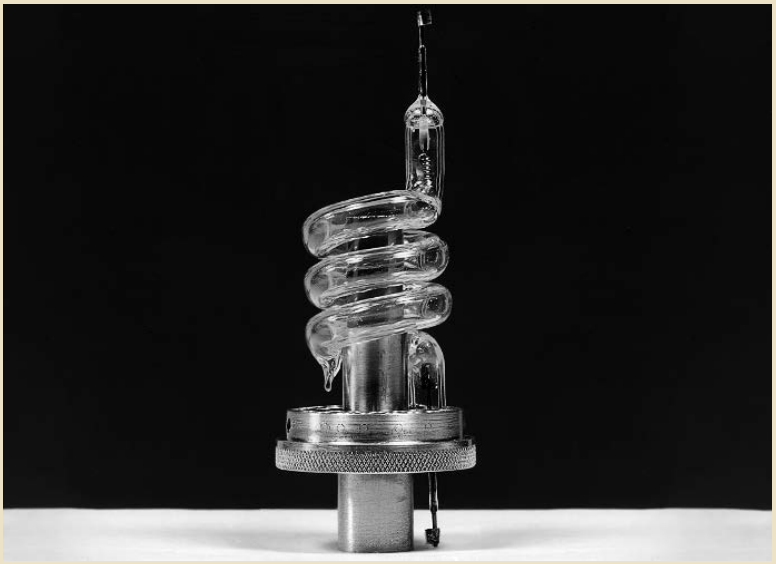


Fig. 4 Theodore Maiman con uno dei suoi primi laser (circa 1960). Nella foto a destra è visibile la barretta di rubino, all'interno della lampada elicoidale per il pompaggio ottico. (© 2020 HRL Laboratories, LLC, with permission).

pagina del quaderno con il timbro del notaio in alto a sinistra.

Era il 13 novembre 1957, e il nuovo dispositivo aveva ricevuto ufficialmente il suo nome: la parola "LASER" avrebbe rapidamente preso piede tra i ricercatori e sostituito la dizione "optical maser" usata da Townes e colleghi, i quali, comunque, per un po' cercarono di opporre resistenza al nuovo nome, inutilmente. Gordon Gould presentò una richiesta di brevetto nel 1959, rivendicando la priorità rispetto al brevetto del 1958 di Schawlow e Townes proprio sulla base di quel quaderno; dopo una lunga controversia, il brevetto fu concesso nel 1977 [21], e questo diede l'avvio a una ancor più lunga guerra legale per il riconoscimento dei diritti sui laser prodotti da varie aziende.

Comunque, nel 1959, mancava ancora la dimostrazione sperimentale del laser, e questa avvenne il 16 maggio 1960 ad opera di Maiman e collaboratori, utilizzando il pompaggio con lampada flash di un cristallo di rubino rosa sintetico. Maiman aveva cominciato lavorando, presso i laboratori di ricerca della Hughes Aircraft Company, allo sviluppo di un maser in banda X (3 cm), richiesto dai servizi per le comunicazioni dell'esercito USA (Army Signal Corps), e aveva adottato con successo il rubino come materiale attivo. Dopo i lavori teorici pubblicati da Schawlow e Townes sulla possibilità di maser ottici, anche Maiman si era impegnato ad ottenerne la dimostrazione pratica e aveva deciso di continuare a lavorare sul rubino, nella sua varietà rosa, cioè con una bassa concentrazione di cromo (circa lo 0,05% in peso), nonostante questo materiale fosse stato considerato non adatto da Schawlow. I calcoli di Maiman, invece, indicavano che con una intensa illuminazione nella banda di assorbimento del cromo nel verde sarebbe stato possibile ottenere una significativa inversione di popolazione: così, il dispositivo con cui ottenne l'emissione di impulsi di luce rossa era costituito da una barretta di rubino inserita all'interno di una lampada flash elicoidale, a sua volta posta dentro un cilindro con le pareti interne argentate, in modo da riflettere quasi tutta la luce della lampada sulla barretta (fig. 4). Il cilindretto di rubino aveva circa 1 cm di diametro e 2 cm di lunghezza, con le due faccette piane e parallele, lucidate e rese riflettenti con la deposizione di uno strato

d'argento: al centro di una delle due facce era stato praticato un forellino nel film di argento, e da lì uscì per la prima volta un fascio laser. Una curiosità, che può servire a non scoraggiare gli autori che si vedono rifiutare un articolo sottoposto a una rivista scientifica, è che Maiman preparò rapidamente un breve articolo sul risultato ottenuto e il 24 giugno 1960 lo inviò a *Physical Review Letters* (anche in considerazione che i lavori teorici di Townes erano apparsi su *Physical Review*), dove però venne rifiutato (ritenevano di avere già ricevuto troppi lavori sui maser). Maiman non si fermò per questo e inviò l'articolo alla rivista inglese *Nature*, dove apparve il 6 agosto 1960, con il titolo "Stimulated optical radiation in ruby" [22]. Alla Hughes, però, erano impazienti di pubblicizzare il successo della loro ricerca, che era anche stata condotta senza finanziamenti governativi, e, senza attendere la pubblicazione su una rivista scientifica, organizzarono una conferenza stampa per il 7 luglio 1960 presso l'Hotel Delmonico a New York (oggi convertito in un condominio residenziale e noto come Trump Park Avenue): il giorno successivo un articolo comparve sul *New York Times*, e da allora il laser continua ad essere citato in migliaia di articoli in tutti i giornali del mondo. La fig. 4 mostra Ted Maiman con uno dei suoi primi laser presentato ai fotografi; in realtà, il "vero" primo laser utilizzava una lampada più corta (immagine a destra), che però ai fotografi dell'ufficio stampa della Hughes non era sembrata abbastanza "fotogenica" [23, 24].

4 Le applicazioni del laser

Il testo del discorso di Maiman durante la conferenza stampa di presentazione del laser, in cui giustamente sottolineava che "…*its success marks the opening of an entirely new era in electronics*", (infatti sarebbe passato ancora molto tempo prima che si parlasse di *fotonica*) è disponibile negli archivi della Hughes Aircraft Company, ora HRL [25]. È molto interessante notare come Maiman avesse già chiari molti dei modi in cui il laser avrebbe cambiato lo sviluppo della scienza e tecnologia nel XX e XXI secolo; ecco le sue frasi e, in estrema sintesi, la situazione attuale corrispondente:

"*We will have an important new scientific tool for investigating properties of matter and for performing basic experiments of physics."*

Grazie alle spettroscopie laser (di assorbimento, di fluorescenza, Raman e Brillouin) sono state acquisite informazioni fondamentali su atomi, molecole e nuovi materiali; sorgenti laser ad alta intensità hanno permesso di studiare il comportamento nonlineare dei materiali, anche a livello dell'elettrodinamica quantistica; gli interferometri laser LIGO e VIRGO hanno permesso di rilevare la presenza di onde gravitazionali; le tecniche di raffreddamento laser hanno permesso di produrre sperimentalmente lo stato della materia noto come condensato di Bose Einstein; laser di altissima potenza possono rendere possibile la fusione nucleare; ….

"We should be able to project light into very high-intensity beams for space communications."

Un laser impulsato a Nd:YAG ha permesso la misura della distanza Terra-Luna con una precisione dell'ordine di 1 mm (su 384000 km!!); gli studi più avanzati di geodesia e geodinamica sono svolti grazie alle tecniche di inseguimento laser di satelliti, sotto il coordinamento dell'International Laser Ranging Service (ILRS); esperimenti laser con i satelliti, quali LARES (ASI), LAGEOS (NASA) e LAGEOS2 (ASI e NASA), hanno permesso di avere conferme della teoria della relatività generale; il futuro delle comunicazioni tra satelliti e per le missioni spaziali verso la Luna e Marte vedrà sempre di più l'uso di segnali laser; già oggi, EDSR (European Data Relay Satellite System) si basa su comunicazioni laser tra satelliti geostazionari per inoltrare informazioni da/a satelliti non geostazionari, veicoli spaziali, e stazioni a terra che altrimenti non potrebbero avere la capacità di comunicazione ininterrotta; ….

"We are shown the way to enormous increases in the present number of available communications channels."

La rivoluzione delle comunicazioni terrestri via internet è stata resa possibile dallo sviluppo dei sistemi di comunicazione su fibra ottica, che utilizzano laser a semiconduttore e amplificatori ottici che lavorano principalmente nel vicino infrarosso, alla lunghezza d'onda di 1,5 micron; ad aprile 2020, nel corso della conferenza OFC (Optical Fiber Communications) a San Diego, i ricercatori del NICT (National Institute for Communications Technology, Japan) hanno presentato il risultato record di trasmissione di 172 Tbit/s su una distanza di oltre 2000 km utilizzando una singola fibra con diametro standard di 125 micron, ma avente tre "cores" (canali di propagazione guidata) – si può ricordare che al tempo di Maiman con un cavetto telefonico (doppino) ottimizzato non si andava oltre 500 Mbits/s su una distanza massima di un centinaio di metri; a livello spaziale, ormai si parla di "SpaceDataHighway": i due satelliti EDSR lanciati nell'ambito di un progetto congiunto tra l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e la compagnia Airbus, grazie alla tecnologia laser di ultima generazione permettono trasferimenti dati sicuri a velocità 1,8 Gbit/s quasi in tempo reale, e il primo satellite, operativo dal 2017, ha già scaricato quasi due petabytes di dati, con una disponibilità del 99,5%; ….

"The possibilities are very real for utilization of high light concentration for industrial, chemical and medical purposes."

Quanto alle applicazioni industriali, chimiche e mediche che prospettava Maiman, oggi esiste soltanto l'imbarazzo

della scelta: dai sistemi automatizzati per il taglio e la saldatura di materiali metallici o plastici con laser ad alta potenza ai sistemi con laser a impulsi ultracorti (femto- e attosecondi) per microlavorazioni o per studiare la dinamica ultraveloce di processi fisici e chimici, fino alla varietà di applicazioni chirurgiche e terapeutiche rese possibili dai diversi tipi di laser. A titolo di esempio, tra le innovazioni più recenti in campo biomedico, possono esserne citate due, di tipo molto diverso: a luglio 2020 è stata lanciata la nuova generazione della piattaforma brevettata MOSES (Lumenis Ltd) basata su laser a olmio e fibra ottica per migliorare notevolmente l'efficienza degli interventi chirurgici per calcoli urinari e ingrossamento della prostata; a giugno, un gruppo della Leigh University ha ottenuto una potenza record (2 W) su un singolo modo spettrale da una matrice di laser plasmonici a cascata quantica che emettono a 3,3 THz [26], con grande potenziale per la rivelazione di varie specie chimiche e biomolecolari, e anche per ottenere in maniera non invasiva immagini di alcuni tipi di tessuti biologici.

E naturalmente oggi il laser è in prima linea contro COVID19, permettendo di ideare test per il riconoscimento dell'infezione in tempi molto brevi, minuti o addirittura secondi, rispetto ai test con tamponi nasali o faringei che richiedono ore; un sistema molto interessante è stato sviluppato dai ricercatori del QuantLase Imaging Lab in Abu Dhabi (UAE – Emirati Arabi Uniti). Il loro metodo, basato sull'analisi delle figure di diffrazione causate dallo scattering e interferenza della luce laser incidente sui globuli rossi di un campione di sangue (tecnologia DPI – diffractive phase interferometry), può dare il risultato in meno di un minuto. Un algoritmo di calcolo, che utilizza anche l'intelligenza artificiale, permette di identificare il particolare tipo di virus in base alle caratteristiche della figura di diffrazione. Il test è stato utilizzato su 6000 campioni forniti dalle autorità governative UAE e ha raggiunto una accuratezza dell'85-90%, tanto che dal 14 luglio 2020 è stato ufficialmente autorizzato dal Ministero della Salute e Prevenzione dell'UAE e che il governo dell'UAE ha disposto che chi vuole entrare nell'emirato di Abu Dhabi deve essere sottoposto a controllo COVID19 mediante questo test [27].

Vi sono, ovviamente, anche alcune applicazioni del laser che Maiman non ha citato nella sua lista: una di esse è stata l'olografia, cioè la registrazione (e ricostruzione) di immagini tridimensionali resa possibile dalle proprietà di coerenza spaziale e temporale del laser. La tecnica olografica era stata concepita da Dennis Gabor nel 1948 (per questo fu insignito del premio Nobel per la fisica nel 1971) cercando di migliorare la risoluzione del microscopio elettronico, ma rimase praticamente inutilizzata finché divennero disponibili le sorgenti laser. Così l'olografia esplose negli anni '60, anche grazie alle nuove tecniche di registrazione laser introdotte in particolare dagli americani Emmett Leith e Juris Upatnieks e dal russo Yuri Denisyuk. Oggi, diodi laser combinati con un ologramma generato da computer aprono la strada alla proiezione di immagini tridimensionali a colori da parte di un minuscolo dispositivo integrabile anche in uno smartphone [28].

Riassumendo, è certo che mai una definizione del laser si è dimostrata più sbagliata di quella che, volutamente ironica, sembra circolasse agli albori della sua storia: *È una soluzione in cerca di un problema*. Invece, è proprio anche (in alcuni casi, solo) grazie alla disponibilità del laser che molti problemi scientifici e tecnologici sono stati risolti e molte conquiste raggiunte.

5 I protagonisti della storia del laser

Tornando al breve excursus storico, e per concludere, dopo la dimostrazione presentata da Maiman l'attività sullo sviluppo di sorgenti laser venne intensificata in molti laboratori di ricerca e industriali, e già nel volgere di due anni nuovi sistemi laser furono presentati: il primo laser a gas e con emissione continua (Ali Javan e collaboratori, Bell Labs, dicembre 1960), il primo laser a Nd in vetro (Elias Snitzer, American Optical, 1961), il primo laser a diodo semiconduttore (Robert Hall, General Electric, 1962). E la storia degli sviluppi e delle applicazioni dei laser continua ancora oggi, grazie all'impegno di fisici, chimici e ingegneri nei laboratori accademici e industriali di tutto il mondo.

I principali protagonisti del periodo "aureo" 1950-1960 ebbero adeguati riconoscimenti, diretti o indiretti: Basov, Prokhorov e Townes condivisero il Nobel per la fisica nel 1964 (per il lavoro fondamentale nel campo dell'elettronica quantistica, che ha portato alla costruzione di oscillatori e amplificatori basati sul principio maser-laser) e Bloembergen e Schawlow quello nel 1981 (per il loro contributo allo sviluppo della spettroscopia laser – insieme a K. M. B. Siegbahn per la spettroscopia elettronica). Una foto di Schawlow e Townes, insieme all'altro premio Nobel Gabor, è mostrata in fig. 5.

Gould, che aveva spirito più imprenditoriale (il suo modello era Thomas Edison) e non si curava troppo dei riconoscimenti della comunità scientifica, diventò multimilionario alla fine della vittoriosa guerra sui brevetti riguardanti i laser (chi fosse interessato a saperne di più può leggere il libro "*Laser: The Inventor, the Nobel Laureate, and the Thirty-Year Patent War*" di Nick Taylor (Simon & Schuster, New York) 2000). Quanto a Maiman, colui che accese il primo laser rimase dispiaciuto di non essere stato considerato per il premio Nobel e, forse anche per questo motivo, arrivò a dichiarare che il Comitato per il Nobel aveva sbagliato e avrebbe dovuto assegnare il premio a Fabrikant. Comunque, continuò a lavorare nel campo della tecnologia laser, acquisendo altri brevetti e fondando più di una società; anche se non ottenne il premio

Fig. 5 I tre premi Nobel Arthur Schawlow, Dennis Gabor e Charles Townes (da sinistra a destra). La foto con molta probabilità si riferisce alla tavola rotonda su "The future possibilities in science and technology" organizzata nell'ambito del Congresso Annuale 1972 dell'Optical Society of America (San Francisco, 17-20 ottobre 1972). A quella tavola rotonda, di livello eccezionale, presieduta da Schawlow, partecipavano altri due premi Nobel per la Fisica, Luis W. Alvarez (1968) e Alfred Kastler (1966), e un premio Nobel per la Chimica, Gerhard Herzberg (1971). Crediti: AIP Emilio Segrè Visual Archives.

Nobel, ricevette numerosi riconoscimenti, tra cui il Premio Wolf per la fisica nel 1984, assegnato dalla Fondazione Wolf in Israele e considerato di prestigio inferiore solo al Nobel. Il suo personale punto di vista sull'epopea del laser è descritto nel libro "*The Laser Odyssey*" (Laser Press, Blaine WA, 2000).

Per citare i protagonisti più recenti nell'evoluzione dei laser e delle loro applicazioni alla fisica fondamentale e alla tecnologia ci si può riferire ai premi Nobel in Fisica degli ultimi due decenni; ben sette premi Nobel su venti sono stati assegnati per ricerche che direttamente o indirettamente sono legate alla fisica del laser e alle caratteristiche della luce emessa da un laser:

- Zhores I. Alferov e Herbert Kroemer (2000) "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics".
- Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle e Carl E. Wieman (2001) "for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates".
- Roy J. Glauber (2005) "for his contribution to the quantum theory of optical coherence".
- John L. Hall and Theodor W. Hänsch (2005) "for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique".
- Charles Kuen Kao (2009) "for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication".
- Serge Haroche e David J. Wineland (2012) "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems".
- Rainer Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne (2017) "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves".
- Arthur Ashkin (2018) "for the optical tweezers and their application to biological systems".
- Gérard Mourou e Donna Strickland (2018) "for their method of generating high-intensity, ultra-short optical pulses".

Non rimane quindi che chiedersi quando verrà assegnato il prossimo premio Nobel legato alla fisica e tecnologia del laser. Certamente sono numerosi nel mondo i gruppi che fanno ricerca di frontiera su questi temi e che aspirano a un riconoscimento prestigioso.

Bibliografia

[1] Interview of Irnee D'Haenens by Joan Bromberg on 1985 February 5, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics. www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5015.

[2] C. H. Townes, "*How the laser happened: adventures of a scientist*" (Oxford University Press, New York) 1999.

[3] A. Einstein, "*Zur Quantentheorie der Strahlung*", *Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft Zürich* (1916) N. 18; *Physikalische Zeitschrift,* 18 (1917) 121.

[4] A. Einstein, Doc. 250, *Collected Papers of Albert Einstein,* vol. 8 (CPAE).

[5] S. G. Lukishova, "*Valentin A. Fabrikant: negative absorption, his 1951 patent application for amplification of electromagnetic radiation (ultraviolet, visible, infrared and radio spectral regions) and his experiments*", *JEOS RP,* 5 (2010) 10045S.

[6] V. A. Fabrikant, "*The emission mechanism of a gas discharge*", *Trudy of VEI* (Proceedings of the All-Soviet-Union Electro-Technical Institute), *Electronic and Ion Devices,* 41 (1940) 236 (in Russian).

[7] N. Carrara, "*The Detection of Microwaves*", *Proc. IRE,* 20 (1932) 1615.

[8] J. L. Bromberg, "*The Laser in America 1950-1970*" (MIT Press) 1991.

[9] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, "*Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH_3*", *Phys. Rev.,* 95 (1954) 282.

[10] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, "*The Maser—New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer*", *Phys. Rev.,* 99 (1955) 1264.

[11] N. G. Basov, A. M. Prokhorov, "*Application of molecular beams for radiospectroscopic investigation of molecular rotational spectra*," *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* (*ZETF*), 27 (1954) 431 (in Russian).

[12] N. V. Karlov, O. N. Krokhin, S. G. Lukishova, "*History of quantum electronics at the Moscow Lebedev and General Physics Institutes: Nikolaj Basov and Alexander Prokhorov*", *Appl. Opt.,* 49 (2010) F32.

[13] N. G. Basov, A. M. Prokhorov, "*Possible methods of obtaining active molecules for a molecular oscillator*", *Zh. Eksp. Teor. Fiz.,* 28 (1955) 249 (in Russian).

[14] N. G. Basov, A. M. Prokhorov, "*Possible methods of obtaining active molecules for a molecular oscillator*," *Sov. Phys. JETP,* 1 (1955) 184.

[15] Interview of Charles Townes by William V. Smith on 1979 June 18 and 20, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4653.

[16] N. Bloembergen, "*Proposal for a New Type Solid State Maser*", *Phys. Rev.,* 104 (1956) 324.

[17] A. L. Schawlow, C. H. Townes, "*Masers and maser communication systems*", US Patent 2,929,922 (filed on July 30, 1958; issued on March 22, 1960).

[18] A. L. Schawlow, C. H. Townes, "*Infrared and optical masers*", *Phys. Rev.,* 112 (1958) 1940.

[19] A. M. Prokhorov, "*Molecular amplifier and generator for submillimeter waves*," *Sov. Phys. JETP,* 4 (1958) 1140 (*Zh. Eksp. Teor. Fiz.,* 34 (1958) 1658).

[20] https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4641-1 (ultimo accesso 1 ottobre 2020).

[21] G. Gould, "*Optically pumped laser amplifiers*", US Patent 4,053,845 (filed on August 16, 1974; continuation in part of Ser. No. 804,539, April 6, 1959; issued on October 11, 1977).

[22] T. H. Maiman, "*Stimulated optical radiation in ruby*", *Nature,* 187 (1960) 493.

[23] M. Bertolotti, "*Storia del laser*" (Bollati Boringhieri) 1999.

[24] https://www.hrl.com/news/2020/05/11/hrl-laboratories-celebrates-60th-anniversary-of-first-laser (ultimo accesso 1 ottobre 2020).

[25] https://www.hrl.com/about/laser/1960-Delmonico-Speech.pdf (ultimo accesso il 30 settembre 2020).

[26] Y. Jin, J. L. Reno, S. Kumar, "*Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode*", *Optica,* 7 (2020) 708.

[27] https://u.ae/en/information-and-services/justice-safety-and-the-law/handling-the-covid-19-outbreak/testing-for-covid-19 (ultimo accesso il 30 settembre 2020).

[28] Z. Huang, D. L. Marks, D. R. Smith, "*Out-of-Plane Computer-Generated Multicolor Waveguide Holography*", *Optica,* 6 (2019) 119.

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 senior all'Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara (IFAC CNR), dove è stato dirigente di ricerca. 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 presidente del comitato tecnico TC20 (*Photonic Glasses and Optical Fibers*) della International Commission on Glass. È socio benemerito della SIF e *fellow* di EOS, OSA, SIOF e SPIE.

WHY AND HOW THE SUN AND THE STARS SHINE

THE BOREXINO EXPERIMENT AT THE GRAN SASSO LABORATORIES REVEALS FOR THE FIRST TIME MECHANISMS THAT MAKE THE SUN AND THE STARS LIVE

GIANPAOLO BELLINI
Department of Physics, University of Milan and INFN, Milan, Italy

Since the early days of humanity, man, when looking at the Sun or contemplating the starry sky at night, has been wondering what those light were and how they were able to shine. Now, finally, we have the definitive answer to this millennial question of mankind. The answer came from a unique experiment that used the best existing probes, *i.e.* neutrinos, capable of bringing us information from the most prohibitive places, and was able to employ techniques that reached unprecedented radio-purity levels. So now we have the direct experimental evidence of the mechanisms that produce the solar energy as well as, extraordinarily, the energy of the massive stars, therefore practically of the Universe. This knowledge does not make our contemplation of the sky less emotional nor filled with less wonder than that of the primitive man, who perhaps was also quite frightened by this sight.

1 A bit of history

1.1 The solar neutrino problem

In the '70s of the last century, the solar neutrino saga, which at the beginning took the name of "solar neutrino problem", began. The Sun produces 99% of its energy through a nuclear fusion chain called pp cycle (see fig. 1a); five of the nuclear fusion reactions in this chain emit electron-flavored neutrinos. The first experiment (Homestake) that studied solar neutrinos using a radiochemical technique, which dates back to the '70s of the last century, found a deficit in the solar neutrinos flux by comparing the measured flux with the prediction by the John N. Bahcall's *Standard Solar Model* (SSM). A similar result was obtained later by the Gallex experiment, again using a radiochemical technique, at the Gran Sasso laboratory.

The problem of solar neutrinos was solved a few decades later by the Canadian experiment SNO which showed that the deficit was due to the reactions used by the two radiochemical experiments, which were triggered only by electron-flavored neutrinos, while the solar neutrinos change flavor, as a consequence of the oscillation phenomenon, in the travel between the production point within the Sun and the detector placed on Earth. The detection mechanism of this experiment was based on the Cherenkov effect in heavy water; similarly a Japanese experiment (Super-Kamiokande) used the Cherenkov effect but in pure water.

Both these experiments were required to set a threshold at ≈ 5 MeV (later reduced a little), very high compared to the solar neutrinos' energy, because the radiations from the natural radioactivity, present in the water or heavy water and in construction materials, conceal the

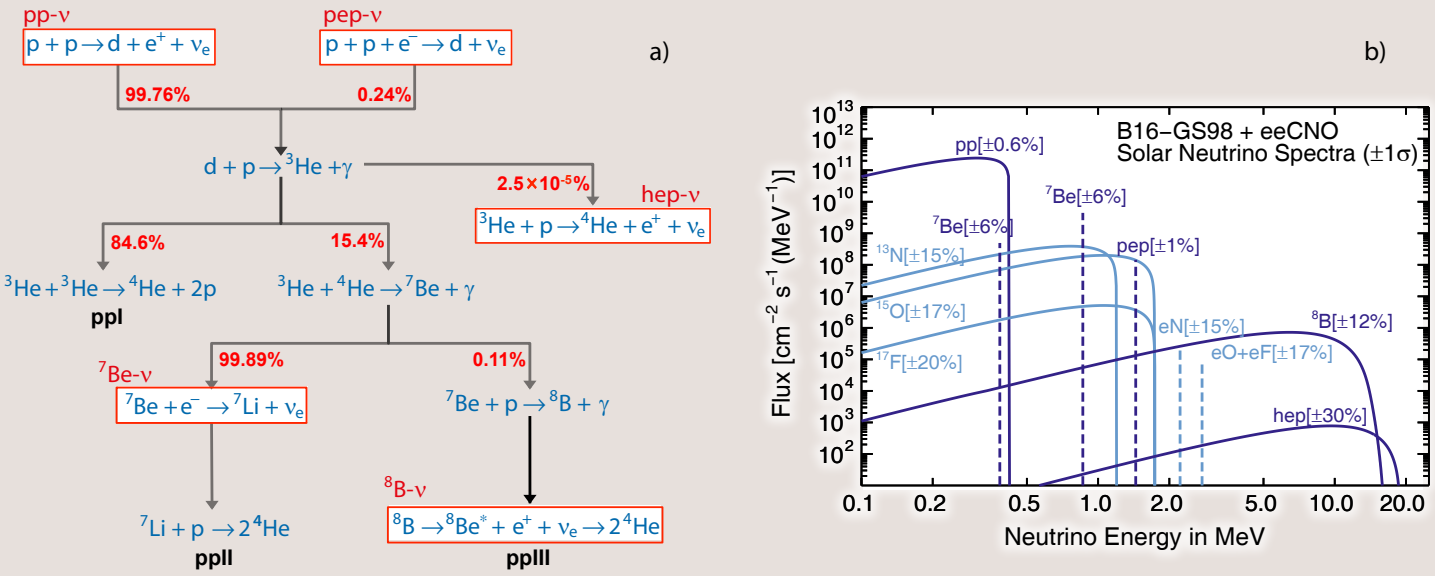


Fig. 1 a) Scheme of the nuclear fusion reactions of the pp cycle. b) Energy spectra of neutrinos emitted by the pp cycle reactions and, in blue, by the CNO cycle; the quoted numbers refer to model uncertainties.

neutrino events which are extremely rare: neutrinos can even cross the entire Universe without interacting. If we look at the energy spectrum of solar neutrinos (fig. 1b) we can observe that a 5 MeV threshold includes only a tail of the neutrinos produced by the reaction involving ^{8}B and hep, and represents less than 0.01% of the total solar flux.

1.2 A story 80 years long

In 1988-1989 myself, with Frank Calaprice of Princeton and Raju Raghavan of Bell Lab, began to discuss the possibility of an experiment capable of measuring solar neutrinos from about 1 MeV of energy, in particular the neutrino spectrum from the nuclear fusion reaction which involves ^{7}Be. To achieve this goal it was first necessary to reduce the radioactivity to levels never reached before: referring to the usual radioactivity of the detector materials, a gain of at least 10 orders of magnitude was needed.

However, I and some collaborators of mine, despite the skepticism of most people, would have liked to reach lower levels of radioactivity in order to study the solar flux from energies of few hundred keV: it was a very challenging goal but also an important milestone able to reveal the mechanism that powers the Sun.

Already in 1938 H. A. Bethe theorized, in a paper on *Physical Review*, that energy was generated in the stars by the fusion of light nuclei into heavier ones. In stars of similar mass to the Sun the nuclear fusion reactions follow a cycle called pp, which is shown in fig. 1, but in the most massive stars, that are the great majority in the Universe, the hydrogen fusion process proceeds through a cycle that is called CNO and whose reactions are catalyzed at higher temperatures than those of the Sun by heavier nuclei, namely carbon, nitrogen and oxygen (fig. 2). This process, which is dominant in the Universe, is also present in the Sun but only at 1%. A similar theory was also developed by C. F. Von Weizsäcker approximately in the same years as Bethe's paper.

The density of the gas compressed in the Sun is about 10 times the Pb density and in order to avoid a solar gravitational collapse a very high temperature is needed; the pp cycle produces a temperature higher than 10 million degrees inside the Sun. For stars more massive than the Sun, with at least 30% greater mass, the CNO cycle triggers a much higher temperature which in turn prevents the star from imploding.

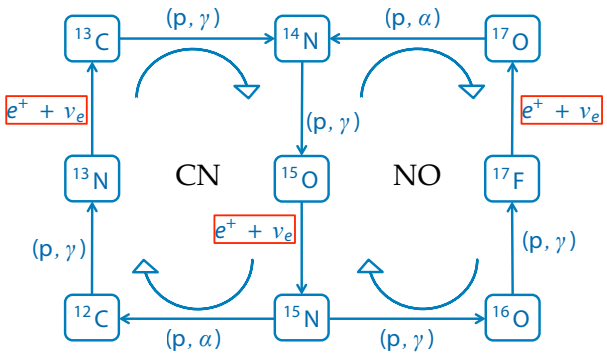


Fig. 2 Scheme of the CNO cycle.

In the '90s of the last century the Gallex radiochemical experiment had measured the integrated flux of solar neutrinos, starting from a threshold of 233 keV, but the various reactions had never been measured individually and had never been identified through the energy spectra of the emitted neutrinos, except, as already mentioned, a tail of the reaction with ^{8}B (Cherenkov experiments). For what concerns the CNO, this reaction, hypothesized by Bethe and Von Weizsäcker and taken up by the astrophysicists, never received an experimental evidence of its existence.

2 The Borexino detector

Our project was surrounded by the skepticism of many physicists of the sector; the collaboration in the meantime had expanded to include, in addition to Milan and Princeton, other groups: one from Dubna, previously my collaborators in Serpukhov, TUM Munich and four Italian groups, Genoa, Pavia, Perugia and Gran Sasso laboratory.

Between 1990 and 1995 we proceeded with an R&D effort to develop new radio-purification methods and to build a reduced and simplified version of the Borexino detector, called Counting Test Facility (CTF) (fig. 3) which allowed to test the effectiveness of the purification methods, which had just been developed. In 1995 in a seminar at the Gran Sasso laboratory I presented the results of tests in CTF demonstrating that our methods were able to achieve levels of radio-purification that saturated the CTF sensitivity (5×10^{-16} grams of contaminants/grams of pure material). The INFN president at that time, Luciano Maiani, who was attending the seminar, approved the project.

2.1 The design

The Borexino detector is built like an onion, with concentric layers that follow the principle of graded shielding: the closer the layer is to the center, the greater its radio-purity. The active material, 278 t of *liquid scintillator* – a hydrocarbon (pseudocumene-*PC*) plus a fluorescent dye (*PPO*) – is positioned in the center, contained in a nylon vessel (*Inner Vessel*), 125 microns of wall thickness. Within it a *Fiducial Volume* (*FV*) is software defined to absorb the emissions of radio contaminants contained in the vessel wall. The inner vessel is surrounded by another nylon vessel, the *Outer Vessel*, which acts as a barrier against emissions from the 2212 photomultipliers, especially from glass and ceramics, mounted inside a *Stainless Steel Sphere*, which surrounds the entire inner part of the detector. The region between the two vessels and the sphere is filled with a buffer liquid, further ≈600 t of PC plus *DMP*, a quencher for the low luminescence produced by the pseudocumene. The whole structure is surrounded by a steel tank (*Water Tank*) containing about 4000 t of highly purified water, 16.9 m high and 9.0 m of radius (fig. 4).

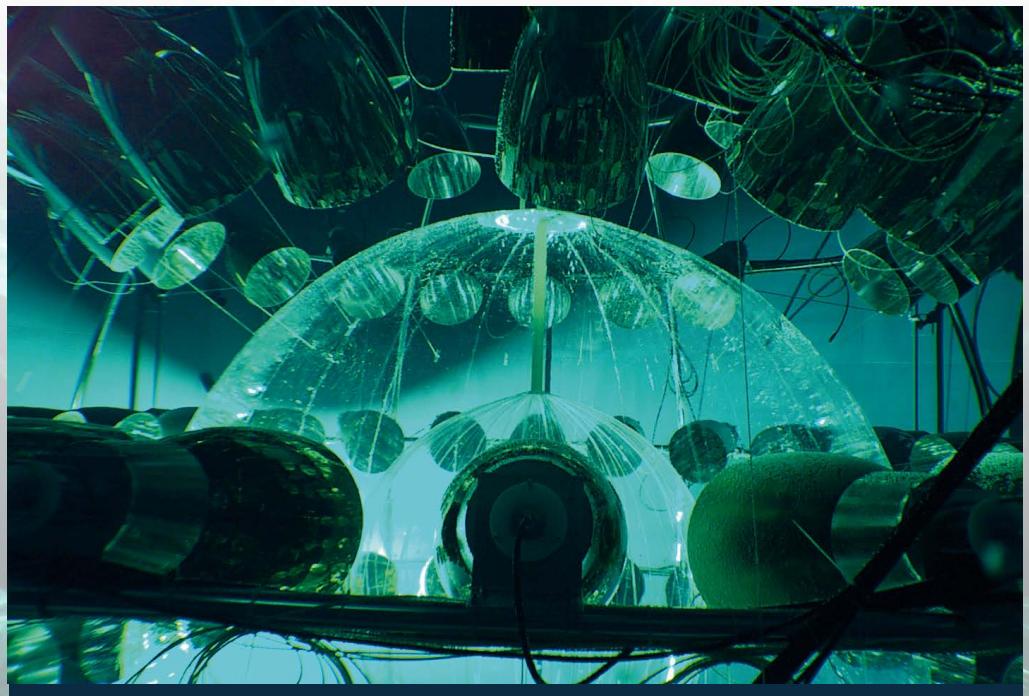


Fig. 3 A picture of the CTF detector. The photomultipliers with the light concentrators, the inner vessel containing the scintillator and the outer vessel, barrier against the ^{222}Rn emitted by the other components, are visible.

Therefore the scintillator is shielded in total by ≈ 5.5 m water equivalent: 2.14 m of water, 1.25 m of buffer plus the thickness of the scintillator between the vessel and the virtual wall defined by the Fiducial Volume; all these layers shield the external radiation (rocks and environment of the underground Hall) as well as the emissions of the nylon walls, the photomultipliers and the sphere stainless steel. Ultra-dense polyethylene ropes hold the inner vessel in place, which is pushed up by the modest buoyancy due to the small density difference between the scintillator and the buffer liquid (0.01%, reduced later by an order of magnitude).

2.2 Installation

Nothing in the Borexino detector is standard. All materials of the detector and of the ancillary systems have been selected by means of Ge detectors selecting those with low radioactivity; the nylon has been extruded and the vessels assembled in radon-free clean rooms; all components have been carefully selected and some of them have been developed in collaboration with external companies; moreover all the surfaces also of the ancillary plants have been pickled, passivated and rinsed with strong detergents; all welds have been done in nitrogen atmosphere; everything inserted into the detector passed through one of the 5 specifically installed class 100 clean rooms and the stainless steel sphere itself was equipped as a class 10000 clean room; synthetic air has been used inside the sphere during the vessels installations (fig. 5). The PC, produced for Borexino according to a stringent quality control plan developed jointly with the company, has been procured via an *ad hoc* unloading station with lines assuring a direct connection between the production towers and special isotanks, moved from Sardinia to the underground laboratory in no more than 18 hours to minimize the nuclides production in it by the cosmic rays, and then transferred through a special unloading station into four big reservoir tanks in the so-called Storage Area installed underground.

2.3 Radiopurity

The radionuclides purification of the scintillator is based on four methods: distillation at 100 °C and 100 mbar, water extraction using a countercurrent packed column, sparging with nitrogen using a column in countercurrent through a structured packing material, and ultra-filtration with Teflon cartridge filters with nominal cutoff size of 0.05 μm. The distillation is effective for the less volatile components and

Fig. 4 Sketch of Borexino with its major components.

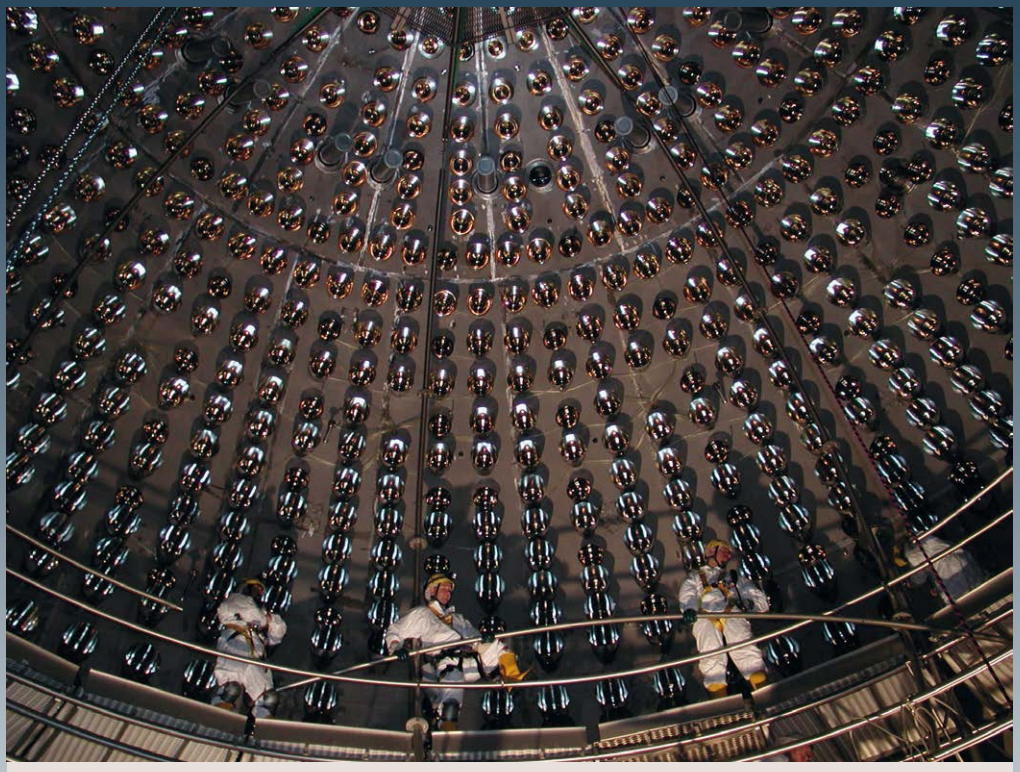


fig. 5 Scaffolding disassembly in the stainless steel sphere equipped as a clean room.

therefore metal salts and dust particles, and for U, Th, K isotopes. In the water extraction the electrically charged impurities have a preference for polar liquids such as water: metal salts, silicate particles and again U, Th, K are efficiently removed. This method, unlike distillation, can be used directly on the already mixed scintillator (solvent + fluors). Gas stripping is used to remove gaseous impurities such as Ar, Kr and Rn; only nitrogen, with concentrations of ^{40}Ar and ^{85}Kr of the order of 10^{-8} Bq/m^3 was used and then purified from the Rn via cryogenic methods. The ultra-filtration stops dust particles as silicates and aluminates.

The first purification was very successful, achieving $(1.67\pm0.06)\cdot10^{-17}$ and $(4.6\pm0.8)\cdot10^{-18}$ g of contaminants/g of material for ^{238}U and ^{232}Th, respectively; ^{40}K is not observed and ^{222}Rn is reduced to < 1 counts/day/100 t of PC, while ^{85}Kr is still present at the level of 10±5 counts/day/100 t. ^{85}Kr has been further reduced in the years 2010-2011 using water extraction in continuous: the effect of this second purification has been the reduction of Kr to >1.96 counts/day/100 t and ^{238}U and ^{232}Th to $< 9.5\cdot10^{-20}$ and $< 7.2\cdot10^{-19}$ g/g, respectively.

The ^{14}C has been found $\approx 2\cdot10^{-12}$ ^{14}C/^{12}C; the ^{14}C cannot be purified and this low level is due to the crude oil procurement from particularly old and very deep layers. These unprecedented achievements have been the key for Borexino's success.

3 The Borexino breakthroughs

In thirty years of activity Borexino has obtained real breakthroughs concerning the physics of the Sun and that of the stars, it has provided an important contribution to the physics of neutrino oscillation and it became one of the two experiments – the other is the Japanese KamLAND – which succeeded in detecting and studying geo-neutrinos.

Borexino detects the neutrinos interactions through the neutrino-electron scattering, while the antineutrinos are detected via the inverse beta decay reaction.

3.1 The physics of the Sun

Figure 1 reproduces the nuclear fusion chain of the so-called pp cycle and it is possible to observe that five of these reactions emit electron-flavored neutrinos. They are called pp, ^{7}Be, pep, hep, ^{8}B, following the nuclei involved. Measuring the individual fluxes of neutrinos, emitted by these nuclear fusion reactions, it is possible to identify, through their energy spectrum and shape, the reaction that produces them. The two reactions, ^{7}Be and pep, are quite easily identifiable because their neutrinos are monochromatic and then the spectra of the recoiled electrons show the Compton shoulder. The other spectra can also be identified on the basis of their shape and energy.

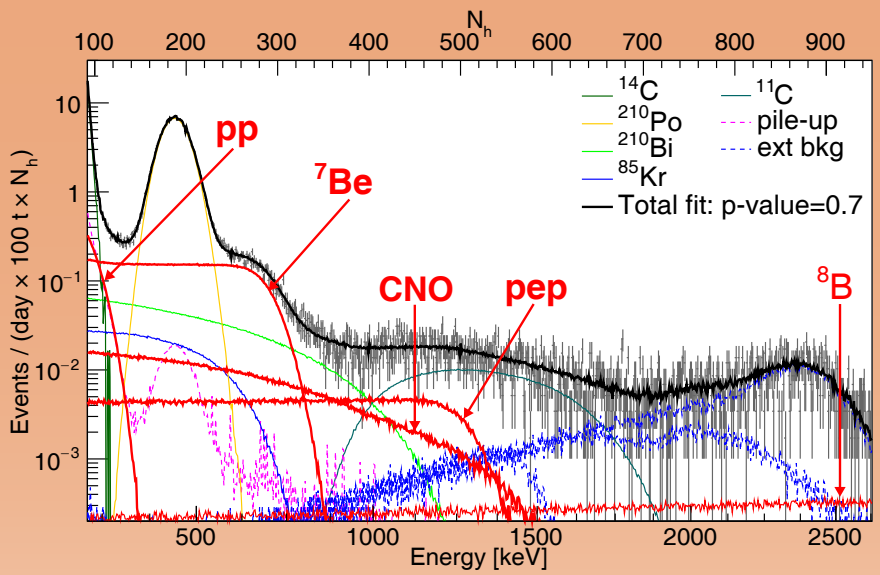


Fig. 6 Result of a multivariate fit applied on the recoiled electron up to 2500 keV of energy. CNO is constrained to the HZ SSM prediction (see text). ^{11}C is reduced to 5% after the application of the 3-fold coincidence and the boosted-decision-tree algorithm.

One of the difficulties in measuring these fluxes is the low rate of neutrino interactions due to the very limited neutrino cross section: we can compare the solar flux that invests the Earth – 60 billion per cm^2 and per second – with the rates of the individual fluxes in about 100 t of Borexino scintillator; just as an example: ~48 counts/day for ^{7}Be, ~2.5 counts/day for pep. Therefore, even the very low residues of radioactivity can interfere with the measurements of the neutrino signals.

The situation is well illustrated in fig. 6, where the results of the fit on signals and background are shown. Many radioactive residues interfere with every neutrino signal, but the most important – taking into account rates, energy and spectra shapes – are: ^{14}C which interferes with the measurement of the neutrinos from the pp reaction (the first of the cycle), ^{210}Po and ^{85}Kr with ^{7}Be, ^{11}C with pep and finally the external background with the ^{8}B reaction.

It is worth dwelling on two of these backgrounds: the ^{210}Po and ^{11}C. The ^{210}Po is not in equilibrium with its ^{238}U family, and increases in conjunction with operations carried out on the scintillator whether it be purification or topping up of the PC. Later it begins to decrease according to its life-time: 130.39 days. Nevertheless it is possible to well identify alpha particles, as produced by ^{210}Po in its decay, with respect to β'_s and γ'_s, which are related to the neutrinos interactions, via α/β discrimination by means of a Multilayer Perceptron machine learning algorithm.

^{11}C is of cosmogenic origin, produced on the ^{12}C of the scintillator by the cosmic muons that invest the Hall C of the underground laboratory, where Borexino is installed. Hence it is continuously produced and cannot be purified. The ^{11}C decay rate compensates the production time and therefore the ^{11}C presence in the scintillator is practically constant; the only possible selection tool is to reduce and almost suppress it via a software 3-fold coincidence (TFC), and a following pulse shape analysis. The 3-fold coincidence is based on the incident muon tracking, on the ^{11}C decay – 29.4 minutes mean life – with the emission of a positron, that annihilates, and the capture of the neutron, produced in the muon interaction, which, after a delay due to the thermalization, is captured and emits a 2.2 MeV γ. This coincidence, with 2h veto in portions of the FV, suppress 90% of ^{11}C and at the same time halves the exposure; in addition this reduction is not enough for a pep measurement. But the positron, emitted in the ^{11}C decay, can form a positronium with an electron of the scintillator, which in its form of ortho-positronium has an average lifetime of 140 ns, reduced to 3 ns in the scintillator. This circumstance and the topology different from γ's produced in the positron annihilation, can be exploited to reject another 5% of the total ^{11}C decays, via a boosted-decision-tree algorithm. What is plotted in fig. 6 is just the remaining 5%.

The ^{8}B analysis follows a different approach because the energy spectrum, which is used in other cases, is distorted by the oscillation phenomenon (^{7}Be and pep are monochromatic, and the pp spectrum shows a negligible distortion). The radial distributions of the contaminants, in particular ^{208}Tl, which is the largest and almost only dangerous contaminant for ^{8}B measurement, shows different

spectrum than ^{8}B. The ^{208}Tl contaminants can be disentangled via the sequence ^{212}Bi-^{212}Po, easy to be identified, which decays to ^{212}Po with 64% B.R. and to ^{208}Tl with 36% B.R. One source of the ^{208}Tl, a ^{232}Th daughter, is the IV nylon, and its decay products contribute to the surface contamination as well as the volatile progenitor ^{222}Rn released into the scintillator.

In the ^{8}B solar neutrinos analysis, a 3 MeV threshold is defined to eliminate part of the background. The strategy to disentangle the ^{8}B neutrinos is based on an accurate subtraction of the contaminants radiation by exploiting the radial distribution of the background events once cuts are applied to muons, cosmogenic nuclides and the Bi-Po sequence. In order to increase the statistics, the entire IV is defined as FV.

Now we have to introduce a few information on the Standard Solar Model. The solar model describes the evolution of the Sun starting from the proto-star and considers it as a sphere of gas in hydrostatic equilibrium between the gravitational compression and the pressure gradient. The experimental data to which the model can refer are the Sun's radius, its luminosity, *i.e.* the energy per time unit, and the so-called metallicity, *i.e.* the ratio Z/X between the mass of the elements present on the solar surface and that of hydrogen, obtained through the analysis of the observed absorption lines in the solar spectrum measurements. The intensity of the lines depends on the conditions of the solar atmosphere, namely the temperature, the electrons density and the pressure; therefore the atmosphere model is crucial. A first model dating back to 1998 (GS98 [1]) is a 1D model while more recently in 2009 (AGSS09 [2]) a 3D model was developed. These two models of the solar atmosphere give two different metallicities: Z/X ~0.023 for the first (HZ) and ~0.018 for the second (LZ). A fundamental test of the SSM model is the so-called helioseismology, that is the study of the oscillations present in the Sun, measured at its surface: these are due to stationary acoustic waves that are present below the photosphere. Helioseismology provides a measurement of the metallicity: while the comparison with the 1D model gives a good agreement, the 3D model disagrees. This problem, so-called *solar abundance problem*, is still open; it could be solved via the neutrino fluxes comparison between the model expectations, partially depending on the metallicity, and the experimental measurements.

In table 1 the solar neutrinos experimental rates and fluxes measured by Borexino are shown, and are compared with the SSM predicted fluxes calculated with the High and the Low multiplicity [3] and with the most recent global fit, which includes all data related to various neutrinos sources [4]: Sun, reactors, accelerators. All these fluxes are produced in the pp cycle.

Form these results it is possible to draw the following conclusions:

1) For the first time the nuclear reactions that produce neutrinos as part of the pp cycle have been individually measured; the only exception is the hep reaction which in Borexino has a very low rate and represents less than 10^{-5} of the total flux. A good alignment is observed between the experimental data of Borexino and the SSM predictions, obviously within the uncertainties of both the experimental data and the model predictions.
2) The luminosity measured via the photons emitted by the Sun has been compared with the luminosity calculated from the neutrino fluxes taking into account that the pp cycle produces 99% of the entire solar energy. An excellent correspondence has been found: $L = (3.89^{+0.35}_{-0.42}) \times 10^{33}$ erg s^{-1} for neutrinos and $L = 3.846 \pm 0.015 \times 10^{33}$ erg s^{-1} for photons. Since neutrinos take a few seconds to leave the Sun and eight minutes to reach the Earth, while photons take more than 100000 years, this result demonstrates that *the Sun is in thermodynamic equilibrium over a 10^5 years' time scale* and at the same time confirms the nuclear origin of solar energy with a precision never achieved until now by a single experiment studying solar neutrinos.
3) The ratio between the two branches of the pp cycle: pp I and pp II (see fig. 1) can be calculated using the Borexino data RI/II = $2\Phi(^{7}\text{Be})/[\Phi(\text{pp}) - \Phi(^{7}\text{Be})] = 0.178^{+0.027}_{-0.023}$ in agreement with the SSM expectations: 0.180±0.011 for HZ and 0.161±0.010 for LZ.

reaction	Borexino rates (cpd/100t)	Borexino fluxes ($cm^{-2}s^{-1}$)	SSM HZ Fluxes ($cm^{-2}s^{-1}$)	SSM LZ Fluxes ($cm^{-2}s^{1}$)	Global fit Fluxes ($cm^{-2}s^{1}$)
pp	$134\pm10^{+6}_{-10}$	$(6.1\pm0.5^{+0.3}_{-0.5})$ x10^{10}	5.98(1± 0-006) x 10^{10}	6.03(1±0.005) x 10^{10}	$5.97^{+0.037}_{-0.033}$ x 10^{10}
^{7}Be	$48.3\pm1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99\pm0.11^{+0.06}_{-0.12})$ x10^{9}	4.93 (1± 0.06) x 10^{9}	4.50(1±0.06) x 10^{9}	$4.80^{+0.24}_{-0.22}$ x 10^{9}
pep (HZ)	$2.43\pm0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27\pm0.19^{+0.08}_{-0.12})$ x 10^{8}	1.44 (1± 0.009) x 10^{8}	1.46 (1± 0.009) x 10^{8}	1.448±0.08 x 10^{8}
pep (LZ)	$2.65\pm0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39\pm0.19^{+0.08}_{-0.13})$ x 10^{8}	1.44 (1± 0.009) x 10^{8}	1.46 (1± 0.009) x 10^{8}	
^{8}B	$0.220^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}$	5.46 (1±0.12) x 10^{6}	4.50(1±0.12) x 10^{6}	$5.16^{+0.13}_{-0.09}$ x 10^{6}
hep	<0.002 (90% C.L.)	< 1.8 x 10^{5} (90% C.L.)	7.98 (1±0.30) x10^{3}	8.25(1±0.12) x 10^{3}	

Tab. 1 Neutrino rates and fluxes as produced by the pp cycle fusion reactions and comparison with the SSM predictions and with a global fit.

3.2 Seasonal modulation

Borexino also studied the seasonal modulation of solar neutrinos, which is due to the eccentricity of the Earth's orbit and then the change of the Earth-Sun distance during the year. This modulation follows a sinusoidal shape with a period of one year and a modulation amplitude of about 7%. Although the solar origin of the neutrinos studied by Borexino is already implicitly demonstrated by the shape of the energy spectra of the neutrinos, the measure of seasonal modulation is a direct and unequivocal demonstration of the solar provenance of the neutrinos detected.

The measurement was made over a four-year period using the neutrinos of the ^{7}Be reaction and selecting the events by α/β discrimination by means of neural networks. The results have been analyzed following two methods: fit on the distribution *vs.* time and the Lomb-Scargle method [5]. The result gives a monthly rate of 33±3 counts/day/100 t with a modulation amplitude of 7.1±1.9% and a period of 367±10 days, in perfect agreement with what was expected, *i.e.* 6.7% of modulation amplitude and 365.25 days period.

4 The neutrino physics

The solar neutrinos are produced almost at the center of the Sun, and they have to cross several layers of solar matter to escape from it. Obviously, they are subjected to the neutrino oscillation phenomenon and in particular to the oscillation in matter. The paradigmatic model is the so-called MSW, from the initials of the physicists who developed it [6], which finds its origin from the consideration that the electron-flavored neutrinos scatter in matter on electrons through two channels, one of charged current and one of neutral current, while neutrinos with other flavors can interact only through the neutral current. Compared to the oscillation in vacuum, in the equations of the oscillation in matter, the term A_{cc} which represents the charged current potential of the electron flavored neutrino depends on the matter electron density and on the neutrinos energy:

$$\frac{A_{cc}}{\Delta m^2} = 1.526\, e^{-7}\, \frac{n_e}{\frac{\text{moles}}{\text{cm}^3}}\, \frac{E}{\text{MeV}}\, \frac{\text{eV}^2}{\Delta m^2},$$

where n_e is the electrons density in solar matter and E is the neutrinos energy. If this term is negligible, either because n_e and/or E are very small, the matter effect is negligible and the neutrino propagation behaves like in vacuum.

In the case of solar neutrinos, n_e is almost constant in solar matter while the neutrino energy changes according to the fusion reaction that emits them. Borexino covers the energy range between 150 keV and 17 MeV. In fig. 7 the survival probability of the electron-flavored neutrino is shown as predicted by the MSW model; it consists of three parts, a first plateau at very low energies with a survival probability greater than the second plateau, that at higher energy shows a much lower value. The region between the two plateaus is called *transition region*. While the prediction for the plateau at higher energies has already been confirmed by the Cherenkov experiments (SNO and Super-Kamiokande), and later also by Borexino, the low-energy plateau was validated by Borexino with the pp neutrino flux measurement, while ^{7}Be and pep, measured again by Borexino, fall in the transition region.

The most important achievements in the neutrino physics can be summarized as follows:
1) The survival probability of ν_e in vacuum regime has been measured for the first time by Borexino, which is the only experiment that succeeded in studying both the vacuum and the matter regime. In addition, the Borexino data allowed for the first time to probe the vacuum-matter transition.
2) The uncertainties of the individual measures do not allow to get a clear idea of the survival probability in the transition region. However, the experimental data do not seem to contradict the MSW model predictions within the experimental uncertainties.

4.1 The day/night effect

The day/night effect consists in the regeneration, in the Earth matter, of the electron-flavored neutrinos, that have oscillated in another flavor during the Sun-Earth journey, and cross the Earth during the night in order to reach the detector. We have to recall that the experimental results on the neutrino oscillation showed that in the tan θ *vs.* Δm^2_{12} eV^2 plan the only allowed region is the so-called Large Mixing Angle (LMA) corresponding to a Δm^2_{12} between 10^{-4} and 10^{-5} eV^2.

Borexino studied the day/night effect using the ^{7}Be neutrinos, where this effect is expected to be null. However, using all and only the results of the solar neutrinos experiments before Borexino, in addition to the LMA region, also the so-called LOW region was found, corresponding to a Δm^2_{12} between 10^{-6} and 10^{-7} eV^2, that is allowed with lower probability (see the left part of fig. 8); for this region the day/night effect at the ^{7}Be energy is possible. The LOW region is excluded if, in addition to solar experiments, the antineutrinos studied by the KamLAND experiment are considered.

The measurement carried out by Borexino gives an absolutely null value for the day/night effect in the ^{7}Be neutrinos energy region: $A_{DN} = \frac{N-D}{(N+D)/2} = 0.0001 \pm 0.012$ (stat.) $\pm$ 0.07 (sys.), which therefore excludes the region outlined in red in the plot on the right of fig 8. In this way, without needing the KamLAND antineutrinos and thus without using *CPT* symmetry, the results of Borexino are able to exclude the LOW region at more than 8.5σ.

4.2 Non-standard neutrino interactions

Theories beyond the standard model point to the existence of non-standard interactions for which flavor-changing NCs are possible. In particular, the Lagrangian for these non-standard interactions (NSI) is written as follows:

$$-\mathcal{L}_{\text{NC-NSI}} = \sum_{\alpha,\beta} 2\sqrt{2} G_F \varepsilon^{ff'C}_{\alpha\beta} \left(\bar{\nu}_\alpha \gamma^\mu P_L \nu_\beta\right) \left(\bar{f} \gamma_\mu P_C f'\right),$$

where $\varepsilon^{ff'C}_{\alpha\beta}$ parametrizes the NSI strength normalized to the Fermi constant, f and f' are leptons or quarks,

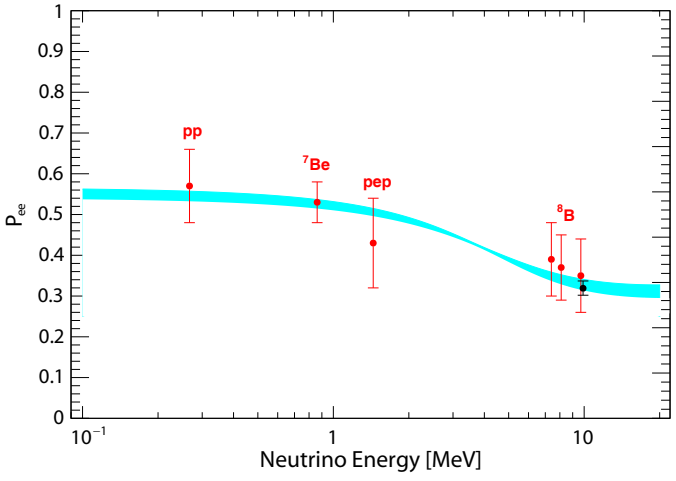


Fig. 7 The ν_e survival probability *vs.* neutrino energy. The light blue band is the prediction of the MSW model with 1σ uncertainty.

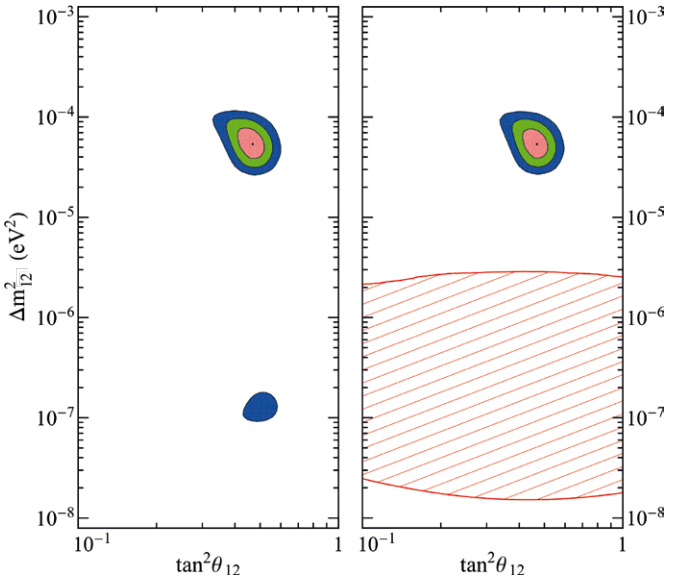


Fig. 8 tan θ_{12} *vs.* Δm^2_{12} scatter plots as obtained by a global fit using all solar results without Borexino (left) and with Borexino (right). The red dashed area is excluded at more than 8.5σ, once used the Borexino data.

$\alpha, \beta = e, \mu, \tau$, and C is the chirality of the ff'current (L or R). In the analysis by Borexino only the flavor-diagonal $f = f' = e$ and $\alpha = \beta$ is taken into account; in this case $\varepsilon_{\alpha}^{C} = \varepsilon_{\alpha\alpha'}^{eeG}$. NSI influences the solar neutrino phenomenology because the neutrino propagation in matter undergoes changes. Borexino analyzed the elastic neutrino-electron scattering because it is the most sensitive to the NSI effects.

The procedure analysis is similar to that used for solar neutrinos but it includes in addition the NSI ε strength parameter, with a penalty factor in order to account for the assumed SSM metallicity (either HZ or LZ).

Hereafter the Borexino analysis results concerning the electron, and then the parameters ε_e^R *vs.* ε_e^L are shown (fig. 9), with the results of other experiments: the allowed region, defined by the intersection of all experiments, is a small area around zero.

5 The stars physics

The gravitational attraction inside the solar matter, which has a density of 1410 kg/m^3, does not produce the implosion of the Sun because it is contrasted by the pressure caused by a temperature of about 10 MK produced by the pp cycle, which, as mentioned, is the source of 99% of the entire solar energy. In massive stars, with 1.30 times the Sun mass, this temperature is no longer sufficient because the gravitational forces are higher. It is theorized by the astrophysicists that the CNO be the primary channel for hydrogen burning in stars more massive than the Sun (fig. 2), and is in fact the primary channel for hydrogen burning in the Universe.

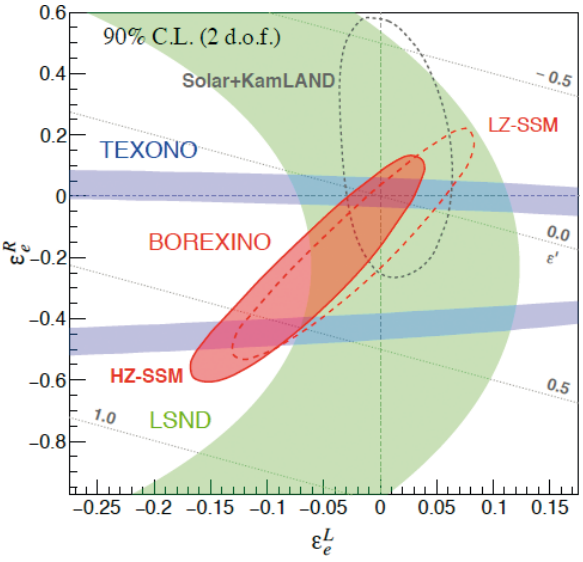


Fig. 9 Allowed regions for $\varepsilon_e^{R,L}$, with $\varepsilon_\tau^{R,L}$ fixed at zero.

The CNO cycle provides an important opportunity for Borexino as it is present in the Sun, even if only at 1%. Therefore Borexino had the objective of measuring this cycle in the Sun. Although all the cuts used for the analysis of the other solar neutrinos were applied in order to reduce the events from radioactive residual impurities, cosmic muons, cosmogenic isotopes and external gammas, and a narrow FV was defined with a reduced radius and a vertical cut ($r < 2.8$ m and -1.8 m $< z < 2.2$ m), this last in order to eliminate the background due to the reinforcements applied to the IV top and bottom, further problems were encountered. In the energy region considered for this study, *i.e.* in the range 320−2640 keV, the key background for the analysis is produced by ^{11}C and ^{210}Bi in addition to the solar neutrino signal of the pep reaction: that is to be compared with the signal of a few counts/day/100 t expected for the CNO (see fig. 6).

For ^{11}C the three-fold-coincidence (TFC) tagging has been applied as described in sect. 3.1. For the strong correlation with neutrinos from pep, a constraint of 1.4% was introduced into the fit, using solar luminosity and the robust assumption of the fixed ratio between the pp and pep rates, the existing data on the solar neutrinos and the latest parameters for the oscillation. These assumptions do not affect the measurement of the CNO because it is totally independent of them. Therefore the background to be understood is that connected with ^{210}Bi; the energy distributions of the CNO and ^{210}Bi not only fall on the same energy window but also have a similar shape. ^{210}Bi is a daughter of ^{210}Pb, which has a residual presence in the scintillator; ^{210}Bi decays in turn, with a β emission, into ^{210}Po, which finally transits to the stable ^{206}Pb nuclide with an α emission. ^{210}Pb cannot be detected because it decays β with an energy of 63.5 keV, below the Borexino threshold.

To reach a reliable estimation of the ^{210}Bi rate, it is necessary to compare it with its daughter ^{210}Po, which however, in our case, is composed of two parts. In fact this nuclide increases when operations are performed on the detector such as purification and PC refilling, but, also when no operations are performed, it is fluctuating. This behavior can be explained if we admit that there are two components: one is a stable component produced by the residue of ^{210}Pb, in secular equilibrium, while the other is out of equilibrium, produced, after operations, by ^{210}Pb deposited on the internal surface of the IV, probably in the dust or particulate. If there are convective currents, they carry ^{210}Po into the fiducial volume (the spontaneous diffusion is negligible) and then the first requirement is to avoid these currents and to stabilize the temperature.

As a consequence, in 2016 the water tank was thermally insulated (fig. 10) and an active temperature control system was installed in the upper part of the detector. This system

stabilized the temperature very well and only a residual seasonal modulation was observed at 0.3 °C/6 months, a sufficiently small effect that cannot trigger the convective currents. This effort paid off and the ^{210}Po decreased and reached its lowest value in a region above the equator of about 80 cm (*restricted region*), allowing to constrain the ^{210}Bi rate. Therefore, for this analysis only the data collected after the temperature stabilization have been considered, then between July 2016 and February 2020, corresponding to 1072 days live time.

The minimum value of ^{210}Po defines a stable plateau during the analysis period, with minimal fluctuations, which was determined with a 2D and 3D fit in the restricted region. This minimum value reasonably matches with the constant production of ^{210}Po in equilibrium with ^{210}Bi and with the ancestor ^{210}Pb. The two fits mentioned above give converging results at $R(^{210}\text{Po min}) = (11.5 \pm 1.0)$ counts/day/100 t. The error includes also the systematic uncertainties of the fit.

The ^{210}Bi rate has been extrapolated to the entire FV and at the same time a check was made to investigate if the ^{210}Bi was uniform over the entire FV. Therefore all the β-like events, in the energy interval showing the greatest Bi contribution, were selected and a uniform distribution was found with a systematic uncertainty ≤0.78 counts/day/100 t. A further verification has been carried out measuring the solar neutrino rate annual modulation and the result is aligned to the previous analysis (see sect. 3.2). In conclusion the ^{210}Bi rate is ≤(11.5±1.3) counts/day/100 t.

The selected events were fitted in the 320−2640 keV energy window considering simultaneously the energy spectrum and the radial distribution. In the fit the pep rate was constrained to (2.74±0.04) counts/day/100 t while the above upper limit to the ^{210}Bi rate is enforced asymmetrically by multiplying the likelihood with a half-Gaussian term: the ^{210}Bi was left unconstrained between 0 and 11.5 counts/day/100 t cpd. The systematic errors were studied by varying the parameters of the fit and the theoretical shapes of the bismuth, and analyzing many others effects of lesser importance.

Finally the CNO rate has been determined to be: $7.2^{+3.0}_{-1.7}$ counts/day/100 t; assuming oscillation in matter, its flux is $7.2^{+3.0}_{-2.0} \times 10^8$ cm^{-2} s^{-1}. A hypothesis test based on the profile likelihood and using million pseudo-data sets excludes the no-CNO observation with a significance ≥5.0σ at 99% C.L. Therefore Borexino reached the first direct experimental demonstration of the CNO existence.

If all neutrino fluxes measured by Borexino (table I) are combined with the CNO measurement it is possible to conclude that the low metallicity hypothesis is excluded at 2.1σ, thus giving a good hint in favor of the high metallicity.

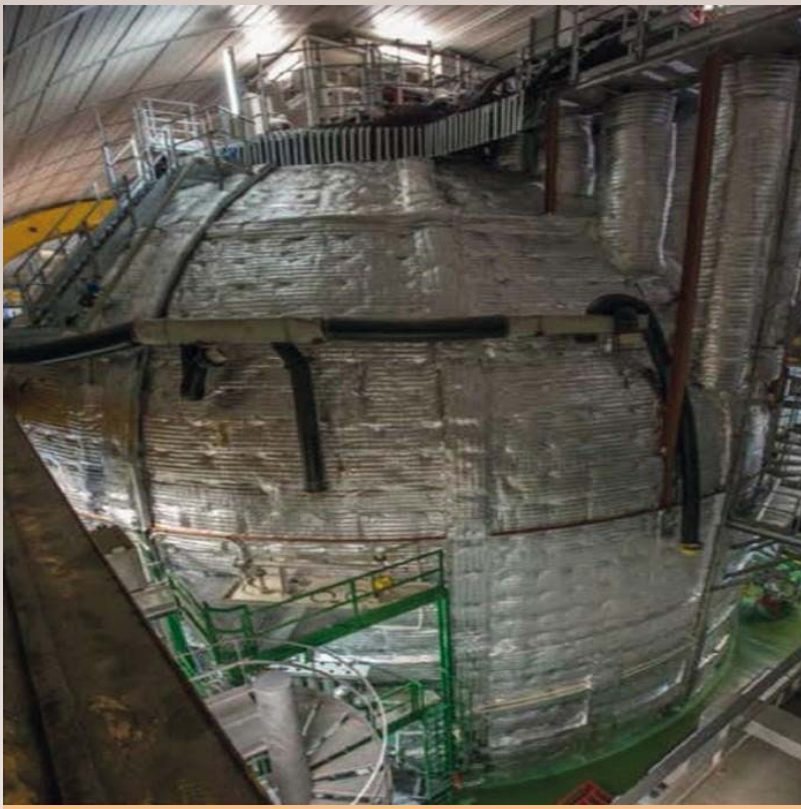


Fig. 10 Borexino water tank covered by insulating material.

6 Geoneutrinos

Although geoneutrinos do not have a direct connection with the Sun and stars physics, I think it is worthwhile to give a hint of this research, because it provides information on the composition of the Earth interior.

Geoneutrinos are electron-flavored antineutrinos emitted by radioactive isotopes present inside the Earth; their radioactive families are ^{238}U, ^{232}Th, ^{235}U and ^{40}K. Their interactions are detected via the inverse β-decay, $\overline{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, with a kinematic threshold at 1.806 MeV. This prevents the study of the antineutrinos from ^{40}K and ^{235}U and allows the analysis of the 38% of those emitted by ^{238}U and 15% by ^{232}Th. The production of antineutrinos and the energy produced by these two radioactive chains are shown in the following expressions:

$$^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e^- + 6\bar{\nu}_e + 51.7 \text{ MeV},$$
$$^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e^- + 4\bar{\nu}_e + 42.8 \text{ MeV}.$$

The geoneutrino flux is of the order of 10^6 cm^{-2} s^{-1}, much smaller than that of solar neutrinos. In Borexino, about one event is measured every two months, and the interactions are very well tagged because the positron produced from inverse β-decay promptly annihilates, emitting two 511 keV γ rays

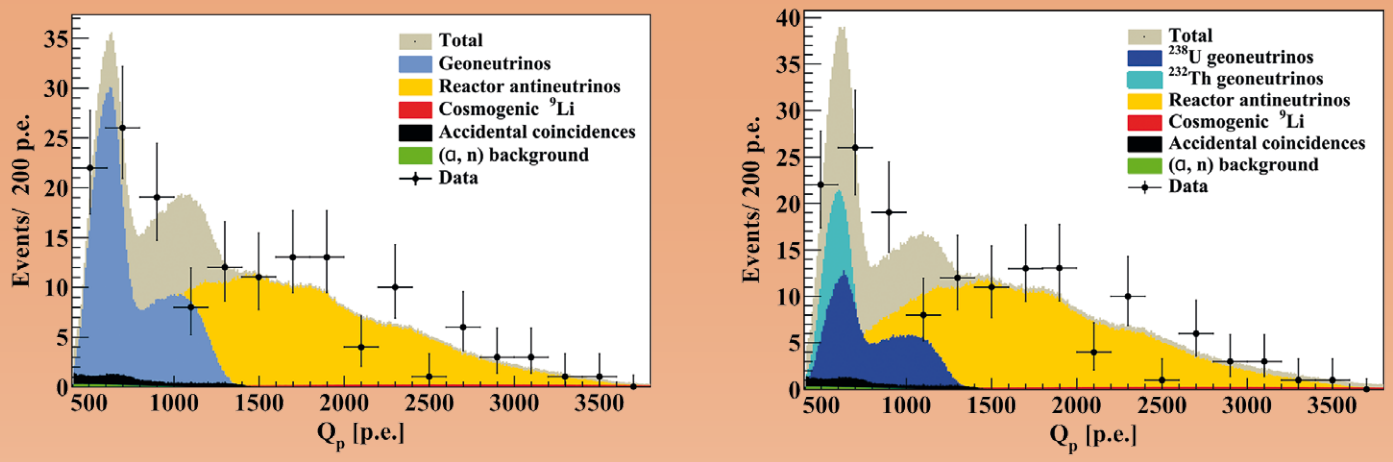


Fig. 11 a) Black points: Borexino results; fit with the assumption of the chondritic Th/U ratio. Brownish-grey: all signals and background; blue: geoneutrinos; yellow: reactor antineutrinos; black and green: non-antineutrino background. b) Fit with U and Th as free parameters; dark blue: U contribution; cyan: Th contribution.

(prompt event, with a visible energy); the neutron emitted is captured on protons with the emission of a γ-ray, which provides a correlated delayed event. The characteristic time and spatial coincidence of the prompt and delayed events offer a clean signature for the anti-neutrino detection.

Due to the oscillation the flux that reaches the Earth is approximately halved; the effect of the oscillation is mediated due to the very large distance traveled: the average survival probability is more precisely 0.54.

The most important backgrounds for the geoneutrino study concern: unstable cosmogenic isotopes, (α, n) interactions, antineutrinos produced by nuclear reactors: the isotopes are easily rejected with appropriate cuts, while the extreme purity of Borexino makes negligible the background due to accidental coincidences and (α, n). Therefore, the greatest background is due to antineutrinos from nuclear power reactors whose energy spectrum overlaps the geoneutrinos window in the range 1.8–3.27 MeV.

In the world there are 440 nuclear power reactors that emit, for every 3 GW, 5.6×10^{20} antineutrinos per second. The reactors signal in Borexino was evaluated taking into consideration for each reactor: the nominal thermal power, the detector-reactor distance, the thermal load factors for each month from December 2007 to April 2019 (the entire Borexino exposure), the different components of nuclear fuel and their characteristics, the produced spectrum of the antineutrinos, and finally the cross section for the inverse beta decay and, as already said, the survival probability of the electron-flavored neutrinos. These data are obtained from the data base of the European Atomic Agency IAEA.

There are only two experiments in the world capable of detecting geoneutrinos: Borexino and the Japanese KamLAND. Compared to KamLAND, Borexino has the disadvantage of a scintillator volume less than 1/3 of the KamLAND one, while has the advantage of a much higher radio purity and a lower reactor antineutrino background due to the lack of nuclear reactors in Italy.

The so-called *5 MeV excess* due to the deviation of the reactor spectrum in the energy range 4–6 MeV, shown in recent experiments, compared to the paradigmatic spectrum of Mueller *et al.* [7], has been taken into account; the difference between the two spectra, with and without the *5 MeV excess,* is 6%.

Given the excellent tagging of the inverse beta decay interactions, it was possible to analyze all together the data collected by Borexino also during the operations, therefore from December 2007 to April 2019, *i.e.* in 3262.74 days corresponding to $(1.29 \pm 0.05) \times 10^{32}$ protons/year. In fig. 11a the result of an unbinned likelihood fit is plotted, including signal and background. The ratio between ^{232}Th and ^{238}U is assumed to be 3.9, corresponding to what is observed in the chondrules of the meteorites just called chondritic, which maintain the characteristics of the Solar System matter. In the fit of fig. 11b ^{232}Th and ^{238}U are left free.

The number of the geo-ν events corresponding to the entire Borexino exposure is $51.0^{+0.4+2.7}_{-8.6-2.1}$ (stat.-sys.) when the Th/U chondritic ratio is assumed, and $48.9^{+25.1}_{-20}$ when U and Th components are left free in the fit: this fit also finds $27.8^{+15.4}_{-11.8}$ events for uranium and $21.1^{+9.7}_{-8.4}$ events for thorium. The results of the two fits on the geo-ν number, with and

without the chondritic ratio, are fully compatible, but there are larger errors when ^{238}U and ^{232}Th are left free: the ratio ^{232}Th/^{238}U obtained is not aligned with the chondritic ratio.

The expected reactor antineutrinos events have been evaluated to be $97.6^{+1.7}_{-1.6}$ without "5 MeV excess" and $91.9^{+1.6}_{-1.5}$ when the "5 MeV excess" has been assumed, to be compared with $92.5^{+13.3}_{-10.5}$ events obtained from the fit on the experimental data assuming the chondritic ratio and $95.8^{+14.3}_{-11.6}$ leaving Th and U as free parameters (what quoted includes both the statistical and systematic errors), showing a good alignment between evaluation and data.

What can be obtained from the study of geoneutrinos? Certainly two pieces of information: the first concerns the mantle and the second the contribution of the radiogenic heat to the total Earth heat.

We know that the Earth crust, by measuring the sediment and rocks, contains radioactive nuclides. To extract the mantle signal, the contribution of the local crust and of the far crust must be subtracted from the total signal. In Borexino the signal due to the crust in the region around the Gran Sasso (LOC) was first calculated, considering an area of 492 km $\times$ 444 km, together with the contribution of the rest of the crust (ROC), using the 1°$\times$1° 3D model of ref. [8] and integrating the contribution on the whole Earth. The two contributions give in total $28.8^{+5.5}_{-4.6}$ events; by subtracting the local contribution of the lithosphere from the total, we obtain: $N_{\text{mantle}} = 23.1$. The statistical significance of the signal is studied with pseudo-MC experiments with and without a generated mantle signal. The *p*-value of the fit is $p = 9.796\times10^{-3}$ and the hypothesis of no signal in the mantle is rejected at 99.0% C.L., corresponding to 2.3σ.

Direct measurements of the accessible lithosphere provide an estimate of the heat that it produces, namely $8.1^{+1.9}_{-1.4}$ TW corresponding to about 17% of the total Earth heat, which is currently estimated at 47$\pm$2 TW. It is much more difficult to assess the radiogenic heat of the mantle because it is not known how the radioactive nuclides are distributed within it; the two extreme hypotheses range from a homogeneous distribution throughout the mantle to the radioactive activity concentrated at the boundary between the mantle and the Earth core. So we can only evaluate an interval, which is very large: 1.2–39.8 TW. Following a procedure on the scatter plot of the mantle signal *vs.* the radiogenic mantle heat we can obtain the median signal in the mantle and then the heat which, including also a ^{40}K contribution, is $30.0^{+13.5}_{-12.7}$ TW, and adding both mantle and lithosphere the total radiogenic heat is $38.2^{+13.6}_{-12.7}$ TW, which corresponds to 81% of the total terrestrial heat.

7 Some final comments

Borexino started thirty years ago and it is not over yet. Throughout these thirty years several members of the collaboration have come and gone and many young people even in the last 2-3 years joined, interested in the potential of the experiment and its results. However the collaboration has never exceeded 100 members at a given time, between researchers and technicians. Among them, about ten researchers and technicians started with me in 1990 and still continue to give their contribution to Borexino to this day. Unfortunately, during all these years 11 members of our collaboration have passed away.

Here I thank all collaborators who, in these thirty years, made the experiment possible. INFN has always supported this project and it was the major financier. I must thank particularly Luciano Maiani, at that time president of the INFN, who in 1995 has supported the approval and the Borexino funding, despite the skepticism of the physicists' community who was judging the project too difficult and too challenging.

In recent years, Borexino has also received awards, such as the Bruno Pontecorvo International Prize and the Enrico Fermi Prize, both assigned to me, but in my mind to be awarded to the entire collaboration; Borexino's results were ranked within the world top 10 in 2014 and in 2020 by the British Institute of Physics and in 2014 the Italian post office dedicated a commemorative stamp to the experiment. But the greatest recognition has been the continuous incoming flow of request we have been receiving for years, inviting to give talks to all the most important conferences in the world.

I want to close this summary of Borexino's activity by saying that this project leaves a legacy to young researchers not to be afraid of engaging themselves in very challenging experiments because the important discoveries mainly come from endeavors. When engaging in such projects it is important to have what I like to call the "physical sense", that is the ability to guess whether an experiment or a measurement, even if particularly difficult and apparently prohibitive, still has the possibility of succeeding. And what pushed us over the years in the Borexino project was this confidence in what we could achieve, despite being surrounded by skepticism since the beginning and met by increasingly complex measures, a skepticism that concerned even some internal members of the collaboration.

I would like to conclude with a statement of a great friend of Borexino, John N. Bahcall: "The most important discoveries will provide answers to questions that we do not yet know how to ask and will concern objects we have not yet imagined" (J. N. Bahcall in "*How the Sun Shines*", 2000, Nobel e-Museum, astroph/0009259) [9].

References

[1] N. Grevesse, A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.,* 85 (1998) 161.
[2] M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, P. Scott, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 47 (2009) 481.
[3] N. Vinyoles, A. Serenelli, F. L. Villante, *J. Phys. Conf. Ser.,* 1056 (2018) 012058.
[4] J. Bergström *et al.*, *J. High Energy Phys.,* 2016 (2016) 132.
[5] N. R. Lomb, *Astrophys. Space Sci.*, 39 (1976) 447; J. D. Scargle, *Astrophys. J.*, 263 (1982) 835.
[6] L. Wolfenstein, *Phys. Rev. D,* 17 (1981) 2369; S. P. Mikheyev, A.Y. Smirnov, *Sov. J. Nucl. Phys.,* 42 (1985) 1441; S. P. Mikheyev, A.Y. Smirnov, *Nuovo Cimento C*, 9 (1986)17.
[7] A. Mueller *et al.*, *Phys. Rev. C*, 83 (2011) 054615.
[8] F. Mantovani *et al.*, *Phys. Rev. D*, 69 (2004) 013001.
[9] The results reported here are taken from the Borexino published papers, which can be found on our website. If you want more information on the Borexino results visit `http://borex.lngs.infn.it/` and follow the link "Papers".

Gianpaolo Bellini

Gianpaolo Bellini is Professor emeritus at the University of Milan and INFN emeritus scientist; he covered various INFN tasks and roles up to Vice President; he has been a member of the CIVR physics groups and founder and director of the European network ISAPP for 11 years; he is member of various academies and societies. His major contributions, discoveries, laboratory results and awards are: 1) Full physics chapter on the coherent production of particles on nuclei – discovery of the first and second radial excitation of the pion (CERN and IHEP Serpukhov – special mention of the URSS Academy of Sciences); 2) first active target and micro-vertex with Si detectors: the best charmed mesons and baryons lifetimes in the '80s and '90s (CERN and Fermilab); 3) design, construction and direction for 21 years of the Borexino experiment (Gran Sasso Laboratories): first measurement of all fusion reactions producing solar energy and observation of the oscillation in vacuum regime (international Bruno Pontecorvo and Enrico Fermi awards, results classified among the 2014 first 10 discoveries by IOP, celebratory stamp of the Italian post office), first experimental evidence of the reactions making the stars shine. He is author of 250 scientific papers, editor of nine volumes on elementary particles, author of popular science books.

DEVELOPING RELEVANT MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY: THE NEW SYSTEM OF UNITS AND THE FUTURE OF METROLOGY

DIEDERIK S. WIERSMA
Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Torino, Italy
Dipartimento di Fisica, Università di Firenze and LENS, Firenze, Italy

Measuring things is common to both science and daily life. We have become so accustomed to accurate measurement devices, like synchronized clocks, digital micrometers, positioning systems, glucose meters, thermometers, sphygmomanometers, and many others, that we do not realize how much work is done by the worldwide metrology community to make this technology work. Measuring means assigning a number to an object or event in such a way that this number can be compared to other objects or events. To provide the world with reliable units of measure on which everyone agrees is essential for international trade, a trustworthy industry and economy, as well as for science itself. Developing reliable measurement technology is also the basis for taking informed political decisions on climate change, health, and our environment and society.

1 Introduction

One can perform an extremely accurate measurement but when the unit of measure is misunderstood, the outcome is useless or can have disastrous effects. NASA lost a spacecraft due to a misunderstanding amongst engineers about the units used in the design of the propulsion system [1], Air Canada managed to have a passenger aircraft run out of fuel in mid-air due to a confusion about metric units [2], and, in medicine, expressing blood sugar levels in the wrong units can have fatal effects for a patient. These are some examples of mistakes caused by mixing up units. But how about the problems that arise when the unit of measure itself has a size that is ill-defined? We often take for granted that the meter is simply the meter and the kilogram the kilogram, but what is the meter actually and how is the kilogram defined? And can we be sure that everyone in the world agrees on their size?

Recently a newly defined international system of units – known by many simply as the SI – has come into force, signed in Versailles by representatives of most countries in the world [3] (fig. 1). One of the major changes in the new system resides in the definition of the kilogram, which up till recently has always been defined with respect to a physical object (artefact), while in the new system it is defined with respect to a natural constant – the Planck constant *h*. Using a natural constant as "unit of measure" for our measurements is a brilliant concept. The natural constants appear in the laws of physics which express our current understanding of the way our universe works [4].

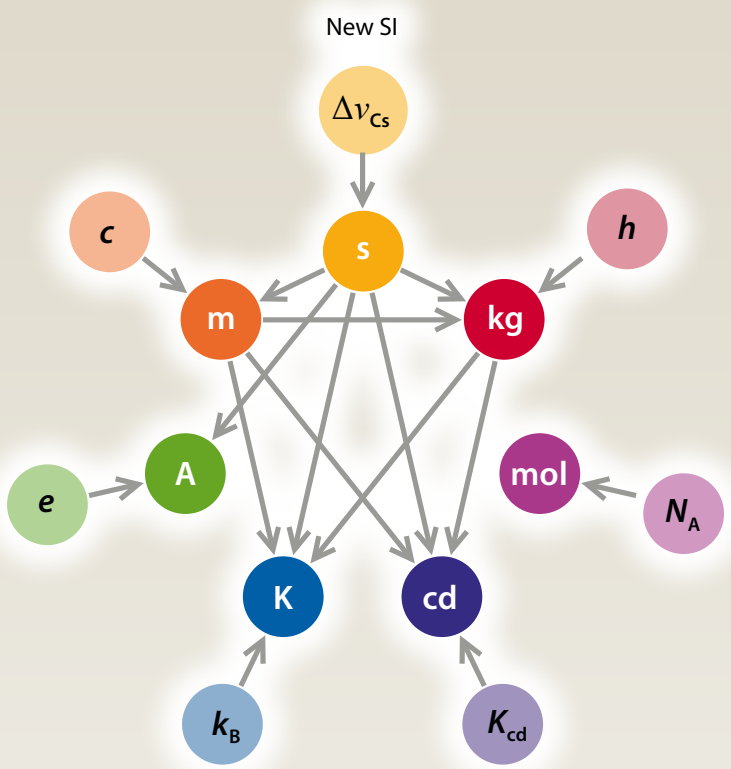


Fig. 1 Metrological dependencies between the different base units of the SI system of units as agreed to on 16 November 2018. This removed the International Prototype of the Kilogram as the definition. The chart shows the fundamental physical constants used to define the base units:
s - the frequency of the cesium hyperfine transition ($\Delta\nu_{Cs}$) for the second,
kg - the Planck constant (h) for the kilogram,
mol - the Avogadro constant (N_A) for the mole,
cd - the sensitivity of the human eye (K_{cd}) for the candela,
K - the Boltzmann constant (k_B) for the kelvin,
A - the elementary electric charge (e) for the ampere,
m - the speed of light (c) for the metre.
Courtesy of Emilio Pisanty, 2016.

2 A very short history of length

Finding the right reference for performing reliable measurements is a problem with a long history. The Egyptians took the approach of using the body as reference standard with the cubit, palm, and digit being defined as the length from elbow to tip of finger, width of hand, and width of finger. To assure standardization not just any body was chosen as reference, but that of the Pharaoh. Since one cannot disturb a Pharaoh very often to compare the length of objects to his body, primary copies of reference values were made in granite and secondary copies in wood. The resulting, surprisingly modern, system based on monthly recalibration of instruments – further strengthened by imposing the death penalty for non-compliance – functioned with amazing success and accuracy [5]. Similar systems based on artefacts as reference for length, weight, and volume have been used throughout Europe over the centuries with varying levels of accuracy and practicality. A massive downside of this type of system is the inconsistency of reference values in various locations, even within a single country. The value of one foot, for instance, could vary up to nearly a factor two from one city to another [6].

It was the French revolution that changed this situation forever. While initial ideas of a metric system can be traced back to the age of enlightenment, it was during the French revolution that a practical realization of a metric system was implemented [7]. Maybe even more importantly, the basic units were taken from the natural world so that they would not be owned by anyone and, in principle, accessible to all peoples and constant for all times. In particular, the metre was defined as one ten-millionth of the distance from the North Pole to the Equator (along the meridian going through Paris – after all the idea of this new system was launched by the French revolutionists) [8]. The new decimal system had various advantages and is still used today in most parts of the world. In an attempt to express every measurement in decimal numbers, even decimal time was introduced in the end of the 18th century, although it never gained the success of the other decimal units of measure.

The size of the Earth was clearly a more stable and universal reference with respect to the Pharaos forearm, but it was clearly not easy to measure the distance from the North Pole to the Equator. The technology used for measuring distances was that of *triangulation* in which unknown distances were inferred from angular measurements on clearly visible objects like towers and hill tops. Amongst the various triangulation studies, a famous one was performed by Méchain and Delambre between 1792 and 1798 – hence in the midst of the French revolution and therefore not without several practical difficulties [8]. As the two men climbed domed volcanoes, churches, and cathedral towers to perform their triangulation measurements, they were sometimes imprisoned as spies, royalists and accused of being sorcerers, while Méchain ended up being trapped in Barcellona when Spain declared war on France. The results of their heroic effort to measure the distance between Dunkerque and Barcelona resulted in a surprisingly accurate result which was only 0.02 percent off with respect to the currently known value. Various previous and successive triangulations to determine the size and shape of the Earth have been performed in different parts of the world, including the massive Great Trigonometrical Survey of India that started in 1802 and which finished nearly seventy years later [9]. The Earth as reference was stable and universal but clearly not very practical. Hence again an artefact had to be produced as primary standard, consisting in a Platinum Iridium bar conserved in a safe at the BIPM in Sèvres (Paris), which served as the standard of the metre until well into the 20th century.

Light can be used to determine length much more accurately than what can be achieved using a platinum iridium bar. People therefore started to use a krypton lamp and interferometry to determine length and this became the *de facto* standard of length while the official definition of the metre – in an attempt to keep up with developments – was only redefined in 1960 in terms of the wavelength in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the levels 2*p*10 and 5*d*5 of the krypton 86 atom [10]. The accuracy that could be achieved with this definition was again limited by technology – namely that of krypton lamps – and was soon superseded by the invention of the laser. The helium neon laser became the new *de facto* standard, with the definition of the metre again running behind technological developments.

At that point the metrology community could have used laser light to redefine the metre but they did not. The brilliant decision was taken to define the speed of light instead, that is to assign a *fixed* number to the speed of light (and hence without uncertainty) and build the definition of the metre on that. In 1983 at the 17th *Conférence Générale des Poids et Mesures* (*CGPM*) – the meeting in which representatives from governments world-wide take decisions on the International System of Units (SI) – it was decided that the new definition of the metre would be: "*The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of 1/299,792,458 second.*" which was reworded in 2019 to become: "*The metre, symbol* m*, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299792458 when expressed in the unit* $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$*, where the second is defined in terms of the caesium frequency* $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$*.*"

3 The last artefact

The definition of the metre – based on the speed of light – is so clever since it incorporates automatically any future technological developments. By fixing the speed of light and using that as reference for the definition of length, the accuracy of the unit is only limited to the accuracy by which a practical realization can be achieved, incorporating thereby in the definition all future technological improvements. With the metre defined in this new way, the only base unit that had remained behind, still defined with respect to an artefact, was the kilogram. It was the recent redefinition of the SI units during the 26th CGPM in 2018 in Versailles that finally overcame this imperfection and embedded a redefinition of the kilogram in terms of a natural constant, in particular the Planck constant [11].

Until that moment there were clear problems with the definition of the kilogram. The International Prototype of the Kilogram, or IPK, as kept in a safe in Sèvres and only occasionally taken out following a complex protocol to make comparisons with national copies, was diverging from its replicas by approximately 50 micrograms since its manufacture in the late 19th century [12]. This was clearly unacceptable since it introduced an inaccuracy in the definition of the unit of mass much greater than what can be measured with current and future technology. Hence a redefinition was in place. Various strategies have been explored by the international metrology community in the last decades to achieve this goal. One possible redefinition, pursued by the *International Avogadro Coordination*, was based on fixing the value of the Avogadro constant and defining the kilogram in terms of the mass corresponding to a well-defined number of silicon atoms or a physical object of well-defined size made of silicon [13]. While this type of definition was based on a natural constant, it still had difficulties for its practical realization in that it required to either count large numbers of silicon atoms or determine the mass of a physical object with possible inaccuracies arising from surface oxidation, impurities, lattice deformations, amongst others.

Box 1
The new definition of the kilogram

The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant, h, to be $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to kg m^2 s^{-1}, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{Cs}$.

This definition implies the exact relation $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ kg m^2 s^{-1}. Inverting this relation gives an exact expression for the kilogram in terms of the three defining constants h, $\Delta\nu_{Cs}$ and c:

$$1\ \text{kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h\Delta\nu_{Cs}}{c^2}$$

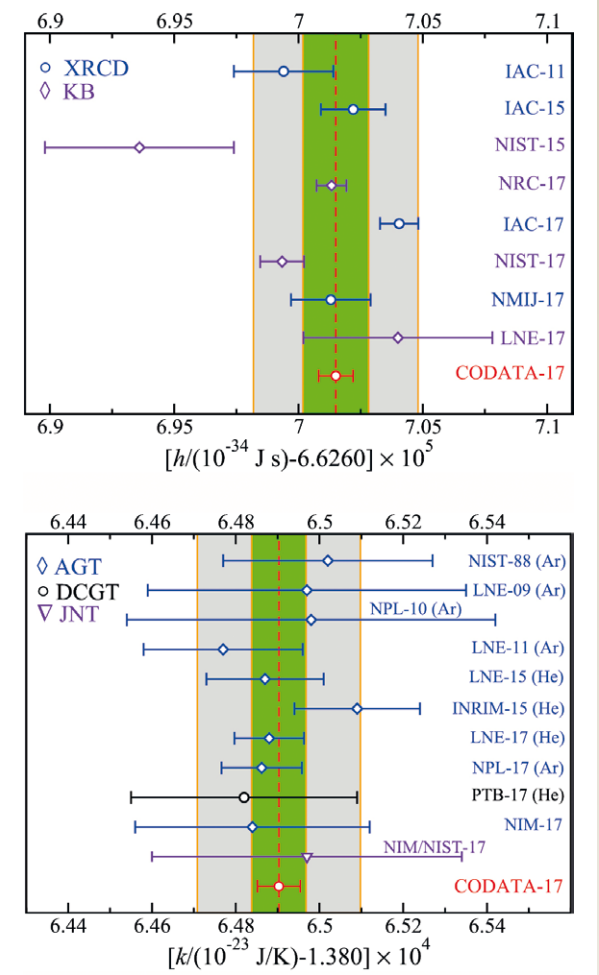


Fig. 2 Comparison, and consistency, of CODATA 2017 values for the Planck constant (top panel) and the Boltzmann constant (bottom panel), as measured by different approaches and collaborations for the revision of the SI. From: "*The CODATA 2017 values of h, e, k, and N_A for the revision of the SI*", D. B. Newell *et al.*, *Metrologia,* 55 (2018) L13. DOI: 10.1088/1681-7575/aa950a
© 2018 BIPM & IOP Publishing Ltd.

After careful consideration, the international metrology community opted for a different redefinition based on fixing the value of the Planck constant (see fig. 2). The Planck constant is related to the quantization of light and matter and equals the energy of a photon divided by its frequency. It can be seen as a subatomic-scale constant of nature and as such plays a fundamental role. Since energy and mass are equivalent through Einstein's relativity theory, the Planck constant can be used as reference for the definition of mass. When an atom emits a photon of frequency ν it loses the amount of energy $E = h\nu$, and hence its mass is reduced by the (tiny) amount $m = E / c^2$. As we saw above, the definition of the metre fixes the value of the velocity of light c, while the definition of the kilogram fixes the value of h. (See also Box 1.)

While the new definition of the kilogram as chosen by the international metrology community might seem, at first sight, somewhat more difficult to understand than the proposal based on counting silicon atoms, it has important advantages regarding its practical realization. In particular, it is now possible to realize the kilogram without creating a physical object. The mass of an object can be determined by a so-called Watt balance, or Kibble balance – named after its inventor Bryan Kibble – in which the weight of an object is compared to the force generated by an electrical current in a magnetic field [14]. This can be done very accurately since excellent quantum standards are available for both electrical current and voltage. Also the local gravitation acceleration g has to be known, but technology exists with which this can

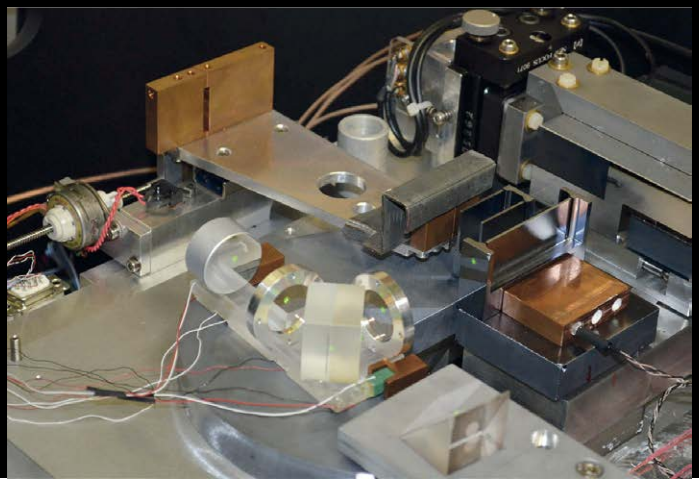


Fig. 3 Apparatus used at the Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) by Giovanni Mana and Enrico Massa to determine the lattice constant of ultra-pure silicon crystals, used within the International Avogadro Collaboration to determine the Avogadro constant and the Planck constant. © INRiM.

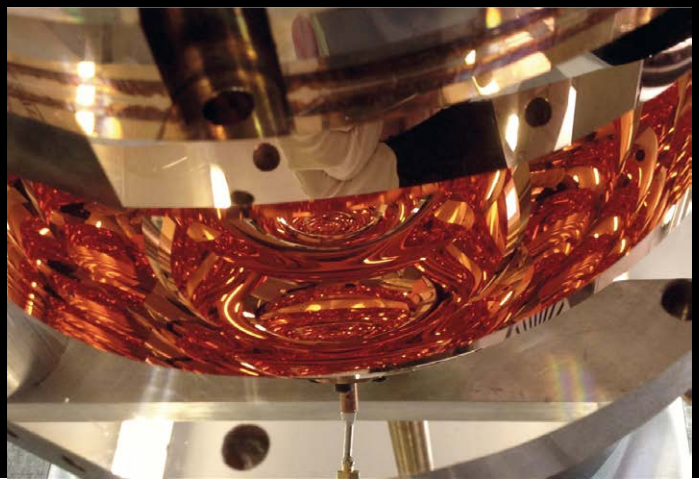


Fig. 4 Apparatus used at the Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) by the group of Roberto Gavioso to determine the Boltzmann constant, required for the new definition of the base unit of temperature, the kelvin. © INRiM.

be determined with great accuracy. In the new definition the Kibble balance is first used to determine the Planck constant and, later on, becomes a realization of the kilogram, without the use of any artefact.

Even though the alternative pursued by the International Avogadro Coordination was not chosen as new definition, the work performed in this context still provided a crucial contribution to the determination of the Planck constant, required for the new SI (see fig. 3). This collaboration provided a value for the Planck constant, measured with a technology totally independent of the Kibble balance, and consistent with the Kibble balance work with a relative uncertainty of the order of 10^{-9}. That is an amazing achievement and only possible thanks to decades of painstaking improvement of accuracies, analysis, and reduction of systematic errors. Much passion and time of metrologists around the world went into this effort. I still remember the meeting of the Consultative Committee for Units (CCU) in Sèvres in 2018, in which results on the Planck constant were discussed and the decision was taken to move forward with the redefinition of the kilogram. Enrico Massa, who worked with Giovanni

Mana at the *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRiM) in a lifetime effort to measure the lattice constant of silicon – a value crucially important for the value of the Planck constant using the Avogadro approach and a measurement in which the entire international community put its trust – confessed that he was truly worried the evening before this crucial meeting: "What if, after 40 years of work, there is still some systematic error or mistake that we did not notice?".

The values for the Planck constant matched and all approvals were obtained to go forward with the redefinition of the SI. It was voted unanimously in favour by the representatives of all member states during the *Conférence Générale des Poids et Mesures* in 2018 and brought into force on May 20th 2019, the date of the world metrology day. Together with the kilogram, all base units were either redefined or reworded, including the kelvin which became defined using a fixed value of the Boltzmann constant [11] (fig. 4). With the redefinition we now have an international system of units, recognized by nearly all countries in the world through the metre convention, in which the base units are defined with respect to natural constants (fig. 5) (see also Box 2.) While there is still an improvement to come in future years regarding the definition of the second [15], a milestone in the definition of the base units has been achieved and the metrology community – rightfully proud of this results – can move forward from here. Important things to be taken care of in the future include the implementation of the new SI and the development of new metrology science and technology for industry, society, and scientific research in general.

4 Towards the future

Our industry and society are rapidly changing. The recent progress in neural networks has allowed efficient implementation of machine learning algorithms which will change, for instance, the way we drive cars, perform medical diagnoses, control industrial processes and take strategic decisions in general. The full impact that the current digital revolution will have on our lives in the near future is difficult to oversee.

At the same time humanity has put unprecedented pressure on the resources offered by our planet, which means we have to deal with important global challenges including climate change induced by global warming, environmental pollution on various scales, and potential scarcity of resources such as energy, food, and drinking water. Within this rapidly changing context one can ask the question how metrology research and technology can and should develop such that its impact for industry and society, as well as for other fields of science, can be maintained and further improved.

Box 2
The new SI

The International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, $\Delta\nu_{Cs}$, is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum, c, is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant, h, is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge, e, is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant, k, is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant, N_A, is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol^{-1} ,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×1012 Hz, K_{cd}, is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to $Hz = s^{-1}$, $J = kg\ m^2\ s^{-2}$, $C = A\ s$, $lm = cd\ m^2\ m^{-2} = cd\ sr$, and $W = kg\ m^2\ s^{-3}$.

Fig. 5 Draft Resolution A of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM, Versailles, 2018) and Italian vote (inset).

4.1 Focus points for future metrology research

A. Monitoring the environment and supporting the development of clean technologies

The state of our environment poses a major concern in our rapidly changing world. Research programs at national, European, and worldwide level dedicate special attention to environment technologies and the protection of the fragile environment in which we are living. Metrology can play an important role, for instance in assessing climate change and pollution.

Monitoring the environment requires a huge amount of data, collected by different sources (satellites, air-based, marine-based, terrestrial networks, etc.), which require careful traceability, calibration, uncertainty evaluation, and conformity assessment for instruments and procedures. Moreover, the global environment is very complex and hence monitoring initiatives must deal with the specific requirements of atmosphere, sea, and land under investigation, including those under extreme environments (*e.g.* mountains, polar regions, etc.).

Monitoring the environment is not only a scientific challenge *per se*, but it is also a trigger to supporting the development of clean technologies. Efficient and reliable assessments of pollution and greenhouse gas emissions in each step of a value chain or during a product life cycle is crucial. In recent years, various methodologies have been developed to quantify and report greenhouse gases emissions, among other things, i) for companies during the whole value chain, ii) for products life cycles, iii) for emission-mitigation projects. Standard protocols are important for planning, comparisons of strategies, products and companies, and for transparent public reporting. However, whereas such a holistic approach is becoming ever more common at the corporate level, end-users tend to focus on very few steps, neglecting large parts of the product life cycle. Faithful measurements of the emissions and clear communication and explanation to the citizens is therefore very important.

B. Supporting sustainable energy conversion and clean storage

The public concern with environmental consequences of energy conversion and storage has increased rapidly in recent years. Effects on the environment happen at all stages, from extraction of raw materials, through manufacturing, distribution, consumption and disposal, and include the depletion of natural resources, pollution, and the degradation of soil and forests.

A limit to the energy that can be made available from renewable sources, which are intermittent and partially unpredictable, is given by the distribution grid and the storage capacity. Various storage approaches are under development that allow for an increase of self-consumption of electricity by small-scale photovoltaic systems, support frequency and voltage regulation of the distribution grid, and decouple energy generation from demand over the time scale of one day. However, batteries play a prominent role because they are particularly suited for the car industry, which canalizes large resources for research and development. Battery production is rather expensive and emits large amounts of greenhouse gases, but the longer the life cycle of a battery the lower is the pollution over the whole life cycle, especially if this allows replacing fossil fuels by renewable sources. Introducing renewable sources into the energy infrastructure is extremely challenging for the grids, because of the need to compensate energy intermittency and to balance energy users and producers. This is typically achieved also by smart metering. Smart electrical, thermal, and fluid grids open new challenges, also because they require new paradigms in distributed metrology and user data protection. Thus, the problem is complex and its solution does not depend only on mere technical improvements but also on social habits, organization, and coordination on a national and international level. Hence the metrological challenge includes the development of methods to measure advantages for the community in such a complex context, and measurements of habits of citizens.

C. Supporting the quality of life and health

Supporting life quality and heath requires that medicines and therapies are assessed, that chronic diseases are monitored over time, and that our food chain is properly protected. If physical metrology has reached its maturity, the situation is much more challenging for chemical metrology and even more for agri-food and biological metrology. In particular, the latter is still actively working on identifying biological markers (biomarkers), which are objective and measurable indicators of normal biological processes, pathogenic processes or pharmacological responses to therapeutics. Once these biomarkers are identified, it is essential to define reference materials, which can be used to ensure the traceability and reproducibility of biological measurements, and to store them in biobanks, namely repositories that store biological samples for use in research and medicine. Similar considerations hold for the traceability and quality assessment of food and medicines.

D. Accelerating digital transformation and supporting industrial transitions

Industrial transitions have significantly changed our society throughout the centuries – from the introduction of steam engines, then mass production, and more recently electronics-based automation. Nowadays industry is facing a new transition based on (large amounts of) data and partially autonomous machines – a concept often referred to as Industry 4.0. Metrology can help to make Europe more competitive in this transition.

Clearly better sensors (smarter, cheaper, and more robust) will play a key role for assessing the quality of measurements. Cheap sensors pave the way towards large-scale sensor networks, which can bring new levels of quality assessment and traceability to primary standards throughout the whole value chain. The use of sensor networks provides a challenge for metrology since it requires a paradigm shift from single, high-quality sensors with extremely low measurement uncertainty to the analysis of large amount of data produced

by many lower-quality sensors. These large amounts of data will also require new types of data processing, analysis, and (automated) decision making. At the same time the data and information infrastructure has to be protected against cyber security threads. Digital transformation is much more than collecting data: it is a way to redesign the industrial production (even dynamically) in order to match a wider set of requirements by the customers.

E. Developing technology for space applications and research

Europe manages today the second largest public space budget (Member States, EU, ESA, and EUMETSAT) in the world with programs and facilities spanning different European countries. Because of this investment, Europe can rely on its own space systems like Copernicus for Earth observations, the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), and Galileo for satellite navigation and geo-positioning. Space technologies, data, and services have become indispensable in the daily lives of European citizens. In particular, Copernicus is the most advanced Earth observation system in the world and Galileo is the first civilian-run navigation satellite system, providing highly accurate global positioning data. In spite of this excellent positioning, Europe has to face new challenges due to global competition and the pervasive integration with digital technologies.

The combination of space data and digital technologies allows to develop novel space services for the benefit of society and the European economy. For these reasons, the new EU space program will integrate current activities and will synergically drive them during the next decade. The European Commission envisions to promote the uptake of Copernicus, EGNOS, and Galileo solutions in EU policies. In particular, the Commission aims to facilitate the use of Copernicus data and information by strengthening data dissemination and setting up platform services, promoting interfaces with non-space data and services. From the metrological point of view, this strategic goal requires a careful assessment of the data quality and their improvement by advanced sensors and their integration. Moreover, the Commission intends to promote measures for introducing the use of Galileo for mobile phones, and critical infrastructures using time synchronization.

F. Improving the quality and impact of fundamental scientific research

Properly designed and executed experiments constitute an essential pillar of both fundamental and applied scientific research. While much investigation is done to improve metrology, the use of – often very advanced and reliable – metrology tools to improve the quality of measurements in other fields of research is less common. Yet there is a golden opportunity for scientific progress by strengthening cross fertilization between research communities. Science – in addition to industry and society – constitutes in that respect a customer for metrology.

Certain areas of fundamental science intrinsically require high-precision measurements. Examples include ultra-sensitive quantum physics experiments, time synchronization in fundamental physics experiments, and the determination of fundamental constants. In addition to the research areas that intrinsically require metrology to achieve the extreme accuracy required for their experiments, there are several fields of research that do not require metrology know-how intrinsically, but that can still benefit enormously from the above-described synergy.

5 Conclusions

With the new SI in place and the implementation on its way, the world-wide metrology community has reached an important milestone. All base units are now defined with reference to natural constants, which means that all future technological developments are

automatically built into the system. A new chapter opens now in which metrology can help to address some of the current fundamental challenges of our society, including energy, environment, and health. Also an important role for metrology tools to improve scientific research in general can be foreseen. The road to the redefined SI has been exciting and many more dreams are bound to become real.

References

[1] A. G. Stephenson, L. S. la Piana, D. R. Mulville, P. J. Rutledge, F. H. Bauer, D. D. Folta, A. Greg, R. Sackheim, P. Norvig, "*Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report*" (NASA, November 10, 1999).

[2] The event became known as the 'Gimly Glider' since the crew was able to glide the Boeing 767 aircraft to an emergency landing on a deserted airforce landing strip in Gimly, Manitoba; R. Witkin, "*Jet's Fuel Ran Out After Metric Conversion Errors*", *The New York Times* (July 30, 1983); retrieved August 21, 2007.

[3] Proceedings and resolutions of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (Versailles, 13-16 November 2018). https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/

[4] The idea was already voiced by James Clerk Maxwell, who predicted that measurement standards can be defined by immutable constants of nature. Speaking at a meeting of the British Association for the Advancement of Science in Liverpool in 1870, Maxwell told delegates that "If…we wish to obtain standards of length, time and mass which shall be absolutely permanent, we must seek them not in the dimensions, or the motion, or the mass of our planet, but in the wavelength, the period of vibration, and the absolute mass of these imperishable and unalterable and perfectly similar molecules". See also: J. C. Maxwell, "*A Treatise On Electricity and Magnetism*" (MacMillan and Co., London) 1873.

[5] R. H. Willard, "*Weights and Measures in Egypt*", edited by H. Selin, "*Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*" (Springer, Dordrecht) 2008. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4425-0_8933

[6] R. E. Zupko, "*Revolution in Measurement: Western European Weights and Measures Since the Age of Science*", *Mem. Am. Philos. Soc.*, 186 (1990) 123. ISBN 978-0-87169-186-6.

[7] "*Histoire de la métrologie*" (in French) (Association Métrodiff, Paris) retrieved 2 April 2020. https://www.metrodiff.org/wp/metrologie/histoire-de-la-metrologie/lois-et-decrets/

[8] K. Alder, "*The Measure of all Things – The Seven-Year-Odyssey that Transformed the World*" (Free Press, New York) 2004.

[9] W. Lambton, "*An account of the Trigonometrical Operations in crossing the peninsula of India, and connecting Fort St. George with Mangalore*", *Asiatic Researches or Transactions of the Society Instituted in Bengal for Inquiring into the History and Antiquities* (1811) pp. 290–384.

[10] 17th General Conference on Weights and Measures, Resolution 1 (1983).

[11] *The International System of Units (SI) – 9th edition* (Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres) 2019. https://www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf

[12] M. Stock, P. Barat, R. S. Davis, A. Picard, M. J. T. Milton, "*Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies", Metrologia,* 52 (2015) 310. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/52/2/310/pdf

[13] B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda, S. Zakel, "*Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition", Metrologia*, 48 (2011) S1; G. Brumfiel, "*Elemental shift for kilo", Nature,* 467 (2010) 892.

[14] I. A. Robinson, S. Schlamminger, "*The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass*", *Metrologia,* 53 (2016) A46.

[15] F. Riehle, "*Optical clock networks", Nat. Photon.,* 11 (2017) 25.

[16] An extensive list can be found in the document "*Metrology – in short*" (EURAMET) 3rd edition.

Diederik S. Wiersma

Born in The Netherlands and PhD at the University of Amsterdam in 1995. He is president of the National Metrology Institute INRIM in Turin, professor in physics at the University of Florence, and affiliated with the LENS laboratory. His research interests lie in the fundamental properties of photonic materials and their practical applications for energy, environment, and health. In particular, he has played a pioneering role in the field of disordered photonics, random lasers, and recently started to explore adaptive/intelligent materials and nano robotics. Of his scientific papers on these topics, over 20 papers were published in the *Nature* and *Science* journals including several cover stories. He appreciates teaching based on innovative methods similar to peer-instruction. Received the Ugo Campisano award in 2004, the Premio Tartufari for physics in 2014, and the Enrico Fermi prize in 2015.

THE SPECOLA VATICANA

THE OBSERVATORY OF THE HOLY SEE

RICHARD D'SOUZA SJ, GABRIELE GIONTI SJ
Specola Vaticana, Città del Vaticano, Stato della Città del Vaticano

The Vatican is an independent nation, with its own national astronomical observatory, the Specola Vaticana. Astronomy has been supported at the Vatican since the 1582 reform of the calendar; the present Observatory has been in operation since 1891. The work of the observatory is divided between two sites, one in the papal summer gardens at Castel Gandolfo, Italy, and the other affiliated with the University of Arizona, Tucson, Arizona, USA. Given the stable funding provided by the Vatican, the Observatory has specialized in long-term research projects ranging from cosmology and the study of galactic evolution to meteoritics and meteors.

LA SPECOLA VATICANA

1 Le origini della Specola

Per la maggior parte delle persone sapere che la Santa Sede ha un proprio osservatorio astronomico è spesso una sorpresa. L'attuale Specola Vaticana è stata fondata nel 1891 da Papa Leone XIII. La Chiesa ha sempre promosso studi di matematica, fisica e astronomia. Il curriculum della formazione dei chierici nel medioevo includeva lo studio dell'aritmetica, geometria e astronomia (nel famoso "quadrivio", il programma di studio delle arti liberali). Sin dal 16° secolo, la Chiesa è stata la più grande sostenitrice della ricerca in astronomia. La motivazione iniziale era quella di risolvere i problemi esistenti con il calendario giuliano e prevedere in modo affidabile le date della Pasqua. Tra il 1650 e il 1750 le Chiese Cattoliche furono utilizzate come osservatori solari per far luce sulla controversa geometria del Sistema Solare. Nel XVIII e XIX secolo la Santa Sede sostenne attivamente la costruzione di osservatori dedicati specializzati nell'osservazione del nuovo fenomeno astronomico scoperto attraverso l'utilizzo dei telescopi. Con la conquista di Roma nel 1870 e l'espropriazione dell'osservatorio Papale del *Collegio Romano* nel 1873, il Papato si trovò privato delle sue istituzioni astronomiche. Ciò spinse Papa Leone XIII all'istituzione di un nuovo Osservatorio di proprietà del Vaticano il cui compito fu dichiarato nel Motu proprio *Ut Mysticam* del 1891, "*sia a tutti chiaro che la Chiesa e i suoi Pastori non si oppongono alla vera e solida scienza, sia umana sia divina, ma che l'abbracciano, l'incoraggiano e la promuovono con tutto l'impegno possibile*".

Ma il fascino della Chiesa per l'astronomia risale più indietro ancora nel tempo. Lo studio della creazione nella Chiesa Cattolica è stato visto a lungo come un atto di adorazione del Creatore. Nella cosmologia di quel tempo, i movimenti degli oggetti nel cielo riflettevano la massima perfezione; c'era un'intima connessione tra il mondo fisico e il mondo metafisico. Comprendere quei movimenti delle stelle e dei pianeti ha avuto importanti implicazioni filosofiche e teologiche.

Tuttavia, il primo compito assegnato agli astronomi dalla Santa Sede fu il problema immediato e pratico di riformare il calendario Giuliano soggetto a errori e la precisa determinazione della data della Pasqua in modo che fosse stato pratico per la cristianità che si stava diffondendo fino all'Asia orientale e alle Americhe. Seguendo le istruzioni del concilio di Trento, Papa Gregorio XIII nel 1579 istituì una commissione per studiare i suggerimenti del medico e astronomo pugliese Luigi Giglio per correggere il calendario esistente. La commissione comprendeva Padre Ignazio Danti, OP, che installò una linea meridiana nella Torre dei venti di recente costruzione in Vaticano per dimostrare che il calendario giuliano aveva un errore di dieci giorni, e Padre Christophorus Clavius, SJ, matematico gesuita e astronomo del Collegio Romano. Il calendario Gregoriano riformato fu promulgato nel 1582. Su richiesta del Papa, Padre Clavius non solo scrisse il libro "*Novi Calendari Romani Apologia*", per spiegare le esigenze della nuova riforma e calcolò le date di Pasqua per i seguenti 5000 anni, ma fece anche molto per divulgare il nuovo calendario Gregoriano. Dopo aver terminato il lavoro, Padre Clavius e i Gesuiti del Collegio Romano continuarono a fare ricerche di astronomia.

Il Collegio Romano, fondato da Sant'Ignazio nel 1551 e patrocinato da Gregorio XIII nel 1584, divenne rapidamente il principale istituto educativo del suo tempo, nonché un centro di ricerca astronomica. Grazie all'introduzione del corso in matematica, astronomia e scienze esatte ad opera di Padre Clavius, il Collegio avrebbe prodotto molti famosi astronomi Gesuiti: Padre Christof Scheiner (1576-1650) che studiò le macchie solari, Padre Orazio Grassi (1583-1654) e Padre Gilles-Francois de Gottignies (1630-1689) che studiarono le comete. Padre Nicola Zucchi nel 1616 costruì quello che fu il primo telescopio riflettore. Padre Atanasio Kircher (1601−1680) grazie al telescopio fece disegni dettagliati di Giove e Saturno, mentre Padre Riccioli e Grimaldi realizzarono mappe e nominarono i crateri sulla luna. Padre Matteo Ricci, SJ, usò invece l'astronomia per riuscire ad entrare nella corte dell'Imperatore della Cina.

I Gesuiti del Collegio Romano entrarono nei dibattiti scientifici del loro tempo. Furono tra i primi a confermare le osservazioni effettuate da Galileo con il telescopio, sebbene rimasero scettici sul sistema copernicano per mancanza di prove adeguate. Da giovane studioso, Galileo venne a Roma per tenere un seminario al Collegio Romano e Padre Clavius contribuì ad affinare la sua formazione scientifica e lo raccomandò per una posizione a Pisa. Tuttavia, i rapporti tra Galileo e i Gesuiti si inasprirono rapidamente, quando rivendicò la priorità su alcuni dei loro risultati o addirittura sminuì le loro osservazioni. Dieci anni dopo, quando Galileo fu processato, le sue aspre controversie con loro gli sarebbero costate la loro amicizia, in un momento in cui ne avrebbe avuto più bisogno.

La reputazione degli astronomi e dei matematici del Collegio Romano continuò nei secoli successivi. Padre Girolamo Saccheri, SJ, nella sua ultima pubblicazione prima della morte nel 1773, fu il primo a sviluppare una geometria non euclidea in Europa. Bisogna menzionare anche Padre Boschovich, SJ, che fu il primo a proporre una teoria dell'atomismo e fu anche il primo al Collegio Romano ad abbandonare il sistema di Tycho Brahe e adottare quello di Copernico. Anche durante la soppressione della Compagnia di Gesù dal 1773 al 1814, il lavoro scientifico del Collegio Romano continuò senza sosta, sotto la guida di Padre Giuseppe Calandrelli, sacerdote diocesano e professore di astronomia, che insieme ai suoi colleghi fece molte osservazioni del Sole, dei pianeti, delle comete e delle occultazioni stellari.

Sebbene al Collegio Romano continuasse la ricerca astronomica, non esisteva un osservatorio separato: le osservazioni venivano fatte dalle finestre e dai balconi del collegio. Fu Padre Boschovich, SJ, il primo a proporre di installare un osservatorio sul tetto della vicina chiesa di Sant'Ignazio, la cui struttura stabile poteva sostenere il peso di un osservatorio. Nel 1774 fu quindi fondato il Pontificio osservatorio del Collegio Romano sotto la guida di Padre

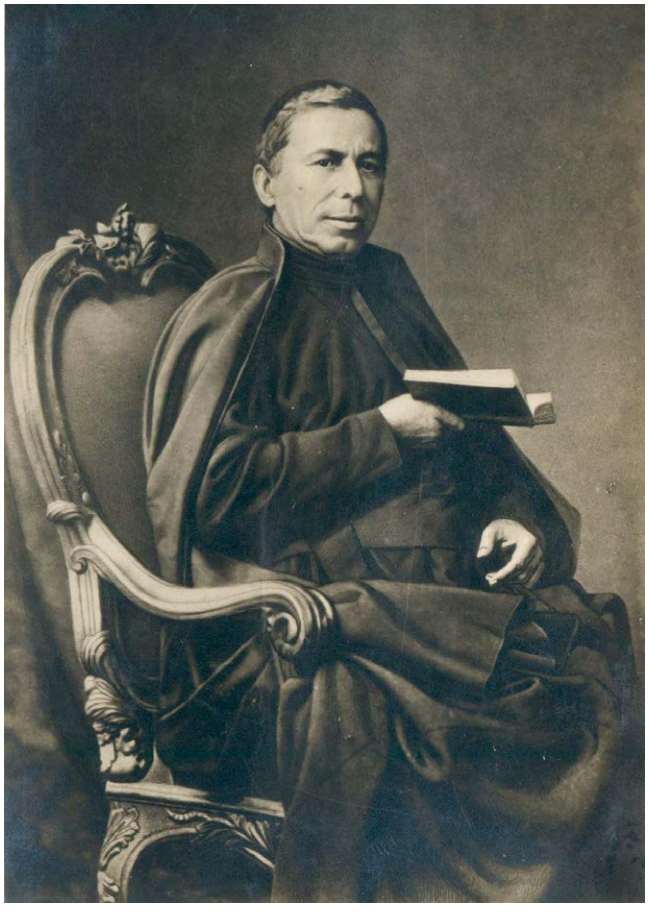


Fig. 1 Padre Angelo Secchi, SJ.

Calandrelli, che costruì una torre al Collegio Romano per condurre le sue osservazioni astronomiche. Quando Padre Angelo Secchi, SJ, fu nominato Direttore del Collegio Romano nel 1850, riprese rapidamente l'idea di Padre Boschovich e, con l'aiuto dei suoi superiori Gesuiti e le donazioni di Pio IX, istituì un osservatorio sul tetto della chiesa di Sant'Ignazio.

Padre Secchi è stato probabilmente il più famoso astronomo Gesuita e il principale protagonista nel dimostrare l'interesse della Chiesa per le scienze (fig. 1). Pur essendo un fisico di formazione, partendo dall'astronomia diede enormi contributi ad una nascente disciplina scientifica: l'astrofisica. Nonostante dovesse tenere lezioni di matematica e fisica al Collegio Romano, non trascurò minimamente la sua attività di ricerca. Il suo principale interesse era il Sole, i cui problemi lo attirarono fino alla fine della sua vita. Quotidianamente osservò il numero delle macchie solari, il loro movimento e la loro forma e, dopo averle osservate al telescopio, disegnandole ne riprodusse le più interessanti. Nel 1861 Janssen capì che lo spettroscopio poteva essere usato per osservare le protuberanze solari anche senza eclissi solare. Secchi subito utilizzò il metodo per osservare anche lui le protuberanze e trovò il nesso tra protuberanze e macchie solari. Seguendo gli esempi di Fraunhofer e Respighi usò lo spettroscopio per analizzare la luce delle stelle verso cui diresse il telescopio Cauchoix ponendo un prisma circolare davanti all'obiettivo per analizzarne lo spettro della loro luce. Così eseguì lo spettro della luce di ben 4000 stelle e notò che tutti questi spettri potevano essere suddivisi in quattro classi principali. Padre Angelo Secchi fu il primo astronomo a proporre una classificazione delle stelle in base ai loro tipi spettrali. Tuttavia, successivamente, la sua classificazione fu superata da una più ampia classificazione in dieci tipi dell'Osservatorio di Harvard.

Con la presa di Roma del 1870, il Collegio Romano fu espropriato e dichiarato proprietà dello Stato Italiano nel 1873. Le autorità italiane volevano occupare anche l'Osservatorio del Collegio Romano. Secchi protestò vivamente. Giacché era troppo famoso all'estero, ed un eventuale sequestro dell'osservatorio sarebbe sfociato in uno scandalo internazionale per il nascente stato italiano, alla fine fu lasciato indisturbato a continuare le sue ricerche. Alla sua morte, nel 1878, l'osservatorio fu subito requisito.

Oltre all'osservatorio del Collegio Romano, il Papato sostenne anche un altro osservatorio chiamato *Archiginnasio Romano* (oggi Università di Roma), sulle colline del Campidoglio. Sia Papa Leone XII che Pio IX lo sostennero attivamente. L'osservatorio vantava astronomi famosi dell'epoca come i suoi direttori, Ignazio Calandrelli (1848) e Lorenzo Respighi (1865). Dopo gli eventi del 1870 questo osservatorio fu incamerato dallo Stato italiano e, dopo un trasferimento, divenne *l'Osservatorio Astronomico di Roma* su Monte Mario.

2 La rifondazione della Specola

Alla fine del diciannovesimo secolo, la Chiesa si trovò immersa in un nuovo clima di antagonismo. Il nuovo stato liberale italiano aveva da poco trasferito la capitale d'Italia a Roma e aveva, come abbiamo già accennato, confiscato tutti i beni della Santa Sede. Il Papa, in senso di protesta, viveva recluso in Vaticano. Gli intellettuali liberali accusavano la Chiesa Cattolica di oscurantismo contro le scienze esatte, citando come esempi il "caso Galilei" e la condanna e la successiva uccisione di Giordano Bruno.

Fu in questo contesto che Leone XIII fondò la Specola Vaticana. Voleva un'istituzione scientifica di livello mondiale con una chiara missione di risposta ai critici della Chiesa, ma anche un'istituzione che rappresentasse la Santa Sede a livello internazionale nel mondo della scienza e legittimasse il Vaticano come una distinta e separata Città Stato. In occasione del 50° giubileo sacerdotale di Leone XIII, nel 1888, Padre Francesco Denza e i suoi collaboratori organizzarono una mostra di strumenti per la meteorologia e la sismologia all'interno della Torre dei Venti nel Vaticano (fig. 2). Leone XIII, con un genuino interesse per la scienza, voleva che questi strumenti continuassero ad essere utilizzati per la ricerca scientifica. Fondò la Specola Vaticana nel 1891 incorporando questi strumenti e nominò Padre Denza come primo Direttore.

Tuttavia, mantenere un osservatorio scientifico di livello mondiale implica fornirgli una leadership e uno staff qualificati, nonché dotarlo delle attrezzature necessarie per fare ricerche in astronomia. Dopo una lunga ricerca di una leadership adeguata, nel 1905 fu nominato a capo della Specola Vaticana l'astronomo gesuita Padre Johann Hagen, SJ, che all'epoca era Direttore dell'Osservatorio del Georgetown College di Washington DC. Dal 1930 la responsabilità di selezionare un Direttore ed il personale dell'osservatorio fu affidata alla Compagnia di Gesù. Tuttavia, il successo dell'osservatorio dipendeva anche dalla sua capacità di osservare il cielo notturno. All'inizio l'osservatorio era ospitato all'interno del Vaticano, con le cupole costruite sulle mura. La crescente luminosità della città di Roma rese quasi impossibile l'osservazione all'interno del Vaticano. Nel 1935 l'osservatorio fu trasferito nel Palazzo Pontificio di Castel Gandolfo alle porte di Roma: sulla terrazza del Palazzo furono costruite le cupole che ospitavano i telescopi astronomici più avanzati del tempo. Tuttavia, negli anni '70, la crescita della città di Roma iniziò a inquinare il cielo notturno di Castel Gandolfo, rendendo difficile qualsiasi osservazione notturna per la ricerca astronomica. Con la nomina di Padre George Coyne, SJ, come Direttore nel 1978 inizia un nuovo capitolo di modernizzazione ed espansione. In primo luogo, nel 1980 è stato istituito un gruppo di ricerca attivo presso l'Università dell'Arizona, Tucson, negli Stati Uniti, che aveva accesso ai numerosi telescopi nel deserto circostante. In secondo luogo,

Fig. 2 La Torre dei Venti in Vaticano dopo la rifondazione della Specola nel 1891.

Fig. 3 Padre Lais, assistente di Padre Denza, mentre fotografa all'astrografo la *Carte du Ciel*.

negli anni '90, insieme all'Università dell'Arizona, la Specola per aiutare le sue attività di ricerca ha costruito un moderno telescopio del diametro di 1,8 metri sulla cima del Monte Graham. Questo telescopio si chiama *Vatican Advanced Technology Telescope* (VATT) ed è il telescopio principale utilizzato oggi per la ricerca astronomica. Dagli anni '90, la Specola continua a operare da queste due sedi principali: Castel Gandolfo, Italia e Tucson, in Arizona, con la prima che è rimasta la sede della Specola.

3 L'attività del nuovo Osservatorio Vaticano

Il primo grande progetto intrapreso dalla Specola Vaticana è stato quello di essere coinvolta in una collaborazione internazionale guidata dall'Osservatorio di Parigi per creare una mappa di tutto il cielo, fotografando le stelle fino a un certo limite di luminosità. Consisteva in due progetti strettamente correlati: il primo noto come il Catalogo astrografico, inteso a ottenere una mappa completa delle stelle fino all'11° magnitudine e in secondo luogo una mappa più profonda, chiamata *Carte du Ciel* (la Carta del Cielo), che fotografava le stelle con una luminosità più bassa della magnitudine 14. Circa 18 osservatori in tutti i continenti parteciparono al progetto, con altri quattro osservatori che si sono uniti in seguito. A ciascuno degli osservatori partecipanti è stata assegnata una zona del cielo notturno da osservare con un telescopio rifrattore (un campo di 4 gradi quadrati) per garantire l'omogeneità dei dati. Questo progetto ha catapultato il giovane osservatorio Vaticano sulla scena internazionale della ricerca astronomica.

I progetti del Catalogo e della *Carte du Ciel* occuparono la Specola per molto più tempo di quanto inizialmente stimato, infatti il lavoro si protrasse per alcuni decenni. Ciò diventa comprensibile considerando le sfide tecniche del progetto. Innanzitutto, per completare la parte di cielo affidata alla Specola, sono state necessarie in totale 1040 lastre fotografiche (fig. 3). I vincoli di osservazione consentivano solo osservazioni per ~ 50 notti all'anno; quindi, il completamento del progetto richiese un tempo sufficientemente lungo. In secondo luogo, l'elaborazione dei dati, il calcolo della posizione delle stelle e la loro pubblicazione richiesero molto lavoro. Padre Hagen per accelerare il processo impiegò tre suore dell'Istituto di Maria Bambina che misurarono e registrarono la posizione e il diametro delle stelle dal 1910 al 1921 (fig. 4). In terzo luogo, la crescente luminosità della città di Roma rese le osservazioni sempre più difficili. Anche dopo che la Specola si trasferì nella sua nuova sede a Castel Gandolfo, il lavoro continuò. In quarto luogo, il costo della stampa manuale dei cataloghi e delle mappe, nonché lo scoppio della Prima e della Seconda

Fig. 4 Le suore di Maria Bambina intente a misurare le lastre del Catalogo astrografico con i micrometri Repsold.

guerra mondiale, rallentarono notevolmente i progetti, con alcuni osservatori che abbandonarono prematuramente il lavoro. La Specola Vaticana è rimasto uno dei pochi osservatori a finire la sua parte in entrambi i progetti che furono completati rispettivamente nel 1928 e nel 1955.

Nonostante i suoi alti costi, il catalogo e la *Carte du Ciel* sono stati il primo progetto internazionale in astronomia e i precursori di futuri grandi programmi internazionali. Il coinvolgimento nel progetto ha fatto rapidamente guadagnare alla Specola una visibilità internazionale. Il catalogo è stato l'unico ad avere un impatto duraturo sulla comunità scientifica. Nel 1980, l'Osservatorio Navale degli Stati Uniti ha elaborato i dati, costruendo una guida del catalogo di stelle del cielo notturno, tuttora in uso. Il progetto *Carte du Ciel* è stato il precursore di ulteriori programmi per mappare l'intero cielo dallo spazio: il satellite Hipparcos (1989) e il satellite Gaia (2013). Tuttavia, le storiche tavole della Specola offrono una registrazione storica delle stelle nel cielo notturno, su una linea di base temporale molto più lunga, e sono state utilizzate per studiare la variabilità a lungo termine delle stelle e i loro movimenti propri. Queste tavole ben conservate sono in fase di digitalizzazione e continuano a far parte delle grandi risorse della Specola.

Oltre al telescopio *Carte du Ciel* la Specola, nel corso degli anni, ha acquisito numerosi telescopi. Con il trasferimento a Castel Gandolfo nel 1934 acquisì due telescopi. Il primo, un rifrattore visuale Zeiss, con un obiettivo di 40 cm e di lunghezza focale di 6 m. Il secondo era un doppio astrografo Zeiss che consisteva di due telescopi tenuti in parallelo: un rifrattore con un obiettivo di 40 cm di lunghezza focale di 240 cm e un riflettore con uno specchio parabolico di 60 cm di lunghezza focale newtoniana di 200 cm. Entrambi questi telescopi continuano ad esistere fino ad oggi e sono utilizzati principalmente per attività di divulgazione. Tuttavia, i telescopi a quei tempi erano all'avanguardia e permettevano agli astronomi vaticani di contribuire alle questioni scientifiche del momento.

Il più famoso di questi contributi scientifici fu l'"*Atlante delle stelle variabili*" ("*Atlas stellarium variabilum*")(stelle che cambiano la loro luminosità con una certa frequenza) di Padre Hagen, l'ultima edizione fu pubblicata nel 1941. Questo atlante offriva una delle mappe più aggiornate di stelle variabili disponibili ed era ampiamente apprezzato nella comunità astronomica. Altrettanto importanti sono gli studi di Hagen sulle nebulose oscure, che intuì correttamente come nuvole di polvere e gas nella Via Lattea e che suscitò un notevole interesse nella comunità astronomica. Questi studi gettarono le basi dei futuri studi sulla struttura della Via Lattea che avrebbero dovuto occupare gli astronomi vaticani dal 1934 in poi. In particolare, continuarono a studiare stelle

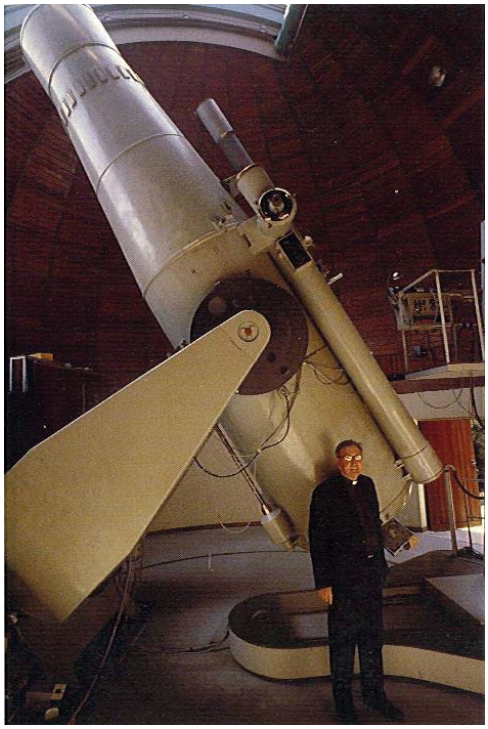


Fig. 5 Il telescopio Schmidt. In primo piano, Padre Martin McCarthy, SJ.

Fig. 6 Laboratorio spettrochimico: sala degli spettrografi.

variabili (in particolare cefeidi and RR *Lyrae*), che fornirono un modo per misurare le distanze all'interno della galassia. Ciò ha anche dato origine al famoso catalogo di 500 nuove stelle variabili chiamate Variabili Vaticane (VV). Altri astronomi hanno studiato l'estinzione e la polarizzazione della luce stellare per studiare la natura del materiale interstellare. Altri ancora hanno continuato nella tradizione di Secchi e hanno studiato gli spettri delle stelle per comprenderne la natura e la composizione.

Lo studio delle stelle nella Via Lattea fu aiutato dall'acquisizione del telescopio Schmidt nel 1958 che era ospitato in una cupola nei giardini delle Ville Pontificie a Castel Gandolfo (fig. 5). Il campo visivo estremamente ampio (~ 5 × 5 gradi) ha permesso agli astronomi vaticani di effettuare un'indagine spettroscopica su ampie parti del cielo per studiare la distribuzione e la natura di vari tipi di stelle. Il telescopio Schmidt continuò ad essere il principale telescopio nel lavoro della Specola Vaticana negli anni '60 e '70, fino a quando il cielo intorno a Castel Gandolfo divenne troppo luminoso per ulteriori osservazioni utili.

Un'altra grande risorsa della Specola Vaticana è la sua considerevole collezione di meteoriti. Questa collezione risale a una donazione di Adrien Charles, Marchese de Mauroy (1848-1927) nel 1935, che è stata arricchita nel corso degli anni. Oggi la collezione è composta da circa 1100 pezzi di 465 diversi meteoriti, inclusi molti meteoriti lunari e marziani. Tra i pezzi più importanti ci sono alcune condriti carbonacee rare e preziose, che risalgono all'inizio del Sistema Solare, circa 4,5 miliardi di anni fa, e sono uno dei minerali più antichi conosciuti. Comprendere la natura e la struttura dei meteoriti fornisce uno spaccato dei processi di formazione del nostro Sistema Solare.

Per accelerare lo studio di questi meteoriti, nel 1933 a Castel Gandolfo, fu istituito un laboratorio spettrochimico diretto da Padre Alois Gatterer, SJ. Sotto la sua guida, il laboratorio produsse una serie di atlanti spettrali di alcuni dei principali atomi e molecole trovati nei meteoriti, che rapidamente divennero uno standard nel campo (fig. 6). Quando la prospettiva della ricerca astronomica basata sull'esplorazione dello spazio attraverso razzi e satelliti divenne sempre più possibile, si iniziarono a studiare gli spettri ultravioletti degli elementi chimici. Grazie alla sua unicità, il laboratorio conquistò rapidamente un posto preminente tra i suoi pari, non solo tra gli astronomi, ma anche tra altri scienziati che erano interessati all'analisi spettrochimica. Il laboratorio pubblica il suo bollettino: *Ricerche Spettroscopiche*, ma ha anche contribuito a creare una nuova rivista dedicata alla spettroscopia e agli atlanti spettrali chiamata *Spectrochimica Acta*. Tuttavia, il laboratorio fu lento nelle ricerche sui meteoriti e, con il senno di poi, questo è comprensibile perché i meteoriti sono costituiti da molecole complesse e gli spettri del materiale meteorico sono spesso difficili da interpretare. I lavori del laboratorio continuarono fino al 1976.

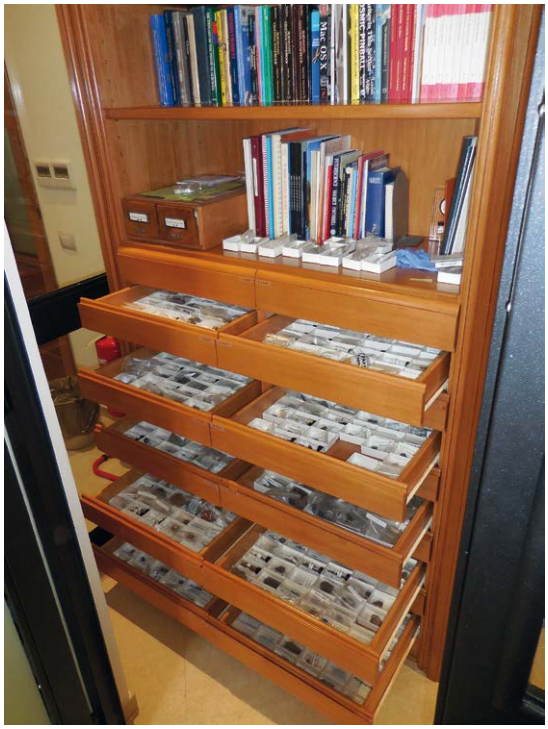


Fig. 7 Collezione di meteoriti.

Fu solo negli anni '90 con l'arrivo di Fratel Guy Consolmagno, SJ, che la collezione di meteoriti iniziò ad essere utilizzata attivamente per la ricerca scientifica. Gli interessi di ricerca di Consolmagno includono lo studio dell'origine, della struttura e della composizione di asteroidi, satelliti ghiacciati nel Sistema Solare esterno, comete e oggetti vicini alla terra. Consolmagno riorganizzò e pubblicò un catalogo, oltre ad aggiungere molti nuovi pezzi alla collezione (fig. 7). Ha istituito un nuovo laboratorio di meteoriti e sviluppato tecniche per misurare le proprietà fisiche della densità, della porosità, della capacità termica e della conduttività del meteorite. Fette sottili di meteoriti sono state utilizzate per studiare l'origine dei meteoriti al microscopio elettronico. Questo lavoro è stato ulteriormente aggiornato con l'arrivo di Fratel Robert Macke, SJ, nel 2013. Non solo gli astronomi vaticani hanno sempre più applicato le loro tecniche per misurare le proprietà fisiche di altri campioni di meteoriti, ma hanno riempito una particolare nicchia scientifica nello sviluppare linee di ricerca per studiare le proprietà fisiche di base dei meteoriti.

Un altro grande contributo della Specola Vaticana sono le conferenze internazionali che ha organizzato. La più famosa è la conferenza del 1957 sulle popolazioni stellari in collaborazione con la Pontificia Accademia delle Scienze, che ha proposto per la prima volta la classificazione standard di un tipo di stella nella nostra galassia a seconda della sua età, cinematica e composizione chimica. Altre settimane di studio/conferenze internazionali degne di nota includono i Nuclei delle Galassie (1971), i Movimenti su Larga Scala nell'Universo (1987), la Formazione e l'Evoluzione delle Galassie Disco (2000 e 2007), l'Astrobiologia (2009), i Buchi Neri, le Onde Gravitazionali e le Singolarità dello Spazio-Tempo (2017) e una conferenza sulla cura di oggetti extra-terrestri (2018). Da quando la Specola ha aderito all'Unione Astronomica Internazionale (IAU) nel 1932, gli astronomi vaticani sono stati attivamente coinvolti nelle sue attività, con molti che hanno ricoperto ruoli di presidenti e segretari di varie commissioni.

Oltre alla ricerca strettamente scientifica, la Specola è stata attiva anche in studi storici e interdisciplinari. Diverse serie eccezionali di pubblicazioni sono uscite da queste conferenze, come: *Studi Galileiani* e *Scientific Perspectives on Divine Action*. Il primo contiene una serie di pubblicazioni iniziate nel 1984 in risposta all'invito di Giovanni Paolo II a studiare più in dettaglio il caso Galileo. La pubblicazione più importante di questa serie fu l'acclamato libro di Annibale Fantoli, "*Galileo: per il copernicanesimo e per la Chiesa*". D'altra parte, la Specola Vaticana insieme al *Center for Theology and the Natural Sciences* di Berkeley, negli anni '80 e '90, hanno organizzato una serie di conferenze sulle prospettive scientifiche sull'azione divina. Le pubblicazioni di questa serie sono state apprezzate dagli studiosi di tutto il mondo e sono diventate un segno distintivo delle nuove attività della Specola.

Dal 1986 la Specola organizza anche un corso estivo sulla ricerca astronomica chiamata VOSS (Vatican Observatory Summer School). Ogni due anni 25 studenti, donne e uomini, indipendentemente dalla religione, vengono scelti da tutto il mondo e un gran numero di questi studenti proviene da paesi in via di sviluppo. Il Governatorato dello Stato della Città del Vaticano aiuta economicamente questi studenti con borse di studio. La scuola comprende lezioni e attività su argomenti di ricerca attuali in astronomia con docenti scelti tra i principali ricercatori del settore. Questa scuola si distingue per la sua durata (un mese) e per i forti legami di amicizia che si sviluppano in questo periodo tra gli studenti (fig. 8). Molti degli ex studenti delle scuole sono diventati professori e leader nei loro campi di ricerca e alcuni di loro sono tornati come docenti nelle successive edizioni della scuola. Nel continuare ad organizzare queste scuole, la Specola non solo ha raggiunto un gran numero di studenti meritevoli che altrimenti non avrebbero avuto l'opportunità di perseguire i propri sogni per diventare ricercatori in astronomia, ma ha anche continuato a dimostrare il sostegno della Chiesa all'ecumenismo e alla cultura umana, e come l'astronomia e il sostegno della Chiesa possano essere usati per unire le persone.

Fig. 8 Scuole estive di astronomia: il gruppo del 2018.

Fig. 9 Il nuovo telescopio vaticano (VATT) a Mount Graham, Tucson, Arizona, USA.

Da questo breve riassunto delle opere della Specola Vaticana possiamo offrire una rapida riflessione sulla sua natura. In realtà, la particolare scienza che promuove la Specola dipende dagli interessi degli astronomi che vengono ad unirsi allo staff. Spesso, coincidenze e opportunità casuali vengono colte per collaborare con altri osservatori internazionali o per rispondere alle domande scientifiche del momento. Ciò può essere visto nel progetto *Carte du Ciel* o nell'acquisizione dei meteoriti. Ma è stato anche il motivo per cui il Vaticano ha ottenuto lo specchio del VATT (costruito nel *forno rotante*, fig. 9), che è stato un dono degli amici di Padre George Coyne. Eppure, nel corso dei decenni, c'è stato un significativo cambiamento nella natura dei progetti svolti presso la Specola: dai primi anni che sono iniziati con grandi progetti istituzionali in determinati settori, la Specola ha risposto ai rapidi sviluppi e all'espansione dell'astronomia muovendosi nella direzione dei ricercatori indipendenti che lavorano in diversi campi. In tutto ciò, il Vaticano sostiene i suoi astronomi dando loro piena libertà accademica, nella speranza che faranno buona scienza e che si vedrà sostenere questa scienza.

Questa libertà è oggi uno degli aspetti più importanti della ricerca alla Specola Vaticana. Una volta assegnato alla Specola Vaticana, il personale non è legato ai vincoli che spesso limitano la ricerca nelle università moderne. Non hanno bisogno di richiedere sovvenzioni e quindi non hanno alcuna restrizione sugli argomenti di ricerca che di solito dipendono da quali programmi sono ben finanziati. E non vi è alcun limite di tempo in base alla necessità di rinnovare le sovvenzioni o di ottenere un mandato, in modo che i progetti che richiedono anni per giungere a compimento possano essere realizzati e sostenuti.

La ricerca in corso oggi presso la Specola abbraccia una varietà di campi e dimostra questa libertà. Boyle, Janusz e Corbally sono coinvolti nella classificazione a lungo termine delle stelle all'interno della Via Lattea, progetti in corso da quasi 30 anni. Consolmagno e Macke stanno

lavorando a una lunga catalogazione delle proprietà fisiche dei meteoriti, un programma che dura da 30 anni. Brown studia modelli di evoluzione stellare. Gabor effettua la sua ricerca nella strumentazione astronomica e nei pianeti extrasolari. Omizzolo studia i Quasar e la galassie Jelly-Fish. D'Souza si occupa dello studio delle Galassie e, in particolare, sulla genesi ed evoluzione della Via Lattea. Gionti continua, sulle orme di Stoeger, la ricerca in cosmologia teorica focalizzandosi sul problema del Big-Bang e quindi sugli aspetti speculativi della Gravità Quantistica (Quantum Gravity). Galaverni si occupa della Dark-Matter e dello studio della Radiazione di Fondo Cosmico (C.M.B.). Kikwaya sta lavorando su come classificare e studiare le meteore. Mueller, come filosofo e storico della scienza, si occupa di filosofia della scienza e del rapporto scienza-fede. Koch si occupa di una biblioteca della Specola che contiene anche libri molto antichi donati, in gran parte, dalla Biblioteca Apostolica Vaticana. Molti di questi programmi sarebbero troppo rischiosi per i giovani studiosi che cercano posizioni sicure nel mondo accademico oggi.

Per fare questa ricerca, gli astronomi della Specola lavorano in collaborazione con i loro colleghi nel mondo accademico e molti partecipano come co-investigatori non finanziati su borse di ricerca tradizionali. In molti casi, tali sovvenzioni sono state finanziate solo dopo che diversi anni di ricerche non finanziate presso la Specola avevano dimostrato la fattibilità e l'utilità del lavoro in questione. Ad esempio, le misurazioni dei meteoriti furono eseguite per la prima volta sulla collezione della Specola; le tecniche sono ora in uso in tutto il mondo nei progetti finanziati da agenzie in Europa, Canada e Stati Uniti. E questa integrazione nella più ampia comunità astronomica può essere vista nelle elezioni nel corso degli anni di un certo numero di astronomi della Specola per posizioni di leadership nell'IAU, nella American Astronomical Society e in altre società scientifiche.

Dal 1930, il personale dell'Osservatorio Vaticano è stato affidato alla Compagnia di Gesù, un ordine religioso di sacerdoti e fratelli, che sono conosciuti per il loro lavoro nell'istruzione superiore e il cui stile di spiritualità è particolarmente adatto alla ricerca scientifica. Non solo i Gesuiti hanno prodotto un numero di eccellenti scienziati nella loro storia, ma continuano a gestire università e istituti di istruzione superiore in tutto il mondo, molti dei quali hanno eccellenti dipartimenti scientifici. Anche se i Gesuiti sono uno dei più grandi ordini maschili nella Chiesa cattolica (~ 16000 membri), il numero di astronomi con un dottorato di ricerca è molto piccolo. Inoltre, la Specola deve condividere questo numero limitato di personale con altre istituzioni gesuitiche universitarie. Pertanto, il numero di astronomi effettivamente disponibili a lavorare presso la Specola può variare significativamente nel tempo. Attualmente, il personale è piuttosto internazionale, sono compresi Stati Uniti, Italia, Gran Bretagna, Repubblica Ceca, Polonia, Congo e India. Dal 2006, sette giovani Gesuiti si sono uniti allo staff della Specola

Secondo Steven J. Harris il motivo di tanto successo dei Gesuiti nelle scienze è da ricercare in quello che lui indica come "*Ideologia Gesuitica*" cioè una spiritualità apostolica dell'ordine nella Chiesa che si mette al servizio, un servizio mistico, dell'uomo e della donne in tutte le attività umane incluse quelle non strettamente religiose come l'attività scientifica. A questo va aggiunto una certa "stima per lo studio" che si trasforma in una "santificazione ottenuta attraverso l'apprendimento", una radice mistica che ha portato l'ordine a fondare tante università e osservatori.

Questa osservazione di Harris trova una conferma diretta nella spiritualità propria della Compagnia di Gesù. S. Ignazio, il fondatore, sottolinea che l'uomo è stato creato per lodare, riverire e servire Dio e che quindi deve desiderare e scegliere "quello che più ci porta al fine per cui siamo stati creati". Questo "più" è diventato nella spiritualità ignaziana il famoso "magis" che S. Ignazio ha tradotto nel motto "Ad Maiorem Dei Gloriam", per la maggiore gloria di Dio. Tutto ciò si è trasformato per i Gesuiti, nel loro lavoro, in un andare verso quelle dimensioni più lontane dell'attività umana che includono anche la ricerca scientifica.

Sicuramente uno dei motivi spirituali fondanti dell'attività scientifica della Compagnia di Gesù è il famoso motto dei Gesuiti di essere "contemplativi nell'azione". L'attività apostolica

vista come servizio che partecipa alla creazione del Creatore e che quindi scopre come preghiera non solamente la meditazione in una stanza remota di un monastero isolato ma anche la ricerca astronomica, cosmologica, biologica, etc. Attraverso queste attività il Gesuita cerca di trovare Dio nella sua vita quotidiana. In altri ordini religiosi questa attività può essere un modo personale di cercare Dio, per un Gesuita questo è alla radice della sua spiritualità. A questo proposito Padre Angelo Secchi, SJ, riconosceva ciò scrivendo "*La contemplazione della Creazione di Dio è una dei più nobili lavori dello spirito; questo è il principale scopo dello studio della natura*".

I gesuiti alla Specola si sforzano non solo di fare una buona scienza, ma anche di manifestare al mondo "*che la Chiesa e i suoi Pastori non si oppongono alla vera e solida scienza, sia divina, sia umana, ma l'abbracciano e la promuovono con tutto l'impegno possibile*", come sottolinea Leone XIII. Ma può farlo solo eccellendo nella ricerca scientifica. Papa Giovanni XXIII, parlando informalmente con Padre Martin McCarthy, SJ, astronomo della Specola, sintetizzò cosi la missione della Specola: "*Due sono i compiti che vi sono assegnati: uno è quello di spiegare il mondo della scienza alla Chiesa Cattolica; l'altro è quello di spiegare la Chiesa Cattolica ai vostri colleghi scienziati*". E scherzando aggiunse: "*Penso che questa seconda cosa vi riesca molto meglio*".

Letture consigliate

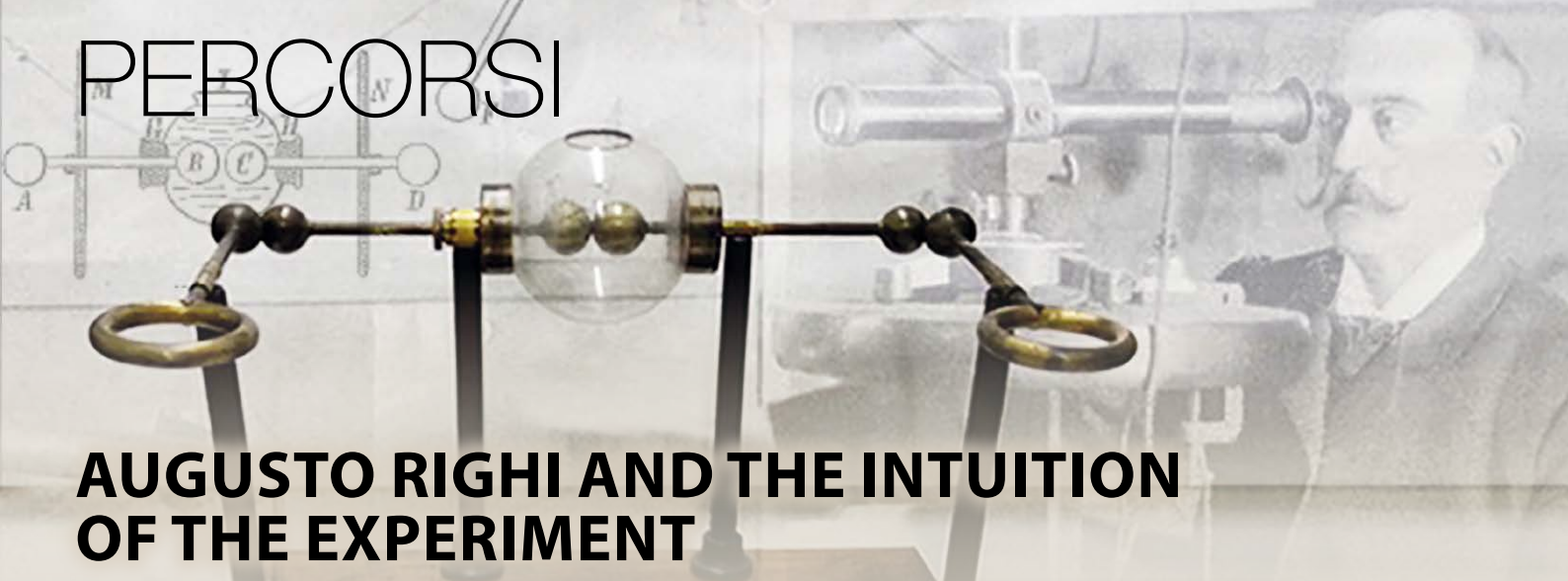
- F. Mancinelli, J. Casanovas, "*La Torre dei Venti in Vaticano*" (Libreria Editrice Vaticana) 1980.
- S. Maffeo, "*I Cento Anni della Specola Vaticana*", *La Civiltà Cattolica,* II quaderno, 3377 (1991) 469-480.
- S. Maffeo, "*La Specola Vaticana Strumento di Dialogo*", *La Civiltà Cattolica,* II quaderno, 3381 (1991) 233-243.
- S. Maffeo, "*La Specola Vaticana*" (Vatican Observatory) 2001.
- A. Udías, "*Jesuit Contribution to Science*" (Springer Verlag) 2015.
- J. L. Heilbron, "*The Sun in the Church: Cathedrals as Solar Observatories*" (Harvard University Press) 2001.
- A. Fantoli, "*Galileo per il copernicanesimo e per la Chiesa*" (Specola Vaticana) 2010.
- A. Altamore, S. Maffeo (a cura di), "*Angelo Secchi, L'avvenutra scientifica del Collegio Romano*" (Edizioni Quarter) 2012.
- G. Consolmagno, C. Corbally, "*La Specola Vaticana, Astronomy at the Vatican*", *Organizations, People and Strategies in Astronomy* 2 (*OPSA 2*), edited by A. Heck (Venngeist) 2013, pp., 217-230.

Richard D'Souza

Dr. Richard D'Souza, SJ, nato in India nel 1978, è entrato a far parte della Compagnia di Gesù nel 1996. Ha studiato fisica e astronomia a Mumbai, Heidelberg e Monaco e fa parte dello staff dell'Osservatorio Vaticano dal 2016. Si occupa della formazione e dell'evoluzione delle galassie.

Gabriele Gionti

Dr. Gabriele Gionti, SJ, nato nel 1967 a Capua (CE), ha studiato fisica a Napoli e Trieste. È entrato a far parte della Compagnia di Gesù nel 2000. Membro dello staff dell'osservatorio vaticano dal 2010, si occupa di gravità quantistica, teoria delle stringhe e sicurezza asintotica.



AUGUSTO RIGHI AND THE INTUITION OF THE EXPERIMENT

A SCIENTIFIC PORTRAIT OF ONE OF THE LEADING ITALIAN PHYSICISTS ACROSS THE END OF THE 19TH AND THE BEGINNING OF THE 20TH CENTURY

EUGENIO BERTOZZI (*)
Department of Physics and Astronomy and University Museum Network
University of Bologna, Bologna, Italy

Ingenious experimental physicist, talented professor and science communicator, committed Senator, Augusto Righi has been one of the greatest Italian physicists across two epochs of physics history – the end of the 19th and the beginning of the 20th century. By means of a close look into Righi's most significant experiments, apparatuses and documents, the paper provides on overview on Righi's major contributions to classical electromagnetism and structure of matter and sheds light on his peculiar "experimental intuition".

1 Introduction

Soon after the death of Augusto Righi, occurred on the 8th of June 1920, authoritative voices among scientists and intellectuals arose to pay their respect to the illustrious physicist and, by doing so, provided several perspectives on him.

The brilliant physicist, future politician and mentor of Enrico Fermi – Orso Mario Corbino – during the commemoration held at the *Accademia dei Lincei* wanted place Righi in a historical perspective by describing him as "the most eminent physicist that Italy had since the epoch of Alessandro Volta" [1]. Shortly afterwards, the President of the Royal Society and physics Noble Prized Joseph John Thomson wanted to focus on Righi's major subjects of investigation and the role he had played in his country:

"Prof. Righi had made important contributions to our knowledge of electrical waves and the passage of electricity through gases. He was one of the leading spirits in the great renaissance of scientific research in Italy, which has been so conspicuous a feature in its recent history" [2].

A more intimate portrait stems from the words of Righi's friend and colleague Giacomo Ciamician who, while taking the floor at the commemoration held at the Senate, wanted to emphasize Righi's research methodology:

"But I can tell you something more intimate about the way Righi worked, and how he conceived. He had what can be called the intuition of the experiment, in the sense that he thought by experimenting. As Senator Volterra has masterfully pointed out, the development of physics in the last fifty years is reflected in his works; every new fact, every new theory found an echo in his mind, and even more in his experimental intuition. When Righi was interested in some experience performed by others, he said: I want to repeat it; but to repeat it meant to transform it; day by day new facts were added to the facts and at the end of a month,

(*) E-mail: eugenio.bertozzi2@unibo.it

or a year a masterful work arose. Thus was born the optics of electric oscillations, whose sequel was known to all. So I was able to follow him in his scientific career from 1888 onwards, and I saw him rise from appreciation to celebrity" [3].

Retracing Righi's path from "appreciation" to "celebrity" and providing insights into his "experimental intuition" is the aim of the present paper. By following Righi's personal scientific career, an epoch of shifting paradigms in the history of physics unfolds: this epoch sees the major international physicists of the time engaged in the experimental completion of a well-grounded theory (Maxwell electromagnetic theory) and the experimental exploration of the atomic domain for which a coherent theory was still to come.

Section 2 provides an overview on Righi's experimental activities until 1888, the year in which he gained an international reputation with his experimental studies on the photoelectric effect. Section 3 focuses on Righi's path from appreciation to celebrity: in particular, his thorough study of the optical behaviour of electromagnetic waves and his "experimental intuition" on how perfecting Hertz's apparatuses in order to do so will be carefully analysed. Section 4 draws from Righi's celebrity period – which includes 15 consecutive years of nominations to the Nobel Prize, the nomination as Senator of the Kingdom of Italy and a successful career as popular science writer. Among the several studies carried out in this period, Righi researches on the Zeeman effect and magnetic rays will be addressed.

2 The building of a scientific career: Righi's activities until 1888

Born in Bologna on the 27th of August 1850, Righi attended the Royal Technical Institute of his town where he had the privilege of having a great figure of physicist and politician – Antonio Pacinotti – as teacher and mentor. Thereafter, during his studies in mathematics at the University of Bologna, Righi met Eugenio Beltrami, also a scientific reference for Righi's future career [4]. Righi's decision of completing his university training with a diploma for practicing the profession of civil engineer and architect should not mislead on a keen interest for the physics of the time, as attested by his publication record.

In fact, the object of Righi's dissertation was a small type of electrostatic generator, useful to measure small differences of potential and which he called "electrometer" [5] (fig. 1): the apparatus had the peculiarity that the belt carrying the charges went through a hollow sphere and it will be quoted as such by Robert Van de Graaff when introducing his homonymous generator [6]. After succeeding to Antonio Pacinotti as physics teacher at the Technical Institute in 1873, Righi became assistant to the Cabinet of Physics at the University and associate at the Academy of Sciences in Bologna. Along these years, Righi studies dealt with electrostatic (controversial points, Volta principles, electrical discharges), light behaviour in magnetized materials and a series of experiences with the new Crookes radiometer.

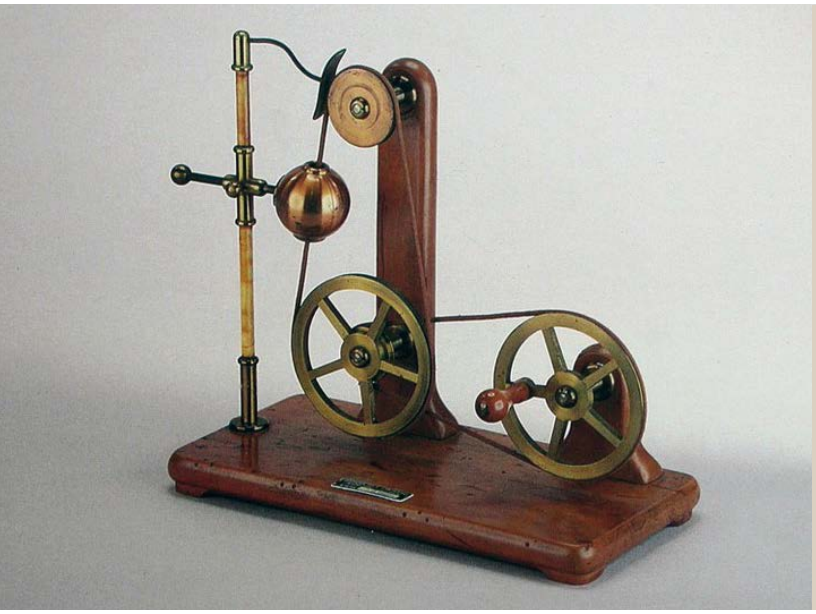


Fig. 1 Righi's induction electrometer (credit: Department of Physics and Astronomy, University of Bologna – DIFA).

Fig. 2 Righi's telephone (credit: Museo Crescenzi-Pacinotti).

Righi soon developed also a special attention for the technological frontiers of the time – the electrical communications – a sector in which he would provide a long-life contribution. In 1878, few months after the introduction of Bell's telephone in Italy, Righi introduced his "own telephone" (fig. 2), a device in which the communication between two people was extended to two groups of people. To the purpose, Righi transformed Bell's receiver into a loudspeaker and introduced the first conductive powders microphone [7].

Righi began his university career in 1880 as professor of experimental physics at the University of Palermo and quickly placed himself at the frontline of physics research. He published for example a short memory which contained the first observation of the hysteresis of steel [8], a discovery usually recognized to Emil Warburg and to his longer paper published the year after [9]. During these firsts years, Righi's methodology recalled by Ciamician – consisting in repeating and modifying experiments performed by others in order to extract new knowledge – quickly revealed: after William Crookes had showed that "shadow phenomena" were created by cathode rays in evacuated tubes subjected to a potential difference, Righi showed that electric shadows could form also in open air and that "electrified particles" able to move along the line of an electric field existed also in the atmosphere. In 1881, Righi referred to these particles as "ions of the gas, according to the new terminology" anticipating the German physicist Walther Giese who, in 1882, assumed gaseous ions to explain the electric conductivity of flames [10, 11]. Following the same method, after carrying out a detailed study on the variation of intensity of polarized light when it is reflected by magnetized materials – known as the "Kerr effect" [12] – Righi discovered the existence of a thermal analogue to the Hall effect, today still called "Righi-Leduc effect"[13].

However, Righi's encounters with the "great physics" of the time took place in Padua, when he would be professor from 1885 to 1888 and become one of the physicists involved in the first experimental investigation of the photoelectric effect. An effect whose name was coined by Righi himself and for which Albert Einstein would introduce the hypothesis of the photon.

In 1886, after discovering the existence of the electro-magnetic waves predicted by Maxwell's electromagnetic theory and while performing experiments to study their behavior, the German physicist Heinrich Rudolph Hertz noticed that when the waves emitted by the oscillator were filtered with a quartz plate, the intensity of the discharge in the resonator would become higher. Hertz realized that the ultra-violet component was responsible of lowering the discharging potential between the electrodes and, by doing so, he identified the "core" of the photoelectric effect [14].

Following Hertz's steps, in the first months of 1888, his collaborator Wilhelm Hallwachs advanced the hypothesis that the phenomena could consist in a dispersion of negative charge from the negative electrode [15, 16]. Righi's contribution to the matter dates to April 1888 and consisted in a more complete experimental account of the phenomena: he showed that conducting or insulating materials, when irradiated with ultraviolet light, would become positively charged according to the proximity of the source and the extension of the metallic surface [17]. Two years later the German colleague, in the person of Hallwachs himself, would recognize Righi's merits by saying that:

"*If I therefore have to deny the priority of discovery, I would not like to omit to mention that the laws of the phenomenon, which we have gained up to now, are mainly due to him*" [18].

3 From appreciation to celebrity: "The optics of electrical oscillations"

Righi's interest in the electromagnetic, or "Hertzian", waves developed around 1892, during his professorship at the University of Bologna, which began in 1889. With four consecutive papers, Righi introduced some "new experimental settings to demonstrate and study the electrical oscillations of Hertz" [19]. The innovations consisted in a new type of oscillators for the emission of the waves, a new type of resonator to detect them and the replication of some of Hertz's experiences with the new equipments. Righi stated very clearly how further researches on the electromagnetic waves were hanging upon the resolution of a technical problem:

"It is known how uncomfortable and difficult it is to repeat the beautiful experiences of Hertz, which show the complete analogy between the propagation of the rays of electric force and that of light rays. Even when the wavelength is only 66 cm, as in the classic experience of Hertz, mirrors, lenses and prisms of colossal dimensions are needed, in order to show the reflection or refraction of electrical radiation, so that it would be not even thinkable to attempt the performance of many other optical experiences. I therefore believed that it would be worthwhile to try to experiment with much shorter wavelengths, and I have come to build rectilinear resonators with such a short vibratory period, as to respond clearly to electrical vibrations whose wavelength is few centimeters as well as the relative oscillators, capable of exciting them effectively" [20].

Since the beginning then, Righi's program was twofold:

a) Introduce suitable devices to reduce the wavelength of the electrical oscillations so that Hertz's experiences could be repeated in a laboratory environment, without being

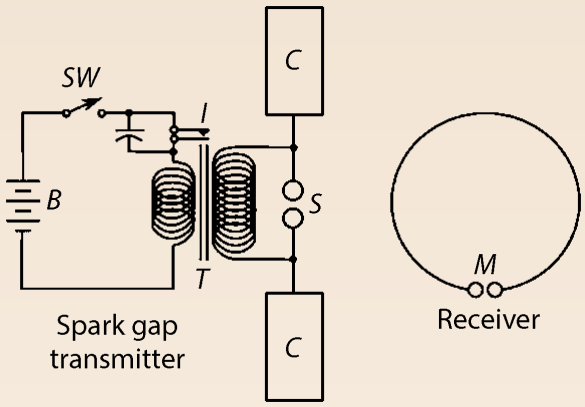


Fig. 3 Electrical circuit and Hertz's apparatus for electromagnetic waves.

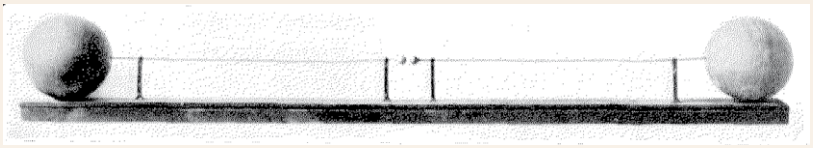


Fig. 4 Detail of Hertz's oscillator for the emission of electromagnetic waves.

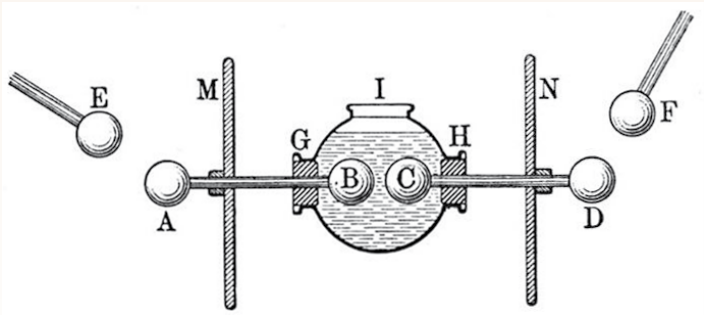


Fig. 5 Righi's three-spark oscillator.

tied up to the use of "colossal mirrors, lenses and prisms". On this account, since his very first paper, Righi repeated Hertz's experiences on reflection, refraction, interference and diffraction with a wavelength of 7.5 cm (reflected by metallic mirrors of the size of 1 dm^2), a wavelength that he was going to reduce to few millimeters in the years to come.

b) Extend Hertz's experiments to the "ordinary optical experiences". In order to demonstrate that the new, Hertzian waves (radio waves, in modern terms) were the same thing as visible light (today, different regions of the electromagnetic spectrum), the totality of the optical phenomena such as double-refraction, total reflection and diffraction had to be verified in the new regime.

The completion of this scientific program is reported by Righi in the volume "*The optics of electrical oscillations*", published in 1897 [21].

3.1 Experimental intuition: the new apparatuses

In Hertz's apparatus, the wave was generated by the oscillating tension of an induction coil applied to a secondary circuit allowing huge amounts of charge to accumulate on the external spheres and discharge between the internal ones (figs. 3, 4).

The critical point of Hertz's setting was the total capacity of the system: the huge amount of charge which was at stake produced low-frequency oscillations with a high wavelength. On the other hand, reducing the size of the spheres would decrease the intensity of the signal, making it undetectable. Righi's intuition consisted in finding out the way to reduce the total capacity and preserving the detectability of the signal. The three sparks, or "Righi oscillator", was made of six spheres of small diameter in order to reduce the total capacity, the inductance of the circuit and its period of oscillation (fig. 5).

The spark generating the wave struck between the two central spheres, charged by induction by two couples of external ones. The immersion in a dielectric liquid – vaseline oil – increased the quantity of charge necessary for the spark, so to compensate the loss of intensity implied by the small size of the spheres. Righi gives an empirical

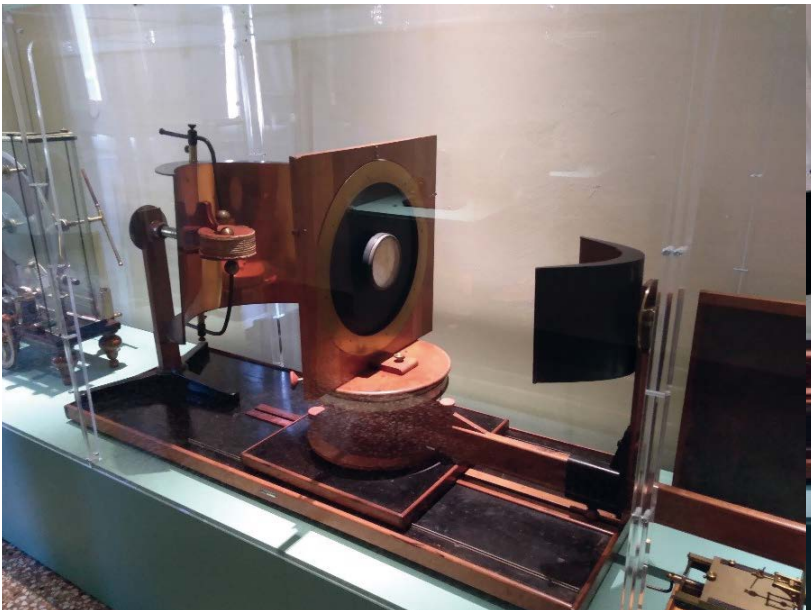


Fig. 6 Righi's electromagnetic bench (credit: DIFA).

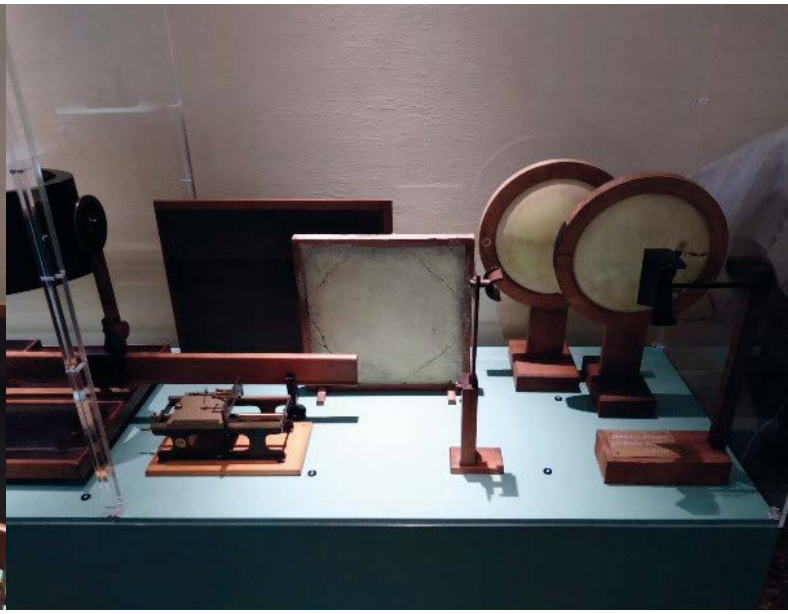


Fig. 7 Metallic mirrors, thin sulphur layers and lenses (credit: DIFA).

correspondence between the diameter of the spheres arranged in this way and the wavelength of the emitted oscillation: 0.8 cm diameter corresponded to a wavelength of 2.6 cm, 3.75 cm to 10.6 cm and 8 cm to 20 cm of wavelength. Righi's oscillator and the empirical knowledge embedded in it for mastering the wavelength was quickly noticed by Guglielmo Marconi and included in his first patent for wireless telegraphy [22].

Righi's improvements of Hertz's apparatus concerned also the receiving system, or resonator, which in Hertz's case consisted in an open, metallic ring terminating with two spheres. According to the orientation of the spheres, the passage of an electromagnetic wave would induce a current through the ring, an accumulation of charge in the spheres and their discharge through a spark. Starting from the observation that the sparks became more visible when propagating on the surface of a conductor, Righi replaced Hertz's resonator with his "silver glass resonator", a small rectangular glass to which he applied a millimetric cut all along its length. The wave emitted by the oscillator was then detected by the resonator and visualized as a series of sparks connecting the two disconnected sections of the resonator, perpendicularly to the cut. An increase or loss of intensity would correspond to a higher/lower number of horizontal sparks sequencing each other. Oscillator and resonator were mounted by Righi in a single bench for the study of electromagnetic waves (fig. 6). The two arms of the bench could rotate around a central pin and two parables hosted the oscillator (on the left) and the resonator (on the right). Sparks in the resonator were observed from the back of the parable through a small telescope. The orientation of both oscillator and the resonator could be varied for polarizing the emitted/received wave. Devices such as metallic mirrors, thin sulphur layers, prisms of sulphur and selenite were positioned on the central platform (fig. 7).

3.2 Extending Hertz's experiences: the completion of a scientific program

Among the optical experiments allowed by the new apparatus, Righi tested the famous Fresnel's relations (fig. 8).

The wave was emitted in *O*, polarized according the angle α and received in *R* with the angle β. Righi verified that when the polarization plane of the emitted wave is perpendicular to the incidence plane, the reflected wave is also vertically polarized and its intensity increases according to the angle of incidence as predicted by Fresnel. Besides, Righi verified that, when the polarization angle is different from zero and the incidence angle is minor to the polarization angle, polarization changes its sign.

Righi's experiences did not only consist in repeating optical experiences but also in perfecting electrical experiences carried out by his contemporaries, as it was for the measurement of the wavelength. Righi remarked how the original experience, suggested by Boltzmann to his collaborators Ignaz Klemenčič and Paul Czermak, contained a critical point. In the original setting, two metal mirrors *AB* and *BC* were used (fig. 9). When these mirrors are combined to form a unique mirror, the resonator placed in *R* detects a maximum of intensity. When *BC* is then moved in the position B_1C_1 in a way that the difference between the optical paths

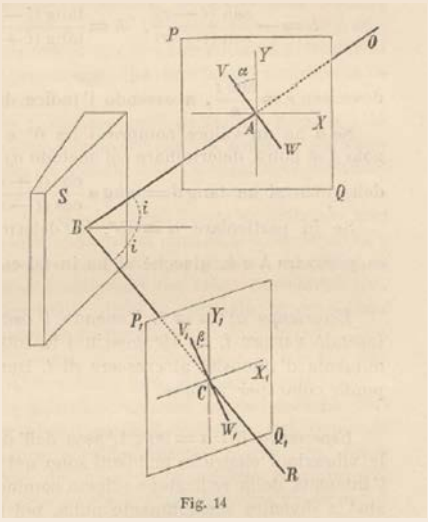


Fig. 8 Test of Fresnel's relations: scheme of the experiment (from ref. [21]).

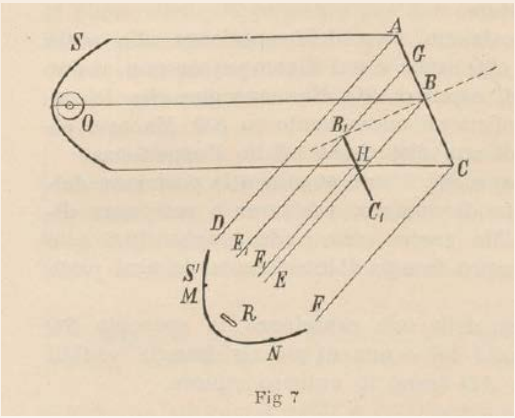


Fig. 9 Measurement of the wavelength: Boltzmann, Klemenčič and Czermak experiment (from ref. [21]).

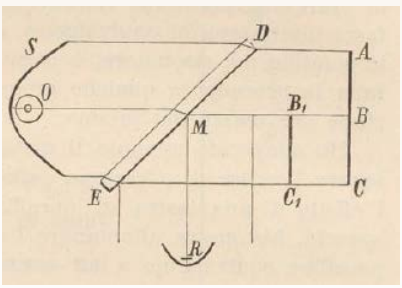


Fig. 10 Measurement of the wavelength: Righi's revision of the experiment (from ref. [21]).

of the two beams is a multiple of $\lambda/2$, the resonator should detect a minimum of intensity and should stop signaling.

Righi remarked that, even though this was theoretically correct, the performance of the experiment proceeded in a different manner. In fact, in order to reduce diffraction effects, the metal plates would be sensibly longer than the ones reported in fig. 9. This would not cause any problem when the mirrors are in the first position; however, when the second mirror *BC* would be moved forward, the resonator would receive more radiation from the second mirror than from the first. The result is that the complete extinction of the signal could not be observed, the position of the minimum would not be precisely determined and so it was for the wavelength of the radiation.

Righi's revision of the experiment foresaw the combined use of metal mirrors with a thin sulphur layer (fig. 10).

Once located the sulphur layers on the central platform to form an angle of 45°, the radiation emitted by *O* would cross the layer and reach the two metal mirrors *AB* and *BC*. Then, the radiation reflected by the mirrors would be reflected also by the sulphur layer to be detected by a resonator placed in *R*. By moving one of the two mirrors (*BC* in B_1C_1), the optical path of the two beams would vary so that in *R* maxima and minima of intensity would be clearly observed. From the measurement of the distance BB_1 and the optical relations (destructive interference when BB_1 is a multiple of $\lambda/4$) Righi could obtain a precise determination of the wavelength. It is worth noticing how the set up for this experience draws from the Michelson and Morley interferometer, an element which confirms Ciamician's perspective on Righi's peculiarity of adapting others' experiences to new environments.

3.3 Conclusion

As remarked by the historian of physics Mario Gliozzi, "*The optics of electrical oscillation*" is a title which means, and we should add closes, an epoch in the history of physics. After Righi's work of systematization and replication, visible light and Hertzian oscillations could be considered "oscillation of electromagnetic ether" and the electromagnetic nature of light could be finally stated. In that year 1897, J. J. Thomson's experiments clarified the nature of electrical currents, by identifying the "atoms of electricity" – already hypothesized by Helmholtz and Maxwell – in the fundamental particle universally known as "the electron". In the meanwhile, the discovery of radioactivity by Becquerel, the studies of Marie and Pierre Curie, together with the observation of astonishing new effects such as the so-called "Zeeman effect" pushed the community toward the understanding of the internal architectures of matter and the incoming atomic models. Righi, despite the achieved celebrity, would not step back from this new chapter of history.

4 Righi's celebrity and full maturity: the studies on the structure of matter and the "magnetic rays"

Righi's growing visibility and achievement of celebrity can be detected at different levels. At University level, he would become the Principal of the Faculty of Mathematical, Physical and Natural Sciences of the University of Bologna (1896–1902; 1912–1915). At national level, besides becoming member of prestigious societies such as the Accademia dei Lincei and "Accademia dei XL", he would be founder member and President of the Italian Physical Society (1897), alternating this presidency with the one of the "Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna".

At the international level a series of honorary memberships include the Philosophical Society of London, the Royal Institution of Great Britain, the Royal Societies of London and Edinburgh, Uppsala and San Petersburg, the Academy of Sciences in Paris. In 1903, after the success of Marconi's intercontinental experiments and the publication of Righi's volume on the history of wireless telegraphy [23], the prestigious journal *Nature* wanted to underline that "Prof. Righi has considerable claims to be regarded as the father of practical wireless telegraphy" [24].

In those years, Righi's scientific recognition is enriched by an important institutional one: on the 4th of March 1905, Righi was nominated Senator of the Kingdom of Italy and in such capacity, he engaged in school and University reforms, water treatment plants for energetical purposes and organized the first service of air-mail in Italy (and Europe) [25].

A sign of celebrity must be identified also in the authoritativeness recognized to him in the the popularization of his own discipline. Starting from 1904, the publisher Cesare Zanichelli transformed Righi's conferences into books addressed to a large audience. In this way, a conference on radioactivity where Righi illustrated the principal discoveries of Becquerel, Marie e Pierre Curie using apparatuses introduced by himself – such as a special electrometer able to detect the activity of 15 mg of radio at 4 meters distance – was published as "*The Radio*" [26]. Along this line, Righi wrote his successful philosophical-oriented book "*The modern theory of physical phenomena*" [27]. In this essay, drawing from Lorentz's theory of electron, Righi explained how the electromagnetic theory of Maxwell and electron's discovery finally allowed to articulate the comprehension of the physical reality in terms of ponderable matter, electrons and ether. Righi would discuss these ideas also in a lesson-demonstration entitled "On the electrical constitution of matter", given on the occasion of the foundation of the Institute of Physics of the University of Bologna, in April 12th, 1907. Righi's ideas were noticed and appreciated by important philosophers of the time like Vladimir Lenin [28] and Benedetto Croce [29]. Righi's popular works include an analysis of the cometary phenomena (like the "comet tail") from the point of view of physics (such as the radiation pressure in gases or observations carried out in vacuum tubes). Presented in the form of a conference given at the Academy of Sciences in Bologna on the 22th of June 1910 for the passage of the Halley Comet, Righi's speech became the book "*Comets and electrons*" [30].

Despite the new activities, Righi's attention to frontier physics did not slow down. Since 1895, he had worked on the propagation of electricity in gas through the Röntgen rays and the comparison between Röntgen rays and ultra-violet light, showing that the new radiation creates dispersion of charges of both signs, differently from the UV in the photoelectric effect [31]. Starting from 1898, Righi focused on the Zeeman effect providing contributions which include an experimental setting to observe the phenomenon without using a spectroscope, the test of Lorentz's prevision according to which, when the gas is immersed in a magnetic field, each spectral line splits in two or three and the light is circularly polarized in case of a doublet and linearly polarized in the other case. Besides, following Lorentz's suggestion, Righi was among the first scientists to study the inverse Zeeman effect, occurring when a circularly polarized ray passes through a highly absorbing gas and magnetizes it [32].

After 1907, Righi's interests started to focus on one, single topic to which he devoted the

last part of his scientific activity, *i.e.* the intriguing subject of "magnetic rays". Righi's renewed attention to an "old topic" – physicists had known the magneto-cathodic rays since the first half of the 19th century – studied by means of an "old technique" – the passage of electricity through gases – was however accompanied by a "new attitude" concerning the way of making research and the role of experimentalists in physics.

In the addresses to the Italian Society for the Progress of Science during the conference of 1911, Righi remarked that in the last three or four decades

"little importance was accorded to scientific hypotheses […] and the main activities of the most eminent physicists was principally devoted to rigorous and patient measurements, to the verification of numerical values and constants to a higher level of precision, to the search and understanding of very specific phenomena, or, in the best occasion, to the invention of experimental methods which would allow the choice between antagonist hypotheses. Today, on the contrary, a different trend, though less severe, tends to be preferred by many of us. Explicative hypotheses are not rejected with horror, and intuition and scientific imagination are widely used as well" [33].

Between the lines, one can read the reference to Einstein's heuristic hypothesis for the interpretation of the photoelectric effect in 1905 and guess that Righi must have been impressed, also due to his longstanding involvement. However, Righi would never really get into the realm of the new quantum hypothesis concerning the interaction between radiation and matter or the atomic models; perhaps, he would stay on a more macroscopic level, proposing a semi-classical model for gas behavior when they are crossed by electricity in vacuum tubes. Before Righi, physicists such as Edouard Sarasin and Auguste de la Rive had tried to understand the beautifully colored and appealing phenomena which can be observed when the electric glow in a cathode tube is immersed in a magnetic field. At the beginning of the XX century, after the discovery of electron, eminent physicists like Paul Villard (discoverer of gamma rays) had brought up the subject that the green fluorescence typical of the cathodic rays did not suffice to explain the variety of these colored phenomena, called "magneto-cathodic" effects.

Righi's first contribution to the subject firstly consisted in the design and construction of an apparatus which was able to provide an almost complete separation between the well-known cathodic rays and the "other rays", which deserved further explanations. The horizontal tube in fig. 11 was commissioned by Righi to the famous instrument-maker Richard Müller-Uri in Braunschweig. It could be crossed horizontally by a magnetic field produced by the electromagnet *R* and, differently from any other apparatuses of this type, it had the anode (*A*) and cathode (*C*) in a vertical position. When the tube was evacuated and a tension applied, a green fluorescence – cathodic rays, or electrons – were observed in the vertical column between *C* and *A*. However, when the electromagnet was switched on, a blue column formed horizontally and by increasing the intensity of the field, the blue column increased its length until a maximal extension *E*. At this value of the field, a second column of a reddish color appeared between *E* and *D* [34].

Righi's theoretical proposal to interpret these horizontal rays ("magnetic rays") consisted in the hypothesis of "planetary doublets": electrons and ions in a gas crossed by electrical currents do not only exist in stable, bound state (molecule) or in an ionized one; according to Righi, they can exist on a third, weakly bound state in which they elliptically rotate around a common center of mass during their propagation, analogously to the double stars in the Universe (or comets around the Sun). The hypothesis was supported from the fact that, according to Maxwell theory, the magnetic field could give temporary stability to these electrical systems, as the gravitational force does for the masses: when sufficiently strong, the magnetic field could position the doublets in a stable orientation via the Lorentz force, provided that the sense of rotation of the electron be the same as the current generating the field. However, because of the current produced by the revolving electrons, the doublets would act as elementary magnetic dipoles, and move toward regions of decreasing field strengths, where they would dissolve either forming a molecule or an electron and an ion. Righi's proposal was to interpret the blue fluorescence between *B* and *E* as evidence for the formation of the magnetic rays and the red one between *E* and *F* as evidence for their dissolution. In fact, few electrons emitted from the cathode would escape toward the anode and combine with the ions of the gas to form the doublet which would form continuously. The existence of a threshold value in the magnetic field and the presence of a second column would be evidence that, below a certain value, the magnetic field would not be able to support the formation anymore. The fact that the left part of the tube contained ions and electrons in a separate state was reinforced by the observation that, when a magnetic pole *S* was placed near the tube, an electric current moving from *D* to *E* was observed: the ions of the broken doublets, because of their inertia, would remain close to the breaking-point (and so between *E* and *S*), while the fast electron would reach the bottom of the tube and recalled back by the magnet.

Righi's hypothesis clearly showed his belief that the

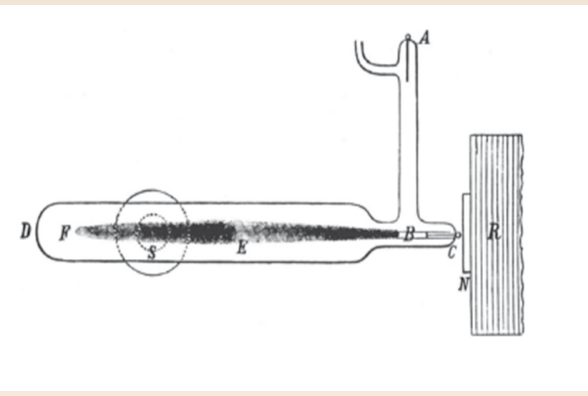


Fig. 11 Righi's apparatus for magnetic rays.

understanding of the intimate structure of matter – the microcosm – should reflect the understanding of the whole – the macrocosm. In the same years, Ernst Rutherford suggested his planetary model for the structure of the atom and what an intriguing and inspirational coincidence the passage of the Halley comet in 1910 must have been.

Scholars have noticed that Righi's hypothesis, even though being the object of a lively controversy, was never really rejected through solid experimental refutation; perhaps, it was more "neglected" as time went by. The weakest point of it was probably Righi's decision of not entering the mechanism of how doublets released light by rearticulating the hypothesis within Bohr's theory of light emission [35].

During the years of the controversy and of the studies on magnetic rays, Righi's international reputation continued its course. The most evident sign are surely the 15 consecutive years during which he was nominated for the Nobel Prize by 40 of his colleagues. He was supported by many Italian scientists such as Orso Mario Corbino, Giacomo Ciamician and Vito Volterra, and European ones such as Henri Poincaré, Henri Becquerel, Oliver Lodge and Pieter Zeeman. In 1918, Righi became member of the Solvay Institute and sat on its scientific committee for the 1921 meeting – dedicated to "atoms and electrons" – along with H. A. Lorentz, Madame Curie, William Bragg and Ernst Rutherford. However, he could not participate to this meeting since he died on the 8th of June, 1920.

Righi's last paper, published with an unfinished final note, focused on another fundamental concept of 20th century physics, *i.e.* the theory of special relativity [36]. As many other experimental physicists until the '30s, Righi was re-analyzing the Michelson and Morley experiment, posing the "supreme question" on whether uniform motion does or does not affect the optical phenomena observed in it, planning new experiences to come. Still, he was not easily prone to banish away the nineteenth-century ether from the theoretical imaginary of physics.

5 Conclusions

This paper provides a scientific portrait of Augusto Righi through a close look into his major contributions to the history of physics, *i.e.* the experimental researches on Maxwell electromagnetic theory and the studies on the structure of matter.

The analysis shows that Righi's "experimental intuition" brought him to solve sophisticated technical problems as the reduction of the wavelength of the electrical oscillations, which

influenced the development of wireless telegraphy. However, the paper also shows that Righi's contributions must be understood beyond the wireless telegraphy in so far they concerned the pure development of physics: Righi had the merit of bringing to completion a scientific program began by Hertz and devoted to show that visible light and electric oscillations were both electromagnetic waves. The celebrity that Righi gained from this enterprise did not prevent him from engaging in the new physics which opened in the last years of the 19th century and flourished at the beginning of the 20th Century. Righi looked at the new epoch with the eyes of a Maxwellian, stretching at best the insights of the classical electromagnetic theory and becoming one of the most representative figures of that era of physics.

Acknowledgements

This research has been carried out for the project "Righi100" organized by the Department of Physics and Astronomy, the University Museum Network and the Rectorate of the University of Bologna to remember and celebrate Augusto Righi 100 years after his death. My grateful thanks go to the many people involved and to the editors of this journal for publishing these results.

References

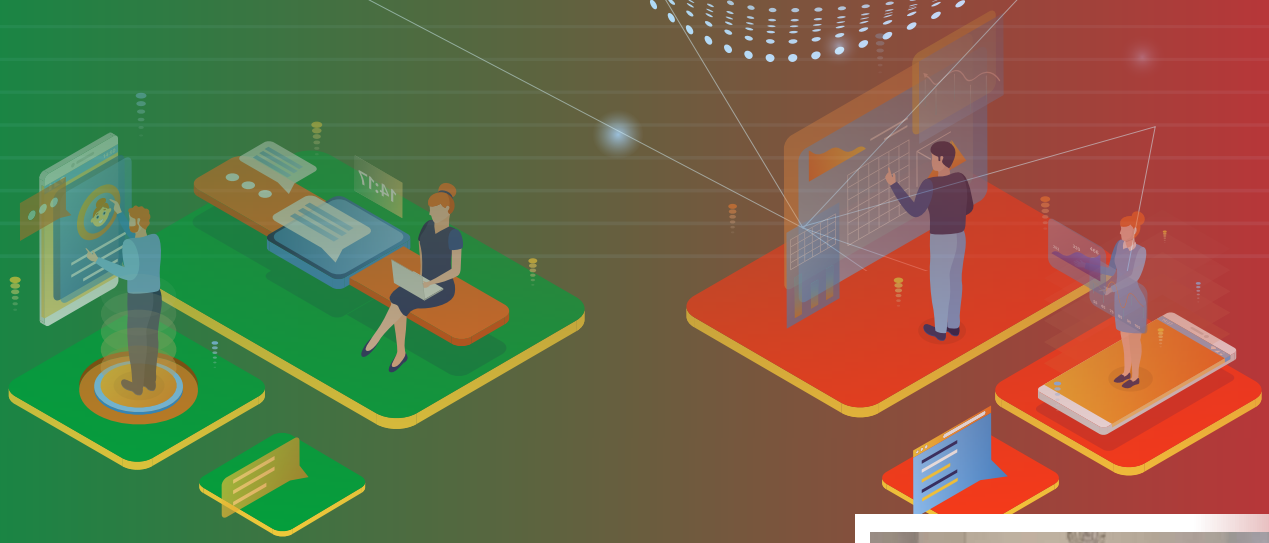
[1] O. M. Corbino, *Atti R. Accademia Lincei*, 30 (1921) 215.
[2] J. J. Thomson, *Proc. R. Soc.*, 98 N. 692 (1921) 322.
[3] G. Ciamician, Senato del Regno, Atti parlamentari. Discussioni, 24 giugno 1920.
[4] G. Dragoni, *Quaderni Storia Fisica*, 19 (2017) 47.
[5] A. Righi, *Nuovo Cimento*, 7 (1), (1872) 123.
[6] R. J. Van de Graaff, K. T. Compton, L. C. Van Atta, *Phys. Rev.*, 43 (1933) 149.
[7] A. Righi, *Nuovo Cimento*, 4 (1), (1878) 233.
[8] A. Righi, *Nuovo Cimento*, 7(1), (1880) 135.
[9] E. G. Warburg, *Ann. Phys. Chem.*, 13 (1881) 141.
[10] A. Righi, *Mem. Accad. Scienze Ist. Bologna*, 12 Maggio 1881, s. 6, tomo 2 (1881), pp. 555–567.
[11] W. Giese, *Ann. Phys.*, 17 (1882) 1.
[12] A. Righi, *Mem. R. Accad. Lincei*, 19 Aprile 1883, s. IV, vol. I, 282 (1884-1885), pp. 367–416.
[13] A. Righi, *Rend. R. Accad. Lincei*, Seduta del 3 Giugno, 1883, vol. VII, 280 (1882-1883), pp. 262–263; A. Righi, *Mem. R. Accad. Lincei*, 1 Giugno 1884, s. III, tomo XIX, 28 (1884), pp. 307–308.
[14] H. R. Hertz, *Ann. Phys.*, 267 (1887) 983.
[15] W. Hallwachs, *Ann. Phys. Chem.*, 269 (1888) 301.
[16] W. Hallwachs, *Ann. Phys.*, 270 (8A), (1888) 731.
[17] A. Righi, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 2, tomo 107 (1888) 559.
[18] W. Hallwachs, *Ann. Phys. Chem.*, 276 (1890) 338.
[19] A. Righi, *Rend. R. Accad. Lincei*, 30 Aprile 1893, pp. 333-337.
[20] A. Righi, *Rend. R. Accad. Lincei*, settembre 1893, pp. 505-517.
[21] A. Righi, "*L'ottica delle oscillazioni elettriche. Studio sperimentale sulla produzione di fenomeni analoghi ai principali fenomeni ottici per mezzo delle onde elettromagnetiche*" (Zanichelli, Bologna) 1897.
[22] G. Marconi, British patent No. 12,039 (1897).
[23] A. Righi, B. Dessau, "*La telegrafia senza filo*" (Zanichelli, Bologna) 1903.
[24] A. Righi, "*La telegrafia senza filo*", *Nature*, 67 (1903) 582.
[25] M. Leone, N. Robotti, "*I Fisici Senatori*" (SIF, Bologna) 2019.
[26] A. Righi, "*Il radio*" (Zanichelli, Bologna) 1904.
[27] A. Righi, "*La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*" (Zanichelli, Bologna) 1904.
[28] V. I. Ulianov, "*Materialismo ed Empiriocriticismo*", I ed. 1909, tr. it. (Ed. Rinascita, Roma) 1953; cit., p. 241.
[29] B. Croce, "*Commemorazione per Augusto Righi*", Senato del Regno, Atti parlamentari. Discussioni, 24 giugno 1920.
[30] A. Righi, "*Comete ed Elettroni*" (Zanichelli, Bologna) 1910.
[31] A. Righi, *Rend. Accad. Sci. Istituto Bologna* (Maggio, 1896).
[32] A. Righi, *Nuovo Cimento*, 11 (1900) 177.
[33] G. C. Dalla Noce, G. Valle (a cura di), "*Scelta di scritti di Augusto Righi*" (Bologna, 1950), pp. 356-357.
[34] A. Righi, "*La materia radiante e i raggi magnetici*" (Zanichelli, Bologna) 1909.
[35] B. Carazza, H. Kragh, *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.*, 21 (1990) 1.
[36] A. Righi, *Nuovo Cimento*, 21 (1921) 187.

Eugenio Bertozzi

Eugenio Bertozzi is researcher in history of physics and responsible of the collection of physics instruments at the University of Bologna since 2019. He obtained his PhD in physics in 2010 within the physics education research group of the University of Bologna. From 2015 to 2016 he has been Humboldt Research Fellow at the Europa-Universität in Flensburg (Germany) with a research on the teaching use of the Wilson cloud chamber. From 2016 to 2017 he has been Scholar in Residence at the Deutsches Museum in Munich where he carried out a study on the bubble chamber physics.

CERIMONIA INAUGURALE 106° CONGRESSO NAZIONALE DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

14 SETTEMBRE 2020



Il Presidente della SIF, Angela Bracco, in collegamento dalla sede della SIF, a Bologna, durante la prima giornata del Congresso.

La Cerimonia Inaugurale del 106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica si è svolta quest'anno in modalità telematica a causa della pandemia COVID-19.

Questa edizione particolare è stata la prima che ha avuto luogo durante la presidenza di Angela Bracco che esprime il suo dispiacere di non avere la possibilità di incontrare i partecipanti di persona. Il Presidente Bracco illustra brevemente le attività portanti della SIF: l'editoria, la Scuola Internazionale di Fisica "Enrico Fermi" di Varenna e il Congresso Nazionale. Anche se si è dovuto rinunciare ai corsi della Scuola di Varenna, l'attività editoriale è continuata grazie allo smart working, ma non si è voluto rinunciare al Congresso anche se in una veste inedita.

Le relazioni plenarie e quelle su invito nelle sezioni parallelle sono avvenute in diretta streaming e le comunicazioni sono state a disposizione con registrazioni, accessibili in ogni momento. Gli autori delle comunicazioni sono stati prevalentemente studenti e giovani ricercatori, che il Presidente ringrazia per essere stati numerosi e per aver preparato i loro contributi in genere di alta qualità. Ringrazia tutti i presidenti di sezione, i relatori plenari e su invito e l'associazione AISF (Associazione Italiana Studenti di Fisica) che ha organizzato una sessione molto speciale e interessante. Invita tutti a esplorare con attenzione la piattaforma creata ad hoc che prevede anche via chat quelle interazioni e discussioni che solitamente animano i Congressi SIF.

Prima di passare alla proclamazione dei diversi premi, che rappresenta il momento più importante della Cerimonia di apertura, Angela Bracco ringrazia tutti coloro che hanno contribuito alla scelta dei premiati, partecipando alle commissioni di selezione.

Ringrazia in particolare gli sponsor privati e le varie associazioni che hanno contribuito mettendo a disposizione somme in denaro per realizzare alcuni premi. Ringrazia il personale SIF, i Consiglieri SIF tutti, e in particolare i membri della task force dedicata che ha lavorato con molta dedizione per la preparazione di questo evento.

A questo Congresso così particolare si dedicheranno quest'anno alcuni volumi de Il Nuovo Cimento che includeranno un certo numero di comunicazioni selezionate tra le numerose pervenute e per questo ringrazia anticipatamente coloro che aiuteranno nella scelta e coloro che scriveranno, nei tempi dovuti, gli articoli basati sulle loro comunicazioni. Il Presidente sottolinea che questa è un'esperienza nuova di cui si potrà fare tesoro, anche se si spera di non ripetere.

Inizia quindi la Cerimonia di proclamazione dei premi con l'annuncio dei diplomi e medaglie ai Soci Benemeriti della Società Italiana di Fisica, colleghi che hanno onorato la Società e la Scienza con i loro contributi e che sono:

- Pasquale BLASI del GSSI L'Aquila, Socio Benemerito per i suoi contributi dati alla Fisica dei Raggi Cosmici.
- Speranza FALCIANO dell'INFN Sezione di Roma, Socia Benemerita per i suoi contributi dati alla Fisica Sperimentale delle Particelle Elementari.
- Antonio MASIERO dell'Università di Padova, Socio Benemerito per i suoi contributi dati alla Fisica Teorica delle Astroparticelle.
- Nadia ROBOTTI dell'Università di Genova, Socia Benemerita per i suoi contributi dati alla Storia della Fisica.

La Cerimonia prosegue con l'assegnazione dei Premi per le Migliori Comunicazioni presentate lo scorso anno al 105° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, che si è tenuto a L'Aquila dal 23 al 27 settembre 2019. I premi per le migliori comunicazioni si dividono in primo premio, secondo premio e menzione, e tutti danno dignità di stampa sulla rivista della SIF Il Nuovo Cimento: i primi ricevono un diploma e piccolo premio in denaro e i secondi un diploma.

I premi per le migliori comunicazioni sono congiuntamente offerti da Il Nuovo Cimento e da The European Physical Journal (EPJ) e si riferiscono alle varie Sezioni parallele del Congresso. Di seguito i premiati con i titoli delle loro comunicazioni.

- Per la Sezione di Fisica Nucleare e Subnucleare, il Primo Premio ex aequo va a Giulia DI GREGORIO dell'Università di Pisa: "Misura della sezione d'urto del processo $pp \rightarrow VH(b\bar{b})$ a LHC con il rivelatore ATLAS e prospettive future"; e a Sara ZILIANI dell'Università di Milano e INFN, Sezione di Milano: "Lifetime measurements of the second 2^+ state in neutron-rich ^{16}O and ^{20}O with AGATA+PARIS+VAMOS setup". Il Secondo Premio ex aequo va a Rosanna DEPALO dell'INFN, Sezione di Padova: "Nuova misura diretta della sezione d'urto della reazione $^6Li(p,\gamma)^7Be$ a LUNA"; e ad Alessio MANGONI per la Collaborazione BESIII, Università di Perugia e INFN, Sezione di Perugia: "Ampiezze forte e elettromagnetica dei decadimenti del mesone J/ψ in barioni e la loro fase relativa".
- Per la Sezione di Fisica della Materia, il Primo Premio ex aequo va a Elena BLUNDO del Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza": "Proton-induced straining of two-dimensional crystals"; e a Gianluca D'OLIMPIO del Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università dell'Aquila: "Transition-metal dichalcogenide $NiTe_2$: An ambient-stable material for catalysis and nanoelectronics". Il Secondo Premio ex aequo va a Danila AMOROSO del CNR-SPIN, Università "G. d'Annunzio", Chieti: "First-principles approach to novel 2D ferromagnets"; e a Davide ROMANIN del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, Politecnico di Torino: "Field-effect induced high-T_C superconductivity in hole doped hydrogenated diamond(111)".
- Per la Sezione di Astrofisica, il Primo Premio va a Dimitrios KYRATZIS per la Collaborazione HERD, GSSI, L'Aquila: "HERD: The High Energy Cosmic-Radiation Detection facility". Questo premio è messo a disposizione dalla famiglia e in particolare dalla moglie Lucia Orneto in memoria di Giuseppe Serpetti "un appassionato cultore di fisica della città dell'Aquila". Il Secondo Premio va a Filippo MARINI del Dipartimento di Fisica, Università di Padova e INFN, Sezione di Padova: "The JUNO large PMT readout electronics and trigger".
- Per la Sezione di Geofisica e Fisica dell'Ambiente, il Primo Premio va a Fabio MADONNA del CNR, Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, Tito Scalo, Potenza: "Can reference radiosounding measurements be used to improve historical time series?". Il Secondo Premio va a Yemane KELEMEWORK EQUBAMARIAM del Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, Università di Napoli "Federico II": "Spectral analysis of potential field data for depth estimation".
- Per la Sezione di Biofisica e Fisica Medica, il Primo Premio va a Allegra CONTI di NeuroSpin, Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot, CEA, Université Paris Saclay, Gif-sur-Yvette, France e del Laboratorio di Fisiologia Neuromotoria, IRCCS, Fondazione Santa Lucia, Roma: "Longitudinal MRI follow-up of ultrasound-induced blood-brain barrier disruption". Il Secondo Premio va a Lorenzo SCAVARDA del Dipartimento di Fisica, Università di Torino: "Design and performance of the calorimeter for the FOOT experiment".
- Per la Sezione Fisica Applicata, Acceleratori e Beni Culturali, il Primo Premio ex aequo va a Lucia GIULIANO dell'INFN, Sezione di Roma e Università di Roma "La Sapienza": "Flash therapy: an innovation in particle therapy"; e a Mariaelena D'ERRICO dell'Università di Napoli "Federico II" e INFN, Sezione di Napoli: "Radiografia muonica e archeologia: Individuazione e ricostruzione in 3D di cavità nascoste". Il Secondo Premio ex aequo va a Gabriele FRIGENTI del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi", Roma, IFAC-CNR, Sesto Fiorentino e LENS, Università di Firenze, Sesto Fiorentino: "Microbubble whispering gallery mode resonator as an all-optical platform for the characterisation of photoacoustics contrast agents"; e a Nicola FUNICELLO dell'Università di Salerno, Fisciano: "NMR portatile a basso campo".
- Per la Sezione Didattica e Storia della Fisica, il Primo Premio va a Marta CARLI del Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova: "Teaching4Learning@UniPD: l'esperienza del Dipartimento di Fisica e Astronomia". Il Secondo Premio va a Sara SATANASSI del Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna: "Un modulo sui computer quantistici per studenti di scuola secondaria: risultati dal progetto I SEE".

La Cerimonia prosegue con i Premi di Operosità Scientifica.

I premi sono di due tipi e sono riservati ai giovani laureati in Fisica rispettivamente dopo il maggio 2013 e il maggio 2017. Questi premi sono solitamente intitolati ai passati Presidenti della Società Italiana di Fisica.

Per i laureati dopo il maggio 2013:

- Il Premio "Pio Picchi", Consigliere della SIF dal 1974 al 1982 e Vice Presidente della Società dal 1983 al 1991, va a Flaminia GIACOMINI, laureata presso l'Università di Roma "La Sapienza", con dottorato conseguito presso l'Università di Vienna, attualmente post-doc presso il Perimeter Institute for Theoretical Physics, Canada.
- Il Premio "Giuseppe Franco Bassani", Presidente della SIF dal 1999 al 2007 e Direttore della Scuola Normale Superiore dal 1995 al 1999, va a Viola INTROINI, laureata presso l'Università di Pavia, con dottorato conseguito presso University of Cambridge, attualmente ricercatore a tempo determinato presso la stessa università.
- Il Premio "Gilberto Bernardini", Presidente SIF dal 1962 al 1967, primo Presidente fondatore della EPS dal 1968 al 1970 e Direttore della Scuola Normale Superiore dal 1964 al 1977, va a Ciro RICCIO, laureato presso l'Università di Napoli "Federico II", con dottorato conseguito presso l'Università di Napoli "Federico II" e Université Paris-Saclay, attualmente post-doc presso Stony Brook University, New York, USA.

Per i laureati dopo il maggio 2017:

- Il Premio "Vito Volterra", Presidente SIF dal 1907 al 1909, promotore della fondazione della Società Italiana di Fisica, va a Claudio Andrea MANZARI, laureato presso l'Università di Bari, attualmente dottorando presso l'Università di Zurigo, Svizzera.

- Il Premio "Ida Ortalli", Consigliere della SIF dal 1983 al 1994 e primo Consigliere donna, va a Eugenia NASELLI, laureata presso l'Università di Catania, attualmente dottoranda in Fisica presso l'Università di Catania e borsista presso INFN-LNS, Catania.

- Il Premio "Giovanni Polvani", Presidente SIF dal 1947 al 1961 e fondatore della Scuola di Varenna nel 1953, va a Valerio PERI, laureato triennale presso l'Università di Milano, laureato magistrale presso ETH Zurich, attualmente, dottorando presso ETH Zurich, Svizzera.

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

- Il Premio "Giuliano Preparata" per la Fisica Teorica (fenomenologia delle particelle elementari, onde gravitazionali, fisica dei neutrini e struttura della materia), assegnato grazie al contributo dell'Associazione per la Fondazione "Giuliano Preparata", va a Federica Maria SURACE, laureata presso l'Università di Pisa, attualmente dottoranda presso SISSA Trieste, "per i suoi notevoli contributi alla dinamica fuori equilibrio dei sistemi quantistici a molti corpi, con l'obiettivo di comprendere l'origine della loro termalizzazione e sotto quali condizioni essa sia assente".

- Il Premio SIF-SoNS "Neutrons Matter", bandito dalla Società Italiana di Fisica congiuntamente all'Associazione School of Neutron Scattering Francesco Paolo Ricci, per un giovane laureato in Fisica, che abbia svolto significative attività nella scienza dei neutroni e nelle sue applicazioni, va a Dalila ONORATI, laureata presso l'Università di Roma Tor Vergata, attualmente dottoranda presso Università di Roma Tor Vergata, "per i suoi contributi alla modellizzazione di spettri di Prompt Gamma Activation Analysis per fasci di neutroni epitermici".

- Il Premio "Vincenzo Ferraro" per la Fisica dei Plasmi, assegnato grazie al contributo della Associazione Onlus Vincenzo Ferraro presieduta dalla promotrice Maddalena Ferraro, va a Alessandro DI SIENA, laureato presso l'Università di Napoli "Federico II", con dottorato conseguito presso Max Planck Institute, attualmente post-doc presso University of Texas at Austin, "per il contributo significativo nell'ambito dei modelli teorici della fisica dei plasmi da fusione, in particolare riguardanti l'interazione tra particelle energetiche e turbolenza".

- Il Premio "Piero Brovetto" per la Fisica Sperimentale della Materia, assegnato grazie al contributo della compianta moglie Vera Maxia, va a Concetto Eugenio Andrea CORDARO, laureato in Fisica presso l'Università di Catania, attualmente dottorando presso AMOLF Institute di Amsterdam, "per essersi distinto con i suoi studi nel campo della fotonica e della nanofabbricazione di metamateriali".

- Il Premio "Sergio Panizza e Gabriele Galimberti" per l'Optoelettronica o la Fotonica, assegnato per iniziativa e con il contributo della Società Laser Optronic di Milano, va a Vincenzo D'AMBROSIO, laureato presso l'Università di Napoli "Federico II", con dottorato conseguito presso l'Università di Roma "La Sapienza", attualmente Ricercatore a tempo determinato presso l'Università di Napoli "Federico II", "per i numerosi contributi nell'utilizzo di luce strutturata in svariati campi della fotonica sperimentale, sia applicativi, che di ricerca fondamentale".

- La Borsa "Ettore Pancini" per la Fisica Nucleare e Subnucleare, assegnata grazie al contributo spontaneo di Roberto Mazzola del CNR di Portici, va a Lorenzo PAGNANINI, laureato presso l'Università di Roma "La Sapienza", con dottorato conseguito presso GSSI e SISSA, attualmente ricercatore a tempo determinato presso GSSI L'Aquila, "per i risultati scientifici dell'esperimento pilota CUPID-0, con particolare riferimento alla scoperta della dinamica nucleare del doppio decadimento beta con due neutrini del ^{82}Se".

- Il Premio per la Comunicazione Scientifica va a Adele LA RANA, University of California Riverside, "per la sceneggiatura del documentario *La Scelta. Edoardo Amaldi e la Scienza senza confini*, lavoro esemplare di comunicazione scientifica che scaturisce anche da un'approfondita attività di ricerca storica e d'archivio e da una preziosa raccolta di testimonianze orali".

- Il Premio per la Didattica o la Storia della Fisica è assegnato quest'anno per la Storia e va a Michele CAMEROTA, Università di Cagliari, a Franco GIUDICE, Università di Bergamo, e a Salvatore RICCIARDO, Università di Bergamo, "per la scoperta e l'analisi di un nuovo documento autografo della 'Lettera a Benedetto Castelli' di Galileo Galilei, del 21 dicembre 1613".

La Cerimonia si conclude quindi con la proclamazione dei premi internazionali.

- Il Premio "Friedel-Volterra" è stato istituito per onorare il legame tra Vito Volterra e Jacques Friedel e il loro straordinario talento nella Fisica, dalla Società Italiana di Fisica (SIF), insieme alla Société Française de Physique (SFP). Il Premio è destinato a un fisico attivo nella collaborazione italo-francese, in riconoscimento di risultati rilevanti del suo lavoro di ricerca. Il Premio ha lo scopo di commemorare le figure dei due insigni scienziati, accomunati da alcuni aspetti delle loro ricerche, e di rinforzare i rapporti tra le due Società. Il Premio è conferito annualmente ed è alternativamente bandito dall'una o dall'altra Società. Il vincitore del Premio Friedel-Volterra 2019 è stato selezionato dal Consiglio di Presidenza della SIF a partire da una rosa di candidati sottoposta dalla SFP, sarà invitato il prossimo anno al nostro Congresso insieme a un rappresentante della SFP e viene qui annunciato. Il Premio 2019 va a Cristiano CIUTI, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université de Paris, "per i contributi eccezionali nell'interazione luce-materia e nell'elettrodinamica quantistica in cavità (regime di coupling ultra-forte)".

- Il Premio "Giuseppe Occhialini" è stato congiuntamente istituito dalla Società di Fisica (IOP – Institute of Physics) del Regno Unito e dalla SIF nel 2007, in occasione del centenario della nascita di Giuseppe Occhialini, allo scopo di commemorare la figura dell'insigne scienziato e di consolidare le relazioni tra le due Società. Il Premio è annuale e viene alternativamente conferito da una delle due Società a un fisico selezionato a partire da una lista di candidati proposti dall'altra. Quest'anno il vincitore del Premio Giuseppe Occhialini è stato selezionato dall'Award Committee dell'IOP a partire da una rosa di candidati sottoposta dal Consiglio di Presidenza della SIF. Il Premio va a Marica BRANCHESI, Gran Sasso Science Institute, L'Aquila, "per la sua visione e lungimiranza nel colmare il divario tra l'astronomia osservativa e la fisica sperimentale delle onde gravitazionali negli anni che hanno anticipato la maestosa scoperta di GW170817, quando un lampo di luce multicolore è stato emesso in concomitanza con il segnale dell'onda gravitazionale a lungo cercato".

Marica Branchesi.

I vincitori del Premio "Enrico Fermi" 2020 Sandro De Silvestri, Patrizia Tavella e Giovanni Mana.

Infine viene conferito il prestigioso PREMIO "ENRICO FERMI" DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA. Il Premio è stato istituito nel 2001, in occasione del centenario della nascita del grande fisico italiano, per onorarne la memoria e legare il suo illustre nome alla Società Italiana di Fisica. Il Premio è assegnato a uno o più Soci che abbiano particolarmente onorato la Fisica con le loro scoperte, selezionati da una Commissione costituita da un rappresentante del CNR, dell'INAF, dell'INFN, dell'INGV, dell'INRIM, del Centro Fermi (Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi") e del Consiglio SIF e presieduta dal Presidente della SIF.

La medaglia che accompagna il premio è una fedele riproduzione del medaglione in bronzo, opera di Giannino Castiglioni, posto nell'aula magna di Villa Monastero (Varenna) nel 1954, quando l'aula e la Scuola Internazionale di Fisica della SIF vennero intitolate a Enrico Fermi.

Il Premio "Enrico Fermi" 2020 è assegnato congiuntamente a Sandro DE SILVESTRI, Politecnico di Milano, ed ex aequo a Patrizia TAVELLA, Bureau International des Poids et Mesures Sèvres e Giovanni MANA, INRiM Torino.

In particolare a:

Sandro DE SILVESTRI, "per la sua attività sulla generazione di impulsi luminosi con una durata del ciclo ottico ridotta e per le applicazioni alla spettroscopia della materia e all'ottica non lineare in condizioni estreme";

e a Patrizia TAVELLA e Giovanni MANA ex aequo, "per i loro originali e importanti contributi alla misura del tempo e alla definizione della massa".

Nello specifico a

Patrizia TAVELLA, "per aver sviluppato metodi e tecniche per la definizione della scala del tempo e la sua implementazione nel sistema di navigazione europeo Galileo";

Giovanni MANA, "per aver dato un contributo unico per la ridefinizione del sistema internazionale delle unità di misura, in particolare mediante la determinazione della costante di Avogadro e della costante di Planck".

Le relazioni di S. De Silvestri, P. Tavella, G. Mana e M. Branchesi sono riportate nelle pagine seguenti.

THE ITALIAN PHYSICAL SOCIETY "ENRICO FERMI" PRIZE AND MEDAL 2020

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

The 2020 "Enrico Fermi" Prize and Medal have been jointly awarded to Sandro De Silvestri and, ex aequo, to Patrizia Tavella and Giovanni Mana. In particular to:
– Sandro DE SILVESTRI, for his activity on the generation of light pulses with a reduced optical cycle duration and for applications to spectroscopy of matter and nonlinear optics in extreme conditions;
– Patrizia TAVELLA and Giovanni MANA, for their original and important contributions to the measurement of time and to the definition of mass. And in particular to:
- Patrizia Tavella, for having developed methods and techniques for defining the time scale and its implementation in the Galileo European navigation system;
- Giovanni Mana, for having given a unique contribution to the redefinition of the international system of units of measurement, in particular through the definition of the Avogadro constant and the Planck constant.

From femtosecond to attosecond light pulses: a story of achievements and breakthroughs

During the last three decades the race towards the generation of extremely short light pulses has become very exciting. A new era in the technology of femtosecond lasers began in 1991, with the first demonstration of the selfmode-locked Ti:Sapphire laser [1]. Since then, a dramatic reduction in achievable pulse duration was obtained. Sub-6-fs pulses were generated directly from Kerr-lens mode-locked Ti:Sapphire lasers using chirped mirrors for dispersion control. In parallel with this progress in femtosecond pulse generation, the introduction, in 1985, of the technique of chirped-pulse amplification (CPA) [2] has made possible the amplification of ultrashort pulses to unprecedented power levels. Gérard Mourou and Donna Strickland, the inventors of this technique, received the Noble Prize in Physics in 2018.

Sub-10-fs light pulses can also be generated by external compression. In 1981 Nakatsuka *et al.* [3] introduced a method for optical pulse compression based on the interplay between self-phase modulation (SPM) and group velocity dispersion (GVD) that arises during the propagation of short light pulses in single-mode optical fibers. Using this technique, pulses as short as 6 fs at 620 nm were obtained in 1987 [4] and, employing an improved ultrabroad-band dispersion compensation, pulses as short as 4.5 fs at 800 nm were generated in 1997 [5]. However, the use of single-mode optical fibers limits the pulse energy to a few nanojoules. In 1996 a powerful pulse compression technique based on SPM-induced spectral broadening in a hollow fiber filled with noble gases has demonstrated the capability of handling high-energy pulses (sub-mJ range) [6]. The initial implementation of the hollow-fiber technique using 20 fs seed pulses from a Ti:Sapphire system and a high-throughput broad-band compressor led to the generation of pulses with duration down to 4.5 fs [7]. Pulses as short as 3.8 fs have been generated in 2003 by adaptive compression of a supercontinuum produced in two gas-filled hollow fibers [8]. Pulses of 5.4 fs durations with an energy up to 2.7 mJ (0.5 TW peak power) have been obtained [9] by using a hollow fiber with a pressure gradient. Due to the excellent spatial beam characteristics at the output of the hollow fiber, such beam has been focused to a nearly diffraction-limited spot size, without the need of wavefront correction, with a peak intensity up to 5×10^{18} W/cm^2.

Since the period of the optical cycle in the visible and near infrared is 2–3 fs, this pulse duration was at the physical limit of compression techniques operating in this wavelength range. Further shortening of the light pulse duration required a breakthrough, which was established at the beginning of the new millennium with the generation of sub-femtosecond light pulses in the extreme ultraviolet spectral (XUV) region [10]: Attosecond Science was born. Attosecond pulses are generated exploiting the interaction of extremely intense laser pulses with gaseous targets [11]. This interaction leads to the so-called high-order harmonic generation (HHG), which consists in the emission of coherent XUV radiation as odd harmonics of the driving laser

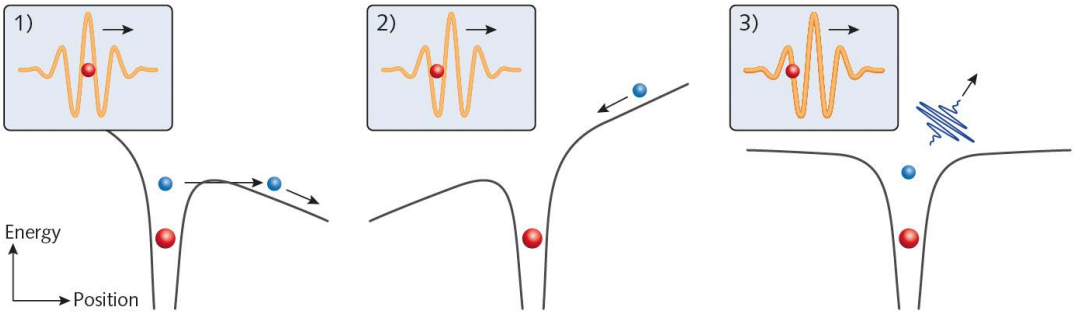


Fig. 1 Three-step model: 1) the outermost electron (blue dot) is freed by tunnel ionization; 2) then it is accelerated by the laser field and is driven back towards the parent ion (red dot); 3) during recombination, the gained kinetic energy is released as an XUV attosecond burst. The upper panels show the oscillating electric field of the intense few-cycle laser pulse during the interaction with the atom (the red dot is a guide for the eye).

wavelength. HHG is only one of the numerous phenomena occurring when light and matter interact in the strong optical-field regime. The dynamics of bound and ionized electrons in strong-field phenomena is dominated by the instantaneous electric field of the strong driving laser pulse (for instance, wavelength and carrier-envelope phase offset). On the other hand, perturbative nonlinear optical phenomena, like Kerr effect or low-order harmonic generation, are governed by the intensity envelope of the laser pulse. This striking difference among strong-field and perturbative optical phenomena must be kept in mind in order to understand the bases of Attosecond Science.

HHG is a source of coherent radiation in the extreme ultraviolet (XUV) and soft X-ray spectral region and consists of a sequence of light bursts, with sub-femtosecond duration, emitted by atoms or molecules exposed to the laser radiation. The physical mechanism behind HHG can be understood in terms of the so-called three-steps model, which is valid within a strong-field and single-active-electron picture [12]. During laser-atom interaction (see fig. 1), the outermost electron of the neutral atom is ionized, accelerated and forced to recombine with the parent ion by the strong oscillating laser field. The recombination is followed by the emission of an XUV photon, whose energy depends on the kinetic energy acquired by the electron in the laser field. Hence, the HHG process is intimately connected to the nature of the trajectory that the freed electron describes before recombination. The mentioned picture of HHG occurs at each half oscillating cycle of the laser pulse. Therefore, the harmonic radiation appears as a sequence of XUV attosecond bursts, separated in time by half the optical cycle of the driving laser field. In the spectral domain, this process corresponds to the emission of numerous odd harmonics of the fundamental driving field.

A way for the production of isolated attosecond pulses is to apply a temporal gate on the harmonic generation process. With such a method the XUV generation is confined within a temporal window, which can be shorter than half an optical cycle of the driving field. Several approaches have been proposed and implemented to perform such temporal confinement of the XUV emission. A method, named polarization gating, relies on the strong sensitivity of the HHG process on the ellipticity of the fundamental field. Indeed, if the polarization of the driving pulse is temporally modulated from circular to linear and back to circular, the XUV emission is limited during the temporal window where the driving field is linearly polarized. By applying such a method, isolated attosecond pulses with a duration down to 130 as were generated [13].

The application of attosecond techniques to molecules offers the possibility of investigating primary relaxation processes, which involve electronic and nuclear degrees of freedom and their coupling. In the case of large molecules (*e.g.*, biologically relevant molecules), prompt ionization by attosecond pulses may produce ultrafast charge migration along the molecular skeleton, which can precede nuclear rearrangement. This electron dynamics, evolving on an attosecond or few-femtosecond temporal scale, can determine the subsequent relaxation pathways of the molecule. The process is induced by sudden generation of an electronic wave packet, which moves across the molecular chain and induces a site-selective reactivity, which is related to charge localization in a particular site of the molecule. In order to study the electron wave-packet dynamics in the outer-valence molecular orbitals relevant to most chemical and biological systems, attosecond pulses are required. The experimental evidence of such ultrafast charge dynamics was demonstrated in the amino acid phenylalanine after prompt ionization induced by isolated attosecond pulses [14].

The extension of attosecond methods to solid-state physics is still limited, but important results have been already achieved as: i) the measured delays in photoemission from various solids of the order of a few tens of attoseconds [15]; ii) the measured upper limit for the carrier-induced band-gap reduction and the electron-electron scattering time in the conduction band of silicon of the order of a few hundreds of attoseconds [16]. These results clearly demonstrate the advantages offered by the application of attosecond techniques.

Sandro De Silvestri
Politecnico di Milano

Bibliography

[1] D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett, *Opt. Lett.*, 16 (1991) 42.
[2] G. Mourou, D. Strickland, *Opt. Commun.*, 56 (1985) 219.
[3] H. Nakatsuka, D. Grischkowsky, A. C. Balant, *Phys. Rev. Lett.*, 47 (1981) 910.
[4] R. L. Fork, C. H. B. Cruz, P. C. Becker, C. V. Shank, *Opt. Lett.*, 12 (1987) 483.
[5] A. Baltuska, Z. Y. Wei, M. S. Pshenichnikov, D. A. Wiersma, *Opt. Lett.*, 22 (1997) 102.

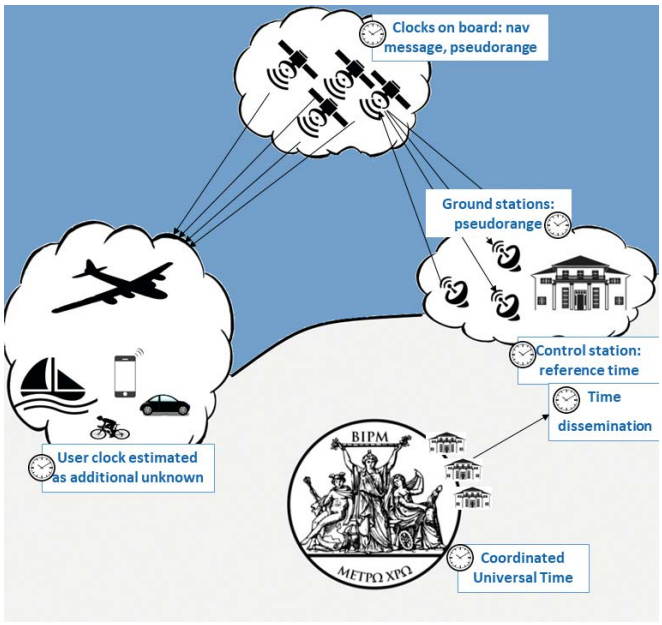


Fig. 1 Typical GNSS structure and the presence of clocks [1].

[6] M. Nisoli, S. De Silvestri, O. Svelto, *Appl. Phys. Lett.*, 68 (1996) 2793.
[7] M. Nisoli, S. De Silvestri, O. Svelto, R. Szipocs, K. Ferencz, C. Spielmann, S. Sartania, F. Krausz, *Opt. Lett.*, 22 (1997) 522.
[8] B. Schenkel, J. Biegert, U. Keller, C. Vozzi, M. Nisoli, G. Sansone, S. Stagira, S. De Silvestri, O. Svelto, *Opt. Lett.*, 28 (2003) 1987.
[9] S. Bohman, A. Suda, M. Kaku, M. Nurhuda, T. Kanai, S. Yamaguchi, K. Midorikawa, *Opt. Express*, 16 (2008) 10684.
[10] M. Hentschel, R. Kienberger, C. Spielmann, G. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz, *Nature*, 414 (2001) 509.
[11] F. Krausz, M. Ivanov, *Rev. Mod. Phys.*, 81 (2009) 163.
[12] P. Corkum, *Phys. Rev. Lett.*, 71 (1993) 1994.
[13] G. Sansone, E. Benedetti, F. Calegari, C. Vozzi, L. Avaldi, R. Flammini, L. Poletto, P. Villoresi, C. Altucci, R. Velotta, S. Stagira, S. De Silvestri, M. Nisoli, *Science*, 314 (2006) 443.
[14] F. Calegari, D. Ayuso, A. Trabattoni, L. Belshaw, S. De Camillis, S. Anumula, F. Frassetto, L. Poletto, A. Palacios, P. Decleva, J. B. Greenwood, F. Martín, *Science*, 346 (2014) 336.
[15] A. L. Cavalieri, N. Müller, Th. Uphues, V. S. Yakovlev, A. Baltuška, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P. M. Echenique, R. Kienberger, F. Krausz, U. Heinzmann, *Nature*, 449 (2007) 1029.
[16] M. Schultze, K. Ramasesha, C. D. Pemmaraju, S. A. Sato, D. Whitmore, A. Gandman, J. S. Prell, L. J. Borja, D. Prendergast, K. Yabana, D. M. Neumark, S. R. Leone, *Science*, 346 (2014) 1348.

Timekeeping and navigation systems: how clocks help positioning

After a degree in theoretical physics and a PhD in metrology in Torino, I started working at the *Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris*, now the National Institute of Research in Metrology (INRiM), studying mathematical models applied to atomic clocks and time scales. Around the year 2000, Europe started thinking of developing a Global Navigation System Satellite (GNSS), named Galileo, and expertise in timekeeping and clock characterization was sought. In fact, modern GNSS are based on clock measurements and the necessary understanding is similar to the typical daily problems of a timekeeping institute. In the beginning the questions and the language used in GNSS was not the usual metrological one, and it was necessary to let the two communities be able to understand each other and to work on slightly different issues. The position of a GNSS user is estimated as the intersection of three or more spheres whose centre is the known position of a satellite and whose radius is given by the velocity of light multiplied by the travel time of the satellite signal, knowing when it started and measuring, by the receiver clock, when it arrived.

Since the light velocity is a very large number, an error of only 1 nanosecond (10^{-9} s) in the time measurement is sufficient to obtain at least 30 cm of error in the estimated position. Keeping space and ground clocks synchronised and being able to limit time error to one nanosecond is difficult; an error of 100 nanoseconds is more common, which would give a positioning error of 30 metres. This gives an understanding of why time metrology is so important in navigation.

We see in fig. 1 that all the segments of a GNSS are equipped with clocks, with different purposes [1, 2]. The more stable, reliable, and space-qualified atomic clocks have the aim of keeping time onboard satellites and to generate the navigation signal. On the ground, the network of monitoring stations, as well as the control centres, need stable and accurate clocks to generate the system reference time, to measure the satellite pseudo-ranges, and to ensure the orbit and clock estimation and prediction. User receivers are equipped with clocks, to measure the time of arrival of the satellite signals. The receiver clock, not necessarily an atomic clock, has an unknown offset which needs to be estimated in the whole navigation solution, adding a fourth unknown to the estimation problem, besides to three space positioning coordinates. In principle, this is sufficient to estimate the user's position, but GNSSs offer also a timing service, by disseminating the Coordinated Universal Time (UTC), through some connection to national time laboratories that realize local approximations of UTC, the international reference time scale realized at the *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) in Sevres, France (`https://www.bipm.org/en/bipm/tai/`).

If for a physicist in a time laboratory the quality of an atomic clock is characterized by the noise spectral density, for a GNSS engineer the question is rather "how long will the space clock remain synchronized!?" or "how often shall clocks be re-synchronized?" To answer these questions, useful in navigation as well as in timekeeping, I started working in collaboration with several colleagues, experts in mathematic and in signal processing, I have been supported by tens of bright students, and we developed methods to mathematically

model the error of an atomic clock [3-5], its estimation [6-8], future prediction [9-10], how to control the signal [11], and also how to quickly identify any anomaly or misbehaviour [12-14]. The integrity of a GNSS service requires a maximum time of 6 seconds to alert the users of a possible anomaly in the system, with an extremely low probability of false alarm. These requests are quite challenging and with my INRIM colleagues we were asked also to participate in the experimental phases of the Galileo system. We realized an experimental Galileo system time, estimated the first onboard clocks, made numerous additional tests to support the understanding of the clocks in the systems [15, 16]. Now INRiM plays an important role in the Galileo system by keeping the system time synchronised to UTC, and by validating all the system clocks. The developed methods are studied also by other GNSS, and find applications in national timekeeping, sensor stability, and geodesy.

I have recently changed my job, moving to the BIPM, where I am responsible of the international UTC and of the coordination of international timekeeping, where time and navigation are still strictly related and enjoy mutual benefits.

Patrizia Tavella
BIPM, Sèvres, France

Bibliography

[1] P. Tavella, G. Petit, "*Precise time scales and navigation systems: mutual benefits of timekeeping and positioning*", *Satell. Navig.*, 1 (2020) 10.
[2] J. Hahn, P. Tavella, "*A time scale for satellite navigation systems: why and how?*", *Int. J. Satell. Commun.*, 18 (2000) 305.
[3] L. Galleani, L. Sacerdote, P. Tavella, C. Zucca, "*A mathematical model for the atomic clock error*", *Metrologia*, 40 (2003) S257.
[4] P. Tavella, C. Zucca, "*The Clock Model and its Relationship with the Allan and related Variances*", *IEEE Trans. UFFC Ultrason. Ferroel. Freq. Control*, 52 (2005) 288.
[5] E. Bibbona, G. Panfilo, P. Tavella, "*The Ornstein-Uhlenbeck Process as a Model of the Filtered White Noise*", *Metrologia,* 45 (2008) S117.
[6] I. Sesia, P. Tavella, "*Estimating the Allan Variance in Presence of Long Periods of Missing Data and Outliers*", *Metrologia,* 45 (2008) S134.
[7] L. Galleani, P. Tavella, "*Dynamic Allan variance*", *IEEE Trans. UFFC Ultrason. Ferroel. Freq. Control,* 56 (2009) 450.
[8] I. Sesia, L. Galleani, P.Tavella, "*Application of the Dynamic Allan Variance for the Characterization of Space Clock Behavior*", *IEEE Trans. Aerospace Electron. Sys.*, 47 (2011) 884.
[9] L. Galleani, P. Tavella, "*Time and the Kalman filter*", *IEEE Control Sys. Mag.*, 30 (2010) 44.
[10] G. Panfilo, P. Tavella, "*Atomic Clock Prediction based on stochastic differential equations*", *Metrologia,* 45 (2008) S108.
[11] M. Farina, L. Galleani, P. Tavella, S. Bittanti, "*A Control Theory Approach to Clock Steering Techniques*", *IEEE Trans. UFFC Ultrason. Ferroel. Freq. Control*, 57 (2010) 2257.
[12] L. Galleani, P. Tavella, "*Detection of Atomic Clock Frequency Jumps with the Kalman Filter,*" *IEEE Trans. UFFC Ultrason. Ferroel. Freq. Control,* 59 (2012) 504.
[13] L. Galleani, P. Tavella, "*The Dynamic Allan Variance IV: Characterization of Atomic Clock Anomalies*", *IEEE Trans. UFFC Ultrason. Ferroel. Freq. Control*, 62 (2015) 791.
[14] C. Zucca, P. Tavella, G. Peskir, "*Detecting atomic clock frequency trends using an optimal stopping method*", *Metrologia*, 53 (2016) 589.
[15] P. Waller, F. Gonzalez, S. Binda, I. Sesia, I. Hidalgo, G. Tobias, P. Tavella, "*The In-orbit Performances of GIOVE Clocks*", *IEEE Trans. UFFC Ultrason. Ferroel. Freq. Control*, 57 (2010) 738.
[16] I. Sesia, G. Signorile, E. Cantoni, G. Cerretto, A. Samperi, P. Tavella, A. Cernigliaro, "*Time Metrology in the Galileo Navigation System: The Experience of the Italian National Metrology Institute*", *IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace*, May 2014, Benevento, Italy, DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865888

The atom counting route to the redefinition of the kilogram

Since the dawn of human culture, metrology has been essential to both understanding of Nature's work and developing new technologies. Modern metrology grew out of the French metric system, whose units were based on Nature and conceived *for all time, for all people*. Though they had to be embodied in artefacts – such as the Pt-It international prototype of the kilogram – the idea of natural units smouldered under the ashes.

In 1963, Egidi (at the Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris, now INRiM) figured a mass standard realised by counting the atoms in a crystal, *scaled so to result outside in the form of a cube with faces parallel to the reticular planes* [1]. He noted that the crystal should be prepared with 1 kg mass and should be mononuclidic, with no more than 0.1 nmol/mol impurities, dislocations, or other defects. He anticipated that the distance between the crystal's lattice planes and its outer dimensions must be measured to within 0.1 nm/m fractional accuracy.

Two years later, Bonse and Hart, at the Cornell University, operated the first x-ray interferometer and paved the way to measurements of the lattice spacing of Si crystals [2]. Soon Deslattes, at the National Bureau of Standards (now, National Institute of Standards and Technologies), completed the first atom count [3].

Counting atoms is an old wish. Johann Magnenus noted that the scent of a granule of burned incense no larger than a chickpea filled a church of more than 7×10^8 times the volume of his nose and used this observation – together with a guess of the minimal amount of evenly dispersed incense that his nose can sense – to estimate that the burned atoms were more than 7.775×10^{17} [4]. What he did was essentially the same thing we do today: to amplify the atomic scale so that macro-scale detection is possible. He used diffusion and smell. We use crystallisation and x-ray diffraction. Since silicon can be grown as

Fig. 1 Realisation of the kilogram by counting the atoms in a silicon monocrystal shaped as a nearly perfect ball.

perfect, pure, and, nowadays, monoisotopic crystals, it was chosen as Egidi's material.

In 1983, Zosi (at the Istituto di Metrologia G. Colonnetti, now INRiM) proposed the realisation of a kilogram prototype shaped as a nanometre-perfect silicon ball [5] (fig. 1) and soon demonstrated its manufacturing [6]. Substituting a ball for Egidi's cube removed the troubles in making and preserving the cube's edges atom-sharp.

The final step began in 2004. By joining know-how, capabilities, and resources, research institutes in Europe, Russia, Japan, Australia, and the United States started the production of a highly pure ^{28}Si monocrystal. The isotopic enrichment made it possible to bypass a stop in the way to determine the molar mass of natural silicon to within the needed 10^{-8} fractional accuracy. Two 1 kg nearly perfect balls were shaped, their chemical purity, molar mass, volume, and lattice parameter were determined, and their surfaces were chemically and physically characterised at the atomic scale.

Atoms were counted to within eight significant digits via the $8V/a^3$ ratio of the ball, V, and atom, $a^3/8$, volumes, where a is the lattice parameter and 8 the number of Si atoms per (cubic) unit cell. Taking the molar volume MV/m into account, where m and M are the ball mass (expressed in terms of the international Pt-Ir prototype of the kilogram) and molar mass, the count delivered the Avogadro constant, $N_A = 8MV/(ma^3)$ [7]. Since the molar Planck constant, $N_A h$, is well-measured, the count also gave a value of the Planck constant. After the redefinition of the international system of units, reversing these equations, the ball mass is expressed in terms of the h value as $m/h = 8MV/(a^3 N_A h)$.

INRiM participated decisively in this effort providing – via combined x-ray and optical interferometry – the most accurate value of the ^{28}Si lattice parameter in terms of a calibrated optical wavelength [8]. INRiM's x-ray interferometry was pioneered by Zosi in the '70s of the last century [9]. Operating a separate-crystal x-ray interferometer and measuring the lattice parameter to within nine significant digits was (and still is) a huge technological challenge. The interferometer was carved in-house from a high-purity and dislocation-free Si monocrystal, ensuring micrometre tolerance and strain-free surfaces. The two interferometer parts were separated and reassembled, placing their atoms in the same relative positions they had in the boule. Eventually, one of the crystals was moved over centimetre strokes keeping the atom-scale alignment of the crystals' lattices, avoiding vibrations exceeding a minute fraction of the atom size, counting the travelling diffracting planes, and measuring the movement in terms of a calibrated optical wavelength to within picometre accuracy. Since silicon expands by about 2.6×10^{-6} parts per kelvin, the targeted 10^{-9} fractional accuracy implied sub-millikelvin temperature stability and measurement.

The effort ended with the work of the Task Group on Fundamental Physical Constants of the Committee on Data for Science and Technology (CODATA), which, since 1969, evaluates the measurement results and recommends self-consistent values of the fundamental physical constants [10]. Eventually, in 2018, the General Conference of Weights and Measures agreed conventional values be assigned to Avogadro and Planck constants to redefine the kilogram and the international system of units.

Today, mass is tied to the Einstein-Planck relationship $mc^2 = h\nu$, which is exact by definition. This generates a tension between the unit definition and the need of a testable law, which, previous 2019, was experimentally demonstrated only to within a fractional accuracy of 4.4×10^{-7} [11]. INRiM's value of the silicon lattice parameter realises the metre at the x and γ wavelengths. This opens the way to improved experimental evidence of the $mc^2 = h\nu$ accuracy by comparing a low-energy determination of the ^{28}Si mass (*e.g.*, by weighing of a ^{28}Si ball on a Kibble's balance and counting its atoms) with a high-energy one (*e.g.*, by measuring the wavelengths of the γ-rays emitted in the decay of the ^{28}Si nucleus after the capture of a thermal neutron).

What is the future of scientific metrology? Bright. The optimism is motivated by the observation that precision measurements are a foundation on which science rests. Also, science triggers technological advances which are instrumental to better metrology, in turn, leading to more accurate understandings of Nature. This loop strengthens both culture and technology.

Giovanni Mana
INRiM, Torino

Bibliography

[1] C. Egidi, "*Phantasies on a natural unity of mass*", *Nature,* 200 (1963) 61.
[2] U. Bonse, M. Hart, "*An x-ray interferometer*", *Appl. Phys. Lett.,* 6 (1965) 155.
[3] R. D. Deslattes, "*Determination of the Avogadro constant*", *Phys. Rev. Lett.,* 33 (1974) 463.
[4] J. C. Magnenus, "*Democritus Reviviscens*" (Wyngaerden) 1646, page 207.
[5] G. Zosi, "*A neo-Pythagorean approach towards an atomic-mass standard*", *Lett. Nuovo Cimento,* 38 (1983) 577.
[6] A. Leistner, G. Zosi, "*Polishing a 1 kg silicon sphere for a density standard*", *Appl. Opt.,* 26 (1987) 600.
[7] G. Bartl *et al.*, "*A new ^{28}Si single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition*", *Metrologia,* 54 (2017) 693.
[8] E. Massa *et al.*, "*A more accurate measurement of the ^{28}Si lattice parameter*", *J. Phys. Chem. Ref. Data,* 44 (2015) 031208.
[9] G. Basile *et al.*, "*Preliminary results in X-ray interferometry at the istituto di metrologia G. Colonnetti*", *Lett. Nuovo Cimento,* 23 (1978) 324.
[10] P. J. Mohr *et al.*, "*Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment*", *Metrologia,* 55 (2018) 125.
[11] S. Rainville, "*A direct test of $E = mc^2$*", *Nature,* 438 (2005) 1096.

SIF-IOP "GIUSEPPE OCCHIALINI" PRIZE AND MEDAL 2020

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

The 2020 Occhialini Prize has been awarded to Marica Branchesi: "For her vision in bridging the observational astronomy and experimental gravitational wave physics that anticipated the majestic discovery of GW170817, when a flash of multicolor light was emitted concurrently with the long searched gravitational wave signal".

A new multi-messenger exploration of the Universe

On 2015 September 14, the first observation of gravitational waves by the Advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) detectors concluded a long scientific quest, which began 100 years ago with Einstein's prediction of their existence. This detection opened a new way to observe the Universe, making gravitational waves part of the forefront astronomy and allowing astrophysicists to probe the nature of compact objects and the rich physics of energetic transient phenomena in the sky.

Two years later, on 2017 August 17, another breakthrough discovery marked the history with the birth of multi-messenger astronomy including gravitational waves. The first detection of a binary neutron star (BNS) merger, GW170817, by the Advanced LIGO detectors and Advanced Virgo, which initiated the most extensive observational campaign in human history enabling the detection of electromagnetic emission in essentially all the electromagnetic bands. This multi-messenger detection revolutionised our understanding of binary neutron star mergers, unveiling the physics governing short gamma-ray bursts and kilonova emissions.

The hunt for electromagnetic signals poses many observational and data-analysis challenges. They start from the real-time gravitational-wave data analysis to identify signals and send rapid alerts to the astronomers, and then the searches for an electromagnetic signature, which need to cover enormous regions of the sky, to remove hundreds of contaminating transients not related to the gravitational-wave source, and to identify the unique transient counterpart.

In 2009-2010 the Virgo and LIGO collaboration made a first pioneering effort aiming at the development of the multi-messenger astronomy by organizing the first electromagnetic follow-up program of gravitational-wave candidate events detected by the initial LIGO and Virgo detectors. The program involved ground- and space-based facilities observing the sky at optical, X-ray and radio wavelengths. Even if we did not have any detections, the follow-up program was a milestone toward the advanced detector era, showing us all the challenges to overcome.

At that time, one of the most urgent requirements was to create a bridge between the communities of gravitational-wave physicists and astronomers to develop strategies and undertake the networking necessary to create the synergy to work together. Explaining to a still skeptical astronomical community the prospects to observe gravitational waves for the Advanced detectors has been a driving force and the base to start collaborating.

We started working together on developing observational strategies, data analysis and infrastructure to integrate gravitational-wave observations into the mainstream astronomy. A larger and larger number of observational resources from 1 to 10 m optical telescopes, high-energy satellites, and radio arrays were involved in the dream of detecting the first electromagnetic counterpart of a gravitational-wave signal.

GW170817 immeasurably repaid us of all the work done over many years to overcome all the observational, data analysis and theoretical challenges. It clearly showed how observing gravitational waves and electromagnetic emissions have an immense scientific reward. It is a unique way to have a complete characterization of the properties of the astrophysical sources, to identify the host galaxy, and probe the source environments.

As soon as the Virgo and LIGO network detected the gravitational-wave signal, we sent an alert to the astronomers.

With my GRAWITA colleagues, we took one of the first optical observations of the kilonova emission by the Rapid Eye Mount in Chile, which led to the host-galaxy identification.

We collected spectra by the ESO's X-shooter spectrograph over the days. These spectra, spanning from the ultraviolet to the infrared, revealed signatures of the radioactive decay of r-process nucleosynthesis elements unveiling the major role of binary neutron-star coalescence in the Universe nucleosynthesis. I participated in the XMM-Newton observations 100 days after the merger and in the very-long-baseline interferometry observations, performed about 200 days after the merger by using a global network of 32 radio telescopes. These observations were crucial to establish that a relativistic energetic and narrowly collimated jet successfully emerged from the neutron-star merger GW170817 and unveil its structured shape. The measure of the distance from the gravitational-wave signal and the recessional velocity of the host galaxy of the binary neutron-star merger, NGC4993, enabled us to measure the expansion rate of the Universe. The multi-messenger observations of GW170817 enabled us to probe the engines of the most energetic phenomena in the Universe, the origin of heavy elements (elements heavier than iron, including gold and platinum), and to open a new way to make cosmology.

This is only the starting of an exciting new frontier of observational astrophysics. We are working to be prepared to observe and theoretically interpret multi-messenger observations. A wealth of discoveries is ahead of us and a promise for the future: electromagnetic and gravitational waves together are unique probes to explore nuclear matter and gravity at the extremes and the expanding Universe with its dark components. We are currently working to develop the science cases of the third generation of gravitational-wave detectors, such as Einstein Telescope, which will make it possible, for the first time, to explore through gravitational waves the entire Universe along its cosmic history up to the cosmological dark ages.

Marica Branchesi
Gran Sasso Science Institute, L'Aquila

I FISICI ITALIANI: UN DIZIONARIO PER CINQUE SECOLI DI FISICA

Nel 2019 la SIF ha dato inizio alla pubblicazione di una serie speciale di supplementi del Giornale di Fisica dedicati a *I Fisici Italiani*, un ampio progetto editoriale curato da Adele La Rana e Paolo Rossi. Secondo la definizione data dai curatori stessi si tratta di una *prosopografia* della fisica italiana, un vero e proprio dizionario che tramite schede biografiche sintetiche, raccolte e ordinate alfabeticamente, presenta la comunità di studiosi italiani che hanno contribuito allo sviluppo e alla diffusione della fisica in Italia e nel mondo nell'arco di cinque secoli, a partire dal Rinascimento.

Sostenuta originariamente dal progetto "HISTPRO – Prosopografia della Fisica Italiana" del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi" (Centro Fermi), *I Fisici Italiani* è un'opera articolata in tre volumi, il primo dei quali raccoglie le schede dei fisici nati nel periodo che va dal 1450, durante il Rinascimento, fino al 1770 e dunque fino al Risorgimento. Più specificamente, questo volume intende prendere in considerazione coloro che hanno avuto un ruolo attivo nel mondo scientifico storicamente precedente alla formazione delle repubbliche postnapoleoniche. In termini di contenuti si scopre che, a partire da Leonardo da Vinci, in questo volume sono state raccolte le schede biografiche di coloro che hanno esercitato lo studio delle scienze fisiche solamente in modo osservativo e sperimentale, escludendo quindi quelli che invece hanno adottato un approccio puramente filosofico e speculativo.

Il secondo volume (A-Z e D-L), che raccoglie 1100 voci, va dal Risorgimento fino alla Seconda Guerra Mondiale e presenta dunque studiosi delle scienze fisiche nati dal 1770 al 1918. In particolare, i curatori hanno raccolto in questo volume le schede relative a coloro che hanno dato il loro contributo alle scienze tramite pubblicazioni su riviste specializzate nazionali e internazionali e che hanno fatto parte del mondo accademico. Inoltre sono state incluse anche le schede di quanti hanno ricoperto il ruolo di professore nelle scuole medie superiori nel periodo storico di riferimento, svolgendo attività di ricerca di valore e allo stesso tempo formando le giovani generazioni che avrebbero proseguito gli studi nelle discipline fisiche e matematiche.

Il terzo volume tratta il periodo storico che va dal Secondo Dopoguerra fino alla vigilia del Terzo Millennio, raccogliendo le informazioni sui fisici nati dal 1918 al 1948. Concepito come un database di scienziati per la maggior parte ancora viventi, in questo volume la prospettiva adottata per la sua compilazione è dunque diversa rispetto a quella dei precedenti due, non intendendo offrire un punto di vista storico sulla biografia dei singoli scienziati. Va infine specificato che da questo volume i curatori hanno voluto escludere coloro che a oggi siano ancora in attività, in particolare nel mondo accademico.

I tre volumi principali saranno infine completati con alcune appendici, la principale delle quali sarà dedicata alla sequenza cronologica relativa alle diverse cariche accademiche occupate nelle università attive nei periodi di riferimento trattati nei volumi stessi. Altre appendici riguarderanno i fisici che parteciparono ai Congressi degli Scienziati, l'elenco cronologico delle laureate in fisica fino alla Seconda Guerra Mondiale e l'elenco dei necrologi pubblicati su Il Nuovo Cimento.

Considerati l'elevato valore dell'opera e l'enorme impegno profuso nella ricerca e nella sua compilazione da parte dei due curatori, la SIF è orgogliosa di annoverare questi volumi fra le sue pubblicazioni. Proposti con una suddivisione in fascicoli grazie all'intuizione di Luisa Cifarelli, questi volumi hanno già raccolto un notevole successo sia fra gli addetti ai lavori sia fra gli appassionati di fisica che dopo la pubblicazione dei primi tre fascicoli dedicati al primo volume e a parte del secondo, attendono i successivi per poter scoprire altre interessanti informazioni su tutti i fisici italiani, donne e uomini, che nell'arco di cinquecento anni hanno contribuito alla storia della scienza, dell'Italia e del mondo intero.

B. Ancarani
Società Italiana di Fisica - Responsabile Editoriale

FACING THE ANTHROPOCENE

ESOF 2020: DISCUSSIONS ON OUR FUTURE

CLAUDIO TUNIZ

Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy

Centre for Archaeological Science, University of Wollongong, Australia

© Pop Nukoonrat | Dreamstime.com

1 Introduction

ESOF 2020 was held in the old port of Trieste. *Tergeste's* origins go back to the military fortifications built in the second century B.C. to secure the north-eastern borders of the Roman Republic [1]. About 1500 years later, Trieste was a multi-ethnic Italian-speaking city in the Habsburg monarchy, with a thriving shipping industry and the status of a free port. Its key role ceased with the collapse of the Austro-Hungarian empire after World War I and its incorporation into the Kingdom of Italy. After World War II, Trieste again became a border city, this time along the Iron Curtain. Its position encouraged the development of the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), with the support of the International Atomic Energy Agency. The mission of the ICTP is to foster advanced studies in physics and mathematics and to promote dialogue among nations on the common ground of scientific cooperation. According to the Nobel Prize speech of its first director, "scientific thought and its creation is the common and shared heritage of humankind" [2].

During the last 60 years, a number of international research institutions flourished in Trieste, such as the World Academy of Sciences, the International Centre for Genetic Engineering and Biotechnology and the International School for Advanced Studies. They were all integrated into the so-called Trieste Science System, which includes the University of Trieste, the Area Science Park, the National Institute of Oceanography and Applied Geophysics, and Sincrotrone Trieste.

Today, Trieste is a "port" where scientists from all over the world, particularly from developing countries, can safely dock to study basic science and its applications in many fields of research, from theoretical physics and mathematics to genetics, from wireless technologies to synchrotron radiation imaging. The Trieste Science System also promotes interdisciplinary studies on sustainable development, global climate change, predictability of extreme environmental events and pandemics. The lofty goal that motivated the creation of these institutions proposes that science represents both mainstream culture in our era and a tool for economic development and international peace. The choice of Trieste as the venue for ESOF 2020 thus evokes the spirit of the old imperial port and the international role of the city.

ESOF 2020 overcame the Covid-19 restrictions by integrating in-person and digital events. About 2400 people registered for the Forum: 1000 were present in Trieste and 1400 connected remotely every day. Its hybrid format was a metaphor for our way of life in a world where cyberspace pervades physical space, blurring boundaries between our material and virtual domains.

The main aim of the programme, organised into 18 themes (fig.1), was to foster a debate on how science and technology can help boost sustainable development. This review is mainly focused on topics from the following ESOF themes: Sustainable Future; Science and Society; I Compute Therefore I Am; and Breaking Frontiers in Science and Knowledge. Participants discussed how to further enhance human capabilities through artificial intelligence and high-performance computers. Intelligent technologies are crucial to face the challenges of the Anthropocene, but they can be disruptive. We need to be aware of their possible ethical, social, political and cognitive impacts.

To get ready for the future, we also need to understand how humans became the rulers of the Earth. The origins and evolution of *Homo sapiens'* mind can shed light on the drivers of our behaviour, both as individuals and societies. A uniquely human cognitive trait is symbolic thinking. It emerged between 100000 and 50000 years ago, promoting pro-social behaviour and energy consumption. Our impact on the biosphere increased dramatically during the last 10000 years. In the last few centuries, as industrialised societies flourished, they have had a major global impact on the atmosphere, the hydrosphere, the cryosphere, the lithosphere and the biosphere. To these we have added our own domain, the technosphere, which emerged in the "geological blink of an eye, and it is evolving at a furious pace" [3]. Human ecological disruptions are – among other things – implicated in the origin of pandemics and their rapid spread.

The EuroScience Open Forum (ESOF), the largest European forum on the connections between science, technology and society, was originally scheduled for July 2020, in the old port of Trieste, but Covid-19 delayed the event to early September 2020. The virus reminded us that we are not the masters of the planet and that science is not only about knowledge. It consists of a value system that helps society overcome its global challenges. Several of the ESOF 2020 sessions dealt with sustainability, pandemics, climate emergency and environmental disasters. The crucial role of "intelligent" technologies in science and society emerges, together with their potential ethical, social, political and cognitive risks. This a short review of these ESOF themes.

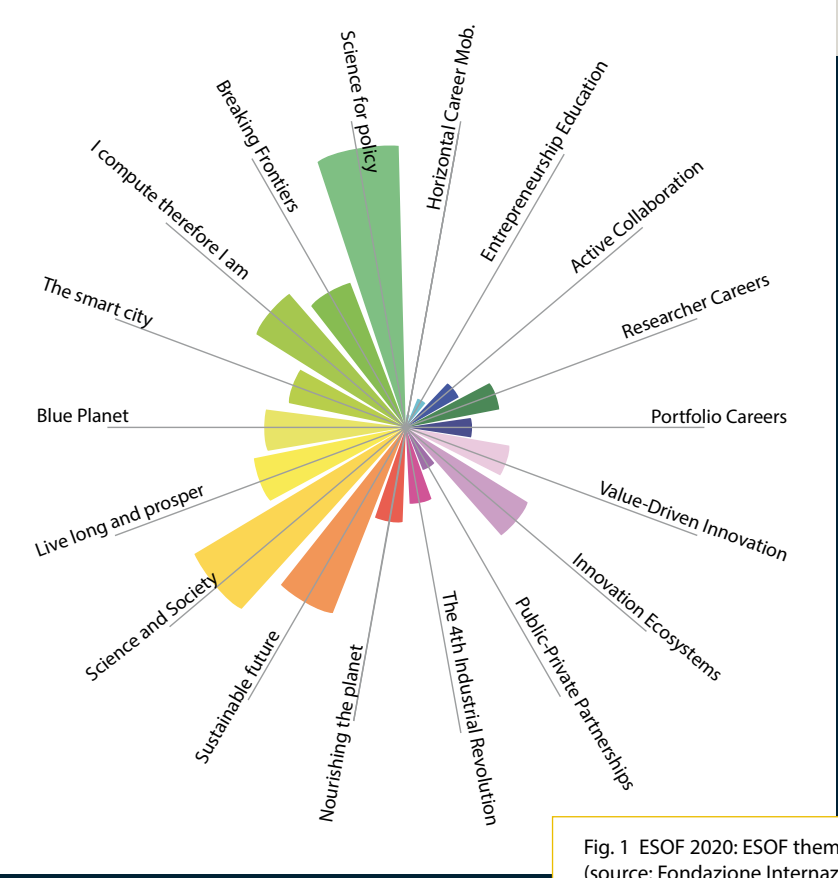


Fig. 1 ESOF 2020: ESOF themes (source: Fondazione Internazionale Trieste per il Progresso e la Libertà delle Scienze).

2 Of viruses and men

The impact of Covid-19 on humans has been largely discussed according to medical, epidemiological, psychological, political, economic and social viewpoints. A less visited topic is our relationship with the virus from the perspective of evolutionary biology [4]. Let's focus on this matter.

The origin of viruses is still debated. They probably evolved more than 3 billion years ago and thus had a long time to perfect their strategies to survive and reproduce. They are the most common and abundant biological entity on Earth [5]. Viruses can have diverse shapes and sizes, based on RNA and DNA genetic structures (single- or double-stranded) that are sealed in a protein capsule, but they all need a host cell to reproduce. They make copies of themselves using the cells of other organisms, which become the vehicles for their diffusion. The RNA genome of SARS-CoV-2, responsible for the Covid-19 pandemic, includes sequences that inhibit the immune system of host cells and the degradation processes that affect the virus, increasing its replication efficiency and virulence [6].

In the deep past, viruses first infected bacteria and other unicellular organisms, then multicellular organisms of increasing complexity, until they eventually reached our *Homo sapiens* species, which emerged in Africa between 300000 and 200000 years ago. This ancient biological history is recorded in our own DNA, which contains about 100000 pieces of viral DNA. They were included in the primordial genetic material of our ancient ancestors many millions of years ago, and then inherited by subsequent species, reaching modern humans [7]. Some of this viral genetic material helps improve our health, some raises our risk of developing cancer or other diseases. A fraction of the genetic material that we inherited from the Neanderthals (which stands between 1.5% and 4%) has also been associated to specific diseases [8]. It seems that we might have reciprocated by infecting the Neanderthals with our own African pathogens, perhaps contributing to their extinction [9]. Interestingly, a recent study shows that we inherited from Neandertals a genomic fragment that increases the risk of respiratory failure after infection with Covid-19 [10].

Since the dawn of our evolution, we had many chances of being infected by unfriendly viruses, but this risk greatly increased during the Late Pleistocene, when we became an intensive pro-social, self-domesticated species. It was at this time that we developed extraordinary capacities for imitation learning and cultural transmission of knowledge[1].

Our new behaviour was supported by rituals that feed our brain's reward mechanisms with dopamine, serotonin and other neuro-activators of pleasure. The remains of musical instruments, ornaments and rock paintings, found in the archaeological record of the Late Pleistocene, suggest that sociality was based on rituals and representations capable of creating emotions and feelings of belonging. Rich ritual burials, found among simple ones, are consistent with a pattern of emerging societies based on inequality and submission [12]. And the new habits were probably instrumental to the creation of a hierarchical society.

After moving out of Africa, *Homo sapiens* groups spread around the planet like pandemic waves, carrying their ideas, tools, weapons and pathogens. They were able to replace all other human species, wipe out many animal species and change entire ecosystems. If the Anthropocene is defined as the era in which humanity leaves major indelible marks in the geological register, it probably started back then.

The human impact on ecological systems intensified during the Holocene, thanks to agriculture and animal domestication. However, it is in the last few centuries that mankind's footprint has dramatically intensified. While Palaeolithic societies consumed 2000 kWh/year per capita, current industrialized countries reached 50000 kWh/year per capita. In addition, by dramatically increasing in number and number of contacts, we turned into a fantastic host for viruses. And by enthusiastically continuing our ancient practice of environment disruption, and biodiversity annihilation, we shrank the natural habitats and the number of species

[1] To develop these capacities our brains recruited the mirror neuron system, which was also crucial for the evolution of complex language [11].

Fig. 2 Delivering our planet to future generations: Present and future human generations have to adapt to environmental conditions that we and previous generations unintentionally generated (source: Shutterstock, Sunny studio).

that protect us, as a buffer, from the spread of viruses. Add illegal poaching, trade of exotic animals and Chinese wet markets and you will get a recipe for disaster.

In conclusion, pandemics are closely related to the construction of our own ecological niche. For tens of thousands of years we had adapted to the environment by augmenting our body with clothes, shoes, instruments and weapons. Then we created multifunctional shelters of increasing complexity to make the world more suitable for our survival and reproduction. Finally, we built complex infrastructures, road systems, bridges and skyscrapers that require an increasing amount of energy. In comparison with all other species, we are by far the most successful niche creators, thanks to our cognitive capacities and our extreme pro-social behaviour. By building our ecological niches, we pass down to future generations genes, cultural innovations and ecological changes (fig. 2). Unfortunately, human niche construction – with its disruptive impacts on environment and biodiversity – has recently turned into an increasingly dangerous game. What benefited previous generations can put future survival at risk.

3 The environmental pandemic

Global climate change could be viewed as a "global environmental pandemic" [13]. "Fever" is a key symptom of climate change. The average global surface temperature increased by 1 °C during the last 100 years – a very rapid effect in geologic terms. Temperatures are demonstrating a higher-than-linear increase, correlating with the behaviour of CO_2 concentrations in the atmosphere, which rose by 45% in the last 100 years.

Geographic maps with different shades of red represent the coronavirus pandemic dispersion around the planet. Similar maps describe the rapid spreading of climate-induced disasters, affecting wildlife, marine ecosystems, food production, human health, economics and social systems.

Scientists believe we have already passed the tipping point on global warming. Since 1980, extreme weather events – drought, floods, intense storms, heat waves and wild fires – doubled in number every 20 years. In the last 20 years there were 7348 major recorded disaster events, 6681 of which were related to climate change. They affected 4.2 billion people, causing 1.23 million deaths and economic losses of US$ 2.97 trillions [14].

A tipping point is when a small change can tip the balance of a system, generating a big change. Beyond this point, an epidemic that previously evolved at a slow and linear pace, starts spreading very rapidly, creating social unrest and havoc in the health system. Soon it becomes difficult to monitor the infection, manage the recovery and make people follow the rules. The Covid-19 pandemic shows that outbreaks can be managed only if measures are clear, rapid and strictly followed. Unfortunately, we do not know in advance when we are approaching a tipping point.

Some environmental phenomena induced by global climate change are also characterised by tipping points, with thresholds above which the processes cannot be stopped. Think of the melting of Antarctic ice sheets or the collapse of the oceans' thermohaline circulation. The 2015 Paris Agreement, the first legally binding global climate change deal, aims to limit global warming to 2 °C. It also promotes adaptation measures to counter the impacts of climate change. The "business as usual" scenario that would lead to a 5 °C temperature increase by the end of this century is probably overestimated. Recent assessments suggest that, without any intervention, the global

surface temperature would increase by 3 °C above pre-industrial levels by that time [15]. However, this is a significant rise, considering that during the Holocene the global temperature was within a variation of 1 ºC.

Humans have to adapt to environmental conditions they have caused (or co-generated). Evolution is a circular process: if we want to survive while changing the world, we need to adapt to its pace of change. If it changes faster, we have to adapt faster. As Lewis Carroll put it, in the words of the Red Queen: "Now, here, you see, it takes all the running you can do, to keep in the same place" [16].

Covid-19 is a wake-up call, urging us to find new ways to prevent and manage global disasters, pandemics and climate catastrophes.

4 The race in cyberspace

There are new forces emerging in the human technosphere that include deep learning machines, supercomputers and robots. They are having a huge impact on our society, government and business. The question is will they help us to achieve global sustainability (fig. 3), or will they foster deeper and wider conflict, further social inequality and environmental disruption? [17].

The Space Race of the 20th century meant technological competition between the United States and the Soviet Union to prevail in spaceflight capabilities. Today's competition in new technologies has enlarged the number of players and moved to "cyberspace", an environment where Big Data are feeding intelligent algorithms that are trained by high-performance computers (HPCs). To win this race, one needs the fastest HPCs, the most sophisticated artificial neural networks and comprehensive datasets. The 5th generation technology standard for broadband cellular network (5G) will connect humans and devices at a dramatically increasing speed. More futuristic technologies, like quantum computing, will come later, depending on major basic research. If going to the Moon served "to organise and measure the best of our energies and skill" [18], cyberspace is the new terrain for measuring one's scientific, technological and political power.

This race is having a revolutionary impact on a range of manufacturing sectors [19]. Until a few years ago, Information Technology (IT) developed new products every 1-2 years; for the automotive sector the product lifetime was 10 years, for aircraft 40 years. Intelligent technologies and digitalisation are now dramatically speeding up product development. IT delivers new products every 6 months, whereas the lifetime of automotive products is 3-4 years. Furthermore, the automotive sector is considering the future market of flying cars. New alliances like Aston Martin/Rolls Royce and Porsche/Boeing are exploring the 3D control of traffic through swarm motion.

A big revolution is occurring in the aircraft industry thanks to HPC simulations. Digital avatars of helicopters, airplanes and satellites can be efficiently designed and tested in cyberspace before their physical construction, skipping the slow process of working on physical prototypes. Digital design will be more effective and sustainable, avoiding the waste of energy, raw materials and other resources.

During flight, terabytes of data are collected through airplane sensors, and used only if there is a specific problem, typically an accident. Now these Big Data can be analysed with AI and HPCs, making maintenance a more predictive process.

Another important issue in the aircraft industry is certification, which presently requires complex procedures based on prototype testing. If this task is performed on digital twins, it will save time, costs and energy. Finally, pilots can be trained by applying Augmented Reality to precise digital descriptions of the flying system.

Fig. 3 Delivering our planet to AI: Will intelligent technologies help us to achieve global sustainability or will they increase conflict, social inequality and environmental disruption? (© ProductionPerig | Dreamstime.com).

The development of new materials is critical in the technological race. They powered human societies since the Pleistocene, when instruments made from stone, wood and bone extended our bodies, giving us new capacities. At some point we started using fire to heat up stones and improve their flaking properties. These pyrotechnologies required a sophisticated knowledge of the effect of fire on specific minerals. At the end of the Ice Ages, in the Holocene, humans started extending the use of high temperatures to treat minerals and produce new materials, like ceramics, glass and different metals. More recently, we became capable of producing synthetic products like plastics, by treating petroleum with very complex chemical and physical procedures. Today we are able to exploit a plethora of new materials, such as semiconductors, superconductors, metamaterials and nanomaterials, which have been designed over many years of extended scientific research. We are collecting the fruits of the quantum physics revolution, producing materials that are empowering us in a very pervasive way, from the chips of our cell phones and computers to systems for storing data and solar energy production.

New revolutions in materials science are now driven by both quantum mechanics models and computer simulations [20]. HPCs allow us to analyse complex atomic systems with electronic clouds that change and interact. Thanks to first-principle calculations, the properties of materials can be predicted without spending years in a laboratory.

Materials science is also relevant to the study of biomolecular systems of interest to life sciences and medicine [21]. HPCs are used to capture structural and dynamic information on the molecular machinery of organisms. Extending all-atom molecular dynamics simulations from single proteins to organelle and cell-scale simulations is challenging. The application of computational molecular microscopy to hundreds of millions of atoms requires a large computational power and efficient codes. Simulations are used to interpret data, suggest new experiments and give information on living systems at the atomic level. Computational molecular microscopy is being used to study SARS-CoV-2 (fig. 4) and HIV and provides high-resolution insights into plant processes like photosynthesis.

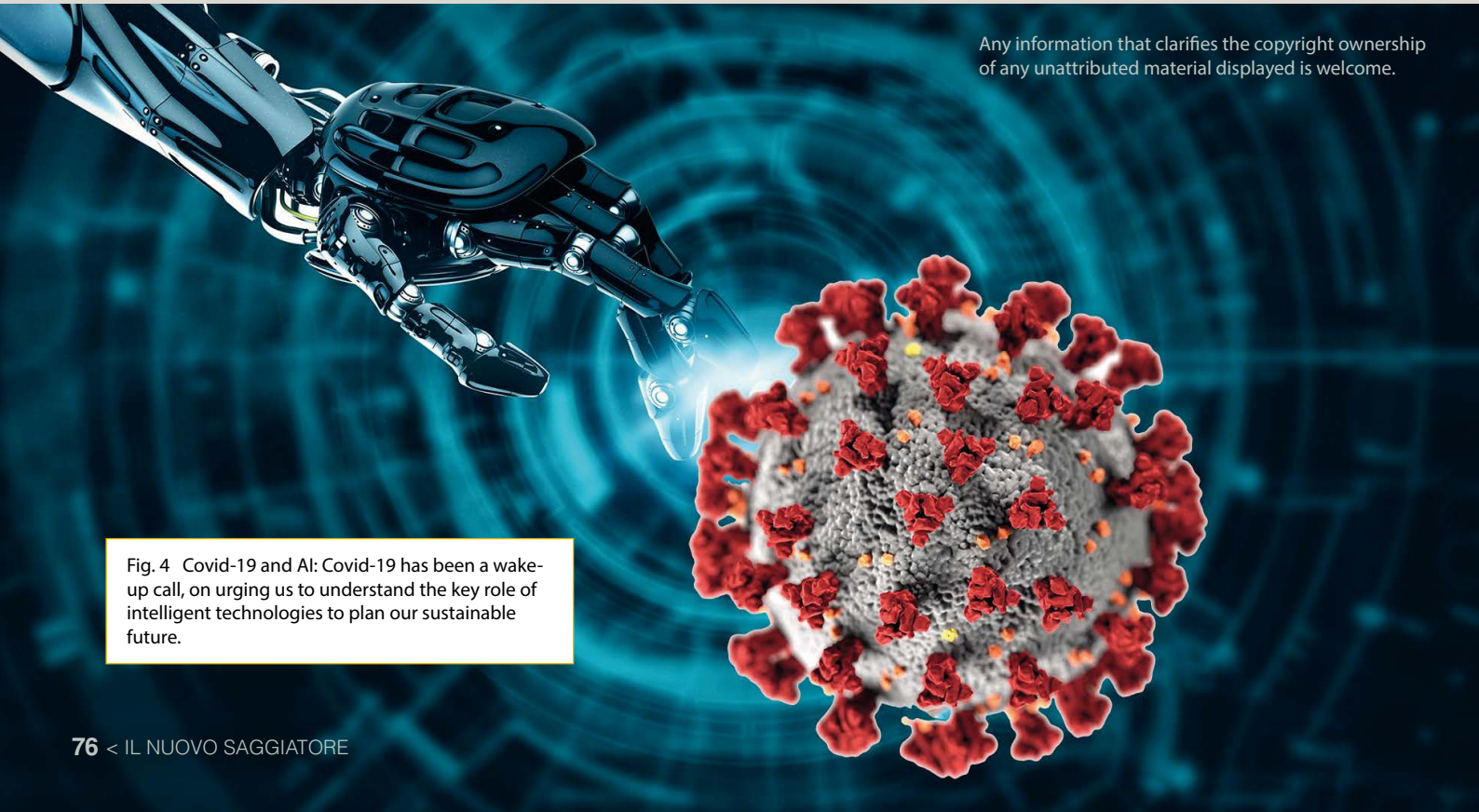
Somebody is wondering whether scientific research based on intelligent technologies might supersede the traditional scientific method [22]. This approach, pioneered by Galileo Galilei, is based on a self-reinforcing circular process between experimental data and theoretical models, born in the minds of scientists. Hypotheses are tested to confirm or falsify theories about how the "real" world functions.

In the Petabyte Age, supercomputers and AI analytics can extract information and knowledge from the Big Data emerging from a vast array of disciplines such as physics, biology, linguistics and sociology. It would seem that hypotheses and theories are now sometimes pleonastic: patterns describing the system could be extracted directly from Big Data, bypassing good old science methods. This is particularly appealing for the life sciences, where complexity hinders mathematical modelling. Think of the implication of Big Data generated by shotgun gene sequencing for generating new knowledge of biological species.

On the other hand, integrating the traditional scientific methods with Big Data analytics is even more promising and could provide a paradigm shift in the multi-scale modelling of complex systems characterised by nonlinearity, non-locality and hyper dimensions [23, 24]. In any case, supercomputers, Big Data and AI are set to play a crucial role in scientific research.

5 Artificial Intelligence: friend or foe?

There are two definitions of AI. The first definition (strong AI) considers it a discipline that aims to create a machine that is "like us" in every respect. Such a definition includes intelligent behaviour and the capacity of understanding to further extend towards "being creative", "having feelings", etc. The second definition (weak AI) considers AI "the discipline that aims to demonstrate the truth of the assumption that implemented Turing machines can be sufficiently powerful for exhibiting intelligent behaviour that is indistinguishable from human intelligent behaviour" [25]. This latter definition covers all current forms of AI (deep learning, reinforcement learning, Bayesian methods, robots, etc.).



Any information that clarifies the copyright ownership of any unattributed material displayed is welcome.

Fig. 4 Covid-19 and AI: Covid-19 has been a wake-up call, on urging us to understand the key role of intelligent technologies to plan our sustainable future.

AI is constantly improving its performance and is present in all aspects of our life: from industrial production to education and scientific research; from leisure and social life to health and environmental monitoring. AI can replace us in many boring and unpleasant tasks and in difficult places like space and the deep sea. It is superior to us when it comes to very fast decisions, accuracy, parallel processing and classification. AI can also compensate some perceived human limitations such as weakness of will, forgetfulness and incorrect reasoning.

In the following we will provide a brief summary of recent advances in AI methods and applications and mention some possible risks [26].

The most popular AI system is machine learning (ML), where the machine is "trained" with the input of a large number of "relevant" data (*i.e.* data representative of the conditions the machine will analyse in the applications) and can tune many ML parameters to give the required output. These machines are built with artificial neural networks, where signals propagate like in human brain's neurons, which are connected through axons and synapses. The ML parameters modulate the signals that come from a group of neurons and act as input for other neurons. This will combine the signals and if the sum of the weighted inputs is above some threshold, the signal is propagated further to other neurons. In deep neural networks, neurons are organised in layers, including input and output layers, plus other hidden layers. It is possible to build systems with hundreds of layers, each with 100000 neurons and millions of ML parameters to weigh the signals. The training of deep neural networks needs large data sets labelled with their content. One example is Imagenet, a database of more than 14 million images used for training algorithms in visual object recognition. In the last few years, the algorithms trained with Imagenet started outperforming the accuracy of humans. However, there are still problems in ML applications with other data sets, which are not benchmark data sets like Imagenet, as they are always characterised by bias and contextual effects.

AI has been around for over 70 years, but real practical progress started only in 2012, when AI based on deep neural networks showed its capacity in image and speech recognition. Today the progress in these areas has been enormous. There are also many new applications, from the analysis of data generated by particle accelerators to strategy board games. Image recognition and segmentation are crucial for developing algorithms for self-driving cars and trucks.

In medical applications, deep neural networks can distinguish between benign and malignant skin melanomas. The variability of the skin lesion images makes the automated classification a challenging task. In a recent application, the deep neural network required pretraining in general object recognition with 1.4 million images, then it had to be fine-tuned on a dataset of 130000 clinical images related to both benign and malignant skin lesions [27]. It seems that AI can classify skin cancer with a competence comparable to dermatologists. In the near future, the use of smartphones outfitted with deep neural networks will provide low-cost access to these important diagnoses.

AI can listen to our voice, understand the meaning of what we are saying and learn about our traits and our psychological or physical conditions [28]. The human voice is a biological mechanism that carries a lot of information about our personality, health, gender, age, emotions and also state (*e.g.*, sleepiness, tiredness, boredom, interest). AI can identify alcohol intoxication better than any human. Speech analysis can give information on facial movements, heart rate, cortisol levels and blood pressure. It is also useful for the early diagnostics of autism, security applications and counselling (*e.g.*, couple relationship).

Researchers have been recently exploring how to use AI-based voice analysis to diagnose coronavirus infections [29]. They collect the recorded voice of thousands of people who had been tested positive for Covid-19 and use them to train ML systems. The aim is to identify a voice fingerprint for the disease. Other groups are analysing audio recordings of coronavirus coughs and designing voice-analysis algorithms that can detect if somebody is wearing a mask. There is hope that in the future the Alexa or Siri of your smartphone will tell you whether you have caught Covid-19 or you just have a bad cold. During the last decade, scientists have been using deep neural networks to identify potential vocal biomarkers for other illnesses, including dementia, autism and depression.

AI will continue to advance with new applications in medical diagnostics, identification of pathogens, development of new drugs, environmental monitoring, pandemic tracing, optimisation of moving people and goods, robotics for elderly people, case-law research, etc.

There are different opinions on the future of our relationship with AI: optimists believe that it will transform us into superhumans, while pessimists are convinced that increasingly autonomous intelligence might pose an existential risk for the human species. Others believe that AI will be immoral or that it will suffer[2]. Which are the realistic and clear dangers that could derive from current forms of AI under development?

One possible risk is linked to the unpredictability and bias of AI. As we said, sub-symbolic algorithms, like deep learning, can only be as fair as the data upon which they have been trained. For example, biases in databases can produce racial discrimination in worker recruitment and in the judicial system. Other problems come from the "amorality" of (weak) AI, which does not have feelings or emotions, and can reason only in terms of goals. Even if algorithms do not have basic drives and pursue only the assigned objectives, these could be misaligned with our own goals.

Other disruptive dangers would affect the functioning of our societies. While the machines of the industrial revolution made their social impacts by replacing many types of physical labour, the intelligent machines of the 21st century will increasingly compete with labour based on reasoning and decisions. Given the fast timescales characterising the digitalisation process, our economic and social system will find it hard to adapt to these changes.

Immediate and real risks derive from the misuse of currently available AI systems by repressive and aggressive regimes and in the development of new autonomous weapons. Particular concerns regard the erosion of privacy linked to the application of intelligent technologies to trace individual actions and opinions for social control (*e.g.*, in the Chinese Social Credit System). People's personal data, collected through social networks, browsers and other digital applications, are increasingly used to influence not only our shopping trends, but also our political decisions, and thus interfere with democratic processes.

In the next section we will follow an evolutionary perspective to evaluate our relationship with all the instruments that extend the limited capabilities of our body and mind.

6 Extending body and mind into digital technologies

The extension of our body and mind does not necessarily imply implanting chips in our brain[3] and connecting intelligent prostheses that change our anatomy and our perceptions. We can augment our mental capacities by resorting to external tools such as smartphones and their apps, which increase our capacity to socialize, memorise, calculate, orientate and share images. Our individual cognitive capacity derives both from (more or less) intelligent tools and from the social networks we belong to and rely on as a source of information.

However, there are some possible risks.

[2] https://theconversation.com/careful-how-you-treat-todays-ai-it-might-take-revenge-in-the-future-112611

[3] https://www.zdnet.com/article/elon-musks-brain-computer-startup-is-getting-ready-to-blow-your-mind/

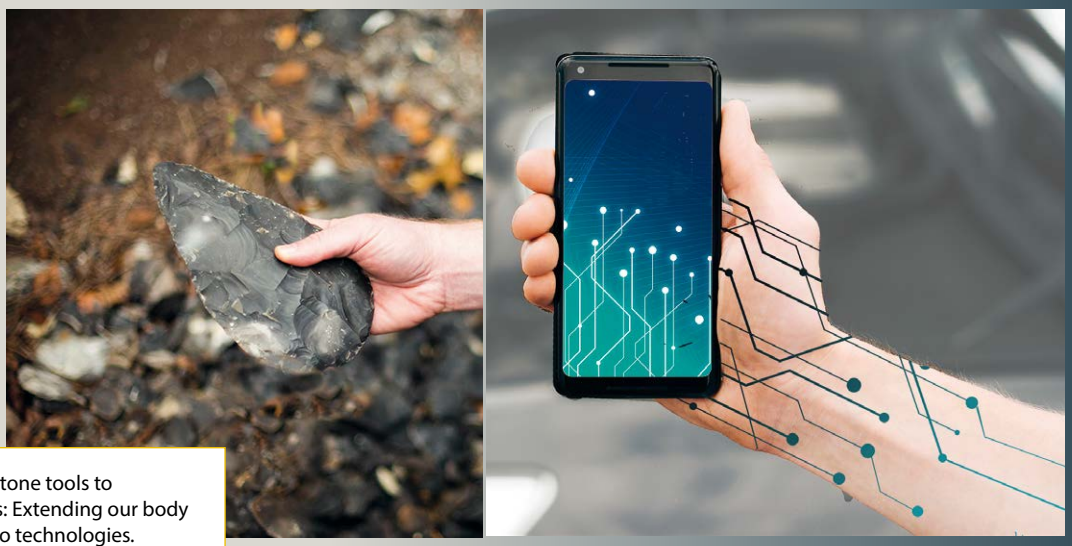


Fig. 5 From stone tools to smartphones: Extending our body and mind into technologies.

We mentioned the impact of intelligent technologies on social, political and ethical issues. Now we consider an evolutionary perspective to understand their impact on our cognitive traits [30]. The biological mechanisms behind our "prosthetic capacity" and pro-social behaviour show the constraints and potentialities of our relationships with digital technologies.

A few questions arise. Which are the specific regions of our brain that became crucial to supporting an enhanced prosthetic capacity? How do we use this capacity to expand our body and mind into the environment? How do we integrate tools into the brain's sensory machinery? And finally, which are the main issues related to the development of intelligent technologies to extend human capabilities?

Comparative neuroanatomy and paleoneurology show that modern humans have evolved large and complex parietal regions, when compared with other primates or extinct hominids [31]. This suggests a specialization of visuospatial cognition, projecting body and vision into a spatial and temporal frame. Hence, this is requisite to supporting an enhanced prosthetic capacity. Technologies are readily integrated into body schemes and incorporated into the cognitive process. Some of the components of the cognitive process are thus exported into out-of-the-body elements, offloading the information flow to devices entrusted with physical, sensorial, storage and computational functions.

In human evolution, natural selection has been integrated with an interactive expansion of ecological, neural and cognitive niches, extending the mind/body into the environment [32]. The neurobiological mechanisms that supported this extension developed with three phase transitions. The first transition occurs with the evolution of the primate brain, around 60 million years ago; the second with the first human use of instruments, around 3 million years ago; and the third with the evolution of symbolic thought and complex language in *H. sapiens*, about 100000 years ago. A fourth phase transition may now be induced by the current explosion of artificial intelligence, introducing a novel model of mind-body-environment interactions.

It is worth remembering that technology extends the boundary of the self [33]. Recent experimental evidence suggests that we integrate tools into the brain's extended sensory machinery. Such changes can be detected through quantitative signals, showing the influence of the tools into the brain-body cognitive system. The brain's strategy to sense with tools is to recruit primary somatosensory dynamics otherwise dedicated to the body.

In conclusion, the extension of our bodies and minds into digital technologies has very deep evolutionary roots (fig. 5). This process needs to be carefully monitored by relying on our "social intelligence".

7 Final remarks

The European Union Green Deal and the UN Agenda for Sustainable Development assign a crucial role to intelligent technologies. They are being proposed to monitor public health and the environment [34], to predict extreme weather events and pandemic peaks, to implement smart work, to manage transport, and to optimize energy efficiency and renewable energy management. The Internet of Things paradigm will have a crucial role in helping to address complex socio-environmental challenges and shape the future of our communities [35].

The intelligent power that increasingly permeates our society appears very friendly and does not make explicit its intention to rule our lives. Yet, some believe we have been infected by an invisible digital virus that might threaten our freedom. Not only our communications, but also our bodies and our health will be under digital surveillance [36].

Nevertheless, we should be optimistic and assume that we still have the capacity to limit and direct our new technologies. We could exploit them for another kind of progress, more respectful of human health, biodiversity and sustainability. We should consider the disruptive effects of artificial intelligence, *i.e.* in military technologies, such as lethal autonomous weapons systems, which "irreversibly alter the nature of warfare, detaching it further from human agency" [37].

It is difficult to forecast the combined impact of climatic, viral and digital pandemics on the future of humankind. But looking at the past, it all began when we started behaving like a virus.

Acknowledgements

Sincere thanks to Patrizia Tiberi Vipraio and Davide Fiocco for their critical review of the manuscript and to Michaela Jarvis for her careful editorial work.

References

[1] F. Bernardini *et al.*, "*Early Roman military fortifications and the origin of Trieste (Italy)*", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 112 (2015) 1520.

[2] A. Salam, "*Gauge unification of fundamental forces*", Nobel lecture (1979), https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1979/salam/lecture/

[3] J. Zalasiewicz, "*The unbearable burden of the technosphere*", *The UNESCO Courier*, 218-2 (2020), https://en.unesco.org/courier/2018-2/unbearable-burden-technosphere.

[4] T. Pievani, *The Darwinian lesson of Covid-19*, ESOF 2020.

[5] E. V. Koonin *et al.*, "*Origins and evolution of viruses of eukaryotes: the ultimate modularity*", *Virology*, 479 (2015) 2, https://doi.org/10.1016/j.virol.2015.02.039

[6] H. Wakida *et al.*, "*Stability of RNA sequences derived from the coronavirus genome in human cells*", *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 527 (2020) 993, DOI: 10.1016/j.bbrc.2020.05.008

[7] G. Magiorkinis *et al.*, "*Roles of endogenous retroviruses in early life events*", *Trends Microbiol.*, 25 (2017) 876.

[8] C. N. Simonti *et al.*, "*The phenotypic legacy of admixture between modern humans and Neanderthals*", *Science*, 351 (2016) 737.

[9] C. J. Houldcroft, S. J. Underdown, "*Neanderthal genomics suggests a Pleistocene time frame for the first epidemiological transition*", *Am. J. Phys. Anthropol.*, 160 (2016) 379, https://doi.org/10.1002/ajpa.22985

[10] H. Zeberg, S. Pääbo, "*The major genetic risk factor for severe COVID-19 is inherited from Neanderthals*", *Nature*, 587 (2020) 610, https://doi.org/10.1038/s41586-020-2818-3

[11] V. Ramachandran, "*Mirror neurons and imitation learning as the driving force behind 'the great leap forward' in human evolution*", *Edge*, 2000 https://www.edge.org/3rd_culture/ramachandran/ramachandran_index.html

[12] C. Tuniz, P. Tiberi Vipraio, "*From apes to cyborgs. New perspectives in human evolution*" (Springer/Nature) 2020.

[13] F. Giorgi, *Climate change: local to global risks and responses*, ESOF 2020.

[14] UNDRR/CRED, "*Human cost of disasters. An overview of the last 20 years*", United Nations Office for Risk Reduction, 2020, https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019

[15] Z. Hausfather, G. P. Peters, "*Emissions – the 'business as usual' story is misleading*", *Nature*, 577 (2020) 618.

[16] L. Carroll, "*Through the Looking Glass and what Alice Found There*" (MacMillan and co., London) 1871.

[17] M. A. Goralski, Tai Keong Tan, "*Artificial intelligence and sustainable development*", *Int. J. Manag. Educ.*, 18 (2020) 100330, https://doi.org/10.1016/j.ijme.2019.100330

[18] R. Kennedy, 1962, https://er.jsc.nasa.gov/seh/ricetalk.htm

[19] R. Cingolani, *Super-computing and the Science & Technology of the future*, ESOF 2020.

[20] E. Molinari, *Super-computing and the Science & Technology of the future*, ESOF 2020.

[21] E. Lindahl, *Super-computing and the Science & Technology of the future*, ESOF 2020.

[22] C. Anderson, "*The end of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete*", *Wired,* 2019.

[23] S. Succi, P. V. Coveney, "*Big Data: the end of the scientific method?*", *Philos. Trans. A*, 377 (2019) 20180145, http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0145

[24] S. Succi, *Big Data meets Big Theory: the dawn of the scientific method*, ESOF 2020.

[25] J. Broersen, *Artificial Intelligence: a blessing or a threat for society?*, ESOF 2020.

[26] M. Mézard, *Recent progress in artificial intelligence: what impact on science and on society*, ESOF 2020.

[27] A. Esteva *et al.*, "*Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks*", *Nature*, 542 (2017) 115.

[28] B. W. Schuller, *Artificial Intelligence: a blessing or a threat for society*, ESOF 2020.

[29] E. Anthes, "*Alexa, do I have Covid-19*", *Nature*, 586 (2020) 23.

[30] C. Tuniz, *Extending the body into digital technology: an evolutionary perspective*, ESOF 2020.

[31] E. Bruner, *Extending the body into digital technology: an evolutionary perspective*, ESOF 2020.

[32] A. Iriki, *Extending the body into digital technology: an evolutionary perspective*, ESOF 2020.

[33] L. E. Miller, *Extending the body into digital technology: an evolutionary perspective*, ESOF 2020.

[34] B. Pernici, *Extending the body into digital technology: an evolutionary perspective*, ESOF 2020.

[35] A. Salam, "*Internet of Things for Sustainable Community Development*" (Springer) 2020.

[36] Han Byung-Chul, "*Pandemic Times: Will the technological revolution change the world as we know it?*", *Advocate*, 2 November, 2020. https://gcadvocate.com/2020/09/27/pandemic-times-will-the-technological-revolution-change-the-world-as-we-know-it/

[37] F. Bergoglio, *Address of His Holiness Pope Francis to the Seventy-fifth Meeting of the General Assembly of the United Nations, 25 September, 2020.*

Claudio Tuniz

Claudio Tuniz is a scientist at the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics in Trieste, Visiting Professor at the Centre for Archaeological Science of the University of Wollongong in Australia, and Editor-in-chief, *Archaeological and Anthropological Sciences*, Springer Nature. He has published more than a hundred papers in international journals, including *Nature*, *Science*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* and *PlosOne*. He has also published the following books: "*Radioactivity, a very short introduction*" (Oxford University Press, UK, 2013), "*The Science of Our Origins*" (with G. Manzi and D. Caramelli; Routledge, USA, 2014), "*The Bone Readers*" (with R. Gillespie and C. Jones; Routledge, USA, 2016), "*Humans, an unauthorized biography*", Nature/Springer, 2016, "*From apes to cyborgs*" (with P. Tiberi Vipraio; Nature/Springer, 2020).

CALENDARIO EVENTI

INTERNATIONAL SCHOOL OF PHYSICS "ENRICO FERMI"

208th Course ⊰ 3 - 8 July 2021
"Quantum Fluids of Light and Matter - QFLM2021"
Directors:
A. BRAMATI (Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, Paris),
I. CARUSOTTO (INO-CNR BEC Center, Povo, TN),
C. CIUTI (Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques,
Université de Paris)

209th Course ⊰ 11 - 16 July 2021
"Multimodal and Nanoscale Optical Microscopy"
Directors:
P. BIANCHINI (Nanoscopy IIT, Erzelli Labs, Genova),
A. DIASPRO (Università di Genova and Nanoscopy IIT,
Erzelli Labs, Genova),
C. J. R. SHEPPARD (Wollongong University and Nanoscopy IIT,
Erzelli Labs, Genova)

210th Course ⊰ 27 July - 1 August 2021
"Quantum Mixtures with Ultra-cold Atoms"
Directors:
S. STRINGARI (Università di Trento),
M. INGUSCIO (LENS, Sesto Fiorentino, FI and CNR, Roma),
R. GRINN (Innsbruck University)

6th Course ⊰ 19 - 24 July 2021
Joint EPS-SIF International School on Energy
"Energy Innovation and Integration for a Clean Environment"
Directors:
L. CIFARELLI (Università di Bologna),
F. ROMANELLI (Università di Roma Tor Vergata)

107° CONGRESSO NAZIONALE DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Milano, 13-17 settembre 2021

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

Enrico Bernardi fu professore di fisica e meccanica nel Regio Istituto Industriale e Professionale di Vicenza. Questo articolo è riprodotto dagli Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti.

Da "Modo di mantenere e regolare le oscillazioni di un pendolo destinato a palesare il movimento della terra intorno al proprio asse" di E. Bernardi, Il Nuovo Cimento, Serie II, Vol. III (1870) 98.

Se vi ha un'esperienza che richiami una seria attenzione nei giovani alunni di una scuola di fisica, credo sia certamente quella che ha per iscopo di mostrare la rotazione della terra a mezzo del pendolo.

L'abbiamo visto facendo l'esperimento a lezione. Ma, se non si prendono adeguate misure, alla fine dell'ora l'angolo di cui il piano è ruotato può essere molto diverso da quello aspettato, a volte anche in verso contrario. Questo perché l'oscillazione inizialmente piana gradualmente diviene conica, a causa dell'asimmetria degli sforzi elastici presenti nel filo di sospensione. Il pendolo allora descrive un'ellisse, il cui asse minore cresce nel tempo, in un verso che sceglie il sistema. L'ellisse precede nello stesso verso della rivoluzione ad una velocità proporzionale alla sua area, e inversamente al quadrato della lunghezza del pendolo. Questa è la ragione di farlo lungo. La causa della precessione è che la forza di richiamo è proporzionale non all'angolo di oscillazione θ ma al suo seno e la si vede includendo il termine cubico nello sviluppo in serie delle equazioni del pendolo sferico [cfr. M. G. Olsson., Am. J. Phys., 49 (1981) 531]. Bernardi non discute questo, anzi usa un pendolo corto (3 m), ma descrive come sia riuscito a costruirlo con prestazioni adeguate. Per avere l'oscillazione piana

tesi un filo di seta in direzione orizzontale, ad una distanza di circa $0^m,15$ dal filo di sospensione del pendolo in quiete. Spostai il pendolo in un piano perpendicolare al detto filo di seta, e nell'abbandonarlo v'impressi una leggera velocità laterale per rendere conica l'oscillazione. Regolata l'ampiezza di questa in modo che il filo del pendolo andasse a toccare appena quello di seta, dopo pochi minuti l'oscillazione era piana.

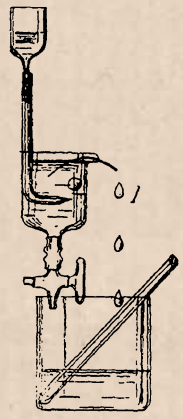
Poi toglie il filo di seta e spiega come evita che l'oscillazione diventi conica, mediante un anello toccato dal sistema ad ogni oscillazione. Il trucco è analogo ma non identico all'anello di Charron, che è un anello metallico posto poco sotto al punto di sospensione che viene toccato dal filo quando al massimo dell'oscillazione.

100 ANNI FA

Un ingegnoso elettrometro ed alcune esperienze.

Da "Teoria di un elettrometro capillare. Con provvedimenti per le corrispondenti esperienze" di P. Barreca, Il Nuovo Cimento, 19 (1920) 35.

Con due liquidi equidistanti, uno coibente e l'altro conducente ed elettrodi metallici, si può ideare di costruire un nuovo elettrometro capillare […]. Esso consiste, in sostanza, nel sospendere una massa liquida dentro un'altra, come nella nota esperienza di Plateau [*Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires (Gauthirers-Villars. Paris-Londres) 1873*], e nel deformarla poi con forze elettrostatiche.
Si disponga di un non lungo tubo di vetro con 3 o 4 mm. di diametro interno piegato ad angolo retto e terminante nel braccio orizzontale, più corto, con la punta collegata con pezzetto di tubo di gomma ad un piccolo rubinetto; un bicchiere sottostante raccolga ciò che da questo si fa effluire oppure ciò che tracima decantando dal becco superiore.



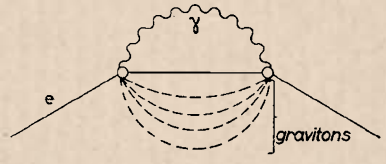
50 ANNI FA

Abdus Salam (1926-1996), fisico teorico pachistano, fu insignito del Premio Nobel nel 1979 per la teoria elettrodebole. L'istituzione a cui dedicò la gran parte della sua vita scientifica oggi si chiama Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics.

Da "Quantum gravity and infinities in quantum electrodynamics" di A. Salam and J. Strathdee, Lettere al Nuovo Cimento, vol. IV (1970) 101.

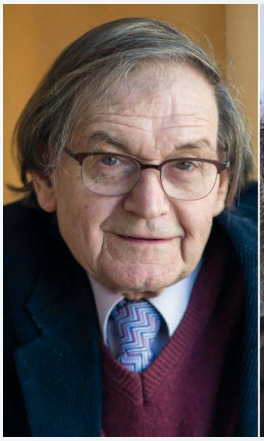
Questa breve lettera inizia riassumendo piacevolmente la storia delle divergenze in elettrodinamica, per poi passare a considerare la possibilità di curarle con l'interazione gravitazionale.

Ultraviolet infinities made their appearance in particle physics some seventy years ago, more or less about the same time that particle theory itself began.
The first infinity arose in Lorentz's calculation of electron self-mass (δm) in classical electrodynamics. His expression for this quantity was $\delta m = e^2/R$; this is linearly infinite for a point electron (lim $R \to 0$). The infinity difficulty persisted even when quantum electrodynamics was used […].
Now among the realistic modifications to (2) [*la Lagrangiana di Dirac*], there is the appealing universal modification where one considers not just electrons and photons interacting with each other, but the full complex of electrons, photons and gravitons.



a cura di Alessandro Bettini

IL PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2020


Roger Penrose

Andrea Ghez

Reinhard Genzel

Roger Penrose

Metà del Premio Nobel per la Fisica del 2020 è stato attribuito al fisico, matematico e cosmologo Roger Penrose, professore emerito dell'Università di Oxford. Penrose è uno scienziato a tutto tondo, che ha ottenuto risultati importanti in vari campi della matematica e della geometria, oltre che della fisica. È noto anche per essere tra i primi ad aver studiato da un punto di vista fisico la coscienza.

La motivazione ufficiale del premio è "di avere scoperto che la formazione dei buchi neri è una previsione robusta della teoria della relatività generale" [1]. In questa frase sta tutta la peculiarità di questa parte di Premio Nobel del 2020. Tipicamente, infatti, il Nobel viene attribuito a una scoperta di tipo teorico solo dopo che questa viene confermata sperimentalmente. Ad esempio, il premio per la fisica del 2013 a Englert e Higgs per la formulazione matematica del meccanismo della rottura spontanea di simmetria da parte di bosoni massivi è stato attribuito solamente dopo che, nel 2012, il bosone di Higgs fu scoperto al CERN.

Nel caso di Penrose, nella motivazione ufficiale la parola "scoperta" viene associata a una previsione robusta della relatività generale, ovvero che il collasso gravitazionale di un corpo sufficientemente massiccio porta alla formazione di un buco nero. È evidente che una prova sperimentale diretta non è possibile averla. Tuttavia la recente misurazione delle onde gravitazionali emesse dalla fusione di buchi neri è considerata una dimostrazione più che convincente che essi esistono e sono, almeno nella parte esterna, descritti in maniera molto accurata dalla relatività generale.

La teoria matematica dei buchi neri ha una storia lunga ed affascinante, che inizia ben prima della pubblicazione della relatività generale di Einstein nel 1915. Già alla fine del '700 l'astronomo inglese John Michell e il matematico francese Pierre-Simon Laplace ipotizzarono che un oggetto della stessa densità del nostro Sole ma 500 volte più grande non sarebbe stato visibile, in quanto la gravità superficiale sarebbe stata talmente elevata da fermare la luce stessa, che già si sapeva avere una velocità finita [2]. Utilizzando semplici equazioni nell'ambito della gravità newtoniana, dimostrarono che dalla superficie di un corpo sferico di massa M e raggio pari a $R=2MG/c^2$ (dove G è la costante di gravitazione universale e c la velocità della luce) la luce non può sfuggire in quanto la velocità di fuga supera il valore c. Utilizzando valori noti si ricava che un corpo della massa della Terra dovrebbe avere un raggio di pochi millimetri mentre quella del Sole di circa 3 chilometri a discapito di densità elevatissime, di parecchi ordini di grandezza superiori a quelle più alte conosciute in natura.

Curiosamente, Michell ipotizzò anche un modo per osservare tali oggetti nel caso fossero legati gravitazionalmente a un'altra stella, anticipando di fatto la tecnica poi utilizzata da Genzel e Ghez per scoprire il buco nero supermassiccio al centro della nostra galassia e che è valso loro la seconda parte del premio di quest'anno.

L'esistenza di oggetti oscuri così densi rimase nella categoria delle ipotesi matematiche per più di un secolo, fino a quando, nel 1916, K. Schwarzschild trovò una soluzione statica alle equazioni di campo di Einstein nel vuoto a simmetria sferica [3]. Il campo gravitazionale corrispondente a questa soluzione, detta metrica di Schwarzschild, combacia con quello newtoniano a grandi distanze dal centro mentre devia significativamente nelle regioni più interne. Grazie a questa soluzione Schwarzschild calcolò la precessione anomala del pianeta Mercurio trovando un risultato identico a quello fornito da Einstein qualche mese prima. La metrica di Schwarzschild è caratterizzata da due singolarità matematiche, una al centro del sistema di coordinate e una posta sulla superficie di una sfera di raggio $R=2MG/c^2$ che è esattamente uguale a quello calcolato da Michell e Laplace, di seguito rinominato raggio di Schwarzschild. L'interpretazione di queste singolarità matematiche è stata fin da subito molto discussa. Il lavoro di Finkelstein del 1958 chiarì definitivamente il ruolo dei sistemi di coordinate nella descrizione delle soluzioni statiche e a simmetria sferica delle equazioni di Einstein [4]. In particolare, divenne evidente che, mentre la singolarità sul raggio di Schwarzschild corrisponde ad una semplice singolarità di coordinata, rimovibile scegliendo un diverso sistema di riferimento, quella al centro non è eliminabile, ovvero si tratta di una singolarità essenziale. In tale punto, la curvatura geometrica dello spazio-tempo in 4 dimensioni diverge come una potenza negativa del raggio. Inoltre, si può dimostrare che una qualsiasi particella che cade all'interno del raggio di Schwarzschild ha una traiettoria che termina necessariamente nella singolarità centrale. In termini tecnici si

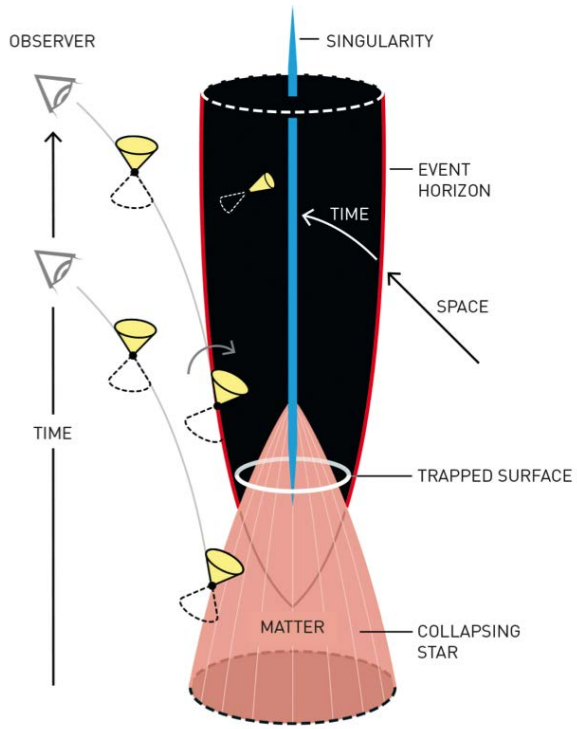


Fig. 1 Rappresentazione schematica del collasso gravitazionale (figura tratta da: `https://www.nobelprize.org/uploads/2020/10/advanced-physicsprize2020.pdf`). In questo diagramma, il tempo misurato da un osservatore distante scorre verso l'alto. I doppi coni di luce locali indicano il passato (in bianco) e il futuro (in giallo) di ogni evento. Si osserva che quando il vertice del doppio cono si trova sull'orizzonte degli eventi, tutte le geodetiche che si propagano dal passato al futuro sono costrette a entrare nella zona interna al buco nero. La materia che collassa all'interno dell'orizzonte forma una superficie intrappolata ed è inevitabilmente veicolata verso il centro del buco nero, dove si trova la singolarità.

dice che la geodetica della particella non è estendibile oltre la singolarità, che è un modo alternativo di caratterizzare matematicamente questi punti estremi. Il raggio di Schwarzschild ha molteplici ruoli. Da un lato rappresenta la superficie sulla quale la velocità di fuga è pari a quella della luce, esattamente come previsto da Michell e Laplace più di un secolo prima. Ai tempi però non era ancora noto che nessun segnale potesse viaggiare più veloce della luce, che invece è uno dei postulati della relatività e che implica profonde conseguenze sulla fisica nelle vicinanze di questa superficie critica. Infatti, l'impossibilità di superare la velocità della luce trasforma il raggio di Schwarzschild in un punto di non ritorno per qualsiasi particella che cada al suo interno. Una volta entrata nella regione interna la particella non può più né uscire né comunicare con l'esterno: la parte interna al raggio di Schwarzschild è quindi causalmente disconnessa dal resto dell'universo e la superficie che ne delimita il confine venne chiamata in maniera molto suggestiva "orizzonte degli eventi". Nei primi anni '60 venne anche coniato (presumibilmente dal fisico J. Dicke) il termine "buco nero" per descrivere una soluzione statica o stazionaria e a simmetria sferica delle equazioni di campo di Einstein con un orizzonte degli eventi.

Molto prima, alla fine degli anni '30, la comunità scientifica iniziò ad interrogarsi sui possibili meccanismi di formazione dinamica della singolarità centrale al buco nero. Molti (tra cui Einstein stesso) erano inizialmente scettici sull'esistenza della singolarità e sulla possibilità che si potessero realisticamente formare in seguito al collasso gravitazionale di un corpo massiccio. In un fondamentale lavoro del 1939, Oppenheimer e Snyder dimostrarono come il collasso gravitazionale di un guscio perfettamente sferico di materia formi una singolarità a curvatura e densità infinita [5]. Questo lavoro presentò il primo esempio di formazione dinamica di un buco nero e diede corpo all'idea che a formare buchi neri potessero essere stelle alla fine della loro vita, quando tutti i cicli di reazioni nucleari terminano per esaurimento del combustibile. Questo lavoro fu attaccato, in particolare dalla scuola russa, in quanto l'assunzione di simmetria sferica perfetta del guscio collassante non era realistica per via di inevitabili perturbazioni [6].

La scoperta dei Quasars nei primi anni '60, e della loro interpretazione come giganteschi buchi neri al centro delle galassie attive, rivitalizzò l'interesse dei fisici teorici nei problemi di collasso gravitazionale e dell'eventuale formazione della singolarità. Fu in questi anni che Penrose iniziò ad interessarsi al problema da un punto di vista anche matematico. La questione della formazione della singolarità era ancora aperta e la disputa tra scuola russa e americana irrisolta. Dopo una serie di lavori preparatori, nel 1965 Penrose pubblicò l'articolo che rappresentò il punto di svolta in questa complessa questione [7]. In questo lavoro riuscì a dimostrare come il collasso gravitazionale porti ad una singolarità indipendentemente dalle simmetrie iniziali del problema. Le uniche condizioni necessarie sono la positività locale dell'energia della materia collassante e la completezza iniziale della varietà differenziale che rappresenta lo spazio-tempo. Grazie ad una solida formazione matematica, Penrose introduce nella risoluzione del problema concetti di geometria differenziale innovativi, quali, ad esempio, la definizione di superficie intrappolata (*trapped surface*). Essa è una varietà bidimensionale caratterizzata dal fatto che tutte le geodetiche nulle ortogonali alla sua superficie convergono in un punto nel futuro. Il punto cruciale della dimostrazione di Penrose è che superfici intrappolate si formano ovunque, localmente, non appena la materia collassante attraversa il raggio di Schwarzschild, indipendentemente dalle simmetrie iniziali della sua distribuzione spaziale. L'unione di tutte le superfici intrappolate forma il cosiddetto orizzonte apparente. Nel caso di simmetria sferica esatta l'orizzonte apparente coincide con quello degli eventi, mentre, in generale, esso è una superficie interna all'orizzonte. La formazione di un orizzonte apparente avviene quindi in maniera generica durante il collasso gravitazionale di materia purché questa abbia densità locale di energia non negativa. Una volta che questo si forma, non è possibile invertire il processo: all'interno del raggio di Schwarzschild spazio e tempo cambiano di ruolo, nel senso che così come all'esterno il tempo scorre ineluttabilmente verso il futuro, all'interno è lo spazio a "scorrere" ineluttabilmente verso la singolarità centrale, la cui formazione diventa a questo punto inevitabile.

Uno schema del collasso gravitazionale è rappresentato in fig. 1.

Il lavoro di Penrose non si arrestò però qui. Assieme al compianto Stephen Hawking, riuscì a estendere il teorema del 1964 a casi molto più generali e, in particolare, all'evoluzione

dell'universo [8]. I due dimostrarono che la presenza di una singolarità nel passato dell'evoluzione cosmica è inevitabile tanto quanto quella al centro del collasso gravitazionale, fornendo un ulteriore supporto teorico alla teoria del Big Bang cosmologico. Per questi risultati, Penrose e Hawking hanno ricevuto il premio Wolf nel 1988.

Inoltre, Penrose discusse un metodo con il quale è possibile in linea di principio estrarre energia da un buco nero rotante tramite un processo chiamato super-radianza [9], una scoperta che contribuì a comprendere la termodinamica dei buchi neri, fondata sul meccanismo di evaporazione proposto da Hawking [10].

Sempre in relazione ai teoremi sulle singolarità, Penrose formulò la congettura del "censore cosmico", secondo la quale non possono esistere singolarità nude, ovvero singolarità non circondate da un orizzonte degli eventi. Questa congettura non è ancora stata dimostrata rigorosamente ma si ritiene che sia vera in quanto una sua violazione porterebbe a svariati paradossi fisici [11].

I teoremi di Penrose (e Hawking) sulle singolarità in relatività generale rappresentano una pietra miliare nello sviluppo della teoria e, come accennato sopra, hanno acquistato una consistenza che va ben oltre la trattazione puramente matematica dopo che l'esistenza stessa dei buchi neri è stata confermata sia dalle onde gravitazionali che dalle osservazioni astronomiche nei nuclei di galassie, incluse la nostra. I dati acquisiti dimostrano che la geometria dello spazio-tempo all'esterno dell'orizzonte degli eventi è ben descritta, nei limiti sperimentali, dalla soluzione di Kerr, che è la generalizzazione al caso rotante di quella di Schwarzschild e presenta a sua volta una singolarità interna [12].

La ricerca contemporanea è orientata a scoprire la natura fisica della singolarità in quanto non è plausibile che esistano punti con densità e curvatura infinita nel nostro universo. Come lo stesso Penrose scrive nel suo articolo del '65, le singolarità possono essere evitate se, all'interno del buco nero, le equazioni di Einstein non valgono più, ad esempio perché intervengono fenomeni quantistici, oppure le condizioni di positività della densità di energia vengono violate. In un'ottica più moderna, il primo caso rientra nelle linee di ricerca che cercano di coniugare meccanica quantistica e relatività generale in una formulazione generale di gravità quantistica. Nel secondo caso, violazioni delle condizioni di positività possono permettere la costruzione matematica di oggetti molto affascinanti detti *wormholes*, in grado di connettere regioni lontane dell'universo attraverso una gola che sostituisce la singolarità centrale [13].

L'attribuzione di una parte del Premio Nobel per la Fisica 2020 a Roger Penrose sembra rappresentare un cambio di paradigma nei criteri di scelta da parte del comitato. Sicuramente fornisce un impulso formidabile alla ricerca teorica nel campo della fisica gravitazionale del futuro.

Massimiliano Rinaldi
Dipartimento di Fisica, Università di Trento
Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (TIFPA)

Bibliografia

[1] www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/penrose/facts/
[2] C. Montgomery, W. Orchiston, I. Whittingham, *J. Astron. Hist. Herit.*, 12 (2009) 90.
[3] K. Schwarzschild, *Sitz. Preuss. Akad. Wiss. Berlin*, (1916) 189.
[4] D. Finkelstein, *Phys. Rev.*, 110 (1958) 965.
[5] J. R. Oppenheimer, H. Snyder, *Phys. Rev.*, 56 (1939) 455.
[6] E. M. Lifshitz, I. M. Khalatnikov, *Adv. Phys.*, 12 (1963) 185.
[7] R. Penrose, *Phys. Rev. Lett.,* 14 (1965) 57.
[8] S. W. Hawking, R. Penrose, *Proc. Roy. Soc. London Ser. A,* 314 (1970) 529.
[9] R. Penrose, R. M. Floyd, *Nat. Phys. Sci.*, 229 (1971) 177.
[10] S. W. Hawking, *Nature*, 248 (1974) 3031.
[11] R. Penrose, in "*General Relativity: An Einstein Centenary Survey*", edited by S. Hawking, W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge) 1979.
[12] R. P. Kerr, *Phys. Rev. Lett.,* 11 (1963) 237.
[13] M. S. Morris, Kip S. Thorne, *Am. J. Phys.*, 56 (1988) 395.

Reinhard Genzel e Andrea Ghez

Reinhard Genzel e Andrea Ghez hanno diviso metà del premio Nobel per la Fisica del 2020 "per la scoperta di un oggetto compatto supermassiccio al centro della nostra galassia". Il termine supermassiccio si riferisce ai buchi neri di masse comprese tra 10^6 e 10^{10} masse solari ($M_\odot$) presenti al centro dei *quasar* e delle galassie e distinti dai buchi neri stellari, che rappresentano lo stadio finale delle stelle più massicce.

Mentre questi ultimi erano stati contemplati dalla teoria dell'evoluzione stellare, le prime osservazioni astronomiche dell'inizio degli anni '60 del secolo scorso che portarono all'ipotesi dell'esistenza dei buchi neri supermassicci (o SBH, dall'inglese *Supermassive Black Holes*) furono totalmente inaspettate. Oltretutto, la comunità scientifica cominciò ad accettare una tale ipotesi solo dopo una ventina d'anni di controversie. Il lavoro dei due gruppi competitori guidati da Genzel e Ghez ha portato all'evidenza osservativa più convincente dell'esistenza di un SBH.

I buchi neri supermassicci

L'astronomo statunitense Maarten Schmidt fu il primo a osservare, nel 1963, un oggetto straordinariamente luminoso nella costellazione della Vergine a un *redshift* $z = 0.158$, corrispondente a una distanza di 2.5 miliardi di anni luce, pressoché ai confini dell'universo allora conosciuto [1]. La sua luminosità supera di centinaia di volte la luminosità di galassie giganti come la nostra o come la vicina galassia di Andromeda (M 31). Altre osservazioni di oggetti di questo tipo, denominati *quasar* (forma abbreviata di *quasistellar radio sources* – radio sorgenti quasi-stellari) presto seguirono e si pensò che essi derivassero la loro straordinaria luminosità dall'accrescimento di materia attorno a un oggetto estremamente massiccio, con più probabilità un SBH [2]. Da allora questo modello fu adottato per lo studio non solo dei *quasar* ma più in generale di tutti i nuclei galattici attivi (o AGN, *Active Galactic Nuclei*). Dal conteggio dei *quasar* nelle varie epoche cosmiche si scoprì che erano più comuni quando l'universo era ancora giovane e aveva un'età di tre miliardi di anni; oggi sono più rari e prevalgono gli AGN che sono meno brillanti. Modelli di evoluzione delle galassie portarono a ipotizzare che i *quasar* "spenti" potessero nascondersi al centro di tutte le galassie massicce vicine. Il passaggio successivo fu quello di dare inizio alla caccia degli SBH. Ad ogni massa si può associare un raggio critico, detto raggio di Schwarzschild, r_s, tale per cui se essa viene sufficientemente compressa da essere contenuta all'interno di r_s, nessun segnale potrà mai uscire da esso, compresa la luce. Il raggio di Schwarzschild si deriva imponendo che la velocità di fuga sia uguale alla velocità della luce ed è definito dall'espressione $r_s=2GM/c^2$ (dove G è la costante di gravitazione universale, M la massa del corpo, c la velocità della luce; questa espressione è valida per un buco nero non rotante e privo di carica elettrica e ne definisce il suo orizzonte degli eventi). Per un buco nero di 1 $M_\odot$ il raggio di Schwarzschild è di 3 km, tale quindi dovrebbe essere il raggio del Sole per divenire un buco nero. Per dare un altro esempio, il raggio di Schwarzschild associato alla massa della Terra è $r_s = 9$ mm. I buchi neri sono per definizione invisibili e un modo per

studiarne le proprietà e determinarne la massa è osservare e analizzare il moto di insieme del gas o delle stelle circostanti entro una regione di spazio sufficientemente vicina in modo da poter risolvere la sfera di influenza dell'SBH. Questa è definita come la regione di spazio in cui il potenziale gravitazionale del buco nero è dominante rispetto al potenziale gravitazionale generato dalle stelle circostanti. Il raggio che delimita la sfera di influenza cresce con il crescere della massa dell'SBH ma la sua dimensione apparente in cielo (ossia in unità angolari) diminuisce con la distanza. Entro la sfera di influenza il moto del gas e delle stelle è prevalentemente kepleriano, ossia la velocità è inversamente proporzionale alla radice quadrata della distanza. Il raggio della sfera di influenza degli SBH di galassie vicine (per distanze da 3.3 milioni a 65 milioni di anni luce) corrisponde mediamente a 0.1 arcsec fino a 1 arcsec (come paragone, il diametro della Luna ha una dimensione apparente di ca. 30 arcmin). Le osservazioni astronomiche da Terra sono limitate dalla presenza del *seeing*, fenomeno per cui la turbolenza atmosferica distorce il fronte d'onda piano della radiazione luminosa proveniente dagli astri e l'immagine al telescopio risulta deformata, perdendo in risoluzione spaziale. Il livello di *seeing* viene quantificato dalla misura della larghezza della PSF (*Point Spread Function*). La PSF è la funzione, in prima approssimazione gaussiana (la cui larghezza viene data dalla FWHM – *Full Width at Half Maximum*), che descrive la distribuzione spaziale dei fotoni che compongono l'immagine di una stella. La misura della PSF è quindi una stima di quanto viene allargata l'immagine di una sorgente puntiforme. Valori tipici della PSF variano da 0.5 a 1.0 secondi d'arco, impedendo di misurare la cinematica entro la sfera di influenza degli ipotetici SBH. Se non ci fosse l'atmosfera terrestre, le immagini ottenute raggiungerebbero la risoluzione massima del telescopio, pari alla minima distanza angolare di due sorgenti che possono essere distinte, dettata dal limite di diffrazione (quest'ultimo è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda in cui si osserva e inversamente proporzionale al diametro dello specchio primario). Proprio per questo motivo l'avvento del telescopio spaziale Hubble (HST, da *Hubble Space Telescope*), con uno specchio principale di 2.4 m, rivoluzionò la ricerca nel campo degli SBH (il suo limite di diffrazione alla lunghezza d'onda di 5000 Å è di 0.05 arcsec). A partire dal 1994, grazie ad HST si susseguirono delle scoperte di grandi concentrazioni di massa nel nucleo di diverse galassie, presumibilmente SBH. M87, la galassia più brillante dell'ammasso di galassie della Vergine, a 55 milioni di anni luce, fu la prima galassia a mostrare una forte evidenza dinamica della presenza di un SBH, di qualche miliardo di masse solari [3], confermando i risultati precedenti ottenuti da Terra ma entro una distanza maggiore dal nucleo. M87 è la stessa galassia di cui, nell'aprile 2019, è stata pubblicata l'immagine dell'"ombra" del suo buco nero centrale, ottenuta tramite una rete di radiotelescopi dell'Event Horizon Telescope. Oltre agli spettacolari risultati forniti da HST, anche tramite dati di interferometria radio fu possibile determinare il moto di molecole d'acqua in un disco di gas nucleare in rapida rotazione nell'AGN NGC 4258, rivelando la presenza di un SBH di $4\times10^7\,M_\odot$ [4].

Le osservazioni che hanno consentito di determinare la massa degli SBH con modelli dinamici della cinematica di insieme del gas o delle stelle sono riuscite a raggiungere una distanza dal centro delle galassie pari a $10^4 - 10^5\,r_s$ [5]. Lo studio del nucleo della Via Lattea si afferma come il caso più estremo.

Il buco nero al centro della Via Lattea

La nostra Galassia è una galassia a spirale (con bracci di spirale che si originano dalle estremità di una grande barra centrale) contenente 100 miliardi di stelle e con un disco di diametro pari a 100 mila anni luce, ricco di stelle, gas e polveri. La presenza di una banda lattiginosa di stelle che attraversa i nostri cieli notturni individua proprio il disco della Galassia. L'astronomo britannico William Herschel ne disegnò per primo la mappa alla fine del '700 e lo statunitense Harlow Shapley nella costellazione del Sagittario ne identificò il centro, che in seguito fu associato alla sorgente radio compatta Sagittarius A* (Sgr A*), a una distanza di 26 mila anni luce. Il Sole orbita intorno al centro galattico con una velocità di 220 km s^{-1} e un periodo di 220 milioni di anni.

Genzel e Ghez ebbero l'idea di provare a risolvere delle singole stelle nella regione centrale della Galassia e rilevare il loro moto proprio, per capire la loro dinamica. Nei primi anni '90 cominciarono quindi a intraprendere una campagna di monitoraggio della regione Sgr A* costituita da un numero considerevole e continuo di osservazioni scrupolose che si protrassero per più di 25 anni. Tutto il loro lavoro si basa su osservazioni con telescopi da Terra. Genzel utilizzò dapprima il 3.58 m New Technology Telescope (NTT) dello European Southern Observatory (ESO) a La Silla in Cile e poi l'8.20 m Very Large Telescope (VLT, ESO) a Cerro Paranal, Cile. Ghez fece le sue osservazioni con il 10 m Keck Observatory telescope situato a Mauna Kea, Hawaii (USA).

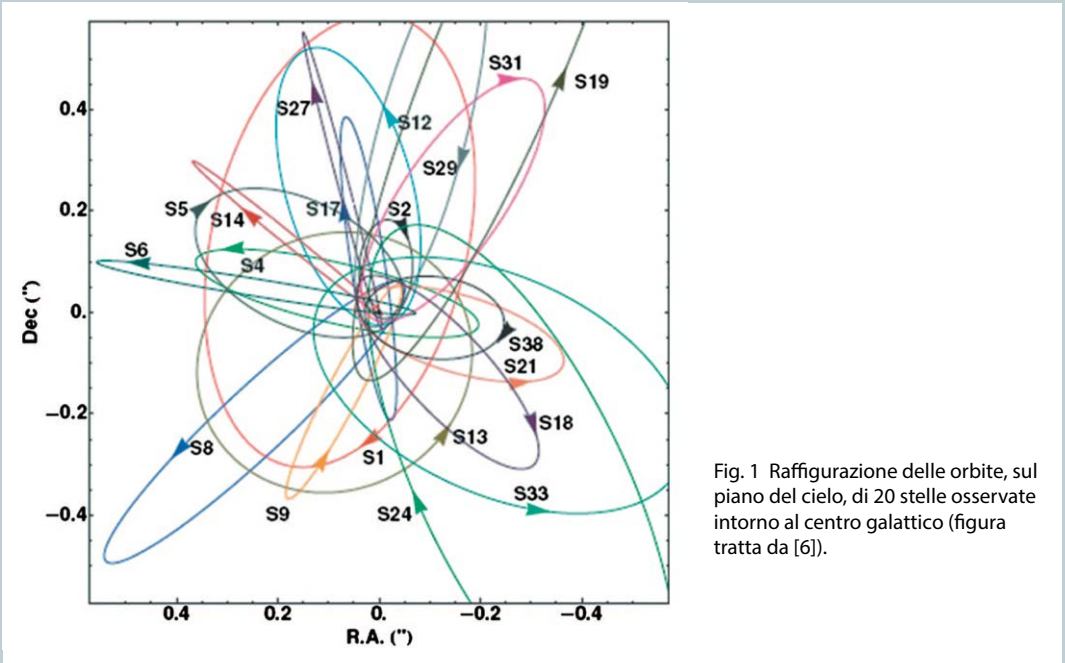


Fig. 1 Raffigurazione delle orbite, sul piano del cielo, di 20 stelle osservate intorno al centro galattico (figura tratta da [6]).

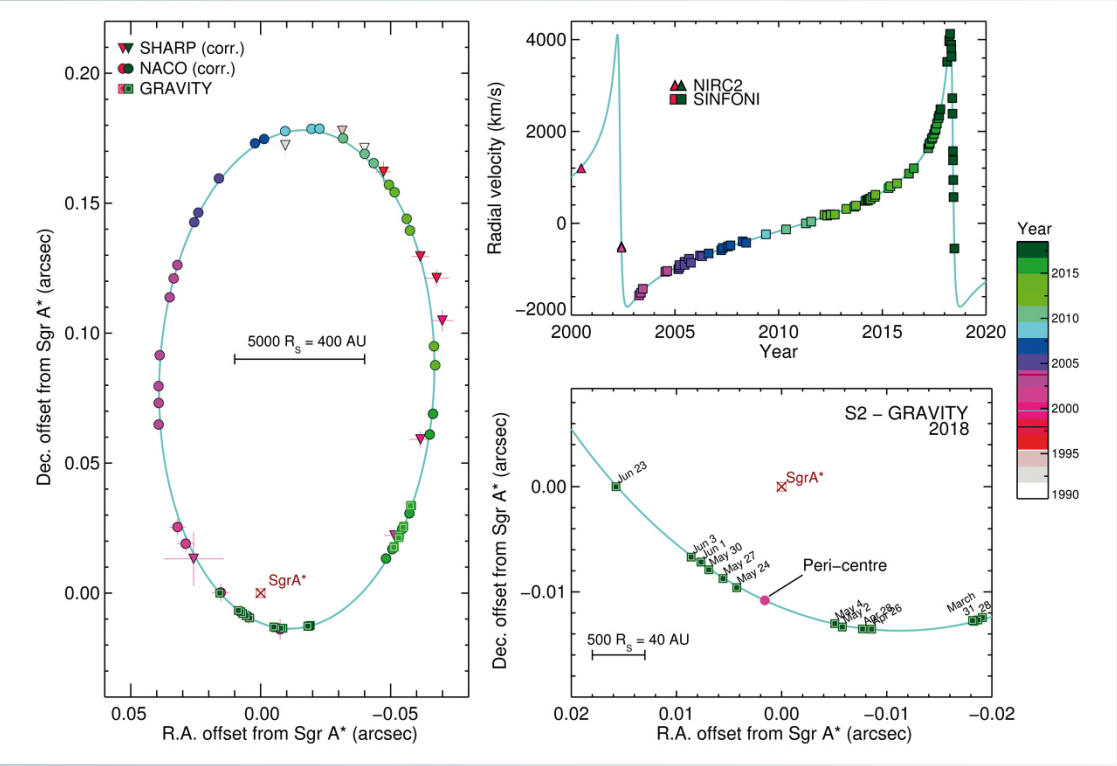


Fig. 2 Risultati della campagna osservativa eseguita dal 1992 al 2018 per monitorare l'orbita della stella S2 intorno a Sgr A*. Sinistra: proiezione dell'orbita della stella S2 sul piano del cielo relativamente alla posizione della sorgente radio compatta Sgr A* (quadrato con croce marrone). I triangoli e i cerchi (e relative incertezze a 1σ) denotano le misure di posizione effettuate con SHARP all'NTT e NACO al VLT, colorati in funzione del periodo di osservazione (vedasi la barra di colore nella parte destra). I quadrati verdi mostrano le misure di GRAVITY. In basso a destra: ingrandimento dell'orbita intorno al passaggio al pericentro osservato nel 2018. In alto a destra: velocità radiale di S2 in funzione del tempo (quadrati: misure di SINFONI/NACO al VLT; triangoli: misure di NIRC2 al Keck). S2 raggiunse il pericentro della sua orbita alla fine di aprile 2002 e ancora il 19 maggio 2018). Le curve in celeste mostrano l'orbita di S2 che meglio interpola tutti i dati, includendo gli effetti della relatività Generale e Speciale (figura tratta da ref. [13]).

Poiché le polveri assorbono la radiazione visibile, le osservazioni furono condotte nella radiazione infrarossa, in grado di attraversare le nubi di polvere che popolano il disco della Via Lattea. Per contrastare il *seeing*, inizialmente per la fotometria si avvalsero della tecnica dello *speckle imaging*, che consiste nel sommare opportunamente un numero elevato di immagini prese con tempi di esposizione molto brevi, dell'ordine di 0.1 secondi, in modo da minimizzare l'effetto della distorsione dell'atmosfera in ogni esposizione. Le osservazioni *speckle* nel vicino infrarosso (meno assorbito dall'atmosfera terrestre della radiazione infrarossa) permisero di risolvere un gruppo di stelle brillanti entro ~ 1 arcsec dal centro. Entrambi i gruppi riuscirono a raggiungere il limite di risoluzione del telescopio. Per osservazioni nella banda *K* con un telescopio avente uno specchio primario di 10 m di diametro, il limite di diffrazione è 0.05 arcsec corrispondenti a 2.5 giorni luce da Sgr A* [7]. Genzel e la sua squadra costruirono la camera SHARP per NTT per migliorare la risoluzione della fotometria; dopo una campagna osservativa di quattro anni riuscirono a misurare il moto proprio nel piano del cielo di alcune stelle e scoprire l'esistenza del tratto kepleriano, previsto appunto per una massa puntiforme centrale [8].

La *speckle imaging*, seppure efficace permetteva di risolvere solo le stelle più brillanti e richiedeva lunghissimi tempi di osservazione. Ghez e Genzel balzarono a un livello notevolmente superiore nelle loro ricerche partecipando in prima linea allo sviluppo della nuova tecnologia dell'ottica adattiva (AO da *Adaptive Optics*).

Dei sensori del fronte d'onda misurano la "sfocatura" prodotta dall'atmosfera tramite l'analisi dell'immagine di una stella brillante posizionata vicino all'oggetto di osservazione, oppure di una stella artificiale (stella laser) prodotta da un potente raggio laser che eccita gli atomi di sodio siti nell'alta atmosfera; successivamente uno specchio secondario deformabile riesce con una frequenza di 10^2-10^3 Hz a correggere in tempo reale la distorsione del fronte d'onda, senza aver bisogno di diminuire i tempi di esposizione degli strumenti. La tecnica AO non solo riuscì a raggiungere i limiti di diffrazione del telescopio, ma diede anche la possibilità di ottenere gli spettri delle stelle, con i quali si possono analizzarne le proprietà e misurare le velocità radiali, ossia lungo la linea di vista. Con l'AO fu possibile vedere dozzine di stelle nell'arcosecondo centrale della Galassia (fig. 1), ossia entro 48 giorni luce dal centro. Per un SBH di 4 milioni di masse solari e alla distanza di 48 giorni luce la velocità circolare orbitale è di ~700 km s^{-1} e il periodo dell'orbita è pari a ~400 anni, ma verso il nucleo le velocità crescono rapidamente ed è possibile seguire i moti orbitali. In particolare, la stella denominata S2 da Genzel (o S02 da Ghez, fig. 1 e fig. 2) è stata seguita per più di un'intera orbita, di quasi 16 anni [9], raggiungendo il pericentro nel 2002 e nel 2018. Il pericentro

dista solo 17 ore luce (corrispondenti a 14 mas o 120 UA) da Sgr A*, ossia 1400 r_s (vedi fig. 1). S2 ha un'orbita di ellitticità elevata, $e=0.88$, e inclinata di 46° rispetto al piano del cielo. La velocità di S2 al pericentro è di ca. 7650 km s^{-1}. Il caso della stella S16 è ancora più sorprendente: la velocità al pericentro è di ~12000 km s^{-1}. S16 è stata osservata al pericentro, a sole 6.2 ore luce $\cong 500\ r_s$ da Sgr A* ma non è ancora stata osservata l'intera orbita di 36 ± 17 anni [10]. I gruppi di Ghez e Genzel, in eccezionale accordo nelle analisi, hanno potuto concludere che il centro galattico ospita un SBH di $4\times10^6\ M_\odot$ entro il pericentro di S2. Questo comporta una densità minima di $1.44\times10^{14}\ M_\odot$ a.l.$^{-3}$ (nei dintorni solari la densità media è pari a 0.003 $M_\odot$ a.l.$^{-3}$). Essi sono anche riusciti a escludere tutte le plausibili ipotesi alternative all'SBH (*e.g.*, ammassi di nane brune o di stelle di neutroni [11]). Ad avvalorare questa tesi, nel corso degli anni sono stati osservati nel vicino infrarosso e nella banda X, in corrispondenza di Sgr A*, diversi bagliori (*flares*) attribuibili a variazioni del flusso di accrescimento di materia (*e.g.*, nubi di gas o singole stelle [12]) verso il buco nero. Recentemente la stella S2 è stata osservata anche dalla Collaborazione GRAVITY, di cui Genzel è tra i leader, con tecniche interferometriche facendo uso dei 4 telescopi VLT contemporaneamente (fig. 2 [13]). È stato possibile testare la Relatività Generale e stabilire che i dati di S2 non sono consistenti con una dinamica puramente newtoniana.

Elena Dalla Bontà
Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova
INAF - Osservatorio Astronomico di Padova
University of Central Lancashire, Preston, UK

Bibliografia

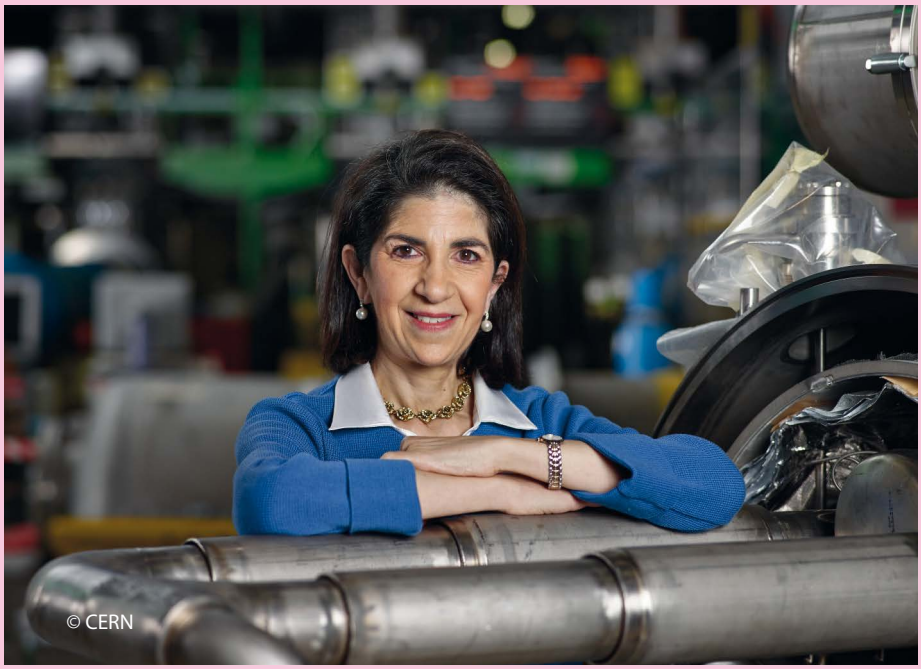
[1] M. Schmidt, *Nature*, 197 (1963) 1040.
[2] E. E. Salpeter, *Astrophys. J.*, 140 (1964) 796; Y. B. Zel'dovich, I. D. Novikov, *IAUS*, 29 (1968) 280; D. Lynden-Bell, *Nature*, 223 (1969) 690.
[3] H. C. Ford *et al.*, *Astrophys. J.*, 435 (1994) 27; R. J. Harms *et al.*, *Astrophys. J.*, 435 (1994) 35; D. Macchetto *et al.*, *Astrophys. J.*, 489 (1997) 579.
[4] M. Miyoshi *et al.*, *Nature*, 373 (1995) 127.
[5] L. Ferrarese, H. Ford, *Space Sci. Rev.*, 116 (2005) 523; J. Kormendy, L. C. Ho, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 51 (2013) 511.
[6] R. Genzel, F. Eisenhauer, S. Gillensen, *Rev. Mod. Phys.*, 82 (2010) 3121.
[7] A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 509 (1998) 2.
[8] A. Eckart, R. Genzel, *Nature*, 383 (1996) 6599; A. Eckart, R. Genzel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 284 (1997) 3.
[9] R. Schödel *et al.*, *Nature*, 419 (2002) 694; A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 586 (2003) 127.
[10] A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 620 (2005) 744.
[11] R. Genzel *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 291 (1997) 219; R. Genzel *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc., 317* (2000) 248; A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 509 (1998) 678; A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 620 (2005) 744; A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 689 (2008) 1044; S. Gillessen *et al.*, *Astrophys. J.*, 707 (2009) 114.
[12] R. Genzel *et al.*, *Nature*, 425 (2003) 934; A. Ghez *et al.*, *Astrophys. J.*, 586 (2003) 127; R. Abuter *et al.* (GRAVITY Collaboration), *Astron. Astrophys.*, 615 (2018) 15.
[13] R. Abuter *et al.* (GRAVITY Collaboration), *Astron. Astrophys.*, 615 (2018) 15.

IL PAPA CHIAMA FABIOLA GIANOTTI, DIRETTRICE DEL CERN, NELLA PONTIFICIA ACCADEMIA DELLE SCIENZE

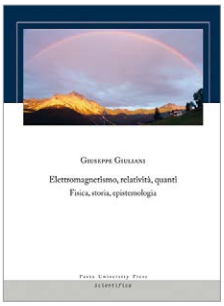
Un nuovo e prestigioso riconoscimento per la direttrice del CERN: il 29 settembre 2020 Sua Santità Papa Francesco ha nominato Fabiola Gianotti membro ordinario della Pontificia Accademia delle Scienze. L'Accademia (nata per promuovere le scienze naturali e matematiche nell'ambito della Santa Sede) è un corpo indipendente dal Vaticano, e gode di libertà di ricerca: i suoi membri vengono scelti senza alcuna distinzione di genere, etnia o religione, ma solo sulla base dei meriti scientifici e morali.

Fabiola Gianotti si conferma ancora una volta una delle protagoniste scientifiche del nostro tempo.

Ricordiamo anche che Fabiola Gianotti, la prima donna a essere designata nel 2014 direttore del CERN, è stata selezionata nel novembre del 2019 dal consiglio del prestigioso laboratorio europeo per un secondo mandato come direttore generale. È la prima volta nella storia del CERN che questo accade. Guiderà il centro di ricerca fino al 2025.



RECENSIONI



Giuseppe Giuliani

Elettromagnetismo, relatività, quanti
Fisica, storia, epistemologia

Pavia University Press, 2019

pp. 340; € 28,00

Recensione di
G. Benedek

Pubblicata online
11 settembre 2020

Antonio Ereditato

Guida turistica per esploratori dello spazio

Il Saggiatore, Milano 2019

pp. 245; € 16,00

Recensione di
A. Mennella

Pubblicata online
11 settembre 2020

Andrea Cimatti

L'universo oscuro
Viaggio tra i più grandi misteri del cosmo.
Nuova edizione

Collana Quality. Carocci editore, 2020

pp. 204; € 17,00

Recensione di
S. Bardelli

Pubblicata online
11 settembre 2020

Patrizia Caraveo

Il cielo è di tutti

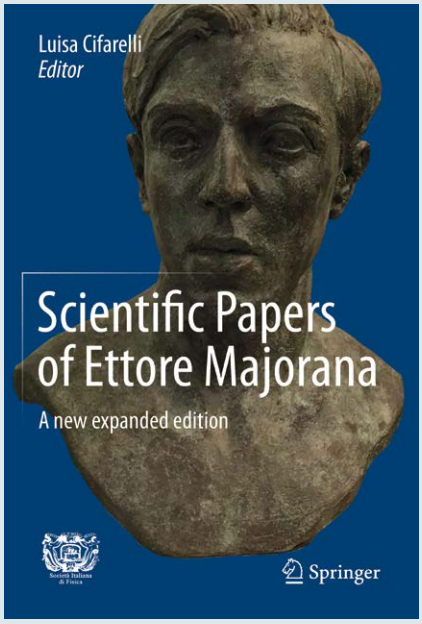
Collana Le Grandi Voci. Edizioni Dedalo, Bari, 2020

pp. 96; € 11,50

Recensione di
G. Benedek

Pubblicata online
14 settembre 2020

VOLUMI IN EDIZIONE INGLESE SIF-SPRINGER



"Scientific Papers of Ettore Majorana -
A new expanded edition"
edited by Luisa Cifarelli
SIF-Springer 2020
Pagine: X + 188
Anno di pubblicazione: 2020
Prezzo: € 114,39
ISBN 978-3-030-23508-6
E-book: € 93,08
ISBN: 978-3-030-23509-3

This book presents in full the work of the Italian theoretical physicist Ettore Majorana and explains its impacts, which are still being felt. It opens with a contribution by A. Zichichi that considers in depth the scientific genius of Majorana. This introductory chapter is followed, in chronological order, by the eleven scientific papers by this great scientist, in most cases translated into English for the first time. Each paper is accompanied by a comment from an expert in the respective field. Although very few in number, Majorana's papers constitute a heritage of undeniable value and extraordinary scientific meaning, since they laid the foundations for research fields that remain topical today. With this in mind, two additional contributions on ongoing developments in these research fields are included: one on neutrino physics and the other on Majorana fermions in condensed matter. The volume closes with a note on Majorana's life until his ill-fated disappearance.

Pubblicata online
30 settembre 2020

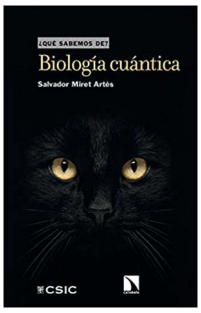
ROBERTO BATTISTON

LA PRIMA ALBA DEL COSMO

Collana Saggi. Rizzoli, Milano, 2019

pp. 256; € 19,00

Recensione di
V. Barone



Pubblicata online
11 dicembre 2020

SALVADOR MIRET ARTÉS

BIOLOGÍA CUÁNTICA

¿Que sabemos de?
CSIC - Catarata, 2019

pp. 144; € 12,00
e-book: € 6,99

Recensione di
G. Caglioti

Pubblicata online
16 dicembre 2020

GIANPAOLO BELLINI, EVANDRO AGAZZI

L'UOMO NELL'ERA DELLA TECNOSCIENZA
DIALOGO TRA UN FISICO E UN FILOSOFO

Collana Invasioni. Ulrico Hoepli Editore, 2020

pp. XVIII + 212; € 16,90
e-book: € 13,99

Recensione di
G. Benedek

Pubblicata online
16 dicembre 2020

ALBERTO DIASPRO

QUELLO CHE GLI OCCHI NON VEDONO
IL MICROSCOPIO: STORIA DI UN PEZZO DI VETRO E DELL'ARCOBALENO

Collana Microscopi. Ulrico Hoepli Editore, 2020

pp. XII + 160; € 12,90
e-book: € 9,99

Recensione di
G. Benedek

IN RICORDO DI

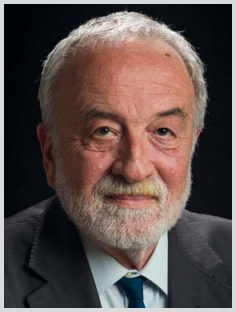
Horst Wenninger

Wilhelmshaven (Germania), 30 settembre 1938 - Ginevra (Svizzera), 16 luglio 2020

A. Zichichi, A. Bettini, L. Cifarelli,

Pubblicato online
14 settembre 2020

Nicolò D'Amico

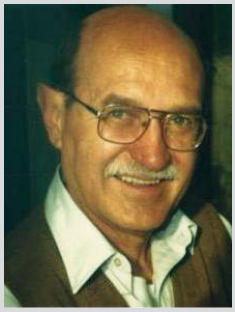


Palermo, 28 giugno 1953 - Cagliari, 14 settembre 2020

E. Coccia

Pubblicato online
12 ottobre 2020

Sergio Ratti



Garlate (LC), 5 settembre 1934 - Pavia, 10 settembre 2020

G. Bellini, C. Riccardi,
P. Vitulo, L. Andreani

Pubblicato online
13 ottobre 2020

Giorgio Trenta

Città della Pieve (PG), 26 marzo 1940 - Roma, 4 ottobre 2020

R. A. Ricci
Pubblicato online
3 dicembre 2020

SCELTI PER VOI

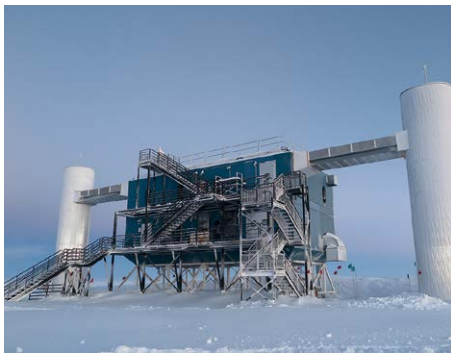
a cura di Alessandro Bettini

NESSUN NEUTRINO STERILE AL POLO SUD

Due esperimenti, non indipendenti, LSND a Los Alamos e MiniBooNE al Fermilab, hanno riportato, ormai da molti anni, anomalie che indicherebbero la possibile esistenza di specie di neutrini diversi dai tre noti, di massa attorno all'elettronvolt. Nessun esperimento indipendente ha confermato. Sono chiamati sterili perché interagirebbero pochissimo con la materia normale, ma possono oscillare con i neutrini noti. In questo modo modificherebbero in maniera ben definita la probabilità di scomparsa per oscillazione dei neutrini muonici osservati dal grande esperimento IceCube al Polo Sud. Ma ciò non accade, in contraddizione con l'esistenza dell'anomalia.

IceCube Collaboration (M. G. Aarsten *et al.*), *Searching for eV-scale sterile neutrinos with eight years of atmospheric neutrinos at the IceCube Neutrino Telescope,* Phys. Rev. D, 102 (2020) 052009; Phys. Rev. Lett., 125 (2020) 141801.

The results of a 3 (*known*) +1 sterile neutrino search using eight years of data from the IceCube Neutrino Observatory are presented. A total of 305 735 muon neutrino events are analyzed in reconstructed energy-zenith space to test for signatures of a matter-enhanced oscillation that would occur given a sterile neutrino state with a mass-squared difference between 0.01 and 100 eV^2. The best-fit point is found to be at $\sin^2(2\theta_{24})$=0.10 and Δm^2_{41}=4.5 eV^2, which is consistent with the no sterile neutrino hypothesis with a *p* value of 8.0%.



L'edificio di controllo di IceCube al Polo Sud. Crediti: Erik Beiser, IceCube/NSF.

IL CANTO DELLE GOCCE DANZANTI

Se si fanno cadere goccioline d'acqua sulla superficie di una piastra a temperatura molto superiore a 100 °C, non evaporano immediatamente, ma si muovono saltellando qua e là. Il fenomeno, che prende il nome di effetto Leidenfrost (1715-1794), da colui che lo descrisse nel 1756, è dovuto al formarsi di un sottile strato di vapore, di bassa conduttività termica, tra la goccia e la superficie calda. Due ricercatori messicani hanno ora trovato che le gocce, che a volte prendono la forma di stelle, emettono suoni con un processo simile alle canne di organo.

T. Singla and M. Rivera, *Sounds of Leidenfrost drops,* Phys. Rev. Fluids, 5 (2020) 113604.

We show that when a drop of water is kept on a substrate with a temperature much higher than the boiling point of water, a periodic sound emits from the drop, … *that they call* beats. It was observed that, for large drops, beats emitted only when the drop oscillated in one of the star configuration modes. In contrast, beats were also detected in small drops even though the stars cannot be observed in drops of these sizes.

Due geometrie di una goccia mentre emette suono. Figura riprodotta con permesso da `https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.113604`, © 2020 American Physical Society.

IN UN ATTOSECONDO UN IMPULSO SOLITARIO DI ELETTRONI

Esperimenti degli scorsi anni su tecniche di accelerazione hanno già realizzato impulsi di elettroni di durate di pochi periodi laser. Per diverse applicazioni sarebbe interessante disporre di singoli impulsi di elettroni liberi di durata dell'ordine degli attosecondi e di energie di keV-MeV.

Y. Morimoto and P. Baum, *Single-cycle optical control of beam electrons,* Phys. Rev. Lett., 125 (2020) 193202.

We report the single-cycle optical control of a freely propagating electron beam with an isolated cycle of mid infrared light. In particular, we produce and characterize a modulated electron current with peak-cycle-specific sub-femtosecond structure in time… *The observed effects* demonstrate the subcycle nature of our control. These results and concept may create novel opportunities in free-electron lasers, laser-driven particle accelerators, ultrafast electron microscopy, and wherever else high-energy electrons are needed with the temporal structure of single-cycle light.

UN NUOVO LIMITE PER IL MISTERIOSO NEUTRINO

Il neutrino è ancora la particella più misteriosa, tanto che ancora non sappiamo se neutrino e antineutrino sono due particelle diverse (Dirac) o la medesima (Majorana). Nel secondo caso è possibile un decadimento rarissimo di alcuni nuclei, il decadimento beta doppio senza neutrini nello stato finale (ma mediato da un propagatore neutrino). Il maggior limite al mondo su di un'emivita è stato ora pubblicato, come suo risultato finale, dall'esperimento GERDA al Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'INFN, dopo aver ridotto a zero, ai fini pratici, il fondo radioattivo all'energia attesa del segnale, grazie all'ottima risoluzione e radio-purezza del germanio.

GERDA Collaboration (M. Agostini *et al.*), *Final results of GERDA on the search for neutrinoless double-β decay*, Phys. Rev. Lett., 125 (2020) 252502.

The GERmanium Detector Array (GERDA) experiment searched for the lepton-number-violating neutrinoless double-β decay of ^{76}Ge, whose discovery would have far-reaching implications in cosmology and particle physics. By operating bare germanium diodes, enriched in ^{76}Ge, in an active liquid argon shield, GERDA achieved an unprecedently low background index of 5.2×10^{-4} counts/(keV·kg·yr) in the signal region and met the design goal to collect an exposure of 100 kg·yr in a background-free regime. … No signal is observed after 127.2 kg·yr of total exposure. A limit on the half-life of $0\nu\beta\beta$ decay in ^{76}Ge is set at $T_{1/2}>1.8\times10^{26}$ yr at 90% C.L., which coincides with the sensitivity assuming no signal.

ANNUNCI

The Galileo Galilei Institute
For Theoretical Physics

Centro Nazionale di Studi Avanzati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics 2021

https://www.ggi.infn.it/showevent.pl?id=384

PHOTOPTICS 2021

9th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology

VIENNA - AUSTRIA | 11 - 13 FEBRUARY, 2021

Conference Areas 1. LASERS 2. OPTICS 3. PHOTONICS

MORE INFORMATION AT: WWW.PHOTOPTICS.ORG

https://www.fast.mi.it/i-giovani-e-le-scienze/

https://agenda.infn.it/event/21964/

ÉCOLE DE PHYSIQUE DES HOUCHES

Summer School on Core Mantle Interactions Through Time

Session CXVII

June 28 - July 23, 2021

Summer School on Dark Matter

Session CXVIII

July 26 - August 20, 2021

https://www.houches-school-physics.com/program/program-2021/

INDICI DEL VOLUME 36

INDICE PER FASCICOLI

Numero 1/2, 2020

Editoriale/Editorial
A. Bracco 3
The birth, the christening, and the first ninety years of neutrino
F. Guerra, N. Robotti 5
Astrophysics with neutrinos
M. Spurio 17
The fascination of scientific discovery
A. Palano 30
How Solid Earth is changing due to its own internal dynamics
R. Sabadini 41
Carbon, between nature and society
B. Bensaude-Vincent 53
La Rivista del Nuovo Cimento: 50 anni di storia per guardare al futuro
B. Ancarani 59
50 years of Physical Review A, B, C, and D
M. Salter, M. Thoennessen 61
Programma della Scuola estiva "Enrico Fermi" di Varenna 62
106° Congresso Nazionale 63
Bandi dei concorsi a premi della SIF 65
Plan S and the scientific societies –An Open Access revolution?
S. Bianco, L. Patrizii 73
Edison, a history of innovation and progress for over 130 years
P. Tosco 79
Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa
A. Bettini 82
Il Ventilatore Meccanico Milano (MVM)
E. Scapparone 83
Intervista a Giovanna Iannantuoni
S. Pirrone 85
Recensioni(*) 87
In ricordo di(*)
Antonio Gandolfi (S. Sgrignoli) 88
Marcello Cresti (A. Bettini, R. A. Ricci) 88
Gualtiero Pisent (R. A. Ricci) 88
Andrea Taroni (R. A. Ricci) 88
Giovanni Vittorio Pallottino (F. Ricci) 88
Emilio Chiavassa (T. Bressani, M. Gallio) 88
Lodovico Riccati (B. Alessandro, P. Giubellino, M. Masera, F. Prino, L. Ramello) 88
Scelti per voi (A. Bettini) 89

Numero 3/4, 2020

Editoriale/Editorial
A. Bracco 3
50 years with the GIM mechanism
A. D. Polosa 5
Amazing glass marbles
G. C. Righini 17
Visualizing elusive quantum-mechanical concepts through multi-ionization experiments
G. Stefani 30

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

Accelerating the future
M. Ferrario, R. W. Assmann 41
Dmitrii Ivanovich Mendeleev (1834-1907): The Periodic Table and beyond
V. D. Shiltsev, E. V. Shiltseva 51
Thus was established the Italian Astronomical Society
I. Chinnici 65
106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 77
Programma Generale 78
Introducing the Italian Society of Pure and Applied Biophysics - SIBPA
C. Viappiani, C. Musio 80
Young Minds, a key for the future
R. Caruso, A. Marino 84
Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa
A. Bettini 89
Intervista a Massimo Inguscio
L. Cifarelli 90
A chair for Laura Bassi. Bologna 1732
M. Focaccia, R. Simili 91
Recensioni (*)
L. Cifarelli (Editor), Scientific Papers of Ettore Majorana - A new expanded edition
(D. Haidt) 92
In ricordo di(*)
Antonino Pullia (G. Bellini, S. Ragazzi) 93
Aldo Covello (G. La Rana, R. A. Ricci) 94
Mario Bruno (T. Marchi, S. Barlini) 94
Scelti per voi (A. Bettini) 95
Annunci 96

Numero 5/6, 2020

Editoriale/Editorial
A. Bracco 3
In memoria di Roberto Habel
R. A. Ricci 5
1960: The laser era begins
G. C. Righini 7
Why and how the Sun and the stars shine
G. Bellini 17
Developing relevant measurement science and technology: The new system of units and the future of metrology
D. S. Wiersma 31
The Specola Vaticana
R. D'Souza, G. Gionti 41
Augusto Righi and the intuition of the experiment
E. Bertozzi 51
Cerimonia Inaugurale
106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 61
The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2020
S. De Silvestri, P. Tavella, G. Mana 65
SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2020
M. Branchesi 70
I Fisici Italiani: un dizionario per cinque secoli di fisica
B. Ancarani 71
Facing the anthropocene
C. Tuniz 72
Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa
A. Bettini 81
Il Premio Nobel per la Fisica 2020
M. Rinaldi, E. Dalla Bontà 82

Recensioni (*) 87
In ricordo di (*) 88
Horst Wenninger (A. Zichichi, A. Bettini, L. Cifarelli) 89
Nicolò D'Amico (E. Coccia) 89
Sergio Ratti (G. Bellini, C. Riccardi, P. Vitulo, L. Andreani) 89
Giorgio Trenta (R. A. Ricci) 89
Scelti per voi (A. Bettini) 90
Annunci 91
Indici di volume 36 94

INDICE PER AUTORI

A
Alessandro B., Giubellino P., Masera M., Prino F., Ramello L.
In ricordo di (*) *Lodovico Riccati* 36:1/2, 88
Ancarani B.
La Rivista del Nuovo Cimento: 50 anni di storia per guardare al futuro 36:1/2, 59
Ancarani B.
I Fisici Italiani: un dizionario per cinque secoli di fisica 36:5/6, 71
Andreani L. (vedi Bellini G.)
Assmann R. W. (vedi Ferrario M.)

B
Barlini S. (vedi Marchi T.)
Bellini G., Ragazzi S.
In ricordo di (*) *Antonino Pullia* 36:3/4, 93
Bellini G.
Why and how the Sun and the stars shine 36:5/6, 17
Bensaude-Vincent B.
Carbon, between nature and society 36:1/2, 53
Bellini G., Riccardi C., Vitulo P., Andreani L.
In ricordo di (*) *Sergio Ratti* 36:5/6, 89
Bertozzi E.
Augusto Righi and the intuition of the experiment 36:5/6, 51
Bettini A., Ricci R. A.
In ricordo di (*) *Marcello Cresti* 36:1/2, 88
Bettini A. (vedi Zichichi A.)
Bianco S., Patrizii L.
Plan S and the scientific societies –An Open Access revolution? 36:1/2, 73
Branchesi M.
SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2020 36:5/6, 70
Bressani T., Gallio M.
In ricordo di (*) *Emilio Chiavassa* 36:1/2, 88

C
Caruso R., Marino A.
Young Minds, a key for the future 36:3/4, 84
Chinnici I.
Thus was established the Italian Astronomical Society 36:3/4, 65
Cifarelli L.
Intervista a Massimo Inguscio 36:3/4, 90
Cifarelli L. (vedi Zichichi A.)
Coccia E.
In ricordo di (*) *Nicolò D'Amico* 36:5/6, 89

D
Dalla Bontà E. (vedi Rinaldi M.)
De Silvestri S., Tavella P., Mana G.
"Enrico Fermi" Prize and Medal 2020 36:5/6, 65
D'Souza R., Gionti G.
The Specola Vaticana 36:5/6, 41

F
Ferrario M., Assmann R. W.
Accelerating the future 36:3/4, 41
Focaccia M., Simili R.
A chair for Laura Bassi. Bologna 1732 36:3/4, 91

G
Gallio M. (vedi Bressani T.)
G. Gionti (vedi D'Souza R.)
Giubellino P. (vedi Alessandro B.)
Guerra F., Robotti N.
The birth, the christening, and the first ninety years of neutrino 36:1/2, 5

H
Haidt D.
L. Cifarelli (Editor), Scientific Papers of Ettore Majorana - A new expanded edition 36:3/4, 92

L
La Rana G., Ricci R. A.
In ricordo di (*) *Aldo Covello* 36:3/4, 94

M
Mana G. (vedi De Silvestri S.)
Marchi T., Barlini S.
In ricordo di (*) *Mario Bruno* 36:3/4, 94
Marino A. (vedi Caruso R.)
Masera M. (vedi Alessandro B.)
Musio C. (vedi Viappiani C.)

P
Palano A.
The fascination of scientific discovery 36:1/2, 30
Patrizii L. (vedi Bianco S.)
Pirrone S.
Intervista a Giovanna Iannantuoni 36:1/2, 85
Polosa A. D.
50 years with the GIM mechanism 36:3/4, 5
Prino F. (vedi Alessandro B.)

R
Ragazzi S. (vedi Bellini G.)
Ramello L. (vedi Alessandro B.)
Riccardi C. (vedi Bellini G.)
Ricci F.
In ricordo di (*) *Giovanni Vittorio Pallottino* 36:1/2, 88
Ricci R. A. (vedi Bettini A.)
Ricci R. A.
In ricordo di (*) *Gualtiero Pisent* 36:1/2, 88
Ricci R. A.
In ricordo di (*) *Andrea Taroni* 36:1/2, 88
Ricci R. A. (vedi La Rana G.) 36:3/4, 94
Ricci R. A.
In memoria di Roberto Habel 36:5/6, 5

Ricci R. A.
In ricordo di (*) *Giorgio Trenta* 36:5/6, 89
Righini G. C.
Amazing glass marbles 36:3/4, 17
Righini G. C.
1960: The laser era begins 36:5/6, 7
Rinaldi M., Dalla Bontà E.
Il Premio Nobel per la Fisica 2020 36:5/6, 82
Robotti N. (vedi Guerra F.)

S
Sabadini R.
How Solid Earth is changing due to its own internal dynamics 36:1/2, 41
Salter M., Thoennessen M.
50 years of Physical Review A, B, C, and D 36:1/2, 61
Scapparone E.
Il Ventilatore Meccanico Milano (MVM) 36:1/2, 83
Sgrignoli S.
In ricordo di (*) *Antonio Gandolfi* 36:1/2, 88
Shiltsev V. D. , Shiltseva E. V.
Dmitrii Ivanovich Mendeleev (1834-1907): The Periodic Table and beyond 36:3/4, 51
Shiltseva E. V. (vedi Shiltsev V. D.)
Simili R. (vedi Focaccia M.)
Spurio M.
Astrophysics with neutrinos 36:1/2, 17
Stefani G.
Visualizing elusive quantum-mechanical concepts through multi-ionization experiments 36:3/4, 30

T
Tavella P. (vedi De Silvestri S.)
Thoennessen M. (vedi Salter M.)
Tosco P.
Edison, a history of innovation and progress for over 130 years 36:1/2, 79
Tuniz C.
Facing the anthropocene 36:5/6, 72

V
Viappiani C., Musio C.
Introducing the Italian Society of Pure and Applied Biophysics - SIBPA 36:3/4, 80
Vitulo P. (vedi Bellini G.)

W
Wiersma D. S.
Developing relevant measurement science and technology: The new system of units and the future of metrology 36:5/6, 31

Z
Zichichi A., Bettini A., Cifarelli L.
In ricordo di (*) *Horst Wenninger* 36:5/6,89

INDICE PER RUBRICHE

IN EVIDENZA
1960: The laser era begins
G. C. Righini 36:5/6, 7
50 years with the GIM mechanism
A. D. Polosa 36:3/4, 5
The birth, the christening, and the first ninety years of neutrino
F. Guerra, N. Robotti 36:1/2, 5

SCIENZA IN PRIMO PIANO
Amazing glass marbles
G. C. Righini 36:3/4, 17
Astrophysics with neutrinos
M. Spurio 36:1/2, 17
The fascination of scientific discovery
A. Palano 36:1/2, 30
Why and how the Sun and the stars shine
G. Bellini 36:5/6, 17
Visualizing elusive quantum-mechanical concepts through multi-ionization experiments
G. Stefani 36:3/4, 30

FISICA E...
Accelerating the future
M. Ferrario, R. W. Assmann 36:3/4, 41
Developing relevant measurement science and technology: The new system of units and the future of metrology
D. S. Wiersma 36:5/6, 31
How Solid Earth is changing due to its own internal dynamics
R. Sabadini 36:1/2, 41

PERCORSI
Augusto Righi and the intuition of the experiment
E. Bertozzi 36:5/6, 51
Carbon, between nature and society
B. Bensaude-Vincent 36:1/2, 53
Dmitrii Ivanovich Mendeleev (1834-1907): The Periodic Table and beyond
V. D. Shiltsev, E. V. Shiltseva 36:3/4, 51
The Specola Vaticana
R. D'Souza, G. Gionti 36:5/6, 41
Thus was established the Italian Astronomical Society
I. Chinnici 36:3/4, 65

IL NOSTRO MONDO
50 years of Physical Review A, B, C, and D
M. Salter, M. Thoennessen 36:1/2, 61
Edison, a history of innovation and progress for over 130 years
P. Tosco 36:1/2, 79
Facing the anthropocene
C. Tuniz 36:5/6, 72

I Fisici Italiani: un dizionario per cinque secoli di fisica
B. Ancarani 36:5/6, 71
Introducing the Italian Society of Pure and Applied Biophysics - SIBPA
C. Viappiani, C. Musio 36:3/4, 80
La Rivista del Nuovo Cimento: 50 anni di storia per guardare al futuro
B. Ancarani 36:1/2, 59
Plan S and the scientific societies – An Open Access revolution?
S. Bianco, L. Patrizii 36:1/2, 73
Young Minds, a key for the future
R. Caruso, A. Marino 36:3/4, 84

Scuole e Congressi SIF
Programma della Scuola estiva "Enrico Fermi" di Varenna 36:1/2, 62
106° Congresso Nazionale 36:1/2, 63
Bandi dei concorsi a premi della SIF 36:1/2, 65
106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 36:3/4, 77
Programma Generale 36:3/4, 78
Cerimonia Inaugurale 106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 36:5/6, 61
The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2020
S. De Silvestri, P. Tavella, G. Mana 36:5/6, 65
SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2020
M. Branchesi 36:5/6, 70

Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa
A. Bettini 36:1/2, 82
36:3/4, 89
36:5/6, 81

News
A chair for Laura Bassi. Bologna 1732
M. Focaccia, R. Simili 36:3/4, 91
Il Premio Nobel per la Fisica 2020
M. Rinaldi, E. Dalla Bontà 36:5/6, 82
Il Ventilatore Meccanico Milano (MVM)
E. Scapparone 36:1/2, 83

RECENSIONI(*)
Atomic and Molecular Physics
recensito da G. Benedek 36:1/2, 87
Biología cuántica
Recensito da G. Caglioti 36:5/6, 89
Close Encounters of Art and Physics
Recensito da M. Massai, G. Spandre 36:1/2, 87
Elettromagnetismo, relatività, quanti
recensito da G. Benedek 36:5/6, 88
Enrico Fermi a Firenze
Recensito da G. C. Righini 36:3/4, 92
Guida turistica per esploratori dello spazio
Recensito da A. Mennella 36:5/6, 88
I marziani siamo noi
Recensito da E. Sindoni 36:1/2, 87
Il cielo è di tutti
Recensito da G. Benedek 36:5/6, 88
Introduction to Particle and Astroparticle Physics
recensito da E. Coccia 36:1/2, 87
L'universo oscuro
Recensito da S. Bardelli 36:5/6, 88
L'uomo nell'era della tecnoscienza
recensito da G. Benedek 36:5/6, 89
La prima alba del cosmo
Recensito da V. Barone 36:5/6, 89
Microclimate for Cultural Heritage
Recensito da M. Martini 36:1/2, 87
Quello che gli occhi non vedono
recensito da G. Benedek 36:5/6, 89
Scientific Papers of Ettore Majorana - A new expanded edition
recensito da D. Haidt 36:3/4, 92
Silicio
recensito da S. Centro 36:1/2, 87
Un mondo di mondi
recensito da G. Benedek 36:1/2, 87

In ricordo di(*)
Antonio Gandolfi (S. Sgrignoli) 36:1/2, 88
Marcello Cresti (A. Bettini, R. A. Ricci) 36:1/2, 88
Gualtiero Pisent (R. A. Ricci) 36:1/2, 88
Andrea Taroni (R. A. Ricci) 36:1/2, 88
Giovanni Vittorio Pallottino (F. Ricci) 36:1/2, 88
Emilio Chiavassa (T. Bressani, M. Gallio) 36:1/2, 88
Lodovico Riccati (B. Alessandro, P. Giubellino, M. Masera, F. Prino, L. Ramello) 36:1/2, 88
Antonino Pullia (G. Bellini, S. Ragazzi) 36:3/4, 93
Aldo Covello (G. La Rana, R. A. Ricci) 36:3/4, 94
Mario Bruno (T. Marchi, S. Barlini) 36:3/4, 94
Roberto Habel (R. A. Ricci) 36:5/6, 5
Horst Wenninger (A. Zichichi, A. Bettini, L. Cifarelli) 36:5/6, 89
Nicolò D'Amico (E. Coccia) 36:5/6, 89
Sergio Ratti (G. Bellini, C. Riccardi, P. Vitulo, L. Andreani) 36:5/6, 89
Giorgio Trenta (R. A. Ricci) 36:5/6, 89

SCELTI PER VOI
Un cristallo 2D largo due pollici - La nuvola di Kondo - Lente 2D con super profondità di campo - Fotosensore veloce in 2D 36:1/2, 89
Livelli atomici del π^- - Onde evanescenti di spin - Vita del π^0 - Il sole negli alberi 36:3/4, 95
Nessun neutrino sterile al Polo Sud - Il canto delle gocce danzanti - In un attosecondo un impulso solitario di elettroni - Un nuovo limite per il misterioso neutrino 36:5/6, 90

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 2021

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 2021-2022-2023) JUNIOR Member under 30 (three year payment 2021-2022-2023)	€ 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 2021 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 2021-2022-2023)	€ 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 2021 della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

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

Modalità di pagamento della quota sociale alla SIF:

☐ online a mezzo carta di credito, tramite collegamento diretto e sicuro (POS) con la banca BNL, attraverso l'Area Soci del sito web della Società Italiana di Fisica

☐ a mezzo bonifico:
BancoPosta, IBAN IT14 G076 0102 4000 0001 9197 409 (dall'estero BIC/SWIFT BPPIITRRXXX)
intestato a: Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.

☐ a mezzo versamento sul c/c postale n. 19197409
intestato a: Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.

☐ a mezzo carta di credito, tramite la Società Italiana di Fisica, compilando e spedendo il modulo sottostante (**)

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

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

Il sottoscritto: _____

Nato a: _____ il _____

Residente a: _____

Via: _____ n. _____

Documento di riconoscimento: _____ n. _____

Rilasciato da: _____ il _____

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

Scadenza _____

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

Scadenza _____

AUTORIZZA

La Società Italiana di Fisica

A prelevare dalla carta di credito sopra descritta

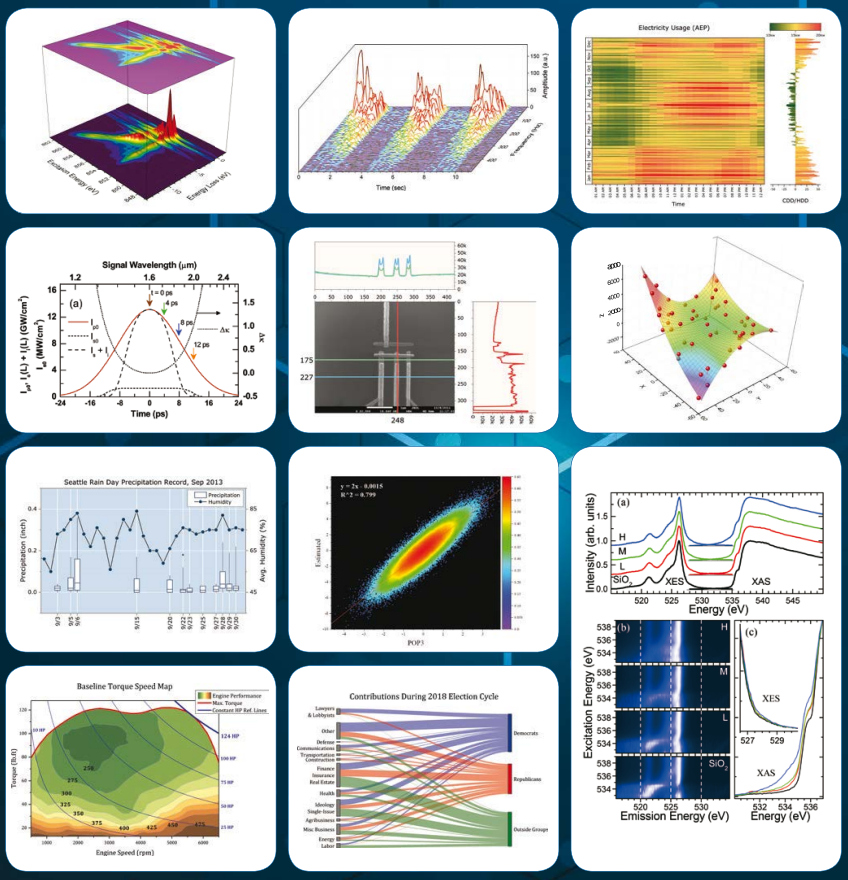
L'importo di € _____ , _____ (_____)
(importo in cifre) (importo in lettere)

Data _____

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

sì ☐ no ☐

_____
Firma



ORIGIN PRO® 2021

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

Decine di 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 ▷**

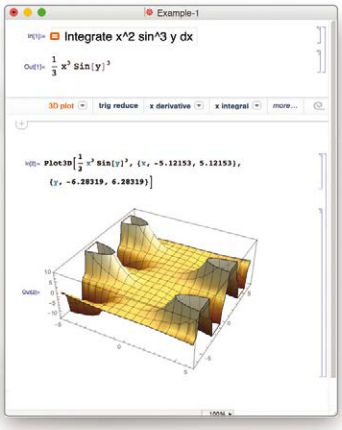
WOLFRAM MATHEMATICA

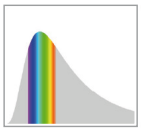
La soluzione definitiva per la ricerca

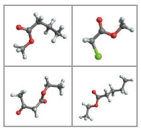
Partecipa ai seminari gratuiti!

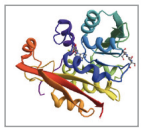
Mathematica integra la più grande collezione al mondo di algoritmi, capacità di calcolo ad alte prestazioni e un potente motore di visualizzazione in un sistema coerente e semplice da usare; ciò rende estremamente intuitivo, veloce ed economico il processo di creazione di modelli di calcolo personalizzati e per questo rappresenta lo strumento ideale per la ricerca di base ed applicata in ogni settore.

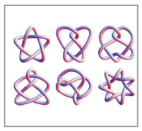
Mathematica ha accesso alle vastissime risorse di conoscenza Wolfram, che includono dati continuamente aggiornati e gratuiti in migliaia di differenti domini: fisica, chimica, biologia, matematica, ecc...Tutti i dati in Mathematica sono immediatamente calcolabili.



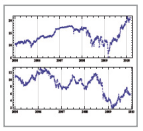

Physics data

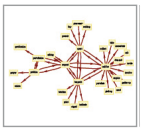

Chemical data


Biological & genomic data


Mathematical data

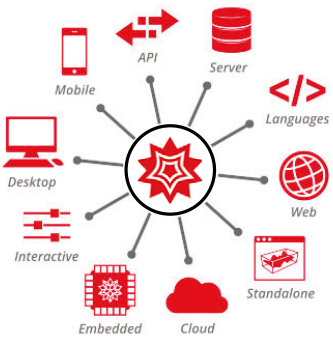
Geographic data


Current & historical financial data


Linguistic data

MATHEMATICA ONLINE

Il sistema Mathematica nell'ambiente cloud

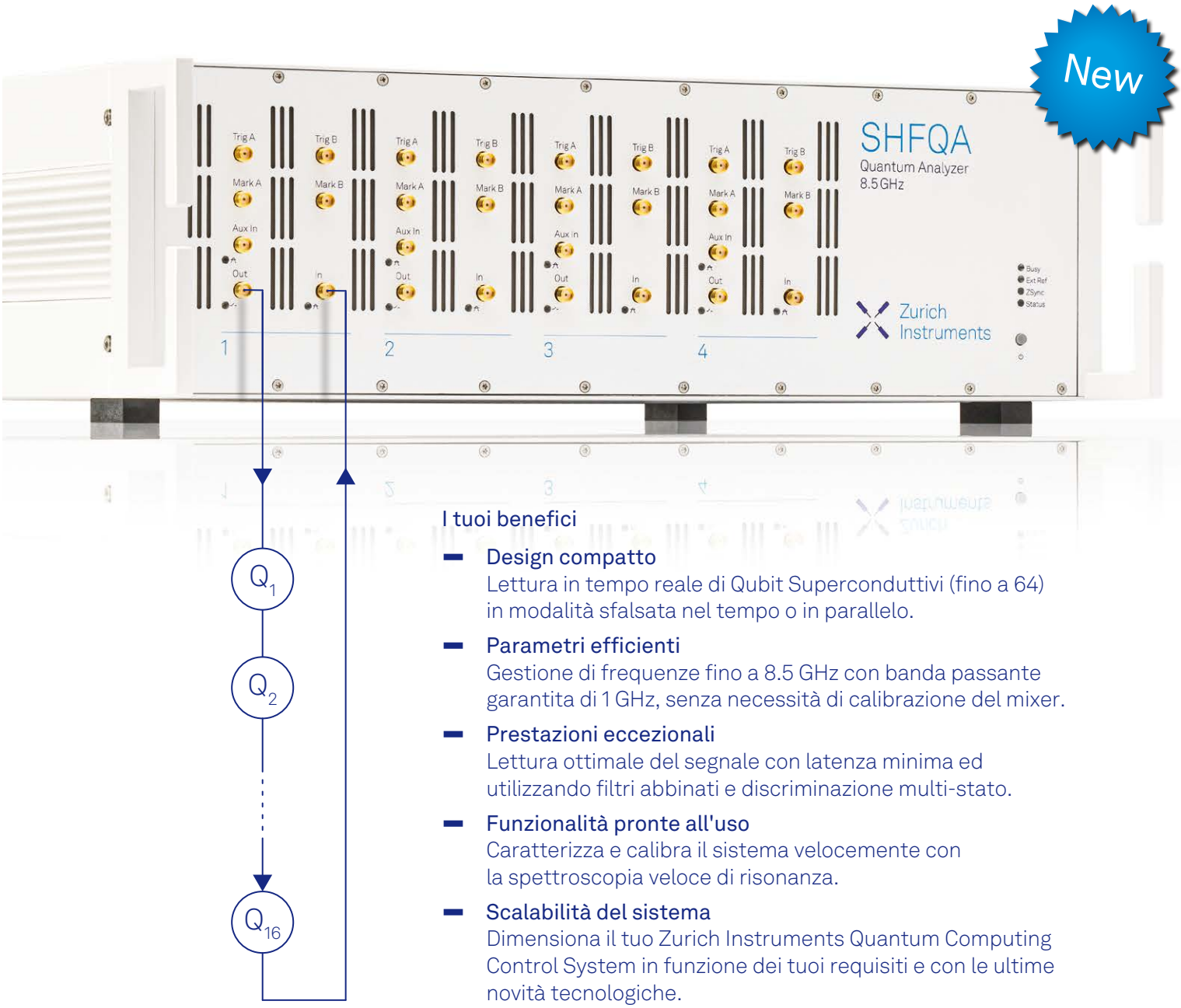


Mathematica Online offre nel cloud la potenza di Mathematica e la versatilità dei Wolfram Notebook.
Consente di calcolare, visualizzare, programmare e creare documenti interattivi direttamente nel browser Web, senza richiedere installazione o configurazione; inoltre gli strumenti di collaborazione integrati permettono di condividere i Notebook interattivi con colleghi in tutto il mondo.

ADALTA Distributore unico per l'Italia di Wolfram **www.adalta.it/Wolfram ▷**

I tuoi Qubit.
Misurati.

Scopri la nuova generazione di Quantum Analyzer che rappresenta un nuovo standard per la lettura di Qubit Superconduttivi.

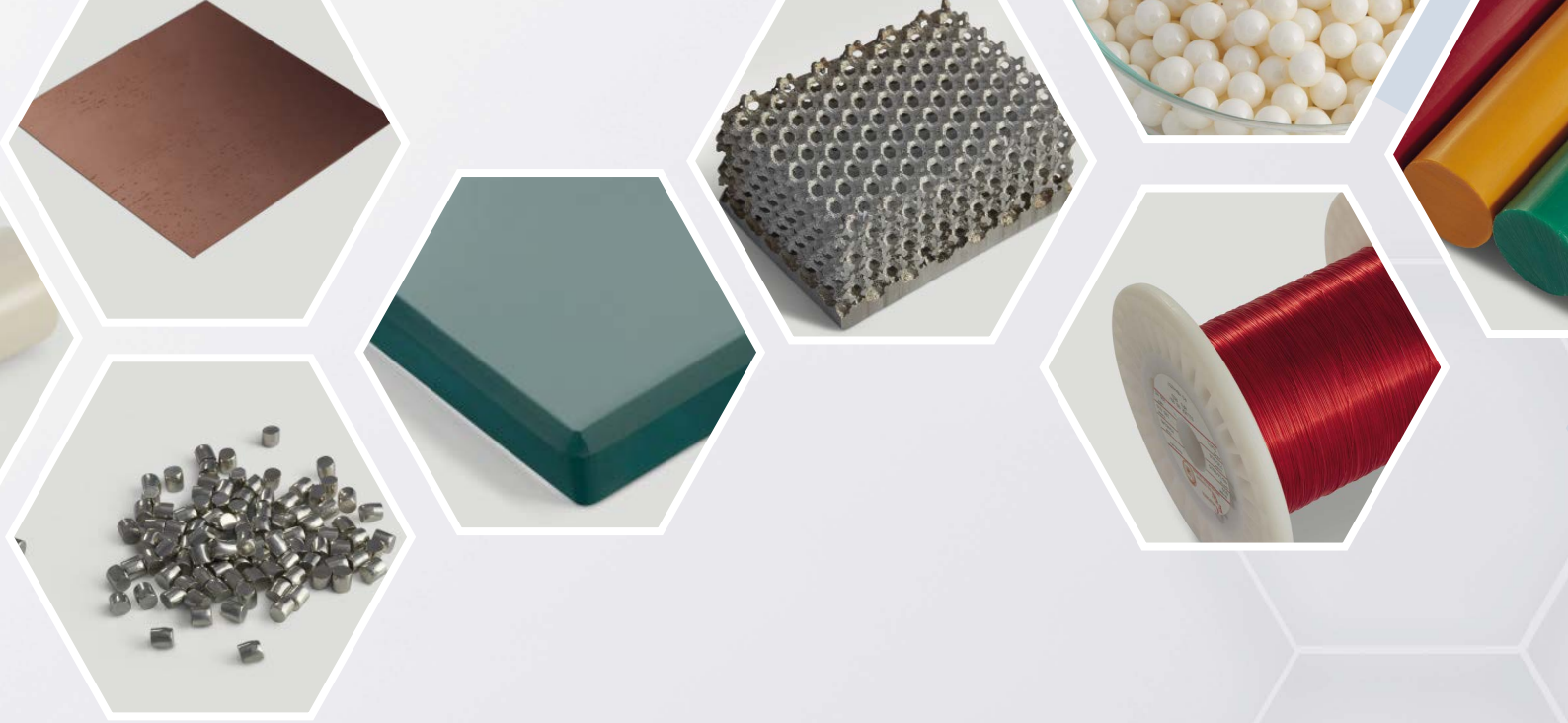


I tuoi benefici

- **Design compatto**
  Lettura in tempo reale di Qubit Superconduttivi (fino a 64) in modalità sfalsata nel tempo o in parallelo.
- **Parametri efficienti**
  Gestione di frequenze fino a 8.5 GHz con banda passante garantita di 1 GHz, senza necessità di calibrazione del mixer.
- **Prestazioni eccezionali**
  Lettura ottimale del segnale con latenza minima ed utilizzando filtri abbinati e discriminazione multi-stato.
- **Funzionalità pronte all'uso**
  Caratterizza e calibra il sistema velocemente con la spettroscopia veloce di risonanza.
- **Scalabilità del sistema**
  Dimensiona il tuo Zurich Instruments Quantum Computing Control System in funzione dei tuoi requisiti e con le ultime novità tecnologiche.

Zurich Instruments

Contattaci oggi
www.zhinst.com



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

POWER SUPPLY

CAEN Electronic Instrumentation

One Stop Shop for All Your Needs!

Power Supply Division
High and Low Voltage Solutions

Designed for Performance and Reliability!

CAEN offers the perfect power supply for any detector:

- Photomultipliers
- Photodiodes
- Avalanche Photodiodes
- Silicon photomultipliers
- Silicon Strips,Drift & Pixel
- Wire Chambers
- MicroMegas
- Resistive Plate Chambers
- Gas Electron Multipliers
- Germanium

Hostile Area:

Magnetic fields and Radiation Tolerant solutions

High Voltage & Low Voltage Power Supplies Products

Universal Multichannel HV/LV Systems

NIM High Voltage PS

VME High Voltage PS

Desktop and Rack High Voltage PS

PCB High Voltage PS

High Power Low Voltage System

Hostile Area Solutions

www.caen.it

*Small details... **Great differences***