

HANNO COLLABORATO A QUESTO
NUMERO:

B. Ancarani, S. Arcelli, J. D. Barrow,
M. Bellacosa, G. Benedek,
G. Bertin, A. Bettini, F. Borsa,
G. Carraro, E. Coccia, A. Coniglio,
F. Fucito, P. Giannozzi, M. Giorgi,
J. J. Gómez-Cadenas, S. Matarrese,
P. Musso, T. Nakada, F. Pegoraro,
G. Piotto, R. Resta, L. Savio,
S. Solimeno, G. Tonelli, L. Vattuone

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 35 • N. 5 settembre-ottobre 2019 • N. 6 novembre-dicembre 2019

DIRETTORE RESPONSABILE
Luisa Cifarelli

VICEDIRETTORE
Giuseppe Grosso

COMITATO SCIENTIFICO
G. Benedek, A. Bettini,
P. Cenci, S. Centro,
S. Croci, R. Piazza,
E. De Sanctis, S. Falciano,
F. Ferroni, E. Iarocci,
F. Palmonari, R. A. Ricci

SOMMARIO

3 EDITORIALE
L. Cifarelli

5 In memoria di Bruno Preziosi
A. Coniglio, S. Solimeno

SCIENZA IN PRIMO PIANO

7 Geometrical observables
in condensed matter
R. Resta

17 From LHC to FCC
G. Tonelli

FISICA E...

27 Is graphene chemically inert?
G. Carraro, L. Savio, L. Vattuone

34 Software for quantum simulations
of tomorrow
P. Giannozzi

PERCORSI

41 The physics of Leonardo da Vinci
F. Borsa

53 In memoriam of Murray Gell-Mann
F. Fucito

IL NOSTRO MONDO

57 Cerimonia Inaugurale
105° Congresso Nazionale della
Società Italiana di Fisica

61 The Italian Physical Society "Enrico
Fermi" Prize and Medal 2019
M. Giorgi, T. Nakada

65 SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize
and Medal 2019

J. D. Barrow

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

News

69 Il Premio Nobel per la Fisica 2019
S. Matarrese, G. Piotto

74 Fabiola Gianotti confermata alla
guida del CERN
S. Arcelli

76 L'editoria e la SIF: il 2019 fra sfide
e rinnovamento
B. Ancarani

78 Le pubblicazioni online della SIF:
i numeri
M. Bellacosa

79 RECENSIONI(*)

80 IN RICORDO DI(*)
Luigi Aialdo Radicati di Brozolo
(G. Bertin, F. Pegoraro)

81 IN EVIDENZA

82 ANNUNCI

83 INDICE DI VOLUME 35

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

MODALITÀ DI ISCRIZIONE ALLA SIF

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

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

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

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

RINNOVO QUOTE SOCIALI

Il rinnovo della quota sociale può essere effettuato:

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

HOW TO BECOME A SIF MEMBER

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

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

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

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

MEMBERSHIP RENEWAL

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

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

Cari Soci,

eccomi giunta al mio ultimo editoriale, in veste di Presidente, su IL NUOVO SAGGIATORE. Bollettino della Società Italiana di Fisica, fondato nel 1985 su un'idea di Pio Picchi, rinnovato nel suo formato editoriale a partire dal 2008 e affiancato nel 2014 dalla newsletter elettronica SIF PRIMA PAGINA, IL NUOVO SAGGIATORE rappresenta oggi non soltanto la voce della SIF in Italia e all'estero ma anche una nota e apprezzata rivista di diffusione della cultura scientifica.

In questo numero compaiono, come sempre in testa, gli articoli scientifici cui diamo il massimo rilievo, poi di seguito le rubriche che riguardano più propriamente le questioni societarie. Compare anche un breve scritto su Bruno Preziosi, che fu valido e illustre Consigliere della SIF negli anni Settanta e poi Ottanta del secolo scorso, e che tutti ricordiamo con affetto. Vi sono poi le pagine dedicate al Congresso, che quest'anno si è svolto a L'Aquila, presso il GSSI (*Gran Sasso Science Institute*), con notevole successo e grande partecipazione.

Durante il Congresso si sono svolte le elezioni per le cariche sociali della SIF, il cui esito è riportato in dettaglio a pagina 80. Complessivamente ha votato quasi il 44% dei Soci aventi diritto. Una percentuale più alta sarebbe stata preferibile ma si è comunque trattato di una percentuale confrontabile con o addirittura superiore a

quelle ottenute solitamente in altre Società, per esempio l'IOP (*Institute of Physics*) o l'APS (*American Physical Society*), in analoghe consultazioni elettorali.

Il Consiglio si rinnova con due nuovi Consiglieri, Antigone Marino e Bernardo Spagnolo, e un nuovo Presidente, cui sono molto lieta di passare il testimone dopo tanti anni di presidenza. Si tratta dell'illustre collega e amica, Angela Bracco, dell'Università di Milano. Anzi, ne sono proprio felice, trattandosi di un Presidente della SIF al femminile, per la seconda volta in 122 anni di storia della Società!

La SIF chiude il 2019 con un bilancio di previsione che non desta particolari preoccupazioni malgrado l'attuale mutevole scenario dell'editoria scientifica che non sembra voler privilegiare le piccole case editrici. Ma la SIF ha ottimi rapporti e contratti di partenariato internazionale, in particolare con SPRINGER NATURE, che la pongono per ora "in sicurezza". Altra sicurezza deriva dall'efficienza ed efficacia dei suoi uffici editoriali, dalla qualità delle sue riviste proprie, specie LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO che ha superato quest'anno i sette punti di *impact factor*, e dal pregio dei suoi volumi. Dopo la pubblicazione e presentazione alla Biblioteca del Senato del volume "I FISICI SENATORI 1848-1943", sono di imminente uscita: "SCIENTIFIC PAPERS OF ETTORE MAJORANA – A new expanded edition" e "LAURA BASSI – THE WORLD'S FIRST WOMAN PROFESSOR

IN NATURAL PHILOSOPHY – An iconic physicist in Enlightenment Italy" (questi ultimi entrambi in coproduzione SIF e SPRINGER NATURE).

Naturalmente il buon andamento economico della SIF si deve anche e soprattutto al suo virtuoso personale e a un'attenta gestione delle risorse. Tutto ciò le consente di svolgere a Varenna i suoi celebri corsi della *International School of Physics "Enrico Fermi"* e della *EPS-SIF International School on Energy*, di organizzare ogni anno il suo Congresso Nazionale, di bandire i suoi numerosi e ambiti premi per giovani e meno giovani, per realizzare le sue molteplici sponsorizzazioni di eventi, borse, ecc.

Infine, non volendo ripercorrere tutte le tante azioni intraprese dalla SIF durante gli anni della mia presidenza, anche in ambito internazionale grazie alla sua vivace collaborazione con altre Società, specie l'EPS (*European Physical Society*) e l'APS (*American Physical Society*), lascio a voi il compito di farne il repertorio. Mi piace solo ricordarne alcune, partendo dal rapporto "THE IMPACT OF PHYSICS ON THE ITALIAN ECONOMY", commissionato dalla SIF alla Deloitte nel 2014, in collaborazione con i maggiori enti di ricerca italiani; passando per la battaglia per l'Associazione professionale dei fisici e poi per l'Ordine professionale dei chimici e fisici (andato in porto dopo varie "fibrillazioni"), per il quale la SIF continua ad attivarsi tramite varie istituzioni, in particolare la ConPER (Consulta dei Presidenti degli Enti



di Ricerca); e finendo con la recentissima e immediata sottoscrizione da parte della SIF della lettera aperta a sostegno dell'Istruzione e della Ricerca come aree prioritarie per l'Europa. La lettera ha ottenuto un insperato successo e permesso di modificare il titolo del portafoglio del nuovo Commissario Europeo M. Gabriel da "Innovation and Youth" a "Education,

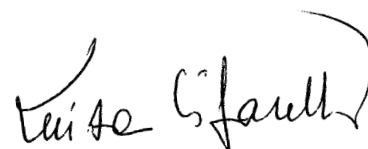
Research, Culture, Innovation and Youth".

Giunta ora al termine del mio mandato, ringrazio di cuore la SIF e il suo personale. Ringrazio tutti i Consiglieri con i quali ho avuto l'onore di collaborare e formulo i miei più calorosi auguri al Presidente e ai Consiglieri neoeletti.

A tutti i Soci della SIF, che con il loro sostegno e la loro fiducia mi hanno

concesso in tutti questi anni una favolosa e indimenticabile opportunità, i miei più vivi ringraziamenti.

Buon 2020!



Dear Members,

here comes my last editorial, as President, on IL NUOVO SAGGIATORE. Bulletin of the Italian Physical Society, founded in 1985 on an idea by Pio Picchi, renewed in its editorial format since 2008 and supported in 2014 by the electronic newsletter SIF PRIMA PAGINA, IL NUOVO SAGGIATORE represents today not only the voice of SIF in Italy and abroad but also a well-known and appreciated magazine for the dissemination of scientific culture.

In this issue, the scientific articles, to which we give the greatest importance, appear as always in the head, then follow the sections that more properly concern societal matters. There is also a short article on Bruno Preziosi, who was a valid and illustrious SIF Councillor in the 1970s and then the 1980s, and which we all remember fondly. Then follow the pages dedicated to the Congress, which this year took place in L'Aquila, at the GSSI (Gran Sasso Science Institute), with considerable success and great participation.

During the Congress the elections for the societal offices of the SIF were held, the outcome of which is reported in detail on page 80. Overall, almost 44% of eligible Members voted. A higher percentage would have been preferable but it was still a percentage comparable with or even higher than those usually obtained in other Societies, for example the IOP (Institute of Physics) or the APS (American Physical Society), in similar electoral consultations.

The Council renews itself with two new Councillors, Antigone Marino and Bernardo Spagnolo, and a new President, to whom I am very happy to pass the baton after so many years of presidency. It is the eminent colleague and friend, Angela Bracco, from

the University of Milan. Indeed, I am really happy to do this with a female SIF President, the second case in 122 years of the Society's history!

The SIF closes 2019 with a budget that does not raise particular concerns despite the current changing scenario of scientific publishing that does not seem to want to favor small publishing houses. But the SIF has excellent relations and international partnership contracts, in particular with SPRINGER NATURE, which for now "secured" it". Another security factor derives from the efficiency and effectiveness of its editorial offices, from the quality of its own journals, especially *LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO*, which exceeded this year seven points of impact factor, and from the value of its volumes. After the publication and presentation at the Library of the Italian Senate of the volume "*I FISICI SENATORI 1848-1943*", the upcoming publications are: "SCIENTIFIC PAPERS OF ETTORE MAJORANA – A new expanded edition" and "LAURA BASSI – THE WORLD'S FIRST WOMAN PROFESSOR IN NATURAL PHILOSOPHY – An iconic physicist in Enlightenment Italy" (the latter both co-produced by SIF and SPRINGER NATURE).

Of course, the good economic performance of the SIF is also and above all due to its virtuous personnel and careful management of resources. All this allows it to hold in Varenna its famous courses of the International School of Physics "Enrico Fermi" and of the EPS-SIF International School on Energy, to organize every year its National Congress, to establish its numerous and coveted awards for young and less young people, to carry out his multiple sponsorships of events, scholarships, etc.

Finally, since I don't want to retrace all the many actions taken by the SIF during the

years of my presidency, also internationally thanks to its lively collaboration with other Societies, especially the EPS (European Physical Society) and the APS (American Physical Society), I leave it to you to do the repertoire. I just like to remember some of them, starting from the report "THE IMPACT OF PHYSICS ON THE ITALIAN ECONOMY", commissioned by the SIF to Deloitte in 2014, in collaboration with the major Italian research institutions; passing through the battle for the Association of professional physicists and then for the Order of professional chemists and physicists (which was carried out after various "fibrillations"), for which the SIF continues to be active through various institutions, in particular ConPER (*Consulta dei Presidenti degli Enti di Ricerca*); and ending with the very recent and immediate signing by the SIF of the open letter in support of Education and Research as priority areas for Europe. The letter has achieved an unexpected success and allowed to modify the portfolio's title of the new European Commissioner M. Gabriel from "Innovation and Youth" to "Education, Research, Culture, Innovation and Youth".

Having reached this year the end of my mandate, I sincerely thank the SIF and its staff. I thank all the Councillors with whom I have had the honour of collaborating and express my warmest wishes to the President and to the newly elected Councillors.

To all SIF Members, who with their support and trust have granted me in all these years a fabulous and unforgettable opportunity, my warmest thanks.

Happy 2020!

Luisa Cifarelli

Bruno Preziosi

Sant'Angelo del Pesco (IS), 8 giugno 1931 – Ivrea, 26 agosto 2019



Lo scorso mese di agosto è venuto a mancare il Professor Bruno Preziosi, Consigliere della Società Italiana di Fisica dal 1971 al 1973 e dal 1986 al 1988. Spirito generoso e idealista, una vita dedicata allo studio, alla ricerca e alla didattica, Preziosi ha contribuito in maniera determinante alla nascita e alla diffusione della Fisica della Materia in Italia. La sua ultima cattedra all'Università di Napoli Federico II, ma sono tanti gli atenei in tutta Italia che hanno tratto lustro dai suoi insegnamenti.

Il giorno 26 agosto, a Ivrea è venuto a mancare Bruno Preziosi, Professore Emerito dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Originario di Sant'Angelo del Pesco in provincia di Isernia dove era nato l'8 giugno 1931, ha contribuito in maniera determinante alla nascita e alla diffusione della Fisica della Materia a Napoli.

Dopo il liceo a L'Aquila, cominciò l'università a 17 anni laureandosi in Matematica e Fisica discutendo una tesi col Prof. Miranda. Nello stesso periodo fu molto attivo come maestro di scacchi scrivendone su parecchie riviste.

Eduardo Caianiello torna a Napoli nel '56 come ordinario di Fisica, ed attorno a lui cominciò a crearsi un gruppo di Fisica teorica che si concentra sulla rinormalizzazione delle teorie quantistiche dei campi. Preziosi si concentra sulla possibilità di estendere il concetto di regolarizzazione di Hadamard al trattamento delle divergenze.

All'inizio degli anni '60 Marinaro e Preziosi, entrambi assistenti di

Caianiello, presero l'iniziativa di organizzare incontri settimanali sulle tecniche di teoria dei campi applicate alla fisica dei molti corpi. Particolare attenzione fu dedicata agli appunti sulle funzioni di Green presi da Franco Bassani alle lezioni di Robert Schrieffer, tenute all'Università dell'Illinois nel 1959. Nella primavera del '63 Caianiello organizza una scuola a Ravello dedicata alla struttura ed alla assiomatica della teoria dei campi, con particolare riferimento ai problemi a molti corpi.

Alla fine del '64 venne fondato il GSM (poi GNSM, Gruppo Nazionale di Struttura della Materia). A Napoli si costituirono una sezione sperimentale che si occupava di ferromagnetismo e proprietà ottiche dei solidi ed una teorica di sistemi a molti corpi coordinata da Maria Marinaro e Bruno Preziosi.

Attraverso il GNSM Preziosi entra in contatto con Franco Bassani, che a inizio '64 venne chiamato sulla cattedra di Fisica Teorica a Messina. In autunno Preziosi e Iadonisi lo raggiunsero assumendo un incarico di

insegnamento ed avviando ricerche sui centri di colore.

Bassani, sulla base della loro competenza in teoria della diffusione, assegnò ai due napoletani lo studio delle transizioni ottiche dallo stato fondamentale di un centro di colore (F) a stati eccitati. Il gruppetto riuscì dopo un lungo lavoro a trovare dei parametri per il potenziale che davano abbastanza bene le energie di transizione degli stati legati. Inoltre si resero conto dei limiti dell'approssimazione della massa efficace. Questi lavori dettero subito buona fama al nascente gruppo napoletano di fisica dei solidi.

Dopo qualche anno Preziosi e Iadonisi ritornarono a Napoli, dove nel '69 Preziosi tenne il primo corso di fisica dello stato solido, sostituito nell'anno successivo da Iadonisi.

Divenuto Professore ordinario di struttura della materia nel '76, i molti compiti di carattere organizzativo e amministrativo, assunti sia a livello locale che nazionale, non gli impedirono di continuare a occuparsi di tematiche scientifiche collegate a

problemi di *random walk* e di relatività speciale e generale.

Nel '96 Preziosi propose a Guglielmo Tino di collaborare allo sviluppo di una sua idea: eseguire test del principio di equivalenza della relatività generale in prossimità della Terra con interferometri ottici. Ricorda Tino: *"Valutammo diverse idee e per ognuna studiammo la fattibilità sulla base di calcoli lunghi e complicatissimi che Bruno eseguiva velocissimamente su fogli di carta che alla fine avevano i bordi tutti mangiucchiati per la sua abitudine di fare piccole palline quando doveva concentrarsi. Il mio ruolo era di controllare i calcoli e analizzare gli aspetti sperimentali. Il lavoro durò a lungo, giorno e notte senza limiti di orari (salvo l'ora per lui inviolabile della "pennichella"). Il lavoro portò alla pubblicazione nel 1998 di un articolo nella rivista "General Relativity and Gravitation" dal titolo "Possible Tests of Curvature Effects in Weak Gravitational Fields". ... Successivamente gli proposi anche di studiare la possibilità di eseguire test con particelle con massa, atomi per esempio, invece che con fotoni, ma nel frattempo Bruno si era appassionato al problema della velocità della luce e io dopo poco mi trasferii da Napoli a Firenze. A Firenze decisi di avviare esperimenti di test della relatività generale con orologi e interferometri atomici che hanno portato a nuovi test del principio di equivalenza e alla misura della curvatura del campo gravitazionale. Bruno era per me una figura quasi mitica: mia madre*

me ne aveva spesso parlato perché da studentessa di Fisica a Napoli lo aveva conosciuto come giovane esercitante; nel dipartimento di Fisica era chiaramente la persona di riferimento per tutti; e poi era stato a Cuba ad aiutare la rivoluzione!"

Nel 2004 avvia una proficua collaborazione con Giuseppe Marmo sulla struttura dello spazio-tempo, con particolare attenzione ai gruppi relativistici.

Preziosi è stato Direttore dell'Istituto di Fisica Teorica, ha fatto parte del Consiglio di Presidenza della Società Italiana di Fisica, ha partecipato agli organi direttivi del Gruppo Nazionale Struttura della Materia (del CNR). Negli anni '80 è stato eletto membro del Comitato per le Scienze Fisiche del CNR, con funzioni di Vice-Presidente, e simultaneamente membro, per due trienni, del Comitato consultivo Consiglio Universitario Nazionale (CUN) per la Fisica per due trienni. È stato direttore del Dipartimento di Fisica e membro del Consiglio di Amministrazione della Federico II. È stato anche socio dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche della Società Nazionale di Scienze, Lettere e Arti in Napoli.

Importante è stata l'influenza di Bruno sul percorso scientifico di molti ricercatori. È stato un esempio di rigore, generosità e saggezza. È stato decisionista nel promuovere gli insegnamenti di fisica della materia ma anche uomo di mediazioni. Sempre

attento agli altri e al sociale. Da direttore apriva l'istituto al mattino e lo chiudeva la sera dopo aver fatto il giro di tutti gli studi per vedere se c'era ancora qualcuno. Idealista, desideroso di aiutare gli altri sia nel sociale che negli impegni universitari. Aperto al nuovo e a tutto ciò che significasse progresso nel senso più ampio, a partire dai modi della sua militanza politica fino agli impegni organizzativi nell'Università italiana e nella creazione di gruppi scientifici nazionali. Ha fondato nel suo paese una cooperativa agricolo-zootecnica, coinvolgendo anche altri fisici napoletani. Molto attivo nel GNSM, dove per molti anni fu a fianco del Presidente Daniele Sette. Si impegnò come Membro del CUN. Nel '70 e '71 si recò a Cuba su richiesta di quel Governo con un gruppo di fisici napoletani per ristrutturare i programmi di matematica e fisica di quella scuola secondaria e per far nascere la fisica nella locale Università.

Fin nell'ultimo periodo voleva sempre uscire perché poteva esserci qualcuno che aveva bisogno. Quando era studente durante l'estate faceva lezione d'inglese ai suoi compaesani che stavano per emigrare in America o Australia in modo che sapessero i rudimenti della lingua.

A. Coniglio, S. Solimeno
Università di Napoli Federico II

GEOMETRICAL OBSERVABLES IN CONDENSED MATTER

ELECTRICAL POLARIZATION, ORBITAL MAGNETIZATION, AND MORE

RAFFAELE RESTA

Istituto Officina dei Materiali (CNR-IOM), Trieste, Italy

Donostia International Physics Center, San Sebastián, Spain

Dedicated to the memory of my dear friends and colleagues

Sandro Massidda (1955-2017)

and Alessandro De Vita (1965-2018)

Some intensive phenomenological observables of condensed matter evaded for many years a sound microscopic definition, and severely challenged quantum-mechanical calculations: macroscopic polarization and the orbital term in macroscopic magnetization are among them. The field has undergone a genuine revolution since the early 1990s; it is now clear that these two observables have a geometrical nature. Polarization is essentially a geometric phase (Berry phase) of the ground-state wavefunction. Orbital magnetization has a geometrical expression as well; other geometrical observables were identified over the years. Here we provide a state-of-the-art outline of the field.

1 The context

All of the present review is in the framework of band-structure theory, which is –since the 1930s– the main theoretical tool for addressing both ground-state and excitation properties of a large class of materials: crystalline solids whose electrons are well described at a mean-field level. Band-structure theory amounts to considering noninteracting electrons in a lattice-periodical one-body potential $V(\mathbf{r})$. As for the choice of the appropriate $V(\mathbf{r})$, it has been mostly semiempirical until the late 1970s [1], and mostly first-principle (either Hartree-Fock or Kohn-Sham) afterwards [2, 3].

The electronic ground state is uniquely defined in terms of the lowest one-electron orbitals, occupied according to Pauli's principle up to the Fermi level; several ground-state observables have a simple expression in terms of these orbitals. There exist, however, ground-state observables which for many years eluded solid-state theory: most notably macroscopic electrical polarization and orbital magnetization. Even the very *definition* of what these observables are –as given in the most popular textbooks [1, 4]– is flawed, not implementable in practical calculations.

A new paradigm appeared in the early 1990s, when it became clear what polarization *really is*, and how it can be computed. The modern theory of polarization is based on a geometric phase (Berry phase) [5, 6]; the geometrical nature of other ground-state observables has been elucidated over the years. The adjective “geometrical” does not refer to the geometry of the ordinary (coordinate) space; it refers instead to the quantum geometry in the Hilbert space of the state vectors, as sketched in **Box 1**. In the cases discussed here, the relevant state vectors are the occupied one-body orbitals.

Box 1

Quantum geometry

The funding concept in geometry is distance. Let $|\Psi_1\rangle$ and $|\Psi_2\rangle$ be two quantum states in the same Hilbert space: we adopt for their distance the expression

$$\mathcal{D}_{12}^2 = -\ln |\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle|^2,$$

which vanishes when the states $|\Psi_1\rangle$ and $|\Psi_2\rangle$ coincide, while it diverges when the states $|\Psi_1\rangle$ and $|\Psi_2\rangle$ are orthogonal. The states $|\Psi_1\rangle$ and $|\Psi_2\rangle$ are defined up to an arbitrary phase factor: fixing this factor amounts to a gauge choice.

The distance is clearly gauge-invariant; it can equivalently be rewritten as

$$\mathcal{D}_{12}^2 = -\ln \langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle - \ln \langle \Psi_2 | \Psi_1 \rangle,$$

where the two terms are not separately gauge-invariant. While the distance is obviously real, each of the two terms is in general a complex number. If we write

$$\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle = |\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle| e^{i\varphi_{21}},$$

then the imaginary part of each of the two terms assumes a transparent meaning:

$$-\operatorname{Im} \ln \langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle = \varphi_{12}, \quad \varphi_{21} = -\varphi_{12}.$$

Besides the metric, an additional geometrical concept is therefore needed: the connection, which fixes the relative phases between two states in the Hilbert space.

The connection is arbitrary and cannot have any physical meaning by itself. Nonetheless, after the groundbreaking paper by Michael Berry, published in 1984, several physical observables are expressed in terms of the connection and related quantities [6].

Fundamental geometrical quantities are the quantum metric and the Berry connection, defined as the differentials of $\mathcal{D}_{12}^2$ and of φ_{12} , respectively, when $|\Psi_2\rangle$ is varied in a neighborhood of $|\Psi_1\rangle$. These two fundamental quantities are defined in terms of the state vectors solely; other geometrical quantities may involve the Hamiltonian as well (and no other operator).

2 Geometry in Bloch space

Owing to the lattice periodicity of the one-body Hamiltonian $\mathcal{H}$, the orbitals assume the Bloch form: $|\psi_{j\mathbf{k}}\rangle = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} |u_{j\mathbf{k}}\rangle$, where $\mathbf{k}$ is the Bloch vector in the first Brillouin zone (BZ). The $|u_{j\mathbf{k}}\rangle$ orbitals are eigenstates of $\mathcal{H}_{\mathbf{k}} = e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \mathcal{H} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ with eigenvalues $\epsilon_{j\mathbf{k}}$. The $|\psi_{j\mathbf{k}}\rangle$ at different $\mathbf{k}$ values are orthogonal, hence their quantum distance is infinite. We will consider instead the geometry of the $|u_{j\mathbf{k}}\rangle$, in the Hilbert space of the lattice-periodical functions. Both the distance and the connection are thus expressed (see Box 1) in terms of the scalar products $\langle u_{j\mathbf{k}} | u_{j'\mathbf{k}'} \rangle$; the corresponding differential forms are

$$(1) \quad D_{\mathbf{k}, \mathbf{k}+d\mathbf{k}}^2 = g_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) dk_{\alpha} dk_{\beta}, \quad \varphi_{\mathbf{k}, \mathbf{k}+d\mathbf{k}} = \mathcal{A}_{\alpha}(\mathbf{k}) dk_{\alpha},$$

where $g_{\alpha\beta}(\mathbf{k})$ is the quantum metric tensor and $\mathcal{A}_{\alpha}(\mathbf{k})$ is known as the Berry connection; summation over Cartesian indices is implicit (here and throughout).

For an insulating solid with n occupied bands the metric and the connection are a geometrical property of the occupied Bloch manifold; their explicit expressions are

$$(2) \quad g_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) = \text{Re} \sum_{j=1}^n \langle \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} | \partial_{k_\beta} u_{j\mathbf{k}} \rangle - \sum_{jj'=1}^n \langle \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} | u_{j'\mathbf{k}} \rangle \langle u_{j'\mathbf{k}} | \partial_{k_\beta} u_{j\mathbf{k}} \rangle,$$

$$(3) \quad \mathcal{A}_\alpha(\mathbf{k}) = i \sum_{j=1}^n \langle u_{j\mathbf{k}} | \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} \rangle.$$

A third important quantity in differential geometry is the curl of $\mathcal{A}(\mathbf{k})$, known as the Berry curvature:

$$(4) \quad \Omega_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) = \partial_{k_\alpha} \mathcal{A}_\beta(\mathbf{k}) - \partial_{k_\beta} \mathcal{A}_\alpha(\mathbf{k}).$$

Since we will need the curvature even in metals, it is expedient to write its most general form as

$$(5) \quad \Omega_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) = i \sum_{\epsilon_{j\mathbf{k}} \leq \mu} (\langle \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} | \partial_{k_\beta} u_{j\mathbf{k}} \rangle - \langle \partial_{k_\beta} u_{j\mathbf{k}} | \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} \rangle),$$

where μ is the Fermi level. It is worth remarking that all of the above forms are real; the connection is a 1-form and is gauge-dependent, while both the metric and the curvature are 2-forms and are gauge-invariant.

The quantum distance and metric are at the root of the modern theory of the insulating state, which addresses all insulators –particularly those where band-structure theory is inadequate– and is therefore beyond the scope of the present work; to the interested reader we mention the recent review of ref. [7]. In the following we will instead address the connection, the curvature, and other related geometrical forms in band insulators and band metals.

3 Modern theory of polarization

Macroscopic electrical polarization only makes sense for insulators which are charge-neutral in average, and is comprised of an electronic (quantum) term and a nuclear (classical) term. Each of the terms separately depends on the choice of the coordinate origin, while their sum is translationally invariant. The basic tenet of the modern theory is that the electronic term is a Berry phase, expressed as a BZ integral of the Berry connection. Such integral is implemented –in its discretized version– in most electronic structure codes, and is routinely used to compute the polarization of a large class of solids [2, 3, 6].

For the sake of simplicity, we outline the theory over the simple case of a quasi-one-dimensional system (a stereoregular polymer), where the polarization P is the dipole per unit length and has the dimensions of a pure charge. The Bloch vector k is one-dimensional, and the theory yields the electronic term in P as

$$(6) \quad P_{\text{el}} = -e \frac{\gamma_{\text{el}}}{2\pi}, \quad \gamma_{\text{el}} = 2 \int_{\text{BZ}} dk \mathcal{A}(k),$$

where e is the unit charge and the factor of two accounts for double orbital occupancy. We have already observed that $\mathcal{A}(k)$ is gauge-dependent; its BZ integral, instead, is gauge-invariant but is multivalued: it is only defined modulo 2π .

Even the nuclear term can be converted to a phase form; if the nuclei of charge eZ_ℓ in the unit cell sit at the positions X_ℓ along the polymer axis, it is expedient to define

$$(7) \quad \gamma_{\text{nuc}} = \text{Im} \ln e^{-i \frac{2\pi}{a} \sum_\ell Z_\ell X_\ell},$$

where a is the lattice constant. The total polarization is thus

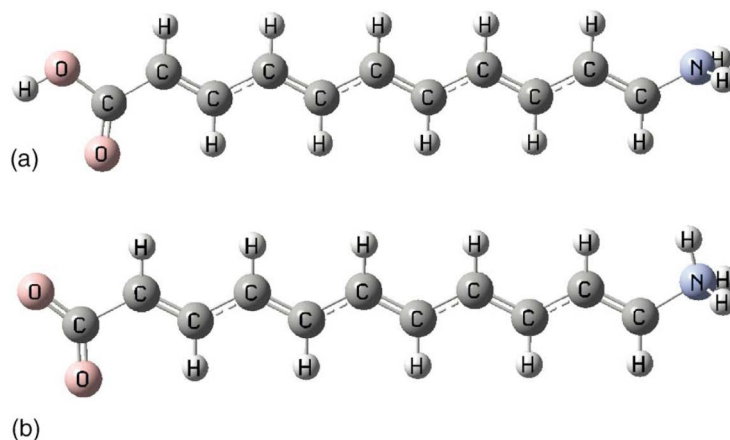


Fig. 1 A centrosymmetric polymer with two different terminations: alternant trans-polyacetylene. Here the “bulk” is five monomers long. After ref. [9].

$$(8) \quad P = -e \frac{\gamma}{2\pi}, \quad \gamma = \gamma_{\text{el}} + \gamma_{\text{nucl}}.$$

In the presence of inversion symmetry $P = -P$, hence γ is either zero or $\pi \pmod{2\pi}$: this has clearly a one-to-one mapping to $\mathbb{Z}_2$, the additive group of the integers modulo two. The polarization of a centrosymmetric polymer is in fact topological; arguably, it is the simplest occurrence of a $\mathbb{Z}_2$ topological invariant in condensed-matter physics. Similar arguments lead to the quantization of the soliton charge in polyacetylene, whose topological nature was discovered by Su, Schrieffer, and Heeger back in 1979 [8].

4 Multivalued nature of polarization

Macroscopic polarization $\mathbf{P}$ is phenomenologically defined by addressing bounded samples of an insulating homogenous material. It is the electrical dipole divided by the sample volume, in the large-sample limit:

$$(9) \quad \mathbf{P} = \frac{\mathbf{d}}{V} = \frac{1}{V} \int d\mathbf{r} \, \mathbf{r} \rho(\mathbf{r}).$$

The integral in eq. (9) is clearly dominated by boundary contributions, and does not make any sense for an unbounded sample, where $\rho(\mathbf{r})$ is lattice periodical and extends over all space: this is the reason why the polarization problem remained unsolved until the 1990s, and wrong statements continue to appear even afterwards [4]. According to the modern theory, the bulk value of $\mathbf{P}$ is a geometric phase of the crystalline orbitals (plus the nuclear contribution). The density $\rho(\mathbf{r})$ obtains instead from the square modulus of the crystalline orbitals: therein, any phase information is obliterated.

In the simple case of a quasi-one-dimensional system the bulk polarization, eq. (8), has a modulo e ambiguity. This may appear a disturbing mathematical artefact; it is instead a key feature of the real world. Band-structure theory addresses unbounded samples, and the modulo ambiguity is fixed only after the sample termination is specified. We are going to show this in detail on the paradigmatic example of polyacetylene, where the modern theory yields $P = 0 \pmod{e}$: it is a topological $\mathbb{Z}_2$ -even case.

We consider two differently terminated samples of trans-polyacetylene, as shown in [fig. 1](#): notice that in both cases the molecule as a whole is *not* centrosymmetric, although the bulk is. The dipoles of such molecules have been computed for several lengths from the Hartree-Fock ground state, as provided by a standard quantum-chemistry code [9]. The dipoles per monomer are plotted in [fig. 2](#):

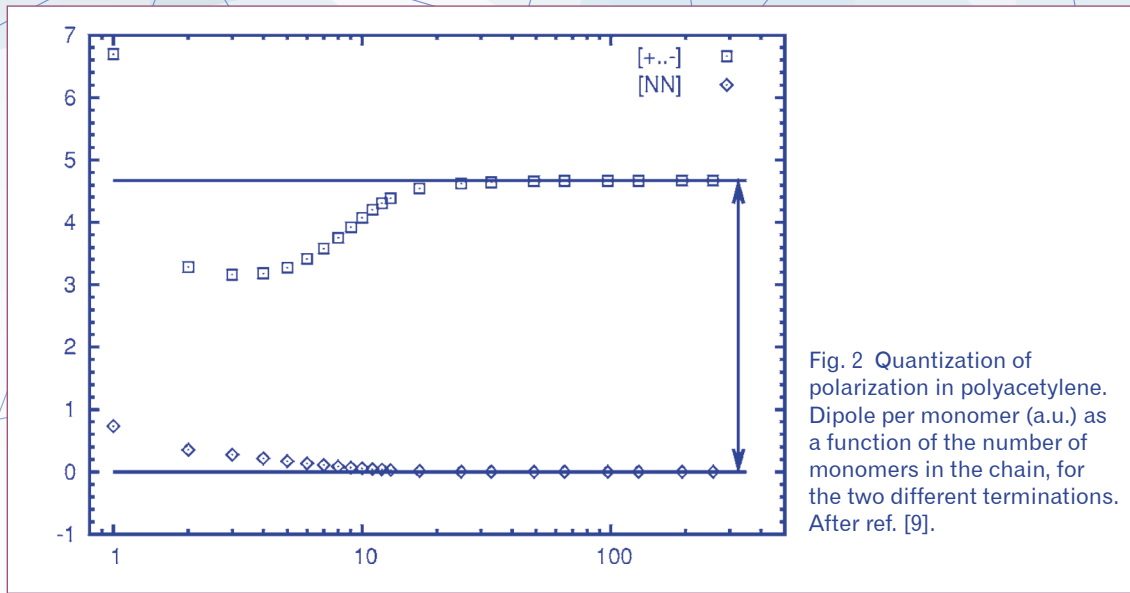


Fig. 2 Quantization of polarization in polyacetylene. Dipole per monomer (a.u.) as a function of the number of monomers in the chain, for the two different terminations. After ref. [9].

for small lengths both dipoles are nonzero, as expected, while in the large-chain limit they clearly converge to a quantized value. Since the lattice constant is $a = 4.67$ a.u., the phenomenological definition of eq. (9) yields $P = 0$ and $P = e$ for the two cases; we have obviously replaced the volume V with the length, *i.e.* the number of monomers times a .

The results in fig. 2 are in perspicuous agreement with the modern theory: in the two bounded realizations of the same quasi-one-dimensional periodic system the dipole per unit length assumes –in the large-system limit– two of the values provided by the theory. Insofar as the system is unbounded the modulo e ambiguity in the P value cannot be removed.

5 Anomalous Hall conductivity

Edwin Hall discovered the eponymous effect in 1879; two years later he discovered the anomalous Hall effect in ferromagnetic metals. The latter is, by definition, the Hall effect in the absence of a macroscopic $\mathbf{B}$ field. Nonvanishing transverse conductivity requires breaking of time-reversal symmetry: in the normal Hall effect the symmetry is broken by the applied $\mathbf{B}$ field; in the anomalous one it is spontaneously broken, for instance by the development of ferromagnetic order. The theory of anomalous Hall conductivity in metals has been controversial for many years; since the early 2000s it became clear that, besides extrinsic effects, there is also an intrinsic contribution, which can be expressed as a geometrical property of the occupied Bloch manifold in the pristine crystal. The classical review on the topic is ref. [10].

We indicate with $\sigma_{\alpha\beta}^{(-)}(0)$ the intrinsic contribution only to dc transverse conductivity: its expression is proportional to the Fermi-volume integral of the Berry curvature, *i.e.*

$$(10) \quad \sigma_{\alpha\beta}^{(-)}(0) = -\frac{e^2}{\hbar} \int_{\text{BZ}} \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^d} \Omega_{\alpha\beta}(\mathbf{k}),$$

where $\Omega_{\alpha\beta}(\mathbf{k})$ is given in eq. (5), and d is the dimension ($d = 2$ or 3). This formula, as well as all of the following ones, is given for single-orbital occupancy.

In $2d$ the integral is dimensionless, and in the insulating case the Fermi volume coincides with the whole BZ: a compact orientable manifold in mathematical speak. The celebrated Gauss-Bonnet-Chern theorem (1945) guarantees that in this case $\sigma_{xy}^{(-)}(0)$ is proportional to a topological integer, called the first Chern number $C_1 \in \mathbb{Z}$. In detail:

$$(11) \quad C_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{\text{BZ}} d\mathbf{k} \Omega_{xy}(\mathbf{k}), \quad \sigma_{xy}^{(-)}(0) = -\frac{e^2}{h} C_1.$$

Notice that h/e^2 is the natural resistance unit: one klitzing, equal to about $2.6 \cdot 10^4 \Omega$.

The possible existence of $2d$ insulators with nonzero (and quantized) transverse conductivity was pointed out by Haldane in 1988 (Nobel prize 2016 [11]); actual synthesis of materials which realize the QAHE (quantum anomalous Hall effect) was first achieved in 2013.

Finally, we stress the crucially different role of the impurities in metals and in $2d$ insulators: in the former case –given that longitudinal conductivity is nondivergent– there must necessarily be extrinsic effects, while in the latter case extrinsic effects are ruled out. In insulators the dc longitudinal conductivity is zero, and, as a basic tenet of topology, impurities and disorder have no effect on transverse conductivity insofar as the system remains insulating.

6 Orbital magnetization

In analogy to anomalous Hall conductivity, even spontaneous macroscopic magnetization requires breaking of time-reversal symmetry, for instance by the development of ferromagnetic order. Magnetization is comprised of two terms: a spin and an orbital one, which can be experimentally resolved. As for the former term, in the present context it is trivial, simply proportional to the cell-averaged spin density. The latter term accounts (in common materials) for 5-10% of the total, and is a nontrivial geometrical ground-state property. We address here the orbital term only; the moment per unit volume is (in Gaussian units)

$$(12) \quad \mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V} = \frac{1}{2cV} \int d\mathbf{r} \, \mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r})$$

in the large-system limit, where $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ is the microscopic orbital current. This expression has the same drawbacks as the analogous eq. (9): it does not make any sense in the framework of band-structure theory. We also observe that, while $\mathbf{P}$ is defined for insulators only, $\mathbf{M}$ is a property of both insulators and metals.

Within the modern theory of orbital magnetization [6], completed in 2006, $\mathbf{M}$ is the Fermi volume integral of a geometrical integrand, closely related to the Berry curvature:

$$(13) \quad M_\gamma = -\frac{ie}{2\hbar c} \varepsilon_{\gamma\alpha\beta} \sum_{\epsilon_j \mathbf{k} \leq \mu} \int_{\text{BZ}} \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^d} \langle \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} | (\mathcal{H}_{\mathbf{k}} + \epsilon_{j\mathbf{k}} - 2\mu) | \partial_{k_\beta} u_{j\mathbf{k}} \rangle,$$

where $\varepsilon_{\gamma\alpha\beta}$ is the antisymmetric tensor. The similarity of the two expressions for $\mathbf{M}$ and for the anomalous Hall conductivity, eqs. (5) and (10), is evident. In the latter case the integrand is the Berry curvature, whose only entries are the $\mathbf{k}$ -derivatives of the orbitals; in the former case, the Hamiltonian $\mathcal{H}_{\mathbf{k}} = e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \mathcal{H} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ and its eigenvalues also enter the formula. Both integrands are gauge-invariant 2-forms.

Given the analogy between their phenomenological expressions, eqs. (9) and (12), one would expect $\mathbf{P}$ and $\mathbf{M}$ to be expressed by similar geometrical observables; surprisingly, this is not the case. $\mathbf{P}$ is a multivalued quantity, obtained as the BZ integral of a gauge-dependent integrand, while $\mathbf{M}$ is single-valued, and obtains as a Fermi volume (BZ in insulators) integral of a gauge-invariant integrand. The profound reasons for this fundamental difference are commented below.

7 Magneto-optical sum rule

An incorrect belief, widespread in the synchrotron-physics community, holds that orbital magnetization is experimentally accessible via measurements of magnetic circular dichroism. The belief is based on a popular 1992 paper [12], which unfortunately is flawed [13]. The so-called dichroic f -sum rule for the integrated spectrum measures indeed a geometrical ground-state property of the solid, but this property *does not coincide* with the orbital magnetization $\mathbf{M}$.

The difference in absorption between light with negative and positive helicities is given by twice the imaginary part of the antisymmetric optical conductivity $\sigma_{\alpha\beta}^{(-)}(\omega)$. The dichroic f -sum rule reads [14]

$$(14) \quad \text{Im} \int_0^\infty d\omega \sigma_{\alpha\beta}^{(-)}(\omega) = -\frac{i\pi e^2}{\hbar^2} \sum_{\epsilon_{j\mathbf{k}} \leq \mu} \int_{\text{BZ}} \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3} \langle \partial_{k_\alpha} u_{j\mathbf{k}} | (\mathcal{H}_{\mathbf{k}} - \epsilon_{j\mathbf{k}}) | \partial_{k_\beta} u_{j\mathbf{k}} \rangle;$$

comparison to eq. (13) perspicuously shows the difference between the two geometrical ground-state observables.

8 Chern forms and Chern-Simons forms

We have addressed here four geometrical observables of the electronic ground state; it is clear from the above that they belong to two very different classes. $\mathbf{P}$ makes sense in insulators only, is multivalued, and is expressed as the $\mathbf{k}$ -space integral of a gauge-dependent integrand. The other three geometrical observables, instead, make sense in both insulators and metals, are single-valued, and are expressed as $\mathbf{k}$ -space integrals of gauge-invariant integrands.

The alert reader may also have noticed that the main entry of $\mathbf{P}$ is a 1-form (the Berry connection), while in all the other cases the main entries are 2-forms (the Berry curvature and related quantities). It is also worth observing that, at the bare-bone level, polarization is essentially a 1d phenomenon: it can be defined and understood even for 1d electrons. The other observables, instead, require at least dimension-two: in the magnetization case, for instance, one may address 2d electrons in the xy plane and $\mathbf{M}$ normal to it.

In order to clearly understand the profound difference between the two classes, in the following we focus only on the electronic polarization of a 1d system, eq. (6), and on the anomalous Hall conductivity of a 2d insulator, eq. (11). The former is the 1d BZ integral of the Berry connection, the latter is the 2d BZ integral of the Berry curvature. Expressions like these were well known to mathematicians well before becoming endowed with physical content.

The calculus of differential forms has a long history, related to the names of Poincaré, Cartan, Pontryagin, Weyl, and culminated with the work of Chern (since the 1940s) and Simons (1970s). The key tools are the generalized vector product (wedge product) and the generalized curl (exterior derivative). A basic tenet of differential geometry is that spaces of even and odd dimensions behave quite differently. In dimension $2n$ one may define the n -th Chern form, whose integral over a compact orientable manifold is quantized: eq. (11) is just a manifestation of the theorem for $n = 1$. Furthermore, the exterior derivative of a Chern form vanishes; by Poincaré's lemma, this guarantees that the Chern form is (locally) the exterior derivative of a $2n - 1$ form, called a Chern-Simons form. Clearly, in our case the Chern-Simons 1-form is the Berry connection.

In eqs. (3) and (4) we have defined the connection (Chern-Simons 1-form) and the curvature (first Chern form) starting from the scalar products $\langle u_{j\mathbf{k}} | u_{j'\mathbf{k}'} \rangle$. Using the same ingredients, the mathematical literature provides the explicit expression for the Chern-Simons 3-form: like its 1-form analogue, it is gauge-dependent but its BZ integral is gauge-invariant and multivalued. Therefore in a 3d crystalline insulator the Chern-Simons 3-form defines a geometrical ground-state property, which can be expressed as an angle θ_{CS} : a kind of “higher order” Berry phase. In presence of some symmetries, θ_{CS} is equal to either zero or π , mod 2π , and becomes therefore a topological $\mathbb{Z}_2$ index, in full analogy with the phase γ in centrosymmetric 1d systems.

Last but not least: which physical observable is defined by θ_{CS} ? The answer was provided by Qi, Hughes, and Zhang in 2008: θ_{CS} yields one of the terms –called the “axion” term– in the magnetoelectric response of a crystalline insulator [6]. The bulk magnetoelectric response is multivalued, and the ambiguity is fixed only after the sample termination is specified (in analogy, again, with polarization).

Fig. 3 A bounded flake of "Haldanium": the one shown here has 1806 sites. In the text we consider three cases: the whole flake; the "bulk" region (1/4 of the sites) and the central cell (two sites). After ref. [19].

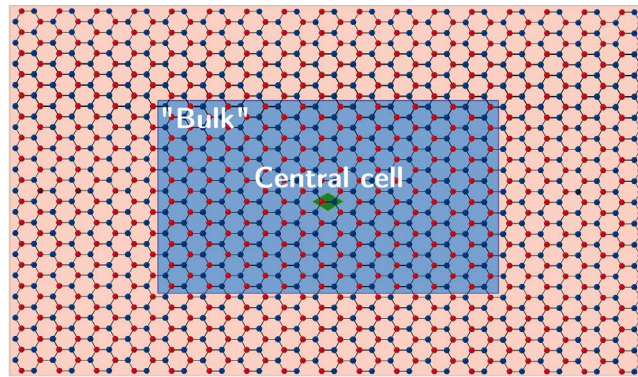
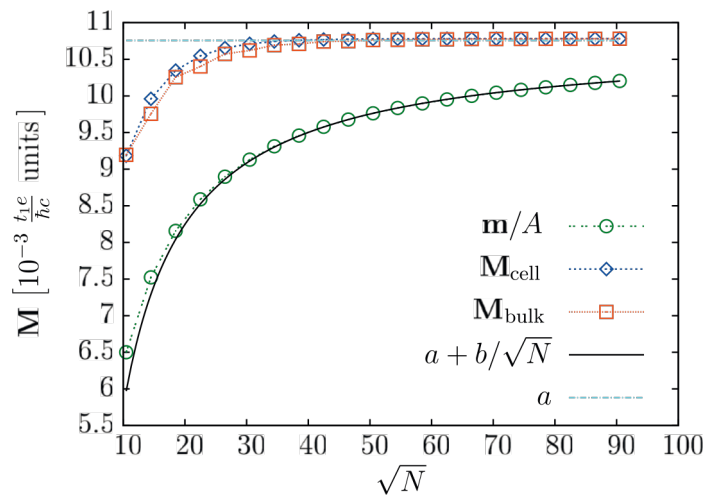


Fig. 4 Green circles: orbital magnetization, evaluated from the textbook expression $\mathbf{m}/A$, as a function of the flake size, in the insulating case. The plots labeled as $\mathbf{M}_{\text{cell}}$ and $\mathbf{M}_{\text{bulk}}$ demonstrate the locality of orbital magnetization, as explained in the text. The horizontal dashed line is provided by the $\mathbf{k}$ -space formula. After ref. [16].



9 Local vs. nonlocal observables

Several bulk observables in condensed matter admit a local definition as an intensive property, which may vary over macroscopic lengths: textbook examples are temperature and pressure. In the quantum-mechanical realm, macroscopic spin-magnetization density is a local intensive property, which e.g. may assume different values in different homogeneous regions of a heterostructure. We may thus address the issue whether even the above geometrical observables can be defined locally in $\mathbf{r}$ space and thus admit a "density".

The case of polarization $\mathbf{P}$ is obvious after the discussion in sect. 4: "polarization density" is an ill-defined concept. Considering the two cases in fig. 1, it is clear that by accessing the central region only of the polymer the $\mathbf{P}$ value remains undetermined: it crucially depends on the sample termination. On this count, $\mathbf{M}$ and the other two observables addressed above are profoundly different: in fact their bulk value is singlevalued and *not* multivalued. We focus on $\mathbf{M}$ for the time being: when we consider a bounded sample, tinkering with its boundaries cannot alter the $\mathbf{M}$ value: this is in striking contrast with eq. (12), which would indicate a dominant role of boundary currents.

Because of the above, the possibility of defining $\mathbf{M}$ locally, or equivalently of defining an "orbital magnetization density" in $\mathbf{r}$ space, is not ruled out. But all the geometrical observables, as presented so far, have been defined as reciprocal space integrals in the framework of band-structure theory, which by definition deals with macroscopically homogenous solids and lacks spatial resolution. In recent years it has been shown that the single-valued geometrical observables can be alternatively formulated locally in $\mathbf{r}$ -space: $\mathbf{M}$ is dealt with in refs. [15, 16], and the anomalous Hall conductivity is dealt with in refs. [17, 18]. For the sake of completeness, we quote here that even the quantum metric can be made local [19].

10 Orbital magnetization as a local property

In order to illustrate the main point, we consider bounded samples (flakes) of a computational 2d material based on the famous Haldane's model Hamiltonian [6, 11]: it can be regarded as a model for hexagonal boron nitride –a.k.a. gapped graphene– plus "some magnetism" (needed to break time-reversal symmetry). The system is either insulating or metallic according to where the Fermi level μ is set. A typical

“Haldanium” flake is shown in [fig. 3](#); we have addressed flakes of increasing size (at constant aspect ratio), and we have computed $\mathbf{M}$ via several different formulæ [15, 16].

The results are shown in [fig. 4](#) for the insulating case. The circles are obtained by means of eq. (12) (where the flake area A replaces V): $\mathbf{M}$ perspicuously converges to a finite asymptotic value, which coincides with the bulk value, shown as the horizontal dashed line. The latter has been computed for the unbounded sample by means of the (discretized) $\mathbf{k}$ -space integral, eq. (13). We have not proven the locality yet: equation (12) is an $\mathbf{r}$ -space expression, but it is strongly nonlocal and dominated by boundary contributions. In refs. [15, 16] we arrived at an explicit expression for the orbital-magnetization density $\mathfrak{M}(\mathbf{r})$ (see [Box 2](#)). The identity

$$(15) \quad \frac{\mathbf{m}}{A} = \frac{1}{2cA} \int d\mathbf{r} \, \mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r}) = \frac{1}{A} \int d\mathbf{r} \, \mathfrak{M}(\mathbf{r})$$

holds at any flake size, but the *integrands* therein are quite different. This is similar in spirit to what happens when integrating a function by parts, thus reshuffling the integrand in different space regions.

The virtue of $\mathfrak{M}(\mathbf{r})$ is that it behaves like an honest density, *i.e.* it can be integrated over an inner region of the sample (and divided by the area of that region). Figure 4 shows precisely this: diamonds and squares were obtained from integrating $\mathfrak{M}(\mathbf{r})$ over the central cell (two sites) and over the “bulk” region (1/4 of the sites), respectively, as displayed in [fig. 3](#). The conventional formula, eq. (12), converges like the inverse linear dimension of the flake (in both the insulating and the metallic case) to the asymptotic value in the large-flake limit. Remarkably, our novel approach converges much faster; in the insulating case shown here the convergence is exponential.

Box 2

Orbital magnetization density

We consider here a bounded crystallite, or even –more generally– a bounded sample of disordered and macroscopically homogeneous material; the occupied orbitals $|\varphi_j\rangle$, with eigenvalues ϵ_j , are square-integrable. If μ is the Fermi level, the ground-state projector $\mathcal{P}$ is (for each spin channel)

$$\mathcal{P} = \sum_{\epsilon_j \leq \mu} |\varphi_j\rangle \langle \varphi_j|;$$

it uniquely determines the many-body wavefunction, hence any ground-state observable (in the independent-electron framework). Equation (12) reads

$$\mathbf{M} = -\frac{e}{2cV} \sum_{\epsilon_j \leq \mu} \langle \varphi_j | \mathbf{r} \times \mathbf{v} | \varphi_j \rangle = -\frac{e}{2cV} \int d\mathbf{r} \langle \mathbf{r} | \mathbf{r} \times \mathbf{v} \mathcal{P} | \mathbf{r} \rangle,$$

where $\mathbf{v} = i[\mathcal{H}; \mathbf{r}]/\hbar$ is the quantum-mechanical velocity.

All observables –bar the energy itself– are invariant by translation of the energy zero, ergo they are a function of $\mathcal{H} - \mu$; and in fact $\mathcal{P}$ can be formally written as $\mathcal{P} = \theta(\mu - \mathcal{H})$, where θ is the step function. The nasty multiplicative operator $\mathbf{r}$ is unbounded, while instead the commutator $[\mathbf{r}, \mathcal{P}]$ is bounded. The vector field $\mathfrak{M}(\mathbf{r})$, to be interpreted as the orbital magnetization density, may be cast in several equivalent forms [15, 16]. Here we display the ultimate, very elegant, formula:

$$\mathfrak{M}(\mathbf{r}) = -\frac{ie}{2\hbar c} \langle \mathbf{r} | [\mathcal{H} - \mu, [\mathbf{r}, \mathcal{P}]] \times [\mathbf{r}, \mathcal{P}] | \mathbf{r} \rangle;$$

therein $|\mathcal{H} - \mu| = (\mathcal{H} - \mu)(I - 2\mathcal{P})$, *i.e.* $|\mathcal{H} - \mu|$ acts as $\mathcal{H} - \mu$ on the unoccupied orbitals, and as $\mu - \mathcal{H}$ on the occupied ones.

11 Conclusions

We have addressed some of the known geometrical bulk observables within band-structure theory. All of them are expressed as reciprocal-space integrals of a geometrical integrand, but they can be partitioned in two very different classes. The observables of class (i) only make sense for insulators, and are defined modulo 2π (in dimensionless units), while the observables of class (ii) are defined for both insulators and metals, and are single-valued.

As for class (i), only two observables are known: electrical polarization (in dimension 1, 2, or 3), and the “axion” term in magnetoelectric response (in dimension 3) [6]. Mathematics-wise, the former is rooted in a Chern-Simons 1-form, the latter in the corresponding Chern-Simons 3-form. For both cases the modulo ambiguity of the bulk observable is fixed only after the termination of the insulating sample is specified. Notice that not only the bulk, but also the boundary must be insulating; the latter condition is always verified in a quasi-1d system (like the one discussed here), since its boundary is zero-dimensional. In the presence of some protecting symmetry, an observable of class (i) becomes a topological $\mathbb{Z}_2$ index: a $\mathbb{Z}_2$ -even crystalline insulator cannot be “continuously

deformed” into a $\mathbb{Z}_2$ -odd one without closing the gap.

Several observables in class (ii) are known. Here we have addressed the time-reversal odd ones, *i.e.* those which are nonvanishing only in the absence of time-reversal symmetry. They are: intrinsic anomalous Hall conductivity; orbital magnetization; and a popular magneto-optical sum rule. We have shown that, contrary to a widespread belief, magneto-optical measurements cannot access orbital magnetization.

The geometrical observables of class (ii), when evaluated for a bounded sample, do not depend on the sample termination: this key feature owes to the fact that their **k**-space expression is single-valued. Therefore these observables admit a dual representation in **r**-space which is local in nature, *i.e.* they admit a density; the case of orbital magnetization has been discussed in some detail.

Acknowledgments

The author acknowledges very useful discussions with R. Bianco, A. Marrazzo, I. Souza, and D. Vanderbilt, over many years. Work supported by the Office of Naval Research (USA) under grant No. N00014-17-1-2803.

References

- [1] N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, “*Solid State Physics*” (Saunders, Philadelphia) 1976.
- [2] G. Grosso, G. Pastori-Parravicini, “*Solid State Physics*”, second edition (Elsevier, Amsterdam) 2014.
- [3] R. M. Martin, “*Electronic Structure: Basic Theory and Practical Methods*” (Cambridge University Press) 2004.
- [4] C. Kittel, “*Introduction to Solid State Physics*”, 8th edition (Wiley, Hoboken, NJ) 2005.
- [5] R. Resta, *Il Nuovo Saggiatore*, 9(5/6) (1993) 79.
- [6] D. Vanderbilt, “*Berry Phases in Electronic Structure Theory*” (Cambridge University Press, Cambridge) 2018.
- [7] R. Resta, *Riv. Nuovo Cimento*, 41 (2018) 463.
- [8] W. P. Su, J. R. Schrieffer, A. J. Heeger, *Phys. Rev. Lett.*, 42 (1979) 1698.
- [9] K. N. Kudin, R. Car, R. Resta, *J. Chem. Phys.*, 127 (2007) 194902.
- [10] N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, A. H. MacDonald, N. P. Ong, *Rev. Mod. Phys.*, 82 (2010) 1539.
- [11] F. D. M. Haldane, *Rev. Mod. Phys.*, 89 (2017) 040502.
- [12] B. T. Thole, P. Carra, F. Sette, G. van der Laan, *Phys. Rev. Lett.*, 68 (1992) 1943.
- [13] J. Kunes, P. M. Oppeneer, *Phys. Rev. B*, 61 (2000) 15774.
- [14] I. Souza, D. Vanderbilt, *Phys. Rev. B*, 77 (2008) 054438.
- [15] R. Bianco, R. Resta, *Phys. Rev. Lett.*, 110 (2013) 087202.
- [16] A. Marrazzo, R. Resta, *Phys. Rev. Lett.*, 116 (2016) 137201.
- [17] R. Bianco, R. Resta, *Phys. Rev. B*, 84 (2011) 241106(R).
- [18] A. Marrazzo, R. Resta, *Phys. Rev. B*, 95 (2017) 121114(R).
- [19] A. Marrazzo, R. Resta, *Phys. Rev. Lett.*, 122 (2019) 166602.

Raffaele Resta

Raffaele Resta is a retired professor of physics. Previously he served in Trieste, first at SISSA (1983–1994) and then at the University of Trieste (1995–2017). Since the birthdate (about 1980) of the modern computational theory of materials, his mainstream research activity has been in this area, working both at the development of new methods and at actual computations. He has made crucial advances in the understanding of macroscopic polarization, orbital magnetization, magnetoelectric couplings, flexoelectricity, and the nature of the insulating state. He is a fellow of the American Physical Society, and a former (2002–08) Divisional Associate Editor for *Physical Review Letters*.

FROM LHC TO FCC

A NEW SYSTEM OF ACCELERATORS FOR THE FUTURE OF HIGH-ENERGY PHYSICS

GUIDO TONELLI

Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Pisa, Italy

INFN, Sezione di Pisa, Pisa, Italy

CERN, Geneva, Switzerland

The discovery of the Higgs boson marks the triumph of the Standard Model of fundamental interactions. However, despite the unquestionable success, the theory contains no convincing explanation for dark matter and dark energy, asymmetry between matter and antimatter and other important phenomena that characterize our universe. The article discusses the proposal and the physics program of the FCC, Future Circular Colliders, a system of new high-energy accelerators which should be built at CERN as heir to LHC. Through the combination of precision measurements of the Standard Model main parameters and the direct search for new particles or interactions, FCC looks like the most promising scientific infrastructure in the quest for New Physics.

DA LHC A FCC

UN NUOVO SISTEMA DI ACCELERATORI PER IL FUTURO DELLA FISICA DELLE ALTE ENERGIE

1 Una scoperta che ci ha permesso di far luce sulla struttura più intima della materia

Con la scoperta del bosone di Higgs [1–4], annunciata nel 2012 dagli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider (LHC) del CERN, la fisica delle alte energie ha superato una pietra miliare nella storia della conoscenza. Con l'inclusione della nuova particella, il Modello Standard delle interazioni fondamentali (MS) è finalmente completo. La teoria considera la materia composta di *quarks* e leptoni, particelle a spin frazionario cioè fermioni, e descrive le loro interazioni attraverso lo scambio di altre particelle a spin intero, bosoni, che trasportano le interazioni forte, debole ed elettromagnetica. Il modello è semplice e combina assieme in maniera elegante relatività speciale e meccanica quantistica, i due pilastri della fisica moderna. Da un insieme limitato di parametri si può ricavare una quantità incredibile di previsioni molto precise su grandezze osservabili che sono state puntualmente verificate da un numero impressionante di misure sperimentali. E il bosone di Higgs costituisce l'architrave dell'intera costruzione.

La nuova particella è la manifestazione materiale di un campo invisibile, *H*, che, da tempo immemorabile, riempie ogni angolo del nostro universo assegnando una massa distinta a ciascuna particella elementare per tramite dell'interazione con il campo stesso. Con la sua scoperta possiamo ricostruire ciò che è successo quando sono passati appena 10^{-11} s dal Big Bang.

Quando l'universo primordiale in espansione raggiunge una temperatura di circa 100 GeV il meccanismo della rottura di simmetria elettrodebole entra improvvisamente in azione. In quell'istante il campo H cambia di colpo le proprietà del vuoto e le particelle che in esso si propagano vengono differenziate fra loro, per sempre. Il vuoto elettrodebole assegna dinamicamente, tramite le sue interazioni, una massa alle particelle elementari fondamentali. I bosoni W e Z , portatori della forza debole, interagendo fortemente col campo scalare, acquisteranno una massa imponente, rispettivamente di 80.4 e 91.2 GeV e la forza debole risulterà per sempre confinata nelle infime distanze sub-nucleari. Al contrario, incapaci di un'interazione diretta col campo di Higgs, i fotoni rimarranno privi di massa e propagheranno all'infinito l'interazione elettromagnetica. Un meccanismo diverso, analogo all'interazione di Yukawa, regolerà le interazioni del campo scalare con i fermioni fondamentali e definirà le masse di *quark* e leptoni.

Alcuni *quark*, in particolare il *top*, interagiranno così fortemente con il campo di Higgs da diventare particelle estremamente massicce. I *top* saranno così pesanti da non riuscire a formare né stati legati né forme stabili di materia. Al contrario altri *quark* interagiranno così debolmente con la nuova forma di vuoto da acquistare sì una massa, ma davvero molto piccola. È il caso dei *quark up* e *down*, così leggeri da potersi aggregare in triplette, tenute assieme da un mare di gluoni, i portatori della forza forte. Grazie a questo meccanismo, quando sono passati poco più di 10^{-6} s dal Big Bang, si formano i primi protoni: una struttura materiale permanente, carica positivamente ed estremamente stabile, la cui vita media supera l'età attuale dell'universo. Alcuni leptoni speciali, gli elettroni, interagiranno molto debolmente con il campo H e ne ricaveranno una piccolissima massa, proprio il valore giusto per consentire loro, carichi negativamente, di orbitare attorno a un protone e formare atomi stabili. In un battito di ciglia tutto è cambiato per sempre.

La forma attuale di tutta la materia, compresi noi, è stata in qualche modo determinata da quei momenti iniziali. In conseguenza di questo meccanismo gli ingredienti caotici dell'universo primordiale, via via che la temperatura si ridurrà ulteriormente, collasseranno in strutture materiali persistenti; molto più tardi da esse prenderanno forma stelle, galassie e pianeti, incluso uno molto particolare, collocato in una regione confortevole del Sistema Solare, sul quale si svilupperanno molte forme di vita. Grazie al vuoto elettrodebole, questa sottile impalcatura che sorregge le enormi strutture che chiamiamo universo, la materia ha acquistato le caratteristiche che ci sono così familiari.

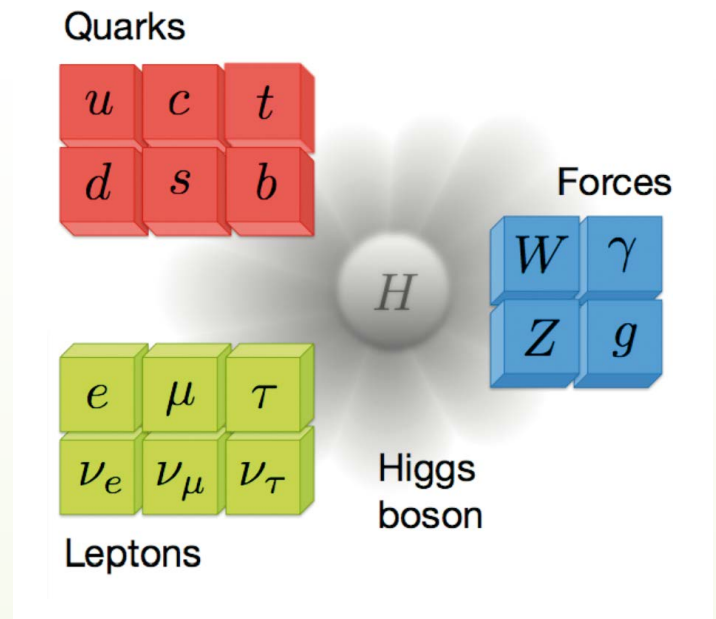


Fig.1 Il Modello Standard.

2 Il problematico trionfo del Modello Standard

La scoperta dell'Higgs segna un altro successo della fisica delle particelle. L'ultimo elemento mancante alla grande costruzione è stato finalmente catturato e il quadro è ormai completo (fig. 1). E tuttavia, mentre celebriamo il trionfo più recente di questa teoria che ha conosciuto così tanti successi, la lista dei problemi aperti, i fenomeni per i quali il MS non fornisce alcuna spiegazione, è francamente imbarazzante. Ci sono buoni motivi di ritenere che la risposta a molti dei quesiti aperti comporterà l'emergere di nuovi paradigmi.

È ben noto che il MS non riesce a spiegare molti fenomeni che giocano un ruolo fondamentale nella dinamica del nostro universo. Per esempio non contiene particelle o forze che consentano di capire materia oscura o energia oscura e neanche ci fornisce meccanismi che diano conto dell'asimmetria fra materia e anti-materia. Infine, e non è un particolare da poco, non include la gravità, come se la più comune fra tutte le forze avesse una natura irriducibile rispetto alle altre interazioni fondamentali descritte dal Modello Standard.

Sappiamo già che prima o poi saremo costretti ad abbandonare la descrizione del mondo di cui oggi siamo così orgogliosi. L'apparire di nuovi campi o di particelle ultra-massicce ci porterà a una descrizione della natura più completa e generale indicata con il nome generico di Nuova Fisica (NF). Ci aspettiamo che essa spieghi la materia fino a una scala di energia molto superiore a quella finora esplorata riducendo il MS a un caso particolare, valido soltanto nel limite delle basse energie.

La bellezza del nostro campo di ricerca è che sappiamo che prima o poi questo succederà ma non sappiamo quando. Potrebbe accadere anche domani, se un nuovo stato della materia venisse scoperto nei dati di LHC; ma ci potrebbero anche volere decenni e magari capiterà soltanto dopo che entrerà in operazione una nuova generazione di potentissimi acceleratori.

Oggi non sappiamo a quale scala di energia il MS perderà la sua validità e dove troveremo le risposte alle questioni per le quali brancoliamo ancora nel buio. Sappiamo comunque che ogni nuova congettura dovrà necessariamente includere il bosone di Higgs e, a sua volta, la nuova particella potrà essere utilizzata come un ulteriore strumento, di grande sensibilità, per esplorare un territorio completamente sconosciuto. Siamo nel bel mezzo di una rivoluzione scientifica i cui contorni ci saranno più chiari, forse, fra qualche decennio.

3 Un nuovo scenario: l'Higgs come portale per la Nuova Fisica

La fisica delle particelle si muove oggi in uno scenario radicalmente diverso rispetto al passato. Negli ultimi quarant'anni il percorso da seguire era indicato con chiarezza: il MS guidava tutte le ricerche e gli sforzi di tutti erano orientati a scoprire, uno dopo l'altro, i componenti ancora mancanti. La ricerca seguiva una specie di percorso obbligato, caratterizzato da alcuni punti di svolta ben definiti. Il primo fu senza dubbio la scoperta della J/ψ nel '74, seguita a breve dalla scoperta della Y nel '77. Gli anni '80 furono dominati dalla scoperta dei bosoni vettoriali intermedi, W e Z , che segnarono un altro punto di svolta, cui seguirà la scoperta del top nel 1995 e quella dell'Higgs nel 2012. Ogni decennio o giù di lì, esperimenti sempre più sofisticati, e acceleratori via via più potenti, producevano una successione di scoperte fondamentali, che confermavano e completavano il quadro teorico definito dal MS.

Con la scoperta dell' H , l'ultimo elemento mancante, la situazione cambia radicalmente. Ora non c'è più una strada ben definita da seguire; l'esplorazione non segue più alcuna direzione privilegiata, ci si deve avventurare in mare aperto senza sapere dove si avranno più chance di scoprire la NF, né tantomeno quando avverrà la prossima scoperta.

Non abbiamo la più pallida idea della scala di energia alla quale il MS si romperà e compariranno nuove particelle o nuove interazioni dominate dai processi di NF; sappiamo tuttavia che molti nuovi studi utilizzeranno il bosone di Higgs come ulteriore strumento di indagine.

Materia oscura

L'esistenza di materia oscura nell'universo è un dato sperimentale ormai consolidato e sappiamo che non ci sono particelle o fenomeni descritti dal MS che possano darne conto. Molte estensioni del MS, in particolare quelle che prevedono particelle massicce debolmente interagenti, potrebbero fornire una spiegazione convincente, ma le ricerche condotte finora non hanno prodotto risultati. Nessuno ha trovato le particelle stabili e pesanti previste da diverse varianti di teorie di Super-Simmetria (SUSY) o le risonanze Kaluza-Klein ipotizzate in alcuni modelli di Extra-Dimensioni.

Rivelatori via via più sofisticati sono in operazione o stanno per essere installati in laboratori sotterranei per cercare di raccogliere gli elusivi segnali di interazione diretta di particelle di materia oscura con i nucleoni della materia ordinaria. Un approccio, in qualche modo complementare, viene seguito a LHC, dove ATLAS e CMS cercano decadimenti invisibili del bosone di Higgs, che deriverebbero dall'interazione dell' H con il settore oscuro della materia.

Inflazione

L'Higgs, prima particella scalare fondamentale, potrebbe accendere una nuova luce su una delle questioni più scottanti della moderna cosmologia. Molte evidenze sperimentali, in particolare quelle raccolte con misure di precisione del fondo di radiazione cosmica a microonde (CMB), ci dicono che è molto probabile che l'universo primordiale sia passato attraverso uno stadio di *inflazione cosmica*. La teoria, proposta nei primi anni '80, sembra dare le spiegazioni più convincenti di un'ampia serie di osservazioni, ma presenta tuttora un punto debole. Nessuno ha ancora scoperto l'*inflatone*, la particella responsabile della crescita esplosiva che avrebbe trasformato una microscopica fluttuazione quantistica del vuoto in un universo materiale costituito da massa-energia intrecciata con lo spazio-tempo.

Un campo scalare debolmente decrescente, come quello previsto per un Higgs di 125 GeV, ad alta energia potrebbe produrre, in linea di principio, una densità di energia del vuoto a pressione negativa, proprio quella necessaria a produrre l'*inflazione cosmica*. Ma non tutti concordano con l'ipotesi che H possa essere l'inflatone. I dubbi potranno essere risolti solo da nuove misure di polarizzazione sul CMB o dalla scoperta di nuove particelle scalari a LHC.

Asimmetria di materia e anti-materia

Studi recenti sembrano indicare la possibilità che l'asimmetria fra materia e anti-materia possa essere stata

determinata dinamicamente. L'ipotesi di una bariogenesi collegata alla rottura spontanea di simmetria elettrodebole si baserebbe su una condizione di non equilibrio nella storia cosmologica del nostro universo. Se la dinamica della rottura di simmetria si fosse tradotta in una brusca transizione di fase, al primo ordine con la temperatura, nella quale fosse stata presente una sorgente importante di violazione di CP, da questo stesso fenomeno avrebbe potuto scaturire l'asimmetria che ancora domina il nostro universo. Ma i dettagli della transizione di fase originaria sono governati dall'andamento del potenziale dell' H ad alta energia e nessuno ha ancora avuto accesso a questo parametro così importante per la costituzione materiale del nostro universo. Misurare direttamente il potenziale dell'Higgs, e il suo andamento fuori dall'usuale condizione di equilibrio, risulterebbe la strada maestra per dirimere la questione. Senza considerare che ci sarebbero effetti indiretti sugli accoppiamenti ordinari dell'Higgs alle particelle del MS che potrebbero essere investigati per produrre ulteriore evidenza.

4 Studi di precisione e l'esplorazione di LHC

Dopo il primo periodo di presa dati che ha portato alla scoperta dell'Higgs, LHC ha ripreso a funzionare nel 2015 all'energia record di 13 TeV; da allora ha accumulato una quantità di nuovi dati quindici volte superiore a quella che ha portato alla scoperta dell'Higgs. Con i miglioramenti che sono in corso, si prevede di raggiungere, entro il 2025, una statistica complessiva di circa 500 fb^{-1} .

Mentre si tiene il fiato sospeso e si analizzano con trepidazione i dati a 13 TeV, è già in corso un'intensa attività per migliorare drasticamente la macchina e i rivelatori. L'obiettivo è di aumentare ulteriormente la luminosità fino a raccogliere 3000 fb^{-1} di dati. Questa fase di altissima luminosità prende il nome di *High Luminosity LHC* (HL-LHC) e coprirà, grosso modo, il periodo 2028–2040.

Dunque il grande acceleratore del CERN ha davanti a sé una lunga vita che consentirà la ricerca sistematica di nuova fisica, attraverso la scoperta diretta di nuove particelle, o con la ricerca di deviazioni significative dalle previsioni del MS. I due percorsi vanno visti come complementari. Mentre si continueranno a ricercare nuovi stati della materia, l'acceleratore funzionerà come una vera e propria fabbrica di bosoni di Higgs e di quark top. In caso di assenza di segnali diretti di nuova fisica, l'altissima statistica permetterà comunque misure di precisione su parametri decisivi del MS che potrebbero dare indicazioni indirette di nuovi fenomeni.

Occorre sottolineare che le misure finora effettuate sull' H sembrano indicare una piena compatibilità con le previsioni del MS; tuttavia le incertezze associate ai risultati sono ancora troppo grandi e non si possono escludere anomalie o proprietà non standard. C'è ancora spazio per scoprire

partners dell'Higgs, magari generati da meccanismi di produzione diversi da quelli previsti dallo SM o dominati da modi di decadimento esotici.

In realtà sono ancora molte le questioni aperte che riguardano l'Higgs. Siamo sicuri che sia una particella elementare? Chi ci garantisce che non sia invece uno stato composito? È solo o è accompagnato da un'intera famiglia di partner esotici? E i suoi accoppiamenti con le altre particelle del MS sono esattamente quelli previsti, o nei dati raccolti si nascondono anomalie? La risposta ad alcune di queste domande potrebbe aprire percorsi inattesi verso la Nuova Fisica.

La scoperta di nuove particelle, o interazioni fondamentali, può presentarsi sotto forma di osservazione diretta di nuovi stati della materia; ma può anche procedere per il tramite di misure di precisione, con l'identificazione di anomalie significative rispetto ai valori previsti dal MS. Le particelle ultra-massicce, ipotizzate in alcuni modelli di NF, se sono troppo pesanti per essere prodotte all'energia di LHC, possono comunque interferire con processi noti del MS e produrre effetti misurabili legati alla loro presenza virtuale. Identificare alcune di queste sottili anomalie porterebbe alla scoperta indiretta di NF. Poiché è così intrinsecamente sensibile a ogni nuova particella, il bosone di Higgs è un candidato naturale per agire da portale per la fisica oltre il MS.

Questo è il motivo per cui ATLAS e CMS stanno concentrando la loro attenzione sulle proprietà dell' H . Nell'era post-scoperta l'attenzione si sta focalizzando sempre più sulle misure di precisione: prima di tutto massa e larghezza dell'Higgs, poi i suoi accoppiamenti con le altre particelle del MS. Fra gli obiettivi più ambiziosi c'è lo studio dei decadimenti rari dell' H , inclusi quelli che darebbero accesso a λ , il coefficiente di auto-accoppiamento. È uno dei parametri fondamentali per capire l'evoluzione del potenziale dell'Higgs e cercare di dire qualcosa di più quantitativo sulla transizione di fase elettrodebole.

Le misure più recenti ci dicono che l'era delle misure di precisione sull' H è già cominciata. A pochi anni dalla scoperta conosciamo ormai la massa dell'Higgs con un'accuratezza dello 0.17%; il risultato più preciso è stato ottenuto recentemente da CMS, $m_H = 125.26 \pm 0.21 \text{ GeV}$ [5]. Metodi indiretti ci hanno anche consentito di ricavare un limite superiore alla sua larghezza $\Gamma_H < 9.16 \text{ MeV}$ @ 95% CL [6].

Le costanti di accoppiamento del bosone di Higgs con le particelle note si possono estrarre dall'intensità del segnale, $\sigma/\sigma_{\text{SM}}$, espresso come rapporto rispetto a quanto previsto dal MS per diversi modi di produzione e di decadimento. La scoperta è stata dominata dai modi di decadimento dell' H in coppie di bosoni, principalmente fotoni e Z. Osservare i decadimenti in coppie di fermioni è stato molto più difficile. Ci sono voluti anni per produrre le prime osservazioni dell' H che decade in coppie di leptoni τ ; ancora più difficile

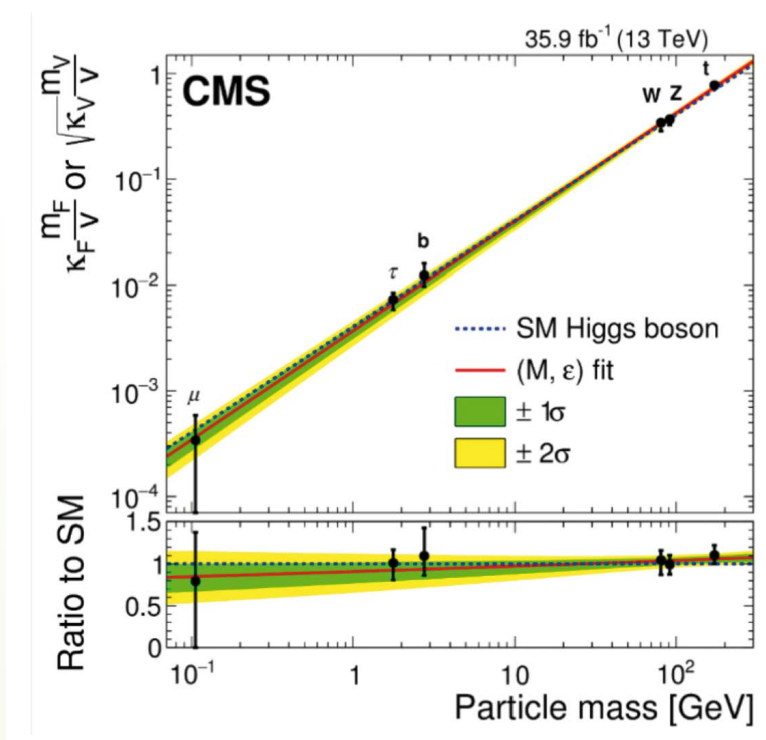


Fig. 2 Costanti di accoppiamento dell'Higgs.

è stato raggiungere le 5σ per il decadimento in coppie di *quark* b o identificare l' H prodotto in associazione con una coppia di *top*. Quest'ultimo modo di produzione, estremamente interessante in quanto sensibile direttamente all'accoppiamento Yukawa col *top*, è risultato particolarmente complicato a causa della minuscola sezione d'urto e dei fondi considerevoli. Dall'insieme di queste misure si ricavano gli accoppiamenti dell'Higgs illustrati in [fig. 2](#).

Nel frattempo proseguono studi dettagliati che cercano potenziali anomalie nelle sezioni d'urto differenziali o nei decadimenti rari dell' H . Per esempio sono in corso ricerche del decadimento in $Z\gamma$, canale per il quale si prevede un BR di 1.54×10^{-3} ; la statistica attuale di dati non consente ancora una sensibilità sufficiente per identificare un segnale, ma gli studi potrebbero fin da ora riservare sorprese. Il canale risulta particolarmente interessante dal momento che è molto sensibile a possibili contributi di NF; particelle pesanti cariche, entrando nei loop del decadimento, potrebbero produrre significative amplificazioni di un BR molto piccolo.

Misurare l'accoppiamento dell' H ai muoni risulta essere anch'essa un'impresa difficile, dal momento che il MS predice in questo caso una frazione di decadimento di 2.2×10^{-4} . E tuttavia i progressi ottenuti nel migliorare l'identificazione dei muoni e la loro risoluzione in energia ci spingono a essere ottimisti sulla possibilità di raggiungere il risultato nei prossimi anni di presa dati. Praticamente impossibile invece, a meno che un qualche processo di nuova fisica non produca un aumento mostruoso del BR, cercare di misurare il decadimento dell' H in coppie di elettroni, processo per il quale ci aspettiamo un BR di 5×10^{-9} .

Per tutti questi studi la statistica gioca un ruolo fondamentale. Dobbiamo produrre decine di milioni di bosoni di Higgs per identificare i modi di decadimento rari e migliorare l'accuratezza con la quale misuriamo gli accoppiamenti. È quello che ci aspettiamo che accada con HL-LHC.

Gli studi che sono stati fatti, estrapolando i risultati attuali ai 3000 fb^{-1} di HL-LHC, ci dicono che sarà possibile misurare la massa dell' H con un'accuratezza migliore di 50 MeV. Mentre la sua larghezza totale potrà essere stimata, con metodi indiretti, fino al valore previsto dal MS $4.2 \pm 2 \text{ MeV}$. Sarà sicuramente possibile analizzare in dettaglio modi di produzione difficili, come il ttH , e non ci dovrebbero essere problemi a investigare in profondità decadimenti rari come $Z\gamma$ e $\mu\mu$.

Per quanto riguarda gli accoppiamenti le proiezioni stimano che sarà possibile raggiungere una precisione ultima nell'intervallo 1–5% [7]. Per collocare questo valore nel giusto contesto occorre far notare che più pesante è la particella sconosciuta che interferisce con gli accoppiamenti ordinari dell' H , più piccoli sono i suoi effetti. Le anomalie scalano con l'inverso del quadrato della massa; per definire la scala, le modifiche agli accoppiamenti prodotte da particelle pesanti qualche TeV sarebbero al di sotto del %. Questo significa che alla fine di LHC, se non ci saranno nuove scoperte dirette, la sfida di scoprire Nuova Fisica attraverso le misure di precisione degli accoppiamenti dell' H sarà ancora aperta.

Infine sarà estremamente difficile, se non impossibile, misurare il parametro λ . In linea di principio potrebbe essere ricavato dai rarissimi eventi nei quali il bosone di Higgs è

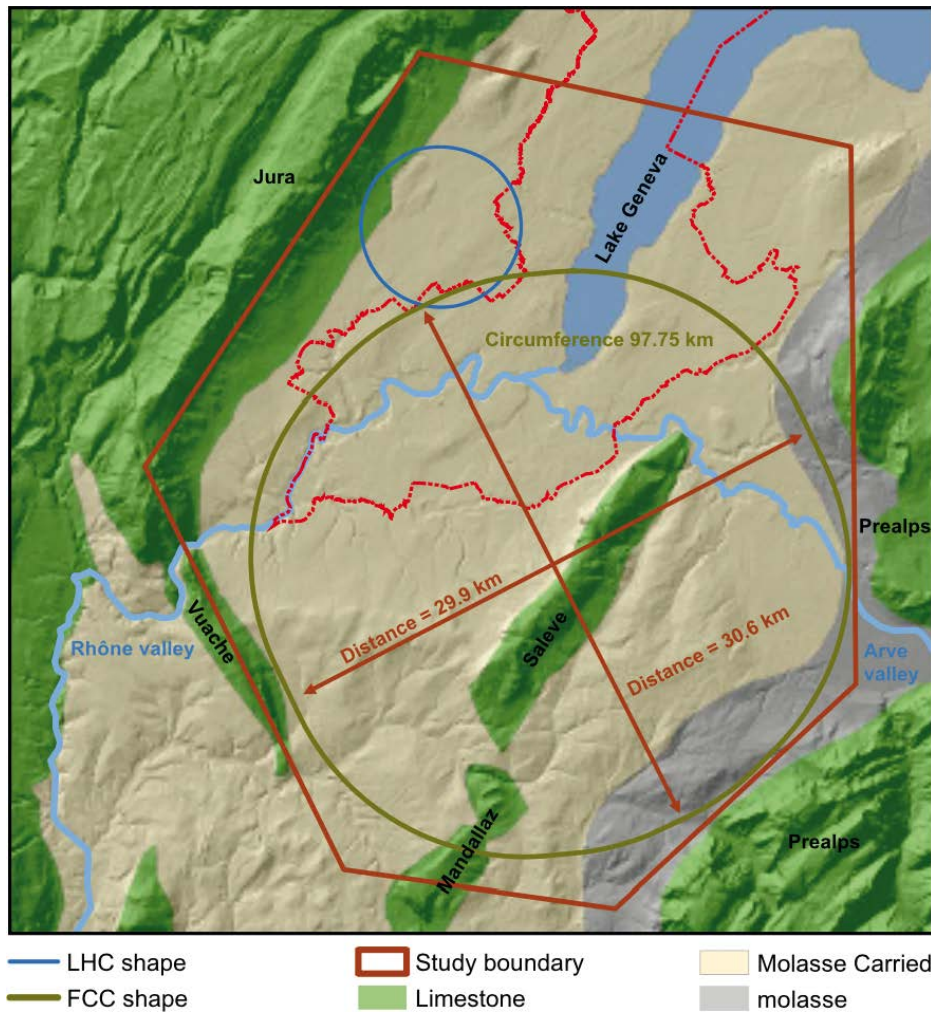


Fig. 3 Layout di FCC.

prodotto in coppie; ma nell'ambiente difficile di HL-LHC si pensa che sia estremamente complicato ricostruirne una quantità sufficiente per ricavare una misura accurata di un parametro fondamentale della natura.

Risulta chiaro insomma che, per esplorare seriamente tutti gli angoli nei quali si può nascondere la Nuova Fisica è necessario cominciare a guardare a una nuova generazione di acceleratori: gli eredi di LHC.

5 Una strategia per i collider del futuro

La strategia europea per il futuro della fisica degli acceleratori è molto chiara. Mentre si continua a sfruttare appieno il potenziale di LHC è giunto il momento di gettare le basi di un nuovo sistema di futuri acceleratori.

FCC, acronimo che sta per *collider* circolari del futuro, è il nome di un gruppo di studio internazionale, che è stato costituito con lo scopo di produrre un disegno concettuale, definire le infrastrutture e stimare i costi per un nuovo anello

da 100 km, da costruire al CERN (fig. 3). In una prima fase il progetto prevede un grande acceleratore che produrrà collisioni fra elettroni e positroni, FCC-ee [8]. In seguito esso dovrebbe essere sostituito da una macchina protone-protone, FCC-hh [9], ospitata nello stesso tunnel; uno schema che il CERN ha già utilizzato con successo con la costruzione in sequenza di LEP e LHC.

La proposta è nata nel 2014 e ha raccolto subito un fortissimo sostegno da parte della comunità internazionale. Il lavoro ha coinvolto oltre 1300 fisici e ingegneri appartenenti a 150 università, istituti di ricerca e partner industriali. Il risultato dello studio è un rapporto dettagliato pubblicato alla fine del 2018, che costituisce la base per definire la nuova strategia europea nel campo degli acceleratori di particelle. La decisione di costruire questa nuova infrastruttura di ricerca dovrebbe essere presa nel prossimo futuro; si avvicina quindi un momento cruciale che potrebbe segnare il corso della fisica di tutto questo secolo.

Dal punto di vista della fisica, la combinazione in

successione dei due acceleratori è di gran lunga la configurazione ottimale. La macchina a leptoni sarebbe la prima a essere installata non appena il tunnel fosse pronto. Le tecnologie richieste per FCC-ee sono abbastanza mature e la produzione industriale di magneti e cavità risonanti può essere organizzata in parallelo mentre procedono i lavori di scavo del tunnel. Gli stessi rivelatori non richiederebbero innovazioni estreme rispetto a quelle già messe a punto per LHC. In uno scenario realistico, si potrebbe immaginare di cominciare la costruzione nel 2028 e iniziare le operazioni di FCC-ee entro il 2040, alla fine della fase di alta luminosità di LHC.

La macchina a protoni è invece molto più complessa, e richiederebbe ancora parecchi anni di sviluppo per la produzione su scala industriale dei magneti. Prevedere come data di partenza per FCC-hh il 2050 permetterebbe di lavorare alle soluzioni migliori per i magneti superconduttori che saranno il cuore dell'impresa. D'altra parte gli stessi rivelatori per la macchina a protoni sono estremamente complicati: richiederanno nuove tecnologie e molti anni di sviluppo di prototipi prima di cominciare la produzione su scala industriale dei vari componenti.

6 Il programma di fisica di FCC-ee

I due approcci risultano pienamente complementari. Nell'ambiente ideale di un collider a leptoni si possono effettuare le misure più precise sui parametri del MS che mente umana possa immaginare; l'obiettivo sarebbe quello di studiare gli effetti indiretti di nuove particelle e interazioni fino a una scala di molte decine di TeV. Un collider a protoni da 100 TeV consentirebbe in seguito l'esplorazione sistematica di una grossa porzione della stessa regione di energia, con la possibilità di osservare direttamente nuovi stati della materia.

Il programma di fisica di FCC-ee è concentrato sulle misure di precisione dell'Higgs, del top e dei parametri fondamentali del Modello Standard [10]. È previsto che la macchina funzioni a 91 GeV per produrre un'enorme quantità di Z (5×10^{12}), per poi passare a 160 GeV per generare 10^8 coppie di W, salire a 240 GeV per produrre 10^6 H in associazione alla Z e infine raggiungere i 350–365 GeV per creare 10^6 coppie di top.

Misure di precisione dei parametri elettrodeboli

Grazie all'immensa statistica alle diverse energie di collisione e a uno sforzo specifico per calibrare con grande accuratezza l'energia dei fasci, FCC-ee potrà dare accesso a diverse manifestazioni di NF. La presenza di nuove interazioni, che si mescolerebbero a quelle del MS, porterebbe a modifiche significative di alcuni dei parametri elettrodeboli più sensibili. Nuove particelle massicce e debolmente interagenti, interferendo con i propagatori ordinari W, Z

e γ produrrebbero correzioni misurabili alla massa di W, Z o all'angolo di Weinberg. Ci potrebbero essere anche effetti dipendenti dal sapore dei quark, traducendosi, per esempio in piccole variazioni degli accoppiamenti dello Z ai *quark* pesanti. Se i neutrini leggeri ordinari si mescolassero con eventuali partner destrorsi, molto più pesanti, si potrebbero osservare anomalie nei loro accoppiamenti ordinari a Z e W e così via. Il programma sarebbe ulteriormente arricchito da misure di precisione sul quark top ricavate dall'enorme statistica di eventi prodotti in soglia. Altre misure di precisione diventerebbero possibili con lo studio delle enormi quantità di prodotti di decadimento, $10^{11} \tau$ e $2 \times 10^{12} b$, identificabili con grande efficienza e ottima purezza.

Per molte misure di precisione la sfida diventerebbe il controllo degli errori sistematici e lo sviluppo di calcoli teorici ordini di grandezza più precisi di quelli attualmente disponibili. Nell'ipotesi di riuscire a controllare queste sorgenti di errore si prevedono risultati impressionanti in termini di precisione raggiungibile. Le masse di Z, W e top, parametri fondamentali per il fit globale elettrodebole, sarebbero misurabili con precisioni dell'ordine, rispettivamente, di 0.1, 1 e 10 MeV migliorando di ordini di grandezza le conoscenze attuali. Analoghi miglioramenti si avrebbero su altri parametri altrettanto importanti come le larghezze, il numero di neutrini leggeri e $\sin^2 \theta_W^{\text{eff}}$.

Misure dell'Higgs

La natura puntiforme dei leptoni che entrano in collisione e la perfetta conoscenza dello stato iniziale renderebbero accessibili misure dell'Higgs che sono impossibili alle macchine adroniche come LHC. Con FCC-ee si sfrutta la produzione dell'H che rinvia contro la Z in 10^6 eventi $e^+e^- \rightarrow ZH$. Questo permette di misurare l'accoppiamento assoluto alla Z, che è il punto di partenza della determinazione della larghezza totale dell'H, e poi degli altri accoppiamenti attraverso misure dei BR. In questo modo si riesce a raggiungere una precisione inferiore al % per tutti i principali accoppiamenti, compresi quelli inaccessibili a LHC, come gli elusivi decadimenti in coppie di gluoni o in coppie di *quark charm*. Ulteriori informazioni potranno venire dagli 1.5 ab^{-1} di dati raccolti a 365 GeV. A questa energia si prevede che verranno prodotti altri 7×10^5 Higgs, fra i quali circa un terzo nel modo di produzione esclusivo di fusione di due bosoni W. L'analisi combinata di tutti questi campioni consentirebbe di migliorare ulteriormente l'accuratezza degli accoppiamenti e misurare con precisione la larghezza totale della risonanza in maniera indipendente dai modelli. Si prevede di raggiungere l'1% nella misura di Γ_H e di confinare la possibilità di decadimenti invisibili dell'Higgs a valori molto inferiori al %. Per collocare nel giusto contesto queste prospettive vale la pena ricordare che i limiti attuali posti dagli esperimenti di LHC al BR invisibile dell'H è attorno

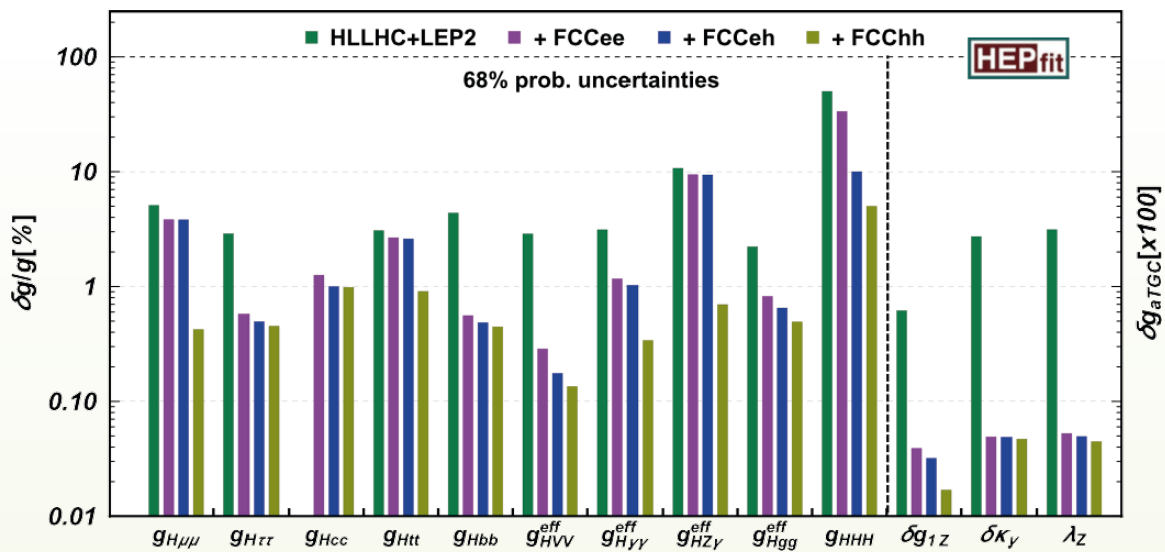


Fig. 4 Precisione sui principali accoppiamenti dell'Higgs raggiungibile con la combinazione in sequenza di FCC-ee e di FCC-hh.

al 20%, valore che potrebbe ancora nascondere molte sorprese.

Infine si sta addirittura valutando, per FCC-ee, la possibilità di organizzare un run speciale della macchina a $\sqrt{s} = m_H$ per provare a misurare, o quanto meno a mettere limiti stringenti, al BR virtualmente *impossibile* in elettroni.

FCC-ee potrebbe infine produrre una prima misura del coefficiente di auto-accoppiamento dell'Higgs, che si prevede di riuscire a misurare con un'accuratezza intorno al 30%. Non sarebbero possibili, invece, miglioramenti significativi per gli accoppiamenti dell' H a muoni e top e qui entrerebbe in gioco la complementarità con FCC-hh.

7 Il programma di fisica di FCC-hh

Il collider a protoni da 100 TeV, FCC-hh, è progettato per raccogliere una luminosità integrata totale fino a 20 ab^{-1} , cui corrisponde una produzione dell'ordine di 10^{10} bosoni di Higgs. Il considerevole aumento di energia nel centro di massa rispetto a LHC permetterebbe di aumentare di circa un ordine di grandezza la potenzialità di scoperta diretta di nuove particelle o nuove interazioni. La grande abbondanza di bosoni di Higgs e la possibilità di produrre misure di precisione sull'Higgs anche in ambiente adronico, come dimostrato da LHC, permetterà inoltre di arricchire e completare l'ambizioso programma di misure delle caratteristiche dell'Higgs già ampiamente sviluppato con FCC-ee [10].

Fisica dell'Higgs

Le diverse opzioni esplorate dal gruppo di studio di FCC offrono un'opportunità unica per studiare la natura del bosone di Higgs. Per esempio sfruttando il regime ad alto impulso degli H prodotti a FCC-hh si potrebbe cercare di capire se il bosone di Higgs è veramente una particella elementare o se ha piuttosto una struttura interna.

Operate in sequenza, le due macchine acceleratrici risulterebbero perfettamente complementari per quanto riguarda la misura degli accoppiamenti. Grazie all'enorme statistica di dati fornita da FCC-hh sarà possibile investigare in dettaglio tutte le caratteristiche di decadimenti rari dell'Higgs come $H \rightarrow \gamma\gamma, \mu\mu, Z\gamma$ e gli accoppiamenti relativi potranno essere misurati con precisioni $\sim 1\%$. Risultati simili potranno essere ricavati per l'accoppiamento diretto dell'Higgs al top che si potrà ricavare dal modo di produzione ttH . Diventeranno accessibili decadimenti invisibili come $H \rightarrow 4\nu$ e si potranno scoprire direttamente o mettere limiti inferiori a 10^{-3} per i BR in particelle invisibili di qualunque genere. Infine la grande statistica di produzione di Higgs in coppie permetterà di migliorare la misura del coefficiente di auto-accoppiamento fino a una precisione del 5–7%.

Con il programma di misure congiunto, FCC-ee + FCC-hh, tutti gli accoppiamenti dell'Higgs ai bosoni di gauge e ai fermioni carichi della seconda e terza generazione –a eccezione del *quark strange*– si potranno misurare con precisioni comprese fra l'1% e lo 0.1% (fig. 4). Tutto questo non solo permetterà di identificare ogni eventuale anomalia,

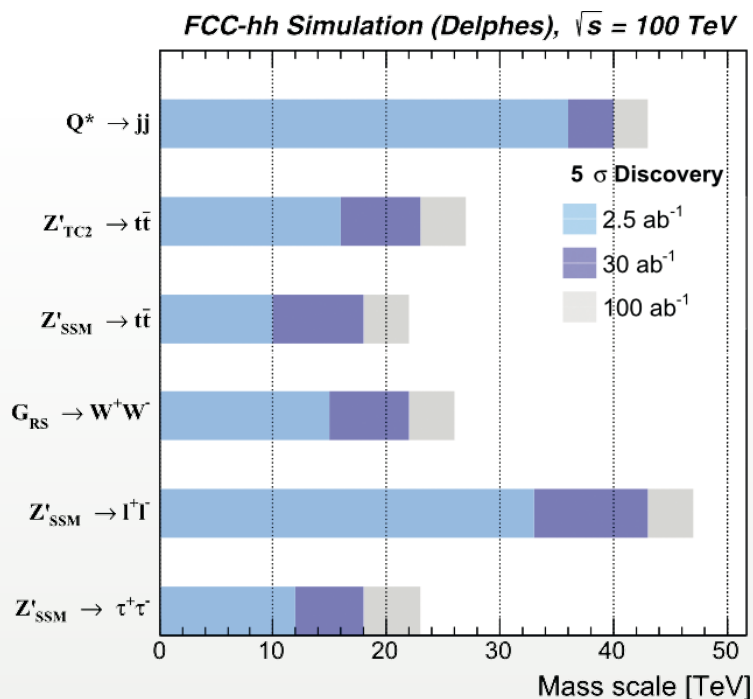


Fig. 5 Potenziale di scoperta diretta di FCC-hh.

ma consentirà anche di estrarre informazioni accurate sulla scala di energia alla quale il MS perderebbe di validità.

Studio della transizione di fase elettrodebole

Come è ben noto il MS non prevede una rottura di simmetria violenta a sufficienza e segnata da un'appropriata sorgente di violazione di CP tali da far risalire a quel fatidico istante la prevalenza di materia su anti-materia che registriamo nel nostro universo. Queste condizioni potrebbero però essere determinate dalla presenza di Nuova Fisica che potrebbe manifestarsi con nuove particelle scalari molto massicce o significative anomalie negli accoppiamenti del bosone di Higgs. Tutti fenomeni che non potrebbero sfuggire alla manovra a tenaglia costruita con la sequenza dei due acceleratori. Per la prima volta con FCC-hh sarebbe possibile avere energia a sufficienza da perturbare il potenziale dell'Higgs e portarlo al di fuori delle ordinarie condizioni di equilibrio in maniera da poterne studiare le caratteristiche con grande dettaglio.

Ricerca diretta di nuova fisica

I 100 TeV di energia nel centro di massa di FCC-hh renderebbero possibile l'esplorazione di una scala di energia 7 volte superiore a quella di LHC. Qualunque nuovo stato della materia, di massa compresa fra alcuni TeV e alcune decine di TeV, sarebbe identificato direttamente. Le ricerche di particelle supersimmetriche verrebbero estese a grandi masse: si potrebbero scoprire partner scalari del top fino

a 10 TeV e gluini fino a 20 TeV. I limiti di esclusione per le risonanze vettoriali previste nei modelli di Higgs composito potrebbero superare i 30 TeV. Si potrebbero sottoporre a verifica teorie che ipotizzano nuovi bosoni di gauge Z' , quark eccitati Q^* , o gravitoni massicci, G_{RS} , come quelli ipotizzati in alcune teorie di extra-dimensioni (fig. 5).

La nuova macchina avrebbe infine un impatto significativo sulle ricerche di materia oscura; in particolare si potrebbe scoprire, o escludere definitivamente, i candidati di materia oscura appartenenti alla classe delle particelle massicce e interagenti solo debolmente (WIMP: Weakly Interacting Massive Particles). L'idea che enormi concentrazioni di WIMP siano state in equilibrio termico con le particelle del Modello Standard fin dai primi istanti dell'universo resta una delle ipotesi più suggestive per spiegare la materia oscura ma finora non ci sono state conferme. La potenza di FCC-ee permetterebbe di confermare o escludere in via definitiva questa ipotesi.

8 Stato della discussione

La strategia europea per i futuri acceleratori sta prendendo in considerazione diversi scenari. Fra questi anche l'idea di effettuare il programma di studi di precisione dell'Higgs tramite un acceleratore lineare a leptoni. Il progetto CLIC (Compact Linear Collider) si propone di costruire una *Higgs-factory* lineare, alternativa a FCC-ee [11]. Per uno sfruttamento ottimale del suo potenziale di fisica CLIC

sarebbe costruito e operato per fasi successive: inizialmente a una energia nel centro di massa di 380 GeV, per poi passare a 1.5 TeV e raggiungere infine 3 TeV. Corrispondentemente le dimensioni del sito crescerebbero da 11 a 50 km. Altre alternative allo studio prevedono di aumentare l'energia di LHC fino a 28 TeV equipaggiando l'attuale acceleratore con magneti superconduttori più potenti.

È indubbio comunque che con la proposta di FCC l'Europa lancia la sua sfida e prende il centro della scena nel dibattito mondiale sugli acceleratori del futuro. Altri attori importanti sono il Giappone che propone ILC (International Linear Collider) [12], una *Higgs-factory* basata su un acceleratore a leptoni di tipo lineare, e soprattutto la Cina.

Il gigante asiatico propone un progetto ambizioso in due fasi, per molti versi simile a FCC. La costruzione di un anello da 100 chilometri che ospiterebbe un collider elettrone-positrone (CECP: Circular Electron-Positron Collider) da 240 GeV (con possibilità di operare anche a 91 e 160 GeV), per poi passare a un acceleratore a protoni SPPC (Super Proton-Proton Collider) capace di produrre collisioni a 100 TeV [13]. Un piano così ambizioso ci fa capire che la Cina punta a raggiungere un ruolo una posizione di assoluta preminenza nella fisica delle alte energie.

Gli Stati Uniti, leader indiscussi del campo fino a qualche decennio fa, stanno invece mantenendo un basso profilo. Partecipano in qualche modo alle iniziative di Europa, Cina e Giappone, ma non hanno proposto un'alternativa, né si candidano a ospitare una delle grandi infrastrutture in discussione.

Sono tutti progetti molto ambiziosi, che richiedono lo sforzo di migliaia di scienziati e importanti investimenti, ma nessuna delle alternative si dimostra superiore alle potenzialità combinate di FCC, che resta la proposta di gran lunga più promettente per portare la fisica delle alte energie all'altezza delle sfide di questo secolo.

9 Conclusioni

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era nella comprensione di alcuni dei fenomeni che hanno determinato la particolare struttura materiale del mondo che ci circonda. Restano aperte tuttavia molte questioni, per capire le quali sarà forse necessario ricorrere a nuovi paradigmi, ma nessuno può prevedere quando e in che forma essi diventeranno evidenza sperimentale.

Mentre procedono senza sosta le ricerche di segnali di nuova fisica, comincia a diventare urgente progettare una nuova generazione di macchine acceleratrici. Le prime discussioni su LHC cominciarono verso la metà degli anni '80 e la grande infrastruttura fu completata nel 2008. Se vogliamo una nuova macchina in operazione alla fine della fase di alta luminosità di LHC, il momento giusto per agire è ora.

La proposta di FCC si presenta come lo strumento migliore per consentire a nuove generazioni di scienziati di esplorare gli angoli più nascosti della materia per fare luce su alcuni dei misteri più oscuri del nostro universo.

References

- [1] ATLAS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 710 (2012) 49.
- [2] CMS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 710 (2012) 26.
- [3] ATLAS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 716 (2012) 1.
- [4] CMS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 716 (2012) 30.
- [5] CMS Collaboration, *JHEP*, 11(2017) 047.
- [6] CMS Collaboration, *Phys. Rev. D*, 99 (2019) 112003.
- [7] M. Cepeda et al., "*Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC*", ArXiv:1902.00134.
- [8] A. Abada et al., *Eur. Phys. J. Special Topics*, 228 (2019) 261.
- [9] A. Abada et al., *Eur. Phys. J. Special Topics*, 228 (2019) 755.
- [10] A. Abada et al., *Eur. Phys. J. C*, 79 (2019) 474.
- [11] A. Robson et al., "*The compact linear e^+e^- Collider (CLIC): Accelerator and Detector*", ArXiv: 1812.07987.
- [12] Ties Behnke et al., "*The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary*", ArXiv:1306.6327.
- [13] The CEPC Study Group, "*CEPC Conceptual Design Report: Volume 1 - Accelerator*", ArXiv:1809.00285.

Guido Tonelli

Fisico del CERN, professore dell'Università di Pisa e ricercatore associato dell'INFN, è uno dei principali protagonisti della scoperta del bosone di Higgs, l'importante risultato che ha portato all'assegnazione del premio Nobel per la fisica del 2013 a François Englert e Peter Higgs. Per il suo contributo a questa scoperta ha ricevuto numerosi premi e riconoscimenti internazionali; fra i più prestigiosi lo *Special Prize for Fundamental Physics*, il Premio "Enrico Fermi" e la Medaglia d'onore del Presidente della Repubblica. È autore di oltre 1200 articoli scientifici su rivista e di libri di divulgazione scientifica per il grande pubblico.

IS GRAPHENE CHEMICALLY INERT?

G. CARRARO¹, L. SAVIO², L. VATTUONE^{1,2}

¹ DIFI, University of Genova, Genova, Italy

² IMEM-CNR, UoS di Genova, Genova, Italy

Graphene, a two-dimensional layer of hexagonally packed C atoms with peculiar electronic and mechanical properties, was considered to be chemically inert due to the high stability of the carbon-carbon bonds that constitute its two-dimensional net. This is indeed true for free standing and unstrained graphene, which can be chemically attacked only by highly reactive species. However, it is now well established that the chemical reactivity of graphene can be significantly enhanced and even controlled by modifying its band structure, *e.g.* by exploiting the graphene-substrate interaction or by introducing mechanical strain and/or chemical doping. Adsorption of simple molecules as well as chemical functionalisation may indeed allow use of graphene as an element in electronic devices since they may cause an opening of a gap in the band structure inducing a semi-conducting behaviour. Last but not least, reversible adsorption is required to use graphene as a gas-sensing element.

1 Introduction

Ever since it became clear that graphene is not the inert material that it was thought to be, the challenge has become how to control and tune its chemical activity, at least up to a certain extent. A significant amount of studies have developed on the interaction of graphene layers with different kinds of reactants (mainly gases, but also liquids). When investigating such interaction, one of the key parameters is the strength of the bond forming between the graphene layers and the adsorbate, the optimal value of which depends on the application envisaged for the material. For example, for the use of graphene as an active element in electronic devices it is necessary to open a gap in the band structure, but also that the Fermi level lies inside the gap; this is not straightforward, since charge donation may be present and shift the Fermi level out of range. Indeed, adsorption of several molecular species causes a band gap opening but only for a few of them (*e.g.* H₂, tetracyanoquinodimethane –TCNQ– and its fluorinated derivative F4-TCNQ, tetracyanoethylene –TCNE– and fullerenes) the condition to keep the Fermi level within the gap is observed [1]. The topic is quite complex since chemical modifications affect the effective mass of the charge carriers, thus reducing their mobility. The stability of the gap under ambient conditions, where of course also other species are present, is another quite important issue. Therefore, in practical applications a compromise between several factors must be found and, in general, strong chemical bonds are required to ensure the stability of the gap opening and of its value induced by adsorption. On the contrary, if the scope is to use graphene as a gas-sensing element, relatively weak molecular bonds are required to ensure the possibility to reset the sensor as easily as possible.

It is therefore clear that the interaction of graphene with other molecular species is of utmost interest for a variety of applications; for this reason, we shall focus here on the fundamental factors affecting the adsorption of simple molecules at graphene.

The first demonstration of the possible use of graphene as a very sensitive gas detector (2007) [2] rapidly followed the discovery of graphene (2004). Schedin *et al.* demonstrated that adsorption of several simple molecules on graphene caused a change in the resistivity. The effect was explained considering that molecules such as NO_2 and H_2O act as electron acceptors and cause *p*-type doping while NH_3 and CO act as donors and induce *n*-type doping. *p*-type doping causes a negative shift of the Fermi level, which falls below the vertex of the Dirac cone (the so-called *K* point in the Brillouin zone), while *n*-type doping induces the opposite effect. The change in resistivity, and hence the sensitivity to the gas, is higher for molecules with larger charge transfer (*i.e.* NO_2 and NH_3) and increases linearly with their concentration in the gas phase. However, the initial resistivity of bare graphene could not be recovered after removal of the gas and annealing to 150 °C (or, alternatively, exposure to UV Light) was needed to reset the sensor to the initial state. Such behaviour is indicative of a relatively high adsorption energy of the molecules and represents a significant drawback because it does not allow to operate the sensor at room temperature in a continuous way. It is also not compatible with the adsorption energy values predicted by Density Functional Theory calculations: 67 meV for NO_2 , 31 meV for NH_3 and only 14 meV for CO [1]. If molecules adsorbed so weakly at the graphene surface, their lifetime at the surface should be so short that a prompt recover of the initial resistivity should occur upon removal of the gas pressure already at room temperature. This contradiction stimulated further experimental studies and it was even found that the sensing activity is suppressed after removing the contaminants introduced using nanolithography [3].

The signal given by a certain concentration of molecules at a given temperature is determined indeed by the number of molecules adsorbed at the surface and by the charge transfer they induce. The charge transfer depends on the nature of the molecule, on its orientation with respect to the surface and on its adsorption site. The amount of molecules that can adsorb at a given pressure and temperature increases directly with their adsorption energy, which also determines whether the sensor can be re-set at a given temperature just by removing the gas or whether annealing or exposure to light is needed.

From a more fundamental point of view, it is important to establish whether gas molecules adsorb at regular or at defected graphene sites and whether physisorption or chemisorption takes place. In the former case, no chemical bond is formed between the molecule and the surface and the adsorption energy is ruled by van der Waals interactions: it is typically lower than 0.5 eV/molecule for light species and it increases with molecular weight. On the contrary, chemisorption implies the formation of a true chemical bond between the molecule and the surface, so that the adsorption energy is higher.

In this frame, we have investigated adsorption of simple molecules on supported graphene samples by using the standard tools of Surface Science. In particular, we have conducted our experiments under controlled Ultra High Vacuum conditions (UHV, *i.e.* for pressures lower than 10^{-9} mbar). UHV guarantees a negligible contamination of the surface over the time required to perform the experiment (a few hours) and allows the use of electron-based spectroscopies such as X-ray photoemission Spectroscopy (XPS) and High Resolution Electron Energy Loss Spectroscopy (HREELS) for chemical and vibrational analysis, respectively. In case of physisorption, the internal vibrational modes of the adsorbed molecule are almost unaffected by the interaction with the surface and their frequencies are close to those observed in the gas phase. When chemisorption occurs, on the contrary, the molecules are significantly deformed due to the interaction with the surface and the frequencies of some normal modes are significantly modified. In case of very strong interaction even dissociation of the molecule can occur thus providing radicals which adsorb at the surface and can react with other

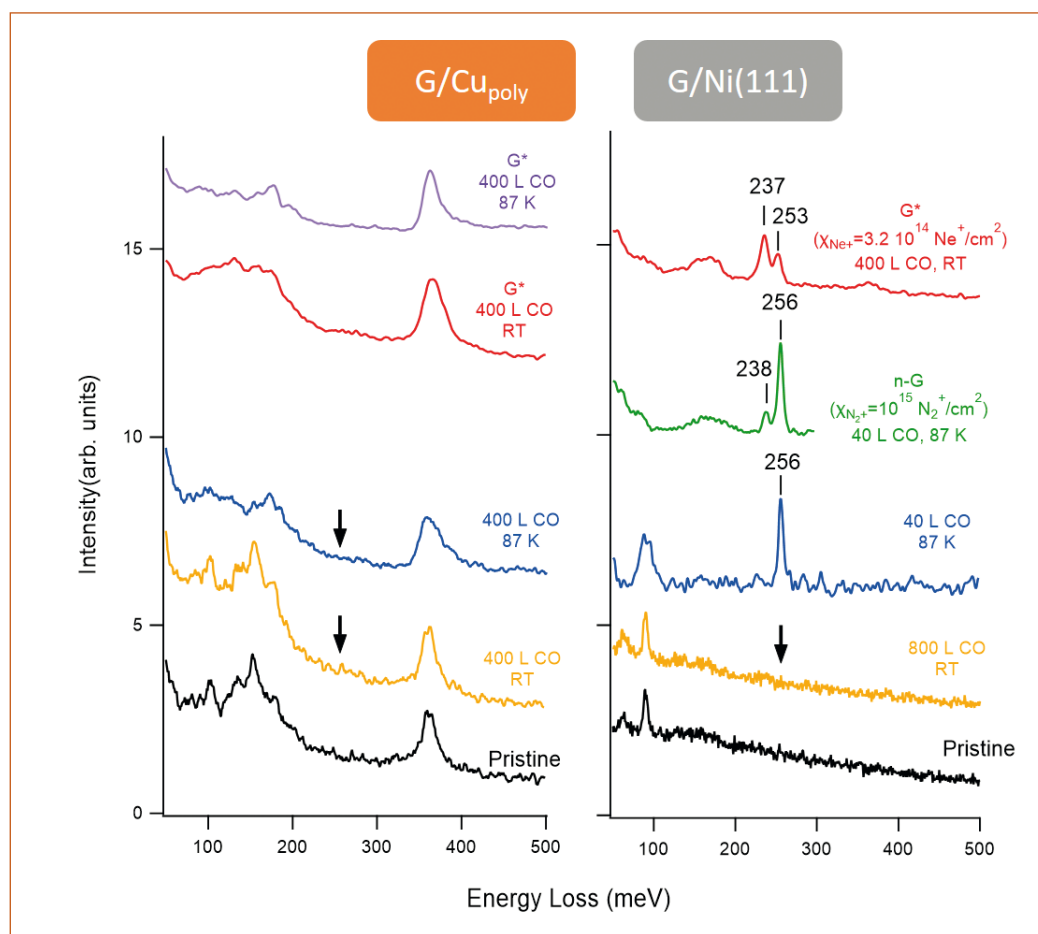


Fig. 1 HREEL spectra recorded after dosing the indicated amounts of CO on G/Cu_{poly} (left) and on G/Ni(111) (right). No trace of CO adsorption is observed at RT on pristine graphene, while CO shows up when the exposure is performed at 87 K for G/Ni(111) but not for G/Cu_{poly}. The black arrows indicate the position where the C=O stretch mode is expected. Similarly, CO-related features appear upon doping with N atoms or producing single vacancies in the G layer (G*, see text for discussion).

species. The latter step is especially relevant in *heterogeneous catalysis*, but it is not expected to occur on surfaces used for sensing purposes.

As outlined above, several factors can boost the reactivity of the graphene layer: doping, strain and interaction with the substrate. We report here about the recent activity performed at the joint CNR-IMEM and Physics Department group at the University of Genova about the role of the graphene-substrate interaction and of doping and defects.

2 Adsorption of carbon monoxide at graphene/Ni(111)

As a first point in our investigation of the interaction of simple gas molecules with supported graphene layers, we wanted to unravel the role of the support on the chemical reactivity of graphene. To this aim we have chosen to compare the adsorption of carbon monoxide (CO) on a single layer of graphene (G) grown on Ni(111) and on polycrystalline copper [4]. The choice of G/Ni(111) is motivated by the lower graphene-substrate distance, which maximizes the potential role of the support, while graphene on polycrystalline Cu (G/Cu_{poly}) is representative of a weakly interacting system and is widely used in applications. The choice of a poisoning molecule like CO as probe molecules is motivated by the weak charge transfer it induces: the sensitivity of sensors to its presence is thus still limited and improvements in sensitivity would be strongly welcome.

Figure 1 shows the comparison between HREEL spectra recorded after dosing CO both on G/Cu_{poly} (left panel) and on G/Ni(111) (right panel). While no signature of CO adsorption is present on either sample at room temperature (RT), a vibrational loss at 256 meV is evident

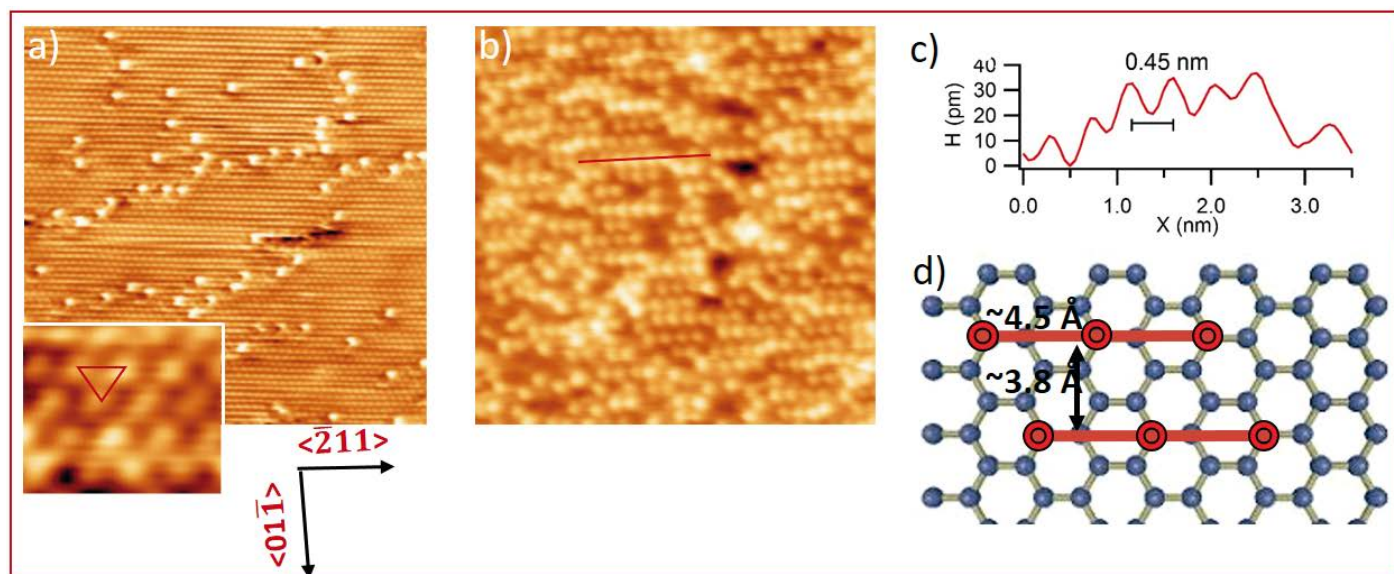


Fig. 2 LT-STM images of the G/Ni(111) layer before (a) and after (b) CO exposure at 87 K. Panels c) and d) show, respectively, the line profile cut along the path marked in b) and the model deduced from it. Taken with permission from ref. [4]. © Wiley.

for G/Ni(111) at $T=87$ K. Such peak, corresponding to the internal CO stretch vibration, has a frequency lower than the one reported for gas phase and physisorbed CO (265 meV) and it is thus a clear fingerprint of CO chemisorption at mono-coordinated (*i.e.* on-top) sites. The loss starts to decrease in intensity upon annealing above 150 K and completely vanishes above 225 K. This temperature range for desorption under UHV conditions is indicative of an adsorption energy between 0.35 and 0.58 eV/molecule, much higher than expected for physisorption and indeed compatible with weak molecular chemisorption. The actual value depends on the amount of molecules present at the surface and usually decreases while approaching saturation.

Although relatively weak, the adsorption energy is much larger than the physisorption energy and thus guarantees that for nearly atmospheric pressure a significant equilibrium coverage of CO can be attained: at room temperature an equilibrium coverage of the order of 0.1 ML (*i.e.* one molecule of CO every ten surface atoms) is expected at the surface for a gas pressure of 10 mbar of CO. This allows to imagine a possible role of graphene on Ni as an *active support* for catalytic applications: graphene would not be the catalyst itself, but it would just stabilize a high enough coverage of molecules to supply reactants to catalytic nanoparticles deposited on it. The use of graphene/Ni as a sensing element is on the contrary not trivial because of the metallic nature of the substrate and also because of the disappearance of the Dirac cone for such a reactive substrate.

We still need to answer the key question whether CO molecules adsorb at defect or at regular graphene sites. To do that, we dosed 1 L of CO on the G/Ni(111) sample at 87 K and we monitored the surface morphology by LT-STM. The outcome is reported in [fig. 2](#), in which the clean graphene layer and the CO-covered sample are compared. While panel a) and the corresponding inset show the symmetry of the clean G layer, panel b) shows that after CO exposure the surface is completely covered by the adsorbate. CO-admolecules organize in short rows along the $\langle\bar{2}11\rangle$ direction at a minimum distance of two lattice spacings in both directions, as determined by the line scans (panel c) and as schematized in the drawing of panel d).

For sake of clarity we have to mention that the CO coverage is not uniform over the whole G sample and that some patches not covered by CO (not shown here) can indeed be found upon extended STM inspection. This is explained by the fact that different domains can form for G/Ni(111), depending on the relative position of the C atoms of the G layer with respect to the topmost layer of atoms of the Ni substrate. Such domains are usually addressed as top-fcc, top-bridge and top-hcp, in a clearly self-explaining nomenclature. Ni₂C can also form as alternative product in the graphene growth process. All these phases can coexist on the surface and their [5] relative amount depends on the preparation conditions and on post-growth treatment. Careful analysis of the XPS spectra enabled us to correlate the reactivity of the graphene layer with the different amount of each graphene phase and of nickel carbide. We proved that the top-fcc phase is the most reactive one, while the presence of Ni₂C and/or of carbon dissolved in the subsurface region has a poisoning action with respect to the adsorption of carbon monoxide.

3 The effect of nitrogen doping on chemical reactivity

Theoretical studies suggest that a significant increase of the adsorption energy, which correlates with changes of the electronic and chemical properties, can be obtained by doping with donors and acceptors atoms.

In order to address the role of doping, we introduced heteroatoms in the graphene lattice by bombarding a single layer of G/Ni(111) with 110 eV N₂⁺ ions before exposing it to CO. It is already proved in the literature that such process leads to the formation of a doped G layer in which N atoms substitute some of the C atoms; due to the different external electronic configuration on N with respect to C and hence to the ability of N to form only three 3 bonds instead of four, N can assume a graphitic, pyridinic or pyrrolic configuration, thus creating defect sites in the perfect hexagonal G lattice.

In our experimental conditions we produced *n*-G/Ni(111) with a significant doping (around 11%), in which all the N atoms were in pyridinic or pyrrolic configuration, according to XPS analysis [6]. When probing this layer towards CO adsorption, we found the appearance of an additional CO-related peak in the HREEL spectrum (see fig. 1). Such moiety is characterised by a CO stretch frequency of 238 meV, which is usually considered as a fingerprint of doubly coordinated chemisorbed CO, and it is still present at 190 K, desorbing completely only around 240 K. On this basis it is possible to estimate an adsorption energy of 0.50–0.85 eV/molecule, depending on coverage, *i.e.* even higher than the one of 0.34–0.54 eV/molecule estimated for mono-coordinated (*i.e.* on-top) CO at regular G sites. This result unambiguously proves the positive effect of N doping on graphene chemical reactivity, at least for G/Ni(111).

4 The role of vacancies

Many theoretical studies suggest an increased heat of adsorption (up to 2.33 eV/molecule) for CO at vacancies of free-standing graphene. In order to test this prediction, we have introduced vacancies (mainly single vacancies according to ref. [7]), in the G/Ni(111) and G/Cu_{poly} layers by low-energy (150 eV) sputtering with Ne⁺ ions impinging at normal incidence. The samples were then exposed to CO at room temperature. Vibrational spectra (top spectra in fig. 1) clearly indicate that no CO adsorption occurs on defected G/Cu_{poly}, while on defected G/Ni(111) CO-related vibrational losses at 236 and 253 meV are present. The frequencies are however different with respect to those observed for pristine G/Ni(111) and closer to those reported for CO on Ni(111). In addition, the desorption temperature of CO is quite similar to the one reported for CO on bare Ni(111). Therefore, the experimental data indicate that CO has not adsorbed at the graphene vacancy but rather that it has intercalated

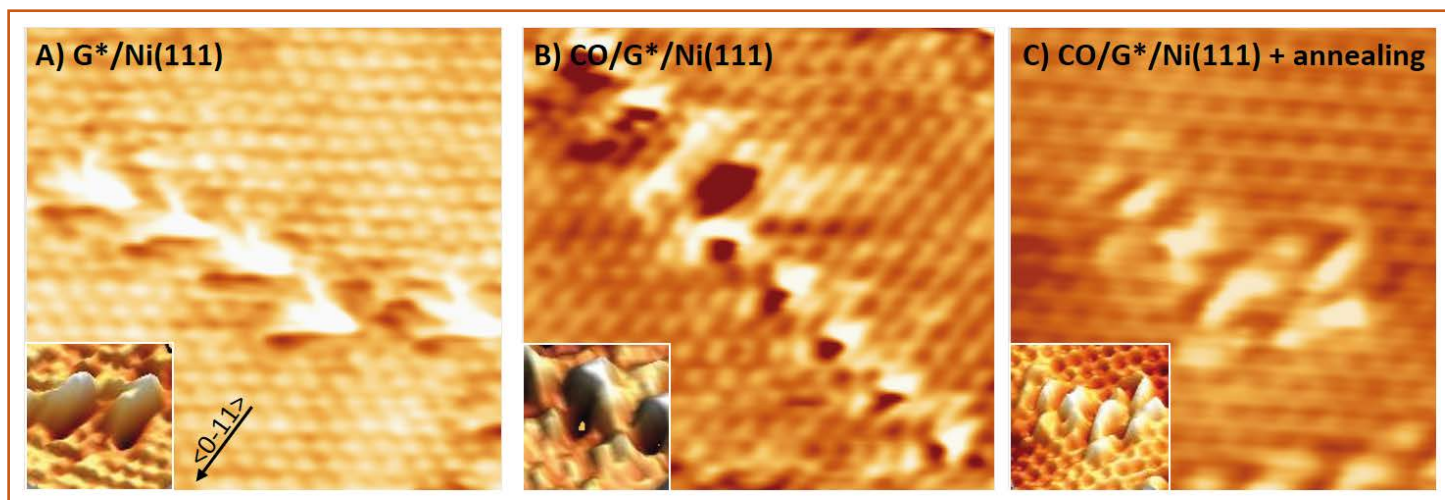


Fig. 3 LT-STM Images of the G/Ni(111) surface recorded after ion bombardment (A), after exposure to CO (B) and after annealing to 400 K (C). Taken with permission from ref. [9]. Published by the PCCP Owner Societies.

below graphene and adsorbed at the underlying Ni substrate. This interpretation is further supported by XPS analysis of the same system, which suggests that graphene layer partly detaches from the substrate upon ion bombardment, thus favouring intercalation. Notably this phenomenon is not observed for G/Cu_{poly} because the adsorption energy of CO is much lower on Cu than on Ni, so CO does not adsorb on Cu under the investigated experimental conditions.

This experiment proves that theoretical results for free-standing graphene are not adequate to extrapolate the behaviour on supported layers: the substrate always plays an important role. Indeed, more recent DFT calculations simulating the behaviour of a single vacancy at graphene supported on Pt and on Cu show that the dangling bonds of the C atoms adjacent the vacancy saturate towards the metal substrate. In the case of the more reactive Pt surface, they are no longer available for the following reaction with water [8]. Due to the reactivity on the Ni substrate, a similar scenario is envisaged also for the CO/G*/Ni(111) system.

Artificially created vacancies could be in principle also active sites for catalysis and for sensing. For both applications it is however essential for adsorption and desorption to occur reversibly. We have thus checked whether CO intercalation through vacancies is a reversible process by repeating several adsorption-desorption cycles. The experiment indicates that the amount of adsorbed CO decreases at each cycle, which suggests a modification of the vacancy sites upon interaction with the gas. In order to understand what is happening, we have studied the process by LT-STM. Figure 3 shows the morphology of the G/Ni(111) surface after sputtering (A), after exposure to CO (B) and after annealing to 400 K (C). Sputtering creates lines of defect on the surface, the aspect of which is modified upon CO exposure. CO desorption induced by annealing causes a partial healing of the vacancies.

This result implies that CO molecules have reacted and released C atoms which repair the vacancy: at the next adsorption cycle the number of possible holes for intercalation is thus lower, accounting for the reduction in the amount of adsorbed CO.

We can speculate that a Boudouard reaction (catalysed by the Ni substrate) between two intercalated CO molecules has taken place leading to CO₂ and C: the former species desorbs and the latter has remained to fix the vacancy. This explanation is consistent with the *scenario of chemistry under cover*: graphene is not directly involved in the chemical reaction but just forces the reactants adsorbed at the substrate underneath to meet and react. The presence of the cover can favour the reaction both due to the constraining effect of the graphene

layer and to the lowering of the adsorption energy at the catalyst, *i.e.* at the support under graphene. The lowering of the adsorption energy leads to a decrease of the activation barrier for the reaction [10] thus resulting in a higher turnover frequency than observed for the same reaction without cover. Interestingly the mechanism is not peculiar to graphene as also hexagonal boron nitride layers have been shown to promote reactivity in a similar manner.

4 Conclusions and perspectives

Our recent studies have shown that the substrate plays a key role in tuning the reactivity of the graphene layer. The strongly interacting G/Ni(111) system seems more promising

for its possible role in catalysis than for sensing applications: indeed the substantial increase in the adsorption energy at the surface enables to use graphene as an active support for reactants while reactions can occur or under cover or by suitable nanoparticles deposited above graphene.

The recent theoretical suggestion [11] about the effect of the local curvature of graphene on its reactivity suggests also a possible use for hydrogen storage. Until now hydrogen adsorption on graphene has been obtained only by using an atomic hydrogen source but the possibility to control the strain of supported graphene might allow to obtain dissociative adsorption at the strained region and to release molecular hydrogen when the strain is removed.

Bibliography

- [1] L. Kong, A. Enders, T. S. Rahman, P. Dowben, "Molecular adsorption on graphene", *J. Phys.: Condens. Matter*, 26 (2014) 443001.
- [2] F. Schedin, A. K. Geim, S. V. Morozov, E. W. Hill, P. Blake, M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene", *Nat. Mater.*, 6 (2007) 652.
- [3] Y. Dan, Y. Lu, N. J. Kybert, Z. Luo, A. T. C. Johnson, "Intrinsic Response of Graphene Vapor Sensors", *Nano Lett.*, 9 (2009) 1472.
- [4] M. Smerieri, E. Celasco, G. Carraro, A. Lusuan, J. Pal, G. Bracco, M. Rocca, L. Savio, L. Vattuone, "Enhanced Chemical Reactivity of Pristine Graphene Interacting Strongly with a Substrate: Chemisorbed Carbon Monoxide on Graphene/Nickel(111)", *ChemCatChem.*, 7 (2015) 2328.
- [5] C. Africh, C. Cepek, L. Patera, G. Zamborlini, P. Genoni, T. O. Montes, A. Sala, A. Locatelli, G. Comelli, "Switchable graphene-substrate coupling through formation/dissolution of an intercalated Ni-carbide layer", *Sci. Rep.*, 6 (2016) 19374.
- [6] G. Carraro, E. Celasco, M. Smerieri, L. Savio, G. Bracco, M. Rocca, L. Vattuone, "Chemisorption of CO on N-doped graphene on Ni(111)", *Appl. Surf. Sci.*, 428 (2018) 775.
- [7] M. Ugeda, D. Fernandez-Torre, I. Brihuega, P. Pou, J. Martinez-Galera, R. Perez, J. M. Gomez-Rodriguez, "Point defects on graphene on metals", *Phys. Rev. Lett.*, 107 (2018) 116803.
- [8] L. Ferrighi, D. Perilli, D. Selli, C. Di Valentin, "Water at the Interface Between Defective Graphene and Cu or Pt (111) Surfaces", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9 (2017) 29932.
- [9] E. Celasco, G. Carraro, A. Lusuan, M. Smerieri, J. Pal, M. Rocca, L. Savio, L. Vattuone, "CO chemisorption at vacancies of supported graphene films: a candidate for a sensor?", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18 (2016) 18692.
- [10] Q. Fu, X. Bao, "Surface chemistry and catalysis confined under two-dimensional materials", *Chem. Soc. Rev.*, 46 (2017) 1842.
- [11] V. Tozzini, V. Pellegrini "Prospects for hydrogen storage in graphene", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15 (2013) 8.

Giovanni Carraro

Giovanni Carraro is at present a post doc at the NanoBioMedical Center in Poznan where he is working on ultrathin iron oxide layers. He was previously a post doc at the Università di Genova, where he received his Ph.D. in Physics in 2018 for his work on the chemical reactivity of supported graphene single layers under the supervision of Prof. Luca Vattuone. His main research activity relates to the growth of ultrathin films and 2D systems and the characterization of their structural and catalytic properties using UHV techniques (HREELS, XPS and STM).

Letizia Savio

Letizia Savio is a researcher at the Istituto dei Materiali per l'Elettronica ed il Magnetismo of CNR, Italy since 2008. She received her Ph.D. in Physics at the Università di Genova in 2002, discussing a thesis on the role of low coordination sites for the adsorption of simple molecules at Ag surfaces. Later she was a postdoc at the Freie University in Berlin and then at the Università di Genova. At present her research interests are centered on the investigation of molecule-surface interactions at the nanoscopic level by spectroscopic (HREELS and XPS) and microscopic (STM) means. In particular, she studies the hybrid organic-inorganic interface and self-assembly phenomena at metal surfaces and 2D layers.

Luca Vattuone

Luca Vattuone is now Associate Professor of Condensed Matter Physics at the University of Genova. He received his PhD in Physics from Università degli Studi di Genova in 1994 with a thesis on chemisorption of oxygen at Ag surfaces under the supervision of Prof. M. Rocca. He was then a postdoc at the Chemistry Department of the University of Cambridge (UK) in the group of Sir David King and then at the University of Genova. In 1999 he was appointed as Staff Researcher in the latter University. His research activity covers several fields of experimental surface science including gas-surface interaction and surface plasmons. He serves now as Coordinator of Material Science Courses in Genoa University.

SOFTWARE FOR QUANTUM SIMULATIONS OF TOMORROW

PAOLO GIANNOZZI

*Università di Udine, Udine, Italy
IOM-CNR, Trieste, Italy*

*Between the idea and the reality
falls the ... software!*

Scientific software allows to transform theories and methods into numerical results and physical insight. This is especially true for the study of realistic models of materials, that heavily rely on first-principle computer simulations. This article describes the problems encountered in the development and maintenance of scientific software and examines the possible solutions. The ongoing work towards better software for present and future simulations of materials, performed with the Quantum ESPRESSO distribution in the framework of the EU-supported MaX Centre of Excellence, is introduced.

1 On first-principle simulations

The field of first-principle quantum simulations (that is: from the electronic structure) of materials has witnessed an explosive growth since the '80s. In condensed-matter physics, the development of density-functional theory (DFT) has been one of the main drivers of the growth, leading to a wealth of applications in fields ranging from "classical" solid-state physics for simple semiconductors and metals, to more complex heterostructures and nanostructures, to exotic metallo-organic and biological systems. The scope of computable properties has meanwhile grown from ground-state properties, such as structural stability, electronic, mechanical and vibrational properties, into the realm of excited-states properties. In parallel, better-performing functionals have allowed a significant increase in the accuracy of results. As a quick and unscientific indicator of the success of DFT-based quantum simulations, one can browse any list of most cited physics papers: a surprising large fraction of them are DFT-related. The interested reader is invited to read Giovanni Pizzi's paper in this Journal [1] for a review of what can be achieved with DFT simulations.

In addition to the improvements in the theory and in the methodology, a crucial role in this success story is played by the enormous increase in computer power since the first supercomputers were available. Simulations that used to be at the frontier in the '80s can be now performed on a desktop PC. While the increase of clock speed has flattened out since several years, under the constraints of semiconductor physics and in the absence of major technological breakthroughs, the increase in the global computing power has progressed via the increase in the number and complexity of central processing units (CPUs).

2 On software in physics

There is however a third actor standing in the middle between theory and computers: the scientific software implementing those theories. Simulations of realistic condensed-matter systems can be time- and memory-consuming, thus requiring sophisticated numerical techniques, implemented into computer codes typically written in Fortran or C/C++, that may run on powerful high-performance computers (HPC).

The importance of proper development and maintenance of scientific software has been overlooked for a long time, especially in fields like quantum simulations where home-brewed software was, at least until ~15 years ago, the norm. Individual researchers and research groups typically had a private version of some software, sometimes developed and maintained “in house”, sometimes obtained from other individuals and groups and modified to fit local needs. This led to much duplicated effort, diverging versions of the same code, and much code of questionable quality, often written in a hurry and with little or no documentation by Ph.D. students or post-docs with other priorities (typically: finding the next job) than good coding, eventually left to *bit-rotting*¹. Overall, a very unsatisfactory situation.

Codes for early numerical simulations consisted of a few thousands of lines of instructions at most, plus a few basic mathematical libraries; today’s codes often include several hundreds of thousands of lines of instructions. During the years, two main factors have pushed computer codes towards increasing complexity: i) the growth in sophistication of theories and methodologies and their extension to the calculation of more properties, and ii) the increased complexity of HPC machines. While the former factor is an unavoidable, and even desirable, consequence of scientific progress, the latter is something most physicists would prefer not to hear about (but too often they have to). During the years, many codes have been ported to or even re-written for all kinds of computer architectures, most of which long forgotten: vector machines (in the '80s), parallel machines (in the '90s), massively parallel machines (*e.g.*, the Blue Gene), multi-core machines (until recently), ... The latest trends in HPC (see Carlo Cavazzoni’s paper in this Journal [2]) are even more worrisome: with the advent of heterogeneous architectures, in which CPUs can offload computation to specialized hardware (GPUs: graphical processing units, or similar “accelerators”), a massive re-writing of codes seems unavoidable. Accelerators in fact do not accelerate anything

without specific machine-dependent coding. The old joke known as 7th law of programming: *Program complexity grows until it exceeds the capability of the programmer who must maintain it*, seems increasingly close to reality, especially for small research groups.

3 On open-source software

One may argue that software has become a commodity: today, several high-quality commercial scientific software suites are offered by specialized software houses, typically academic spin-offs. After all, in the quantum-chemistry community the leading code for molecular calculations is developed and licensed –at a hefty price for companies, with a large discount for academia– by such a company.

Commercial software has the obvious advantage of providing the means to develop and maintain a complex code in a professional way. It is not however the solution for everybody and for every usage. In developing countries, or for very small groups, the price may already be an obstacle, but even if it is not, software in physics is often stretched to the limits of its capabilities, adapted to local needs, used for testing and development of new ideas and algorithms. All this requires free access to the sources, that not all commercial software suites provide.

There are other more “philosophical” aspects in favor of free access to sources:

- **Correctness.** The probability to spot bugs, or errors in analytical formulae or numerical algorithms implemented in software, increases with the number of eyes that can look into the codes.
- **Collaboration.** Different research groups can more easily share knowledge and codes.
- **Reproducibility.** Science, including “numerical” experiments, is based upon it. Reproducibility of computer simulations, sometimes not obvious even under ideal conditions (*e.g.*, obtaining the same molecular dynamics trajectories is in practice impossible), is seriously hindered by the lack of access to software and to the data needed to run it (*e.g.*, pseudopotentials for electronic-structure calculations).

All these factors have pushed many research groups towards the adoption of so-called “open-source” licenses for software. The most popular of them is likely the GNU General Public License (GPL).

More recently, the need for an analogous open access to data used or produced by software has started to be appreciated in all its importance (see [1] for more on this subject).

¹ The mysterious decay phenomenon that makes software unusable after a few years or even months at rest.

4 Origins of the Quantum ESPRESSO distribution

More than 20 years ago, a group of Italian physicists, based in or loosely connected to Trieste, considered the idea to merge different versions of the same set of codes for first-principle simulations already in use since several years, into a unified “community software”, to be developed and maintained in a more professional manner using modern software engineering techniques. The main goals of such endeavor were:

- innovation in theoretical methods and numerical algorithms,
- efficiency on modern computer architectures,
- formation of a user and developer community.

The release of code into the public domain with an open-source license was already common in other domains but still relatively new for scientific software. It took a few more years before the idea condensed into what is known as Quantum ESPRESSO (QE) (web site: www.quantum-espresso.org). “ESPRESSO” stands for opEn-Source Package for Research in Electronic Structure, Simulation, and Optimization, while “Quantum” stresses both the quantum nature of simulation and the difference with another scientific software project, on soft matter, with a similar name. QE is not a single code or a single package. It is more alike to an integrated suite: a “distribution”, to which everybody can contribute new packages. Contributions are required to loosely follow some general programming rules, not to stick to a rigid software architecture: no need to vex potential contributors with unnecessary restrictions.

The initial release of QE contained codes for self-consistent calculations, first-principle molecular dynamics (Car-Parrinello), linear response (phonons), plus a set of utilities and tools for post-processing of data produced by simulations. These codes were the results of years (literally) of efforts by permanent and temporary staff and graduate students at various institutions in Italy and abroad. They consisted of a few tens of thousands of Fortran-77 lines. There was a single parallelization level, on plane waves using the PVM (now obsolete) and MPI (message-passing interface) libraries. Parallel machines of the time were simple clusters of workstations, connected by fast, and sometimes not-so-fast, communication hardware.

5 Quantum ESPRESSO today

The need to keep QE aligned with theoretical and methodological progresses and with new computer architectures has transformed QE during the years into a much more complex distribution. QE has been converted to modern Fortran (90/95/2003), ported to all kinds of

architectures, has seen the implementation of multiple parallelization levels and of new packages. Today the core distribution includes almost 600 000 lines of Fortran code, 60 000 lines of C and of shell and python scripts, plus a large amount of tests, examples, documentation.

The management of such a relatively large software project is close to impossible without resorting to the help of dedicated software tools. After the initial experience with CVS², QE moved to Subversion (svn), hosted on a Contents Management System (CMS) known as “qe-forge.org”, open to anybody desiring to develop open-source atomistic simulation software. Recently the development has moved to “git”, a sophisticated and complex software development tool, complemented by an even more sophisticated and complex web interface (web site: GitLab.com/QEF/q-e).

Initial support for QE came from the DEMOCRITOS National Simulation Center of the much-regretted National Institute for the Physics of Matter. Currently the maintenance and further development of QE is fostered by the Quantum ESPRESSO Foundation (QEF), a not-for-profit company incorporated in the UK, created to protect the name, logo (fig. 1), web domains, and trademarks of QE. The QEF also raises funds for the development of QE via agreements with commercial entities, following the open-source model. This in fact does not forbid commercial exploitation as long as sources remain available and free: one does not sell the software itself but services related to the software.

A peculiar aspect of QE is the large number of schools and tutorials organized around the world. The desire to bring first-principle techniques to a wider audience, and the presence of ICTP in Trieste with its mission to bring knowledge to developing countries, naturally lead to the organization of a series of “QE Schools” in various places of the world. Thirty-six such schools have been organized to date, the first in 2004 in Beijing, the latest in September 2019 in Ljubljana.

The usage and diffusion of an open-source software is hard to measure. We have however some estimates and indicators:

- the number of subscribers to the mailing list (more than 1000),
- the total number of attendees to schools (no less than 1600),
- the number of downloads of each release (more than 4000),
- the number of citations received by the papers [3, 4] documenting QE (15 000 since 2009)

all pointing towards a significant base of users.

² Concurrent versioning system: a simple but reliable tool for keeping track of the software history and versions in a centralized repository.



Fig. 1 The official Quantum ESPRESSO logo.

In addition to being used directly, QE is also in use in other independent software projects as a “quantum engine”, or to produce data for subsequent processing. Graphical user interfaces (GUIs) to QE have been developed by other groups as well and there is an ongoing commercial agreement with a major scientific software vendor that distributes QE together with its proprietary GUI. Other manifestations of interest by commercial entities have also been received. It is fair to say that QE is one of the most successful software suites in the field of electronic structure calculations.

6 On exascale and exascale computing

Quantum simulations are computationally expensive. The size of the system that can be simulated, the configuration space that can be explored, the level of theory that can be used, the type of property that can be computed, are in practice constrained by computer resources. The development of efficient methodological and numerical techniques has always been a major goal in QE. Better theories and better algorithms must however be accompanied by an efficient exploitation of the computing power of available computers. The latter is an ever-shifting target, often conflicting with portability and making software maintenance harder.

A time-honored technique to achieve performances without sacrificing portability and maintainability is to offload computing-intensive kernels –typically, linear-algebra and fast Fourier transforms (FFT) operations– to machine-optimized mathematical libraries. On parallel machines, portability and maintainability were favored by the availability of a standard library (MPI) for inter-process communications. In QE, basic parallelization operations were thus encapsulated into a few routines, hiding the technical details of parallelization from the sight of developers (except the few people directly involved in parallel algorithms). For machines based on multiple-core computing nodes, the OpenMP standard for light-weight in-core parallelization (threads) allowed to achieve good performances via compiler directives, with minor changes to the source code.

The recent trends in HPC machines [2] are dictated by the need to reduce the energy consumption. Accelerators –GPUs and the like, have a much better flops-per-watt ratio than conventional multi-core CPUs, thus holding the promise to make an “exascale” machine (that is: executing 1 exaflop, 10^{18} floating-point operations per second) feasible. Most supercomputers already have some form of acceleration, typically via one or more GPUs per compute node (a multi-core CPU). Being able to exploit such a computer power –two orders of magnitude with respect to the most powerful machines available today– opens entirely new perspectives in terms of what can be computed (see [fig. 2](#)).

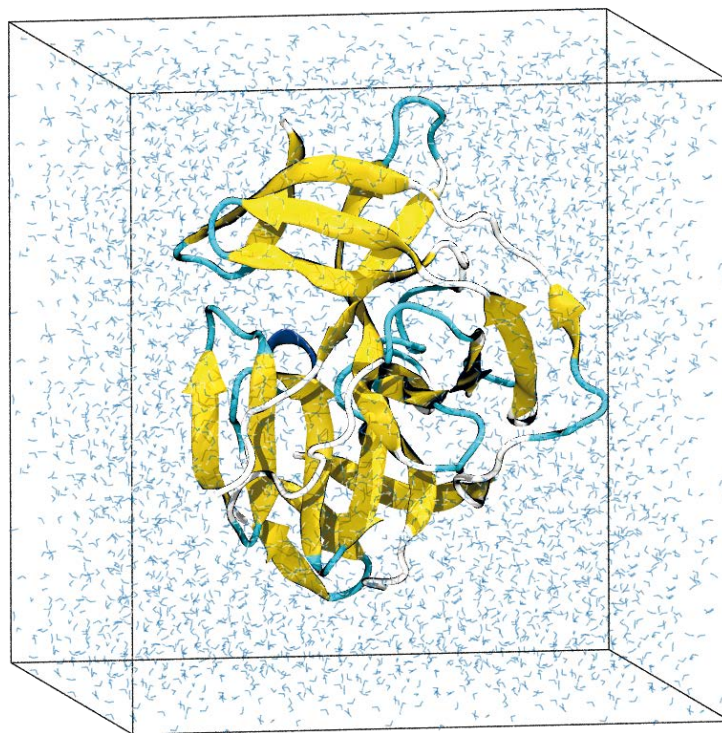


Fig. 2 The largest system used to benchmark Quantum ESPRESSO: a small section of a protein in water, containing 7534 atoms. Courtesy of Maria Celeste Maschio and Patrick Charchar.

An exascale machine is unlikely to be available before 2023, but pre-exascale machines are expected to hit the market by 2020-2021. It is however still unclear what they will look like: as of today, there are three competing candidate architectures. The road towards exascale is made hard not only by the uncertainty about future machines but also by the non-existence of anything like the standard mathematical libraries, MPI and OpenMP, that have made life easy, or less difficult, for developers of electronic-structure codes.

The new accelerated architectures require in fact a major re-organization of the way calculations are performed. Data need to be copied from CPU to GPU, where it is processed, then results copied back to CPU. The bottleneck is data communication: once data is on the GPU, computation is extraordinarily fast. Direct communication between different GPUs is still not possible or hard to use, so some strategies that have been successfully implemented for parallel computing, *e.g.* for three-dimensional distributed parallel FFT, may no longer be suitable and may require significant revisions.

7 Quantum ESPRESSO at the exascale

It would be a pity if the electronic-structure community were not ready to exploit the power of exascale machines when they arrive. The EU-supported MaX (Materials design at the eXascale) Centre of Excellence (web site: www.max-centre.eu), led by CNR-NANO in Modena, addresses such issue. MaX is active since 2015 and is the second phase of a previous successful Horizon-2020 project, aimed towards establishing a software “computational infrastructure”. The general and ambitious goal of MaX is to provide physicists with a sustainable framework for electronic-structure software development.

In particular, MaX aims to make the six “community codes” participating to the project: QE, Siesta, Yambo, BigDFT, Fleur, CP2K, ready for future exascale machines. Isolating and removing all bottlenecks, notably non-distributed computation and arrays, is a prerequisite for approaching exascale. A significant further effort is needed in order to achieve what is dubbed “separation of concerns”, that is: to isolate the physics-related code layers, of interest

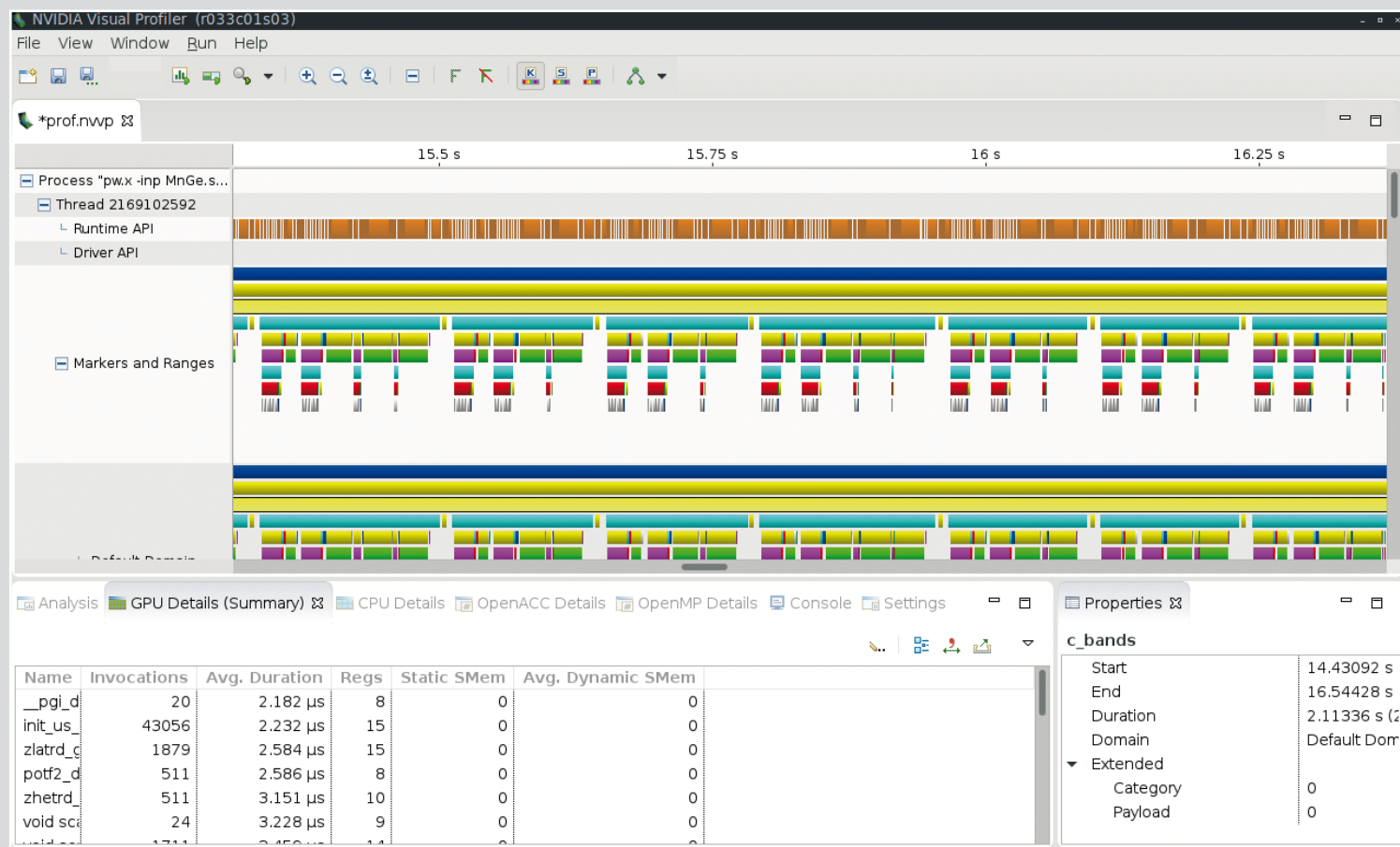


Fig. 3 Snapshot of a basic self-consistent calculation, produced by the Nvidia profiler nvvp. Profiling a code shows how effectively GPUs are used and reveals the presence of bottlenecks.

to scientists, from computational kernels. The latter are the target of more aggressive optimization, possibly done independently of the original codes, with the help of HPC and information technology (IT) experts. The efforts of MaX, in conjunction with the five participating European HPC centers (CINECA, BSC, Juelich, CSCS, CEA), have already led to the definition of important common libraries, for FFT and linear algebra, extracted from existing codes.

MaX is also active in the field of the so-called “co-design”, that is: the involvement of all partners in HPC –from hardware vendors to HPC centers and to scientists developing electronic-structure codes– towards a mutual understanding of what is important for producing effective software. This is the only possibility for scientists, whose “market share” is dwarfed by videogames and by the various AI applications, to have some leverage on the choices made by machine builders. A first result of the collaboration with IT experts at Nvidia (the leading GPU producer) is a QE version that works on Nvidia GPUs. This version is by now production-ready and is being continuously extended and improved (see [fig. 3](#)). Written in Fortran, the distribution of computation and of memory between CPU and GPU is managed with directives that are recognized by the PGI compiler (distributed for no charge by Nvidia).

The code is being structured in a way that will allow in the future a relatively easy porting to different kinds of heterogeneous architectures.

8 Conclusions

Writing scientific software is still a task for scientists, but it can be made easier and more effective by the open-source approach. Writing maintainable, portable, extensible scientific software requires the collaboration of many IT actors and in particular of HPC centers. We cannot hope to build the software for tomorrow with yesterday's approaches.

As a final remark: writing software for use by other people requires a significant additional effort with respect to writing software for one's own usage. This comes from the need to provide user and developer documentation and to guarantee the stability of the APIs (application programming interfaces, in plain English: how developers can use the source code). The scientific community should attribute more dignity to

software development and give more reward to the people doing code development.

Acknowledgments

The name ESPRESSO was proposed by Nicola Marzari while waiting for a delayed flight during the first Quantum ESPRESSO School in Beijing (2004). Quantum ESPRESSO today is the result of a collective effort by too many people to be mentioned here. I will make an exception for a few people who have given a most significant and enduring contribution: Stefano Baroni, Stefano de Gironcoli, Carlo Cavazzoni; for the coordinator of the development in the last few years: Pietro Delugas, and for the main contributor to the current efforts on heterogeneous architectures: Pietro Bonfà.

This work is supported by EU H2020-INFRAEDI-2018-1 MaX "Materials Design at the Exascale. European Centre of Excellence in materials modelling, simulations, and design" (Grant No. 824143).

References

- [1] G. Pizzi, "Discovering new materials with the computer", *Il Nuovo Saggiatore*, 33, n.1-2 (2017) 53.
- [2] C. Cavazzoni, "Cineca - A leadership facility for Italian computational science", *Il Nuovo Saggiatore*, 35, n. 1-2 (2019) 77.
- [3] P. Giannozzi et al., "Quantum ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials", *J. Phys.: Condens. Matter*, 21 (2009) 395502.
- [4] P. Giannozzi et al., "Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO", *J. Phys.: Condens. Matter*, 29 (2017) 465901.

Paolo Giannozzi

Paolo Giannozzi graduated at the University of Pisa (1982) and obtained his Ph.D. at the University of Lausanne (1988). He spent various periods in EPF Lausanne, Scuola Normale Superiore Pisa, SISSA Trieste, IBM Research Laboratories Zurich, CECAM Lyon, CECAM Lausanne, Princeton University. Since 2006 he is associate professor of condensed-matter physics at the University of Udine. His research field is the developments of methodologies for density-functional theory and their application to nano-structures. He is currently one of the leading developers of the Quantum ESPRESSO distribution of software and one of the coordinators of its development.

THE PHYSICS OF LEONARDO DA VINCI

FERDINANDO BORSA

Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Milan, Italy

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia, Pavia, Italy

Department of Physics and Ames Laboratory, Iowa State University, Ames, Iowa, USA

Five hundred years after the death of Leonardo da Vinci there are still aspects of his prodigious activity that attract the attention and the interest of scholars in the field of art and science. The birth of modern experimental physics, and science in general, is attributed to Galilei and later to Newton. Leonardo did enunciate the paradigm of modern science correctly but the extent to which he implemented it in his observation of physical phenomena has not been fully established yet. In this note we address this problem by concentrating our attention on how Leonardo dealt with some specific physical phenomena that he studied in a systematic manner over an extended span of his life.

1 Introduction

The works of Leonardo have been studied and commented extensively. Suffices it to say that Gerolamo Calvi, in charge by the Istituto Lombardo di Scienze e Lettere in 1905 to list all references to works on Leonardo, reported 1500 items. The number of works referencing Leonardo has greatly increased since then. Most of the studies and biographies deal with the artistic masterpieces of Leonardo, but there are also many that deal with Leonardo as a scientist. Most of the interest seems to be focused on the genius of Leonardo in describing nature through careful observation and drawings of exceptional quality. Leonardo's penchant for observation is particularly evident in the fields of engineering and anatomy. He did not really invent any new machine, but, for the first time, he uses technical drawing to show how the different parts operate, often introducing modifications and improvements. Many museums around the world display models of Leonardo's machines which were constructed following the original drawings: some of them work, some of them do not. None of the instruments were likely constructed at the time of Leonardo. Nonetheless, Leonardo's anatomical drawings are of incredible accuracy. During his short stay in

Pavia, he met and collaborated with Marco Antonio Della Torre, who was then professor of anatomy at the University of Pavia. Together they decided to publish a comprehensive treatise on the subject, but the project was truncated by the premature death of Marco Antonio. If they had completed the project, they would have anticipated the atlas of Vesalio, considered the founder of modern anatomy, by some fifty years.

Based on his contributions to engineering and anatomy, most of the biographers and scholars of Leonardo conclude that he was a great scientist besides being one of the greatest artists that ever lived. But such praise often focuses on his talents in meticulous observation without exploring his empirical interest in physical phenomena or, more simply put, his interest in physics. Physics, unlike anatomy, is not a descriptive science. Physics is an experimental science based on a paradigm which requires experiments from which one can reach, by inductive reasoning, the formulation of theories in mathematical language, and these theories can, in turn, be used to explain further experiments and natural phenomena with deductive reasoning. Leonardo did not seem to be interested in developing physical theories by

themselves, but he was forced to deal with physical laws whenever he pursued his interests in art, engineering, or the observation of nature. He studied optics, since light is of fundamental importance in painting; he studied fluids as part of his work as hydraulic engineer; he studied mechanics to learn how machines operate; he studied acoustics for his interest in musical instruments; and so on. It is amazing to discover that Leonardo had a very clear idea of the paradigm of modern science. Let us see what he has to say: *“Nessuna umana investigazione si può dimandare vera scienza, s’essa non passa per le matematiche dimostrazioni...”* (“No human investigation can be considered true science, if it does not go through mathematical demonstrations...”).

“Ma prima farò alcuna esperienza, ... , perchè mia intenzione è allegare prima l’esperienza, e poi colla ragione dimostrare, perchè tale esperienza è costretta in tal modo ad operare” (“But first I will perform some experiments ... , because my purpose is to assess first the experience (experiment?) and then with reasoning demonstrate why the experiment is coming out that way”).

It is natural to ask oneself if Leonardo did indeed use the modern science method to investigate physical phenomena. It is very difficult to address this question because the interest of Leonardo in specific physical phenomena is scattered over space and time. It is scattered in space because Leonardo writings have been largely dismembered and are found now in different museums and institutions around the world organized in the form of Codes and Manuscripts. It is scattered in time because, although the chronology of his “folios” has been reconstructed thanks to the wonderful work of Carlo Pedretti, Leonardo used to work on a given problem only for a short time, then jump to a different subject, maybe to an artistic drawing or a technical one or simply to a note of his expenses. He then superimposed these eclectic entries on the same “folio”, returning to the initial subject days or months later, sometimes in another “folio” altogether. This difficulty in concentrating on a subject, particularly when it had to do with a physical law which requires concentration, method, and persistence to fully grasp, is reminiscent of a recent investigation by Catani and Mazzarello [1]. The authors arrive at the striking conclusion that Leonardo may have suffered from some form of attention deficit disorder, a conclusion that will most likely ignite a controversy in years to come.

There are only a few physicists who examined Leonardo’s contribution in the field of physics. Among them I would like to quote here in chronological order: Gilberto Govi (1872) [2], Leopold Infeld (1953) [3], Domenico Argentieri and Sebastiano Timpanaro (1983) [4], Fritjof Capra (2007) [5], Luigi Borzacchini (2019) [6].

The works of the above-cited authors are very captivating and well documented, but they are generic with respect to

the physics of Leonardo and all seem to miss the point which interests me the most here, namely, did Leonardo apply the paradigm of modern science to his investigations of a particular physical phenomenon to derive a law formulated in mathematical terms? Only recently has this issue been examined in detail by a Cambridge professor of engineering, Ian M. Hutchings [7]. In his paper, Hutchings traces all the studies of Leonardo over a span of 20 years dealing with friction and its applications. He demonstrates that Leonardo did extensive experimentation on the subject and that he formulated the correct laws of friction two hundred years before Guillaume Amontons, who is credited with their formulation.

In the present note, I would like to discuss first the work of Hutchings to see if Leonardo did indeed perform the experiments that he drew and to what extent he arrived at the mathematical formulation of the laws of friction which actually imply only the understanding of the concept of proportionality of two physical quantities. By using Hutchings’ methodology, I will then analyze the work of Leonardo in the field of hydrodynamics in order to show to what extent he formulated Torricelli’s Theorem, the definition of fluid flow, and the principle of continuity. Only in discussing in detail these two specific cases can one get a clear idea of the extent to which Leonardo was able to apply the principles of modern scientific investigation which he indeed described correctly. But first let us see some of the “discoveries” in physics reported by most of the biographers and scholars of Leonardo.

2 Some intuitions and anticipations of physics laws by Leonardo

Leonardo’s fame as a physicist is mostly ascribed to his many intuitive explanations of physical phenomena and laws. A few of them are worth mentioning to see how he came about to his almost miraculous anticipations. We could start with the most far-fetched, which is mentioned by Infeld in his article [3]. When Leonardo says *“prendi un oggetto riscaldato al color rosso e pesalo nuovamente quando è freddo”* (“take an object heated to the red color and weigh it again when it is cold”), does he anticipate the equivalence of energy and mass expressed by the famous relation, $E = mc^2$, the result of Einstein’s theory of special relativity? Very unlikely! Nevertheless, the scientific curiosity of Leonardo and his fine intellect are shown in the mere fact that he poses the right questions. Let us now see some more concrete cases:

The explanation of the blue color of the sky

In the Leicester Codex Leonardo explains the blue color of the sky which is remarkably close to the correct explanation given by Lord Rayleigh in 1871 based on the detailed theory

of the scattering of solar light by the molecules in the atmosphere.

"Dico l'azzurro in che si mostra l'aria non essere suo proprio colore, ma è causato da umidità calda, vaporata in minutissimi e insensibili attimi, la quale piglia dopo sé la percussione dei raggi solari e..." (I say that the blue which the air shows is not its own color but is caused by the hot humidity, evaporated in tiny and insensitive fractions (?) which receives on itself the percussione of the solar rays and ...").

In other "folios", Leonardo describes experiments where he shines light on smoke rising in front of a dark background, thereby obtaining a bluish color of the smoke. Clearly, he arrives at the intuition of the explanation of the sky's blue color by considering the analogy between the two situations. Leonardo very often applies analogical reasoning in his scientific observations even when the phenomena that are compared are totally different. This allows him often to reach correct conclusions that can be hardly considered scientific deductions.

Vibrations, waves and the nature of sound and light

In the study of wave motion, Leonardo demonstrates his quality as an interpreter of nature's subtleties. He observes the circular waves generated by a stone cast in a pool of water and concludes in Manuscript A "... e la ragione di questo è che l'acqua, malgrado sembri muoversi, in realtà non lascia la posizione originale, perché il vuoto creato dal sasso si richiude prontamente. Pertanto il moto prodotto dall'aprirsi e chiudersi veloce dell'acqua ha come conseguenza solo un urto che può essere descritto come un tremore piuttosto che un movimento" ("... and the reason of this is that the water, although it seems to move, in reality does not abandon the original position, because the vacuum created by the stone is closed immediately. Therefore the motion generated by the fast opening and closing of the water has the only consequence of an impact which can be better described as a tremor rather than a movement").

This statement may appear trivial to us today, but it took 200 years to reach a rigorous formulation of transverse waves by Huygens (a contemporary of Newton) who used in his *Traité de la lumière* (1690) words that seem to have been copied from Leonardo statement. Leonardo went even further. By using analogical reasoning, so dear to him, he states that light and sound must also be transverse "tremors" although the nature of either was totally unknown to him. This indicates that his mind was more driven by his artistic sense than by sound scientific reasoning.

Reflection, refraction and dispersion of light

In his treatise on painting, where Leonardo gathers most of his studies on light, one can find several examples of his understanding of the law of reflection as expressed by

drawings of light rays impinging on a surface and bouncing back, forming an angle equal to the incident angle, but he never states clearly the law which implies that the two rays and the normal to the surface have to lie in the same plane.

Regarding the phenomenon of refraction, Leonardo observes correctly that light rays are bent as they cross the surface separating two transparent media, but he never investigates the phenomenon quantitatively. Understandably, with the knowledge of mathematics at his time, he could not arrive at Snell's law.

In the Leicester Codex Leonardo describes in words the decomposition of white light in different colors when crossing water, anticipating the experiments of Newton with the prism: "... Ma se tu poni tal bicchiere pieno d'acqua sul piano della finestra in modo che dall'opposta parte lo ferischino li raggi solari, allora tu vedrai li predetti colori generarsi nella impressio fatta dalli raggi solari penetrati per esso bicchiere e terminati sopra il pavimento ..." ("... But if you set such a glass full of water on the plane of the window in such a way that from the opposite side it is hit by the sun's rays, you will see the given colors generated by the impression done by the solar rays penetrated in the glass and terminated on the pavement ...").

As can be seen from the "folio" in [fig. 1](#), in this rare case he formulates the observation of light dispersion correctly in words while the drawing is grossly wrong! Normally it is the other way around with Leonardo.

The three laws of mechanics (Newton's laws)

Classical mechanics is based on Newton's second law, $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$. In Leonardo's time, calculus had not been invented yet and thus it was impossible for Leonardo to acquire the concept of acceleration. Without acceleration, it was impossible to define the force and the inertial mass. In fact, Leonardo never mentions mass (he talks about weight but not as a force), and gives a definition of force which is purely metaphysical! However, the first law, or law of inertia, which is a case of the second law when $\mathbf{F} = 0$, could be discovered by Galilei who had the great intuition that, to investigate the motion of bodies one has to eliminate friction from the picture. Some biographers and scholars of Leonardo claim that he anticipated Galilei by formulating the law of inertia in these terms: "Ogni moto naturale e continuo desidera conservare suo corso per la linea del suo principio" ("Every natural and continuous motion desires to maintain its course along the line of its beginning").

"Ogni moto attende al suo mantenimento, ovvero: ogni corpo mosso sempre si move, mentre che la impressione della potenza del suo motore, in lui si riserva" ("Every motion aims at his continuation, namely: every body set in motion keeps moving, as long as the impulse of the power of its motor, remains in it").

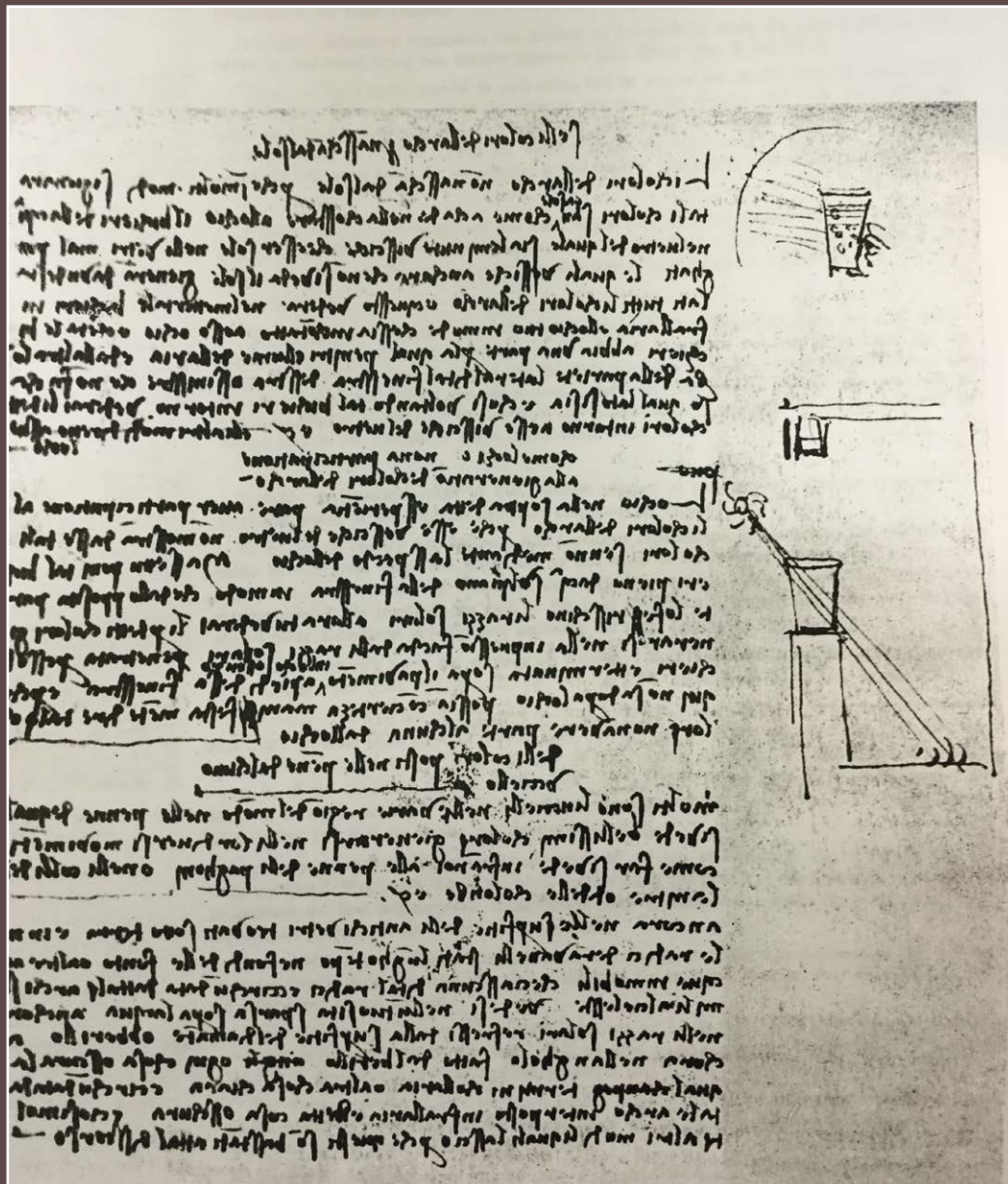


Fig. 1 Reproduction of the "folio" where Leonardo draws an experiment on the refraction of light with the comment reported in the text. Leicester Codex.

It is clear to me that these statements do not fully adumbrate the law of inertia. In the first one, there is no mention of the need for having no force on the object while the second is a formulation of the theory of the impetus of Buridan in line with Aristotelian dynamics.

The third law is another matter. The quasi-static version, namely to every action there is a reaction equal and opposite, does not require any understanding of motion, and thus it is no surprise that Leonardo did arrive to the correct formulation of the third law: In the "folio" 135 of the Arundel Codex we read: "*Ogni corpo si muove in direzione opposta dal punto da cui è spinto dall'oggetto che lo colpisce. ... Il corpo*

colpisce l'oggetto nella stessa misura in cui l'oggetto colpisce il corpo" ("Every object moves in the opposite direction from the point from which is pushed by the object which strikes it.... The body strikes the object in the same way as the object strikes the body").

The more complete formulation, namely the conservation of momentum for an isolated system, was out of reach for Leonardo. However, it is surprising that he understood and described many cases of collisions both elastic and inelastic in which the conservation of momentum is implicit.

In the Arundel Codex 263, 83v, he reports this remarkable statement which is clearly the result of reasoning based on

performed experiments: "... ci sono due tipi di percussione, quando l'oggetto si allontana dal corpo in movimento che lo ha colpito e quando un corpo rimbalza contro un oggetto che lo ha colpito. ... Quando i due corpi hanno lo stesso volume e peso il corpo che viene colpito lascia il corpo che lo colpisce al suo posto e prosegue con il moto del primo corpo" ("... there are two types of collision, when the object departs from the moving body that has hit it and when a body bounces back from an object that has hit it ... When the two bodies have the same volume and same weight the body which is hit leaves the body which hits it at his place and continues with the motion of the first body").

All different cases of collisions are summarized in Manuscript A "folio" 8r with beautiful and accurate drawings of the trajectories of the colliding bodies without, however, any description of the experiments which led to those geometrical conclusions.

The conservation of energy and the perpetual motion

Leonardo could not have had the concept of work and of energy. He struggles to build a machine which can operate continuously without an energy input. After many attempts, he abandons the idea and concludes that it is impossible and he compares whoever tries to obtain perpetual motion to an alchemist: *"O speculatori dello continuo moto, quanti vani disegni, in simile cerca, avete creato! Accompagnatevi colli cercatori dell'oro"* ("O speculators of continuous motion, how many useless designs, in such a search, you have created! Join the ones who search for gold").

Actually one has to make a distinction between continuous motion and perpetual motion. In the first case the motion can continue indefinitely in a force field which is conservative. The motion of celestial bodies is an example. Thus, in principle, continuous motion is possible if one can eliminate frictional forces completely. A machine moving continuously in a conservative force field would not generate any work but only measure time. With the discovery of phenomena such as superconductivity and superfluidity a continuous pendulum is in principle feasible. Perpetual motion, on the other hand, is impossible even in principle because it violates the principle of conservation of energy. It is not clear if Leonardo was after a machine that would measure time by running continuously without friction or a machine that would produce work without an energy input, i.e. perpetual motion. In the first case his statement would be wrong while in the second case it would be correct.

Leonardo expressed, however, the intuition of the conservation of energy when he describes the cycle of a living creature. He says: *"Il corpo di qualunque cosa, la qual si nutrica, al continuo muore e al continuo rinasce, perché entrare non può nutrimento, se non in quelli lochi, dove il passato nutrimento è spirato. ... Ma se tu ne rendi tanto quanto se ne*

distrugge alla giornata, allora tanto rinasce di vita, quanto se ne consuma ..." ("The body of whatever thing, that nourishes itself, continuously dies and continuously is born again, because no nourishment can enter, if not in those places where the previous nourishment is finished. ... But if you give back the same amount that was destroyed, during the day, then so much is born again of life as it is consumed ...").

The above statement sounds pretty much as the application of the first principle of thermodynamics to a living creature!

I mentioned some of the most relevant examples of intuitions of Leonardo about physical laws. These have been reported in most of the biographies of the artist and in specific studies about Leonardo as a scientist. As I pointed out along the way, there is no systematic study of physics in the above instances, no quantitative experiments, no mathematical formulation of any law. On the basis of those "discoveries," someone may claim that Leonardo was the greatest scientific genius while somebody else may claim that he was only a great artist with acute sense of observation and great fantasy, like Jules Verne or Albert Robida! This is why it is necessary to focus on a specific physical law that Leonardo studied over the years with some consistency to understand to which extent he applied the paradigm of modern science that he so clearly stated. We thus analyze in the following a few studies of Leonardo on friction and on fluid dynamics.

3 The laws of friction

Hutchings, in his seminal paper [7], starts by observing that some of the first experiments on the study of friction are drawn on a small notebook-sized piece of paper (fig. 2).

Hutchings points out, with maybe excessive animosity, that the art historians who examined the document were only interested in the sketch, on the upper right-hand corner, of the old woman (Helen of Troy in old age?) and the quote from the Renaissance poet Petrarch *"cosa bella mortal passa e non dura"* ("a mortal beautiful thing does not last").

Starting from these sketches, Hutchings goes back and reconstructs all investigations of Leonardo regarding the laws of friction and their applications. These span over a period of about 20 years, and they present conclusions, often incorrect, that he later changed.

The two drawings of fig. 3 and fig. 4 reproduced above (two among the many regarding friction found in Leonardo's "folios") represent possible experiments designed at establishing the amount of frictional force and its dependence upon the weight of the object experiencing friction, as well as the dependence of the frictional force on the surface area of contact of the object on the plane. In the first drawing the various objects are connected to a sort of handle. This seems to indicate that Leonardo tried to measure

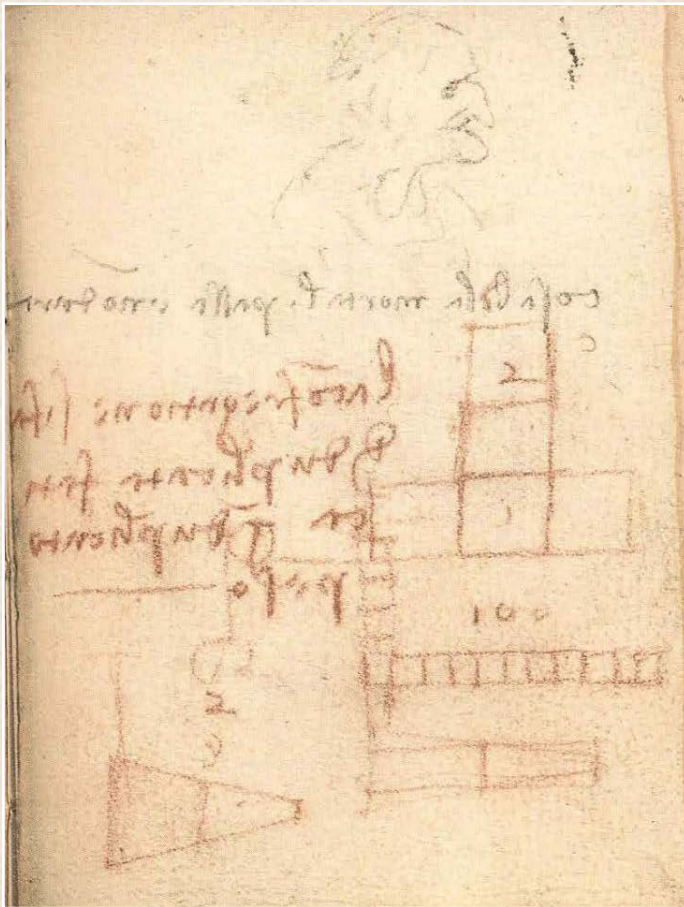


Fig. 2 Reproduction of the notebook's page with the drawing of an old woman and the drawings of experiments on friction. Codex Forster III folio 72 r. Credit: Victoria and Albert Museum, London.

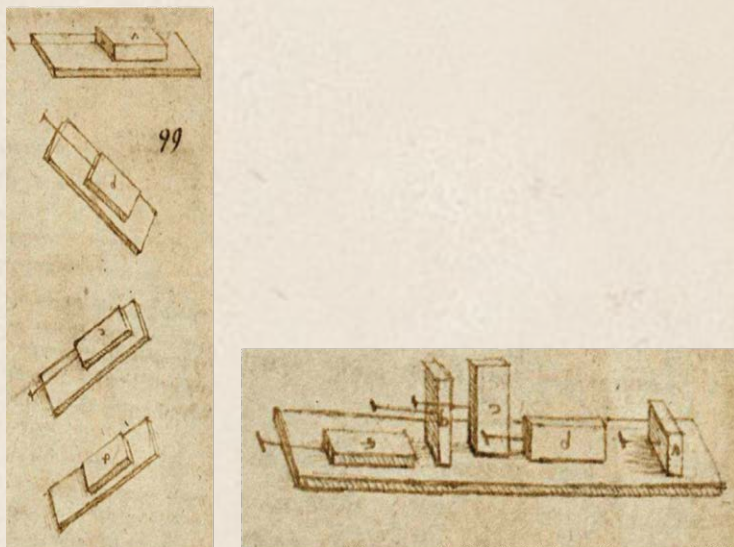


Fig. 3 Some representative drawings of Leonardo dealing with frictional forces. From Atlantic Codex, folio 532r c. 1506-08. Credit: Biblioteca Ambrosiana, Milan.

the frictional force by the effort necessary to set the object in motion. On the "folio" there is no mention of quantitative results of the experiments. There is only the following comment: "*La confragazione si fa in duplicata fatica in duplicato peso*" ("Friction is done in twice the effort for twice the weight").

The idea is there, but there is no attempt to formulate the law in mathematical terms. He does not identify the friction and the muscular force as two equal and opposite forces nor does he distinguish static from dynamic friction. In the second drawing Leonardo sets up a more quantitative experiment. He decides to compare the frictional resistance to the weight acting in opposite direction. But, again, there are no notes about the results of the experiment. He seems to be content to find out that the same weight displaces the object independently of the area of contact on the plane. Again, he is measuring the static friction not the dynamic one. It is a matter of great disappointment for me to see that Leonardo, who designed extraordinary machines to perform all sort of tasks, did not even try to design an experiment to measure the weight necessary to move an object at constant velocity on a horizontal plane. In that way, he would have measured correctly the dynamical friction and, as an added bonus, he would have perhaps also understood the principle of inertia! In any case, he correctly formulates the laws of friction which he summarizes in the "folio" 187 of the Atlantic Codex:

1. *Quelli corpi che son di più pulita superficie hanno più facile confragazione.*
2. *Infra li corpi di ugal lubricità il più grave ha più potente resistenza nella sua confragazione.*
3. *'N un corpo d'ugal lubricità e di lati inequali la confragazione fatta da qualunque d'essi lati non muterà potenza nel resistere al suo motore.*

In the first, he states that friction depends on the conditions of the two surfaces in contact. In the second, he states that the frictional resistance depends on the weight of the body. In the third, he states that the frictional resistance for the same weight is independent of the area of contact. The discovery of the laws of friction 200 years before Amonton stated the very same laws is a remarkable achievement. The fact that at that time Luca Pacioli, who taught algebra to Leonardo, did not use yet symbolic representation of known and unknown quantities prevented Leonardo from stating the second law as $F_A = \mu N$. However, as described in detail by Hutchings, he uses in many applications values of the coefficient of friction which he must have

determined from the ratio of frictional force to weight although it is not clear if the coefficient refers to static or dynamic friction. It is true that Leonardo never records and describes quantitatively the results of his measurements, but the judgment of C. Truesdell [8], who claims that Leonardo never did any experiment in his life, appears too harsh!

Leonardo is interested in applying the laws of friction to the study of the effort necessary to draw a cart on wheels such as the carriages that carry cannons and other materials on the battlefield. Thus, first he tackles the problem of the difference between revolving friction and dragging friction. The drawing in [fig. 5](#), found in the Madrid Codex 165r c.1493–1497, is clearly designed for this purpose. Leonardo understands that the revolving friction is much smaller than the dragging one. He gives a very elaborate and obscure explanation of the revolving friction, but he accompanies it with a drawing which is self-explanatory (see [fig. 6](#)). In fact, he shows that to move a wheel, even heavily loaded, only the very small force required to move the wheel from one equilibrium position to the next is sufficient.

As long as the wheel rolls, the friction is static and much larger than the dragging friction. A great anticipation of the ABS (Assisted Braking System)!

In the drawing in [fig. 6b](#), he indicates that a wheel loaded by a huge weight (900 000) can be displaced by a tiny one (1/900 000). The numbers are purely indicative and in arbitrary units! Once again, he is more at ease with drawing and geometry than with words and mathematics.

At this point, Leonardo tries to understand where the resistance to the movement of a wheel comes from. After several wrong attempts, he understands correctly that the friction force acts on the axle of the wheel and that the crucial parameter is the circumference of the axle. The drawing shown in [fig. 7](#) (from the Atlantic Codex 561r, c.1487–90) demonstrates that he planned experiments to understand the effect. There is no report of quantitative measurements, but somehow he states that the friction is less if the circumference of the axle is smaller, and he even correctly concludes that the force necessary to draw a cart is the frictional force scaled by the ratio of the circumference of the axle to that of the wheel. By using the definition of work, the result follows immediately by equating, approximately, the active work to the passive one, i.e., $F \cdot C_W = F_A \cdot C_A$, from which $F = F_A \cdot C_A / C_W = F_A \cdot d_A / d_W$, where C and d are the circumference and the diameter of the wheel, and the subscripts W and A refer to the

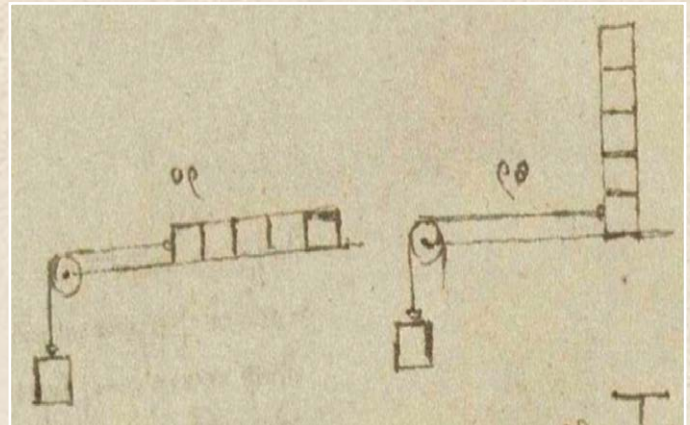


Fig. 4 Drawings of Leonardo for possible experiments about the dependence of the frictional force on the area of contact (Madrid I 173v, c. 1493-7, Biblioteca Nacional, Madrid).

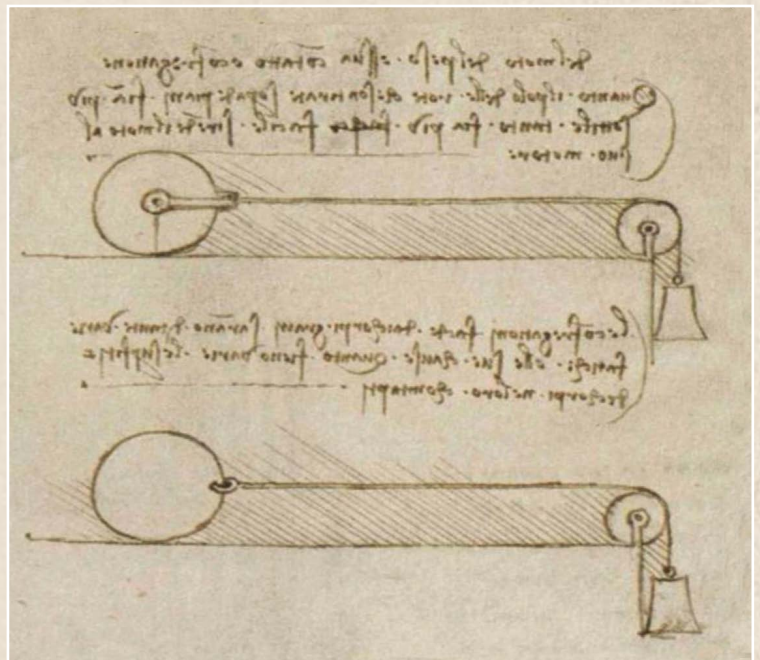


Fig. 5 Drawings of Leonardo suggesting an experiment to compare rolling friction with dragging friction (Madrid I 65r, c. 1493-7).

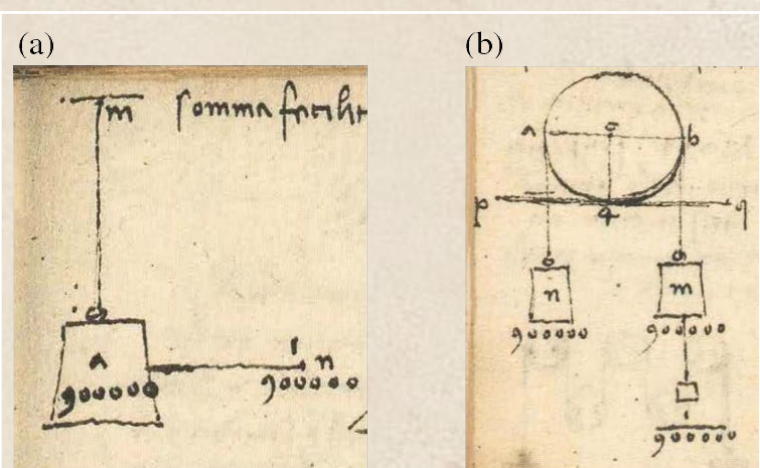


Fig. 6 Drawings by Leonardo for an experiment to prove that rolling friction is very small (Forster II 124v, 125r, c. 1497; images reflected for clarity).

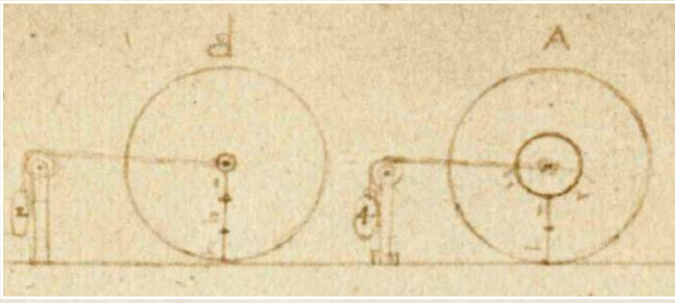


Fig. 7 Drawing by Leonardo to investigate the effect of the diameter of the axle on the dragging frictional force acting on a wheel (Atlantic Codex 561r, c. 1487-90).

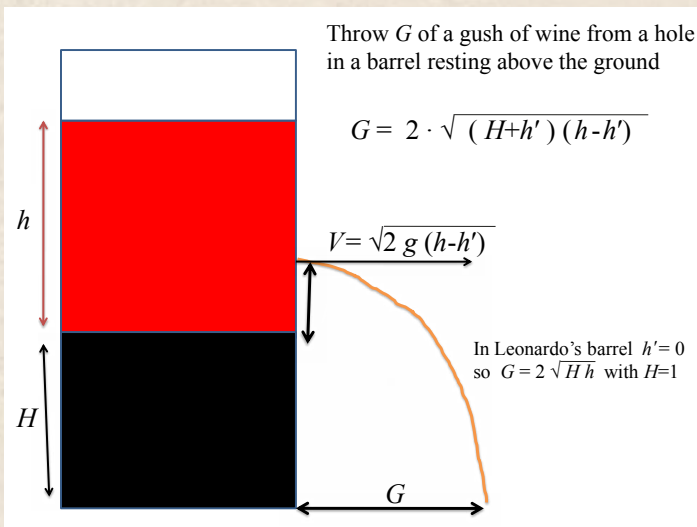


Fig. 8 In this drawing the results are summarized obtained on the basis of Torricelli's Theorem for the trajectory and the range of a gush of liquid exiting a hole in a barrel. h is the height of the liquid in the barrel and H is the height of the barrel from the ground.

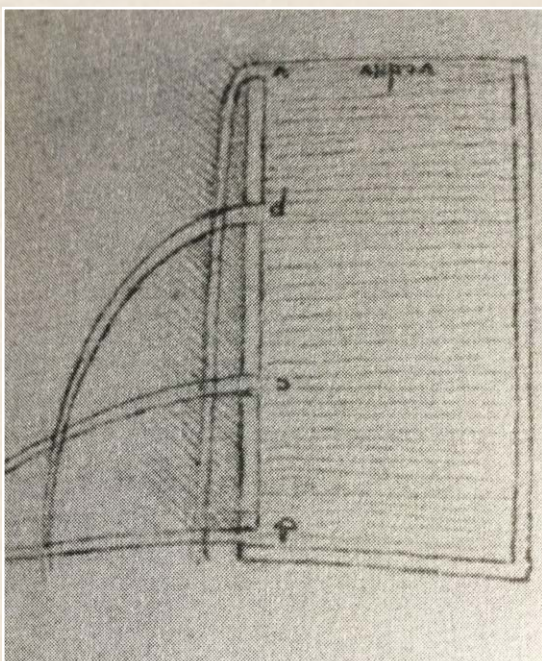


Fig. 9 Drawings from the Madrid Codex 1, 124r related to Torricelli's Theorem.

wheel and axle, respectively. How Leonardo could arrive at the correct result without the concept of work, without symbolic algebra, and even without any systematic and quantitative measurements is one more example of his extraordinary intuition which makes up for his mathematical shortcomings and his lack of quantitative experimentation.

In the Madrid Codex (46r, c. 1503–5), he sets up a scheme to use his discoveries to find out the force necessary to move a given cart for any given load. This is a summary of what he does expressed in my own words:

"He assumes a load of 96 pounds on a wheel having a circumference 24 times the one of the axle. He assumes a friction coefficient of 0.25. Thus the frictional force is 24 pounds and the force to move the wheel is 1 pound. Now he can calculate the force necessary to move that particular wheel for any load. If, for example, the load is 6000 pounds the force necessary to move the wheel is 62.5 pounds. To arrive at this number he uses what at the time was called the "rule of three" which in symbolic algebra is the solution of the proportion $96:1 = 6000:x$."

The choice of those particular parameters for the wheel and the load make the calculations very simple. One assumes that Leonardo used the method also for more complicate numbers, but he does not report any such example demonstrating his uneasiness with mathematics even when only multiplication and division are involved.

In the paper by Hutchings, there are several more examples of applications of the laws of friction by Leonardo, but the ones illustrated here are sufficient to draw conclusions about Leonardo's methods in his physical research:

1. With his drawings, he proposes experiments which either he does not execute or, if he does, quantitative results have not been reported.
2. He arrives at the formulation of correct laws and conclusions with great intuition and imagination by using analogical more than deductive reasoning and with no use of mathematics.
3. He expresses his thinking better with drawing and geometry than with words and mathematics.

4 Fluid dynamics

Leonardo investigated the laws of fluid dynamics mostly in connection with his extensive work in the field of hydraulic engineering. He came to a remarkable understanding of the equation of

continuity and of the flow capacity for a stationary motion in a rigid pipe. He derived these concepts from the idea of the conservation of mass and understood that the flow is the product of the velocity times the section of the pipes. However, he never expressed these concepts in mathematical terms but he simply stated, correctly, that where the pipe (or river) is narrower the velocity is greater.

In the Leicester Codex 6v he says: "*Ne fiumi di qualunque varia di largeza e profondita a cha de per necessita che in ogni grado della sua lungheza con equal tempo passa equal quantita d'acqua*" ("In the rivers of whatever size and depth it is necessary that in any point of its path for the same time there is the same amount of water flowing").

In Manuscript A, 57 r he says: "*Il fiume d'equale profondita sara tanto piu fugha nella minore largheza che nella maggiore quanto la maggiore largheza avanza la minore ...*" ("In a river of constant depth the flow will be faster in the regions of less width than in the wider ones by as much as the wider size is bigger than the smaller size...") In the same "folio" he continues: "...*Esenplo. Verbigratia se fia un loco che abbi 3 varie largheze ...*" by describing in a poetic way the analogy of the flow of water in a river with the flow of a crowd of people in a street of variable width whereby he points out that where the street narrows people are forced to walk faster to keep up with the flow of the crowd (a reader who knows Italian will recognize that the above three quotes are in the original Leonardo's language).

Leonardo was intrigued by the problem of the velocity with which a liquid spurts from a hole or an opening in a container as a function of the depth of the hole from the free surface of the liquid. This is the problem solved by Torricelli which goes under the name of Torricelli's Theorem. The interest of Leonardo for Torricelli's Theorem is twofold. On the one hand, the problem is important when bottling the wine from a barrel, and Leonardo did produce wine for a short time in his life when Ludovico il Moro gave him a piece of land close to the church of Santa Maria delle Grazie as a gift (the "vigna di Leonardo" has been recently restored in the same place and with the same kind of grapes and is open to the public to be visited). The other application is to measure the amount of water drawn from a gate in irrigation channels. In the following section, I will show how Leonardo tackled these problems.

Regarding the problem of bottling the wine, in the Manuscript I 7r he says: "... *se una botte ha in se il vino alto 4 braccia e gitta il vino lontano da se 4 braccia, quando il vino sarà nel calare disceso all'altezza di 2 braccia della botte gitterà ella il vino per la medesima cannella ancora 4 braccia? Cioè se il calo e l'empito del gittare della cannella diminuisce con equale proporzione o no ...*" ("if a barrel contains wine up to 4 'braccia' (a unit of the order of a yard) and gushes the wine 4 'braccia' away, when the wine in the barrel is lowered to a

level of 2 'braccia' will the wine gush still 4 'braccia' away? In other words if the level of the wine and the speed of exit from the hole decrease in equal proportion or not ...").

Clearly Leonardo does not have the answer and so, as he does in many other instances, he poses the problem in the form of a question. Actually, the range reached by the wine spurting from the hole depends on the initial velocity and the level of the hole from the ground. This is illustrated in [fig. 8](#) based on the current knowledge of Torricelli's Theorem and parabolic motion (see also [fig. 9](#) and [fig. 10](#)).

From what Leonardo says, it appears that the barrel is set 1 "braccia" from the ground although he does not explicitly state it. In fact, for $H=1$ and $h=4$ the range or throw G is also 4 "braccia" as stated by Leonardo. Of course, Leonardo did not know the laws of parabolic motion of a mass in the gravitational field. However, he seems to understand that for a constant height from ground the range G is proportional to the initial horizontal velocity. Thus, he has a way to measure the velocity (which he calls "empito") as a function of the level of the wine above the hole. What clearly throws him off is that the velocity is not proportional to the level h but to the square root of h . I am convinced that he did try to answer the question that he poses above but got confused by the fact that the throw G , when the level decreases from 4 to 2 "braccia," does not decrease from 4 to 2 but from 4 to $2\sqrt{2}$. If he had known the square root (which he should have), and he had used symbolic algebra (which he could not at his time), he would have discovered Torricelli's law!

The trajectories of the water spurting from holes at different levels are only qualitatively correct. As usual, Leonardo does not report any quantitative and systematic measurements. In some cases, the drawings are also incorrect. Thus, we can conclude that Leonardo understood that the speed with which water spurts from a hole in a barrel is higher when the level of the water above the hole is higher, but he does not go any further and does not seem to relate the effect to hydrostatic pressure (a concept familiar to him from Archimedes work).

Leonardo did realize that the spout of water out of a container due to hydrostatic pressure allowed an easy way to investigate parabolic motion. He could not understand parabolic motion without the knowledge of Newton's laws, but he could study it and describe it in a phenomenological way. This problem was important to him to understand and design the throw of cannon balls. A device he used for the purpose is described in [fig. 11](#). It is a clever device made up of a pressurized rubber container where he applied spigots that he could orient in different ways to simulate all kinds of trajectories.

Related to hydrostatic pressure are also Pascal's principle and the principle of communicating vessels which were already known by the Hellenistic scientists. Leonardo

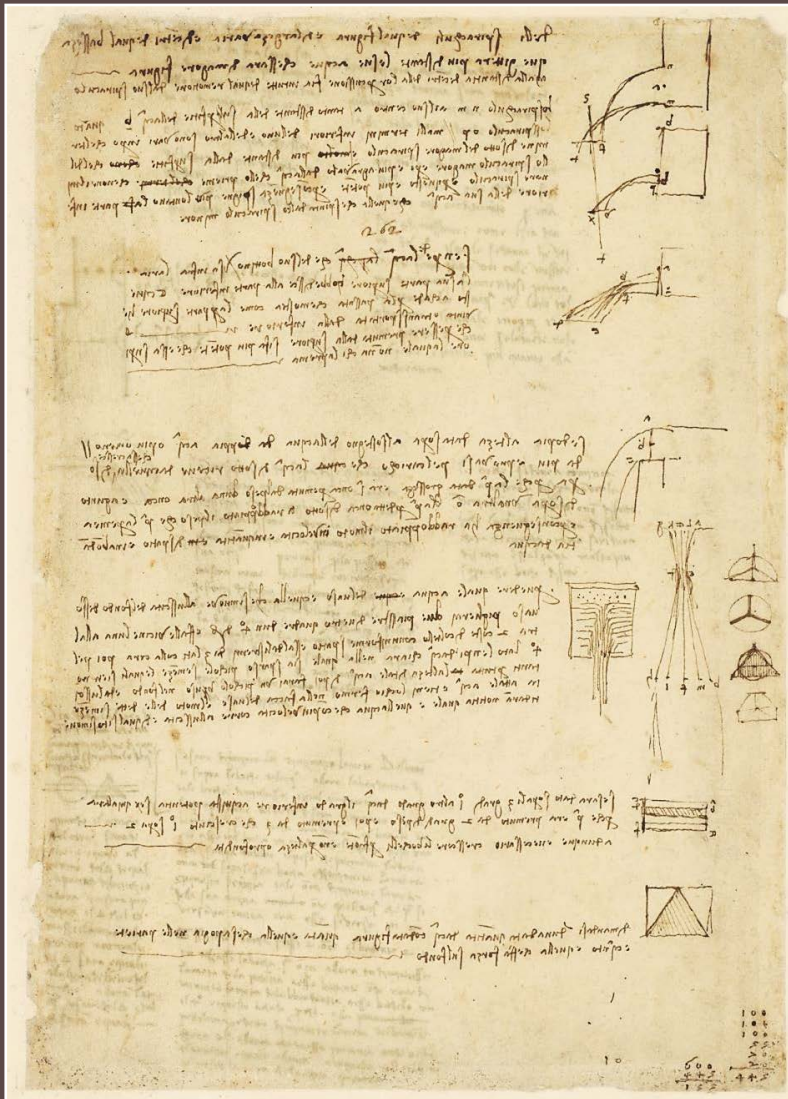


Fig. 10 More experiments from the Atlantic Codex 219r describing the trajectory of gushes of water from a barrel or a container.

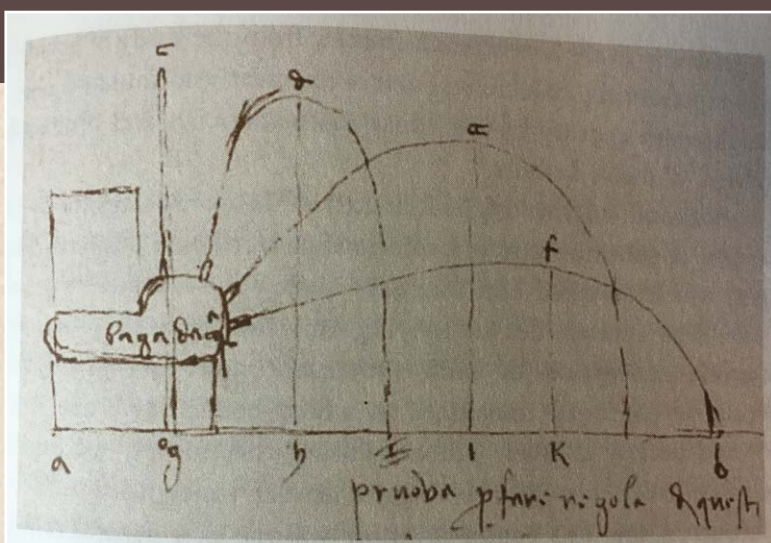


Fig. 11 Drawing of Leonardo's device to investigate the trajectory of cannon's balls. Ms. C, folio 7r.

understood both but, as demonstrated by what he says, he draws his conclusions from observation rather than experimentation:

"... il mare è la più bassa parte del mondo: nessuna superficie d'acqua può per sua natura essere più bassa che quella del mare. La sfera dell'acqua desidera perfetta rotondità e quella parte che supera la sua universal superficie non può durare e con breve tempo si spiana" ("... the sea is the lowest part of the world: no water surface can by its nature be lower than the one of the sea. The sphere of the water desires perfect roundness and the portion that surmounts its universal surface cannot last and in a short time makes level").

In the process of bottling his wine he also dealt with the functioning of the siphon, an instrument already used and described by Egyptians and Greeks. He draws many examples as shown in fig. 12 but he does not even try to explain the effect which is not trivial anyway. However, he does come to the correct conclusion that in order for a siphon to work the exit hole of the siphon has to lie below the level of the liquid in the container, which indicates at least in this case that he did perform some experiments!

Leonardo's incomplete understanding of Torricelli's Theorem does not prevent him from providing the Duke Ludovico il Moro a great service in correcting the way water flow was measured. In fact, at that time the unit "oncia" used to measure the amount of water dispensed by the irrigation channels was based on the surface of the gate to be open and the time duration of the irrigation. The exit speed of the water was not considered. Leonardo realized that the speed depends on the level of the gate with respect to the level of the water in the channel (as from Torricelli's Theorem) and thus proposed a change in the definition of the "oncia" to take into account the effect (fig. 13). He did not build himself any device to monitor the flow, but the ones built at his time and improved in later centuries are based on Leonardo's observation.

Even in this case one can see that Leonardo was not interested in reaching a complete and correct statement of the physical laws. Once he had understood

enough to solve his practical problems, he would be satisfied!

After completing this paper I was made aware by Prof. Hutchings of the monumental work by Enzo Macagno on the fluid mechanics of Leonardo which can be found in the numerous monographs and references on the web site <https://ir.uiowa.edu>. Macagno's work is based on a very strict and severe methodology which requires, according to him, the use of only the original writings of Leonardo which are organized and reported in the original form with all the mistakes, lack of punctuation, omissis, misspellings. The result is a very rigorous and compelling panorama of Leonardo's writings and drawings in the field of fluid mechanics but it has the disadvantage of being very analytical and lacking a critical synthesis. In reading the parts related to my very limited analysis of Leonardo's study of hydrodynamics I could not find anything contradicting my conclusions contained in the next section. I quote here a comment by Macagno in the introduction of one of the four volumes he entitled "*Libro dell'acqua*" (Book of water) where he organizes most of the observations of Leonardo on fluid mechanics.

"Leonardo's conception of applied hydraulics was also very ample; in addition to traditional concerns of hydraulic engineers for centuries and even millennia, he favored the inclusion of the study of their beautiful patterns water can produce in properly designed devices. He did not exclude the pleasant sounds that can be generated, the music that can emanate from water when falling from a fountain or some other device. That I know, there is no text on hydraulics in the twentieth century that has included the music of water or the ways to produce beautiful patterns with flowing water just for the sake of the esthetical pleasures we can derive from it."

In this quote by Macagno there is the confirmation that Leonardo's observations in physics are more the result of his artistic temperament than his scientific interest.

Nevertheless, had I known Macagno's very comprehensive analysis, I would have given much more space and credit



Fig. 12 One of the many drawings by Leonardo describing the functioning of the siphon. Leicester Codex, 3A, folio 34 verso.

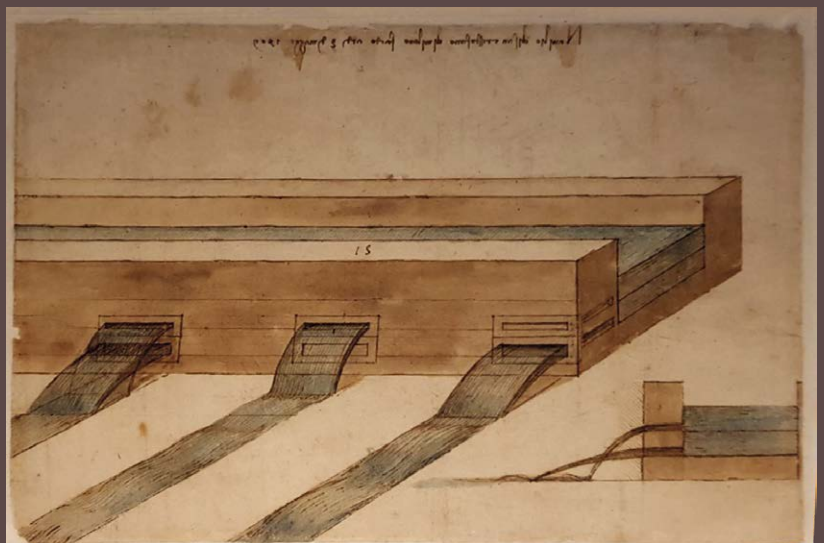


Fig. 13 In the Atlantic Codex, folio 831 r, the system is depicted to dispense water in the *Naviglio di san crisstofanodjmilano facto addi 3 di maggio 1509* (by permission of Ing. Alessandro Paoletti).

to the impressive amount of observations and qualitative understanding of fluid mechanics by Leonardo.

5 Conclusions

Although Leonardo enunciates correctly the principles on which the modern experimental scientific method is based, he does not seem to implement them and thus we cannot say that he anticipated the scientific revolution of Galilei. Part of the problem is his limited understanding of mathematics. Of course, many necessary mathematical tools were not available at his time, like symbolic algebra or calculus, but even the tools available were not very familiar to him.

But the main problem is that he uses the experimentation in a limited way. In fact, he often draws experiments, but he then fails to follow up with the implementation of his drawings or never gives quantitative results for the experiments granted that he did perform them at all.

Furthermore, the reasoning that follows his experimentation is more often analogical than inductive.

He did much better with geometry which is more directly related to his extraordinary ability as an artist, and this explains why he was very successful as a descriptive scientist

in areas such as anatomy, engineering, geology, botany, cartography. As a visual scientist, he is very successful because of his insatiable curiosity and immense ability to observe nature and phenomena and describe them with his drawings. In this way, he arrives often at incredible intuitions. Still, an experimental science like physics ultimately requires specific experiments to interrogate nature and in this way to materialize the intuitions, and this is not generally done by Leonardo.

The great scientific merit of Leonardo is the one of having helped to rediscover the great knowledge of the Hellenistic world and at the same time of having pointed out the necessity to check with one's own experience the validity of previous knowledge without fear of rejecting what appeared to be incorrect. In this respect, he stands, as stated so well by Luigi Borzacchini [6], a solitary giant connecting the old scientific world to the new.

Acknowledgements

I would like to thank A. Rigamonti and P. Mazzarello for stimulating discussions and A. Borsa for a critical reading of the manuscript

References

- [1] M. Catani, P. Mazzarello, "Leonardo Da Vinci, a genius driven to distraction", *Brain*, 142 (2019) 1842.
- [2] G. Govi, "Leonardo letterato e scienziato, Saggio delle opera di Leonardo da Vinci" (Ricordi, Milano) 1872, pp. 5-22.
- [3] L. Infeld, "Leonardo Da Vinci and the fundamental laws of science", *Science and Society*, 17 (1953) 26.
- [4] D. Argentieri, S. Timpanaro, "Leonardo", edited by Ralph Steadman (Jonathan Cape Ltd, London) 1983.
- [5] F. Capra, "The science of Leonardo: Inside the mind of the Great genius of the Renaissance" (Anchor Books, New York) 2007.
- [6] L. Borzacchini, "La solitudine di Leonardo. Il genio universale e le origini della scienza moderna" (Edizioni Dedalo) 2019.
- [7] I. M. Hutchings, "Leonardo Da Vinci's studies of friction", *Wear* 360-361 (2016) 51.
- [8] C. Truesdell, "The mechanics of Leonardo da Vinci" (Springer, Berlin) 1968.

Additional readings

- J. P. Richter, "The notebooks of Leonardo da Vinci" (Dover Publications) 1970 – original publication 1883.
- L. Beltrami, "Scritti di Leonardo" (Istituto Editoriale Italiano) 1920.
- C. Pedretti, "Leonardo da Vinci" (Giunti Gruppo Editoriale) 2000.
- M. White, "Leonardo: the first scientist" (St. Martin Press, New York) 2000.
- A. Marinoni, Trascrizioni codice atlantico, Vol. 1, 2, 3.
- P. Galluzzi, Mostre, Conferenze, Interviste, Articoli, Internet.
- D. Laurenza, "Enciclopedia Treccani", ottava appendice, 2013.
- C. Nicholl, "Leonardo da Vinci: Flights of the mind" (Penguin books, 2004).
- S. Klein, "L'eredità di Leonardo" (Bollati Boringhieri) 2017 (2005).
- M. De Micheli, "Leonardo da Vinci, l'uomo e la natura" (Feltrinelli) 1991.
- W. Isaacson, "Leonardo da Vinci" (Simon and Schuster) 2017.
- C. Vecce, "Leonardo" (Salerno editrice) 2005.
- E. Zanon, "Codex on flight" (Leonardo 3 srl) 2000.
- G. Giovannetti, "Indagine su Leonardo" (Effigie) 2015.

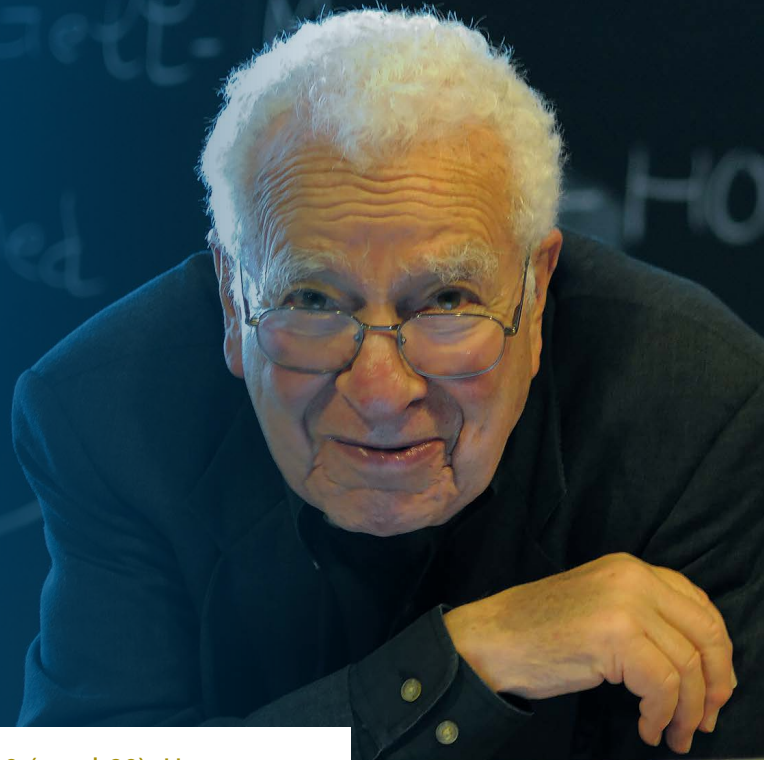
Ferdinando Borsa

Former Professor of Physics at the University of Pavia, Italy and Emeritus Professor of Physics at Iowa State University, Ames, USA. Member of Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere. Fellow of the American Physical Society. Expert in Nuclear Magnetic Resonance applied to problems in solid state physics with particular emphasis on phase transitions, metals and superconductors, low dimensional and molecular magnetism. Long experience in teaching physics for life sciences and author of textbooks on physics for biomedical sciences.

IN MEMORIAM OF MURRAY GELL-MANN

FRANCESCO FUCITO

Università di Roma Tor Vergata, Roma, Italy



Murray Gell-Mann passed away on May 24th, 2019 (aged 89). He was one of the most prominent physicists of his generation and had a tremendous impact on the development of theoretical physics in the years from the beginning of the fifties to the mid-seventies. As a boy, Murray Gell-Mann excelled in every possible field of academic study, except one –physics– but after he decided to pursue it as a career, he emerged as the era’s most brilliant and original mind in the field. In his 20s, he revolutionized the study of particle physics, and for the next two decades, he dominated the field. He was awarded the 1969 Nobel Prize in Physics, for bringing order out of the chaos of particle theory. Even a short list of his discoveries reads like a history of mankind’s evolving understanding of the building blocks of matter.

© Melirius

The California Institute of Technology (CALTECH), where Murray Gell-Mann spent most of his professional life, started at the end of the sixties a program called The Caltech Archives with the aim of keeping alive the collective memory of his community. Part of this program were a series of interviews (collected under the name of Oral History) to his distinguished scientists. In his interview Gell-Mann recollects his early years: he was born in New York City in 1929 from a family of Jewish immigrants from the former Austro-Hungarian empire. His father had attended the University in Vienna and then in Germany but when his family, which was already in the United States, encountered some financial difficulties he was urged to join them and suspended his studies. He had many jobs and in 1910 he met Gell-Mann’s mother whom he married in 1919. It was around that time that he opened a language school that closed a dozen years later due to the economic depression and the 1924 Immigration Act which diminished drastically the number of new immigrants. He finally landed a job in a bank where he stayed until he retired.

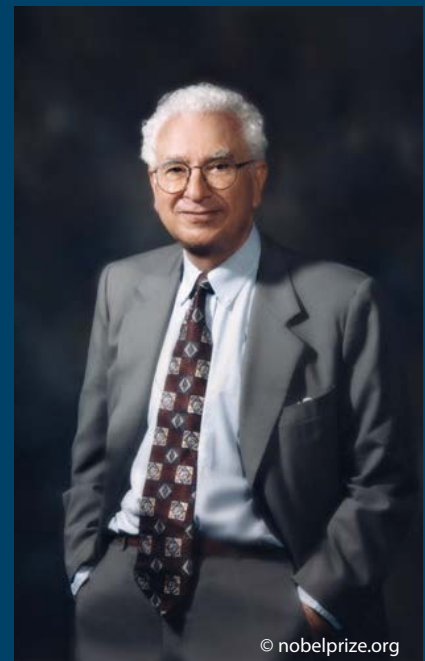
Gell-Mann’s mother was a brilliant high school student but eventually left her studies and went to work. She always thought his son Murray was particularly gifted and she took him to a great variety of schools to be tested. Finally he started public school in the Bronx where, in a year and half, he passed the first three grades. He was then accepted at Columbia Grammar School with a full scholarship since his family had no money: he started there the sixth grade, skipping the



© nobelprize.org

fourth and the fifth. He stayed there until the end of high school. In those years physics and mathematics were not the focus of his interests which lay in archeology, history, linguistics, natural history. Some of these interests were also cultivated in later years. In 1944, at the age of fourteen, he was admitted to college at Yale. When it was time to fill the application for a major he was thinking of archeology or linguistics but his father discouraged him saying: "You'll starve". Physics was then a compromise given that he thought himself totally inapt at engineering. In his physics classes during high school he got bad grades and, as a result, he hated it. His father though encouraged him saying: "Quantum mechanics and relativity are marvelous." So he took physics and soon discovered that, as his father said, quantum mechanics and relativity were marvelous indeed. When it was time to apply for graduate school, Yale and Princeton turned him down while Harvard accepted him but did not give him an opportunity to make some money to support himself. So he went to MIT which gave him the opportunity to be the assistant of Viktor Weisskopf, his advisor. In a couple of years his thesis was ready: the subject was the shell model in nuclear physics. At that time the shell model was considering the nucleons almost as free particles and it gave good results for the ground state and the first excited states of the nuclei. But there was a lot of evidence that the coupling in the nucleus was strong so Weisskopf thought that somehow the two different scenarios should be compatible and he assigned Gell-Mann the task to work out the case of intermediate coupling. Gell-Mann supplied parts of the answer and that was his PhD dissertation. This work was never published because he thought it was not good enough. This was a distinct trait of his character: he was a perfectionist. Therefore he was very slow in publishing and that happened also later in his career. Eventually this problem was completely solved by Lane, Thomas and Wigner. At the beginning of 1951 he moved to Princeton where he started a collaboration with his office mate Francis Low. His first breakthrough happened in 1953 when he was Associate Professor at the University of Chicago. At the time the world of elementary particle physics was very different from nowadays. Particle accelerators were producing a lot of particles besides nucleons: muons, pions, kaons, hyperons and all of them were unstable. All of these particles were generated by the strong nuclear force but their decay could only happen through the weak force. How could that be possible? Gell-Mann then postulated the existence of a new quantum number, the "strangeness", which ought to be conserved by strong and electric forces but was violated by weak interactions. Protons, neutrons had strangeness zero, while the hyperon Λ had strangeness -1 , the positive kaon $+1$ and so on. Gell-Mann's idea was able to explain many observed phenomena. During the summer of that year, Gell-Mann visited his ex office mate Francis Low at the University of Urbana Champaign where he was an Assistant Professor. At that time the infinities which were plaguing electrodynamics (QED) had already been tamed by the work of Feynman, Schwinger, Tomonaga and others with the procedure named renormalization which made mathematical sense of the QED expansion in the coupling $\alpha=1/137$. But Gell-Mann and Low wanted to explore the theory at all orders in α . This work is the precursor of the modern Renormalization Group which was much later developed by Kenneth Wilson (and many others) in the seventies. Wilson was Gell-Mann's student at Caltech and graduated in 1961. Gell-Mann has always thought this contribution did not get the attention it should have deserved. By now Gell-Mann had moved to Caltech where he joined the faculty as an Associate Professor of Physics, became Professor in 1956 and Millikan Professor in 1967. In 1957 in his only collaboration with Richard Feynman he put forward the $V-A$ theory (also Marshak and Sudarshan came to similar conclusions a little earlier) in which the weak interactions act only on left-handed particles (and right-handed antiparticles). Since parity reflects a left-handed particle into a right-handed one, this explains its maximal violation. During the fifties and part of the sixties, it became clear to physicists that the strong interactions could not be treated the way QED was treated, using perturbation theory. So they devised a new computational scheme called S -matrix to deal with scattering amplitudes. According to this idea the mathematical form of the scattering

amplitudes could be recovered by its known properties like analyticity with respect to certain values of the momenta, crossing symmetries, etc. Curiously enough these methods have resurfaced recently in connection to certain developments of field and string theory. But Gell-Mann's idea was completely different from all of this: he thought that elementary particles could be accommodated in the representations of a certain Lie group, $SU(3)$. Now Lie groups were not completely unknown to physicists, since rotational symmetries were used in nuclear physics to characterize spectral lines but the idea of accommodating the quantum numbers in the representations and the type of mathematics involved were completely new even if similar conclusions were also reached by the Israeli scientist Yuval Ne'eman. So in 1961, he published his eightfold way (named after Buddha's Eightfold Way) according to which there should be $8 + 1$ types of mesons, and $10 + 8$ types of baryons (hyperons plus nucleons, such as proton and neutron). This classification not only was in agreement with the known particles but also carried a prediction for a new one, the Ω^- of strangeness -3 and certain mass and decay features which were observed in 1964. At the same time the eightfold way did not explain the interactions among different particles and this induced Gell-Mann to introduce his current algebra. He then soon realized that his $SU(3)$ symmetry could also be used to imagine the proton as composed of more fundamental entities which he called quarks. At the beginning it was not clear if quarks were physical entities or a mathematical device: they had to have fractional electric charges while until then physicists were accustomed to thinking of the quantized electric charge in units of the electron charge but even more important, quarks were not observed. At almost the same time a Caltech student, George Zweig (who was then visiting CERN), came up with a very similar idea and he called these fundamental objects "aces". He later became Professor at Caltech but eventually quit physics to study the neurobiology of the ear. Meanwhile Gell-Mann continued to work on his idea and at the beginning of 1968 the collisions of high-energy electrons with protons ("deep inelastic scattering") at particle accelerators showed that sometimes the electrons could suffer large deflections. This triggered Feynman to put forward his parton model (which Gell-Mann called "put-on") in which the proton contained point-like "parton" particles. It did not take much to guess that these partons were Gell-Mann's quarks and in a couple of years this identification was resting on solid basis. In 1969 Murray Gell-Mann was awarded the Nobel Prize in Physics "for his contributions and discoveries concerning the classification of elementary particles and their interactions." Still quarks were not observed. The idea of introducing a new quantum number, "color", had already been put forward but it was in 1973, in collaboration with Harald Fritzsch, that it was hypothesized that color was "similar" to the electric charge and that it was mediated by "gluons," that hold quarks together. As photons mediate the electromagnetic $U(1)$, so gluons do for the color $SU(3)$: this theory is known as quantum chromodynamics (QCD). In the years that followed there were many new developments that strengthened this scenario: in 1974 the J/ψ meson was observed. It is made of a quark-anti-quark pair of a new flavor: the charm. In 1978 a fifth quark was observed. In the meantime the behavior of QCD at high energies was explored and it was realized that the QCD coupling at these energies becomes weak, thus explaining Feynman's parton model. Once again this discovery (the computation of the β -function) had a precursor in the paper of Gell-Mann and Low of few years before, where they introduced the ψ function which had similar properties. At the beginning of the eighties the so-called Standard Model which incorporated in the same frame electromagnetism, weak interactions and quantum chromodynamics had already been put on solid basis. It was then in September 1982 that I joined the Caltech faculty as a post doc with a three-year Weingarten Fellowship (I was told later that Mr. Weingarten disliked his son so he left his money to Caltech. Of this I was very glad). Even though the time of his best intuitions was passed, Gell-Mann was still very active: he was interested in Grand Unification, Supersymmetry, Supergravity and was curious of everything. He also played a major (but indirect) role in the development of superstring





theory supporting John Schwarz in his research in years during which many were skeptical of his approach. But Gell-Mann always backed him up allowing him to keep on with his research and to invite his collaborators Michael Green, Lars Brink and many others to Caltech. That until 1984 when John Schwarz and Michael Green showed that Superstring Theory had sound mathematical basis being anomaly free. From that point on Superstring Theory became one of the major lines of research in theoretical physics. In those years Gell-Mann was also very active in promoting the Santa Fe Institute for complex systems which he co-founded in 1984 and where he moved after retiring from Caltech in 1993. With us, young post docs, he was very friendly and supportive. I remember being invited with others to his home and being asked all kind of questions on many subjects, not only physics. I never attended his lessons though. He was known not to prepare his lessons which were sometimes very messy. In Caltech there was a weekly lunch seminar. That was the stage for the weekly Murray vs. Dick (Feynman) show. Caltech was not large enough for those two egos even if they had neighboring offices for almost four decades. I think Gell-Mann suffered from Feynman's flamboyant personality: the latter was a show man (and what a show!) driving a van painted with diagrams and wearing a

cow boy belt, the former was a refined intellectual speaking many languages, caring for the right accents, studying linguistics, archeology, who loved bird watching and travelling to foreign countries. He was a master in naming things: The Eightfold Way, Quarks (from the by now famous quote among physicists from Joice's novel "*Finnegans wake*": "Three quarks for Muster Mark!"). How many physicists had that kind of universal culture? Murray Gell-Mann left a deep imprint on physics for more than two decades.

Besides the Nobel Prize he got many other prizes and recognitions during his career: the Dannie Heineman Prize for Mathematical Physics (1959), the E. O. Lawrence Award (1966), the Franklin Medal (1967), the John J. Carty Award (1968), the United Nations Environment Programme Roll of Honor for Environmental Achievement (1988), the Einstein Medal (2005), the mention from the American Humanist Association – Humanist of the Year (2005), the Helmholtz-Medal of the Berlin-Brandenburg Academy of Sciences and Humanities (2014). He was a member of the National Science Academy and Foreign member of the Royal Society, received honorary degrees from Cambridge, Columbia, the University of Chicago, Oxford and Yale. His work not only deeply affected his generation but also those of later generations which further developed many of his intuitions.

Francesco Fucito

Research Director at the INFN Tor Vergata section, he graduated in 1981 from La Sapienza University in Rome with a thesis entitled "Calcolo degli indici critici della percolazione", supervisor G. Parisi. He was post doc at the California Institute of Technology (1982–1985), a fellow at CERN (1988–1990) and a researcher at the University of Rome Tor Vergata from 1982 to 1995. In his career he worked on statistical mechanics, lattice gauge theories, non-perturbative effects in supersymmetric theories, string theories and gravity.

CERIMONIA INAUGURALE 105° CONGRESSO NAZIONALE DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

L'AQUILA, 23 SETTEMBRE 2019



Cerimonia Inaugurale del Congresso presso L'Auditorium del Gran Sasso Science Institute, L'Aquila.
Da sinistra: Pasquale Blasi, Luisa Cifarelli, Eugenio Coccia, Paola Inverardi, Stefano Ragazzi.

La Cerimonia Inaugurale del 105° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica si è svolta a L'Aquila presso l'Auditorium del Gran Sasso Science Institute.

Al tavolo d'onore accanto al Presidente della SIF, Luisa Cifarelli, sono presenti la Rettore dell'Università di L'Aquila, Paola Inverardi, il Rettore del Gran Sasso Science Institute (GSSI), Eugenio Coccia, il Direttore dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Stefano Ragazzi, e il Presidente del Comitato Organizzatore locale del Congresso, Pasquale Blasi.

Il Presidente Luisa Cifarelli dà il benvenuto a tutti gli ospiti, italiani e stranieri, ai presidenti e ai rappresentanti delle diverse associazioni e organizzazioni nazionali presenti all'inaugurazione. Ricorda che il Congresso della SIF si è già svolto più volte a L'Aquila: nel lontano 1971, poi nel 1991 e successivamente nel 2011, a due anni dal tragico terremoto del 2009. Ma il Congresso di quest'anno, dieci anni dopo, è particolarmente significativo.

Innanzitutto perché si svolge in questa nuova e importante realtà che è il GSSI, ma anche perché risente in maniera tangibile la rinascita di tutta la città, non solo dal punto di vista scientifico.

Viene quindi data la parola al Sindaco di L'Aquila, Pierluigi Biondi, e successivamente al Presidente della Regione Abruzzo, Marco Marsilio.

La parola passa poi per i saluti di rito alle Autorità sedute al tavolo.

Dopo gli interventi, Luisa Cifarelli ringrazia gli illustri ospiti per la loro presenza alla Cerimonia Inaugurale del Congresso e dà poi il via alla tradizionale Cerimonia di Premiazione.

La Cerimonia inizia con la consegna di 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:

- Roberto BARTOLINO dell'Università della Calabria, Socio Benemerito per i suoi contributi

dati alla Fisica Sperimentale della Materia.

- Fernando FERRONI del Gran Sasso Science Institute di L'Aquila, Socio Benemerito per i suoi contributi dati alla Fisica Sperimentale delle Particelle.

- Marco MARTINI dell'Università di Milano Bicocca, Socio Benemerito per i suoi contributi dati alla Fisica per i Beni Culturali.

- Piero MONACELLI dell'Università di L'Aquila, Socio Benemerito per i suoi contributi dati alla Fisica Sperimentale delle Particelle.

- Ileana RABUFFO dell'Università di Salerno, Socia Benemerita per i suoi contributi dati alla Fisica Teorica della Materia e alla Didattica della Fisica.

- Lucia VOTANO dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, Socia Benemerita per i suoi contributi dati alla Fisica Sperimentale delle Particelle.

- Clara FRONTALI dell'Istituto Superiore di Sanità, Socia Benemerita per i suoi contributi dati alla Didattica della Fisica.

La Cerimonia prosegue con l'assegnazione dei **PREMI PER LE MIGLIORI COMUNICAZIONI** presentate lo scorso anno al 104° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, che si è tenuto ad Arcavacata di Rende (Cosenza) dal 17 al 21 settembre. Questi si dividono in primo premio, secondo premio e menzione, e tutti danno dignità di stampa sulla rivista della SIF IL NUOVO CIMENTO.

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 (vengono nominati solo i premiati che avevano fatto sapere di essere presenti alla Cerimonia).

- Per la Sezione di **Fisica Nucleare e Subnucleare**, il Primo Premio ex aequo va a Luca MARSICANO dell'Università di Genova e INFN, Sezione di Genova, per la sua comunicazione "The Beam Dump eXperiment at Jefferson Lab"; e a Elisabetta SPADARO NORELLA dell'Università di Milano e INFN, Sezione di Milano, per la sua comunicazione "Observation of the $B_s^0 \rightarrow J/\psi p \bar{p}$ decays and precise B_s^0 mass measurement".

- Per la Sezione di **Fisica della Materia**, il Primo Premio ex aequo va a Carmelo CORSARO del Dipartimento MIFT, Università di Messina, per la sua comunicazione "Thermodynamic thresholds in water/methanol solutions"; e a Leonardo SALVI del Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze, per la sua comunicazione "Testing gravity with atomic quantum sensors". Il Secondo Premio ex aequo va a Giuseppe CASTRO dell'INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, per la sua comunicazione "Multi-diagnostics investigation of an ECR plasma confined in a simple mirror trap"; e a Francesco PECORA del Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, Arcavacata di Rende, Cosenza, per la sua comunicazione "Ion diffusion and acceleration in plasma turbulence".

- Per la Sezione di **Astrofisica**, il Primo Premio va a Vanessa ZEMA per la Collaborazione COSINUS, del GSSI, L'Aquila, Chalmers University of Technology, Göteborg, Svezia e INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, per la sua comunicazione "COSINUS: a NaI-based cryogenic calorimeter for direct dark matter search".

- Per la Sezione di **Geofisica e Fisica dell'Ambiente**, il Secondo Premio va a Ferdinando NAPOLITANO del Dipartimento di Fisica, Università di Salerno, per la sua comunicazione "Seismogenic fault

characterization in the Pollino area".

- Per la Sezione di **Biofisica e Fisica Medica**, il Primo Premio va a Gianluca DE MASI del Consorzio RFX di Padova, per la sua comunicazione "A low temperature atmospheric pressure plasma source for accelerating blood coagulation". Il Secondo Premio va a Ginevra BEGANI PROVINCIALI del NANOTEC-CNR, Laboratorio di Soft and Living Matter di Roma, per la sua comunicazione "X-ray phase contrast tomography for the investigation of ALS disease".

- Per la Sezione **Fisica Applicata, Acceleratori e Beni Culturali**, il Primo Premio ex aequo va a Daniela CIRRIANCIONE del Dipartimento di Scienze Matematiche, Informatiche e Fisiche, Università di Udine, per la sua comunicazione "Characterization of the Detector System for the XAFS beam-line of the synchrotron light source SESAME"; e a Francesca PETRONELLA dell'IPCF-CNR di Bari, per la sua comunicazione "Photoactive semiconductor nanocrystals for surface protection of architectural stone". Il Secondo Premio va a Francesca BONFIGLI dell'ENEA, C.R. Frascati e Dipartimento Fusione e Sicurezza Nucleare di Roma, per la sua comunicazione "Characterization of imaging detectors based on photoluminescence of radiation-induced defects in lithium fluoride for X-FEL beam monitoring".

- Per la Sezione **Didattica e Storia della Fisica**, il Primo Premio va a Adele LA RANA del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e ricerche "Enrico Fermi" di Roma, per la sua comunicazione "Il Dizionario Biografico dei Fisici Italiani: lo stato dei lavori". Il Secondo Premio va a Pasquale ONORATO del



Fernando Ferroni, Socio Benemerito.

Dipartimento di Fisica, Università di Trento, per la sua comunicazione "Dal mondo del caso alle leggi fisiche: modelli giocattolo per collegare la comprensione microscopica e macroscopica dei fenomeni fisici".

Seguono i **PREMI DI OPEROSITÀ SCIENTIFICA**.

I premi sono di due tipi e sono riservati ai giovani laureati in Fisica rispettivamente dopo il maggio 2012 e il maggio 2016. Questi premi sono solitamente intitolati ai passati Presidenti della Società Italiana di Fisica.

Per i laureati dopo il maggio 2012:

- Il **Premio "Ida Ortalli"**, Consigliere della SIF dal 1983 al 1994 e Primo Consigliere donna, va a Giuliana GALATI, laureata in Fisica all'Università di Bari, dottorato all'Università di Napoli Federico II, attualmente assegnista di ricerca presso l'INFN, Sezione di Napoli.

- Il **Premio "Pio Picchi"**, Consigliere della SIF dal 1974 al 1982 e Vice Presidente della Società dal 1983 al 1991, va a Sunny VAGNOZZI, laureato triennale all'Università di Trento, laureato Magistrale all'Università di Melbourne, Dottorato all'Università di Stoccolma, attualmente assegnista di ricerca presso l'Università di Cambridge.

Per i laureati dopo il maggio 2016:

- Il **Premio "Guido Piragino"**, Consigliere della SIF dal 2005 al 2013, va a Matteo ACCIAI, laureato in Fisica all'Università di Genova, attualmente dottorando presso la stessa Università.

- Il **Premio "Laura Bassi"**, prima donna socia dell'Accademia dell'Istituto delle Scienze di Bologna nel 1732 e prima donna al mondo a ottenere la cattedra universitaria di "Filosofia



Alberto Diaspro, vincitore del Premio per la Comunicazione Scientifica.



La vincitrice del Premio SIF-SoNS, Alice Manna.

Universa", va a Simona GARGIULO, laureata in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza", attualmente dottoranda presso l'Albert-Ludwigs-Universität di Friburgo.

- Il Premio **"Giuseppe Franco Bassani"**, Presidente della SIF dal 1999 al 2007 e Direttore della Scuola Normale Superiore di Pisa dal 1995 al 1999, va a Gianluca NAPOLETANO, laureato triennale all'Università di Napoli Federico II, laureato magistrale all'Università de L'Aquila, attualmente dottorando presso la stessa Università.

Segue poi 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". È consegnato da Emilia Campochiaro Preparata e va a Alessandro PODO, laureato all'Università di Pisa e perfezionando in Fisica alla Scuola Normale Superiore di Pisa, "per l'interessante proposta di nuovi modelli di materia oscura e loro verifica osservando gli effetti nel segnale di monopolio della riga cosmologica dell'idrogeno a 21 cm".

- 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. È consegnato dal Presidente della SoNS Roberto Senesi e va a Alice MANNA, laureata in Fisica all'Università di Bologna, attualmente dottoranda presso la stessa Università, "per le significative misure di sezioni d'urto indotte da neutroni di energie superiori a 200 MeV, prodotti presso sorgenti a spallazione, e per l'utilizzo di tecniche innovative e loro applicazioni allo studio di reazioni di fissione ad alte energie".

- Il PREMIO CONGIUNTO SAI-SIF **"GIOVANNI BIGNAMI"**, attribuito quest'anno per la fisica astroparticellare, va a Silvia CELLI, laureata all'Università di Roma "La Sapienza", dottorato conseguito al GSSI, attualmente ricercatrice presso l'Università di Roma "La Sapienza", "per i contributi alla fisica dei raggi cosmici, per quanto attiene sia all'analisi dei dati osservativi sia a sviluppi teorici originali".

- Il PREMIO **"PIERO BROVETTO" PER LA FISICA SPERIMENTALE DELLA MATERIA**, assegnato grazie al contributo della famiglia, va a Alessio Antonio LEONARDI, laureato in Fisica all'Università di Catania, attualmente dottorando presso la stessa Università, "per la realizzazione dei primi biosensori ottici label-free basati sulla luminescenza a temperatura ambiente di nanofili di silicio".

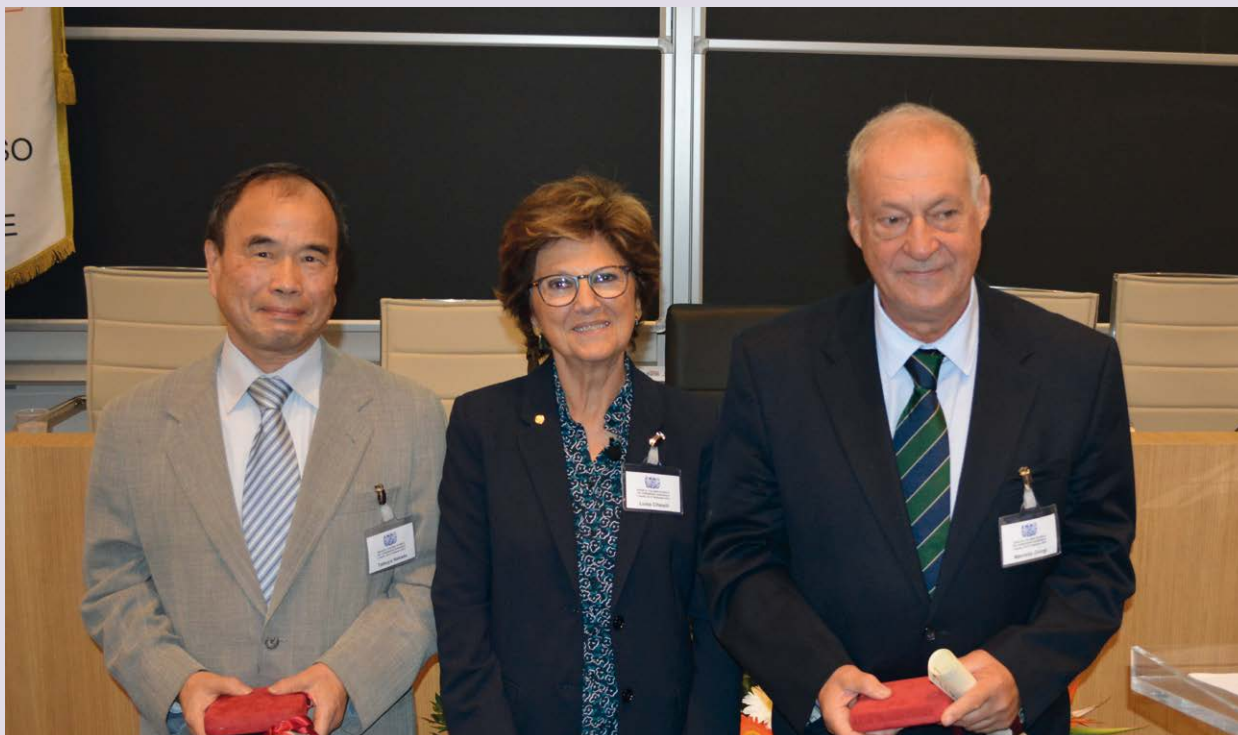
- La BORSA **"ANTONIO STANGHELLINI" PER LA FISICA TEORICA**, assegnata grazie al contributo della famiglia, va a Davide GIUSTI, laureato in Fisica all'Università di Roma Tre, attualmente dottorando presso la stessa Università,

"per i risultati ottenuti in fisica teorica delle interazioni adroniche con simulazioni sul reticolo, in particolare per chiarire la sussistenza dell'ipotesi di unitarietà della matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa".

- La BORSA **"ETTORE PANCINI" PER LA FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE**, assegnata grazie al contributo di Roberto Mazzola (CNR, Portici) va a Paolo GANDINI, laureato in Fisica all'Università di Milano, dottorato all'Università di Oxford, attualmente ricercatore all'INFN, Sezione di Milano, "per il contributo determinante alle attività dell'esperimento LHCb del CERN con particolare riferimento alle misure di spettroscopia e violazione di CP".

- Il PREMIO PER LA COMUNICAZIONE SCIENTIFICA va a Alberto DIASPRO del Dipartimento di Fisica, Università di Genova e del Dipartimento di Nanofisica, IIT di Genova, "per il notevole impegno su vari fronti della comunicazione scientifica, in particolare per la sua attività di pubblicista su importanti quotidiani e di autorevole organizzatore del Festival della Scienza di Genova".

- Il PREMIO PER LA DIDATTICA O LA STORIA DELLA FISICA è assegnato quest'anno per la Didattica e va a Fabio ZORATTI, studente Master in Fisica Teorica alla Scuola Normale Superiore di Pisa, "per il coordinamento di un gruppo di giovani fisici universitari nella realizzazione di stages finalizzati alla preparazione alle Olimpiadi della Fisica di studenti di Scuola Superiore".



I vincitori del Premio "Enrico Fermi" 2019 Tatsuya Nakada e Marcello Giorgi insieme a Luisa Cifarelli.

La Cerimonia si conclude con la consegna dei premi internazionali.

- 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 è stato selezionato dal Consiglio di Presidenza della SIF a partire da una rosa di candidati sottoposta dall'Award Committee dell'IOP.

Il Premio va a John BARROW del Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, "per contributi alla cosmologia, alla gravitazione e all'uso dell'astronomia per estendere la nostra comprensione delle costanti della natura e limitarne la possibile variazione nel tempo".

Infine viene conferito il 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 in bronzo che accompagna il Premio è una fedele riproduzione del medaglione in bronzo, opera di Giannino Castiglioni, posto nell'Aula Magna di Villa Monastero a Varenna nel 1954, quando l'Aula e la Scuola Internazionale di Fisica della SIF vennero intitolate a Enrico Fermi dall'allora Presidente Giovanni Polvani. Insieme alla medaglia viene anche consegnato un distintivo in oro che riproduce ancora lo stesso storico medaglione di Villa Monastero.

Il Premio "Enrico Fermi" 2019 è assegnato congiuntamente a Marcello GIORGI e Tatsuya NAKADA "per i loro eccezionali contributi all'evidenza sperimentale della violazione della simmetria CP nei settori del beauty e del charm, rispettivamente ai collisori e^+e^- e pp ".

In particolare a:

- Marcello GIORGI dell'Università di Pisa, "per il suo ruolo guida nella fisica delle alte energie, in particolare nell'esperimento BaBar e nella scoperta della violazione della simmetria CP nei sistemi di mesoni B con quark beauty".

- Tatsuya NAKADA, dell'École Polytechnique Fédérale di Losanna, "per l'ideazione e il ruolo cruciale nella realizzazione dell'esperimento LHCb che ha portato quest'anno alla scoperta della violazione di CP nei mesoni D con quark charm".

Le relazioni di M. Giorgi, T. Nakada e J. Barrow sono riportate nelle pagine seguenti.

THE ITALIAN PHYSICAL SOCIETY “ENRICO FERMI” PRIZE AND MEDAL 2019

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 2019 “Enrico Fermi” Prize and Medal have been jointly awarded to Marcello Giorgi and Tatsuya Nakada, “for their outstanding contributions in the experimental evidence of CP symmetry violation in the beauty and charm sectors at e^+e^- and pp colliders, respectively”. In particular to:

- Marcello GIORGI (Università di Pisa), “for his leading role in experimental high-energy particle physics with particular regard to the BaBar experiment and the discovery of CP symmetry violation in the B meson systems with beauty quarks”.
- Tatsuya NAKADA (EPFL, Switzerland), “for the conception and crucial leading role in the realization of the LHCb experiment that led this year to the discovery of the CP violation in D mesons with charm quarks”.

The road to the discovery of CP violation in B meson decay with BaBar

CP violation was firstly and unexpectedly observed in K_L decay in 1964 at Brookhaven by Christensen, Cronin, Fitch and Turlay. The international community of physicists was astonished and surprised by the experimental evidence of what, at that time, assumed as one of the pillars of particle physics was falling down. The CP violation was discovered in the $K^0 \bar{K}^0$ mixing and later in the years was strongly supported by many successful experiments. The crucial question was then: what is the origin of this violation, is it only possible in kaon decays and only with the mixing mechanism?

In the same period A. Sakharov in a famous paper on *Pisma Zh. Eksp. Theor. Fiz.* (1967) proposed an elegant interpretation of the strong matter-antimatter unbalance in the Universe. The hypothesis was based on three conditions:

- Baryon instability.
- C and CP violation.
- Thermodynamical non-equilibrium.

The violation of the discrete symmetries C and CP was therefore assumed as one of the conditions for the existence of this Universe as it is. While the parity P and the charge conjugation C violations were explained in the weak decay mechanism, the joint violation of C and P symmetry was not easily interpreted. Many models based on the existence of new interactions as Super-Weak or milli-Weak were suggested.

With his paper “*Violation of CP Invariance and the Possibility of Very Weak Interactions*”, *Phys. Rev. Lett.*, 13 (1964) 562, L. Wolfenstein suggested that the violation in $|\Delta S|=1$ decays of neutral kaons could only occur via the particle-antiparticle mixing and a mechanism of direct violation was excluded. Such hypothesis rather intriguing and its experimental verification appeared difficult, however, after almost 40 years this Super-Weak model was ruled out thanks to the measurements of $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ made by the two experiments Na48 at CERN and KTeV at FermiLab. On the other hand, in 1973 M. Kobayashi and T. Maskawa (“*CP Violation In The Renormalizable Theory Of Weak Interaction*”, *Prog. Theor. Phys.*, 49 (1973) 652) with the extension to three quark generations



the flavour mixing model originally proposed by Nicola Cabibbo ("Unitary Symmetry and Leptonic Decays", *Phys. Rev. Lett.*, 10 (1963) 531) gave an elegant interpretation of the violation mechanism within the Standard Model. The Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) paradigm explains the violation with the presence of an irreducible complex phase in the 3×3 unitary mixing matrix V . The validation of such a model could have been provided by the measurement of parameters related to the unitarity condition of $V(VV^\dagger = I)$. The expected large violation in b quark decay suggested the measurement of CP asymmetries in the neutral B_d mesons generated by the interference between flavor mixing and decay amplitudes and expressed, as a function of time, by the difference between decay rates of meson and anti-meson into the same CP eigenstate.

It was clear that, despite the large production cross section, the measurement of time-dependent asymmetries in experiments with hadron beams requires a rather big effort because of the huge background and the quite difficult flavor assignment to the meson decaying into a CP eigenstate. A very high statistics and a strong analysis effort are needed to cope with the large dilutions of the signal and with the various sources of the systematic uncertainties. The possibility of experiments at e^+e^- colliders in a rather low physical background environment was also explored and many suggestions were considered. Particularly appealing was the unique feature offered by the exclusive production of $B^0\bar{B}^0$ pair coming from the bottomium state Y_4s . The mixing mechanism, as for neutral kaons, makes a neutral B meson oscillate between the states of particle and antiparticle. In their evolution the two mesons cannot be at the same time both B 's or both $\bar{B}$'s since they are bosons (0^-) coming from the decay of $Y_4s(1^{--})$. If at a given time t_1 one of the two mesons decays and is identified by flavour as B_d , the other meson of the pair is a $\bar{B}_d$, that could decay at the time $t_2 = t_1 + \Delta t$ in a CP eigenstate and is then usable for building the asymmetry relation. Such a peculiarity of the e^+e^- production at the Y_4s peak makes the measurement of the time-dependent asymmetries induced by CP violation easier and cleaner.

However, since the two B mesons are almost at rest in the Y_4s system, their mass being just about half of the mass of the resonance, a boost to their centre of mass (Y_4s) is then mandatory to allow the measurement of the decay times, namely the decay vertices

appreciably separate from the production point and between them. The main ingredients for a successful experiment in e^+e^- at the Y_4s peak are:

- A high luminosity $O(10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$ e^+e^- asymmetric collider, to allow rather high statistics and a reasonable vertex separation.
 - In 1993 the construction at SLAC of the asymmetric BFactory PEP-II was approved and funded. The BaBar Collaboration was born, our INFN teams were among the founders and gave a relevant contribution to the definition of the apparatus as a whole and in particular to some key detectors.
- A very precise vertex detector with a resolution of $80 \mu\text{m}$ or better along the boost direction z .
 - The group I was leading had the expertise for the design, construction and running of a very precise Silicon Vertex Detector for measuring decay times. Our team had in fact pioneered since 1978 the development and the use of Semiconductor Detectors for High Energy Physics, the motivation was the measurement, in a photo production experiment, of the lifetimes of charm mesons expected in the range of 10^{-13} s. The determination of the distance between the production and the decay vertices of charm mesons was allowed by the large boost of the photo produced charmonium resonance immediately decaying into a $D\bar{D}$ pair. A Silicon telescope and high-resolution Germanium strip detectors ($25 \mu\text{m}$ pitch) were developed, built, installed and successfully employed in Na1 experiment at CERN. Later on our team took the responsibility of the construction and running of the Vertex Detector of the Aleph experiment at LEP. After the approval of PEP-II BFactory at SLAC played a relevant role in the design and the construction of the Silicon Vertex Tracker.
- A good tagging system for an efficient identification of particles as B^0 or $\bar{B}^0$.
 - In order to determine the flavour of the B meson, the identification of the sign of the muon or the kaon present in its decay was provided by an innovative Cherenkov apparatus (DIRC) made of quartz slabs which was built by the SLAC team and a big multilayer detector made of iron layers and RPC's for muon and K_L detection was built by INFN in Italy.

One of the most accessible observables for the validation of the CKM model is $\sin 2\beta$, where β is one of the three angles of the triangle that in a complex plane represents one relation from the Unitarity condition of V . In 2001 $\sin 2\beta$ was extracted by the time-dependent asymmetry $A(\Delta t)$ of the decay rates of B_d and $\bar{B}_d$ decaying into the same CP eigenstate $J/\Psi K_{S/L}$ by BaBar and by Belle, the experiment at the other e^+e^- BFactory built at KEK.

The direct CP violation in the b sector was also measured by BaBar in 2004.

The violation of the symmetries P, C and CP in the decays of b quarks was proven inside the Standard Model of electro weak interaction.

PEP-II was turned off in April 2008, having reached a peak luminosity of $1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ exceeding by almost one order of magnitude the project and having delivered an integrated luminosity of 557 fb^{-1} . In 2012 the analysis of the huge amount of data collected before the turn off of PEP-II allowed the first direct observation of the T symmetry violation. CPT invariance had a solid theoretical and experimental basis, never experimentally disproved so far. If CP is violated and CPT holds, the violation T could also be assumed. However BaBar data allowed the evidence of T violation by looking at the asymmetry between the rate of B going to B^0 in a time interval $\Delta\tau > 0$ and the rate B^0 going to B_- in the time interval $\Delta\tau < 0$, B_- being the mixed state of B^0 and $\bar{B}^0$ identified by the $J/\Psi K_S$ decay, and B^0 identified by the presence of a negative lepton in its semi-leptonic decay. This asymmetry was obtained by comparing the rate $\Gamma_{\Delta\tau > 0}(B^0 \rightarrow B_-)$ and $\Gamma_{\Delta\tau < 0}(B^0 \rightarrow B_-)$.

The CKM paradigm was experimentally confirmed by BaBar and by Belle, but the amount of CP violation was still not sufficient to justify the matter-antimatter unbalance in the Universe. There is some hope that in the near future new measurements could solve this unbalance problem, perhaps by looking at very rare decays and thanks to a more precise investigation of CP violation observables.

Marcello Giorgi
Università di Pisa

History and pre-history of the LHCb experiment

Since their discovery in 1974 at Brookhaven National Laboratory and Stanford Linear Accelerator Center, the properties of charm-hadrons have been investigated by the experiments both with e^+e^- colliders at various energies, *i.e.* from the $c\bar{c}$ threshold to the Z^0 energies, and with hadron machines. In the e^+e^- collisions, events are clean allowing detailed studies of c -hadron properties. Physics performance was primarily limited by the luminosity of the colliders. On the other hand, the intensity of hadron beams could be made very high and the typical number of c -hadrons produced in a fixed-target experiment was much higher than that in e^+e^- collider experiments. However, the fraction of charm events, $\sigma_{c\bar{c}}/\sigma_{\text{hadron}}$, was small, typically $\sim 10^{-3}$, for hadron beams at available energies, which required a large number of events to be processed to obtain a large charm hadron sample. Furthermore, many other particles were produced in the event together with the charm particles, making clean reconstruction of c -hadrons difficult.

For the hadron experiments in the 1980's, rapid progress in computing power based on microprocessor chips allowed to reconstruct a large number of events. Advancement of micro-vertex detectors based on thin solid-state sensors with micro-strip readout allowed the reconstruction of charm hadrons by isolating tracks belonging to charm hadrons from the other particles. This led to the first precise measurements of the D -meson [1] lifetimes.

For the beauty hadrons, although their discovery was made by a fixed-target experiment, studies of their detailed properties have long been dominated by the experiments working at e^+e^- colliders. Due to much smaller b production cross-sections compared to that of charm, the fraction of b events containing b -hadrons, $\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{\text{hadron}}$, is several orders of magnitude smaller. This made the detailed study of b -hadrons with a hadron machine simply too difficult.

A breakthrough came at the Tevatron $p\bar{p}$ collider, where the CDF experiment showed in 1992 the fully reconstructed $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ decays with the largest statistics at that time. This was a clear demonstration that $\sigma_{b\bar{b}}$ at very high energy hadronic interactions was large enough to perform B physics experiments. Since then, both CDF and D0 experiments have made significant contributions to b physics, in

particular the discovery of $B_s^0-\bar{B}_s^0$ oscillations and the measurement of its oscillation frequency Δm_s in 2006 by CDF. By combining with the $B^0-\bar{B}^0$ oscillation frequency Δm_d measurements by the e^+e^- experiments (first by ARGUS in 1987), a very stringent test of the flavour oscillation phenomena in the framework of the Standard Model was made [2].

Success at the Tevatron encouraged the flavour community to design dedicated heavy-flavour experiments at the LHC, already during the early discussion of its realisation, as a complementary approach to the experiments at high luminosity $e^+e^- B$ factories under consideration. The original evaluation [3] was rather modest, *e.g.* while the CP violation measurement with $B^0 \rightarrow$ and $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ would be feasible, that for $B^0 \rightarrow$ and $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ decays with a very small branching fraction expected, 10^{-6} , would be very difficult in the severe background condition expected for a hadron machine. However, further investigation showed more promising results and three Expressions of Interest were presented during the LHC Symposium in Evian in 1992 [4]: two fixed-target and one collider experiment [5]. It is worth noting that none of $e^+e^- B$ factories were yet approved at that moment.

The two fixed-target mode experiments aimed to exploit the long b -hadron flight distance before decaying due to the large Lorentz boost, despite of the loss of $\sigma_{b\bar{b}}$ compared with that at the higher centre-of-mass energy of the collider mode. One of the two experiments proposed to extract protons from the LHC beam halo without disturbing the collider operation using a bent crystal, and to transport them to a dedicated experimental area. This would have allowed optimising the detector without being disturbed by the beam pipe. The Lorentz boost of the fixed-target mode would have been large enough to reconstruct $B^\pm$ meson trajectories, which could have been a powerful tool for clean reconstruction of decays such as $B^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$. The other experiment proposed to use an internal heavy gas jet as the target, with a detector built in the forward direction around the beam pipe. The longitudinal thickness of the target is a few mm, which is much smaller than the average longitudinal b -hadron flight length of several cm. This would have allowed a very efficient first-level trigger to be developed in hardware based on a vertex detector with a special geometry. The third proposed experiment was based on the collider mode in order to benefit from the



much larger $\sigma_{b\bar{b}}$ at the LHC collision energy. The detector was also a forward spectrometer. The three Expressions of Interest were followed by the submission of Letters of Intent [6].

After evaluating the three Letters of Intent, the LHC Committee decided not to approve any of them, but asked the three groups to merge and to design a new experiment based on the collider mode, in order to exploit the significantly larger $\sigma_{b\bar{b}}$ at the collider mode energy. The three groups agreed to form one collaboration, which later became the LHCb Collaboration, and submitted a Letter of Intent in 1995 with a new detector design. It adopted a forward geometry due to the following reasons:

- The B -meson production angles are peaked in the forward and backward direction with respect to the beam direction. The produced b and $\bar{b}$ are typically correlated in one unit of rapidity. Therefore, the geometric efficiency is high for detecting all the decay particles from one b -hadron together with a decay particle from the accompanying hadron to be used as a flavour tag.
- A particle identification system of a manageable size covering the necessary momentum region can be built based on Ring Imaging Cherenkov (RICH) detectors.
- An efficient early level trigger can be designed based on muons, electrons and hadrons with large transverse momenta. In the forward direction, the longitudinal momenta of particles are large. Threshold values for a p_T cut can therefore be decided

on the basis of background suppression rather than detector requirements.

- The large Lorentz boost of accepted B -mesons (corresponding to about 1 cm mean decay distance) allows proper-time measurements to be made with a few percent uncertainty. This was crucial for studying CP violation and oscillations with B_s -mesons because of the expected high oscillation frequency.
- Forward planar detector systems, quite similar to those used in fixed-target experiments, are less complicated, easier to install, maintain and upgrade.

Following the positive recommendation by the LHC Committee, the collaboration submitted a Technical Proposal in 1998.

In the meantime, the $e^+e^- B$ factories in Japan and the US had been approved in 1993 and were well into the construction phase. Similarly, numerous results in B physics, particularly in the B_s sector, were anticipated from the Tevatron experiments. Therefore, the LHCb collaboration was frequently questioned about the added value to have a dedicated B physics experiment at LHC, which would come after the B factories and Tevatron experiments. It was argued that compared to the B factory experiments, there would be many more B -mesons, in particular B_s -mesons, as well as b -baryons which would not be accessible at B factories. Compared to the Tevatron experiments, the particle identification capability, superior proper-time resolution and trigger sensitive for purely hadronic decay modes were presented as distinctive advantages. The experiment was finally approved in September 1998.

The construction of the LHCb detector started with the spectrometer dipole magnet, Ring Imaging Cherenkov detectors and calorimeters [7]. In the meantime, the material budget of the LHCb detector kept increasing with the increasing realism of the detector design, and it was realised that the total radiation and interaction lengths had almost doubled compared to those estimated in the Technical Proposal. Those increases resulted in a sizeable reduction of the reconstruction efficiencies for the many-body hadronic decay modes of b -hadrons, affecting the core physics programme of the LHCb experiment. It was also realised that the occupancies of the tracking stations placed inside of the dipole magnet would be very high due to the curling up of low-momentum tracks generated by the secondary interactions, hitting the detector many times. In 2003 [8], it was therefore decided to reduce the number of the tracking stations to $\sim 1/3$ of the original design. All the tracking stations inside of the dipole magnet were removed and three tracking stations were placed behind the dipole magnet. In order to help the track finding, one tracking station was placed just in front of the dipole magnet. This

change also helped to keep the construction time and budget of the detector as planned.

Around that time, the trigger and data acquisition systems were also revised such that the entire detector information would be read out with a rate of 1 MHz to a CPU farm right after the first level of the hardware trigger. Events would then be processed in the CPU farm and software selection algorithms would reduce the event rate to 2 kHz for data to be stored for offline analysis [9]. This large bandwidth of data, 10 times larger than the original design, allowed extending the physics scope of the LHCb experiment, in particular for charm physics, since charm quarks are abundantly produced at the LHC energies.

With those changes, the LHCb experiment remained competitive, despite the very successful operation of $e^+e^- B$ factories where the physics outcomes were far beyond those originally anticipated. The software trigger that could adapt the event selection algorithms to the evolving physics requirements was particularly important.

In the Technical Proposal, the goal of the experiment was set to collect data with an integrated luminosity of 10 fb^{-1} in five years of data taking running at a luminosity of $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The detector was then required to withstand the expected radiation dose for this operation. The detector was also designed so that it could take data efficiently at a luminosity of $5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ with the bunch collision frequency of 40 MHz foreseen for the LHC. The latter requirement turned out to be particularly useful during the early years of data taking where the LHC operated with 20 MHz collision frequency, where the LHCb experiment had to collect data with an effective luminosity of $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in order to maintain the same integrated luminosity as planned.

Although the start-up of the LHC was very much delayed, the LHCb experiment, together with ALICE, ATLAS and CMS experiments, were able to collect good quality data very well from the beginning. The detector performance such as momentum and proper-time resolutions, as well as the particle identification power and trigger efficiencies, were very close to the design values given in the Technical Proposal. After two periods of data taking, Run 1 and Run 2, the LHCb experiment collected data corresponding to about 9 fb^{-1} of integrated luminosity in seven years of running, where two of the years had only very short data taking, i.e. basically as planned in the Technical Proposal.

The LHCb experiment demonstrated that the LHC is a hadron B factory where b -hadron decays could be cleanly reconstructed with a powerful vertex detector and particle identification devices. With the progress in the capability of CPU farms and in the network bandwidth, a very powerful and flexible trigger

and data acquisition system, yet affordable, could be deployed to achieve high statistics. LHCb physics output from the Run-1 and Run-2 data has been far beyond the CP violation and rare decays of b -hadrons. A notable example is the recent discovery of CP violation in the amplitudes of D -mesons to two hadrons [10]. Although physics with D -mesons had been considered as a part of the LHCb physics programme in the Technical Proposal, it had not been explored in detail.

Now the LHCb detector is in the middle of a major upgrade [11] where the whole tracking system will be replaced together with other modifications. The front-end electronics will be replaced so that the data acquisition system will work in a triggerless mode. Event selection will then be done on the CPU farm. The upgraded detector will start taking data in Run 3 starting in 2021. This will be the beginning of a new phase of the LHCb experiment. There is also a well-developed idea for a further upgrade [12] in the longer term. In conclusion, the LHCb experiment will continue to exploit flavour physics with the LHC, as one of the most promising avenues to probe physics beyond the Standard Model.

Tatsuya Nakada
EPFL, Lausanne, Switzerland

Bibliografia

- [1] E691 experiment at FNAL, *Phys. Rev. D*, 37 (1988) 2391.
- [2] See, for example, PDG review on the CKM mass mixing matrix, *Phys. Rev. D*, 98 (2018) 030001.
- [3] See Proceedings for the LHC Workshop in Aachen, 1990.
- [4] See Proceedings for the Evian LHC Workshop in 1992.
- [5] Similar studies were done for the SSC with both fixed-target and collider modes. However, the SSC project was cancelled by the US government in 1999.
- [6] COBEX, GAJET and LHB Letters of Intent submitted to the LHC Committee in 1993.
- [7] Technical Design Reports for Magnet, RICH and Calorimeters in 2000 by the LHCb Collaboration.
- [8] Reoptimisation of the LHCb, Technical Design Report in 2003 by the LHCb Collaboration.
- [9] LHCb Computing Technical Design Report in 2005 by the LHCb Collaboration.
- [10] LHCb Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, 122 (2019) 211803.
- [11] LHCb Framework TDR for the LHCb upgrade, 2012.
- [12] Physics case for an LHCb Upgrade II, 2018.

SIF-IOP “GIUSEPPE OCCHIALINI” PRIZE AND MEDAL 2019

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 2019 Occhialini Prize has been awarded on the occasion of the Opening Ceremony of the SIF National congress in L'Aquila to John D. Barrow with the following citation: “For contributions to cosmology, gravitation and the use of astronomy to extend our understanding of the constants of Nature and constrain their possible variation in time”.

Constants and variations

The constants of Nature, the mysterious set of pure numbers that define the fabric of the physical universe, are paradoxical in many ways. They combine our greatest experimental accuracy in the quest to determine their values to ever greater places of decimals, with our greatest theoretical ignorance. No one has ever successfully predicted or explained the numerical value of any dimensionless constant of Nature. Einstein believed their values would be uniquely and completely determined by the one and only possible theory of everything –the unified field theory that he spent his later years searching for. A lot of his private scientific correspondence was focussed on clarifying the status of different types of “constant” quantity that appear in the laws of physics.

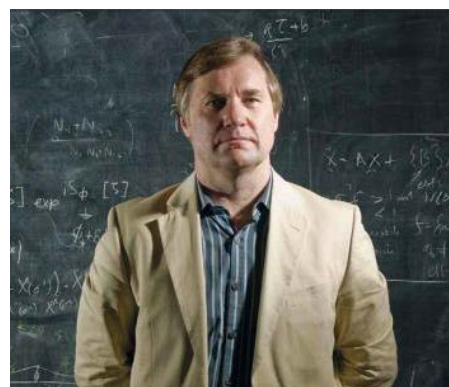
When I began thinking about constants of Nature in physics and cosmology in the mid 1980s, Einstein’s view that the constants were rigidly determined, like a triangular strut with no scope for small movement to another position. The alternative view, then unpopular, is that they exhibit just one of many allowed possibilities, like a rectangular strut that can be deformed into countless neighbouring parallelograms.

This second view has become increasingly the expectation of many high-energy physicists. We now see that many of the quantities we call constants of Nature do not have their values uniquely programmed into the beginning of the universe like the laws of Nature, but arise by random symmetry

breakings. They will only exhibit a unique set of values if the quantum vacuum state of the universe is unique. If it is non-unique then there will be many sets of possible values, each consistent with the underlying laws. String theory advertises the number of vacuum state to be in excess of 10^{500} .

Moreover, high-energy physics theories demand the presence of extra dimensions of space in order to reconcile their desire for finiteness with the low-energy world of physics we see around us. These have two implications for constants. First, the true constants of Nature are not necessarily those we see in the three-dimensional space we inhabit; second, if the mean sizes of the “extra” dimensions change in space or time then many of our three-dimensional gauge coupling constants will be seen to change at the same rate.

Thus the scene is set to take seriously theories that self-consistently describe varying “constants” and devise new observational searches to seek out or constrain their possible variations. In 1998, in collaboration with John Webb, we first set out to use the extraordinary precision of detectors on new telescopes to greatly improve the limits on the possible variations of the fine structure constant, α , and other atomic constants, far beyond what was possible in the laboratory. This programme has continued until the present, most recently finding the four highest redshift determinations of α , for absorption systems along the line of sight to the quasar J1120+0641 located at $z = 7.085, 6.171, 5.951$ and 5.507 –that is, 13 billion years ago. The



results for the relative shift in α between redshift z and now ($z = 0$) made with X-Shooter spectrograph on the ESO’s Very Large Telescope are:

$$\Delta\alpha/\alpha = [\alpha(z) - \alpha(0)]/\alpha(0) = (-2.18 \pm 7.27) \times 10^{-5}.$$

This forms the latest part of a long-running quest to determine if persistent indications of a small variation in α are real. In 2013, I introduced a new way of testing constants by using metal and molecular lines in the atmospheres of white dwarf stars in the Galaxy. As we have often found we need better high-precision laboratory determinations of the lines of interest, usually highly ionised in the far UV, in order to exploit fully the precision of the HST observations we have made.

In addition to pursuing observational probes of constants, I have also developed with Joao Magueijo, Håvard Sandvik and my students, self-consistent theories of α variation and of electron mass variation. These

IL NUOVO CIMENTO 150, 100, 50 ANNI FA

theories generalise Maxwell's theory and general relativity and allow us to find the cosmological evolution of the variations. They replace constants by scalar fields, just as Brans-Dicke theory describes varying G . Previously, astronomers were in the habit of just "writing in" a time variation for a constant in the same equations that hold when it is constant. This is dangerous.

Finally, just to show that there are still very simple fundamental things to be found, Gary Gibbons and I have conjectured that $c^4/4G$ is a maximum force in general relativity. This notion does not exist in Newtonian gravity because point masses attracting under an inverse square law experience arbitrarily large forces. In general relativity, things are different. Two point masses cannot approach arbitrarily closely. When two masses reach their combined Schwarzschild radius, an event horizon forms around them. At that moment the force between them is $c^4/4G$. Cosmologists will also recall that there is a maximum tension for a cosmic string that corresponds to a deficit angle of 2π radians: that maximum tension is $c^4/4G$. There is also a maximum luminosity, $c^5/4G$, that is becoming more familiar thanks to LIGO. Thus one might even seek to characterise general relativity by the existence of a maximum speed, c , and a maximum force. An exploration of this idea through more complex situations supports it but we still seek a general proof. The signpost to these results is that there are particular Planck units for physical quantities made from G , c , and h that do not include Planck's constant, h : they are classical. Velocity, force, luminosity and angular momentum to magnetic moment ratio are all examples of this situation.

This situation signals something fundamental about the Planck units that do not involve h . Our results also depend on space dimension, N , because the units of G , although not those of h or c , depend on N . Thus we find that in N dimensions a non-quantum Planck unit is $\text{Mass} \times (\text{Acceleration})^{N-2}$, so it is only a force when $N = 3$.

John D. Barrow
University of Cambridge

150 ANNI FA

Pacinotti discute le possibili soluzioni del problema delle piene dell'Arno e di conseguenti trabocchi, rotte e inondazioni, in particolare a Pisa in città. Gli argini certo servono, ma non bastano nel caso di piene eccezionali. Riprende quindi la sua proposta del 1855 dei diversivi sfioratori e ne discute la fisica e i vantaggi e avverte che si deve agire perché ci si può attendere che in un prossimo futuro le cose vadano peggio.

Da "Sopra i diversivi sfioratori da usarsi nell'Arno" di L. Pacinotti, *Il Nuovo Cimento*, 2 (1869) 391.

Conviene adottare un modo, non dannoso, anzi proficuo che impedisca il passaggio per Pisa di una porzione delle acque dell'Arno, allorquando eccedono un limite. Conviene che questa porzione produca lente e generali colmate per la pianura, senza togliere i raccolti ove ora sono abbondanti: che sollevi i luoghi che sono infrigiditi dalle acque che attualmente li inondano: che renda potenti ad una cultura più generale quelle terre che non si prestano alla vegetazione degli alberi [...]. Tutti questi vantaggi possono a parer mio conseguirsi con un sistema di diversivi sfioratori, quale esposi per Arno e Serchio [...].

La situazione dell'Arno, come degli altri fiumi, si farà sempre peggiore: proseguirà il diboscamento che ha fatto accorrere contemporanee le acque nei torrenti: proseguiranno i restringimenti e le rettificazioni nei torrenti ed influenti dell'Arno, che ne hanno fatta accrescere la rapidità del corso, perché è l'interesse dei limitrofi possidenti che guida queste operazioni [...].

Nessuno, parmi, dovrebbe dunque lasciarsi abbagliare da un presente minimo vantaggio a fronte di uno molto più grande che succederà ben presto, né tenersi in quella ignavia in cui si tennero nel medio evo tanti popoli italiani che lasciarono sterilire le più floride contrade, e prepararono ai posteri una trista eredità.

100 ANNI FA

Sui due volumi del 1919 del *Nuovo Cimento* si trovano solo pochi articoli di contenuti scientifici di qualche valore. Sembra che la ricerca stenti a riprendersi, in questo primo dopoguerra. Sulla rivista, d'altra parte, appare l'impegno a sviluppare strumenti per l'insegnamento. Ranieri Magini insegnò in un Istituto tecnico e fu consigliere comunale a Montepulciano e provinciale a Siena, eletto nelle liste del Partito Socialista. In questo articolo osserva come l'insegnamento della fisica, a partire dai licei, sia spesso troppo teorico e trascuri gli aspetti sperimentali, che invece dovrebbero essere sviluppati. Considera, in particolare, l'ottica.

Da "Per l'insegnamento sperimentale dell'ottica geometrica" di R. Magini, *Il Nuovo Cimento*, 18 (1919) 289.

Nella presente nota mi propongo pertanto di mostrare come sia possibile dare un indirizzo sperimentale a questo capitolo della fisica e come si possa con mezzi semplici procedere alla verifica dei fatti fondamentali dell'ottica geometrica. Non ho creduto di escludere da questa esemplificazione la rifrazione sopra una superficie piana perché le esperienze ad esse relative servono di guida a quelle sui punti aplanatici di una superficie sferica.

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

50 ANNI FA

Marcello Ceccarelli si laureò in Fisica nel 1948 a Padova dove lavorò sulla fisica delle particelle elementari prodotte dai raggi cosmici e rivelate da lastre a bordo di palloni. Nel 1962 fu chiamato sulla cattedra di Fisica Generale a Bologna, quando i suoi interessi scientifici si erano già spostati sull'astrofisica ed aveva iniziato la guida del progetto di un grande radiotelescopio, che sarà la "Croce del Nord", costruita a Medicina a partire dal 1962 e descritta in quest'articolo. Il telescopio, ancora oggi pienamente attivo, aprì in Italia un settore della fisica che prima era assente. Ceccarelli non fu solo un grande scienziato, ma anche grande scrittore. Ma presto contrasse una terribile malattia, la sclerosi a placche, che l'avrebbe portato dolorosamente alla morte nel 1985. La descrive lui stesso, scientificamente e poeticamente, in "Viaggio provvisorio". Di Ceccarelli scrisse, tra gli altri, Piero Bertolini nell'occasione dell'assegnazione alla memoria dell'Archiginnasio d'oro, massimo riconoscimento del comune di Bologna, cui rimando. <https://www.ira.inaf.it/slide-story/Ceccarelli/8-La%20scomparsa%20e%20Ricordi/Rivista%20Infanzia.PDF>

Da "The Italian Cross Radiotelescope. III. - Operation of the Telescope" di A. Braccesi, M. Ceccarelli *et al.*, Il Nuovo Cimento B, 62 (1969) 13.

Questo articolo è il seguito di due precedenti lavori, pubblicati con lo stesso titolo, che descrivono il progetto dell'antenna e del sistema ricevente del Radiotelescopio Italiano "Croce del Nord". A quell'epoca non tutti i problemi tecnici relativi al funzionamento dello strumento erano stati risolti; successivamente sono stati apportati alcuni perfezionamenti ai progetti originali. Così ci è ora possibile descrivere in dettaglio lo strumento nella sua versione finale.

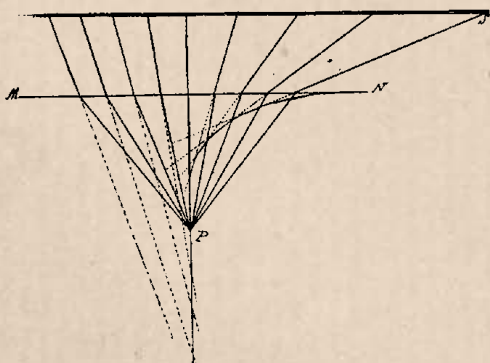


Fig. 1. Rifrazione ad un piano di un fascio omocentrico, e caustica.



Cominciano i lavori. Ceccarelli, col cappello bianco, assiste. Crediti: INAF-Istituto di Radioastronomia.

a cura di Alessandro Bettini

CALENDARIO EVENTI

VARENNA - VILLA MONASTERO - LAKE COMO INTERNATIONAL SCHOOL OF PHYSICS "ENRICO FERMI"

208th Course ∞ 25 - 30 June 2020

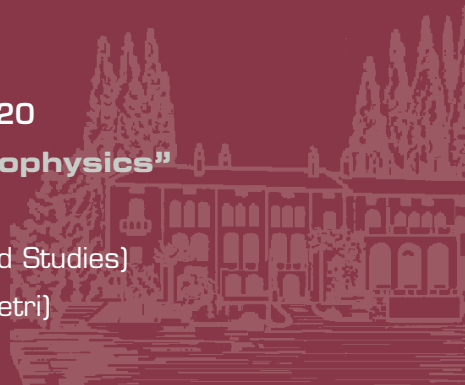
"Foundations of Cosmic Ray Astrophysics"

Directors:

F. AHARONIAN (Dublin Institute of Advanced Studies)

E. AMATO (INAF/Osservatorio di Arcetri)

P. BLASI (GSSI, L'Aquila)



209th Course ∞ 3 - 8 July 2020

"Quantum Fluids of Light and Matter - QFLM2020"

Directors:

A. BRAMATI (Laboratoire Kastler Brossel, Paris)

I. CARUSOTTO (INO-CNR BEC Center, Povo, TN)

C. CIUTI (Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université de Paris)

210th Course ∞ 11 - 16 July 2020

"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)

More info: https://www.sif.it/corsi/scuola_fermi/mmx

106° CONGRESSO NAZIONALE DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Milano, 14-18 settembre 2020

More info: <https://www.sif.it/attivita/congresso/106>

IL PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2019



James Peebles



Michel Mayor



Didier Queloz

Il premio Nobel per la Fisica 2019 è stato attribuito per metà a James Peebles per le sue “scoperte teoriche nella cosmologia fisica” e l'altra metà è stata divisa tra Michel Mayor e Didier Queloz per la loro “scoperta di un esopianeta orbitante intorno a una stella simile al Sole”. I tre sono stati insigniti di questo riconoscimento per “il loro contributo alla comprensione dell'evoluzione dell'Universo e del ruolo della Terra nel cosmo”. Un riconoscimento, dunque, assegnato ex aequo a scienziati operanti in due ambiti di ricerca che si situano agli estremi opposti dell'astrofisica: la cosmologia, ovvero la scienza che studia le più grandi scale osservabili, per descrivere l'Universo nel suo insieme, e quel ramo della moderna astronomia rivolto alla ricerca di pianeti –oggetti astronomici tra quelli a noi più familiari– al di fuori del Sistema Solare. La motivazione generale, così ampia da lasciare quasi senza fiato, è decisamente ben mirata verso questi due settori della moderna ricerca astrofisica che stanno assorbendo enormi risorse umane e finanziarie e dalle altrettanto enormi prospettive.

Jim Peebles e lo sviluppo della Cosmologia Fisica

Il premio Nobel all'ultra-ottantenne cosmologo di origine canadese James (per tutti “Jim”) Peebles (Winnipeg, 1935) è un indubbio riconoscimento alla sua intera carriera, più che un premio per una singola scoperta scientifica. La motivazione del premio riecheggia, non a caso, il titolo del suo primo fondamentale libro,

“*Physical Cosmology*”, del 1971 [1]. È indubbio che in quegli anni abbia preso forma un nuovo modo di concepire la scienza cosmologica, che ne consentirà presto l'alleanza con la fisica delle particelle elementari e la nascita di quella che oggi chiamiamo “Fisica Astro-Particellare”, la cui fortuna viene sancita dalla pubblicazione nel 1990 di un altro fondamentale libro, “*The Early Universe*”, scritto a quattro mani da Edward (“Rocky”) Kolb e Michael (“Mike”) Turner [2].

La motivazione del Nobel attribuisce a Peebles il merito di aver contribuito, a partire dalla metà degli anni sessanta, a trasformare la cosmologia da disciplina speculativa a scienza. Questo graduale passaggio è in realtà il frutto di un lavoro corale portato avanti da una vasta comunità di astrofisici e fisici che hanno saputo mettere assieme competenze diverse e complementari, per costruire quella che oggi chiamiamo a ragione “Cosmologia di Precisione”, una disciplina che riesce a determinare con estrema precisione i principali parametri del modello cosmologico e che fornisce anche preziose informazioni sulla fisica delle particelle elementari (si pensi, ad esempio, all'accuratissimo limite superiore ottenuto dal team della missione spaziale *Planck* sulla massa dei neutrini [3]). A guidare questo cammino sono state certamente personalità carismatiche del calibro di Jim Peebles. Ma come non citare un'altra grande personalità, quella dello scomparso fisico russo Jakov Borisovič Zel'dovič (1914–1987)? In effetti, il periodo storico che va dalla metà degli anni '60, con la scoperta della radiazione cosmica di fondo termica nella banda delle

microonde (Cosmic Microwave Background o CMB) a 3K, e arriva fino alla fine degli anni '80 –quando lo sgretolamento dell'Unione Sovietica porterà alla diaspora di molti scienziati di quella scuola– è stato segnato da un'accesa quanto fruttuosa competizione tra le due principali scuole: quella occidentale, che in quegli anni, oltre a Peebles, comprendeva personalità come Joe Silk, Jerry Ostriker, Martin Rees e tanti altri, e quella russa, che attorno a Zel'dovič raccolse un gruppo di scienziati di grande valore, come Rashid Sunyaev, Igor Novikov, Andrej Sacharov e altri ancora.

Nell'elencare i principali contributi di Peebles alla cosmologia non si può non iniziare ricordando il fondamentale ruolo da lui svolto nella scoperta della radiazione cosmica di fondo fossile alle microonde, o meglio nella teorizzazione della sua esistenza. Quando nel 1964 i due radio-astronomi statunitensi Arno Penzias e Robert Wilson arrivarono –in maniera del tutto fortuita!– a rivelare l'esistenza della CMB, a Princeton R. Dicke, J. Peebles, P. Roll e D. Wilkinson [4] ne stavano già ipotizzando l'esistenza, avendone compreso appieno le conseguenze fisiche (vedi fig. 1). La scoperta della CMB fruttò a Penzias e Wilson nel 1978 il premio Nobel per la fisica. Viene da pensare che, per certi aspetti, l'assegnazione del Nobel a Peebles rappresenti anche un tardivo quanto doveroso riconoscimento del suo ruolo proprio in quella scoperta, che tanto ha segnato tutta la storia successiva della cosmologia fisica.

La radiazione cosmica di fondo è un pressoché perfetto corpo nero, del quale misuriamo la temperatura con estrema precisione: $T_0 = 2.7255 \pm 0.0006$ K [5]. La CMB

ci mostra anche, sotto forma di minuscole fluttuazioni in temperatura e polarizzazione ("anisotropie") nelle varie direzioni di osservazione, l'impronta delle piccole perturbazioni che daranno successivamente luogo alla nascita di tutte le strutture cosmiche da noi osservate: galassie, ammassi di galassie e, al loro interno, stelle, pianeti, etc. Ebbene, la cosmologia fisica riesce a mettere assieme tutte queste informazioni in un unico quadro coerente. È quello che chiamiamo "modello cosmologico standard".

Com'è costituito il modello standard della cosmologia? È una costruzione che inizia (nei primi decenni del secolo scorso) con l'assunzione di una particolare geometria dello spazio-tempo, quella ipotizzata da Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker che, sulla base del Principio Cosmologico, assume isotropia (ovvero invarianza rispetto a rotazioni spaziali) e omogeneità (invarianza rispetto a traslazioni spaziali) per un insieme privilegiato di osservatori, detti "comoventi" (ovvero a riposo con la media della materia ed energia cosmica), a tempo cosmico fissato. Su questa base geometrica, assumendo la validità della Relatività Generale Einsteiniana, si arriva alla scrittura delle cosiddette "equazioni di Friedmann" che governano la dinamica dell'Universo su grande scala, ovvero dell'Universo osservato a bassa risoluzione spaziale, così da poter trascurare le disomogeneità locali indotte sulla geometria del cosmo dall'esistenza delle strutture cosmiche.

La scoperta della CMB portò all'abbandono definitivo del vecchio modello dello "Stato Stazionario" e all'affermazione definitiva del cosiddetto "Hot Big Bang model", oggi universalmente accettato. L'aggettivo "hot" (caldo) venne posto a vessillo di una vittoria sul campo: quella di chi proponeva una storia termica dell'Universo caratterizzata da epoche primordiali ad altissima temperatura – da cui ha tratto origine proprio la CMB – contro chi invece propugnava un modello di Universo in espansione sì, ma con caratteristiche perennemente identiche a sé stesse.

Fermi restando questi capisaldi, a partire dagli anni '80 si iniziano gradualmente a costruire i muri di quella complessa e solida costruzione che oggi chiamiamo modello "Lambda Cold Dark Matter" (ΛCDM), basato sull'ipotesi che oltre alla materia ordinaria (o "barionica"), alla radiazione della CMB e ai neutrini cosmici, l'universo contenga due componenti oscure energeticamente dominanti: la materia oscura fredda (Cold Dark Matter o CDM) e la cosiddetta energia oscura, che appare ben descritta da un contributo energetico costante nello spazio e nel tempo, detto "costante cosmologica" Λ , che, a causa della sua pressione negativa, è in grado di impartire al cosmo la sua attuale espansione accelerata. Il "budget energetico cosmico" attuale mostra che solo il 5% della massa/energia dell'Universo è dovuto alla materia ordinaria, mentre il 26% è sotto forma di materia oscura. Il restante 69% è dovuto al contributo dell'energia oscura [3].

Possiamo vedere questo modello come l'attuale e più completa implementazione del modello cosmologico standard. A questi ingredienti del modello occorre però aggiungere la teoria dell'*Inflazione Cosmica*, che fornisce una buona motivazione per l'attuale isotropia e omogeneità dell'Universo, ma, soprattutto, dà finalmente una spiegazione fisica per la nascita di quelle minuscole disomogeneità cosmiche da cui sono state generate sia le anisotropie della CMB che le strutture cosmiche osservate. In questo senso, quindi, possiamo pensare l'Inflazione come il modello fisico che determina le condizioni iniziali per l'evoluzione dell'Universo così come lo osserviamo noi oggi.

Molte di queste idee nacquero all'inizio degli anni '80, periodo molto fecondo nel quale i semi della cosmologia fisica iniziarono a dare i primi germogli, tra questi la comprensione delle curve di rotazione "piatte" delle galassie a spirale, con l'ipotesi che la parte visibile delle galassie sia circondata da aloni di materia oscura, l'analisi dei modelli di inflazione, con la conseguente teorizzazione sull'origine quantistica delle perturbazioni cosmologiche e l'inizio della comprensione del possibile ruolo di una costante cosmologica sull'evoluzione dell'Universo.

Va a questo punto ricordato come, a partire dagli anni '70 Peebles avesse iniziato uno studio sistematico del "clustering" delle galassie (vedi, ad esempio [6]), ovvero del modo in cui le galassie si ammassano nello spazio, e dei loro moti "peculiari" (le piccole deviazioni del loro moto dalla legge di espansione universale di Hubble)¹. La base teorica per l'analisi statistica del clustering delle galassie (dapprima sulla volta celeste e successivamente nello spazio tri-dimensionale, grazie alla raccolta sempre più massiccia di spettri di galassie), è descritta da Peebles in un altro classico della letteratura cosmologica: il libro *"The Large-Scale Structure of the Universe"* del 1980 [8]. In effetti, assieme allo studio della CMB (in termini di spettro, anisotropie in temperatura e polarizzazione), l'analisi dei dati sulla Struttura su Grande Scala (Large-Scale Structure, LSS) dell'Universo rappresenta oggi un'altra fonte quasi inesauribile di informazioni cosmologiche. È la ricerca di un modello unificato, capace di mettere assieme in modo coerente queste due facce della cosmologia osservativa, che porta a partire dagli anni '80 all'introduzione dapprima della materia oscura e successivamente dell'energia oscura.

I primi studi sui possibili candidati per la materia oscura, con la rapida esclusione del

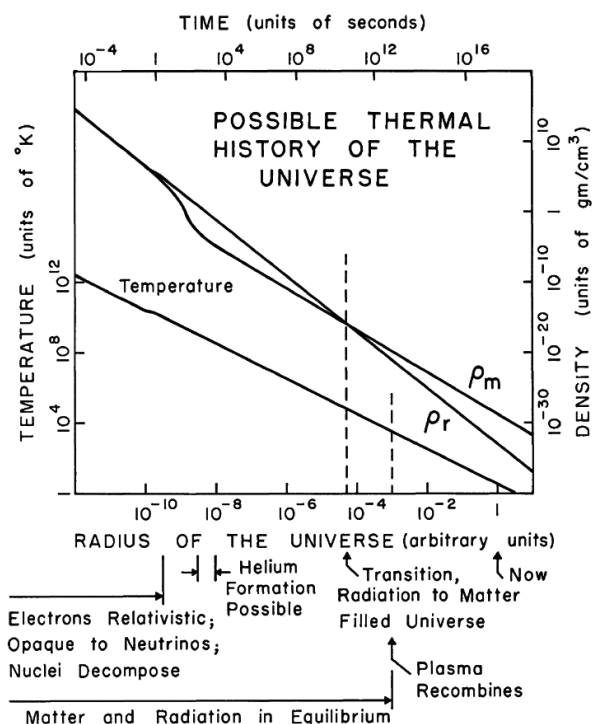


Fig. 1 Schema della storia termica dell'Universo, come ipotizzata da Peebles e collaboratori a metà degli anni '60. Figura tratta da [4].

¹ Oltre al clustering delle galassie, una notevole, ma meno esplorata, fonte di informazioni è rappresentata dal fenomeno "complementare", ovvero dalla distribuzione spaziale dei vuoti tra le galassie. A questa problematica Peebles ha dedicato alcuni dei suoi recenti articoli (vedi, e.g., [7]).

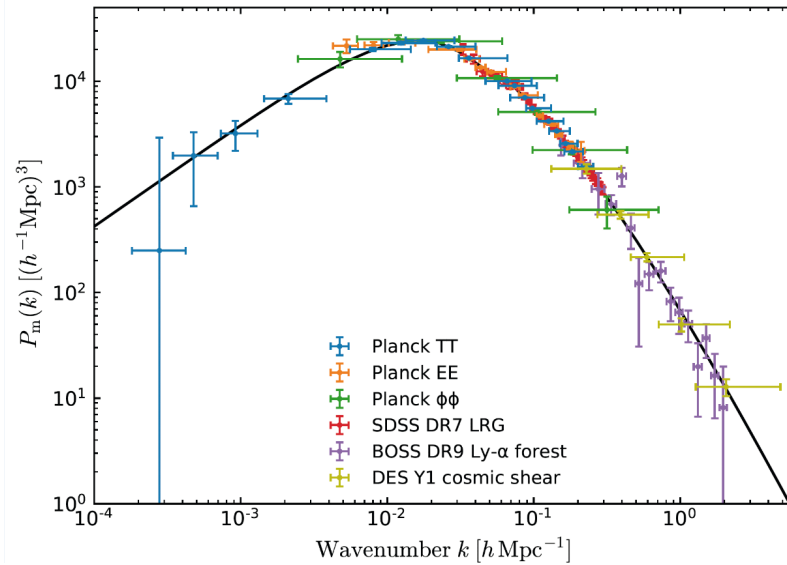


Fig. 2 Il confronto tra le predizioni del modello LCDM (linea continua), in termini di spettro di potenza delle perturbazioni di densità della materia oscura $P_m(k)$, con i dati provenienti da varie osservazioni indipendenti (dalle anisotropie della CMB, al clustering delle galassie, ai dati sulla foresta Lyman-alpha, etc.) testimonia di un impressionante accordo tra teoria e osservazioni, su un intervallo di più di tre decenni in numero d'onda k . Figura tratta da [14].

neutrino, prototipo della materia oscura "calda" –a causa dell'eccessiva dispersione di velocità, che avrebbe inibito e ritardato la formazione delle galassie– portarono già a metà degli anni '80 a formulare la teoria della formazione delle galassie in scenari con materia oscura fredda [9], il cosiddetto scenario gerarchico "bottom-up" (dal basso verso l'alto), secondo il quale le strutture cosmiche su scala galattica si sono formate grazie ad un graduale processo di aggregazione della materia oscura fredda in oggetti gravitazionalmente legati di massa via via sempre più grande.

Un altro passaggio indispensabile è rappresentato dall'analisi teorica delle anisotropie in temperatura della CMB nello stesso modello [10, 11]. La nascita della teoria dell'Inflazione cosmica è pure degli stessi anni; secondo tale teoria sono le oscillazioni quantistiche del vuoto durante una fase primordiale di espansione accelerata (detta appunto "inflazione") ad aver causato la nascita di minuscole fluttuazioni nella densità di energia; fluttuazioni delle quali il modello standard necessita per innescare il processo di formazione delle strutture cosmiche.

L'ultima rivoluzione, in ordine di tempo, arriva nella seconda metà degli anni '90 con la scoperta dell'espansione accelerata del cosmo. Va ricordato a questo punto come Peebles fosse tra i pochi a sostenere già da anni la necessità di una componente di energia oscura², mentre nella gran parte della comunità dei cosmologi prevaleva

un atteggiamento di scetticismo sulla sua esistenza. I dati osservativi, sia per quanto riguarda la CMB che in riferimento alle proprietà della LSS, lasciano però poco spazio ai dubbi: l'Universo attuale è pervaso da una qualche forma di energia oscura, che appare ben modellata da una costante cosmologica, ed è responsabile per circa il 69% del budget energetico cosmico (vedi, e.g., [3]).

A questo punto, possiamo dire che la costruzione del modello standard è completa. Nella sua versione minimale, pochi (sei, per la precisione) parametri liberi permettono al modello di fornire un buon accordo con essenzialmente tutti i dati osservativi in ambito cosmologico, in un range di scale che copre almeno tre decenni (vedi fig. 2).

Rimangono due problemi a tutt'oggi ben lontani da una soluzione: la natura (verosimilmente particellare³) della materia oscura e quella dell'ancor più enigmatica energia oscura. La cosmologia ci ha consentito di scoprirne l'esistenza, ma la risposta sulla natura di questi due fenomeni fisici richiederà senza dubbio lo sforzo della più vasta comunità dei fisici.

Sabino Matarrese

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova
INFN, Sezione di Padova
INAF-Osservatorio Astronomico di Padova
Gran Sasso Science Institute, L'Aquila

³ Peebles negli ultimi anni ha proposto un'interessante variante del modello standard, secondo la quale la materia oscura fredda sarebbe composta da un campo scalare classico che, in epoche recenti, si comporterebbe come un fluido ideale [13].

Bibliografia

- [1] P. J. E. Peebles, "Physical Cosmology" (Princeton University Press, Princeton, N.J.) 1971.
- [2] E. W. Kolb, M. S. Turner, "The Early Universe" (Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City) 1990.
- [3] N. Aghanim *et al.* (The Planck Collaboration), "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters", preprint arXiv:1807.06209 (2018).
- [4] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll, D. T. Wilkinson, "Cosmic Black-Body Radiation", *Astrophys. J.*, 142 (1965) 414.
- [5] D. J. Fixsen, "The Temperature of the Cosmic Microwave Background", *Astrophys. J.*, 707 (2009) 916.
- [6] P. J. E. Peebles, "Statistical Analysis of Catalogs of Extragalactic Objects: I. Theory", *Astrophys. J.*, 185 (1973) 413.
- [7] P. J. E. Peebles, "The Void Phenomenon", *Astrophys. J.*, 557 (2001) 491.
- [8] P. J. E. Peebles, "The Large-Scale Structure of the Universe" (Princeton University Press, Princeton, N.J.) 1980.
- [9] G. R. Blumenthal, S. R. Faber, J. R. Primack, M. Rees, "Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter", *Nature*, 311 (1984) 517.
- [10] N. Vittorio, J. Silk, "Fine-scale anisotropy of the cosmic microwave background in a Universe dominated by cold dark matter", *Astrophys. J.*, 285 (1984) L39.
- [11] J. R. Bond, G. Efstathiou, "Cosmic background radiation anisotropies in universes dominated by nonbaryonic dark matter", *Astrophys. J.*, 285 (1984) L45.
- [12] B. Ratra, P. J. E. Peebles, "Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field", *Phys. Rev. D*, 37 (1988) 3406.
- [13] P. J. E. Peebles, "Fluid Dark Matter", *Astrophys. J.*, 534 (2000) L127.
- [14] Y. Akrami *et al.* (The Planck Collaboration), "Planck 2018 results. I. Overview, and the cosmological legacy of Planck", preprint arXiv:1807.06205 (2018).

² Non necessariamente sotto forma di costante cosmologica; ma eventualmente come componente dinamica, lentamente variabile nel tempo e nello spazio [12]; quella che verrà successivamente chiamata "quintessenza".

Michel Mayor e Didier Queloz: il primo "exoplanet"

La scoperta del primo pianeta orbitante una stella simile al Sole, 51 Peg, annunciata a Firenze da Mayor e Queloz nel maggio del 1995 ad un congresso su "Sole, stelle e popolazioni stellari" fu accolta con grande entusiasmo e non poco scetticismo dalla comunità astronomica. Tuttavia è indubbio, come ricordato dalla stessa Accademia assegnataria del Nobel, che questa scoperta abbia portato ad una rivoluzione in Astronomia, creando di fatto un nuovo settore di ricerca. Oltre 4000 exoplanet sono stati confermati da allora e continuando con le parole dell'Accademia: "Altri nuovi mondi strani sono ancora da scoprire, con una enorme varietà di dimensioni, forme e orbite. Questi mondi sfidano ogni nostra precedente idea sui sistemi planetari, e impongono agli scienziati di rivedere le loro teorie sui processi fisici alla base della formazione dei pianeti. Con numerosi progetti in corso o pianificati per la ricerca di exoplanet, potremo alla fine cercare di dare una risposta alla eterna questione sulla presenza di vita al di fuori della Terra".

Mai una ricerca astrofisica è stata così vicina a dare una risposta scientifica all'ancestrale domanda "Siamo soli nell'Universo?".

La ricerca degli exoplaneti

La scoperta di 51 Peg b (il nome del pianeta, che segue la consuetudine di nominare i compagni di ogni stella con il nome della stella seguito da lettere minuscole dell'alfabeto dalla b e progressive, in ordine di scoperta) non è casuale, ma non per questo meno eccezionale. L'idea di base è semplice: due corpi in mutua attrazione gravitazionale orbitano attorno al loro centro di massa. Se misuriamo lo spostamento radiale (effetto Doppler) della stella ospite (di massa nota), possiamo dedurre la massa del secondo corpo (più correttamente $m \sin i$, con i inclinazione dell'orbita rispetto alla perpendicolare alla visuale). Il problema è che la variazione di velocità radiale indotta da Giove sul Sole è di soli 12 m/s. All'inizio degli anni '90, la maggior parte degli spettrografi di alta precisione non riusciva a fare misure più precise di qualche centinaio di m/s. Molti gruppi lavoravano al perfezionamento dei loro spettrografi con l'intento nemmeno tanto celato di trovare compagni non stellari orbitanti attorno a stelle brillanti. Ed alcuni li avevano pure identificati [1-3]. Tuttavia gli articoli di presentazione dei risultati risultarono troppo "timidi" o incerti sia perché gli oggetti trovati erano molto diversi dai pianeti del Sistema Solare, unico riferimento al tempo, sia perché gli autori stessi volevano essere sicuri che il risultato non fosse in realtà una conseguenza della attività stellare (rotazione, pulsazione, etc.) o di qualche problema strumentale. Chi credette al proprio risultato furono Wolszczan & Frail [4], ma il loro sistema

planetario, tre pianeti di alcune masse terrestri, orbitanti attorno ad una pulsar (quanto rimane di una stella dopo la sua esplosione in supernova) era talmente peculiare ed è così difficile (a tutt'oggi) capirne l'origine che non venne preso in seria considerazione.

Nel frattempo Michel Mayor lavorava allo sviluppo dei suoi strumenti. Il gruppo dell'Osservatorio di Ginevra, in collaborazione con l'Osservatorio di Marsiglia, aveva già costruito CORAVEL uno spettrografo che riusciva ad ottenere misure di velocità radiale con una precisione fino a 250 m/s, cross-correlando la distribuzione in lunghezza d'onda delle righe spettrali della stella osservata con una maschera meccanica con incise 3000 righe dallo spettro della stella Arturo. Da CORAVEL a ELODIE il passo non è stato semplice, ma è valso un premio Nobel. ELODIE era uno spettrografo basato sullo stesso principio del suo predecessore, permettendo però di calibrare gli spettri usando l'emissione simultanea di righe da parte di una lampada al Torio-Argon. Scopo di ELODIE era di arrivare a misurare velocità radiali con precisione fino a 15 m/s, una volta installato al telescopio di 1.93 m in Haute-Provence. Alla costruzione dello strumento, ideato da André Baranne (Observatoire de Marseille) collaborò il dottorando di Mayor, Didier Queloz, che condusse anche le osservazioni, concentrandosi su 51 Peg, una stella simile al Sole, ad una distanza di circa 50 anni luce da noi. Ben presto Queloz si accorse che la stella mostrava una variazione di velocità radiale, ma l'interpretazione di queste osservazioni portava ad un compagno dalle proprietà del tutto inaspettate. Un pianeta con massa pari o superiore a metà della massa di Giove, ma con un periodo orbitale di poco più di 4 giorni, con un semiasse maggiore di meno di 8 milioni di km, pari a circa 10 volte il raggio della stella ospite. Nulla era più inatteso dagli astronomi, che del resto fino ad allora avevano come unico riferimento i pianeti del Sistema Solare. Il grande merito di Mayor e Queloz fu quello di credere nella loro strumentazione, nella loro tecnica e infine accettare il loro risultato osservativo. Il lavoro uscito su *Nature* nel novembre 1995 [5] viene riconosciuto universalmente come la prima scoperta di un pianeta extrasolare attorno ad una stella simile al Sole e, di fatto, rappresenta l'inizio di una nuova era di esplorazione.

A fine ottobre 2019, risultato confermato più di 4120 pianeti (fonte <http://exoplanet.eu/>), in 3067 sistemi planetari (671 di questi ospitano più di un pianeta). Di questi, 863 sono stati identificati con la stessa tecnica usata da Mayor e Queloz; una buona parte con HARPS (montato al telescopio di 3.6 m dell'European Southern Observatory, in Cile) e con il suo gemello HARPS-N (montato sul nostro Telescopio Nazionale Galileo, alle Canarie), che sono

la diretta progenie dello strumento che ha portato alla scoperta di 51 Peg b, ma con una precisione in velocità radiale inferiore ad 1 m/s. Ed è entrato recentemente in funzione al VLT (ESO-Cile), l'ultima generazione di questi strumenti, ESPRESSO, che promette di arrivare a 10 cm/s di precisione, ovvero la variazione di velocità radiale indotta da un pianeta come la Terra, ad una distanza di una unità astronomica (150 milioni di km) da una stella come il Sole.

Il dubbio che la variazione di velocità radiale in 51 Peg fosse conseguenza della attività intrinseca della stella ospite rimase nella comunità per un certo numero di anni, finché, in due studi indipendenti, sottomessi a distanza di un giorno l'uno dall'altro alle rispettive riviste, Henry *et al.* [6] e Charbonneau *et al.* [7] non dimostrarono la presenza di un pianeta transitante la stella HD209458, un altro gigante gassoso (Hot-Jupiter), con massa 0.64 volte la massa di Giove e periodo di soli 3.5 giorni terrestri. In questo caso la massa è nota con precisione perché il pianeta è stato identificato sia con la tecnica delle velocità radiali, che fornisce $m \sin i$, che con i transiti. Il transito può avvenire solo se l'orbita è parallela o quasi (scarto al più di pochi gradi) alla linea di vista. Inoltre, il transito fornisce anche il raggio del pianeta (noto il raggio della stella, semplice questione geometrica legata alla diminuzione di luce causata dall'exoplanet transitante). In pratica, per un pianeta identificato sia tramite il transito che tramite effetto Doppler abbiamo sia il raggio che la massa, quindi la densità, ovvero una prima classificazione fisica (gassoso, roccioso o altro). Su questo importante punto torneremo a breve.

Le prospettive future

La tecnica dei transiti è un secondo metodo, ancora più efficiente, di identificare pianeti extrasolari. Un transito avviene quando orbita e linea di vista sono quasi paralleli. La probabilità che ciò avvenga è molto bassa. La Terra vista dallo spazio ha una probabilità dello 0.5% di transitare di fronte al Sole. Ma questa probabilità sale al 10% per gli Hot Jupiters come 51 Peg b e HD209458 b (è invece dello 0.09% per Giove). Serve comunque osservare un grande campione di stelle. Numerose campagne osservative a Terra, ma soprattutto il satellite Kepler della NASA e, ancor più, il satellite TESS (NASA, lanciato in aprile 2018 e tuttora funzionante) hanno già identificato più di 5300 candidati exoplanet, di cui più di 2900 successivamente confermati.

Qui serve aprire una breve parentesi. Vi sono numerosi effetti astrofisici che generano un segnale simile ad un transito (false alarms). L'unico modo per confermare che il transito sia dovuto ad un pianeta è di misurare la massa dell'oggetto transitante, ovvero passare alla misura della variazione di velocità radiale per ottenerne la massa. Questo non è sempre

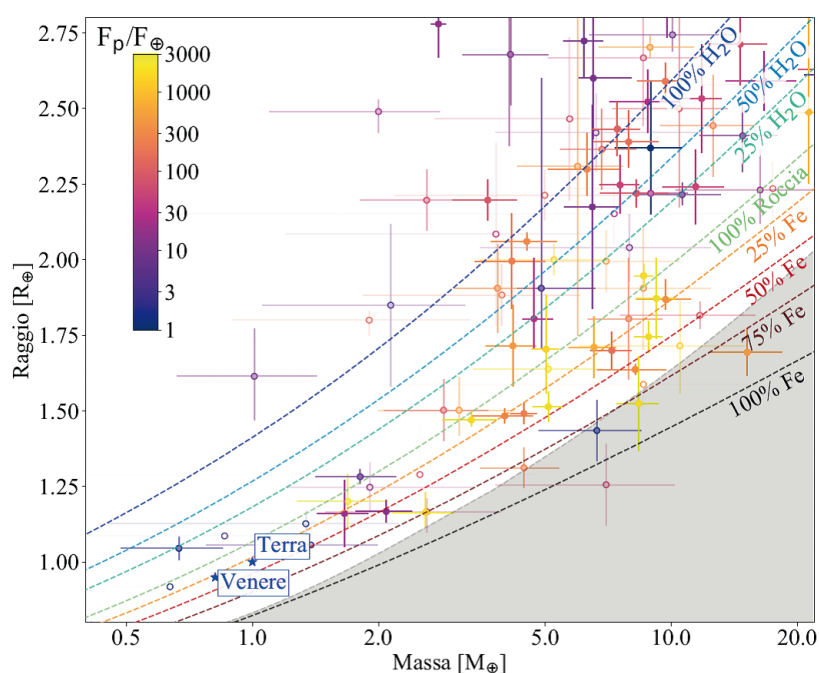


Fig. 1 Diagramma massa-raggio per pianeti con massa fino a 20 masse terrestri, ottenuto con i dati della Extrasolar Planets Encyclopaedia, aggiornato al primo Novembre 2019. Le linee tratteggiate mostrano le relazioni teoriche per pianeti con percentuali differenti di ferro, silicati, e acqua. I punti sono colorati in base al flusso di radiazione incidente proveniente dalla stella ospite (F_p) relativo al flusso ricevuto dalla Terra proveniente dal Sole ($F_\oplus$). Il colore grigio indica la regione del diagramma proibita dagli attuali modelli di evoluzione planetaria. La Terra e Venere sono mostrate per riferimento. Adattato da Malavolta *et al.* (2018).

possibile, per esempio perché la stella ospite è troppo debole. È il problema che abbiamo per la maggior parte dei candidati transiti Kepler, orbitanti stelle troppo deboli. TESS sta invece osservando stelle brillanti e per la maggior parte dei transiti si potrà confermare la natura planetaria con osservazioni di velocità radiale da Terra. Altre missioni sono in fase avanzata di preparazione da parte dell'ESA. Tra queste CHEOPS (lancio schedato per metà dicembre 2019): CHEOPS cercherà transiti di exoplanet già noti da misure di velocità radiale e perfezionerà i parametri orbitali e il raggio dei pianeti scoperti da TESS, per selezionare i più interessanti per un possibile studio delle loro atmosfere. Ma sarà PLATO (ESA) che permetterà al settore di ricerca di fare un vero passo in avanti, in quanto scopo primario della missione (lancio previsto per fine 2026) sarà quello di identificare pianeti analoghi alla Terra, avvalendosi dei suoi 26 telescopi posti nel punto Lagrangiano L2 del sistema Terra-Sole. PLATO identificherà pianeti rocciosi, di massa simile alla Terra, orbitanti stelle simili al Sole, in zona abitabile. Gli astronomi definiscono zona abitabile quella regione dello spazio attorno ad una stella che riceve radiazione sufficiente per avere una temperatura alla superficie del pianeta tra 0 e 100 gradi centigradi. La missione PLATO include la conferma, con osservazioni di velocità radiale da Terra, della

natura planetaria dei transiti identificati. Il che significa che il prodotto finale di PLATO saranno exoplanet con massa, raggio (e quindi densità) e parametri orbitali. Il contributo scientifico e tecnologico dell'Italia in CHEOPS e PLATO è fondamentale. Il progetto delle ottiche di entrambi i satelliti è stato fatto da INAF-Osservatorio Astronomico di Padova. L'industria italiana ha costruito le ottiche di CHEOPS e assemblato il telescopio e sta ora lavorando alla produzione delle ottiche di PLATO. L'Università di Padova ha la responsabilità di selezionare i target attorno a cui PLATO cercherà i pianeti, oltre a contribuire ad identificare i target di CHEOPS, assieme ai ricercatori INAF.

Il contributo di TESS, CHEOPS e PLATO è essenziale. Se c'è una cosa che abbiamo imparato in questi 25 anni di studio degli exoplanet è la loro diversità. Sono stati scoperti pianeti con dimensioni simili alla Terra, ma anche Super-Terre (raggi fino a due raggi terrestri, masse fino ad una decina di masse terrestri, che non esistono nel nostro Sistema Solare), Hot Jupiters (pure una novità assoluta rispetto al nostro sistema: pianeti di massa gioviana ma estremamente vicini alla stella ospite, forse per effetto di migrazioni dinamiche), pianeti con masse varie volte la massa di Giove. Soprattutto, è saltata la regola classica del nostro Sistema Solare: piccolo

significa pianeta roccioso, grande gassoso. Ci sono pianeti con raggi poco più del raggio terrestre, ma gassosi, e pianeti con raggi simili a Nettuno rocciosi (si veda fig. 1). La misura della densità planetaria (transito + velocità radiale) è divenuta essenziale per capire la natura dell'exoplanet. La tecnologia attuale ci permette già di studiare le atmosfere degli exoplanet, per esempio con la spettroscopia durante il transito, quando la luce stellare passa attraverso la seppur tenue atmosfera dell'exoplanet. Molecole come O_2 , CO_2 , TiO , H_2O e varie altre sono già state identificate nelle atmosfere di exoplanet, come sono stati identificati particolati e condensanti. Future missioni spaziali come JWST (NASA), ARIEL (ESA, dedicato allo studio delle atmosfere exoplanet) e l'ELT dell'ESO (localizzato in Cile) sono specificatamente progettati per lo studio delle atmosfere degli exoplanet, ma è fondamentale identificare i target adatti per questo studio, con il nemmeno tanto nascosto obiettivo di focalizzare l'attenzione su pianeti rocciosi in zona abitabile alla ricerca di molecole nella loro atmosfera che possano essere ricollegate alla vita.

Venticinque anni fa la comunità astronomica dubitava della presenza di pianeti extrasolari. Il lavoro di Michel Mayor e Didier Queloz ci ha aperto una strada che ci ha portato a dimostrare che verosimilmente esistono più pianeti che stelle nell'Universo. I pianeti, specie quelli di piccola massa, sono molto diffusi. In base alle statistiche attuali, sappiamo che tutte o quasi le stelle ospitano almeno un pianeta di piccole dimensioni. Il prossimo passo sarà capire cosa c'è in questi pianeti e non è da escludere che la generazione nata nel 2000 possa dare una risposta scientifica all'ulteriore domanda: c'è vita al di fuori della Terra, nel nostro Sistema Solare o oltre?

Giampaolo Piotto
Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova

Bibliografia

- [1] D. W. Latham *et al.*, *Nature*, 339 (1989) 38.
- [2] G. A. H. Walker *et al.*, *Astrophys. J.*, 343 (1992) L21.
- [3] A. P. Hatzes, W. D. Cochran, *Astrophys. J.*, 413 (1993) 339.
- [4] A. Wolszczan, D. A. Frail, *Nature*, 355 (1992) 145.
- [5] M. Mayor, D. Queloz, *Nature*, 378 (1995) 355.
- [6] G. W. Henry *et al.*, *Astrophys. J.*, 529 (2000) L41.
- [7] D. Charbonneau *et al.*, *Astrophys. J.*, 529 (2000) L45.
- [8] L. Malavolta *et al.*, *Astron. J.*, 155 (2018) 107.

FABIOLA GIANOTTI CONFERMATA ALLA GUIDA DEL CERN

Il Consiglio del CERN ha votato il 6 novembre scorso per l'elezione del Direttore Generale, confermando Fabiola Gianotti a capo del grande laboratorio europeo di fisica delle particelle. La nomina sarà formalizzata durante la riunione del Consiglio del CERN che si svolgerà a dicembre prossimo e il nuovo mandato quinquennale inizierà dal primo gennaio del 2021.

Eletta per il primo mandato nel 2016, succedendo a Rolf-Dieter Heuer, Fabiola Gianotti è stata la prima donna a guidare il CERN. Romana di nascita, ha studiato Fisica all'Università di Milano dove, nel 1989, ha conseguito il dottorato di ricerca in fisica sperimentale subnucleare. Come portavoce dell'esperimento ATLAS a LHC, il 4 luglio del 2012 ha annunciato la scoperta del bosone di Higgs, che è stato premiato l'anno successivo con il Nobel per la Fisica. Ha ricevuto numerosi riconoscimenti, tra cui la nomina da parte del Presidente Giorgio Napolitano nel febbraio 2009 a Commendatore della Repubblica Italiana e nel settembre 2013 a Grande Ufficiale dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana. Fabiola Gianotti è membro corrispondente dell'Accademia dei Lincei, e fra i numerosi premi a lei insigniti ricordiamo il Premio Enrico Fermi della Società Italiana di Fisica e il Fundamental Physics Prize.

Come ha dichiarato il Presidente del Consiglio del CERN, Ursula Bassler, a margine della seduta del 6 novembre scorso, *"During her first term, she excelled in leading our diverse and international scientific organisation, becoming a role model, especially for women in science"*, sottolineando anche il beneficio che l'esperienza e le doti di leadership mostrate da Fabiola Gianotti durante il primo mandato potranno fornire per la realizzazione di importanti progetti imminenti quali l'LHC ad alta luminosità e l'implementazione della strategia europea per la fisica delle particelle.

Interpellata sulla sua rielezione, ci ha rilasciato questa sua dichiarazione:

"Essere Direttore del CERN per un secondo mandato è un grande privilegio e una grande responsabilità, e sono riconoscente al Consiglio del CERN per la fiducia e il supporto. Gli anni a venire saranno cruciali per preparare il futuro del CERN e sono felice di avere la possibilità di lavorare con i Paesi Membri e Membri Associati del CERN, i nostri partners internazionali, il personale del CERN e la comunità mondiale della fisica delle particelle per raggiungere questo obiettivo. Sono particolarmente felice di poter continuare a collaborare intensamente con l'INFN, le Università Italiane e la comunità Italiana della fisica delle particelle."

A lei vanno le nostre più vive congratulazioni e un caloroso augurio di buon lavoro!

Silvia Arcelli
Università di Bologna



Copyright CERN, under CC-BY license,
Photo by Maximilien Brice.



7TH IUPAP INTERNATIONAL CONFERENCE ON WOMEN IN PHYSICS: 13-17 JULY 2020

Durante l'Assemblea Generale IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) del 1999, venne espressa per la prima volta la preoccupazione che le donne siano molto sottorappresentate nel campo della fisica nella maggior parte dei paesi. Riconoscendo che tutti i campi della scienza progrediscono più rapidamente quando attingono dall'insieme completo di persone di talento disponibili, i partecipanti all'Assemblea Generale hanno approvato una risoluzione per formare un gruppo di lavoro IUPAP sulle donne in fisica, convenendo sulla precisa necessità di favorire la partecipazione delle donne alla fisica.

La serie di IUPAP Conferences on Women in Physics (<https://wp.csiro.au/icwip2020/>) organizzata dal gruppo di lavoro IUPAP 5, giunge quest'anno alla settima edizione e ha una storia non solo di successo e crescita, ma anche di impegno per cambiare le cose nella comunità dei fisici.

La conferenza si terrà a luglio 2020 presso l'Università di Melbourne, organizzata in collaborazione con l'Australian Institute of Physics (IOP) e tutti i dipartimenti di fisica e i centri di eccellenza australiani, e molte di

queste organizzazioni sono già state premiate per il loro impegno nella promozione dell'uguaglianza di genere in ambito scientifico.

La Conferenza si atterrà al principio di accesso universale alla scienza e alla sua fruizione grazie alla libera circolazione degli scienziati, un principio che si pone come presupposto fondamentale per il progresso scientifico. Poter garantire libertà di movimento, associazione, espressione e comunicazione tra gli scienziati, nonché un accesso equo a dati, informazioni e materiali di ricerca, sono obiettivi di IUPAP e delle sue Conferenze e per sostenere attivamente questo principio IUPAP si oppone a qualsiasi discriminazione sulla base di fattori quali l'origine etnica, la religione, la cittadinanza, la lingua, la posizione politica, il genere o età.

Tutti i partecipanti e le attività sostenute godranno inoltre di un ambiente che incoraggia la libera espressione e lo scambio di idee scientifiche, libero da ogni forma di discriminazione, molestie e ritorsioni.

IL PREMIO EPS EMMY NOETHER DISTINCTION SUMMER 2019 VA A SARAH KÖSTER

Nel 2013, la Società Europea di Fisica (EPS) ha istituito uno speciale riconoscimento riservato alle ricercatrici donne e intitolato a Emmy Noether, la più grande matematica di tutti i tempi, i cui contributi sono stati fondamentali anche nel campo della fisica. Attribuito semestralmente (spring/summer, autumn/winter), l'EPS Emmy Noether Distinction for Women in Physics va a una scienziata per premiarne sia i risultati ottenuti nel campo della ricerca sia l'attività didattica e di diffusione della scienza, con l'obiettivo di portarla all'attenzione della comunità scientifica e del grande pubblico e di proporre così un modello capace di attrarre le ragazze verso le carriere scientifiche.



Bandito semestralmente, il prestigioso premio EPS Emmy Noether Distinction Summer 2019 è stato assegnato a Sarah Köster dell'Institute for X-Ray Physics, Georg-August-University Göttingen, "per il suo contributo fondamentale alla fisica delle cellule biologiche e dei biopolimeri, in particolare per la comprensione dei filamenti intermedi, e la sua notevole capacità di insegnare e reclutare donne scienziate nel suo campo di ricerca". Dopo aver ricevuto altri prestigiosi riconoscimenti internazionali, Sara Köster dirige ora il gruppo di ricerca di Biofisica Cellulare presso l'Università di Göttingen, dove è a capo di un ampio gruppo di ricerca nel quale lavora un'alta percentuale di giovani donne (14 su 17 studenti e postdoc). Molti tra questi sono stati premiati con riconoscimenti e borse di studio. Il suo gruppo attualmente lavora per cercare di definire il modo in cui le interazioni molecolari nei filamenti proteici definiscono le loro uniche proprietà meccaniche e quindi le proprietà fisiche delle cellule biologiche.

L'EDITORIA E LA SIF: IL 2019 FRA SFIDE E RINNOVAMENTO

Il 2019 è stato per le attività editoriali della SIF un anno di forte impegno per rispondere alle sfide che il mondo dell'editoria, a livello sia nazionale sia internazionale, si è trovato a dover affrontare. A partire dalla fine del 2018, quando fu lanciata da Science Europe-cOAlition S l'iniziativa del Plan S che promuove la pubblicazione in riviste *full open access* di tutti gli articoli riguardanti progetti di istituti e agenzie finanziate dai governi, la SIF ne ha seguito gli sviluppi cercando, anche quest'anno, di ribadire e rafforzare come proprio scopo principale la promozione della fisica e il sostegno a essa anche tramite le sue pubblicazioni e le attività a esse correlate.

Per quanto riguarda le riviste, la SIF ha registrato la conferma del successo de IL NUOVO SAGGIATORE. L'enorme impulso dato dalle scelte editoriali e dalla supervisione dei contenuti della Direzione e del suo comitato editoriale presieduto da Giuseppe Grosso hanno confermato il ruolo de IL NUOVO SAGGIATORE come rivista di diffusione e approfondimento della cultura scientifica, elevandone la qualità e le caratteristiche ben al di sopra di quella di semplice bollettino societario.

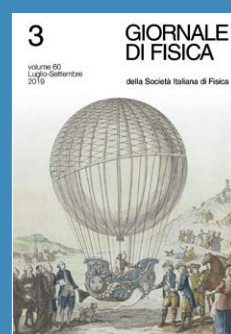
Insieme a IL NUOVO SAGGIATORE si deve segnalare anche il successo de LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO. Nel 2019 è stato reso noto l'*Impact Factor* relativo all'anno 2018 che ha registrato una crescita consistente rispetto all'anno precedente, arrivando a un valore di 7.565. Questo successo è dovuto sicuramente alla qualità dei contenuti e quindi al lavoro e all'impegno di Alessandro Bettini, Angiolino Stella e di tutto il comitato editoriale della rivista, ma anche alla promozione fatta tramite gli *alert* regolarmente inviati per ciascun fascicolo pubblicato e alla possibilità di accedere gratuitamente *online* agli articoli per 30 giorni a partire dal giorno della loro pubblicazione sul sito della SIF.

A seguito di questo successo crescente e con l'intento di dare maggior impulso a questa pubblicazione, la SIF ha concluso un accordo con Springer Nature che prevede che a partire dal 2020 la rivista sia prodotta e distribuita dalla casa editrice internazionale. La proprietà rimarrà comunque della SIF e l'ufficio editoriale continuerà

a essere gestito dal suo personale. I canali di distribuzione di Springer Nature e il sostegno dei loro rappresentanti per lo sviluppo editoriale potranno dare maggiore visibilità a LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO a livello internazionale e in quanto rivista associata allo EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL potrà fare breccia in nuove comunità scientifiche del cui contributo ci si potrà avvalere.

L'accordo siglato per LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO si inserisce poi in un più ampio contesto internazionale che riguarda il cambio di alcune attività editoriali al momento svolte dal personale della redazione della SIF. Mentre all'inizio del 2019 è stato rinnovato il contratto che conferma la produzione della rivista EPL per la SIF, a partire dal 2020 la produzione delle sezioni A e PLUS di EPJ – THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL, fino al 2019 svolta dalla SIF, verrà sostituita dalla gestione di uffici editoriali di altre riviste di Springer Nature. Dal 2018 e nel corso del 2019 questa transizione si è andata sviluppando con l'assegnazione degli uffici editoriali di riviste quali MATHEMATICAL PHYSICS, ANALYSIS AND GEOMETRY, JOURNAL OF STATISTICAL PHYSICS e COMPUTER AND SOFTWARE FOR BIG SCIENCE e nel 2020 avverranno ulteriori acquisizioni. Questi cambiamenti rappresentano sfide che la SIF si è dichiarata pronta ad accettare in risposta alle richieste e alle rinnovate esigenze dell'editoria mondiale. Alla SIF e al suo personale impegnato nelle attività editoriali vengono riconosciute eccellenze di rara reperibilità ed è stato quindi deciso con entusiasmo di metterle al servizio del mondo scientifico e soprattutto della fisica.

IL NUOVO CIMENTO ha continuato a pubblicare i *proceedings* delle Conferenze degli IFAE – Incontri di Fisica delle Alte Energie e de *Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste – La Thuile*. Inoltre, nel corso del 2019, sono stati rinnovati gli accordi che garantiscono per il triennio 2019-2021 la pubblicazione di questi *proceedings* su IL NUOVO CIMENTO mentre è stato siglato l'accordo per la pubblicazione nel 2020 degli atti del convegno FATA2019 – *Fast Timing Applications for Nuclear Physics and Medical Imaging*. Quest'anno sono stati pubblicati anche i



proceedings delle Migliori Comunicazione del Congresso della SIF, del SoHe3 – *Third Meeting of the Italian Solar and Heliospheric Community*, della *2018 European Nuclear Physics Conference – EuNPC*. In definitiva, IL NUOVO CIMENTO si conferma come una rivista d'elezione per la pubblicazione di atti di conferenze, ribadendo così che la scelta fatta alcuni anni fa di renderla disponibile *online in open access* è stata di indubbio successo.

Un altro successo editoriale della SIF del 2019 si è confermato essere il GIORNALE DI FISICA e insieme a esso anche i QUADERNI DI STORIA DELLA FISICA. Grazie all'impegno profuso dalla Vicedirezione e alle scelte della Direzione volte a un sostanziale rinnovamento, entrambe le riviste hanno continuato a crescere in termini di numero di articoli pubblicati e di qualità, facendo in modo che allo stesso tempo aumentasse la visibilità presso gli insegnanti e presso i Soci della SIF. Questi ultimi, se regolarmente associati alla SIF, godono infatti della possibilità di accedere gratuitamente a entrambe le riviste attraverso l'Area Soci. Inoltre, nel corso del 2019 è stato pubblicato come supplemento del GIORNALE DI FISICA il primo fascicolo del dizionario biografico I FISICI ITALIANI, un progetto editoriale di sicuro interesse curato da Adele La Rana e Paolo Rossi e sostenuto dal Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi" – Centro Fermi.

Per quanto riguarda i volumi e altri progetti editoriali speciali, la SIF si è dimostrata altrettanto attiva. Nell'ambito dell'accordo stretto nel 2017, la SIF e Springer Nature hanno pubblicato nel corso del 2019 il volume *PIETRO BLASERNA AND THE BIRTH OF THE INSTITUTE OF PHYSICS IN ROME* (di M. Focaccia) mentre sono di prossima pubblicazione i volumi *SCIENTIFIC PAPERS OF ETTORE MAJORANA – A NEW EXPANDED EDITION* (a cura di L. Cifarelli) e *LAURA BASSI – THE WORLD'S FIRST WOMAN PROFESSOR IN NATURAL PHILOSOPHY* (a cura di L. Cifarelli e R. Simili).

Un grande riscontro è stato ottenuto dal volume *I FISICI SENATORI 1848-1943* di M. Leone e N. Robotti pubblicato dalla SIF nel 2019 (in collaborazione con il Centro Fermi). Per i suoi contenuti di estremo

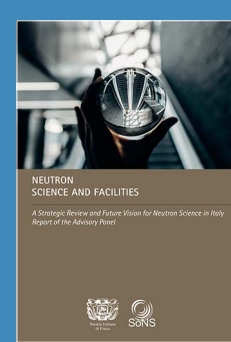
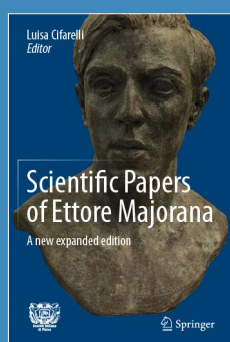
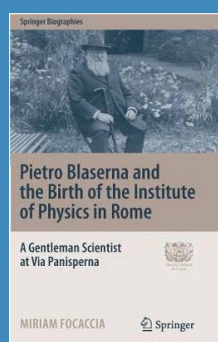
valore storico e scientifico, il libro è stato presentato il 13 settembre di quest'anno nella Sala degli Atti Parlamentari della Biblioteca del Senato della Repubblica in Roma. Alla presentazione, presieduta dal Senatore Gaetano Quagliariello, hanno partecipato come relatori Luisa Cifarelli (Università di Bologna, Presidente SIF), Umberto Bottazzini (Università di Milano), Ginevra Trinchieri (INAF, Presidente SAlt) e Raffaella Simili (Università di Bologna).

Fra le attività editoriali della SIF, va doverosamente segnalato che nel corso del 2019, la pubblicazione dei *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"* ha contato la produzione di ben quattro volumi: *FOUNDATIONS OF QUANTUM THEORY* (a cura di E. M. Rasel *et al.*), *NUCLEAR PHYSICS WITH STABLE AND RADIOACTIVE ION BEAMS* (a cura di F. Gramegna *et al.*), *MECHANICS OF EARTHQUAKE FAULTING* (a cura di A. Bizzarri *et al.*) e *COMPUTATIONAL SOCIAL SCIENCE AND COMPLEX SYSTEMS* (a cura di J. Kertész *et al.*).

Non vanno dimenticati i progetti editoriali speciali. Un esempio, frutto della collaborazione della SIF con la SoNS, è il rapporto *NEUTRON SCIENCE AND FACILITIES – A STRATEGIC REVIEW AND FUTURE VISION FOR NEUTRON SCIENCE IN ITALY*. Questo rapporto e i suoi contenuti, che affrontano il tema della neutronica italiana nel contesto europeo, sono frutto dell'impegno della SoNS, presieduta da Roberto Senesi, e a esso ha contribuito la SIF occupandosi della sua edizione stampata. Infine la SIF si è occupata della pubblicazione del rapporto *ANALISI DI GENERE DEL PROFILO DEI LAUREATI IN FISICA ITALIANI* a cura del Comitato Pari Opportunità della Società Italiana di Fisica presieduto da Sara Pirrone.

Con questo bagaglio di attività e con l'impegno che a esse viene costantemente dedicato, la SIF si prepara dunque ad affrontare i prossimi anni e le sfide che presenteranno con l'intenzione di accettarle per ottenere risultati sempre migliori nel segno della promozione, della diffusione e del sostegno della fisica e della scienza.

Barbara Ancarani
Società Italiana di Fisica - Responsabile Editoriale



LE PUBBLICAZIONI ONLINE DELLA SIF: I NUMERI

L'editoria scientifica è da sempre un cardine dell'attività della Società Italiana di Fisica nella sua missione di promozione e progresso della fisica e di diffusione della cultura scientifica in Italia. Fin dalla sua fondazione nel 1897 la Società si è sviluppata attorno alla rivista mensile *IL NUOVO CIMENTO* e nel corso della sua storia ha accresciuto il proprio impegno nelle attività editoriali e adeguato costantemente le capacità di produzione. Nel corso degli ultimi anni la SIF si è impegnata in strategie di sviluppo nella propria presenza *online* e nella comunicazione. A oggi tutte le riviste SIF sono pubblicate online con standard di qualità e reperibilità che riproducono lo stato dell'arte dell'editoria scientifica contemporanea.

Forte di un completo rinnovamento della piattaforma online, la SIF ha registrato in appena tre anni un notevole e costante aumento della fruizione dei propri contenuti. Solo tra il 2017 e il 2018 è raddoppiato il numero di download di articoli di rivista passando dai circa 45000 del 2017 agli oltre 90000 del 2018.

La rivista più letta e consultata online è sicuramente *IL NUOVO CIMENTO* che da solo registra la metà dei download complessivi. Questa eccezionalità dipende essenzialmente da due fattori primari: la pubblicazione in full open access di ciascun articolo e il numero stesso di articoli pubblicati che sono diverse centinaia all'anno.

Un successo importante è poi quello de *LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO* che tra il 2017 e il 2019 ha visto crescere il numero di download di circa il 50% (fig. 1), un dato indicativo del rinnovato interesse anche internazionale per questa pubblicazione di altissima qualità scientifica, confermato anche dal consistente aumento dell'*Impact Factor* nel 2018.

Anche il *GIORNALE DI FISICA* ha mostrato un andamento estremamente positivo nell'ultimo periodo con un incremento degli accessi online di circa il 250% (fig. 2) tra il 2017 e 2018 e con una sostanziale conferma dei valori dell'anno precedente nel 2019. Questo exploit è sicuramente

dipeso dal rinnovamento dei contenuti, dalla diffusione online non solo agli abbonati ma anche ai Soci della SIF attraverso un'apposita piattaforma riservata e da campagne di comunicazione relative alle possibilità di fruizione *free-to-read* in determinati momenti dell'anno (in genere nei primi 15 giorni dalla pubblicazione di un fascicolo).

Un discorso a parte merita *IL NUOVO SAGGIATORE* che dalla fine del 2017 è pubblicato online su una moderna piattaforma attraverso la quale i contenuti della rivista sono disponibili in differenti formati: PDF, web e in forma di magazine digitale sfogliabile. Sebbene i numeri degli accessi non siano paragonabili a quelli delle riviste eminentemente scientifiche già menzionate, anche perché la fruizione online è riservata ai Soci della SIF per la maggior parte dell'anno, questa rivista ha ormai superato la dimensione del bollettino societario confermando la vocazione di rivista di diffusione scientifica e la capacità di aggregare una vasta comunità di lettori nei periodi in cui i fascicoli vengono resi *free-to-read*. In questi periodi *IL NUOVO SAGGIATORE* arriva ad avere un numero di accessi fino a 5 volte superiore alla media. Dall'analisi delle sessioni di lettura si osserva, inoltre, che ciascuna di queste consiste mediamente di quattro articoli letti, ogni utente, cioè, si sofferma nella lettura di più articoli, un comportamento che dimostra che ogni fascicolo è considerato un unico documento da conservare e consultare dall'inizio alla fine.

La sintesi dei dati statistici raccolti segnala dunque una generale crescita dell'interesse per le riviste pubblicate dalla SIF coerente sia con il rinnovamento dei contenuti sia con il costante sviluppo dei sistemi che ne garantiscono le possibilità di accesso.

Marco Bellacosa
Società Italiana di Fisica - Responsabile Ufficio IT

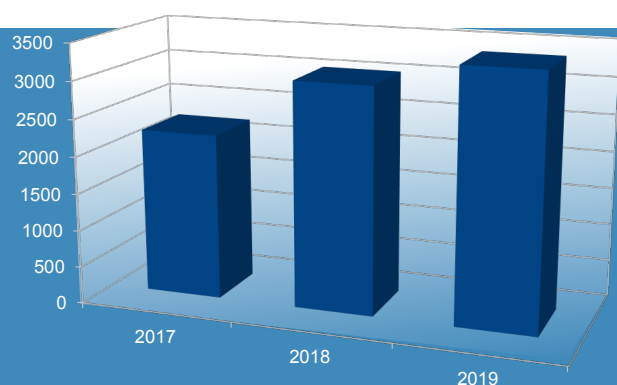


Fig. 1 Numero di download per anno per LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO (dati relativi ai periodi dal 1 gennaio al 30 novembre di ciascun anno).

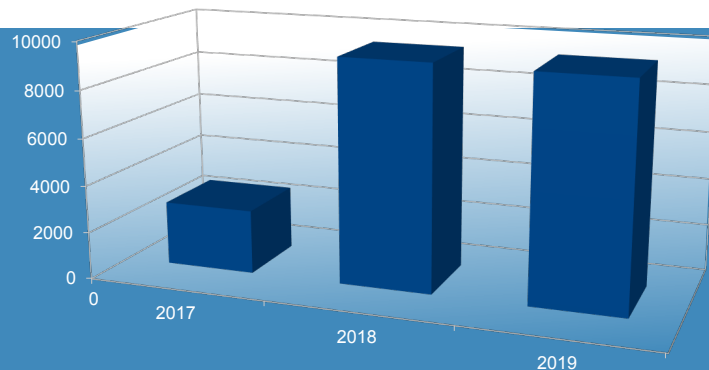


Fig. 2 Numero di download per anno per IL GIORNALE DI FISICA (dati relativi ai periodi dal 1 gennaio al 30 novembre di ciascun anno).

RECENSIONI



Pubblicata online
5 settembre 2019

L. GAMMAIONI, A. VULPIANI

**PERCHÉ È DIFFICILE PREVEDERE IL FUTURO
IL SOGNO PIÙ SFUGGENTE DELL'UOMO SOTTO
LALENTE DELLA FISICA**

Edizioni Dedalo, 2019

pp. 152, € 16,50

Recensione di
G. Benedek



Pubblicata online
5 settembre 2019

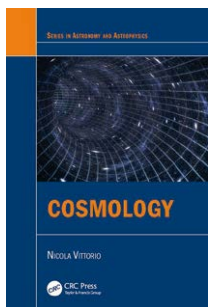
MASSIMO CAPACCIOLI

**LUNA ROSSA
LA CONQUISTA SOVIETICA DELLO SPAZIO**

Le Sfere. Carocci Editore, 2019

pp. 240, € 18,00

Recensione di
A. Bettini



Pubblicata online
22 ottobre 2019

NICOLA VITTORIO

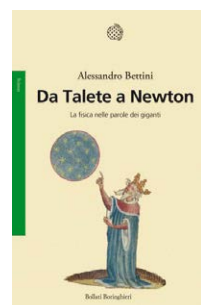
COSMOLOGY

CRC Press. Taylor & Francis Group,
New York, 2017

hardcover: pp. 428, £ 60.99

e-book: £ 54.89

Recensione di
S. Matarrese



Pubblicata online
25 novembre 2019

ALESSANDRO BETTINI

**DA TALETE A NEWTON
LA FISICA NELLE PAROLE DEI GIGANTI**

Saggi. Bollati Boringhieri, 2019

pp 297, € 24,00

Recensione di
J. J. Gómez-Cadenas



Pubblicata online
5 settembre 2019

ADALBERTO GIAZOTTO

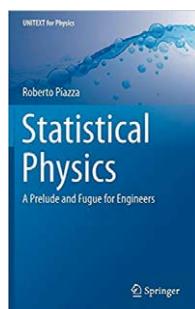
**LA MUSICA NASCOSTA DELL'UNIVERSO
LA MIA VITA A CACCIA DELLE ONDE
GRAVITAZIONALI**

(a cura di Andrea Parlange)

Passaggi Einaudi, 2018

pp. X - 128, € 15,00

Recensione di
E. Coccia



Pubblicata online
9 settembre 2019

ROBERTO PIAZZA

**STATISTICAL PHYSICS
A PRELUDE AND FUGUE FOR ENGINEERS**

UNITEXT for Physics. Springer
Nature, 2017

hardcover: pp. XV + 453, € 72,79

e-book: € 59,49

Recensione di
G. Benedek



Pubblicata online
30 ottobre 2019

FORTUNATO TITO ARECCHI

COGNIZIONE E REALTÀ

Firenze University Press, 2018

pp. 150, € 19,90

Recensione di
P. Musso

ASSEMBLEA DI RATIFICA DELLE ELEZIONI DELLE CARICHE SOCIALI PER IL TRIENNIO 2020-2022

Il giorno venerdì 27 settembre 2019 alle ore 19:00 si sono riuniti nella Sala Rossa del GSSI Ex-ISEF a L'Aquila, i soci della Società Italiana di Fisica per la ratifica e proclamazione degli eletti alle cariche di Presidente e di membro del Consiglio di Presidenza della SIF.

Presiede, in qualità di Presidente della Commissione Elettorale, il Dottor Tullio Pepe.

I risultati delle votazioni telematiche effettuate, a norma del nuovo regolamento elettorale, da postazioni remote dal 26 agosto 2019 alle ore 10:00 fino al 25 settembre 2019 alle ore 9:59 e dal seggio elettorale allestito al Congresso SIF, dal 25 settembre 2019 alle ore 10:00 al 27 settembre 2019 alle ore 12.00, sono i seguenti:

Numero di soci aventi diritto al voto	1319
Numero di votanti al seggio	19
Numero di votanti da remoto	553
Numero di deleghe inviate	3
Numero di voti in delega espletati al seggio	0
Totale voti	575
Voti nulli	0
Totale voti validi	575

Presidenza

Angela Bracco	456
bianche	119
nulle	0
Totale voti Presidenza	575

Consiglio

Antigone Marino	199
Sara Pirrone	194

Alessandro Bettini	191
Giuseppe Grosso	168
Eugenio Coccia	162
Salvatore De Pasquale	117
Bernardo Spagnolo	106
Roberto Senesi	100
Francesco Mallamace	69
Antonio D'Onofrio	52
bianche	3
nulle	0

La maggioranza assoluta dei voti (288) è stata ottenuta da Angela Bracco per la Presidenza e da nessuno dei candidati per il Consiglio di Presidenza.

Il Presidente pro-tempore chiede quindi all'Assemblea di ratificare l'elezione dei candidati che non hanno ottenuto la maggioranza assoluta, procedendo in ordine di preferenze.

L'Assemblea ratifica all'unanimità. Risultano perciò eletti nel Consiglio di Presidenza SIF 2020-2022 i soci: Antigone Marino, Sara Pirrone, Alessandro Bettini, Giuseppe Grosso, Eugenio Coccia, Salvatore De Pasquale, Bernardo Spagnolo.

Per quanto sopra, la Professoressa Angela Bracco è nominata Presidente della Società Italiana di Fisica.

La decorrenza della nomina è fissata dalla data del 1° gennaio 2020.

I candidati sopra elencati sono nominati membri del Consiglio di Presidenza.

La decorrenza della loro nomina è fissata dalla data del 1° gennaio 2020.

La seduta è tolta alle ore 19:30 del 27 settembre 2019.

Il Presidente della Commissione Elettorale

Tullio Pepe

IN RICORDO DI

Luigi Arialdo Radicati di Brozolo



Milano, 12 ottobre 1919 -
Pisa, 23 agosto 2019

G. Bertin, F. Pegoraro

Pubblicato online
22 ottobre 2019

UN DISPLAY TRIDIMENSIONALE INTERATTIVO

Diverse sono le tecniche per realizzare display in tre dimensioni. Ricercatori dell'Università del Sussex hanno seguito un approccio acustico. Onde ultrasonore sono programmate in modo da creare formazioni di pressione in cui intrappolare e muovere velocemente piccoli oggetti. Per creare immagini non basta catturare acusticamente una pallina di 1-2 mm di diametro, illuminarla e muoverla a creare l'immagine punto per punto, ma bisogna anche farlo in meno di un decimo di secondo, cosa che sinora non era riuscita. Il prototipo realizzato fornisce immagini in movimento ancora a risoluzione limitata, ma permette anche di produrre segnali sonori e di interazione tattile.

Ryuji Hirayama *et al.*, *A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping*, *Nature*, 575 (2019) 320.

Here we present the multimodal acoustic trap display (MATD): a levitating volumetric display that can simultaneously deliver visual, auditory and tactile content, using acoustophoresis as the single operating principle. Our system traps a particle acoustically and illuminates it with red, green and blue light to control its colour as it quickly scans the display volume. Using time multiplexing with a secondary trap, amplitude modulation and phase minimization, the MATD delivers simultaneous auditory and tactile content. The system demonstrates particle speeds of up to 8.75 m/s and 3.75 m/s in the vertical and horizontal directions, respectively, offering particle manipulation capabilities superior to those of other optical or acoustic approaches demonstrated until now.



Immagine in 3D nel MATD e mani dell'utente. Ringraziamenti a Ryuji Hirayama.

CRISTALLI TEMPORALI

La possibilità di rompere la simmetria per traslazioni temporali, sollevata nel 2012 da Frank Wilczek, che ha chiamato il fenomeno cristalli temporali, ha stimolato la nascita di un nuovo campo di indagine, in particolare dopo l'introduzione dei cosiddetti cristalli di Floquet, dal nome del teorema. La dinamica di questi sistemi, quando soggetti a sollecitazione periodica, è caratterizzata da osservabili che oscillano a periodi multipli di quello forzante. La situazione qui analizzata sembra poter condurre a verifiche sperimentali.

A. Pizzi *et al.*, *Period-n Discrete Time Crystals and Quasicrystals with Ultracold Bosons*, *Phys. Rev. Lett.*, 123 (2019) 150601.

We investigate the out-of-equilibrium properties of a system of interacting bosons in a ring lattice. We present a Floquet driving that induces clockwise (counterclockwise) circulation of the particles among the odd (even) sites of the ring which can be mapped to a fully connected model of clocks of two counterrotating species. The clocklike motion of the particles is at the core of a period- n discrete time crystal where $L=2n$ is the number of lattice sites.

METALLO, MA CON COPPIE DI COOPER

Le coppie (di elettroni) di Cooper sono bosoni responsabili della superconduttività a bassa temperatura, con resistenza nulla. In questo articolo, gli autori hanno scoperto un nuovo stato della materia, nel quale le coppie di Cooper possono trasportare carica, come gli elettroni in un metallo, con resistività non nulla.

Chao Yang *et al.*, *Intermediate bosonic metallic state in the superconductor-insulator transition*, *Science* (14.11.2019) eaax5798.

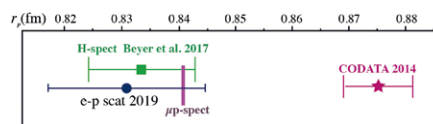
Whether a metallic ground state exists in a two-dimensional system beyond Anderson localization remains an unresolved question. Here, we study how quantum phase coherence evolves across superconductor-metal-insulator transitions via magneto-conductance quantum oscillations in nanopatterned high-temperature superconducting films. Between the superconducting and insulating regimes, we detect a robust intervening anomalous metallic state characterized by saturating resistance and oscillation amplitude at low temperatures. Our measurements suggest that the anomalous metallic state is bosonic and that the saturation of phase coherence plays a prominent role in its formation.

IL PROTONE È PIÙ PICCOLO

Nel 2013 accuratissime misure del Lamb-shift dell'idrogeno muonico μp hanno dato un valore del raggio di carica del protone r_p più piccolo di quello misurato in idrogeno normale di 5.6σ . Due anni fa, in questa rubrica (Vol. 33, N. 5-6, p. 86), segnalavo una nuova misura sullo spettro dell'idrogeno normale, in accordo con quelle sullo spettro del μp . Rimaneva da ricontrollare il terzo metodo, la diffusione elastica elettrone-protone. Un esperimento di precisione, progettato allo scopo al Jefferson Lab, ha ora pubblicato la sua misura, che è in accordo con gli altri due metodi. Il protone è realmente più piccolo (vedi "e-p scat 2019" in figura).

W. Xiong *et al.*, *A small proton charge radius from an electron-proton scattering experiment*, *Nature*, 575 (2019) 147.

Elastic e-p scattering and the spectroscopy of hydrogen atoms are the two methods traditionally used to determine the proton charge radius r_p . In 2010, a new method using muonic hydrogen atoms found a substantial discrepancy compared with previous results, which became known as the "proton radius puzzle". The puzzle remains unresolved. In fact, there is a discrepancy between the two most recent spectroscopic measurements conducted on ordinary hydrogen. Here we report on the proton charge radius high-precision e-p experiment at Jefferson Laboratory (PRad). We used a magnetic-spectrometer-free method along with a windowless hydrogen gas target, which overcame several limitations of previous e-p experiments and enabled measurements at very small forward-scattering angles. Our result is smaller than the most recent high-precision e-p measurement and 2.7σ smaller than the average of all e-p experimental results. The smaller r_p we have measured supports the value found by two previous muonic hydrogen experiments.



Le recenti misure del raggio del protone e la media sino al 2014.



**QUANTUM TECHNOLOGIES
WITHIN INFN
STATUS AND PERSPECTIVES**

<https://agenda.infn.it/event/21070/overview>

PADOVA, 20-21 JANUARY 2020

SIBPA
Società Italiana di Biofisica Pura e Applicata
fondato nel 1973

 **Istituto Veneto
di Scienze, Lettere
ed Arti**

XXIV INTERNATIONAL SCHOOL OF PURE AND APPLIED BIOPHYSICS



Venice (Italy)- Palazzo Franchetti- 27-31 January 2020

Applications of X-rays and Neutron Scattering in Biology

<http://www.pa.ibf.cnr.it/sibpa/index.php/scuola-internazionale-di-biofisica-sibpa-ivsla>

INDICI DEL VOLUME 35

INDICE PER FASCICOLI

Numero 1/2, 2019

Editoriale/Editorial

L. Cifarelli

In memoria di Pio Picchi

R. A. Ricci, E. Iarocci, F. Pietropaolo

A research lasting one hundred years and the beginning of a new exploration of the Universe

M. Branchesi

The arcane ultra-high energy cosmic radiation

A. Bueno Villar

LIQUITOPY® – addressing a new paradigm in optical microscopy

A. Diaspro

Sola scriptura mathematica

E. Giannetto

The ancient Beijing Astronomical Observatory

A. Bettini

High- T_c superconductivity: the Erice legacy

G. Benedek

Programma della Scuola Estiva “Enrico Fermi” di Varenna

Joint EPS-SIF International School on Energy

Passion for Science

105° Congresso Nazionale

Bandi dei concorsi a premi della SIF

NICA in Dubna

V. Kekelidze, V. Matveev, I. Meshkov, G. Trubnikov

Cineca – a leadership facility for Italian computational science

C. Cavazzoni

Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa

A. Bettini

Tanti auguri per i 30 anni del Web!

A. Sidoti

Recensioni ()*

In ricordo di ()*

Enzo Boschi (T. Pepe)

Gianni Mula (S. Nuvoli, F. Casula, F. Meloni, L. Colombo, G. Pegna)

Carlo Bernardini (L. Bonolis)

In evidenza (A. Bettini)

Annunci

Numero 3/4, 2019

Editoriale/Editorial

L. Cifarelli

In memoria di Guido Piragino

A. Maggiora, G. Pontecorvo

Cosmic rays

A. De Angelis

Multiquark hadrons

A. D. Polosa

Italian quantum backbone

D. Calonico, C. Clivati

High-resolution Resonant Inelastic soft X-ray Scattering (RIXS)

L. Braicovich, G. Ghiringhelli

The incomplete revolutions of string theory

A. Sagnotti

The 1919 total solar eclipse

A. Bettini

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

	<i>105° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica</i>	69
	<i>Programma Generale</i>	70
	<i>Elezioni delle cariche sociali SIF per il triennio 2020-2022</i>	72
	<i>Passion for Science</i>	73
	<i>Lunar renaissance</i>	74
3	P. Caraveo	
	<i>Earthquakes in Italy: why can't we defend ourselves?</i>	82
5	A. Amato	
	<i>Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa</i>	
	A. Bettini	90
9	<i>Recensioni (*)</i>	
	<i>I Fisici Senatori 1848-1943 di M. Leone, N. Robotti</i>	
14	(U. Bottazzini)	92
	<i>In ricordo di (*)</i>	
21	Antonio Paoletti (C. Andreani, E. Rimini, A. Stella)	
	<i>Giuseppe Pastori Parravicini (G. Grosso)</i>	
29	Graziano Fortuna (R. A. Ricci)	
	<i>Alessandro Marini (L. Votano, F. Ronga)</i>	
35	Vinicio Montelatici (G. Baldacchini)	
	<i>Gerda Antonia Wolzak (R. A. Ricci)</i>	95
47	<i>In evidenza (A. Bettini)</i>	96
53	<i>Annunci</i>	97
57		
59		
60	Numero 5/6, 2019	
62		
	<i>Editoriale/Editorial</i>	
68	L. Cifarelli	3
	<i>In memoria di Bruno Preziosi</i>	
77	A. Coniglio, S. Solimeno	5
	<i>Geometrical observables in condensed matter</i>	
85	R. Resta	7
	<i>From LHC to FCC</i>	
86	G. Tonelli	17
88	<i>Is graphene chemically inert?</i>	
	G. Carraro, L. Savio, L. Vattuone	27
88	<i>Software for quantum simulations of tomorrow</i>	
88	P. Giannozzi	34
88	<i>The physics of Leonardo da Vinci</i>	
89	F. Borsa	41
93	<i>In memoriam of Murray Gell-Mann</i>	
	F. Fucito	53
	<i>Cerimonia Inaugurale</i>	
	<i>105° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica</i>	57
	<i>The Italian Physical Society “Enrico Fermi” Prize and Medal 2019</i>	
	M. Giorgi, T. Nakada	61
3	<i>SIF-IOP “Giuseppe Occhialini” Prize and Medal 2019</i>	
	J. D. Barrow	65
5	<i>Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa</i>	
	A. Bettini	66
9	<i>Il Premio Nobel per la Fisica 2019</i>	
	S. Matarrese, G. Piatto	69
21	<i>Fabiola Gianotti confermata alla guida del CERN</i>	
	S. Arcelli	74
29	<i>L'editoria e la SIF: il 2019 fra sfide e rinnovamento</i>	
	B. Ancarani	76
37	<i>Le pubblicazioni online della SIF: i numeri</i>	
	M. Bellacosa	78
47	<i>Recensioni (*)</i>	79
	<i>In ricordo di (*)</i>	
56	<i>Luigi Arialdo Radicati di Brozolo (G. Bertin, F. Pegoraro)</i>	80
	<i>In evidenza (A. Bettini)</i>	81
	<i>Annunci</i>	82
	<i>Indici volume 35</i>	83

INDICE PER AUTORI

A

- Amato A.
Earthquakes in Italy: why can't we defend ourselves? 35:3/4, 82
- Ancarani B.
L'editoria e la SIF: il 2019 fra sfide e rinnovamento 35:5/6, 76
- Andreani C., Rimini E., Stella A.
In ricordo di () Antonio Paoletti* 35:3/4, 95
- Arcelli S.
Fabiola Gianotti confermata alla guida del CERN 35:5/6, 74

B

- Baldacchini G.
In ricordo di () Vinicio Montelatici* 35:3/4, 95
- Bellacosa M.
Le pubblicazioni online della SIF: i numeri 35:5/6, 78
- G. Benedek
High- T_c superconductivity: the Erice legacy 35:1/2, 47
- Bertin G., Pegoraro F.
In ricordo di () Luigi Aialdo Radicati di Brozolo* 35:5/6, 80
- Bettini A.
The 1919 total solar eclipse 35:3/4, 56
- Bettini A.
The ancient Beijing Astronomical Observatory 35:1/2, 35
- Bonolis L.
In ricordo di () Carlo Bernardini* 35:1/2, 88
- Borsa F.
The physics of Leonardo da Vinci 35:5/6, 41
- Bottazzini U.
I Fisici Senatori 1848-1943 di M. Leone, N. Robotti 35:3/4, 92
- Braicovich L., Ghiringhelli G.
High-resolution Resonant Inelastic soft X-ray Scattering (RIXS) 35:3/4, 37
- Branchesi M.
A research lasting one hundred years and the beginning of a new exploration of the Universe 35:1/2, 9
- Bueno Villar A.
The arcane ultra-high energy cosmic radiation 35:1/2, 14

C

- Calonico D., Clivati C.
Italian quantum backbone 35:3/4, 29
- Caraveo P.
Lunar renaissance 35:3/4, 74
- Casula F. (vedi Nuvoli S.)
- Carraro G. (vedi Vattuone L.)
- Cavazzoni C.
Cineca – a leadership facility for Italian computational science 35:1/2, 77
- Clivati C. (vedi Calonico D.)
- Colombo L. (vedi Nuvoli S.)
- Coniglio A., Solimeno S.
In memoria di Bruno Preziosi 35:5/6, 5

D

- De Angelis A.
Cosmic rays 35:3/4, 9
- Diaspro A.
LQUITOPY® – addressing a new paradigm in optical microscopy 35:1/2, 21

F

- Fucito F.
In memoriam of Murray Gell-Mann 35:5/6, 53

G

- Ghiringhelli G. (vedi Braicovich L.)
- Giannetto E.
Sola scriptura mathematica 35:1/2, 29
- Giannozzi P.
Software for quantum simulations of tomorrow 35:5/6, 34
- Grosso G.
In ricordo di () Giuseppe Pastori Parravicini* 35:3/4, 95

I

- Iarocci E. (vedi Ricci R. A.)

K

- Kekelidze V. (vedi Meshkov I.)

M

- Maggiora A., Pontecorvo G.
In memoria di Guido Piragino 35:3/4, 5
- Matarrese S., Piotto G.
Il Premio Nobel per la Fisica 2019 35:5/6, 69
- Matveev V. (vedi Meshkov I.)
- Meloni F. (vedi Nuvoli S.)
- Meshkov I., Kekelidze V., Matveev V., Trubnikov G.
NICA in Dubna 35:1/2, 68

N

- Nuvoli S., Casula F., Meloni F., Colombo L., Pegna G.
In ricordo di () Gianni Mula* 35:1/2, 88

P

- Pegna G. (vedi Nuvoli S.)
- Pegoraro F. (vedi Bertin G.)
- Pepe T.
In ricordo di () Enzo Boschi* 35:1/2, 88
- Pietropaolo F. (vedi Ricci R. A.)
- Piotto G. (vedi Matarrese S.)
- Polosa A. D.
Multiquark hadrons 35:3/4, 21
- Pontecorvo G. (vedi Maggiora A.)

R

- Resta R.
Geometrical observables in condensed matter 35:5/6, 7
- Ricci R. A.
In ricordo di () Graziano Fortuna* 35:3/4, 95
- Ricci R. A.
In ricordo di () Gerda Antonia Wolzak* 35:3/4, 95
- Ricci R. A., Iarocci E., Pietropaolo F.
In memoria di Pio Picchi 35:1/2, 5
- Rimini E. (vedi Andreani C.)
- Ronga F. (vedi Votano L.)

S

- Sagnotti A.
The incomplete revolutions of string theory 35:3/4, 47
- Savio L. (vedi Vattuone L.)
- Sidoti A.
Tanti auguri per i 30 anni del Web! 35:1/2, 86
- Solimeno S. (vedi Coniglio A.)
- Stella A. (vedi Andreani C.)

T

- Tonelli G.
From LHC to FCC 35:5/6, 17
- Trubnikov G. (vedi Meshkov I.)

V

Vattuone L., Carraro G., Savio L.
Is graphene chemically inert?
 Votano L., Ronga F.
In ricordo di () Alessandro Marini*

35:5/6, 27
 35:3/4, 95

INDICE PER RUBRICHE

SCIENZA IN PRIMO PIANO

A research lasting one hundred years and the beginning of a new exploration of the Universe

M. Branchesi 35:1/2, 9
Cosmic rays
 A. De Angelis 35:3/4, 9
From LHC to FCC
 G. Tonelli 35:5/6, 17
Geometrical observables in condensed matter
 R. Resta 35:5/6, 7
Multiquark hadrons
 A. D. Polosa 35:3/4, 21
The arcane ultra-high energy cosmic radiation
 A. Bueno Villar 35:1/2, 14

FISICA E...

High-resolution Resonant Inelastic soft X-ray Scattering (RIXS)
 L. Braicovich, G. Ghiringhelli 35:3/4, 37
Is graphene chemically inert?
 G. Carraro, L. Savio, L. Vattuone 35:5/6, 27
Italian quantum backbone
 D. Calonico, C. Clivati 35:3/4, 29
LIQUITOPY® – addressing a new paradigm in optical microscopy
 A. Diaspro 35:1/2, 21
Software for quantum simulations of tomorrow
 P. Giannozzi 35:5/6, 34

PERCORSI

High- T_c superconductivity: the Erice legacy
 G. Benedek 35:1/2, 47
In memoriam of Murray Gell-Mann
 F. Fucito 35:5/6, 53
Sola scriptura mathematica
 E. Giannetto 35:1/2, 29
The 1919 total solar eclipse
 A. Bettini 35:3/4, 56
The ancient Beijing Astronomical Observatory
 A. Bettini 35:1/2, 35
The incomplete revolutions of string theory
 A. Sagnotti 35:3/4, 47
The physics of Leonardo da Vinci
 F. Borsa 35:5/6, 41

IL NOSTRO MONDO

Cineca – a leadership facility for Italian computational science
 C. Cavazzoni 35:1/2, 77
Earthquakes in Italy: why can't we defend ourselves?
 A. Amato 35:3/4, 82
Lunar renaissance
 P. Caraveo 35:3/4, 74
NICA in Dubna
 V. Kekelidze, V. Matveev, I. Meshkov, G. Trubnikov 35:1/2, 68

Suole e Congressi SIF

Programma della Scuola Estiva "Enrico Fermi" di Varenna 35:1/2, 53
Joint EPS-SIF International School on Energy 35:1/2, 57
Passion for Science 35:1/2, 59
105° Congresso Nazionale 35:1/2, 60
Bandi dei concorsi a premi della SIF 35:1/2, 62
105° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 35:3/4, 69
Programma Generale 35:3/4, 70
Elezioni delle cariche sociali SIF per il triennio 2020-2022 35:3/4, 72
Passion for Science 35:3/4, 73
Cerimonia Inaugurale
105° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica 35:5/6, 57
The Italian Physical Society "Enrico Fermi" Prize and Medal 2019
 M. Giorgi, T. Nakada 35:5/6, 61
SIF-IOP "Giuseppe Occhialini" Prize and Medal 2019
 J. D. Barrow 35:5/6, 65

Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa
 A. Bettini 35:1/2, 85
 35:3/4, 90
 35:5/6, 66

News

Fabiola Gianotti confermata alla guida del CERN
 S. Arcelli 35:5/6, 74
Il Premio Nobel per la Fisica 2019
 S. Matarrese, G. Pionto 35:5/6, 69
L'editoria e la SIF: il 2019 fra sfide e rinnovamento
 B. Ancarani 35:5/6, 76
Le pubblicazioni online della SIF: i numeri
 M. Bellacosa 35:5/6, 78
Tanti auguri per i 30 anni del Web!
 A. Sidoti 35:1/2, 86

RECENSIONI(*)

Atomic Scale Dynamics at Surfaces
 recensito da L. Miglio 35:3/4, 94
Cognizione e realtà
 recensito da P. Musso 35:5/6, 79
Conquistati dalla Luna
 recensito da G. Benedek 35:3/4, 94
Cosmology
 recensito da S. Matarrese 35:5/6, 79
Da Talete a Newton
 recensito da J. J. Gómez-Cadenas 35:5/6, 79
ICGG 2018 – Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics
 recensito da G. Benedek 35:3/4, 95
I Fisici Senatori 1848-1943
 recensito da U. Bottazzini 35:3/4, 92
La musica nascosta dell'Universo
 recensito da E. Coccia 35:5/6, 79
L'infinita curiosità
 recensito da G. Caglioti 35:3/4, 94
Luna Rossa
 recensito da A. Bettini 35:5/6, 79
Manuale di Ottica
 recensito da A. Sassella 35:1/2, 88
Michelson-Morley Experiments
 recensito da G. Benedek 35:3/4, 94
Perché è difficile prevedere il futuro
 recensito da G. Benedek 35:5/6, 79
Principles of Quantum Computation and Information
 recensito da G. Benedek 35:1/2, 88

Spectroscopy of Semiconductors

recensito da A. Sassella

Statistical Physics

recensito da G. Benedek

Strega di Agnesi

recensito da S. Pirrone

In ricordo di(*)

Carlo Bernardini (L. Bonolis)

Gianni Mula (S. Nuvoli, F. Casula, F. Meloni, L. Colombo, G. Pegna)

Enzo Boschi (T. Pepe)

Antonio Paoletti (C. Andreani, E. Rimini, A. Stella)

Alessandro Marini (L. Votano, F. Ronga)

35:3/4, 94

35:5/6, 79

35:3/4, 94

Graziano Fortuna (R. A. Ricci)

Gerda Antonia Wolzak (R. A. Ricci)

Giuseppe Pastori Parravicini (G. Grosso)

Vinicio Montelatici (G. Baldacchini)

Luigi Arialdo Radicati di Brozolo (G. Bertin, F. Pegoraro)

35:3/4, 95

35:3/4, 95

35:3/4, 95

35:3/4, 95

35:5/6, 80

IN EVIDENZA

Semi elicotteri - Pressione nel protone - Film di elastici volanti -

Magico (doppio) grafene

Un gas di solitoni - Nanopixel - Microgravità -

Piccolo ma fortissimo

Un display tridimensionale interattivo - Cristalli temporali -

Metallo, ma con coppie di Cooper - Il protone è più piccolo

35:1/2, 89

35:3/4, 96

35:5/6, 81

**L'INFN e il CNR bandiscono per l'anno scolastico
2019/2020 il concorso:**

**STORIE DI DONNE, DI RICERCA E DI FISICA APPLICATA:
L'ALTRO VOLTO DELLA FISICA**

Adesione entro il: 28 Febbraio 2020

Per registrazione e aggiornamenti:

<https://agenda.infn.it/e/concorsoscuole2020>

Info: donnericerca@lists.infn.it

32^a

SELEZIONE ITALIANA PER IL CONCORSO
DELL'UNIONE EUROPEA
DEI GIOVANI SCIENZIATI
E PER ALTRI EVENTI INTERNAZIONALI

2020

I GIOVANI E LE SCIENZE



<http://www.fast.mi.it/g2020/g2020.htm>

Milano, 7-9 marzo 2020

DOMANDA DI ISCRIZIONE alla SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA
ITALIAN PHYSICAL SOCIETY MEMBERSHIP APPLICATION FORM

2020

Nome _____
Name

Cognome _____
Surname

Luogo e data di nascita _____
Place and date of birth

Nazionalità _____
Nationality

a Istituto o Ente di appartenenza _____
Affiliation

b Indirizzo privato _____
Home address

Indirizzo e-mail _____
E-mail

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

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

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

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

1) _____

2) _____

☐ Socio INDIVIDUALE € 50,00 ☐
INDIVIDUAL Member

☐ Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni (pagamento annuale) € 30,00 ☐
JUNIOR Member under 30 (one year payment)

☐ Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni (pagamento triennale 2020-2021-2022) € 75,00 ☐
JUNIOR Member under 30 (three year payment 2020-2021-2022)

☐ Socio SENIOR al di sopra dei 70 anni € 40,00 ☐
SENIOR Member over 70

☐ Socio INDIVIDUALE anche membro di altre associazioni scientifiche italiane relative alla fisica (*) € 40,00 ☐
INDIVIDUAL Member also member of other Italian scientific associations (*)

☐ Socio COLLETTIVO € 300,00 ☐
COLLECTIVE Member

☐ Socio SOSTENITORE (a partire da) € 350,00 ☐
SPONSORING Member (starting from)

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

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

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

Data _____
Date

Firma _____
Signature

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

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

SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Per diventare Socio SIF:

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

Quote sociali 2020 della Società Italiana di Fisica

- | | | |
|--|----------|--------------------------|
| ☐ Socio Individuale | € 50,00 | ☐ |
| ☐ Socio Junior al di sotto dei 30 anni (pagamento annuale) | € 30,00 | ☐ |
| ☐ Socio Junior al di sotto dei 30 anni (pagamento triennale 2020-2021-2022) | € 75,00 | ☐ |
| ☐ Socio Senior al di sopra dei 70 anni | € 40,00 | ☐ |
| ☐ Socio Individuale anche membro di altra associazione scientifica italiana relativa alla fisica (*) | € 40,00 | ☐ |
| ☐ Socio Collettivo | € 300,00 | ☐ |
| ☐ Socio Sostenitore (a partire da) | € 350,00 | ☐ |
| ☐ Socio Invitato (*) - primo anno di pagamento (quota SIF) | € 15,00 | ☐ |
| ☐ Socio Invitato (*) - primo anno di pagamento (quota SIF+EPS) | € 25,00 | ☐ |

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

Per diventare Socio EPS:

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

Quote sociali 2020 della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

- | | | |
|--|---------|--------------------------|
| ☐ Socio | | |
| ☐ 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
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

si ☐ no ☐

Firma _____

physicsworld



Digital issues now freely available to SIF members

Download the free *Physics World* app for access. Available for iPhone, iPad and all Android devices.



Authenticate your access at members.sif.it

brightrecruits

IOP Publishing and Società Italiana di Fisica wish to thank *brightrecruits* for facilitating digital access to *Physics World* for SIF members in 2019.

IOP Publishing | science first



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 powered by **brightrecruits**

Download the free Physics World app today!

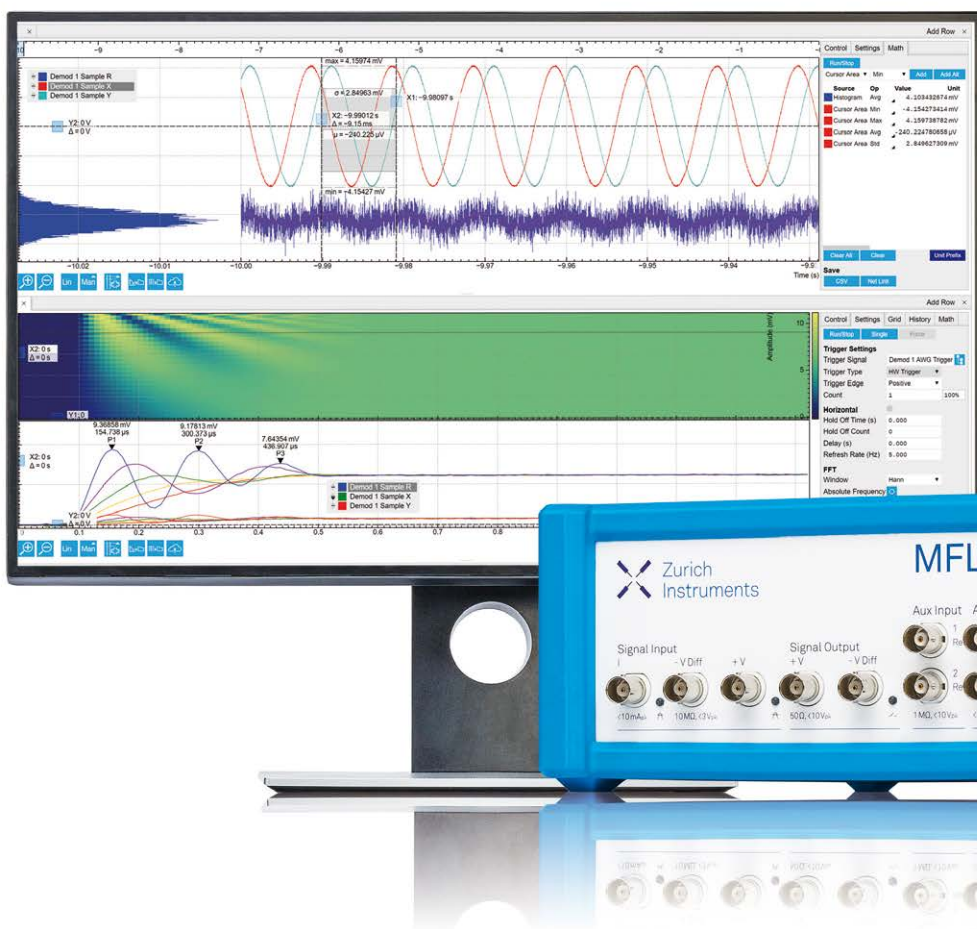


Read online at physicsworld.com/careers

Metteteci alla prova!

Quali sono i vostri requisiti per misurare segnali deboli e periodici?

La nostra missione: fornire un ecosistema di strumenti e software per permettervi di ottenere i migliori risultati con velocità e accuratezza.



MFLI 500 kHz
Lock-in Amplifier
A partire da

EUR 5.400

È possibile scegliere
fra oltre 70.000
prodotti
a catalogo

Goodfellow

Your global supplier for materials

Materials Excellence



Metalli



Leghe



Ceramiche



Polimeri



Compositi



Compositi

Rappresentata in Italia da



PRODOTTIGIANNI

Our competence, your value.

www.ricerca.it | ricerca.assistenza@prodottigianni.com | 800 832 027

725-730 Digitizer Families

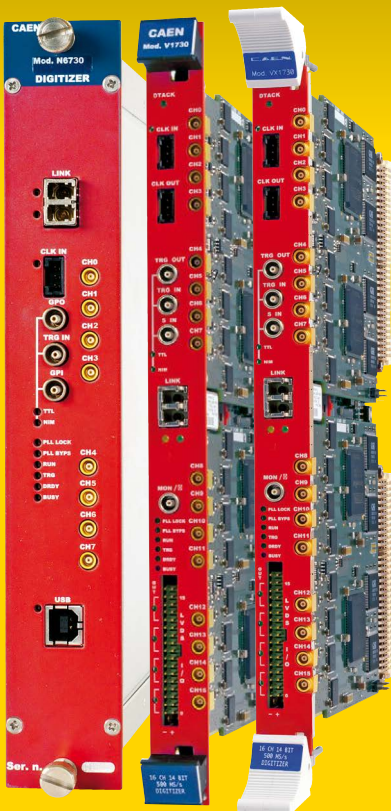
8/16 Channel 14-bit 250-500 MS/s Digitizer

CHECK THIS OUT!



The perfect mix of sampling rate, resolution and channel density for the maximum flexibility

CAEN continuous R&D efforts are the driving force behind the technology of 725/730 Digitizers, the best seller models selected by many users and experiments Worldwide.



APPLICATIONS

- Nuclear and Particle Physics
- Dark Matter and Astroparticle Physics
- Fast Neutron Spectroscopy
- Fusion Plasma Diagnostic
- Neutrino Physics
- Environmental Monitoring
- Homeland Security
- and more

COMPATIBLE DETECTORS

- Solid organic and inorganic Scintillators
- Liquid Scintillators
- HPGe
- SiPM
- Diamond Detectors
- and more

Precise signal reconstruction, advanced zero suppression algorithms, high energy resolution, pulse-shape discrimination and sub-ns timing capabilities ... all of these are in 725/730 Digitizers, the ideal solutions for many applications in Physics and Nuclear Engineering.



FIRMWARE



SOFTWARE



C and LabVIEW™ libraries available for custom developments.

Waveform Digitizer Families - VME64, VME64X, NIM, Desktop, Rack



12/14-bit
100/250 MS/s

720/724 Digitizer Family
8/4/2 Ch.



12-bit
62.5 MS/s

740 Digitizer Family
64/32 Ch.



10-bit
1-2-4 GS/s

751/761 Digitizer Family
2/1/8-4/4-2 Ch.



12-bit
3.2/5 GS/s

742/743 Switched Capacitor
Digitizer Family
32+2/16+1 - 16/8 Ch.



14-bit
@125 MS/s

R5560/ DT5560SE Digitizer
Family
32/128 Ch.