HANNO COLLABORATO A QUESTO NUMERO:
L. Angelani, L. Belloni, A. Bottino, R. Camuffo, P. Cenci, S. Centro, E. Dalessandro, V. Dallacasa, G. M. D'Ariano, R. Di Leonardo, A. Di Virgilio, A. Ereditato, S. Esposito, S. Falciano, M. Fedi, F. R. Ferraro, G. L. Fogli, A. Gemma, N. Grassi, R. Kirby-Harris, F. Lacava, B. Lanzoni, P. A. Mandò, A. Mucciarelli, R. Raimondi, G. Ruocco, G. Sironi, L. Ubaldini, D. Zavattaro

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 26 • N. 3 maggio-giugno 2010 • N. 4 luglio-agosto 2010

DIRETTORE RESPONSABILE
Luisa Cifarelli

VICEDIRETTORI
Sergio Focardi
Giuseppe Grosso

COMITATO SCIENTIFICO
G. Benedek, A. Bettini, S. Centro, E. De Sanctis, E. Iarocci, I. Ortalli, F. Palmonari, R. Petronzio, P. Picchi, B. Preziosi

SOMMARIO

3 EDITORIALE / EDITORIAL

SCIENZA IN PRIMO PIANO

5 **The appearance of the tau-neutrino**
A. Ereditato

21 **Spin e carica: un dialogo promettente**
R. Raimondi

33 **Astroarcheologia con gli ammassi stellari**
F. R. Ferraro, B. Lanzoni, E. Dalessandro, A. Mucciarelli

45 **Micromotori a propulsione batterica**
R. Di Leonardo, L. Angelani, G. Ruocco

FISICA E...

53 **Acceleratori di particelle: quale ruolo oggi per i beni culturali?**
P. A. Mandò, M. Fedi, N. Grassi

Ricerca & Industria

65 **RENCO: Il colosso pesarese nella sfida dell'alta tecnologia industriale**
A. Gemma

67 **SIMIC: la storia di come investire in R&S porta a crescere**
R. Camuffo

IL NOSTRO MONDO

69 **XCVI Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica Programma Generale**

72 **C'è spazio per un fisico nelle scienze forensi?**
D. Zavattaro

78 **Origin, role and structure of the Institute of Physics**
R. Kirby-Harris

News

83 **Incontro per i 90 anni di Giorgio Salvini**
S. Falciano, F. Lacava

86 **Donne e ricerca nell'Unione Europea**
P. Cenci, A. Di Virgilio, L. Ubaldini

Intervista a

90 **Federico Faggin**
S. Centro

91 OPINIONI

92 RECENSIONI

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

MODALITÀ DI ISCRIZIONE ALLA SIF

Per iscriversi occorre presentare domanda di associazione con un breve curriculum scientifico e l'indicazione di due Soci presentatori.
La domanda di associazione può essere fatta online (oppure scaricando l'apposito modulo di associazione, pubblicato anche in ultima pagina) all'indirizzo: `http://www.sif.it/SIF/it/portal/associazione.`
La domanda verrà poi esaminata ed eventualmente approvata dal Consiglio di Presidenza.
Il pagamento della quota sociale, nei modi sotto indicati, dovrà avvenire dopo aver ricevuto comunicazione della accettazione a Socio.

RINNOVO QUOTE SOCIALI

Il rinnovo della quota sociale può essere effettuato:

- Online nell'Area Soci del sito web della SIF; in questo caso si utilizza la carta di credito, con collegamento diretto e sicuro al sito della Banca Nazionale del Lavoro (BNL).
  Ricordiamo che l'Area Soci è un'area protetta per accedere alla quale occorre utilizzare username e password che vengono inviati a tutti i Soci. (Per accedere agli altri servizi disponibli nell'Area Soci occorre essere Soci in regola).
- Seguendo le modalità pubblicate in ultima pagina e pubblicate in rete all'indirizzo:
  `http://www.sif.it/SIF/it/portal/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://www.sif.it/SIF/en/portal/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://www.sif.it/SIF/en/portal/association.`
  In case you wish to use the credit card also in this case, make sure to fill in the form in all its parts.
- It is also possible to renew the association to the European Physical Society (EPS) through the respective national societies. Members who wish to pay the EPS association fee through SIF can do so according to the instructions above. The EPS association fees are available on the SIF website at the above-indicated address.

EDITORIALE / EDITORIAL

Con il mio consueto Editoriale su queste colonne, giunta quasi alla fine del mio primo mandato alla Presidenza della SIF, vorrei dare qualche buona notizia ai Soci. Una rassegna complessiva dell'andamento della Società nel triennio 2008-2010 sarà presentata all'Assemblea Generale dei Soci durante il 96° Congresso Nazionale di Bologna.

Cominciamo con il successo de La Rivista del Nuovo Cimento, il cui impact factor ha raggiunto quota 3.5. Sono andati anche molto bene quest'anno sia Il Nuovo Cimento B-Basic topics in physics (NCB) sia Il Nuovo Cimento C-Colloquia on physics (NCC), che hanno recuperato terreno in termini di quantità di pagine prodotte, tempi di pubblicazione e abbonamenti. A tal punto che NCB è stato scelto per trasformarsi nella prima sezione puramente elettronica dell'European Physical Journal (EPJ), con l'accattivante nome di EPJ Plus. Il lancio della nuova rivista, che esordirà nel 2010, è già in corso. Aggiungo inoltre che il Giornale di Fisica ha cambiato aspetto e formato, per potere a sua volta contenere un maggior numero di pagine. Sarà anche abbinato alla speciale collana di carattere didattico per la scuola secondaria "L'Energia nella Scuola", pubblicata come supplemento al Giornale stesso.

Altro successo da menzionare è quello di Varenna, dove i corsi 2010 della International School of Physics "Enrico Fermi" hanno ottenuto, tra l'altro, la generosa sponsorizzazione della Camera di Commercio di Lecco. Ne ricordo di seguito i titoli e i nomi dei direttori, che ringrazio per il loro impegno, come sempre all'origine di tale successo: "Complex materials in physics and biology" (29 Giugno-9 Luglio, Direttori: F. Mallamace, E. Stanley); "Advanced methods in optical fluorescence microscopy towards nanoscopy" (12-17 Luglio, Direttori: G. J. Brakenhoff, A. Diaspro); "From the Big Bang to the nucleosynthesis" (19-24 Luglio, Direttori: A. Bracco, E. Nappi). Per il 2011 sono in programma quattro corsi invece di tre, dato il gran numero di richieste pervenute.

Veniamo poi al successo della SIF in generale. Le attività e le iniziative portate avanti su vari fronti si sono moltiplicate. La Società sta crescendo. Il numero dei Soci è ancora in aumento rispetto al 2009, ed è in aumento soprattutto la componente dei Soci Invitati (i neolaureati in Fisica pre-associati gratuitamente alla SIF). Molti di questi saranno i nostri potenziali Soci Junior a partire dall'anno prossimo. Tantissime (circa 200 quest'anno) sono le domande che riceviamo per i nostri concorsi a premi. La Società ha anche istituito nuovi premi – tra cui il Premio per le Applicazioni Industriali (intitolato a Guglielmo Marconi) e il Premio per l'Outreach – e ottenuto nuovi sponsor per questi e altri premi. Il Congresso annuale della SIF continua a essere un forte richiamo per la comunità dei fisici italiani. La qualità del programma scientifico, nei molti settori in cui si articola il Congresso, rimane eccellente grazie al lavoro dei Presidenti di Sezione, del Comitato Organizzatore e del Consiglio della SIF. Anche a loro vanno i miei ringraziamenti. E i miei ringraziamenti vanno inoltre all'impareggiabile personale della SIF, senza il quale tutto ciò non sarebbe possibile.

Infine grazie a tutti i Soci cui si deve il passato, il presente e il futuro della SIF.

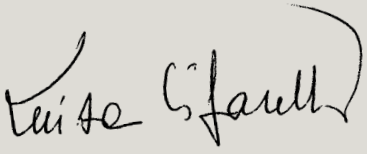
Being my first mandate as SIF President almost over, I would like to fill in the columns of my usual editorial with some good news for the Members. A comprehensive report of the Society performance in the three years 2008-2010 will be presented at the Members General Assembly taking place during the 96th National SIF Congress in Bologna.

Let us begin with the success of La Rivista del Nuovo Cimento whose impact factor jumped to 3.5. But also Il Nuovo Cimento B-Basic topics in physics (NCB) and Il Nuovo Cimento C-Colloquia on physics (NCC) performed very well in terms of number of published pages, publication time and number of subscriptions. To the extent that it has been decided to relaunch NCB as the first electronic-only section of the European Physical Journal (EPJ) with the appealing title EPJ Plus. The launch of this new section that is due to make its debut in 2011 is already in progress. Furthermore Il Giornale di Fisica has changed its format and presentation to fit a higher number of pages and it will be supplemented by the special didactic series "L'Energia nella Scuola" (Energy in Secondary Schools).

It is also worth mentioning the great success of the 2010 International School of Physics "Enrico Fermi" in Varenna; the courses have also benefited from the generous financial support of the "Camera di Commercio" (Chamber of Commerce) of Lecco. Let me list herewith the titles of the courses and their respective directors, whom I warmly thank for their commitment that is always fundamental for such a success: "Complex: materials in physics and biology" (29 June-9 July, Directors: F. Mallamace, E. Stanley); "Advanced methods in optical fluorescence microscopy towards nanoscopy" (12-17 July, Directors: G. J. Brakenhoff, A. Diaspro); "From the Big Bang to the nucleosynthesis" (19-24 July, Directors A. Bracco, E. Nappi). Due to the great number of requests we received, the courses planned for 2011 will be four instead of three.

Let us now consider SIF success in general. The initiatives and activities brought forward in many different areas have sensibly augmented. The Society is growing. The Membership is on the increase in comparison with 2009, in particular concerning the Invited Members (the new graduates in Physics who are granted a pre-association to SIF for free). Many of them will be our potential Junior Members starting from next year. Very many are the applications (ca. 200 this year) we received for our prize competitions. Moreover new competitions have been added this year – among which the Prize for Industrial Applications (named after Guglielmo Marconi) and the Prize for Outreach – and new sponsors have been found to finance these and other prizes. The annual Congress of SIF continues to play a central role of attraction for the Italian physicists community. The quality of the scientific programme, in the various field the Congress deals with, is kept at a level of excellence thanks to the joint effort of the Presidents of the different Sections, the Organizing Committee and the SIF Council. Let me express my sincere thankfulness to them all, and also to the incomparable SIF staff without whom all this could not be realized.

Lastly, thanks to all the Members who are the true makers of the past, present and future of SIF.



«ETTORE MAJORANA» FOUNDATION AND CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE

TO PAY A PERMANENT TRIBUTE TO GALILEO GALILEI, FOUNDER OF MODERN SCIENCE AND TO ENRICO FERMI, THE "ITALIAN NAVIGATOR", FATHER OF THE WEAK FORCES

WORLD FEDERATION OF SCIENTISTS — Founded in Erice — Beijing Geneva Moscow New York

INTERNATIONAL SCHOOL OF SUBNUCLEAR PHYSICS

WHAT IS KNOWN AND UNEXPECTED AT LHC

48th Course – ERICE-SICILY: 29 AUGUST – 7 SEPTEMBER 2010

Sponsored by the: · Italian Ministry of Education, University and Scientific Research · Sicilian Regional Government · Academies of Sciences of Estonia, Georgia, Lithuania, Russia and Ukraine · Chinese Academy of Sciences · Commission of the European Communities · European Physical Society · Italian National Institute for Nuclear Physics · Weizmann Institute of Science · World Federation of Scientists · World Laboratory

PROGRAMME AND LECTURERS

HOT THEORETICAL TOPICS

Harmony of Scattering Amplitudes: From QCD to N=8 Supergravity
• Z. BERN, UCLA, Los Angeles, CA, US

Black Holes, Qubits and Quantum Information
• M.J. DUFF, Imperial College London, UK

The Gravitational S Matrix
• S. GIDDINGS, University of California, Santa Barbara, CA, US

Extremal Astrophysical Black Holes
• A. STROMINGER, Harvard University, Cambridge, MA, US

Perturbative and Non-Perturbative Aspects of N=8 Supergravity
• S. FERRARA, CERN, Geneva, CH; UCLA, Los Angeles, CA, US

SEMINARS ON SPECILIZED TOPICS

Direct Evidence of Oscillation from II to III Family Neutrinos
• Y. DECLAIS, IN2P3, Lyon, F

The QGCW Project-Technological Challenges to Study the New World
• H. WENNINGER, CERN, Geneve, CH

Latest News from Black-Holes Physics
• G. 't HOOFT, Utrecht University, NL

Complexity at the Fundamental Level
• A. ZICHICHI, CERN, Geneva, CH; INFN & University of Bologna, IT

HIGHLIGHTS FROM LABORATORIES

BNL–RHIC:
• S. VIGDOR, Brookhaven National Laboratory, NY, US

CERN:
• R.-D. HEUER, CERN, Geneva, CH

FERMILAB:
• P.J. ODDONE, Fermi Lab, Chicago, IL, US

GRAN SASSO:
• L. VOTANO, LNGS, L'Aquila, IT

GSI:
• H. STOECKER, GSI, Darmstadt, DE

ISS–AMS:
• S.C.C. TING, MIT, Cambridge, MA, US

DIPLOMAS FOR THE BEST NEW TALENTS

The following Diplomas have been established in honour of, and named after, the late physicists:

JOHN S. BELL
PATRICK M.S. BLACKETT
JAMES CHADWICK
SIDNEY COLEMAN
RICHARD H. DALITZ
PAUL A.M. DIRAC
VLADIMIR N. GRIBOV
ROBERT HOFSTADTER
GUNNAR KÄLLEN
SEYMOUR J. LINDENBAUM
YUVAL NEEMAN
GIUSEPPE P.S. OCCHIALINI
ORESTE PICCIONI
BRUNO PONTECORVO
GIAMPIETRO PUPPI
ISIDOR I. RABI
GIULIO RACAH
BRUNO ROSSI
JULIAN S. SCHWINGER
VICTOR F. WEISSKOPF
EUGENE P. WIGNER
BJORN H. WIIK
CHIEN SHIUNG WU

These Diplomas will be awarded at the end of the Course by the Board composed of the Lecturers and the Invited Scientists.

PURPOSE OF THE SCHOOL

The latest results from LHC will be the focus of experimental physics lectures, together with the highlights from all Labs. The theoretical lectures will present what could come out from fascinating topics such as extra-dimensions and black holes physics. If Complexity exists at the fundamental level, a totally unexpected discovery should show up in some experiment either at LHC or elsewhere. The most existing part of the School will be the Discussion Sessions with Invited Scientists, Lecturers and Students engaged to debate the hottest topics presented at the School. The New Talents are encouraged to come and prove the originality of their knowledge.

APPLICATIONS

Interested candidates should send a letter to the Director of the School:

Professor Antonino ZICHICHI
CERN
CH-1211 GENEVA 23, Switzerland

Needed:
i) date of birth and present activity;
ii) nationality;
iii) letter of recommendation from a senior physicist.

- *PLEASE NOTE*

Participants must arrive in Erice on August 29, not later than 5 p.m.

More information about the other activities of the "ETTORE MAJORANA" FOUNDATION AND CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE can be found on the WWW at the following address: http://www.ccsem.infn.it

G. 'T HOOFT – A. ZICHICHI
CO-DIRECTORS OF THE COURSE

A. ZICHICHI
DIRECTOR OF THE SCHOOL

THE APPEARANCE OF THE TAU-NEUTRINO

ANTONIO EREDITATO,
A. Einstein Center for Fundamental Physics, Laboratory for High Energy Physics, University of Bern, Switzerland

After three years of running in the INFN Gran Sasso underground laboratory (LNGS), and billions of billions of muon-neutrinos sent from CERN in the CNGS beam, the OPERA detector, located 730 km away from CERN, has catched a first candidate event for the direct transformation (oscillation) of a muon-neutrino into a tau-neutrino. This achievement allows researchers to see good prospects for the final goal of OPERA: the long-awaited discovery of the "appearance" of neutrino oscillations.

1 Recent and less recent history

On August 22nd, 2009 at 19:27 (UTC) the event number 9234119599 was taken by the data acquisition system of the OPERA experiment at the LNGS underground laboratory, during a run in the CNGS neutrino beam, sent from CERN over a baseline of 730 km. Up to that time, a few 10^{19} muon-neutrinos had been sent from CERN from the beginning of the experiment. According to a well-established and complex analysis chain, the signals from the real-time electronic detectors first allowed to predict which one of the 150000 "bricks" of the lead/emulsion target was hit. The interface emulsion films attached to that brick were then extracted and scanned and three tracks were found to be compatible with the signals of the downstream electronic trackers. This provided the trigger to the exposure of the brick to cosmic rays for the precision alignment of the 57 emulsion films that constitute the brick lead/emulsion sandwich and to the opening of the light-tight brick package.

The emulsion films were developed and shipped to one of the 12 scanning labs of the international collaboration, where, starting from the most downstream film, the track predictions from the interface films were searched for, and one by one extrapolated upstream until a neutrino interaction vertex was finally found. A 40 mrad kink was detected on a track generated from the neutrino interaction in one of the 56 lead plates, after a flight length of ~1.3 mm, while all the other tracks were found to match within a few μm impact parameter. A full volume scan around the vertex region allowed finding a total of 8 tracks and two electromagnetic showers induced by two γ-rays pointing to the decay vertex. The γ energy was measured. The two γ's were found to have an invariant mass compatible to that of the π^0 ($120 \pm 20 \pm 30$ MeV).

Following this finding, several additional bricks were removed and scanned, to follow down all the primary tracks in order to determine their nature and measure the momentum by the Multiple Coulomb Scattering method. The films of the brick with the neutrino vertex were shipped to another laboratory to perform an independent measurement of the track parameters, with a different scanning system and method. A careful visual check of the

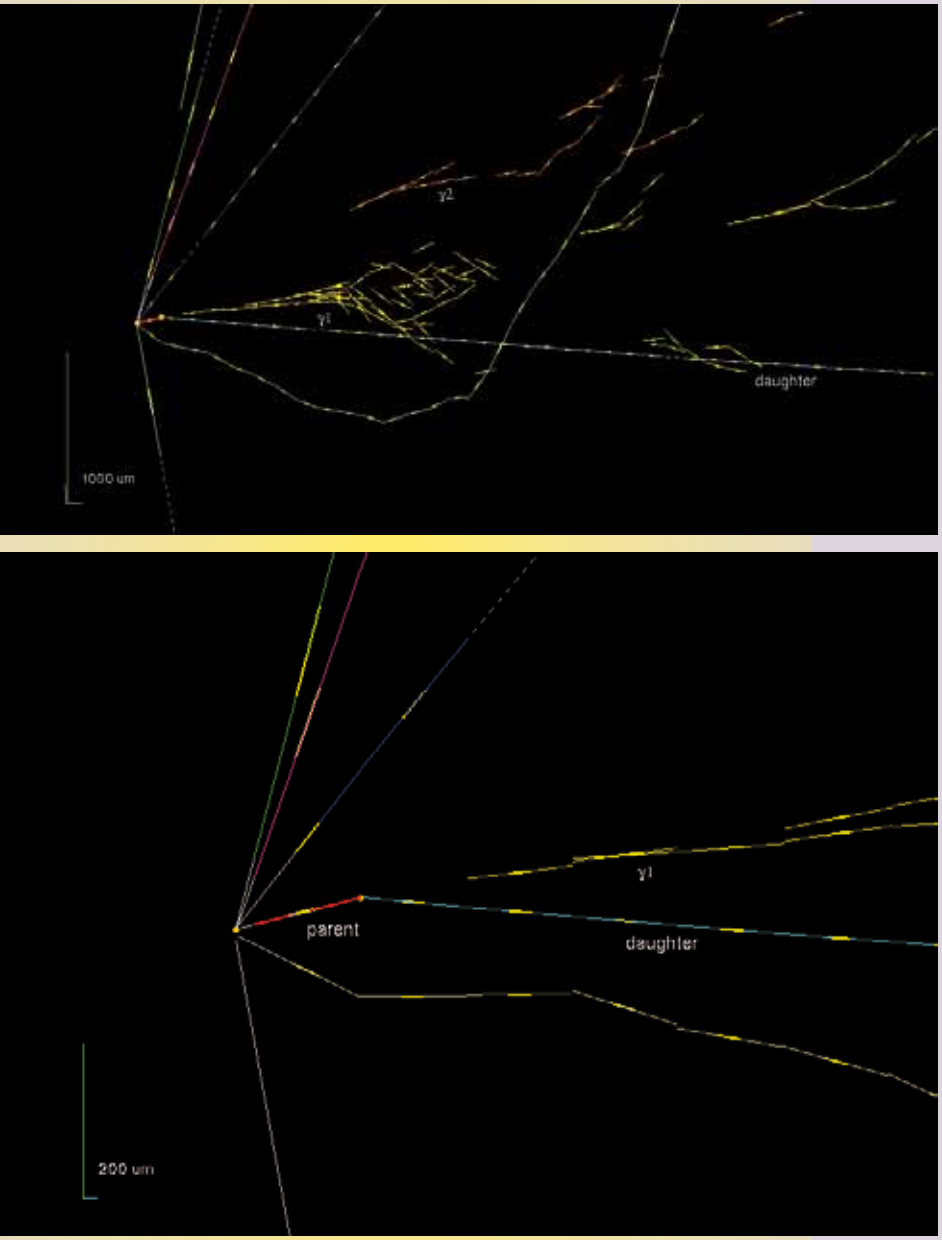


Fig. 1 Top: display of the first OPERA ν_τ candidate event. The "tau" (red short track) decays into a hadron (light blue track) with the characteristic "kink" topology; bottom: a zoom of the vertex region.

kink (decay?) region allowed excluding the presence of micro-tracks that could be potentially attributed to a hadronic interaction generating a kink, topologically similar to what occurs for a decay. The absence of tracks that could be attributed to muons and the fulfillment of all the stringent kinematical cuts required to reject known sources of background, finally allowed the event to be classified as a candidate $\nu_\tau \rightarrow \tau \rightarrow \pi^0$ + charged hadron + ν_τ event. A computer-reconstructed display of the event is shown in fig.1.

The estimate of the residual background yielded 0.018 ± 0.007 expected events within the statistics of scanned events. This implies that the probability of explaining the observed event (one over about 1000 fully analyzed) in terms of a background fluctuation turns out to be about 1.8%, for a 2.36 σ statistical significance for the observation of a first ν_τ candidate event from ν_μ oscillations in the OPERA experiment. This is just a first candidate, but with a handful more events like this, OPERA will be in the position of claiming the long-awaited discovery of neutrino oscillations in appearance mode.

This apparently short story took actually quite long, several months, during which many checks, measurements, discussions, simulations, etc. took place and converged into a seminar given at LNGS on May 31st, 2010 [1], repeated a few days later at CERN, Fermilab and Nagoya.

We can certainly state that this first ν_τ candidate event, despite its relatively limited statistical significance, is a crucial milestone for the OPERA Collaboration. Neutrino oscillation direct appearance is indeed still one of the missing tiles of the neutrino oscillation scenario, that after many years of controversial and not conclusive results got a convincing confirmation in 1998 with the discovery of oscillations with atmospheric neutrinos, thanks to the beautiful results from the Super-Kamiokande experiment [2].

The oscillation between neutrino weak eigenstates (ν_e, ν_μ and ν_τ) can occur if the neutrino is a massive particle, and therefore mass eigenstates (ν_1, ν_2 and ν_3) exist. The two sets of eigenstates mix through a mixing matrix, and one can then obtain a periodic flavour variation of a given neutrino during its

propagation in space and time (oscillation), provided that the corresponding mass eigenvalues are not degenerate.
Neutrino oscillations were originally proposed by Bruno Pontecorvo (fig. 2), initially for the neutrino-antineutrino oscillation mode, around the end of the Fifties of the last century (note that at that time only one neutrino flavour was known) [3]. A few years later, after the discovery of the ν_μ [4], a more general flavour-mixing scheme between ν_e and ν_μ with two states called "true" neutrinos, ν_1 and ν_2, was proposed by Ziro Maki, Masami Nakagawa and Shoici Sakata [5], in the framework of the so-called Nagoya Model [6].
Mixing among massive neutrinos was assumed to occur similarly to quarks, as first described by Nicola Cabibbo, and later on generalized by Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa. This eventually led to the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa quark-mixing matrix [7], while for neutrinos, we commonly talk today of the Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) mixing matrix (see section 3 for more theoretical considerations). Neutrino mixing and oscillation are schematically depicted in fig. 3 for the simple case of two arbitrary neutrino flavours.
It is worth noting that soon after the discovery of the second neutrino flavor, partner of the muon, the concept of a third family came about, with its own third neutrino and a (likely heavier) new charged lepton. In 1967, Antonino Zichichi started the search for a possible third lepton family at the ADONE collider in Frascati [8]. However, the tau charged lepton would be found only in 1975 by Martin Perl at the SPEAR collider, which, contrary to ADONE, had enough energy to produce it [9]. As we will see later on, it took almost 25 years more to discover the neutrino partner of the τ, the tau-neutrino.
The possibility of neutrino oscillations was advocated as a possible explanation of the deficit of the detected solar electron-neutrinos soon after its first experimental indications around the end of the Sixties. Already in 1967, Bruno Pontecorvo (again!) put forward this possibility [10], after the first puzzling results from Ray Davis Jr. with the radiochemical Homestake experiment [11], one of the longest lasting in the history of particle physics, who

Fig. 2 Bruno Pontecorvo and the author in a photograph taken in 1984 at JINR, Dubna. Pontecorvo first postulated the hypothesis of neutrino oscillations.

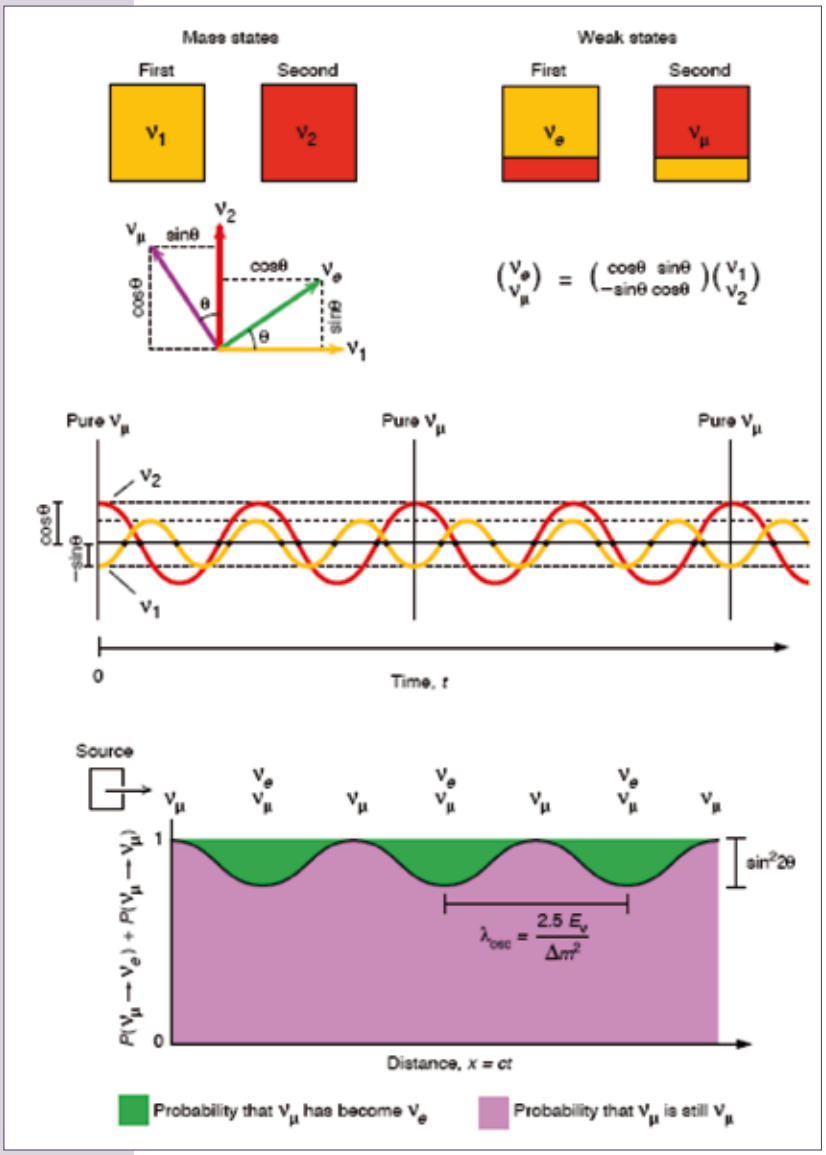


Fig. 3 Schematics of two-flavour mixing and oscillation for an arbitrary ν_μ - ν_e oscillation scenario.

first got hints of the "disappearance" of solar neutrinos.
The solar neutrino puzzle "officially" started in 1964, when two correlated papers were published on solar neutrinos in the same journal issue, a theoretical paper by John Bahcall [12] and an experimental one by Ray Davis Jr. [13]. These papers certified the starting of neutrino astrophysics, and the experimental observation of a deficit in the solar electron-neutrino flux, when compared with the theoretical expectations. Thanks to his work Ray Davis was awarded the 2002 Nobel Prize "*for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"* together with Masatoshi Koshiba who, with his Kamiokande detector (see below), not only confirmed Davis' observations, but also detected in 1987 neutrinos from the SN1987A supernova explosion [14]. Now we know what the interpretation of the deficit is: during the travel from the inner solar core to the detector on Earth, a fraction of the electron-neutrinos oscillate into muon- or tau-neutrinos, to which the detector is not sensitive.
More sensitive radiochemical experiments, and with a lower energy detection threshold, were conducted later on by the GALLEX [15] and GNO [16] Collaborations (at the LNGS laboratory), and by SAGE [17]. Around the beginning of this century, these radiochemical detectors together with the real-time Kamiokande [18], Super-Kamiokande [19] and SNO [20] experiments, allowed to firmly establish the correctness of the Standard Solar Model of John Bahcall [21], and unambiguously point to the hypothesis of Mikheev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) matter oscillations for solar neutrinos [22]. Given the peculiar *L/E* dependence of oscillations (see below) these results were then tested and strongly supported by another key experiment, KamLAND [23], sensitive to the same oscillation parameter region, and carried on by exploiting the detection of anti electron-neutrinos from several Japanese nuclear reactor plants. Figure 4 shows a global fit of the oscillation parameters relative to the "solar neutrino sector" [24].
However, a few years earlier (1998) the first clear evidence, hence discovery, of "atmospheric" neutrino oscillations was reported at the Neutrino98 conference by Takahaki Kajita [25], concluding a phase of work originally and pioneeringly conducted by Masatoshi Koshiba, and then continued under the leadership of Yoji Totsuka, who brought the technique of the large water Cherenkov detectors (Kamiokande and then Super-Kamiokande) to the collection of an incredible number of scientific achievements in neutrino physics and astrophysics.
Atmospheric neutrinos are produced by the interaction of primary cosmic rays with the atmosphere, giving rise to a cascade of particles from which muon- and electron-neutrinos (and antineutrinos) are produced. The Super-Kamiokande experiment has been the first to unambiguously show that, while the number of detected atmospheric ν_e is what one expects, a clear deficit of ν_μ is observed, depending on the neutrino energy *E* and on its path length from the production point to the detector, the baseline *L*.
Figure 5 shows the zenith angle dependence of the flux of atmospheric neutrinos obtained by Super-Kamiokande, well fitted by the neutrino oscillation formula under the hypothesis of ν_μ- ν_τ oscillations [2]. Also for the atmospheric oscillation sector, more experiments contributed to the collection of complementary and clarifying results (Kamiokande [26], Soudan2 [27], MACRO [28], CHOOZ [29] and Palo Verde [30]), while later on projects exploiting neutrino accelerator beams sensitive to the specific parameter region confirmed the atmospheric neutrino results in a spectacular manner (K2K [31] and MINOS [32]), improving the knowledge of the oscillation parameters.
It is within this (not yet over!) fascinating race, already lasted more than two decades, and featuring successes, failures, strong debates, controversial results, errors and intuitions, that the discussion on direct appearance got momentum around the end of the Nineties of the last century, although several colleagues and groups had already previously put forward this opportunity as a required element to support, unambiguously confirm, complement, etc. (everybody is free to use the preferred statement!) the measurement of neutrino oscillations in disappearance mode.
Actually, and this fact sets the scale to the complexity and the inherent difficulties of an appearance oscillation experiment, all the above-mentioned projects had been based on disappearance searches, apart from SNO that performed an "indirect appearance" measurement of neutrino oscillations, culminated with the outstanding results on the study of neutral-current reactions induced by solar neutrinos [33]. The determined muon- and tau-neutrino fluxes were exactly equal to the disappeared electron-neutrino flux. The SNO result, together with those of the previous "solar neutrino" experiments, finally led to a unique determination of the corresponding oscillation parameters. In particular, the actual value of the mixing angle proved the existence of the MSW phenomenon inside the solar matter. In summary, by the beginning of this century, we had measured disappearance of solar electron-neutrinos, disappearance of atmospheric muon-neutrinos, disappearance of reactor anti-electron neutrinos, disappearance of accelerator muon-neutrinos, and "indirect appearance" of muon- and tau-neutrinos (with SNO).
Around 1995, CERN was in the process of designing an accelerator neutrino beam directed towards LNGS, the largest underground laboratory in the world. The latter had been strongly wanted and then realized under the leadership of Antonino Zichichi as president of INFN, who many years before the debate on the CERN long-baseline neutrino beam already put forward (more than 30 years ago!) the conceptual

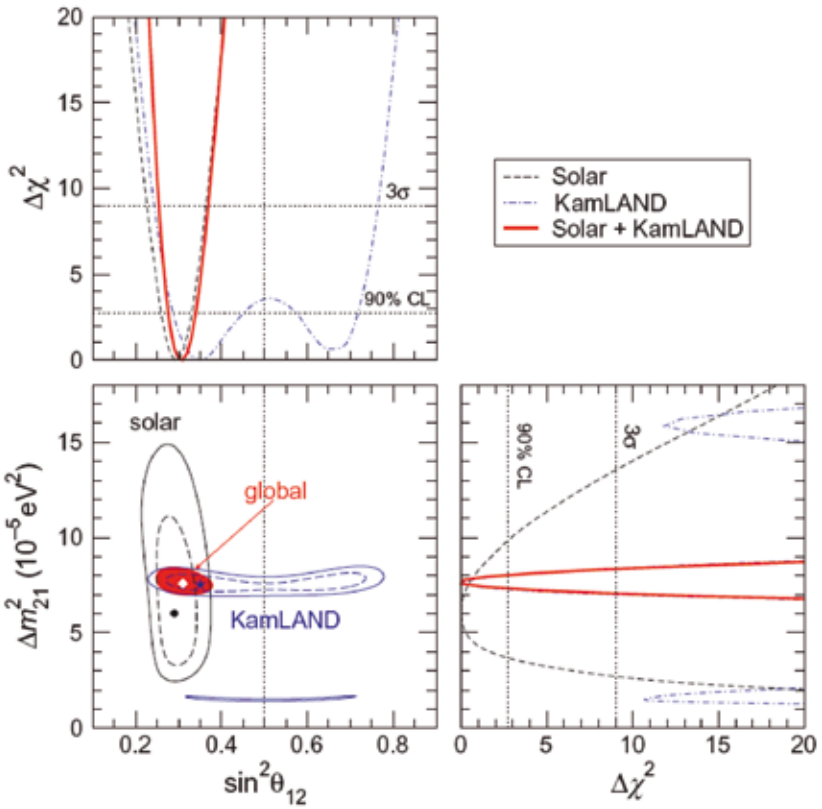


Fig. 4 Oscillation parameter region allowed by solar neutrino experiments, combined with the results from the KamLAND reactor experiment [24].

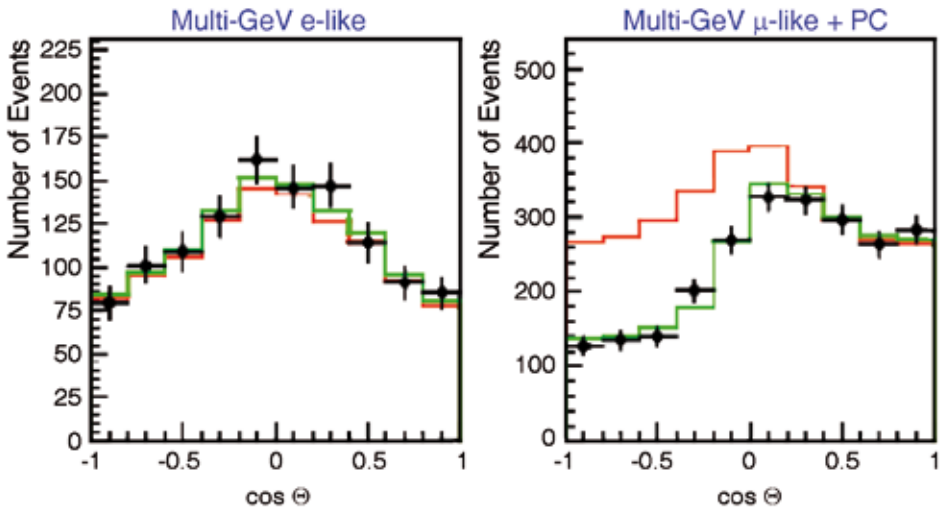


Fig. 5 Zenith angle dependence of atmospheric electron- and muon-neutrinos in the Super-Kamiokande experiment. The observed behavior is well fitted by the muon- into tau-neutrino oscillation hypothesis (green curve) and it is not compatible with the absence of oscillations (red curve). These results represent the discovery of neutrino oscillations in disappearance mode.

design of a "real" underground laboratory, not just a cavern in the middle of nowhere, with its own technical infrastructure, workshops and facilities, along with the visionary idea of the orientation of the large experimental halls towards CERN, ready to welcome a long-baseline neutrino beam.

In 1997, I had the honor to be a member of the Technical Committee jointly mandated by CERN and INFN, initially led by Kurt Hubner an later on by Konrad Elsener, with the task of designing the new beam facility. The first choice that was taken with the strong support of both institutions was the realization of a beam dedicated to ν_τ appearance from ν_μ oscillations. Luciano Maiani, as CERN Director General, Enzo Iarocci, as INFN President, and Sandro Bettini as LNGS Director, were amongst the main actors of this agreement that materialized in the funding of the largest fraction of the cost of the facility by the Italian agency, with additional extraordinary contributions from Belgium, France, Germany, Spain and Switzerland, and also from the Italian Compagnia di San Paolo, in addition to an in-kind contribution from Russia.

The CNGS beam (CERN Neutrinos to Gran Sasso) was finally approved in 1999 [34]. In a speech at the CERN Staff meeting Luciano Maiani said:"...hope that CERN would continue to play an important role in neutrino physics with the realization of the planned, long-baseline neutrino beam to Gran Sasso. It would be a major disaster if neutrino physics disappeared from Europe".

The main implications of that choice were basically on the energy of the neutrinos (high enough to be above the kinematical threshold for the production of the tau-lepton in the charged-current interactions of the ν_τ possibly coming from the oscillation) and on its intensity. The smallness of the signal, in fact, demands a high-intensity facility for the collection of an adequate statistics in a reasonable time. The layout of the CNGS beam is schematically depicted in fig. 6.

Soon after the final approval of the CNGS project, the procedure for the definition of the scientific program started. Two projects were eventually retained: first OPERA [35] and afterwards ICARUS [36], both proposing a search for ν_μ- ν_τ oscillations in appearance mode based on complementary experimental approaches. On the one hand, the direct observation of the tau-lepton with a nuclear-emulsion–based detector, and, on the other hand, the reconstruction of the event kinematics with a liquid-argon TPC active target. Apparently, the story of the CERN neutrino experiments of the previous generation, CHORUS [37] and NOMAD [38], repeated itself!

OPERA and ICARUS were eventually approved by the CERN Research Board, and by the LNGS Director and INFN Council in the years 2001 and 2003, respectively, and baptized as CNGS1 and CNGS2 CERN projects. For the first time CERN experiments were located outside the boundaries of the site, opening the way to a fully global European laboratory for particle physics, a concept that is becoming more and more attractive and realistic in today's debate.

At this point, we have to make a flash back and jump to early 1996. At that time, the idea of a neutrino beam from CERN to LNGS was just getting momentum and the first Kamiokande result with atmospheric neutrinos was puzzling the neutrino community (as said above we would had to wait for Super-Kamiokande for a definite statement). In parallel, the possibility of ν_μ - ν_τ oscillations at short baseline, namely small mixing angle and large Δm^2 (see section 3), with a sensitivity beyond what could be addressed by CHORUS and NOMAD, also motivated some interest.

Although it is not the subject of this paper, I am pleased to mention the idea that the author shared with Paolo Strolin and Giorgio Romano for a very high-sensitivity experiment (TENOR) based on nuclear emulsions for the exploration of the above-mentioned parameter region [39]. This conceptual design was one of the ingredients for the follow-up TOSCA Letter of Intent at CERN [40].

However, the community soon realized that atmospheric neutrinos were telling us something worth to be listened, and most of the attention then moved to long-baseline searches in the complementary parameter region of relatively large mixing angle and small Δm^2. In 1997, with a paper signed by Kimio Niwa, Paolo Strolin and myself [41], the idea of possible medium- and long-baseline experiments aimed at the direct detection of

ν_τ appearance with an ECC (Emulsion Cloud Chamber) based detector was proposed (OPERA, Oscillation Project with an Emulsion tRacking Apparatus). The ECC is a detector that essentially "speaks Japanese" (see, *e.g.,* [42]). This rather old technique features emulsions used as high-resolution tracking detectors with three-dimensional reconstruction capabilities, more than a mere visual and volume-sensitive detector. This is obtained by sandwiching emulsion films (or plates) with passive material layers, usually made of plastic or metal. Today, we would call such a detector a high-frequency sampling calorimeter, by means of which all tracks from charged particles originating from a shower can be reconstructed in space with high accuracy. In the ECC, emulsion films are placed perpendicular to the incoming particles, featuring a spatial resolution down to ~1 μm. ECC detectors were successfully employed for the study of the cosmic-ray spectrum and of very-high-energy interaction processes [42]. Among the various important achievements with this detector, a notable example is given by Kiyoshi Niu's discovery of the so-called X-particle in 1971 [43] (fig. 7). Today we know that this event had to be attributed to a charmed-meson production and decay. This happened three years earlier than the discovery of hidden charm with the J/Ψ particle by the groups of Burton Richter and Samuel Ting.

Kimio Niwa, successor of Kiyoshi Niu at Nagoya, further developed the ECC technique introducing automatic emulsion scanning by computer-driven microscopes. His experience with this detector and with modern emulsion technology has been essential for the development of the ideas that led to the conceptual design of the OPERA experiment [44], for its construction and for its current successful exploitation. Following this line, Kimio Niwa and collaborators obtained another outstanding result with an ECC detector, namely the discovery of the tau-neutrino, promptly produced in proton collisions at Fermilab with the DONUT experiment [45]. For this discovery he was awarded the Nishina Prize. The display of a ν_τ event detected in DONUT is shown in fig. 8.

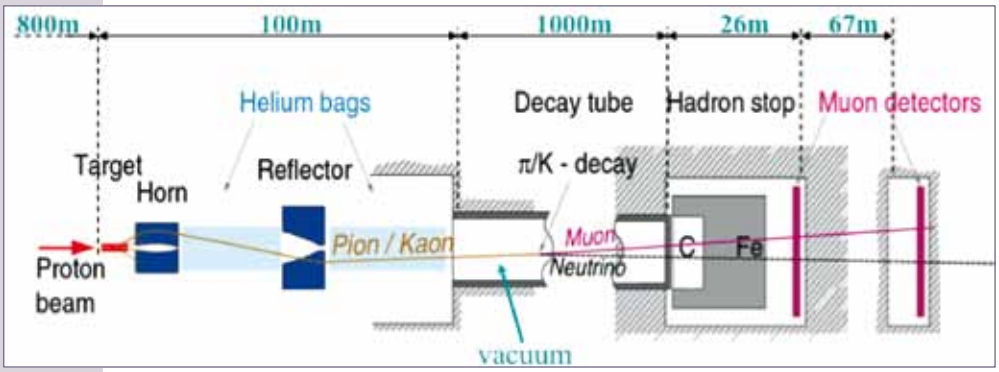


Fig. 6 Schematic layout of the CNGS beam.

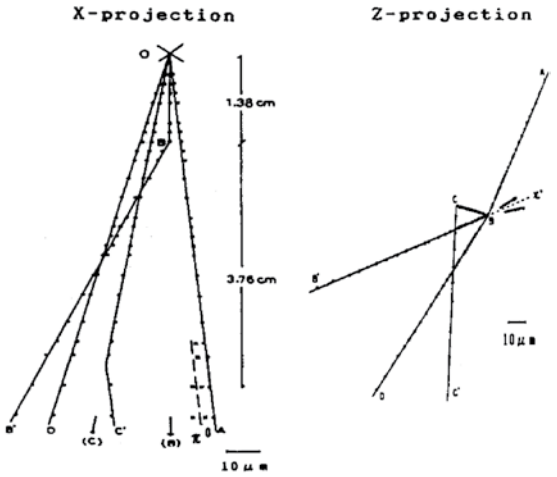


Fig. 7 Original display of the first X-events (today attributed to the decay of charmed mesons produced in cosmic rays) measured by Kiyoshi Niu in 1971 with an ECC detector as the one used by OPERA, three years before the discovery of the J/Ψ [43].

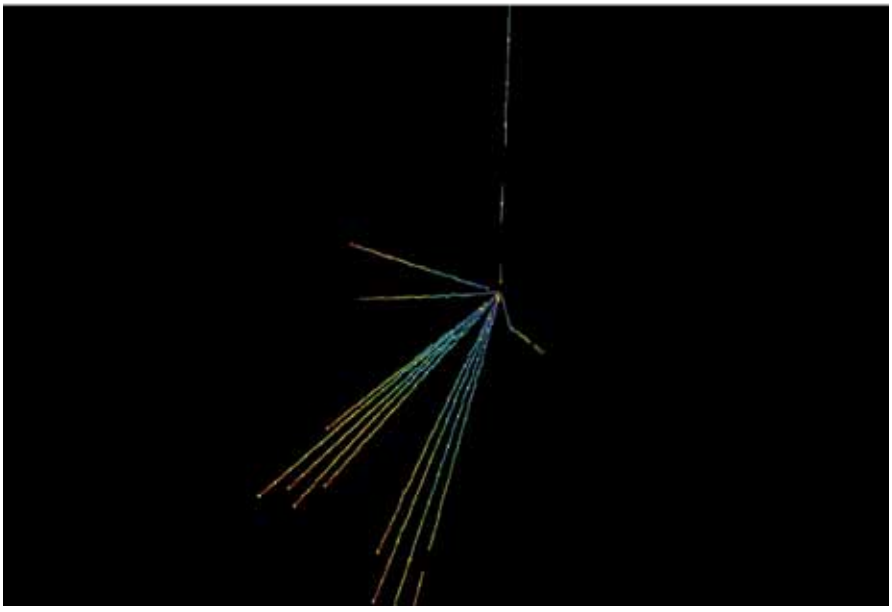


Fig. 8 Event display of one of the prompt tau-neutrinos detected by the Fermilab DONUT experiment. The tau is identified from its "kink" decay, visible on the right of the picture. A few detected events like this constituted the discovery of the third neutrino flavour by Kimio Niwa and collaborators in 2000. Also in this case, an ECC detector was employed as active neutrino target [45].

The idea of OPERA had soon a positive resonance and a small group including colleagues from Nagoya, Napoli, Salerno, Toho and Utsunomiya jointly submitted a Letter of Intent for the OPERA experiment to CERN and LNGS [46]. The Collaboration soon increased with the joining of more groups, in parallel to the conduction of preliminary studies and of the experiment technical design. In 1999 I was honored to present the OPERA concept at the CERN SPS Scientific Committee. Since then, more than 10 years passed. The Collaboration now counts about 170 colleagues from 33 institutions[1].

After the early times, when I had the duty of coordinating the "proto-collaboration", the experiment was then successfully led by the spokespersons Paolo Strolin first and Yves Declais later, who took the responsibility of the important phase of construction of the detector and the infrastructure, until the very first data collected in 2006. I wish to recall and acknowledge here the strong commitment of all the funding agencies of the Collaboration for the complete realization of the project.

I mention in particular the continuous support from CERN (through its DGs Luciano Maiani, Roger Aymar and Rolf-Dieter Heuer) and from the INFN/LNGS, with the strong presence of the presidents Enzo Iarocci and Roberto Petronzio, and of the Gran Sasso directors who followed the experiment construction and first operation, Sandro Bettini and Eugenio Coccia, the latter recently replaced by Lucia Votano.

The largest fraction of the cost of the OPERA experiment has been covered by INFN and LNGS, matched by a very substantial contribution from the Nagoya group for the acquisition of the more than 10 million industrial emulsion films from Fuji-Film, and with an overall important support from the European countries of Belgium, France, Germany and Switzerland. In particular, it is worth mentioning the specific efforts of INFN for the spectrometers (magnets and RPCs), the brick mechanical structure, the brick lead, the Brick Assembly Machine, the film development facility, and all the detector logistics at LNGS; the additional contribution from Japan for the interface emulsion films production and for the massive "refreshing" of the emulsion films in Japan, after production; the effort of Belgium on the scintillator Target Tracker (TT); the contribution of France to the TT, the DAQ system, the Brick Manipulation System and the event database hardware; the commitment of the German groups for the production of the brick lead plates and of the high-precision drift tubes; the contribution of Switzerland on TT and lead, as well as the general effort of Croatian, Korean, Russian, Tunisian and Turkish colleagues for the labor intense activities of detector construction, and operation of the facilities. It has also to be mentioned the dedicated effort of many Japanese and European groups for the successful development of the two automatic emulsion scanning-systems, the S-UTS and the ESS (see below). Last but not least, one should not forget the huge amount of work that has been accomplished by many OPERA collaborators to develop the software analysis tools, the simulations and the computer programs needed to transform digits from detectors into physics results!

Thanks to the skill and the dedication of all the groups and individual members of the Collaboration, the apparatus and the complex ancillary facilities were built and set-up in time with the parallel realization and commissioning of the CNGS beam.

I am now in charge of leading the OPERA experiment in the physics exploitation phase proceeding in parallel to the mass data taking in the CNGS beam. Two successful runs took place in 2008 and 2009, with excellent prospects for 2010 through 2012. The first ν_τ candidate event rewards today the whole Collaboration for many years of tireless effort and it is a key milestone in view of the discovery of the appearance of neutrino oscillations.

[1] Belgium: Brussels; Croatia: Zagreb; France: Annecy, Lyon, Strasbourg; Germany: Hamburg, Münster, Rostock; Israel: Technion; Italy: Bari, Bologna, LNF, L'Aquila, LNGS, Naples, Padova, Rome, Salerno; Japan: Aichi, Toho, Kobe, Nagoya, Utsunomiya; Korea: Jinju; Russia: INR Moscow, LPI Moscow, ITEP Moscow, MSU Moscow, JINR; Switzerland: Bern, ETH Zurich; Tunisia: Tunis; Turkey: Ankara.

2 Experiment, methods and data

Looking at the OPERA experiment more closely, we can realize that it is a typical long-baseline neutrino experiment, characterized by an underground location, a large neutrino-target mass, and an intense ν_μ beam with negligible contamination of other neutrino types, notably of the "appearing" flavour ν_τ [47]. As already said, the experiment exploits the long-baseline CNGS neutrino beam from CERN to LNGS, the largest underground physics laboratory in the world, 730 km away from the source.

The challenge of the experiment is to measure the appearance of ν_τ from ν_μ oscillations. Therefore, the detection of the short-lived tau-lepton ($c\tau$ ~87 μm) produced in the charged-current interaction of the ν_τ is mandatory. This sets two conflicting requirements: a large target mass to collect enough event statistics, and an extremely high spatial accuracy to detect the tau-lepton.

The tau is identified by the detection of its characteristic decay topologies either in one prong (electron, muon or hadron) or in three prongs; its short track (< 2 mm) is measured with thin nuclear emulsion films industrially produced by Fuji-Film on an unprecedented scale of about ten million films, assembled with the above-mentioned ECC structure. The OPERA detection principle is outlined in fig. 9.

The full OPERA setup (fig. 10) is a hybrid detector made of two identical Super Modules each consisting of a target section made of emulsion/lead ECC modules called "bricks", of a scintillator tracker detector needed to trigger the read-out and localize neutrino interactions within the target, and of a muon spectrometer. The total number of bricks is 150 000 for a target mass of 1250 ton. The total volume of the underground detector is roughly $10 \times 10 \times 20$ m^3.

Each of the two magnetic spectrometers consists of a large iron magnet instrumented with plastic Resistive Plate Chambers (RPC). Six stations of long drift tubes measure the deflection of charged

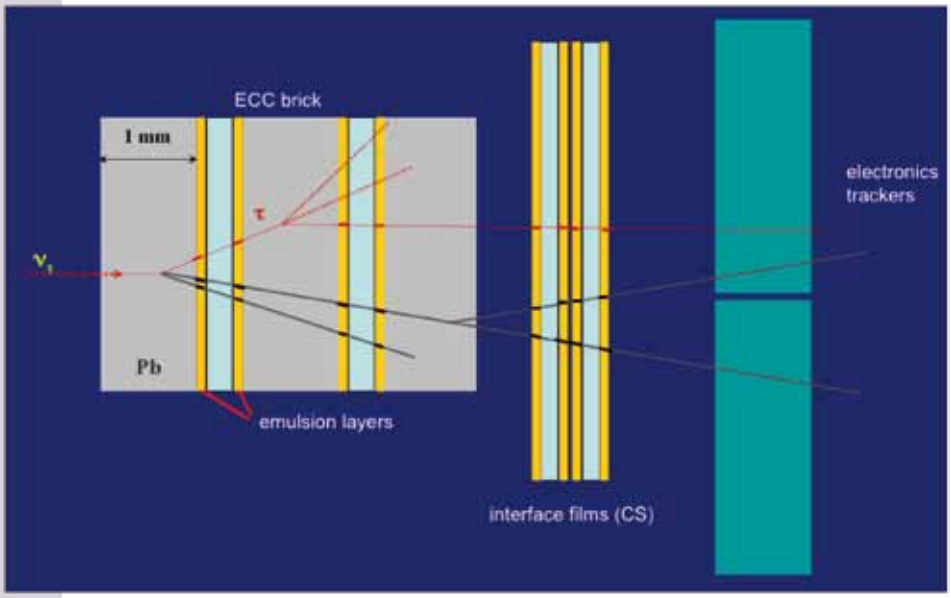


Fig. 9 The neutrino detection principle of OPERA. Electronic trackers predict the brick "hit" by the neutrino with the help of emulsion interface films (Changeable Sheets: CS). The interaction vertex is found by a "scan back" scanning procedure on those tracks identified by the CS.

Fig. 10 The OPERA detector in the LNGS underground Hall C.

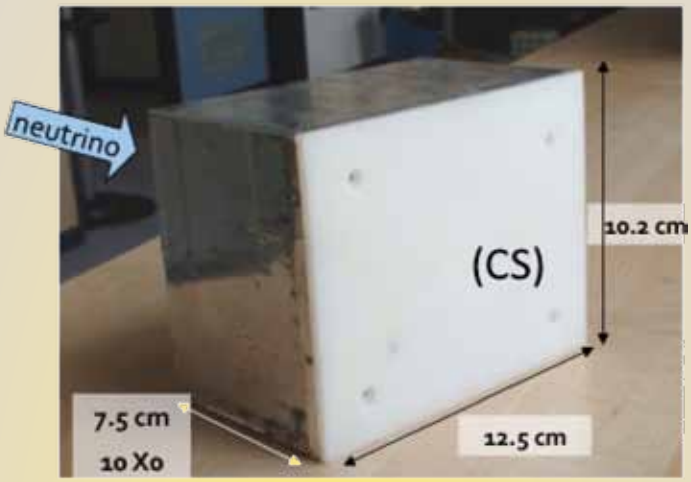


Fig. 11 One of the 150000 ECC target units (bricks) that constitute the OPERA neutrino target. The interface downstream the emulsion film doublet (CS) attached to the brick is also shown.

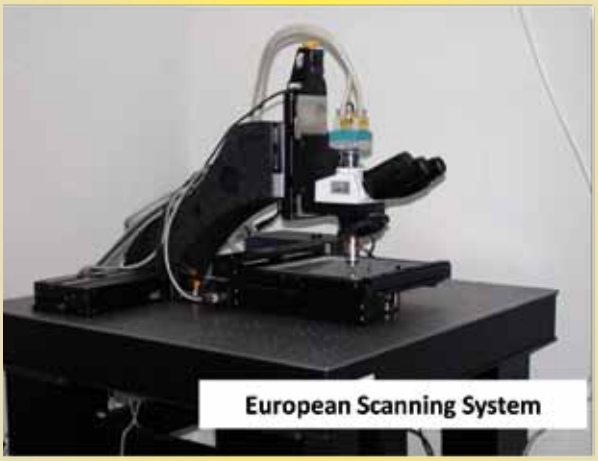


Fig. 12 Two of the many automatic microscopes used for the analysis of the OPERA emulsion films. Top: the system developed in Europe; bottom: the device used by the Japanese groups.

particles inside the magnetized iron. Left-right ambiguities in the reconstruction of particle trajectories are solved by means of additional chambers with readout strips rotated by ±45° with respect to the horizontal. Finally, two glass RPC planes mounted in front of the most upstream target (VETO) allow rejecting charged particles originating from outside the target fiducial region, coming from neutrino interactions in the surrounding rock material.
One target ECC brick consists of 56 lead plates with 1 mm thickness interleaved with 57 emulsion films. The plate material is a lead alloy with a small calcium content, to improve its mechanical properties. The transverse dimensions of a brick (fig. 11) are 12.8×10.2 cm^2 and the thickness along the beam direction is 7.9 cm (about 10 radiation lengths). The bricks are housed in a light, stainless-steel support structure placed between consecutive target tracker walls.
OPERA is the first very-large-scale emulsion experiment. Just to give an idea, the 150000 ECC bricks include about 110000 m^2 emulsion films and 105000 m^2 lead plates.
The detector is equipped with two robots that allow the automatic removal of bricks from the target. Ancillary large facilities are used for the handling, the development and the scanning of the emulsion films. Emulsion scanning is performed with two different types of automatic microscopes (fig. 12) independently developed by the European and the Japanese groups of the Collaboration [48, 49]. Each of the several tens of microscopes is faster by about two orders of magnitude than those used, *e.g.*, in the former CHORUS experiment.
In order to reduce the emulsion scanning load, the use of Changeable Sheets (CS) film interfaces, successfully applied in particular to the CHORUS and DONUT experiments, was extended to OPERA on a much larger scale. Tightly packed doublets of emulsion films are glued to the downstream face of each brick and can be removed without opening the brick itself.
Charged particles from a neutrino interaction in the brick lead plates can cross the CS and then produce a signal in the target tracker scintillators. An automatic classification algorithm provides high efficiency in the selection of neutrino events inside the OPERA

target both for charged- and neutral-current events. The correspondingly selected brick is then extracted and the CS developed and analyzed in the two dedicated scanning facilities at LNGS and Nagoya. All tracks measured in the CS are searched for in the most downstream films of the brick and followed back until they are not found in three consecutive films. The stopping point is considered as the signature either for a primary or a secondary vertex. The vertex is then confirmed by scanning a volume with a transverse size of 1 cm^2 in 11 films in total, upstream and downstream of the stopping point. A typical charged-current ν_μ-induced event as reconstructed by the electronic trackers and by the emulsion on two completely different scales, is shown in fig. 13. The complex and time-consuming scanning of the brick emulsions is accomplished in 12 different laboratories of the Collaboration, in Europe and Japan.

As an example of detected classes of interactions, "charm" particles production and decay events have a great importance in OPERA, for two main reasons. On the one hand, in order to certify the observation of ν_τ events one should prove the ability of observing charm interactions at the expected rate. On the other hand, since charm decays exhibit the same topology as tau decays, they are a potential source of background if the muon at the primary vertex is not identified. Therefore, searching for charm decays in events with the primary muon correctly detected provides a direct measurement of this background. The distinctive topology of one of the detected 1-prong charm decay events is depicted in fig. 14.

Another potentially important source of background is given by re-interactions of hadrons in muonless events. This scattering process, exhibiting the typical kink topology, could well fake hadronic tau decays, although rather unlikely, given the relatively long interaction length of hadrons in the lead target as compared to the 2 mm allowed decay length for signal events. Similar considerations apply to muon large-angle scattering, a background source to the "gold plated" $\tau \rightarrow \mu$ decay mode.

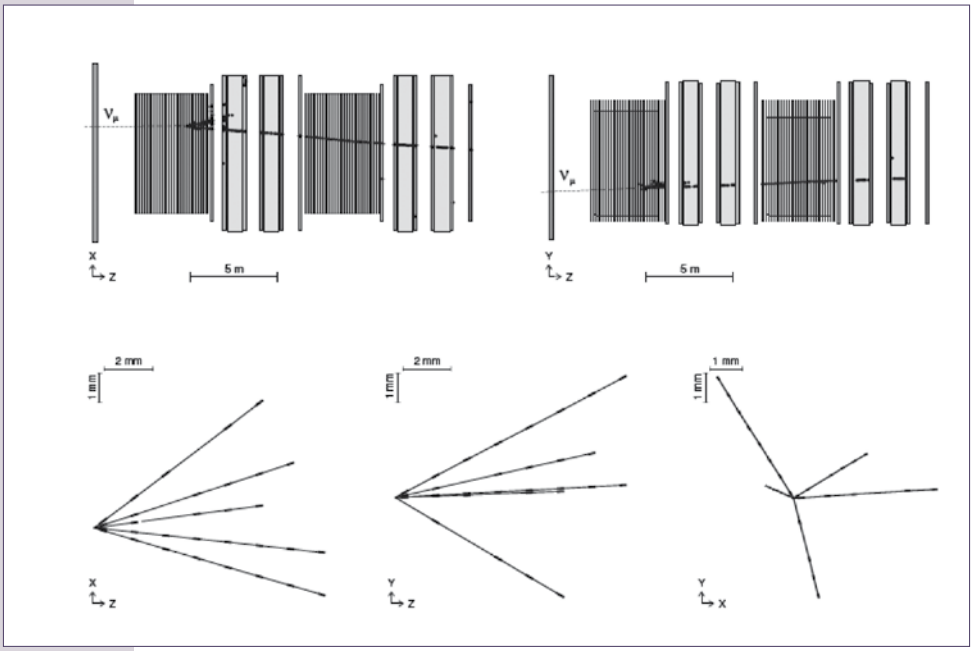


Fig. 13 Display of a charged-current muon-neutrino event produced in the OPERA target. Top: the reconstruction by the electronic detectors (~15 m scale). Bottom: the neutrino interaction vertex region reconstructed by means of the emulsions (millimeter scale).

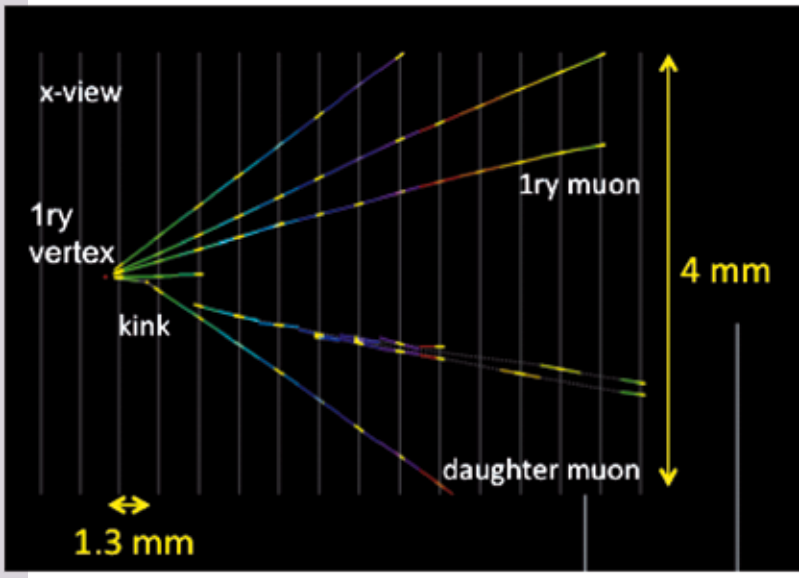


Fig. 14 Charm meson production and decay in the OPERA target. The distinctive kink topology is detected. The presence of an identified prompt muon at the primary vertex excludes the hypothesis of tau production and decay.

As far as the experiment sensitivity is concerned, we already mentioned that OPERA should be able to discover appearance oscillations already with a handful of candidate events, given its low physics background. The experiment is basically sensitive to all tau decay modes, with about 10 signal events expected for the nominal integrated beam intensity of ~22×10^{19} CERN protons on target (the target for the production of the neutrinos), and for less than 0.75 background events, for the current best-fit values of the oscillation parameters.
The experiment has been running since 2006, when a technical run was performed without target bricks [50]. In 2007 the first interactions in the emulsions were detected [51] and, as mentioned above, 2008 and 2009 featured the first two "production runs", with the collection of several thousand neutrino interactions, out of which we detected the expected number of charm events and the first ν_τ candidate event [52], discussed in the previous section.

3 Neutrino oscillation physics appendix

Before concluding, let us make some basic considerations on the physics of neutrino oscillations in order to better frame the case of tau appearance in the current experimental scenario.
The formalism of neutrino oscillations, as previously discussed, is well explained by the 3×3 PMNS neutrino-mixing matrix *U*, similar to the CKM quark-mixing matrix. If three Majorana neutrino states exist (neutrino ≡ antineutrino) the matrix then features six independent parameters: three angles and three phases. The matrix can then be conveniently parametrized as

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{i\eta_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\eta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

where $c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij}$ and $s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij}$. The first three matrices can be independently explored by different classes of oscillation experiments: the first one is relevant to atmospheric and accelerator neutrino searches (*e.g.*, OPERA), the third one is sensitive to solar and reactor experiments, while the second one represents an "interference" or "linking" term, that as we will see below, can be assessed by testing "sub-leading" ν_μ- ν_e oscillations.
In the case of three Dirac neutrinos (neutrino ≠ antineutrino), the Majorana phases η_1 and η_2 appearing in the fourth matrix can be absorbed in the neutrino states and the number of physical phases becomes one (analogously to the CKM matrix). The mixing matrix *U* then takes the form

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}.$$

It is important to stress that neutrino oscillation experiments are neither sensitive to the so far unknown Majorana or Dirac nature of the neutrino, nor to the actual values of the mass eigenvalues, but only to their squared differences, as shown below.
One can then derive the well-known oscillation probability formula that in the most general case takes the expression

$$P_{\alpha,\beta} = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} U^*_{\alpha i} U_{\beta j} \langle \nu_j | \nu_i(t) \rangle \right|^2.$$

This describes the oscillatory probability for a neutrino flavour α produced at the time $t = 0$ to be found at the time t as a neutrino of flavour β, the latter able to produce the charged lepton β in a charged-current interaction with the detector. The above relation applies to propagation of the oscillating neutrinos in vacuum and can only occur if the mass eigenvalues are not degenerate. For propagation in matter a more complicated formula must be used; this is the case, *e.g.,* of the above-mentioned electron-neutrinos propagation in the dense solar matter, well described by the MSW formalism [22].

In summary, oscillations are described (take the case of vacuum neutrino propagation as an example) by 3 independent mixing angles: θ_{12}, experimentally associated to the solar neutrino oscillations, θ_{23}, associated to the atmospheric neutrino oscillations, and the still unknown θ_{13} angle that represents as already said a sort of "link" between the two main oscillation channels. This angle directly affects the possibility of detecting a non-vanishing *CP*-violating phase δ, as evident from the above parametrizations of the mixing matrix: a null θ_{13} value would make the dependence of the oscillation probability on δ undetectable.

Two independent values of the squared-mass eigenvalue differences $(m_i^2 - m_j^2)$, Δm^2_{12} and Δm^2_{23}, respectively associated to the solar and atmospheric sectors, complete the oscillation parameters to be determined by the experiments. To the above, unknown parameters we have to add the baseline L and the energy of the neutrinos E, both in principle fixed by the experimental conditions. The oscillation formula amplitude is then a function of the mixing angles, while the frequency of the oscillation (or its length) does depend upon Δm^2 times L/E.

The results of a global fit including all neutrino oscillation results obtained with natural and artificial neutrinos is shown in fig. 15 [53]. This is a remarkable achievement, although one may notice the different accuracy yielded so far in the measurement of the corresponding mixing parameters in the quark sector: this indicates that the work has just started and more efforts will be needed for the future! Figure 16 shows the consequent flavour composition of the mass neutrino eigenstates in the two (still both) possible hypotheses of normal or inverted mass hierarchy: $m(\nu_3) > m(\nu_2) > m(\nu_1)$ and $m(\nu_2) > m(\nu_1) > m(\nu_3)$. Analogously, each of the neutrino flavour eigenstates has a "specific" composition in terms of mass eigenstates.

Looking at the oscillation parameter values, it turns out that both the atmospheric and solar sectors exhibit small values of Δm^2 and large values (or maximal, as in the case of the atmospheric sector 23) of the corresponding mixing angles. This is "per se" a quite intriguing result, since a rather different situation occurs for the quark-mixing parameters in the CKM matrix.

From the measurements made so far on the oscillation parameters and from the limits set by beta-decay and cosmological measurements, it also very clearly emerges that the neutrino mass eigenvalues are extremely small, when compared to the masses of the other fermions. This is a fundamental question that deserves an answer. The explanation of the neutrino mass smallness is actually a mandatory duty of any theory going beyond the present version of the Standard Model. Among the various proposed interpretation hypotheses, the so-called "see-saw" models predict the existence of a "grand unification mass scale" heavy Majorana neutrino, as counterpart of the physically observed low-mass neutrinos. This is a rather appealing possibility, also because such models predict (as a "by-product") leptogenesis, and therefore a way to account for the supremacy of matter over anti-matter in the present Universe, and ultimately for the fact that we are here talking about neutrinos! For a review of these interesting subjects the reader can refer to, *e.g.,* [53].

The previous considerations on the neutrino mass, in particular, have motivated another category of precision experiments, such as those on the search for neutrinoless double-beta decay, a process that if eventually detected, would at the same time tell us the (average) neutrino mass value, and confirm its Majorana particle nature (for a review see, *e.g.*, [54]).

Back to the oscillation formalism, we can write below two notable examples of oscillation

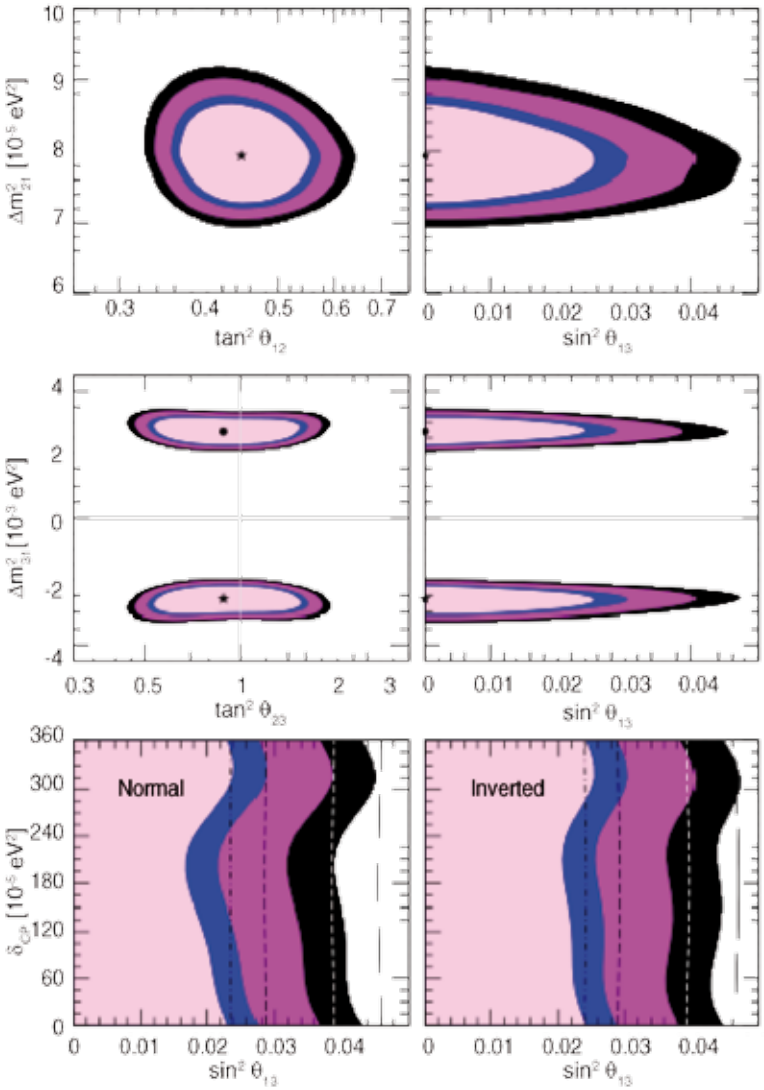


Fig. 15 An example of a global fit of all oscillation data, to infer the oscillation parameters in the general 3-flavour mixing scheme [53].

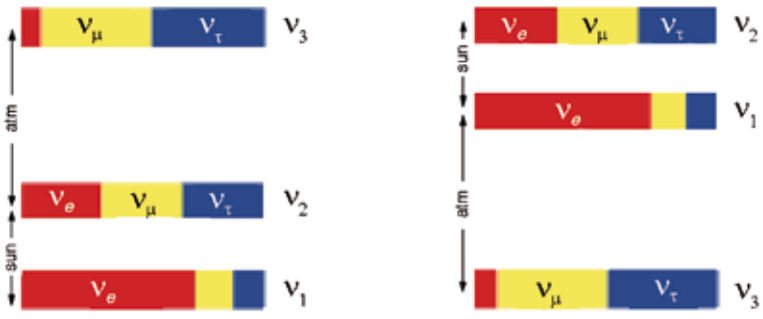


Fig. 16 Flavour composition of the neutrino mass eigenstates as indicated by all neutrino oscillation experiments, for the two possible hierarchy schemes.

probability formulae in a simplified expression of the general oscillation formula, respectively for the ν_μ- ν_τ mode (*i.e.* tau-neutrino appearance oscillations, studied by OPERA) and the ν_μ-ν_e (electron neutrino appearance, currently addressed, *e.g.*, by the T2K experiment [55], aimed at the measurement of the θ_{13} angle):

$$P(\nu_\mu\text{-}\nu_\tau) \sim \cos^4\theta_{13}\sin^2 2\theta_{23}\sin^2\left(\Delta m^2_{23}L/4E\right),$$

$$P(\nu_\mu\text{-}\nu_e) \sim \sin^2 2\theta_{13}\sin^2\theta_{23}\sin^2\left(\Delta m^2_{23}L/4E\right).$$

From the above relations, it is clear that OPERA is well sensitive to the atmospheric neutrino oscillation parameters (sector 23), while, in order to achieve a good sensitivity to the "interference" sector 13, one should better exploit the ν_μ - ν_e oscillation channel, given the presumably very small value of the so far unknown θ_{13} angle. This is straightforward, given the $\cos^4$ dependence of $P(\nu_\mu$- $\nu_\tau)$ on θ_{13}. For completeness, from one (of the several available) global fits of all oscillation data we know that $\sin^2\theta_{13} < 0.035$ at the 90% CL [24].
It is worth stressing that the appearance of ν_τ can be in principle also attempted with atmospheric neutrinos, without the use of a high-energy accelerator beam as done by OPERA. In that case, the strong limitation is the rather low number of events that can be detected by an (even large) underground detector, due to the extremely low flux of atmospheric ν_τ (~ 1 per kton year) that are above the high-energy kinematical threshold of ~3.5 GeV that is required to produce a tau-lepton. In addition, such a measurement can only be (realistically) performed on a statistical basis, by exploiting the differences in the kinematical features of ν_τ events as compared to ordinary atmospheric ν_μ and ν_e interactions. This implies a rather unfavourable signal-to-noise ratio that eventually will limit the achievable statistical significance of the measurement. Despite these strong experimental difficulties, the Super-Kamiokande Collaboration has got an interesting result with this method, "*disfavouring the absence of tau appearance*" [56].

4 What next?

After the final confirmation of OPERA on ν_τ appearance with the adequate statistical significance, we should be able to shed light on the alternative hypothesis to standard 3-flavour neutrino oscillations, such as additional sterile neutrinos, decoherence or decay models, etc.

In order to achieve its goal OPERA will have to run at least two more years in the CNGS beam, with the hope that the continuous improvements of the beam intensity and stability, as well as of the performance of detector and related facilities, will continue.
We will have then to move on towards the next generation of measurements. The precise determination of the above-mentioned θ_{13} angle by accelerator and nuclear-reactor–based experiments will allow the assessment of the full 3 × 3 nature of the mixing matrix and open the way to an even further step, namely the measurement of a possible *CP*-violating phase in the leptonic sector, a major issue in particle physics. For such a goal, a complete new generation of beam facilities and detectors will be required to cope with the complexity of the measurements and with the smallness of the expected signal.
Certainly many years of studies, investments, construction work and experimental struggle will be needed and, hopefully, new unexpected results will motivate even more neutrino physicists in their work. This subject, however, goes beyond the scopes of the present paper. More information could be found elsewhere (look for example at the papers presented at the recent CERN Workshop on Future Neutrino Physics [57]).
As a conclusion, I believe that the positive achievements reported here, obtained by the OPERA experiment, constitute an important result among those that in the last two decades came from the various projects and that contributed to our comprehension of neutrino oscillation physics. The first OPERA ν_τ candidate is a key milestone towards the discovery of the appearance of neutrino oscillations, more than 50 years after their first hypothesis. Obviously, more work will be needed, but I am confident that the OPERA Collaboration will be definitively able to accomplish its task, given the by now proven ability in reconstructing CNGS neutrino interactions and in identifying decay topologies with low physics background.

Acknowledgements

I am pleased to thank all the colleagues of the OPERA Collaboration, who did the high-quality work that brought to the results I presented here. I am also indebted to Sandro Bettini for the enlightening discussions on historical issues. Many thanks to my wife Paola, for the careful reading of the manuscript.

References

[1] A. Ereditato (on behalf of the OPERA Collaboration), Observation of events with decay topologies in the OPERA experiment, seminar given at LNGS, 31 May 2010 and at CERN, 4 June 2010.
[2] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 81 (1998) 1562.
[3] B. Pontecorvo, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.,* 33 (1957) 549 (*Sov. Phys. JETP,* 6 (1957) 429); B. Pontecorvo, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 34 (1957), 247 (*Sov. Phys. JETP,* 7 (1958) 172).
[4] G. Dandby *et al.*, *Phys. Rev. Lett.,* 9 (1962) 36.
[5] Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, *Prog. Theor. Phys.,* 28 (1962) 870.
[6] Z. Maki, M. Nakagawa, Y. Ohnuki and S. Sakata, *Prog. Theor. Phys.,* 23 (1960) 1174.
[7] N. Cabibbo, *Phys. Rev. Lett.* 10 (1963) 531; M. Kobayashi and T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.,* 49 (1973) 652.
[8] M. Bernardini *et al.*, INFN/AE-67/3, 20 March 1967; C.S. Wu *et al.*, *"The origin of the third family"*, World Scientific Series in 20th Century Physics, vol. 20 (1998).
[9] M. Perl *et al.*, *Phys. Rev. Lett.,* 35 (1975) 1489.
[10] B. Pontecorvo, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.,* 53 (1967) 1717 (*Sov. Phys. JETP,* 26 (1968) 984).
[11] R. J. Davis, D. S. Harmer and K. C. Hoffman, *Phys. Rev. Lett.,* 20 (1968) 1205.
[12] J. N. Bahcall , *Phys. Rev. Lett.,* 12 (1964) 300.
[13] R. J. Davis, *Phys. Rev. Lett.,* 12 (1964) 303.
[14] K.S. Hirata *et al.* (Kamiokande II Collaboration), *Phys. Rev. D,* 38 (1988) 448.
[15] W. Hampel *et al.* (GALLEX Collaboration), *Phys. Lett. B,* 447 (1999) 127.
[16] M. Altmann *et al.* (GNO Collaboration), *Phys. Lett. B,* 616 (2005) 174.
[17] J. N. Abdurashitov *et al.* (SAGE Collaboration), *J. Exp. Theor. Phys.,* 95 (2002) 181 (*Zh. Eksp. Teor. Fiz.,* 122 (2002) 211).
[18] Y. Fukuda *et al.* (Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 77 (1996) 1683.
[19] M. B. Smy *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. D,* 69 (2004) 011104.
[20] Q. R. Ahmad *et al.* (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 87 (2001) 071301.
[21] J. N. Bahcall, A. M. Serenelli and S. Basu, *Astrophys. J.,* 621 (2005) L85.
[22] L. Wolfenstein, *Phys. Rev. D,* 17 (1978) 2369; S. P. Mikheev and A. Y. Smirnov, *Sov. J. Nucl. Phys.* 42, 913 (1985) (*Yad. Fiz.,* 42 (1985) 1441).
[23] T. Araki *et al.* (KAMLAND Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 94 (2005) 081801.
[24] Th. Schwetz, M. Tortola and J. W. F. Valle, *New J. Phys.,* 10 (2008) 113011.
[25] T. Kajita, talk given at the NEUTRINO98 Conference in Takayama, `http://www-sk.icrr.u tokyo.ac.jp/nu98/`
[26] Y. Fukuda *et al.* (Kamiokande Collaboration), *Phys. Lett. B,* 335 (1994) 237.
[27] M. C. Sanchez *et al.* (Soudan 2 Collaboration), *Phys. Rev. D,* 68 (2003) 113004.
[28] M. Ambrosio *et al.* (MACRO Collaboration), *Phys. Lett. B,* 517 (2001) 59.
[29] M. Apollonio *et al.* (CHOOZ Collaboration), *Phys. Lett. B,* 466 (1999) 415.
[30] A. Piepke (Palo Verde Collaboration), *Prog. Part. Nucl. Phys.,* 48 (2002) 113.
[31] S. H. Ahn *et al.* (K2K Collaboration), *Phys. Lett. B,* 511 (2001) 178.
[32] D. G. Michael *et al.* (MINOS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 97 (2006) 191801.
[33] Q. R. Ahmad *et al.* (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 89 (2002) 011301.
[34] Ed. K. Elsener, CERN 98-02, INFN/AE-98/05; R. Bailey *et al.*, Addendum to report CERN 98-02, INFN/AE-98/05, CERN-SL/99-034(DI), INFN/AE- 99/05.
[35] M. Guler *et al.* (OPERA Collaboration), CERN-SPSC-2000-028, LNGS P25/2000.
[36] P. Aprili *et al.* (ICARUS Collaboration), CERN/SPSC 2002-027 (SPSC-P-323), LNGS-EXP 13/89 add.2 /01.
[37] E. Eskut *et al.* (CHORUS Collaboration), *Phys. Lett. B,* 497 (2001) 8.
[38] P. Astier *et al.* (NOMAD Collaboration), *Nucl. Phys. B,* 611 (2001) 3.
[39] A. Ereditato, G. Romano and P. Strolin, *Nucl. Phys. B,* 54 (1997) 139.
[40] A. S. Ayan *et al.* (TOSCA Collaboration), CERN-SPSC/97-05 SPSC/I 213.
[41] A. Ereditato, K. Niwa and P. Strolin, INFN/AE-97/06, DPNU-97-07.
[42] G. De Lellis, A. Ereditato and K. Niwa, *"Nuclear Emulsions"*, in *The Handbook of Particle Physics*, edited by H. Shopper, *Landoldt-Boernstein*, vol. II (Springer Verlag, Heidelberg), to be published.
[43] K. Niu, E. Mikumo and Y. Maeda, Prog. Theor. Phys., 46 (1971) 1644.
[44] K. Niwa, contribution to the *"Snowmass 94"* Conference on *"Particle and Nuclear Astrophysics and Cosmology in the Next Millennium"*, 29 June – 14 July, Snowmass, Colorado.
[45] K. Kodama *et al.* (DONUT Collaboration), *Phys. Lett. B,* 504 (2001) 218.
[46] H. Shibuya *et al.* (OPERA Collaboration), CERN-SPSC-97-24, LNGS-LOI-8-97.
[47] R. Acquafredda *et al.* (OPERA Collaboration), *JINST,* 4 (2009) P04018.
[48] N. Armenise *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods. A*, 551 (2005) 261; M. De Serio *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods. A*, 554 (2005) 247; L. Arrabito *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods. A*, 568 (2006) 578.
[49] K. Morishima and T. Nakano, *JINST,* 5 (2010) P04011.
[50] R. Acquafredda *et al.* (OPERA Collaboration), *New J. Phys.,* 8 (2006) 303.
[51] N. Agafonova *et al.* (OPERA Collaboration), *JINST,* 4 (2009) P06020.
[52] N. Agafonova *et al.* (OPERA Collaboration), arXiv: 1006.1623v1, to be published in *Phys. Lett. B*.
[53] M. C. Gonzales-Garcia and M. Maltoni, arXiv 0704.1800.v1.
[54] S. M. Bilenky, arXiv:1001.1946v1.
[55] `http://jnusrv01.kek.jp/public/t2k/index.html`
[56] K. Abe *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.,* 97, (2006) 171801.
[57] `http://indico.cern.ch/contributionListDisplay.py?confId=69984`

Antonio Ereditato

Antonio Ereditato was born in Naples where he obtained the "Laurea in Fisica" and the PhD in Physics at the "Federico II" University. He had positions at CNRS, Strasbourg and CERN, Geneva before coming back to INFN, Naples where has been Researcher, Senior Researcher and from 1998 Director of Research. In 2006 he moved to Switzerland where he has the Chair of Experimental Particle Physics at the University of Bern, and is Director of the Laboratory for High Energy Physics. He served in several international scientific committees (*e.g.,* the SPS and LHC Committees at CERN) and, in particular, he is presently member of the Board of the Swiss National Foundation, the most important Swiss agency promoting and funding scientific research. His main field of interest is experimental neutrino physics. He has conducted important particle physics experiments at CERN, in Japan and at LNGS. He is currently the Spokesperson of the OPERA experiment.

SPIN E CARICA: UN DIALOGO PROMETTENTE

ROBERTO RAIMONDI*,
Dipartimento di Fisica "E. Amaldi", Università Roma Tre, Roma, Italia

L'effetto Hall di spin, cioè la generazione di una corrente di spin con un campo elettrico, è una delle prospettive più interessanti per lo sviluppo dei dispositivi spintronici del futuro. Da un punto di vista fondamentale, il suo studio ci ha spinto verso una comprensione più profonda delle manifestazioni dell'interazione spin orbita nello stato solido.

1 Introduzione

In un conduttore, una corrente elettrica, in presenza di un campo magnetico ad essa perpendicolare, induce una differenza di potenziale nella direzione perpendicolare al piano individuato dalla corrente e dal campo magnetico. Questo è il ben noto effetto Hall e l'origine della differenza di potenziale è l'accumulo di carica di segno opposto lungo i bordi laterali del conduttore. Se al passaggio della corrente, in assenza di un campo magnetico esterno, si ha un accumulo di polarizzazione di spin con segno opposto lungo i bordi laterali del conduttore, si parla di effetto Hall di spin (SHE acronimo dall'inglese Spin Hall Effect). L'esistenza di quest'effetto è stata proposta teoricamente per la prima volta da Dyakonov e Perel nel 1971 [1, 2], ma l'invenzione del nome è dovuta a Hirsch, che lo ha riproposto indipendentemente nel 1999 [3]. L'origine fisica dell'effetto è la capacità dell'interazione spin-orbita di separare spazialmente elettroni con spin opposto. Ad esempio, in presenza d'interazione spin-orbita, se un elettrone è diffuso da un centro di forza, l'angolo di diffusione dipende dalla proiezione dello spin lungo l'asse individuato dal momento angolare orbitale. Come vedremo più in dettaglio nel seguito, questa asimmetria nella diffusione di elettroni polarizzati è in grado di generare correnti polarizzate di elettroni a partire da una corrente inizialmente non polarizzata. Tale caratteristica rende l'effetto Hall di spin particolarmente attraente per la spintronica (dall'inglese spintronics crasi per spin-based electronics), che ha l'obiettivo di sfruttare lo spin elettronico e il momento magnetico ad esso associato ai fini di un più efficiente trasporto, manipolazione e immagazzinamento dell'informazione.

L'interazione spin-orbita agente sugli elettroni di conduzione può avere origini diverse. In un metallo, tipicamente, la principale fonte di interazione spin-orbita è il potenziale associato alle imperfezioni del reticolo cristallino e si è soliti indicare come *estrinseco* l'effetto Hall di spin dovuto a questo meccanismo. In un semiconduttore, l'interazione spin-orbita ha anche un'origine intrinseca derivante dalla natura degli orbitali *p* responsabili della formazione delle bande di valenza o dalla riduzione della simmetria spaziale come nei semiconduttori

* raimondi@fis.uniroma3.it
http://webusers.fis.uniroma3.it/raimondi

non centrosimmetrici e nei dispositivi ad eterostruttura. Quest'ultima osservazione è alla base delle più recenti proposte teoriche di effetto Hall di spin *intrinseco* avanzate da Murakami e collaboratori [4] e da Sinova e collaboratori [5]**.** Il merito di queste ultime proposte è di rendere esplicito il ruolo che l'effetto Hall di spin potrebbe giocare nello sviluppo dei dispositivi spintronici futuri. Infatti l'utilizzo dell'effetto Hall di spin consentirebbe, in linea di principio, di generare e rivelare la polarizzazione di spin senza dover utilizzare elettrodi ferromagnetici o campi magnetici esterni e quindi la possibilità di ottenere dispositivi spintronici alla portata dell'attuale tecnologia. Non stupisce quindi che, sebbene l'idea dell'effetto Hall di spin fosse stata proposta circa quaranta anni fa, la ricerca su di esso abbia avuto un forte sviluppo solo negli ultimi sei anni, durante i quali ci sono state le prime conferme sperimentali in sistemi semiconduttori [6, 7] e metallici [8], seguite da un numero crescente di esperimenti [9–11].

L'obiettivo di questo articolo è di fornire una panoramica di questo campo di ricerca. Nella sez. 2 presentiamo l'effetto Hall di spin in modo fenomenologico introducendo il concetto di corrente di spin accanto a quello più familiare di corrente di carica. Nella successiva sez. 3 passiamo in rassegna le prime conferme sperimentali, mentre rimandiamo alla sez. 4 una discussione dei meccanismi microscopici. L'ultima sezione infine è dedicata ad alcuni commenti conclusivi.

2 Fenomenologia dell'effetto Hall di spin

Per farsi un'idea intuitiva dell'effetto Hall di spin, è utile ricordare che la sua origine è intimamente legata a quella del cosidetto effetto Hall anomalo (AHE acronimo dall'inglese Anomalous Hall Effect) osservato nei metalli ferromagnetici [12]. In questi ultimi, la resistenza di Hall, oltre alla dipendenza lineare dal campo magnetico esterno dovuta alla forza di Lorentz, presenta un contributo aggiuntivo proporzionale alla magnetizzazione. Se l'interazione spin-orbita è in grado di separare spazialmente elettroni con spin opposto, allora una corrente elettrica in un ferromagnete, avendo una polarizzazione di spin diversa da zero, deve produrre una differenza di potenziale trasversa (Hall) anche in assenza di un campo magnetico esterno. Se quindi si assume che in un metallo paramagnetico siano presenti gli stessi meccanismi microscopici responsabili dell'effetto Hall anomalo, una corrente elettrica non polarizzata induce una corrente di spin trasversa che determina un accumulo di polarizzazione con segno opposto ai bordi [3], come qualitativamente illustrato in fig.1.

Ad un livello più quantitativo è possibile scrivere delle equazioni fenomenologiche che descrivono l'accoppiamento delle correnti di carica e spin. Introduciamo la corrente di carica nel modo usuale considerando il temine di deriva e quello di diffusione

$$j_i^{(0)} = \mu(-e)nE_i - D\partial_i(-e)n \ , \tag{1}$$

dove e è il valore assoluto della carica elettronica, $\mu = -e\tau/m$ è la usuale mobilità elettronica (con τ il tempo di trasporto e m la massa elettronica), n la densità elettronica, D il coefficiente di diffusione, ed E_i la componente i-esima del campo elettrico ed infine ∂_i la derivata rispetto alla coordinata i-esima. In modo analogo possiamo scrivere per la corrente di spin

$$j_{ij}^{(0)} = \mu s_j E_i - D\partial_i s_j \ , \tag{2}$$

dove s_j indica la densità di polarizzazione di spin lungo l'asse j. Nelle eq. (1), (2) l'indice soprascritto indica che le espressioni valgono in assenza di accoppiamento spin-orbita. Nel seguito, per semplicità, usiamo unità di misura per lo spin in modo che le correnti di carica e di spin abbiano le stesse dimensioni fisiche. A tal fine è sufficiente moltiplicare la polarizzazione di spin per il fattore $-e/\hbar$.

In presenza di interazione spin-orbita, le due correnti sono accoppiate e sono descritte dalle equazioni

$$j_i = j_i^{(0)} - 4\gamma\varepsilon_{ijk}j_{jk}^{(0)} \ , \tag{3}$$

$$j_{ij} = j_{ij}^{(0)} + \gamma\varepsilon_{ijk}j_k^{(0)} \ , \tag{4}$$

dove ε_{ijk} è il tensore di rango tre completamente antisimmetrico e γ è un parametro adimensionale proporzionale all'interazione spin-orbita. Mentre una discussione dei vari meccanismi microscopici sarà fatta più avanti nella sez. 4, qui notiamo che le eq. (3), (4) sono ricavate assumendo l'invarianza per inversione spaziale e temporale. Il coefficiente di accoppiamento tra le due correnti è determinato da un unico parametro in virtù del fatto che le due equazioni accoppiate devono soddisfare le relazioni di reciprocità di Onsager: il segno meno relativo è una conseguenza del diverso comportamento delle correnti di carica e spin per inversione temporale. Infatti, mentre entrambe le correnti sono dispari per inversione spaziale, la corrente di spin è pari per inversione temporale a differenza di quanto accade per quella di carica. Il fattore quattro di differenza, infine, origina dal fattore 1/2 nella definizione della densità di spin.

Le equazioni per le correnti di carica e spin devono essere considerate insieme alle corrispondenti equazioni di continuità. Poichè lo spin non è, in generale, una quantità conservata, la sua equazione del moto assume la forma

$$\partial_t s_i + \partial_j j_{ji} + \frac{s_i}{\tau_s} = 0 \ , \tag{5}$$

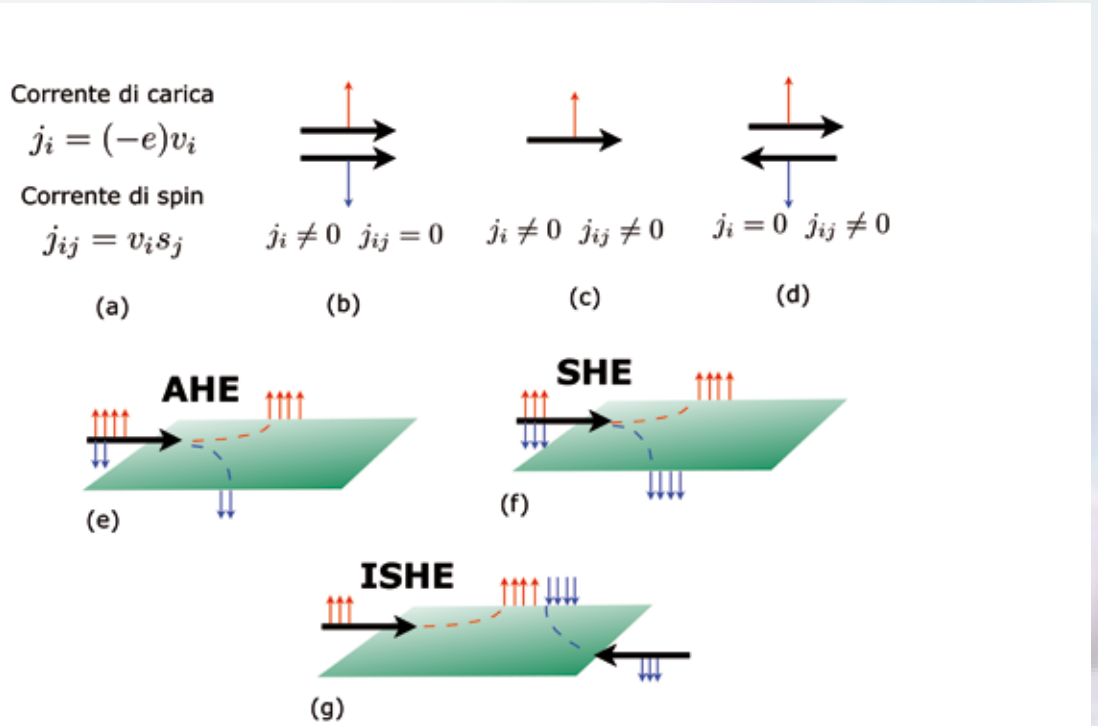


Fig. 1 (a) Un elettrone in moto con velocità v_i genera una corrente di carica (e è la carica elementare positiva) $j_i = -ev_i$ ed una corrente di spin $j_{ij} = v_i s_j$ con asse di quantizzazione j. (b) In un metallo normale si ha un ugual numero di elettroni con spin-su (freccia rossa) e spin-giù (freccia blu) e si ha quindi solo corrente di carica. (c) In un ferromagnete completamente polarizzato, si ha una corrente di spin parallela a quella di carica. (d) Una *pura* corrente di spin si ottiene quando due correnti con polarizzazioni opposte fluiscono in direzioni contrarie. (e) Nell'effetto Hall anomalo (AHE), gli spin-su, maggioritari, sono deviati a sinistra, mentre gli spin-giù, minoritari, a destra. I due bordi risultano quindi diversamente carichi e si ha una differenza di potenziale trasversa. (f) Nell'effetto Hall di spin (SHE), gli spin-su e spin-giù sono deviati in direzioni opposte e determinano una pura corrente di spin trasversa, che produce, infine, un accumulo di spin con opposta polarizzazione ai due bordi. (g) L'effetto Hall di spin inverso (ISHE) consiste nella generazione di una differenza di potenziale trasversa indotta da una pura corrente di spin.

dove τ_s è il tempo di rilassamento di spin che qui abbiamo, per semplicità, supposto isotropo. In un sistema diffusivo, al tempo di rilassamento di spin corrisponde una lunghezza di diffusione di spin $L_s^2 = D\tau_s$.
Le eq. (3)–(5) ci permettono di descrivere quantitativamente l'effetto Hall di spin descritto in modo intuitivo in fig. 1(f). A tale scopo, consideriamo, come mostrato, in fig. 2 (a), un conduttore paramagnetico percorso da una corrente di carica che fluisce lungo l'asse x. Se le dimensioni L_x, L_y e L_z del conduttore sono grandi rispetto alla lunghezza di diffusione di spin L_s, possiamo descrivere ciò che accade al centro del conduttore ignorando la presenza dei bordi. Ciò corrisponde all'approssimazione di conduttore infinito sufficiente per descrivere gli effetti di volume. L'espressione (4) per la corrente di spin ci fornisce quindi

(6) $$j_{yz} = \sigma_{sH} E_x , \qquad \sigma_{sH} = \gamma\sigma ,$$

dove abbiamo introdotto la conducibilità Hall di spin, σ_{sH} e la usuale conducibilità elettrica di Drude $\sigma = (-e)\mu n$. La conducibilità Hall di spin è il coefficiente che collega la corrente di spin che fluisce trasversalmente ad un campo elettrico applicato, in analogia alla conducibilità di Hall che collega la corrente ed il campo elettrico nell'effetto Hall ordinario. È da notare che la polarizzazione della corrente di spin è diretta lungo l'asse z, cioè è perpendicolare alla corrente di spin j_{yz} ed al campo E_x. Ciò deriva formalmente dalla presenza del tensore antisimmetrico ε_{ijk} nelle eq. (3), (4). In un esperimento non si misura la corrente di spin trasversa, ma piuttosto l'accumulo di spin ai bordi, così come in una misura di effetto Hall si misura la differenza di potenziale dovuta all'accumulo di carica. Per descrivere l'accumulo di spin ai bordi, consideriamo per semplicità l'effetto di un unico bordo, posto nel piano $y = 0$, cioè immaginiamo che il conduttore occupi il semispazio $y > 0$, come illustrato

in fig. 2 (b). Se inseriamo l'espressione della corrente di spin dell'eq. (4) nell'equazione di continuità (5), otteniamo un'equazione di diffusione per la polarizzazione di spin. Tale equazione deve essere risolta imponendo come condizione al contorno l'annullamento del flusso di spin normale alla superficie di separazione tra il conduttore ed il vuoto. Il risultato di tale analisi è illustrato in fig. 2(b).
In particolare si ottiene che il valore della polarizzazione massima s_0 è direttamente legato alla conducibilità Hall di spin dalla relazione

(7) $$s_0 = \frac{\tau_s}{L_s}\sigma_{sH}E_x \ .$$

La eq. (7) mostra che per ricavare il valore numerico della conducibilità Hall di spin dalla polarizzazione di spin misurata bisogna conoscere il tempo di rilassamento di spin e il coefficiente di diffusione. Dal punto di vista sperimentale ciò richiede la combinazione di più misure simultanee, come andiamo ad illustrare nella prossima sezione.

3 Esperimenti di effetto Hall di spin

Nell'esperimento condotto presso l'Università della California, Santa Barbara, dal gruppo di David Awschalom [6] si è osservato per la prima volta l'effetto Hall di spin in un semiconduttore, costituito da un film sottile di arseniuro di gallio. A tale scopo è stata utilizzata la spettroscopia Kerr per misurare l'accumulo di polarizzazione di spin. Infatti, inviando luce polarizzata lungo l'asse *z*, perpendicolarmente al piano in cui è applicato il campo elettrico, la luce riflessa subisce, in presenza di una polarizzazione diretta lungo l'asse *z*, una rotazione dell'asse di polarizzazione (effetto Kerr).
In particolare, nell'esperimento è stato possibile misurare la rotazione dell'asse di polarizzazione in funzione della posizione spaziale del fascio incidente in modo da ottenere una mappatura della polarizzazione di spin. Quest'ultima è risultata nulla nel bulk, e di segno opposto ai bordi laterali, con una lunghezza di diffusione dell'ordine dei micrometri. Le dimensioni $L_x = 300$ μm e $L_y = 77$ μm del campione misurato giustificano ampiamente l'approssimazione diffusiva nel piano *x*-*y*.
Per poter usare la relazione (7) in modo da collegare la misura della polarizzazione s_0 con la conducibilità Hall di spin, è necessario conoscere il valore del tempo di rilassamento di spin, τ_s. Applicando allora un campo magnetico lungo l'asse *y*, cioè perpendicolare alla direzione del campo elettrico e della polarizzazione di spin, è stata misurato il valore di s_0 al crescere dell'intensità del campo a causa della precessione dello spin. L'andamento lorentziano ha permesso di ottenere un valore di $\tau_s = 10^{-9}$ s da cui per la conducibilità Hall di spin si è calcolato un valore $\sigma_{sH} \sim 1\Omega^{-1}\,m^{-1}$.

Un altro esperimento che utilizza una combinazione di misure elettriche ed ottiche è quello del gruppo di Cambridge [7] condotto da Jorge Wunderlich e collaboratori, dove si è realizzato un dispositivo a semiconduttore all'arseniuro di gallio, costituito da un gas bidimensionale di buche (cioè stati elettronici non occupati da elettroni) in prossimità di un gas bidimensionale di elettroni. In tal modo si è realizzata una giunzione *p*-*n*. L'effetto Hall di spin si verifica nel gas di buche. Queste ultime si accumulano lungo i bordi del gas bidimensionale con polarizzazione di spin opposta. Applicando un'opportuna tensione alla giunzione *p*-*n*, le buche si ricombinano con gli elettroni provenienti dal gas bidimensionale di elettroni. La luce emessa risulta polarizzata e fornisce una misura della polarizzazione indotta per effetto Hall di spin.
La combinazione di misure elettriche ed ottiche utilizzata nei due esperimenti descritti non è però la sola strada percorribile. Ad esempio le misure ottiche possono essere sostituite dall'impiego di elettrodi ferromagnetici, come nel caso dell'esperimento del gruppo di Harvard, condotto da Sergio Valenzuela e Michael Tinkham [8], dove si è misurato per la prima volta l'effetto Hall di spin inverso (cf. fig. 1 (g)) con l'utilizzo di un dispositivo metallico. Quest'ultimo è composto da una croce di alluminio a contatto con un ferromagnete, anch'esso metallico, fatto di una lega di ferro e cobalto. Per uno schema del dispositivo si veda la fig. 2 (c). L'idea alla base dell'esperimento è di usare il ferromagnete per iniettare una corrente di spin, j_{yz} , lungo il braccio orizzontale della croce di alluminio. Se consideriamo l'eq. (3) otteniamo per l'espressione della corrente di carica che fluisce lungo il braccio verticale della croce:

(8) $$j_y = \sigma E_y + 4\gamma j_{xz} \ .$$

Poichè il braccio verticale costituisce un circuito aperto, la corrente j_y deve essere nulla. Questo genera un campo elettrico E_y e la differenza di potenziale V_{sH} associata, secondo lo schema della fig. 2 (c).
Come ultimo esempio consideriamo l'esperimento condotto da una collaborazione giapponese [10], dove è notevole il modo in cui nello stesso dispositivo si riesce a misurare sia l'effetto Hall di spin diretto che quello inverso. Per quest'ultimo, infatti, si usa uno schema simile a quello dell'esperimento di Harvard: la corrente di carica proveniente dal ferromagnete, costituito da una lega di ferro e nichel, è raccolta dal braccio superiore della croce di rame. In virtù del grado di polarizzazione della corrente proveniente dal ferromagnete, una corrente di spin fluisce nel filo di platino perpendicolarmente al suo asse longitudinale, come mostrato in fig. 2 (d). L'effetto Hall di spin inverso genera quindi, nel filo di platino, una corrente di carica che può essere misurata. La misura diretta dell'effetto Hall di spin si

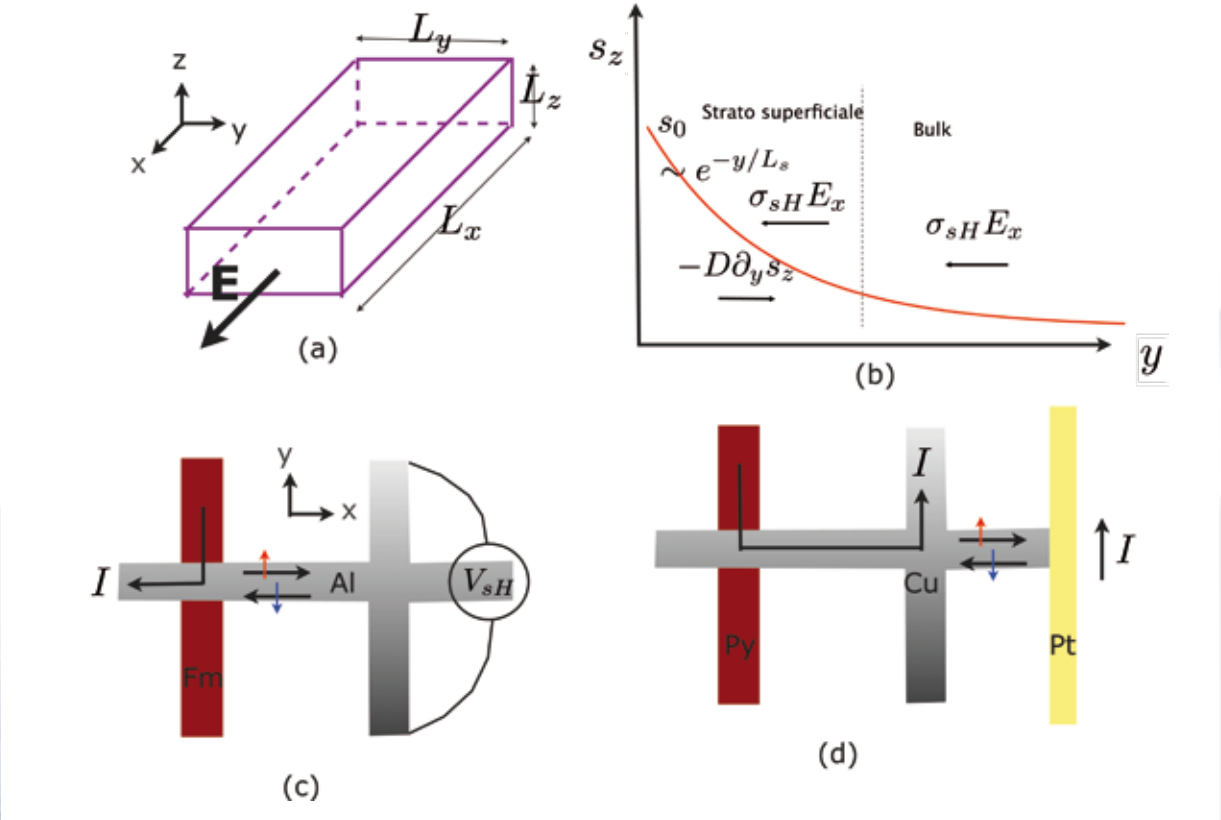


Fig. 2 (a) Conduttore in presenza di un campo elettrico esterno diretto lungo l'asse *x*. Le dimensioni del conduttore sono supposte grandi rispetto alla lunghezza di diffusione di spin L_s. (b) Andamento della polarizzazione di spin in prossimità di un bordo laterale. Il conduttore è supposto infinito nelle direzioni *z* ed *x* e nella direzione delle *y* positive. Lontano dal bordo, nel bulk, la polarizzazione è nulla e la corrente è $j_{yz}=\sigma_{sH}E_x$. Nell'approssimarsi al bordo, la polarizzazione di spin cresce esponenzialmente dando luogo ad una corrente di spin di diffusione che compensa gradualmente la corrente del bulk. (c) Schema del dispositivo usato nell'esperimento di Harvard con in rosso il ferromagnete ed in grigio una croce di alluminio. Dall'elettrodo ferromagnetico fluisce una corrente di carica polarizzata in spin. Tale corrente è raccolta verso sinistra come indicato in figura. All'interfaccia tra il ferromagnete e l'alluminio viene iniettata una pura corrente di spin che, per effetto Hall di spin inverso, genera una differenza di potenziale misurabile. (d) Schema del dispositivo usato dalla collaborazione giapponese. Il ferromagnete (in rosso) inietta una corrente di carica polarizzata che viene raccolta dal braccio superiore della croce di rame (in grigio). La pura corrente di spin iniettata nel braccio destro della croce di rame induce una corrente di carica, per effetto Hall di spin inverso, nel filo di platino (in giallo). La scelta del platino è dovuta all'intensità della sua interazione spin-orbita. Tale dispositivo può anche misurare l'effetto Hall di spin diretto. Se infatti una corrente di carica viene inviata nel filo di platino, per effetto Hall di spin, una polarizzazione di spin si genera all'interfaccia tra il platino e il rame. Tale interfaccia insieme con il ferromagnete funziona allora come un dispositivo a magnetoresistenza gigante [13].

opera, invece, inviando corrente nel filo di platino. In tal modo l'accumulo di spin all'interfaccia tra il platino e il rame agisce come il secondo elettrodo ferromagnetico di un dispositivo a magnetoresistenza gigante. Il principio di funzionamento di un dispositivo di questo tipo si basa sul fatto che la resistenza elettrica dipende dall'orientazione relativa della magnetizzazione nei due elettrodi ferromagnetici. Per un'introduzione al funzionamento di un tale tipo di dispositivo si veda, ad esempio, la Nobel Lecture di Albert Fert [13]. Notiamo infine che in questo esperimento il valore misurato della conducibilità Hall di spin è $\sigma_{sH} \sim 10^4\,\Omega^{-1}\,\mathrm{m}^{-1}$ ben quattro ordini di grandezza maggiore di quello misurato in esperimenti con semiconduttori. Inoltre, a differenza degli altri esperimenti, è stata verificata la robustezza dell'effetto che persiste anche a temperatura ambiente.

La rassegna di questi esperimenti dimostra come l'effetto Hall di spin sia ormai non solo una previsione teorica, ma anche un fenomeno reale e riproducibile, presente in sistemi diversi

e con un'intensità variabile su diversi ordini di grandezza. Questo fatto indica chiaramente che non abbiamo un unico meccanismo microscopico responsabile di quest'effetto. Nella prossima sezione ci dedichiamo allora ad una rassegna dei meccanismi fisici che sono stati finora studiati ed utilizzati per interpretare gli esperimenti.

4 Meccanismi microscopici dell'effetto Hall di spin

L'effetto Hall di spin origina dall'interazione spin-orbita, che si ottiene nel limite non relativistico dell'equazione di Dirac

$$H_{so} = \frac{\lambda_0^2}{4}\boldsymbol{\sigma} \times \nabla e\phi \cdot (-i\nabla) \,, \tag{9}$$

dove $\lambda_0 = \hbar/(mc) \sim 10^{-3}$ Å indica la lunghezza d'onda Compton divisa per 2π e fornisce la scala di lunghezza caratteristica dell'interazione spin-orbita nel vuoto. $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ è il vettore che ha per componenti le matrici di Pauli, mentre ϕ descrive il potenziale cui è soggetto l'elettrone. In un solido, generalmente, il valore della costante λ_0 è diverso da quello nel vuoto in quanto dipende sia dall'entità dell'interazione spin-orbita di un particolare atomo sia dall'effetto che le altre bande di energia hanno su quella in cui si trovano i portatori di carica (elettroni in banda di conduzione o buche in quella di valenza). Nell'arseniuro di gallio, ad esempio, la lunghezza d'onda Compton efficace è circa tre ordini di grandezza maggiore di quella nel vuoto ed è plausibile l'osservazione di effetti dovuti alla hamiltoniana (9).

Ci sono due utili punti di vista per comprendere l'effetto della hamiltoniana di spin-orbita. Nel primo caso, se l'hamiltoniana (9) può essere trattata in teoria delle perturbazioni, è facile vedere che l'elemento di matrice preso tra due stati, iniziale e finale, di onde piane è proporzionale al prodotto misto degli impulsi iniziale e finale e dello spin, determinando così l'asimmetria della diffusione menzionata nell'introduzione. Nel secondo caso, data la proporzionalità della hamiltoniana (9) all'operatore impulso, è utile talvolta introdurre il concetto di una correzione *anomala* (dipendente dallo spin) all'operatore velocità. Nel seguito illustrando i diversi meccanismi microscopici si farà ricorso ad entrambi i punti di vista.

Se consideriamo la descrizione standard degli stati elettronici in un solido, possiamo dividere il potenziale ϕ responsabile dell'interazione spin-orbita in due classi. Nella prima includiamo il potenziale che deriva dai nuclei che formano il reticolo cristallino e che quindi determina i livelli elettronici. In tale classe includiamo anche i potenziali che originano dal modo in cui un particolare sistema elettronico è realizzato. Ad esempio, in una tipica eterostruttura a semiconduttore, gli elettroni sono soggetti ad un potenziale di confinamento, che vincola il moto elettronico in due dimensioni. Nella seconda classe includiamo, invece, il potenziale che deriva da atomi di impurezza o difetti. Adottando una terminologia largamente diffusa in letteratura, indichiamo come *intrinseci* i meccanismi che originano dai potenziali della prima classe ed *estrinseci* i meccanismi dovuti a quelli della seconda classe.

4.1 I meccanismi estrinseci

Come menzionato nell'introduzione, la proposta iniziale di Dyakonov e Perel, così come le teorie riguardanti l'effetto Hall anomalo, si è basata sullo studio dei meccanismi estrinseci, che quindi analizziamo per primi. A tale scopo ricordiamo che il *modello standard* della conduzione elettrica in un solido, sia esso un metallo o un semiconduttore, considera gli elettroni come un gas di Fermi soggetto al potenziale di centri diffusionali (impurezze e difetti) situati in modo disordinato. A livello semiclassico, gli elettroni si muovono di moto browniano, caratterizzato da un cammino libero medio, $l = v_F \tau$, dove τ è il tempo intercorrente tra un urto ed il successivo. Nella fig. 3(a) mostriamo una rappresentazione intuitiva di tale modello. In tal modo si arriva alla formula di Drude per la conducibilità elettrica, $\sigma = e^2 n\tau/m$, ben nota dai corsi elementari di fisica dei solidi. Nell'approssimazione semiclassica, l'inverso del tempo τ è legato alla probabilità di transizione tra uno stato di vettore d'onda cristallino $\mathbf{k}$ ad uno $\mathbf{k}'$. Tale probabilità di transizione è calcolata considerando il modulo quadro dell'ampiezza di diffusione.

Nell'ambito dell'approssimazione semiclassica, la diffusione dovuta ai diversi atomi di impurezza viene sommata in modo incoerente ed è quindi sufficiente considerare cosa accade nel singolo evento di diffusione. Come mostrato nella fig. 3 (b), l'ampiezza di diffusione S è composta da due contributi, rispettivamente, indipendente e dipendente dallo spin. Il secondo contributo è dovuto all'interazione spin-orbita, come si può derivare dalla (9) usando la teoria delle perturbazioni. Il meccanismo illustrato nella 3 (b) corrisponde alla asimmetria nella diffusione di elettroni polarizzati discussa nell'introduzione. Tale meccansimo è usualmente denominato skew-scattering e deriva, matematicamente, dall'interferenza dei due contributi all'ampiezza di diffusione. Elettroni con spin opposto sono diffusi secondo angoli supplementari. La teoria microscopica di questo meccanismo, al primo ordine non nullo in teoria delle perturbazioni, conduce ad un contributo alla conducibilità Hall di spin

$$\sigma_{sH}^{SS} = \left(\frac{\lambda_0 k_F}{4}\right)^2 (2\pi N_0 |A|)\,\sigma \,, \tag{10}$$

dove k_F è il vettore d'onda di Fermi e N_0 la densità degli stati all'energia di Fermi. L'aspetto interessante di questa formula, oltre alla dipendenza lineare da λ_0^2, è la proporzionalità rispetto alla conducibilità elettrica. Da un lato, infatti, permette di dedurre il coefficiente γ delle formule (3), (4) relativo al meccanismo di skew-scattering. Dall'altro, tenendo

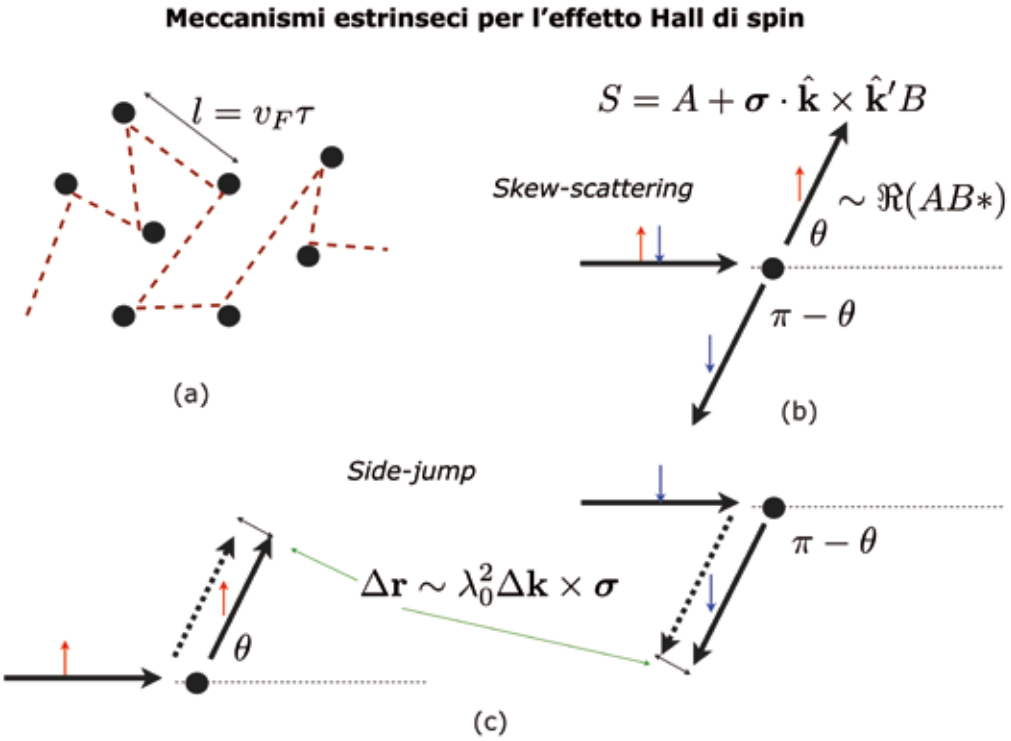


Fig. 3 (a) Traiettoria (linea tratteggiata in rosso) di un elettrone soggetto al potenziale di centri diffusionali (dischi neri) situati in modo disordinato. (b) L'ampiezza di diffusione *S*, in presenza di interazione spin-orbita può essere divisa in due contributi. *A* rappresenta il contributo indipendente dallo spin e determina il tempo di trasporto, $\tau^{-1} \propto |A|^2$. Inoltre, nella cosidetta approssimazione di Born, l'ampiezza *A* coincide con la trasformata di Fourier del potenziale di diffusione ϕ ed è quindi reale. Al primo ordine nell'interazione spin-orbita, l'ampiezza *B* è puramente immaginaria, $B \propto i\lambda_0^2$ e determina il tempo di rilassamento di spin di Elliott-Yafet, $\tau_s^{-1} \propto |B|^2$. In approssimazione di Born, poichè *A* e *B* sono sfasati di $\pi/2$, non si ha interferenza e quindi il modulo quadro dell'ampiezza totale non dipende dalla proiezione dello spin su un asse perpendicolare (parallelo a $\mathbf{k}\times\mathbf{k}'$) al piano di diffusione. Per avere un effetto di interferenza, e quindi skew-scattering, bisogna andare oltre l'approssimazione di Born, in modo che *A* diventi complessa. (c) In una descrizione semiclassica, lo spostamento laterale, o side-jump, si può ottenere integrando la variazione anomala della velocità sull'arco di tempo durante il quale si verifica l'evento di diffusione. Poichè la componente anomala della velocità è $\delta\mathbf{v} \propto \nabla\phi$ e l'equazione del moto per l'impulso è $e\nabla\phi \sim (d\mathbf{k}/dt)$, si ottiene l'espressione mostrata nella figura.

conto della formula (8), permette di dedurre che la differenza di potenziale V_{sH} misurata nell'effetto Hall di spin inverso è proporzionale alla resistività elettrica.

In aggiunta all'effetto di skew-scattering, l'interazione spin-orbita introduce un ulteriore meccanismo che determina la separazione di elettroni con spin opposto, come illustrato in figura 3 (c). Dalla forma della hamiltoniana di spin-orbita nella (9), è agevole rendersi conto che l'operatore velocità è modificato con un contributo anomalo dipendente dallo spin, $\delta\mathbf{v} \sim \lambda_0^2\,\boldsymbol{\sigma}\times\nabla\phi$. Tale contributo anomalo determina, usando un linguaggio semiclassico, uno spostamento laterale, o side-jump, della traiettoria di diffusione. Tale spostamento laterale ha segno opposto per le due proiezioni di spin e contribuisce alla separazione spaziale delle due popolazioni di spin. In questo caso, la teoria microscopica produce il seguente contributo alla conducibilità Hall di spin:

$$\sigma_{sH}^{SJ} = e^2\frac{\lambda_0^2}{4}n \quad . \tag{11}$$

A differenza del termine di skew-scattering, quello di side-

jump dipende solo dalla densità elettronica. La differenza di potenziale V_{sH} acquista quindi una dipendenza quadratica dalla resistività. La differenza nella dipendenza dalla resistività è quindi un utile indicatore per determinare quale meccanismo fisico, tra quelli di tipo estrinseco, sia maggiormente rilevante in un dato esperimento. Mediante un'analisi di questo tipo si è portati ad esempio ad attribuire al meccanismo di side-jump l'effetto Hall di spin osservato nel platino e nell'alluminio. Nel caso del film di arseniuro di gallio, invece, lo skew-scattering ed il side-jump danno un contributo all'effetto Hall di spin dello stesso ordine di grandezza e si ritiene che entambi i meccanismi estrinseci siano responsabili del comportamento osservato. Infine, per l'effetto Hall di spin osservato nel gas bidimensionale di buche, l'opinione prevalente è che l'origine sia dovuta ai meccanismi intrinseci che andiamo a discutere nella prossima sottosezione.

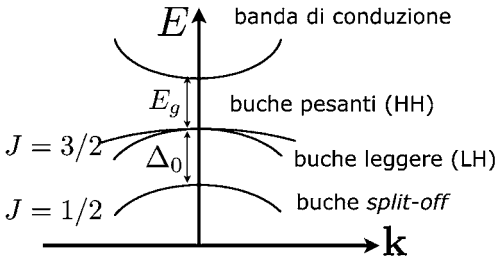
4.2 I meccanismi intrinseci

I meccanismi intrinseci sono stati proposti per sistemi semiconduttori e possono essere, a loro volta, divisi in due gruppi, distinti dalla presenza o meno della simmetria per inversione spaziale. Per capire in che modo l'interazione spin-orbita opera nei due gruppi, è utile richiamare la struttura a bande tipica dei semiconduttori. Nella classificazione delle bande si fa riferimento agli orbitali atomici dai quali i livelli energetici del solido sono formati e di cui conservano il carattere. Poichè siamo qui interessati a fenomeni di trasporto, possiamo limitarci a considerare solo le bande vicino al livello di Fermi come mostrato in fig. 4 (a), cioè le bande di valenza e di conduzione, separate dalla gap E_g.
Le bande di conduzione, provenienti dall'ibridizzazione di orbitali atomici *s* sono doppiamente degeneri ed hanno il momento angolare totale coincidente con lo spin, cioè $J = S = 1/2$. Le bande di valenza, invece, formate a partire da orbitali atomici *p*, a causa dell'interazione spin-orbita atomica, si dividono in due multipletti con momento angolare totale $J = 3/2$ e $J = 1/2$. Al punto Γ, cioè a $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$, la separazione in energia, Δ_0, tra il multipletto $J = 3/2$ e quello $J = 1/2$ misura l'intensità dell'interazione spin-orbita in un dato materiale. In fig. 4 (b) sono mostrati i valori per alcuni semiconduttori più noti.
Come ha mostrato Joaquin M. Luttinger, la forma della bande nell'intorno del punto Γ può essere determinata sulla base di argomenti di simmetria. Infatti, se è presente la simmetria per inversione spaziale, le bande possono dipendere soltanto da due invarianti, $\mathbf{k}\cdot\mathbf{k} = k^2$ e $(\mathbf{k}\cdot\mathbf{J})^2$. Nel caso della banda di conduzione e di quella di valenza con $J = 1/2$, si ha che $(\mathbf{k}\cdot\mathbf{J})^2 = 1/4(\mathbf{k}\cdot\boldsymbol{\sigma})^2 = \mathbf{k}\cdot\mathbf{k}$, e quindi la relazione di dispersione assume la forma standard della particella libera. Diverso è il caso per il multipletto $J = 3/2$, le cui bande sono descritte dalla hamiltoniana di Luttinger, mostrata in fig. 4 (c) e costruita come una combinazione dei due invarianti $\mathbf{k}\cdot\mathbf{k} = k^2$ e $(\mathbf{k}\cdot\mathbf{J})^2$.
La hamiltoniana di Luttinger è alla base della proposta di Murakami e collaboratori [4], che qui accenniamo brevemente. Le due bande delle buche pesanti e leggere corrispondono agli autovalori della hamiltoniana con $J_z = \pm 3/2$ e $J_z = \pm 1/2$, rispettivamente. La base degli autovettori corrisponde a scegliere l'asse di quantizzazione dello spin lungo la direzione del vettore d'onda **k** ed il passaggio a tale base è descritto da una matrice di trasformazione $U(\mathbf{k})$. Se usiamo per la funzione d'onda la rappresentazione in cui è diagonale l'operatore vettore d'onda **k**, l'operatore posizione assume la forma $i\nabla_k$ e nel passaggio alla base degli autovettori si trasforma in $i\nabla_k - \mathbf{A}(\mathbf{k})$, dove appare un potenziale vettore di pura gauge definito nello spazio **k** da $\mathbf{A}(\mathbf{k}) = -iU(\mathbf{k})\nabla_k U^{\dagger}(\mathbf{k})$. Se il semiconduttore è poco drogato con buche, soltanto la banda delle buche pesanti è parzialmente occupata. Il potenziale vettore proiettato nella banda delle buche pesanti ha allora rotore non nullo nello spazio **k** e dà luogo ad un effetto fisico che formalmente corrisponde ad una "forza" di Lorentz nello spazio **k**. Infatti, mentre nel caso della ordinaria forza di Lorentz bisogna operare la cosidetta sostituzione minimale $-i\hbar\nabla_r \rightarrow -i\hbar\nabla_r - e\mathbf{A}(r)$, nel caso presente i ruoli delle due coordinate canoniche sono invertiti e si ha la sostituzione $-i\nabla_k \rightarrow -i\nabla_k - e\mathbf{A}(\mathbf{k})$. La "forza" di Lorentz nello spazio **k** ha, quindi, la forma $(d\mathbf{k}/dt) \times \mathbf{B}(\mathbf{k}) \propto e\mathbf{E} \times \mathbf{J}$, dove si è usata l'equazione del moto per il vettore d'onda in presenza di un campo elettrico ed il fatto che il campo magnetico efficace, $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{k})$, è diretto lungo la direzione dello spin per gli autostati elettronici. Questa "forza" di Lorentz efficace agisce come una correzione anomala all'operatore velocità e produce una corrente di spin perpendicolare sia al campo elettrico applicato che allo spin elettronico. Il risultato è una conducibilità Hall di spin

$$\sigma_{sH}^{IL} = \frac{e^2 k_F}{4\pi^2 \hbar} , \qquad (12)$$

dove k_F è il vettore d'onda di Fermi relativo alla banda delle buche pesanti. L'esponente *IL* indica l'origine intrinseca dovuta alla hamiltoniana di Luttinger. Il calcolo microscopico dettagliato modifica il coefficiente numerico della (12), ma conferma la validità del meccanismo fisico proposto. Una stima del valore numerico della espressione (12) produce $\sigma_{sH} \sim \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$, ma al momento non ci sono esperimenti riguardanti un gas di buche tridimensionale con cui fare un confronto diretto.
In presenza di simmetria per inversione spaziale, l'effetto Hall di spin è dovuto al meccanismo intrinseco descritto dalla (12). Questo è il caso dei semiconduttori del gruppo IV, come il silicio ed il germanio. I semiconduttori III-V, come l'arseniuro di gallio, presentano tipicamente il reticolo della zincoblenda

Struttura a bande dei semiconduttori



(a)

$\Delta_0(\text{in eV})$

Si	0,044
Ge	0,29
GaAs	0,34
InAs	0,38
InSb	0,82

(b)

Hamiltoniana di Luttinger per il multipletto J=3/2

$$H_L = \frac{\hbar^2}{m}\left[\left(\gamma_1 + \frac{5}{2}\gamma_2\right)\frac{\mathbf{k}^2}{2} - \gamma_3(\mathbf{k}\cdot\mathbf{J})^2 + (\gamma_3 - \gamma_2)\sum_i k_i^2 J_i^2\right] \qquad \text{(c)}$$

Asimmetria d'inversione spaziale: termini di Dresselhaus

$$H_{6c}^{BIA} = a_{42}k_x(k_y^2 - k_z^2)\sigma_x + \text{p.c.}$$

$$H_{8c}^{BIA} = \frac{2}{\sqrt{3}}C_k\left[k_x\{J_x, J_y^2 - J_z^2\} + \text{p.c.}\right] + b_{41}k_x(k_y^2 - k_z^2)J_x + \text{p.c.} \qquad \text{(d)}$$

Fig. 4 (a) Struttura a bande tipica dei semiconduttori. Al punto **k** = (0, 0, 0) le bande di valenza sono quattro volte degeneri, come richiesto dal fatto che appartengono al multipletto $J = 3/2$. Per valori finiti del vettore d'onda cristallino parte della degenerazione è rimossa e si hanno due bande, convenzionalmente indicate come buche pesanti (dall'inglese heavy holes (HH)) e buche leggere (light holes (HH)). Il doppietto $J = 1/2$ delle bande di valenza è denominato banda separata (split-off band). (b) I valori tipici della separazione tra i multipletti delle bande di valenza per alcuni semiconduttori. Maggiore è il valore di Δ_0, maggiore è l'interazione spin-orbita per un dato materiale. (c) Il multipletto $J = 3/2$ delle bande di valenza è descritto dalla hamiltoniana di Luttinger, derivata con argomenti di teoria dei gruppi. J_x, J_y e J_z rappresentano le componenti del momento angolare corrispondenti a $J = 3/2$. I parametri γ_i $i = 1, 2, 3$ dipendono dal particolare semiconduttore considerato. (d) La rottura della simmetria per inversione spaziale introduce, nel caso dei reticoli con la struttura della zincoblenda, ulteriori termini, che danno luogo al meccanismo di Dresselhaus. Il termine H_{6c}^{BIA} si riferisce alla banda di conduzione, mentre H_{8c}^{BIA} a quella di conduzione. La scrittura p.c. indica la presenza di altri termini ottenuti mediante una permutazione ciclica degli indici relativi alle componenti *x*, *y*, e *z*. I parametri a_{42}, b_{41}, C_k sono specifici per un dato materiale.

con rottura della simmetria per inversione spaziale. Per tali sistemi, quindi, oltre al meccanismo suggerito da Murakami e collaboratori, l'effetto Hall di spin può aver origine dall'interazione spin-orbita associata alla rottura della simmetria per inversione spaziale. Tale interazione assume la forma di un accoppiamento Zeeman efficace che rimuove la degenerazione di spin, come è stato illustrato con eleganti argomenti di teoria dei gruppi da Gene Dresselhaus. Infatti, in virtù del teorema di Kramers, lo stato con impulso cristallino **k** e spin ↑ è, in presenza di simmetria per inversione temporale, degenere con lo stato –**k** e spin ↓, cioè $E(\mathbf{k}, \uparrow) = E(-\mathbf{k}, \downarrow)$. Se si ha, in aggiunta, simmetria per inversione spaziale, segue che $E(-\mathbf{k}, \downarrow) = E(\mathbf{k}, \downarrow)$, cioè la degenerazione di spin. Se la simmetria per inversione spaziale viene a mancare, si ha invece che $E(\mathbf{k}, \uparrow) \neq E(\mathbf{k}, \downarrow)$, corrispondente ad un campo magnetico *interno* dipendente dal vettore d'onda **k**.

In fig. 4(d), a titolo esemplificativo, riportiamo la forma dei termini hamiltoniani responsabili del meccanismo di Dresselhaus.
Oltre al meccanismo di Dresselhaus, che è un effetto di volume, la simmetria per inversione spaziale può essere rotta mediante la realizzazione di un dispositivo strutturalmente asimmetrico. Questo è il caso, ad esempio, di un gas bidimensionale. Tipicamente un tale dispositivo si ottiene confinando in una direzione i portatori di carica siano essi elettroni o buche, come indicato nella fig. 5(a). In questa situazione un potenziale di confinamento asimmetrico produce il cosidetto termine di Rashba. Rispetto al meccanismo di Dresselhaus, quello di Rashba presenta il vantaggio di poter essere modulato, applicando ad esempio degli opportuni accoppiamenti capacitivi in modo da aumentare o diminuire il campo elettrico responsabile del confinamento. La proposta dell'effetto Hall di spin di Sinova e collaboratori [5] è stata appunto fatta per il cosiddetto modello di Rashba. Tale modello consiste in un gas di Fermi bidimensionale con l'aggiunta del termine di spin-orbita di Rashba

$$H_R = \frac{1}{2m}\left(p_x^2 + p_y^2\right) + \frac{\alpha}{\hbar}\left(\sigma_x p_y - \sigma_y p_x\right) \ , \tag{13}$$

dove m è la massa efficace, p_x e p_y gli operatori impulso, σ_x e σ_y le matrici di Pauli descriventi le componenti x e y dello spin ed α una costante proporzionale all'interazione spin-orbita del materiale e al campo elettrico di confinamento diretto perpendicolarmente al gas bidimensionale. Naturalmente la hamiltoniana di Rashba può esser scritta anche per il gas di buche formato con gli stati elettronici delle bande di valenza. In tal caso le matrici di Pauli nella (13) devono essere sostituite dalle corrispondenti matrici di spin per $J = 3/2$.
Gli autostati e gli autovalori della hamiltoniana (13) si ottengono facilmente e sono illustrati in fig. 5 (cf. (b) e (c)).
Tale modello è stato studiato molto intensamente per almeno due ragioni. Da un lato, il grande sviluppo tecnologico dei semiconduttori ha consentito la realizzazione di gas bidimensionali di elevata qualità ed è lecito aspettarsi che un futuro utilizzo dell'effetto Hall di spin abbia una ragionevole probabilità di implementazione in dispositivi di questo tipo. Dall'altro, il modello di Rashba dell'eq. (13) ha attratto l'interesse della ricerca teorica in quanto rappresenta il contesto più semplice e nello stesso tempo non banale per lo studio dell'accoppiamento dei gradi di libertà di carica e di spin nei fenomeni di trasporto. In generale, tale accoppiamento è originato dai termini anomali nell'operatore velocità, dovuti all'interazione spin-orbita. Può però essere utile dare uno sguardo più da vicino al modello di Rashba limitandoci ad un semplice argomento semiclassico. Il termine di interazione spin-orbita dell'eq. (13) può essere visto come un termine di tipo Zeeman con un campo magnetico efficace giacente nel piano del gas bidimensionale e dipendente dall'impulso, $\mathbf{b}(\mathbf{p}) = -(2\alpha/\hbar^2)\ \mathbf{p} \times \hat{\mathbf{e}}_z$. L'equazione del moto per lo spin di un elettrone con impulso $\mathbf{p}$ assume quindi la forma standard di un moto di precessione

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{s}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{s} \times \mathbf{b} \ . \tag{14}$$

Se l'impulso è un buon numero quantico, la (14) ci dice che lo spin è conservato lungo una direzione nel piano perpendicolare all'impulso. Per capire l'insorgenza dell'effetto Hall di spin, bisogna però vedere cosa accade quando un campo elettrico è applicato nel piano del gas bidimensionale. Prendendo la derivata seconda rispetto al tempo della (14) si ottiene

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathbf{s}}{\mathrm{d}t^2} = \mathbf{b} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{s}) + \frac{\mathrm{d}\mathbf{b}}{\mathrm{d}t} \times \mathbf{s} \ . \tag{15}$$

Nella (15) il primo termine a membro di destra è l'usuale termine di precessione dovuto al campo magnetico efficace **b**. La dipendenza temporale del secondo termine è legata alla dinamica dell'impulso in virtù del fatto che $(\mathrm{d}\mathbf{b}/\mathrm{d}t) = (-2\alpha/\hbar^2)\ (\mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}t) \times \hat{\mathbf{e}}_z$. La variazione di impulso dovuta al campo elettrico tende a mutare il campo magnetico efficace e, di conseguenza, lo spin elettronico, nel riallinearsi, acquista una componente fuori piano lungo l'asse $\hat{\mathbf{e}}_z$, come illustrato in fig. 5 (d). Usando, infatti, l'equazione semiclassica del moto $(\mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}t) = -e\mathbf{E}$, il secondo termine della (15) produce, in risposta lineare ad un campo elettrico diretto lungo l'asse $\hat{\mathbf{e}}_x$, una polarizzazione *stazionaria* di spin lungo l'asse $\hat{\mathbf{e}}_z$ che ha segno discorde su zone opposte della superficie di Fermi, $s_z \sim E_x p_y$. Ciò genera una corrente di spin, $j_{yz} = (p_y/m)s_z$, poichè questa, a differenza della polarizzazione s_z, è una funzione pari dell'impulso e quindi produce un risultato finito quando si consideri il contributo di tutta la sfera di Fermi. La conducibilità Hall di spin assume allora la forma derivata da Sinova e collaboratori

$$\sigma_{sH}^{IR} = \frac{e^2}{8\pi\hbar} \ , \tag{16}$$

dove l'esponente *IR* indica l'origine intrinseca dovuta alla hamiltoniana di Rashba. Il fatto notevole della formula (16) è l'indipendenza dal valore dell'interazione spin-orbita e da altri parametri fisici caratterizzanti un dato materiale. In realtà il calcolo microscopico, pur confermando la derivazione semiclassica, chiarisce che la formula (16) ha una validità limitata, in quanto la ricerca di una soluzione *stazionaria* della (15) richiede la presenza di un meccanismo di rilassamento, come, ad esempio, quello dovuto alla diffusione da impurezze e difetti. Allora, benché l'interazione spin-orbita del termine di Rashba abbia un'origine intrinseca, lo studio del suo effetto sul trasporto non può esser fatto senza tener conto anche dell'effetto estrinseco delle impurezze. In presenza di queste

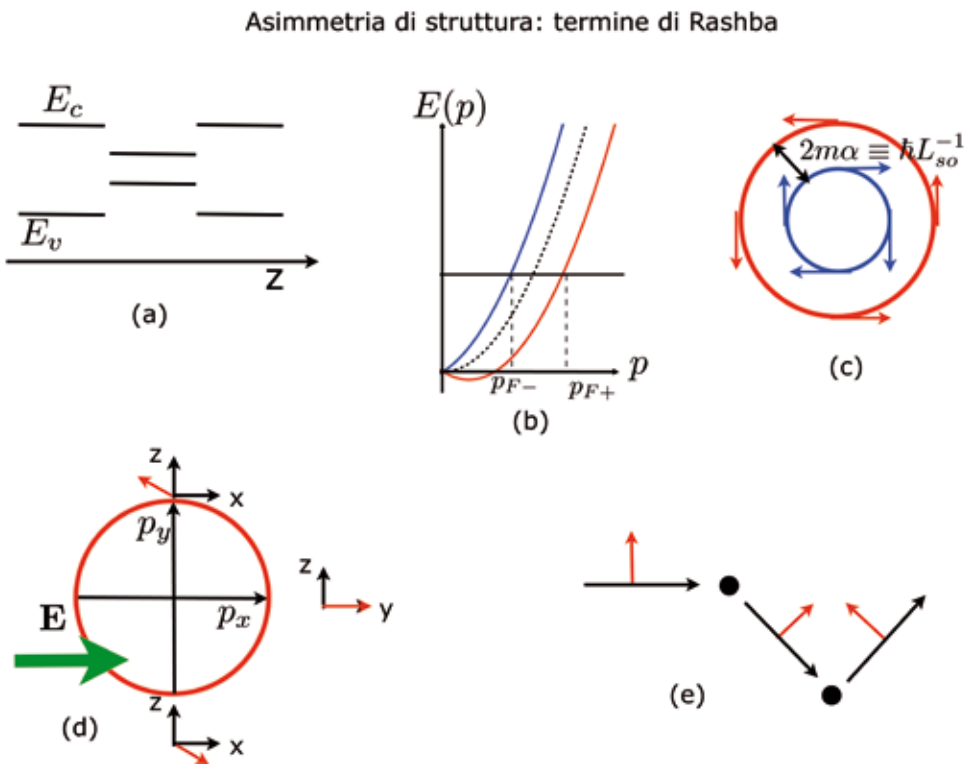


Fig. 5 (a) Interponendo uno strato di semiconduttore a gap più stretto tra due a strati di un semiconduttore a gap più largo, il profilo delle bande di conduzione e di valenza, al variare della direzione di crescita *z*, presenta una buca di potenziale che confina il moto elettronico nel piano *xy*. In un'eterostruttura reale si utilizza un'opportuna sequenza di strati di semiconduttori diversi in modo da ottenere il profilo delle bande desiderato, simmetrico o asimmetrico. (b) Il termine di Rashba presente nell'eq. (13) del testo separa i livelli elettronici in due bande con dispersione $E_+(p) = p^2/2m - (\alpha/\hbar)p$ (linea rossa) ed $E_-(p) = p^2/2m - (\alpha/\hbar)p$ (linea blu). La linea tratteggiata indica la dispersione in assenza dell'interazione spin-orbita. La linea continua orizzontale indica il livello di Fermi, che intersecando le due dispersioni $E_-(p)$ e $E_+(p)$ determina i due impulsi di Fermi, p_{F-} e p_{F+}. (c) Per ogni stato elettronico, lo spin giace nel piano *xy* e punta in direzione perpendicolare all'impulso, in modo diverso per le due bande, come indicato in figura. La differenza degli impulsi di Fermi nelle due bande determina la scala delle lunghezze caratteristica dell'interazione spin-orbita, $L_{so} = \hbar/(2m\alpha)$. (d) Applicando un campo elettrico lungo la direzione *x* (indicato con una freccia verde), lo spin degli elettroni sente un momento torcente che tende a farli precedere intorno all'asse *y*. Gli elettroni con impulso lungo l'asse *x*, hanno lo spin allineato lungo l'asse *y* e non sono quindi disturbati da questa precessione. Quelli con impulso lungo l'asse *y*, avendo lo spin allineato lungo l'asse *x*, precedono verso l'alto o il basso in funzione del verso positivo o negativo dell'impulso. In tal modo si genera una componente lungo l'asse *z* con segno dipendente dalla componente dell'impulso lungo l'asse *y*. (e) Origine del meccanismo di rilassamento di Dyakonov-Perel: ad ogni collisione con un centro diffusionale d'impurezza, l'impulso elettronico cambia bruscamente direzione e conseguentemente la direzione verso cui punta lo spin. La successione delle collisioni determina una progressiva perdita d'informazione della direzione iniziale dello spin. L'espressione del tempo di rilassamento di Dyakonov-Perel si ottiene richiedendo che tale tempo sia pari a quello necessario all'elettrone a diffondere su una distanza pari alla lunghezza L_{so}, cioè $\tau_{DP} = L_{so}^2/D$.

ultime l'equazione del moto dello spin elettronico non può più avere la semplice forma della (14), ma richiede l'aggiunta dei cosidetti termini di rilassamento di spin di Dyakonov-Perel. Un'illustrazione intuitiva di questo meccanismo è mostrata in fig. 5(e). Pur tenendo conto di queste precisazioni, la formula (16) fornisce l'unità di misura naturale per la conducibilità Hall di spin in un sistema bidimensionale in modo analogo a quella di carica. In particolare, la (16) fornisce il corretto ordine di grandezza per interpretare l'effetto Hall di spin osservato nell'esperimento con il gas di buche, per il quale è anche possibile considerare l'effetto del termine di Rashba con le opportune cautele.
Al termine di questa rassegna dei meccanismi fisici responsabili dell'effetto Hall di spin, notiamo che, con molta probabilità, nell'analisi di un esperimento può essere importante tener conto della contemporanea presenza di meccanismi estrinseci ed intrinseci [9,11]. L'analisi di tale situazione, anche se diventa necessariamente più complicata, può nondimeno esser sviluppata ricorrendo alla formula di Kubo o ad un'opportuna generalizzazione quantistica dell'equazione del trasporto di Boltzmann [14]. Tale trattazione però esula dallo scopo che ci siamo qui prefissi di illustrare l'origine fisica dell'effetto Hall di spin e rimandiamo per maggiori dettagli a recenti articoli di rassegna che, ad un livello più specialistico, descrivono bene l'impressionante sviluppo della ricerca in questo campo [15,16].

5 Conclusioni

A parte il lavoro pionieristico di Dyakonov e Perel nel 1971, sono trascorsi dieci anni dalla proposta di Hirsch [3], con cui potremmo dire è iniziata *l'era moderna* dell'effetto Hall di spin. Le conferme sperimentali cha abbiamo qui illustrato appaiono convincenti. Certamente la comprensione dettagliata delle diverse modalità in cui l'effetto Hall di spin si manifesta e come i diversi meccanismi interagiscano tra loro è appena all'inizio e molto lavoro sia teorico che sperimentale resta da fare, soprattutto in vista di un utilizzo tecnologico dell'effetto Hall di spin. Al momento, infatti, è difficile fare previsioni sulla reale applicabilità di quest'effetto per la realizzazione di dispositivi spintronici e soprattutto sui tempi per arrivarci. Se guardiamo alla rapidità di come l'effetto di magnetoresistenza gigante precedentemente citato [13] è passato dall'essere un argomento della ricerca di punta al principio costruttivo degli attuali dispositivi di memoria dei nostri computer, ci si può augurare che l'utilizzo pratico dell'effetto Hall di spin non ci faccia troppo aspettare.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro con i quali ho avuto modo di condividere lo studio degli effetti dell'interazione spin-orbita sul trasporto di carica e spin: Claudio Castellani, Michael Dzierzawa, Cosimo Gorini, Procolo Lucignano, Mirco Milletarì, Arturo Tagliacozzo, e soprattutto Peter Schwab.
Un grazie anche a Massimo Capone ed Enrico Silva per i preziosi suggerimenti avuti durante la preparazione di questo articolo.

Bibliografia

[1] M. I. Dyakonov and V. I. Perel, *JETP Lett.* ,13 (1971) 467.
[2] M. I. Dyakonov and V. I. Perel, *Phys. Lett.* A, 35 (1971) 459.
[3] J. E. Hirsch, *Phys. Rev. Lett.,* 83 (1999) 1834.
[4] S. Murakami, N. Nagaosa, and S.-C. Zhang, *Science,* 301 (2003) 1348.
[5] J. Sinova, D. Culcer, Q. Niu, N. Sinitsyn, T. Jungwirth, and A. H. MacDonald, *Phys. Rev. Lett.*, 92 (2004) 126603.
[6] Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, *Phys. Rev. Lett.,* 93 (2004) 176601.
[7] J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova, and T. Jungwirth, *Phys. Rev. Lett.*, 94 (2005) 047204.
[8] S. Valenzuela and M. Thinkam, *Nature,* 442 (2006) 176.
[9] V. Sih, R. C. Myers, Y. K. Kato, W. H. Lau, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, *Nature Phys.,* 1 (2005) 31.
[10] T. Kimura, Y. Otani, T. Saito, S. Takahashi, and S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.,* 98 (2007) 156601.
[11] J. Wunderlich, A. C. Irvine, J. Sinova, B. G. Park, L. P. Zârbo, X. L. Xu, B. Kaestner, V. Novâk, and T. Jungwirth, *Nature Phys.,* 5 (2009) 675.
[12] E. H. Hall, *Philos. Mag.,* 12 (1881) 157.
[13] A. Fert, *Rev. Mod. Phys.,* 80 (2008) 1517.
[14] R. Raimondi and P. Schawb, *EPL,* 87 (2009) 37008.
[15] J. I. Inoue, T. K. , G. E. W. Bauer, and L. W. Molenkamp, *Semicond. Sci. Technol.,* 24 (2009) 4003.
[16] G. Vignale, *J. Supercond. Nov. Magn.,* 23 (2010) 3.

Roberto Raimondi

Roberto Raimondi è Professore Associato di Fisica della Materia presso l'Università degli Studi Roma Tre. Dopo aver conseguito il Dottorato in Fisica presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" nel 1992, ha lavorato alcuni anni all'estero nel Regno Unito ed in Francia. Si è occupato a livello teorico di sistemi elettronici disordinati, superconduttività e sistemi mesoscopici. Attualmente i suoi interessi di ricerca prevalenti vertono sulla spintronica ed in particolare sugli effetti dell'interazione spin-orbita nel trasporto di carica e spin in gas elettronici bidimensionali.

ASTROARCHEOLOGIA CON GLI AMMASSI STELLARI

TERZAN 5: IL PRIMO FOSSILE NEL BULGE DELLA GALASSIA

FRANCESCO R. FERRARO, BARBARA LANZONI, EMANUELE DALESSANDRO, ALESSIO MUCCIARELLI
Dipartimento di Astronomia, Università di Bologna, Bologna, Italia

Si chiama Terzan 5 ed è il primo "fossile" scovato nel cuore della Via Lattea. In questo ammasso stellare sono state scoperte due distinte generazioni di astri. Potrebbe quindi trattarsi del relitto di un sistema molto più grande, che 12 miliardi di anni fa ha contribuito a formare il bulge della Galassia.

1 La Via Lattea e la formazione delle galassie

La Galassia a cui apparteniamo, la Via Lattea, è costituita da un disco di gas e stelle distribuiti lungo una struttura a spirale, da un alone di stelle pressoché sferico e molto esteso e da un rigonfiamento centrale (detto bulge) ricco di stelle, gas e spesse nubi di polvere (fig. 1). Il disco ha un diametro di circa 50 kpc (circa 100 mila anni luce) ed uno spessore massimo di appena 1.5 kpc. Ruota a più di 200 km/s attorno al centro galattico ed è costituito da stelle di diverse età, anche molto giovani o addirittura in via di formazione nelle regioni ricche di gas (Inserto 1). La Terra e il Sistema Solare si trovano sul disco, a circa 8 kpc dal centro. L'alone puo' essere immaginato come un'enorme struttura sferica di circa 30–40 kpc di diametro, al centro della quale si trova il disco e all'interno della quale orbitano stelle molto vecchie (di circa 12–13 miliardi di anni) e povere di metalli, talvolta organizzate in sistemi densi chiamati "ammassi globulari" (sez. 2). Il bulge è il "cuore" della Via Lattea, un'altra struttura sferoidale situata nel centro del disco, molto più piccola dell'alone (il suo diametro è di circa 6 kpc), estremamente ricca di stelle vecchie con alto contenuto metallico, e fortemente oscurata da spesse nubi di polvere. La presenza di queste nubi fa sì che il bulge sia la regione della Via Lattea più inaccessibile alle osservazioni astronomiche: la polvere, infatti, assorbe gran parte della luce ottica, in una maniera che dipende anche dalla direzione di osservazione (assorbimento differenziale), e solo la radiazione infrarossa riesce a portarci informazioni dirette da quelle regioni galattiche e dagli oggetti che le popolano.

Nell'Universo esistono miliardi di altre "galassie a spirale" simili alla Via Lattea, prima fra tutte Andromeda, la nostra vicina più prossima, che si trova ad una distanza di circa 2 milioni di anni luce da noi. Esistono inoltre altri tipi di galassie, che vengono generalmente classificate come "lenticolari", "ellittiche" ed

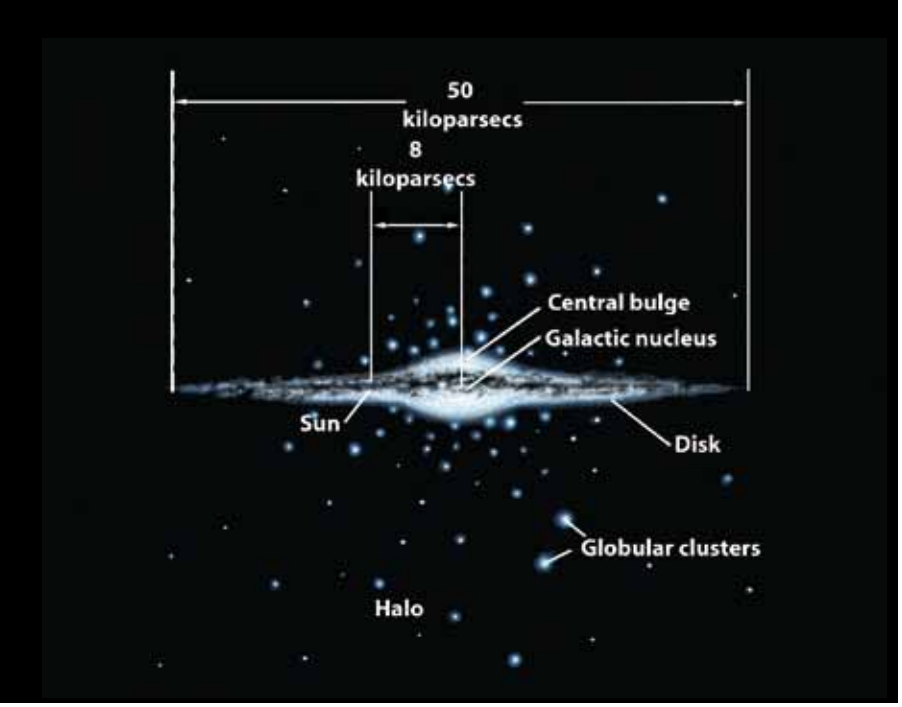


Fig. 1 Rappresentazione schematica della struttura della Via Lattea. Il disco è costituito da stelle giovani e gas. Il Sole e il Sistema Solare si trovano sul disco a circa 8 kpc dal nucleo della Galassia. Il bulge è il rigonfiamento centrale, fortemente oscurato da spesse nubi di polvere, dentro al quale orbita Terzan 5. L'alone è una struttura pressoché sferica e molto ampia (circa 30–40 kpc di diametro) che circonda il disco e il bulge ed è ricco di stelle vecchie e di ammassi globulari.

"irregolari". In particolare, le galassie ellittiche sono di forma sferoidale, essenzialmente prive di gas e costituite da stelle vecchie, con caratteristiche molto simili a quelle dei bulge delle spirali. Uno dei principali problemi astrofisici tuttora aperti riguarda i meccanismi di formazione delle galassie di diverso tipo. Lo scenario attualmente più accreditato è il cosiddetto "modello gerarchico", secondo il quale le spirali si formano per il collasso gravitazionale di dischi di gas in rotazione, mentre le ellittiche sono generate da ripetuti eventi di cattura reciproca e fusione (merging) tra galassie più piccole, formatesi precedentemente. Tuttavia, questo modello non riesce ancora a spiegare diverse proprietà delle galassie e le incertezze sono ancora maggiori riguardo ai dettagli di come si formano le loro strutture interne, quali gli aloni e soprattutto i bulge. Infatti, oltre che da processi violenti e rapidi avvenuti in epoche molto remote (per esempio, processi di merging e/o di collasso gravitazionale veloce), la struttura di molti bulge (tra cui anche quello della nostra Galassia) potrebbe essere spiegata anche dalla cosiddetta "evoluzione secolare", ovvero l'interazione a lungo termine di stelle e nubi di gas con sotto-sistemi quali un disco ovale o una barra centrale [1]. Per riuscire finalmente a svelare il mistero della formazione delle galassie è di fondamentale importanza non solo studiare come evolvono le loro proprietà e la loro morfologia nel corso del tempo cosmico, ma anche investigare in grande dettaglio le caratteristiche delle galassie più vicine (prima fra tutte la Via Lattea), alla ricerca di reperti "fossili" capaci di rivelarne la storia passata.

2 Astroarcheologia: allaricerca di fossili galattici

Gli ammassi globulari sono aggregati stellari densi e popolosi, di forma pressocché sferica, che possono contenere fino a oltre un milione di stelle. Si osservano soprattutto nell'alone, ma sono presenti anche nel bulge e nel disco della Galassia. Sono tra gli oggetti più belli che si possano osservare nel cielo, ma la loro importanza va ben oltre il loro magnifico aspetto. Sono autentiche pietre miliari dell'astrofisica, il cui studio è intimamente connesso con problematiche fondamentali che spaziano dall'evoluzione e la dinamica stellare, alla formazione della Via Lattea e delle galassie esterne alla nostra, fino alla struttura e alle proprietà dell'Universo all'epoca in cui era appena nato.
In particolare, gli ammassi globulari che popolano la Via Lattea possono essere considerati veri e propri reperti fossili risalenti alle prime e violente fasi della formazione della la nostra Galassia: essi sono stati testimoni di tutti gli eventi che, attraverso 12 miliardi di anni, hanno forgiato la Via Lattea così come la osserviamo oggi. Inoltre l'atmosfera delle stelle che li popolano conserva ancora la stessa composizione chimica che caratterizzava l'Universo di alcuni miliardi di anni fa (Inserto 1). E dunque, proprio come

INSERTO 1:

L'evoluzione delle stelle

Le stelle si formano dal collasso gravitazionale di nubi di gas: quando, a seguito del collasso, la densità e la temperatura centrali diventano sufficientemente elevate, si innescano le reazioni di fusione termonucleare dell'idrogeno, che "accendono" la stella. La fase di bruciamento dell'idrogeno in elio nel nucleo della stella prende il nome di "sequenza principale" e dura per la maggior parte della vita dell'astro. L'evoluzione successiva vede il progressivo bruciamento degli elementi chimici prodotti nei processi di fusione nucleare precedenti (per esempio, l'elio sintetizzato dalla fusione dell'idrogeno, porterà alla produzione di carbonio, durante la cosiddetta fase di "ramo orizzontale"), con tempi e modi che dipendono soprattutto dalla massa iniziale dell'astro. La composizione chimica del nucleo delle stelle, quindi, varia progressivamente nel corso della loro evoluzione. Viceversa, quella del loro inviluppo (l'unica che siamo in grado di osservare con i telescopi) può essere considerata, almeno in prima approssimazione, costante ed immutata dal momento della loro formazione. Quando le stelle sviluppano forti venti (soprattutto durante le fasi finali della loro vita) e/o esplodono come supernovae, gli elementi chimici prodotti nel loro interno vengono dispersi nell'ambiente circostante. In particolare, dopo alcune decine di milioni di anni dalla loro formazione, le stelle massicce (con masse almeno 8 volte superiori a quella del Sole) esplodono come supernovae di tipo II (SNII), arricchendo il gas circostante soprattutto dei cosiddetti "elementi alfa" (calcio, magnesio, ossigeno, ecc.) e di ferro, e producendo stelle di neutroni e buchi neri. Chiaramente, le stelle che si formeranno successivamente, a partire dal gas arricchito da queste supernovae, presenteranno nel loro inviluppo abbondanze di ferro e di elementi alfa più elevate rispetto a quelle della generazione precedente.

La figura I.1 mostra un tipico diagramma colore-magnitudine (ovvero, temperatura-luminosità) di un ammasso globulare della nostra Galassia. In esso sono ben distinguibili le diverse fasi evolutive in cui si trovano le stelle. Come accennato sopra, le fasi evolutive corrispondono strettamente ad un diverso tipo di combustione termonucleare all'interno di ciascuna stella: per esempio, la sequenza principale (MS, combustione di idrogeno nel nucleo), il ramo delle giganti rosse (RGB, combustione dell'idrogeno in un guscio sottile attorno al nucleo), il ramo orizzontale (HB, combustione nucleare di elio), il ramo asintotico (AGB, combustione di elio in un guscio interno e di idrogeno in un guscio più esterno). In generale, negli ammassi ricchi di metalli le stelle di ramo orizzontale formano un agglomerato (clump) nel diagramma colore-magnitudine.

Il confronto con il diagramma colore-magnitudine di ω Centauri (fig. 2b) mette subito in evidenza che questo sistema stellare, orbitante nell'alone della Via Lattea e dall'apparenza del tutto simile a quella di un normale ammasso globulare (fig. 2a), è invece costituito da popolazioni multiple, per le quali sono state misurate delle abbondanze chimiche (soprattutto di ferro) diverse e per le quali sono state stimate età differenti (sez. 2).

Anche il diagramma colore-magnitudine di Terzan 5 (fig. 6 e 7) risulta chiaramente diverso da quello di un comune ammasso globulare, e i due clump evidenti in corrispondenza della fase di ramo orizzontale dimostrano che anche questo sistema, che orbita nel bulge della Via Lattea, contiene almeno due popolazioni stellari distinte (sez. 3).

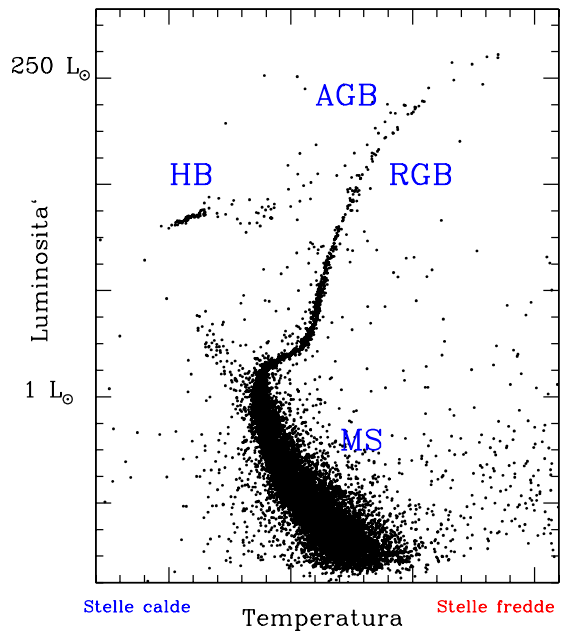


Fig. I.1 Tipico diagramma colore-magnitudine (temperatura-luminosità) di un comune ammasso globulare. Le principali sequenze evolutive delle stelle sono indicate con le sigle nella figura: la sequenza principale (MS, combustione di idrogeno nel nucleo), il ramo delle giganti rosse (RGB, combustione dell'idrogeno in un guscio sottile attorno al nucleo), il ramo orizzontale (HB, combustione nucleare di elio), il ramo asintotico (AGB, combustione di elio in un guscio interno e di idrogeno in un guscio più esterno).

gli archeologi cercano le tracce delle vestigia di antiche civiltà analizzando frammenti di fossili, così gli astronomi cercano di ricostruire com'era l'Universo all'epoca della formazione della Galassia attraverso lo studio di questi sistemi stellari.
Essendo costituiti da un numero così elevato di stelle ed essendo localizzati ad una distanza relativamente piccola da noi, gli ammassi globulari galattici sono i maggiori aggregati per il quali è possibile osservare individualmente tutte le stelle (in qualunque fase evolutiva) e misurare con grande accuratezza le diverse proprietà di ciascuna di esse. Tali studi hanno mostrato che questi sistemi sono il miglior esempio di "Popolazione Stellare Semplice", ovvero un insieme di stelle coeve, formatesi tutte in un tempo scala relativamente breve (inferiore ad un miliardo di anni), da una stessa nube di gas (tutti gli astri, quindi, hanno la stessa composizione chimica). Dunque gli ammassi globulari costituiscono i laboratori ideali per verificare i modelli teorici di evoluzione stellare ed è possibile affermare che gran parte di quello che attualmente sappiamo sull'evoluzione delle stelle è basato sullo studio delle popolazioni stellari in ammassi. Le conoscenze acquisite dallo studio di questi aggregati sono inoltre fondamentali per comprendere la struttura e la natura di sistemi più complessi e più lontani, come le galassie, per i quali siamo in grado generalmente di osservare solo la luce integrata. La conoscenza dettagliata della formazione e dell'evoluzione degli ammassi globulari galattici è dunque un passo assolutamente necessario per la comprensione delle strutture cosmiche complesse e dell'Universo stesso.
Per tali ragioni gli ammassi globulari sono stati oggetto di numerose indagini sin dagli albori dell'astronomia osservativa. Tuttavia lo studio di questi sistemi non smette ancor'oggi di stupire, anzi, ogni volta che, a seguito di un avanzamento tecnologico, lo specchio di un telescopio equipaggiato con un nuovo strumento viene puntato verso questi sistemi stellari, essi rivelano una nuova inaspettata caratteristica che rinnova l'interesse del mondo scientifico nei loro riguardi. Negli ultimi 20 anni, i telescopi spaziali (come Hubble, Spitzer e i satelliti per osservazioni nei raggi X) e la nuova generazione di telescopi terrestri con specchi da 8–10 m di diametro, assistiti da strumentazione di nuova concezione, hanno permesso di raggiungere traguardi straordinari.
Questi nuovi studi hanno mostrato come le popolazioni stellari negli ammassi globulari non siano dopo tutto così "semplici" [2]. Infatti le stelle che li compongono non sono completamente omogenee dal punto di vista chimico: per quanto il contenuto di ferro sia lo stesso per tutte, le abbondanze degli elementi più leggeri (per esempio, ossigeno e sodio) mostrano delle variazioni significative [3], probabilmente dovute ad una generazione precedente di stelle che ha "inquinato" il gas del proto-ammasso. Inoltre non tutte le stelle sono singole, ma una frazione importante (per quanto tuttora incerta) di esse si trova in sistemi binari o multipli. Infine, gli ammassi globulari non sono sistemi statici, ma risentono di forti evoluzioni dinamiche e di frequenti interazioni stellari, che possono generare una varietà di oggetti peculiari (come le cosiddette "vagadonde blu", le binarie X, le pulsar al millisecondo, ecc.) che non sono spiegabili con la teoria standard di evoluzione stellare.
Le più recenti osservazioni hanno addirittura rivelato che alcuni sistemi che orbitano nell'alone della Via Lattea e sono in apparenza del tutto simili a comuni ammassi globulari, nascondono invece una natura e una storia di formazione molto più complesse. Il caso più famoso è senz'altro quello di ω Centauri (fig. 2a), un gigantesco ammasso stellare (il più massiccio dell'intera Via Lattea) nel quale è stata scoperta la presenza di popolazioni stellari multiple (fig. 2b), caratterizzate da abbondanze chimiche (soprattutto di ferro) e da età diverse [4, 5]. Il mistero della sua formazione si è via via infittito con gli anni e ω Centauri costituisce a tutt'oggi un esempio unico nel suo genere: nessun altro sistema stellare con le "sembianze" di un ammasso globulare, infatti, possiede evidenze così chiare di variazioni di abbondanza di elementi pesanti (ferro).
L'esistenza di popolazioni stellari con diverso contenuto metallico è un importantissimo indicatore di una storia di formazione molto complessa. Infatti solo sistemi stellari molto

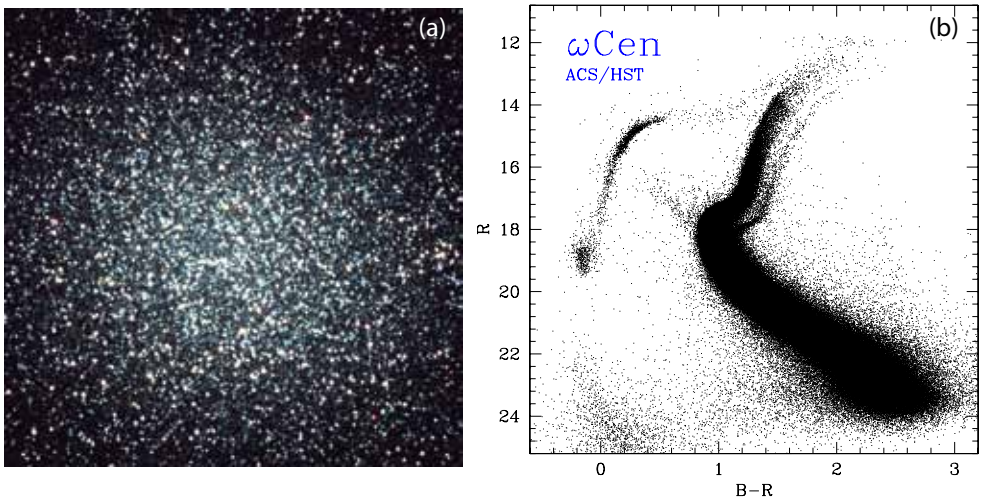


Fig. 2 (a) Immagine dell'ammasso stellare ω Centauri ottenuta con osservazioni effettuate con lo strumento Wide Field Imager (WFI) montato al telescopio ESO-MPI di 2.2 m di diametro situato a La Silla (Cile). (b) Diagramma colore-magnitudine (temperatura-luminosità) di ω Centauri, nelle bande fotometriche visibili B e R. Il confronto col diagramma di un tipico ammasso globulare (fig. I.1) evidenzia immediatamente la peculiarità di ω Centauri: il ramo delle giganti rosse (RGB) è chiaramente "allargato" e costituito da sequenze multiple, che indicano la presenza di popolazioni stellari con differente contenuto di metalli.

massicci sono in grado di trattenere il gas arricchito di metalli espulso dalle violente esplosioni delle supernovae e da quel gas poi formare una nuova generazione di stelle (Inserto 1). Un tipico ammasso globulare ha una massa circa centomila volte superiore a quella del Sole (10^5 masse solari), del tutto insufficiente per trattenere quel gas, e dunque sperimenta un singolo episodio di formazione stellare e non mostra variazioni di ferro. Le galassie nane (i sistemi stellari auto-arricchiti meno massicci che si conoscano) hanno invece masse di alcune centinaia di milioni di masse solari (10^8–10^9 masse solari) e sono quindi in grado di mantenere il gas al loro interno e da lì formare una o più generazioni di nuove stelle arricchite di metalli. ω Centauri può quindi essere considerato un sistema ponte tra un normale ammasso globulare e una galassia nana. L'interpretazione corrente è che esso sia il relitto di una galassia nana catturata ed incorporata dalla Via Lattea in epoche remote.

D'altra parte fenomeni di cattura e distruzione di sistemi stellari minori effettivamente avvengono e ne abbiamo diverse evidenze dirette. Nell'alone della nostra galassia, infatti, orbita il relitto di una galassia sferoidale nana (la galassia del Sagittario) che si sta disgregando a causa dell'interazione con il campo mareale della Via Lattea [6, 7]. Sistemi stellari come ω Centauri e la galassia del Sagittario potrebbero aver contribuito alla formazione dell'alone galattico e rappresentano quindi una sorta di Stele di Rosetta per comprendere in che misura i fenomeni di accrescimento di strutture esterne hanno contribuito a plasmare la struttura galattica così come la osserviamo oggi. Dunque lo studio di questi sistemi ha un impatto diretto sulle teorie di formazione della Via Lattea e delle galassie in generale ed è fondamentale per comprendere i loro principali fenomeni di evoluzione e di mutua interazione. Tuttavia, mentre ω Centauri e Sagittario orbitano entrambi nell'alone della Via Lattea, nessun sistema stellare simile era mai stato individuato nel bulge, lasciando aperta un'importante questione: tale assenza indica che i bulge non si formano per cattura/aggregazione successiva di sotto-strutture più piccole e pre-evolute, oppure è dovuta soltanto a difficoltà osservative legate al fatto che il bulge è fortemente oscurato da spesse nubi di polvere interstellare?

3 Terzan 5 il primo fossile nel bulge

Terzan 5 è un sistema stellare scoperto nel 1968 dall'astronomo francese Agop Terzan e finora catalogato come un comune ammasso globulare. Poiché è situato nel bulge della Via Lattea, in direzione del centro galattico, è fortemente oscurato da spesse nubi di polvere, che rendono particolarmente problematica la sua osservazione. Negli ultimi anni Terzan 5 è tornato ad attrarre l'attenzione dei ricercatori a causa dell'eccezionale popolazione di pulsar al millisecondo (in inglese millisecond pulsars – MSP) scoperte in questo sistema stellare. Si pensa che le MSP siano pulsar "riciclate", ovvero stelle di neutroni in sistemi binari, riportate in un regime di rapida rotazione grazie all'accrescimento di gas appartenente

Fig. 3 I quattro telescopi da 8.2 m di diametro che costituiscono il Very Large Telescope (VLT) dell'European Southern Observatory (ESO; http://www.eso.org/public/), situato sul Cerro Paranal nel deserto di Atacama (Cile).

alla stella compagna. Terzan 5 ne contiene al suo interno ben 33, che corrispondono circa al 25% di tutte le pulsar al millisecondo scoperte finora nell'intero sistema di ammassi globulari della nostra Galassia [8]. L'origine di questa straordinaria popolazione di MSP è un mistero che ha spinto numerosi ricercatori ad intensificare lo studio delle proprietà di questo sistema stellare.

È proprio nell'ambito di un progetto che mira allo studio degli ammassi globulari contenenti ricche popolazioni di MSP che il nostro gruppo di ricerca ha deciso di puntare gli "occhi" del Very Large Telescope (fig. 3), potenziati dal prototipo di ottiche adattive multiconiugate MAD (Inserto 2), verso Terzan 5. Un ammasso ad alta densità stellare e per di più oscurato da spesse nubi di polveri come Terzan 5 è davvero l'oggetto ideale su cui sperimentare le eccezionali potenzialità di MAD, che permette di ottenere immagini ad alta risoluzione nel vicino infrarosso (da 1.2 μm a 2.2 μm), a lunghezze d'onda, cioè, in cui la radiazione elettromagnetica è capace di "bucare" le nubi di polvere.

Sfruttando dunque queste potenzialità abbiamo ottenuto una serie di immagini ad alta risoluzione, nelle bande fotometriche J e K (la banda J è centrata ad una lunghezza d'onda di 1.2 μm, la K a 2.2 μm). La correzione apportata dal sistema di ottiche adattive di MAD è risultata estremamente precisa e, soprattutto, uniforme su l'intero campo di vista. Queste immagini, nelle quali le distorsioni introdotte dall'atmosfera terrestre sono state quasi completamente corrette, sono del tutto confrontabili con quelle ottenibili con osservazioni dallo spazio tramite l'Hubble Space Telescope (HST), con il notevole addizionale vantaggio della potenza di un telescopio con uno specchio di 8.2 m di diametro (quello di HST è di soli 2.4 m) e di potere estendere le osservazioni fino alla banda K (non disponibile su HST). Una di queste straordinarie immagini è mostrata nella fig. 4 ed il confronto con quanto ottenibile con osservazioni da Terra senza le correzioni apportate dalle ottiche adattive è presentato in fig. 5. La dimensione angolare di ciascuna stella nell'immagine MAD è di soli 0.1 secondi d'arco (circa il limite di diffrazione) ed è pressocché costante sull'intero campo di vista: un risultato eccezionale per un telescopio terrestre. Queste immagini rappresentano

INSERTO 2:

Sistemi di ottiche adattive: occhi sempre più "tecnologici" scrutano il cielo

Le immagini astronomiche ottenibili con osservazioni da Terra sono generalmente degradate da effetti di turbolenza prodotti dall'atmosfera terrestre. È proprio a causa di queste turbolenze che le stelle scintillano in quella maniera così affascinante per i poeti e per chiunque alzi gli occhi al cielo in una notte oscura, ma così frustrante per gli astronomi che studiano le caratteristiche fisiche degli astri. Per correggere le deformazioni provocate dall'atmosfera terrestre ed acquisire immagini con una nitidezza confrontabile a quella raggiungibile con osservazioni dallo spazio, astronomi ed ingegneri hanno messo a punto la tecnica delle cosiddette "ottiche adattive" ed equipaggiato i più grandi telescopi moderni con sistemi basati su questa tecnologia d'avanguardia.

I sistemi ad ottica adattiva [9] lavorano grazie a speciali specchi che, seguendo le istruzioni (centinaia di comandi al secondo) inviate da appropriati computer, si deformano in tempo reale in maniera tale da compensare e correggere le distorsioni provocate dall'atmosfera sul fascio di luce proveniente dalle stelle. La tipologia e l'entità delle deformazioni da dare agli specchi sono determinate sulla base di come appare una stella di riferimento molto brillante, che viene osservata tramite uno speciale strumento, chiamato "sensore di fronte d'onda", simultaneamente all'oggetto astronomico che si sta studiando. I sistemi di ottiche adattive più diffusi riescono così a correggere gli effetti di distorsione provocati dall'atmosfera su regioni di cielo tipicamente di 15 secondi d'arco o meno, a causa della rapida degradazione della correzione man mano che ci si allontana dalla posizione della stella di riferimento.

Al fine di superare questa limitazione, astronomi ed ingegneri stanno sviluppando nuove tecniche, tra cui quella delle "Ottiche Adattive Multiconiugate". Tale tecnica utilizza numerosi sensori di fronte d'onda puntati su più stelle brillanti di riferimento per correggere la turbolenza atmosferica su grandi volumi di spazio. I segnali forniti dai sensori di fronte d'onda vengono sfruttati per ottenere accurate informazioni sulla struttura verticale della turbolenza atmosferica. Inoltre, poiché puntano nella direzione di diverse stelle di riferimento, permettono di ottenere una correzione ottimale ed uniforme su tutto il campo di vista dello strumento, che generalmente è molto più grande di 15 secondi d'arco.

MAD (l'acronimo di Multiconjugate Adaptive Optic Demonstrator; fig. I.2) è un prototipo d'avanguardia di questo tipo di strumenti, progettato per correggere la degradazione atmosferica su grandi aree di cielo (il suo campo di vista è di ben 1'×1') durante osservazioni nel vicino infrarosso [10]. È stato montato in via sperimentale per alcuni mesi su uno dei telescopi più grandi del mondo (8.2 m di diametro), il Very Large Telescope (VLT; fig. 3), situato nel deserto del nord del Cile e gestito dall'Osservatorio Europeo del Sud (ESO) ed è servito come prototipo per la progettazione di strumenti simili previsti per la prossima generazione di telescopi della classe dei 40 m di diametro, come l'European - Extremely Large Telescope (E-ELT).

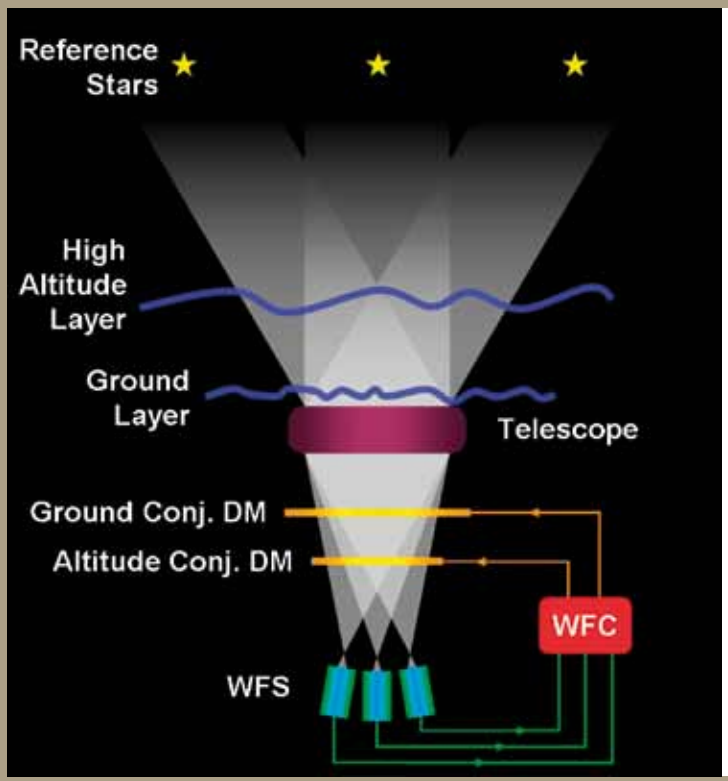


Fig. I.2 Schema del concetto di ottiche adattive multi-coniugate: le distorsioni dei fasci luminosi provocate dall'atmosfera terreste vengono corrette grazie all'analisi in tempo reale dell'immagine di alcune stelle brillanti di riferimento (References Stars), effettuata da altrettanti sensori di fronte d'onda (in inglese wave front sensors, WFS).

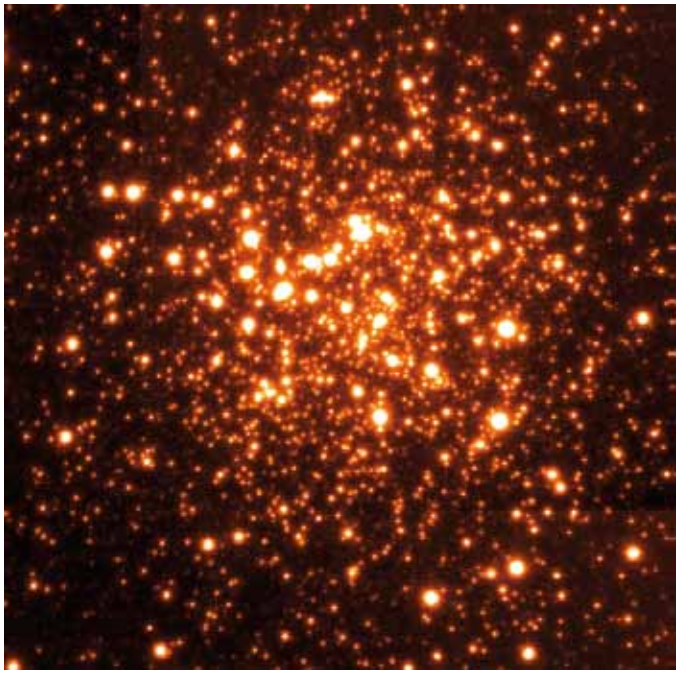


Fig. 4 La straordinaria immagine di Terzan 5 ottenuta nell'infrarosso (cioè in banda K, a lunghezze d'onda di circa 2.2 μm) con lo strumento MAD montato al VLT. La dimensione angolare di ciascuna stella nell'immagine MAD è di soli 0.1 secondi d'arco, ed è pressocché costante sull'intero campo di vista: un risultato eccezionale per un telescopio terrestre. Terzan 5 orbita nel bulge della nostra Galassia, in direzione della costellazione del Sagittario, a circa 20 000 anni luce dalla Terra (la radiazione che osserviamo è dunque partita dalle stelle di questo ammasso quando l'*Homo Sapiens* cominciava a popolare le Americhe).

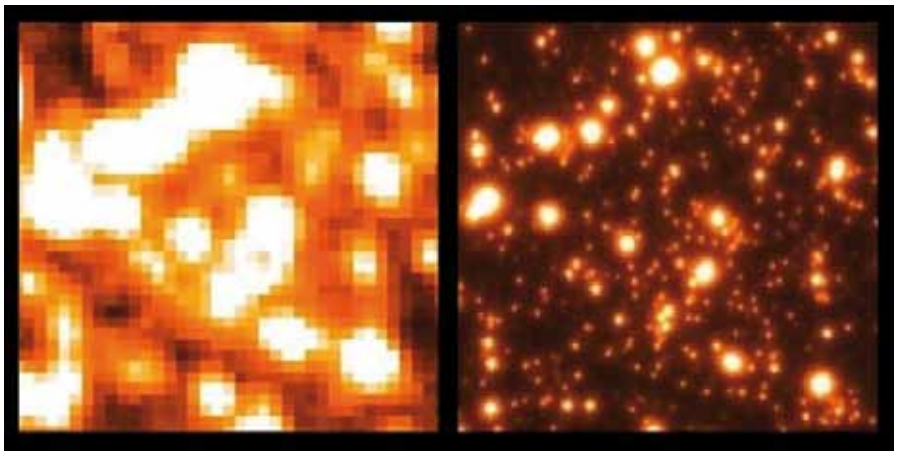


Fig. 5 Due immagini della stessa regione centrale di Terzan 5 "scattate" con osservazioni da Terra: quella di sinistra è stata ottenuta con lo strumento SOFI montato sul New Technology Telescope (NTT) di 3.6 m di diametro dell'ESO, mentre quella di destra è uno zoom dell'immagine scattata da MAD al VLT. Il netto miglioramento in termini di nitidezza è dovuto soprattutto alla straordinaria capacità di MAD di correggere (utilizzando le cosiddette ottiche adattive; Inserto 2) le distorsioni dovute all'atmosfera terrestre, che degradano notevolmente la qualità delle immagini ottenibili da Terra.

un vero e proprio successo per la tecnica delle ottiche adattive multiconiugate poiché dimostrano chiaramente che è possibile correggere le distorsioni atmosferiche con estrema accuratezza ed uniformità su campi di vista relativamente grandi (il campo di vista di MAD è di circa 1 primo quadrato).
Analizzando le immagini MAD è stato possibile distinguere le singole stelle fin nelle regioni più centrali e altamente popolate di Terzan 5, misurando per ciascuna di esse la luminosità (magnitudine) nelle due bande fotometriche J e K. Questo ha permesso di costruire il diagramma colore-magnitudine mostrato nella fig. 6, che ha portato ad una eccezionale scoperta [11]: Terzan 5 non è un comune ammasso globulare, ma un sistema stellare complesso che contiene due popolazioni stellari distinte. Nel diagramma, infatti, sono ben riconoscibili due agglomerati (clump) distinti di stelle che stanno sperimentando la fase di combustione dell'elio nel nucleo (fase di ramo orizzontale): uno più luminoso a magnitudine $K = 12.85$ (che d'ora in poi denomineremo "bright horizontal branch, bHB") ed uno meno brillante a $K = 13.15$ ("faint horizontal branch, fHB").
Ovviamente per una popolazione semplice ci si aspetta un unico clump e non due, poiché stelle con fissata età e uguale contenuto metallico avranno le stesse caratteristiche di temperatura e luminosità durante la combustione nucleare dell'elio. Dunque la scoperta di due diversi clump suggerisce l'esistenza di due gruppi di stelle con proprietà (età e/o metallicità) distinte.

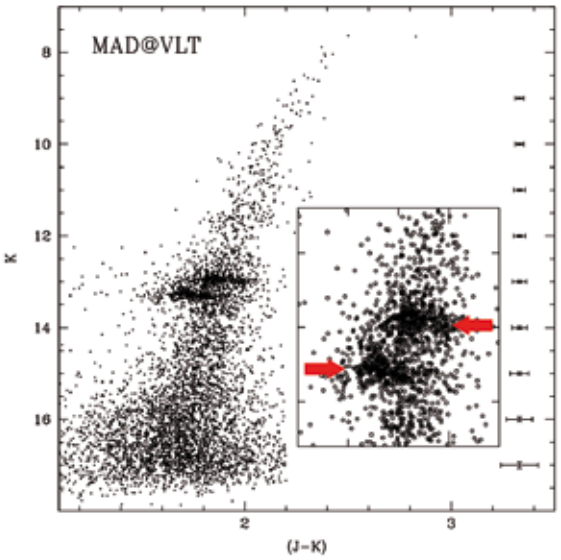


Fig. 6 Diagramma colore-magnitudine di Terzan 5 nel vicino infrarosso (cioè nelle bande fotometriche J e K, centrate rispettivamente a 1.2 e 2.2 μm), ottenuto dall'analisi delle immagini MAD. L'inserto mostra uno zoom nella regione del ramo orizzontale (fase di bruciamento dell'elio nel nucleo delle stelle), dove è ben visibile la presenza di due clump distinti di stelle (indicati con le frecce rosse): una popolazione di bright horizontal branch (bHB) ad una magnitudine $K = 12.85$ ed una meno luminosa, il faint horizontal branch (fHB), a $K = 13.15$. L'esistenza di due popolazioni stellari in un ammasso appartenente al bulge galattico non era mai stata messa in evidenza prima d'ora ed è stata scoperta grazie alle eccezionali caratteristiche strumentali di MAD.

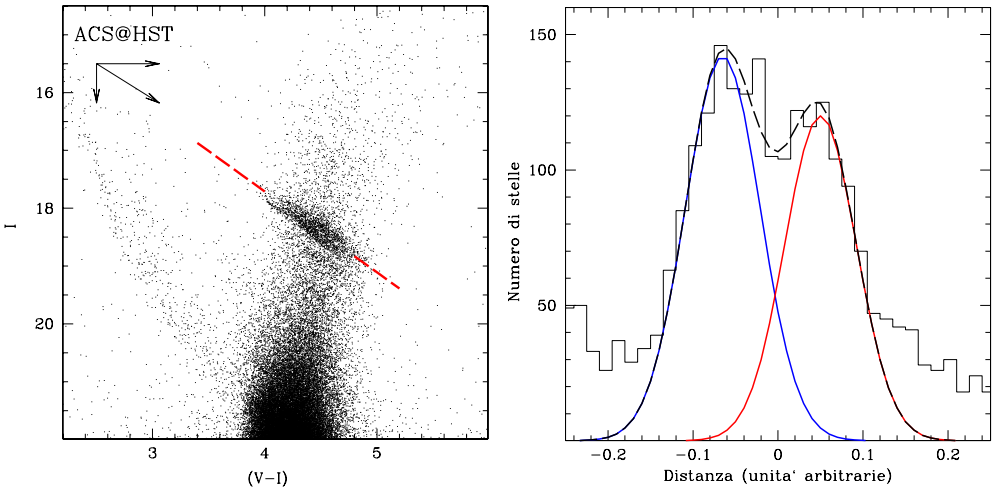


Fig. 7 Diagramma colore-magnitudine di Terzan 5 in banda ottica (nei filtri V e I, centrati rispettivamente a 6060 e 8140 Å) ottenuto dall'analisi di immagini raccolte con la Advanced Camera for Survey (ACS) a bordo del telescopio spaziale Hubble (HST). Nonostante l'assorbimento differenziale dovuto alle nubi di polvere che oscurano il bulge della nostra galassia provochi un effetto di "stiramento" delle sequenze evolutive nella direzione del vettore di assorbimento interstellare indicato in alto a sinistra, due clump distinti di stelle sono comunque visibili (pannello di sinistra): la loro distribuzione rispetto alla linea tratteggiata è chiaramente bimodale (pannello di destra).

Ma come mai questa caratteristica non era mai stata osservata prima d'ora?
Alla luce di questo risultato abbiamo immediatamente rianalizzato alcuni dati in banda ottica (nei filtri fotometrici V e I) ottenuti tramite osservazioni effettuate con la Advanced Camera for Survey (ACS) montata a bordo di HST. Sebbene l'effetto dell'assorbimento differenziale provochi un allungamento di circa 1 magnitudine dell'estensione in colore (V-I) del ramo orizzontale, una distribuzione bimodale delle stelle è comunque visibile (fig. 7). Inoltre, la presenza di questa caratteristica può essere riconosciuta anche analizzando immagini ottenute nel vicino infrarosso (bande J e H) con lo strumento NICMOS a bordo di HST, sebbene l'estensione in colore (J-H), più ridotta di quella (J-K) offerta dalle osservazioni MAD, ne permetta solo una vaga individuazione.
In conclusione, l'insieme di questi risultati conferma in maniera definitiva che Terzan 5 ospita due gruppi di stelle con caratteristiche fotometriche distinte.
Ma le sorprese non sono finite. Infatti, selezionando le stelle appartenenti ai due gruppi sulla base della loro posizione nel diagramma (K, J-K) ottenuto con i dati MAD (fig. 6), abbiamo studiato la loro distribuzione radiale rispetto al centro di gravità del sistema ed abbiamo scoperto che la popolazione di bHB è più concentrata di quella di fHB, con un livello di significatività superiore a 3.5σ. Inoltre, le stelle di bHB sono sostanzialmente più numerose di quelle di fHB nelle regioni più interne dell'ammasso (a raggi $r < 20''$) e

Fig. 8 I due telescopi da 10 m di diametro che costituiscono il Telescopio Keck situato sulla cima del vulcano Mauna Kea nelle isole Hawaii (USA).

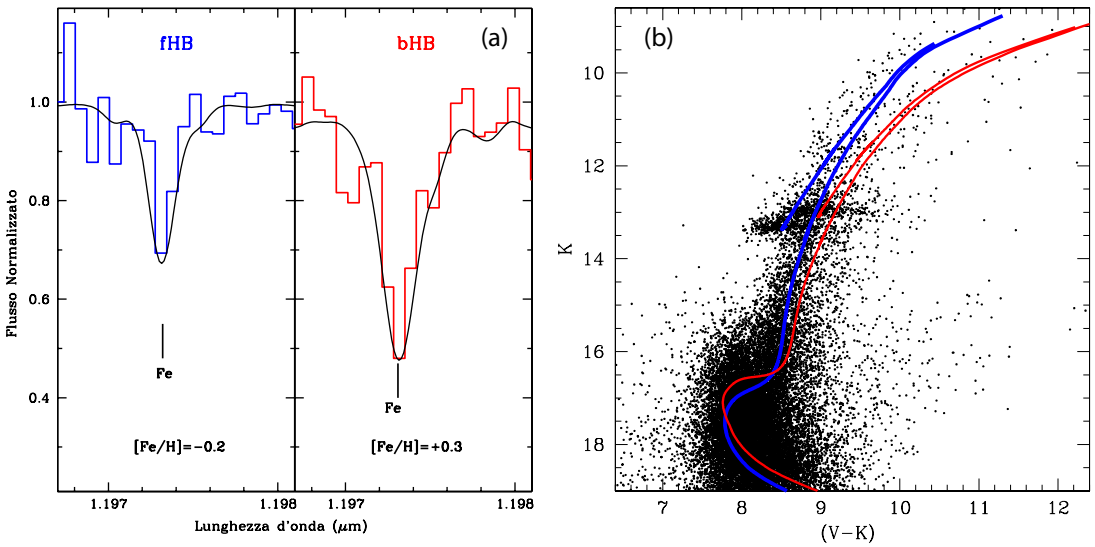


Fig. 9 (a) Spettri combinati delle 3 stelle di fHB (istogramma blu) e delle 3 stelle di bHB (istogramma rosso) ottenuti con lo spettrografo NIRSPEC al telescopio Keck. La misura della larghezza equivalente delle righe del ferro, ottenuta con un'opportuna sintesi spettrale (curve nere), ha rivelato che il contenuto metallico nei due gruppi è diverso: le stelle di bHB hanno un'abbondanza ([Fe/H] = +0.3) circa 3 volte superiore a quella ([Fe/H] = –0.2) delle stelle di fHB.
(b) Diagramma colore-magnitudine di Terzan 5 nelle bande V e K, con sovrapposte le predizioni di modelli teorici di evoluzione stellare. La linea blu, corrispondente ad un modello di popolazione con abbondanza di ferro pari a [Fe/H] = –0.2 ed un'età di 12 miliardi di anni, è in grado di ben riprodurre la magnitudine e il colore delle stelle di fHB. Per render conto del bHB, è invece necessaria una popolazione con [Fe/H] = +0.3 ed un'età di appena 6 miliardi di anni (linea rossa).

diventano via via sempre più rare a distanze maggiori. Queste evidenze suggeriscono che le due popolazioni stellari siano caratterizzate da storie di formazione ed evoluzione diverse.
In particolare, i modelli teorici di evoluzione stellare prevedono che la luminosità del ramo orizzontale in banda K aumenti all'aumentare del contenuto di metalli delle stelle. Di conseguenza, la peculiarità osservata in Terzan 5 potrebbe essere spiegata, almeno in linea di principio, ipotizzando che la popolazione di bHB sia più ricca di metalli rispetto a quella di fHB. Con lo scopo di verificare sperimentalmente questa ipotesi, abbiamo misurato l'abbondanza di ferro delle due popolazioni sfruttando la potenza dei 10 metri di diametro del telescopio americano Keck (fig. 8), situato sulla cima del vulcano Mauna Kea alle isole Hawaii (USA). Lo studio spettroscopico di 3 stelle del bHB e 3 appartenenti al fHB, effettuato con lo strumento NIRSPEC in un intervallo di lunghezze d'onda attorno a 1.2 μm, ha mostrato che la velocità radiale dei due gruppi di astri è la stessa ed ha un valore (circa –85 km/s) in ottimo accordo con quello precedentemente misurato per l'intero ammasso. Tali risultati confermano che le 6 stelle selezionate sono effettivamente membre dell'ammasso e che le due popolazioni non presentano alcuna differenza cinematica. Lo studio ha inoltre rivelato che il contenuto di ferro nei due gruppi è diverso! In particolare, le stelle di bHB hanno un'abbondanza ([Fe/H] = +0.3)[1] circa 3 volte superiore a quella ([Fe/H] = –0.2) delle stelle di fHB (si veda la fig. 9a).
Ci sono quindi due aspetti da sottolineare.
1) Del tutto inaspettatamente Terzan 5 ospita due popolazioni stellari con abbondanze di ferro distinte. 2) Le due popolazioni sono estremamente ricche di metalli: le stelle di fHB hanno metallicità compatibili con quelle delle stelle di bulge, le bHB sono tra le stelle più metalliche (circa il doppio dell'abbondanza di ferro del Sole) mai osservate nella nostra Galassia.

1 L'abbondanza chimica si esprime in scala logaritmica rispetto al valore solare. Il simbolo [Fe/H] sta per log $(Fe/H)/(Fe/H)_{\odot}$ dove (Fe/H) e $(Fe/H)_{\odot}$ sono rispettivamente l'abbondanza di ferro rispetto a quella di idrogeno misurata nella stella e nel Sole. Così [Fe/H] = 0 indica abbondanze solari, [Fe/H] = –1 un decimo solare, etc.

Come abbiamo visto (Sezione 2), Terzan 5 non è il primo sistema stellare con sembianze di ammasso globulare che ospita popolazioni con diverse abbondanze di ferro ad essere identificato nella nostra Galassia (vedi il caso di ω Centauri nell'alone), ma è sicuramente il primo mai scoperto nel bulge e, per di più, in un intervallo di metallicità così alto.
Combinando le informazioni di carattere chimico con le proprietà di luminosità e temperatura delle due popolazioni e confrontandole con le predizioni dei modelli teorici è possibile ricavare una stima dell'età delle due popolazioni identificate in Terzan 5. Come mostrato in figura 9b, un modello di popolazione stellare con abbondanza di ferro pari a [Fe/H] = –0.2 ed un'età di 12 miliardi di anni è in grado di riprodurre la magnitudine e il colore delle stelle di fHB, mentre per render conto del bHB è necessario ipotizzare che questa popolazione si sia formata in epoche più recenti: solo 6 miliardi di anni fa.
Le osservazioni hanno dunque dimostrato che, nonostante le apparenze, Terzan 5 non è un vero e proprio ammasso globulare, ma piuttosto un sistema stellare con una storia di formazione ed evoluzione complessa. Le evidenze raccolte aprono una serie di interrogativi. Infatti la differenza tra le abbondanze di ferro misurate nelle due popolazioni implica che le stelle appartenenti al bHB devono essersi formate da nubi di gas arricchite in ferro da una generazione precedente di supernovae (Inserto 1). E dunque occorre chiedersi: Terzan5 è sufficientemente massiccio da poter trattenere al suo interno il gas espulso ad altissime velocità dalle violente esplosioni di supernovae?
Dalla magnitudine totale in banda K, così come dal numero (~1300) di stelle osservate nei due clump, è possibile stimare la luminosità totale di Terzan 5. I valori che si ottengono dai due metodi (rispettivamente, 9.5×10^5 e 6.5×10^5 luminosità solari) sono in accordo tra loro entro le incertezze. Adottando il valor medio di 8×10^5 luminosità solari ed un rapporto massa-luminosità pari a 3, si ottiene una massa totale di circa 2×10^6 masse solari per Terzan 5. Questo valore, benché sia un fattore 10 più elevato di quanto stimato da studi precedenti, non è comunque sufficiente per giustificare il fatto che Terzan 5 sia riuscito a trattenere al suo interno il gas ricco di ferro, contrastando le violente esplosioni delle supernovae. Occorre infatti una

massa almeno 500–1000 volte più grande.
In aggiunta, notiamo che le abbondanze di elementi chimici misurate in Terzan 5 [11, 12] sono del tutto compatibili con quelle osservate nel bulge galattico, suggerendo così che queste due strutture abbiano avuto una storia di formazione stellare e subito processi di arricchimento chimico molto simili tra loro. I modelli di evoluzione chimica del bulge [13, 14] richiedono un'alta efficienza nel processo di formazione stellare e una sovra-produzione di stelle di grande massa, così da favorire un rapido arricchimento di ferro attraverso l'esplosione di un elevato numero di supernovae di tipo II.
Il fatto che Terzan 5 fosse molto più massiccio nel passato (per riuscire a trattenere il gas espulso dalle supernovae) e abbia ospitato un numero eccezionalmente grande di SNII (necessario per spiegare l'elevata abbondanza di ferro misurata) è probabilmente la chiave per comprendere l'origine della sua straordinaria popolazione di pulsar al millisecondo. Infatti il gran numero di SNII avrebbe prodotto in maniera naturale una vasta popolazione di stelle di neutroni, la maggior parte delle quali sarebbe rimasta intrappolata nella profonda buca di potenziale del massiccio proto-Terzan 5. L'elevato tasso di interazioni stellari stimato per Terzan 5 (il più elevato dell'intero sistema di ammassi globulari della Galassia) avrebbe inoltre favorito la formazione di sistemi binari contenenti una stella di neutroni e stimolato il trasferimento di massa dalla stella compagna, producendo così la straordinaria popolazione di MSP che oggi osserviamo in Terzan 5.
Ma le evidenze raccolte hanno forti implicazioni anche per gli scenari di formazione del bulge stesso e della struttura galattica in generale. Le considerazioni descritte, infatti, suggeriscono che Terzan 5 sia il relitto di una sistema più grande, che abbia perso gran parte delle sue stelle a causa di forti interazioni dinamiche con altri sistemi simili o con una barra galattica centrale. Mentre gran parte delle strutture ad esso simili si sarebbe dissolta, formando quello che oggi vediamo come bulge, Terzan 5, per qualche motivo ancora sconosciuto, è riuscito a sopravvivere ad una totale distruzione. In questa ottica il secondo episodio di formazione stellare, quello che ha generato la popolazione di bHB, potrebbe indicare l'epoca dell'inizio di queste forti interazioni dinamiche. A tutti gli effetti, quindi, Terzan 5 sembra essere un altro relitto fossile dell'epoca di formazione della Via Lattea: il primo scoperto nel bulge. Rappresenta cioè una nuova Stele di Rosetta, grazie alla quale, attraverso ulteriori e più approfonditi studi, sarà possibile determinare in che misura e su quali tempi scala fenomeni di accrescimento di sottostrutture già formate e parzialmente evolute e fenomeni di interazione dinamica abbiano contribuito alla costruzione del bulge galattico.

Bibliografia

[1] J. Kormendy, R. C. Kennicutt Jr., *"Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies"*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys*., 42 (2004) 603.
[2] G. Piotto, *"Observations of multiple populations in star clusters"*, 2009, arXiv:0902.1422.
[3] R. Gratton, C. Sneden, E. Carretta, *"Abundance Variations Within Globular Clusters"*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys*., 42 (2004) 385.
[4] J. E. Norris e G. S. Da Costa, *"The Giant Branch of omega Centauri. IV. Abundance Patterns Based on Echelle Spectra of 40 Red Giants"*, *Astrophys. J.,* 447 (1995) 680.
[5] A. Sollima, E. Pancino, F.R. Ferraro, M. Bellazzini, O. Straniero, L. Pasquini, *"Metallicities, Relative Ages, and Kinematics of Stellar Populations in ω Centauri"*, *Astrophys. J.,* 634 (2005) 332.
[6] R. A. Ibata, G. Gilmore, M. J. Irwin, *"A dwarf satellite galaxy in Sagittarius"*, *Nature,* 370 (1994) 194.
[7] M. Bellazzini, R. A. Ibata, S. C. Chapman, A. D. Mackey, L. Monaco, M. J. Irwin, N. F. Martin, G. F. Lewis, E. Dalessandro, *"The Nucleus of the Sagittarius Dsph Galaxy and M54: a Window on the Process of Galaxy Nucleation"*, *Astron. J.,* 136 (2008) 1147.
[8] S. M. Ransom, J. W. T. Hessels, I. H. Stairs, P. C. C. Freire, F. Camilo, V. M. Kaspi, D. L. Kaplan, *"Twenty-One Millisecond Pulsars in Terzan 5 Using the Green Bank Telescope"*, *Science,* 307 (2005) 892.
[9] B. Marano, *"L'evoluzione dei grandi telescopi ottici: dal telescopio di Mt. Palomar all'European Extremely Large Telescope (EELT)"*, *Il Nuovo Saggiatore,* 25, No. 1-2 (2009) 36.
[10] E. Marchetti *et al*., *"On-sky Testing of the Multi-Conjugate Adaptive Optics Demonstrator"*, *The Messenger*, 129 (2007) 8. (`http://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.129-sep07/messenger-no129-8-13.pdf`).
[11] F. R. Ferraro *et al*., *"The cluster Terzan 5 as a remnant of a primordial building block of the Galactic bulge"*, *Nature,* 462 (2009) 483.
[12] L. Origlia, R. M. Rich, *"High-Resolution Infrared Spectra of Bulge Globular Clusters: The Extreme Chemical Abundances of Terzan 4 and Terzan 5"*, *Astron. J.,*127 (2004) 3422.
[13] S.K. Ballero, F. Matteucci, L. Origlia, R. M. Rich, *"Formation and evolution of the Galactic bulge: constraints from stellar abundances"*, *Astron. Astrophys.,* 467 (2007) 123.
[14] A. McWilliam, F. Matteucci, S. Ballero, R. M. Rich, J. P. Fulbright, G. Cescutti, *"The Evolution of Oxygen and Magnesium in the Bulge and Disk of the Milky way"*, *Astron J.,* 136 (2008) 367.

Link

`http://www.bo.astro.it/ter5/ter5page.html1`
`http://www.eso.org/public/news/eso0945/`
`http://keckobservatory.org/index.php/news/a_galactic_fossil_in_the_core_of_the_milky_way/`

Francesco R. Ferraro

Francesco R. Ferraro è Professore Ordinario di Astrofisica Stellare presso il Dipartimento di Astronomia dell'Università di Bologna. Dal 2006 è anche Presidente di Corso di Laurea per la Laurea in Astronomia e la Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia. I suoi principali interessi scientifici riguardano lo studio dell'evoluzione stellare e delle proprietà degli ammassi stellari. È autore di oltre 300 pubblicazioni su riviste specializzate. È stato più volte membro di diversi comitati internazionali per l'assegnazione del tempo di osservazione ai telescopi e conta numerose collaborazioni sia in Europa, che negli Stati Uniti.

MICROMOTORI A PROPULSIONE BATTERICA

ROBERTO DI LEONARDO[1, 2], LUCA ANGELANI[1, 2], GIANCARLO RUOCCO[2]

[1] *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i Processi Chimico-Fisici, Roma, Italia*
[2] *Dipartimento di Fisica, "Sapienza" Università di Roma, Roma, Italia*

L'agitazione caotica di microrganismi autopropellenti può essere rettificata e sfruttata per la propulsione di strutture microfabbricate con opportune geometrie asimmetriche. Il micromotore a propulsione batterica nasce dall'incontro tra la meccanica statistica fuori dall'equilibrio, le nanotecnologie e la microbiologia, aprendo la strada verso nuove tecnologie alla frontiera tra discipline diverse.

Lo studio della materia vivente deve essere considerato oramai come una parte sostanziale della moderna definizione di fisica. Non soltanto perché i fisici possono contribuire a creare nuove tecnologie e modelli interpretativi per l'indagine di problemi biologici, ma anche perché la materia vivente e i successi quantitativi della biologia molecolare, della biochimica e della genetica, possono servire alla risoluzione di numerosi problemi fisici. Nello sforzo di estendere il nostro dominio al mondo fisico microscopico ci accorgiamo spesso di avere molto da imparare da chi quel mondo lo ha conquistato molto tempo prima di noi: i batteri. Vogliamo qui affrontare il problema di generare movimento alle microscale, ovvero di come azionare macchine e dispositivi in grado di svolgere un compito determinato all'interno di un volume di qualche picolitro. Non si tratta di sola micromanipolazione, ovvero del controllo della materia su scala micrometrica mediante campi di forza esterni, come micropipette, campi elettrici, magnetici o ottici, ma della possibilità di costruire micro-dispositivi autonomi che racchiudano in sé tutto ciò che occorre al loro funzionamento, che siano cioè autopropellenti.
Tale compito diventa ancora più difficile quando ci accorgiamo che le tecniche di autopropulsione che abbiamo sviluppato nel nostro mondo macroscopico si rivelano del tutto inutili in un mondo senza inerzia, come appare un liquido sulla scala dei micrometri. Al diminuire della scala spaziale l'attrito viscoso diventa predominante sull'inerzia e solo la costante applicazione di una forza può mantenere un corpo in movimento. La

situazione è ulteriormente complicata dalla "reversibilità" delle equazioni idrodinamiche a bassi numeri di Reynolds per cui una deformazione reciproca non può produrre uno spostamento netto. Per fare un esempio, la capasanta é un mollusco di qualche centimetro che riesce a nuotare richiudendo rapidamente la conchiglia ed espellendo un getto di acqua nella direzione opposta al moto. A causa della reversibilità idrodinamica una micro-capasanta ritornerebbe esattamente al punto di partenza una volta riaperta la conchiglia. Questo risultato è noto in micro-idrodinamica come "teorema della capasanta" [1] ed esclude la possibilità di autopropulsione attraverso deformazioni reciproche, ovvero deformazioni cicliche per cui è necessario ripercorrere tutte le configurazioni a ritroso per tornare nello stato di partenza. I batteri autopropellenti hanno escogitato uno stratagemma molto semplice ed ingegnoso per eludere i vincoli del "teorema della capasanta". Il trucco consiste nel ruotare un filamento elicoidale, il flagello, producendo una deformazione ciclica continua e non reciproca. Dopo un giro completo, infatti, l'elica si ritrova al punto di partenza e il batterio avrà percorso uno spostamento netto. Il motore flagellare che aziona l'elica è un vero gioiello di nanotecnologia, misura non più di 50 nm di diametro ed è composto di circa 20 parti diverse. Può ruotare in senso antiorario e orario ad una frequenza dell'ordine di 100 Hz con una efficienza stimata dell'ordine del 90%. Il motore flagellare è uno dei motori biologici più potenti e la possibilità di costruire dispositivi artificiali con un paragonabile grado di perfezione è ancora molto remota. D'altra parte estrarre da una cellula un motore flagellare funzionante è un'impresa troppo sofisticata vista la complessità strutturale del motore. Una possibile alternativa è allora quella di utilizzare l'intera cellula, con il suo motore flagellare già assemblato, e con la possibilità aggiuntiva di sfruttare le capacità sensoriali del batterio. In un certo senso si può dire che ci troviamo in una situazione simile a quella che ha caratterizzato il periodo storico pre-industriale. In mancanza di una tecnologia che ci permetta di costruire artificialmente macchine micrometriche della perfezione di quelle viventi, possiamo sfruttare i microrganismi come veri e propri micro-animali da soma del XXI secolo. Di recente è stata dimostrata la possibilità di movimentare delle microstrutture mediante l'adesione di uno strato di batteri motili ("tappeto batterico") sulla superficie di vari oggetti sintetici come microsfere di latex (polistirene) [2] o strutture di PDMS (polidimetilsiloxano) [3].

Le proprietà fototattiche dei batteri possono essere utilizzate per controllare e guidare tali strutture con la luce [4, 5]. È stato dimostrato, ad esempio, come un'alga biflagellata (*Chlamydomonas reinhardtii*) possa trasportare un carico ancorato chimicamente alla parete cellulare. Le proprietà fototattiche della cellula possono essere utilizzate per guidarne il percorso attraverso campi ottici esterni, ma a questo punto è forse più conveniente utilizzare la luce stessa per trasportare direttamente il carico con tecniche di intrappolamento ottico. Uno dei maggiori problemi nello sfruttamento del lavoro batterico consiste, infatti, nel guidare le cellule in un moto direzionale predeterminato. In un ambiente omogeneo i batteri nuotano in maniera caotica, esplorando l'ambiente circostante alla ricerca di condizioni più favorevoli. Fin dalle prime osservazioni di Leeuwenhoek, una sospensione di batteri autopropellenti colpisce da subito per l'attività frenetica che si osserva ("*Il movimento nell'acqua della maggior parte di questi animaculi era così rapido, e così variamente diretto verso l'alto, verso il basso e orizzontalmente che confesso di non aver potuto far altro che meravigliarmene.*"), un'attività che appare senza scopo e che, se potessimo rettificare, potrebbe essere sfruttata per scopi per noi molto più utili. Chi è abituato a manipolare la materia non vivente sa però che estrarre lavoro da un sistema caotico isolato è un'impresa senza speranza, come stabilito dal secondo principio della termodinamica. Se così non fosse un battello potrebbe navigare semplicemente convertendo l'agitazione termica delle molecole d'acqua in energia cinetica. D'altra parte i cammini casuali delle cellule in un bagno batterico assomigliano a prima vista ai moti di agitazione termica delle molecole di un gas. Abbiamo dunque speranza di estrarre lavoro dall'agitazione disordinata della materia vivente? In altre parole, possiamo realizzare un micro-dispositivo che sia spinto dal movimento batterico in un moto unidirezionale e riproducibile senza ricorrere all'ausilio di campi di forza esterni? Queste domande sono inevitabilmente connesse con il problema più fondamentale di quali siano le condizioni necessarie per l'emergere di un comportamento ordinato attraverso un meccanismo di auto-organizzazione. In questo senso le simmetrie giocano un ruolo fondamentale. Come già riconosciuto da Curie: "*Les effets, ce sont les phénomènes qui nécessitent toujours, pour se produire, une certaine dissymetrie. Si cette dissymetrie n'existe pas, le phénomène est impossible. Ceci nous empêche souvent de nous égarer à la recherche de phénomènes irréalisables*"[6]. In sostanza, effetti asimmetrici riproducibili necessitano sempre di corrispondenti cause asimmetriche. Se tali asimmetrie non esistono il fenomeno è irrealizzabile. In particolare, il fenomeno che intendiamo produrre consiste nella rotazione spontanea e unidirezionale di un sistema nanofabbricato immerso in un bagno batterico. Questo fenomeno viola tre simmetrie principali: a) simmetria per inversione dell'asse temporale, b) simmetria per riflessione attraverso un piano contenente l'asse di rotazione *z*, c) simmetria per rotazioni di 180° attorno a un asse perpendicolare a *z*. In altre parole, un moto rotatorio che osservato dall'alto avviene in senso antiorario, avverrebbe in senso orario se osservato: a) a ritroso nel tempo, b) riflesso in uno specchio contenente l'asse di rotazione, c) dal basso. Se il nostro dispositivo apparisse simmetrico sotto almeno una delle trasformazioni a), b) o c), non sarebbe in grado di rompere la corrispondente simmetria spontaneamente in una maniera predicibile e riproducibile.

La rottura della simmetria temporale richiede necessariamente di avere a che fare con un sistema fuori dall'equilibrio. Le sospensioni di batteri autopropellenti sono proprio un esempio di fluido complesso fuori dall'equilibrio. Sebbene, a prima vista, il moto dei batteri assomigli alla dinamica caotica delle molecole in un gas, le traiettorie dei batteri sono generate da leggi dinamiche irreversibili. L'azione costante dei motori flagellari produce una forza propulsiva che spinge il corpo cellulare contro la resistenza viscosa del fluido in cui è immerso. Tali forze propulsive agiscono come un campo di forze esterne non conservativo, producendo quindi una dinamica che non è simmetrica per inversione dell'asse temporale. In particolare, i batteri *Escherichia coli* sono spinti da flagelli azionati da motori rotatori bidirezionali. Quando tutti i motori ruotano in senso antiorario (se osservati da dietro) la cellula viene spinta in un moto traslatorio quasi rettilineo. Tale moto è interrotto da eventi di "tumble" durante i quali uno o più motori invertono il senso di rotazione provocando uno svolgimento del fascio flagellare e una conseguente orientazione casuale del corpo cellulare. Per quanto riguarda le simmetrie spaziali, la natura chirale del flagello rompe evidentemente la simmetria per riflessione b) ma non quella per ribaltamento c). Quest'ultima simmetria deve essere quindi esplicitamente rotta progettando dei componenti di forma asimmetrica.

In un primo lavoro di simulazione numerica abbiamo creato un modello di batteri autopropellenti in interazione con ruote dentate di forma asimmetrica [7]. Il modello utilizzato per rappresentare il singolo batterio è quello di corpo rigido allungato (aspect ratio 1/2) costituito da 2 centri di interazione equidistanziati lungo il corpo. Ogni batterio interagisce con gli altri tramite forze repulsive generate da potenziali sferici a corto raggio tra i centri di interazione dei batteri. Ogni batterio è altresì dotato di forza

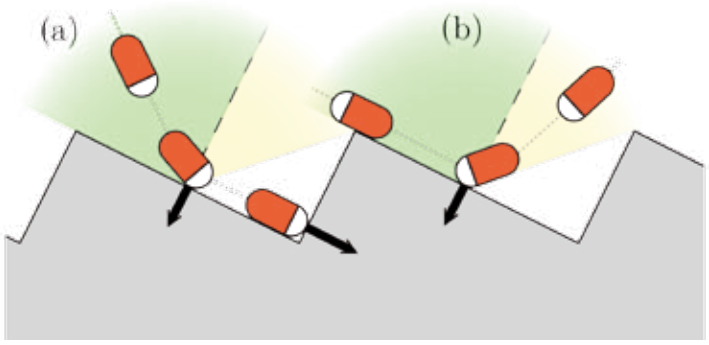


Fig. 1 Meccanismo di incastro e spinta di un singolo batterio sulla ruota. A causa dell'asimmetria del bordo della ruota, i batteri che provengono con un angolo nella regione verde, rimangono incastrati sullo spigolo e contribuiscono a far ruotare il dispositivo. Quelli che provengono dalla regione arancione scivolano via dalla ruota lungo il bordo.

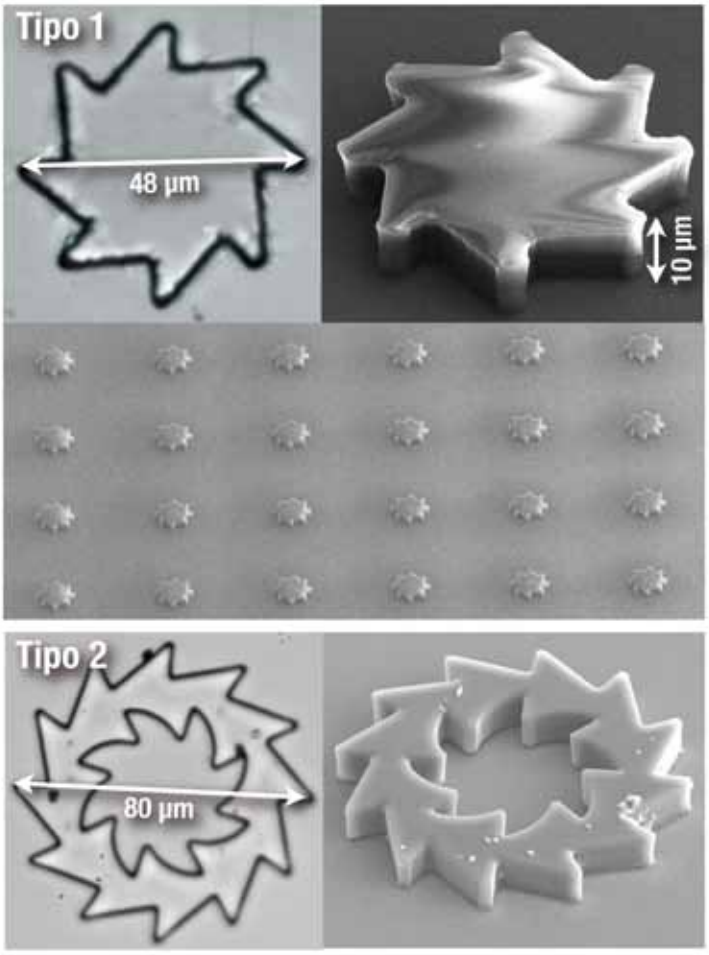


Fig. 2 In alto a sinistra un'immagine al microscopio ottico di una micro-ruota di 48 µm in soluzione acquosa. A fianco e di sotto le stesse ruote ancorate al substrato sacrificale viste al microscopio elettronico. In basso, da sinistra a destra, immagini al microscopio ottico ed elettronico di ruote cave di 80 µm.

autoprolusiva lungo la sua direzione assiale ed è soggetto al fenomeno del "tumbling" che ne modifica, a frequenza fissata, la direzione di moto in maniera casuale. La dinamica è caratterizzata dall'assenza dei termini inerziali per cui le equazioni del moto esprimono una relazione lineare tra le velocità dei corpi sospesi nel fluido (batteri e micro-oggetti) e le forze in gioco. Per simulare l'interazione tra i batteri e l'oggetto esterno è stato messo a punto un codice basato sulla repulsione con potenziale continuo a corto raggio tra il singolo batterio ed i lati dell'oggetto. Ci si è concentrati prevalentemente su oggetti esterni costituiti da rotelline con denti di forma asimmetrica, ancorati al centro e liberi di ruotare intorno al proprio asse. Facendo partire la simulazione abbiamo osservato l'innesco di un moto spontaneo delle micro-rotelle,sostenuto dalla spinta dei batteri sul bordo sagomato degli oggetti. Gli oggetti ruotano infatti con una velocità angolare fluttuante intorno ad un valor medio non nullo di una decina di gradi al secondo.
Da un punto di vista microscopico l'effetto osservato di rotazione unidirezionale si può comprendere analizzando le collisioni dei batteri con il bordo dell'oggetto. A causa della forma asimmetrica di quest'ultimo, i batteri, a seconda dell'angolo di incidenza, tenderanno ad allontanarsi velocemente da esso oppure a rimanere incastrati tra i denti ed esercitare quindi una forza persistente sulla rotella (vedi fig. 1). Sono proprio tali forze nette unidirezionali che sospingono l'oggetto in moto rotatorio, il cui verso è legato alla particolare simmetria dei bordi (simmetrie opposte generano moti rotatori in direzioni opposte).
Il fenomeno è risultato essere indipendente dai dettagli del problema (aspect ratio dei batteri, concentrazione della soluzione, particolare forma dei denti asimmetrici, dimensioni della ruota), con solo possibili differenze

quantitative nei vari casi. Si tratta quindi di una fenomenologia robusta, basata esclusivamente sulle proprietà generali di non-equilibrio del bagno e di asimmetria dell'ambiente, che potrebbe essere osservata in svariate situazioni e sistemi reali.
I risultati numerici ci hanno incoraggiato nella ricerca di collaborazioni esterne per realizzare un primo prototipo sperimentale del "micromotore a batteri" [8]. Le moderne tecniche di nanolitografia consentono di fabbricare facilmente strutture quasi planari di dimensioni micrometriche. Nel nostro caso, ruote dentate di varia forma e dimensione, composte da una resina epossidica (SU-8), sono state realizzate nei laboratori BIONEM dell'Università Magna Graecia di Catanzaro[1]. Array di 10000 ruote identiche vengono "stampati" mediante processi di litografia elettronica ed ottica su di un substrato "sacrificale" di Polimetilmetacrilato (PMMA) (vedi fig. 2). Le micro-ruote vengono successivamente staccate sciogliendo lo strato di PMMA in acetone, e disperse in soluzione acquosa. La parte microbiologica è stata curata da ricercatori del Dipartimento di Scienze di Sanità Pubblica della «Sapienza»[2], che hanno messo a punto una procedura di crescita e un buffer che esaltassero le caratteristiche di motilità di un ceppo batterico di *Escherichia coli* (MG1655). Una goccia contenente una sospensione di micro-rotelle in bagno batterico viene sospesa dal pozzetto concavo di un vetrino per microscopia lasciando una intercapedine di aria tra l'interfaccia del liquido e il vetrino copri oggetto. Le ruote sedimentano

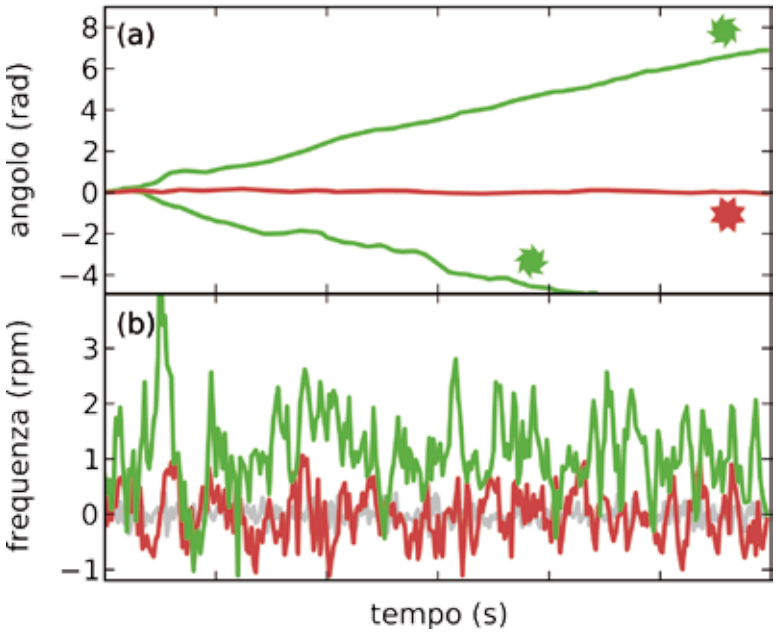


Fig. 3 (a) Angolo percorso in funzione del tempo relativo a due ruote asimmetriche (linee verdi) con diversa orientazione, e una ruota simmetrica (linea rossa). (b) Frequenza di rotazione istantanea in giri al minuto per una ruota asimmetrica (linea verde) e una simmetrica (linea rossa). Sebbene le fluttuazioni nelle due curve siano confrontabili, a differenza della ruota simmetrica, le ruote asimmetriche presentano un valore medio di velocità angolare diverso da zero. In grigio le fluttuazioni termiche di una ruota asimmetrica in un buffer privo di batteri.

[1] E. Di Fabrizio, F. De Angelis, F. Mecarini, BIONEM Labs (Catanzaro).

[2] V. Iebba, M. P. Conte e S. Schippa, Dipartimento di Scienze di Sanità Pubblica, Sapienza (Roma).

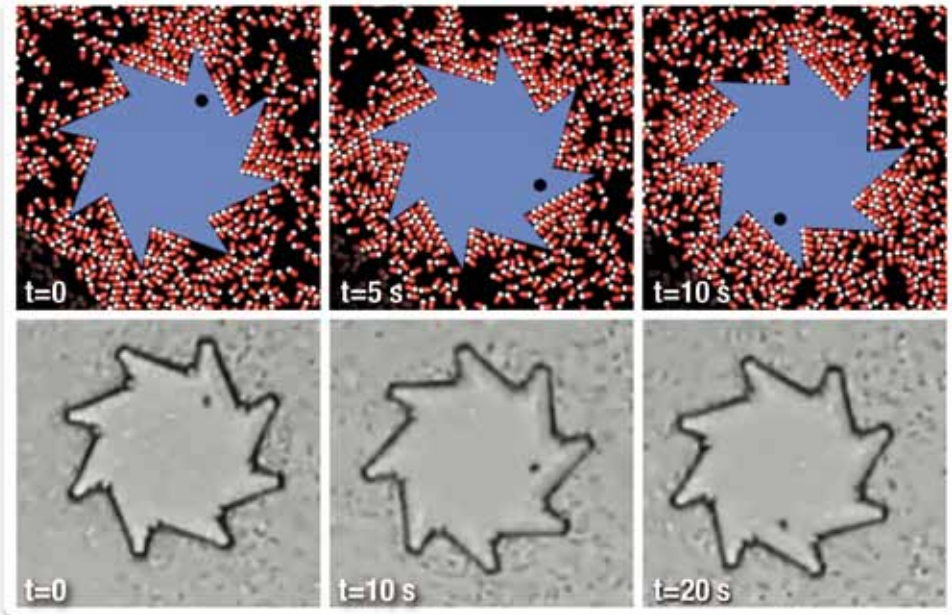


Fig. 4 Confronto tra le configurazioni istantanee relative a tre tempi successivi di ruote asimmetriche ottenute in simulazione (in alto) e osservate nell'esperimento (in basso).

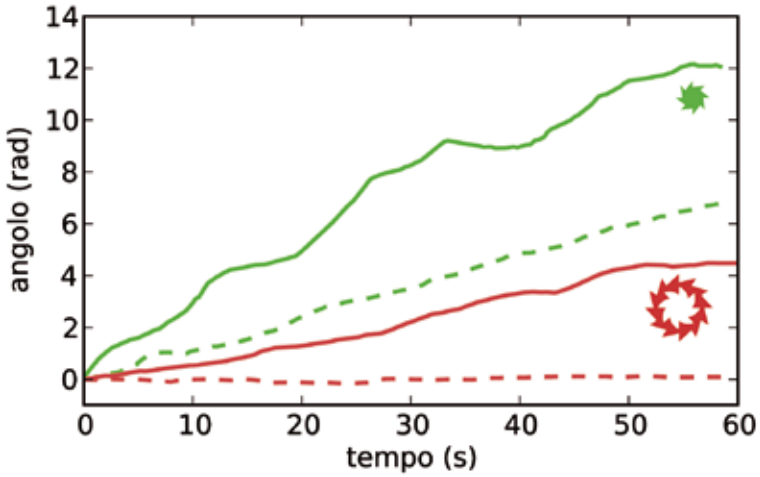


Fig. 5 Effetto della concentrazione batterica sulla dinamica di rotazione di due tipi di ruote asimmetriche (vedi fig. 2). Nelle soluzioni più concentrate si osservano velocità di rotazione maggiori accompagnate da fluttuazioni più ampie e persistenti, legate alle dinamiche collettive dei batteri ad alta densità.

sull'interfaccia liquido-aria dove sono libere di ruotare. Quando la concentrazione raggiunge un valore abbastanza elevato (10^{10} batteri/ml), l'azione cooperativa dei batteri produce un momento torcente sufficiente a ruotare le micro-ruote con una frequenza di circa 1 rpm. Essendo sospese su un'interfaccia liquido-aria, il contributo dell'attrito viscoso sulla base della rotella è trascurabile, per cui possiamo stimare il momento torcente applicato dai batteri assumendo un coefficiente d'attrito rotazionale pari alla metà di quello di un disco lontano da interfacce.
In tale approssimazione una frequenza rotazionale di 1 rpm corrisponde a un momento torcente di circa 10 pN μm. La direzione di rotazione può essere oraria o antioraria rispettivamente per le due possibili orientazioni del bordo asimmetrico dell'oggetto. La fig. 3 riporta l'angolo di rotazione in funzione del tempo per ruote asimmetriche di opposta orientazione e per una ruota simmetrica. Fluttuazioni nel numero e nella disposizione locale dei batteri sui contorni delle ruote producono grosse fluttuazioni nella velocità angolare sia delle ruote simmetriche che di quelle asimmetriche come mostrato in fig. 3. Una ruota asimmetrica in un buffer privo di batteri presenta delle fluttuazioni browniane di entità molto minore. La dinamica di rotazione osservata somiglia molto alle previsioni numeriche [7] come evidenziato dal confronto in fig. 4. La velocità di nuoto di un singolo batterio fornisce un limite massimo per la velocità lineare del bordo di una ruota. Nel nostro caso il bordo delle micro-ruote gira con una velocità lineare di soli 2.5 μm al secondo contro una velocità media di nuoto dei batteri di 20 μm al secondo. Col passare del tempo la concentrazione di "cibo" diminuisce mentre quella di sottoprodotti del metabolismo cellulare aumenta. I batteri perdono progressivamente la loro motilità

e infine muoiono. Altri fenomeni quali l'aggregazione tra batteri e la formazione di biofilm fissano un limite alla durata di funzionamento dei dispositivi a propulsione batterica. Anche se possiamo pensare a diverse strategie per ritardare questi processi, un tempo di vita finito è un prezzo da pagare inevitabilmente se vogliamo costruire un micromotore autonomo, che contenga in sé tutto ciò che è necessario al suo funzionamento, senza bisogno di sorgenti energetiche esterne. Abbiamo costruito ruote di diversa geometria per studiare il ruolo della forma. Ad esempio ruote aventi lo stesso diametro di 48 μm ma con un numero maggiore di denti presentano un comportamento molto simile. Sebbene le variazioni nella velocità angolare possano essere grandi anche tra ruote con la stessa geometria e nello stesso bagno, tuttavia le velocità di rotazione massime non sembrano dipendere molto dalla geometria a parità di dimensioni. La presenza di grosse fluttuazioni nella velocità angolare rende anche difficile valutare in maniera quantitativa il ruolo della concentrazione. Tuttavia quando la concentrazione raggiunge valori molto elevati (circa 10^{11} batteri/ml), i batteri iniziano a manifestare comportamenti collettivi su larga scala che si traducono in una maggiore velocità di rotazione delle microstrutture. In particolare abbiamo osservato ruote di tipo I in una sospensione batterica di 7×10^{10} batteri/ml ruotare a velocità di 2 rpm e cioè a circa il doppio della velocità osservata a concentrazioni più basse (fig. 5). La dinamica delle microstrutture in sospensioni molto dense è però caratterizzata anche da fluttuazioni nella velocità angolare (o equivalentemente nel momento torcente) più persistenti e di maggiore entità.

Aumentando le dimensioni delle ruote potremmo aspettarci che il momento torcente aumenti come il quadrato delle dimensioni lineari poiché sia il perimetro, e quindi il numero di batteri che spingono, che il braccio del momento aumentano linearmente con la taglia del sistema. D'altra parte la mobilità rotazionale delle ruote decresce come l'inverso del cubo delle dimensioni lineari. Di conseguenza ci aspettiamo che la velocità di rotazione decresca come l'inverso del raggio della ruota. Pertanto nel progettare ruote di dimensioni maggiori (80 μm, vedi fig. 2) abbiamo cercato di ridurre le forze di attrito, scavando un buco al centro del disco, e di aumentare il momento delle forze sagomando anche il bordo interno con un profilo a dente di sega. Siamo riusciti a produrre una rotazione unidirezionale di queste ruote più grandi soltanto in sospensioni molto dense e con una frequenza rotazionale di 0.7 rpm (fig. 5) e cioè meno della metà della velocità di rotazione delle ruote più piccole, il che dimostra che il nostro argomento di scala per le velocità angolari fornisce delle previsioni solo qualitativamente corrette.

È interessante notare come un simile fenomeno di rettificazione di un moto caotico sarebbe irrealizzabile in un bagno termico all'equilibrio a causa dei vincoli imposti dal secondo principio della termodinamica. In una celebre lezione, Richard Feynman dimostra come l'analisi di un dispositivo elementare, la ruota a dente di arresto ("ratchet and pawl"), possa fornire una spiegazione semplice, in termini di collisioni molecolari, del secondo principio [9]. L'argomento si sviluppa a partire dal tentativo di costruire un dispositivo in grado di estrarre lavoro da un bagno termico mantenuto a temperatura costante, in evidente violazione del secondo principio.

Il dispositivo consiste in una ruota dentata di forma asimmetrica, vincolata a ruotare in un'unica direzione da un dente di arresto, e sollecitata dagli urti delle molecole di un gas. La geometria asimmetrica della ruota costituisce un primo ingrediente essenziale per ottenere un movimento direzionale. Le leggi della dinamica, che governano l'interazione tra la ruota e le molecole del gas, sono infatti invarianti per inversione spaziale: se la ruota fosse simmetrica allora, per ogni possibile traiettoria del sistema in cui la ruota si muove in senso orario, ne esisterebbe una riflessa in cui la ruota si muove in senso antiorario. Le due traiettorie sono ugualmente probabili e in media la ruota non girerà né a destra né a sinistra. In realtà Feynman dimostra ingegnosamente che anche una ruota asimmetrica con dente di arresto non può ruotare in una direzione definita rettificando l'agitazione termica del gas. Le ragioni profonde di ciò risiedono in un'altra simmetria, forse più nascosta di quella per inversione spaziale, ma altrettanto fondamentale: la simmetria per inversione temporale. Gli urti fra le molecole del gas, e fra queste e la ruota dentata sono perfettamente compatibili con le leggi fisiche della dinamica se osservati a ritroso nel tempo. Di nuovo la presenza di una simmetria garantisce un bilancio equo tra le traiettorie in cui la ruota gira in un verso e quelle, simmetriche rispetto al tempo, in cui la ruota gira in senso opposto. La possibilità di ottenere un movimento direzionale richiede allora una duplice rottura di simmetria, spaziale e temporale. La combinazione di asimmetria spaziale e non-equilibrio è dunque alla base del cosiddetto "effetto ratchet", ovvero la possibilità di estrarre lavoro dall'agitazione disordinata dei costituenti elementari di un sistema fuori dall'equilibrio. L'effetto ratchet gioca un ruolo fondamentale in numerosi fenomeni fisici e biologici, quali ad esempio i motori molecolari. In passato sono state escogitate molte strategie per ottenere sistemi fuori dall'equilibrio come ad esempio l'applicazione di campi esterni dipendenti dal tempo o la variazione

ciclica della temperatura. Il nostro esperimento propone una nuova realizzazione dell'effetto ratchet dove i batteri giocano il ruolo di "molecole" intrinsecamente fuori equilibrio. Un ambiente asimmetrico può essere usato per rompere le rimanenti simmetrie spaziali e permettere l'emergere di un moto ordinato e riproducibile che possa servire come meccanismo propulsivo per micro-dispositivi completamente autonomi. Le applicazioni più promettenti sono senza dubbio legate alla micro-movimentazione di dispositivi per microfluidica o micro-robot autopropellenti per utilizzi biologici, medici o micro-ingegneristici. Ci possiamo tuttavia anche porre la domanda più impegnativa del possibile utilizzo dei motori batterici come sorgente energetica su scala macroscopica.

Il "micromotore a propulsione batterica" è solo un esempio di come l'incontro tra la fisica e la biologia non solo offra un'opportunità unica ai fisici di dare contributi quantitativi alla biologia, ma di come la fisica stessa possa arricchirsi quando il comportamento "inusuale" della materia "attiva" biologica stimola i ricercatori a pensare in modi nuovi.

Ringraziamenti

Ringraziamo per il supporto alle ricerche il CNR, il Dipartimento di Fisica della Sapienza, l'Istituto Italiano di Tecnologia e il CINECA. Desideriamo inoltre ringraziare tutti i ricercatori che hanno partecipato alla realizzazione del prototipo di micromotore a batteri: M. P. Conte, F. De Angelis, D. Dell'Arciprete, E. Di Fabrizio, V. Iebba, F. Mecarini e S. Schippa.

Bibliografia

[1] E. M. Purcell, *"Life at low Reynolds number"*, *Am. J. Phys.*, 45 (1976) 3.
[2] B. Behkam and M. Sitti, *"Effect of quantity and configuration of attached bacteria on bacterial propulsion of microbeads"*, *Appl. Phys. Lett.*, 93 (2008) 223901.
[3] N. Darnton, L. Turner, K. Breuer, H. C. Berg, *"Moving fluid with bacterial carpets"*, *Biophys. J.*, 86 (2004) 1863.
[4] D. B. Weibel, *et al*., *"Microoxen: Microorganisms to move microscale loads"*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 102 (2005) 11963.
[5] E. Steager, C. B. Kim, J. Patel, S. Bith, C. Naik, *"Control of microfabricated structures powered by flagellated bacteria using phototaxis"*, *Appl. Phys. Lett.*, 90 (2007) 263901.
[6] P. Curie, *"Sur la symetrie dans les phénomènes physiques, symetrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique"*, *J. Phys.* (Paris), 3 (1894), 393.
[7] L. Angelani, R. Di Leonardo, G. Ruocco, *"Self-starting micromotors in a bacterial bath"*, *Phys. Rev. Lett.*, 102 (2009) 048104.
[8] R. Di Leonardo *et al*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA,* 107 (2010) 9541.
[9] R. P. Feynman, L. B. Leighton, and M. Sands, "*The Feynman Lectures on Physics*" Vol. I (Addison Wesley, Reading, MA)1966, Chapt. 46.

Roberto Di Leonardo
Roberto Di Leonardo è Ricercatore del CNR presso l'Unità di Roma dell'Istituto per i Processi Chimico-Fisici. Nato a Pescara nel 1973, frequenta i corsi di laurea e dottorato in Fisica a L'Aquila, svolgendo attività di ricerca su liquidi sottoraffreddati e transizione vetrosa. A partire dal 2005 la sua attività di ricerca si concentra sull'utilizzo della luce come strumento di manipolazione della materia sulla scala del micrometro e nel 2007 riceve il Premio "Le Scienze" per le applicazioni delle trappole ottiche alla meccanica statistica, materia soffice e microfluidica.

Luca Angelani
Luca Angelani è Ricercatore del CNR presso l'Unità di Roma dell'Istituto per i Processi Chimico-Fisici. Nato a Roma nel 1969, laureato in Fisica alla "Sapienza" di Roma, dottorato a L'Aquila, successivamente ha svolto attività di ricerca a Trento e Roma. I suoi interessi scientifici riguardano la fisica dei sistemi disordinati, dai vetri ai liquidi e recentemente sistemi biologici e materia attiva, integrando metodi teorici e numerici. Attualmente è responsabile della linea di ricerca del CNR "Dinamica dei sistemi disordinati: materia soffice e biologica".

Giancarlo Ruocco
Giancarlo Ruocco è Professore di Struttura della Materia presso il Dipartimento di Fisica della "Sapienza", Università di Roma. Nato a Roma nel 1959, si laurea in Fisica nel 1981, diviene prima Ricercatore (1984) e poi Professore Associato (1992) all'Università di L'Aquila. I suoi interessi scientifici riguardano i liquidi, i vetri e la materia soffice. Nel 2000 diviene Professore Ordinario alla "Sapienza", nel 2004 fonda il Centro di Ricerca "Soft" dell'INFM, di cui è Direttore fino al 2008. Dal 2007 è Direttore del Dipartimento di Fisica della "Sapienza".

ACCELERATORI DI PARTICELLE: QUALE RUOLO OGGI PER I BENI CULTURALI ?

PIER ANDREA MANDÒ[1,2], MARIAELENA FEDI[2], NOVELLA GRASSI[2]
[1] Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze, Firenze, Italia
[2] Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze, Firenze, Italia

La domanda di supporto scientifico per la conoscenza e conservazione dei Beni Culturali è in forte crescita; in questo ambito le tecniche "nucleari" giocano ancora oggi un ruolo centrale, in particolare nelle analisi dei materiali e nelle datazioni.
Facciamo il punto sugli sviluppi recenti delle tecniche che usano piccoli acceleratori.

1 Introduzione

Rispetto a qualche anno fa, le tecniche diagnostiche per lo studio dei Beni Culturali sono molto cresciute in numero e importanza. Quelle basate sull'uso dei piccoli acceleratori di particelle sono ormai, si potrebbe dire, classiche, ma per il tipo di risposte che riescono a dare continuano a rivestire un ruolo di primo piano. Non solo; c'è anche spazio per migliorare ancora le metodiche già disponibili e aprire la strada a nuove prospettive applicative.
In realtà, al di là della discussione sugli ulteriori sviluppi, la conoscenza degli stessi principi di base di queste tecniche non è per niente scontata presso una parte del pubblico non specializzato – e forse anche per una parte dei colleghi fisici. Può quindi essere utile prima di tutto ricordare brevemente in cosa consistano queste tecniche, e in quali applicazioni giochino un ruolo importante.
Nel fare questo, è giusto anche guardarsi intorno e porsi con onestà intellettuale il problema se altre tecniche fisiche o fisico-chimiche siano preferibili per alcuni aspetti in determinate situazioni. Come abbiamo detto poco sopra, nel campo della diagnostica dei Beni Culturali l'offerta è senz'altro cresciuta negli ultimi anni, anche perché da parte del mondo stesso dei Beni Culturali la domanda di supporto alla scienza in generale si è fatta sempre più estesa, esigente e puntuale, stimolando con ciò l'affinarsi e l'adattarsi di tecnologie magari inizialmente sviluppatesi per applicazioni in altri settori. Ma anche le stesse tecniche nucleari hanno beneficiato di questo stimolo, crescendo in potenzialità. E se può essere vero che alcune loro peculiarità sono oggi meno "uniche", ci sembra che ad esempio, rispetto ad altre emergenti, le tecniche di Ion Beam Analysis con le loro più recenti varianti siano tuttora all'avanguardia per lo studio dei materiali usati per produrre opere d'arte. Per non parlare delle eccezionali prestazioni della Spettrometria di Massa con Acceleratore per le datazioni col radiocarbonio. Nel seguito quindi, dopo aver richiamato i principi essenziali di queste tecniche basate sull'uso di acceleratori, ne illustreremo tramite qualche esempio le potenzialità odierne nello specifico campo di applicazioni allo studio dei Beni Culturali.

2 Acceleratori di particelle per i Beni Culturali

Parlando di tecniche con acceleratori, ci riferiremo a macchine "gestibili" anche in strutture relativamente piccole (in Italia ad esempio LABEC a Firenze, CEDAD a Lecce, CIRCE a Caserta[1]). Non discuteremo quindi delle prospettive per applicazioni in questo settore nei grandi laboratori (acceleratori per luce di sincrotrone, o strutture che producono fasci di neutroni): prospettive senz'altro molto interessanti ma ancora un po' fuori portata, almeno in Italia. Da quanto si vede oggi, è comunque possibile che per queste applicazioni ci siano in futuro sviluppi che le portino a un uso più diffuso.
Quando si parla di "piccoli" acceleratori come quelli dei tre laboratori citati (acceleratori elettrostatici da qualche MV di tensione massima di terminale), i campi di intervento in cui entrano in gioco nel settore dei Beni Culturali sono – come già si diceva – le analisi di composizione tramite l'uso di fasci di ioni (Ion Beam Analysis, IBA) e le datazioni col metodo del radiocarbonio con l'uso della spettrometria di massa con acceleratore (Accelerator Mass Spectrometry, AMS).
Sulle datazioni ^{14}C con AMS, francamente non si intravedono proprio, al momento, alternative competitive. La AMS è insostituibile per datazioni precise, affidabili e "quasi non distruttive" di reperti archeologici e storici, e non solo. Ci torneremo dopo comunque, per fare il punto e vedere cosa si muove.
Partiamo invece dalle tecniche con fasci di ioni per l'analisi di composizione elementale dei materiali.

2.1 Ion Beam Analysis

In una misura di Ion Beam Analysis, come è noto, il materiale da analizzare è bombardato con fasci di particelle – tipicamente protoni o alfa di qualche MeV di energia prodotti da un acceleratore. Per capirne la composizione, si analizza la radiazione emessa dal materiale sotto fascio, radiazione che ha energie caratteristiche degli atomi (raggi X) o dei nuclei (raggi gamma e particelle) coinvolti nell'interazione con le particelle incidenti. Le tecniche IBA più importanti sono la PIXE (Particle-Induced X-ray Emission), la PIGE (Particle-Induced Gamma-ray Emission), e nel caso della rivelazione di particelle, la BS (Backscattering Spectrometry) e la NRA (Nuclear Reaction Analysis). La PIXE, in particolare, copre con buona efficienza tutti gli elementi della tavola periodica a partire dal Na, anche usando un fascio estratto in atmosfera (e quindi senza collocare il bersaglio in vuoto, requisito fondamentale per garantire l'assenza di danno nelle analisi sui Beni Culturali). Se nel set-up sono presenti anche rivelatori per altri tipi di radiazioni, il range si estende ancora e praticamente si arriva a coprire l'intera tavola periodica; inoltre, anche per gli elementi già rivelabili dalla sola PIXE, con l'implementazione di altre tecniche IBA si superano alcune limitazioni (vedi oltre). Le analisi sono quantitative, molto sensibili (con Minimum Detection Limits fino alle parti per milione), non invasive e non danneggianti (anche su questo punto torneremo in seguito). C'è la possibilità di effettuare mappature composizionali anche con elevata risoluzione spaziale e di raccogliere informazioni sulla eventuale struttura stratigrafica, sempre in maniera completamente non distruttiva.
Oggi la Ion Beam Analysis in alcune situazioni è in concorrenza con altre tecniche che richiedono attrezzature molto meno ingombranti di un acceleratore, e magari sono trasportabili. È soprattutto quest'ultimo aspetto che rende queste nuove tecniche, o affinamenti di già esistenti, molto competitive, almeno come primo passo in un protocollo esteso di analisi. Prendiamo ad esempio la LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectrometry), talvolta anche chiamata LIPS (Laser-Induced Plasma Spectrometry) [1, 2], basata sulla induzione di un plasma bombardando il materiale con un impulso laser e sull'analisi spettroscopica delle emissioni pronte nel visibile e vicino UV che hanno luogo nella fase di ricombinazione del plasma. La LIBS si basa su strumentazione relativamente semplice ed economica, quindi è trasportabile e consente un'analisi *in situ*. Inoltre può fornire facilmente informazioni sul profilo in profondità degli elementi rivelati, purché sia tollerabile "scavare" un microforo nel materiale. Per questi motivi è sicuramente una tecnica molto interessante, ma rispetto alle IBA – almeno allo stato dell'arte – restano alcune limitazioni che non sempre sono irrilevanti per le esigenze degli storici dell'arte, degli storici o degli archeologi: prima di tutto, si tratta di una tecnica comunque invasiva e distruttiva (anche se a livello submillimetrico), quindi accettabile solo su alcuni tipi di opere. Per lo stesso motivo (microdistruttività), non è pensabile evidentemente poter effettuare mappature *x-y*, che porterebbero ad un allargamento del danno su un'area maggiore di quanto già avviene nella misura sul singolo punto. Inoltre, l'analisi quantitativa è molto meno affidabile (sempre in confronto alle IBA), con problemi in parecchi casi reali. Le cause principali sono la riproducibilità fra impulso e impulso non perfettamente controllabile e la dipendenza della risposta dalla composizione della matrice – il che richiede necessariamente misure relative, tramite l'analisi di standard di composizione analoga, non sempre facilmente disponibili. Infine, la sensibilità è notevolmente inferiore rispetto ad altre tecniche tra cui proprio le IBA, rendendo la LIBS inadatta ad esempio per studi di provenienza basati sulla rivelazione di elementi in traccia.

[1] LABEC, Laboratorio di tecniche nucleari per i Beni Culturali dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze; CEDAD, Centro Datazione e Diagnostica dell'Università del Salento; CIRCE, Centro di Ricerche Isotopiche per i Beni Culturali e Ambientali, Seconda Università di Napoli.

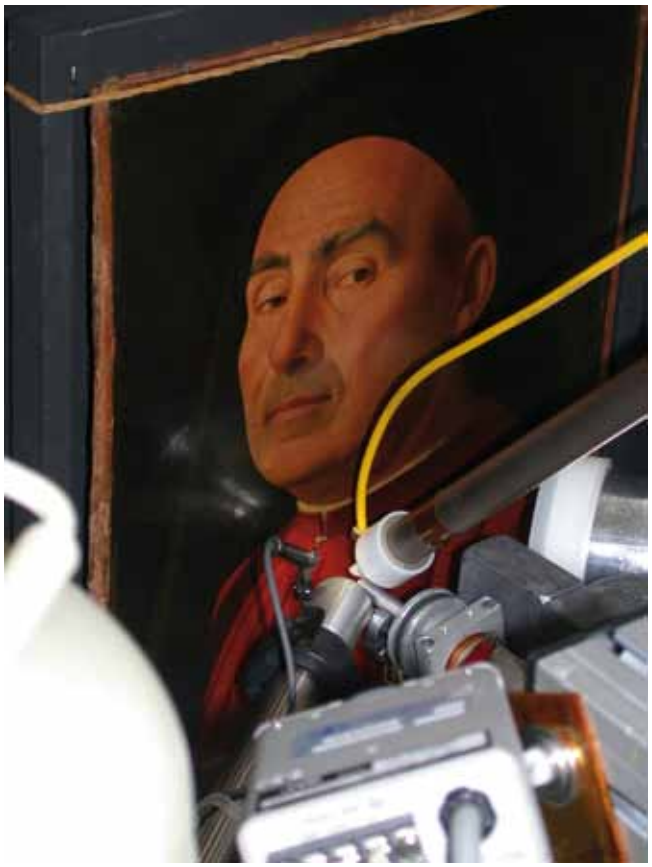
Anche le nuove generazioni di spettrometri per XRF (X-Ray Fluorescence) stanno facendo una notevole concorrenza alle IBA. Nella XRF – una fra le prime tecniche fisiche ad essere state utilizzate per la diagnostica dei Beni Culturali (vedi ad esempio [3]) – si inducono emissioni X caratteristiche degli elementi irraggiando il materiale con fasci di radiazione elettromagnetica primaria. I sistemi XRF, che come è noto si possono rendere facilmente portatili o almeno trasportabili, presentano di norma diverse limitazioni; ma negli ultimi anni si sono introdotte migliorie importanti che hanno significativamente ridotto queste limitazioni. Ad esempio, in alcuni set-up il range di elementi rivelabili è stato esteso verso *Z* più bassi rispetto alla XRF tradizionale, diminuendo con questo il divario rispetto alle prestazioni della PIXE; al limite, con certi sistemi XRF [4] si può adesso arrivare anche a rivelare il Na se è presente in concentrazioni dell'ordine di qualche per mille. Inoltre, c'è oggi la possibilità di utilizzare fasci X primari focheggiati grazie alle lenti policapillari (vedi ad esempio [5, 6]), che, oltre a misure puntuali su minuti dettagli, consentono perfino di ottenere mappature *x-y* [7]. Infine l'analisi XRF quantitativa ha raggiunto ormai buoni livelli di affidabilità (purché su campioni omogenei fino a profondità dell'ordine delle centinaia di micrometri).
Nel complesso quindi, queste nuove generazioni di XRF, relativamente economiche, e col vantaggio di poter effettuare analisi *in situ*, si presentano come un'alternativa molto valida alle misure PIXE con acceleratore. Tuttavia, restano dei punti di debolezza, che sono principalmente la sensibilità per bassi *Z*, comunque assai inferiore; un'informazione "multielementale" su un range meno esteso di *Z* rispetto alla PIXE (almeno facendo un'unica misura); la difficoltà di ottenere informazioni sul profilo degli elementi in funzione della profondità, a causa della elevata penetrazione della radiazione primaria[2]; sempre per questo motivo, una notevole interferenza dal substrato e di conseguenza una maggior problematicità nell'analisi quantitativa, nei casi in cui interessa l'analisi di strati sottili superficiali su un supporto di fondo, come nel caso dei dipinti.
Torniamo adesso alle tecniche di Ion Beam Analysis; con riferimento al loro impiego in analisi su beni artistici o comunque di elevato valore culturale, va innanzitutto ribadito che, sapendole usare, i risultati si ottengono in maniera assolutamente non invasiva e senza alcun danno ai materiali analizzati. Ciò, grazie alla possibilità di utilizzare correnti di fascio debolissime (a sua volta garantita dalle elevate sezioni d'urto dei processi fisici sfruttati) in maniera perfettamente controllata. Non hanno fondamento ad esempio i timori che qualcuno ancora avanza su presunti rischi di danno alle opere in relazione alle analisi di pigmenti di dipinti; se in qualche laboratorio sono stati prodotti piccoli danni visibili su dipinti è soltanto perché si è lavorato con densità di carica integrata del fascio sul bersaglio inutilmente elevata. Con bersagli dello spessore degli strati pittorici, e utilizzando sistemi di rivelazione in geometrie che ne ottimizzino l'efficienza, in due o tre minuti e con fasci intorno al mezzo millimetro di diametro a correnti dell'ordine della decina di pA, si ottengono statistiche di conteggio più che soddisfacenti *senza danno di sorta*[3]. Non è quindi questione di minimizzare la portata del problema del danno come talvolta si sente fare ("si tratta comunque di aree molto piccole"; oppure "rispetto a un prelievo l'invasività è comunque minore"); se si lavora correttamente, il problema *proprio non esiste!*
Detto questo, che è un prerequisito fondamentale, vanno poi ricordati alcuni sviluppi recenti nell'uso delle IBA, che sono stati molto significativi per le applicazioni ai Beni Culturali. Senz'altro importante ad esempio è stata l'idea della PIXE differenziale [9–11], che consente di ottenere in maniera non distruttiva informazioni sulla distribuzione degli elementi in profondità, ripetendo la misura su un punto a energie di fascio diverse. Nel caso ad esempio dei dipinti su tavola, si ha una sequenza di strati che hanno spessori tipici delle decine di micrometri (dalla superficie verso l'interno: vernice protettiva, strati pittorici, imprimitura, preparazione). I range di protoni da qualche centinaio di keV a qualche MeV di energia nei materiali caratteristici sono proprio tali che, analizzando successivamente lo stesso punto a queste energie, si può sondare solo lo strato superficiale protettivo, oppure via via interessare anche gli strati pittorici, e poi l'imprimitura e la preparazione. Di conseguenza, il confronto fra gli spettri X ottenuti alle diverse energie di fascio dà informazioni molto utili per discriminare fra la composizione dei differenti strati. Naturalmente, occorre tenere conto di molti fattori, come il variare della sezione d'urto di produzione X via via che l'energia del fascio diminuisce nel penetrare all'interno degli strati, l'autoassorbimento degli X in uscita verso il rivelatore, e non ultimo la variabilità fra

[2] Gioca anche il fatto che, per via dei diversi meccanismi di interazione nel bersaglio, per un fascio di radiazioni elettromagnetiche non esiste neppure un "range" di penetrazione ben definito come nel caso di un fascio di particelle

[3] In altri materiali quali le ceramiche smaltate o i vetri possono invece prodursi, anche con bassissime densità di carica, temporanee alterazioni cromatiche, dovute alla creazione di centri di colore nel materiale isolante a causa dell'impiantazione delle particelle del fascio. Ma queste alterazioni scompaiono spontaneamente in breve tempo, tanto più se è possibile – come è in quei materiali – accelerare il processo di annealing del "danno" con un riscaldamento locale. In pochi minuti l'alterazione cromatica scompare del tutto [8].

1

punto e punto degli spessori, che nel caso delle pitture non sono quindi in sé un qualcosa di rigorosamente definibile. Perciò va usato – come sempre – buon senso, e prima di attribuire significati "assoluti" alle misure occorre effettuarne su parecchi punti di una data campitura per controllarne la variabilità. La PIXE differenziale è stata utilizzata su dipinti di grandi maestri come Leonardo, Antonello, Vasari [12–14] (si vedano le fig. 1, 2, 3). È stato possibile non solo individuare la "tavolozza" usata dagli artisti, ma dare risposte a domande più difficili e dettagliate che venivano poste dagli storici e dai restauratori: capire se la tecnica pittorica usata era quella di mescolare i pigmenti o se si erano cercati effetti di trasparenza sovrapponendo sottili strati pittorici separati; determinarne in questo caso l'ordine e gli spessori (che ad esempio sono risultati sottilissimi, poco più di 10 μm, in alcune campiture del dipinto di Leonardo analizzato all'acceleratore di Firenze [12]); verificare la presenza di depositi o alterazioni superficiali da rimuovere in fase di restauro [14].
Un altro importante passo avanti nella significatività delle misure IBA nel settore dei Beni Culturali è stata la messa a punto di sistemi di *micro*fascio *esterno* a scansione, con acquisizione dati in list-mode delle terne *E, x, y* (*E* energia rivelata, quindi elemento presente; *x, y* coordinate del punto da dove è emessa la radiazione rivelata di energia *E*), per costruire mappe di composizione elementale con elevata risoluzione spaziale. In questo caso, le informazioni composizionali di un dettaglio di un'opera, risolte su dimensioni quasi microscopiche, sono rese possibili [16] dall'abbinamento di un set-up in fascio esterno con la sua riduzione a dimensioni effettive fino a meno di 10 μm di diametro sul bersaglio (grazie a focheggiamenti forti con multipletti di quadrupoli ed estrazione in atmosfera tramite finestre ultrasottili di Si_3N_4, anche di soli 100 nm di spessore). Anche in questo caso, la maggiore potenzialità analitica che deriva da questi sviluppi può servire a rispondere a precise domande degli storici dell'arte e dei restauratori. Come esempio, si possono citare le misure fatte col microfascio a scansione sul Ritratto Trivulzio di Antonello da Messina [13] (fig. 2) che



2

Fig. 1 Un dipinto su tavola di Leonardo (Madonna dei Fusi, versione ex-Reford, collezione privata) durante le analisi IBA presso l'acceleratore di Firenze. In questo caso si sono usate sia la tecnica della PIXE differenziale [12] che l'analisi combinata PIXE-PIGE [15], rispettivamente per ottenere in maniera completamente non distruttiva informazioni sulla sequenza stratigrafica della pittura e per identificare materiali a basso *Z* negli strati pittorici al di sotto della vernice protettiva.

Fig 2 Un dipinto su tavola di Antonello da Messina (cosiddetto Ritratto Trivulzio, Torino Museo Civico di Palazzo Madama) durante le analisi al microfascio esterno a scansione del laboratorio LABEC di Firenze. Su questo dipinto si sono effettuate [13] misure di PIXE differenziale e mappature di composizione elementale, che hanno risolto alcuni dubbi sulle tecniche adottate dall'artista e contribuito alle decisioni operative nell'intervento conservativo.

Fig. 3 Analisi IBA di una tavoletta del Vasari, dal complesso della Pala Albergotti, attualmente conservato nella chiesa delle Sante Flora e Lucilla di Arezzo. Anche in questo caso i risultati delle analisi [14] condotte al LABEC di Firenze preliminarmente ai restauri hanno contribuito alle scelte tecniche dell'intervento conservativo.

3

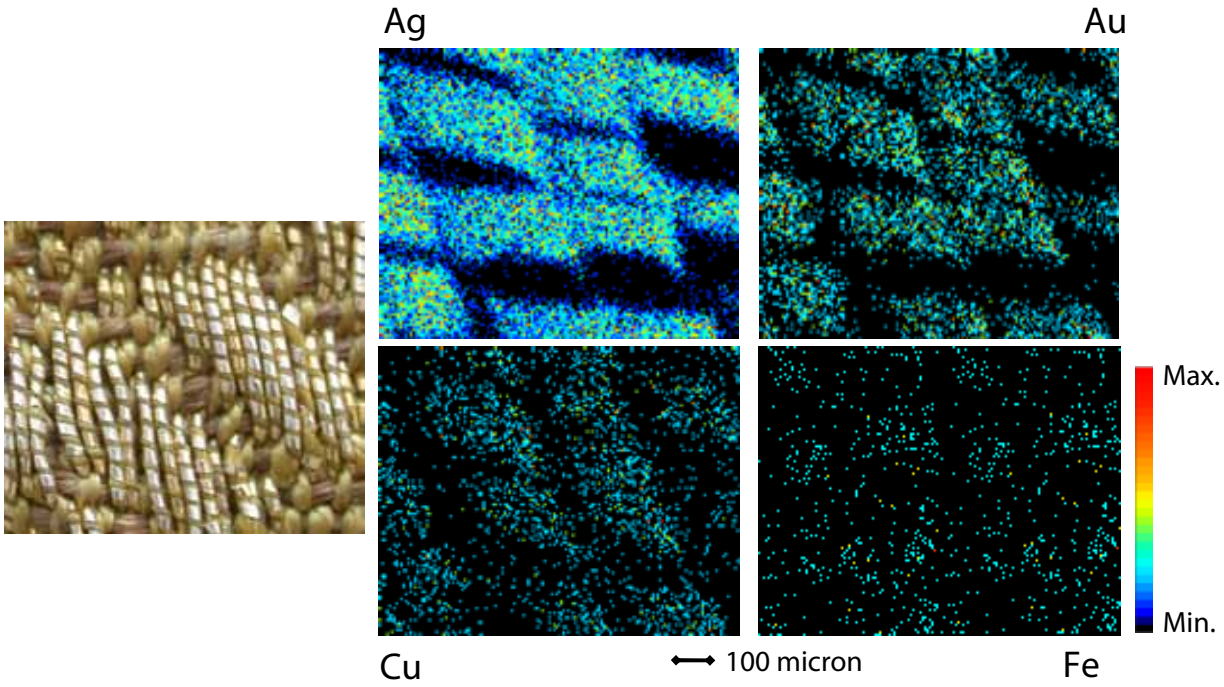


Fig. 4 Esempio di mappe elementali ottenute in una misura PIXE con microfascio esterno a scansione: analisi di un ricamo a fili dorati (misure effettuate al LABEC con un fascio esterno di protoni da 3 MeV e dimensioni di circa 20 μm). La fotografia a sinistra mostra una porzione della superficie del ricamo, realizzato con la tecnica cosiddetta a "or nué" che utilizza fili di seta sui quali è avvolto un sottilissimo nastro dorato; le mappe sulla destra mostrano la distribuzione spaziale dei raggi X rivelati all'interno di una delle aree analizzate. Argento, oro e rame sono chiaramente presenti all'interno del nastro metallico (è riconoscibile nelle mappe l'avvolgimento a spirale), mentre il ferro è correlato al filo di seta scoperto.

hanno consentito di capire la tecnica usata da Antonello per ottenere particolari effetti di ombreggiatura e di prendere decisioni ponderate sugli interventi di ripulitura da effettuare in superficie; oppure le misure sui ricami a filo dorato, dalle quali si sono potute ricavare informazioni quantitative sul tipo di materiale utilizzato e distinguerne diverse tipologie composizionali, associate a diverse tipologie stilistiche dei ricami [17] (fig.4).

Non sempre però è necessaria una risoluzione spaziale così spinta, mentre può essere molto utile mappare la composizione anche con minor risoluzione (ordine del centinaio o di qualche centinaia di micrometri), ma su superfici relativamente grandi, fino a qualche centimetro quadro [18]. Per queste applicazioni sono stati sviluppati sistemi di millifascio esterno (ottenuto per semplice collimazione), sempre a scansione e con acquisizione dati *E, x, y* in list-mode; in questi sistemi, non è il fascio a muoversi sul bersaglio – come nel caso dei microfasci – ma è il bersaglio che si muove davanti a un fascio fisso, grazie a opportuni stage di movimento.

Come già si accennava all'inizio di questo paragrafo, di grande utilità specificamente nel campo dei Beni Culturali si sono dimostrati i sistemi integrati di più tecniche IBA utilizzate simultaneamente. Ad esempio, l'acquisizione anche dei raggi gamma (PIGE) emessi sotto fascio dai nuclei degli elementi a basso *Z* permette di metterne in evidenza la presenza anche al di sotto di strati superficiali di qualche decina di micrometri. I raggi X di questi elementi sono di energia troppo bassa e sono totalmente assorbiti dallo strato superficiale, mentre i raggi gamma, di molto maggiore energia, non presentano problemi di assorbimento. D'altra parte proprio per gli elementi a basso *Z* è più probabile in linea di massima indurre interazioni inelastiche nucleari – con conseguenti diseccitazioni gamma – perché la repulsione coulombiana tra proiettile e bersaglio è minore, e le particelle possono avvicinarsi di più al nucleo bersaglio facendo entrare in gioco interazioni di tipo nucleare. L'uso della PIGE ha consentito di dare risposte importanti in diversi casi: ad esempio la rivelazione dei gamma del Na ha consentito l'identificazione certa del blu di lapislazzuli al di sotto della vernice protettiva nel dipinto di Leonardo mostrato sopra nella fig. 1 [15], e sempre la rivelazione dei gamma del Na ha

prodotto diverse applicazioni nello studio di vetri antichi, ad esempio in [19].
E a proposito di misure simultanee con diverse tecniche IBA, va citato senz'altro lo sviluppo della IBIL (Ion-Beam–Induced Luminescence), anche con mappatura e con microfascio esterno, per aggiungere informazioni non solo elementali [20, 21]. La IBIL è l'emissione di fotoni nel IR/VIS/UV (200–900 nm nel set-up allestito al LABEC) da parte di un materiale eccitato da ioni con le solite energie di qualche MeV. Essa consente per alcuni materiali, in via di principio, di determinare: la natura dei legami molecolari, lo stato di valenza degli ioni, le caratteristiche dei reticoli cristallini, e infine la presenza di elementi in tracce, impurezze, difetti strutturali. La IBIL fornisce, anche con fasci di debolissima intensità, segnali molto intensi e può essere utile anche per prevenire possibili insorgenze di danni dovuti appunto all'irraggiamento col fascio, in quanto una diminuzione dell'intensità del segnale IBIL si manifesta ben prima che l'interazione delle particelle del fascio col materiale produca un qualche danno visibile.
Infine, anche se in questo caso non si tratta più di tecniche IBA convenzionali e c'è la necessità di usare acceleratori a energie molto maggiori, come recente sviluppo delle analisi con fasci ionici che hanno aperto in qualche modo un nuovo campo di applicazioni va ricordata la possibilità di analisi di "quasi bulk" utilizzando – con fasci di protoni a energie delle decine di MeV– la tecnica DPAA (Deep Proton Activation Analysis) [22].
Nel complesso dunque, ci sembra si possa senz'altro affermare che usando le tecniche IBA si possono ottenere nel campo dei Beni Culturali – in maniera assolutamente non distruttiva, in senso molto ampio – informazioni di una qualità e ricchezza insuperate.
Naturalmente, non è detto che questa grande potenzialità sia sempre indispensabile. Perciò è cosa saggia (come per qualunque tecnica del resto) un uso ragionato, in relazione al particolare problema che viene posto dagli storici dell'arte e dai restauratori, alla complessità della strumentazione da usare e ai vincoli specifici che si possono avere (ad esempio le difficoltà di movimentazione dell'opera da analizzare): è in altri termini importante stabilire dei protocolli caso per caso, che prevedano magari, prima, delle misure *in situ* con altre tecniche e, successivamente, la possibilità di utilizzare tecniche di fascio per completare e/o meglio chiarire i risultati.

2.2 Datazioni col radiocarbonio e Accelerator Mass Spectrometry

Perché siano più pregnanti le considerazioni che faremo in seguito, richiamiamo brevemente i principi fondamentali del metodo del ^{14}C.
La datazione di un reperto di origine organica si basa sul fatto che, assumendo che dopo la morte dell'organismo non ci sia più alcun meccanismo di assimilazione o formazione di ^{14}C, la relazione fra tempo trascorso dalla morte e concentrazione residua di ^{14}C è data proprio dall'equazione del decadimento radioattivo. Chiamando ^{14}R il rapporto fra il numero di atomi di ^{14}C e quello totale di atomi di carbonio, si ha allora $^{14}R(t) = {}^{14}R(0)\, e^{-t/\tau}$. Perciò, la "età del reperto", cioè il tempo trascorso dalla morte dell'organismo di origine, si può determinare misurando la concentrazione residua di ^{14}C, $^{14}R(t)$. Assumendo di conoscere la concentrazione $^{14}R(0)$ al momento della morte (valore convenzionale $^{14}R(0)_{conv} = 1.18 \times 10^{-12}$), e assumendo un valore convenzionale della vita media τ del ^{14}C ($\tau_{conv} = 8033$ anni), dalla misura del ^{14}R residuo si deduce una età anch'essa evidentemente convenzionale ("radiocarbon age", t_{rC}):

$$t_{rC} = \tau_{conv} \ln \frac{{}^{14}R(0)_{conv}}{{}^{14}R(t)} \ .$$

La radiocarbon age non corrisponderà all'età vera, per via dell'arbitrarietà delle assunzioni fatte. In particolare, sappiamo con certezza che a causa di molti fattori sia naturali che antropogenici, il valore ^{14}R (0) non è sempre stato lo stesso in passato: ha fluttuato anzi notevolmente, e bisogna quindi tenerne conto correggendo opportunamente il valore della t_{rC}. E si può fare: grazie a un gran numero di misure di concentrazione residua di ^{14}C, effettuate su campioni la cui età è misurabile con tecniche indipendenti, si è potuta infatti progressivamente costruire una curva di calibrazione (valore convenzionale misurato t_{rC} *vs.* età vera) che oggi arriva fino a quasi 50 000 anni fa [23]. Con questa curva si può allora correggere, nelle misure su reperti incogniti, l'età convenzionale inizialmente ottenuta, convertendola in una data vera "calendariale". La fig. 5 mostra ad esempio l'andamento della curva di calibrazione per gli ultimi 2000 anni e la fig. 6 due esempi grafici di procedura di calibrazione.
Un altro aspetto che è importante richiamare sulle datazioni col ^{14}C è quello dell'incertezza del risultato. Una prima causa di incertezza è dovuta alla propagazione su t_{rC} dell'errore sul dato misurato direttamente, cioè la concentrazione $^{14}R(t)$. Da $t_{rC} = \tau_{conv} \ln \frac{{}^{14}R(0)_{conv}}{{}^{14}R(t)}$, segue immediatamente che

$$\delta t_{rC} = \tau \frac{\delta {}^{14}R(t)}{{}^{14}R(t)}$$

Dato che τ è circa 8000 anni, un'incertezza ad esempio di un ± 1% in $^{14}R\,(t)$ ne produce una di ± 80 anni in t_{rC}. A questo si aggiunga che spesso la procedura di ricalibrazione fa aumentare l'incertezza, sia perché anche la curva di calibrazione – essendo stata costruita essa stessa sulla base di misure – ha i suoi margini di errore (si noti nelle fig. 5 e

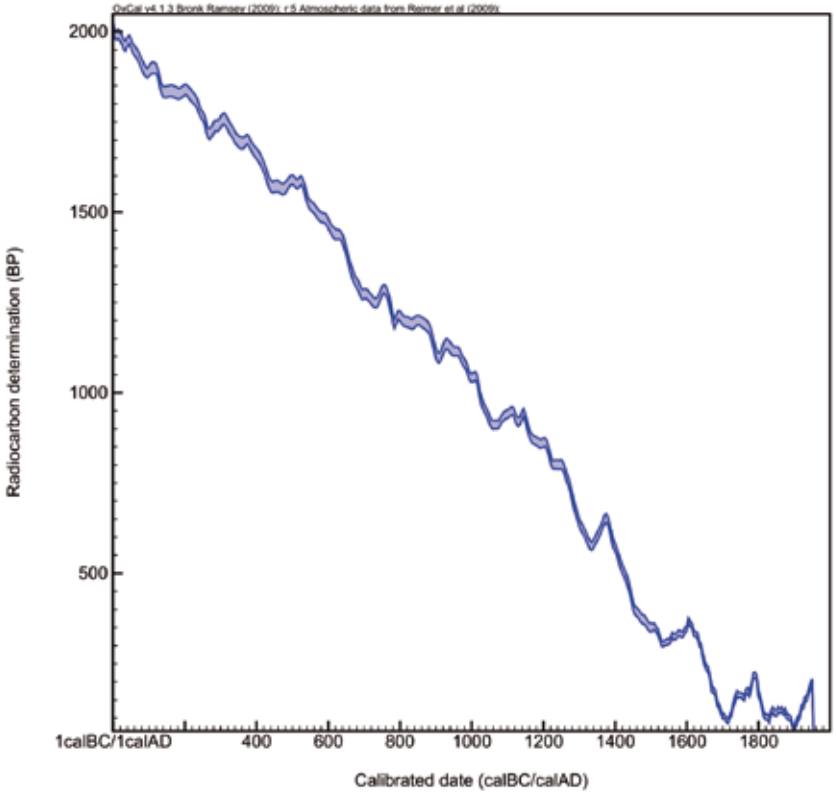


Fig. 5 Andamento della curva di calibrazione negli ultimi due millenni (la rappresentazione grafica è quella che si ottiene usando il software OxCal, versione 4 [24], sviluppato presso l'Università di Oxford, Oxford Radiocarbon Accelerator Unit, e a disposizione gratuita di tutta la comunità dei ricercatori). In ascissa, la data vera (BC=before Christ, AD=Anno Domini); in ordinata, l'età convenzionale di radiocarbonio t_{rC}, espressa in anni BP (before present, dove, sempre per convenzione, il "present" è l'anno 1950).

6 che si tratta non di una linea, ma di una "fascia"), sia per il suo andamento in alcuni tratti "quasi orrizzontale", o talvolta oscillante, che può far corrispondere a un piccolo intervallo di t_{rC} ottenuto dalla misura, un range anche parecchio più grande di valori per la data calendariale corrispondente (come in fig. 6b).

In generale si assume come obiettivo di una buona datazione col radiocarbonio, per reperti di epoca storica o poco più vecchi, un errore nel valore misurato per ^{14}R non superiore al ± 0.5% (cioè un errore propagato su t_{rC} di ± 40 anni), fermo restando che poco si potrà fare se poi nella ricalibrazione si capita in una zona di curva "infelice" che può far aumentare l'incertezza effettiva sulla data calendariale (ma in casi fortunati, se la curva è localmente monotona e a elevata pendenza – come in fig. 6a – si può invece addirittura diminuire l'incertezza finale!).

Visto allora che si tratta di misurare un valore di ^{14}R che è al massimo di 10^{-12}, e che vogliamo misurarlo con una precisione dello 0.5% o meglio, si capisce subito bene che non è cosa facile, perché si tratta di coniugare una enorme sensibilità con un'ottima precisione, e come i fisici sanno fin dai tempi della Fisichetta I, le due cose sono difficili da far andare d'accordo. Ci si riesce in effetti, però, usando la spettrometria di massa con acceleratore (vedi ad esempio [26, 27]). Grazie a "filtri" di soppressione degli interferenti isobarici (che sono i nemici principali quando si richiedono questi livelli di sensibilità in una misura di rapporto isotopico) si riesce ad arrivare oggi a un livello minimo di rivelabilità di ~10^{-15} in ^{14}R (che vuol dire un valore massimo di t_{rC} del reperto superiore a 50 mila anni!). Come è noto infatti, in un acceleratore Tandem si ottiene una poderosa reiezione degli interferenti isobarici grazie proprio alle sue modalità di funzionamento; in particolare quella degli isobari molecolari $^{12}CH_2$ e ^{13}CH deriva dalla dissociazione di tali molecole nella fase di stripping degli elettroni al terminale di alta tensione. Ma oltre all'enorme sensibilità, l'AMS possiede anche l'altro requisito richiesto, quello della precisione: misure allo 0.5% sono ormai standard grazie all'elevata efficienza dei processi di sputtering nelle sorgenti dei Tandem dove si colloca il materiale ottenuto dal campione da datare, all'efficienza di trasmissione del fascio fino all'analisi magnetica e elettrostatica di massa, e a quella del

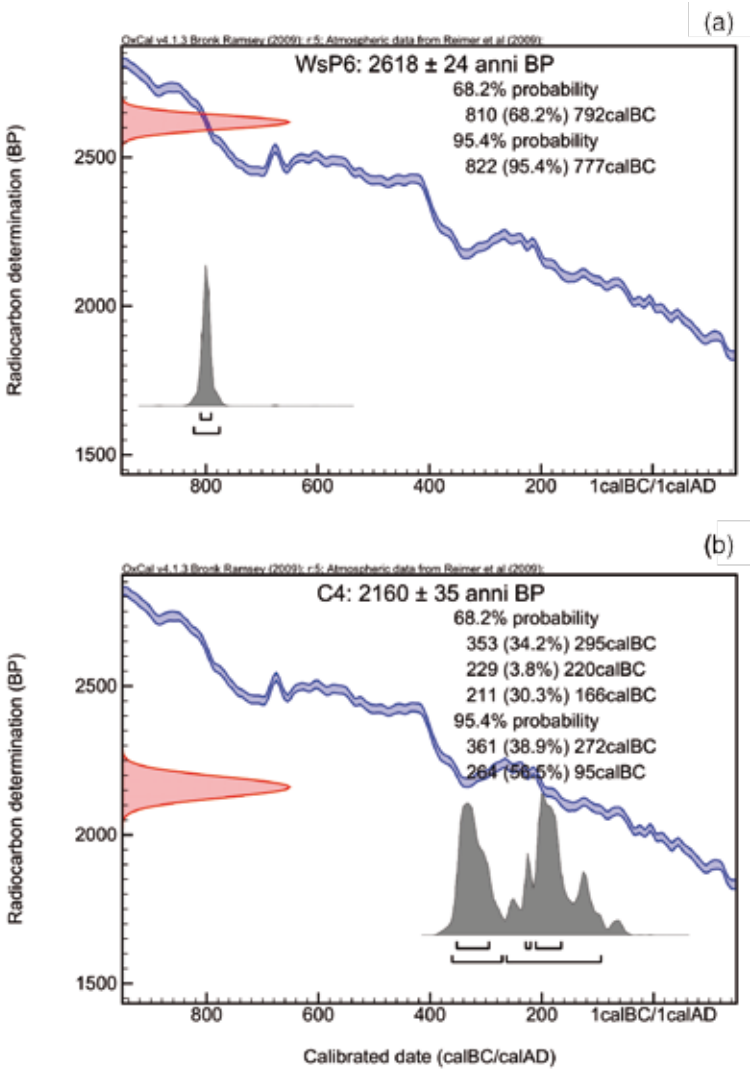


Fig. 6 Esempi di calibrazione dell'età convenzionale di radiocarbonio ottenuti utilizzando il già citato programma OxCal, versione 4. I due esempi corrispondono a misure effettuate al LABEC su campioni di carbone rinvenuti in uno scavo nel Parco Archeologico di Baratti e Populonia [25]. L'età convenzionale di radiocarbonio è rappresentata sull'asse *y* in rosso come una variabile a distribuzione gaussiana; sull'asse *x* è mostrata in grigio la corrispondente distribuzione di probabilità della data calibrata (calcolata usando la curva di calibrazione) per la quale sono riportati anche gli intervalli al 68% e al 95% di livello di confidenza. A causa dell'andamento irregolare della curva di calibrazione, la distribuzione di probabilità della data calibrata non è evidentemente gaussiana; in particolare (vedi b)), a una età convenzionale misurata possono corrispondere anche più intervalli possibili di età calibrata.

conteggio finale nel rivelatore. È questa elevata efficienza dei processi nella AMS che fa sì che le statistiche di conteggio richieste (ovviamente, si devono superare i 40 000 conteggi per un'incertezza statistica <0.5%) si raggiungano in tempi molto brevi (dell'ordine della ventina di minuti complessivi per un campione recente), e sacrificando soltanto pochi milligrammi del materiale che si vuole datare. Rispetto alla tecnica tradizionale del β-counting, ci sono circa tre ordini di grandezza di guadagno per quanto riguarda le masse necessarie alla misura, e questo guadagno è stato decisivo per la possibilità stessa di datare certi tipi di reperti, o perché di valore simbolico o archeologico o artistico tale da non consentire sacrifici di quantità significative, o perché, addirittura, pur essendo "sacrificabili" hanno essi stessi proprio masse di pochi milligrammi.

Grazie all'AMS, oggi le datazioni ^{14}C sono veramente tantissime (si può stimare che nel mondo ne vengano fatte tra le dieci e le ventimila l'anno). Ogni tanto qualche risultato assurge agli onori della cronaca anche dei media (specie quando vengono confutate tradizioni o convincimenti radicati nella cultura o nella religione) [28–32]. Ma la maggior parte delle datazioni che si fanno restano ignote al grande pubblico, pur costituendo uno strumento fondamentale per l'avanzamento delle conoscenze in campo archeologico soprattutto, ma talvolta anche in campo storico-artistico. È davvero un grande servizio che la fisica nucleare, e la tecnologia associata, offrono agli archeologi e agli storici. La possibilità di datare reperti di pochi milligrammi è stata decisiva anche per la costruzione stessa della curva di calibrazione [33], che come abbiamo visto sopra è l'altro pilastro su cui si fonda la possibilità di effettuare una datazione calendariale e non convenzionale. Solo grazie all'AMS si sono potuti datare così tanti reperti di età indipendentemente nota, e quindi costruire una curva affidabile estesa nel tempo fino quasi ai citati limiti di sensibilità del metodo, cioè i 50 000 anni.

In definitiva, pur essendo stata introdotta ormai trenta anni fa, la AMS è ancora oggi l'unica tecnica ragionevolmente possibile per le datazioni col radiocarbonio, e non si intravedono proprio alternative. Ma all'interno della AMS c'è ancora spazio per nuovi sviluppi: le procedure si sono affinate, la tecnologia corre e l'affidabilità degli acceleratori e

in genere dei sistemi per AMS è molto cresciuta negli ultimi anni.
Per quanto riguarda le procedure, uno sviluppo relativamente recente, sempre legato alla AMS perché richiede di datare reperti di piccolissima massa, è quello del cosiddetto "wiggle matching". Nella misura di un singolo reperto, se non ci fosse la necessità di ricalibrare, si potrebbe pensare di poter rendere l'incertezza su t_{rC} piccola a piacere, semplicemente aumentando la statistica di conteggio per ridurre l'incertezza nella misura della concentrazione residua di ^{14}C. Ma a causa della necessità di ricalibrare, con l'incertezza aggiuntiva che essa comporta nella determinazione dell'età vera, non ha molto senso spingere il limite della statistica di conteggio fino a ridursi al di sotto di qualche per mille. Tuttavia se si dispone di più reperti di cui si conosca a priori la *differenza di età* (questo è il caso ad esempio di frammenti di anelli diversi di tronchi di albero[4] rinvenuti in contesti archeologici o all'interno di rocce formatesi per eruzioni vulcaniche, o prelevati da tavole lignee), si possono sfruttare proprio le oscillazioni della curva di calibrazione per migliorare la precisione delle datazioni. Se infatti alle misure delle età di questi campioni si aggiunge l'informazione sulla differenza nota fra la loro età vera, si pone di fatto un "vincolo" ai singoli risultati, "condizionando" le singole distribuzioni di probabilità delle date calibrate ottenute per i vari reperti a essere compatibili anche con differenze note fra di esse. Ciò può portare a una sensibile riduzione dell'incertezza, fino a pochi anni.
Un caso che ha avuto molta risonanza in cui si è potuta adottare questa tecnica è stata la ricollocazione cronologica della famosa eruzione del vulcano dell'isola greca di Santorini [34]. L'eccezionale ritrovamento di un tronco di albero rimasto intrappolato nella lava – nel quale si potevano ben distinguere ancora gli anelli di accrescimento – ha permesso di costruire una sequenza di campioni di differenza di età nota, che sono stati datati con AMS; la calibrazione di questa sequenza tenendo conto del wiggle matching ha ristretto l'intervallo temporale a cui far risalire l'eruzione al periodo compreso fra il 1627 e il 1600 a.C. (al 95% di probabilità). Questa datazione è di circa cento anni precedente a quanto risultava dalle ricostruzioni storiche, e ne è scaturito un dibattito che ha avuto vasta eco e che è tuttora in corso.
Il wiggle matching evidentemente non è sempre applicabile, e comporta comunque un grosso sforzo sperimentale perché il miglioramento che ne consegue per la datazione richiede parecchie misure per essere significativo; nella maggior parte dei casi, o proprio non si dispone di reperti su cui si possa adottare la tecnica, o comunque il gioco non varrebbe la candela essendo comunque sufficiente la precisione della data ottenuta da una singola misura. Va messo in evidenza comunque che è solo la capacità dell'AMS di ottenere una data da campioni di piccola massa che, nel caso, rende possibile il wiggle matching.
E a proposito di variazioni nella concentrazione di equilibrio del ^{14}C nel passato, c'è un'anomalia molto particolare ancora poco sfruttata in applicazioni dedicate ai Beni Culturali. È il cosiddetto "bomb peak", cioè il rapidissimo aumento della concentrazione atmosferica di ^{14}C che si è avuto nel secondo dopoguerra a causa dei test nucleari condotti in atmosfera da varie potenze mondiali fino al trattato di non proliferazione del 1963. A causa di queste esplosioni, i neutroni emessi nelle fissioni hanno prodotto una enorme quantità aggiuntiva di ^{14}C in atmosfera (reazione $^{14}N(n_{th}, p)^{14}C$), che ha portato quasi a raddoppiare in pochi anni, fra il 1955 e il 1964, la concentrazione di equilibrio. Successivamente, essendo cessati i test in atmosfera, la concentrazione si è di nuovo abbassata progressivamente via via che l'eccesso di molecole $^{14}CO_2$ veniva riassorbito nel ciclo naturale del carbonio, in particolare diluendosi in quell'enorme serbatoio che sono gli oceani. Una curva che rappresenta il "bomb peak" è riportata in fig. 7.
Le variazioni così rapide e grandi nelle concentrazioni di equilibrio in atmosfera si sono ripercosse anche sugli organismi viventi in quegli anni, offrendo così una possibilità molto chiara ad esempio di discriminazione fra "prima" e "durante" il periodo considerato, e anche da anno a anno al suo interno. Molte e interessanti sono le applicazioni in campo forense e biologico [36, 37], ma le stesse variazioni possono essere utilizzate ad esempio per la possibile scoperta di falsificazioni recenti di opere della prima metà del XX secolo.
Infine, dal punto di vista degli sviluppi strumentali dell'AMS, un trend che sembra esserci è quello verso macchine di tensione più bassa. All'inizio, i Tandem che venivano usati erano quelli ereditati dalle misure di fisica nucleare di base, quindi molti avevano tensioni massime di terminale di parecchi MV; poi se ne sono cominciati a costruire di dedicati (progettati per massimizzare ad esempio la trasmissione del fascio) con tensioni massime intorno ai 2.5–3 MV. Recentemente, sono state messe sul mercato anche macchine con più basse tensioni di terminale massime, più maneggevoli e economiche. Ce ne sono da 500 kV, ma sono stati costruiti sistemi sperimentali dedicati anche di soli 200 kV [38]. Ovviamente sono macchine di dimensioni più compatte, ma paradossalmente sono più "difficili" nell'uso. Infatti, l'efficienza di stripping al terminale del Tandem per gli stati di carica positiva multipla è minima dopo una prima accelerazione a un'energia così bassa, e quindi, tipicamente,

[4] In un tronco di albero, ogni anno si forma un nuovo anello, quello più esterno, che è l'unico che scambia con l'atmosfera. Perciò dalla misura di radiocarbonio l'età del materiale di un anello più interno ci si aspetta che risulti maggiore di quella di uno più esterno, di tanti anni quanta è la differenza di posizione fra gli anelli.

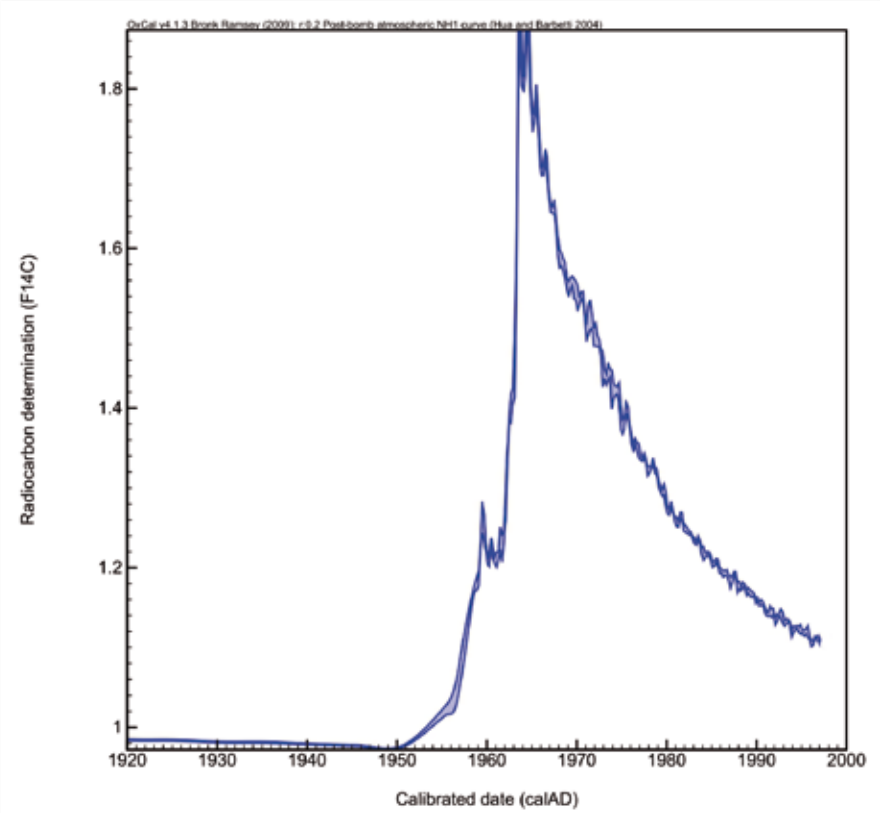


Fig. 7 Variazione relativa della concentrazione atmosferica di ^{14}C misurata durante gli ultimi decenni (da [35]). I valori riportati si riferiscono a misure effettuate nell'emisfero settentrionale (nella zona compresa fra il 40° parallelo e il polo nord). L'ordinata rappresenta la frazione rispetto al valore convenzionale di ^{14}C nel 1955.

ad essere analizzati sono gli ioni ^{14}C con stato di carica 1^+, con una più bassa efficienza di soppressione degli isobari molecolari. Inoltre, l'energia finale molto più bassa rende il conteggio finale più critico: ad esempio la perdita di energia nello spessore morto del rivelatore (o nella finestra di ingresso se si lavora con contatori a gas) è elevata e produce un grosso straggling, rendendo difficili o impossibili tecniche come quella dell'ulteriore discriminazione in un rivelatore ΔE - E, o comunque impedendo la discriminazione di eventuali interferenti residui basata su piccole differenze nell'energia finale. Molti progressi sono stati comunque fatti per superare questi problemi, e la precisione della misura può avvicinarsi a quella ottenibile con macchine più grosse. È vero però che, proprio per la sofisticazione degli accorgimenti adottati per aggirare e superare i problemi, si tratta di macchine che devono ancora – e diremmo ancor più di quelle più grosse – rimanere nelle mani dei fisici: lo sperato salto di qualità di una macchina per datazioni do-it-yourself da parte degli archeologi sembra ben lungi dall'essere a portata di mano.

3 Conclusioni

Ci sembra quindi di poter tranquillamente concludere esprimendo la sicura convinzione che ci sia ancora tanto spazio per continuare a lavorare nel campo dei Beni Culturali con le tecniche nucleari, in maniera non solo stimolante per noi fisici, ma veramente utile per la comunità degli studiosi e dei conservatori. Naturalmente occorre avere la capacità di utilizzare queste tecniche al meglio e l'equilibrio per farlo nella giusta misura – cioè quando sono effettivamente utili – integrandole o comunque affiancandole se necessario ad altri tipi di tecniche complementari, sia di tipo fisico che in altri ambiti scientifici. Il messaggio che emerge infatti da una seria analisi della situazione generale nel campo della "scienza per i Beni Culturali" è che è spesso opportuno utilizzare un'ampia gamma di tecniche per rispondere in maniera esaustiva alle domande (sempre più complesse e esigenti) che studiosi e restauratori ci pongono. Questa constatazione da un lato dimostra la vitalità dell'intero settore delle applicazioni scientifiche per lo studio del patrimonio culturale; dall'altro, testimonia che le culture umanistica e scientifica si integrano e si cercano sempre più spesso, con grande beneficio per la crescita di entrambe.

La portata delle applicazioni della scienza ai beni culturali è sempre più percepita a tutti i livelli, dal grande pubblico alle alte sfere della politica. Speriamo non ci si dimentichi che la possibilità di continuare ad alimentare queste applicazioni, migliorarle e comunque mantenerle attuali ed efficaci è qui – come in tutti i settori della scienza applicata – strettamente legata al mantenere viva anche la ricerca di base da cui le applicazioni discendono.

Referenze

[1] A. Giakoumaki, K. Melessanaki, D. Anglos, *Anal. Bioanal. Chem.,* 387 (2007) 749.
[2] J. Agresti, A. A. Mencaglia, S. Siano, *Anal. Bioanal. Chem.,* 395 (2009) 2255.
[3] S. Sciuti, G. Suber, *La Rivista del Nuovo Cimento,* 14, no. 7 (1991) 1.
[4] A. Migliori, P. Bonanni, A. Cagnini, L. Carraresi, N. Grassi, P. A. Mandò, S. Porcinai, *Application of a novel portable XRF spectrometer to a gilded bronze relief by L. Ghiberti from the Gate of Paradise of the Florcence Baptistery*, accettato per la pubblicazione su *Il Nuovo Cimento B*.
[5] M. A. Kumakhov, *X-Ray Spectrom.,* 29 (2000) 343.
[6] C. Fiorini, A. Longoni, A.Bjeoumikhov, *IEEE Trans. Nucl. Sci*., 48 (3) (2001) 268.
[7] A. Longoni, C. Fiorini, C. Guazzoni, S. Buzzetti, M. Bellini, L. Strüder, P. Lechner, A. Bjeoumikhov , J. Kemmer, *X-Ray Spectrom*., 34 (2005) 439.
[8] M. Chiari, A. Migliori, P. A. Mandò, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 188 (2002) 151.
[9] I. Brissaud, A. Guillò, G. Lagarde, P. Midy, T. Calligaro, J. Salomon, *Nucl. Instrum. Methods. B*,155 (1999) 447.
[10] C. Neelmeijer, I. Brissaud, T. Calligaro, G. Demortier, A. Hautojärvi, M. Mäder, L. Martinot, M. Schreiner, T. Tuurnala, G. Weber, *X-Ray Spectrom*., 29 (2000) 101.
[11] P. A. Mandò, M. E. Fedi, N. Grassi, A. Migliori, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 239 (2005) 71.
[12] N. Grassi, A. Migliori, P. A. Mandò, H. Calvo del Castillo, *X-ray Spectrom*., 34 (2005) 306.
[13] N. Grassi, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 267 (2009) 825.
[14] N. Grassi, P. Bonanni, C. Mazzotta, A. Migliori, P. A. Mandò, *X-Ray Spectrom*., 38 (2009) 301.
[15] N. Grassi, A. Migliori, P. A. Mandò, H. Calvo del Castillo, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 219-220 (2004), 48.
[16] L. Giuntini, M. Massi, S. Calusi, *Nucl. Instrum. Methods. A*, 576 (2007), 266.
[17] A. Migliori, N. Grassi, P. A. Mandò, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2339.
[18] N. Grassi, L. Giuntini, P. A. Mandò, M. Massi, Nucl. *Nucl. Instrum. Methods. B*, 256 (2007) 712.
[19] G. Weber, Y. Vanden Bemden, M. Pirotte, B. Gilbert, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 240 (2005) 512.
[20] S. Calusi, E. Colombo, L. Giuntini, A. Lo Giudice, C. Manfredotti, M. Massi, G. Pratesi, E. Vittone, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008), 2306.
[21] A. Quaranta, J. C. Dran, J. Salomon, M. Tonezzer, C. Scian, L. Beck, S. Carturan, G. Maggioni, G. Della Mea, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2301.
[22] G. Pappalardo, A. Esposito, G. A. Cirrone, G. Cuttone, S. Garraffo, L. Pappalardo, F. Rizzo, F. P. Romano, S. Russo, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 266 (2008) 2286.
[23] P. J. Reimer, *et al*; *Radiocarbon,* 51 (4) (2009) 1111.
[24] C. Bronk Ramsey, *Radiocarbon*, 51 (1), (2009) 337.
[25] A. Cartocci, M. E. Fedi, F. Taccetti, M. Benvenuti, L. Chiarantini, S. Guideri, *Nucl. Instrum. Methods. B*, 259 (2007) 384.
[26] C. Tuniz, J. R. Bird, D. Fink and G. F. Herzog, "*Accelerator Mass Spectrometry: ultrasensitive analysis for global science*" (CRC Press, Boca Raton) 1998.
[27] M. E. Fedi, "*Accelerator Mass Spectrometry for ^{14}C dating*", in *Organic Mass Spectrometry in Art and Archaeology*, a cura di M. P. Colombini and F. Modugno (Wiley, Chichester, UK) 2009, p. 459.
[28] P. E. Damon, *et al; Nature*, 337 (1989) 611.
[29] W. Kutschera, W. Müller, *Nucl. Instrum. Methods. B,* 204 (2003), 705.
[30] M. E. Fedi, A. Cartocci, F. Taccetti, P. A. Mandò, *Nucl. Instrum. Methods. B,* 266 (2008) 2251.
[31] D. Penny, Q. Hua, C. Pottier, R. Fletcherd M. Barbetti, *Nucl. Instrum. Methods. B,* 259 (2007) 388.
[32] M. E. Fedi, L. Carraresi, N. Grassi, A. Migliori, F. Taccetti, F. Terrasi, P. A. Mandò, "*The Artemidorus papyrus: solving an ancient puzzle with radiocarbon and Ion Beam Analysis measurements*", *Radiocarbon 52,* no. 2-3 (2010), in stampa.
[33] M. G. L. Baillie, *Radiocarbon* 51 (1) (2009) 361.
[34] W. L. Friedrich, B. Kromer, M. Friedrich, J. Heinemeier, T. Pfeiffer, S. Talamo, *Science,* 312 (2006) 548.
[35] Q. Hua e M. Barbetti, *Radiocarbon,* 46 (3) (2004) 1273.
[36] E. M. Wild, R. Golser, P. Hille, W. Kutschera, A. Priller, S. Puchegger, W. Rom, P. Steier, *Radiocarbon,* 40 (1) (1998) 273.
[37] S. Bernard, J. Frisén, K. L. Spalding, *Nucl. Instrum. Methods. B,* 268 (2010) 1295.
[38] H.-A. Synal, M. Stocker, M. Suter, *Nucl. Instrum. Methods. B,* 259 (2007) 7.

Pier Andrea Mandò

Pier Andrea Mandò, Professore Ordinario di Fisica Applicata nell'Università di Firenze e Direttore della Sezione di Firenze dell'INFN, da molti anni si è dedicato allo sviluppo di tecniche nucleari per applicazioni in vari settori, come lo studio dei Beni Culturali e il controllo dell'inquinamento atmosferico. Intorno a queste attività ha formato un gruppo di ricerca progressivamente affermatosi a livello internazionale, che ha portato alla costituzione a Firenze di un laboratorio INFN dedicato, il LABEC (Laboratorio di tecniche nucleari per i Beni Culturali). Nel 2009 ha ricevuto dalla Società Europea di Fisica il Premio IBA Europhysics per i suoi contributi nel campo della fisica nucleare applicata

Mariaelena Fedi

Mariaelena Fedi, laureata in Fisica nel 2000, PhD in Fisica nel 2004, è attualmente Ricercatore della Sezione di Firenze dell'INFN. Tiene dal 2005 il corso di Tecniche Analitiche Nucleari per la Laurea Specialistica in Conservazione e Diagnostica di Opere d'Arte all'Università di Ferrara. Si è inizialmente dedicata ad applicazioni di Ion Beam Analysis in vari settori, e in seguito alla creazione di un laboratorio di Spettrometria di Massa con Acceleratore presso il LABEC. È autrice di numerose pubblicazioni su riviste internazionali e su volumi sia a carattere scientifico che divulgativo.

Novella Grassi

Novella Grassi, laureata in Fisica nel 2002, PhD in Scienze per i Beni Culturali nel 2005, lavora presso il LABEC come Assegnista di Ricerca INFN. Tiene dal 2005 il corso di Laboratorio di Fisica per la Laurea Specialistica in Scienze per la Conservazione e il Restauro all'Università di Firenze ed è docente nel Master sui Beni Culturali all'Università di Pisa. Collabora con vari gruppi in Italia e all'estero per lo sviluppo di tecniche e strumentazioni innovative in particolare nel campo della Ion Beam Analysis. È autrice di numerose pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali e su volumi.

IL COLOSSO PESARESE NELLA SFIDA DELL'ALTA TECNOLOGIA INDUSTRIALE

La tecnologia è un concetto ampiamente impiegato al CERN, anche in semplici condutture, quando vengono impiegate per trasportare elio superfluido ai magneti superconduttori di LHC. Un'azienda capace di garantire il successo di un incarico da 35 milioni di franchi svizzeri, una grande opera industriale italiana.

Una consolidata esperienza acquisita in grandi progetti industriali realizzati in tutto il mondo, un imponente know-how tecnologico accumulato in 30 anni nell'ambito dell'ingegneria civile e petrolchimica, e nella costruzione dei grandi impianti per la produzione di energia. Engineering contractor del settore Oil &Gas dal 1979, la RENCO SpA, fondata da Rinaldo Gasparini a Pesaro, ha sempre seguito una filosofia d'impresa basata sul lavoro a stretto contatto col cliente, realizzando grandi opere industriali in Europa, Asia, Medio Oriente e Africa.
L'azienda è da anni una affermata realtà nel panorama delle imprese italiane che operano con successo in grandi progetti internazionali: 200 milioni di € il fatturato annuo, 2400 dipendenti in 33 filiali di 16 paesi, e una rete commerciale organizzata in 4 divisioni (Industria, Infrastrutture, Servizi, e Management). La vocazione è industriale, tuttavia l'azienda possiede le risorse umane e tecnologiche per intraprendere collaborazioni scientifiche, e da alcuni anni ha iniziato a farlo con istituti di ricerca internazionali. Si tratta di incarichi svolti soprattutto nell'ambito delle applicazioni per le energie rinnovabili, come le celle a combustibile per la produzione di idrogeno, e gli impianti fotovoltaici e idroelettrici. Nei progetti di collaborazione, il team aziendale di tecnici del settore Ricerca & Sviluppo viene sempre affiancato da specialisti in ingegneria pura, mobilitati, a seconda delle esigenze, da altri settori dell'azienda, per studiare soluzioni applicabili ai diversi progetti. Così le possibilità dell'industria possono soddisfare le esigenze della ricerca, del resto questo fa parte della filosofia dell'azienda: mobilitare risorse umane ed economiche per studiare le soluzioni migliori, in collaborazione col "cliente".

Segmenti di conduttura pronti per l'installazione.

Una grande opera

Progettazione e realizzazione di grandi strutture, competenza nella gestione della manutenzione di grandi impianti, consulenza tecnica e gestionale, fino alla formazione del personale tecnico di servizio. Queste caratteristiche fanno dell'azienda una delle pochissime candidate per un

Assemblaggio di una conduttura tramite processo semi-automatico di saldatura.

incarico da 35 milioni di franchi svizzeri: la costruzione di oltre 200 km di condutture speciali per trasportare acqua, aria compressa, azoto ed elio all'interno del tunnel di LHC.
Il CERN ha dovuto utilizzare criteri molto severi per individuare un fornitore con le adeguate capacità tecniche, ingegneristiche e finanziare per affrontare un incarico così impegnativo e costoso. Del resto il lavoro da realizzare deve assolvere, tra le altre, una funzione fondamentale per LHC: garantire il funzionamento dei suoi magneti superconduttori. Per produrre il campo magnetico che direziona i fasci di particelle lungo la traiettoria circolare di LHC, questi magneti devono essere mantenuti a una temperatura di 1,9° K (–271,1 °C) da un sistema criogenico di raffreddamento ad elio. Per lo scopo, è necessario realizzare un sistema di condutture che trasporti elio superfluido a tutti i magneti, situati lungo il percorso del tunnel.
L'azienda si aggiudica l'incarico nel 2002, e porta a termine i lavori nel 2007; per la RENCO è stato un incarico completamente nuovo, come sottolinea l'Ing. Claudio Ferri: "Per noi, una conduttura è abbastanza semplice da realizzare, ne abbiamo costruite a centinaia in tutto il mondo. Ma in questo caso, le specifiche tecniche richieste dal CERN hanno rappresentato quasi una sfida, per la novità dei materiali impiegati e per le lavorazioni avanzate che abbiamo effettuato. Ad esempio, non ci si era mai posti il problema di contenere un gas fugace come l'elio, e per giunta in una struttura così estesa. Abbiamo dovuto "passarla" ai raggi-X lungo tutta la sua lunghezza, per certificare la sua perfetta tenuta".

Un lavoro fuori dal comune

È stato realizzato un impianto unico nel suo genere, il cui principale elemento è costituito da una conduttura speciale di 180 km in acciaio galvanizzato, costata 27 milioni di franchi svizzeri. Questa struttura alloggia i circuiti di distribuzione delle linee criogeniche ad elio e delle linee che trasportano aria compressa e acqua demineralizzata.
A loro volta, queste linee sono realizzate con un sistema di condutture progettate per resistere alle sollecitazioni termiche, meccaniche e chimiche più "estreme". Il range di valori di pressione interna sopportabile è tra 10 e 25 bar, inoltre, in alcune linee, all'alta pressione si alternano condizioni di vuoto spinto, che hanno richiesto di effettuare studi strutturali *ad hoc*. Nelle linee criogeniche, le ampie variazioni di temperatura fino a valori prossimi allo zero assoluto, hanno richiesto di effettuare lavori supplementari. È stato necessario dotare le linee di uno speciale rivestimento esterno, per garantire l'isolamento termico, e sono stati installati 700 compensatori assiali. Si tratta di giunti di espansione, che compensano le contrazioni e le estensioni longitudinali del metallo causate dalle variazioni di temperatura al loro interno. Ogni segmento di queste linee compreso tra due giunti, può infatti contrarsi fino a 5 millimetri ed espandersi fino a 80, a seconda delle variazioni della temperatura all'interno.
Un altro intervento necessario per garantire la resistenza dell'impianto è stato il collaudo finale della struttura, che ha previsto il controllo ai raggi-X delle 26000 saldature delle linee (eseguite da due team distinti, vista la grande mole di lavoro). I tecnici RENCO hanno dovuto utilizzare, in un cantiere situato a 100 metri di profondità, le stesse attrezzature impiegate nei laboratori radiografici. Un autentico esempio

di trasferimento tecnologico, in cui l'industria riesce ad applicare alle lavorazioni meccaniche, procedure tipiche della scienza medica, grazie all'impiego di tecnici altamente specializzati.
Con la conclusione dei lavori su LHC, l'azienda ha ricevuto molti riconoscimenti dal CERN, per un incarico così impegnativo e realizzato brillantemente.
E oltre all'orgoglio di collaborare con successo a un'esperienza scientifica senza precedenti, l'azienda sa di aver meritato la fiducia del CERN per il futuro: è stato stipulato un nuovo contratto, da 6 milioni di franchi svizzeri, per realizzare impianti di condizionamento e di rilevazione magnetica nel tunnel di LHC.

Andrea Gemma
Master in Comunicazione delle Scienze all'Università di Padova

LA STORIA DI COME INVESTIRE IN R&S PORTA A CRESCERE

La SIMIC s.p.a. nacque a Camerana, in Piemonte, oltre trent'anni fa, dalla collaborazione di due tecnici che sono attualmente i due maggiori azionisti della Società.
Iniziarono con la carpenteria metallica leggera ma investirono in risorse e fatica – persino dopo l'alluvione del 1994 – fino a specializzarsi in carpenteria meccanica pesante, apparecchi a pressione per generazione di vapore, in particolare per il settore petrolchimico siderurgico e di produzione elettrica. Dalla produzione di attrezzature industriali sono poi passati anche al montaggio di impianti in cantieri esterni con squadre specializzate.
All'inizio dell'attività, la piccola azienda contava circa 30 dipendenti; oggi sono oltre 200 in uno stabilimento che copre un'area di 65 000 metri quadri.
Il segreto del successo della SIMIC sta nella sua flessibilità e capacità di diversificare e di sviluppare continui investimenti in nuovi prodotti, strutture e personale. Di recente, infatti la SIMIC ha acquisito una nuova area nel porto internazionale di Marghera, dove potrà costruire pezzi fino a 300 mm di spessore e peso fino a 2000 tonnellate.
La flessibilità e lo spirito di collaborazione dimostrato dall'azienda di Camerana sono state premiate con il premio "Golden Hadron Award", consegnato dal CERN come apprezzamento per la qualità del lavoro svolto e il rispetto degli impegni. Sì, perché anche per il Centro Europeo di Ricerca Nucleare (CERN) di Ginevra la SIMIC ha ottenuto più di una commessa per costruire componenti di quell'enorme puzzle che è

LHC Project CERN / End Cap Cryostats per l'esperimento ATLAS.

Alcuni dei 937 Vacuum Vessels realizzati per LHC.

Modello del proto-reattore nucleare ITER.

l'acceleratore di particelle sotterraneo LHC, la macchina più grande mai costruita dall'uomo.
L'azienda piemontese ha fornito gli End Cap Cryostats dell'esperimento ATLAS di LHC.
ATLAS è un rivelatore lungo 45 metri, alto 25 e pesante 7000 tonnellate: il peso della Torre Eiffel con le dimensioni di mezza cattedrale di Notre Dame di Parigi.
Ma SIMIC il premio Golden Hadron Award lo ha vinto per aver realizzato 937 "recipienti per il vuoto" Vacuum Vessels, contenenti le masse fredde dei dipoli magnetici superconduttori. Il 75% del totale dei dipoli.
Per realizzare questi progetti, l'azienda ha dovuto investire in macchinari e risorse specializzate, dando il via ad un'attività di elevato spessore tecnologico nell'ambito dell'alto vuoto e della criogenia, e facendo crescere il proprio know-how.
Grazie a questa esperienza la SIMIC ha vinto nuovi appalti internazionali, dagli impianti di "liquefazione dell'elio" in Qatar alle camere a vuoto per impianti criogenici in Corea, comprese parti del progetto per il reattore a fusione nucleare ITER commissionate dall'Ansaldo Ricerche e direttamente da Fusion for Energy.
Lavorare per la ricerca è senz'altro un'occasione di crescita. Per concludere con le parole di Roberto Petronzio, Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare: "Dalla collaborazione fra enti di ricerca e industrie non deriva solo un ritorno economico immediato, ma anche un trasferimento tecnologico essenziale per il miglioramento della competitività".
Vero anche per l'Italia le cui piccole-medie imprese, che hanno creduto nell'investimento in R&D e hanno iniziato l'avventura al CERN, sono riuscite ad ottenere commesse per un valore superiore ai finanziamenti versati dal nostro Paese per realizzare l'acceleratore LHC.

Roberta Camuffo
Master in Comunicazione delle Scienze all'Università di Padova

a cura di Sandro Centro

SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

XCVI CONGRESSO NAZIONALE

Bologna 20 - 24 settembre 2010

Sede del Congresso: Complesso Belmeloro
Alma Mater Studiorum
Università di Bologna

PROGRAMMA GENERALE

Lunedì 20 Settembre

9:30 11:00 Cerimonia di Inaugurazione, Relazione del Presidente, Premiazioni:
Medaglie ai Soci Benemeriti della SIF
Premi per le Migliori Comunicazioni al Congresso Nazionale di Bari 2009
- Premi per giovani laureati in Fisica dopo il maggio 2003 e dopo il maggio 2007
- Borsa "Ettore Pancini"
- Premio "Sergio Panizza"
- Premio per l'Outreach
- Premio per le Applicazioni Industriali "Guglielmo Marconi"
- Premio "Luigi Giulotto"
- Premio "Giuliano Preparata"
- Premio per la Didattica o Storia della Fisica
- Premio "Giuseppe (Beppo) Occhialini"
- Premio "Enrico Fermi"

11:00–12:00 Relazione Generale:
R. HEUER (Geneva, Switzerland): *The Large Hadron Collider LHC: entering a new era of fundamental science.*

12:00–13:00 Relazione Generale:
A. ZICHICHI (Bologna): *The Gran Sasso underground laboratory: origin and future.*

15:00–16:00 Relazione Generale Sezione IVb (Biofisica e fisica medica):
B. MARAVIGLIA (Roma): *A central frontier for physics research: the human brain structure and function.*

16:00–19:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

Martedì 21 Settembre

9:00–12:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

12:00–13:00 Relazione Generale Sezione Va (Fisica applicata):
L. SERAFINI (Milano): *Nuovi paradigmi per gli acceleratori alle frontiere di alta energia e brillanza.*

15:00 16:00 Relazione Generale Sezione III (Astrofisica e fisica cosmica):
M. VIETRI (Pisa): *Gamma-Ray Bursts.*

16:00–18:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

18:00–19:30 Assemblea Generale dei Soci
Ordine del giorno:
1) Approvazione ordine del giorno.
2) Approvazione del Verbale dell'Assemblea Generale dei Soci del 29 Settembre 2009 (disponibile in download nell'*Area Soci* del sito `http://www.sif.it/`)
3) Relazione del Presidente.
4) Relazioni del Collegio dei Revisori dei Conti e approvazione dei bilanci.
5) Ratifica e nomina dei Revisori dei Conti.
6) Discussione e approvazione della Relazione del Presidente.
7) EPJ Plus (*Relazione di A. Oleandri*).
8) Ordine Professionale (*Relazione di V. Grasso*).
9) EPS: Energy Group (*Relazione di E. De Sanctis*).
10) Varie ed eventuali.

21:00–22:00 Conferenza Cittadina
C. PEDRETTI (University of California, Los Angeles, CA, USA): *Leonardo a Bologna: il modello come strumento di ricerca e come prototipo.*

Mercoledì 22 Settembre

9:00–10:00 Assemblea Elettorale

10:00 Apertura del Seggio Elettorale

11:00–12:00 Relazione Generale Sezione VI (Fisica generale, didattica e storia della fisica):
I. GALILI (Jerusalem, Israel): *Discipline-culture framework of physics knowledge representation for teaching and learning.*

12:00–13:00 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare):
P. CHOMAZ (Gif-sur-Yvette, France): *The impact of nuclear physics on human life.*

14:30–15:30 Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia):
L.C. ANDREANI (Pavia): *Cristalli fotonici: semiconduttori di luce.*

15:30–19:30 Relazioni su Invito e Comunicazioni

20:30 Cena Sociale

Giovedì 23 Settembre

9:00–12:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

12:00–13:00 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare):
G. MARTINELLI (Roma): *Dal Modello Standard alla materia oscura e oltre: in viaggio con i teorici alla ricerca della nuova fisica.*

14:00–15:00 Relazione Generale Sezione Vb (Fisica per i beni culturali):
C. TUNIZ (Trieste): *La preistoria ai raggi X: nuovi metodi fisici in archeologia e paleoantropologia.*

15:00–16:00 Relazione Generale:
F. CAPASSO (Cambridge, MA, USA): *Attractive and repulsive Casimir-Lifshitz forces: vacuum fluctuations, quantum levitation and the future of nanomachines.*

16:00 19:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

Venerdì 24 Settembre

9:00–13:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

10:00 Chiusura del seggio elettorale

14:30–15:30 Relazione Generale Sezione IVa (Geofisica e fisica dell'ambiente):
A. AMATO (Roma): *Il terremoto del 6 aprile 2009 a L'Aquila.*

15:30–18:30 Tavola Rotonda: *Cinquanta Anni di Laser*

Moderatore: L. CIFARELLI (Presidente della Società Italiana di Fisica)

Interventi di:

O. SVELTO (Politecnico di Milano):
Dai primi passi del laser in Italia alla piattaforma italiana sulla fotonica.

V. DEGIORGIO (Università di Pavia):
Lo sviluppo dei laser al CISE e le iniziative CNR di coordinamento (GNEQP).

S. MARTELLUCCI (Università di Roma "Tor Vergata"):
Le attività pionieristiche dell'ENEA ed i Progetti Finalizzati del CNR.

L. MASOTTI (Università di Firenze e El.En. SpA):
Dallo sviluppo del laser alla nascita di un'azienda laser.

L. PALUMBO (Sapienza Università di Roma):
SPARX-FEL: nuove opportunità per la scienza e la tecnologia.

D. BATANI (Università di Milano-Bicocca):
HiPER: progressi nella fusione inerziale con laser.

Dalla accensione del primo laser, il 16 maggio 1960, questo dispositivo è divenuto uno strumento indispensabile, dei laboratori scientifici, ma anche nella vita di ogni giorno. È dunque ampiamente giustificata la celebrazione dei 50 anni di laser, organizzata dalle principali Società scientifiche internazionali di ottica con una serie di eventi distribuiti sotto il titolo di "Laser Fest". Anche la SIF e la SIOF aderiscono a tale iniziativa con la presente Tavola Rotonda, che vede la partecipazione di scienziati e tecnici che focalizzeranno la discussione sulla storia del laser in Italia e su alcune delle iniziative che hanno caratterizzato il suo sviluppo sia scientifico che industriale. Ma ovviamente non ci si limiterà a guardare al passato, e sarà affrontato anche il problema delle sfide scientifico-tecnologiche legate allo sviluppo delle nuove sorgenti di radiazione coerente.

18:30–19:00 Cerimonia di Chiusura e Proclamazione delle Migliori Comunicazioni

19.00 Assemblea di ratifica e proclamazione degli eletti

C'È SPAZIO PER UN FISICO NELLE SCIENZE FORENSI?

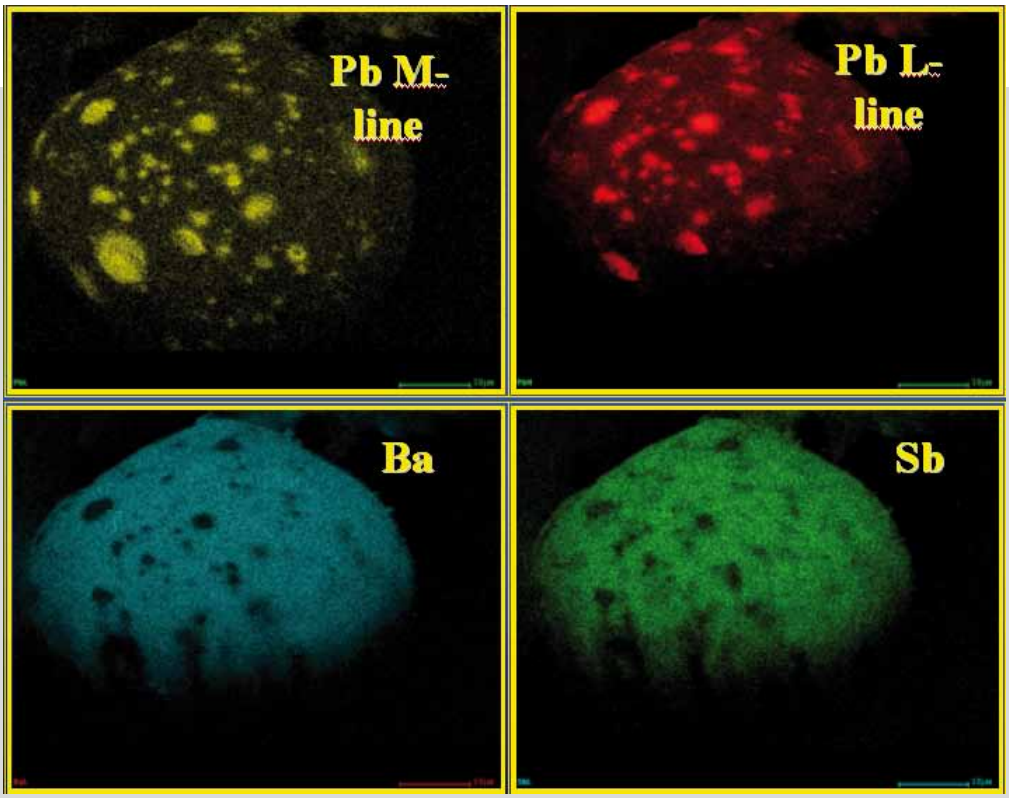
DAVIDE ZAVATTARO
Viale Tor di Quinto, 119 – 00191 Roma, Italia

Una volta c'era Sherlock Holmes, investigatore eclettico capace di risolvere con poche intuizioni complesse situazioni. Era l'epoca nella quale nasceva la criminalistica classica, con il segnalamento foto-descrittivo, l'assunzione delle impronte digitali e si sperimentavano le prime tecniche di identificazione personale. Da quegli anni si è sviluppato un intero universo di metodologie e tecnologie più o meno scientifiche volto principalmente alla ricostruzione della scena del crimine e all'individuazione dell'autore di un reato.
Nel corso degli anni lo sviluppo della criminalistica ha seguito un percorso duplice: da un lato verso le esigenze del mondo forense, affinché il lavoro che ha portato all'identificazione di un soggetto o oggetto fosse poi effettivamente valutato da un Giudice nella maniera corretta e, dall'altro, vi è stato l'affinamento delle tecniche e l'ingresso di nuove strumentazioni, processo che ha coinvolto tante figure professionali del mondo scientifico. Grande risalto per i medici legali, per i chimici, per i biologi con l'esame del DNA, ma sui fisici poche parole…
Oggi la criminalistica viene chiamata "scienze forensi". È un lifting semantico o c'è del nuovo? E ancora, quanta fisica c'è nelle scienze forensi?

1 Le scienze forensi

Ogni scienza capace di rispondere alle esigenze giudiziarie è "Scienza Forense". Questa recente definizione proviene dall'American Academy of Forensic Science e rappresenta il superamento dell'antica tradizione europea che, da oltre un secolo, indicava sotto il nome "criminalistica" (da non confondersi con "criminologia") quel ristretto numero di discipline, spesso sviluppatesi in modo pionieristico, che trovavano vasta applicazione nell'ambito dell'investigazione e nell'identificazione/segnalamento di polizia, intendendo con queste la dattiloscopia, l'antropometria, la medicina legale, la balistica, l'analisi delle manoscritture ecc...
In questa definizione segnaliamo due circostanze significative: "Forensic Science" è al singolare, vista come entità collettiva e trasversale ma, soprattutto, l'utilizzo del termine "scienza" pone una particolare attenzione non solo sul rigore metodologico ma anche sugli aspetti di carattere epistemologico.
Ciò che storicamente sta accadendo è che le applicazioni e i requisiti tipici si sono modificati nel tempo in base alle necessità di un mondo giuridico più esigente. In altre parole lo spostamento dell'attenzione dall'investigazione "tout court" al dibattimento nelle aule di giustizia è il passaggio fondamentale che ha comportato parallelamente l'evoluzione di discipline piuttosto empiriche e sperimentali verso il rango di "scienza". La migliore investigazione è del tutto inutile se poi gli esiti non vengono ratificati da un Tribunale. Se i telefilm tipo CSI o i più casalinghi "RIS" si concludono con la "scoperta" del colpevole e relativa confessione, nella realtà i casi giudiziari (anche i più eclatanti) insegnano che il vero scoglio non è soltanto l'individuazione degli autori ma piuttosto il superamento delle varie fasi processuali. Il modello "Sherlock Holmes", malgrado l'odierna quantità di strumentazione scientifica di supporto, non è in grado, da solo, di garantire il buon esito di un processo. Servono altri requisiti, ciò che porta dalla criminalistica ad una scienza ma anche ciò che trasforma una scienza in "forense".
Su questo secondo aspetto appare opportuno soffermarsi sulle differenze che possono trasformare uno scienziato, per esempio un fisico, da "classico" a "forense" sebbene, ovviamente, la formazione di base sia comune per entrambi.
Una prima evidente diversità può essere rappresentata dall'ambito di

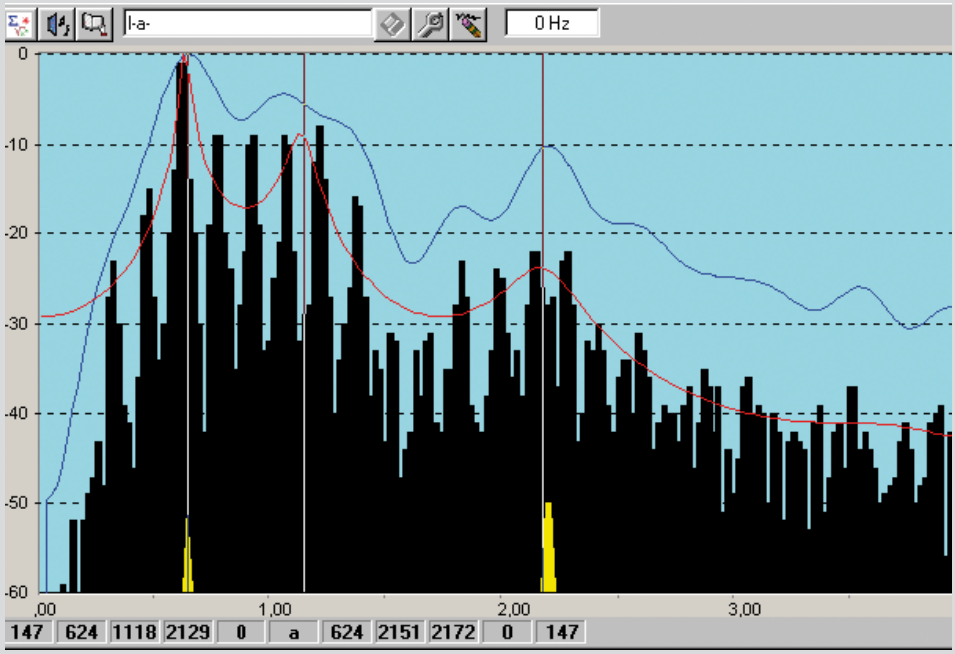
specializzazione e dall'esperienza maturata nel settore ma, anche, occorre rappresentare che la specificità delle applicazioni forensi richiede il possesso di un ulteriore bagaglio di nozioni giuridiche, necessarie per poter conferire al proprio lavoro scientifico quei requisiti indispensabili per essere presentato in un processo.
Non si tratta semplicemente di acquisire un minimo di conoscenze relative alla giurisprudenza nazionale, ma di assumere una diversa mentalità nell'approccio alla problematica in relazione alla finalità da perseguire. Lo scienziato tradizionale si chiude nel proprio laboratorio, impiega il tempo che ritiene necessario per effettuare il proprio esperimento, ottiene dei risultati, spesso parziali, e pubblica il proprio lavoro su una rivista del settore, scrivendo con un linguaggio tipico per addetti ai lavori, sintetico. Le conseguenze del proprio lavoro sono solitamente la base per un lavoro successivo. In ambito forense le condizioni al contorno sono molto diverse. I tempi sono stabiliti da un Giudice, spesso il lavoro può essere condotto anche alla presenza delle parti in gioco, seguendo un particolare iter procedurale, e la relazione tecnica dovrà essere scritta in un linguaggio comprensibile a tutti ma, soprattutto, il compito non si esaurisce con la semplice stesura e consegna della relazione, questa non ha nulla di definitivo e dovrà essere necessariamente discussa oralmente davanti ad una Corte. Nel moderno processo con rito accusatorio, in effetti, un esperto produce una "fonte di prova" che si può tramutare in "prova" solo dopo aver sostenuto una cross-examination (cioè l'esame incrociato con tutte le parti, difesa, accusa, eventuale parte civile e relativi esperti). Al termine del dibattimento ci sarà la formalizzazione della decisione del Giudice che, secondo la giurisprudenza, è infatti *peritus peritorum* anche se, per ovvie ragioni, non possiede sufficienti cognizioni tecniche. Il rapporto comunicativo tra esperto e Magistrato è un momento di scambio di fondamentale importanza, lo scienziato diventa autenticamente "forense" quando riesce a rendere fruibile il proprio lavoro a persone con basi culturali molto differenti. A livello internazionale il dibattito più corposo degli ultimi anni riguarda principalmente questo delicato tema. Un caposaldo è la storica sentenza "Daubert vs. Merrel pharmaceutics" della Suprema Corte USA (1993), nella quale si stabilì che un'expertise è ammissibile in un processo con il crisma di "scientifica" solo se condotta con una metodologia che rispetti ben determinati requisiti, tra i quali la "falsificabilità" di Popperiana memoria e la possibilità di associare all'esito un error rate. Questa sentenza ha modificato il criterio di scientificità della prova forense nel mondo. Se fino ad allora l'esame di laboratorio era considerato, nei fatti, qualcosa di "indiscutibile" che il giudice utilizzava in una sorta di totale fiducia come "prova certa", al giorno d'oggi risulta sempre più chiaro che un lavoro scientifico possa essere discusso, anzi, debba essere discusso per consentire al giudice di comprenderne ogni limite di applicazione e, di conseguenza, utilizzarne i risultati al meglio. Il compito dello "scienziato forense" non si esaurisce dunque nel laboratorio ma trova la sua massima espressione nel dibattimento, luogo deputato alla trasformazione della "fonte di prova" in "prova".
Ammesso che l'esperto sia effettivamente "esperto" dell'argomento su cui è stato chiamato a fornire una relazione tecnica, il principale problema che può portare all'errore giudiziario consiste proprio nella comunicazione alla Corte dei limiti dell'elaborato peritale, cioè le condizioni sotto le quali è applicabile il risultato, ovvero la significatività effettiva, intendendo con questo la quantificazione dell'errore sperimentale e, se l'esito di un confronto è stato positivo, la stima di un errore di falsa identificazione (inteso come la probabilità di poter ritrovare le medesime caratteristiche misurate in altri soggetti). Questi dati sono gli unici che possono consentire al Magistrato di giungere ad una decisione di merito.



1

2 Formazione, letteratura, organismi

In Europa sono veramente poche le Università dedicate alla formazione diretta di scienziati forensi, la più autorevole (a giudizio di qualcuno forse l'unica) è a Losanna, fondata una ventina di anni fa da Pierre Margot.
In Italia non esistono corsi di laurea in scienze forensi (ad eccezione di qualche scuola specifica, per esempio per grafologi) ma, nell'ultimo decennio, sono nati dei Master di II livello e qualche dottorato di ricerca, aperti prevalentemente a laureati in materie scientifiche.
La formazione resta un punto critico, anche per i centri che svolgono attività scientifica nel forense, che a livello istituzionale sono sostanzialmente due: l'Arma dei Carabinieri (con il RaCIS, da cui dipendono i RIS) e la Polizia Scientifica. I laureati sono arruolati con appositi concorsi e devono frequentare un ulteriore anno di corso internamente alla struttura, prima di diventare operativi.
Oltre a questi Istituti esistono le università, che formano e ospitano alcune figure tipiche (Medici Legali, Tossicologi…) e qualche centro privato o parastatale. Nel corso di laurea in giurisprudenza è sempre presente un esame complementare in medicina legale anche se appare un po' datato nel programma e, da solo, non risulta sufficiente a fornire ai futuri avvocati e magistrati una preparazione adeguata per affrontare le attuali esigenze processuali in materia scientifica.
Perché un soggetto possa esercitare in Italia l'attività di perito/consulente può iscriversi in appositi albi presso i tribunali, a cui i Magistrati possono far ricorso quando necessitino particolari esigenze tecniche, tuttavia non sono previsti esami di ammissione né una selezione certificata e, di fatto, non garantiscono alcuna competenza professionale. Il rischio che presunti esperti, improvvisati o autoreferenziati, siano chiamati per lo svolgimento di incarichi tecnico/scientifici anche delicati è altissimo.
Quale percorso può dunque seguire chi volesse affacciarsi alle scienze forensi? Oltre ai testi specifici presenti sul mercato esistono riviste internazionali di alto profilo dedicate esclusivamente alle scienze forensi, tra quelle con il più alto impact factor troviamo il Journal of Forensic Science (USA) e il Forensic Science International (gruppo Elsevier, europeo), ma può capitare che articoli interessanti si trovino anche sulle pubblicazioni più tradizionali dei settori fisico, chimico, biologico o ingegneristico, solitamente con taglio applicativo o sperimentale (una su tutte



2

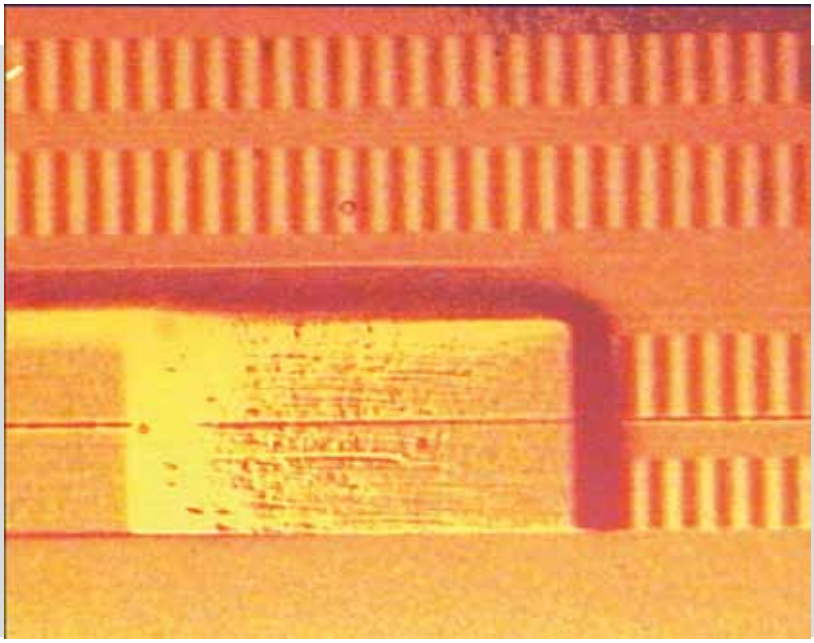
Fig. 1 Mappatura X di una particella residuo di sparo in falsi colori.

Fig. 2 Spettro dell'emissione della voce di soggetto maschile nella pronuncia della vocale 'a'.

IEEE Transactions).
A livello di organismi, oltre a qualche associazione nazionale di settore (es. il Gruppo di Fonetica Forense –GFF), in Europa esiste da una quindicina d'anni l'ENFSI (European Network of Forensic Institutes), istituzione che riunisce in gruppi di lavoro (circa una ventina, uno per ogni branca applicativa) gli esperti di ogni nazione per attività di ricerca, confronto, standardizzazione e assessment. Sempre in ambito internazionale, per citare i più qualificati, troviamo inoltre l'International Association of Identification, l'American Academy of Forensic Science e l'International Academy of Forensic Science. Questi enti organizzano annualmente seminari e meeting scientifici con vastissima partecipazione e sèguito.

3 Il fisico forense

Tornando al rapporto tra le varie scienze tradizionali e le applicazioni forensi, notiamo come la medicina e la chimica siano state le prime ad entrare nel mondo giudiziario, la figura del medico legale e del tossicologo forense rappresentano da sempre figure professionali ben riconosciute. Per quanto riguarda la fisica, tuttavia, appare per molti ancora inusuale un'associazione con il mondo delle investigazioni e del forense.
Nella realtà operativa non esiste una professione specifica denominata "fisico forense" perché la denominazione è data dal settore applicativo. Esiste pertanto il balistico, il fonico, il dattiloscopista, il microscopista elettronico, l'esperto di blood pattern analysis, ma anche l'esperto grafico, l'analista della scena del crimine, l'esperto di immagini… In questi settori, sia in Italia che nel mondo, troviamo i fisici.
A differenza di altri laureati con indirizzi ad elevata specializzazione (citiamo per esempio la biologia molecolare o la chimica analitica) che possono introdursi rapidamente nei laboratori forensi, il giovane fisico impiegherà più tempo, tuttavia può trovare maggiori possibilità di collocazione, perché generalmente possiede una base scientifica che consente di spaziare in innumerevoli campi.
Un caso investigativo non si risolve solamente frammentando le analisi in esami specialistici, ma anche gestendo situazioni complesse ricche di elementi che devono essere messi in relazione. L'apporto culturale del fisico risulta molto richiesto ed apprezzato come figura di supporto e confronto proprio per la tipica versatilità offerta dalla preparazione di base.



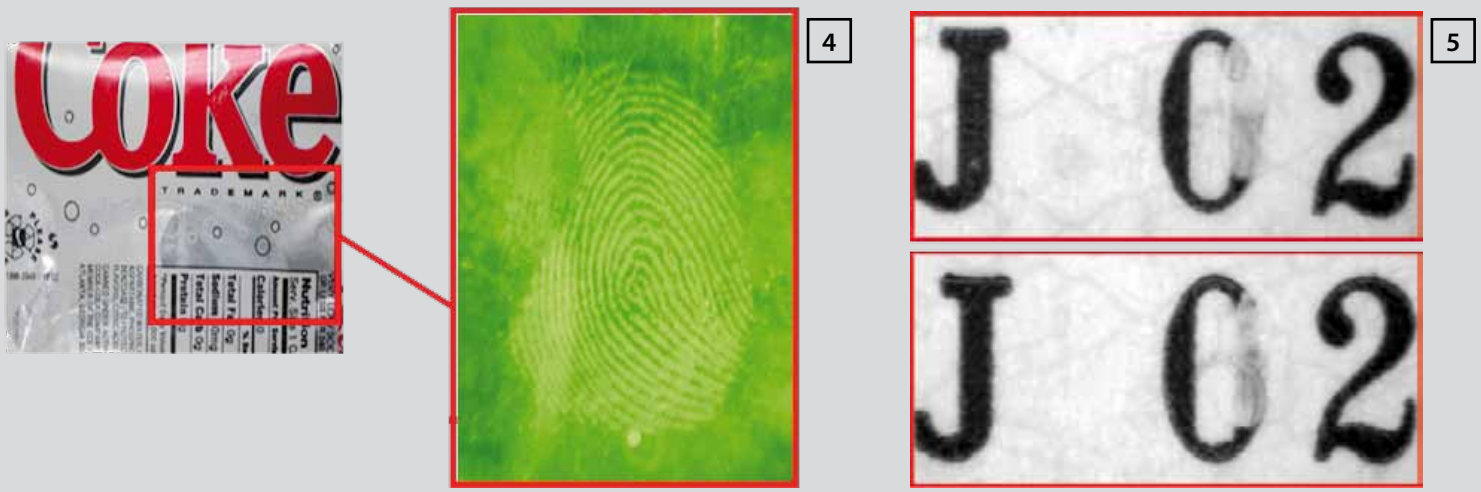
3

Fig. 3 Immagine ingrandita dello stato di magnetizzazione di un nastro audio inciso. Nella pista in basso si apprezzano le particolarità della testina di cancellazione del registratore.

Fig. 4 Impronta digitale latente rilevata con intensificatore di luce sotto irraggiamento UV.

Fig. 5 Particolare di un'alterazione del numero seriale di una carta d'identità all'infrarosso.

Nell'Arma dei Carabinieri e nella Polizia di Stato, come anticipato, esistono concorsi indirizzati all'assunzione di fisici, per un impiego esclusivo nel settore delle investigazioni scientifiche. Anche riguardo all'approccio comunicativo in dibattimento e alla maggior facilità nell'utilizzo degli strumenti statistici il fisico esprime potenzialità trasversali che semplificano un ingresso in questo mondo così variegato che, peraltro, non comprende solo l'investigazione e il dibattimento ma è anche ricerca e sviluppo di metodologie e strumentazioni. Entrando velocemente nelle attività che un fisico può intraprendere, iniziamo con l'ambito balistico nel quale si passa dall'analisi al microscopio delle particolarità impresse dalle parti metalliche di un'arma su bossoli e proiettili alla ricostruzione delle traiettorie per finire agli effetti prodotti sul bersaglio (balistica interna, esterna e terminale). Sempre in ambito di armi può esserci il problema di rivelare un numero di matricola abraso dai malfattori, sfruttando differenti tecniche. Uno strumento molto utilizzato nei laboratori è il microscopio elettronico a scansione, al quale è associato un sistema di rilevazione di spettri X indotti dal fascio elettronico (fig. 1). Sebbene sia impiegato principalmente per la ricerca dei residui metallici dello sparo è indubbiamente una risorsa importante per un'infinità di altre ricerche e possibilità investigative. Un altro settore tipicamente da fisico è quello acustico, dove si può trattare il segnale audio proveniente da intercettazioni al fine di migliorarne strumentalmente l'intelligibilità oppure per effettuare un'identificazione della voce tramite lo studio delle risonanze del condotto orale (fig. 2). Se il reperto non proviene da Forze di Polizia può essere richiesto uno studio di autenticità della registrazione, investigando sulle discontinuità delle frequenze parassite introdotte dalle apparecchiature al momento dell'incisione o analizzando i segnali immessi dai tasti di azionamento del registratore. In questo settore la ricerca è continua, a titolo di esempio si segnalano i brillanti risultati di fisici russi che hanno sviluppato e prodotto particolari cristalli con proprietà nonlineari capaci di rendere visibile lo stato di magnetizzazione di



un nastro magnetico (fig. 3). Anche l'analisi delle immagini e dei filmati, sia per il miglioramento della qualità che per l'effettuazione di confronti antropometrici è una branca in costante sviluppo nella quale i fisici, insieme agli ingegneri, possono fornire un notevole contributo. L'ottica è un altro esempio di campo nel quale un fisico può trovarsi a proprio agio, e l'ottica nelle scienze forensi è dappertutto, dall'infrarosso all'ultravioletto esiste un mondo di strumenti e di possibilità, oltre ai dispositivi fotografici e videoripresa ci sono laser, laser-scanner, sorgenti luminose a lunghezza d'onda variabile, filtri, microspettrofotometri per la caratterizzazione di fibre, inchiostri e materiali in genere, strumentazione per la determinazione dell'indice di rifrazione dei vetri, un intero universo che abbraccia tutti i settori, partendo dalla scena del crimine passando per la maggior parte dei laboratori (figg. 4-5). Non è possibile elencare tutte le possibilità in poco spazio, ma può essere utile segnalare che il fisico, indipendentemente dalla propria specializzazione, spesso si trovi a lavorare in team come elemento di supporto con specialisti di altri settori, per esempio insieme ai biologi o ai medici legali nell'interpretazione di un pattern di macchie di sangue, con i chimici e i grafici per la datazione di carta o inchiostri o nella formulazione di modelli matematici descrittivi di particolari fenomeni o nell'impostazione di modelli statistici per i processi decisionali.

Il mondo della criminalistica nasce dunque senza i fisici, avendo investito per decenni su figure professionali provenienti da altre aree tecniche o scientifiche. Non si è mai compreso storicamente se siano stati gli eredi di Galilei e Newton ad essere disinteressati oppure abbiano subìto una sorta di ostracismo culturale, di fatto con l'evoluzione nelle attuali scienze forensi si è arrivati ad un momento di ampia rivalutazione delle competenze, del rigore metodologico e delle potenzialità espressive, con l'auspicio di una richiesta sempre maggiore sia in termini qualitativi che quantitativi. Per una completa integrazione nel sistema forense dovrebbe però essere soddisfatto un requisito fondamentale, la consapevolezza dei fisici stessi.

Davide Zavattaro

Davide Zavattaro, Maggiore dei Carabinieri nel ruolo Tecnico Logistico, presta servizio presso il RaCIS. È laureato in Fisica e ha conseguito il dottorato di ricerca in Scienze Forensi. È stato comandante della Sezione Fonica e Grafica del RIS di Roma dal 1996 al 2004 e attualmente comanda la Sezione Corsi del RaCIS. È stato membro del gruppo di lavoro ENFSI Speech & Audio Analysis e del relativo steering committee, è membro del gruppo ENFSI European Document Expert. Ha trattato, direttamente o come supervisore, migliaia di casi giudiziari. Collabora con alcune università italiane con incarichi temporanei di insegnamento. Ha pubblicato articoli nel settore dell'acustica, dei documenti e della statistica forense. È coautore del libro "Intercettazioni telefoniche e ambientali - metodi, limiti e sviluppi della trascrizione e verbalizzazione" edito dal Centro Scientifico Editori nel 2007.

ORIGIN, ROLE AND STRUCTURE OF THE INSTITUTE OF PHYSICS

BOB KIRBY-HARRIS
Institute of Physics, London, UK

The Institute of Physics is a scientific charity devoted to improving the practice, understanding and application of physics. It has a worldwide membership of over 36 000 and is a leading communicator of physics-related science to all audiences, from specialists through to government and the general public. Its publishing company, IOP Publishing, is a world leader in scientific publishing and the electronic dissemination of physics.

The Institute of Physics (IOP) can trace its origins back to the formation of the Physical Society in 1874. This original organisation was formed by the initiative of Frederick Guthrie, a professor of physics at the Royal College of Science in South Kensington, London. Together with his assistant, William Barrett (later Sir William Barrett FRS), he proposed setting up a "Society for physical research", by sending an initial circular to 30 physicists. The initial emphasis was on practical and experimental science.

By 1917, the Council of the Physical Society had begun to explore ways of improving the professional status of physicists, along with the Faraday Society, Optical Society and the Roentgen Society. The Institute of Physics was formed and held its inaugural meeting in April 1921; its first president was Sir Richard Glazebrooke.

Having long shared administrative arrangements, the two bodies merged in 1960, adopting the name The Institute of Physics and the Physical Society. This was shortened to the organisation's current name on the award of a Royal Charter in 1970. Although a Royal Charter was once the sole means of incorporating an organisation (*i.e.* changing it from a collection of individuals into a single legal entity), grants of a new charter are now reserved for eminent professional bodies or charities.

Today, the Institute of Physics defines its mission as: advancing physics in order to further the understanding of the physical world and its application for economic and social benefit; promoting interest and participation in physics across society as a whole; and supporting and involving physicists throughout their education and careers.

IOP has grown over the years and now has about 36 000 members, mainly from the UK and Ireland but also distributed right across the world. It is governed by an elected Council of 25 trustees, who control the affairs of the Institute and meet four times a year. The council is headed by a president (see box, below) who is elected

Posters that the Institute has placed on buses in several cities.

to serve a term of two years, along with the immediate past-president or president-elect and an honorary secretary and treasurer who together make up the IOP's senior officers. Council is advised by a number of boards and committees, to which it delegates some of its responsibility as trustees. These include the education board, the science board, the business & innovation board and the external engagement committee. IOP engages professionally with its membership through over 50 subject groups, which enable members to work together to take forward their specific fields of research or pursue physics-related interests. These range across the full discipline of physics and also the interfaces with other fields and areas of application. Groups organise conferences, produce newsletters, and award prizes in their field. During 2009, the Institute's groups also awarded more than 100 bursaries to postgraduate students via the Research Student Conference Fund. Members can now join as many groups as they wish free of charge, and more than 30% of members belong to at least one of them.

All IOP members living in the UK or Ireland are automatically assigned to of one of 13 national or regional branches. These represent a grass-roots link between members and the Institute. They undertake a range of activities from lecture programmes, to schools outreach. Recent examples include high-level policy-related presentations by senior government scientists in London, talks on soap bubbles as part of the Manchester Science Festival, and demonstrations of the physics behind toasting marshmallows and the principles of buoyancy given at a regional "County Show" in the South West. The branches, along with regional officers in England and national officers for Ireland, Scotland and Wales, who are Institute staff, work towards IOP's goals locally, on national and regional policy issues.

1 Membership

The Institute of Physics has a growing, diverse membership, which ranges from university students to internationally renowned researchers. It also includes many people who have a physics degree, or simply an interest in the subject, and do not necessarily work professionally in the field. IOP is intended to be a "natural home" place for any physicist or person interested in physics where they can come to develop themselves and/or form positive connections with others who share their fascination with physics.

Membership is offered in several categories depending on qualifications and experience. Affiliate membership is for anyone with an interest in physics who wants to support the Institute's objectives and be part of a learned society, but does not have a formal physics background. Associate membership is for recent graduates of degrees in the physical sciences or engineering, or an equivalent. Members have at least three years of post-degree experience during which professional skills have been acquired (the degree being in the physical sciences or engineering or an equivalent). Fellowship indicates a very high level of achievement in their

profession. The latter three levels of membership entitle the member to use the post-nominal letters AMInstP, MInstP or FInstP respectively.
Student membership is available to those who are enrolled on a full-time physics-related undergraduate course, and is free for students taking courses recognised and accredited by IOP. Similarly, youth membership is available to 16–19-year-olds studying physics in schools or colleges before entry to university.
The Institute recently introduced an electronic affiliate membership – free to physicists from countries on the World Bank's list of low-income economies, or for an annual fee of £10 to those from middle-income economies. This new type of membership works with national physical societies where they exist, and allows access to all of the Institute's services that are delivered through the web, as well as allowing these online affiliate members to receive discounted rates for professional courses delivered online, and to attend conferences in the UK at members' rates.
One of the benefits of belonging to the Institute is that it allows members to achieve chartered status as either a Chartered Physicist, which is unique to IOP, or Chartered Engineer, which is maintained by the Engineering Council UK. Chartered status is the aspiration of members engaged at the leading edge of all fields of physics and its applications, and it stands for the highest standards of professionalism, up-to-date expertise, quality and safety, and for capacity to exercise leadership and undertake independent practice. As well as competence, the title denotes commitment to keep pace with advancing knowledge and with the increasing expectations and requirements for which any profession must take responsibility.
Members are kept up-to-date on the Institute's activities via the members' newspaper *Interactions*, and on developments in physics through the internationally acclaimed members' magazine *Physics World*. They can subscribe at discounted rates to up to three journals published by the Institute's subsidiary company IOP Publishing (see below); benefit from support and advice through mentoring facilities; and use the IOP's professional-development services, which include low-cost, online transferable skills courses and company accreditation of training schemes. The Institute of Physics Careers Service was recently awarded the Matrix Standard, the national quality standard for any organisation that delivers information, advice and/or guidance on learning and work. Accreditation required an assessment involving meeting all eight elements of the standard: four focused on delivery of service and four focused on management of that service.
The Institute's commitment to utilising new methods of communication led to the development of *MyIOP*, a web-based social network that allows members anywhere in the world to establish links with colleagues who share their interests, and to exchange views on any topic – current discussion forums range from climate change to research funding. More than 12 000 physicists are already using the network to communicate with each other and with IOP.
One major area of Institute activity relating to members is the organising of conferences. During 2009, conferences organised by the Institute attracted 2770 participants. Examples included the conference on Optical Fibre Sensors 20 which was held at Heriot-Watt University, Edinburgh in October and attended by 376 international physicists, and the Condensed Matter and Particle Division's conference at the University of Warwick in December which had 380 participants.

2 Communications, publications and outreach

Communication has always been at the heart of scientific research, and the Institute is a leading communicator in the physical sciences. Its journal-publishing arm, the subsidiary company IOP Publishing, is based in Bristol, with other sites worldwide, including Philadelphia, Washington DC, Tokyo, Beijing, Moscow, St. Petersburg, and Munich. It collaborates with partners including the International Atomic Energy Agency, the US Department of Energy and CERN to disseminate leading-edge scientific research. IOP Publishing also works with the American Astronomical Society, Turpion-Moscow and the Chinese Academy of Sciences to showcase its journals to an international audience.
The publications list contains more than 60 high-quality journals, including the prestigious *Journal of Physics* series; and 32 of the company's journals are published in cooperation with international partners, such as the *New Journal of Physics*, published jointly with the German Physical Society. IOP Publishing now has 108 consortia contracts in 68 countries, with 2395 institutions benefiting from access through these agreements. As part of the IOP's commitment to developing nations, free or low-cost access to its published content is available for researchers in these areas.
Two new publications were launched during 2009, and the publishing programme grew with almost 30 000 articles being published. Journals published or produced by the company are read in more than 180 countries, and journal articles were downloaded more than 18 million times last year.
IOPscience, the new online platform for distributing journal content, provides access to more than 130 years of leading scientific research and now hosts more than 350 000 journal articles dating from 1874 to the present day. *IOPscience* was recognised by the 2009 PROSE awards with an Honorable Mention in the Best Website or Platform category.
More than 40% of IOP Publishing's journals achieved an

impact factor of two or more during the last year, and there are now five journals with an impact factor over 5.

As well as its journal-publishing activities, the Institute communicates with key stakeholders and the general public to develop awareness of the central importance of physics, respond to political issues that impact on the health of the subject, and exert the greatest possible influence in support of physics research, education and application.

IOP commissions reviews on policy issues affecting physics research and its application in the UK and Ireland, compiling evidence and issuing authoritative reports on issues such as the contribution of physics to the economy, the finances of university physics departments, or the status and impact of research in different disciplines of physics. One recent report commissioned by the Institute of Physics in Scotland showed physics graduates from Scottish institutions "punch well above their weight" in terms of their contribution to the local economy, accounting for 4% of the workforce but delivering 10% of Scotland's Gross Value Added.

As well as these activities, the Institute publishes "vision papers" highlighting exciting new areas of physics research, and their potential impact. From fundamental areas such as the forces of nature to the security applications of terahertz radiation, they show how physics pervades all areas of science and makes a key contribution to society and the economy.

One example, Physics for an Advanced World, a series of case studies showing how technologies from MRI scanners to optical fibres are dependent on physics and often arise unexpectedly from pure research, was launched with an event in the Houses of Parliament attended by almost 100 people; the report was very well received as a powerful demonstration of the value of investing in science.

Public seminars, often organised in partnership with other learned societies, showcase the importance of physics in areas as diverse as geoengineering and international development, and IOP also responds to consultations by government and lobbies proactively in support of the physics community at both national and regional level.

For the general public, the Institute runs its Physics in Society programme, with a range of innovative outreach activities aimed at inspiring people of all ages, who are not normally exposed to physics, about the subject and engaging them in meaningful debate on scientific topics.

The programme includes physics "busking" – demonstrating physics-related experiments – at festivals throughout the UK, organising Spooky Science shows at Butlins holiday camps, and advertising campaigns using posters on buses and distributing beer-mats designed to engage the public – the latter reaching around 4000 people in the north-east of England last year.

The Institute provides support and resources to physicists who take physics into their communities through training workshops and grants for public-engagement activity – 26 projects were funded in this way during 2009. The Physics in Society website `physics.org`, which has undergone a redesign, is a collection of the best physics resources available; and its search technology allows users to match their question, age and knowledge to a range of hand-picked and refereed websites.

IOP's Lab in a Lorry is a fleet of three mobile science labs staffed by volunteer physicists. Run on a regional basis depending on funding, the lab takes hands-on physics experiments into the community with the aim of getting young people excited about science, encouraging them to consider careers in physics and engineering, and giving them face-to-face contact with real scientists. Since its launch in 2005, it has reached more than 110 000 students and benefitted from the expertise of more than 530 volunteers. The programme depends on generous sponsorship from business and the public sector. For example, the lorry in Scotland recently received funding from Opito – the Oil & Gas Academy, to contribute towards its operations over the next three years.

3 Schools programmes

The future of physics depends on attracting new generations of people into the field. Equally, IOP believes that all students deserve an opportunity to benefit from a physics education: gaining a deeper understanding of our world, obtaining an essential step in training for many science and engineering disciplines, and providing an open door to a wide variety of careers in which analytical skills are at a premium. Through its educational programmes, the Institute aims to increase the number and diversity of those who choose to study physics.

Along with the Science Learning Centres, IOP has formed a partnership to establish and run a support network for physics teachers and pupils in England, the Stimulating Physics Network. The project is funded by the UK government's Department for Children, Schools and Families until March 2011, and aims to provide an inspiring, coherent and sustainable programme of lessons, activities and continuous professional development in order to achieve a significant change in the teaching of physics in English secondary schools.

IOP has also run the Stimulating Physics Programme, a two-year initiative funded by the Higher Education Funding Council for England (HEFCE) aimed at addressing government concerns about the number of students opting for physics. With similar projects for chemistry, engineering and maths after the age of 16, it has become part of the National HE STEM programme led by Birmingham University, with funding of £1.6 m for three years.

The Institute supports both teacher recruitment, working with a number of teacher-training centres to help them recruit more trainee physics teachers, and provide continuous professional development to teachers. With funding from the Gatsby Charitable Foundation, IOP provides mentoring support for participants in two key government programmes designed to help science graduates whose specialism is not physics to train as physics teachers, and to help teachers who do not have degrees in physics or chemistry to teach these subjects more effectively.
IOP is committed to promoting an inclusive environment for everyone who studies or works in the field of physics, regardless of gender, ethnicity, social background, or disabilities. Current initiatives include the Girls in Physics Programme to help teachers improve the engagement of girls in the physics classroom, Project Juno to address employment inequality in university physics departments, advice on improving access for disabled students, and a pilot project to look at ways to encourage minority ethnic students to continue studying physics at university level.

4 International development

Internationally, the Institute's Physics for Development programme is aimed at promoting the economic and social benefits that physics can deliver in the developing world, including support for educational opportunities. IOP works towards these aims by providing practical equipment, running teacher-training courses and workshops on entrepreneurial skills. The Institute recently set up a mechanism to send used or donated equipment to Africa to encourage science at school level, in collaboration with charities such as LabAid and BookAid, and also developed an online entrepreneurship curriculum covering how to understand the entrepreneurial process, the potential of physicists and engineers to contribute, and the steps involved in turning an invention into a product.

5 The future

Future plans for the Institute include finding ways to exert influence on EU-wide issues, launching a new Business Forum to engage high-technology companies, and providing new ways for teachers and others interested in education to contribute in depth to the Institute's education policy and activities.
IOP also intends to organise the first National Physics Day, and to negotiate agreements with India and China to promote membership of the IOP to scientists in their countries.
Through these, other new initiatives and the continuation of IOP's flagship programmes, the Institute believes that it is in a strong position to achieve its purpose of improving the practice, understanding and application of physics.

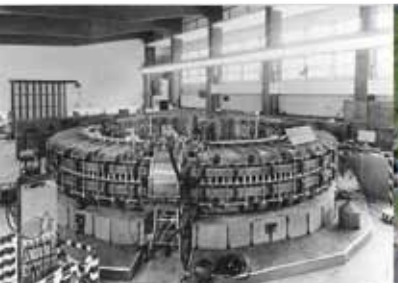
The President

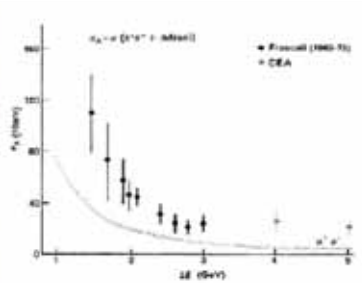
Members elect the president of the Institute of Physics, who holds the position for two years. The current president is Prof. Jocelyn Bell Burnell DBE FRS FInstP.
"Physics is an inspirational endeavour. I have been lucky enough to work in the field of astrophysics for most of my career, and to experience at first hand the excitement of pushing back the frontiers of knowledge. As President of the Institute of Physics, I am proud to help communicate the work of leading edge researchers around the world, and celebrate their achievements. However, in the UK at least, physics remains dominantly the preserve of white, middle-class men, and we need to encourage more diversity. By attracting more girls, and more students from different social and ethnic backgrounds into physics we will open up a range of exciting opportunities for the individuals concerned, as the same time as ensuring the long-term health of the discipline. I am absolutely committed to supporting IOP's activities in this field."
Professor Jocelyn Bell Burnell DBE FRS FInstP
President of the Institute of Physics

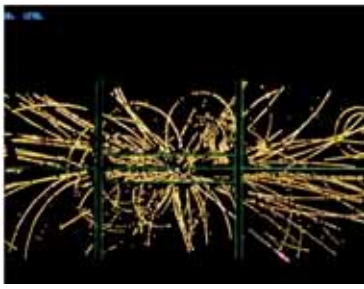
Dr Robert Kirby-Harris CPhys CSci FInstP

Robert (Bob) Kirby-Harris is the Chief Executive of the Institute of Physics (IOP) with responsibility for the strategic management of one of the world's leading physical societies. Prior to taking over at IOP, Bob Kirby-Harris has directed several educational and scientific organisations, having spent two years as the operations director of the Royal Botanic Gardens Kew, 12 years as a deputy vice chancellor of two universities, and five years running the consultancy & applied research company of a polytechnic. Prior to this he served in the Royal Navy for eight years as a lecturer and also taught physics and mathematics in a secondary school. He also has a deep interest in sustainable development arising out of 7 years work in Southern Africa promoting the role of universities in building capacity and transforming their societies. He spearheaded the development of science and engineering, and of distance leaning to meet the needs of disadvantaged urban and outlying rural communities.

INCONTRO PER I 90 ANNI DI GIORGIO SALVINI







La Sezione INFN di Roma e il Dipartimento di Fisica dell'Università "Sapienza" in collaborazione con i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN (LNF) hanno organizzato per il pomeriggio del 7 maggio un incontro nell'aula Amaldi del Dipartimento per festeggiare i 90 anni di Giorgio Salvini. Per fargli gli auguri sono venuti in tanti anche da fuori Roma: molti erano stati suoi allievi a Pisa o a Roma, e poi c'erano i colleghi e gli amici della sua lunga carriera scientifica e didattica.
L'incontro è stato diviso in due sessioni. Nella prima, presieduta dal Prof. Giorgio Parisi, molti colleghi, anche a nome delle istituzioni da loro rappresentate, hanno salutato e fatto gli auguri a Salvini. Il Prof. Elvidio Lupia Palmieri, Preside della Facoltà di Scienze, ha portato il saluto del Rettore ed ha ricordato la lunga attività didattica di Salvini dal 1955 al 1990 alla "Sapienza", dove oggi rimane come Professore Emerito. Speranza Falciano, Direttore della Sezione di Roma dell'INFN, oltre a fare gli auguri della Sezione, ha letto un messaggio della Prof. Luisa Cifarelli, Presidente della SIF, impossibilitata a partecipare, che ha sottolineato il ruolo scientifico di riferimento che Salvini ha avuto e tuttora ha in Italia e nel mondo. Il Prof. Annibale Mottana, a nome del Presidente dell'Accademia dei Lincei Prof. Lamberto Maffei, ha portato il saluto dell'Accademia ricordando che Salvini ne è stato Presidente dal 1990 al 1994 e ne è oggi Presidente Onorario. Sono quindi intervenuti il Prof. Luciano Maiani, anche come Presidente del CNR, che ha ricordato tra l'altro l'entusiasmo degli anni '70 quando ADONE ha cominciato la sua sperimentazione ed ha prodotto eccellenti risultati che hanno fatto vivere ai Laboratori di Frascati una seconda giovinezza dopo i tempi del sincrotrone, e il Prof. Roberto Petronzio, Presidente dell'INFN, studente del corso di Salvini a Roma, che ha ricordato come Salvini, al pari di Conversi, fosse capace di trasmettere agli allievi una carica di entusiasmo per la ricerca ed il lavoro, che poi rimaneva nella carriera successiva. Inoltre ha ricordato i ruoli di responsabilità ricoperti da Salvini nell'INFN: dopo aver diretto la costruzione dell'elettrosincrotrone contribuendo alla nascita dei Laboratori di Frascati dei quali è stato Direttore fino al 1960, ha ricoperto la carica di Presidente dell'INFN dal 1966 al 1969. Il Prof. Renato Angelo Ricci, Presidente Onorario della SIF, ha voluto ricordare alcuni degli atti di Salvini, primo Presidente dell'INFN designato direttamente dalle unità operative. Durante la sua Presidenza venne emanato il decreto ministeriale (luglio '67) grazie al quale l'INFN otteneva un primo riconoscimento sul piano giuridico, che valse a toglierlo dalla sua incerta situazione di ente di fatto; fu stipulata la convenzione INFN-CNEN; furono istituiti i Laboratori Nazionali di Legnaro con i quali nacquero le prime iniziative di fisica dei nuclei di cui Salvini fu uno dei promotori essenziali in Italia; fu consolidata la partecipazione italiana al CERN e in particolare nel progetto e nella costruzione del SPS da 400 GeV. Ricci ha poi sottolineato come Salvini abbia sempre sentito e ricordato ai suoi colleghi fisici di frontiera la necessità dell'insegnamento e della trasmissione alle generazioni future della cultura e del sapere scientifico, unita alla ricerca di conoscenza con onestà intellettuale e culturale. Il Prof. Corrado Mencuccini, studente di Salvini, ha ricordato l'inizio della sperimentazione al sincrotrone quando faceva parte del gruppo di giovani di Roma per i quali Salvini aveva previsto un'attività di collaborazione con persone di primo piano provenienti dall'estero e da tutta Italia per formare nei Laboratori di Frascati un gruppo residente di fisici di alto livello. Il Prof. Carlo Bernardini, ha ricordato come Salvini al tempo della costruzione del sincrotrone avesse radunato i giovani laureati più brillanti da tutta Italia poco più che ventenni. Quella del sincrotrone fu un'avventura guidata dalla volontà di ferro di Salvini, che vide la stretta collaborazione di fisici ed ingegneri, una sorta di ammodernamento della fisica sperimentale. Giorgio Parisi ha portato infine i saluti del Prof. Nicola Cabibbo e di altri che non hanno potuto partecipare. Parisi, anche lui allievo di Salvini, ricorda il rapporto con gli studenti: Salvini prendeva le persone estremamente sul serio, era esigente come con se stesso. La sua domanda: "dammi la definizione del successo in questa ricerca" aiutava a capire quello che si voleva.
Carlo Bernardini all'inizio della seconda sessione, da lui presieduta, ha annunciato la pubblicazione dell'autobiografia di Giorgio Salvini: "L'uomo, un insieme aperto. La mia vita di fisico", un documento unico che racconta un pezzo della storia scientifica italiana. Sono quindi intervenuti il Prof. Mario Calvetti, Direttore dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN e il Prof. Carlo Rubbia.
Mario Calvetti, nel portare i saluti affettuosi di tutto il personale di Frascati, ha prima raccontato il passato dei Laboratori e il contributo di Salvini, e poi ne ha illustrato le attività attuali. Calvetti ha ricordato come Enrico Fermi, che Salvini ha conosciuto, avesse proposto già nel '37 la costruzione di un laboratorio nazionale di radioattività che di fatto non vide la luce fino a dopo la guerra. In questo contesto culturale furono messi a disposizione nel '53, con lettera a Giorgio Salvini, dei fondi per gli studi di progettazione di un sincrotrone, che

Giorgio Salvini.

Intervento di Luciano Maiani.

segnò l'inizio dell'attività di fisica degli acceleratori nell'INFN e che portò alla costruzione dell'elettrosincrotrone di Frascati da 1100 MeV definito da Salvini in un'intervista una macchina al servizio dei fisici e quindi della ricerca di base nonchè un grosso strumento didattico per i ricercatori per educarsi ed educare alla ricerca. Di grande interesse sono stati i numerosi documenti e filmati originali con interviste a Salvini presentati da Calvetti su molti passaggi storici delle attività dell'epoca (parzialmente riportati in `http://www.lnf.infn.it/public/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=111&lang=i`). Dal sincrotrone nacque l'impresa di ADA, un anello di accumulazione elettrone-positrone chiamato da Salvini "il grande figlio dell'elettrosincrotrone" nato dal genio di Bruno Touschek. ADA fu progettato nei Laboratori e provato al sincrotrone stesso; ad esso fece seguito la costruzione di ADONE all'energia di 3 GeV. Come già ricordato da altri, i risultati scientifici di quel periodo furono numerosi e importanti, tra questi la misura della produzione multiadronica più grande di circa un fattore due rispetto al valore aspettato e l'osservazione della J/ψ appena scoperta negli Stati Uniti.
L'attività di Giorgio Salvini in quegli anni si colloca così tra quelle pionieristiche sulle macchine acceleratrici. Quell'inizio (circa 60 persone per la costruzione del sincrotrone nel 1957) è diventato un grande laboratorio frequentato da più di mille persone, con oltre 300 dipendenti e tanti ospiti. Attualmente i Laboratori di Frascati sono una galassia di attività che ruotano intorno all'acceleratore DAΦNE, una Φ-Factory che produce mesoni K. Oltre alle attività locali, a Frascati sono attive numerose collaborazioni con enti e laboratori nazionali e internazionali, ad esempio con il CERN per la sperimentazione ad LHC e gli studi per CLIC, con il CNAO di Pavia, con l'ENEA e il CNR. Tra le attività locali si distinguono poi: la realizzazione di un laser ad elettroni liberi (progetto SPARC che di recente, dopo aver iniettato un fascio di elettroni accelerati da un Linac di 12 metri in un ondulatore lungo 14 metri, ha prodotto luce verde, ed in futuro evolverà in SPARX per la produzione di raggi X), un sistema laser di altissima potenza, denominato FLAME, per l'accelerazione di particelle con onde di plasma e, in prospettiva, la partecipazione alla costruzione e assemblaggio della prossima generazione di esperimenti per lo spazio. Inoltre nel laboratorio LIFE (Laboratorio Interdisciplinare Fotoni Elettroni) partirà presto una sperimentazione unica al mondo per l'integrazione di fasci di elettroni ad altissima brillanza e fasci di fotoni ad altissima intensità sincronizzati al femtosecondo. A Frascati è attivo anche un grande laboratorio di luce di sincrotrone collegato a DAΦNE e una "facility" di test con fasci di elettroni, positroni e fotoni. I Laboratori di Frascati si presentano quindi oggi come un laboratorio multidisciplinare al servizio dell'INFN ma non solo, sia per la fisica delle particelle che per ricerche interdisciplinari.
Calvetti ha sottolineato come attualmente DAΦNE, pronto a ripartire a giugno, abbia raggiunto il suo massimo di luminosità di 4.5×10^{32} $cm^{-2}s^{-1}$, che è anche la luminosità di disegno della macchina, ottenuta grazie a un'idea di Pantaleo Raimondi basata su una nuova ottica che strizza i fasci ("Crab-Waist") senza ridurne la vita media. Raccogliendo già 20 pb^{-1} al giorno è possibile effettuare una seconda generazione di esperimenti e KLOE-2, funzionando per tre anni, potrà completare il programma previsto ed osservare la violazione diretta di *CP* anche a una Φ-Factory. In passato una misura importante a DAΦNE è stata quella di V_{us} e il test di unitarietà della matrice CKM, oltre a molte altre misure sui mesoni K, riscrivendo praticamente la tabella del Particle Data Book per queste particelle. Anche gli esperimenti FINUDA, con i suoi studi di fisica ipernucleare, e SIDDHARTA, che studia la formazione e il decadimento di atomi esotici con mesoni K, hanno contribuito a tutta una serie di misure fondamentali di fisica del nucleo. Nel futuro dei Laboratori c'è infine la possibilità di realizzare una Super B Factory (SuperB).
I Laboratori di Frascati sono oggi anche un laboratorio aperto di divulgazione scientifica sia per gli insegnanti di matematica e fisica che per un pubblico molto più vasto.
Mario Calvetti, nel presentare i filmati originali di vecchie interviste a Giorgio Salvini, ha sottolineato come i concetti da lui espressi in passato sulla ricerca scientifica e sui giovani siano ancora oggi di grande attualità e ha lasciato le previsioni sui Laboratori a un'intervista nella quale Salvini esprime la sua certezza nel contributo di Frascati al futuro della Scienza.
È poi intervenuto Carlo Rubbia ricordando i suoi cinquant'anni di amicizia e di collaborazione scientifica con Giorgio Salvini. Lo incontrò a Pisa quando, studente alla Normale, ebbe tra i suoi docenti anche Salvini e Conversi, giovani e brillanti cattedratici, dei quali ha voluto ricordare le vite "parallele". A Salvini nel 1953 venne affidato il progetto e poi la costruzione dell'elettrosincrotrone di 1100 MeV, similmente a quanto accadde al giovane John Adams, suo coetaneo, incaricato due anni dopo della costruzione del protosincrotrone al CERN. Salvini e Conversi restarono a Pisa per un periodo breve lasciando il segno: la nascita di una forte scuola sperimentale e un seguito di brillanti studenti. A quel tempo anche Bruno Touschek andava da Roma a fare lezioni di Fisica Teorica a Pisa.
Con questi maestri eccezionali il giovane Rubbia non ebbe problemi

Stretta di mano tra Carlo Rubbia e Giorgio Salvini.

quando andò alla Columbia University con una borsa Fulbright. Ritornato in Italia, seguì Conversi per un anno a Roma, dove c'era anche Salvini, impegnato a Frascati nella realizzazione del sincrotrone, e Touschek che istillò a molti il virus delle collisioni materia-antimateria. Carlo Rubbia ha ricordato che Salvini è stato dal 1966 al 1969 uno straordinario Presidente dell'INFN. Nel 1967 Salvini lanciò un gruppo di studio per un protosincrotone nazionale nel quale Rubbia fu invitato insieme ad altri tra cui Ghigo, Puglisi e Turrin. Il progetto fu poi abbandonato perché al CERN si costruì il PS ma fu l'occasione per riprendere il vecchio sogno di collisioni materia-antimateria con gli adroni e per studiare il cooling di antiprotoni. Rubbia in seguito continuò a pensare alle collisioni p-$\bar{p}$ e nel 1976 pubblicò con D. Cline e P. McIntyre un lavoro sulla produzione di bosoni intermedi sfruttando come collisori le macchine a protoni esistenti. La proposta, considerata irrealistica a Fermilab, fu apprezzata e sostenuta dai direttori del CERN Adams e Van Hove. Salvini passò al CERN un lungo periodo (1977-79) lavorando alla proposta dell'esperimento UA1 e nell'ottobre 1977 vi andò anche Touschek. All'inizio del 1978 la proposta di UA1 fu completata e un gruppo di fisici di Roma partecipò con Salvini all'esperimento. I progetti avanzarono rapidamente e a metà del 1981 si ebbero le prime collisioni nell'SPS e poi le scoperte nel 1983. All'inizio di quell'anno in Aula Amaldi ci fu un convegno sulla fisica protone-antiprotone, una specie di "general rehearsal", che precedette le scoperte di W e Z e poi a fine 1984 anche Salvini accompagnò Rubbia per il Nobel a Stoccolma. Infine Rubbia ha ricordato di aver lavorato con Salvini ministro del governo Dini (1995-96), quando questi gli chiese di presiedere il cosiddetto "Gruppo dei cinque" per un rapporto sullo stato della ricerca italiana nel campo aerospaziale.

Ha concluso Giorgio Salvini che, dopo aver ringraziato i presenti, ha voluto ricordare i tanti fisici, tecnici, ingegneri e altri che hanno lavorato con lui e ha voluto esprimere la sua riconoscenza ai grandi fisici che sono stati suoi maestri.

Ha quindi presentato un po' di riflessioni personali. Dall'osservazione che tutto sulla Terra è pregno di vita ci si deve chiedere come questa abbia avuto origine e poi come ciò possa accadere nell'Universo: c'è vita negli altri pianeti o altrove nell'Universo? Siamo soli? La domanda è antica ma oggi, messo un piede sulla Luna, possiamo andare a cercare la vita direttamente su altri pianeti e oltre. Ma segue una seconda domanda: qual è l'origine di tutto questo? Ha senso parlare di un'origine? E qual è l'età dell'Universo? Oggi siamo certi di un big bang iniziale. Ma questo per molti non è sufficiente. Gli uomini si chiedono dell'esistenza di un Dio creatore. Molti popoli hanno inventato una religione con esseri superiori. I laici lo negano. Noi non lo sappiamo, siamo forse all'inizio, ne possiamo riparlare in futuro … forse fra 5000 anni. Intanto l'uomo non può che essere "innamorato" di fronte allo spettacolo della vita e dell'Universo. Da tempo stiamo cercando di capire perché alcune cose avvengano e come: è l'ansia della ricerca scientifica, la consapevolezza socratica della nostra ignoranza. Noi non sappiamo a che punto siamo e quanto riusciremo a scoprire, ma siamo in cammino verso il Sapere, lungo una strada di cui non vediamo la fine, che supera le speranze di una singola vita umana e ci sentiamo quindi parte di un esercito enorme: l'armata del pensiero e della ricerca. Sarebbe assurdo ora fermare la ricerca scientifica: stiamo cercando di comprendere il problema della materia oscura, dell'origine dell'Universo ed oltre. Cinquant'anni fa si è vissuto un momento magico con i primi acceleratori, ma è probabile che nei prossimi mesi rivedremo qualcosa di simile con LHC.

A novant'anni si ha il dovere di esser coscienti del proprio limite temporale ma si deve sostituire all'*Io* il *Noi*: "Ebbene, voglio darvi un consiglio per quando sarete in tarda età. Si tratta di barattare l'*Io* col *Noi*. Non è difficile. Si tratta di capire che ciò che siamo e sappiamo l'abbiamo ereditato dagli antenati e dai nostri colleghi e amici e parenti. Possediamo un immenso sapere, e non per merito nostro. Il nostro passato sostiene il nostro presente, e ci dà la speranza di un futuro di conoscenza. Tutto questo è *Noi*, un bene sterminato del quale, insieme, possiamo godere". Tutto è come un corpo solido: all'interno c'è il nostro tempo passato, noi restiamo alla superficie per il tempo della nostra vita e poi ci sciogliamo nel solido massiccio del passato. Il futuro di Galilei sono i nostri tre secoli passati, e quindi anche noi avremo il nostro futuro. Infine Salvini ha rivolto un pensiero alla necessità di pace. Il secolo scorso ha visto cose orrende, sono stati accumulati mezzi di sterminio. Ciò deve cessare: "Se ci convinceremo che vale la pena di studiare e di fare ricerca scientifica, e che l'altruismo è un buon affare, allora varrà la pena di sperare. Scusate, mi fermo un momento. Questo *altruismo, buon affare* non l'ho inventato io, ma è formidabile, e può diventare la nostra bussola per navigare tra i nostri eventi futuri".

Speranza Falciano
INFN Sezione di Roma

Francesco Lacava
Dipartimento di Fisica Università "Sapienza" di Roma

DONNE E RICERCA NELL'UNIONE EUROPEA

1 Introduzione

La ricerca, associata all'istruzione e all'innovazione, costituisce il "triangolo della conoscenza" che deve consentire all'Europa di mantenere dinamismo economico e preservare il proprio modello sociale. Un importante obiettivo strategico per l'UE, stabilito nel Consiglio di Lisbona del 2000[1], è quello di "diventare l'economia basata sulla conoscenza più competitiva e dinamica del mondo, in grado di realizzare una crescita economica sostenibile con nuovi e migliori posti di lavoro e una maggiore coesione sociale". Con queste finalità, in linea con la strategia elaborata a Lisbona, i Paesi UE si sono posti l'obiettivo di aumentare fino al 3% la quota del PIL europeo dedicato alla ricerca e sviluppo[2] entro il 2010, di aumentare il numero di ricercatori[3] e di raggiungere, entro la stessa scadenza, il 25% di donne in posizioni direttive di responsabilità nel settore pubblico della ricerca[4], ottenendo, in tal modo, una migliore rappresentanza femminile nel potere decisionale[5]. Obiettivi tuttora molto lontani nella maggior parte dei Paesi europei.

Proprio con la finalità di monitorare la partecipazione femminile nella ricerca scientifica e verificare i progressi nella direzione dell'uguaglianza professionale tra donne e uomini nei diversi settori della scienza e della tecnologia, l'Unione Europea elabora e pubblica dal 2003 il rapporto periodico *She Figures* [6]. Il rapporto presenta gli aggiornamenti delle statistiche di genere e degli indicatori sulle risorse umane nel campo della ricerca nei 27 Paesi dell'Unione e intende fornire informazioni e spunti di riflessioni per i "policy-makers", ricercatori, insegnanti, studenti e genitori che desiderano un'Europa più democratica, competitiva e tecnologicamente avanzata.

2 Scienza e tecnologia: poche donne al lavoro, poche donne sui banchi di scuola

La scienza europea è donna? Non molto, a giudicare dai dati contenuti nei tre rapporti She Figures, in particolare nell'ultimo pubblicato. *She Figures 2009* [7] raccoglie e confronta i più recenti dati ufficiali dell'UE-27, mostrando come la partecipazione delle donne sia tuttora pesantemente limitata in molti ambiti della scienza e della tecnologia, aree chiave per la ricerca e lo sviluppo. I dati ufficiali europei indicano, in particolare, che le donne sono seriamente sottorappresentate nelle posizioni di vertice che definiscono le scelte e le strategie dell'agenda europea della ricerca; che la presenza femminile nei comitati scientifici è inspiegabilmente modesta; che l'accesso ai finanziamenti è più agevole per gli uomini rispetto alle donne; che esiste un divario retributivo fra i generi in tutti i settori economici.

Il primo dato rilevante del rapporto riguarda la formazione superiore. Le donne nell'UE-27 nel 2007 rappresentano più del 50% degli studenti universitari, confermando una tendenza ormai consolidata, e conseguono il diploma di dottorato di ricerca nel 45% dei casi, uguagliando o superando, in numero, gli uomini in quasi tutti i settori di studio, esclusi quelli più prettamente scientifici e tecnologici: la percentuale, infatti, scende al 41% nel caso delle scienze pure, della matematica e dell'informatica e al 25% nei settori dell'ingegneria integrata.

L'istruzione superiore si conferma un buon investimento per il futuro professionale delle donne europee: nel 2006, infatti, il 52% degli occupati in settori lavorativi che comportano una formazione di terzo livello è costituito da donne. Tuttavia, le europee sono solo il 32% della forza lavoro in campo scientifico e nell'ingegneria (erano il 29% nel 2004). Ancora oggi le giovani europee continuano a prediligere indirizzi di studio e attività di ricerca a carattere umanistico, giuridico e scientifico applicativo, come, ad esempio, il settore medico o delle scienze agrarie.

Perché l'accesso alle professioni scientifiche è meno agevole per le donne? Perché le donne stesse appaiono riluttanti a dedicare i propri studi superiori alla scienza pura o a materie tecnologiche? Quali sono gli ostacoli che le spingono alla rinuncia, condizionando il proprio futuro lavorativo e creando le premesse per il perpetuarsi di uno squilibrio di genere nella ricerca scientifica europea?

I dati sull'occupazione femminile europea nel settore della ricerca scientifica forniscono una

---

[1] Consiglio Europeo di Lisbona, 2000, in: http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_it.htm

[2] Consiglio Europeo di Barcellona, 2002, in: http://www.europarl.europa.eu/summits/

[3] Europe needs more scientists http://ec.europa.eu/research/conferences/2004/sciprof/pdf/final_en.pdf

[4] http://europa.eu/legislation_summaries/employment_and_social_policy/equality_between_men_and_women/c10404_it.htm: Una tabella di marcia per la parità tra donne e uomini 2006-2010 {SEC(2006) 275}.

[5] Si osserva che l'effettiva parità richiederebbe una presenza femminile del 40%, come sottolineato dal Parlamento Europeo in: http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20080520IPR29483+0+DOC+XML+V0//IT Comunicato stampa "Incentivare la presenza di donne nella Scienza", Parlamento Europeo, 21-05-2008.

[6] http://ec.europa.eu/research/science-society/index.cfm?fuseaction=public.topic&id=126

[7] http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/she_figures_2009_en.pdf

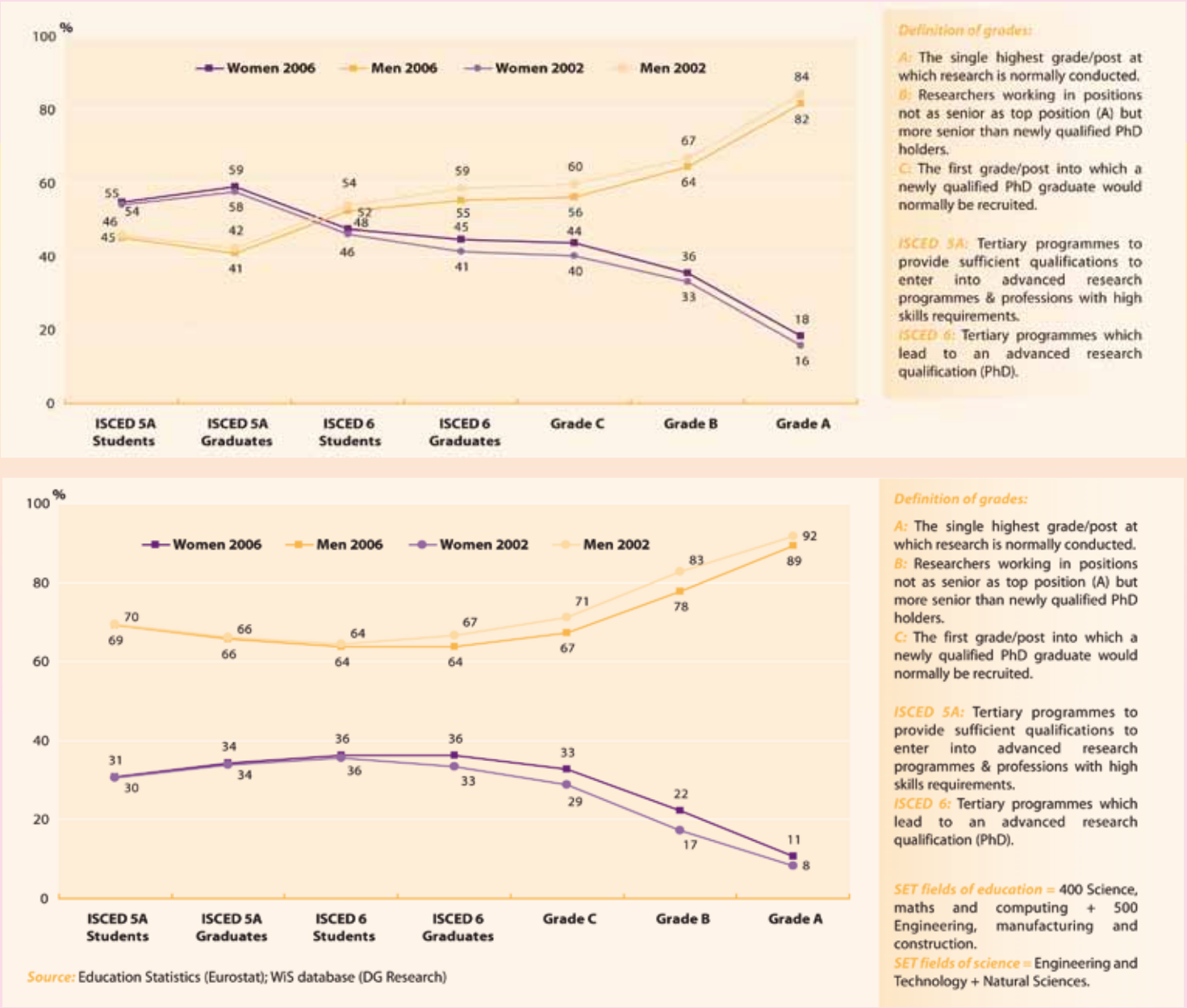


Fig. 1 Evoluzione della carriera femminile e maschile in ambiente accademico (in alto) e nelle facoltà scientifiche – Scienze pure e Ingegneria – (in basso) nella Unione Europea (27 paesi, confronto tra dati 2002 e 2006).

prima risposta a queste domande: nel 2006, in media, il 30% dei ricercatori nei 27 paesi dell'UE è donna, valore di poco superiore al 29% del 2003. Analizzando il dato più in dettaglio, si osserva una maggiore presenza femminile nei settori della ricerca pubblica – pari al 39% negli enti pubblici di ricerca e al 37% nelle università e negli istituti di istruzione superiore – mentre nel settore privato la frazione di donne nella ricerca scientifica scende al 19%. Questa distribuzione mostra che le donne si orientano prevalentemente ad intraprendere la propria carriera nei settori pubblici, dove probabilmente hanno maggiori probabilità di accesso.

Sebbene la presenza femminile nella ricerca scientifica cresca più velocemente di quella maschile (+6.3% nel periodo 2002-2006 contro il +3.7% degli uomini), persiste una sottorappresentazione femminile che risulta evidente dal confronto del numero medio dei ricercatori maschi in relazione alla popolazione attiva nei Paesi UE – il 9‰ – rispetto a quello femminile, pari al 5‰. Questo dato indica che la crescita della presenza femminile nella ricerca non è sufficiente a garantire che lo squilibrio di genere nel settore sia in grado di auto-correggersi.

La limitata presenza delle donne nella ricerca scientifica, osserva il rapporto, è quindi una delle cause della disaffezione delle giovani verso discipline di studio tecnico-scientifiche: la scarsità di modelli di ruolo femminili positivi, ai quali le ragazze possano ispirarsi, contribuisce a perpetuare una disparità di genere che continua a condizionare le possibilità di sviluppo dell'intero sistema della ricerca europea.

3 Il soffitto di cristallo

Oltre ad una segregazione orizzontale, cioè per indirizzo di studio e di occupazione, le ricercatrici europee patiscono una pesante segregazione verticale: la scarsa presenza di donne ai vertici delle carriere scientifiche. I dati parlano chiaro: nelle università, ad esempio, le donne occupano solo il 18% dei livelli più alti della docenza – con ampie variazioni a seconda del settore di studio – ma costituiscono il 44% del totale al livello di ingresso, il più basso della carriera (fig. 1, alto). La presenza femminile ai vertici delle carriere accademiche è maggiore nel settore umanistico e delle scienze sociali, con il 27% e il 18.6% rispettivamente, e diminuisce fino a raggiungere il valore minimo del 7.2% nei settori tecnologici e nell'ingegneria. Nelle scienze pure e nell'ingegneria, che annoverano, complessivamente, il 36% di donne tra i titolari di dottorato di ricerca, è donna, in media, il 33% dei ricercatori, il 22% dei professori associati e il 11% dei professori ordinari (vedi fig. 1, basso). La situazione sembra migliorare per le generazioni di docenti più giovani: analizzando i dati per fasce di età si verifica, infatti, che il 23% dei docenti è donna nella classe di età 35-44 anni, mentre nella classe 45-54 anni la percentuale scende al 21% e oltre i 55 anni si attesta al 18%.

Questo modello di presenza – o assenza – delle donne ha come conseguenza che il livello più alto della carriera è, di norma, declinato al maschile. Questo dato, associato alla constatazione che la "leadership", cioè il potere decisionale, sia quasi esclusivamente in mano maschile, condiziona la possibilità delle donne di realizzare progressi nella gerarchia professionale della ricerca scientifica. Il "soffitto di cristallo", l'invisibile barriera che impedisce di raggiungere i vertici delle carriere, per le ricercatrici europee è davvero difficile da infrangere.

Alla luce dei dati del rapporto europeo è opportuno chiedersi quanto le donne contribuiscono alla definizione dell'agenda scientifica, cioè alle decisioni sulla strategia di politica scientifica dei Paesi dell'Unione. A questo scopo, un dato rilevante deriva dall'analisi della presenza femminile nei comitati scientifici: in media nei 27 paesi dell'UE è donna il 22% dei componenti delle commissioni scientifiche. Inoltre, solo il 13% degli istituti nel settore dell'istruzione superiore e il 9% delle università sono diretti da una donna. In generale, più si sale nella gerarchia professionale, minore è il numero di donne: sono un'esigua minoranza le ricercatrici che si trovano ai posti di comando e nelle "stanze dei bottoni" delle istituzioni scientifiche. L'immagine della "leaky pipeline", una conduttura che perde, esemplifica efficacemente questo fenomeno.

Questi dati illustrano con chiarezza le difficoltà che incontrano donne di influenzare e orientare le decisioni di politica scientifica dell'UE, in particolare per quanto riguarda i soggetti da finanziare e i criteri che disciplinano il reclutamento delle nuove leve della ricerca.

4 Progettare il cambiamento

I dati del rapporto *She Figures* sulle donne nella ricerca e nelle professioni scientifiche mostrano con chiarezza che il potenziale intellettuale femminile europeo non è adeguatamente capitalizzato: non si tratta solo di una discriminazione che colpisce una parte, oltretutto cospicua, della popolazione lavorativa europea, ma di una perdita per l'intero sistema scientifico e tecnologico dell'UE. Sebbene la situazione in alcuni Paesi dell'Unione sia migliore rispetto ad altri, i dati dimostrano che la politica del "laissez faire" non produce risultati significativi: il gap di genere non si colma spontaneamente.

L'effettiva parità di trattamento richiede prima di tutto un cambiamento culturale sostenuto dalle istituzioni, al quale devono essere associate politiche mirate e strategie comuni. Un primo, indispensabile intervento deve essere finalizzato ad incoraggiare le giovani a indirizzare i propri studi verso quelle discipline in cui le donne sono tuttora sottorappresentate.

È fondamentale, inoltre, che sia garantita la trasparenza nelle selezioni professionali, attraverso la definizione di criteri di scelta equi e chiari e una corretta valutazione delle capacità e delle competenze di ognuno: esiste, infatti, una relazione tra la trasparenza nella valutazione, il livello professionale e il successo delle donne in campo lavorativo.

Assicurare trasparenza e uguale trattamento tra donne e uomini nella procedura di valutazione e puntare a raggiungere un equilibrio di genere a tutti i livelli della carriera sono obiettivi rilevanti che procedono in parallelo con la promozione dell'eccellenza, come indicato esplicitamente dalla Carta Europea dei Ricercatori e dal Codice di Condotta per il loro reclutamento[8], raccomandati ai Paesi dell'UE nel 2005, e dal Codice Minerva[9] sulle procedure di reclutamento.

Un altro intervento strategico deve essere indirizzato al superamento degli stereotipi sui ruoli tradizionali di donne e uomini: una nuova cultura della condivisione delle responsabilità all'interno della famiglia, sostenuta da adeguate politiche mirate alla conciliazione della vita professionale e di quella privata – orari di lavoro più flessibili e servizi per l'infanzia[10] e per la cura dei familiari – è una condizione indispensabile per favorire l'ingresso delle donne nelle carriere professionali più impegnative, quale è il lavoro nella ricerca.

5 Conclusioni

Rimuovere lo squilibrio di genere ad ogni livello e grado in campo scientifico è un passo fondamentale per mantenere e per accrescere la capacità di svolgere attività di ricerca in Europa, a beneficio non solo dello sviluppo culturale e professionale delle donne, ma anche per mantenere competitiva la ricerca scientifica dell'Unione rispetto alle altre regioni del mondo. Una società priva di squilibri di genere, quindi più attenta a realizzare concretamente pari opportunità, è una società più equa e democratica, proiettata verso il benessere socio-economico di tutti i suoi cittadini.

L'auspicio è, quindi, che le giovani di talento perseguano obiettivi intellettuali ambiziosi, evitando di sacrificare la propria intelligenza e le proprie capacità per rincorrere avvilenti modelli femminili di perfezione fisica, tanto vuota quanto effimera, troppo spesso veicolati dalla pubblicità e dai media.

La società europea moderna, che vuole "diventare l'economia basata sulla conoscenza più competitiva e dinamica del mondo, in grado di realizzare una crescita economica sostenibile con nuovi e migliori posti di lavoro e una maggiore coesione sociale" ha sicuramente bisogno di tutti i suoi giovani talenti, senza distinzione di genere.

Patrizia Cenci, Angela Di Virgilio,
Liliana Ubaldini
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

[8] europa.eu/eracareers/pdf/am509774CEE_EN_E4.pdf

[9] www.researchinaustria.at/conference/slides/vallerga.pdf

[10] Sulla base della strategia di Lisbona sono stati indicati ai paesi dell'UE obiettivi nel settore dei servizi per l'infanzia aventi come scadenza il 2010 quali, ad esempio: 90% di copertura delle esigenze legate alla cura dei bambini tra i 3 anni e l'età della scuola dell'obbligo e il 33% di copertura nel caso dei bambini sotto ai 3 anni.

Per Lucia Votano, Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e Direttore dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) dell'INFN, il 2010 è sicuramente un anno di grandi soddisfazioni. Infatti molti esperimenti di LNGS stanno producendo risultati di fisica importanti nello studio del neutrino e della materia oscura, e inoltre, alla fine di marzo, il Presidente della Repubblica Giorgio Napolitano le ha conferito l'onorificenza di Commendatore dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana.

Luisa Torsi, Professore di Chimica Analitica all'Università di Bari, ha ottenuto il Premio Heinrich Emanuel Merck 2010. Luisa Torsi ha una laurea in Fisica e un PhD in Chimica. È la prima volta che questo prestigioso premio, della ditta farmaceutica omonima, viene dato a un italiano e a una donna. Il premio è stato istituito oltre venti anni fa, ed è riservato a scenziati al di sotto di 45 anni, per metodi innovative in analisi chimica per applicazioni mirate a migliorare la qualità della vita umana.

"Torsi viene premiata per la sua ricerca sui sensori chimici basati su semiconduttori organici, transistor a effetto di campo su film sottile organico. Questa interessantissima tecnologia permette di misurare sostanze chiamate "chirali", cioè la distribuzione spaziale degli atomi nelle molecole. Le sostanze "chirali" sono responsabili di molti effetti biologici negli enzimi, anticorpi o altri recettori molecolari. Questi di rimando permettono molte applicazioni nella sintesi di materie prime e ingredienti attivi in applicazioni chimiche e farmaceutiche".

http://www.merck.de/de/presse/extNewsDetail.html?newsId=5A0E18A77ED0AF79C12577190057E6EA&newsType=1

Istituto de Física
Universidade de São Paulo
Brasil

1 -30 Settembre 2010

La mostra "GIUSEPPE OCCHIALINI" va in Brasile

l'1 settembre 2010, presso l'Istituto di Fisica dell'Università di San Paolo in Brasile, verrà inaugurata la Mostra "Giuseppe Occhialini, uno scienziato alla scoperta dell'universo invisibile" realizzata, con il patrocinio della SIF, dal Museo del Balì nel 2007, nel centenario della nascita del grande scienziato. La Mostra rimarrà in visione per tutto il mese di settembre. Con questo evento i fisici dell'Università di San Paolo vogliono ricordare l'importante ruolo di Occhialini nella fondazione della Scuola di Fisica di quell'università.

INTERVISTA A
FEDERICO FAGGIN

Federico Faggin, vicentino, si laurea in Fisica all'Università di Padova nel 1965, summa cum laude. Nel 1968, alla Fairchild Semiconductor in Palo Alto, California, Faggin inventa la tecnologia "Silicon Gate Technology (SGT)" per la fabbricazione di circuiti integrati MOS. Assunto dall'Intel nel 1970, Faggin progetta il primo microprocessore al mondo, il 4004, e tutti i primi microprocessori dell'Intel fino all'8080.
Nel 1975 Faggin fonda la prima di tre aziende, la Zilog, che crea il microprocessore Z80. Faggin è attualmente presidente onorario della Synaptics, ditta da lui avviata nel 1986.

Federico Faggin è uno dei molti italiani che dopo essere nato, cresciuto ed educato interamente in Italia si trasferì negli USA. Faggin, dopo aver dato dei contributi tecnologici fondamentali nel campo della microelettronica, è diventato un imprenditore di successo, e ora sta iniziando una terza carriera.
Circa un anno fa Faggin ha ceduto la Foveon, ditta innovativa nel campo dei sensori di immagine, e ha lasciato il campo dell'industria per dedicarsi interamente allo studio della consapevolezza.

DALLA MICROELETTRONICA ALLA CONSAPEVOLEZZA

Federico, da quando eravamo insieme sui banchi dell'Università di Padova, direi che hai avuto una carriera movimentata. Quali sono state le svolte principali, e come le spieghi?
Quando avevo 13 anni, decisi di fare l'Istituto Industriale malgrado mio padre, libero docente di filosofía, avrebbe voluto che io facessi il Liceo. Questa mia decisione fu importante perchè mi portò nel 1961 a lavorare nel laboratorio di elettronica dell'Olivetti a Borgolombardo dove finii per progettare in parte e costruire un piccolo calcolatore elettronico sperimentale. Avevo 19 anni e conducevo il progetto con quattro tecnici che lavoravano per me. L'esperienza fatta all'Olivetti fu indispensabile alla mia creazione del microprocessore, dieci anni dopo.
Come mai hai deciso di lasciare l'Olivetti e iscriverti a Fisica all'Università di Padova?
Avevo sviluppato un gran desiderio di capire a fondo la física e in particolare mi interessavano i semiconduttori. Ciò richiedeva una profonda conoscenza della meccanica quantistica, di cui sapevo ben poco.
Che cosa hai fatto poi, dopo la laurea?
Decisi presto che la carriera universitaria non faceva per me, passando all'industria. Il mio primo lavoro, nel 1966, mi dette l'opportunità di visitare la Silicon Valley per seguire un corso sui circuiti integrati MOS, che erano ancora sperimentali. Subito dopo lavorai per la SGS-Fairchild di Agrate Brianza (la STMicro di oggi) dove sviluppai il loro primo processo di fabbricazione MOS e i loro primi due circuiti MOS. Da lì arrivai alla Fairchild Semiconductor in California, nel 1968, dove iniziò la mia carriera statunitense.
Quale fu il tuo primo progetto importante alla Fairchild?
Ebbi subito la scelta tra due progetti e decisi di sviluppare un processo di fabbricazione per circuiti integrati MOS con gate autoallineante. Creai così, meno di un anno dopo, la Silicon Gate Technology (SGT), e il primo circuito integrato commerciale che la usava. Fu la SGT a rendere possibile la fabbricazione delle prime memorie a semiconduttori e il primo microprocessore. Pochi anni dopo, la SGT diventò la tecnologia alla base del progresso straordinario che abbiamo visto negli ultimi quarant'anni, ancora in uso oggi.
Dal Silicon Gate al microprocessore… Mi sembra un salto improbabile. Come avvenne?
La Fairchild era titubante nell'adottare la SGT per fare circuiti integrati logici, decisi così di lavorare all'Intel dove potevo dimostrare la superiorità della SGT non solo per fare memorie, ma anche per fare circuiti logici. A quel tempo, l'Intel aveva un progetto custom per un cliente giapponese che richiedeva di progettare un CPU in un singolo chip insieme ad altri tre chips di memoria e di input-output. Mi fu affidato il progetto che portai a termine in tempo record, contribuendo nuove idee indispensabili alla sua realizzazione, e superando la competizione che stava lavorando a progetti simili. Nacque così, nel 1971, il primo microprocessore al mondo: l'Intel 4004.
Come è avvenuta la transizione da inventore-progettista a imprenditore?
L'Intel allora era una ditta di memorie, e il microprocessore era considerato un prodotto interessante principalmente perchè aiutava a vendere più memorie. Io però credevo fortemente nell'enorme potenziale del microprocessore, e verso la fine del 1974, decisi di fondare una ditta interamente dedicata ai microprocessori: la Zilog.
C'è voluto molto coraggio a decidere di cambiare strada?
Si, certo, anche perchè a quel tempo era difficile trovare capitale di ventura. Avevo 32 anni e la possibilità di fallire non mi sfiorava nemmeno. Se non fossi riuscito a trovare i fondi necessari, sarei tornato a lavorare per un'altra ditta, dopo aver fatto un'ulteriore importante esperienza.
Come è stata la tua esperienza alla Zilog?
Più esilarante e impegnativa di quanto avessi mai potuto immaginare. Dopo aver concepito e progettato il microprocessore Z80, essendo il CEO della ditta, il mio lavoro cambiò radicalmente. In due anni e mezzo crescemmo da 11 a 1300 impiegati, con uffici internazionali e con una fabbrica in Silicon Valley e una in Asia. Lo Z80 è ancora oggi fabbricato in grandi volumi, 34 anni dopo la sua introduzione sul mercato.
Che cosa hai fatto poi?
Gradualmente la mia vita cambiò da inventore-progettista a imprenditore-CEO. Fondai altre due ditte di alta tecnologia e presi le redini di una quarta ditta che fu ceduta poco più di un anno fa. Imparai moltissimo, sia nel campo del business che nel campo umano. Un paio di anni fa, però, decisi di togliermi gradualmente da tutti i miei impegni per far posto alla mia nuova passione. Imboccai così un'altra strada.
Sono curioso. Che cosa vuoi fare?
Da molti anni mi sto interessando alle problematiche della consapevolezza; e da interesse secondario, un po' alla volta, questo è diventato il mio interesse primario. A qualche livello intuisco che la natura della consapevolezza deve essere legata alla natura della realtà física, ma come? Manca una metodologia specifica per studiare scientificamente esperienze soggettive. E la divisione tra mondo soggettivo e mondo oggettivo mi sembra completamente arbitraria, retaggio della divisione tra religione e scienza. Vorrei però fare un'indagine scientifica, non filosofica, partendo da una posizione unitaria. Se la consapevolezza è reale, e non un epifenomeno del funzionamento del cervello, deve avere una realtà fisica di qualche tipo. Sono ancora agli inizi della mia investigazione, e sto raccogliendo esperienze personali come ipotesi di lavoro. Ci vorranno ancora parecchi anni di lavoro prima di avere una teoria solida.

S. Centro

SCIENZA E "MISTERI OSCURI"

Caro Direttore,
in Italia, la scienza non ha mai goduto di una buona reputazione, soprattutto tra le fasce meno preparate della popolazione, per le quali, talvolta, contano di più i pareri dei ciarlatani che quelli degli scienziati. Ciò si contrasta con una buona divulgazione scientifica, ed in quest'ottica è da lodare la decisione del CERN di essere presente in una trasmissione televisiva di prima serata come MISTERO (Italia 1, 11 maggio 2010). Meno lodevole è la scelta del tipo di trasmissione, essendo MISTERO notoriamente incline a creare i misteri laddove non ci sono, piuttosto che a cercare di chiarirli. Ne è emersa, quindi, un'immagine tutt'altro che costruttiva dell'LHC, del CERN e, cosa più grave, della scienza in generale.
Nel servizio, si è ripetuto più volte che all'LHC si celano "misteri oscuri". Si è parlato della possibilità di creare dei micro buchi neri che, nella "traduzione" degli autori, è diventata il pericolo di distruggere l'intero pianeta, anche perchè nell'LHC, si è detto, "girano" energie tali da poter provocare esplosioni disatrose. Il fisico intervistato, ha spiegato che l'energia di un protone accelerato non supera quella di una mosca in volo, ma nella testa dell'ascoltatore inesperto, è facile immaginare quale dei due messaggi rimanga. Nell'impostazione della trasmissione, le ipotesi più fantasiose sono state poste sullo stesso piano di confronto delle posizioni degli scienziati. Se è giusto confrontare le diverse posizioni, è vero anche che non bisogna perdere il senso delle proporzioni: mettere intorno ad un tavolo il Prof. Rubbia ed uno stregone a discutere di fisica sarà certamente democratico, ma francamente è fuorviante per i non esperti (che, ricordiamolo, sono la maggioranza, e sono il target di quella trasmissione) perchè sarebbero indotti a pensare che ciò che dice lo stregone sia in qualche modo confrontabile con quello che dice Rubbia. La trasmissione si conclude con la domanda: "quanto siamo disposti a rischiare per trovare le risposte?", riferendosi ad alcuni problemi tecnici verificatisi all'LHC e che sono stati presentati come potenzialmente catastrofici per la sicurezza dell'umanità. Probabilmente, tutto il CERN messo insieme, rappresenta un pericolo per l'umanità minore di quello rappresentato da un qualsiasi impianto industriale, ma non è certo questo il messaggio che è passato. Infine, è stata esposta l'opinione di un ingegnere, per valutare la competenza del quale basti considerare che, riferendosi alla meccanica quantistica, ha affermato che l'influenza dell'osservazione sul risultato della misura si estrinseca nel fatto che "i ricercatori alla fine trovano quello che vogliono trovare".
Mi chiedo se il CERN, pur mostrandosi giustamente aperto ai media, non debba pretendere una maggiore sobrietà dei toni e più correttezza nell'informazione. Nella trasmissione, le cose dette dagli scienziati intervistati sono state, alle orecchie di un pubblico non specialistico, in buona parte oscurate dalle domande tendenziose e dai toni allarmistici dei conduttori. Credo che un servizio del genere, abbia ottenuto il risultato diametralmente opposto a quello che si prefiggeva, ovvero promuovere la cultura scientifica e ridurre la distanza tra l'uomo della strada e la ricerca.
Una posizione abbastanza (troppo?) diffusa tra gli addetti ai lavori, è un certo snobismo nei confronti di tali episodi, riassumibile con: "certa TV non è degna nemmeno di attenzione, tanto solo i 'creduloni' possono abboccare". Tuttavia, ci dobbiamo chiedere: certa TV, quanta gente raggiunge? siamo sicuri che i 'creduloni' siano la minoranza e possano essere trascurati? Non sono proprio le fasce della popolazione meno preparate scientificamente (e che sono la maggioranza, non la minoranza!) ad essere, di fatto, maggiormente influenzate da prodotti tipo MISTERO? Paradossalmente, le buone fonti di divulgazione sono consultate da chi è già più critico, mentre la cattiva divulgazione raggiunge più facilmente chi è meno preparato.

Enrico Campanelli
Laureato in Fisica
all'Università di Pisa

Pisa, 31 maggio 2010

OPINIONI Online First
8 giugno 2010

IN RICORDO DI

Daniele Prosperi

Roma 28 gennaio1934 -
Roma 26 marzo 2010.

Pubblicato online
l'11 maggio 2010.

George Timofeevich Zatsepin

Mosca 28 maggio 1917 -
Mosca 8 marzo 2010.

Pubblicato online
il 13 maggio 2010.

Alexei Norairovich Sissakian

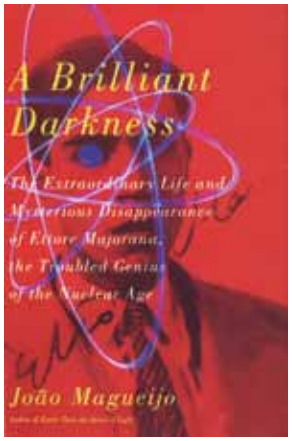
Mosca 14 ottobre 1944 -
Mosca 1 maggio 2010.

Pubblicato online
il 18 giugno 2010.

Alessandro G. Ruggiero

Roma 10 aprile 1940 -
East Moriches (NY) 26 giugno 2010.

Pubblicato online
il 21 luglio 2010.



J. Magueijo – A Brilliant Darkness. The Extraordinary Life and Mysterious Disappearance of Ettore Majorana, the Troubled Genius of the Nuclear Age. Basic Books, a member of the Perseus Books Group, New York, 2009; pp. XXI + 280; $27.50, Can $ 34.95

La personalità scientifica e la vicenda umana di uno dei più importanti fisici teorici del '900, Ettore Majorana, ha da sempre eccitato la fantasia di molti. Considerato un genio al pari di Galilei e Newton dal suo mentore Enrico Fermi, nel panorama scientifico attuale il nome di Majorana compare in molte aree della ricerca di frontiera in fisica (e non solo), dalla fisica delle particelle elementari a quella della materia condensata e alla fisica matematica. I suoi fondamentali contributi in tali settori sono certamente un testamento alla sua lungimiranza non comune, e la sua misteriosa scomparsa dopo l'imbarco su una nave in partenza da Napoli il 25 Marzo 1938 svolge – o almeno dovrebbe svolgere – solo un ruolo marginale nello spiegare perché Majorana ha catturato l'interesse di tanti. Scienziati, letterati e gente comune si sono, infatti, spesso dilettati ad inseguire un "mistero", talvolta inesistente, ma quasi mai si sono "sporcati le mani" con i "dati sperimentali" sul personaggio che ambivano descrivere e, ancor meno, con i risultati della sua scienza (certamente non accessibili a tutti). Da qualche mese è uscito un nuovo capitolo di questa interessantissima storia (la Majoranologia), scritto dal fisico teorico Joao Magueijo, la cui peculiarità sembra essere, diversamente dagli altri capitoli, quella di stupire il lettore con turpiloquio, oscenità, et similia. Le motivazioni per una "nuova" biografia su Majorana? Ce le spiega direttamente l'autore (la traduzione è mia). "Da anni dopo che ho imparato a conoscere Ettore Majorana, avrei voluto scrivere un libro sulla sua vita... ma ho sempre rinviato ad un futuro incerto l'atto di mettere penna su carta. Poi, un giorno lessi un ritaglio di giornale, e mi resi conto che stava per chiudersi il cerchio sul mistero. Ettore aveva da poco compiuto cento anni, e una grande scoperta era stata fatta nelle acque profonde vicino Catania. Il tempo era arrivato per il disvelamento finale dell'eredità di Majorana"

Ettore Majorana nacque il 5 agosto 1906 a Catania, in una famiglia con un ricco patrimonio scientifico, tecnologico e politico alle spalle, contando tra le sue fila rinomati scienziati, giuristi, parlamentari e rettori universitari. Nel 1923 Ettore si iscrisse alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma, dove divenne amico di fisici del calibro di Giovannino Gentile, Edoardo Amaldi o del futuro premio Nobel Emilio Segrè. Spinto da Segrè e da Amaldi, che dopo un po' dalla loro iscrizione all'Università si erano trasferiti da Ingegneria a Fisica, Majorana "concesse" di incontrare Fermi e, in seguito a tale incontro avvenuto nell'autunno del 1927, decise di passare lui pure a Fisica.

A quel tempo, Fermi era il "leader" scientifico dell'Istituto di Fisica di Roma, diretto da Orso Mario Corbino e situato nella storica Via Panisperna. Magueijo descrive questo ambiente come "un asilo per geni: un gruppo di giovani fisici molto brillanti guidato da Fermi che lavoravano presso un istituto dove potevano dar libero sfogo al loro estro". Majorana contribuì notevolmente alla ricerca teorica del gruppo, e nel 1928 – mentre era ancora uno studente universitario – pubblicò il suo primo articolo, sulla fisica atomica.

Per qualche strano motivo, però, Majorana sviluppò una strana avversione per la pubblicazione dei suoi risultati, tanto è vero che uscirono su rivista solo nove articoli dal 1928 al 1933 (e un altro ancora nel 1937), e la maggior parte di questi probabilmente videro la luce solo grazie all'insistenza di Fermi o di altri. La sua ininterrotta attività teorica durante questo periodo, tuttavia, è ben testimoniata dai suoi amici e colleghi e, per fortuna, una gran parte di questo lavoro è stato conservato nei suoi appunti personali.

Sebbene sconosciuto negli anni '30, la maggior parte di questo lavoro è ora finalmente stata resa nota, ed è quindi strano che Magueijo non ne tenga in considerazione nella sua "biografia". Tuttavia, anche considerare solo due articoli, come fa Magueijo, è sufficiente per apprezzare il genio di Majorana. Per esempio, il suo celebre lavoro del 1937, "teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", dove introdusse la ormai ben nota ipotesi del "neutrino di Majorana", era completamente rivoluzionario per il periodo in cui uscì, poiché in esso si sosteneva che l'antiparticella di una data particella avrebbe potuto coincidere con la particella stessa, contrariamente a quanto aveva da poco – e con successo – mostrato Paul A. M. Dirac. Ancora una volta con una lungimiranza senza precedenti, Majorana suggerì che il neutrino, ancora non osservato sperimentalmente, avrebbe potuto avere proprio tali caratteristiche. Oggi molti esperimenti sono dedicati alla rivelazione di alcuni fenomeni previsti dalla teoria di Majorana, tra cui le oscillazioni di neutrino e il possibile doppio decadimento beta senza emissione di neutrini. Eppure, secondo Magueijo, Majorana riguardava questo suo lavoro come "un'appendice minore a un altro articolo pubblicato nel 1932, che Majorana considerava il suo capolavoro: 'teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario'."

Alla luce di questi fondamentali contributi – e di molti altri non considerati nel libro – la convinzione dell'autore che "la maggior parte dei punti di forza di Ettore era semplice messa-in-scena" è abbastanza singolare (e anche un po' ridicola). Come è parimenti singolare l'affermazione (anche questa non supportata da prove) che Fermi fosse "vessato" da Majorana a livello psicologico.

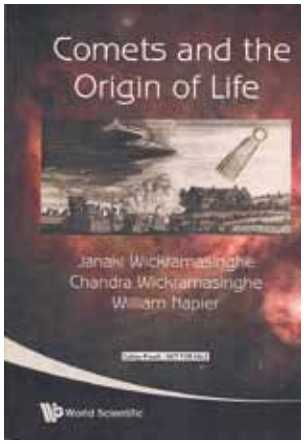
A un certo punto, infatti, Magueijo scrive che "Fermi si sentiva umiliato dal genio di Ettore come pure dal suo atteggiamento generale verso la scienza e la vita. Perché al di là del suo lato spensierato, Fermi aveva un grande complesso. Non riguardo alle donne, come Ettore, ma riguardo alla scienza." E, un po' più avanti, in modo ancora più "ad effetto", suggerisce pure che "Fermi era intellettualmente un po' limitato. Aveva grandi abilità che, però, discendevano soprattutto da grandi riserve di energia, duro lavoro, e ferma determinazione: pura forza bruta, insomma. Gli faceva difetto la fantasia."

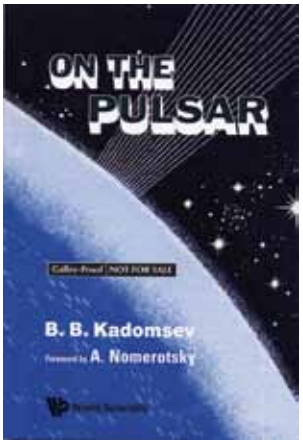
Fantasia, tuttavia, che all'autore non manca, sia quando cerca di spiegare concetti fisici (pur essendo – apparentemente – un provetto fisico teorico) sia, soprattutto, quando cerca di delineare il carattere e la personalità di Majorana. Diversi presunti aneddoti non sono, nello stile di Magueijo, riportabili in questa sede – diremmo "vietati ai minori" – , ma per altri aspetti il brano che segue è tipico del libro: "Majorana fu allevato in un clima di emarginazione sociale e crebbe mostruosamente distorto, privo di capacità relazionali e di indipendenza, pieno di inettitudine. A gente come lui – quando non diventano criminali, tossicodipendenti, o psicopatici – non può essere di aiuto il sentirsi intellettualmente superiori. Sono dei 'Frankenstein', creati artificialmente, intelligenti 'contro natura'."

La fantasia di Magueijo influenza anche la sua discussione sulla scomparsa di Majorana. Piuttosto che ancorarsi a fatti certi, Magueijo preferisce andar dietro esplicitamente a suggestioni romanzesche, spunti folkloristici e così via. Per citare un esempio, la grande scoperta fatta nelle acque profonde vicino a Catania, riportata in apertura di questa recensione, egli si riferisce a esperimenti sui neutrini nel Mediterraneo e non a nuove informazioni sulla sorte di Majorana… Ma, come l'autore stesso riporta in modo chiaro nella sua conclusione, "questo libro non avrebbe potuto essere più aperto, questo essendo il motivo che mi ha spinto a scriverlo: io odio verità eterne. Non sappiamo cosa è successo a Ettore, e non sappiamo se il neutrino è del tipo di Majorana. Ma chi se ne importa? Come Einstein e Infeld dissero una volta, la scienza è un giallo scritto male, in cui non sappiamo mai come va a finire."

Senza dubbio una lettura particolare, molto particolare.

S. Esposito





J. T. Wickramasinghe, N. C. Wickramasinghe, W. M. Napier - Comets and the Origin of Life. World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2009; pp. VIII + 199; U.S. $ 55., £ 41

Come l'Universo sia nato e dall'Universo Primitivo sia derivato l'Universo Fisico attuale, crediamo di saperlo, almeno a grandi linee. Ma come all'interno dell'Universo, in particolare sulla Terra, sia comparsa la vita è un problema ancora completamente aperto.
La nucleosintesi primordiale ha prodotto l'idrogeno e l'elio iniziali. La formazione di condensazioni stabili e massicce di tale materia iniziale, l'innesco al loro interno di processi di fusione e la successiva esplosione di alcune di condensazioni hanno quindi contaminato il mezzo primordiale con elementi più pesanti dell'idrogeno ed elio, elementi la cui presenza è oggi rilevabile direttamente sulla Terra e, attraverso la spettroscopia, in tutti gli oggetti celesti e nello spazio tra questi. E il processo riparte con la formazione di nuovi oggetti stellari a partire da miscele iniziali già arricchite. Dove le condizioni sono più favorevoli, in particolare in gigantesche nubi di materia interstellare, incubatrici di nuove stelle, gli elementi cominciano a interagire: Nascono così molecole prima semplici e poi via via più complesse. La varietà di molecole che oggi osserviamo sulla Terra è enorme: si va dalle sostanze inorganiche a quelle organiche, alle enormi catene di atomi che caratterizzano la materia vivente. Anche se non siamo ancora in grado di dire come, è certo che la materia vivente è derivata dai prodotti della nucleosintesi primordiale e di svariate successive nucleosintesi stellari: nell'Universo primordiale le condizioni di temperatura e densità ed il fondo di radiazione erano infatti tali da distruggere qualunque molecole si fosse per avventura formata. Ma oggi sulla Terra forme di vita (nel senso di oggetti in grado di autoreplicarsi) esistono, quindi in qualche modo ed in qualche tempo devono essere apparse.
È anche ragionevole supporre che ciò che osserviamo sulla Terra presente possa essere presente in forme più o meno simili anche su altri pianeti del Sistema Solare, su pianeti di altri sistemi solari all'interno della Galassia e fuori di essa oltre che nelle parti più dense delle gigantesche nubi molecolari che si formano all'interno del mezzo interstellare e da cui nascono nuove stelle. Su questo punto purtroppo la spettroscopia, soprattutto a radio frequenza, ci permette solo di verificare la presenza di molecole importanti come quelle dell'acqua, del monossido di carbonio, dell'ammoniaca, del metano e di alcuni idrocarburi poliaromatici (PAH). Non esistono però al momento metodi di indagine che ci consentano di identificare senza ombra di dubbio al di fuori della Terra e del Sistema Solare le molecole che sulla Terra caratterizzano la materia vivente. Possiamo solo constatare che alcuni spettri di emissione ed assorbimento che osserviamo in oggetti galattici ed extragalattici possono essere riprodotti realizzando opportuni agglomerati di materia vivente e non vivente esistenti sulla Terra.
Inoltre le strutture osservate nei campioni di materia che giungono sulla Terra dallo spazio esterno (meteoriti e polveri) sono compatibili con strutture di materiale organico formatesi nel passato attorno a esseri viventi di tipo microbico oggi non più presenti, ma non contengono nessuna evidenza diretta di tali esseri. Alle stesse conclusioni si giunge considerando i campioni di materia direttamente prelevati, negli ultimi decenni, sulla Luna, su Marte e su alcune comete.
Oggi quindi possiamo dire che la presenza di forme viventi al di fuori della Terra non è in contrasto con le osservazioni, ma nulla di più.
Che la vita sia oggi presente sulla Terra è invece un dato di fatto. E allora come si è giunti a questa presenza ? L'età della Terra (circa 4.5 miliardi di anni) è di poco superiore ai 3.6-3.8 miliardi di anni a cui risalgono le più antiche tracce di materia vivente osservate. Pertanto nel caso di nascita della vita direttamente sulla Terra ci sono stati a disposizione al massimo 7-800 milioni di anni perché da materia inerte potesse derivare, attraverso successive trasformazioni, forme di vita, intese come insieme di enti fisici in grado di autoreplicarsi. Un intervallo di tempo generalmente ritenuto troppo breve per un processo tuttora sconosciuto, ma sicuramente non comune. Viceversa lo studio di ciò che oggi avviene sulla Terra mostra, che forme di vita, anche le più elementari come i batteri, una volta prodotte riescono a moltiplicarsi con estrema rapidità in condizioni ambientali piuttosto semplici, caratterizzate dalla compresenza di argille ed acqua liquida. E tali situazioni si sono sicuramente presentate sulla Terra subito dopo la sua formazione.
Per ovviare a questa difficoltà è stato proposto a più riprese nel passato anzitutto da pensatori e filosofi che la vita sia giunta sulla Terra dallo spazio esterno e qui, avendo trovato condizioni adatte, si sia rapidamente sviluppata. A partire dagli anni '60 del secolo scorso, in una lunga serie di articoli, soprattutto su Nature, e in varie monografie, Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe hanno ripreso ed analizzato in modo quantitativo questa ipotesi giungendo a proporre che le prime forme di vita siano state trasportate sulla Terra da comete.
Nel volume "Comets and the Origin of Life", scritto da Wickramasinghe junior, Janacki, assieme a Wickramasinghe senior, Chandra, e a William Napier l'ipotesi delle comete viene riesaminata in modo sistematico alla luce delle più recenti osservazioni astrofisiche e cosmologiche ed inserita in un più ampio quadro, la Panspermia, secondo cui le comete sarebbero stato il tramite per la diffusione della vita non solo sulla Terra ma in tutta la Via Lattea e probabilmente in tutto l'Universo. In questo modo il tempo a disposizione per la nascita delle prime forme di vita si dilata da 7-800 milioni di anni ad oltre 10 miliardi di anni, l'età degli oggetti stellari più antichi.
È questo un intervallo temporale sufficientemente lungo da permettere di considerare tra i processi tutt'ora sconosciuti che possono aver provocato la transizione della materia da forme non vitali a forme vitali, anche processi a bassissima probabilità.
Nella Panspermia le comete hanno un doppio ruolo: colpendo oggetti (pianeti?) molto antichi già sede di forme di vita possono provocare l'espulsione verso lo spazio di meteoriti e polveri contaminate da forme viventi e, venendo a loro volta contaminate, da queste possono trasportare queste forme di vita verso altri oggetti. Inoltre le comete più massicce, contenendo acqua liquida ed argilla, potrebbero agire da reattori in cui anche debolissime tracce di vita giunte all'interno della cometa, dove risultano protette dalle ostili condizioni ambientali tipiche degli spazi inerplanetari ed interstellari, possono rigenerarsi e moltiplicarsi, durante i lunghissimi viaggi che la cometa compie tra due collisioni.
Ovviamente la Panspermia è un possibile modello utile per spiegare la presenza di vita sulla Terra e (forse) nell'Universo, ma la sua realtà è tutta da provare.
Il Volume, evidentemente derivato dalla tesi di Dottorato di Wickramasinghe junior (2007) anche se non sempre di facile lettura è estremamente utile. Fornisce un quadro aggiornato dei dati osservativi sulle comete, sui segnali attribuibili a materia vivente ecc. e presenta modelli matematici utilizzabili per interpretare e riunire le diverse informazioni. Ciò è estremamente interessante non solo per biofisici ed astrofisici ma per qualunque fisico desideroso di cogliere appieno il senso delle numerose osservazioni oggi in corso che mirano ad individuare sistemi planetari esterni al Sistema Solare e tracce di acqua su oggetti del Sistema Solare diversi dalla nostra Terra.

G. Sironi

B. B. Kadomsev (Foreword by A. Nomerotsky) – On the Pulsar. World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2009; pp. XI + 135, U.S. $ 48, £ 36 (Hardback), U.S. $ 26, £ 20 (Paperback)

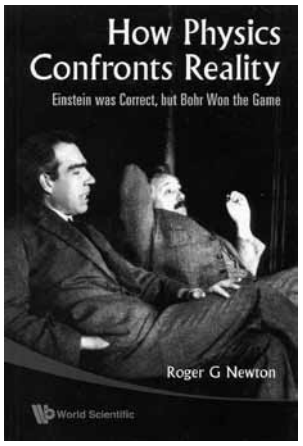
La scoperta, inaspettata, nel 1968, delle pulsars ha avuto immediate ricadute sia sull'astrofisica

che sulla fisica. Da una parte ha portato prepotentemente alla ribalta la realtà dei fenomeni rapidamente variabili, fino ad allora erroneamente ritenuti praticamente inesistenti in astrofisica e quindi non cercati nonostante la tecnologia dell' epoca fosse perfettamente in grado di rivelarli. Non per niente, appena la scoperta delle pulsars effettuata al Mullard Radio Astronomy Observatory di Cambridge fu resa pubblica, i principali osservatori mondiali, si attrezzarono rapidamente (fu sufficiente ridurre le costanti di tempo dei loro sistemi di registrazione dati (a quell'epoca semplici registratori a carta!)) e giunsero a scoprire in brevissimo tempo numerose altre pulsars. Dall' altra con questa scoperta il concetto di stella di neutroni, avanzato negli anni '30 e fino ad allora considerato poco più che una fantasticheria da teorici spinti, entrò prepotentemente nella fisica sperimentale.
Fu infatti ben presto evidente che il brevissimo periodo (dell' ordine del secondo) e la stabilità delle pulsazioni della radiazione elettromagnetica provenienti dalle pulsar poteva essere attribuito solamente ad oggetti con masse di tipo stellare ($\sim 10^{33}$ g) ruotanti su stesse con periodo uguale al periodo della pulsazione. Per questioni di stabilità il raggio di tali oggetti doveva essere dell'ordine di 10 km, e l' emissione elettromagnetica richiedeva la presenza di un dipolo magnetico ruotante assieme alla stella, con campo B di circa 10^{12} gauss. Tale oggetto poteva essere il risultato del collasso praticamente adiabatico di stelle di massa opportuna, giunte ad uno stadio catastrofico della loro evoluzione ed aveva tutte le caratteristiche delle stelle di neutroni ipotizzate negli anni '30.
A causa della densità della materia e del campo magnetico esistenti sulla stella di neutroni, alla superficie di una pulsar la materia, la sua struttura atomica e la sua struttura molecolare assumono configurazioni molto peculiari.
Consideriamo ad esempio l' effetto del fortissimo campo magnetico. In una visione puramente classica, per campi magnetici inferiori a $\sim 10^{9}$ gauss il raggio di Larmor degli elettroni che circondano il nucleo di un atomo, supposti liberi, è superiore al raggio di Bohr. In queste condizioni la nuvola elettronica che circonda il nucleo viene solo perturbata e l' atomo mantiene sostanzialmente la sua simmetria sferica. A 2.35×10^{9} gauss però il raggio di Larmor diventa uguale al raggio di Bohr ed oltre diventa più piccolo. In questa condizioni per gli elettroni è più facile muoversi lungo la direzione delle linee di forza del campo magnetico e la nuvola elettronica, deformandosi, tende ad assumere simmetria cilindrica attorno alla direzione del campo *B*. Il raggio della sezione trasversale del cilindro diventa tanto più piccolo ed inferiore al raggio di Bohr quanto più elevato è *B*. L'energia di legame degli elettroni quindi cresce al crescere di *B*, divenendo per $B=10^{12}$ gauss da 10 a 20 volte superiore al valore dell'energia di legame dello stesso atomo in assenza di campi magnetici.
A causa della diversa simmetria e dell' aumentata energia di legame degli elettroni gli atomi esistenti alla superficie di una stella di neutroni permeata da campo magnetico tendono quindi a formare lunghe catene, di tipo polimerico, di atomi identici, anziché aggregarsi secondo le classiche strutture di molecole composte da pochi atomi. Queste catene sono ovviamente orientate lungo la direzione del campo magnetico. Ciò fa assumere alla materia una distribuzione ed un comportamento di tipo anisotropo.
Questa è soltanto una delle peculiarità che caratterizzano una stella di neutroni e del tipo di fisica che entra in gioco quando si parla di pulsars.
In questo volumetto, pubblicato nel 2009, l'autore B. B. Kadomsev si rivolge a studenti degli ultimi anni delle scuole medie superiori per introdurli alle stranezze della fisica che occorre utilizzare parlando di pulsars e di stelle di neutroni. Visti i destinatari l' autore ricorre solo ad elementari concetti di fisica classica, senza alcun bagaglio matematico avanzato. Viene così esaminato il moto di una particella con distribuzione anisotropa di massa e quindi di un fluido di particelle dello stesso tipo in un campo magnetico, per un giungere ad un semplice modello dell'atmosfera esistente alla superficie di una stella di neutroni. Vengono anche discusse la distribuzione delle correnti alla superficie della stella e l' andamento delle linee di forza del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse di rotazione, dalla superficie della stella fino al cilindro che ruota con velocità uguale a quella della luce e fuori di esso.
Improvvisamente nel penultimo capitolo l'autore si domanda cosa si debba intendere per vita e dopo una breve introduzione su non-linearità ed auto-organizzazione, lasciando definitivamente la divulgazione scientifica si lancia nella "science fiction" per immaginare la pulsar come il sistema nervoso di un essere pensante. Ciò, si dice, viene fatto allo scopo di "stimolare i giovani lettori a sognare e fantasticare come unico modo di giungere a nuove idee e pensieri". Questa parte viene presentata da Kadomsev, forse inconsciamente imitando il Somnium di Keplero, come frutto di un sogno.
Il volumetto termina con una serie di esercizi non banali di meccanica.
Allo scopo, a mio modesto avviso non riuscito, di rendere la lettura più agevole i diversi argomenti vengono trattati attraverso scambi di domande e risposte tra un anziano accademico della vecchia Unione Sovietica e due giovani studenti, uno di scuola media superiore ed uno già studente universitario, in un avveniristico laboratorio che consente di simulare le condizioni esistenti su una pulsar (da cui il titolo del volume "On the pulsar").
Il libro pur illustrando fenomeni interessanti non raggiunge, a mio parere, lo scopo di far comprendere aspetti molto peculiari della fisica a giovani delle scuole medie superiori, almeno ai nostri. La preparazione richiesta è infatti ben al di là di quella fornita dalle nostre scuole. Inoltre l'uso forzato della fisica classica, la mancanza di qualunque trattazione matematica e in un caso l'uso dell'analisi dimensionale un po' affrettato conducono qua e là a sovrasemplificazioni eccessive e, almeno in un caso, se non siamo in presenza di errori di stampa, ad errori veri e propri. Non penso quindi che valga la pena di suggerire questo libro a giovani studenti, per quanto interessati alla fisica ed all'astrofisica attuali. Il volume può invece costituire una lettura stimolante per fisici ed astrofisici già formati che sappiano affrontare gli stessi problemi in modo più approfondito resistendo, grazie al vivace quadro fenomenologico presentato da Kadomsev, alla tentazione di abbandonare la pesantezza, anche matematica, di uno studio approfondito di ciò che avviene alla superficie di una pulsar.

G. Sironi

P. Goodchild - Il vero dottor Stranamore - Edward Teller e la guerra nucleare.
Prefazione all'edizione italiana di Giulio Giorello e Elio Sindoni, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2009; pp. XXI + 570; € 36,00

Una decisa incursione nel 'real world' con l'ultimo volume della collana Scienza e Idee, diretta da Giulio Giorello, e con una biografia di Edward Teller (Budapest,1908- Stanford, 2003). Fu una delle stelle del gruppo di fenomeni ungheresi, comprendente, fra gli altri, Eugene Wigner e John von Neumann. Nonchè figura di primo piano nella decennale vicenda della Guerra Fredda.
Il libro non è una biografia autorizzata, precisa l'autore, e si vale della vastissima bibliografia, relativa al personaggio, che si è moltiplicata nel tempo. In aggiunta alle fonti note, si avvale dell'autobiografia dello stesso Teller, uscita nel 2001, che fornisce versioni ulteriori di episodi, già esaminati e sviscerati in precedenti interviste ed interventi del medesimo protagonista.
In più, si avvale di un nutrito gruppo di lettere, che fino a tempi recentissimi, neppure Teller aveva realizzato che esistessero ancora. Dalla fine degli anni Trenta, per due decenni, Teller era stato in corrispondenza con la fisica Maria Goeppert-Mayer. Lui aveva distrutto le lettere ricevute: ma, a sua insaputa, la scienziata aveva conservato le sue. Si tratta della fisica nucleare, Premio Nobel del 1963.
Il libro si legge facilmente, come lo script di una serie di sceneggiati, con continui stacchi e cambiamenti di inquadratura, e la voce fuori campo, che commenta sulla base dei documenti originali, e interrompendo il racconto serrato con brani delle lettere di Maria. Un astuto espediente letterario per ingentilire la narrazione su un personaggio ispido.
Goodchild trascina il lettore in una rivisitazione, in tono brillante, della lunga 'confrontation' fra USA e URSS, che è stata animata dalle intuizioni geniali di Teller, in materia di armamenti, e dalla sua decisa azione di lobbying a Washington. Si passa dalla lotta per la realizzazione della Super,



cioè della bomba all'idrogeno, ai missili Polaris, e al grande azzardo finale delle Guerre Stellari, bollato come fanta-tecnologia da Hans Bethe e dall'American Physical Society.
Secondo molti osservatori, la giocata di poker di Star Wars, condotta da Washington, costrinse l'impero del male a gettare la spugna. Si finisce con l'ultimo zar, Mikhail Gorbachev, che rifiuta di stringere la mano al nemico di sempre, nel corso di un ricevimento ufficiale, di fronte a Ronald Reagan.
Come detto, una rivisitazione della storia politica di un periodo cruciale del passato recente, segnato dalle grandi lotte, che hanno legato l'Europa e gli Stati Uniti in uno sforzo comune. Un'epoca di stretti legami trans-atlantici, che pare oggi 'Gone, Solid gone', come recita il titolo dell'editoriale di Roger Cohen, nel New York Times del 9 marzo scorso. E che nessuno, a partire dal Presidente Obama, attento primariamente all'area del Pacifico, ha intenzione di far rivivere.

L. Belloni

R. G. Newton - How Physics Confronts Reality. Einstein was Correct, but Bohr Won the Game. World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2009; pp. IX + 147, $ 54, £ 41

Ecco un altro libro di Roger G. Newton, fisico teorico delle particelle, autore di libri divulgativi di successo. Il titolo promette un'analisi del dibattito fra Einstein e Bohr e sul problema di riconciliare il realismo con la Meccanica Quantistica. Invece è un'esposizione un po' troppo sintetica, anche se ben divulgata, della storia della fisica moderna e contemporanea, dai primi modelli di atomo, al Modello Standard. Quindi, per chi già conosce l'autore, niente di confrontabile, ad esempio, con il suo bellissimo libro "Thinking about Physics" (Princeton)–fonte di idee e suggestioni interessanti ed originali.
Il sottotitolo del libro "Einstein was correct, but Bohr won the game" è il leitmotif che guida la presentazione storica, che si incentra soprattutto sulla storia della Meccanica Quantistica, delle sue interpretazioni, le obiezioni di Einstein e le risposte ai suoi argomenti. È quasi una tautologia che Einstein avesse ragione nella sua insistenza che la Meccanica Quantistica non descriva direttamente la realtà. Ma come fa notare l'autore, fin dalle leggi del moto di Newton l'astrazione ha sempre più guadagnato terreno, sacrificando il contatto intuitivo con la realtà per una descrizione teorica sempre piu' precisa e predittiva. E questo processo di astrazione ha caratterizzato tutta la storia successiva della fisica teorica fino ai giorni nostri.
Nel primo capitolo R. Newton tratta le origini della Meccanica Quantistica, non mancando di inserire idee interessanti, ad esempio ribadendo l'erronea interpretazione di Heisenberg della sua famosa relazione di indeterminazione in termini di disturbo dovuto alla misurazione (il famoso Gedanken experiment del microscopio), interpretazione che, sottolinea Newton, ha purtroppo plagiato tutta la comunità scientifica, e che Eisntein stesso ha mostrato essere scorretta.
Nel secondo capitolo R. Newton tratta molto succintamente del problema dell'interpretazione, e sottolinea l'inappropriatezza dell'idea del collasso della funzione d'onda vista come un oggetto fisico oggettivo, anziché come una costruzione astratta, e dibattendo sul problema dell'osservatore che "produrrebbe" il collasso. Si tratta di uno dei problemi più dibattuti della Meccanica Quantistica---il problema del famoso gatto di Schroedinger. Purtroppo R. Newton vi dedica a malapena una paginetta. Riprende successivamente il problema nel capitolo 3, dove tratta del famoso articolo EPR (di Einstein, Podolsky e Rosen) che sostiene l'incompletezza della Meccanica Quantistica. R. Newton parla quindi brevemente della risposta di Bohr al lavoro EPR, nonché del famoso lavoro di Bell (seguito quasi trent'anni dopo!) dove si mostra che le correlazioni quantistiche del "entanglement" non si possono ottenere con variabili nascoste "locali". Einstein aveva ragione? Bohr risponde negativamente, affermando: "é scorretto pensare che lo scopo della fisica sia di scoprire come è fatta la natura. La fisica invece deve occuparsi di ciò che possiamo dire sulla natura". É questo il punto di vista (che oggi chiamiamo "operazionale") che caratterizza "la scuola di Copenhagen", secondo la quale nulla "esiste" se non ciò che si misura.
Nel quarto capitolo R. Newton traccia quindi la storia dell'atomismo, dai primordi al notevole lavoro di Boltzman, alla feroce opposizione di Mach, fino ai primi esperimenti sulla particelle. I successivi capitoli trattano in modo molto succinto la storia della fisica delle particelle fino ai giorni nostri. Il libro è molto breve (solo 133 pagine): è scritto in modo avvincente e si legge d'un fiato. Purtroppo, essendo così breve, non può che trattare se non superficialmente gli annosi problemi d'interpretazione della Meccanica Quantistica, e men che mai la successiva evoluzione concettuale della teoria di campo quantistica relativistica. Niente di confrontabile, quindi, con il bel libro già menzionato "Thinking about Physics" dello stesso autore.

G. M. D'Ariano

F. Ferroni, F. Vissani and C. Brofferio (Editors) – Measurements of Neutrino Mass. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi". Course CLXX. IOS Press, Amsterdam; SIF, Bologna, 2009; pp. XX + 459; € 180,00

Il volume riporta i rendiconti del CLXX Corso della Scuola Internazionale di Fisica intitolata a Enrico Fermi, tenutasi a Varenna dal 17 al 27 giugno 2008, aventi come tema "Misure della massa del neutrino", pubblicati dalla Società Italiana di Fisica nella consueta collana dedicata a questa Scuola di grande tradizione.
Nel volume appaiono i contributi di specialisti, in questo caso della fisica del neutrino, che sono stati chiamati ad illustrare gli aspetti di maggior interesse, sia sperimentale che teorico, dell'argomento.
La lettura si presenta perciò di grande interesse, e lascia intuire che le lezioni, con la possibilità di interagire con il docente, siano state entusiasmanti. Vi hanno contribuito infatti alcuni tra gli esperti più noti a livello internazionale, con una ampia partecipazione di docenti stranieri.
Il ruolo dei neutrini nella fisica nucleare è introdotto con la consueta brillantezza da *Ettore Fiorini*. Le sue lezioni contengono una interessante retrospettiva storica di alcuni fra gli esperimenti cruciali nella fisica del neutrino e dei nuclei, quale quello di Madame Wu sul decadimento del cobalto 60, e costituiscono una preziosa introduzione alle lezioni successive.
Ad *Alessandro Strumia* è affidato il compito di presentare gli aspetti principali della fenomenologia del neutrino, e quindi in

particolare la descrizione del fenomeno delle oscillazioni di "sapore". È presentata la trattazione della propagazione dei neutrini nel vuoto e nella materia, e vengono descritte le implicazioni che le misure di oscillazione hanno agli effetti del problema, ancora aperto, delle masse assolute dei neutrini.
L'importante processo del doppio decadimento beta ($\beta\beta$), con particolare riguardo al caso senza neutrini nello stato finale ($0\nu\beta\beta$), è la tematica affrontata da *Petr Vogel*. Fisico teorico di grande notorietà internazionale, Petr Vogel descrive con ricchezza di particolari gli aspetti di fisica nucleare rilevanti in questo processo di decadimento, fornendo un quadro molto interessante dell'argomento.
Un tema a parte è affrontato in termini problematici da *Alessandro Bettini*, che si pone l'interessante questione di che cosa si debba intendere per massa, e, per conseguenza, come questo concetto sia indissolubilmente legato alle metodologie seguite nella sua stessa misura. Ne deriva un succedersi di considerazioni che stimolano il lettore-studente a guardare con maggior profondità al tema stesso della misura.
Dedicate specificatamente alle importanti ricerche sperimentali del decadimento $0\nu\beta\beta$ sono le lezioni di *Andrea Giuliani*. Il fenomeno, se osservato, sarebbe decisivo nell'indicarci una proprietà del neutrino – quella di coincidere con la sua antiparticella – che ne farebbe un "neutrino di Majorana", dal nome del teorico italiano che per primo intuì questa possibilità. L'osservazione del decadimento $0\nu\beta\beta$ si presenta come una vera e propria sfida per i fisici sperimentali. Vengono perciò descritte le tecniche e le strategie che sono adottate in diversi rivelatori, assieme alla situazione sperimentale attuale.
Le deformazioni dei nuclei, con i loro effetti sulla stima degli elementi di matrice nucleare rilevanti per il decadimento $0\nu\beta\beta$, sono gli argomento affrontati e discussi da *Alfredo Poves*, studioso spagnolo molto noto in campo internazionale, che da anni indaga su queste complesse tematiche, di assoluto rilievo nello sforzo in atto di comprendere gli aspetti più intimi della struttura nucleare.
I decadimenti doppio beta con o senza neutrini ($2\nu\beta\beta$ e $0\nu\beta\beta$) e la possibilità di avere informazioni circa i loro elementi di matrice nucleare dalle cosiddette reazioni di scambio carica sono gli argomenti delle lezioni tenute da *Dieter Frekers*. Vi si descrivono i più recenti esperimenti e si mostra come l'alta risoluzione che li caratterizza abbia consentito di valutare le intensità delle transizioni di tipo Gamow-Teller, e da esse gli elementi di matrice che intervengono nel decadimento $2\nu\beta\beta$.
Il ruolo dei neutrini nell'evoluzione dell'Universo è l'affascinante tema affrontato nelle sue lezioni da *Sergio Pastor*. I neutrini che popolano l'Universo come resti delle interazioni avvenute nel corso della sua evoluzione, attraverso la conoscenza dei parametri cosmologici misurati ormai con grande precisione, sono in grado di fornire informazioni complementari rispetto alle osservazioni di laboratorio. In particolare, possiamo vincolare le masse dei neutrini alla osservazione delle caratteristiche delle strutture a larga scala che osserviamo nell'Universo. Questo ruolo del neutrino in Astrofisica e in Cosmologia riveste grande interesse, e testimonia gli stretti legami fra fisica nucleare, fisica delle particelle, astrofisica e cosmologia, che trovano la loro sintesi in un nuovo paradigma, quello della Fisica Astroparticellare.
La misura diretta della massa del neutrino ricavata dallo spettro del decadimento β del trizio è l'argomento presentato da *Christian Weinheimer*, uno dei maggiori responsabili dell'esperimento KATRIN, in fase di costruzione a Karlsruhe, in Germania. Questo esperimento è destinato a migliorare di un ordine di grandezza la sensibilità sperimentale alla massa assoluta del neutrino, potendosi spingere fino a 0.2 eV^2/c^2.
Una introduzione alla fisica del cosiddetto fondo cosmico a microonde (spesso indicato con l'acronimo CMB, Cosmic Microwave Background), è offerta nelle lezioni di *Paolo De Bernardis*. Viene delineata l'importanza che le relative misure, effettuate con sempre più raffinati dispositivi sperimentali su satellite, hanno nell'aiutarci a comprendere sia la struttura dell'Universo su grandi scale, sia gli aspetti principali della sua evoluzione. Nelle lezioni vengono presentate le teorie attuali dell'espansione dell'Universo a partire dal "Big Bang", la connessione con le abbondanze misurate degli elementi leggeri, e l'importanza del fondo cosmico a microonde in questo tipo di analisi. Nell'Universo in espansione un ruolo particolare hanno i neutrini: da queste osservazioni è difatti possibile risalire alla somma delle loro masse. Vengono descritte le tecniche di osservazione, i risultati circa l'anisotropia e la polarizzazione del fondo cosmico e la connessione con l'inflazione che avrebbe caratterizzato le prime fasi dell'espansione. Da prossime misure di precisione di queste grandezze ci si attende risultati di grande importanza, per meglio comprendere alcuni tra gli aspetti attualmente più misteriosi della cosmologia corrente, quali l'inflazione appunto, la materia oscura e l'energia oscura.
L'introduzione alla teoria delle masse e dei mescolamenti dei neutrini è affidata a *Goran Senjanović*. Gli aspetti elusivi della fisica del neutrino, chiamata a descrivere una particella di massa estremamente piccola con forti effetti di mescolamento tra i vari tipi o "sapori", richiede di guardare al di là del cosiddetto Modello Standard delle interazioni fondamentali. Ciò sarebbe particolarmente vero se il neutrino fosse una particella di Majorana. Nelle lezioni sono discussi vari meccanismi in grado di dare massa al neutrino, basati sulle cosiddette teorie di Grande Unificazione delle interazioni fondamentali, con particolare riguardo per le predizioni connesse a versioni minimali di tali teorie.
Nelle lezioni successive *Flavio Gatti* affronta il tema della spettroscopia calorimetrica come tecnologia in grado di consentire una misura diretta della massa del neutrino dallo spettro del decadimento β. Sembra possibile spingere tale tecnologia a sensibilità al di sotto di 1 eV^2/c^2 attraverso una opportuna riduzione delle incertezze sistematiche su vari isotopi. Vengono riportate le motivazioni di una tale ricerca, le prime misure, e le prospettive di questa tecnologia.
Le lezioni di *Antonio Riotto* descrivono lo stato dell'arte della teoria della leptogenesi, secondo la quale l'asimmetria barionica dell'Universo sarebbe connessa ad una asimmetria leptonica, a sua volta prodotta a temperature estremamente alte dal decadimento di neutrini pesanti di tipo destrogiro. Questi stessi stati potrebbero essere inoltre responsabili, attraverso un meccanismo denominato "see-saw", del fatto che siano così leggeri i neutrini levogiri, quelli che appaiono nelle interazioni deboli osservate in natura. Una teoria affascinante, che fornirebbe una interpretazione alla elusiva proprietà del neutrino di avere una massa così piccola e al tempo stesso spiegherebbe l'asimmetria barionica, uno dei più misteriosi aspetti che caratterizzano l'evoluzione dell'Universo.
Ad *Alexei Smirnov* è affidato il compito di descrivere il problema della massa del neutrino nel contesto generale della ricerca di nuova fisica al di là del Modello Standard delle interazioni fondamentali. Vengono descritti quindi gli aspetti fenomenologici connessi alla massa del neutrino, l'origine e la natura di essa, le possibili interpretazioni che giustifichino il suo essere così piccola, le relazioni tra massa e mescolamento, le implicazioni della sua determinazione e la possibilità di predire le singole masse o quanto meno il loro ordinamento o "spettro". Una trattazione di grande interesse, che sottolinea le grandi incognite che la fisica del neutrino ancora racchiude, malgrado i grandi progressi che sono stati fatti sotto il profilo sia teorico che sperimentale. Qual è la massa del neutrino più "pesante"? Quali sono i processi sensibili alla massa assoluta del neutrino? Che tipo di spettro di massa vi è da attendersi, degenere, parzialmente degenere o gerarchico? La

natura del neutrino di che tipo è, di Dirac o di Majorana? C'è una relazione tra masse e mescolamenti? Un succedersi di domande, cui ci si augura in un prossimo futuro di poter dare una risposta.
In conclusione, una Scuola di grande interesse scientifico, alla frontiera di una fisica, la Fisica del neutrino, tra le più affascinanti e misteriose, con uno sguardo sull'infinitamente piccolo, ma, al tempo stesso, con implicazioni sulla nascita e sull'evoluzione dell'Universo. Affidata a docenti di grande esperienza scientifica e didattica, il volume che ne racchiude le lezioni appare come una preziosa raccolta di contributi che costituiscono una attuale e approfondita descrizione dello stato dell'arte di questa tematica. Ne raccomandiamo caldamente la lettura e la consultazione sia agli esperti, sia agli studenti che, attirati da una fisica straordinariamente affascinante, vogliano riuscire a condividerne gli aspetti più peculiari.

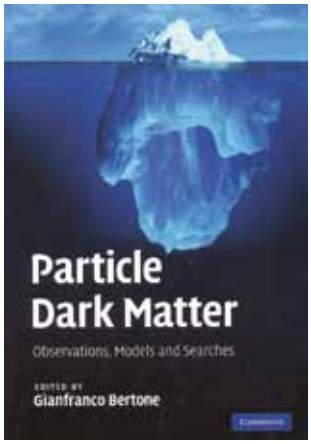
G. L. Fogli

F. Bersani, S. Bettati, P. F. Biagi, V. Capozzi, L. Feroci, M. Lepore, D. G. Mita, I. Ortalli, G. Roberti, P. Viglino e A. Vitturi (Coordinato da D. G. Mita e L. Feroci) – Fisica Biomedica. Per i corsi di laurea magistrale in Medicina e Chirurgia, Odontoiatria, Medicina Veterinaria, Farmacia, Scienze e Tecnologie Farmaceutiche, Corsi di laurea nelle professioni Sanitarie e in Scienze delle Attività Motorie. Piccin Nuova Libraria S.p.A. Padova, 2010; pp. XV + 677; € 48,00

Questo libro di testo è dedicato allo studio della fisica biomedica ed è rivolto a studenti dei corsi di laurea Magistrale in Medicina e Chirurgia, Odontoiatria, Medicina Veterinaria, Farmacia, Scienze e Tecnologie Farmaceutiche, Corsi di laurea nelle professioni Sanitarie e in Scienze delle Attività Motorie. Il criterio e l'obbiettivo degli autori è quello di produrre un testo di facile comprensione e con l'uso di un formalismo matematico semplificato, che riduca al minimo l'uso di derivate ed integrali.
Si ha chiaramente l'impressione generale di un testo nato dalla lunga esperienza didattica degli autori, ed arricchito di numerosi inserimenti più squisitamente biomedici frutto della rilevante attività di ricerca, il cui impianto potrebbe essere utile anche per altri corsi di studio di nuovo ordinamento.
Il libro si sviluppa attraverso un primo capitolo dedicato a richiami di matematica di base, all'introduzione delle grandezze fisiche e alle unità di misura, ai vettori, all'analisi dimensionale e alla teoria degli errori, seguito da altri nove capitoli nei quali vengono esposti seguendo la successione convenzionale le leggi della meccanica, dei fluidi, della termodinamica, dei fenomeni ondulatori e delle onde acustiche, dell'elettrostatica, delle correnti elettriche, del magnetismo e dei fenomeni di induzione, dell'ottica. La trattazione teorica delle onde elettromagnetiche è condotta in forma semiquantitativa, sicuramente per l'intento degli autori di non fare intervenire una descrizione matematica del campo elettromagnetico e mantenere un livello di facile apprendimento. Così lo sviluppo dell'ottica è prevalentemente di tipo geometrico con particolare rilievo ai fenomeni connessi, come le lenti e gli strumenti ottici; in genere gli effetti ondulatori vengono discussi in forma semplificata.
Seguono altri due capitoli dedicati alle radiazioni elettromagnetiche e alle tecnologie e strumentazioni biomediche. Alla fine del testo è aggiunta un'appendice di complementi integrativi ed esplicativi per approfondimenti, da parte degli studenti più interessati alla materia.
Ogni capitolo riporta esercizi risolti che forniscono agli studenti una guida per l'applicazione delle leggi fisiche apprese nel capitolo e che sono distribuiti in numero più o meno paragonabile in ogni capitolo, salvo in numero maggiore per la termodinamica e minore per le onde. I problemi presentati sono quasi tutti di tipo elementare, generalmente relazionati con il capitolo in cui è trattato l'argomento. Essi danno inoltre allo studente un'idea dei valori numerici delle grandezze fisiche. Oltre a esercizi di carattere generale vengono inseriti esercizi mirati strettamente alle tematiche della medicina e della biologia. Il tutto in quantità e forma compatibili con il numero di crediti formativi destinati al corso.
Le sezioni di applicazioni con cui i capitoli si chiudono sono distribuite con efficacia per la rilevanza degli argomenti presentati relativi alla attività biomedica. Vengono presentati e discussi nel capitolo della meccanica cunei e leve in relazione al corpo umano, cuspidi presenti nella dentatura relativi all'odontoiatria. Nel capitolo sui fluidi vengono presentate applicazioni del moto dei fluidi utili alla comprensione della respirazione, delle anomalie come la stenosi, l'aneurisma e l'embolia gassosa e il moto del sangue nei vasi sanguigni. Per le onde acustiche sono presentati le applicazioni degli ultrasuoni in medicina, per i fenomeni elettrici il defribillatore cardiaco, per la corrente l'elettroforesi e il pace-maker, per quelli magnetici lo spettrometro di massa e il misuratore elettromagnetico di flusso. Per l'ottica infine sono presentati vari applicativi sulle lenti, il microscopio, la macchina fotografica, le fibre ottiche in medicina.
Lo stile è generalmente conciso e poco discorsivo ma anche discorsivo a tratti; nel testo metodi numerici o calcoli sono accennati solo molto brevemente e la stesura rimane sul formale. L'esposizione è rigorosa e chiara con una accentuata distinzione tra definizioni, enunciati di teoremi e loro dimostrazione, commenti, esempi ed esercizi. In tutto il libro è attribuita grande importanza alla chiarezza espositiva e all' impostazione. Il libro parte da un livello molto semplice e avanza man mano che cresce la conoscenza dello studente. Si parte dai concetti elementari di meccanica, fluidi , termodinamica ed elettromagnetismo per finire con la strumentazione avanzata basata su concetti meno elementari e più complessi, come per esempio quelli sulla fisica moderna.
Caratteristica è l'attenzione alla completezza, a volte a scapito della possibilità di presentare dettagli sugli argomenti, che renderebbero più fluida la trattazione. Va reso merito agli autori per questo, nonostante l'ampiezza della materia da trattare che non rende facile coprire in modo esauriente tutti i vari argomenti.
Con qualche incertezza che penalizza le onde e la fisica moderna, è stato trovata una metodologia rigorosa, che fa uso di poca matematica.
Il libro utilizza un solo colore per figure e riquadri di tono più o meno acceso, ciò da l'impressione di continuità ed unitarietà della trattazione. Le unità di misura sono quelle del sistema internazionale (SI).
I capitoli 11 e 12 sono di carattere più informativo che pedagogico.
Il capitolo 11 introduce le radiazioni ionizzanti e non ionizzanti, la radioattività e decadimenti radioattivi e gli effetti biologici di queste radiazioni. Pur in assenza di una base formale per la presentazione del fenomeno ondulatorio, e quindi necessariamente in modo discorsivo, e ancora di più in assenza di un supporto di meccanica quantistica, vengono introdotti in modo efficace aspetti legati all'energetica dei fotoni e alla loro interazione con la materia e ai parametri normalmente usati per determinare l'effetto, la dosimetria, con una descrizione forse un po' lunga degli

effetti delle radiazioni non ionizzanti. Nella parte delle applicazioni viene fatta una descrizione dei principali radioisotopi utilizzati in campo medico, e di alcune terapie come quella basata sulla cattura di neutroni da parte di nuclei di boro, la tomografia ad emissione di positroni (PET) e quella basata sulla emissione di singolo fotone, con un corredo di esercizi ad illustrazione dei concetti introdotti.
Il capitolo 12 richiama le basi della meccanica quantistica della radiazione e della materia e introduce sulla base di queste conoscenze alle tecniche più utilizzate e attuali nella medicina. È un capitolo che conclude l'iter formativo dello studente portandolo nel mondo professionale, sulla base delle conoscenze di fisica acquisite.
È ben fatto, io trovo, in questo libro trattare anche di strumentazione ad alta tecnologia nel mondo biomedico e di concetti moderni, quali fotoni, livelli energetici, compatibilmente con i nuovi criteri formativi.
Dobbiamo tenere presente che viviamo in un mondo in rapido mutamento, molti dei cambiamenti che avvengono in ambito professionale sono determinati dai progressi della fisica, dell'ingegneria e della alta tecnologia. Poichè l'ingegneria e la tecnologia sono l'applicazione della fisica alla risoluzione dei problemi pratici, è interesse di ogni individuo conoscere la fisica nel modo più ampio possibile.

V. Dallacasa



G. Bertone (Editor) – Particle Dark Matter. Observations, Models and Searches. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo, Delhi, 2010; pp. XXIII + 738; $115.00

Most of the matter constituting the cosmological structures is commonly expected to be made up of particles which, while providing a sizable contribution to the total matter/density content of the Universe, have a very tiny possibility of interacting with ordinary (baryonic) matter and of emitting radiation by their mutual annihilation processes. Such prerequisites are not satisfied by any particle within the Standard Model of particle physics, but would be shared by new particles within some of the most natural extensions of the Standard Model. This is for instance the case for the most popular particle candidate, the neutralino, which rises in the cornucopia of new particles offered by supersymmetric theories. Investigation about the nature of dark particles and the various ways to detect the very faint signals possibly emitted by these particles represents one of the major endeavours for researchers in astroparticle physics, *i. e.* in the research field at the intersection of particle physics, astrophysics and cosmology.
These extremely intriguing topics are the subjects treated in the book "Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches", a thorough overview of the very many facets of the big puzzle of dark matter, from the cosmological observations providing the crucial physical motivations for its existence, to the large variety of possible particle candidates, to the many independent strategies for detecting direct and indirect signs of the presence of these dark particles in our cosmological environment, to the investigation of the relevant particle candidates at new accelerators.
In the book these many different aspects are organized in five parts: Dark matter in cosmology, Candidates, Collider searches, Direct detection and Indirect detection and astrophysical constraints. Each part consists of a set of various contributions on specific topics written by different authors, for a total of 29 chapters contributed by 46 authors. Contributors are among the leading and most active scientists in different branches of astroparticle physics.
Each part is exhaustively subdivided into the many facets of the main subject. Thus, Part one (Dark matter in cosmology) covers the various aspects of cosmological structures with specific contributions about simulations of cold dark matter haloes, information through studies of dwarf galaxies, investigation by gravitational lensing, detailed discussion on dark matter distribution on sub-parsec scales. In order to concede a generous chance to a completely different point of view, a final contribution in this Part I is devoted to a discussion of theories where the main cosmological features, which are commonly considered as a compelling proof for existence of dark matter, are tentatively interpreted in terms of modified theories of gravity.
The same fine-grained structure is maintained in the subsequent four Parts, both in delineating the many possible candidates and their formation mechanism in the evolution of the Universe, as well as in illustrating the rich panorama of experimental strategies which entail measurements in the most diverse environments: from underground laboratories to neutrino telescopes, to air-borne detectors.
The set of the 29 chapters constitutes a very handy collection of review papers, which are kept together by the intrinsic fact of being the various pieces of the magnificent mosaic of dark matter, single contributions providing, in a short self-contained format, high-standard and well-documented reviews of various topical subjects at the frontier of the most advanced researches in particle dark matter.
Perhaps, it would have been desirable that these various contributions were better linked together by a more generous amount of internal references among the different papers (chapters). Except for the first chapter, meant for a global overview of the dark matter puzzle and of the book project, few other chapters have some role in providing an introductory role to the contributions which follow. Likely, a less pronounced fragmentation of topics into various reviews and a reduced number of authors would have helped in providing a more coherent and economical presentation of some subjects, by avoiding an excessively large number of repetitions.
However, just because of its structure, this book represents a text that any scholar whose research field is somewhat related to dark matter will find useful to have within easy reach, either for a quick reference or to have a better understanding of some physical aspect collateral to his main competence. It is also foreseeable that graduate students will find in this book an extremely useful guide into the vast and multidisciplinary field of dark matter; they will be greatly helped by the concision of the single presentations and by the richness of references to original literature given therein. People wishing to attack some problem of dark matter with their own analyzes, without having specific experience in some of the difficult calculations involved in it, will find in one of the papers a valuable guide to the use of public codes now available for the evaluation of the main quantities of relevance in the field.
The usefulness of this book could be considerably improved in the future by adequately expanding the index of subjects which is at present somewhat limited in view of the very many subjects actually contained in the book. A rapid consultation of the book could be made much easier by this implementation.

A. Bottino

a cura di Giorgio Benedek

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

2010

Nome
Name _____

Cognome
Surname _____

Luogo e data di nascita
Place and date of birth _____

Nazionalità
Nationality _____

a Istituto o Ente di appartenenza
Affiliation _____

_____

b Indirizzo privato
Home address _____

_____

Indirizzo e-mail
E-mail _____

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

_____

_____

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

Firme leggibili dei Soci Presentatori (*) Signatures of two introducing Members (*)	Nomi in stampatello e indirizzi e-mail Names in block letters and e-mail addresses
1) _____	_____
2) _____	_____

○ Socio INDIVIDUALE INDIVIDUAL Member	€ 45,00 ☐
○ Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni JUNIOR Member under 30	€ 25,00 ☐
○ Socio INDIVIDUALE anche membro di altre associazioni scientifiche relative alla fisica (**) INDIVIDUAL Member also member of other scientific associations (**)	€ 35,00 ☐
○ Socio COLLETTIVO COLLECTIVE Member	€ 260,00 ☐
○ Socio SOSTENITORE (a partire da) SPONSORING Member (starting from)	€ 310,00 ☐

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

(*) Eccetto per i Soci INVITATI (neolaureati triennali in Fisica) che usufruiscono di pre-associazione gratuita per due anni.
(*) Except for INVITED Members (newly graduated bachelors in Physics) who are granted free pre-membership for two years.
(**) Informazioni: `http://www.sif.it/SIF/it/portal/associazione`
(**) Information: `http://www.sif.it/SIF/en/portal/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: http: //www.sif.it

SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Per diventare Socio SIF:

Informazioni: http://www.sif.it/SIF/it/portal/associazione

Quote sociali 2010 della Società Italiana di Fisica

○ Socio Individuale	€ 45,00	☐
○ Socio Junior al di sotto dei 30 anni	€ 25,00	☐
○ Socio Individuale anche membro di altra associazione scientifica relativa alla fisica (*)	€ 35,00	☐
○ Socio Collettivo	€ 260,00	☐
○ Socio Sostenitore (a partire da)	€ 310,00	☐

(*) Informazioni: http://www.sif.it/SIF/it/portal/associazione

Per diventare Socio EPS:

Informazioni: http://www.eps.org/subscribe

Quote sociali 2010 della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

○ Socio	€ 20,00	☐
○ Socio al di sotto dei 30 anni	€ 15,00	☐
○ Socio in pensione	€ 15,00	☐
○ Studente	€ 15,00	☐
○ Insegnante (pre-universitario)	€ 15,00	☐

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 assegno bancario

☐ a mezzo bonifico postale:
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

Carta n. _____

Data di scadenza _____

Nome e Cognome o Ente _____

Via _____

Città e C.A.P. _____

Data e luogo di nascita _____

Data _____ Firma _____

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

sì ☐ no ☐

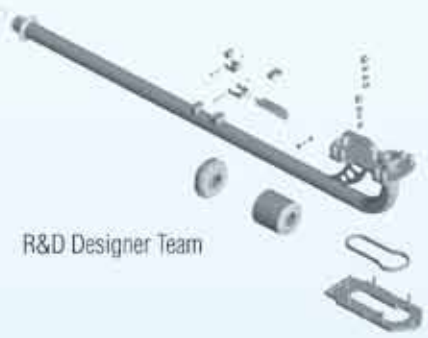
ECOR RESEARCH

Welcome to the Welding World

ENGINEERING

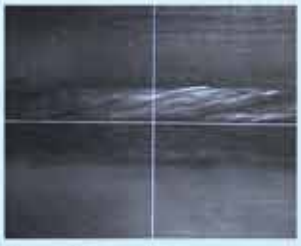
Research & Development Design

Developing a project by implementing the needs of the customer with our know-how and experience, in order to reach the best result



R&D Designer Team

Pro-E Design



Special Process Focus

ADVANCED WELDING

Welding Process Special Material

Choosing the most suitable welding technology and respecting the quality standards and their continuity in all processes

Laser YAG - Advanced robot welding

- Pipe Ø from 10 up to 150 mm
- Thickness from 0,3 up to 5 mm

Titanium Welding

- Titanium Tig Welding
- Thickness from 0,1 up to 8 mm

NEW

Advanced Vacuum Furnace - BRAZING

ASSEMBLY

Complete Assembly Process

We wish to provide turnkey solutions, from the assembly and testing operations to the packing and delivery of the goods according to our customers' requirements.

1. Mechanical Assembly
2. Pneumatic Assembly
3. Electrical Wiring

WORLD CLASS MANUFACTURING ECOR RESEARCH

Service units module and module for complete lines

ECOR RESEARCH

Ecor Research SpA - Via Friuli, 11 - 36015 SCHIO (VI) ITALY
Phone: +39 0445 576063 - Fax: +39 0445 576264
Email: info@ecor-research.com - Web: www.ecor-research.com

SIMIC S.p.A.

Cryogenics

Cryostats, Vacuum Vessels & High Vacuum Equipment

ENDCAP CRYOSTAT FOR ATLAS
EXPERIMENT - LHC PROJECT
MATERIAL: ALUMINIUM AL 5083;
THICKNESS: 160 mm;
EXT. DIAM. 5.500 mm;
HEIGHT: 3.700 mm;
WEIGHT: 30.000 Kg;
TESTS: HYDRAULIC TEST,
CRYOGENIC TEST 90K
HELIUM LEAK TEST (< $1x10^{-8}$ mbar.l/s)

COMPONENTS FOR THE RADIO
FREQUENCY SYSTEM OF A K500
SUPERCONDUCTING CYCLOTRON
MATERIAL: COPPER UNSC 10100
HELIUM LEAK TEST < $1x10^{-9}$ mbar.l/s)

VACUUM CHAMBER
FOR THE X-RAY
ASTRONOMY &
TESTING FACILITY
OF THE
ASTRONOMIC
OBSERVATORY OF
PALERMO (ITALY)-
INAF

SIMIC SPA, VIA VITTORIO VENETO, 12072 CAMERANA (CN), ITALY
TEL +39 0174 906611 FAX +39 0174 906609
www.simic.it simic@simic.it

FLAMAR

di Claudio Bellotti
Via Manzoni, 28 - 20021 Baranzate (Mi)
Tel: 02.36 52 45 56 - Fax: 02.36 52 52 44
claudio_bellotti@fastwebnet.it
P.Iva 06467530967

www.flamarweb.it

MCL
MAD CITY LABS INC.
Sistemi piezo per nanoposizionamenti

Steinmeyer FMD DRESDEN
Slitte di traslazione e rotazione ad alta precisione

Fine Adjustment Montaggi ottici ultra fini

NT-MDT
Integrated solutions for NanoTechnology
Microscopia SPM/AFM

TNX X-Ray technologies
Diffrattometri a raggi X

csm Instruments
Analisi superfici Nanoidentazione

DHC 大恒光电 CDHC-OPTICS | 大恒新紀元科技股份有限公司 China Daheng Group, Inc.
Optomeccanica

KINETIC SYSTEMS Vibration Control Solutions
Soluzioni per l'isolamento dalle vibrazioni

Per richiesta cataloghi e informazioni scrivere a : claudio_bellotti@fastwebnet.it

CAEN Electronic Instrumentation
Tools for Discovery

N1471

Another Module of the New NIM Programmable HV Power Supply Family

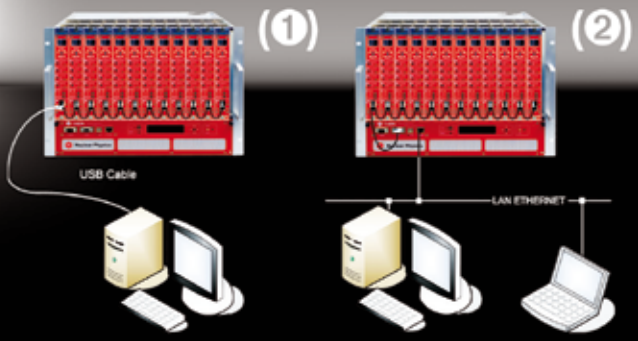
Can be a System!

- Remote control up to 128 channel
- Modules daisy-chained can operate in several Crate
- Optional Software Tool (SW1470) for remote control

Module control can take place either locally (graphic colour display) or remotely via USB (❶) or RS485 (❶).

It is also controllable via TCP/IP (❷) through the Smart Fan Unit of CAEN NIM 8301 crate.

Suitable for Germanium detectors.



High Performance - Low Cost - Low Ripple - High Resolution

- 5.5kV 300µA [1]; Ripple <5 mVpp [3]
- Selectable positive or negative polarity
- Very high current resolution (500 pA [2])
- Programmable ramp-up/ramp-down (1-500 V/s)
- Individual channel kill
- Interlock logic for board enable
- Under/Over-Voltage Status alarm
- Overcurrent and max. voltage protection
- SHV coaxial output connectors
- Common floating return

Model	# Ch	V Full Scale	I Full Scale	Vset/Vmon res.	Iset/Imon res.	Max Ripple
N1470/A/B	4/2/1	±8 kV	3 mA[1]	0.2 V	50 - 5 [2] nA	10÷30 mVpp
N1471/A/B	4/2/1	±5.5 kV	0.3 mA	0.1 V	5 - 0.5 [2] nA	5 mVpp [3]

(1) Max power: 9W (<3kV), 8W (>3kV) (2) Optional Imon x 10 zoom (3) @ 4kV/100µA

www.caen.it

Small details **Great differences**