

HANNO COLLABORATO A QUESTO  
NUMERO:

A. Amabile, C. Andreani, G. Artiano,  
L. Baldini, M. E. Bergamaschini  
Guzzi, A. Bettini, T. Bressani,  
R. Calarco, A. Cannavale, L. Cifarelli,  
G. Compagno, P. Cossari, S. Croci,  
M. Durante, G. Galati, L. Gariboldi,  
G. Gigli, G. Gorini, L. Lugiato,  
A. Messina, F. Montalenti,  
A. Oleandri, S. Olivares, A. Papagni,  
L. Pavesi, R. A. Ricci, E. Scapparone,  
R. Senesi, E. Zallo

# IL NUOVO SAGGIATORE

## BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 33 • N. 3 maggio-giugno 2017 • N. 4 luglio-agosto 2017

**DIRETTORE RESPONSABILE**  
Luisa Cifarelli

**VICEDIRETTORE**  
Giuseppe Grosso

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

### SOMMARIO

3 **EDITORIALE**  
L. Cifarelli

4 **In memoria di Ida Ortalli**  
L. Cifarelli, R. A. Ricci

#### SCIENZA IN PRIMO PIANO

7 **The LHC as a photon collider**  
E. Scapparone

15 **Fast neutron irradiation facilities  
for electronics and materials**  
R. Senesi, G. Gorini, C. Andreani

#### FISICA E...

21 **Recent advances in space radiation  
protection**  
M. Durante

31 **Crescita epitassiale van der Waals  
per memorie a cambiamento  
di fase**  
E. Zallo, R. Calarco

41 **Finestre smart:  
risparmio energetico  
e comfort visivo**  
A. Cannavale, P. Cossari, G. Gigli

#### PERCORSI

49 **Una nuova luce sugli oggetti  
più estremi del cosmo**  
L. Baldini

#### IL NOSTRO MONDO

57 **103° Congresso Nazionale della  
Società Italiana di Fisica**

58 **Programma Generale**

60 **SIF: una passione per la Fisica  
che dura da 120 anni**  
L. Cifarelli, A. Oleandri

64 **Fisica a Trento**  
L. Pavesi

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

#### News

73 **Parco Avventura Scientifica  
un'esperienza di divulgazione  
integrata tra l'apprendimento  
e il gioco**  
G. Artiano, A. Amabile, G. Galati

77 **Women and Physics in Italy:  
numbers, projects, actions**  
S. Croci

81 **RECENSIONI(\*)**

81 **IN RICORDO DI(\*)**  
**Luigi Busso** (T. Bressani)  
**Lanfranco Belloni** (L. Gariboldi,  
S. Olivares)  
**Franco Persico** (A. Messina,  
G. Compagno)

82 **IN EVIDENZA**

83 **ANNUNCI**

(\*) Il testo completo è pubblicato online:  
[www.sif.it/attivita/saggiatore/recensioni](http://www.sif.it/attivita/saggiatore/recensioni)  
[www.sif.it/attivita/saggiatore/ricordo](http://www.sif.it/attivita/saggiatore/ricordo)

#### MODALITÀ DI ISCRIZIONE ALLA SIF

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

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

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

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

#### RINNOVO QUOTE SOCIALI

Il rinnovo della quota sociale può essere effettuato:

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

---

#### HOW TO BECOME A SIF MEMBER

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

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

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

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

#### MEMBERSHIP RENEWAL

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

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

La SIF celebra quest'anno il 120° anniversario della sua fondazione, avvenuta a Roma nel 1897 nella famosa palazzina di via Panisperna. Primo evento celebrativo, per mettere in risalto questo importante traguardo della sua storia, è stato il Simposio Internazionale "Passion for Physics" che ha avuto luogo sabato 24 giugno a Varenna, sul Lago di Como, nella splendida cornice di Villa Monastero.

Villa Monastero ospita dal 1953 i corsi della Scuola internazionale post universitaria di eccellenza della SIF, intitolata a uno dei più grandi fisici di tutti i tempi, Enrico Fermi. La Villa, la sua storia e le bellezze naturali che la circondano costituiscono un potente ingrediente per la riuscita dei corsi e degli eventi che vi sono organizzati. Per questo motivo la SIF ha scelto un luogo così magico per festeggiare. Un dettagliato rendiconto del Simposio è pubblicato nella rubrica IL NOSTRO MONDO di questo numero de IL NUOVO SAGGIATORE (p. 60-63).

Negli ultimi 120 anni, tante, anzi tantissime sono state e sono le attività e le iniziative della SIF da raccontare, i suoi premi, le sue pubblicazioni, i suoi congressi. Una bella sintesi è stata di recente pubblicata nel fascicolo (scaricabile dal sito web della SIF) che vi invito a leggere: "SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA – 120 ANNI E OLTRE / ITALIAN PHYSICAL SOCIETY – 120 YEARS AND BEYOND".

Varenna quest'anno ha vissuto un'alta concentrazione di eventi dal 24 giugno al 26 luglio. Infatti, tornando alla nostra beneamata International School of Physics "Enrico Fermi", tre corsi hanno seguito il Simposio "Passion for Physics". Ecco l'elenco dei titoli e dei direttori cui vanno i miei sinceri ringraziamenti per il successo ottenuto: "Physics of and Science with X-Ray Free Electron Lasers" (199° Corso, 26 giugno-1° luglio, Direttori: C. Pellegrini,

J. Hastings), "Gravitational Waves and Cosmology" (200° Corso, 3-12 luglio, Direttori: E. Coccia, N. Vittorio, J. Silk), "Nuclear Physics with Stable and Radioactive Ion Beams" (201° Corso, 14-19 luglio, Direttori F. Gramegna, P. Van Duppen, A. Vitturi). A seguire un corso della Joint EPS-SIF International School on Energy, su "Advances in Basic Energy Issues" (4° Corso, 21-26 luglio, Direttori: L. Cifarelli, F. Wagner).

Va sottolineato che in occasione del suo 120° anniversario la SIF ha eccezionalmente bandito, per ogni corso, un elevato numero di borse per studenti allo scopo di spronare la partecipazione dei giovani.

In tema di giovani, un'apposita "Task Force" è stata recentemente istituita dalla SIF con il compito di proporre azioni atte a stimolare e rendere più efficace il passaggio dallo stato di Socio Invited (riservato agli studenti magistrali che vengono associati alla SIF a titolo gratuito per 2 anni) a quello di Socio Junior (riservato ai soci paganti con meno di 30 anni). Per esempio, per il 2018, si sta pensando per i giovani a una revisione delle quote associative, a una ridefinizione di quelle per la partecipazione a scuole e conferenze, all'istituzione di travel grants, ecc. Ma meglio non anticipare troppo ...

Sul fronte editoriale, segnalo il buon andamento della rivista EPJ Plus che è in continua crescita in termini di numero di lavori e di impact factor. Segnalo anche il previsto rilancio del GIORNALE DI FISICA, con i suoi QUADERNI DI STORIA DELLA FISICA, che a partire dal 2018 sarà

in formato unicamente elettronico, con alcuni articoli fruibili in open access.

È anche in corso la traduzione in inglese del volume "ENRICO FERMI E IL QUADERNO RITROVATO" (di F. Guerra e N. Robotti), che verrà presentato alla fine dell'anno negli Stati Uniti, in occasione delle celebrazioni del 75° anniversario dell'accensione della prima pila nucleare CP-1. E bollono in pentola nuove idee per la pubblicazione di volumi in co-edizione SIF-Springer.

Per finire, veniamo al 103° Congresso Nazionale della SIF che quest'anno si svolge a Trento, dall'11 al 15 settembre. Il Congresso riunisce tradizionalmente circa 600 fisici italiani e rappresenta il momento d'incontro e di riflessione di una grande e omogenea comunità scientifica che esprime diversi interessi culturali e di ricerca. Il Congresso, articolato in sessioni plenarie e parallele, tocca i principali ambiti delle sue ormai consuete sette sezioni tematiche. Un attivissimo Comitato Organizzatore Locale ha inoltre messo a punto un programma sociale e scientifico parallelo, con l'accattivante titolo di "FisiCittà – La fisica come non l'avete mai vista", ricco di eventi che mirano ad avvicinare al massimo la cittadinanza trentina all'affascinante e, forse, poco noto mondo della fisica.

In occasione del suo 120° anniversario, non ci poteva essere migliore iniziativa per la SIF il cui scopo primario è quello di "promuovere, favorire e tutelare lo studio e il progresso della fisica in Italia e nel mondo". Infatti, non basta fare della buona ricerca e della buona istruzione scientifica. Occorre darsi attivamente da fare per far conoscere a tutti ciò che facciamo, affinché tutti si rendano conto che sostenere con convinzione la scienza è il dovere di ogni società che voglia definirsi moderna e civile.



**120 ANNI**  
1897-2017

The SIF celebrates this year the 120th anniversary of its founding in Rome, in 1897, in the famous building of via Panisperna. The first celebration event planned to highlight this important milestone of its history has been the International Symposium "Passion for Physics" that took place on Saturday 24 June in Varenna, Lake Como, in the splendid setting of Villa Monastero.

Since 1953, Villa Monastero has been hosting the courses of the post-graduate School of excellence of the SIF, named after one of the greatest physicists of all times, Enrico Fermi. The Villa, its history and the natural beauties that surround it are a powerful ingredient for the success of the courses and events that are organized there. For this reason, the SIF has chosen such a magical place to celebrate.



A detailed report of the Symposium can be found in the section IL NOSTRO MONDO of this issue of IL NUOVO SAGGIATORE (p. 60-63).

During the last 120 years, there are many, or rather very many SIF activities and initiatives to tell, which have been and are being carried out, its awards, its publications, its congresses. A

good synthesis has been recently published in a booklet (downloadable from the SIF web site) that I invite you to read: "SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA – 120 ANNI E OLTRE / ITALIAN PHYSICAL SOCIETY – 120 YEARS AND BEYOND".

Varenna this year has had a high concentration of events from 24 June to 26 July. Indeed, coming back to our beloved International School of Physics "Enrico Fermi", three courses have followed the Symposium "Passion for Physics". Here is the list of titles and directors to whom I would like to express my sincere thanks for the success achieved: "Physics of Science and X-Ray Free Electron Lasers" (199th Course, June 26-July 1, Directors: C. Pellegrini, J. Hastings), "Gravitational Waves and Cosmology" (200th Course, 3-12 July, Directors: E. Coccia, N. Vittorio, J. Silk), "Nuclear Physics with Stable

and *Radioactive Ion Beams*" (201st Course, 14-19 July, Directors F. Gramegna, P. Van Duppen, A. Vitturi). And then a course of the Joint EPS-SIF International School on Energy, on *"Advances in Basic Energy Issues"* (4th Course, 21-26 July, Directors: L. Cifarelli, F. Wagner).

It should be emphasized that on the occasion of its 120th anniversary, the SIF has exceptionally banned, for each course, a large number of student grants in order to encourage the participation of young people.

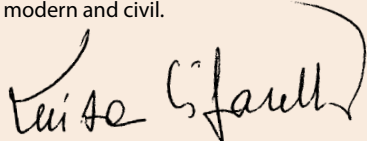
With regard to young people, a special "Task Force" has been recently set up by the SIF with the assignment of proposing actions to stimulate and make more effective the transition from the status of Invited Member (reserved for MD students who benefit from free association to the SIF for 2 years) to Junior Member (reserved for paying members under 30). For instance, in 2018, one could think of reviewing membership fees, of redefining those for participation in schools and conferences, of establishing travel grants, etc. But it's better not to say too much in advance ...

On the publishing front, let me first report the good performance of the EPJ PLUS journal, which is continuously growing in terms of number of articles and impact factor. I would also like to signal the planned revival of *GIORNALE DI FISICA*, with its *QUADERNI DI STORIA DELLA FISICA*, which will appear in electronic format only, starting from 2018, with a selection of articles in open access.

Also the English translation of the volume *"ENRICO FERMI E IL QUADERNO RITROVATO"* (by F. Guerra and N. Robotti) is going on. It will be presented at the end of the year in the United States, on the occasion of the 75th anniversary of the ignition of the first nuclear pile CP-1. And new ideas are cooking for the production of SIF-Springer co-published volumes.

Finally, let's get to the 103rd National Congress of the SIF that takes place this year in Trento, from 11 to 15 September. The Congress traditionally brings together about 600 Italian physicists and represents the time to meet and reflect for a large and homogeneous scientific community that expresses various cultural and research interests. The Congress, articulated in plenary and parallel sessions, touches the main areas of its now-familiar seven topical sections. An extremely active Local Organizing Committee has also put in place a parallel social and scientific programme, with the captivating title of *"FisiCittà - Physics as you have never seen it"*, rich in events that aim to maximize the involvement of the citizens of Trento in the fascinating and, perhaps, little-known world of physics.

On the occasion of its 120th anniversary, there could be no better initiative for the SIF, whose main purpose is to "promote, encourage and safeguard the study and progress of physics in Italy and in the world". In fact, it is not enough to do good research and good scientific education. We need to be proactively engaged in making everyone aware of what we do, so that everyone can realize that to firmly support science is the duty of any society that wishes to be modern and civil.



## IN MEMORIA DI

### Ida (Ducci) Ortalli

Parma, 1 giugno 1932 – 13 aprile 2017

*L'anno 2017 è stato segnato dalla scomparsa di una figura di rilievo e di riferimento della Società Italiana di Fisica: la Professoressa Ida (Ducci) Ortalli, Socio Benemerito e Membro del Consiglio di Presidenza della Società negli anni 1983-1994.*

Ho conosciuto la Professoressa Ida (Ducci) Ortalli negli anni '90. Mi fu presentata da Antonino Zichichi. Ho un ricordo abbagliante di lei. Non passava certo inosservata. Era intelligente, simpatica, allegra, bellissima, elegante, piena di fascino, e aveva un portamento davvero speciale. Ricordo proprio di avere subito notato in lei questo suo portamento, così importante per una signora. E poi ricordo i suoi occhi color del mare.

Quando l'ho conosciuta era già da circa dieci anni professore ordinario all'Università di Parma e occupava un posto da protagonista nel campo della fisica medica. Aveva esordito negli anni '60 nella fisica delle particelle, partecipando agli esperimenti di Carlo Castagnoli (allora professore a Parma) con emulsioni nucleari. Aveva partecipato, nel gruppo di Marcello Conversi, all'esperimento di cattura radiativa dei muoni del CERN, a Ginevra. Risale a quei tempi il suo incontro con Nicola Cabibbo e Antonino Zichichi che diventeranno i suoi amici di una vita.

Dopo le sue ricerche al CERN, passò a studi di fisica della materia in ambito CNR, compiendo un soggiorno a Parigi, al CNRS, dove si dedicò all'indagine delle proprietà magnetiche della materia.

Nel '77 scoprì la prima evidenza delle tre transizioni di fase in SnTe, che portò a una sua collaborazione con il Central Research Laboratory della Hitachi Ltd, a Tokyo, in Giappone.

Rientrata a Parma nel '78, fondò il primo laboratorio in Italia dedicato alla spettroscopia Mössbauer. Tra le sue ricerche sperimentali vanno ricordate quelle sulle proprietà magnetiche dei composti intermetallici, sulle proprietà chimico-fisiche dei semiconduttori, sui semiconduttori termoelettrici e sui semiconduttori per rivelatori di infrarossi, nonché quelle su meteoriti e reperti archeologici.

Nel contesto della fisica della materia passò allo studio dei materiali biologici e alla fisica interdisciplinare biomedica di cui fu un vero pioniere. I suoi primi studi in questo ambito dimostrarono le prime evidenze di materiale magnetico nei piccioni viaggiatori.

Tra i suoi studi di maggior rilievo figuravano gli studi cellulari per patologie ematologiche neoplastiche e per patologie oncologiche, come il progetto CLEANER (Cellular Local Eradication by Absorption of Nuclear Electromagnetic Radiation). Altri importanti risultati li ottenne studiando gli effetti delle terapie per la beta-talassemia o più recentemente gli effetti indotti dagli stress ossidativi in patologie tumorali.



In ambito accademico, all'Università di Parma, è stata: Direttore fondatore dell'Istituto di Scienze Fisiche della Facoltà di Medicina; Direttore del Dipartimento di Sanità Pubblica; Direttore fondatore della Scuola Diretta a Fini Speciali in Fisica Sanitaria; Presidente fondatore del Corso di Laurea in Tecniche della Prevenzione nell'Ambiente e nei Luoghi di Lavoro; Responsabile del Servizio di Fisica Sanitaria. Tra i suoi incarichi anche quello di responsabile scientifico dell'Unità Risonanze Magnetiche del GNSM-CNR.

Consigliere della SIF dal 1983 al 1994, Ducci Ortalli è stata il primo Consigliere donna nella storia della SIF, sotto la presidenza di Renato Angelo Ricci. Lasciò a me il testimone nel 1994 e da lì ebbe inizio la nostra amicizia, basata su continuità di visione e d'intenti, collaborazione e profonda stima. Questa amicizia, dapprima professionale, presto divenne un'amicizia personale, un'amicizia che mi fece collocare Ducci nella sfera dei miei affetti familiari più veri e irrevocabili. Sarò sempre grata a Zichichi per avermela fatta conoscere.

Ma torniamo a ciò che ha fatto e a ciò che è stata. In campo internazionale, è stata membro del Council dell'EPS in rappresentanza della SIF, membro dell'importante Panel ASI/ARW nella Divisione Affari Scientifici della NATO, membro del Consiglio di Presidenza del World Laboratory. Nel quadro del World Laboratory, negli anni '90 fece parte di una delegazione di scienziati che si recò a ispezionare i luoghi del disastro di Chernobyl. Compì anche viaggi di lavoro in Cina. Fu un'assidua frequentatrice dei Seminari Internazionali sulle Emergenze Planetarie, organizzati a Erice da Zichichi presso il Centro Majorana. Nel corso delle sue attività internazionali, con sua

intelligenza, la sua vivacità e il suo carattere, strinse rapporti di stima e amicizia con i Nobel Pierre-Gilles De Gennes, Rudolf Mössbauer e Tsung Dao Lee.

Fu nominata Socio Benemerito della SIF nel 2003, per i contributi dati alla scienza e alla Società di cui restò sempre grande amica e sostenitrice.

Tutto il personale della SIF e Renato Angelo Ricci, adesso Presidente Onorario della Società, la ricordano con grande affetto e commozione. Renato ha voluto anche lui scrivere di lei su queste colonne.

Vorrei inoltre ricordarne la forte personalità. Era una donna brillante, vivace, capace, battagliera, coraggiosa, energica, tenace, generosa e piena di passione, non si tirava mai indietro. È stata una grande sostenitrice dei suoi allievi e collaboratori che ha molto amato e dai quali è stata molto amata. Tra questi, prima fra tutti, Simonetta Croci, anche lei adesso Consigliere della SIF. È inoltre stata una strenua paladina delle donne nella fisica e io stessa senza di lei non sarei diventata ciò che sono attualmente.

Parmigiana del "sasso", come amava definirsi, è sempre stata strettamente legata alla sua città, in cui viveva, appassionata melomane così come delle tradizioni parmigiane. Molte volte, proprio com'era il suo carattere, scriveva sulla Gazzetta di Parma, esprimendo la sua decisa opinione. Ed è con parole affettuose di elogio che la stampa parmigiana ha voluto ricordarla, associandosi al lutto del mondo scientifico per la sua scomparsa.

La SIF, a partire da quest'anno, intitolerà uno dei suoi premi per i giovani ricercatori al femminile alla Professoressa Ortalli per onorarne la memoria.

Per finire, un pensiero mio personale sulla "mia Ducci", che vorrei dedicare con vera emozione ai membri della sua famiglia e in particolare al nipote Paolo, suo prediletto. Ducci era capace di un'amicizia generosa, incondizionata e assoluta di cui ho avuto il privilegio di godere fino all'ultimo. Se si diventava amici di Ducci – alcuni di noi lo sanno – allora la cosa diventava molto seria perché si veniva letteralmente adottati, e con noi la nostra intera famiglia.

Nel corso degli anni, a me, a mia figlia Lauretta, ai miei genitori, aveva preso il cuore. Ed è una parte di me che se n'è andata per sempre con lei.

Luisa Cifarelli  
Presidente SIF

*“Il 1° dicembre 1988 si è tenuta, presso l'Istituto di Scienze Fisiche dell'Università di Parma la lezione inaugurale della Scuola Diretta a Fini Speciali in Fisica Sanitaria. La Scuola, che è la prima di questo tipo in Italia e in Europa, ha lo scopo di dare una preparazione teorica e pratica agli allievi istruendoli sui problemi delle radiazioni ionizzanti, della fisica ambientale e delle tecnologie biomediche. ... La lezione inaugurale, sul tema 'Radiazioni e Ambiente', è stata tenuta dal Prof. Renato Angelo Ricci, Presidente della Società Italiana di Fisica e della Società Europea di Fisica ...”*

Così Ida (Ducci) Ortalli, Direttore della Scuola, oltre che dell'Istituto, presentava il libretto pubblicato dall'Istituto di Scienze Fisiche della Facoltà di Medicina e Chirurgia dell'Università di Parma, in cui erano state raccolte le note della mia lezione “come base culturale della Scuola”. Avevo accolto con piacere, e me ne sentivo onorato, il suo invito anche e soprattutto perché l'iniziativa da lei diretta era stata voluta e promossa da tempo e presentata in occasione del Congresso della SIF del 1984 a Genova nella tavola rotonda su “Fisica, Medicina, Sanità: Aspetti Interdisciplinari e Organizzativi” che del resto lei stessa aveva proposto in sede di Consiglio SIF, di cui faceva parte. Fu in questo campo, ma non solo, che la sua esperienza culturale e la sua indubbia intelligenza organizzativa portarono a risultati importanti e ne fecero oltre che una docente e una scienziata di notevole capacità (tra l'altro ha costituito a Parma il primo laboratorio italiano di spettroscopia Mössbauer), una appassionata attivista della SIF intesa come comunità di valori più che di interessi di categoria, ancor prima di assumersi dirette responsabilità.

Fu in effetti nel 1982 che al Congresso di Perugia, con me Presidente, la tornata elettorale tenne a battesimo la sua entrata, prima donna

dalla fondazione della SIF, nel Consiglio di Presidenza (con lei furono eletti Bassani, Focardi, Picchi, Rubbino, Ceolin e Habel). Da allora per 4 trienni fino al 1994, fu non solo una collaboratrice validissima e di grande competenza e capacità di iniziativa ma anche una consigliera, nel vero senso del termine, preziosa in un periodo che non fu dei più facili sia dal punto di vista della rappresentatività il più possibile unitaria della comunità dei fisici italiani sia per le complesse vicende di carattere socio-politico e non solo culturale. Ducci portò nel Consiglio proposte e contributi che avevano il pregio della chiarezza oltre che significative per la franchezza e il coraggio con una sensibilità femminile che erano di grande conforto e meritavano grande rispetto. Come in altri esempi tuttora attuali, le sue doti non avevano bisogno di essere conteggiate attraverso un bilanciamento di quote o di “genere” ma erano il risultato di una forte esperienza e di una solida cultura (che portò anche in altre sedi nazionali e internazionali, come il CERN, e il Council dell'EPS).

Lasciò il Consiglio al Congresso di Lecce nel 1994, restando tuttavia attiva, presente e di aiuto prezioso. Aveva comunque aperto una porta: quella dell'ingresso di intelligenze e qualità femminili rappresentate da Luisa Cifarelli (diventata addirittura la prima Presidente donna della SIF nonché dell'EPS) e successivamente da Simonetta Croci e Sara Pirrone.

Ricordarla quindi, oltre al rimpianto di un'amica affettuosa e sincera, di cui sono testimoni mia moglie Claudine e i miei figli Marco e Françoise, è un omaggio all'inestimabile contributo della sua collaborazione.

Renato Angelo Ricci  
Presidente Onorario SIF

## THE LHC AS A PHOTON COLLIDER

**EUGENIO SCAPPARONE**

*INFN, Sezione di Bologna, Bologna, Italy*

LHC is the world's most powerful collider for protons and lead ions but this is not the end of the story: it is also a powerful machine to study high-energy photon-hadron and photon-photon collisions. This is especially so if one considers heavy ions, where the number of photons, being proportional to the square of the ion charge, is enhanced by almost four orders of magnitude compared to the protons. Shedding light on the lead ion allowed to go deeper in the understanding of the nuclear gluon field at high energy that was found to be quite different from a simple superposition of those of the single nucleons. In the short term these studies will benefit of the LHC increasing luminosity, and in the future the Electron Ion Collider (EIC) project, presently under discussion in USA, would allow a terrific step forward in this field.

### 1 Introduction

LHC is a powerful, flexible and complex machine; it delivers an impressive luminosity independent of the energy at which it runs and of the type of hadrons circulating in its pipes. World records at CERN largest ring do not hold for long: the LHC itself continuously updates them. The LHC experiments have been analyzing a huge amount of data, collected in proton-proton, proton-ion and ion-ion hadronic interactions, but that is not the end of the story. At TeV energies, hadrons circulating in the machine produce a remarkable number of photons, reaching an energy up to several hundreds of GeV: the LHC is therefore a powerful source of high-energy light too.

After drilling a hole in the upper left-hand corner of the plaster door of Tutankhamun's tomb, the first thing the archeologist Howard Carter did was to insert a candle and peer into the darkness, looking on with amazement. For a physicist working at the world's largest hadron accelerator, having a rich source of photons is as valuable as it was for Carter at the Valley of the Kings. The nature of the photon source used at the LHC is, however, quite different from that of a normal candle.

The electromagnetic field observed some distance away from a moving charged particle cannot be distinguished from

that of an equivalent flux of photons – this was realized by Enrico Fermi [1] at about the same time as Tutankhamun's tomb was discovered (1923-24). About ten years later, Weizsacker and Williams extended Fermi's method to the ultra-relativistic case.

When two hadrons or nuclei pass by each other at the LHC at a distance which is larger than the sum of their two radii, no hadronic interactions will occur, but their electromagnetic field will produce an intense pulse of photons on the beam particle moving in the opposite direction. These interactions are called Ultra Peripheral Collisions (UPC), a domain where photons shed light almost undisturbed on hadrons.

At the LHC, p-p, p-Pb, and Pb-Pb collisions offer the opportunity to illuminate nucleons and heavy nuclei. The number of photons in the field is proportional to  $Z^2$  ( $Z$  being the charge of the projectile) making heavy ions particularly good photon sources. The transverse momentum of the photons is restricted to  $\hbar/R$ , whereas the longitudinal momentum is enhanced by the Lorentz factor  $\gamma$ . The latter property, together with the extremely high beam energies, makes LHC the world's highest-energy photon collider. Photon-induced interactions have been studied by most of the LHC experiments. What did we learn so far?

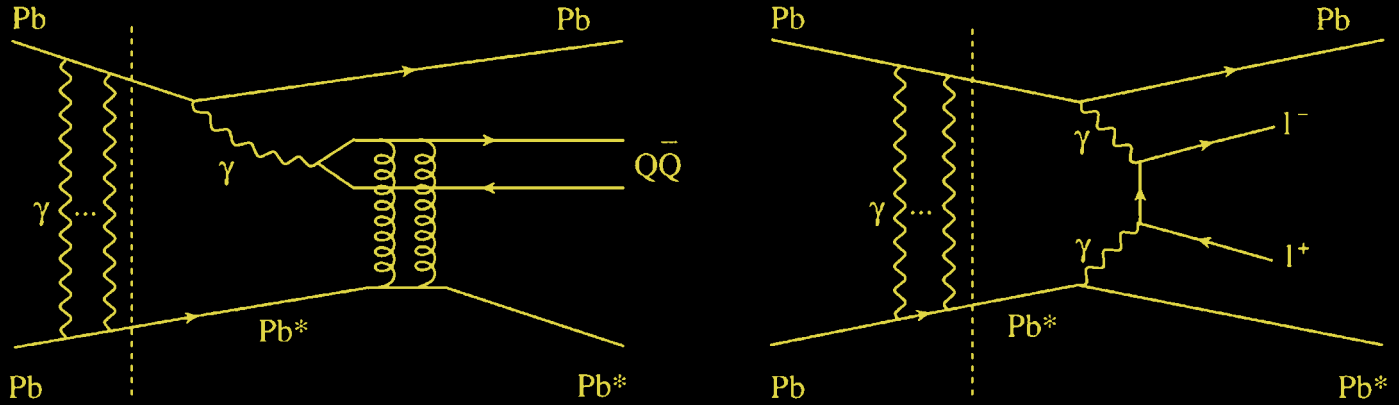


Fig. 1 Feynman diagram for ultra-peripheral vector meson (left) and di-lepton (right) production.

## 2 Vector meson production in nucleus-nucleus collisions

The first analyses on vector meson photo-production in relativistic heavy-ion collisions date back to STAR [2] and PHENIX [3]: these collaborations studied  $\rho$  and  $J/\psi$  photo-production in ultra-peripheral Au-Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. Although RHIC studies have demonstrated the feasibility of these measurements, it was not possible to significantly constrain the nuclear gluon PDFs. The  $J/\psi$  analysis was statistically limited, while in UPC-produced  $\rho$ , a hard scale cannot be established to perform perturbative QCD calculations.

In fact in photo-production events, the hard scale  $Q^2$  is set by the particle mass,  $Q^2 \sim M^2$  and therefore the production of  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$  and  $\Upsilon$  is much more attractive, since it can be treated perturbatively. Unfortunately heavy vector meson photo-production cross section is quite small (as an example, the UPC  $J/\psi$  cross section is less than 1 mb at RHIC in Au-Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV); it increases with the centre-of-mass energy, so that LHC offers better opportunities to study these mesons.

The ALICE and the CMS collaborations have studied exclusive photo-production of  $J/\psi$  mesons in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. The photon spends part of its time as a virtual  $q\bar{q}$  pair (fig. 1, left) preserving the spin of the photon ( $J=1$ ). The interaction of the pair with the nuclear field, through the colourless exchange of two (or more) gluons, may produce a real vector meson.

The events considered here are characterized by a single  $J/\psi$  meson (reconstructed through its di-muon or di-electron decay) but no other particles being produced, giving an event with two tracks in an otherwise empty detector: figure 2 shows a  $J/\psi$  candidate in ALICE produced in a hadronic event (left) and a UPC  $J/\psi$  candidate (right). At leading order, the cross section of this process is proportional to the nuclear gluon distribution function squared, as computed by Ryskin [4]:

$$(1) \quad \frac{d\sigma}{dt}(\gamma^* p \rightarrow \psi p) \Big|_0 = \frac{\Gamma_{ee} M_\psi^3 \pi^3 \alpha_S (\bar{Q}^2)^2}{48\alpha} \frac{1}{\bar{Q}^8} [xg(x, \bar{Q}^2)]^2 \left(1 + \frac{Q^2}{M_\psi^2}\right).$$

$J/\psi$  produced at a given rapidity  $y$  is sensitive to the gluon distribution at Bjorken- $x$ ,  $x = (M_{J/\psi} / \sqrt{s}) \cdot e^{\pm y}$ , at a hard scale  $Q^2 \sim M_{J/\psi}^2 / 4$ . The relevant values of  $x$  that can be explored at the LHC are in the  $10^{-2}$  to  $10^{-5}$  range, a region where the nuclear gluon PDF are poorly known:

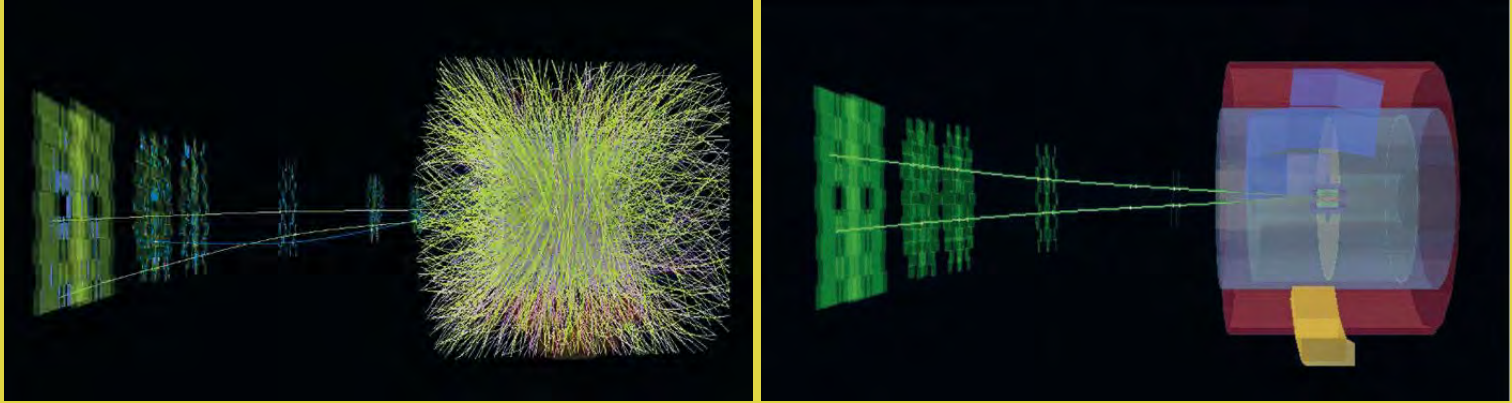


Fig. 2 ALICE event display of a  $J/\psi$  ( $2S$ ) candidate in the forward muon spectrometer for a hadronic event (left) and a candidate produced in a Pb-Pb ultra peripheral collision (right).

that is why the study of  $J/\psi$  photo-production in Pb-Pb collisions is a very important measurement.

The exclusive photo-production can be either coherent, where the photon couples coherently to almost all the nucleons, or incoherent, where the photon couples to a single nucleon. Coherent production is characterized by low transverse momentum of vector mesons ( $\langle p_T \rangle \sim 60$  MeV/c) where the nucleus normally does not break up by the  $J/\psi$  production.

However the exchange of additional photons may lead to the nucleus break-up, estimated by the simulation models at the level of 20-30% of the events. Incoherent production, corresponding to quasi-elastic scattering off a single nucleon, is characterized by a somewhat higher transverse momentum ( $\langle p_T \rangle \sim 500$  MeV/c).

ALICE performed an analysis selecting di-muon events at forward rapidity, using the muon spectrometer [5] and another analysis at mid rapidity using both the  $\mu^+\mu^-$  and  $e^+e^-$   $J/\psi$  decay channels [6]. The  $J/\psi$ 's selected in the first analysis correspond to Bjorken- $x \sim 10^{-2}$ , while those selected in the second one to  $x \sim 10^{-3}$ . At mid rapidity the events were triggered by the coincidence of the Silicon Pixel detector and the Time of Flight detector, while the forward plastic scintillator detector (VZERO) was used as a veto, to reject hadronic events. The obtained coherent cross sections for the process  $Pb+Pb \rightarrow J/\psi+Pb+Pb$  were  $1.00 \pm 0.18(\text{stat})^{+0.24}_{-0.26}(\text{syst})$  mb at  $-3.6 < y < -2.6$  and  $2.38^{+0.34}_{-0.24}$  (stat+syst) mb at  $-0.9 < y < 0.9$  (fig. 3).

These results clearly showed the nuclear gluon structure

function at  $x \sim 10^{-2}-10^{-3}$  and  $Q^2 \sim 2.2$  GeV $^2/c^2$  is below that expected by a simple superposition of the proton and neutron structure functions. This is the so-called "impulse approximation", where the  $q-\bar{q}$  pair interacts with the gluons radiated by just a single nucleon of the Pb nucleus with a probability enhanced by a factor  $A$ . The impulse approximation prediction uses data from exclusive  $J/\psi$  photo-production in  $\gamma$ -p interactions to estimate the coherent  $J/\psi$  cross section in  $\gamma$ -Pb collisions. By using  $\gamma$ -p data, the impulse approximation calculation neglects all nuclear effects such as the expected modification of the gluon density in the lead nuclei compared to that of the proton.

The CMS measurement [7], obtained at  $1.8 < |y| < 2.3$  nicely complements the ALICE data, collected at  $-0.9 < y < 0.9$  and  $-3.6 < y < -2.6$ , allowing to investigate a different Bjorken- $x$  region. CMS candidates were triggered requiring an energy deposit consistent with at least one neutron in either of the ZDCs; low signal in at least one of the beam scintillator counters (BSC); the presence of at least one single muon, and at least one track in the pixel detector. These results confirmed the evidence that the nuclear gluon density is below that expected for a simple superposition of protons and neutrons in the nucleus.

Considering both the ALICE and the CMS results, the impulse approximation over-predicts the ALICE and CMS  $J/\psi$  UPC cross section by more than  $5\sigma$  (fig. 3).

According to these results, the gluon field of each nucleon is therefore screened by the presence of the other nucleon

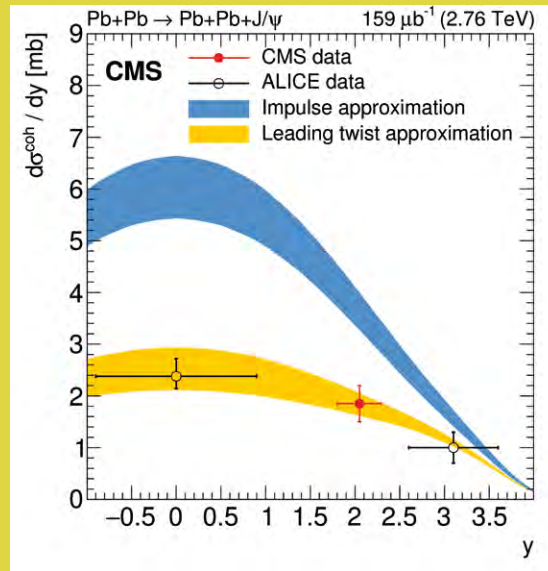


Fig. 3 Differential cross section versus rapidity for coherent  $J/\psi$  production in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, measured by ALICE [5, 6] and CMS [7]. The vertical error bars include the statistical and systematic uncertainties added in quadrature, and the horizontal bars represent the range of the measurements in  $y$ . Also the impulse approximation and the leading twist approximation calculations are shown.

fields. This effect is usually named “gluon shadowing” and it is quantified by the ratio

$$(2) \quad R(x, Q^2) = G_N(x, Q^2) / (A \cdot G_n(x, Q^2)),$$

where  $G_N(x, Q^2)$  represents the nuclear gluon PDF and  $G_n(x, Q^2)$  are the nucleon gluon PDF.

Data show a good agreement with the prediction of the “leading twist approximation” model, developed by V. Guzey, M. Strikman and M. Zhalov [8]. This is a calculation at the partonic level that uses a diffractive proton PDF as an input and implements a gluon recombination mechanism. It is based on the combination of the generalization of the Gribov-Glauber theory with the QCD factorization theorem, resulting in an effective nuclear gluon shadowing. The theoretical uncertainty band for the leading twist approximation result, shown in fig. 3, is  $\sim 12\%$  and is due to the uncertainty in the strength of the gluon recombination mechanism. This uncertainty is uncorrelated with the photon flux uncertainty (about 5%). This model foresees a gluon shadowing  $R(x, Q^2)$  of about 50% at Bjorken- $x \sim 10^{-3}$ .

The ultra-peripheral collisions studies performed at the LHC provided the first direct evidence for nuclear gluon shadowing. Nevertheless the use of these measurements to constrain the gluon shadowing is not trivial.

As an example a NLO prediction (used in most of the PDF fit analyses) for this cross section is not available yet. A first attempt to extract  $R(x, Q^2)$  from these data was made by Guzey *et al.* [9] obtaining  $R(x, Q^2) = 0.61^{+0.05}_{-0.04}$ .

Recently ALICE presented at the Quark Matter 2017 conference a new analysis based on the 2015 Pb-Pb run data collected at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV [10]. The results show a

good agreement with models predicting a gluon shadowing compatible with that predicted by ref. [8].

### 3 Vector meson production in pp and p-A collisions

The process  $e+p \rightarrow e+p+J/\psi$  was studied in detail at HERA. As a result the cross section of the process  $\gamma+p \rightarrow J/\psi+p$  as a function of the photon-proton centre-of-mass energy ( $W_{\gamma p}$ ) was found to grow as a power law. The fit to a power law,  $\sigma \propto W_{\gamma p}^\delta$ , in the range  $20 < W_{\gamma p} < 300$  GeV, gave  $\delta = 0.69 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.03(\text{syst})$  (ZEUS) [11] and  $\delta = 0.67 \pm 0.03(\text{stat+syst})$  (H1) [12]. The growth of the cross section was interpreted by pQCD-inspired models as an increase of the gluon density approaching smaller Bjorken- $x$ .

ALICE studied the  $J/\psi$  photo-production up to  $W_{\gamma p} \sim 700$  GeV, using p-Pb data collected at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV [13]. In this case the Pb nucleus acts as photon emitter in more than 95% of the events. This allows to give an unambiguous determination of the event rapidity  $y$  and therefore of  $W_{\gamma p}$ . During the 2013 p-Pb run, the beam direction was reversed, allowing the study of two different rapidity ranges.

The obtained cross section was  $\sigma(p+\text{Pb} \rightarrow J/\psi+p+\text{Pb}) = 6.42 \pm 0.43(\text{stat}) \pm 0.61(\text{syst}) \mu\text{b}$  at  $2.5 < y < 4$  and  $\sigma(p+\text{Pb} \rightarrow J/\psi+p+\text{Pb}) = 2.46 \pm 0.31(\text{stat})^{+0.24}_{-0.28}(\text{syst}) \mu\text{b}$  at  $-3.6 < y < -2.6$ . The above cross section is related to the photon-proton cross section  $\gamma+p \rightarrow J/\psi+p$  through the photon flux,  $dn/dk$ , where  $k$  is the photon energy, which is determined by the  $J/\psi$  mass and rapidity,

$$(3) \quad k = 1/2 M_{J/\psi} e^{-y}.$$

Figure 4 shows the cross section measured by the

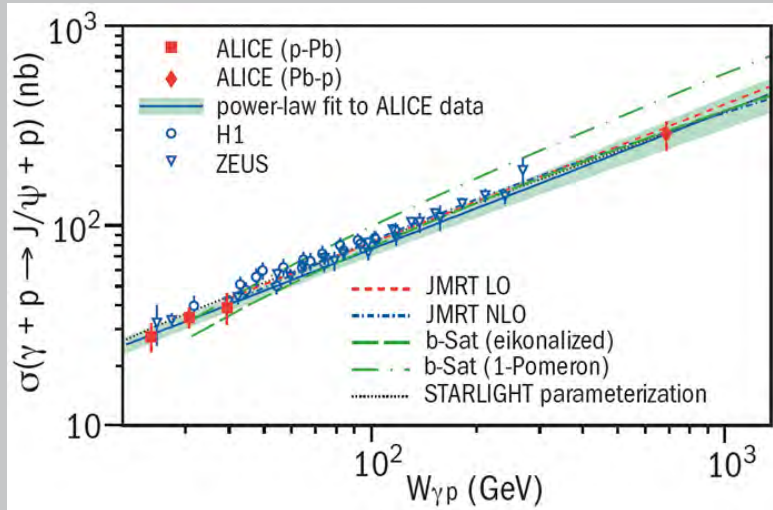


Fig. 4 Exclusive  $J/\psi$  photo-production cross section off protons measured by ALICE [13] and compared to HERA data.

ALICE muon spectrometer at four different  $W_{\gamma p}$ . Two calculations are available from the JMRT model [14]: the first one referred to as LO is based on a power law description of the process, while the second model is labeled as NLO, and includes contributions which mimic effects expected from the dominant NLO corrections. Because both JMRT models have been fitted to the same data, the resulting energy dependences are very similar. ALICE data support their extracted gluon distribution up to  $x \sim 2 \cdot 10^{-5}$ . The STARLIGHT parameterization [15] is based on a power law fit using only fixed-target and HERA data, giving  $\delta = 0.65 \pm 0.02$ .

Figure 4 shows predictions from the b-Sat eikonalized model [16] which uses the Color Glass Condensate approach to incorporate saturation, constrained to HERA data alone. Comparisons to STARLIGHT and the b-Sat (1-pomeron) models [17] are also shown.

The results from the models mentioned above are within one sigma of our measurement. The b-Sat (1-pomeron) prediction taken from [17] also agrees with the ALICE low-energy data points, but it is about  $4\sigma$  above ALICE measurement at the highest energy. ALICE data are successfully fitted to a power law giving  $\delta = 0.68 \pm 0.06(\text{stat} + \text{syst})$  in good agreement with the results found at HERA. This result shows that there is no change of the cross section behaviour, within the errors, between the HERA and the LHC energies.

$J/\psi$  and  $\psi(2s)$  production in ultra-peripheral collisions was studied by LHCb in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV [18]. Identical hadron interactions do not allow to distinguish which one of the two hadrons emitted the photon and therefore an ambiguity on the rapidity is present: as a consequence each event has two possible  $W_{\gamma p}$  solutions. In this case extracting the  $\gamma + p \rightarrow J/\psi + p$  cross section from the measured  $p+p \rightarrow J/\psi + p+p$  measured cross section is not trivial. The analysis required 2 tracks in an otherwise empty detector. Invariant-mass distribution showed clear  $J/\psi$  and  $\psi(2s)$  peaks. After correcting for acceptance and efficiency, the  $0.93 \text{ pb}^{-1}$  integrated luminosity gave a cross section in the pseudorapidity interval  $2.0 < \eta < 4.5$ ,  $\sigma(p+p \rightarrow J/\psi + p+p) = 291 \pm 7(\text{stat}) \pm 19(\text{syst}) \text{ pb}$  and  $\sigma(p+p \rightarrow \psi(2s) + p+p) = 6.5 \pm 0.9(\text{stat}) \pm 0.4(\text{syst}) \text{ pb}$ . The extraction of the  $\gamma + p \rightarrow V + p$  ( $V = J/\psi, \psi(2s)$  or  $\Upsilon$ ) cross section was obtained by using a power law to connect the two cross sections:

$$(4) \quad \frac{d\sigma(p + p \rightarrow V + p + p)}{dy} = S^2(W_+) \left( k_+ \frac{dn}{dk_+} \right) \sigma_+^{\text{th}}(\gamma p) + S^2(W_-) \left( k_- \frac{dn}{dk_-} \right) \sigma_-^{\text{th}}(\gamma p),$$

where  $S$  is the gap survival probability,  $k$  is the photon energy,  $k \frac{dn}{dk}$  is the photon flux and  $\sigma^{\text{th}}_{\pm}(\gamma p)$  are the cross sections of the process  $\gamma + p \rightarrow J/\psi + p$  corresponding to the two different

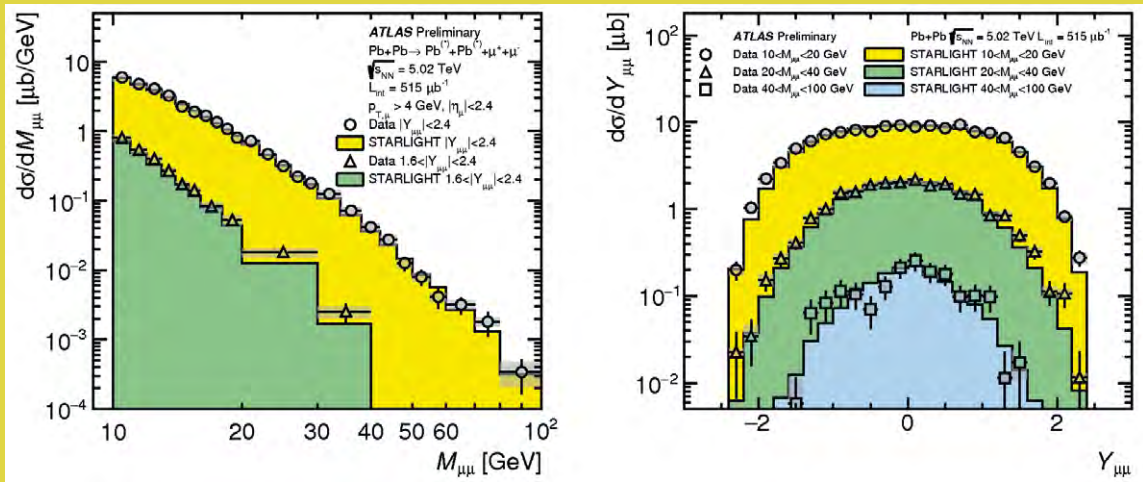


Fig. 5 ATLAS cross section for di-muon production in UPC, as a function of pair mass (left) and pair rapidity (right) [22]. The data are indicated by the symbols while calculations are shown by solid histograms. Error bars indicate statistical uncertainties while the grey bands indicate the combined systematic uncertainties, including 7% global luminosity uncertainty.

$W_{\gamma p}$  solutions.  $S$  is the probability that no other processes in the event may affect the existence of the gap in the particle distribution. In fact, besides the quark-antiquark pair, the other spectator partons might participate in the interaction, and destroy the rapidity gap(s) in the final state, for instance by exchanging gluons with the partons of the other hadron. This quantity has not been measured experimentally at the LHC. One has therefore to rely on Monte Carlo simulation. According to the eikonal model, it depends on the vector meson mass, rapidity and center-of-mass energy. As far as  $\psi(2s)(J/\psi)$  is concerned, at  $\sqrt{s}=7$  TeV,  $S^2(W_+)$  ranges from  $\sim 0.81$  ( $\sim 0.87$ ) at  $y \sim 2$  and  $\sim 0.47$  ( $\sim 0.68$ ) at  $y \sim 4.5$  [14].

Models including saturation reproduce within the error the  $J/\psi$  and  $\psi(2s)$  cross section measured by LHCb as a function of the rapidity. Comparing the ALICE and LHCb results shows that the cross sections measured by LHCb at different  $W_{\gamma p}$  agree within the error with the ALICE fit quoted above [13].

At a first look the interpretation of these results might appear a bit confused: experimentally the LHC data show no deviation from the HERA behavior, where the power law growth of the cross section was explained as an increase of the gluon density at smaller Bjorken- $x$ , *i.e.* no smoking gun for gluon saturation. On the other hand, few models including gluon saturation reproduce the experimental data. Implementing the gluon saturation in model predictions is not a unique procedure: according to few authors, the gluon saturation could be a slow process, whose effect grows very smoothly as a function of  $1/x$ : LHC energies could not be high enough to see remarkable effects with respect to lower-

energy data. Indeed HERA data can be reproduced by few models, that are based on gluon saturation as IP-Sat [16, 19] or on the Colour Glass Condensate, as b-CGC [20, 21].

#### 4 Photon-photon collisions

Two-photon production of  $e^+e^-$  pairs has a topology similar to that of exclusive vector mesons production followed by decay into a pair of di-leptons (fig. 1, right). This process is of interest since the coupling between the photon and the emitting nucleus is enhanced by a factor  $Z$  (the nuclear charge), allowing to probe Quantum Electrodynamics in the regime of strong fields. The coupling  $Z\sqrt{\alpha_{em}}$  is large, so higher-order terms may become important. It is therefore interesting to compare the experimental results with a Monte Carlo code, as STARLIGHT, implementing just the QED at leading order for this process.

ALICE measured the cross section for di-electron invariant mass for a rapidity in the interval  $|y| < 0.9$  in a wide range, outside the  $\rho$  and the  $J/\psi$  peaks. The data with  $2.2 < M_{inv} < 2.6$  GeV/ $c^2$  ( $3.7 < M_{inv} < 10$  GeV/ $c^2$ ) [5] gave a cross section  $\sigma = 154 \pm 11$  (stat) $^{+17}_{-11}$  (syst)  $\mu\text{b}$  ( $\sigma = 91 \pm 10$  (stat) $^{+0.7}_{-1.1}$  (syst)  $\mu\text{b}$ ), to be compared with  $\sigma = 128$   $\mu\text{b}$  and  $\sigma = 77$   $\mu\text{b}$  predicted by STARLIGHT. At lower invariant mass [22], the measured cross section for the selection  $0.6 < M_{inv} < 2.0$  GeV/ $c^2$  and  $|\eta_{1,2}| < 0.9$  (1,2 are the pseudo-rapidities of the two tracks) is  $\sigma = 9.8 \pm 0.6$  (stat) $^{+0.9}_{-1.2}$  (syst) mb. The STARLIGHT prediction for the same selection is  $\sigma = 9.7$  mb.

The measured values of the cross sections in the first two

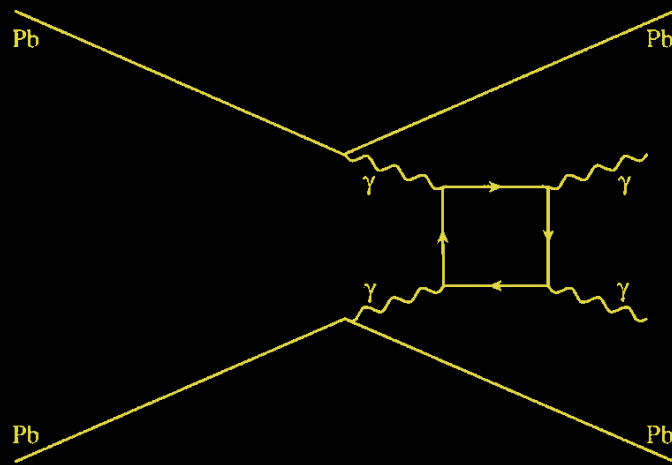


Fig. 6 Feynman diagram of  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  events: the loop may contain SM or exotic particles.

invariant-mass intervals are 20% above, but compatible within 1.0 and 1.5  $\sigma$  with the STARLIGHT prediction, if the statistical and systematic errors are added in quadrature. At lower invariant mass ( $0.5 < M_{inv} < 2.0 \text{ GeV}/c^2$ ) the agreement is quite good. ATLAS measured the di-muon events in ultra-peripheral collisions with  $10 < M_{inv} < 100.0 \text{ GeV}/c^2$  [23]. The analysis (fig. 5) is based on a single-muon trigger with veto of additional activity in the detector. The Level-1 required at least one track in the muon spectrometer and less than 50 GeV of transverse energy in the calorimeters. The High Level Trigger (HLT) level rejected events with more than one hit in the forward scintillators and required an inner detector track with transverse momentum  $p_T$  above 400 MeV. This gives  $\sigma(\text{Pb} + \text{Pb} \rightarrow \text{Pb} + \text{Pb} + \mu^+ + \mu^-) = 32.2 \pm 0.3 \text{ (stat)}_{-3.4}^{+4.0} \text{ (syst)} \mu\text{b}$ . The STARLIGHT predicted cross section is  $31.64 \pm 0.04 \text{ (stat)} \mu\text{b}$ , well within the experimental uncertainties.

In summary predictions are in good agreement with the measured cross-sections across a wide invariant-mass range exceeding two orders of magnitude (from  $0.6 \text{ GeV}/c^2$  to  $100 \text{ GeV}/c^2$ ), suggesting that the nuclear electromagnetic fields are reasonably described by the nuclear form factor and photon fluxes used in the calculation. The above results provide constraints on calculations that include terms of higher orders in  $\alpha_{em}$ , predicting a cross section up to 30% lower.

UPC photon-photon collisions offer the possibility to search for physics beyond the standard model. CMS has studied interactions where two photons annihilate upon p-p collision

to produce of  $W^+W^-$  pairs, implying four particles at the same vertex in a Feynman diagram. Using a luminosity  $5.05 \text{ fb}^{-1}$  collected in pp interactions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ , two signal events were observed, consistent with standard model expectations: the result sets competitive limits on the anomalous quartic gamma-W couplings [24]. More stringent limits (or maybe evidence for new physics) will be provided by the new CMS-TOTEM CT-PPS detector.

Photons produced by the huge electromagnetic field of relativistic ions circulating in the LHC pipe can interact each through the process  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  (light-by-light scattering). The last LHC Pb-Pb run delivered enough luminosity to study this rare channel. This scattering is mediated by a loop (fig. 6) of SM particles (q, l, W). As proposed in [25], exotic particles could also give a contribution to the total cross section. Finding an excess of  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  events therefore would be a hint of new physics. Possible backgrounds can arise from misidentified electrons from the QED process  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ , as well as from the central exclusive production of two photons from the fusion of two gluons ( $gg \rightarrow \gamma\gamma$ ). The ATLAS experiment has conducted a preliminary search for light-by-light scattering in  $480 \mu\text{b}^{-1}$  of Pb-Pb data collected at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  during the 2015 heavy-ion run [26]. While almost four billion strongly interacting events were provided by the LHC, only 13 di-photon candidates were observed.

After background subtraction and analysis corrections, the cross section  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  process for photon transverse energy  $E_T > 3 \text{ GeV}$ , photon pseudo-rapidity  $|\eta| < 2.4$ , di-photon invariant mass larger than 6 GeV, di-photon transverse energy

lower than 2 GeV and di-photon acoplanarity below 0.01, was measured to be  $70 \pm 20$  (stat)  $\pm 17$  (syst) nb, in agreement with the SM prediction of  $49 \pm 10$  nb.

## 5 Conclusions

The UPC physics will benefit from the LHC luminosity increase in the next years: the  $\Upsilon$  vector meson cross section measurement will allow to study the nuclear gluon shadowing at larger  $Q^2$ , where the pQCD-inspired theoretical model provides higher precision cross section predictions. In addition high statistics measurement of the  $J/\psi$  production will allow to study the UPC  $J/\psi$  cross section as a function of  $|\mathbf{t}|$ : gluon saturation signature is expected to manifest with the presence of a pronounced dip (or multiple dips) at relatively large  $|\mathbf{t}|$  ( $1-3$  GeV<sup>2</sup>) [27].

As discussed above, the  $\gamma+p \rightarrow J/\psi + p$  cross section is still growing with the photon-proton centre-of-mass energy at the LHC. Nevertheless we expect that the rise of the gluon PDF at low  $x$  should be tamed to avoid cross section divergence, by mechanisms as gluon recombination. Is the nuclear gluon shadowing observed in ultra-peripheral Pb-Pb interactions a manifestation of gluon saturation in the nucleus?

The LHC experiments showed clearly that the gluon field in the nucleus at low Bjorken- $x$  and at  $Q^2 \sim 2.2$  GeV/c<sup>2</sup> is not a simple superposition of that of the single nucleons. On the other hand, a precise quantification of the effect and an explanation of its origin is not available yet.

A new machine is now under consideration in USA: the Electron Ion Collider (EIC) [28] is a facility with a versatile range of kinematics, beam polarization, high luminosity and beam energy designed to improve our understanding of QCD phenomena. The broad physics program spans from spin physics with polarized proton beams to 3D tomography of the gluons and sea quark in the nucleus, and includes a comprehensive electron-heavy-ion interaction program to explore gluon saturation and test the Colour Gluon Condensate model.

EIC would be a powerful tool to address a systematic study of the nuclear gluon shadowing signals observed at the LHC, taking advantage of an expected luminosity  $10^{33-34}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and a centre-of-mass energy  $\sqrt{s_{NN}} = 30-140$  GeV. While in photo-production events the  $Q^2$  is set by the mass of the produced vector meson, this new machine will allow to tune the  $x$ ,  $Q^2$  working point, covering a wide region to understand the nuclear gluon shadowing and its mechanism down to  $x \sim 10^{-5}$ .

## Bibliography

- [1] E. Fermi, *Z. Phys.*, 29 (1924) 315.
- [2] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, 89 (2002) 272302; *Phys. Rev. C*, 77 (2008) 034910, *Phys. Rev. C*, 85 (2012) 014910.
- [3] PHENIX Collaboration, *Phys. Lett. B*, 679 (2009) 321.
- [4] M. G. Ryskin, *Z. Phys. C*, 57 (1993) 89.
- [5] ALICE Collaboration, *Phys. Lett. B*, 718 (2013) 1273.
- [6] ALICE Collaboration, *Eur. Phys. J. C*, 73 (2013) 2617.
- [7] CMS Collaboration, arXiv: 1605.06966v1, submitted to *Phys. Lett. B*.
- [8] V. Guzey *et al.*, *Eur. Phys. J. C*, 74 (2014) 2942.
- [9] V. Guzey, *et al.*, *Phys. Lett. B*, 726 (2013) 290.
- [10] O. Villalobos on behalf of the ALICE Collaboration, Proceedings Quark Matter 2017, in press.
- [11] ZEUS Collaboration, *Eur. Phys. J. C*, 24 (2002) 345.
- [12] H1 Collaboration, *Eur. Phys. J. C*, 46 (2006) 585, *Eur. Phys. J. C*, 73 (2013) 2466.
- [13] ALICE Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 232504.
- [14] S. P. Jones *et al.*, *JHEP*, 1311 (2013) 085.
- [15] "STARLIGHT Monte Carlo generator". Online documentation available at <http://starlight.hepforge.org> (2015).
- [16] H. Kowalski, L. Motyka and G. Watt, *Phys. Rev. D*, 74 (2006) 074016.
- [17] J. L. Abelleira Fernandez, *et al.*, arXiv:1211.4831 [hep-ex].
- [18] LHCb Collaboration, *J. Phys. G*, 41 (2014) 055002.
- [19] G. Watt and H. Kowalski, *Phys. Rev. D*, 78 (2008) 014016.
- [20] A. H. Rezaeian and I. Schmidt, *Phys. Rev. D*, 88 (2013) 074016.
- [21] A. H. Rezaeian *et al.*, *Phys. Rev. D*, 87 (2013) 034002.
- [22] ALICE Collaboration, *JHEP*, 09 (2015) 095.
- [23] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2016-025.
- [24] CMS Collaboration, *JHEP*, 07 (2013) 116.
- [25] D. D'Enterria and G. G. Silveira, *Phys. Rev. Lett.*, 111 (2013) 080405, (Erratum: *Phys. Rev. Lett.*, 116 (2016) 129901).
- [26] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2016-111.
- [27] N. Armesto *et al.*, *Phys. Rev. D*, 90 (2014) 054003.
- [28] EIC White paper, arXiv: 1212.1701v3.

### Eugenio Scapparone

Eugenio Scapparone is Senior Researcher (Primo Ricercatore) at INFN-Bologna. He has been member of the ALICE Collaboration since 2002 and has joined the DarkSide Collaboration in 2016. In ALICE he participated to the construction and the commissioning of the Time of Flight (TOF) detector, built by the Bologna and Salerno groups. He had the responsibility of the TOF HV system and of a first level trigger (L0) based on the TOF, that selected vector meson photo-production events in Pb-Pb and p-Pb collisions. During his contract as CERN Paid Scientific Associate, he was appointed (2008-2009) ALICE Deputy Commissioning Coordinator and coordinator of the L0 trigger based on the LHC-BPTX detectors. Later he served the ALICE Collaboration (2012-2014) as convener of the Diffractive and Ultra-peripheral collision Physics Working Group (PWG-UD). Since 2016 he has been convener of the Minimum Bias event Physics Working Group (PWG-MM) and member of the ALICE Physics Board. In Darkside-20k he is coordinator of the Photo-electronic group (SiPMs and cold electronics) and member of the DarkSide-20k Executive Board.

## FAST NEUTRON IRRADIATION FACILITIES FOR ELECTRONICS AND MATERIALS

### NEW OPPORTUNITIES AT SPALLATION SOURCES IN EUROPE

ROBERTO SENESI<sup>1,2,3</sup>, GIUSEPPE GORINI<sup>4,5,3</sup>, CARLA ANDREANI<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica and Centro NAST, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Roma, Italy

<sup>2</sup> CNR-IPCF Sezione di Messina, Messina, Italy

<sup>3</sup> Centro Fermi-Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi", Roma, Italy

<sup>4</sup> Dipartimento di Fisica "G. Occhialini", Università degli Studi di Milano Bicocca, Milano, Italy

<sup>5</sup> CNR-IFP, Milano, Italy

Neutrons are the neutral particle probe of choice for the investigation of materials at the atomic scale. The delicate, precise and highly penetrating nature of low-energy (thermal) neutron beams make them ideal to study non-destructively the structure and dynamics of matter with atomic resolution. However the interaction of high-energy (fast) neutrons with materials can have disruptive effects on the functioning of electronic devices and on the mechanical integrity of materials. Fast neutrons are found naturally in the atmosphere, in space environments, or produced in reactors- and accelerator-based neutron sources. New opportunities to investigate the effects of high-energy neutrons for the screening of microchips and structural materials are operational or under development at the ISIS pulsed neutron and muon source (UK) and the European Spallation Source ESS (SE). The Italian contribution to these efforts, set within the CNR programmes on neutron sciences, has its most recent display on the ChipIR beam line at ISIS and the neutron Irradiation Module at the ESS. These will represent unique venues to carry out accelerated tests of electronic chips in the fast-neutron atmospheric environment and to obtain information on the behavior of next-generation metallic alloys under high fluxes of neutrons up to GeV energies.

#### 1 Introduction

A sudden blast of votes on an electronic voting machine, an unexpected dive on a transoceanic flight, beams of stainless steel becoming brittle and decreasing their density. This is what can happen when high-energy neutrons interact with electronic chips or with atoms in the lattice of solid materials.

Interaction of neutrons with atomic nuclei is intimately connected to the fact that, unlike the interaction of charged particles such as protons or ions with nuclei, neutrons do not have to overcome the Coulomb repulsion to penetrate into the nucleus, and have therefore a high penetration into materials. When high-energy neutrons collide with an electronic



potential triggering event was a “single-event effect (SEE) resulting from a high-energy atmospheric particle striking one of the integrated circuits within the CPU module” [4].

In general, a small fraction of the energy lost by a fast neutron passing through a medium is imparted to create atomic displacements. However in high-flux neutron radiation environments, such as fission and fusion reactors or modern accelerator-driven spallation neutron sources, this form of damage has a strong impact on the reliability and operation of a plant or a neutron research facility [5].

As early as 1942, in Fermi’s reports on the operation of the uranium-graphite reactor, E.P. Wigner pointed out that the intense fluxes of high-energy neutrons created in the fission events would cause the displacement of carbon atoms from their equilibrium positions in the graphite lattice [6]. For every fission reaction, neutrons with MeV energies would transfer part of their energy into the graphite lattice destruction, and it was anticipated that the forthcoming challenges in the prediction of the behavior of reactor components exposed to prolonged irradiation would hardly be solved. The swelling and distortion of graphite under the bombardment of fast neutrons from nuclear fission was called the “Wigner disease”, and led to intense activity on solid-state physics and materials research [7]. The quantification of this type of damage is the *displacement per atom*, dpa, a parameter expressing the average number of atomic displacements induced by fast-neutron irradiation; the latter is often accompanied by the ratio of the amount of helium produced per *displaced atom*, the so called He/dpa ratio, expressing the effect of neutron-induced reactions where alpha particle are created and generate helium atoms, which aggregate in bubbles, embrittling the materials [5].

The advent of spallation neutron sources, with neutron energy spectra extending up to 3 GeV, and intense fluxes of fast neutrons, has opened up new opportunities to fulfil the needs of knowledge of testing electronic devices and structural spallation materials under fast-neutron irradiation.

The Italian involvement in the design, construction, and exploitation of neutron

irradiation stations at spallation neutron sources is supported by the neutron science program at Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), within the framework of the agreements with the Science and Technology Facilities Council (STFC) collaboration in scientific research at the spallation neutron source ISIS (UK) and within the agreement with the European Spallation Source (ESS) ERIC (SE).

## 2 Man-made environments for accelerated neutron testing of electronic chips: the ChipIR beam line at ISIS

Following pioneering experimental work in 2007 [8], a new facility, named ChipIR was designed to look at how silicon microchips respond to cosmic neutron radiation. The latter was realized within a British-Italian collaboration under the international CNR-STFC agreements 2008-2014 and 2014-2020. ChipIR is located at the ISIS pulsed neutron and muon source at the Rutherford Appleton Laboratory, UK, and incorporates many features to help users of the facility perform test measurements accurately and efficiently. One-hour exposure in the beam is equivalent to hundreds to thousands of years in the real environment! ChipIR is able to deliver an atmospheric spectrum of neutrons up to an energy of 800 MeV, with a variable collimated beam and large area beam. Flux levels with small beams for components reach values of the order of  $10^7$  n  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , and large systems have more modest fluxes. Up to  $1 \times 1 \text{ m}^2$  systems can be irradiated. By achieving its performance goals, ChipIR is poised to become the premier neutron SEE test facility in the world, with about 3000 annual operating hours [9]. Among the most recent measurements carried out during the user programme, safety critical computing systems [10], as well as Commercial Off The Shelf (COTS) components [11] were tested by Italian teams, in collaboration with the ChipIR scientists. As an example, the measurements on commercial components show how the response of systems based on CCD and SRAM for stratospheric balloon experiments respond to the impact of neutrons with energies up to hundreds of MeV. The fast-neutron effects on the CCD are reported schematically in [fig. 2](#) [11].

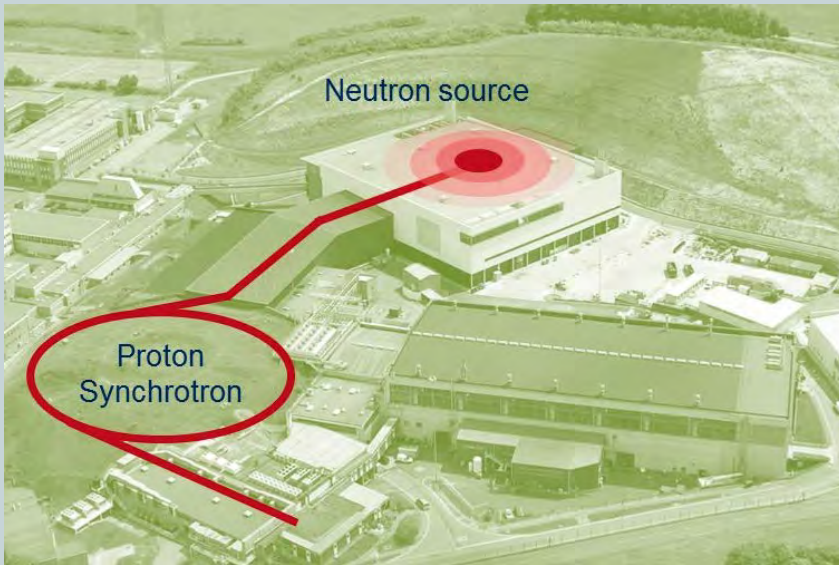


Fig. 2 Top: Schematics of the neutron production layout at ISIS. Bottom: Rendering of the charge generation clusters induced by the impact of the ChipIR neutron beam on a CCD for irradiation exposures of approximately 33 ms. The CCD was exposed at 90 degrees with respect to the CCD plane, therefore neutrons arrive sideways. Multiple (long) tracks clusters are due to fast-energy neutrons. Single (dot-like) track clusters are due to low-energy neutrons [11].

### 3 Healing from Wigner's disease

Knowledge of structural materials' response to the displacement damage induced by neutrons of energies up to 2 GeV will help the development and research on sustainable materials for current and next-generation accelerator-based sources. Within the framework of the CNR In-Kind contributions to the ESS construction phase, a dedicated effort is devoted to design and build instrumentation for advancing the knowledge of displacement damage at unprecedented extremes of energies and intensity (2 GeV proton energy,

5 MW power delivered to the target). The neutron Irradiation Module at the European Spallation Source will make use of the high-intensity fast-neutron spectrum to study the behaviour of the materials used in the facility, and will be used to support ESS own program of target station R&D. By studying how these materials are affected by radiation, estimates of the material degradation in radiated components will allow to optimise of the design and lifetime of regularly replaced target components. Samples to be irradiated shall be located as close as possible to the target material, in a

position offering both a representative radiation spectrum and an acceptable disturbance of moderators' performance. The module will be located in the ESS water moderator and will be passively cooled by the moderator's water flow. The enclosure, consisting of a cylinder-shaped vessel of less than 15 cm length, and 1.7 cm diameter, will contain 192 miniature samples composed of relevant structural materials such as special stainless steels, high performance aluminium alloys, titanium-vanadium alloys and low-activation stainless steel for extreme neutron radiation

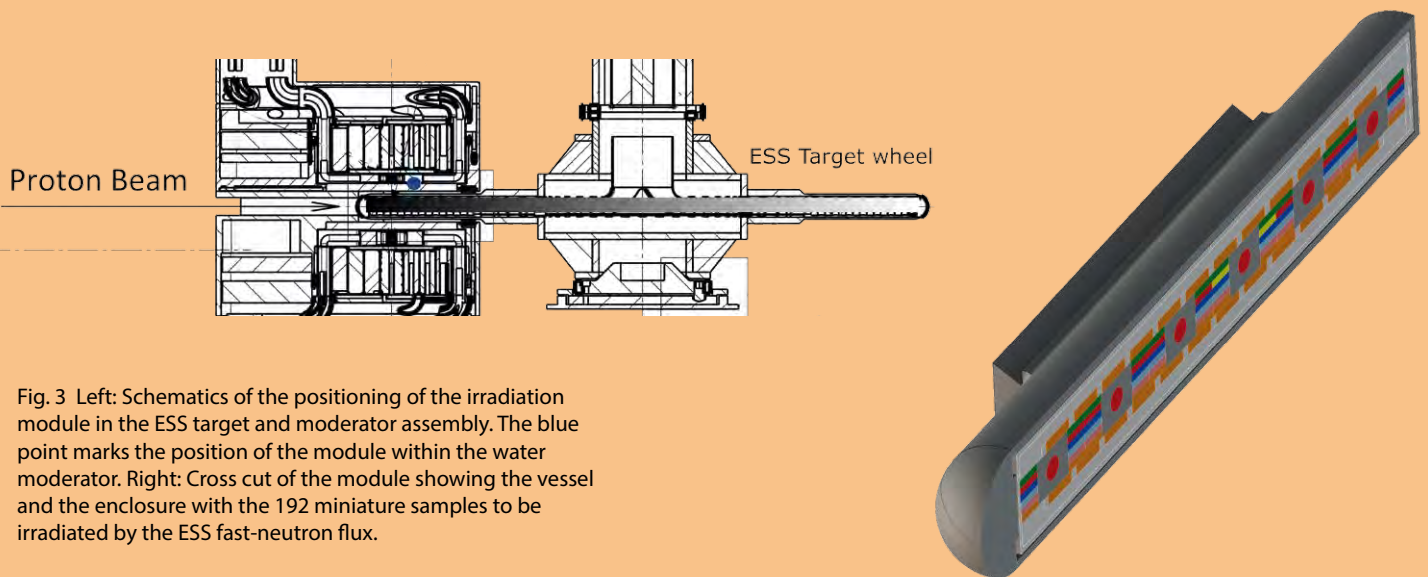


Fig. 3 Left: Schematics of the positioning of the irradiation module in the ESS target and moderator assembly. The blue point marks the position of the module within the water moderator. Right: Cross cut of the module showing the vessel and the enclosure with the 192 miniature samples to be irradiated by the ESS fast-neutron flux.

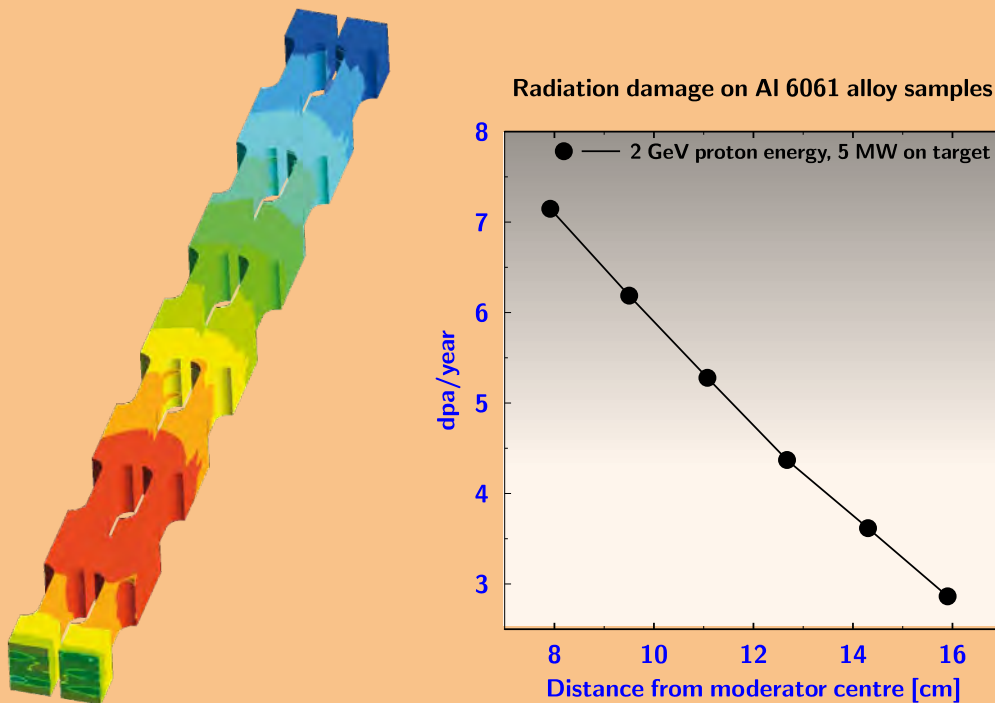


Fig. 4 Left: Map of displacement damage across the samples for tensile tests in the module. Right: Displacement damage per year of the aluminium alloy samples for tensile tests as a function of the distance from the moderator centre, for proton energy of 2 GeV, 5 MW of power on the target, and 5400 hours of operation per year.

environment. The radiation effects on the mechanical, thermal, electrical, microstructural properties will be carried out by comparing examinations on irradiated and non-irradiated samples. The layout of the module within the ESS tungsten wheel, target and moderator assembly is shown in [fig. 3](#).

The module will be installed in the moderator within 2017 and is expected to receive its first neutrons before 2020. The performance of the module has been calculated using state-of-the-art Monte Carlo techniques and will allow to obtain a radiation damage in the range of 7 dpa/year and a gas production of approximately 15 He/dpa.

The calculated map of displacement damage

across the samples for tensile tests in the module, and the displacement damage of the aluminium alloy samples as a function of the distance from the moderator centre are reported in [fig. 4](#) [12].

#### 4 Outlook

The forthcoming years will fulfill the promise to significantly advance the knowledge of the response of materials and electronics to fast-neutron radiation environments. As ChipIR enters in its full user programme, it is expected that users from the electronics, aerospace, electronics safety, from space to ground, and beyond, will gather enough information

to help screening the next generation of microchips from neutron-induced malfunctioning. On a longer time scale, the examination of irradiated samples at ESS will provide unique knowledge to help developing the next-generation structural materials for extreme radiation environments. We expect that much of what will be found most interesting in these investigations will be unexpected.

## References

- [1] J. F. Ziegler, H. Puchner, "SER-History, Trends, and Challenges: A Guide for Designing with Memory ICs", (Cypress) 2004. Available at <http://www.cypress.com>
- [2] JEDEC Standard JESD89A "Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices", Oct. 2006. Available at <http://www.jedec.org>
- [3] <http://www.independent.co.uk/news/science/subatomic-particles-cosmic-rays-computers-change-elections-planes-autopilot-a7584616.html>
- [4] In-flight upset, 154 km west of Learmonth, Western Australia, 7 October 2008, VH-QPA, Airbus A330-303, Australian Transport Safety Bureau report no. AO-2008-070 (2011), ISBN 978-1-74251-231-0, Australian Transport Safety Bureau, PO Box 967, Civic Square ACT 2608 Australia, [www.atSB.gov.au](http://www.atSB.gov.au)
- [5] J. Knaster, A. Moeslang, T. Muroga, "Materials research for fusion", *Nature Phys.*, 12 (2016) 424.
- [6] E. Fermi, Report for month ending December 15, 1942, Physics Division, USAEC Report CP-387, University of Chicago, 1942.
- [7] D. Schaffer, L. Johnson, "Oak Ridge National Laboratory: The First Fifty Years" (The University of Tennessee Press, Knoxville) 1994.
- [8] C. Andreani, A. Pietropaolo, A. Salsano, G. Gorini, M. Tardocchi, A. Paccagnella, S. C. D. Frost, S. Ansell, S. P. Platt, "Facility for fast neutron irradiation tests of electronics at the ISIS spallation neutron source", *Appl. Phys. Lett.*, 92 (2008) 114101.
- [9] C. Cazzaniga, S. P. Platt, C. D. Frost, "Preliminary Results of ChipIR, a new Atmospheric-like Neutron Beamline for the Irradiation of Microelectronics", in *Proceeding of the SELSE-13, 13th Workshop on Silicon Errors in Logic-System Effects*, 21-22 March 2017, Northeastern University, Boston, Massachusetts (USA); C. Cazzaniga, C. D. Frost, "Progress of the Commissioning of a fast neutron beamline for Chip Irradiation", *Proceedings of the 22nd meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XXII)*, 27th -31st March 2017, Oxford, UK, submitted to *J. Phys. Conf. Ser.*
- [10] A. Fedi, M. Ottavi, G. Furano, A. Bruno, R. Senesi, C. Andreani, C. Cazzaniga, "High-energy Neutrons Characterization of a Safety Critical Computing System", submitted to *IEEE Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems DFT 2017 in Cambridge, UK*, <http://www.dfts.org/index.htm> (2017).
- [11] E. Grosso, D. Ascioffa, T. Fiorucci, C. Marzullo, A. Scaramella, S. Stramaccioni, A. Zibecchi, C. Cazzaniga, G. C. Cardarilli, L. Di Nunzio, G. Furano, M. Re, R. Senesi, C. Andreani, M. Ottavi, "Setup and experimental results analysis of COTS SRAMs tests at the ISIS facility", submitted to *IEEE Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems, DFT 2017, Cambridge, UK*, <http://www.dfts.org/index.htm> (2017).
- [12] R. Senesi, F. Masi, G. Gorini, G. Scionti, C. Vasi, Y. Bessler, M. Kickulies, Y. Lee, R. Linander, D. Lyngh, V. Santoro, L. Zanini, "The neutron irradiation module at the European Spallation Source ESS", *Proceedings of the 22nd Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XXII)*, 27th-31st March 2017 Oxford, UK, submitted to *J. Phys. Conf. Ser.*

## Acknowledgments

This work was supported within the CNR-STFC Agreement 2014–2020 (No. 3420 2014–2020) concerning collaboration in scientific research at ISIS Spallation Neutron Source, and the CNR In-Kind contributions to the ESS construction phase.

### Roberto Senesi

Roberto Senesi is Associate Professor in Applied Physics at the Università degli Studi di Roma "Tor Vergata". He held postdoctoral positions at the NIST Center for Neutron Research (USA) and the Rutherford Appleton Laboratory (UK). He has been involved in scientific and technical development in both large and small projects. These have encompassed working on the development, construction and operation of the VESUVIO electron Volt neutron spectrometer, ChipIR and IMAT instruments at ISIS. Currently he is responsible for the Target In-Kind Irradiation Module at the European Spallation Source.

### Giuseppe Gorini

Giuseppe Gorini is Full Professor in Experimental Physics at the Università di Milano Bicocca. He introduced a broad research line encompassing R&D in neutron and gamma spectroscopy instrumentation for plasma and material science. The instrumentation is developed for tokamak facilities (mainly JET) and neutron sources, in particular the ISIS and ESS spallation neutron sources, in collaboration with other EU teams. At present he is the coordinator of the development of instrumentation and techniques associated with the utilisation of ISIS Target Station 1 and Target Station 2 within the CNR-STFC Agreement 2014–2020 concerning collaboration in scientific research at ISIS Spallation Neutron Source.

### Carla Andreani

Carla Andreani is Full Professor in Applied Physics at the Università degli Studi di Roma "Tor Vergata". She has been involved in the design and construction of seven spectrometers at the ISIS neutron source, pioneering the use of MeV energy neutrons at spallation neutron sources to test electronic devices, leading to the construction of the Chip Irradiation (ChipIR). She is the recipient of the 2016 "Giuseppe Occhialini Prize", for her outstanding contributions to novel experimental techniques and methods in neutron spectroscopy and her tireless commitment to fostering the British-Italian collaboration in neutron science.

## RECENT ADVANCES IN SPACE RADIATION PROTECTION

**MARCO DURANTE**

*TIFPA, INFN, Università di Trento, Trento, Italy*

*Dipartimento di Fisica "Ettore Pancini", Università Federico II, Napoli, Italy*

Our planet is bombarded by galactic cosmic rays and they are a constant presence in interstellar space. Cosmic rays are a huge hurdle to successful long-haul space flights, such as a manned mission to Mars. In fact, they can cause cancer and other health complaints in exposed astronauts, and we do not yet have effective ways to shield spacecraft and their occupants. Space agencies promoted in the past 20 years research programs to quantify the risks associated to radiation exposure in space and to develop countermeasures. We will summarize the latest news derived from flight and ground-based experiments that have significantly reduced the uncertainty on the risk.

NASA/JPL-CALTECH/CORNELL/Arizona State Univ.

### 1 Introduction

While the XX century is remembered for the first human space travel, the XXI century will be characterized by the colonization of the Solar System. Current exploration programs include missions to near-Earth asteroids, the Moon (Moon Village), and Mars<sup>1</sup>. Astronauts should be prepared to remain in space for longer periods, and the recent 1-year mission on the International Space Station (ISS) is considered a stepping stone to future missions beyond low-Earth Orbit (BLEO). The question is whether the extraterrestrial space is safe enough for humans to allow colonization. Traditionally, three main risks are identified in space<sup>2</sup>:

- i) Physiological problems caused by microgravity (or reduced gravity).
- ii) Psychological and medical problems caused by isolation.
- iii) Acute and late risks caused by exposure to radiation.

The **physiological changes** due to weightlessness have been extensively studied in LEO. Bone loss, kidney stone formation, skeletal muscle mass reduction, cardiovascular alterations,

<sup>1</sup> <http://www.globalspaceexploration.org/>

<sup>2</sup> <https://humanresearchroadmap.nasa.gov/>

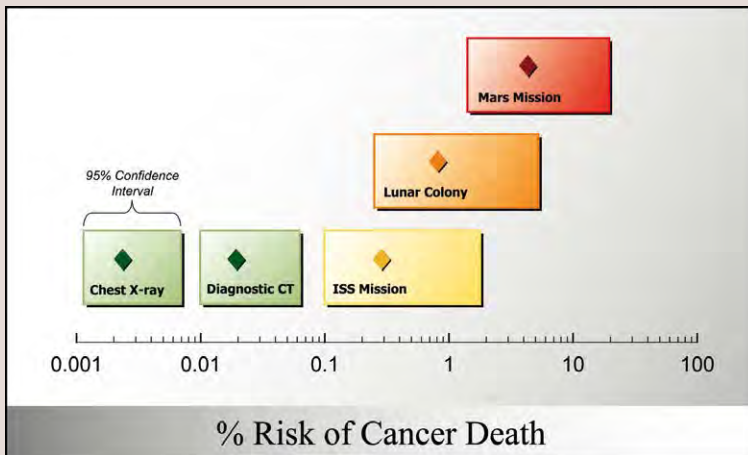


Fig. 1 Excess lifetime percentage risk of radiation-induced cancer death following different exposures. Diamonds represent the point estimates, and the rectangle base the 95% confidence interval. Figure from ref. [2], NPG group, reproduced with permission.

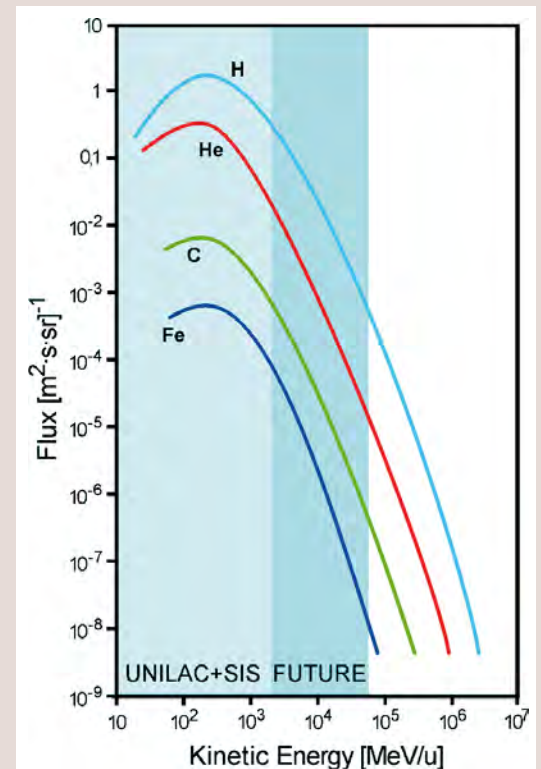


Fig. 2 Energy spectra of different ions in the GCR. The shaded areas represent the energy regions that are covered by current (light blue, e.g. NSRL at the Brookhaven National Laboratory) and future (dark blue, e.g. FAIR in Germany) ion accelerator.

impaired sensory-motor capabilities, immune system dysfunctions are among the consequences of prolonged stays in microgravity. The risks are very well characterized, and several countermeasures are available. None of these risk are rated 1 (the highest rank, corresponding to a risk that makes the mission impossible without mitigation) in the NASA Bioastronautics roadmap (see footnote <sup>2</sup>).

**Isolation** may lead to serious neurobehavioral problems caused by poor psychosocial adaptation. Several ground platforms are used to study these problems and develop countermeasures, such as the Concordia base in Antarctica and the Mars500 isolation facility in Russia. Isolation also brings the problem of autonomous medical care (AMC), *i.e.* the capability to handle sickness or accidents in complete isolation. This is a risk category 1 for the mission to Mars. Countermeasures for AMC risks are mostly technological, *i.e.* rely on the development of portable medical equipment and telemedicine.

Finally, there are the risks related to exposure to space **radiation**. Because of the complex nature of the space radiation environment [1], both acute (*i.e.* short-term risk of radiation sickness) and late (*e.g.* cancer) effects are possible. Acute radiation syndrome (ARS) can be caused by intense solar particle events (SPE) with crews unable to reach adequate shielding. Late radiation morbidity is associated to the chronic exposure to galactic cosmic radiation (GCR), which is substantially different both qualitatively and quantitatively from the Earth's radiation natural background. Because of the qualitative difference in the radiation spectrum ( $\gamma$ -,  $\beta$ - and  $\alpha$ -rays on Earth; high-energy protons and heavy ions in space), terrestrial data cannot be extrapolated to space radiation exposure scenarios. Therefore, the uncertainty in radiation risk estimates is very high, especially for carcinogenesis, central nervous system (CNS) damage, and late cardiovascular damage. Early estimates of the uncertainty on space radiation cancer mortality risk ranged



Fig. 3 The MATROSHKA phantom in January 2006, inside the ISS.

Fig. 4 The RAD instrument used to measure the radiation field on Mars. The right panel shows its position on the Curiosity rover and the acceptance cone. Images from the NASA image gallery.



from 400% to 1500%, with more precise estimates showing uncertainties at the 95% confidence level of 4-fold times the point projection (fig. 1) [2]. Moreover, countermeasures are not readily available, because space radiation is very energetic (fig. 2) and would require very heavy loads to achieve significant dose reductions within a spacecraft.

Radiation risk is therefore now generally acknowledged as the main showstopper for the human colonization of the Solar System. In the past 20 years, space agencies have invested resources in research on space radiation research, both with experiments on ISS or BLEO on radiation dosimetry and with important

ground-based radiobiology programs: the NASA Space Radiation Health Program<sup>3</sup> and the ESA Investigation on Biological Effects of Radiation (IBER) program<sup>4</sup>. Certainly the results of these experiments have substantially reduced the uncertainty compared to those present at the time of the NASA Roadmap (see footnote <sup>2</sup>). Yet, as it happens, they have also found new problems that beg for new questions. The most recent results will be summarized below.

<sup>3</sup> <https://spaceradiation.jsc.nasa.gov/>

<sup>4</sup> [https://www.gsi.de/work/forschung/biophysik/esa\\_iber.htm](https://www.gsi.de/work/forschung/biophysik/esa_iber.htm)

## 2 Dosimetry

Recent flight experiments have now largely reduced our uncertainty on the radiation dose absorbed in space.

The MATROSHKA experiment (fig. 3) [3] provided the first accurate map of the internal organ dose in LEO. Astronauts' dose is always measured with badge dosimeters, providing the skin dose. Dose to the critical organs (e.g. bone marrow, lung, gonads) is calculated using transport codes, which are affected by large uncertainties. The anthropomorphic phantom MATROSHKA, a modified phantom used in radiotherapy for quality assurance, was filled with different passive and active dosimeters and was exposed to

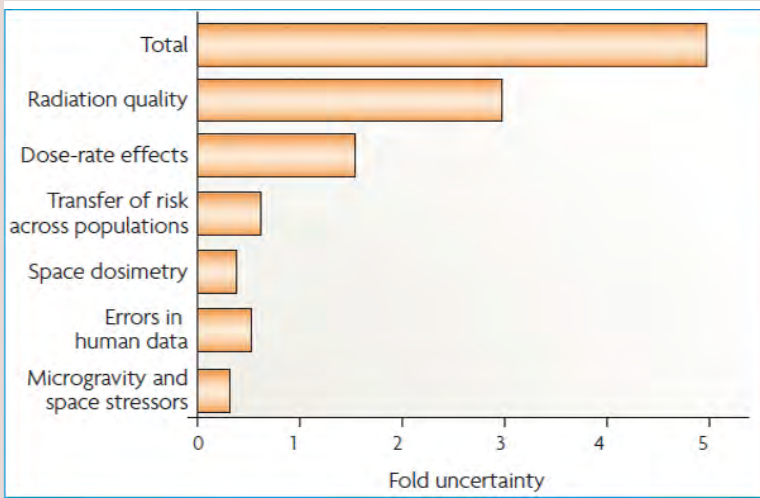


Fig. 5 Contribution to total uncertainty on radiation-induced cancer risk from different factors. Figure from ref. [2], NPG group, reproduced with permission.

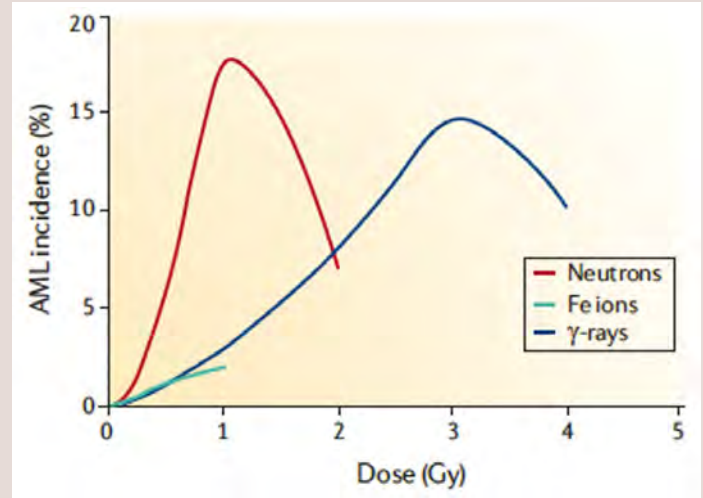


Fig. 6 Dose-response curve for the induction of acute myeloid leukemia (AML) in mice exposed to fission-spectrum neutrons, γ-rays, or 1 GeV/n Fe ions. Figure modified from the data in ref. [8].

space radiation both outside and inside the ISS. The accurate dose maps registered with the phantom were used to tune the Monte Carlo and analytical codes used to calculate the effective dose in space. Fluence to dose conversion factors for different organs have been tabulated in the most recent report of the International Commission of Radiological Protection (ICRP) on exposure in space [4].

The second major improvement comes from the measurements of the Radiation Assessment Detector (RAD) instrument on the Mars Science Laboratory (MSL), carrying the rover Curiosity (fig. 4), during the cruise to Mars [5] and on the planet's surface [6]. Measurements were accumulated around the 2012–2013 solar maximum activity, and represent the first accurate determinations of the physical dose and of

the equivalent dose in BLEO. Even though the mission was around the solar maximum period, SPE only contributed 5% to the total dose during the journey [5], perhaps because the present solar maximum is relatively weak. During solar minimum the solar magnetic field is reduced and the GCR equivalent dose rate can be up to two times higher [1]. However, the actual dose rate within the spacecraft will depend on the shielding. Based on the MSL data, we can calculate the expected doses in different Mars mission scenarios (table 1) [7]. It is interesting to see that most of the dose is incurred during cruise phase. The dose on the planet can be further reduced using bases with heavy shielding, exploiting *in situ* planetary materials.

	GCR dose rate (mGy/day)	GCR dose-equivalent rate (mSv/day)	Inspiration Mars (Sv)	Mars sortie (Sv)	Mars base (Sv)
MSL cruise [5]	0.46	1.84	0.92	0.7	0.98
MSL on Mars [6]	0.21	0.64			

Tab. 1 GCR dose in different mission scenarios based on the recent MSL measurements [5-6]. Inspiration Mars is a 501 flyby mission. Mars sortie assumes a 30-days stay on the planet, and Mars base 500 days. Both those design reference missions assume a 180 days cruise to/from Mars.

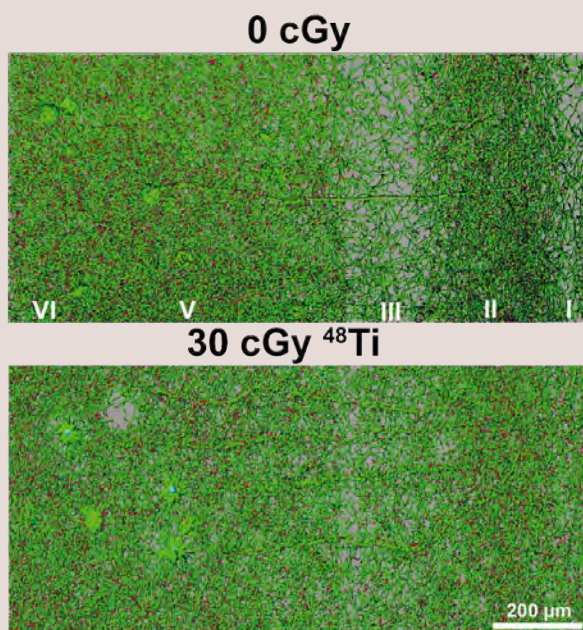


Fig. 7 Digitally reconstructed neurons from control and irradiated mice showing dendrites (green) and spines (red). Even low doses of Ti ions produce a significant reduction of dendritic branching and length after 15 weeks from exposure. Figure from ref. [9], reproduced with permission.

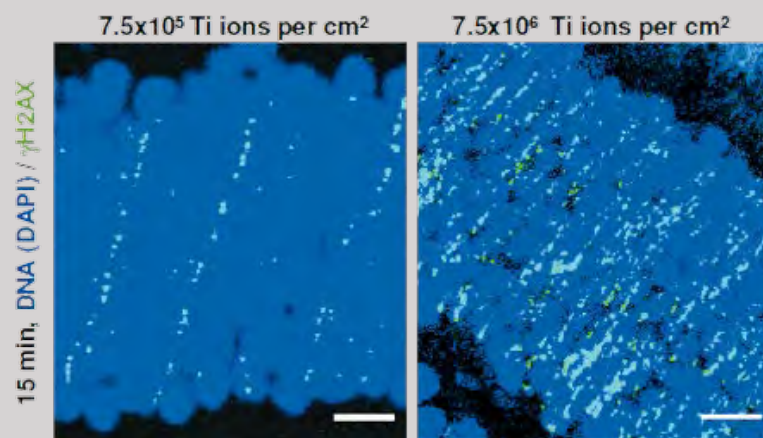


Fig. 8 Tracks of 1 GeV/n Ti ions in the mouse retina. The retina cells are painted by DAPI in blue, while tracks appear green after immunostaining of the phosphorylated histone  $\gamma$ H2AX, a marker of DNA double-strand breaks. The tissue was fixed after 15 min from the exposure to a low or high fluence of Ti ions. Bar = 5  $\mu$ m. Image from ref. [10] (supplement), reproduced with permission.

### 3 Biological effects

The health risks associated to the exposure to space radiation have been discussed in several reports and publications, and can be essentially divided into four groups:

- i) Cancer
- ii) Tissue degenerative late effects
- iii) Acute radiation syndromes
- iv) Hereditary effects

Radiation carcinogenesis has been traditionally considered the main health risk associated to radiation exposure. Dose limits for workers and astronauts are based on the cancer risk, and therefore major research efforts have been dedicated to reducing the uncertainty on cancer risk. Most of the uncertainty shown in fig. 1 is caused by the radiation quality (fig. 5). To convert physical dose (in Gy) into equivalent dose (in Sv) ICRP [4] recommends the use of an LET-dependent quality factor, but these values were notoriously affected by large uncertainties, because of the lack of epidemiological data. The organ dose equivalent  $H_T$  is calculated as [4]

$$(1) \quad H_T = \frac{1}{m} \int_m dm \int Q(L) F_T(L) L dL,$$

where  $L$  is the linear energy transfer ( $LET=dE/dx$ , normally expressed in  $keV/\mu m$ ),  $m$  the organ mass,  $F_T$  the fluence of particles through the organ  $T$  (in particles/ $cm^2$ ), and  $Q$  the LET-dependent quality factor (dimensionless).

While radiation protection on Earth has the solid epidemiological base of the A-bomb survivors' database, no

epidemiological data are available for exposure to energetic protons and high-LET heavy ions. To simulate this radiation, both NASA and ESA supported radiobiological research at high-energy accelerators: the NASA Space Laboratory (NSRL)<sup>5</sup> at the Brookhaven National Laboratory (BNL) in Upton, Long Island (NY, USA) and the SIS18 synchrotron of the GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research in Darmstadt (Hessen, Germany) (see footnote <sup>4</sup>). Animal experiments at NSRL [8] have shown that the quality factor for heavy ions is strongly dependent on the tumor (fig. 6): a high quality factor is found for some solid tumors (e.g. liver cancer) but values around unity are measured for liquid cancers (leukemia), much lower than those found for fission-spectrum neutrons. These data have certainly reduced the uncertainty on the quality factor for carcinogenesis, thus improving the estimates of the equivalent dose for long-term missions (table 1).

However, accelerator-based studies have also found significant noncancer effects induced by energetic charged particles. A major concern comes from the effects on the central nervous system (CNS), because even low doses (down to 5 cGy) of energetic heavy ions induce significant impairment in spatial, episodic and recognition memory in mice, associated to deficits in executive function and reduced rates of fear extinction and elevated anxiety. This was somehow surprising, because the brain is generally

<sup>5</sup> <http://www.bnl.gov/nsrl/>

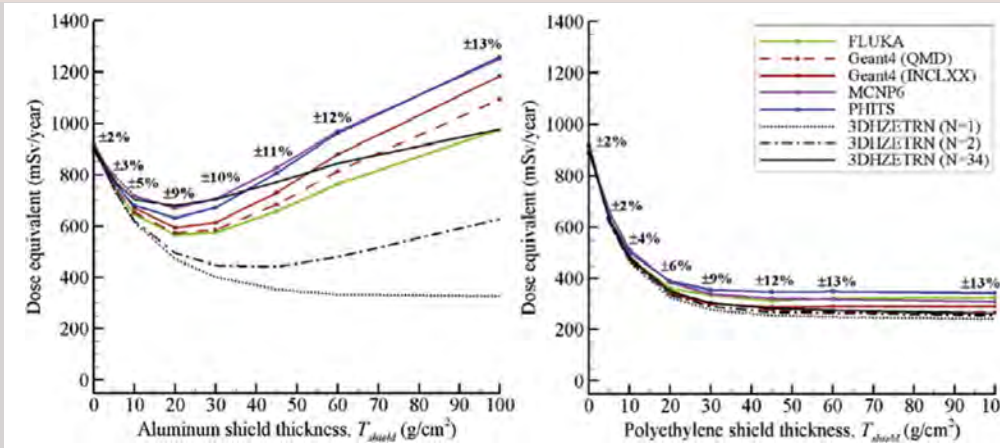
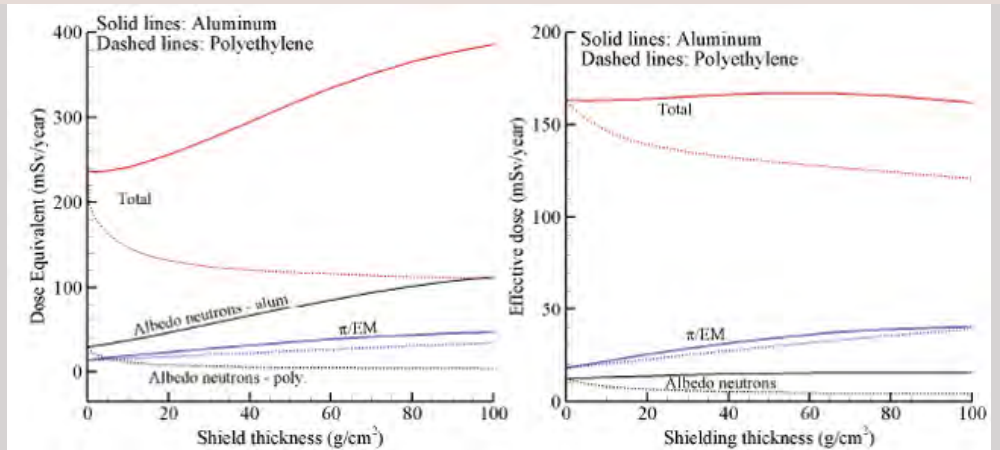


Fig. 9 Total dose equivalent, including neutrons and charged particles, from GCR as a function of shielding thickness of aluminum (left) or polyethylene (right). Different Monte Carlo codes are compared to different versions of the HZETRN NASA code. Plots from ref. [14], reproduced with permission.

Fig. 10 Dose equivalent (left panel) and effective dose (right panel) as a function of shield thickness on the Martian surface. Black lines = albedo neutrons; blu lines = pions + electrons + positrons + muons + photons; red lines = total dose, including all charged particles and neutrons. Solid lines are for Al shielding, dotted lines is polyethylene shielding. Plots from ref. [15], reproduced with permission.



considered a radioresistant organ, but is consistent with observed reductions in dendritic complexity, spine density (fig. 7) and altered spine morphology along mice medial prefrontal cortical neurons [9]. The low-dose effects are caused by the high density of energy deposition along the ion tracks, which can now be visualized in the neural tissues using immunohistochemistry [10] (fig. 8). CNS risk is therefore considered a major concern, and its uncertainty is higher than cancer.

A second **tissue late effect** has gained large importance in radiation protection: cardiovascular disease. In fact, epidemiological evidence (A-bomb survivors, Mayak workers, and radiotherapy patients) clearly show that radiation can damage the heart even at doses below 1 Gy, even if the data do not exclude a possible threshold at low doses [11]. Even if the excess relative risk per unit

dose is small, cardiovascular morbidity is the main cause of death in adults, and therefore even a small increase in risk corresponds to a high mortality. Experiments at accelerators point to an increased effectiveness of heavy ions in the induction of vascular endothelial cell dysfunction, possibly associated to an increased cardiovascular mortality among Apollo astronauts [12].

**Acute effects** are possible in case of major SPE, but the solar protons can be effectively shielded. The risk is limited to exposure during EVA, e.g. on the Moon surface. Uncertainty is related to the threshold doses for prodromal syndromes under reduced gravity. The main countermeasure is reliable space weather forecast ability. Today, SPE forecasts are still inadequate to provide advance warning with sufficient credibility to lead operators to initiate protective measures, but substantial

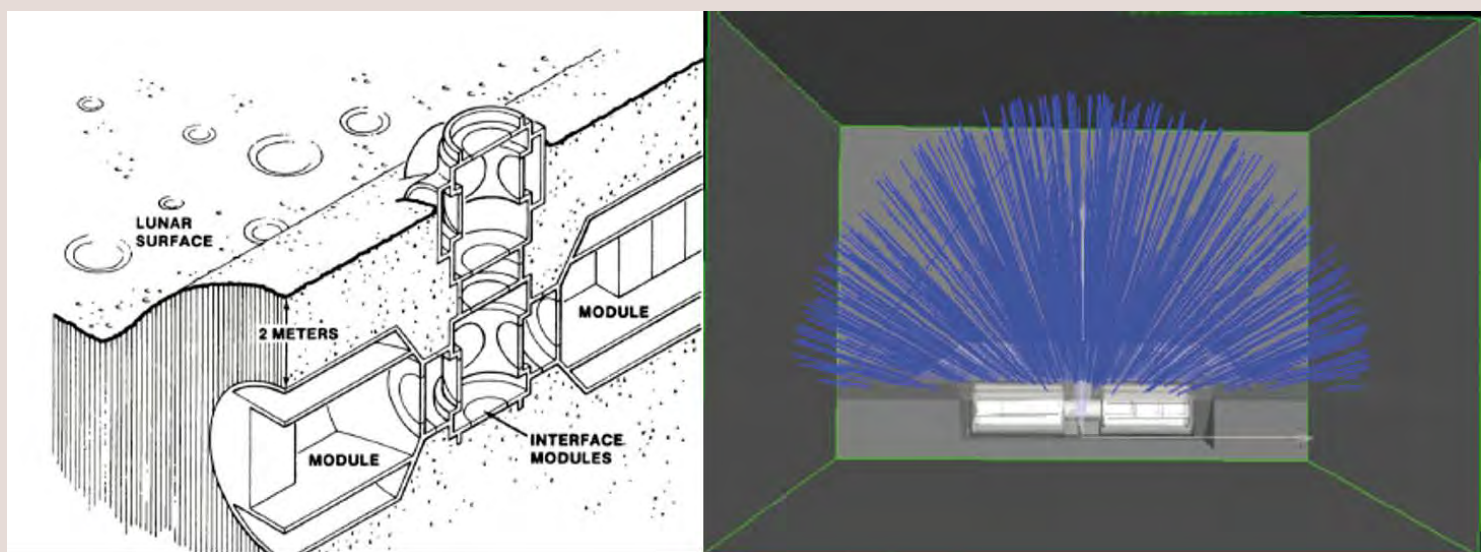


Fig. 11 Model of a sub-surface lunar base (left) and its implementation with the GEANT4 Monte Carlo code for the calculation of the radiation doses in the base (right). Courtesy of Martina Giraud, Thales Alenia Space, Turin.

improvements in understanding solar energetic particle acceleration and propagation have been accomplished in the past few years [1].

**Hereditary effects** are generally considered of minor importance, especially because there is no epidemiological evidence of transgenerational effects in humans, not even from the large A-bomb cohort [13]. Nevertheless, the relative effectiveness of protons and heavy ions for hereditary effects is still unknown and this gap in knowledge should be filled at least with accelerator-based experiments.

#### 4 Countermeasures

A fundamental tenet of radiation protection is that there are three means to reduce exposure to ionizing radiation: increasing the distance from the radiation source, reducing the exposure time, and by shielding. Distance is not an issue in space, GCR being isotropic. Time in space should be increased rather than decreased according to the plans of exploration and colonization, although reduction of the transit time to the planet, where heavy shielding can be more easily achieved, may contribute to reducing radiation exposure [7].

The problem in cosmic rays shielding derives from the physics interaction of charged particles with matter. Cosmic radiation is very energetic and produces showers of light fragments and neutrons by nuclear fragmentation when hitting the shields. Both electromagnetic energy loss (Bethe-Bloch formula) and nuclear fragmentation cross-sections per unit mass decrease by increasing the target atomic number  $A$  [1]. Therefore, light, highly hydrogenated materials are more

effective per unit mass in decreasing the dose than heavy, high- $Z$  materials such as Al (common structural material in the spacecraft) or Pb (generally used for shielding radiation sources on Earth). This prediction has been confirmed in many accelerator-based tests and in tests on the ISS using polyethylene and water (reviewed in [7]).

Shielding calculations are performed using analytical (such as the NASA HZETRN code) or Monte Carlo (GEANT4, FLUKA, PHITS) codes. The prediction of the codes have some substantial differences, due to the different physics models used and to the lack of reliable cross-sections for the fragmentation of several ions at high energy [1]. Predictions of different codes for the dose equivalent in free space as a function of different thickness of Al and polyethylene are shown in fig. 9 [14]. Apart from clear significant inter-code differences, the plot shows a peculiar minimum around 20 g/cm<sup>2</sup> Al-shielding, and the equivalent dose tends to increase for thicker shields. This paradoxical result is caused by the generation of neutrons, whose high quality factor eventually increases the dose equivalent behind the shield. This effect is not seen when light shielding materials are used, yet all codes predict saturation for high thickness, suggesting that there will be no gain in heavier shelters.

The situation will be similar for a planetary base (fig. 10) [15] where, however, the thickness of the shield can be increased >100 g/cm<sup>2</sup> using *in situ* resources (fig. 11) or placing the bases in deep, underground caves. As water is an effective shielding material, one interesting option would be to cover an inflatable base with a shell of ice, which could be extracted from Mars (fig. 12). The Mars ice home (or igloo house) would be nearly transparent, hence allowing natural light inside



Fig. 12 Artist's view of the Mars ice house.  
Image from the NASA image gallery.

compared to the dark sub-surface modules (fig. 11) or the deep caves.

Another approach to improve shielding would be the use of specially designed spacesuits filled with highly hydrogenated materials. This can be water, or more sophisticated light fibers, which can be modeled on every crewmember individual body and made thicker in correspondence of the most sensitive organs (e.g. breast or gonads). This is the concept of the AstroRad space vest (fig. 13), developed by the Stemrad<sup>6</sup> company and that will be tested on a phantom in the next Orion mission on the Moon.

Biomedical countermeasures would be ideal for reducing the effects of space radiation. Unfortunately, at present radioprotectors have low effectiveness, or are too toxic for use in space [16]. The only radioprotective drug used in clinics to mitigate the side effects of radiotherapy in the head-and-neck region is amifostine (marketed by Clinigen as Ethyol) an organic thiophosphate effective in free radical

scavenging. However, amifostine has severe side effects, including vomiting and diarrhea, preventing its use in astronauts. Dietary antioxidants are beneficial in reducing long-term radiation effects, but their effectiveness is limited [2]. Research in the field is very active, and several new drugs and molecules have been tested. New molecules selected in US within the homeland security program are also under test for protection of radiotherapy patients and possibly astronauts.

### 5 Dose limits

The significant advancements in knowledge of the past years should be reflected in a revision of the dose limits for the astronauts. This actually happened at NASA, where a careful gender- and age-specific risk model is used [17]. The model calculates the risk of exposure-induced death (REID) and its associated uncertainty based on the calculated equivalent organ doses. The dose limits are set to maintain the individual astronaut's REID <3% within a 95% confidence interval.

<sup>6</sup><http://stemrad.com/>



Fig. 13 Women wear prototype of the AstroRad radiation vest produced by the Stemrad company. Photo courtesy of Stemrad, Ltd., Tel Aviv, Israel.

The most recent version of the model [18] includes the cardiovascular disease mortality in addition to cancer. The model is complex and highly dependent on the inputs from scientific experiments. The other space agencies prefer more pragmatic approaches for dose limits, often based on extrapolation of the maximum annual dose for radiation workers on Earth to a full career [19]. A summary of the dose limits is provided in table 2. Certainly these limits should be

made more uniform among the different agencies. There is a general consensus on the ALARA (as-low-as-reasonably-achievable) principle also for space activities, but an agreement on the dose limits would be desirable. The current level of knowledge seems to be sufficient to grant a science-based limit for interplanetary missions, and this value is needed for the design of countermeasures, such as the shield thickness.

Space agency	Gender	Age at first exposure			
		25	35	45	55
NASA (USA)	Female	0.4	0.6	0.9	1.7
	Male	0.7	1.0	1.5	3.0
JAXA (Japan)	Female	0.6	0.8	0.9	1.1
	Male	0.6	0.9	1.0	1.2
ESA (Europe)		1.0	1.0	1.0	1.0
RSA (Russia)		1.0	1.0	1.0	1.0
CSA (Canada)		1.0	1.0	1.0	1.0

Tab. 2 Age- and gender-dependent career effective dose limits (in Sv) as recommended by different space agencies. Adapted from ref. [19].

## 6 Conclusions

We learned a lot in the past decade about the radiation risk in space. Flight measurements have largely increased our knowledge of the exposure in LEO and BLEO. Accelerator-based experiments have reduced the uncertainty on the biological effects of cosmic rays, but they also unexpectedly

showed that noncancer endpoints (CNS and cardiovascular) could be even more harmful than carcinogenesis for crews of interplanetary missions. The development of countermeasures, both physical and biomedical, remains indispensable for a safe human space exploration.

### References

- [1] M. Durante and F. A. Cucinotta, "Physical basis of radiation protection in space travel", *Rev. Mod. Phys.*, 83 (2011) 1245.
- [2] M. Durante and F. A. Cucinotta, "Heavy ion carcinogenesis and human space exploration", *Nat. Rev. Cancer*, 8 (2008) 465.
- [3] T. Berger et al., "The MATROSHKA experiment: results and comparison from extravehicular activity (MTR-1) and intravehicular activity (MTR-2A/2B) exposure", *Radiat. Res.*, 180 (2013) 622.
- [4] ICRP, "Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space". ICRP Publication 123, *Ann. ICRP*, 42 (2013).
- [5] C. Zeitlin et al., "Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory", *Science*, 340 (2013) 1080.
- [6] D.M. Hassler et al., "Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover", *Science*, 343 (2014) 1244797.
- [7] M. Durante "Space radiation protection: destination Mars", *Life Sci. Space Res.*, 1 (2014) 2.
- [8] M.M. Weil et al., "Effects of  $^{28}\text{Si}$  ions,  $^{56}\text{Fe}$  ions, and protons on the induction of murine acute myeloid leukemia and hepatocellular carcinoma", *PLoS One.*, 9 (2014) e104819.
- [9] V.K. Parihar et al., "Cosmic radiation exposure and persistent cognitive dysfunction", *Sci. Rep.*, 6 (2016) 34774.
- [10] J. Mirsch et al., "Direct measurement of the 3-dimensional DNA lesion distribution induced by energetic charged particles in a mouse model tissue", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 112 (2015) 12396.
- [11] M.P. Little, "Radiation and circulatory disease", *Mutat. Res.*, 770(B), (2016) 299.
- [12] M.D. Delp et al., "Apollo Lunar astronauts show higher cardiovascular disease mortality: possible deep space radiation effects on the vascular endothelium", *Sci. Rep.*, 6 (2016) 29901.
- [13] E. J. Grant et al., "Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study", *Lancet Oncol.*, 16 (2015) 1316.
- [14] T. C. Slaba et al., "Optimal shielding thickness for galactic cosmic ray environments", *Life Sci. Space Res.*, 12 (2017) 1.
- [15] T. C. Slaba et al., "Radiation Shielding Optimization on Mars". NASA-TP-2013-217983, NASA Langley, Hampton, VA.
- [16] A. R. Kennedy, "Biological effects of space radiation and development of effective countermeasures", *Life Sci. Space Res.*, 1 (2014) 10.
- [17] F. A. Cucinotta and L.J. Chappell, "Updates to astronaut radiation limits: radiation risks for never-smokers", *Radiat. Res.*, 176 (2011) 102.
- [18] F. A. Cucinotta et al., "How safe is safe enough? Radiation risk for a human mission to Mars", *PLoS One.*, 8 (2013) e74988.
- [19] S. McKenna-Lawlor, "Feasibility study of astronaut standardized career dose limits in LEO and the outlook for BLEO", *Acta Astronaut.*, 104 (2014) 565.

### Marco Durante

Marco Durante was appointed as the Director of the Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (TIFPA), of the Italian National Institute for Nuclear Physics (INFN), in April 2015. He previously served as Director of the Biophysics Department at GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research (Darmstadt, Germany) since 2007. He is also Professor of Physics at the University of Naples Federico II in Italy, Adjunct Professor at the Temple University in Philadelphia (USA) and at the Gunma College of Medicine in Japan. Marco Durante got his Ph.D. in physics in 1992 and has dedicated his research efforts to the biophysics of high-energy charged particles, with applications in cancer therapy and space radiation protection. He is currently Chair of the ESA Life Sciences Advisory Group and of the ESA Topical Team on Space Radiation, and Vice-Chair of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG). He has been awarded several prizes for his contributions to charged-particle biophysics, including the 60th Timofeeff-Ressovsky Medal, the 8th Warren K. Sinclair Award, the 2013 IBA-Europhysics Award for Applied Nuclear Science and Nuclear Methods in Medicine (European Physical Society) and the 2013 Bacq & Alexander Award of the European Radiation Research Society (ERRS).

## CRESCITA EPITASSIALE VAN DER WAALS PER MEMORIE A CAMBIAMENTO DI FASE

EUGENIO ZALLO, RAFFAELLA CALARCO

*Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlino, Germania*

I materiali a cambiamento di fase riscuotono enorme successo a livello tecnologico nel campo delle memorie non volatili allo stato solido. Le loro straordinarie proprietà nascono da complessi meccanismi microscopici che sono stati analizzati attraverso diverse tecniche di caratterizzazione. La recente realizzazione epitassiale di film ultra sottili a base di calcogenuri ha contribuito alla comprensione della struttura cristallina e rappresenta un passo fondamentale per lo sviluppo di dispositivi ancora più efficienti in un futuro sempre più prossimo.

### 1 I materiali del futuro

L'ottimizzazione nella sintesi dei materiali è senza dubbio alla base della realizzazione di tecnologie innovative in grado di affrontare le grandi sfide della società contemporanea. Soffermandosi sulla storia della fisica dei semiconduttori, si capisce che i maggiori successi sono stati spesso compiuti grazie alla disponibilità di materiali di elevata qualità cristallina. Un esempio calzante è la microelettronica, che non sarebbe esistita senza il silicio (Si) ultra puro. E che dire dell'effetto Hall quantistico che ha portato Klaus von Klitzing a vincere il premio Nobel per la fisica nel 1985? Non c'è alcun dubbio che la scoperta di quest'ultimo è strettamente legata alle raffinate strutture ad alta mobilità di portatori costituite da transistor a effetto di campo a base di Si e di eterogiunzioni di semiconduttori dei gruppi III-V della tavola periodica.

Le sfide tecnologiche presenti e future, come la produzione d'energia sostenibile o le apparecchiature compatibili con l'ambiente, richiedono dunque lo sviluppo di materiali avanzati. A tal proposito, una nuova categoria di materiali cristallini ultra sottili sta avendo un enorme successo nella fisica della materia condensata. Questi cristalli sono sia a base di carbonio, come il grafene, che della famiglia dei calcogenuri, comprendendo alcuni tipi di ossidi o elementi calcogeni come lo zolfo (S), il selenio (Se) e il tellurio (Te). Essi mostrano una straordinaria varietà di proprietà e molte di queste possono addirittura coesistere (multi funzionalità)

in un singolo materiale. I cristalli sottili sono anche detti bidimensionali (2D) perché, sebbene gli atomi contenuti in un singolo piano risentano di legami covalenti, i piani atomici sono debolmente legati tra loro attraverso forze di van der Waals (vdW) e di conseguenza possono essere resi termodinamicamente stabili piuttosto facilmente a livello del singolo piano o di suoi multipli. Una delle metodologie utilizzate in maggior misura per questo scopo è l'esfoliazione chimica o meccanica, la quale però non permette la deposizione del materiale su vasta scala, necessaria per l'implementazione industriale. In quest'ottica, molti ricercatori sono quindi impegnati nella sfida della fabbricazione dei materiali 2D utilizzando tecniche differenti. Un metodo particolarmente conveniente è quello della deposizione epitassiale che sfrutta la disposizione ordinata di un piano atomico sopra l'altro. Nel caso specifico si parla di epitassia di vdW che ha il vantaggio di poter essere estesa a un gran numero di materiali 2D combinandoli anche tra di loro. Questo aspetto permette di realizzare dispositivi innovativi a base di semiconduttori artificiali grazie a fenomeni e proprietà inaspettate dei cristalli 2D, come la possibilità di cambiare la "band gap", la mobilità e le costanti dielettriche al variare dello spessore.

Nel seguito ci occuperemo solo di una particolare famiglia di calcogenuri che nella sua fase cristallina stabile si presenta in blocchi di piani atomici legati tramite forze di vdW: il gruppo  $(IV-VI)_x-(V_2-VI_3)_{1-x}$ .

## 2 Proprietà di cambiamento di fase dei calcogenuri $(IV-VI)_x-(V_2-VI_3)_{1-x}$

I calcogenuri  $(IV-VI)_x-(V_2-VI_3)_{1-x}$  sono anche chiamati materiali a cambiamento di fase ("phase change materials", PCM), proprio per la proprietà di cambiare fase tra quella amorfa e quella cristallina reversibilmente [1], come esemplificato in fig. 1 per le leghe di germanio (Ge), antimonio (Sb) e tellurio (GST). La grande differenza nella riflettività ottica e resistività elettrica tra i due stati e una cinetica di cambiamento di fase ultraveloce li rendono assolutamente adatti per applicazioni tecnologiche come le memorie ad accesso casuale ("phase change random access memory", PCRAM) con buone prestazioni di durata [2] e i dispositivi optoelettronici [3].

In ambedue i casi è possibile passare in modo reversibile dalla fase amorfa a quella cristallina trasferendo calore al materiale per mezzo di impulsi laser o riscaldamento Joule. La fase amorfa (stato RESET), in particolare, è ottenuta tramite la fusione del cristallo e il suo raffreddamento veloce mentre una temperatura più bassa, seppur superiore a quella di cristallizzazione, permette al materiale di transire dallo stato amorfo a quello cristallino (stato SET) fino a ristabilirne l'ordine a lunga distanza.

Negli ultimi anni i PCM sono stati utilizzati anche

come elementi di memorie fotoniche [4] e ancora più sorprendentemente per emulare le funzioni neurali per lo sviluppo della computazione neuromorfa [5].

## 3 Struttura cristallina delle leghe GST

La struttura cristallina delle leghe GST consiste di due fasi metastabili e una stabile, come mostrato nello schema in fig. 1.

La prima fase metastabile è caratterizzata da una struttura di tipo salgemma (cubico ordinato), appartenente al gruppo spaziale  $Fm\bar{3}m$ , dove Te occupa il sottoreticolo dell'anione mentre Ge, Sb e un numero importante di vacanze (fino al 33%) occupano casualmente il sottoreticolo del catione [6]. Questo a causa della sfavorevole tendenza delle vacanze a livello energetico ad organizzarsi in strati [7]. La fig. 1 (vedi cubico ordinato) mostra un esempio di strato di vacanze quasi completamente ordinato, che è tipico della seconda fase metastabile, con gli atomi di Te posizionati vicino agli strati delle vacanze e la presenza di alcuni atomi di Ge/Sb tra i piani intermedi. Inoltre, la distanza tra due strati consecutivi di vacanze varia tra 7, 9 e 11 piani atomici a seconda della composizione della lega [8].

La transizione tra le due fasi metastabili e quella stabile

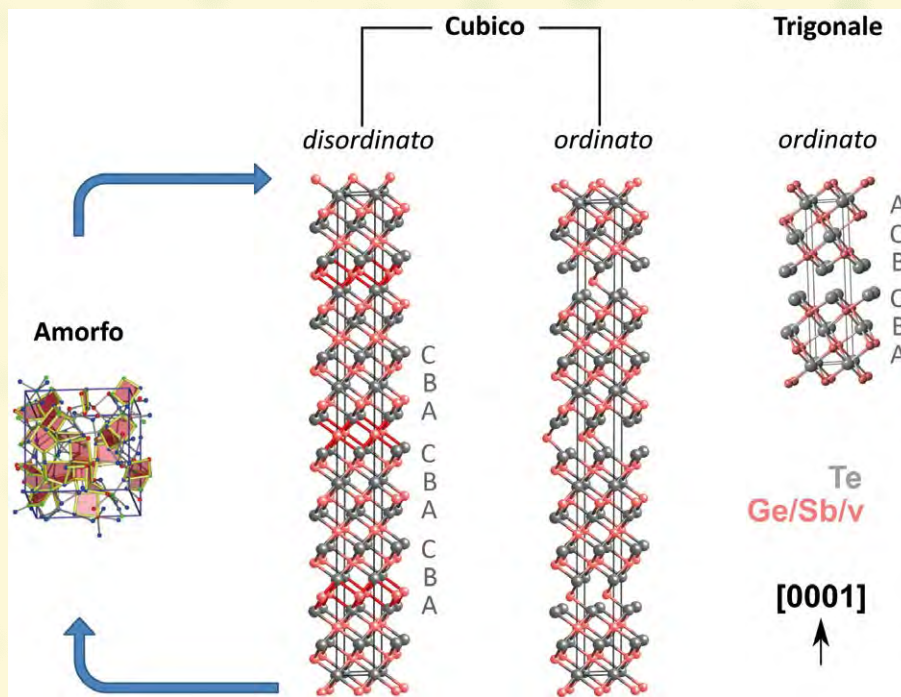


Fig. 1 Schema della struttura cristallina del  $Ge_2Sb_2Te_5$  (GST225) amorfo, cristallino cubico disordinato, cristallino cubico ordinato e cristallino trigonale ordinato. I corrispondenti impilamenti cubico e romboedrico sono riportati a lato. Il cambiamento di fase reversibile da amorfo a cristallino è evidenziato dalle frecce blu. Figura adattata da ref. [1] con il permesso di Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, © 2008.

trigonale non è improvvisa ma graduale: le vacanze si ordinano sui piani dei cationi fino a formare gli strati di interazione vdW. Questi ultimi saranno denominati d'ora in poi regioni "vdW gap" e vanno distinti dagli strati di vacanze sopra riportati proprio a causa della diversa forza d'interazione, molto più debole per legami vdW che non nel caso delle vacanze [9]. A seguito della transizione gli atomi si muovono lungo le due direzioni verticale e orizzontale rendendo i piani reticolari non più paralleli tra di loro.

La fase stabile del GST (vedi trigonale ordinato della fig. 1), invece, appartiene al gruppo di simmetria  $P\bar{3}m1$  ed è molto simile a quella stabile di un'altra lega,  $Sb_2Te_3$ , a causa della presenza delle regioni "vdW gap". Essa è basata su un impilamento di piani impacchettati compatti di tipo *abc* (o romboedrici) con la caratteristica essenziale di avere piani di Te impacchettati compatti adiacenti, dove le forze dominanti sono di tipo vdW [10]. In un primo periodo si era creduto che i sottoreticoli di Ge e Sb nella fase stabile fossero completamente ordinati e formassero l'impilamento di tipo Petrov [11] o Kooi [12] (dal nome dei ricercatori che hanno descritto i possibili modelli per fasi ordinate). Tuttavia, Matsunaga *et al.* hanno mostrato che c'è ancora del disordine nel sottoreticolo Ge/Sb [6].

#### 4 Crescita epitassiale delle leghe GST

Una tecnica di deposizione utilizzata per la crescita epitassiale su larga scala delle leghe GST è l'epitassia da fasci molecolari ("molecular beam epitaxy", MBE). I tre elementi costituenti (Ge, Sb e Te) sono evaporati sul substrato attraverso tre celle di effusione indipendenti. Le condizioni di ultra alto vuoto ( $P \sim 10^{-10}$  mbar) e la lenta velocità di deposizione ( $<1$  nm/min) permettono un accurato controllo della deposizione. Gli elementi arrivano sulla superficie come Ge,  $Sb_4$  e  $Te_2$  in sovrappressione di  $Te_2$  e la composizione è controllata variando il rapporto Ge/ $Sb_4$ . Oltre ai flussi, un parametro fondamentale per la deposizione MBE è la temperatura del substrato che influisce sulla velocità dei vari processi cinetici dato che l'equilibrio termodinamico locale avviene su una scala di tempi molto più breve. L'intervallo termico ottimale per la crescita epitassiale di questi materiali è 250–270 °C poiché a temperature più alte si ha il desorbimento del GST. Una temperatura di crescita sotto ai 180 °C rende il materiale GST policristallino mentre a temperature ancora più basse si ottiene GST amorfo [13].

La prima dimostrazione della crescita epitassiale del GST è stata effettuata da Braun *et al.* [13] su substrati di GaSb (001), sfruttando il piccolo disadattamento reticolare rispetto al GST cubico. La qualità cristallina, tuttavia, non era soddisfacente.

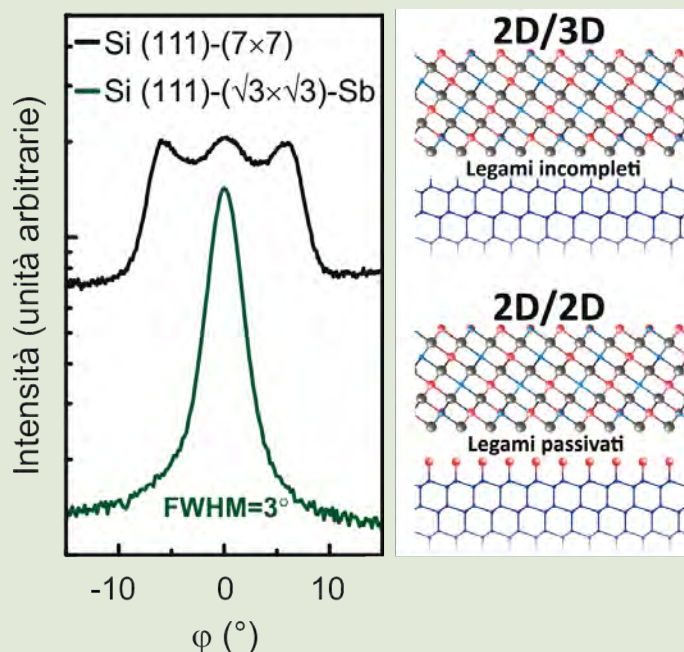


Fig. 2 Sinistra: Diffrazione dei raggi X (XRD, scansione  $\phi$ ) attorno al picco di diffrazione GST (01.13) per un film cresciuto da epitassia da fasci molecolari (MBE) su Si (111)-(7x7) (curva nera) e su Si (111)- $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$  passivato con Sb (curva verde). Figura adattata con il permesso da ref. [15] Boschker *et al.*, *Nano Lett.*, 14 (2014) 3534, Surface reconstruction-induced coincidence lattice formation between two-dimensionally bonded materials and a three-dimensionally bonded substrate, © (2014) American Chemical Society. Destra: Corrispondenti strutture cristalline all'interfaccia tra lo strato epitassiale di GST e il substrato di Si (111).

In seguito, sebbene i substrati di Si orientati (001) presentino vantaggi per l'integrazione nella piattaforma industriale, quelli orientati (111) si sono rivelati più adatti per la deposizione epitassiale a causa della tendenza delle vacanze nel GST metastabile ad ordinarsi nei piani {111}.

Nonostante il grande disadattamento reticolare tra Si e GST (11%) è stato possibile crescere GST con una buona qualità cristallina grazie ad un'unica relazione epitassiale lungo la direzione di crescita. Infatti, la presenza di interazione debole tra il substrato (gli atomi del Si sono legati covalentemente in 3D) e il film di GST (materiale 2D) [14] nella crescita del GST sulla superficie ricostruita Si (111)-(7x7) permette di avere una coincidenza del passo reticolare [15]. Tuttavia, da analisi di diffrazione dei raggi X ("X-ray diffraction", XRD) nel piano del substrato (scansione  $\varphi$ ) si vedono diversi domini epitassiali ruotati (vedi curva nera in fig. 2) che corrispondono alla superficie ricostruita Si (111)-(7x7) piuttosto che alla superficie non ricostruita Si (111)-(1x1), come nel caso della crescita di materiali 3D. Questa forma di coincidenza epitassiale a domini è piuttosto inconsueta e rappresenta un tratto distintivo di un materiale 2D.

Un grande passo in avanti nella realizzazione dell'epitassia 2D con materiali calcogenuri (IV-VI)<sub>x</sub>-(V<sub>2</sub>-VI<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> è stato ottenuto attraverso la passivazione dei substrati di Si (111). Infatti, se il GST è cresciuto sulla superficie ricostruita Si (111)-( $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ )R30° passivata con Sb, i legami chimici incompleti sono passivati e i domini epitassiali ruotati in piano soppressi [15] (vedi il confronto in fig. 2). Come risultato si ha una crescita epitassiale quasi vdW (2D/2D). Questo avviene anche nel caso del Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, un altro materiale 2D caratterizzato dall'impilamento di cinque strati legati tra di loro da forze di vdW (vedi la sezione "Superreticoli come memorie"). L'immagine di una lega GST epitassiale cresciuta su Si (111) passivato con Sb, ottenuta attraverso un tipo di microscopia elettronica a scansione in trasmissione ("high-angle annular dark-field imaging", HAADF-STEM), è mostrata in fig. 3. Gli strati di vacanze sono visibili principalmente ogni 7 (Ge<sub>1</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> o GST124) e 9 (GST225) piani atomici; gli strati più chiari rappresentano gli atomi di Te mentre quelli che mostrano una modulazione di intensità indicano l'occupazione mista Ge/Sb. È interessante notare il livello di ordine delle vacanze sia nel caso dell'impilamento cubico

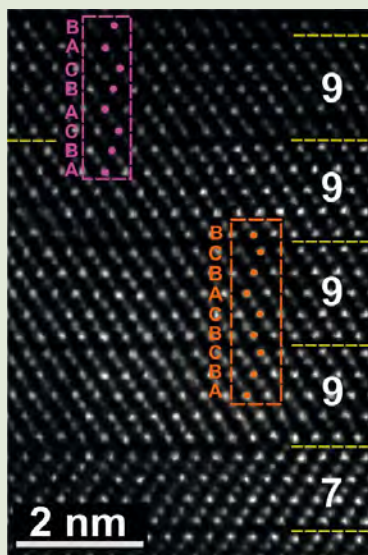


Fig. 3 Micrografia da microscopia elettronica a scansione in trasmissione ("High-Angle Annular Dark Field Scanning Transmission Electron Microscopy", HAADF-STEM) del GST epitassiale (00.1) cresciuto su Si (111) passivato con Sb. Gli strati di vacanze (linee tratteggiate gialle) sono presenti ogni 7-9 piani atomici. Gli impilamenti cubico (magenta) e romboedrico (arancione) rispetto al sottoreticolo di Te sono evidenziati. Figura adattata da ref. [8] con il permesso di Macmillan Publishers Ltd: Sci. Rep., © 2016.

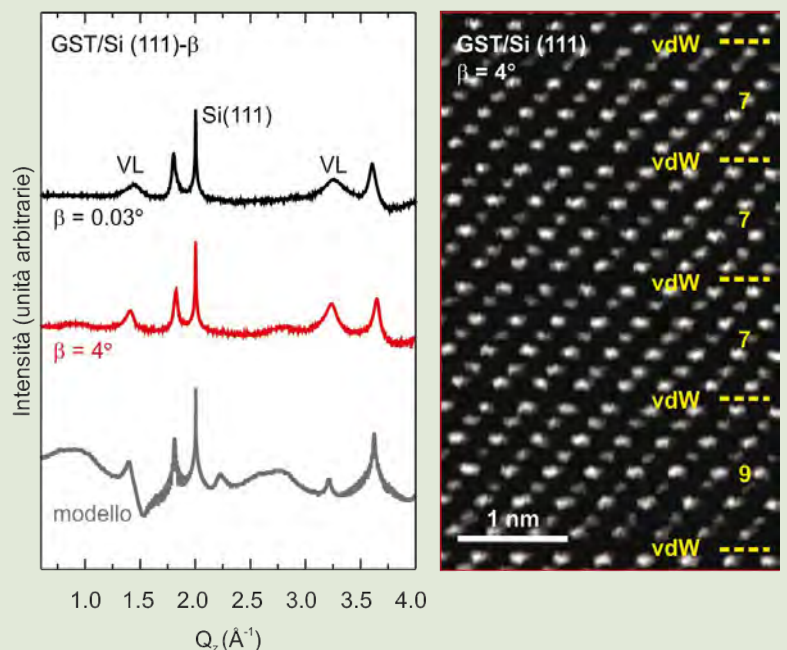


Fig. 4 Sinistra: XRD (scansione  $\omega$ -2 $\theta$ ) del GST cristallino cresciuto su Si (111) con orientazione fuori asse ( $\beta$ ) di 0.03° (curva nera) e 4° (curva rossa). La curva grigia è la simulazione del GST cresciuto su substrato con  $\beta > 0.03^\circ$ . Destra: Micrografia trasversale [11-20] ad alta risoluzione HAADF-STEM di GST (00.1) epitassiale cresciuto su Si (111) con  $\beta = 4^\circ$ . Figura adattata da ref. [18] con il permesso di Macmillan Publishers Ltd: Sci. Rep., © 2017.

(rettangolo magenta) che di quello romboedrico (rettangolo arancione) dato dal diverso grado di svuotamento dei piani di Ge/Sb. In conclusione, l'utilizzo della passivazione e un'attenta calibrazione dei flussi e della temperatura di crescita hanno permesso di dimostrare la realizzazione di GST di elevata qualità cristallina [8].

## 5 Modulazione tra le epitassie classica e van der Waals

I materiali 2D offrono enormi possibilità per la realizzazione di nuove eterostrutture grazie al disaccoppiamento tra il substrato e gli strati legati da forze di vdW. In particolare, abbiamo appena visto come il film epitassiale cresce completamente rilassato senza dover considerare le condizioni di disadattamento reticolare all'interfaccia. Ci sono casi, però, nei quali l'interazione tra il substrato e lo strato epitassiale può essere utile. È noto che deformazioni tensili o compressive modificano la struttura cristallina e variano le proprietà dei materiali, come ad esempio il controllo del "tunneling" elettronico in molecole di punti quantici [16] o dell'intervallo energetico tra le bande nel MoS<sub>2</sub> [17]. Nel caso dell'epitassia classica, tuttavia, una volta raggiunto uno spessore critico, la deformazione accumulata nello strato epitassiale per effetto del disadattamento reticolare con il substrato rilassa plasticamente con la formazione di dislocazioni.

Sfruttando le proprietà 2D del GST e crescendo su substrati di Si (111) con un'orientazione fuori asse ( $\beta$ ) di 3–4° e passivati con Sb, Zallo *et al.* [18] hanno dimostrato la modulazione tra le due crescite epitassiali vdW e classica riuscendo a mantenere un'elevata qualità strutturale del cristallo. Il pannello a sinistra della *fig. 4* mostra la XRD (scansione  $\omega$ -2 $\theta$ ) dei film di GST225 cresciuti su substrati senza ( $\beta = 0.03^\circ$ ) e con un'orientazione fuori asse di 4°. Nel primo caso (curva nera) lo spettro mostra la perfetta crescita del film lungo la direzione (111) (picchi a  $Q_z = 1.8$  e  $3.61 \text{ \AA}^{-1}$ ) con l'interessante presenza di picchi aggiuntivi che rappresentano le riflessioni di Bragg degli strati di vacanze (VL). Queste ultime permettono di quantificare il livello di ordine della struttura cristallina (vedi la sezione "Transizione metallo-isolante"). La loro maggiore larghezza di linea (FWHM) è data dalla variazione nella composizione dei blocchi di GST. Quello che succede, invece, quando il GST225 viene cresciuto su Si (111) con  $\beta = 4^\circ$  è molto interessante (curva rossa). Innanzitutto si nota che il disordine strutturale diminuisce, come indicato dai picchi delle vacanze più stretti, e il GST si riconfigura con una composizione non più puramente GST225 ma con un rapporto di composizione GST225/GST124 = 0.6, come confermato da calcoli computazionali del tipo Monte Carlo (curva grigia). La pendenza del substrato facilita così la configurazione del GST124 che è quella più favorevole a

livello energetico. Analisi STEM (pannello a destra in *fig. 4*), inoltre, rivelano l'ottima qualità epitassiale con strati scuri dati dalle regioni "vdW gap" ed evidenziano un impilamento degli atomi di Te di tipo romboedrico.

L'analisi "rocking curve" della XRD (scansione  $\omega$  attorno al picco GST (00.15), non mostrata) ha permesso poi di ricavare informazioni sull'orientazione fuori dal piano del film rispetto al substrato, se cioè lo strato epitassiale cresce inclinato o no [18]. Grazie a questo studio è stato possibile scoprire l'effetto più importante del substrato sulla crescita epitassiale di tipo vdW. I campioni con ( $\beta = 4^\circ$ ) e senza ( $\beta = 0.03^\circ$ ) orientazione fuori asse sono eccitati in due configurazioni, a seconda della direzione dei raggi X rispetto alle terrazze e i gradini definiti dal substrato: quando i raggi X sono paralleli al gradino del Si ([1-10]) gli spettri sono simili e dimostrano una crescita fuori dal piano orientata come il substrato mentre nel caso in cui i raggi X sono ortogonali al piano del gradino ([-211]) il film cresciuto sul substrato con  $\beta = 4^\circ$  è inclinato di 0.4°. Lo stesso tipo di analisi su substrati con  $\beta = 3^\circ$  e  $6^\circ$  e il confronto con il modello proposto da Nagai [19] mostrano un perfetto accordo tra dati sperimentali e teorici. Dato che il suddetto modello è valido per la crescita pseudomorfa (distorsione del reticolo per adattarsi al parametro reticolare del substrato sottostante) su substrati che possiedono orientazione fuori asse e bassa densità di difetti all'interfaccia, questo risultato dimostra che in realtà esiste interazione tra film e substrato e che la deformazione influenza la crescita con un disadattamento reticolare fuori dal piano del 10%. Per questo tipo di deposizione è necessario modificare il modello considerando una crescita di tipo classico con un forte accoppiamento del materiale epitassiale ai gradini (l'epitassia sulle terrazze è di tipo vdW a causa della passivazione) mentre muovendosi lontano dall'interfaccia la crescita è puramente vdW.

## 6 Transizione metallo-isolante

Lo studio del trasporto dei portatori di carica è sempre stato uno strumento fondamentale per la caratterizzazione dei solidi. La resistenza delle fasi amorfe e salgemma differisce di diversi ordini di grandezza, per la precisione la fase salgemma è semiconduttrice e la transizione allo stato metallico corrisponde a quella nella struttura trigonale stabile [8, 20]. In aggiunta alla trasformazione di fase da amorfo a cristallino, alcuni risultati sperimentali ottenuti su GST policristallino hanno evidenziato una transizione metallo-isolante ("metal insulator transition", MIT) attribuita al disordine [20] a seguito della variazione di temperatura del materiale.

Il valore della resistività nel limite di temperatura  $T = 0 \text{ K}$  permette di distinguere due classi di solidi: i metalli con resistività finita e gli isolanti con valori divergenti. Per spiegare

la MIT due fisici teorici hanno proposto dei meccanismi distinti di localizzazione dei portatori di carica, che portano il loro nome. Mott pone l'accento sul ruolo delle correlazioni quando l'energia d'interazione degli elettroni supera l'energia di Fermi ( $E_F$ ). Anderson mostra che il comportamento isolante è da attribuire piuttosto al forte disordine che può localizzare gli stati elettronici all'energia  $E_F$ . I semiconduttori drogati così come le leghe metalliche e gli ossidi di metalli di transizione sono caratterizzati da tutte e due i tipi di localizzazioni. Nel caso dei PCM, invece, sono presenti un grande numero di difetti intrinseci e la MIT è attribuita solo alla loro disposizione nel cristallo [7]. Infatti, calcoli *ab initio* hanno dimostrato che il comportamento isolante è causato dalla localizzazione degli stati elettronici attorno ai gruppi di vacanze casualmente distribuite nel sottoreticolo Ge/Sb, mentre la transizione allo stato metallico non è dovuta al cambiamento di struttura da salgemma a trigonale ma ad un graduale ordinamento delle vacanze che ne riduce il posizionamento casuale.

Il controllo del livello di disordine nello stato cristallino può essere fondamentale per la realizzazione di PCRAM a multilivelli di stati resistivi, utilizzando la localizzazione indotta dal disordine. Si può quindi definire un parametro d'ordine che varia da 0 per la fase metastabile a 1 per quella con le vacanze completamente ordinate (regione "vdW gap") e la formazione della fase trigonale. Come dimostrato da Bragaglia *et al.* [8], questo livello d'ordine può essere

modificato attraverso la scelta dei parametri di crescita nel caso della deposizione MBE o della temperatura di ricottura del GST amorfo per la cristallizzazione.

Il grafico della resistività nel piano ( $\rho$ ) in funzione della temperatura ( $T$ ) per campioni ottenuti con diversi metodi di fabbricazione mostra che la disposizione ordinata in strati delle vacanze e la formazione di regioni "vdW gap" riduce la resistività del film (vedi fig. 5). Nel caso del GST amorfo ricotto a 110 °C per 10 min (quadrati gialli), il campione è cristallino ma gli strati delle vacanze non sono ordinati e la pendenza della curva  $\rho$  vs.  $T$  è negativa, caratteristica tipica di un isolante. Al contrario, il GST amorfo ricotto a 170 °C per 1 ora (quadrati rossi), il GST altamente ordinato (quadrati blu chiaro), cresciuto attraverso MBE con impilamento cubico e romboedrico, e il GST trigonale (quadrati marroni), ottenuto dalla ricottura del GST amorfo a 270 °C per 1 ora, mostrano una pendenza della curva  $\rho$  vs.  $T$  positiva, tipica di un metallo. In aggiunta, la resistività diminuisce nei tre casi proporzionalmente all'aumento dell'ordine delle vacanze.

Questo risultato è confermato anche dall'analisi dei picchi XRD (non mostrati), dove il rapporto delle intensità tra il picco delle vacanze ( $I_{VLP}$ ) e il picco del GST ( $I_{GST}$ ) permette di stimare il livello d'ordine del cristallo [8]. In particolare, nel caso del campione isolante  $I_{VLP}/I_{GST} = 0$  mentre per i campioni metallici  $I_{VLP}/I_{GST} = 0.01, 0.45, 1$ , rispettivamente.

È importante aggiungere che la crescita epitassiale

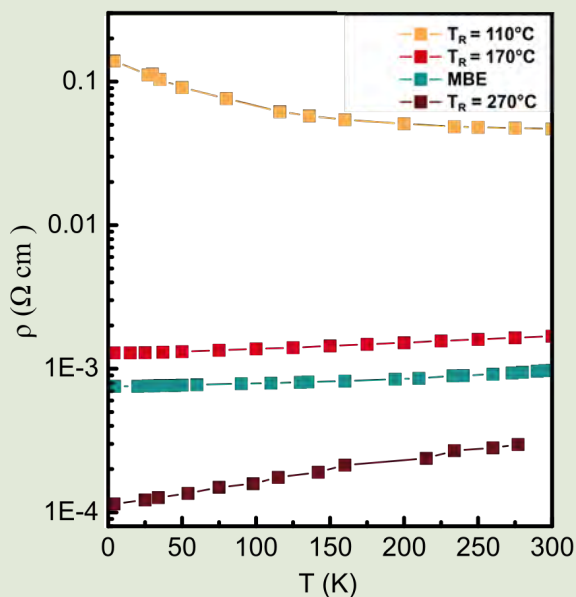


Fig. 5 Resistività ( $\rho$ ) in funzione della temperatura ( $T$ ) per campioni cristallini di GST ricotti a  $T_R$  di 110 °C (quadrati gialli), 170 °C (quadrati rossi), 270 °C (quadrati marroni) e cresciuti altamente ordinati con MBE (quadrati blu chiaro). Per gentile concessione di Valeria Bragaglia.

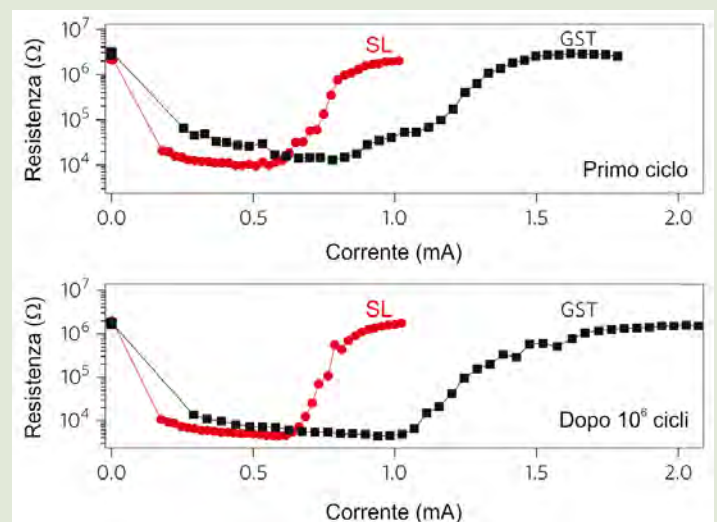


Fig. 6 Grafico della resistenza in funzione della corrente per dispositivi PCRAM dopo un ciclo (pannello in alto) e dopo  $10^6$  cicli (pannello in basso). I quadrati pieni si riferiscono ai dispositivi a base di GST e i cerchi pieni a quelli contenenti superreticoli (SL). Figura adattata da ref. [22] con il permesso di Macmillan Publishers Ltd: Nat. Nanotechnol., © 2011.

dei calcogenuri permette di variare la resistività di un fattore molto più grande. Infatti, confrontando i valori da singolo cristallo ottenuti in questa analisi con quelli da GST policristallino [20] si vede che questi ultimi hanno un valore di resistività sistematicamente più alto e che il campione cresciuto epitassialmente ha lo stesso valore di quello esagonale policristallino.

Inoltre, a conferma della MIT di tipo Anderson, sono stati realizzati esperimenti di spettroscopia Raman e nell'infrarosso lontano su campioni GST e la MIT è stata misurata all'inizio della transizione tra le fasi cubiche disordinata e ordinata [21].

## 7 Superreticoli come memorie

Facciamo adesso un salto in avanti nello sviluppo delle PCRAM. Nonostante il GST sia ancora il materiale tecnologicamente più utilizzato, è stato recentemente dimostrato che PCRAM costituite da superreticoli ("superlattice", SL) di strati alternati di GeTe e  $Sb_2Te_3$  permettono di migliorare le prestazioni a livello di consumo, velocità e durata [22], come è descritto dal grafico resistenza-corrente di fig. 6 per il SL (cerchi pieni) e il GST (quadrati pieni). Per esempio, la corrente per il cambiamento reversibile di fase tra stato ad alta resistenza (stato RESET) e stato a bassa resistenza (stato SET) per il SL è molto più bassa di quella richiesta per un dispositivo a base di GST. In aggiunta,

nel caso del SL il cambiamento SET-RESET è repentino e la ciclabilità o durata della memoria è più di un ordine di grandezza superiore rispetto alle memorie PCM tradizionali. Questo miglioramento è stato attribuito alla diminuzione dell'entropia configurazionale tra gli stati SET e RESET. È stato inoltre ipotizzato che il cambiamento reversibile di fase avvenga nello stato cristallino senza raggiungere la temperatura di fusione tipica della fase amorfa.

A questo punto è importante descrivere brevemente le caratteristiche delle due leghe che costituiscono il SL. La lega  $Sb_2Te_3$  appartiene al gruppo spaziale  $R\bar{3}m$ , ha una fase amorfa non stabile ed è legata risonantemente nella sua fase cristallina [23] con la formazione di regioni "vdW gap" ogni cinque strati. Inoltre, possiede buone proprietà termoelettriche a causa dell'alta anisotropia della conduttività termica per la presenza delle regioni "vdW gap". Il GeTe è un materiale 3D che mostra legami covalenti nella fase amorfa e due fasi cristalline quali la cubica ( $\beta$ -GeTe) ad alta temperatura (720 °C) e la romboedrica ( $\alpha$ -GeTe) a temperature più basse. Oltre ad avere proprietà termoelettriche, ferroelettriche e di cambiamento di fase, è stato recentemente dimostrato che il materiale massivo possiede bande Rashba con una separazione energetica di "spin" che è importante per la realizzazione di dispositivi spintronici [24].

## 8 Crescita dei superreticoli

Vediamo ora come sono realizzati i SL epitassiali. Si inizia, come nel caso del GST, con la passivazione con Sb del Si (111) che si ricostruisce formando la superficie  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ . I SL sono cresciuti a temperature di 230–250 °C impilando le due leghe  $Sb_2Te_3$  e GeTe e sfruttando le proprietà 2D dello strato di  $Sb_2Te_3$ . La cella del Te è lasciata aperta durante tutta la deposizione mentre le celle di Sb e Ge vengono alternativamente aperte e chiuse in modo da ottenere la periodicità scelta.

La tecnica MBE permette di controllare le interfacce in modo preciso e pulito, come dimostrano le singole orientazioni in piano e fuori dal piano del cristallo [25] e l'immagine HAADF-STEM di fig. 7 per un SL formato da 15 successioni di blocchi da 3 nm di  $Sb_2Te_3$  e 1 nm di GeTe [26]. Partendo dal basso si vede il substrato di Si che è scuro per il contrasto dato dal numero atomico. La passivazione è testimoniata dal primo strato atomico brillante sopra il substrato mentre le linee scure orizzontali rappresentano le regioni "vdW gap" (legami Te-Te). L'immagine mostra anche dei difetti di impilamento ma le "vdW-gap" sono ben definite ed estese a sottolineare la superiore qualità della crescita MBE strato per strato rispetto alle altre tecniche di deposizione. La periodicità è indicata dalle frecce sulla sinistra ed è ottenuta tenendo presente che il Ge ha un numero atomico diverso rispetto a Sb e Te, che invece sono simili, e che  $Sb_2Te_3$

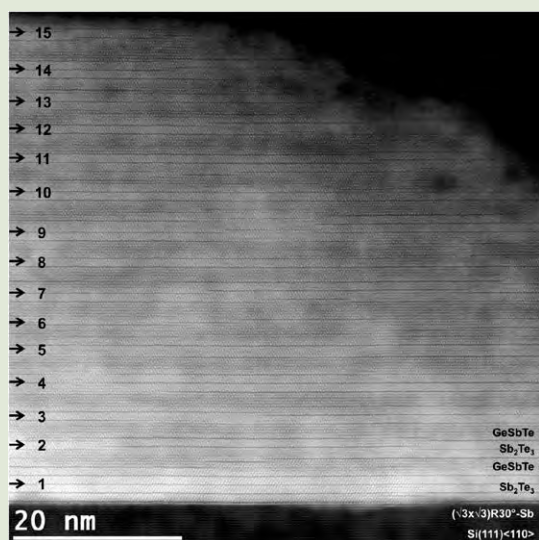


Fig. 7 Immagine HAADF-STEM di un SL cresciuto con MBE e formato da 15 blocchi di  $Sb_2Te_3$  (3 nm) e GeTe (1 nm). Figura riprodotta da ref. [26] Momand *et al.*, Interface formation of two- and three-dimensionally bonded materials in the case of GeTe– $Sb_2Te_3$  superlattices, *Nanoscale* 7 (2015) 19136, © (2015) Royal Society of Chemistry.

è un materiale 2D. Un'informazione importante che si ricava da questa immagine è che lo strato di GeTe reagisce con  $Sb_2Te_3$  e interdiffonde formando una struttura finale di 2 nm di  $Sb_2Te_3$  e 2 nm di GST romboedrico. Un'altra conclusione dell'esperienza è che il SL si trasforma in GST trigonale a seguito della ricottura [26]. Lo studio microscopico ha così dimostrato che il SL è un'eterostruttura vdW caratterizzata dall'alternarsi di due materiali 2D partendo da uno 2D ( $Sb_2Te_3$ ) e uno 3D (GeTe).

Il livello di interdiffusione di Ge e Sb vicino ai piani atomici di Te in prossimità delle regioni "vdW gap" è stato descritto nel lavoro di Wang *et al.* [25] con un efficace modello (vedi fig. 8). La deposizione di GeTe inizia su due strati di  $Sb_2Te_3$ . Non appena il GeTe arriva sulla superficie si può legare direttamente al blocco di  $Sb_2Te_3$  (nonostante la passivazione della superficie vdW), su difetti o su strati di  $Sb_2Te_3$  che non sono completi. A questo punto la superficie è terminata con il Te (più stabile di quella terminata con il Ge) e si forma il GST con il Ge che è al centro dei blocchi, ovvero nella posizione energeticamente favorevole come riportato da Da Silva *et al.* [10]. A causa del fattore termico di Boltzmann e del gradiente

di concentrazione, gli atomi di Ge lasciano spazio a quelli di Sb scambiandosi la posizione e atomi di Sb si spostano verso la superficie. Questo schema si ripete durante la crescita del GeTe portando alla formazione del GST al posto del GeTe. Il GST, come materiale 2D, sarà quindi in grado di ospitare  $Sb_2Te_3$  formando dei legami deboli di tipo vdW.

Nello stesso studio è stata realizzata anche la configurazione inversa in cui il primo strato del SL è costituito da GeTe. Nonostante l'inferiore qualità del SL e le interfacce più rugose a causa della crescita 3D del GeTe su substrato, è stato possibile dimostrare, in uno studio separato, che si può indurre una trasformazione strutturale irreversibile del SL in GST ordinato attraverso l'utilizzo di luce laser come risultato di un'interazione elettronica piuttosto che termica [27]. Il contributo elettronico, misurato anche nelle memorie elettriche a base di GST amorfo [28], potrà aiutare a spiegare il meccanismo di cambiamento di fase che è ancora argomento di intenso dibattito nella comunità dei PCM.

Finora abbiamo visto quanto il ruolo dell'interfaccia e l'ordine siano importanti per la comprensione dei PCM a base di SL. La riduzione dell'interdiffusione del Ge nello

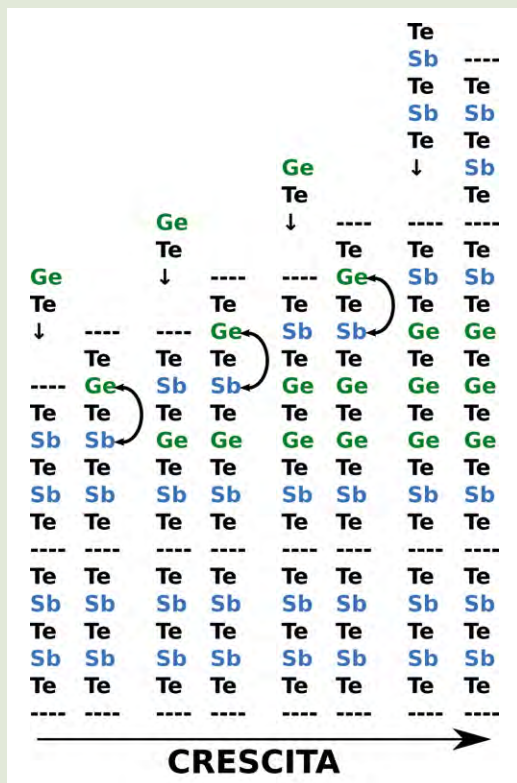


Fig. 8 Rappresentazione schematica della formazione del GST nella struttura SL durante la deposizione di GeTe e  $Sb_2Te_3$ . Figura adattata con il permesso da ref. [25], Wang *et al.*, Intermixing during epitaxial growth of van der Waals bonded nominal GeTe/ $Sb_2Te_3$  superlattices, *Cryst. Growth Des.* 16 (2016) 3596, © (2016) American Chemical Society.

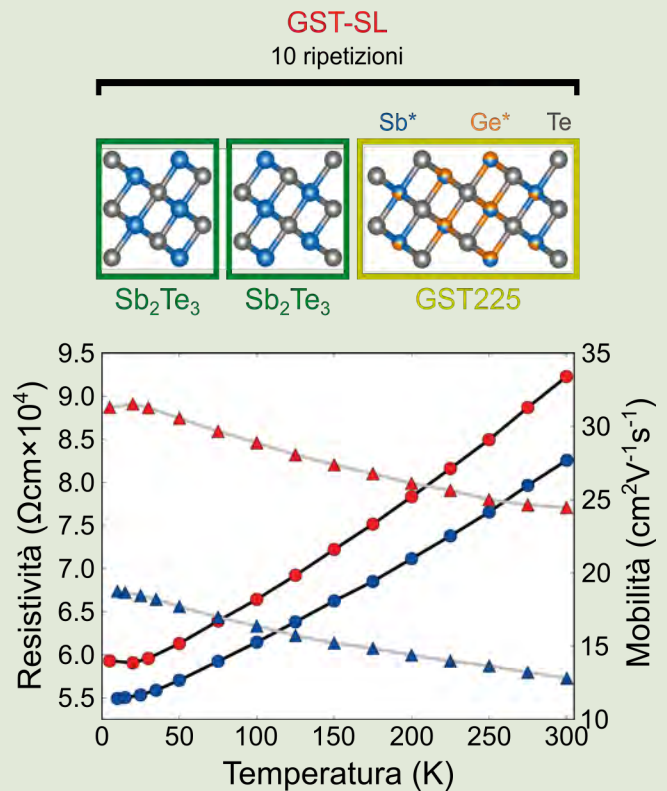


Fig. 9 Sopra: Schema della struttura nominale del SL a base di GST. Sotto: Resistività laterale in funzione della temperatura (linee nere e cerchi) e mobilità (linee grigie e triangoli) per strutture SL a base di GeTe (blu) e a base di GST (rosso). Figura adattata con il permesso da ref. [29] Cecchi *et al.*, Improved structural and electrical properties in native  $Sb_2Te_3/Ge_xSb_{2-x}Te_{3+x}$  van der Waals superlattices due to intermixing mitigation, *APL Mater.* 5 (2017) 26107, © (2017) AIP Publishing.

strato di  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  permetterebbe di ottenere un sistema più definito in termini di contrasto all'interfaccia e un SL di migliore qualità cristallina. Cecchi *et al.* [29] hanno quindi cresciuto intenzionalmente GST nel SL alternandolo al  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Il campione utilizzato consiste di 10 blocchi di  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (2 nm) e GST225 (3.7 nm) cresciuti su superfici di Si (111) passivate con Sb (vedi il pannello in alto di fig. 9). L'ottimizzazione della crescita è sicuramente più semplice, poiché entrambi i costituenti sono di tipo vdW e il disordine creato dal gradiente di composizione può essere controllato. In questo modo la qualità strutturale risulta migliorata rispetto ai SL a base di GeTe con un minore numero di difetti, maggiore ordine verticale e interfacce ben definite. In aggiunta, altri vantaggi sono riportati nel pannello in basso di fig. 9, dove la resistività e la mobilità dei portatori di carica dei due tipi di SL a base di GeTe e GST (punti blu e rossi, rispettivamente) sono state misurate in funzione della temperatura. Entrambi i campioni sono caratterizzati da un chiaro comportamento metallico poiché sia  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  che GST presentano un livello di ordine delle vacanze ma la resistività dei SL a base di GST è leggermente più alta. È importante notare la diminuzione della mobilità all'aumentare della temperatura. In particolare, il SL a base di GST ha una mobilità due volte più grande rispetto a quello a base di GeTe (linee grigie e triangoli). Allo stesso tempo la concentrazione dei portatori di carica è maggiore nel secondo. Questa differenza è stata spiegata con il fatto che la crescita intenzionale di strati di GST nel SL fa diminuire il numero di difetti di impilamento aumentando la mobilità e diminuendo il numero di portatori intrinseci (le vacanze).

Uno studio recente di spettroscopia EXAFS ("Extended-X-ray Absorption Fine Structure", un tipo di spettroscopia di assorbimento dei raggi-X) e STEM [30] ha permesso di fare luce sulla struttura atomica del SL all'interfaccia tra le due leghe di  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (3 nm) e di GeTe (1 nm). Sono state

misurate, infatti, delle peculiarità del SL che svolgono un ruolo importante nel funzionamento delle memorie, come le distorsioni del reticolo, gli spostamenti delle regioni "vdW gap" e l'interdiffusione del Ge e Sb. Questi risultati mostrano che il meccanismo di cambiamento di fase nei SL formati da  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  e GeTe è molto più complicato di alcuni modelli proposti [31] e che ulteriori sforzi sono necessari in futuro.

## 9 Conclusioni

In questo articolo abbiamo passato in rassegna i recenti risultati sulla crescita epitassiale dei PCM. Questa tipologia di deposizione ha permesso di far luce sulla loro struttura cristallina ordinata, di scoprire interessanti modalità di crescita dei film sottili attraverso l'utilizzo di substrati specifici che aprono la strada ad applicazioni innovative e di verificare una serie di fenomeni fisici, come ad esempio la transizione metallo-isolante, che prima erano stati analizzati solo teoricamente. Inoltre, l'accurato controllo dello spessore e della composizione dei materiali ha dato vita ad uno nuovo tipo di PCM a base di superreticoli che sta rivoluzionando il campo delle memorie di calcogenuri, la cui strada maestra sarà la comprensione del meccanismo di cambiamento di fase.

## Ringraziamenti

Si ringrazia V. Bragaglia per la gentile concessione di parte delle figure 1 e 2 e della figura 5. Il lavoro è stato finanziato dal "Leibniz Gemeinschaft" all'interno della "Leibniz Competition" su un progetto intitolato: "Epitaxial phase change superlattices designed for investigation of non-thermal switching". Vorremmo ringraziare tutte le persone del PDI Berlin che hanno contribuito allo sviluppo del campo dei PCM e C. Sinito per la lettura critica dell'articolo.

## Bibliografia

- [1] J. Hegedus, S. R. Elliott, "Microscopic Origin of the Fast Crystallization Ability of Ge-Sb-Te Phase-Change Memory Materials", *Nat. Mater.*, 7 (2008) 399. doi:10.1038/nmat2157.
- [2] A. Pirovano, A. Redaelli, F. Pellizzer, F. Ottogalli, M. Tosi, D. Ielmini, A.L. Lacaita, R. Bez, "Reliability Study of Phase-Change Nonvolatile Memories", *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, 4 (2004) 422.
- [3] P. Hosseini, C. D. Wright, H. Bhaskaran, "An Optoelectronic Framework Enabled by Low-Dimensional Phase-Change Films", *Nature*, 511 (2014) 206. doi:10.1038/nature13487.
- [4] C. Ríos, M. Stegmaier, P. Hosseini, D. Wang, T. Scherer, C. D. Wright, H. Bhaskaran, W.H.P. Pernice, "Integrated All-Photonic Non-Volatile Multi-Level Memory", *Nat. Photon.*, 9 (2015) 725. doi:10.1038/nphoton.2015.182.
- [5] T. Tuma, A. Pantazi, M. Le Gallo, A. Sebastian, E. Eleftheriou, "Stochastic Phase-Change Neurons", *Nat. Nanotechnol.*, 11 (2016) 693. doi:10.1038/nnano.2016.70.
- [6] T. Matsunaga, N. Yamada, Y. Kubota, "Structures of Stable and Metastable  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , an Intermetallic Compound in GeTe- $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  Pseudobinary Systems", *Acta Crystallogr.*, B 60 (2004) 685. doi:10.1107/S0108768104022906.
- [7] W. Zhang, A. Thiess, P. Zalden, R. Zeller, P.H. Dederichs, J.-Y. Raty, M. Wuttig, S. Blügel, R. Mazzarello, "Role of Vacancies in Metal-Insulator Transitions of Crystalline Phase-Change Materials", *Nat. Mater.*, 11 (2012) 952. doi:10.1038/nmat3456.
- [8] V. Bragaglia, F. Arciprete, W. Zhang, A. M. Mio, E. Zallo, K. Perumal, A. Giussani, S. Cecchi, J. E. Boschker, H. Riechert, S. Privitera, E. Rimini, R. Mazzarello, R. Calarco, "Metal-Insulator Transition Driven by Vacancy Ordering in GeSbTe Phase Change Materials", *Sci. Rep.*, 6 (2016) 23843. doi:10.1038/srep23843.

- [9] U. Ross, A. Lotnyk, E. Thelander, B. Rauschenbach, "Direct Imaging of Crystal Structure and Defects in Metastable  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  by Quantitative Aberration-Corrected Scanning Transmission Electron Microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, 104 (2014) 121904. doi: 10.1063/1.4869471.
- [10] J. Da Silva, A. Walsh, H. Lee, "Insights into the Structure of the Stable and Metastable  $(\text{GeTe})_m(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_n$  Compounds", *Phys. Rev. B.*, 78 (2008) 224111. doi:10.1103/PhysRevB.78.224111.
- [11] I. I. Petrov, R. M. Imamov, Z. G. Pinsker, "Electron-Diffraction Determination of the Structures of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and  $\text{GeSb}_4\text{Te}_7$ ", *Sov. Phys. - Crystallogr.*, 13 (1968) 339.
- [12] B.J. Kooi, J.T.M. De Hosson, "Electron Diffraction and High-Resolution Transmission Electron Microscopy of the High Temperature Crystal Structures of  $\text{Ge}_x\text{Sb}_2\text{Te}_{(3+x)}$  ( $x=1,2,3$ ) Phase Change Material", *J. Appl. Phys.*, 92 (2002) 3584. doi: 10.1063/1.1502915.
- [13] W. Braun, R. Shayduk, T. Flissikowski, M. Ramsteiner, H.T. Grahn, H. Riechert, P. Fons, A. Kolobov, "Epitaxy of Ge-Sb-Te Phase-Change Memory Alloys", *Appl. Phys. Lett.*, 94 (2009) 41902. doi: 10.1063/1.3072615.
- [14] A. Koma, Van der Waals "Epitaxy—a New Epitaxial Growth Method for a Highly Lattice-Mismatched System", *Thin Solid Films*, 216 (1992) 72. doi: 10.1016/0040-6090(92)90872-9.
- [15] J. E. Boschker, J. Momand, V. Bragaglia, R. Wang, K. Perumal, A. Giussani, B.J. Kooi, H. Riechert, R. Calarco, "Surface Reconstruction-Induced Coincidence Lattice Formation Between Two-Dimensionally Bonded Materials and a Three-Dimensionally Bonded Substrate", *Nano Lett.*, 14 (2014) 3534. doi: 10.1021/nl5011492.
- [16] E. Zallo, R. Trotta, V. Křápek, Y.H. Huo, P. Atkinson, F. Ding, T. Šikola, A. Rastelli, O.G. Schmidt, "Strain-Induced Active Tuning of the Coherent Tunneling in Quantum Dot Molecules", *Phys. Rev. B.*, 89 (2014) 241303. doi: 10.1103/PhysRevB.89.241303.
- [17] A. Castellanos-Gomez, R. Roldán, E. Cappelluti, M. Buscema, F. Guinea, H.S.J. Van Der Zant, G.A. Steele, "Local Strain Engineering in Atomically Thin  $\text{MoS}_2$ ", *Nano Lett.*, 13 (2013) 5361. doi: 10.1021/nl402875m.
- [18] E. Zallo, S. Cecchi, J. E. Boschker, A. M. Mio, F. Arciprete, S. Privitera, R. Calarco, "Modulation of van der Waals and Classical Epitaxy Induced by Strain at the Si Step Edges in  $\text{GeSbTe}$  Alloys", *Sci. Rep.*, 7 (2017) 1466. doi: 10.1038/s41598-017-01502-z.
- [19] H. Nagai, "Structure of Vapor-Deposited  $\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  Crystals", *J. Appl. Phys.*, 45 (1974) 3789. doi:10.1063/1.1663861.
- [20] T. Siegrist, P. Jost, H. Volker, M. Woda, P. Merkelbach, C. Schlockermann, M. Wuttig, "Disorder-Induced Localization in Crystalline Phase-Change Materials", *Nat. Mater.*, 10 (2011) 202. doi: 10.1038/nmat2934.
- [21] V. Bragaglia, K. Holldack, J.E. Boschker, F. Arciprete, E. Zallo, T. Flissikowski, R. Calarco, "Far-Infrared and Raman Spectroscopy Investigation of Phonon Modes in Amorphous and Crystalline Epitaxial  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  Alloys", *Sci. Rep.*, 6 (2016) 28560. doi: 10.1038/srep28560.
- [22] R.E. Simpson, P. Fons, A.V. Kolobov, T. Fukaya, M. Krbal, T. Yagi, J. Tominaga, "Interfacial Phase-Change Memory", *Nat. Nanotechnol.*, 6 (2011) 501. doi: 10.1038/nnano.2011.96.
- [23] K. Shportko, S. Kremers, M. Woda, D. Lencer, J. Robertson, M. Wuttig, "Resonant Bonding in Crystalline Phase-Change Materials", *Nat. Mater.*, 7 (2008) 653. doi: 10.1038/nmat2226.
- [24] M. Liebmann, C. Rinaldi, D. Di Sante, J. Kellner, C. Pauly, R.N. Wang, J.E. Boschker, A. Giussani, S. Bertoli, M. Cantoni, L. Baldrati, M. Asa, I. Vobornik, G. Panaccione, D. Marchenko, J. Sánchez-Barriga, O. Rader, R. Calarco, S. Picozzi, R. Bertacco, M. Morgenstern, "Giant Rashba-type Spin Splitting in Ferroelectric  $\text{GeTe}(111)$ ", *Adv. Mater.*, 28 (2016) 560. doi: 10.1002/adma.201503459.
- [25] R. Wang, V. Bragaglia, J.E. Boschker, R. Calarco, "Intermixing during Epitaxial Growth of van der Waals Bonded Nominal  $\text{GeTe/Sb}_2\text{Te}_3$  Superlattices", *Crystal Growth Des.*, 16 (2016) 3596. doi: 10.1021/acs.cgd.5b01714.
- [26] J. Momand, R. Wang, J.E. Boschker, M.A. Verheijen, R. Calarco, B.J. Kooi, "Interface Formation of Two- and Three-Dimensionally Bonded Materials in the case of  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  Superlattices", *Nanoscale*, 7 (2015) 19136. doi: 10.1039/C5NR04530D.
- [27] E. Zallo, R. Wang, V. Bragaglia, R. Calarco, "Laser Induced Structural Transformation in Chalcogenide based Superlattices", *Appl. Phys. Lett.*, 108 (2016) 221904. doi: 10.1063/1.4953158.
- [28] A. Redaelli, A. Pirovano, F. Pellizzer, A.L. Lacaita, D. Ielmini, R. Bez, "Electronic Switching Effect and Phase-Change Transition in Chalcogenide Materials", *IEEE Electron Device Lett.*, 25 (2004) 684. doi: 10.1109/LED.2004.836032.
- [29] S. Cecchi, E. Zallo, J. Momand, R. Wang, B.J. Kooi, M.A. Verheijen, R. Calarco, "Improved Structural and Electrical Properties in Native  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Ge}_x\text{Sb}_2\text{Te}_{3+x}$  van der Waals Superlattices due to Intermixing Mitigation", *APL Mater.*, 5 (2017) 26107. doi: 10.1063/1.4976828.
- [30] B. Casarin, A. Caretta, J. Momand, B.J. Kooi, M.A. Verheijen, V. Bragaglia, R. Calarco, M. Chukalina, X. Yu, J. Robertson, F.R.L. Lange, M. Wuttig, A. Redaelli, E. Varesi, F. Parmigiani, M. Malvestuto, "Revisiting the Local Structure in Ge-Sb-Te based Chalcogenide Superlattices", *Sci. Rep.*, 6 (2016) 22353. doi: 10.1038/srep22353.
- [31] X. Yu, J. Robertson, "Modeling of Switching Mechanism in  $\text{GeSbTe}$  Chalcogenide Superlattices", *Sci. Rep.*, 5 (2015) 12612. doi: 10.1038/srep12612.

#### Eugenio Zallo

Eugenio Zallo è Ricercatore Sperimentale dal 2015 dell'istituto Paul Drude per l'elettronica dello stato solido di Berlino dove sviluppa nuovi concetti per le memorie a base di materiali calcogenuri a cambiamento di fase. Ha ottenuto nel 2010 il titolo di Dottore in Fisica dall'Università di Roma "Tor Vergata" e nel 2015 un dottorato di ricerca in fisica dall'Università tecnica di Chemnitz. Dal 2010 ha iniziato a lavorare su dispositivi optoelettronici con modulazione della deformazione a base di punti quantici di InAs e GaAs all'istituto Leibniz per la ricerca sullo stato solido e sui materiali di Dresda. È un esperto di crescita epitassiale di nanostrutture di leghe dei gruppi III/V e di film sottili di calcogenuri, e della loro caratterizzazione attraverso spettroscopie di fotoluminescenza, Raman e "pump and probe".

#### Raffaella Calarco

Raffaella Calarco ha ricevuto nel 1996 il titolo di Dottore in Fisica tramite la laurea all'Università di Roma "Tor Vergata" con una tesi su punti quantici di SiGe. Nel 2001 ha poi conseguito il titolo di dottorato in scienza dei materiali dall'Università di Roma "La Sapienza" investigando fotodiodi al SiGe. Dal 2000 al 2001 ha lavorato come ricercatrice presso l'Università di Aquisgrana trattando la crescita epitassiale di materiali ferromagnetici. Dal 2001 al 2010 ha lavorato presso il centro di ricerca di Jülich occupandosi di spintronica e di nanoelettronica con l'ausilio di nanofili. Dal 2010 lavora come Investigatore Principale presso l'istituto Paul Drude per l'elettronica dello stato solido di Berlino svolgendo attività di crescita e caratterizzazione di materiali del gruppo III-nitruuri e calcogenuri a cambiamento di fase.

## FINESTRE SMART: RISPARMIO ENERGETICO E COMFORT VISIVO

ALESSANDRO CANNAVALE, PIERLUIGI COSSARI, GIUSEPPE GIGLI

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR,  
Politecnico di Bari, Bari, Italia*

La trasparenza rappresenta la preziosa peculiarità del materiale vetro, in quanto consente interazione visuale con lo spazio esterno e impiego della luce naturale come fonte di illuminazione, con i suoi molteplici benefici per la salute degli abitanti. D'altro canto, dal punto vista termofisico, la vetratura costituisce spesso un punto debole dell'involucro. Nei secoli XIX e XX, il vetro ha acquisito sempre maggiore importanza in ambito architettonico, parallelamente a grandi avanzamenti tecnologici che ne hanno favorito la produzione su larga scala e un raffinato controllo delle proprietà ottiche, termiche e meccaniche. Le sperimentazioni del XX secolo hanno permesso di parlare di progetto della "pelle" architettonica, dotata di proprietà mutevoli e controllabili. Nell'ottica del miglioramento delle proprietà termiche delle finestrate sono state introdotte varie classi di rivestimenti superficiali per vetri, come i low-E, in grado di ridurre l'emissività superficiale del pannello e contenere la dispersione di energia termica per irraggiamento. I rivestimenti sono depositati prevalentemente per PVD (physical vapor deposition) o per CVD (chemical vapor deposition). Attraverso il processo MSVD (magnetron sputtering vacuum deposition), vengono depositati i film a controllo solare, al fine di contenere l'aliquota di trasmissione della radiazione infrarossa (corta) attraverso il vetro. Queste tecnologie costituiscono applicazioni storiche delle nanotecnologie in edilizia e presentano il limite di definire in modo rigido e definitivo il comportamento termofisico di una vetratura con riferimento al valore di trasmissione della radiazione elettromagnetica, senza alcuna possibilità di modifica. Con lo scopo di reinterpretare dinamicamente la "trasparenza" del vetro, mirando a farne una proprietà mutevole in relazione alle condizioni di illuminamento, nasce l'ambito di ricerca sperimentale delle finestre intelligenti o "smart windows". La disponibilità di materiali e strumenti innovativi provenienti dal campo delle nanotecnologie ha consentito rilevanti sviluppi tecnologici nel settore delle smart windows, che puntano alla modulazione variabile della radiazione solare, in base alle condizioni climatiche e alle esigenze dei fruitori.

### 1 Smart Windows Elettrocromiche

Le smart windows consentono di progettare una "membrana adattiva", in dialogo con l'ambiente circostante, puntando a massimizzare il comfort termico e visivo. Esse si basano sull'impiego di materiali e dispositivi cromogenici, ossia un'ampia gamma di materiali responsivi, o smart, capaci di cambiare caratteristiche cromatiche in ragione della variazione di uno stimolo esterno specifico. Il target dei sistemi cromogenici consiste nel controllo

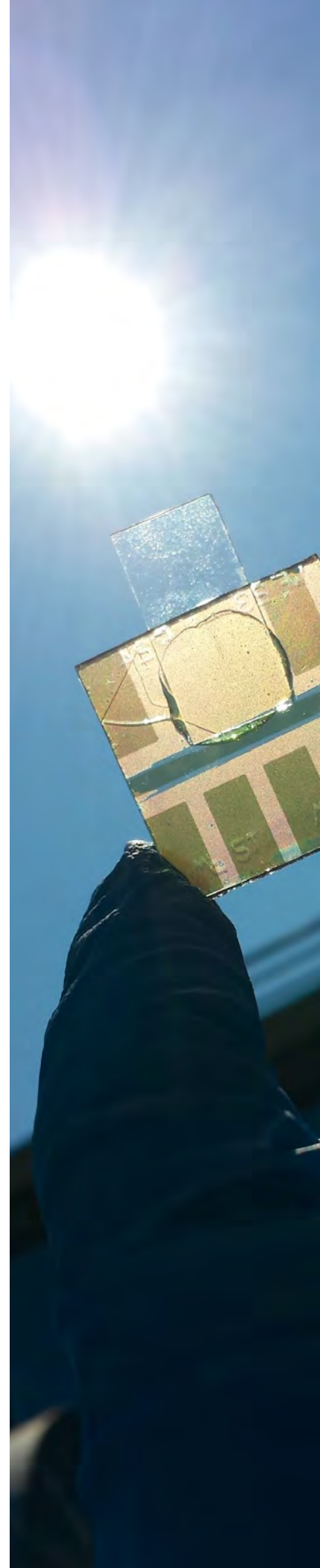




Fig. 1 Dispositivo elettrocromico nelle condizioni on/off.



dinamico del fattore di trasmissione solare  $g$  (rapporto tra energia termica globalmente trasmessa dalla lastra e quella incidente). I dispositivi elettrocromici consentono di modulare le proprietà spettrali in risposta all'applicazione di una tensione.

Secondo diversi ricercatori, tra cui Azens *et al.*, il risparmio energetico derivante da una finestra elettrocromica supererebbe la produzione di energia elettrica che si otterrebbe applicando sulla medesima superficie un sistema fotovoltaico, di pari area [1]. La specifica strategia di impiego del sistema smart window può massimizzare l'entità di tale beneficio.

Il risparmio energetico derivante dall'impiego ottimale di una smart window come sistema vetrato consisterebbe in attenuazione dei consumi di energia elettrica per il raffrescamento in regime estivo e la riduzione dell'impiego di energia elettrica per l'illuminazione artificiale quando, ad esempio, si fosse costretti ad attivare schermature totali tradizionali in presenza di disagio visivo da sovrailluminamento e abbagliamento. Secondo C.G. Granqvist [2], l'entità di questa riduzione è di  $30 \text{ kWh/m}^2$  anno in termini di riduzione dell'energia per raffrescamento e circa  $20 \text{ kWh/m}^2$  per energia elettrica per illuminazione artificiale [3].

L'elettrocromismo, come già specificato è il fenomeno che permette il cambiamento di colore di una precisa gamma di materiali, detti elettrocromici, attraverso l'applicazione di una tensione esterna. Tale fenomeno si osserva sia in alcuni materiali organici che inorganici. Si adotta una suddivisione in materiali elettrocromici catodici e anodici in relazione al meccanismo di colorazione che può avvenire per riduzione catodica e/o ossidazione anodica. Tra gli inorganici catodici i più diffusi sono gli ossidi di metalli di transizione quali il tungsteno, il vanadio, il molibdeno ed il titanio mentre tra gli anodici l'ossido di nichel. In particolare, uno dei materiali elettrocromici catodici più utilizzati è il triossido di tungsteno ( $\text{WO}_3$ ) il quale ha la peculiarità di agire quale conduttore misto, essendo un ossido in grado di garantire conduzione ionica ed elettronica al contempo [4]. Il  $\text{WO}_3$  è un materiale che si organizza sotto forma di ottaedri, con atomi di tungsteno in posizione centrale, e ossigeno in posizione periferica. I canali vuoti formati tra gli ottaedri originano i cosiddetti "tunnel", via di accesso privilegiato per la movimentazione e intercalazione di piccoli cationi, (protoni, ioni litio, sodio) (fig. 1).

La reazione reversibile di ossido-riduzione che spiega la colorazione e la decolorazione del triossido di tungsteno si innesca a seguito di un'iniezione di elettroni e della contemporanea intercalazione di piccoli cationi. La conseguente alterazione del "bandgap" del materiale ne comporta la modifica del colore: da trasparente, in condizioni normali, esso subisce una transizione ottica fino ad assumere una colorazione blu scuro, in funzione del livello di intercalazione cationica (definito dal rapporto  $x=Li/W$ ). La transizione cromatica consegue all'iniezione di elettroni sui siti di tungsteno, che vedono mutare il proprio stato di ossidazione (da +6 a +5).

Come per i materiali inorganici, quelli organici sono a loro volta suddivisi in catodici ed anodici dipendentemente dal meccanismo di colorazione per riduzione ed ossidazione. Sono generalmente classificati in due principali categorie: a) piccole molecole organiche quali ad esempio il blu di Prussia, la classe dei viologeni e ftalocianine; b) polimeri semiconduttori organici policoniugati come le polianiline, politiofene, polipirroli e loro derivati (poli-3,4 etilen diossitiofene, PEDOT). Per la loro la migliore filmabilità, proprietà di adesione, maggiore stabilità dei film e più ampia durabilità, i polimeri coniugati sono tra i materiali organici quelli più popolari ed impiegati in vetrate smart. Il meccanismo di colorazione tuttavia differisce da quello degli ossidi inorganici. In questo caso la colorazione è un processo che riguarda gli stati elettronici del polimero coniugato prima e dopo il drogaggio, "doping", con conseguente modificazioni nello spettro di assorbimento indotte dal drogaggio con transizione dallo stato neutro coniugato non conduttivo alla forma polaronica o bipolaronica conduttiva. Tra i diversi polimeri conduttivi, la polianilina (PANI) ed i suoi derivati sono quelli maggiormente impiegati come materiali cromogenici anodici. La transizione cromatica da uno stato neutro di colore verde ad uno stato conduttivo di colore blu scuro è associata a fenomeni redox indotti dal doping con una variazione dalla forma "smeraldo" semi ossidata del PANI, PANI-ES (emeraldina sale), a quella completamente ossidata di pernigralina PANI-PS (pernigralina sale). Il processo reversibile di riduzione del PANI-PS a PANI-ES promuove la decolorazione passando dalla forma ossidata di colore blu/viola a quella ridotta di colore verde. È da osservare che la forma conduttiva salificata in seguito al drogaggio in soluzione acida (protonazione) è altamente insolubile nei più comuni solventi organici ed acquosi per cui il processo di deposizione dei film cromogenici avviene a partire dalla sua forma non drogata PANI-EB (emeraldina base) dispersa in un solvente organico quale il N-metil pirrolidone o toluene

L'architettura più ricorrente dei dispositivi elettrocromici impiega due elettrodi in vetro o materiale plastico (e.g. poliestere, polietilene), rivestiti da ossidi conduttivi

trasparenti (prevalentemente  $In_2O_3:Sn$  o  $SnO_2:F$ ). Sui due elettrodi così ottenuti vengono depositati due materiali elettrocromici dotati di funzionalità complementare, ad esempio ossido di tungsteno (a colorazione catodica) e ossido di nichel (a colorazione anodica). Tra gli elettrodi un elettrolita, liquido o gel, a cui è demandata la conduzione ionica dei piccoli ioni. Un circuito esterno collega i due elettrodi e consente l'applicazione di una tensione per l'attivazione della colorazione e decolorazione del dispositivo. La formulazione dell'elettrolita più impiegata in letteratura scientifica è quella che prevede l'impiego di un sale di litio perclorato in carbonato di propilene od etilene. Lo studio della idonea formulazione della soluzione elettrolitica è di fondamentale importanza per garantire la durabilità del sistema, specialmente in vista dell'impiego industriale delle smart windows. Si osserva, in letteratura, un netto trend orientato al design di dispositivi elettrocromici con materiali completamente a stato solido. Tra i vari approcci è utile citare il tentativo di utilizzare il dispositivo elettrocromico, depositato su supporti trasparenti di poliestere, in un sistema di laminazione tra vetri [5]. In questo caso, il dispositivo elettrocromico si presta agevolmente ai processi di laminazione del vetro stratificato, con il vantaggio aggiuntivo di offrire modulazione cromatica.

Una linea di ricerca dell'Istituto di Nanotecnologia CNR-Nanotec di Lecce si occupa del design di dispositivi cromogenici a stato solido, ossia dispositivi elettrocromici fabbricati su singolo substrato (fig. 2) contenenti pellicole elettrolitiche solide, ad elevata conduzione ionica, con elevate trasparenza e compatibilità con gli strati elettrodici (catodo e anodo) e dotate di elevate performance e stabilità elettrochimica. Di fatto, la sostituzione di elettroliti gelatinosi, plasticizzati o liquidi con quelli in forma solida semplifica il processo di fabbricazione superando il classico design a sandwich in cui l'elettrolita interposto tra gli elettrodi della cella elettrochimica viene sigillato per impedirne la fuoriuscita o l'evaporazione del solvente e conseguente deterioramento delle proprietà elettro-ottiche ed elettro-chimiche del dispositivo. In questo caso l'elettrolita polimerico a stato solido consente la deposizione per "sputtering" di un sottile film di ITO (300 nm) altamente conduttivo e trasparente direttamente sulla superficie dell'elettrolita conferendo pertanto un carattere monolitico alla struttura del dispositivo. La stabilità del sistema, la durabilità e la facile integrazione nella struttura dell'infisso sono due punti di forza delle attività di ricerca in corso [6].

In collaborazione con i ricercatori del CNR Nanotec, un team di fisici tecnici del Politecnico di Bari indaga sui potenziali benefici derivanti dall'integrazione architettonica, "building integration", di dispositivi elettrocromici innovativi in edifici, puntando a prefigurare, mediante affidabili strumenti di simulazione, risparmio energetico (riduzione dei

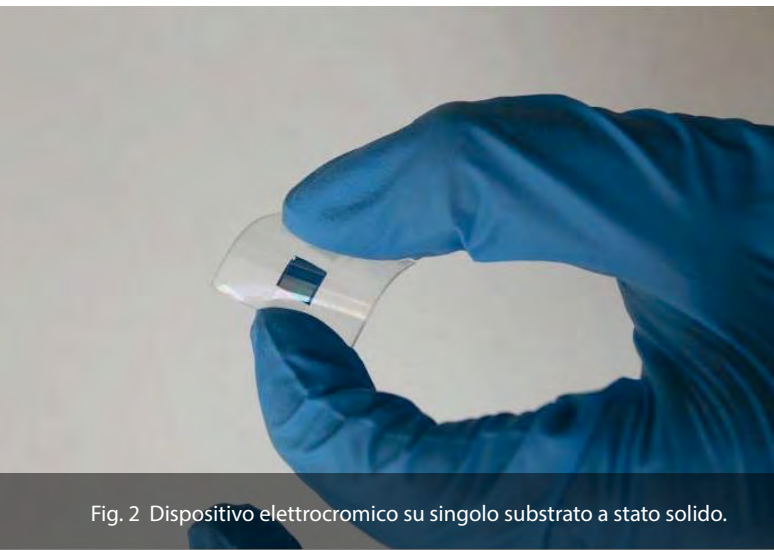
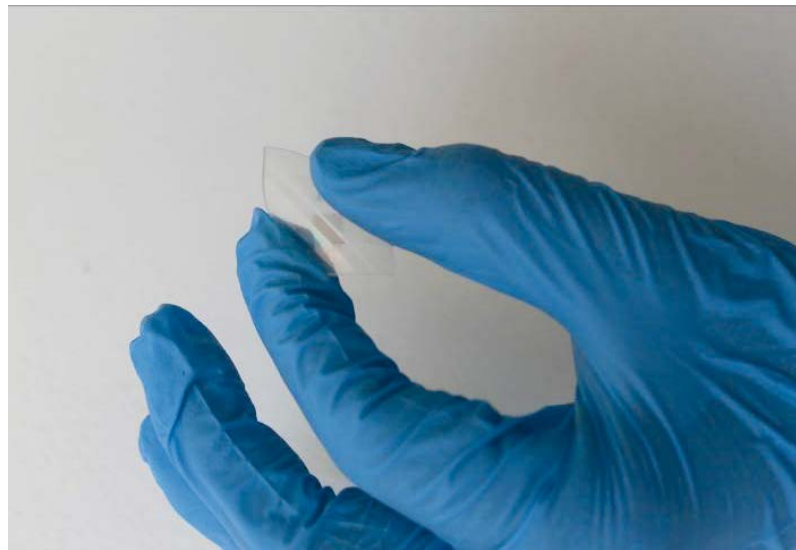


Fig. 2 Dispositivo elettrocromico su singolo substrato a stato solido.



costi di raffrescamento e illuminazione artificiale) e comfort visivo. Ulteriori indagini sono in corso per eseguire la valutazione del ciclo di vita, "life-cycle assessment", dei dispositivi innovativi.

I molteplici settori applicativi delle smart windows sono: in primis, quello delle costruzioni, ma anche l'industria automobilistica (specchietti retrovisori e parabrezza) e l'aeronautica (ad esempio, sono elettrocromici i finestrini dei nuovi Boeing 787). Una delle prime installazioni italiane di smart windows è stata realizzata a Corsico (MI), presso il Multicomfort Habitat Lab, di Saint-Gobain Italia.

Un lavoro di Tavares *et al.* [7] del 2014 ha valutato i vantaggi economici derivanti dall'impiego delle finestre elettrocromiche nel caso di ammodernamento di edifici di area Mediterranea. È stato altresì dimostrato [8] che i vetri elettrocromici impiegati negli edifici per uffici possono portare a significative riduzioni dei consumi energetici sia nelle nuove costruzioni sia nei lavori di ristrutturazione.

## 2 Smart windows fotoelettrocromiche e fotovoltaicromiche

In anni più recenti (fine del XX secolo) la ricerca nel campo delle smart windows ha reso realistica la possibilità di progettare chiusure trasparenti in grado di veder modificata la propria selettività spettrale ed al contempo di produrre energia così come teorizzato nel 1996 dal celebre architetto T. Herzog *et al.*, in *Solar Energy in Architecture and Urban Planning* [9]. Nei suoi scritti auspicava infatti una maggiore attenzione nei riguardi dell'efficienza energetica nella costruzione di case e città prevedendo, anche, la possibilità di edificare costruzioni in grado di non richiedere apporti energetici nel corso della propria vita utile. Fino a prefigurare che potesse concretizzarsi uno scenario in cui le case potessero produrre e persino cedere energia, essendo dotate di involucri permeabili a luce, calore e aria in modo modificabile: *"The permeability of the skin of a building towards light, heat and air, and its transparency must be controllable and capable of modification, so that it can react to changing local climatic conditions"*. Tale scenario, oggi, viene pressoché imposto per direttiva europea, visto che si chiede, entro il 2020, di progettare esclusivamente edilizia "nearly zero energy", ossia quasi a consumo energetico zero, secondo quanto introdotto e definito dalla Direttiva UE 2010/31/EU (*"a building that has a very high energy performance. The nearly zero or very low amount of energy required should be covered to a very significant extent by energy from renewable sources, including energy from renewable sources produced on-site or nearby"*).

L'intensificarsi degli sforzi scientifici miranti alla realizzazione di involucri edilizi fotovoltaici efficienti e allo sviluppo di tecnologie mature per la dispositivistica cromogenica (elettrocromica, cristalli liquidi), ha aperto la strada (fine XX secolo, 1996) al campo di indagine dei dispositivi "cromofotovoltaici" o "fotovoltacromici" trovando il proprio obiettivo proprio in questo rilevante sforzo di integrazione funzionale.

Il settore dei sistemi fotovoltaici ad alta integrazione architettonica, Building Integrated PhotoVoltaics (BIPV), rappresenta, senza dubbio, un settore di notevole interesse, in ambito scientifico e industriale. La definizione BIPV allude al fatto che i dispositivi fotovoltaici non siano meramente installati sull'involucro esterno di un edificio, ma vi siano completamente integrati, garantendo, oltre alla produzione di energia elettrica per conversione fotovoltaica, anche tutti gli altri requisiti prestazionali tipici del componente di involucro (trasparente od opaco) sostituito. Con l'adozione di questa strategia, il modulo BIPV, aggiungendo il requisito della produttività elettrica, potrà compensare il maggior costo rispetto a quelli del componente edile interamente sostituito (requisiti termici, acustici, protezione da aria e acqua, caratteristiche meccaniche, fattore di trasmissione luminosa). Se la building integration del fotovoltaico trova un'immediata applicazione in componenti opachi quali rivestimenti edilizi, pareti ventilate, coperture, e pensiline, il design dell'integrazione in componenti trasparenti diviene particolarmente complesso, dovendosi tenere in conto il mantenimento delle proprietà di selettività spettrale tipicamente in capo ai componenti finestrati. Lo sviluppo del BIPV sottintende uno sforzo multifattoriale che contempra la contemporanea considerazione di aspetti funzionali, estetici e caratteristiche dispositivistiche. È stato osservato dagli esperti dell'International Energy Agency (IEA) che, anche in presenza di una efficienza fotovoltaica bassa, ad esempio del 5%, i 23 miliardi di metri quadri di tetti e facciate disponibili nei paesi più sviluppati permetterebbe la produzione di più di 1000 GWp di potenza elettrica.

Lo sviluppo di nuove tecnologie fotovoltaiche, ad esempio basate sull'impiego di film sottili o le nuove tecnologie fotovoltaiche disponibili a seguito della diffusione di materiali fotovoltaici innovativi – "dye sensitized solar cells" (DSCs) o le più recenti "perovskite-based solar cells" – permette di prefigurare un'alta compatibilità con l'impiego in componenti finestrati. Questi ultimi dispositivi offrono il vantaggio di bassi costi di processo, e, quindi, sono fortemente compatibili con i costi di produzione di componenti edili standardizzati. Più problematica, invece, l'integrazione di moduli in silicio (c-Si o p-Si), che presentano requisiti di trasparenza solo attraverso gli spazi lasciati liberi dai moduli fotovoltaici opachi, configurando una "texture" luminosa, non priva di criticità in termini di effetti sul comfort visivo "indoor".

Si configura, così, l'opportunità – o, persino, la necessità – di progettare un muro polifunzionale, "multifunctional wall", che, oltre a garantire idonei requisiti prestazionali per l'impiego in un involucro edilizio, offra ulteriori performance, quali la produzione di energia elettrica e la gestione dinamica del fattore solare della vetratura. Le celle fotovoltaiche DSCs sono dei dispositivi fotoelettrocromici assai promettenti in termini di BIPV, la cui trasparenza dipende principalmente dallo spessore dello strato mesoporoso di ossido presente sul fotoanodo (principalmente biossido di titanio e ossido di zinco) e dall'assorbimento spettrale del colorante, "dye" impiegato, che, in definitiva, definisce il colore del dispositivo. Un accorto design del dispositivo consente di ottenere sistemi fotovoltaici ad elevata trasparenza e una significativa compatibilità con l'impiego in facciate trasparenti. Andreas Hinsch *et al.*, hanno dimostrato nel 2012 di aver realizzato un modulo DSC di dimensioni 60 x 100 cm<sup>2</sup>, con efficienza del 7.1%, destinati alla building integration [10]. Si tratta di moduli di colore ambra, per via dell'impiego di un colorante metallorganico basato sul rutenio (N719). Potenzialmente, cambiando il colorante impiegato, il colore del pannello fotovoltaico può essere mutato per esigenze di design, aprendo a ventagli applicativi molteplici, sotto il profilo estetico.

Sulla base della promettente tecnologia delle celle fotoelettrocromiche "dye-sensitized", o celle di Gratzel, negli anni '90, furono progettati dei dispositivi in grado di modulare il proprio assorbimento spettrale in funzione delle condizioni di irraggiamento presenti nell'ambiente esterno. Clemens Bechinger *et al.*, (del NREL di Berkeley) pubblicarono sulla rivista Nature, nel 1996, un lavoro molto interessante inerente la prima cella fotoelettrocromica: in sostanza, una sorta di ibrido tra una cella fotovoltaica dye-sensitized e un dispositivo elettrocromico [11]. Da un lato, il fotoanodo (TiO<sub>2</sub>+dye), quando illuminato, produce una fototensione, dall'altro, sul catodo, viene depositato un film di materiale elettrocromico (triossido di tungsteno, WO<sub>3</sub>). L'elettrolita presenta una formulazione simile a quella dei dispositivi fotovoltaici: essenziale, ai fini della colorazione del dispositivo sotto irraggiamento solare, la presenza di cationi di litio al suo interno. Questi ultimi, mossi dalla forza trainante, "driving force", generata sul fotoelettrodo, possono migrare nella TiO<sub>2</sub>, intercalando nel film di WO<sub>3</sub>, caricandosi negativamente nel momento in cui il circuito esterno viene chiuso. L'architettura del dispositivo parte dal presupposto di un accurato studio dei livelli energetici, che favoriscono il passaggio degli elettroni dal primo semiconduttore inorganico, su cui sono generati, il TiO<sub>2</sub>, al secondo, il WO<sub>3</sub>, in cui attivano il meccanismo di colorazione. La contemporanea intercalazione di elettroni e cationi nella struttura ottaedrica del WO<sub>3</sub> attiva la tipica reazione redox, che determina la colorazione del materiale. Questa prima dimostrazione di un dispositivo

fotoelettrocromico, permise di apprezzare l'indubbio vantaggio di modulare il proprio stato cromatico impiegando la sola energia prodotta da conversione fotovoltaica.

Essendo noto che la colorazione dei dispositivi elettrocromici dipende significativamente dall'entità della driving force impiegata, si intravede facilmente il vantaggio conseguente dall'architettura disegnata da Bechinger: al di sotto di 0,3 sun non si attiva alcuna modulazione cromatica. Per valori più alti invece, esso produrrà valori significativi dei parametri fotovoltaici, fino a ottenere la transizione cromatica del dispositivo, da trasparente a blu scuro con intensità e cinetiche strettamente dipendenti dai parametri fotovoltaici generati nel dispositivo a seguito dell'irraggiamento presente nell'ambiente circostante. In questo modo, il dispositivo assume una funzionalità altamente responsiva, o smart, essendo in grado di reagire alle variazioni di irraggiamento solare disponibile, dando come output un diverso grado di assorbimento ottico.

Anni dopo, i ricercatori del Fraunhofer-ISE di Friburgo presentarono un'architettura leggermente diversa [12]: il materiale elettrocromico, il  $\text{WO}_3$ , viene questa volta depositato sul fotoanodo subito sopra il materiale conduttivo trasparente, ossia ossido di stagno drogato fluoro (FTO). Su di esso, uno strato di biossido di titanio di spessore contenuto (pochi micron) è sufficiente a svolgere funzione di fotoanodo, sul quale viene fatto adsorbire un dye. Sul controlettrodo è invece depositato un sottile strato di platino.

In condizioni di circuito aperto, quando il dispositivo viene irradiato con la luce solare, si instaura una fototensione e gli elettroni prodotti, trovando energeticamente favorevole il passaggio dalla  $\text{TiO}_2$  nel  $\text{WO}_3$ , caricano il materiale negativamente, attivando l'attrazione dei cationi di litio presenti nell'elettrolita liquido. In tal modo, il dispositivo tende a colorare. La chiusura del circuito, ottenuta collegando, mediante un circuito esterno, il fotoanodo al controlettrodo di platino, permette da un lato la decolorazione del dispositivo e dall'altro l'attivazione di una blanda attività fotovoltaica (efficienza di conversione fotovoltaica: 0.05%).

In quello stesso periodo, diversi altri dispositivi fotoelettrocromici sono apparsi in letteratura scientifica, con varianti più o meno significative sia nell'architettura che nei materiali impiegati.

Punti cruciali, in tutti i tentativi esperiti, la massimizzazione della trasparenza del dispositivo nello stato decolorato, o "bleached", e la durabilità del dispositivo. I dispositivi elettrocromici, presentando le caratteristiche di due differenti famiglie di dispositivi – elettrocromici e fotovoltaici – presentano una significativa complessità sotto il profilo della durabilità e della compatibilità dei materiali, in particolar modo in corrispondenza delle interfacce.

Ad esempio, Liu *et al.*, nel 2008 presentarono un dispositivo

[13] in cui il fotoelettrodo era costituito da fili di titanio rivestiti con  $\text{TiO}_2$  nanocristallino sensibilizzato con colorante, al fine di incrementare la trasmittanza nello stato decolorato (circa 68%).

Un passaggio evolutivo significativo nel settore scientifico delle smart windows fotoelettrocromiche fu quello proposto da Wu *et al.*, nel 2009, [14] in cui venne discusso il primo dispositivo "fotovoltacromico". Si trattava del primo dispositivo in grado di presentare dichiaratamente una duplice funzione: quella fotovoltaica (efficienza di conversione fotovoltaica ancora bassa: 0.5%) e quella fotoelettrocromica, potendo manifestare una modulazione cromatica dipendente dall'irraggiamento solare disponibile.

Il layout del dispositivo era caratterizzato dalla disposizione "frame-type" – ossia a cornice – del fotoelettrodo di  $\text{TiO}_2$ , praticamente opaco, e da una finestra quadrata trasparente, deputata alla modulazione cromatica.

Il principale punto di forza di questo dispositivo è la rapida colorazione del dispositivo sotto luce in condizioni di corto circuito, accelerata per l'azione catalitica del platino; tra i punti deboli, la bassa efficienza fotovoltaica osservata e l'impossibilità di controllare, separatamente, la funzionalità fotovoltaica e quella fotoelettrocromica. L'impossibilità di un comportamento interattivo potrebbe, infatti, costituire un vincolo in termini di impiego industriale del dispositivo.

Un'evoluzione del dispositivo fotovoltacromico è stata rappresentata dal lavoro congiunto del gruppo di ricerca dell'Istituto di Nanotecnologia CNR-Nanotec di Lecce ed del dipartimento di Fisica dell'Università di Oxford [15], apparso sulla rivista scientifica Energy and Environmental Science, in cui il dispositivo fotovoltacromico ha presentato delle innovazioni sia sull'architettura del dispositivo, sia sulla formulazione dell'elettrolita, come di seguito specificato (fig. 3)

Una serie di attività di ingegnerizzazione del controlettrodo hanno permesso di ottenere due importanti risultati: da un lato, la separazione dell'area di platino da quella di triossido di tungsteno ha consentito di controllare disgiuntamente la funzionalità fotovoltaica e quella fotoelettrocromica; dall'altro, è stato possibile effettuare misure accurate del dispositivo sotto il profilo elettro-ottico ed elettrochimico, investigando accuratamente la mutua influenza tra il fenomeno della colorazione elettrocromica e le performance di conversione fotovoltaica del dispositivo fotovoltacromico. Si è giunti alla conclusione secondo cui lo spostamento della minima aliquota di cationi litio coinvolti nel meccanismo di intercalazione non inficia le caratteristiche fotovoltaiche del dispositivo in misura significativa. La formulazione dell'elettrolita liquido è stata peraltro ottimizzata al fine di pervenire a un giusto compromesso tra la funzionalità fotovoltaica e quella fotoelettrocromica. Infatti, la riduzione della concentrazione di iodio e, d'altro canto,

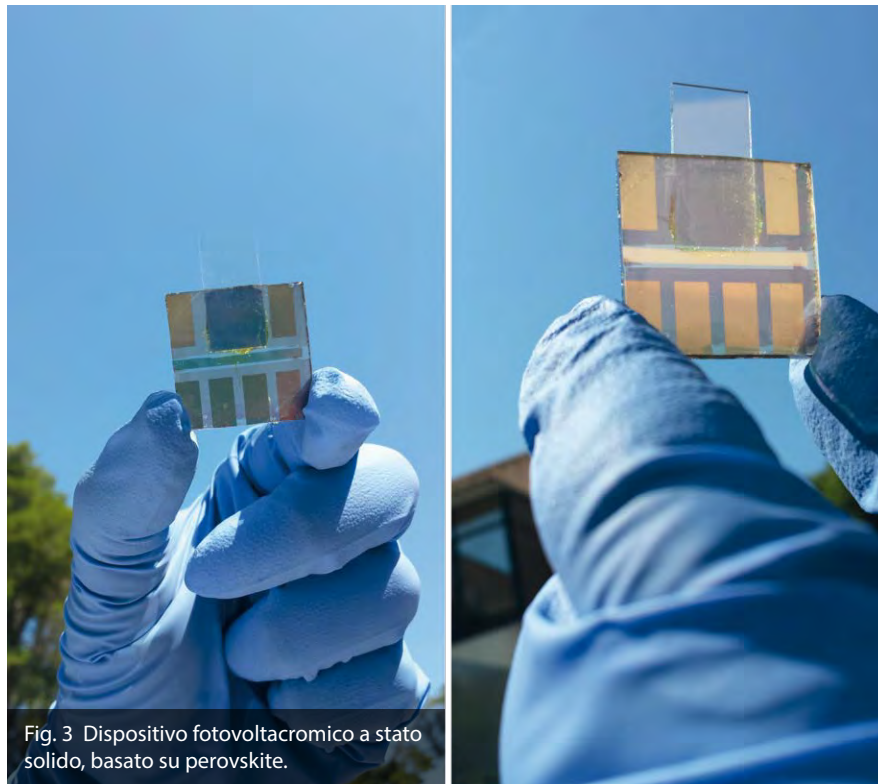


Fig. 3 Dispositivo fotovoltaico a stato solido, basato su perovskite.

l'impiego di additivi specifici (4-*tert*-butylpyridine), hanno consentito di incrementare i valori di fototensione ottenendo efficienze di conversione fotovoltaica pari al 6.55%, fermi restando i più che soddisfacenti parametri di cinetica elettrocromica.

Ai fini della applicazione dei dispositivi fotovoltaici in ambito BIPV, si è pensato di attuare delle strategie di ottimizzazione della trasparenza del dispositivo, incrementando, parallelamente, la superficie del fotoanodo attraverso la progettazione di dye organici in grado di coniugare elevata trasparenza e una buona efficienza di conversione fotovoltaica. A tale scopo, sono stati progettati dei dispositivi con controlettrodo interdigitato [16] per ridurre l'impatto della superficie di platino sulla trasparenza complessiva del dispositivo ed evitare così, di dover distinguere due superfici differenti nel dispositivo: una deputata alla conversione fotovoltaica e l'altra alla colorazione smart.

In parallelo, sono stati condotti degli studi in collaborazione con i ricercatori dell'università di Sydney [17] per verificare l'effettivo vantaggio che potrebbe derivare dalla integrazione dei sistemi fotovoltaici in architettura. Dalle simulazioni dei dispositivi in larga scala sono emersi dei dati molto interessanti: sotto il profilo del comfort visivo indoor, rispetto a una finestra standard, si è potuto accertare che una finestratura fotovoltaica produrrebbe impatti benefici sia in termini di una significativa riduzione dei fenomeni di abbagliamento sia in termini di massimizzazione dei punti dell'ambiente in cui si gode di condizioni di illuminamento ottimale. Tali risultati sono particolarmente significativi nelle esposizioni sud ed est, per le quali si ravvisa la maggiore necessità di impiego per sistemi di schermatura.

La mancata diffusione commerciale delle celle di Gratzel ha avuto ripercussioni nella ridotta industrializzazione dei dispositivi, con il conseguente rallentamento dello sviluppo di tutte le tecnologie ad esse collegate, tra cui le celle fotovoltaiche.

Recentemente, la comparsa di dispositivi fotovoltaici completamente a stato solido, basati sull'impiego di perovskiti, ha consentito di pensare, parallelamente, a sistemi fotovoltaici di nuova generazione. Una particolare gamma di perovskiti, di particolare interesse per applicazioni in BIPV, è stata progettata in modo da permettere di fabbricare celle fotovoltaiche dotate di una trasparenza relativamente più elevata [18]. Partendo da queste premesse, sono state avviate attività di collaborazione scientifica tra l'Istituto di Nanotecnologie CNR-Nanotec

di Lecce e il Dipartimento di Fisica dell'Università di Oxford. In questo ambito è stato progettato il primo dispositivo fotovoltaico che comprende un film fotovoltaico basato su perovskite, il quale fornisce la potenza elettrica idonea ad attivare la colorazione di un sistema elettrocromico basato su WO<sub>3</sub> come materiale catodico cromogenico ed un elettrolita polimerico plasticizzato costituito da polietilene ossido (PEO) ad alto peso molecolare, ioduro di litio (LiI) e glicole di polietilene come additivo plasticizzante. La formulazione dell'elettrolita è stata ottimizzata variando i rapporti molari tra il sale di litio ed il polimero al fine di aumentarne la conducibilità ionica e di conseguenza le performance del dispositivo. Dissolvendo i sali di litio, il PEO riesce infatti a formare delle soluzioni elettrolitiche solide (attraverso la coordinazione degli ioni Li<sup>+</sup> da parte degli

atomi di ossigeno del polimero), più facilmente processabili rispetto ai più comuni elettroliti liquidi e quindi in grado di operare in condizioni di elevata sicurezza. I risultati ottenuti con questa innovativa architettura hanno trovato recentemente spazio sulla rivista *Energy and Environmental Science* [19], lasciando prefigurare più ampi margini di impiego delle celle fotovoltaiche nel settore BIPV, dati i valori ottici soddisfacenti, l'elevata efficienza fotovoltaica e, soprattutto, la durabilità del sistema e la facilità del processo di fabbricazione. Una pubblicazione molto recente analizza nel dettaglio gli aspetti molteplici della transizione verso sistemi a stato solido illustrando i principali costituenti ed innovazione dei materiali con un focus critico sull'evoluzione della dispositivi a partire dai primi sistemi fotoelettrocromici [20].

## Bibliografia

- [1] A. Azens, C. Granqvist., *J. Solid State Electrochem.*, 7 (2003) 64.
- [2] C.G. Granqvist., *J. Vacuum Sci. Technol. B*, 32 (2014) 060801.
- [3] C.G. Granqvist., *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 99 (2012) 1.
- [4] C.G. Granqvist, P.C. Lansaker, N.R. Mlyuka, G.A. Niklasson, E. Avendano, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 93 (2009) 2032.
- [5] C.G. Granqvist, *Thin solid films*, 564 (2014) 1.
- [6] P. Cossari, A. Cannavale, S. Gambino, G. Gigli, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 155 (2016) 411.
- [7] P. F. Tavares, A.R. Gaspar, A.G. Martins, F. Frontini, *Energy Policy*, 67 (2014) 68, .
- [8] N.L. Sbar, L. Podbelski, H. M. Yang, B. Pease, *Int. J. Sustain. Built Environ.*, 1 (2012) 125.
- [9] T. Herzog, N. Kaiser, *Solar energy in architecture and urban planning*, (Prestel, Munich) 1996, ISBN 3791316524.
- [10] A. Hinsch, W. Veurman, H. Brandt, R. L. Aguirre, K. Bialecka and K. F. Jensen, *Progr. Photovoltaic: Res. Applicat.*, 20, (2012) 698.
- [11] C. Bechinger, S. Ferrere, A. Zaban, J. Sprague, B. Gregg, *Nature*, 383 (1996) 608.
- [12] A. Georg, O. Krasovec, *Thin Solid Films*, 502 (2006) 246.
- [13] Y. Liu, H. Shen, W. Chen, H. Wang, Y. J. Deng, D.H. Wang, *Chin. Sci. Bull.*, 53 (2008) 3173.
- [14] J. J Wu, M. D Hsieh, W. P Liao, W. T. Wu, J. S. Chen, *ACS Nano*, 3 (2009) 2297.
- [15] A. Cannavale, M. Manca, F. Malara, L. De Marco, R. Cingolani, G. Gigli, *Energy Environ. Sci.*, 4 (2012) 2567, .
- [16] A. Cannavale, M. Manca, L. De Marco, R. Grisorio, S. Carallo, G. P. Suranna and G. Gigli, *ACS App. Mat. Int.*, 6 (2014) 2415.
- [17] A. Cannavale, F. Fiorito, D. Resta and G. Gigli, *Energy Building*, 65 (2013) 137.
- [18] G. E. Eperon, V. M. Burlakov, A. Goriely and H. J. Snaith, *ACS Nano*, 8 (2013) 591.
- [19] A. Cannavale, G. E. Eperon, P. Cossari, A. Abate, H. J. Snaith and G. Gigli, *Energy & Envir. Sci.*, DOI: 10.1039/c5ee00896d
- [20] A. Cannavale, P. Cossari, G. E. Eperon, S. Colella, F. Fiorito, G. Gigli, H. J. Snaith, A. Listorti, *Energy & Envir. Sci.*, 9 (2016), 2682.

### Alessandro Cannavale

Laureato in Ingegneria Edile, ha conseguito il Dottorato presso il Politecnico di Bari collaborando con il Laboratorio Nazionale di Nanotecnologie del CNR. Ha elaborato una tesi multidisciplinare dal titolo "Nanotecnologie e dispositivi smart per l'involucro edilizio trasparente". Dal 2011 al 2014 è stato postdoc presso la Energy Platform dell'Istituto Italiano di Tecnologia, dove si è occupato di dispositivi multifunzione fotovoltaici per la produzione di energia e la schermatura smart della radiazione solare. Dal 2015 al 2016 ha lavorato presso il Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento al design di dispositivi cromogenici a stato solido e basati su perovskiti. Dal 2016 è Ricercatore nel campo della fisica tecnica presso il Politecnico di Bari.

### Pierluigi Cossari

Laureato in Chimica e Tecnologia Farmaceutiche presso l'Università di Roma "La Sapienza" e Dottore di Ricerca internazionale in NanoBioTecnologie presso l'Università degli Studi di Genova e l'Università di Marburg, è Ricercatore Universitario dell'Università del Salento ed associato CNR presso l'Istituto di Nanotecnologie, Nanotec-Lecce. Ha svolto attività di ricerca all'Istituto dei Materiali Nanostrutturati del CNR nel campo della chimica spettroscopica ed analitica e durante il dottorato si è specializzato nella sintesi dei polimeri policoniugati e nanocompositi di carbonio. Attualmente si occupa della sintesi e caratterizzazione di materiali elettrocromici e di elettroliti polimerici per la fabbricazione di dispositivi avanzati elettrocromici e fotoelettrocromici a stato solido.

### Giuseppe Gigli

Ha conseguito la laurea in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza" nel 1996 ed il Dottorato in Fisica nel 1999 all'Università di Lecce. Nel 1999 è presso il Laboratorio Cavendish dell'Università di Cambridge, UK e nel 2000 è presso l'Università di Linköping in Svezia. Dal 2010 è Professore Ordinario presso l'Università del Salento e dal 2015 Direttore dell'Istituto di Nanotecnologia del CNR. Il suo principale ambito di ricerca riguarda la nanotecnologia per l'optoelettronica molecolare e la medicina di precisione.

## UNA NUOVA LUCE SUGLI OGGETTI PIÙ ESTREMI DEL COSMO

### LA (RI)NASCITA DELLA POLARIMETRIA ASTRONOMICA A RAGGI X

**LUCA BALDINI**

*Università di Pisa e INFN-Sezione di Pisa, Pisa, Italia*

A più di quarant'anni di distanza dal lancio di OSO-8, l'ultimo osservatorio spaziale per raggi X equipaggiato con un polarimetro ad aver operato con successo, la NASA ha recentemente selezionato la proposta Imaging X-Ray Polarimetry Explorer (IXPE), interamente dedicata alla polarimetria astronomica a raggi X, come prossimo Small Explorer (SMEX)—lancio previsto per la fine del 2020. Con il supporto dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e la partecipazione diretta di ricercatori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), oltre che di ASI stessa, l'Italia giocherà un ruolo di primissimo piano, fornendo il cuore tecnologico della missione, ovvero i rivelatori di piano focale sensibili alla polarizzazione. Con una sensibilità senza precedenti, IXPE permetterà di studiare la polarizzazione lineare di decine di sorgenti astrofisiche, aprendo una nuova finestra osservativa sull'Universo.

#### 1 Introduzione

La radiazione elettromagnetica trasporta essenzialmente quattro tipi distinti di informazione: direzione, tempo, energia e polarizzazione. Le prime tre proprietà della luce sono familiari a tutti noi, e le corrispondenti tecniche osservative (*imaging*, *timing* e *spettroscopia*) sono ormai strumenti di routine per lo studio degli oggetti celesti a tutte le lunghezze d'onda. Gli sviluppi che queste tre branche dell'astronomia X hanno vissuto, sulla scorta dei progressi tecnologici dell'ultimo mezzo secolo, sono niente meno che spettacolari ed è sufficiente, *e.g.*, uno sguardo anche distratto ad una delle ormai celebri immagini di Chandra (come quella mostrata in [fig. 1](#)) per avere un'idea del grado di sensibilità e del livello di dettaglio raggiunti.

La polarizzazione è una proprietà della luce comparativamente più complessa, che ha a che vedere con la direzione di oscillazione del campo elettrico associato alla luce stessa. Per un'onda piana il campo elettrico, il campo magnetico e la direzione di propagazione del fotone formano una terna ortogonale; quando il vettore campo elettrico

è confinato ad oscillare in un piano fissato l'onda si dice polarizzata linearmente—e la direzione del campo elettrico stesso definisce l'angolo di polarizzazione. La situazione può essere in pratica significativamente più complicata, specialmente nel caso di una sovrapposizione di treni d'onda, e in generale la radiazione può avere un *grado di polarizzazione* arbitrario compreso tra 0 (non polarizzata) ed 1 (completamente polarizzata), ma qualitativamente il semplice quadro che abbiamo delineato non cambia.

Detto questo, non possiamo non partire da alcune domande ovvie: la polarimetria astronomica a raggi X ha un qualche interesse scientifico? A che livello? Quali sono le informazioni che essa è in grado di fornirci—da sola ed in sinergia con le altre tecniche osservative dell'astronomia X? E quali sono le informazioni, se esistono, che non sarebbero accessibili per altra via? La risposta a queste domande passa in prima istanza attraverso la semplice constatazione che, sulla base della nostra comprensione dei processi fisici in atto, ci si attende un livello più o meno elevato di polarizzazione lineare in una grande varietà di sorgenti

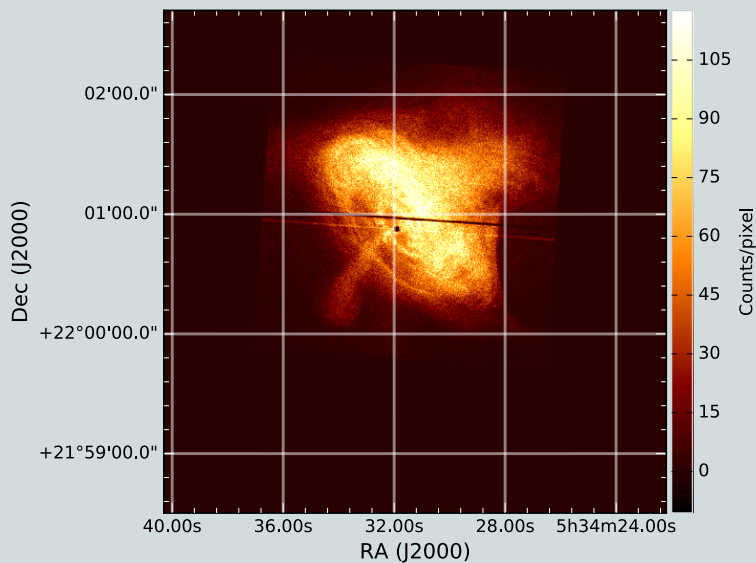


Fig. 1 L'immagine della nebulosa del Granchio nei raggi X prodotta dall'osservatorio spaziale Chandra è una delle illustrazioni più celebri del livello di dettaglio raggiunto dall'imaging astronomico a raggi X. Per confronto, l'unica informazione che abbiamo a disposizione sulle proprietà polarimetriche della sorgente è costituita dalla misura pionieristica fatta da OSO-8 del grado ed angolo di polarizzazione mediati su tutta la regione [2].

astronomiche. I fenomeni di accelerazione ed i processi di emissione non termica in generale (*e.g.*, la radiazione di sincrotrone) producono per loro stessa natura radiazione intrinsecamente polarizzata. E anche laddove i processi di emissione in atto siano di natura termica, la propagazione in mezzi birifrangenti e/o la diffusione in geometrie non sferiche può far acquisire un grado di polarizzazione non nullo a radiazione originariamente non polarizzata. In un certo senso potremmo ribaltare l'argomento e dire che l'assenza totale di polarizzazione netta è una condizione comparativamente inusuale, che richiede condizioni di simmetria *ad hoc* nella sorgente per potersi verificare. In questo senso la misura del grado e dell'angolo di polarizzazione è potenzialmente in grado di fornire informazioni dirette sulla geometria e sulla configurazione del campo magnetico della sorgente—informazioni che nella maggior parte dei casi non sono ottenibili per altra via e che sostanzialmente aggiungono due parametri indipendenti allo spazio delle fasi in cui i dati si confrontano con i modelli.

La zoologia dei sistemi astrofisici cui quanto appena detto si applica è estremamente varia, ed il lettore può trovare un resoconto relativamente aggiornato dello stato dell'arte, insieme ad una lista esauriente di riferimenti bibliografici, in [1]. I resti di supernova sono esempi prototipici in cui la turbolenza del campo magnetico in corrispondenza dei fronti d'onda è uno degli ingredienti fondamentali alla base del paradigma corrente di accelerazione dei raggi cosmici galattici, e la mappatura delle proprietà polarimetriche degli fronti stessi su scale spaziali opportune può fornire in linea di principio informazioni preziose e complementare alla spettroscopia ed all'imaging. Per le pulsar, isolate o al

centro di resti di supernova, l'andamento delle caratteristiche polarimetriche della radiazione in funzione della fase di rotazione costituisce una diagnostica estremamente potente dei processi di emissione che hanno luogo in questi sistemi. Al di fuori della nostra Galassia, i nuclei galattici attivi (AGN) costituiscono un'altra classe di sorgenti in cui ci si aspetta un grado di polarizzazione potenzialmente misurabile (dell'ordine di 1–10%). Il fatto stesso di avere a disposizione sorgenti di radiazione potenzialmente polarizzata a distanze cosmologiche costituisce un laboratorio eccezionale per test di fisica fondamentale (*e.g.*, una possibile birifrangenza del vuoto) su scale di lunghezza inaccessibili sulla Terra. Capitolo completamente diverso, ma non meno interessante, è quello della fisica dei sistemi estremi, in cui la polarimetria a raggi X ha il potenziale di testare predizioni specifiche di relatività generale o elettrodinamica quantistica in regime di campo forte—ne sono esempi, rispettivamente, i dischi di accrescimento attorno ad oggetti compatti e le magnetar.

A fronte di un caso scientifico così complesso e variegato, e a dispetto degli indubbi successi della polarimetria astronomica a lunghezze d'onda più grandi (*e.g.*, nell'ottico e nel radio), sorprenderà il fatto che, da un punto di vista osservativo, la storia della polarimetria a raggi X ha di fatto inizio e termine negli anni '70. Essa consta essenzialmente di un'unica misura incontrovertibile, quella della nebulosa del Granchio eseguita dalla missione OSO-8 [2], che a più di quarant'anni di distanza costituisce ancora lo stato dell'arte. Il resto della storia, fino ai giorni nostri, è segnata da una lunga serie di circostanze avverse ed aspirazioni frustrate. Un polarimetro a raggi X originariamente previsto per la missione Einstein ed eliminato nella configurazione finale

lanciata con successo alla fine del 1978. Lo Stellar X-Ray Polarimeter (SXP), costruito e calibrato per la versione originale della missione Stellar Rontgen Gamma (SRG), cancellata *tout court* nel 2002. E, più di recente, la proposta Gravity and Extreme Magnetism SMEX (GEMS), selezionata dalla NASA nel 2009 per un lancio nel 2014, ma cancellata nel 2012 per motivi programmatici.

Uno dei fattori determinanti in questo senso, è stata la scarsa sensibilità ottenibile nel quadro delle due tecniche standard tradizionalmente impiegate sin dagli anni '70: la diffrazione di Bragg a 45 gradi e la diffusione Thomson a 90 gradi [3]. La prima, a dispetto di fattori di modulazione prossimi all'unità, è caratterizzata da una scarsa banda passante in energia (una serie di armoniche tipicamente molto strette in corrispondenza delle soluzioni della legge di Bragg) ed è dispersiva (si misura, cioè, un angolo alla volta). La seconda è intrinsecamente limitata alle basse energie dal fatto che la diffusione diviene sottodominante rispetto all'effetto fotoelettrico ed è non-imaging. Entrambe richiedono, per loro natura, di mettere in rotazione l'apparato e le difficoltà tecniche che ne conseguono hanno storicamente costituito un ulteriore fattore di disincentivo all'inserimento di un polarimetro nel piano focale dei grandi osservatori X.

## 2 Formalismo di base e tecniche della polarimetria a raggi X

Un polarimetro è essenzialmente uno strumento che misura un'asimmetria (o modulazione) azimutale nel piano ortogonale alla direzione di propagazione della radiazione e questa asimmetria è proporzionale al grado di polarizzazione della radiazione stessa e con una fase caratteristica coincidente con l'angolo di polarizzazione corrispondente.

Se la risposta azimutale ha la forma tipica

$$R(\varphi) = A + B \cos^2(\varphi - \varphi_0),$$

la visibilità della modulazione per radiazione incidente polarizzata linearmente al 100% è uno dei parametri fondamentali di un polarimetro, che prende il nome di *fattore di modulazione*

$$\mu = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}} = \frac{B}{B + 2A}.$$

Per fissare le idee: uno strumento con fattore di modulazione pari all'unità è un polarimetro perfetto; un fattore di modulazione nullo, d'altra parte, implica l'assenza di qualsiasi sensibilità alla polarizzazione.

Il fattore di modulazione è uno dei due ingredienti fondamentali che, in termini pratici, concorrono a determinare la sensibilità di un polarimetro. L'altro, come

vedremo tra un attimo, è banalmente il numero totale  $N$  di fotoni raccolti in una specifica osservazione. Questi due fattori concorrono a definire la Minimum Detectable Polarization (MDP), o *polarizzazione minima rivelabile*:

$$MDP = 4.29 \frac{\mu}{\sqrt{N}},$$

vale a dire il livello di polarizzazione della sorgente corrispondente alla modulazione strumentale che ha la probabilità dell'1% di essere rivelata per una fluttuazione statistica.

Va da sé che, in pratica, il numero di fotoni rivelati è connesso al tempo di integrazione necessario attraverso il flusso della sorgente e l'area di raccolta delle ottiche, ma l'espressione appena scritta è la chiave per comprendere la statistica di base della misura. Anche immaginando di avere a disposizione un polarimetro perfetto ( $\mu = 1$ ) servono circa 184000 fotoni per raggiungere una MDP pari all'1%. Per confronto, l'adagio tipico dell'astronomia X è che basta una manciata di fotoni per identificare una sorgente, ed un centinaio per una misura ragionevole delle sue proprietà spettrali. Proprio la lunghezza dei tempi scala di osservazione necessari, e più specificamente la discrepanza con quelli tipici dell'imaging e della spettroscopia, è uno dei fattori determinanti che, come abbiamo detto, ha impedito alla polarimetria a raggi X di divenire una tecnica osservativa di routine.

## 3 Polarimetria ad effetto fotoelettrico: il Gas Pixel Detector

In linea di principio l'effetto fotoelettrico è un analizzatore perfetto per la polarizzazione. Per fotoni tra 1 e 10 keV (ove i flussi delle sorgenti sono relativamente intensi e le ottiche a raggi X sono estremamente efficienti) è il processo di interazione con la sezione d'urto più alta e, cosa più importante, la direzione di emissione del fotoelettrone (per fotoassorbimento su shell K) è modulata al 100% nel caso di radiazione polarizzata. Il problema fondamentale è che a queste energie gli elettroni hanno una capacità di propagazione nella materia molto limitata: anche in una miscela di gas relativamente leggera il range di un elettrone di qualche keV non è più lungo di qualche centinaio di  $\mu\text{m}$  ed è tipicamente tre ordini di grandezza più piccolo in un solido. Da un punto di vista tecnologico, dunque, la sfida è proprio quella di riuscire a campionare la traccia di un fotoelettrone di così bassa energia con un dettaglio sufficiente a ricostruirne la direzione di emissione, che a sua volta permette di misurare su base statistica il grado e l'angolo di polarizzazione della radiazione incidente.

L'introduzione dei Micro-Pattern Gas Detector (MPGD) è stato lo sviluppo tecnologico fondamentale che ha aperto

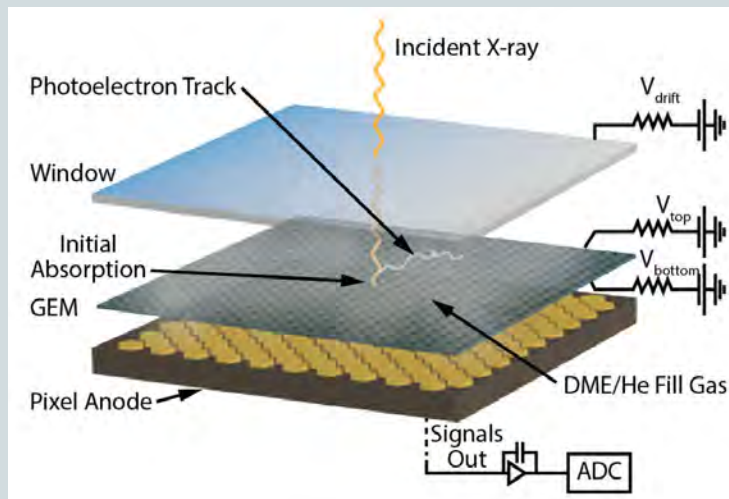


Fig. 2 Illustrazione schematica del principio di funzionamento di un Gas Pixel Detector per applicazioni polarimetriche. Il fotone entra nella parte sensibile del rivelatore attraverso una finestra di berillio e, se assorbito nella parte superiore della cella di gas, emette un fotoelettrone che, ionizzando il gas stesso, crea una serie di coppie elettrone-ione lungo il suo cammino. Gli elettroni sono trasportati verso il basso mediante un opportuno campo elettrico, moltiplicati per effetto valanga nel Gas Electron Multiplier, e raccolti sotto forma di segnale elettronico sull'anodo di lettura, fornendo un'immagine dettagliata della proiezione della traccia originale sul piano stesso.

la via, alla fine degli anni '90, alla prima implementazione praticamente utilizzabile di un polarimetro X ad alta efficienza che utilizzasse l'effetto fotoelettrico [4]. La **fig. 2** mostra schematicamente la struttura di un Gas Pixel Detector (GPD) per applicazioni polarimetriche nella geometria descritta in [4]. Il principio di funzionamento è sorprendentemente semplice. Il fotone incide ortogonalmente al piano del rivelatore attraversando una sottile finestra (e.g., di berillio). Se assorbito nella regione attiva (una cella sigillata dello spessore di circa 1 cm riempita con una opportuna miscela di gas) provoca l'emissione di un fotoelettrone che, ionizzando il gas stesso, lascia lungo la sua traccia una serie di coppie elettrone-ione. (La dinamica dell'effetto fotoelettrico è tale che il fotoelettrone è emesso preferenzialmente nel piano ortogonale alla direzione di propagazione del fotone originale, il che rende una geometria di lettura bidimensionale come quella mostrata in figura estremamente favorevole per il campionamento della traccia.) Gli elettroni della ionizzazione primaria sono quindi trasportati verso il piano di lettura per mezzo di un opportuno campo elettrico, moltiplicati e raccolti su un anodo di lettura finemente segmentato.

Gli ingredienti fondamentali del GPD nella geometria mostrata in figura sono dunque due: il Gas Electron Multiplier (GEM) ed il circuito integrato di lettura.

Il GEM [5] consiste in un sottile strato di dielettrico metallizzato su entrambe le facce in cui viene praticata una matrice regolare di fori circolari, come mostrato in **fig. 3**. L'applicazione di una opportuna differenza di potenziale tra le facce (tipicamente qualche centinaio di V) fa sì che il campo elettrico all'interno dei fori sia abbastanza intenso da innescare una valanga in regime proporzionale al passaggio

di una particella carica. Il GEM serve dunque a moltiplicare la ionizzazione primaria, che per fotoelettroni di qualche keV consta di una miscela tipica di circa un centinaio di elettroni, in modo che il segnale generato sull'anodo di lettura sia abbastanza grande da poter essere amplificato e digitalizzato con una catena di elettronica standard (i valori di guadagno efficace necessario per questa applicazione sono dell'ordine di qualche centinaio). Le caratteristiche peculiari del GEM sono che esso permette di disaccoppiare totalmente lo stadio di guadagno da quello di lettura, preservando allo stesso tempo, sotto opportune condizioni, l'informazione spaziale contenuta nella ionizzazione primaria. Pur trattandosi di un dispositivo che ha ormai una storia consolidata di applicazione in fisica delle alte energie ed imaging a raggi X [6], per la nostra applicazione è stato necessario spingere ai limiti le tecnologie di incisione per arrivare ad un passo di 50  $\mu\text{m}$  (molto più piccolo dei valori tipici per le applicazioni summenzionate) mantenendo allo stesso tempo la necessaria uniformità sulla superficie.

Il cuore vero e proprio del GPD è però l'anodo di lettura [7, 8], che ha richiesto una attività di ricerca e sviluppo di durata decennale per raggiungere le prestazioni ed il livello di maturazione necessario per l'impiego in una missione spaziale. Nello sforzo di superare le limitazioni intrinseche di un approccio basato su semplici circuiti stampati, che pure ha permesso di realizzare con successo prototipi funzionanti, e di dimostrare la validità di principio del nostro approccio, sono stati sviluppate negli anni tre generazioni di circuiti integrati dedicati, con superficie attiva e caratteristiche via via migliori (**fig. 4**). Comune a queste tre generazioni di ASIC è l'architettura complessiva: l'organizzazione in una matrice di pixel esagonali in cui lo strato metallico superiore funge

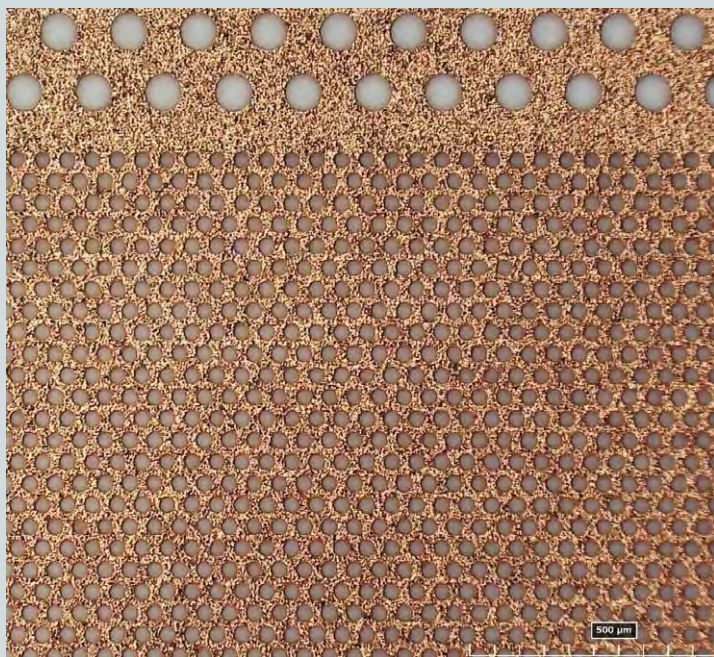


Fig. 3 Microfotografia di uno dei Gas Electron Multiplier che verranno utilizzati per i rivelatori sensibili alla polarizzazione del piano focale di IXPE. Lo spessore del foglio di dielettrico è  $50\ \mu\text{m}$  ed i fori all'interno dell'area attiva hanno un diametro di  $30\ \mu\text{m}$  ed un passo di  $50\ \mu\text{m}$ . Applicando una differenza di potenziale di  $400\text{--}500\ \text{V}$  tra le due facce, il campo elettrico all'interno dei fori è abbastanza intenso da innescare l'effetto valanga (in regime proporzionale) quando essi vengono attraversati da un elettrone della ionizzazione primaria.

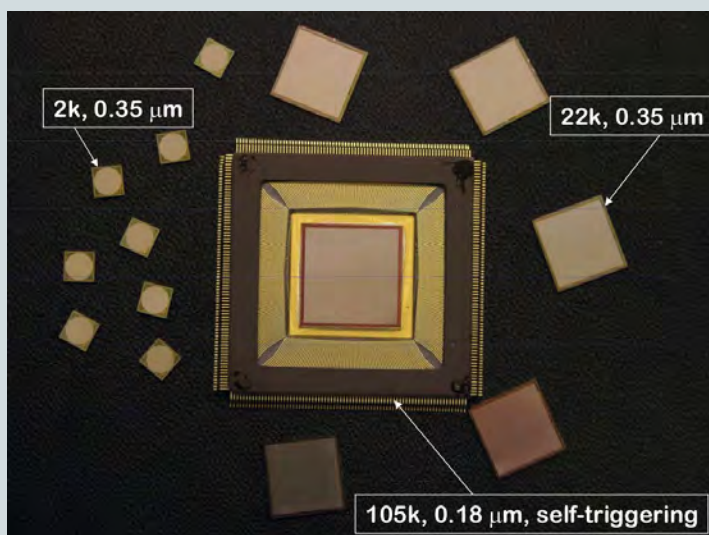


Fig. 4 Il circuito integrato utilizzato come anodo di lettura rappresenta, per molti versi, il cuore del Gas Pixel Detector. È organizzato in una matrice di pixel esagonali di passo  $50\ \mu\text{m}$ , ognuno dei quali contiene al suo interno una catena completa di elettronica. Nel corso del programma di ricerca e sviluppo culminato nella selezione di IXPE sono state sviluppate tre generazioni di ASIC, l'ultima delle quali (con  $300 \times 352$  pixel ed un'area attiva di circa  $2\ \text{cm}^2$ , mostrato al centro della foto all'interno del suo contenitore ceramico) è quella che volerà al piano focale della missione.

direttamente da anodo di collezione di carica ed ogni pixel contiene al suo interno una catena completa di elettronica (preamplificatore, shaper, sample and hold) e la lettura è seriale attraverso un convertitore analogico digitale esterno. Nella sua versione più avanzata, quella che volerà al piano focale di IXPE, il circuito integrato comprende  $352 \times 300$  pixel a passo di  $50\ \mu\text{m}$  per una superficie attiva totale di circa  $1,5 \times 1,5\ \text{cm}^2$ , numeri che si accordano bene con le ottiche ad incidenza radente che verranno utilizzate per la missione, sia in termini di Point-Spread-Function (PSF) che in termini di campo di vista. Una delle caratteristiche salienti di quest'ultima generazione di ASIC è la funzionalità di self-triggering e la capacità di auto-selezionare una regione di interesse attorno ai pixel che registrano un segnale fisico,

che permette di evitare la lettura seriale dell'intero integrato (che come abbiamo detto contiene più di 100000 pixel) abbattendo di tre ordini di grandezza il tempo necessario per l'acquisizione di un frame.

La fig. 5 mostra una traccia di un fotoelettrone reale acquisita con un GPD nella configurazione illustrata sopra. La scala di colori è indicativa del segnale indotto su ciascun pixel, ovvero della densità locale di ionizzazione, e mette in luce il dettaglio con cui il GPD è in grado di risolvere la traccia—è chiaramente visibile, ad esempio, il picco di Bragg alla fine della traccia. L'algoritmo base di ricostruzione consiste in una prima analisi dei momenti della distribuzione di carica attorno al suo baricentro per identificare l'asse principale della distribuzione stessa. La presenza del

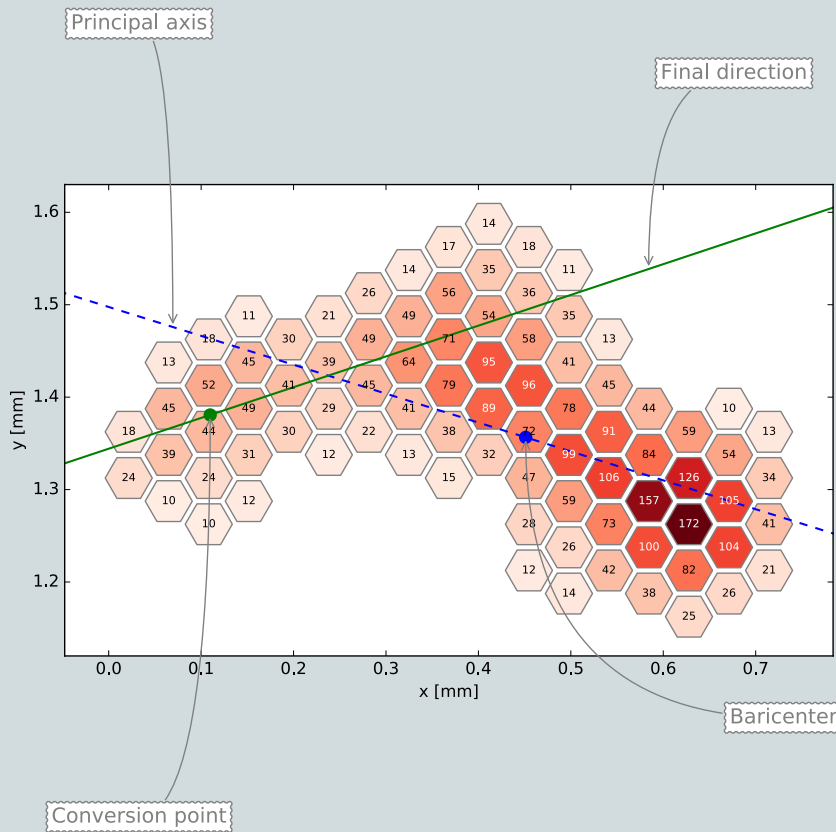


Fig. 5 Esempio di traccia di un fotoelettrone raccolta in laboratorio esponendo un Gas Pixel Detector alla radiazione di una sorgente monocromatica di raggi X di 5,9 keV. La scale di colori ed i numeri all'interno di ciascun pixel sono rappresentativi della carica raccolta dal pixel stesso. L'evento illustra la ricchezza di dettaglio con cui la traccia, lunga solo 700  $\mu\text{m}$ , può essere ricostruita (si vede chiaramente, ad esempio, il picco di Bragg nella parte finale della traccia stessa). Per completezza, il punto e la linea tratteggiata blu rappresentano il baricentro e l'asse principale della traccia, rispettivamente, mentre il punto e la linea verde rappresentano la posizione del punto di assorbimento e la direzione iniziale di emissione del fotoelettrone ricostruite.

picco di Bragg fa sì che il momento terzo della proiezione longitudinale della carica sull'asse principale permetta poi di distinguere la parte iniziale della traccia da quella finale e fornisce una stima del punto di assorbimento significativamente più accurata del baricentro. A questo punto una seconda analisi dei momenti, in cui i pixel sono opportunamente pesati a seconda della distanza stimata dalla posizione di assorbimento, fornisce la stima finale della direzione di emissione del fotoelettrone.

La peculiarità del GPD come rivelatore di piano focale è la capacità, unica nel suo genere, di misurare contemporaneamente le quattro proprietà della radiazione incidente: direzione, tempo, energie e, per la prima volta, polarizzazione. La **tabella 1** riassume le proprietà strumentali del GPD nella configurazione studiata per la missione IXPE.

#### 4 La missione Imaging X-ray Polarimetry Explorer

La selezione della proposta IXPE [9] come prossima missione del programma SMEX della NASA costituisce il riconoscimento di uno sviluppo tecnologico interamente italiano che ha permesso un salto in avanti di almeno un ordine di grandezza in sensibilità rispetto alle tecniche tradizionali della polarimetria a raggi X. Questo è ancora più notevole in considerazione del fatto che questo salto in avanti è stato possibile all'interno dell'involucro relativamente stretto di una missione "piccola": 300 kg di massa totale, 200 W di potenza e poco più di 1 m<sup>3</sup> di spazio disponibile per il lancio.

La **fig. 6** mostra una rappresentazione artistica di IXPE in configurazione di presa dati. Lo strumento è composto da tre telescopi identici, ciascuno dei quali è composto da un'ottica per raggi X, che serve a focalizzare i fotoni per incidenza radente su una serie di specchi concentrici annidati, ed un

Parametro	Valore
Fattore di modulazione	20% (70%) a 2 (8) keV
Modulazione sistematica residua	< 0.5%
Risoluzione spaziale	90 $\mu\text{m}$ a 5.9 keV
Risoluzione energetica	< 20% a 5.9 keV
Risoluzione temporale	10 $\mu\text{s}$

Tab. 1 Proprietà strumentali del GPD nella configurazione che volerà nel piano focale della missione IXPE.

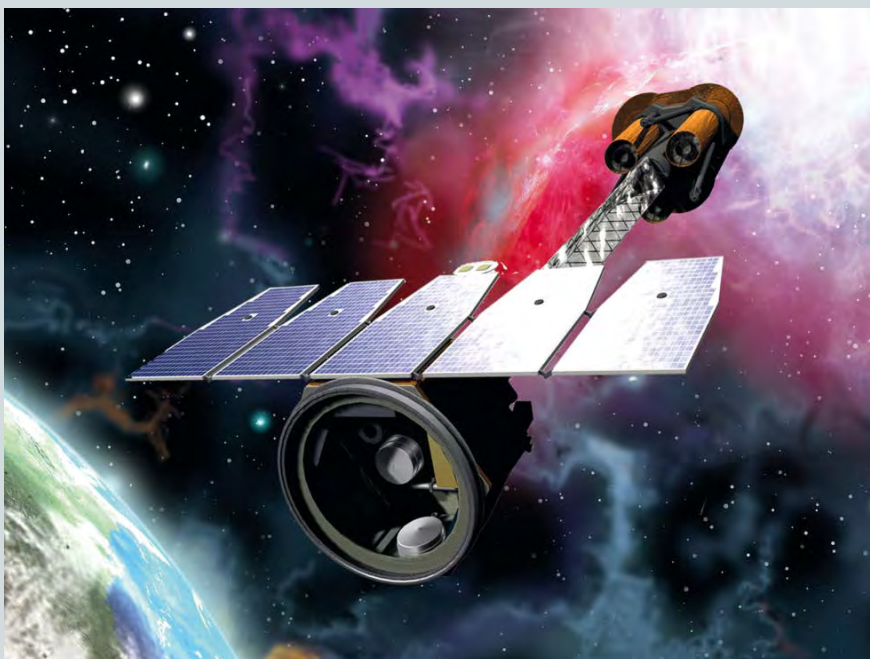


Fig. 6 Rappresentazione artistica del telescopio spaziale per raggi X IXPE, che sarà lanciato dalla NASA alla fine del 2020. Lo strumento è composto da tre telescopi identici, ciascuno dei quali include un'ottica a incidenza radente ed un rivelatore a gas sensibile alla polarizzazione. Le ottiche ed i rivelatori di piano focale sono collegati tra di loro da un traliccio estensibile che verrà dispiegato in orbita per raggiungere la lunghezza focale di progetto (4 m).

GPD posto al fuoco dell'ottica stessa. Sarà messo in un'orbita circolare equatoriale ad un'altezza di 540 km da un lanciatore Pegasus e, per permettere allo strumento di entrare nello spazio disponibile nel vano di carico del lanciatore stesso, le ottiche sono collegate al piano focale attraverso un traliccio estensibile. IXPE sarà lanciato in configurazione "ripiegata" ed il traliccio si estenderà fino alla lunghezza focale di disegno (4 m) una volta in orbita, dopo la separazione della satellite dal lanciatore ed il dispiegamento dei pannelli solari. Le principali caratteristiche del telescopio e della missione sono riassunte nella [tabella 2](#).

Una volta in configurazione operativa, IXPE darà avvio al suo programma osservativo, che lo porterà a puntare in modo nuovo decine di sorgenti diverse, galattiche ed extragalattiche, per periodi di tempo variabile da poche ore a svariati giorni a seconda del flusso della sorgente stessa e

del grado di polarizzazione atteso. Per alcune delle sorgenti più intense IXPE sarà in grado di misurare il grado e l'angolo di polarizzazione lineare in funzione dell'energia, del tempo (o della fase di rotazione per le sorgenti periodiche) o della posizione, come mostrato nella simulazione in [fig. 7](#) nel caso del residuo di supernova Cassiopea A. In ogni caso IXPE fornirà informazioni preziose e non accessibili per altra via su alcuni degli oggetti più estremi dell'Universo conosciuto.

Con la missione X-ray Imaging Polarimetry Explorer (XIPE) [10] attualmente in fase di studio dall'Agenzia Spaziale Europea, e la proposta congiunta Europa-Cina enhanced X-ray Timing and Polarimetry (e-XTP) [11], ciascuna delle quali prevede GPD simili a quelli che verranno utilizzati per IXPE, la polarimetria a raggi X potrebbe, a quarant'anni di distanza dalla sua nascita, entrare finalmente a pieno titolo tra le tecniche standard dell'astronomia X.

Parametro	Valore
Massa	300 kg
Potenza disponibile	200 W
Lunghezza focale	4 m
Point-Spread Function (PSF)	< 25 arcsec
Campo di vista	10 × 10 arcmin <sup>2</sup>
Data di lancio prevista	2020
Orbita	Circolare, inclinazione 0 gradi, altezza 540 km
Durata della missione	> 2 anni

Tab. 2 Sommario delle caratteristiche salienti del telescopio spaziale IXPE e delle proprietà della missione.

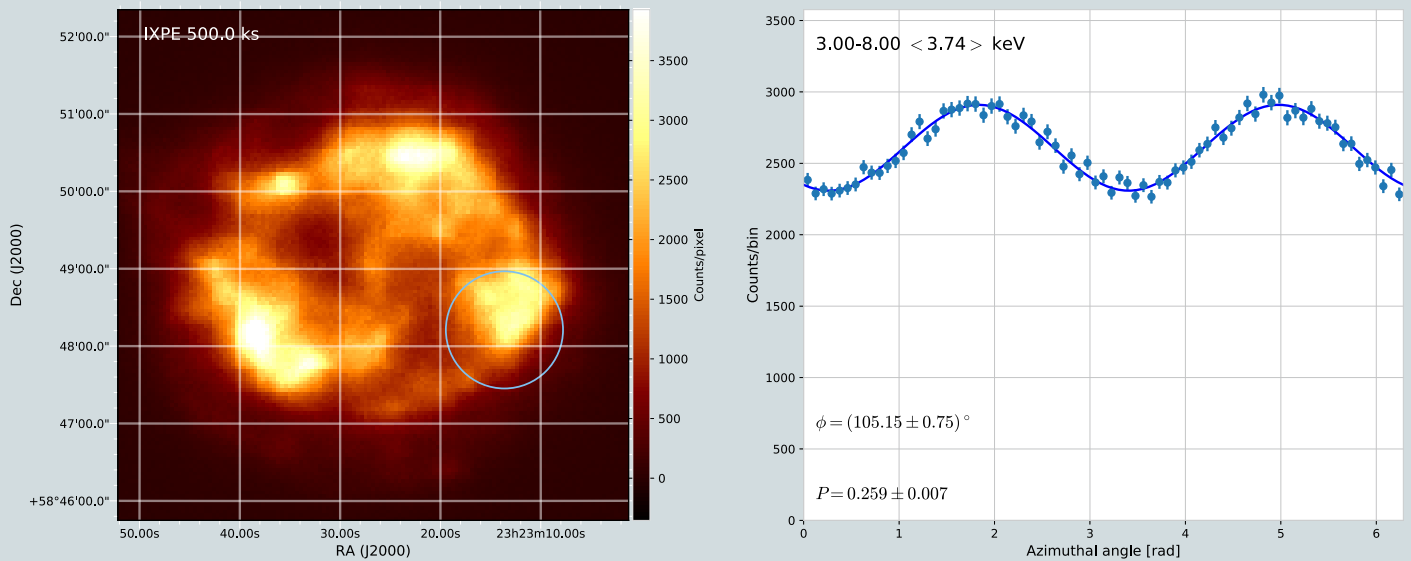


Fig. 7 Simulazione realistica di un'osservazione del residuo di supernova Cassiopea A con IXPE. IXPE permetterà di studiare simultaneamente tutte le proprietà della radiazione X emessa dalla sorgente, incluso l'angolo ed il grado di polarizzazione in funzione della posizione all'interno della sorgente. Per completezza, la curva di modulazione sulla destra, integrata tra 3 ed 8 keV, si riferisce alla regione di interesse circolare mostrata con un cerchio nell'immagine di sinistra.

### Riferimenti bibliografici

- [1] R. Bellazzini, E. Costa, G. Matt, G. Tagliaferri (Editors), "X-ray polarimetry: a new window in astrophysics" (Cambridge University Press) 2010.
- [2] M. C. Weisskopf, E. H. Silver, H. L. Kestembaum, K. S. Long, R. Novick, "A precision measurement of the X-ray polarization of the Crab Nebula without pulsar contamination", *Astrophys. J.*, 220 (1978) L117.
- [3] P. Soffitta et al., "Techniques and detectors for polarimetry in X-ray astronomy", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 510 (2003) 170.
- [4] E. Costa, P. Soffitta, R. Bellazzini, A. Brez, N. Lumb, G. Spandre, "An efficient photoelectric X-ray polarimeter for the study of black holes and neutron stars", *Nature*, 411 (2001) 662.
- [5] F. Sauli, "GEM, a new concept for electron amplification in gas detectors", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 386 (1997) 531.
- [6] F. Sauli, "The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 805 (2016) 2.
- [7] R. Bellazzini, F. Angelini, L. Baldini, F. Bitti, A. Brez, M. Ceccanti, L. Latronico, M. M. Massai, M. Minuti, N. Omodei, M. Razzano, C. Sgrò, G. Spandre, E. Costa, P. Soffitta, "Reading a GEM with a VLSI pixel ASIC used as a direct charge collecting anode", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 535 (2004) 477.
- [8] R. Bellazzini, G. Spandre, M. Minuti, L. Baldini, A. Brez, F. Cavalca, L. Latronico, N. Omodei, M. M. Massai, C. Sgrò, E. Costa, P. Soffitta, F. Krummenacher, R. de Oliveira, "Direct reading of charge multipliers with a self-triggering CMOS analog chip with 105 k pixels at 50  $\mu\text{m}$  pitch", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 566 (2006) 552.
- [9] M. C. Weisskopf et al., "The Imaging X-ray Polarimeter (IXPE)", *Proc. SPIE*, 9905 (2016).
- [10] <http://www.isdc.unige.ch/xipe/>
- [11] <http://www.isdc.unige.ch/extp/>

Luca Baldini

Luca Baldini si è laureato in Fisica presso l'Università di Pisa nel 2001 ed ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Fisica Applicata presso la stessa Università nel 2005. Dal 2011 è Ricercatore Universitario presso il Dipartimento di Fisica Enrico Fermi ed incaricato di ricerca presso la Sezione di Pisa dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Nel corso degli ultimi 15 anni ha partecipato attivamente alla progettazione, la costruzione e l'analisi dei dati scientifici del Large Area Telescope, lo strumento principale a bordo dell'osservatorio spaziale per raggi gamma *Fermi*. È "co-investigatore" della missione Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) che verrà lanciata dalla NASA alla fine del 2020.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI TRENTO

Dipartimento di Fisica



120 ANNI  
1897-2017

# 103° CONGRESSO NAZIONALE della SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Trento, 11-15 settembre 2017

Polo scientifico e tecnologico "Fabio Ferrari" (Povo 1)

Via Sommarive, 9 - Povo (Trento)

IMG - veduta sulla città di Trento dalla Loggia del Romanino (Castello del Buonconsiglio), foto BRUNIS - Archivio APT Trento ART - UniTrento

<https://congresso.sif.it/>

<http://events.unitn.it/sif2017>

Con il patrocinio di



# PROGRAMMA GENERALE DEL CONGRESSO

<http://congresso.sif.it/>

## Lunedì 11 Settembre

- 9:00–11:00 Cerimonia di Inaugurazione, Saluti Autorità, Introduzione del Presidente, Premiazioni:
- Premio “Enrico Fermi”
  - Premio “Giuseppe Occhialini” SIF-IOP (Institute of Physics)
  - Premio per la Didattica o Storia della Fisica
  - Premio per la Comunicazione Scientifica
  - Borsa “Ettore Pancini”
  - Premio “Pietro Bassi”
  - Premio “Giuliano Preparata”
  - Premio “Piero Broveto”
  - Premio “Franco Manfredi”
  - Premi per giovani laureati in Fisica dopo il maggio 2010 e dopo il maggio 2014
  - Premi per le Migliori Comunicazioni al Congresso Nazionale di Padova 2016
  - Medaglie ai Soci Benemeriti della SIF
- 11:00–12:00 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare)  
F. FERRONI (INFN, Sezione di Roma)  
*Il neutrino: 90 anni e ancora non lo conosciamo veramente.*
- 12:00–13:00 Relazione Generale Sezione III (Astrofisica)  
S. VITALE (Dipartimento di Fisica, Università di Trento, Povo, TN)  
*LISA Pathfinder and LISA: Gravitational waves from the dawn of the universe.*
- 14:30–18:30 Relazioni su Invito e Comunicazioni

## Martedì 12 Settembre

- 9:00–13:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 14:30–15:30 Relazione Generale Sezione VII (Didattica e storia della fisica)  
S. OSSICINI (Dipartimento di Scienze e Metodi dell’Ingegneria, Università di Modena e Reggio Emilia)  
*I pinocchi della scienza: Storie di illusioni e frodi nella ricerca scientifica.*
- 15:30–17:00 Assemblea Generale dei Soci della SIF
- Ordine del giorno:
- 1) Approvazione dell’ordine del giorno.
  - 2) Approvazione del verbale dell’Assemblea Generale dei Soci del 27 settembre 2016.
  - 3) Relazione del Presidente.
  - 4) Relazioni del Collegio dei Revisori dei Conti e approvazione dei bilanci consuntivi 2016.
  - 5) Ratifica e nomina dei Revisori dei Conti.
  - 6) Discussione e approvazione della Relazione del Presidente.
  - 7) Università e settori concorsuali/disciplinari.
  - 8) La SIF e i giovani.
  - 9) Varie ed eventuali.
- 17:00–18:00 Relazione Generale Sezione VI (Fisica applicata, acceleratori e beni culturali)  
M. DURANTE (TIFPA-INFN, Sezione di Trento, Povo, TN)  
*Heavy ions in therapy and space.*

# PROGRAMMA GENERALE DEL CONGRESSO

## Mercoledì 13 Settembre

- 9:00–13:00      Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 14:30–15:30    Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare)  
J.W. HARRIS (Yale University, New Haven, CT, USA)  
*Ultra-Relativistic Heavy-Ion Physics – Recent Results and a Future Perspective.*
- 15:30–16:30    Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia)  
R. FAZIO (Scuola Normale Superiore, Pisa)  
*Quantum Simulators.*
- 16:30–17:30    Relazione Generale Sezione V (Biofisica e fisica medica)  
W. LOSERT (College of Computer, Mathematical, and Natural Sciences University of Maryland,  
College Park, MD, USA)  
*Guided cell migration: A dynamical systems perspective.*
- 18:30            Visita al MUSE
- 20:30            Cena Sociale

## Giovedì 14 Settembre

- 9:00–11:30     Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 11:30–13:00    Tavola Rotonda “Fisica, femminile singolare”.
- 15:00–16:00    Relazione Generale Sezione VI (Fisica applicata, acceleratori e beni culturali)  
J.A. ROGERS (Northwestern University, Evanston, IL, USA)  
*Soft optoelectronic interfaces to the brain.*
- 16:00–19:00    Relazioni su Invito e Comunicazioni

## Venerdì 15 Settembre

- 9:00–12:00     Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 12:00–13:00    Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia)  
A.K. SOPER (ISIS Facility, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK)  
*Water and nitrogen in confinement.*
- 14:30–15:30    Relazione Generale Sezione IV (Geofisica e fisica dell’ambiente)  
A. AMATO (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma)  
*I recenti terremoti in Italia: Acquisizioni scientifiche, percezione del rischio e impatto sulla società.*
- 15:30–18:30    Relazioni su Invito e Comunicazioni

## PASSION FOR PHYSICS

Società Italiana di Fisica 1897 - 2017

120<sup>th</sup> Anniversary



24 June 2017

Villa Monastero  
Varenna (Lake Como)



### SIF: UNA PASSIONE PER LA FISICA CHE DURA DA 120 ANNI



Nel 2017 la SIF celebra il 120° anniversario della sua fondazione, avvenuta ufficialmente a Roma nel settembre del 1897 presso il famoso Regio Istituto Fisico di via Panisperna in occasione della prima Adunanza Generale in cui si tennero le elezioni alle cariche sociali. I tre promotori principali, Pietro Blaserna, Angelo Battelli e Antonio Ròiti, assieme a Riccardo Felici, allora proprietario della rivista *Il Nuovo Cimento*, così ne davano comunicazione ai colleghi nel numero di gennaio dello

stesso anno della rivista:

*"Abbiamo il piacere di annunciare ai nostri lettori che è ormai assicurata la costituzione di una Società Italiana di Fisica ... Essa assume per Organo 'Il Nuovo Cimento'..."*

Sin dall'inizio la storia della SIF fu strettamente collegata alla rivista di fisica *Il Nuovo Cimento*, fondata nel 1855 a Pisa. Il titolo si ispirava chiaramente all'antica Accademia del Cimento, l'associazione dei discepoli di Galileo Galilei, il cui motto e logo

furono poi naturalmente adottati dalla SIF, rimanendo invariati nel tempo.

"Provando e Riprovando", il motto che è riportato sul logo, è infatti quanto di più appropriato poiché riassume in sé l'essenza del metodo scientifico.

Vediamo come per tutti questi anni la SIF ha perseguito ininterrottamente la sua missione cioè "promuovere, favorire e tutelare lo sviluppo della fisica in Italia e nel mondo".

Nei primi decenni del XX

secolo la vita della Società fu soprattutto rivolta ad attività societarie, attraverso la guida di illustri Presidenti quali Augusto Righi, Angelo Battelli, Vito Volterra, Antonio Garbasso e i suoi eminenti associati. A partire dagli anni 1930-40, sotto la guida di Orso Mario Corbino, la nuova generazione dei fisici, stimolata da brillanti personalità come Enrico Fermi e il suo gruppo, divenne più attiva e numerosa, accelerando così lo sviluppo ad ampio raggio della Società e della fisica in



120 ANNI  
1897-2017



Italia e all'estero. Parallelamente anche Il Nuovo Cimento, che fino ad allora pubblicava articoli in italiano, col passaggio alla lingua inglese divenne internazionale e crebbe notevolmente sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

Ma è a partire dal primo dopoguerra, sotto la presidenza di Giovanni Polvani, che si verifica il maggior sviluppo della Società, testimoniato dall'incredibile aumento del numero dei Soci che passa da poche centinaia

a più di mille. Partono nuove iniziative, di cui la più rilevante è certamente la fondazione nel 1953 della Scuola Internazionale di Varenna. La Società diviene così un'influente istituzione nazionale, con sempre maggior partecipazione e riconoscimento nel contesto internazionale. Tanto che in epoca successiva, la SIF ha un ruolo preminente nella fondazione della Società Europea di Fisica - European Physical Society (EPS), avvenuta nel 1968 ad opera di Gilberto Bernardini,

allora Presidente SIF, che ne divenne il primo Presidente.

Oggi la SIF con i circa 3500 Soci, di cui un terzo sono donne e oltre la metà sono giovani, rappresenta la comunità scientifica italiana in tutti i campi della fisica e in tutti i suoi settori applicativi, e fornisce un forum nazionale di discussione su temi di interesse e attualità nel mondo accademico, dell'insegnamento, della ricerca e dell'industria.

Le attività della SIF continuano a essere molteplici,

sia quelle istituzionali rivolte all'organizzazione di eventi, scuole e congressi, mostre, sia quelle editoriali per la diffusione della cultura scientifica. Le pubblicazioni della SIF si articolano in volumi, riviste proprietarie e riviste a partenariato europeo. Ma non solo pubblicazioni, in tempi recenti la SIF ha divulgato anche attraverso prodotti multimediali, e si è cimentata persino nella progettazione ed esecuzione di una rappresentazione teatrale.



Tutto ciò è stato reso possibile grazie all'attività e al costante impegno di tutti quanti si sono avvicinati nel tempo alla Presidenza e quali Membri del Consiglio, l'organo direttivo che viene eletto con cadenza triennale.

Tra le numerose attività della SIF, indubbio vanto è la celebre Scuola Internazionale di Fisica "Enrico Fermi" di Varenna, dedicata al grande fisico che vi tenne una memorabile serie di lezioni poco prima della sua immatura scomparsa. Da allora, senza interruzioni, la SIF ha continuato a organizzare ogni anno una serie di corsi che radunano eminenti scienziati e giovani ricercatori, provenienti da ogni angolo del pianeta, per studiare temi della massima attualità scientifica in tutti i campi della fisica. Questi corsi sono stati finora più di 200, con la partecipazione di

oltre 13000 studiosi, tra cui ben sessanta Premi Nobel. Oggi la tradizione continua, mantenendo inalterata la straordinaria qualità della Scuola, e l'altissimo prestigio internazionale di cui gode da sempre.

Per mettere nel dovuto risalto questa importante tappa di storia della SIF, il primo evento celebrativo del 120° anniversario, il Simposio Internazionale "Passion for Physics" ha avuto luogo il 24 giugno proprio a Varenna, sul Lago di Como, nella splendida cornice di Villa Monastero.

Esistono pochi luoghi al mondo come questa villa dove storia, natura, stile e bellezza si fondono in un'atmosfera che stimola idee e creatività, vivaci scambi di opinioni, dibattiti e confronti. Lavorare in un ambiente così felice è un privilegio e inoltre un potente ingrediente per la riuscita dei corsi e degli eventi che vi sono

organizzati. Per questo motivo la SIF ha scelto un luogo così magico per festeggiare.

Il Simposio è stato inaugurato dalle Autorità locali, il Presidente della Provincia di Lecco, Flavio Polano, e il Sindaco di Varenna, Mauro Manzoni, e da personalità del mondo accademico e della ricerca quali il Presidente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Massimo Inguscio, il Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Fernando Ferroni, il Rettore dell'Università di Milano Bicocca, Cristina Messa, e il Presidente della European Physical Society (EPS), Rüdiger Voss.

Gli indirizzi di saluto hanno sottolineato con forza quanto sia importante che la SIF, insieme agli Enti e alle Istituzioni che la sostengono, stimoli e asseconi questa passione per la fisica, questa sete di sapere scientifico che anima tutti coloro che,

giovanissimi, giovani o meno giovani, fanno ricerca nei più diversi settori della fisica, e la tramandi efficacemente a nuove generazioni di "appassionati".

Durante il simposio sono state illustrate alcune delle più recenti e maggiori conquiste della fisica in tutti i suoi svariati aspetti teorici e sperimentali, dalle onde gravitazionali, il Big Bang, l'origine del tempo e la materia oscura dell'Universo, alla struttura a quark delle particelle, alle oscillazioni dei neutrini, alla struttura della materia a livello atomico, alla superconduttività, alla luce e alle sue innumerevoli applicazioni, ai grandi progetti per nuove infrastrutture di ricerca.

A farlo, oltre agli illustri relatori stranieri intervenuti, sono stati alcuni protagonisti italiani del mondo della ricerca tra cui alcuni detentori del Premio Fermi (il più importante premio della SIF,



Il programma completo e il video dell'evento sono disponibili in rete:  
<https://www.sif.it/attivita/passionforphysics2>

istituito nel 2001 in occasione del centenario della nascita di Fermi e di cui Antonino Zichichi fu il primo vincitore) ossia, oltre a Massimo Inguscio, Luciano Maiani, Michele Parrinello e Gabriele Veneziano.

Il Simposio di Varenna si è concluso all'imbrunire con un breve ma incantevole concerto di musica classica eseguito nel giardino di Villa Monastero, sotto i cipressi secolari, da un quartetto d'archi di giovani virtuosi.

Una volta calata la sera, alcune delle immagini più significative del glorioso passato della SIF sono state proiettate sulla fiancata della Villa. E per finire, del tutto fuori programma, la notte è stata allietata da festosi fuochi d'artificio, visibili in lontananza sulla sponda opposta del lago. Tanti auguri SIF!

L. Cifarelli  
 A. Oleandri



Per i suoi 120 anni la SIF ha prodotto una versione aggiornata del fascicolo, in italiano e in inglese, intitolato "120 ANNI E OLTRE / 120 YEARS AND BEYOND". Il fascicolo contiene una bella sintesi degli eventi della SIF con tutti i dati relativi ai Presidenti e Consigli di Presidenza, ai Congressi Nazionali, alle pubblicazioni, ai premi e riconoscimenti. Ampio spazio è riservato alla Scuola di Varenna con l'elenco di tutti i corsi e rispettivi direttori, arricchito dalla galleria dei Premi Nobel che vi hanno partecipato.

Il fascicolo è stato distribuito in anteprima ai partecipanti del Simposio Internazionale "Passion for Physics" a Varenna e sarà anche disponibile al 103° Congresso Nazionale della SIF a Trento.

## FISICA A TRENTO

**LORENZO PAVESI**

*Dipartimento di Fisica, Università di Trento*

Sulla collina a est di Trento si trova un sistema di ricerca integrato che assieme al Dipartimento di Fisica dell'Università vede presenti le realtà del Centro Materiali e Microsistemi (CMM) e del Centro Europeo per Studi in Fisica Teorica Nucleare (ECT\*) della Fondazione Bruno Kessler (FBK), il Centro Istituto Trentino per la Fisica Fondamentale e le Applicazioni (TIFPA) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), e varie unità locali di istituti del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR): Istituto Nazionale di Ottica INO, Istituto Materiali per l'Elettronica e il Magnetismo IMEM, Istituto di Fotonica e Nanotecnologie IFN, Istituto di Biofisica IBF. Poco lontano, a Rovereto, infine si trova il Center for Neuroscience and Cognitive Systems dell'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT). Si tratta di una popolazione di quasi 600 ricercatori, assegnisti e dottorandi che lavorano su tematiche inerenti la fisica. In questo breve articolo cercherò di descrivere di cosa si occupano.

### 1 Il Dipartimento di Fisica di Trento<sup>1</sup>

Scienze quantistiche, cosmologia, astroparticelle, onde gravitazionali, gas ultra-freddi, fotonica, sistemi complessi, spettroscopia molecolare e atomica, fisica nucleare, nanoscienza, biofisica e fisica medica, supercalcolo, energia-ambiente, comunicazione delle scienze e didattica della fisica sono le aree di ricerca su cui sono attivi le ricercatrici e i ricercatori del Dipartimento. Inoltre il Dipartimento ospita nelle sue strutture il TIFPA, il Laboratorio Interdisciplinare di Scienza Computazionale LISC – iniziativa congiunta con FBK, il centro BEC iniziativa congiunta con INO-CNR e parte dell'unità trentina dell'IFN-CNR. Ecco di cosa si occupano i dieci laboratori che costituiscono il Dipartimento.

#### Laboratorio di Fisica Astroparticellare

Il laboratorio si occupa dei metodi e delle tecniche per misurare la radiazione nello spazio, includendo l'analisi dei dati raccolti. Attualmente è impegnato su quattro fronti: esperimento AMS-02, situato sulla *International Space Station (ISS)*; esperimento LIMADOU, col rivelatore *High Energy Particle Detector (HEPD)*, che partirà in agosto 2017 sul *China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES)*; ricerca e sviluppo di nuovi rivelatori di radiazione ionizzante, con uso di tecnologia al silicio;

ricerca e sviluppo di magneti superconduttori ad alta temperatura per applicazioni spaziali. I programmi di ricerca e sviluppo sono mirati ad una prossima generazione di rivelatori di radiazione cosmica nello spazio ed avvengono in un contesto organico di collaborazione con il TIFPA, FBK e il CERN.

In particolare, AMS-02 sta effettuando misure dirette di composizione ed energia dei raggi cosmici con un livello di accuratezza mai raggiunto prima, esplorando nuove frontiere

nella ricerca dell'antimateria primordiale e nell'indagine sulla natura della materia oscura. Il gruppo trentino è impegnato sulla misura del flusso di deuterio ed anti-deuterio, quest'ultimo di primaria importanza per validare o falsificare diversi modelli esotici di materia oscura.

#### Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare

Il laboratorio si occupa della dinamica dei sistemi atomici e molecolari. Specificatamente:



La stazione spaziale internazionale che ospita AMS.

<sup>1</sup>[www.physics.unitn.it](http://www.physics.unitn.it)

#### *Collisioni reattive di bassa energia tra ioni e neutri:*

Le reazioni ione-molecola a basse energie di collisione (sub eV – eV) permettono di capire la formazione di molecole complesse nello spazio interstellare e nelle ionosfere planetarie. Nel laboratorio si usano spettrometri di massa in configurazione tandem accoppiati ad una guida a radio-frequenza che serve per manipolare un fascio ionico di bassa energia. Si misurano sezioni d'urto totali in funzione dell'energia di collisione per i diversi canali di reazione. Questi dati sono a supporto delle osservazioni astronomiche e sono fondamentali per modellare le densità delle varie specie molecolari extraterrestri.

#### *Fisica-chimica dei plasmi di non-equilibrio:*

Le scariche elettriche in miscele gassose possono creare plasmi caratterizzati da una situazione lontana dall'equilibrio. In particolare, mentre la temperatura del gas può essere vicina a quella ambiente, l'energia vibrazionale e quella degli elettroni possono essere molto alte. Tale situazione può promuovere una "hot chemistry with cold molecules". Questa opportunità può essere sfruttata per dissociare a bassa temperatura (quindi con alta efficienza) molecole particolarmente stabili come CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, al fine di riconvertirle in combustibili (detti solari se il plasma viene alimentato con energia rinnovabile).

#### **Laboratorio di Chimica Bio-organica**

Il tema centrale delle attività di ricerca riguarda l'utilizzo dei metodi della chimica organica per lo studio della "Chimica dei Prodotti Naturali". Essa richiede un approccio interdisciplinare tra fisica, chimica e biologia molecolare con prospettive applicative in farmacologia, medicina, biotecnologie, agronomia e nelle scienze ecologico-ambientali. Le tematiche di ricerca riguardano:

#### *Composti naturali di interesse farmaceutico e nutraceutico:*

Separazione e determinazione quantitative, isolamento di metaboliti secondari di origine marina e terrestre e da colture batteriche, caratterizzazione strutturale (principalmente mediante analisi NMR e spettrometria di massa) e sintesi organica.

*Sintesi organica e Progettazione biomimetica di farmaci e sintesi organica:* Calcoli di docking molecolare di molecole naturali e sintetiche con interesse quali agenti antitumorali e per il trattamento di malattie neurodegenerative. Sintesi di molecole chirali strutturalmente simili a metaboliti antibatterici e citotossici, mediante tecniche ecocompatibili (reazioni assistite da microonde e in assenza di solvente).

#### *Valorizzazione di prodotti di recupero da biomasse:*

Sintesi di molecole di interesse biologico a partire da building blocks chirali ottenuti dalla pirolisi della cellulosa.

#### *Chimica-fisica organica e Chimica del plasma:*

Indagine meccanicistica di processi ione-molecola in sorgenti ioniche, calcoli *ab-initio* su molecole organiche medio-piccole.

*Chimica-biofisica e Lipidomica:* Profili qualitativi e quantitativi di lipidi in membrane cellulari, interazioni proteine-lipidi.

#### **Laboratorio di Biofisica e Biosegnali**

Il laboratorio si occupa dell'organizzazione e del funzionamento di sistemi viventi a diverse scale spazio-temporali.

Un primo ambito riguarda i meccanismi alla base della ricezione, della trasduzione, della memoria e del recupero dei segnali nel sistema nervoso. I metodi sperimentali si basano sulla tecnica di imaging nonlineare che utilizza un microscopio a due fotoni per l'imaging di calcio in piccoli animali con elevata risoluzione spazio-temporale. L'attività di ricerca si concentra sul sistema olfattivo. Uno dei modelli animali studiati è l'ape, che con un cervello di appena un milione di neuroni è in grado di eseguire compiti di cognizione e di apprendimento molto complessi.

Un altro settore di ricerca è rivolto alla comprensione dei fenomeni bioelettrici cardiaci con un approccio traslazionale. La ricerca, condotta attraverso tecniche avanzate di analisi del segnale, modelli di simulazione e imaging multimodale, è finalizzata alla caratterizzazione dell'attività elettromeccanica cardiaca in condizioni fisiologiche e patologiche, con particolare interesse per le aritmie cardiache.

Infine, con l'inizio delle attività nella sala sperimentale presso il centro di protonterapia di Trento, si sono aperte nuove linee di ricerca, dalla radioprotezione nello spazio alla fisica medica con le particelle cariche. Le tematiche studiate includono interazioni nucleari ionomateria, implementazioni di tecniche avanzate nei piani di trattamento, sviluppo e test di rivelatori.

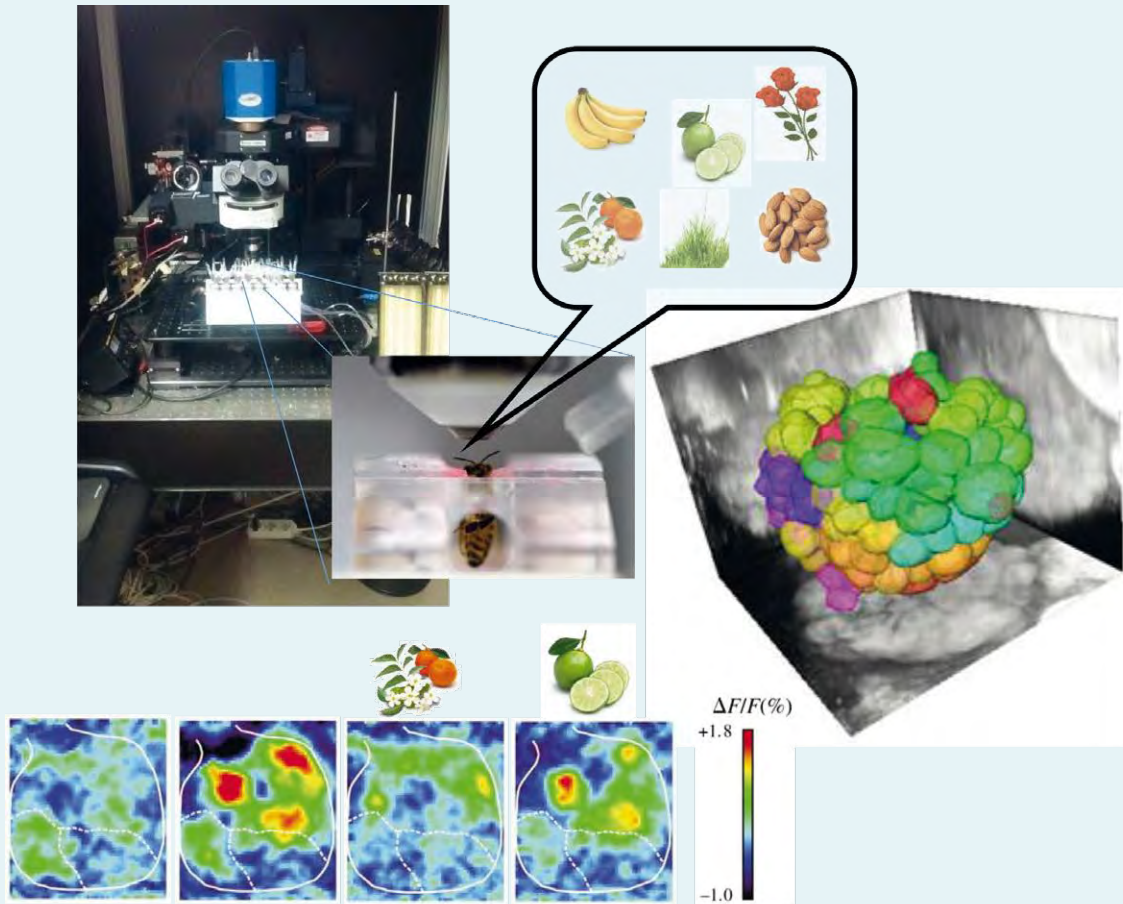
#### **Comunicazione della Scienza Fisica**

L'attività di ricerca di questo laboratorio è caratterizzata da tre filoni principali.

In uno vengono affrontate tematiche di interpretazione didattica – in collaborazione con i principali gruppi nazionali e internazionali del settore – per la trattazione e descrizione di argomenti "standard" di fisica (meccanica, elettromagnetismo, ottica, fluidi, quantistica,



Strumentazione del laboratorio: risonanza magnetica nucleare e spettrometro di massa a trappola ionica, con sorgenti di ionizzazione ESI e APCI, accoppiato a un cromatografo liquido HPLC con rivelatore UV-vis DAD.



Il modello sperimentale dell'ape con alcune mappe cerebrali.

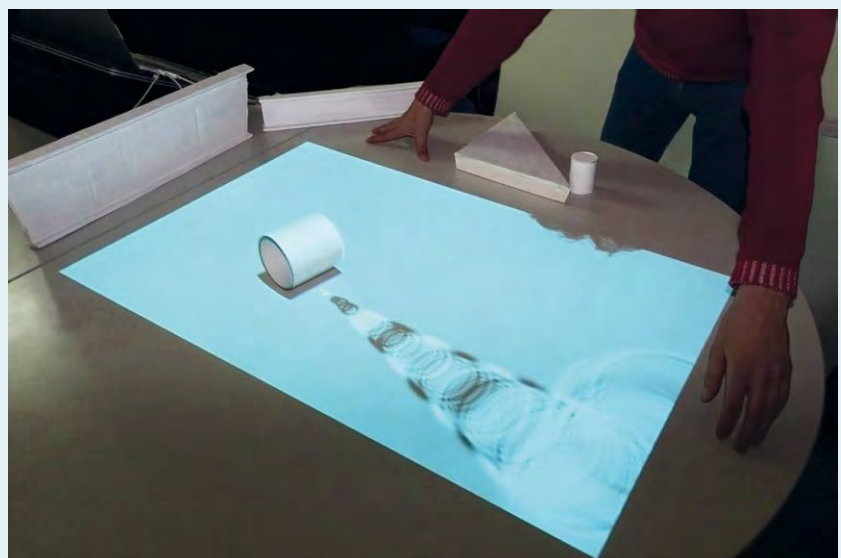
termodinamica, da punti di vista sia teorici che sperimentali) anche avvalendosi di nuove tecnologie basate sull'utilizzo di software e hardware di ultima generazione. Nel secondo si trattano questioni più generali di comunicazione delle scienze in contesti informali, quali l'organizzazione e la partecipazione a mostre, festival, eventi e pubblicazioni per il grande pubblico. Nel terzo filone il laboratorio è impegnato in attività di formazione, aggiornamento e specializzazione di docenti della scuola secondaria, anche in ottemperanza alle richieste di adeguamento alle nuove normative nazionali in ambito di attuazione della legislazione vigente.

#### Laboratorio di Gravitazione Sperimentale

L'attività di ricerca è focalizzata sullo sviluppo, realizzazione e funzionamento di rivelatori di onde gravitazionali, sia basati a terra sia spaziali. Altre attività includono lo sviluppo di esperimenti ad alta sensibilità e rivelatori a bassa temperatura nella fisica fondamentale. Il gruppo ha partecipato, fin dalle prime fasi, al gruppo principale che ha sviluppato il progetto dell'interferometro spaziale LISA e ha la responsabilità di Principal Investigator del precursore tecnologico LISA Pathfinder, dell'Agenzia Spaziale Europea, che sta ultimando le operazioni e i cui risultati hanno dato il via libera definitivo per l'osservatorio gravitazionale vero e proprio. Ha inoltre la

responsabilità di co-Principal Investigator in LISA, adottata ora dall'Agenzia Spaziale Europea per la terza missione large-class, e che ha cominciato lo studio di formulazione. Il gruppo partecipa ai lavori di Virgo, che gestisce rivelatori di onde gravitazionali basati

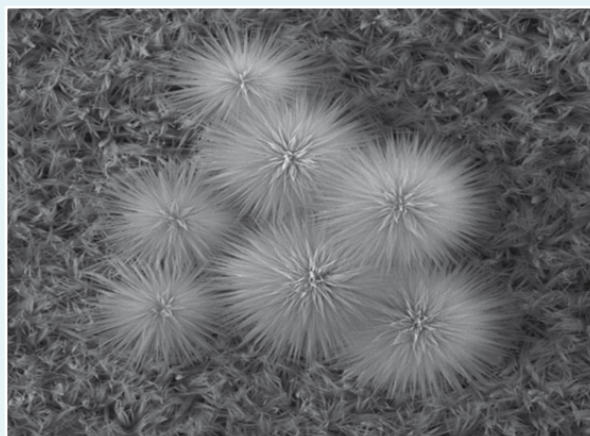
a terra. Trento ha la responsabilità della rete per l'analisi dei dati. Inoltre, per il miglioramento della sensibilità del rivelatore si sviluppa strumentazione che funziona vicino al limite quantico.



Laboratorio didattico di realtà virtuale realizzato con strumentazioni semplici.



La copertina di Physical Review Letters che annuncia i risultati di LISA Pathfinder. Riprodotta con permesso dell'American Physical Society, © 2016, APS, <https://journals.aps.org/prl/issues/116/23>



Fotocatalizzatore  $\text{Co}_3\text{O}_4$  con struttura a riccio preparato in laboratorio.

### Laboratorio IdEA (Idrogeno, Energia, Ambiente)

Il laboratorio si occupa della produzione e analisi di materiali innovativi e di nano materiali (nanocatalizzatori, fotocatalizzatori, membrane) per l'energia (produzione di idrogeno per dissociazione dell'acqua) e l'ambiente (depurazione dell'acqua, separazione dei gas). Inoltre si occupa anche della fisica dei positroni con applicazioni alla fisica della materia, studiando ad esempio gli aspetti microscopici dei solidi (difetti puntuali), e alla fisica fondamentale partecipando ad esperimenti sull'antimateria.

Un tema di primaria importanza riguarda lo sviluppo di efficienti sistemi di purificazione dell'acqua. La ricerca si occupa di sviluppare fotocatalizzatori che utilizzano la luce solare e le superfici di semiconduttori con caratteristiche tali da permettere il processo di ossidazione della molecola d'acqua ed il processo di riduzione dell' $\text{H}^+$ . Questo ricorda la fotosintesi clorofilliana che quindi si cerca di riprodurre in laboratorio. Da notare che il prodotto della scissione dell'acqua forma l'elemento  $\text{OH}^*$  che è in grado di attaccare virus, batteri o contaminanti presenti nell'acqua, distruggendoli. Per fabbricare un fotocatalizzatore efficiente, occorre anche avere una superficie ampia che comunichi con l'ambiente per ricevere la luce del sole e per interagire con l'acqua. La natura ci suggerisce

come fare attraverso le strutture a riccio: in laboratorio siamo stati in grado di produrre strutture simili a quello che la natura ci mostra (ricci di mare).

### Laboratorio Nanoscienze

Il laboratorio si occupa di nanofotonica e nanobioteconologie. L'obiettivo è la generazione di nuove conoscenze e nuovi dispositivi dalla comprensione dei fenomeni fisici che si verificano quando l'interazione luce-materia avviene a scala nanometrica. In particolare il laboratorio applica il paradigma delle nanoscienze al silicio o a materiali compatibili con il silicio, per consentire sue nuove applicazioni e sviluppare nanosistemi, compatibili con la microelettronica: si tratta della Silicon Photonics. Tra gli argomenti oggetto di studio ci sono le reti ottiche su chip, circuiti ottici quantistici integrati, l'ottica non lineare, sensori e biosensori fotonici, e reti ottiche neuromorfiche.

Inoltre si progettano nanomateriali per le scienze della vita e il controllo ambientale. I precursori utilizzati sono composti inorganici (silicio, alluminio, titanati) a base di carbonio (grafene) e materiali di origine naturale (polisaccaridi e proteine) opportunamente modificati con processi chimici. L'interesse è focalizzato sulle proprietà fondamentali dei nanomateriali quali le proprietà meccaniche, ottiche, termiche

e sulla ricerca delle relazioni tra queste proprietà e la struttura del nanomateriale e della sua interfaccia. Struttura e composizione dell'interfaccia sono determinanti anche in vista di applicazioni nelle scienze della vita in quanto possono rendere un materiale biocompatibile o, viceversa, capace di produrre esiti clinici avversi.

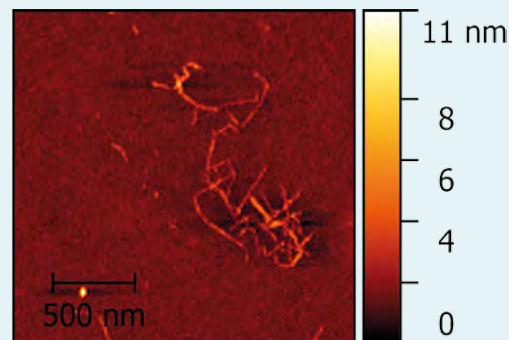


Immagine AFM di una fibra di nanocellulosa.



La sala sperimentale per studi con fasci di protoni di alta energia presso il centro di protonterapia a Trento.

## Laboratorio di Struttura e Dinamica dei Sistemi Complessi

Le attività di ricerca presso il laboratorio sono centrate sullo studio dell'effetto combinato di proprietà strutturali e dinamiche in una classe di materiali che include: liquidi e vetri, materia soffice, materiali ceramici e sistemi fotonici disordinati. Queste attività di ricerca hanno come scopo quello di raggiungere una comprensione accurata ed, in ultima analisi, un disegno su misura di materiali con proprietà predefinite. Le proprietà strutturali e dinamiche (vibrazioni, rilassamenti) di questi materiali sono investigate utilizzando un ventaglio di tecniche differenti che includono la diffrazione X, la spettroscopia di diffusione Brillouin e Raman, la luminescenza e la diffusione dinamica della luce. Questi esperimenti sono complementati da studi con spettroscopie nell'intervallo spettrale dei raggi X portati avanti presso sorgenti di luce di sincrotrone ad esempio Elettra a Trieste ed ESRF a Grenoble, Francia) e centri di laser ad elettroni liberi (ad esempio Fermi a Trieste e LCLS a Stanford, USA).

## Laboratorio di Fisica Teorica e Computazionale

Il laboratorio si occupa di studi della fisica teorica, utilizzando anche tecniche computazionali avanzate. Le aree di ricerca fondamentali riguardano: astrofisica, fisica gravitazionale, teoria dei campi e fisica delle particelle, fisica nucleare, fluidi quantistici, fisica dello stato solido, condensazione di Bose - Einstein e gas atomici superfreddi, fisica statistica delle biomolecole.

Le attività di ricerca beneficiano di importanti collaborazioni nazionali e internazionali

con altri Istituti e Centri di Ricerca. A livello locale questi includono: the Trento Institute for Fundamental Physics and Application (TIFPA), the European Center for Theoretical Research in Nuclear Physics and Related Areas (ECT\*), the INO-CNR Center on Bose-Einstein Condensation (BEC), the Interdisciplinary Laboratory for Computational Science (LISC).

## 2 Il Trento Institute for Fundamental Physics and Applications<sup>2</sup>

Il TIFPA è un centro nazionale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in collaborazione con l'Università di Trento, la Fondazione Bruno Kessler (FBK) e l'Azienda Provinciale per i Servizi Sanitari (APSS). Questa nuova realtà si pone l'obiettivo di essere un centro di ricerca dove la fisica di base incontra la fisica applicata, aspirando a diventare un polo per la ricerca traslazionale ed il trasferimento tecnologico, orientata in modo particolare verso tre settori: lo spazio, la medicina ed i sensori.

All'interno del TIFPA sono attivi tre laboratori virtuali dedicati a spazio, fisica medica e rivelatori, che rispecchiano i principali filoni applicativi del centro. Molti degli esperimenti INFN presenti al TIFPA, i quali coinvolgono tutte le cinque commissioni nazionali, si avvalgono di questi tre laboratori che allo stesso tempo contribuiscono a sviluppare e ad arricchire. Gli esperimenti si occupano di tematiche innovative, quali ad esempio la ricerca sulle onde gravitazionali e l'antimateria, affrontandole con un approccio sia teorico

<sup>2</sup>[www.tifpa.it](http://www.tifpa.it)

che sperimentale. Il TIFPA ha anche una forte collaborazione con l'esperimento ATLAS presso il CERN, in modo particolare per quanto riguarda l'upgrade del rivelatore attraverso lo sviluppo di sensori innovativi. Altro settore è quello della radioterapia con protoni di alta energia, sia per quanto riguarda aspetti legati all'impatto delle interazioni nucleari ed elettromagnetiche, sia in merito agli aspetti radiobiologici. Ciò si inserisce nelle attività di fisica applicata, le quali includono più in generali la ricerca in biofisica e lo sviluppo di rivelatori di radiazioni.

A partire dal 2016, a seguito di un intenso lavoro di preparazione e dell'accordo attuativo INFN-Azienda Provinciale per i Servizi Sanitari APSS, è entrata in funzione la Sala Sperimentale gestita dal TIFPA presso il centro clinico APSS di protonterapia che si trova a Trento. Presso la sala sono disponibili due linee di fascio, che forniscono protoni accelerati fino ad un'energia di 226 MeV. Ciò consente di portare avanti attività di ricerca che includono applicazioni di fisica nucleare, fisica medica, sviluppo e test di rivelatori, radioprotezione in ambito spaziale. Allo stesso tempo, insieme alla moderna macchina a raggi X da 200 kVp installata presso il TIFPA a Povo, la sala sperimentale offre opportunità di ricerca in radiobiologia pre-clinica. L'accesso alla sala sperimentale è aperto anche a gruppi di ricerca e ad aziende nell'ambito di collaborazioni scientifiche e/o industriali, previa valutazione delle proposte effettuata da un Program Advisory Committee. Ciò ha consentito, già nel corso del 2016, di ospitare diversi gruppi di ricerca, sia italiani che internazionali, dimostrando il forte interesse verso le variegate opportunità offerte dalla facility.



Ricercatori presso l'ECT\* in occasione di un workshop.

### 3 European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas<sup>3</sup>

L'ECT\* è attivo dal 1993 come un'iniziativa "bottom up" della comunità europea di fisica nucleare e, da allora, si è sviluppato in un centro di ricerca di grande successo per la fisica nucleare. In senso ampio, ECT\* è il solo centro del suo genere in Europa ed è simile per argomenti e missione all'Institute for Nuclear Theory in Seattle (INT), USA. È membro istituzionale del NuPECC della European Science Foundation. Con circa 700 visitatori ogni anno, provenienti da tutto il mondo, per una settimana o diversi mesi, ECT\* ha guadagnato un'elevata visibilità internazionale. Da statuto, ECT\* svolge una funzione di coordinamento della comunità scientifica europea e internazionale attraverso:

- una ricerca approfondita sugli sviluppi contemporanei della fisica nucleare teorica;
- contatti interdisciplinari tra fisica nucleare e campi vicini, come la fisica delle particelle, l'astrofisica, la fisica della materia condensata, la fisica statistica e computazionale e la fisica quantistica di piccoli sistemi;
- il sostegno alla ricerca di giovani fisici brillanti con l'organizzazione della loro partecipazione alle attività dell'ECT\*, con l'organizzazione di programmi di formazione e con la creazione di reti di giovani ricercatori.

Gli obiettivi di ECT\* sono raggiunti attraverso workshop internazionali e meeting, programmi di formazione avanzata di dottorato e scuole, nonché ricerche condotte da ricercatori senior,

post-doc e visitatori a lungo termine. Allo stato attuale, insieme al Direttore dell'ECT\*, due ricercatori senior e cinque post-doc sono attivi presso il centro su argomenti, che vanno dagli studi di struttura nucleare e reazioni a bassa energia alla fisica delle collisioni alle più alte energie. Le attività di ricerca dell'ECT\* sono integrate in "related areas" dal laboratorio LISC, attivo sui temi della scienza computazionale che vanno dai materiali avanzati ai sistemi biologici.

Esistono delle collaborazioni con il Dipartimento di Fisica e il Centro BEC presso l'Università di Trento. Esistono accordi di cooperazione con altre istituzioni scientifiche, tra cui l'Extreme Matter Institute di Darmstadt, il Centro Internazionale Helmholtz per FAIR, il Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, il Centro Ricerche RIKEN e l'Osservatorio Nazionale Astronomico del Giappone, l'Istituto di Fisica Teorica dell'Accademia Cinese delle Scienze e il Asia Pacific Center for Theoretical Physics in Corea.

L'ECT\* è sponsorizzato dalla Fondazione Bruno Kessler in collaborazione con l'Assessorato alla Cultura di Trento e con le agenzie di finanziamento degli Stati membri e degli Stati associati.

### 4 Il Centro Materiali e Microsistemi<sup>4</sup>

Il Centro Materiali e Microsistemi della Fondazione Bruno Kessler (FBK-CMM) svolge ricerche di base e applicative nelle aree dei materiali e interfacce, dei dispositivi a semiconduttori, dei microsistemi e sistemi

integrati. La missione strategica del CMM è l'eccellenza scientifica combinata con la capacità di sfruttare i risultati della ricerca. Una parte significativa dell'attività del centro è dedicata allo sviluppo di nuova strumentazione per esperimenti scientifici, spesso in collaborazione con i Dipartimenti di Fisica di Università, CNR o INFN.

Un'attività di ricerca particolarmente riuscita riguarda lo sviluppo di sensori per esperimenti ad alta energia in fisica e astrofisica. CMM ha introdotto diversi innovazioni tecnologiche su rivelatori di silicio sensibili alla posizione a risoluzione fine. Un esempio sono i pixel detectors con elettrodi cilindrici scavati nel substrato di silicio (i cosiddetti rivelatori 3D). Essi sono vantaggiosi rispetto ai sensori standard per l'alta tolleranza a irradiazioni adroniche pesanti, per la bassa tensione di pieno svuotamento e per i veloci tempi di raccolta di carica. Queste caratteristiche soddisfano le richieste per l'aggiornamento di LHC (High Luminosity-LHC). I dispositivi progettati e prodotti da CMM sono operativi nel ATLAS Insertable B-Layer. Questo è il primo esperimento di fisica delle alte energie che utilizza sensori 3D. Il loro utilizzo è ora previsto per l'aggiornamento di altri sistemi di rivelatori in LHC (ad es., AFP e CT-PPS) e per i più interni livelli di tracking nel futuro HL-LHC.

Altri dispositivi sviluppati dal CMM per esperimenti di fisica fondamentale sono vari tipi di bolometri in silicio, del tipo Kinetic Inductance (KID) e Luke-Neganov. I bolometri KID sono bolometri a superconduttore che sfruttano il cambiamento dell'induttanza causato dalle variazioni nella concentrazione di quasi-particelle. Il vantaggio principale dei KID è nella facilità di lettura e di fabbricazione.

<sup>3</sup> [www.ectstar.it](http://www.ectstar.it)

<sup>4</sup> [cmm.fbk.eu](http://cmm.fbk.eu)

Il CMM ha sviluppato una tecnologia KID a multistrato basata su film Ti e TiN che sfrutta l'effetto di prossimità per controllare la temperatura di transizione dei dispositivi. L'altra famiglia di bolometri sono i rivelatori Luke-Neganov, realizzati con un processo MOS quasi standard per la formazione di microelettrodi e che possono essere polarizzati per generare campi elettrici all'interno del semiconduttore. I sensori Luke-Neganov sono adatti per l'uso su grandi aree come richiesto nella seconda fase di esperimenti come CUORE. Ulteriori attività di ricerca del centro comprendono altri dispositivi compatibili con la piattaforma in silicio, come dispositivi di emissione di luce basati su nano particelle, dispositivi integrati per la generazione di numeri casuali, sensori ottici e dispositivi di silicio per applicazioni in tecnologie quantistiche (ad esempio atomi virtuali, q-bits in stato solido, ..).

### 5 Fisica nel CNR a Trento<sup>5</sup>

Il Consiglio Nazionale delle Ricerche è presente a Trento con unità di ricerca di diversi istituti. In questo contesto, il CNR offre contributi significativi che spaziano dalla ricerca di base a quella applicata.

Un esempio importante di integrazione tra Università e INO-CNR è costituito dal Centro sulla Condensazione di Bose-Einstein (BEC), creato nel 2002. Il Centro svolge attività sia di fisica teorica che sperimentale ed è riconosciuto a livello internazionale come uno dei centri di eccellenza nel campo delle ricerche sui gas quantistici e gli atomi ultrafreddi. Nel laboratorio sperimentale, attivato nel 2011, vengono studiate le proprietà di condensati di atomi di sodio utilizzando tecniche raffinate per la manipolazione di atomi con campi magnetici e

<sup>5</sup> [www.cnr.it](http://www.cnr.it)

fasci laser. L'osservazione e la caratterizzazione dei difetti topologici prodotti spontaneamente in un condensato a seguito del raffreddamento veloce del gas attraverso la transizione di fase è un primo risultato importante del laboratorio, che ha avuto un impatto significativo nel settore ed ha costituito il punto di partenza per una serie di lavori rilevanti nello studio dei gas quantistici fuori dall'equilibrio.

Un accordo tra CNR, Università e FBK ha anche portato alla creazione di una piattaforma tecnologica comune per il sequenziamento e di analisi strutturale biomolecolare per la salute, in cui è coinvolta l'unità di Trento dell'IBF.

Il gruppo si occupa dello studio di membrane biologiche, i complessi macromolecolari e l'imaging biomolecolare con lo studio dei meccanismi biofisici di danneggiamento cellulare; lo sviluppo di sonde molecolari per microscopie a fluorescenza e il tracking di singole molecole; la biofisica fotosensoriale e lo studio dei neurosistemi; lo studio dell'organizzazione superstrutturale di RNA e proteine e del ruolo dell'organizzazione dei polisomi nel controllo traduzionale.

L'IFN opera in fruttuosa sinergia con FBK e Università nello studio dei meccanismi fisici essenziali per la sintesi, lo sviluppo e caratterizzazione di materiali fotonici innovativi, la progettazione e realizzazione di dispositivi ottimizzati per applicazioni quali la sensoristica, l'information technology e le sorgenti di luce. Le competenze di IFN includono tecniche di mecatronica quantica e di fotonica a raggi X, e lo studio della struttura locale, la cristallizzazione, i processi di trasferimento di energia e le proprietà ottiche e spettroscopiche di vetri attivati con terre rare e strutture confinate, realizzate con varie tecniche fisiche e chimiche di avanguardia. Infine, l'IMEM è una realtà sperimentale che lavora in stretta collaborazione con FBK e Università in progetti di ricerca di ampio spettro. Il gruppo spazia da studi di base nell'ambito della fisica/chimica, fino

alla realizzazione di dispositivi prototipali per applicazioni in tecnologie innovative mediante un approccio fortemente multidisciplinare. L'attività di ricerca si articola sullo studio alla nano e mesoscala dei processi di sintesi, crescita di film sottili di materiali organici, inorganici ed ibridi, della loro funzionalizzazione, al fine di ottenere materiali funzionali e multifunzionali per applicazioni nei settori della elettronica, sensoristica, biomedicale e della salute. Si realizzano inoltre studi di fisica fondamentale: meccanica statistica per l'analisi di fenomeni di trasduzione di rumore, nonché caratterizzazione e realizzazione di oscillatori meccanici e optomeccanici quantistici in condizioni fuori dall'equilibrio. Il gruppo lavora infine anche sull'analisi non invasiva di VOC per applicazioni nell'agronomia, conservazione del cibo, controllo di processi industriali e biomedicale.

### 6 Center for Neuroscience and Cognitive Systems<sup>6</sup>

Il Centro per la Neuroscienza e i Sistemi Cognitivi (CNCS) di IIT@UniTn si concentra su un approccio multidisciplinare per comprendere le capacità computazionali del cervello. La ricerca comprende l'utilizzo di imaging funzionale per misurare la connettività funzionale nel cervello sano e malato, studiando i meccanismi cerebrali per l'attenzione e la temporizzazione, sviluppando metodi avanzati per decodificare i segnali neurofisiologici e utilizzandoli per comprendere il codice neurale, progettando modelli biofisici di reti neurali del cervello, sviluppando metodi avanzati per la registrazione o la stimolazione dell'attività neurale.

<sup>6</sup> <http://cncs.iit.it/>

Lorenzo Pavesi

Lorenzo Pavesi è Professore di Fisica Sperimentale e Direttore del Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento (Italia). Nato il 21 novembre 1961, ha conseguito il Dottorato in Fisica nel 1990 presso l'Ecole Polytechnique Fédérale di Losanna (Svizzera). Nel 1990 diviene Ricercatore, Professore Associato nel 1999 e Professore Ordinario nel 2002 presso l'Università di Trento. Dirige il Laboratorio di Nanoscienza. Durante gli ultimi anni, si è concentrato sulla fotonica in silicio dove cerca la convergenza tra fotonica e elettronica. Si interessa di dispositivi fotonici classici o quantistici che possono essere integrati in silicio per applicazioni in fisica di base, nelle comunicazioni ottiche, nella biosensoristica e nella computazione neuromorfica.

## IL NUOVO CIMENTO 150, 100, 50 ANNI FA

### 150 ANNI FA

Riccardo Felici (1819-1902) fu assistente e poi professore a Pisa. Nel 1849 combatté a Curtatone con il Battaglione Universitario Toscano. A Pisa fondò nel 1843 la rivista "Il Cimento" e nel 1855, con C. Matteucci e R. Piria, "Il Nuovo Cimento" che rimase di sua proprietà fino al 1897, anno in cui lo donò alla neocostituita Società Italiana di Fisica di cui fu promotore e socio fondatore. Le sue grandi scoperte sull'elettromagnetismo sono degli anni 1850.

Ma fu anche un bravo insegnante e in questo articolo descrive esperienze didattiche, da fare in aula a lezione.

Da "Esperienze per determinare la legge di oscillazione di un corpo elastico" di R. Felici, *Il Nuovo Cimento*, 26 (1867) 255.

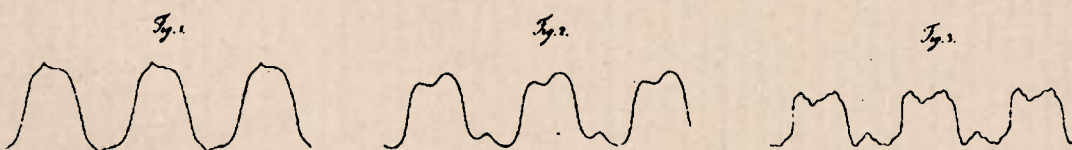
Descriveremo qui alcune esperienze che hanno lo scopo di rendere nei corsi scolastici ordinari, facile e chiara la esposizione di molte leggi dell'acustica [...]. Il maggior numero de' miei Scolari essendo di Medicina, dovetti, per facilitare la discussione de' fenomeni [...] sostituire alla considerazione delle funzioni periodiche, che esprimono la legge di oscillazione di un corpo elastico, la rappresentazione grafica di quella legge, ossia il disegno di una curva di oscillazione.

*Il corpo vibrante è una corda tesa di cui si vede un punto attraverso una fenditura verticale che trasla lungo la corda.*

Se la velocità della fenditura non sarà troppo piccola, se essa sarà illuminata dalla luce diffusa del cielo [...] e se [...] a quella fenditura ne succederanno altre simili con uguali velocità, pel solito fenomeno dovuto alla persistenza delle immagini nell'occhio, [...] vedremo una linea sinuosa ma regolare, che sarà il luogo geometrico apparente di tutti i successivi punti di intersezione della corda con la fenditura.

*Dopo averne descritto la costruzione, l'apparecchio consente anche facilmente*

di mostrare sperimentalmente [quale] è la dipendenza fra colore, o metallo, del suono e la legge di oscillazione dello strumento [...]. Le figure 1, 2 e 3 rappresentano le curve di oscillazione della corda scossa rispettivamente ne'tre punti che sono distanti un terzo, un sesto e un dodicesimo, da un'estremità, sollevandola solamente con due dita, e poi lasciandola a se stessa.



## 100 ANNI FA

Gian Antonio Maggi (Milano 1856 – 1937) fu un grande fisico-matematico. Insegnò nelle università di Pavia, Modena, Messina, Pisa e Milano. Fondamentale fu la sua dimostrazione, del 1888, di come l'integrale di radiazione in ottica, che è un integrale di superficie, si possa ridurre ad un integrale di linea. In questo articolo, del 1917, discute il collegamento tra funzioni in due e tre dimensioni.

Da "Sul collegamento di una funzione data nei punti di una superficie con una funzione dei punti dello spazio, e sua applicazione alla teoria della funzione potenziale di doppio strato" di G. A. Maggi, *Il Nuovo Cimento*, 14 (1917) 5.

Mi propongo, con questo breve scritto, di rilevare alcune circostanze generali, attinenti a simile collegamento, e di mostrarne l'applicazione ad espressioni delle derivate prime della funzione potenziale di doppio strato, che sembrano meritevoli di qualche attenzione.

*Sviluppato il problema, osserva che i risultati si possono applicare ad altri sistemi fisici.*

Tale è il caso della discontinuità delle componenti dello spostamento elastico, ad una superficie, rappresentante un diaframma del campo (molteplicemente connesso) rappresentato dal corpo elastico, nelle "distorsioni di Volterra".

## 50 ANNI FA

James Stuart Bell (1928 – 1990) è autore del famoso teorema, che porta il suo nome, e che permise di testare l'esistenza delle variabili nascoste (e di dimostrare sperimentalmente che non esistono). Altri importanti contributi sono nell'algebra delle correnti, in particolare la cosiddetta anomalia ABJ (1969).

Da "Current algebra and gauge variance" di J. S. Bell, *Il Nuovo Cimento A*, 50 (1967) 129.

*Nel 1967 il Modello Standard era nelle prime fasi di sviluppo. Importanti progressi vennero dall'"algebra delle correnti". In quest'articolo, Bell dimostra che molte previsioni di questa, verificate sperimentalmente, e di fatto l'algebra delle correnti stessa, sono conseguenze dell'invarianza di gauge. Il problema centrale allo studio era la ricerca di una teoria delle interazioni deboli nella quale le divergenze fossero controllabili. Si poteva tentare di procedere*

[...] by simply imposing gauge invariance on the matrix elements of interest. Veltman, in a fundamental paper, has taken the essential step in generalizing this approach to cover much of the algebra of the quark model. The purpose of this note is to spell out the relation of his equations to gauge variance of the S-matrix elements, and the translation into this language of a class of applications of current algebra.

*Riferendosi a questo articolo, scriverà Veltman nella sua lezione Nobel: "I finally decided to take Bell's conclusion seriously and therefore assumed that the weak currents were those of a gauge theory".*

## PARCO AVVENTURA SCIENTIFICA UN'ESPERIENZA DI DIVULGAZIONE INTEGRATA TRA L'APPRENDIMENTO E IL GIOCO

GIANCARLO ARTIANO, ALESSANDRO AMABILE, GIULIANA GALATI  
PONYS (Physics and Optics Naples Young Students)

Fotografia di F. di Franco

Il *gioco* è uno dei modi di apprendimento più efficaci in assoluto durante tutte le fasi dello sviluppo di una persona. Non è raro vedere questa idea realizzata nei moderni musei scientifici mediante mostre e aree interattive. Ma è possibile fare qualcosa di diverso, inserendo l'attività di divulgazione nella cornice di un unico grande gioco, all'interno del quale introdurre i contenuti scientifici che si vogliono trasmettere? Questo è quello che abbiamo provato a fare come associazione PONYS (Physics and Optics Naples Young Students), un gruppo di studenti, dottorandi e post-doc del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, che dal 2006 organizza attività di divulgazione scientifica, sviluppo professionale e networking.

Il 22 e il 29 aprile la Villa di Scampia e il Parco "Massimo Troisi" di San Giovanni a Teduccio, a Napoli, hanno ospitato il Parco Avventura Scientifica, un'attività organizzata dall'Assessorato all'Ambiente del Comune di Napoli, ideata e realizzata dall'associazione PONYS in collaborazione con la sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). I due eventi sono stati parte dell'iniziativa "Rete dei Parchi - Primavera 2017 - I Parchi di Napoli: Esperienze e Scoperte". I quartieri di Scampia e San Giovanni a Teduccio non sono stati scelti a caso: situati rispettivamente ai confini settentrionale e orientale della città, entrambi ospitano dei parchi urbani meravigliosi, ma conosciuti e frequentati solo dagli abitanti del quartiere. Il progetto "Rete dei Parchi" mirava, quindi, anche a farli conoscere e apprezzare nella loro bellezza a tutta la cittadinanza. Il 22 aprile, inoltre, è stato il giorno della "March for Science", una manifestazione internazionale con l'obiettivo di sensibilizzare l'opinione pubblica e i governi circa l'importanza della ricerca e dell'educazione scientifica, che ha avuto più di 500 eventi in tutti il mondo, il principale dei quali si è svolto a Washington D.C, mentre in Italia otto città hanno aderito all'iniziativa, tra cui Napoli con il Parco Avventura Scientifica. L'obiettivo del progetto era proporre appuntamenti attraverso i quali le visite ai parchi diventassero l'occasione per veicolare messaggi relativi ai temi dell'ecologia e al rispetto del luogo pubblico, utilizzando come strumento una corretta comunicazione

scientifica. In questo caso, abbiamo pensato di creare un grande gioco per offrire al pubblico l'occasione per riscoprire il parco come luogo dove condividere e apprendere nuove conoscenze.

### 1 Regole del gioco e Kit dell'Esploratore Scientifico

L'obiettivo del gioco era esplorare il parco, assistere a una serie di esperimenti e rispondere a semplici domande. L'iniziativa era rivolta soprattutto ai bambini in età scolare, in particolare delle scuole elementari e medie. All'ingresso del parco, alcuni volontari spiegavano le regole del gioco e distribuivano ai partecipanti il "Kit dell'Esploratore Scientifico", contenente una Mappa del parco, un Passaporto Scientifico e un Foglio Sfida.

La **Mappa**, fondamentale per esplorare il parco, era stata disegnata da noi per l'occasione in stile *cartoon*, in modo da risultare più accattivante per il pubblico di bambini. Su di essa, oltre agli elementi fondamentali per orientarsi, erano disegnate delle bandierine di colori diversi, che indicavano la posizione delle postazioni con gli esperimenti a cui assistere per proseguire nel gioco. I colori corrispondevano a tre percorsi tematici, in cui erano raggruppati i vari esperimenti proposti: ciascun percorso si componeva a sua volta di tre tappe, ognuna delle quali dedicata a uno specifico argomento, tematicamente coerente con il resto del percorso.

Il **Passaporto Scientifico** era un documento

personalizzabile con nome, cognome, data di nascita, firma e foto, su cui segnare i progressi fatti durante il gioco. Alla fine di ogni percorso tematico, infatti, il visitatore doveva recarsi al *checkpoint* indicato sulla mappa, dove il Passaporto veniva timbrato, in modo da attestare i risultati conseguiti. Ogni casella da timbrare era associata a un illustre scienziato o scienziata, così da fornire l'occasione di soffermarsi a raccontarne la vita e le scoperte.

Il **Foglio Sfida**, infine, conteneva le prove da superare per avanzare nel gioco e presentava tre domande a risposta multipla relative agli esperimenti del percorso associato. Concluso un percorso, gli "scienziati-esploratori" dovevano recarsi al *checkpoint* per verificare la correttezza delle risposte date e vincere un piccolo premio. Potevano poi decidere se continuare o meno il gioco esplorando un nuovo percorso e partecipando a una nuova sfida, in modo da collezionare quanti più timbri possibile sul proprio Passaporto Scientifico.

### 2 I Percorsi Tematici, il Giardino della Fisica e lo stand INFN

Il fulcro dei contenuti scientifici del Parco Avventura sono stati i percorsi tematici. Tutti gli esperimenti proposti sono stati da noi realizzati, attingendo in parte al vasto repertorio progettato nel corso degli anni, in parte realizzandone di nuovi.

Ogni percorso aveva come filo conduttore un tema: energia, elementi e onde. Per ognuno di questi sono state allestite tre postazioni,



Fig. 1



Fig. 2

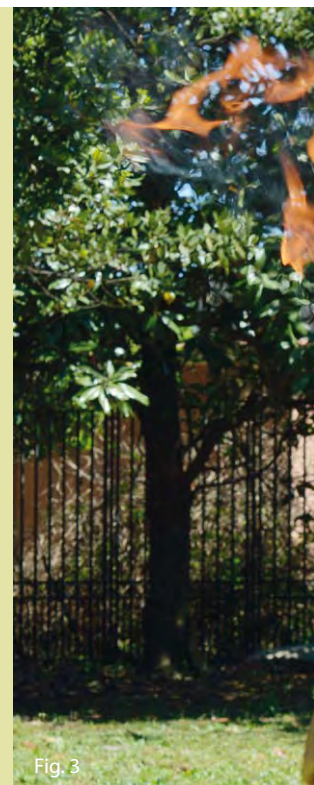


Fig. 3

corrispondenti alle tappe del gioco, in cui alcuni volontari mostravano esperimenti riguardanti vari ambiti della fisica scelti per l'occasione. Riportiamo di seguito una descrizione più dettagliata e alcuni esempi:

- **Percorso Onde:** *Ottica, Elettromagnetismo, Acustica*

In questo percorso si è cercato di evidenziare il concetto trasversale di onda, che permette di ricondurre sotto una visione unificata una vasta fenomenologia: il suono, la luce e l'elettricità, che sono fenomeni estremamente familiari e suscitano subito un grande interesse. Per esempio, alla postazione di *Acustica*, una chitarra veniva usata per illustrare i fenomeni di risonanza; al banchetto di *Ottica* degli occhiali montanti un reticolo di diffrazione permettevano ai bambini di osservare lo spettro solare (fig. 1); infine allo stand di *Elettromagnetismo* si poteva realizzare una gabbia di Faraday con semplice carta alluminio.

- **Percorso Elementi:** *Geofisica, Astrofisica, Fluidodinamica*

In questo percorso venivano spiegate innanzitutto le proprietà più insolite di elementi come l'aria e l'acqua, in un banchetto di *Fluidodinamica*, dopo di che, allo stand di *Geofisica*, venivano mostrate la struttura interna della Terra (fig. 2) e le caratteristiche di un edificio antisismico mediante appositi modellini. Infine, alla postazione di *Astrofisica*, i

principi della Relatività Generale venivano spiegati utilizzando un telo elastico teso, rappresentante lo spaziotempo, in cui una massa era utilizzata per provocare la curvatura e delle biglie venivano lanciate per riprodurre le orbite dei pianeti intorno al Sole.

- **Percorso Energia:** *Combustione, Bolle di Sapone, Smart Materials*

In questo percorso alte fiamme sulle mani, bolle di sapone dalle forme bizzarre e materiali dal comportamento inusuale mostravano il lato più "magico" della Fisica. L'energia e i modi in cui questa si trasforma sono stati la chiave per spiegare i fenomeni di combustione (fig. 3), il perché le bolle di sapone hanno specifiche forme geometriche e come mai una graffetta di Nitinol, un materiale a memoria di forma, dopo essere stata deformata, torna alla sua struttura originaria quando viene immersa in acqua calda.

Terminati i tre percorsi tematici, l'avventura continuava nel "Giardino della Fisica", un'area aperta e totalmente interattiva, dedicata al legame tra fisica e sport. Diverse discipline sono state analizzate, illustrando i principi fisici alla base di gesti atletici più o meno familiari: basket e calcio sono stati l'occasione per parlare dell'effetto Magnus; una pedana rotante e una ruota di bicicletta munita di manubrio sono serviti a spiegare la conservazione del momento angolare; gare di tiro alla fune hanno permesso di analizzare

le caratteristiche della forza di attrito e la scomposizione delle forze. Particolarmente adatto all'ambientazione del parco, il Giardino della Fisica permetteva di avvicinare anche chi non aveva il tempo o la voglia di intraprendere uno dei percorsi tematici, rivelandosi particolarmente coinvolgente per i bambini del quartiere, abituati ad andare al parco a giocare "a pallone".

A completare l'esperienza, vi era uno stand della sezione INFN di Napoli, rivolta principalmente agli adulti, al quale anche alcuni bambini si sono mostrati interessati. Alcuni ricercatori hanno presentato le ricerche condotte sulle onde gravitazionali e sulla radiografia muonica, entrambi argomenti di estrema attualità scientifica, mostrando al pubblico anche elementi di rivelatori veri. La scoperta delle onde gravitazionali, a febbraio 2016, da parte delle Collaborazioni LIGO e VIRGO, ha suscitato, infatti, un grande interesse da parte dei media e molti dei visitatori del parco erano curiosi di saperne di più direttamente dai ricercatori coinvolti nella scoperta. Il secondo argomento trattato, la radiografia muonica, è stato scelto come esempio di applicazione delle tecnologie usate nella fisica di base. Alla fine degli anni '60 gli archeologi si chiedevano se la piramide di Chephren nascondesse ulteriori camere, come quelle scoperte nella piramide di Cheope. Per scoprirlo, il premio Nobel Luis Alvarez propose di installare rivelatori di muoni nella camera centrale per effettuare una radiografia utilizzando i muoni provenienti dai raggi



Fig. 1 Piccoli scienziati esploratori alla scoperta dello spettro solare nel Percorso Onde. Fotografia di R. Ruggiero.

Fig. 2 La struttura della Terra spiegata nel Percorso Elementi. Fotografia di F. di Franco.

Fig. 3 La combustione di sapone e butano mostrata durante il Percorso Energia. Fotografia di F. di Franco.

cosmici della piramide [1]. Le applicazioni più recenti della radiografia muonica interessano in particolar modo lo studio dei vulcani e del sottosuolo. Con questo metodo, infatti, sono state già ottenute delle radiografie muoniche dei condotti vulcanici, e alcune misure sono state fatte anche sul Vesuvio. Inoltre, di recente pubblicazione è una radiografia muonica del monte Echia realizzata dal tunnel borbonico a Napoli [2] che apre potenziali applicazioni del metodo allo studio del sottosuolo.

### 3 L'esperienza PONYS

Il Parco Avventura Scientifica è stato il frutto di esperienze accumulate in anni di appassionato lavoro, durante i quali a ogni evento abbiamo cercato di arricchire le nostre attività di divulgazione con proposte sempre nuove.

Il primo obiettivo è sempre stato mostrare i diversi aspetti della fisica classica con esperimenti semplici e immediati. Molti degli esperimenti proposti erano realizzati con materiale povero, così da essere facilmente riproducibili anche a casa. Due sono essenzialmente gli scopi alla base di questa scelta: facilitare il coinvolgimento del visitatore, che ha già familiarità con molti degli oggetti utilizzati, e trasmettere l'idea che la fisica e i modi per osservarla sono dappertutto. Inoltre, durante le spiegazioni, cerchiamo sempre di evidenziare il legame tra il fenomeno fisico osservato e l'esperienza quotidiana. Infine, laddove possibile, la dimostrazione è resa

interattiva coinvolgendo direttamente il pubblico nell'esecuzione degli esperimenti.

Nel corso degli anni, partecipando a grandi eventi di divulgazione come la "Notte Europea dei Ricercatori" o il festival della scienza di Napoli "Futuro Remoto", e collaborando con alcune scuole di Napoli e provincia, abbiamo sperimentato attività di diverso tipo, variando l'approccio utilizzato con l'intento di rendere il pubblico il vero protagonista delle nostre iniziative. Un esempio in tal senso è il laboratorio di Fisica dello Sport, da cui è poi nato il Giardino della Fisica. Oltre a essere per loro stessa natura fortemente interattive, le esperienze proposte in questa attività mirano a utilizzare l'interesse per lo sport per incuriosire il pubblico verso i principi fisici coinvolti in un qualunque gesto atletico: gli esempi possibili della versatilità di questo approccio sono innumerevoli [3]. Spesso, persino lo studioso di fisica rimane sorpreso nel constatare quanti spunti interessanti offrano le attività sportive: l'idea è dunque di avvicinare tra loro questi due mondi e farli interagire l'uno con l'altro, integrandoli in una singola attività di divulgazione.

Per valutare l'efficacia delle nostre attività di comunicazione scientifica, al di là delle reazioni immediate del pubblico, abbiamo pensato di trasformare la necessità di ricevere un riscontro in un gioco: perché non consegnare un questionario prima di iniziare, proponendo una sorta di sfida a premi? Nel corso della maggior parte delle nostre attività, il visitatore è invitato a rispondere a delle domande per

poter poi ricevere un piccolo premio. Oltre a stimolare il coinvolgimento del pubblico, la sfida proposta diventa quindi un sistema di verifica immediato. Analizzando le risposte ricevute, è possibile valutare a posteriori se ci sono dei concetti che non sono stati recepiti in modo corretto, in modo da ricercare nuove strategie di comunicazione in vista degli eventi successivi. Introdotto alla trentesima edizione di Futuro Remoto, questo sistema costituisce la base da cui sono nati i Fogli Sfida del Parco Avventura Scientifica.

### 4 Il gioco, l'esplorazione e l'apprendimento

Il Parco Avventura Scientifica rappresenta un tentativo di mettere insieme tutte le esperienze e riflessioni sopra descritte in un'unica grande attività. Gli obiettivi del progetto "Rete dei Parchi", relativi alla riscoperta dei parchi urbani, hanno arricchito ulteriormente la prospettiva dell'evento, alla base del quale in definitiva vi sono state tre idee fondamentali sviluppate in maniera integrata: gioco, esplorazione, apprendimento.

Il gioco è stato molto più di un espediente per attirare il pubblico: esso rappresenta uno strumento ideale di apprendimento, in cui sono coinvolti contemporaneamente aspetti cognitivi, emotivi e motori [4]. I riscontri che abbiamo ricevuto durante le due giornate ai parchi vanno proprio in questa direzione: i bambini, interpretando il ruolo dello "scienziato-esploratore", non hanno

mai smesso di correre da una parte all'altra del parco muniti del loro "kit". Trovata la postazione, assistevano agli esperimenti per poi ripartire alla ricerca della tappa successiva. A questi momenti di euforia si univano momenti di disappunto relativi a una sfida non superata. Grande attenzione è stata posta alle regole relative alla vittoria del premio: una sola risposta esatta su tre era sufficiente, cosicché il piccolo regalo fungesse solo da catalizzatore senza spostare eccessivamente l'attenzione dall'esperienza in sé. A fine giornata, le immagini dei bambini felici ma esausti hanno confermato la totalità del loro coinvolgimento in questa attività di divulgazione. Le facce dei bambini, però, non erano le sole a essere appagate: anche quelle dei 40 volontari che hanno animato il Parco Avventura Scientifica erano chiaramente soddisfatte. L'attività descritta, infatti, è stata possibile soprattutto grazie a loro e alla loro voglia di mettersi in gioco, cimentandosi nello spiegare a un pubblico generico i contenuti scientifici che quotidianamente studiano. Riteniamo che attività come queste costituiscano un completamento dell'esperienza universitaria e siano un'opportunità per testare le proprie competenze e diffondere, in modo divertente, una parte della cultura scientifica.

## 5 Prospettive future

"Ma quando lo rifate?": questa è la domanda che ci siamo sentiti rivolgere più volte, sia dai bambini che dai genitori, questi ultimi stupiti da tanto coinvolgimento in un'attività scientifica i cui contenuti non erano tanto diversi da quelli su cui i loro figli tanto faticano quando fanno i compiti a casa. Le premesse per replicare e ampliare il Parco Avventura Scientifica ci sono tutte: più di 500 visitatori hanno partecipato complessivamente ai due eventi, dimostrando approvazione ed entusiasmo. Questi numeri sono il risultato anche del lavoro di rete instaurato nei quartieri interessati, promuovendo l'iniziativa direttamente nelle scuole e nelle altri centri di educativa territoriali nei giorni immediatamente precedenti gli eventi.

Crediamo che tale lavoro non andrà perso, anzi riteniamo che un coinvolgimento delle scuole e delle associazioni di quartiere già in una fase preparatoria dell'evento possa in futuro portare risultati ancora migliori. L'idea del Parco Avventura Scientifica potrebbe, quindi, diventare un appuntamento a cadenza regolare, in cui il Passaporto funga da filo conduttore. Per questi due eventi il Passaporto è stato progettato in modo che non fosse possibile completarlo partecipando a un singolo evento: diversi bambini sono

dunque tornati a distanza di una settimana per terminarlo. Un'iniziativa del genere si potrebbe estendere ad altri parchi della città, continuando il progetto di riqualificazione e riscoperta delle aree verdi avviato questa primavera dal Comune di Napoli. Anche sul piano dei contenuti le idee in campo sono tante: nell'ottica di una collaborazione con le scuole si potrebbero progettare percorsi differenziati per disciplina, ad esempio introducendo dimostrazioni di biologia, chimica e geologia. In questo modo il Parco Avventura Scientifica fungerebbe da attività extracurricolare ben collegata con i contenuti dei programmi scolastici.

Al di là delle prospettive future, l'esperienza del Parco Avventura Scientifica dimostra secondo noi l'efficacia di un approccio integrato, in cui i contenuti scientifici siano inseriti all'interno di un'opportuna cornice ludica. Apprendimento e divertimento non sono termini contrari, ma due facce di una stessa medaglia, i due poli tra cui deve oscillare un'attività di divulgazione che voglia davvero raggiungere l'ambizioso obiettivo di incidere sulla visione della scienza delle persone che vi partecipano.

## Bibliografia

- [1] Luis W. Alvarez *et al.*, "Search for hidden chambers in the pyramids," *Science*, 167 (1969) 832.
- [2] G. Saracino *et al.*, "Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples)", *Sci. Rep.*, 7 (2017) 1181, doi:10.1038/s41598-017-01277-3
- [3] E. Krzysztof, "Fisica dello sport" (Edizioni Gnocchi, Napoli) 1998.
- [4] A. Tambini, U. Rimmel, E. A. Phelps, L. Davachi "Emotional brain states carry over and enhance future memory formation", *Nat. Neurosci.*, 20 (2017) 271.

I PONYS (Physics and Optics Naples Young Students) sono un'associazione culturale no-profit di studenti in fisica. Il gruppo è composto da studenti del corso di laurea triennale e magistrale, dottorandi, borsisti e assegnisti del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Da oltre un decennio sono impegnati in attività di divulgazione scientifica e crescita professionale: organizzano, senza alcuna finalità lucrativa, eventi e manifestazioni per la promozione della fisica e della scienza più in generale, non solo nell'ambito accademico, ma anche sociale.  
Contatti  
Sito Web: <http://ponys.fisica.unina.it>;  
Email: [ponys@fisica.unina.it](mailto:ponys@fisica.unina.it);  
Pagina Facebook: <https://www.facebook.com/ponys.unina/>

### Giancarlo Artiano

Studente del corso di laurea magistrale in Fisica presso l'Università di Napoli Federico II. Negli ultimi anni ha approfondito il collegamento tra didattica e sport, applicandolo alla divulgazione scientifica. Attualmente è Presidente dei PONYS.

### Alessandro Amabile

Studente del corso di laurea magistrale in Fisica presso l'Università di Napoli Federico II. Dal 2015 collabora con Città della Scienza in veste di conduttore di Attività Didattiche di Fisica per le scuole elementari, medie e superiori. Attualmente è Vicepresidente dei PONYS.

### Giuliana Galati

Laureata in Fisica Nucleare, Subnucleare e Astroparticellare presso l'Università di Bari "Aldo Moro"; ha conseguito il dottorato in Fisica presso l'Università di Napoli Federico II. Si occupa di fisica delle particelle elementari. Dal 2012 è blogger e speaker per Scientificast ([www.scientificast.it](http://www.scientificast.it)), di cui è socio fondatore. È membro attivo dei PONYS.

## International Conference on Women in Physics



## WOMEN AND PHYSICS IN ITALY: NUMBERS, PROJECTS, ACTIONS

Research in physical sciences in Italy is carried out by different organizations, operating under the supervision of the Ministry of Education, Universities and Research (MIUR). The career path of researchers in scientific Institutions and Universities is divided into three levels. The access to any of them is through a public competition, that in the mind of the legislator should give equal opportunities to all participants and recruit the “excellency”. Unfortunately the Italian laws have hampered recruiting and renewal of the staff in the past several years! The Italian law requires Unique Guarantee Committees (“Comitati Unici di Garanzia”, CUG) to be appointed in government-funded organizations, including Universities and public research agencies. CUG is the reference body for any issue related to equality and equal opportunities, to guarantee equal dignity in the workplace to all the personnel categories. An important part of its activity is the definition of the Triennial Affirmative Action Plans (“Piani Triennali di Azioni Positive”, PTAP), to be reviewed by the government. It also monitors the results of the actions proposed by the organization, a critical aspect since, in this respect, no formal requirement is stated by the Italian law.

We here give an update on the overview of Women and Physics in Italy presented in 2011, including two specific examples of European projects applied in Italian Institutions focussed on addressing gender disequity in science.

### CNR (National Research Council)

CNR, the largest public research institution in Italy performing multidisciplinary activities, has as mission to carry out, promote, transfer and improve research activities and their applications in the main sectors of knowledge aiming at the scientific, technological, economic and social development of the Country. CNR is distributed all over Italy through a network of 7 Departments and 101 Institutes. More than 8000 employees work at CNR in the main fields of scientific and humanistic research. Associates from Universities and private firms take also part in CNR research activities. More than half of the CNR employees are researchers and technologists. Women represent 45% of all CNR researchers. Physical, Earth and Environment, Mathematics and Computer Sciences are the disciplines with the highest male population, while the highest women population is registered in Biological and Chemical Sciences.

No women are in the role of President, Vice President, and General Director. The CNR Collegial Organization consists of a Board of Director (1 woman out of 5 members), a Scientific Council (2 women out of 10 members) and a College of Auditors (no women out of the 3 permanent members). No women are present among the 7 Directors of Department; 17 women out of 101 are Institute Directors (17%). Physics research at CNR is carried out in different CNR institutes by 793 researchers (32% women), including graduate

and PhD students in physics.

Figure 1 shows (a) the gender distribution of physicists at CNR at the different career levels and (b) the age distribution through career levels. The average female and male ages are comparable although differences appear along the career progression.

### INAF (National Institute of Astrophysics)

INAF<sup>1</sup>, the Italian institution devoted to research and technological development in the field of astronomy, astrophysics and space science, is a relatively recent national Institute, born from the association of Observatories (no longer used for scientific observations) and other institutes formerly part of CNR dedicated to this discipline (17 in all). In addition to promoting and supporting astronomical research, INAF is also engaged in science communication projects and in bringing the astronomical sciences to schools and society at large. At the end of 2016, almost 1000 people were part of the permanent staff, with ~580 researchers (~32 % women) and ~390 technicians and administrative staff (41% women). Non-permanent and post-doc positions amount to ~400. In the past 20 years, the absolute percentage of women in the research staff has slowly increased, although the top levels are still

sparsely populated. In particular, women represent a different percentage of the research staff (regardless of their career level) as a function of age: 37% among research staff younger than 45, 31% in the range between 45 and 55, and 25% for staff over 55, suggesting a better gender balance in the more recently hired staff. Unfortunately, the average age of the research staff is 51, due to the very small number of new and young researchers being hired!

Moreover, the scissor diagram (fig. 2(a)) does not appear to improve significantly with time: a slightly higher percentage of women at the entry level, no significant differences at the top levels. In particular, women remain at the same level longer than their equivalent male colleagues: at the middle level the median seniority is 30 years for women vs. 25 years for men (from fig. 2(b)).

Italy is well positioned in the field of astronomy compared to other countries: the statistics based on membership to the International Astronomical Union, which covers a large fraction of the world, indicate that Italy has one of the highest percentages of active women astronomers, together with France and Spain. The situation unfortunately is rather poor at the level of the governing boards of INAF: no representatives in the executive board (0/5), and 1 in 14 high level positions supporting the president. Only 3/17 institute directors are women, while the situation is slightly better in the scientific board (3/7 women).

<sup>1</sup> Data and text have been discussed with the president of the INAF CUG, Dr. Angela Iovino.

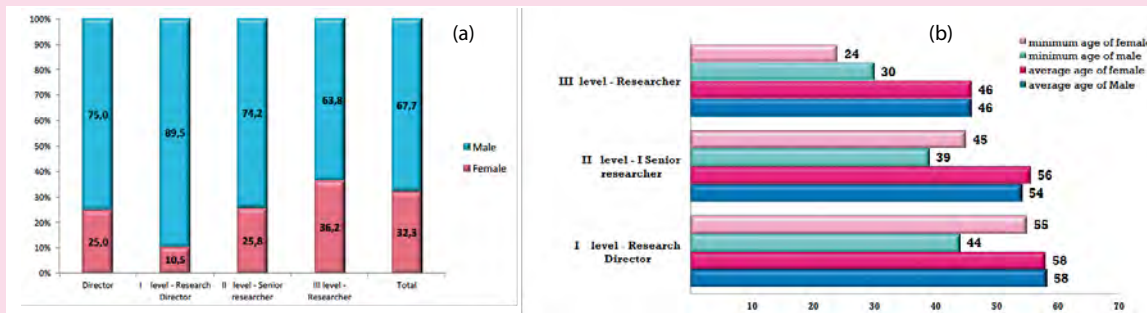


Fig. 1 The gender distribution of physicists at CNR at the different career levels (a). The age distribution through career levels (I level: grade A; II level: grade B; III level: grade C) (b).

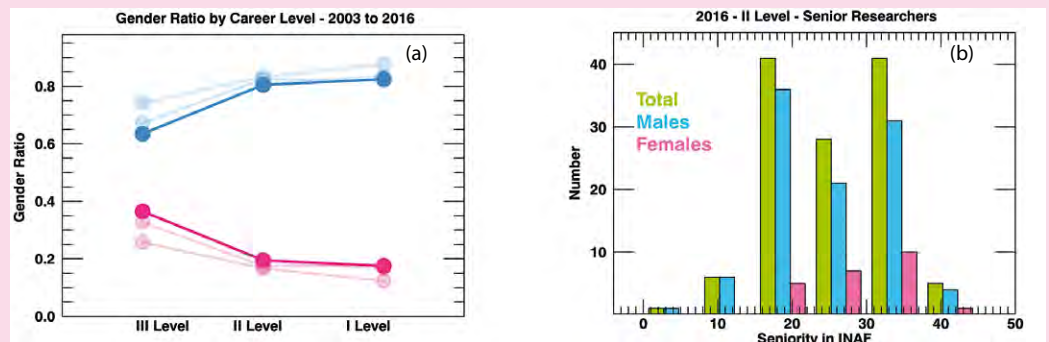


Fig. 2 The scissor diagram for the year 2016 at INAF (dark colors) compared to 2007 and 2003 (light colors, with 2003 at the extreme). Only permanent research positions are considered (a). Seniority accumulated in the middle level separately for men and women (b).

## INFN (National Institute of Nuclear Physics)

INFN<sup>2</sup>, the Italian research agency dedicated to the study of the fundamental constituents of matter and the laws that govern them, conducts research and technological development in the field of theoretical and experimental sub-nuclear, nuclear, and astroparticle physics and accelerator physics, in 4 national laboratories and 20 divisions, located in physics departments inside Universities. At the moment the permanent staff consists of 1712 people, plus 332 non-permanent positions and roughly 3000 associates (professors, students, PhD and technicians) all doing research in collaboration also with local and international industries. At the end of 2016, among 820 researchers and technologists, only 20% were

women of which one out of 5 a technologist. Women represent ~28% of the 892 technicians and administrative staff. Looking at research careers, as shown in fig. 3(a) the distribution in the career levels for men and women starts with a rough equality (40%), but the percentage at the top levels is quite different (19% vs. 9%). This means that the probability for a woman to reach the highest level is half than that for a man. This situation did not change in the last 10 years as shown in fig. 3(b) where the women presence in INFN research is considered from the beginning of the University studies to the top career level.

A horizontal segregation can be noticed inside INFN among different disciplines. It can be easily quantified by looking at the fraction of women that are responsible of INFN experiments, which span from the lowest percentage in theoretical physics, at about 5%, to the largest in

experimental nuclear physics, at 39%. Finally, inside the executive board (5 people plus the president), for the first time a woman was appointed in 2012; inside the board of directors, 12% are women as it was in 2011!

## Italian Academy

In 2016 the women in academic position in Physics reached the 20% (18% in 2009): 11% of full professors (FP), 21% of associate professors (AP), and 26% of researchers (R). The tendency in the period 2009-2016 is reported in fig. 4<sup>3</sup>.

The overall shrinkage of academic positions in Physics from 2009 is about 21%, mainly due to retirement and new way of recruitments. Most graduates

in Italy are still women, with the highest presence in the humanities, arts, law, health, and education. In 2016 women represented 58% of the graduates. In 2015 the women graduates (five years) in Physics were 32% of the total numbers, and the same percentage after the first diploma degree (three years). 36% of students obtaining three years degree in physics do not continue, irrespective of gender. Therefore women in physics could aspire to cover at least 30% of the academic apical position, or the top level positions in any of the organizations that focus on physical sciences.

## GENERA - Gender Equality Network in the European Research Area

GENERA is a Horizon 2020 Project that involves 12 Countries, 18 Research Institutions and 13 Observers. In Italy, INFN and CNR are the two research institutes

<sup>2</sup> Data coming from INFN CUG and INFN analysis

<sup>3</sup> Data coming from MIUR web site: <http://cercauniversita.cineca.it/php5/docenti/cerca.php>

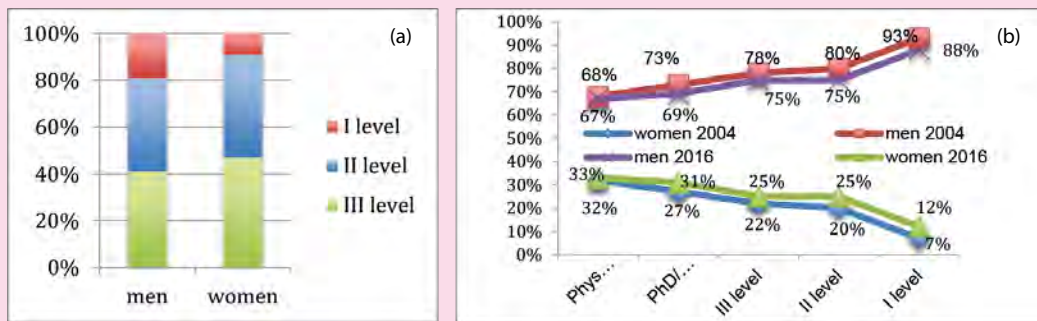


Fig. 3 Distribution of women and men in the levels of careers of the research plus technological personnel at INFN (a). The scissor diagram for year 2016 compared with 2004 for INFN researchers starting from university period (b).

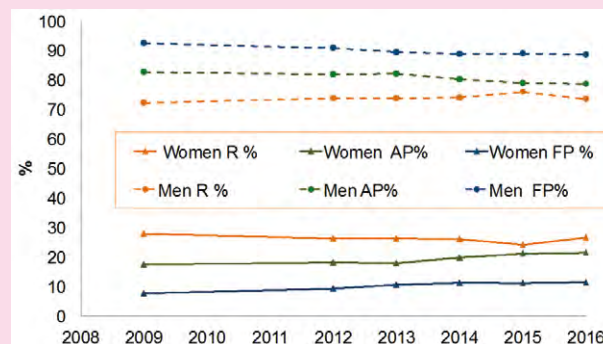


Fig. 4 Diagram of Academic positions in Physics from 2009 to 2016.

participating in it. The Project intends to support research organizations in implementing, monitoring and improving Gender Equality Plans (GEPs) customized to circumstances and needs of the physics research field, in order to improve gender equality in the physics research area. The customized Gender Equality Plans involve systematic examination of all decision-making processes to identify any possible source of gender bias in the research organisations in physics.

Another major goal of GENERA is to contribute to overcoming the under-representation of women in physics research, which is long standing and persistent even if the prevailing cultures adopt the assumption of being "gender neutral". Finally, the Project promotes the organization of Gender-in-Physics Days (GiPD) in the Partner Countries. GiPDs aim to analyse the implementation of innovative actions towards gender equality and to outline best

practices and, on the other hand, to help to identify persistent gaps and barriers.

### GENOVATE - Transforming organisational culture for gender equality

in research and Innovation GENOVATE is a FP7 project based on the implementation of Gender Equality Action Plans (GEAPs) in six European universities; the University of Naples Federico II (UNINA) is the Italian partner. During the project life cycle (2013-2017) UNINA has realised several actions to address gender inequality in academia. The key actions of the UNINA's GEAP consists of:

- The release of the First Gender Budget of the Ateneo Fridericiano (FedOAPress, 2016), a thorough context analysis of the student body, of Faculty, and of technical and administrative staff that provides a detailed map of the current gender gap in the

institution; these data confirm that Physics still remains a male-dominated disciplinary area.

- The implementation of a Mentoring Programme only women. The main goal of the programme was to help young women to identify their own career goals and to focus on their accomplishment. At the same time, it aimed at promoting diversity and at defying academic practices that may cling to gender-neutral assumptions. The program was supported by other initiatives, such as seminars, debates, world cafés, etc. aimed at increasing gender awareness and strengthening a network of women committed to structural change in academic organizations.

- The establishment of a Gender Observatory on University and Research aimed to promote a) gender perspectives into scientific knowledge and academic activities, b) gender and diversity-sensitive tools in the evaluation

methodologies, c) data analyses of women's presence in research and academia, d) support of women's careers in science.

Simonetta Croci  
Università degli Studi di Parma

Paper presented at the 6th IUPAP International Conference on Women in Physics, held in Manchester (UK) on 16-20 July 2017 by the Italian representatives:

R. Antolini (LNGS-INFN, L'Aquila), P. Cenci (INFN, Sezione di Perugia), S. Croci (Università di Parma), S. Leone (INFN, Sezione di Pisa), M. R. Masullo (INFN, Sezione di Napoli), I. Picardi (INFN, Sezione di Napoli), G. Trinchieri (INAF, Milano).

## 52° PREMIO INTERNAZIONALE "LE MUSE"



Il prestigioso Premio Internazionale "Le Muse", promosso dall'omonima Accademia, premia ogni anno dodici nomi illustri e famosi nel campo delle lettere, scienze, poesia, musica, canto, danza, arte, storia, teatro, cinema, televisione, scienze e impresa, tutti associati ai nomi delle rispettive nove Muse, alle quali sono stati aggiunti una X e una XI Musa e Apollo Musagète (guida delle Muse).

Nel 2017, il Premio "Le Muse" per la Storia, sotto il segno della Musa Clio, è stato assegnato a **Nadia Robotti** dell'Università di Genova per i

suoi studi nel campo della Storia, dove la Storia è la "Storia della Fisica".

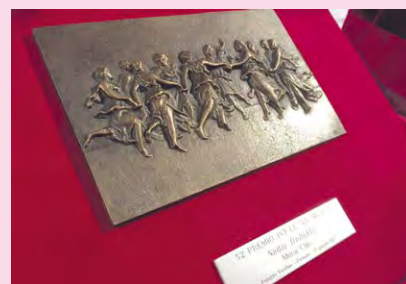
Finora i premi Le Muse per la Storia erano stati attribuiti per altri settori quali l'Architettura, l'Arte, la Politica, le Istituzioni, ecc. È la prima volta che un premio per la Storia è associato alla Scienza, o a una materia scientifica ben definita. Quest'anno l'Accademia ha deciso di premiare la Storia della Fisica; e così anche la Fisica, attraverso la sua storia, è entrata nel mondo delle Muse.

La solenne Cerimonia di premiazione è avvenuta sabato 17 giugno, nello storico Salone dei Cinquecento di Palazzo Vecchio a Firenze, alla presenza di un vasto pubblico internazionale e delle maggiori autorità civili, militari e religiose.

Durante la cerimonia tutti i premiati, dopo essere stati presentati e intervistati dalla

fondatrice del premio, hanno ricevuto un diploma e un basso rilievo bronzeo raffigurante le Muse, opera dello scultore Salvadori.

La SIF si rallegra in particolar modo con **Nadia Robotti**, già vincitrice nel 2008 del Premio per la Storia della Fisica della SIF e attuale Vice Direttore del Giornale di Fisica della SIF!

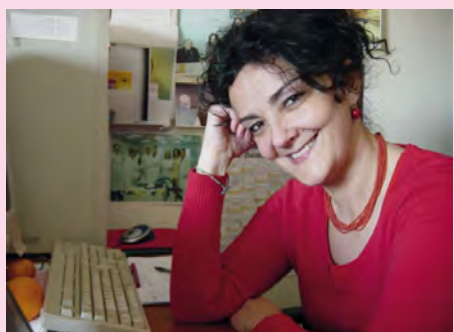


Il Premio Internazionale "Le Muse" è stato fondato nel 1965, per iniziativa di Giuliana Fiumicelli Plastino, con l'appoggio dell'allora sindaco di Firenze Giorgio La Pira. Da allora, ogni anno, vengono premiate personalità in Italia e nel mondo che si sono particolarmente distinte nel campo delle lettere, delle arti, della scienza, del cinema, della televisione.

I dodici premiati di questa edizione 2017 sono stati: Sergio Redaelli (Apollo Musagete-

Scienza e Impresa), Marcello Brugioni (Urania-Scienze), Lida de Polzer (Calliope-Poesia), Mario Landolfi (Talia-Lettere), Luca Bruni (Tersicore-Danza), Nadia Robotti (Clio-Storia), Giovanni Cultrera di Montesano (Polimnia-Musica), Giulio Scarpati (Melpomene-Teatro), Gemma Bertagnolli (Euterpe-Canto), Fabio Viale (Erato-Pittura/Scultura), Isabell Russinova (X Musa-Cinema), Marisa Laurito (XI Musa-Televisione).

## EPS EMMY NOETHER DISTINCTION FOR WOMEN IN PHYSICS



La prima assegnazione per il 2017 (spring/summer) è andata a **Catalina Curceanu**, primo ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Laboratori Nazionali di

Frascati (LNGS), membro del Foundational Questions Institute (FOXi) e associata al Centro Fermi - Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi". Catalina ha ricevuto il riconoscimento, come si legge nella motivazione dell'EPS, per "il suo ruolo guida nel campo della fisica sperimentale nucleare e adronica, per i suoi essenziali contributi a una migliore comprensione della teoria della Cromo Dinamica Quantistica (QCD) a basse energie in regime non perturbativo e per i suoi studi pionieristici nel campo dei fondamenti della fisica moderna. Con la sua notevole produzione scientifica, e un'attività molto ricca di divulgazione e didattica scientifica, la Dr.ssa Curceanu rappresenta un eccezionale modello per le ricercatrici!"

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

# RECENSIONI



Publicata online  
21 aprile 2017

**P. ATKINS**

**CHE COS'È LA CHIMICA?**  
UN VIAGGIO NEL CUORE DELLA MATERIA

Chiavi di lettura. A cura di L. Vozza,  
Traduzione di L. Doplicher  
Zanichelli Editore, Bologna, 2015

pp. 160, € 11,50

Recensione di  
A. Papagni



Publicata online  
12 maggio 2017

**VITTORIO DEGIORGIO, ILARIA CRISTIANI**

**NOTE DI FOTONICA**

UNITEXT for Physics. Seconda Edizione  
Springer-Verlag Italia Srl, 2016;

hardcover: pp. XII + 222, € 69.99  
e-book: € 56.99

Recensione di  
L. Lugiato



Publicata online  
7 luglio 2017

**GIANPAOLO BELLINI (A CURA DI)**

**DALL'ATOMO ALL'IO**  
AVVENTURE ALLE FRONTIERE DELLA SCIENZA

Ulrico Hoepli, Milano, 2017

pp. 288; € 19,90

Recensione di  
M. E. Bergamaschini Guzzi



Publicata online  
31 luglio 2017

**ALASTAIR I. M. RAE, JIM NAPOLITANO**

**QUANTUM MECHANICS**  
Sixth Edition

CRC Press. Taylor & Francis Group,  
New York, 2015

Paperback: pp. 413, £ 41.99  
e-book: £ 25.19

Recensione di  
F. Montalenti

## IN RICORDO DI

### Luigi Busso



Torino, 20 maggio 1942 -  
Torino, 28 aprile 2017

T. Bressani

Publicato online  
6 giugno 2017

### Lanfranco Belloni



Milano, 19 settembre 1944 -  
Milano, 3 maggio 2017

L. Gariboldi, S. Olivares

Publicato online  
31 luglio 2017

### Franco Persico



Palermo, 27 settembre 1938 -  
Palermo, 17 marzo 2017

A. Messina, G. Compagno

Publicato online  
31 luglio 2017

## FERROMAGNETISMO A DUE DIMENSIONI

Due articoli apparsi sullo stesso numero di Nature riferiscono della realizzazione, per la prima volta, di cristalli di van der Waals (cioè tenuti assieme da questa forza) di spessore monoatomico, o di pochi atomi, nei quali gli spin elettronici sono allineati, paralleli o antiparalleli, e quindi ferromagneti o antiferromagneti bidimensionali.

1. C. Gong *et al.*, *Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals*, Nature, 546 (2017) 265

"We report intrinsic long-range ferromagnetic order in pristine Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> atomic layers, as revealed by scanning magneto-optic Kerr microscopy. In this magnetically soft, two-dimensional van der Waals ferromagnet, we achieve unprecedented control of the transition temperature ... using very small fields (< 0.3 T). ... We found that the small applied field leads to an effective anisotropy that is much greater than the near-zero magnetocrystalline anisotropy... We conclude that the unusual field dependence of the transition temperature is a hallmark of soft, two-dimensional (Heisenberg) ferromagnetic van der Waals crystals".

2. B. Huang *et al.*, *Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit*, Nature, 546 (2017) 270

"Here we use magneto-optical Kerr effect microscopy to demonstrate that monolayer CrI<sub>3</sub> is an Ising ferromagnet with out-of-plane spin orientation... Our studies suggest a layer-dependent magnetic phase, highlighting thickness-dependent physical properties typical of van der Waals crystals. Remarkably, bilayer CrI<sub>3</sub> displays suppressed magnetization with a metamagnetic effect, whereas in trilayer CrI<sub>3</sub> the interlayer ferromagnetism observed in the bulk crystal is restored."

## COME UNALENTE, MA A DUE DIMENSIONI

Qualunque esso sia, un dispositivo che forma un'immagine, lo fa introducendo nell'onda incidente un ritardo (o anticipo) di fase che cresce allontanandosi dall'asse ottico come il quadrato della distanza da esso. Nella lente è lo spessore che aumenta (o diminuisce) con tale dipendenza. Ne consegue che la lente ha un ingombro longitudinale inevitabile. Una tecnica recentemente proposta potrebbe evitarlo con un dispositivo attivo.

R. Fatemi, B. Abiri, and A. Hajimiri, *An 8x8 Heterodyne Lens-less OPA Camera*, Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper JW2A.9

"This paper presents an 8x8 optical phased array (OPA) receiver that operates as a lens-less camera using a heterodyne architecture on a thin silicon-photonics integrated SOI substrate. It has a receiving beam width of 0.75° and beam steering range of 8°"



Distribuzione dell'illuminamento nell'immagine di una sorgente puntiforme monocromatica. Riprodotta con permesso della Optical Society of America ©2017 OSA da [https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO\\_QELS-2017-JW2A.9](https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO_QELS-2017-JW2A.9)

## UN BARIONE DUE VOLTE FASCINOSO

L'esperimento LHCb al collisore LHC al CERN ha riportato alla "Conferenza sulla Fisica delle Alte Energie" dell'EPS a Venezia (5-12 luglio 2017) l'osservazione di un nuovo barione stabile rispetto alle interazioni forti, composto di un quark up e di due charm, con una massa di 3621 MeV, valore che coincide con quello atteso. Solo 5 dei 6 quark formano adroni, perché il top decade prima di averne il tempo. In totale quindi ci sono 35 combinazioni di tre quark scelti, con ripetizioni, tra i 5. Sinora ne erano stati scoperti 22, fatti dei tre quark

"leggeri" u, d ed s (10 possibilità) e di due di loro ed uno dei "pesanti", cioè un c o un b (6 possibilità per ciascuno). Ora ne abbiamo anche uno con due pesanti, cioè ucc. Ne mancano ancora 12.

LHCb Collaboration. *Observation of the doubly charmed baryon  $\Xi_{cc}^{++}$* , CERN-EP-2017-156. arXiv:1707.0162

"A highly significant structure is observed in the  $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$  mass spectrum, where the  $\Lambda_c^+$  baryon is reconstructed in the decay mode  $p K^- \pi^+$ . The structure is consistent with originating from a weakly decaying particle, identified as the doubly charmed baryon  $\Xi_{cc}^{++}$ ."

## LE ACQUE SONO DUE

Un gruppo di ricerca di Stoccolma ha scoperto che nell'acqua allo stato liquido coesistono due diverse fasi, con grandi differenze di struttura e densità. Gli autori hanno impiegato due sorgenti di raggi X, una presso il Laboratorio Nazionale di Argonne (ANL) in Illinois, l'altra a DESY (Amburgo), dove è stato possibile seguire l'evolversi delle trasformazioni di fase.

F. Perakis *et al.*, *Diffusive dynamics during the high-to-low density transition in amorphous ice*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A, 114 (2017)

"Here we combine wide-angle X-ray scattering (WAXS) with X-ray photon-correlation spectroscopy in the small-angle X-ray scattering (SAXS) geometry to probe both the structural and dynamical properties during the high-to-low-density transition in amorphous ice at 1 bar. By analysing the structure factor and the radial distribution function, the coexistence of two structurally distinct domains is observed at  $T=125$  K."

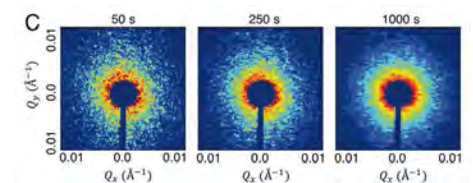
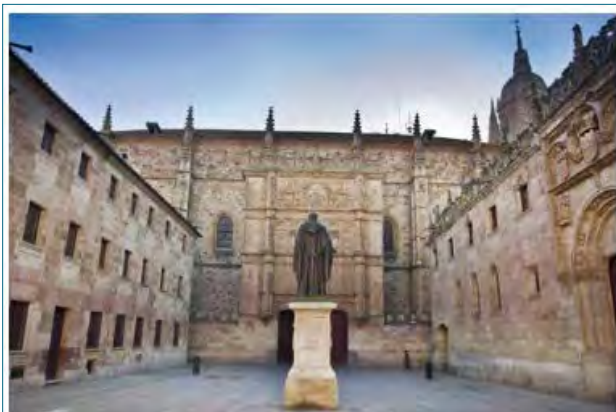


Figure di diffrazione in geometria SAXS per differenti tempi di esposizione alla temperatura  $T = 89$  K. Riprodotta da [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1705303114](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1705303114)



Salamanca

HADRON

2017

XVII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure

September 25th-29th 2017



<http://hadron2017.usal.es/>

**29 settembre 2017**  
**NOTTE EUROPEA DEI RICERCATORI**

<http://nottedeiricercatori-society.eu/>

IX incontro nazionale dei  
**Gruppi Italiani di Astrofisica**  
**Nucleare Teorica e Sperimentale**  
5-6 ottobre 2017  
Palazzo Poggi, Bologna

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=13357>



# ICALEPCS2017

Barcelona · Spain, October 8-13 · Palau de Congressos de Catalunya

<http://www.icalepcs2017.org/>

## 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems



## Condensed Matter Physics 2017

October 19-21, 2017

<http://condensedmatterphysics.conferenceseries.com/>



Conference Series LLC

## MetroArcheo2017

*Castello Carlo V, Lecce, Italy, October 23-25, 2017*



## IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage

# QCD Challenges from pp to AA

31-October 2017

<https://indico.cern.ch/event/617445/>



## International Conference on Extreme Light

5-9 November 2017

<https://www.eli-alps.hu/indico/event/12/>



[http://www.iss.it/binary/cong/cong/Correlative\\_Microscopy.pdf](http://www.iss.it/binary/cong/cong/Correlative_Microscopy.pdf)

## CORRELATIVE MICROSCOPY IN LIFE AND MATERIALS SCIENCES

# physicsworld

## Digital issues now freely available to SIF members

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



Authenticate your access at [members.sif.it](http://members.sif.it)



IOP Publishing and Societa Italiana di Fisica wish to thank CAEN S.p.A. for facilitating digital access to *Physics World* for SIF Members in 2017.



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

2017

Nome \_\_\_\_\_  
Name

Cognome \_\_\_\_\_  
Surname

Luogo e data di nascita \_\_\_\_\_  
Place and date of birth

Nazionalità \_\_\_\_\_  
Nationality

**a** Istituto o Ente di appartenenza \_\_\_\_\_  
Affiliation

**b** Indirizzo privato \_\_\_\_\_  
Home address

Indirizzo e-mail \_\_\_\_\_  
E-mail

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

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

**a**

**b**

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

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

1) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

- Socio INDIVIDUALE € 45,00   
INDIVIDUAL Member
- Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni € 25,00   
JUNIOR Member under 30
- Socio SENIOR al di sopra dei 70 anni € 35,00   
SENIOR Member over 70
- Socio INDIVIDUALE anche membro di altre associazioni scientifiche italiane relative alla fisica (\*\*) € 35,00   
INDIVIDUAL Member also member of other Italian scientific associations (\*\*)
- Socio COLLETTIVO € 260,00   
COLLECTIVE Member
- Socio SOSTENITORE (a partire da) € 310,00   
SPONSORING Member (starting from)

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

(\*) 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/associazione>

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

Data \_\_\_\_\_  
Date

Firma \_\_\_\_\_  
Signature

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

# SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

## Per diventare Socio SIF:

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

### Quote sociali 2017 della Società Italiana di Fisica

- |  |          |                          |
|--|----------|--------------------------|
| <input type="radio"/> Socio Individuale  | € 45,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Junior al di sotto dei 30 anni   | € 25,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Senior al di sopra dei 70 anni   | € 35,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Individuale anche membro di altra associazione scientifica italiana relativa alla fisica (*) | € 35,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Collettivo   | € 260,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Sostenitore (a partire da)   | € 310,00 | <input type="checkbox"/> |

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

## Per diventare Socio EPS:

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

### Quote sociali 2017 della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

- |  |         |                          |
|--|---------|--------------------------|
| <input type="radio"/> Socio                          | € 27,50 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio al di sotto dei 30 anni  | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio in pensione              | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Studente                       | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Insegnante (pre-universitario) | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |

## Modalità di pagamento della quota sociale alla SIF:

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

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

Compilare e spedire a :

**Società Italiana di Fisica - Via Saragozza 12 - 40123 Bologna - fax 051 581340**

Il sottoscritto: \_\_\_\_\_

Nato a: \_\_\_\_\_ il \_\_\_\_\_

Residente a: \_\_\_\_\_

Via: \_\_\_\_\_ n. \_\_\_\_\_

Documento di riconoscimento: \_\_\_\_\_ n. \_\_\_\_\_

Rilasciato da: \_\_\_\_\_ il \_\_\_\_\_

Titolare carta di credito **VISA** n. \_\_\_\_\_

Scadenza \_\_\_\_\_

Titolare carta di credito **MASTERCARD** n. \_\_\_\_\_

Scadenza \_\_\_\_\_

### AUTORIZZA

La Società Italiana di Fisica

A prelevare dalla carta di credito sopra descritta

L'importo di € \_\_\_\_\_ , \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )  
(importo in cifre) (importo in lettere)

Data \_\_\_\_\_

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

si  no

\_\_\_\_\_ Firma

Da DC a 500 kHz oppure da DC a 5 MHz

# Lock-in Amplifier MFLI

# Impedance Analyzer MFIA

A partire da  
EUR 5.400

EUR 9.300



Ogni strumento include

-  Analizzatore di spettro
-  Sweeper parametrico
-  Oscilloscopio con FFT
-  Acquisizione di immagini
-  Protezione di sonda locale
-  Interfaccia per Python, MATLAB®, .NET, C e LabVIEW®

Opzioni aggiuntive

4 controllori PID/PLL

- L'assistente PID suggerisce il set di parametri iniziale
- L'Auto-tune minimizza automaticamente l'errore PID residuo
- La modalità PLL può misurare fasi fino a  $\pm 1024$  volte  $\pi$

Modulazione AM/FM

- Generazione e analisi di segnali AM/FM
- Analisi dei picchi satellite fondamentali e di ordine superiore
- Parametri dei filtri impostabili indipendentemente per ogni frequenza



Zurich  
Instruments

[www.zhinst.com](http://www.zhinst.com)  
[info@zhinst.com](mailto:info@zhinst.com)  
+41 44 515 0410

Contattateci

# Tecnologia in Movimento

PRECISIONE, AFFIDABILITA' ED INNOVAZIONE



### Nuova Serie Q-Motion: Precisi, Compatti, Affidabili

- + Q-614: Rotatore di precisione miniaturizzato
- + Q-545: Asse lineare di precisione miniaturizzato
- + Q-821: SpaceFAB 6D robot miniaturizzato



### Sistemi di Posizionamento Compatibili con il Vuoto: Design Compatto ed Elevata Precisione

- + L-402: Asse lineare di precisione miniaturizzato
- + RS-40: Rotatore compatto e preciso
- + SF-450 PS: SpaceFAB a sei assi con sistema micro robot



### Nuovi Assi Lineari di PI e PI miCos: Posizionamento di Precisione e Controllo di Movimento

- + M-406: Asse lineare adatto per la ricerca e per l'industria
- + L-509: Asse lineare robusto ideale per carichi fino a 10 kg
- + V-551: Asse lineare PIMag® compatto e veloce

# Goodfellow

È possibile scegliere  
fra oltre 70.000 prodotti  
presenti in catalogo

## Metalli e materiali per ricerca



Metalli



Leghe



Ceramiche



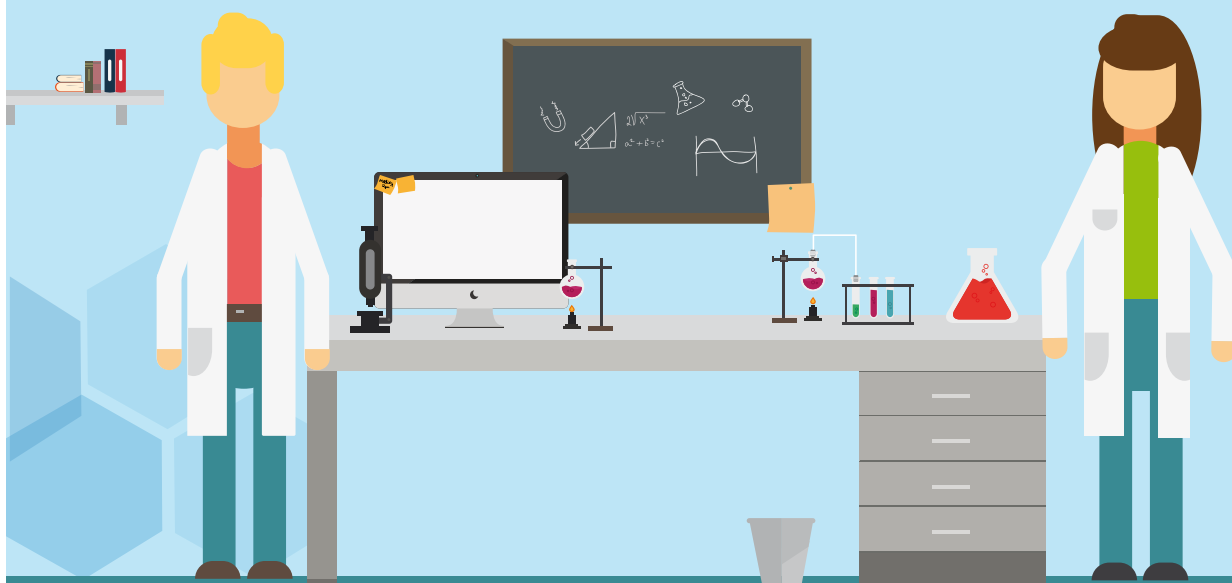
Polimeri



Compositi



Compositi



[www.goodfellow.com](http://www.goodfellow.com)

 **PRODOTTIGIANNI**

Our competence, your value.

Rappresentata in ITALIA da:  
**Prodotti Gianni S.r.l.**

Via M.F. Quintiliano 30, 20138 Milano  
Tel. 02 509 7 220 - Fax 02 509 7 276  
[ricerca@prodottigianni.com](mailto:ricerca@prodottigianni.com)

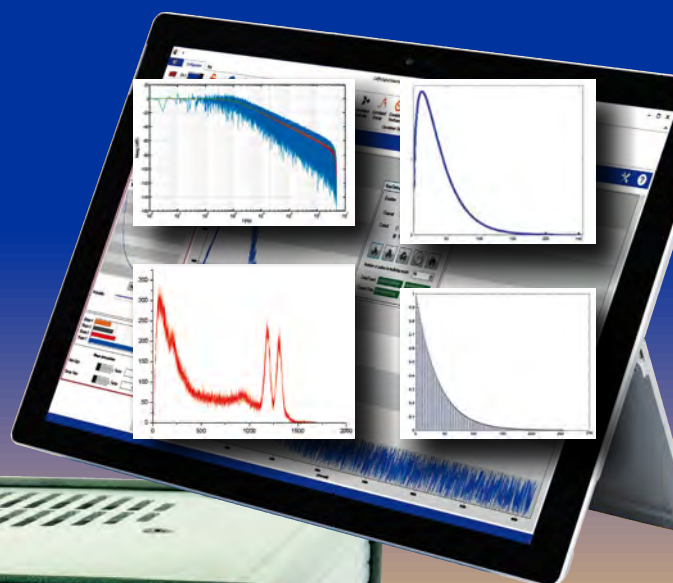
[www.ricerca.it](http://www.ricerca.it)

DT5810 - DT5800 - DT4800 - NDT6800

# The only family of Digital Detector Emulators on the Market

*From a set of user defined data...*

- Energy Distribution
- Time Distribution
- Signal Shape
- Pile-up Emulation
- Baseline Drift
- Noise & Interference
- Multiple Shapes Emulation
- Correlated Events Generation
- Real Analog Input
- Continuous and Pulsed reset Preamplifier



CHECK THIS OUT!



*... to Emulated Analog Outputs*

- Remote Experimentation
- DAQ electronics Test and Development
- Educational Applications
- Test of user defined algorithms:
  - Pulse Shape Discrimination
  - Events Correlation
  - Timing Resolution

## A portable lab in your hands!

available in Desktop and NIM Form Factor