Bollettino della Società Italiana di Fisica
Nuova Serie Anno 22
N. 3 maggio-giugno 2006
N. 4 luglio-agosto 2006

Comitato di Redazione:
Giuseppe-Franco Bassani, Luisa Cifarelli, Enzo De Sanctis, Vincenzo Grasso, Roberto Habel, Guido Piragino, Angiolino Stella

Direttore Editoriale:
Angela Oleandri

Hanno inoltre collaborato a questo numero: N. Belcari, M. Bersanelli, A. Bonetti, L. Colombo, A. Del Guerra, L. Di Gaspare, F. Evangelisti, S. Focardi, F. Guerra, R. Habel, F. Parmigiani, B. Preziosi, R. A. Ricci, S. Scandolo, A. Sestero, E. Sindoni.

Copertina a cura di Simona Oleandri

Segreteria di Redazione:
Carmen Vasini

Direzione e Redazione:
Società Italiana di Fisica
Via Saragozza 12
40123 Bologna
Tel. 051331554 / 051581569

Questo fascicolo è stato realizzato in Fotocomposizione dalla Monograf, Bologna e Stampato dalla Tipografia Compositori nel mese di Settembre 2006

Autorizzazione del Tribunale di Bologna n. 3265 del 3/5/1967

© Società Italiana di Fisica
Proprietà Letteraria Riservata

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta in qualsiasi forma (per fotocopia, microfilm o qualsiasi altro procedimento), o rielaborata con uso di sistemi elettronici, o riprodotta, o diffusa, senza autorizzazione scritta dell'editore

USPI Associato all'Unione Stampa Periodica Italiana

SIF, Bologna

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Direttore Responsabile
Giuseppe-Franco Bassani

Vicedirettori
Sergio Focardi e Giuseppe Grosso

Comitato Scientifico
G. Benedek, N. Cabibbo, E. De Sanctis, R. Petronzio, P. Picchi e A. Vitale

IL NOSTRO MONDO
3 Anno Mondiale della Fisica: L'avventura continua
R. A. Ricci e R. Habel
21 Alle Colonne d'Ercole - Navigando ai confini dell'impresa scientifica
M. Bersanelli e E. Sindoni
26 Calcolo ad alte prestazioni in fisica della materia: una iniziativa nazionale di coordinamento e promozione
L. Colombo
32 Ricordo di Livio Scarsi (1927-2006)
A. Bonetti
35 Massimo Sancrotti (12 luglio 1953 - 22 aprile 2006)
F. Parmigiani
36 Ricordo di Giulio Cortini (1 dicembre 1918 - 29 maggio 2006)
F. Guerra e B. Preziosi

PERCORSI
39 Afflati galileiani e non nella fisica contemporanea
A. Sestero

SCIENZA IN PRIMO PIANO
47 Fisica mesoscopica con eterostrutture Si/SiGe
F. Evangelisti e L. Di Gaspare
55 La simulazione a principi primi esplora il cuore dei pianeti
S. Scandolo

FISICA E ...
65 Utilizzo di Tecniche nucleari nell'*imaging* molecolare
N. Belcari e A. Del Guerra

77 RECENSIONI

SCELTI PER VOI
80 Una bilancia meccanica per protoni - Un nano-ponteggio per ridare vista ai cechi - Sicuri o pericolosi?

81 ANNUNCI

Il Nuovo Saggiatore - Bollettino della Società Italiana di Fisica viene inviato gratuitamente ai soci.

Modalità di Iscrizione

Per iscriversi occorre presentare domanda di associazione sul modulo apposito (che pubblichiamo in penultima pagina, e sulla nostra pagina web all'indirizzo www.sif.it/membership/applicationform_it.php) con un breve curriculum scientifico e la firma di due soci presentatori. 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. Le quote di iscrizione sono pubblicate nell'ultima pagina.

Rinnovo Quote Sociali

Il rinnovo della quota sociale per l'anno corrente può essere effettuato nei modi seguenti:

- a mezzo assegno bancario
- a mezzo versamento su c/c postale n. 19197409
  Il Nuovo Cimento - SIF, via Saragozza 12, 40123 Bologna
- a mezzo carta di credito (Cartasí, MasterCard, Eurocard e VISA)
  Comunicare per iscritto nome, cognome, indirizzo postale completo, numero e data di scadenza della carta, data e firma utilizzando il tagliando pubblicato in fondo al fascicolo.
- A partire dal 2005 è possibile rinnovare l'iscrizione all'European Physical Society attraverso le rispettive società nazionali. I Soci che desiderano pagare la propria quota di iscrizione individuale tramite la SIF, possono farlo con le modalità di cui sopra. Per gli importi di dette quote rinviamo alla nostra pagina web all'indirizzo www.sif.it/membership_it.php.

PUBBLICITÀ

La pubblicità ne Il Nuovo Saggiatore è limitata al 20% del fascicolo.
La Direzione si riserva la facoltà di pubblicare esclusivamente le inserzioni che ritiene conformi al contenuto della rivista.
Le inserzioni pubblicate devono essere inviate alla redazione del Nuovo Saggiatore come file .ps rispettando esattamente le misure standard indicate in tabella.
In tabella sono riportate i prezzi delle inserzioni.

Spazio dell'inserzione	Superficie stampata altezza × larghezza	Numero di inserzioni		
		1 inserzione	3 inserzioni	6 inserzioni
1 pagina	cm 25.3 × 17.2	€ 760	€ 730	€ 700
1/2 pagina	cm 12.2 × 17.2	€ 565	€ 540	€ 500
1/3 pagina	cm 25.3 × 5.4	€ 450	€ 430	€ 410
1/4 pagina	cm 12.2 × 8.1	€ 410	€ 390	€ 375

Supplemento per stampa in quadricromia: € 700

Gli articoli destinati alla pubblicazione devono essere inviati in duplice copia direttamente ed esclusivamente al seguente indirizzo:

Redazione de *Il Nuovo Saggiatore*
Società Italiana di Fisica
Via Saragozza 12 **tel. +39-051581569 - fax +39-051581340**
40123 Bologna **e-mail: saggiatore@sif.it - web page: www.sif.it**

Periodicità: 6 numeri l'anno
Stampa in fotocomposizione SIF, Bologna

IL NOSTRO MONDO

ANNO MONDIALE DELLA FISICA: L'AVVENTURA CONTINUA

R. A. Ricci e R. Habel

1. – Introduzione

Il titolo è quello dell'incontro tenutosi a Como (Villa Olmo) il 25 marzo u.s. organizzato dal Comitato Nazionale di Coordinamento e che ha avuto per scopo un primo bilancio delle iniziative per l'Anno Mondiale della Fisica a livello nazionale e locale in Italia.

Tale incontro, dal quale è emerso non solo il successo generale delle varie manifestazioni ma la chiara indicazione della opportunità, se non la necessità, di procedere oltre ("L'avventura continua"), costituisce pertanto non un punto di arrivo e non soltanto un termine di riferimento ma soprattutto una vera e propria base di partenza per portare avanti nel concreto lo spirito e il significato dell'"avventura" promossa dalla Società Europea di Fisica e dalle Società nazionali di Fisica nel 2001: "*Scopo principale dell'Anno mondiale della Fisica è di suscitare l'interesse dell'opinione pubblica per la fisica e, più in generale, delle scienze fisiche. La percezione della fisica e della sua importanza nella nostra vita quotidiana è diminuita agli occhi del pubblico medio tanto che il numero degli studenti di fisica nelle scuole superiori e nelle Università è sceso drammaticamente negli ultimi anni. È necessario pertanto che le Società di Fisica in tutto il mondo si attivino nel trasmettere le loro visioni e convinzioni sulla fisica ai politici e al pubblico ..... Agli albori del XXI secolo il ruolo interdisciplinare della fisica aumenterà ulteriormente e sarà di aiuto nella soluzione di problemi cruciali specifici del nostro mondo quali: la produzione di energia, la tutela ambientale, la salute pubblica*".

L'illustrazione delle scienze fisiche e dei loro risultati è stata quindi l'asse portante dell'anno mondiale della fisica nel 2006 e ha costituito l'oggetto di numerose e multiformi attività tese a ravvivare l'interesse del pubblico: programmi radio e televisivi (scarsi purtroppo in Italia), articoli e presentazioni su giornali e riviste specializzati (qualcosa ma insufficiente in Italia), incontri sulla fisica e sulla visione fisica del mondo, mostre locali e itineranti, iniziative presso le scuole e le Università, fisica in piazze e strade, dibattiti e conferenze, simposi sul significato e l'evoluzione della scienza, sulla responsabilità e l'etica della scienza, sul carattere interdisciplinare e le applicazioni della fisica, sui legami con la tecnologia e le industrie. Sugli argomenti qui citati le attività intraprese e tuttora in corso nel territorio nazionale sono state certamente notevoli, di grande significato e spesso di grande livello anche nel confronto internazionale.

Le iniziative italiane sono state illustrate nell'ambito del "*Final WYP-2005 Meeting*", tenutosi a Parigi il 3-4 marzo di quest'anno.

È importante richiamare subito, per riprendere il concetto della continuità delle azioni intraprese a livello internazionale, il consuntivo delle attività che si può riassumere come segue (sommario dell'European Physical Society (EPS)):

Successful WYP Activities
– School events School competitions, hands-on activities Natural radio-activity measurements, pollution measurements (internet-linked)
– Interactive "open air" experiments Street experiments, physics on the beach, in the supermarket Science bus, science on the city buses Science cafes
– Exhibits Museum exhibits on physics, Einstein, etc. Physics fairs, science shows
– International events Physics Talent Search Physics enlightens the world International Students Olympiads, Young Physicists Tournament

Come si vede in tale contesto rientrano molte delle iniziative italiane.

Ciò ha fatto concludere che WYP-2005 è stato un "*major success, with international impact*" e che si può parlare del futuro: "*What next? Are we finished? No, we have just started*!".

Quali prospettive al di là del 2005?

Osservazioni e proposte:

– Un anno internazionale ogni anno? (È opportuno ricordare che il 2009 sarà l' Anno Mondiale dell' Astronomia.) In ogni caso una possibile proposta è quella di una tregiorni per la fisica ogni anno.

– Estendere e portare avanti le attività di successo:
  gare scolastiche, mostre, conferenze, cafè della scienza, scienza in autobus, in piazza, esperimenti in strada.
– Insegnamento della fisica nelle scuole:
  Continuare le analisi e riflessioni sull'insegnamento scientifico, mantenere i legami tra ricercatori e docenti.

Gli scienziati devono continuare il loro coinvolgimento nello sviluppo della fisica.

Essenziali appaiono le attività congiunte a livello internazionale; possibile un Comitato "Fisica e Società" in seno alla IUPAP?

Dialogo fra fisici e decisori politici (vedasi il Forum "*Physics and Society*", Graz, Austria, 20-22 aprile 2006 cui ha partecipato per l'Italia Pasquale Tucci).

A proposito di quest'ultimo vale la pena di ricordare gli argomenti discussi e che hanno costituito oggetto di elaborazione da parte di tre Commissioni per la produzione di un documento complessivo approvato dai presenti:

– il ruolo della fisica nel contesto della società, della cultura e della scienza;
– l'importanza della fisica per la competitività in un'economia mondiale basata sulla tecnologia;
– esigenze nella politica e nel finanziamento della ricerca;
– standards e controllo di qualità nell'educazione in fisica e confronto nei curricula internazionali a tutti i livelli dell'educazione;
– problemi etici in fisica.

Data l'importanza del documento finale se ne pubblica a parte il testo integrale con l'elenco dei partecipanti (vedi appendice).

2. – Un po' di storia

Va ricordato che l'idea dell'anno mondiale della fisica ha avuto una felice concomitanza con la ricorrenza del centenario dell'anno mirabile 1905 delle grandi scoperte di Einstein (pubblicazione dei suoi articoli sulla teoria della relatività, la teoria dei quanti e il moto browniano, tre pietre miliari in tre campi fondamentali che stanno alla base dello sviluppo della fisica moderna). L'occasione del centenario è stata colta dalla comunità internazionale dei fisici per dedicare l'anno 2005 alla fisica.

L'iniziativa promossa dall'EPS ebbe nell'ottobre 2002 la sponsorizzazione della IUPAP nella sua assemblea generale a Berlino. Un anno dopo (ottobre 2003) la conferenza generale dell'Unesco ne accettò la convocazione a Parigi e, infine, nel giugno 2004, l'Assemblea Generale dell'ONU a New York approvò per acclamazione la risoluzione che dichiarava il 2005 Anno Internazionale della Fisica (la dichiarazione "Internazionale" è propria dell'ONU). Nel frattempo due convegni preparatori per l'anno mondiale della fisica furono tenuti a Graz (presente per l'Italia Giuseppina Rinaudo) nel luglio 2003 e a Montreal (presente R. A. Ricci) nel marzo 2004. Nell'ottobre 2004 i coordinatori (R. A. Ricci per l'Italia) si sono riuniti a Mulhouse (sede dell'EPS) per la presentazione e la messa a punto dei programmi nazionali e internazionali e per definirne la struttura, l'organizzazione e il finanziamento, in particolare a livello europeo.

Il livello di preparazione era già notevolmente avanzato e ha dato i suoi frutti nel corso del 2005.

L'accreditamento delle attività nazionali è stato realizzato tramite coordinatori ufficiali (R. A. Ricci e R. Habel per l'Italia) e l'istituzione di Comitati Nazionali di Coordinamento. In Italia già a partire dal 2003 è stato istituito un Comitato di coordinamento presieduto da R. A. Ricci (copresidente Roberto Habel, segretario Riccardo Govoni) sotto l'egida della SIF e con la partnership dell'AIF e della SAiT e la collaborazione dell'INFN, del CNR, del Centro Volta, dell'ICTP, e della Scuola Internazionale di Fisica del Plasma.

Le manifestazioni nazionali in ambito SIF hanno avuto l'Alto Patronato del Presidente della Repubblica, Carlo Azeglio Ciampi, il patrocinio della Presidenza del Consiglio del Governo Berlusconi, il patrocinio e la sponsorizzazione del MIUR (con un contributo finanziario per i progetti "Radioattività Ambientale" e "Classe Virtuale" di 200 000 euro), del MIAMB (Ministero dell'Ambiente con un contributo di 20 000 euro) grazie soprattutto all'in-

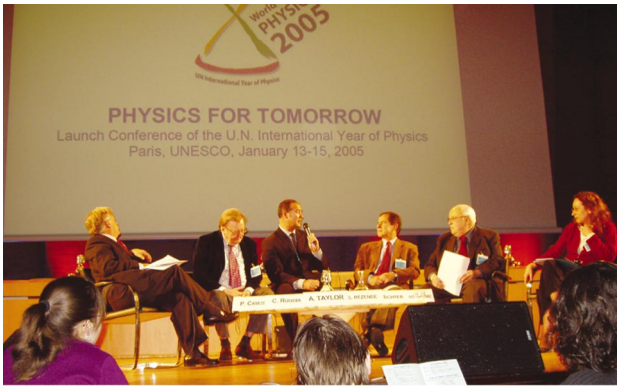
teressamento rispettivamente del Vice-Ministro del MIUR, On.le Guido Possa e del Capo di Gabinetto del Ministero dell' Ambiente, Prof. Paolo Togni.

Il coordinamento ha permesso, sia pure con qualche problema di definizione degli interventi e delle relazioni a livello istituzionale e rappresentativo, una diffusione delle informazioni e una presentazione e organizzazione delle varie manifestazioni molto efficace, come si è potuto constatare ai Convegni di Parigi e di Como, grazie anche e soprattutto all'entusiasmo e allo spirito di iniziativa dei colleghi ricercatori e docenti, universitari e soprattutto delle scuole secondarie e studenti di tutte le classi.

Ciò è stato evidenziato in particolare nei numerosi incontri e convegni del Comitato, del Consiglio SIF, dell'AIF. Ricorderemo in particolare l'incontro in occasione del Seminario AIF di Salice Terme, nell'ottobre 2004, in cui vennero presentate e messe a punto proposte interessanti (oltre ai due progetti nazionali: "Radioattività" e "Classe Virtuale") quali la Fisica itinerante in autobus, la divulgazione tramite DVD, la ristampa di lavori storici, la fisica in piazza e vari esperimenti di fisica con i ragazzi delle scuole secondarie.

I risultati si sono visti, come già citato, al Convegno di Como.

L'apertura ufficiale a livello internazionale dell'anno della fisica ha avuto luogo a Parigi presso la sede UNESCO dal 13 al 15 gennaio 2005. La Conferenza intitolata "*Physics for tomorrow*" e aperta al pubblico (più di 800 partecipanti di 50 Paesi) ha attirato l'attenzione della stampa e dei *media* internazionali sia per ciò che riguarda i recenti sviluppi e le prospettive della fisica sia per l'importanza e l'interesse dei vari eventi organizzati in tutto il mondo.



Più di metà dei partecipanti erano giovani studenti (età compresa fra 16 e 21 anni) provenienti da tutte le parti del mondo (incluse Asia e Africa) (erano presenti nell'ambito della delegazione italiana, studenti scelti tra i partecipanti alle Olimpiadi della Fisica e guidati dalla Prof.ssa Cavaggioni).

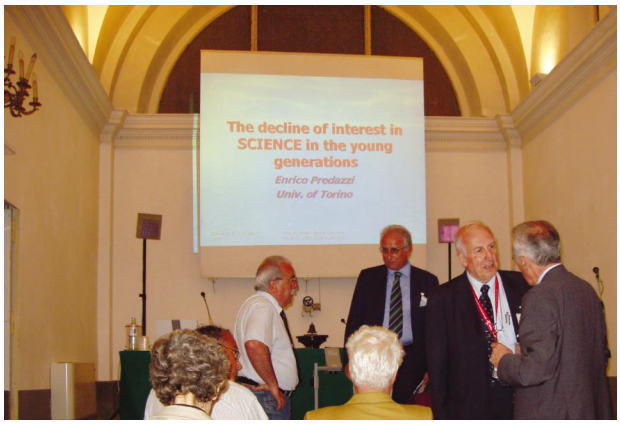
Ciò ha permesso una opportunità di incontro con prestigiosi scienziati (molti Premi Nobel, tra cui il nostro Carlo Rubbia) che hanno presentato varie opinioni sul ruolo della fisica nella società di fronte alle sfide del XXI secolo (energia, ambiente, sviluppo .....), sul suo carattere transdisciplinare e la sua influenza sulle altre discipline, sui nuovi approcci all'insegnamento della fisica e all'educazione scientifica.

Il secondo grande evento internazionale del 2005 è stato la XIII Conferenza Generale dell'EPS tenutasi a Berna (11-15 luglio 2005) insieme con il Festival Einstein, il cui motivo principale è stato la "*Fisica come eredità culturale*". Questo e la celebrazione del centesimo anniversario dell'"*Annus Mirabilis*" hanno caratterizzato lo scopo di procedere oltre. "*Beyond Einstein: Physics for the 21st Century*" è il titolo che ha segnato lo spirito dell'incontro. La partecipazione italiana si è qualificata con la presenza di R. A. Ricci nell'*International Advisory Committee* e il contributo ad alcune delle relazioni principali di G. Parisi, E. Fiorini, F. Iachello, A. Vulpiani, R. Mantegna e a *panel* e simposi specialistici di M. M. Piancastelli e M. Inguscio.

Il successo notevole della confereza di Berna è dimostrato dalla partecipazione di circa 600 fisici fra cui molti giovani, dalle qualità delle sessioni plenarie dedicate ai "100 anni di relatività" (relatore T. Damour premiato con la "*C. Powell Memorial Medal*") ai laser al limite degli attosecondi (relatore F. Krausz) e al moto browniano (relatore G. Parisi) e delle sessioni su tre filoni principali: 1) fotoni, laser e statistica quantica; 2) relatività, materia e cosmologia; 3) moto browniano, sistemi complessi e fisica in biologia. La seconda di tali sessioni è stata assunta come simposio triennale congiunto di ESA, ESO e CERN.

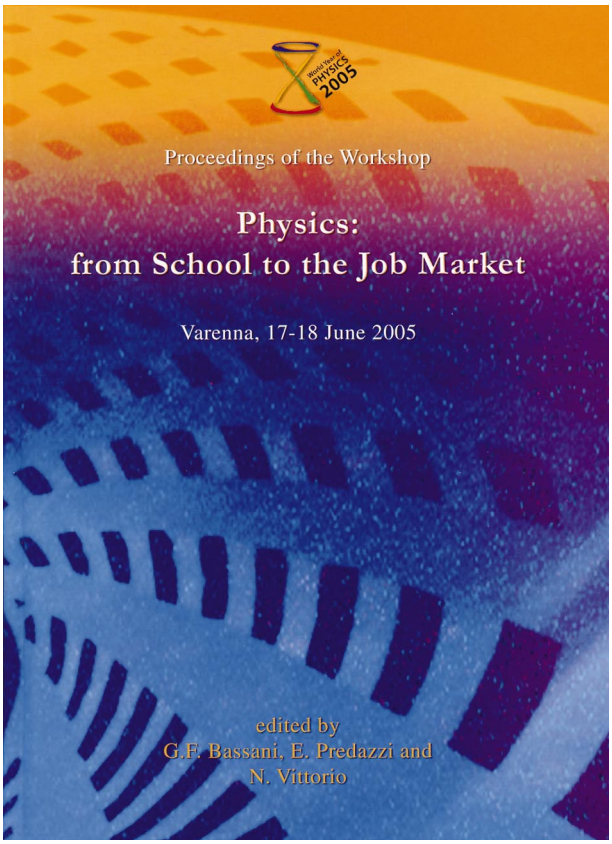
Proprio in considerazione dell'evento einsteiniano il contesto della conferenza è stato ravvivato da eventi museali e musicali aperti al pubblico e da celebrazioni e visite alla città con inaugurazione della "Terrazza di Einstein" e della restaurata "Casa di Einstein". La giornata conclusiva del 15 luglio ha avuto luogo presso il "Forum Einstein 2005" con tanto di concerto jazz.

In Italia, d'altra parte, le manifestazioni nazionali di apertura e di chiusura si sono svolte, sotto l'egida della SIF, rispettivamente a Varenna con il Workshop internazionale "*Physics: from School to the Job Market*" il 17-18 giugno 2005 e a Villa Mondragone di Monteporzio Catone (Roma) con il "*Celebration Day*" il 14 dicembre.



La prima, organizzata in collaborazione con l'Associazione Italiana dei Presidi delle Facoltà di Scienze (in particolare con il prezioso aiuto di E. Predazzi e N. Vittorio), aveva per scopo l'analisi e la discussione delle opportunità professionali per i fisici nel mercato europeo. Si è colta tale opportunità per meglio analizzare il problema dell'insegnamento della fisica, dell'arruolamento e dei curricula degli studenti oltre, ovviamente, all'inserimento dei giovani laureati in fisica nel mercato del lavoro. Gli atti di tale simposio sono stati pubblicati dalla SIF in una edizione speciale del Giornale di Fisica (vol. **47**, no. 1, gennaio-marzo 2006).

La seconda è stata caratterizzata dalla partecipazione qualificata di fisici a livello nazionale e internazionale, invitati a discutere delle future prospettive della Fisica (tra i partecipanti, oltre al Presidente SIF, G. F. Bassani, e al Presidente dell'INFN, R. Petronzio, i premi Nobel A. Penzias, C. Rubbia, J. Steinberger e inoltre R. Cingolani, L. Maiani, G. Parisi, E. Predazzi, N. Vittorio e B. Zumino). Di particolare significato la tavola rotonda sul "Ruolo della Fisica in un mondo ad alta tecnologia".



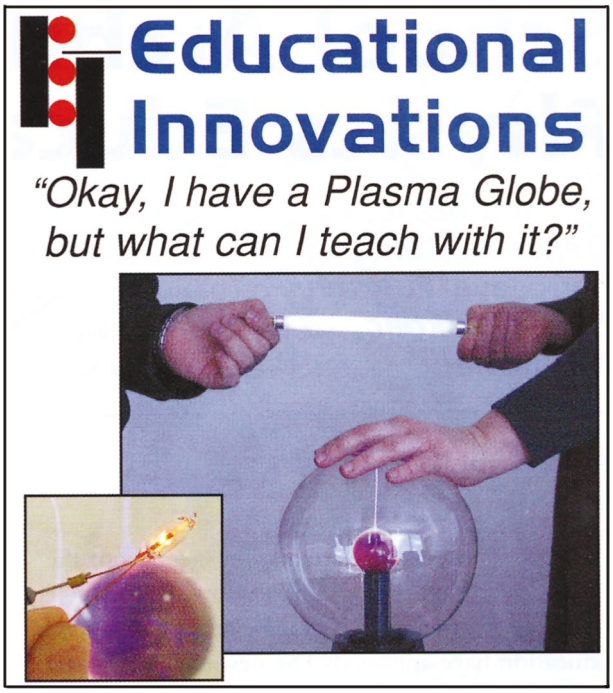
3. – Eventi e manifestazioni

3.1. – All'estero

Sulla base della documentazione presentata all'incontro di Parigi le iniziative svolte all'estero si possono così sintetizzare:

Uno dei grandi eventi internazionali che purtroppo, a parte l'ICTP di Trieste, non ha coinvolto le sedi italiane è stato il progetto di "illuminazione planetaria" ("*Physics enlightens the world*") iniziativa promossa dai colleghi austriaci (M. E. Lippitsch e S. Draxler). Partendo da Princeton la notte del 18 aprile 2005, cinquantesimo anniversario della morte di Einstein, un fascio di luce è partito e attraverso staffette ottiche ha attraversato con sprazzi di luce e buio diversi paesi di tutto il mondo come segnali del messaggio della Fisica.

In generale dalle varie iniziative è apparso un notevole impatto sull'opinione pubblica e sugli studenti. Più diversificato l'interesse delle Istituzioni e delle classi politiche. In paesi di grandi tradizioni e risorse come la Germania, il Regno Unito e la Francia, ma anche la Spagna e il Portogallo, la Svizzera e l'Austria, tale interesse è stato rilevante e di grande aiuto con diretta partecipa-



zione di governanti e celebrazioni a livello istituzionale. Meno significativa, a parte i patrocini e le sponsorizzazioni, la partecipazione politica in paesi come l'Italia, la Svezia, la Danimarca, la Norvegia, l'Olanda e il Belgio.

Una annotazione particolare meritano alcuni paesi dell'Est europeo (Polonia, Slovacchia, Slovenia) in cui l'interesse istituzionale e pubblico è stato estremamente significativo, in alcuni casi entusiastico, contribuendo ovviamente allo spirito europeistico di tali nazioni.

Meno rilevante, se non in casi specifici e tradizionali (Regno Unito e Germania) o di richiamo politico-istituzionale (Paesi dell'Est) è stato quasi dappertutto l'interesse dei *mass media*. In Italia certamente la copertura della stampa e della televisione, a parte alcune testate o trasmissioni specializzate, soprattutto della radio, il silenzio sull'Anno Mondiale della Fisica è stato assordante. Meglio sui circuiti informativi a carattere locale.

I paesi coinvolti a livello mondiale nelle iniziative WYP-2005 sono stati 86, di cui 37 in Europa, 18 in America (Nord e Sud) 10 in Africa, 11 in Asia e 7 in Oceania.

Esempi significativi:

– nel Regno Unito si sono avuti 500 eventi con 500 000 partecipanti, una forte sponsorizzazione pubblica e privata (600 000 sterline) e una buona copertura ""mass mediatica"; grande interesse per la parte interattiva nella scuola, le iniziative museali ed editoriali (IOPP) e i dibattiti sulla storia e lo sviluppo della Fisica;

– in Germania apertura e chiusura ufficiale con la presenza prima di Gerhard Schröder e poi di Angela Merkel (che è, come noto, un fisico); grandi manifestazioni nei vari dipartimenti di fisica e partecipazione di giovani in gran numero;

– in Spagna: celebrazione del WYP-2005 in parlamento e diffusione di iniziative di tutti i tipi in vari settori: università, scuole, teatri pubblici;

– in Svezia e in Austria si sono svolte nell'ambito dell'Anno della Fisica anche le celebrazioni, rispettivamente di Tiho Brahe e di Keplero;

– in Estonia la Settimana della Scienza ha dato spazio al progetto ITER per la fusione e a problemi ambientali quali la sequestrazione di CO_2;

– in Croazia una settimana dedicata alla Fisica è stata organizzata con lezioni pubbliche, seminari di studenti e video-intercity;

– in Finlandia è stata istituita una giornata nazionale della Fisica dedicata soprattutto ai bambini delle scuole primarie;

– in Slovenia ha avuto un grande successo la fisica in autobus di linea con cartelli riportanti quesiti rivolti ai viaggiatori;

– in Svizzera, a parte le celebrazioni einsteiniane di Berna, altre manifestazioni rivolte alle scuole con competizioni e premi hanno privilegiato soprattutto il centenario delle opere di Einstein;

– in Russia un particolare risalto ha avuto il concorso nazionale per il miglior sito Web dedicato alla Fisica e per la citazione del miglior motto di un fisico moderno.

3.2. – In Italia

La fig. 1 mostra la mappa delle varie sedi nel territorio italiano in relazione ai tre aspetti principali delle varie attività

Come già riportato, la sponsorizzazione dell'iniziativa è stata concessa soprattutto dal MIUR, dal MIAMB e altre istituzioni nazionali e locali con la collaborazione di AIF, INFN, CNR, INFM.

I contributi pervenuti attraverso la SIF sono stati 200 000 euro da parte del MIUR, 20 000 dal MIAMB e 200 000 dall'UE tramite l'EPS.

Le varie attività possono così caratterizzarsi:

1) *Attività direttamente organizzate dalla SIF e dal Comitato Nazionale di Coordinamento*

i) Progetto Radioattività Ambientale (campagna di monitoraggio della radioattività ambientale

Fig. 1. – Mappa delle varie manifestazioni nazionali (verde) e dei progetti "Radioattività Ambientale" e "Aula virtuale" (giallo).

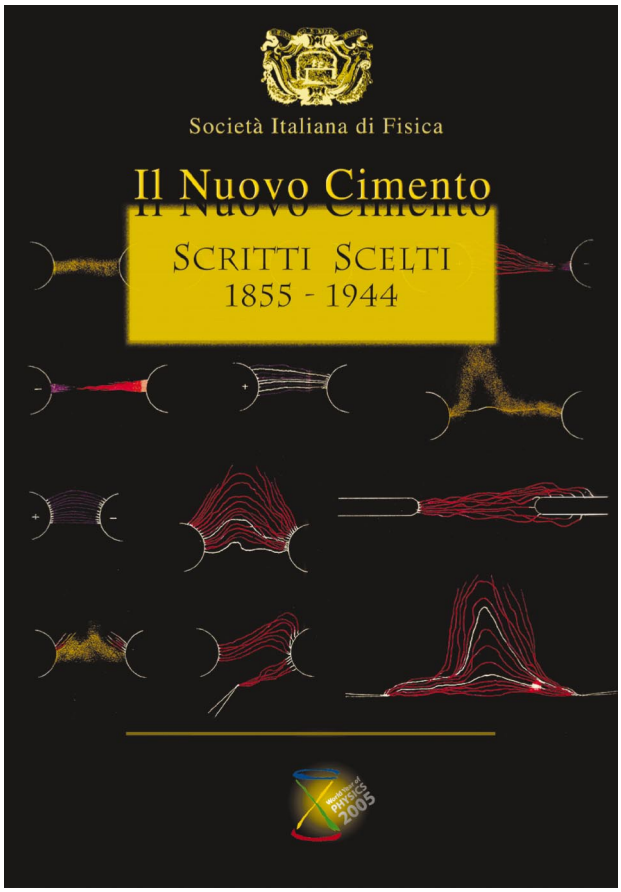
da parte di studenti e docenti delle scuole secondarie forniti di *kit-bags* costituiti da contatori Geiger-Müller, computer *Lap-top* e GPS e di apposite istruzioni). Gli studenti in gruppi di 4-5 prendono dati dentro e fuori la scuola con lo scopo di produrre una mappa del fondo di radiazione naturale.

La campagna è tuttora in corso e fornirà una mappa nazionale analizzata e coordinata centralmente.

ii) Classe Virtuale (esperimenti in classe) per la costruzione di esperimenti e misure effettuate direttamente dagli studenti con mezzi semplici. Una connessione bi-direzionale in video e audio tra insegnanti e/o studenti di varie classi, a partire da una classe proponente, assicurano l'interattività e l'operatività dell'iniziativa, tuttora in corso.

Lezioni specifiche in merito vengono periodicamente pubblicate e messe in rete.

iii) Registrazioni in DVD di esperimenti condotti nell'ambito del progetto Classe Virtuale: Il Laboratorio di Galileo Galilei; Misura della velocità della luce; La riflessione e la rifrazione della luce; L'effetto fotoelettrico; Dal silicio al computer; Dalla pietra al microchip; film sulla vita di illustri fisici italiani: "Antonio Pacinotti e il secolo dell'elettricità"; "Enrico Fermi"; "Bruno Pontecorvo", e distribuzione nelle scuole secondarie.



iv) Iniziative editoriali:

— Atti del Convegno "*Physics: from School to the Job Market*" (Varenna, luglio 2005), già citato.

— "Nuovo Cimento. Scritti Scelti 1855-1944", selezione di lavori pubblicati sul Nuovo Cimento dalla fondazione del giornale alla fine della II guerra mondiale. Tali lavori costituiscono la base per nuovi importanti sviluppi della fisica o pietre miliari di nuovi campi di ricerca. L'iniziativa è stata promossa in occasione del 150mo anniversario della fondazione dello storico giornale della fisica italiana.

2) *Attività organizzate da associazioni e istituzioni nazionali*

i) L'AIF (Associazione per l'Insegnamento della Fisica) ha svolto un notevole ed encomiabile lavoro di promozione e coordinamento delle lodevoli iniziative locali, curando in particolare la partecipazione di giovani studenti e la diversificazione degli eventi (mostre, concorsi, spettacoli, laboratori aperti e itineranti, manifestazioni, registrazioni CVD e DVD).

Esempi significativi: a Padova l'iniziativa "Sperimentando" con 200 esperimenti, week-end della Fisica, laboratori aperti, tra cui i Laboratori Nazio-

La Fisica in Piazza a Ivrea 20 marzo 2005

nali di Legnaro; a Sassari e Ivrea "Fisica in Piazza" come alfieri di manifestazioni all'aperto effettuate anche altrove il giorno dell'equinozio di primavera; la cura di un CD-ROM sull'evoluzione delle idee scientifiche e una rassegna cinematografica "Fisica di celluloide" nella regione del Ticino, oltre una raccolta di giocattoli per esperimenti di bambini (La scatola di Einstein); una serie di incontri sulla storia di una scuola e della corrispondente raccolta di vecchi strumenti di fisica; e spettacoli su Einstein e sul significato della luce.

Altri eventi significativi sono stati: il concorso fotografico "La fisica nei fenomeni naturali" (Ivrea, AIF-Mathesis); "La scienza dei ragazzi" (AIF, Trieste, Giuliana Cavaggioni), fiera organizzata presso la biblioteca comunale, con presentazione di attività di bambini delle scuole elementari delle provincie di Trieste e Gorizia; "Scienza al castello" (AIF-Alcamo), passerella di esperimenti, incontri e mostre presso il castello dei Conti di Modica ad Alcamo.

ii) La SAIt (Società Astronomica Italiana) ha associato le manifestazioni dell'Anno della Fisica con il centenario della morte di Pietro Tacchini, il fondatore della Società Italiana di Spettroscopia assegnando anche un premio intitolato a suo nome al Congresso Annuale tenutosi a Catania nel maggio 2005. Tra le varie attività offerte a studenti, insegnanti e pubblico, da segnalare la "Storia della Scienza", dal Medio Evo ai tempi moderni; "Scienza e Magia" come storia dell'evoluzione della cultura scientifica dai primordi dell'umanità e della sua pubblica percezione.

Conferenze pubbliche e seminari sulla fisica solare, l'evoluzione dell'Universo tra mito, arte e scienza, l'universo tolemaico e einsteiniano hanno avuto notevole successo.

iii) L'ICTP (*International Center of Theoretical Physics*) di Trieste ha inserito nell'anno della fisica molte delle attività tipiche del Centro, in particolare incontri, seminari e corsi di Fisica fondamentale e applicata, Dinamica sismica, Ecosistemi, Fisica del clima, Ecologia, Sistemi a nanoscale, Fisica del suolo, Energia. Sistemi ADS, strategie per l'apprendimento scientifico.

iv) L'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) ha intensificato la propria attività di comunicazione dedicandola principalmente alla popolazione e ai giovani e privilegiando le iniziative collegate con i propri Laboratori Nazionali, le Sezioni e le Univesità con cui l'Ente collabora.

Si segnalano:

– la mostra itinerante "La Fisica su Ruote" in varie città italiane (Torino, Milano, Bologna, Firenze, Napoli, Catania);

– edizioni della mostra "I microscopi della Fisica" (Torino, Milano, Trieste, Genova, Roma, Frascati, Napoli, Catania) e "La Radioattività, una faccia della natura" (Ferrara, Genova, S. Giovanni Valdarno, Catania);

– partecipazione alla "*Physics Masterclass*", iniziativa internazionale di lezioni di fisica moderna presso le Università di Padova, Torino, Pisa, Roma-3, Catania e i Laboratori Nazionali di Frascati;

– "Fisica in Autobus", estesa alle città di Trieste, Pavia, Perugia, Bari, Lecce oltre che a Roma e a Frascati;

– estensione dell'iniziativa torinese "Il nucleare non è il diavolo" alle scuole abruzzesi, campane, laziali e piemontesi per la misura della radioattività naturale;

– realizzazione delle mostre:

"Da Galileo ai giorni nostri" ai Laboratori del Gran Sasso; "Franco Rasetti" a Perugia, "Ricerche in fisica nucleare" a Cagliari e "Storia del CERN" a Torino nonchè di un documentario sulla "Vita di Bruno Rossi" e un gioco sui "Grafici di Feynmann" a Padova.

L'INFN ha collaborato altresì ad una pagina dell'"Inserto α" sul Sole 24 Ore in cui vengono illustrati vari aspetti dell'equivalenza massa-energia, delle reazioni nucleari nelle stelle, delle realtà e prospettive per le applicazioni di tecnologie nucleari alla vita quotidiana.

v) L'ICRA (*International Center for Relativistic Astrophysics*) ha organizzato a Pescara una serie di seminari su "Astrofisica e Relatività a 100 anni dall'Anno Mirabilis di Einstein", in collaborazione con l'ISPEF (Istituto di Studi Pedagogici e Filosofici) destinati a studenti e docenti della Scuola Secondaria (aggiornamento riconosciuto dal MIUR).

Sono stati trattati i seguenti argomenti: meccanismi di emissione e assorbimento in astrofisica (coefficienti di Einstein); la radiazione X e gamma: informazioni dello spazio-tempo estremo; stelle nane bianche e stelle di neutroni; la fisica degli oggetti collassati e la statistica di Fermi; dai lunari ai GPS: astrometria classica e relatività per dare forma alla Terra.

Inoltre convegni itineranti (Piacenza, Roma, Pescara, Palermo, Bologna, Milano) nei luoghi delle grandi meridiane dove scienza, arte e religione si sono incontrate in modo eminente, per ricordare la figura di Gerbert d'Aurillac, il più famoso docente del X secolo che introdusse le arti del quadrivio nel curriculum studiorum delle scuole cattedrali.

vi) LA FONDAZIONE Giuseppe Occhialini, intitolata ad uno dei più prestigiosi fisici italiani del XX secolo, ha dedicato, in preparazione alla celebrazione del centenario della sua nascita (2007) una serie di iniziative all'Anno Mondiale della Fisica.

Esse sono rivolte alla promozione della cultura della fisica tra giovani studenti e opinione pubblica.

In particolare il simposio "Tra fisica e astrofisica" è dedicato al centenario della nascita di un altro illustre fisico italiano, Gilberto Bernardini.

Inoltre una mostra interattiva su "Acqua per l'uomo" è stata organizzata costruendo un'unità tecnico scientifica per il monitoraggio della qualità dell'aria.

Numerose attività sono state promosse per l'educazione e la guida a beneficio di studenti delle scuole secondarie nella loro preparazione per gli studi universitari.

vii) Il Gruppo PIRELLI ha istituito, nell'ambito dei tradizionali premi Pirelli, un premio speciale dal titolo "*Pirelli Relativity Challenge*" aperto a insegnanti, ricercatori e accademici per la migliore presentazione mediatica della durata di 5 minuti della relatività speciale di Einstein. Il premio, di 25 000 euro, è stato assegnato a Venezia il 1° dicembre 2005 al canadese Kiran Sachdev.

SABATO 7 MAGGIO 2005
Corsico - Piazza della Fontana
dalle ore 10^{00} alle 17^{00}

SCIENZA IN PIAZZA
capire si può

Gli studenti illustrano ai cittadini
fenomeni e curiosità delle scienze

3.3. – Attività locali e mirate

A parte le manifestazioni organizzate direttamente sotto l'egida della SIF, dell'AIF e dell'INFN, sono da evidenziare a titolo di esempio:

i) In Lombardia le iniziative promosse a Milano dalle Società di Storia della Fisica e dell'Astronomia (SISFA), dal Dipartimento di Fisica dell'Università e dalla sezione INFN: Conferenze su Einstein, *stages* di laboratori di fisica per giovani studenti, spettacoli di curiosi fenomeni fisici per bambini delle scuole primarie.

A Milano si è tenuto il XXV Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia interamente dedicato all'anno della fisica, così come parte del Congresso annuale del Dipartimento di Fisica con la presentazione di "Highlights in Physics 2005". Mostre organizzate da Milano Bicocca ("Alle Colonne di Ercole", "Da Democrito ai Quarks") sono state presentate al Congresso della SIF e al *Meeting* di Bergamo Scienza nel settembre 2005. Da ricordare il ciclo di conferenze sul tema "Le grandi rivoluzioni della fisica moderna" tenutosi presso il Polo Tecnologico di Treviglio: nell'ambito dell'argomento : "La fisica al servizio della sicurezza e della salute", è stato trattato il tema: "L'impiego delle sostanze radioattive in medicina nucleare".

Grande successo ha avuto "Vedere la scienza", una rassegna del film e del documentario scientifico, giunta alla sua IX edizione, organizzata dall'Istituto di Fisica Generale e Applicata dell'Università di Milano, in collaborazione con la provincia e la Fondazione Cinetica Nazionale.

A Como il Dipartimento di Fisica e Matematica dell'Università dell'Insubria ha organizzato una

mostra su "La fisica intorno a noi: 100 anni di scoperte hanno cambiato la nostra vita quotidiana" visitata da migliaia di persone, specialmente studenti delle scuole primarie e secondarie (vedasi il bel volume dallo stesso titolo pubblicato al riguardo) e che ha dato luogo ad un notevole successo insieme con il concorso per studenti delle scuole secondarie sui temi della mostra. Da segnalare la serie di conferenze "Noi siamo i Marziani", "Il mistero della Costante Cosmologica", "Einstein tra scienza e fisica", "Fisica nucleare per l'Arte", "L'importanza di chiamarsi neutrino", "La fisica nella battaglia contro il cancro".

Pavia è stata una delle sedi più impegnate in particolare per quanto riguarda l'organizzazione della Conferenza Internazionale "*Space-time in action: 100 years of Relativity*", tenutasi con successo dal 29 marzo al 2 aprile 2005, con la partecipazione di insigni fisici a livello internazionale e in occasione della quale è stato emesso un francobollo speciale delle Poste italiane, il cui annullo è avvenuto durante il Congresso della SIF a Catania e in altre manifestazioni del WYP-2005. Sempre a Pavia, presso il Collegio S. Caterina, è stata organizzata il 13-14 ottobre 2005 la mostra "Semplice e Complesso", mostra interattiva su complessità, disordine e caos.

ii) In Piemonte si è costituito a Torino un Comitato promozionale della Regione Piemonte in collaborazione con l'Università di Torino, la sezione INFN di Torino, il Politecnico e l'AIF, il MIUR, la FIAT, l'Accademia delle Scienze di Torino, il Centro UNESCO di Torino, la CRT e la S. Paolo, oltre ad altre istituzioni locali.

Particolare enfasi è stata data a concorsi per studenti organizzati dal Dipartimento di Fisica di Torino su "Einstein e i minori di 14 anni", "Le donne nella fisica", "Louis Lagrange per la fisica", con premi consistenti in visite a musei e laboratori europei. Anche qui si è fatto largo uso di conferenze e seminari su Einstein, la storia e la didattica della fisica; da segnalare "Fisica dell'Automobile" e "Fisica e Storia del Sincrotrone di Torino".

La "Fisica in piazza" organizzata a Ivrea il 20-21 marzo 2005 fa parte delle manifestazioni dell'equinozio di Primavera. Visite al CERN nell'ambito della manifestazione laboratori aperti e itineranti sono state promosse da INFN e CNR. Particolarmente significative le iniziative "Il Nucleare non è il diavolo", (con misure di radioattività) che ha costituito tra l'altro la spinta iniziale al Progetto Nazionale Radioattività e interessante quella su "Fisica e sensori senza filo nel campo sportivo". Tra le numerose mostre si segnalano "La Fisica sulle ruote", "Fugit irreparabile tempus", "Tempo e orologi" (dalla meridiana all'orologio atomico) oltre a quelle su Einstein e Fermi e a spettacoli vari su Marie Curie e Galileo. Sono stati prodotti CVD e DVD su "Stringhe e biliardi cosmici" e sul "Linguaggio della misura".

A cura del Museo nazionale del cinema, della Facoltà di scienze dell'Università di Torino, dell'AIF di Settimo Torinese e della sezione INFN di Torino è stata realizzata una rassegna del cinema scientifico dedicata alla fisica "Vedere la scienza".

iii) Nel Triveneto della iniziativa "Sperimentando 2005" (mostra scientifica interattiva per imparare divertendosi) a Padova, promossa dall'AIF con la collaborazione del Comune e della Provincia, oltre che delle sezioni INFN e INFM, dei Laboratori Nazionali di Legnaro e del Dipartimento di Fisica, si è già detto.

È da ricordare l'impegno dell'INFN e dei Laboratori Nazionali di Legnaro nel progetto nazionale Radioattività, arricchito di dimostrazioni e conferenze nelle scuole.

A queste attività vanno aggiunte le iniziative dei "Week-end della Fisica"; le visite guidate ai Laboratori Nazionali di Legnaro; "L'Arte sperimenta con la Fisica"; l'osservazione di Venere e delle

macchie solari con il telescopio dell'Associazione degli Astrofili; il lancio di razzi d'acqua, l'ascensione in mongolfiera; storia, fisica e costruzione (e volo) di aquiloni.

Sono da ricordare inoltre l'*European Masterclasses* per gli studenti delle scuole medie superiori, un'iniziativa EPOG (*European Particle Physics Outreach Group*) con il supporto del Dipartimento di Fisica e della Sezione INFN di Padova e "Le mani sulla QED", un gioco scientifico sull'elettrodinamica quantistica, basato sui diagrammi di Feymann.

Inoltre a Padova e all'Istituto Veneto di Venezia sono state organizzate significative celebrazioni del centenario della nascita di Bruno Rossi, uno dei maestri della fisica italiana del dopoguerra e pioniere della fisica astroparticellare.

Importante il progetto Friuli, progettato dall'unità di Ricerca Didattica della Fisica del Dipartimento di Fisica e del Centro Laboratorio per la Didattica della Fisica dell'Università di Udine, in collaborazione con l'AIF di Udine e Pordenone.

Tali attività si riassumono in particolare nelle mostre ("Giochi, esperimenti, idee"; "Le frequenze del violetto", "Agathos"), nel laboratorio cognitivo per la scuola di base (scuola primaria), Laboratorio per le scuole superiori (sensori *online*, *problem solving*...), seminari culturali sulle ricerche scientifiche avanzate e didattiche, nonchè su aspetti storici, epistemologici e scientifici, seminari di aggiornamento per insegnanti, manifestazioni teatrali ("Il fuoco del radio", "Rane il venerdì"), attività di aggiornamento per classi di giovani studenti.

iv) In Emilia, a Bologna, notevole successo ha riscosso la mostra "Il Mistero della Gravità" consistente in 45 pannelli attraverso i quali i numerosi visitatori hanno percorso un viaggio straordinario tra le varie idee sulla gravità da Newton in poi. Un insieme di esperimenti manuali erano disponibili e pronti all'uso (bilancia di Cavendish, pendoli, aree di libera caduta, macchine gravitazionali) atti ad incuriosire il pubblico ed esaltarne l'immaginazione. Inoltre, nella Basilica di S. Petronio è stato effettuato l'esperimento del "Pendolo di Foucault", inaugurato l'8 ottobre 2005 alla presenza di Umberto Eco.
Da segnalare per il rilevante interesse didattico lo spettacolo "Fisica sognante", attività interdisciplinare che ha visto coinvolti nella scrittura e nella trasposizione scenica un gruppo di studenti liceali.

A Ferrara la mostra "La Radioattività è una faccia della Natura" (in collaborazione con INFN ed ENEA) è stata di grande supportro al Progetto nazionale Radioattività, con particolare attenzione alla partecipazione di giovani studenti.

A Ravenna sono da segnalare i simposi internazionali "*Physics and Humanity*", "*Nuclear and atomic methods for knowledge and restauration of cultural heritage*", "*Cosmology of the cross-over of the science*".

v) Toscana. Si è accennato nell'ambito delle manifestazioni della SAiT all'iniziativa "Scienza e Magia", svoltasi a Firenze (Istituto Tecnico Russell-Newton) rivolta al pubblico, nella quale si è evidenziata l'evoluzione scientifica affrancata dalle concezioni magiche degli antichi fino alla società moderna, con proiezione del film "Il destino" sulla vita di Averroè.

Per le classi dei Licei si sono svolti corsi e seminari di "Storia della scienza" (Medioevo, Rinascimento, Positivismo e Rivoluzione tecnologica, '800, '900, scienza moderna).

Pisa si è caratterizzata, oltre che con la produzione di DVD scientifici, con la Ludoteca scientifica "Sperimentando sotto la Torre e intorno alla fisica", una raccolta di più di 40 giochi ed esperimenti scientifici presentati da studenti e giovani ricercatori per introdurre i visitatori al mondo della scienza e tecnologia. Un'altra iniziativa è la messa in rete, nell'ambito del progetto europeo "*Hystory of Physics will be put on line*", di una realizzazione dell'Università di Pisa (Biblioteca di Ingegneria) di "Risorse Internet per la storia della fisica" (Claudia Lamberti).

vi) Umbria e Centro Italia. A Perugia ha avuto successo la mostra "Un uomo per tutte le scienze", con altre iniziative divulgative intorno alla figura di Franco Rasetti (umbro di nascita) e alla sua vita attraverso l'esperienza del gruppo romano di Via Panisperna e le sue molteplici attività scientifiche in tutto un secolo.

Va inoltre ricordata l'iniziativa umbra su "Meteorologia in Italia: il primo pluviometro" e "Il futuro della meteorologia".

A L'Aquila, nei Laboratori INFN del Gran Sasso, è stato rappresentato, in forma di percorso scenico, lo

spettacolo "Metamorphoses", che si configura come una sinergia tra organismi di produzione e programmazione teatrale e istituti scientifici e si ispira al concetto di trasformazione, di cambiamento di forma, così come avviene in natura e descritto dalla fisica, e nella messa in scena teatrale.

vii) Roma e dintorni. Molteplici sono state le iniziative nella capitale, tra cui le rappresentazioni teatrali (il "Galileo Galilei" di Bertold Brecht, "I fisici" di Dürenmatt e "Trias-Harmonica" di A. Kircher, rappresentata in occasione dell'inaugurazione della nuova biblioteca scientifica dell'Osservatorio di Monteporzio, nella cupola ristrutturata; il ciclo di conferene divulgative "La Fisica incontra la città", sui vari temi della fisica contemporanea; il film documentario "Bruno Touschek e l'arte della fisica"; il progetto "La strada del tempo", con un collegamento (spaziale, scientifico, storico e temporale) tra l'Osservatorio Astronomico di Roma-Monteporzio e la sede di Villa Mondragone (dove fu emanato il calendario Gregoriano).

Osservazioni astronomiche aperte al pubblico di studenti, professionisti e privati cittadini sono state organizzate in occasione dell'eclissi solare del 3 ottobre 2005. L'INFN ha presentato il Laboratorio di Calcolo ApeNext, gestito insieme con il Dipartimento di Fisica dell'Università La Sapienza e il CTCORD, con i suoi 12 teraflops (12 000 miliardi di operazioni al secondo).

Presso i Laboratori di Frascati si è provveduto alla organizzazione del Progetto Nazionale Radioattività, con la messa a punto e la distribuzione dei *kits* di misura alle varie scuole, insieme con un apposito manuale d'istruzione. Infine, fra le iniziative Frascati-Roma è da segnalare il successo della "Fisica in Autobus" . Questo progetto (LNF, F. Fabbri; SISSA, S. Fantoni; Pavia, S. Ratti) è stato scelto come argomento nel corso di fisica nel Master in Comunicazione della scienza e indirizzato al pubblico generico : i viaggiatori delle linee pubbliche sono stati coinvolti attraverso inserzioni di argomento scientifico all'interno e alle fermate degli autobus.

viii) In Campania spiccano le molteplici attività di Napoli-Città della Scienza. Circa 40 conferenze sono state organizzate a beneficio della cittadinanza e dei giovani con la partecipazione di circa 5000 persone. Alle Conferenze sono state abbinate diverse mostre, come "I microscopi della fisica dell'INFN", mentre durante le settimane della cultura scientifica si sono avuti seminari speciali per gli insegnanti ("Tre giorni per la scuola") con mostre come "La primavera della scienza". Altre

mostre dedicate a speciali aspetti come "*Beautiful mind*" sono state visitate da qualcosa come diecimila studenti.

Da segnalare inoltre concorsi sul "Teatro scientifico" e la partecipazione a Unidansa 2005 (Barcellona), con uno spettacolo su "La fisica della danza" di un gruppo napoletano, spettacolo ripetuto alla Città della Scienza. Qui e al Festival della Scienza tenutosi a Genova è stato inoltre rappresentato lo spettacolo "La fisica del trapezio".

ix) A Reggio Calabria la sezione SAiT ha organizzato, in occasione dell'eclissi parziale anulare del Sole del 3 ottobre 2005, un'osservazione pubblica del fenomeno dal lungomare con la presenza di docenti ed esperti, per commentare e guidare l'iniziativa.

È stata altresì organizzata una Scuola estiva (STILO) per docenti avente per tema "Astronomia e Astrofisica nella progettazione di percorsi formativi" con il patrocinio del MIUR e dell'INAF, nonchè un Seminario aperto a docenti ed allievi sul tema "L'avventura del pensiero: Albert Einstein 1905-2005".

Ad Einstein è stata interamente dedicata la Settimana Nazionale dell'Astronomia, nel mese di aprile.

Conferenze pubbliche varie e seminari su: "L'evoluzione dell'Universo tramite arte e scienza" (Massimo Capaccioli) e "L'Universo alle soglie del 3° Millennio" (Margherita Hack) sono stati seguiti con grande interesse.

x) Numerose le iniziative in Sicilia.

A Palermo, oltre le manifestazioni della SAiT già citate, in memoria di Pietro Tacchini, sono state organizzate una serie di conferenze su Einstein (Einstein filosofo ed epistemiologo, Einstein, l'uomo e lo scienziato, Einstein 1905: il genio all'opera) e sulla Relatività (Astrofisica e Relatività,

Relatività e Cosmologia); altre sono state dedicate alle nanotecnologie e alle applicazioni.

Una mostra importante con grande partecipazione di pubblico e di studenti e inaugurata dal Presidente della SIF è stata "Le ruote quadrate", così come "Alle colonne d'Ercole" presentato a Catania, che è stata sede del Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, durante il quale diverse relazioni e conferenze sono state dedicate all'Anno mondiale della Fisica. Da citare la Conferenza di apertura "Fermi, Dirac e Einstein", tenuta da A. Zichichi, e "Einstein: Fisica e Conoscenza" tenuta ad Acireale da R. A. Ricci.

A Messina, oltre la partecipazione significativa al Progetto Nazionale Radioattività, si è voluto celebrare anche "La figura scientifica e umana di Ettore Majorana", e organizzare un incontro internazionale su "Einstein e la Relatività, 100 anni dopo". Significativo l'interessamento di studenti e insegnanti anche delle facoltà umanistiche in una serie di conferenze sulla relatività e la meccanica quantistica.

Gli studenti delle scuole secondarie sono stati coinvolti nella progettazione e realizzazione di meridiane e orologi solari, nonchè di DVD su personaggi diversi (Aristotele, Archimede, Leonardo da Vinci, Galilei, Marie Curie, Einstein) e argomenti quali l'atomo, l'uomo nello spazio, il Sistema Solare, i buchi neri, i terremoti, lo tsunami, l'antimateria.

"L'evoluzione della fisica nell'ultimo secolo" è stata oggetto di una serie di simposi e seminari per studenti, incluse osservazioni astronomiche dirette con telescopi per i giovani studenti.

xi) In Sardegna importante è stata la partecipazione al Progetto Radioattività, con l'iniziativa LABORAD.

Vanno ricordati, oltre alla "Fisica in piazza", gli eventi organizzati a Cagliari (Pula), a Polaris (Parco Scientifico e Tecnologico della Sardegna): "Fantastica Fisica", rassegna di conferenze e uno spettacolo teatrale per avvicinare gli adulti al linguaggio complesso della Fisica.

Altre iniziative: lo spettacolo teatrale di C. Licheri e M. Verona su "Il secondo principio della termodinamica.... e poi il terzo e poi..... l'Entropia"; le conferenze di P. G. Odifreddi "Che forme e che formule!" (linguaggio formale, parole, simboli nella descrizione della natura), e di Guido Pegna "Meraviglie, Paradossi e Misteri dell'elettromagnetismo" (spettacoli ed esperimenti dal vivo).

A Cala Gonone si è tenuta nel settembre 2005 la Conferenza Internazionale "*Constrained Dynamics and Quantum Gravity*".

4. – Conclusioni e proposte

Le varie iniziative qui riportate insieme con diverse altre che non sono state menzionate — e ce ne scusiamo — per questioni di concisione e perchè non direttamente collegate al Coordinamento Nazionale, (a parte sono riportati i titoli delle iniziative patrocinate dalla SIF, vedi tabella I) hanno dimostrato veramente che l'Anno Mondiale della Fisica ha suscitato non solo l'interesse ma anche un grande entusiasmo a livello di docenti, studenti e pubblico ed ha costituito un motivo di ripresa di chi da anni opera meritoriamente nel campo della diffusione della cultura scientifica, in particolare della Fisica.

La concreta e diffusa realizzazione di "*progetti anche piccoli destinati a restituire all'insegnamento della fisica la sua dimensione fenomenologica*" (cito una frase recente del collega Ninni Messina) dimostra che vi è un terreno assai fertile non solo per stabilizzare quanto già fatto ma soprattutto per definire un progetto nazionale che si basi su un Laboratorio o un Forum permanente che colleghi i vari operatori e metta a disposizione di tutti non solo un archivio delle iniziative condotte e delle esperienze acquisite ma un luogo aperto alle varie proposte e ai vari suggerimenti e rivolto soprattutto a riavvicinare i giovani studenti alle nostre discipline.

Il Consiglio della SIF verrà interessato in merito.

Crediamo comunque che tali proposte siano di interesse di tutte le istanze associative e istituzionali della fisica italiana.

* * *

Ringraziamo innanzitutto il Presidente e il Consiglio della SIF direttamente impegnati in tutte le varie manifestazioni, le istanze istituzionali e governative che hanno sponsorizzato le iniziative qui descritte, i colleghi dell'AIF, della SAiT, dell'ICTP, dell'INFN e dell'INFM per la continua e indispensabile collaborazione, i membri del Comitato Nazionale di Coordinamento, i cui nomi, insieme con i responsabili delle iniziative sono riportati a parte (tabelle II e III), i docenti, i tecnici e gli studenti delle varie Università e Scuole che hanno partecipato con entusiasmo a questo straordinario evento che è stato l'Anno Mondiale della Fisica. Un particolare ringraziamento e apprezzamento all'efficace lavoro svolto e alla continua assistenza del personale della SIF, in particolare: Barbara Alzani, Angela Oleandri, Carmen Vasini, Marcella Missiroli e Roberta Comastri e, inoltre, a Carla Piva, dei Laboratori Nazionali di Legnaro.

Tabella I. – Altri eventi patrocinati dalla SIF.

Albert Einstein ingegnere dell'Universo
(mostra)
Pavia, 24 ottobre-24 dicembre 2005

Commento alle lezioni napoletane di Ettore Majorana
Napoli, 25 ottobre 2004

I cent'anni della Relatività 1905-2005
(giornate di studio)
Università di Modena e Reggio Emilia

Scuola Internazionale di Biofisica
Organizzata dalla Società Italiana di Biofisica Pura ed Applicata
Venezia, gennaio 2005

World Conference on Physics and Sustainable Development
Organizzata da ICTP, UNESCO, IUPAP
Durban, 31 ottobre-novembre 2005

Viaggio nell'Universo
(ciclo di seminari e conferenze)
Dipartimento di Fisica di Lecce, gennaio-maggio 2005

Ugo Fano Symposium: L'eredità di Ugo Fano per la Fisica del XXI secolo
(convegno)
Università di Roma La Sapienza, 4 febbraio 2005

I giochi di Einstein
(mostra interattiva)
Trento, Museo Tridentino di Scienze Naturali, 12 marzo-30 ottobre 2005

Il valore delle scoperte: Enrico Fermi e i ragazzi di Via Panisperna
(convegno)
Ascoli Piceno, ITIS "E. Fermi", 25 maggio 2005

Incontri con Studenti Scuole Superiori (Associazione Studenti di Fisica)
Padova, settembre-dicembre 2005

Fisica e Altro
(Incontri e lezioni con studenti)
Avellino, ITIS "G. Dorso", aprile 2005-gennaio 2006-06-28

La Fisica-A. Einstein-La Pace
(Conferenza)
Modica (RG) Liceo Scientifico "Campailla", 28 maggio 2005

KRONOUS 2005
(convegno celebrativo)
Dipartimento di Fisica di Lecce, Tricase, 14 luglio 2005

Cerimonia celebrativa Prof. Tullio Regge
(Annullo filatelico)
Borgo d'Ale, 10 luglio 2005

Neutron Scattering Highlights on Biological Systems
(Workshop)
Lipari, 5-9 giugno 2005

Il Mondo Fisico
(evento)
Università Bocconi, Milano ottobre-dicembre 2005

L'Eredità di Einstein
(manifestazione)
Istituto S. Gabriele, Roma, 24-25 novembre 2005

Liceo Einstein Milano-Celebrazioni di Albert Einstein
(manifestazione)
Liceo Scientifico "A. Einstein", Milano

Einstein Filosofo Metodologo
(evento)
Centro Interuniversitario di Ricerca in Filosofia e Fondamenti della Fisica
Cesena, 24-26 novembre 2005

ERA-Esposizione di Ricerca Avanzata
(rassegna biennale)
Stazione Marittima di Trieste, 7-21 dicembre 2005

Semiconduttori e Superconduttori: dalla Fisica della Materia alla Tecnologia
(Mostra Sperimentale Interattiva)
Dipartimento di Fisica "Volta", Università di Pavia
13-25 febbraio 2006

Scienza, Tecnica e Società
(Conferenza cittadina)
ITC "Iaci", Messina e Sezione AIF Messina
20 dicembre 2005

Ciclo di serate a tema sulla fisica
Rho, ITIS "S. Cannizzaro"

Fisica nel Passato e nel Futuro
(manifestazioni triestine per l'anno mondiale della fisica)
Università di Trieste, 10 ottobre - 27 novembre 2005

L'Apparato Gravità e il laboratorio di Galileo Galileo
(mostra)
Pisa, 9 aprile 2005

I Microscopi della Fisica
(mostra)
Pisa, 9-17 maggio 2005

UNIVERSUS 2005 – Asteroidi, minaccia dallo Spazio
(Convegno internazionale)
Montecorvino (SA), luglio 2005

Forum Mediterraneo di Fisica Medica
(meeting scientifico)
Lampedusa, 26-30 settembre 2005

I costi delle Scelte Disinformate: il Paradosso del Nucleare in Italia
(Convegno)
Roma. CNR, 9 marzo 2005
(Associazione Galileo-2001)

Il Meeting DRAGO: la Fisica intorno e dentro di noi
(Progetto Pilota MIUR)
Vibo Valentia, Liceo Statale "Berto", 6-8 maggio 2005

Fisica e Ambiente
(Ciclo di conferenze)
Montebelluna, maggio-giugno 2005

Tabella II. – Componenti Comitato Nazionale di Coordinamento

Renato A. Ricci
Presidente del Comitato
INFN-Laboratori Nazionali di Legnaro

Roberto Habel
Co-Presidente del Comitato
INFN-Laboratori Nazionali di Frascati

Riccardo Govoni
Segretario Scientifico del Comitato
AIF

Emilio Balzano
Università di Napoli Federico II-Città della Scienza

Marco Bianucci
INFM Parma

Luisa Bonolis
Dott.nda Università di Bari

Gian Nicola Cabizza
AIF Sassari

Mauro Carfora
Università di Pavia

Giulio Casati
Università Insubria
Centro Volta Como

Franco Luigi Fabbri
INFN-Laboratori Nazionali di Frascati

Attilio Ferrari
Dipartimento di Fisica Torino

Simonetta Filippi
ICRA Pescara

Piero Galeotti
Università di Torino

Giuseppe Giuliani
Università di Pavia

Giovanni Magliarditi
AIF Messina

Corrado Mencuccini
INFN e Università di Roma La Sapienza

Angela Misiano
(SAiT)

Guido Pegna
Università di Cagliari

Giuseppina Rinaudo
(INFN-Università di Torino)

Angelo Scribano
Università di Siena INFN – Pisa

Elio Sindoni
Università di Milano-Bicocca

Pasquale Tucci
Università di Milano-SISFA

Claudio Tuniz
ICTP-Trieste

Antonio Vitale
Fondazione Occhialini-Univ. Bologna

Tabella III. – Referenti e responsabili delle varie iniziative italiane (non altrimenti menzionati).

W. Alberico	(Torino, Università e INFN)
L. C. andreani	(Pavia)
F. Andolfato	(Montebelluna)
R. Baggio	(Milano, Università Bocconi)
R. Battiston	(Perugia, INFN)
C. Bemporad	(Pisa, Università e INFN)
S. Bergia	(Bologna, Università)
B. Bertotti	(Pavia, Università)
A. Bianconi	(Trieste)
L. Biondaro	(Associazione Studenti di Fisica)
G. Bonera	(Pavia, Università)
C. Bradascia	(Pisa)
D. Caloro	(Lecce)
R. Castaldi	(Pisa)
G. Castelli	(Trento)
G. Chiarotti	(Roma)
F. Clarelli	(Roma, ICRA)
A. Covello	(Roma)
N. Cutuli	(Vibo Valentia)
R. Damiani	(Lecco)
M. D'Elia	(Lecce)
M. De Sciscio	(Rho, Milano)
P. Di Trapani	(Como)
C. Felici	(Ascoli Piceno)
G. Fiorentini	(Ferrara, INFN e Università)
E. Gariglio	(Borgo d'Ale)
F. Gelardi	(Palermo)
G. Giacomelli-Poli	(Bologna)
C. Gianino	(Vibo Valentia)
A. Giuliani	(Como)
M. Grassi	(Pisa)
E. Guidi	(Como)
G. Haeusermann	(Canton Ticino)
N. Ioli-Pierazzini	(Pisa)
S. Jona-Pugliese	(Ivrea)
La Sala	(Avellino, ITIS)
C. Lavarian	(Trento)
D. Lichelli	(Monte Corvino, Salerno)
G. Maccario	(Milano, AIF)
S. Magazzù	(Messina)
G. Magliarditi	(Messina)
F. Malaspina	(Umbria)
M. Marcolini	(Pordenone, AIF)
G. Marcucci	(Ispettore MIUR)
T. Marino	(Settimo Torinese, AIF)
L. Mattiacci	(Roma, Liceo V. Volterra)
F. Mazzucconi	(Firenze)
A. Metellini	(Padova, AIF)
M. Michelini	(Udine, GIREP)
V. Montel	(Torino)
M. Morando	(AIF, Alessandria)
D. R. Napoli	(Laboratori Nazionali di Legnaro, INFN)
A. Nucita	(Lecce)
C. Palici di Suni	(Torino)
A. Pennisi	(Verona)
A. Pennisi di Fioristella	(Catania, INFM)
A. Perali	(Trieste)
E. Pestellini	(Firenze)
S. Piraneo	(Lampedusa)
R. Pisano	(Latina, AIF)
R. Pistidda	(Sassari)
F. Pollini	(Cesena)
B. Preziosi	(Napoli, Università e INFM)

M. Prest	(Como)	B. Stella	(Università Roma-3, INFM)
P. Randaccio	(Cagliari)	P. Suria	(Settimo Torinese, AIF)
S. Regina	(Globo Divulgazione Scientifica)	G. Tofani	(Pisa)
V. Roca	(Napoli, Città della Scienza)	F. Tomasini	(Trieste)
G. Rossi	(Rho, Milano)	L. Torchio	(Settimo Torinese, AIF)
V. Russo	(Alcamo, AIF)	S. Turso	(Torino)
E. Sartirana	(Rho, Milano)	G. Vecco	(AIF)
A. Scaboro	(Associazione Studenti di Fisica)	R. Vergara-Caffarelli	(Pisa)
S. Serio	(SAIt)	F. Vidotto	(Padova, Donne e Scienza)
V. Silvestrini	(Napoli, Città della Scienza)	L. Viglietta	(Torino)

APPENDICE

The Graz Forum on Physics and Society, Resolution and Recommendations Graz, 21 April 2006

www.kfunigraz.ac.at/exp8www/wyp2005/forum-resolution.pdf

Science in general and **physics** in particular is one of the basic elements in our culture that sustain our communities. It is also a prerequisite for basic job skills and many of our daily functions. Science and physics are also the foundation for the high technology revolution seen in our societies and the way such technologies influence other societal challenges such as environment, energy supply, and communication and production technologies.

Forum Physics and Society, composed of high level physics representatives from 20 European countries and 7 countries outside Europe, has discussed the role of physics and its interaction with society. The Forum, being part of the Austrian EU-Chair program, was cosponsored by the European Physical Society and the World Year of Physics 2005 initiative.

The Forum notes the major challenges facing modern science and thus also physics. Globalization is putting pressure on the "physics enterprise". The linear innovation model was abandoned many years ago and more complex systemic models have been introduced, changing the way knowledge is produced, applied, and commercialised in social settings.

OECD studies show that a falling share of new tertiary graduates chooses physics as their field of study. Recognizing the central role of physics in the innovation process, the Forum stresses the importance of strengthening physics as a field of study and as a scientific profession. The Forum notes that these challenges are of a global nature and express commitment to address the challenges in Africa. Other regions present similar problems.

The Forum chooses to address five topics of importance for understanding the role of physics in society: *i) culture, ii) competitiveness and technology, iii) funding structures, iv) education, and v) ethical issues.*

The Role of Physics in Society, Culture and the Sciences

Physics represents the rational analysis and accounting of the world we live in. It forms an essential part of human culture. Physics allows us to explore the world from the smallest to the largest objects. The application of physics is responsible for most of the basis of modern society and civilization, and it is essential that a large number of people in all parts of the world have some understanding of this subject. Electricity and electronics, now part of engineering, had their basis in previous physics discoveries. There is often a long time interval between basic discoveries and their applications to solving societal problems. Developments in many areas, including medicine, transport, communications, information technology and even the arts, have benefited directly from physics discoveries, and we are confident that physics and its methods will be necessary to solve many problems including those of the environment.

Physics is a good vehicle for international cooperation. Large and complex physics-based facilities are shared successfully between scientists from many countries. An outstanding example is the CERN Laboratory, formed by European countries only nine years after they had been fighting each other in World War II. In some ways this laboratory was a scientific forerunner of the EU. It is worth noting that this laboratory, whose task is to discover the fundamental constituents of the world and the forces through which they interact, invented the World Wide Web, and gave it freely to the world.

Physics education at all levels needs to be supported, particularly for women, both to ensure

that all people understand the technological world in which we live, and the methods of physics in which observations and experimental results are incorporated into theories of the world, and also to provide the next generation of scientists and engineers who are greatly in demand in many sectors of the economy. The importance of physics education appears to be self-evident in a number of Asian countries, whose economies are boosted by the injection of scientific and technical know-how, and we urge the EU countries with their proud history of science to face up to this challenge. There is an urgent need for more teachers trained in physics, and those teachers who are not fully qualified in this subject need to be supported with appropriate materials and training.

It is encouraging that physics outreach activities and its popularisation as demonstrated in the 2005 World Year have increased the public's interest in science. In this respect, the role model of scientists, and particularly of physicists, within the population has been exemplified in the 2005 World Year of Physics. Many physicists have found their vocation as science communicators. We encourage a continuing dialogue between scientists and members of the public, which should be of mutual advantage.

We believe that important and challenging problems facing the world today are the threats of climate change and the anticipated global peaking of fossil energy production with the upcoming shortage of oil and gas.

These coincide with increasing global demand for energy originating from the presently less developed world. Intensive research and development of satisfactory clean alternative energy sources are urgently needed. The main candidates are biomass, hydro, nuclear, solar and wind power. Physics is an important provider of knowledge and methods of analysis concerning energy and environment, challenges that are with us today and will be with us on a time scale of generations. Mankind cannot afford to neglect to explore any possible energy sources.

Physics, Competitiveness and Technology

Recent studies have shown that over 40% of manufacturing employment in the UK is in industries based on physics (and physics-related engineering) and that this sector is growing faster than other manufacturing sectors. Similar effects can be expected for many other countries.

Areas of physics which are playing an important role in competitiveness include the energy sectors, medicine, materials and emerging areas such as information and communications technologies, photonics and nanotechnology. Physics gives the means for understanding a wide range of technologies and the ability to tackle problems from first principles when conventional approaches fail. Physics underpins engineering and its role in wealth creation. Physics also plays a major role in the present-day life sciences through the provision of techniques and equipment and as an important participant in these interdisciplinary fields. Notable techniques from physics used in medicine include MRI, PET scans, etc.

New technology requires basic research as it is not possible to predict where the new techniques will come from. History is full of examples of technology that has come from basic research in physics, *e.g.*, electric power, X-rays, etc. Examples of recent developments that have come from surprising areas of physics include the World Wide Web and THz imaging developed to see through the atmospheres of planets and now used for security scanning to detect weapons, etc. under clothes. Knowledge of the fundamental laws of physics is the starting point for the majority of present-day and emerging technologies.

Industrial development is increasingly characterized by outsourcing, sparked off by a feeling of a lack of predictability and that the source of new ideas appears to be drying up. The challenge is international, as is physics, which serves as an innovative tool no matter where production is carried out. Industry is becoming increasingly global, relying on basic research performed around the world. Physics works on a global scale, dependent on the interaction of groups of physicists in different countries and regions. In Asia industry is expanding rapidly supported by greatly increased investment in the basic sciences, in physics in particular.

Unbiased and reliable research, essential for the long-term contribution of physics to economic competitiveness, requires international cooperation and an open exchange of information. Any serious conflict of interest with the later commercialization of results originating in such research should not arise as long as publicly funded research infrastructures themselves are not commercial competitors.

Needs in Research Policies and Funding

- The governments should accelerate the implementation of the Lisbon 2000 agenda and realize its objectives.

• The research infrastructure including large-scale facilities should be distributed across Europe in a balanced way and combined with strong "home bases" as an interface for the cooperation. In eligible countries structural funds should be better used for this purpose.

• Integration of the scientific potential of the new EU member states and the associated states should be accelerated.

• The bottom-up principle of science funding should be kept for basic research and strengthened via the creation of the European Research Council.

• The assessment of research output and impact should be put onto a more rational basis with the development of qualitative as well as quantitative indicators and analysis tools.

• Researchers should be able to maintain their independence from political and commercial interests with proper consideration of societal needs and respecting ethical issues.

• Serious attention should be paid to the quality of science administrators and to the reduction of bureaucracy by streamlining and developing best management practices.

• A larger fraction of the EU budget as well as national funding should be spent on mathematical and physical sciences in accordance with tendencies in other major regions in the world.

• The harmonization of the whole European R&D is important, but the presently proposed concepts of a European Institute of Technology are not the appropriate solution. On the other hand instruments exist to reach these goals (*e.g.* technology platforms and ERC).

• Physics pioneered international cooperation which should be strengthened to countries outside the EU including the developing countries.

Education, Quality Assurance and Curricula

The Forum endorses the EPS position paper on Education, noting that physics educational issues are truly international.

The position paper emphasises that the physics educational system must master two important tasks: delivering physics-based scientific knowledge to all in elementary and especially in secondary schools, and providing tertiary research-based education to train the next generation of scientists for advancing science and for the needs of society.

The Forum endorses the Socrates/Erasmus programmes for exchange of high-school and university students and teachers and recommends extension beyond Europe.

Science education for women, particularly as it offers quantitative analysis of problems and the understanding of causality, is a critical factor for development. Women's particular role in early childhood education makes this especially important. Africa is an important example. There, science education for women can offer the opportunity to allow women to take decision-making control of their lives with respect, *e.g.* to health, work, and the future of their societies. This demands action from European countries and their physicists.

The Forum emphasises the importance of high quality physics teaching and teacher education.

Networking of physics teachers, teacher educators, physics education researchers and physicists is essential and should ensure that the rich variety of European physics teaching experiences is utilised. There is an urgent need for platforms where pupils, teachers and scientists come together, *e.g.*, in the form of in-service teacher training, science centres and museums and science festivals.

The Forum emphasises that teaching should present physics as an international, creative and collaborative problem-solving effort, involving both men and women. Therefore, teachers must have a background in physics and have encountered scientists in action. The quality of physics education is threatened by a shortage of well trained teachers and the Forum strongly recommends measures to increase the attractiveness of the profession. Teachers must be given the opportunity to maintain their enthusiasm and the contact with developments in physics and physics education research.

The Forum stresses the importance that teachers have a voice in curricular reforms. These must be subject to pilot testing and evaluation before full-scale implementation.

The Forum recommends international collaboration in the setting of benchmarks for education and in developing research-based techniques for measuring learning outcomes.

The Forum notes the importance of rethinking the goals for both primary and secondary school science education to achieve "scientific literacy".

Scientific literacy includes a basic understanding of how science works and the capability for quantitative thinking. It also covers science-based knowledge for citizens in a society that needs to deal with many complex problems, often related to the resources of the Earth. Secondary school has to

deal with socio-scientific issues, which often require expert knowledge in many different specialisations, calling for a multidisciplinary approach. The Forum appeals to governments to put more efforts on teacher training (initial and in-service) to enable teachers to realise these goals. It stresses the need for interdisciplinarity while doing justice to the specific characters of the different disciplines.

Ethical issues in physics

Upholding the highest ethical standards in physics is essential, in its research and teaching practices and in regard to its wider obligations to society. To this end the community of physicists needs to further improve its self-regulatory practices. Physicists must accept personal responsibility to uphold the integrity of their science and to transmit its fundamental values to students and young researchers. The Forum acknowledges efforts developing appropriate codes of professional ethics.

To strengthen mutual trust physicists should engage in dialogue with their fellow citizens in order to share with them the excitement of scientific discovery and obtain a better understanding of currently felt needs and anxieties.

In order to further the quality and efficiency of physics research, authorities should refrain from any direct interference with its workings and only regulate its practices to the extent deemed absolutely necessary. Forms of funding should be agreed upon that minimize the risk of jeopardizing the integrity of physics research, professional standards, openness and good practice.

The participants of the Forum Physics and Society listed below unanimously support this resolution and recommendations.

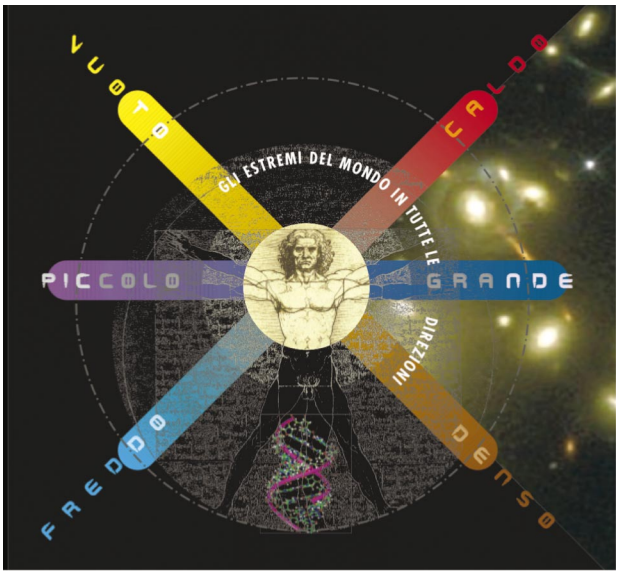
Name		Country	Representative of following institution
Draxler	Sonja	Austria	Austrian Physical Society
Krenn	Heinz	Austria	Austrian Physical Society
Lippitsch	Max	Austria	Austrian Physical Society (Director)
Musso	Maurizio	Austria	Austrian Physical Society
Rauch	Helmut	Austria	Austrian Physical Society (President)
Schäffer	M.-Magdalena	Austria	Austrian Physical Society
Titulaer	Urbaan	Austria	European Physical Society Education Division
Steinitz	Michael	Canada	Canadian Association of Physicists
Kirin	Davor	Croatia	Croatian Physical Society
Valkarova	Alice	Czech Republic	Czech Physical Society (President)
Poulsen	Ove	Denmark	European Physical Society (President)
Nieminen	Risto	Finland	Finnish Physical Society
Ducloy	Martial	France	International Steering Committee WYP2005 (Chairman)
Maynard	Roger	France	French Physical Society (President)
Kovach	Adam	Hungary	Roland Eötvös Physical Society (Secretary General)
Kroo	Norbert	Hungary	Hungarian Academy of Sciences (Vice President)
Tucci	Pasquale	Italy	Italian Physical Society
Kitahara	Kazuo	Japan	Japan Committee on WYP2005 (Chairman)
Rudzikas	Zenonas	Lithuania	Lithuanian Academy of Sciences (President)
Cisneros	Carmen	Mexico	Mexican Physical Society
De Wolf	Els	Netherlands	Netherlands Physical Society
Vaagen	Jan Sigurd	Norway	European Physical Society Technology Group
Warczewski	Jerzy	Poland	Polish Physical Society
Urbano	José	Portugal	Portuguese Society of Physics (President)
Chang	Yuan-Huei	Republic of China	Physical Society of Republic of China
Zadkov	Victor	Russia	Russian Physical Society
Popovic Bozic	Mirj ana	Serbia & Montenegro	Physical Society of Serbia and Montenegro
Trontelj	Zvonko	Slovenia	Soc. of Mathematicians, Physicists and Astronomers of Slovenia
Zingu	Edmund	South Africa	South African Physical Society
Kim	Jewan	South Korea	Korean Physical Society
Lee	YoungPak	South Korea	Korean Physical Society
Lee	Chul H.	South Korea	Korean Physical Society
Ferrer-Anglada	Nuria	Spain	Catalan Physical Society (Vice President)
Bargholtz	Christoph	Sweden	European Physical Society
Pendrill	Ann-Marie	Sweden	European Physical Society Education Division
Gyalog	Tibor	Switzerland	Swiss Physical Society (President)
Huber	Martin	Switzerland	Swiss Physical Society
Kalmus	Peter	United Kingdom	Institute of Physics
Melville	Peter	United Kingdom	Institute of Physics, IUPAP
Kohn	Walter	USA	

www.kfunigraz.ac.at/exp8www/wyp2005/forum-resolution.pdf

ALLE COLONNE D'ERCOLE
Navigando ai confini dell'impresa scientifica

M. Bersanelli
Università degli Studi di Milano
E. Sindoni
Università degli Studi di Milano-Bicocca

Considerate la vostra semenza:
fatti non foste a viver come bruti,
ma per seguir virtute e canoscenza.
(Inferno XXVI, 118-120)



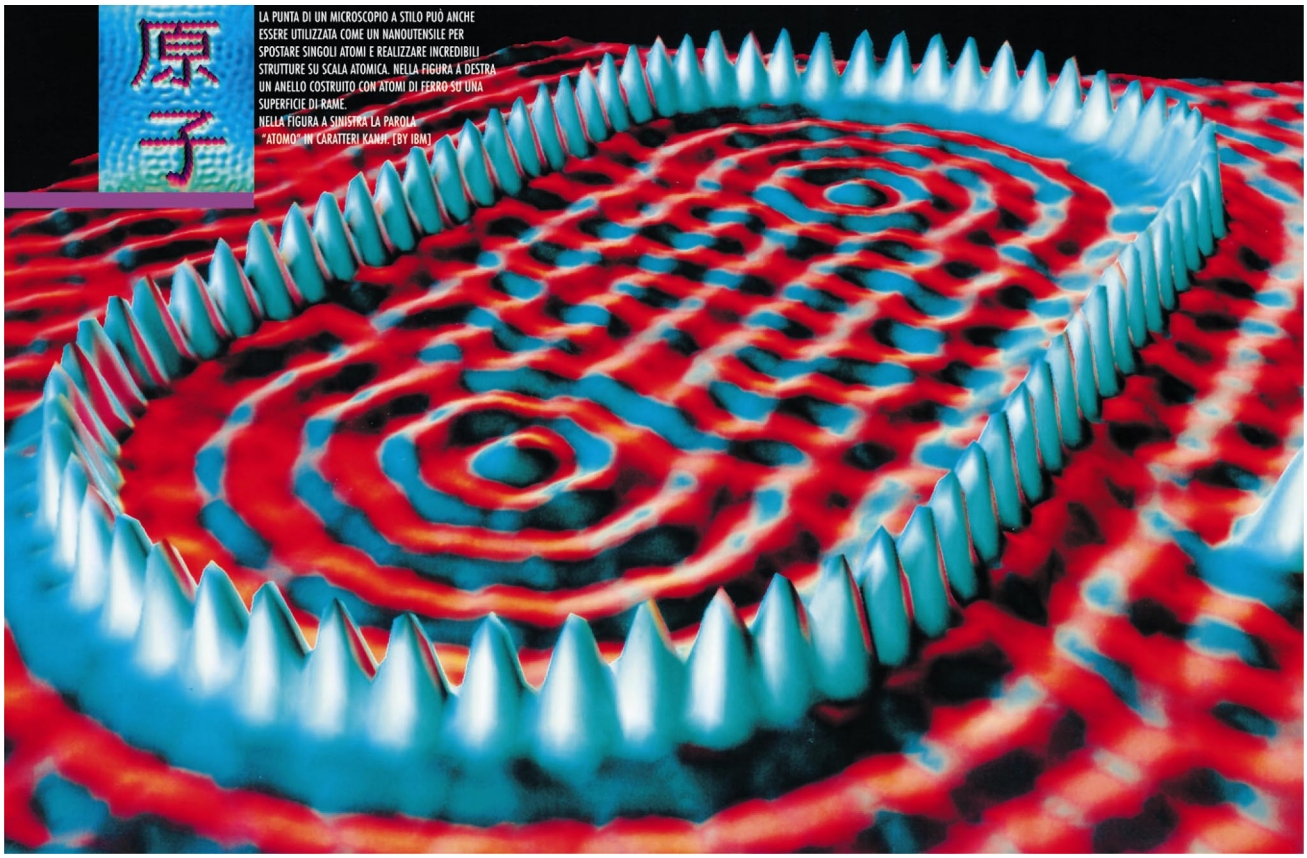
1. – Introduzione

In occasione del "World Year of Physics 2005", durante il XCI Congresso della Società Italiana di Fisica, che si è tenuto a Catania alla fine di settembre del 2005, è stata esposta la mostra "Alle colonne d'Ercole, navigando ai confini dell'impresa scientifica". Questa mostra è stata realizzata da EURESIS, "Associazione per la promozione e lo sviluppo della cultura e del lavoro scientifico", che da un decennio si occupa fra l'altro di preparare mostre a carattere didattico su argomenti di grande rilevanza, avvalendosi dell'apporto di studiosi di varie discipline. Il valore aggiunto di tali mostre sta nel fatto che, lavorando congiuntamente, cosmologi, fisici, biologi, chimici, geologi, matematici, possono giungere a una descrizione più completa di tematiche che, se affrontate nell'ambito di una singola disciplina, risultano spesso carenti e di scarso valore didattico. Al tempo stesso le mostre di EURESIS sono animate dalla ricerca di una visione sintetica, in cui l'elemento di unità è dato del fascino della realtà, oggetto della ricerca, e dall'emergere nel soggetto delle domande fondamentali che continuamente accompagnano l'indagine scientifica. Le mostre, per il loro carattere didattico e di informazione scientifica, sono particolarmente richieste da Istituti scolastici, Università, Centri culturali, sia in Italia sia all'estero.

La mostra non guarda al di là delle "colonne d'Ercole della Scienza", ma conduce alle estremità del mondo fisico conosciuto secondo le tre coordinate: piccolo-grande, denso-vuoto, freddo-caldo. La scienza moderna estende la nostra capacità di conoscere la realtà fisica fino a situazioni estremamente lontane da quelle della nostra normale esperienza. In queste condizioni, dove le capacità razionali e tecnologiche sono spinte all'estremo, la natura della conoscenza scientifica appare con particolare chiarezza. Percorrendo la mostra, via via emerge la stupefacente capacità della ragione umana di conoscere la realtà fisica sino a livelli tanto profondi. Al tempo stesso, in questi punti di frontiera, affiora l'irriducibilità della realtà alla nostra capacità di definizione, e si manifestano alcuni limiti alla nostra conoscenza insiti nella natura stessa. Scienza e limite, conoscenza e ignoto: la tensione tra questi due poli, sempre presenti insieme e simultaneamente, è al cuore del fascino della ricerca. Scrutando la realtà ai suoi confini, appare più evidente il carattere misterioso del reale e ancor di più della nostra stessa possibilità di conoscerlo: la cosa più incomprensibile dell'universo, diceva Einstein, è il fatto che l'universo sia comprensibile. Ma il mistero non è solo nei lembi lontani della realtà, ma è nella profondità di quello che è tutti i giorni sotto i nostri occhi. Questo mistero riguarda la realtà tutta. E in modo assolutamente unico riguarda il fenomeno fragile e prodigioso della vita. Tracciamo ora, in sintesi, il percorso della mostra.

2. – Dal grande al piccolo

Una domanda che l'uomo si è posto sin dall'inizio della storia, forse fin dai primi albori della sua coscienza, è quanto sia grande il mondo attorno a noi. Le prime stime quantitative risalgono alle misure dei greci, in particolare di Aristarco di Samo (320 – 230 a.C.) che valutò le distanze del Sole e della Luna dalla Terra. In seguito, per 1800 anni, la più grande distanza stimata è stata quella



LA PUNTA DI UN MICROSCOPIO A STILO PUÒ ANCHE ESSERE UTILIZZATA COME UN NANOUTENSILE PER SPOSTARE SINGOLI ATOMI E REALIZZARE INCREDIBILI STRUTTURE SU SCALA ATOMICA. NELLA FIGURA A DESTRA UN ANELLO COSTRUITO CON ATOMI DI FERRO SU UNA SUPERFICIE DI RAME.
NELLA FIGURA A SINISTRA LA PAROLA "ATOMO" IN CARATTERI KANJI. [BY IBM]

di Saturno, il più lontano pianeta visibile a occhio nudo. A partire dal 1600, con l'introduzione del cannocchiale, le stime delle dimensioni dell'Universo sono cresciute di 15 ordini di grandezza, un milione di miliardi di volte. All'inizio del 1900 l'Universo osservabile era stato identificato con la Via Lattea. Si deve all'astronomo Edwin Hubble, nel 1923, la prima misura della distanza di una galassia al di fuori della Via Lattea, Andromeda (M31), a 2 milioni di anni luce da noi. Da allora, grazie a telescopi sempre più potenti, in particolare al telescopio spaziale Hubble posto in orbita a 600 chilometri dalla Terra, e a tecniche di analisi sempre più approfondite, l'Universo osservato è diventato sempre più grande, man mano che è stata rivelata la luce proveniente da oggetti sempre più distanti. Oggi siamo in grado di studiare la luce di galassie e quasar distanti oltre 10 miliardi di anni luce; strumenti ultra-sensibili sondano regioni ancora più remote, ai limiti dell'Universo osservabile, da dove riceviamo il fondo di microonde, la luce fossile di un cosmo nella sua prima infanzia. È questa la fonte di informazione più remota, nel tempo e nello spazio, di cui disponiamo, e ci proviene dopo un viaggio durato per il 99.998% dell'età dell'Universo: 13,7 miliardi di anni.

Sul fronte opposto, oggi siamo in grado di comprendere con una profondità sorprendente ciò che accade nell'intimità della materia, scendendo all'interno delle singole particelle che compongono i nuclei atomici. Solo nel XX secolo si sono cominciate a sviluppare le tecniche sperimentali che hanno consentito di spingere la ricerca fino alla frontiera dei costituenti ultimi della materia, degli oggetti "più piccoli". In questa affascinante esplorazione dell'infinitamente piccolo più volte si è scoperto che quelle che si ritenevano essere particelle elementari sono in effetti costituite da altre particelle. Dal microscopio ottico, sviluppato nel XVII secolo, il cui potere risolutivo è limitato dalla lunghezza d'onda della luce visibile, e che non permette quindi di distinguere oggetti più piccoli di un batterio, si è via via passati ai microscopi elettronici a scansione (SEM) e a trasmissione (TEM) e infine a quelli "a stilo", che permettono di *toccare* i singoli atomi. La "caccia" agli oggetti più piccoli è ora effettuata per mezzo dei grandi acceleratori di particelle: facendo scontrare tra loro fasci di particelle ad altissima energia si possono realizzare in un piccolissimo volume e per un tempo brevissimo le condizioni fisiche vigenti nell'universo primordiale. In queste condizioni si generano nuove particelle la cui identificazione ha permesso ai fisici di formu-

lare un quadro sempre più completo dei mattoni fondamentali della materia: famiglie di quark e di leptoni. Il problema è molto più complesso poiché, secondo la fisica quantistica, lo spazio "occupato" da una particella non è legato a una sua estensione fisica, ma alla "funzione d'onda" che ne descrive la probabilità di trovarsi in un certo punto. L'estensione di un elettrone misura meno di un miliardesimo di milionesimo di millimetro: si tratta della dimensione più piccola stimata in natura finora.

3. – Dal denso al vuoto

Oggi grazie alla scienza abbiamo anche familiarizzato con situazioni fisiche estreme dal punto di vista della densità dove, ancora una volta, si producono fenomeni ben diversi da quelli prevedibili a partire dall'esperienza quotidiana: dagli oggetti collassati al vuoto più spinto. La materia in condizioni ordinarie, come già ipotizzato da Democrito, è costituita da insiemi di atomi. La densità di un oggetto, che esprime il grado di compressione della materia in un volume, è legata alla sua struttura microscopica, che, a livello atomico, è sostanzialmente la stessa. Per questo le densità dei corpi con cui abbiamo solitamente a che fare non differiscono moltissimo. Va tuttavia tenuto presente che la massa degli atomi è concentrata nel nucleo e gli orbitali occupati dagli elettroni circostanti sono di circa tre ordini di grandezza maggiori delle dimensioni dei nuclei. La conclusione è che... la materia è sostanzialmente vuota! Nelle fasi finali della vita di stelle di massa molto grande, la forza di gravità raggiunge valori così elevati da vincere le forze di repulsione atomiche, facendo aumentare enormemente il valore della densità. Protoni ed elettroni possono stare così vicini tra loro da fondersi, producendo neutroni. Si formano così le stelle di neutroni, oggetti praticamente privi di vuoto atomico, in cui i neutroni sono vicini tra loro come in un unico gigantesco nucleo atomico, raggiungendo densità di circa centomila miliardi di volte la densità dell'acqua. Sembrerebbe impossibile comprimere ulteriormente la materia, costringendo le particelle a stare più vicine tra loro di quanto lo siano in un nucleo atomico. Eppure stelle di massa superiore a tre volte la massa del Sole terminano la loro vita in misteriosi oggetti, con densità ancora più elevate di quelle delle stelle di neutroni: i buchi neri. La forza di gravità che esercitano è così intensa che anche la luce che passa in loro vicinanza viene deviata fino al punto di essere assorbita. Sono gli oggetti più densi che oggi conosciamo. Ma nei primissimi istanti di esistenza dell'Universo di cui possiamo avere qualche cognizione fisica, alla cosiddetta "epoca di Planck", si stima che la densità rispetto a quella dell'acqua doveva raggiungere il valore di 10 elevato alla novantaquattresima potenza: superando questa soglia la nostra fisica, ma anche la nostra immaginazione, ci si dovrebbe spingere oltre le colonne d'Ercole.

All'estremo opposto vi è il vuoto, un concetto solo apparentemente banale. Per J. C. Maxwell il vuoto era semplicemente ciò che rimane dopo tutto ciò che si può rimuovere è stato rimosso: oggi la nostra idea di vuoto è molto più complessa. Bisogna distinguere due diversi problemi: un problema tecnologico, che riguarda la corsa verso "vuoti sempre più spinti" e un problema fisico che riguarda il vuoto secondo la teoria quantistica dei campi. Il progresso tecnologico in questo campo parte dalle prime pompe a vuoto rudimentali, verso la metà del 1600, che raggiungevano pressioni di qualche Torr (un'unità di misura della pressione che equivale a circa un millesimo della pressione atmosferica), per passare alle pompe rotative, a quelle a diffusione e a quelle dette a *getters*, giungendo a ottenere pressioni dell'ordine di un centomillesimo di miliardesimo di Torr. Ma come la fisica moderna descrive il vuoto? Secondo la teoria quantistica dei campi, lo spazio vuoto non è affatto "il nulla", ma diventa lo stato fondamentale, lo stato a minima energia di tutti i campi quantistici che esistono in natura. La visione quantistica del vuoto indica una realtà assai più ricca e vivace di quanto si possa immaginare. È piuttosto analoga a quella di un mare calmo (stato di minima energia), che però come ogni mare che si rispetti non è mai privo di qualche increspatura. Così nel vuoto esistono fluttuazioni di particelle dette "virtuali", fluttuazioni che sono anche state osservate sperimentalmente (effetto Casimir).

4. – Dal freddo al caldo

La temperatura di un oggetto è un indice della velocità del moto disordinato degli atomi e delle molecole di cui è composto. Lo "zero assoluto", corrispondente a $-273{,}15$ °C, è uno stato in cui gli atomi sono completamente fermi. Investigare che cosa accada alla materia in queste condizioni ha incuriosito gli scienziati già dal 1800, per cui è

iniziata una vera e propria "corsa" verso lo zero assoluto. Questa corsa fu segnata, nella seconda metà del XIX secolo, da notevoli successi, tra i quali di particolare importanza fu la liquefazione dei gas. Il francese Louis-Paul Cailletet riuscì a produrre, nel 1877, alcune gocce di ossigeno liquido alla temperatura di −180 °C. Negli anni successivi si sono ottenuti valori sempre più prossimi allo zero assoluto: nel 1907 si riuscì a raffreddare l'elio a 4 gradi kelvin, cioè a −269 °C. Ma a "raffreddare" gli entusiasmi verso la possibilità di raggiungere lo zero assoluto, nel 1907 Walther Nerst dimostrò in modo irrevocabile, con considerazioni basate sul concetto di entropia, che non era possibile raggiungere lo zero assoluto (terzo principio della termodinamica). Ma la marcia di avvicinamento allo zero assoluto, anche con la consapevolezza di non poter raggiungere la meta, è continuata e nel 1995 ci si è avvicinati fino a 100 miliardesimi di grado dallo zero assoluto. La tecnologia ci ha così permesso di raggiungere temperature più basse di quelle mai raggiunte in natura nella storia dell'Universo. La spinta degli scienziati ad approssimarsi a questo limite naturale ha portato alla scoperta di inaspettate e importantissime proprietà che la materia acquista a bassissime temperature, tra cui la superfluidità e la superconduttività. Il venire alla luce di queste proprietà non solo ha portato eccezionali applicazioni tecnologiche, ma ha rivelato nuovi aspetti sulla struttura intima della materia. Tra questi, di grande importanza è la condensazione di Bose-Einstein, un effetto in cui il gas raffreddato assume comportamenti tipici delle onde.

Le temperature più alte descrivibili fisicamente riguardano l'Universo ai suoi primi istanti. Al tempo di Planck si stima una temperatura in gradi dell'ordine di 10 elevato alla trentaduesima potenza: lo descrizione dello stato della materia a tale temperatura è, almeno al momento, al di là delle possibilità della fisica. l'Universo si è poi raffreddato, grazie all'espansione cosmica, rendendo finalmente possibile la condensazione della materia in stelle: oggi l'Universo è ovunque molto freddo (3 gradi sopra lo zero assoluto), con alcuni punti bollenti: le stelle e altre strutture sparse nello spazio. Ma anche per il "caldo" si può in un certo senso parlare di una corsa tecnologica per riprodurre in laboratorio le condizioni che tengono accese le stelle, cioè temperature dell'ordine delle diecine di milioni di gradi. Al crescere della temperatura, la materia passa dallo stato solido a quello liquido e quindi quando si raggiungono temperature di qualche migliaio di gradi, allo stato di plasma. Il plasma è caratterizzato dalla separazione degli atomi in nuclei (semplici protoni nel caso dell'idrogeno) ed elettroni. All'interno del Sole, a causa della compressione gravitazionale, si raggiungono temperature che permettono l'innesco e il mantenimento di reazioni di fusione nucleare, con trasformazione dell'idrogeno in elio. Stelle più massive del Sole sono vere e proprie "fucine nucleari", in cui le reazioni di fusione e le esplosioni di supernovae portano a produrre gli elementi più pesanti sino al ferro. Dall'inizio degli anni '50 gli scienziati tentano di riprodurre in laboratorio tali processi, già ottenuti in modo non controllato nelle bombe H, per realizzare un reattore nucleare basato su reazioni di fusione. È un'impresa di enorme difficoltà, che ha raggiunto notevoli risultati ma che ancora vede la meta abbastanza lontana.

5. – E la vita?

È inevitabile la domanda su dove si ponga il fenomeno vita sui tre assi densità, dimensione e temperatura. Per quanto riguarda la densità, gli organismi condividono con la maggior parte dei solidi esistenti in natura valori non troppo diversi da quelli della densità atomica. La densità degli esseri viventi, sia animali sia vegetali, è per tutti vicina a quella dell'acqua. Ben più ampie appaiono le variazioni in dimensione e temperatura. Gli organismi unicellulari hanno dimensioni dell'ordine del micron, mentre le più grandi balene raggiungono la lunghezza di decine di metri e gli alberi maggiori possono superare il centinaio di metri. La forza di gravità terrestre pone un limite alle massime dimensioni raggiungibili dagli organismi viventi: essi non possono crescere indefinitamente perché, al crescere delle loro dimensioni, la coesione interna, che dipende da una sezione superficiale tipica dell'organismo, aumenta meno rapidamente del loro peso, che dipende dal volume. L'intensità relativa della forza di gravità e delle forze intermolecolari di origine elettromagnetica, dalle quali dipendono i legami intermolecolari, determinano a loro volta anche le dimensioni di un pianeta capace di ospitare organismi viventi. Per quanto riguarda la temperatura, oggi conosciamo microrganismi "estremofili" il cui habitat richiede temperature di −15 gradi centigradi e altri che, in vicinanza di sorgenti calde sul fondo degli oceani, vivono a temperature altissime, sino a 200 °C. Per quanto notevole siano le capacità di adattamento degli organismi, i valori compatibili con la "vita" lungo tutti

e tre gli assi sono strettissimi e molto lontani dai confini fisici del mondo subatomico e del macrocosmo, così come dal caldo del centro delle stelle e dallo zero assoluto: la vita, almeno nella forma in cui noi la conosciamo, sussiste in una regione molto limitata e moderata di questi assi.

Ci sono precisi motivi per cui i fattori che rendono possibile la complessità e la vita biologica richiedono condizioni fisiche e ambientali intermedie. Ma l'ampiezza delle possibilità che la natura realizza in temperatura, densità e dimensione non è affatto estranea alla vita stessa. La formazione del carbonio, dell'ossigeno e degli altri elementi pesanti necessari alla vita ha bisogno dei milioni di gradi che si raggiungono all'interno delle stelle; la complessità delle cellule usa le proprietà degli infinitesimi mattoni della materia; senza i giganteschi buchi neri centrali con densità estreme e masse pari a milioni di masse solari probabilmente non si sarebbero formate galassie come la nostra, capaci di ospitare in una loro regione periferica un sistema planetario come quello che noi abitiamo. Ciò che sappiamo dell'evoluzione e della storia dell'Universo sembra indicare che l'ampiezza di condizioni realizzate in natura, su ordini di grandezza così apparentemente estranei al nostro presente, sia in realtà necessaria per accogliere in un delicatissima "nicchia" di parametri intermedi forme di complessità e di vita. E quindi anche la nostra vita.

L'Associazione EURESIS ha curato altre mostre a carattere scientifico:

- Pronti, partenza, vita: documenti e ipotesi sull'origine della vita nell'Universo
- 1799 e la corrente fu: a 200 anni dalla pila di Volta
- Da Democrito ai quark, le grandi intuizioni della fisica
- Una Terra per l'uomo: i tratti eccezionali del nostro piccolo pianeta
- L'alba dell'uomo
- Alla ricerca del vero: aspetti del dialogo tra gli scienziati e la Chiesa Cattolica
- Alle fonti dell'energia: dalla natura risorse per il cammino dell'uomo
- Galileo, mito e realtà
- Einstein 1905: il genio all'opera
- Sulle spalle dei giganti: luoghi e maestri della Scienza nel Medioevo europeo
- A che tante facelle ? La Via Lattea tra scienza, storia e arte

---

Olimpiadi Internazionali della Fisica

8 - 17 July 2006, Singapore

Menzioniamo la meritoria attività di preparazione degli studenti della squadra italiana, tutti premiati alle Olimpiadi Internazionali della Fisica che si sono tenute a Singapore. Da sinistra: Alessandro Farace (Trento, medaglia di bronzo), Marco Peruzzi (Prato, medaglia di bronzo), Andrea Petri (Udine, medaglia di bronzo), Giorgio Busoni (Livorno, menzione di merito), Nicola Peruzzi (Dolo Venezia, medaglia di bronzo).

CALCOLO AD ALTE PRESTAZIONI IN FISICA DELLA MATERIA: UNA INIZIATIVA NAZIONALE DI COORDINAMENTO E PROMOZIONE

L. Colombo (*)
Dipartimento di Fisica, Università di Cagliari
Cittadella Universitaria, 09042 Monserrato (Ca)

1. – Introduzione

Come in altri settori delle Scienze Naturali, anche nel campo della Fisica della Materia la simulazione numerica si è universalmente affermata come terzo paradigma — insieme con l'esperimento e la teoria — dell'indagine sui fenomeni di specifico interesse. Lo sviluppo del paradigma computazionale è stato reso possibile dalla sinergia tra la spettacolare crescita della potenza di calcolo disponibile sulle diverse piattaforme, il contemporaneo sviluppo di teorie "calcolabili" (cioè efficientemente traducibili in forma numerica) e l'affermarsi di algoritmi numerici a bassa complessità e scalabili su macchine multi-processore.

Le caratteristiche tipiche della simulazione numerica sono sostanzialmente due: da un lato essa provvede strumenti diretti per la "misurazione" di una certa teoria (non diversamente da come un esperimento misura un fenomeno); dall'altro, consente di investigare le proprietà della materia su scala atomica in condizioni arbitrarie, tra cui anche quelle non direttamente controllabili o accessibili nella realtà sperimentale.

Il grado di affidabilità delle simulazioni numeriche è in continua crescita, avendo in molti contesti già raggiunto il livello di capacità predittiva di nuovi fenomeni. Ciò si riflette in un crescente ruolo giocato dal paradigma computazionale sia nel campo della ricerca fondamentale, sia nel campo dell'applicazione tecnologica. Il "*predictive modelling*" viene infatti ampiamente utilizzato nella ricerca pre-competitiva e nella ricerca industriale, come valido strumento di indagine sulla ottimizzazione dei processi di manipolazione dei materiali, come strumento di "*virtual prototyping*" e come strumento di abbattimento dei costi.

(*) E-mail: luciano.colombo@dsf.unica.it

2. – La comunità nazionale operante in Fisica Computazionale della Materia

La comunità italiana operante in questo campo è particolarmente vivace e di livello assolutamente competitivo con le migliori realtà internazionali. I contributi dei ricercatori italiani si dividono in pari misura tra gli aspetti teorico-metodologici-algoritmici e quelli più direttamente applicativi.

Per quanto riguarda la prima classe, possiamo citare contributi fondamentali nei calcoli di struttura elettronica da primi principi (metodi basati sulla teoria del funzionale densità, quale il metodo Car-Parrinello), nei metodi di dinamica molecolare *ab initio*, *tight-binding* o classica, nei metodi Monte Carlo, nella dinamica molecolare quanto-classica non adiabatica. Per ciò che concerne le applicazioni, esse spaziano dagli studi sulle proprietà elettroniche, strutturali, magnetiche, ottiche, vibrazionali, termodinamiche e di trasporto in materiali a stato solido o liquido; alla biofisica molecolare ed ai biomateriali; ai sistemi a bassa dimensionalità (superfici e nanostrutture quantiche); ai materiali complessi (vetri, polimeri, liquidi, proteine e biomolecole); alle proprietà dei materiali in condizioni fisiche estreme (geomateriali); alle più moderne problematiche di nanoscienza e nanotecnologia (trasporto, nano-/bioelettronica, nano-meccanica).

La comunità nazionale di Fisica della Materia si è data nel tempo diverse forme di aggregazione. Dalla metà degli anni novanta fino a poco fa l'istituzione che raccoglieva la maggior parte di questa comunità era l'Istituto Nazionale per la Fisica della Materia (INFM). A seguito del processo di riordino e accorpamento degli Enti di Ricerca, l'INFM è scomparso (come istituto nazionale autonomo) per confluire parzialmente nel nuovo Diparimento "Materiali e Dispositivi" del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Altra parte dell'organico degli afferenti INFM si è riaggregata nel Consorzio Interuniversitario per le Scienze Fisiche della Materia (CNISM). Altri ricercatori sono infine distribuiti nella rete universitaria. In questo articolo descriverò brevemente l'esperienza, maturata in ambito INFM, di gestione di una iniziativa nazionale, trasversale, coerente e sostenuta nel tempo finalizzata alla promozione e supporto del calcolo ad alte prestazioni per applicazioni in Fisica della Materia. Ho avuto il privilegio di poter coordinare, tramite la presidenza della Commissione Calcolo INFM, questa inziative (in collaborazione con i proff. G. Ciccotti dell'Università di Roma "La Sapienza" e G.

Pastore dell'Università di Trieste) negli anni 2001-2006 e, in base a questa esperienza, ritengo il modello dell'iniziativa INFM ancora attuale e validissimo, a dispetto dello scioglimento dell'Istituto.

3. – Ricognizione ed analisi delle esigenze di supercalcolo

L'esigenza caratterizzante della fisica computazionale è rappresentata dalla necessità di accedere a risorse di super-calcolo difficilmente reperibili a livello di singolo gruppo di ricerca. In altre parole, non sto alludendo alla singola stazione di lavoro facilmente acquistabile nell'ambito di un tipico progetto PRIN o FIRB; questa classe di macchine è sì ottimale per lo sviluppo dei codici, per l'analisi dei dati, ma consente l'esecuzione di campagne di simulazione solo su problemi di ridotta complessità o solo su sistemi materiali a limitato numero di gradi di libertà. Piuttosto, la ricerca numerica veramente *computer-intensive* (tipicamente: calcoli di struttura elettronica da primi principi, simulazioni atomistiche di grossa taglia, modellazione multi-scala) necessita di grandi infrastrutture nella fattispecie di piattaforme di calcolo multi-processore.

Queste infrastrutture multi-processore abilitano al calcolo massicciamente parallelo, ma sono tuttavia caratterizzate da: i) grande costo di impianto e messa in produzione (da parecchie centinaia di migliaia a milioni di euro); ii) onerose procedure di *housing* (insieme delle strutture edilizie, impiantistiche e di sicurezza); iii) estrema rapidità dei tempi di obsolescenza (24-36 mesi nei casi ordinari, anche meno per specifici aspetti tecnologici, quali quelli legati alla interconnesione tra nodi); iv) necessità di mantenere personale altamente qualificato per la gestione ordinaria e per l'evoluzione sistemistica e di corredo *software*. È ovvio che nessun gruppo di ricerca può permettersi tanto. Se anche fosse, la moltiplicazione delle installazioni di questo tipo apparirebbe come uno spreco non sostenibile dal sistema-Paese, con inevitabile proliferazione dei costi.

È sostanzialmente per questo complesso di motivi che l'INFM ha fin dalla sua costituzione avviato una iniziativa trasversale "Calcolo parallelo", scaricando i singoli gruppi di ricerca dall'onere di acquisizione e gestione di *hardware* di tipologia piattaforme multi-processore massicciamente parallele. In aggiunta a questa missione primaria, la Commissione Calcolo ha avviato anche una serie di iniziative di promozione e supporto al supercalcolo che, ripeto ancora una volta, va in questo contesto principalmente inteso come "*number crunching*", cioè calcolo intensivo (piuttosto che *data-analysis*, o *data-mining*, o *data-GRID*).

4. – Le azioni della Commissione Calcolo INFM

La Commissione Calcolo ha storicamente sviluppato tre diverse linee d'intervento:

— progetti di supercalcolo
— *grant* promozionali
— progetti per "*visiting scientist*"

Alla prima tipologia corrispondono progetti di ricerca avanzati ad alto contenuto numerico e bisognosi di un elevato numero di ore-CPU su piattaforme multi-processore. La maggior parte dei progetti approvati negli anni scorsi ha goduto di una assegnazione compresa tra le 15000 e le 70000 ore-CPU (singolo nodo). Di fatto il "progetto di supercalcolo" ha rappresentato il modo più consistente con cui INFM ha finanziato la ricerca computazionale. I *grant* promozionali, invece, rappresentano lo strumento di avvio al supercalcolo: un *grant* viene, infatti, assegnato per sperimentazioni algoritmiche o sistemistiche, oppure per *porting* di codici in nuovi ambienti, oppure per esecuzione di *benchmark* intensi. La distinzione tra le suddette tipologie di progetto è cruciale al fine di separare nettamente le applicazioni di produzione da quelle di sperimentazione. Infine, i progetti "*visiting scientist*" hanno finanziato visite (fino ad alcuni mesi) di ricercatori INFM presso istituti o centri stranieri o visite di ricercatori stranieri attivi su tematiche di fisica computazionale.

La Commissione ha previsto l'annuale emissione di un bando di chiamata per progetti e *grant*, interamente gestito in modo telematico tramite una procedura *WEB-based* all'uopo sviluppata; i progetti pervenuti sono valutati con una procedura di *peer-review*. La valutazione di ciascun progetto è operata sulla base di tre criteri:

i) validità ed attualità della tematica scientifica proposta e sua congruità con le linee tematiche del Piano Triennale dell'INFM;

ii) esperienza del gruppo proponente e proprietà delle metodologie numeriche proposte;

iii) livello di efficienza dimostrato dal gruppo proponente nell'utilizzo delle risorse di super-

calcolo precedentemente assegnate, e congruità della richiesta rispetto agli obiettivi dichiarati.

Quest'ultimo punto merita, forse, un commento più specifico. Al fine di evitare il mancato utilizzo di risorse (comunque già pagate in anticipo), la Commissione Calcolo ha operato per ciascun singolo progetto un controllo periodico sul loro effettivo utilizzo, applicando un meccanismo "*bonus/malus*": venivano premiati con un *bonus-extra* quei progetti che, a compimento del primo semestre, avessero virtuosamente consumato più del 50% delle risorse allocate inizialmente. Al contrario, si procedeva con una penalizzazione in termini di riduzione del monte-ore disponibile. I risultati hanno dimostrato l'estrema efficacia di questo strumento: la percentuale di ore-CPU effettivamente consumate a fine anno sulle diverse piattaforme di calcolo rese disponibili agli utenti INFM ha raggiunto percentuali del *budget* complessivo disponibile prossime al 100%. Negli anni 2002-2006 questo *budget* è cresciuto da circa 1,2 a circa 2,1 milioni di ore-CPU (per anno), ulteriormente confermando la capacità di ottimale impiego.

In tabella I riporto, relativamente al quinquiennio 2002-2006, il numero complessivo di progetti approvati e di ore-CPU allocate. È immediato riconoscere come gli indicatori numerici dimostrino nei fatti una crescita monotona, a riprova non solo della vivacità di questa comunità scientifica, ma anche della validità di tale iniziativa che, incidentalmente, ha mantenuto quasi inalterate queste caratteristiche nonostante il fatto che INFM sia stato nel triennio 2004-2006 prima commissariato, poi sciolto e riaccorpato.

Tabella I. – Entità numerica della Iniziativa Trasversale "Calcolo Parallelo" dell'INFM negli anni 2002-2006.

Anno	Numero dei progetti approvati	Monte-ore CPU complessivo
2002	52	1299212
2003	65	1616546
2004	99	1872293
2005	109	2186248
2006	141	2135100

5. – La convenzione col CINECA e la politica per le grandi infrastrutture di calcolo

Sulla base delle considerazioni prima esposte, INFM ha sin dalla sua istituzione rinunciato a creare un proprio centro di calcolo i cui costi di creazione e mantenimento risultavano semplicemente proibitivi, così come l'investimento in personale. L'istituto, invece, ha optato per la stipula di una convenzione-quadro con un grande centro di calcolo nazionale, individuato nel Consorzio Interuniversitario CINECA (Bologna).

La Commissione Calcolo ha, dunque, gestito per conto dell'INFM una convenzione (rinnovata triennalmente) con CINECA, nell'ambito della quale ha sviluppato la propria politica di accesso alle grandi infrastrutture di calcolo, così come definite in precedenza. Il modello di interazione mediato da questa convenzione ha, a mio avviso, consentito di far percepire al centro di calcolo la comunità INFM non come una semplice somma di utenti, ma piuttosto come un soggetto scientifico collettivo e di peso notevole. I riflessi positivi non sono stati solo di immagine, ma anche — e soprattutto — concreti: tramite lo strumento della convenzione INFM-CINECA una intera comunità scientifica nazionale ha potuto nei fatti essere un attivo co-protagonista nelle scelte legate alla individuazione di nuove piattaforme e nella definizione delle stragie di evoluzione tecnologica.

Questa stessa convenzione INFM-CINECA ha inoltre dimostrato nel tempo di possedere notevoli vantaggi di grande efficacia finanziaria:

i) ha messo a disposizione dell'utenza un ricco portafoglio di ore di CPU all'anno, necessario a soddisfare tutte le richieste di eccellenza;

ii) ha permesso di distribuire le ore-CPU su diverse piattaforme multiprocessore mantenute sempre agli standard "*state-of-the-art*";

iii) ha comportato costi comparativamente assai contenuti, stimabili dell'ordine di un 0,5–1,0 milioni di euro per anno.

Nella tabella II, viene presentato il ventaglio delle piattaforme di calcolo intensivo rese disponibili ai ricercatori INFM tramite la convenzione con CINECA.

6. – Conclusioni

Volendo tracciare un rapido consuntivo dell'esperienza INFM 2001-2006, appare chiaro a chi scrive che la scelta strategica di avviare una iniziativa di Istituto per il calcolo ad alte prestazioni e la scelta di *partnership* con CINECA siano state entrambe estremamente fruttuose. Questa combinazione ha permesso, in modo chiaro e documentato

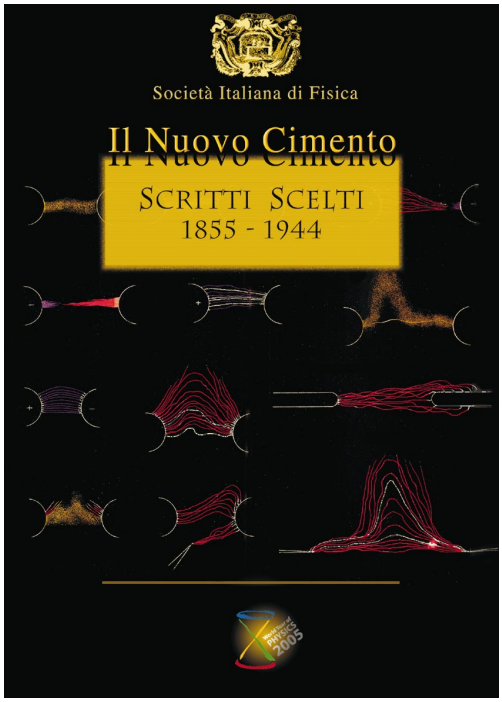
Tabella II. – Piattaforme multi-processore disponibili all'utenza INFM negli anni 2002-2006. In terza colonna tra parentesi è riportato il tipo di processore (PE) e in quarta colonna il loro numero.

Anno	Piattaforma	Tipologia	No. PE
2002	O3K	SGI Origin 3000 (RK14000 - 600MHz)	128
	SP3	IBM SP3 (power3 - 375MHz)	128
	SP4	IBM SP4 (power4 - 1.3GHz)	515
	BEOWULF	Cluster Linux (Intel Xeon - 1.333MHz)	128
2003	O3K	SGI Origin 3000 (RK14000 - 600MHz)	128
	SP4	IBM SP4 (power4 - 1.3GHz)	515
	BEOWULF	Cluster Linux (Intel Xeon - 1.333MHz)	128
2004	SP4	IBM SP4 (power4 - 1.3GHz)	515
	CLX	IBM Linux Cluster (Intel Xeon - 3.03GHz)	256
2005	CLX	IBM Linux Cluster (Intel Xeon - 3.03GHz)	1024
	SP5	IBM SP5 (power5 - 1.9GHz)	515
2006	CLX	IBM Linux Cluster (Intel Xeon - 3.03GHz)	1024
	SP5	IBM SP5 (power5 - 1.9GHz)	515
	XD1	Cray XD1 (AMD Opteron - 2.4GHz)	144

dagli eccellenti risultati, di offrire alla comunità scientifica INFM non solo l'accesso a moderni sistemi di calcolo gestiti in modo professionale, ma anche strumenti di promozione che hanno avvicinato alla fisica computazionale numerosi gruppi operanti sul territorio nazionale.

In futuro, al fine di mantenere ogni qualsivoglia iniziativa nazionale per il calcolo ad alte prestazioni ad un livello competitivo in un quadro scientifico e tecnologico in continua evoluzione, sarà quantomai opportuno (se non proprio necessario) agganciarsi alle future iniziative italiane e transnazionali attualmente in corso nella direzione del *grid computing*.

Da questo punto di vista, putroppo, il quadro istituzionale in cui è chiamata ad operare la comunità scientifica nazionale attiva in questo settore non è al momento particolarmente incoraggiante. Qualunque sia l'esito finale del processo di riforma del sistema della ricerca pubblica in Italia, chi scrive auspica che non venga disperso il patrimonio di esperienza, mezzi e competenze tecnico-scientifiche che INFM ha sviluppato ed accumulato nell'arco di un decennio.



In occasione dell'Anno Mondiale della Fisica, che ha coinciso con il 150° anniversario della fondazione de «Il Nuovo Cimento», la SIF ha ritenuto utile ripresentare in un volume celebrativo, alcuni dei contributi più significativi apparsi tra il 1855 e il 1944. La selezione, peraltro incompleta e limitata, dà un'idea della fisica italiana e del suo sviluppo e suggerisce riflessioni di qualche interesse per la storia della scienza.

XCII CONGRESSO NAZIONALE
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA
Torino, 18 - 23 settembre 2006

Lunedì 18 settembre

9:30–11:00	Cerimonia di Inaugurazione, Relazione del Presidente, Premiazioni (Premi SIF e Migliori Comunicazioni al Congresso Nazionale di Catania 2005)
11:00–12:00	Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia): Hänsch T.W. (Monaco): *A passion for precision*
12:00–13:00	Relazione Generale Sezione VI (Fisica generale, didattica e storia della fisica): Sassi E. (Napoli): *Didattica della Fisica: note su problemi aperti*
15:30–16:30	Relazione Generale Sezione IVa (Geofisica e fisica dell'ambiente): Harries J.E. (Londra): *Studies of the Earth's radiation budget with the new Geostationary Earth Radiation Budget experiment, GERB, and thoughts for the future*
16:30–19:30	Relazioni su Invito e Comunicazioni

Martedì 19 settembre

9:00–12:00	Relazioni su Invito e Comunicazioni
12:00–13:00	Relazione Generale Sezione III (Astrofisica e fisica cosmica): Tarenghi M. (Santiago): *The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*
15:00–18:30	Relazioni su Invito e Comunicazioni
18:30–20:30	Assemblea Generale dei Soci Ordine del giorno: – Approvazione ordine del giorno. – Approvazione del Verbale dell'Assemblea Generale dei Soci del 27 settembre 2005 (*Il Nuovo Saggiatore*, Vol. 21, N. 5/6, 2005). – Relazione del Presidente. – Relazioni del Collegio dei Revisori dei Conti e approvazione dei bilanci. – Nomina dei Revisori dei Conti (due effettivi e uno supplente). – Discussione e approvazione della Relazione del Presidente. – Ordine Professionale Fisici. – Progetto Lauree Scientifiche. – Relazione Associazione Italiana Studenti di Fisica. – Varie ed eventuali.

Mercoledì 20 settembre

9:00–12:00	Relazioni su Invito e Comunicazioni
12:00–13:00	Relazione Generale Sezione V (Elettronica e fisica applicata): Salimbeni R. (Firenze): *Le tecniche laser nella conservazione di opere d'arte: metodi fisici che innovano la cultura del restauro*
15:00–19:00	Relazioni su Invito e Comunicazioni
20:30	Cena Sociale

Giovedì 21 settembre

9:00–12:00	Relazioni su Invito e Comunicazioni
12:00–13:00	Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare): Riccati L. (Torino): *Lo studio della materia nucleare alle energie del Large Hadron Collider del CERN*
15:00–16:00	Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia): Tosatti E. (Trieste): *Theory of metal nanocontacts and nanowires*
16:00–17:00	Relazione Generale Sezione IVb (Biofisica e fisica medica): Rustichelli F. (Ancona): *Cellule staminali e sperimentazione: studi mediante radiazione X di sincrotrone*
17:00–20:00	Tavola Rotonda: *La Fisica per la salute* Presiede: Bassani G.-F. Coordina: Ferrero M.I. Interventi di: Amaldi U., Donato L., Fortuna G., Piazza A., Stefanini A., Torresin A.

Venerdì 22 settembre

9:00–13:00	Relazioni su Invito e Comunicazioni
16:00–17:00	Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare): Marchesini G. (Milano): *QCD e la nuova fisica a LHC*
17:00–18:00	Conferenza Cittadina del Prof. Regge T.: *L'opera e il pensiero di Amedeo Avogadro a 150 anni dalla morte*
18:00–18:30	Cerimonia di Chiusura e Proclamazione Migliori Comunicazioni

Sabato 23 settembre

9:00–18:30	Gita Sociale nelle Langhe

Ricordo di LIVIO SCARSI (1927-2006)

Caro Livio, ho pensato di non scrivere il tuo necrologio, ti scrivo una lettera di ricordi.

Ti ho conosciuto a Genova nel 1946, esame di Fisica Sperimentale, e ti ho anche bocciato: in quei mesi di baraonda tra esami e corsi di ricupero, ho deciso che come studente di Fisica (forse l'unico in quel momento) eri mal preparato! Ti ho ritrovato nel laboratorio di terz'anno con Baratta, qualcosa a proposito delle oscillazioni di una molla pesante: Occhialini padre aveva apprezzato quel tuo primo passo come fisico. Poi la brillante Fisica Teorica con Corben e Borsellino, e la laurea con Beppo Occhialini, la sua prima laurea dopo il ritorno in Italia. Ho raggiunto te (e Beppo) a Milano nel 1952, in quell'atmosfera di speranze ed entusiasmo creata dall'INFN. Con Levi Setti abbiamo avuto molti momenti di lavoro felice, come l'elegante ipertrizio, svelatosi durante una discussione nel baretto di viale Romagna. In quei mesi, più che anni, si era aperto, tra tanti altri, il problema del decadimento del mesone K, anzi, della unicità o meno di mesoni "strani". Vedo crescere l'istogramma delle misure di massa con i loro errori, nel quale Beppo, Connie e tu accumulavate osservazioni che venivano, sto per dire, da tutto il mondo: il valore medio della massa risultava molto vicino alle 960 masse elettroniche del mesone τ, indipendentemente dal tipo di decadimento. La prima valutazione complessiva dei modi di decadimento è stata data poco dopo dall'esperimento del G-Stack, col quale si è conclusa l'era dei raggi cosmici come produttori di particelle nuove. Ricordo meno la tua attività al *Centre d'Etudes Nucleaires* di Saclay, a parte il tuo entusiasmo nell'estendere la tua preparazione tecnica al di là delle lastre nucleari, e il tuo piacere nello stringere rapporti con persone che sarebbero diventate in seguito colleghi, collaboratori, e soprattutto amici.

La tua curiosità, la tua vocazione, che credo risaliva alla laurea con Beppo, era la natura e l'origine dei raggi cosmici, e a questo punto hai incontrato il tuo secondo maestro, Bruno Rossi, mentore, compagno di lavoro e amico di Beppo fin dai tempi favolosi di Arcetri. Nel giro di tre anni, in Nuovo Messico con John Linsley, realizzavi a Volcano Ranch il mosaico di rivelatori che doveva portarvi all'identificazione del primario cosmico di più alta energia fino allora osservato. Abbiamo passato alcuni giorni assieme ad Albuquerque, mi hai portato a vedere il tuo pezzo di terra vicino al confine del Colorado, una landa assolata abitata da *pinions* e pozzi di gas... . Abbiamo poi viaggiato insieme fino a Boston, cominciando col mitico Santa Fe e finendo in seconda classe, due facce dell'America. Io avevo una "missione" da parte di Beppo, riportarti in Italia! Bruno ha commentato: "Beppo è come una chioccia coi suoi pulcini", ma non ha ostacolato il tuo ritorno. Mi domando se in seguito mi hai maledetto o mi hai perdonato.

Erano i primi anni '60, l'era spaziale era cominciata. Il gruppo di Milano, piccolo ma qualificato, poteva contare in Europa su connessioni tecnicamente e scientificamente di avanguardia. Con la sua caratteristica perspicacia , Beppo ha indirizzato il gruppo, non solo a immaginare missioni originali e avanzate, non solo ad acquisire tecniche strumentali sofisticate, ma, come primo passo e coi mezzi disponibili, a produrre strumenti a livello di prototipo, provandone sia l'affidabilità che l'efficacia scientifica in condizioni e con tecniche conosciute. Non a caso, la Francia stava mettendo a punto con mezzi non artigianali la tecnica dei palloni stratosferici, mentre le macchine acceleratici sparse in Europa fornivano ampie possibilità per calibrazioni. Beppo (con Connie) ha trovato in te il collaboratore pronto e capace di realizzare quel programma, di individuare gli esperimenti significativi, e, non ultimo, di concorrere con quello che egli chiamava il tuo "charme" alla creazione di collaborazioni efficienti ed entusiaste. Le amicizie di Beppo e tue a Saclay

hanno prodotto una cooperazione scientifica e tecnica che si è protratta negli anni. E così è nato il primo progetto. Tu mi permetterai di citare liberamente dal tuo contributo per il centenario di Occhialini le parole di Bernard Agrinier (2005): *«En 1961 (fin '61 début '62) entre en scene "Beppo" Occhialini copain de Jacques Labeyrie. Il nous propose de participer à une experience sur les Rayons Cosmiques! Il s'agissait de chercher la presence d'électrons de haute energie dans ce rayonnement [...]. Ainsi a debuté une collaboration Franco-Italienne qui dure encore aujourd'hui [...]. Le premier ballon fut lancé le 5 Nov. 1963 de Aire sur l'Adour [...]. [on a observé] 18 électrons "primaires" [...]. au-delà de 4,5 GeV..... Cela représentait environ 1% de l'ensemble des Rayons Cosmiques [...]. Ce resultat fut communiqué sans délai à l'I.C.R.C. de decembre 1963 à Jaipur (Inde) [...]».* Tu eri parte di questo successo scientifico e tecnico che si è ripetuto sfruttando il metodo della camera a scintilla nei progetti seguenti, culminando con il satellite COS-B "dedicato" all'astronomia gamma. E tu eri già dal 1967 a Palermo e avevi formato rapidamente un gruppo in grado di partecipare ai progetti anche a livello di *hardware*. A questo punto mi pare giusto lasciare la parola ai tuoi allievi, che sono diventati ben presto i tuoi collaboratori, la parola che hanno pronunciato per te a Rocca Grimalda, il 18 marzo 2006. Ma non posso non commentare con te due cose, il tuo successo più significativo, il satellite BeppoSAX, il tuo progetto più ardito, EUSO. Dicevo prima della tua vocazione, la natura e l'origine dei raggi cosmici. Hai cominciato con la coda di alta energia dei "primari", qualunque cosa fossero; hai continuato mettendo in evidenza gli elettroni "primari". Con BeppoSAX hai aggiornato fino a questo momento la questione dei raggi gamma, che dopo tutto ci sono, anche se non sono quelli che voleva Millikan. Ma sono i primari di altissima energia che nascondono ancora qualche verità forse inconsueta, e hai pensato di poter usare l'intera nostra atmosfera per rivelare loro e la loro verità: spero che qualcuno porti avanti il tuo EUSO.

E finalmente voglio dire una parola che riassume per me nel modo migliore le tue qualità intellettuali e comportamentali: integrità. È una parola che Beppo usava sovente e che avevamo sentito da lui quando ci spiegava il significato delle parole inglesi "a decent person".

ALBERTO BONETTI
Università di Firenze

* * *

A parte una parentesi di tre anni, in cui insegnò a Roma su esplicito invito di Edoardo Amaldi, Livio Scarsi è stato, per oltre trent'anni, professore di fisica all'Università di Palermo. Responsabile di importanti programmi di ricerca nel campo della fisica dei raggi cosmici, dell'astrofisica alle alte energie, della ricerca spaziale, fondò e diresse per molti anni l'Istituto di Fisica Cosmica ed Applicazioni all'Informatica (IFCAI) del CNR di Palermo.

Era membro dell'Accademia dei Lincei, della Academia Europea, della *International Astronautics Academy*. Aveva ricevuto la laurea *honoris causa* alla Université de Paris 7 "Denis Diderot" e il premio "Bruno Rossi" della *American Astronomical Society*.

Nel corso della sua lunga carriera scientifica, Livio Scarsi ha svolto importanti funzioni di direzione e di consulenza scientifica in molte prestigiose istituzioni internazionali. È stato membro di vari comitati di consulenza del Consiglio Nazionale delle Ricerche, dell'Agenzia Spaziale Europea, dell'Agenzia Spaziale Italiana, dell'Accademia delle Scienze di Russia. Ha avuto ruoli di direzione scientifica nella realizzazione di importanti missioni spaziali italiane ed europee.

Laureato a Genova nel 1950 con Giuseppe Occhialini, uno dei protagonisti della fisica del secolo scorso, lo ha seguito subito dopo a Milano, diventandone da allievo collaboratore per molti anni. Da Occhialini Scarsi era stato indirizzato fin dalla laurea allo studio dei raggi cosmici. Nella prima metà degli anni '50, Scarsi fu impegnato nella ricerca delle "particelle nuove" prodotte dai raggi cosmici nell'atmosfera e, in particolare, nella preparazione di un grande esperimento per lo studio delle cosiddette "particelle strane". L'esperimento, denominato G-Stack, fu realizzato nel 1954 da una collaborazione di vari laboratori italiani ed europei con l'invio di un pacco di vari litri di emulsioni nucleari nella stratosfera con un grande pallone aerostatico. I risultati dell'esperimento avevano permesso la soluzione di alcuni problemi della fisica dei mesoni K quando ancora non erano disponibili i grandi acceleratori di particelle. Successivamente per due anni soggiornò in Francia operando presso i laboratori del Centro di Studi Nucleari di Saclay come associato di ricerca.

Tra il '57 e il '60, appena sposato, si trasferì con una *Fulbright Research Fellowship* negli Stati Uniti, nel gruppo di Bruno Rossi, altro protagoni-

sta della fisica del secolo scorso, emigrato negli Stati Uniti a causa delle leggi razziali del regime fascista. Beppo Occhialini e Bruno Rossi sono stati i punti di riferimento di Livio nella sua carriera scientifica.

Negli Stati Uniti insieme a John Linsley realizzò nel deserto del Nuovo Messico una estesa rete di rivelatori per lo studio degli sciami estesi prodotti in atmosfera dai raggi cosmici "primari": con tale strumento Livio e John scoprirono la presenza di primari di energia elevatissima, la più alta fino allora osservata.

Tornato a Milano nel gruppo di Occhialini, il suo lavoro sui raggi cosmici continuò con la realizzazione di vari esperimenti con palloni stratosferici, mirati in particolare allo studio della rara componente elettronica della radiazione cosmica, riprendendo così lo studio iniziato con la laurea e continuato nei primi anni di Milano a quota di montagna. Quegli esperimenti costituirono anche l'occasione per una collaborazione durata negli anni con i vecchi amici del gruppo di Saclay.

Nel 1967 Livio Scarsi diviene Professore Ordinario di Fisica Superiore presso la facoltà di Scienze dell'Università di Palermo, dove si trasferisce con la famiglia: con Irma e con Manuela, Paolo e Chiara ancora bambini.

A Palermo, Scarsi porta un nuovo settore di ricerca: l'Astrofisica delle Alte Energie, sviluppata con sofisticate tecnologie connesse alla ricerca spaziale; ma quel che più conta, porta un'attività scientifica di respiro internazionale.

Con il trasferimento a Palermo, l'uso di grandi palloni stratosferici per lo studio delle radiazioni provenienti dallo spazio fu introdotto anche in quella università. Un piccolo numero di laureandi e di tecnici fu rapidamente addestrato all'uso di queste nuove tecnologie, e si costituì così il primo nucleo di un gruppo di ricerca destinato a crescere rapidamente negli anni successivi. Va ricordato che da queste prime esperienze ebbe origine la base di lancio per palloni stratosferici a Trapani-Milo, oggi gestita dall'Agenzia Spaziale Italiana.

A partire dalla metà degli anni '60, la ricerca spaziale rappresentava la nuova frontiera della fisica cosmica e dell'astrofisica. Nel 1963 era stata creata ESRO, una organizzazione internazionale per promuovere la collaborazione europea in questo campo. Ad essa seguirà, nel 1975, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), che ancora oggi promuove e sviluppa le attività spaziali in Europa per conto dei suoi 17 stati membri. Il gruppo di Occhialini a Milano fu il primo in Italia a riconoscere e sfruttare le nuove opportunità offerte dall'uso delle tecnologie spaziali e dalla cooperazione scientifica, tecnica e finanziaria tra gli Stati europei: grazie a Scarsi, anche l'Istituto di Fisica dell'Università di Palermo fu lanciato, letteralmente, in orbita.

Il primo satellite che portava la sigla dell'ESA, denominato COS-B e lanciato nel 1975, portava a bordo uno strumento progettato a Palermo da Scarsi e dai suoi collaboratori. Tale strumento faceva parte di un grande rivelatore di raggi gamma costruito da una collaborazione (promossa da Occhialini) di sei laboratori in quattro paesi europei. In dieci anni di vita il satellite COS-B ha fornito la prima mappa delle sorgenti celesti di raggi gamma di alta energia, facendo della gamma-astronomia uno dei settori d'avanguardia nella ricerca spaziale.

Nel corso degli anni '70, le attività di ricerca del gruppo diretto da Scarsi diventarono troppo impegnative per restare confinate nella dimensione universitaria. Fu creato così a Palermo un Istituto del CNR, l'IFCAI appunto, specificatamente dedicato alla realizzazione di grandi progetti di ricerca spaziale, di cui Scarsi fu il naturale direttore. A presiedere il Consiglio Scientifico dell'Istituto fu chiamato Occhialini.

Il successo più notevole di Livio Scarsi fu certamente la realizzazione di un satellite per la X-astronomia, lanciato nel 1996 e denominato BeppoSAX, in onore di Giuseppe (Beppo) Occhialini. Nel corso dei cinque anni della sua vita in orbita, BeppoSAX, operando come un vero e proprio osservatorio astronomico, ha prodotto risultati estremamente importanti nel campo dell'astrofisica (basti ricordare la localizzazione delle sorgenti di *gamma-bursts*), documentati in oltre 1500 articoli pubblicati nelle maggiori riviste internazionali.

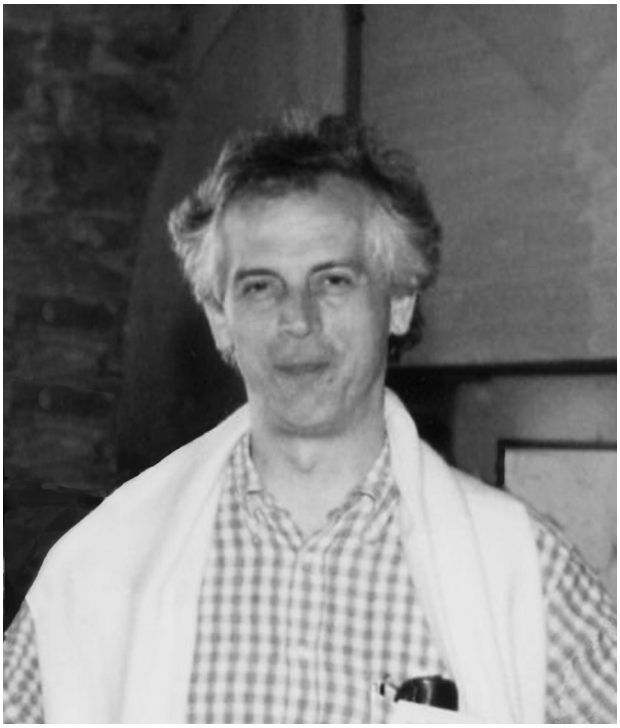
Alla realizzazione di BeppoSAX sotto la guida di Scarsi hanno contribuito diversi gruppi scientifici italiani ed europei, ma anche ed in maniera determinante l'industria spaziale italiana, l'Alenia di Torino e la Laben di Milano, per citare quelle di maggior rilievo. Livio Scarsi ha sempre considerato fondamentale ed ha curato in dettaglio il rapporto tra mondo scientifico e mondo dell'industria, ritenendo che solo attraverso una loro stretta collaborazione si potessero realizzare grandi imprese.

Sempre animato da giovanile entusiasmo, Livio Scarsi è entrato nel nuovo secolo con la proposta di un nuova e ambiziosa missione spaziale. Denominato "*Extreme Universe Space Observatory*"

(EUSO), il progetto prevede la realizzazione di un sofisticato strumento di rivelazione dei raggi cosmici di più alta energia utilizzando come "rivelatore" l'intera atmosfera terrestre. Alla realizzazione di questa idea sono attualmente impegnati più di 100 ricercatori di diverse istituzioni scientifiche in sei paesi europei, negli Stati Uniti e in Giappone. Livio Scarsi è stato il leader di questa grande collaborazione internazionale. Da oggi, saranno il ricordo della sua straordinaria personalità e l'esempio del suo entusiasmo a guidare lo sforzo collettivo.

Livio Scarsi è stato un punto di riferimento per la comunità scientifica. Coloro che lo hanno conosciuto ne hanno apprezzato l'alta levatura scientifica, il grande carisma e la sua profonda umanità.

Questa nota è tratta da uno scritto di Arturo Russo (Dipartimento di Storia della Fisica, Università di Palermo), rielaborato e letto da Bruno Sacco (IFCAI, Palermo) in occasione delle esequie di Livio Scarsi nella Parrocchia di Rocca Grimalda il 18 - Marzo - 2006. Arturo Russo e Bruno Sacco sono stati allievi e collaboratori di Livio fin dalla seconda meta degli anni '60)



MASSIMO SANCROTTI
(12 luglio 1953 – 22 aprile 2006)

Il giusto, anche se muore prematuramente, troverà riposo.
Vecchiaia veneranda non è la longevità,
né si calcola dal numero degli anni;
ma la canìzie per gli uomini sta nella sapienza;
vera longevità è una vita senza macchia.

Sapienza (4, 7-15)

Al volgere della fine dello scorso mese d'aprile Massimo Sancrotti ci ha lasciato per sempre, dopo una malattia devastante ed implacabile. Massimo se ne è andato con lo stesso stile e la stessa semplicità con la quale aveva vissuto. Una semplicità che racchiudeva in sé una profonda forza e dignità. Ha affrontato la malattia con grande lucidità e razionalità e fino agli ultimi giorni ha lavorato e pensato agli altri, in particolare, alla mamma, che lasciava sola e ai suoi giovani collaboratori.

Massimo Sancrotti si era laureato in ingegneria nucleare al Politecnico di Milano nel 1981 con una tesi di fisica delle superfici. In seguito aveva continuato la sua ricerca sempre al Politecnico di Milano nel gruppo di Lucio Braicovich. La sua straordinaria creatività lo aveva portato ad occuparsi anche di altri temi di ricerca quali la struttura elettronica di composti di terre rare e di metalli 3d. Nell'ultimo decennio si era occupato sempre di più dello studio e della crescita di strati ultra-sottili di fullereni e quindi della loro struttura elettronica, fino ad entrare, a pieno titolo, tra i più qualificati ricercatori in Italia nell'ambito della fisica dei nanosistemi.

Durante gli anni del Politecnico, Massimo aveva acquisito una profonda conoscenza delle tecniche sperimentali della fisica delle superfici e delle tecniche di deposizione e crescita di strati sottili e anche una vasta esperienza nell'ambito dei laboratori di luce di sincrotrone, sia europei sia statunitensi. Massimo era così diventato noto e apprezzato in ambito internazionale. L'elenco delle collaborazioni internazionali è esteso e data dalla seconda metà degli anni '80. Dopo una lunga e scientificamente produttiva carriera al Politecnico di Milano come ricercatore, Massimo diventò professore associato di fisica generale presso la facoltà di Scienze dell'Università Cattolica del Sacro Cuore a Brescia e quindi professore di prima fascia di fisica della materia nel 2002.

Oggi, non è facile suscitare, ancora una volta, il ricordo di una persona che mi è stata cara e che se n'è andata prematuramente. Massimo era un col-

lega, ma anche un amico, con il quale ho percorso una parte della vita, con il quale ho costruito, quel tanto o quel poco che oggi esiste a Brescia nei laboratori di fisica dell'Università Cattolica.

Ho incontrato Massimo tanti anni fa ad uno dei congressi nazionali della SIF. Aveva fatto una relazione sulla superficie dei monocristalli di silicio. Ricordo che alla fine ringraziò, come d'uso i collaboratori, ma poi disse "...e con loro ringrazio Mozart, Bach, Beethoven, per la compagnia che mi hanno fatto durante le lunghe notti solitarie degli esperimenti al sincrotrone !" . Mi parve originale il modo di porsi, verso la comunità scientifica, di quel quasi-coetaneo, magro, vestito in modo scomposto e con lo sguardo intelligente e disincantato, al punto che ancora oggi porto un ricordo indelebile.

Lo persi di vista per alcuni anni, ma lo ritrovai quando, nel '94, fui chiamato come professore al Politecnico di Milano.

Aveva lo studio nel sottotetto del dipartimento di fisica del Politecnico, assieme a Gigi Quartapelle, alla Prof. Fasana e al Prof. Puppin. Io, mi aggiunsi alla "allegra" compagnia. Furono anni interessanti, per varie ragioni.

Massimo aveva il suo laboratorio a Trieste, Gigi Quartapelle si occupava di fluidodinamica, io avevo il mio laboratorio al LASA (INFN) a Segrate mentre la Prof. Fasana, ormai vicina alla pensione, si occupava principalmente di didattica.

Il caldo d'estate era torrido e d'inverno il freddo pungente, ma tutti avevamo un certo gusto da "bohémienne"": i tetti di Milano nelle brume dell'autunno, la pioggia battente sulle lamiere, il torrido calore dei pomeriggi di luglio, ma anche il tepore intimo e suffuso che dà la solidarietà agli uomini che hanno idee da condividere e per le quali operare assieme.

Solo io, nella "allegra compagnia" avevo interessi scientifici comuni con Massimo, ma parlavamo relativamente poco di questo; invece, spesso e con gli altri, parlavamo di didattica. Ore di discussione sui problemi e sui testi degli esami.

Ci siamo conosciuti così.

Poi io mi trasferii all'Università Cattolica del Sacro Cuore, a Brescia, dove partiva il corso di laurea in fisica.

Era, se ricordo bene, il 1999 e Massimo aveva vinto il concorso di professore associato per la fisica generale. Massimo era una garanzia scientifica e didattica e così, anche se aveva altre offerte forse più "comode" di Brescia, si fece convincere dalle proposte che gli fecero. Può sembrare incredibile, per un ateneo italiano, ma tutto quello che fu programmato si è realizzato in pochi anni. Il suo laboratorio, il suo gruppo, la sua promozione a professore ordinario.

Quando lasciai Brescia, lo scorso aprile, sapevo di fare una cosa saggia e rischiosa, ma confidavo nel fatto di lasciare quello che era stato costruito nelle mani di un collega-amico capace, onesto e ricco di iniziativa e creatività.

Il destino ha disposto diversamente. Massimo mi informò della sua terribile malattia lo scorso autunno. L'ha combattuta con razionalità, con tenacia e con una estrema serenità. Ebbene, molti si sono chiesti se questa serenità fosse solo una maschera imposta. Io credo di no . Solo una potente forza interiore può dare all'uomo la serenità che Massimo ha avuto nella malattia prima e quindi nelle ultime ore della sua vita.

Non conosco l'origine della sua serenità, ma certo, in lui era una tangibile presenza.

Se oggi ci chiediamo come onorare Massimo, allora vorrei ricordarvi che fino all'ultimo egli è stato "in trincea" per difendere un'istituzione che lui aveva servito e amato: l'Istituto Nazionale per la Fisica della Materia. Già in terapia intensiva si recava, ogni settimana a Genova, nella sede dell'INFM. Ragioni politiche oscure avevano portato alla soppressione di questo ente. Oggi una tenue speranza di rivedere rinascere un'istituzione che così bene ha operato, per la fisica, per i giovani e per le università, si sta riaccendendo. Questo potrebbe essere l'impegno di chi vuole ricordare Massimo nel nome di quella continuità e solidarietà umana che porta la nostra specie a pensare oltre la morte.

FULVIO PARMIGIANI
Sincrotrone, Trieste

RICORDO DI GIULIO CORTINI
(1 dicembre 1918 – 29 maggio 2006)

Laureato in Fisica a Roma nel 1942, venne arrestato dal governo fascista nel 1943 per cospirazione. Uscì di prigione alla caduta del governo Mussolini, dopo il 25 luglio. Durante l'occupazione tedesca prese parte attiva alla resistenza romana, militando nei Gruppi di Azione Partigiana e riuscendo a costruire ordigni esplosivi attivati da vecchi orologi da tasca.

Con la liberazione, tornò a frequentare l'Istituto di Fisica, dove divenne assistente ed entrò

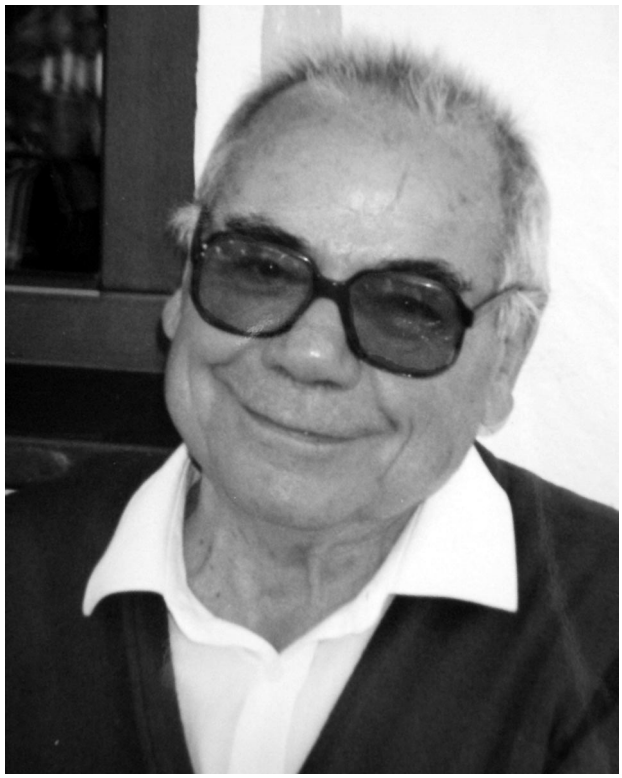
in un gruppo di collaboratori di Edoardo Amaldi (fra questi, Carlo Castagnoli ed Augusta Manfredini). Questo gruppo cominciò subito ad occuparsi della evaporazione nucleare provocata dai raggi cosmici, utilizzando la tecnica delle emulsioni nucleari, tecnica che Giulio utilizzerà a lungo. Il risultato più originale riguardò la scoperta in una emulsione di un antiprotone cosmico. Giulio, in un ricordo lasciato al figlio Massimo due anni fa, riporta che in un evento si registrava la annichilazione di una particella. In quel momento Amaldi era fuori Roma, ma gli altri avanzarono il sospetto, confortato da Touschek,che si potesse trattare della annichilazione di un antiprotone con un protone, con la formazione di prodotti di evaporazione corrispondenti ad una energia totale di 2 GeV. Il problema era di verificare che l'energia sviluppata fosse così alta. Il merito di Cortini consistè nell'escogitare un metodo, di cui rimase orgoglioso, per la valutazione dell'energia di una traccia attraversante più lastre. Al rientro di Amaldi, il gruppo decise di inviare il lavoro per la pubblicazione [Amaldi E., Castagnoli C., Cortini G., Franzinetti C., Manfredini A.: "*Unusual event in cosmic rays*", Nuovo Cimento **1** (1955) 492]. È stato emozionante scoprire, in un documento conservato presso l'Archivio Amaldi del Dipartimento di Fisica di Roma, che, per il Premio Feltrinelli del 1956, Gilberto Bernardini aveva proposto all'Accademia dei Lincei il conferimento del Premio per la Fisica (assegnato poi quell'anno ad Antonio Rostagni) agli scopritori dell'antiprotone elencandoli, in ordine alfabetico, come segue:

Owen Chamberlain
Giulio Cortini
Emilio Segrè.

La proposta di Bernardini, di cui sicuramente Amaldi era a conoscenza come membro dell'Accademia dei Lincei, era tanto sensata che, nel 1959, Chamberlain e Segrè ebbero il Premio Nobel.

Comunque, proprio nel 1955-56 Giulio vinse il concorso a cattedra, prendendo servizio il 1 febbraio 1956 all'Università di Messina. Nel biennio successivo fu professore all'Università di Catania e quindi a Napoli, dove la sua permanenza fu molto più lunga e significativa.

Per seguire questo passaggio, va premesso che, nel 1957-58, per merito di Eduardo Caianiello, la fisica teorica moderna era entrata in forma stabile nell'Università di Napoli. In tale anno, grazie al



sostegno di Felice Ippolito ed Edoardo Amaldi, vennero istituiti l'Istituto di Fisica Teorica e la Scuola di Perfezionamento in Fisica Teorica e Nucleare, inaugurata il 1° Aprile con un seminario di Werner Heisenberg. Nell'anno successivo, dopo l'istituzione della Sottosezione di Napoli dell'INFN, vennero chiamati Giulio Cortini a sviluppare la Fisica Nucleare e Renato Angelo Ricci la Spettroscopia Nucleare.

Fu proprio Cortini, come ricorda Ricci, a volerlo a Napoli dopo che da Torino si era recato ad Amsterdam a far parte di uno dei primo e più importanti gruppi europei di Spettroscopia Nucleare. Cortini, ricorda sempre Ricci, appoggiò in modo costante ed efficace il sorgere e lo svilupparsi a Napoli di quell'attività sperimentale e teorica nel campo della struttura necleare che diventò il riferimento per l'evolversi di queste ricerche in Italia (da Napoli a Firenze, a Padova, ai Laboratori Nazionali di Legnano).

A Giulio fu affidato il corso di Fisica Superiore il cui contenuto può rilevarsi dal libro che lui suggerì di scrivere, sulla base delle sue lezioni e previa consultazione di altri testi, ai suoi studenti Emilio del Giudice ed Elena Sassi e che fu pubblicato dalla editrice Liguori.

Già all'inizio del '59, avvalendosi della collaborazione di Raffaele Rinzivillo, Giulio fece allestire, in due locali del pad. 19 della Mostra d'Ol-

tremare, un laboratorio, finanziato dall'INFN, con microscopi appositamente attrezzati per la misura dello *scattering* di particelle nucleari in emulsioni fotografiche. In un cantinato, umido ed oscuro, dello stesso padiglione fu realizzato un laboratorio per la preparazione di emulsioni nucleari dello spessore di 300-600 micron e per lo sviluppo dopo esposizione a fasci di macchine acceleratici. Assunse sei persone che furono addestrate al lavoro di microscopia, alcune delle quali sono poi rimaste nella sezione con compiti diversi. Le ricerche si concentrarono dapprima sulla fotofissione su nuclei pesanti e successivamente sulla frammentazione e sulla fissione prodotta in nuclei pesanti da fasci di protoni o gamma per esposizione al CERN, ai LNF ed al Saturne di Orsay. Cortini seguì sempre, con accortezza e con qualche raro tratto di ruvidezza, il lavoro dei suoi collaboratori (fra loro, i sudamericani Hervasio de Carvalho e Mario Muchnik, Raffaele Rinzivillo, Francesco Carbonara, Giulia Potenza, Emilio del Giudice ed Elena Sassi), riportato in numerosi lavori e varie comunicazioni.

Molto importante per gli sviluppi che seguirono fu, ai primi degli anni '60, l'appoggio dato da Giulio, insieme a Eduardo Caianiello ed al chimico Alfonso Maria Liguori, alla creazione dell'Istituto di Biofisica del CNR. A tale proposito egli scrive ad Amaldi, il 4-10-1960: "*Ti mando questa lettera, attraverso l'amico Buzzati, per pregarti di appoggiare Napoli — anche prima di Roma — come sede dell'Istituto di Biofisica*". Più avanti motiva: "*mentre l'istituto di Buzzati e dei suoi a Roma rappresenterebbe solo un incremento certo importante, ma non decisivo, del livello culturale nel campo della ricerca, qui esso cambierebbe totalmente la situazione*". Significativo il fatto che Giulio inquadra tale iniziativa in un quadro di interazione avanzata fra discipline scientifiche diverse. A dimostrazione di tale volontà di interazione, fra il 1963 e il 1967 i gruppi sperimentali, in particolare di fisica nucleare e subnucleare, in significativa espansione, furono ospitati dal laboratorio di Genetica e Biofisica; Cortini collaborò con i biologi per lo studio del decadimento del fago radioattivo caricato in lastre nucleari.

Come ricorda Elena Sassi, dopo il Congresso della SIF del '63 a Bari, Giulio comunicò loro l'intenzione di occuparsi anche di ricerca didattica pur continuando a seguire il lavoro del gruppo che, peraltro, col tempo diversificò i propri interessi.. Sempre più intensi divennero i suoi rapporti con gli insegnanti delle scuole secondarie che lo portarono a realizzare, alla fine degli anni '60 e in forte sintonia con Ettore Pancini, il Seminario Didattico, che aveva le prerogative di un Istituto, in cui gli incontri fra i docenti delle scuole e dell'Università divennero frequenti e rivolti sia alla fisica che ad altre discipline scientifiche e sociali. Fu in tale periodo che prende l'avvio il suo progetto sull'insegnamento della relatività, che andò negli anni successivi via via perfezionandosi alla luce della progressiva sperimentazione didattica sul campo.

Come ci ricorda M. Vicentini, dal 1972 Giulio riallacciò i rapporti con l'Istituto di Fisica di Roma, dove fu richiamato nel 1975. Seguirono l'organizzazione del Raggruppamento Didattico della Facoltà di Scienze MFN (a partecipazione multidisciplinare) e quindi l'istituzione del Laboratorio di Didattica delle Scienze.

Le attività del Laboratorio hanno coinvolto circa 1000 insegnanti di materie scientifiche nelle scuole romane, per i quali è stato compilato un esteso archivio elettronico. Inoltre sono stati organizzati più di 50 corsi di aggiornamento per insegnanti, diversi congressi, e diversi cicli di conferenze. Sulle attività del Laboratorio sono stati pubblicati numerosi libri presso la casa editrice Nuova Italia. Con spirito critico e acuto senso dell'ironia, tra le attività del Laboratorio lui stesso elencava "*un tentativo fallito di portare l'elettronica nella scuola secondaria (fallito, ma aveva un pregio: è l'unico ESPERIMENTO didattico che, a mia conoscenza, abbia avuto un esito negativo. Il che dimostra che è stato, effettivamente, un esperimento).*"

Il suo rapporto con gli insegnanti delle scuole secondarie è descritto in modo sintetico in questa testimonianza di Michela Mayer: "*Non era facile allora, e non è facile adesso, per gli insegnanti trovarsi in una situazione di 'parità', reale e non formale, con il mondo accademico, in un rapporto di fiducia reciproca e di discussione senza barriere e senza pregiudizi*".

Intensissima è sempre stata la sua interazione con l'AIF, in particolare con la sezione romana, realizzata anche attraverso l'organizzazione di molti corsi di aggiornamento per docenti. Significativa, infine, la sua attività di divulgazione scientifica.

Dopo il pensionamento è stato nominato Professore Emerito presso la Facoltà di Scienze M.F.N. dell'Università di Roma "La Sapienza".

FRANCESCO GUERRA
Università di Roma "La Sapienza"
BRUNO PREZIOSI
Università di Napoli

PERCORSI

AFFLATI GALILEIANI E NON NELLA FISICA CONTEMPORANEA

A. Sestero
ENEA - Frascati[1]

1. – Afflati galileiani...

Quattro secoli fa — ad un'umanità abituata da sempre a mescolare realtà e fantasia, ad intrecciare esperienze concrete con immaginarie elucubrazioni mentali — venne detto che l'unica guida sicura per comprendere il mondo che ci circonda era *l'esperimento fisico*, controllato e ripetibile, sfrondato da qualsiasi assunto aprioristico. Da allora ebbe inizio una stagione rigogliosa per la scienza: stagione che, ricchissima di risultati, si è protratta sino ai giorni nostri. Non senza prove difficili: ad esempio, la comprensione della realtà atomica e subatomica è stata acquisita attraverso lo sviluppo della *meccanica quantistica* — una disciplina che si è dimostrata straordinariamente efficace nell'interpretazione delle fenomenologie microscopiche, ma che al contempo è apparsa ostica e fondamentalmente estranea al senso fisico comune, evoluto attraverso millenni di assuefazione alle proprietà del mondo macroscopico da noi percepito. Tuttavia, l'aderenza totale e puntuale del dettato quantico alla sempre più ricca messe di *risultanze sperimentali* condusse infine all'accettazione senza riserve della nuova disciplina: momento questo certamente di sapore squisitamente *galileiano*, con l'esperimento assunto a giudice supremo e privilegiato della riflessione teorica, contro ogni possibile pregiudizio e precedente presunzione.

L'assunto quantico dovette tuttavia affrontare nuove prove all'atto della formulazione della *teoria quantistica dei campi* — l'estensione e generalizzazione cioè della meccanica quantistica ai campi continui (sistemi aventi un numero infinito di gradi di libertà). In questa fase ci si dovette confrontare infatti con la comparsa copiosa e sistematica di espressioni matematiche divergenti, praticamente nel corso di qualsiasi calcolo ci si accingesse ad eseguire. Dopo un periodo iniziale di disorientamento e sconcerto, alla fine vennero tuttavia messe a punto con successo procedure di calcolo particolari (le cosiddette procedure di *rinormalizzazione*) attraverso le quali le espressioni matematiche divergenti incontrate poterono essere sistematicamente rimosse, e i vari calcoli ricondotti ad espressioni finite.

L'artificio della rinormalizzazione fu escogitato ed applicato con successo dapprima nel caso dell'interazione *elettromagnetica*. Successivamente — dopo esser pervenuti a fondere le interazioni *elettromagnetica* e *debole* nello schema unitario della cosiddetta interazione *elettrodebole* — si trovò il modo di adattare le tecniche di rinormalizzazione anche alle peculiarità di questo nuovo contesto (ciò ottenendosi comunque attraverso sviluppi non banali). Finalmente, fu reso possibile estendere le procedure rinormalizzative anche al caso dell'interazione *forte*. L'insieme di tutte queste elaborazioni teoriche — che condusse ad erigere l'importante edificio di principi fisici noto come *modello standard* — costituì indubbiamente un momento altamente positivo della ricerca nel campo della fisica delle alte energie.

Tuttavia in questo quadro di grande successo si cela un'insidiosa debolezza. Infatti la rimozione delle divergenze che si manifestano così profusamente nei calcoli è ottenuta al prezzo di un'incongruenza matematica: cioè la sistematica inversione dell'ordine di esecuzione di un'operazione di passaggio al limite rispetto ad altra operazione (in taluni casi algebrica, in altri casi anch'essa di passaggio al limite). Tale in-

[1] *Retired*. Indirizzo di casa: Viale Giulio Agricola 131, Roma 00174.

versione, come sappiamo, non è matematicamente una procedura indolore. La fattibilità di essa dovrebbe costituire un teorema, dovrebbe essere cioè dimostrata caso per caso: viceversa nei punti critici delle procedure di rinormalizzazione detta invertibilità viene data a priori per scontata, senza poterne fornire dimostrazione. Si noti che non si tratta di una contraddizione nel discorso matematico, che ovviamente non sarebbe accettabile, bensì di una *lacuna*, di un'argomentazione mancante. Per giustificare l'accettazione di tale stato di cose, ci si appiglia di fatto all'eccezionale concordanza che viene riscontrata tra valori calcolati e valori misurati sperimentalmente: tutto questo non può essere casuale — si argomenta — pertanto le procedure seguite, se pur non rigorose, *devono* essere sostanzialmente esatte[2].

A questo punto dobbiamo ricordare come il modello standard, quale elaborato sino a tutti gli anni '70, abbia un impianto di calcolo interamente asintotico-perturbativo. Ciò si rivela più che adeguato per la trattazione delle fenomenologie legate all'interazione elettrodebole, ma nel caso dell'interazione forte consente invece di presentare soltanto un quadro parziale di risultati. Per chiarire tutta una serie di aspetti fra i più interessanti (incluse ad esempio le circostanze attraverso cui si manifesta il cosiddetto confinamento dei *quark*) viene richiesta infatti la soluzione delle pertinenti equazioni in termini finiti, non perturbativi. Dall'inizio degli anni '80 tale necessità ha originato un importante filone di ricerca su base numerica, noto col nome di *quantocromodinamica su reticolo* (*lattice QCD*). Questo filone si è rivelato assai fecondo: e verosimilmente continuerà ad esserlo ancora a lungo, assoggettato come è alla disponibilità di mezzi di calcolo sempre più potenti. Scopo di esso è la riproduzione e comprensione approfondita della variegata *realtà sperimentale* che caratterizza il mondo dei quark e gluoni in situazioni non analizzabili coi metodi perturbativi (in condizioni, cioè, lontane dal cosiddetto *regime di libertà asintotica*). Evidentemente, pertanto, tale indirizzo merita ancora appieno di essere qualificato come ricerca di stampo genuinamente *galileiano*.

Per contro, è importante far osservare come esistano oggi importanti aree di indagine nella fisica delle alte energie alle quali invece — come verrà illustrato nelle sezioni successive — non sarebbe più di fatto legittimamente concesso fregiarsi di tale appellativo...

2. – ...e non : universi continui

A partire dagli anni '70 — e prendendo spunto dai traguardi sino a quel momento raggiunti dall'investigazione fisica, compendiati nel *modello standard* precedentemente ricordato — è stata avviata una serie di ricerche teoriche su tematiche per le quali i riferimenti sperimentali appaiono indiretti e lontani, quando non del tutto assenti. In queste circostanze, l'orientamento nel dedalo delle possibili scelte teoriche è affidato unicamente a categorie di giudizio estetiche, introspettive — quali coerenza, bellezza, economia, completezza... e così via. Tali categorie hanno da sempre avuto un peso, naturalmente, anche nella fisica galileiana: ma in armonico equilibrio con l'evidenza sperimentale. Ora giocano invece un ruolo assoluto, e questa è una novità (o se vogliamo, è piuttosto un ricorso storico, una riproposta del modo con cui si argomentava di *filosofia naturale* in epoca pre-galileiana). Una siffatta situazione non è frutto di scelta volontaria, naturalmente, ma è oggettivamente imposta dalla indisponibilità del riferimento sperimentale nell'ambito delle tematiche prescelte. Tutto ciò è comunque fonte di palese disagio nella comunità delle alte energie: la quale è conseguentemente alla ricerca incessante di qualsiasi indizio — nella fisica di laboratorio come in astrofisica — dal quale possa trarsi anche solo lontana e indiretta conferma alle nuove elaborazioni teoriche.

Di seguito ricorderemo brevemente alcuni fra tali filoni di indagine, cui l'attribuzione di stimmate *non-galileiane* più o meno palesemente si attaglia. Un aspetto che dette aree di studio hanno in comune (e che certamente mette in difficoltà ogni osservatore interessato che non sia egli stesso uno specialista in materia) è la grande complessità e difficoltà del discorso matematico che viene proposto sin dall'inizio — al punto che riesce difficile, in linguaggio piano, anche solo delineare gli scopi che tali ricerche si propongono. È pertanto reale il rischio che

[2] A mo' di postilla scherzosa — con un piccolo gioco di parole — di tale permissivo atteggiamento si potrebbe asserire che, nel contesto in oggetto, l'adesione al *credo* galileiano abbia effettivamente comportato la proclamazione di un vero e proprio *atto di fede*: fede che prima o poi, attraverso futuri sviluppi, il denunciato vuoto argomentativo possa essere adeguatamente colmato!

quanto è qui di seguito esposto appaia solo come un arido elenco di termini, il cui vero significato non riesce ad emergere. Se ciò dovesse accadere, ne chiediamo anticipatamente scusa al lettore.

Nel dar corso alla nostra rassegna, ricordiamo innanzitutto come il successo conseguito dall'unificazione delle interazioni *debole* ed *elettromagnetica* abbia comprensibilmente suscitato il desiderio di far rientrare nella partita dell'unificazione anche l'interazione *forte*. Tale disegno — volto a costruire quella che è stata chiamata *teoria della grande unificazione* — si è rivelato non scevro di difficoltà. Ci si è accorti che una maggiore simmetria tra bosoni e fermioni avrebbe verosimilmente facilitato le cose. Si è pertanto introdotta, nelle elaborazioni teoriche, la proprietà cosiddetta di *supersimmetria*, secondo la quale esisterebbero partner supersimmetrici — peraltro sinora mai osservati sperimentalmente — di ciascuna particella fondamentale: ad ogni bosone noto essendo associato un nuovo fermione, e ad ogni fermione noto essendo associato un nuovo bosone. In tale cornice è stato possibile realizzare un certo progresso: ma nell'insieme il problema della grande unificazione non ha tuttora trovato una soluzione chiara e definitiva.

Ancora, sempre in omaggio al mito dell'unificazione — una sorta di Santo Graal della fisica contemporanea — ci si è ardimentosamente accinti alla sfida di ricondurre anche la forza gravitazionale entro un unico disegno generale comprendente tutti i tipi di interazione. Tale importante obbiettivo di indagine teorica, ambito ed elusivo, è stato battezzato *teoria della superunificazione*. L'ipotesi di supersimmetria precedentemente introdotta è stata riproposta anche in questo nuovo contesto. In particolare è stata elaborata una descrizione supersimmetrica dell'interazione gravitazionale — denominata *supergravità* — che prevede l'esistenza, a fianco del *gravitone* (bosone di spin 2), di una nuova particella detta *gravitino* (fermione di spin 3/2). Anche in tale quadro di maggior simmetria, tuttavia, ci si è visti costretti alla fine a gettare la spugna di fronte ad un ostacolo apparentemente insormontabile: ovvero la manifesta inidoneità delle tecniche di rinormalizzazione ad operare nel contesto gravitazionale. Tale circostanza ha di fatto mortificato la speranza di poter conseguire l'obbiettivo della superunificazione per questa via.

Si è reso pertanto necessario, con un pizzico di umiltà, fare un passo indietro, temporaneamente cassando dai nostri obiettivi la meta ardita della superunificazione, e concentrandoci invece sul traguardo preliminare di conciliare tra loro meccanica quantistica e relatività generale. Poiché le divergenze incontrate nei calcoli gravitazionali appaiono essere conseguenza diretta dell'uso di approcci asintotico-perturbativi, ci si è risolti ad introdurre il più difficile, ma più fondamentale — e sperabilmente scevro appunto da divergenze — *approccio quantistico non perturbativo alla gravità*. Il problema è stato abbordato da angolazioni diverse, ma in ogni caso si sono sempre dovute fronteggiare difficoltà matematiche imponenti. Ciononostante si è persistito con tenacia, e sono stati conseguiti progressi interessanti — in particolare attraverso il filone di indagine denominato *loop quantum gravity*. Specificamente, quest'ultima linea di investigazione teorica si avvale di un'impostazione dei calcoli non perturbativa già utilizzata con successo nel contesto della *quantocromodinamica su reticolo* (disciplina già ricordata nella precedente sezione) e basata sulla considerazione di particolari strutture denominate *loops* — da cui appunto il nome di *loop quantum gravity* attribuito a tale indirizzo.

C'è stato peraltro chi ha affrontato le problematiche sopra delineate in modo completamente diverso (vorremmo dire rivoluzionario) rispetto alla tradizione consolidata della *teoria quantistica dei campi* — gli assunti di base di quest'ultima essendo di fatto recepiti *in toto* nell'ambito delle ricerche che abbiamo sinora elencate. Ci riferiamo qui alla cosiddetta *teoria delle stringhe*. Tale teoria ha avuto negli ultimi decenni un posto di assoluto rilievo nella letteratura scientifica — e per la sua originalità ha evocato echi inusitati anche nel grande circuito mediatico. Vale pertanto la pena di soffermarci brevemente sulla sua storia. Il tutto nacque quando, negli anni '60, nuove macchine acceleratrici produssero una copiosa messe di risultati, rivelando tutta una serie di particelle e risonanze in precedenza sconosciute. In uno dei vari tentativi empirici posti in atto per portare un po' di ordine in tale cospicuo materiale sperimentale, fu elaborata una espressione matematica che appariva in grado di riprodurre con una certa efficacia le ampiezze di probabilità misurate in tutta una gamma di eventi collisionali. Al momento non fu attribuita un'importanza particolare a tale risultato, giustamente ravvisato come del tutto empirico. Peraltro l'interesse attorno ad esso si riaccese alcuni

anni più tardi quando fu segnalato (quasi simultaneamente da più parti) che la stessa espressione matematica appariva fornire altresì una descrizione corretta delle ampiezze di probabilità relative a collisioni tra ipotetiche entità non più puntiformi (zerodimensionali) bensì unidimensionali: le cosiddette *stringhe* (dal termine inglese *strings*, utilizzato nel significato di "corde vibranti"). Dette stringhe — dotate internamente di tensione meccanica e di una distribuzione di massa-energia — venivano ipotizzate assumere distinti stati quantistici di vibrazione: come conseguenza dei quali si deducevano per esse dinamiche collisionali diverse, le quali apparivano riprodurre efficacemente le caratteristiche di una gamma di eventi interattivi — tutti di origine bosonica — effettivamente osservati.

Si affacciava pertanto la possibilità di interpretare il variegato zoo dei bosoni presenti in natura come procedente da un'unica entità fondamentale — la stringa — posta in stati vibrazionali distinti. L'interesse per siffatta ipotesi dilagò rapidamente. C'era, è vero, una seria difficoltà, legata al numero di dimensioni spazio-temporali richieste: condizioni di consistenza interna imponevano infatti che le stringhe venissero allogate in un cronotopo avente un numero di dimensioni ben maggiore delle quattro a noi familiari: per l'esattezza, le dimensioni del cronotopo dovevano essere in numero di 26. Detta difficoltà fu superata ipotizzando che le dimensioni spaziali eccedenti fossero *compattificate*, cioè arrotolate, arricciate su sé stesse, così da non poter essere percepite su scale di distanza grandi rispetto alla lunghezza di arricciamento. Cinetica e dinamica quantistiche delle *stringhe* furono esplorate approfonditamente, con uno sforzo matematico innovativo non indifferente. Non tutto andava per il verso giusto, tuttavia: tra gli stati vibrazionali calcolati, alcuni apparivano rappresentare particelle dalle proprietà implausibili — come tachioni, o bosoni di spin 2. La previsione dell'esistenza di tachioni, certo, lasciava alquanto perplessi... Peraltro, un bosone di spin 2 (e massa zero) poteva forse essere implausibile nel mondo delle interazioni forti, ma era proprio quanto richiesto, guarda caso, per la rappresentazione del gravitone! Questa illuminazione — manifestatasi proprio nel momento in cui altrove veniva gettata definitivamente la spugna, come sopra ricordato, nella travagliata vicenda della rinormalizzazione dell'interazione gravitazionale — determinò uno sviluppo travolgente della teoria delle stringhe, accolta con entusiasmo come possibile teoria unificante di tutte le forze fondamentali esistenti in natura, gravità compresa.

Come è stato sopra indicato, in una sua prima fase la teoria delle stringhe è stata una teoria per soli bosoni. Sarebbe stato bello poter riconoscere e descrivere come stati vibrazionali delle stringhe anche i fermioni. Ciò fu in effetti reso possibile celebrando il matrimonio della teoria delle stringhe con la precedentemente ricordata ipotesi di supersimmetria: da questo connubio nacque la cosiddetta teoria delle *superstringhe*. In tale nuova cornice vennero superate alcune anomalie che si erano in precedenza manifestate (ad esempio, la ricordata presenza di tachioni nel novero delle particelle pronosticate). Contemporaneamente, il numero delle dimensioni globali richieste per il cronotopo venne ridotto da 26 a 10. Per la teoria delle superstringhe si manifestò presto un periodo di grande popolarità. Fiorì una letteratura scientifica ricca di importanti lavori, che aprì orizzonti e prospettive sempre più affascinanti. L'entusiasmo crebbe a tal punto che fra i cultori più ottimisti di detta disciplina si diffuse il convincimento (o quanto meno la speranza) che dall'*humus* fecondo della teoria delle superstringhe potesse emergere, un giorno, la possibile, auspicata teoria fisica definitiva: la cosiddetta *TOE* (*Theory Of Everything*).

Peraltro, la teoria delle superstringhe rimane a tutt'oggi più un'insieme di fascinose, elaborate promesse che una realtà concreta. Negli oltre quattro lustri della sua esistenza si sono moltiplicate le sue varianti. Alle stringhe si sono aggiunti altri oggetti vibranti fondamentali, quali le *membrane* (oggetti vibranti bidimensionali), e più in generale le *p-brane* (oggetti vibranti p-dimensionali). La teoria delle superstringhe vibranti in un cronotopo a 10 dimensioni si è evoluta in una teoria di membrane vibranti in un cronotopo a 11 dimensioni, la cosiddetta *Teoria-M*. La procedura già ricordata della *compattificazione* si è frammentata in misura inverosimile, dando luogo ad una moltitudine sterminata di possibilità, tra le quali è assolutamente arduo orientarsi [3]. Si è allora pensato ad una via di uscita (dal problema delle dimensioni

[3] Vedi anche il commento a fine sezione, con annesso rimando al riquadro.

... Quante sono le varianti della teoria che emergono dalla procedura di compattificazione (a ciascuna variante essendo collegato un diverso tipo di universo, un universo cioè corredato da una diversa fisica)? Diciamo, un numero dell'ordine di 10^{300} (*sic!*) Sono troppe? Bene, allora occorre escogitare un efficace "setaccio" che consenta di selezionarne un numero congruo — o meglio ancora, che ci consenta di approdare ad una sola teoria, all'unica "vera". Per esempio, un setaccio di natura interna, basato sulla validità delle scelte matematiche compiute nella definizione delle diverse varianti... No, non si può: sul piano logico-matematico tutte le varianti teoriche sono equipollenti, e tutti gli universi che esse predicono sono egualmente validi. Bene, pensiamo allora ad un setaccio di natura esterna, basato sulla corrispondenza coi risultati sperimentali... No, neanche così si può: se pure avessimo a disposizione intere biblioteche di dati sperimentali, assemblate magari in centinaia di anni di ricerca, esisterebbe sempre comunque un numero straordinariamente grande di teorie che, nei limiti dell'errore sperimentale, renderebbero tutte egualmente conto del materiale sperimentale raccolto... Bene, allora dobbiamo tenerci tutte quante le nostre teorie... Anzi, possiamo compiere un audace balzo concettuale: ipotizzare cioè che tutto ciò che può esistere, *esista realmente*. Questo significa ammettere che siano simultaneamnente in esistenza dell'ordine di 10^{300} universi (anzi di più, se accettiamo la presenza di repliche identiche) a costituire nel loro insieme il cosiddetto *megaverso*. E quale sarebbe la distribuzione dei vari universi nel megaverso? Sarebbero tutti presenti nello stesso numero di repliche? No, gli universi più *validi* sarebbero più numerosi... Rieccoci al punto: ma non s'era detto che era impossibile introdurre un criterio di merito tra le teorie (e quindi tra gli universi da esse originati)? Be', si potrebbe sempre pensare ad una selezione evolutiva di tipo darwiniano... funzionerebbe così: gli universi non nascerebbero a caso, bensì verrebbero procreati a partire dalle singolarità che allignano nei *buchi neri*: in tale processo di generazione, ciascun buco-nero-madre trasferirebbe agli universi-figli il proprio corredo genetico — cioè la propria fisica — cosicché le fisiche più diffuse nel megaverso sarebbero quelle corrispondenti agli universi nei quali il tasso di produzione dei buchi neri fosse massimizzato...

E via dicendo...

in eccesso) che fosse alternativa alla compattificazione: la cosiddetta *braneworld theory*. In tale teoria viene ipotizzato che parte della fisica — precisamente quella afferente, nei limiti appropriati, ai contenuti del modello standard — sia vincolata a svilupparsi esclusivamente all'interno di una varietà quadridimensionale (denominata perlappunto *brane*, e corrispondente al mondo da noi percepito) immersa in un cronotopo di base che è invece decadimensionale. All'esterno di detta *brane* sarebbe permessa la propagazione del solo campo gravitazionale (o, alternativamente, di un connubio di questo con *nuovi* campi, concepiti *ad hoc* per le esigenze della proponenda teoria).

In ogni caso — per quest'ultimo capitolo della teoria delle superstringhe come per i precedenti — strade inedite appaiono essere state imboccate (in linea di principio ricche di affascinanti possibilità e preconitrici di grandiosi sviluppi) senza che peraltro alcuna di esse sia stata persuasivamente percorsa sino alla fine. Per di più, il tutto essendo sviluppato nella segregazione di un pressoché assoluto, gravoso isolamento dal dettato sperimentale.

Ora, quanto è stato sin qui illustrato — sebbene, senza alcun dubbio, sia già di per sé alquanto stupefacente — riverbera tuttavia ancora solo una pallida effigie delle audacie immaginifiche alle quali può accadere di essere esposti oggidì in congressi e convegni. A testimonianza di ciò, nel riquadro qui sopra riportiamo un breve florilegio di asserzioni, rappresentative di ciò che può oggi effettivamente udirsi in vari teatri di discussione.

3. – ...e non : universi discreti

Dall'atomismo di Democrito alle monadi leibniziane, l'idea che nei suoi recessi più intimi il mondo che ci circonda possa albergare una struttura discreta è stata più volte autorevol-

mente formulata nella storia del pensiero umano. A partire dal secolo XVIII, tuttavia, il grande successo arriso alle applicazioni fisiche e tecnologiche del calcolo infinitesimale — strumento di natura squisitamente continua — ha determinato un rafforzamento in noi della convinzione che l'universo sia costruito sulla continuità. Ne è derivato lo sviluppo di una fisica fondamentalmente continua: e neppure l'evidenza incontestabile di una realtà almeno *parzialmente* discreta quale è andata emergendo dall'esplorarazione del mondo microscopico — e quale è stata recepita nello spirito della meccanica quantistica — ha di fatto scosso la fede dei fisici in una continuità strutturale di base dell'universo. Emblematica di tale atteggiamento è la *teoria quantistica dei campi*, nella quale viene eletto il concetto stesso di *campo continuo* a mattone fondamentale della corrispondente visione ontologica dell'universo.

Proprio in conseguenza di quest'ultima teoria, tuttavia, verso la fine degli anni '30 si manifestò una crisi sofferta. Il proliferare di divergenze indesiderate in praticamente tutti i calcoli affrontati nel contesto della nascente disciplina indusse infatti per qualche tempo la comunità dei fisici a chiedersi seriamente se non fosse il caso di abbandonare i modelli matematici correnti e riformulare il tutto su basi discrete. Poi, come è noto, nei primi anni '40 furono escogitate le procedure di rinormalizzazione, e il loro successo rafforzò nuovamente i fisici nel loro credo continuo...

... Pur di non abiurare il quale si sono di fatto dimostrati propensi ad affrontare le tenzoni più temerarie: quali appunto quelle evocate nella precedente sezione!

Noi fisici dunque non sembriamo amare gli universi discreti. C'è una giustificazione a ciò, se vogliamo. Per l'addestramento che abbiamo ricevuto, il calcolo infinitesimale coi suoi algoritmi continui si è profondamente sedimentato nel nostro DNA. È oggettivamente difficile rinunciarvi, e ricondizionarci a speculare in termini di algoritmi discreti. Ne rende testimonianza il fatto che i (pochi) proseliti dell'idea di un universo discreto non allignano solitamente nei dipartimenti di fisica, bensì piuttosto in quelli di matematica pura, o di *computer science*. D'altra parte in un mondo di speculazioni virtuali, scollegate da evidenze sperimentali, l'assunzione di un universo *discreto* ha a priori lo stesso diritto di cittadinanza della postulazione di un universo di *loops* o di un universo di *stringhe*. Anzi, sul piano filosofico ha qualche freccia in più al suo arco. Per quanto vediamo attorno a noi, infatti, madre natura sembra gestire i suoi piani con parsimoniosa sagacia. Perché mai dovrebbe rinunciare a questo comportamento proprio nel momento cruciale della scelta tra discreto e continuo? Perché dovrebbe profondere una quantità effettivamente infinita di informazione nella creazione di un universo continuo, qualora la scelta di un universo discreto fosse sufficiente per il raggiungimento dei suoi scopi (quali che essi mai siano)?

Spezzata dunque (filosoficamente) una lancia in favore degli universi discreti, passeremo ora ad illustrare in qualche dettaglio uno degli approcci proposti, che si presenta fra i più interessanti: quello costruito sulla struttura matematica dei cosiddetti *singrammi orientati aciclici* (chiamati anche, alternativamente, *grafi direzionali aciclici*). Abbiamo scelto di dedicare un po' più di spazio a questo argomento, rispetto a quanto mediamente dedicato agli indirizzi di indagine precedentemente commentati, perché i discorsi sugli universi discreti sono relativamente poco noti tra i fisici: e vorremmo dare al lettore una sensazione concreta di ciò che tali discorsi comportano. Inoltre, la relativa semplicità della matematica che viene (almeno inizialmente) messa in gioco ci consente di delineare un quadro sufficientemente perspicuo degli intendimenti perseguiti.

Iniziamo pertanto col richiamare le definizioni di base. Un *singramma* è una struttura matematica composta di *nodi* e *lati* — ciascun lato rappresentando un collegamento tra due nodi. Nei *singrammi orientati* tale collegamento induce una *relazione d'ordine* tra i nodi coinvolti, individuando uno di essi come *antecedente* e l'altro come *conseguente*. Nell'ambito dei singrammi orientati è possibile tracciare delle *traiettorie* procedendo da un nodo all'altro lungo i lati, in accordo con le direzionalità prescritte. Qualora ogni traiettoria definibile, comunque prolungata, non passi mai due volte per lo stesso nodo, il singramma orientato viene definito *aciclico*. Quest'ultima proprietà è importante se la relazione d'ordine che si intende rappresentare è di tipo *causale*: essa consente infatti di evitare inconsistenze e paradossi legati al principio di causalità.

A questo punto si rende necessario porre in relazione la struttura matematica sopra definita

con la realtà fisica: stabilire cioè quali costituenti fisici debbano essere collegarti ai *nodi* e rispettivamente ai *lati* del singramma orientato aciclico che abbiamo testè introdotto. A tal fine sono state prese in considerazione opzioni diverse. In una di queste — forse la più interessante — si può ravvisare un'ispirazione tratta da ciò che nell'ortodossia quantistica è prescritto accadere in un *evento di misura*: in tale opzione viene stipulato infatti che ad ogni *nodo* del singramma sia associato un *evento*, definito come un accadimento nel corso del quale lo stato quantico di un sistema fisico è oggetto di un cambiamento discontinuo e finito. A loro volta, i *lati* del singramma sono dichiarati rappresentare *collegamenti causali* tra eventi, indotti tramite leggi fisiche da formularsi acconciamente. Si noti che al livello fondamentale sin qui contemplato non è definito alcun rapporto di natura spazio-temporale, bensì esistono solo legami causali. Uno spazio-tempo continuo può farsi emergere infatti nella costruenda teoria solo in fase successiva, mediante opportune operazioni di passaggio al limite.

È utile infine completare la caratterizzazione del nostro modello a singramma dell'universo — per il quale possiamo convenientemente introdurre il nome di *singramma cosmologico* — richiedendo ad esso di essere *finito* (ovvero composto da un numero finito di nodi e di lati). Di certo è istanza non peregrina: rammentando il discorso fatto dianzi, una madre natura che apparisse cautelarsi contro le insidie del continuo (cioè dell'infinito "in piccolo"), a maggior ragione dovrebbe avvertire la necessità di cautelarsi contro l'infinito "in grande", l'infinito *tout court*. Se dunque formuliamo la richiesta che il nostro universo sia costituito da un *numero finito* di eventi, alcune importanti conseguenze ne discendono pressocché immediatamente. Seguendo infatti nel nostro singramma cosmologico una traiettoria indirizzata verso il futuro [4], poiché il numero degli eventi è finito e l'asserita aciclicità del percorso ci impedisce di ripassare più volte per lo stesso evento, ad un certo momento saremo costretti a fermarci in corrispondenza di un evento senza ulteriore futuro, un evento *finale*. Analogamente, procedendo lungo una traiettoria indirizzata verso il passato, ad un certo momento saremo costretti a fermarci in corrispondenza di un evento senza ulteriore passato, un evento *iniziale*. È illuminante osservare come — a partire soltanto da alcune semplici definizioni, e senza formulare una sola equazione — sia stato possibile inferire la necessaria esistenza nel nostro universo di almeno un *evento iniziale* (un evento cioè che causa altri eventi, ma che non è a sua volta causato da alcunché) e di almeno un *evento finale* (un evento cioè che è causato da altri eventi, ma che non è a sua volta causa di alcunché). A questo punto, ovviamente, si propone in modo del tutto spontaneo un collegamento fra tali *eventi speciali* (iniziale e finale) del nostro singramma cosmologico e le fenomenologie rispettivamente del *big bang* e del *big crunch* descritte dalla cosmologia. Tale constatazione chiaramente fornisce indicazioni preziose ai fini di far correttamente evolvere dal nostro singramma discreto uno spazio-tempo continuo che sia consistente con le equazioni della relatività generale — e più specificamente con le soluzioni di queste ultime che comportano l'esistenza contemporanea di due singolarità limite (iniziale e finale).

Nei precedenti capoversi abbiamo esposto soltanto alcune semplici riflessioni introduttive riferite al particolare approccio alla discretezza che abbiamo scelto di illustrare. A tali riflessioni deve obbligatoriamente seguire, tuttavia, un impegno di sviluppo che non è certo dei più agevoli. Scrivere relazioni matematiche tra eventi che traducano idonee leggi fisiche, stabilire come venga generato il singramma, fare emergere dal modello discreto (nel limite appropriato) lo spazio-tempo continuo quale da noi percepito, farne altresì emergere tutta la fisica nota (quella cioè descritta dal modello standard e dalla relatività generale)...: sono tutti traguardi ai quali si deve di necessità mirare, ma che nel contesto attuale appaiono ancora lontani dall'essere raggiunti.

Qui possiamo forse interromperci per un momento, al fine di proporre una divagazione di carattere un po' diverso, più *filosofico*. È importante infatti rilevare la differenza profonda che esiste tra la "Weltanschauung" che affiora nell'ultimo esempio discusso, e quelle che erano invece implicite negli approcci precedentemente commentati. Là le componenti ontologiche fondamentali su cui veniva costruita l'interpretazione del mondo erano in ogni caso degli *oggetti*: particelle puntiformi nella meccani-

[4] Dove, qui e nel seguito, i termini "futuro" e "passato" non vengono usati in senso propriamente *temporale*, bensì in senso *causale*.

ca quantistica di base, campi continui nella teoria quantistica dei campi, *loops* nella *loop quantum gravity*, stringhe, membrane e quant'altro nella teoria delle stringhe. Qui le componenti ontologiche di base sono invece puri *accadimenti* — gli oggetti fondamentali delle precedenti interpretazioni essendo utilizzati semplicemente come supporti intuitivi per la descrizione degli accadimenti stessi.

Chiusa la breve parentesi filosofica, possiamo riprendere il filo principale del discorso. È doveroso a questo punto ricordare che — in alternativa al modello sopra illustrato — svariati altri indirizzi di indagine teorica ispirati all'assunto discreto sono presentemente perseguiti. Ad esempio (come già in precedenza accennato) alcuni autori usano la stessa struttura di *singramma orientato aciclico* sopra definita, introducendo tuttavia scelte diverse nella definizione dell'evento fisico corrispondente ad un nodo del singramma. Altri approcci sono invece basati sulla struttura matematica di *insieme causale* (*causal set*, o *causet* per brevità): che è simile alla struttura di singramma orientato aciclico, ma un po' meno flessibile, per la presenza di vincoli addizionali. La minore flessibilità di tale approccio costituisce un ostacolo nella riproduzione di alcune peculiarità della meccanica quantistica (quali, ad esempio, le bizzarrie del *quantum entanglement*): ma con esso in compenso la transizione verso i cronotopi continui della relatività speciale e generale viene resa più agevole e naturale. Infine — per completare la nostra rassegna — è utile ricordare che esistono anche approcci alla discretezza molto diversi da quelli sopra descritti (approcci, di fatto, coltivati di preferenza da proseliti della *computer science*). In taluni di questi indirizzi di indagine, ad esempio, ci si sforza di ravvisare nell'universo l'architettura di un *automa cellulare* — in altri invece, alternativamente, si cercano elementi che possano evidenziare nel creato la configurazione di un *computer digitale*.

Quale che sia l'indirizzo seguito sulla via della discretezza, una conseguenza di rilievo fondamentale è comunque sempre riscontrabile: vale a dire i cronotopi continui che emergono nei limiti appropriati dalle varie teorie mostrano in ogni caso di possedere una "struttura granulare" alle piccole distanze. La lunghezza caratteristica (o lunghezza di *cut-off*) introdotta da tale granularità è di fatto un parametro libero della teoria, di cui abbiamo piena disponibilità. Scelte diverse poste in atto per tale parametro conducono a conseguenze assai diverse. Nelle investigazioni attualmente in corso si procede in proposito con molta cautela. Finché è concesso farlo, si sviluppano le varie argomentazioni rimanendo avulsi da una scelta specifica della lunghezza di cut-off. Quando alla fine, peraltro, si deve venire al dunque, si ipotizza *una lunghezza di cut-off non superiore alla lunghezza di Planck* — la lunghezza cioè in corrispondenza della quale si manifestano i conflitti più fieri tra meccanica quantistica e relatività generale. È bene porre in evidenza come con tale scelta della lunghezza di cut-off sia possibile conseguire il *superamento definitivo di ogni problema di divergenza* — portentosa prerogativa portata perlappunto in dote dall'assunzione di discretezza — senza tuttavia correre il rischio che il ricco patrimonio di conoscenza precedentemente accumulato in anni di investigazioni teoriche condotte su modelli continui debba essere in qualche modo invalidato.

È importante d'altro canto comprendere che se mai invece dovesse introdursi *una lunghezza di cut-off maggiore della lunghezza di Planck* (cosa in principio lecita, e che potrebbe ad esempio essere imposta da futuri risultati sperimentali) ciò sconvolgerebbe di fatto il nostro modo di porci nei confronti di quanto acquisito nelle precedenti investigazioni quantistico-gravitazionali. Dobbiamo infatti tener ben presente come il conflitto tra meccanica quantistica e gravità sia stato senza alcun dubbio il maggiore scoglio che la fisica delle alte energie si sia trovata ad affrontare negli ultimi cinque, sei lustri. Quasi tutta l'attività di ricerca teorica svolta in detto periodo è stata infatti direttamente o indirettamente collegata al tema del conflitto irriducibile esistente tra meccanica quantistica e relatività generale: conflitto che si manifesta a pieno vigore appunto sulla scala della lunghezza di Planck — laddove su scale più estese è solo marginalmente presente. È evidente pertanto che l'introduzione di una lunghezza di *cut-off* maggiore della lunghezza di Planck produrrebbe l'effetto preoccupante di *svuotare completamente di significato* vasti capitoli della ricerca teorica precedentemente vergati. Una conclusione che riuscirebbe piuttosto sgradevole da accettare, senza alcun dubbio, per una gran parte della comunità dei fisici...

... S'è detto dianzi che noi fisici non ameremmo l'idea di un universo discreto: dopo tutto, forse, n'avrem ben donde...!

SCIENZA IN PRIMO PIANO

FISICA MESOSCOPICA CON ETEROSTRUTTURE Si/SiGe

F. Evangelisti e L. Di Gaspare
Dipartimento di Fisica "E. Amaldi"
Università di Roma TRE
via Vasca Navale 84, 00146 Roma, Italy

1. – Introduzione

La recente evoluzione della fisica dei semiconduttori è stata fortemente influenzata dallo sviluppo alla fine degli anni settanta delle tecniche di crescita epitassiale. Queste tecniche permettono di ottenere materiali "ingegnerizzati *ad hoc*", costituiti da sequenze di strati atomici di composizione differente ("eterostrutture") caratterizzati da un'elevatissima perfezione cristallina. In questo modo è possibile variare le bande di energia nella direzione di crescita ed ottenere profili di potenziale per gli elettroni progettati a priori in base alla proprietà fisica da implementare ("ingegneria delle bande"). Utilizzando le "opportune" sequenze di materiali si sono "costruiti" campioni contenenti, ad esempio, gas bidimensionali di elettroni con altissima mobilità nei quali sono stati scoperti l'effetto Hall quantistico sia intero che frazionario, sono stati sviluppare transistori che rispondono a frequenze di centinaia di GHz, sono stati realizzati laser a buca quantica, laser a cascata quantica, diodi tunnel risonante ([1])

Il concomitante sviluppo delle tecnologie di miniaturizzazione e, più in generale, delle nanotecnologie ha permesso la realizzazione di sistemi confinati su scala submicrometrica, il cui studio costituisce uno dei campi di frontiera della ricerca sulla materia condensata. Sempre più spesso i sistemi in studio sono "mesoscopici", vale a dire che le loro dimensioni sono minori delle "lunghezze caratteristiche" (lunghezza d'onda di Fermi, libero cammino medio, lunghezza di coerenza di fase, etc). Il progresso della fisica mesoscopica ha evidenziato una ricca fenomenologia di effetti connessi al trasporto balistico e alla coerenza di fase degli elettroni (quantizzazione della conduttanza, blocco Coulombiano, fenomenologia di Kondo, trasporto risonante e interferenza alla Fano, "*focusing*" magnetico, ecc).

Queste problematiche e i dispositivi innovativi risultanti hanno visto il predominio incontrastato dei semiconduttori III-V, quali GaAs, InP, ecc. e rispettive leghe. Il silicio, che, come ben noto, è il semiconduttore più importante per la microelettronica, ha svolto un ruolo marginale. Due pricipali ragioni possono essere individuate: la bassa efficienza radiativa dovuta al carattere "indiretto" della sua *gap* di energia, che ha rallentato lo sviluppo di una nanofotonica basata sul silicio per mancanza di efficienti sorgenti di luce; l'assenza di altri semiconduttori con lo stesso parametro reticolare del silicio che rende difficile la crescita di eterostrutture di buona qualità cristallina per sviluppare l'"ingegneria delle bande". Mentre il problema dello sviluppo di sorgenti basate sul silicio non è ancora risolto (importanti progressi sono stati tuttavia ottenuti negli ultimi anni!), la situazione si sta rapidamente evolvendo per quanto riguarda il secondo punto, grazie ai progressi nella comprensione e nella crescita di eterostrutture basate su reticoli cristallini con differente parametro reticolare. In particolare le eterostrutture ottenute crescendo su Si strati di Ge o di lega SiGe[1] sono state studiate in grande dettaglio. È attualmente possibile ottenere eterostrutture con profili di composizione la cui variazione sia sufficientemente ampia da implementare un'efficace "ingegneria delle bande". È quindi stato possibile realizzare anche su silicio gas bidimensionali di elettroni ad alta mobilità e diodi tunnel risonante. In quest'ultimo caso l'evoluzione delle tecniche di

[1] Si e Ge sono miscibili in ogni proporzione

crescita epitassiale e di microfabbricazione ha permesso la realizzazione di dispositivi operanti a temperatura ambiente ed il raggiungimento di prestazioni del tutto paragonabili a quelle ottenute utilizzando tecnologia basata su semiconduttori III-V([2]).

In questo articolo si illustreranno brevemente alcuni aspetti di fisica mesoscopica su eterostrutture di Si/SiGe.

2. – Eterostrutture e gas bidimensionali di elettroni

Se si vuole crescere una eterostruttura epitassiale (vale a dire coerente) fra semiconduttori con diverso parametro reticolare, come nel caso di Si e Ge, è necessario considerare cosa accade all'interfaccia fra i due reticoli cristallini. Il disaccordo reticolare fra Si e Ge puri, entrambi cristalli con la struttura del diamante, è del 4.2%. Questo valore, dovuto alla differenza fra il lato della cella del silicio e quella del Ge, pari rispettivamente a $a_{\mathrm{Si}} = 5.43$ Å e $a_{\mathrm{Ge}} = 5.66$ Å, è piuttosto elevato. In una lega di SiGe possiamo immaginare che il parametro reticolare vari linearmente con il contenuto di Ge fra quello della cella del Si e quello della cella del Ge: in corrispondenza anche il disaccordo reticolare fra un film di SiGe e un substrato di Si aumenterà linearmente, fino il valore massimo previsto per i materiali puri.

Come conseguenza della presenza di disaccordo reticolare, la crescita di una generica lega SiGe, avente un contenuto di Ge diverso da quello del substrato può avvenire con due diverse modalità. Nella prima, la cosiddetta crescita pseudomorfa o coerente, lo strato cresciuto, epistrato, si accorda perfettamente nel piano di crescita al parametro reticolare del substrato, mediante una deformazione tensile o compressiva, come schematizzato nella fig. 1(a). Nella seconda modalità (fig. 1(b)) invece questa deformazione non si produce e lo strato cresce con il suo parametro reticolare naturale: la crescita si dice allora rilassata. All'interfaccia fra i due diversi materiali si formano un numero rilevante di difetti, di solito dislocazioni, che si propagano nell'eterostruttura, limitandone l'utilizzabilità nella costruzione di dispositivi per l'elettronica.

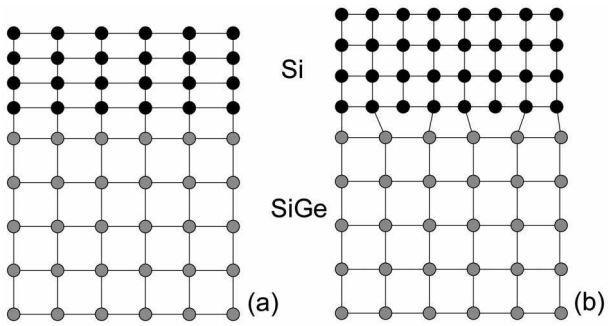


Fig. 1(a). – Schema di crescita pseudomorfa di Si su SiGe. La cella del Si subisce una deformazione tensile nel piano per adattarsi al parametro reticolare più grande del SiGe, contemporaneamente si accorcia nella direzione perpendicolare. (b) Schema di crescita rilassata. La cella del Si non subisce deformazione e si creano difetti per accomodare il "disaccordo" reticolare.

Nella crescita pseudomorfa, per compensare l'aumento (o riduzione) del parametro reticolare dell'epistrato nel piano di crescita, il parametro reticolare diminuisce (o aumenta) nella direzione perpendicolare e il reticolo viene ad assumere una deformazione tetragonale, la cui entità è determinata dalle proprietà elastiche del materiale. La distorsione è accompagnata da un accumulo di energia elastica nell'epistrato che aumenta linearmente con il suo spessore. Questo meccanismo di accumulo si mantiene durante la crescita fintanto che lo spessore del film depositato rimane inferiore ad un valore critico, superato il quale diventa energeticamente più favorevole per lo strato cresciuto rilassare la deformazione cristallina introducendo dislocazioni, e continuare a crescere in modo rilassato, cioè organizzandosi nel suo reticolo cristallino cubico naturale.

La distorsione del reticolo cristallino si riflette sulle proprietà elettroniche del materiale, inducendo dei cambiamenti nella struttura a bande degli strati depositati, e modificando il valore dell'energia di *gap*. Questa caratteristica, opportunamente controllata in fase di progettazione e crescita della eterostruttura, costituisce un grado di libertà addizionale nella ingegneria delle bande.

Nella fig. 2 possiamo osservare l'andamento della energia di *gap* di uno strato pseudomorfo di SiGe depositato su Si al variare del contenuto di Ge, in confronto con i valori della *gap* in una lega di analogo contenuto ma rilassata. All'aumentare del contenuto di Ge il valore della *gap* di energia si discosta sempre più dal corrispondente valore osservato nella lega in cui la deformazione è assente. Oltre alla forte diminuzione del valore della *gap*, anche la topologia delle bande del materiale pseudomorfo viene alterata, con modalità che dipendono dal tipo di deformazione reticolare (tensile o compressi-

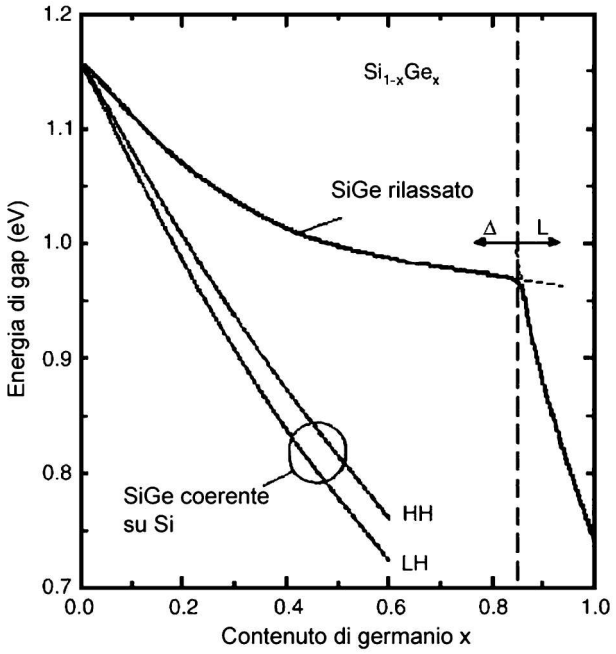


Fig. 2. – Andamento dell'energia della *gap* proibita in funzione della concentrazione di Ge nel caso di reticolo rilassato e di reticolo deformato coerentemente. HH e LH denotano, rispettivamente, lacune pesanti e lacune leggere, la cui degenerazione è rimossa dalla deformazione.

va). Queste variazioni hanno una forte influenza sulle proprietà di trasporto (ad es. può cambiare il minimo assoluto della banda di conduzione e quindi la massa efficace dei portatori) e possono essere opportunamente sfruttate nella progettazione di dispositivi innovativi.

Nell'ambito della fisica mesoscopica e delle proprietà di trasporto riveste grande importanza la realizzazione di campioni contenenti gas bidimensionali di elettroni (2DEG: *two-dimensional electron gas*) di alta mobilità, vale a dire, con grande cammino libero medio. Il 2DEG si ottiene intrappolando gli elettroni in una buca di potenziale unidimensionale. Nel caso del Si/SiGe la buca di potenziale si ottiene depositando un sottile strato pseudomorfo di Si fra due strati di lega di SiGe rilassata (contenuto di Ge indicativamente dell'ordine del 20–30%.). La sequenza di strati e il profilo della banda di conduzione lungo la direzione di crescita della eterostruttura sono illustrati nella fig. 3. L'esistenza della buca quantica per il confinamento richiede che lo strato di Si che ospita il gas di elettroni sia pseudomorfo e quindi con il reticolo deformato. Lo spessore critico del Si coerente cresciuto su SiGe è dell'ordine di pochi nanometri. La scala nanometrica degli spessori in gioco ben mostra come il canale di Si si possa schematizzare come un sistema bidimensionale, in cui gli elettroni, confinati lungo la direzione di crescita della eterostruttura dai profili di potenziale *ad hoc* della ingegneria di banda, siano liberi di muoversi nel piano di crescita.

L'alta mobilità dei portatori si ottiene utilizzando la tecnica di modulazione del drogaggio, il cui risultato è di separare spazialmente gli elettroni dalle cariche ionizzate fisse. In questo modo viene ridotto lo *scattering* coulombiano che, a basse temperature, è il maggior fattore limitante la mobilità degli elettroni. Per far ciò si deposita il drogante, di tipo n, in uno strato rilassato di SiGe separato spazialmente dal canale pseudomorfo di Si. Gli elettroni dei livelli donori vengono ad avere un'energia più elevata dei livelli della buca quantica e possono quindi trasferirsi nella buca quantica stessa. Ne risulta una sostanziale riduzione dell'interazione tra i donori ionizzati e gli elettroni del gas. Il continuo miglioramento delle tecniche di deposizione di eterostrutture con disaccordo reticolare e

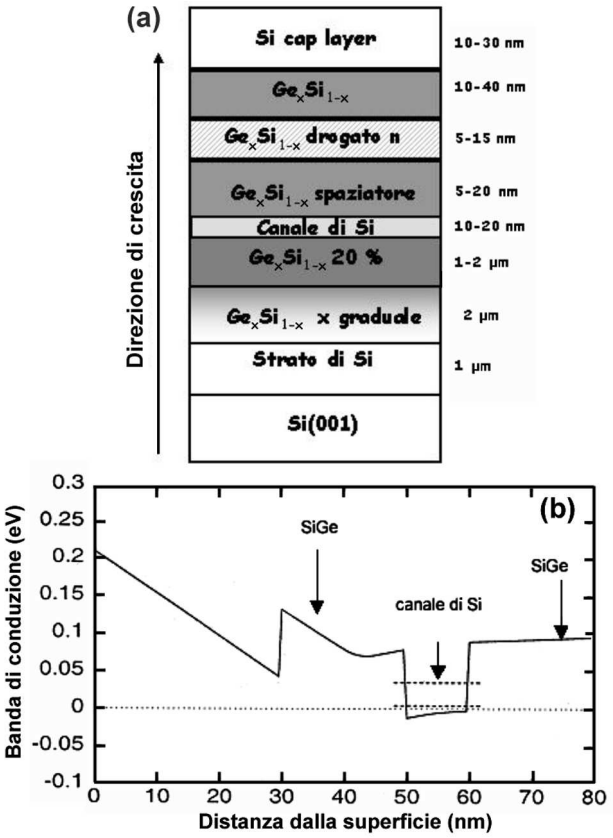


Fig. 3. – (a) Tipica sequenza di strati e spessori per ottenere un gas bidimensionale di elettroni di alta mobilità. (b) Andamento tipico del minimo della banda di conduzione in funzione della distanza dalla superficie. Sono evidenziati due livelli localizzati nel canale di Si. La linea a punti denota il livello di Fermi.

quindi delle loro proprietà cristalline insieme all'uso della tecnica di modulazione del drogaggio hanno permesso di ottenere mobilità eletroniche a bassa temperature dell'ordine di $2\text{–}5\times10^5$ $cm^2V^-s^{-1}$, a cui corrisponde un libero cammino medio maggiore del micron. Benché questi valori siano ancora notevolmente inferiori a quelli dei 2DEG di GaAs, essi sono tuttavia sufficientemente elevati da permettere l'osservazione dei fenomeni tipici della fisica mesoscopica anche sul "sistema silicio".

3. – Trasporto balistico

Quando le dimensioni del conduttore diventano minori del libero cammino medio i portatori possono attraversarlo senza subire urti: il trasporto diventa "balistico". La manifestazione certamente più eclatante del trasporto balistico in un sistema unidimensionale è rappresentata dalla quantizzazione della conduttanza in unità $G_0 = 2e^2/h$, valida per un gas di elettroni non interagenti([3]). Il fattore 2 deriva dalla degenerazione di spin. La quantizzazione è dovuta alla "topologia" della conduzione di un sistema unidimensionale: se la relazione di dispersione energia-momento è unidimensionale, la variazione di velocità dei portatori dovuta al campo accelerante è esattamente bilanciata dalla variazione di densità degli stati. Indicando con N il numero di bande unidimensionali che incrociano il livello di Fermi, si ha per la conduttanza $G = N(2e^2/h) = NG_0$.

Dal punto di vista sperimentale la quantizzazione della conduttanza si osserva in campioni contenenti gas bidimensionali di elettroni di alta mobilità in cui vengono delimitate, mediante nanolitografia elettronica, regioni di lunghezza minore del libero cammino medio e di larghezza confrontabili o minori della lunghezza d'onda di Fermi. Queste "costrizioni" fungono da conduttore unidimensionale. La tecnica realizzativa più semplice consiste nel depositare due *gate* metallici separati da una *gap* nanometrica (*split-gate*), come mostrato schematicamente in fig. 4(a). Una polarizzazione negativa sufficientemente elevata espelle il gas elettronico al disotto del metallo. Solo la regione di *gap* rimane popolata e si comporta da conduttore unidimensionale balistico (QPC: *quantum point contact*). Al crescere della tensione applicata allo *split-gate* diminuisce la larghezza del *quantum point contact*, aumenta la spaziatura

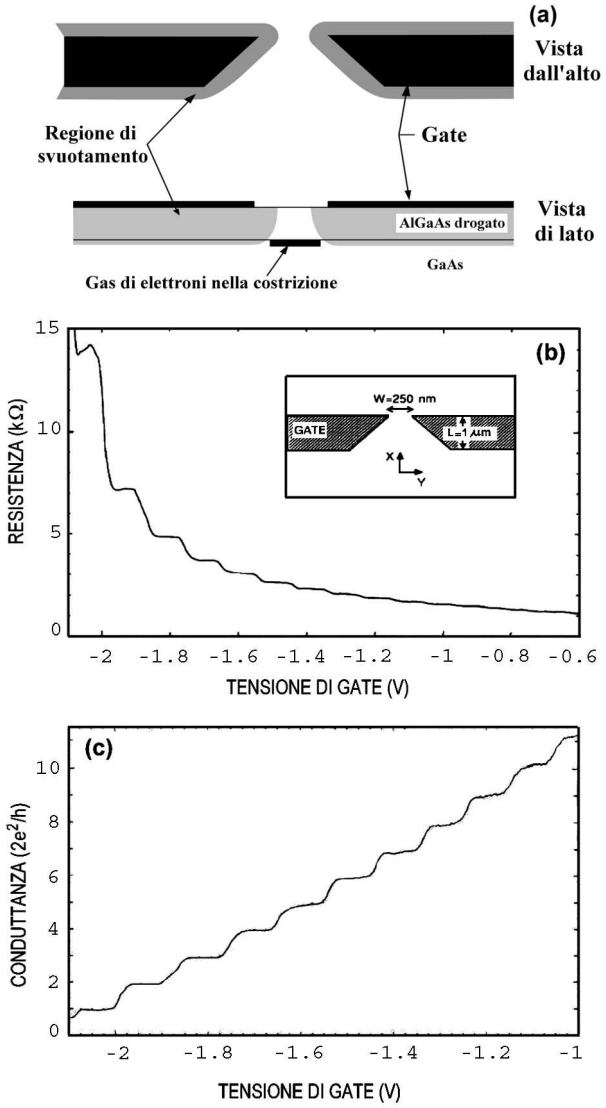


Fig. 4. – (a) Schema di "costrizione" creata da uno *split-gate*. (b) Andamento della resistenza in funzione della tensione di *gate*. (c) Andamento della conduttanza in unità $2e^2/h$ in funzione della tensione di gate. Le figure (b) e (c) sono i dati originali riportati in ref. [3].

delle bande unidimensionali e conseguentemente diminuisce N. La conduttance in funzione della tensione di gate ha l'andamento a gradino riportato in fig. 4.

Più di recente, sono state osservate deviazioni dalla relazione $G = N(2e^2/h)$, che hanno suscitato un notevole interesse in quanto possibili evidenze di non trascurabili effetti di correlazione elettronica presenti in sistemi confinati sulla nanoscala. In particolare, è stato studiato in grande dettaglio un gradino a $G \sim 0{,}7\ G_0$, riportata per la prima volta in ref. ([4]), perché una quantizzazione minore di $(2e^2/h)$ potrebbe implicare la rimozione della degenerazione di spin, responsabile per il fattore 2 nell'espressione per

elettroni non interagenti e la dipendenza esplicita dallo spin delle proprietà di trasporto. L'effetto che porterebbe alla rimozione della degenerazione non è ancora chiaro, nonostante numerosi lavori teorici dedicati all'argomento. Un modello attribuisce l'effetto alla polarizzazione spontanea degli spin nel QPC come conseguenza dell'interazione di scambio. Un secondo modello presuppone l'effetto Kondo. Altri modelli teorici propongono l'interazione elettrone-fonone come origine del fenomeno. Altri ancora invocano la cristallizzazione di Wigner.

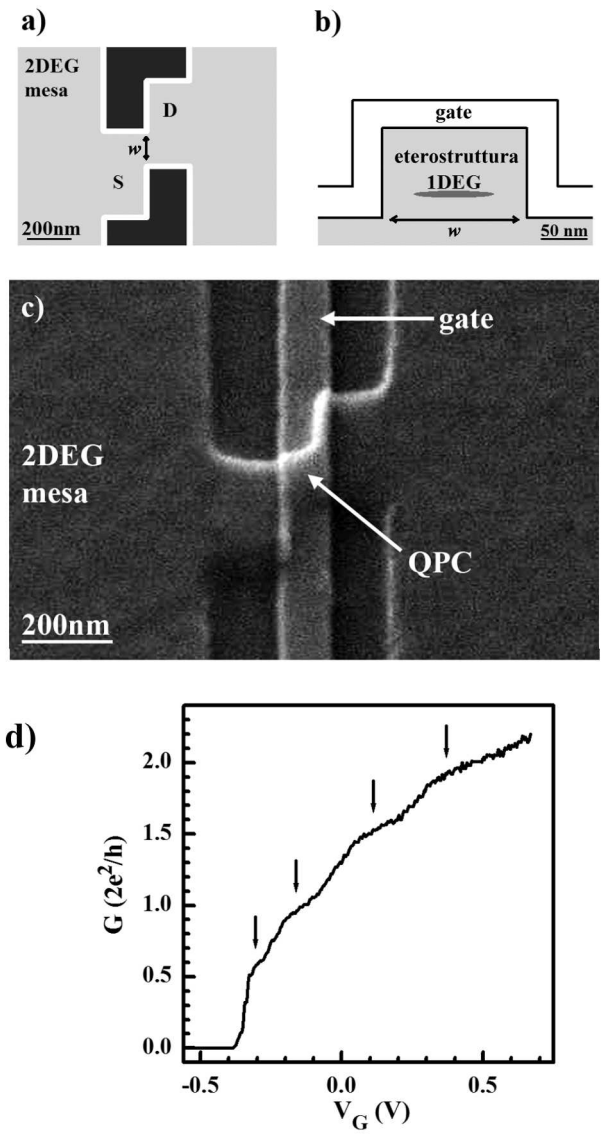


Fig. 5. – (a) Schema di costrizione di larghezza *w*, vista dall'alto La parte scura denota la regione asportata mediante litografia elettronica ed attacco reattivo. S e D indicano le regioni che fungono da contatti di *source* e *drain* per il QPC. (b) Schema della costrizione e del *gate*, visti lateralmente. 1DEG denota il gas di elettroni unidimensionale. (c) Foto di un dispositivo realizzato, ottenuta con microscopio elettronico a scansione. (d) Conduttanza in funzione della tensione di *gate*, misurata alla temperatura di 0.3 K.

Mentre nel caso di campioni realizzati con eterostrutture GaAlAs/GaAs la fenomenologia sperimentale è comunque abbastanza univoca, nel caso di studi a partire da eterostrutture SiGe/Si la situazione è alquanto più complessa anche a livello di evidenze sperimentali. Per elettroni non interagenti ci si apetta una quantizzazione in multipli di $4e^2/h$, poiché, oltre alla degenerazione di spin, è presente un'ulteriore degenerazione 2, dovuta ai minimi equivalenti della banda di conduzione nella direzione di crescita. In effetti, una quantizzazione della conduttanza in multipli di $4e^2/h$ è stata osservata in QPC ottenuti con la tecnica degli *split-gate* su strati di inversione di Si([5]) e su 2DEG di Si/SiGe([6]) e su costrizioni introdotte sul 2DEG di Si/SiGe rimuovendo il materiale mediante litografia ed *etching*([7]). Viceversa, in strutture di tipo verticale, in cui la corrente fluisce lungo la direzione di crescita e il QPC è generato da una costrizione circolare, la quantizzazione osservata è in multipli di $2e^2/h$([8]).

Recentemente il nostro gruppo ha ottenuto evidenza di completa rimozione di degenerazione in QPC del tipo illustrato in fig. 5([9]). Due fattori possono concorrere alla completa rimozione della degenerazione di valle e di spin: la presenza di un forte potenziale di confinamento dovuto alle "pareti" generate asportando il materiale e la sua asimmetria di posizionamento rispetto alle regioni rettangolari che fungono da contatti di *source* e *drain*. Benché per identificare con certezza l'origine dell'effetto sia necessaria dell'ulteriore sperimentazione, la dimostrazione di una dipendenza dallo spin delle proprietà di trasporto apre delle prospettive estremamente interessanti. Infatti, uno degli sviluppi più recenti della fisica mesoscopica e delle nanotecnologie è rappresentato dalla "spintronica", definibile come quel settore di conoscenza sviluppato con il fine ultimo di utilizzare lo spin dell'elettrone per trasportare, immagazzinare e manipolare le informazioni. Una chiara dipendenza della conduttanza dallo spin permetterebbe lo sviluppo di una "spintronica" del silicio, che potrebbe avere un impatto rilevante sulla futura nanoelettronica.

4. – Dispositivi a singolo elettrone e cavità

La tendenza alla miniaturizzazione dei componenti elettronici ha portato gli attuali dispo-

sitivi ad avere dimensioni talmente ridotte, che per mantenere l'attuale *trend* di riduzione (legge di Moore) le prossime generazioni di dispositivi dovranno avere dimensioni di poche decine di nanometri e saranno di conseguenza governati dai fenomeni studiati nell'ambito della fisica mesoscopica. Nuovi fenomeni, quali il "bloccaggio Coulombiano", la quantizzazione della conduttanza, il trasporto balistico, gli effetti dovuti all'interferenza di fase delle funzioni d'onda elettroniche, influenzeranno in modo determinante il funzionamento dei nanodispositivi. Basandosi su questi effetti, sono stati proposti e realizzati svariati dispositivi innovativi, fra questi i dispositivi a singolo elettrone (SED: *single electron devices*), grazie alle loro proprietà di bassissima dissipazione ed alta funzionalità, hanno attratto un forte interesse nell'industria microelettronica e sono candidati per i futuri circuiti elettronici ad elevatissima integrazione.

Per dispositivo a singolo elettrone si intende comunemente un dispositivo basato sul "bloccaggio Coulombiano", in cui una "isola" di dimensioni nanometriche è separata dalle regioni di "*source*" e "*drain*" da due barriere attraversabili per effetto tunnel (si veda fig. 6(a)). Nel caso di un'isola metallica l'aggiunta di un elettrone ha una soglia energetica pari all'energia necessaria per superare la repulsione coulombiana dovuta agli elettroni già presenti sull'isola stessa. Questa energia di caricamento, pari a $E_c = e^2/C$ (C è la capacità dell'isola), è inversamente proporzionale alle dimensioni dell'isola, è dell'ordine dei meV per dimensioni lineari di centinaia di nanometri e può diventare molto grande per isole di dimensioni di qualche nanometro (ed è completamente trascurabile

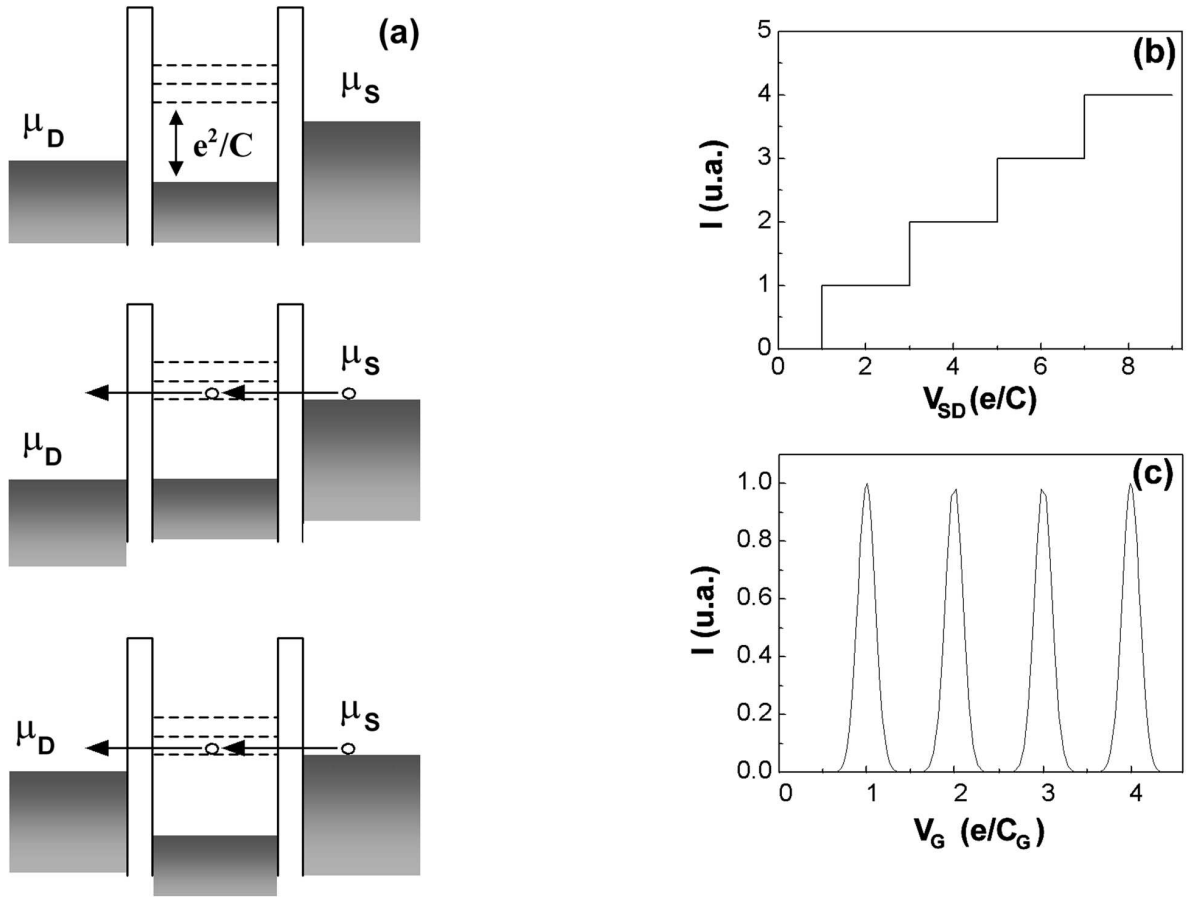


Fig. 6. – (a) Schema di profilo di potenziale e livelli energetici di un'isola metallica, separata dai contatti di *source* e *drain* da due barriere tunnel in tre diverse condizioni di polarizzazione V_{SD} tra *source* e *drain* e polarizzazione V_G di *gate*. Le zone ombreggiate denotano gli stati pieni fino al livello di Fermi μ. Partendo dall'alto: 1) V_G trascurabile e V_{SD} minore della soglia di caricamento: non c'è flusso di cariche; 2) V_G trascurabile e V_{SD} pari alla soglia di caricamento: fluisce un elettrone alla volta; 3) V_{SD} piccolo ma V_G tale da compensare per l'energia di caricamento: fluisce un elettrone alla volta. (b) Andamento schematico della corrente in funzione di V_{SD}: ciascun gradino rappresenta il flusso di un singolo elettrone. (c) Andamento schematico della corrente in funzione di V_G per V_{SD} piccolo: ciascun picco rappresenta il flusso di un singolo elettrone.

per dimensioni lineari maggiori o uguali al micron). Nel caso di metalli, l'energia di caricamento è puramente coulombiana, poiché gli effetti quantistici dovuti al confinamento e all'interferenza delle funzioni d'onda sono comunque trascurabili, in quanto sia la lunghezza d'onda di Fermi che la lunghezza di coerenza di fase sono già trascurabili per isole di dimensioni del nanometro. La situazione è diversa nel caso di strutture realizzate con semiconduttori, dove le lunghezze d'onda di Fermi sono tipicamente di varie decine di nanometri e le lunghezze di coerenza eccedono il micron a bassa temperatura. Ne consegue che effetti quantistici contribuiscono significativamente all'energia di caricamento e la fenomenologia degli effetti di singolo elettrone è notevolmente più complessa.

Quando la polarizzazione tra *source* e *drain* è tale da fornire l'energia di caricamento al sistema, il dispositivo comincia a condurre e la corrente è legata al flusso di un portatore alla volta attraverso l'isola (si veda fig. 6). È questa la caratteristica più interessante del dispositivo! L'introduzione di un *gate* sull'isola permette di variarne l'allineamento dei livelli rispetto al livello di Fermi del *source* e del *drain* e quindi controllare la conduzione del sistema (si veda fig. 6). Si ottiene quindi un dispositivo a tre terminali, che per analogia viene anche indicato come transistor a singolo elettrone. In linea di principio tali dispositivi sono miniaturizzabili fino ad avere una singola molecola che costituisca l'isola. Utilizzando SED sono già stati realizzati elettrometri ad alta sensibilità, standard di capacità e di corrente, rivelatori di singolo fotone.

Una grande varietà di geometrie e di materiali sono stati utilizzati in letteratura per ottenere SED. Le eterostrutture Si/SiGe costituiscono una strada molto interessante per avere dispositivi integrabili nella tecnologia del silicio. La struttura planare riportata schematicamente in fig. 7(a) appare particolarmente promettente in termini di controllo delle giunzioni tunnel, di scalabilità e riproducibilità. Con questo tipo di architettura è stato realizzato il primo transistor a singolo elettrone ottenuto a partire da gas bidimensionali di elettroni basati su eterostrutture Si/SiGe([10]).

Per funzionare in regime di "bloccaggio coulombiano" e dar luogo al flusso di singoli elettroni le barriere che separano l'isola dai contatti devono avere una bassa probabilità di tunnel, vale a dire un'alta resistenza di barriera, in modo da poter trattare in prima approssimazione l'isola stessa come un sistema isolato. Si può dimostrare che la resistenza minima per avere il regime di "bloccaggio coulombiano" (o di isola

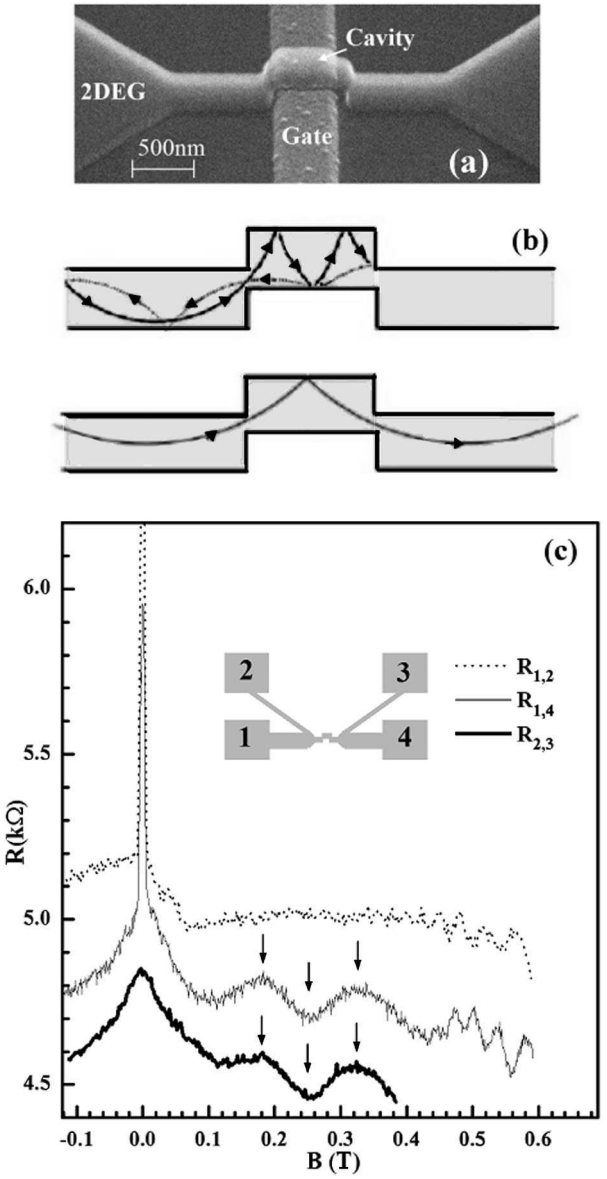


Fig. 7. – (a) Foto di un dispositivo a singolo elettrone, ottenuta con microscopio elettronico a scansione. L'isola è ottenuta scavando il materiale in modo da generare la doppia discontinuita di figura. Le costrizioni in corrispondenza delle discontinuità danno luogo alle barriere tunnel al variare della tensione di gate. (b) Schema di traiettoria "non-propagante" (in alto) e "propagante" (in basso) attraverso la cavità ottenibili a diversi valori di campo magnetico. (c) Resistenza in funzione del campo magnetico B misurato in tesla. Nell'inserto è mostrato lo schema dei 4 contatti del dispositivo. $R_{1,2}$ (linea puntinata) è la resistenza per andare da 1 a 2, vale dire senza attraversare la cavità e rappresenta il contributo del 2DEG in serie alla cavità; $R_{1,4}$ (linea sottile) è la resistenza per andare da 1 a 4 ed è la somma della resistenza della cavità e del 2DEG; $R_{2,3}$ (linea spessa) è il risultato della misura a 4-terminali ed è la resistenza della sola cavità.

"chiusa") è pari al quanto di resistenza h/e^2. Se, viceversa, si aumenta il coefficiente di trasmissione e la resistenza di barriera diventa minore del quanto di resistenza, il dispositivo opera in regime di isola "aperta". In questo regime la particolare geometria del sistema mostrato in fig. 7(a) è tale che l'insieme isola più barriere diventa l'analogo di una cavità ottica per quanto riguarda la propagazione degli elettroni.

Questa analogia è stata dimostrata studiando il trasporto elettronico in presenza di debole campo magnetico([11]). Infatti, un campo magnetico ortogonale devia la traiettoria degli elettroni balistici e quindi la misura di magnetoresistenza fornisce informazioni utili sulla distribuzione del potenziale confinante e delle funzioni d'onda. Il focheggiamento degli elettroni (*electron focusing*) e la debole localizzazione sono alcuni tra gli effetti rilevanti che si manifestano nel trasporto in deboli campi magnetici([1]). Il primo è un effetto semiclassico dovuto al trasporto balistico mentre il secondo è un effetto di interferenza prettamente quanto-meccanico.

I primi studi sul focheggiamento degli elettroni in regime mesoscopico sono stati riportati da van Houten *et al.* ([12]) poco dopo la scoperta della quantizzazione della conduttanza nei conduttori balistici unidimensionali. La geometria adottata consisteva in due QPC adiacenti, uno che fungeva da sorgente di elettroni e l'altro di raccolta. I QPC erano definiti mediante *splitgate* su di un gas elettronico ad alta mobilità di GaAs/GaAlAs. In presenza di campo magnetico perpendicolare, solo gli elettroni di opportuno momento vengono raccolti. Come mostrato schematicamente in fig. 7(b), una situazione analoga si ottiene con la particolare geometria adottata per costruire i SED di Si/Ge. In regime di "isola aperta" l'attraversamento della cavità è favorito per alcune traiettorie elettroniche e al variare del campo magnetico ci si aspetta un'oscillazione tra massimi e minimi dell'intensità di corrente, come effettivamente osservato (fig. 7(c)). L'osservazione del focheggiamento elettronico costituisce una dimostrazione diretta che il sistema opera in regime balistico.

Il picco di magnetoresistenza a campo nullo ha le caratteristiche tipiche del fenomeno della localizzazione debole([1]). I dati mostrano chiaramente che siamo in presenza di una doppia struttura, un picco alto e stretto dovuto al trasporto nella regione fuori dalla cavità e un picco più basso e largo dovuto alla cavità stessa. Il primo è quello che ci si aspetta per il trasporto diffusivo in un conduttore le cui dimensioni siano confrontabili con la lunghezza di coerenza di fase. La sua origine è legata alla presenza di orbite chiuse che sono statisticamente presenti come conseguenza della diffusione degli elettroni a causa del disordine. Le funzioni d'onda legate ai due versi di percorrenza dell'orbita coniugati per "inversione temporale" interferiscono tra loro, riducendo l'ampiezza della probabilità di trasmissione e, conseguentemente, diminuendo la conduttanza del sistema. In presenza di trasporto balistico il picco di magnetoresistenza deve avere un'origine diversa dal disordine. Esso è intimamente legato ai modi che si istaurano nella cavità e come tale fornisce informazioni preziose sulla propagazione degli elettroni nel sistema([13]).

Bibliografia

(1) D. K. Ferry and S. M. Goodnick, *Transport in Nanostructures* (Cambridge University Press) 1997; V. V. Mitin, V. A. Kochelap, and M. A. Stroscio, *Quantum Heterostructures: Microelectronics and Optoelectronics* (Cambridge University Press) 1999.

(2) C. Brunner, "Si/Ge nanostructures", *Rep. Prog. Phys.* **65** (2002) 27–72; D. J. Paul, "Si/SiGe heterostructures: from material and physics to devices and circuits", *Semicond. Sci. Technol.* **19** (2004) R75–R108.

(3) B. J. van Wees *et al.*, "Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas", *Phys. Rev. Lett.* **60** (1988) 848.

(4) K. J. Thomas, J. T. Nicholls, M. Y. Simmons, M. Pepper, D. R. Mace, and D. A. Ritchie, "Possible spin polarization in a one-dimensional electron gas", *Phys. Rev. Lett.* **77** (1996) 135.

(5) S. L. Wang, P. C. van Son, B. J. van Wees, and T. M. Klapwijk, "Quantum conductance of point contacts in Si inversion layers", *Phys. Rev.* B **46** (1992) R12873.

(6) D. Tobben, D. A. Wharam, G. Abstreiter, J. P. Kolthaus, and F. Schaffler, "Ballistic electron transport through a quantum point contact defined in a Si/SiGe heterostructure", *Semicond. Sci. Technol.* **10** (1995) 711.

(7) U. Wieser, U. Kunze, K. Ismail, and J. O. Chu, "Quantum-ballistic transport in an etch-defined Si/SiGe quantum point contact", *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 1726.

(8) K. Nishiguchi and S. Oda, "Conductance quantization in nanoscale vertical structure silicon field-effect transistors with a wrap gate", *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 2922.

(9) G. Scappucci, L. Di Gaspare, E. Giovine, A. Notargiacomo, R. Leoni, and F. Evangelisti, "Conductance quantization in etched Si/SiGe quantum point contacts", *Phys. Rev. B* **74** (2006), in stampa.

(10) A. Notargiacomo, L. Di Gaspare, G. Scappucci, G. Mariottini, F. Evangelisti, E. Giovine and R. Leoni, "Single electron transistor based on modulation-doped SiGe heterostructures", *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 302.

(11) G. Scappucci, L. Di Gaspare, F. Evangelisti, E. Giovine, A. Notargiacomo, R. Leoni, V. Piazza, P. Pingue, and F. Beltram, "Low field magnetotransport in strained Si/SiGe cavities", *Phys. Rev. B* **71** (2005) 245311.

(12) H. van Houten *et al.*, "Coherent electron focusing with quantum point contacts in a two-dimensional electron gas", *Phys. Rev. B* **39** (1989) 8556.

(13) J. P. Bird *et al.*, "Interference and interactions in open quantum dots", *Rep. Prog. Phys.* **66** (2003) 583.

LA SIMULAZIONE A PRINCIPI PRIMI ESPLORA IL CUORE DEI PIANETI

S. Scandolo
The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, e Centro Nazionale di Eccellenza CNR/INFM "Democritos", Trieste

"*Diamonds in the sky*". Così la rivista "Nature" titolò nel 1981 l'articolo di Marvin Ross([1]), allora ricercatore ai Laboratori Nazionali di Livermore in California. Non c'era Lucy, e i Beatles nel 1981 appartenevano già al passato, ma l'idea che una gigantesca miniera di diamanti potesse celarsi nel cuore di Urano e di Nettuno, come Marvin Ross arditamente proponeva, aveva per planetologi il sapore di una provocazione ben più seria della psichedelica canzone della band inglese. La notizia ebbe l'effetto di un'onda d'urto. E su un'onda d'urto si basava la sua veridicità.

Verso la fine degli anni '70 le onde d'urto erano l'unico modo in cui la fisica riusciva a esplorare il comportamento della materia a condizioni estreme di pressione e di temperatura, le stesse condizioni che sappiamo esistere all'interno dei pianeti del sistema solare, inclusa la Terra. Il cuore dei pianeti è totalmente imperscrutabile all'analisi diretta. Se la sonda spaziale Galileo è riuscita a penetrare per ben 600 km all'interno di Giove — una frazione comunque piccolissima del raggio del pianeta gigante, che si aggira sui 70000 km — nessuna sonda è mai penetrata più in profondità di 12 km al di sotto della superficie terrestre. Lasciando da parte, per il momento, i fantasiosi racconti di Verne e la popolare filmografia sul tema, l'esplorazione scientifica del cuore dei pianeti si basa oggi esclusivamente sulla capacità di riprodurre in laboratorio o al calcolatore le condizioni estreme che li caratterizzano, ovvero pressioni che superano il miliardo di atmosfere (come al centro dei pianeti giganti), e temperature che raggiungono svariate migliaia di gradi kelvin, a seconda del pianeta([2]), come illustrato in fig. 1. Generare condizioni così estreme in modo controllato non è semplice. Nell'Unione Sovietica degli anni '60 gli esperimenti venivano condotti piazzando il campione nelle vicinanze di un esplosione nucleare e sfruttando l'onda d'urto da essa generata. L'onda d'urto poteva anche essere generata in modo più controllato lanciando ad altissima velocità un proiettile su un campione. Velocità comunemente raggiunte in laboratorio si aggirano oggi sui 10 km/s, un ordine di gradezza superiori a quella di un normale proiettile. In entrambi i casi l'impatto provoca un fronte di pressione e temperatura che si propaga all'interno del campione alla velocità del suono, producendo per tempi brevissimi le stesse condizioni che si trovano all'interno dei pianeti.

Marvin Ross, Bill Nellis, e colleghi ai Laboratori di Livermore avevano deciso nel 1981 di sondare con le onde d'urto la capacità del metano, uno dei maggiori componenti degli strati interni di Nettuno ed Urano, di resistere alle condizioni estreme che caratterizzano l'interno di questi pianeti. Al termine di una decina di esperimenti con onde d'urto, essi riuscirono a ricostruire la curva della densità del metano in funzione della pressione applicata. Confrontando i dati sperimentali con il risultato di un calcolo fatto qualche anno prima da Francis Ree, anch'esso ai Laboratori di Livermore, Ross notò che la curva sperimentale mostrava un impercettibile ma significativa discontinuità ad

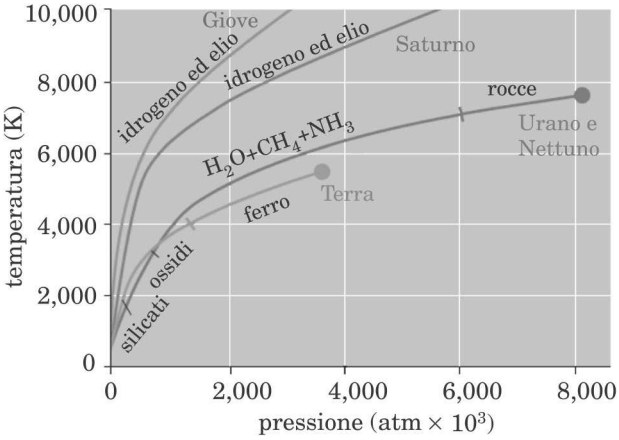


Fig. 1. – Scendendo lungo il raggio di un pianeta la pressione e la temperatura aumentano fino a raggiungere il loro massimo al centro del pianeta. Il grafico riporta la variazione della temperatura in funzione della pressione per vari pianeti del Sistema Solare. Le varie curve terminano al centro del pianeta, indicato qui da un cerchio. La composizione dei vari pianeti è anch'essa indicata. I pianeti giganti (Giove e Saturno) sono quasi completamente composti di idrogeno, con tracce di elio. I pianeti "intermedi" (Nettuno e Urano) hanno una composizione più ricca, principalmente acqua, ammoniaca e metano. Si presume che sia i pianeti giganti che quelli intermedi abbiano un nucleo solido al loro interno, probabilmente roccioso, ma non abbiamo dati sufficienti per confermarlo. I pianeti terrestri sono composti da un vasto strato di ossidi e silicati (il mantello) al cui interno si nasconde un nucleo di ferro (figura tratta da ([2])).

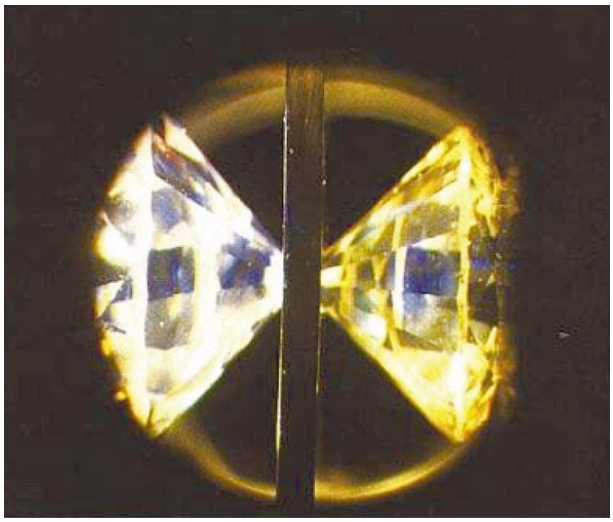


Fig. 2. – Celle a diamante come quella mostrata in figura vengono ormai usate di routine in molti laboratori di alte pressioni. La dimensione dei diamanti può raggiungere qualche millimetro, mentre quella del campione è in genere dell'ordine di qualche centinaio di micron. Il campione viene piazzato tra le due punte, e contenuto lateralmente da una guarnizione (*gasket*) metallica.

una pressione attorno a 40 gigapascal (1 gigapascal, o GPa, corrisponde a circa 10000 atmosfere). E da qui la conclusione, forse un po' azzardata, che il metano potesse dissociare nei suoi componenti elementari, carbonio e idrogeno([1]). Il carbonio, nella sua forma più stabile a quelle condizioni, cioè il diamante, sarebbe quindi "affondato" per effetto gravitazionale verso l'interno del pianeta. Il fascino della scoperta — una pioggia di minuscoli diamanti che precipitano verso una gigantesca miniera nelle viscere del pianeta — trascendeva la curiosità scientifica, ed ebbe a quel tempo grande risonanza, anche giornalistica.

Nonostante le onde d'urto abbiano dato un contributo fondamentale alla nascita di quel ramo della fisica oggi chiamato delle "alte pressioni", le onde d'urto non sono esse stesse prive di controindicazioni. Il problema più ovvio consiste nel fatto che l'intero apparato di misura finisce in briciole in alcuni microsecondi, frantumato dall'impatto generato dall'onda d'urto. Ciò riduce il numero di grandezze fisiche che si possono misurare con le onde d'urto ad una mezza dozzina: densità, velocità del suono, compressibilità, conducibilità elettrica, e poche altre.

Ma esistono modi più controllati di esplorare la materia a condizioni estreme? Al pioniere della fisica ad alte pressioni, Percy Bridgman dell'Università di Harvard, premio Nobel per la fisica nel 1946, si deve lo sviluppo di alcuni dei metodi più sofisticati per comprimere la materia staticamente. Nelle sue ingegnose celle idrauliche, Bridgman riuscì a raggiungere in modo completamente controllato pressioni dell'ordine di 10 GPa. E l'evoluzione tecnica in questo campo è stata negli ultimi anni sbalorditiva. Uno dei candidati più promettenti è oggi la cosiddetta cella ad incudine di diamante (*diamond-anvil cell*), mostrata in fig. 2. Sviluppata agli inizi degli anni '60, e successivamente raffinata da Ho-Kwang Mao, Russel Hemley e colleghi al Geophysical Laboratory di Washington, la cella a diamante è costituita da due gemme ultrapure di diamante tagliate a forma di incudine, che vengono schiacciate l'una contro l'altra da un sistema di pistoni. Il campione viene piazzato tra le due punte e sigillato per mezzo di una guarnizione metallica. Una cella a diamanti può generare tra le due punte pressioni di alcune centinaia di gigapascal (GPa) in modo assolutamente controllato. Il record mondiale è detenuto dal gruppo di Yogesh Vohra, in Alabama, che sostiene di aver raggiunto una pressione di 560 GPa, ovvero quasi il doppio della pressione stimata per il centro della Terra (circa 360 GPa). Una cella a diamante opportunamente caricata può mantenere la pressione al suo interno per periodi di tempo arbitrariamente lunghi, fino ad alcuni anni. La cella a diamante ha senza dubbio rivoluzionato a partire dagli anni '80 il campo della fisica delle alte pressioni. Tuttavia nemmeno questa tecnica è priva di controindicazioni. Quando si tratta di scaldare il campione per raggiungere le temperature che caratterizzano l'interno dei pianeti, la cella a diamante mostra il suo lato debole, cedendo meccanicamente e andando anch'essa in frantumi.

Parallelamente allo sviluppo delle tecniche di compressione dinamiche e statiche, alcuni gruppi teorici incluso il nostro, a Trieste, hanno cercato di sviluppare un approccio completamente diverso alla comprensione dei fenomeni sotto altissime pressioni. Invece di cercare di riprodurre condizioni estreme di pressione e temperatura in laboratorio, abbiamo cercato di simulare tali condizioni al calcolatore, cioè risolvendo le leggi fondamentali della meccanica classica e quantistica. Partendo da un numero limitato di atomi — qualche centinaio è il numero massimo che gli attuali supercalcolatori ci consentono — cerchiamo di

risolverne le equazioni del moto di Newton per un tempo sufficientemente lungo — qualche decina di picosecondi sono in genere sufficienti — tale da poter trarre conclusioni riguardo allo stato chimico e fisico della materia soggetta a condizioni esterne arbitrarie. Immaginatevi un esperimento in miniatura, ma molto più semplice di un'onda d'urto, molto meno costoso di una cella a diamante, e molto più sicuro di un esplosione nucleare.

Risolvere le equazioni di Newton richiede tuttavia che la forza agente su ciascun atomo venga specificata. In altre parole, è necessario sapere con precisione come gli atomi interagiscono uno con l'altro, e qui le cose cominciano a complicarsi. Più di quattro decenni fa, quando le prime simulazioni di dinamica atomica apparvero sulla scena (la tecnica viene oggi comunemente chiamata "dinamica molecolare"), nessuno avrebbe scommesso un centesimo sulla capacità dei potenziali interatomici disponibili a quel tempo di riprodurre con accuratezza le forze tra atomi. Si consideri ad esempio il diamante, il più duro di tutti i materiali conosciuti. Le sue eccezionali proprietà meccaniche possono essere fatte risalire al forte legame direzionale (covalente) che i suoi orbitali atomici ibridi sp^3 formano quando l'atomo viene a trovarsi in una configurazione tetraedrica. Nella grafite, d'altra parte, gli stessi atomi di carbonio si ordinano in una configurazione planare a strati dovuta ad una differente ibridizzazione (sp^2) dell'atomo. Benchè la grafite sia la forma più stabile del carbonio a condizioni ambiente, essa si trasforma spontaneamente in diamante quando viene sottoposta a pressioni che superano 1,4 GPa. È evidente che qualsiasi modello di interazione interatomica che pretenda di descrivere il carbonio nelle sue varie forme dovrà tenere conto di questa doppia veste dell'atomo di carbonio, ed è altrettanto ovvio che nessun modello semplice potrà farlo con accuratezza. Il risultato fu che tutti i tentativi iniziali (attorno ai primi anni '70) di simulare in modo realistico la conversione di grafite a diamante, uno dei fenomeni più noti (e più redditizi!) della fisica delle alte pressioni, si scontrarono con la complessità del modello di interazione tra atomi di carbonio, che nessun potenziale empirico riusciva a riprodurre con la sufficiente fedeltà. Un innocente problema di meccanica classica, la soluzione delle equazioni del moto di Newton, si era trasformato in un problema tremendamente complesso di meccanica quantistica: come era possibile calcolare in modo efficiente l'ibridizzazione, o più in generale lo stato fondamentale quantistico delle centinaia di elettroni che circondano gli atomi di carbonio, con una precisione sufficiente da permettere la generazione di forze interatomiche il più vicine possibile alla realtà? Fu Walter Kohn, a quel tempo professore all'Università della California a San Diego, a dare nei primi anni '60 il primo fondamentale contributo alla soluzione del problema. La sua teoria del "funzionale densità" permise di ridurre il problema della determinazione dello stato fondamentale di un sistema a molti elettroni a quello, molto più semplice, del calcolo dello stato fondamentale di molti elettroni indipendenti, soggetti ad un campo medio autoconsistente. La soluzione del problema si semplificò a tal punto da rendere il calcolo delle forze interatomiche a "principi primi", cioè interamente basata sulle leggi fondamentali della meccanica quantistica, senza alcun parametro empirico esterno, un'operazione possibile per sistemi di alcune centinaia di atomi. L'eleganza formale della teoria fu chiara fin dal suo concepimento, ma passarono alcuni decenni prima che fisici e chimici riconoscessero la sua estrema utilità e accuratezza nel calcolo delle proprietà microscopiche di ogni tipo di materiale. Nel 1998 Kohn fu insignito del premio Nobel per la chimica per la teoria da lui sviluppata più di trent'anni prima.

La teoria del funzionale densità aveva semplificato enormemente il problema di calcolare le forze interatomiche per sistemi dell'ordine di qualche centinaia di atomi, ma una simulazione di dinamica molecolare richiede che tale operazione venga ripetuta un numero di volte sufficiente a coprire un periodo di tempo reale dell'ordine di qualche decina di picosecondi. L'integrazione delle equazioni del moto di Newton viene infatti eseguita discretizzando il tempo in intervalli dell'ordine di qualche frazione di femtosecondo. Ne consegue che le forze devono essere calcolate, lungo un *run* di dinamica molecolare, un numero di volte pari a circa 10^4–10^5. Era chiaramente necessario un ulteriore grosso passo in avanti metodologico prima di poter raggiungere questi valori.

Tra Michele Parrinello, che proveniva dal campo della dinamica molecolare, e Roberto Car, un esperto nel campo della struttura elettronica di atomi e solidi, la scintilla scoccò a Trieste nell'autunno del 1984. Lo scopo era quello di rendere il processo di aggiornamento

della funzione d'onda il più efficiente possibile, man mano che gli atomi si muovevano nella loro dinamica, così da poter raggiungere lo scopo di ripetere tale operazione di aggiornamento per un numero molto alto di volte. L'idea di Car e Parrinello fu di rilassare la regola che lo stato fondamentale elettronico dovesse essere determinato con la massima accuratezza ad ogni passo temporale della dinamica molecolare, cosa che risultava estremamente pesante dal punto di vista computazionale. Al suo posto, Car e Parrinello introdussero una dinamica fittizia anche per le funzioni d'onda, tale da mantenere le funzioni d'onda sempre molto vicine allo stato fondamentale durante l'evoluzione delle coordinate atomiche ([3]). Il loro metodo, che da allora ha preso il nome di dinamica a principi primi di "Car-Parrinello", si rivelò così efficiente che si prestò immediatamente ad un numero svariato di applicazioni a sistemi realistici. Oggi, a più di vent'anni dalla sua introduzione, il metodo di Car e Parrinello è uno dei pilastri fondamentali, assieme alla teoria del funzionale densità, su cui si basa la comprensione teorica dei materiali a livello microscopico.

Ma torniamo ai nostri pianeti, e in particolare al problema di capire il comportamento della materia al loro interno. La dinamica di Car-Parrinello era senza dubbio il metodo più appropriato, poichè nella simulazione era possibile fissare condizioni arbitrarie di densità e di temperatura, e soprattutto perchè tale dinamica, essendo basata sulla teoria del funzionale densità, poteva considerarsi sufficientemente predittiva da permettere di esplorare con sufficiente confidenza situazioni ben più estreme di quelle che potevano essere raggiunte in laboratorio. E questo senza rompere neppure un diamante, se non in modo puramente virtuale! Ma i problemi da risolvere non erano finiti. Ritorniamo per un attimo alla famosa conversione della grafite in diamante. Una volta raggiunta la pressione di transizione, questa trasformazione avviene in modo brusco, con un grosso aumento di densità (il diamante è circa 50% più denso della grafite) e un cambiamento repentino della struttura cristallina. Sfortunamente una simulazione di dinamica molecolare tradizionale, dove un certo numero di atomi viene collocato in una scatola dai lati fissati, non è in grado di simulare cambiamenti repentini di densità, essendo la densità data, per l'appunto, dal numero di atomi per unità di volume, quantità che rimane fissa durante la simulazione. La grafite non si sarebbe mai trasformata in diamante spontaneamente in una simulazione tradizionale. Il problema era molto simile a quello che Parrinello, con il collega Aneesur Rahman, avevano affrontato, e brillantemente risolto, nel 1980, quando entrambi erano al Laboratorio Nazionale di Argonne, a Chicago. A quel tempo, Parrinello e Rahman , nella loro ricerca di un metodo efficiente per poter predirre senza alcun *input* esterno la struttura cristallina del rubidio (che era nota essere cubica a corpo centrato), posizionarono gli atomi di rubidio all'interno di una cella di simulazione partendo da un reticolo cubico diverso, e cioè a facce centrate. Elaborando un'idea proposta qualche anno prima da Hans C. Andersen, un chimico della Stanford University, Parrinello e Rahman lasciarono che i lati della cella di simulazione cambiassero di forma e di dimensione, vincolati solo dall'imposizione che la pressione interna rimanesse costante e uguale a quella atmosferica. La cella modificò la sua forma in risposta alla sollecitazione interna degli atomi, che nel giro di qualche femtosecondo si riorganizzarono spontaneamente passando dal reticolo cubico a facce centrate di partenza ad un reticolo cubico a corpo centrato, come desiderato ([4]). Il metodo della cella variabile aveva permesso di predirre la struttura cristallina del rubidio senza alcuna assunzione *a priori*, e lasciando che fosse la dinamica stessa a condurre gli atomi nella struttura cristallina energeticamente più favorevole. Poteva essere questa la soluzione al problema di simulare la conversione di grafite a diamante? Una risposta positiva a questo interrogativo richiedeva che le varie metodologie di simulazione descritte finora, e cioè la teoria del funzionale densità, il metodo di Car-Parrinello, e la cella variabile, venissero tutte e tre combinate in un unico potente algoritmo capace, in principio, di simulare e predirre l'occorrenza di transizioni di fase a condizioni arbitrarie di pressione e temperatura. La combinazione dei tre metodi venne portata a termine a Trieste nella metà degli anni '90, quando Paolo Focher, Guido Chiarotti, Marco Bernasconi, ed Erio Tosatti, in collaborazione con Michele Parrinello che si era nel frattempo trasferito a Zurigo, misero a punto e testarono con successo la nuova metodologia riproducendo la trasformazione del silicio dal reticolo del diamante al reticolo esagonale semplice, già nota e caratterizzata sperimentalmente ([5]). Qualche anno dopo la tecnica venne applicata finalmente alla

conversione della grafite al diamante. Oltre a dimostrare ancora una volta la potenza del metodo, la simulazione consentì di svelare il percorso microscopico seguito dagli atomi di carbonio durante la transizione. Esso consisteva in uno scivolamento dei piani esagonali della grafite e nel loro conseguente ripiegamento (fig. 3). Riuscimmo a mostrare che tale processo poteva portare con uguale probabilità alla formazione di diamante cubico e diamante esagonale, in perfetto accordo con le osservazioni sperimentali, dalle quali però sarebbe stato impossibile estrarre informazioni microscopiche di questo tipo ([6]).

Avendo verificato la solidità del metodo con un paio di esempi significativi, non restava che partire, computer alla mano, all'esplorazione delle viscere dei pianeti. La prima questione aperta da affrontare era ovviamente quella dell'esistenza di diamanti nel cuore di Nettuno. Il lavoro di Ross suggeriva che il metano si dovesse dissociare all'interno di Nettuno ed Urano, per formare diamanti ed idrogeno allo stato di elemento. Fu così che, nel 1997, ci apprestammo, con la preziosa collaborazione di Francesco Ancilotto dell'Università di Padova, a simulare la compressione del metano a pressioni di qualche milione di atmosfere e a temperature di qualche migliaio di gradi kelvin. Il risultato confermava il suggerimento di Ross solo parzialmente, e apriva un nuovo scenario nella chimica degli strati profondi planetari. Nella simulazione il metano si dissociò, come previsto da Ross, ad una pressione di circa 100 GPa, ma prima di separarsi completamente nei suoi componenti fondamentali, carbonio e idrogeno, il nostro metano "virtuale" si trasformò in una miscela di idrocarburi saturi (alcani) (vedi fig. 4) ([7]). L'impatto mediatico non era sicuramente al livello dei "diamanti nello spazio" di Ross, ma l'eccitazione della comunità degli planetologi non fu meno intensa di quella mostrata tempo addientro per la scoperta di Ross. Qualche anno prima, infatti, la sonda spaziale Voyager 2, nel suo viaggio attraverso il Sistema Solare, aveva avuto modo di rivelarci che l'atmosfera di Nettuno, il cosiddetto "pianeta blu", conteneva una quantità abnorme di etano, un noto idrocarburo saturo (C_2H_6), la cui origine non poteva essere spiegata mediante modelli fotochimici tradizionali. I risultati delle nostre simulazioni suggerivano che la dissociazione del metano negli strati interni del pianeta avrebbe potuto contribuire come un'ulteriore sorgente

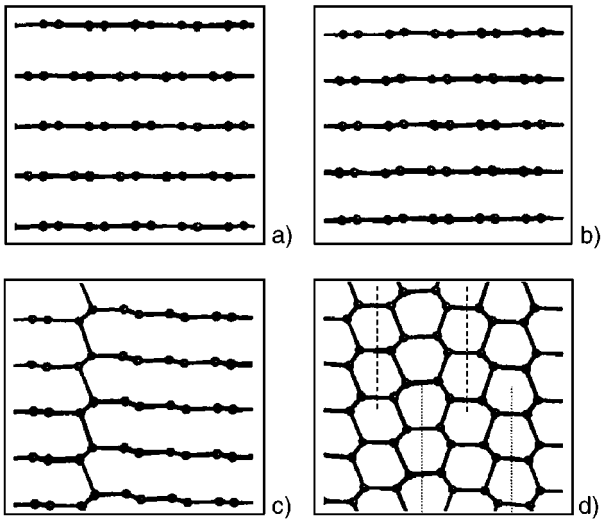


Fig. 3. – "Istantanee" prese a pochi femtosecondi di distanza durante un *run* di dinamica molecolare a principi primi ([6]) in cui un campione iniziale di grafite (a) viene compresso fino a trasformarsi in diamante (d). Si noti lo slittamento dei piani grafitici in (b), che prelude alla formazione del primo seme della trasformazione (c). La trasformazione è completa in (d), dove si nota che il campione è in realtà formato da due domini, uno dei quali costituito da diamante cubico (tra le linee continue in basso), e l'altro da diamante esagonale (la cosiddetta "londsdalite" , tra le linee tratteggiate in alto).

per l'etano in eccesso alla superficie del pianeta, dove l'idrocarburo sarebbe risalito grazie a violenti moti convettivi.

Diamanti o idrocarburi? Non era facile decidere a chi credere: alle simulazioni, una realtà virtuale accurata, ma estremamente limitate nella taglia e nell'estensione temporale, o alle onde d'urto, la realtà sperimentale, ma di difficilissima interpretazione. La risposta venne nel 1999, grazie ad esperimenti in cella a diamante condotti da Robin Benedetti, Raymond Jeanloz, e collaboratori alla University of California a Berkeley ([8]). Magnanimamente, gli esperimenti in celle a diamanti hanno portato alla conclusione che entrambi i risultati precedenti portano con sè una parte di verità. Schiacciando in modo controllato, come solo in una cella a diamante è possibile fare, un campione di metano fino a 19 GPa, e riscaldando il campione a 1500 K, il gruppo di Berkeley trovò evidenza della formazione di idrocarburi, tramite spettroscopia Raman. Ciò era in accordo con i risultati delle simulazioni. Ma mentre la simulazione aveva suggerito che il diamante si sarebbe formato solo al di sopra dei 300 GPa, il gruppo di Berkeley trovò nei suoi campioni tracce di diamante quando questi venivano portati a pres-

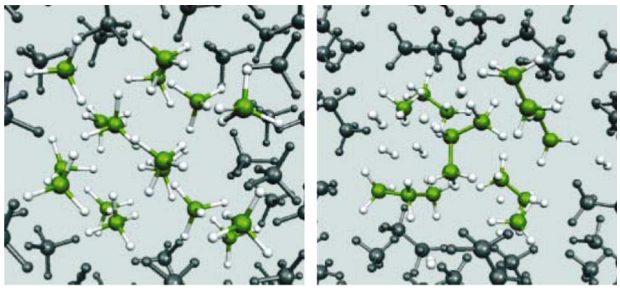


Fig. 4. – Simulazione a principi primi della dissociazione del metano a condizioni estreme ([7]). A sinistra si nota le cella di simulazione, contenente 16 molecole, prima della dissociazione. Le molecole colorate appartengono alla cella primitiva, le molecole grigie appartengono alle ripetizioni periodiche della cella primitiva di simulazione, necessarie per simulare un sistema esteso. A destra si nota invece il risultato della compressione fino a 100 GPa e del riscaldamento fino a 4000 K. La maggior parte delle molecole originarie di metano si sono trasformate in alcani (idrocarburi saturi) più lunghi.

sioni appena superiori a 20 GPa e a temperature di 2000 K. L'argomento di Ross era perciò anch'esso corretto. La diatriba era risolta, e nuovi modelli della composizione di Nettuno ed Urano sono oggi in procinto di essere sviluppati grazie alle informazioni fornite dalle simulazioni e dagli esperimenti.

Analizzando la probabile composizione chimica dell'interno di Nettuno ed Urano, ci si accorge che, secondo i modelli più accreditati, la composizione dello strato mediano, il più voluminoso, dei due pianeti, è dominata dai tre "ghiacci" metano, ammoniaca, e acqua, con l'acqua (H_2O) presente in proporzioni superiori (56%) rispetto al metano (36%). La dissociazione del metano suggeriva che nulla poteva essere dato per scontato riguardo allo stato dell'acqua alle condizioni di pressione e temperature dello strato mediano. Ed è in questo spirito che ci imbarcammo, nel 1999, nella simulazione dell'acqua a condizione estreme, trovando che nemmeno questa molecola riusciva a sopportare l'effetto della compressione ([9]). A pressioni superiori a circa 20 GPa le simulazioni indicavano che l'acqua si dissocia nei suoi componenti fondamentali, ossigeno ed idrogeno. Ma contrariamente al metano, idrogeno ed ossigeno si comportano, a condizioni estreme come specie chimiche completamente ioniche, dando perciò luogo ad un fluido "ionico" composto da protoni (H^+) e ioni ossigeno ($O^=$). I fluidi ionici sono caratterizzati da un alta conducibilità elettrica, ciò che potrebbe spiegare, tramite un meccanismo di dinamo, la presenza di un forte ed anomalo campo magnetico fatta dalla sonda Voyager 2 nel suo passaggio nei pressi di Nettuno ed Urano. Ma la sorpresa più ghiotta riguardo il comportanto dell'acqua non riguardava i due pianeti. Mantenendo la pressione fissa ad un milione di atmosfere e scendendo lentamente in temperatura ben al di sotto della temperatura a cui si pensa si trovi l'acqua all'interno di Nettuno, le nostre simulazioni rivelarono che il fluido ionico di protoni e ioni ossigeno mostrava, attorno a 4000 K, un curioso fenomeno di parziale condensazione. Gli ioni ossigeno cristallizzavano in un perfetto reticolo cubico a corpo centrato, compenetrato però da un fluido di protoni che continuava a diffondere indisturbato come nel fluido originario (fig. 5). Tale stato della materia è noto come "superionico", e si verifica in altri composti ionici come lo ioduro di argento. In principio, un materiale di questo tipo combina proprietà meccaniche tipiche di un solido, grazie alla rigidità del reticolo degli ioni ossigeno, ad un'alta conducibilità elettrica, tipica di un fluido conduttore, grazie alla diffusione dei protoni. Idealmente, se fosse possibile riportare a condizioni ambiente l'acqua nello stato superionico, un processo altamente im-

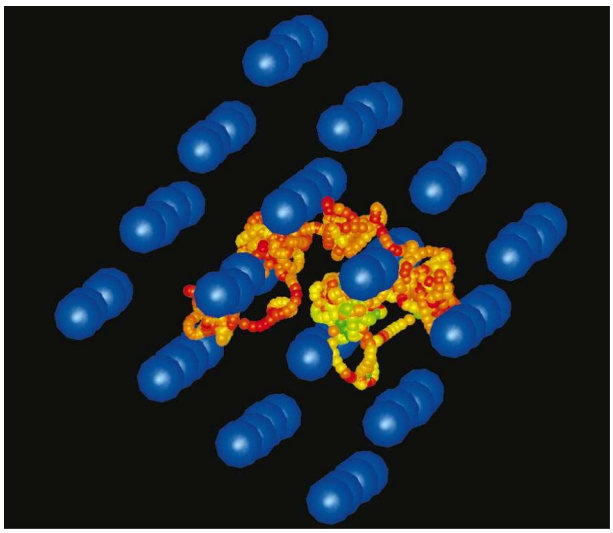


Fig. 5. – La simulazione mostra il comportamento di un protone all'interno del reticolo degli ioni ossigeno, in una simulazione a principi primi dell'acqua superionica. La cella di simulazione contiene 32 molecole di acqua e la temperatura viene aumentata da 1000 K a 2500 K in un picosecondo circa. Il moto di uno dei 64 protoni è illustrato con un codice di colori che indica la sua temperatura, dal verde (1000 K) al rosso (2500 K). Alle temperature più basse il protone è localizzato vicino ad uno ione ossigeno, il che indica la natura molecolare del composto, ma a 2500 K il moto del protone diventa diffusivo, e quindi indicativo del raggiungimento della fase superionica.

probabile purtroppo, ci troveremmo di fronte ad una batteria dalle proprietà insuperabili.

Batterie ad acqua a parte, la sintesi di materiali tramite pressione è un campo estremamente florido della scienza ad alti pressioni, e per certi aspetti molto più redditizio dell'esplorazione delle viscere dei pianeti, come testimonia la sintesi artificiale di diamante da grafite, un processo che produce annualmente una quantità di diamanti 20 volte superiore rispetto all'estrazione, generando un giro d'affari di un miliardo di dollari. Il campo merita quindi senz'altro una breve digressione. Della sintesi di diamanti ed in particolare del ruolo che le simulazioni hanno avuto nel chiarire il meccanismo di transizione dal punto di vista microscopico ho già avuto modo di accennare sopra. Ma se le simulazioni aspirano a diventare uno strumento importante nella sintesi di nuovi materiali, l'esempio del diamante, in cui le simulazioni hanno sostanzialmente verificato ciò di cui l'industria dei diamanti artificiali era a conoscenza da ormai mezzo secolo, non è particolarmente significativo. Molto più significativo è invece il risultato di una simulazione condotta nel 1999 a Trieste nel nostro gruppo, in cui si è mostrato per la prima volta che le simulazioni possono portare a predizioni riguardo alla formazione di materiali precedentemente ignoti e con proprietà interessanti([10]). È il caso della diossido di carbonio (CO_2) solido, un materiale ultraduro e potenzialmente utile per applicazioni nella componentistica optoelettronica per sistemi operanti in condizioni estreme di temperatura. Benchè il disossido di carbonio sia estremamente stabile in forma molecolare a condizioni ambiente, non è difficile immaginare che sotto compressione sufficientemente elevata, l'avvicinamento delle molecole une alle altre possa raggiungere la soglia oltre la quale la formazione di un composto esteso più denso, isoelettronico al quarzo (SiO_2), diventa energeticamente favorita. Sorprendentemente, la simulazione indicò che la pressione critica a cui questa transizione avviene non è così elevata, e si aggira sui 50 GPa, una pressione quasi di "routine" per un laboratorio di alte pressioni ben equipaggiato. La verifica sperimentale fu questione solo di qualche settimana. Il gruppo di Choong-Shik Yoo, ai Laboratori Nazionali di Livermore, in California, riuscì a sintetizzare il composto([11]) e fu in grado di mostrare che il materiale prodotto, un cristallo covalente, aveva interessanti proprietà ottiche nonlineari simili a quelle del quarzo, in ottimo accordo con le previsioni teoriche. Ma le simulazioni avevano anche mostrato che l'analogia con il disossido di silicio (SiO_2) non si fermava alla formazione di composti cristallini simili al quarzo. Quando la temperatura nella simulazione veniva fissata ad un valore piuttosto alto di 2000 K, il prodotto della trasformazione diventava un amorfo, cioè un sistema spazialmente disordinato dove l'ordine atomico cristallino è completamente perso. In altre parole, un vetro, che grazie alla sostituzione del silicio con il carbonio, diventava molto più leggero e duro del vetro che tutti conosciamo. Proprio mentre questo articolo va in stampa, il gruppo di Mario Santoro, Federico Gorelli, e collaboratori al LENS di Firenze, ha annunciato la sintesi sperimentale di tale vetro([12]).

La scoperta che un sistema molecolare molto stabile come il diossido di carbonio poteva trasformarsi in un materiale non-molecolare esteso ed ultraduro stimolò negli anni successivi alla sua scoperta un'intensa ricerca verso sistemi analoghi. L'azoto, ad esempio, è anch'esso caratterizzato da una fase molecolare molto stabile a pressione ambiente, ma è stato recentemente mostrato che pressioni dell'ordine di 100 GPa causano la completa scomparsa del legame triplo caratteristico della fase molecolari, e la formazione di un "polimero" esteso caratterizzato da legami singoli tra atomi di azoto([13]). Nonostante notevoli sforzi sia teorici che sperimentali, l'utilizzo di questi nuovi materiali per applicazioni pratiche è ancora lontano sull'orizzonte, perchè la trasformazione del diossido di carbonio e dell'azoto in fasi estese ultradure è stata finora osservata esclusivamente mentre il campione è sotto compressione. Quando la cella viene aperta, il campione ritorna beffardamente, ma non inaspettatamente vista l'alta energia di formazione, nella fase molecolare originaria.

Terminata questa digressione nel mondo della sintesi di materiali, ritorniamo ora ai pianeti, e in particolare al "nostro" pianeta, cioè la Terra. Se per i pianeti giganti del Sistema Solare, distanti miliardi di chilometri dai nostri occhi, si conosce così poco riguardo al loro cuore, la nostra delle conoscenza di cosa si cela nelle viscere del nostro pianeta, distanti solamente poche migliaia di chilometri dai nostri piedi, è senza dubbio molto più completa. Grazie alle informazioni ottenute dalla propagazione delle onde sismiche sappiamo ad esempio con grossa precisione a quale profondità dobbiamo loca-

lizzare i confini tra gli strati che formano la Terra (crosta, mantello, nucleo liquido e solido). Sappiamo anche con esattezza, grazie alla misura dei momenti gravitazionali terrestri, a quale pressione sottostanno, e quale densità posseggono, i materiali che compongono i vari strati, in funzione della distanza dalla superficie del pianeta. Ma sorprendentemente abbiamo un'idea molto vaga di quale sia la temperatura raggiunta man mano che ci si avvicina al centro del nostro pianeta. Stime della temperatura al confine tra mantello e nucleo liquido, a meno di 3000 km di profondità, basate su modelli dell'evoluzione termica della Terra e su alcuni vincoli forniti dalla fisica dei minerali, si aggirano tra i 2500 e i 4000 K, un'incertezza molto pesante, in particolare se confrontata con l'accuratezza di qualche percento con cui si conosce la densità a quelle profondità. Una conoscenza più precisa della temperatura del nucleo terrestre ci permetterebbe di conoscere in maggior dettaglio i meccanismi di conduzione di calore all'interno della Terra, e con essi vincolare con maggiore precisione le sorgenti di tale calore. Il nucleo terrestre è composto da una regione esterna composta principalmente da ferro allo stato liquido, e da una regione interna composta da ferro allo stato solido. Le leggi della termodinamica impongono perciò che la temperatura al confine tra le due regioni, a 5150 km di profondità, coincida con il punto di fusione del ferro a quella particolare pressione, che è nota essere di 330 GPa. Tracce di impurità, principalmente elementi leggeri, suggeriscono un piccolo ritocco verso il basso rispetto al punto di fusione del ferro puro, ma per gli scopi di questa discussione questo abbassamento può essere considerato un effetto trascurabile. Giulio Verne e gli eroi del suo "Viaggio al centro della Terra" avrebbero sicuramente trovato il modo di fornirci questa informazione con un pizzico di fantasia. Ma diversi gruppi nel mondo hanno tentato negli ultimi anni di seguire un approccio più razionale, cercando di riprodurre le condizioni del nucleo della Terra in laboratorio, o al calcolatore. Sfortunatamente, gli esperimenti ad onda d'urto hanno finora fornito risposte molto differenti rispetto a quelle fornite dagli esperimenti con celle a diamante. La temperature di fusione del ferro appare essere molto alta (6000–8000 K) secondo gli esperti di onde d'urto, e molto più bassa (attorno ai 5000 K) secondo gli esperti di celle a diamanti. La differenza è significativa, la ragioni controverse, e la situazione sperimentale ad un punto di stallo. Ed è a questo punto che entrano in gioco le simulazioni, con due lavori pubblicati a distanza di alcuni mesi, nel 1999 e 2000, dal gruppo di Dario Alfè, all'University College di London, e da noi, a Trieste. La determinazione del punto di fusione di una sostanza tramite simulazioni di dinamica molecolare a principi primi è stato per molto tempo considerato fuori portata, a causa della difficoltà di calcolare tramite dinamica molecolare i potenziali termodinamici (che a pressione e temperatura costante prendono il nome di energie libere di Gibbs) che determinano la stabilità relativa delle due fasi, quella liquida e quella solida, il punto di fusione essendo determinato dal punto in cui i due potenziali termodinamici coincidono. Un approccio diretto del problema era chiaramente non perseguibile, per limitazioni di risorse computazionali, ma Dario Alfè e il suo gruppo proposero un intelligente scorciatoia, basata su una tecnica, la cosiddetta "integrazione termodinamica", sviluppata anni addietro nella comunità dei dinamici molecolari, ma applicata alla dinamica a principi primi solo in un caso prima di quel momento. La tecnica consiste nel calcolare la differenza di energia libera tra il sistema simulato con forze calcolate a principi primi, e lo stesso materiale simulato con forze calcolate sulla base di un modello ausiliario classico meno realistico, ma molto più semplice da trattare computazionalmente. La semplicità del modello ausiliario rende possibile il calcolo dei suoi potenziali termodinamici con grande precisione, e quindi, aggiungendo la differenza tra modello ausiliario e modello a principi primi, di ottenere finalmente l'energia libera del sistema simulato a principi primi. Utilizzando questo approccio il gruppo di Alfè stimò, per la temperatura di fusione del ferro a 330 GPa un valore che si aggira sui 6300 K, cioè in buon accordo con i risultati delle onde d'urto([14]).

Nello stesso periodo Alessandro Laio e il nostro *team* triestino, in collaborazione con Stephane Bernard del Centro per l'Energia Atomica di Parigi, aveva intrapreso il calcolo del punto di fusione seguendo un approccio completamente diverso. Invece di usare un modello di forze classico unicamente come sistema ausiliario di riferimento, il nostro scopo era quello di costruire un modello di forze empirico parametrizzato che riuscisse a riprodurre con la massima accuratezza le traiettorie generate dalla

dinamica molecolare a principi primi. Memori dei problemi incontrati nei decenni scorsi da chiunque avesse tentato di costruire potenziali realistici, ma non a principi primi, per la conversione di grafite in diamante, ci era chiaro che il compito era dei più ardui. L'idea che tramutò l'atteso insuccesso nello sviluppo di un metodo più che credibile fu quella di vincolare il modello empirico a riprodurre la dinamica a principi primi esclusivamente alle condizioni di temperatura e pressione desiderate. I potenziali generati con questo metodo erano in grado di riprodurre le proprietà termodinamiche del ferro calcolate con la dinamica a principi primi con estrema accuratezza, ma avevano il trascurabile difetto di non essere "traferibili", cioè di non essere utilizzabili a condizioni di pressione e temperatura diverse, dove il potenziale andava generato ex-novo. La temperatura di fusione del ferro a 330 GPa fu quindi calcolata utlizzando un potenziale interatomico classico parametrizzato sulla dinamica a principi primi a quelle condizioni, tramite simulazioni di coesistenza liquido-solido come quelle illustrate in fig. 6.

Sorprendentemente la nostra temperatura di fusione risultò essere di quasi 1000 K più bassa di quella calcolata da Alfè e collaboratori a Londra, e quindi in ottimo accordo con i risultati degli esperimenti in cella a diamante. La controversia non è ancora stata risolta, ma vari gruppi, sia teorici che sperimentali hanno negli ultimi anni confermato che la temperatura di fusione del ferro si aggira sui 6000 K, con un'incertezza di soli 500 K, molto minore di quella che era emersa dalla differenza dei risultati sperimentali degli anni '80 e '90.

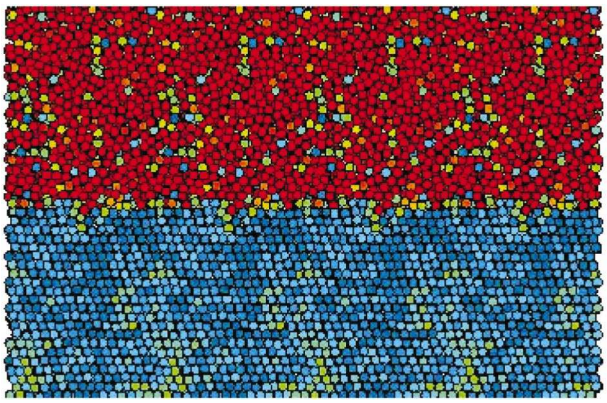


Fig. 6. – Simulazione di un solido (atomi rossi) e di un liquido (atomi blu) in coesistenza. La differenza di colore misura la distanza percorsa dall'atomo nell'ultimo picosecondo di simulazione, distanza che risulta più elevata per gli atomi appartenenti alla fase liquida. Mediante questo tipo di simulazioni è possibile stabilire la temperatura di fusione di un materiale (la figura è di Furio Ercolessi).

La determinazione della temperatura di fusione fu il risultato più eclatante delle simulazioni, ma non il più importante. Le simulazioni potevano infatti fornire altre importanti informazioni riguardo alla termodinamica e alla dinamica del ferro alle condizioni del nucleo terrestre. Ad esempio, fornivano una stima abbastanza accurata della velocità del suono, cioè della velocità di propagazione delle onde sismiche. Le onde sismiche si distinguono in onde longitudinali o primarie, le cosiddette "onde-*p*", in cui la densità oscilla lungo la direzione di propagazione, e in onde trasversali o secondarie, le cosiddette "onde-*s*", in cui la materia oscilla perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. Mentre un solido permette la propagazione di entrambi tipi di onde, in un liquido si propagano solo onde longitudinali (onde-*p*). Da più di un secolo le onde sismiche sono la nostra principale sorgente di informazione riguardo alla struttura interna della Terra. Ad esempio, è grazie all'osservazione che le onde-*s* non si propagano per uno strato consistente del nucleo a confermarci che la parte esterna del nucleo si trova allo stato liquido. Ma l'interpretazione dei dati sismici non è sempre così ovvia. In particolare, i geofisici si sono per lungo tempo chiesti per quale motivo le onde-*s* si propagano nella parte solida del nucleo con una velocità molto minore rispetto a quella che ci si aspetterebbe sulla base di estrapolazioni di dati ottenuti per il ferro a condizioni ambiente. Una possibile spiegazione dell'anomalia è data dalla presenza di zone di fusione parziale all'interno del nucleo solido, che sono però difficili da riconciliare con la termodinamica del ferro, che a quelle temperature e pressioni deve trovarsi ampiamente all'interno della fase solida. Le nostre simulazioni, condotte nel ferro solido cristallino a temperature molto vicine a quella di fusione (5400 K) , rivelarono che la velocità di propagazione delle onde trasversali è molto più bassa rispetto a quella calcolata alla stessa pressione, ma a temperature di qualche centinaia di kelvin([15]). In altre parole, la spiegazione dell'anomalia sismica stava nel comportamento anomalo del ferro cristallino stesso, e non nell'ipotetica presenza di altre fasi. E riuscimmo a concludere anche che la drastica diminuzione della velocità di propagazione delle onde trasversali nel ferro

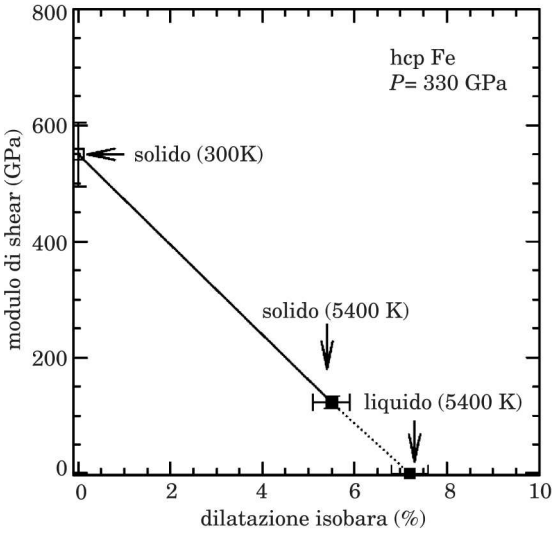


Fig. 7. – Comportamento del modulo di *shear*, la cui radice quadrata è proporzionale alla velocità delle onde trasversali (onde-*s*), in funzione della dilatazione, che a sua volta cresce con la temperatura. I dati sono stati ottenuti mediante simulazioni di dinamica molecolare e si riferiscono al ferro solido alla pressione del nucleo interno terrestre ([15]). Si noti come il valore molto basso del modulo di shear alla temperatura di fusione si giustifica con la prossimità del volume del solido al punto di fusione, con il volume del liquido appena sopra il punto di fusione.

vicino al punto di fusione era una pura e semplice conseguenza della prossimità del cristallo al punto fusione, punto oltre al quale le onde-*s* avrebbero dovuto scomparire spontaneamente, a conseguenza della trasformazione alla fase liquida (fig. 7).

La simulazione, al calcolatore o in laboratorio, dei fenomeni che hanno luogo nel cuore dei pianeti ha ricevuto negli ultimi decenni un impulso notevole, grazie allo sviluppo e al raffinamento di metodologie sperimentali quali la cella a diamante, e di metodologie teoriche quali la dinamica molecolare a principi primi. Ma c'è ancora chi non ha abbandonato il sogno di riuscire, un giorno o l'altro, a penetrare nel cuore della Terra e verificare in prima persona cosa bolle sotto i nostri piedi.

Non si tratta di fantascienza, e nemmeno di un film di cassetta. Si tratta di uno dei maggiori esperti mondiali di planetologia, David Stevenson, del California Institute of Technology di Pasadena, e della sua proposta, pubblicata su "Nature" nel 2003, di versare in una frattura alla superficie della Terra una quantità pari ad un milione di tonnellate di ferro liquido ([16]). Secondo i conti di Stevenson la massa di ferro liquido si propagherebbe verso il centro della Terra con una velocità di qualche decina di chilometri all'ora, e sarebbe quindi in grado di raggiungerlo nel giro di qualche giorno. Se si riuscisse ad immergere nel ferro liquido una sonda, questa sarebbe in grado di mandarci informazioni di prima mano direttamente dalle viscere del pianeta. Stevenson definisce la sua idea una proposta "modesta", e conti alla mano mostra che l'investimento finanziario sarebbe minore di quello di una qualunque missione planetaria. Ma il sospetto che Stevenson se la stia ridendo sotto i baffi è troppo grosso, e a noi, per il momento, per immaginare cosa bolle sotto i nostri piedi non resta che accontentarci delle colorate immagini virtuali che corredano questo articolo.

* * *

Vorrei esprimere un grosso ringraziamento ai numerosi colleghi che hanno condiviso con me questi viaggi planetari virtuali, e in particolare Erio Tosatti, Guido Chiarotti, Marco Bernasconi, Paolo Focher, Michele Parrinello, Francesco Ancilotto, Stefano Serra, Carlo Cavazzoni Alessandro Laio, Stephane Bernard, e Jorge Kohanoff.

References

(1) M. Ross, *Nature* **292** (1981) 435.
(2) S. Scandolo e R. Jeanloz, *Am. Sci.* **91**, (2003) 516.
(3) R. Car e M. Parrinello, *Phys. Rev. Lett.* **55** (1985) 2471.
(4) M. Parrinello e A. Rahman, *Phys. Rev. Lett.* **45** (1980) 1196.
(5) P. Focher, G. L. Chiarotti, M. Bernasconi, E. Tosatti, e M. Parrinello, *Europhys. Lett.* **36** (1994) 345; S. Scandolo, *Proceedings of the International School of Physics "E. Fermi" on "High Pressure Phenomena"*, Course **CXLVII** (SIF, Bologna; IOS, Amsterdam) 2002, pp. 195-214.
(6) S. Scandolo, M. Bernasconi, G. L. Chiarotti, P. Focher, e E. Tosatti, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 4015.
(7) F. Ancilotto, Guido L. Chiarotti, S. Scandolo, e E. Tosatti, *Science* **275** (1997) 1288.
(8) L. R. Benedetti, J. H. Nguyen, W. A. Caldwell, H. Liu, M. Kruger, e R. Jeanloz, *Science* **286** (1999) 5437.
(9) C. Cavazzoni, G. L. Chiarotti, S. Scandolo, E. Tosatti, M. Bernasconi, e M. Parrinello, *Science* **283** (1999) 44.
(10) S. Serra, C. Cavazzoni, G. L. Chiarotti, S. Scandolo, e E. Tosatti, *Science* **284** (1999) 788.
(11) V. Iota, C. S. Yoo, and H. Cynn, *Science* **283** (1999) 1510.
(12) M. Santoro, F. Gorelli, R. Bini, G. Ruocco, S. Scandolo, e W. A. Crichton, *Nature* **441** (2006) 857.
(13) M. I. Eremets, R. J. Hemley, H. K. Mao, e E. Gregoryanz, *Nature* **411** (2001) 170.
(14) D. Alfé, M. J. Gillan, G. D. Price, *Nature* **401** (1999) 462.
(15) A. Laio, S. Bernard, G. L. Chiarotti, S. Scandolo, e E. Tosatti, *Science* **287** (2000) 1027.
(16) D. J. Stevenson, *Nature* **423** (2003) 239.

FISICA E...

UTILIZZO DI TECNICHE NUCLEARI NELL'*IMAGING* MOLECOLARE

N. Belcari e A. Del Guerra
Dipartimento di Fisica "E. Fermi",
Centro di Eccellenza "AmbiSEN"
Università di Pisa, e INFN Sezione di Pisa

1. – Introduzione

Fin dalla realizzazione del primo microscopio alla fine del sedicesimo secolo, l'osservazione morfologica è stata il principale strumento di indagine in campo biologico. Allo stesso modo la scoperta dei raggi X da parte di Wilhelm Conrad Roentgen nel 1895 ha aperto la strada alla radiologia nel campo dell'*imaging* medicale. L'evoluzione della medicina degli ultimi anni ha richiesto modalità di *imaging* che forniscano informazioni aggiuntive rispetto alla semplice osservazione morfologica. Per questo motivo un crescente interesse è mostrato verso le tecniche di *imaging* funzionale e molecolare.

L'*imaging* molecolare è una disciplina della ricerca biomedica che sta crescendo molto negli ultimi anni. Si può definire come la rappresentazione visuale, la caratterizzazione e la quantificazione dei processi biologici che avvengono in un essere vivente a livello cellulare e sub-cellulare. Le immagini ottenute riflettono quindi i percorsi cellulari e molecolari, nonché i meccanismi di evoluzione di una patologia. Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, l'*imaging* molecolare necessita della convergenza di varie metodologie di *imaging*, di biologia cellulare e molecolare, chimica, medicina e farmacologia, fisica medica, matematica e informatica in un nuovo campo di ricerca altamente interdisciplinare.

Le attuali tecniche di "*medical imaging*" si basano sull'osservazione dei cambiamenti di grandezze macroscopiche, non specifiche, fisiche, fisiologiche o metaboliche come indice della differenza tra una condizione normale ed una patologica. L'*imaging* molecolare si orienta invece verso l'identificazione di specifici eventi che avvengono a livello molecolare (ad esempio l'espressione di un gene) come indicatore della presenza o meno di una patologia e del suo stato di avanzamento. A tal fine si utilizzano opportuni "*probes*" molecolari come sorgente di contrasto per l'immagine. Questi sono solitamente ottenuti a partire da un composto affine che interagisce con il *target* di interesse (sia esso ad esempio un tessuto o un determinato percorso metabolico) con l'aggiunta di una componente che produce un segnale. Ad esempio in *imaging* molecolare ottico la sorgente di segnale può essere una molecola bioluminescente o fluorescente, mentre per l'*imaging* in risonanza magnetica la sorgente può essere un atomo paramagnetico (ad es. gadolinio). Nel caso dell'*imaging* mediante radionuclidi (*imaging* nucleare) la componente di segnale è un atomo radioattivo che viene inserito nella componente affine attraverso sostituzione isotopica (ad es. ^{12}C con ^{11}C), sostituzione non isotopica (^{1}H con ^{18}F) o attraverso l'introduzione di atomi di maggiori dimensioni come ^{68}Ga o ^{99m}Tc.

Questo cambiamento di prospettiva di osservazione tra fenomeni non specifici e specifici rappresenta un vero e proprio salto quantico nella comprensione e caratterizzazione delle malattie, nella diagnosi precoce, nella valutazione delle cure da adottare e nel "*follow-up*".

2. – *Imaging* nucleare

La crescente importanza che le tecniche che utilizzano radiotraccianti attualmente rivestono deriva dal fatto che esse costituiscono un valido approccio per l'indagine *in vivo* dei processi molecolari che avvengono a livello cellulare, come ad esempio processi di metabolizzazione anormale del glucosio (indice della presenza di

Tabella I. — Confronto tra le varie modalità di *imaging* molecolare.

Tecnica di *imaging*	Sorgente di segnale	Risoluzione spaziale (limiti attuali)	Sensibilità (mol/l)	Livello di informazione quantitativa	Livello di informazione morfologica
PET	raggi γ (511 keV)	1–2 mm	10^{-11}–10^{-12}	+ + +	+
SPECT	raggi γ (< 300 keV)	300 μm–1mm	10^{-10}–10^{-11}	++	+
Ottico Bioluminescenza	luce visibile	3–5 mm	Limite teorico 10^{-15}–10^{-17}	+/ + +	n.a.
Ottico Fluorescenza	luce visibile e vicino infrarosso	2–3 mm	Limite probabile 10^{-9}–10^{-12}	+/ + +	n.a.
RM	onde radio	25–100 μm	10^{-3}–10^{-5}	++	+ + +
TAC	raggi X (70–120 keV)	50–200 μm	n.a.	n.a.	+ + +

cellule neoplasiche) o di modificazioni metaboliche legate alla presenza o meno di cellule transgeniche. Ciò accade perché, in numerosi processi biologici, la concentrazione effettiva delle molecole coinvolte, quali ormoni, trasmettitori, messaggeri e trasportatori, è spesso inferiore a 10^{-11} o 10^{-12} mol/l.

Utilizzando le tecniche standard di indagine medicale che non utilizzano radionuclidi, quali Risonanza Magnetica (RM) e la Tomografia Assiale Computerizzata (TAC), non è possibile studiare precisamente i meccanismi coinvolti nelle interazioni biochimiche a livello pico- o sub-picomolare a causa della loro limitata sensibilità.

Negli ultimi anni le tecniche di *imaging* ottico stanno aprendo nuove frontiere grazie alla loro superiore sensibilità. Tuttavia, il limite principale per l'applicazione clinica risiede nella limitata efficienza di rivelazione in profondità nel tessuto superiori a 1–2 cm. In tabella I è mostrato un confronto tra le varie tecniche di *imaging* molecolare.

2.1. – PET e SPECT

La Tomografia a Emissione di Positroni (PET) è una tecnica della Medicina Nucleare che permette la misura *in vivo* della concentrazione locale di radiofarmaci che emettono positroni (β^+) (fig. 1). Il processo fisico utilizzato consiste nella rivelazione dei due fotoni di energia pari a 511 keV emessi in seguito al decadimento β^+ del

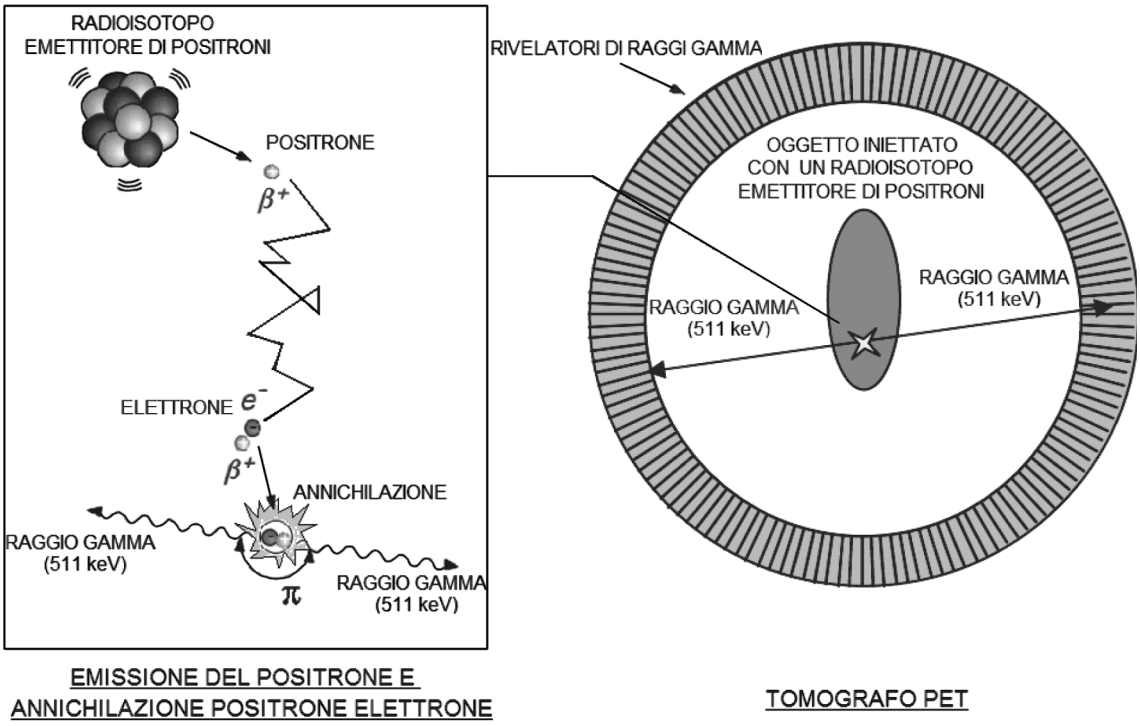


Fig. 1. – Principio fisico della tomografia a emissione di positroni (PET).

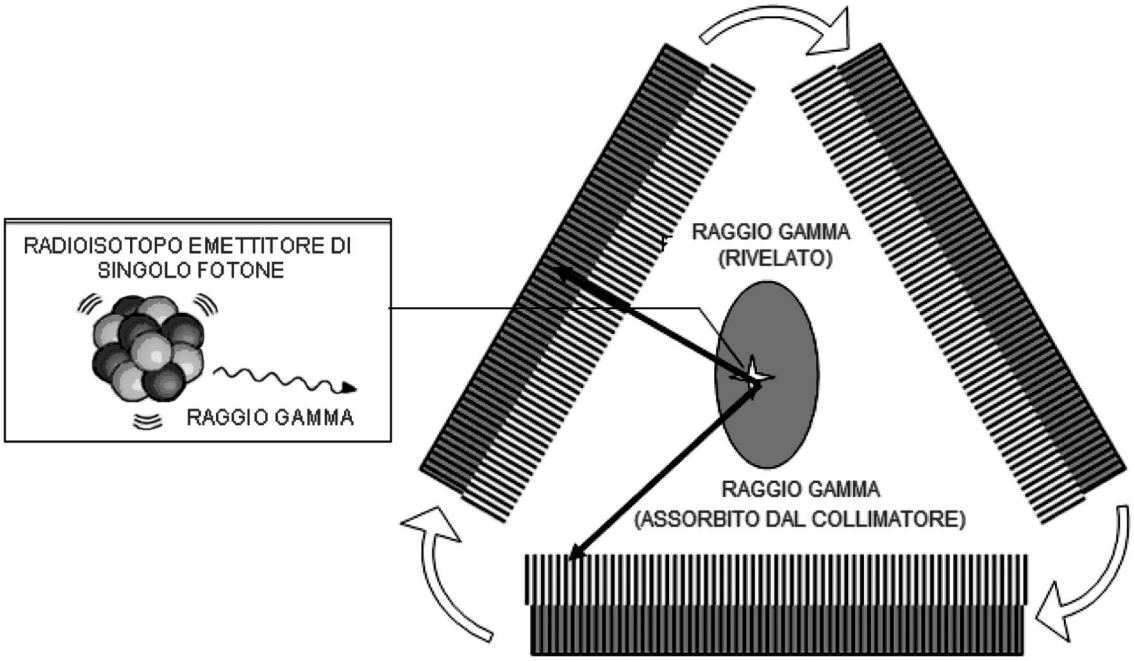


Fig. 2. – Principio fisico della Tomografia a Emissione di Singolo Fotone (SPECT).

radioisotopo e successiva annichilazione del positrone con un elettrone del tessuto. I due fotoni vengono emessi simultaneamente lungo la stessa direzione ma in verso opposto, e la loro direzione di volo viene misurata utilizzando una serie di rivelatori in coincidenza temporale posti attorno al paziente. La rivelazione in coincidenza dei due γ all'interno di una finestra temporale tipicamente di circa 10 ns definisce la linea di risposta (*Line-Of-Response* o LOR) e dunque la direzione lungo la quale è avvenuta l'annichilazione (collimazione elettronica).

Un tomografo PET è solitamente costituito da più anelli di rivelatori posti attorno all'oggetto da osservare. Ogni rivelatore è messo in coincidenza con i rivelatori che giacciono su un arco di circonferenza diametralmente opposto. L'intersezione tra tutti i settori così definiti definisce il campo di vista (FOV) del tomografo. L'acquisizione tomografica si ottiene registrando le LOR a vari angoli. Nella moderna tomografia 3-D sono ammesse coincidenze tra un piano e gli altri. La sensibilità della PET è relativamente elevata, nell'ordine di 10^{-11}–10^{-12} mol/l. Tipicamente alcuni milioni di cellule che incorporano il probe radiomarcato sono sufficienti a discriminare un determinato fenomeno dal fondo.

Nel caso della Tomografia a Emissione di Singolo Fotone (SPECT) vengono utilizzati emettitori di un singolo γ (fig. 2) In questo caso la direzione della linea di volo è determinata tramite collimazione geometrica attraverso opportuni collimatori passivi che tipicamente sono di piombo a fori paralleli.

Un tomografo SPECT è solitamente costituito da uno o più rivelatori piani, ciascuno accoppiato al relativo collimatore. In questo caso l'acquisizione tomografica avviene facendo ruotare i rivelatori attorno al paziente. Nel caso della SPECT il collimatore viene progettato cercando di ottenere il migliore compromesso tra sensibilità e risoluzione spaziale. Ad esempio, in un collimatore a fori paralleli, la riduzione della dimensione dei fori e l'aumento della lunghezza degli stessi ha come conseguenza l'aumento della risoluzione spaziale e la riduzione dell'efficienza e viceversa. L'utilizzo del collimatore ha come conseguenza un fattore di riduzione dell'efficienza di rivelazione dell'ordine di 10^{-4}.

Per entrambe le modalità un opportuno *software* di ricostruzione utilizza le informazioni delle LOR registrate a vari angoli e per determinate posizioni lungo l'asse per ottenere un'immagine della concentrazione del radioisotopo all'interno dell'organo in esame.

2.2. – Radioisotopi per PET e SPECT

Uno degli aspetti più interessanti della PET consiste nella possibilità di utilizzare radioiso-

Tabella II. — I principali radioisotopi utilizzati nella PET.

Isotopo	Emivita	Produzione
^{11}C	20,4 min.	ciclotrone
^{13}N	9,97 min.	ciclotrone
^{15}O	122 s	ciclotrone
^{18}F	109,7 min.	ciclotrone
^{62}Cu	9,74 min.	generatore $^{62}Zn/^{62}Cu$
^{64}Cu	12,7 h	reattore/ciclotrone
^{68}Ga	68,1 min.	generatore $^{68}Ge/^{68}Ga$
^{76}Br	16,1 h	reattore/ciclotrone
^{124}I	4,17 giorni	reattore/ciclotrone

topi corrispondenti ad elementi stabili presenti nella materia biologica (tabella II). Alcuni tra i radioisotopi β^+ emettenti hanno emivita breve, ^{11}C ($t_{1/2} = 20{,}4$ min), ^{13}N ($t_{1/2} = 9{,}97$ min), ^{15}O ($t_{1/2} = 2{,}05$ min), e sono presenti come carbonio (^{12}C), azoto (^{14}N) e ossigeno (^{16}O) nella forma isotopica non radioattiva nei sistemi viventi. Se sono sostituiti ad un atomo stabile di una molecola biologica non ne cambiano la biochimica permettendo, con un esame di tipo PET, di seguire *in vivo* la distribuzione di farmaci e agenti fisiologici radiomarcati (radiotraccianti) all'interno di un organo o di un determinato tessuto biologico.

Caso particolare è quello del ^{18}F ($t_{1/2} = 109{,}7$ min) che ha proprietà chimiche simili all'idrogeno e può essere sostituito a quest'ultimo in molte molecole naturali quali amminoacidi, carboidrati, lipidi ed una grande quantità di farmaci permettendo l'analisi di numerose funzioni metaboliche, con particolare riguardo alla metabolizzazione del glucosio. In generale il ^{18}F può essere utilizzato in molte molecole attive tramite la sostituzione di un atomo di idrogeno, portando alla formazione di composti che possono essere simili dal punto di vista biologico ai composti originali, anche se la loro relazione struttura/attività deve essere confermata da studi farmacologici e biochimici di volta in volta.

2.3. – Applicazioni PET e SPECT

Gli studi che possono essere eseguiti con le tecniche PET e SPECT vanno dalla diagnostica per immagini standard della medicina nucleare, attraverso una misura degli indici fisiologici (fig. 3 e fig. 4), fino a complesse analisi sulla cinetica dei farmaci attraverso misure quantitative assolute. Il tipo di analisi dipende dalle proprietà biochimiche del radiotracciante utilizzato. I farmaci radiomarcati possono essere suddivisi in due categorie. La prima categoria comprende i radiotraccianti aspecifici che seguono un determinato percorso biochimico e che permettono la misura dell'attività tessutale e metabolica, individuando se esistono in un organo processi fisiologici o biochimici anormali. Questo si ottiene confrontando la distribuzione all'interno dell'organo di un opportuno radiofarmaco con la distribuzione dello stesso in un organo sano. Radiofarmaci aspecifici per la PET sono ad esempio: ^{15}O-acqua, tracciante inerte principalmente usato per la misura del flusso sanguigno nel cervello, o ^{18}F-fluorodesossoglucosio (^{18}F-FDG), un precursore del glucosio che ne segue il processo di metabolizzazione. Nella SPECT un esempio è rappresentato dal ^{99m}Tc-Myoview per la misura della perfusione del miocardio. La seconda categoria comprende i radiotraccianti specifici che interagiscono direttamente con un sito ricettore e sono impiegati per rivelare (tracciare) uno specifico processo fisiologico o biochimico. A questa categoria appartengono ad esempio il ^{18}F-Fallypride usato nella PET per tracciare i recettori della dopamina D2, ed il ^{123}I-FP-CIT (Datscan) usato nella SPECT per lo studio del morbo di Parkinson.

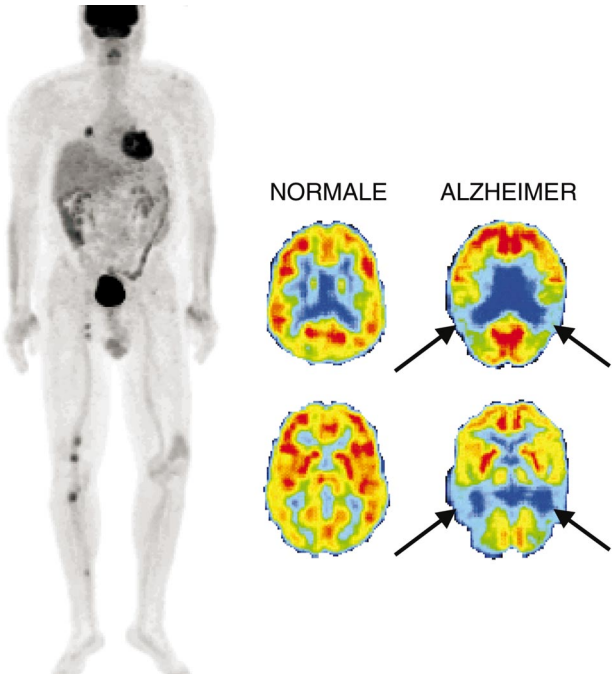


Fig. 3. – Esempi di applicazioni PET utilizzando ^{18}F-FDG. A sinistra una tomografia *total body* per diagnosi oncologica. A destra una applicazione in neurologia per la diagnosi del morbo di Alzheimer.

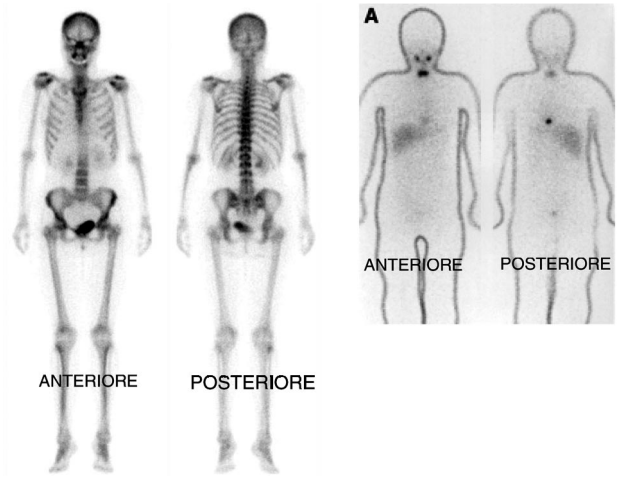


Fig. 4. – Esempi di applicazioni SPECT in oncologia. A sinistra una scansione ossea ottenuta con ^{99m}Tc. A destra un'immagine della tiroide ottenuta con ^{131}I.

Attualmente circa il 90% degli studi clinici PET riguardano indagini oncologiche effettuate con il ^{18}F-FDG. La SPECT è invece principalmente utilizzata, con radiotraccianti tecneziati, in oncologia per lo studio di metastasi ossee ed in cardiologia.

3. – *Imaging* su piccoli animali

L'utilizzo di "modelli animali" è uno strumento largamente usato nella ricerca per la comprensione dei processi che regolano le patologie sull'uomo per la valutazione delle terapie potenzialmente utili.

Lo sviluppo di protocolli di *imaging* molecolare tramite tecniche nucleari risulta particolarmente vantaggioso grazie alla possibilità di validare gli stessi *in vitro* e su modelli animali prima che un determinato studio venga fatto sull'uomo. Prima di procedere a sperimentazione su soggetti umani di nuovi farmaci o terapie, si eseguono infatti studi di biodistribuzione su animali, ossia si misurano le concentrazioni spaziali e temporali del farmaco nei tessuti. Inoltre, molte patologie tumorali umane sono state riprodotte con successo in animali da laboratorio, come tumori specifici o malattie degenerative del sistema neurologico quali ad esempio il morbo di Parkinson, e varie patologie cardiache. In questo campo le tecniche di *imaging in vivo* rivestono un ruolo fondamentale che contribuisce al miglioramento della qualità dei risultati nonché alla riduzione degli animali da sacrificare se confrontate con le normali tecniche *ex vivo* (come ad esempio l'autoradiografia). Analogamente alla validazione di neurofarmaci le tecniche nucleari per piccoli animali possono essere utilizzate per lo studio di nuovi farmaci antitumorali attraverso la possibilità di monitorare la captazione del farmaco, opportunamente radiomarcato, nelle cellule tumorali e nei successivi studi di "*follow-up*" sull'efficacia della cura stessa.

Nonostante la complessità ed il costo di strumentazione PET e SPECT per piccoli animali, le notevoli potenzialità offerte da queste tecniche giustificano il crescente interesse mostrato da vari laboratori di *imaging* molecolare nel mondo per la loro applicazione nella ricerca pre-clinica.

3.1. – Requisiti tecnologici per strumentazione di imaging nucleare su piccoli animali

A causa delle minori dimensioni degli oggetti da studiare l'*imaging* nucleare di piccoli animali come ratti e topi necessita dello sviluppo di strumenti dedicati in grado di offrire una risoluzione spaziale più elevata mantenendo, o migliorando, la sensibilità dei tomografi clinici. Ad esempio, in modalità PET, a fronte di una risoluzione spaziale di 4–6 mm FWHM ottenibile con strumentazione clinica, l'*imaging* del ratto richiede una risoluzione migliore di 2 mm, mentre per il topo sarebbe ideale una risoluzione $<$ 1mm. Negli ultimi anni sono stati sviluppati vari scanner PET per piccoli animali. Questi sistemi hanno tipicamente una risoluzione spaziale di 2 mm ma gli scanner di ultima generazione possono raggiungere una risoluzione volumetrica di $\sim$ 1 mm ^{3}.

La sensibilità dello strumento, definita come il rapporto tra il numero di conteggi rivelati nell'unità di tempo per unità di attività, è un parametro fondamentale per l'applicazione delle tecniche nucleari all'*imaging* di piccoli animali. In particolare un elevato valore di sensibilità si rende necessario quando si vanno ad effettuare studi dinamici di processi metabolici (con tempi caratteristici dell'ordine del tempo d'acquisizione) o quando si devono visualizzare sorgenti di bassa attività (processi a basso *uptake* come in ricerca genica). Ci sono inoltre limitazioni biologiche che non consentono di aumentare il valore di attività iniettata, in particolare quando si utilizzano radiofarmaci per studi recettoriali

(saturazione dei recettori), tipicamente 100–200 μCi per studi sui recettori cerebrali nel topo. Infine ci sono limiti sul volume iniettabile ($\sim$10% del volume totale di sangue).

4. – Limiti fondamentali delle tecniche PET e SPECT

4.1. – PET

In modalità PET la risoluzione spaziale massima ottenibile è limitata sia dalla fisica del decadimento β^+ sia dalle tecnologie utilizzabili per la rivelazione dei γ in coincidenza.

Il positrone viene emesso con un energia cinetica non nulla e viene rallentato nel tessuto attraverso interazioni coulombiane. La perdita di energia continua finché il positrone, raggiungendo l'equilibrio termico con il mezzo circostante, non annichila con un elettrone. Il *range* del positrone dipende dalla densità elettronica del mezzo. In acqua, che rappresenta la componente principale del tessuto biologico, il *range* del positrone emesso da un tipico radioisotopo per la PET è dell'ordine di 1–2 mm. Questo *effetto range* degrada la risoluzione spaziale del tomografo PET. L'effetto sulla FWHM misurata dallo strumento per vari isotopi è riportato in tabella III. In generale, l'annichilazione avviene con un elettrone legato quando il positrone ha raggiunto l'equilibrio termico. Come conseguenza i due fotoni non sono emessi a riposo e dunque si ha una deviazione dalla collinearità che, in acqua, vale $\pm 0.25°$. Questo porta ad una degradazione della risoluzione spaziale che può essere stimata in 2.2 mm FWHM per ogni metro di separazione tra i rivelatori. L'effetto *range* e la non collinearità sono i due processi fisici fondamentali che limitano la risoluzione spaziale della PET. La risoluzione ottenibile in PET dipende anche da altri fattori quali la dimensione dei cristalli, il sistema di lettura utilizzato (codifica), e l'algoritmo di ricostruzione. La FWHM della risoluzione spaziale ottenibile può essere dunque espressa come:

$$\mathrm{FWHM} = 1{,}2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + b^2 + (0{,}0022D)^2 + r^2 + p^2},$$

dove:

$1{,}2$ = fattore di degradazione dovuto alla ricostruzione tomografica;
d = dimensione dei cristalli;
b = inaccuratezza della codifica;
D = distanza tra i rivelatori;
r = dimensione efficace della sorgente, incluso il range del β^+;
p = errore di parallasse.

Quest'ultimo contributo può essere approssimato dalla formula:

$$p = \alpha\frac{r}{\sqrt{r^2 + R^2}},$$

dove r è la distanza dal centro, R è il raggio del tomografo ed α dipende dallo spessore e tipo di scintillatore (ad es. si assume $\alpha = 12{,}5$ per 30 mm di LSO o BGO). L'errore di parallasse è connesso con lo spessore non nullo del cristallo scintillatore utilizzato. Questo fa sì che in geometria ad anello le linee che non passano per il centro siano di fatto soggette ad una incertezza che aumenta all'aumentare della distanza del punto di emissione dei γ dal centro del tomografo.

Considerando tutti i vari effetti che limitano la risoluzione spaziale risulta evidente che la risoluzione spaziale di un tomografo PET per piccoli animali difficilmente potrà essere migliore di 0,8–0,9 mm FWHM.

Tabella III. — Contributo dell'effetto *range* per alcuni radioisotopi utilizzati in PET.

Isotopo	E_{cinetica} media dello spettro (MeV)	Range medio in acqua (mm)	FWHM (mm)
^{18}F	0,242	1,4	0,22
^{11}C	0,385	1,7	0,28
^{68}Ga	0,740	3,0	1,35

4.2. – SPECT

Diversamente dalla tecnica PET la SPECT non ha limiti intrinseci di risoluzione spaziale. Le uniche limitazioni stanno nel trovare un ottimale compromesso tra risoluzione spaziale e sensibilità. Infatti nel caso di un collimatore a fori paralleli la risoluzione spaziale stimata come FWHM della *point spread function (PSF)* è data da

$$\mathrm{FWHM} = D + d\cdot(D/L),$$

dove D è il diametro del foro, d è la distanza dalla sorgente e L è la lunghezza dei fori: la risoluzione spaziale aumenta dunque con l'avvi-

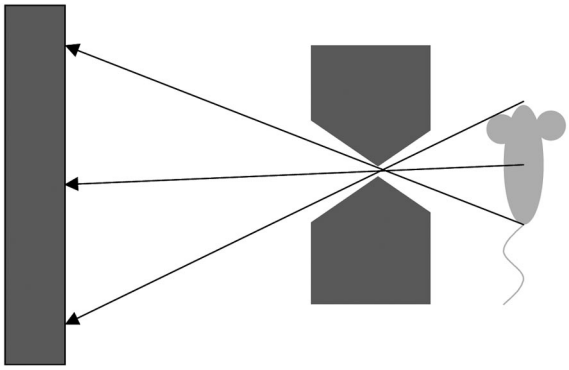


Fig. 5. – Principio dell'*imaging* SPECT a *pinhole*.

cinarsi dell'oggetto al collimatore. La sensibilità geometrica è invece data da

$$g \propto (D/L)^2 \cdot (D^2/(D+h)^2),$$

dove h è lo spessore del setto tra i fori.

Negli ultimi anni, specialmente nel campo dell'*imaging* ad alta risoluzione su piccoli animali si sta diffondendo l'uso di collimatori a *pinhole*. Questi consistono in un unico foro con una forma a doppio cono (fig. 5). In questo caso la FWHM della risoluzione spaziale geometrica è data da:

$$\mathrm{FWHM} = D_e/b \cdot (d+b),$$

dove d è la distanza della sorgente dall'apertura del collimatore e b è la distanza dello scintillatore dall'apertura. D_e rappresenta il diametro efficace del *pinhole*, che dipende non solo dal diametro geometrico D ma anche dal coefficiente di attenuazione lineare del materiale di cui è fatto il collimatore e dalla sua apertura angolare. Per limitare la penetrazione in prossimità del bordo del foro, questi collimatori sono solitamente costruiti in materiale ad alto numero atomico (ad esempio oro). Per quanto riguarda la sensibilità, a differenza dei collimatori a fori paralleli, per un *pinhole* questa è proporzionale a d^{-2}. Sfruttando l'ingrandimento dell'immagine si possono ottenere immagini ad alta risoluzione di oggetti piccoli (piccolo FOV) rispetto alle dimensioni del rivelatore, pur mantenendo la sensibilità che si otterrebbe con collimatori a fori paralleli. Aumentando ulteriormente la magnificazione è possibile ottenere risoluzioni spaziali dell'ordine di poche centinaia di micron anche utilizzando le camere a scintillazione usate in clinica. Utilizzando più fori (*multi-pinhole*) e riducendo la magnificazione è possibile ottenere immagini ad alta risoluzione su campi di vista sufficienti alla visualizzazione "*total body*" di piccoli roditori.

5. – Attuale tecnologia per la strumentazione per PET e SPECT per piccoli animali

Tipicamente la rivelazione dei gamma si ottiene con un materiale scintillante opportunamente segmentato che converte la radiazione in luce visibile, in combinazione con un opportuno fotorivelatore sensibile alla posizione, capace di fornire le coordinate del punto di impatto del γ nello scintillatore (vedi fig. 6).

5.1. – Scintillatori

L'utilizzo di scintillatori è il metodo più utilizzato per la rivelazione di raggi gamma in medicina nucleare. Lo scintillatore è responsabile della conversione dell'energia di ionizzazione depositata dai γ in luce la quale è poi rivelata e amplificata dal fotorivelatore. Per gli scanner PET e SPECT sono usati scintillatori inorganici.

I più importanti parametri fisici che caratterizzano le prestazioni di uno scintillatore per PET e SPECT sono (vedi tabella IV):

– L'efficienza di rivelazione, che dipende dalla densità ρ e il numero atomico efficace (Z_{eff}), che influenzano la lunghezza di attenuazione (λ) per i γ secondo la formula aprossimata $\lambda \infty \rho\,(Z_{\mathrm{eff}})^4$, e dalla sezione d'urto per effetto fotoelettrico.

– La risoluzione energetica, che è associata alla resa di luce dello scintillatore (N_{fotoni}/MeV), definita come il numero di fotoni di fluorescenza emessi per MeV di energia persa dal gamma per

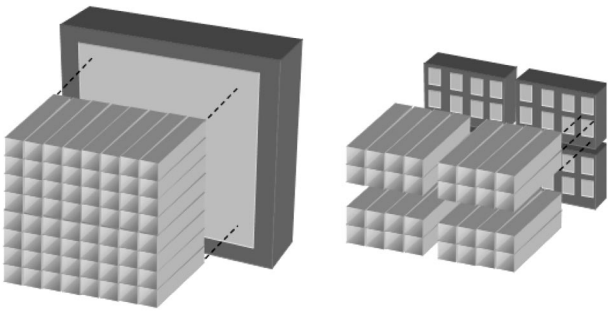


Fig. 6. – Esempi di accoppiamento matrice di scintillatore-fotorivelatore. A sinistra una matrice di scintillatore è letta da un fotomoltiplicatore di grande area sensibile alla posizione (codifica elettronica). A destra ogni cristallino di un elemento di matrice è letto da un singolo APD (accoppiamento uno-a-uno).

Tabella IV. — Caratteristiche fisiche dei tipici materiali scintillanti utilizzati in SPECT(1) e PET(2).

Materiale	Densità (g/cm^3)	Z_{eff}	Resa di luce (fotoni/MeV)	Tempo di decadimento (ns)	Lunghezza d'onda (picco) (nm)	Lunghezza di attenuazione (511 keV)	Indice di rifrazione	Probabilità di effetto fotoelettrico. (%)
NaI:Tl(1)	3,76	51	41000	230	410	29,1	1,85	17
BGO (2)	7,13	75	9000	300	480	10,4	2,15	40
LSO:Ce(2)	7,4	66	30000	40	420	11,4	1,82	32
GSO:Ce(2)	6,71	59	8000	600	440	14,1	1,85	25
CsI:Tl(1)	4,51	52	66000	1000	565	22,9	1,80	21
LuAP:Ce(2)	8,3	64/9	12000	18	365	10,5	1,94	30
LaBr:Ce(1), (2)?	5,29	46/9	63000	16	380	21	1,9	15
YAP:Ce(1), (2)	5,37	33/5	23000	27	370	21,3	1,95	4,2

un evento di assorbimento totale nel cristallo. L'intensità della luce di fluorescenza riduce, infatti, l'allargamento statistico come $\sqrt{\varepsilon N_{\text{fotoni}}}$, dove ε è l'efficienza di raccolta della luce da parte del fotorivelatore. Nella maggior parte degli scintillatori la resa di luce dipende linearmente dall'energia rilasciata.

– La risoluzione temporale, che è associata al tempo di decadimento della transizione fluorescente, che quindi influisce sulla capacità di discriminare eventi in coincidenza (per la PET) nonché sul rate massimo di conteggio del rivelatore. Per applicazioni PET ad alto rate di conteggio, il tempo di decadimento dovrebbe essere il più corto possibile per permettere una buona risoluzione di coincidenza temporale e minimizzare gli eventi di coincidenza accidentale. Il contributo principale alla FWHM osservata nell'allargamento temporale può essere presentato come $\Delta t = \tau/N_{\text{fotoni}}$, dove τ è la costante di decadimento dello scintillatore e N_{fotoni} è il numero totale di fotoni emessi dallo scintillatore.

– Altri parametri caratteristici sono la lunghezza d'onda di emissione e l'indice di rifrazione (che sono importanti per l'accoppiamento con il fotorivelatore), nonché le proprietà meccaniche e igroscopiche, la resistenza alla radiazione, il costo e la disponibilità sul mercato.

5.2. – Fotorivelatori

Per l'identificazione del cristallino dove è avvenuta l'interazione si utilizzano attualmente fotomoltiplicatori sensibili alla posizione (PS-PMT). Questi fotomoltiplicatori, attraverso una struttura multi-anodica, che può essere a fili incrociati o a matrice di anodi indipendenti, forniscono le informazioni sufficienti ad ottenere una buona codifica della posizione del punto di interazione. La lettura dei vari anodi avviene solitamente tramite una catena resistiva che riduce notevolmente il numero di canali da acquisire.

Negli ultimi anni si è osservato un crescente interesse per lo sviluppo di rivelatori per *imaging* nucleare (in particolare PET per piccoli animali) basati su fotorivelatori a stato solido quali ad esempio fotodiodi a valanga (APD) in alternativa ad i PS-PMT (vedi fig. 6). Questi sistemi sono caratterizzati da un accoppiamento uno-a-uno tra cristallo scintillatore e fotorivelatore, superando di fatto il problema della codifica. Conseguentemente, non si ha perdita di risoluzione spaziale dovuta alla misura del baricentro della luce emessa o dovuta alla codifica elettronica, come avviene nei PS-PMT, potendo di fatto limitare la risoluzione spaziale alla sola dimensione del cristallino. Questo avviene a prezzo di una maggiore complessità dell'elettronica di acquisizione e elaborazione dovuta al maggior numero di canali (uno per *pixel*) da trattare. Un ulteriore vantaggio di soluzioni basate su APD consiste nella possibilità di utilizzare tali dispositivi anche in presenza di forti campi magnetici senza variazioni nelle loro prestazioni. Questo risulta di notevole interesse per lo sviluppo di sistemi di *imaging* nucleare combinato con RM. Nonostante le prestazioni dei dispositivi APD attualmente disponibili, i PS-PMT mantengono tuttavia il loro vantaggio in termini di maggiore guadagno e minore rumore elettronico. Inoltre il principale svantaggio degli APD per applicazioni PET è la loro limitata risoluzione temporale e la forte dipendenza del guadagno dalla temperatura.

6. – Sistemi commerciali PET e SPECT per piccoli animali

Ogni anno vengono sviluppati, da parte di vari laboratori in tutto il mondo, nuovi prototipi PET e SPECT per piccoli animali, che offrono o promettono prestazioni sempre migliori. Allo stesso tempo, alcuni *scanner* sono sviluppati in versioni completamente ingegnerizzate e sono disponibili commercialmente.

Il primo scanner PET per piccoli animali disponibile sul mercato è stato il Concorde MicroPET, sviluppato inizialmente presso l'UCLA di Los Angeles ed ora sviluppato e commercializzato dalla Siemens/CTI [http://www.ctimi.com/]. Questo scanner ha una classica configurazione ad anello ed utilizza matrici di LSO:Ce accoppiate a PS-PMT da 1" tramite fibre ottiche. Ha una elevata sensibilità, circa 7%, ed una risoluzione spaziale <1.3 mm FWHM, entrambe misurate al centro del campo di vista. Simili prestazioni sono offerte dal tomografo eXplore Vista commercializzato dalla General Electric [http://www.gehealthcare.com/]. Anche questo tomografo è basato su un anello stazionario di rivelatori. In questo caso la risoluzione spaziale al centro del FOV vale 1.4 mm FWHM mentre la sensibilità è circa il 4%. Questo scanner utilizza matrici di scintillatori a doppio strato (GSO/LYSO) in modo tale da controllare l'effetto del parallasse e limitare la degradazione di risoluzione spaziale lontano dal centro del FOV. Altri esempi sono lo *scanner* ClearPET, sviluppato dal progetto ClearPET della collaborazione Crystal Clear al CERN ed ora distribuito da Raytest [http://www.raytest. de/] e lo scanner Philips MOSAIC animal PET [http://www.medical. philips.com/], che basa la sua tecnologia sui rivelatori dello scanner clinico Allegro PET. Una menzione a parte merita il tomografo Quad HIDAC-PET della Positron System Ltd. [http://www.oxpos.co.uk/]. Questo è l'unico sistema ad utilizzare camere proporzionali a gas a multi-filo in combinazione con una struttura addizionale per la conversione e la moltiplicazione degli elettroni prodotti dall'interazione del gamma (*HIgh Density Avalanche gas Chamber* — HIDAC). Per aumentare la sensibilità, questo scanner utilizza quattro rivelatori posti su un sistema rotante, ciascuno dei quali dotato di otto HIDAC. Con questa tecnologia, il tomografo Quad-HIDAC offre la più elevata risoluzione spaziale tra tutti gli scanner disponibili (circa 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 1mm al centro del FOV con una sensibilità dell'1,8%.

Alcuni esempi di scanner SPECT per piccoli animali sono la NanoSPECT inizialmente sviluppata al Research Center di Julich (Germania) e commercializzata da Bioscan Inc. [http://www.bioscan.com/] e la X-SPECT della GammaMedica-IDEAS [http://www.gammamedica.com/].

La NanoSPECT utilizza fino a quattro teste di rivelazione poste su un supporto rotante basate su rivelatori a NaI:Tl. A ciascuna di queste possono essere accoppiati vari collimatori a *multi-pinhole* (fino a 9 fori) offrendo una risoluzione spaziale sub-millimetrica ed una sensibilità fino a 2500 cps/MBq. Lo scanner X-SPECT si basa su due rivelatori a NaI:Tl con pixel da 2 mm di passo letti da fotomoltiplicatori sensibili alla posizione. A questi possono essere accoppiati vari collimatori a *pinhole* singolo o a fori paralleli. La risoluzione spaziale massima è 0,62 mm FWHM (utilizzando un collimatore a *pinhole* di 0,5 mm $\varnothing$) mentre la sensibilità massima è 855 cps/MBq (con un collimatore a *pinhole* di 2,0 mm $\varnothing$).

6.1. – YAP-(S)PET

Il tomografo YAP-(S)PET è attualmente l'unico scanner per piccoli animali capace di combinare le tecniche PET e SPECT (fig. 7). Questo tomografo, inizialmente sviluppato dalle Università di Ferrara e Pisa, con il contributo dell'INFN, è stato successivamente ingegnerizzato dalla ditta ISE di Pisa [http://www.ise-srl.com/] ed è oggi disponibile in versione commerciale. La versione attuale è composta da quattro teste di rivelazione poste su un sistema rotante; ogni testa è composta da una matrice 4×4 cm^2 di scintillatore YAP:Ce formata da 400 cristallini ciascuno di $2 \times 2 \times 25$ mm^3, accoppiata ad un PS-PMT Hamamatsu R2486. In modalità PET le teste opposte distano 15 cm tra loro e sono poste in coincidenza.

Il passaggio alla modalità SPECT è possibile montando un collimatore in piombo a fori paralleli ad alta risoluzione (0,6 mm $\varnothing$, 0,15 mm di setto) in fronte ad ogni rivelatore. Per entrambe le modalità il campo di vista è un cilindro 4 cm $\varnothing$, 4 cm di lunghezza. Per la ricostruzione delle immagini sono utilizzati sia algoritmi analitici (retroproiezione filtrata o FBP) che statistici (*Expected Maximization* o EM).

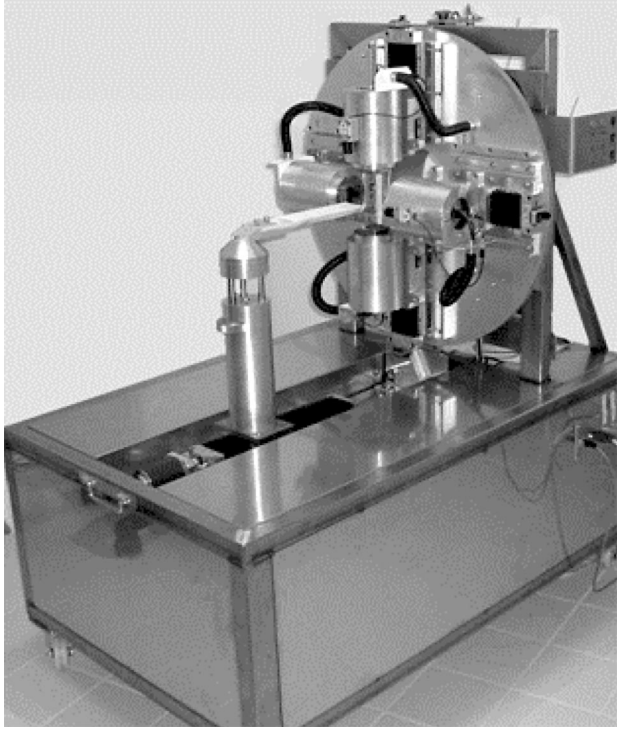


Fig. 7. – Foto del tomografo YAP-(S)PET del Centro di Eccellenza AmbiSEN dell'Università di Pisa, istallato presso l'IFC-CNR di Pisa.

In modalità PET la massima risoluzione spaziale, misurata al centro del FOV (ricostruzione FBP) vale 2,3 mm × 2,3 mm × 2,0 mm (Radiale × Tangenziale × Assiale) FWHM, mentre usando l'EM questa si riduce a 1,8 mm × 1,8 mm × 1,7 mm (R×T×A) FWHM. La sensibilità assoluta misurata al centro del FOV vale 22 cps/kBq (2,2%). Per quanto riguarda la SPECT la risoluzione misurata sul piano transassiale vale 3,8 mm FWHM usando l'FBP mentre si riduce a 2,7 mm FWHM con l'EM. La sensibilità in SPECT vale 37 cps/Mbq. Alcuni esempi di applicazioni di *imaging* molecolare ottenuti con il tomografo YAP-(S)PET sono mostrati in fig. 8.

7. – Futuro della strumentazione per *imaging* nucleare

Gli sforzi per il miglioramento delle prestazioni della strumentazione nucleare per l'*imaging* molecolare sono concentrati principalmente sull'incremento di risoluzione spaziale e di sensibilità. Il superamento dei limiti attuali passa necessariamente attraverso lo sviluppo di nuovi materiali di rivelazione dei raggi γ e di nuovi fotorivelatori. Nel caso della PET ad esempio l'incremento della sensibilità attraverso l'aumento dello spessore del cristallo ha come conseguenza un incremento dell'errore di parallasse e dunque una degradazione della ri-

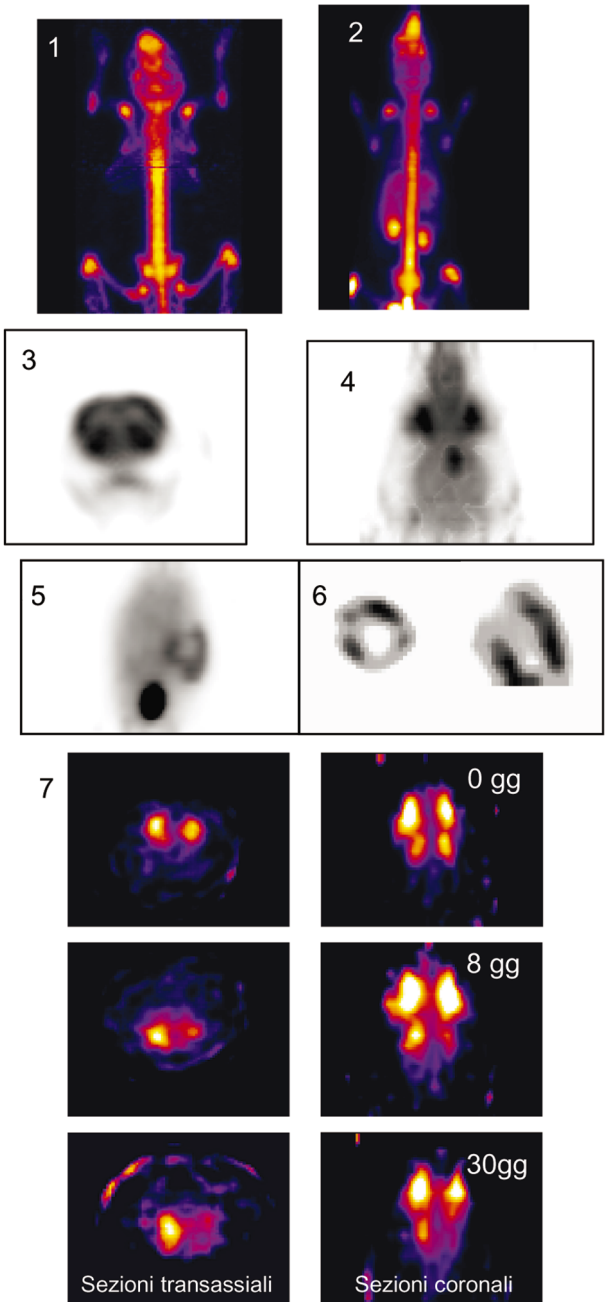


Fig. 8. – Esempi di applicazioni di *imaging* molecolare con il tomografo YAP-(S)PET. Immagini dello scheletro di un topo ottenute con 1) $^{18}F^{-}$ (PET) e 2) ^{99m}Tc-MDP (SPECT); 3) studio del metabolismo del glucosio del cervello in ratti ipotiroidei (immagine transassiale) con ^{18}F-FDG (PET); 4) studio oncologico su gliomi umani nel cervello di ratto con ^{18}F-FDG (PET); 5) studio oncologico sul tumore della prostata in topi con ^{18}F-FDG (PET); 6) studi di perfusione del miocardio di ratto (immagini transassiale e coronale del ventricolo sinistro) con ^{99m}Tc-Myoview (SPECT); 7) evoluzione temporale di una lesione monolaterale indotta (modello di malattia di Huntington) nel cervello di ratto con ^{11}C-raclopride (PET).

soluzione spaziale. A tale proposito sono state proposte molte tecniche per determinare una stima della profondità di interazione (*Depth-Of-Interaction* o DOI): ad esempio misurando il rapporto tra la luce di scintillazione rivelata ai lati opposti dello stesso cristallo usando due fotorivelatori, oppure segmentando il cristallo stesso in due strati in modo che il sistema di fotorivelazione sia capace di distinguere le interazioni che avvengono in ciascuno strato.

Dal punto di vista della ricerca su nuovi scintillatori il parametro che influenza la sensibilità è ρZ_{eff}^4. Tra tutti i materiali utilizzati, il valore più elevato si ha per il BGO. La ricerca di nuovi cristalli scintillatori è dunque focalizzata al mantenimento del valore di ρZ_{eff}^4 simile a quello del BGO, migliorando però quei parametri per i quali il BGO non è ottimale, come ad esempio la costante di decadimento del processo di emissione della luce (che influenza la larghezza della finestra di coincidenza), la luminosità di scintillazione (che influenza sia l'accuratezza nella determinazione del punto di rivelazione che la risoluzione energetica). Un ulteriore miglioramento, che potenzialmente ha un notevole impatto nelle prestazioni della PET, sarebbe la riduzione della risoluzione temporale di un ordine di grandezza. Questo, oltre a ridurre la frazione di eventi accidentali renderebbe possibile l'utilizzo delle informazioni sul tempo di volo (*Time-Of-Flight* o TOF) per la ricostruzione delle immagini. Con una risoluzione temporale di 500 ps sarebbe possibile limitare il punto di annichilazione del positrone ad un segmento inferiore a 7,5 cm, mentre una risoluzione di 50 ps consentirebbe di limitare la LOR ad un segmento di 0,75 cm riducendo notevolmente la degradazione della risoluzione spaziale connessa con la ricostruzione delle immagini. Tali valori sono però lontani dall'essere raggiunti anche se con l'uso di un cristallo come il LaBr:Ce sembra possibile il raggiungimento di una risoluzione temporale dell'ordine di 300–500 ps. Un tale valore consentirebbe quanto meno una diminuzione della varianza del fondo, che nel caso di una risoluzione temporale di 500 ns per un oggetto di 30 cm corrisponderebbe ad una riduzione della varianza di un fattore 5×, risultando di fatto equivalente ad un aumento della sensibilità.

Anche lo sviluppo di nuovi fotorivelatori riveste un ruolo importante per il futuro dell'*imaging* nucleare. Due sono gli approcci che si stanno seguendo. Da un lato si stanno proponendo sistemi che superino le limitazioni della codifica (il parametro b), principalmente tramite APD, mentre dall'altro si stanno studiando rivelatori basati su un blocco di scintillatore accoppiato a fotorivelatori ad alta granularità, capaci di misurare con grande precisione il baricentro della macchia, superando di fatto il problema delle dimensioni del cristallo (il parametro $d/2$). Un nuovo fotorivelatore che sta riscuotendo un notevole interesse a livello internazionale è il *Silicon PhotoMultiplier* (o SiPM). Il SiPM è un rivelatore a diodo di silicio molto promettente per applicazioni di *imaging* nucleare e non solo. In pratica il SiPM è una matrice di piccole celle APD in modalità Geiger (GAPD), ognuna delle quali ha una dimensione tipicamente di $40\times40\ \mu\mathrm{m}^2$ per un totale di celle dell'ordine del migliaio così da raggiungere le dimensioni di 1 mm × 1 mm (fig. 9). La modalità Geiger in cui lavora ogni cella produce un elevato guadagno (5×10^5–1×10^6) a tensioni di alimentazione relativamente basse (dell'ordine di 50 V). Tutte le microcelle sono connesse tra loro in parallelo così da ottenere un'uscita proporzionale per moderati flussi di fotoni entranti (il range dinamico è circa pari al numero di microcelle). Le prestazioni sono comparabili o migliori con quelle dei convenzionali PMT, ma con la compattezza (e la totale insensibilità ai campi magnetici) tipica dei rivelatori a semiconduttore.

8. – *Imaging* multimodale

L'*imaging* con radionuclidi fornisce informazioni relative alla fisiologia e al metabolismo, ma non dà informazioni morfologiche, che permettano di localizzare esattamente i siti di accumulazione del radionuclide. Inoltre l'attenuazione dei fotoni e lo *scattering* rendono le im-

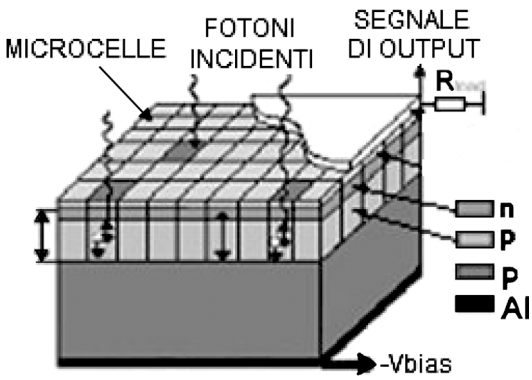


Fig. 9. – Disegno schematico della tipica configurazione di un SiPM.

magini PET e SPECT difficili da usare in studi quantitativi. Negli ultimi anni l'uso di sistemi di *imaging* con doppia modalità è stato sperimentato per varie applicazioni cliniche (neurologia, cardiologia ed oncologia). Uno degli aspetti più interessanti è la fusione di una tecnica che dia informazioni morfologiche (TAC) con una che fornisca informazioni funzionali (PET o SPECT). La tomografia computerizzata (TAC) fornisce immagini morfologiche 3-D degli oggetti analizzati e le informazioni anatomiche della TAC possono essere usate per compensare i limiti delle tecniche di *imaging* con radionuclidi. La TAC permette lo svolgimento di studi quantitativi più accurati, grazie all'individuazione delle regioni di interesse nelle immagini nucleari. I sistemi PET/TAC stanno diventando una tecnica standard per le indagini cliniche, mentre i sistemi SPECT/TAC stanno emergendo adesso.

Lo sviluppo di sistemi integrati capaci di svolgere tecniche di *imaging* complementari (per esempio PET/TAC o SPECT/TAC) rappresenta la nuova frontiera per il campo dell'*imaging in vivo* di piccoli animali. Per l'*imaging* di piccole strutture anatomiche, come quelle dei piccoli animali quali topi o ratti, è però necessaria una maggiore risoluzione spaziale rispetto a quella delle TAC cliniche. Oggi iniziano ad essere disponibili sul mercato alcuni *scanner* PET e SPECT combinati con TAC (in un unico dispositivo o unendo due *scanner* separati).

Oltre alla combinazione di tecniche morfologico-funzionali si stanno studiando anche combinazioni di strumentazioni capaci di fornire maggiori informazioni combinando tecniche di *imaging* molecolare che siano complementari. Una di queste è ad esempio la PET/RM: in questo caso, sarebbe possibile ottenere non solo informazioni funzionali (o spettroscopiche), ma anche ulteriori informazioni morfologiche ad alta risoluzione tipiche della RM da integrare con quelle della PET.

Altre interessanti combinazioni che si stanno studiando sono la PET/SPECT simultanea (possibile ad esempio nel tomografo YAP-(S)PET) e la PET combinata con *imaging* ottico.

L'*imaging* multimodale, nelle sue varie espressioni, rappresenta di fatto il futuro dell'*imaging* molecolare. Nessuna delle tecniche che abbiamo illustrato rappresenta infatti la tecnica di elezione capace di fornire tutte le risposte e non va mai dimenticato che la scelta della tecnica da utilizzare dipende dallo studio che si vuole effettuare. La combinazione di più tecniche di *imaging* molecolare fornirà in futuro la possibilità di studiare nuovi protocolli di ricerca ed aprirà nuove possibilità per lo sviluppo ulteriore dell'*imaging* molecolare.

Letture consigliate

M. E. Phelps, "Positron emission tomography provides molecular *imaging* of biological processes", *Proceedings of the National Academy of Science*, **97** (16) (2000) 9226-9233.

S. R. Cherry, S. S. Gambhir, "Use of Positron Emission Tomography in animal research", *ILAR Journal*, **42** (3) (2001) 219-232.

A. Del Guerra, N. Belcari, "Advances in animal PET scanners", *Quarterly Journal of Nuclear Medicine*, **46** (2002) 35-47.

J. L. Humm, A. Rosenfeld, A. Del Guerra, "From PET detector to PET scanners", *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **30** (11) (2003) 1574-1597.

T. F. Massoud, S. S. Gambhir, "Molecular imaging in living subjects: seeing fundamental biological processes in a new light", *Genes & Development*, **17** (2003) 545-580.

S. R. Meikle *et al.*, "Small animal SPECT and its place in the matrix of molecular imaging technologies", *Physics in Medicine and Biology*, **50** (2005) R45-R61.

A. Del Guerra, *Ionizing radiation detectors for medical imaging* (World Scientific, Singapore) 2004.

RECENSIONI

M. Martini, M. Milazzo and M. Piacentini (Editors)

Physics Methods in Archaeometry. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course CLIV.

Società Italiana di Fisica, Bologna; IOS Press, Amsterdam, Oxford, Tokyo, 2004; pp. XVIII + 503

C'è una dimensione nelle opere d'arte che sfugge normalmente al fruitore e spesso anche allo specialista, a causa della loro prevalente formazione umanistica. Eppure si tratta di una dimensione culturale non separabile dagli elementi linguistici, dai canoni estetici e dai parametri storici ai quali facciamo abitualmente riferimento ogni volta che osserviamo e valutiamo un'opera d'arte. Tale dimensione è espressa dai materiali utilizzati e dalle procedure tecniche impiegate per la realizzazione dell'opera. Le antiche culture, in mancanza di precisi dati e documenti storici, sono appunto scandite e quindi definite dai materiali e dalle tecniche. I grandi artisti di ogni epoca erano prima di tutto superbi artigiani, che conoscevano profondamente i materiali e le procedure e ne erano sovente custodi dei segreti. Spesso l'evoluzione delle arti, pur correlandosi a importanti rivolgimenti storici, politici ed economici, è resa possibile da innovazioni tecnologiche. Vi è dunque una dimensione dell'opera d'arte che, se non può sostituire quella linguistica, estetica e storica, ne è però complemento necessario. La sola giustificazione per non considerarla è spesso la semplice mancanza di conoscenze scientifiche sufficienti per poterla apprezzare. Non è che servano grandi conoscenze. Basterebbe che nella formazione scolastica si ricordasse che lo sviluppo tecnologico e le sue conseguenze economiche hanno inciso sulla storia assai più delle grandi battaglie.

Questa premessa serve a magnificare il ruolo che la fisica e la scienza dei materiali hanno assunto, ormai da molti anni, nella definizione, valutazione e conservazione dei beni culturali, e nel far apprezzare al pubblico e agli studiosi la dimensione tecnica dell'opera d'arte. La quarta dimensione, appunto, a fianco di quelle linguistica, estetica e storica. Un settore fondamentale della fisica e scienza dei materiali applicate ai beni culturali è l'archeometria. Non serve sottolineare che la datazione, la determinazione dell'origine e la caratterizzazione strutturale dei manufatti sono preliminari ad ogni valutazione storica ed estetica, e anzi indispensabili per evitare macroscopiche cantonate da parte degli esperti nell'assegnazione delle opere d'arte. Ad esempio l'esame microscopico della lavorazione superficiale sarebbe bastato a smascherare la burla dei falsi Modì, evitando una figuraccia ad alcuni celebri studiosi (anche se in tal caso ci saremmo divertiti assai meno). Ai metodi fisici nell'archeometria è stato dedicato nel 2003 un corso della Scuola Enrico Fermi di Varenna, diretto da tre grandi esperti: Marco Martini, del Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano Bicocca, Mario Milazzo, dell'Istituto di Fisica Generale Applicata dell'Università di Milano e Mario Piacentini, del Dipartimento di Energetica della Sapienza a Roma. Dal corso è stato ricavato questo magnifico volume di oltre 500 pagine nel quale i tre curatori hanno raccolto ventisei lezioni che coprono i numerosi aspetti dell'attuale archeometria fisica, per sua natura disciplina altamente interdisciplinare.

Evito di elencare gli argomenti trattati, sarebbe troppo lungo. Segnalo la serie di quattro lezioni di W. Andrew Oddy che spaziano dalle dorature alla fabbricazione di fili metallici nell'età del bronzo, dall'affascinante vicenda della sepoltura di Sutton Hoo all'arte di smascherare antiche falsificazioni. Cito ancora le lezioni di Michael Tite, Università di Oxford, che fece parte del *pool* di laboratori che datarono la Sindone di Torino, assegnandola inequivocabilmente al 14° secolo. Qui Tite si occupa di cose più generali e importanti quali gli aspetti generali dell'archeometria, la tecnologia di produzione dell'antica ceramica, dei materiali vetrosi e della ceramica invetriata. A parte qualche articolo dotato inevitabilmente di equazioni, il libro si distingue per una larga maggioranza di testi discorsivi e di interesse per un pubblico ben più ampio di quello scientifico. Per questo vanno ampiamente lodati i curatori. Anzi varrebbe certamente la pena che essi selezionassero il materiale per un'edizione divulgativa, con belle illustrazioni, rivolta alla massa dei frequentatori di musei e fruitori delle opere d'arte. Si coglierebbe così il duplice obiettivo di far conoscere e apprezzare la quarta dimensione dell'opera d'arte, e di instillare una maggiore fiducia nella scienza in quanto produttrice di evidenze contro le numerose e dubbie mitologie che circondano molti antichi manufatti.

G. Benedek

J. Steinberger

Learning about Particles-50 Privileged Years.

Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005; pp. X + 181; Euro 39,95

Jack Steinberger, fisico americano di origine tedesca, premio Nobel per la fisica nel 1988 è stato uno dei protagonisti del grande sviluppo della fisica delle particelle elementari dal secondo dopoguerra fino ai tempi presenti.

In questo agile libretto, una sorta di autobiografia scientifica, egli ripercorre la sua vita dall'infanzia in Germania, a una difficile adolescenza da emigrato negli Usa, agli anni a Chicago con Enrico Fermi, proseguendo nella sua progressiva affermazione professionale nei vari laboratori e università americane da Berkeley a Brookhaven, da Princeton alla Columbia sino all'attività al CERN di Ginevra dove giunge nel 1968.

È un testo che sarà letto con interesse e piacere specialmente dagli addetti ai lavori che hanno conosciuto direttamente la persona o comunque la sua produzione scientifica, dove ritroveranno buona parte della storia della fisica delle particelle subatomiche, illustri personaggi del settore e l'atmosfera degli inizi.

I primi capitoli rievocano l'ambiente familiare nella piccola comunità ebraica della cittadina di Bad Kissingen, da dove a 13 anni fuggirà le persecuzioni antisemite partendo da solo col fratello maggiore verso l'America, ospite di famiglie benevole.

I genitori arriveranno solo 2 anni dopo e si stabiliranno a Chicago traendo un modesto reddito da un piccolo negozio.

Nel 1946 l'occasione della sua vita e la sua definitiva scelta scientifica si concretizzano con l'arrivo all'università di Chicago allora dominata dalla figura di Fermi e vivaio di molti suoi giovani e brillanti allievi.

Sulla base della tesi suggerita da Fermi ottiene il suo primo risultato scientifico rilevante confermando lo spettro continuo degli elettroni di decadimento del muone, cui seguono, nel 1949/1950, durante un proficuo soggiorno a Berkeley, tre importanti esperimenti sui pioni neutri e carichi.

Il testo prosegue e ogni capitolo — con dovizia di illustrazioni — è successivamente dedicato al suo tema di ricerca prevalente: dai pioni alle particelle strane, dai neutrini agli studi della violazione di *CP*, quindi al CERN i neutrini di nuovo e l'esperimento ALEPH al collider e+e-LEP.

Qui il racconto è tutto incentrato sulla descrizione degli esperimenti e del progressivo sviluppo delle conoscenze del settore, lungo un arco di tempo di circa 50 anni, dai tempi "eroici" dove con apparati semplici, da soli o con pochi collaboratori e in poco tempo si affrontavano e si risolvevano problemi ed interrogativi posti da via via da nuovi fenomeni ed osservazioni, fino agli anni recenti che hanno visto consolidarsi il quadro teorico nel cosiddetto Modello Standard ma anche l'evoluzione del settore verso la "*Big Science*" con esperimenti che richiedono impegni decennali e gruppi di molte centinaia di fisici.

L'autore guida il lettore in questo percorso illustrando volta per volta in maniera divulgativa sia i singoli esperimenti che la loro motivazione teorica soffermandosi sulle tappe fondamentali. È pure sottolineata l'importanza degli sviluppi tecnologici, dalla costruzione di acceleratori sempre più potenti ai progressi nel campo dei rivelatori (dalle camere a nebbia agli scintillatori plastici, dalle camere a bolle alle camere a scintilla e a fili).

Dal testo traspare l'entusiasmo e la dedizione dello scienziato per la sua ricerca e anche la soddisfazione (il privilegio) per aver assistito e contribuito ai grandi sviluppi e scoperte di questo ramo della fisica fondamentale.

Forse invece non emerge appieno tutta la forte personalità di Jack Steinberger, la sua qualità di fisico e di *leader* capace di individuare e concentrarsi sul nocciolo dei problemi senza attardarsi nei dettagli. Dopo i primi capitoli dedicati agli anni giovanili l'esposizione è molto focalizzata sulla fisica e le notazioni e riflessioni personali si fanno più scarse. Sparsi nel testo troviamo accenni alle sue simpatie di sinistra (che gli hanno creato qualche problema) alle sue passioni sportive e all'interesse per la musica; questi aspetti sono poi ripresi e illustrati assieme alla sua storia familiare nell'epilogo alla fine del volume.

Giorgio Capon

A. Stajano

Research, Quality, Competitiveness.

European Union Technology Policy for the information Society. Springer, Heidelberg, 2006; pp. XXIV+464; Euro 114,35

Uno dei principali obiettivi da tempo perseguiti dall'Unione Europea resta la realizzazione di un efficace collegamento fra ricerca accademica e mondo produttivo per incrementare l'innovazione e competitività nei confronti di USA e nazioni asiatiche. In questo quadro la posizione del nostro Paese risulta particolarmente debole, ma indubbiamente esistono margini di recupero che dovrebbero però essere adeguatamente utilizzati. Fortunatamente un numero crescente di fisici italiani si sta facendo carico del problema oltre che con iniziative personalmente promosse, anche attraverso la diretta partecipazione a progetti specifici del VI Programma quadro della UE oltre che a progetti EUREKA ed a programmi nazionali o bilaterali.

Tuttavia spesso mancano informazioni precise del contesto in cui occorre agire: dai principali indicatori economici dei vari paesi europei, alle regole di accesso e alla gestione dei finanziamenti disponibili e ciò rischia di rendere meno effficace l'intervento di persone che pure possiedono elevate competenze specifiche e notevoli capacità gestionali.

Attilio Stajano, un brillante fisico che dopo venti anni di attività di ricerca nella grande industria informatica ha lavorato per oltre un decennio presso l'Unione Europea, ha provveduto a fornire a *manager High Tech* ed a ricercatori che intendono appunto partecipare allo sforzo che l'Europa sta compiendo — purtroppo con la partecipazione assai episodica dell'Italia — per sostenere l'odierna globale sfida tecnologica, un prezioso testo di riferimento attraverso il volume "*Research*, *Quality*, *Competitiveness*" edito da Springer e pubblicato nel maggio di quest'anno.

Il libro è suddiviso in tre parti che dell'Europa illustrano rispettivamente l'attuale quadro istituzionale, il livello di competitività e la politica per la ricerca e le nuove tecnologie. Oltre ai principi ed ai concetti generali vengono riportati una gran quantità di dati statistici ed una vastissima bibliografia per di più integrata da specifici approfondimenti disponibili su CD-ROM accluso al volume.

"*Research*, *Quality*, *Competitiveness*" è una descrizione pragmatica dello stato e delle prospettive di queste tre componenti nell'attuale congiuntura e delle loro importantissime ricadute sul piano culturale ed economico e potrà essere letto con profitto da tutti coloro che in qualsiasi parte del mondo abbiano responsabilità o semplicemente interesse nei confronti dei problemi della formazione, della ricerca, dello sviluppo.

Per quanto riguarda in particolare i fisici italiani la lettura del libro di Stajano è particolarmente raccomandata, e non solo a quelli che intendono proporre progetti a livello europeo ma a tutti, dal momento che adeguati, oculati investimenti nell'istruzione curriculare e permanente, nelle infrastrutture tecnologiche e nella ricerca, rappresentano l'unica via per invertire l'attuale declino del Paese e che i fisici dovrebbero porsi in prima linea ai fini di una corretta utilizzazione delle risorse disponibili per una salutare inversione di tendenza.

Si ha infatti l'impressione che alcuni di essi risposino ancora su allori accademici che si vanno vieppiù appassendo senza porre le proprie potenzialità che pure sono notevoli, al servizio di una ripresa culturale ed economica di cui l'Europa e l'Italia in particolare hanno urgente bisogno.

Occorre inoltre sottolineare che l'accrescimento delle conoscenze deve rientrare in un quadro di cui la loro tempestiva e corretta utilizzazione rappresenta una componente essenziale. Ciò ovviamente vale non solo per il nostro paese dal momento che una serie di nuovi problemi a cominciare dalla sostenibilità dello sviluppo investono oramai tutto il pianeta. Sembra tuttavia che in Italia buona parte della comunità scientifica ed in particolare della sua componente accademica stenti a rendersene conto, probabilmente tuttora affascinata dal ricordo di un tempo in cui l'utilizzazione delle nuove conoscenze avveniva pressoché esclusivamente da parte di una schiera di addetti ai lavori con i quali gli scienziati potevano avere contatti assai limitati. Le cose sono ora radicalmente e irreversibilmente cambiate, da quando cioè i limiti allo sviluppo si stanno delineando con crescente chiarezza, indicando inoltre che è necessario mettere la scienza, soprattutto quella più avanzata, al servizio non solo della cultura e del benessere ma oramai della sopravvivenza stessa della collettività.

A tal fine il libro di Stajano costituisce unn elemento prezioso di comprensione appunto delle metodologie e delle regole che sono alla base di questa nuova dimensione della scienza e per la comprensione ed auspicabilmente soluzione di tutta una serie di problemi con i quali volenti o nolenti dobbiamo misurarci.

A. Paoletti

A. Drago

La riforma della dinamica secondo G.W. Leibniz. Testi originali e loro interpretazione moderna.

Hevelins Edizioni, Benevento, 2003; pp.142; Euro 12.00

Il libro discute la fisica di Leibniz e le sue polemiche con l'ambiente culturale dell'epoca (in particolare Cartesio e Newton), presentando anche alcuni lavori di Leibniz, in italiano.

La presentazione del dibattito storico è interessante e per qualche verso illuminante, ma ciò che difetta a mio avviso nel libro, è una visione veramente prospettica, ancorata a una chiara consapevolezza della sistemazione che questi problemi hanno avuto, da allora ad oggi.

In questo senso ritengo ci siano, nell'analisi degli interessanti documenti presentati, alcune occasione mancate.

In generale l'analisi leibniziana, illustrata nel libro, parte da un qualche particolare problema o principio della dinamica, e lo usa come strumento per una rilettura di tutto l'assieme (in contrapposizione per esempio alla lettura di Newton).

Un punto particolarmente caro a Leibniz è quello della presunta riformulazione della dinamica che parta dalle leggi di conservazione (in particolare dell'energia) anziché dalle equazioni dellla dinamica.

A questo proposito però si deve ricordare che, se in un problema dianamico sono note le forze agenti e le condizioni al contorno e si sanno integrare le equazioni del moto, il problema in questione è completamente risolto, nel senso che tutte le leggi di conservazione sono implicite e quindi superflue.

È vero che in molti problemi posti dalla lettura del mondo (per esempio le applicazioni statistiche che portano alla termodinamica) l'impostazione dinamica basata sulle equazioni del moto non è perseguibile, e la conservazione dell'energia diventa quindi strumento insostituibile per ottenere risultati; ma dire oggi che questo equivale a una rifondazione della dinamica, mi pare quanto meno improprio.

Un altro approccio caro a Leibniz è quello che parte dai problemi d'urto meccanico fra corpi elastici. Qui non ci sono le aborrite (per Leibniz) forze a distanza, e il problema pare efettivamente più tratabile dal punto di vista delle leggi di conservazione (dell'energia e della quantità di moto).

È noto che la teoria dell'urto, sia classica che quantistica, è un capitolo fondamentale della fisica moderna, soprattutto per quanto riguarda l'indagine sul microcosmo. Ebbene, la posizione unificante che assumono i testi moderni, è quella di definire in generale il problema d'urto come un problema a due corpi con condizioni al contorno di energia totale positiva, condizioni indispensabili perché gli stati asintotici iniziale e finale (a enegia potenziale nulla) risultino accessibili al sistema. In questa definizione non si specifica il tipo di interazione (salvo l'ipotesi ovvia di annullamento all'infinito), e si prescinde quindi dagli aspetti (solo apparentemente) patologici che emergono nel caso particolare dell'interazione di contatto.

In questo contesto sono particolarmente interessanti le argomentazioni di Leibniz riportate alla pagine 113 e seguenti, che con linguaggio moderno potrebbero essere così riassunte.

Consideriamo l'urto frontale elastico di una palla da biliardo contro un'altra inizialmente ferma. L'energia dello stato iniziale, pari all'energia cinetica del proiettile, è uguale all'energia dello stato finale, somma delle energie cinetiche del proiettile che rimbalza e del bersaglio che rincula. Ma c'è un momento (l'istante dell'urto) in cui il proiettile s'è fermato nell'atto di invertire la marcia (ammettendo come ipotesi di lavoro che il bersaglio sia più massivo del proiettile), e il bersaglio non si è ancora messo in moto. In quell'istante l'energia cinetica del sistema è nulla, e ciò che manca al bilancio energetico non può essere dato che dall'energia di deformazione elastica, ovvero dall'energia potenziale interna ai due oggetti. Ma ciò vuol dire che se noi immaginiamo al posto delle palle da biliardo due oggetti puntiformi elementari privi di struttura interna (e quindi incapaci di portare energia potenziale), il processo descrittivo non può avvenire, e da ciò si deduce che *i corpi non hanno elementi irriducibilmente primitivi*.

Le conclusioni (sbagliate) hanno portata filosofica straordinaria in quanto demoliscono ogni possibile teoria atomistica, sulla base di argomentazioni apparentemente ineccepibili. È qui che il confronto con l'attuale diventa illuminante, poiché dimostra la debolezza della pura logica, senza il sostegno della sperimentazione.

Oggi noi sappiamo che una descrizione dell'interazione protone-protone può essere realisticamente descritta nei termini di cui sopra, pur essendo il protone (almeno entro certi limiti energetici) una particella elementare. Come mai? Perché il protone è bensì semplice e quindi indeformabile, ma è però sorgente del campo elettrico tramite il quale interagisce con l'altro protone, e le variazioni di energia potenziale che servono a chiarire il paradosso, si riferiscono ai campi di forze.

Se consideriamo l'urto di un protone con un neutrone che è scarico, la dinamica è la stessa, salvo il fatto che scompare la forza elettrostatica a lungo raggio, e sopravvive solo quella nucleare a raggio breve. Per energie sufficientemente elevate interviene il *core* repulsivo dell'interazione forte, e il problema somiglia allora moltissimo al problema delle palle da biliardo.

In altre parole il confronto con l'attualità spiega l'apparente paradosso, in quanto riconosce la necessità dell'unificazione fra il punto di vista newtoniano dell'interazione a distanza e quello leibniziano dell'interazione di contatto; e quindi implicitamente respinge una classificazione assurda delle due visuali come formulazioni alternative della dinamica. Queste conclusioni mi sembrano ovvie e rilevanti per chiunque consideri la storia della scienza come struimento didattico per capire meglio il mondo, e non come possibile occasione di *scoop*.

All'interno di queste problematiche ci sono altre riflessioni sui corpi duri non deformabili, che mi sembrano però marginali e poco interessanti, una volta chiarito il problema fisico. In particolare non mi sembrano rilevanti ma solo curiose, alcune notazioni riportate nel libro, come per esempio la seguente:

"*L'atteggiamento di Newton, riferendosi a corpi perfettamente duri che non cambiano di forma, qualsiasi sia la violenza dell'urto, corrisponde chiaramente al comportamento ideale di un oppressore violento; mentre l'atteggiamento di Leibniz — giuste le sue convinzioni pacifiste — corrisponde all'atteggiamento non violento*".

L'impressione, che manchi all'analisi un solido ancoraggio con il panorama attuale consolidato, viene confermata dalla disinvoltura con cui si maneggiano le formule, nei pochi casi in cui il testo viene formalizzato. Per esempio a pagina 34 si riportano di seguito tre formule in cui le variabili x, y rappresentano prima le coordinate e poi le velocità, senza che ciò sia adeguatamente spiegato, e a pagina 35 si introduce il momento della quantità di moto nella forma $m\mathbf{v}\cdot\mathbf{r}$, che potrebbe far pensare a un prodotto scalare anziché vettoriale.

G. Pisent

SCELTI PER VOI a cura di Sergio Focardi

UNA BILANCIA MECCANICA PER PROTONI

Come recentemente pubblicato su *Nano Letters*, un gruppo di CalTech ha realizzato una bilancia meccanica in grado di misurare masse di 7×10^{-21}g, cioè 7 zeptogrammi. Malgrado la sensibilità raggiunta permetta di misurare la massa di 30 atomi di xenon, il gruppo di ricercatori è ben lungi dal ritenersi soddisfatto: il suo prossimo obiettivo è una bilancia meccanica capace di misurare la massa del singolo protone ($1,66 \times 10^{-24}$g). Numerosi gruppi, nel mondo, stanno cercando di abbassare la sensibilità di bilance meccaniche perché intravedono applicazioni nella realizzazione di versioni su nanoscala di spettrometri di massa. La gara fra i diversi gruppi che lavorano in questo campo ebbe inizio nel 2003 quando due ricercatori del *Oak Ridge National Laboratory* in Tennessee annunciarono di aver misurato composti organici con una massa di 10^{-15}g; un anno dopo il loro limite fu abbassato di 3 ordini di grandezza.

La maggior parte di queste nanobilancie è costruita con sottili fili di silicio o altri materiali resistenti ancorati a una estremità come trampolini oppure ad entrambi gli estremi, come ponti. Innescando oscillazioni nei fili, la frequenza cambia quando si aggiunge una piccola massa.

Il gruppo di CalTech per calibrare lo strumento costruì una serie di ponti fatti di carburo di silicio fra loro collegati, inserì il tutto in una camera a vuoto in un intenso campo magnetico e fece passare una corrente da un filo al successivo. I fili sotto l'azione esercitata dal campo magnetico sulle correnti entrarono in oscillazione con una frequenza di 133 o 190 MHz controllata da un circuito specifico: come risultato fu ottenuta una particolare distribuzione di tensioni ai capi dei differenti fili. Iniettando nella camera sotto vuoto atomi di xenon o molecole di azoto, la frequenza di oscillazione diminuì quando questi si posarono sui fili, producendo una variazione della distribuzione di tensioni. A partire dal 2002 la sensibilità dell'apparato è stata aumentata di 3 ordini di grandezza, ma altra strada dovrà essere percorsa per riuscire a misurare la massa del protone: dovranno essere realizzati fili più sottili in modo da aumentare la loro frequenza di oscillazione, migliorando anche il circuito di reazione. Il vantaggio delle nanobilance rispetto agli spettrometri di massa consiste nel fatto che questi ultimi lavorano su milioni di molecole e calcolano la massa media.

Science, **312**, 5 maggio 2006, pag. 683

UN NANO-PONTEGGIO PER RIDARE LA VISTA AI CIECHI

Animali resi ciechi per danneggiamento del nervo ottico hanno recuperato parzialmente le loro capacità visive grazie ad un nano-ponteggio che ha permesso la ricrescita del nervo ottico. La tecnica paragonata dai suoi inventori al modo in cui un traliccio favorisce la crescita dell'edera dà la speranza che le persone con il nervo ottico ammalato o danneggiato possano un giorno recuperare la vista. Il nervo ottico che collega l'occhio al cervello può venire danneggiato in incidenti stradali o dal glaucoma, quando un eccesso di pressione intraoculare provoca il collasso del tessuto oculare interno separando le fibre nervose e provocando una progressiva perdita della visione. La riparazione del nervo ottico richiede che gli assoni ricrescano e si riconnettano: si può favorire questo processo trattando gli assoni con fattori di crescita, ma raramente essi crescono abbastanza da colmare le distanze tipiche della maggior parte dei danni prodottisi. Per superare queste difficoltà, un gruppo di ricercatori cinesi ha costruito una impalcatura di sostegno per il nervo fatta di fibre formate da nanoparticelle delle stesse dimensioni dei complessi di zuccheri e proteine esistenti sulla superficie degli assoni strappati, nella speranza di incoraggiare in questo modo la crescita delle cellule e la loro migrazione. Per verificare se l'ipotesi di lavoro fosse corretta sono stati impiegati criceti i cui nervi ottici erano stati deliberatamente recisi iniettando loro nel cervello, in vicinanza del sito danneggiato una miscela di peptidi. Dopo sei mesi gli animali avevano recuperato in parte la capacità visiva essendo in grado di trovare il cibo. Il risultato ha permesso di stimare che 30 000 assoni si erano riconnessi, un fattore 1000 in più di quanto ottenuto in precedenti esperimenti in cui era stato utilizzato un fattore di crescita. Il risultato ha suscitato entusiasmo fra gli addetti ai lavori anche se occorre cautela perché la rigenerazione dei tessuti nervosi è diversa in specie fra loro differenti e non è detto che negli esseri umani avvengono le stesse cose che accadono nei roditori.

New Scientist, 18 marzo 2006, pag. 30

SICURI O PERICOLOSI?

La domanda si riferisce ai telefoni cellulari, il cui numero complessivo nel mondo raggiungerà nel corso dell'anno i due miliardi. Lo scorso gennaio, ricercatori inglesi hanno pubblicato i risultati di loro competenza dello studio, denominato *Interphone*, un progetto internazionale che coinvolge 13 paesi e che dal 1998 sta studiando la tendenza a usare telefoni cellulari da parte di persone con tumori cerebrali: in sintesi coloro che usano regolarmente il cellulare non corrono maggiori rischi di chi ne fa uso saltuario. Nello stesso tempo, un gruppo della Università di Ulm ha confermato i risultati di un altro progetto internazionale denominato *Reflex* secondo cui la radiazione emessa dai telefoni mobili potrebbe danneggiare il DNA: cautela vorrebbe che non si permettesse l'uso di tali telefoni al di sotto dei nove anni. Altri ricercatori in questo campo sostengono che rotture del DNA e variazioni nella espressione dei geni non implicano necessariamente che si verifichi un danno.

Una situazione più chiara potrà emergere quando, nel giro di alcuni mesi, sarà completata l'analisi e saranno pubblicati i risultati di *Interphone* anche se alcuni gruppi, in particolare quello tedesco, sono meno ottimisti dei colleghi inglesi, ritenendo che nel lungo termine l'uso dei cellulari possa provocare danni agli utenti. Nel frattempo, un gruppo dell'*Imperial College* di Londra ha iniziato uno studio, che sarà pubblicato il prossimo anno, sulla pericolosità delle antenne, riportando su una mappa tutti i casi di tumore in bambini di età inferiore ai 4 anni correlati alla distanza dalle antenne.

Nel frattempo, mentre le vendite di questi telefoni sono in costante aumento, in attesa di sapere quali saranno i risultati delle inchieste, altro non ci resterà da fare se non immaginare come sarebbe la nostra vita senza di loro!

New Scientist, 4 febbraio 2006, pag. 8

ANNUNCI

Fondazione "Angelo Della Riccia"

Fondazione Italiana eretta in Ente morale con R.D. 19.07.41 n'979 con sede in Firenze Fondazione Svizzera con sede in Glarus

Bando per l'anno accademico 2006/2007

I Consigli di Amministrazione delle Fondazioni sopra indicate hanno deliberato di mettere a concorso a favore di giovani italiani studiosi di microfisica, che nell'anno accademico 2006/07 intendano recarsi all'estero per studi e ricerche e necessitino di sussidi per tutto o parte del loro fabbisogno, le somme di

Euro 250.000,00 da parte della Fondazione italiana

Euro 60.000,00 da parte della Fondazione svizzera

con assegnazione direttamente nel Paese in cui verrà svolta l'attivita' di studio o di ricerca.
Gli aspiranti dovranno inviare **esclusivamente** all'indirizzo della Fondazione, **Casella Postale 38, 50123 Firenze** non oltre il termine improrogabile del **30 Settembre 2006** (fa data il timbro postale), una domanda in carta semplice corredata da:

- dichiarazione sottoscritta di essere cittadino italiano residente in Italia, di non avere riportato condanne penali e di non aver procedimenti penali in corso.Tale attestato deve inoltre contenere la esplicita dichiarazione: "Presto espressamente il mio consenso a che la Fondazione Angelo Della Riccia effettui il trattamento dei dati personali che mi riguardano per l'adempimento degli scopi statutari della stessa e per le attività collegate, nessuna esclusa o eccettuata, il tutto ai sensi e per gli effetti della legge n. 675/1996 e successive modifiche";
- curriculum scientifico documentato da pubblicazioni ed ogni altro elemento che sia ritenuto utile allo scopo (tutto il materiale rimarrà agli atti della Fondazione);
- piano di attività che si intende svolgere all'estero, con l'indicazione del centro di studi prescelto, della prevedibile durata del soggiorno, del preventivo di spesa e di ogni altro emolumento (assegni, borse di studio, salari, ecc.) che possa essere percepito nel periodo di utilizzo della assegnazione;
- lettera di accettazione dell'Istituto presso il quale si intende svolgere gli studi;
- eventuali lettere di presentazione del candidato da parte di fisici senior.

Inoltre dovrà essere inviato via rete, sempre entro la improrogabile data del **30 settembre 2006, il modulo** reperibile all'indirizzo **http://theory.fi.infn.it/casalbuoni/dellariccia/** La mancanza di tale modulo è motivo di esclusione dal concorso. Copia del modulo inviato via rete dovrà essere allegata alla documentazione inoltrata via posta.

Gli aspiranti che abbiano già usufruito di un contributo da parte della Fondazione italiana o della omonima Fondazione svizzera sono pregati di indicarne nella domanda l'ammontare e l'anno e sono invitati ad unire alla richiesta un sintetico consuntivo dei risultati conseguiti. Per Statuto la sovvenzione non può essere accordata più di due volte eccezion fatta per coloro che intendano conseguire il dottorato di ricerca all'estero, nel qual caso il Comitato scientifico potrà proporre la sovvenzione una terza volta. I sussidi ottenuti devono essere utilizzati entro il **31 Dicembre 2007**. La Fondazione procede all'assegnazione sulla base dei giudizi insindacabili espressi dal Comitato scientifico che esamina i progetti di lavoro e di ricerca presentati dai candidati verificandone la rispondenza con gli scopi e con le disposizioni statutarie dell'Ente. Ulteriori informazioni sono disponibili sul sito della Fondazione **http://theory.fi.infn.it/casalbuoni/dellariccia/**
La Fondazione Angelo Della Riccia comunica che il trattamento dei dati personali degli aspiranti avviene in conformità della legge 675 del 1996 e successive modifiche. Coloro che inviano la domanda di sovvenzione nei modi e nei termini sopra descritti prendono atto di ciò e, con l'invio, consentono che il trattamento dei dati che li riguardano venga effettuato dalla Fondazione Angelo Della Riccia per l'adempimento degli scopi statutari della stessa sia per quanto riguarda l'attuazione del bando per l'anno accademico 2006/07 sia per le eventuali attività collegate, nessuna esclusa o eccettuata.
In considerazione di ciò, lo Statuto della Fondazione è disponibile presso il sito internet **http://theory.fi.infn.it/casalbuoni/dellariccia/**

Il Presidente della Fondazione
Prof. Roberto Casalbuoni
dell'Università di Firenze

Firenze 30 aprile 2006

CAS

THE CERN ACCELERATOR SCHOOL

CERN Accelerator School
National Atomic Energy Agency, Warsaw
AGH University of Science and Technology, Cracow

Announce a course on

"Introduction to Accelerator Physics"

Hotel Belvedere, Zakopane, Poland
1 - 13 October 2006

For further information:
CERN Accelerator School
CH - 1211Geneva 23, Switzerland
fax: +41 22 767 5460
e-mail: Barbara.Strasser@cern.ch
web:http://cas.web.cern.ch/cas/Zakopane-2006/Zakopane-advert.html

"Big opportunity is in the small (nano) scale of thinking"
Insight, Knowledge, and Global Networking in the Nano Economy

You are invited to participate in the upcoming

International Congress of Nanotechnology

ICNT 2006

October 30-November 2, 2006, San Francisco

Nanomaterials
Nanodevices
Nanoelectronics
Nanomedicine
Nano drug delivery
Nanobiotechnology
Aerospace Industries
Textile Industries
Energy Industries
Nano manufacturing
Semiconductor Industries
Biopharmaceutical Industries

Capital Funding & Grants
International Standards
Education & Training
Intellectual Property
Nanotech Initiatives
Nano Manufacturing
Molecular Engineering
International Standard
Nanoparticles Toxicology
Nomenclature Terminology
Health & Safety Implications
Societal & Environmental Impacts

http://www.nanotechcongress.com

For further information:
2386 Fair Oaks Boulevard
Sacramento, CA 95825
P.O. Box 231823
Sacramento, CA 95823 USA
Tel. 916-529-4119 Fax. 916-244-7029
e-mail: program@ianano.org
service@ianano.org

Workshop
Theoretical Approaches for the Genome

8–10 November 2006
LAPTH, Annecy-le-Vieux, France

organised by

UNIVERSITE CHAMBERY ANNECY SAVOIE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

For further information:
Véronique Jonnery, tel: (33) 4 50 09 16 83
LAPTH, 9 Chemin de Bellevue, B.P. 110
F-74941 ANNECY-LE-VIEUX Cedex, FRANCE
Tel: +33 4 50 09 16 84 Fax: +33 4 50 09 89 13
LAMA, Campus Scientifique, Bât. Le Chablais
F-73376 LE BOURGET DU LAC Cedex, FRANCE
Tel: +33 4 79 75 87 20 Fax: +33 4 79 75 81 42

ASSOCIAZIONE PER L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA
Gruppo Storia della Fisica

Scuola di Storia della fisica
Corso di formazione

L'EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI CAMPO DALL'OTTOCENTO AI GIORNI NOSTRI

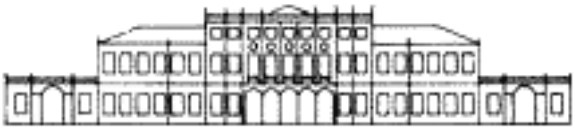
MEMO Multicentro Educativo di Modena Sergio Neri
Col patrocinio del Comune di Modena

27 novembre - 1 dicembre 2006

Direttore del corso Carla Romagnino

Iscrizione: l'iscrizione è gratuita per tutti i soci AIF. Si effettua inviando la scheda di partecipazione o per posta, all'indirizzo: Carla Romagnino, via Alghero 37, 09127 Cagliari; o per e-mail all'indirizzo: carlaromagnino@tiscali.it. E' possibile prelevare la scheda d'iscrizione dal sito www.a-i-f.it. Si raccomanda di fare l'iscrizione il più presto possibile e di confermarla entro il 20 ottobre 2006.

For further information:
e-mail: carlaromagnino@tiscali.it
web:http://www.a-i-f.it/STORIA/Scuola%202006/progr2006.php



International Workshop
"Collective phenomena in macroscopic systems"

Villa Olmo, Como, Italy
December 4-6, 2006

For further information:
Chiara Stefanetti
Organizing Secretariat
Centro di Cultura Scientifica "A. Volta"
FAX: +39.031.573395
e-mail: collective@centrovolta.it
web-site: http://www.centrovolta.it/collective/collective.html

@ITIM 2006

7° Congresso Nazionale

DELL' ASSOCIAZIONE ITALIANA DI TELEMEDICINA E INFORMATICA MEDICA

Sistemi Informativi Sanitari Regionali, Standards, Informatica Biomedica, Web Services in Telemedicina

Workshop Nazionale di GRID in Sanità

Torino
11-13 Dicembre 2006

In collaborazione con

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Istituto di Tecnologie Biomediche

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Torino

For further information:
tel. +39 0362 627190
fax +39 0362 337840
e-mail: segreteria@aitim.net
website: www.aitim.net

Polo Tecnologico Universitario Desio
VILLA TITTONI - TRAVERSI
Desio (Milano) Lombardia Region

IMMIT: INTERNATIONAL MASTER ON MEDICAL INFORMATICS & TELEMEDICINE

October 2006 - September 2007

TWO COURSES ON
PHYSICS, TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS OF PARTICLE ACCELERATORS

EUROPEAN SCIENTIFIC INSTITUTE ESI

haute savoie Conseil Général

Intensive programme for graduate students
Credits available from the European partner universities (ECTS)
Modular courses for professionals

Scholarships available for students

8 January - 16 March
at Archamps (France), 10 km from Geneva (Switzerland)

JUAS 2007
Joint Universities Accelerator School

For further information:
Joint Universities Accelerator School
European Scientific Institute
Centre Universitaire
F-74166 Archamps
Tel: +33 4 50 31 50 03
Fax: +33 4 50 95 38 01
e-mail: juas@esi.cur-archamps.fr
web: http://juas.in2p3.fr

2006

DOMANDA DI ISCRIZIONE alla SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nome _____

Cognome _____

Data di nascita _____

① Istituto o Ente di Appartenenza _____

_____

② Indirizzo privato _____

_____

Indirizzo e-mail _____

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

_____

_____

Indirizzo a cui inviare il Bollettino della Società e la corrispondenza: ① ②

Firme leggibili dei Soci Presentatori — Nome in stampatello

1) _____ _____

2) _____ _____

Socio individuale: Euro 45 ☐
Socio al di sotto dei 30 anni: Euro 30 ☐
Membri di altre associazioni scientifiche relative alla fisica*: Euro 30 ☐
*Informazioni e modulistica: http://www.sif.it/membership_it.php
Socio collettivo: Euro 260 ☐
Socio sostenitore: (a partire da) Euro 310 ☐

La quota di iscrizione dovrà essere pagata dopo aver ricevuto comunicazione dell'accettazione della domanda.

Data _____ Firma _____

Presto il consenso del trattamento dei miei dati personali ai sensi del D.Lgs. 30 giugno 2003, n.196

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

QUOTE SOCIALI E ABBONAMENTI 2007

Quota di associazione alla Società Italiana di Fisica:

Socio individuale		☐ € 45,00
Socio al di sotto dei 30 anni		☐ € 30,00
Socio membro di altre Associazioni Scientifiche (*)		☐ € 30,00
Socio collettivo		☐ € 260,00
Socio sostenitore	(a partire da)	☐ € 310,00

(*) Informazioni e modulistica: http://www.sif.it/membership_it.php

Quote di abbonamento ai periodici della Società Italiana di Fisica:

	soci	**non soci**
Il Nuovo Cimento B	☐ € 622,30	☐ € 821,40
Il Nuovo Cimento C	☐ € 315,20	☐ € 398,30
Rivista del Nuovo Cimento	☐ € 331,80	☐ € 431,40
Abbonamento cumulativo alle 3 riviste	☐ € 1079,00	☐ € 1403,40
Giornale di Fisica	☐ € 78,00	☐ € 98,00
Quaderni di Storia della Fisica		
Per gli iscritti all'A.I.F (*)		☐ € 78,00

(*) Queste quote debbono pervenire tramite la segreteria dell'A.I.F.

Il Nuovo Saggiatore	☐ € 84,00

Per quote associative e abbonamenti compilare questa cedola con il Vs. indirizzo esatto:

Cognome e Nome
o Ente
.....

.....

.....

Via
.....

C.A.P.
.....

Città
.....

Partita IVA
.....

Totale
.....

Modalità di pagamento:

☐ a mezzo assegno bancario
☐ a mezzo versamento sul c/c n. 19197409 -
Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.
Via Saragozza 12, 40123 Bologna
☐ a mezzo carta di credito:

(sbarrare il simbolo desiderato)

Carta n. .....

Data di scadenza .....

Data ..... Firma.....

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del DLG 196/2003
si ☐ no ☐