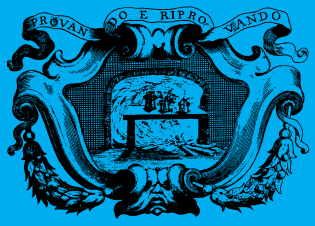
Bollettino della Società Italiana di Fisica
Nuova Serie Anno 16
N. 1 gennaio-febbraio 2000
N. 2 marzo-aprile 2000



Comitato di Redazione:
Giuseppe-Franco Bassani, Enrico Bellotti, Luisa Cifarelli, Vincenzo Grasso, Roberto Habel, Angiolino Stella, Andrea Taroni, Antonio Vitale

Direttore Editoriale:
Andrea Taroni

Responsabile di produzione:
Angela Oleandri

Hanno inoltre collaborato a questo numero: M. Asdente, G. Baldacchini, S. Bergia, R. Bonetti, V. Calini, M. Camatini, F. Cordella, G. Fazio, E. Fiorini, G. Giardina, A. Guglielmetti, N.O. Lipari, E. Previtali, F. Sebastiani e C. Urani

Copertina a cura di Enzo Iarocci

Segreteria di Redazione:
Carmen Vasini

Direzione e Redazione:
Società Italiana di Fisica
Via Castiglione 101
40136 Bologna
Tel. 051331554 / 051581569

Questo fascicolo è stato realizzato in Fotocomposizione dalla Monograf, Bologna e Stampato dalla Tipografia Compositori nel mese di Maggio 2000

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

Editrice Compositori, Via Stalingrado 97/2, Bologna

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Direttore Responsabile
Giuseppe-Franco Bassani

Vicedirettori
Antonio Bertin e Antonio Vitale

Comitato Editoriale
E. Arimondo, G. Benedek, N. Cabibbo, S. Focardi, E. Iarocci, P. Picchi, e R.A. Ricci

OPINIONI

3 Lettera al direttore
G. Baldacchini

3 Commenti sulla giornata Fisica e Industria
N.O. Lipari

4 Lettera al direttore
M. Asdente

IL NOSTRO MONDO

5 In ricordo di Placido d'Agostino

PERCORSI

11 Sul percorso di Fermi verso la statistica quantica
F. Cordella e F. Sebastiani

23 Mario Ageno, filosofo della fisica
S. Bergia

SCIENZA IN PRIMO PIANO

29 Esperimenti di radioattività esotica
R. Bonetti e A. Guglielmetti

FISICA E...

44 Misure di contaminazione del radiocesio e valutazione del suo danno biologico
E. Fiorini, E. Previtali, V. Calini, M. Camatini e C. Urani

53 RECENSIONI

56 SCELTI PER VOI
Leucemia e campi magnetici – Molecole a riposo – Cerotti anziché iniezioni

57 ANNUNCI

ABBONAMENTI 2000

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

Quota di associazione alla Società Italiana di Fisica:

Socio individuale		Lit. 70.000 36 €
Socio collettivo		Lit. 300.000 155 €
Socio sostenitore	(a partire da)	Lit. 500.000 258 €

Quota abbonamento a Il Nuovo Saggiatore - Bollettino della Società Italiana di Fisica per i non soci: Lit. 100.000 52 €.

Quote di abbonamento ai periodici della Società Italiana di Fisica:

Il Nuovo Cimento B per i soci	Lit. 670.000 346 €	Il Nuovo Cimento C per i non soci	Lit. 405.000 209 €
Il Nuovo Cimento B per i non soci	Lit. 835.000 431 €	Rivista del Nuovo Cimento per i soci	Lit. 357.000 184 €
Il Nuovo Cimento C per i soci	Lit. 340.000 175 €	Rivista del Nuovo Cimento per i non soci	Lit. 440.000 227 €

Abbonamento cumulativo alle 3 riviste

per i soci	Lit. 1.250.000 645 €
per i non soci	Lit. 1.500.000 775 €

Giornale di Fisica per i soci Quaderni di Storia della Fisica	Lit. 79.000 40 €	Giornale di Fisica per i non soci Quaderni di Storia della Fisica	Lit. 95.000 49 €

A partire dal gennaio 2000 la sezione A del *Nuovo Cimento* si è fusa con le sezioni A e C dell'*European Physical Journal*, rivista europea nata nel 1998 dalla fusione del *Journal de Physique* con lo *Zeitschrift für Physik* oltre che del *Nuovo Cimento*, e pubblicata col supporto della Società Europea di Fisica e di numerose società di fisica della comunità europea.

Le somme per l'abbonamento devono essere versate (direttamente o per mezzo di un libraio) sul c/c N. 19197409 - Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F., via Stalingrado 97/2, 40128 Bologna

Per ulteriori informazioni rivolgersi a:

Editrice Compositori
Via Stalingrado, 97/2
40128 Bologna, Italy

tel. +39-0514199711
fax +39-051327877
e-mail: 1865@compositori.it

PUBBLICITÀ

Nella tabella sottostante sono indicati i prezzi delle inserzioni pubblicitarie ne Il Nuovo Saggiatore - Bollettino della Società Italiana di Fisica.

Spazio dell'inserzione	Superficie stampata (altezza × larghezza)	Numero di inserzioni			
		1 inserzione	3 inserzioni	6 inserzioni	12 inserzioni
1 pagina	cm 25.3 × 17.2	L. 1.000.000	L. 960.000	L. 930.000	L. 920.000
½ pagina	cm 12.2 × 17.2	L. 665.000	L. 640.000	L. 625.000	L. 590.000
⅓ pagina	cm 25.3 × 5.4	L. 585.000	L. 558.000	L. 530.000	L. 505.000
¼ pagina	cm 12.2 × 8.1	L. 500.000	L. 475.000	L. 458.000	L. 425.000

Supplemento per stampa a colori L. 600.000 + eventuali spese di produzione dei files per la quadricromia.
Le inserzioni pubblicitarie devono attenersi alle misure standard indicate.
La pubblicità è limitata al 20% del fascicolo.
La Direzione si riserva la facoltà di pubblicare esclusivamente le inserzioni che ritiene conformi al contenuto della rivista.

Periodicità: 6 numeri l'anno.
Stampa in fotocomposizione
Riproduzione di offset.

Gli articoli destinati alla pubblicazione devono essere inviati in duplice copia direttamente ed esclusivamente alla redazione, così come la corrispondenza relativa ad articoli e pubblicità:

Redazione de *Il Nuovo Saggiatore*
Società Italiana di Fisica
Via Castiglione 101
40136 Bologna

tel. +39-051581569 - fax +39-051581340
e-mail: saggiatore@sif.it - web page: www.sif.it

OPINIONI

Caro Direttore,

Ho visto con piacere che uno degli scopi che mi ripromettevo con il mio articolo, quello di suscitare un dibattito sul tema della scuola in Italia, è stato raggiunto. Mi riferisco alle lettere nel Nuovo Saggiatore **15**, 5-6 1999, pag. 8, 9 di E. Smargiassi e G. Pastore e di G.V. Pallottino, i quali però mi sembra non abbiano colto del tutto lo spirito del mio contributo. Infatti, non era possibile in un breve articolo riportare una descrizione dettagliata del funzionamento della scuola americana in tutte le sue realtà, quindi mi sono limitato consapevolmente ai soli principi fondamentali, che è pur sempre un metodo che mantiene una sua validità di carattere generale.

È ovvio che il numero dei premi Nobel in Fisica non sia il solo parametro da prendere in considerazione per dimostrare l'eccellenza di un sistema scolastico nel suo complesso, ma sicuramente è uno tra i più importanti. Ed è altrettanto vero che se avessi considerato anche i premi Nobel nelle altre discipline, eccetto che per la Pace e la Letteratura, avrei ottenuto più o meno gli stessi risultati già presentati per la Fisica nel mio articolo.

Come si fa allora ad affermare che questo non sia un successo dell'organizzazione scolastica nel suo complesso? Non è un successo anche il fatto che tanti studenti europei ed asiatici siano attratti dalle Università americane (*graduate level*)?

Mi è stato anche ricordato in più di un'occasione che è la ricchezza americana il motore principale di questo successo. Questo è sicuramente vero oggi, ma è mai venuto in mente a queste persone che probabilmente la ricchezza attuale sia il risultato di avere scelto nel passato un certo tipo di organizzazione (anche scolastica), e non il contrario?

Si potrebbe continuare all'infinito a parlare di questo argomento e di tutte le connessioni sociali, politiche, etiche, storiche, etc. ... esistenti nel mondo scolastico americano, ma a me preme di mettere di nuovo in risalto i principi ispiratori di questo sistema educativo. Essi si basano essenzialmente sul metodo democratico e sulla opportunità offerta a tutti, e poi anche su una severa selezione su base meritocratica. È un sistema che ha dato fino ad ora buoni risultati malgrado le molte Cassandre da una parte e dall'altra dell'Atlantico (vedi la bibliografia nel mio articolo e nella lettera di risposta di Pallottino). È anche un sistema che può essere migliorato nel senso di eliminare o quanto meno di diminuire gli illetterati scientifici, ma non a scapito di ciò che funziona egregiamente e cioè il sistema universitario superiore (*graduate level*). A questo proposito ricordo che a parere di molti lo sforzo maggiore andrebbe fatto a livello di scuola media superiore (*high school*), che richiederebbe però altre risorse finanziarie con risultati finali assai discutibili. Infatti, non è assolutamente detto che in una scuola obbligatoria e di massa, praticamente fino alla maggiore età, tutti gli studenti siano interessati a perseguire un cammino conoscitivo culturale anche nelle migliori condizioni al contorno. È a questo punto che entra in gioco il metodo democratico con il quale si devono decidere le risorse finanziare da dedicare alla scuola tenendo presente anche le altre esigenze della società.

Vorrei infine ultimare questa lettera di replica facendo osservare che nelle lettere di risposta di cui sopra si è molto discusso di questioni polemiche nelle quali si potrebbe continuare all'infinito, ma non si è spesa, una sola parola sui suggerimenti finali che ho proposto per il sistema educativo italiano e che sono una conseguenza dei ragionamenti fatti nell'articolo. In chiusura, voglio aggiungere che questi suggerimenti hanno trovato molti consensi a livello di colloqui con numerose persone, colleghi e non.

Certo di una sua attenzione a questa mia contro replica, Le invio i miei più cordiali saluti.

Giuseppe Baldacchini
ENEA, Frascati

Commenti sulla Giornata Fisica e Industria.
Milano Bicocca, 17 marzo 2000.

La Giornata-incontro ha discusso un argomento di grande attualità e di importanza per il futuro di una parte della fisica e di fisici in Italia.

Credo che l'incontro sia stato molto positivo e che sia adesso necessario che il momento generato venga sostenuto con efficacia, così da portare a delle concrete ed esplicite attività e risultati.

A questo proposito, manifesto le seguenti opinioni e suggerimenti:

1) Mi sembra che ci sia ancora un certo senso di incertezza e di dubbio, e forse anche paura, da parte di certi fisici sulla opportunità e validità di uno sforzo reale verso una maggiore rilevanza industriale della fisica e dei fisici. Questo induce spesso ad un «filosofare» che è controproducente.

2) Credo che la spinta principale per muoversi in questa direzione dovrebbe essere data dal mondo industriale, e da esplicite necessità ed opportunità articolate dalle industrie come necessarie al loro successo.

3) La fisica è una delle discipline importanti per il mondo industriale. La chimica lo è anche, per esempio. Storicamente la chimica ha avuto rapporti più stretti con l'industria. Sarebbe utile cercare di imparare dalla loro esperienza e forse definire anche delle attività dove il sinergismo potrebbe aiutare ad aprire nuove opportunità.

4) Il ruolo del fisico, in aggiunta a quello della fisica, nell'industria moderna dovrebbe essere illustrato più chiaramente e con chiari esempi di successo.

5) Le profonde trasformazioni che sono alla base della presente rivoluzione industriale ed il loro impatto sulle future opportunità sia in senso negativo (*downsizing*), come in senso positivo («gazzelle») dovrebbero essere parte delle conoscenze che aiutano i fisici moderni a decidere sui loro interessi.

6) L'esperienza del FIAP dell'APS mostra che, una volta istituiti dei meccanismi indirizzati alla fisica/industria interazione come «The Industrial Physicist» e la FIAP, c'è una grande comunità di persone nuove che mostra grande interesse a questi argomenti (esempio: più del 60% di persone che ricevono «The Industrial Physicist» non sono membri dell' APS).

7) In aggiunta alle grandi industrie, anche e soprattutto quelle medie e piccole dovrebbero essere incoraggiate ad articolare le proprie necessità e dipendenze su materiali e processi nuovi.

8) La SIF dovrebbe portare queste giornate *on the road*, cioè averle non in locali universitari ma industriali, facendo bene attenzione a non preferire certe industrie su altre.

9) Ogni giornata dovrebbe avere dei chiari risultati, noti alla comunità, e un *next step*.

10) Sarebbe utile avere degli *owners* e *supporters* per tutte le attività che vengono determinate come importanti e che verranno organizzate nel futuro.

11) Un calendario delle future attività e giornate-incontro, con le rispettive agende, dovrebbe essere definito e reso noto alla comunità interessata.

Nunzio O. Lipari
Università di Milano-Bicocca

Caro direttore,

vorrei esprimere a te ed ai colleghi eventualmente interessati all'argomento la mia preoccupazione verso un atteggiamento che mi pare farsi strada in vari aspetti della vita dell'Università.

Mi riferisco alla tendenza verso una gestione delle cose universitarie chiusa in un localismo esasperato, tendenza cui contribuiscono anche i recenti provvedimenti, per molti aspetti peraltro positivi, legati all'autonomia universitaria,ma che non corrisponde alla migliore tradizione della fisica italiana.

Cito ad esemplificazione, due fatti:

– Per la formazione delle commissioni per la valutazione comparativa durante gli ultimi concorsi sono state fatte circolare liste bloccate proposte da gruppi di colleghi, abbastanza numerosi da poter essere incisivi, e, tuttavia, non abbastanza da poter essere considerati rappresentativi di tutto il raggruppamento. Non c'è ovviamente nulla di male a svolgere consultazioni ed a presentare proposte, ma, mi pare, ad almeno una delle seguenti condizioni:che le liste siano aperte anche ad altre candidature oppure che a promuovere l'iniziativa sia un organismo rappresentativo di tutta la comunità dei fisici.

Senza questo mi pare inevitabile non solo che vi siano degli scontenti, ma anche che a lungo andare il sistema, autori producentesi, si avvii a sclerotizzazione.

– Di fatto non esistono più meccanismi che permettano l'inserimento nelle strutture universitarie di persone «fuori dal giro» come potrebbero essere i giovani che sono stati all'estero per più anni e che, per questo motivo, hanno tagliato il cordone ombelicale con il gruppo di provenienza.

Si tratta sovente di giovani intellettualmente intraprendenti che hanno acquisito valide conoscenze e che potrebbero portare nella comunità scientifica italiana competenze e tematiche nuove.

Gli scarsi meccanismi di reclutamento attivi oggi in Italia non offrono in pratica alcuna possibilità a questi giovani; non mi sembra che questo sia un vantaggio per la ricerca e per la cultura in generale.

Questi non sono che due esempi, indici di una situazione che determina in me una sensazione di disagio, Mi piacerebbe che tale sensazione venisse fugata da colleghi più ottimisti di me o che, se condivisa, si pensasse a qualche iniziativa che, per quanto sta in noi, tendesse a migliorare le cose.

Cordiali saluti

Maria Asdente
Università di Milano

ULTIMI VOLUMI USCITI NELLA COLLANA RENDICONTI DELLA SCUOLA INTERNAZIONALE DI FISICA «ENRICO FERMI»

CORSO CXLII

PLASMA ASTROPHYSICS

Edited by B. Coppi, A. Ferrari and E. Sindoni
Pag. 538, Dfl. 300.00
Prezzo scontato per i Soci L. 189.000

CORSO CXLIII

NEW DIRECTIONS IN QUANTUM CHAOS

Edited by G. Casati, I. Guarneri and U. Smilansky
Pag. 530, Dfl. 300.00
Prezzo scontato per i Soci L. 189.000

Questi volumi possono essere ordinati dai SOCI direttamente alla:
Redazione del Nuovo Cimento
Via Castiglione, 101 - 40136 Bologna
Tel. 051-581569, Fax 051-581340
e-mail: cimento@sif.it

IL NOSTRO MONDO

IN RICORDO DI PLACIDO D'AGOSTINO

Il ricordo di Placido D'Agostino, tratteggiato da Fazio e Giardina, è vivo anche tra i soci della SIF. In particolare il cordoglio per la sua scomparsa è tanto più sentito in quanto la sua vivacità e la sua generosa, amichevole e disinteressata partecipazione alle iniziative della comunità dei fisici ci hanno sempre portato un tratto di grande umanità oltre che di significativa collaborazione e competenza scientifica.

Renato Angelo Ricci



Il 2 Marzo scorso è venuto a mancare improvvisamente il professore Placido D'Agostino, docente di ruolo di Fisica Generale presso la Facoltà di Scienze dell'Università di Messina.

Era nato nel 1940 a Soriano nel Cimino (VT) e si era laureato in Fisica a Messina nel 1965. Era entrato nel 1966 a far parte dei gruppo di ricerca in Fisica Nucleare, guidato per numerosi anni dal professore Santi Jannelli, facendosi apprezzare per la sua attività scientifica in collaborazione, caratterizzandosi oltre che per il contributo dato alla ricerca, in modo particolare per le sue doti di onestà e bontà.

Il professore D'Agostino ha continuato a collaborare con noi allo sviluppo dell'attività di ricerca nel campo delle Reazioni Nucleari ed a lavorare nell'ambito delle collaborazioni scientifiche internazionali con gli Istituti di Ricerca in Fisica Nucleare di Kiev e Dubna, con l'Istituto di Fisica Nucleare di Mosca e con l'Istituto di Ingegneria Nucleare di Obninsk.

Ha fatto parte in modo determinante del Local Organizing Committee dell'*International Symposium on Large-Scale Collective Motion of Atomic Nuclei*, tenutosi a Brolo (Messina) nel 1996.

Accanto all'intenso lavoro di ricerca su temi diversi di notevole rilevanza, il professore D'Agostino aveva sviluppato un'ampia attività didattica volta a favore degli studenti del corso di laurea in Matematica, realizzando un testo assai apprezzato di Fisica Generale.

Oltre che un immenso amore per la famiglia e la generosa amicizia espressa verso tutti, il caro Placido era anche riconosciuto per le sue rilevanti doti di cultore ed estimatore nel campo della Filatelia.

La sua scomparsa è stata una grossa perdita per molti di noi.

G. Fazio e G. Giardina
Dipartimento di Fisica
Università di Messina

Nel licenziare questo numero del Nuovo Saggiatore giunge la notizia della scomparsa dell'amico Giuliano Preparata, socio della SIF dal 1965.

Fisico di valore internazionale, con risvolti di intuizione e idee anche fuori dagli schemi dell'ortodossia, sempre generoso ed esuberante nella sua «missione culturale», lascia un vuoto difficilmente colmabile, oltre che nella dialettica scientifica, nella fedeltà alle amicizie sincere e alle partecipazioni comunitarie.

Lo ricorderemo certamente in modo più appropriato.

Renato Angelo Ricci

Pubblichiamo qui di seguito la lista dei premiati del Concorso della Fondazione ANGELO DELLA RICCIA, il cui bando è stato pubblicato nel Nuovo Saggiatore vol. 15, no. 3-4, 1999.

CONCORSO 1999-2000 RELAZIONE

La Commissione della Fondazione, riunita presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Firenze, composta dai Professori: B. Bosco (Presidente della Fondazione), R. Fieschi (Presidente Commissione Scientifica), E. Beltrametti, A. di Giacomo, R. Casalbuoni (Membri permanenti della Commissione) e dai Professori: M. Baldo Ceolin, M. Rasetti, A. Stefanini (Membri annuali della Commissione); funge da segretaria la signora D. Scarselli, dopo aver proceduto alle operazioni per l'espletamento del concorso di cui al bando, dichiara di aver assegnato, all'unanimità, contributi ai seguenti candidati nella misura a fianco indicata (in milioni di lire)

Arnaldi Roberta	18
Beretta Sabrina	12
Berruto Federico	10
Cirigliano Vincenzo	27
Cocco Simona	30
Colferai Dimitri	18
Contedini Marco	18
Foffa Stefano	28
Galli Matteo	15
Gori Giorgi Paola	30
Grosso Paola	10
Liccardo Antonella	15
Mancini Francesco	17
Mazzuccato Federica	12
Merlino Silvia	11
Messina Marcello	12
Paladini Roberta	15
Perazzi Elena	15
Piotto Enrico	10
Rosati Francesca	15
Rosso Alberto	5
Santachiara Raul	8
Sguazzoni Giacomo	19
Travaglino Batino Vittorelli G.	30

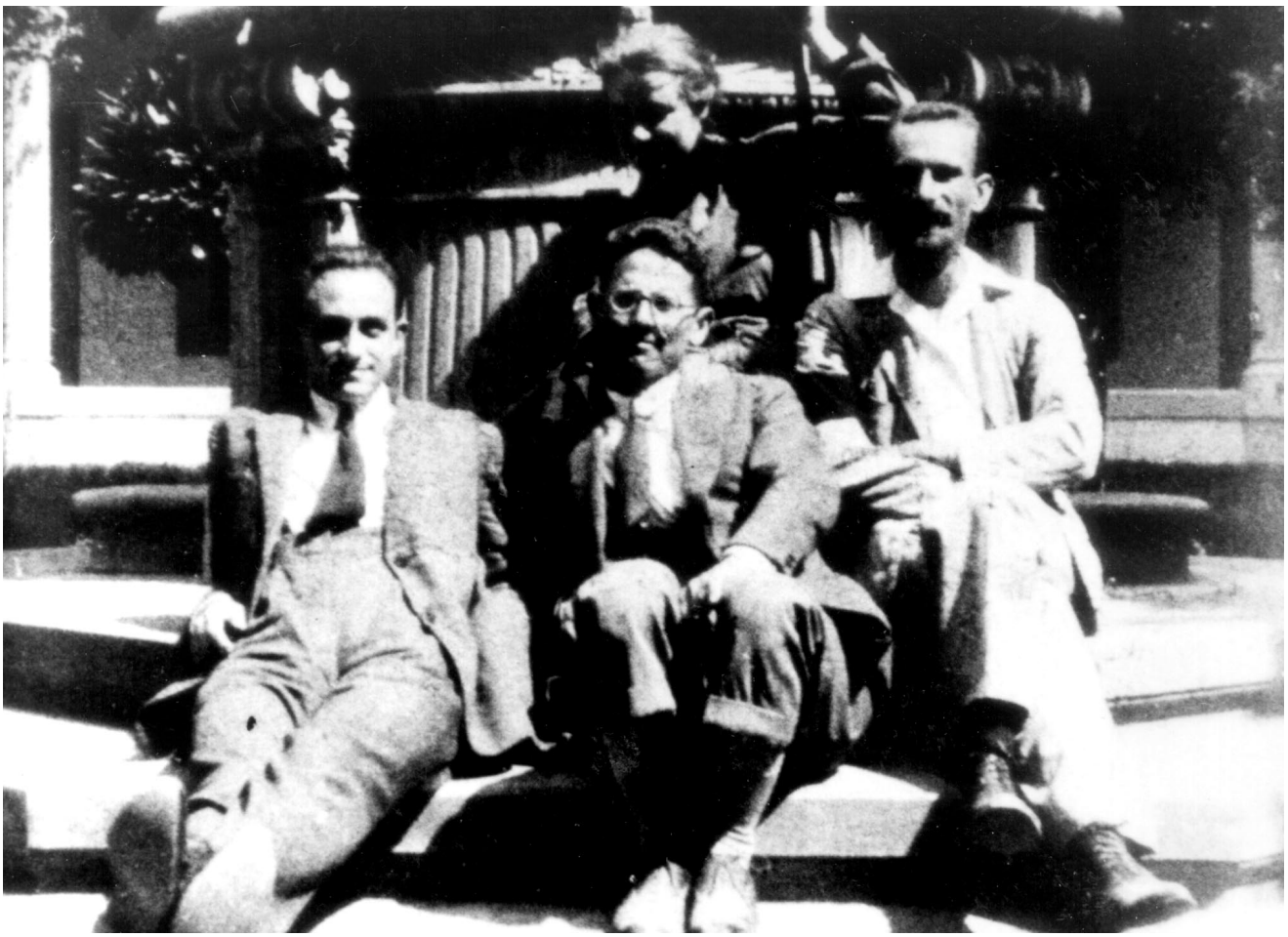
PERCORSI

SUL PERCORSO DI FERMI VERSO LA STATISTICA QUANTICA

F. Cordella e F. Sebastiani
Dipartimento di Fisica dell'Università «La Sapienza», Roma

Emilio Segrè nell'«*Enrico Fermi fisico*» afferma [1]: "Il soggiorno a Gottinga non fu così fruttuoso come ci si sarebbe potuto aspettare. Fermi scrisse alcuni lavori di meccanica analitica come avrebbe egualmente potuto fare a Roma e non sembra che abbia subito l'influenza dell'ambiente di Gottinga".
Questo autorevole giudizio, anticipato da Laura Fermi in *Atomi in famiglia* («dai sette mesi a Gottinga Fermi trasse poco profitto») e già espresso da Segrè nella Nota biografica del *Fermi Note e Memorie*, e quindi almeno in linea di massima condiviso da Amaldi, Persico e Rasetti che collaborarono alla Nota, ha

[1] Segrè (1987[2]), p. 31.



Rita Brunetti, Enrico Fermi, Nello Carrara e Franco Rasetti (Firenze, 1925).

finito per far sì che il periodo trascorso da Fermi a Gottinga venga unanimemente considerato ininfluente per la successiva produzione scientifica del giovane fisico romano.
L'equazione "Ehrenfest uguale meccanica statistica" ha finito inoltre per attribuire un valore preparatorio per la nuova statistica quantica solo al periodo trascorso da Fermi a Leida nell'autunno del 1924.
Una più attenta ricostruzione storica sembra invece indicare che l'influenza dell'ambiente di Gottinga sulla genesi del programma di ricerca nell'ambito del quale Fermi giunse alla statistica sia stata tutt'altro che irrilevante. Anche se questa ricostruzione è spesso basata soltanto su indizi perché, come sottolinea Rasetti, «*little is known of the circumstances that led Fermi to some of his most significant contributions in the theoretical field*».
In questa Nota cercheremo di mostrare come il periodo di otto mesi trascorso da Fermi nel 1923 in Germania, pur vissuto in modo sofferto sul piano personale, sia stato importante per la gestazione della nuova statistica quantica, scoperta sul finire del 1925.
È peraltro unanimemente riconosciuto [2] che due lavori di Fermi, *Sopra la teoria di Stern della costante assoluta dell'entropia di un gas perfetto monoatomico* (F.N.M.16, presentato ai Lincei il 2 dicembre 1923) e *Considerazioni sulla quantizzazione dei sistemi che contengono degli elementi identici* (F.N.M.19, recante la data di chiusura: Roma, gennaio 1924), ultimati pochi mesi dopo il ritorno da Gottinga nell'agosto del 1923, svolsero un vero e proprio ruolo preparatorio nel cammino verso la nuova statistica.
A tale proposito Segrè, dopo aver parlato delle *sue* [di Fermi] *lunghe e tenaci meditazioni sull'entropia di un gas perfetto monoatomico, sulla formula di Sackur-Tetrode e sulla dimostrazione datane da Otto Stern*, conclude: "stava così maturando la scoperta della statistica di Fermi". Segrè colloca però l'inizio di queste *meditazioni* durante il periodo trascorso da Fermi a Leida (settembre-dicembre 1924) e sposta in avanti di un anno la collocazione temporale dei due lavori preparatorî: "È probabile che proprio [a Leida] abbiano avuto origine le sue lunghe e tenaci meditazioni [...]. Si trova traccia di questi interessi in lavori scritti durante il 1924 e il 1925". La corretta collocazione temporale dei due lavori di per sé sola suggerisce che questi possano piuttosto aver preso le mosse da meditazioni iniziate a Gottinga.

1. – Il soggiorno tedesco

Dal gennaio all'agosto del 1923 [3], Fermi soggiornò a Gottinga fruendo di una borsa di perfezionamento del Ministero della Pubblica Istruzione.

Le lettere che Fermi scrisse a Persico in questo periodo purtroppo non contengono notizie riguardanti l'ambiente scientifico di Gottinga, se non l'affermazione piuttosto generica: "I professori, specialmente Born, sono persone simpatiche e non la fanno cader troppo dall'alto". Per quanto estremamente succinta, questa frase sembra circoscrivere il giudizio positivo ai professori di Gottinga ed escludere i loro collaboratori più giovani. È forse opportuno ricordare che nella corrispondenza Fermi-Persico l'aggettivo *simpatico* esprime un giudizio particolarmente lusinghiero ed è riservato a pochi (così per Persico, che scrive del suo soggiorno a Cambridge, Rutherford è *molto simpatico*, Fowler *simpaticissimo*; per Fermi, a Leida, Einstein ed Ehrenfest sono *molto simpatici*).

Bruno Pontecorvo riferisce che, "secondo Samuel Allison, molti anni dopo Fermi ricordava quel periodo con una certa amarezza: i professori di Gottinga si consideravano, secondo Fermi, onniscienti e non si preoccupavano certo di incoraggiarlo". Anche Laura Fermi parla di *preoccupazioni intellettuali* che affliggevano Enrico: "gli era tornata l'antica timidezza, dovuta non alla difficoltà con la lingua bensì alla mancanza di *incoraggiamento* da parte di Born".

Peraltro, come ci ha confermato David Cassidy, si è persa quasi ogni traccia della presenza di Fermi a Gottinga, persino nei ricordi dei fisici che qui lo incontrarono, ad ec-

[2] Cfr. l'Introduzione di F. Rasetti a F.N.M. 19, gli articoli di G. Belloni e quello di A. Desalvo citati nella bibliografia.

[3] Un termine *ante quem* per la data di arrivo di Fermi a Gottinga è fornito da una cartolina postale inviata a E. Persico l'8 gennaio 1923 nella quale si legge: "Eccomi dunque ormai diventato gottingese". In una cartolina postale inviata a Persico da Gottinga il 14.07.1923 Fermi scrive: "Secondo ogni probabilità io sarò a Roma prima della metà di agosto".

cezione di Heisenberg [4]. Questo è probabilmente un sintomo dell'incomprensione (o forse emarginazione) che Fermi ebbe a soffrire durante il soggiorno tedesco.

Vista la scarsità di notizie, sono quindi estremamente interessanti i ricordi di Heisenberg circa il comportamento e l'atteggiamento di Fermi durante il periodo trascorso a Gottinga, esposti in un'intervista raccolta da T. S. Kuhn per l'Archive for History of Quantum Physics nel 1963 [5]. Secondo Heisenberg, Fermi non doveva attraversare *a good period of his young life* a causa forse di problemi personali, perché se ne stava sempre in disparte e non era facile entrare in contatto né avere una conversazione con lui, al punto da far nascere il sospetto che avesse difficoltà con la lingua tedesca. Heisenberg ipotizza anche che forse Fermi si era recato a Gottinga in uno stadio troppo precoce dei suoi studi, privo della preparazione necessaria per *really take part in the game*.

Quando Fermi ritornò in Italia e incontrò per la prima volta G. Uhlenbeck nell'autunno del 1923, il fisico olandese *found he'd just come back from Germany, completely discouraged*.

2. – Gli interessi di Born all'inizio del 1923

A Gottinga durante la primavera del 1922 si era tenuto il famoso ciclo di conferenze di Bohr sulla fisica quantistica che aveva suscitato grande interesse fra i fisici presenti (Born, Ehrenfest, Franck, Heisenberg, Ladenburg, Landé, Pauli, Sommerfeld, van Vleck). La «Sezione di fisica matematica» dell'Università di Gottinga nel 1922, sotto la direzione di Born, aveva significativamente cambiato la denominazione in «Istituto per la Fisica Teorica». L'interesse di Gottinga per la nuova fisica era dovuto in parte anche al diretto coinvolgimento di David Hilbert che riteneva *la fisica troppo difficile per i fisici* e aveva chiesto a Sommerfeld di inviargli dei giovani di valore. Nei primi anni Venti sia Pauli che Heisenberg furono mandati da Sommerfeld a Gottinga.

Proprio nel periodo in cui Fermi giunse a Gottinga, i due piú famosi collaboratori di Born si erano da poco avvicendati, perché Pauli andò a Copenhagen da Bohr dall'ottobre del 1922 al settembre del 1923, sostituito da Heisenberg [6]

In una lettera a Einstein del 7 aprile 1923, circa tre mesi dopo l'arrivo di Fermi, Born scrive:

"[...] ho lavorato parecchio e ho fatto anche lavorare un buon numero di allievi. Ma i problemi affrontati sono soltanto piccoli problemi: nonostante ogni sforzo, non riesco a penetrare i grandi enigmi dei quanti. Abbiamo studiato la teoria delle perturbazioni (di Poincaré) per stabilire se è possibile ottenere dal modello di Bohr, con calcoli accurati, i valori osservati dei livelli energetici; ma certamente ciò non accade, come s'è visto nel caso dell'elio, per il quale abbiamo trovato (con sufficiente approssimazione) tutte le possibili orbite multiperiodiche. [...] Finalmente ho terminato il lungo articolo sulla teoria dei reticoli destinato all'*Enzyklopdie*".

Lo sconforto di Born riguardo alla fisica quantistica di quel periodo, trova riscontro anche in varie precedenti lettere di Heisenberg a Pauli. Il 19 febbraio 1923, infatti, parlando del proprio lavoro insieme a Born, Heisenberg scrive: "[...] per riassumere il tutto: è uno strazio". E ancora, il 26 marzo, afferma: "Non ci vogliamo affaticare inutilmente. Fondamentalmente siamo convinti che tutti i modelli dell'elio proposti finora siano falsi, così come l'intera fisica atomica". Heisenberg d'altronde ricorderà questo periodo come pieno di "discussioni continue, in cui i nostri dubbi rimanevano sempre irrisolti, dato che seguitavamo a cadere in contraddizioni e difficoltà che non riuscivamo affatto a risolvere con mezzi razionali [...]. Precipitammo così in uno stato di vera e propria disperazione".

[4] David Cassidy, interpellato al riguardo, nel giugno 1998, conviene sul fatto che del periodo di Fermi a Gottinga restino ben poche tracce: "[...] *in searching for further information in letters from that period, I have looked through the published letters in the Pauli and Bohr editions and the Born-Einstein correspondence, as well as my notes on Heisenberg's private letters from Goettingen and the records of the Goettingen physics institute, all without success. I also found nothing in Heisenberg's memoir, Der Teil und das Ganze. However, Heisenberg apparently recalled Fermi's visit to Goettingen in the unpublished interviews by Thomas Kuhn for the Archive for History of Quantum Physics.*"

[5] Intervista concessa da W. Heisenberg a T.S. Kuhn per l'*Archive for History of Quantum Physics* il 15.2.1963 (tape 49a), trascritta a cura del *Center for History of Physics* dell'*American Institute of Physics*.

[6] Per conseguenza, Fermi conobbe Pauli solamente nell'autunno del 1927, al Congresso di Como.

Estremamente illuminanti sull'atmosfera che regnava a Gottinga immediatamente prima e durante il soggiorno di Fermi sono anche i ricordi di Heisenberg, esposti nella citata intervista. Questi ricorda come Born tenesse nella propria abitazione un seminario serale rivolto a un ristrettissimo gruppo di giovani ricercatori (Heisenberg stesso, Jordan, Fermi, *forse* Hund, e *al massimo un altro paio di persone*). Nel seminario, Born insegnava le tecniche allora disponibili per sviluppare la teoria quantistica e tentava anche nuove strade, come per esempio quella fornita dalla teoria delle perturbazioni mutuata dalla meccanica celeste, per cercare invano di risolvere il problema dell'atomo di elio. Ad Heisenberg, Born appariva in quel periodo "*as an extremely good mathematician who was interested in the mathematical methods of physics, but* [...who] *had not so much feeling about how the things in atomic physics were*". Proprio ricordando l'abilità matematica di Born e il suo minor *feeling* con la fisica atomica, Heisenberg viene a parlare di Fermi:

"*I remember that* [...] *Fermi, who took part in this seminar was a bit unhappy about it; he disliked these mathematical subtleties, proof of convergence, and such.* [...] *This kind of mathematical subtlety he hated. I mean, Fermi felt, «That's not physics»*".

Comunque sia, Fermi, anche se forse turbato per il fatto di non primeggiare tra i giovani colleghi di Gottinga e probabilmente infastidito dall'approccio troppo «matematico» usato da Born [7], non si perde d'animo e lavora sodo ad alcuni problemi che destano il suo interesse. Anche per non deludere le aspettative che accompagnano il suo soggiorno «gottinghese», delle quali si trova larga eco nelle lettere che dall'Italia gli invia Enrico Persico. Questi, oltre ad attendere *notizie scientifiche* dal *paese dei quanti*, quando è prossimo il rientro di Fermi in Italia gli scrive: "E speriamo che ci porterai alcune bombole di aria gottinghese, per rinnovare i nostri ambienti scientifici e guidarci ad un lavoro organizzato e serio".

3. – Gli articoli di Fermi a Gottinga

Nel febbraio 1923, ovvero circa un mese dopo il suo arrivo a Gottinga, Fermi ha già pronto un lavoro che pubblicherà sul Nuovo Cimento: *Il principio delle adiabatiche ed i sistemi che non ammettono coordinate angolari* (F.N.M.12). Dalla corrispondenza di Fermi durante il suo soggiorno a Gottinga, non è possibile ricostruire puntualmente la genesi di questo lavoro. È quasi certo, però, dall'analisi del testo dell'articolo e dai lavori che Fermi cita in nota, che questo scritto sia nato dalla lettura da parte di Fermi della traduzione tedesca della memoria di Ehrenfest sul principio delle adiabatiche.

L'articolo di Fermi è dedicato ad alcune importanti eccezioni per le quali l'applicazione del principio delle adiabatiche fallisce. In particolare Fermi trova che se durante la trasformazione adiabatica ci si imbatte in uno stato intermedio che non ammette la separazione delle variabili, allora "il principio delle adiabatiche viene a perdere la sua base [...]. Anche dal punto di vista della teoria dei quanti [...] si capisce dunque che se negli stati intermedii della trasformazione il nostro sistema non si può quantizzare rigorosamente, questa imprecisione si trasmetta [*sic*] anche allo stato finale".

Circa due mesi dopo l'articolo sul principio delle adiabatiche, ovvero nell'aprile del 1923, Fermi completò un lavoro che ritenne particolarmente significativo e che, conseguentemente, pubblicò anche su *Physikalische Zeitschrift* con il titolo: *Beweis, dass ein mechanisches normalsystem im allgemeinen quasi-ergodisch ist* (F.N.M. 11a). Il lavoro attirò l'attenzione di Ehrenfest che lo citò in un proprio articolo dell'ottobre '23. La traduzione italiana dell'articolo comparve sul Nuovo Cimento divisa in due parti (F.N.M. 11b e F.N.M. 15) [8].

Fermi dedica la maggior parte del lavoro alla generalizzazione di un teorema di Poincaré, premessa necessaria per poter dimostrare che i sistemi meccanici normali sono in generale quasi-ergodici. Si ricordi, a questo proposito, come Poincaré (in particolare, la sua teoria delle perturbazioni) fosse oggetto di attento studio da parte di Born (e di Heisenberg) proprio nei mesi in cui Fermi era a Gottinga. È quindi senz'altro ipotizzabile

[7] Anche Pauli considerava Born "un appassionato dei formalismi noiosi e complicati e della *matematica futile*". Cfr. Born (1980), p. 323.

[8] In *Fermi Note e Memorie*, F.N.M. 15 è erroneamente considerato come un lavoro distinto da F.N.M. 11a. In realtà non è altro che una parte ridotta di quest'ultimo, in traduzione italiana.

un'influenza dell'ambiente tedesco sul giovane Fermi per quanto riguarda la scelta dell'argomento trattato in questo lavoro.

In una lettera a Persico del 31 marzo 1923, Fermi scrive: "Sto tentando di fare una generalizzazione del principio delle adiabatiche a sistemi meccanici qualunque, che mi pare stia per dare risultati discreti". Il lavoro cui si riferisce Fermi sarà inviato poco dopo al Nuovo Cimento con il titolo *Alcuni teoremi di meccanica analitica importanti per la teoria dei quanti* (F.N.M.13). Non è da escludersi che Fermi possa aver portato avanti contemporaneamente questo gruppo di lavori (F.N.M.12, 11a, 13), strettamente collegati l'uno con l'altro.

In questo lavoro, che è l'ultimo scritto a Gottinga, il principio delle adiabatiche viene presentato da Fermi come la possibile strada da seguire per la soluzione dell'«annoso» problema dell'atomo di elio (che, come abbiamo visto, era oggetto di studio da parte di Born e Heisenberg) o dello ione idrogeno molecolare. La prima parte dell'articolo è dedicata a un lungo calcolo che mostra come per i sistemi quasi-ergodici il valore assunto dall'energia alla fine di una trasformazione adiabatica non dipenda dalla particolare trasformazione adiabatica che si è scelta. Conseguentemente, per questa particolare classe di sistemi, sarà possibile l'applicazione del principio delle adiabatiche. Gli ultimi due paragrafi sono dedicati a una breve analisi di alcune classi di eccezioni.

Il 16 aprile Fermi scrive a Persico: "Io sto molto lavorando ad un lavoro ai confini fra la meccanica celeste, la meccanica statistica e la teoria quantistica. Ma non posso ancora prevedere dove andrò a sbattere. E neanche se andrò a sbattere in qualche luogo". Il 21 aprile precisa all'amico: "[...] ho pronti tre lavori piuttosto importanti". Il lavoro al quale Fermi si riferisce nella lettera del 16 è probabilmente la somma di F.N.M.12, 11a e 13, che Fermi sta forse cercando di portare avanti insieme; resosi conto della sua vastità, cinque giorni dopo Fermi sembra aver deciso di segmentarlo in tre parti.

4. – Il problema della costante dell'entropia

Nell'estate del 1923 Fermi rientrò in Italia dalla Germania e nell'autunno incontrò Uhlenbeck [9], che rimase impressionato dalla delusione del collega italiano riguardo al periodo appena trascorso a Gottinga. Poco dopo, però, Fermi pubblicò i due lavori di argomento termodinamico-statistico (F.N.M. 16 e 19), ultimati rispettivamente prima del 2 dicembre 1923 e nel gennaio 1924, unanimemente indicati come preparatorî alla nuova statistica.

Il *leitmotiv* che li unisce a quello sulla nuova statistica è rappresentato dalla formula di Sackur e Tetrode per l'entropia di un gas perfetto monoatomico. Questa formula, raggiunta grazie allo sforzo di più ricercatori nella prima metà degli anni Dieci, rappresentò per Fermi un punto di riferimento molto importante nella scoperta della nuova statistica quantica.

Sackur trattò il problema della costante dell'entropia tra il 1911 e il 1913, in tre successivi lavori. Usando un approccio *à la* Boltzmann e quantizzando lo spazio delle fasi, secondo alcuni suggerimenti emersi nel Primo Congresso Solvay, Sackur trovò che la costante dell'entropia di un gas perfetto monoatomico risultava essere uguale a

$$S_0 = \frac{5}{2}R + R\ln\left[\left(\frac{2\pi m}{h^2}\right)^{3/2} k^{5/2}\right].$$

A una espressione uguale arrivò Tetrode nel 1912, indipendentemente da Sackur, sempre quantizzando lo spazio delle fasi ma seguendo un approccio *à la* Gibbs. Alcune ipotesi alquanto arbitrarie utilizzate da Sackur e Tetrode suscitarono un intenso e prolungato dibattito.

È a questo punto che si inserisce cronologicamente il contributo del 1913 di Stern, il quale, pur arrivando alla formula di Sackur e Tetrode, si pone in netta contrapposizione metodologica con questi due scienziati, ritenendo che la quantizzazione del gas perfetto non fosse sufficientemente motivata. Stern ritornò ancora sull'argomento nel 1919, apportando alcuni ritocchi alla propria deduzione.

[9] Segrè colloca questo incontro nell'autunno del 1924 (cfr. l'Introduzione di Segrè a F.N.M. 11a). L'errore, che oltre a Segrè ha coinvolto altri, ha presumibilmente avuto origine in Fermi, L. (1954), p. 95. Lo stesso Uhlenbeck riferisce del resto che: "[...] *in 1923 I also met and became good friends with Enrico Fermi*", cfr. Uhlenbeck (1976).

Stern, dopo aver conseguito il dottorato in fisica chimica nel 1912 con Sackur, in seguito fu con Einstein dalla primavera del 1912 fino al 1914. Nell'autunno del 1913 Ehrenfest visitò Einstein a Zurigo e vi sono buone ragioni per ritenere che sia stata proprio una sua osservazione che fornì lo spunto a Stern per il lavoro sulla costante dell'entropia.

L'idea brillante di Stern fu quella di eseguire secondo due diverse procedure il calcolo per trovare la pressione di vapore P all'equilibrio tra la fase solida e il vapore corrispondente. Il calcolo fu svolto da Stern dapprima termodinamicamente e poi tramite un modello cinetico. Con il calcolo termodinamico, nel limite di alte temperature, Stern otteneva un'espressione di P contenente la costante dell'entropia S_0. Con il calcolo fondato sul modello cinetico, invece, P era ottenibile, al limite delle alte temperature, senza costanti indeterminate. Confrontando le due espressioni, Stern fu quindi in grado di determinare il valore di S_0, ottenendo esattamente la formula che Sackur e Tetrode avevano trovato l'anno precedente.

Poiché Ehrenfest è da ritenersi l'ispiratore dell'interesse di Stern per il problema della costante dell'entropia, se fosse cronologicamente possibile (Fermi si recherà a Leida nel settembre del 1924) sarebbe naturale attribuire, come fa Segrè, al grande scienziato viennese il ruolo di aver richiamato l'attenzione di Fermi su questo problema e sul metodo di Stern.

È invece un fatto al quale non è stata sinora dedicata una sufficiente attenzione che Born, nell'ampio articolo di rassegna sulla teoria dei reticoli cristallini (ultimato nella primavera del 1923 e pubblicato nell'agosto successivo) fornisce un'esposizione elegante e concisa del metodo di Stern, il cui risultato giudica tra *i più sicuri della teoria quantistica*. Inoltre a Gottinga, anche precedentemente, il problema della costante dell'entropia era stato oggetto di studi e ricerche. È quindi estremamente probabile che Fermi si sia avvicinato a questo problema e al metodo di Stern proprio durante il soggiorno a Gottinga, anche per l'abitudine di Born di far rileggere ai propri allievi i manoscritti e le bozze dei suoi articoli. Non per caso, Fermi porta a compimento il lavoro sul metodo di Stern solo tre mesi dopo il ritorno da Gottinga e ben nove mesi prima del suo soggiorno a Leida.

5. – Fermi e il metodo di Stern

Fermi dedica la memoria del dicembre 1923 (F.N.M.16) proprio a una nuova derivazione della costante dell'entropia basata sul metodo di Stern. Questo interesse di Fermi per il calcolo di Stern continuò a manifestarsi anche in seguito. In *Molecole e Cristalli* (1934), nella parte dedicata alla statistica, Fermi riservò infatti un consistente paragrafo a tale argomento. Inoltre esso trovò ancora spazio nelle *Notes on Thermodynamics and Statistics* (schemi preparatorî delle lezioni tenute da Fermi nel 1951-52).

Come accennato, riteniamo che l'interesse di Fermi per il metodo di Stern e più in generale per il problema della costante dell'entropia sia da collegarsi con il periodo trascorso a Gottinga tra il gennaio e l'agosto del 1923. Proprio nell'agosto del 1923, Born pubblicò l'articolo di rassegna di circa 250 pagine sulle proprietà dei solidi dal titolo: *Teoria atomica dello stato solido (dinamica dei reticoli cristallini)* [10]. Nel trentacinquesimo paragrafo di questo lavoro Born fece il punto della situazione riguardo al metodo di Stern per il calcolo della costante dell'entropia, seguendo abbastanza fedelmente l'ultimo lavoro di Stern del 1919. Significativamente, Born portò a conclusione questo lavoro proprio durante la permanenza di Fermi a Gottinga. Alcuni brani di lettere scritte da Born a Einstein evidenziano l'impegno e il tempo che richiese la stesura di questo articolo. Nell'articolo Born si dimostra entusiasta del metodo di Stern: "Tramite la deduzione sicuramente ineccepibile di Stern si giunge anche a dare un senso, sulla base del teorema di Nernst, [... al] valore della costante dell'entropia del gas".

Come si ricava dai lavori pubblicati e dalla corrispondenza con Persico, Fermi in Germania si occupò di meccanica analitica fino all'aprile del 1923; a partire da tale data fino alla fine del soggiorno a Gottinga, rimangono «scoperti» circa quattro mesi di cui non è purtroppo rimasta alcuna traccia dei suoi interessi scientifici.

[10] Cfr. BORN M., *Atomtheorie des festen Zustandes (Dynamik der Kristallgitter)*, in *Encykl. d. math. Wiss.* (Teubner, Leipzig, 1923), vol. V.

E. Brody [11] (collaboratore di Born che nel 1921 pubblicò un articolo sulla costante dell'entropia), come risulta dal carteggio Born-Einstein, fu molto d'aiuto a Born nella preparazione dell'articolo di rassegna sui solidi. Del resto nell'introduzione Born scrive: "L'aiuto più prezioso durante il lavoro mi è stato fornito dal prof. E. Brody". Fermi, nel suo secondo articolo riguardante il problema della costante dell'entropia (F.N.M. 19), ultimato nel gennaio 1924, si richiamò esplicitamente al lavoro di Brody del 1921. Inoltre, in questo periodo a Gottinga, sia D. Enskog che L. Nordheim si occuparono del problema. Come si vede, quindi, durante il soggiorno a Gottinga a Fermi non mancarono certamente gli stimoli a occuparsi di questo argomento.

Come anticipato, la memoria di Fermi: *Sopra la teoria di Stern della costante assoluta dell'entropia di un gas perfetto monoatomico* (F.N.M. 16) fu presentata da Corbino ai Lincei il 2 dicembre 1923. La memoria è un breve lavoro di 3 pagine ed è organizzata in altrettanti paragrafi. Nei primi due, Fermi accenna brevemente ai lavori di Sackur del 1913, di Tetrode del 1912 e ai lavori di Stern sia del 1913 che del 1919. La prima formula che Fermi riporta nella sua memoria è la formula di Sackur-Tetrode per l'entropia di un gas perfetto monoatomico. Fermi, in questi due paragrafi introduttivi, non nasconde il suo apprezzamento per il metodo di Stern e afferma esplicitamente che la necessità di quantizzare lo spazio delle fasi del gas, così come avevano fatto Sackur e Tetrode, gli appariva un'ipotesi poco legittima:

"Che nonostante la verifica sperimentale [della formula di Sackur-Tetrode] questo modo di dedurla non sia apparso a molti soddisfacente, è dimostrato dal gran numero di lavori teorici, che furono fatti in seguito, con lo scopo di trovarne una dimostrazione migliore. Di tutti questi tentativi, quello che senza dubbio ha meglio raggiunto il suo scopo è quello di Stern [...]. Il suo metodo ha il vantaggio di non fare sopra il gas perfetto nessuna di quelle poco legittime ipotesi, che sono necessarie agli altri Autori, come per esempio quella di una quantizzazione del gas stesso, della quale non si vede chiaramente la ragione".

Il contributo di Fermi prende come punto di partenza i risultati più generali raggiunti da Stern nel suo lavoro del 1919 ed esposti da Born nell'articolo di rassegna del 1923. Stern nel quantizzare gli oscillatori mediante i quali schematizzava la fase solida aveva introdotto una energia di punto zero. Fermi, nel suo articolo, ritiene questa ipotesi *innaturale* e, nella deduzione cinetica, ne fa a meno, pur giungendo agli stessi risultati di Stern.

6. – L'articolo di Brody del 1921

L'articolo di Brody del 1921: *Sulla determinazione teorica della costante chimica di un gas monoatomico* [12], fu molto importante oltre che per l'influenza che ebbe su Fermi anche per la sua concisione ed eleganza nel modo di presentare la risoluzione del problema della costante dell'entropia. Ben presto, quella seguita da Brody divenne la procedura standard per coloro che accettavano la quantizzazione del moto traslazionale.

Poiché Fermi nel gennaio 1924 (in F.N.M. 19) si richiamerà direttamente a questo lavoro di Brody, riteniamo opportuno ricordarne brevemente il contenuto [13].

Il giovane fisico ungherese prende in considerazione N particelle puntiformi di massa m in una scatola cubica di spigolo l con pareti perfettamente elastiche. Si riferisce, inoltre, a un sistema di coordinate cartesiane parallele agli spigoli della scatola. Le particelle non subiscono l'azione di alcuna forza, avendo supposto il gas perfetto, così che le loro com-

[11] Nella propria autobiografia, Born così ricorda Brody: "Mentre preparavo quell'articolo [sulla dinamica dei reticoli cristallini] per l'Enciclopedia mi imbattei in un gran numero di problemi non risolti, che costituivano degli argomenti adatti per delle tesi [...]. Parecchi dei miei allievi si laurearono dottori [di ricerca] con una tesi su questi problemi. [Tra di essi] c'era il piccolo ebreo ungherese E. Brody, forse il più dotato di tutti, che riusciva a risolvere problemi complicatissimi, ma non era capace di scrivere i suoi risultati in modo comprensibile. Pubblicammo insieme alcuni articoli sulla termodinamica dei cristalli. Cfr. Born (1980), p. 316.

[12] Cfr. Brody E., *Zur theoretischen Bestimmung der chemischen Konstante einatomiger Gase*, *Z. Phys.*, **6**, 79-83 (1921). Brody prende le mosse da un precedente lavoro di Scherrer, pubblicato a Gottinga nel 1916: P. Scherrer, *Das ideale Gas als bedingt periodisches System im Sinne der Quantentheorie*, Göttingen Nachr. 1916, pp. 154-159.

[13] Anche nel libro del 1934, *Molecole e Cristalli*, Fermi si richiamerà ai risultati ottenuti da Brody in questo lavoro.

ponenti della velocità rimangono costanti in valore assoluto. Le condizioni quantiche di Sommerfeld per il moto multiperiodico delle particelle nella scatola impongono che l'energia (cinetica) totale sia $E = (h^2/8ml^2) \cdot \Sigma_i(n_{ix}^2 + n_{iy}^2 + n_{iz}^2)$. L'energia del gas può quindi assumere solamente valori discontinui, multipli di una quantità dipendente dal volume: $h^2/(8ml^2) = h^2/(8mV^{2/3})$.

Nella parte statistica, Brody per individuare gli stati microscopici (ed è questa una novità di rilievo), al posto delle coordinate e dei momenti delle particelle, prende in considerazione i numeri quantici n_{ij} (dove $i = 1, \ldots N$ e $j = x, y, z$). Al fine di calcolare la probabilità termodinamica W, da inserire nella formula di Boltzmann $S = k \cdot \ln W$, deve quindi determinare in quanti modi diversi è possibile scegliere gli n_{ji} stati microscopici che corrispondono a un dato sistema macroscopico determinato da E e $l = V^{1/3}$. Per questa via, giunge all'espressione di S_0 ottenuta da Sackur e Tetrode.

7. – Alla ricerca del principio mancante

Si è gi accennato al fatto che Fermi, nel gennaio del 1924, completò l'articolo pubblicato in seguito sul Nuovo Cimento con il titolo: *Considerazioni sulla quantizzazione dei sistemi che contengono degli elementi identici* (F.N.M.19). Era quindi trascorso poco più di un mese dalla precedente memoria di Fermi riguardante il perfezionamento del metodo di Stern (F.N.M.16). Questo secondo lavoro di carattere termodinamico-statistico, più lungo del precedente, è organizzato in tre paragrafi oltre a una introduzione e a un riassunto finale.

Nell'introduzione Fermi ricorda come le regole di quantizzazione di Sommerfeld avessero avuto un grosso successo nella descrizione dell'atomo di idrogeno ma come, d'altro canto, fossero rimaste inefficaci nella descrizione di atomi più complessi:

"Un tale insuccesso viene di solito attribuito al fatto che tali sistemi più complessi non



Enrico Fermi, Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli (Como, 1927).

ammettono la separazione delle variabili [...]. In questo lavoro mi propongo di mostrare come ci siano delle ragioni che inducono a credere, che l'insuccesso sia dovuto piuttosto all'insufficienza delle condizioni di Sommerfeld a calcolare le orbite statiche [*stazionarie*] di quei sistemi che, indipendentemente dall'ammettere o no la separazione delle variabili, contengono alcune parti identiche (nel caso dell'atomo di elio per esempio i due elettroni sono tra di loro non distinguibili)".

Va a tal proposito sottolineato che a Gottinga, durante il soggiorno di Fermi, Born stava proprio cercando senza successo di venire a capo della dinamica e quindi dello spettro dell'atomo di elio, svolgendo sofisticatissimi calcoli perturbativi. A questo problema era, tra l'altro, dedicata parte del seminario tenuto da Born la sera nella propria abitazione.

Per giustificare la necessità di modificare le regole di quantizzazione nel caso che il sistema contenga elementi identici Fermi, nell'introduzione dell'articolo, propone il seguente semplice esempio. Si dispongano tre elettroni su di un anello in modo che essi occupino i vertici di un triangolo equilatero. Considerando gli elettroni distinguibili, è chiaro che si deve ruotare l'anello di un angolo pari a 2π per riottenere la situazione iniziale. Se invece gli elettroni fossero indistinguibili sarebbe necessario ruotarlo solamente di $2\pi/3$ per riportarlo nella situazione iniziale. Se quindi si indica con p il momento angolare *dell'anello*, nel primo caso le regole di quantizzazione di Sommerfeld porgono $(2\pi)\,p = nh$, mentre nel secondo caso si avrà $(2\pi/3)\,p = nh$. Pertanto p, nel caso di elettroni indistinguibili, è tre volte più grande che nel caso di elettroni distinguibili.

Fermi a questo punto dell'esposizione precisa: "Considerazioni di questo genere applicate alla quantizzazione dei reticoli cristallini, nei quali, data l'identità tra tutti gli atomi, una traslazione eguale e parallela ad uno dei lati del parallelepipedo elementare, può considerarsi come un periodo, furono recentemente svolte da Compton e altri". Sembra così indicare una delle fonti di ispirazione del proprio lavoro nella fisica dei cristalli e quindi nel settore della fisica al quale, anche nel passato, si erano particolarmente rivolti gli interessi di Born e della sua scuola.

Nei successivi tre paragrafi, Fermi mostra come l'applicazione delle regole di quantizzazione di Sommerfeld a un gas perfetto sia insufficiente per determinare la formula di Sackur-Tetrode, che aveva ricevuto piena conferma sperimentale. Infatti, per giungere a quest'ultima, Fermi deve introdurre *ad hoc* l'ulteriore ipotesi secondo la quale "il sistema fondamentale, a cui si ridurrà il nostro gas, contenga un solo atomo; mentre riducendolo a sistemi, pure a variabili separate, ma contenenti più di un atomo, si troveranno sempre delle maggiori o minori divergenze".

Fermi si propone di considerare il gas perfetto come un sistema a variabili *separate* e in seguito di applicare le regole di quantizzazione di Sommerfeld, "facendo diverse ipotesi sopra il modo di quantizzarlo (per ottenere un valore finito dell'entropia di un gas perfetto è necessario quantizzarlo in un modo o nell'altro, poiché la trattazione classica ci condurrebbe sempre ad un valore infinito)".

Si noti come sia mutata significativamente l'opinione di Fermi rispetto alla posizione da lui assunta poco tempo prima nel lavoro sulla teoria di Stern (F.N.M. 16).

Fermi considera quindi un gas perfetto costituito da N molecole puntiformi racchiuse in un recipiente di volume V. Divide il volume V in celle a forma di parallelepipedi rettangoli di spigoli a, b, c, e indica il volume di una cella con $V_C = a \cdot b \cdot c$. Assume anche che in ogni cella vi sia lo stesso numero di molecole. Pertanto si avranno varie possibilità potendo immaginare il volume V costituito da: N celle uguali con 1 molecola per cella, $N/2$ celle uguali con 2 molecole per cella, ..., 1 cella con N molecole. In generale, estendendo il ragionamento di Fermi, si possono considerare N/x celle con x molecole per cella. Se si prendono, come nell'articolo di Brody, le coordinate cartesiane parallele ai lati della cella, allora il sistema è chiaramente a variabili separate. A questo punto Fermi si richiama direttamente ai risultati di Brody, ottenendo, per l'energia di una molecola che si muova parallelamente all'asse delle x, lungo un segmento di misura a: $w_i = i^2 h^2/8a^2 m$ $(i = 0, 1, 2, ...)$. Per ricondursi al risultato di Sackur e Tetrode, deve quindi trovare una formula che permetta di calcolare il contributo σ all'entropia totale di questo grado di libertà della molecola. Fermi la riporta senza dimostrazione, asserendo che tale formula *si può facilmente dedurre con un calcolo diretto*. Tenendo conto dei tre gradi di libertà di una molecola (supponendo

pertanto il gas monoatomico) e delle N molecole che costituiscono il gas, si ottiene quindi per l'entropia totale l'espressione:

$$S = kn \cdot$$

$$\cdot \left\{ \frac{5}{2} \ln T - \ln P + \ln \left[\frac{(2\pi m)^{3/2} k^{5/2} e^{5/2}}{h^3} \cdot \frac{x}{e} \right] \right\},$$

dove $x = N \cdot V_C/V$ è il numero di molecole presenti in ciascuna cella.

Fino a questo punto, il lavoro di Fermi differisce poco da quello di Brody. Seguendo Brody, bisognerebbe ora considerare un'unica cella contenente N molecole, ovvero $x = N$; introducendo poi un'opinabile divisione per $N!$ si otterrebbe precisamente la formula di Sackur-Tetrode. Tuttavia Fermi non ricorre a questa procedura e ne propone una nuova più sofisticata. Nel derivare l'espressione di S si è supposto che il volume V fosse diviso in N/x celle tutte uguali, ciascuna contenente un numero x di molecole del gas. Sia P_r la probabilità che ciò avvenga; Fermi asserisce allora che l'effettiva entropia del gas si otterrà sottraendo $k \cdot \ln P_r$ dalla precedente espressione di S. Poiché $P_r = [N!/(x!)^{N/x}]/[(N/x)^N] \cong x^N/[e^N \cdot (x!)^{N/x}]$, allora l'entropia effettiva risulterà, secondo Fermi,

$$S_{\text{eff}} = kN \left\{ \frac{5}{2} \ln T - \ln P + \right.$$

$$\left. + \ln \left[\frac{(2\pi m)^{3/2} k^{5/2} e^{5/2}}{h^3} \right] + \ln (x!)^{1/x} \right\},$$

e quindi, come si vede subito, l'accordo con la formula di Sackur-Tetrode si ottiene soltanto per $x = 1$. In conclusione, secondo il ragionamento di Fermi, la verifica sperimentale della formula di Sackur-Tetrode impone che il recipiente sia diviso in N celle uguali, ciascuna contenente una molecola e ciascuna di volume V/N. Tutte le altre possibilità sono da ritenersi escluse.

Fermi sottolinea particolarmente il fatto che tutti i problemi nascono proprio dall'identità delle due o più molecole contenute in un'unica cella. Nel caso in cui tale identità venga a mancare (ad esempio se le molecole contenute in un'unica cella sono di specie diverse), egli mostra come si ottenga un risultato corretto per l'entropia seguendo la procedura standard.

Prima di concludere l'articolo, Fermi svolge infine alcune considerazioni sulle implicazioni che il risultato ottenuto può avere sullo studio degli atomi con più di un elettrone. Identificando, per esempio, un atomo di elio con una cella nella quale porre due elettroni indistinguibili, le precedenti considerazioni sul gas perfetto fanno pensare alla necessità, anche per gli atomi complessi, di trovare un ulteriore principio ordinatore che completi le regole di quantizzazione di Sommerfeld che in questo caso risultano insufficienti:

"L'insuccesso delle regole di Sommerfeld nel calcolo quantitativo degli atomi di numero atomico più grande di uno, più che a una deficienza del metodo delle perturbazioni, oppure della meccanica, [può essere] dovuto al fatto che questi atomi contengono almeno 2 elettroni non distinguibili tra di loro, e che le regole di Sommerfeld, anche nel caso della possibilità della separazione delle variabili, [possono non essere] applicabili nel caso che alcune parti del sistema siano tra di loro completamente identiche. A sostegno di tale ipotesi, [...] la quantizzazione del moto di molecole eguali contenute in una cella a forma di parallelepipedo conduce al risultato esatto per il valore assoluto dell'entropia del gas solo nel caso che in ogni cella sia contenuta una sola molecola, mentre se il gas è una miscela di due specie di molecole e lo si quantizza racchiudendo le molecole in celle, per modo che in ciascuna cella siano contenute due molecole, però di specie diversa, si ottiene ancora il risultato esatto".

Peraltro, la quantizzazione dell'atomo di elio era, come abbiamo veduto, un problema al quale Born da tempo aveva invano cercato di trovare una soluzione.

Il principio ordinatore mancante era, ovviamente, il principio di esclusione di Pauli, anche se da «estrapolare» dal suo originale ambito spettroscopico. In proposito, Rasetti riferisce che Fermi "*told much later to Segrè that the division of phase space into finite cells had occupied him very much and that had not Pauli discovered the exclusion principle he might have arrived at it in a roundabout way from the entropy constant*".

Epilogo

Il lavoro di Fermi sulla nuova statistica quantica fu presentato da Garbasso ai Lincei

il 7 febbraio 1926. Il 26 marzo 1926, l'editore della *Zeitschrift für Physik* ricevette una versione più dettagliata del lavoro che fu pubblicata in seguito sulla rivista tedesca l'11 maggio 1926. Erano trascorsi, quindi, poco più di due anni dall'ultimo articolo di Fermi di argomento termodinamico-statistico.

Fermi per quantizzare il gas utilizza le regole di Sommerfeld e il nucleo centrale dell'articolo si ricollega pertanto alle conclusioni che Fermi stesso aveva raggiunto nell'articolo del gennaio 1924 sulla quantizzazione dei sistemi contenenti elementi identici (F.N.M. 19), che viene richiamato. E cioè al fatto che le regole di quantizzazione di Sommerfeld non sono sufficienti per discriminare fra i diversi valori che si possono assegnare a x (numero di molecole nella cella di volume V_C). Questa incertezza, che Fermi nel gennaio del 1924 aveva potuto in qualche modo «aggirare» con un'ipotesi *ad hoc*, richiedendo l'accordo dei risultati con la formula di Sackur-Tetrode, viene a essere ora totalmente rimossa grazie alle «nuove» prescrizioni fornite dal principio di esclusione di Pauli.

Forse si potrebbe arrivare a dire che Fermi aveva rinunciato ormai da due anni a occuparsi dell'argomento proprio perché stava aspettando questo principio mancante al quale era del resto arrivato molto vicino.

Il *complemento alle regole di Sommerfeld*, viene quindi ad assumere la funzione di «chiave di volta» per le argomentazioni di Fermi. Egli, verosimilmente, non deve aver impiegato molto tempo per raggiungere tutte le conclusioni più importanti, una volta utilizzata la *regola di Pauli* per affrontare *il problema della quantizzazione del gas perfetto*. Regola che si era *dimostrata estremamente feconda nell'interpretazione dei risultati spettroscopici*. Il principio di esclusione risolve di colpo tutti i precedenti interrogativi di Fermi e gli fornisce la possibilità di "trovare un metodo [...] che è il più possibile indipendente da ipotesi arbitrarie".

Così, nel sommario dell'articolo in tedesco, Fermi riassume le motivazioni e le finalità della ricerca e i risultati ottenuti:

"Se si deve ritenere valido il teorema del calore di Nernst anche per il gas perfetto, si deve supporre che la legge per il gas perfetto si discosti da quella classica per le basse temperature. La causa di questa degenerazione è da ricercarsi in una quantizzazione del movimento molecolare. In tutte le teorie della degenerazione vengono sempre fatte ipotesi più o meno arbitrarie sul comportamento statistico delle molecole, o sulla loro quantizzazione. Nel presente lavoro si utilizzerà solamente l'ipotesi, formulata per la prima volta da Pauli e convalidata da numerosi fatti spettroscopici, che in un sistema non possano mai esserci due elementi equivalenti i cui numeri quantici concordino completamente. Con questa ipotesi verranno dedotte l'equazione di stato e l'energia interna del gas perfetto; il valore dell'entropia per grandi temperature coincide con il valore di Stern e Tetrode".

Da un'analisi della memoria presentata ai Lincei è evidente che in essa Fermi aveva già raggiunto tutti i risultati fondamentali della nuova statistica. Poiché il 7 febbraio il lavoro di Fermi era stato gi elaborato in tutte le sue parti, si può quindi affermare che il limite *ante quem* della statistica di Fermi è individuabile abbastanza esattamente nei primi giorni del febbraio 1926. Una minore precisione sussiste invece sul più importante limite *post quem*. Tutti concordano sul fatto che la nuova statistica vide la luce poche settimane dopo che Fermi ebbe letto il lavoro di Pauli, ma rimane comunque in sospeso la questione di quando Fermi venne a conoscenza del principio di esclusione.

Quest'ultimo apparve in un lavoro che fu ricevuto dalla *Zeitschrift für Physik* il 16 gennaio 1925 e pubblicato nel numero di febbraio-aprile 1925. Quindi Fermi avrebbe avuto la possibilità di conoscerlo almeno fin dalla primavera del 1925. Tuttavia, durante la primavera del 1925, egli era stato molto impegnato in un lavoro sperimentale condotto insieme a Rasetti. In seguito, per tutto il mese di luglio, Fermi fu occupato con gli esami di stato a Firenze. Agosto fu trascorso da Fermi, insieme a R. de L. Kronig e altri amici, a S. Vito di Cadore. È da ritenersi che Kronig, informatissimo, abbia aggiornato Fermi sui più significativi risultati ottenuti negli ultimi mesi. Inoltre Kronig era a conoscenza del principio d'esclusione di Pauli sin dal gennaio 1925 (in una lettera a Goudsmit, infatti scrive: "A Tubinga ho incontrato Pauli. Ha scritto un lavoro bellissimo, che apparirà molto presto.)". È quindi plausibile che Kronig abbia parlato con Fermi del principio d'esclusione di Pauli durante le vacanze estive a S. Vito. Tuttavia, per quanto è a nostra cono-

scenza, nelle fonti riguardanti Fermi prima del 7 febbraio 1926 non è rimasta traccia del principio di esclusione di Pauli. Nella lettera a Persico del 23 settembre 1925 si legge soltanto:

"Durante questa estate io ho naturalmente sospeso tutti i lavori scientifici. Solo ora ho un po' ricominciato a leggere qualche cosa per rimettermi al corrente con la bibliografia di questi ultimi tempi. La mia impressione è che il progresso di questi ultimi mesi non sia stato molto grande, nonostante i risultati formali di zoologia dei termini spettroscopici raggiunti da Heisenberg. Per il mio gusto mi pare che comincino veramente ad esagerare nella tendenza di rinunziare a capire le cose. Ora ho intenzione di mettermi a studiare, sia dal punto di vista teorico che da quello sperimentale, il problema delle nuove righe spettrali che appaiono in un campo elettrico o magnetico di intensità opportuna."

Nella corrispondenza intercorsa tra Fermi e Persico nella seconda metà del 1925 e nei primi mesi del 1926 non viene mai menzionato né il principio di Pauli né la nuova statistica.

L'ultima fonte diretta che pone un limite *post quem* per gli interessi di Fermi riguardo al principio di esclusione di Pauli e, più in generale, per la quantizzazione del gas perfetto è una cartolina postale da Firenze di Fermi a Kronig (il quale allora si trovava a Copenhagen) in data 23 novembre 1925:

"Attualmente ho quasi finito con la teoria della conduzione del calore nei cristalli (forse ti ricordi che ci lavoravo sopra già a S. Vito). [...] Desidererei chiederti se sei a conoscenza di qualche pubblicazione di Pauli al riguardo. Nella letteratura non ho potuto trovare nulla. [...] Qui ho cominciato le lezioni. Quest'anno insegno calcolo delle probabilità e meccanica statistica."

Questa cartolina postale in primo luogo testimonia degli interessi di Fermi, durante l'estate-autunno 1925, per la conduzione del calore nei cristalli (argomento che troverà spazio solo nel libro *Molecole e Cristalli*, nove anni dopo). Il fatto di avere quasi finito di occuparsene potrebbe indicare l'imminente scelta di un nuovo argomento di ricerca. Inoltre, merita di essere sottolineato l'accenno di Fermi alle lezioni da lui tenute di meccanica statistica e calcolo delle probabilità. Durante la preparazione delle lezioni, Fermi potrebbe aver trovato lo spunto per le riflessioni che lo condussero alla nuova statistica quantica.

In definitiva il limite *post quem* della statistica di Fermi è individuabile, con minor precisione di quello *ante quem*, verso la fine del mese di novembre 1925. Ad avvalorare tale ipotesi, R. Vergara Caffarelli ci ha informato di una lettera inedita scritta da Fermi alla sorella il 2 dicembre 1925. In questa lettera Fermi riferisce di aver molto da fare e di essere contemporaneamente impegnato con due o tre lavori. Uno di questi lavori potrebbe essere quello sulla statistica.

Il periodo olandese fu per Fermi sicuramente più gratificante sul piano personale di quello tedesco. Tuttavia è anche vero che i due lavori di Fermi che preludono alla nuova statistica videro la luce subito dopo il ritorno di Fermi dalla Germania ed è molto probabile che proprio a Gottinga Fermi abbia cominciato a interessarsi degli argomenti che lo portarono a pubblicare questi articoli. Sotto questo punto di vista, il successivo periodo trascorso a Leida potrebbe aver rappresentato per Fermi, quasi paradossalmente, una diversione da questa linea di ricerca. Il primo articolo sulla nuova statistica apparve, infatti, solo dopo circa un anno dal rientro di Fermi dall'Olanda e anche dalla formulazione del principio di esclusione da parte di Pauli.

Bibliografia

— *Archive for History of Quantum Physics* (e le trascrizioni curate dal *Center for History of Physics* dell'*American Institute of Physics*).
— *Archivio Amaldi* del *Dipartimento di Fisica dell'Università «La Sapienza» di Roma.*
— AMALDI E., *The Fermi-Dirac statistics and the statistics of nuclei*, in *Symmetries in Physics (1600-1980)*, a cura di M.G. Doncel *et al.* (Universitat Autònoma de Barcelona, Barcellona, 1983), pp. 253-277.
— BELLONI L., *Una nota su come Fermi giunse alla statistica di Fermi-Dirac*, *Scientia*, **113**, 431-438 (1978); *On Fermi's route to Fermi-Dirac statistics*, *Eur. J. Phys.*, **15**, 102-109 (1994); *Sull'origine della statistica di Fermi*, *Quaderno di Storia della Fisica del Giornale di Fisica*, **1**, 275-286 (1997).
— BORN M., *Scienza e vita, Lettere 1916-1955*, trad. italiana (Einaudi, Torino, 1973²); *Autobiografia di un fisico*, trad. italiana (Editori Riuniti, Roma, 1980).
— DESALVO A., *From the chemical constant to quantum statistics: a thermodynamic route to quantum mechanics*, *Physis*, **29**, 465-537 (1992).
— FERMI E., *Note e Memorie (Collected Papers)*, a cura di E. AMALDI *et al.*, 2 voll. (Accademia Nazionale dei Lincei, Roma) - (University of Chicago Press, Chicago, 1962-1965). Abbreviato in F.N.M. Con «F.N.M. k» viene indicato il *k-esimo* lavoro riportato in F.N.M.
— FERMI L., *Atomi in famiglia*, trad. italiana (Mondadori, Verona, 1954).
— GOUDSMIT S.A., *Guess work: The discovery of the electron spin*, *Delta*, Summer (1972) p. 77; *It might as well be spin*, *Physics Today*, June (1976) p. 40.

— PAIS A., *Inward Bound* (Oxford University Press, New York, 1986).
— PAULI W., *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg, u.a. 1919-1929*, a cura di A. HERMANN *et al.* (Springer, New York, 1979).
— PONTECORVO B., *Enrico Fermi*, trad. italiana (Studio Tesi, Pordenone, 1993).
— SEGRÈ E., *Enrico Fermi fisico*, trad.italiana (Zanichelli, Bologna, 1971[1], 1987[2]).
— TAGLIAFERRI G., *Storia della fisica quantistica* (Angeli, Milano, 1985).
— UHLENBECK G.E., *Personal reminiscences*, *Physics Today*, June (1976).

* * *

— SASSI M.C. e SEBASTIANI F., *La formazione scientifica di Enrico Fermi*, *Giornale di Fisica*, **40**, 89-113 (1999).
— CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *Il debutto di Enrico Fermi come fisico teorico: i primi lavori sulla relatività (1921-1922/23)*, *Quaderno di Storia della fisica del Giornale di Fisica*, **5**, 69-88 (1999).
— CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *La corrispondenza Persico-Fermi (1922-1926)*, *Giornale di Fisica*, **40**, 143 (1999).
— CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *Fermi a Gottinga e a Leida: gli anni che precedono la statistica quantica*, *Quaderni di Storia della Fisica*, **6**, 17 (2000).
— CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *La genesi della statistica di Fermi*, Nota interna del Dip. di Fisica de «La Sapienza» di Roma no. 1106 (1999).
— CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *La corrispondenza inedita Fermi-Persico (1917-1938)*, Nota interna del Dip. di Fisica de «La Sapienza» di Roma no. 1107 (1999).
— CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *La statistica di Fermi*, Nota interna del Dip. di Fisica de «La Sapienza» di Roma no. 1110 (1999).

MARIO AGENO, FILOSOFO DELLA FISICA

S. Bergia
Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, INFN, Sezione di Bologna

1. – Introduzione

Questa rivista ha pubblicato, a cura di Paolo Salvatori ([1]), una commemorazione di Mario Ageno poco dopo la sua scomparsa, avvenuta il 23 dicembre 1992. Ad essa rimando per un inquadramento complessivo della sua figura e della sua opera. Ha inoltre ospitato una recensione al suo libro *La Biofisica* ([2]), a cura di Renato Angelo Ricci ([3]), che inquadra sia la concezione precisa che Ageno ebbe di questa disciplina — di cui, come scrive Salvatori, si può considerare il fondatore in Italia — sia la sua severa visione dell'impegno scientifico. Qui vorrei limitarmi a ricordare tre sue opere della tarda maturità, pubblicate fra il 1991 e l'anno della sua morte: *Dal non vivente al vivente - Nuove ipotesi sulle origini della vita* ([4]); *Metodi e problemi della biofisica* ([5]); e *Le origini della irreversibilità* ([6]). Si tratta, in ciascuno dei casi, di lavori che hanno un grande interesse nel loro complesso. Non è tuttavia mia intenzione presentarli e commentarli globalmente. Mi propongo invece di evidenziare tre spunti metodologici — uno per ciascuno del tre lavori — che mi sembra giustifichino il titolo che ho scelto per questo articolo) [1]. Ha scritto recentemente Giovanni Boniolo [2], dopo aver affermato che fisica e filosofia in quanto tali non sono affatto eterogenei: «Tale omogeneità non deve però essere rintracciata nel tentativo fatto da alcuni fisici di risolvere problemi filosofici attraverso l'esperimento o la formalizzazione matematica, né, meno che mai, nel tentativo di qualche filosofo di risolvere i problemi fisici attraverso l'argomentazione (...). In realtà il filosofo della fisica cerca di attuare una riflessione filosofica, meglio logico-filosofica, sulla struttura delle teorie fisiche e sui concetti che vi sono contenuti.» È secondo questa accezione del termine che mi sembra si debba annoverare Ageno fra i filosofi della fisica.

Come si vedrà, due dei tre spunti metodologici ai quali ho fatto riferimento appaiono riguardare la biologia piuttosto che la fisica. E «filosofo delle scienze della natura» sembrerebbe quindi una denominazione più adeguata per denotare l'opera di Ageno cui faccio riferimento che non quella scelta. Tuttavia Ageno, la cui attività di studio e ricerca si è svolta sulla terra di confine fra fisica e biologia, ha mantenuto, complessivamente, — almeno così mi pare — una atteggiamento che è rimasto più da fisico, quale egli era per formazione, che non da biologo.

Passo ora ad esaminare, in rapida successione, i tre spunti cui ho accennato. In seguito indicherò aspetti dell'atteggiamento di Ageno che accomunano la trattazione dei tre casi.

2. – L'origine della vita: probabilità evanescenti e possibilità concrete (in: *Dal non vivente al vivente*)

Alla base della biologia moderna, sia che si affronti il problema dell'origine della vita, sia

[1] Una sua versione preliminare è stata presentata al convegno *Cento anni di filosofia della fisica in Italia*, Cesena, 1997.
[2] Introduzione a *Filosofia della fisica* ([7]), a cura di Giovanni Boniolo (Bruno Mondadori, 1997).

che si indaghino le modalità dell'evoluzione, c'è, nelle parole di un biologo, F. Morchio ([8]), «una visione combinatoria dei processi biologici fondamentali», che può essere espressa come segue: «Le strutture biologiche, a tutti i livelli, sono il risultato di processi combinatori del tutto casuali dei loro elementi componenti.» Ora, che succede se ci si mette a «fare qualche conto, anche se per necessità sommario e quindi solo indicativo, per verificare la validità dei fondamenti concettuali della teoria combinatoria?» Ci si può per esempio domandare quale risulti essere la probabilità che «collegando a caso degli aminoacidi» si ottenga una proteina con specifiche proprietà enzimatiche. Se la proteina, per fissare le idee, è formata da un centinaio di aminoacidi, un calcolo combinatorio standard mostra che la probabilità di ottenere combinando a caso quegli aminoacidi quella proteina specifica è di $1/10^{130}$. Un lancio di dadi al secondo — per metterla in questi termini — richiederebbe allora, come tipico tempo necessario per la sintesi di una tale proteina, 10^{130} secondi, un tempo spaventosamente superiore non solo all'età della Terra ma a quella dello stesso universo.

Ageno mostra in modo persuasivo che quello che possiamo chiamare *il problema delle probabilità evanescenti* in biologia trova una soluzione di principio una volta che se ne siano individuati i termini corretti e che ci si sia posti la domanda giusta. Si consideri, per esempio, con Ageno, l'istidina, uno dei venti aminoacidi costituenti le proteine biologiche, per la cui sintesi l'analisi combinatoria standard produce risposte analoghe a quella appena menzionata riguardante le proteine. Per ottenere una molecola di istidina «si devono mettere insieme una molecola di PRPP, una di ATP, una di glutammina e due di NAD+, tutte presenti nel liquido cellulare, oltre a due molecole d'acqua (...). [Si noterà che si è qui compiuto un passo importante, consistente nell' individuare in modo meno astratto il contesto nel quale la supposta sintesi deve aver luogo]. Qual è la probabilità (...) che tutte queste molecole convergano insieme spostandosi a caso nella soluzione, e reagiscano in modo corretto, sia pure in presenza di un catalizzatore specifico?» Se il problema è formulato così, si è indotti fatalmente a concludere che il processo è praticamente impossibile. Com'è allora — si domanda Ageno — che la sintesi ha luogo correntemente in *Escherichia coli*? Evidentemente non ci si è posti la domanda giusta. Si dà infatti il caso che la sintesi in questione avvenga «attraverso ben nove passi reattivi consecutivi», e che l'intero processo non comporti mai «altro che incontri binari (...) di molecole presenti in soluzione in concentrazioni convenienti». La nozione rilevante diventa dunque quella di *probabilità per unità di tempo* che si verifichi un incontro che dia luogo a uno di questi processi. Questa probabilità è inizialmente nulla per i processi successivi al primo, ma va poi crescendo man mano che si formano gli stadi successivi di aggregazione. La domanda da farsi è dunque in questo caso quale probabilità ha di formarsi l'istidina nelle condizioni specificate entro limiti di tempo assegnati.

«Questo semplice esempio — scrive Ageno — mette chiaramente in luce quale sia la natura (...) [del] (...) processo di transizione dal non vivente al vivente (...). Il problema che ci troviamo davanti, il problema dell'origine della vita, non è quello del coalescere, più o meno per caso, a un certo istante, di tutti gli indispensabili precursori a formare la prima cellula, un sistema questo estremamente complesso. Il nostro problema sarà quello di riuscire a individuare una lunga catena di passi consecutivi, ciascuno fortemente condizionato dal verificarsi del passo precedente e con il suo verificarsi fortemente condizionante il passo seguente, che, a partire da una situazione fisica caotica iniziale, attraverso un periodo di tempo neppure particolarmente lungo, deve portare a quella "macchina per produrre viventi", che ancor oggi funziona ...».

3. – Legalità della fisica e storicità della biologia (in: *Metodi e problemi della biofisica*)

Per cercare di tracciare una frontiera fra fisica e biologia verrebbe probabilmente fatto di partire dal dominio dei fenomeni indagati. Ageno arriva a definire una linea di demarcazione indagando su aspetti della teorizzazione con finalità predittive caratteristici delle due discipline. All'originalità dell'impostazione fa riscontro l'interesse epistemologico dell'analisi. La fisica, scrive Ageno, ha attinto, nel corso della sua storia, due *livelli di teorizzazione*. Ha raggiunto *il primo* con il completamento della fisica classica, fornendo un mo-

dello completamente deterministico della parte di mondo fisico fino ad allora indagato. È la generalizzazione di questo schema che ha portato la fisica al suo *secondo livello di teorizzazione*. «Ciò è avvenuto quando, estendendo i suoi territori, la fisica si è trovata di fronte la granularità elementare, che sta alla base della realtà fenomenica. Ha così incontrato e annesso al suo dominio una quantità di nuovi sistemi, in cui ogni singolo evento può di regola dar luogo a più esiti alternativi e non è possibile prevedere quale di questi si verificherà nel caso particolare. Sono però perfettamente determinate e calcolabili a partire dai loro valori iniziali, in base alle leggi fondamentali della teoria, *le probabilità* di tutti quegli esiti alternativi.»

Nel porsi il problema di una completa riduzione della biologia alla fisica, viene fatto di partire dalla considerazione che «un sistema biologico qualunque ha sempre alla sua base una struttura granulare (il complesso dei geni), così come ha una struttura fondamentale granulare ogni sistema fisico». C'è indubbiamente un elemento che distingue fortemente il caso biologico da quello immediatemente fisico: «I granuli elementari che stanno alla base dei sistemi fisici abiologici sono tutti dello stesso tipo o di pochissimi tipi diversi (...) [la contrapposizione è qui evidentemente fra i costituenti elementari della materia, i quark, e i geni]. Ciascuno dei granuli che stanno alla base di un sistema biologico, invece, ha una sua precisa individualità e una sua funzione (...); quest'ultimo fatto (...) fa crescere a dismisura il numero delle alternative strutturali possibili e (...) fa la differenza.» Si tratta tuttavia di una differenza di carattere piuttosto quantitativo che non qualitativo, e, a questo stadio dell'analisi, si è ancora autorizzati «ad accreditare l'idea che il mondo della vita possa effettivamente venir considerato un potenziale campo di espansione delle scienze fisiche.»

La discriminazione nasce da un altro tipo di considerazione. Nel caso dei sistemi biologici «esistono situazioni oggettive perfettamente definite in cui il numero delle possibili alternative è fantasticamente elevato.» Esaminiamo, con Ageno, un caso tratto dal primo dei libri citati. Supponiamo, per esempio, di considerare una popolazione di organismi di N esemplari, e supponiamo che il genoma di ogni esemplare contenga 5000 geni. Si calcola allora che il numero dei genotipi possibili a priori nella popolazione è di 10^{1500}. La risposta alla domanda «Quanti esemplari di un dato genotipo ci si deve aspettare di trovare nella popolazione in questione?» è formalmente pN, con p dell'ordine di 10^{-1500}. D'altra parte, osserva Ageno, «nessuna popolazione biologica ha mai avuto e potrà mai avere più di 10^{80} esemplari (...). Nel nostro caso, dunque, il prodotto pN è certamente molto più piccolo di 10^{-1420}. Ciò significa (...) che la stragrande maggioranza dei genotipi possibili, quasi la totalità, non può essere presente affatto nella popolazione in questione». In casi come questo, «è lo stesso concetto di probabilità di ciascuna alternativa che perde di significato, sia sul piano sperimentale (in quanto le frequenze previste, anche nelle popolazioni più numerose che si possono concretamente realizzare, risultano di gran lunga minori dell'unità, per cui non ha senso proporsi di confermarle sperimentalmente), sia sul piano concettuale (in quanto, per la stessa ragione, nessuna previsione utile sul comportamento futuro di una qualsiasi popolazione può effettivamente trarsi dalle probabilità eventualmente calcolate).

In questo limite, dunque, perdono significato le stesse leggi fondamentali che in linea di principio determinano le probabilità: è l'idea stessa di legge che in definitiva entra in crisi». Si individua così un *terzo livello di teorizzazione*, caratterizzato dagli aspetti appena presentati. È un livello che si è costretti ad attingere quando si affronta la trattazione di sistemi così complessi come sono quelli biologici. Esso sembrerebbe individuare il terreno su cui si può realizzare quella «*fisicalizzazione della biologia* tanto preconizzata, auspicata, deprecata, discussa nei decenni passati, che a molti è sembrata già conseguita con il trionfale affermarsi della biologia molecolare». Ma — scrive Ageno — «ciò cui portano le considerazioni precedenti è proprio il contrario: la fondazione, chiara e definitiva, dell'*autonomia della biologia* come scienza, nel momento stesso in cui si chiarisce il modo in cui il propriamente "biologico" emerge dal sottofondo chimico-fisico, che realizza il macchinismo del vivente». Ciò che caratterizza l'ambito della descrizione teorica dei processi biologici, dunque in definitiva il metodo proprio della biologia, è quanto emerge dall'esempio discusso: «il concetto di legge fisica perde si-

gnificato e l'unico modo che resta di descrivere ciò che accade risulta essere quello di raccontarlo nell'ordine di tempo».

4. – La genesi del teorema H: «Come i difetti di un cattivo modello sono compensati dall'arbitrarietà del procedimento matematico» (in: *Le origini dell'irreversibilità*)

Il terzo spunto metodologico (Ageno usa l'espressione *tesi epistemologica*) non è legato, come il secondo, al primo. Fa invece in massima parte storia a sé. Per addentrarci, anche minimamente, sul terreno dell'analisi di Ageno, si devono premettere alcune sue osservazioni sul modo in cui la fisica affronta la trattazione dei sistemi che studia. Essa comincia col sostituire i sistemi *reali* (nel senso — scrive Ageno — della realtà dell'uomo della strada) con sistemi *ideali*, isolando, galileianamente, «un singolo ben definito *fenomeno*, nel burrascoso mare dei messaggi del mondo ...».

Ma — aggiunge Ageno — c'è un terzo stadio, che di solito non riceve attenzione. Anche «il sistema ideale immaginato dallo scienziato non è generalmente tale da consentire facili elaborazioni concettuali». Egli allora talvolta finisce inavvertitamente per sostituire allo stesso sistema ideale un *sistema schematizzato*, che non ha tutte e sole le stesse proprietà, che è poi di fatto usato «per poter procedere facilmente nei successivi sviluppi deduttivi», «Si tratta generalmente di "adattare" il sistema ideale, così che in esso siano in qualche modo soddisfatti i postulati di qualche teoria matematica. Ecco allora che il sistema adattato si presenta come un'interpretazione di quell'astratto sistema logico-deduttivo, e questo ultimo può allora essere usato come formidabile strumento deduttivo, ai fini dello studio e della comprensione di quello.» L'esempio classico è quello che riguarda le proprietà di cui occorre dotare un sistema (ideale!) perché soddisfi i requisiti per l'impiego del calcolo infinitesimale nella sua trattazione.

Ora, il punto è che l'adattamento del sistema fisico ideale ai postulati di un sistema logico deduttivo già predisposto può comportare dei pericoli, in quanto non è detto che il comportamento del sistema modificato possa poi sempre attribuirsi anche al sistema ideale originario.

Questa è la tesi epistemologica che Ageno si propone di illustrare nel caso della derivazione originale di Boltzmann del suo famoso *teorema H* [3]. In essa, il sistema reale è un gas, il sistema ideale, o, con linguaggio appropriato al caso specifico, sistema modello, è quello in cui le molecole del gas sono assimilate a sfere perfettamente elastiche, e le pareti del recipiente che contiene il gas sono supposte perfettamente lisce e anch'esse perfettamente elastiche. Boltzmann asserisce che, se le molecole hanno tutte all'inizio uguale velocità scalare, ben presto le loro velocità si differenzieranno per effetto degli urti, e conclude che, attraverso urti successivi, tutte le velocità possibili finiranno con l'essere presenti nel gas (se le molecole sono abbastanza numerose) e ne arguisce la possibilità di calcolare la relativa legge di distribuzione.

Sembrerebbe — scrive Ageno — «che si sia qui in presenza di una deduzione logica, anche se un po' sommaria, dalle proprietà del modello». Ma non è così. Che qualsiasi tipo di urto fra due sferette sia *a priori* possibile è vero solo «*se non si specificano le condizioni iniziali del sistema*». Nel quadro meccanicistico assunto da Boltzmann fin dall'inizio, dobbiamo invece «assumere che il sistema parta da condizioni iniziali precisamente definite, indipendentemente dal fatto che queste condizioni siano da noi conosciute oppure no». «Ciò che si dovrebbe dimostrare è che, *una volta che si siano fissate le condizioni iniziali*, ogni tipo di urto elastico possa prima o poi effettivamente verificarsi (...)

Ciò però è certamente non vero. Per convincersene, basta osservare che gli urti che si verificano nel gas-modello una volta che si siano fissate le condizioni iniziali costituiscono *un insieme numerabile*, mentre l'insieme di tutti i tipi di urto tra due sferette *a priori* possibili nel recipiente che contiene il gas è un continuo a 11 dimensioni.» Ageno analizza questo punto, giungendo alla conclusione che «gli urti che hanno luogo nel recipiente, per date condizioni iniziali del gas-modello, costituiscono nella loro totalità un insieme di misura nulla, nel continuo di tutti gli urti possibili».

[3] Il lavoro di Ageno sulle origini dell'irreversibilità ha avuto una recensione ([9]) e un commento ([10]) sul Giornale di Fisica. Esso è brevemente menzionato anche in un altro scritto dell'autore del commento ([11]) e nel recente libro di Cercignani su Boltzmann ([12]).

Urti che facciano uscire da questo insieme sono possibili solo se si abbandona l'assunzione della validità rigorosa dei teoremi di conservazione dell'energia e dell'impulso della meccanica classica. Se non si abbandona questa assunzione, niente nel modello permette di inferire che il gas tenderà a una configurazione d'equilibrio descritta dalla distribuzione maxwelliana delle velocità. Questo è il nocciolo di un insieme di considerazioni che non posso cercare di riprodurre qui, e che portano Ageno a concludere che «la dimostrazione del teorema H di Boltzmann risulta non valida per il gas-modello ideale di Boltzmann. La validità del teorema risulta assicurata solo dalle ipotesi di schematizzazione introdotte, ipotesi che hanno modificato tale modello, rendendo possibili urti, che in realtà non sono consentiti dai teoremi di conservazione, e accessibili al sistema microstati, che non sono tali per il modello ideale». La tesi epistemologica di Ageno risulta così dimostrata su di un caso specifico.

Un punto che merita un piccolo supplemento di analisi è la sottolineatura, da parte di Ageno, che si deve assumere, nel quadro delineato dallo stesso Boltzmann, che il sistema parta da condizioni iniziali precisamente definite. Conviene istituire al proposito un confronto fra il caso del gas e quello di una sostanza radioattiva. Nell'uno come nell'altro caso, possiamo immaginarci un insieme statistico costituito, a un dato istante scelto come iniziale, da un numero indefinito di esemplari, tutti uguali al sistema reale. Poiché si suppone che ogni atomo radioattivo abbia una definita probabilità di disintegrarsi nell'unità di tempo — e niente più che questo — ne segue che ciascun esemplare dell'insieme statistico evolve per suo conto. A un generico istante di tempo successivo il numero di atomi che non si sono ancora disintegrati è di regola diverso da esemplare a esemplare. Nel caso del gas, partendo gli esemplari tutti dalle stesse condizioni iniziali, ogni esemplare percorre la stessa successione obbligata di microstati. Ciò mostra, scrive Ageno, «come la sostanza radioattiva e il gas-modello di Boltzmann siano due tipi di sistema profondamente diversi tra loro dal punto di vista fisico». «Sembra che molti ritengano che si possa ovviare a questa differenza, partendo dalla osservazione che noi in realtà non conosciamo altro che parzialmente lo stato iniziale di un gas...» Parrebbe che in tal modo ci si potesse riportare alla stessa situazione dell'altro insieme statistico, quello relativo alla sostanza radioattiva. Ma non è così. Quanto sopra descritto circa il modo di differenziarsi tra loro dei singoli esemplari dell'insieme statistico nel caso del decadimento radioattivo è infatti dovuto ad una stocasticità intrinseca alla natura fisica del sistema [alla sua natura quantomeccanica, N.d.R.] e non ha nulla a che fare con ciò che di esso noi possiamo o non possiamo conoscere...».

5. – Il metodo analitico nelle indagini di Ageno

Ho accennato inizialmente che avrei indicato aspetti che accomunano i tre spunti metodologici al di là del loro contenuto intrinseco.

Il primo riguarda — per così dire — l'altezza della posta in gioco: in ciascuno dei tre casi la riflessione specifica che ho ricordato è premessa importante, o addirittura decisiva, per poter affrontare con un occhio nuovo questioni di interesse primario.

Nel primo libro, il tema è quello dell'origine della vita sulla Terra: l'argomento presentato mira ad individuare la natura vera del processo di transizione dal non vivente al vivente, e finisce per prospettare una risposta positiva ai dubbi sulla possibilità della sua realizzazione.

Nel secondo, l'analisi condotta invita all'indagine di un sistema biologico seguendolo nella transizione fra i due regimi: si tratterà di studiarlo sperimentalmente dapprima «sottoponendo la sua intrinseca variabilità a vincoli così rigorosi, in condizioni così strettamente controllate, che esso non abbia altra possibilità di svilupparsi, almeno per un certo limitato intervallo di tempo, che come sistema apparentemente deterministico. In tali condizioni, deve quindi essere possibile descriverne il comportamento e l'evoluzione mediante una teoria di tipo fisico ... E deve poi essere possibile far vedere come, man mano che le condizioni più restrittive e vincolanti vengono lasciate cadere, la teoria formulata (...) si trasformi gradualmente, con lo svanire della significatività delle leggi (...) in una teoria di tipo biologico...». L'esperimento è stato effettivamente condotto da Ageno su una coltura batterica, mettendo in luce la

transizione appena descritta. A parte il suo interesse intrinseco, esso ha richiesto, per la sua interpretazione, una nuova teoria della divisione cellulare dei batteri, che, a sua volta, ha fornito l'elemento chiave per la costruzione di un modello fisico per il più semplice tipo di organismo vivente.

Nel terzo, infine, il tema affrontato è quello delle origini dell'irreversibilità. Di fatto, ricorda Ageno, l'*enunciato* del teorema H descrive correttamente il comportamento evolutivo di un gas. «Ci deve dunque essere un preciso fatto fisico, di cui il modello ideale di Boltzmann non tiene conto, che rende valido l'enunciato del teorema H e che, nella dimostrazione, viene surrogato dall'artificio matematico di schematizzazione.» La seconda parte del libro è dedicata alla ricerca di una risposta alla domanda su quale sia questo fatto fisico. E la posta in gioco, sulla quale mi è assolutamente impossibile soffermarmi, è una nuova ipotesi su quale sia, appunto, l'origine dell'irreversibilità.

Il secondo aspetto che, mi sembra, accomuna i tre casi è la capacità di riproporsi i problemi nella loro complessità, e di addentrarsi, con passo lento ma sicuro, in una loro analisi raramente uguagliata per scrupolosità e completezza. È un'analisi che deve avere di necessità il respiro che un articolo scientifico non può avere, e che solo un libro lungamente meditato può attingere.

Il terzo ed ultimo aspetto esula da quanto discusso fin qui in quanto riguarda piuttosto ciascuno dei libri nel suo complesso — ma in modo particolarmente marcato il primo dei tre — piuttosto che gli spunti metodologici che ne ho estratto. Mi sembra opportuno accennarvi in chiusura perché mi sembra individuare un aspetto di metodo che può diventare imprescindibile in qualche scienza della natura. Che fare se, come nel caso delle origini della vita sulla Terra mancano non solo, come è ovvio, esperimento ed osservazioni dirette, ma è anche scarso e fragile l'insieme dei riscontri nel senso il più lato possibile? Ebbene, Ageno mostra che ci si può inoltrare su questi terreni con la prospettiva di ricostruire un quadro plausibile, se ci si arma di tutte le conoscenze disponibili, e, soprattutto, si è disposti a fare un uso tenace e perspicace delle proprie capacità analitiche. Edgar Allan Poe — che di simili capacità ha fatto uso, per esempio, nella sua opera cosmologica *Eureka*, nella quale esse gli hanno permesso di giungere, potendo contare su ben pochi dati osservativi, ad anticipare numerosi aspetti della cosmologia del *big bang* — ha scelto come motto per il suo famoso racconto «I delitti della via Morgue», un passo di Sir Thomas Browne: «Quale canzone cantassero le sirene o qual nome abbia assunto Achille quando si nascose nel gineceo, per quanto ci lascino perplessi, non sono quesiti al di sopra di qualsiasi possibile congettura.» Ageno ci conduce, con tenacia e pazienza infinite, attraverso le lagune di un pianeta primordiale, facendoci apparire la possibilità di capire quali sirene vi cantassero quale canzone meno remota di quanto non avremmo pensato.

Daniele Mundici mi ha messo in guardia circa la condivisibilità dell'analisi e delle conclusioni di Ageno su Boltzmann a fronte del lavoro compiuto, dall'epoca del lavoro di Boltzmann ai giorni nostri, in riferimento sia alla validità del teorema H sia ai fondamenti della teoria dell'irreversibilità. Ne è nato uno scambio epistolare che sta prendendo moltissimo i due corrispondenti, ma che è lecito dubitare prenderebbe nella stessa misura il lettore, e che quindi non provo a riproporre neanche in sunto. Dirò solo che, fino a questo momento, Mundici non è riuscito a farmi recedere dalla convinzione che Ageno abbia sostanzialmente ragione.

Bibliografia

(1) R. Salvatori, *Ricordo di Mario Ageno*, *Il Nuovo Saggiatore*, **8**, no. 5/6, 30 (1992).
(2) M. Ageno, *La biofisica* (Giuseppe Laterza & Figli, Bari, 1987).
(3) R. A. Ricci, recensione de *La Biofisica*, *Il Nuovo Saggiatore*, **4**, no. 4, 75 (1988).
(4) M. Ageno, *Dal non vivente al vivente – Nuove ipotesi sulle origini della vita* (Theoria, 1991).
(5) M. Ageno, *Metodi e problemi della biofisica* (Theoria, 1992).
(6) M. Ageno, *Le origini della irreversibilità* (Bollati Boringhieri, 1992).
(7) G. Boniolo (a cura di), Introduzione a *Filosofia della fisica* (Bruno Mondadori, 1997).
(8) F. Morchio, *Quale portata ha l'evoluzione biologica in cosmologia*, in AA.VV., *La cosmologia nella cultura del Novecento*, *Atti della conferenza internazionale nel centenario della nascita di Hubble, Torino, 21-23 novembre 1990*, *Giornale di Astronomia*, 17, 1991.
(9) L. Briatore, *Giornale di Fisica*, **37**, 158-159 (1996).
(10) G. Santacroce, *Il problema dell'irreversibilità macroscopica e il contributo di Mario Ageno*, *Giornale di Fisica*, **37**, 277-292 (1996).
(11) G. Santacroce, *Alcuni aspetti dell'approccio di Gibbs alla meccanica statistica*, *Giornale di Fisica*, **34**, 227-239 (1993).
(12) C. Cercignani, *Ludwig Boltzmann e la Meccanica Statistica* (La Goliardica Pavese, 1997).

ESPERIMENTI DI RADIOATTIVITÀ ESOTICA

R. Bonetti e A. Guglielmetti
Istituto di Fisica Generale Applicata, Università degli Studi di Milano
INFN, Sezione di Milano

1. – Introduzione

Nel 1984 due cavalieri erranti della ricerca, H. Rose e G.A. Jones dell'Università di Oxford, scoprivano che una sorgentina di pochi microcurie di ^{223}Ra, posta di fronte ad un semplice sistema di rivelazione basato su rivelatori al silicio del tipo di quelli usati in qualsiasi laboratorio didattico di fisica nucleare, emetteva nel corso di un irraggiamento di diversi mesi una decina di ioni di ^{14}C ([1]).

In questo modo, quasi cento anni dopo la scoperta della radioattività da parte di Becquerel, nasceva la *radioattività esotica*.

Perché è stato necessario aspettare tanto per scoprire questa nuova forma di radioattività, in cui particelle di massa intermedia tra quella della α e dei frammenti di fissione vengono emesse spontaneamente dai nuclei atomici, e perché è stata subito chiamata «esotica»? Una delle possibili risposte, spesso citate nella letteratura sull'argomento, sta nella natura stessa del processo, un decadimento a due corpi profondamente sotto barriera e per ciò stesso estremamente raro soprattutto se confrontato con il decadimento α, altro canale di decadimento adronico dominante nella zona della carta di Segré, quella dei nuclei pesanti, in cui ha luogo l'esotico. Questo concetto può essere meglio chiarito introducendo il rapporto di *branching* rispetto al decadimento α, $B_\alpha = \lambda_{\text{esotico}}/\lambda_\alpha$, che in effetti, come verrà illustrato più avanti in questo articolo, è compreso tra 10^{-9} e 10^{-17} per i casi misurati fino ad oggi.

Ma a nostro parere, anche se questi valori parlano da soli dimostrando la difficoltà di discriminare i pochi eventi di interesse (ioni o *cluster* ^{14}C, ^{20}O, ^{24}Ne ...) dal *mare magnum* dei decadimenti α, il problema non è stato tanto tecnologico, cioè legato allo sviluppo dei metodi di rivelazione, quanto di metodo. È sufficiente infatti eseguire semplici calcoli di tonalità termica, $Q = (m_{\text{padre}}\text{-}m_{\text{figlio}}\text{-}m_{\text{cluster}})\,c^2$, basandosi su una delle numerose compilazioni di masse nucleari, per rendersi conto che le zone di metastabilità nella carta dei nuclidi sono addirittura più estese per il decadimento esotico che non per il tradizionale decadimento α (fig. 1), e che sfruttando opportunamente la zona di particolare stabilità o elevato difetto di massa in prossimità di un nucleo bimagico come il ^{208}Pb, il valore di Q può essere corrispondentemente particolarmente elevato (fig. 2), e quindi tale da compensare almeno parzialmente l'altezza della barriera di potenziale, come noto proporzionale al prodotto dei numeri atomici del padre e del *cluster*. Il merito di Rose e Jones sta quindi proprio qui, nell'aver voluto sistematicamente compiere questi studi prima, e nell'aver mon-

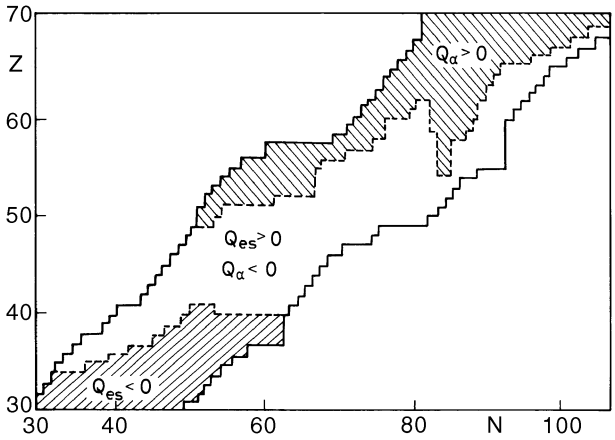


Fig. 1. – Sezione della carta di Segré con le regioni di metastabilità per decadimento α ed esotico.

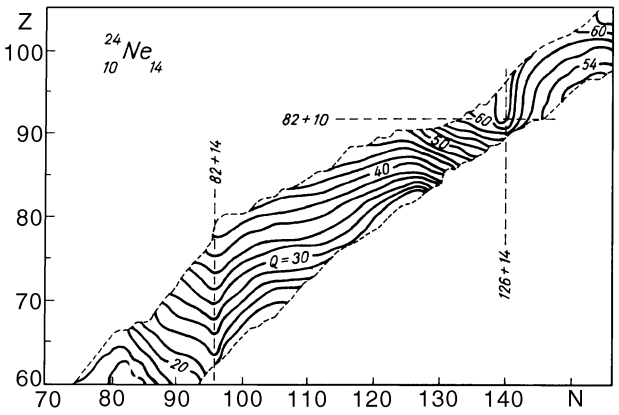


Fig. 2. – Valori di Q (in MeV) per l'emissione di ^{24}Ne da vari nuclei pesanti. È evidente l'effetto dei numeri magici.

tato poi un esperimento per la misura di un processo che era ritenuto non misurabile anche da parte dei «sacri testi» della fisica nucleare ([2]).

Ricordiamo, essendo stati presenti in quegli anni ad Oxford, l'eccitazione conseguente questa scoperta. Si tratta infatti di un processo che ha il fascino dei fenomeni naturali e fondamentali, alla pari delle altre forme di radioattività finora note, il cui studio ha addirittura stimolato il sorgere della fisica nucleare.

Per questo motivo si è assistito ad un crescendo impressionante dell'attività sia sperimentale che teorica, che solo adesso, a distanza di circa quindici anni, si sta lentamente affievolendo. Diversi gruppi sperimentali, a Orsay e ad Argonne hanno inizialmente cercato (e trovato) la conferma del decadimento $^{223}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{14}\mathrm{C} + {}^{209}\mathrm{Pb}$ misurato da Rose e Jones. Altri gruppi, a Berkeley, CERN, Dubna, Orsay e Milano si sono successivamente dedicati ad uno studio sistematico delle proprietà di questa nuova radioattività. Sono state così sviluppate tecniche di rivelazione *ad hoc* e addirittura metodi di produzione di fasci radioattivi per lo studio di casi di decadimento esotico lontano dalla valle della stabilità β. Sono state così scoperte nuove emissioni (^{20}O, ^{23}F, ^{24}Ne, ^{28}Mg, $^{32-4}$Si), evidenziati effetti pari-dispari fortemente correlati con la struttura dei nuclei coinvolti, studiata la competizione con la fissione spontanea e l'andamento della costante di decadimento sia al variare del numero di massa del nucleo padre che del *cluster* emesso. Dal punto di vista dell'attività teorica, abbiamo contato oltre una dozzina di modelli che hanno cercato di interpretare questo fenomeno partendo dalle ipotesi più svariate: un decadimento α generalizzato a *cluster* più pesanti, una fissione spontanea superasimmetrica, un *tunnelling* superfluido o addirittura dei solitoni sulla superficie nucleare.

Questa intensa attività teorica, in particolare, è stata motivata dalla natura peculiare del fenomeno, intermedio dal punto di vista della massa dei frammenti emessi tra due casi estremi come l'α e i frammenti di fissione (fig. 3), emissioni che sono d'altronde, a distanze di tempo ormai secolari, non ancora completamente capite dal punto di vista teorico.

In questo articolo, dopo aver descritto le caratteristiche generali e le tecniche sperimentali sviluppate per la misura di questa rara forma di radioattività, cercheremo di fare il punto sui risultati sperimentali ed interpretativi. Inevitabilmente, porremo l'accento sulle tecniche usate e sulle misure effettuate dal nostro gruppo di Milano, anche in collaborazione con altri gruppi esteri (Berkeley, Dubna, GSI, Mosca, Orsay).

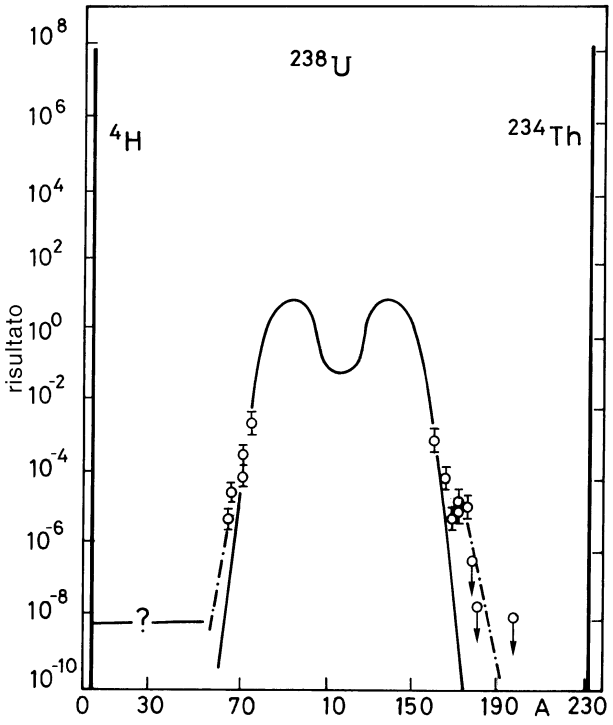


Fig. 3. – Spettro di massa del ^{238}U. La zona compresa tra il decadimento α (A = 4) ed i frammenti di fissione è quella in cui ha luogo la radioattività esotica.

2. – Considerazioni generali

Le varie denominazioni usate dai vari autori evidenziano volta per volta alcuni degli aspetti di questo nuovo modo di decadimento: il termine *heavy particle* o *cluster radioactivity* fa ovviamente riferimento alla massa della particella emessa, un «aggregato» di nucleoni con (attualmente) numero di massa da 14 a 34; il termine *exotic*, oltre alla sua «rarità», inteso come piccolo valore della costante di decadimento, anche probabilmente alla «stranezza» delle particelle emesse, tutti isotopi estremamente ricchi di neutroni, come conseguenza del maggior eccesso neutronico tipico della zona di massa cui appartiene il nucleo padre rispetto al figlio; il termine *bypass decay*, coniato dagli stessi scopritori Rose e Jones, può essere facilmente compreso sulla base della fig. 4: in sostanza, un nucleo pesante come il ^{223}Ra per esempio, tipico appartenente ad una delle ben note serie radioattive, preferisce occasionalmente liberarsi della sua energia in eccesso emettendo in un sol colpo un frammento pesante come il ^{14}C e arrivando così ad una configurazione stabile (^{209}Pb e poi ^{209}Bi) piuttosto che tramite l'usuale e complicata sequenza di decadimenti α e β. Per inciso, può essere divertente notare come l'emissione di questi *cluster* di numero di massa A non multiplo di 4 (quello della particella α), porti a violare la regola aurea nota fin dai primordi della radioattività secondo cui A sarebbe dato per ogni membro delle serie radioattive naturali dalla formula $4n + x$ (n intero, $x = 0, 1, 2, 3$).

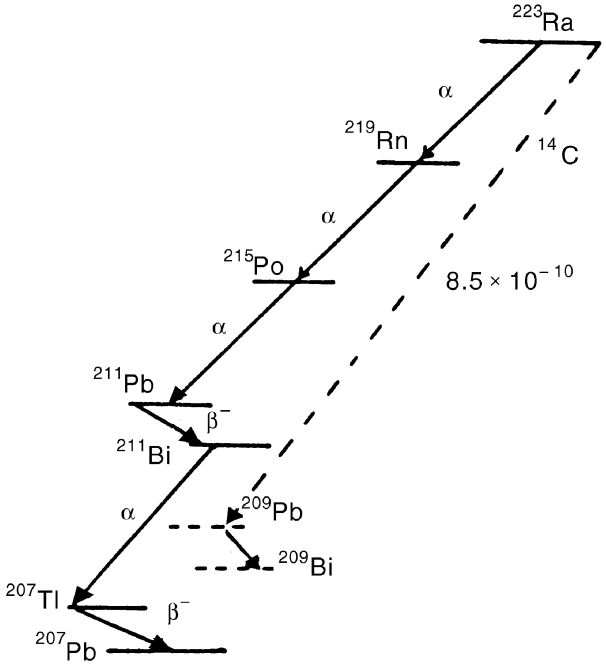


Fig. 4. – Parte della serie radioattiva naturale $4n + 3$ con il decadimento parallelo per emissione di ^{14}C.

Per entrare ora un po' più in dettaglio, possiamo prendere a prestito la teoria del decadimento α come esempio di un *cluster* molto leggero ed applicarla, in prima approssimazione, all'emissione di *cluster* più pesanti, per esempio ^{20}O dal ^{228}Th misurato per la prima volta a Milano nel 1993 ([3]).

L'andamento dell'energia potenziale con la separazione tra i centri dei due frammenti, il nucleo figlio (^{208}Pb) ed il *cluster* ^{20}O viene mostrato in fig. 5. A distanze minori della distanza di contatto $R_c = R_1 + R_2$ tra i due frammenti il potenziale è fortemente attrattivo e può essere approssimato da una buca quadrata, mentre a distanze maggiori, come conseguenza del corto *range* delle forze nucleari, viene sostituito dal potenziale coulombiano repulsivo, $V_C = Z_1 Z_2 e^2/r$. È facile calcolare che per $r = R_c$, $V_C = 87$ MeV, valore molto maggiore dell'energia cinetica del *cluster* ^{20}O, circa 40 MeV. La situazione è quindi, da questo punto di vista, del tutto analoga a quella che si ha nel decadimento α. Come è noto, il problema dell'attraversamento di questa *barriera di potenziale* è stato risolto nel 1928 da Gamow ([4]) che ha ricavato la famosa espressione per la probabilità di trasmissione:

$$(2.1)\quad P = \exp\left[-2\int_{R1}^{R2}\sqrt{\frac{2m(V-E)}{\hbar^2}}\,\mathrm{d}r\right],$$

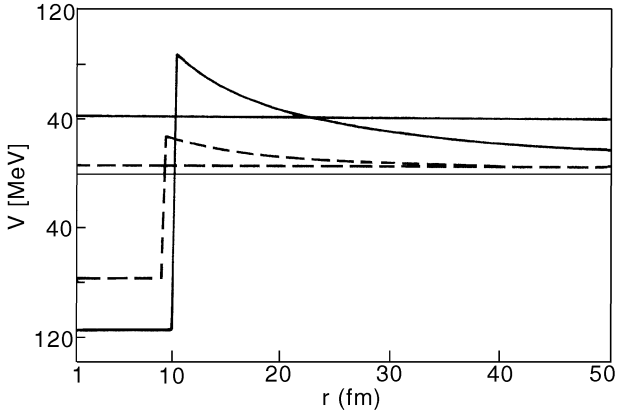


Fig. 5. – Potenziale ed energie cinetiche per i decadimenti ^{228}Th→α+^{224}Ra (– – –) e ^{228}Th→^{20}O+^{208}Pb (——).

Tabella I.

	E (MeV)	V_C (MeV)	R_2 (fm)	ν (s^{-1})	P	λ_{exp}	λ_{exp}/λ_G
α	5.43	26.4	46.6	$3.7 \cdot 10^{21}$	$2.2 \cdot 10^{-28}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$
^{20}O	40.79	87.4	23.1	$3.4 \cdot 10^{21}$	$2.6 \cdot 10^{-30}$	$1 \cdot 10^{-22}$	$1.1 \cdot 10^{-14}$

dove m è la massa ridotta e R_1 e R_2 sono i due «punti d'inversione classica», per i quali cioè $V = E$.

Sempre utilizzando il modello di Gamow del decadimento α, la costante di decadimento λ_G può essere calcolata sulla base dell'espressione

$$\lambda_G = \nu P \,, \tag{2.2}$$

dove ν rappresenta la frequenza di oscillazione della particella all'interno della buca di potenziale, ovvero la frequenza di assalti alla barriera di potenziale.

La tabella I permette di confrontare queste quantità per il decadimento α e per la radioattività-ossigeno. Il calcolo è stato effettuato utilizzando per V la somma di un potenziale nucleare medio della forma di Woods-Saxon ([5]) e del potenziale Coulombiano, mentre per la frequenza ν è stata utilizzata la velocità della particella *interna* alla buca di potenziale.

Il risultato sorprendente è che non solo le frequenze ν ma anche le probabilità di trasmissione P sono molto simili per i due decadimenti, nonostante le rispettive barriere di potenziale siano molto diverse tra di loro. Quello che succede in effetti è che il valore relativamente elevato dell'energia cinetica del *cluster* ^{20}O unitamente al conseguentemente piccolo valore del punto di inversione esterno R_2 compensano la maggiore altezza della barriera rispetto al decadimento α. Questo a sua volta è dovuto alla scelta operata sui nuclidi in gioco. È chiaro, dalla (2.1), che il valore di P viene massimizzato dal minimo valore della differenza $(V - E)$. D'altra parte, E è tanto maggiore quanto maggiore è la tonalità termica Q del decadimento, ossia quanto maggiore il difetto di massa del nucleo figlio. Questo è esattamente quello che succede per il decadimento $^{228}Th \rightarrow {}^{20}O + {}^{208}Pb$ di cui ci stiamo occupando, che porta a raggiungere un nucleo *bimagico* e quindi estremamente stabile come il ^{208}Pb (cosa invece che non succede per il decadimento α dello stesso nucleo padre!).

Come è possibile quindi giustificare il valore estremamente piccolo di λ_{exp}, e quindi la «rarità» del decadimento esotico, se ci atteniamo alla formula (2.2)? Sveleremo il mistero soltanto nell'ultimo paragrafo di questo articolo.

3. – Tecniche sperimentali: la sorgente

In linea di principio un esperimento di radioattività esotica consiste semplicemente di una sorgente radioattiva ed un rivelatore. In effetti, a parte le prime, più semplici misure, a monte di quello che abbiamo chiamato sorgente c'è molto spesso un apparato di produzione dei radionuclidi che può essere costituito, a seconda dei casi, da un reattore nucleare, da un acceleratore di particelle o addirittura da un sistema a due acceleratori per la produzione di fasci radioattivi.

In una scala di complessità crescente, poniamo al primo posto le misure sui capostipiti delle serie radioattive naturali, come il ^{232}Th e il ^{238}U. Abbiamo visto nel paragrafo precedente i motivi, sostanzialmente energetici, per i quali è lecito attendersi buoni candidati nella zona dei nuclei β-stabili più pesanti del piombo. In particolare, il ^{232}Th è previsto emettere *cluster* di ^{24}Ne con un rapporto di *branching* rispetto al decadimento α, $B_\alpha = \lambda_{cluster}/\lambda_\alpha \sim 10^{-12}$, mentre per il ^{238}U il candidato migliore sembra essere il ^{34}Si, con $B_\alpha \sim 10^{-13}$. In questi casi, misurati od in corso di misura, la sorgente era semplicemente costituita da fogli metallici commerciali.

Leggermente più complessi gli esperimenti che coinvolgono altri nuclidi facenti parte delle serie radioattive, purché a vita media sufficientemente lunga, come per esempio il ^{231}Pa (serie dell'attinio) o il già ricordato ^{228}Th (serie del torio). In questi casi la sorgente viene prodotta per separazione chimica dell'elemento voluto e successiva elettrodeposizione.

Se il radionuclide non fa parte di una serie naturale, è necessario produrlo con tecniche di fisica nucleare. Nel caso del ^{242}Cm, utilizza-

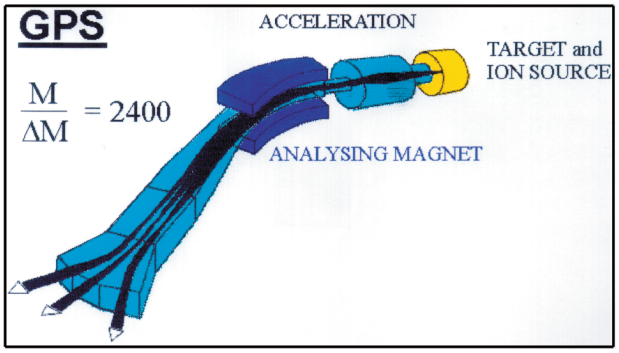


Fig. 6. – Schema del separatore isotopico GPS di ISOLDE. Possono essere contemporaneamente separati ed inviati a diverse linee tre fasci con $\Delta A \leqslant \pm 15\%$.

to dalla collaborazione Dubna-Milano-Mosca per studiarne il decadimento per emissione di ^{34}Si, è stato possibile produrre una intensa sorgente di qualche Curie irraggiando 68 mg di ^{241}Am con i neutroni termici del reattore IR-8 del Kurchatov Institute di Mosca. La sorgente di ^{230}U (collaborazione Milano-Orsay) è stata ottenuta, invece, bombardando con il fascio di protoni del ciclotrone di Orleans un bersaglio di ^{232}Th tramite una reazione (p, 3n) e successivo decadimento β del ^{230}Pa così prodotto.

All'ultimo gradino della nostra scala di complessità si collocano quelle misure su nuclidi non esistenti in natura e/o caratterizzati da vite medie troppo brevi ai fini pratici. In questo caso l'unica possibilità è offerta dalle moderne tecniche di produzione di fasci secondari o radioattivi. A ISOLDE (CERN) per esempio, sia il nostro gruppo che quello di P.B. Price di Berkeley hanno bombardato spessi bersagli di ^{232}Th con fasci di protoni da 600–1000 MeV. I prodotti di spallazione sono stati successivamente ionizzati selettivamente e post-accelerati ad una energia (60 keV) sufficiente per la loro separazione magnetica e il loro trasporto al rivelatore finale (fig. 6). La misura del decadimento di un certo nuclide viene quindi effettuata *on-line*, in pratica contemporaneamente alla sua produzione. In questo modo sono state scoperte diverse emissioni esotiche da vari isotopi poveri di neutroni del Ra, Fr ed Ac.

3.1. – Il rivelatore

Come già evidenziato nella sezione **2**, il decadimento esotico è un fenomeno molto raro e in forte competizione con il decadimento α: ciò limita moltissimo la scelta dei rivelatori utilizzabili che devono essere contemporaneamente molto efficienti e molto selettivi. L'esperimento effettuato da Rose e Jones [1] ed uno quasi contemporaneo relativo al medesimo decadimento [6] furono gli unici per i quali si fece uso di un telescopio costituito da rivelatori al silicio: questa tecnica infatti non può essere utilizzata per misurare rapporti di *branching* inferiori a 10^{-9}, a causa del forte danneggiamento dei rivelatori causato dal flusso di particelle α. È però possibile ovviare a questo inconveniente accoppiando uno spettrometro magnetico al telescopio o eventualmente anche ad un solo rivelatore al silicio: così facendo infatti, a causa della diversa rigidità magnetica delle particelle α rispetto a quella degli ioni più pesanti, si può focalizzare soltanto questi ultimi sul rivelatore. L'efficienza di conteggio di questa tecnica è

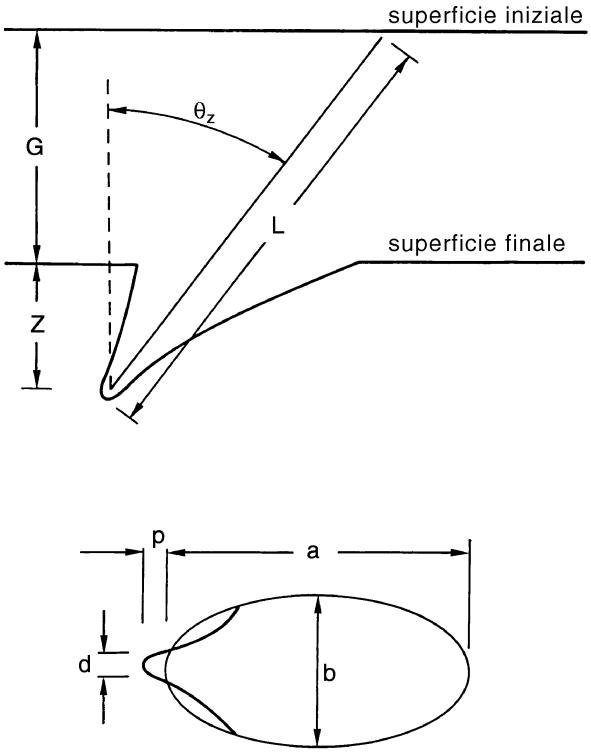


Fig. 7. – Schema geometrico di una traccia formata da una particella che ha inciso con un angolo θ_z rispetto alla normale alla superficie del rivelatore. L è la lunghezza totale della traccia, z la profondità, G la quantità di materiale asportato alla velocità V_g, a e b gli assi dell'ellisse visibile alla superficie del rivelatore, d il diametro della parte terminale della traccia e $(a + p)$ la lunghezza proiettata. La misura di tutti questi parametri geometrici consente di calcolare la coppia $(S = V_t/V_g, R_r)$.

però piuttosto limitata a causa dell'accettanza angolare dello spettrometro (solitamente molto inferiore a 200 msr); ciò riduce drasticamente il numero di casi misurabili: fino ad ora, infatti, soltanto quattro decadimenti sono stati studiati con un sistema di questo tipo ([7]). In tutti gli altri casi misurati fino ad oggi sono stati utilizzati i *rivelatori a traccia*.

Si tratta di semplici plastiche o vetri che hanno la proprietà di registrare permanentemente il passaggio di una particella ionizzante mediante un danneggiamento della loro struttura, sia essa polimerica come nel caso delle plastiche o amorfa come nel caso dei vetri. Quando una particella carica li colpisce, essa crea per ionizzazione delle coppie ione-elettrone; la conseguente repulsione coulombiana tra gli ioni fa sì che alcuni di essi si spostino in posizioni «interstiziali» rispetto alla struttura ordinata originaria creando così una «traccia» del passaggio della particella, di dimensioni dell'ordine dell'angstrom. Al fine di rendere visibile la traccia con un microscopio ottico, si effettua un trattamento chimico del vetro o della plastica in soluzioni acide o basiche al termine del quale essa ha dimensioni dell'ordine del micron. Il trattamento chimico agisce selettivamente con velocità V_t lungo la traccia e con velocità V_g minore nel resto del materiale: la competizione tra le due velocità dà luogo ad una forma conica, come rappresentato in fig. 7. Misurando alcuni parametri geometrici della traccia così ottenuta, quali la profondità z o gli assi a e b dell'ellisse visibile alla superficie del rivelatore, è possibile calcolare una coppia di valori, $S = V_t/V_g$ e R_r detti *sensibilità* e *range residuo* rispettivamente, che consentono di identificare la particella che ha formato la traccia. Infatti la sensibilità è proporzionale alla perdita di energia specifica, a sua volta legata alla carica, massa ed energia della particella, mentre il range residuo è proporzionale all'energia: la tecnica di identificazione è pertanto simile alla più familiare tecnica $E - \Delta E$.

La caratteristica dei rivelatori a traccia che li rende particolarmente adatti a misurare

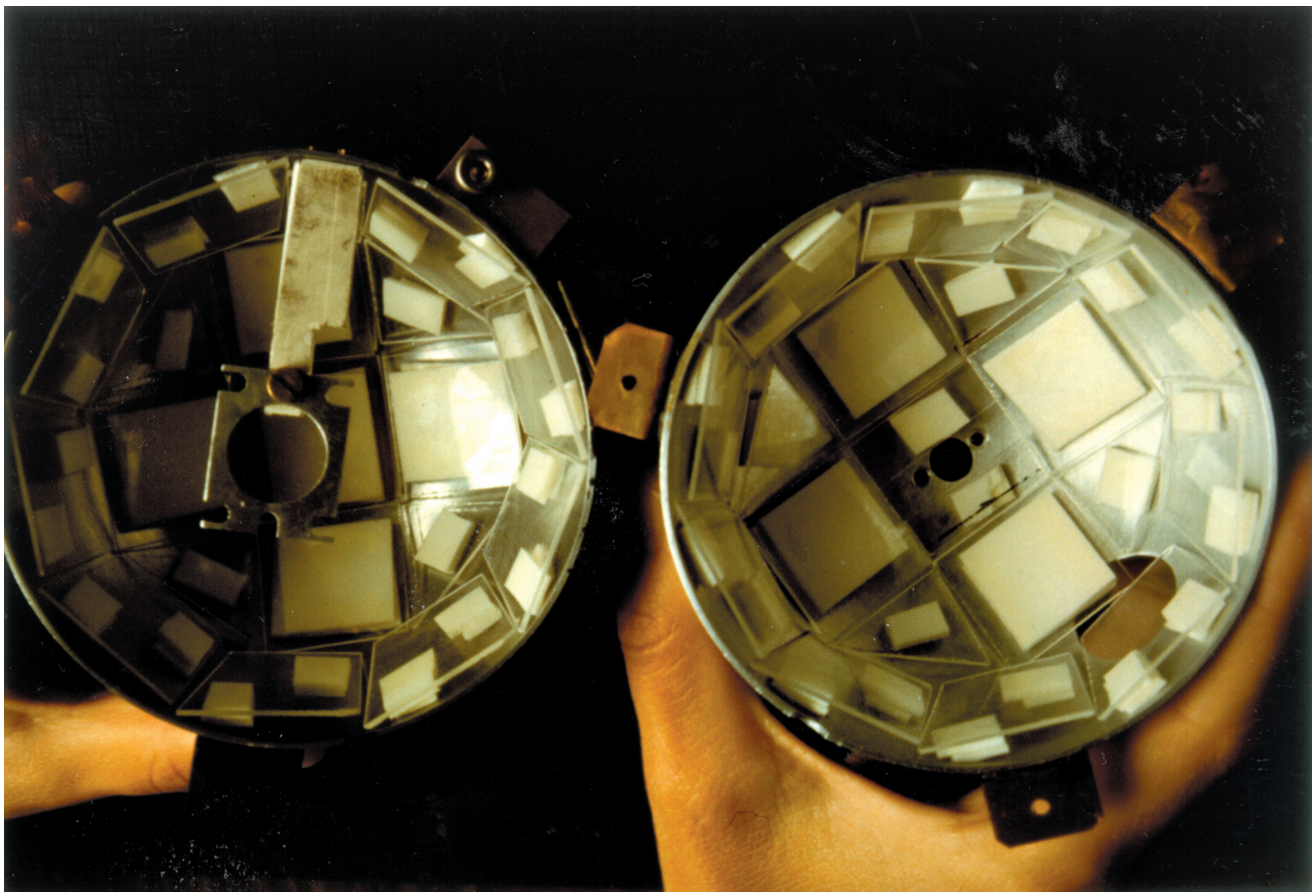


Fig. 8. – Apparato di rivelazione di efficienza prossima al 100% costituito da una sfera di alluminio rivestita internamente da rivelatori a traccia. La sorgente in studio era posta al centro della sfera.

casi di radioattività esotica è la loro possibilità di registrare il passaggio di una particella soltanto quando la perdita di energia specifica della particella stessa è superiore ad un certo valore, caratteristico del rivelatore. In questo modo è possibile scegliere materiali sensibili allo ione che si vuole misurare e non sensibili alle meno ionizzanti particelle α, presenti, come si è visto sopra, in numero assai maggiore (rapporti di *branching* inferiori a 10^{-9}). Inoltre, data la maneggevolezza delle plastiche e dei vetri, è possibile tagliarli in qualsivoglia forma e dimensione fino a costruire apparati di rivelazione di efficienza elevatissima, anche prossima al 100% (per esempio ricoprendo internamente una sfera e ponendo la sorgente di cui si vuole misurare il decadimento al centro di essa, si veda la fig. 8). Si è pertanto in grado di aggirare le due peculiarità più volte già evidenziate che hanno reso il decadimento esotico un fenomeno così difficile da studiare: la presenza di una forte competizione con il decadimento α e la rarità.

Prima di utilizzare un rivelatore a traccia in un esperimento di radioattività esotica, è necessario effettuare una calibrazione del rivelatore stesso con ioni di carica, massa ed energia nota, ottenuti mediante un acceleratore. Il nostro gruppo di Milano utilizza, ad esempio, l'acceleratore *Tandem XTU* da 16 MV dei Laboratori Nazionali di Legnaro, che può fornire ioni come C, O, F, Mg, Si e S dell'energia prevista per un decadimento esotico, circa 2 MeV/amu. Al termine dell'irraggiamento si deve stabilire quale sia il trattamento chimico che ottimizza la risposta del rivelatore allo ione cercato, ossia trovare la combinazione di reagente, concentrazione, temperatura e tempo con i quali ottenere tracce ben visibili con un microscopio ottico.

Questa fase è sfortunatamente piuttosto laboriosa e va ripetuta non solo per ogni tipo di rivelatore ma anche per forniture commerciali diverse della stessa plastica o vetro, la cui composizione chimica può essere leggermente differente. Una volta stabilito il trattamento chimico da effettuare, si misurano i parametri geometrici delle tracce formate dai diversi ioni e con essi si calcolano le coppie di valori (R_r, S), costruendo curve di calibrazione, di cui è riportato un esempio in fig. 9. A questo punto il rivelatore è pronto per essere usato in un vero e proprio esperimento: esso viene irraggiato per un tempo opportuno con una sorgente di cui si vuole misurare un'eventuale emissione esotica, trattato chimicamente come precedentemente stabilito e analizzato con un microscopio ottico, ad un ingrandimento variabile tra 100× e 300× (fig. 10).

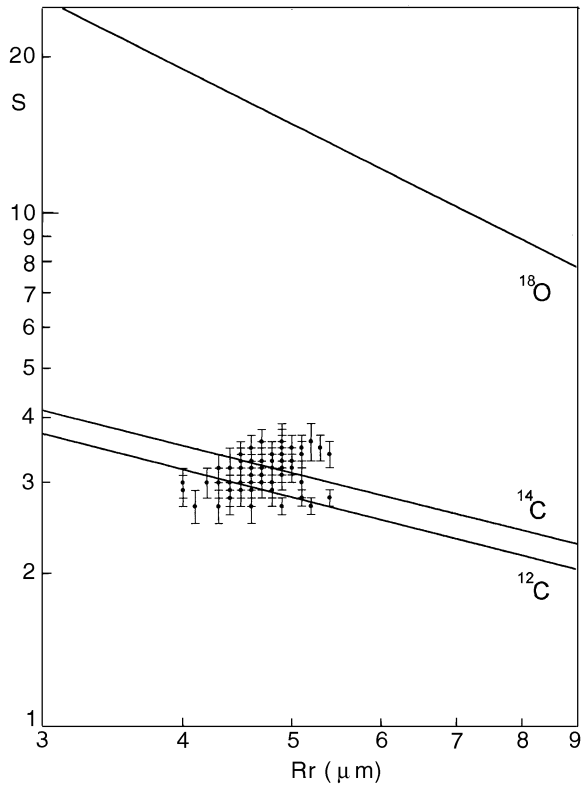


Fig. 9. – Confronto tra i valori di sensibilità e *range* residuo per i 75 eventi ottenuti dal decadimento del ^{221}Fr e le curve di calibrazione ottenute con ioni di carica, massa ed energia nota accelerati dal Tandem XTU dei Laboratori di Legnaro.

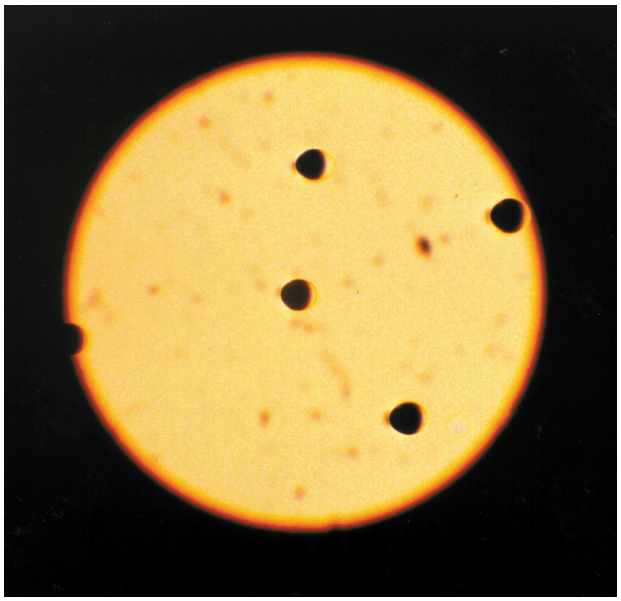


Fig. 10. – Fotografia dell'immagine ottenuta con un microscopio ottico di alcune tracce di carbonio in un vetro fosfato.

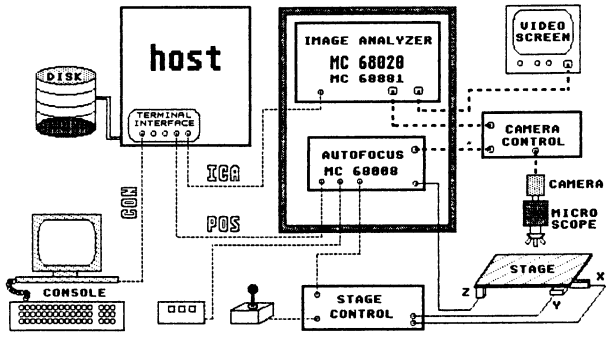


Fig. 11. – Schema del sistema di analisi automatica utilizzato dal gruppo di Milano: sono visibili il microscopio con tavolino motorizzato, la telecamera, l'analizzatore d'immagine e il computer utilizzato per la raccolta e gestione dei dati.

Quest'ultima fase può essere effettuata sia manualmente sia con l'ausilio di un sistema di analisi automatica, costituito da un microscopio con tavolino motorizzato, da una telecamera e da un analizzatore di immagine (in fig. 11 è riportato ad esempio lo schema del sistema di analisi utilizzato dal nostro gruppo). Entrambi i sistemi portano alla selezione di alcuni candidati di cui vengono misurati i parametri geometrici e per i quali si ricavano i valori di sensibilità e *range* residuo. Tali valori sono poi confrontati con le curve di calibrazione al fine di ottenere l'identificazione delle particelle che hanno formato le tracce in questione (fig. 9).

La risoluzione di carica dei rivelatori a traccia è pari a circa 0.2–0.3 unità di Z e quindi consente una buona identificazione del numero atomico; la risoluzione energetica invece non è altrettanto buona: tipicamente essa è pari al 3–5%. Ciò significa ad esempio che i 30 MeV di energia di uno ione di carbonio possono essere misurati con una incertezza superiore al MeV e questo non consente di effettuare esperimenti di struttura fine (si veda il paragrafo successivo). Infine la risoluzione di massa è pari a circa 1–2 unità; l'attribuzione del numero di massa alle particelle trovate viene generalmente fatta utilizzando il criterio del massimo valore di Q.

Come già evidenziato, i rivelatori a traccia utilizzati in esperimenti di radioattività esotica non sono sensibili alle particelle α; tuttavia l'esposizione ad un elevato flusso di tali particelle può portare ad un loro danneggiamento. Essi sono infatti in grado di rivelare le tracce formate dagli atomi che costituiscono i vetri o le plastiche diffusi in seguito all'urto elastico con le particelle α; un numero troppo elevato di tali tracce peggiora la qualità ottica dell'immagine vista al microscopio e può modificare la sensibilità del rivelatore. Esiste pertanto un massima dose α che ciascuna plastica o vetro è in grado di sopportare, da 10^9 a 10^{14} α/cm^{2}per i materiali finora utilizzati.

La scelta del rivelatore a traccia da utilizzare in un particolare esperimento è quindi vincolata da questo valore e dal minimo numero atomico rivelabile.

4. – Esperimenti effettuati e risultati

A causa dei vincoli energetici discussi nella sezione **2**, quasi tutte le misure finora effettuate sul decadimento esotico sono limitate alla zona di massa a ridosso del ^{208}Pb, dove i forti effetti a *shell* permettono di avere emissioni esotiche con energia dell'ordine di 2–2.5 MeV/amu. Fanno eccezione alcuni tentativi nella zona del ^{100}Sn; in questo caso si tratta comunque della classica eccezione che conferma la regola, essendo anche questo nucleo un bimagico, anche se molto lontano dalla valle della stabilità β.

La situazione attuale delle misure è illustrata in fig. 12. Sono stati misurati 20 casi di emissioni di *cluster* con $A = 14 - 34$ e $Z = 6 - 14$ e rapporti di *branching* B_α da 10^{-9} per il già ricordato decadimento $^{223}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{14}\mathrm{C} + {}^{209}\mathrm{Pb}$ a 10^{-17}

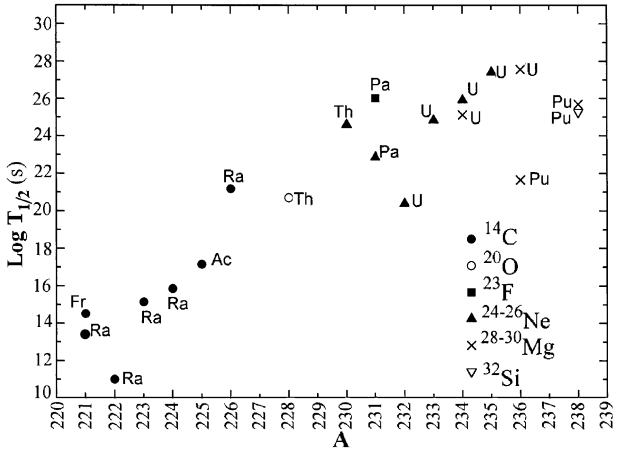


Fig. 12. – Vite medie parziali per tutti i casi di emissione esotica misurati fino ad oggi, in funzione del numero di massa del nucleo padre. Sono chiaramente visibili i minimi in corrispondenza delle combinazioni emettitore-*cluster* che portano ad avere come nucleo residuo il bimagico ^{208}Pb.

per il $^{238}Pu \rightarrow {}^{32}Si + {}^{206}Hg$ misurato a Berkeley nel 1989 ([8]). I valori delle vite medie parziali sono molto lunghi, andando da 10^{11} a 10^{27} s. Questi risultati mostrano chiaramente l'aumento della vita media con il numero di massa del *cluster* emesso, nonché i minimi per $A = 222, 232, 236$ in corrispondenza di quei decadimenti che portano al figlio più stabile, il già ricordato ^{208}Pb.

Ognuno dei 20 casi di radioattività esotica che compaiono in fig. 12 ha una sua storia personale che lo differenzia da tutti gli altri, o per i problemi di preparazione della sorgente, o per il tipo di rivelatore e la geometria di irraggiamento, o per il tipo di analisi che viene effettuata sui rivelatori stessi, con particolare riferimento a quelli a traccia. Abbiamo già accennato ai criteri che stanno alla base della scelta del tipo di sorgente, sostanzialmente legati alla disponibilità in natura del particolare radionuclide e alla sua vita media.

La scelta del tipo di rivelatore invece, tra quelli descritti in precedenza, è determinata in primo luogo dalla competizione con il decadimento α ed in secondo luogo dal tipo di informazione che si vorrebbe ottenere. Fermo restando che la tecnica che assicura la maggior efficienza di raccolta è quella dei rivelatori a traccia, se il rapporto di *branching* B_α rispetto al decadimento α è sufficientemente grande, tipicamente $\geqslant 10^{-11}$–10^{-12}, è possibile utilizzare in alternativa uno spettrometro magnetico, con il vantaggio di lavorare con una ottima risoluzione energetica.

Quando invece, come nella maggior parte dei 20 casi già misurati (senza voler citare le diverse migliaia mostrati in fig. 1!), B_α è minore, è giocoforza utilizzare i rivelatori a traccia, scegliendo, come già discusso, il tipo di materiale (policarbonato, polietilene, vetri ad alto contenuto di fosforo e bario) in funzione della loro soglia in Z e quindi del tipo di particella che si vorrebbe misurare e del fondo α.

Descriveremo ora sommariamente alcuni degli esperimenti effettuati come rappresentativi delle diverse tecniche e dei risultati che si possono ottenere.

Una delle misure più semplici è stata quella sul decadimento del ^{232}U per emissione di ^{24}Ne, effettuata sia a Berkeley che a Milano ([9]). In questi esperimenti è stata utilizzata una sorgente elettrodepositata di ^{232}U ($T_{1/2} = 70$ anni) di circa 0.5 mCi, posta a contatto con un rivelatore a traccia, nell'esperimento di Milano una semplice lastrina di vetro fosfato PSK50 di $5 \times 5\ cm^2$. Dopo un irraggiamento durato 61 giorni il vetro è stato trattato chimicamente in una soluzione di acido nitrico concentrata ed analizzato al microscopio. Sono stati sufficienti pochi giorni per effettuare l'analisi che ha permesso di evidenziare 138 tracce tutte attribuite a ^{24}Ne sulla base del confronto con le curve di calibrazione. Il valore di B_α è risultato pari a 8.68×10^{-12}, uno di più alti in assoluto per decadimenti così rari. Oltre a confermare che la radioattività esotica è un fenomeno non limitato al singolo caso e al singolo *cluster* misurato da Rose e Jones, questo esperimento è interessante perché ha permesso di misurare anche un limite superiore per la fissione spontanea, $\lambda < 3.2 \times 10^{-24}\ s^{-1}$, che è risultato sorprendentemente inferiore di due ordini di grandezza a quello misurato nel 1950 e riportato in qualsiasi libro di testo sull'argomento. Osservando d'altro canto che tale valore è molto vicino al risultato per il ^{24}Ne sopra riportato, è immediato dedurre che quello che era stato misurato allora, ma non riconosciuto come tale, era proprio il primo caso di emissione esotica!

Casi come questo appena discusso, per i quali cioè la probabilità di decadimento per fissione spontanea è molto più piccola di quella per emissione di *cluster*, sono, tra l'altro, la dimostrazione più convincente che questa nuova forma di radioattività non può essere interpretata come l'effetto di una tenue «coda» estesa verso le masse leggere della distribuzione di massa dei frammenti di fissione.

Un altro caso in cui la tecnica dei rivelatori a traccia ha permesso di studiare contemporaneamente sia il decadimento esotico che la fissione spontanea è quello del ^{232}Th ([10]). A causa della bassa attività specifica di questo nucleo ($T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10}$ anni), la sorgente consisteva di ben 10 fogli di $10 \times 10\ cm^2$ di torio metallico messoci a disposizione dalla Goodfellow ltd. per i due anni per i quali è durata l'esposizione. Questi sono stati messi a contatto con 20 fogli di polietilene tereftalato, il familiare PET con cui sono realizzate le bottiglie per l'acqua minerale. Allo scopo di abbattere il contributo dato dalla fissione indotta dai neutroni cosmici, l'irraggiamento è

stato effettuato nei laboratori sotterranei del Gran Sasso dell'INFN. L'esperimento è risultato quindi a costo zero in termini economici ma non di fatica umana, essendo stato necessario oltre un anno per analizzare nei due laboratori partecipanti (Dubna e Milano) i 2000 cm^2 di rivelatore. La sensibilità raggiunta in questo esperimento, che segue lo storico tentativo di Flerov del 1957 ([11]) è stata molto elevata, come dimostrato dal limite inferiore misurato per l'emissione di ^{24}Ne, $T_{1/2} > 1.57 \times 10^{29}$ s e dalla vita media per fissione spontanea, $T_{1/2} = 3.8 \times 10^{28}$ s, la più lunga mai misurata per un decadimento adronico. Questo risultato permette di estendere la sistematica di questo modo di decadimento verso valori estremi del ben noto parametro di fissionabilità Z^2/A del modello a goccia, confermandone la validità per la caratterizzazione della fissione spontanea.

Ben più complessa dal punto di vista sperimentale la misura su nuclidi a vita media breve, come il ^{114}Ba ($T_{1/2} \approx 0.1$ s) ([12]), il ^{221}Ra ($T_{1/2} = 28$ s) e il ^{221}Fr ($T_{1/2} = 4.9$ m) misurati dal gruppo di Milano o il ^{222}Ra ($T_{1/2} = 38$ s) e il ^{224}Ra ($T_{1/2} = 3.66$ g) misurati da quello di Berkeley. Qui l'unica possibilità è la misura *on line*, come quelle effettuate al separatore ISOLDE del CERN o a quello del GSI dai gruppi di Berkeley e Milano negli anni 1985-99 ([7]). La sorgente radioattiva è in questi casi ottenuta impiantando su un bersaglio sottile (il cosiddetto *catcher*, tipicamente un foglio di Al di 1 μm di spessore), il fascio secondario ottenuto tramite una reazione di spallazione o di fusione indotta rispettivamente da un fascio di protoni altamente energetici o di ioni pesanti (fig. 13).

Negli esperimenti effettuati ad ISOLDE, la rivelazione delle particelle emesse era affidata ad un insieme di rivelatori a traccia disposti a tappezzare la superficie interna di una sfera di 15–20 cm di diametro, nel cui centro era posto il *catcher*. In esperimenti di questo tipo vengono tipicamente raccolti 10^{14}–10^{15} atomi in irraggiamenti della durata di qualche giorno, con intensità del fascio primario di 10^{13} protoni/s e del fascio secondario di 10^9 ioni/s.

La successiva analisi dei rivelatori al microscopio è stata facilitata in queste misure dall'uso dell'analizzatore di immagine automatico descritto in precedenza, che lavora più agevolmente su tracce perpendicolari come quelle ottenute in geometria sferica in quanto più uniformi rispetto a quelle in geometria planare come forma e contrasto.

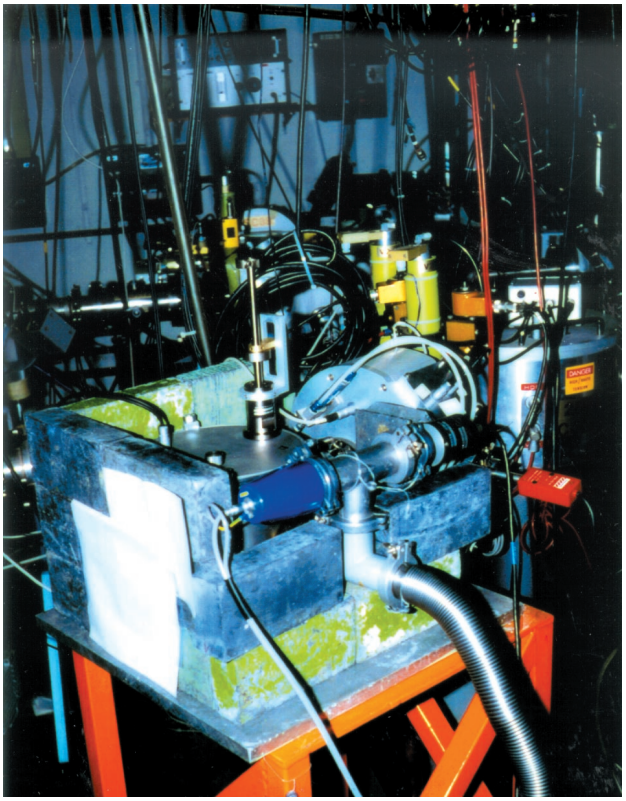


Fig. 13. – È visibile dietro la schermatura di piombo la camerina di irraggiamento utilizzata per gli esperimenti a ISOLDE, che alloggia la «sfera» di rivelatori a traccia mostrata in fig. 8. In questo caso sono stati raccolti 1.6×10^{14} atomi di ^{221}Fr che hanno dato luogo a 75 eventi di ^{14}C (v. fig. 9).

Un risultato interessante di queste ed altre misure condotte su nuclei dispari è stata la messa in luce di un effetto di parità molto simile a quello noto per il decadimento α. Il modo più evidente di rappresentarlo è utilizzare le ben note curve di Geiger-Nuttal che mettono in relazione il logaritmo della vita media con l'energia cinetica o il Q del decadimento (e quindi la probabilità di trasmissione), traducendo graficamente l'andamento insito nell'eq. (2.1). La fig. 14 mostra che mentre i nuclei pari-pari si dispongono perfettamente su una retta, conformemente all'andamento atteso, gli emettitori dispari ne sono al di sopra. Questo indica chiaramente che le corrispondenti transizioni sono «sfavorite»; la deviazione verticale può essere indicativa del grado di «soppressione» che un decadimento da un nucleo dispari ha rispetto a quello pari, a parità di probabilità di trasmis-

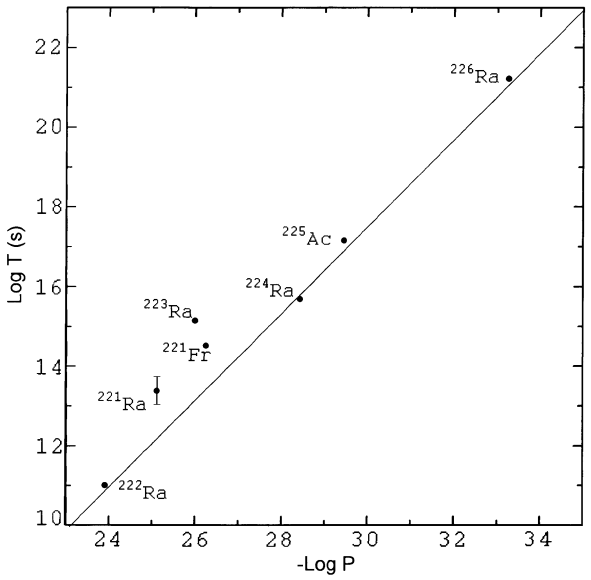


Fig. 14. – Diagramma di Geiger-Nuttal per gli emettitori di ^{14}C misurati fino ad oggi. *P* è la penetrabilità della barriera di potenziale, data dalla relazione (2.1), *T* la vita media parziale. È possibile individuare una retta su cui giacciono tutti gli emettitori pari-pari; i nuclei dispari si dispongono al di sopra.

sione. Ancora una volta, notiamo che questo effetto sfugge completamente alla descrizione data dall'eq. (2.2).

L'ultimo esperimento-tipo che descriviamo è quello che fa uso di uno *spettrometro magnetico* per la separazione dei *cluster* di interesse dalla marea di particelle α in competizione. Come sottolineato in precedenza, il grosso vantaggio di questa tecnica è l'ottima risoluzione energetica possibile, tipicamente di 100 keV. Questa caratteristica è stata utilizzata più volte dal gruppo di Orsay per la conferma della scoperta di Rose e Jones prima e per numerose misure di spettroscopia poi.

Nella fig. 15 è mostrato schematicamente l'apparato utilizzato. Il campo magnetico prodotto dalla bobina superconduttrice dello spettrometro SOLENO viene regolato in modo da far convergere il ^{14}C emesso dalla sorgente radioattiva posta ad un'estremità dello spettrometro su un tradizionale rivelatore al silicio posto all'estremità opposta, mentre l'intenso flusso di α, caratterizzato da una diversa rigidità magnetica, è soggetto ad una traiettoria diversa e non può quindi dar luogo a indesiderati contributi di fondo o causare effetti di danneggiamento da radiazioni sul rivelatore stesso. Lo spettrometro è inoltre posto su una linea di fascio del Tandem di Or-

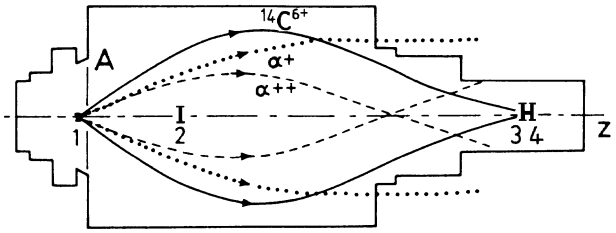


Fig. 15. – Schema dello spettrometro SOLENO dell'IPN di Orsay ([7]). La sorgente è posta in 1. L'otturatore 2 impedisce che il telescopio di rivelatori al silicio $E - \Delta E$ posto in 3-4 «veda» la sorgente stessa. Sono mostrate le traiettorie degli ioni $^{14}C^{6+}$ e delle α singolarmente e doppiamente ionizzate.

say e può quindi essere calibrato ed ottimizzato tramite le stesse particelle di cui è prevista l'emissione da parte della sorgente radioattiva.

Dei molti esperimenti effettuati con questo strumento sicuramente il più eclatante è quello che ha rivelato la struttura fine nello spettro energetico dei *cluster* ^{14}C emessi dal ^{223}Ra. Il risultato dell'ultimo di una serie di esperimenti ([13]) nel corso dei quali si sono progressivamente migliorate le condizioni di fondo, di uniformità e di purezza della sorgente e di risoluzione energetica è mostrato in fig. 16. Sorprendentemente nella struttura fine evidenziata dall'ottima risoluzione del-

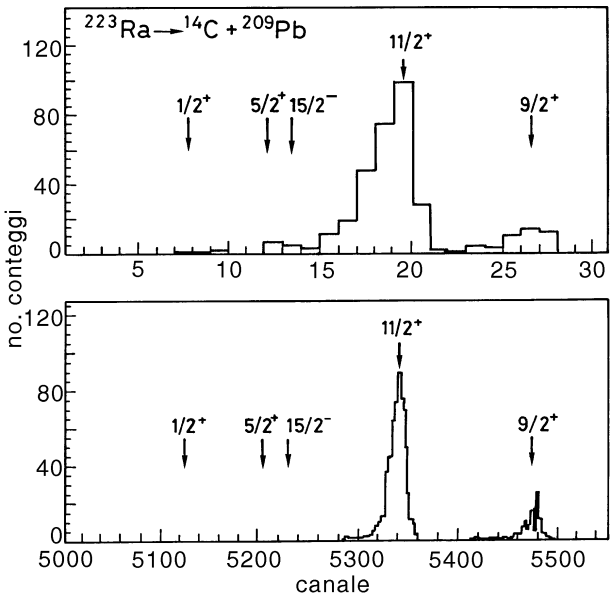


Fig. 16. – Struttura fine nello spettro energetico del ^{14}C emesso dal ^{223}Ra, misurato con lo spettrometro magnetico superconduttore SOLENO dell'IPN di Orsay (Francia) nel 1989 (sopra) e nel 1995 (sotto) ([13]). Lo stato eccitato $11/2^{+}$ risulta popolato preferenzialmente da questo decadimento.

l'apparato non è lo stato fondamentale, cui corrispondono i *cluster* più energetici, ad essere preferenzialmente popolato come richiederebbe l'eq. (2.1), bensì il 1° livello eccitato a 0.779 MeV del nucleo residuo ^{209}Pb. Questi risultati, su cui torneremo nel prossimo paragrafo, sono estremamente importanti perché hanno segnato una transizione negli esperimenti di radioattività esotica dalla fase esploratoria, in cui ci si limitava a misurare vite medie e rapporti di *branching*, a quella di spettroscopia, in cui si cerca di evidenziare il ruolo della struttura dei nuclei coinvolti nel decadimento.

5. – Un po' di teoria: il fattore di preformazione, questo sconosciuto

Ciò che ci suggeriscono i risultati sperimentali presentati nel paragrafo precedente e più in generale i 20 esperimenti sul decadimento esotico può essere così sintetizzato:

1) L'andamento relativo della probabilità di decadimento dei nuclei *pari-pari* con l'energia cinetica del *cluster* e con le caratteristiche (raggio, numero atomico) del nucleo padre è ben riprodotto dalla (2.1), come mostrato dalla curva di Geiger-Nuttal; tuttavia:

2) il valore assoluto della costante di decadimento dato dalla (2.2) sovrastima di svariati ordini di grandezza il risultato sperimentale (tabella I);

3) questo effetto aumenta con il numero di massa del *cluster* emesso;

4) i decadimenti dei nuclei *dispari* contrastano con quanto presentato nel punto 1, risultando in genere meno probabili dei contigui decadimenti di nuclei pari e mostrando effetti peculiari di struttura fine.

Per cercare di risolvere queste difficoltà ricorriamo ancora alla radioattività α, ricordando che già negli anni '50-'60 si era evidenziata la necessità di migliorare il modello originariamente introdotto da Gamow introducendo una quantità, il *coefficiente di preformazione* o *fattore spettroscopico* ([14]) che tenesse conto della natura non «elementare» di questa particella all'interno del nucleo padre.

Fisicamente esso rappresenta la probabilità che la struttura del canale di decadimento α+*nucleo figlio* sia presente nel padre, ovvero quella frazione di tempo per la quale 4 nucleoni all'interno del nucleo sono spazialmente correlati in una particella α.

Formalmente, questa quantità è scritta come

$$\langle \phi_{A+a} | P | \phi_{A+a} \rangle , \tag{5.1}$$

dove ϕ_{A+a} è la funzione d'onda a molti corpi del nucleo padre (A rappresenta il nucleo figlio e a l'α uscente) e P è l'operatore di proiezione sulla struttura $A + a$.

Per il calcolo microscopico di questa quantità è stato necessario attendere prima che arrivasse e venisse sufficientemente sviluppato il modello a *shell*, e poi i grandi calcolatori, solo con i quali è stato possibile eseguire i complessi calcoli impliciti nella (5.1) includendo spazi di configurazioni sempre più ampi per un'accurata descrizione delle funzioni d'onda nucleari.

Una volta calcolato S è immediato modificare la (2.2) scrivendo

$$\lambda = S\nu P \tag{5.2}$$

ed introducendo quindi esplicitamente nel calcolo della costante di decadimento α tramite il fattore spettroscopico tutti quegli effetti — per esesempio quelli di cui al precedente punto 4 — che dipendono dalla struttura dei nuclei coinvolti.

È quindi chiaro che è possibile giustificare così la presenza di transizioni favorite o soppresse come quelle tipiche di nuclei dispari sulla base del concetto di *sovrapposizione* tra le funzioni d'onda dello stato iniziale e finale contenuto nella (5.1). In particolare, se dopo il decadimento il protone o il neutrone dispari rimarranno nello stesso stato quantico iniziale, il grado di sovrapposizione risulterà massimizzato e avremo una transizione favorita (come sono tutte quelle allo stato fondamentale dei nuclei pari-pari); se d'altro canto questo non succede (come è tipico dei decadimenti allo stato fondamentale dei nuclei dispari), la relativa transizione sarà inibita, in misura direttamente legata a, e quindi indicativa del, grado di *mismatch* tra le funzioni d'onda stesse.

In effetti il quadro del confronto teoria-esperimento per il decadimento α non è così roseo come appena dipinto. Esiste un annoso e famoso problema, per esempio, di valore assoluto delle costanti di decadimento che quando sono calcolate col modello a molti

corpi (eq. (5.1) e (5.2)) risultano in genere più o meno fortemente sottostimate. In altri termini, esiste una difficoltà a descrivere microscopicamente la correlazione nucleare necessaria ad indurre il *clustering* α. Solo negli ultimi anni, dopo un lento processo di approssimazioni successive, il problema è stato risolto in pochi casi specifici includendo, nella descrizione di ϕ_A e ϕ_a, le correlazioni di *pairing* in una larga base di configurazioni di modello a *shell* ([15]).

Notiamo che il fattore di preformazione può comunque essere dedotto sperimentalmente *a posteriori*, cioè dopo che sia stata effettuata una misura, dal semplice rapporto $\lambda_{\text{exp}}/\lambda_{\text{G}}$. Per il decadimento di nuclei pari-pari esso risulta dell'ordine dello 0.1–1%, come nel caso mostrato in tabella I.

Dopo la scoperta della radioattività esotica è stato naturale da parte di diversi gruppi teorici attivi nel campo del decadimento α (Bucarest, Catania, Dubna, Mosca, Siegen) chiedersi se questi concetti fossero generalizzabili all'emissione di *cluster* più complessi. In particolare, sono estremamente interessanti i risultati di Blendowske, Fliessbach e Walliser dell'Università di Siegen ([5]). Sulla base dei calcoli microscopici di S (eq. (5.1)) eseguiti esplicitamente per alcuni casi di emissioni di α, ^{12,14}C e ^{16}O da isotopi del radio, questi Autori hanno ricavato una semplice e trasparente relazione con il numero di massa a del *cluster*,

$$S(a) = S(\alpha)^{(a-1)/3} \tag{5.3}$$

dove $S(\alpha)$ è il fattore spettroscopico per il decadimento α. Questa relazione, rappresentata graficamente in fig. 17, mostra anzitutto la natura unitaria dei vari decadimenti con emissione di un *cluster*, sia esso leggero (α) o pesante (esotico). È immediato poi comprendere la struttura dell'eq. (5.3): il fattore spettroscopico rappresenta il quadrato del prodotto delle sovrapposizioni tra gli stati di particella singola del *cluster* e del nucleo padre e contiene $a - 1$ sovrapposizioni perché ϕ_a dipende da $a - 1$ coordinate libere interne (l'ultima è quella del centro di massa). È logico quindi che S varii secondo la potenza $(a - 1)$-esima di tali termini, diminuendo rapidamente all'aumentare della massa del *cluster* stesso.

Con questa descrizione vengono così chiariti diversi aspetti del quadro sperimentale illustrato in precedenza. In particolare, è ora chiaro che è soprattutto il piccolo valore della probabilità di preformazione a giustificare la «rarità» di questo nuovo decadimento (v. tabella I); è il suo andamento con la massa del *cluster* che sta alla base della graduale diminuzione della costante di decadimento all'aumentare di A (vedi fig. 12) e quindi permette di risolvere i punti 2, 3 citati all'inizio di questo paragrafo.

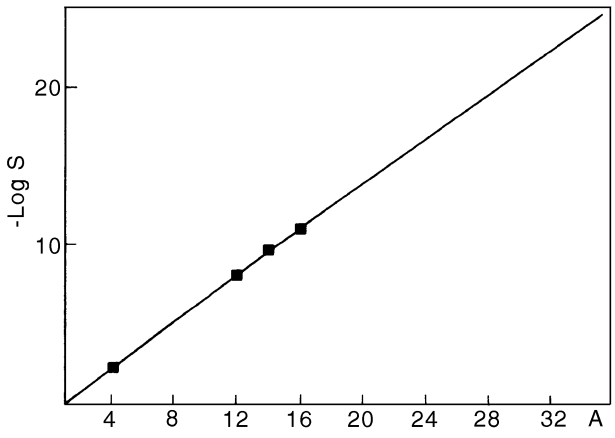


Fig. 17. – Andamento del fattore spettroscopico S in funzione della massa del *cluster* (eq. (5.3)). I quadratini rappresentano i risultati del calcolo microscopico secondo l'eq. (5.1) ([5]). Il valore di $S(\alpha)$ è pari a 6.3×10^{-3}.

Come risultato di tutto questo, le costanti di decadimento misurate per i 20 emettitori esotici sono ben riprodotte dal modello, molto spesso meglio di un fattore 10.

Sempre proseguendo con l'analogia con il decadimento α, è possibile interpretare, almeno qualitativamente, il comportamento evidenziato per i nuclei dispari e la relativa struttura fine. In effetti, per il decadimento $^{223}\text{Ra} \rightarrow {}^{14}\text{C} + {}^{209}\text{Pb}$ è immediato giustificare il popolamento preferenziale del 1° livello eccitato $11/2^+$ del nucleo figlio ^{209}Pb sulla base della struttura di particella singola degli stati nucleari coinvolti, osservando che la funzione d'onda deformata che descrive il ^{223}Ra contiene forti componenti dello stato di neutrone $i11/2$, che rappresenta proprio la configurazione dominante del 1° eccitato del ^{209}Pb. È naturale quindi che sia massimizzato il fattore spettroscopico per questa transizione, e che lo stesso accada per la relativa probabilità di decadimento.

L'aspetto estremamente interessante di questa discussione è che a differenza del de-

cadimento α, che avviene con un trasferimento di massa ridotto, l'esotico mette in relazione stati nucleari in zone di massa sempre molto diverse tra di loro. Quella del nucleo padre è sempre una regione di nuclei più o meno deformati, la cui funzione d'onda è spesso non ben nota, a differenza di quella del figlio, come più volte detto in prossimità del nucleo sferico ^{208}Pb. Di qui quindi la possibile, e ancora esplorabile, utilità di questo decadimento come strumento di indagine spettroscopica.

È in conclusione così roseo il quadro interpretativo per questa nuova radioattività?

Vi sono, fortunatamente, diversi punti ancora da chiarire: ad esempio, il quadro che abbiamo tratteggiato, ed in particolare il ruolo degli aspetti di particella singola, è chiaramente ultrasemplificato. È evidente che una approssimazione migliore sarà considerare anche l'aspetto collettivo nel trasferimento di *cluster* così complessi. Questo è d'altronde suggerito dagli ancor scarni risultati sperimentali sui decadimenti di nuclei dispari, che mostrano fattori di soppressione molto più piccoli, e quindi un effetto più «smussato», dei corrispondenti decadimenti α.

Ma l'aspetto più curioso del confronto teoria-esperimento è che se si considerano approcci completamente diversi da quello finora descritto, per esempio quello *a fissione* della collaborazione Bucarest-Francoforte (Greiner, Poenaru, Sandulescu e coll.), si continua a trovare, sempre limitatamente ai nuclei pari-pari, un accordo più che buono con i dati sperimentali!

Non vogliamo dilungarci troppo nella descrizione di questo modello per il quale, insieme a quello a *tunnelling superfluido* del gruppo di Milano, rimandiamo alla letteratura specializzata ([16,17]).

Ci limitiamo a sottolineare che l'idea qui è di partire dall'estremità opposta della distribuzione di massa dei frammenti (fig. 3), generalizzando il modello di fissione spontanea a modi di frammentazione estremamente asimmetrici come l'esotico o, addirittura, il decadimento α. La costante di decadimento è fattorizzata esattamente come nell'eq. (5.2) in un termine di frequenza di oscillazione e uno di trasmissione attraverso una barriera di potenziale, con la differenza che quest'ultimo ora è un potenziale di deformazione, come quello fornito dal modello a goccia. Il fattore di preformazione qui è unitario: infatti non è necessario «attendere» che nel nucleo padre sia presente la struttura del canale aperto *cluster preformato+figlio*; qui il *cluster* prende forma come risultato del processo di deformazione geometrica e quindi di penetrazione della barriera (fig. 18).

Questo modello ha l'evidente vantaggio di presentare in forma unificata ben tre modi apparentemente diversi di decadimento di un nucleo, fornendo in particolare per l'esotico, dopo un lavoro di «aggiustaggio» dei parametri della barriera, risultati almeno altrettanto buoni del modello a preformazione nel calcolo delle costanti di decadimento ma trovandosi in difficoltà per tutti gli aspetti di struttura già messi in evidenza.

È d'altronde evidente che questa analogia di comportamento è indicativa di un aspetto più fondamentale del problema, e cioè il fatto che almeno per i nuclei pari-pari è l'attraversamento della barriera per $r > R_C$ il termine dominante, quantità trattata in modo molto simile da tutti i modelli.

Se comunque questa similitudine di previsioni vale nella (limitata!) zona di massa finora esplorata, ci si aspetta ragionevolmente che non sia più così per masse completamente diverse.

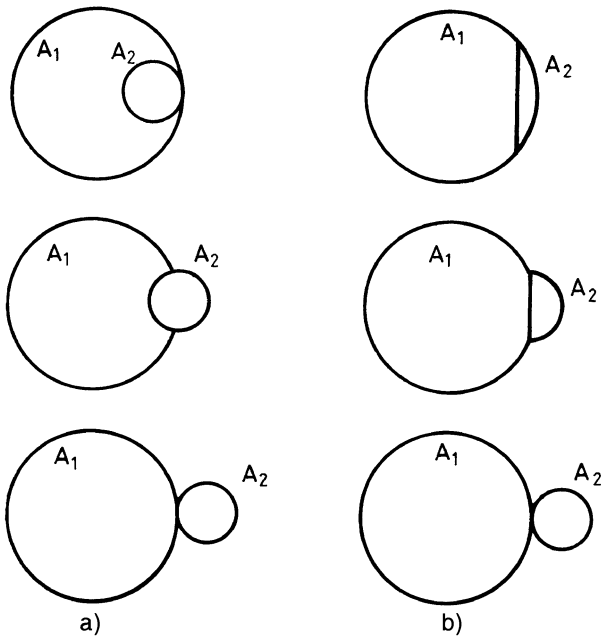


Fig. 18. – Decadimento esotico secondo il modello a preformazione (a) e a fissione superasimmetrica (b). In (a) il raggio del *cluster* A_1 non cambia. In (b) il nucleo padre A_2 si deforma nei due frammenti.

Per esempio, esiste una promettente «isola» di metastabilità prevista a ridosso del bimagico ^{100}Sn, nella quale i decadimenti più appetibili sembrano essere il $^{114}\mathrm{Ba} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{102}\mathrm{Sn}$ e il $^{118}\mathrm{Ce} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O} + {}^{102}\mathrm{Sn}$. Qui le previsioni fornite dai diversi modelli si discostano di diversi ordini di grandezza, come conseguenza dell'elevata simmetria protone-neutrone da una parte, fatto che dovrebbe portare ad elevati valori della probabilità di preformazione del *cluster*, e del piccolo valore del parametro di fissionabilità Z^2/A dall'altra, che porterebbe a sopprimere la probabilità di decadimento per fissione spontanea superasimmetrica.

Sfortunatamente è molto difficile verificare queste congetture visto che questi sono nuclei molto lontano dalla valle della stabilità e che quindi possono essere ottenuti solo in reazioni nucleari e misurati con la tecnica *on-line* discussa in precedenza. Sono a questo proposito stati condotti con esito altalenante diversi esperimenti dal gruppo di Dubna e dalla collaborazione Berkeley-GSI-Milano, che si sono imbattuti in grossi problemi di fondo e scarsa intensità di produzione degli atomi di ^{114}Ba, dell'ordine di 0.1/s nell'ultimo esperimento effettuato al GSI! ([12]).

Gli stessi argomenti sopra citati potrebbero invece agire in senso inverso sull'emissione di *cluster* più pesanti da nuclei molto pesanti, come il Cm e il Cf. È d'altronde naturale pensare, anche sulla base dell'andamento del fattore di preformazione, che man mano ci si avvicina alla tipica «taglia» dei frammenti di fissione, l'emissione di *cluster* preformati debba cedere il passo all'altro meccanismo.

Sono in corso o già previsti da parte di vari gruppi esperimenti in tal senso, che testimoniano la vitalità e l'interesse tuttora esistente per questo campo di ricerca.

Bibliografia

(1) H.J. ROSE e G.A. JONES, *Nature*, **307**, 245 (1984).
(2) Vedi, per es., G.C. HNANNA, in *Experimental Nuclear Physics*, a cura di E. SEGRÉ, vol III (Wiley, New York), 1959.
(3) R. BONETTI *et al.*, *Nucl. Phys. A*, **556**, 115 (1993).
(4) G. GAMOW, *Z. Phys.*, **51**, 204 (1928).
(5) R. BLENDOWSKE e H. WALLISER, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 1930 (1988).
(6) D.V. ALEXANDROV *et al.*, *JETP Lett.*, **40**, 909 (1984).
(7) Per un sommario v. E. HOURANY, in *Nuclear Decay Modes*, a cura di D.N. POENARU (DOP Publishing, Bristol), 1996.
(8) S. WANG *et al.*, *Phys. Rev. C*, **39**, 1647 (1989).
(9) R. BONETTI *et al.*, *Phys. Lett. B*, **241**, 179 (1990).
(10) R. BONETTI *et al.*, *Phys. Rev. C*, **51**, 2530 (1995).
(11) G.N. FLEROV, D.S. KLOCHKOV, V.S. SKOBKIN e V.V. TERENTEV, *Sov. Phys. Dokl.*, **3**, 79 (1958).
(12) A. GUGLIELMETTI *et al.*, *Phys. Rev. C*, **56**, R2912 (1997).
(13) E. HOURANY *et al.*, *Phys. Rev. C*, **52**, 267 (1995).
(14) Vedi, per es., H.J. MANG, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **14**, 1 (1964).
(15) A. INSOLIA *et al.*, *Phys. Rev. C*, **44**, 545 (1991).
(16) D.N. POENARU e W. GREINER, in *Heavy Elements and Related New Phenomena*, a cura di W. GREINER e R.K. GUPTA, vol. II (World Scientific Publ., Singapore), 1999.
(17) F. BARRANCO, G.F. BERTSCH, R.A. BROGLIA e E. VIGEZZI, *Nucl. Phys. A*, **512**, 253 (1990).

Roberto Bonetti è professore associato di Radioattività all'Università di Milano. È attivo da oltre 25 anni nel campo della fisica nucleare sperimentale. È autore di oltre 100 articoli scientifici sullo studio di meccanismi di reazioni nucleari, fenomeni di *clustering* α e radioattività esotica e problemi di datazioni con tecniche nucleari. Fa attualmente parte della collaborazione LUNA per lo studio di reazioni nucleari di interesse astrofisico presso i Laboratori del Gran Sasso.

Alessandra Guglielmetti è titolare di un contratto di ricerca presso l'Università di Milano. Si è occupata di radioattività esotica e protonica ed è responsabile dell'apparato di rivelazione dell'esperimento IRIS per la misura di emissioni spontanee di protoni da nuclei *proton-rich*. Attualmente i suoi interessi sono nel campo della produzione di nuclei esotici e dell'astrofisica nucleare. È autrice di oltre 40 articoli scientifici.

FISICA E...

MISURE DI CONTAMINAZIONE DEL RADIOCESIO E VALUTAZIONE DEL SUO DANNO BIOLOGICO

E. Fiorini, E. Previtali
Dipartimento di Fisica G. Occhialini, Università di Milano-Bicocca
INFN, Sezione di Milano
V. Calini, M. Camatini e C. Urani
Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano-Bicocca

1. – Introduzione

A seguito della fuga di ^{137}Cs partita dalla Spagna all'inizio del giugno 1998 si è ritenuto opportuno compiere una serie di misure sistematiche sulla presenza di questo radionuclide nell'atmosfera durante e dopo l'incidente, sulla contaminazione nel terreno ed in varie matrici alimentari e sui danni biologici ([1,2]) derivanti da sorgenti intense di questo nucleo.

Come è noto il ^{137}Cs, tipico prodotto di fissione dei reattori nucleari, decade β in ^{137}Ba con un'energia di transizione di 1175.3 keV ([3]) ed un tempo di dimezzamento di 30.17 anni. La percentuale (detta BR per *Branching Ratio*) dei decadimenti accompagnati dall'emissione di un raggio γ da 661.65 keV è del 85.2%.

La distribuzione relativa iniziale del ^{137}Cs, in seguito alle ricadute per test nucleari o per incidenti, tra ecosistema acquatico e terrestre dipende essenzialmente dall'origine del radioisotopo; la deposizione sugli oceani in seguito alla ricaduta atmosferica è circa doppia rispetto a quella terrestre. Nell'ambiente acquatico il trasferimento di Cesio dall'acqua alla componente biotica dipende essenzialmente dalla competizione con gli altri cationi monovalenti presenti nel mezzo, in particolare dalla concentrazione del potassio. A causa della concentrazione relativamente alta di K nell'acqua di mare il fattore di bioconcentrazione del ^{137}Cs nel biota di acqua dolce è ordini di grandezza superiore di quello degli organismi marini o di estuario.

Il cesio viene inoltre facilmente intrappolato nei sedimenti che fungono così sia da deposito temporaneo, che da fonte di elementi radioattivi per il futuro compatibilmente con il suo tempo di dimezzamento. La maggior parte del ^{137}Cs rilasciato nell'ambiente terrestre rimane confinato nei primi 10 cm di suolo in quanto strettamente legato ai minerali argillosi e alla sostanza organica; per questo motivo l'assorbimento da parte delle radici è limitato e la contaminazione della componente vegetale è essenzialmente dovuta ad adsorbimento foliare e a risospensione dovuta all'impatto delle gocce di pioggia con il suolo. In quanto congenere del potassio il cesio può essere trasferito dal suolo alle piante e, attraverso la catena alimentare, ai bovini e quindi all'uomo sotto forma sia di latte sia di carne ([4]). Risulta quindi di importanza considerevole il rapporto tra l'attività γ del ^{137}Cs rispetto a quella del ^{40}K, che ha un'abbondanza isotopica dello 0.0117% e decade con una vita di 1.28×10^9 anni. Questa transizione può avvenire per decadimento β, con un BR del 89.28% ed energia di transizione di 1.33 MeV, o per cattura elettronica con un BR dello 10.72% ed un'energia di transizione di 1504.9 keV. Questo secondo processo è accompagnato dall'emissione di un raggio γ da 1460.8 keV ([3]).

Le misure di contaminazione radioattiva sono state condotte con la tecnica della spettroscopia γ presso il Laboratorio di Basse Attività dell'INFN e dell'Università di Milano-Bicocca installato presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio.

I danni biologici su linea cellulare C3H (fibroblasti embrionali di topo), esposta ad in-

tense radiazioni di ^{137}Cs presso l'Istituto per lo Studio e la Cura dei Tumori di Milano, sono stati valutati utilizzando il test citogenetico *Comet Assay* che permette di determinare i danni al DNA indotti sia da agenti chimici sia da radiazioni ionizzanti.

2. – Misure della presenza del ^{137}Cs nell'ambiente e nel particolato atmosferico

Le misure di spettroscopia γ sono state condotte con due rivelatori al germanio con un'efficienza intrinseca del 30% circa. La radioattività ambientale viene monitorata in continuazione: quella del Cs è sempre presente con un tasso costante. Anche in occasione dell'incidente spagnolo essa non è variata sensibilmente, mentre la presenza del ^{137}Cs è stata rilevata nettamente nel particolato atmosferico. L'esiguità della presenza del Cs nella radioattività ambientale appare chiaramente nello spettro in fig. 1: la riga del ^{137}Cs a 661.65 keV è nettamente separata da quella a 665.6 keV dovuta alla radioattività naturale del ^{214}Bi (BR di appena 1.6%). Si noti per contro la riga a 609.4 keV dovuta allo stesso nuclide (BR 45%). I tassi dovuti al ^{137}Cs sono di circa 20 conteggi l'ora e non calano con il tempo, corrispondono a quelli misurati con gli stessi rivelatori in vari periodi del 1997 e 1998 e sono evidentemente da attribuirsi a contaminazioni residue antecedenti dovute prevalentemente all'incidente di Chernobyl ([5]).

La presenza di ^{137}Cs nel particolato atmosferico a seguito della fuga di questo radionuclide dalla Spagna è stata rivelata con misure γ su un filtro del sistema di areazione del Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio che era stato montato alla fine di Maggio e che è stato rimosso il 15 giugno 1998. La misura, condotta per 52 ore ha mostrato (fig. 2) una chiara indicazione della presenza di ^{137}Cs che domina anche rispetto alla presenza del picco a 609.4 keV dovuto al ^{214}Bi, mentre il corrispondente picco a 665.5 keV dovuto allo stesso nuclide non è evidentemente osservabile. Si osservi anche la debole presenza di ^{110m}Ag (picco a 657.4 keV) e del ^{134}Cs (picco a 604.7 keV), la cui presenza verrà discussa in seguito. Una

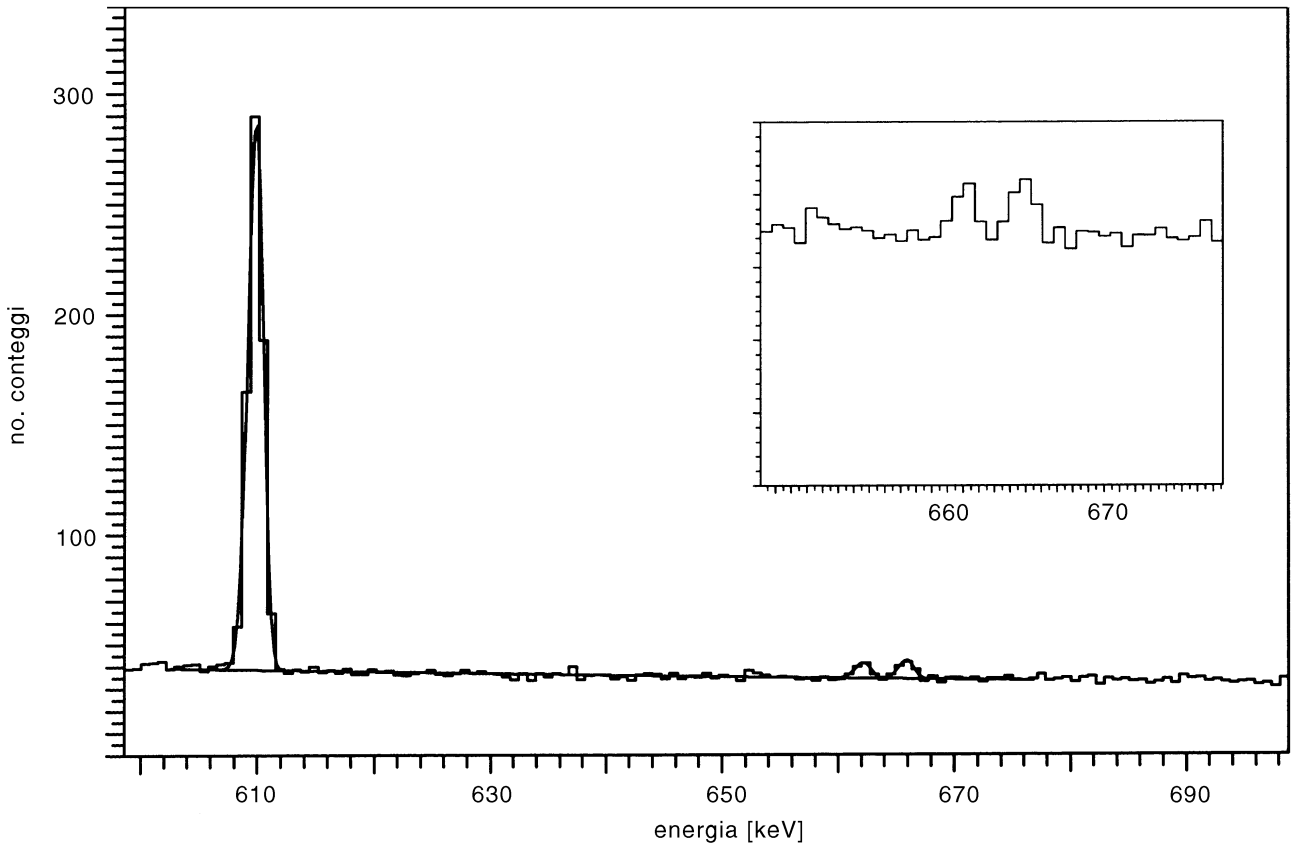


Fig. 1. – La riga a 661.65 keV dovuta al ^{137}Cs e le righe a 665.6 e 609.4 keV dovute al ^{214}Bi.

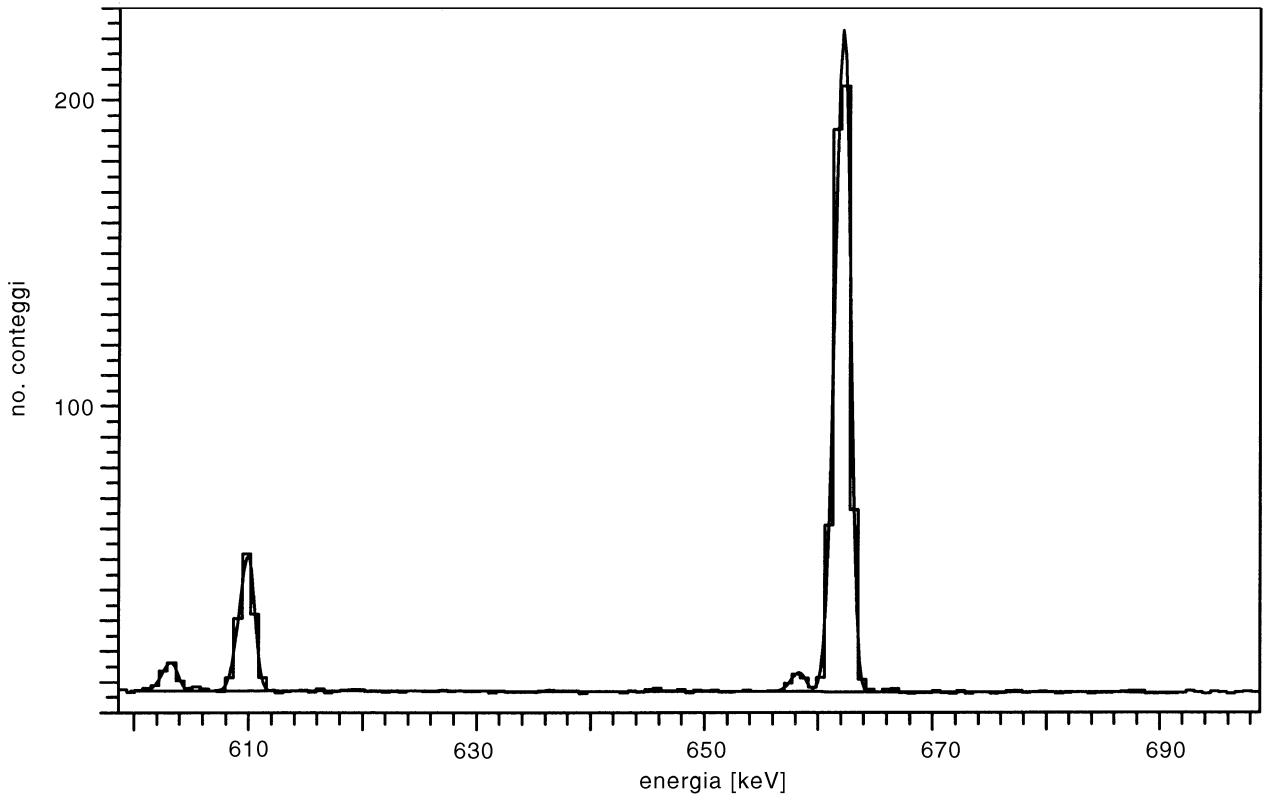


Fig. 2. – Misura del particolato atmosferico dominata dalla presenza del ^{137}Cs.

misura «di zero» condotta su un filtro pulito non ha mostrato alcuna contaminazione dovuta a questi radionuclidi.

Dal 15 giugno si svolgono misure sistematiche su filtri prelevati ogni mese circa: i risultati sono mostrati nella Tabella I. Si osservi come il tasso dei conteggi dovuti al ^{137}Cs si riduca dopo l'incidente rimanendo sostanzialmente costante: è quindi da attribuirsi alla contaminazione residua conseguente all'incidente di Chernobyl o a contaminazioni precedenti ([5]).

Tabella I

Inizio della misura	Metri cubi di aria	Conteggi per ora	Contaminazione (μBq/m^3)
15-5-98	4.5×10^5	504 ± 5	30 ± 4
15-6-98	2.5×10^5	9 ± 1	1.0 ± 0.2
4-7-98	2.2×10^5	11 ± 1	1.3 ± 0.2
20-7-98	2.2×10^5	13 ± 1.5	1.6 ± 0.3
3-8-98	6.5×10^5	13.4 ± 1.5	0.6 ± 0.1
27-10-98	7.5×10^5	15 ± 2	0.5 ± 0.1
16-12-98	7.5×10^5	24 ± 2.5	0.9 ± 0.2
5-2-99	6.0×10^5	24 ± 2.5	1.1 ± 0.2
17-3-99	6.0×10^5	11.4 ± 1.5	0.5 ± 0.1
28-4-99	4.0×10^5	7 ± 1.5	0.5 ± 0.1
26-5-99	1.1×10^6		

Per ricavare l'effettiva contaminazione di ^{137}Cs e di altri isotopi radioattivi in questi campioni, come pure nei campioni che verranno descritti nei paragrafi seguenti, si è determinata l'efficienza γ dei due rivelatori utilizzando il metodo di Monte Carlo ([6]). Gli errori sono compresi nell'indeterminazione delle contaminazioni riportate nella tabella I. Tenendo conto dell'efficienza del nostro rivelatore e del volume di aria filtrata si ricava nella prima metà di giugno una concentrazione media di ^{137}Cs di una trentina μBq m^{-3} che si riduce a valori pari o inferiori ad un μBq m^{-3} nelle misure successive.

3. – Contaminazione del terreno

Il ^{137}Cs rilasciato nell'ambiente rimane confinato nel suolo ([7]), prevalentemente negli strati superficiali dello stesso; i colloidi presenti nel suolo quali argille e sostanza organica, infatti, a causa della loro carica negativa, legano fortemente il Cs impedendone la migrazione lungo il profilo verticale.

Si riportano nelle prime due righe della tabella II i valori delle contaminazioni da ^{137}Cs

Tabella II

Campione	Profondità (cm)	pH	Granulometria (g/kg)			Sostanze Organiche	^{137}Cs (μBq/kg)	^{134}Cs (μBq/kg)	Cs/K $\times 10^{-6}$
			Sabbia	Limo	Argilla				
Terreno (marzo 1994)	0-5	—					31 ± 4		
Terreno (giugno 1994)	0-5	—					74 ± 5		
Terr. di bosco	0-10	4.05	559	374	67	115	165 ± 6	1.6 ± 0.2	43 ± 2
Terr. di bosco	10-20	4.08	457	451	92	43	33 ± 2	0.06 ± 0.01	7.1 ± 0.7
Terr. di bosco	20-30	4.16	467	417	116	31	27 ± 2	< 0.01	4.5 ± 0.4
Terr. di prato	0-5	5.66	606	342	52	51	197 ± 4	1.9 ± 0.3	43 ± 1
Terr. di prato	5-10	5.83	515	419	66	47	152 ± 5	1.2 ± 0.2	34 ± 1
Terr. di prato	10-20	5.66	523	408	69	34	56 ± 2	< 0.01	12 ± 1
Terr. di prato	20-30	5.97	458	429	113	20	12 ± 1	< 0.01	2.3 ± 0.3
Terr. seminato	0-10	5.78	398	473	129	23	90 ± 4	0.9 ± 0.2	14 ± 1
Terr. seminato	10-20	5.83	403	474	123	25	65 ± 2	0.6 ± 0.1	15 ± 1
Terr. seminato	20-30	5.63	394	474	132	23	57 ± 2	0.6 ± 0.1	13 ± 1
Terr. organico							261 ± 10		

rilevati in due campioni di terreno prelevati nella stessa zona presso il Parco Agricolo di Cassano Magnago (Varese) prima e immediatamente dopo l'incidente spagnolo. Nelle ri-

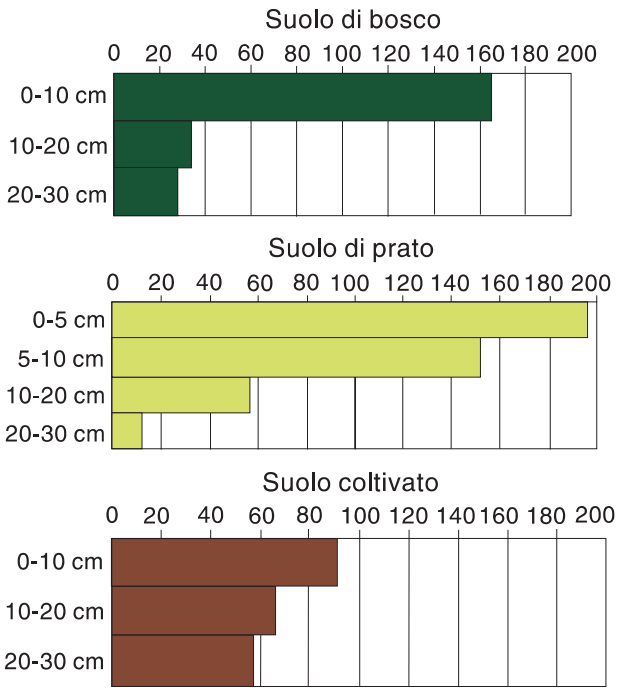


Fig. 3. – Decremento della contaminazione di ^{137}Cs nel terreno.

ghe successive si riportano le contaminazioni in varie tipologie di terreno prelevato qualche mese dopo tale incidente.

Le prime due righe della tabella mostrano un possibile aumento della contaminazione superficiale da ^{137}Cs su campioni prelevati nello stesso punto: essa potrebbe essere dovuta all'effetto del cesio proveniente dalla Spagna. La tabella II e la fig. 3 mostrano l'andamento della contaminazione da tale radionuclide negli altri campioni: essa è funzione della profondità nel caso del terreno di bosco e prato, mentre il suo decremento è molto limitato nel terreno seminato dove la stratificazione tipica dei terreni naturali viene annullata dalle pratiche di lavorazione. Nell'ultima colonna è riportata la percentuale dell'elemento cesio rispetto al potassio ricavata dall'attività relativa del ^{137}Cs e del ^{40}K, tenendo naturalmente conto della diversa efficienza di rivelazione e della differente abbondanza isotopica. In tutti i campioni da noi esaminati la distribuzione del potassio risulta sostanzialmente indipendente dalla profondità.

Di particolare interesse risulta essere la misura sulla contaminazione dell'isotopo ^{134}Cs, che decade con un tempo di dimezzamento di 2.065 anni, con conseguente emissione di fo-

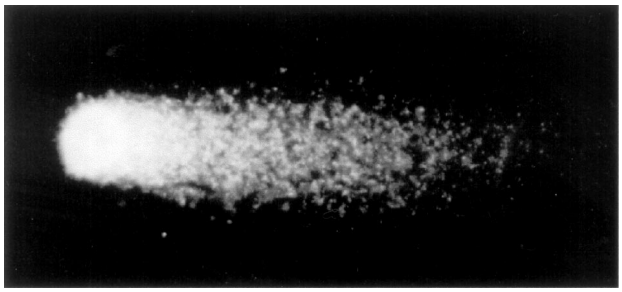


Fig. 4. – Cometa osservata nella misura di controllo positivo.

toni da 604.7 e 795.9 keV, con rapporti di decadimento pari rispettivamente al 97.8 e 85.4%. La sensibilità della misura effettuata permette di rilevare anche questa contaminazione (fig. 4), che è debolissima dato il tempo di dimezzamento relativamente breve rispetto al tempo trascorso dall'incidente di Chernobyl. Va notato che mentre la presenza del ^{134}Cs è da attribuirsi solo a questo incidente, quella del ^{137}Cs è dovuta anche alle esplosioni nucleari precedenti. Di conseguenza solo la distribuzione in profondità del ^{134}Cs può permettere di valutare la migrazione del cesio. Nel caso dei terreni «naturali» (bosco e prato) la distribuzione del ^{134}Cs da noi misurata indica che il tempo di migrazione del cesio nel terreno è ben maggiore della vita di questo suo isotopo. D'altra parte, per quanto limitata dalla bassa statistica, la nostra analisi sembra indicare che l'attività del ^{137}Cs decresce con la profondità più lentamente di quanto avvenga per il ^{134}Cs: essa è quindi dovuta in parte anche alle esplosioni nucleari precedenti. Questo aspetto sarà analizzato con dati statistici più consistenti e derivati da una maggiore stratificazione dei campioni. Anche nel caso del ^{134}Cs non si osserva un rilevante decremento dell'attività con la profondità nei terreni coltivati, ad ulteriore conferma dell'effetto delle pratiche di lavorazione dei terreni stessi.

La contaminazione da cesio in varie specie vegetali e in alimenti ed il rapporto dell'attività corrispondente rispetto a quella del potassio è mostrata in tabella III. Al fine di valutare l'assorbimento radicale del ^{137}Cs ([8]) è stato utilizzato un parametro quale il fattore di concentrazione CR (*Concentration Ratio*) riportato nell'ultima colonna di tabella III, tale indice è definito come il rapporto tra la concentrazione del cesio nella pianta e quella nel suolo sottostante considerato alla profondità caratterizzata dalla maggiore presenza di radici ([9]).

Si osservi il diverso assorbimento del cesio riscontrato nei vari campioni. Il fattore di concentrazione assume sempre valori fortemente inferiori all'unità: ciò indica che non esiste una tendenza alla concentrazione nel passaggio dal suolo alla componente vegetale. Un comportamento del genere conferma lo stretto legame tra il cesio e le sostanze colloidali del suolo che si riflette, come conseguenza, in un assorbimento radicale limitato. Si osservi inoltre come il cesio tenda ad accumularsi nelle parti verdi delle piante.

4. – Misura *in vitro* dei danni cellulari indotti ^{137}Cs tramite il *Comet Assay*

Tra le molecole presenti all'interno di una cellula che possono subire l'azione delle ra-

Tabella III. Fattore di concentrazione (CR) per vari campioni biologici determinato, a seconda dei casi, in rapporto al: terreno del bosco (20–30 cm) (a)**; prato (5-10 cm)** (b)**; seminato (10-20 cm)** (c)**; e seminato (0-10 cm)** (d)**.**

Campione	^{137}Cs (μBq/kg)	^{137}Cs/K $\times 10^{-10}$	CR
Castagne (98)	2.8 ± 0.3	3.7 ± 0.4	0.10 ± 0.01 (a)
Sfalcio agosto 98	6 ± 0.5	2.5 ± 0.3	0.039 ± 0.004 (b)
Sfalcio settembre 98	16 ± 1	18 ± 2	0.10 ± 0.01 (b)
Mais granella	0.16 ± 0.02	0.5 ± 0.1	0.0024 ± 0.0006 (c)
Mais stocco	2.7 ± 0.3	17 ± 0.5	0.042 ± 0.004 (c)
Cicoria	0.36 ± 0.04	1.5 ± 0.2	0.004 ± 0.001 (d)
Patate settembre 1997	0.54 ± 0.06	0.5 ± 0.1	0.006 ± 0.001 (d)
Cipolle	0.12 ± 0.01	0.5 ± 0.1	0.0013 ± 0.0004 (d)
Kiwi	0.25 ± 0.02	0.6 ± 0.1	0.004 ± 0.0001 (c)
Vino vendemmia 97	0.07 ± 0.01		
Vino vendemmia 98	0.09 ± 0.02		
Salsa di pomodoro	0.07 ± 0.01		

diazioni ionizzanti le più importanti sono gli acidi nucleici ed in particolare il DNA che viene quindi considerato il bersaglio principale delle radiazioni. Lo spettro di lesioni indotte dalle radiazioni a carico del DNA include rotture a singolo e doppio filamento, legami che creano ponti intermolecolari che bloccano la replicazione e danni alle basi azotate. Il danno subito dal DNA può essere riparabile o meno; nel caso non possa essere riparato, come ad esempio nel caso di rotture a doppio filamento, porta alla morte cellulare ed è quindi definito letale ([1]). L'*end point* di gran lunga più significativo per la quantificazione del danno al DNA è la determinazione delle rotture a singola elica.

Nel 1984 Ostling e Johanson ([10]) descrissero una metodologia di analisi del DNA che permette la visualizzazione del danno a carico delle singole cellule. Un adeguato numero di cellule viene intrappolato tra due strati di gel di agarosio, le cellule vengono successivamente lisate e quindi sottoposte ad un campo elettrico. Al termine della corsa elettroforetica vengono colorate con un intercalante al DNA fluorescente e osservate al microscopio a fluorescenza.

Il campo fa migrare il DNA carico negativamente lontano dal nucleo verso l'anodo e i frammenti più piccoli migrano più lontano mostrando, all'osservazione al microscopio a fluorescenza, un'immagine che ricorda quella di una cometa con una testa intensamente fluorescente e una coda la cui lunghezza e intensità sono indice della quantità di DNA danneggiato all'interno della cellula.

In fig. 5 è rappresentato un esempio di cometa ottenuta durante la sperimentazione sottoponendo le cellule appartenenti ad una linea di fibroblasti di topo (C3H) ad un trattamento con perossido di idrogeno 50 μM per 30 minuti. Il perossido di idrogeno è stato utilizzato come controllo positivo.

Condizioni di elettroforesi differenti permettono l'analisi delle rotture a singolo o doppio filamento: un trattamento alcalino facilita lo srotolamento e la denaturazione delle molecole di DNA permettendo un sensibile rilevamento delle rotture a singolo filamento, condizioni neutre invece non inducono denaturazione e permettono quindi la determinazione delle rotture a doppio filamento ([2]). La quantità di DNA in un punto specifico è proporzionale all'intensità della flourescenza nel punto. Il miglior metodo per quantificare la quantità del danno al DNA ([10-14]) utilizzando un'analisi digitale dell'immagine della cometa è quella di combinare la lunghezza della coda con la distribuzione del DNA nella coda stessa, tramite queste due grandezze viene definito il «momento della coda» che viene calcolato come un vero momento fisico rispetto alla testa della cometa. Gli integrali delle intensità su ogni colonna di pixel in cui viene

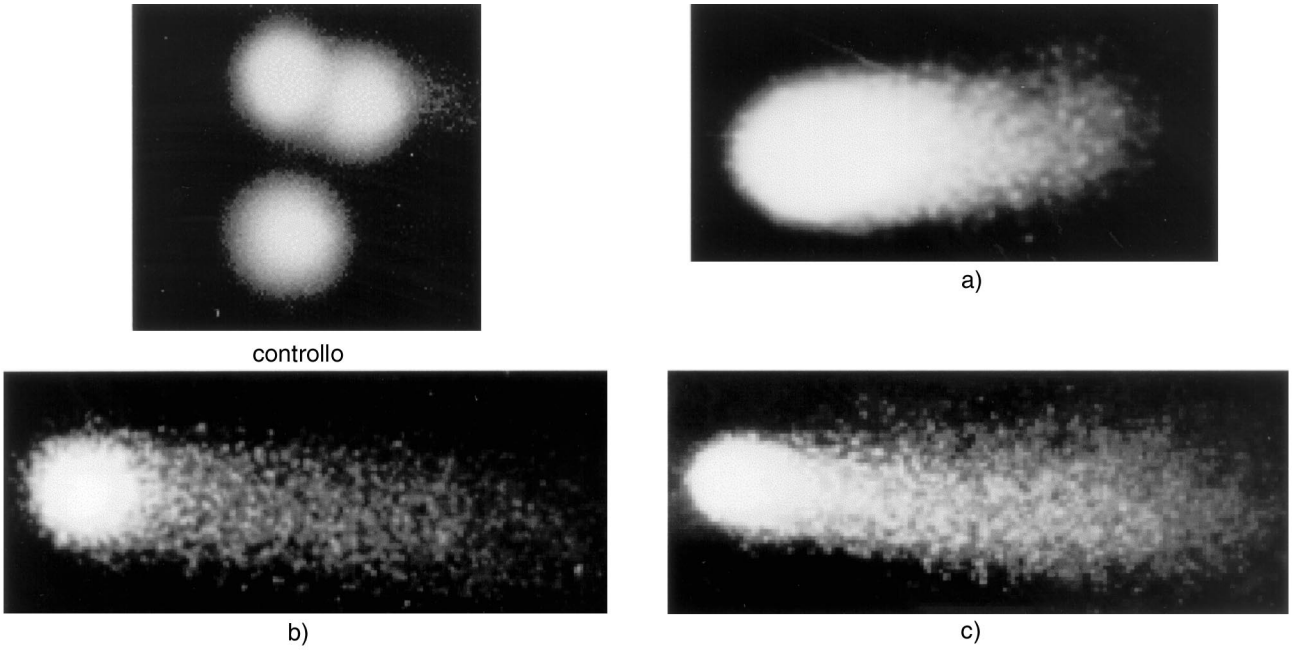


Fig. 5. – Comete dopo l'irraggiamento: a) 1 gray; b) 5 gray; c) 10 gray.

suddivisa l'immagine sono pesati moltiplicandoli per la distanza in pixel dal centro della colonna al centro della testa della cometa. Questi «momenti» individuali sono poi sommati lungo l'intera lunghezza della coda e normalizzati sull'intensità totale della cometa ottenendo così il momento della coda.

Se l'intensità della fluorescenza in un punto rappresenta la massa del DNA, il momento della coda rappresenta la distanza dal centro della testa al centro di massa della coda moltiplicato per la frazione di DNA nella coda.

In questo modo il momento descrive attraverso un solo parametro sia la quantità di DNA che migra nella coda sia la distanza a cui migra.

Le fotografie delle comete vengono acquisite tramite scanner ad una risoluzione di 360 dpi e, sull'immagine così ottenuta, viene costruita una griglia di 20 × 20 pixel sulla base della quale sono applicate le formule seguenti che permettono di ricavare i parametri utilizzati per l'analisi: lunghezza della coda, percentuale di DNA nella coda e momento della coda.

$C(x, y)$ = intensità della singola unità della griglia. Il valore viene espresso in scala di grigi 0–255.

Profilo della cometa:

$$P_C(x) = \int C(x, y)\,dy - B,\ B = \text{background}.$$

Profilo della testa: $P_H(x)$.

Profilo della coda: $P_T(x) = P_C(x) - P_H(x)$.

DNA totale, Intensità totale della cometa:

$$= \int P_C(x)\,dx = x\int\int C(x, y)\,dy\,dx.$$

Percentuale di DNA nella coda:

$$= \int P_T(x)\,dx / \int P_C(x)\,dx.$$

Momento della coda:

$$= \int (x - c) \cdot P_T(x)\,dx / \int P_C(x)\,dx.$$

Tabella IV

Tempo di trattamento (min)	Lunghezza della coda (μm)	DNA nella coda (%)	Momento della coda
15	71 ± 30	64 ± 22	80 ± 65
30	147 ± 48	68 ± 11	140 ± 59

Per questi esperimenti è stata utilizzata la linea cellulare C3H10T1/2 ([15]), fibroblasti embrionali di topo, isolata originariamente presso il Laboratorio dell'Università di Heidelberg e gentilmente fornita dalla Prof.ssa Tallone Lombardi del Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano.

La preparazione dei campioni e dei vetrini, la lisi delle cellule e le operazioni di neutralizzazione, elettroforesi e colorazione, nonché le procedure di osservazione sono riportati altrove ([16]).

Per un confronto con i risultati di danno cellulare indotti dall'irraggiamento con ^{137}Cs si sono svolte misure di controllo positivo trattando le cellule con perossido di Idrogeno 50 μM per 15 e 30 minuti. I risultati sono riportati in tabella IV.

Le cellule sono state esposte al ^{137}Cs presso l'Istituto per lo Studio e la Cura dei Tumori di Milano utilizzando l'irradiatore per prodotti sanguigni IBL 437 C prodotto da CEA ORIS (Francia) ([17]), dotato di tre sorgenti da 63 TBq ciascuna in grado di produrre un'esposizione al centro della camera di 1200 ± 120 R/min. I risultati ottenuti con irraggiamenti corrispondenti a dosi di 1, 5, 10 Gy sono riportati in tabella V. Alcune comete corrispondenti al controllo e alle tre dosi testate sono mostrate in fig. 6.

È stata successivamente valutata la capacità di recupero alle varie dosi a 2 ore dal trattamento. Durante il tempo di *recovering* le cellule sono state mantenute in incubatore a 37 °C e atmosfera al 5% di CO_2. Il recupero conseguente a tale procedimento è mostrato in tabella VI e in fig. 7.

Tabella V

Dose (Gy)	% di comete sul totale	Lunghezza (μm)	DNA nella coda (%)	Momento
0	8	37	7	8
1	55 ± 3	67 ± 8	44 ± 6	74 ± 15
5	54 ± 6	91 ± 18	57 ± 10	111 ± 28
10	98 ± 2	156 ± 19	78 ± 13	209 ± 68

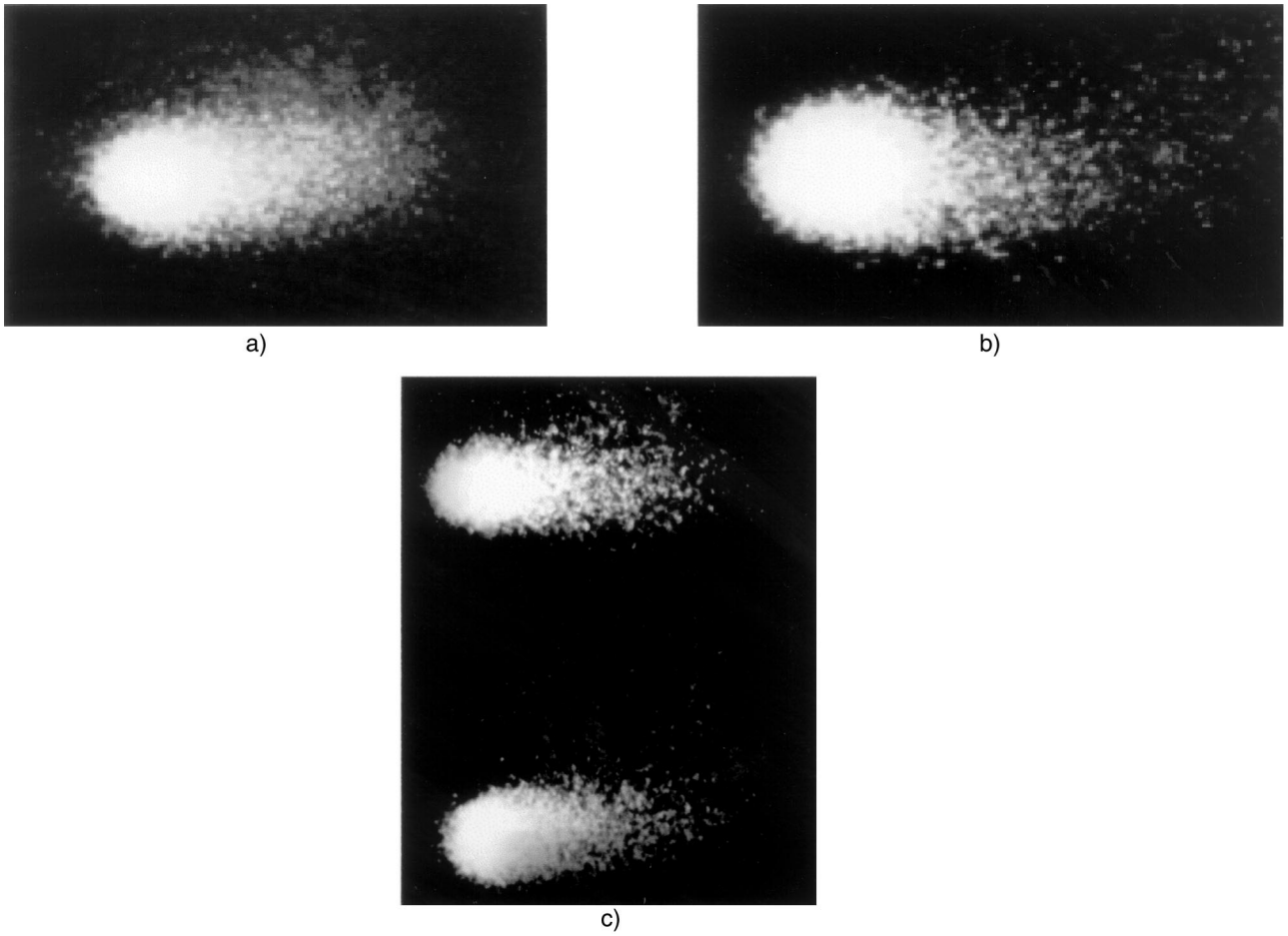


Fig. 6. – Comete dopo l'irraggiamento e ricupero: a) 1 gray; b) 5 gray; c) 10 gray.

Tabella VI

Dose (Gy)	% di comete sul totale	Lunghezza (μm)	DNA nella coda (%)	Momento
1	40 ± 4	58 ± 37	38 ± 10	60 ± 22
5	33 ± 2	57 ± 13	43 ± 13	73 ± 26
10	80 ± 7	74 ± 16	53 ± 16	78 ± 30

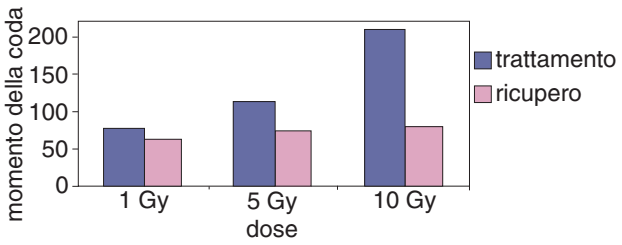


Fig. 7. – Momento delle comete dopo l'irraggiamento ed il ricupero.

5. – Conclusioni

Le misure di spettroscopia γ, svolte immediatamente dopo la fuga di ^{137}Cs dalla Spagna nel Giugno 1998, hanno mostrato l'aumento della presenza di tale nuclide sia nel particolato atmosferico che in strati superficiali del terreno. Tale aumento è inferiore di almeno quattro ordini di grandezza rispetto ad una possibile rilevanza sanitaria ed è scomparso già dal mese successivo all'incidente. Misure successive sulla presenza del radiocesio, dovuto prevalentemente all'incidente nucleare di Chernobyl, in vari tipi di terreno hanno confermato una forte diminuzione con la profondità in terreni naturali (bosco e prato), mentre tale decremento risulta, come atteso, molto limitato nel terreno seminato.

La determinazione della contaminazione da radiocesio in vari tipi di piante ed alimenti, anche in rapporto alla radioattività del ^{40}K,

ha permesso di escludere un forte passaggio di ^{137}Cs dal terreno alla componente vegetale ed ha evidenziato un conseguente assorbimento radicale alquanto limitato. Nella seconda parte di questo lavoro è stato valutato il danno cellulare indotto da dosi di ^{137}Cs da 1 a 10 Gy utilizzando la linea cellulare C3H10T1/2 ed applicando il test citogenetico *Comet Assay*. I parametri di danneggiamento, ed in particolare il momento della coda, hanno mostrato una buona dipendenza lineare dalla dose ($R^2 = 0.94$). Il danno evidenziato inoltre risulta essere non letale e in buona parte recuperabile già dopo 2 ore dal trattamento: la diminuzione percentuale del momento della coda, che evidenzia la percentuale di recupero, risulta essere il 62% per la dose più elevata.

Ringraziamenti

Desideriamo esprimere la nostra gratitudine all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ed in particolare al prof. E. Iarocci per il supporto nel potenziamento del Laboratorio di Radioattività operante presso l'Università di Milano-Bicocca, all'Istituto Nazionale per lo Studio e la Cura dei Tumori, ed in particolare al dr. R. Marchesini, per il valido aiuto datoci nell'irraggiamento delle cellule ed al dr. M. Castelnuovo direttore del Parco Agricolo di Cassano Magnago che ha fornito tutti i campioni del terreno e del materiale organico da noi esaminato. Un particolare ringraziamento va a C. Callegaro per il valido contributo fornitoci nell'espletamento delle misure di spettroscopia gamma ed a P. Melchioretto per il supporto tecnico nell'allestimento del *Comet Assay*.

Bibliografia

(1) C. Martinenghi, *Radiobiologia, basi fisiche e biologiche della radioterapia e della radioprotezione*. Seconda Edizione (Ed. Libreria Cortina, Milano) 1984.
(2) A.D. da Cruz and B.W. Glickman, *Envir. and Molecular Mutagenesis*, **30**, 107 (1997).
(3) R.B. Firestone, C.M. Baglin and S.Y. Frank Chu, *Tables of Isotopes* (Eight Edition), 1998 CD-ROM update.
(4) Si veda ad esempio: G. Eisenbud, *Environmental Radioactivity* (Academic Press Inc., San Diego, New York, Berkeley, Boston, London, Sydney, Tokio, Toronto) 1987.
(5) Si veda ad esempio: F. Casali, G. Maltoni Giacomelli e V. Prodi, *Nuovo Saggiatore*, **2**, no. 4, 40 (1986); E. Bellotti *et al.*, *Nuovo Saggiatore*, **2**, no. 4, 85 (1986); S. Galassini *et al.*, *Nuovo Saggiatore*, **2**, no. 4, 71 (1986); C. Lelli, *Nuovo Saggiatore*, **2**, no. 4, 58 (1986); G. Gialamella *et al.*, *Nuovo Saggiatore*, **2**, no. 4, 44 (1986).
(6) C. Cozzini, *Misure di radioattività debolissime*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Milano (1999).
(7) Si veda ad esempio: D. Barisic, A. Vertacknic and S. Lulic, *J. Envir. Radioact.*, **46**, 361 (1999), e bibliografia ivi contenuta.
(8) Si veda ad esempio: V. Scarlou, C. Nobeli, J. Anoussis, C. Haidouti and E. Papanicolau, *Envir. Radioact.*, **45**, 139 (1999), e bibliografia ivi contenuta.
(9) J.F. Seel, F.W. Whicker and D.C. Adriano, *Health Phys.*, **68**, 793-798 (1995).
(10) O. Ostling and K.J. Johanson, *Microelectrophoretic study of radiation induced DNA damages in individual mammalian cells*, in *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **123** (1984).
(11) B.E. Nelms, *Measuring apoptosis in individual cells with the Comet Assay*, in *Promega News No.*, **64**, 13 (1997).
(12) P.L. Olive, J.P. Banayh and R. Durand, *Heterogeneity in radiation-induced DNA damage and repair in tumor and normel cells measured using the «Comet» Assay*, in *Rad. Research*, **122**, 86 (1990).
(13) W. Bocker, T. Bauch, W.U. Muller and C. Streffer, *Technical Report. Image analysis of comet assay measurements*, in *Int. J. Radiat. Biol.*, **72**, 449 (1997).
(14) Y. Miyamae *et al.*, *Detection of DNA lesions induced by chemical mutagens using the single-cell gel electrophoresis comet assay. 2. Relationship between DNA migration and alkaline condition*, in *Mutation Research*, **393**, 107 (1997).
(15) J. Reznikoff, F. Bertram, D.W. Brankow, C. Heidelberg, *Quantitative and qualitative studies of chemical transformation of cloned C3H mouse embryo cells sensitive to postconfluene inibition of cell division*, in *Cancer Research*, **33**, 3239 (1973)
(16) V. Calini, *Contaminazione da* ^{137}Cs *misure con spettroscopia* γ *e valutazione di danno biologico*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Milano-Bicocca (1999).
(17) *Irradiateur de produits sanguins* IBL 437 C *Applications et Descriptif Technique* (Commissariat a l'energie atomique-Office des Rayonnements Ionisants-Laboratorie des Sources et Irradiateurs) 1984.

RECENSIONI

A. Frova

Fisica nella musica

Zanichelli Editore, Bologna, 1999; pp. XI + 563; L. 98000

I fisici sono notoriamente dei ficcanaso. Non c'è area dello scibile umano, sia essa scientifica o umanistica, che sia rimasta immune dall'interesse dei fisici e che non sia diventata oggetto della loro curiosità. Spesso questa curiosità ha addirittura aperto nuove aree di ricerca interdisciplinare. È persino scontato citare discipline come la medicina, la fisiologia, la biologia, la psicologia sperimentale, oppure gli sport, il giuoco degli scacchi e tanti altri fatti correnti indagati in un altro aureo libro del nostro autore «Perché accade ciò che accade» (Rizzoli 1995). Di recente abbiamo scoperto l'econofisica e i fisici che vanno nelle banche e a Wall Street a fare modelli economici e finanziari e, a quanto pare, anche molti quattrini. Nelle più elevate sfere umanistiche, alle quali Benedetto Croce ammetteva le cosiddette persone colte e non gli elettricisti, come egli definiva gli scienziati, ora troviamo fisici statistici a braccetto con gli ermeneuti nell'analisi dei testi, nucleari e solidisti con gli archeologi a datare e restaurare reperti, materialisti impegnati nella lettura di antichi testi carbonizzati. Vi è anche qualche bello spirito che, con qualche licenza riguardo alle severe regole del nostro mestiere, gareggia con i teologi enunciando principi antropici o addirittura dimostrando il Padre Eterno a suon di equazioni.

Molti artisti contemporanei si valgono di frattali, di laser e altre tecniche e fenomeni fisici per generare strutture inusitate che colpiscono il nostro senso estetico, quando non ne inducano uno nuovo. E la più nobile e astratta delle arti, la musica? A significare che forse la fisica è, con la matematica (sua nobile sposa) la piu' nobile delle scienze, musica, fisica e matematica sono emerse insieme come discipline rigorose, indissolubilmente legate dall'opera di Pitagora: «*Musica est exercitium arithmeticae occultum nescientis se numerare animi*» (Leibniz, 1712). Non c'è aspetto della musica che non sia stato scavato in profondità, fin dai tempi più remoti e sempre più nei tempi recenti, dai fisici e che da queste indagini non abbia tratto profitto. Il fenomeno sonoro, i principi fisici e i materiali degli strumenti musicali, la fisiologia e psicologia dell'udito, la meccanica e fisiologia della voce, l'acustica degli ambienti, la registrazione e riproduzione dei suoni, la loro sintesi ed elaborazione analogica e digitale costituiscono un vasto territorio multidisciplinare al quale la fisica ha dato e continua a dare un contributo fondamentale di conoscenza e pratica. Di questa conoscenza e pratica i musicisti, siano essi compositori, esecutori o ascoltatori, così come i costruttori di strumenti e sale da concerto e i tecnici audio, hanno sempre fatto largo uso e probabilmente non ne possono più fare a meno, vista la pervasiva presenza della scienza e della tecnologia in tutti gli aspetti della musica.

A questa viva esigenza il nuovo, eccellente libro di Andrea Frova offre una risposta ampia ed esauriente. Ricordo, da alcune nostre chiaccherate di quasi trent'anni fa, la grande passione di Andrea Frova per la musica in generale (passione che ci accomuna) congiunta a una vasta competenza della sua fenomenologia fisica. In questo libro vedo dunque una summa di ricerche e di sintesi su tutto quanto dovrebbero sapere i fisici, appassionati di musica o studiosi di acustica che siano, e i musicisti che vogliano approfondire la teoria musicale in tutti i suoi aspetti o/e servirsi degli attuali mezzi elettronici. Per questi ultimi vale l'esemplare citazione di Pierre Boulez: «La tecnologia non è l'unica evoluzione possibile per la musica, ma non la si può evitare».

Il libro è organizzato in tre parti. Nella prima parte si pongono le basi dell'acustica musicale: l'origine, la natura e le caratteristiche dei suoni, le loro combinazioni, la loro percezione fisiologica e la fisica dell'emissione vocale, le relazioni tra i caratteri fisici, musicali e fisiologici del suono. Di particolare interesse i capitoli su «Consonanza, dissonanza e armonia tonale» e quello sulle scale musicali e temperamenti, ove si discutono, con chiarezza e rigore esemplari, i fondamenti psicoacustici della consonanza, le scale diatoniche di Pitagora e di giusta intonazione (naturale) e il problema del temperamento con le sue diverse soluzioni.

La seconda parte del libro è dedicata alla fisica degli strumenti musicali e all'acustica ambientale. Gli strumenti musicali sono suddivisi in famiglie definite dai principi fisici su cui si basano: strumenti a corde, a tastiera, a fiato di legno e di ottone, l'organo e le percussioni. Suggestivi i capitoli dedicati all'acustica delle sale da concerto e dei teatri d'opera, con alcuni interessanti storie dal vivo, e al Silenzio, un valore di cui si sente sempre più acuta la mancanza nonostante gli ottimi isolamenti degli spazi musicali dal mondo esterno. Qui Frova cita John Cage: «Per studiare il rumore bisogna andare alla scuola di percussione. Lì si scopre cos'è il silenzio: un mezzo per mutare il pensiero. Lì si scoprono nuove forme di tempo, mai praticate».

La terza parte riguarda il moderno ruolo dell'elettronica e dei computer nella musica: dalla registrazione e riproduzione del suono alla sintesi ed elaborazione sia analogica che digitale della musica.

Il libro è stato concepito per essere fruibile da lettori di diversa formazione, sia essa scientifica o musicale. La trattazione si svolge su tre livelli. Il testo ordinario è di regola accessibile al lettore con una cultura di scuola media superiore. I dettagli meno elementari sono inseriti nel testo in corpo ridotto e possono essere omessi senza perdere la comprensione delle linee essenziali. Infine le parti ove si

usano strumenti matematici non elementari, accessibili a studenti del primo biennio universitario di scienze o ingegneria, sono relegate nelle note. Ogni capitolo è poi corredato di ampia bibliografia per gli eventuali approfondimenti. Nella sua interezza il libro mi sembra particolarmente appropriato come testo per un complementare della laurea in fisica o ingegneria acustica, mentre nei suoi primi due livelli può essere adatto a un corso monografico di conservatorio o a corsi di specializzazione di liuteria, etc.

Al di là di queste apparenti destinazioni, la scrittura del libro si mantiene sempre fluida e piacevole, nello stile cui l'autore ci ha abituato nei suoi precedenti libri di intento divulgativo. Per questa ragione i fisici appassionati di musica, magari esecutori dilettanti (e ce ne sono molti), così come i musicisti che vogliano aggiungere alla loro maestria la conoscenza dei fondamenti fisici che regolano la loro nobile arte dovrebbero tutti possedere questo libro. A tutti i lettori, poi, sono destinate le letture poste in appendice a ciascun capitolo, vere e proprie ricreazioni su argomenti di vario carattere, con contributi anche esterni. Il lettore vi troverà, fra le altre cose, anche «tutto quello che avreste voluto dire sulla musica contemporanea», e «la base ontogenetica dell'avversione per la dissonanza». L'evidente familiarità dell'autore con Berio e Boulez ci assicura che le sue osservazioni sullo sperimentalismo contemporaneo non nascono da un pregiudizio, ma, al contrario, da una conoscenza avanzata delle basi fisiologiche della percezione estetica musicale. Tale conoscenza dovrebbe costituire un viatico indispensabile per il viaggio della musica nel futuro verso territori inesplorati.

G. Benedek

G. Campurra

Medicina del lavoro. Organizzazione, compiti e normativa

Ipsoa Editore, Milano, 1998

È stato recentemente pubblicato da Indicitalia — Ipsoa Editore un Manuale operativo dedicato alla Medicina del Lavoro; l'autore, Dr. Gabriele Campurra, è responsabile da oltre venti anni del Servizio di Medicina del Lavoro e Radioprotezione del Centro di Frascati dell'ENEA ed ha trasferito in questa opera tutta l'esperienza sia scientifica, sia organizzativa, acquisita in tanti anni di attività operativa sul «campo».

Questo manuale è disponibile sia come testo in forma cartacea, a schede mobili per circa 500 pagine di testo e 300 di appendice destinata alla legislazione in merito, sia come CD ROM in cui è compreso anche un potente *software* per la gestione delle schede di destinazione lavorativa e delle cartelle cliniche. Entrambe le edizioni vengono aggiornate in abbonamento con cadenza quadrimestrale.

Tutta la recente evoluzione normativa in tema di medicina del lavoro, con particolare riguardo ai D.Lgs. 277/1991, D.Lgs. 626/1994 e D.Lgs. 230/1995, ha reso estremamente critica e delicata la sorveglianza sanitaria in qualunque unità produttiva o Laboratorio di ricercà sia di piccole che di grandi dimensioni. Gli obblighi previsti in questo ambito, per il medico, ma anche per il datore di lavoro, si sono notevolmente ampliati e nel contempo sono aumentati i rischi di compiere errori, talora pesantemente sanzionati.

Particolare rilevanza riveste la valutazione di tutti gli obblighi di tutela della salute negli istituti di ricerca; in pratica in ogni laboratorio in cui si possa avere una eventuale esposizione ad agenti chimici biologici e fisici di tutti i tipi occorre eseguire una corretta valutazione dei rischi e, quasi sempre, è necessario istituire un programma di medicina del lavoro.

Nello stesso tempo il vecchio concetto di medico di fabbrica, la cui *competenza* poteva essere solo su base empirica, è stato sostituito dalla figura attuale del medico competente, figura ben definita di professionista, cui sono affidati compiti particolarmente complessi che non si esauriscono nella semplice esecuzione di visite mediche, ma che comprendono tutta una serie di adempimenti da eseguire spesso in stretta collaborazione con le altre figure interessate alla tutela della sicurezza e della salute sul luogo di lavoro quali il datore di lavoro, il responsabile del servizio di prevenzione e protezione, il rappresentante per la sicurezza.

Lo scopo di quest'opera è quello di fornire un manuale di facile e rapida consultazione che non vuole certo sostituire o sovrapporsi ai classici testi accademici, ma rappresentare una guida per valutare e risolvere i molti problemi quotidiani che il medico competente deve affrontare nella sua poliedrica attività in azienda. Considerando che vengono affrontati e risolti anche molti aspetti organizzativi, il testo può essere anche utile per il datore di lavoro, il capo laboratorio, il responsabile del servizio di prevenzione e protezione, il rappresentante per la sicurezza e per chiunque collabori nell'esecuzione della sorveglianza sanitaria in azienda.

È pertanto, al momento, l'unico testo che affronti la medicina del lavoro non sotto un aspetto accademico, e quindi rivolto prevalentemente allo studente, ma in una veste di ausilio operativo destinato anche al medico competente o al medico autorizzato già esperto nella materia.

L'opera è sostanzialmente divisa in diverse parti consequenziali di cui la prima, che è forse la più innovativa, è dedicata ad un'analisi approfondita degli obblighi inerenti la sorveglianza sanitaria nelle unità produttive e si propongono alcune soluzioni operative ed organizzative di semplice attuazione.

Viene successivamente analizzato il ruolo della medicina del lavoro in azienda sia per quanto riguarda gli interventi nell'ambiente di lavoro, sia in ordine al supporto che può fornire per migliorare le condizioni generali di lavoro.

Nella terza parte viene effettuata, tramite tavole sinottiche, un'analisi delle principali attività lavorative elencando per ognuna le caratteristiche dell'ambiente di lavoro, i materiali utilizzati, le lavorazioni effettuate ed i rischi presenti. È possibile in tal modo valutare rapidamente l'impostazione della sorveglianza sanitaria per ogni tipologia di azienda.

I singoli rischi lavorativi vengono analizzati nella parte successiva, suddividendoli nei classici grandi capitoli di rischi chimici, fisici, biologici, cancerogeni e polveri; per ognuno di essi vengono indicati, tra l'altro, gli effetti lesivi acuti e cronici e vengono proposti dei protocolli diagnostici. Inoltre, alcune particolari attività lavorative sono infine analizzate nell'ultima parte ed anche per esse si riportano i principali disturbi o patologie correlate e le conseguenti indagini mediche consigliate.

L'appendice dell'opera infine riporta tutte le principali leggi vigenti in tema di medicina del lavoro, alcune in modo completo, altre limitate agli articoli specifici in materia.

È previsto un programma di aggiornamento periodico, in modo da rendere l'opera sempre valida per quanto riguarda la costante evoluzione legislativa; verranno implementati, in occasione di questi aggiornamenti, tutti gli argomenti che, considerata la vastità della materia affrontata, si ritenga necessario trattare in modo più approfondito, soprattutto con il costante incremento dell'analisi dei vari rischi lavorativi.

Le principali implementazioni del CD ROM rispetto all'opera a schede mobile possono essere così sintetizzate:

a) Il *software* presente permette una gestione automatizzata, interattiva e guidata di una scheda di destinazione lavorativa, di una cartella sanitaria e di rischio per rischi convenzionali (D.Lgs. 626/1994) e di un documento sanitario personale per rischi da radiazioni ionizzanti (D.Lgs. 230/1995). È l'unico prodotto sul mercato che prevede una scheda informatizzata che rispetti gli obblighi previsti dal DM 449/1990 (*Regolamento concernente le modalità di tenuta della documentazione relativa alla sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti e la sorvegllanza medica dei lavoratori esposti al rischio di tali radiazioni*).

b) La compilazione delle varie schede e cartelle è facilitata da numerosi aiuti *on line* per velocizzarne l'esecuzione (elenco agenti chimici, biologici, tasti di scelta rapida, ecc.) e le schede vengono gestite in modo completo: dalla prima immissione dati fino alla trasmissione del giudizio d'idoneità (ovviamente con tutte le tappe intermedie). È comunque possibile accedere in modo diretto ad ogni sezione delle schede, non obbligatoriamente in modo sequenziale.

c) Esistono tutti i sistemi di blocco necessari per evitare di lasciare in bianco campi la cui compilazione sia obbligatoria e, per garantire il rispetto della legge, ogni scheda, una volta compilata e confermata non è più correggibile; sono peraltro possibili correzioni (intese come annotazioni successive) che vengono sempre registrate con data e ora di immissione.

d) Esistono vari livelli di *password* (medico, paramedico, amministrativo) per garantire il rispetto assoluto del segreto professionale e della legge sulla "privacy".

e) È ovviamente possibile la stampa delle schede, delle cartelle cliniche generate e delle varie lettere e comunicazioni conseguenti le attività di medicina del lavoro.

f) Diverse sono le possibilità di ricerca: unità, persone, schede (per data o per numero), visite (per data, per numero, per tipo, per esito, validità del giudizio d'idoneità). Si può di conseguenza creare anche uno *scadenzario* per gestire gli appuntamenti.

g) Uno schema ad albero delle schede e delle visite, variamente espandibile, permette di controllare sinteticamente ed in modo completo la cronologia e gli esiti di tutta la sorveglianza sanitaria eseguita in ogni attività produttiva e per ogni lavoratore.

h) Tutti gli argomenti trattati nell'opera a schede mobili sono inseriti in uno schema ad albero per una facile ricerca degli stessi nei vari capitoli. Non essendoci i vincoli di spazio dovuti alle dimensioni della carta, vengono trattati un numero maggiore di argomenti e, soprattutto, la legislazione riportata in appendice è più estesa ed aggiornata. È possibile una *navigazione ipertestuale* nel contesto dei vari capitoli verso le leggi riportate nella documentazione, anch'esse dotate di *navigazione ipertestuale*.

i) Un sistema di finestre permette di accedere in modo rapido agli argomenti o alla legislazione: in pratica è come avere, durante l'attività di sorveglianza sanitaria, sempre sotto mano e rapidamente consultabile sia il testo di "Medicina del lavoro" che tutta la legislazione vigente.

Il manuale appare dunque uno strumento certamente indispensabile per il medico competente, ma la sua impostazione è tale da renderlo estremamente prezioso per quanti, datori di lavoro, responsabili di ricerca, ricercatori, vogliano evitare incresciosi... incidenti di percorso che potrebbero avere come meta finale anche un tribunale della repubblica.

R. Habel

NUOVO CIMENTO SECTION A HAS MERGED WITH
THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL SECTIONS A AND C

The European Physical Journal

A merger of Il Nuovo Cimento, Journal de Physique and Zeitschrift für Physik

EDP SCIENCES · Società Italiana di Fisica · Springer

Please send me a **free** sample copy

- ❑ *The European Physical Journal A*
- ❑ *The European Physical Journal B*
- ❑ *The European Physical Journal C*
- ❑ *The European Physical Journal D*
- ❑ *The European Physical Journal E*

Name
Street
City/ZIP-Code
Country
e-mail:

to be addressed to:
Springer Customer Service
Haberstraße 7 - 69126 Heidelberg - Germany

SCELTI PER VOI

a cura di S. Focardi

LEUCEMIA E CAMPI MAGNETICI

I campi magnetici generati in casa dalle linee di alimentazione elettrica e dagli elettrodomestici, non hanno alcuna responsabilità di causare la leucemia infantile. Il risultato di una ricerca condotta su vasta scala in Gran Bretagna vale per tutti i paesi europei, non necessariamente per Stati Uniti e Canada, dove la tensione elettrica è minore di quella europea e di conseguenza maggiori sono le intensità di corrente. La ricerca è durata otto anni ed è costata una trentina di miliardi di lire.

Sono stati studiati due campioni, entrambi formati da 2226 bambini uno costituito da malati di cancro e l'altro, per controllo, da individui sani. Entrambi i campioni erano formati con la stessa rappresentanza numerica di bambini della stessa età e dello stesso sesso.

Studiando le abitazioni, i luoghi attorno a casa, le scuole, gli asili, per ogni individuo è stato determinato il valor medio del campo magnetico cui era stato precedentemente esposto.

Suddividendo in tre intervalli le intensità di campo magnetico così valutate, gli autori della ricerca hanno suddiviso i soggetti studiati a seconda che l'esposizione media fosse minore di 0,1 microTesla, compresa fra 0,1 e 0,2 microTesla, maggiore di 0,2 microTesla. I risultati numerici relativi alla suddetta classificazione, sono stati per il campione di bambini malati 2067, 120, 39; per il campione di controllo 2054, 128, 44.

Il risultato indica che valori del campo maggiori di 0,2 microTesla, che precedenti ricerche avevano indicato come pericolosi, in realtà non lo sono. La percentuale di soggetti esposti a questi valori è piccola, attorno al 2%. Negli Stati Uniti detta percentuale sale a 11,4% e nel Canada a 15,4%. Quest'ultimo paese appare quindi il più adatto per un'analisi che permette di ottenere una risposta statisticamente significativo sull'effettivo grado di pericolosità di campi magnetici intensi.

New Scientist, **2216**, 11 dicembre 1999, p. 14

MOLECOLE A RIPOSO

Un nuovo interessante risultato di un gruppo della Università del Texas consiste nell'aver ottenuto molecole di Rb ferme, partendo da un condensato Bose-Einstein di atomi di rubidio. Lo sviluppo di sorgenti monoenergetiche di elettroni, neutroni, ioni e atomi ha sempre aperto la strada ad importanti applicazioni. È ora la volta di sorgenti di molecole.

La formazione di molecole in un condensato è la naturale conseguenza delle interazioni fra atomi. Queste tuttavia danno origine a molecole che a seguito della interazione da cui sono state prodotte posseggono energia sia traslazionale che rotazionale e vibrazionale. D'altra parte, l'esistenza delle strutture rotazionali e vibrazionali delle molecole rende impossibile un loro raffreddamento diretto mediante fasci laser.

La tecnica utilizzata consiste nel fotoassociare coppie di atomi di Rb di un consensato, mediante un processo Raman coerente a due fotoni. Si ottengono in questo modo molecole in un singolo stato quantico vibrazionale, debolmente legato con una energia di 636 MHz sotto quella dei due atomi liberi. Il processo è tale che le molecole prodotte ricevono una trascurabile quantità di moto dai fotoni. Poiché gli atomi nel condensato sono praticamente fermi con velocità dell'ordine di alcuni millimetri al secondo, anche le molecole sono essenzialmente a riposo, con temperature inferiori a 100 nK. Ciò apre la strada ad una spettroscopia di precisione dei livelli di energia molecolari che può essere usata per determinare i coefficienti di Van der Waals per i potenziali interatomici a lunga distanza, e per investigare l'esistenza di deboli effetti relativistici in tali potenziali.

Gli autori mostrano nel loro articolo la dipendenza delle forme della riga di transizione dalla densità del condensato, fenomeno che permette di affrontare lo studio della interazione fra atomi e molecole. La studio della dipendenza di tale interazione dagli stati rotazionali e vibrazionali delle molecole è uno degli aspetti della futura ricerca. Gli autori ritengono sia possibile ottenere un condensato molecolare che aprirebbe la strada a nuovi interessanti fenomeni osservabili con laser molecolari.

Science, **287**, 11 febbraio 2000, pag. 986 e 1016

CEROTTI ANZICHÉ INIEZIONI

Inghiottire una pillola o farsi fare una iniezione può non essere il modo migliore per prendere una medicina. I ricercatori della ALZA corporation, in California, hanno inventato un sistema più efficiente e meno doloroso: un cerotto intelligente che utilizza una carica elettrica per sospingere le medicine attraverso sottili incisioni nella pelle.

L'utilizzo di cerotti come quelli alla nicotina che aiutano le persone a smettere di fumare è stato limitato perché la diffusione passiva attraverso la pelle è contrastata dal fatto che questa è spessa ed essenzialmente impermeabile. Da alcuni anni è noto che l'applicazione di una differenza di potenziale può aiutare a superare la barriera. Molte molecole con proprietà medicinali sono elettricamente cariche in soluzione e possono essere spinte da un elettrodo carico dello stesso segno all'interno dei tessuti, attraverso la pelle. Su questa idea è stato progettato il cerotto intelligente con un circuito elettronico integrato.

Il sistema, ora nella terza fase delle verifiche cliniche, toglie ogni dolore a pazienti che soffrono di inquietudini postoperatorie.

Tuttavia, malgrado la spinta elettrica, le molecole di grandi dimensioni, come ad esempio quella dell'insulina non riescono a penetrare attraverso la pelle. Così ora ALZA, riprendendo una vecchia idea già brevettata venti anni or sono, ha aggiunto al suo cerotto elettrico un insieme di sottili lame il cui compito è di produrre nella pelle microscopici fori. Le lame hanno l'aspetto dei denti di una sega sporgenti di un decimo di millimetro, talmente corte da non provocare dolore. Rispetto alle compresse e alle pillole questo sistema protegge il medicinale dall'azione distruttiva dell'intestino e del fegato. Nelle prime prove il cerotto intelligente è stato utilizzato su malati di diabete volontari per la somministrazione dell'insulina ad essi necessaria. Alcuni ricercatori temono che per questa strada possano superare la barriera della pelle anche sgraditi ospiti, come i batteri. Tuttavia nessuno dei 60 volontari che hanno sperimentato il sistema ha mostrato segni di infezione o di irritazione.

New Scientist, **2233**, 8 aprile 2000, pag. 13

ANNUNCI

ETTORE MAJORANA FOUNDATION AND CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE

THE SCIENTISTS' JUBILEE OF THE YEAR 2000 — ERICE

UNDER THE PATRONAGE OF H.H. JOANNES PAULUS II

INTERNATIONAL SCHOOL OF ASTROPARTICLE PHYSICS - Directors: G. 't HOOFT, G. VENEZIANO - Workshop on *Space for Peace Technology: Physics with AMS* - Chairman: S.C.C. TING - 7-15 May 2000

INTERNATIONAL SCHOOL ON "PHYSICS FOR INDUSTRY" - Director: E. IAROCCI - Workshop on *Present Status and Future Trends* - 17-21 May 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF CRYSTALLOGRAPHY - Director: T.L. BLUNDELL
30th Course: *Methods in macromolecular Crystallography* - Directors: L.N. JOHNSON, D. TURK - 25 May-4 June 2000
31th Course: *Prospectives in Crystallography of Molecular Biology* - Directors: L.N. JOHNSON, D.I. STUART - 25 May-4 June 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF SPACE CHEMISTRY - Director: M. GREENBERG - 5th Course: *Solid State Astrochemistry* - Directors: V. PIRRONELLO, J. KRELOWSKY - 5-16 June 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF SOLID EARTH GEOPHYSICS - Director: E. BOSCHI - 17th Course: *Fault Interaction by Stress Transfer: New Horizons for Understanding Earthquake Occurrence* - Directors: M. COCCO, J.R. RICE, R.S. STEIN - 17-23 June 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF QUANTUM ELECTRONICS - Directors: A.N. CHESTER, S. MARTELLUCCI
29th Course: *Nanoscale Linear and Non-linear Optics* - Directors: M. BERTOLOTTI, C.M. BOWDEN, R. HORAK - 2-14 July 2000
30th Course: *Atoms, Solids and Plasmas in Super-Intense Laser Fields* - Directors: D. BATANI, C.J. JOACHAIN - 8-14 July 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF SOLIDS STATE PHYSICS - Director: G. BENEDEK
18th Course: *Nonstructured Carbon for Advanced Applications* - Directors: P. MILANI, V.G. RALCHENKO - 19-31 July 2000
19th Course: *EPIOPTICS 2000* - Directors: A. CRICENTI, Th. RASING - 19-25 July 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF ATOMIC AND MOLECULAR SPECTROSCOPY - Director: B. DI BARTOLO - 13th Workshop: *Advanced Topics in Luminescence Spectroscopy* - Directors: B. DI BARTOLO, C. RONDA - 24-29 July 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF SOLIDS STATE PHYSICS - Director: G. BENEDEK - 20th Course: *Applications of Surface Science Techniques (ISASST4)* - Directors: M. ANDERLE, G. MARGARITONDO, M. SANCROTTI - 25-31 July 2000

WFS - PLANETARY EMERGENCIES - THE SCIENTISTS' JUBILEE - Chairman: A. ZICHICHI - 26th Session - Co-Chairmen: T.D. LEE, K.M.B. SIEGBAHN - 19-24 August 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF SUBNUCLEAR PHYSICS - Director: A. ZICHICHI - 38th Course: *Theory and Experiment heading for New Physics* - Directors: G. 't HOOFT, G. VENEZIANO, A. ZICHICHI - 27 August-5 September 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS - Director: A. FAESSLER - 22nd Course: *Radioactive Beams in Nuclear and Astro Physics* - Director: A. FAESSLER - 16-24 September 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF LIQUID CRYSTALS - Director: C. ZANNONI - 4th Course: *Computer Simulations of Defects in Liquid Crystals Including their Relation to Theory and Experiment* - Director: P. PASINI, S. ZUMER - 19-23 September 2000

INFN ELOISATRON PROJECT - Director: A. ZICHICHI - 40th Workshop - Director: L. CIFARELLI - 26 September-1 October 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF COSMIC RAY ASTROPHYSICS - Director: M.M. SHAPIRO - 12th Course: *High Energy Phenomena in Astrophysics and Cosmology* - Directors: P. GALEOTTI, V. PTUSKIN, T. STANEV, J.P. WEFEL - 11-21 November 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF QUANTUM PHYSICS - Director: E. BELTRAMETTI - 3rd Course: *Advances in Quantum Structures 2000* - 2-7 December 2000

INTERNATIONAL SCHOOL OF ASTROPHYSICS «D. CHALONGE» - Directors: N. SANCHEZ, A. ZICHICHI - 8th Course: *Phase Transitions in the Early Universe: Theory and Observations* - Directors: H.J. DE VEGA, I.M. KHALATNIKOV - 6-17 December 2000

INTERNATIONAL WORKSHOP ON DATA ANALYSIS IN ASTRONOMY - Directors: V. DI GESÙ, L. SCARSI - 6th Course: *Science with Stratospheric Balloons* - Directors: R. IBBA, V. JONES, L. SCARSI - 10-14 December 2000

for more information: http://www.ccsem.infn.it

CERN ACCELERATOR SCHOOL

CAS

GSI Darmstadt

Radio-Frequency Engineering

Lufthansa Training Center
Seeheim, Darmstadt, Germany
8-16 May 2000

Institute for Accelerating Systems and Applications, Athens

Introduction to Accelerator Physics

Poseidon Hotel, Loutraki, Greece
2-13 October 2000

For further information:

CERN accelerator school
AC Division
CH-1211 Geneva 23 - Switzerland
Fax + +41 22 767 5460
web http://www.cern.ch/Schools/CAS/
e-mail: Suzanne.von.Wartburg@cern.ch

INFMeeting

National Conference on Physics of Matter

Magazzini del Cotone, Porto Antico, Genova

12-16 Giugno 2000

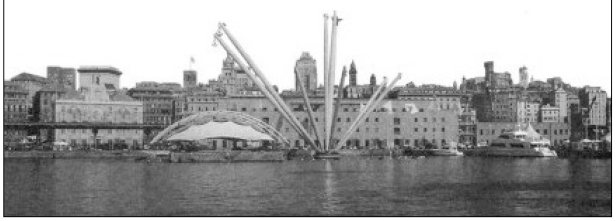
Per ulteriori informazioni:

Sito web di INFMeeting
http://www.infm.it/INFMEETING2000

Sede di INFMeeting
Ingresso Foyer Maestrale
Magazzini del Cotone
Via ala Porto Antico - Genova

Segreteria Organizzativa
C.so Perrone 24 - 16152 Genova
tel. ***010-6598718/6598728***
fax ***010-6506302***
E-mail: ***infmeeting2000@infm.it***

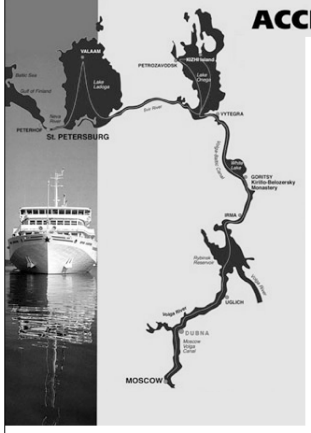
Sestante travel Shop
tel. ***010/2474483***
fax ***010/2476136***



JAS'2000

JOINT CERN-JAPAN-JINR-RUSSIA-USA

ACCELERATOR SCHOOL



Frontiers of Accelerator Technology: High Quality Beams

on board the ship along the Volga river, Russia, 1-14 July 2000

for further information:

General questions:
Prof. Igor Meshkov, JINR,
141980 Dubna, Moscow Region, Russia
Phone: (+7 09621) 65193 - fax: (+7 09621) 65891, 65379
e-mail: meshkov@nusun.jinr.ru

Dr. Grigori Shirkov, LPP JINR,
141980 Dubna, Moscow Region, Russia
Phone: (+7 09621) 65136 - fax: (+7 09621) 65136
e-mail: shirkov@sunse.jinr.ru

Programme, Registration, etc.
Dr. Nadezhda Tokareva, LPP, JINR,
141980 Dubna, Moscow Region, Russia
Phone: (+7 09621) 66239 - fax: (+7 09621) 65767
e-mail: tokareva@sunse.jinr.ru

Registration, accommodation, visas, etc.
Mrs. Natalia Dokalenko, Intern. Depart., JINR,
141980 Dubna, Moscow Region, Russia
Phone: (+7 09621) 65011 - fax: (+7 09621) 65599; 65891
e-mail: natasha@cv.jinr.ru

JAS'2000 home page: http://sunse.jinr.ru/jas2000.html

ETTORE MAJORANA
CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE

International School of Quantum Electronics

30th Course: Atoms, Solids and Plasmas in Superintense Laser Fields

Erice, Trapani
July 8-14, 2000

Directors: D. BATANI
C.J. JOACHAIN

for further information:

dr. Dimitri Batani
Università di Milano-Bicocca
fax: +39 02 2392 208
e-mail: batani@mi.infn.it

dr. Giovanni Petrocelli

Dipartimento di Fisica and INFM
Università di Milano-Bicocca
Via Emanueli 15
20126 Milano, Italy
tel. +39-02-2392232
fax +39-02-2392208
web page: http://www.mi.infm.it

h
1 y
h one hundred years of *h*

Pavia, Collegio Ghislieri

14-16 settembre 2000

- Il Convegno si articola in quindici relazioni ad invito suddivise in cinque sessioni. Al termine di ciascuna sessione è prevista un'ampia discussione.
- Verranno trattate le più significative ricorrenze di h nella Fisica del XX secolo.
- Gli Atti verranno pubblicati dalla SIF.
- Informazioni, incluse quelle per l'iscrizione, si trovano sul sito: http://matsci.unipv.it/1hyh/

UNIVERSIDADE
FEDERAL DE ALAGOAS

IUPAP International Conference
New Trends in the
Fractal Aspects of Complex Systems
FACS 2000

Maceió, Brazil, October 16-20, 2000



Deadline for registration and abstract submission:
May 31, 2000

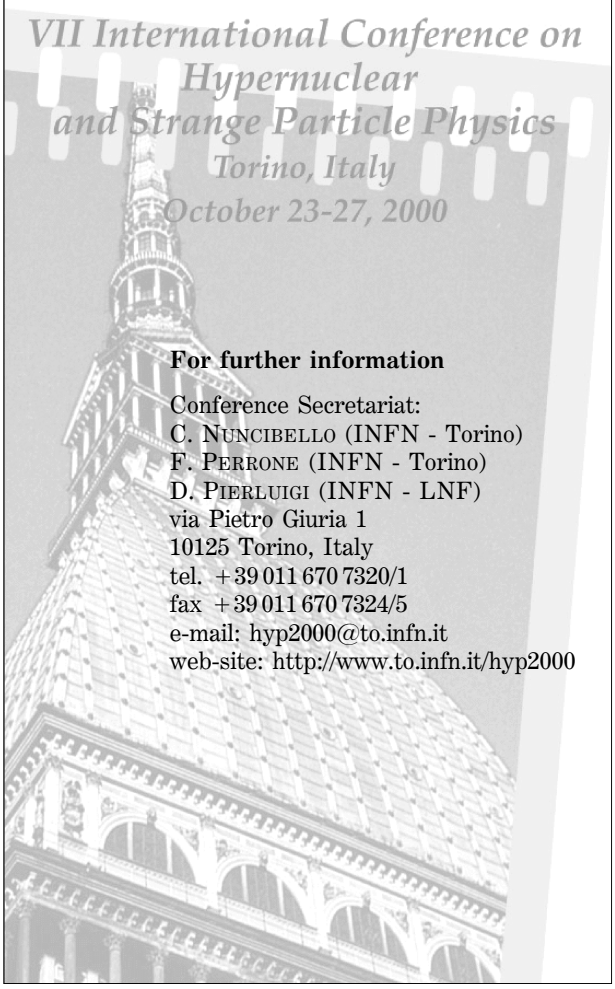
for further information: http://facs2000.fis.ufal.br
e-mail: facs2000@fis.ufal.br

Conference chairman: Dr. Marcelo Leite Lyra
Departamento de Física
Universidade Federal de Alagoas
Cidade Universitaria
57072-970 Maceió - AL Brasil
tel. +5582214-1423
fax +5582214-1645

INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Torino

HYP 2000

VII International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics
Torino, Italy
October 23-27, 2000



For further information

Conference Secretariat:
C. Nuncibello (INFN - Torino)
F. Perrone (INFN - Torino)
D. Pierluigi (INFN - LNF)
via Pietro Giuria 1
10125 Torino, Italy
tel. +39 011 670 7320/1
fax +39 011 670 7324/5
e-mail: hyp2000@to.infn.it
web-site: http://www.to.infn.it/hyp2000

European Physical Society
Nuclear Physics Division

XVIIth International Nuclear Physics Divisional Conference
Nuclear Physics in Astrophysics

Eilat, Israel

January 15-19, 2001

for further information:

Secretariat and Official Travel Agent
SECRETARIAT - Nuclear Physics
c/o UNITOURS Israel Ltd.
P.O. Box 3190, Tel Aviv 61031, Israel
Tel: +972-3-5209999
Fax: +972-3-5239299/5239099
E-mail: meetings@unitours.co.il
web: http://www.tau.ac.il/~eilat01

Summer School on Theoretical Physics

Escuela de Física, Zacatecas Autonomous University, México
July 31-August 5, 2000

Working languages are English and Spanish. The number of participants will be restricted by 40. Participants who need to obtain the Mexican visa should apply before May 31, 2000. There is no registration fee. Financial assistance is possible for few participants from developing countries. A session with small contributions from the participants will be organized. We plan also a cultural programm during the School. Proceedings will be published after the School.

Further information:

Dr. V.V. Dvoeglazov
Escuela de Física, UAZ, Apartado Postal C-580, Zacatecas, 98068, Zac., Mexico
Phone: (52 4) 924 13 14
Fax: (52 4) 924 02 86
E-mail: valeri@ahobon.reduaz.mx