

Bollettino della Società Italiana di Fisica
Nuova Serie Anno 21
N. 3 maggio-giugno 2005
N. 4 luglio-agosto 2005



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

Direttore Editoriale:
Angela Oleandri

Hanno inoltre collaborato a questo numero: G. Basini, B. Bertotti, S. Capozziello, M. Carfora, G. Chiarotti, A. De Gregorio, A. Di Giacomo, S. Focardi, A. Gigli Berzolari, V. Latora, A. Marzuoli, P. Nason, I. Ortalli, P. Picchi, G. Piragino, E. Predazzi, B. Preziosi, E. Recami, Y. Rephaeli, R.A. Ricci, O. Saavedra e N. Vittorio

Copertina a cura di Simona Oleandri

Segreteria di Redazione:
Carmen Vasini

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

Questo fascicolo è stato realizzato in Fotocomposizione dalla Monograf, Bologna e Stampato dalla Tipografia Compositori nel mese di Settembre 2005

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

© Società Italiana di Fisica
Proprietà Letteraria Riservata

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

 USPI Associato all'Unione
Stampa Periodica Italiana

SIF, Bologna

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Direttore Responsabile
Giuseppe-Franco Bassani

Vicedirettori
Sergio Focardi e Giuseppe Grosso

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

EDITORIALE

- 3 G. F. Bassani
- 4 Commiato - *R.A. Ricci*
- 5 Conferenza Inaugurale dell'Anno Mondiale della Fisica -
E. Predazzi e N. Vittorio
- 8 Spacetime in action - *B. Bertotti, M. Carfora e A. Marzuoli*
- 10 Albert Einstein e il moto Browniano - *A. Di Giacomo*
- 13 L'alba della relatività - *B. Preziosi*
- 20 L'effetto fotoelettrico e l'ipotesi di Einstein sui quanti di
luce - *G. Chiarotti*

IL NOSTRO MONDO

- 25 In memoria di Carlo Castagnoli
R.A. Ricci
- 27 Roma: con Carlo negli anni del dopoguerra
A. Gigli Berzolari
- 30 Carlo Castagnoli e la sua prima Cattedra a Parma
I. Ortalli
- 31 A Roma con il Professore tra gli anni '60 e '70
P. Picchi
- 32 In ricordo di Carlo Castagnoli
G. Piragino
- 36 XCI Congresso Nazionale, programma generale
- 38 Obituary: Francesco Melchiorri
Y. Rephaeli

PERCORSI

- 39 Via Panisperna e la radioattività indotta dai neutroni: il
coronamento di un progetto
A. De Gregorio
- 50 La scomparsa di Cesare Lattes
E. Recami
- 51 Il Laboratorio di Chacaltaya
O. Saavedra

SCIENZA IN PRIMO PIANO

- 57 Asymptotic freedom
P. Nason
- 67 Quantomeccanica, relatività e tempo
G. Basini e S. Capozziello

FISICA E ...

- 77 Reti *small world*: l'architettura di un sistema complesso
V. Latora

RECENSIONI

SCELTI PER VOI

- 89 Che fine han fatto le macchine pensanti? - Un nuovo
orologio di elevata accuratezza - HUTT

90 ANNUNCI

EDITORIALE

Questo numero de *Il Nuovo Saggiatore* è dedicato all'Anno Mondiale della Fisica 2005 del quale la Società Italiana di Fisica coordina manifestazioni nazionali e internazionali sotto l'Alto Patronato della Presidenza della Repubblica e con il patrocinio del Ministero dei Beni e della Attività Culturali e della Presidenza del Consiglio dei Ministri. Notizie sulle iniziative in corso in Italia e all'estero si possono trovare sul sito della SIF (www.sif.it) e del WYP (www.wyp2005.it).

Una manifestazione speciale che ha dato l'avvio alle molte iniziative in programma si è tenuta a Varenna il 17 e 18 giugno insieme alla Conferenza dei Presidi delle Facoltà di Scienze. Il tema scelto è stato quello delle prospettive di lavoro dei giovani fisici e un breve resoconto compare su questo fascicolo.

In seguito apparirà un numero speciale del *Giornale di Fisica* con gli Atti del Convegno.

Presentiamo in questo numero tre articoli sulle scoperte fondamentali di Einstein nell'*annus mirabilis 1905* e in essi, anche se la fama di queste scoperte è ormai acquisita, i lettori troveranno aspetti storico-critici di notevole interesse.

Come annunciato nel numero precedente il Consiglio di Presidenza della SIF ha deciso di avviare un cambio di responsabilità nella gestione delle riviste pubblicate direttamente dalla

Società. Di tali riviste è Direttore il Presidente della SIF e sono Vicedirettori:

per *Il Nuovo Saggiatore*: Sergio Focardi e Giuseppe Grosso,

per *Il Giornale di Fisica*: Giuseppe Giuliani e Rosa Maria Sperandeo-Mineo,

per *La Rivista del Nuovo Cimento*: Luisa Cifarelli e Angiolino Stella,

per *Il Nuovo Cimento B*: Giuseppe Bertin e Carlo Cercignani,

per *Il Nuovo Cimento C*: Arnaldo Longhetto.

Si è proceduto anche ad un rinnovo dei Comitati scientifici di tutte le nostre riviste e desidero pubblicamente ringraziare i fisici italiani e stranieri che hanno accettato di collaborare con noi.

A tutti loro i migliori auguri di buon lavoro con la speranza che il loro apporto contribuisca a rinviare queste nostre riviste.

Ai colleghi Antonio Bertin, Antonio Vitale, Carlo Castagnoli, Renato Angelo Ricci, Raoul Gatto, Pio Picchi, Remo Ruffini il nostro più vivo ringraziamento per la loro opera di tanti anni che ha reso possibile la continuità delle nostre riviste in tempi difficili e la loro affermazione in campo internazionale.

Al Presidente Onorario della nostra Società Carlo Castagnoli, che ci ha lasciato il 5 maggio scorso, il nostro pensiero commosso e un grato ricordo che non è destinato a spegnersi.

Commiato

A seguito dei recenti cambiamenti editoriali decisi dal Consiglio di Presidenza della SIF sono venute a cessare le mie funzioni di Direttore della Rivista del Nuovo Cimento a far data dall'1 aprile. Ciò riguarda anche i Vice-direttori Raoul Gatto e Pio Picchi, con i quali ho intrattenuto per anni un efficace oltre che affettuoso rapporto di collaborazione, che certamente ha contribuito ai successi della "Rivista" (da noi rifondata a partire dal 1984) sia in campo nazionale che internazionale.

Pur considerando che negli ultimi due anni erano emerse difficoltà nel reperire un numero sufficiente di contributi all'altezza del prestigio della Rivista verificandosi, come avviene anche nell'editoria internazionale, una minore attenzione di autori di rilievo a lavori (del resto assai impegnativi) di rassegna, l'insieme dei risultati ottenuti appare comunque significativo e tale da giustificare il notevole sforzo di recupero da noi già avviato e che verrà sicuramente proseguito e sostenuto dai nostri successori.

La direzione della Rivista verrà completamente assunta dal Presidente Franco Bassani coadiuvato dai nuovi Vicedirettori i colleghi Luisa Cifarelli e Angiolino Stella ai quali, nel trasmettere loro l'eredità del lavoro da noi compiuto, formuliamo l'augurio di operare in migliori condizioni.

4

Poiché i cambiamenti editoriali riguardano anche il "Giornale di Fisica" e "Il Nuovo Saggiatore" non posso esimermi dall'esprimere il profondo rammarico per la perdita irreparabile di Carlo Castagnoli che ha diretto per più di quarant'anni il Giornale di Fisica e a cui sono stato particolarmente e affettuosamente vicino anche come membro del Comitato di Redazione.

Comunico inoltre di aver cessato la mia partecipazione al Comitato Editoriale del Nuovo Saggiatore, un vero simbolo per me che ne sono stato fondatore nel 1985 e direttore fino al 1998. È doveroso inoltre che io esprima il mio apprezzamento e un caro saluto agli amici Antonio Bertin e Antonio Vitale che hanno anch'essi lasciato la loro funzione di Vicedirettori.

Mi preme qui rivolgere il più sentito apprezzamento a chi ha collaborato con me in tutta l'attività della SIF, innanzitutto per ciò che riguarda la Rivista e il Nuovo Saggiatore, ma anche la Direzione del Nuovo Cimento durante la

mia Presidenza e le iniziative editoriali europee (Europhysics Letters e European Physical Journal) nonché della Scuola di Varenna, in particolare Raoul Gatto, Pio Picchi, Antonio Bertin, Antonio Vitale, Andrea Taroni, Tito Arecchi, Antonio Paoletti, Remo Ruffini, Elio Sindoni, Arnaldo Longhetto, Antonino Zichichi e i compianti Claudio Villi, Nino Rubbino e Carlo Castagnoli; la staff editoriale della SIF: Angela Oleandri, Marcella Missiroli, Monica Bonetti, Paola Rucci, Paola Marangon, Cristina Calzolari, Simona Oleandri e Stefano Frabetti, senza dimenticare Anneke e Monique Van Vloten e Wolfango Valbonesi e, in particolare, per la segreteria di redazione della Rivista, Carmen Vasini (SIF) e Carla Piva (LNL) il cui aiuto è stato veramente prezioso.

Il ringraziamento va esteso a tutta la staff segretariale e amministrativa della SIF, da Gerda Wolzak a Enrica Mazzi, Barbara Alzani e Roberta Comastri, con un commosso pensiero a chi, nel corso degli anni, ci ha lasciato: Gioacchino Germanà, Paolino Papali, Elettra Tarabusi, Mirca Cassanelli, Franca Finelli e Dante Zaniboni.

Poiché con l'attenuazione delle responsabilità esplicite in ambito SIF, a parte il coordinamento delle attività riguardanti l'anno mondiale della fisica e di cui riferirò in sede congressuale, verrà gradualmente meno la mia diretta partecipazione (a fine anno lascerò anche l'incarico di membro dello Steering Committee dell'European Physical Journal alla cui promozione e al cui successo credo di aver dato un significativo contributo), colgo l'occasione per salutare e ringraziare tutti coloro che, come consiglieri e collaboratori esterni, soci e non soci della SIF, mi hanno onorato della loro amicizia e stima oltre ad assicurarmi la loro preziosa collaborazione.

Agli amici Revisori dei conti: Icilio Agostini, Giorgio Comini e Luciano Majorani un caloroso "grazie" per l'efficace cooperazione e l'affettuoso, assiduo supporto durante la nostra militanza comune.

Agli autori e lettori non solo della Rivista ma delle varie pubblicazioni della SIF, con i quali per anni ho piacevolmente interagito, un sentito ringraziamento e un carissimo saluto.

R ENATO ANGELO RICCI
Presidente Onorario



SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

CONFERENZA NAZIONALE PERMANENTE DEI PRESIDI
DELLE FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE

Conferenza Inaugurale dell'Anno Mondiale della Fisica

Physics: from school to the job market

Villa Monastero, Varenna, 17-19 June 2005

Directors: Franco Bassani, Enrico Predazzi and Nicola Vittorio



VILLA MONASTERO, VARENNA
Foto di gruppo dei partecipanti

MEETING INTERNAZIONALE A VARENNA HA INAUGURATO L'ANNO MONDIALE DELLA FISICA IN ITALIA

6 La Conferenza Nazionale dei Presidi delle Facoltà di Scienze e Tecnologie e la SIF (*Società Italiana di Fisica*), con la sponsorizzazione del MIUR e con il supporto fondamentale delle Fondazioni San Paolo e CRT, dell'INFN (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*) e delle Facoltà di Scienze MFN dell'Università di Torino e dell'Università di Roma "Tor Vergata", hanno organizzato il 17 e 18 Giugno a Varenna, nella prestigiosa cornice di Villa Monastero sul lago di Como, un Meeting internazionale di ampio respiro e di estrema rilevanza su tutti i problemi della Scienza (della Fisica in particolare) nel mondo d'oggi. Momento *clou* di molte iniziative celebrative del 2005 dichiarato *Anno Mondiale della Fisica* dall'Assemblea Generale dell'ONU, il Convegno è stata l'occasione per dare alla ricorrenza una rilevanza sovranazionale. L'evento, ricordiamolo, va visto nel quadro del centenario dell'anno straordinario in cui Albert Einstein ha pubblicato vari lavori su tre argomenti due dei quali aprono il XX secolo a quelle grandi rivoluzioni del pensiero scientifico che saranno la *Relatività* e la *Meccanica Quantistica* mentre il terzo (quello sul *moto Browniano*) supera una delle grandi controversie scientifiche del XIX secolo con la dimostrazione concreta della realtà fisica dei costituenti della materia. Al Convegno hanno dato importanti contributi i presidenti dell'INFN, dell'INAF (*Istituto Nazionale di Astrofisica*), dell'EPS (*European Physical Society*) dell'IOP (*Institute of Physics*) e di altre prestigiose istituzioni italiane ed estere e ha visto la folta e attiva partecipazione di studiosi stranieri ed italiani che hanno messo a confronto metodi d'insegnamento diverso, realtà economiche, risultati, prospettive, problemi di genere femminili nella scienza ecc. Particolarmente utile ed illustrativo il confronto tra dati statistici mondiali, europei, nordamericani, inglesi, finlandesi ed italiani (questi ultimi prodotti da quella realtà ormai essenziale che è il consorzio *Almal laurea*). Il titolo stesso *Physics: from school to the job market* dà la misura dell'ambizione e il taglio del convegno che si è posto nel solco del progetto *Lauree Scientifiche* che il Ministero (nella sua doppia componente Università e Istruzione scolastica) ha messo in opera insieme a Confindustria e alla Conferenza Nazionale dei Presidi delle Facoltà di Scienze e Tecnologie e che è attentamente seguito dai partner OCSE come

uno strumento da cui ci si aspettano risultati importanti.

In due giorni di discussione piena, vivace e costruttiva, si è fatto il punto sul difficile momento della scienza (e della fisica in particolare) in tutto il mondo industrializzato che in Italia sta preoccupando fortemente i responsabili politici (a cominciare dal Presidente della Repubblica che più volte ha attirato l'attenzione sul problema) e gli addetti ai lavori e che negli anni '90 aveva portato ad un forte calo delle iscrizioni in molte materie scientifiche (fra cui fisica). Importante il confronto tra le misure che si stanno prendendo in Italia a questo riguardo e quelle che altri paesi hanno già attuato o stanno per attuare. Unanime il consenso sul piano internazionale: il rilancio economico e scientifico di un paese passa attraverso una politica forte di incentivazione della ricerca scientifica; forte, in particolare, il ritardo dovuto ad una pluridecennale mancanza di coordinamento della politica scientifica che l'Italia deve colmare.

Molti gli interventi per i quali varrebbe la pena analizzare nei dettagli i contenuti. Gli atti del Convegno, appariranno appena possibile a cura della SIF mentre le trasparenze di tutti gli interventi e del programma, sono già consultabili presso il sito della Conferenza www.con-scienze.it

Dopo le parole introduttive del neoeletto Rettore dell'Università di Pavia, il professor Angiolino Stella che ha portato il saluto del Presidente della SIF, professor Franco Bassani e ha formalmente inaugurato l'*Anno Mondiale della Fisica* in Italia, nella lezione introduttiva, il professor Roberto Petronzio, Presidente dell'INFN, ha dato una concisa ma compiuta definizione degli scopi dell'Ente, delle sue molteplici ed intense attività di ricerca, di diffusione della cultura scientifica, di trasferimento tecnologico ecc.

Il Convegno, idealmente suddiviso in 4 sessioni, ha affrontato nella prima, la domanda "*Is the way we present Physics appropriate?*", con risposte che spaziavano dalla situazione nordamericana all'intervento del professor Riccardo Govoni, presidente dell'*Associazione Insegnanti di Fisica* (AIF) che ha puntualizzato aspettative, problemi e difficoltà dell'insegnamento della fisica nella scuola di oggi esprimendo anche alcune preoccupazioni legate al già ricordato progetto *Lauree Scientifiche* e al suo impatto su questo insegnamento.

La seconda sessione (*Undergraduate studies after Bologna*), ha affrontato sia il problema del declino dell'interesse dei giovani nella Scienza (E.

Predazzi) che quello dei rimedi possibili di cui si è fatto carico il professor Sjoerd Wendelaar Bonga di Nijmegen che sta organizzando, su questi temi, una grossa conferenza OCSE in programma per l'autunno ad Amsterdam. Altre relazioni hanno fatto riferimento a dati interessantissimi raccolti in Finlandia e presentati dal professor Jari Lavonen (Helsinki) cui ha fatto seguito una messa a punto preparata dalla professoressa J. Immè sugli studi in fisica in Italia dopo la riforma universitaria. La sessione si è conclusa con una dettagliata presentazione del progetto *Lauree Scientifiche* (N. Vittorio) che è ormai in fase di imminente decollo.

La terza sessione ha affrontato un problema centrale agli studi di fisica e da essi inscindibile e cioè *Research in Physics* che ha visto interventi di grande interesse sugli studi di dottorato in Europa (L. Donà dalle Rose), sulla loro collocazione nel mondo del lavoro (E. Vittone), sul ruolo dell'Unione Europea nell'ambito del VII programma quadro (R. Bilyalov) e del futuro della ricerca in Europa (S. Parker). Di grande peso la ricognizione sul ruolo del CERN in quest'ambito fatta dal professor Luciano Maiani nella sua veste di ex Direttore Generale del CERN stesso.

La quarta ed ultima sessione (*The job market in Physics*) ha avuto anch'essa momenti di grande interesse. Il dr. Giovanni Carrada, un giovane ma esperto collaboratore di Piero Angela, ha illustrato un suo libretto che, commissionato dalla Conferenza dei Presidi di Scienze, è appena apparso e conduce il lettore ad un approfondito esame delle problematiche legate al problema della comunicazione scientifica. Hanno fatto seguito interventi di Robert Lambourne sul mercato del lavoro europeo per i fisici, di Marilena Bianchi Streit sul trasferimento tecnologico e di Andrea Cammelli sui dati sempre più attuali e interessanti che è in grado di fornire oggi Almalaurea. La sessione si è chiusa con un intervento a tutto campo del presidente dell'INAF, il professor Piero Benvenuti che prima ha concisamente portato l'uditorio ad una rapida passeggiata nel Cosmo e ha poi concluso con una rassegna delle grandi novità in questo settore che, lungi dal subire la contrazione del

resto delle discipline fisiche, appare in piena espansione.

La lezione conclusiva sul problema sempre più attuale e difficile della collocazione dell'altra metà dell'Universo (quello femminile) nel mondo della scienza oggi (*The role of women in science today*), è stata fornita dalla prof.ssa Sveva Avveduto del CNR che ha sottolineato le difficoltà di ogni tipo incontrate dalle donne scienziato e che altri interventi avevano già puntualizzato. Si pensi, ad esempio, che, partendo da una situazione in cui vi sono leggermente più studentesse che studenti (52% contro il 48%), in Europa vi è solo l'11.4% di donne che arrivano a diventare ordinario (e negli USA è peggio). Mediamente, poi, la popolazione di studenti che all'Università si iscrivono a Fisica è solo per un terzo di ragazze.

Il Presidente della IOP (*Institute of Physics*), il professor John Enderby ha poi formalmente chiuso il Convegno che ha avuto peraltro una simpatica coda dopocena in cui il Presidente Onorario della SIF professor Renato Ricci si è impegnato in una divertente ma seria analisi non solo del Convegno e non tanto degli obiettivi raggiunti e messi a fuoco quanto, ancora più, del significato sociologico degli studi di fisica nel mondo moderno.

Malgrado il rammarico per le non molte ma significative defezioni che hanno visto all'ultimo momento la componente ministeriale e confindustriale impossibilitate a partecipare, il Convegno ha avuto un notevole successo sia per la mole dei risultati presentati, sia per l'ampia discussione, sia per l'attualità del tema proposto sia, infine per la completezza evidenziata, per la rimarchevole partecipazione di ospiti italiani e stranieri. Di questo successo va dato atto anche agli sponsor già citati per aver contribuito così validamente alla sua buona riuscita. La riflessione finale è che momenti di questa ampiezza possano e debbano essere proposti con maggiore assiduità.

E. PREDAZZI

Università di Torino

N. VITTORIO

Università di Roma "Tor Vergata"

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
Manifestazione nell'ambito delle Celebrazioni
dell'anno mondiale della Fisica



Fig. 1. – Il francobollo dell'Anno mondiale della Fisica emesso con annullo speciale durante la conferenza. La vignetta raffigura, in primo piano un diagramma di Feynman affiancato dallo schema rappresentativo della creazione di un Buco Nero in un collasso stellare. Nel descrivere graficamente la generazione dell'orizzonte degli eventi è stato utilizzato il logo dell'anno mondiale della fisica. Sullo sfondo è riprodotta una xilografia cinquecentesca di Gerolamo de Sanctis raffigurante la città universitaria di Pavia.

Nel 2005 cade un anniversario significativo: il centenario della pubblicazione dell' articolo di Albert Einstein del 1905 che segna la nascita della teoria della Relatività Speciale con le sue straordinarie applicazioni fisiche. Nello stesso *annus mirabilis* il giovane scienziato (nato nel 1879) pubblica sugli *Annalen der Physik* altri quattro lavori che riguardano la struttura atomica della materia, l'equivalenza fra massa e energia, e l'effetto fotoelettrico che gli valse il premio Nobel assegnato nel 1922. Difficilmente nella storia della Scienza si ricorda una successione tanto impressionante di contributi fondamentali che hanno mostrato la potenza creativa dell'ingegno umano.

Come nel caso della Relatività Speciale, ciascuno di questi risultati ha contribuito a rivoluzionare il pensiero scientifico moderno e ha impresso una traccia indelebile sulla cultura umana. Non sorprende quindi che, per celebrare il centenario dell'

8



Fig. 2. – Una litografia del cosmologo artista Jean-Pierre Luminet: Spazio, Tempo, e Materia.

annus mirabilis Einsteniano, le Nazioni Unite abbiano adottato, nell'Assemblea Generale del 10 Giugno 2004, la Risoluzione n. 58/293 che dichiara il 2005 *Anno Mondiale della Fisica*. Le motivazioni sono le seguenti:

La Fisica fornisce una base fondamentale per lo sviluppo della nostra comprensione della Natura.

La Fisica e le sue applicazioni sono alla base di gran parte degli sviluppi tecnologici moderni.

La Fisica fornisce agli uomini e alle donne gli strumenti per costruire le infrastrutture scientifiche essenziali per lo sviluppo.

Le Nazioni Unite hanno quindi affidato all'UNESCO il coordinamento delle attività celebrative per l'Anno Mondiale della Fisica in collaborazione con i governi nazionali, e coinvolgendo il grande pubblico con iniziative che, nell'illustrare la figura di Albert Einstein, evidenzino il ruolo fondamentale della cultura scientifica per il progresso dell'Umanità.

Nel 1895 e 1896 il giovane Einstein trascorse parecchi mesi della sua adolescenza a Pavia, ove la famiglia aveva un'impresa di costruzioni elettriche; sereni e liberi, quei mesi furono sempre da lui ricordati con grande piacere e nostalgia, come appare dalla corrispondenza con Ernesta Marangoni, conservata nel Museo della Storia dell'Università. Considerato quindi il ruolo particolare che la città di Pavia riveste nella biografia dello scienziato, l'Università degli Studi di Pavia ha ritenuto di assumere un ruolo guida nelle celebrazioni einsteiniane a livello nazionale e internazionale, e dal 29 marzo al 2 aprile 2005, ha ricordato il centenario del 1905 con una serie di importanti eventi culturali di natura artistica e scientifica. La manifestazione pavese è stata appropriatamente chiamata *Spacetime in action: 100 years of relativity* per esprimere la straordinaria proliferazione e le innumerevoli applicazioni del concetto di spaziotempo. Essa ha avuto il patrocinio di parecchie istituzioni, tra le quali la Società Italiana di Fisica. Al suo centro un convegno scientifico di alto livello, con 20 relatori su invito, ha permesso, in sessioni ben frequentate e ricche di numerose discussioni, di mettere a fuoco le radici passate, lo stato presente e gli sviluppi futuri della relatività nei campi della fisica teorica e matematica, dell'astrofisica relativistica, della gravitazione sperimentale e della fisica fondamentale. Tutte le relazioni sono disponibili in rete



Fig. 3. – Ultimo Racconto: La scultura realizzata appositamente per la conferenza dal maestro Carlo Mo.

sul sito ufficiale del convegno: <http://www.pv.infn.it/~spacetimeinaction/>. Al primo relatore, J. Ehlers, che ha trattato il tema «*The rise of a genius: Einstein's annus mirabilis*», è stata consegnata la Medaglia Volta del Dottorato di Fisica dell'Università per i suoi meriti di fisico e didatta. In questa occasione il Ministero delle Poste e Telecomunicazioni ha emesso un francobollo speciale di € 0,85 dedicato al 2005 quale Anno Mondiale della Fisica (vedi fig. 1); il ministro Gasparri è intervenuto alla cerimonia inaugurale. Due mostre artistiche hanno accompagnato i lavori scientifici. Quella di J.-P. Luminet, noto cosmologo, e anche relatore, comprendeva parecchie litografie aventi per soggetto simmetrie in universi senza fine (vedi fig. 2); C. Mo (purtroppo scomparso poco prima del convegno) ha esposto nei giardini dell'Università sculture in acciaio di grande fascino geometrico (vedi fig. 3). Per celebrare il rapporto particolare che Einstein aveva con la musica è stato anche organizzato, dal gruppo «Concerto Vago» diretto dal Maestro M. Lonardi, un affascinante concerto di alcune rare canzoni da battello del '700 veneziano. Una ricca mostra di lettere autografe di Einstein e di molti altri documenti ha permesso di apprezzare il rapporto particolare che Einstein ebbe con Pavia e un interessante episodio della storia industriale della città.

BRUNO BERTOTTI
MAURO CARFORA
ANNALISA MARZUOLI
Università di Pavia



In occasione dell'Anno della Fisica, a cui questo numero del Nuovo Saggiatore è dedicato, si è pensato di presentare tre articoli critici sulle scoperte importanti di Einstein dell'annus mirabilis.

È certamente di interesse a un secolo di distanza cercare di capire come siano nate le tre idee fondamentali che hanno cambiato il volto della fisica.

ALBERT EINSTEIN E IL MOTO BROWNIANO

A. Di Giacomo

*Dipartimento di Fisica E. Fermi,
Università di Pisa, INFN Sezione di Pisa*

1. - Introduzione

Nel 1905 Albert Einstein, ventisei anni e non ancora Phd, produce tre lavori fondamentali che hanno cambiato il modo di pensare nella ricerca scientifica.

- 1) La teoria della relatività ristretta⁽¹⁾.
- 2) La teoria dei fotoni e l'effetto fotoelettrico⁽²⁾.
- 3) La teoria del moto Browniano⁽³⁾.

Per celebrare il centennale di queste scoperte l'anno 2005 è stato dichiarato dall'UNESCO "Anno della Fisica".

I tre lavori trattano argomenti diversi, ma hanno molto in comune nel metodo e nel tipo di problematica: affrontano problemi all'epoca controversi, in cui fatti sperimentali mettono in crisi modi di pensare consolidati. L'esperimento di Michelson contro l'esistenza di un riferimento assoluto; l'esistenza del quanto di radiazione richiesto dallo spettro del corpo nero a fronte dell'elettromagnetismo classico; l'osservazione del moto Browniano a fronte del secondo principio della termodinamica.

Tutti e tre i lavori propongono soluzioni tecnicamente semplici ma profonde e rivoluzionarie al tempo stesso. L'indipendenza dal riferimento della velocità della luce e il principio di relatività per i fenomeni elettromagnetici e meccanici. L'esistenza del quanto come particella di massa nulla (fotone). La validità della meccanica statistica e una discussione critica del concetto di microscopico e macroscopico.

Tutti e tre i lavori sono stati pienamente confer-

mati dalle osservazioni sperimentali e dagli sviluppi teorici successivi e sono diventati patrimonio scientifico, ma non senza difficoltà e opposizioni. Personaggi di grande rilievo nella comunità scientifica hanno osteggiato per anni la teoria della relatività: tra di essi Henry Poincaré che pure aveva sviluppato prima di Einstein la matematica delle trasformazioni di Lorentz. Max Planck, lo scopritore dei quanti di luce, considerava azzardato il lavoro di Einstein sui fotoni. Il lavoro sul moto Browniano, che assumeva come principio la meccanica statistica e la struttura atomico-molecolare della materia, cadeva in un'epoca in cui le idee di Boltzman sulla termodinamica come meccanica statistica non erano universalmente accettate, e con esse la struttura atomica stessa^(4,5).

In questa breve nota discuteremo gli aspetti essenziali del lavoro sul moto Browniano e gli sviluppi sperimentali successivi di Jean Perrin⁽⁶⁾, che portarono alla conferma definitiva della struttura atomica della materia e alla misura del numero di Avogadro.

2. - Il moto Browniano⁽⁶⁾

Nel 1828 Robert Brown, un botanico inglese, osservò che particelle di polline sospese in acqua sono soggette a un movimento continuo e vivace. Il fenomeno era stato già osservato da Lazzaro Spallanzani nel 1670, ma Brown che per primo poté disporre di un microscopio corretto per le aberrazioni cromatiche poté per primo averne immagini chiare e precise.

Un'idea del moto è data dalla fig. 1 che è tratta dal famoso libro di J. Perrin "Les Atomes"⁽⁶⁾. Nella figura una sospensione colloidale di particelle uguali di raggio $0,5\ \mu\text{m}$ viene fotografata al mi-

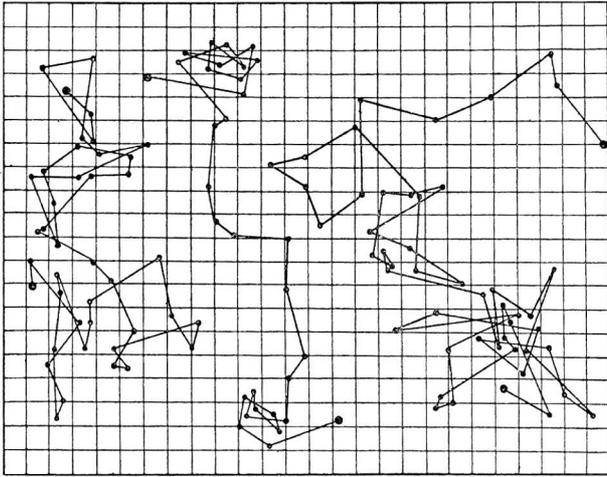


Fig. 1. – Moto Browniano fotografato a intervalli di 30 s proiettato sul piano orizzontale. Sedici divisioni reticolari corrispondono a 50 μm . Le particelle in sospensione sono tutte uguali e hanno raggio 0,5 μm .

croscopio ogni 30 s. Sedici divisioni del reticolo corrispondono a 50 μm . Il moto a zig zag è proiettato su un piano. La prima ipotesi dopo l'osservazione del moto fu che l'energia corrispondente fosse di origine biologica. Brown stesso esclude questa ipotesi osservando l'effetto con particelle di origine inorganica, ma essa tornò ad essere proposta a più riprese nei decenni successivi.

Esperimenti successivi mostrarono che il movimento è perpetuo: in un recipiente isolato persiste per anni. Esso non è correlato a campi elettrici o magnetici esterni, nè a correnti convettive nel liquido. È più veloce per particelle più piccole e per liquidi meno viscosi.

Il punto chiave della discussione era il seguente: una particella di polline è un corpo macroscopico, e come tale deve obbedire alle leggi della termodinamica, in particolare alla seconda. Di conseguenza deve cadere in fondo al liquido convertendo in calore la sua energia meccanica. Il moto browniano è come se un sasso saltasse spontaneamente dal pavimento su un tavolo, convertendo in energia meccanica l'energia termica fornita da una sola sorgente, il che viola la seconda legge della termodinamica.

Nella teoria cinetica del calore è possibile che una singola molecola (particella microscopica) si muova in un gas guadagnando energia potenziale. Ma anche accettando la teoria cinetica del calore (il che non era all'inizio del '900) come si fa a decidere se un corpo è microscopico o macroscopico?

Una ulteriore difficoltà stava nella velocità media v osservata nel moto browniano: come si vede dalla fig. 1 essa è $\approx \mu\text{m/s}$. La teoria cinetica dei gas

prevederebbe ingenuamente

$$(1) \quad v = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{RT}{Nm}},$$

dove R è la costante dei gas, N il numero di Avogadro, m la massa effettiva della particella, che include la spinta di Archimede. Si sapeva dalla stima dello spessore di strati monomolecolari di olio che $N \geq 10^{22}$. Per le molecole di polline $m \approx 10^{-14}$ g e a $T = 300$ K l'eq. (1) dà $v \approx \text{cm/s}$.

In realtà l'eq. (1) non è corretta per un corpo che si muove in un liquido viscoso.

L'idea semplice e rivoluzionaria di Einstein è che la meccanica statistica vale per tutti i gradi di libertà di un sistema, e quindi per corpi di qualunque grandezza: la differenza tra macroscopico e microscopico è solo quantitativa. Un sasso può saltare spontaneamente su un tavolo, ma questo è estremamente improbabile.

3. – La teoria di Einstein

Una particella di massa m di dimensioni grandi rispetto alle distanze intermolecolari si muove in un fluido con equazione

$$(2) \quad m\vec{a} = \vec{F} - B\vec{v},$$

dove \vec{F} è la forza esterna, ad esempio il peso, e $-B\vec{v}$ è la forza di attrito viscoso. Se il liquido bagna la particella è facile calcolare B (7)

$$(3) \quad B = 6\pi a\eta,$$

dove a è il raggio della particella e η la viscosità. Per l'acqua a 300 K $\eta = 0,0105 \text{ dyn} \times \text{s/cm}^2$.

A regime l'eq. (2) prevede una velocità

$$(4) \quad \vec{v} = \frac{\vec{F}}{B},$$

che viene raggiunta in un tempo $\tau \approx \frac{m}{B}$. Secondo la teoria classica nel moto Browniano la particella raggiunge il fondo con velocità \vec{v} . Secondo la teoria cinetica, in assenza di forze esterne la probabilità di trovare la particella nel volume d^3x è

$$(5) \quad dP = \frac{d^3x}{V},$$

dove V è il volume del liquido. In presenza di gravità

$$(6) \quad dP = Ce^{-mg\frac{z}{RT}},$$

dove z è la quota. La densità di corpuscoli in funzione della quota è perciò

$$(7) \quad n(z) = n(0) \exp\left[-mg\frac{zN}{RT}\right] \equiv n(0) \exp[-z/L],$$

dove si è posto $L \equiv \frac{RT}{Nmg}$. Per $m = 10^{-14}g$ $L \approx 50 \mu m$ dell'ordine di quello osservato.

L'equilibrio meccanico richiede che il peso sia equilibrato dal gradiente di pressione

$$(8) \quad \frac{dp}{dz} = -mgn(z) = \frac{RT}{N} \frac{dn}{dz}$$

e siccome sia p che n si annullano a grandi quote

$$(9) \quad p = \frac{nRT}{N}$$

I corpuscoli sospesi producono pressione osmotica e obbediscono l'equazione di Van'tHoff ossia l'equazione dei gas perfetti.

L'equilibrio "chimico" comporta che il flusso verso il basso Φ_- di particelle dovuto alla forza peso sia compensato dalla diffusione Φ_+ dalle zone più dense a quelle meno dense.

$$(10) \quad \begin{aligned} \Phi_- &= \Phi_+, \\ \Phi_- &= nv = nmg/B, \\ \Phi_+ &= -D \frac{dn}{dz}. \end{aligned}$$

Si è usata per v l'eq. (4). D è il coefficiente di diffusione. Dall'eq. (10) si ha

$$(11) \quad D = \frac{RT}{NB} = \frac{RT}{6\pi a \eta}$$

Si è fatto uso dell'eq. (3). Dalla misura del coefficiente di diffusione si può determinare il numero di Avogadro, se le particelle hanno tutte lo stesso raggio a .

4. - Le conferme sperimentali

Jean Perrin, che era un fine sperimentatore, realizzò delle sospensioni colloidali di particelle uguali, di cui osservò il moto Browniano.

Misurò la dipendenza dalla quota della densità e con essa il parametro L dell'eq. (7) dando così una determinazione di N .

Misurò anche il coefficiente di diffusione D con due metodi diversi.

1) Se si osserva il moto di una particella sospesa a intervalli uguali di tempo τ , come nella fig. (1), e si chiama \vec{R}_i la posizione all' i -esimo passo ($\vec{R}_0 \equiv 0$), si ha

$$(12) \quad \begin{aligned} \vec{R}_i &= \vec{R}_{i-1} + \vec{\Delta}_i, \\ R_i^2 &= R_{i-1}^2 + \Delta_i^2 + 2\vec{R}_{i-1} \cdot \vec{\Delta}_i. \end{aligned}$$

L'ultimo termine dà zero in media perché $\vec{\Delta}_i$ è distribuito isotropicamente. Pertanto

$$(13) \quad \frac{\langle R_i^2 \rangle}{i\tau} = \frac{\langle \Delta_i^2 \rangle}{\tau} = D.$$

Il moto è tanto più vivace quanto più D è grande,

cioè per l'eq. (11) quanto più piccole sono le particelle e meno viscoso il mezzo, in accordo con l'esperienza. La distribuzione della distanza percorsa \vec{R} dopo un tempo t è data da

$$(14) \quad W(\vec{R})d^3R = \frac{1}{(2\pi Dt)^{3/2}} \exp[-R^2/Dt] d^3R.$$

L'eq. (14) è stata verificata da Perrin e da essa è stato determinato il coefficiente di diffusione D e quindi il numero di Avogadro.

2) Il numero di particelle $\nu(t)$ che si depositano su una superficie assorbente in un tempo t sono quelle che la raggiungono per diffusione in direzione perpendicolare alla superficie nel tempo dato, cioè

$$(15) \quad \nu(t) = \int d\Delta \Delta \exp[-\Delta^2/Dt] (4\pi Dt)^{-1/2} = n \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

I valori trovati per N da Perrin sono 64×10^{22} dalla diffusione; 68×10^{22} dalla distribuzione con la quota; 68×10^{22} dall'adsorbimento. Il valore ufficiale attuale è $N = 60,2214 \times 10^{22}$. Nel 1926 a J. Perrin fu conferito il premio Nobel per la Fisica per questi suoi risultati.

5. - Conclusioni

L'elaborazione teorica di Einstein e gli esperimenti da lui proposti permisero di provare in maniera definitiva la struttura atomica della materia.

I fondamenti della meccanica statistica erano posti su solide basi.

Soprattutto veniva dimostrata la capacità della mente umana di elevarsi con semplicità e modestia al di sopra di preconcetti e convenzionalismi.

6. - Nota storica.

Contributi alla discussione del Moto Browniano sono pubblicati sul Nuovo Cimento da Giovanni Cantoni nel vol. 16 (1862) pag. 306.

Bibliografia

- (1) A. EINSTEIN, *Zur Elektrodynamik bewegter Koerper*, Ann. Phys. (Leipzig) 17, 891 (1905)
- (2) A. EINSTEIN, *Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Ann. Phys. (Leipzig) 17, 132, (1905).
- (3) A. EINSTEIN, *Ueber die von der molekularinetischen Theorie der Waerme geforderte Bewegung von in ruhenden Fluessigkeiten suspendierten Teilchen* Ann. Phys. (Leipzig) 17 (1905) 549.
- (4) H. POINCARÉ, *Thermodynamique* (Gauthier-Villars, Paris) 1908.
- (5) H. POINCARÉ, *La Valeur de la Science* (Flammarion, Paris) 1907, Cap. VIII.
- (6) JEAN PERRIN, *Les Atomes* (Alcan, Paris) 1913.
- (7) L. LANDAU e E. LIFSHITZ, *Corso di Fisica Teorica*, Vol. IV (Editions de la Paix, Mosca) 1966, par. 20.

L'ALBA DELLA RELATIVITÀ

B. Preziosi

*Dipartimento di Scienze Fisiche
Università Federico II, Napoli*

1. – Il concetto di etere prima di Maxwell

Il concetto di etere è molto antico ed era considerato il supporto di vari fenomeni con caratteristiche in parte dipendenti dai fenomeni in considerazione.

Nel campo dell'ottica, fu utilizzato da Huygens per spiegare la propagazione della luce in uno schema in cui la sorgente trasmetteva all'etere una perturbazione ondulatoria che si propagava seguendo il "principio di Huygens"; la perturbazione poteva essere una sovrapposizione di frequenze diverse che davano spiegazione dei diversi colori. Nello schema di Huygens la propagazione aveva caratteristiche identiche a quelle che caratterizzavano la propagazione delle onde sonore. La differenza sostanziale era che, mentre nel caso delle onde sonore la perturbazione era trasmessa dal mezzo (aria), nel caso della luce la trasmissione avveniva anche in assenza di materia, per cui tornava utile ipotizzare l'etere.

Tale schema si prestava meglio dell'ipotesi corpuscolare di Newton ad interpretare fenomeni quali l'interferenza e la diffrazione, anche se andò un po' in crisi quando si trattò di interpretare il fenomeno della polarizzazione. A seguito di un esperimento di François Arago, in cui due onde polarizzate a 90 gradi non esibivano fenomeni di interferenza, Augustin Jean Fresnel fu portato ad introdurre il concetto di onde trasversali, di tipo elastico, rimanendo peraltro nello schema di Huygens. Questo fatto implicava che l'etere dovesse avere proprietà di grande rigidità, altrimenti riusciva difficile spiegare la grandezza della velocità della luce. Nonostante ci fossero perplessità, soprattutto connesse con il moto libero dei corpi in un universo pervaso da questo etere rigido, l'ipotesi di Fresnel fu mantenuta in grande considerazione, perché riusciva a spiegare molte cose.

Nel 1810 Arago propose un esperimento in cui un prisma di vetro, posto all'estremità di un telescopio, avrebbe dovuto rifrangere la luce proveniente da una stella prossima al piano dell'eclittica in modo diverso a seconda della velocità della stella e della velocità della Terra durante il suo moto di rivoluzione. In particolare Arago si aspettava una distanza focale diversa tra quando

la Terra si muoveva verso la stella e quando si muoveva in senso opposto. Gli esperimenti proposti da lui ed anche ripetuti da altri dettero risultato negativo. Fu ancora Fresnel a risolvere la questione supponendo che il vetro del prisma contenga una quantità di etere per unità di volume ρ_g diversa dalla densità dell'etere nell'aria ρ_a ; queste due quantità devono essere proporzionali con un fattore che dipende dall'indice di rifrazione nella forma $\rho_g = n^2 \rho_a$. In conclusione la velocità V della luce nel vetro in movimento è legata alla velocità $v = \frac{c}{n}$ della luce nel caso il cui il vetro sia fermo rispetto all'etere dalla relazione

$$\frac{V}{c} = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

dove il coefficiente in parentesi prende il nome di coefficiente di trascinamento di Fresnel. Con questa correzione $\frac{V}{c}$ è indipendente da v e il risultato nullo dell'esperimento di Arago è fatto salvo.

L'esperimento con cui Fizeau, nel 1851, misurò la velocità della luce nell'acqua in movimento con velocità v confermò perfettamente la precedente relazione. Una variante dell'esperimento di Fizeau fu realizzata nel 1868 da Hoek con identico risultato.

2. – La teoria elettromagnetica di Maxwell e problemi connessi

Con l'avvento delle equazioni di Maxwell fu confermata la trasversalità e nel contempo non fu necessario ricorrere ad un supporto rigido per spiegare la propagazione delle onde luminose o, utilizzando il nuovo linguaggio, delle onde elettromagnetiche. Semplicemente le cariche e le correnti creano dei campi elettrici e magnetici che si propagano nel vuoto con la velocità della luce. L'etere inteso come supporto per le onde luminose scompariva, ma riappariva sotto la veste di sistema di riferimento in cui erano valide le equazioni di Maxwell.

Infatti, il principio di relatività di Galilei, secondo cui all'interno di un vascello in moto uniforme rispetto alla terra e senza sobbalzi o oscillazioni le cose vanno come sulla terra, era stato ripreso e precisato cinquant'anni dopo da Newton:

1) osservatori inerziali, ossia osservatori associati a corpi sufficientemente lontani da altri corpi, vedono gli altri corpi, sufficientemente lontani dagli altri, muoversi di moto rettilineo uniforme;

2) il tempo è assoluto: $t = t'$ (in particolare, se due eventi sono simultanei per gli osservatori solidali con un sistema inerziale, lo sono anche per gli osservatori degli altri sistemi inerziali).

Le conseguenti trasformazioni di Galilei implicano che, se un osservatore inerziale O' vede l'osservatore O muoversi con velocità v' , un corpo che si muove rispetto ad O con velocità v verrà visto da O' muoversi con velocità $v + v'$.

La pubblicazione delle equazioni di Maxwell pose subito ai fisici dell'epoca un grosso problema. In tali equazioni compare esplicitamente la velocità $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ con cui si muove la luce nel vuoto, che, in base alle trasformazioni di Galileo, avrebbe dovuto cambiare il suo valore nel passare da un sistema di riferimento ad un sistema in moto rispetto ad esso. Un modo per evitare la contraddizione era di supporre che tali equazioni valessero solo in un particolare riferimento, il sistema dell'etere; in tal caso si sarebbero potuti effettuare esperimenti per misurare la velocità del nostro sistema terrestre rispetto all'etere.

3. – Esperimenti connessi con l'elettrodinamica

Citerò qui solo e molto schematicamente gli esperimenti precedenti il 1905.

Il più importante e sofisticato esperimento che aveva lo scopo di misurare questa velocità fu quello di Michelson del 1881, ripetuto con maggiore accuratezza da Michelson e Morley nel 1887. In tale esperimento, un fascio di luce monocromatica veniva "splittato", da uno specchio semitrasparente, in due raggi che procedevano in direzioni perpendicolari e che, opportunamente riflessi, si sovrapponevano di nuovo dando luogo a delle frange di interferenza. Se l'apparato sperimentale veniva ruotato, si sarebbe dovuto vedere, nell'ipotesi che la Terra si muovesse rispetto all'etere e sulla base delle leggi di composizione delle velocità previste dalle trasformazioni di Galileo, uno spostamento di tali frange. Il risultato, nullo, dell'esperimento sembrava indicare che la Terra non fosse in moto rispetto all'etere, ossia che l'etere fosse solidale con la Terra e la seguisse nel moto di rivoluzione intorno al Sole. Lorentz e Fitzgerald trovarono che il risultato nullo di tale esperimento si sarebbe spiegato se si faceva l'ipotesi che le lunghezze si contraggono di un fattore $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ nella direzione del moto.

Quest'ultima conclusione cozzava contro il ben noto fenomeno dell'aberrazione. Gli astronomi sapevano che, per poter osservare una stella allo zenith, dovevano inclinare il telescopio in modo che, mentre il telescopio si muoveva seguendo il moto di rivoluzione della Terra, la luce, entrata nel telescopio, potesse procedere verso il basso senza urtare con le pareti del telescopio. Questo avveniva quando l'inclinazione α era $\tan\alpha = \frac{v}{c}$. Airy, nel 1871, aveva verificato che l'aberrazione c'era anche quando il telescopio veniva riempito d'acqua, con inclinazione data dalla stessa espressione (c essendo ora la velocità della luce nell'acqua).

Un altro esperimento del 1901-03, che porta il nome dei realizzatori F. T. Trouton e H. R. Noble, prevedeva, come suggerito da George Fitzgerald, che un condensatore carico a piatti paralleli, sospeso solidalmente alla Terra, dovesse essere sottoposto a torsione a causa del moto rispetto all'etere. Anche questo dette risultato nullo. È interessante notare che W. C. Roentgen tentò un esperimento dello stesso tipo nel 1888, ma giudicò l'esperimento un fallimento.

Infine vanno menzionati gli esperimenti di Walter Kaufmann condotti a partire dal 1901 (*Goettinger Nachrichten*, 1901 v. 1, 1902 v. 5, 1903 v. 33) che suscitavano l'interesse di vari contemporanei. In tali esperimenti, raggi β diretti lungo x subivano l'azione di un campo elettrico e di un campo magnetico, entrambi "uniformi" ed entrambi diretti lungo y . Tali raggi venivano raccolti su una lastra fotografica perpendicolare ad x . La curva, nel piano (y, z) , delle tracce lasciate dai vari β non rispettava la traiettoria parametrica $y = \frac{eEa}{mv^2}$, $z = \frac{eHb}{mv}$ (con a e b fissati dalla geometria dell'apparato) prevista, nell'analisi di Kaufmann, dalla forza di Lorentz. Le cose miglioravano se si usava, per eguagliare la forza magnetica e la forza centripeta, la relazione $qvb = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{v^2}{r}$ (introducendo

la correzione $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$). Anche così non si rientrava negli errori sperimentali dati da Kaufmann. È interessante notare che il primo lavoro, della fine del 1905, in cui è citato il lavoro di Einstein sulla relatività speciale è proprio di Kaufmann, il quale osserva, in una sua nota su *Annalen der Physics* del 30 Novembre 1905:

"Inoltre, va menzionata una recente pubblicazione del signor Einstein sulla teoria della relatività, che porta a risultati formalmente identici a quelli della teoria di Lorentz[...]. I risultati delle mie misure non sono compatibili con

le ipotesi fondamentali di Lorentz-Einstein.”

Interessante la reazione di Lorentz in una lettera a Poincaré:

“Unfortunately my hypothesis of the flattening of electrons is in contradiction with Kaufmann results, and I must abandon it. I am, therefore, at the end of my Latin.”

La reazione di Einstein, pubblicata in un articolo di rassegna del 1907, è più pacata:

“Sarà possibile decidere se i fondamenti sulla teoria della relatività sono attendibili solo quando una grande varietà di osservazioni sarà disponibile ...”

Walter Ritz fece una accurata analisi dell'esperimento in questione, ma fu solo Planck (*Physikalische Abhandlungen un Vortraege*, 2, 121-35 (1906), 210-14(1907)) a dirimere la questione con una accurata ricostruzione dell'esperimento, con particolare attenzione alle valutazioni dei campi elettrico e magnetico di Kaufmann. L'esperimento di Kaufmann fu ripetuto da Bucherer nel 1908 e, successivamente da altri, confermando la compatibilità con le ipotesi di Einstein.

4. – Lorentz e Poincaré

Il lavoro di Lorentz è di grande rilevanza perchè tende a spiegare, in termini della particella elementare “elettrone”, l'elettrodinamica macroscopica di Maxwell. Questo già dal 1892, ossia sei anni prima che J. J. Thomson riuscisse ad effettuare misure sulla carica dell'elettrone.

In questo senso il lavoro di Lorentz è pionieristico. L'elettromagnetismo di Maxwell, espresso in termini di densità di corrente e densità di carica, veniva da Lorentz ricondotto al comportamento di particelle con carica elementare, da cui, attraverso operazioni di media, era possibile ricostruire i comportamenti macroscopici indicati da Maxwell. Le cariche elementari, positive e negative, generano un campo, di cui altre cariche risentono; quando gli elettroni sono in moto qualsiasi, ad esempio oscillatorio, anche i campi sono variabili col tempo e, in accordo con le equazioni di Maxwell, si propagano nell'etere sotto forma di onde elettromagnetiche. Lorentz intuì che un forte campo magnetico avrebbe agito sugli elettroni, generatori del campo elettromagnetico, in modo da modificare la struttura delle onde generate (il che fu verificato dal suo allievo Zeeman).

Allo scopo di spiegare gli esperimenti relativi alla propagazione della luce nell'etere ed i risultati negativi dell'esperimento di Michelson e Morley,

Lorentz propose che corpi, che si muovono a velocità prossima a quella della luce, si contraggono nella direzione del moto (tale ipotesi fu suggerita simultaneamente da Fitzgerald). Questo comportava che la prima delle relazioni che esprimono la relatività galileiana andasse corretta per questo fattore di contrazione; ma la cosa più sconvolgente era che anche la seconda relazione ($t' = t$) andava modificata. In altre parole non era più accettabile che la simultaneità fosse un fatto assoluto (due eventi simultanei per un osservatore non lo erano per un altro osservatore). Lorentz fu portato a introdurre il concetto di tempo proprio o tempo locale, per individuare la durata di un fenomeno da parte di un osservatore fermo rispetto al punto in cui il fenomeno stava evolvendo. Già nel 1899 Lorentz aveva pubblicato (*Zittingsverslag Akad. v. Wet*, 7, 1899, p. 507; *Amsterdam Proc.* 1898-99, p. 427) una trasformazione che rendesse conto della propagazione nei mezzi in movimento e della contrazione delle lunghezze necessaria per spiegare l'effetto nullo dell'esperimento di Michelson:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t - \frac{vx}{c^2}.$$

Nel maggio 1904 Lorentz, nel suo articolo *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, pubblicato su *Proceedings de l'Academie d'Amsterdam*, ritorna sull'argomento. Poincaré aveva infatti sollevato il problema che la teoria proposta era troppo legata alla necessità di spiegare fatti sperimentali e che in questo modo la teoria inseguiva gli esperimenti. Con grande correttezza intellettuale, in tale articolo Lorentz scrive: “Surely this course of inventing special hypotheses for each new experimental result is somewhat artificial. It would be more satisfactory if it were possible to show by means of certain fundamental assumptions and without neglecting terms of one order of magnitude or another, that many electromagnetic actions are enterily independent of the motion of the system.” Lorentz passa ad analizzare come le sorgenti ed i campi elettromagnetici si trasformano nel passare da un riferimento caratterizzato da un tempo “locale” ad un altro in moto.

La trasformazione a cui giunge al termine di questa ulteriore analisi ha la forma

$$x' = \beta l(x - vt), \quad y' = ly, \quad z' = lz, \\ t' = \frac{l}{\beta} t - \beta l \frac{v}{c^2} (x - vt), \quad \beta^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}.$$

In tal modo vengono spiegate sia le correzioni al primo ordine in $\frac{v}{c}$ che quelle al secondo ordine (contrazione di Lorentz). Va rimarcato che anche a tali trasformazioni Lorentz giunge stimolato non da principi generali, ma dalla necessità di dare una interpretazione ad alcuni fenomeni.

Il 5 giugno 1905 Henri Poincaré sottometteva a *Comptes rendue de l'Académie des Sciences* un breve lavoro dal titolo: *Sur la dynamique de l'électron*. In tale lavoro, egli riprende il problema e scrive:

“Les résultats que j'ai obtenus sont d'accord sur tous les points importants avec ceux de Lorentz; j'ai été seulement conduit à les modifier et à les compléter dans quelques points de détail. Le point essentiel, établi par Lorentz, c'est que les équations du champ électromagnétique ne sont pas altérées par une certaine transformation (que j'appellerai du nom de Lorentz) et qui est de la forme suivante:

$$x' = kl(x + \varepsilon t), \quad y' = ly,$$

$$z' = lz, \quad t' = kl(t + \varepsilon x), \quad k = 1/\sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

x, y, z sont les coordonnées et t le temps avant la transformation, x', y', z' et t' après la transformation. D'ailleurs ε est une constante qui définit la transformation

$$k = 1/\sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

et l est une fonction quelconque de ε . [...] L'ensemble de toutes ces transformations, joint à l'ensemble de toutes les rotations de l'espace, doit former un groupe; mais pour qu'il en soit ainsi, il faut que $l = 1$; on est donc conduit à supposer $l = 1$ et c'est là une conséquence que Lorentz avait obtenue par une autre voie.”

Va osservato che se si parte dalla trasformazione di Lorentz che dà x' in funzione di x e t e si richiede che le trasformazioni formino gruppo, necessariamente la relazione lineare che dà t' in termini di t ed x deve avere la forma proposta da Poincaré.

Una volta raggiunte queste conclusioni, Poincaré, con grande correttezza, propone di chiamare le trasformazioni ultime, da lui proposte, *trasformazioni di Lorentz*.

Il mese successivo Poincaré invierà a *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* un articolo, molto più lungo, con lo stesso titolo, in cui vengono forniti molti dettagli ed esaminate alcune delle conseguenze di tali trasformazioni. È interessante notare che, nell'introduzione di questo lavoro, Poincaré afferma: *“On trouve*

d'abord qu'elle nous force à supposer que la propagation de la gravitation n'est pas instantanée, mais se fait avec la vitesse de la lumière Comment faisons-nous nos mesures? En transportant, les unes sur les autres, des objets regardées comme des solides invariables, répondrait-on d'abord; mais cela n'est plus vrai dans la théorie actuelle, si l'on admet la contraction lorentzienne. Dans cette théorie, deux longueurs égales, se sont, par définition, deux longueurs que la lumière met le même temps à parcourir.

Si intravedono molte delle problematiche affrontate contemporaneamente da Einstein e risolte con una impostazione filosofica decisamente più alta e senza le incertezze che si ritrovano in Lorentz e Poincaré, peraltro in parte giustificate anche da un quadro sperimentale non chiaro.

Bisogna notare che già nel 1898 Poincaré aveva contestato l'ipotesi di simultaneità assoluta e proposto una definizione operativa di simultaneità basata sulla velocità della luce. Inoltre Poincaré è portato a considerare l'impossibilità di verificare il moto assoluto della Terra con esperimenti di qualsiasi tipo.

È quindi chiaro che la forma delle trasformazioni di Lorentz data da Poincaré coincide con quella che il 30 giugno dello stesso anno Einstein invierà ad *Annalen der Physik*. Tuttavia l'impostazione filosofica è profondamente diversa: Poincaré, sulla scia di Lorentz, esamina le trasformazioni che rendono covarianti le equazioni delle onde, Einstein si muove in un contesto puramente cinematico, estremamente rigoroso e convincente, in cui si confrontano tempi e lunghezze di due osservatori inerziali per i quali la velocità della luce è la stessa.

È importante notare che Einstein non farà riferimenti al lavoro di Poincaré salvo che nel lavoro del 1906 teso ad approfondire l'equivalenza fra inerzia ed energia trattata nel settembre 1905, in cui dice:

Although the simple formal considerations that have been carried out to prove this statement are in the main already contained in a work of H. Poincaré (in Lorentz Festschrift (1900)), for the sake of clarity I shall not base myself upon that work.”

Addirittura Pais, nel libro “Subtle is the Lord”, avanza il sospetto che Einstein non abbia mai letto il lavoro di Poincaré del 1905.

Va anche detto che Poincaré ricambiò, anche se ebbe a dire:

“Einstein è uno degli spiriti più originali che io abbia conosciuto; sebbene giovanissimo occupa un alto posto d'onore fra i migliori scienziati contemporanei. Ciò che di lui si deve maggiormente ammirare è la facilità con la quale crea nuove concezioni, traendone tutte le possibili conseguenze.”

Per chiudere questa parte, desidero ricordare, a solo titolo di curiosità, che, nel 1887, Wolde-
mar Voigt pubblicò su *Goettingen Nachr*, il lavoro “*Ueber das Doppler'sche Prinzip*” in cui mostrava che l'equazione delle onde $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial T^2}$ era invariante rispetto alla trasformazione $x = A(X - vT)$, $T = A(T - vX)$ (richiedendo che il determinante della trasformazione fosse 1, trovava $A = 1/\sqrt{1 - v^2}$). In una lettera a Hilbert del 1889, Minkowski riconosceva che la speculazione astratta non era sufficiente per la speculazione fisica; considerava inoltre inconcepibile che qualcuno sviluppasse equazioni matematiche solo nella speranza che qualche altro successivamente ne dimostrasse l'utilità.

5. – La cinematica della relatività speciale

Nell'introduzione al suo articolo, in cui Einstein introduce la relatività speciale, fa notare come in elettromagnetismo, per descrivere l'interazione fra un magnete ed un conduttore si usano due linguaggi diversi a seconda che si consideri fermo il magnete ed il conduttore in moto (nel qual caso si attribuisce la corrente nel conduttore alla forza di Lorentz) o si consideri fermo il conduttore ed il magnete in moto (nel qual caso la forza che agisce sulle cariche del conduttore è riconducibile alla presenza del campo elettrico). Il risultato è lo stesso. È sulla base di questo argomento che Einstein è portato a considerare che, per le leggi della elettrodinamica, debba applicarsi il principio di relatività, così come si era fatto per la meccanica con le trasformazioni di Galilei. Immediatamente dopo dice che occorre aggiungere un altro postulato, solo apparentemente inconciliabile con il precedente: “la velocità della luce è sempre c , indipendentemente dallo stato di moto dell'emettitore”. Questa seconda ipotesi è del tutto coerente con la precedente. Infatti nelle equazioni di Maxwell nel vuoto entra una velocità; se questa velocità dipendesse dal riferimento l'idea che debba valere il principio di relatività per l'elettrodinamica non sarebbe sostenibile. In altre parole, Einstein non è tanto mosso a queste

due ipotesi dall'esperimento di Michelson, quanto da una idea molto più alta: le leggi della natura non possono dipendere dallo stato di moto dell'osservatore inerziale.

Dopo questa premessa il lavoro si divide in due parti: la parte cinematica e la parte elettrodinamica.

Nella parte cinematica Einstein affronta subito il problema della simultaneità che lo porta alla sincronizzazione degli orologi. Questa idea era già stata sviluppata da Henri Poincaré nel lavoro, citato verso la fine del precedente paragrafo, “*La théorie de Lorentz et le principe de réaction*”, offerto dall'autore a Lorentz l'11 Dicembre 1900 per il 25mo anniversario del suo dottorato e pubblicato lo stesso anno su *Archives néerlandaises des Sciences exactes et naturelle*.

“Pour que la compensation se fasse, il faut rapporter les phénomènes, non pas au temps vrai t , mais à un certain “temps local t' ” défini de la façon suivante.

Je suppose que des observateurs placés en différents points, règlent leurs montres à l'aide de signaux lumineux; qu'ils cherchent à corriger ces signaux du temps de la transmission, mais qu'ignorant le mouvement de translation dont ils sont animés et croyant par conséquent que les signaux se transmettent également vite dans les deux sens, ils se bornent à croiser les observations, en envoyant un signal de A en B, puis un autre de B en A. Le temps local t est le temps marqué par les montres ainsi réglées.

Si alors V est la vitesse de la lumière, et v est la translation de la Terre que je suppose parallèle à l'axe des x positifs, on aura: $t' = t - vx/V^2$.

La simultaneità viene definita nel sistema stazionario, dove gli osservatori non sono in moto relativo. In tale sistema si possono usare regoli rigidi e supporre valida la geometria euclidea ed ogni osservatore usa l'orologio che ha con sé, tutti gli orologi essendo eguali. Anche se notissima, vale la pena di riportare la procedura di sincronizzazione descritta da Einstein, per un breve commento. Un raggio di luce parte da A al tempo t_A di A, si riflette in B al tempo t_B di B e ritorna in A al tempo t'_A di A. I due orologi si diranno sincronizzati se $t_B - t_A = t'_A - t_B$. Come farà notare Reichenbach (in “*The philosophy of space and time*”, Dover publications, 1957), tale procedura è puramente convenzionale, ma indubbiamente la più conveniente. Verso la fine del paragrafo Einstein scrive: “*in accordo con l'esperienza sup-*

poniamo inoltre che la quantità

$$\frac{2AB}{t'_A - t_A} = c$$

sia una costante universale." Tenuto conto del fatto che oggi giorno le lunghezze sono definite a partire dalla velocità della luce, la procedura di sincronizzazione di Einstein va ora formulata dicendo che, se dei fasci di luce che partono da A e si riflettono su B ritornano ad A sempre dopo lo stesso tempo (diciamo 2 secondi), allora A dirà che B è fermo rispetto a lui; chiederà inoltre a B di sincronizzare il suo orologio su 1 secondo quando gli arriverà un fascio di luce che A farà partire al suo tempo 0.

Una volta chiarito questo fatto fondamentale, Einstein passa a vedere come la procedura di sincronizzazione ora stabilita dall'osservatore O stazionario viene vista da un osservatore inerziale O' che veda O e gli oggetti solidali con O muoversi con velocità v diretta lungo le direzioni degli assi x e x' e la luce muoversi nel vuoto con velocità c .

In una prima fase viene considerato il caso in cui un raggio di luce parte da O , viene riflesso da uno specchio fermo rispetto ad O e posto in $(a, 0, 0)$;

1) il raggio di luce che parte da O al $t = 0$ da $x = 0$, viene visto da O' partire al tempo $t' = 0$ da $x' = 0$;

2) per O il raggio raggiunge lo specchio in $x = a$ al tempo $t = a/c$, mentre per O' ciò avviene al tempo $t' = \frac{a'(v)}{c-v}$ in $x' = a'(v) + vt'$;

3) per O il raggio ritorna alla sorgente in $x = 0$ al tempo $t = 2a/c$, mentre per O' ciò avviene al tempo $t' = \frac{a'(v)}{c-v} + \frac{a'(v)}{c+v}$ in $x' = vt'$.

Scrivendo la trasformazione nella forma $x' = f(v)(x + vt)$, $t' = g(v)x + h(v)t$,

2) implica $a'(v)(1 + \frac{v}{c-v}) = af(v)(1 + v/c)$, $\frac{a'(v)}{c-v} = g(v)a + h(v)a/c$,

3) implica $va'(v)(\frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v}) = f(v)v2a/c$, $a'(v)(\frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v}) = h(v)2a/c$, da cui $h(v) = \frac{a'(v)c^2}{a(c^2-v^2)}$, $g(v) = \frac{va'(v)}{a(c^2-v^2)} = \frac{v}{c^2}h(v)$, $f(v) = h(v)$.

A questo punto Einstein discute, con lo stesso criterio di sincronizzazione e sempre supponendo la costanza della velocità della luce, il caso in cui la luce compia sempre lo stesso tragitto tra sorgente e specchio, ma quest'ultimo è posto in $(0, b, 0)$ e si muove per O' sempre con velocità v nella direzione di x . In questo caso O valuta che il tempo impiegato per l'andata e ritorno sia $t = 2b/c$, mentre O' vede la luce percorrere un tragitto più lungo; infatti, se le lunghezze lungo y siano viste da O' scalate di un fattore $\phi(v)$, il tempo t' impiegato a percorrere il

cammino è tale che $v^2(\frac{t'}{2})^2 + b^2\phi^2(v) = c^2(\frac{t'}{2})^2$, da cui $\frac{t'}{2} = \phi(v)/\sqrt{1-v^2/c^2}$. È quindi $h(v) = \frac{\phi(v)}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$; la trasformazione prende la forma

$$x' = \frac{\phi(v)}{\sqrt{1-v^2/c^2}}(x + vt),$$

$$t' = \frac{\phi(v)}{\sqrt{1-v^2/c^2}}(t + \frac{v}{c^2}x), \quad y' = \phi(v)y, \quad z' = \phi(v)z.$$

Già in questa forma si ritrova la costanza della velocità della luce: se $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$, è anche $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2$.

Considerazioni di simmetria portano Einstein infine a scegliere $\phi(v) = 1$.

Nel paragrafo successivo Einstein esamina con grande semplicità e chiarezza come vadano misurati lunghezze e tempi di oggetti in moto, arrivando alle ben note contrazioni delle lunghezze e dilatazioni dei tempi.

La parte cinematica del lavoro viene conclusa con la esposizione di come si compongano le velocità di oggetti, con la conclusione che, se un oggetto viene visto muoversi con velocità minore di c da un sistema, ogni altro sistema risconterà la stessa proprietà.

6. – La relatività speciale e l'elettrodinamica

Essendo l'ipotesi fondamentale della relatività speciale imposta dalla circostanza che le equazioni di Maxwell contengono esplicitamente la velocità della luce, è del tutto naturale andare a verificare se tali equazioni rimangono invarianti per trasformazioni di Lorentz. È questo che Einstein fa all'inizio della seconda parte utilizzando il formalismo introdotto da Hertz. Egli analizza prima le equazioni nel vuoto, andando ad analizzare come si trasformano i campi, con successive applicazioni all'effetto Doppler ed all'aberrazione della luce; negli ultimi due paragrafi esamina cosa accade in presenza di cariche e correnti, giungendo a trovare la correzione per piccole accelerazioni delle equazioni del moto di un elettrone.

Particolarmente interessante l'ottavo paragrafo, in cui Einstein discute come si trasforma l'energia dei raggi luminosi al cambiare del riferimento. Risulterà particolarmente importante il risultato secondo cui, se in un riferimento l'energia luminosa E è diffusa in maniera simmetrica nelle varie direzioni spaziali, in un sistema che si muove con

velocità v rispetto al primo l'energia diffusa E' nella direzione ϕ è tale che

$$\frac{E'}{E} = \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Infatti due mesi dopo, nel lavoro pubblicato su *Annalen der Physik* **4**, 18, 1905, Einstein ritorna sull'argomento per dire che, se un corpo con energia E_0 emette in una direzione e nella direzione opposta delle radiazioni, ciascuna con energia $\frac{L}{2}$, la sua energia nel riferimento in cui era fermo diventerà $E_1 = E_0 - L$, (mentre il suo momento rimarrà nullo). Nel riferimento in cui il corpo si muove, in base alla relazione precedente, la sua energia passa da H_0 ad $H_1 = H_0 - \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. La differenza

$$(H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - L$$

non può che essere di tipo cinetico. Poichè, all'ordine $\frac{v^2}{c^2}$, tale differenza è eguale a $\frac{1}{2} \frac{L}{c^2} v^2$, Einstein conclude che “se un corpo emette l'energia L in forma di radiazione, si diminuisce la sua massa di L/c^2 ”; poichè, aggiunge, è evidentemente inessenziale che l'energia sottratta al corpo sia andata in energia di radiazione, “la massa di un corpo è una misura del suo contenuto in energia”.

Dell'enorme importanza di questa scoperta Einstein si rese subito conto, tant'è, che, in una lettera a Conrad Habicht dell'estate 1905, riportata in *Collected Papers*, vol. 5, doc 28, p. 33, scrive:

Mi è venuta in mente un'ulteriore conseguenza del lavoro sull'elettrodinamica. Il principio di relatività, unito alle equazioni di Maxwell, prescrive che la massa sia una misura diretta dell'energia contenuta in un corpo; la luce cioè porta con sé una massa. Nel caso del radio, dovrebbe aversi una sensibile diminuzione di massa. L'argomento è buffo e seducente; ma per quanto ne so, il Signore potrebbe riderci sopra e menarmi per il naso.

7. – Conclusioni

Probabilmente qualcuno non condividerà la mia scelta di tacere, sostanzialmente, su quello che è accaduto dopo il 1905, sia per gli aspetti teorici che per gli esperimenti connessi con la relatività Einsteiniana. Ma, mi creda, già cercare di ricostruire ed evidenziare le premesse, sperimentali e teoriche, che hanno preceduto il lavoro di Einstein

sulla relatività, non mi è stato facile. Sicuramente ho tralasciato qualcosa che meritava di essere ricordato e me ne scuso.

Per compensare, riporto, nella bibliografia, una breve raccolta di testi, abbastanza divulgativi, in cui i non addetti ai lavori potranno attingere per un approfondimento. Nei testi stessi si potrà risalire ad ulteriore bibliografia.

Per tornare ai postulati che sono alla base della relatività speciale, in particolare a quello sulla costanza di c , desidero menzionare che, nei lavori di de Ritis, Marmo e Preziosi, *General Relativity and Gravitation* **31**, 1501, 1999 e di Marmo e Preziosi su *Symmetries in Science XI*, Kluwer A. P., 2004, p. 445, si mostra che l'ipotesi di esistenza oggettiva, secondo cui una particella, a riposo in un dato sistema di riferimento, non può essere percepita da un altro sistema di riferimento come esistente in un solo istante di tempo (e quindi senza passato e senza futuro), è compatibile solo con trasformazioni (x, t) di tipo Lorentz o Galilei; inoltre il prodotto di due trasformazioni (x, t) con diversi c non è compatibile con l'esistenza oggettiva. Sono invece ammissibili trasformazioni con diversi valori di c per diverse direzioni (cristallo uniassico).

Infine desidero esprimere i miei sentiti ringraziamenti a Giuseppe Marmo per l'incoraggiamento e le numerose discussioni.

Bibliografia

- A. EINSTEIN, *Autobiografia scientifica* (Boringhieri, Torino) 1981.
- Autori vari: *Cinquant'anni di relatività (1905-1955)* (Eds. Giuntine-Sansoni) 1955.
- J. STACHEL (a cura di), *L'anno memorabile di Einstein, i cinque scritti che hanno rivoluzionato la fisica del novecento* (Dedalo, Bari) 2001.
- H. REICHENBACH, *La filosofia dello spazio e del tempo* (Feltrinelli, Milano) 1977.
- A. EINSTEIN, *Opere scelte* a cura di E. Bellone (Bollati Boringhieri, Torino) 1988.
- J. RENN e D. HOFFMAN, “1905 — A Miraculous Year”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38** (2005) 437-448.
- H. P. ROBERTSON: “Postulate versus Observation in the special theory of relativity”, *Rev. Mod. Phys.* **21** (1949) 378-382.
- J. S. BELL, *How to teach special relativity*, in *Speakable and unspeakable in quantum mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, England) 1987.
- R. MANSOURI, R. U. SEXL: “A test theory of special relativity I, II, III”, *Gen. Relat. Gravit.*, **8** (1977) 497-537.
- H. WEYL, *Space-time-matter* (Dover, New York) 1952.
- H. WEYL, *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (Dover, New York) 1963.
- Y. Z. ZHANG, “Test theories of special relativity”, *Gen. Relat. Gravit.* **27** (1995) 475-493.
- V. BARGMANN, “Relativity”, *Rev. Mod. Phys.* **29** (1957) 161-174.
- E. SCHROEDINGER, *Space-time structure* (Cambridge University Press, Cambridge, UK) 1950.

L'EFFETTO FOTOELETTRICO E L'IPOTESI DI EINSTEIN SUI QUANTI DI LUCE

G. Chiarotti

Dipartimento di Fisica

Università di Roma "Tor Vergata"

Nel discorso per l'attribuzione del Premio Nobel ad Albert Einstein nel 1921, S. Arrhenius (un chimico famoso anch'egli insignito del Premio Nobel nel 1903) diceva: "Non c'è probabilmente nessun fisico al mondo il cui nome sia tanto noto quanto quello di Albert Einstein. Molte discussioni si sono sviluppate intorno alla sua teoria della relatività. Questa riguarda essenzialmente l'epistemologia [?] ed è stata pertanto soggetto di accesi dibattiti nei circoli filosofici. Non è un segreto che il famoso filosofo Bergson a Parigi ha sollevato obiezioni, mentre altri filosofi l'hanno acclamata". Con molta prudenza l'Accademia delle Scienze Svedese gli attribuì il Premio "per i suoi servizi alla Fisica Teorica e specialmente per la sua scoperta delle leggi dell'effetto fotoelettrico".

Commenta Emilio Segrè⁽¹⁾: "Che non si menzioni la relatività esplicitamente può forse sembrare strano, ma ripensandoci mi sembra che ci fosse più che un grano di saggezza, non perché essa sia cosa da poco, ma perché gli altri 'servizi' sono immensi".

In effetti Einstein era convinto del carattere rivoluzionario del suo lavoro sull'effetto fotoelettrico. In una lettera all'amico Conrad Habicht scrive: "ti ho promesso quattro lavori [...] il primo dei quali te lo manderò al più presto in quanto ho appena ricevuto le bozze. Il lavoro riguarda la radiazione e le proprietà energetiche della luce ed è molto rivoluzionario come vedrai". Esso apparve nel 1905 con il titolo "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt"⁽²⁾ (Su un punto di vista euristico concernente la produzione e trasformazione della luce).

L'ipotesi dei quanti di luce, che è alla base dell'interpretazione einsteiniana dell'effetto fotoelettrico, fu contrastata per molto tempo dai fisici più accreditati. Ancora nel 1910 Max Planck scrisse che qualora l'ipotesi dei fotoni fosse stata accettata "la teoria della luce sarebbe tornata indietro di secoli" e tutta la sintesi Maxwelliana dell'elettromagnetismo "sarebbe stata minacciata a causa di poche ancor dubbie speculazioni". Nel 1913, in occasione dell'ammissione di Einstein all'Accademia Prussiana delle Scienze, Planck espresse ancora un unico dubbio nei suoi riguardi "che le sue speculazioni l'avevano spinto talvolta

troppo in là, ad esempio con l'ipotesi dei quanti di luce: tuttavia non si doveva dare troppa importanza a questo fatto. Infatti le Scienze esatte progredirebbero ben poco se nessuno osasse correre rischi".

Probabilmente le "poche ancor dubbie speculazioni" si riferivano, almeno in parte, a quelle associate ai contrastanti risultati sperimentali sull'effetto fotoelettrico come si presentavano all'inizio del secolo.

L'effetto fotoelettrico era stato scoperto da Heinrich Rudolf Hertz nel 1887⁽³⁾. Per le sue ricerche sulle onde elettromagnetiche, Hertz aveva sviluppato un rivelatore costituito da un anello metallico aperto (inserito in un circuito risonante) tra le cui estremità scoccava una piccola scintilla quando veniva investito da un fascio di onde elettromagnetiche.

Hertz notò che la scintilla scoccava più facilmente quando l'anello veniva illuminato con della luce ultravioletta. Più tardi P.E.A. Lenard⁽⁴⁾ ed altri osservarono che le particelle emesse erano degli elettroni, che l'intensità della corrente fotoelettrica era proporzionale all'intensità della luce e che esisteva una soglia di frequenza e una energia massima degli elettroni fotoemessi. Tuttavia la dipendenza dell'energia massima di questi elettroni dalla frequenza ν della luce era controversa: alcuni⁽⁵⁾ propendevano per una relazione lineare tra V (il potenziale di interdizione) e ν , altri⁽⁶⁾ tra \sqrt{V} e ν , altri ancora⁽⁷⁾ ritenevano che dai dati sperimentali non fosse possibile distinguere tra i due casi.

Ancora nel 1914, Sir J.J. Thomson scriveva⁽⁸⁾: "the experimental results hitherto obtained seem on the whole to confirm this result [ossia la dipendenza lineare dell'energia dei fotoelettroni dalla frequenza] though it must I think be confessed that the direct experimental evidence in favour of the strict proportionality is too meagre to enable us to maintain that it is a direct result of experiment". Nel 1913 R. W. Pohl e E. Pringheim, in un articolo di rassegna⁽⁹⁾ arrivano alla stessa conclusione, spingendosi a scrivere che l'assunzione di una dipendenza lineare dalla frequenza era "premature and quite unsupported by any experiments by light waves".

Si deve tuttavia dire che sul finire del primo decennio del secolo XX l'ipotesi dei quanti di luce era abbastanza accettata (l'articolo di N. Bohr sull'atomo di idrogeno, che fa propria la teoria di Einstein è del 1913) anche se tra i lavori che sostenevano la linearità di V con la frequenza (in accordo con la teoria di Einstein), il più accura-

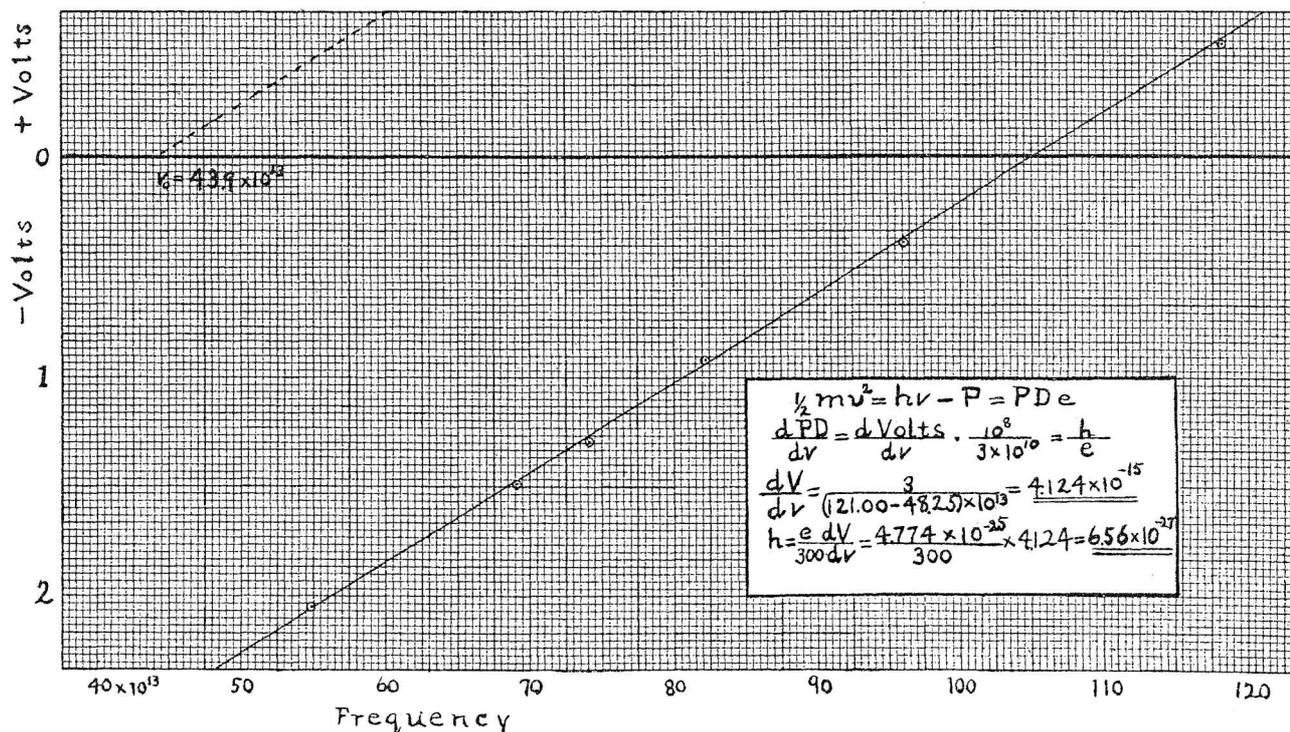


Fig. 1. - Andamento dell'energia massima degli elettroni fotoemessi dal Na in funzione della frequenza dei fotoni incidenti. Sulle ordinate è riportato V (il valore del potenziale di arresto) che corrisponde alla (energia massima)/ e . I dati riportati in figura sono presi dal brogliaccio sperimentale e non tengono conto della d.d.p. di contatto (effetto Volta) tra il fotocatodo e la griglia colletttrice. Tale d.d.p. veniva misurata *in loco* da Millikan con il metodo di Kelvin. Operando questa correzione i valori di V diventano tutti dello stesso segno (che Millikan assume come positivo) e la retta diviene quella tratteggiata che si intravede in alto a sinistra nella figura. Il valore di h rimane, ovviamente, immutato. Da: R.A. Millikan, rif. (10).

to⁽⁵⁾ dava valori della costante di Planck che variavano, negli otto metalli presi in considerazione, da $3,55$ a $5,85 \times 10^{-27}$ ergs.

L'articolo che mise fine alla controversia e segnò la definitiva accettazione dell'ipotesi di Einstein fu quello di R. A. Millikan⁽¹⁰⁾ del 1916 i cui risultati per il Na, di eccezionale precisione, sono riportati nella fig. 1. Si vede che l'equazione di Einstein:

$$(1) \quad \frac{1}{2}mv^2 = eV = hv - W$$

(con W = funzione lavoro del metallo) è pienamente verificata¹.

Per dirlo con le parole di Einstein: "nella propagazione di un raggio luminoso emesso da una sorgente puntiforme, l'energia non è distribuita in modo continuo sopra volumi di spazio sempre crescenti, ma consiste di un numero finito di quanti di energia localizzati in punti dello spazio

¹ Millikan attribuisce correttamente la grande dispersione dei precedenti risultati sperimentali: i) nel caso dei catodi di metalli alcalini, alla contaminazione della superficie; ii) nel caso degli altri metalli (che hanno un W assai maggiore) al ridotto intervallo di frequenze usato.

(es besteht aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten localisierten Energiequanten) che si muovono senza dividersi e vengono assorbiti o generati solo come un tutto (*nur als Ganze*)".

Che cosa rendeva Einstein tanto fiducioso, già nel 1905, da proporre la sua ipotesi "spericolata" ("reckless", come la chiama Millikan)? Come abbiamo visto, l'effetto fotoelettrico non forniva una base sufficientemente solida. Lo stesso Einstein parla della sua ipotesi come "non contraria" (*nicht in Widerspruch*) ai risultati sperimentali di Lenard. Certamente Einstein, come molti altri, avrà fatto un calcolo dell'energia che poteva "piovere" su un singolo atomo nel caso in cui l'energia fosse distribuita uniformemente sul fronte d'onda²; secondo quanto previsto dall'Elettromagnetismo classico, e questo potrà averlo orientato nella sua ricerca.

² Per es. si può valutare che una lampadina da 1W, posta a un metro di distanza da una cellula fotoelettrica, fa giungere su un singolo atomo del metallo (di area $\sim 10^{-16}$ cm²) una potenza di $\sim 5 \times 10^{-3}$ eV/s. Ammesso che un quinto di questa abbia energia superiore alla soglia, occorrerebbero circa 1000 s (~ 16 m) per accumulare l'energia posseduta dagli elettroni fotoemessi (~ 1 eV).

Egli tuttavia aveva un'altra linea di pensiero, basata su un argomento di termodinamica statistica, che dimostra di per sé la sua grande intuizione fisica e potenza innovatrice.

Egli dimostra che l'Entropia di un sistema di onde elettromagnetiche in equilibrio in una cavità a temperatura T (corpo nero) è identica a quella di un gas perfetto costituito da N particelle di energia $h\nu$! Solo come esempio di applicazione della sua ipotesi, ricava quindi la (1) e svolge altre considerazioni sulla regola di Stokes e sulla ionizzazione di un gas sottoposto all'azione di una radiazione ultravioletta.

Nel seguito cercherò di illustrare il percorso logico seguito da Einstein per arrivare alla sua ipotesi dei quanti di luce. Userò per le grandezze fisiche le notazioni moderne (più familiari di quelle di Einstein³), aggiungendo alcuni commenti e osservazioni che mi sembra facilitino la comprensione del testo.

Premetto la celebre formula di Planck del corpo nero, principalmente allo scopo di introdurre le notazioni che verranno usate nel seguito:

$$(2) \quad u(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu,$$

con ovvio significato dei simboli. Qui $u(\nu, T)$ è la densità di energia per unità di volume e di intervallo di frequenza.

Einstein preferisce partire dalla sua espressione asintotica valida per alte frequenze ($h\nu \gg kT$):

$$(3) \quad u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} e^{-\frac{h\nu}{kT}},$$

che era stata ricavata da W. Wien in modo semi-empirico. La ragione di questa scelta va ricercata nell'idea guida (*Gedankengang*) di Einstein che ipotizzava che un sistema di onde elettromagnetiche stazionarie si comportasse come un gas perfetto. Poiché un gas può considerarsi tale solo a basse densità, Einstein per analogia considera il caso di bassa densità di energia elettromagnetica, ben rappresentato dalla formula di Wien. L'uso della (3) permette inoltre una notevole semplificazione dei calcoli matematici.

Nel seguito mi atterrò strettamente al ragiona-

mento di Einstein. L'entropia di un sistema di onde elettromagnetiche stazionarie contenute in una cavità di volume V , può essere definita in modo del tutto generale come

$$(4) \quad S = V \int_0^\infty \varphi(u, \nu) d\nu,$$

dove $\varphi(u, \nu) d\nu$ è l'entropia per unità di volume della radiazione compresa tra ν e $\nu + \delta\nu$.

La (4) deve essere massimizzata per ogni valore dell'energia totale:

$$(5) \quad E = V \int_0^\infty u(\nu, T) d\nu,$$

essendo E una costante dipendente dalla temperatura. Il massimo della (4) con la condizione (5) può essere ottenuto facendo uso dei moltiplicatori di Lagrange, cercando cioè il massimo libero della funzione

$$(6) \quad \Phi(u) = \int_0^\infty \varphi(u, \nu) d\nu - \lambda \int_0^\infty u(\nu, T) d\nu + \lambda E,$$

essendo λ il moltiplicatore di Lagrange. Imponendo:

$$(7) \quad d\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial u} du = 0,$$

si ottiene immediatamente

$$(8) \quad \int_0^\infty \left[\frac{\partial\varphi}{\partial u} - \lambda \right] d\nu du = 0,$$

la quale è verificata se

$$(9) \quad \frac{\partial\varphi}{\partial u} = \lambda = \text{cost} \quad (\text{ossia indipendente da } \nu)$$

Si avrà cioè:

$$(10) \quad dS = \int_0^\infty \frac{\partial\varphi}{\partial u} d\nu du = \frac{\partial\varphi}{\partial u} \delta E,$$

avendo chiamato con δE l'energia scambiata reversibilmente dal sistema⁴.

⁴ Dal punto di vista strettamente matematico sarebbe stato più opportuno limitare l'intervallo di integrazione a ν_{\max} , sufficientemente grande ma non infinito, onde evitare di introdurre il prodotto *infinito* \times *infinitesimo*. Dal punto di vista fisico, poiché la $u(\nu, T)$ data dalla (3) decade esponenzialmente con la frequenza, l'introduzione di un limite superiore ν_{\max} non dà origine a problemi.

³ Per es. Einstein non usa la notazione h per la costante di Planck che scrive invece come $(R/N_A)\beta$, essendo R la costante dei gas, N_A il numero di Avogadro e β la costante semiempirica che compare nella legge di Wien scritta come $\rho = \alpha\nu^3 e^{-\beta\nu/T}$. Risulta ovviamente $h = \beta k$.

D'altra parte si sa dalla Termodinamica che

$$(11) \quad dS = \frac{\delta E}{T}.$$

Dal confronto di (10) e (11) risulta

$$(12) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial u} = \frac{1}{T}.$$

Limitandoci alla regione di validità della (3), ossia alle alte frequenze, è facile ricavare dalla stessa l'espressione per $1/T$ e cioè

$$(13) \quad \frac{1}{T} = \frac{\partial \varphi}{\partial u} = -\frac{k}{h\nu} \ln \frac{c^3 u}{8\pi h \nu^3}.$$

Integrando l'equazione precedente rispetto a u e omettendo la costante di integrazione dato che l'entropia è definita a meno di una costante additiva arbitraria, si ottiene l'espressione per la densità di entropia:

$$(14) \quad \varphi(u, \nu) = -\frac{ku}{h\nu} \left[\ln \frac{uc^3}{8\pi h \nu^3} - 1 \right].$$

Se ora consideriamo una radiazione quasi monocromatica, di energia finita, contenuta nel volume V in un piccolo intervallo di frequenza da ν a $\nu + \Delta\nu$, si avrà

$$(15) \quad \begin{aligned} E &= V u \Delta\nu, \\ S &= V \varphi \Delta\nu = -\frac{kE}{h\nu} \left[\ln \frac{Ec^3}{V 8\pi h \nu^3 \Delta\nu} - 1 \right]. \end{aligned}$$

Si noti che E è una grandezza piccola ma non infinitesima perché tale è $\Delta\nu$.

Consideriamo ora il cambiamento di entropia che si manifesta nel nostro sistema di onde elettromagnetiche stazionarie quando si fa variare reversibilmente il volume da V_0 a V , tenendo costante l'energia. Ciò può essere fatto in un cilindro a pareti perfettamente riflettenti, cambiando lentamente il volume.

Si trova immediatamente

$$(16) \quad S - S_0 = \frac{kE}{h\nu} \ln \frac{V}{V_0}.$$

Questa espressione ha la stessa forma della variazione di entropia di un gas perfetto che subisca una variazione reversibile di volume a temperatura costante⁵:

$$(17) \quad S - S_0 = nR \ln \frac{V}{V_0} = Nk \ln \frac{V}{V_0},$$

essendo n il numero delle moli e N quello delle

molecole del gas. Einstein nota che la (16) e la (17) sono identiche qualora si assuma $E = Nh\nu$; ossia che la radiazione elettromagnetica contenuta nel volume V si comporta come un gas di N particelle ciascuna dotata dell'energia $h\nu$.

Per usare le parole di Einstein: "Da questo noi possiamo concludere che la radiazione monocromatica di bassa densità (nell'intervallo di validità della formula di Wien) si comporta termodinamicamente come se consistesse di quanti di energia mutuamente indipendenti di grandezza $h\nu$ " [...]; "sembra [perciò] ragionevole domandarsi se le leggi che governano l'emissione e la trasformazione della luce possano essere dedotte assumendo che la luce consista di questi quanti di energia".

Commenta Emilio Segré⁽¹¹⁾: "quando lessi [l'articolo di Einstein] mi colpì quasi fisicamente per la sua potenza e semplicità".

Nell'anno seguente Einstein pubblica un secondo articolo: *Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption*⁽¹²⁾ (Sulla teoria dell'emissione e assorbimento della luce) dove applica la nuova ipotesi alla teoria di Planck del corpo nero, dandone una interpretazione fisica basata sull'equilibrio statistico tra gli oscillatori delle pareti della cavità e quelli del "gas" elettromagnetico in essa contenuto. Quello che era sembrato ad Einstein un artificio matematico usato da Planck nell'eseguire le integrazioni per il calcolo dei valori medi (ipotizzare cioè una discontinuità nei valori dell'energia), assume ora un preciso significato fisico: il "gas" elettromagnetico è costituito da quanti (fotoni) corrispondenti ai salti energetici tra i livelli degli oscillatori della cavità.

Einstein arriva a concludere (probabilmente senza l'approvazione del Maestro) "*dass Hr. Planck in seiner Strahlungstheorie ein neues hypothetisches Element — die Lichtquantenhypothese — in die Physik eingeführt hat*" (che Herr Planck nella sua teoria della radiazione ha introdotto nella Fisica una nuova ipotesi — l'ipotesi dei quanti di luce)!

Naturalmente il successo della teoria di Einstein — all'effetto fotoelettrico presto si aggiunse la teoria dei calori specifici alle basse temperature, l'effetto Compton, l'atomo di Bohr etc. — non deve far dimenticare le difficoltà concettuali che sono ad essa inerenti. L'esistenza della interferenza, della diffrazione e di tutte le proprietà caratteristiche delle onde sembrano inconciliabili con la teoria dei quanti di luce.

A. Sommerfeld, M. Planck, J. J. Thomson e, pa-

⁵ In un gas perfetto l'energia interna dipende soltanto dalla temperatura. È pertanto equivalente far subire al gas una trasformazione a $E = \text{cost}$ o a $T = \text{cost}$.

radossalmente, anche R. A. Millikan⁶ rifiutano la spiegazione di Einstein e tentano senza successo di proporre teorie alternative. Lentamente si fa strada una teoria dualistica onda/corpuscolo in cui la luce si comporta come una particella nell'atto di emissione o assorbimento e come un'onda nel tragitto intermedio (tra l'emissione e l'assorbimento).

Con la scoperta di De Broglie e l'osservazione della diffrazione degli elettroni il dualismo onda/corpuscolo si estende alle particelle elementari.

Questo dualismo trova una sistemazione concettuale solo con la teoria quantistica (o quanto-relativistica) dei campi. Enrico Fermi con la chiarezza che gli è consueta descrive questo processo (in un famoso articolo di rassegna del 1932 su *Review of Modern Physics* (¹³)) così: "Until a few years ago it had been impossible to construct a theory of radiation which could account satisfactorily both for interference phenomena and the phenomena of emission and absorption of light by matter. The first set of phenomena was interpreted by the wave theory, and the second set by the theory of light quanta. It was not until 1927 that Dirac succeeded in constructing a quantum theory of radiation which could explain in a simplified way both types of phenomena". Illustra poi la teoria con un esempio classico basato su un pendolo e una corda vibrante debolmente accoppiati che rappresentano simbolicamente un atomo e il campo di radiazione. Se al tempo $t = 0$ il pendolo è fermo e la corda in vibrazione, la corda trasmette al pendolo dei piccoli impulsi (attraverso l'accoppiamento, che Fermi schematizza con un filo molto sottile ed elastico che connette i due sistemi). Qualora le frequenze proprie del pendolo e della corda siano sufficientemente vicine, si trasferisce dell'energia dalla corda al pendolo che si mette ad oscillare. Questo processo corrisponde all'assorbimento della radiazione da parte dell'atomo. Al contrario se il pendolo è in movimento e la corda ferma si verifica il processo inverso che corrisponde all'emissione di radiazione da parte dell'atomo.

Dal punto di vista storico, può essere interessante osservare che la motivazione che ha spinto Fermi ad affrontare il problema della teoria quantistica dei campi (di cui è giustamente considerato uno dei fondatori) è stato proprio il superamento del dualismo onda/corpuscolo. Già nel 1926 in un articolo: "Argomenti pro e contro l'ipotesi dei

⁶ Millikan arriva a scrivere "Despite the apparently complete success of the Einstein equation, the physical theory of which it was designed to be a symbolic expression is found so untenable that Einstein himself, I believe, no longer holds to it" [!].

quanti di luce" (¹⁴), anziché soffermarsi su questo dualismo, Fermi si domanda se alcune proprietà caratteristiche delle onde non possano essere spiegate anche da una teoria corpuscolare. Attribuendo ai quanti di luce di energia $h\nu$ una quantità di moto $h\nu/c$ (come previsto dalla teoria della relatività speciale) Fermi spiega facilmente (con un ragionamento che ricorda la teoria dell'effetto Compton) l'effetto Doppler, cioè un fenomeno tipicamente ondulatorio. Più tardi, nel 1930 in un articolo "Sulla teoria quantistica delle frange di interferenza" (¹⁵) Fermi, che aveva esteso la teoria di Dirac al caso in cui nel campo siano presenti anche delle particelle cariche o degli atomi (¹⁶), spiega, in modo quanto-meccanico, l'interferenza che si osserva nelle frange di Lippman⁷. La teoria dettagliata di questo fenomeno è inclusa nel famoso articolo del 1932.

Anche Einstein (come Planck) rifiutò le conseguenze introdotte dalla sua teoria dei quanti di luce nella Fisica moderna, che (insieme ad altre rilevanti scoperte) portarono allo sviluppo della Meccanica Quantistica e all'abbandono del determinismo della Meccanica Classica.

Nell'Aprile 1924 Einstein scriveva a Max Born: "La concezione di Bohr sulla radiazione mi interessa vivamente. Tuttavia non mi farò trascinare ad abbandonare il principio di causalità senza averlo difeso. Mi è insopportabile il pensiero che un elettrone possa scegliere in tutta libertà il momento e la direzione di emissione. E se così fosse preferirei fare il calzolaio o addirittura il croupier in una casa da gioco".

Bibliografia

- (1) E. SEGRÈ: *Personaggi e scoperte della Fisica contemporanea* (A. Mondadori) 1996, p. 85.
- (2) A. EINSTEIN: *Ann. Phys. (Leipzig)* (4) **17**, 132 (1905).
- (3) H. HERTZ: *Ann. Phys. (Leipzig)* **31**, 983 (1887).
- (4) P. LENARD: *Ann. Phys. (Leipzig)* (4) **8**, 149 (1902).
- (5) O.W. RICHARDSON and K.T. COMPTON: *Philos. Mag.* **24**, 575 (1912).
- (6) E. LANDENBURG: *Verh. Phys. Gesellschaft*, **9**, 504 (1907).
- (7) A.F. JOFFE: *Ann. Phys. (Leipzig)* **24**, 939 (1907).
- (8) J.J. THOMSON: *Proc. Phys. Soc., London*, XXVII, 105 (1914).
- (9) R.W. POHL and E. PRINGSHEIM: *Philos. Mag.*, **26**, 1017 (1913).
- (10) R.A. MILLIKAN: *Phys. Rev.* **7**, 355 (1916).
- (11) E. SEGRÈ: *op. cit.* p. 86.
- (12) A. EINSTEIN: *Ann. Phys. (Leipzig)* **20**, 199 (1906).
- (13) E. FERMI: *Rev. Mod. Phys.* **4**, 87 (1932).
- (14) E. FERMI: *Nuovo Cimento*, **3**, 47 (1926).
- (15) E. FERMI: *Rend. Lincei*, **10**, 72 (1929); *Nuovo Cimento*, **7**, 153 (1930).
- (16) E. FERMI: *Rend. Lincei*, **9**, 881 (1929).

⁷ Le frange di Lippman sono causate dall'interferenza tra il fascio incidente e quello riflesso da uno specchio piano.

IL NOSTRO MONDO

In memoria di Carlo Castagnoli, che ci ha lasciato il 5 maggio 2005, pubblichiamo i ricordi di alcuni dei suoi più vicini collaboratori e amici in attesa di preparare un volume in Suo onore che uscirà entro il prossimo anno.



IN MEMORIA DI CARLO CASTAGNOLI

La scomparsa improvvisa di Carlo Castagnoli il 5 maggio scorso a Torino, due mesi appena dopo quella di sua moglie Giuliana Cini Castagnoli (anch'essa valente ricercatrice e socia attiva della SIF), non può essere considerata solo un evento che ci richiede un particolare ricordo ed una commossa rievocazione, dovuti alla stima, all'amicizia e all'affetto di cui entrambi godevano tra la comunità dei fisici.

Scompare in realtà con Carlo, pioniere della fisica cosmica, una parte importante della storia della fisica italiana in generale e della Società Italiana di Fisica in particolare. Nel 1996 in occasione della sua ultima lezione accademica e nella prefazione del volume a lui dedicato «*Topics in Cosmogeophysics*» così mi esprimevo:

«Carlo Castagnoli appartiene alla generazione degli allievi diretti dei grandi maestri che, nel dopoguerra, furono artefici della ricostruzione, anzi della rifondazione della fisica italiana negli anni '50. A Roma, alla Scuola di Edoardo Amaldi, egli fu, infatti, insieme con Alberto Gigli e Sebastiano Sciuti, parte attiva di quel gruppo romano impegnato nello studio della «chimica dell'Universo» ad altissime energie (10^{12} eV) delle proprietà fondamentali delle particelle adroniche e leptoniche.

Mantovano di nascita (era nato a Mantova nel 1924), di cultura e di temperamento, ce lo troviamo spesso a studiare le migliori tattiche e le vie più adatte allo sviluppo della ricerca scientifica in funzione di una visione strategica imparata dai vecchi maestri ed assimilata in un tessuto umano di grande solidità.

A Roma Castagnoli era approdato, prima ancora di divenirvi Professore incaricato dal 1948 al 1959, già negli ultimi anni della sua affiliazione alla Scuola Normale di Pisa, dove si diplomò con lode nel 1947, dopo essersi laureato pure con lode nella stessa Università».

I trascorsi della Scuola Normale sono, per me che ne sono stato una specie di fratello minore, fonte di grande commozione. Essi sono alla base di una solida ed affettuosa amicizia che non doveva più attenuarsi né perdersi nel tempo. Tale amicizia si andò via via rafforzando nel ritrovarci spesso negli anni '50, prima a Parigi come borsisti io della Scuola

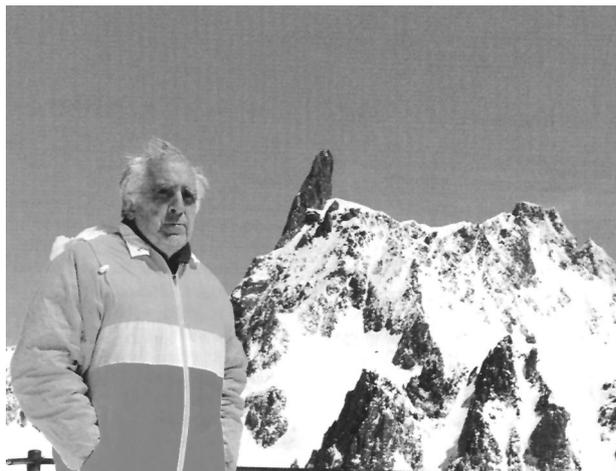
Normale e lui dell'Università di Roma, e poi a Torino, dove ci incrociammo nuovamente prima che io ne partissi per trasferirmi a Napoli ad avviare le ricerche di spettroscopia nucleare in Italia e lui si insediò definitivamente come pioniere della fisica cosmica. Furono anni di maturazione delle nostre affinità culturali e sociali e del nostro affettuoso sodalizio. E ciò fu ancor più chiaro quando di nuovo entrambi ci ritrovammo a condividere posizioni e responsabilità rappresentative, in particolare nella Società Italiana di Fisica.

In effetti Carlo, dopo essere diventato Professore ordinario di Fisica Generale a Parma negli anni 1959-60, trasferitosi poi a Torino dove, dopo il periodo di ordinariato in Fisica Generale dal 1960 al 1987, passò alla cattedra di Astrofisica, fu Presidente della SIF, succedendo a Toraldo di Francia, dal 1974 al 1981, dopo esserne stato Vice Presidente dal 1968 al 1973, carica che ha nuovamente ricoperto dal 1992 al 1996 durante la mia Presidenza.

È nell'ambito della SIF che entrambi, prima come Consiglieri e poi in posizioni di maggiori responsabilità, ci formammo alla Scuola di Gilberto Bernardini, richiamandoci ancora a lui e al suo predecessore Giovanni Polvani per difendere e far progredire lo spirito di unità, di libertà e tolleranza scientifica che sono un patrimonio tradizionale della fisica italiana.

Ciò andava di pari passo con l'impegno scientifico e la presenza in diversi settori di frontiera della fisica moderna. Per Carletto, che aveva anche assunto responsabilità di direzione, sia dell'Istituto di Fisica Generale di Torino che dell'Istituto di Cosmogeofisica del CNR, oltre che di Presidente del Collegio dei Direttori del CNR, l'impegno fu di grande rilievo. Basti ricordare, dopo le significative imprese del gruppo romano, delle quali fanno parte la prima osservazione dell'annichilazione anti-protoni-protoni, lo studio della non conservazione della parità del decadimento π -e e dei parametri fondamentali ad essa correlati, del decadimento radiativo $\pi \rightarrow \mu + e + \gamma$, l'organizzazione di esperimenti di alta montagna al Laboratorio della Testa Grigia e l'avvio degli esperimenti *underground* sotto il Monte Bianco. Fu questa una vera e propria impresa pionieristica, iniziata con il Laboratorio del Monte dei Cappuccini, la Testa Grigia e il Tunnel del Monte Bianco, che aprì poi la strada al contributo di primaria importanza dei fisici italiani a questo campo di ricerche rafforzatosi con l'avvento promosso da Antonino Zichichi, del Laboratorio del Gran Sasso dell'INFN.

In tale contesto temporale (1969-1985) vanno ricordati, tra i risultati più importanti del gruppo di



Carlo Castagnoli, lo studio dell'emissione radio da EAS (sciame estesi in aria) lo spettro dei primari cosmici tra 10^9 e 10^{15} eV con tecniche visualizzanti, il limite della vita media del protone (10^{31} anni) che esclude alcune versioni delle teorie di grande unificazione (GUT), il limite superiore del flusso di monopoli GUT cosmologici e l'osservazione di un flusso modulato di muoni da CygX-3.

Ma l'avventura scientifica forse più piacevole per lui, anche perché la più recente e quindi predisposta e percorsa con la visione di chi vede tanto cammino dietro di sé, è quella dell'Astrofisica neutrinica cui fa da riferimento l'emissione di neutrini della Supernova 1987A e, in seguito, la misura della prima correlazione tra segnali di telescopi neutrinici e di antenne gravitazionali (1988-1991), la prima osservazione (1989) di correlazioni tra EAS in superficie (Campo Imperatore) e i *bundles* muonici *underground* (Gran Sasso) fino alla osservazione di sporadiche emissioni di flotti a UHF dalla Crab Nebula (1991) e alla correlazione fra Cherenkov e rivelatori sottoterra al Gran Sasso. Tutto questo a dimostrazione di un continuo spirito d'iniziativa e un grande entusiasmo sui temi di frontiera e su linee che hanno poi aperto nuovi campi d'indagine.

Le vie parallele della ricerca e della sua organizzazione hanno trovato in Carlo Castagnoli un alfiere di grandi attitudini, di sapiente maestria e di saldo carattere. Queste doti si sono anche espresse nella sua veste di sagace divulgatore.

Di particolare rilievo la direzione de «*Il Giornale di Fisica*» della SIF, alla quale fu chiamato nel 1962 da Giovanni Polvani e che condusse con grande capacità e competenza proprio fino ad un mese prima della sua morte. Ma egli era e resterà sempre «il» Direttore del Giornale di Fisica, che era diventato una sua «creatura» di grande valore di-

dattico e storico. L'invenzione dei *Quaderni di Storia della Fisica* è sua e ci fa sentire ancor più profondo il rammarico di non vederlo più all'opera.

È proprio sul n. 3 di questi quaderni, nel 1998, che Carlo Castagnoli ha scritto quello che potrebbe considerarsi una specie di testamento scientifico e spirituale.

Così egli affermava a proposito dell'Astrofisica particellare – oggi di notevole rilievo nella fisica di frontiera –

«... risorge dopo più di 30 anni il mal sopito spirito particellare della fisica cosmica... Ci sono problemi (come la materia oscura, il decadimento del protone, le massime energie raggiungibili...) che sono di natura particellare sì ma intrinsecamente di natura cosmica. Il gioco a rincorrersi tra acceleratori e fisica cosmica iniziato quasi 50 anni fa (siamo nel 1998) così continua alle soglie del 2000».

Del resto il suo riconoscersi, come altri, in un contesto «naturale» della fisica è così ben espresso da queste sue parole, a proposito della «*fisica montana*» che ne rivelano un insospettato ma genuino spirito romantico e sentimentale di grande spessore umano:

«Esse (le stazioni montane definite da Leprince-Ringuet luoghi di elezione per i fisici) ... sono però anche luoghi ove la ricerca richiede notevoli disagi e sacrifici personali (certamente ignoti a coloro che si sono imposti il compito di studiare i fenomeni cosmici con le simulazioni). Resta comunque vivo nel cuore di chi vi ha operato e vi opera una memoria che restituisce quell'alone romantico alla ricerca scientifica e naturalistica che, molto forte nei secoli passati, si è generalmente disperso in questi ultimi decenni dominati dal sovradimensionamento delle strutture tecniche ormai necessarie».

Anche per questo Carlo Castagnoli ci mancherà.

RENATO ANGELO RICCI
Presidente Onorario

ROMA: CON CARLO NEGLI ANNI DEL DOPOGUERRA

La notizia della scomparsa di Carlo è pervenuta a mia moglie Tita e a me improvvisa e particolarmente dolorosa; apprendevamo in quella occasione che, pochi mesi prima, era scomparsa sua moglie Giuliana, cara ed indimenticabile amica.

Abbiamo partecipato ai funerali di Carlo con tanta angoscia e commozione. Avrei voluto dire qualche parola su di lui, quando trasferito al cimitero; mi è mancata la forza, tradito dalla commozione.

Ho conosciuto Carlo a Pavia nel 1947. Era ospite, per qualche giorno, del suo compagno di Scuola Normale Enrico Magenes. Tutti e tre eravamo appena laureati e reduci, per fortuna, della guerra o della guerra civile; io ero il più anziano. Si discuteva sul «che fare» nel drammatico dopoguerra dove tutto era da rivedere e proprio «da rifare». Tra noi nascevano e si stabilivano una simpatia ed una ammirazione che si sarebbero prolungate, intense e affettuose, per tutta la nostra vita.

Nella primavera del 1948 risultavo vincitore di una borsa di studio del Consiglio Nazionale delle Ricerche per trascorrere sei mesi presso il «Centro Studi di Fisica Nucleare e delle Particelle Elementari» fondato a Roma da Edoardo Amaldi¹.

A Roma ritrovavo Carlo, borsista della Scuola Normale. È stata certamente la simpatia nata tra noi in occasione dell'incontro a Pavia che ha influito sulla scelta del gruppo di giovani al quale associarmi nel lavoro di ricerca. Quel gruppo diretto da Edoardo Amaldi, impareggiabile figura di uomo e di scienziato, insieme a Sebastiano Sciuti, mi avrebbe coinvolto tra loro per ben cinque anni dei sei trascorsi a Roma. La borsa di studio era prevista per soli sei mesi!!

Per Amaldi noi eravamo Carletto e Albertino; eppure, essendo ancora molto giovani, eravamo già di dimensioni fisiche gagliarde e ragguardevoli!

Era un grande ed autentico maestro; a tutti e due è rimasta bene impressa, lezione insostituibile, la sua curiosità intellettuale di capire il nuovo e la sua capacità di far capire il nuovo: «con tanto fare, saper fare e far sapere».

¹ Amaldi era riuscito a far convergere, presso il «Centro ...» molti giovani fisici provenienti da tutta Italia. Chi con borse di studio del CNR, chi con borse di studio di Enti o Organizzazioni della propria città, chi retribuito in qualche modo dal Centro stesso. (Ho trovato, tra i tanti, B. Brunelli, A. Alberigi-Quaranta, A. De Marco, G. Fidecaro, G. Boato, R. Gatto, R. Querzoli, G. Martelli, A. Michelini, G. Segrè, A. Zichichi ed altri.)

I nostri professori erano, insieme ad Amaldi, G. Bernardini, B. Ferretti, E. Persico. B.N. Cacciapuoti e G. Wick. Trovavamo colleghi più anziani di noi che ci avevano preceduto (M. Ageno, M. Conversi, E. Pancini, M. Santangelo, C. Ballario, L. Mezzetti, F. Lepri, S. Sciuti, G. Cortini, A. Manfredini) e quelli, più giovani, di scuola romana (I.F. Quercia, B. Rispoli, F. Bachelet, A.M. Conforto, G. Morpurgo, C. Franzinetti, M. Beneventano, G. Careri, G. Stoppini, C. Bernardini, A. Baroni, M. Cervasi ed altri).

Il gruppo di Amaldi, Castagnoli, Gigli Berzolari, Sciuti preparava un esperimento sulla radiazione cosmica da effettuare al «Laboratorio della Testa Grigia» sopra Cervinia e poi proseguito, con molte variazioni, sotto forti spessori di roccia in una galleria al Gran Sasso.

Quando Carletto, a più di cinquanta anni di distanza, mi ha chiesto un ricordo sugli anni trascorsi alla Testa Grigia, sono stato ben lieto di scriverlo con il titolo: «Notizie sommarie, serie e semiserie, sul «Laboratorio della Testa Grigia» negli anni 1948-1949»; ben lieto, perché era proprio lui che me lo chiedeva. Di seguito ne riporto la parte iniziale ed il brano finale che, tra l'altro, mi consentono di ricordare care persone che hanno passato con Carletto e con me anni irripetibili, dando così una idea del lavoro di una gioventù appassionata e generosa.

Ho frequentato il «Laboratorio della Testa Grigia» per circa due anni, dall'estate 1948 ai primi mesi del 1950.

A Cervinia sono arrivato nell'agosto del 1948. Per qualche giorno ho alloggiato in una casa per ospiti dislocata a mezza costa e concessa in uso dal Comune di Milano. Era una sorta di campo base per chi doveva poi salire al Plateau Rosa dove era installato il Laboratorio. La famiglia Bernardini (Gilberto, Nella e i due figli) passava l'estate in quella casa. Il «carattere forte» che gestiva quel campo base era quello di Nella (Nellina) Bernardini; aiutava in casa una simpatica ragazzina di nome Giuliana Minuzzo che, fattasi grande, sarebbe diventata una bravissima e ben nota campionessa di sci. Al Laboratorio ho incontrato Ettore Pancini, il direttore.

Bernardini e Pancini, i principali artefici del Laboratorio, avevano stabilito buoni rapporti con varie persone di Cervinia: Leo Gasperl che gestiva con la moglie un negozio di articoli sportivi ed era maestro di sci molto noto; le famiglie Minuzzo, Compagnoni, Carrel, Bich, Pellissier ed altre che si tramandavano di padre in figlio la professione di Guida Alpina.

Avevano stabilito buoni rapporti anche con la famiglia Lora Totino che aveva casa a Cervinia vicino alla chiesa e su al Plateau. L'ingegnere Lora Totino era l'imprenditore che aveva progettato e costruito le funivie (era presidente della Società Cervino per la loro gestione) che portavano da Cervinia al Plateau, attraverso le stazioni intermedie di Plan Maison e Cime Blanche e che era stato nominato conte durante il fascismo. Bernardini, Pancini e poi Lucio Mezzetti, vice direttore, avevano accesso alle case dei Lora. Noi no; forse non eravamo «presentabili». Mezzetti sì; pareva anche che avesse ricevuto l'incarico da Bernardini di «corteggiare» la contessa per avere poi qualche vantaggio per i viaggi in funivia (inizialmente avevamo la concessione di 5 biglietti gratuiti giornalieri). Oltre che

bello, tenebroso e con il ciuffo, Mezzetti era, probabilmente, anche il più «presentabile».

Al Plateau avevamo fatto amicizia con i Carabinieri della guarnigione di confine; la loro casermetta, così come il Laboratorio, stava a cavallo tra Italia e Svizzera. Erano care e semplici persone; ci si faceva visita e assieme si beveva un bicchiere di vino, si giocava a carte e alla «morra cinese» (sasso, foglio, forbici). Ho visto Giorgio Salvini, bravissimo, sempre vincente su tutti; alla «morra cinese» riusciva a soggiogare tutti con il suo sguardo di fuoco e con l'indice teso, alzato e ammonitore, della mano libera (così come fa ancora adesso).

Nel paese e nei dintorni ci chiamavano i «cosmici»; spesso, più famigliarmente e con qualche ironia, i «comici».

Al sabato e alla domenica assistevamo all'assalto dei turisti (il grosso veniva da Torino e Milano); non poche volte i più coraggiosi di noi — Pancini in testa — si sono uniti ai Carabinieri del confine e a Guide Alpine trovate sul posto, per soccorrere qualche sciagurato che uscendo dai percorsi indicati e sordo agli avvertimenti (*Tourists - Skieurs! Prenez garde, Crevasses dangereuses!*) finiva in qualche crepaccio, specie nelle mezze stagioni. Erano cose serie e partecipare a quei salvataggi era molto pericoloso; proprio cose da coraggiosi.

In paese si mangiava nel ristorante di qualche albergo, il più economico possibile perché vivevamo tutti in una splendida povertà. Nel Laboratorio facevamo cucina noi. Pancini era un maestro, Bernardini e Mezzetti erano piuttosto deboli. Tutti gli altri — ed io, naturalmente — erano totalmente incapaci. Quando mancavano Pancini o Bernardini e Mezzetti era un disastro. Una volta la signorina Carola Maria Garelli era riuscita a fare un brodino con la sciacquatura dei piatti; poverina, aveva scambiato un recipiente con un altro. Ma ricordo che Bernardini aveva apprezzato come eccellente quel brodino. In compenso quando la signorina Garelli saliva al Laboratorio dopo essere stata a casa, portava con se bottiglie di vino, di sua produzione, di qualità veramente eccezionale.

Mai, in vita mia, ho mangiato tanta carne lessa e tante patate lesse. Ma chi non era capace di fare questa cucina?

La persona più seria, impegnata e responsabile tra i fornelli era Pancini: dava ordini, disposizioni, lavate di capo con volto imperturbabile; in quei momenti era inavvicinabile ma quello che offriva agli affamati era sempre perfetto; Mezzetti lo seguiva a grande distanza. In compenso lui e Salvini (e pochi altri) esprimevano ordine, disciplina e serietà in tutto; erano «caratteri forti» e davano sicurezza. Ma l'ironia, insieme alla povertà, era in tutti ad altissimo livello.

Avevamo una radio rice-trasmittente e tutte le mattine ci si collegava con l'Istituto di Fisica di Roma. Il servizio d'informazioni, da e per, era molto efficiente.

Il Laboratorio, in quanto tale, era equipaggiato piuttosto bene di mezzi strumentali, ricambi e componenti.

Pancini ed altri (tra i quali Franco Lepri, Sebastiano Sciuti e Mezzetti) erano riusciti ad arricchire sia i laboratori dell'Istituto di Fisica di Roma sia il «Laboratorio della Testa Grigia» con mezzi raccolti nei campi ARAR; erano depositi di materiale delle forze armate americane lasciati in Italia dopo la guerra. Erano riusciti ad ottenere le necessarie concessioni formali per grandi quantitativi di materiale di tutti i tipi, specie componenti elettronici; alcuni camion di materiale.

Si dormiva in una stanzetta attrezzata con quattro cuccette, l'una sopra l'altra, a due a due.

Tutto sommato si stava benone; non ci mancava nulla, il buon umore e la voglia di lavorare erano molto alti. Erano fastidiose: le montagne di neve che coprivano la capanna e il suo ingresso quando portate dal vento (quanta neve spalata!); l'atmosfera secca del Laboratorio che prendeva alla gola malgrado i rimedi predisposti; la solitudine e l'isolamento nelle mezze stagioni; il vuoto totale delle nostre tasche.

Durante l'estate del mio approdo a Cervinia, arrivavano da varie parti d'Italia i gruppi sperimentali che poi avrebbero operato per tempi diversi presso il Laboratorio:

Antonio Lovati, Antonino Mura, Giorgio Salvini, Carlo Succi, Guido Tagliaferri (Milano). Il gruppo si occupava di ricerche sulle reazioni nucleari indotte dalla componente penetrante della radiazione cosmica utilizzando una «camera di Wilson» comandata da telescopi di contatori di Geiger e Müller in coincidenza.

Italo Federico Quercia, Brunello Rispoli (Roma). Si occupavano dell'«eccesso positivo» della componente penetrante della radiazione cosmica; utilizzavano telescopi di contatori di Geiger e Müller in coincidenza tra «lenti magnetiche».

Edoardo Amaldi, Carlo Castagnoli, Alberto Gigli Berzolari, Sebastiano Sciuti (Roma). Si occupavano dei rapporti tra componente penetrante e componente elettrofotonica negli sciami estesi della radiazione cosmica; la tecnica di rivelazione era costituita da camere di ionizzazione schermate sotto piombo accoppiate a contatori di Geiger e Müller.

Lucio Mezzetti, Ruggero Querzoli (Roma). Effettuavano ricerche su sciami penetranti prodotti in piombo e carbonio con la tecnica dei contatori di Geiger e Müller in coincidenza.

Carlo Ballario, Marcello Beneventano, Bruno Brunelli, Angelo De Marco, Giuseppe Martelli (Roma). Studiavano le variazioni diurne degli sciami estesi di grande densità con la tecnica dei contatori di Geiger e Müller in coincidenza.

Gleb Wataghin, Carola Maria Garelli, Marcello Cini, M. Panetti ed altri (Torino). Effettuavano ricerche sugli sciami penetranti con la tecnica dei contatori di Geiger e Müller in coincidenza.

Gilberto Bernardini, Giulio Cortini, Augusta Manfredini (Roma). Avevano esposto emulsioni sensibili per studiare l'assorbimento della componente genitrice di «stelle».

Tra tanti cristiani e non, c'era anche un cane di nome Alí e la sua presenza era importante. Era un

bastardo, incrocio tra un cane lupo e uno da pastore; era di pelo fulvo, intelligente e bravo ma aveva il difetto di abbaiare inseguendo gli sciatori e cercando di mordere il loro sedere. In sua difesa abbiamo sostenuto accese discussioni con gl'infortunati.

Non avevo mai visto — ne avrei poi visto in seguito — tanta ricchezza intellettuale e tanta povertà economica in così poco spazio!

* * * *

A cinquanta anni di distanza desidero ricordare, con una certa commozione, che quella incontrata al «Laboratorio della Testa Grigia» era una gioventù veramente splendida; era quella — reduce dalla guerra e dalla guerra civile — che si era buttata a capofitto nel processo di ricostruzione morale e materiale del dopoguerra donando, con grande generosità, intelligenza, fantasia, creatività ed energia, con umile e grande voglia di lavorare.

Quelli passati a Roma o alla Testa Grigia sarebbero stati anni per noi straordinari e pieni di sorprese e di soddisfazioni.

Carletto arrotondava la sua borsa di studio con un incarico di operatore presso il microscopio elettronico messo a punto dall'Istituto Superiore di Sanità. Io arrotondavo la mia con un incarico di consulente presso una Società elettronica — facente capo alla FIAT — chiamata BETA; tali incarichi erano stati procurati da Amaldi.

Le giornate erano piene; si lavorava dal mattino presto alla sera e spesso anche dopo cena, al sabato e alla domenica.

A mezzogiorno consumavamo i pasti alla mensa organizzata, alla meglio, nello scantinato dell'Istituto. Alla sera Carletto ed io consumavamo la cena alla mensa popolare dell'ONARMO, gestita da suore; tra barboni e poveracci ci mettevamo in fila ed arrivati a una parete terminale di uno stanzone puzzolente e fumoso, ci passavano, attraverso un piccolo buco nel muro, una ciotola di pasta e fagioli. Ma nei mesi estivi, e più di una volta alla settimana, rinunciavamo alla mensa delle suore e accanto a una fontanella da strada, seduti sul marciapiede, mangiavamo un paio di pesche e un grappolo d'uva. Volendo far festa, a volte, si andava in pizzeria².

² Devo dire che con Carletto si «litigava» abbastanza spesso; ma erano «litigate» tra amici e si finiva per riderci sopra. Ma i «litigi» avevano una sola motivazione: quella politica. Carletto era arrabbiato socialista ed io ero arrabbiato azionista; tali erano le nostre famiglie. Ma quello che provocava le nostre «litigate» erano le discussioni intorno alla alleanza politica del tempo tra socialisti e comunisti. Carletto ne era convinto e con passione; io ne ero contrario e con cattiveria.

Il nostro alloggio, in modeste camere d'affitto, era in Viale Ippocrate vicino all'Università.

Partecipavamo con grande attenzione ai seminari scientifici del venerdì ed eravamo assidui ascoltatori dei concerti di musica classica proposti in Aula Magna e nella Basilica di Messenzio.

Dobbiamo a Carletto, e in larga misura, l'intelligente e impegnativo lavoro di analisi dei risultati sperimentali ottenuti alla Testa Grigia, nonché i suoi contributi alla loro interpretazione fisica; e dobbiamo a lui l'intelligente e ben noto lavoro scientifico condotto in quel Laboratorio nei decenni successivi fino ad oggi! Ha avuto anche il grande merito di aver salvato il Laboratorio dall'abbandono.

Dopo tre anni di lavoro in comune, abbiamo cominciato a prendere strade diverse e al termine del quarto anno eravamo ormai impegnati su indirizzi per noi nuovi.

Carletto si associava al gruppo impegnato nelle ricerche che utilizzavano le emulsioni fotografiche quale tecnica di rivelazione di particelle cariche; ottenevano risultati di rilevante importanza.

Io proseguivo nelle ricerche sulla radiazione cosmica sotto forti spessori di roccia in una galleria presso Tivoli con un nuovo gruppo fatto di giovani neolaureati. Con lo stesso gruppo mi sono poi impegnato nello studio teorico e sperimentale sui rivelatori visualizzanti di particelle cariche quali, camere a diffusione e camera a bolle a gas disciolto, in preparazione della sperimentazione con l'Elettrosincrotrone previsto presso i nuovi Laboratori di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.

Entrambi ci saremmo sposati abbandonando definitivamente la nostra vita randagia tra camere d'affitto, mensa dell'Istituto e dei Laboratori, mensa delle suore, mensa sui marciapiedi e pizzerie.

Entravamo nella normalità. Io mi sarei trasferito a Genova su invito di Ettore Pancini, facendo poi il pendolare con Roma per qualche anno.

Nel 1959 risultavamo vincitori ad un concorso di Fisica Generale chiesto dalla Università di Parma. Carletto era il primo della terna, io il secondo e Guido Tagliaferri il terzo. Carletto raggiungeva Parma e dopo qualche tempo ha avuto la bella idea di farmi chiamare in quella sede sulla cattedra di Fisica Superiore. Non ho avuto momenti di dubbio; rinunciando ad altre offerte, peraltro allettanti, raggiungevo Parma con il primo treno: raggiungevo Carletto!!

Così abbiamo avuto la fortuna di conoscere una autentica e nobilissima Capitale.

Abbiamo avuto la soddisfazione, sia nell'ambito della Facoltà, sia in quello dell'Istituto, di creare qualche cosa di nuovo: vivacità e creatività scientifica, avanzata didattica ed atmosfera ambientale libera e democratica. Abbiamo anche avuto la fortuna di trovare in quella sede giovani e meno giovani con i quali è stato assai facile la comunione di idee; erano gli insegnamenti che avevamo ricevuto da Amaldi, pur sempre riferimento sicuro, raggiungibile e prezioso anche perché profondamente amico.

Trasferiti poi, Carletto a Torino ed io a Pavia, abbiamo salutato Roma quasi definitivamente; ed anche quella bella Capitale che era Parma.

ALBERTO GIGLI BERZOLARI
Università di Pavia

CARLO CASTAGNOLI E LA SUA PRIMA CATTEDRA A PARMA

Carlo Castagnoli ha onorato con la sua presenza anche l'Università degli Studi di Parma alla quale rimase sempre affezionato così come lo fu alla sua adorata Mantova.

Nel 1959 neo-vincitore di un concorso di Fisica Sperimentale venne chiamato a Parma sulla cattedra di Fisica dell'allora Istituto di Fisica.

Era il primo di Dicembre del 1959 quando il prof. Carlo Castagnoli prese servizio a Parma divenendo subito anche Direttore dell'Istituto e suscitando grande curiosità fra tutto il personale. *Era un «normalista» che veniva da Roma dove svolgeva la ricerca nel gruppo diretto dal prof. Edoardo Amaldi, era molto attivo nella ricerca e famoso per aver individuato l'antiprotone.*

Con lui iniziò la sprovincializzazione dell'Istituto di Fisica di Parma nonché un modo nuovo di fare ricerca. Organizzò subito a Parma un «Gruppo Lastre» autonomo, che lavorava nel campo delle particelle elementari con le emulsioni nucleari, inserendo i neolaureati (come chi scrive) in Gruppi Nazionali ed in collaborazioni internazionali: a Parma arrivò a quella che viene riportata nei libri di testo come «formula di Castagnoli».

La vita dei giovani ricercatori fece, con il prof. Castagnoli, un salto di qualità: avevamo una guida intransigente che non dava tregua. Ciò che più mi appassionò fu apprendere, lavorando con lui, come interpretare i dati sperimentali e l'essere sempre pronta a ripensare o rivedere quanto fatto o deciso in precedenza secondo il «PROVANDO E

RIPROVANDO» di Dante, simbolo della Società Italiana di Fisica. Passammo un periodo, sfortunatamente breve, veramente formativo per tutti sia per lo studio che per la ricerca.

Varie furono le ricerche svolte a Parma sotto la sua guida.

Un risultato importante fu lo sviluppo del metodo di misura dell'energia delle particelle interagenti nelle emulsioni nucleari, che anticipava concetti che sarebbero stati sviluppati in seguito.

Un'altra ricerca, molto appassionante anche se non ebbe tanta fortuna, fu quella sugli *antineutroni* allora di avanguardia nel campo della fisica. Una volta individuato un metodo con cui si sarebbero dovute trovare le annichilazioni di antineutroni, il prof. Castagnoli acquistò dei supermicroscopi con cui appena arrivarono iniziammo subito a lavorare. Andavamo (io e Carmen Lamborizio) in istituto la sera per poter operare in un ambiente tranquillo e con poche vibrazioni. Cerca, cerca e ricerca finalmente trovammo un evento che dai calcoli sui prodotti di interazione poteva essere ricondotto alla produzione di un antineutrone: eravamo tutti eccitati e felici. Avrei voluto pubblicarlo subito, ma il prof. Castagnoli, da buon saggio, disse che, dato che il metodo era quello giusto, tanto valeva continuare e scrivere l'articolo completo appena trovati un certo numero di eventi. E così facemmo. Nel mese di Luglio l'articolo era scritto. Lo avrei portato per l'ultima supervisione, prima della spedizione al Nuovo Cimento, al prof. Castagnoli. Ma, qualche giorno prima, con la stesura dell'articolo pronta da spedire, arrivò in Istituto l'ultimo numero del Nuovo Cimento (vol. 17, 259 (1960)) con pubblicata una lettera breve del signor Tsai-Chu *et al.* in cui *veniva pubblicata l'osservazione del primo evento di antineutrone!!!* Arrivai dal prof. Castagnoli tristissima portando con me l'articolo. Il lavoro fu pubblicato più tardi sugli Atti della Accademia delle Scienze di Torino nel 1961, ma non con l'enfasi che speravamo.

Ma non sono solo queste le attività promosse a Parma dal Prof. Castagnoli.

Decise anche di potenziare i laboratori didattici: ottenne dal Ministero un contributo speciale di 50 Milioni per dotare l'Istituto di un nuovo laboratorio per gli studenti del IV anno (che non esisteva) in modo che avessero esperimenti e strumentazione adeguata.

Aiutò il prof. Dascola che desiderava realizzare un laboratorio di Risonanza Paramagnetica Elettronica. Anche a lui il prof. Castagnoli diede un fattivo aiuto mettendolo, fra l'altro, in contatto con

il prof. Gozzini di Pisa, collaborazione che il prof. Dascola ed il suo gruppo continuarono per parecchi anni. Lo aiutò poi in futuro nella carriera universitaria.

Era anche un ottimo Docente, seguii il suo corso «la fisica dei reattori» e fui, per tutto il tempo che rimase a Parma, con lui in commissione degli esami di Fisica I, imparando come condurre gli esami e come tenere sempre il tempo affinché questi non durassero troppo a lungo o troppo poco, ma fossero di ugual durata per tutti gli studenti!

A Febbraio del 1960 chiamò a Parma sulla Cattedra di Fisica Superiore un altro nuovo giovane professore, Alberto Gigli, che veniva da Pavia. Aveva vinto lo stesso concorso di Castagnoli ed erano amici dai tempi romani.

Insieme crearono in Istituto un'atmosfera vivace che riuscì a coinvolgere tutti anche i più restii. A loro si aggiunse più tardi il prof. Claudio Villi con la cattedra di Fisica Teorica. Da un piccolo Istituto si arrivò a un istituto multicattedre.

Fu molto interessante scoprire l'amicizia e la stima reciproca fra questi tre professori, così diversi non tanto fisicamente, quanto intellettualmente; ascoltarli e partecipare alle loro discussioni scientifiche e anche un po' politiche apriva orizzonti nuovi e molto stimolanti.

Purtroppo l'Università di Torino ci portò via troppo presto il prof. Castagnoli, lo chiamarono l'anno accademico 1960/61.

Tra le attività importanti del prof. Castagnoli, svolte nel seguito, vorrei ricordare il grande impulso dato alla Geofisica, alla Fisica dell'Atmosfera ed all'Astrofisica.

Con Carlo Castagnoli scompare, e lascia un grande vuoto, una delle figure più rappresentative della fisica degli ultimi 50 anni.

IDA ORTALLI
Università di Parma

A ROMA CON IL PROFESSORE TRA GLI ANNI '60 E '70

Conobbi il Professore Carlo Castagnoli nell'estate del '62 nei Laboratori Nazionali di Frascati dove mi ero recato per avere una tesi. Il «Professore» fumava la pipa con accanto Renato Scrimaglio fresco di laurea e Carlo Schaerf che veniva dagli Stati Uniti. Tutti e tre si occupavano di LEALE, un acceleratore lineare che doveva fornire fasci di pioni. Schaerf dava tesi su progetti

di esperimenti, Castagnoli sullo schermaggio del LINAC. Il Professore commentando disse che le tesi di Schaerf erano per futuri ricercatori e la sua era invece una tesi compilativa. C'era con me un amico carissimo che scelse immediatamente la tesi di Schaerf. Io scelsi la tesi sulle schermature. Pensai che potevo imparare un mestiere, che Castagnoli era il Professore e che potevo spendere il suo nome per avere un certo peso nei laboratori. Mi misi al lavoro e dopo pochi giorni compresi che per fare una tesi ragionevole dovevo usare il metodo di Montecarlo. Io non ero un esperto programmatore ma ero amico di due espertissimi in calcolo: Mario Locci e Pino Verri che facevano parte del centro di calcolo presidiando un 1620 IBM. A quel tempo non esisteva internet e dovetti passare molto tempo in biblioteca per procurarmi tutto il materiale (sezioni d'urto, distribuzioni angolari, distribuzione di secondari). In due o tre settimane con il 1620 a pieno regime ottenemmo i risultati del Montecarlo. Scrivemmo due o tre rapporti interni in italiano e dichiarammo finito il lavoro.

Da Los Alamos ci chiesero il permesso di tradurre in inglese i nostri rapporti interni. Il professore rimase sorpreso dalla facilità con cui si era fatto il lavoro e ci chiese di calcolare a diverse altezze dal suolo la distribuzione temporale della luce Čerenkov prodotta in aria da uno sciame esteso elettromagnetico di 10^{14} eV. Con il 1620 era impossibile calcolare uno sciame così grande anche usando degli algoritmi. L'istituto di Sanità aveva un potente calcolatore il 7040 IBM. Chiedemmo al capo dell'istituto Prof. Ageno di poterlo usare per una notte intera. Alle ore 17 infilammo le schede e alle 10 del mattino seguente il calcolatore sfornò i risultati. Il Professore fu felicissimo e immediatamente pubblicammo il risultato sul Nuovo Cimento. Castagnoli ogni volta che veniva a Frascati da Torino si portava qualcosa da calcolare: muoni paralleli, *stragglings*, sciami orizzontali, interazione inelastica muone-adrone ecc. Con Locci e con Verri si produceva così tanto che non c'era tempo di pensare. Il professore a Frascati era sempre in riunione. Decidemmo di chiarirci le idee durante i tempi morti. Cominciammo a discutere di nuovi esperimenti e decidemmo di formare a Frascati un gruppo (Frascati-Torino) che fosse in grado di costruire rivelatori. Era composto da diversi ricercatori: Benedetto D'Ettorre Piazzoli, Giampaolo Mannocchi, Luciano Periale, Halina Bilokon, Roberto Visentin e, come tecnici: Angelo Giuliano, Rutili Alberto, Anelli Mario, Ciaffoni Orlando, Antonori Nazzareno, Lucio Ruggeri. Ci

introducemmo così bene nei laboratori che avevamo tutto a disposizione. Vivevamo felici tra il laboratorio e il 7040 IBM della Sanità e le lezioni personali del Professore. Ma ci fu un esperimento che ci fece allontanare dal nostro habitat naturale. Enzo Iarocci aveva sviluppato un rivelatore molto semplice, ma allo stesso tempo quasi geniale (tubi a *streamer* limitato, o tubi di Iarocci) che lavorava a streamer limitato con alti segnali che venivano indotti sulle *stips* esterne e ci propose di usarlo per un esperimento di *proton decay* nel Laboratorio del Monte Bianco. Il Professore era d'accordo e iniziammo la costruzione di NUSEX al CERN. Il rivelatore NUSEX costituito di 136 lastre di ferro di spessore di 1 cm intervallato da 136 piani di tubi Iarocci di 1 cm di spessore e formava un cubo di 3,5 m. NUSEX che è sia targhetta sia rivelatore fu portato al Monte Bianco nel 1981 dove rimase in funzione per diversi anni. Forni ottimi risultati, ma frantumò il gruppo Frascati-Torino. Alcuni di noi ritornarono a Torino, altri a Frascati ed altri ancora rimasero al CERN. Ma L'istituto di Cosmogeofisica con direttore Castagnoli rimase il nostro punto di riferimento.

Vorrei ricordare infine che da lui io ho appreso il rispetto dovuto al «proprio» professore. Per questo l'ho sempre chiamato «professore» nonostante il grande affetto reciproco che ci ha legati per tutta la vita.

Durante i molti anni di lavoro comune con il «professor» Carlo Castagnoli ho avuto l'opportunità di sentirlo a più riprese esprimere il suo sentimento e la sua gratitudine verso il professore Edoardo Amaldi che fu al tempo stesso suo mastro di fisica ed esempio vita.

Egli ha sempre dimostrato il suo profondo apprezzamento per colleghi e collaboratori e per tutti gli amici che lo hanno aiutato nella sua attività scientifica, didattica e organizzativa e per tutti i tecnici che gli hanno fornito la loro preziosa collaborazione.

Per questo egli resta per noi una figura indimenticabile.

PIO PICCHI
CERN - Ginevra

IN RICORDO DI CARLO CASTAGNOLI

Mi fa molto piacere ricordare di essere stato presente sia alla seduta del Consiglio di Presidenza della SIF del 19.02.2005, quando aderii con entusiasmo alla proposta del prof. Giuseppe

Franco Bassani di nominare Presidente Onorario della SIF il prof. Carlo Castagnoli, sia di aver letto la seguente «laudatio» al Consiglio della Facoltà di Scienze m.f.n. di Torino del 12.07.2000.

La proposta, che riguardava la nomina a Professore Emerito del prof. Carlo Castagnoli, venne approvata all'unanimità.

Il testo verbalizzato fu il seguente:

«**Carlo Castagnoli** appartiene alla generazione degli allievi diretti dei grandi maestri che, nel dopoguerra, furono artefici della ricostruzione della Fisica Italiana negli anni '50. A Roma, alla scuola di Edoardo Amaldi, egli fu parte attiva di quel gruppo romano impegnato nello studio della «Chimica dell'Universo» ad altissime energie (10^{12} eV) e delle particelle adroniche e leptoniche.

Nato a Mantova nel 1924, è mantovano di cultura e temperamento, con un tessuto umano di grande solidità.

Carlo Castagnoli nel 1947 si laureò con lode all'Università di Pisa e nello stesso anno si diplomò con lode alla Scuola Normale e già negli ultimi anni della Scuola iniziò la collaborazione con il «Gruppo di Roma», dove fu Professore Incaricato dal 1948 al 1959.

Dopo essere diventato Professore Straordinario di Fisica Generale a Parma negli anni 1959-1960, venne chiamato a Torino dove tenne la cattedra di Fisica Generale I dal 1960 al 1987, per passare alla cattedra di Astrofisica.

Fu Presidente della Società Italiana di Fisica da 1974 al 1981, dopo essere stato Vicepresidente dal 1968 al 1973 (carica alla quale venne rieletto dal 1992 al 1996). È nell'ambito della SIF che, prima come Consigliere e poi in posizioni di maggior responsabilità, essendosi formato alla Scuola di Gilberto Bernardini e del suo predecessore Giovanni Polvani, si battè sempre per difendere e far progredire lo spirito di unità e tolleranza scientifica che sono patrimonio tradizionale della Fisica Italiana.

Ciò andava di pari passo con l'impegno scientifico e la presenza in diversi settori di frontiera della Fisica moderna. Castagnoli, che dopo Gleb Wataghin aveva assunto la responsabilità delle direzioni dell'Istituto di Fisica Generale «A. Avogadro» di Torino (dal 1969 al 1981 e dal 1987 al 1995), aveva creato l'Istituto di Cosmogeofisica del CNR di Torino nel 1968 (da lui diretto fino al 1994), divenendo Presidente del Collegio dei Direttori del CNR dal 1972 al 1981. L'impegno scientifico fu di grande rilievo, basti ricordare le importanti ricerche col Gruppo romano, delle quali fanno parte la prima osserva-

zione in lastre nucleari di una annichilazione antiprotone cosmico con un protone, lo studio della non conservazione della parità nel decadimento $\pi \rightarrow e$ e dei parametri fondamentali ad essa correlati, lo studio del decadimento radiativo $\pi \rightarrow \mu e \gamma$ e l'avvio e l'organizzazione degli esperimenti «sotterranei» creando il Laboratorio della galleria del Monte Bianco del CNR (1969-1999). Fu quest'ultima una vera e propria impresa pionieristica che aprì la strada al contributo di primaria importanza dei fisici italiani a questo campo di ricerche, rafforzatosi con l'avvento del Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'INFN. Vanno ricordati, tra i risultati più importanti del gruppo cosmico di Carlo Castagnoli, lo studio dell'emissione radio da EAS, la misura dello spettro dei primari cosmici tra 10^9 e 10^{15} eV con tecniche visualizzanti, il limite della vita media del protone ($\tau \approx 10^{31}$ anni) che esclude alcune versioni delle teorie di grande unificazione (GUT), il limite superiore del flusso di monopoli GUT cosmologici e il flusso modulato da CygX-3. Più recente l'avvio dell'Astrofisica neutrinica, cui fa riferimento lo studio dell'emissione di neutrini della Supernova 1987A e, in seguito, la misura della prima correlazione tra segnali di telescopi neutrinici e di antenne gravitazionali (1988-1991), la prima osservazione (1989) di correlazioni tra EAS in superficie (Campo Imperatore) e i «*bundles*» muonici sotterranei (Gran Sasso) fino alla osservazione di sporadiche emissioni di fiotti γ a UHF dalla Crab Nebula (1991) e alla correlazione fra contatori Čerenkov. Un continuo spirito d'iniziativa e un grande entusiasmo sui temi di frontiera e su linee innovative hanno in seguito aperto nuovi campi d'indagine.

Le vie parallele della ricerca e della sua organizzazione hanno trovato in Castagnoli un alfiere di grandi attitudini, di sapiente maestria e di saldo carattere. Queste doti sono evidenti anche nella sua veste di sagace divulgatore. È stato ideatore e direttore del «Giornale di Fisica» della SIF, direttore del «Nuovo Cimento», della «Rivista del Nuovo Cimento» dal 1961 al 1981 ed è tuttora Direttore del Seminario Didattico di Torino.

È socio corrispondente della storica Accademia delle Scienze di Torino.»

Dopo ampia discussione la Facoltà unanime, alla luce delle qualità di scienziato e di docente e della sua totale dedizione alla ricerca ed alla vita universitaria, è lieta di proporre il prof. Carlo Castagnoli a suo Professore Emerito.

Questo il verbale di Facoltà¹.

Vorrei, pertanto, aggiungere qualche parola sul rimpianto e l'affetto che oggi esprimono i suoi molti amici e collaboratori torinesi che, tuttora, lavorano sulle molte linee di ricerca da lui avviate.

Arrivò a Torino principalmente su invito di Romolo Deaglio, Sergio Fubini, Gleb Wataghin. Si dedicò alla Fisica Cosmica iniziando con la ristrutturazione ed il rilancio del Laboratorio di Plateau Rosa, chiuso nell'estate del 1958 e quindi caduto nell'oblio. Direttore del LINAC iniettore di ADONE, avviò con l'aiuto di Renato Scrimaglio anche il laboratorio LEALE per elettroprodurre fasci di pioni. Io lo conobbi nel 1962, quando ancora sperimentavo all'elettrosincrotrone di Frascati con Alberto Gigli Berzolari. Immediatamente appoggiò l'idea di creare un gruppo di fisici nucleari dell'Istituto di Fisica Generale di Torino e, in una storica riunione del Direttivo INFN a Torino, ottenne per noi il finanziamento per la costruzione di un elettromagnete per camera a diffusione. Tale elettromagnete ci permise di fare ottimi esperimenti sia al fascio del sincrotrone di Torino sia ai fasci di pioni del LEALE. Fu una dimostrazione di stima e di generosità, in quanto la Fisica nucleare alla energie intermedie era fuori dal suo campo d'interesse. Posso dire che, se Gleb Wataghin mi fu maestro avviandomi alla Fisica sperimentale con una tesi/esperimento su una misura originale al Laboratorio della Testa Grigia che, se Gigli mi diede l'opportunità di imparare a sperimentare con fasci estratti da macchine acceleratrici, Carlo Castagnoli mi fu maestro di vita sia scientifica che universitaria. Il nostro gruppo crebbe e ha lavorato e lavora presso i maggiori Laboratori mondiali. Al JINR di Dubna iniziammo una collaborazione che dura dal 1968. Nel 1972 ebbi il piacere, con l'aiuto della direzione del JINR, di organizzare il primo incontro a Mosca tra il Gruppo Cosmico di Carlo Castagnoli e quello di Geoge Zatsepin dell'Istituto di Ricerche Nucleari dell'Accademia delle Scienze Russa. Fu l'inizio di una fruttuosa collaborazione italo-russa nel campo delle ricerche nei laboratori sotterranei

dei due Paesi. Tra i validi collaboratori di Castagnoli vi furono Giuliana Cini, Gianfranco Bologna, Pio Picchi, Mauro Dardo, Laura Bergamasco, Gianni Maria Navarra, Piero Galeotti, Oscar Saavedra, Benedetto D'Ettore Piazzoli, Gianpaolo Mannocchi, Roberto Visentin, Gian Carlo Trincherò, Andrea Chiavassa, Carlo Morrello, Luigi Briatore, Angelo Piano e molti altri. Nel campo della Fisica Nucleare gli sono grati (oltre me) Raffaello Garfagnini, Raimondo Bertini, Livio Ferrero, Luigi Busso, Ferruccio Balestra, Maria Pia Bussa, Angelo Maggiora, Daniele Panzieri, Gil Pontecorvo, Gianfranco Zosi, Flavio Tosello, Luigi Roasio, Piergiorgio Cerello, Antonino Grasso, e molti altri. Altre linee di ricerca fondamentale create dall'intuito di Castagnoli furono la formazione di un gruppo per lo studio della Fisica dell'Atmosfera, ponendo le basi anche della prima cattedra italiana in tale disciplina, andata ad Arnaldo Longhetto. Attualmente tale linea di ricerca è stata arricchita dalla costruzione di un Laboratorio di Geofluidodinamica, con il supporto del Centro Studi e Ricerche «Enrico Fermi» di Roma, presieduto da Antonino Zichichi. Hanno seguito tali studi Giuseppe Bonino, Paolo Trivero, Claudio Cassardo, Claudio Giraudò, Rita Genovese, Massimiliano Manfrin, Renzo Richiardone, Silvia Alessio, Giovanni Badino, Carla Taricco, e molti altri. Allo studio dell'Oceanografia si sono dedicati con successo Albert Osborne, Marina Serio, Miguel Onorato. Molto importante il gruppo di Astrofisica con Attilio Ferrari, Giovanni Silvestro, Roberto Gallino, Silvano Masaglia, Edoardo Trussoni, Antonaldo Diaferio, e di Fisica Solare con Ester Antonucci, Adele Doderò, Daniela Marocchi, e molti altri.

In occasione delle esequie di Carlo Castagnoli, la Federazione Mondiale degli Scienziati ha accolto la proposta avanzata dal suo Presidente, prof. Antonino Zichichi, di creare una borsa di studio, intitolata a Carlo Castagnoli, da assegnare ad un giovane brillante, originario di un Paese in via di sviluppo.

Tutti questi amici, ex-allievi, studiosi, porteranno sempre nel cuore l'alta figura di Carlo Castagnoli e ricorderanno con rimpianto i suoi saggi consigli, sia in campo scientifico, sia in campo umano.

GUIDO PIRAGINO
Università di Torino

¹ Le note biografiche contenute in detto verbale sono state tratte dalla prefazione a cura di R. A. Ricci al libro: «*Topics in cosmogeophysics*» *Collected papers in occasion of Prof. C. Castagnoli last teaching lecture.*

Il Consiglio della Società Italiana di Fisica, nella seduta tenutasi il giorno 8 giugno 2005, accogliendo di buon grado la proposta del Presidente Onorario, Prof. Renato Angelo Ricci, di istituire una borsa o un premio intitolato a Giuliana e Carlo Castagnoli per una tesi di laurea (o di dottorato), ha deliberato di istituire detto premio per una tesi di laurea svolta in uno dei due seguenti settori di ricerca:

- 1) astrofisica particellare;
- 2) confronto della variabilità solare fra passato e presente.

Il premio verrà assegnato in occasione del Congresso 2006.

Modalità e bando di partecipazione saranno presto disponibili in rete al sito: www.sif.it

Following a proposal by its President, Professor Antonino Zichichi, the World Federation of Scientists has decided to establish the Carlo Castagnoli Scholarship as part of its National Scholarship Programmes, implemented in 18 Developing and Emerging Countries. The scholarship will be instituted at SIF and awarded to young scientists in Developing Countries, to conduct scientific research activities in the field of Astrophysics and Cosmic Rays, in their national institutions and institutes and under the supervision of an eminent national scientist. Applications are sent to the Italian Physical Society, c/o The Carlo Castagnoli World Federation of Scientists' Committee.

Details on the scholarship basic rules and application form will be soon available on the web site: www.sif.it



**XCI CONGRESSO NAZIONALE
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA
Catania, 26 settembre - 1 ottobre 2005**

Lunedì 26 settembre

- 9:30–11:00 Cerimonia di Inaugurazione, Relazione del Presidente, Premiazioni
(Premi SIF e Migliori Comunicazioni al Congresso Nazionale di Brescia 2004)
- 11:00–12:00 Relazione Generale Sezione VI (Fisica generale, didattica e storia della fisica):
RENN J. (Berlino): *“L’annus mirabilis” di Albert Einstein*
- 12:00–13:00 Relazione Generale Sezione III (Astrofisica e fisica cosmica):
D’AMICO N. (Cagliari): *Radio pulsar in sistemi binari relativistici*
- 15:00–16:00 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare):
PETRONZIO R. (Roma): *Cromodinamica e simulazioni numeriche*
- 16:00–19:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

Martedì 27 settembre

- 9:00–12:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 12:00–13:00 Relazione Generale Sezione IVa (Geofisica e fisica dell’ambiente):
CRESCENTI U. (Chieti): *Il contributo delle scienze geologiche per la valutazione delle modificazioni climatico-ambientali*
- 15:00–18:30 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 18:30–20:30 Assemblea Generale dei Soci
Ordine del giorno:
- Approvazione ordine del giorno.
 - Approvazione del Verbale dell’Assemblea Generale dei Soci del 21 settembre 2004
(*Il Nuovo Saggiatore*, Vol. 20, N. 5/6, 2004).
 - Relazione del Presidente.
 - Relazioni del Collegio dei Revisori dei Conti e approvazione dei bilanci.
 - Nomina dei Revisori dei Conti (tre effettivi).
 - Discussione e approvazione della Relazione del Presidente.
 - 2005 Anno Mondiale della Fisica.
 - Presentazione Progetto Lauree Scientifiche (relazione di Immé J.).
 - Presentazione Associazione Italiana Studenti di Fisica (relazione di Venturelli D.).
 - Prospettive e sviluppo della SIF.
 - Varie ed eventuali.

Mercoledì 28 settembre

- 9:00–12:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 12:00–13:00 Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia):
MAZZOLDI P. (Padova): *Aspetti dell’impianto ionico nel settore delle nanotecnologie*
- 15:00–19:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 20:30 Cena Sociale

Giovedì 29 settembre

- 9:00–12:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 12:00–13:00 Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia):
MARCH N.H. (Oxford): *Quantum statistics of charged particles and fingerprints of Wigner crystallization*
- 15:00–16:00 Relazione Generale Sezione IVb (Biofisica e fisica medica):
GAMBHIR S.S. (Stanford): *Of mice and men: molecular imaging in living subjects*
- 16:00–17:00 Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare):
FIORENTINI G. (Ferrara): *Alcuni punti chiave in astrofisica nucleare*
- 17:00–20:00 Tavola Rotonda: *Le Tematiche di Einstein oggi*
Presiede: Bassani G.-F.
Coordina: Pucci R.
Interventi di: Aspect A., Giazotto A., Parisi G., Rovelli C.

Venerdì 30 settembre

- 9:00–13:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 15:00–16:00 Relazione Generale Sezione V (Elettronica e fisica applicata):
PISTORIO P. (Catania): *Creando il futuro con la Nanoelettronica: una strategia per l'Europa*
- 16:00–18:00 Conferenza Cittadina del Prof. ZICHICHI A.: *L'Anno Mondiale della Fisica: Fermi, Dirac, Einstein*
- 18:30–19:00 Cerimonia di Chiusura e Proclamazione Migliori Comunicazioni

Sabato 1 ottobre

- 9:00–18:30 Gita Sociale a Siracusa

**OBITUARY: FRANCESCO MELCHIORRI
(1940-2005)**

The death of Francesco Melchiorri on Thursday, July 28, marks the end of the pioneer era of experimental cosmology in Italy. Francesco, who was born in Rome on 24 March 1940, began, more than 30 years ago, experimental and observational work on the cosmic microwave background (CMB) radiation, our main probe of the large-scale Universe. The work he and his colleagues have done resulted in major contributions to the requisite knowledge of the infrastructure of CMB measurements in general, and CMB anisotropy in particular. His many past students and colleagues are spread all over Italy and elsewhere, continuing the mission he helped define and lead for so many years.

Francesco's scientific leadership was provided through his mastery of the field and its experimental complexities. He maintained a high level of involvement in experimental CMB research,

leading the work of a large number of students and researchers in a very busy lab.

His leadership emanated in a gentle, unassuming style. He was soft spoken, clear and concise. Eversince we first met (in Varenna, in 1980, when he and Remo Ruffini invited me to lecture in the Fermi School on «Gamov Cosmology») I was impressed by his pleasant demeanor, and his healthy, sarcastic attitude towards «crazy» cosmological theories and models (which, however, did not prevent him from co-authoring quite a few theoretically inclined papers on non standard models).

But this is obviously not a summary of Francesco's impressive scientific output. So close to his death just a few days ago, what mostly comes to mind is the essence of his human qualities: the wonderful husband and father, a caring and nurturing educator, an extremely generous colleague, and a highly sensitive man. His noble attitude and gentle conduct continued through the last, painful



phase of his life, when his health deteriorated, and he must have felt tremendous discomfort and anxiety. Francesco endured stoically, seemingly unaffected by his condition; one had the feeling that he was concerned not to cause any uneasiness to whoever asked him about his health, a subject matter he discreetly tried to avoid.

These qualities, along with his scientific leadership, have undoubtedly contributed greatly to his prolific record as a mentor to so many who will miss him greatly.

YOEL REPHAELI
Tel Aviv University

PERCORSI

VIA PANISPERNA E LA RADIOATTIVITÀ INDOTTA DAI NEUTRONI: IL CORONAMENTO DI UN PROGETTO

A. De Gregorio

*Dipartimento di Fisica, Università
«La Sapienza», Roma*

Il 25 marzo 1934 Enrico Fermi annunciò su «La Ricerca Scientifica» di aver osservato la radioattività indotta da neutroni in campioni di fluoro e alluminio. Tale fondamentale risultato costituiva l'efficace sintesi di due precedenti scoperte: quella del neutrone e quella della radioattività artificiale (prodotta mediante particelle alfa, deutoni e protoni). Il successivo ottobre una seconda, cruciale scoperta seguì: quella dell'effetto delle sostanze idrogenate sulla radioattività indotta dai neutroni, primo passo verso l'utilizzazione dell'energia nucleare.

Il 1934 segnava così l'anno di una da lungo attesa rinascita per la fisica italiana, che per decenni aveva versato in condizioni di inferiorità rispetto a quella degli altri grandi paesi europei e degli Stati Uniti: grazie alle ricerche di Fermi, che a cavallo tra il 1933 e il 1934 aveva pubblicato la teoria del decadimento beta e che adesso, con gli esperimenti di radioattività indotta, dettava le linee guida anche per le ricerche sulla fisica dei neutroni, Roma divenne polo di riferimento a livello mondiale per gli studi sul nucleo. Giungeva così a compimento un progetto in cui fin dalla metà degli anni Venti del Novecento il direttore dell'Istituto fisico di Roma Orso M. Corbino aveva creduto e per la cui realizzazione egli aveva investito ogni risorsa proprio sul giovane Fermi. Nella presente nota ripercorreremo le principali tappe di questo cammino di preparazione alla sperimentazione sul nucleo, dalle quali emergerà chiaramente il contributo di Franco Rasetti.

Degli eventi che portarono i laboratori di via Panisperna a primeggiare nella fisica nucleare,

nello specifico legati agli esperimenti con i neutroni, esistono testimonianze particolarmente dovute agli stessi collaboratori di Fermi, nonché a sua moglie⁽¹⁾. Sono però anche accessibili ulteriori fonti storiche, quali quaderni e schede di laboratorio, appunti, lettere e altro materiale autografo, che permettono un utile, e persino necessario, approfondimento e arricchimento del quadro tracciato a decenni di distanza dai testimoni diretti di quegli avvenimenti; né vanno dimenticati gli stessi articoli scientifici dell'epoca, che permettono una valutazione oggettiva del contesto in cui maturarono gli eventi a via Panisperna.

1. – Verso l'esplorazione del nucleo

L'ambiente scientifico italiano iniziò a guardare con interesse alle questioni legate al nucleo atomico alla fine degli anni Venti, come è documentato da un discorso tenuto alla Società italiana per il progresso delle scienze nel settembre 1929 da Corbino, direttore dell'Istituto fisico di Roma:

Si può quindi concludere che mentre si presentano come improbabili grandi progressi della fisica sperimentale nel suo dominio ordinario, molte possibilità sono aperte sulla via dell'aggressione del nucleo atomico, il vero campo della Fisica di domani⁽²⁾.

Altrettanto consapevole del futuro che attendeva la microfisica si mostrò nel 1930 Fermi:

Ora che lo studio dell'atomo e della molecola è bene avviato verso la sua soluzione, l'attenzione dei fisici incomincia a rivolgersi, con sempre maggiore insistenza, verso un nuovo problema: quello della struttura del nucleo⁽³⁾.

Fino ad allora, le ricerche svolte da Fermi e dal suo gruppo avevano riguardato tutt'altri ar-

gomenti, come l'elettrodinamica quantistica, per la parte di teoria, e per il versante sperimentale la spettroscopia atomica e molecolare.

In campo teorico, oltre a Giovanni Gentile jr, che (già nel 1928) si era occupato di un modello nucleare proposto da Ernest Rutherford nel 1927, Ettore Majorana e Fermi avevano manifestato fin dal 1929 la loro attenzione verso il nucleo: il primo discutendo a luglio una tesi di laurea (di cui Fermi era stato relatore) che conteneva un affinamento dei calcoli di Gamow e Houtermans e una trattazione del problema della ricostituzione dei nuclei radioattivi mediante cattura di una particella alfa; il secondo con un articolo riguardante la teoria dei momenti magnetici nucleari, pubblicato alla fine di quell'anno⁽⁴⁾. Nuovi spunti di riflessione giunsero a via Panisperna dai successi sperimentali che Rasetti aveva conseguito durante l'anno accademico 1928-29 al California Institute of Technology di Pasadena. Nell'Archivio «Amaldi», presso il Dipartimento di fisica dell'Università «La Sapienza» di Roma, è conservato un dattiloscritto che Rasetti redasse allo scopo di «*facilitate the task of those friends and colleagues who will write my obituaries [...] and to avoid those errors that almost inevitably creep in, even when writing about persons with whom one has been closely associated*»; il fisico italiano ricorda che a Pasadena egli, immediatamente dopo che fu scoperto l'effetto Raman, ne intraprese lo studio nei gas e aggiunge: «*I undertook this work entirely on my own initiative, since nobody at that laboratory had any previous experience with Raman techniques*». Rasetti scoprì che il nucleo di azoto $^{14}_7\text{N}$ segue la statistica di Bose-Einstein, proprietà che, assieme a quella già nota che il relativo spin vale 1, poneva seri ostacoli al modello per cui il nucleo avrebbe contenuto protoni ed elettroni (in numero totale dispari).

Rasetti, in una nota di commento contenuta nella raccolta degli articoli di Fermi, ricorda:

[Fermi's] intention of entering the nuclear field first became manifest in the winter of 1930-1931, although his theoretical work at the time followed entirely different lines. He set himself as a first task the construction and operation of a cloud chamber, with the help of E. Amaldi. The weakest point of the Rome physics department was its poorly equipped and inefficiently staffed machine shop [...]. These circumstances induced Fermi to make use of the «do-it-yourself» methods that were characteristic of him both in theoretical and experimental work. [...] Al-

pha-particle tracks were soon observed, but their quality was poor owing to the slowness of the expansion and difficulty of clearing the field of old tracks. [...] In the spring of 1931 Fermi gave up the cloud chamber project and went back to theoretical work.

Fino all'ottobre del 1931, quando, sotto il patrocinio della Reale Accademia d'Italia, si tenne a Roma il *Convegno di fisica nucleare* che sanciva ufficialmente l'aprirsi dell'istituto romano allo studio del nucleo⁽⁵⁾, i risultati concreti riguardanti la fisica nucleare che erano stati pubblicati dai fisici di via Panisperna rimanevano circoscritti ai già citati contributi di Rasetti (mentre si trovava negli Stati Uniti) e di Gentile e Fermi: dopotutto, nonostante la presa di coscienza manifestata da Corbino e da Fermi delle importanti prospettive che si aprivano, quelli descritti nel commento di Rasetti non erano che i primi passi verso la sperimentazione sul nucleo e l'istituto romano era ancora, nel 1931, prevalentemente impegnato in ricerche «classiche» di fisica atomica e molecolare.

2. – L'attuazione di un progetto

Il convegno del 1931 impresse una accelerazione verso il concretizzarsi del nuovo programma di ricerca. In particolare, tra il 1931 e il 1932 Rasetti trascorse un altro anno accademico all'estero, presso il laboratorio di Lise Meitner a Berlino-Dahlem, per apprendervi le tecniche proprie della fisica nucleare. Il ruolo che il fisico umbro ricoprì nell'economia dell'Istituto fisico di Roma è espresso chiaramente da Amaldi in un'intervista a Charles Weiner: *Segrè and I both learned to do experimental work from Rasetti. Rasetti was a very good experimentalist, and he taught us how to work. He was much better than Fermi as an experimentalist. [...] Rasetti went to Berlin, and he was working with Meitner. It was part of this idea to learn nuclear physics techniques*⁽⁶⁾. Nello scritto autobiografico Rasetti, a proposito delle motivazioni del proprio soggiorno in Germania, ricorda:

In the fall of 1931 I left Rome for another year [...] to learn radioactive techniques under Lise Meitner [...]. Discussions with Fermi and the other physicists in Rome had led to the conclusion that spectroscopy was rapidly becoming a field where new fundamental discoveries could no longer be expected, whereas the nucleus appeared as the likely centre of interest in the near future. Hence the decision

to learn and import nuclear techniques. In Dahlem I familiarised myself with the preparation of radioactive sources and the use of counters, ionisation chambers and cloud chambers.

«Importare» un bagaglio di competenze sperimentali era necessario per elevare le potenzialità dei laboratori romani, dal livello che aveva indotto Fermi a cimentarsi e quasi subito a desistere dall'uso delle camere a nebbia, a un livello di pari efficienza rispetto ai centri specialistici stranieri. L'obiettivo da perseguire in modo risoluto è ribadito molto efficacemente da Fermi in una lettera del 10 settembre 1932 a Segrè: «Programmi di lavoro per l'anno venturo non ne ho affatto: non so nemmeno se tornerò a camera-di-wilsoneggiare, oppure se diventerò di nuovo teorico. [...] Certo il problema di attrezzare l'Istituto a lavorare sui nuclei si fa sempre più urgente, se non vogliamo ridurci troppo in uno stato di dormiveglia intellettuale»⁽⁷⁾. Si faceva sempre più strada la consapevolezza che il filone spettroscopico, che fino ad allora era andato per la maggiore a via Panisperna, era destinato a esaurirsi, ma d'altra parte tale settore dava le garanzie di un campo di ricerca collaudato e ciò provocava resistenze da parte di chi, Segrè su tutti, era riluttante ad abbandonare la vecchia via per avventurarsi sul terreno poco familiare del nucleo.

Pochi mesi dopo il Convegno dell'ottobre 1931, l'ambiente romano ricevette dalla scoperta del neutrone nuovo, ulteriore stimolo a perseguire il programma nucleare: Rasetti seppe dei risultati di Chadwick mentre si trovava a Berlino e, subito, intraprese alcuni esperimenti mediante i quali riuscì a dimostrare che la radiazione penetrante del berillio, oltre a contenere corpuscoli elettricamente neutri di massa circa uguale a quella del protone, ha una componente elettromagnetica⁽⁸⁾. Rasetti ricorre al metodo delle coincidenze, registrate con due contatori Geiger-Müller a pareti di alluminio spesse 0,5 mm disposti a piccola distanza l'uno dall'altro. La radiazione $Po + Be$ filtrata attraverso 2 cm di piombo provoca un incremento del numero di coincidenze, dalle 12 all'ora (dovute al fondo) a 90; interponendo alcuni schermi di alluminio tra i due contatori, tale numero decresce: della metà con 2 mm di alluminio, per sparire quasi del tutto con 5 mm. I neutroni, afferma Rasetti, non sono sensibilmente assorbiti attraverso simili spessori di materia; d'altra parte i nuclei pesanti e gli elettroni che sono proiettati dall'urto dei neu-

troni non sono abbastanza penetranti da produrre coincidenze. Quindi, egli conclude, queste ultime sono generate da particelle che si comportano come elettroni, emessi per effetto Compton da fotoni di circa 10 MeV di energia: la radiazione del berillio non è omogenea, ma rappresenta un «miscuglio» di neutroni e quanti gamma (nella disintegrazione del berillio, egli rassicura, non c'è da stupirsi che si producano raggi gamma). Durante il soggiorno berlinese, Rasetti studierà anche in che modo l'intensità della radiazione del berillio dipenda dall'energia delle alfa incidenti; l'anno successivo Gilberto Bernardini, anch'egli presso i laboratori di Lise Meitner, ne confermerà i risultati⁽⁹⁾.

Fin dall'inizio del 1932 Rasetti possiede una padronanza delle tecniche sperimentali che gli permette di confrontarsi alla pari con gli scienziati che conducono ricerche di avanguardia nel campo della fisica del nucleo: usa con perizia contatori Geiger-Müller e anche camere di Wilson (due foto pubblicate nell'articolo mostrano le traiettorie dei protoni di rinculo prodotti dai neutroni). Egli, nella già citata nota di commento contenuta nella raccolta degli articoli di Fermi, scrive:

In the fall of 1932, Fermi and Rasetti organised a joint program of research in nuclear physics in Rome. To minimise the drawback of the inadequate machine shop, several instruments were designed and their construction was «farmed out» in a private shop in Rome. A rather large cloud chamber, essentially designed after those in use in Berlin-Dahlem, worked excellently as soon as it was assembled. [...] These developments were made possible by a grant from the Consiglio Nazionale delle Ricerche, which had raised the research budget of the department to an amount of the order of \$ 2000 to \$ 3000 per year; a fabulous wealth when one considers that the average for physics departments in Italian universities was about one-tenth of that amount.

Il progetto di rinnovamento era dunque in fase di attuazione, ma, a dispetto di tali sforzi, ancora per diverso tempo risultati concreti maturarono soltanto in campo teorico: Fermi e Segrè si occuparono della teoria delle strutture iperfini, Renato Einaudi espone alcuni calcoli sulle righe proibite connesse allo spin nucleare, Gian Carlo Wick studiò alcuni aspetti dell'interazione neutrone-protone; nel 1933 Majorana pubblicò un'importante teoria dei nuclei — nella quale ai neutroni era assegnato un ruolo fondamentale — e Fermi la celebre teoria del decadimento be-

ta⁽¹⁰⁾. Tuttavia, in campo sperimentale fino al 1934 nessun lavoro fu svolto in Italia sui neutroni, cosicché, di fatto, gli unici esperimenti di fisici italiani erano stati condotti da Rasetti e Bernardini mentre si trovavano in Germania, nel 1932 e nel 1933. Tale era dunque la situazione nel nostro Paese, mentre in Francia, in Inghilterra, in Germania e negli Stati Uniti fervevano le indagini sui neutroni: si indagavano le proprietà di diffusione e assorbimento, si scopriva la capacità di provocare disintegrazioni nucleari e ci si interrogava sulla natura degli elettroni secondari associati al passaggio della radiazione penetrante del berillio⁽¹¹⁾.

Se ci si limita a considerare i soli risultati conseguiti, la condizione della fisica del nucleo che fino al 1933 fu praticata nei laboratori italiani appare non molto dissimile dalla situazione dei primi due decenni del Novecento, quando all'estero si cavalcava l'onda della trasformazione introdotta dalla teoria dei quanti e dalla relatività mentre il nostro paese vi rimaneva impermeabile, per non dire refrattario. Ma la somiglianza è soltanto esteriore, proprio perché, nonostante tardassero a concretizzarsi risultati di valore, Corbino e Fermi avevano colto l'importanza del nuovo campo d'indagine e avevano promosso un deciso, seppur graduale, avvicinamento alle linee di ricerca seguite all'estero. La radicale differenza che esisteva nella sostanza tra le situazione improduttiva dei primi anni Trenta e le condizioni di sterilità di inizio secolo si può riassumere con un'unica parola: progetto. Il programma nucleare era in via di attuazione: i lavori stranieri erano studiati sistematicamente e ci si familiarizzava con le tecniche sperimentali. Quando il progetto di rinnovamento ebbe coinvolto pienamente le competenze individuali e le dotazioni di laboratorio, e si presentò il momento propizio, anche in campo sperimentale i risultati giunsero copiosi.

3. – Le sorgenti radioattive e le tecniche di rivelazione

Il conseguimento di risultati nella sperimentazione nucleare era subordinato alla disponibilità di sorgenti radioattive adeguate. Come Rasetti scrisse chiaramente nel 1934:

Nell'Istituto Fisico dell'Università di Roma si sta svolgendo, con l'aiuto del Consiglio Nazionale delle

Ricerche, un programma organico allo scopo di attrezzare l'Istituto stesso per ricerche di fisica del nucleo. Lavori di questo tipo non si possono improvvisare, anzi esigono una complessa organizzazione, sia per gli apparecchi del tutto speciali usati nella tecnica della radioattività, sia — e più ancora — per le difficoltà connesse col procurarsi le sostanze radioattive, per separarle e metterle nelle condizioni di essere adoperate per gli esperimenti⁽¹²⁾.

Nel 1933, le sostanze radioattive possedute dai laboratori di fisica delle università italiane ammontavano nel complesso a pochi milligrammi di sali di radio, adatti tutt'al più a dimostrazioni didattiche sugli effetti ionizzanti, non certamente a condurre ricerche di fisica nucleare. I laboratori della Sanità pubblica, diretti da Giulio Cesare Trabacchi e ospitati nelle stesse strutture dove aveva sede l'Istituto fisico della Regia università, disponevano invece di un cospicuo quantitativo del prezioso elemento: Oscar D'Agostino⁽¹³⁾ nel 1958 ricorda di 1600 mg di sali di radio, dei quali 1300 erano destinati alle terapie mediche, mediante l'estrazione settimanale del radon da distribuire agli ospedali romani; dagli altri 300 mg, che «per particolari vicende» erano rimasti inutilizzati diversi anni, erano ricavate le sorgenti per le ricerche di fisica. A questo proposito, Rasetti nel 1934 riferì con maggiore precisione che i 300 mg di sali di radio, rimasti inutilizzati 14 anni «per complicate vicende», erano stati di recente acquisiti dalla Direzione della Sanità pubblica.

L'uso di sorgenti radioattive a scopi di ricerca è testimoniato dagli studi sul radon condotti nel 1933 da Nella Mortara, presso l'Ufficio del radio. In un articolo apparso nel 1932 sulla Rivista di radiologia e fisica medica, ella descrive uno dei due impianti con i quali, da soluzioni di cloruro di radio (che contenevano rispettivamente 200 e 1041 mg di radio), era estratta l'emanazione (fig. 1). La collaboratrice di Trabacchi presso i laboratori della Sanità pubblica mise a punto alcuni metodi per la «taratura» dei preparati radioattivi mediante camere a ionizzazione, analizzò le proprietà di diffusione del radon e l'ottimizzazione dei metodi per la sua purificazione⁽¹⁴⁾.

Il radon, in quantità equivalente a 100–150 mCi, fu usato nel 1933 anche da Fermi e da Rasetti, come sorgente gamma per la messa a punto di uno spettrografo che sfruttava la diffrazione attraverso il reticolo cristallino del bismuto. Nelle ricerche di fisica nucleare vere e proprie, ben più ambite erano però le sorgenti di polonio, che

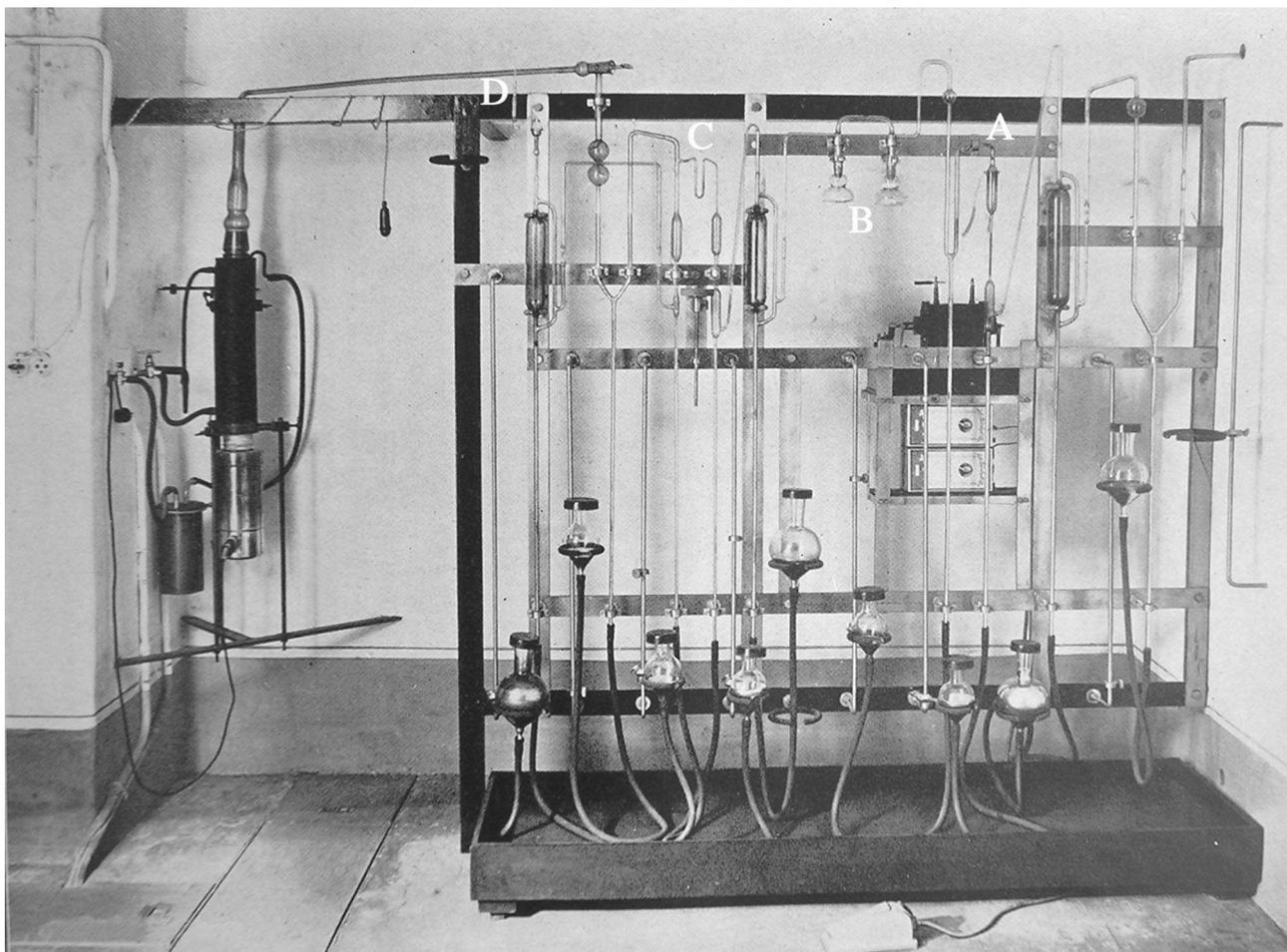


Fig. 1. – Veduta parziale di uno dei due impianti per l'estrazione del radon (la soluzione di cloruro di radio era in una stanza attigua). Nel tubo *A* erano fatte scoccare alcune scintille per far ricombinare tra loro idrogeno e ossigeno; la miscela gassosa era in comunicazione con i due recipienti *B*, contenenti sostanze essiccanti; immergendo la successiva ansa *C* in aria liquida, avveniva la liquefazione del radon. Il tubo verticale di vetro *D* terminava con il capillare nel quale era pompata l'emanazione. Le grandi ampolle in basso contenevano il mercurio per l'apertura e la chiusura delle varie parti del circuito di estrazione (da: N. Mortara, *L'Ufficio del Radio*, cit. in rif. (14)).

43

emettevano quasi esclusivamente particelle alfa: Rasetti riuscì nella "impresa" di ottenere da Trabacchi i 300 mg di preparati di radio di recente acquisizione, che usò appunto per produrre sorgenti di polonio. Nella catena di decadimenti che ha origine dal radon, si giunge alla formazione del radio D (^{210}Pb), quindi del radio E (^{210}Bi) e del polonio, o radio F (^{210}Po). Ma mentre tutti i prodotti del radon che precedono il Ra D hanno vite medie dell'ordine di qualche minuto, il radio D ha tempo di dimezzamento di 22 anni, per cui se si intendeva estrarne il polonio era necessario disporre di forti preparati di radio, dai quali però per molti anni non fosse stata estratta l'emanazione.

Per apprendere le tecniche di separazione, Rasetti nel 1933 si era recato nuovamente presso il Keiser Wilhelm Institut in Berlin-Dahlem, dove aveva potuto applicare a una piccola quantità di radio i procedimenti che avrebbe poi

dovuto ripetere su più vasta scala. Tornato a Roma, a novembre separò dal radio messo a disposizione da Trabacchi il radio D, da cui ricavare periodicamente il polonio per gli esperimenti. Alle separazioni collaborò il chimico D'Agostino, che, su proposta di Rasetti (ormai completamente proiettato verso le ricerche di fisica nucleare) e con l'appoggio di Corbino e di Fermi, ottenne una borsa di studio del CNR per poi recarsi presso i laboratori di Marie Curie a Parigi, «per impraticarsi nelle manipolazioni della chimica radioattiva»⁽¹⁵⁾. Grazie a una separazione «pressoché quantitativa», a via Panisperna fu ottenuto un preparato di radio D con attività di circa centodieci millicurie, «uno dei più forti del mondo, forse inferiore soltanto a quello posseduto nel Laboratorio di M.me Curie»⁽¹⁶⁾; talmente forte, che Rasetti poté inviare il polonio anche ad altri laboratori (e in parti-

colare a Gilberto Bernardini), per le ricerche sui neutroni.

L'acquisizione di un consistente e provvidenziale quantitativo di sali di radio, l'uso che Trabacchi concesse di farne a Rasetti e le sorgenti di polonio destinate alla sperimentazione nucleare che questi ne ricavò rappresentano nel modo più emblematico il momento in cui, nel 1933, l'attività sperimentale di via Panisperna virò decisamente verso la fisica del nucleo.

Se, da una parte, fino al 1933 i laboratori di via Panisperna erano di fatto ancora impegnati in ricerche di spettroscopia e nei preparativi per la fisica nucleare, dall'altra a Firenze, nonostante le assai più limitate risorse a disposizione, erano state realizzate ricerche riguardanti sostanze debolmente radioattive. Non si trattava né di studi di punta, né che a rigore riguardavano la fisica del nucleo propriamente detta, ma per le tecniche adottate e persino per alcune delle sostanze fatte oggetto di studio presentavano importanti aspetti in comune con i successivi esperimenti di radioattività indotta dai neutroni realizzati nella capitale.

Tra i giovani fisici dell'istituto romano e di quello fiorentino si era stabilita da alcuni anni una proficua interazione. Tra la fine del 1924 e il 1926, Fermi aveva ottenuto per due anni consecutivi l'incarico per il corso di Fisica matematica presso l'università di Firenze; qui, con Rasetti, aveva anche svolto alcune ricerche sperimentali di spettroscopia. Ottenuta nel 1926 la cattedra di Fisica teorica a Roma, dallo stesso concorso risultò vincitore anche l'amico Persico che fu chiamato a Firenze, dove, sotto la sua guida illuminata, si formarono alla meccanica quantistica giovani studiosi. Tra i ricercatori che alla fine degli anni Venti operavano nell'istituto di Arcetri citiamo Daria Bocciarelli, Gilberto Bernardini, Giuseppe Occhialini, Giulio Racah e Bruno Rossi. Fu, in particolare, in seguito alla entusiastica reazione con cui quest'ultimo accolse il lavoro in cui Walther W. Bothe e Werner Köhlorster ponevano, con il metodo delle coincidenze, in serio dubbio l'interpretazione dominante che assegnava ai raggi cosmici natura elettromagnetica, che furono intraprese a Arcetri ricerche mediante contatori Geiger-Müller. Tra l'autunno del 1929 e la successiva primavera Rossi si occupò della costruzione di alcuni geiger e dell'elettronica di supporto per la rivelazione dei raggi cosmici e introdusse il circuito a coincidenze, che migliorava di un ordine di grandezza la risoluzione temporale ottenuta

(con l'ausilio di una tecnica fotografica) da Bothe e Köhlorster. Giunta l'estate del 1930, egli si recò per alcuni mesi presso il laboratorio di Bothe, a Berlino, dove ripeté in una versione modificata l'esperimento di Bothe e Köhlorster e dove nacque il suo interesse per gli effetti geomagnetici: in breve tempo, quella di Rossi divenne una delle voci più autorevoli nel campo dei raggi cosmici.

Vinto nell'autunno del 1932 il concorso a cattedra e chiamato presso l'università di Padova, Rossi lasciò Arcetri. Qui Giuseppe Occhialini e Daria Bocciarelli si dedicarono a un'assidua indagine sperimentale riguardante le sostanze debolmente radioattive, nella quale impiegarono contatori Geiger-Müller⁽¹⁷⁾. L'inconveniente sistematico in esperimenti del genere era che la debole attività dei preparati impediva di ricorrere ai metodi usuali per l'analisi magnetica dei raggi: tali metodi richiedevano l'uso di sorgenti di piccole dimensioni, mentre elementi come il rubidio e il potassio, data la loro debole attività, dovevano necessariamente presentare una grande superficie per offrire una intensità misurabile. La soluzione che Rossi suggerisce a Occhialini prevede il ricorso a uno spettrografo costituito da un piccolo contatore Geiger-Müller a parete di alluminio spessa $7\mu\text{m}$, attorno al quale è disposta coassialmente una superficie cilindrica (di raggio circa dieci volte maggiore) ricoperta internamente da una patina di cloruro di rubidio; un contatore telefonico registra gli impulsi, opportunamente amplificati, che provengono dal contatore Geiger-Müller. Parallelamente all'asse del cilindro è applicato un campo magnetico: all'aumentare della sua intensità sempre meno elettroni di decadimento raggiungono il contatore ed è così possibile ricostruire il loro spettro. Daria Bocciarelli sfrutta le medesime procedure per il potassio, di cui analizza lo spettro beta (uno dei suoi lavori è presentato da Fermi ai Lincei). Ella ricorre sia al metodo delle coincidenze, mediante due contatori a tubo con pareti di alluminio spesse solamente $7\mu\text{m}$ (mantenuti a bassa pressione in un recipiente di vetro), sia a un unico contatore (circondando, ad esempio, un geiger a pareti di alluminio spesse $2/10$ di mm con una superficie cilindrica ricoperta di sali di potassio e ponendo tra i due vari schermi coassiali di alluminio, in modo da ricavare lo spettro di assorbimento).

Una disposizione sperimentale non dissimile era stata usata da Georg von Hevesy, W. Seith e M. Pahl, che nell'autunno del 1931 avevano in-

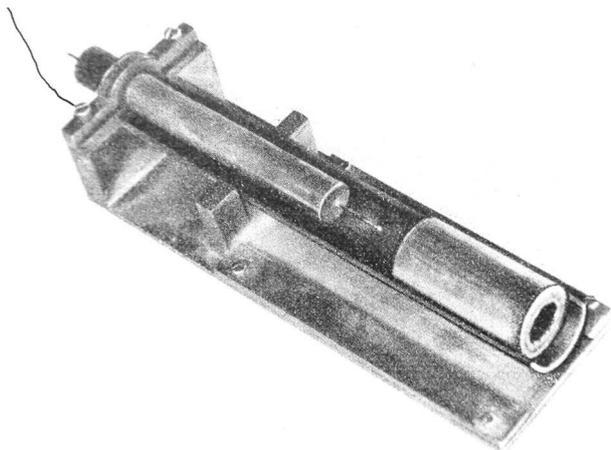


Fig. 2. – L'apparato di rivelazione per lo studio della radioattività del potassio usato da von Hevesy, Seith e Pahl: sono chiaramente riconoscibili il contatore e il campione da analizzare, a forma di cilindro cavo (da: G. von Hevesy, W. Seith, M. Pahl, *Über die Radioaktivität des Kalium*, cit. in rif. (18)).

viato a «Zeitschrift für physikalische Chemie» un lavoro sulla misurazione della debole attività del potassio⁽¹⁸⁾. La sostanza in polvere era pressata in forma di un cilindro cavo che era fatto scorrere su una guida, fino a disporlo coassialmente attorno al contatore (fig. 2).

Il problema delle sostanze debolmente radioattive, con la difficoltà di individuarne l'esistenza e le proprietà, sarà esattamente quello che Fermi si troverà a fronteggiare negli esperimenti di radioattività indotta dai neutroni. Gli accorgimenti a cui ricorrerà saranno gli stessi che abbiamo qui visto: contatori Geiger-Müller di piccole dimensioni a pareti di alluminio 'sottili' e, quando possibile, campioni in forma di cilindro cavo, con i quali massimizzare l'efficienza nella produzione di nuclidi radioattivi e nel conteggio degli elettroni di decadimento.

4. – Le reazioni di Fermi e del suo gruppo alla scoperta della radioattività artificiale

Nel 1933 l'Istituto Fisico romano si teneva regolarmente aggiornato sulle ricerche in fisica nucleare condotte nei laboratori stranieri. A Fermi, in particolare, si presentarono diverse occasioni per conoscere in prima persona i risultati che altri laboratori andavano conseguendo, con diversi viaggi all'estero e con la partecipazione a convegni internazionali: prese parte infatti sia alla conferenza dell'*American Physical Society*, nel giugno 1933, sia al settimo

Convegno Solvay, nell'ottobre successivo⁽¹⁹⁾. Durante il congresso di Chicago presentarono i risultati conseguiti nei loro laboratori, tra gli altri, Cockcroft, Harkins, Henderson, Lawrence, Lewis, Livingston, che subito dopo la scoperta della radioattività indotta dalle alfa — ma prima di quella provocata dai neutroni — avrebbero ottenuto la radioattività artificiale mediante acceleratori; a Bruxelles, oltre che degli esperimenti di disintegrazione mediante α e particelle accelerate artificialmente, si discusse molto sulla natura del neutrone e su aspetti generali riguardanti la struttura del nucleo⁽²⁰⁾. Per Fermi la partecipazione al convegno Solvay fu di grande stimolo e poche settimane più tardi pubblicò la teoria del decadimento beta.

Quando, all'inizio del 1934, giunse notizia della scoperta della radioattività artificiale, l'ambiente di via Panisperna era non solamente in grado di accoglierla apprezzandone a fondo il significato, ma anche preparato a inaugurare finalmente un nuovo corso di ricerche in fisica nucleare. Tra le carte conservate presso la Fondazione «Oscar D'Agostino» di Avellino vi è una lettera che il 9 febbraio 1934 Fermi e Rasetti scrissero (con in calce i saluti di Segrè e Amaldi) al chimico che su loro invito era partito a gennaio per Parigi, dove era stato accolto nei laboratori di M.me Curie. Fermi e Rasetti aggiornano D'Agostino sullo stato di avanzamento dei preparativi per le ricerche di fisica nucleare: si compiacciono che i preparati di polonio, al cui ottenimento aveva contribuito lo stesso D'Agostino, siano molto «puliti» e diano in camera a nebbia «un bel ventaglio di particelle α della stessa lunghezza» e riferiscono che una prima camera di Wilson funziona già bene, con l'unico inconveniente di produrre forti vibrazioni, deleterie per la tenuta; una seconda camera a nebbia è in stato avanzato di costruzione. Il testo della lettera recita:

Roma, 9 febbraio 1934

Caro D'Agostino,

La ringraziamo delle sue notizie e ci fa piacere sentire che ha potuto orientarsi facilmente nell'ambiente dell'Istituto di M.me Curie.

Il procedimento per la preparazione della pizza di bismuto è descritto dettagliatamente nella nota di cui le inviamo due estratti; in ogni caso siamo a disposizione per qualsiasi ulteriore schiarimento. Le inviamo anche una fotografia di uno spettro di raggi gamma, perché le riproduzioni sulla Ricerca Scientifica non sono venute molto chiare. Le spediamo anche per Joliot un monocristallo di Bismuto con una faccia già preparata per le spettrografie.

599	✓ 9.12.33	Camera di Wilson a funzionamento pneumatico, costituita da cilindro, pistone galleggiante, rubinetto a tre vie con meccanismo a scatto, e tre anelli di bronzo di ricambio.	1260
600	✓ 9.12.33	Camera di Wilson sperimentale a molle di acciaio, con cilindro e pistone fusi in bronzo, completo di meccanismi di caricamento e scatto	1260
601	9.12.33	Motorino elettrico 150 Volt (S.N. 15) puleggia riduttore velocità 1/50	1261
602	9.12.33	Reostato a cursore tipo $\text{P.S. } 650/45k - 1.80 \text{ amp. } 1k \text{ Ohm. (N. } 14368)$	1263
603	18.12.33	Reostato a cursore tipo $\text{P.S. } 650/17k - \text{amp. } 2.50 - \text{Ohm } 33 (14369)$	1263
604	7.2.34	Dispositivo con 4 termocoppie riunite a forma di ponte per misure su debolissime correnti alternate	1273

Fig. 3. – Le note di carico delle due camere di Wilson fatte costruire per conto dell'Istituto fisico di via Panisperna e quella del relativo motorino (Museo di Fisica dell'Università «La Sapienza» di Roma).

I preparati di polonio che sono stati messi nella camera di Wilson sono pulitissimi, e danno un bel ventaglio di particelle alfa tutte della stessa lunghezza; la camera grande funziona bene, salvo per le masticiature. È in stadio avanzato di costruzione l'altra camera a reticella tipo Wilson. Siamo mettendo su dei contatori per ripetere le esperienze di Joliot sulla radioattività artificiale con emissione di positroni, cercando se non è possibile separare nei pochi minuti di vita media il prodotto radioattivo instabile che si dovrebbe formare.

Molti auguri e saluti; ricambi i nostri saluti a tutti i conoscenti comuni.

Enrico Fermi
F. Rasetti

Grazie delle cartoline e molti cordialissimi saluti
E. Segrè
E. Amaldi

È di grandissimo interesse l'intenzione di approntare dei contatori per ripetere le esperienze di Joliot sulla radioattività artificiale con emissione di positroni: davvero notevole è il fatto che, secondo quanto riferito a D'Agostino, la prima reazione alla notizia della radioattività artificiale fu quella di ripetere gli esperimenti dei Joliot-Curie, piuttosto che di intraprenderne di nuovi ricorrendo ai neutroni⁽²¹⁾.

La lettera, inoltre, rappresenta un importante documento per stabilire cronologicamente le tappe finali verso l'ingresso nella fisica sperimentale del nucleo. Nella già citata nota del 1962, Rasetti ricorda che «several instruments were

designed and their construction was "farmed out" in a private shop in Rome. A rather large cloud chamber, essentially designed after those in use in Berlin-Dahlem, worked excellently as soon as it was assembled». Questo passo riporta all'attenzione il ruolo svolto da Rasetti (reduce da Berlino) anche nel suggerire il progetto della camera di Wilson; se lo si confronta con quanto Fermi e Rasetti scrissero il 9 febbraio, inoltre, esso sembra indicare orientativamente nell'inizio del 1934 — tra la partenza di D'Agostino e la data della lettera — l'arco di tempo durante il quale l'istituto di fisica di Roma entrò in possesso della camera di Wilson «grande».

La data entro la quale avvenne l'acquisizione delle due camere a nebbia può essere individuata con esattezza. In un voluminoso registro contabile conservato presso il Museo di fisica dell'Università «La Sapienza», infatti, sono schedate due camere di Wilson (fig. 3): consegnate dalla ditta che, come afferma anche Rasetti, provvide alla loro fabbricazione, furono prese in carico dall'istituto di via Panisperna il 9 dicembre 1933.

5. – Il ruolo di Rasetti

Si è spesso esaltata l'intraprendenza e l'abilità manuale mostrate da Fermi nel costruirsi da solo i contatori con cui scoprì la radioattività artificiale; di quest'ultima versione dei fatti esi-

stono effettivamente un paio di testimonianze, tra loro concordanti: la prima è dovuta alla moglie di Fermi, Laura Capon (ma contiene alcuni margini di ambiguità). A proposito della costruzione dei contatori ella nel 1954 scrive che «Fermi non sapeva da dove cominciare», aggiungendo però poco oltre che poiché Rasetti era partito per il Marocco «Enrico si mise all'opera da solo e preparò i primi contatori in un tempo ragionevole»; Segrè l'anno successivo concorda sul fatto che in primavera Fermi «*built with his own hands some primitive Geiger-Müller counters of aluminium*»⁽²²⁾. La lettera a D'Agostino dimostra però che i contatori erano stati predisposti da Fermi insieme a Rasetti oltre un mese prima della scoperta della radioattività indotta dai neutroni (e quindi se davvero Fermi nel marzo del 1934 ne aveva costruiti alcuni con le proprie mani, non si trattava dei primi messi a punto a via Panisperna). Ciò è in linea con quanto Amaldi, intervistato, dichiarò sui contributi fondamentali apportati da Rasetti all'attività sperimentale dell'Istituto fisico e con quanto Fermi stesso disse di sé, parlando dei neutroni: «Debbo confessare che, fino da quel tempo, e in buona parte anche dopo, sono stato prevalentemente un fisico teorico e [...] appena le esperienze diventano un po' complicate esse sono al di là della mia abilità sperimentale. [...] Dunque quello che non sapevo fare io [...] lo sapevano fare questi miei amici»⁽²³⁾. Questi commenti, tenuto anche conto della costruzione dei primi contatori Geiger-Müller e delle preziose indicazioni nella progettazione della camera di Wilson, avvalorano ciò che Rasetti afferma nella propria nota autobiografica: «*I do not believe that Fermi would have attempted his historic experiment unless neutron sources, counters, and other nuclear instruments had been already familiar to him*».

L'affermazione secondo cui a via Panisperna, a febbraio, era in progetto la ripetizione degli esperimenti condotti a Parigi (irradiare i campioni mediante particelle alfa e ricercarne l'emissione di positroni) non trova al momento altri riscontri al di fuori della lettera scritta da Fermi e Rasetti a D'Agostino, e ciò pone in piena luce la necessità di integrare con le fonti d'archivio i ricordi personali di chi partecipò alle vicende che ebbero per teatro via Panisperna. Dei rinnovati progetti da seguire nell'attività sperimentale e della decisione di indagare la radioattività indotta dai neutroni anziché ripetere gli esperimenti dei Joliot-Curie ci si è oc-

cupati però in altra sede, cfr. A De Gregorio in ref.⁽¹¹⁾. Ciò che ci preme evidenziare adesso è che, il 9 febbraio 1934, a via Panisperna erano in fase di completamento i preparativi per le ricerche di radioattività artificiale: i laboratori si erano già dotati di sorgenti di polonio, era operativa almeno una camera di Wilson (poi usata per determinare il segno della carica delle particelle emesse) ed erano in fase di costruzione alcuni contatori Geiger-Müller.

Le fonti sono generalmente concordi nell'affermare che a marzo Fermi decise di tentare di osservare effetti simili a quelli dei Joliot-Curie, ricorrendo però ai neutroni: come abbiamo ora visto, ciò accadde quando nei laboratori di via Panisperna era giunta ormai a termine la fase preparatoria, e della dotazione facevano parte contatori, camere di Wilson e sorgenti di polonio. Sulle modalità dei tentativi iniziali di provocare la radioattività mediante irraggiamento di neutroni, alcune testimonianze sono però discordanti tra loro. Laura Capon e Segrè, oltre a sostenere che i primi geiger li aveva costruiti con le proprie mani Fermi stesso immediatamente prima di iniziare i nuovi esperimenti, affermano anche che quest'ultimo aveva intrapreso da solo la ricerca della radioattività indotta dai neutroni, usando una sorgente radon-berillio procuratagli da Trabacchi. Segrè ripeterà la stessa versione anche nel presentare alcuni degli articoli contenuti nella raccolta dei lavori di Fermi, nel 1962. Ma è singolare che nella medesima raccolta Rasetti, nella nota di presentazione al lavoro scritto congiuntamente sulla spettrografia gamma, affermerà che Fermi gli aveva suggerito di intraprendere insieme gli esperimenti sui neutroni e che la prima sorgente da loro usata era del tipo polonio-berillio; così lo stesso volume, a poche pagine di distanza, riporta due ricostruzioni discordanti.

Dalla pubblicazione dell'*opera omnia* di Fermi in poi, le versioni dell'accaduto si uniformeranno a quella di Rasetti: lo stesso Segrè, sempre nel 1962, in occasione del decimo Congresso internazionale di Storia della scienza a Ithaca affermerà che «*after the discovery of the alpha-induced radioactivity had been announced by Curie and Joliot, Fermi suggested to Rasetti that they try to observe similar effects with neutrons*»⁽²⁴⁾; le prime prove, secondo la versione "aggiornata" di Segrè, furono condotte con le sorgenti polonio-berillio. Nel 1978, egli affermerà persino che Fermi ottenne risultati positivi ricorrendo a «sorgenti che Ra-

setti aveva preparato col radio della Sanità Pubblica» e che, evidentemente, oltre al berillio contenevano il polonio estratto alla fine del 1933 con l'aiuto di D'Agostino⁽²⁵⁾. Lo stesso Amaldi nel 1984 confermerà la ricostruzione fornita da Rasetti.

L'uso del polonio come prima sorgente alfa con cui irradiare il berillio trova altri riscontri: la lettera a D'Agostino e l'articolo sulla separazione del radio D, senz'altro immuni da eventuali distorsioni introdotte negli anni, affermano che i preparati di polonio erano stati in parte ceduti a Bernardini «per ricerche sui neutroni», in parte usati a Roma per collaudare la camera di Wilson «grande»; inoltre Zaira Ollano, a Cagliari, in ottobre ringrazia Rasetti per averle fornito il preparato di polonio da lei impiegato in esperimenti relativi alle proprietà di assorbimento della radiazione del berillio⁽²⁶⁾. Da ciò appare del tutto verosimile il fatto che per preparare le prime sorgenti di neutroni, a via Panisperna, sia stato usato il polonio.

Il fatto che Fermi si sia rivolto a Rasetti è anch'esso completamente credibile: a via Panisperna Rasetti era riconosciuto in modo unanime come il fisico sperimentale di maggior talento; era stato lui, nell'ambito del progetto di ricerca per cui l'istituto avrebbe dovuto occuparsi di fisica nucleare, a essersi recato due volte a Berlino, per apprendervi le tecniche specifiche; era l'unico veramente esperto di fisica sperimentale del neutrone, essendovisi dedicato fin dai primi mesi del 1932; aveva preso parte alla costruzione dei primi contatori Geiger-Müller entrati in dotazione al laboratorio romano; suo il merito di aver ottenuto i preparati di polonio ed evidentemente sue le indicazioni per costruire una camera di Wilson «essenzialmente progettata dopo quelle in uso a Berlino-Dahlem». È perciò del tutto ragionevole che Fermi, «prevalentemente un fisico teorico», quando decise di trasformarsi in fisico sperimentale abbia coinvolto un così valido collega, suo amico fin da quando erano studenti a Pisa.

Quanto esposto mette chiaramente in evidenza come le fondamentali scoperte realizzate nel 1934 nei laboratori di via Panisperna siano state frutto di un impegnativo programma di preparazione e adeguamento dell'istituto di fisica romano alle esigenze imposte dalla sperimentazione sul nucleo, progetto che era stato promosso tenacemente da Corbino. Grazie al doppio canale di testimonianze costituito non

soltanto dai ricordi dei fisici di via Panisperna, ma anche dalle carte originali che sono giunte fino a noi, è stato condotto un confronto tra le diverse fonti, colmando se necessario lacune e mettendo in risalto eventuali incongruenze, e così è stato possibile evidenziare attraverso quali strade, giunto il momento propizio, l'Istituto fisico di via Panisperna abbia debuttato nella fisica sperimentale del nucleo. Come messo in risalto già in passato⁽²⁷⁾, l'indagine storica degli avvenimenti che ebbero luogo a Roma non può limitarsi ai ricordi di chi partecipò a quelle scoperte e ne riferì a distanza di decenni: per quanto ciò possa sembrare forse paradossale, le testimonianze rese dai protagonisti che presero parte in prima persona all'attività sperimentale potrebbero, se private del riscontro documentale, non essere sufficienti per una ricostruzione oggettivamente attendibile.

* * *

Desidero esprimere la mia gratitudine al professor Fabio Sebastiani per avermi seguito e incoraggiato nella preparazione del presente lavoro, dispensandomi preziosi suggerimenti. Ringrazio anche il preside Michele Cardellicchio per la gentile e collaborativa disponibilità alla consultazione del Fondo «Oscar D'Agostino», presso l'omonimo istituto tecnico di Avellino.

Bibliografia

- (1) Cfr. L. CAPON FERMI, *Atomi in famiglia*, trad. it. (Mondadori, Verona 1965³). (Nel 2001 è stata pubblicata una ristampa anastatica dell'edizione del 1965, a cura dell'Associazione per l'insegnamento della Fisica: supplemento a «La Fisica nella scuola», XXXIV, 3 (2001).) E. G. SEGRÈ, *Fermi and the Neutron Physics*, Rev. Mod. Phys., **27** (1955) 257-63. E. G. SEGRÈ, *The Consequences of the Discovery of the Neutron*, in *Proceedings of the Tenth International Congress of the History of Science* (Hermann, Paris) 1962, pp. 149-54. E. G. SEGRÈ, nota di commento agli articoli sulla radioattività indotta dai neutroni; in: E. FERMI, *Note e memorie (Collected Papers)*, a cura di Edoardo Amaldi et al. (Roma, Accademia Nazionale dei Lincei - Chicago, the University of Chicago Press) 2 voll.: vol. I, (1962) pp. 639-44. E. G. SEGRÈ, *Enrico Fermi, fisico*, trad. it., seconda edizione (Zanichelli, Bologna) 1987. F. RASETTI, nota di commento a: E. FERMI e F. RASETTI, *Uno spettrografo per raggi «gamma» a cristallo di bismuto*, Ric. Scient., IV, 2 (1933) 299-302; in: E. FERMI *Note e memorie*, cit., pp. 548-49. F. RASETTI, *Biographical Notes and Scientific Work*, nota autobiografica conservata presso l'Archivio «E. Amaldi» del Dipartimento di Fisica dell'Università «La Sapienza» di Roma, 1968. B. M. PONTICORVO 1993: *Enrico Fermi*, trad. it. (Edizioni Studio Tesi, Pordenone). E. AMALDI, *From the Discovery of the Neutron to the Discovery of Nuclear Fission*, Phys. Rep., **111**, nn. 1-4 (1984).
- (2) O.M. CORBINO, *I compiti nuovi della fisica sperimentale*, Atti della SIPS, (1929) 12.
- (3) E. FERMI, *La fisica moderna*, Nuova Antologia, **65** (1930) 137-45.
- (4) G. GENTILE, *Sulla teoria dei satelliti di Rutherford*, Rend.

- Accad. Lincei, VII (1928) 346-49; E. FERMI, *Magnetic Moments of Atomic Nuclei*, Nature, CXXV (1930) 16.
- (5) Cfr. *Convegno di fisica nucleare (ottobre 1931)*, Reale Accademia d'Italia, Roma 1932.
- (6) E. AMALDI, intervista rilasciata a Charles Weiner il 9 e il 10 aprile 1969, p. 8; cortesia del Niels Bohr Library, American Institute of Physics, College Park, MD USA.
- (7) Cfr. E. G. SEGRÈ, *Autobiografia di un fisico* (Il Mulino, Bologna) 1995, p.115.
- (8) F. RASETTI, *Über die Natur der durchdringenden Berylliumstrahlung*, Naturwiss., XX (1932) 252-53.
- (9) F. RASETTI *Über die Anregung von Neutronen in Beryllium*, Z. Phys., LXXVIII (1932) 165-68. G. BERNARDINI, *Über die Anregung der Neutronen in Beryllium*, Z. Phys., LXXXV (1933) 555-58; G. BERNARDINI, *Sull'eccitazione dei neutroni nel berillio*, Ric. Scient., IV, 2 (1933) 15-18.
- (10) E. FERMI e E. G. SEGRÈ *Zur Theorie der Hyperfinstruktur*, Z. Phys., LXXXII (1933) 728-49. E. FERMI e E. G. SEGRÈ, *Sulla teoria delle strutture iperfini*, Mem. Accad. d'Italia, 4 (1933) 131-58. R. EINAUDI, *Righe proibite dovute a spin nucleare*, Rend. Acc. Lincei, XVII (1933) 552-57. G. C. WICK, *Über die Wechselwirkung zwischen Neutronen*, Z. Phys., LXXXIV (1933) 799-800. G. C. WICK, *Sull'interazione dei neutroni coi protoni*, Ric. Scient., IV, 1 (1933) 585-86. E. MAJORANA, *Über die Kerntheorie*, Z. Phys., LXXXII (1933) 137-45. E. MAJORANA, *Sulla teoria dei nuclei*, Ric. Scient., I (1933) 559-65. E. FERMI, *Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi «beta»*, Ric. Scient., IV, 2 (1933) 491-95.
- (11) Cfr. A. DE GREGORIO, *Neutron physics in the early 1930s*, Hist. Stud. Phys. Biol. Sci., 35 (2005).
- (12) F. RASETTI, *Sopra un forte preparato di Radio D ottenuto nell'Istituto Fisico di Roma*, Ric. Scient., V, 1 (1934) 3-5, p. 3.
- (13) O. D'AGOSTINO, *L'era atomica incominciò a Roma nel 1934*, 1^a puntata, «Candido», anno XVI n. 23, 8 giugno 1958, 23.
- (14) N. MORTARA, *L'Ufficio del Radio*, Rivista di radiologia e fisica medica, IV, 4 (1931-32) 462-68; *Apparecchi per la taratura dei preparati radioattivi*, Rivista di radiologia e fisica medica, VII, 3 (1933) 334-39; *Un metodo semplice per determinare il coefficiente di diffusione della emanazione del radio*, Rendic. Accad. Lincei, XVII (1933) 949-50; *Sull'impiego dell'aria liquida per la purificazione della emanazione del radio*, Rendic. Accad. Lincei, XVII (1933) 1069-72.
- (15) Lettera del 22 novembre 1933, con cui il segretario generale del CNR comunica che è stata approvata l'assegnazione della borsa di studio a D'Agostino; la lettera è custodita presso il Fondo «Oscar D'Agostino» di Avellino ed è riprodotta in: G. PUGLIESE *Oscar D'Agostino. Il chimico del gruppo di via Panisperna* (Pergola Editore, Avellino) 1988.
- (16) F. RASETTI, *Sopra un forte preparato di Radio D*, cit. in rif. (12), p. 5. L'attività del preparato di radio D ottenuto da Rasetti corrisponderebbe effettivamente a una separazione pressoché totale: il radio D (tempo di dimezzamento 22 anni) che in 14 anni si produce da 300 mg di radio è $300 \cdot [1 - \exp[-14/22 \cdot \ln 2]]$ mCi = 107 mCi. Nella Mortara riferisce tuttavia di una soluzione di cloruro di radio contenente non 300, ma 200 milligrammi di radio (cfr. N. MORTARA, *L'Ufficio del Radio*, cit. in rif. (14)).
- (17) G. OCCHIALINI, *Uno spettrografo magnetico per raggi β emessi da sostanze debolmente radioattive*, Rendic. Accad. Lincei, XIV (1931) 103-107. D. BOCCIARELLI, *Ricerche sulla radioattività del potassio*, Rend. Accad. Lincei, XV (1932) 686-93; *Sulla radioattività del potassio*, Rend. Accad. Lincei, XVII (1932) 830-36; *Sulla radioattività «gamma» del potassio*, Ric. Scient., IV (1933) 179-82; *Sulla radioattività del potassio*, Ric. Scient., IV (1933) 500-507.
- (18) G. VON HEVESY, W. SEITH, M. PAHL, *Über die Radioaktivität des Kalium*, Z. Phys. Chem., Bodenst.-Festband (1931) 309-18.
- (19) *Proceedings of the American Physical Society* (19-24 giugno 1933), in Phys. Rev., XLIV (1933) 313-31; *Structure et propriétés des noyaux atomiques*, Atti del VII Congresso Solvay, Bruxelles 22-29 ottobre 1933 (Gauthier-Villars, Paris) 1934.
- (20) In questa occasione, ad esempio, F. Perrin, nell'interpretare i risultati presentati dai Joliot-Curie sugli elettroni positivi di trasmutazione prodotti mediante irraggiamento di particelle α , aveva previsto la radioattività artificiale.
- (21) Non si può escludere che Fermi e Rasetti abbiano volutamente taciuto l'intenzione di indagare l'effetto dei neutroni. Questa possibilità, da un'attenta analisi degli avvenimenti che seguirono la scoperta della radioattività indotta dalle particelle alfa, appare tuttavia remota. (Cfr. A. DE GREGORIO, *Neutron Physics*, cit. in rif. (11)).
- (22) L. CAPON FERMI, *Atomi in famiglia*, cit. in nota [1], p. 93; E. G. SEGRÈ, *Fermi and the Neutron Physics*, cit. in nota [1], p. 258; cfr. anche E. G. SEGRÈ in: E. FERMI, *Note e memorie*, cit. in nota [1], p. 640.
- (23) Cfr. E. AMALDI, intervista rilasciata a Charles Weiner, cit. in nota [9], p. 8; E. FERMI, *Conferenze di fisica atomica* (Fondazione «Donegani») – Settima conferenza: *Il neutrone* (Accademia dei Lincei, Roma) 1950, p. 92.
- (24) E. G. SEGRÈ, *The Consequences of the Discovery*, cit. in nota [1], p. 151.
- (25) E. G. SEGRÈ, *Per il settantesimo compleanno di Edoardo Amaldi*, G. Fis., 20 (1979) 181.
- (26) Z. OLANO, *Emissione secondaria da elementi di peso atomico medio sotto l'azione della radiazione da Po + Be*, Ric. Scient., V, 2 (1934) 374-76.
- (27) A. DE GREGORIO, *Sulla scoperta delle proprietà delle sostanze idrogenate di accrescere la radioattività indotta dai neutroni*, Il Nuovo Saggiatore, 19, 3-4 (2003) 41-47.

LA SCOMPARSA DI CESARE LATTES

E. Recami

Università di Bergamo, e Sezione INFN di Milano

Il grande fisico sperimentale italo-brasiliano Cesare Mansueto Giulio Lattes (universalmente noto in Brasile come César Lattes) è scomparso lo scorso giorno 8 di marzo, a Campinas, SP. Nato nel 1924 a Curitiba da genitori entrambi italiani, si era presto rivelato un talento precoce. Il suo nome entrò nella storia ufficiale della fisica quando aveva solo 22 anni, ovvero quando, insieme con Giuseppe (Beppo) Occhialini e Cecil F. Powell, ebbe a scoprire l'attesa "particella di Yukawa": il pione.

La fisica moderna brasiliana, ora fiorente, era appena nata. Nel 1933 il governatore dello stato di San Paolo, desiderando creare una nuova università di alto livello, aveva richiesto a vari governi europei l'invio di professori esperti. All'Italia aveva chiesto fisici e matematici (ma vi andrà a insegnare anche il grande poeta Giuseppe Ungaretti). In quanto alla fisica, Mussolini incaricò Enrico Fermi di trovare la persona adatta: e Fermi scelse Gleb Wataghin, di origine ucraina (da Kiev), allora all'università di Torino. La scelta fu straordinariamente felice: Wataghin, fisico abilissimo e versatile, era famoso per essere di carattere altrettanto simpatico, e pieno di entusiasmo. Attirato dalle attività già intraprese nel 1934, scende a San Paolo da Recife il giovane Mário Shoenberg — chiamato anche Schenberg —, il quale presto diverrà collaboratore di Subrahmanian Chandrasekar e George Gamow, guadagnandosi grande reputazione come fisico teorico: nel 1941, ad esempio, con Gamow associa le supernovae a fortissime emissioni di neutrini, coniano per tale emissione il nome di "processo URCA" (ove Urca è il nome di un quartiere di Rio ove esisteva un noto casinò...).

Proveniente da Curitiba, entra nella scuola di Wataghin, qualche anno dopo, Cesare Lattes, il quale si laurea nel 1943 a soli 19 anni. Chi scrive deve, tra parentesi, a Wataghin il primo invito a svolgere ricerche in Kiev, e a Lattes il primo invito da parte della Università statale di Campinas (avendo avuto poi, a San Paolo, anche la ventura di conoscere, ultracentenario ma lucidissimo, il tecnico di laboratorio sceltosi da Wataghin durante i propri anni brasiliani, Francisco B. Guidolin: "Proprio quello che ci voleva!", aveva esclamato Wataghin quando lo ebbe incontrato). Una brevissima digressione: nel settore della matematica, andarono a San Paolo gli italiani Luigi Fan-

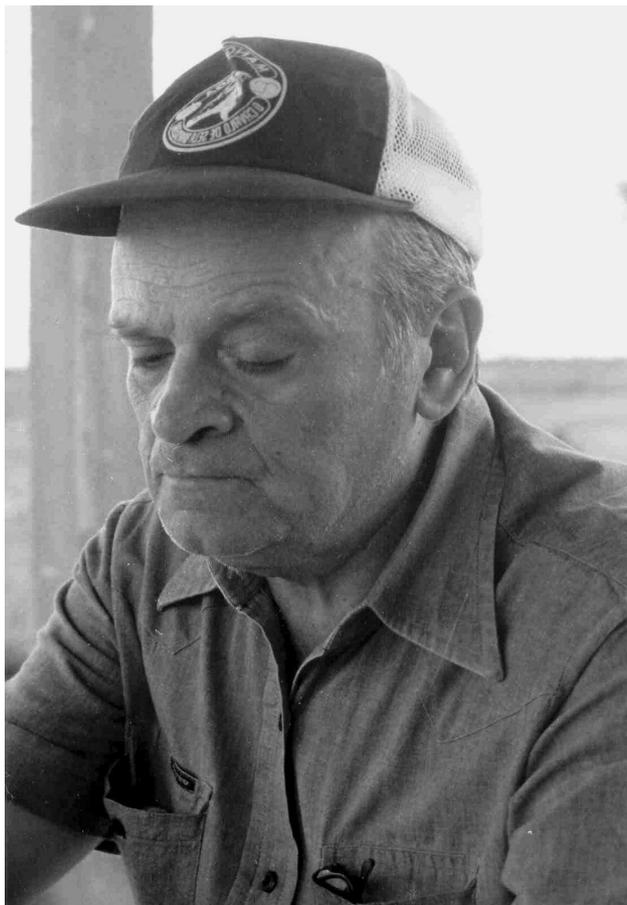
tappiè, con Giacomo Albanese, e più tardi Gabriele Mammana e Agostino Bassi.

All'università di San Paolo, Lattes incontra pure Occhialini, uno dei maggiori fisici sperimentali italiani del secolo XX, colà invitato da Wataghin. Scoppia il secondo conflitto mondiale e, quando l'America (anzi, le Americhe, si può dire; eccetto l'Argentina) dichiarano guerra all'Italia, Occhialini si ritira prudentemente sulle montagne di Itatiaia, guadagnandosi da vivere anche come guida alpina.

Terminata la guerra, Occhialini si trasferisce a Bristol, in Inghilterra, proseguendo con Powell le proprie ricerche su raggi cosmici e particelle elementari mediante la tecnica delle emulsioni fotografiche. Nel 1947 lo raggiunge Lattes, il quale immediatamente chiede al fabbricante di aggiungere del boro alle emulsioni. Le nuove lastre si rivelano adattissime. Lattes torna allora in America del Sud, e le espone ai raggi cosmici a 5200 m di altitudine, sul monte Chacaltaya, presso La Paz, in Bolivia. Lattes ed Occhialini vi scoprono presto le chiare tracce della nuova particella, il pione, necessaria per spiegare la stabilità dei nuclei atomici (e che ora sta trovando applicazioni contro i tumori nell'ambito dell'adronterapia). Con pazienza da certosino Lattes ne misura la massa. Il premio Nobel verrà dato al direttore del Laboratorio, Cecil Powell. L'anno successivo, nel 1948, Lattes viene invitato a Berkeley da Eugene Gardner, e in una sola settimana scopre i pioni artificiali prodottivi dal ciclotrone. È un secondo importante risultato che, per ripetere le parole di Occhialini stesso, avrebbe potuto questa volta fare pendere la bilancia del Comitato Nobel almeno verso Lattes, se non verso gli altri "esclusi" (categoria della quale proprio Occhialini, come ben noto, era già entrato a far parte da una quindicina d'anni): ma sfortunatamente l'americano Gardner muore due anni dopo, nel 1950.

Nel frattempo, nel 1949, ispirandosi alla creazione dell'INFN in Italia per iniziativa di Gilberto Bernardini, Edoardo Amaldi, Pierre Auger e altri, Lattes aveva contribuito a creare a Rio de Janeiro — col prestigio del proprio nome — il "Centro Brasiliano per le Ricerche Fisiche" (CBPF): centro che si varrà della collaborazione di fisici come Richard Feynman e David Bohm.

Negli anni tra il 1955 e il 1957 Lattes, dopo la scomparsa di Fermi, dirige il laboratorio di Chicago da questi fondato, ora noto come Fermilab. Aumentano però in lui alcuni disturbi psicologici, che forse Lattes aveva eroicamente superato durante i precedenti anni di intensa attività. Cionon-



Cesare Lattes nel 1988, durante un viaggio nel Mato Grosso (Foto dell'Autore).

nostante, coordina per altri 23 anni originali ricerche nippo-brasiliane sul comportamento di raggi cosmici di energia elevatissima, sempre basate sull'esposizione in Bolivia di nuovi tipi di lastre, al piombo; e nel 1969 determina le masse delle cosiddette "palle di fuoco" (*fireballs*). Questi risultati non sono ancora di moda, in attesa probabilmente che le *fireballs* possano venire prodotte anche da grandi acceleratori... Nel contempo Lattes mantiene stretti contatti con fisici italiani, ad esempio con Enrico Predazzi, con l'Istituto di Geocronologia del CNR (Pisa), con Adriano Di Giacomo, e ancor più col grande e compianto Adriano Gozzini. Cesare Lattes e Gozzini si incontrano spesso, in Italia e non meno in Brasile, collaborando su fenomeni di fisica fondamentale legati all'influenza dei raggi cosmici sui materiali (e la famiglia Gozzini, col permesso del governo brasiliano, si porterà fino in Italia uno dei regali di Lattes: un'affezionata scimmietta, che diverrà la *mascotte* dell'intera via Randaccio di Pisa).

Negli ultimi anni Lattes ha trascorso molto del proprio tempo ascoltando musica classica, leggendo, e passeggiando (senza dimenticare, durante un lungo periodo, di passare a chiacchierare e prendere il tè nella nostra casa in Campinas; insegnò così al sottoscritto che le particelle elementari devono avere *imbuilt* un "senso di vite", cosa in seguito teoricamente asseverata da Campolattaro, Hestenes, Recami, Salesi e altri). Da un anno era abbattuto per la perdita della consorte, Martha, persona di classe, cultura e temperamento, laureata in matematica, e a suo tempo amica — per esempio — della moglie di Fermi. Dona Martha era nata in una famiglia benestante del Pernambuco. Nei suoi non pochi momenti di buon umore, Lattes (che amava molto le battute e le barzellette) consigliava ai giovani scienziati di sposarsi con una moglie ricca, perché *carmina non dant panem*: anzi, per dirla con le sue parole, perché "la scienza non dava, e non dà, molto denaro"... (*).

(*) L'autore è grato a G.-Franco Bassani, a Claudio Minetto, a Oscar Saavedra e a Carmen Vasini. Ringrazia anche Neuza T. Vasconcelos per una utile discussione.

IL LABORATORIO CHACALTAYA*

O. Saavedra

Dipartimento di Fisica Generale "A. Avogadro"
INFN sez. di Torino, Torino

51

Il nome di Chacaltaya iniziò a circolare negli ambienti scientifici, per le ricerche di fisica cosmica, da quando nel 1947 divenne famoso per la scoperta del pione.

In quegli anni C. Lattes, G. Occhialini e C. Powell⁽¹⁾ esposero le loro lastre di emulsioni nucleari, proponendosi una fantastica sfida scientifica che li condusse alla scoperta di quella fondamentale particella ed all'assegnazione del premio Nobel a C. Powell.

Prima dell'arrivo di Lattes, a Chacaltaya, una montagna dell'altipiano Andino boliviano, era in funzione un osservatorio meteorologico. Fu solo dopo gli studi di Lattes che Chacaltaya assunse

(*) Dedico questo scritto in memoria di tre eminenti fisici recentemente scomparsi, che hanno dato un grande contributo al Laboratorio di Chacaltaya e con i quali, per lungo tempo, ho avuto la fortuna di svolgere attività di ricerca: C. Castagnoli, C. M. G. Lattes, e K. Kamata.



Fig. 1. – C. Lattes a Chacaltaya (1949) in una rara fotografia.



Fig. 2. – B. Rossi con K. Suga e I. Escobar mentre discutono sul BASJE al MIT (1960).

un'importanza mondiale per le ricerche sui raggi cosmici.

Dal 1952 l'osservatorio prese il nome di Laboratorio di Fisica Cosmica di Chacaltaya e ora, dopo la recente scomparsa di Lattes, gli è stata attribuita la denominazione di "Instituto de Investigaciones Físicas C. Lattes".

Il grande fisico italo-brasiliano Cesar Lattes rese celebre, assieme a G. Occhialini, il laboratorio la cui enorme importanza è dovuta al fatto che si trova a 5230 metri sul livello del mare, quota a cui la pressione atmosferica è circa la metà di quella del livello del mare. Un altro indiscutibile vantaggio di Chacaltaya è quello di trovarsi a pochi chilometri dalla capitale La Paz, da cui è agevolmente raggiungibile, distando da essa appena 15 km in linea d'aria e un'ora e mezzo di percorso su strada camionabile. L'ulteriore vantaggio di cui gode Chacaltaya rispetto ad altri laboratori è la sua collocazione a $\sim 4^\circ$ latitudine geomagnetica cui corrisponde un alto taglio alla rigidità magnetica (~ 13 GV a Chacaltaya) valido per le particelle cariche ma non per i raggi gamma.

A Chacaltaya, oltre al notevole contributo di C. Lattes, G. Occhialini e C. Powell, sono stati effettuati molti altri interessanti esperimenti di fisica cosmica di cui possiamo elencare qui solo alcuni tra i più importanti.

1. – I primi esperimenti

L'esperimento BASJE (Bolivian Air Shower Joint Experiment) è stato il primo esperimento dedicato alla ricerca nel campo dell'Astronomia gamma, affrontato per la prima volta ad altissime energie nel 1960, utilizzando un apparato sciame assieme ad un rivelatore di muoni di 60 m^2 , allora il più grande del mondo⁽²⁾.

La ricerca consisteva nel cercare gli sciame privi di muoni e quindi presumibilmente iniziati da gamma primari per i quali fu coniata la denominazione di *mu-less showers*⁽³⁾

La realizzazione di quest'esperimento, grazie anche al grande contributo di Bruno Rossi, allora al MIT, USA, fu notevole in quanto si dava origine ad una nuova astronomia con lo studio, per la prima volta, dei gamma d'altissima energia. Infatti, i raggi gamma entrando nella nostra atmosfera producono una cascata, puramente elettromagnetica di soli elettroni, positroni e raggi gamma che si sviluppa lungo il percorso senza dar luogo a muoni e componente adronica. Le particelle cariche primarie producono invece oltre alla componente EM, anche quella nucleare.

L'importanza della rivelazione dei gamma primari è chiaramente quella di cercare le sorgenti astrofisiche, impossibili da studiare con i raggi cosmici. Questi infatti, essendo particelle cariche, subiscono deviazioni dal loro percorso a



Fig. 3. – L'ingresso al Laboratorio.

causa dei campi magnetici nella nostra Galassia e quindi non ci portano informazioni dirette dalla sorgente.

Negli anni successivi si è visto poi che i gamma d'altissime energie possono produrre anche muoni per fotoproduzione e che il rivelatore di muoni di BASJE, pur essendo allora il più grande del mondo non era sufficiente a causa delle grandi fluttuazioni dei muoni nello sciame.

In seguito BASJE è stato condotto solo dal gruppo giapponese e boliviano ed ha avuto varie modifiche che hanno permesso di compiere svariate misure particolarmente sullo spettro primario della radiazione cosmica.

Nel 1965, il rivelatore di muoni è stato utilizzato come un calorimetro per la misura delle interazioni nucleari d'altissima energia dei protoni *survival*.

Per l'elevata posizione di Chacaltaya, i protoni primari possono arrivare fino al livello di Chacaltaya senza subire interazioni con un rapporto di 1 su 1000. Infatti, tenendo conto del *l.c.m.* del protone di 80 gr/cm^2 si ricava facilmente che il numero di protoni che attraversano lo spessore atmosferico di 530 gr/cm^2 è di \sim uno su mille rispetto al flusso primario. Dalla misura dell'energia

di questi protoni, nel rivelatore di muoni (calorimetro a singolo strato) e che non siano accompagnati da uno sciame nell'apparato EAS che funge d'anticoincidenza, si ricava lo spettro dei protoni, che ci si aspetta avere la stessa pendenza dello spettro dei protoni primari. L'energia misurata nel calorimetro è nell'intervallo che varia da $\sim 3 \text{ TeV}$ fino a $\sim 50 \text{ TeV}$.

Il risultato che si è trovato con questo esperimento è che lo spettro dei protoni *survival* presentava una maggiore pendenza di quello dei protoni primari, indicando che la sezione d'urto nella reazione $p + N$ aumenta con l'energia del protone.

I dati delle misure fino ad energie di qualche decina di TeV furono presentati per la prima volta a Calgary (⁴) nel 1967 dove è stato presentato anche l'andamento logaritmico della sezione d'urto con l'energia. Si tenga presente che, in quegli anni, la massima energia disponibile negli acceleratori era di 30 GeV al CERN.

Nel 1975 è stato definitivamente pubblicato lo spettro dei protoni *survival* (⁵).

L'andamento logaritmico della sezione d'urto è stato poi successivamente confermato con misure ad energie più grandi eseguite per mezzo di acceleratori.

2. – Esperimento con emulsioni nucleari e apparati ibridi.

Una collaborazione Brasile-Giappone è stata avviata da C. Lattes e H. Yukawa nel 1962 con lo scopo di studiare le interazioni d'altissima energia utilizzando lastre ad emulsioni nucleari. Questa ricerca si proponeva di studiare energie migliaia di volte più grandi dei 30 GeV disponibili agli acceleratori dell'epoca.

L'apparato utilizzato per questa ricerca consisteva in lastre di Pb intervallate con lastre fotosensibili a raggi X e ad emulsioni nucleari⁽⁶⁾. In particolare furono usati due blocchi separati l'uno dall'altro da uno spazio d'aria di circa 2 m avente lo scopo di separare gli eventi a piccoli angoli. In quest'esperimento fu predisposto un bersaglio di carbonio di ~30 cm di spessore per individuare le interazioni avvenute nel bersaglio (C-jets) e separarle da quelle avvenute ad esempio in aria (A-jets). Furono misurati anche quegli eventi generati nel Pb, (Pb-jets). Gli sciame o cascate generate nella parte inferiore dell'apparato erano dovuti naturalmente ad adroni che riuscivano a penetrare tutto il materiale della camera interagendo soltanto nel rivelatore in basso.

Questa gamma di misure delle caratteristiche delle interazioni nucleari ad alte energie, in particolare mediante lo studio degli eventi nel bersaglio di C (C-jets) ha dato luogo ad una serie di misure molto innovative che poi negli anni successivi si

sono dovute confrontare con i risultati delle macchine acceleratrici ad energie sempre più grandi. Basti pensare alla distribuzione del momento trasversale e alla violazione di scala di Feynman nella regione di frammentazione. Molte altre misure con questa tecnica delle emulsioni nucleari hanno dato risultati tuttora non spiegabili, come ad esempio l'esistenza di cascate molto penetranti, gli eventi con alone, gli eventi allineati ecc.

Oltre a queste misure dei C-jets, A-jets o Pb-jets, sono stati osservati anche eventi d'altissima energia⁽⁶⁻⁷⁾, mai rivelati prima, come ad esempio i *gamma-family* giganti o superfamiglie (così sono chiamati gli eventi di straordinaria ed elevata energia che sono stati trovati in laboratori d'alta quota). Gli esempi riportati nelle fig. 4a, 4b e 4c hanno energie rispettivamente di $\sim 10^{18}$ eV, 6×10^{17} eV e $\sim 10^{17}$ eV. Si noti che questi eventi straordinari, osservati con le sole emulsioni nucleari, la cui componente EM è concentrata in pochi cm^2 di superficie sono generati poco al di sopra del Laboratorio, ragione per cui lo sciame non ha sufficiente spazio per svilupparsi e coprire centinaia di m^2 o km^2 come è osservato normalmente con gli sciame estesi a quote più basse.

Certamente, l'osservazione e lo studio di questi eventi giganti è stato possibile solo mediante la tecnica delle emulsioni nucleari, mentre non sarebbe stato possibile con altre tecniche anche con le più moderne utilizzate nei grandi laboratori.

Un sistema di tecniche calorimetriche combi-

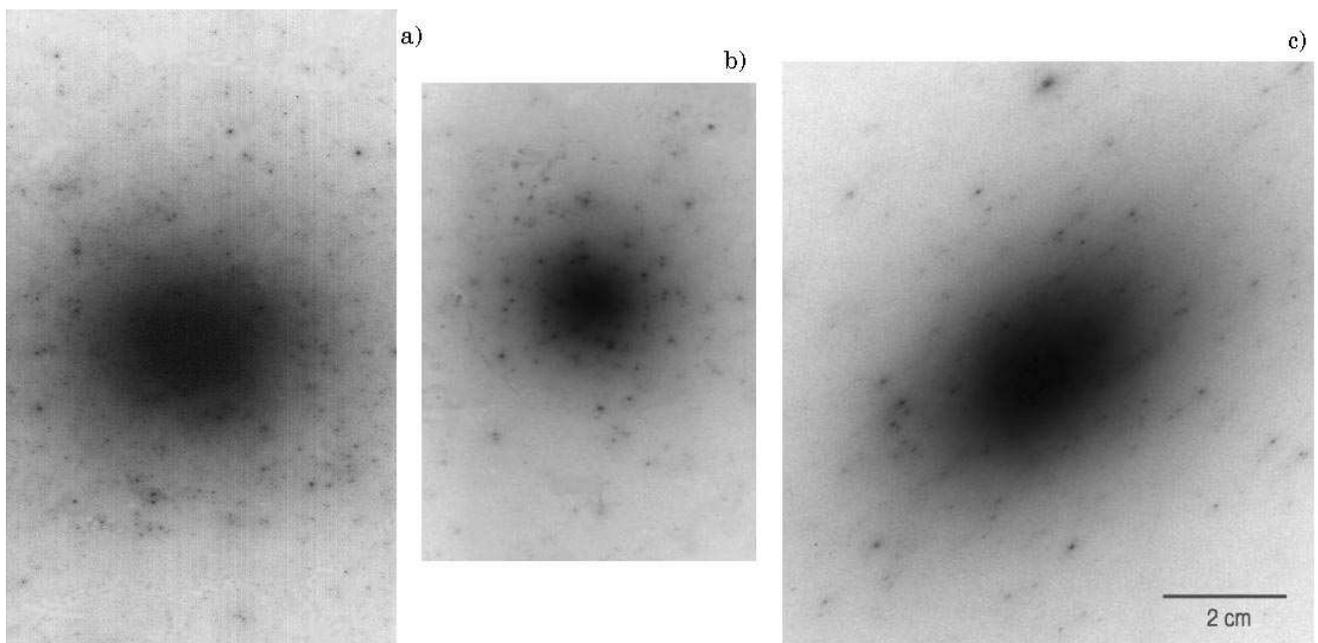


Fig. 4. – a) Evento TAJIKISTAN energia di $\sim 10^{18}$ eV, b) evento FIANT energia di 6×10^{17} eV e c) evento ANDROMEDA di energia $\sim 10^{17}$ eV. Gli eventi a) e b) sono stati osservati a Pamir (4200 m a.s.l.) l'evento c) a Chacaltaya.

nato con emulsioni nucleari darebbe informazioni molto interessanti per eventi di questa natura.

I risultati, che questa collaborazione ha dato, sono stati molto importanti per la conoscenza dei meccanismi delle interazioni nucleari ad altissime energie, che non possono essere raggiunte nemmeno con acceleratori come il futuro LHC. L'evento Andromeda, vedi fig. 4c (così chiamato per la sua forma) e l'evento Centauro non sono che alcuni esempi di questa ricerca effettuata ad alta quota.

Negli anni 1973-74 ebbe inizio una nuova collaborazione, SYS⁽⁸⁾ (Saitama-Yamanashi-San Andres), tra università giapponesi e Chacaltaya che consisteva nell'uso di un rivelatore ibrido in altre parole di un sistema di scintillatori per la misura dei parametri dello sciame, un rivelatore a emulsioni nucleari e lastre a raggi X per misure dei gamma e degli adroni dello sciame.

Le misure effettuate con l'apparato ibrido hanno dato risultati molto interessanti coerenti con quelli di altre misure con tecniche indipendenti. Ad esempio si è trovato che l'intensità delle famiglie gamma⁽⁹⁾ misurata risulta essere più bassa di quella che ci si aspetta. Lo stesso effetto di riduzione viene trovato con SYS. Infatti, l'intensità delle famiglie gamma in funzione delle dimensioni dello sciame mostra che l'intensità al di sopra di 10^7 particelle è minore di ciò che si aspetta⁽¹⁰⁾. Il confronto è fatto anche con i risultati di un'altra misura nel laboratorio di Tien Shan nel Kazakistan. SYS ha misurato anche la componente adronica: pure in questo caso si ha un numero di adroni minore di quello atteso⁽¹¹⁾. Risultati analoghi sono stati trovati nell'esperimento KASCADE.

Tutti i tre risultati sembrano mostrare una forte dissipazione d'energia in una forma che ancora a noi non è nota mostrando forse una forte violazione della legge di scala di Feynman. È interessante rilevare che questi risultati sono stati ottenuti con appena 8 m^2 di rivelatore.

3. – Il contributo di Torino

Da quando G. Wataghin propose l'idea della produzione multipla di particelle, nell'urto ad altissime energie, l'interesse di Torino è stato sempre molto forte verso lo studio delle interazioni nucleari ad alte energie, in particolare dei raggi cosmici. Dopo la scoperta del pione a Chacaltaya, Wataghin e Lattes hanno dato inizio ad una collaborazione molto produttiva per quanto riguarda le interazioni di altissima energia in Chacaltaya. L'apporto di Wataghin soprattutto sui meccanismi

di produzione multipla è stato essenziale fin da quando l'aveva proposto. L'interesse è stato sempre molto alto soprattutto dopo il ritrovamento dell'evento Centauro a Chacaltaya.

In anni successivi C. Castagnoli, allora direttore del Dipartimento di Fisica e dell'Istituto di Cosmogeofisica del CNR di Torino ha indirizzato il suo interesse verso Chacaltaya con un esperimento per la rivelazione di gamma d'alta energia dalla SN 1987a. Da Chacaltaya la SN 1987a viene osservata a ~ 40 gradi sull'orizzonte. Questo esperimento è stato portato avanti da G. Navarra⁽¹²⁾ dell'Università di Torino.

Tenendo conto dell'imparagonabile vantaggio logistico di Chacaltaya, abbiamo realizzato da alcuni anni, in collaborazione fra il Dipartimento di Fisica Generale "A. Avogadro" dell'Università di Torino, con l'Istituto di Cosmogeofisica del CNR di Torino e dell'Istituto d'Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés di La Paz Bolivia, l'esperimento INCA (*INvestigation of Cosmic Anomalies*) per la rivelazione dei famosi ed enigmatici *Gamma Ray Burst* (Lampi di Raggi Gamma). Il principio su cui si basa questa ricerca è quello di rivelare i raggi gamma alle più basse energie possibili. I raggi gamma di energie dell'ordine di poche GeV danno luogo a cascate EM molto piccole in aria, quindi facilmente assorbite nell'alta atmosfera. Nonostante quest'assorbimento, qualche particella di queste cascate può raggiungere il livello d'osservazione. Infatti, da calcoli di simulazioni una singola particella a Chacaltaya, in media è il residuo di una cascata originata da un gamma primario di $\sim 16 \text{ GeV}$ ⁽¹³⁾. Questa tecnica di rivelazione della singola particella è stata già usata in precedenza a Plateau Rosa.

Monitorando in modo continuo i conteggi dei rivelatori usati per l'esperimento INCA, possiamo osservarne l'andamento ed eventuali fluttuazioni che vanno al di fuori dei valori normali. Mettendo in coincidenza temporale queste fluttuazioni, con la rivelazione di GRB da parte d'osservazioni satellitari, sempre e quando la direzione del *burst* rivelato con i satelliti sia nel cono di vista di Chacaltaya, possiamo attribuire la rivelazione di un GRB.

Con quest'esperimento abbiamo raggiunto i migliori limiti superiori alla rivelazione dei GRB a terra. L'osservazione di tali lampi ci ha fatto trovare l'*upper limit* che è il migliore a tutt'oggi mai raggiunto altrove⁽¹⁴⁾.

Anche in questo caso si potrebbe argomentare che i nostri risultati sono stati raggiunti con un apparato di appena 48 m^2 e che danno un flusso

migliore di 10^{-4} erg/cm². Ciò ci induce a pensare che con un apparato più grande si potrebbero raggiungere facilmente le sensibilità dei satelliti.

Dal marzo 2000 è in funzione, a Chacaltaya, un altro esperimento, detto SLIM (*Search for Light Magnetic Monopoles*) approvato dall'INFN, in collaborazione tra i Dipartimenti di Fisica delle Università di Torino e di Bologna (gruppo del prof. G. Giacomelli). SLIM⁽¹⁵⁾ ha lo scopo di cercare i Monopoli magnetici e *Strange Quark Matter* o nucleariti nella radiazione cosmica galattica.

SLIM consiste nell'esposizione di un rivelatore passivo di circa 400 m² di lastre in moduli di 24×24 cm² composti di 3 strati di CR39, 3 lastre di policarbonato e assorbitore d'alluminio di 1 nm di spessore. Ogni modulo è sigillato in un contenitore di alluminio riempito con dell'aria secca. Dopo 4 anni d'esposizione SLIM è ora in fase di smontaggio a Chacaltaya e di analisi a Bologna.

Un'altra ricerca riguarda il flusso di neutroni, misurato per la prima volta ad alta quota da A. Zanini⁽¹⁶⁾ dell'INFN di Torino con un sistema innovativo di rivelatori passivi e in modo indipendente anche da Schaurbe⁽¹⁷⁾ con la tecnica delle Bonner Spheres, sempre a Chacaltaya. I risultati di Zanini *et al.* sono confrontati con le misure su voli di linea (MI-LA-MI) ad una quota di 12000 metri⁽¹⁶⁾.

Tutti questi esperimenti sono difficilmente riproducibili, se non impossibili, a quote più basse.

Nel 2000, a La Paz, si è tenuto un "Meeting internazionale sulla Fisica Cosmica" che ha visto la partecipazione di 60 illustri scienziati di tutto il mondo: dalla Russia all'America, dal Giappone alla Polonia ecc. in cui sono stati discussi i principali temi sull'attuale ricerca nel campo della fisica cosmica.

Nel 2004 è stata inaugurata la "*First School on Cosmic Ray Physics and Astrophysics*" rivolta soprattutto ai giovani laureati latino americani.

Per questi due eventi, oltre alla partecipazione ed al contributo delle Università di Torino, Bologna, Roma e di istituzioni come l'INFN e CNR, e ICTP di Trieste, vi è stata una nutrita partecipazione di giovani scienziati latino-americani provenienti dall'Argentina, Brasile, Messico, Perù, Costa Rica, Uruguay e Chile.

Dato il successo di questa Scuola, una seconda edizione sarà realizzata in Messico, nel 2006.

Durante questi due eventi internazionali, è stata anche organizzata la mostra "Il legato di Galvani-

Volta nella Fisica Contemporanea" rivolta ad un pubblico più vasto. Questa mostra, ha avuto anche lo scopo di realizzare seminari divulgativi da parte di quasi tutti gli scienziati partecipanti ai due meeting.

Bibliografia

- (1) C. LATTES, G. OCCHIALINI e C. POWEL: *Nature*, **160** (1947) 486, 543.
- (2) K. SUGA, I. ESCOBAR, G. CLARK, W. HAZEN, A. HENDEL e K. MURATAMI: "*Bolivian Air Shower Joint Experiment*" *J. Phys. Soc. Jpn.*, **17**, suppl. A III (1962).
- (3) K. SUGA, I. ESCOBAR, K. MURATAMI, V. DOMINGO, Y. TOYODA, G. CLARK e M. LA POINTE: "*Evidence for EAS with extremely few penetrating particles*" *Proceedings of the 8th ICRC, Jaipur, India* vol. **4** (1963) 9.
- (4) K. KAMATA, S. SHIBATA, O. SAAVEDRA, M. LA POINTE, J. GAEBLER, I. ESCOBAR, A. ALARCON, K. SUGA, K. MURATAMI e Y. TOYODA: "*High Energy Nuclear Interactions of Cosmic Rays (10^{12} eV) Observed at 5200 m a.s.l.*" *Can. J. Phys.* **46** (1968) 10.
- (5) C. AGUIRRE, A. TREPP, G. MEJIA, K. MURATAMI, K. KAMATA, Y. TOTODA, T. MAEDA, C. YOKOYAMA, P. MAC KEOWN, K. SUGA, K. UCHINO e T. KANEKO: "*Energy Spectrum of surviving protons with energies (3–30) TeV at 5200m a.s.l. and the cross section of proton – air-nucleus Collisions*" *Nuovo Cimento B* **27** (1975) 263.
- (6) C. M. G. LATTES, Y. FUJIMOTO e S. HASEGAWA: "*Hadronic Interactions of High Energy Cosmic-Ray Observed by Emulsion Chambers*" *Phys. Rep.* **65**, No 3, (1980).
- (7) S. A. SLAVATINSKY: "*Investigation of unusual phenomena in cosmic rays with Tien Shan and Pamir experimental setups at energy higher than 1 PeV*" *Nuovo Cimento C*, **24** (2001) 557.
- (8) T. MATANO, M. MACHIDA, K. OHTA, I. IMAI, M. NAGAYASU, I. TSUSHIMA, C. AGUIRRE, R. ANDA, e C. NAVIA *Proceedings of the 17th ICRC, Paris, France*, vol 2 (1981) pp. 314.
- (9) J. R. REN *et al.* *Nuovo Cimento C* **10** (1987) 43.
- (10) N. KAWASUMI, I. TSUSHIMA, K. HONDA, K. HASHIMOTO, T. MATANO, N. INOUE, A. OHSAWA, N. MARTINIC, R. TICONA e C. AGUIRRE: "*Simultaneous observation of families and accompanied air showers at Mt. Chacaltaya*" *Phys. Rev. D*, **53** (1996) 3534.
- (11) C. AGUIRRE *et al.* *Phys. Rev. D*, **62** (2000) 032003.
- (12) C. CASTAGNOLI, C. MORELLO, G. NAVARRA, L. PERIALE e P. VILLANIA: "*Search for 100TeV gamma-rays from SN1987a from the Chacaltaya station*" *Proceedings of the 21st ICRC, Adelaide, Australia*, vol. 2 (1990) 204.
- (13) A. CASTELLINA, P. L. GHIA, F. KAKIMOTO, T. KANEKO, C. MORELLO, G. NAVARRA, K. NISHI, O. SAAVEDRA, G. TRINCHERO, D. URZAGASTI, P. VILLANIA, A. VELARDE, S. VERNETTO e H. YOSHII: "*Search for gamma-ray burst at Chacaltaya*" *Nuovo Cimento C*, **24** (2001) 631.
- (14) A. CASTELLINA, P. L. GHIA, F. KAKIMOTO, T. KANEKO, C. MORELLO, G. NAVARRA, K. NISHI, O. SAAVEDRA, G. TRINCHERO, D. URZAGASTI, P. VILLANIA, A. VELARDE, S. VERNETTO e H. YOSHII: "*Search for GeV GRB at Chacaltaya*" *Proceedings of the 27th ICRC, Hamburg, Germany*, vol. **7** (2001) 2735.
- (15) S. CECCHINI, G. GIACOMELLI, M. GIORGINI, J. MC DONALD, G. MANDRIOLI, S. MANZOOR, A. MARGOTTA, J. NOGALES, L. PATRIZII, J. PINFOLD, V. POPA, I. E. QURESHI, A. A. RANA, O. SAAVEDRA, P. SERRA, I. SHAHZAD, M. SPURIO, R. TICONA, V. TOGO, A. VELARDE e A. ZANINI: "*Search for magnetic monopoles at the Chacaltaya cosmic ray Laboratory*" *Nuovo Cimento C*, (2001) 639.
- (16) A. ZANINI in: Grieder, P.K.F., *Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*. (Elsevier) 2001, pp. 126-127.
- (17) H. SCHRAUBE, V. MARES, S. ROESLER e W. HEINRICH: "*Experimental verification and calculation of aviation routs doses*" *Rad. Prot. Dos.* **86** (1999) 309.

SCIENZA IN PRIMO PIANO

ASYMPTOTIC FREEDOM

P. Nason (*)

INFN, Sezione di Milano,

Piazza della Scienza 3, 20126 Milano, Italy

1. - Introduzione

La “Royal Swedish Academy of Sciences” ha assegnato il premio Nobel in Fisica per il 2004 a David J. Gross, H. David Politzer e Frank Wilczek, per la scoperta della libertà asintotica nella teoria delle interazioni forti⁽¹⁻⁴⁾. Tale scoperta ha portato alla formulazione della teoria moderna delle interazioni forti, nota come QCD¹. In questo breve articolo discuterò gli aspetti più salienti di questa scoperta. Illustrerò in primo luogo le caratteristiche fenomenologiche delle interazioni forti, e in particolare quei fenomeni che suggeriscono l'esistenza di costituenti puntiformi debolmente interagenti negli adroni. Quindi mostrerò come, nell'ambito delle teorie di campo quantizzate rinormalizzabili, possa avvenire che per piccole distanze le particelle fondamentali della teoria interagiscono sempre più debolmente, si abbia cioè la libertà asintotica. Illustrerò quindi le caratteristiche principali delle teorie che manifestano la libertà asintotica, le cosiddette teorie di *gauge* non abeliane⁽⁵⁾. Descriverò inoltre le caratteristiche specifiche della QCD, e l'ambito teorico e fenomenologico nel quale la teoria è stata verificata sperimentalmente.

2. - Le interazioni forti

2.1. - Energie moderate

Le interazioni forti a energie moderate (cioè fino a qualche GeV) manifestano una notevole

complessità. Si osservano risonanze con larghezze dell'ordine di qualche centinaio di MeV, e spazature non molto superiori alle larghezze. Le tipiche sezioni d'urto di collisione adroniche sono di qualche decina di millibarn (mb). Notiamo che $10 \text{ mb} = (1 \text{ fm})^2$ (dove $1 \text{ fm} = 10^{-15}$ metri), consistentemente con le tipiche dimensioni dei nucleoni. È conveniente esaminare queste quantità in unità naturali, con $c = 1$ e $\hbar = 1$. Prendendo l'elettronvolt come unità di misura dell'energia (e ricordando che $\hbar c \approx 200 \text{ MeV fm}$), troviamo che le tipiche dimensioni dei nucleoni sono dell'ordine di $1/200 \text{ MeV}^{-1}$, caratterizzate perciò dalle stesse scale tipiche della spazatura e della larghezza delle eccitazioni. Essendo le scale tutte dello stesso ordine, non esiste in questo contesto un piccolo parametro adimensionato caratteristico, un analogo della costante di struttura fine α_{em} dell'elettromagnetismo. Pertanto, in questo regime le interazioni forti devono essere caratterizzate da grandi costanti di accoppiamento, e presentano notevole complessità. Inizialmente vennero principalmente studiate in termini delle loro proprietà di simmetria e di principi dinamici generali, quali la causalità e l'unitarietà della matrice di *scattering*.

È stato grazie alle proprietà di simmetria delle interazioni forti che si è giunti a postulare l'esistenza dei quark⁽⁶⁾. Lo spettro adronico poteva essere semplicemente classificato in base all'assunzione che gli adroni fossero composti da costituenti (quark) di spin $1/2$.

Le cariche elettriche e le masse dei quark noti al presente sono date nella tabella 1. Si usa co-

Tabella I. - Quark noti.

Carica elettrica = $\frac{2}{3}e$ <i>m</i>	<i>up</i> qualche MeV	<i>charm</i> $\approx 1.5 \text{ GeV}$	<i>top</i> $\approx 170 \text{ GeV}$
Carica elettrica = $-\frac{1}{3}e$ <i>m</i>	<i>down</i> qualche MeV	<i>strange</i> 100-200 MeV	<i>bottom</i> $\approx 5 \text{ GeV}$

* E-mail: Paolo.Nason@mib.infn.it

¹ Acronimo di *Quantum-Chromo-Dynamics*.

munemente il termine *flavour* (sapore) per distinguere i vari tipi di quark. Gli *u*, *d* e *s* sono i cosiddetti sapori leggeri. I sapori pesanti *c*, *b* e *t* sono stati scoperti successivamente.

Per classificare lo spettro dei barioni (gli adroni formati da 3 quark) è necessario assumere che la loro funzione d'onda sia totalmente simmetrica negli indici di spin e di sapore dei quark. Ciò, avendo i quark spin semintero, contrasta col principio di esclusione di Fermi.

L'ipotesi dei quark venne considerata inizialmente solo un artificio matematico per la classificazione dello spettro. Tuttavia, diversi autori (⁷⁻⁹), per rimediare al problema della statistica di Fermi, postularono l'esistenza di un ulteriore numero quantico, il cosiddetto colore, che può assumere tre valori. Con l'inclusione del colore si può classificare lo spettro assumendo semplicemente che gli adroni siano singoletti (*i.e.* invarianti) sotto il gruppo *SU*(3) di colore. Il gruppo di simmetria *SU*(3) è il gruppo delle matrici complesse 3 × 3 unitarie e con determinante uguale a 1. È facile costruire i singoletti per stati costituiti da coppie di quark-antiquark. Indicando con $|i, f; \bar{j}, \bar{f}'\rangle$ la funzione d'onda di un sistema composto da un quark di colore *i* e *flavour* *f*, e dall'antiparticella di un quark di colore *j* e *flavour* *f'*, vediamo che $\sum_i |i, f; \bar{i}, \bar{f}'\rangle$ è invariante sotto *SU*(3) di colore. Infatti, applicando una trasformazione di *SU*(3) associata alla matrice U_{ml} , usando l'unitarietà abbiamo

$$(1) \quad \sum \varepsilon_i |i, f; \bar{i}, \bar{f}'\rangle \implies \sum_{i'i'} U_{ii'} U_{i'j'}^* |i', f; \bar{j}', \bar{f}'\rangle = \sum_{i'} |i', f; \bar{i}', \bar{f}'\rangle .$$

Si possono anche formare singoletti di colore da stati di tre quark, poiché la combinazione totalmente antisimmetrica di tre colori è invariante. Si ha

$$(2) \quad \sum_{ijk} \varepsilon_{ijk} |i, f_1; j, f_2; k, f_3\rangle \implies \sum_{ijk, i'j'k'} \varepsilon_{ijk} U_{ii'} U_{jj'} U_{kk'} |i', f_1; j', f_2; k', f_3\rangle ,$$

che è identico al membro di sinistra, poiché dalla definizione di determinante, e dalla condizione $\det U = 1$ per le matrici di *SU*(3), segue che

$$(3) \quad \sum_{ijk} \varepsilon_{ijk} U_{ii'} U_{jj'} U_{kk'} = \det U \varepsilon_{i'j'k'} = \varepsilon_{i'j'k'} .$$

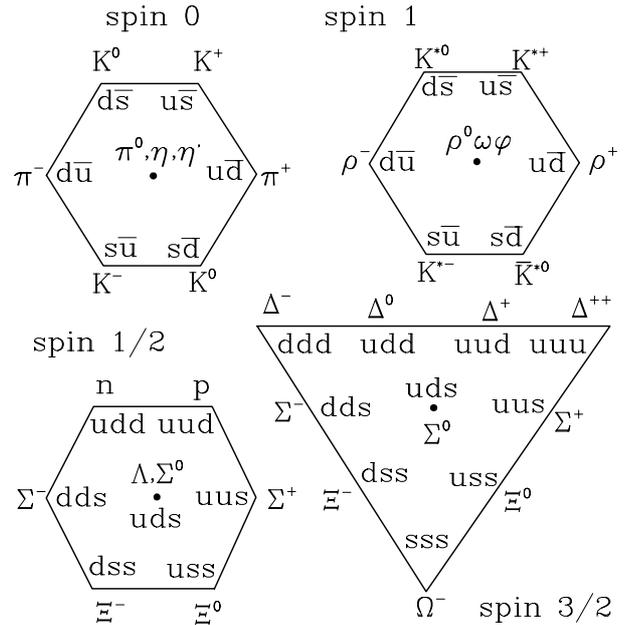


Fig. 1. - Spettro degli adroni.

Nella fig. 1 sono rappresentate le strutture di base dello spettro adronico formato dai quark leggeri. Tali strutture sono raggruppate in termini di multipletti di un gruppo di simmetria, il cosiddetto gruppo di *SU*(3) di *flavour*, che agisce sugli indici di *flavour* dei vari quark, così come *SU*(3) di colore agisce sugli indici di colore.

Il gruppo *SU*(3) di *flavour* è una simmetria approssimata delle interazioni forti, cosicché gli elementi di uno stesso multipletto hanno proprietà simili. In particolare, il sottogruppo di isospin *SU*(2) di *SU*(3) che agisce solo sui *flavour* *u* e *d*, è un'ottima simmetria delle interazioni forti, come testimonia la piccolissima differenza di massa tra neutrone e protone, e tra il π[±] ed il π⁰.

La necessità del colore è particolarmente evidente nel decupletto barionico a spin 3/2. Particelle come Δ⁻, Δ⁺⁺ e Ω⁻ sono composte da tre quark con gli spin allineati e lo stesso *flavour*, e quindi violerebbero, in assenza del colore, il principio di esclusione.

2.2. - Alte energie

I fenomeni di collisione elettrone-protone studiati a SLAC negli anni '60, con fasci di elettroni di 20 GeV circa, dimostrarono che ad alte energie le interazioni forti mostrano caratteristiche di inaspettata semplicità². Nelle collisioni

² Nel 1990 il premio Nobel per la fisica è stato assegnato ai principali autori dell'esperimento, J. I. Friedman, H. W. Kendall and R. E. Taylor (¹⁰).

ad alte energie è utile esaminare la sezione d'urto nel centro di massa, dove elettrone e protone hanno momenti opposti ultrarelativistici. Nel caso di un bersaglio puntiforme di spin $1/2$ e carica unitaria, trascurando le masse, si ha

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{\pi\alpha_{\text{em}}^2}{4E_{\text{CM}}^2(1-\cos\theta)^2} \left(1 + \frac{1}{4}(1+\cos\theta)^2\right), \quad (4)$$

dove θ ed E_{CM} sono l'angolo di *scattering* e l'energia nel centro di massa. La sezione d'urto ha la consueta divergenza di Coulomb per *scattering* in avanti, a piccoli momenti trasferiti. Ad angoli fissi, la sezione d'urto scala come E_{CM}^{-2} , come ci si aspetterebbe dall'analisi dimensionale in unità naturali. Nel caso di un bersaglio non puntiforme, con la carica distribuita su distanze di ordine R , appare nella sezione d'urto un fattore di forma (che è la trasformata di Fourier della distribuzione di carica), funzione del modulo del momento trasferito Q , che si annulla rapidamente quando $Q \gg 1/R$. In questo caso la sezione d'urto è soppressa molto più rapidamente di E_{CM}^{-2} per $E_{\text{CM}} > 1/R$.

Nel caso di collisioni elastiche elettrone-protone, si osservò come atteso la soppressione di un fattore di forma per $E_{\text{CM}} > 1/R$, con $R \approx 1$ fm. Tuttavia si osservò anche che la sezione d'urto inelastica (espressa in termini delle variabili di *scattering* adimensionate appropriate al caso inelastico) ha l'andamento $1/E_{\text{CM}}^2$. In altre parole, nel caso inelastico la sezione d'urto scala come dettato dall'analisi dimensionale, e non c'è traccia di un fattore di forma. Questo fenomeno è noto come *scaling in DIS*³.

Lo *scaling*⁴ può essere facilmente spiegato se si assume che il bersaglio sia composto da costituenti puntiformi. Nel centro di massa di collisione l'elettrone può colpire un costituente del protone, con una sezione d'urto elastica dell'ordine di E_{CM}^{-2} . Il costituente che subisce la collisione verrà diffuso a grande angolo rispetto al resto del protone, dando luogo ad un sistema adronico finale con grande massa invariante. Perciò la sezione d'urto inelastica elettrone-protone viene interpretata come sezione d'urto elastica dell'elettrone su di un costituente pun-

tiforme del protone, e acquista lo stesso andamento di quest'ultima in funzione dell'energia. Vi sono varie assunzioni non del tutto ovvie che rendono plausibile l'interpretazione dello *scaling* in termini di costituenti. Nello stato finale della collisione non si osserva la particella che ha subito lo *scattering*. Lo stato finale è formato principalmente da vari pioni e un nucleone. Si deve perciò assumere che la particella puntiforme si manifesti solo nella collisione ad alto momento trasferito, cioè a piccole distanze, e che a grandi distanze, quando si sono formati gli adroni dello stato finale, non sia più osservabile individualmente. Con queste ipotesi è possibile, tuttavia, fare predizioni significative sulla forma della sezione d'urto. In particolare, assumendo che i partoni elettricamente carichi siano fermioni di spin $1/2$ (i quark), si pongono vincoli cinematici sulla forma della sezione d'urto differenziale (relazione di Callan-Gross) che vengono verificati sperimentalmente. I fenomeni di *scaling* mostrarono perciò che si doveva attribuire ai quark una realtà fisica ben più profonda di quanto si ritenesse prima.

Nell'annichilazione di coppie e^+e^- (elettrone-positrone) ad alta energia, l'effettiva esistenza dei quark, ed il loro carattere di particelle puntiformi, si manifesta in modo ancora più semplice. Accade che la sezione d'urto di produzione per energie nel centro di massa superiori a 2 GeV (ma inferiori a due volte la massa del quark *charm*, dell'ordine di 3 GeV) ha il valore che ci si aspetterebbe se i quark fossero particelle libere

$$(5) \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{adroni}) \approx$$

$$\approx \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \times 3 \times \left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}\right).$$

La sezione d'urto è perciò identica alla sezione d'urto di produzione di una coppia muone-antimuone (in quanto, come i quark, i muoni sono particelle elettricamente cariche di spin $1/2$) moltiplicato per 3 (in quanto i quark hanno 3 possibili colori) e per il quadrato della carica elettrica del quark prodotto: $4/9$ per il quark *up*, e $1/9$ per il *down* e lo *strange*.

3. - Le teorie dei campi quantizzati e le interazioni forti

Le teorie di campo rinormalizzabili hanno avuto notevole successo nella descrizione della

³ DIS è acronimo di *Deep Inelastic Scattering*.

⁴ Un'interpretazione del fenomeno venne data da Bjorken, in termini di un formalismo noto come algebra delle correnti⁽¹¹⁾, e, in modo più intuitivo, da Feynman, che introdusse il cosiddetto *parton model* (dove "parton" sta per costituente).

elettrodinamica quantistica. Esse forniscono un contesto in cui la relatività e la meccanica quantistica convivono senza contraddizioni. Consentono inoltre di formulare l'elettrodinamica con grande semplicità, e di calcolare processi di *scattering* di elettroni, positroni e fotoni. Inoltre, quantità come la *Lamb Shift* e il rapporto giromagnetico dell'elettrone possono essere calcolati con grande accuratezza. Visto il successo dell'elettrodinamica quantistica, era logico cercare di utilizzare le teorie di campo rinormalizzabili per descrivere anche gli altri aspetti delle interazioni elementari. Nell'ambito delle interazioni deboli, la teoria di Fermi consente di calcolare accuratamente fenomeni a basse energie, ma non essendo rinormalizzabile, non può essere considerata una teoria valida a tutte le scale. La ricerca di una teoria rinormalizzabile che spiegasse le interazioni deboli ha portato negli anni '60 alla formulazione della moderna teoria elettrodebole di Weinberg-Salam.

Malgrado questi successi, si era sviluppata negli anni '60 una generale sfiducia sulla possibilità di descrivere le interazioni forti in termini di una teoria di campo. Da un lato, la presenza di molte particelle e risonanze faceva dubitare dell'esistenza stessa di campi fondamentali. Nella pratica, ogni tentativo di formulare un modello si scontrava con l'impossibilità di usare efficacemente la teoria delle perturbazioni, vista la mancanza di un piccolo parametro che caratterizzasse le interazioni forti.

La scoperta dei fenomeni di *scaling* portò alla conclusione che le interazioni forti dovevano manifestare libertà asintotica, ovvero alle alte energie i quark costituenti dovevano comportarsi come particelle libere. Purtroppo era noto che proprio l'importante esempio dell'elettrodinamica quantistica manifesta un comportamento esattamente opposto.

4. – Comportamento asintotico della costante di accoppiamento

Intuitivamente si potrebbe pensare che in una teoria come l'elettrodinamica quantistica, ad alte energie, nel limite in cui la massa dell'elettrone può essere trascurata, le sezioni d'urto abbiano tutte l'andamento

$$(6) \quad \sigma(s) = \frac{1}{s} g(\alpha) = \frac{1}{s} [g_0 + g_1 \alpha + g_2 \alpha^2 + \dots] ,$$

(dove $s = E_{CM}^2$) in quanto, essendo α_{em} adimensionata, null'altro è consentito dall'analisi dimensionale. Ciò non accade senz'altro per teorie caratterizzate da accoppiamenti aventi dimensione non nulla. Per esempio, se α avesse la dimensionalità di un'energia alla potenza $2k$, la sezione d'urto dovrebbe avere la forma

$$(7) \quad \sigma(s) = \frac{1}{s} g(\alpha/s^k) = \frac{1}{s} \left[g_0 + g_1 \frac{\alpha}{s^k} + g_2 \left(\frac{\alpha}{s^k} \right)^2 + \dots \right] .$$

Per $k > 0$ si avrebbe che ad alte energie solo il primo termine non nullo è importante. Lo sviluppo perturbativo diverrebbe perciò sempre più rapidamente convergente in questo limite. Si avrebbe quindi libertà asintotica. Nel caso opposto ($k < 0$) si ha l'esatto contrario: anche se la costante di accoppiamento fosse sufficientemente piccola a basse energie da avere una serie perturbativa rapidamente convergente, ad alte energie si arriverebbe inevitabilmente ad avere una serie intrattabile. Fra le teorie di campo di interesse, la teoria di Fermi e la gravità sono caratterizzate da $k < 0$. Diventano perciò intrattabili alle alte energie. Soltanto in pochi esempi di interesse puramente accademico si osserva la caratteristica opposta $k > 0$.

La presenza di divergenze ultraviolette nelle teorie dei campi quantizzati fa sì che nel caso di costanti di accoppiamento adimensionate ($k = 0$) il ragionamento intuitivo esposto sopra fallisce. Fortunatamente, nel caso di teorie rinormalizzabili, è possibile ugualmente calcolare il comportamento asintotico. Consideriamo per semplicità una teoria come l'elettrodinamica di fotoni ed elettroni per energie molto superiori alla massa dell'elettrone. Una generica osservabile fisica verrebbe data da un'espressione della forma

$$(8) \quad G(s) = G(\alpha, M, s),$$

dove si assume senza perdita di generalità che G dipenda da un'unica variabile dimensionata s , con dimensione del quadrato di una massa. Per via delle divergenze ultraviolette bisogna introdurre un *cutoff* ultravioletto M . Avremo che $G(\alpha, M)$ sarà espresso da una serie perturbativa in potenze di α , con coefficienti che dipendono da s e M .

La proprietà di rinormalizzabilità della teoria si può esprimere sinteticamente come segue:

per M molto grandi⁵ la dipendenza dal *cutoff* M può essere riassorbita tramite una ridefinizione della costante di accoppiamento. Più precisamente, esiste una funzione

$$(9) \quad \alpha_R(\alpha, M/\mu) = \\ = \alpha + c_1(M/\mu)\alpha^2 + c_2(M/\mu)\alpha^3 \dots$$

tale che, definendo la sua funzione inversa

$$(10) \quad \alpha(\alpha_R, M/\mu) = \alpha_R - c_1(M/\mu)\alpha_R^2 + \\ + [2c_1^2(M/\mu) - c_2(M/\mu)]\alpha_R^3 + \dots$$

si ha che $G(\alpha(\alpha_R, M/\mu), M, s)$ non dipende da M , ovvero possiamo scrivere

$$(11) \quad G(\alpha(\alpha_R, M/\mu), M, s) = G_R(\alpha_R, \mu, s)$$

per tutte le quantità fisiche. Osserviamo che, poiché α_R pur essendo adimensionata deve dipendere dal *cutoff*, è necessario introdurre un'ulteriore scala arbitraria μ nella sua definizione.

La proprietà di rinormalizzabilità rende una teoria di campo pienamente predittiva: se si misura α_R in un processo fisico, se ne può poi utilizzare il valore per calcolare qualsiasi altro processo. Inoltre, grazie alla rinormalizzabilità è possibile calcolare le proprietà asintotiche della teoria.

Poiché la teoria è definita a partire da α e M , variazioni di α_R e μ ad α e M fissati devono corrispondere alla medesima teoria fisica, ovvero devono lasciare invariate le quantità fisiche. Formalmente, per variazioni $d\alpha_R$ e $d\mu^2$ tali che

$$(12) \quad \frac{\partial \alpha(\alpha_R, M/\mu)}{\partial \alpha_R} d\alpha_R + \frac{\partial \alpha(\alpha_R, M/\mu)}{\partial \mu^2} d\mu^2 = 0,$$

si deve avere anche

$$(13) \quad \frac{\partial G_R(\alpha_R, \mu, s)}{\partial \alpha_R} d\alpha_R + \frac{\partial G_R(\alpha_R, \mu, s)}{\partial \mu^2} d\mu^2 = 0.$$

Dalle equazioni (12) e (13) otteniamo

$$(14) \quad \mu^2 \frac{d\alpha_R}{d\mu^2} = - \frac{\mu^2 \frac{\partial}{\partial \mu^2} \alpha(\alpha_R, M/\mu)}{\frac{\partial}{\partial \alpha_R} \alpha(\alpha_R, M/\mu)} = \\ = - \frac{\mu^2 \frac{\partial}{\partial \mu^2} G_R(\alpha_R, \mu, s)}{\frac{\partial}{\partial \alpha_R} G_R(\alpha_R, \mu, s)}$$

da cui segue il notevole risultato

$$(16) \quad \mu^2 \frac{d\alpha_R}{d\mu^2} = \beta(\alpha_R),$$

⁵ Tali cioè che contributi soppressi da potenze di M siano totalmente trascurabili.

dove β non dipende da s , M or μ . Infatti, β non dipende da M , perché M non appare nel lato destro della seconda equazione nella (14), e non può dipendere da s perché s è assente nel lato destro della prima equazione. Infine, non può dipendere da μ , perché μ ha dimensione di massa, β è adimensionata, e non vi sono altre quantità dimensionate da cui potrebbe dipendere.

L'equazione (15) descrive una famiglia di curve nel piano α_R, μ . Punti nella stessa curva descrivono la stessa teoria, e perciò muovendosi lungo la stessa curva le quantità fisiche non cambiano.

Ulteriori informazioni sulla struttura della funzione β si possono ricavare dalla equazione (9), da cui si deduce

$$(16) \quad \mu^2 \frac{d\alpha_R}{d\mu^2} = \alpha^2 \mu^2 \frac{dc_1(M/\mu)}{d\mu^2} + \mathcal{O}(\alpha^3) = \\ = \alpha_R^2 \mu^2 \frac{dc_1(M/\mu)}{d\mu^2} + \mathcal{O}(\alpha_R^3),$$

e perciò che β ha uno sviluppo che inizia al second'ordine in α_R

$$(17) \quad \beta(\alpha_R) = -b_0 \alpha_R^2 + \mathcal{O}(\alpha_R^3)$$

e che inoltre (dalle (16) e (17))

$$(18) \quad c_1(M/\mu) = -b_0 \log \frac{\mu^2}{M^2} + \text{cost.}$$

Si può ottenere facilmente la soluzione generale della (15) all'ordine più basso in α_R . Si ha

$$(19) \quad \mu^2 \frac{d\alpha_R}{d\mu^2} = -b_0 \alpha_R^2 \implies \frac{s}{d \log \mu^2} \frac{1}{\alpha_R} = b_0$$

$$\implies \frac{1}{\alpha_R} = b_0 \log \mu^2 + \text{cost.},$$

dove la costante può essere conglobata in un parametro dimensionato Λ , scrivendo $\log \mu^2 \rightarrow \log \mu^2 / \Lambda^2$. Si ha quindi

$$(20) \quad \alpha_R = \frac{1}{b_0 \log \mu^2 / \Lambda^2}.$$

L'equazione (20) descrive perciò esplicitamente la famiglia di curve nel piano α_R, μ , parametrizzate dal valore di Λ , soluzioni approssimate della (15) nel limite di piccoli α_R .

Una generica quantità fisica con dimensione (per esempio) di una sezione d'urto ha lo sviluppo perturbativo

$$(21) \quad G_R(\alpha_R, \mu, s) = \frac{1}{s} \sum_l g_l(s/\mu^2) \alpha_R^l,$$

dove i coefficienti dello sviluppo sono adimensionati, e possono perciò dipendere da s e μ^2 solo tramite il loro rapporto. Nell'espressione della nostra quantità fisica abbiamo la libertà di scegliere arbitrariamente μ e α_R nella stessa curva nel piano α_R, μ soluzione dell'equazione (15). Per studiare l'andamento asintotico di G in funzione della scala di energia è conveniente però scegliere μ dell'ordine di s . In questo caso, infatti, i coefficienti g_l rimangono costanti in funzione dell'energia, ed è il comportamento di α_R che controlla il comportamento asintotico.

Nel caso dell'elettrodinamica di elettroni e fotoni si calcola

$$(22) \quad b_0 = -\frac{1}{3\pi}.$$

Poiché $b_0 < 0$, abbiamo che solo per $\mu \ll \Lambda$ la costante di accoppiamento è positiva e piccola. Poiché l'equazione (20) è valida solo nel limite di alte energie, cioè per $\mu > m_e$ (dove m_e è la massa dell'elettrone), il valore iniziale di α_{em} a $\mu \geq m_e$ è prossimo a $1/137$, consistentemente con l'approssimazione perturbativa usata per la funzione β . Con l'aumentare della scala μ , la costante di accoppiamento cresce. L'espressione (20) diverge poi per $\mu = \Lambda$ (il cosiddetto polo di Landau). La divergenza occorre quando oramai α_R è grande, per cui l'approssimazione perturbativa per β non è più valida.

Il fallimento dell'approssimazione perturbativa si ripercuote sull'andamento asintotico di qualsiasi quantità fisica ad alte energie. La presenza del polo di Landau indica perciò un'inconsistenza nella formulazione dell'elettrodinamica. Infatti, la teoria viene formulata come teoria di campo locale (cioè a piccole distanze) e però fallisce proprio a piccole distanze. È consolante il fatto che, per via della piccolezza di α a scale dell'ordine della massa dell'elettrone, il valore di Λ è enorme: $\Lambda \approx m_e \exp[137/|2b_0|]^6$ e quindi l'inconsistenza dell'elettrodinamica non preoccupa molto in pratica.

Sarebbe invece impossibile utilizzare una teoria di questo tipo per descrivere le interazioni forti, poiché per esse il valore iniziale della costante di accoppiamento non sarebbe piccolo, e perciò il fallimento dello sviluppo perturbativo avverrebbe già a basse scale.

⁶ In realtà, mano a mano che la scala μ aumenta altre particelle con massa minore di μ contribuiscono al valore di b_0 . Tuttavia, anche includendo questi effetti, le conclusioni tratte sopra non cambiano apprezzabilmente.

5. – La libertà asintotica in teorie di *gauge* non abeliane

Da quanto esposto nelle precedenti sezioni, emerge ovviamente che la corretta teoria delle interazioni forti va cercata in modelli di campi quantizzati con $b_0 > 0$. In questo caso, infatti, si dovrebbe avere $\mu \gg \Lambda$ affinché la costante di accoppiamento sia positiva e piccola. Si avrebbe sempre un regime di alte energie in cui la costante di accoppiamento è piccola. In questo limite, le quantità fisiche verrebbero dominate dall'ordine più basso dello sviluppo perturbativo. A basse energie la costante di accoppiamento sarebbe invece grande, e ciò sarebbe consistente con la complessa struttura delle interazioni forti in quei regimi.

Curiosamente, Gross e Wilczek affrontarono il calcolo del b_0 in teorie di *gauge* non abeliane non perché sospettassero che esse potessero essere utilizzate per descrivere le interazioni forti, ma per l'esatto contrario. Volevano infatti dimostrare che non era possibile descrivere le interazioni forti nell'ambito delle teorie di campo. Poiché Gross e Coleman⁽¹²⁾ avevano dimostrato con argomenti piuttosto generali che in tutti i modelli di teorie di campo, escluse le teorie di *gauge* non abeliane, si aveva $b_0 < 0$, il lavoro di Gross e Wilczek mirava ad escludere quest'ultima possibilità. Le ragioni di quest'approccio vanno cercate nella generale atmosfera di sfiducia verso le teorie di campo che si era creata nella comunità dei fisici teorici a quei tempi, e certamente io non sono in grado di commentarle ulteriormente. Resta il fatto che il calcolo di Gross e Wilczek, e indipendentemente di Politzer, dimostrò invece che $b_0 > 0$ per le teorie di *gauge* non abeliane⁷.

6. – Le teorie di *gauge* non abeliane

Prima di procedere, darò una breve descrizione delle teorie di *gauge*. In primo luogo, esse sono associate ad un gruppo di simmetrie. Nel nostro caso, il gruppo rilevante è $SU(3)$ di colore, per cui nel seguito mi riferirò specifica-

⁷ Nel 1972 't Hooft annunciò ad una conferenza a Marsiglia di aver ottenuto il risultato $b_0 > 0$ in teorie di *gauge*. Tuttavia non pubblicò il risultato, che perciò non attirò molta attenzione.

mente a questo gruppo. Le teorie di *gauge* sono una generalizzazione dell'elettrodinamica. Formalmente, così come l'elettrodinamica può essere costruita sulla base di un principio di invarianza di *gauge* sotto trasformazioni locali di fase dei campi $\Psi(x) \rightarrow e^{ig\theta(x)}\psi(x)$, i campi di *gauge* si ottengono generalizzando questa costruzione a gruppi di trasformazioni matriciali $\Psi_i(x) \rightarrow \sum_j U_{ij}(x)\psi_j(x)$. Il gruppo di trasformazioni di fase dell'elettrodinamica è ovviamente un gruppo abeliano (*i.e.* commutativo). Nel caso di gruppi non abeliani come $SU(3)$ si parla di teorie di *gauge* non abeliane. Così come, per mantenere l'invarianza di *gauge* in elettrodinamica, si deve introdurre un campo vettoriale che trasforma non linearmente sotto la trasformazione di fase $A_\mu \rightarrow A_\mu - \partial_\mu\theta$, così per la teoria di *gauge* del gruppo $SU(3)$ si devono introdurre otto campi vettoriali A_μ^a , che trasformano non linearmente sotto $SU(3)$ (associati ai generatori della rappresentazione aggiunta del gruppo) i cosiddetti gluoni. Analogamente alla costante di struttura fine α_{em} si introduce la costante α_S (dove il pedice sta per *strong*) delle interazioni forti.

È istruttivo rappresentare graficamente l'emissione di un gluone da parte di un quark, in relazione all'emissione di un fotone da parte di un elettrone:



Nel grafico di sinistra si rappresenta l'emissione di un fotone da parte di un elettrone, e in quello di destra l'emissione di un gluone da parte di un quark. I due processi differiscono unicamente per il fatto che, mentre la carica dell'elettrone rimane invariata dopo l'emissione, nel caso del quark la carica cambia. Un quark di colore r si tramuta in un quark di colore b , emettendo un gluone di colore $r\bar{b}$. Come nell'elettrodinamica, il gluone è una particella vettoriale (*i.e.* con spin uguale a 1) senza massa. Avendo a disposizione i tre colori rgb , possiamo formare nove combinazioni di colore-anticolore. Tuttavia la somma di colore-anticolore è un singoletto di $SU(3)$, cioè è neutra in colore. Perciò i gluoni sono $9 - 1 = 8$. A differenza dell'elettrodinamica, in cui il fotone non porta carica elettrica, il gluone porta colore, e perciò può interagire direttamente con altri gluoni.

Il valore di b_0 per un campo di *gauge* associato al gruppo $SU(3)$ di colore è dato da

$$(24) \quad b_0 = \frac{33 - 2n_f}{12\pi} ,$$

dove n_f è il numero di quark accessibili al regime energetico in questione. Il 33, che appare con segno opposto al contributo dovuto ai quark, è proprio la conseguenza dell'autointerazione dei gluoni. Il segno di questo contributo è positivo, e per n_f non troppo grande rende positivo il b_0 . All'ordine più basso si ha

$$(26) \quad \alpha_S = \frac{1}{b_0 \log \mu^2 / \Lambda_{\text{QCD}}^2} .$$

Si osservi che, poiché le interazioni forti diventano forti a scale dell'ordine di qualche centinaio di MeV, ci si aspetta che Λ_{QCD} sia dell'ordine di qualche centinaio di MeV.

Nel caso delle interazioni forti, il gruppo di simmetria a cui associare i campi di *gauge* non abeliani è chiaramente il gruppo $SU(3)$ di colore. Questo rende plausibile il fatto che gli oggetti «colorati» non possano essere isolati, e quindi è in sintonia con il modello a quark, che richiede che gli adroni dello spettro devono essere singoletti (cioè neutri) nel colore. Lo stesso meccanismo farebbe sì che anche i gluoni, che sono formalmente particelle senza massa, non siano osservabili come particelle libere a basse energie.

La formulazione delle interazioni forti in termini di campi di *gauge* aprì una nuova prospettiva per l'unificazione delle forze fondamentali. Le interazioni deboli ed elettromagnetiche sono descritte infatti da campi di *gauge*. Diventa quindi possibile speculare che tutte le forze note (con l'eccezione della gravità) abbiano origine da un singolo campo di *gauge*, associato ad un grande gruppo di simmetria, che ha come sottogruppi il gruppo di colore e il gruppo elettrodebole.

7. - Il confronto con la fenomenologia

Dall'esistenza dei fenomeni di *scaling* ad alte energie e dalla struttura dello spettro adronico segue sostanzialmente che nell'ambito delle teorie di campo rinormalizzabili non vi siano alternative valide alla QCD. Questo ha fatto sì che la QCD venisse accettata in modo quasi unanime nella comunità teorica fin dalla sua formulazione. Bisogna però ricordare che fino a

pochi anni prima c'era uno scetticismo notevole sulla possibilità di descrivere le interazioni forti in termini di teorie di campo. La scoperta della libertà asintotica in teorie di campo non esclude a priori la possibilità che esistano ambiti alternativi alle teorie di campo in cui si manifesta la libertà asintotica. Si pone perciò il problema di verificare sperimentalmente la QCD. Ovviamente, se si potesse utilizzare la teoria per calcolare lo spettro degli adroni e confrontarlo con la realtà si avrebbe immediatamente una verifica inequivocabile. Purtroppo però ciò è estremamente difficile. Le strutture adroniche hanno dimensioni tipiche dell'ordine del fermi, e a quelle distanze la costante di accoppiamento forte è grande⁸.

I test della QCD più importanti effettuati fino al presente sono test di alta energia, in cui si verifica la teoria nel limite perturbativo (cioè di piccola costante di accoppiamento). In questo ambito i quark e i gluoni si manifestano come particelle puntiformi, con interazioni considerevolmente simili alle interazioni dell'elettrodinamica.

Fenomeni dominati dalla fisica delle piccole distanze (grandi momenti) sono calcolabili perturbativamente grazie alla libertà asintotica. Ma quali fenomeni sono dominati da piccole distanze? In realtà, tutti i fenomeni di fisica adronica accessibili in pratica coinvolgono adroni nello stato iniziale e/o finale, e la stessa formazione degli adroni non è un fenomeno di piccole distanze. È ugualmente possibile, tuttavia, trovare quantità che non dipendono dai dettagli della formazione dello stato finale, e sono perciò controllate dalle interazioni a piccole distanze.

Consideriamo l'esempio della produzione di una coppia particella antiparticella nell'annichilazione elettrone-positrone ad alta energia. Normalmente la sezione d'urto viene misurata rivelando la presenza delle particelle nel laboratorio, su scale dell'ordine del metro. Esistono però casi in cui lo stato finale continua a cambiare aumentando le dimensioni del rivelatore. Se la coppia prodotta porta carica elettrica, per esempio, si ha il caratteristico spettro di *bremmsstrahlung* $d\omega/\omega$ dei fotoni prodotti. Per un rivelatore di dimensione L , non si possono rivelare fotoni con lunghezza d'onda maggiore di L . Accade così che la sezione d'urto di pro-

duzione di particelle cariche associate ad un numero definito di fotoni non è ben definita nel limite $L \rightarrow \infty$. La sezione d'urto di produzione di particella cariche più un numero qualunque di fotoni (cioè la sezione d'urto *inclusiva*) è invece ben definita, in quanto l'irradiazione di fotoni soffici è successiva al processo di produzione iniziale, e non ne altera la probabilità. Quanto può essere piccolo L affinché la misura della sezione d'urto corrisponda al suo valore asintotico? Si deve ovviamente avere che $L \gg 1/E$, dove E è l'energia delle particelle rivelate. In questo caso, infatti, la loro funzione d'onda ha fatto già un numero sufficiente di oscillazioni, così che il loro momento e la loro energia sono ben definite.

La strategia per il calcolo perturbativo di sezioni d'urto adroniche parte proprio da considerazioni di questo tipo. In un fenomeno di produzione di adroni ad energia $E \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ si può immaginare di effettuare la misura della sezione d'urto in un laboratorio di dimensioni $L \ll 1/\Lambda_{\text{QCD}}$, e però con $L \gg 1/E$. In altre parole, il laboratorio può avere dimensioni molto inferiori al fermi, ma molto superiori all'inverso dell'energia di collisione. Se la sezione d'urto ha un limite definito per $L \rightarrow \infty$, essa può essere calcolata ad un ordine arbitrario della costante di accoppiamento, che risulterà valutata a scale μ non inferiori a $1/L$, e quindi sarà piccola grazie alla libertà asintotica. La formazione degli adroni avviene a distanze maggiori, dell'ordine del fermi, e quindi non influenzerà apprezzabilmente la sezione d'urto calcolata. Vista la similitudine della QCD con l'elettrodinamica, è chiaro che in analogia con l'elettrodinamica solo certe sezioni d'urto inclusive sono calcolabili, cioè hanno un limite ben definito per $L \rightarrow \infty$.

8. – I test della QCD

La verifica della QCD è stata un processo complesso e laborioso. Spesso le quantità dominate dalle piccole distanze non sono ottimali dal punto di vista sperimentale. D'altro canto, ci sono molti contesti sperimentali in cui si possono cercare verifiche della teoria. Quindi non c'è un singolo fenomeno chiave in cui si verificava la QCD, ma diversi fenomeni in contesti molto diversi che insieme costruiscono una solida conferma della teoria. Qui in seguito porterò solo alcuni esempi.

⁸ Calcoli dello spettro vengono effettuati con simulazioni della teoria di campo in uno spazio-tempo discretizzato, tramite l'utilizzo di calcolatori dedicati.

8.1. – La sezione d'urto totale di annichilazione e^+e^- in adroni

È il più semplice processo dominato da piccole distanze. La sezione d'urto è totalmente inclusiva: si accettano cioè tutti gli stati finali che contengono adroni. Nel calcolo perturbativo di questa quantità si accettano perciò tutti gli stati finali che contengono quark e/o gluoni. La sezione d'urto è data da una serie nella costante di accoppiamento forte valutata alla scala $\mu = E_{\text{CM}}$. Al prim'ordine nelle interazioni forti si ha

$$(26) \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{adroni}) = \\ = \sigma_0 \times \left(1 + \frac{\alpha_S(E_{\text{CM}})}{\pi} + \mathcal{O}(\alpha_S^2) \right),$$

dove σ_0 è la sezione d'urto di produzione dei quark liberi (cioè con $\alpha_S = 0$). Questa sezione d'urto è stata calcolata sino al terzo ordine della costante di accoppiamento forte, e grazie alle misure di precisione di LEP (a $E_{\text{CM}} = M_Z$, dove $M_Z = 91,2$ GeV) consente la determinazione di $\alpha_S(M_Z) = 0,1186 \pm 0,0027$ ⁽¹³⁾. Si osservi che con un tale valore di α_S la correzione α/π nella (26) è dell'ordine del 4%.

Osserviamo che anche un calcolo grossolano conduce ad un risultato simile. Poiché le interazioni forti divengono forti a scale dell'ordine di qualche centinaio di MeV, possiamo assumere che $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200$ MeV. Possiamo ora calcolare il valore della correzione forte alla sezione d'urto adronica per $E_{\text{CM}} = 91,2$ GeV. Il valore di b_0 è dato dalla (24), con $n_f = 5$, poiché tutti i quark, escluso il *top*, possono essere prodotti a queste energie. Troveremmo una correzione del 4,3% alla sezione d'urto. Questo risultato ovviamente dipende dalla scelta di 200 MeV per Λ_{QCD} . Tuttavia dipende da tale scala solo logicamente. E va notato che, se il valore della correzione misurato a LEP fosse stato del 9% questo avrebbe richiesto $\Lambda_{\text{QCD}} = 5$ GeV, in contrasto con l'osservazione di fenomeni di *scaling* ben al di sotto di queste energie.

8.2. – Violazioni dello “scaling in DIS”

La libertà asintotica in QCD è raggiunta soltanto in modo logaritmico. Questo fa sì che lo *scaling in DIS* non sia esatto, ma violato logicamente in modo calcolabile. Verifiche delle violazioni di *scaling*, nonché corrispon-

denti misure di α_S sono state effettuate nel contesto degli esperimenti di DIS.

8.3. – Getti e^+e^- in adroni

Nell'annichilazione e^+e^- in quark-antiquark, nello stato finale, si osservano, in corrispondenza con i quark prodotti, dei getti di adroni, tanto più collimati quanto più alta è l'energia. La coppia quark-antiquark prodotta in annichilazione e^+e^- può irradiare un ulteriore gluone a grande angolo e ad alta energia, con una probabilità di ordine α_S . Ci si aspetta quindi che il grosso degli eventi sia composto da due getti, con una frazione di ordine α_S di eventi a 3 getti, una frazione di ordine α_S^2 di eventi a 4 getti, etc. A LEP, grazie all'altissima statistica, è stato portato a termine un programma di studi della produzione di getti che ha brillantemente confermato le predizioni della QCD.

8.4. – Produzione di getti in collisioni adroniche

I fenomeni di collisione a grande momento trasferito possono anch'essi essere interpretati come dovuti a collisioni di costituenti. I costituenti diffusi danno luogo a getti di adroni. La distribuzione di questi getti è calcolabile con buona precisione su di una considerevole estensione di valori. Buona parte della sezione d'urto di produzione di getti è dovuta in questo caso alla collisione di gluoni (essendo anch'essi costituenti degli adroni) e fornisce perciò un'ulteriore verifica della loro esistenza.

9. – Conclusioni

Nella fig. 2 ⁽¹³⁾ sono riportate le più significative determinazioni di α_S in diversi contesti sperimentali. Le varie determinazioni sono effettuate a varie energie μ , ed il corrispondente valore di $\alpha_S(\mu)$ viene poi utilizzato per calcolare $\alpha_S(M_Z)$ usando l'equazione (15). Come si nota, c'è una consistenza notevole delle varie determinazioni. Sono anche riportate, nel grafico di destra, le varie determinazioni di $\alpha_S(\mu)$ in funzione dell'energia, con le curve teoriche soluzioni dell'equazione (16) corrispondenti agli estremi superiori e inferiori al valore centrale della determinazione media di $\alpha_S(M_Z)$ riportata nel riquadro di sinistra. La soppressione della

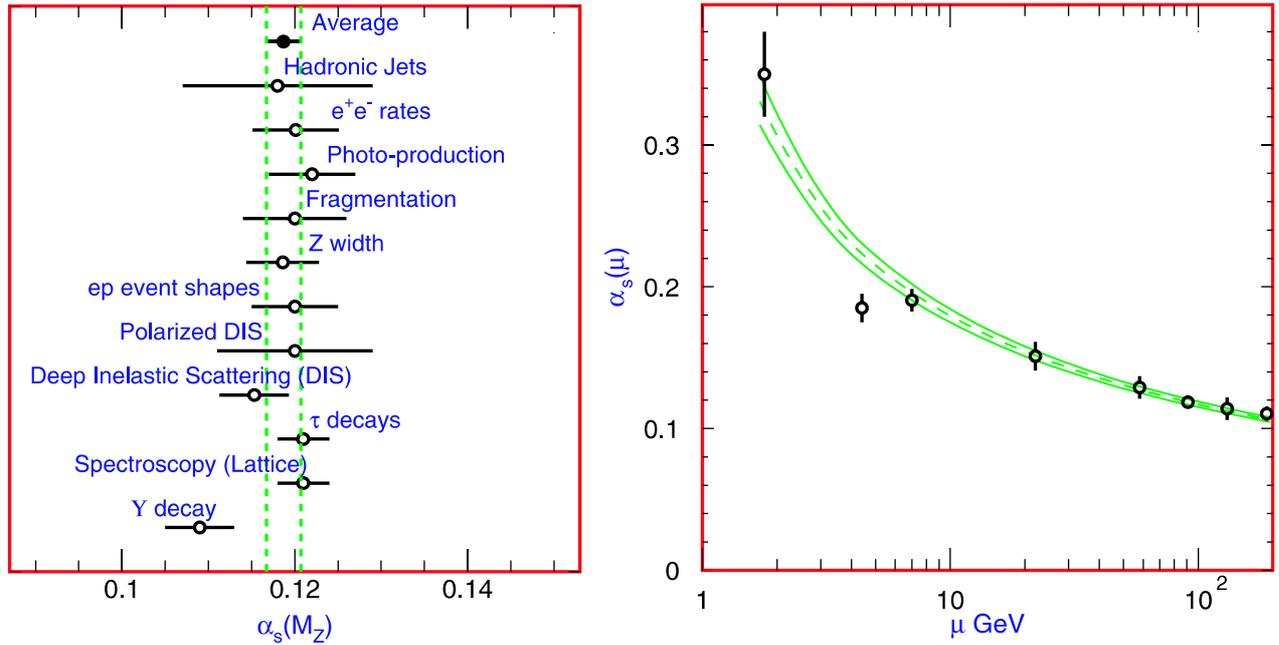


Fig. 2. – Riassunto delle misure di α_s in vari contesti.

costante di accoppiamento a grandi energie è brillantemente verificata. Si può dire che la fig. 2 rappresenti la verifica sperimentale dell'esistenza della libertà asintotica nelle interazioni forti.

Al giorno d'oggi, specialmente dopo il decennio di fisica di LEP, si ritiene che la QCD sia ragionevolmente verificata.

La QCD è diventata uno strumento essenziale per la ricerca di nuova fisica negli esperimenti di alta energia. Un esempio considerevole è stata la scoperta del quark *top*, effettuata al TEVATRON di Fermilab. Le coppie *top-antitop* hanno origine in collisioni adroniche da vertici di QCD, in cui un gluone virtuale decade in una coppia *t \bar{t}* . La ricerca del *top* in collisioni adroniche ai collisori protone-antiprotone del CERN e di Fermilab sono state effettuate sulla base di calcoli di QCD della sua sezione d'urto. Misure recenti danno sezioni d'urto di produzione al TEVATRON tra i 5 e gli 8 pb, in buon accordo con i risultati teorici, che danno risultati tra i 5 e 7 pb. Questo risultato ha dimostrato l'affidabilità della QCD in un regime completamente inesplorato. Un ulteriore esempio è la futura ricerca del bosone di Higgs (l'ultima particella del Modello Standard non ancora osservata), uno dei principali obiettivi di fisica del *Large Hadron Collider* (LHC) del CERN. Il meccanismo di produzione principale dello Higgs in collisioni adroniche è mediato dalle interazioni

forti. Avviene tramite la collisione di due gluoni, che si accoppiano allo Higgs tramite la produzione di una coppia virtuale di quark *top-antitop*. Questo processo è dominante in quanto α_s è più grande delle costanti di accoppiamento debole ed elettromagnetica, e inoltre lo Higgs si accoppia fortemente alle particelle pesanti. La QCD è lo strumento essenziale per il calcolo della sezione d'urto di produzione, nonché dei processi di *background*, ed è sulla base di questi calcoli che vengono progettati e costruiti i rivelatori.

Bibliografia

- (1) D. J. GROSS e F. WILCZEK, *Phys. Rev. Lett.* **30** (1973) 1343.
- (2) D. J. GROSS e F. WILCZEK, *Phys. Rev. D* **8** (1973) 3633.
- (3) H. D. POLITZER, *Phys. Rev. Lett.* **30** (1973) 1346.
- (4) H. D. POLITZER, *Phys. Rep.* **14** (1974) 129.
- (5) C. N. YANG e R. L. MILLS, *Phys. Rev.* **96** (1954) 191.
- (6) M. GELL-MANN, *Phys. Lett.* **8** (1964) 214; G. ZWEIG, CERN preprint TH401(1964).
- (7) O. W. GREENBERG, *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 598.
- (8) M. Y. HAN e Y. NAMBU, *Phys. Rev.* **139** (1965) B1006.
- (9) W.A. BARDEEN, H. FRITZSCH e M. GELL-MANN, in *Scale and Conformal Invariance in Hadron Physics*, a cura di R. Gatto (Wiley, New York) 1973.
- (10) J. I. FRIEDMAN, H. W. KENDALL e R. E. TAYLOR, *Rev. Mod. Phys.* **63** (1991) 573.
- (11) J. D. BJORKEN, *Phys. Rev.* **179** (1969) 1547.
- (12) S. R. COLEMAN e D. J. GROSS, *Phys. Rev. Lett.* **31** (1973) 851.
- (13) Dalla sezione "QCD" in *Review of Particle Physics*, S. Eidelman *et al.*, *Phys. Lett. B* **592** (2004) 1 (accessibile al sito <http://pdg.lbl.gov>).

QUANTOMECCANICA, RELATIVITÀ E TEMPO

G. Basini

Laboratori Nazionali di Frascati, INFN
Frascati, Roma

S. Capozziello

Dipartimento di Scienze Fisiche, Università di
Napoli Federico II, INFN Sezione di Napoli

Le relazioni tra la relatività generale e la quantomeccanica sono discusse alla luce di un nuovo approccio che ricerca una descrizione comune alle due teorie. In questo quadro, la necessità di cinque dimensioni e di due frecce del tempo deriva dall'assunzione di portata generale che le leggi di conservazione non possano essere mai violate. I risultati del confronto tra le previsioni di questa teoria ed i dati delle più recenti osservazioni sperimentali vengono presentati a supporto del nuovo approccio.

1. – Problemi aperti nella fisica moderna

La fisica del XX secolo ha offerto, nel suo sviluppo, una visione contraddittoria, perché il secolo delle più grandi scoperte scientifiche è cominciato apparentemente vicino ad un quadro generale unitario delle leggi della Natura, ma è finito ancora ben lontano da questo obiettivo. I successi di una fisica sperimentale raffinata, aprendo la strada all'osservazione di fenomeni anche enormemente lontani dalla nostra percezione quotidiana, hanno portato a risultati nuovi e sorprendenti, ma anche molto difficili ad essere interpretati all'interno degli schemi standard e questo fatto, insieme alla persistente mancanza di un unico schema adatto sia per la Quantomeccanica che per la Relatività, è alla base dell'assenza di questa visione unificata. La questione del tempo come entità relativa non cessa poi di cambiare la visione della fisica e sembra che sia capace di produrre ancora più conseguenze nel prossimo futuro. In effetti, dato che ci sono evidenze sperimentali, non solo per i ben noti fenomeni standard (come l'allungamento della vita media di particelle accelerate) ma anche per altri nuovissimi (come il teletrasporto quantistico istantaneo) sembra impossibile semplicemente chiudere la porta ad ogni ipotesi di tunnel temporali e, di conseguenza, si presenta la necessità di un nuovo schema teorico per includere questa possibilità. Come conseguenza della rapidità stessa dello svi-

luppo, molti nuovi problemi sono stati poi per un momento sostanzialmente accantonati, come confinati fuori dalla corrente principale della fisica, ma non sono più a lungo ignorabili, per proseguire lungo questo progresso. Ricordiamone alcuni: *a*) la contraddizione evidenziata da Einstein Podolsky e Rosen (paradosso EPR⁽¹⁾) di poter perturbare, sotto particolari condizioni, un oggetto fisico senza interagire con esso in nessun modo conosciuto; *b*) l'esistenza di oggetti come i buchi neri^(2,3) che sembrano violare la conservazione dell'energia totale⁽⁴⁾; *c*) la considerazione dei quark come particelle elementari nonostante sia generalmente ipotizzato che essi non possano mai raggiungere una loro individualità⁽⁵⁾; *d*) l'assenza, fino ad oggi osservata, di antimateria primaria nel nostro universo, nonostante l'evidenza di creazione sempre simmetrica di coppie materia-antimateria⁽⁶⁻⁹⁾; *e*) la teoria del *Big Bang*, dove rimane il problema della singolarità iniziale⁽¹⁰⁾; *f*) i sorprendenti risultati sperimentali nel cosiddetto teletrasporto quantico^(11,12), che suggeriscono, sfidando la relatività, un intervallo di tempo uguale a zero nel trasferimento; *g*) la mancanza di una descrizione unitaria di tutte le interazioni fondamentali⁽⁵⁾; e infine *h*) la questione fondamentale dell'assenza di una teoria unitaria^(13,14) in grado di descrivere quantomeccanica e relatività nell'ambito dello stesso schema. Ora, a noi sembra che la maggior parte di queste contraddizioni, pur se in campi apparentemente così lontani, possa essere affrontata, in uno schema unitario, con un nuovo approccio di carattere generale. Un approccio strettamente legato alle leggi di conservazione, perché proponiamo di vedere cosa succede se *“le leggi di conservazione sono considerate sempre ed assolutamente valide e le simmetrie sono sempre mantenute”*.

In questo approccio, come vedremo, proprio per il fatto che le leggi di conservazione non possono essere mai violate, la simmetria della teoria porta alla conclusione che le evoluzioni del tempo, in avanti e all'indietro, sono entrambe permesse, che la topologia delle varietà spazio-temporali, dove i sistemi evolvono, va vista come una struttura dinamica e che inoltre è necessaria una generalizzazione dello schema a cinque dimensioni di reale significato fisico. In questa rassegna, partiremo da una discussione sul paradosso EPR (punto iniziale delle considerazioni che implicano la quantomeccanica e la relatività); continueremo con la considerazione delle leggi di conservazione e della presenza di due frecce del tempo come base dell'*entanglement* di sistemi fisici; poi gene-

ralizzeremo l'approccio a cinque dimensioni per estendere la definizione del tempo e infine presenteremo una descrizione unificante della quantomeccanica e della relatività, insieme ad alcuni risultati della teoria confrontati con i dati sperimentali.

2. – Quantomeccanica e Relatività . Il ruolo delle leggi di conservazione.

2.1. – Effetto EPR e frecce del tempo .

I fondamenti della quantomeccanica, specialmente in relazione con la relatività, sono sempre stati profondamente discussi, anche perché una delle sue caratteristiche intrinseche è che i sistemi fisici quantistici possono essere descritti solo in base ad un processo di misura che definisce un insieme di osservabili. In altre parole, secondo la formulazione della Scuola di Copenhagen, non è possibile definire in modo auto-consistente un sistema fisico quantistico, se non esiste un osservatore (classico) che effettua le misure. Il punto più significativo è che questo è dovuto al fatto che lo stato del sistema è una sovrapposizione di differenti stati e che l'unica possibilità, per l'osservazione, è quella di interagire in un modo irreversibile con il sistema stesso, facendo collassare, con il processo di misura, il sistema in un autostato dell'osservabile. Questa descrizione, principalmente dovuta a Bohr, è conosciuta come interpretazione della Scuola di Copenhagen e in questa, l'irreversibilità del processo di misura e conseguentemente l'irreversibilità della direzione del tempo, gioca un ruolo fondamentale. In più, la sovrapposizione degli stati quantici, che nell'interpretazione di Copenhagen è caratteristica della descrizione microscopica della natura, può avere effetti macroscopici e questo è alla base del paradosso EPR. Supponiamo (prendendo il chiaro esempio dovuto a Bohm⁽¹⁵⁾) di avere una particella di spin 0, o in generale uno stato legato che decade al tempo t_0 in due particelle. Adesso, al tempo t_m , misuriamo lo spin σ_1 della particella 1 e l'operazione di misura causa il collasso della funzione d'onda in uno dei due stati $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ o $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$ e questo implica che, per le leggi di conservazione, una volta che lo spin della particella 1 sia misurato, pure lo spin della particella 2 sia istantaneamente acquisito, anche se le particelle sono ormai completamente separate e lontane. Si noti che non viene effettuata una misura al tempo t tale che $t_0 < t < t_m$ e quindi non cono-

sciamo nulla sullo stato del sistema in questo lasso di tempo. Abbiamo allora il seguente paradosso: di avere due particelle separate, in condizione di assenza di una interazione diretta tra loro, ma con uno stato del sistema tale che, se noi determiniamo lo stato di spin di una particella, anche lo stato di spin dell'altra è istantaneamente fissato. Il comportamento non locale (legato alle disuguaglianze di Bell) di questo tipo di sistemi è stato verificato da Aspect⁽¹⁶⁾ e da molti altri poco dopo e i risultati sperimentali mostrano che la non località di questo fenomeno sembra una caratteristica intrinseca della Natura. Lasciateci riassumere i risultati di questi esperimenti usando le parole di Sakurai nel libro rivisto da J. Bell stesso⁽¹⁴⁾: *"tutti gli esperimenti fatti hanno conclusivamente mostrato che le disuguaglianze di Bell (che vengono dalla prescrizione di località di Einstein) sono violate e violate in un modo che, nei limiti degli errori, sono compatibili con le predizioni della quantomeccanica"*.

Per spiegare questo paradosso, così cruciale poiché all'intersezione tra quantomeccanica e relatività, si può partire dall'osservazione che, per il teorema di Noether, deve esistere una simmetria per ogni legge di conservazione della Natura. Da questa considerazione, nel quadro delle leggi di conservazione, deriva formalmente la necessità di una evoluzione indietro nel tempo della funzione d'onda, poiché la dinamica, se derivata da un principio variazionale, è sempre simmetrica sotto trasformazioni di reversibilità del tempo.

Questa considerazione generale dice che le leggi di conservazione contengono intrinsecamente una causalità tanto in avanti che all'indietro nel tempo, anche se contro il senso comune e il cosiddetto realismo locale, che invece assumono sempre solo una freccia del tempo. Da questa dinamica è possibile recuperare l'evoluzione in avanti e all'indietro nel tempo della funzione d'onda, iniziando le nostre considerazioni dal fatto che la materia quantistica può essere descritta da un campo scalare ϕ ⁽¹⁷⁻²⁰⁾ e dalla definizione dell'*entanglement* come il fenomeno che si verifica quando due oggetti fisici, nonostante siano spazialmente disconnessi, sono soggetti ad una interrelazione per la quale una perturbazione su uno di essi induce una perturbazione sull'altro senza nessuna diretta interazione tra i due. In un primo articolo⁽²¹⁾, abbiamo presentato una soluzione del paradosso EPR che non cambia formalmente il quadro dell'interpretazione di Copenhagen, anche se il fluire microscopico del tempo, per la funzione d'onda, è differente dalla percezione del tempo per

l'osservatore. Come abbiamo sottolineato, questa possibilità, sebbene non intuitiva e non riferibile alla nostra percezione macroscopica della realtà, è compatibile con la quantomeccanica a causa della nostra ignoranza intrinseca dello stato del sistema nell'intervallo di tempo $t_0 < t < t_m$.

Più specificamente, la dinamica di un campo scalare ϕ , descrivente la materia quantistica su di uno spazio-tempo, è data dal tensore energia-impulso che è un oggetto completamente simmetrico. Questo tensore deve soddisfare le leggi di conservazione, che sono poi le identità di Bianchi contratte. Rimandando al riferimento⁽²¹⁾ per la completa derivazione matematica, il risultato finale è che le identità di Bianchi contratte, se conservate, implicano l'equazione di Klein-Gordon che dà la dinamica di ϕ , dove è interessante notare che anche l'operatore di Klein-Gordon è simmetrico. Essendo ϕ un campo scalare, può essere interpretato come il prodotto di due campi complessi coniugati $\phi = \psi^* \psi$. L'equazione di Klein-Gordon può essere scritta come

$$(1) \quad (\square + m^2)\phi = (\partial_\alpha \partial^\alpha + m^2)(\psi^* \psi) = \\ = (\partial - im)(\partial + im)(\psi^* \psi) = 0,$$

che, per particelle dotate di massa, può essere separata nei casi

$$(2) \quad (\partial - im)\psi = 0, \quad (\partial + im)\psi^* = 0,$$

$$(3) \quad (\partial - im)\psi^* = 0, \quad (\partial + im)\psi = 0,$$

mentre, per particelle prive di massa, le quattro condizioni si riducono a due:

$$(4) \quad \partial\psi = 0, \quad \partial\psi^* = 0.$$

Possiamo vedere che

$$(\partial - im)\psi = 0$$

può essere considerato come un propagatore in avanti, mentre

$$(6) \quad (\partial + im)\psi^* = 0$$

è un propagatore all'indietro e viceversa per gli altri due. Le soluzioni

$$(7) \quad \psi(x) = e^{-ikx} u(k), \quad \psi^*(x) = e^{ikx} u^*(k)$$

sono progressive e regressive. Ne consegue che una funzione (una sovrapposizione) della forma

$$(8) \quad \varphi(x) = \alpha_1 \psi(x) + \alpha_2 \psi^*(x),$$

dove $\alpha_{1,2}$ sono costanti arbitrarie, è allora una soluzione generale della dinamica e gli stati ψ e ψ^* sono da considerare, nel nostro schema, come "entangled", poiché possono influenzarsi mutua-

mente, anche se ordinariamente sono considerati sconnessi.

In altre parole, la considerazione di validità assoluta delle leggi di conservazione dà origine ad una dinamica simmetrica (evoluzione del sistema in avanti e all'indietro), con il che stiamo indicando come la soluzione regressiva supponga un'effettiva dinamica indietro nel tempo. Vogliamo sottolineare che le evoluzioni in avanti e all'indietro riguardano tanto il campo ψ che il suo coniugato ψ^* . In un certo senso, ipotizziamo che tutte le falde del cono di luce in uno spazio-tempo di Minkowski abbiano la stessa dignità, anche se sembra che siamo confinati a poter influire causalmente (almeno macroscopicamente) solo sulla falda verso il futuro (la freccia del tempo che noi possiamo normalmente percepire). Queste considerazioni sono completamente generali e possono essere sviluppate anche su spazi-tempi curvi⁽²⁴⁾.

2.2. – Principio Generale di Conservazione e spazio a cinque dimensioni

Continuando la descrizione per grandi linee di questo nuovo approccio, proviamo a mostrare come tramite esso possano essere affrontate diverse contraddizioni in quantomeccanica e relatività⁽²²⁻²⁴⁾. Fondamentale a questo punto è l'introduzione del *Principio Generale di Conservazione*: "le leggi di conservazione sono le uniche ad avere un significato assoluto e a mantenere sempre la loro validità. Questa è la ragione per cui, quando sarebbe altrimenti impossibile mantenere questa validità, si determina il fenomeno dell'*entanglement*, che permette in ogni caso il loro recupero grazie al cambio di topologia ed alla reversibilità delle frecce del tempo. Cioè le leggi di conservazione non sono mai violate, mentre le topologie possono cambiare⁽²⁴⁾". Questo principio, permesso dal fatto che il formalismo matematico non vieta evoluzioni avanti e indietro nel tempo, consente una spiegazione in termini fisici del comportamento non locale dei sistemi "entangled", è in accordo con le disuguaglianze di Bell e conseguentemente con la violazione del principio di località di Einstein⁽¹⁾ ed apre una profonda discussione sui principi primi che conducono a un tale comportamento simmetrico del tempo. Per il principio di causalità tradizionale⁽¹³⁾ e per il punto di vista di Einstein, Podolsky e Rosen⁽¹⁾ questo comportamento è un paradosso. Tuttavia, se si concepiscono evoluzioni in avanti e all'indietro sullo stesso cammino (linea di mon-

do), i sistemi *entanglati* sono naturalmente spiegati⁽²¹⁾. Una conseguenza di questo schema, strettamente correlata con il concetto di *entanglement*, è il cambio di topologia che emerge per preservare una legge di conservazione, ad esempio della materia-energia nella dinamica dei buchi neri o dei numeri quantici nell'effetto EPR⁽²¹⁾. Nella nostra teoria, le leggi di conservazione sono il principio primo che determina tutte le successive evoluzioni, perché il fatto che esse non possano essere mai violate, evitando schemi arbitrari di rottura spontanea di simmetria, conduce ad un meccanismo per evitare tale violazione. La possibile esistenza di un'evoluzione tanto in avanti che all'indietro porta necessariamente all'esigenza di definire una quinta dimensione. Prendiamo in esame un semplice esempio, immaginando un ipotetico universo unidimensionale: in tale universo un punto posto alla sinistra di un altro non può mai invertire la sua posizione relativa, scambiando la destra con la sinistra, mentre, se passiamo ad un universo bidimensionale, ciò diventa ovviamente possibile, e questo, ed è ciò che ci interessa, è vero anche passando da 4 a 5 dimensioni, per rendere possibile l'evoluzione in due direzioni sull'asse del tempo⁽²²⁻²⁴⁾. Nel nostro approccio, così come la quarta dimensione può essere naturalmente relazionata al tempo in relatività, la quinta dimensione può essere relazionata alla massa e alle caratteristiche delle particelle (con ciò facendo anche emergere la differenziazione tra le interazioni fondamentali⁽²⁴⁻³⁰⁾). In altre parole, noi abbiamo a che fare con un *mass-cronotopo* pentadimensionale, ogni punto del quale è caratterizzato da 3 coordinate spaziali, da una temporale e dalla massa. È rilevante notare il fatto che noi non percepiamo la quarta dimensione temporale allo stesso modo delle dimensioni spaziali e la situazione è analoga per questa quinta dimensione-massa. In vari articoli, il problema è stato trattato per casi diversi: dopo il paradosso EPR⁽²¹⁾; si è preso in considerazione un sistema astrofisico come un buco nero, assumendo che la materia-energia collassante sia totalmente conservata poiché questo buco nero evolve, attraverso un cambio di topologia (il meccanismo strutturale dei cosiddetti *wormhole*) in un buco bianco cosicché il buco nero e il buco bianco (quest'ultimo, come vedremo, in effetti una "fontana bianca" sorgente di *Gamma Rays Burst*⁽³³⁾) sono così due oggetti *entanglati*, che possono vivere in due regioni spazio-temporali causalmente sconnesse. In definitiva, in questo approccio, la possibilità di evolvere indietro nel passato (più

precisamente in ciò che percepiamo come passato) è una proprietà generale della Natura, ma noi, nella nostra falda di cono luce in avanti, non possiamo avere diretta esperienza di ciò. Il solo modo di fare esperienza di un'evoluzione all'indietro (e sotto le estreme condizioni in cui una legge di conservazione, risulterebbe altrimenti violata) è attraverso un cambio di topologia che collega due sistemi *entanglati*. Fenomeno permesso dalla presenza di una quinta dimensione e di un Principio Generale di Conservazione che è fondamentale per il legame esistente tra leggi di conservazione, simmetrie e integrali primi del moto.

2.3. – Cambi di topologia, "entanglement" e causalità

Einstein, Podolsky e Rosen, in definitiva, stabilirono che la quantomeccanica, contraddicendo il principio di località, porta a risultati che violano il principio generale di causalità⁽¹⁾, cosicché il paradosso EPR, mostrando apparentemente l'incompatibilità tra causalità e quantomeccanica, porta a una crisi profonda del concetto stesso di causalità. Nel nuovo approccio, la completa ridefinizione del concetto di *entanglement*, porta invece al recupero della causalità, idea classica e fondamentale per la fisica, permettendo, grazie alle due frecce del tempo, il concetto di "*futuro che influenza il passato*", accanto al tradizionale contrario. La assoluta validità delle leggi di conservazione, induce, nei casi ove sarebbero altrimenti violate, cambi di topologia che rendono possibili tunnel che connettono regioni separate di spaziotempo. In effetti, la meccanica quantistica richiede che una interazione, anche se su una singola parte di un sistema, determini una evoluzione dipendente dalle quantità correlate delle altre parti, anche quando queste parti siano poste in regioni "*causalmente sconnesse*" dello spazio-tempo (cioè quando esse siano lontane cosicché non possa esserci diretta interazione tra le parti nel limite finito della velocità della luce). Fin dall'inizio, Schroedinger cercò di superare il problema con il concetto qualitativo di *entanglement*, descritto come una sorta di profonda correlazione, non ancora dinamicamente specificata, capace di legare due oggetti causalmente sconnessi, ma quantisticamente legati. Senza contraddire il concetto qualitativo di Schroedinger, in seguito accettato ed elaborato da vari autori⁽²⁸⁾, è possibile però recuperare il concetto di causalità tramite una definizione di *entan-*

gument basata sul nuovo approccio⁽²⁰⁾: “due oggetti, spazialmente separati e causalmente sconnessi nello spazio quadridimensionale, che possiamo ordinariamente percepire, sono ‘entangled’ se una interazione con uno di essi può influenzare l’altro, senza in nessun modo direttamente interagire con esso, poiché un ‘entanglement’ quadridimensionale significa che esiste un nesso di causalità in uno spazio fisico pentadimensionale”. Il ragionamento che porta a questa definizione sembra una necessità reale, poiché l’entanglement, questo concetto inevitabile per spiegare perché la quantomeccanica funzioni, sarebbe altrimenti semplicemente impossibile senza violare il principio di causalità, ed anche la logica, che stabilisce che “è impossibile un’interazione con un oggetto senza in qualche modo interagire con esso”. Se noi non ipotizziamo un’altra dimensione, realmente fisica, nella quale i due stati siano causalmente connessi, in tal modo restaurando il principio di causalità, ciò che noi chiamiamo *entanglement* resterebbe un “necessario, ma inesplicabile” fenomeno. L’entanglement, in questo schema, mantiene il significato di meccanismo sottostante che permette interazioni altrimenti impossibili (che Schroedinger inizialmente gli diede), ma con una dinamica che provvede una spiegazione del fenomeno, mentre l’assoluta validità delle identità di Bianchi previene l’emergere di singolarità e questo gioca un ruolo fondamentale in cosmologia ed astrofisica⁽³⁴⁾. Lasciando ai lavori citati la descrizione e la derivazione formale di questi risultati, qui vogliamo sottolineare che queste considerazioni comportano un significato generale per il concetto di *entanglement*, perché risolvono il paradosso EPR senza contraddire la quantomeccanica e insieme recuperano il principio di causalità.

2.4. – Una struttura covariante simplettica in Quantomeccanica e Relatività

La ricerca di una descrizione comune per la Relatività e la Quantomeccanica, si è basata, nel nuovo schema^(46,50), sull’uso di sistemi hamiltoniani definiti su varietà cosiddette simplettiche, cioè dotate di parentesi di Poisson⁽⁵¹⁾. Affinché il Principio Generale di Conservazione possa essere formulato ad un livello fondamentale (cioè quantistico) si dovrà cercare una struttura covariante simplettica a partire da grandezze invarianti. È ben noto che tutti i tentativi di quantizzazione della

relatività generale hanno portato a risultati non risolutivi, a volte contraddittori, per cui una teoria quantistica della gravitazione ancora non esiste in forma chiusa ed autoconsistente. Prendiamo ad esempio la formulazione di Arnowitt, Deser e Misner (ADM) del campo gravitazionale⁽⁵²⁾. Questi autori giungono ad una definizione hamiltoniana del campo gravitazionale in cui si impone una riduzione (3+1) della dinamica, dove il tempo è cioè distinto a priori dai gradi di libertà spaziali. Attuando questo programma, le equazioni di campo sono suscettibili di una rilettura come equazioni di Hamilton, ma si perde la caratteristica più genuina e fondamentale della relatività generale: la covarianza. In questo senso, una formulazione canonica del campo gravitazionale non è covariante. Un’altra contraddizione sta nel fatto che non è possibile definire una teoria di campo quantistica in cui i gradi di libertà dinamici, il tensore metrico $g_{\mu\nu}$ ed il “background”, coincidano come nel caso del campo gravitazionale. Con queste considerazioni in mente, si devono cercare strutture invarianti, comunque conservate, che diano luogo ad una struttura simplettica, indipendente dal tensore metrico, che consenta di scrivere equazioni di Hamilton covarianti. In questo senso, il Principio Generale di Conservazione può essere formulato ad un livello fondamentale, conducendo in linea di principio ad uno schema generale di quantizzazione. In quest’ottica, è possibile costruire invarianti hamiltoniani a partire da coppie di vettori, bivettori e, in generale, tensori covarianti e controvarianti opportunamente contratti. La variazione di queste grandezze è intrinsecamente conservata e, considerando le derivate covarianti dei vettori componenti, si ottiene una struttura covariante simplettica che possiede naturalmente le parentesi di Poisson e quindi le equazioni di Hamilton^(46,50). Gli ingredienti chiave di questo approccio sono un invariante hamiltoniano opportunamente costruito e le connessioni affini (non la metrica) che danno luogo, tramite la derivazione covariante, alle equazioni di Hamilton e questo schema covariante simplettico è completamente generale. Specificando I vettori (o i tensori) che costituiscono l’invariante hamiltoniano, si ricava ogni particolare teoria di campo, perché lo schema è di validità generale. Ad esempio, se i vettori sono le quadri-velocità su spazi-tempi curvi, le equazioni di Hamilton corrispondono all’equazione delle geodetiche e a quella della deviazione geodetica (le equazioni per le \dot{q}_i e le \dot{p}_i dell’ordinaria meccanica hamiltoniana), mentre se i vettori sono i quadripotenziali del

campo elettromagnetico, otteniamo la *gauge* di Lorentz e le equazioni di Maxwell.

2.5. – *Contemporaneità e recupero del limite della velocità della luce*

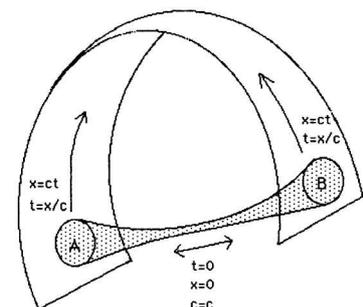
Alla luce del nuovo approccio, un'altra questione fondamentale trova una possibile soluzione: quella dell'ipotizzata contemporaneità degli effetti di un'interazione su una parte di un sistema con gli effetti indotti sull'altra parte (posta lontano e non direttamente interagente, ma "entangolata"), questione diventata cruciale dopo risultati sperimentali che mostrano evidenze di teletrasporto quantistico^(11,12). Il punto da sottolineare è la possibilità di trasferire informazioni istantanee ed impossibili ad essere rivelate al di fuori del sistema "entangolato" emittente-ricevitore. La lunga serie di lavori su Bob e Alice (ricevitore ed emittitore) sono il più famoso esempio di ciò⁽¹¹⁾ e uno speciale rilievo va dato al lavoro di Bowmeester ed altri⁽¹²⁾, dove si presentano evidenze sperimentali di un effetto di polarizzazione di un fotone trasferito, senza apparente interazione diretta, ad un altro, secondo lo schema di Bennet per cui: "è possibile trasferire lo stato quantico di una particella ad un'altra particella, purché non si cerchi nessuna informazione sullo stato nel corso della trasformazione"⁽³⁵⁾. Nell'esperienza, vi era una sorta di "trasferimento di entanglement", da un fotone di una coppia "entangolata" ad un terzo esterno, ed alla fine il fotone 1 non era più disponibile nello stato originale, ma il terzo si trovava ad essere proprio in quello stato come reale risultato di un teletrasporto quantico.

Questi risultati sperimentali inducono alcuni commenti: i) sembra possibile determinare un *entanglement* anche tra particelle (e molto probabilmente anche tra oggetti più complessi) non necessariamente *entanglati* dall'origine, aprendo la via a una concepibile tecnica generale; ii) sembra possibile inviare informazioni, via *entanglement*, senza nessuna influenza dell'ambiente esterno e tanto lontano quanto si vuole; iii) sembra possibile inviare informazioni istantaneamente, anche se poi un messaggio convenzionale è necessario per informare e controllare l'avvenuta trasmissione. Gli ultimi due punti sembrano indicare un $\Delta t = 0$ nell'operazione di trasferimento e questo sembra in contraddizione con la relatività speciale. Anche se alcuni autori cercano di eliminare il problema, dicendo che la necessità di inviare anche un messaggio convenzionale riporte-

rebbe di nuovo il fenomeno nell'ambito della relatività, (poiché non potrebbe essere usato per inviare segnali più veloci della luce nel vuoto) questa interpretazione non sembra risolvere il problema, perché, al di là della nostra capacità di utilizzare l'informazione solo in maniera standard, rimane tuttavia il fatto che il fenomeno sarebbe istantaneo e dunque in contraddizione con le basi della relatività. Tuttavia questo è un problema se trattato in termini di super-luminalità, non lo è se in termini di *a-luminalità*.

Prendiamo in considerazione una superficie limitata e connessa: è evidente che è necessario del tempo per andare da un punto posto su di essa al corrispondente punto immagine sottostante. Questo tempo è però ridotto a zero se esiste un meccanismo per "forare" e raggiungere direttamente il sotto dal sopra (avendo definito un'orientazione della superficie) e la situazione è così quella descritta in termini generalizzati nel viaggio da A a B (o viceversa) di fig. 1. Il meccanismo è il cambio di topologia e la ragione fisica profonda di ciò è la necessità di preservare le leggi di conservazione, senza superare il limite della velocità della luce. Questo tipo di percorso può essere definito *a-luminale*. È il cambio di topologia che determina la dinamica che permette quella particolare interazione tra due stati altrimenti causalmente sconnessi che chiamiamo *entanglement*, è il cambio di topologia che rende possibile il "buco" che connette il sopra e il sotto dell'esempio appena visto, o, più specificamente, la formazione di un *worm-hole* che connette un buco nero con il suo buco bianco *entangolato* attraverso una soluzione alla Goedel⁽²⁹⁾. Ma il concetto collegato, da sottolineare qui, è quello di *a-luminalità*, perché salva contemporaneamente le leggi di conservazione e il principio di causalità, e sembra inoltre l'unico compatibile con la necessità di estendere, ma non contraddire, la relatività.

○ = 4 Dimensional Manifold
 ○ U ○ (with stippled pattern) = 5 Dimensional Manifold



3. – Il ruolo del tempo nella fisica contemporanea

3.1. – Il tempo in cosmologia nel quadro di una relatività estesa

Anche se può essere considerata una sintesi che risolse molti problemi della fisica classica, la relatività generale è soprattutto la pietra miliare di un nuovo modo di considerare la Natura ed ha aperto la porta a un modo differente di vedere e definire anche concetti storici, specialmente quello del tempo. In effetti, se la possibilità di un viaggio relativistico nel futuro (come per un astronauta, nel futuro del genere umano sulla Terra, se accelerato per un periodo in un razzo fuori dalla Terra stessa) è certamente possibile già nello schema della relatività generale, è nelle teorie post-relativistiche che l'ipotesi di viaggio nel tempo assume un maggiore significato, soprattutto se tali teorie prendono in considerazione anche gli effetti che vengono dalla quantomeccanica. Se fissiamo la nostra attenzione sulla possibilità (indotta dalle leggi di conservazione) di cambi di topologia, possiamo ottenere per esempio una condizione alla Goedel⁽²⁹⁾ di geometrie con linee chiuse di tipo tempo (*closed time-like curves*, CTC, ^(36,38,39,40,41,43,47)), recuperandone il più profondo significato e aprendo la strada al viaggiare anche indietro nel tempo. In effetti una linea di tempo chiusa, che Goedel presentò come una possibilità formale nella sua soluzione delle equazioni di Einstein, rende possibile ritracciare indietro nel tempo il cammino fatto, cioè a dire passare di nuovo nel passato. Ora, ciò che per Goedel era una congettura matematica, può diventare un'ipotesi fisica plausibile, perché basata su una dinamica possibile (l'evoluzione in avanti e all'indietro dell'equazione di Klein-Gordon) e su un cammino concepibile (il cambio di topologia) e questo nel quadro di una teoria capace di proporre una spiegazione di parecchi problemi aperti (paradosso EPR, teletrasporto quantico, buchi neri, *Gamma Ray Burst*, curva di rotazione delle galassie, derivazione dei parametri cosmologici^(25,31)). Negli ultimi anni, molti autori hanno mostrato che, ben lontana dall'essere un'eccezione, la possibile esistenza di CTC naturali nell'universo dovrebbe essere un'infinità, a meno dell'esistenza di regole ostative espressamente introdotte proprio per evitare ciò, come ad esempio la cosiddetta *protezione cronologica*. Regole ostative però insoddisfacenti, perché tutte, finora,

basate su considerazioni semiclassiche e cioè non applicabili in un quadro di gravità quantistica⁽³⁸⁾. Nello schema della relatività generale, per avere una macchina del tempo (che in questo contesto significa in generale una regione con CTC) attraverso l'uso di un *wormhole*, è necessario assumere che esista la possibilità che esso abbia una vita lunga e che esso sia traversabile, il che, nella visione standard, non è facilmente ipotizzabile, perché si renderebbe necessaria la violazione delle condizioni sull'energia⁽⁴⁸⁾. La prima caratteristica del nuovo approccio è invece che, pur muovendosi nel quadro di riferimento della quantomeccanica, non viola né la relatività speciale né quella generale, ma estende il loro schema ad includere naturalmente soluzioni indietro nel tempo, per preservare le leggi di conservazione e il principio di causalità, fino ad arrivare all'interpretazione "*Many Worlds*" della meccanica quantistica che è, come vedremo, un altro ingrediente necessario in questo schema. Uno schema che emerge da necessità basilari quali la soluzione del conflitto tra quantomeccanica e relatività nel paradosso EPR⁽²¹⁾; la generalizzazione del concetto di *entanglement* come modalità per connessioni con cambio di topologia nello spazio-tempo⁽²⁰⁾; una descrizione dinamica condivisa delle differenti interazioni⁽³⁰⁾ ed infine una rappresentazione, tramite una comune struttura simplettica, sia della quantomeccanica che della relatività generale⁽⁴⁶⁾. In questo senso noi parliamo di *Open Quantum Relativity*. Dobbiamo sottolineare che l'intera questione del tempo e delle ipotesi di "macchina del tempo" viene completamente riformulata in questa nuova teoria, poiché il concetto di "*moto nel tempo*" non si presenta più come una situazione estrema dovuta esclusivamente al moto relativo di due sistemi di riferimento sulla stessa freccia dl tempo, ma ad una ben più generale possibilità, dovuta all'esistenza di una seconda freccia temporale retroversa. Nelle considerazioni esposte sopra, questa possibilità deriva direttamente dalla dinamica che, essendo simmetrica (con simmetrie e leggi di conservazione assolutamente conservate), "deve" necessariamente prevedere anche evoluzioni "all'indietro", indipendentemente da noi osservatori in grado di percepire solo evoluzioni "in avanti".

In altre parole, in una macchina del tempo convenzionale "*indietro nel tempo*" significa solo un passato relativo e "circolare", mentre, nella nuova teoria, c'è anche un'altra possibilità più generale e la domanda provocatoria è allora come raggiungere fisicamente una freccia temporale al-

l'indietro, che noi non possiamo ordinariamente percepire, ma che dovrebbe necessariamente esistere in base a principi primi⁽²⁰⁻²²⁾.

3.2. – “Open Quantum Relativity” ed evidenze sperimentali

L'approccio che abbiamo delineato, ha conseguenze grazie alle quali è possibile inquadrare in uno schema coerente tutta una serie di evidenze osservative e sperimentali emerse negli ultimi anni. Alcune importanti evidenze provengono dalla cosmologia e dall'astrofisica. Ad esempio, una delle problematiche più dibattute negli ultimi anni è quella di trovare le condizioni iniziali da cui è evoluto l'Universo come da noi osservato a partire da leggi fisiche generali. Un risultato importante, nell'ambito del nostro schema, è stato quello di dimostrare che l'esistenza di leggi di conservazione (cioè simmetrie del sistema dinamico delle equazioni cosmologiche) fa sì che la cosiddetta “funzione d'onda dell'universo” selezioni integrali primi del moto, le cui soluzioni cosmologiche sono “universi osservabili” nel senso di spazi-tempi classicamente intesi⁽³⁷⁾. Questo fatto risolverebbe l'annosa questione, ampiamente dibattuta da autori quali Hawking, Vilenkin, Hartle ed altri^(42,45), di come scegliere condizioni iniziali per generare universi classici. Questa questione concettuale trova immediato riscontro in cosmologia osservativa, poiché i modelli provenienti dal processo di riduzione dimensionale da 5 a 4 dimensioni sembrano pienamente coerenti con i dati delle campagne di osservazione più recenti. Infatti, combinando i dati provenienti dalle supernovae di tipo Ia, dalla radiazione cosmica di fondo (in particolare COBE, BOOMERANG e WMAP), dalle nubi galattiche Lya e dalla distribuzione degli ammassi di galassie a larga scala⁽³²⁾ emerge un modello cosmologico spazialmente piatto la cui dinamica è dominata per il 30% dalla materia (oscura e barionica) e per il 70% da energia oscura (che può essere costante cosmologica, un campo scalare chiamato “quintessenza” o qualche altra non ancora identificata entità dinamica). La caratteristica principale di questo quadro è che l'universo sembra accelerare, anziché decelerare, come previsto dal Modello Cosmologico Standard e in più le sorgenti della sua dinamica sembrano assolutamente sconosciute. Con il nuovo meccanismo, riusciamo invece a riprodurre i parametri cosmologici coerentemente con i valori ricavati dalle osservazioni, partendo da una teoria generale e senza imporre arbitrariamente

ingredienti aggiuntivi. In particolare, prendendo in considerazione il nostro modello cosmologico⁽³¹⁾ proveniente dal processo di *embedding* da 5 a 4 dimensioni ricaviamo $\Omega_M \approx 0,3$ (parametro di densità della materia oscura e barionica), $\Omega_\Lambda \approx 0,7$ (parametro di densità dell'energia oscura), $q_0 \approx -0,5$ (parametro di decelerazione), $t_0 \approx 14$ Gy (età stimata dell'universo), $H_0 \approx 65$ km/s/Mpc (parametro di Hubble), riproducendo così coerentemente i risultati osservativi dei cinque parametri cosmologici più importanti. Un altro problema astrofisico, che si riesce ad inquadrare nello stesso schema, è quello della materia oscura che occorrerebbe per spiegare la dinamica osservata delle curve di rotazione delle galassie. Infatti, la teoria effettiva della gravitazione, che emerge dal processo di riduzione dimensionale, implica un accoppiamento gravitazionale variabile, in cui la costante di Newton risulta essere un parametro dipendente dalla scala. In altri termini, il potenziale newtoniano, che ben descrive gli effetti gravitazionali fino alle scale del Sistema Solare, deve essere corretto con termini alla Yukawa, dipendenti da lunghezze caratteristiche, una delle quali è confrontabile con le scale tipiche delle galassie (dai 10 ai 100 kpc). In questo schema, le enormi quantità di materia oscura necessarie agli astronomi per giustificare le dinamiche galattiche osservate (fino al 90% della massa totale di una galassia tipica) non sono più necessarie, poiché la dipendenza dalla scala dell'interazione gravitazionale può fornire un quadro coerente, senza l'aggiunta di elementi non ancora identificati. In fine, un'altra questione può essere coerentemente inquadrata nello schema della *Open Quantum Relativity*: quella dei *Gamma Ray Burst*⁽³³⁾. Questi enormi getti energetici, per i quali non si riesce a trovare un meccanismo auto-consistente che ne giustifichi origine, potenza, polarizzazione e distribuzione nello spazio, possono essere considerati la “segnatura” di processi dinamici di sistemi astrofisici “*entanglati*” come quelli *black hole-wormhole-white hole*. Come già accennato, l'idea è che la conservazione assoluta della massa-energia durante il collasso gravitazionale (buco nero) induca un cambio di topologia (*wormhole*) tramite il quale, in un'altra zona dello spazio-tempo, si genera una fontana bianca (buco bianco). Il processo può dar luogo ad una emissione esplosiva (picco del *Gamma Ray Burst*) con una successiva coda (spettro del *Gamma Ray Burst*). Dai calcoli emerge che, se il buco nero è generato da una stella tipica di massa sufficientemente grande (ad esempio dell'ordine delle 10 masse solari), si ottengono i valori energetici dei *Gamma Ray*

Burst. Inoltre, la distribuzione dei *burst* sembra simile a quella delle stelle evolute (e quindi adatte a formare buchi neri, se di massa sufficiente). Infine, la polarizzazione è naturalmente spiegabile tramite il passaggio del flusso energetico nel *wormhole*⁽³³⁾. Come conclusione di questa necessariamente breve rassegna di confronti sperimentali, sembra che molti problemi aperti della fisica contemporanea possano essere coerentemente spiegati grazie ad un Principio Generale di Conservazione nel quadro della *Open Quantum Relativity*, senza la necessità di introdurre arbitrariamente ingredienti “*ad hoc*”.

4. – Conclusioni

La *Open Quantum Relativity*⁽⁴⁶⁾ è il tentativo di una teoria dinamica coerente, in grado di comprendere nel suo schema fenomeni che non trovano posto nelle descrizioni standard, a causa della persistente difficoltà nell’unire la descrizione quantomeccanica a quella relativistica. Si basa su di un principio: il Principio Generale di Conservazione e su di un metodo: la deduzione dinamica delle leggi in un quadro unitario, con il numero minimo possibile di variabili indipendenti effettive. Ricordiamone i punti principali:

a) Le leggi di conservazione sono considerate sempre valide⁽²⁴⁾ e cioè esse non possono mai essere violate. Si conservano perciò le simmetrie.

b) Il quadro generale in cui il nuovo approccio prende posto è uno spazio fisico a 5 dimensioni^(23,24).

c) Una correlazione tra due oggetti separati causalmente disconnessi (tali cioè che non possano effettivamente interagire nel limite finito della velocità della luce) significa che essi sono “*entanglati*”, cioè causalmente connessi in uno spazio a cinque dimensioni^(23,24), il che, nell’ordinario spazio-tempo quadridimensionale, significa che la causalità è recuperata ammettendo che il presente sia influenzato anche dal futuro e che la contemporaneità delle interazioni su oggetti “*entanglati*” sia un processo a-luminale.

d) In cinque dimensioni, le evoluzioni del tempo in avanti e all’indietro sono senza distinzione (la quinta dimensione “libera” il tempo), mentre, nel nostro spazio-tempo quadridimensionale, emerge la differenziazione in due frecce insieme alla nostra limitazione a percepirne una sola, tranne che nella condizione di “*entanglement*” attraverso il cambio di topologia^(23,24).

e) La possibilità di esprimere la relatività in for-

ma quantistica, si basa sul riconoscimento di una struttura simplettica, comune tanto alla relatività che alla quantomeccanica, che permette di esprimere le relazioni attraverso le parentesi di Poisson delle connessioni affini, anziché attraverso una quantizzazione canonica della metrica⁽⁴⁶⁾.

Se il risultato più immediato di questa teoria è di proporre una spiegazione di molti fenomenici fisici irrisolti e di inquadrare in uno schema coerente varie osservazioni sperimentali, non minori sono le conseguenze che ne derivano. Queste conseguenze hanno un profondo significato sull’ipotesi di macchina del tempo, dato che non sono più “anomalie” nel quadro di una teoria standard (la relatività generale), ma sono conseguenze “ordinarie” nel quadro della *Open Quantum Relativity*, poiché, nel nuovo approccio, una CTC non ha bisogno, per esistere, di condizioni limite, visto che è possibile ottenere il moto lungo una curva chiusa temporale come combinazione di due moti lineari in senso opposto. La nuova teoria, pur non entrando in nessuna speculazione sulla “tecnologia” di una ipotetica macchina del tempo, fornisce tuttavia i principi su cui una tale macchina dovrebbe essere basata, perché fissa i limiti in cui tale fenomeno sarebbe eventualmente possibile⁽²²⁾. In effetti, solo in una situazione di impossibilità di evitare la violazione di una legge di conservazione, accade che la Natura reagisca cambiando la topologia, cosicché dobbiamo prima di tutto trovare nell’Universo una tale situazione o essere capaci di ricrearla. Nel primo caso (per le conoscenze di oggi) il laboratorio per un tale esperimento dovrebbe essere un buco nero, nel secondo una “macchina ad *entanglement*”, un tipo di macchina non ancora possibile da progettare, ma che non possiamo in principio escludere⁽⁴⁹⁾. In effetti ci sono lavori di autori che dimostrano che l’*entanglement* di due sistemi macroscopici non ha bisogno dell’*entanglement* di ogni loro componente con una corrispondenza uno ad uno (che sarebbe probabilmente impossibile da ottenere), ma solo di una corrispondenza almeno sotto il limite del principio di indeterminazione (non impossibile a priori⁽⁴⁴⁾). In questo quadro, la teoria *Many Worlds* deve essere presa non come una possibilità, ma come una necessità, per evitare nuovi e più profondi paradossi determinati da viaggi indietro nel tempo, come la famosa ipotesi del crono-viaggiatore che uccida un suo avo, così annullando se stesso e rendendogli impossibile ucciderlo. Solo la teoria *Many Worlds*, nella sua versione completa⁽⁴⁵⁾ di una infinità di universi (ognuno dei quali rappresentanti una possibilità virtuale che

può diventare una reale evoluzione) può sistemare questo quadro, salvando la causalità e la logica insieme. In questa prospettiva, ogni universo può essere così ipotizzato come un “fatto locale”. È molto difficile, oggi, stimare tutte le conseguenze delle considerazioni precedenti, soprattutto quelle concernenti una macchina del tempo, tuttavia si possono derivare alcune conclusioni per aprire un utile dibattito. L'ipotesi di viaggi nel tempo, emergendo da una nuova teoria in cui due frecce del tempo e le CTC sono considerate caratteristiche generali della Natura, rappresenta una rottura con il punto di vista più tradizionale, capace però di riconciliare, in principio, relatività generale e causalità in un quadro in cui relatività e quantomeccanica sono profondamente connesse. Queste considerazioni spingono, in ogni caso, la comunità scientifica ad interrogarsi, perché implicano il problema di una rilettura del concetto di tempo. La questione del tempo come entità relativa continua a provocarci fin dalla sua originaria definizione e sembra capace di produrre sempre nuove conseguenze, poiché, date le evidenze sperimentali per effetti come il teletrasporto quantistico, non sembra possibile semplicemente ignorare ogni ipotesi di tunnel temporali. Siamo al centro di un grande cambiamento e dobbiamo trovare una sintesi che ben difficilmente approssimazioni semiclassiche o fenomenologiche saranno sufficienti a determinare. E allora la ricerca di una composizione tra quantomeccanica e relatività, si presenta come un'esigenza che non può essere più elusa, perché legata alle possibili soluzioni dei paradossi che emergono dai principi primi della fisica.

Bibliografia

- (1) A. EINSTEIN, B. PODOLSKY, N. ROSEN, *Phys. Rev.* **47** (1935) 777.
- (2) S. O. ALEXEYEV, M.V. SAZHIN, *Gen. Relativ. Gravit.* **30** (1998) 1187.
- (3) S. ALEXEYEV, A. BARRAU, G. BOUDOUL, M. SAZHIN, *Class. Quant. Grav.* **19** (2002) 4431.
- (4) J. D. BEKENSTEIN, Black Hole Thermodynamics, *Physics Today, January* (1980) 24.
- (5) C. QUIGG, *Gauge Theories of Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions* (Addison-Wesley, Reading, MA) 1983; P. D. B. COLLINS, A. D. MARTIN, E. I. SQUIRES, *Particle Physics and Cosmology* (Wiley, New York) 1991.
- (6) G. BASINI, A. MORSELLI, M. RICCI, *Riv. Nuovo Cimento* **12**, No. 4 (1989).
- (7) A. ZICHICHI, *Riv. Nuovo Cimento* **24** No. 12 (2001).
- (8) A. D. DOLGOV, M. V. SAZHIN, Ya. B. ZELDOVICH, *Basic of Modern Cosmology* (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette) 1990.
- (9) V. A. RUBAKOV, M. E. SHAPOSHNIKOV, *Usp. Fiz. Nauk* **166** (1996) 493.
- (10) E. W. KOLB, M. S. TURNER, *The Early Universe* (Addison-Wesley, Redwood) 1990.
- (11) C. H. BENNETT *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 1985; M. ZUKOWSKI *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 4287; H. WEINFURTER, *Europhys. Lett.* **25** (1994) 559.
- (12) D. BOUWMEESTER *et al.* *Nature* **390** (1997) 575.
- (13) F. SELLERI (Curatore), *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics* (Benjamin, Menlo Park, CA) 1988; F. SELLERI (Curatore), *Quantum Mechanics versus Local Realism* (Plenum, London) 1988; J. BELL, *Rev. Mod. Phys.* **38** (1966) 447; J. BELL, *Physics* **1** (1965) 195.
- (14) J. J. SAKURAI, *Modern Quantum Mechanics*, Revised Edition (Addison-Wesley Publ. Co., New York) 1994.
- (15) D. BOHM, *Quantum Mechanics* (Prentice-Hall, Englewood, N.J.) 1951.
- (16) A. ASPECT, P. GRANGIER, G. ROGER, *Phys. Rev. Lett.* **47** (1981) 460; *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 91. A. ASPECT, J. DALIBARD, G. ROGER, *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 1804.
- (17) C. ITZYKSON, J. B. ZUBER, *Quantum Field Theory* (McGraw-Hill, Singapore) 1980.
- (18) M. KAKU, *Quantum Field Theory* (Oxford University Press, Oxford) 1993.
- (19) N. BIRRELL, P. C. DAVIES, *Quantum Fields in Curved Space* (Cambridge University Press) 1984.
- (20) G. BASINI S. CAPOZZIELLO, *Europhys. Lett.* **63** (2003) 166.
- (21) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, G. LONGO, *Gen. Relativ. Gravit.* **35** (2003) 189.
- (22) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, *Riv. Nuovo Cimento* **26**, No. 11 (2004).
- (23) G. BASINI S. CAPOZZIELLO, *Europhys. Lett.* **63** (2003) 635.
- (24) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, G. LONGO, *Phys. Lett. A* **311** (2003) 465.
- (25) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, M. RICCI, F. BUONGIORNO, *Int. J. Mod. Phys. D* **13** (2004) 359.
- (26) F. MANDL, G. SHAW, *Quantum Field Theory* (Wiley, Singapore) 1984.
- (27) L. D. LANDAU, E. M. LIFSHITZ, *Théorie du Champ* (Mir, Moscow) 1960.
- (28) C. BRUKNER, M. ZUKOWSKI, A. ZEILINGER, *Quantum-ph/0106119* (2001).
- (29) K. GOEDEL, *Rev. Mod. Phys.* **21** (1949) 447.
- (30) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, *Gen. Relativ. Gravit* **35** (2003) 2217.
- (31) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, *Astropart. Phys.* **21** (2004) 543.
- (32) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, F. BONGIORNO, *Int. J. Mod. Phys* **13** (2004) 717.
- (33) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, G. LONGO, *Astropart. Phys.* **20** (2003) 457.
- (34) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, *Int. J. Mod. Phys. D* **13** (2004) 1129.
- (35) C. H. BENNETT, *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 1895.
- (36) V. P. FROLOV and I. D. NOVIKOV, *Phys. Rev. D* **42** (1990) 1057.
- (37) M. S. MORRIS, K. S. THORNE, and U. YURTSEVER, *Phys. Rev. Lett.* **61** (1988) 1446.
- (38) M. VISSER, *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (American Institute of Physics Press) 1995.
- (39) K. S. THORNE, in *GRG13: General Relativity and Gravitation 1992 - Proceedings of the 13th International Conference on General Relativity and Gravitation, Cordoba, Argentina, 1992* (Institute of Physics, Bristol) 1993, p. 295.
- (40) J. L. FRIEDMAN *et al.* *Phys. Rev. D* **42** (1990) 1915.
- (41) S. W. HAWKING, *Phys. Rev. D* **46** (1992) 2.
- (42) J. B. HARTLE, S. W. HAWKING, *Phys. Rev. D* **28** (1983) 2960.
- (43) F. DE FELICE, *Nuovo Cimento* **65** (1981) 224.
- (44) B. JULSGAARD, A. KOZHEKIN, E. S. POLZIK, *Nature* **413** (2001) 400.
- (45) J. J. HALLIWELL, *Nucl. Phys. B* **266** (1986) 228; *Phys. Rev. D* **36** (1987) 3626; *Quantum Cosmology and Baby Universes*, a cura di S. Coleman S., Hartle J. B., Piran T., Weinberg S. (World Scientific, Singapore) 1991.
- (46) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, *Gen. Relativ. Gravit.* **37** (2005) 115.
- (47) W. J. VAN STOCKUM, *Proc. Roy. Soc. Edin.*, **57** (1937) 135.
- (48) S.W. HAWKING, G.F.R. ELLIS, *The Large Scale Structure of Space-Time* (Cambridge University Press) 1973.
- (49) V. P. FROLOV, I. D. NOVIKOV, *Phys. Rev. D* **42** (1990) 1057.
- (50) G. BASINI, S. CAPOZZIELLO, *Mod. Phys. Lett. A* **20** (2005) 251.
- (51) B. DUBROVIN, S. NOVIKOV, A. FOMENKO, *Geometria Contemporanea* Vol. II (Ed. Riuniti MIR) 1988.
- (52) R. ARNOWITT, S. DESER, C. W. MISNER, *Phys. Rev.* **113** (1959) 745.

FISICA E...

RETI SMALL WORLD: L'ARCHITETTURA DI UN SISTEMA COMPLESSO

V. Latora

Dipartimento di Fisica e Astronomia,
Università di Catania,
e INFN Sezione di Catania,
Via S. Sofia 64, I-95123 Catania, Italy

1. – Introduzione

Quello sui sistemi complessi è un settore di ricerca interdisciplinare in grande espansione negli ultimi anni, e di straordinario interesse sia per la comprensione del mondo in cui viviamo che per le possibili ricadute applicative⁽¹⁻³⁾. Da un punto di vista concettuale lo studio dei sistemi complessi ha causato una vera e propria rivoluzione nel nostro modo di pensare. Infatti per decenni ogni buon fisico è stato educato all'approccio *riduzionistico*, che consiste nell'affrontare un qualunque sistema o problema fisico scomponendolo in una serie di parti, di elementi semplici. Il metodo riduzionistico è la chiave *pass-partout* per aprire il forziere delle meraviglie della natura: l'idea di base infatti è che un qualunque sistema all'apparenza complicato può essere compreso una volta che viene scomposto nei suoi costituenti elementari. La complessità di ogni sistema va solo ricercata quindi nella complessità dei suoi costituenti. Il paradigma riduzionistico, che è stato alla base delle più grandi scoperte scientifiche dell'800 e del '900, ha iniziato a vacillare negli ultimi 30 anni a causa dell'affermarsi del caos deterministico⁽⁴⁾, ed ha ora visto definitivamente sanciti i suoi limiti con la nascita di un vasto movimento di interessi e ricerche su problemi multidisciplinari e la nascita di una nuova scienza, la

scienza dei *sistemi complessi*. Infatti, le principali caratteristiche di un sistema complesso sono proprio: la presenza di numerosi elementi che interagiscono non linearmente e che sono fortemente interdipendenti, e la comparsa a livello globale di proprietà cosiddette emergenti, come la capacità di auto-organizzazione, proprietà che non si possono spiegare a partire dalle proprietà degli elementi costituenti il sistema^(5,6). Quando parliamo di sistemi complessi abbiamo naturalmente in mente i sistemi complessi per eccellenza cioè i sistemi biologici, ed in special modo quei sistemi che hanno a che fare con gli esseri umani: il nostro corpo, la società in cui viviamo, le nostre culture. Anche se sappiamo che il nostro corpo è fatto di atomi, e la meccanica quantistica ci dà delle informazioni complete e dettagliate di come gli atomi si comportano, le nostre conoscenze di fisica atomica non ci permettono di fare delle previsioni su come funzionano gli organi del nostro corpo, o sul comportamento sociale di un essere umano. Analogamente il cervello non è semplicemente una somma di tanti neuroni, così come un sistema sociale non è una semplice somma di tanti individui. Quando si studia un sistema vivente l'approccio riduzionistico non può funzionare. Un sistema complesso va studiato nella sua integrità perché non è una somma delle parti⁽⁷⁾.

I sistemi complessi hanno naturalmente attirato l'attenzione dei fisici, visto che i metodi sviluppati per lo studio della dinamica dei sistemi caotici e in meccanica statistica si sono rivelati indispensabili nello studio teorico e nella modellizzazione di sistemi biologici, sociali ed economici. È interessante notare come Ettore Majorana, nel suo ultimo articolo pubblicato postumo su «Scientia»⁽⁸⁾, parli, già 60 anni fa, delle forti analogie tra termodinamica/meccanica statistica e scienze sociali. Si può forse considerare il lavoro di Majorana come il primo articolo sui sistemi complessi.

* Relazione presentata da V. Latora al LXXXVIII Congresso SIF, Alghero, Italy, Settembre 2002.

Il presente articolo non intende essere una rassegna sui sistemi complessi — per una introduzione generale allo studio dei sistemi complessi consigliamo un articolo divulgativo di Michel Baranger⁽⁹⁾ —, voglio piuttosto soffermarmi su di un aspetto ben particolare dello studio dei sistemi complessi: l'architettura di un sistema complesso. Grazie alla disponibilità sempre maggiore di dati di sistemi reali, si è recentemente iniziato a studiare le proprietà di connettività dei sistemi complessi. Infatti, un generico sistema complesso si può, in prima approssimazione, descrivere come una rete, un *network*, o in termini matematici un grafo. Un grafo è un'entità costituita sostanzialmente da vertici (o nodi) ed archi (o spigoli). I vertici rappresentano gli elementi della rete, mentre gli archi connettono coppie di nodi e rappresentano le relazioni fra gli elementi. Ad esempio, in un sistema sociale i nodi sono gli individui e gli archi rappresentano i rapporti sociali fra individui, che possono essere di varia natura, ad esempio legami di parentela, o legami di amicizia, o rapporti sessuali, a seconda del tipo di studio a cui si è interessati. In un cervello i nodi sono i neuroni e gli archi sono le sinapsi. Uno studio delle proprietà di connettività, cioè di chi è connesso a chi, è il primo passo per comprendere come funziona un sistema complesso. Un risultato molto importante emerso recentemente (lo studio dei *networks* di sistemi complessi da parte dei fisici ha avuto il suo apice negli ultimi 5 anni) è che *networks* apparentemente diversi di vari sistemi biologici, sociali e tecnologici mostrano tutti la stessa architettura, una architettura che non è né completamente regolare né completamente random. Questa classe particolare di reti è stata nominata *small world networks*, in analogia con il fenomeno dello *small world* evidenziato sperimentalmente 40 anni fa da dei sociologi americani⁽¹⁰⁾.

2. – I sei gradi di separazione ed il fenomeno dello *small world*

Kevin Bacon è un attore di Hollywood che ha recitato in numerosi films e che negli ultimi anni è diventato famoso per un gioco a lui ispirato. Il gioco di Kevin Bacon, popolare fra i *teenagers* americani, consiste nello scegliere un attore a caso, chiamiamolo *A*, e cercare di determinare il numero di Bacon di *A*. Se *A* ha recitato insieme a

Bacon in almeno un film allora l'attore *A* ha numero di Bacon 1. Se invece *A* non ha mai recitato insieme a Bacon, ma ha recitato con un attore *B* e questi a sua volta ha partecipato ad un film con Bacon, allora l'attore *A* ha numero di Bacon 2. E così via, il gioco consiste nel determinare il percorso più breve da *A* a Bacon tramite una catena di collaborazioni. Qualche anno fa Brett Tjaden ha addirittura costruito un *web site*, l'Oracolo di Bacon⁽¹¹⁾, che, utilizzando l'archivio di films dell'*International Movie Database*⁽¹²⁾, è capace di calcolare il minimo numero di Bacon di un attore scelto a caso. Per fare un esempio a noi caro, l'Oracolo ci dice che Marcello Mastroianni ha numero di Bacon 2. Anche attori appartenenti a periodi diversi hanno un numero di Bacon piccolo (2 per Elvis Presley e Marilyn Monroe), e si trova come risultato generale che il più grande numero di Bacon finito, che si ottiene considerando tutti gli attori di tutti i periodi è solo 8. Chiaramente questo non significa che Kevin Bacon è il centro del mondo degli attori, anzi ci sono molti altri attori che sono più centrali di Bacon. In realtà, la stessa proprietà è valida per tutti gli attori, cioè per ogni coppia di attori è possibile trovare un percorso breve che li collega. Inoltre, questa, che a prima vista potrebbe sembrare una proprietà tipica di un *network* sociale sicuramente molto particolare, come il network di collaborazione degli attori di Hollywood, è invece una caratteristica tipica di tutti i sistemi sociali.

Infatti, quante volte è capitato a tutti noi di scoprire delle amicizie in comune con una persona appena incontrata ad una festa, apparentemente uno sconosciuto, e di esclamare "ma come è piccolo il mondo!". Ebbene, il cosiddetto fenomeno dello *small world* è stato interesse di studio dei sociologi già 40 anni fa. Nel 1967 Steven Milgram effettuò il primo di una serie di esperimenti volti a misurare il numero di passaggi necessari per connettere due persone, scelte a caso, negli Stati Uniti⁽¹⁰⁾. Milgram chiese ad un centinaio di persone di Omaha in Nebraska (appartenenti a varie tipologie sociali) di recapitare una lettera ad un individuo *target*, uno *stockbroker* di Boston (identificato solo dal nome, dalla professione, e dalla città) utilizzando una catena di amicizie. Ad ogni partecipante all'esperimento veniva richiesto di passare la lettera a quello dei suoi amici che lui reputava il più vicino possibile al *target*, con lo scopo di raggiungere il *target* con il minore numero di passaggi possibili. Ci si aspettava che la

lettera dovesse compiere centinaia di passaggi prima di raggiungere il *target* finale. Invece, analizzando il percorso compiuto dalle lettere arrivate a destinazione Milgram misurò una lunghezza media di 6 passaggi e questo risultato fu alla base della famosa nozione popolare dei “sei gradi di separazione”: nonostante la popolazione mondiale stimata nel 2003 sia di circa $6 \cdot 10^9$, due persone possono essere connesse tramite una catena lunga solo 6 passi!! Questo risultato diventa ancora più interessante se si pensa a quanto i *networks* sociali siano importanti per le comunicazioni: infatti, la diffusione di idee, di mode, ma anche di malattie, è basata sui contatti fra individui, e questa diffusione è molto più veloce in un *network* con una breve distanza di separazione fra due individui, rispetto ad un *network* meno connesso. La struttura di un sistema sociale è anche la prima cosa da conoscere quando si vuole scegliere la migliore strategia per pubblicizzare un prodotto.

3. – Reti *Small World*: il modello di Watts e Strogatz

Il più semplice *network* che possiamo pensare di costruire per modellizzare un sistema sociale è un *albero di Cayley*. Un albero di N nodi e K archi è un grafo di N nodi con il minimo numero di archi affinché tutti i nodi siano connessi fra di loro, cioè con $K = N - 1$. Un albero di Cayley è un albero in cui tutti i nodi hanno lo stesso *grado* k , dove il grado di un nodo è il numero di archi incidenti sul nodo (in una rete sociale il numero di conoscenti diretti di un individuo). Un albero di Cayley si ottiene come in fig. 1 assumendo che un nodo sia connesso direttamente ad altri k nodi, e ciascuno di questi sia a sua volta collegato ad altri $k - 1$ nodi distinti da

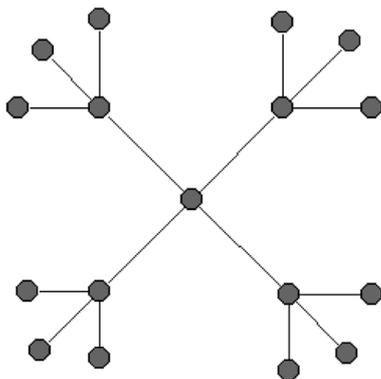


Fig. 1. – Albero di Cayley con $k = 4$ archi per nodo.

quelli precedenti, e così via. Dal nodo centrale quindi si possono raggiungere k nodi in un passo, $k(k - 1)$ nodi in due passi, e in generale $k(k - 1)^{D-1}$ nodi in D passi. Se $k \gg 1$ allora si può assumere che $N \sim k^D$ cioè che il numero di nodi del grafo è approssimativamente uguale al numero dei nodi esterni. Di conseguenza il numero di passi necessario per raggiungere dal nodo centrale i nodi più esterni di un albero di Cayley di N nodi è uguale a $D \sim \log N / \log k$, cioè dipende dal logaritmo del numero di nodi del grafo. Per avere un'idea concreta di questo risultato basta pensare che in un sistema sociale di $N = 10^9$ individui, ognuno di questi con $k = 100$ amici, si ottiene un numero piccolissimo: $D = 4,5$. Un risultato del tutto simile si ottiene se si considera un *grafo random* come quello mostrato in fig. 2, cioè un grafo in cui i K archi uniscono coppie di nodi scelti a caso. I grafi random, sono stati introdotti da Paul Erdős ed Alfred Rényi negli anni 50⁽¹³⁾ e sono sicuramente i grafi più amati dai matematici e più studiati in letteratura⁽¹⁴⁾. Per un grafo random è possibile provare analiticamente che la distanza media fra due nodi L è uguale a $\log N / \log k$, dove k è il numero medio di archi per nodo. Nonostante questi due semplici esempi mostrino che non è impossibile trovare dei *networks* che pur avendo un numero enorme di nodi esibiscono la proprietà di *small world*, né un albero di Cayley né il grafo random sono delle modellizzazioni soddisfacenti di un sistema sociale. Infatti entrambi questi grafi mancano di una proprietà fondamentale di ogni sistema sociale: il concetto di gruppo o comunità. Infatti, nella costruzione di un albero di Cayley, si è imposto che non vi sia alcun legame diretto (arco) fra i k amici di un generico individuo. Analogamente per un grafo random si prova che il numero di

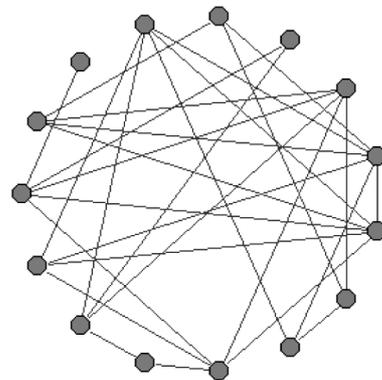


Fig. 2. – Grafo random alla Erdős-Rényi, con un media di $k = 4$ archi per nodo.

legami diretti fra i k amici di un generico individuo non è nullo ma tende a zero al crescere di N . Questa è sicuramente un'assunzione troppo forte per un sistema sociale che invece presenta quella che viene definita proprietà di *clustering*. Infatti, noi sappiamo benissimo che nella maggior parte dei casi due dei nostri amici si conoscono anche direttamente tra di loro!! Un grafo che presenta spiccate proprietà di *clustering* simili a quelle di un sistema sociale è un *reticolo regolare*. Nella fig. 3 si mostra un reticolo regolare in 1 dimensione con $k = 4$ archi per nodo e con condizioni al contorno periodiche. Si nota chiaramente che i primi vicini di un nodo sono connessi fra di loro. Purtroppo il prezzo da pagare per avere le proprietà di *clustering* è che la distanza media fra due nodi dipende linearmente e non logaritmicamente dalla dimensione del sistema. Si prova infatti che $L \sim N/2k$, e quindi il reticolo regolare non mostra le proprietà di *small world*. Nel 1998 due ricercatori di Cornell, Duncan Watts e Steven Strogatz, propongono un metodo per costruire reti di tipo small-world con proprietà di *clustering*, e mostrano che altri *networks* di natura totalmente diversa mostrano proprietà analoghe a quelle dei sistemi sociali ^(15,16). Il formalismo di Watts e Strogatz è sviluppato in termini di un grafo G , con N nodi e K archi, *non pesato* (agli archi non è associato nessun peso, cioè gli archi sono tutti equivalenti), *sparso* ($K \ll N(N-1)/2$), e *connesso* (esiste almeno un percorso per connettere una qualunque coppia di nodi). G può essere rappresentato tramite una matrice $N \cdot N$ il cui generico elemento a_{ij} è uguale ad 1 se esiste un arco fra il nodo i ed il nodo j , e uguale a 0 altrimenti. In termini della matrice di adiacenza, il grado k_i di un nodo i è definito come

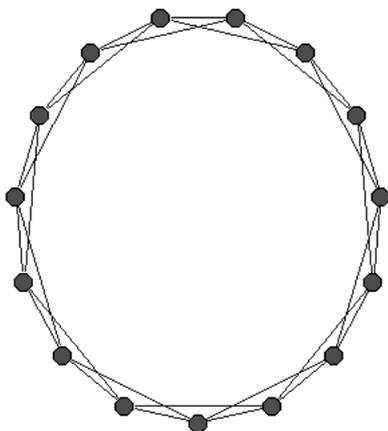


Fig. 3. – Grafo regolare con $k = 4$ archi per nodo.

$k_i = \sum_j a_{ij}$. Il valore medio di k_i è $\bar{k} = 2K/N$. A partire dalla matrice di adiacenza $\{a_{ij}\}$ è possibile derivare ⁽¹⁷⁾ la matrice $\{d_{ij}\}$ che dà il numero di passi del percorso più breve per collegare ogni coppia di nodi i e j . Watts e Strogatz propongono di quantificare le proprietà strutturali di un grafo calcolando le due quantità seguenti: la lunghezza caratteristica L ed il coefficiente di *clustering* C . L è la lunghezza media del percorso tra due nodi, definita come

$$(1) \quad L(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1}^N d_{ij},$$

mentre il coefficiente di *clustering* C del grafo è dato da

$$(2) \quad C(G) = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N}$$

dove

$$(3) \quad C_i = \frac{\# \text{ archi in } G_i}{k_i(k_i - 1)/2}$$

è il coefficiente di *clustering* del nodo i . C_i è proporzionale al numero di archi che esistono nel sottografo G_i , il grafo di k_i nodi che si ottiene da G considerando i primi vicini del nodo i e tutti gli archi che esistono fra questi nodi. C_i è una quantità che varia in $[0,1]$ grazie al fattore di normalizzazione $k_i(k_i - 1)/2$ che è il numero massimo di archi che ci possono essere in un grafo di k_i nodi. In altri termini C_i misura quanto è connesso "clusterizzato" il gruppo degli amici dell'individuo i , una volta che i viene rimosso dal gruppo. In rif. ⁽¹⁵⁾ viene proposto un modello per costruire grafi con proprietà intermedie fra quelle del grafo regolare e quelle del grafo random. Si considera ognuno dei K archi del grafo regolare e con probabilità p , detta probabilità di *rewiring*, lo si rimuove da uno dei due nodi a cui è connesso e lo si ricollega ad uno nodo scelto a caso. In questo modo, al variare di p si riesce a passare in maniera continua da un grafo regolare ($p = 0$) ad uno random ($p = 1$). Per il grafo regolare ci si aspetta $L \sim N/2k$ ed un alto coefficiente di clustering $C = 3/4(k-2)/(k-1)$, mentre per il grafo random $L \sim \log N / \log(k-1)$ e $C \sim k/N$ ^(14, 18). Quindi, sebbene nei due casi limite ad un grande valore di C è associato un grande valore di L e viceversa, le simulazioni numeriche mostrano ⁽¹⁵⁾ un regime intermedio in cui il grafo è fortemente "clusterizzato" come un reticolo

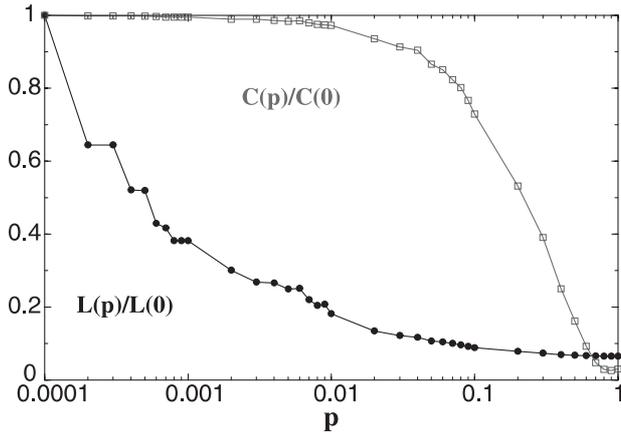


Fig. 4. - Le due quantità L e C normalizzate ai valori $L(0)$ e $C(0)$ del reticolo regolare in funzione della probabilità di *rewiring* p . La figura si riferisce a grafi con $N=1000$, $K=5000$. Per $p \sim 0.01$ si osserva il fenomeno dello *small world*: il grafo ha un valore di L simile a quello del grafo random, pur avendo un coefficiente di *clustering* C grande come quello del reticolo regolare.

regolare pur avendo una piccola lunghezza caratteristica L come un grafo random. Vedi fig. 4. Il regime di *small world* si ottiene per piccoli valori di p : infatti, sono sufficienti solo alcuni archi random per rendere L piccola senza alterare le proprietà di *clustering* del reticolo regolare. Utilizzando le due variabili L e C è possibile studiare le proprietà di *networks* reali. Come esempio di un sistema sociale Watts e Strogatz considerano proprio il grafo delle collaborazioni fra attori, costruito a partire dall'*International Movie Database*⁽¹²⁾ (aggiornato al 1997) nel modo seguente: due attori sono connessi da un arco se hanno recitato insieme almeno in un film. Il grafo che si ottiene non è connesso, per cui l'analisi viene ristretta alla più grande componente connessa del grafo che ha $N = 225226$ e $\bar{k} = 61$. I risultati riportati in tabella I mostrano che il sistema considerato è uno *small world* in quanto ha lunghezza caratteristica L dell'ordine di L_{rand} cioè della lunghezza caratteristica che si ottiene per un grafo random con lo stesso numero di nodi ed archi, ma coefficiente di *clustering* C molto più grande di C_{rand} . Watts e Strogatz riescono a provare che anche altri due reti, di natura totalmente differente, mostrano le proprietà di *small world*. Il primo *network* è il sistema nervoso di un piccolo nematode, il *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*)⁽¹⁹⁾ mentre il secondo è una rete di trasporto di energia elettrica negli Stati Uniti, un esempio di una rete costruita dall'uomo. Nel primo caso i nodi

Tabella I. - Lunghezza caratteristica e coefficiente di *clustering* di alcuni *networks* reali e dei corrispondenti grafi random con lo stesso numero di vertici e di archi. I primi tre esempi sono stati studiati in rif. (15), gli altri rispettivamente in rif. (20), rif. (21) rif. (22), rif. (23).

	L	L_{rand}	C	C_{rand}
Attori	3,65	2,99	0,79	0,00027
<i>C. elegans</i>	2,65	2,25	0,28	0,05
Rete elettrica	18,7	12,4	0,08	0,005
SPIRES	4	7,52	0,72	0,003
Metabolismo	3,88	3,78	0,48	0,0017
WWW	3,1	2,88	0,11	0,0002
Internet	3,7	2,1	0,24	0,0007

del grafo rappresentano i neuroni e due nodi sono collegati da un arco se esiste almeno una sinapsi fra i corrispondenti neuroni. Nel secondo caso i nodi sono i generatori e le stazioni elettriche, mentre gli archi rappresentano le linee di alta tensione. Si ottengono, rispettivamente un grafo con $N = 282$ e $\bar{k} = 14$ ed un grafo con $N = 4941$ e $\bar{k} = 2,67$: entrambi mostrano le proprietà di *small world*.

All'articolo dei due ricercatori di Cornell è seguita tutta una serie di studi sulle proprietà di *small world* in reti di vario tipo. In tabella I riportiamo alcuni dei risultati ottenuti. In particolare, Mark Newman del Santa Fe Institute ha studiato il grafo delle collaborazioni scientifiche⁽²⁴⁾ analizzando i vari *databases* di *preprints* ed articoli disponibili in rete (SPIRES, NANL, MEDLINE), ed ha pubblicato i risultati in un articolo dal titolo *Who is the best connected scientist?*⁽²⁰⁾. Oltre a verificare che la comunità scientifica è uno *small world*, Newman ha prodotto delle liste dei vari scienziati ordinati a seconda del numero di articoli firmati, del numero di collaboratori, o di varie altre misure di centralità⁽²⁵⁾ come la *closeness* (la distanza media fra un autore e tutti gli altri) o la *betweenness*^(26,27). Fell e Wagner hanno studiato la rete di reazioni biochimiche che governa il metabolismo dell'*Escherichia coli*⁽²³⁾, trovando che anche la topologia di questo *network* presenta proprietà di tipo *small world*. Altri esempi di *small world* apparsi in letteratura riguardano i campi più disparati: reti di animali sociali come i delfini⁽²⁸⁾, collaborazioni fra musicisti jazz, circuiti elettronici⁽²⁹⁾, *networks* di e-mail⁽³⁰⁾, e perfino il *network* delle collaborazioni fra i supereroi della Marvel⁽³¹⁾.

In parallelo a questi lavori, basati sulla ricerca delle proprietà di *small world* in natura e nelle

reti costruite dall'uomo, si è visto un grande interesse verso: la caratterizzazione della transizione di fase a *network* di tipo *small world* nel modello di Watts e Strogatz^(18,32,33); lo studio di modelli di spin^(18,34), modelli percolativi e di diffusione di epidemie⁽³⁵⁾ su reti di tipo *small world*; la sincronizzazione di sistemi biologici o nervosi in cui le unità sono connesse con una topologia di *small world*⁽³⁾.

4. – Estensione a reti pesate

Come abbiamo visto, l'approccio di Watts e Strogatz è valido nel caso in cui un *network* reale è descritto bene da un grafo non pesato, cioè quando l'unica informazione che si vuole mantenere è l'esistenza o meno di un arco e non vi è necessità di associare alcun peso all'arco. Una generalizzazione del formalismo ai grafi pesati, valida anche per i grafi non connessi, permette una analisi più dettagliata delle reti reali e di ampliare ulteriormente le possibili applicazioni. Ad esempio, tutti i tre *network* studiati in rif.⁽¹⁵⁾ possono essere meglio descritti da un grafo pesato. Infatti, nel caso degli attori si è considerato se due attori hanno recitato insieme, ma non si è tenuto conto del numero di film fatti insieme: due attori che hanno recitato insieme in decine di films sono sicuramente in relazione molto più stretta di due attori che hanno fatto solo un film insieme. Inoltre, per evitare che la lunghezza caratteristica L definita in formula (1) diverga, è stato possibile considerare solo la più grande componente connessa del grafo. In maniera del tutto analoga, nel caso del sistema nervoso del *C. elegans*, non si è tenuto conto che vi sono coppie di neuroni connesse da più di una sinapsi. E nel caso della rete elettrica, così come in generale in tutti i sistemi di trasporto come reti ferroviarie e autostrade, ogni arco ha una lunghezza propria legata alla distanza geografica fra i nodi. Considerare un grafo non pesato è certamente una descrizione povera di questi sistemi. Insieme a Massimo Marchiori, del Dipartimento di Informatica del MIT, abbiamo proposto in rif.⁽³⁶⁾ una generalizzazione delle idee di Watts e Strogatz per grafi pesati. La nostra definizione di *small world* è basata su di un unico concetto, quello di efficienza del *network*, e su di un'unica variabile che permette di misurare sia le proprietà di connettività globali del *network* che quelle locali di *clustering*.

Consideriamo, quindi, un grafo \mathbf{G} pesato e non necessariamente connesso e sparso. Per descrivere il grafo, adesso è necessario utilizzare oltre alla matrice di adiacenza $\{a_{ij}\}$ anche una matrice $\{\ell_{ij}\}$. Chiamiamo questa matrice, matrice delle distanze fisiche, perché, per semplicità, immaginiamo di considerare una rete elettrica o una rete di trasporto, cioè un caso in cui ℓ_{ij} è la distanza euclidea fra il nodo i ed il nodo j . Più in generale, si può immaginare ℓ_{ij} uguale all'inverso del numero di films in cui i due attori i e j hanno recitato insieme, oppure uguale all'inverso del numero di sinapsi fra la coppia di neuroni i e j nel sistema nervoso del *C. elegans*. Oppure, nel caso di un rete *Internet*, possiamo assumere ℓ_{ij} uguale al tempo impiegato da due *routers* per scambiare un'unità di informazione. La matrice $\{d_{ij}\}$ adesso rappresenta non il numero di salti ma la lunghezza del percorso più breve fra i e j e viene calcolata al computer utilizzando sia la matrice di adiacenza che quella delle distanze fisiche. Si ha $d_{ij} \geq \ell_{ij} \forall i, j$ dove l'uguaglianza è valida quando c'è un arco fra i e j . Immaginiamo adesso che ogni nodo comunichi con gli altri tramite i percorsi più brevi e definiamo l'efficienza ε_{ij} nella comunicazione fra i e j come $\varepsilon_{ij} = 1/d_{ij} \forall i, j$. Se non vi è alcun percorso sul grafo per connettere i e j , allora $d_{ij} = +\infty$ e di conseguenza $\varepsilon_{ij} = 0$. L'efficienza globale di \mathbf{G} è l'efficienza media del sistema definita come

$$(4) \quad E_{\text{glob}}(\mathbf{G}) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij}$$

e gioca un ruolo simile all'inverso della variabile L .

Per quantificare il grado di *clustering* di \mathbf{G} è possibile utilizzare lo stesso concetto di efficienza e calcolare per ogni nodo i l'efficienza di \mathbf{G}_i , il sottografo dei k_i vicini di i . Si definisce efficienza locale di \mathbf{G} la quantità

$$(5) \quad E_{\text{loc}}(\mathbf{G}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(\mathbf{G}_i),$$

dove

$$(6) \quad E(\mathbf{G}_i) = \frac{\sum_{l=1}^{k_i} \sum_{m=1}^{k_i} \varepsilon'_{lm}}{k_i(k_i - 1)},$$

e dove le ε'_{lm} sono le efficienze calcolate dalle distanze più brevi su \mathbf{G}_i . E_{loc} gioca un ruolo simile a C , ed è una misura di quanto il sistema è localmente resistente agli errori, cioè di quanto è efficiente la comunicazione fra i primi vicini di

un generico nodo quando questo viene rimosso. Le efficienze globali e locali vengono poi normalizzate al grafo totalmente connesso, cioè al grafo che ha archi fra tutte le coppie di nodi, in modo da avere due quantità che variano fra 0 ed 1 (per i dettagli vedi ⁽³⁶⁾). Adesso la definizione di *small worlds* può essere rifrasata in termini del flusso di informazione: infatti, un *network* di tipo *small world* è un *network* in cui la comunicazione è molto efficiente sia a livello globale che a livello locale. Questa definizione è valida sia per grafi pesati che per grafi non pesati, e pure nel caso in cui il grafo non è né connesso né sparso. Proprio per trattare insieme grafi sparsi e grafi non sparsi, risulta utile definire una variabile per quantificare il costo di una rete:

$$(7) \quad \text{Costo}(\mathbf{G}) = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \ell_{ij}}{\sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1}^N \ell_{ij}}$$

Il costo è definito come il rapporto fra la somma delle lunghezze degli archi in \mathbf{G} e la somma delle lunghezze degli archi nel caso di un grafo completamente connesso, ed è quindi anche questa una quantità che varia nell'intervallo $[0, 1]$. Per un grafo non pesato, il costo si riduce a $2K/N(N-1)$, ed è proporzionale al numero di archi del grafo. Se si calcolano E_{glob} ed E_{loc} per il modello di Watts e Strogatz considerato precedentemente, si vede che al variare di p il modello produce *networks* efficienti sia globalmente che localmente. Ma il modello di Watts e Strogatz costruisce *networks* non pesati e tutti con lo stesso numero di archi, cioè con lo stesso costo. È possibile ideare tutta una serie di modelli per costruire *networks* pesati con le proprietà di *small world* e che mostrano come il costo è una variabile molto importante. Per i dettagli sui modelli rimandiamo il lettore interessato al rif. ⁽³⁶⁾. In generale, possiamo dire che l'alta efficienza globale e locale implica un alto costo del *network*, sebbene questo non sia sempre vero. Qui ci occupiamo invece di mostrare delle applicazioni allo studio di reti reali. In tabella II riportiamo i risultati per due degli esempi studiati in rif. ⁽¹⁵⁾, da noi considerati come *networks* pesati. Entrambi questi sistemi sono degli *small world* anche se considerati come *networks* pesati, sono cioè dei sistemi efficienti sia globalmente che localmente. Il *C. elegans*, ad esempio ha, sia al livello globale che al livello locale, una efficienza uguale a

Tabella II. – Efficienza globale, efficienza locale e costo di alcuni *networks* reali ⁽³⁶⁾. I primi due esempi sono gli stessi considerati in rif. ⁽¹⁵⁾, ma qui trattati come grafi pesati. Il terzo esempio è la rete di trasporto urbano di Boston: metropolitana e metropolitana più sistema di autobus ⁽³⁷⁾.

	Costo	E_{glob}	E_{loc}
Attori	0,0005	0,29	0,52
<i>C. elegans</i>	0,18	0,35	0,34
Metro	0,002	0,63	0,03
Metro + bus	0,004	0,72	0,46

circa il 35% di quella del grafo totalmente connesso, con un costo di solo il 18%. Il terzo esempio riguarda la rete metropolitana della città di Boston. Si tratta di un grafo costituito da $N = 124$ nodi (le stazioni) e $K = 124$ archi (i tunnel fra stazioni), in cui ad ogni arco è associata la distanza euclidea fra le due stazioni che l'arco connette. Questo grafo pesato non è un *small world* perché, pur essendo molto efficiente a livello globale, è carente a livello locale. Questo significa che il sistema non è localmente tollerante agli errori, cioè che un eventuale problema che comporti la chiusura di una stazione blocca il traffico lungo tutta la linea. Evidentemente la metropolitana è stata progettata senza mettere fra gli scopi prioritari quello di costruire un sistema localmente tollerante agli errori. Tutto ciò, perché si può ovviare facilmente alla chiusura di una stazione, ad esempio istituendo un servizio alternativo che colleghi la stazione precedente a quella successiva. E a vantaggio del costo totale della metropolitana, che infatti è estremamente ridotto. È interessante notare che se si analizza l'intera rete di trasporto, costituita sia dalla metropolitana che dal servizio di autobus, si ritrovano le proprietà di *small world*.

5. – Oltre il modello di Watts e Strogatz

Il modello proposto da Watts e Strogatz è solo uno dei modi possibili e più semplici per realizzare *networks* efficienti sia localmente che globalmente. In molti casi, però, questo modello non riesce a riprodurre tutte le proprietà di una rete reale. Sono necessari modelli più realistici che sono stati sviluppati negli ultimi anni ^(35, 38-41). Infatti, *clustering* e breve distanza di separazione non sono le uniche proprietà notevoli di una rete sociale o biologica. Laszlo Barabasi insieme al suo gruppo di collaboratori di Notre Dame

University ha provato, ad esempio, che le reti reali sono caratterizzate dalla presenza di alcuni nodi (*hubs*) con un numero enorme di *links* rispetto alla maggior parte degli altri nodi⁽³⁸⁾. In pratica, se si riporta il numero di nodi di grado k , $N(k)$, in funzione di k , per una rete metabolica⁽⁴²⁾ o di interazione fra proteine, o per i grafi che descrivono gli *hyperlinks* nel *World-Wide-Web* (WWW)⁽⁴³⁾ o le connessioni di *Internet*⁽⁴¹⁾, si ottiene in tutti i casi una curva a legge di potenza:

$$(8) \quad N(k) \sim k^{-\gamma}$$

con esponente γ compreso fra 2 e 3. Questo risultato è diverso da quello che si ottiene per un grafo random alla Erdős-Rényi, per il quale la distribuzione di grado ha una coda che decade esponenzialmente, cioè tutti i nodi hanno più o meno lo stesso numero di *links*. Le reti con una distribuzione $N(k)$ a legge di potenza sono state battezzate reti *scale-free* proprio perché sono prive di scala, in quanto contengono nodi appartenenti a tutte le possibili gerarchie di importanza. Le strutture *scale-free* si presentano soprattutto nei casi di reti che crescono nel tempo, e nelle quali i nodi che si aggiungono alla rete si collegano preferenzialmente ai nodi di grado maggiore^(39,38,43). Si è inoltre provato che una rete con $N(k)$ a legge di potenza è più resistente di una rete random ai guasti e meno agli attacchi^(44,45). Infatti, se si simula un guasto come la disattivazione di un nodo scelto a caso e dei suoi collegamenti, scegliendo in modo casuale il nodo da danneggiare, vi è una buona probabilità che tale nodo non sia rilevante, poiché i nodi con un grado talmente alto da garantire la solidità della rete sono pochissimi. Viceversa, di fronte ad un attacco, la rete porge il suo tallone d'Achille: conoscendo i nodi con il numero maggiore di links (gli *hubs*) un *hacker* può danneggiare un'intera rete di computer attaccando pochi nodi ma ben collegati. Romualdo Pastor-Satorras ed Alessandro Vespignani hanno studiato la propagazione di epidemie su reti di tipo *scale-free* dimostrando che la presenza degli *hubs* implica una assenza di soglia critica: cioè, su di una rete *scale-free* un virus si può diffondere comunque piccola sia la probabilità di contagio⁽⁴⁶⁾.

Un'ulteriore caratteristica di molte reti reali è la presenza di sottostrutture. Nel caso di un sistema sociale, ad esempio, esistono le comunità sociali, cioè gruppi di persone che sono molto connesse fra di loro e poco connesse alle per-

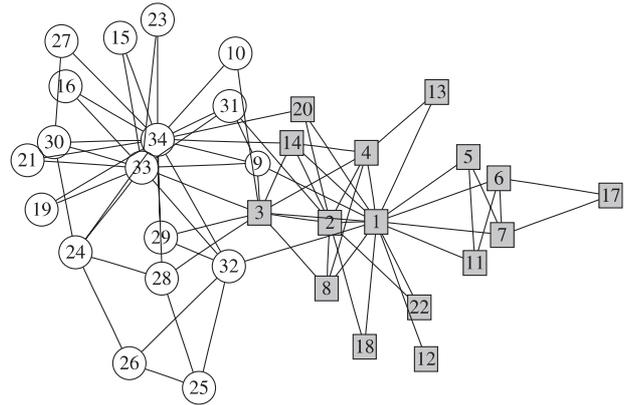


Fig. 5. – Il club di karate di Zachary⁽⁴⁷⁾.

sone di comunità diverse. Un esempio tipico, rappresentato nella fig. 5, è il “karate club di Zachary”, un grafo di 34 nodi e 78 archi ottenuto da un sociologo, Wayne Zachary, che ha seguito per un periodo di due anni l’evolversi delle relazioni interpersonali fra gli iscritti ad un club di karate universitario⁽⁴⁷⁾. In particolare, a causa dei contrasti fra un istruttore e l’amministratore del club, il club dopo i due anni verrà diviso in due clubs più piccoli (A e B). Il grafo rappresenta le relazioni fra i vari iscritti nel periodo dei due anni. Inoltre i nodi sono di due tipi: i cerchi rappresentano gli individui che dopo la divisione scelgono di appartenere al club A e i quadrati quelli che scelgono il club B. Le domande interessanti dal punto di vista della teoria delle reti sono le seguenti: è possibile, a partire dalla struttura del grafo in fig. 5, predire la futura suddivisione del sistema e identificare con esattezza le due classi? E si può in qualche modo dire che la divisione in due sottogruppi è più probabile che quella in tre o in quattro sottogruppi? Vari metodi per determinare le comunità nascoste in un grafo sono stati già sviluppati dai sociologi, ed altri sono stati proposti più di recente dai fisici^(48,49).

6. – Conclusioni

Sono trascorsi pochi anni da quando il lavoro di Watts e Strogatz sugli *small worlds* ha attratto l’attenzione di fisici e matematici verso la caratterizzazione e la modellizzazione di reti complesse. Ne sono scaturiti un enorme numero di progetti e ricerche interdisciplinari (in collaborazione principalmente con biologi, medici e sociologi), di lavori scientifici, e recentemente sono apparsi anche i primi libri divulgativi sul-

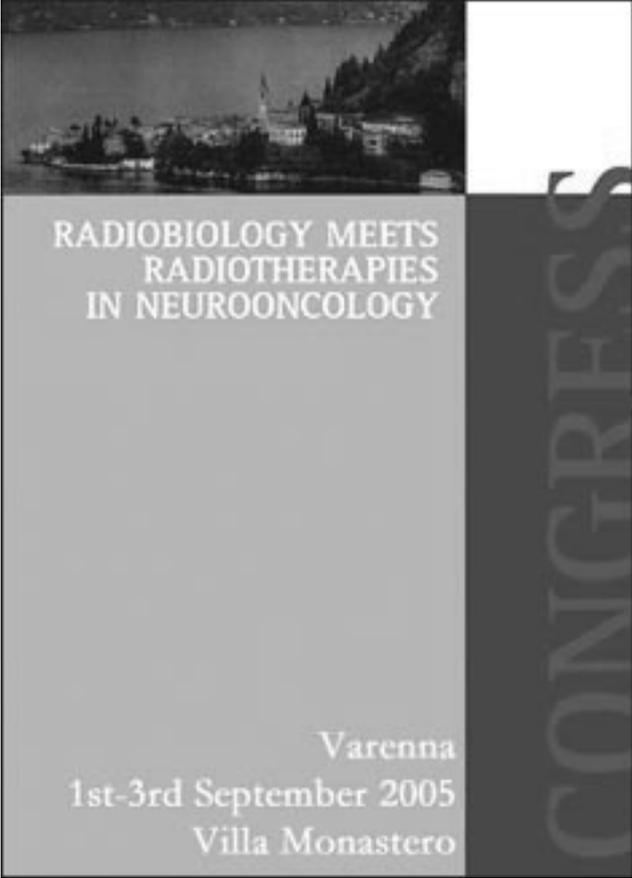
l'argomento (vedi ad esempio rif. ⁽⁵⁰⁾). Ci si sta sempre più convincendo che vari sistemi complessi mostrano la stessa architettura governata da leggi universali che valgono sia per i sistemi sociali, che per le cellule e per le reti di computers. Utilizzando dei modelli estremamente semplici è possibile descrivere e classificare i vari tipi di reti non in funzione del loro particolare campo di applicazione, ma grazie a concetti universali e a tutta una serie di misure come C , L o l'esponente γ . Comprendere queste leggi universali può sicuramente avere importanti conseguenze per lo sviluppo di medicine più efficaci ⁽⁵¹⁾, per contrastare la diffusione di epidemie ⁽⁴⁶⁾, per prevenire *blackouts* in reti elettriche ^(52,53), per difendere *Internet* dagli *hackers* o le reti di trasporto e comunicazione dagli attacchi terroristici ⁽⁵⁴⁾.

Bibliografia

- (1) M. GELL-MANN, *The Quark and the Jaguar* (Freeman, New York) 1994.
- (2) Y. BAR-YAM, *Dynamics of Complex Systems* (Addison-Wesley, Reading Mass) 1997.
- (3) S. H. STROGATZ, *Exploring complex networks*. *Nature*, **410** (2001) 268-276.
- (4) J. GLEICK, *Chaos: Making a New Science* (Penguin Books) 1988.
- (5) T. VICSEK, *Nature*, **411** (2001) 412; **418**, (2002) 131.
- (6) F. T. ARECCHI e A. FARINI, *Lexicon of Complexity* (Studio Editoriale Fiorentino, Firenze) 1996.
- (7) P. W. ANDERSON, *More is Different*, *Science*, **177** (1972) 393.
- (8) E. MAJORANA, *Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali*, *Scientia*, **36**, (1942) 58-66.
- (9) M. BARANGER, *Chaos, Complexity, and Entropy: a Physics Talk for Non-Physicists* <http://www.necsi.org/projects/baranger/cce.html>
- (10) S. MILGRAM, *The Small World Problem*, *Psychology Today*, **2** (1967) 60.
- (11) <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>
- (12) L'Internet Movie Database si trova all'indirizzo <http://www.imdb.com>
- (13) P. ERDŐS e A. RÉNYI, *Publ. Math. Debrecen*, **6** (1959) 290.
- (14) B. BOLLOBÁS, *Random Graphs* (Academic, London) 1985.
- (15) D. J. WATTS, S. H. STROGATZ, *Collective dynamics of 'small-world' networks*, *Nature*, **393** (1998) 440.
- (16) D. J. WATTS, *Small Worlds* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey) 1999.
- (17) Vi sono diversi algoritmi che svolgono questo compito in maniera molto efficiente. I più veloci permettono di calcolare allo stesso tempo le distanze fra tutte le coppie di nodi in un tempo $\sim O(N^2 \log N)$.
- (18) A. BARRAT, M. WEIGT, *On the properties of small-world network models*, *Eur. Phys. J. B*, **13** (2000) 547.
- (19) T. B. ACHACOSO, W. S. YAMAMOTO, *AY's Neuroanatomy of C. elegans for Computation* (CRC Press, Boca Raton, FL) 1992.
- (20) M. E. J. NEWMAN, *Scientific collaboration networks*, *Phys. Rev. E*, **64** (2001) 016131; 016132.
- (21) L. A. ADAMIC, *Proceedings of ECDL'99*, LNCS 1696 (1999) 443.
- (22) R. PASTOR-SATORRAS, A. VAZQUEZ, A. VESPIGNANI, *Dynamical and correlation properties of the internet*, *Phys. Rev. Lett.*, **87** (2001) 2587.
- (23) D. FELL, A. WAGNER, *The small world of metabolism*, *Nature Biotechnology*, **18** (2000) 1121. A. WAGNER, D. FELL, *The small world inside large metabolic networks*, *Proc. R. Soc. London Ser. B*, **268** (2001) 1803.
- (24) È interessante ricordare a tal proposito che il Kevin Bacon della comunità dei matematici è proprio Paul Erdős. Il numero di Erdős di un matematico è la sua distanza da Erdős. Chi ha scritto un articolo con Erdős ha numero di Erdős uguale ad 1, chi non ha scritto un articolo con Erdős ma ha scritto un articolo con un coautore di Erdős ha numero di Erdős uguale a 2...
- (25) S. WASSERMAN, K. FAUST, *Social Networks Analysis* (Cambridge University Press, Cambridge) 1994.
- (26) L. C. FREEMAN, C. LINTON, *Centrality in social networks: I. Conceptual clarification*. *Social Networks*, **1** (1979) 215-239.
- (27) V. LATORA, M. MARCHIORI, *A measure of centrality based on the network efficiency*, cond-mat/0402050
- (28) D. LUSSEAU, *The emergent properties of a dolphin social network*. *Proc. R. Soc. London Ser. B*, **270** (2003) S186-S188.
- (29) R. F. CANCHO, C. JANSSEN, R.V. SOLÉ, *Topology of technology graphs: Small world patterns in electronic circuits*, *Phys. Rev. E*, **64** (2001) 046119.
- (30) P. S. DODDS, R. MUHAMAD, D. J. WATTS. *An experimental study of search in global social networks*, *Science*, **301** (2003) 827-829.
- (31) R. ALBERICH, J. MIRO-JULIA, F. ROSSELLO, *Marvel Universe looks almost like a real social network*, cond-mat/0202174
- (32) M. BARTHELEMY, L. AMARAL, *Small-world networks: Evidence for a crossover picture*, *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 3180.
- (33) M. E. J. NEWMAN, C. MOORE, D. J. WATTS, *Mean-field solution of the small-world network model*, *Phys. Rev. Lett.*, **84** (2000) 3201.
- (34) K. MEDVEDYEVA, P. HOLME, P. MINNHAGEN, B. J. KIM, *Dynamic critical behavior of the XY model in small-world networks*, *Phys. Rev. E*, **67** 036118 (2003).
- (35) M. E. J. NEWMAN, *Models of the small world*, *J. Stat. Phys.*, **101** (2000) 819; *The structure and function of networks*, *Comput. Phys. Commun.*, **147** (2002) 40.
- (36) V. LATORA, M. MARCHIORI, *Efficient Behavior of Small-World Networks*, *Phys. Rev. Lett.*, **87** (2001) 198701; *Economic Small-World Behavior in Weighted Networks*, *Eur. Phys. J. B*, **32** (2003) 249.
- (37) V. LATORA, M. MARCHIORI, *Is the Boston subway a small-world network?*, *Physica A*, **314** (2002) 109.
- (38) R. ALBERT and A.-L. BARABÁSI, *Statistical mechanics of complex networks*, *Rev. Mod. Phys.*, **74** (2002) 47.
- (39) S. N. DOROGOTSEV, J. F. F. MENDES, *Evolution of networks* (Oxford University Press) 2003.
- (40) M. E. J. NEWMAN, *The structure and function of complex networks*, *SIAM Rev.*, **45** (2003) 167.
- (41) R. PASTOR-SATORRAS, A. VESPIGNANI, *Evolution and Structure of the Internet: A Statistical Physics Approach*, (Cambridge University Press) 2004.
- (42) H. JEONG, B. TOMBOR, R. ALBERT, Z. N. OLTVAI e A.-L. BARABÁSI, *Large-Scale Organization of Metabolic Networks*, *Nature*, **407** (2000) 651.
- (43) A.-L. BARABÁSI, R. ALBERT, *Emergence of scaling random networks*, *Science*, **286** (1999) 509.
- (44) R. ALBERT, H. JEONG, A.-L. BARABÁSI, *Attack Tolerance of Complex Networks*, *Nature*, **406** (2000) 378.
- (45) P. CRUCITTI, V. LATORA, M. MARCHIORI, A. RAPISARDA, *Efficiency of Scale-Free Networks: Error and Attack Tolerance*, *Physica A*, **320** (2003) 622.
- (46) R. PASTOR-SATORRAS and A. VESPIGNANI, *Epidemic spreading in scale-free networks*, *Phys. Rev. Lett.*, **86** (2001) 3200.
- (47) W. W. ZACHARY, *An information flow model for conflict and fission in small groups*. *J. Anthropol. Res.*, **33** (1977) 452.

- (48) M. E. J. NEWMAN, M. GIRVAN, *Finding and evaluating community structure in networks*, *Phys. Rev. E*, **69** (2004) 026113.
- (49) S. FORTUNATO, V. LATORA, M. MARCHIORI, *A Method to Find Community Structures Based on Information Centrality*. *Phys. Rev. E*, **70** (2004) 056104.
- (50) M. BUCHANAM, *Nexus: Small Worlds and the Ground-breaking Science of Networks* (W. W. Norton and Co.), 2002.
- (51) P. TIERI, S. VALENSIN, V. LATORA, G. C. CASTELLANI, M. MARCHIORI, D. REMONDINI e C. FRANCESCHI, *Quantifying the relevance of different mediators in the human immune cell network*. *Bioinformatics*, **21** (2005) 1639.
- (52) P. CRUCITTI, V. LATORA, M. MARCHIORI, *A model for cascading failures in complex networks*, *Phys. Rev. E*, **69** (2004) 045104R.
- (53) R. KINNEY, P. CRUCITTI, R. ALBERT, V. LATORA, *Modeling Cascading Failures in the North American Power Grid*, *Eur. Phys. J. B*, **46** (2005) 101.
- (54) V. LATORA, M. MARCHIORI, *Vulnerability and Protection of infrastructure networks*, *Phys. Rev. E* **71** (2005) 015103R.

86



RADIOBIOLOGY MEETS
RADIOTHERAPIES
IN NEUROONCOLOGY

Varenna
1st-3rd September 2005
Villa Monastero

CONGRESS

Un breve resoconto di questo convegno sarà pubblicato prossimamente nel Nuovo Saggiatore

RECENSIONI

**B. Altshuler, A. Tagliacozzo
V. Tognetti (Editors)**

Phenomena in Mesoscopic Systems

**Proceedings of The International School of Physics "Enrico Fermi"
Course CLI, IOS Press Amsterdam; SIF, Bologna 2003;
pp. XVIII+452**

I sistemi mesoscopici sono il punto d'incontro di due grandi processi che hanno caratterizzato la fisica nella seconda metà del '900. Il primo processo riguarda la fisica sperimentale e le sue applicazioni tecnologiche: è il cammino *top-down* verso la scala nanometrica, reso necessario dalla richiesta di calcolatori e di sistemi di comunicazione sempre più veloci e capaci, di materiali innovativi sempre più versatili ed efficienti. Il secondo processo riguarda la fisica teorica, ed il cammino *bottom-up* con il quale la meccanica quantistica riesce a dominare e simulare sistemi di elettroni e di atomi sempre più estesi e complessi. Le scale d'azione delle tecnologie attuali e quelle del calcolo quantistico sono ormai le stesse, per cui la simulazione da principi primi è virtualmente in grado di rimpiazzare con buoni livelli di attendibilità e predittività molti costosi esperimenti. Sulla scala mesoscopica si incontrano poi livelli di complessità e nuovi fenomeni non riducibili, per cui lo studio dei fenomeni quantistici nei sistemi mesoscopici costituisce uno dei fronti più avanzati e affascinanti della nuova fisica. Non poteva mancare alla Scuola Internazionale Enrico Fermi di Varenna un corso in questo settore, e Boris Altshuler, Arturo Tagliacozzo e Valerio Tognetti non hanno tradito le attese, mettendo assieme un programma e una serie di docenti di grandissimo livello. Le inevitabili scelte operate in un settore già molto vasto, benchè recente, hanno privilegiato argomenti quali i meccanismi di rilassamento in sistemi mesoscopici, il trasporto e l'*entanglement* nei punti quantici, la coerenza quantistica nei dispositivi Josephson, le interazioni elettroniche nei fili quantici, i sistemi elettronici fortemente correlati e con di-

sordine. Il volume è stato splendidamente realizzato, impresa non facile in un'epoca in cui i docenti più illustri e ricercati sono di solito riluttanti a scrivere i testi delle lezioni (specialmente se debbono essere didattiche, cioè veramente utili). In questa impresa i curatori, congiuntamente alla desk editor della SIF, Carmen Vasini, (che la prefazione giustamente definisce "di ferma e ostinata determinazione"), sono perfettamente riusciti, e sono certo che esperti, e meno esperti come me, apprezzeranno molto questo libro.

G. Benedek

**N. Bloembergen, N. Rahman
and A. Rizzo (Editors)**

Atoms, Molecules and Quantum Dots in Laser Fields: Fundamental Processes

**SIF Conference Proceedings, Volume 71. Editrice Compositori, Bologna, 2000;
pp. XI+360 € 67,14**

Forse è un po' tardi per parlare di questo volume che raccoglie gli atti della conferenza omonima tenutasi a Pisa nel giugno 2000. A chiunque si interessi di ottica non lineare applicata ad atomi, molecole e nanostrutture questa conferenza non sarà passata inosservata e, suppongo, neppure i suoi *proceedings*. Questo *reminder* è dunque dedicato ai pochi che erano già al mare e che hanno quest'ultima possibilità per procurarsi il volume. La compagnia che ha partecipato e ha scritto ampi contributi per il libro è straordinaria, e non mi metto certo a elencare i nomi illustri, rischiando di fare qualche torto. Cito solo l'articolo d'apertura: Ahmed Zewail, "*Femtosecond atomic-scale stroboscopy: From Physics to Chemistry and on to Biology*". Le idee avanzate che vi si trovano e la vastità dei settori interessati danno immediatamente il polso della conferenza. Sono stati enfatizzati settori quali i processi a molti fotoni e la ionizzazione sopra soglia; le proprietà ottiche non lineari e la generazione ar-

monica di ordine elevato; la spettroscopia transiente; le applicazioni a singoli atomi e molecole, ai punti quantici e ai cluster. Grande merito a Naseem Rahman, Nicolaas Bloembergen e Antonio Rizzo e ai membri del comitato scientifico per avere celebrato il nascente millennio con questa piccola ma straordinaria conferenza e con questo ottimo volume.

G. Benedek

Alwyn Scott (Editor)

Encyclopedia of Nonlinear Science

**Routledge, New York, 2004,
pp. 1010; ISBN 1-57958-385-7; \$ 225.00 (£ 135.00)**

Research in nonlinear science (NLS) goes back at least to the seventeenth century when Isaac Newton formulated and solved the two-body problem of planetary motion. A century later, the equations for ideal fluid motion were derived by Leonhard Euler, after which Louis Navier and George Stokes proposed corresponding nonlinear field equations for real (*i.e.*, viscous) fluids, which continue to confound theorists and numerical analysts to the present day. On the experimental side of nonlinear hydrodynamics, John Scott Russell discovered and carefully described a solitary wave on a Scottish canal that was closely related to a tsunami (tidal wave) and was modeled by a simple nonlinear wave equation by Diederik Kortweg and Henrik de Vries. Although the three-body planetary problem was investigated by several of the most illustrious names in the history of mathematics, it was near the end of the nineteenth century that Henri Poincaré used qualitative methods to show that this problem is inherently insoluble due to sensitive dependence on initial conditions, setting the stage for recent studies of dynamical chaos.

Throughout much of the twentieth century, developments in NLS were balkanized, with communications among various practitioners weak to nonexistent. Perhaps the most widely known contribution was Albert Einstein's general

theory of relativity, and he *was* aware of the importance of Poincaré's results. At about the same time, Gustav Mie — better known for his work on particle scattering of light — proposed a nonlinear generalization of Maxwell's electrodynamic equations that contained something like the electron as a localized solution. In the 1930s, Reinhard Mecke studied interatomic vibrations of certain molecules (CH-stretch in benzene, for example) that were found experimentally to be localized at particular bonds, Lev Landau proposed the polaron concept, under which electric charge could be localized in a crystal through a self-consistent distortion of the surrounding crystal structure, and Max Born — picking up on Carl Anderson's discovery of positron-electron creation from cosmic radiation — reworked Mie's theory to obtain a simpler nonlinear field theory for the electron. Just before the second World War, Yakov Frenkel and Tatiana Kontorova proposed a nonlinear wave equation to describe the localization and propagation of crystal dislocations, which (unknown to them) had been studied by nineteenth-century mathematicians and would later serve as a model for domain walls in ferromagnetic and ferroelectric materials and for the propagation of magnetic flux quanta (fluxons) in long Josephson-type superconducting junctions, but that's getting ahead of the story.

Considering nonconservative systems, young Andrej Lomogoroff and his colleagues proposed a nonlinear reaction-diffusion model for the progress of useful genes through a biological population, which was closely related to the model of flame-front propagation studied by Yakov Zeldovich and David Frank-Kamenetsky. Two decades later, their work would serve to describe the shape and speed of a nerve impulse, which was just then — in the mid-1930s — being observed on the newly invented cathode ray oscilloscope by Kenneth Cole, but at the time no such connection was made. Invigorated by the technical advances in electronics, post-war neuroscience saw a complete formulation of nerve impulse dynamics by Alan Hodgkin and Andrew Huxley, based on

reaction diffusion. Closely related was a nonlinear model for morphogenesis (pattern formation) proposed by Alan Turing and an experimental discovery of such phenomena in nonequilibrium chemical mixtures by Boris Belousov, which (sadly) were rejected for publication in a major journal by benighted editors who thought his data were in violation of the second law of thermodynamics!

Another important postwar invention was the digital computer which was invaluable in studying all of these reaction-diffusion systems. As one of the first scientific computer experiments, Enrico Fermi and Stan Ulam proposed a study of energy thermalization among the modes of a weakly nonlinear vibrating string. Unexpectedly, this Ferm-Pasta-Ulam (FPU) model did not proceed toward equipartition of energy but showed close recurrences of the initial conditions at times much shorter than those that had been anticipated by Poincaré. In the early 1960s, computer studies on simplified atmospheric models by Edward Lorenz numerically confirmed Poincaré's theoretical results on sensitive dependence of simple dynamical systems on their initial conditions, bringing the world of applied mathematics face-to-face with the phenomenon of deterministic chaos. In the mid-1960s, the curious FPU result was explained by Martin Kruskal and Norman Zabusky, using the Korteweg-de Vries (KdV) model of Scott Russell's solitary wave, which they named a "soliton". At about the same time John Perring and Tony Skyrme were using the Frenkel-Kontorova equation — later to be called the "sine-Gordon" (SG) equation — to model positron-electron creation and annihilation, during which they obtained an exact formula for the collision of two SG solitons. As physical chemists were rediscovering local modes in molecules, Morikazu Toda was finding soliton solutions for nonlinear mass-spring lattices.

Although the 1960s were a fruitful period in the history of nonlinear science, the component activities remained balkanized. In the early 1970s, however, applied science experienced a phase change in its

social structure. Interdisciplinary conferences on nonlinear science sprang up, to which were invited scientists from a variety of backgrounds — mathematics and physics, of course, but also engineering, biology, physical chemistry, hydrodynamics, economics, neuroscience, meteorology, and optics, among several others — and these participants found that they had much to learn from each other. The methods developed in one field for understanding the interplay between chaos and nonlinear localization of dynamic activity were often found to be novel and stimulating one another. This was an exciting experience for those involved, leading in the early 1980s to the formation of nonlinear science centers throughout the world and the launching of several journals devoted to the new area. Today, nonlinear science is an established area of activity, with participants from all of the above-mentioned professional areas and more.

The primary aim of the *Encyclopedia of Nonlinear Science* is to introduce undergraduates and beginning graduate students in all areas of science to the key concepts of this new area. Comprising 438 entries, carefully written to be reader friendly by a team of more than 300 experts from 29 different countries, this is a truly international effort, which covers all of the above topics and much more. Those consulting this work for background information on a particular topic will find themselves led in unexpected directions to unanticipated bits of knowledge. In addition to its intended audience, this *Encyclopedia* will also be of interest to practicing scientists who wish to learn more about the nonlinear revolution and to philosophers and historians of science.

Ablly edited by Alwyn Scott, who has devoted his professional life to nonlinear science — leading one of the first nonlinear study centers and editing one of the first journals in the area — the *Encyclopedia of Nonlinear Science* should be on the shelf of every group working in applied science, and in the personal collections of many scientists.

A. Barone

SCELTI PER VOI

a cura di Sergio Focardi

CHE FINE HAN FATTO LE MACCHINE PENSANTI?

Nel 1950, nel giornale di filosofia *Mind*, Alan Turing suggerì che una macchina avrebbe potuto essere considerata intelligente se le sue risposte fossero state indistinguibili da quelle di un essere umano. Tale definizione è considerata a tutt'oggi valida, anche perché ci evita di imbarcarci nell'inutile tentativo di definire l'intelligenza: per esempio, una colonia di formiche, ma anche un sistema immunitario sono intelligenti.

Va detto che all'epoca della definizione di Turing c'era fra gli addetti ai lavori la convinzione di arrivare alla realizzazione di macchine intelligenti.

Va subito aggiunto che le cose sono andate diversamente e la discussione si è spesso spostata sul piano filosofico, per esempio sulla possibilità che una macchina assuma una propria coscienza o provi emozioni.

Nel 1982, il Giappone varò un programma denominato Sistemi di calcolo di quinta generazione, puntando su calcolatori paralleli che avrebbero portato il calcolo e il campo dell'intelligenza artificiale a nuovi livelli. Gli Stati Uniti reagirono per contrastare la supremazia nipponica, investendo nel campo notevoli risorse economiche.

I progressi sono stati lenti in maniera frustrante con la frammentazione dei gruppi di ricerca che hanno seguito approcci diversi: alcuni ritenendo che la chiave dell'intelligenza fosse da ricercare nel ragionamento simbolico, un approccio matematico in cui idee e concetti sono rappresentati da simboli quali parole.

Tuttavia il supporto economico permise di aprire nuove linee di ricerca come lo sviluppo delle reti neurali, degli algoritmi genetici, la comprensione del linguaggio, la pianificazione automatica: il campo della intelligenza automatica si frammentò in numerosi sottosectori, tutti destinati ad una fine ingloriosa.

Qualcuno tuttavia non si è arreso e ha fondato ad Austin una compagnia, denominata Cycorp, nella speranza di verificare un giorno la definizione di Turing. Verrà messo a disposizione in rete un sistema chiamato Cyc col quale chiunque potrà dialogare e che acquisirà informazioni da questo continuo rapporto con gli utenti. Potremo scoprire un giorno che Cyc si comporta come uno di noi?

UN NUOVO OROLOGIO DI ELEVATA ACCURATEZZA

Un gruppo della Università di Tokio ha sviluppato un orologio la cui accuratezza raggiunge il valore di 10^{-18} che appare destinato a cambiare la stessa definizione di secondo, oggi basata sugli orologi al cesio (la cui accuratezza è 10^{-15}). La realizzazione di un orologio richiede siano soddisfatte due condizioni: l'esistenza di un fenomeno periodico e quella di un sistema in grado di contare il numero di periodi. Ovviamente il contatore deve essere sufficientemente veloce da seguire le variazioni del fenomeno. Uno sviluppo importante fu realizzato nel 1999 con l'introduzione di un contatore ottico basato su un laser pulsato al fs (10^{-15} secondi): fu così sviluppato il primo orologio ottico sperimentale. Un buon oscillatore ottico richiede una transizione netta che dia un segnale di elevata ampiezza e poco sensibile alle perturbazioni esterne. Le ricerche sono state condotte lungo due direttrici: a) un singolo ione intrappolato da un campo elettrico e fermato con laser, con lo svantaggio di non avere misure stabili perché il segnale è generato da un solo ione e deve essere mediato su un lungo periodo; b) milioni di atomi neutri che danno un segnale di ampiezza ben più elevata ed eccellente stabilità il cui svantaggio è uno sfasamento non controllabile in frequenza dovuto alle interazioni fra atomi.

Il gruppo giapponese sfrutta i vantaggi dei due metodi intrappolando atomi in un reticolo costruito con laser, in pratica producendo miliardi di microtrappole in un volume di 1 mm^3 . Nel corso dei primi tentativi risultò che l'intensità dei laser necessari per costruire le trappole perturbava in maniera significativa la frequenza di transizione, un effetto non correggibile perché l'intensità, diversamente dalla frequenza e dal tempo non può essere misurata con sufficiente accuratezza. Gli autori, con una procedura che non può essere qui descritta, hanno adattato la frequenza del laser usato per produrre la trappola in modo da compensare gli sfasamenti di energia dei livelli.

Cosa potremmo fare con questi nuovi orologi? Migliorare la navigazione controllata dai satelliti e la sincronizzazione temporale dei sistemi. Nel campo della ricerca misurare lo sfasamento gravitazionale fra due orologi le cui quote differiscono di un solo centimetro nel campo terrestre.

HUTT

HUTT, acronimo di High-resolution Ultrasonic Transmission Tomography scanner è un nuovo tomografo le cui verifiche cliniche cominceranno entro l'anno e che sarà commercializzato nel giro di tre anni. Si tratta di un sistema sicuro, non invasivo che può vedere l'interno degli organi, osservare in dettaglio particolari tessuti e distinguere anche fra crescite maligne e benigne.

Progettato e costruito alla Università della Carolina del sud, Los Angeles, utilizza ultrasuoni per creare immagini tridimensionali dei tessuti molli. A differenza degli ecografi che rivelano le onde sonore riflesse dalle discontinuità che definiscono i confini dei diversi organi interni, HUTT utilizza, per produrre le immagini il suono che attraversa i tessuti. Poiché l'intensità dell'onda sonora trasmessa è 2000 volte quella dell'onda riflessa, il sistema può produrre immagini con risoluzione molto più elevata di quella degli ecografi. In effetti HUTT ha una risoluzione spaziale migliore di tutte le tecniche usate in medicina, inclusa la risonanza magnetica nucleare (MRI), raggiungendo 0,4 mm contro i 2 mm di MRI.

HUTT produce immagini tridimensionali di grande precisione tali da permettere al chirurgo di localizzare con la massima accuratezza la posizione di lesioni da rimuovere; inoltre può identificare differenti tipi di tessuto molle sfruttando la differenziale attenuazione delle onde sonore che lo hanno attraversato, distinguendo anche fra forme benigne e maligne.

HUTT avrà un aspetto simile a quello di MRI, con la differenza che il paziente sarà in piedi, e non disteso, all'interno di un cilindro ruotante. Ai due estremi di un diametro sono collocati due insiemi di trasduttori, ciascuno di $0,4 \text{ mm}^2$ che servono per trasmettere e ricevere rispettivamente brevi impulsi di ultrasuoni a frequenza compresa fra 4 e 12 MHz. Durante la rotazione del cilindro i due sistemi di trasduttori si muovono parallelamente alle generatrici, in modo da ottenere una serie di immagini bidimensionali che possono essere trasformate in una immagine 3D. Il sistema costerà 300.000 \$, tra 5 e 10 volte meno di un sistema MRI.

89

ANNUNCI



Burnett Bgs

Researching new connections.

L'edizione 2005 del Premio Italgas si articola in quattro diversi riconoscimenti:

- premio Scienza e Ambiente, riservato a scienziati e ricercatori;
- premio Progetti per l'Ambiente, destinato a enti, organizzazioni e aziende;
- premio Divulgazione Scientifica, per operatori dell'informazione e della comunicazione;
- premio Debutto nella Ricerca, destinato agli autori di tesi di dottorato.

Le domande di partecipazione andranno inoltrate entro il 23 settembre 2005. Tutti i dettagli sulle modalità di presentazione e ulteriori informazioni sono disponibili sul sito internet.

For further information:

Segreteria Scientifica
Fondazione Eni Enrico Mattei
Corso Magenta, 63
Tel. +39 02 52036964 - 52036934
Fax +39 02 52036946 - 52036958
E-mail: premioitalgas@feem.it
www.premioitalgas.it



**PREMIO
ITALGAS**
energia & ambiente





18th International Conference on X-ray Optics and Microanalysis

Frascati, 25 - 30 September, 2005

For further information:

Secretary: Donatella Pierluigi
Phone: +39 06 94032317
Fax: +39 06 94032559

E-mail: icxom05@Inf.infn.it

E-mail: Nucleon05@Inf.infn.it



N05

Workshop on Nucleon Form Factors

Frascati, 12-14 October, 2005

91

CAS

THE CERN ACCELERATOR SCHOOL



ELETTRA Synchrotron Light Laboratory

"Accelerator Physics"

(Intermediate level)

Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy

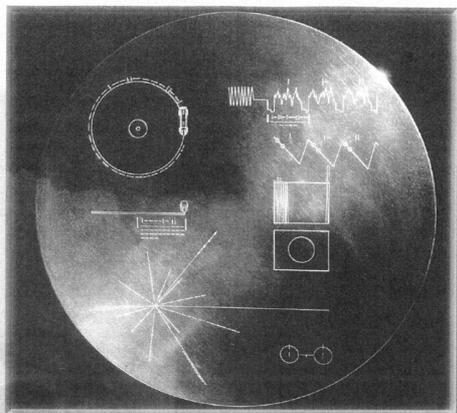
2 - 14 October 2005

For further information:

Mrs. S. von Wartburg CERN
Accelerator School, AC Division
CH - 1211 GENEVA 23
Fax: +41 22 767 5460
Web: <http://www.cern.ch/schools/CAS>
E-mail: Suzanne.von.Wartburg@cern.ch

COMUNICARE FISICA

24-27 Ottobre 2005
Laboratori Nazionali di Frascati



For further information:

S. Colasanti, tel/fax: 06 94032716
A. Pelagalli, tel: 06 94032740
Web: <http://www.cern.ch/schools/CAS>
E-mail: comunicarefisica2005@Inf.infn.it

World Conference on Physics and Sustainable Development



For further information:

Edmund Zingu, President
South African Institute of Physics
Vice-Principal (Academic)
Mangosuthu Technikon
Box 12363
Jacobs 4026, South Africa
Tel : +27 31 907 7216
Fax : +27 31 906 1166
Web: <http://www.wcpsd.org>
E-mail: zingu@julian.mantec.ac.za



92

International Association
of Nanotechnology

International Congress of Nanotechnology (ICNT 2005)
October 31- November 4, 2005, San Francisco



International Congress of Nanotechnology (ICNT) 2005

October 31- November 4, 2005
at the San Francisco Airport Marriott Hotel



For further information:

International Association of Nanotechnology, Inc.
2386 Fair Oaks Boulevard
Sacramento, CA 95825
P.O. Box 231823
Sacramento, CA 95823 USA
Tel. 916-529-4119 Fax. 916-244-7029
Web: <http://www.ianano.org>
Email: info@ianano.org

IPSI-2005

VENICE, ITALY
10-13 November, 2005

Chairman: Prof.Dr. V. Milutinovic, Fellow of the IEEE



For further information:

Web: www.internetconferences.net
Email: venice@internetconferences.net

2005

DOMANDA DI ISCRIZIONE ALLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nome _____

Cognome _____

Data di nascita _____

① Istituto o Ente di Appartenenza _____

② Indirizzo privato _____

③ Indirizzo e-mail _____

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

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

Firme leggibili dei Soci Presentatori

Nome in stampatello

1) _____

2) _____

Socio individuale: Euro 45

Socio al di sotto dei 30 anni: Euro 30

Socio membro di altre Associazioni Scientifiche (AIF, AIFM, SAIT, SIGRAV, SIOF): Euro 30

Socio collettivo: Euro 260

Socio sostenitore: (a partire da) Euro 310

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

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

Data _____

Firma _____

QUOTE SOCIALI E ABBONAMENTI 2005

Quota di associazione alla Società Italiana di Fisica:

- | | |
|--|--|
| Socio individuale | <input type="checkbox"/> € 45,00 |
| Socio al di sotto dei 30 anni | <input type="checkbox"/> € 30,00 |
| Socio membro di altre Associazioni Scientifiche
(AIF, AIFM, SAIT, SIGRAV, SIOF) | <input type="checkbox"/> € 30,00 |
| Socio collettivo | <input type="checkbox"/> € 260,00 |
| Socio sostenitore | (a partire da) <input type="checkbox"/> € 310,00 |

Quote di abbonamento ai periodici della Società Italiana di Fisica:

	soci	non soci
Il Nuovo Cimento B	<input type="checkbox"/> € 592,70	<input type="checkbox"/> € 782,30
Il Nuovo Cimento C	<input type="checkbox"/> € 300,20	<input type="checkbox"/> € 379,30
Rivista del Nuovo Cimento	<input type="checkbox"/> € 316,00	<input type="checkbox"/> € 410,90
 Abbonamento cumulativo alle 3 riviste	 <input type="checkbox"/> € 1027,60	 <input type="checkbox"/> € 1336,60
 Giornale di Fisica	 <input type="checkbox"/> € 75,00	 <input type="checkbox"/> € 94,00
Quaderni di storia della Fisica		
Per gli iscritti all'A.I.F. (*)		<input type="checkbox"/> € 75,00
(*) Queste quote debbono pervenire tramite la segreteria dell'A.I.F.		
 Il Nuovo Saggiatore		 <input type="checkbox"/> € 75,00

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

Cognome e Nome
o Ente

.....

.....

.....

Via

.....

C.A.P.

.....

Città

.....

Partita IVA

.....

Totale

.....

Modalità di pagamento:

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



(sbarrare il simbolo desiderato)

Carta n.

Data di scadenza

Data Firma.....

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