

FRASCATI E LA FISICA TEORICA: DA ADA A DAΦNE

di Mario Greco e Giulia Pancheri

Negli anni 1950-'60, fra Frascati e Roma, avvenne qualcosa di straordinario: la nascita delle collisioni materia-antimateria in laboratorio e il sorgere di una grande scuola di fisica teorica. Questi due avvenimenti, che furono strettamente legati, avrebbero lasciato il segno nella storia dello sviluppo del Modello Standard delle particelle elementari. In questo articolo parleremo soprattutto della parte meno conosciuta al di fuori del nostro ambiente, e cioè tratteremo la storia degli sviluppi teorici, anche se, come si vedrà, si trattò di un cammino comune, non già parallelo, fra idee teoriche, misure sperimentali e progettazione di macchine acceleratrici, una simbiosi alla base dei grandi successi della fisica del XX secolo.

Introduzione

A Frascati la fisica teorica nasce in simbiosi con la sperimentazione e la costruzione delle macchine acceleratrici, il cui grande sviluppo in tutto il mondo nella seconda metà del novecento segna una svolta epocale nella fisica, potenziando enormemente lo strumento con cui controllare e studiare in laboratorio il comportamento delle particelle che costituiscono la materia. Oggi al mondo ci sono più di 17000 acceleratori usati per scopi non solo di ricerca fondamentale, ma soprattutto medica e industriale.

Grazie allo sviluppo degli acceleratori e dei rivelatori di particelle e al progresso della teoria nell'interpretazione e nelle predizioni dei risultati sperimentali, la fisica delle particelle elementari ha ottenuto grandi successi. Insieme ai risultati ottenuti nella fisica dei raggi cosmici, le particelle che vengono dallo spazio, e nell'astrofisica, si è giunti ad una visione complessiva non solo della struttura della materia ma anche della cosmologia e dell'astrofisica, delle origini e dell'evoluzione dell'universo. Il Laboratorio di Frascati per le scelte lungimiranti dell'INFN e grazie al capitale umano ivi presente, ha giocato un ruolo di protagonista sia nella fisica degli acceleratori che in quella delle astroparticelle, con attiva partecipazione di membri del gruppo teorico in entrambe le direzioni.

L'interscambio con gli sperimentali tuttavia è solo uno degli aspetti della fisica teorica. Non mancano nella storia della scienza esempi di grandi intuizioni basate su pochissimi dati, confermate molti anni dopo, o, anche, costruzioni puramente teoriche che danno origine a sviluppi inaspettati e anticipano grandi scoperte. Ai Laboratori di Frascati sono coesistiti questi due aspetti del lavoro teorico, la simbiosi con la spe-

rimentazione da un lato e la ricerca di nuove soluzioni, quali ad esempio la predizione che il mondo fisico sia supersimmetrico e che la gravità faccia parte di questa superiore simmetria della natura.

Alcuni di questi sviluppi teorici iniziarono a Frascati nella seconda metà degli anni settanta e furono poi proseguiti al CERN di Ginevra. Un altro aspetto molto importante della fisica teorica contemporanea è legato a studi che utilizzano computers estremamente potenti dedicati esclusivamente a simulare la complessità delle interazioni fra particelle. La forza che lega il nucleo e gli adroni fra di loro è descritta dalla Cromodinamica Quantistica, in breve QCD, così come la forza fra elettroni e positroni è descritta dalla Elettrodinamica Quantistica, la QED. A differenza della QED però, le interazioni in QCD possono richiedere più e più iterazioni del calcolo di base, in un crescendo di complessità. Per risolvere questo problema si può ricorrere in alcuni casi a tecniche di risommazione come in QED oppure allo studio con calcolatori dedicati. A Frascati entrambe queste direzioni furono sviluppate e perseguite negli anni 70 e poi proseguite in altre sedi, restando tuttora una delle linee di ricerca del gruppo teorico.

In questo lavoro faremo un po' la storia delle attività teoriche svolte a Frascati, seguendo le linee principali di sviluppo del pensiero teorico e dei suoi protagonisti. Mostriamo come nel Laboratorio siano nate e sviluppate molte linee di ricerca teoriche che hanno poi lasciato delle tracce ben evidenti nella fisica dei nostri giorni. I lavori teorici direttamente o indirettamente ispirati da queste linee di ricerca sono molti e molti di loro hanno avuto grande risonanza, qui ci limitiamo a fare riferimento bibliografico solo a lavori esplicitamente connessi alla fisica di

Frascati o lavori dove uno degli autori era affiliato a Frascati.

La nostra storia parte da Roma, nei primi anni 50 e si ferma con l'approvazione e la partenza del progetto DAΦNE, l'ultima macchina acceleratrice di elettroni e positroni costruita a Frascati nella tradizione iniziata con AdA. I successi e la storia di DAΦNE sono raccontati in altri articoli di questa rivista, lasciamo invece al futuro e in particolare ai giovani che la faranno, la storia della fisica teorica a Frascati negli anni successivi.

Per stendere questa storia, ci siamo basati sia su documenti esistenti [1, 2, 3, 4], che sui nostri ricordi e sulle memorie personali dei colleghi citati.

Gli inizi

Negli anni cinquanta e nei primi anni sessanta, il laboratorio fu un importante centro di attrazione per tutti i fisici teorici che frequentavano l'Università di Roma. Il sincrotrone rappresentava un'impresa di grande novità all'avanguardia della tecnologia e della fisica e naturalmente attraeva tutti, sia teorici che sperimentali.

Il supporto teorico di partenza per l'impresa del Sincrotrone era stato Enrico Persico, amico e sodale di Enrico Fermi. Persico insegnava un corso alla Scuola di Perfezionamento in Fisica a Roma sulle macchine acceleratrici e i reattori nucleari e fra i suoi studenti c'era il giovane Carlo Bernardini, che si era laureato nel 1952 con Bruno Ferretti con una tesi di meccanica quantistica. Quando Bernardini, dopo la laurea chiese un lavoro a Persico, quest'ultimo lo presentò a Salvini che lo coinvolse nell'avventura del Sincrotrone [5]. L'importanza di avere fisici teorici che si interessassero alla fisica del laboratorio e che venissero a frequentare Frascati e interagire con gli sperimentali era stata chiara a Giorgio Salvini, fin dall'inizio dell'impresa del Sincrotrone: era importante che nel Laboratorio ci fossero persone in grado di rispondere ai quesiti degli sperimentali o, comunque, in grado di trovare le risposte e cercare nuove direzioni. Questo faceva parte di una tradizione dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma. A Roma i teorici erano alloggiati al secondo piano dell'Istituto nel cosiddetto "corridoio teorico". Nel corridoio, in una rientranza del muro, c'era un telefono che aveva la funzione di permettere, a

chi telefonava in Istituto, di fare domande di fisica e averne risposta esauriente da qualcuno dei teorici presenti.

Quando i Laboratori entrarono in funzione, Salvini volle che ci fosse un ufficio a disposizione per ogni università e si preoccupò che venissero i teorici. Nelle parole di Carlo Bernardini, "Per primo arrivò Giacomo Morpurgo", poi Raoul Gatto che si era laureato con Ferretti. Infine, di concerto e su suggerimento di Edoardo Amaldi, Salvini fece venire Bruno Touschek.

Gatto, come studente della Scuola Normale, avrebbe dovuto svolgere la tesi a Pisa, ma poiché la cattedra di fisica teorica a Pisa era scoperta, ottenne dalla Scuola di potere lavorare alla tesi a Roma, salvo poi per la discussione finale che doveva aver luogo a Pisa. La tesi, con Ferretti, fu su un modello non perturbativo di diffusione inelastica, avendo come relatore Marcello Conversi, che aveva avuto la cattedra di fisica sperimentale a Pisa. Dopo la laurea Gatto restò a Roma, dove si trovava quando venne Bruno Touschek, la cui venuta rappresentò, come dice Gatto, "una grande fortuna per il gruppo teorico di Roma". Infatti, poiché Ferretti si trasferì poco dopo a Bologna, Bruno Touschek diventò il teorico di riferimento per chi volesse fare una tesi in fisica delle particelle.

Bruno Touschek era naturalmente attratto dall'impresa del sincrotrone a causa dell'interesse per le macchine acceleratrici, sviluppato durante la Guerra nelle sue interazioni con Wideroe. Durante la guerra, in Germania, c'era stato un progetto di costruire un betatrone e installarlo su un aeroplano, al fine poi di sparare un fascio di elettroni contro gli aerei nemici [6]. Per realizzare questo progetto, i tedeschi chiamarono il norvegese Rolf Wideroe (il cui fratello, asso della aviazione scandinava era stato fatto prigioniero dai tedeschi). Wideroe iniziò la progettazione di un betatrone e Touschek, all'epoca in Germania, venne in contatto con lui, in modo abbastanza casuale [1]. Durante la successiva prigionia di Touschek ad Amburgo, Wideroe continuò a lavorare con Touschek, portandogli libri, cibo e sigarette, come ricorda lo stesso Wideroe [6]. Fra i libri, il volume "The Quantum Theory of Radiation" di Walter Heitler, sul quale Touschek scrisse con l'inchiostro simpatico un saggio sulla riduzione dei fasci per irraggiamento, nei betatroni.

Wideroe ricorda anche di aver discusso con Touschek un'idea, che aveva avuto mentre guardava due nuvole in cielo che si scontravano frontalmente, su collisioni nel centro di massa fra particelle di carica opposta, idea per la quale Wideroe propose in seguito un brevetto per un anello di accumulazione elettroni-protoni.

Da Gatto e Touschek sarebbe nata una grande scuola di fisica teorica, in parte passata proprio per Frascati. E infatti i due primi laureandi di Touschek si sarebbero in seguito entrambi occupati della fisica da studiare a Frascati: Nicola Cabibbo collaborando con Gatto sulla descrizione delle reazioni interessanti da studiare nelle collisioni fra elettroni e positroni (e^+e^-), Francesco Calogero studiando le interazioni fotone-fotone. Seppure per pochi anni, Cabibbo fu uno dei primi dipendenti di Frascati. Assunto nel 1961, nel 1963 era già al CERN, e poi nel 1965 professore all'Aquila. Cabibbo, influenzato dalla fama della grande scuola di Fermi, aveva deciso di fare una tesi in fisica teorica. A Roma, all'epoca, Touschek era la persona più affascinante, provenendo da quell'ambiente mitteleuropeo della grande fisica pre e post-bellica. Nel 1958 le inte-



Fig. 1
Raoul Gatto a Frascati nel 1957.

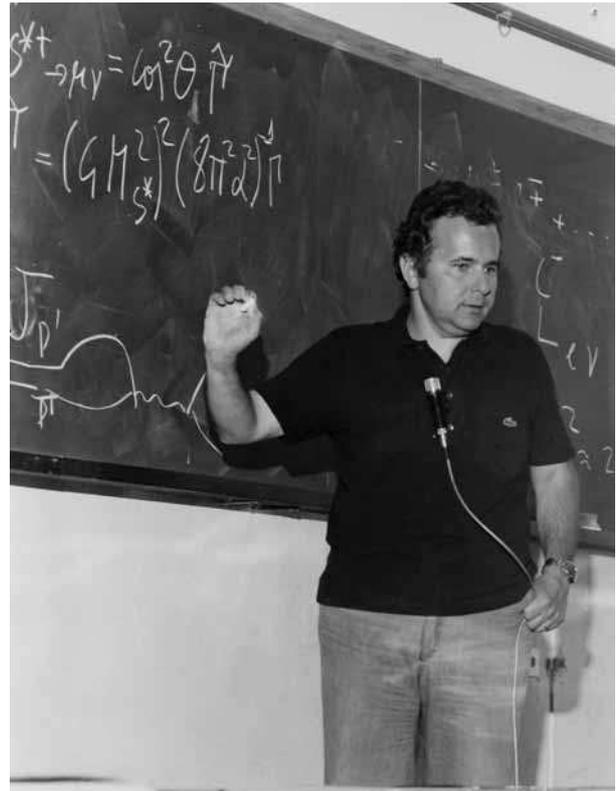


Fig. 2
Nicola Cabibbo nel 1963.

razioni deboli erano diventate un argomento molto di punta e Cabibbo con Calogero e Guidoni fece una tesi sotto la direzione di Touschek su un'idea di Pauli. Ma quando i tre avevano finito la tesi di laurea, Touschek già non si occupava più di interazioni deboli, essendo preso dall'avventura del sincrotrone. Così Cabibbo iniziò a lavorare con Raoul Gatto, che era assistente all'Università di Roma. Quando Touschek propose la costruzione di AdA [7], Cabibbo e Gatto iniziarono e portarono a termine prima un lavoro sul fattore di forma del pione e, successivamente all'assunzione di Cabibbo a Frascati nella primavera del 1961, la cosiddetta "Bibbia" sulle interazioni e^+e^- [8]. In quegli anni l'interazione fra fisici teorici e sperimentali era molto stretta, e l'attività sperimentale di Frascati ebbe un ruolo determinante sui successivi sviluppi teorici. Nel 1961 Gell-mann e Néeman avevano proposto SU(3) come simmetria delle interazioni forti, così Cabibbo e Gatto decisero di applicare la teoria di SU(3) al decadimento del mesone η che si stava misurando a Frascati per la prima volta [9]. È Cabibbo a dire [2] che il seme del suo fondamentale lavoro sul mescolamento fra quarks di tipo

down e quarks di tipo strange, scritto al CERN nel 1963, viene da Frascati.

Un altro esperimento fatto a Frascati, questa volta da Giordano Diambrini-Palazzi, ispirò a Cabibbo un lavoro a lui particolarmente caro, sul passaggio di un fotone nei cristalli, mostrando una volta di più la simbiosi fra teoria ed esperimenti [10]. Infine la misura dei fattori di forma del protone, fatta dagli americani in quel periodo, portò Cabibbo e Gatto a collaborare con Antonino Zichichi in un lavoro sulla possibilità di misurare la struttura del protone partendo dalle proprietà della sua annichilazione con un antiprotone [11].

Dopo la proposta per la costruzione di ADONE, fatta con una nota interna mai pubblicata, scritta fra gli altri da Bernardini, Gatto e Touschek [12], e la pubblicazione della "Bibbia", fu altresì chiaro che per poter estrarre utili informazioni di fisica dai futuri esperimenti, sarebbe stato necessario fare diversi calcoli teorici che ancora non esistevano nella letteratura. Si resero così disponibili diverse tesi di laurea su argomenti nuovi e originali. All'epoca, per poter fare una tesi di laurea in fisica teorica, si doveva fare un piccolo esame, cioè risolvere un problema assegnato da uno dei membri del gruppo teorico. I più bravi studenti di quegli anni vi si cimentavano. Fu così che a Frascati comparvero i due laureandi di Gatto, Guido Altarelli e Franco Buccella, quest'ultimo detto "l'altro laureando" a causa di un piccolo scherzo fatto alle loro spalle da Gianni De Franceschi, un giovane teorico che stava a Frascati e che si occupava di teoria dei gruppi. De Franceschi si era laureato con Marcello Cini ed era arrivato a Frascati con una borsa di studio nel settembre 1960. Aveva poi iniziato a collaborare con Gatto e Cabibbo. De Franceschi era bravissimo nell'imitare le voci e un giorno, a Frascati, dal telefono della stanza accanto, chiamò Altarelli e fingendo di essere Gatto, gli fece una terribile lavata di capo, accusando lui e "l'altro laureando" di non lavorare abbastanza ed essere dei fannulloni. Oggi questa cosa può far sorridere, ma allora una tale lavata di capo fece impallidire i due laureandi, terrorizzati all'idea di non riuscire a laurearsi. De Franceschi scrisse in seguito un lavoro con Luciano Maiani sulla teoria dei gruppi, su cui studiarono quasi tutti i fisici che si laurearono a Roma in quelli anni [13].

Guido Altarelli aveva inizialmente pensato di chiedere una tesi a Touschek. L'incontro fra Touschek e Altarelli si svolse nel grande ufficio di

Touschek al secondo piano dell'Istituto a Roma, in un momento in cui Bruno era particolarmente preoccupato per il mancato funzionamento di AdA e poco incline a comunicare con un giovane sia pur estremamente brillante come Altarelli. Il colloquio terminò quando la giacca di Touschek, appoggiata su una sedia vicino a una stufetta (era novembre), iniziò improvvisamente a prendere fuoco. Dopo questo incontro tragicomico, Guido decise di andare a chiedere la tesi a Gatto, che in quel periodo, fine 1963, in fase di trasferimento a Firenze, si occupava ancora di Frascati.

La fisica di ADONE

Il problema teorico che Altarelli e Buccella risolsero per la loro tesi di laurea, sull'emissione di un fotone di alta energia nell'annichilazione elettrone-positrone, è un classico nella letteratura scientifica, tuttora usato dai fisici di macchina, ed affrontava uno dei molti problemi che gli esperimenti avrebbero incontrato [14], con la (allora) altissima energia di ADONE. Anche a Touschek il problema stava a cuore, ma egli si preoccupava in particolare dell'emissione di molti fotoni di bassa energia, i cosiddetti fotoni molli. Questo era un problema a cui Touschek si era interessato quando era stato a Glasgow, nei primi anni 50. A Glasgow, assieme a Walther Thirring, Touschek aveva infatti affrontato uno dei problemi classici della elettrodinamica quantistica, problema noto come "la catastrofe infrarossa", che si verifica quando l'energia dei fotoni emessi da un elettrone accelerato diventa sempre più bassa mandando così ad infinito il numero di fotoni emessi a momento zero.

Touschek si preoccupava molto del calcolo delle correzioni che questo tipo di processi avrebbero richiesto per l'interpretazione dei futuri esperimenti ad ADONE e mise al lavoro su questo tema il giovane Ugo Amaldi, che, a questo proposito, racconta un episodio che mostra il tipico senso dell'umorismo di Touschek [4].

Un giorno Touschek gli chiese come procedesse nei suoi calcoli e che metodo usasse per farli. Ugo rispose che stava utilizzando il metodo di Kessler, Paul Kessler essendo un fisico francese del College de France, molto noto all'epoca per questo tipo di calcoli. E chiese, Ugo, a Bruno: "Tu conosci Kessler?". Al che Touschek rispose: "Io conosco solo ... le sorelle Kessler!" (due

gemelle molto note all'epoca, soubrettes del popolare programma televisivo Studio Uno).

Verso il 1965 altri due giovani da Roma avevano chiesto la tesi a Touschek, Paolo Di Vecchia e Giancarlo Rossi, che furono messi a studiare altri aspetti del problema dell'emissione di fotoni. A Frascati c'erano già tre teorici, Gianni De Franceschi, Mario Greco e Antonio Tenore, entrambi questi ultimi nel gruppo dedicato ai calcoli per ADONE, gruppo che comprendeva anche Mario Bassetti. Greco si era laureato con Benedetto De Tollis con una tesi di fotoproduzione di pioni, vincendo poi una borsa di studio del CNR, che era all'epoca uno dei principali erogatori di borse post-laurea. Touschek era ad Orsay con AdA in quel periodo e la fisica teorica delle particelle a Roma non sembrava avere molti sbocchi. Un incontro fortuito con Massimo Bernardini, che lavorava presso il gruppo ADONE, convinse Greco ad andare a Frascati dove gli studi per realizzare un monitor di luminosità per ADONE richiedevano calcoli nuovi e complessi. In particolare Greco portò a termine il calcolo dell'emissione di due fotoni dagli elettroni accelerati in ADONE. A questo progetto [15] si era unito successivamente Paolo Di Vecchia, che Touschek, al ritorno dal periodo passato ad Orsay, dove aveva accompagnato AdA, aveva messo a lavorare su questo problema.

Intorno al 1966 a Frascati si materializzò così un gruppo sostanzioso di giovani teorici che lavoravano con Touschek o sotto la sua guida su problemi di elettrodinamica legati alla futura macchina ADONE. Per un breve periodo anche Pucci De Stefano, futura moglie di Luciano Maiani, che si era laureata con Francesco Calogero, fece parte del gruppo. Come già accennato, Touschek voleva andare oltre i calcoli che in teoria delle perturbazioni trattavano l'emissione di uno o due fotoni: prese così inizio un filone di ricerca che a Frascati e oltre ebbe una vita molto lunga. Touschek iniziò questi studi con Etim Gabriel Etim, un giovane nigeriano che studiava all'Università di Roma e aveva chiesto di laurearsi con lui. Nel 1967 scrisse su questo argomento un lavoro approfondito [16] con Etim e con Giulia Pancheri. Pancheri, come Greco, si era laureata a Roma con Benedetto De Tollis, assistente di Enrico Persico, con una tesi in QED e, subito dopo la laurea, aveva ottenuto di poter fare parte del gruppo teorico che Touschek stava formando a Frascati.

Fu durante questo periodo che nacque il termine "fattore di Bond", che era un gioco di parole, un altro esempio del senso dell'humour di Touschek. Il fattore di Bond era una quantità che numericamente valeva 0.07 all'energia di ADONE e rappresentava la probabilità di emissione dei fotoni negli urti elettrone-positrone. Erano gli anni dei primi film di James Bond, e a Touschek piaceva giocare con le parole, trovare le coincidenze e l'assurdo anche nella fisica, come aveva fatto con il metodo di Kessler.

Sul fronte delle correzioni radiative portato avanti da Touschek e dai suoi collaboratori in quegli anni fu realizzato un programma di calcoli che permetteva di descrivere l'emissione di un numero indefinito di fotoni soffici in ogni tipo di reazioni, con l'introduzione in particolare del concetto di "stati coerenti" in QED [17] e l'estensione della risommazione a processi dove si producessero risonanze molto strette [18]. Pertanto, anche in questo caso il lavoro teorico di Frascati si muoveva all'unisono con le ricerche più avanzate, permettendo a Frascati di essere in prima fila quando nel 1974 fu scoperta la particella J/Ψ . Infatti per estrarre dai dati le informazioni sulla vita media e massa di questa particella, furono necessarie le tecniche di risommazione sviluppate appunto con Touschek anni prima, che permisero di raggiungere la precisione necessaria per lo studio di una risonanza dalle caratteristiche così inusuali. Quella delle correzioni radiative alla J/Ψ è solo una piccola parte di una storia molto interessante che verrà raccontata in un capitolo a parte.

Non si faceva solo QED, però. ADONE aveva scoperto una abbondante produzione multiadronica, che includeva anche nuove risonanze. Le interazioni forti erano la nuova frontiera per cui ADONE era stato costruito, e nel resto del mondo si erano ormai affermate le idee di scaling, il modello a partoni, i quark e "l'asymptotic freedom". Un problema particolare era quello di trovare un meccanismo capace di descrivere la produzione di nuove particelle estratte dal vuoto quantistico nell'annichilazione fra elettroni e positroni con i risultati asintotici di scaling che sembravano precocemente già presenti alle più alte energie di Adone. Fra queste particelle c'era anche la ρ' , una particella instabile, prodotta ad ADONE nell'annichilazione e^+e^- , simile alla ρ , per la quale il grande fisico giapponese J.J. Sakurai, in visita a Roma in quel periodo, aveva alcuni anni prima già proposto il mecca-

nismo noto come Vector Meson Dominance. La proposta - nota con il nome di Extended Vector Meson Dominance - di Greco, Etim e Albert Bramon, un visitatore da Barcellona, fu la soluzione più adeguata [19,20] al problema descritto sopra, portando alla formulazione della "dualità". I lavori successivi, in particolare le "duality sum rules" [21] in QCD anticiparono di alcuni anni il famoso lavoro russo di Shifman, Vainshtein and Zakharov. L'idea di dualità è tuttora molto usata nella descrizione di molti processi adronici.

C'era dunque a Frascati un folto gruppo che si occupava sia di fisica delle interazioni elettro-positrone che della struttura delle nuove particelle, ma anche di fisica delle macchine acceleratrici. Un altro esempio dell'intercambiabilità presente a Frascati per molti anni fra fisici teorici di particelle e quelli di macchine acceleratrici è Guido Martinelli, inizialmente assunto nella Divisione Macchine dei Laboratori e solo successivamente passato alla Divisione Ricerca.

In un capitolo seguente descriveremo le ricerche avviate successivamente a Frascati dopo la scoperta della J/Ψ .

La scoperta della J/Ψ

La storia delle particelle è indissolubilmente legata alla scoperta del charmonio, avvenuta nel 1974, e a cui Frascati, con gli sperimentali e i teorici, ha dato un importante contributo.

Ci sono molte storie, aneddoti e vicende di grande emozione legate alla scoperta della J/Ψ , non tutte sono state scritte, anche se naturalmente esse fanno parte della tradizione orale dei fisici di Frascati e di Roma. In questo articolo, racconteremo alcune di queste storie. Ma prima, vorremmo ricordare a chi non è fisico di particelle, quale fu l'impatto di questa scoperta, a chi fu dovuta e come ci si arrivò. La scoperta della J/Ψ , fu sufficientemente importante per la fisica della seconda metà del XX secolo, da essere ricompensata con il premio Nobel 1976 ai direttori dei due esperimenti americani che ne rivendicarono il merito e fu anche una delle ragioni per cui fu conferito il Nobel nel 1979 a tre fisici teorici, uno dei quali aveva esplicitamente predetto l'esistenza del quark charm prima della sua scoperta. Uno di noi ricorda Shelly Glashow, uno dei tre, in una Conferenza a Boston nell'aprile 1974, dire ai colleghi "I'll eat my hat if you

don't discover it within a year, but if you discover it, then you will eat your hat".

Due anni dopo, alla stessa conferenza, Glashow faceva distribuire ai partecipanti trecento caramelle di gomma a forma di cappello, avendo vinto ovviamente la scommessa. Citiamo dal Comunicato Stampa del Premio Nobel a Richter e Ting [25]: On November 11, 1974, Richter and Ting met at the Stanford Linear Accelerator Center and found that the two research teams had discovered the same particle. The announcement appeared at once and the scientific publications within a week. A short time after, the discovery was confirmed, first at Frascati, Italy, and then at the Deutsches Elektronen Synchrotron in Hamburg, West Germany.

Per giungere alla scoperta della J/Ψ , cioè la particella che è lo stato fondamentale del charmonio (un positronio fatto da quark e antiquark con charm) furono necessari congrui sforzi per la realizzazione di opportuni acceleratori per la produzione in laboratorio della particella e dei necessari apparati sperimentali per la sua rivelazione. Ciò avvenne in due laboratori diversi. Come riconosciuto da tutti, le prime avvisaglie che ci fosse una particella nuova con massa intorno ai 3 GeV, vennero dall'esperimento di Sam Ting, E598, che si svolgeva a Brookhaven National Laboratory, a Long Island, con l'acceleratore di protoni del laboratorio. Questo esperimento indagava in dettaglio un effetto non completamente chiaro osservato in un precedente esperimento di Leon Lederman, premio Nobel nel 1988 per un'altra scoperta. In parallelo si investigava allo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), dove l'acceleratore SPEAR studiava collisioni elettroni-positroni nel centro di massa a energie fino a 4 GeV, in una regione cinematica dove un precedente esperimento all'acceleratore CEA a Boston, successivo ad Adone, aveva suggerito una produzione adronica con una sezione d'urto più alta di quanto ci si potesse aspettare. Tuttavia, entrambi i gruppi sperimentali che lavoravano all'analisi preliminari dei dati non furono completamente sicuri che non ci fosse qualche effetto sistematico non compreso, fino all'11 novembre 1974 quando Ting volò da Brookhaven a San Francisco, incontrando Burt Richter. Come raccontiamo nel seguito, la notizia della scoperta della particella a vita media molto lunga e con 3.1 GeV di massa giunse quasi immediatamente a Frascati. A Frascati ADONE funzionava già da quattro anni ed

aveva fatto già l'importante scoperta della produzione multiadronica, come descritto in dettaglio in questo stesso numero. Però l'energia della macchina ADONE era di 100 MeV più bassa del necessario per arrivare a produrre la J/Ψ . In due giorni e due notti di enorme entusiasmo e speranza, l'energia di ADONE fu innalzata fino alla soglia necessaria per produrre la J/Ψ e i fisici di Frascati, increduli, videro improvvisamente i rivelatori elettronici quasi impazziti saltare da pochi conteggi al secondo ad alcune migliaia. Non si era mai vista una cosa del genere, ed era chiaro che si era di fronte ad una grande scoperta, a qualcosa che cambiava il mondo delle particelle elementari così come era conosciuto fino ad allora. I fisici di Frascati raccolsero i dati, li elaborarono, e scrissero in pochi giorni il lavoro relativo a questa scoperta [23], che fu dettato per telefono alla redazione di Physical Review Letters a Upton, a Long Island. La data di arrivo dell'articolo di Frascati è il 18 novembre e la lista degli autori contiene un gran numero di errori, proprio perché era stata dettata al telefono. Nell'eccitazione del momento, come è ben noto, il nome di Giorgio Salvini manca: esso compare fra le iniziali di Mario Spinetti, come G.S., proprio perché Salvini stesso abbreviò il suo nome mentre dettava la lista. Altri errori comprendono nomi mancanti e scambi di vocali, come nel caso di Mario Calvetti che diventò Celvetti, e così via (le sviste furono segnalate in un erratum a parte). Rileggendo, dopo tanti anni, l'inizio dell'articolo dei fisici di Frascati, si coglie ancora l'emozione della scoperta, assieme a quello che ancora oggi è un vanto dei fisici di allora, essere stati onesti nel dichiarare di essere arrivati terzi. L'articolo inizia con la frase *"Soon after the news that a particle of 3.1 GeV with a width consistent with zero had been observed at Brookhaven National Laboratory by the Massachusetts Institute of Technology group, it was immediately decided to push ADONE beyond the nominal limit of energy (2x1.5 GeV) to push for this particle. On the following day the information had reached us that this particle had also been observed at SPEAR at the energy of exactly 3.1 GeV with a narrow width, < 1.3 MeV."*

Prima dei ringraziamenti al gruppo macchina di Adone e ai teorici, l'articolo termina con *"We are grateful to Dr. San Lan Wu for providing us with the Massachusetts Institute of Technology results before publication"*. Gli articoli dei due esperimenti americani hanno come data di arrivo il 12 e 13 novembre, rispettivamente quello di Sam Ting e

quello di Richter. L'articolo del MIT fu il primo ad arrivare e certamente l'esperimento del MIT fu il primo ad avere osservato un'anomala produzione di coppie μ o e^+e^- nei dati dello scattering pp a targhetta fissa. In quest'articolo si menziona esplicitamente la possibile origine della particella osservata come dovuta a produzione di charm. Citando dal lavoro si legge: *"The most striking feature of J is the possibility that it may be one of the theoretically suggested charmed particles or a's or Z0's. In order to study the real nature of J, measurements are now under way on the various decay modes, e.g., an $\epsilon\pi\nu$ mode would imply that J is weakly interacting in nature"*. In queste righe si fa riferimento a Glashow (per il suggerimento che si tratti del charm) e alla scoperta di SPEAR con la nota *"After completion of this paper we learnt of a similar result from SPEAR, B. Richter and W. Panosky, private communication"* con il riferimento al lavoro dei fisici di SLAC che veniva subito dopo, nello stesso numero di Physical Review Letters. Infine l'articolo di SLAC inizia con: *"We have observed a very sharp peak in the cross section for $e^+e^- \rightarrow$ hadrons, e^+e^- and possibly for $\mu^+\mu^-$ in the Stanford Linear Accelerator Center"* e continua con una frase che mostra l'emozione di chi scriveva: *"The large mass, large cross - section and narrow width of this structure are entirely unexpected"*. Il riferimento al lavoro del MIT avviene quando si menziona la sezione d'urto al picco e il numero di eventi con la nota a fine lavoro: *"While preparing this manuscript we were informed that the Massachusetts Institute of Technology group etc..."* È interessante notare che mentre i due gruppi americani si riconoscono l'un l'altro, non viene fatta menzione del risultato di Frascati, anche se quasi contemporaneo. Il risultato di Frascati segue quello di SLAC, e viene da chiedersi come infatti vennero a sapere della scoperta i fisici di Frascati. Nel seguito daremo la risposta, ma per quanto riguarda come Frascati ebbe la notizia da Ting, ecco come racconta Ting nella sua Nobel Lecture [26]: *"On 11 November [1974], we telephoned G. Bellettini, the director of Frascati Laboratory, informing him of our results. At Frascati they started a search on 13 November, and called us back on 15 November to tell us excitedly that they had also seen the J signal ..."*.

A distanza di più di trent'anni dalla scoperta della J/Ψ e di quasi cinquanta dalla proposta di costruire il primo anello di accumulazione, AdA, avanzata a Frascati da Touschek, assieme a Carlo Bernardini, Gianfranco Corazza, Giorgio Ghigo e

Giancarlo Sacerdoti, possiamo certamente dire che il ruolo di Frascati avrebbe meritato di essere riconosciuto allo stesso livello di quello dei nostri colleghi americani, non solo perché Frascati riuscì in tre giorni ad osservare la J/Ψ nonostante ADONE non fosse in precedenza mai arrivato all'energia necessaria, ma soprattutto per il ruolo pionieristico che Frascati aveva avuto nella realizzazione di questo tipo di macchine acceleratrici, gli anelli di accumulazione materia-antimateria. Inoltre, l'articolo scientifico in cui si annunciava la scoperta della J/Ψ fu pubblicato nello stesso numero della rivista americana *Physical Review Letters*, assieme ai due articoli degli americani.

Ci si è spesso chiesti perché non fu dato il Nobel anche agli italiani ed una unica risposta è difficile da dare. I protagonisti di questa storia, i fisici di Frascati, molti dei quali sono ora professori in varie università italiane, hanno opinioni diverse, anche perché ne sono troppo coinvolti direttamente. È certamente vero che a Frascati non vi fu un solo gruppo a scoprire la particella e dunque sarebbe stato difficile attribuire il merito ad uno particolare dei fisici sperimentali che parteciparono alla scoperta. Negli Stati Uniti invece, la presenza di una chiara scala gerarchica, con capi di esperimento aggressivi e carismatici come Richter e Ting, rendeva le cose più chiare. È vero che noi italiani arrivammo a scoprire la particella solo dopo che dagli Stati Uniti ci venne comunicato che l'avevano osservata - ne parleremo in seguito - ma Frascati ebbe la capacità tecnica, scientifica e tecnologica di arrivare all'energia necessaria e confermare la scoperta in pochi giorni.

Tuttavia la nostra risposta è che il Nobel sarebbe dovuto andare anche a Bruno Touschek, che aveva per primo fatto la proposta di costruire il primo anello di accumulazione, AdA, a Frascati, nel febbraio 1960, annotando uno schema dei parametri della macchina e le possibilità di fisica sul suo quaderno di appunti, nel giro di un mese. Touschek l'aveva già accennata durante un seminario di Panofsky all'università di Roma alcuni mesi prima (e qui ancora torna la connessione fra Frascati e Stanford). Secondo il racconto di Giancarlo Sacerdoti [4], Touschek aveva ripensato alla possibilità delle collisioni elettroni contro positroni nella primavera del 1945, quando si avviava, spinto dalle SS, al campo di concentramento di Kiel, dove lo destinava la sua origine ebrea da parte di madre. Ma

Touschek, nel 1976, quando fu dato il premio Nobel a Richter e Ting, era già malato ed si era distaccato dal mondo delle particelle elementari, che giudicava fosse spinto dalla megalomania dei costruttori di macchine acceleratrici, e da cui si sentiva estraneo.

Inoltre è ragionevole ammettere che dietro alla concessione del premio Nobel, giochi un ruolo anche la capacità di pressione e l'influenza dell'Università o del Laboratorio dove è fatta una grande scoperta, e negli anni '70 l'Università italiana era sconvolta dai postumi del '68. Basti ricordare che nel 1972 Sidney Drell, il fisico teorico di Stanford di grande valore - di cui si dirà dopo - non poté tenere un seminario di fisica teorica all'Università di Roma perché membro del Jason Committee, comitato di consulenza del Presidente Nixon. Un altro elemento che probabilmente potrebbe aver contribuito fu anche la rilevanza sempre maggiore della partecipazione italiana al CERN, in quegli anni. Un premio a Frascati per la scoperta della J/Ψ avrebbe rinforzato la proposta di costruire a Frascati una macchina più grande e più potente di ADONE, il cosiddetto SuperADONE, portando forse via risorse alla comunità che invece avrebbe voluto contribuire allo sforzo che il CERN si apprestava a fare per costruire il LEP, l'anello a elettroni e positroni lungo 27 Chilometri, l'ultimo epigono di AdA.

La scoperta della J/Ψ a SLAC è stata vissuta in modo molto diretto da uno degli autori (MG) che si è trovato a Stanford all'indomani del giorno che segnò la cosiddetta "November revolution". La sua osservazione a Frascati è stata anche, in parte, legata a questa fortunata coincidenza. In viaggio con destinazione finale Città del Messico per una serie di lezioni, Greco era stato invitato a SLAC da Sid Drell a dare un seminario sulla dualità, alla luce dei recenti lavori sulla fisica e^+e^- a Frascati e della sperimentazione a Stanford con la nuova macchina SPEAR. Egli conosceva personalmente Sid, avendolo invitato in precedenza per un suo anno sabbatico a Roma - Frascati, quando Drell aveva da poco terminato il famoso lavoro sulla produzione di coppie di muoni, detta appunto di Drell-Yan, e durante la sua visita a Roma avevano a lungo parlato della fisica dei "partoni" che egli chiamava "the soul", l'anima dei nucleoni.

Sid aveva anche seguito ed apprezzato lo sviluppo delle idee di dualità, nate in relazione con

la scoperta ad ADONE del ρ' e della produzione multiadronica.

Giunto a Stanford, Greco apprese immediatamente, nell'ascensore che lo portava alla divisione teorica, della recentissima scoperta, e trovò quindi tutti i teorici presenti a SLAC convocati in riunione permanente, presieduta ovviamente da Sid Drell, intorno ad un lungo tavolo ovale. Sid lo informò in dettaglio delle scoperte da parte dei due gruppi sperimentali di S. Ting a Brookhaven a B. Richter a SLAC. Nel frattempo i telefoni squillavano senza interruzione con chiamate da tutto il mondo, c'era tantissima eccitazione, ed egli si rese subito conto che la scoperta era al limite delle possibilità di Adone, e che solo una diretta informazione sulla esatta energia dei fasci avrebbe potuto aiutare i colleghi a Frascati. Questa informazione non avrebbe potuto giungere da Brookhaven perché la risoluzione sperimentale nell'esperimento di Ting non avrebbe permesso di definire con precisione la massa della J/Ψ e quindi l'energia da raggiungere con ADONE a Frascati. Così Greco pregò Sid di permettergli di chiamare i LNF, ed egli molto gentilmente lo accompagnò nell'ufficio riservato al suo lavoro di consulente per il Presidente degli USA - Sid era membro del famoso Jason Project, come si è ricordato sopra - dove Greco chiamò Giorgio Bellettini, direttore dei LNF, dando le esatte informazioni sull'energia necessarie alla rivelazione della J/Ψ , che così fu osservata anche a Frascati. Racconteremo adesso come nacque l'interpretazione che la J/Ψ fosse uno stato legato charm-anticharm- indipendentemente dagli altri lavori teorici successivi alla scoperta. Nei pochi giorni successivi a SLAC, Greco ebbe modo di guardare e discutere in dettaglio i dati con gli amici sperimentali, in particolare Roy Schwitters, futuro direttore di SSC, che gli indicò anche due risultati importanti piuttosto precisi. Primo, la misura del famoso rapporto R, ad energie inferiori alla J/Ψ , $R = 2.4-2.5$, era in perfetto accordo con le predizioni sulla base della ipotesi di dualità relativa alla componente multiadronica standard. Poi, i dati suggerivano una possibile indicazione per l'esistenza di "qualcos'altro", ossia due misure di R a più alta energia (a posteriori sarebbero stati due punti sulla coda radiativa della Ψ') suggerivano immediatamente di fare una "spazzolata" precisa in quella zona.

Qualche giorno dopo, da un giornale di Città del Messico, Greco apprese che anche la Ψ' era stata scoperta confermando le indicazioni preli-

minari, e questo fatto consolidò l'idea che nel frattempo era nata - utilizzando argomenti di dualità sulla base dei dati precisi sulla J/Ψ che aveva portato con sé - che la nuova serie di stati scoperti a SLAC erano in realtà stati legati di charm-anticharm. Il lavoro relativo, scritto insieme a Cesareo Dominguez, fu immediatamente inviato alle Lettere del Nuovo Cimento [22], avendo egli avuto in precedenza difficoltà a pubblicare sul Physical Review i lavori originali sulla dualità. L'orgoglio di aver avuto l'idea giusta (in buona compagnia dei ben più famosi colleghi, come Shelly Glashow e Alvaro de Rujula) non fu purtroppo ripagato nella stessa misura per la poca diffusione della rivista Lettere al Nuovo Cimento nell'ambito della nostra comunità scientifica.

La scoperta della J/Ψ è stata poi, dal punto di vista delle attività teoriche a Frascati, un argomento di ricerca molto interessante, che ha avuto importanti risvolti successivamente anche nella fisica dello Z a LEP/SLC e che si ricollega, come già detto sopra, alle tematiche di risommazione degli effetti soffici in QED sviluppate nei primi anni in collaborazione con Bruno Touschek. Inoltre, è stato un esempio istruttivo anche da un punto di vista sociologico, mettendo in evidenza come talvolta sia possibile pubblicare per molti anni, anche in un campo rigorosamente scientifico su riviste di assoluta serietà, delle analisi errate ma ispirate da famosi guru.

Subito dopo la scoperta, fu subito a noi chiaro a Frascati, sulla base dell'esperienza dei primi calcoli di correzioni radiative ad Adone e le caratteristiche molto peculiari della J/Ψ , in particolare la sua larghezza di decadimento di nemmeno 100 Kev, che una misura precisa delle osservabili sperimentali richiedesse un trattamento molto sofisticato, e a tutti gli ordini in $\alpha(\text{QED})$, degli effetti radiativi, soprattutto nel caso di produzione leptonica nello stato finale. Le varie tecniche di risommazione già utilizzate in passato, in particolare quella cosiddetta "degli stati coerenti", portarono presto ad una trattazione sistematica dei vari effetti nelle reazioni di produzione sia adronica che leptonica, mostrando esplicitamente che l'effetto dominante era legato ad un termine proporzionale a $(\Gamma/M)^\beta$, dove β era il fattore di Bond, che riflette l'azione di cutoff intrinseco sulla energia dei fotoni soffici operato dalla larghezza Γ (inversamente proporzionale alla vita media della nuova risonanza) della J/Ψ . Le nostre formule, che ebbero

subito l'approvazione di Bruno, erano in perfetto accordo con i dati sperimentali di Frascati, e fornivano dei risultati sulle varie larghezze di decadimento, parziali e totale della J/Ψ , in disaccordo del 15-20% con i risultati analoghi ottenuti a SLAC analizzando i dati sperimentali, ovviamente più precisi, con la formula ottenuta da D.R. Yennie pubblicata sul *Physical Review Letters*. Tale formula differiva dalle nostre poiché conteneva una simile ma errata dipendenza dalla larghezza σ della distribuzione gaussiana dei fasci nella macchina.

Inutilmente cercammo di pubblicare i nostri risultati su *Physical Review Letters* o *Physical Review*. Ci si imbatteva sempre in qualche referee, talvolta anche molto conosciuto, che sosteneva l'impossibilità di pubblicare su un argomento di QED un lavoro in contrasto con il risultato ottenuto da uno dei famosi artefici della risommazione, anche se noi fornivamo tutti gli argomenti matematici e di fisica utili a capire immediatamente l'origine della differenza tra i risultati (una banale inversione di integrali non permessa). Pubblicammo infine in Europa [24]. Ma tutti i dati di SLAC, anche successivi alla J/Ψ , relativi alle varie eccitazioni radiali e alle osservabili connesse con il charm, furono sempre analizzati con dei codici basati sulle formule errate. Fu soltanto nel 1987, in seguito al successivo lavoro che generalizzava il nostro approccio alla fisica dello Z a LEP, che Burt Richter fu da noi convinto a formare un nuovo gruppo di studio al fine di analizzare le aspettative per SLC in base ai nostri risultati. Tale gruppo, coordinato da Persis Drell, rianalizzò anche gli antichi dati di SLAC relativi a J/Ψ , Ψ' , etc. con una finale modifica dei risultati precedenti pubblicati sul Particle Data Group di circa il 15-20%, in accordo con Frascati per ciò che riguardava la J/Ψ . Il nostro lavoro di correzioni radiative a LEP/SLC è stato alla base di tutte le analisi dei dati prodotti dagli esperimenti alle due macchine al CERN e a SLAC.

Bruno Touschek e il contributo alla risommazione in QED e QCD

Touschek è ricordato soprattutto per il suo contributo alla fisica degli acceleratori, ma, come abbiamo cercato di illustrare nei capitoli precedenti, la sua influenza sulla fisica teorica non è forse da meno. Questa influenza infatti va

oltre il suo ruolo di mentore e guida del gruppo di giovani teorici che abbiamo descritto a lungo nel primo capitolo. Il riferimento qui è al suo contributo, sia individuale che tramite i suoi collaboratori, al problema, a lungo di grande attualità, della risommazione di quanti di massa nulla, emessi nelle interazioni fra particelle cariche. Questo è un problema risolvibile esattamente in QED, ed ancora ampiamente discusso in QCD.

Quando Touschek propose la formulazione covariante del teorema di Bloch e Nordsieck, che mostrava come la sezione d'urto fra particelle cariche fosse finita solo quando veniva emesso un numero infinito di fotoni, il problema era già stato esaminato nell'ambito della seconda quantizzazione da Schwinger che aveva mostrato la cancellazione fra fotoni reali e virtuali di bassissima energia al primo ordine nella costante di struttura fine $\alpha(\text{QED})$. Schwinger aveva anche formulato l'ipotesi dell'esponentiazione del termine residuo della cancellazione, che dipendeva logicamente dalla risoluzione sperimentale.

L'esponentiazione e la cancellazione a tutti gli ordini della divergenza furono poi l'oggetto di molti lavori, culminati nel lavoro fondamentale di Yennie, Frautschi e Suura. Quale fu dunque l'apporto o la novità introdotta da Touschek nel problema? Essenzialmente due furono le intuizioni fondamentali di Touschek: una è di aver capito che il cut-off, che divide la radiazione non osservabile da quella misurata, è una quantità dal profondo significato fisico, e quindi può dipendere dal processo osservato: nel caso delle risonanze strette, il cutoff è fornito dalla larghezza della risonanza, se questa è più piccola della risoluzione sperimentale. Fu così, come abbiamo spiegato, che quando arrivò la J/Ψ , il gruppo di Frascati sapeva come estrarre correttamente la larghezza della risonanza dai dati degli esperimenti. L'altro contributo, spesso dimenticato, è nel trattamento della risommazione per quanto riguarda correzioni radiative nel momento spaziale. Questo problema preoccupava Touschek non poco, in parte perché era stato ignorato nelle trattazioni precedenti. Touschek passò molti mesi a cercare di trovare una forma chiusa (risommata) per queste correzioni, senza riuscirci - contrariamente al caso della variabile energia non esiste una formula semplice precisa per questo effetto - e finalmente utilizzò l'espressione al primo ordine in $\alpha(\text{QED})$, che si mostrava suffi-

ciente per le applicazioni sperimentali. Ma a Frascati, alcuni di noi continuarono a preoccuparsi di questo aspetto del problema, anche alla luce delle interazioni forti, per le quali le distribuzioni in momento trasverso erano l'oggetto di moltissimo interesse e dove la costante di accoppiamento non era certo piccola. E quando la QCD si affermava come la teoria delle interazioni forti e molti calcoli perturbativi ne stabilivano il potere predittivo, da Frascati apparvero i lavori di risommazione, discussi in seguito, alcuni dei quali si ispiravano direttamente a quella preoccupazione di Touschek sulla distribuzione spaziale della radiazione emessa.

Non solo QED

L'elettrodinamica e i processi misurabili con ADONE sono stati solo alcuni dei grandi temi di fisica sviluppati a Frascati. Infatti, altri temi principali, a partire dal 1970, hanno riguardato la proposta della Supergravità e lavori di Supersimmetria, molti sviluppi della Cromodinamica Quantistica, una stretta collaborazione con gli sperimentali nella preparazione dell'esperimento MACRO presso i Laboratori del Gran Sasso, studi di fisica nucleare, dello stato solido, studi di tecniche computazionali applicate alle interazioni fra le particelle elementari, studi di astrofisica e cosmologia, tuttora attivi a Frascati.

Alcuni di questi sviluppi ebbero l'avvio con l'arrivo di un gruppo di giovani teorici iniziato nei primi anni '70 con Sergio Ferrara, Aurelio Grillo e Giorgio Parisi e proseguito poi con Fabrizio Palumbo e Calogero Natoli. Con loro le ricerche teoriche svolte a Frascati si ampliarono oltre l'orizzonte della fisica dell' e^+e^- , affermando una volta di più Frascati come centro di primissimo livello per la fisica teorica oltre che di quella sperimentale. Parisi e Ferrara, per i loro contributi, in parte sviluppati a Frascati, hanno ricevuto prestigiosi premi internazionali, tra cui la Medaglia Dirac dell'International Center for Theoretical Physics di Trieste, il Premio Heine- man dell'American Physical Society e il Premio Fermi della Società Italiana di Fisica.

Il primo ad arrivare fu Aurelio Grillo, che aveva cominciato a frequentare i Laboratori nel 1967 dopo aver preso contatto con Touschek per la tesi di laurea. Laureatosi nell'estate del 1968, Grillo arrivò a Frascati con la solita borsa di studio e all'inizio del 1969 cominciò a lavorare con

Ferrara, continuando successivamente con Gatto con cui portarono avanti fino al 1973 una collaborazione molto intensa, che coinvolse anche Giorgio Parisi. Grillo si spostò poi gradualmente su problemi astrofisici/cosmologici, inizialmente in collaborazione con E. Etim, iniziando a interagire con fisici dell'esperimento NUSEX, realizzato sotto il Monte Bianco per studiare il possibile decadimento del protone e segnali di possibili supernovae. Negli anni ottanta, al tempo della stesura dei progetti scientifici per il nascente Laboratorio del Gran Sasso (LNGS), Grillo entrò nel progetto per la costruzione di MACRO, il rivelatore costruito per rivelare Monopoli e studiare i Raggi Cosmici. Grillo partecipò attivamente alla costruzione, alla presa dati e all'analisi, fino a quando MACRO fu decommissionato [27]. La collaborazione con MACRO produsse l'effetto di spostare il baricentro degli interessi di fisica di Grillo verso i LNGS, dove Grillo si trasferì definitivamente nel 1994. Poco dopo, si trasferì a LNGS un altro membro del gruppo teorico di Frascati, Giuseppe Di Carlo, che si era laureato con lui su fisica del reticolo, e con il quale Grillo aveva iniziato, ancora a Frascati, una lunga e fruttuosa collaborazione su questi temi.

Giorgio Parisi entrò a Frascati come borsista nel 1971, dopo la tesi fatta insieme a Massimo Testa sotto la supervisione di Nicola Cabibbo. Era quello, come dice Parisi stesso, un momento d'oro per Frascati, perché si stavano facendo esperimenti ad una energia che nessuna macchina aveva mai raggiunto [2]. E gli esperimenti erano molto significativi, trattavano della produzione di particelle nell'annichilazione elettrone-positrone, e si discuteva anche delle tematiche di SLAC dove invece si studiava lo scattering elettrone-protone a grande momento trasferito. Erano tutte problematiche collegate alla teoria dei campi. A Frascati Parisi collaborò a diversi lavori con Ferrara, Grillo e Gatto [28]. Gatto era tornato a Roma e aveva spinto Grillo e Ferrara a lavorare sul gruppo conforme. Parisi si unì a loro [29], acquisendo un interesse e una conoscenza delle tecniche delle trasformazioni di scala [30,31] che più tardi lo avrebbero portato a formulare uno degli approcci fenomenologici più importanti nella descrizione dello scattering fra particelle ad alta energia, le cosiddette equazioni di evoluzione [32], e ad ottenere dei limiti sulle masse delle particelle fondamentali [33]. Contemporaneamente Parisi approfondiva lo studio della meccanica statistica, e dei temi legati alle

simulazioni con potenti calcolatori della struttura di teorie quali la QED e la QCD. In questo campo Parisi avrebbe dato contributi fondamentali, negli ultimi anni della sua permanenza a Frascati [34]. Agli sviluppi in questo campo, quando era ancora a Frascati, aveva contribuito anche Guido Martinelli [35], passato poi all'Università di Roma negli anni ottanta. L'influenza di queste ricerche sul gruppo teorico di Frascati lasciò un segno portando Aurelio Grillo, prima del passaggio ai Laboratori del Gran Sasso, ad iniziare un programma di studi [36] in questa nuova direzione in cui stava andando la fisica teorica, programma che comprese anche lo sviluppo locale di transputers, calcolatori dedicati e costruiti in loco.

Sergio Ferrara si era laureato a Roma nel 1968, con Marco Toller e una tesi teorica su un metodo sviluppato da Toller per analizzare le interazioni forti. Approdato a Frascati con una borsa di studio dopo la laurea, Ferrara entrò in contatto con Gatto, che all'epoca era a Ginevra. Al ritorno di Gatto a Roma (per un paio d'anni) si iniziò la collaborazione con Giorgio Parisi e Aurelio Grillo, sull'invarianza conforme. Questa collaborazione terminò nel 1973 quando Ferrara si recò a CERN, dove iniziò ad occuparsi di supersimmetria, per tornare poi a Frascati a vari intervalli fino al 1980, anno in cui si trasferì definitivamente al CERN. Fra i risultati di fisica teorica sviluppati a Frascati sono le sue ricerche in supergravità e i lavori in supersimmetria. Già dal 1977 le congetture fatte da Ferrara nel campo della supergravità venivano esplicitamente menzionate in molte riviste scientifiche di grande impatto, come *Physics Today* e *Scientific American*. Sergio Ferrara era ancora affiliato a Frascati quando scrisse uno dei suoi lavori più importanti, per il quale è stato insignito recentemente di un premio prestigioso dalla società Americana di Fisica [37]. Dal 1980 in poi Ferrara fu al CERN dove proseguì le sue ricerche con lavori di grande risonanza, alcuni in collaborazione con Bruno Zumino [38], un altro grande fisico teorico romano, che si era laureato con Bruno Ferretti nel 1945 e che presto, nei primi anni Cinquanta, era andato all'estero.

A Frascati Ferrara aveva iniziato anche studi sulle masse delle particelle in teorie supersimmetriche con importanti conseguenze per ogni estensione supersimmetrica del Modello Standard. Questo lavoro [39] fu fatto in collaborazione con Fabrizio Palumbo, un teorico arrivato a Frascati nel 1974, dal Laboratorio del CNEN alla

Casaccia, vicino a Bracciano. Palumbo si era laureato con Rosario Liotta, che gli aveva proposto una tesi dal titolo molto attraente: "Una nuova formulazione della teoria dei campi", che Palumbo aveva scelto in alternativa a quella propostagli da Tauschek su un argomento di correzioni radiative. Palumbo era stato molto favorevolmente impressionato da Frascati, che aveva già visitato da studente e tuttavia, pur avendo vinto una borsa di studio presso i Laboratori, vi rinunciò dopo qualche mese optando per il Laboratorio della Casaccia, dove ebbe un posto permanente, e iniziò a occuparsi di fisica nucleare. In quegli anni poi si recò all'estero in vari periodi, fra cui al JINR di Dubna e un anno al MIT. A Dubna iniziò una collaborazione con Francesco Calogero che portò a ipotizzare una fase della materia nucleare con cristallizzazione unidimensionale e ordine di spin-isospin. Le ricerche successive portarono a specifiche predizioni relative ai nuclei deformati leggeri compatibili con i risultati sperimentali. Nel 1974 Palumbo si trasferì finalmente ai LNF, che lasciò solo per alcuni mesi (nel 1987, quando divenne professore ordinario all'università di Bari). Tra gli argomenti studiati nel seguito compare la predizione di una eccitazione nucleare collettiva, il cosiddetto "Modo a Forbice" (Scissors mode) [40] che consiste in una oscillazione rotazionale dei protoni rispetto ai neutroni in un nucleo deformato. Palumbo partecipò anche al lavoro sperimentale condotto da un gruppo tedesco, che per questa scoperta ricevette vari riconoscimenti e stimolò la predizione di analoghe eccitazioni in molti sistemi [41, 42]. Assieme a Palumbo, arrivò a Frascati nel 1974 Calogero Natoli, ampliando così ulteriormente gli interessi del gruppo teorico. Anche Natoli proveniva dalla Casaccia, si era laureato anch'egli con Liotta, scegliendo poi la fisica dello stato condensato come linea di ricerca. Arrivato a Frascati, introdusse nel gruppo teorico la linea di ricerca legata alla struttura della materia [43], che sarebbe stata importante per il programma di luce di sincrotrone sviluppato a Frascati di lì a non molto e sul quale iniziò una lunga collaborazione con Maurizio Benfatto, arrivato a Frascati nel 1984. La parte del gruppo teorico che si interessa di struttura della materia ha sempre lavorato nel campo della Luce di Sincrotrone. In particolare ha sviluppato delle metodologie teoriche per l'interpretazione dei dati sperimentali di assorbimento di raggi X da stati profondi e di urto elastico di

raggi X nella regione anomala. Per quello che riguarda la prima tecnica si è mostrato come essa contenga importanti informazioni strutturali dalle quali si è in grado di ricostruire la geometria tridimensionale intorno al sito atomico che compie il processo di fotoassorbimento. Tale lavoro è alla base di tutti i programmi attualmente esistenti che vengono oggi utilizzati per l'analisi dei dati sperimentali. Per quello che riguarda la seconda tematica, il contributo del gruppo di Frascati è stato quello di formulare un approccio teorico basato sulla teoria della diffusione multipla con il quale si è in grado di interpretare i dati sperimentali e separare in essi le informazioni strutturali da quelle elettroniche [44].

La Cromodinamica Quantistica

Nel 1973 era nata la QCD, la teoria delle interazioni forti, che avrebbe permesso di interpretare e predire lo scattering fra adroni ad altissime energie ed indicato la strada per unificare le tre forze principali fra le particelle. Giorgio Parisi era ancora a Frascati quando fu scritta la prima versione del lavoro sulle equazioni di evoluzione che descrivono il comportamento dei quarks e dei gluoni in funzione del momento trasferito. Il lavoro presentato a Moriond nel 1976, portò alla formulazione delle equazioni di Altarelli e Parisi con un lavoro di grande impatto e risonanza, scritto l'anno successivo, durante una comune permanenza in Francia. I contributi allo sviluppo dei calcoli e delle previsioni della Cromodinamica Quantistica fatti dai membri del gruppo di Frascati si succedettero rapidamente [45, 46, 47]. Il gruppo di giovani teorici di talento, che si trovarono in quel periodo a Frascati,



Fig. 3

Da sinistra: Mario Greco, Yogi Srivastava e Guido Altarelli nel 1979 all'Accademia dei Lincei, Roma.

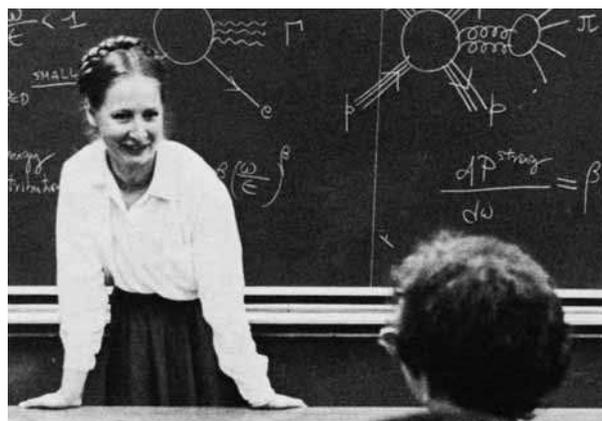


Fig. 4

Giulia Pancheri a Boston nel 1979.

insieme a vari collaboratori e visitatori, come Yogendra Srivastava e Giulia Pancheri da Boston (G.P. si era trasferita negli Stati Uniti nel 1968), Giuseppe Curci da Pisa, Roberto Petronzio da Roma, portò Frascati a eccellere nelle ricerche sulla QCD e produsse lavori fondamentali per la fenomenologia dei processi delle interazioni forti. Questo incluse sia il calcolo dettagliato dei processi di QCD al primo ordine perturbativo, sia la risommazione degli effetti perturbativi a tutti gli ordini, introducendo in QCD concetti e tecniche simili a quelli sviluppati precedentemente in QED. Di particolare interesse i lavori sui cosiddetti "K-factors", la fisica dei jet, le distribuzioni nel momento trasverso delle coppie di Drell-Yan e poi dei bosoni W e Z scoperti successivamente al Cern nel 1984. Infine, con una collaborazione con Pierre Chiappetta a Marseille e altri giovani studenti, fu portato a termine il calcolo esatto delle correzioni a 1-loop di tutti i processi partonici osservabili nei collider adronici [48, 49, 50, 51]. Molti di questi lavori sono tuttora alla base delle predizioni teoriche relative alla sperimentazione al Tevatron e LHC. A commento delle attività di ricerca svolte a Frascati in QED e QCD, ma non solo, dalla metà degli anni '60 fino a circa la metà degli anni '80, non si può non mettere in evidenza un parallelismo di interessi, tematiche e tecniche di approccio tra i vari risultati ottenuti a Frascati ed analoghi contributi sviluppati indipendentemente dalla scuola russa, includendo naturalmente Vladimir Gribov, Lev Lipatov, Victor Fadin a St. Petersburg e Novosibirsk e altri loro colleghi e collaboratori a Mosca. In un momento storico in cui le comunicazioni tra le comunità scientifiche ad est ed ovest non erano certo facili, come oggi.

La fisica del flavour a Frascati

Frascati ha avuto un ruolo assai importante nella fisica dei sapori, cioè nello studio di quelle particelle elementari caratterizzate da un numero quantico, il sapore, detto "flavour" in inglese.

La storia della fisica dei sapori a Frascati inizia con la scoperta della J/Ψ che, nel 1974, come abbiamo già ricordato, portò a quattro i tipi di quarks allora conosciuti, distinti fra loro dal cosiddetto flavour. I quarks che costituiscono il nucleone sono di due sapori diversi, di tipo up e down; nei mesoni K invece compare il terzo, lo strange, mentre il charm è presente nella J/Ψ . Altri due sapori sono stati poi scoperti, il quark con beauty, detto anche bottom, e il quark top, entrambi a FermiLab. Dopo la scoperta della J/Ψ la comunità dei fisici delle particelle, e in particolare i teorici, si convinsero presto dell'importanza di realizzare a Frascati un nuovo progetto, il SuperAdone, ad energie più elevate, che avrebbe svelato altri scenari: sicuramente la scoperta del quark bottom sarebbe stato uno di quelli. Tuttavia il periodo critico (1975-'76), sia economicamente che politicamente, e la scissione dei Laboratori Nazionali in due parti, di competenza rispettivamente dell'INFN e dell'ENEA, non permisero la realizzazione del progetto. Solo nel 1990, con il progetto DAΦNE, la fisica del flavour torna a Frascati, dopo un lungo periodo di interruzione, dovuto alla trasformazione di ADONE in macchina per la luce di sincrotrone, con una brevissima parentesi come collisionatore di elettroni e positroni per l'esperimento FENICE. Infatti, nella seconda parte degli anni ottanta a Frascati, alla ricerca di un nuovo progetto che mantenesse le competenze di conoscenza sviluppate nei laboratori in tanti anni, e fornisse un futuro di fisica in Italia alla nuova generazione di ricercatori, un gruppo di teorici e sperimentali, sotto la leadership di Mario Greco, aveva iniziato a studiare [52] la possibilità di una nuova macchina ad elettroni e positroni. Essa avrebbe utilizzato le nuove tecniche di accelerazione e foceggiamento delle particelle che, nelle promesse di Mario Bassetti, coordinatore degli studi teorici di macchina, avrebbero assicurato collisioni con altissimo numero di eventi con particelle dotate di stranezza (quark strange). In questo quadro con la nuova "Φ-factory" a Frascati, come altrove con le "Beauty factories" - se ne sarebbero poi realizzate due, una a SLAC e

una in Giappone – si sarebbero potuti studiare fenomeni rari quali la non-conservazione della simmetria sotto trasformazioni di Carica e Parità (CP) alla base della attuale asimmetria di materia-antimateria nell'universo. Fu Nicola Cabibbo, diventato Presidente dell'INFN, a ricevere la proposta della costruzione di DAΦNE. Lo scopo di DAΦNE è quindi quello di studiare con grande precisione la violazione della simmetria di CP, tramite misure dei processi di decadimento del mesone Φ in mesoni K. Con la Φ-factory e l'altissimo numero di mesoni K producibili con essa, si dava così l'avvio a un grande progetto di fisica dei sapori centrato a Frascati. Per avere il più vasto panorama possibile della fisica che si sarebbe potuto studiare a DAΦNE, Cabibbo chiese ad alcuni dei migliori fisici teorici italiani di preparare un breve rapporto sulle prospettive di fisica a DAΦNE al di là della violazione di CP. Questo gruppo, in una relazione al Presidente del 1990, individuò molti temi che meritavano approfondimento. Il progetto fu dunque approvato dal consiglio Direttivo dell'INFN e Frascati ripartì a fare fisica delle particelle con una macchina di punta e un progetto di fisica da realizzare in loco, nei Laboratori. Era chiara, come già nel passato, la necessità di avere un supporto teorico e fu così formato, sotto la guida di Luciano Maiani, un gruppo teorico internazionale con il mandato di preparare un Manuale, un Handbook, dove i fisici sperimentali potessero trovare tutte le informazioni utili alla sperimentazione a DAΦNE. A questo sforzo [53] contribuirono molti dei migliori fisici teorici italiani, fra loro Roberto Petronzio da Roma, Nello Paver da Trieste, e alcuni del gruppo storico dei fisici delle interazioni $e+e-$, come Mario Greco, ora trasferitosi all'Università e Alberto Bramon. Dal gruppo teorico di Frascati parteciparono Giulia Pancheri e Stefano Bellucci [54]. Si cercarono le competenze necessarie in Europa e in America e si iniziò la formazione di un network europeo coordinato da Frascati che per 14 anni si dedicherà alla fisica di DAΦNE, fino ad approdare nel 2006 a un progetto teorico di studio della fisica del flavour a più ampio respiro.

Il fatto che si stesse per costruire una fabbrica di K a Frascati è stata una delle motivazioni principali dell'arrivo di una nuova attività di ricerca sulla fisica del sapore, che si è radicata decisamente con l'arrivo di Gino Isidori, laureatosi con Luciano Maiani, con il quale ha portato anche a termine il dottorato di ricerca.

Attualmente la linea di ricerca sul flavour si muove su due linee principali, la ricerca di nuova fisica attraverso i processi rari di decadimento [55], dei mesoni K in particolare, e una migliore comprensione della teoria chirale come limite del modello standard a bassa energia. Come nel passato per ADONE, l'impatto delle ricerche è spesso andato al di là degli interessi specifici degli esperimenti a DAFNE, e anche al di là della fisica dei K. Molte delle predizioni effettuate sui decadimenti dei K alla fine degli anni '90 sono state verificate con successo dagli esperimenti NA48 e KTeV nel 2000-'04, aprendo la strada ad una nuova generazione di esperimenti in questo campo che verranno fatti al CERN (con partecipazione di diversi fisici LNF) e in Giappone, e a ripercussioni anche nella fisica del B, il mesone costituito da quarks del tipo "beauty".

Il gruppo teorico di Frascati negli anni 2010 sarà molto diverso. Molti dei protagonisti che abbiamo descritto sono ora all'Università, dove

hanno portato avanti nuovi progetti e sviluppato ulteriormente le ricerche iniziate a Frascati, con risultati spesso di grande risonanza, che meritano una storia parte, non limitata a Frascati, come questa attuale.

Quelli di noi che invece hanno continuato a Frascati le loro attività, sono diventati Associati Senior, lasciando la via ai giovani, Stefano Bellucci, Maurizio Benfatto, Gino Isidori, Maria Paola Lombardo, Enrico Nardi. Sarà loro responsabilità scrivere la storia delle prossime scoperte.

Ringraziamenti

Uno degli autori, G.P., ringrazia Luisa Bonolis per diverse illuminanti conversazioni e collaborazione su alcuni aspetti storici e per avere messo a nostra disposizione parte del materiale fotografico. Ringraziamo anche Claudio Federici e Luigina Invidia dei Laboratori INFN di Frascati per contributi relativi all'archivio storico.

GIULIA PANCHERI

Giulia Pancheri si è laureata presso l'Università di Roma nel febbraio 1966 con il prof. Benedetto de Tollis con una tesi teorica in Elettrodinamica Quantistica. Entrata successivamente a far parte del gruppo teorico di Frascati guidato dal prof. Bruno Touschek, nel novembre 1967 si trasferì a Boston, dove è rimasta fino al 1982, insegnando presso la Northeastern University, dopo un periodo di ricerche presso il Radcliffe Institute for Independent Studies dell'Università di Harvard. Tornata in Italia nel 1982 come dipendente INFN, è stata professore associato presso l'Università di Palermo dal 1989 al 1991 e poi Dirigente di Ricerca dell'INFN presso i Laboratori Nazionali di Frascati fino al febbraio 2008. Durante questo ultimo periodo, è stata coordinatore europeo di tre networks di ricerca finanziati dalla Unione Europea sulla fisica di DAPHNE, ha iniziato e coordinato la Frascati Spring School "Bruno Touschek", che si svolge ogni anno presso i Laboratori Nazionali di Frascati, è stata presidente del Comitato Nazionale per le Pari opportunità dell'INFN, ha collaborato a molti progetti di ricerca e ad articoli divulgativi sulla figura di Bruno Touschek. Ha collaborato alla stesura del libro "Via del Sincrotrone Km. 12" di Vincenzo Valente, pubblicato nel 2007 sulla storia dei Laboratori Nazionali di Frascati. Autrice di più di 200 pubblicazioni scientifiche, è attualmente Associato Senior dell'INFN presso i Laboratori Nazionali di Frascati, dove si occupa di modelli fenomenologici per le interazioni fra particelle di altissima energia, con tecniche di Cromodinamica Quantistica.

Contatti

Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN
Tel. 06-94032885

Via Enrico Fermi, 40

Frascati, I00044
Email pancheri@lnf.infn.it

MARIO GRECO

Mario Greco si è laureato presso l'Università di Roma nel 1964 con Benedetto de Tollis. Dopo un periodo di borse di studio, nel luglio 1966 è entrato a far parte del Gruppo Teorico dei Laboratori Nazionali di Frascati, allora guidato da Bruno Touschek, dove ha poi svolto prevalentemente la sua attività di ricerca fino al 1990. È stato in visita per vari periodi a SLAC (Stanford), CERN (Ginevra), DESY (Amburgo), e Marsiglia. È stato Direttore della Div. Ricerca dei LNF dal 1983 al 1989. Passato all'Università nel 1990 come ordinario di Fisica Teorica è stato a Pavia (1990-93), L'Aquila (1993-94) e Roma Tre (dal 1994) dove è attualmente Dir. della Sezione INFN Roma Tre.

È stato il fondatore nel 1987 delle *Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste*, che si tengono annualmente a La Thuile. È autore di più di 200 pubblicazioni, principalmente nella fenomenologia del Modello Standard.

Contatti

Università Roma Tre, Dip.to di Fisica
Tel. 06 5733 7041

Email: mario.greco@roma3.infn.it

Bibliografia

- [1] E. Amaldi, The Bruno Touschek Legacy, CERN 81-19, 23, Dicembre 1981; L'eredità di Bruno Touschek, Quaderni del Nuovo Cimento, SIF, Vol. V, 1982.
- [2] Fisici italiani del tempo presente, curato da L. Bonolis e M.G. Melchiorri, Marsilio Editori, 2003.
- [3] V. Valente, Strada del Sincrotrone Km 12, INFN 2007, ISBN 978-88-88610-15-3.
- [4] Bruno Touschek Memorial lectures 1987, Frascati Physics series Vol. XXXIII, 2005. Eds. M. Greco e G. Pancheri.
- [5] Carlo Bernardini, Fisica Vissuta, Codice edizioni, Torino 2006.
- [6] The Infancy of particle accelerators: Life and work of Rolf Wideroe, P. Waloschek, (ed.), R. Wideroe. DESY-94-039, 1994. Braunschweig, Germany: Vieweg (1994).
- [7] C. Bernardini, G.F. Corazza, G. Ghigo and B. Touschek, The Frascati Storage Ring, Nuovo Cimento 18 (1960) 1293.
- [8] N. Cabibbo e R. Gatto, Theoretical discussion of possible experiments with electron-positron colliding beams, Nuovo Cimento 20 (1961) 185; N. Cabibbo e R. Gatto, Electron Positron Colliding Beam Experiments, Phys.Rev. 124 (1961) 1577.
- [9] N. Cabibbo and R. Gatto, Consequences of unitary symmetry for weak and electromagnetic transitions, Nuovo Cimento 21 (1961) 872.
- [10] N. Cabibbo, G. Da Prato, G. De Franceschi, U. Mosco, New method for producing and analyzing linearly polarized gamma-ray beams, Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 270.
- [11] A. Zichichi, S. Berman, N. Cabibbo, R. Gatto, Proton-Antiproton annihilation into electrons, muons and vector bosons, Nuovo Cimento 24 (1962) 170.
- [12] F. Amman, C. Bernardini, R. Gatto G. Ghigo e B. Touschek, Anello di Accumulazione per elettroni e positroni (ADONE), Frascati, Nota Interna n. 68, 27 gennaio 1961.
- [13] G. De Franceschi e L. Maiani, Introduction to group theory and to unitary symmetry models, Fortschritte der Physik, 13 (1965) 279.
- [14] G. Altarelli e F. Buccella, Single photon emission in high energy e^+e^- collisions, Nuovo Cimento 34 (1964) 1337.
- [15] P. Di Vecchia e M. Greco, Double Photon Emission in e^+e^- Collisions, Nuovo Cimento 50 (1967) 319.
- [16] E. Etim, G. Pancheri e B. Touschek, Infrared Radiative Corrections for electron-positron experiments, Nuovo Cimento 51B (1967) 276.
- [17] M. Greco e G. Rossi, A note on the infrared divergence, Nuovo Cimento 50 A (1967) 168.
- [18] G. Pancheri, Infra-red Radiative Corrections for Resonant Processes, Il Nuovo Cimento 60A (1969) 321.
- [19] A. Bramon, E. Etim e M. Greco, A vector meson dominance approach to scale invariance, Phys.Lett. B41 (1972) 609.
- [20] A. Bramon e M. Greco, The reaction $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ and the ρ' -meson, Lett.Nuovo Cim. 352 (1972) 693.

- [21] E. Etim e M. Greco, Duality sum rules in $e^+ e^-$ annihilation from canonical trace anomalies, *Lett. Nuovo Cim.* 16 (1975) 91.
- [22] C.A. Dominguez e M. Greco, Charm, EVMD and narrow resonances in $e^+ e^-$ annihilation, *Nuovo Cim. Lett.* 12 (1975) 439.
- [23] C. Bacci et al., Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of a New 3.1-GeV Particle Produced in $e^+ e^-$ Annihilation, *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1408, Erratum-ibid. 33 (1974) 1649.
- [24] M. Greco, G. Pancheri-Srivastava e Y. Srivastava, Radiative corrections for colliding beam resonances, *Nucl. Phys.* B101 (1975) 234.
- [25] http://nobelprize.org/nobel/_prizes/physics/laureates/1976/press.html
- [26] http://nobelprize.org/nobel/_prizes/physics/laureates/1976/ting-lecture.pdf
- [27] A. Grillo con la Collaborazione MACRO (S.P. Ahlen et al.), First supermodule of the MACRO detector at Gran Sasso, *Nucl. Instrum. Meth.* A324 (1993) 337.
- [28] S. Ferrara, A.F. Grillo, G. Parisi e R. Gatto, The shadow operator formalism for conformal algebra, vacuum expectation values and operator products, *Lett. Nuovo Cim.* 4 (1972) 115; Canonical scaling and conformal invariance, *Phys. Lett.* B38 (1972) 333.
- [29] S. Ferrara, A.F. Grillo e G. Parisi, Possible tests of scale invariance in very high-energy $e^+ e^-$ collisions, *Phys. Lett.* B45 (1973) 63.
- [30] G. Parisi, Bjorken scaling and the parton model, *Phys. Lett.* B42 (1972) 114.
- [31] G. Parisi, Experimental limits on the values of anomalous dimensions, *Phys. Lett.* B43 (1973) 207.
- [32] G. Parisi, An introduction to scaling violations, LNF-76 / 025(P), Int. Meeting on Neutrino Physics, Flaine, France, Mar 6-12, 1976. Published in *Moriond Conf.* 1976:0083 (QCD161:R34:1976:V.2).
- [33] N. Cabibbo, L. Maiani, R. Petronzio e G. Parisi, Bounds on the fermions and Higgs boson masses in Grand Unified Theories, *Nucl. Phys.* B158 (1979) 295.
- [34] H. Hamber e G. Parisi, Numerical estimates of hadronic masses in a pure SU(3) Gauge Theory, *Phys. Rev. Lett.* 47 (1981) 1792.
- [35] F. Fucito, G. Martinelli, C. Omero, G. Parisi, R. Petronzio e F. Rapuano, Hadron spectroscopy in Lattice QCD, *Nucl. Phys.* B210 (1982) 407.
- [36] V. Azcoiti, A. Cruz, G. Di Carlo, A.F. Grillo e A. Vladikas, Simulating lattice fermions by microcanonically averaging the nonlocal dependence of the fermionic action, *Phys. Rev.* D43 (1991) 3487.
- [37] Daniel Z. Freedman, P. van Nieuwenhuizen e S. Ferrara, Local Supersymmetry And Supergravity, *Relazione su invito alla Conferenza della American Physical Society, Brookhaven National Lab., Upton, N.Y., Oct 6-8, 1976. Pubblicato su DPF Conf.* 1976:E1 (QCD161:A6:1976) e in *Tbilisi Conf.* 1976:0T34 (QCD161:H51:1976:V. 2)
- [38] S. Ferrara, J. Scherk e B. Zumino, Supergravity and local extended supersymmetry, *Phys. Lett.* B66 (1977) 35.
- [39] S. Ferrara, F. Palumbo e L. Girardello, A general mass formula in broken supersymmetry, *Phys. Rev.* D20 (1979) 403.
- [40] N. Lo Iudice e F. Palumbo, New isovector collective modes in deformed nuclei, *Phys. Rev. Lett.* 41 (1978) 1532.
- [41] D. Bohle, A. Richter, W. Steffen, A.E.L. Dieperink, O. Scholten, N. Lo Iudice e F. Palumbo, New magnetic dipole excitation mode studied in the heavy deformed nucleus Gd-156 by inelastic scattering, *Phys. Lett.* B 137 (1984) 27.

- [42] C. Rangacharyulu, E.J. Ansaldo, D. Stockhausen, D. Bender, S. Muller, A. Richter, N. LoIudice e F. Palumbo, Search for isovector magnetic quadrupole strength and spin-isospin correlations in NE-20, Phys. Rev. C 31(1985) 1656.
- [43] C. Castellani, C.R. Natoli e J. Ranninger, Insulating phase of V_2O_3 : an attempt to a realistic calculation, Phys. Rev. B18 (1978) 4967.
- [44] M. Benfatto, C.R. Natoli, A. Bianconi, J. Garcia, A. Marcelli, M. Fanfoni, I. Davoli, Multiple scattering regime and higher order correlations in X-ray absorption spectra of liquid solutions, Phys. Rev. B34 (1986) 5774.
- [45] G. Altarelli, R.K. Ellis, G. Martinelli, Large Perturbative Corrections To The Drell-Yan Process In QCD, Nucl.Phys. B157 (1979) 461.
- [46] G. Curci, M. Greco e Y. Srivastava, QCD jets from coherent states, Nucl.Phys. B159 (1979) 451.
- [47] G. Parisi e R. Petronzio, Small transverse momentum distribution in hard processes, Nucl.Phys. B154 (1979) 427.
- [48] G. Curci e M. Greco, Large Infrared corrections in QCD processes, Phys.Lett. B92 (1980) 175.
- [49] G. Parisi, Summing Large Perturbative Corrections In QCD, Phys.Lett. B90 (1980) 295.
- [50] Guido Altarelli, R.K. Ellis, M. Greco e G. Martinelli, Vector Boson Production At Colliders: A Theoretical Reappraisal, Nucl.Phys. B246 (1984) 12.
- [51] F. Aversa, P. Chiappetta, M. Greco, J.P. Guillet, QCD corrections to parton-parton scattering processes, Nucl.Phys. B327 (1989) 105.
- [52] M. Greco et al., Proposal for a Phi-Factory, LNF-90/031(R).
- [53] The DAΦNE Physics Handbook, Edited by L. Maiani, G. Pancheri e N. Paver, Frascati, 1992; The Second DAΦNE Physics Handbook, Eds. L. Maiani, G. Pancheri and N. Paver, Frascati, 1995.
- [54] D. Babusci, S. Bellucci, G. Giordano, G. Matone, A.M. Sandorfi e M.A. Moinester, Chiral symmetry and pion polarizabilities, Phys.Lett. B277 (1992) 158; S. Bellucci, J. Gasser e M. E. Sainio, Low-energy photon-photon collisions to two loop order, Nucl.Phys. B423 (1994) 80, Erratum-ibid. B431 (1994) 413.
- [55] G. Colangelo, G. Isidori, Supersymmetric contributions to rare kaon decays: Beyond the single mass insertion approximation, JHEP 9809:009,1998; G. D'Ambrosio and G. Isidori, CP violation in kaon decays, Int. J. Mod. Phys. A 13 (1998) 1.