

## L'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI E I PRIMI ESPERIMENTI DI FISICA NUCLEARE

Giorgio Cortellesa

La seconda guerra mondiale terminò lasciando dietro di sé un cumulo di macerie e un'Italia in preda alle divisioni esistenti tra le aree più colpite, incluse le Università e i Laboratori di ricerca ma, ancor peggio, entro la popolazione.

Ricordiamo le fasi finali del nazismo e del fascismo, in particolare le leggi razziali che portarono al licenziamento di tutti i dipendenti pubblici ebrei e, quindi, all'emigrazione di molti professori e ricercatori ebrei o che, semplicemente, venissero indicati come tali. Su tutto questo si inserì la lunga guerra sul territorio italiano, con tutte le conseguenze che ne sono derivate.

Si deve ricordare che, tra le attività di ricerca di fisica, sin dagli anni '40 vi era lo studio di reazioni nucleari svolto utilizzando l'unico acceleratore funzionante in quegli anni (Amaldi *et al.*, 1940) e cioè il Cockcroft-Walton dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS). Può far sorridere, oggi, di fronte alle grandi macchine, ad esempio quelle del CERN a Ginevra, che si potesse sperimentare con protoni o deutoni accelerati "soltanto" all'energia di 1 MeV, eppure fu proprio quell'acceleratore a tenere vivo, nell'area romana, il fuoco della ricerca in fisica dei nuclei, dizione in cui allora confluiva anche l'attività che poi si distinguerà come fisica delle particelle elementari, mentre altre importanti ricerche venivano fatte utilizzando come sorgente i raggi cosmici.

Subito dopo la fine della guerra, i fisici italiani, anche con il poderoso apporto di chi era rientrato in Italia, approvarono l'idea che occorresse dotare la ricerca italiana di un acceleratore di particelle che, ovviamente, andasse molto al di là del pur glorioso Cockcroft-Walton dell'ISS.

La prima cosa che fu fatta, di fondamentale importanza per il futuro, fu la costituzione di un consorzio tra i più importanti

gruppi di ricerca in fisica nucleare attivi in Italia. L'8 agosto 1951 nacque, con decreto del presidente del CNR, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), con il compito di coordinare le attività scientifiche dei centri già esistenti di Roma, Padova e Torino e con la possibilità di ampliare il coordinamento ad altri organi ed istituti di studio e di ricerca (Battimelli, De Maria e Paoloni, 2001, p. 71).

In questo contesto, un fatto importante fu che, con una negoziazione personalmente condotta da chi scrive con i livelli politici di Governo, i Reparti 1° e 2° dei Laboratori di Fisica e le sue strutture comunque connesse con la radioattività entrarono a far parte, nel 1957, del neo costituito Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, con il rango di Sottosezione, venendo così inseriti fra gli attori della grande realizzazione.

La decisione di costruire una macchina acceleratrice fu presa dal Consiglio Direttivo dell'INFN nella seduta del 19 gennaio 1953, sotto la presidenza del prof. Gilberto Bernardini. Il presidente sottolineava che "il progresso delle ricerche sulla fisica dei mesoni e dei nucleoni compiute negli ultimi due anni con le macchine acceleratrici americane è tale da imporre come una necessità la costruzione di una macchina acceleratrice di energia nell'intervallo 500-1000 MeV, non appena ve ne saranno i mezzi sufficienti". Non si accennava al tipo di acceleratore che sarebbe stato poi scelto. Nella stessa seduta venne affidata la direzione della costruzione della macchina a Giorgio Salvini, allora professore all'Università di Pisa. Salvini fu invitato a costituire un gruppo di fisici ed ingegneri per lo studio ed il progetto della macchina (Battimelli, De Maria e Paoloni, 2001, p. 99-100). Nei mesi successivi Salvini, insieme a Gilberto Bernardini, fece un giro per l'Italia ed individuò "un gruppo di fisici ed ingegneri che corrispondono ai nomi di Fernando Amman, Carlo Bernardini, Giordano Diambri, Mario Puglisi, Giancarlo Sacerdoti e altri. Queste persone divennero poi il nucleo centrale dell'iniziativa insieme ad alcuni professori che avevano all'incirca la mia età, come Ruggero Querzoli, Italo Federico Quercia e Mario Ageno. Così si formò una base, diciamo, di venticinquenni, un piano di trentacinquenni, qualche quarantenne ed in cima a tutti c'era Enrico Persico, che è stato il teorico del gruppo ed ha diretto la progettazione tecnica della macchina" (Battimelli, De Maria e Paoloni, 2001, p. 99-100). Ageno e Querzoli erano membri del Laboratorio di Fisica dell'ISS, allora diretto da Giulio Cesare Trabacchi.

Per apprezzare compiutamente l'impresa scientifica che lo studio, la progettazione e la costruzione della macchina comportò è bene inserirla nel contesto internazionale in cui la scelta e poi la costruzione dell'acceleratore si collocò (si veda, a questo proposito, il contributo di Salvatore Frullani disponibile online, come materiale supplementare).

Formato dunque il gruppo nella primavera del 1953, si avviò la fase delle scelte tecniche per individuare il tipo di macchina da costruire. Data la situazione internazionale, illustrata nella monografia di Frullani, fu abbastanza facile scegliere gli elettroni come sonde da accelerare nella macchina da costruire. La scelta tra sincrotrone e Linac richiese una valutazione di fattibilità nel contesto italiano. Ricorda Salvini che "... dopo aver esaminato le cose e aver concluso che l'Italia, nella sua industria, era più forte nell'arte di far magneti che nell'arte di fare un'elettronica estremamente spinta come quella dei *klystron*, optammo per l'elettrosincrotrone" (Battimelli, De Maria e Paoloni, 2001, p. 101). L'energia scelta doveva essere decisamente superiore a quella delle macchine esistenti, perché l'impresa, avendo una nuova fascia di energie da esplorare, potesse assumere una rilevanza internazionale. Si optò per 1,0 - 1,2 GeV.

Le scelte fatte si rivelarono, con la scienza del poi, particolarmente adatte anche dal punto di vista della ricaduta scientifica. In quegli stessi anni si stava avviando la costituzione del CERN, con la ratifica della convenzione da parte dei paesi membri. Già da tempo erano in discussione i programmi e la linea perseguita era quella di sviluppare una macchina acceleratrice di protoni, che sarebbe stata il CPS (CERN Proto-Syncrotron, come era allora chiamata) con energia di 28 GeV, che entrò in funzione nel 1960. Inoltre, l'elettrosincrotrone dette, come vedremo, la possibilità di sviluppare lo studio dei sistemi nucleari con reazioni di tipo diverso e complementari a quanto possibile con i Linac costruiti con la tecnologia degli inizi degli anni '50.

Rimaneva la scelta della localizzazione dell'acceleratore, che risulterà anch'essa essenziale per il riflesso sulla partecipazione del personale del Laboratorio di Fisica dell'ISS. Ci fu un'aspra discussione sulla scelta tra Milano e Roma. Di fronte all'argomento che nel Nord era localizzata la maggior parte della capacità industriale italiana e che quindi sarebbe stato più facile reperire competenze per la costruzione della macchina, Edoardo Amaldi oppose: "A Roma si

è realizzato l'acceleratore elettrostatico, si sono costruiti microscopi elettronici e spettrografi di massa. A Roma funzionano grandi impianti di penicillina. Insomma, quando si tratta di prototipi e non di produzioni in serie, Roma si è dimostrata sempre alla pari o meglio del Nord" (Battimelli, De Maria e Paoloni, 2001, p. 102). Almeno tre delle imprese citate da Amaldi erano state realizzate nell'ISS, di cui due dal Laboratorio di Fisica. La scelta della localizzazione fu alla fine decisa dalle migliori offerte di contributo finanziario presentate da enti e amministrazioni dell'area romana e dalla generosa offerta del Comune di Frascati di fornire gratuitamente l'area del sito per l'installazione del Laboratorio che avrebbe ospitato l'elettronsincrotrone e le attività collegate (Battimelli, De Maria e Paoloni, 2001, p. 104).

Il progetto fu elaborato e definito tra il novembre 1953 e la fine del 1954 e cominciò la fase di costruzione. La partecipazione di ricercatori e tecnici del Laboratorio di Fisica dell'ISS alla struttura dell'INFN, per il tramite della Sottosezione Sanità, permise di accedere, al pari di quelli delle altre Sezioni, non solo ai "tempi macchina" del sincrotrone, quando l'acceleratore fu completato, ma anche ai finanziamenti utilizzati ai fini della costruzione di parti dell'acceleratore e dei dispositivi sperimentali. Importante fu, tra l'altro, sia pure diversi anni dopo, l'apporto teorico e pratico alla realizzazione dell'estrazione del fascio di elettroni da 1 GeV e, ovviamente, a quella del sistema iniettore del fascio di elettroni nei magneti (Ageno *et al.*, 1959, 1962, 1962a, 1962b; Amaldi, 1958; Cortellessa, Amaldi e Reale, 1962). La partecipazione di personale del Laboratorio di Fisica alla costruzione del sincrotrone di Frascati fu di una certa rilevanza. Segnatamente, i ricercatori Mario Ageno, Ruggero Querzoli, il sottoscritto, Ugo Amaldi, Armando Reale ed i tecnici Alfredo Rosati, Armando Gandini, Riccardo Crateri, Giuseppe Di Nunzio, Renato e Corindo Felici.

Le condizioni al contorno per la realizzazione dell'acceleratore furono quelle di scegliere una tipologia che potesse essere integralmente costruita in Italia dalle imprese italiane coinvolte e che l'ammontare dei finanziamenti fosse compatibile con i bilanci pubblici e con gli impegni di spesa delle imprese. Nella fase iniziale si cercò quindi di lavorare con un "tutto italiano". Tuttavia, proprio per quanto riguarda la parte di pertinenza dei Laboratori di Fisica

dell'ISS, l'iniettore elettrostatico di elettroni nella ciambella del sincrotrone, ciò non fu possibile e si dovette invece passare all'acquisto di una macchina, un Van de Graaff, prodotta fuori d'Italia, anziché realizzare il previsto iniettore di tipo Cockcroft-Walton. Questo però permise, tra l'altro, di iniettare il fascio iniziale di elettroni con un'energia più elevata e con un miglior grado di focalizzazione.

Negli Stati Uniti gli acceleratori, come tutte le attività che avevano a che fare con la fisica nucleare, furono finanziati e costruiti nel quadro del progetto Manhattan, cioè il progetto militare volto alla costruzione dell'arsenale nucleare. La decisione italiana fu quella di contribuire a colmare un vuoto esistente nel settore degli acceleratori di elettroni. Per quanto riguarda l'energia massima di accelerazione degli elettroni ci si basò sulla considerazione che occorre raggiungere l'energia a cui era prevedibile accadesse la creazione di nuove particelle e tale energia si situava tra i 900 MeV e 1 GeV. Occorre considerare che, negli Stati Uniti, i colleghi fisici del Laboratorio Floyd Newman dell'Università di Cornell, nello stato di New York, erano giunti alle medesime conclusioni e stavano progettando una macchina acceleratrice da 1 GeV.

Per condurre in porto una collaborazione tecnica e scientifica della portata della costruzione di un acceleratore di dimensioni e potenzialità senza precedenti, con collaborazioni nazionali e internazionali altrettanto importanti, venne messa in atto un'organizzazione adeguata, funzionale e il più possibile non burocratica. Il giudizio che oggi ci diamo, a posteriori, è che riuscimmo nell'impresa. Ovviamente si può obiettare che il giudizio su noi stessi è un autoincensamento. Guardando allora ai risultati, si evince chiaramente che nella cordiale e amichevole competizione con il Laboratorio Floyd Newman dell'Università di Cornell, precedentemente menzionato, segnammo parecchi punti a nostro favore, tanto che i risultati pubblicati dai nostri gruppi di ricerca prece-dettero, e spesso non di poco, le analoghe ricerche dei colleghi americani. In generale gli acceleratori, compattando gli elettroni in "pacchetti" molto brevi, di fatto rendevano praticamente impossibile utilizzare sistemi di coincidenze tra le particelle coinvolte nella reazione nucleare in studio. Occorrevano "impulsi lunghi" di particelle accelerate e questo lo si poteva ottenere solo con macchine come i sincrotroni. Molti anni dopo, il sistema che ci permise,

con l'estrazione del fascio di elettroni, di lavorare molto più facilmente con eventi in coincidenza, fu la caratteristica fondamentale della tipologia sperimentale scelta.

Così come alcuni di noi furono in quel periodo ospitati a Ithaca (New York), così colleghi del Laboratorio Floyd Newman vennero a Frascati e anche il nostro gruppo dell'ISS, come gli altri gruppi di ricerca, ospitò fisici provenienti dagli USA e anche dall'Unione Sovietica.

Il lavoro di progettazione e poi di costruzione del sincrotrone venne suddiviso tra diverse realtà, fra cui il CNEN, di cui i Laboratori di Frascati facevano statutariamente parte, e l'INFN. Giorgio Salvini ne divenne il Direttore mentre a Fernando Amman venne affidata la responsabilità di tutte le parti costruttive e al fisico Giorgio Ghigo quella di direttore della macchina, in pratica il responsabile del funzionamento di tutto il sistema.

Gli sperimentatori, riuniti in gruppi di ricerca, con propria decisione eleggevano al loro interno il responsabile del gruppo. I responsabili dovevano assicurare la presenza di almeno due sperimentatori durante tutto il tempo in cui "avevano la macchina". A regime il sincrotrone funzionava 24 ore su 24, con solo un'interruzione di circa otto ore ogni lunedì, per effettuare la manutenzione ordinaria e alcuni eventuali lavori programmati. Era a disposizione anche una foresteria, nel caso qualche sperimentatore avesse avuto bisogno di riposare. I turni erano organizzati da un "Consiglio dei capigruppo" e poiché i ricercatori avevano normalmente anche altre cose da fare, come far lezione all'Università, era frequente fare turni anche di 10/12 ore, cosa che d'altra parte accadeva anche per i colleghi di altri laboratori del mondo. Per tutto il proprio tempo macchina il gruppo era libero di decidere sui tempi del sincrotrone, sui parametri del funzionamento, per esempio l'energia finale di accelerazione, sull'estrazione del fascio di elettroni o sull'utilizzo del fascio di fotoni.

Terminata l'attività connessa con l'entrata in funzione dell'elettrosincrotrone, Ageno aveva assunto la direzione del Laboratorio con le connesse attività di gestione ed il suo interesse scientifico era ormai più orientato verso la biofisica, Querzoli aveva lasciato il Laboratorio ed aveva assunto un importante ruolo scientifico presso il Laboratorio dell'elettrosincrotrone, il gruppo di ricerca-

tori del Laboratorio di Fisica impegnati nell'attività sperimentale con i fasci disponibili erano, oltre il sottoscritto, Armando Reale, Gloria Campos Venuti, Paolo Salvadori, Giorgio Matthiae, Gabriele Fronterotta e Ugo Amaldi, quest'ultimo quando nel 1962 rientrò a Roma dopo un periodo di congedo passato presso il CERN di Ginevra (come descritto nel capitolo di Ugo Amaldi) per partecipare alle prime attività di quel Laboratorio. Inoltre erano coinvolti ricercatori stranieri, ospiti dell'ISS, che erano venuti in Italia, insieme ad altri ospitati da altri gruppi di ricerca esterni al Laboratorio di Frascati ma che ne utilizzavano le peculiari risorse sperimentali, per partecipare ad esperimenti presso l'elettrosincrotrone che fu, per alcuni anni, tra le macchine acceleratrici di elettroni, una con le caratteristiche più spinte. Del gruppo di ricerca facevano ovviamente parte anche numerosi tecnici che fornivano il loro importante contributo. Al gruppo di ricercatori si univano poi gli studenti che venivano presso il nostro Laboratorio per preparare la loro tesi di laurea.

Un'importante sorgente di informazioni tecnico-scientifiche sull'attività svolta a quel tempo dai Laboratori di Fisica dell'ISS è costituita dalle Relazioni che, annualmente, venivano approntate e pubblicate, come Rapporti interni, per rendicontare sull'attività della Sottosezione Sanità associata all'INFN, come per esempio illustrato in Autori vari (1961). Parte dell'attività era ovviamente rivolta alla progettazione e realizzazione dei dispositivi elettronici (Cortellessa e Reale, 1960b; Campos Venuti e Matthiae, 1961) necessari allo svolgimento delle esperienze, alla definizione e progettazione dei necessari contatori e al calcolo della loro efficienza (in particolare scintillatori plastici e contatori di Čerenkov). Un primo tema di ricerca affrontato fu quello, a carattere solo in parte elettronico, dello studio del comportamento statistico dell'emissione secondaria, cioè dell'effetto che è alla base della moltiplicazione degli elettroni in un fotomoltiplicatore. Si trattava di calcolare la distribuzione di probabilità degli elettroni emessi da un elettrodo che dà origine alla distribuzione di probabilità osservata dopo un  $n$ -esimo stadio e, per risolvere questo problema, si utilizzò per la prima volta una tecnica matematica dovuta a L. Janossy. Allo stesso scopo venne progettato e allestito un apparato sperimentale che permetteva di studiare la statistica del fotoelettrone singolo. Il risultato sperimentale ottenu-

to, che mostrava una varianza relativa “normale” per la curva di distribuzione dell’elettrone singolo, fu utilizzato per la stesura di una tesi di laurea (Gloria Campos Venuti), ma non venne tuttavia mai pubblicato perché, mentre si stava allestendo una tecnica che permettesse misure sistematiche, venne pubblicato da ricercatori francesi un lavoro completo sull’argomento.

L’attività sperimentale fu molto vasta e si concentrò, inizialmente, su esperienze di fotoproduzione di mesoni (Ageno *et al.*, 1961; Berkelman, Cortellessa e Reale, 1961; Berkelman *et al.*, 1961; Cortellessa e Reale, 1960a; Cortellessa, Reale e Salvadori, 1960; MacDaniel *et al.*, 1959; Matthiae, 1961; Farchi e Lanciani, 1964; Grandolfo, 1964) e su ricerche sulla struttura del protone attraverso misure di sezione d’urto differenziale di fotoproduzione singola di mesoni  $\pi^0$  e di effetto Compton. L’attività era quindi prevalentemente legata a quella che già allora rientrava nel campo delle particelle elementari.

Di grande impegno furono poi anche tutti i calcoli delle cinematiche relative ai vari eventi nucleari studiati, che vennero svolti utilizzando lo storico calcolatore elettronico IBM 610 (Ageno, 1960a, 1960b; Cortellessa e Reale, 1959a, 1959b). Durante il 1962 e il 1963 il gruppo fu interessato al problema della cinematica di un urto a due e a tre corpi, elaborando programmi di calcolo per gli elaboratori elettronici IBM 610 e IBM 7040 e curando la pubblicazione di tutta una serie di tabelle e grafici (Campos Venuti, 1961, 1962; Campos Venuti e Giucci, 1963). In particolare, durante il 1963, in vista della preparazione di una esperienza di fotoproduzione a doppia carica di mesoni in idrogeno in camera a diffusione venne anche svolta un’approfondita analisi cinematica di eventi di questo tipo (Amaldi, Campos Venuti e Matthiae, 1964).

Non trascurabile fu poi anche l’attività a carattere radioprotezionistico messa in atto per proteggere gli operatori dalla radiazione diffusa generata da una macchina acceleratrice per elettroni con energie fino a circa 1 GeV (Cortellessa, 1960; Ageno, 1962).

Si cominciò a dedicare attenzione anche a problemi di fisica nucleare utilizzando particelle di alta energia (per quei tempi), poiché esistevano un gran numero di aspetti, relativi alle forze nucleari e alla struttura e dimensione dei nuclei, che solamente l’uso di fasci di particelle energetiche e l’adozione di tecniche sperimentali avanzate

potavano risolvere. Seguendo questa linea, dal febbraio 1960 al settembre 1963 venne progettata, messa a punto ed eseguita un'esperienza presso l'elettrosincrotrone nazionale di Frascati sulla cattura di mesoni  $\pi^-$  in nuclei complessi. Si trattava di mettere a punto un fascio di mesoni  $\pi$  di circa 150 MeV/c, ottenuto per fotoproduzione, e di studiare lo spettro dei neutroni emessi con energie da 1 a 50 MeV in seguito all'assorbimento di pioni negativi in diversi bersagli. Scopo dell'esperienza era lo studio del meccanismo d'interazione tra il mesone in quiete e il nucleo, analizzando sia la parte diretta che la parte evaporativa dello spettro neutronico. I risultati ottenuti in Cu, Sn e Pb furono di grande validità (Campos Venuti, Fronterotta e Matthiae, 1964) e per la parte evaporativa dello spettro neutronico si poterono confrontare i valori relativi al parametro proporzionale alla densità dei livelli nucleari, ricavati dai dati sperimentali sulla base della teoria di K.J. Le Couteur e B.W. Lang, con quelli ottenuti in esperienze che avevano utilizzato fasci di protoni incidenti su nuclei, trovando un buon accordo per Cu e Sn e un valore per il Pb che poteva essere in parte spiegato con il modello a shell e attribuito a un effetto della shell chiusa caratteristica di questo nucleo doppiamente magico ( $Z = 82$ ,  $A = 208$ ).

Il gruppo di ricerca che proveniva dai Laboratori di Fisica dell'ISS analizzò i dati sulla struttura dei nuclei ottenuti fino ad allora con fasci di protoni. Tali dati erano relativi a reazioni nucleari con bersagli di nuclei leggeri. D'altro canto i fisici teorici ipotizzavano a quel tempo una struttura dei nuclei in termini di una mescolanza di protoni che, per motivi di carica, tendevano ad allontanarsi tra loro, tenuti assieme dai neutroni. Nei nuclei molto leggeri il numero di neutroni è uguale a quello dei protoni ma poi, man mano che ci si sposta lungo la tabella del sistema periodico degli elementi, supera quello dei protoni fino all'uranio 238, che ha un nucleo costituito da 92 protoni e 146 neutroni. Questi ultimi provvedono, con una forza nucleare priva di carica, quel *surplus* d'energia di legame che "sconfigge" la repulsione elettrostatica dei 92 protoni.

Lo studio dello stato fondamentale e dei primi livelli eccitati dei nuclei rientra nel quadro della spettroscopia nucleare di bassa energia: la conoscenza dell'energia di separazione dei protoni e dei neutroni meno legati è un fatto sperimentale in parte risolto con numerosi tipi di reazioni. Dal confronto con quanto si ricavava dal-

la misura dei difetti di massa, questa conoscenza permise, tra l'altro, di accertare, limitatamente alle orbite più esterne, la validità del modello a strati, ricavandone interessanti informazioni quantitative.

Diverso era, invece, il problema relativo allo studio degli strati più interni e, in particolare, alla misura delle energie di separazione e delle distribuzioni di quantità di moto dei protoni in essi legati: il numero di reazioni, infatti, che consentono tale studio è assai più limitato e anche per queste poche vi sono difficoltà sia sperimentali sia di principio che ne limitano la portata. È necessario, infatti, usare proiettili di energia sufficientemente elevata, in modo che, tra l'altro, la quantità di moto trasferibile nella reazione corrisponda a una localizzazione dell'interazione tale che si possa considerare il processo come l'urto del proiettile con un solo nucleone, piuttosto che con il nucleo stesso. D'altra parte, non ci si può ragionevolmente aspettare che l'estrazione di un nucleone "profondo" non comporti un notevole riarrangiamento del nucleo residuo in tempi così brevi da rendere difficile un'interpretazione della reazione in due fasi, quella dell'estrazione del nucleone legato e quella della disseccazione del nucleo residuo.

Fra le reazioni che presentavano le caratteristiche essenziali per lo studio dei livelli più interni dei nuclei, le reazioni di diffusione quasi-elastica, come la  $(p, 2p)$ , avevano già fornito interessanti risultati, anche se solo parzialmente in accordo (Jacob e Maris, 1966 e 1973).

L'attività sperimentale in fisica nucleare svolta dai ricercatori dei Laboratori di Fisica si focalizzò proprio sulle tematiche connesse alla verifica della validità del modello a strati nei nuclei leggeri e medio pesanti. Nel 1963, venne presentata per la prima volta nel mondo la proposta di un nuovo e originale esperimento di fisica nucleare alle energie intermedie che avrebbe, poi, avuto un grande impatto sulla fisica nucleare (Amaldi *et al.*, 1963). L'esperimento in questione analizzò la diffusione quasi-elastica di elettroni di elevata energia da parte di nuclei e consisteva nel bombardare un nucleo bersaglio con elettroni ( $e^-$ ) di energia sufficientemente elevata da penetrare all'interno del nucleo ed espellere da questo un protone ( $p$ ). Misurando in coincidenza l'energia e l'impulso dell'elettrone diffuso ( $e'$ ) e del protone espulso si poteva risalire all'energia e all'impulso dei nucleoni all'interno del nucleo bersaglio. L'esperimento, a tutti noto come

l'esperimento ( $e, e'p$ ), fu effettuato utilizzando il fascio di elettroni del sincrotrone dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. Il problema era quello di studiare le energie di separazione dei protoni nei nuclei anche nei livelli più interni e, quindi, di utilizzare una reazione quasi-elastica rivelando in coincidenza le particelle emesse. Come già indicato in precedenza, un gran numero di informazioni sull'energia di separazione nel caso di nuclei leggeri erano state fornite da esperienze del tipo ( $p, 2p$ ), ma con questa reazione non era stato possibile arrivare a studiare i livelli più interni in nuclei con numero di massa  $A > 16$ . Infatti, i nucleoni dei livelli più profondi sono localizzati in prevalenza nelle regioni più interne del nucleo e quindi sia il protone entrante che quelli uscenti debbono compiere un cammino dentro al nucleo che è sicuramente maggiore del loro libero cammino medio in materia nucleare: essi subiscono allora un assorbimento che diviene sempre più sensibile all'aumentare del numero di massa. Comunque la maggiore interazione dei protoni fa sì che la misura sperimentale risulti molto più distorta da effetti secondari che rendono di più difficile interpretazione i risultati per effetto delle distorsioni energetiche ed angolari. Tali limitazioni praticamente non sussistevano nel caso di reazioni ( $e, e'p$ ) e, sin dal 1962, G. Jacob e Th. A.J. Maris avevano suggerito l'uso di elettroni di alta energia (Jacob e Maris, 1962). Subito dopo la pubblicazione dell'articolo furono fatti dei primi esperimenti a Stanford con targhette di deuterio, trizio ed elio-3 e all'acceleratore lineare di Orsay su deuterio. Ma la sperimentazione con gli acceleratori lineari si fermò a questi nuclei leggeri.

In effetti, un'esperienza di questo tipo su nuclei più pesanti presentava grosse difficoltà collegate sia alle caratteristiche degli acceleratori allora esistenti sia alla bassa sezione d'urto della reazione e non era per questo mai stata né progettata né eseguita. Dal settembre 1963 al dicembre 1966 il gruppo della Sanità studiò l'energia di separazione dei protoni in  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{27}\text{Al}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{75}\text{As}$ , utilizzando la reazione quasi-elastica fra elettroni di alta energia (600 - 800 MeV) e protoni legati. Si utilizzò il fascio interno, inserendo le diverse targhette in una delle sezioni dritte dell'acceleratore nel punto in cui l'orbita degli elettroni raggiungeva l'energia voluta e modificando la ciambella in modo da inserire due finestre di uscita una verso l'interno ed un'altra verso l'esterno dell'anello del sin-

crotrone, per avere modo di visionare la targhetta ed evitare il più possibile interazioni con la materia, lungo il percorso verso i sistemi di rivelazione, delle particelle che si dovevano rivelare. Si rivelavano in coincidenza gli elettroni e i protoni diffusi, i primi per mezzo di un sistema magnetico focalizzante e deflettente e gli altri con un *telescopio di range* (Cortellessa e Reale, 1961). Per la reazione su carbonio, si misurò anche la distribuzione angolare dei protoni e si poté risalire, mediante una relazione cinematica conglobata nella speciale forma del rivelatore di protoni (rivelatore “a cipolla”), alla distribuzione di quantità di moto che i protoni hanno nel nucleo e questo fornì informazioni sulle funzioni d’onda nei vari livelli da cui i protoni stessi sono strappati. Per la prima volta fu messa sperimentalmente in evidenza la diversa funzione d’onda per protoni espulsi dagli stati  $1s$  e  $1p$  del carbonio  $^{12}$ .

I risultati (Amaldi *et al.*, 1964a, 1964b, 1966) confermarono l’interesse del problema affrontato. I valori sperimentali, ottenuti per le energie mancanti dei protoni più interni nei nuclei di medio numero di massa, risultarono assai più alti, anche tenendo conto dei grossi errori, di quelli fino ad allora ipotizzati sulla base delle teorie esistenti e rappresentarono per il gruppo di teorici della Sanità e per diversi gruppi di teorici di istituti stranieri un forte stimolo al tentativo di elaborare teorie più raffinate e svolgere calcoli più complessi sul valore del potenziale nucleare. Un fattore importante alla riuscita degli esperimenti fu l’iniziazione alla fisica dell’*electron scattering* di studenti che, sui temi connessi alle problematiche legate agli interessi del gruppo, chiesero e ottennero di fare tesi in fisica nel gruppo ( $e$ ,  $e’p$ ) in quegli anni. Qui citerò, per i risvolti successivi che si ebbero nell’attività del gruppo, Salvatore Frullani, Enzo De Sanctis e Giampaolo Capitani. Il primo fu poi assunto nei ruoli del Laboratorio, mentre gli altri due furono assunti dal Laboratorio di Frascati, dove si unirono al Gruppo LEALE (Laboratorio Esperimenti Acceleratore Lineare Elettroni) ma rimasero per lunghi anni a collaborare con il gruppo del Laboratorio di Fisica. L’attività del gruppo spinse Claudio Ciofi degli Atti, rientrato dalla Russia dove aveva ottenuto il dottorato sotto la guida di V.V. Balashov proprio avendo come tema lo studio teorico delle reazioni ( $e$ ,  $e’p$ ), a chiedere una borsa di studio all’ISS. Dopo qualche anno di borsa ottenne l’assunzione dall’INFN come dipendente della Sottosezio-

ne Sanità. La sua attività fu molto interconnessa con l'attività del gruppo sperimentale e svolse anche un importante lavoro di crescita delle attività di fisica teorica iniziando alla ricerca Omar Benhar e Giovanni Salmè (ora all'Università "Sapienza" di Roma), Emanuele Pace (ora all'Università Tor Vergata di Roma) e Silvano Simula (ora Università di Roma 3) che svolsero per lungo tempo la loro attività alle dipendenze dell'INFN presso la Sezione Sanità, anche quando Ciofi degli Atti passò, agli inizi degli anni '90, al Dipartimento di Fisica dell'Università di Perugia. La vicinanza ed il contatto con il gruppo teorico di fisica nucleare è stato di valido aiuto culturale per il gruppo sperimentale.

Il gruppo ospitò anche giovani studenti stranieri, rimasti anche per più anni, che utilizzavano le possibilità fornite dalle borse di studio per stranieri che l'ISS metteva a disposizione. Quasi tutti venivano da Università o laboratori che avevano già partecipato ad attività legate agli interessi del gruppo: Wolfgang Ulrici (Università di Francoforte), Bo Hoistad (Università di Uppsala), Roselyn Lombard (Acceleratore di Orsay), Kunio Takamatsu (Università di Tokyo). Parimenti ci furono parecchie visite di affermati ricercatori stranieri che chiedevano, nel loro passaggio da Roma, di poter visitare il gruppo e l'apparato sperimentale. Insomma, il gruppo aveva assunto una notorietà internazionale. Si giunse quindi alla conclusione che lo studio delle energie di separazione dei protoni nei nuclei per mezzo di reazioni dirette era ancora molto promettente, ma che la tecnica usata nel primo esperimento presentava forti limiti. Ciò era soprattutto dovuto ai valori degli angoli solidi di rivelazione e delle bande d'energia accettate dai contatori, che erano tali da non riuscire a compensare la piccola sezione d'urto e quindi comportavano una velocità di conteggio assai bassa. Né d'altra parte l'uso del fascio interno dell'elettrosincrotrone di Frascati permetteva sostanziali modifiche dell'apparato sperimentale. Sulla base di queste considerazioni venne allora progettata una nuova esperienza, da eseguirsi con il fascio estratto dell'elettrosincrotrone di Frascati, con un apparato sperimentale completamente diverso, che permetteva un notevole aumento della velocità di conteggio e del potere risolutivo e una misura contemporanea dell'energia di separazione dei protoni emessi e della loro distribuzione in quantità di moto (Campos Venuti *et al.*, 1966; Frullani, 1966). Si decise anche di

studiare contemporaneamente la reazione ( $e, e'n$ ), che presentava un forte interesse, sia per un possibile confronto fra il potenziale nucleare dei protoni e quello dei neutroni, sia per motivi intrinseci, e anche le reazioni ( $e, e'd$ ) e ( $e, e'\alpha$ ). In quegli anni stava iniziando l'attività di Adone, l'anello di accumulazione  $e^+e^-$  che rappresentava la nuova grande iniziativa del Laboratorio di Frascati e presentava grande attrattiva per un nuovo filone di indagine, ma che riguardava il campo delle particelle elementari. Ugo Amaldi costituì un gruppo per partecipare alle attività sperimentali di Adone e lasciò il gruppo di fisica nucleare.

L'apparato sperimentale per lo studio delle reazioni ( $e, e'p$ ) e ( $e, e'd$ ) consisteva in un magnete di cui si utilizzava la focalizzazione di bordo, in un sistema di camere a scintilla per analizzare in energia gli elettroni, in una *camera di range* per rivelare i protoni entro una banda d'energia fissata e, infine, in una camera per la localizzazione spaziale delle particelle. Per lo studio simultaneo della reazione ( $e, e'n$ ) si utilizzò il sistema già descritto per gli elettroni e per i neutroni, un complesso di 15 contatori a scintillazione di grandi dimensioni opportunamente schermati. La tecnica adottata per la selezione in energia fu quella del tempo di volo e tutta l'esperienza era controllata da un elaboratore IBM 1800 in linea, che permetteva non solo il controllo di tutti i parametri considerati essenziali dell'apparato di rivelazione e dello stesso elettrosincrotrone, ma raccoglieva anche i dati e, oltre a immagazzinarli per permettere una susseguente elaborazione da eseguire con l'elaboratore IBM 7040 (reso a questo scopo compatibile), ne forniva man mano anche una presentazione visiva. Fu il primo esperimento all'elettrosincrotrone di Frascati ad essere asservito ad un sistema di controllo ed acquisizione gestito da calcolatore e rimase l'unico perché l'elettrosincrotrone terminò l'attività poco dopo la fine dell'esperimento.

Il gruppo era formato, oltre che dal sottoscritto, da Gloria Campos Venuti, Paolo Salvadori, Gino Farchi, Salvatore Frullani, mentre lo staff tecnico era formato, tra gli altri, da Giulio Grisanti e Angelo Calicchia (per un certo tempo). Inoltre Enzo De Sanctis e Giampaolo Capitani, benché dipendenti del Laboratorio di Frascati, partecipavano alla attività di presa dati e successiva elaborazione. Una prima taratura dell'apparato, eseguita nel periodo luglio 1969-luglio 1970 con elettroni da 710 MeV/c di momento del

fascio estratto dell'elettrosincrotrone, venne effettuata utilizzando unicamente contatori a scintillazione, e precisamente un sistema di 8 contatori sottili disposti lungo il fuoco del magnete che, in coincidenza con altri 2 contatori, rivelavano gli elettroni diffusi e un telescopio di 2 contatori in coincidenza e uno in anticoincidenza che rivelavano protoni entro una determinata banda d'energia, con un angolo solido di 0,36 sr. Come controllo dell'apparato sperimentale venne studiata la diffusione elastica di elettroni su idrogeno e la diffusione quasi elastica su  $^{12}\text{C}$ ; la risoluzione in energia trovata fu di circa 4 MeV e la dispersione dell'ordine di 7 MeV/cm. Nel periodo agosto-dicembre 1970 venne misurata la distribuzione energetica dei protoni emessi in coincidenza con gli elettroni da un bersaglio di acqua, al fine di studiare l'energia mancante dei protoni in  $^{16}\text{O}$  che presentava un notevole interesse dal punto di vista teorico, e i risultati preliminari vennero presentati al 56° Congresso della Società Italiana di Fisica.

Nel corso del 1971 vennero sostituiti definitivamente i contatori a scintillazione con le camere a scintilla digitizzate: 2 camere a fili *bigap* sul ramo elettroni, 1 camera acustica *bigap* con 24 microfoni per lo studio della distribuzione angolare dei protoni, tutte già provate in Laboratorio e funzionanti in modo assai soddisfacente. Venne inoltre montata sull'esperienza una *camera di range* per protoni a 30 canali; tenendo però conto delle difficoltà che si incontrano normalmente nel far funzionare una camera a scintilla di quel tipo a poche decine di centimetri dal fascio estratto, a causa degli elevati fondi di radiazione, fu messo a punto un sistema alternativo per la misura del *range* dei protoni diffusi, consistente in 30 contatori a scintillazione dello spessore di 2 mm di grandi dimensioni ( $60 \times 60 \text{ cm}^2$ ). Infine, vennero messi a punto i programmi di calcolo per l'elaboratore IBM 1800 al fine di registrare e ricostruire gli eventi e tenere l'esperienza sotto controllo.

Nel 1972 vennero raccolti dati, con un apparato non definitivo, sulle distribuzioni angolari dei protoni nel calcio, al fine di verificare l'andamento delle distribuzioni di quantità di moto dei protoni per elevate energie mancanti. Il risultato, particolarmente rilevante per le sue conseguenze sull'interpretazione delle caratteristiche della struttura nucleare, fu presentato a diversi congressi internazionali. Sempre nel 1972, venne montato l'apparato definitivo, con il *tele-*

*scopio di range* sul ramo protoni e vennero raccolti 5000 eventi in  $\text{CH}_2$  per un controllo definitivo della risoluzione. Durante il 1973 venne effettuato anche uno studio sistematico delle distribuzioni in energia mancante e in quantità di moto dei protoni su diversi nuclei con la reazione ( $e, e'p$ ) e si iniziò a raccogliere dati sulla reazione ( $e, e'n$ ).

Il 1973 fu l'ultimo anno di funzionamento dell'elettrosincrotrone. L'attività del Laboratorio di Frascati era ormai da anni polarizzata verso le attività sperimentali ad Adone, gli esperimenti rimasti attivi all'elettrosincrotrone erano pochi e la peculiarità di alto *duty factor* che aveva favorito l'esperimento ( $e, e'p$ ) era stata ormai ottenuta anche con gli acceleratori lineari di nuova generazione, come vedremo. Data la mancanza di acceleratori adeguati nei dintorni di Roma e più in generale in Italia, la possibilità di continuare l'attività iniziata era legata ad una prospettiva di collaborazione all'estero, con risvolti pesanti sull'organizzazione di vita extra ISS.

Il tormentato periodo 1968-1969 che aveva di molto rallentato nell'ISS l'attività sperimentale e uno stesso stato di agitazione presso il Laboratorio di Frascati avevano doppiamente danneggiato l'attività del gruppo. Queste lotte avevano però prodotto la legge di riforma dell'ISS e stavano quindi maturando cambiamenti di attività di molti componenti del gruppo. Negli anni successivi, il sottoscritto assunse un importante incarico presso il CNR, pur continuando a mantenere costanti contatti con le attività di fisica nucleare che continuavano. Gloria Campos Venuti assunse l'incarico di Direttore del Laboratorio delle Radiazioni, Paolo Salvadori assunse l'incarico di Direttore del Reparto di Fisica Atomica e responsabile del centro di taratura di secondo livello, Gino Farchi, che fino ad allora aveva anche esercitato la funzione di responsabile del Centro di Calcolo, passò al nuovo Laboratorio di Epidemiologia dove vedeva migliori prospettive per le sue competenze di gestione e analisi dati. Salvatore Frullani accettò un invito a passare un periodo di congedo sabbatico presso il nuovo Laboratorio dell'Acceleratore Lineare di Saclay (ALS), vicino Parigi. Frullani dedicò il suo periodo sabbatico (circa un anno e mezzo) alla strumentazione dello spettrometro del ramo protoni, con la messa a punto di camere a fili multiproportionali per il tracciamento, e dei rivelatori a scintillazione e dei Čerenkov di veto per il *trigger* oltre che alla messa a punto dei relativi pro-

grammi di acquisizione (Leconte *et al.*, 1980). Al rientro in Italia, l'INFN approvò l'inizio di una collaborazione con l'ALS, promossa da Frullani, a cui partecipavano anche, per parte italiana, Enzo De Sanctis e Giampaolo Capitani, e a cui si aggiunse successivamente Franco Garibaldi.

Per completezza, e a conclusione di queste brevi note, va detto che, seguendo una tradizione che risale in pratica alla fondazione dell'Istituto, negli anni le ricerche di Fisica nucleare si sono sviluppate ben inserendosi nei progetti di punta condotti in diversi Laboratori nazionali e internazionali e hanno comportato quel continuo aggiornamento necessario all'analisi dei dati, alla progettazione e alla costruzione di apparati sperimentali molto sofisticati e basati su conoscenze tecnologiche molto avanzate. Le competenze formatesi nel corso degli anni sono risultate di assoluta rilevanza tecnica e culturale e hanno permesso, tra l'altro, la formazione di una struttura tecnologica di notevole valore. La ricerca fondamentale in Fisica nucleare ha poi, nel tempo, costituito un supporto rilevante anche allo studio delle interazioni delle radiazioni ionizzanti con la materia, alla messa a punto di tecniche di rivelazione delle radiazioni ionizzanti e la loro integrazione in sistemi di acquisizione dati e di controllo, necessarie sia in campo ambientale che medico, e all'uso di modelli e tecniche di calcolo e di visualizzazione avanzati, utilizzati anche per scopi istituzionali.

*L'Autore desidera vivamente ringraziare Salvatore Frullani per l'accurata lettura critica del capitolo.*

### **Bibliografia**

- Ageno M. Cinematica della fotoproduzione di mesoni  $\pi$  su deuterio tra 300 e 1500 MeV. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* DT 60/10 (1960a).
- Ageno M. *et al.* L'elettrosincrotrone. *Nuovo Cimento Suppl.* 24,17-50 (1962).
- Ageno M. *et al.* Il sistema centrale di controllo e comando. *Nuovo Cimento Supplemento* 24, 312-320 (1962a).
- Ageno M. *et al.* La ricerca del fascio. *Nuovo Cimento Suppl.* 24, 334-340 (1962b).
- Ageno M. *et al.* Sulla situazione dei lavori per l'Elettrosincrotrone italiano da 1200 MeV e sul programma di ricerche. *Nuovo Cimento Suppl.* 11, 324-343 (1959).

- Ageno M. *Le radiazioni e i loro effetti*. Editore P. Boringhieri, Torino, 1962.
- Ageno M. Programmi per il calcolo della cinematica di una reazione a due corpi (calcolatore elettronico IBM 610). *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* IT 60/5 (1960b).
- Ageno M, Amaldi E, Rispoli B, Sanna G. Misure di vita media di mesoni  $\pi$  su traiettoria rettilinea e circolare. CNEN, Laboratori Nazionali di Frascati, VR-4, p.140 (1961).
- Amaldi E, Bocciarelli D, Rasetti F, Trabacchi GC. L'impianto generatore di neutroni a 1000 kilovolt dell'Istituto di Sanità Pubblica. *Rendiconti Istituto Superiore Sanità* 3, 201-216 (1940).
- Amaldi U Jr. Sistema di focalizzazione per l'iniezione di elettroni nel sincrotrone nazionale. *Rendiconti Istituto Superiore Sanità* 21, 896-914 (1958).
- Amaldi U Jr, Campos Venuti G, Matthiae G. Analisi cinematica di eventi di fotoproduzione a doppia carica in camera a diffusione. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 64/5 (1964).
- Amaldi U Jr, Campos Venuti G, Cortellessa G, De Sanctis E, Frullani S, Lombard R, Salvadori P. The (e, e'p) reaction in calcium induced by 580-750 MeV electrons. *Phys Lett* 22, 593-595 (1966).
- Amaldi U Jr, Campos Venuti G, Cortellessa G, Fronterotta G, Hillman P, Matthiae G. Impiego del fascio interno del Sincrotrone Nazionale per lo studio di reazioni (e, e'p) (proposta di esperienza). *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 63/42 (4 dicembre 1963).
- Amaldi U Jr, Campos Venuti G, Cortellessa G, Fronterotta G, Hillman P, Reale A, Salvadori P. Preliminary results of a study of the reactions  $C^{12}(e, e'p)B^{11}$  induced by 550 MeV electrons. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 64/25 (25 giugno 1964a).
- Amaldi U Jr, Campos Venuti G, Cortellessa G, Fronterotta G, Reale A, Salvadori P, Hillman P. Inner-Shell proton binding energy in  $C^{12}$  and  $Al^{27}$  from the (e, e'p) reaction using 550-MeV electrons. *Phys Rev Lett* 13, 341-343 (1964b).
- Autori vari. Relazione sull'attività dei reparti 1° e 2° dei Laboratori di Fisica (Sottosezione "Sanità" associata all'INFN) nel 1960-1961. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 61/29.
- Battimelli G, De Maria M, Paoloni G. *L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Storia di una comunità di ricerca*. Editori Laterza (2001).
- Berkelman K, Cortellessa G, Reale A. Search for the  $\omega^0$  photoproduction. *Phys Rev Lett* 6, 234-236 (1961).
- Berkelman K, Cortellessa G, Reale A, Salvadori P. *Fotoproduzione di mesoni  $\pi^0$  da idrogeno*. CNEN, Laboratori Nazionali di Frascati. VR-4, p. 102 (1961).
- Campos Venuti G. Cinematica della fotoproduzione dei  $\Lambda^0$  e dei  $K^+$  in idrogeno tra 925 e 1500 MeV. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 61/14 (1961).

- Campos Venuti G. Cinematica della fotoproduzione in idrogeno di particelle di massa apparente pari a 300, 400, 500, 600, 900 e 1000 MeV. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 62/27-28-29-30 (1962).
- Campos Venuti G, Giucci D. Programma per il calcolo della cinematica della fotoproduzione in idrogeno di particelle di massa apparente pari a 300, 350, 400, 450, 500, 600 e 700 MeV (correlazioni angolari). *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 63/12-13-14-15-16-17-18 (1963).
- Campos Venuti G, Matthiae G. Calcolo dell'efficienza degli scintillatori plastici nella rivelazione di neutroni veloci. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 61/47.
- Campos Venuti G, Cortellessa G, De Sanctis E, Farchi G, Frullani S, Lombard R, Salvadori P. Studio delle reazioni (e, e'p), (e, e'n), (e, e'α) utilizzando il fascio estratto dall'Elettrosincrotrone di Frascati (proposta d'esperienza). *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 66/20 (1966).
- Campos Venuti G, Fronterotta G, Matthiae G. Neutron spectra from  $\pi$  capture in Cu, Sn, and Pb. *Phys Lett* 9, 45-48 (1964).
- Cortellessa G, Reale A. Cinematica della diffusione elastica di gamma da protoni tra 300 e 1200 MeV. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* DT 59/4 (1959a).
- Cortellessa G, Reale A. Cinematica della fotoproduzione in idrogeno e decadimento dei mesoni  $\pi^0$ . *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* DT 59/3 (1959b).
- Cortellessa G, Reale A. Preliminary results of a measurement of the differential cross sections for single  $\pi^0$ -meson photoproduction in hydrogen. *Nuovo Cimento* 18, 1265-1266 (1960a).
- Cortellessa G, Reale A. Programma per il calcolo di un telescopio di range (calcolatore IBM 610). *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 61/17 (1961).
- Cortellessa G. Sulla protezione dalla radiazione diffusa generata dalle macchine acceleratrici per elettroni con energia massima attorno a 1 GeV. *Rendiconti dell'Istituto Superiore di Sanità* 23, 397-422 (1960).
- Cortellessa G, Amaldi U Jr, Reale A. Ottica di iniezione. *Nuovo Cimento Supplemento* 24, 298-311 (1962).
- Cortellessa G, Reale A. Dispositivi elettronici per una esperienza di fotoproduzione di mesoni  $\pi^0$  da protoni. *Rendiconti dell'Istituto Superiore di Sanità* 23, 550-574 (1960b).
- Cortellessa G, Reale A, Salvadori P. Ricerche sulla struttura del protone attraverso misure di sezione d'urto differenziale di fotoproduzione singola di mesoni  $\pi^0$  e di effetto Compton. *Rendiconti dell'Istituto Superiore di Sanità* 23, 1177-1197 (1960).
- Farchi G, Lanciani P. Il programma Ariel per lo studio di reazioni di fotoproduzione in idrogeno. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 64/21 (12 giugno 1964).

- Frullani S. Le reazioni  $A(e, e'x)R$  in approssimazione impulsiva. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 66/45 (1966).
- Grandolfo M. Misure di fotoproduzione di mesoni  $\pi^+$  mediante coincidenze neutrone-pione. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 64/41 (1964).
- Jacob G, Maris Th. AJ. Quasi-free electron-proton scattering (I). *Nucl Phys* 31, 139-151 (1962).
- Jacob G, Maris Th. AJ. Quasi-free scattering and nuclear structure. *Rev Mod Phys* 38, 121-142 (1966).
- Jacob G, Maris Th. AJ. Quasi-free scattering and nuclear structure (II). *Rev Mod Phys* 45, 6 (1973).
- Leconte P, Mougey J, Tomasso A, Barreau P, Bernheim M, Bussiere de Nercy M, Cohen N, Comoretto J-C, Dupont J, Frullani S, Grunberg C, Hisleur J-M, Le Devehat J, Lefevre M, Lemarchand G, Millaud J, Royer D, Salvaudon R. The electron scattering facility at the Saclay 600 MeV linear accelerator. *Nucl Instrum Meth* 169, 401-412 (1980).
- MacDaniel BD, Silverman A, Wilson RR, Cortellessa G. Photoproduction of  $K^+$  Mesons. *Phys Rev* 115, 1039-1048 (1959).
- Matthiae G. Calcolo della contaminazione di mesoni  $\mu$  in un fascio di mesoni  $\pi$  carichi. *Rapporti dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità* ISS 61/20 (1961).