

PILLOLE DI STORIA / HISTORICAL PILLS

Nello Taccetti

# Fisica con gli acceleratori in Arcetri

Breve cronistoria dedicata a Tito Fazzini che ne è stato uno dei protagonisti principali

*Physics with the accelerators at Arcetri. A short chronicle dedicated to Tito Fazzini who was one of its leading protagonists*

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze e Sezione INFN di Firenze

**Sommario.** Si ripercorre per grandi linee il periodo dal 1960 al 2000 in cui sono stati operativi in Arcetri due acceleratori elettrostatici con i quali, anche attuando sofisticati accorgimenti tecnici, sono stati condotti studi di struttura nucleare, di violazione di parità e di reazioni nucleari.

**Keywords.** Fisica nucleare con acceleratori, struttura nucleare, violazione di parità, reazioni nucleari.

In Arcetri la fisica nucleare sperimentale con acceleratori inizia nei primi anni 60 del 1900. All'epoca, in Italia, le ricerche di fisica nucleare erano condotte da gruppi afferenti all'INFN nell'ambito dei contratti di ricerca EURATOM (Comunità Europea dell'Energia Atomica) – CNEN (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare).

**Abstract.** A general overview of the period from 1960 to 2000, during which two electrostatic accelerators were in operation at Arcetri. Also by implementing novel devices, these accelerators were used to carry out studies on nuclear structure, parity violation and nuclear reactions.

**Keywords.** nuclear physics with accelerators, nuclear structure, parity violation, nuclear reactions.

Experimental nuclear physics with accelerators began at Arcetri in the early 1960s. At that time nuclear physics research in Italy was carried out by groups belonging to the INFN (National Nuclear Physics Institute) in the frame of research contracts administered by EURATOM (European Atomic Energy Community) – CNEN (National Nuclear Energy Committee).

The members of the nuclear physics group of the Florence subsection of the INFN (which was a branch of the Rome section) included: Manlio Mandò (the group leader), Tito Fazzini, Piergiorgio Bizzeti, Anna Maria Bizzeti-Sona, Mario Bocciolini, Giuliano di Caporiacco (who



Facevano parte del gruppo di fisica nucleare della sottosezione INFN di Firenze (che afferiva alla sezione di Roma): Manlio Mandò (capogruppo), Tito Fazzini, Piergiorgio Bizzeti, Anna Maria Bizzeti-Sona, Mario Bocciolini, Giuliano di Caporiacco (che, molto presto, trasferì i suoi interessi allo studio delle particelle elementari con tecniche visualizzanti) e, dagli anni 62-63, i neo-laureati: Pietro Sona, Paolo Maurenzig, Nello Taccetti, Paolo Blasi.

In quel periodo, nel quadro del potenziamento delle attività di ricerca di fisica nucleare in Italia, furono acquisiti, con fondi del contratto, alcuni acceleratori di tipo Van de Graaff della ditta HVEC (High Voltage Engineering Co.: Burlington, Massachusetts USA). Nel 1960 uno di questi fu assegnato alla sottosezione di Firenze: si trattava di un acceleratore modello PN 400 che forniva una tensione di terminale di 400 kV ed era adatto per accelerare protoni e deutoni, con lo scopo di produrre neutroni e raggi  $\gamma$ .

Per la sua collocazione operativa fu costruito un bunker adiacente all'edificio dell'Istituto di Fisica. L'accesso al bunker dall'adiacente locale dell'Istituto, che fu adibito a sala comandi e misure, fu realizzato modificando una loggetta preesistente. La Figura 1 mostra l'acceleratore alloggiato nel bunker.

La messa a punto dell'acceleratore fu curata da M. Bocciolini e G. di Caporiacco con la collaborazione dei tecnici Paolo Calonaci, Daniele Lolli e Giuseppe Pregno. Le principali attività svolte furono: 1) produzione di stati isomerici con reazioni del tipo  $(n,2n)$ ,  $(n,n')$ ; 2) misura delle fluttuazioni della sezione d'urto di foto-produzione al variare dell'energia dei  $\gamma$  in reazioni  $(\gamma,p)$ ,  $(\gamma,\alpha)$ .

Una delle prime utilizzazioni del PN400 si ebbe con le tesi di P. Sona e Giorgio Curzio nell'a.a. 61-62. Si sfruttava il forte flusso di neutroni di energia di

very soon turned his attention to the study of elementary particles with visualising techniques) and, from 1962-63, the new graduates Pietro Sona, Paolo Maurenzig, Nello Taccetti and Paolo Blasi.

With a view to boosting nuclear physics research activities in Italy, at that time the Executive Board of INFN decided to use funds of the EURATOM-CNEN contract to purchase several accelerators of the Van de Graaff type from the HVEC firm (High Voltage Engineering Co., Burlington, Massachusetts, USA). In 1960 one of these was assigned to Florence: it was a PN 400 model accelerator with a terminal voltage of 400 kV which was suitable for accelerating protons and deuterons, with the purpose of producing neutrons and  $\gamma$  rays through nuclear reactions on appropriate targets.

For the operational housing of the accelerator a special bunker was built next to the Physics Institute building. An adjacent area of the Institute was set up as a control and measurements room, and access from this to the bunker was created by modifying an existing loggia. Figure 1 shows the accelerator housed in the bunker.

The fine tuning of the accelerator was carried out by M. Bocciolini and G. di Caporiacco, with the collaboration of the technicians Paolo Calonaci, Daniele Lolli and Giuseppe Pregno. The main activities performed were: 1) production of isomeric states with reactions of the type  $(n,2n)$ ,  $(n,n')$ ; 2) measurement of the fluctuations of the photoproduction cross section as a function of the energy of the  $\gamma$  rays in  $(\gamma,p)$ ,  $(\gamma,\alpha)$  reactions.

One of the first uses of the PN400 was for the theses of P. Sona and Giorgio Curzio in the academic year 1961-2. These works exploited the strong flow of neutrons of an energy of

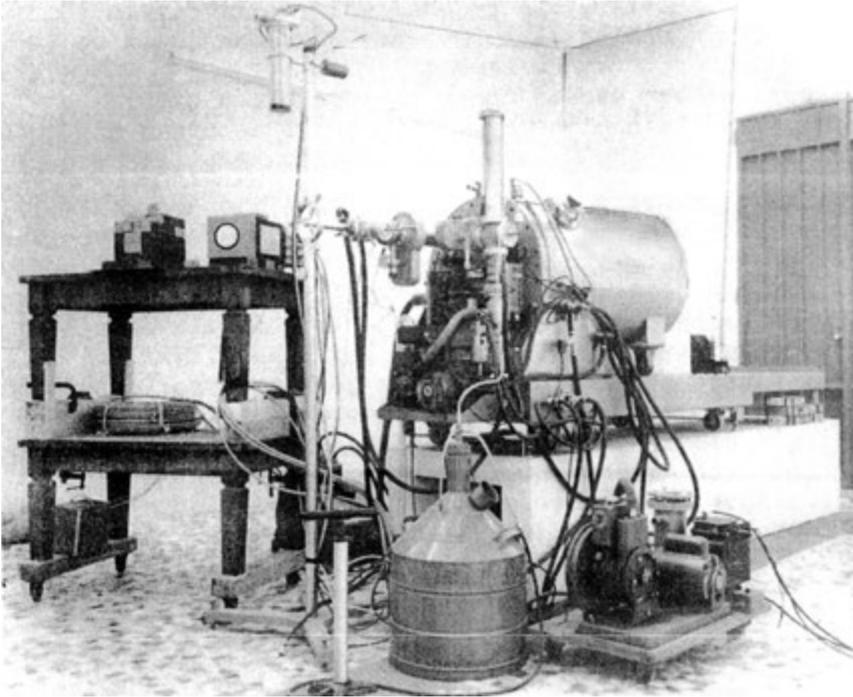


Figura 1. L'acceleratore PN400 della High Voltage Engineering Co. e i suoi servizi, installato nel bunker di Arcetri. L'acceleratore è ora esposto nell'atrio del Dipartimento di Fisica e Astronomia a Sesto Fiorentino.

Figure 1. The PN400 accelerator made by the High Voltage Engineering Co. and its services, installed in the bunker at Arcetri. The accelerator is now displayed in the entrance hall of the Department of Physics and Astronomy at Sesto Fiorentino.

around 14 MeV, produced with the  ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$  reaction, to induce  $(n,2n)$  reactions on a series of isotopes, among which the first studied were  ${}^{81}\text{Br}$  and  ${}^{112}\text{In}$ . The unstable nuclei thus produced were highly populated in both the fundamental state and in an isomeric state. The isomeric state decayed, with a typical lifetime in the order of minutes, towards the fundamental state which was also unstable. Following the  $\beta$ -decay of the latter the excited levels of the daughter nucleus were populated, and the  $\gamma$  rays of de-excitation could be detected. The detection of these was made using NaI(Tl) scintillators and the decay-time of the  $\gamma$  intensity recorded revealed a composite trend due to the lifetimes of the isomeric state and the fundamental state of the parent nucleus. The neutron irradiation and the counting of the consequent  $\gamma$  radiation took place in prefixed time cycles using a pneumatic system which, in less than a second, moved the sample from the radiation site (close to the tritium target) to the counting station located several metres away. The analysis of the experimental data enabled the extraction of the ratio of production via the reaction  $(n,2n)$  of the isomeric level and of the fundamental state. This ratio then made it possible to extract the parameter of spin cut-off characterising the distribution of spin of the levels of the compound nucleus.

Of particular technological interest was the research on the  ${}^{127}\text{I}(n,\alpha)$  reaction, in which a NaI(Tl) scintillator crystal acted both as target and as detector for the particles produced within it. For the first time, on the basis of the different shapes of the light pulses as a function of the time, using a NaI(Tl) detector it was possible to distinguish different detected particles: alpha, protons and electrons.

circa 14 MeV, prodotti con la reazione  ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ , per indurre reazioni  $(n,2n)$  su una serie di isotopi di cui i primi studiati furono  ${}^{81}\text{Br}$  e  ${}^{112}\text{In}$ . I nuclei instabili così prodotti erano molto popolati sia nello stato fondamentale sia in uno stato isomerico. Lo stato isomerico decadeva, con vita media tipica dell'ordine dei minuti, verso lo stato fondamentale, anch'esso instabile. A seguito del decadimento  $\beta$  di quest'ultimo venivano popolati livelli eccitati del nucleo figlio di cui si potevano rivelare i raggi  $\gamma$  di diseccitazione. La rivelazione di questi avveniva mediante scintillatori NaI(Tl) e il decadimento temporale dell'intensità  $\gamma$  registrata mostrava un andamento composito dovuto alle vite medie dello stato isomerico e dello stato fondamentale del nucleo padre. Le operazioni di irradiazione con neutroni e conteggio della radiazione  $\gamma$  avvenivano in cicli temporali prestabiliti utilizzando un sistema pneumatico che, in meno di un secondo, spostava il campione dal sito di irradiazione (in prossimità del target di trizio) alla stazione di conteggio situata a vari metri di distanza. L'analisi dei dati sperimentali consentiva l'estrazione del rapporto di produzione via reazione  $(n,2n)$  del livello isomerico e dello stato fondamentale. Da tale rapporto si poteva poi estrarre il parametro di spin cut-off che caratterizza la distribuzione di spin dei livelli del nucleo composto.

Di notevole interesse tecnologico fu la ricerca relativa alla reazione  ${}^{127}\text{I}(n,\alpha)$  nella quale un cristallo scintillatore di NaI(Tl) fungeva sia da bersaglio che da rivelatore per le particelle prodotte al suo interno. Per la prima volta, in base alle differenti forme degli impulsi di luce in funzione del tempo, si poterono distinguere con un rivelatore NaI(Tl) le differenti particelle rivelate: alfa, protoni, elettroni.

Following the theoretical prediction of T. Ericson and subsequent experimental observations the measurements of the cross sections induced by neutrons were postponed and the accelerator was dedicated to the study of the fluctuations of the cross section in nuclear reactions at energies much higher than those typical of isolated resonances. M. Mandò was the first to clarify that the fluctuations could also be observed in the photoreactions and that, for this purpose, it was possible to use the  $\gamma$  rays of the  ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$  reaction of the resonance at  $E_p = 441$  keV. The energy of the  $\gamma$  rays produced is around 17 MeV and, by Doppler effect, varies with the change in the angle of emission with respect to the direction of the proton beam. The maximum working energy of the accelerator was brought to over 470 keV (with major contribution from G. di Caporiacco), and a series of measurements [1] on the  ${}^{28}\text{Si}(\gamma,p){}^{27}\text{Al}$  and  ${}^{28}\text{Si}(\gamma,\alpha){}^{24}\text{Mg}$  reactions demonstrated the presence of rapid variations of the cross section depending on the energy, also in the case of photoreactions (P.G. Bizzeti, A.M. Bizzeti-Sona, M. Bocciolini, G. di Caporiacco, T. Fazzini, M. Mandò). In these measurements too, the target of Si consisted of the same semiconductor detector used to measure the energy of the particles produced inside it.

At the end of the 1960s the potential of the PN400 as a research instrument began to be restrictive. Nevertheless the nuclear group as a whole were of the opinion that an accelerator with a low (but not too low) terminal voltage could be useful both for specific fundamental nuclear research and in terms of the training of undergraduates and graduates in the field of experimental nuclear physics. For this reason, M. Mandò submitted a request to the Execu-

Il programma delle sezioni d'urto indotte da neutroni fu interrotto a seguito della previsione teorica di T. Ericson e successive osservazioni sperimentali delle fluttuazioni di sezione d'urto nelle reazioni nucleari a energie molto superiori a quelle tipiche delle risonanze isolate. M. Mandò, per primo, puntualizzò che le fluttuazioni potevano essere osservate anche nelle fotoreazioni e che, per questo scopo, si potevano utilizzare i  $\gamma$  della reazione  ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$  della risonanza a  $E_p = 441$  keV. L'energia dei  $\gamma$  prodotti è circa 17 MeV e varia, per effetto Doppler, al variare dell'angolo di emissione rispetto alla direzione del fascio. L'energia massima di lavoro dell'acceleratore fu portata (con il contributo determinante di G. di Caporiacco) oltre 470 keV e una serie di misure [1] sulle reazioni  ${}^{28}\text{Si}(\gamma,p){}^{27}\text{Al}$  e  ${}^{28}\text{Si}(\gamma,\alpha){}^{24}\text{Mg}$  mostrò la presenza di rapide variazioni di sezione d'urto in funzione dell'energia anche nel caso delle fotoreazioni (P.G. Bizzeti, A.M. Bizzeti-Sona, M. Bocciolini, G. di Caporiacco, T. Fazzini, M. Mandò). Anche in queste misure il bersaglio di Si era costituito dallo stesso rivelatore a semiconduttore utilizzato per misurare l'energia delle particelle prodotte al suo interno.

Alla fine degli anni 60 le potenzialità del PN400 come strumento di ricerca risultarono limitanti. Era tuttavia opinione diffusa nel gruppo nucleare che un acceleratore che disponesse di una tensione di terminale piccola, ma non piccolissima, potesse risultare utile sia per particolari ricerche di fisica nucleare fondamentale sia dal punto di vista della formazione di laureandi e neo-laureati nel campo della fisica nucleare sperimentale. Per questi motivi, a nome del gruppo nucleare della sezione di Firenze, M. Mandò presentò al Consiglio Direttivo dell'INFN una richiesta per trasferire ad Arcetri l'acceleratore di elettroni KS3000 (VdG di 3 MV

ive Board of the INFN to transfer to Arcetri the KS3000 electron accelerator (a 3MV Van de Graaff made by the HVEC), the injector of the electrosynchrotron of Frascati, which had begun working in the mid-1950s and ceased in 1968-9. The accelerator arrived in Florence in 1971 and was housed in the bunker of the disused PN400. In 1972 its conversion into a positive ion accelerator was begun. The conversion and adjustment phase, as well as the acquisition of an analysing magnet and a tube for the acceleration of positive ions, took longer than expected. This delay was partly due to the need to provide the accelerator with reliable services and, above all, to the economic difficulties of the Country, and hence of the INFN for extra-budget expenditure. Finally, in the second half of the 70s several favourable circumstances occurred: the relevant increase in the availability of INFN funds and the stimulus given by the INFN to the study of problems of fundamental physics. All this was translated into the support and funding of the INFN for studying the effect of weak interaction in the nuclei to verify the – at the time, recent – theoretical predictions of a small but non-negligible parity mixing in the nuclear states. The upshot was that the nuclear group decided to entrust N. Taccetti, T. Fazzini and G. Poggi with the running of the accelerator. An excellent assistance was provided by the technicians: P. Calonaci (electronics), Piero Del Carmine (vacuum systems and logistics) and Adriano Pecchioli (mechanics and electromechanics).

Over a period of about 3 years the accelerator was completely refurbished and equipped with reliable basic services. In 1978, the revision of the accelerator was completed with the installation of the positive ion tube. From then on, using the HVEC acronym for the positive ion

di tensione della HVEC), iniettore dell'elettrosincrotrone di Frascati, la cui attività, iniziata alla metà degli anni 50, era terminata negli anni 68-69. L'acceleratore giunse a Firenze nel 1971 e fu alloggiato nel bunker del dismesso PN400. Nel 1972 iniziò la sua conversione per accelerare ioni positivi. La fase di conversione e messa a punto, nonché l'acquisizione di un adeguato magnete di analisi e di un tubo per l'accelerazione di ioni positivi, si protrasse più a lungo del previsto. Il ritardo fu dovuto in parte alla necessità di provvedere l'acceleratore di servizi affidabili e, soprattutto, alle difficoltà economiche del paese e di riflesso dell'INFN per finanziamenti extra-budget. Finalmente, nella seconda metà degli anni 70, si verificarono alcune circostanze favorevoli: 1. Deciso aumento di disponibilità di fondi INFN 2. Impulso dato dall'INFN allo studio di problemi di fisica fondamentale. Tutto ciò si tradusse nel sostegno e finanziamento dell'INFN allo studio dell'effetto nei nuclei dell'interazione debole (delle correnti deboli cariche e neutre) come verifica delle, allora recenti, previsioni teoriche di piccoli, ma non piccolissimi, mescolamenti di parità negli stati nucleari. Il risultato fu la decisione del gruppo nucleare di affidare la conduzione dell'acceleratore a N. Taccetti, T. Fazzini e G. Poggi coadiuvati dai tecnici: P. Calonaci (elettronica), Piero Del Carmine (impianti di vuoto e logistica), Adriano Pecchioli (meccanica ed elettromeccanica).

In un periodo di circa 3 anni l'acceleratore fu completamente revisionato e dotato di servizi di base affidabili. Nel '78, con la installazione del tubo per ioni positivi, la revisione dell'acceleratore fu completata. Da allora, utilizzando la sigla della HVEC per individuare gli acceleratori di ioni positivi di 3 MV di tensione, l'acceleratore fu indicato come KN 3000. Dopo aver superato un periodo

accelerators of a voltage of 3 MV, the name of the accelerator was changed to KN 3000. After a successful trial period with a beam of  ${}^4\text{He}^+$  ions of 3.2 MeV and a current of 7  $\mu\text{A}$  the accelerator entered the operational phase.

The accelerator operated continuously up to 1982 in two different branches of the nuclear research, yielding: technical and methodological results, a broader and deeper knowledge of nuclei of intermediate mass, a first verification of the theoretical results predicted for the mixing of parity in nuclear states (FWEIN experiment) and the preparation of a second-generation experiment designed to improve the statistical accuracy (WEIN2 experiment).

In the case of the study of nuclei of intermediate mass (M. Bini, T. Fazzini, P. Maurenzig, Andrea Perego, G. Poggi and N. Taccetti), this was a set of measurements expected to provide reliable spectroscopic information for nuclei for which information was deficient or lacking at all.

The study of the  ${}^{83,85,86}\text{Rb}$  isotopes used principally the technique of the Doppler-shift attenuation in gas for measuring the lifetimes of the excited levels. This technique, which is in principle extremely powerful in terms of the simplicity with which, by varying the pressure of the gas, the slowing-down time of the recoiling nuclei (and hence the timescale with which the attenuation is observed) is varied, suffered from a limitation on its use caused by the major uncertainty in determining the slowing-down time, an uncertainty stemming from the heating caused by the passage of the beam in the gas. Furthermore, the maximum pressures utilised up to then did not exceed 10 atmospheres, making the field of the lifetimes between tens of picoseconds and a few tenths of a picosecond inaccessible. To overcome these problems a

di prova con un fascio di ioni  ${}^4\text{He}^+$  di 3.2 MeV e corrente di 7  $\mu\text{A}$  l'acceleratore iniziò la sua fase operativa.

Fino all'82 l'acceleratore ha lavorato in maniera continua in due ambiti di ricerca che hanno prodotto: risultati tecnico-metodologici, un ampliamento e approfondimento nella conoscenza di nuclei di massa intermedia, una prima verifica dei risultati teorici previsti per il mescolamento di parità negli stati nucleari (esperimento FWEIN), la preparazione di un esperimento di seconda generazione (esperimento WEIN2) inteso a migliorare l'accuratezza statistica.

Nel caso dello studio dei nuclei di massa intermedia (M. Bini, T. Fazzini, P. Maurenzig, Andrea Perego, G. Poggi, N. Taccetti), si è trattato di un complesso di misure con le quali si volevano ottenere informazioni spettroscopiche attendibili per nuclei per i quali tali informazioni erano carenti o assenti.

Lo studio degli isotopi  ${}^{83,85,86}\text{Rb}$  utilizzò principalmente la tecnica del Doppler-shift attenuato nei gas per la misura delle vite medie dei livelli eccitati. Questa tecnica, in linea di principio molto potente per la semplicità con la quale, variando la pressione del gas, si può variare il tempo di rallentamento dei nuclei di rinculo (e quindi la scala dei tempi con la quale si osserva l'attenuazione), soffriva di un limite di utilizzo a causa della grande incertezza nella determinazione del tempo di rallentamento, incertezza che nasceva dal riscaldamento provocato dal passaggio del fascio nel gas. Inoltre le pressioni massime fino ad allora utilizzate non superavano le 10 atmosfere, ciò che rendeva inaccessibile il campo di vite medie fra le decine di picosecondi e pochi decimi di picosecondo. Per superare questi problemi fu realizzata una cella speciale, con finestra di Nickel sottile in grado di

special cell was made with a thin nickel window capable of working up to 100 Atm. Furthermore, for krypton and argon the gas density correction factors were determined as a function of the power deposited by the beam. The set of new experimental data, much more complete and accurate than the previous ones, highlighted the need for a substantial review of the theoretical approach previously attempted for the description of the spectroscopic properties of the levels in this nuclear region.

As regards the measurements of the parity mixing in the nuclear states, the programme consisted of two phases. The first, lasting from 1978 to 1980, took place in fairly precarious logistic conditions, while the second was carried out after the accelerator was moved in 1982 into the new area purposely designed for it on the occasion of the extension of the Physics Department building.

First phase: FWEIN experiment

*"If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned together with a small percentage of state possessing the opposite parity"* T.D. Lee, C.N. Yang Phys. Rev. 104 (1958) 254.

In the case of nuclear states the effect was described through a "small" parity violating term of potential, linked to the nucleon-nucleon interaction, which was assumed to take place mainly through the exchange of a  $\pi$  meson. In 1968 E.M. Henley identified the case of  ${}^{18}\text{F}$  as

lavorare fino a 100 Atm. Inoltre per Krypton e Argon furono determinati i fattori di correzione della densità del gas in funzione della potenza depositata dal fascio. Il complesso dei nuovi dati sperimentali, molto più completi e accurati dei precedenti, evidenziò la necessità di una sostanziale revisione dell'approccio teorico tentato fino ad allora per la descrizione delle proprietà spettroscopiche dei livelli in questa zona nucleare.

Riguardo alle misure di mescolamento di parità negli stati nucleari si è trattato di un programma che si è articolato in due fasi. La prima, durata dal '78 all'80, si è svolta in condizioni logistiche abbastanza precarie, mentre la seconda è stata effettuata dopo lo spostamento dell'acceleratore, avvenuto nel 1982, nei nuovi locali ad esso dedicati nel quadro dell'ampliamento del Dipartimento di Fisica.

Prima fase: esperimento FWEIN

*"If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned together with a small percentage of state possessing the opposite parity"* T.D. Lee, C.N. Yang Phys. Rev. 104 (1958) 254.

Nel caso di stati nucleari si descriveva l'effetto tramite un "piccolo" termine di potenziale che viola la parità, collegato all'interazione nucleone-nucleone che era supposta avvenire prevalentemente per scambio di un mesone  $\pi$ . Nel 68 fu individuato da E.M. Henley il caso del  $^{18}\text{F}$  come particolarmente adatto a mette-

particularly suitable to demonstrate these effects. In extreme simplification, one could say that the measurement of the fraction  $P_\gamma$  of circularly polarised  $\gamma$  rays, of all those that de-excite the level at 1081 keV ( $J^\pi = 0^-$ ) towards the fundamental state ( $J^\pi = 1^+$ ), enables an experimental verification of the various theoretical predictions of the entity of a component  $0^+$  in that level, due precisely to the mixing with a nearby level of opposite parity and identical spin. The presence of a small fraction of circularly polarized  $\gamma$  rays is due to the fact that the state, in addition to its usual negative parity, also possesses positive parity, so that its decay to the fundamental state can take place not only through the "natural" electric dipole transition, but also through the "anomalous" magnetic dipole transition. It is the interference between these two modes of decay that generates the presence of a small fraction  $P_\gamma$  of circularly polarised  $\gamma$  rays. In the middle of the 1970s the entity of the parity mixing of the state at 1081 keV had been assessed by various authors within the Weinberg-Salam model (WS) of the weak interaction and the predicted circular polarisation was:  $P_\gamma^{\text{ws}} = (20 \div 120) \cdot 10^{-4}$  with a "best value" of  $60 \cdot 10^{-4}$ .

In this context the FWEIN experiment funded by the INFN (P.G. Bizzeti, T. Fazzini, P. Mauzenzig, A. Perego, G. Poggi, P. Sona and N. Taccetti), aimed to measure the circular polarisation with a statistical error  $\Delta P_\gamma = 30 \cdot 10^{-4}$ . The levels of  $^{18}\text{F}$  were populated with the reaction  $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p)^{18}\text{F}$ , bombarding a thick target of quartz ( $\text{SiO}_2$ ) housed in a Faraday cup, with a beam of  $3 \mu\text{A } ^3\text{He}^+$  ions of 3 MeV. The transmission polarimeter for  $\gamma$  rays consisted of a cylindrical iron core positioned after the target, with the axis along the direction of the beam on the target, followed by a coaxial Ge(Li) detector also positioned along the same axis. The core, enclosed

re in evidenza questi effetti. Semplificando molto, si può dire che la misura della frazione  $P_\gamma$  di  $\gamma$  polarizzati circolarmente, di tutti quelli che diseccitano il livello a 1081 keV ( $J^\pi = 0^-$ ) verso lo stato fondamentale ( $J^\pi = 1^+$ ), permette una verifica sperimentale significativa delle diverse previsioni teoriche della entità di una componente  $0^+$  in tale livello, dovuta proprio al mescolamento con un vicino livello di parità opposta e spin identico. L'insorgere della polarizzazione circolare è la conseguenza del fatto che lo stato, oltre alla sua usuale parità negativa, possiede anche parità positiva, cosicché il suo decadimento allo stato fondamentale può avvenire oltre che con la transizione "naturale" di dipolo elettrico anche tramite la transizione "anomala" di dipolo magnetico. È l'interferenza fra questi due modi di decadimento che genera la presenza di una piccola frazione  $P_\gamma$  di  $\gamma$  polarizzati circolarmente. L'entità del mescolamento di parità dello stato a 1081 keV era stato valutato da diversi autori nell'ambito del modello di Weinberg-Salam (WS) e la polarizzazione circolare prevista era:  $P_\gamma^{ws} = (20 \div 120) 10^{-4}$  con un "best value" di  $60 10^{-4}$ .

In questo quadro, con l'esperimento FWEIN finanziato dall'INFN (P.G. Bizzeti, T. Fazzini, P. Maurenzig, A. Perego, G. Poggi, P. Sona, N. Taccetti), fu deciso di misurare la polarizzazione circolare con un errore statistico  $\Delta P_\gamma = 30 10^{-4}$ . I livelli del  $^{18}\text{F}$  erano popolati con la reazione  $^{16}\text{O}(^3\text{He},p)^{18}\text{F}$ , bombardando un bersaglio spesso di quarzo ( $\text{SiO}_2$ ), alloggiato in una Faraday-cup, con un fascio di  $3 \mu\text{A}$  di ioni  $^3\text{He}^+$  di 3 MeV. Il polarimetro a trasmissione per raggi  $\gamma$  consisteva di un nocciolo cilindrico di ferro posto dopo il target con l'asse coincidente con la direzione del fascio sul target ed era seguito da un rivelatore coassiale Ge(Li)

by 4 sheets also made of iron, constituted a magnetic circuit that could be magnetised to saturation in the two opposite ways by means of an excitation coil. Its function is based on the fact that at a given energy of the  $\gamma$  rays, their cross section for Compton scattering on the electrons shows a contribution depending on their possible circular polarisation. In particular, the difference in the value of the cross section is greatest when the electron spins of the iron are parallel or antiparallel with respect to the velocity vector of the  $\gamma$  rays. The analysing power  $S$  of the polarimeter is defined by the relation  $A_\gamma = S P_\gamma$  with the experimental asymmetry of  $A_\gamma$  given by:  $A_\gamma = (n^+ - n^-) / (n^+ + n^-)$ , where  $n^+$  ( $n^-$ ) is the number of  $\gamma$  counts recorded in the photopeak of the Ge(Li) detector when the magnetisation of the polarimeter is antiparallel (parallel) with respect to the propagation vector of the  $\gamma$  rays. The measurement of the analysing power, carried out with a  $\gamma$  source with known circular polarisation, provided the value  $S = 1.76 10^{-2}$  and hence a precision in the asymmetry to be measured in the photopeak  $\gamma$  count of 1081 keV:  $\Delta A = 5.2 10^{-5}$ .

After 175 days of the beam on the target, the experiment's result, once it was combined with other results of similar statistical accuracy obtained almost contemporaneously by laboratories abroad, led to a value of  $P_\gamma = (8 \pm 12) 10^{-4}$ , definitely lower than the initially predicted effect. In the meantime, further theoretical predictions had lowered the range of  $P_\gamma$ , indicating a best value of  $20 10^{-4}$ . Since the topic remained of strong interest and it was considered important to obtain a value for  $P_\gamma$  rather than having only an upper limit, two new experiments were designed at Queen's University (Kingston, Ontario) and in Florence that aimed at reaching an overall statistical accuracy of  $\Delta P_\gamma = 4 10^{-4}$ .

posto di nuovo secondo lo stesso asse. Il nocciolo, richiuso da 4 lastre anch'esse di ferro, costituiva un circuito magnetico che, tramite una bobina di eccitazione, poteva essere magnetizzato a saturazione nei due versi opposti. Il suo funzionamento si basa sul fatto che, fissata l'energia dei  $\gamma$ , la loro sezione d'urto per scattering Compton sugli elettroni ha una parte che dipende da una loro eventuale polarizzazione circolare. In particolare, la differenza nel valore della sezione d'urto è massima quando gli spin degli elettroni del ferro attraversato sono paralleli o antiparalleli rispetto al vettore velocità dei  $\gamma$ . Il potere analizzante  $S$  del polarimetro è definito dalla relazione  $A_\gamma = S P_\gamma$  con  $A_\gamma$  asimmetria sperimentale data da:  $A_\gamma = (n^+ - n^-)/(n^+ + n^-)$  con  $n^+$  ( $n^-$ ) numero di conteggi  $\gamma$  registrati nel fotopicco del rivelatore Ge(Li) quando la magnetizzazione del polarimetro è antiparallela (parallela) rispetto al vettore di propagazione dei  $\gamma$ . La misura del potere analizzante, fatta con una sorgente  $\gamma$  di polarizzazione circolare nota, fornì il valore  $S = 1.76 \cdot 10^{-2}$ . Pertanto la precisione nella misura dell'asimmetria del conteggio di fotopicco dei gamma di 1081 keV doveva essere:  $\Delta A = 5.2 \cdot 10^{-5}$ .

Dopo 175 giorni di fascio sul bersaglio, il risultato dell'esperimento, una volta combinato con altri di simile accuratezza statistica ottenuti quasi in contemporanea in laboratori esteri, portava ad un valore  $P_\gamma = (8 \pm 12) \cdot 10^{-4}$  decisamente inferiore rispetto all'effetto inizialmente previsto. Nel frattempo ulteriori previsioni teoriche avevano abbassato il range per  $P_\gamma$ , indicando un "best value" di  $20 \cdot 10^{-4}$ . Siccome l'argomento rimaneva di forte attualità ed era ritenuto importante ottenere un valore di  $P_\gamma$  piuttosto che avere solo un limite superiore, furono progettati alla Queen's University (Kingston, Ontario) e a Firenze due nuovi esperi-

## Second phase: experiment WEIN2

The experiment WEIN2 (M. Bini, T. Fazzini, G. Poggi, N. Taccetti) was financed with about 400 million liras, and in the first phase the activity was concentrated on the accelerator move to the new rooms necessary for setting up the new experiment.

The fine-tuning of the profound changes to be made to the experimental apparatus in order to achieve the desired statistical accuracy in the measurement of  $P_\gamma(1081 \text{ keV})$  over measuring times in the order of a year took until the middle of 1984. The measuring phase then took place successively until the first months of 1985. With the addition of sulphur hexafluoride gas to the usual tank insulation gas, stable functioning of the accelerator at a voltage of 3.4 MV was achieved, more than 10% above the maximum normally rated operating voltage. This made it possible to obtain a larger cross section for the reaction and to work with a  $^3\text{He}^+$  current below  $10 \mu\text{A}$ .

As shown by the photograph in Figure 2, the quartz target used during the first measurement was replaced by a water jet with no window towards the beam. The advantage of this is that the  $\gamma$  background caused by the  $\beta$ -decay of the  $^{18}\text{F}$  is removed immediately and the power dissipated by the beam on the target is disposed of very efficiently. The polarimeter was replaced by a polarimeter with four prongs placed at  $90^\circ$  to one another and with respect to the incoming beam direction. The photograph in Figure 3 shows the participants in the experiment next to the set-up of the water jet, the polarimeter and the 4 HpGe detectors in the

menti che si proponevano di raggiungere una accuratezza statistica complessiva di  $\Delta P_\gamma = 4 \cdot 10^{-4}$ .

## Seconda fase: esperimento WEIN2

L'esperimento WEIN2 (M. Bini, T. Fazzini, G. Poggi, N. Taccetti) fu finanziato con circa 400 Mlire e in una prima fase l'attività fu concentrata nello spostamento dell'acceleratore nei nuovi locali, necessario per allestire il nuovo esperimento.

La messa a punto delle profonde modifiche da apportare all'apparato sperimentale per raggiungere nella misura di  $P_\gamma(1081 \text{ keV})$  l'accuratezza statistica voluta e in tempi di misura dell'ordine dell'anno, durò fino alla metà dell'84; la fase di misura si svolse poi, in sequenza, fino ai primi mesi dell'85. Con l'aggiunta di gas esafluoruro di zolfo all'usuale gas di isolamento della tank, si ottenne una operazione stabile dell'acceleratore alla tensione di 3.4 MV, superiore di più del 10% della tensione massima garantita di esercizio. Questo permetteva di avere una maggiore sezione d'urto per la reazione e di lavorare con una corrente di  ${}^3\text{He}^+$  inferiore a 10  $\mu\text{A}$ . Come mostrato dalla foto di Figura 2, il target di quarzo fu sostituito da uno a getto d'acqua senza finestra verso il fascio, con il vantaggio di allontanare subito il fondo  $\gamma$  dovuto al decadimento  $\beta$  del  ${}^{18}\text{F}$ . Il polarimetro fu sostituito da uno a quattro rami a  $90^\circ$  fra loro e rispetto alla direzione di arrivo del fascio. La foto di Figura 3 mostra i partecipanti all'esperimento accanto al complesso del bersaglio ad acqua, del polarimetro e dei 4 rivelatori HpGe nel-

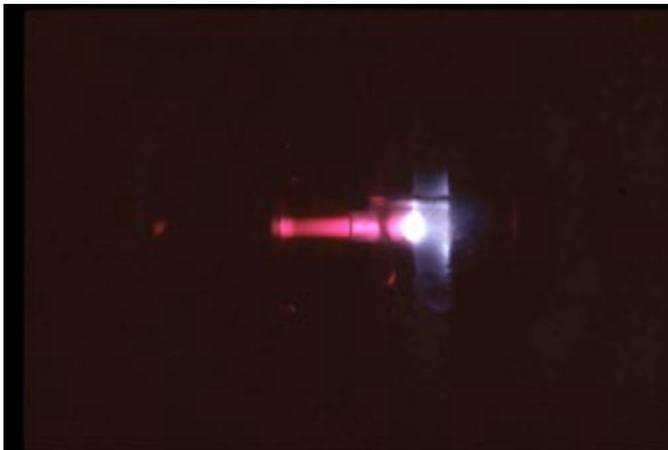


Figura 2. Bersaglio a getto d'acqua sotto vuoto osservato attraverso una finestra di plexiglass. La luminescenza porporina è indotta dal fascio di  ${}^3\text{He}$  sull'idrogeno presente nel vapor d'acqua residuo e diventa molto intensa nel punto di impatto del fascio con l'acqua del getto. Le bande scure sono le tracce dei diaframmi di Tantalio attraversati in successione dal fascio.

Figure 2. Water jet target under vacuum observed through a plexiglass window. The red purple luminescence is induced by the  ${}^3\text{He}$  beam on the hydrogen present in the residual water vapour and becomes very intense at the point where the beam hits the water of the stream. The dark bands are traces of tantalum diaphragms crossed successively by the beam.

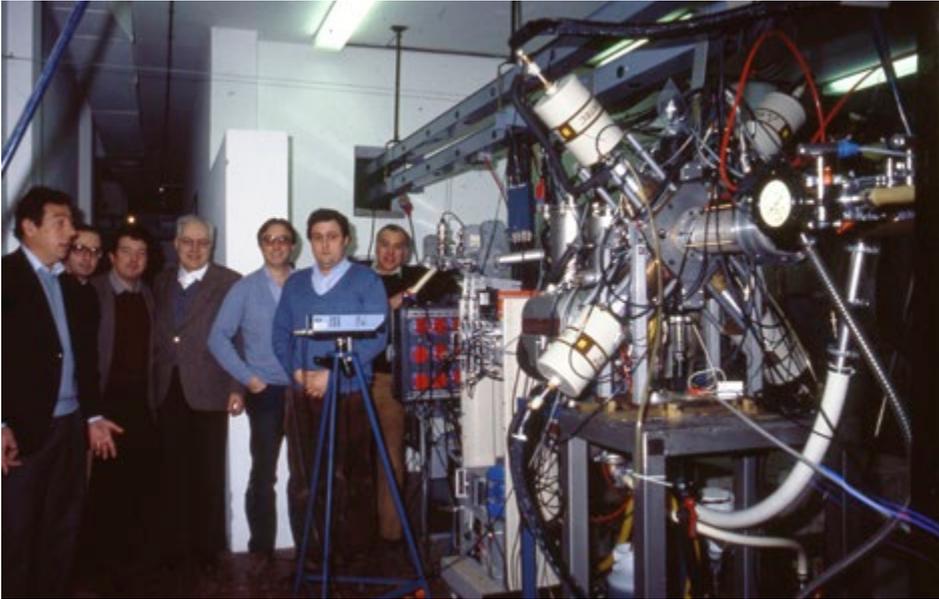


Figura 3. Il gruppo di ricercatori e tecnici coinvolti nell'esperimento WEIN2, fotografati accanto all'apparato sperimentale, durante una sosta della presa dati. Da sinistra: N. Taccetti, P. Calonaci, M. Bini, T. Fazzini, P. Del Carmine, G. Poggi e A. Pecchioli.

Figure 3. The group of researchers and technicians involved in experiment WEIN2, photographed next to the experimental apparatus during a break of the data taking. From the left: N. Taccetti, P. Calonaci, M. Bini, T. Fazzini, P. Del Carmine, G. Poggi and A. Pecchioli.

"gamma-gage" configuration (detector cooled by means of a small Dewar flask automatically rechargeable with liquid nitrogen). On account of the high counting rates, special trapezoidal filters were devised that maintained an energy resolution better than 3 keV at 1081 keV.

Special care was taken for the identification and evaluation of the systematic effects, which were in fact suppressed very efficiently thanks to the high symmetry of the apparatus, to the chosen temporal sequence of the inversion of the magnetic field in the arms of the polarimeter and to the choice of asymmetry estimators that were particularly "robust" with respect to the integration limits used for the evaluation of the intensities of the  $\gamma$  photopeaks. The experiment required 180 days of beam-on-target time. The result [2] was  $P_V = (2.7 \pm 5.7) \cdot 10^{-4}$ , and the weighted average with the results of Queen's University and with the previous results was  $P_V^{\text{exp}} = (1.2 \pm 3.9) \cdot 10^{-4}$ . Immediately afterwards new theoretical estimates updated the situation, indicating  $2 \cdot 10^{-4} < P_V^{\text{th}} < 15 \cdot 10^{-4}$ . The experimental limit made a large part of this range of values unlikely, but it remained completely compatible with the lower theoretical limit. For this reason, the final work on the topic [3] ended as follows: "As a conclusion we may agree with these (theoretical) authors in saying that further nonambiguous insight on this subject could be obtained by substantially lowering the experimental error on  $P_V$ . This is however, in our opinion, a very hard-to-reach goal in the case of  $^{18}\text{F}$ , owing to the small analyzing power of the presently available polarimeters."

From 1986 the accelerator started to be used also for measurements in the fields of environmental physics and cultural heritage, as thoroughly reported in reference [4] by Pierandrea

la configurazione “gamma-gage” (rivelatore raffreddato con un piccolo dewar di azoto liquido ricaricabile automaticamente). Siccome i ritmi di conteggio erano elevati furono utilizzati speciali formatori trapezoidali che mantenevano una risoluzione energetica migliore di 3 keV a 1081 keV.

Una cura speciale fu dedicata all’individuazione e alla valutazione degli effetti sistematici, che risultarono soppressi molto efficacemente: per l’alta simmetria dell’apparato, per la sequenza temporale scelta per l’inversione del campo magnetico nei bracci del polarimetro e per la scelta di estimatori della asimmetria particolarmente “robusti” rispetto ai limiti di integrazione individuati per valutare gli integrali dei fotopicchi  $\gamma$ . L’esperimento richiese 180 giorni di fascio sul bersaglio. Il risultato [2] fu:  $P_\gamma = (2.7 \pm 5.7) 10^{-4}$  e la media con il risultato della Queen’s University e con i precedenti:  $P_\gamma^{\text{exp}} = (1.2 \pm 3.9) 10^{-4}$ . Subito dopo nuove stime teoriche aggiornarono la situazione indicando:  $2 10^{-4} < P_\gamma^{\text{th}} < 15 10^{-4}$ . Il limite sperimentale rendeva poco probabile larga parte di questo campo di valori, ma rimaneva del tutto compatibile con il limite teorico inferiore. Per questo motivo, il lavoro finale sull’argomento [3] chiudeva così: “*As a conclusion we may agree with these authors (teorici) in saying that further nonambiguous insight on this subject could be obtained by substantially lowering the experimental error on  $P_\gamma$ . This is however, in our opinion, a very hard-to-reach goal in the case of  $^{18}\text{F}$ , owing to the small analyzing power of the presently available polarimeters.*”

Dall’86 l’acceleratore iniziò ad essere utilizzato anche per misure nei campi della fisica ambientale e dei beni culturali come esaurientemente riferito in un recente scritto [4] di Pierandrea Mandò, che di questa attività è stato il promotore.

Mandò, who was the leader of this activity. Nevertheless, measurements in the field of nuclear physics, both of a fundamental nature and as support to activities of applied physics and physics of heavy ions, continued until the 3 MV Tandem of the LABEC laboratory at Sesto Fiorentino became operational. To make the managing of the two activities (basic nuclear physics and applied physics) easier, a switching magnet was introduced that made it possible to have two more beam lines at 15° and 35° in addition to the original one at 0°.

Using the 0° beam line, another intriguing experiment (M. Bini, T. Fazzini, Angela Gianatiempo, G. Poggi, P. Sona, N. Taccetti, K. Elsener, P.G. Hansen, E. Uggerhoj) was conducted in 1987. This was motivated by some results obtained in heavy-ion reactions at the GSI of Darmstadt (1984-86) that suggested the emission of an unknown neutral particle with zero spin (the so-called “axion”) that decayed to an electron-positron pair. In order to detect a possible weak channel of decay of a nuclear level with emission of an axion it was necessary to populate a level whose transition to the fundamental state was prohibited through the emission of a quantum of gamma radiation. This is the case with the first excited state of  $^{16}\text{O}$  at 6.05 MeV with zero spin and positive parity. This cannot decay by emission of a gamma towards the fundamental state of equal spin and parity, and the decay takes place with the emission of an electron-positron pair with a particularly long lifetime ( $\approx 96$  ps). The decay with the emission of an axion, which would decay to an electron-positron pair near the nucleus of  $^{16}\text{O}$ , would be detected by a peak in the distribution of the invariant mass whose reconstruction, event by event, requires measuring the angle between the directions of the electron and of the positron,

Tuttavia misure di fisica del nucleo, sia di carattere fondamentale sia di supporto alle attività di fisica applicata e di fisica degli ioni pesanti si protrassero fino all'entrata in funzione del Tandem di 3 MV del laboratorio LABEC di Sesto Fiorentino. Per rendere compatibili le due attività (fisica nucleare di base e applicata) fu introdotto un magnete switching che permise di avere altri due canali di misura a 15° e 35° oltre a quello originale a 0°.

Utilizzando il canale a 0° un altro interessante esperimento (M. Bini, T. Fazzini, Angela Giannatiempo, G. Poggi, P. Sona, N. Taccetti, K. Elsener, P.G. Hansen, E. Uggerhøj) venne compiuto nell'87. La motivazione era dovuta ad alcuni risultati ottenuti in reazioni di ioni pesanti al GSI di Darmstadt (anni 84-86) che suggerivano l'emissione di una particella neutra sconosciuta di spin zero (denominata "assione") che decadeva in una coppia elettrone-positrone. Per rivelare un eventuale debole canale di decadimento di un livello nucleare con emissione di un assione, occorreva popolare un livello la cui transizione verso lo stato fondamentale fosse proibita per l'emissione di un quanto di radiazione gamma. Tale è il caso del primo stato eccitato dell' $^{16}\text{O}$  a 6.05 MeV con spin zero e parità positiva. Esso non può decadere con emissione di un gamma verso lo stato fondamentale di uguale spin e parità ed il decadimento avviene con l'emissione di una coppia elettrone-positrone, con vita media particolarmente lunga ( $\approx 96$  ps). Il decadimento con emissione di un assione che, in vicinanza del nucleo di  $^{16}\text{O}$ , decadesse in una coppia elettrone-positrone, verrebbe segnalato da un picco nella distribuzione di massa invariante la cui ricostruzione, evento per evento, richiede la misura dell'angolo compreso fra le direzioni dell'elettrone e del positrone e l'energia di

and the energy of at least one of these. The state in question was populated by means of the reaction  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  at 1.73 MeV of the proton beam. The most innovative part of the experimental apparatus compared to the standard nuclear methods was a multi-wire proportional chamber borrowed from colleagues working at CERN. This experiment (30 days of beam on target) established an upper limit of  $<0.1\%$  for a branch of decay via an axion with a mass in the range from 1.5 to 3.1 MeV.

From 1995 measurements were started to be performed of non-Rutherford elastic backscattering cross sections of protons on light nuclei, fundamental for obtaining quantitative results with IBA (Ion Beam Analysis) measurements for the recognition and quantification of the elements present in the samples under analysis (Massimo Chiari, Lorenzo Giuntini, P.A. Mandò, Stefano Mazzoni, N. Taccetti). In particular, the use of protons made it possible to probe deeper layers in the samples and, above all, with much greater sensitivity, since backward cross sections are much larger than the Coulomb ones owing to the nuclear contribution, which however cannot be easily predicted either with respect to the proton energy and to the scattering angle. Ultimately the safest method was to accurately measure the cross section as a function of the angle and of the energy of the protons for the light elements of interest. To this end a scattering chamber with an inner diameter of 400 mm was installed on the 15° channel; the chamber was set up to house 15 Si detectors that covered a field from 100° to 170° with respect to the beam direction in steps of 5°. The detectors were cooled (to obtain excellent energy resolutions) and were mounted on the base of the chamber together with their cryogenic

almeno uno di essi. Lo stato in questione è stato popolato mediante la reazione  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  a 1.73 MeV del fascio di protoni. La parte più innovativa dell'apparato sperimentale, rispetto alle tecniche nucleari standard, era costituita da una camera proporzionale a molti fili ottenuta in prestito da colleghi del CERN. Questo esperimento (33 giorni di fascio sul bersaglio) stabilì un limite superiore  $<0.1\%$  ad un branching di decadimento via assione di massa compresa fra 1.5 e 3.1 MeV.

Dal 1995 iniziò una attività propedeutica alle misure di fisica applicata, ovvero la misura di sezioni d'urto di backscattering elastico non Rutherford di protoni su nuclei leggeri, fondamentali per ottenere risultati quantitativi nelle misure IBA (Ion Beam Analysis) per il riconoscimento e la quantificazione degli elementi presenti nei campioni analizzati (Massimo Chiari, Lorenzo Giuntini, P.A. Mandò, Stefano Mazzoni, N. Taccetti). In particolare, l'utilizzo di protoni permetteva di saggiare i campioni in maggiore profondità e soprattutto con sensibilità molto più elevata potendo fruire di sezioni d'urto backward molto maggiori di quelle coulombiane, per effetto del contributo nucleare che però non può essere facilmente predetto né in funzione dell'energia dei protoni né in funzione dell'angolo di scattering. In definitiva la maniera più sicura era quella di misurare accuratamente la sezione d'urto in funzione dell'angolo e dell'energia dei protoni per gli elementi leggeri di interesse. Per questo scopo sul canale a  $15^\circ$  fu installata una camera di scattering di 400 mm di diametro, attrezzata in modo da alloggiare 15 rivelatori al Si che coprivano, a passi di  $5^\circ$ , un campo da  $100^\circ$  a  $170^\circ$  rispetto alla direzione del fascio. I rivelatori erano raffreddabili (per avere ottime risoluzioni energetiche) e assieme al loro supporto criogenico erano montati sulla base del-

support while all the elements defining the scattering geometry were mounted on the cover: the beam inlet and outlet collimators, the support of the targets and the collimators of the detectors. The accuracy in the machining of the collimators and in their angular placement, the care dedicated to the measurement of the beam current and of the dead time of the acquisition system as well as the statistical counting accuracy made it possible to determine the cross sections with an overall accuracy better than 3%.

Systematic measurements were made for proton energies from 350 keV to 3 MeV for B, C, Al. As an example for the relevance of the nuclear effects on the backscattering cross section for light nuclei Figure 4 shows the results [5] obtained by bombarding a natural boron target with protons with an energy between 500 keV and 3.3 MeV at angles of  $110^\circ$  and  $170^\circ$ . All of the data obtained with these measurements went on to enrich the database of the Nuclear Data Section of the IAEA.

The last significant activity with the KN3000 is linked to the generation of pulsed beams with an electrostatic deflector installed on the  $0^\circ$  beam line in 1998 (Giovanni Casini, M. Chiari, Maria Elena Fedi, L. Giuntini, P.A. Mandò, Andrea Stefanini, N. Taccetti). Pulsing of the beam was based on a station with adjustable inlet slits  $S_1$  (called "definition" slits; typical size: 1 mm x 1 mm) which determines the size of the beam and its intensity, an electrostatic beam deflector that accomplished the transition between two voltage states of opposite polarity and a second station of adjustable slits  $S_2$  (called "timing" slits; typical sizes in the direction of the beam deflection: 0.1-1.0 mm) positioned immediately in front of the target. The voltage transi-

la camera. Viceversa tutti gli elementi che definiscono la geometria di scattering erano montati sul coperchio: i collimatori di ingresso e di uscita del fascio, il supporto dei bersagli e i collimatori dei rivelatori. L'accuratezza nella lavorazione dei collimatori e nel loro posizionamento angolare, la cura dedicata alla misura della corrente di fascio e del tempo morto del sistema di acquisizione e la accuratezza statistica di conteggio permisero di determinare le sezioni d'urto a meglio del 3%. Furono fatte misure sistematiche per energie di protoni fra 350 keV e 3 MeV per B, C, Al. Come esempio della rilevanza degli effetti nucleari sulla sezione d'urto di backscattering per nuclei leggeri, in Figura 4 sono riportati i risultati [5] ottenuti bombardando un bersaglio di Boro naturale con protoni di energia da 500 keV a 3.3 MeV agli angoli di  $110^\circ$  e  $170^\circ$ . Il complesso dei dati ottenuti con queste misure è andato ad arricchire il Data Base della Nuclear Data Section della IAEA.

L'ultima attività di rilievo al KN3000 è collegata alla produzione di fasci pulsati con un deflettore elettrostatico che fu installato nel 1998 sul canale a  $0^\circ$  (Giovanni Casini, M. Chiari, Maria Elena Fedi, L. Giuntini, P.A. Mandò, Andrea Stefanini, N. Taccetti). L'impulsamento del fascio si basava su una stazione di slitte di ingresso  $S_i$  (dette di definizione; dimensioni tipiche: 1mm x 1mm) che determinava le dimensioni del fascio e la sua intensità, un deflettore elettrostatico del fascio che eseguiva transizioni fra due stati di tensione di opposta polarità, una stazione di slitte  $S_t$  (dette di temporizzazione; dimensioni tipiche nella direzione di deflessione del fascio:  $0.1 \div 1.0$  mm) che erano poste subito prima del bersaglio. Le transizioni di tensione sono così ampie e rapide che, assieme all'effetto di leva della distanza fra deflettore e slitte  $S_t$ , permettono il transito degli ioni verso il bersaglio solo per

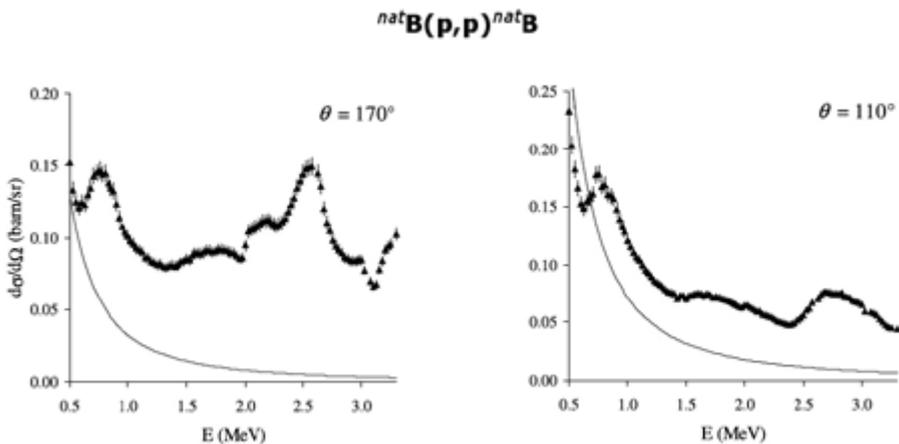


Figura 4. Sezione d'urto sperimentale per la diffusione elastica di protoni su Boro nella composizione isotopica naturale in funzione dell'energia dei protoni, per due valori dell'angolo polare rispetto al fascio. È evidente la grande differenza fra la sezione d'urto misurata e quella Rutherford, riportata con una linea continua.

Figure 4. Experimental cross section for the elastic scattering of protons on boron in the natural isotopic composition as a function of the energy of the protons, for two values of the scattering angle. The great difference between the measured cross section and the Rutherford cross section, shown with a continuous line, is apparent.

tempi brevissimi (0.5÷5.0 ns). Agendo opportunamente sulla apertura delle slitte  $S_i$  e  $S_p$ , è possibile generare impulsi il cui contenuto può variare da meno di uno a alcune centinaia di ioni. Accenniamo a due rilevanti applicazioni.

Una applicazione riguardava la misura della perdita di energia e del relativo straggling di protoni in Kapton e Al. Per questa misura la trasmissione del sistema deflettore più slitte era aggiustata per avere nella maggior parte dei casi un protone per impulso. Utilizzando protoni di 3 MeV, le loro energie residue, per differenti spessori interposti di Kapton e di Al, erano ottenute dagli spettri registrati con un rivelatore al Si e la richiesta di registrare i segnali del rivelatore solo se in stretta coincidenza con i transitori della tensione di deflessione permetteva di avere spettri senza fondo. È interessante osservare come nel caso dell'Al la misura diretta fornisse una relazione fra energia residua e straggling che, né le simulazioni (SRIM) né le versioni più moderne della teoria di Bohr, riuscivano a riprodurre.

Un'altra applicazione [6], per la quale era viceversa richiesta un'alta molteplicità di ioni per impulso, riguardava la verifica della linearità di rivelatori al Si, e della elettronica associata, utilizzati per la rivelazione di ioni pesanti in esperimenti condotti ai Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN. Come mostrato in Figura 5a, si possono costruire impulsi, di durata tipica 1 ns, contenenti un numero medio di 15, 150, 500 protoni di 3 MeV, permettendo di studiare la non linearità del sistema in un campo da 3 MeV a 2.4 GeV a passi di 3 MeV (Figura 5b). Si trova così (Figura 5c) uno scarto dalla linearità di  $\pm 0.15\%$ , sufficientemente piccolo da mettere chiaramente in evidenza il comportamento non lineare dei rivelatori al Si bombardati con ioni pesanti. Per esempio per ioni Xe di 1 GeV è stato misu-

tions are so ample and rapid that together with the lever effect linked to the distance between the deflector and the slits  $S_i$  they permit the transit of ions towards the target only for very short periods (0.5-5.0 ns). By acting suitably on the aperture of the slits  $S_i$  and  $S_p$  it is possible to generate pulses whose content may vary from less than one to several hundred particles. Two relevant applications are outlined below.

One application concerned the measuring of energy loss and the corresponding straggling of protons in Kapton and Al. For this measurement the transmission of the system, made up of the deflector and slits, was adjusted to obtain one proton per pulse in most cases. Using protons of 3 MeV, their residual energies after passing through Kapton and Al of various thickness were obtained from the spectra recorded with a Si detector, and the requirement to record the detector signals only when they strictly coincided with the deflector voltage transients made it possible to obtain spectra with no background. It is interesting to observe that in the case of Al the direct measurement provided a relation between the residual energy of the protons and their straggling that neither the simulations (SRIM) nor the more modern versions of the Bohr theory were able to reproduce.

Another application [6] for which conversely a high number of ions per pulse was required, concerned the verification of the linearity of Si detectors and of the associated electronics, used to detect heavy ions in experiments conducted at the Laboratori Nazionali del Sud of the INFN. As shown in Figure 5a, pulses (with a typical duration of 1 ns) can be generated that contain an average number of 15, 150 and 500 protons of 3 MeV, thus making it possible to study

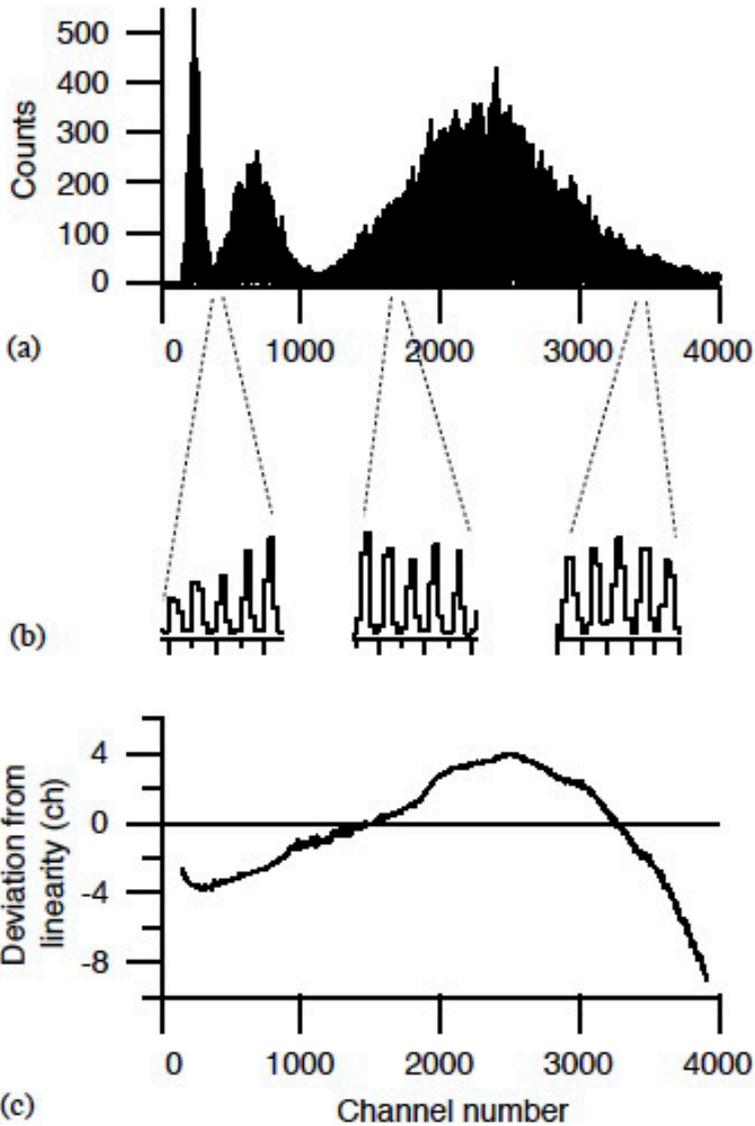


Figura 5. a) Spettri di energia sperimentali raccolti in tre successive irradiazioni caratterizzate da pacchetti di fascio contenenti un numero medio di 15, 150, 500 protoni, b) dettaglio delle differenti regioni di energia dove si notano pacchetti adiacenti che differiscono per un protone, c) deviazioni dalla linearità osservate nella misura.

Figure 5. a) Experimental energy spectra recorded in three successive irradiations characterised by beam bunches containing an average number of 15, 150 and 500 protons, b) details of the different energy regions where adjacent bunches are seen that differ by one proton, c) measured deviations from linearity.

rato un “pulse height defect” di oltre il 5%, cosicché questo vistoso effetto doveva essere interamente attribuito alla maggiore densità di ionizzazione rilasciata nel rivelatore dagli ioni Xe rispetto ai protoni.

Nel 2003, al LABEC del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino, è entrato in funzione l’acceleratore Tandem di 3 MV di tensione di terminale e il canale del fascio pulsato è stato spostato su una delle sue linee così come quello della camera di scattering.

Si era conclusa ad Arcetri l’attività con gli acceleratori che proseguiva nel Polo Scientifico in un ambiente gradevole e sicuramente meglio pensato e attrezzato per le ricerche moderne ma, naturalmente, non partecipe del fascino creato in Arcetri dall’intrecciarsi della memoria galileiana e della bellezza dei luoghi.

*Nello Taccetti*, professore ordinario di Fisica Generale, in pensione dal 2009. Ha dedicato larga parte della sua attività all’innovazione e al miglioramento delle tecniche sperimentali, con lo scopo di ottenere risultati affidabili in ricerche di frontiera.

## Bibliografia

- [1] P.G. Bizzeti et al. “Ericson’s fluctuations in the photodisintegration of  $^{28}\text{Si}$ ” Nucl. Phys. 63 (1965) 161.
- [2] M. Bini et al. “Search for the circular polarization of the 1081-keV gamma ray in  $^{18}\text{F}$ ” Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 795.

the system non-linearity in a range from 3 MeV to 2.4 GeV in steps of 3 MeV (Figure 5b). In this way (Figure 5c) a deviation from linearity of  $\pm 0.15\%$  is detected, which is sufficiently small to clearly highlight any non-linear behaviour of the Si detectors bombarded with heavy ions. For example, for Xe ions of 1 GeV a pulse height defect of over 5% was measured, hence this considerable effect was entirely attributable to the greater ionisation density released in the detector by Xe ions compared to the protons.

In 2004 a Tandem accelerator with 3 MV terminal voltage became operational at the LABEC of the Polo Scientifico of Sesto Fiorentino [4], and the channel of the pulsed beam was moved to one of its beam lines, as was the one of the scattering chamber.

Work with the accelerators came to an end at Arcetri and continued at the Polo Scientifico in a pleasant environment that is certainly better designed and equipped for modern research, but naturally lacks the charm of Arcetri with its memory of Galileo and the beauty of the surroundings.

*Nello Taccetti*, full professor of General Physics, retired since 2009. He has dedicated a large part of his activities to the innovation and improvement of experimental methods with the purpose of achieving reliable results in frontier research.

- [3] M. Bini et al. "Experimental limit of the circular polarization of the 1081-keV gamma ray in  $^{18}\text{F}$ " *Phys. Rev. C* 38 (1988) 1195.
- [4] P.A. Mandò "Nascita e prime fasi dell'attività di fisica nucleare applicata a Firenze" *Il colle di Galileo* vol 2,2 2013 pp 27-42.
- [5] M. Chiari et al. "Proton elastic scattering cross-section on Boron from 0.5 to 3.3 MeV" *Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. B* 174 (2001) 259.
- [6] N. Taccetti et al. "Linear electronics for Si detectors and its energy calibration for use in heavy ion experiments" *Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A* 496 (2003) 481.

## Bibliography

- [1] P.G. Bizzeti et al. "Ericson's fluctuations in the photodisintegration of  $^{28}\text{Si}$ " *Nucl. Phys.* 63 (1965) 161.
- [2] M. Bini et al. "Search for the circular polarization of the 1081-keV gamma ray in  $^{18}\text{F}$ " *Phys. Rev. Lett.* 55 (1985) 795.
- [3] M. Bini et al. "Experimental limit of the circular polarization of the 1081-keV gamma ray in  $^{18}\text{F}$ " *Phys. Rev. C* 38 (1988) 1195.
- [4] P.A. Mandò "Nascita e prime fasi delle attività di fisica nucleare applicata a Firenze" *Il colle di Galileo* vol 2,2 2013 pp 27-42.
- [5] M. Chiari et al. "Proton elastic scattering cross-section on Boron from 0.5 to 3.3 MeV" *Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. B* 174 (2001) 259.
- [6] N. Taccetti et al. "Linear electronics for Si detectors and its energy calibration for use in heavy ion experiments" *Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A* 496 (2003) 481.