

Pier Andrea Mandò

Nascita e prime fasi delle attività di fisica nucleare applicata a Firenze

The birth and early phases of applied nuclear physics in Florence

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

Sommario. Dopo una premessa che riassume il periodo che le ha precedute e rese possibili, si ripercorrono le fasi iniziali delle attività di fisica nucleare applicata, ad Arcetri, fino al momento in cui hanno iniziato a farsi concrete le prospettive di creazione formale dell'attuale LABEC.

Keywords. Fisica Nucleare Applicata, KN3000, Ion Beam Analysis

Per capire come, e grazie a cosa, siano nate le attività oggi svolte al LABEC, *Laboratorio di tecniche nucleari per l'Ambiente e i Beni Culturali* della Sezione INFN di Firenze, bisogna partire un po' da lontano. Quando cominciammo a pensare ad applicazioni con tecniche nucleari (primi anni '80), l'acceleratore Van de Graaff da 3 MV che volevamo usare allo scopo era operativo da oltre un decennio ad Arcetri, utilizzato per misure di fisica nucleare di base, alcune particolarmente rilevanti. E aveva avuto una storia gloriosa ancor prima! Infatti il KS3000 (così si chiamava quando fu costruito dalla High Voltage, USA, nel 1956) era stato l'innietto dell'elettrosincrotrone dei Laboratori Nazionali di Frascati. E a Frascati, l'elettrosincrotrone aveva portato a risultati davvero storici, sia per la fisica di ba-

Abstract. Starting with an introduction summarising the preceding period that made it possible, the initial phases of applied nuclear physics activities at Arcetri are traced through to the moment when the prospects of the formal creation of what is now LABEC began to materialise.

Keywords. Applied Nuclear Physics, KN3000, Ion Beam Analysis

In order to understand what lies behind the activities now performed by LABEC, *Laboratorio di tecniche nucleari per l'Ambiente e i Beni Culturali* (Laboratory for Nuclear Techniques applied to the Environment and Cultural Heritage) of the Florence Section of the INFN, and how it came into being, we need to take a step back in time. When, in the early 80s, we began to think about applications using nuclear techniques, the 3MV Van de Graaff accelerator that we wanted to use for the purpose had been operating at Arcetri for over a decade, being used for fundamental nuclear physics measurements, some of them particularly significant. And even be-

se, sia aprendo una nuova tecnica di indagine sperimentale con un grande futuro per la ricerca e la tecnologia: la luce di sincrotrone.

A fine anni '60, l'elettrosincrotrone fu poi dismesso; e il gruppo nucleare fiorentino ottenne dall'INFN di trasferire a Firenze il KS3000, per "trasformarlo" in un acceleratore di ioni positivi con cui fare misure di spettroscopia nucleare. Arrivò a Firenze nei primi anni '70, e fu installato nelle stanzette di Arcetri (una superficie sì e no di 100 m²) che in precedenza ospitavano un Van de Graaff molto più piccolo, da 0.4 MV, il PN400 (che oggi funge da elemento di arredo "storico" nell'ingresso del Dipartimento di Fisica e Astronomia a Sesto Fiorentino). La conversione a ioni positivi fu realizzata con successo "in casa", con i contributi decisivi di Tito Fazzini, Giacomo Poggi e Nello Taccetti coadiuvati dalle mani d'oro e dalle grandi capacità tecniche di Paolo Calonaci, Adriano Pecchioli e Piero Del Carmine. Il KS3000 fu rivoltato come un calzino: il terminale HV e la sorgente furono praticamente rifatti, così come il generatore di corrente di carica; successivamente fu cambiato anche il tubo acceleratore. In uscita dalla macchina si installò un magnete di analisi a 90° e si realizzarono sistemi di stabilizzazione della tensione di terminale. A sottolineare le radicali trasformazioni, il nome - con molto meno sforzo! - fu cambiato in KN3000 (adottando la sigla della High Voltage per un VdG 3MV per ioni positivi).

All'inizio col KN3000 furono fatte effettivamente misure di spettroscopia nucleare. Poi un gruppo guidato da Piergiorgio Bizzeti e Paolo Maurenzig, con Tito Fazzini, Andrea Perego, Giacomo Poggi, Pietro Sona, Nello Taccetti e successivamente Maurizio Bini, si lanciò in un ambizioso esperimento (FWEIN): verificare

fore this it already had a glorious history behind it! Indeed, the KS3000 (as it was called when it was built in 1956 by High Voltage, USA) had been the injector of the electrosynchrotron in the INFN National Laboratories in Frascati. And in Frascati, the electrosynchrotron had led to authentic milestone results in terms of both pure physics and by opening up a new technique of experimental investigation with a brilliant future for research and technology: synchrotron light.

At the end of the 60s, the electrosynchrotron was shut down, and the Florentine nuclear group got permission from the INFN to move the KS3000 to Florence, to 'transform' it into a positive ion accelerator for making nuclear spectroscopy measurements. It arrived in Florence in the early 70s and was installed in the small premises at Arcetri (a surface area of round about 100 m²) which had previously housed a much smaller 0.4 MV Van de Graaff, the PN400, which now acts as a 'historic' decor element in the entrance to the Department of Physics and Astronomy in Sesto Fiorentino. The conversion into a positive ion accelerator was successfully performed in-house, with the decisive contributions of Tito Fazzini, Giacomo Poggi and Nello Taccetti, assisted by the skilled hands and great technical expertise of Paolo Calonaci, Adriano Pecchioli and Piero Del Carmine.

The KS3000 was turned inside out: the HV terminal and the source were practically rebuilt, as was the charge current generator; subsequently the accelerator tube was also changed. A 90° analysis magnet was installed on the output of the machine and systems for stabilising the terminal voltage were developed. To underscore these radical transformations, the name was also changed - a much simpler operation! - to KN3000, adopting the High Voltage acronym for a positive ion 3MV VdG.

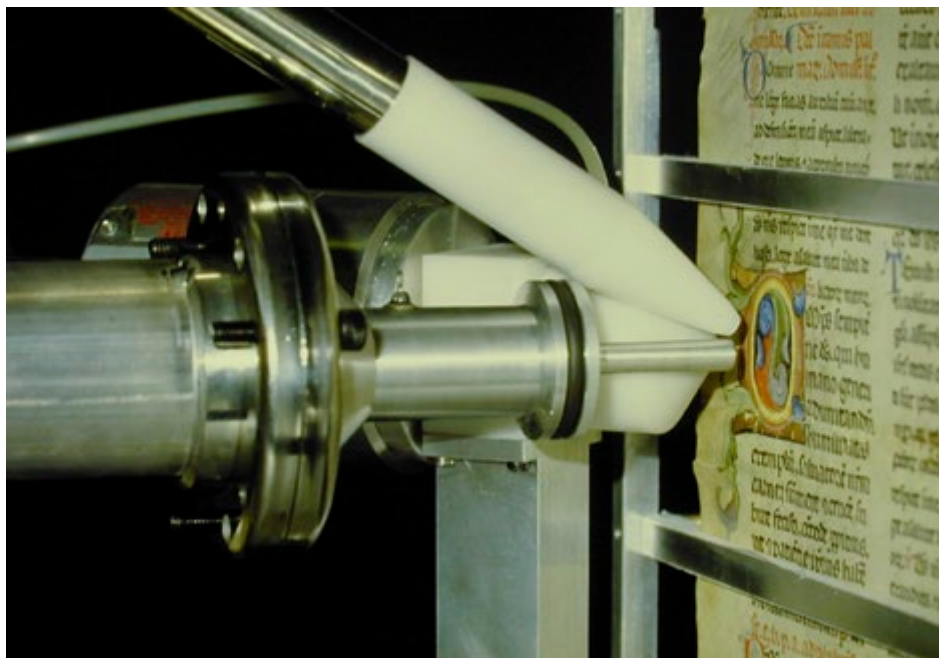


Fig. 1. Una delle prime miniature rinascimentali analizzate (circa 1986-87), usando la tecnica PIXE in fascio esterno con set-up a due rivelatori.

Fig. 1. One of the first illuminations from the Renaissance that we analyzed (around 1986-87) with the external PIXE, two-detector set-up.

At the beginning, the KN3000 was actually used to make nuclear spectroscopy measurements. Then, a group led by Piergiorgio Bizzeti and Paolo Maurenzig, and including Tito Fazzini, Andrea Perego, Giacomo Poggi, Pietro Sona, Nello Taccetti and later Maurizio Bini, launched into an ambitious experiment (FWEIN). The idea was to check the effect of weak neutral currents in hadronic interactions, as predicted in the Weinberg and Salam theory, through the search for nuclear parity violation. The experiment was based on the measurement of the gamma decay of level 0^- at 1081 keV in ^{18}F , close in energy to a 0^+ (at 1040 keV). Any parity mixing between the two levels would have produced a circular polarisation of the decay gamma, which could be detected by an asymmetry of the gamma counts correlated with the direction of the magnetisation of the material traversed (transmission polarimeter). The reaction used, $(^3\text{He}, p)$ on ^{16}O , meant that a not inconsiderable series of technological challenges had to be addressed, including for example the installation downstream of the accelerator tube of a system for pumping and recovery of the extremely costly ^3He . The effect predicted by the theorists was very low: an asymmetry of counts in the order of 10^{-5} had to be shown, which in addition to the study and elimination of the systematic effects, also called for a reduction of the statistical uncertainty that could only be achieved with a huge number of detected events, and hence working with high beam currents round the clock for months.

The result of the FWEIN experiment was negative, but it did establish an upper limit for the asymmetry that was lower than that laid down in the theory. Consequently, a second-generation experiment (WEIN2) was designed. To boost statistics and reduce possible systematic ef-

l'effetto delle correnti deboli neutre nelle interazioni adroniche, previste dalla teoria di Weinberg e Salam, tramite la ricerca di violazioni di parità nei nuclei. L'esperimento si basava sulla misura del decadimento gamma del livello 0^- a 1081 keV nel ^{18}F , vicino in energia a uno 0^+ (a 1040 keV). Un eventuale mescolamento di parità fra i due livelli avrebbe prodotto una polarizzazione circolare del gamma di decadimento, rivelabile da un'asimmetria di conteggio dei gamma correlata col verso della magnetizzazione del materiale attraversato (polarimetro a trasmissione). La reazione utilizzata, ($^3\text{He}, p$) su ^{16}O , richiese di affrontare una serie di sfide tecnologiche non indifferenti, quali, ad esempio, l'installazione a valle del tubo acceleratore di un sistema di pompaggio e recupero del costosissimo ^3He . L'effetto previsto dai teorici era assai basso: andava messa in evidenza un'asimmetria di conteggi dell'ordine di 10^{-5} che imponeva, oltre allo studio e all'eliminazione di effetti sistemati, una riduzione dell'incertezza statistica raggiungibile solo con un numero enorme di eventi rivelati, quindi lavorando con alte correnti 24h/24 per mesi.

Il risultato della FWEIN fu negativo, ma stabilì già un limite superiore per l'asimmetria inferiore a quella prevista dalla teoria. Fu allora progettato un esperimento di seconda generazione (WEIN2): per aumentare la statistica e ridurre possibili effetti sistemati si utilizzò un polarimetro a quattro bracci accoppiati a quattro rivelatori al Germanio iperpuro, fra i primissimi mai usati. Per aumentare le correnti sostenibili dal target (e quindi la statistica), come bersaglio fu utilizzata acqua, iniettata con un sofisticato sistema a getto sotto vuoto; sempre per aumentare la statistica, la macchina fu portata a lavorare addirittura a tensione maggiore dei 3 MV nominali massimi.

fects, a polarimeter was constructed with four arms coupled with four hyperpure germanium detectors, the latter being among the very first ever used. To increase the currents that could be withstood by the target, and hence the statistics, the target used was water injected through a sophisticated vacuum jet system; again to boost the statistics, the machine was set to work at a voltage even higher than the maximum nominal 3 MV.

Overall FWEIN and WEIN2 lasted for several years, with long phases of data recording. The effect was not found at the end of WEIN2 either, but the physics result was nevertheless significant because the upper limit of the effect sought was lowered further, stimulating substantial theoretical revisions. In addition, an important parallel result was also yielded by the intense technological commitment that I mentioned, which allowed those who had worked with KN3000 to acquire enormous experience while also establishing the high level of reliability of the machine. I mention this here precisely because the experience, coupled with the reliability of KN3000, proved to be crucial for the applications using the KN3000 in the years that followed, which then laid the foundations for the creation of LABEC.

After the adventure of the two WEINs, the machine was effectively on top form, but for fundamental physics measurements it began to be somewhat obsolete, and the majority of the Florentine nuclear group decided to shift its attention to other aspects of nuclear physics, such as the study of the dynamics of collision between heavy ions, which called for accelerators of totally different dimensions, available in larger laboratories in Italy and abroad. I myself, on the other hand, wanted to devote myself more to the applications of nuclear techniques. This was

FWEIN e WEIN2 durarono nel complesso qualche anno, con lunghe fasi di presa dati. Anche alla fine della WEIN2 l'effetto non fu trovato, ma il risultato di fisica fu comunque rilevante perché fu abbassato ancora molto il limite superiore all'effetto cercato, stimolando sostanziali revisioni teoriche. Ma un importante risultato parallelo venne proprio dall'intenso lavoro tecnologico che ho citato, che fece acquisire enorme esperienza a chi aveva lavorato col KN3000 e dette un grande livello di affidabilità alla macchina; ne ho parlato qui proprio perché questa esperienza e l'affidabilità del KN3000 sono state cruciali per le applicazioni col KN3000 degli anni successivi, che posero poi le premesse per la nascita del LABEC.

Dopo l'avventura delle due WEIN, in effetti, la macchina era in ottima forma, ma per misure di fisica fondamentale cominciava a essere obsoleta, e la maggioranza del gruppo nucleare fiorentino decise di spostare la propria attività su altre tematiche di fisica nucleare, quali lo studio della dinamica delle collisioni fra ioni pesanti, che richiedevano acceleratori di dimensioni totalmente differenti, disponibili in laboratori più grandi, in Italia e all'estero. Io invece avevo voglia di dedicarmi più ad applicazioni di tecniche nucleari: se ne sentiva parlare come di una nuova frontiera per i piccoli acceleratori di bassa energia, e, forse anche per la mia indole orientata alle cose pratiche, questa prospettiva mi attirava. Decisi quindi di provare a dare in questo senso una "terza vita" alla macchina, dopo la prima come iniettore di elettroni a Frascati e la seconda come acceleratore di ioni per fisica nucleare ad Arcetri.

Gli altri nucleari fiorentini furono molto generosi nel lasciare che prendessi in mano l'acceleratore e altra strumentazione; sostennero la mia scelta e misero

beginning to be spoken of as a new frontier for small, low-energy accelerators, and perhaps on account of my inclination towards practical things, I was greatly attracted by this prospect. And so I decided to explore this approach to give a third "life" to the machine, after its first as an electron injector at Frascati and its second as an ion accelerator for nuclear physics at Arcetri.

The other Florentine nuclear scientists were extremely generous in allowing me to take the accelerator and other instruments in hand: they supported my choice and set at my disposal their extensive direct experience of the machine, and much else. Last but not least, they allowed me to draw broadly on the assistance of Calonaci, Pecchioli and Del Carmine.

Other things too had happened that facilitated the start of this adventure in applied nuclear physics. More specifically:

- I had received the national eligibility qualification to fill the position of Associate Professor and I had been rapidly called (those were other times, indeed!), which gave me the prospective serenity to try out a new path;
- the new wing of the Department had been constructed at Arcetri (where the studios of the Galileo Galilei Institute are now), and the accelerator laboratory had been enlarged at the same time. WEIN2 had at the time already benefited from the new layout, comprising a new room; and here there was enough room for further beam lines.

We got funding for a few years by taking part in a "small accelerators coordination" with Naples, Catania and Legnaro, within the framework of the "40%" projects (the equivalent of

a disposizione la loro grande esperienza diretta della macchina, e non solo. *Last but not least*, mi permisero di usufruire largamente dell'aiuto di Calonaci, Pechioli e Del Carmine.

Erano successe anche altre cose che facilitarono l'inizio di questa avventura nella fisica nucleare applicata, in particolare:

- avevo avuto l'idoneità nazionale a professore associato ed ero stato rapidamente chiamato (altri tempi!), il che mi dava una prospettiva di tranquillità nel tentare una strada nuova;
- ad Arcetri era stata costruita la nuova ala del Dipartimento (dove oggi sono gli studi del Galileo Galilei Institute) e con l'occasione anche il laboratorio acceleratore era stato ampliato (già la WEIN2 aveva beneficiato della nuova configurazione, con una nuova sala; e in questa c'era spazio per ulteriori linee di fascio).

Partecipando a un "coordinamento piccoli acceleratori" con Napoli, Catania e Legnaro, nell'ambito dei progetti "40%" (equivalente dei PRIN di oggi), fummo finanziati per qualche anno e per prima cosa comprammo un magnete *switching* con tre uscite, da collocare dopo il magnete di analisi a 90°, per installare almeno una seconda linea di fascio. Nel frattempo ero andato un po' a giro per vedere cosa si cominciava a fare altrove con la IBA (Ion Beam Analysis), che fornisce la composizione di un materiale colpito da un fascio di ioni sfruttando le emissioni caratteristiche a seguito dell'interazione: raggi X (tecnica PIXE¹), raggi gamma (PIGE²), particelle retrodiffuse elasticamente (BS³), particelle secondarie da reazioni nucleari (NRA⁴). Diversi gruppi usavano PIXE per lo studio del PM (par-

the modern-day PRINs – research projects of national interest). The first thing we bought was a switching magnet with three outputs to position after the 90° analysis magnet, so that we could install at least one more beam line. In the meantime I'd been going the rounds to see what was beginning to be done elsewhere with the IBA (Ion Beam Analysis), which can reveal the composition of a material struck by a beam of ions, by exploiting the characteristic emissions following the interaction: X rays (PIXE¹ technique), gamma rays (PIGE),² elastically back-scattered particles (BS),³ secondary particles or gamma rays from nuclear reactions (NRA).⁴ Various groups were using PIXE for the study of atmospheric PM (particulate matter), and NRA (exploiting narrow resonances in the cross-sections), for depth profiling in cases of surface alterations of materials. At the beginning I was somewhat sceptical about the potential of IBA, and I'd also begun working with neutron activation, another technique used to determine the composition of a material (but in bulk).⁵ Then, after attending a couple of PIXE conferences, I came to realise just how fruitful this technique in particular could be.

It sprang to mind that, particularly in Florence, a perfect combination could be that of science-art, utilising the PIXE to detect the materials and techniques used to produce paintings, and works of art in general. However, I was also attracted by the 'ecological' strand regarding study of particulate matter (PM), if only out of a sort of 'nuclear pride' and the wish to make a stand against the prejudice of considering everything containing the word 'nuclear' as by definition detrimental to the environment. We purchased a first X-ray detector and did tests of PIXE measurements (in biomedical applications) as teaching experiments in the applied phys-

ticulate matter) atmosferico, e NRA (sfruttando risonanze strette nelle sezioni d'urto), per *depth profiling* in problemi di modifiche superficiali di materiali. All'inizio ero un po' scettico sulle potenzialità della IBA e avevo iniziato a lavorare anche con l'attivazione neutronica, altra tecnica per determinare la composizione di un materiale (ma in *bulk*)⁵. Poi, seguendo qualche congresso PIXE, mi convinsi invece di quanto questa tecnica, in particolare, potesse essere feconda.

Mi venne in mente che, a Firenze, un abbinamento ideale avrebbe potuto essere quello scienza-arte, utilizzando la PIXE per rivelare materiali e tecniche usati per produrre dipinti, e in generale opere d'arte. Ma anche il filone "ecologista" sullo studio del PM (le famose polveri fini) mi attirava, se non altro per una sorta di *nuclear pride* contro il luogo comune di associare tutto quello che contenesse il termine "nucleare" a qualcosa per definizione contro l'ambiente. Comprammo un primo rivelatore X e si fecero dei test di misure PIXE (in applicazioni biomediche) come esperimenti didattici del Laboratorio di fisica applicativo. Fra gli studenti ebbi Stefania De Curtis, Elena Castellani, Andrea Cappelli e Ruggero Vaia, che non devo aver troppo convinto perché in seguito sono diventati tutti teorici!

Avevo saputo che una parabola simile a quella che ci accingevamo a percorrere l'aveva iniziata un collega, Duncan MacArthur, della Queen's University di Kingston (Canada): anche lì avevano fatto un esperimento come la WEIN con un acceleratore simile al nostro, e successivamente Duncan aveva "riciclato" il Van de Graaff per fare PIXE. Lo andai a trovare durante un giro negli USA a fine 1984; mi piacquero le cose che faceva, e che tuttavia avrebbe dovuto smettere a breve perché lì, il laboratorio l'avrebbero proprio chiuso. Pensai allora che avrei

ics laboratory. Among my students I had Stefania De Curtis, Elena Castellani, Andrea Cappelli and Ruggero Vaia, and I evidently didn't succeed in convincing them, since they all went on to become theorists!

I had heard that a similar adventure to that we were about to embark on had been undertaken by a colleague, Duncan MacArthur of the Queen's University of Kingston (Canada). There too they had carried out an experiment like WEIN using an accelerator similar to ours, after which Duncan had 'recycled' the Van de Graaff to do PIXE. I went to visit him during a trip to the States at the end of 1984; I liked the things he was doing, which nevertheless he was shortly going to have to give up since the laboratory there was about to be closed down. I thought at the time that I might be able to invite him to Florence as a temporary lecturer, and in 1986 he did indeed come to us for a sabbatical year.

It was an important year. In the meantime I had co-opted Franco Lucarelli, at the time a young nuclear graduate who shared my applicational ambitions on a part-time basis, and Duncan taught us lots of things. We built a set-up for the extraction of the beam in atmosphere through a thin window. Although the idea was simple, it was an unusual choice, and the upshot was that a whole new world opened up before us. With the beam extracted in the air it was indeed possible to analyse any object at all in an instant: all you had to do was place it close to the beam exit window and by observing the X-rays emitted you could immediately detect its composition. We bought another X-ray detector second-hand, and this system of two detectors proved crucial for covering a very broad range of X-ray energies starting from

potuto invitarlo a Firenze come “professore a contratto”, e nel 1986 venne in anno sabbatico da noi.

Fu un anno importante. Avevo intanto cooptato Franco Lucarelli, allora neolaureato nucleare che part-time condivideva le mie velleità applicative, e Duncan ci insegnò tante cose. Costruimmo un *set-up* per l'estrazione del fascio in atmosfera attraverso una finestra sottile. Una scelta inusuale, anche se l'idea era semplice: e fu una cosa che ci aprì un mondo. Col fascio estratto in aria si poteva infatti analizzare in un attimo un oggetto qualunque: bastava avvicinarlo davanti alla finestra di uscita del fascio e rivelando i raggi X emessi si capiva al volo qual era la sua composizione. Comprammo di seconda mano un altro rivelatore X, e il sistema di due rivelatori fu fondamentale per coprire un amplissimo range di energie X a partire da circa 1 keV, bilanciando, con differenti angoli solidi e assorbimenti sui due rivelatori, le differenze di sezioni d'urto di produzione X per elementi leggeri e pesanti. Nel complesso, si rivelavano simultaneamente con grande sensibilità, in poche decine di secondi, tutti gli elementi a partire dal sodio.

Nell'anno successivo continuammo a migliorare i *set-up*: costruimmo sistemi di movimentazione remota del bersaglio sotto fascio, e di puntamento laser del punto di analisi. Muovendo il *target* da remoto e visualizzandolo con una telecamera, il laser ci consentiva di “mirare” esattamente e velocemente l'area da analizzare⁶. Pecchioli costruì anche un *chopper* a paletta rotante per campionare la corrente di fascio, essenziale per poterla aggiustare e controllare, e per conoscere la carica integrata sul bersaglio in una misura, necessaria per analisi quantitative⁷.

around 1 keV, balancing the cross-section differences of X-ray production for light and heavy elements with different solid angles and absorptions on the two detectors. Altogether, in a few dozen seconds it was possible to simultaneously detect, with extreme sensitivity, all the elements starting from sodium.

In the following year we continued to improve the set-up: we constructed systems for the remote handling of the target under beam, and for laser targeting of the analysis point. By moving the target remotely and visualising it with a video camera, the laser allowed us to rapidly and precisely target the area to be analysed.⁶ Pecchioli also built a revolving-blade chopper to sample the beam current, which was essential in order to be able to adjust and control it and to acquire the integrated charge on the target in a measurement, necessary for quantitative analyses.⁷

All these expedients resulted in our set-up for external PIXE measurements becoming a model for other European groups that were launching similar activities at that time. In France, for example, they had decided to install an accelerator in the basement of the Louvre for the precise purpose of performing PIXE analyses on the cultural assets. I had been a member of the Scientific Committee from the launch of the proposal in 1985. The accelerator then began operational in 1989, and in Florence we built for them an end-line for the external beam similar to our own.

But, to return to our measurements in Florence: who gave us the materials to analyse?

As regards the environmental pollution applications (particulate matter in the atmosphere),

Tutti questi accorgimenti fecero sì che il nostro *set-up* per misure PIXE in esterno divenne un modello per altri gruppi europei che in quegli anni partivano con attività simili. In Francia ad esempio avevano deciso di installare un acceleratore nei sotterranei del Louvre proprio per fare analisi PIXE su beni culturali. Io avevo fatto parte del loro comitato scientifico fin dal momento della proposta, nel 1985; l'acceleratore cominciò a funzionare poi nel 1989, e a Firenze costruimmo per loro un fondo-canale di fascio esterno simile al nostro.

Tornando alle nostre misure a Firenze: chi ci dava i materiali da analizzare?

Per le applicazioni ai problemi di inquinamento ambientale (le polveri fini in atmosfera), beh, di materiale ce n'era, gratis, in abbondanza! Si costruì in casa un prototipo di campionatore, che installammo nella centralina della USL in Via del Ponte alle Mosse. Un telaietto portafiltro scorreva lentamente (1 mm/h) sull'orifizio di aspirazione di una piccola pompa; dopo una settimana, sul filtro restava una "striscia" di polveri fini⁸, in cui ogni mm corrispondeva a una determinata ora e giorno di campionamento nella settimana. Poi con la PIXE si ricostruiva, con misure in sequenza mm per mm, la composizione del particolato "ora per ora" durante il campionamento. Già con questo prototipo fu svolta nel 1988 una tesi di laurea, e si osservarono le correlazioni degli andamenti temporali dei diversi elementi nel particolato fra di loro, e quelle con le fasce orarie o con le condizioni atmosferiche; ad esempio tanto piombo e bromo (allora dovuti agli scarichi delle auto a benzina) nelle ore di maggior traffico, oppure, d'inverno, tanto zolfo nelle ore di accensione dei riscaldamenti (allora quasi tutti ancora a gasolio)⁹; o ancora, si trovavano grandi quantità di sodio e di cloro quando tirava vento dal mare.

well there was certainly no shortage at all of that, and it was free! We ourselves built a prototype sampler, which we installed in the monitoring station of the USL (local health department) in Via del Ponte alle Mosse. A small filter-bearing frame ran very slowly (1 mm/h) over the suction orifice of a small pump. After a week a "streak" of particulate matter⁸ could be observed on the filter, each millimetre of which corresponded to a particular day and time of the week of sampling. Using the PIXE, with measurements in sequence millimetre by millimetre, we then reconstructed the composition of the particulate 'hour by hour' over the sampling period. Already in 1988 a graduation thesis was devoted to this prototype, and it was possible to observe the correlations between the different elements of the particulate with each other over time, and of each element with the time brackets and with the atmospheric conditions. For example, high levels of lead and bromine (at the time caused by the exhaust from cars with petrol-driven engines) at peak traffic times, or, in the winter, high levels of sulphur in the hours during which central heating systems were in use (at the time almost all still oil-fired);⁹ or, again, large quantities of sodium and chlorine when the wind was blowing from the sea.

For the analysis of works of art we did instead come up against the problem of finding willing lenders. In other words, art historians or curators who were, on the one hand sensitive to the aspect of the material composition of the works and had interesting problems to resolve, and who were, on the other hand, not afraid of subjecting them to our analyses. The word 'nuclear' attached to the techniques was already a drawback. In addition we ourselves often involuntarily contributed to frighten them further, but letting slip expressions in jargon that

Per le analisi su oggetti d'arte, c'era invece un problema per trovare dei "prestatori di opere", storici d'arte o curatori che fossero da un lato sensibili all'aspetto della composizione materica delle opere e avessero problemi interessanti da risolvere, dall'altro non avessero paura di sottoporle alle nostre analisi. Già non aiutava la parola "nucleare" abbinata alle tecniche; e in più, noi a volte ci mettevamo involontariamente del nostro a intimidire, lasciandoci sfuggire espressioni gergali non propriamente incoraggianti come: "Basta *bombardare* col fascio il dipinto per sapere se il pittore ha usato un pigmento o un altro"! In realtà avevamo fatto tantissime prove (su vecchi quadri o stampe di casa mia) per trovare condizioni ultrasicure di analisi: avevamo visto che grazie alle altissime sezioni d'urto di produzione X nella PIXE e all'ottima efficienza del sistema a due rivelatori sopra detto, usando correnti debolissime (<100 pA) e tempi di misura molto brevi (un minuto o due) non si arrecava danno di sorta, e la statistica di conteggio era già ampiamente sufficiente per l'analisi. Però all'inizio fu dura convincere curatori di musei e storici dell'arte: pur vogliosi di avere le risposte che potevano venire dalla PIXE, titubavano. Una collega, pur di evitare all'opera il rischio che temeva potesse subire, buttò lì la proposta di mettere sotto fascio anziché l'opera, una sua fotografia! Evidentemente era anche un problema di capirsi, e dedicammo molto tempo a scrivere articoli divulgativi e a fare conferenze in contesti "umanistici", inizialmente circondati da diffidenza. Progressivamente, riuscimmo però a conquistare fiducia. Il primo lavoro non episodico, ma con dietro un progetto organico, fu l'analisi dei pigmenti in un ampio gruppo di miniature medievali e rinascimentali di manoscritti della biblioteca Rilliana di Poppi e della Civica Comunale di Arezzo.

were not exactly encouraging, such as: "All we need to do is *bombard* the painting with the beam to know whether the artist used one type of pigment or another"! In actual fact, we had already carried out numerous tests (on old paintings or prints from my own home) so as to ensure totally safe conditions of analysis. We had indeed noticed that, as a result of the very high cross-sections of X-ray production in the PIXE, and the very good efficiency of the two-detector system mentioned above, using very weak currents (<100 pA) and very short measuring times (one or two minutes) absolutely no damage was caused, and the statistics was already amply sufficient for the analysis. Nevertheless, at the start it was very hard to convince museum curators and art historians: despite wishing to have the answers that the PIXE could yield, they continued to be hesitant. To avoid the risk that she feared the work might be subjected to, one colleague even came up with the proposal of subjecting a photograph of it, rather than the work itself, to the beam analysis! Evidently there was also an underlying problem of making ourselves understood, and we devoted a great deal of time to writing informative articles and holding conferences in "humanities" contexts, initially greeted with extreme wariness. Nevertheless, gradually we succeeded in winning trust. The first commission that was not of an occasional nature, but part of an organic project, was the analysis of the pigments in a large group of mediaeval and Renaissance illuminations from manuscripts in the Rilliana library of Poppi and the Municipal Civic library of Arezzo.

We repaid the trust of the conservators who had allowed us to perform the analyses, finding a series of results that were unexpected and considered significant, such as, for example,

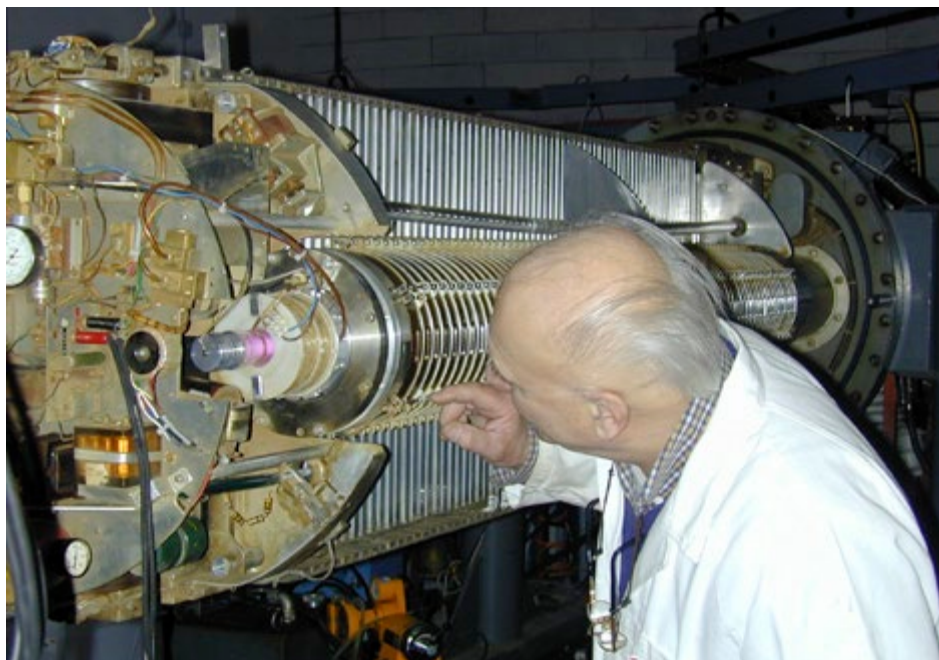


Fig. 2. La colonna di carica del KN3000 durante una delle frequenti manutenzioni, “amorevolmente assistita” da Adriano Pecchioli. Si vedono bene il tubo acceleratore, la sorgente di ioni a radiofrequenza e tutto il terminale di alta tensione, che era stato completamente modificato in casa.

Fig. 2. The charging column of the KN3000 during one of the frequent maintenance operations, “lovingly assisted” by Adriano Pecchioli. Clearly visible are the acceleration tube, the radiofrequency ion source and all the high-voltage terminal, which had been entirely home-modified.

the use of precious lapis lazuli blue from as far back as the twelfth century, even in aesthetically modest illuminations. In 1988 I was invited to give a talk on this job at the SIF national conference in Urbino, and afterwards we submitted an article on the subject of proton beams on mediaeval illuminations to the *Nuovo Saggiatore*. Not long afterwards I received a phone call from a Latin palaeographer, Marco Palma, who had read an article about us in the *Corriere della Sera* (presumably inspired by our own article in the *Nuovo Saggiatore*). Marco proposed a collaboration with the Vatican Library, using the PIXE to study the “rulings”¹⁰ in twelfth-century Greek and Latin manuscripts. We obtained an unexpected result: in addition to the already known modes of ruling (with leadpoint or watered-down ink) in some codices we discovered a third type of ruling made using a sort of graphite point. It didn’t seem that important to us, but the discovery aroused a certain sensation and we published it in the most prestigious codicology journal, *Scriptorium*.

Following this success, Marco and his collaborators asked us to analyse the writing inks and the temperas of the illuminations in numerous ancient codices. It was a period of great satisfaction: in short not only were the doors of the Vatican Library opened for our investigations, but also those of other extremely important libraries, such as the Laurenziana and the Marcelliana.¹¹ They even brought us codices that were very awkward and heavy, for which we constructed a sort of large lectern to support them in front of the beam. We had to exploit to the full the short time that the codices were allowed out ‘on mission’ and we spent entire nights making measurements with our humanist friends. There was an atmosphere of

Ripagammo la fiducia dei conservatori che ci consentirono le analisi, trovando una serie di cose inaspettate e giudicate importanti (come l'uso del prezioso blu di lapislazzuli fin dal XII secolo, anche in miniature esteticamente modeste). Nel 1988 su questo lavoro fui invitato a fare una relazione al congresso nazionale SIF a Urbino, e a seguire scrivemmo un articolo sul Nuovo Saggiatore, "Fasci di protoni su miniature medievali". Poco dopo mi telefonò un paleografo latino, Marco Palma, che aveva letto un articolo su di noi sul Corriere della Sera (suppongo ispirato dal nostro pezzo sul Nuovo Saggiatore). Marco propose una collaborazione con la Biblioteca Vaticana per studiare con la PIXE le "rigature"¹⁰ di manoscritti greci e latini del XII secolo. Ottenemmo un risultato inatteso: oltre alle modalità di rigatura note (con mina di piombo o inchiostro diluito) in alcuni codici scoprimmo un terzo tipo di rigatura, tracciata con una sorta di mina di grafite. A noi non sembrava così importante, invece la cosa fece un certo scalpore e la pubblicammo sulla rivista più prestigiosa di codicologia, *Scriptorium*.

A seguito di questo successo, Marco e collaboratori ci chiesero di analizzare inchiostri di scrittura e tempere delle miniature di moltissimi codici antichi. Fu un periodo di soddisfazioni: in breve ci si aprirono le porte non solo della Vaticana, ma anche di altre importantissime biblioteche come la Laurenziana e la Marcelliana¹¹. Ci portavano codici anche molto ingombranti e pesanti, per sostenere i quali davanti al fascio avevamo costruito una sorta di grandi leggi. Bisognava sfruttare il poco tempo in cui i codici potevano restare "in trasferta", e passavamo nottate a misurare insieme agli amici umanisti. C'era un clima di entusiasmo e, pur nella complementarità delle competenze si lavorava veramente con spi-

great enthusiasm and, despite the complementary nature of our expertise, we worked with an authentic team spirit. The little control room of the KN3000 was sometimes crowded out, with ten or maybe twelve people in it, mostly non-physicists, and finally with an adequate turnout of the fair sex which definitely improved the ambience of the measurements room of an accelerator, which was a predominantly male province, at least up to then. It was a genuine delight to see the satisfaction of our colleagues when, from the X spectra which came up in the space of a few seconds, we were able to already provide them with the first answers (here we have lead, here lots of copper, here there's more iron than in the other ink which actually seemed the same, etc.). The group included illustrious figures such as Monsignor Paul Canard, the person in charge of the manuscripts section of the Vatican Library no less, who was so enthusiastic that he too attended night-long shifts with the KN3000. By now he was able to interpret the spectra, and he would suggest which other inks or illuminations it would be a good idea to analyse immediately to corroborate the theories that he was drawing up in real time. The results we obtained brought us a certain 'glory', which culminated in our taking part in September 1992 at the course on *Ancient Books Materials and Techniques*, under the aegis of the Codicology school at Erice. I held four long lessons, somewhat disconcerting the humanists who were accustomed to more highbrow prose and more qualitative speech, but I didn't do too badly. These lessons were then used as the basis for an equivalent number of weighty articles for the official journal of the Biblioteca Apostolica Vaticana, *Studi e Testi*.

rito di squadra. La piccolissima sala di controllo del KN3000 era a volte affollata anche da dieci o dodici persone, in maggioranza non fisici, e con finalmente una congrua rappresentanza del gentil sesso, che ingentilivano l'ambiente della sala misure di un acceleratore - tipicamente a grande prevalenza maschile, almeno a quei tempi. Era una gioia vedere la soddisfazione dei nostri colleghi quando dagli spettri X che venivano su in pochi secondi, noi già davamo i primi "responsi" (qui c'è piombo, qui tanto rame, qui c'è più ferro che nell'altro inchiostro che invece sembrava uguale, etc.). Nel gruppo c'erano personaggi illustri come Monsignor Paul Canard, nientemeno che il responsabile della sezione manoscritti della Biblioteca Vaticana, che si era talmente appassionato da farsi anche lui nottate di turno al KN3000. Ormai interpretava correttamente gli spettri, e suggeriva quali altri inchiostri, o miniature, sarebbe stato bene analizzare subito per corroborare le ipotesi che elaborava in tempo reale. Ottenemmo risultati che ci portarono una certa "gloria", culminata della nostra partecipazione (settembre 1992) al corso su *Ancient Books Materials and Techniques*, nell'ambito della Scuola di codicologia a Erice. Io vi feci quattro lunghe lezioni, sconvolgendo un po' gli umanisti abituati a linguaggi più aulici e discorsi più qualitativi; ma andò bene. Da queste lezioni furono tratti altrettanti corposi lavori per la rivista ufficiale della Biblioteca Apostolica Vaticana, *Studi e Testi*.

Nel frattempo arrivavano altri studenti interessati a fare tesi con Franco e me. Lorenzo Giuntini, in una tesi "metodologico-strumentale", costruì con successo un *set-up* per misure RBS e non solo PIXE con fascio esterno. Il filone del *backscattering* (BS) fu alimentato poi dalle tesi di laurea e dottorato di Massimo Chiari, e

In the meantime other students interested in doing theses with Franco and myself had arrived. In a 'methodical-instrumental' thesis Lorenzo Giuntini successfully constructed a *set-up* to perform not only PIXE but also RBS measurements with an external beam. The backscattering (BS) field was then fuelled by the graduation and doctoral theses of Massimo Chiari and the graduation thesis of Stefano Mazzoni, within the framework of the SEDUR experiment which brought Nello Taccetti back to the KN3000: we measured non-Rutherford BS elastic cross-sections of protons on light nuclei, necessary for quantitative results in the IBA measurements with particle scattering. For SEDUR we mounted the third beam line on the exit from the switching magnet, installing a measuring chamber with 16 silicon detectors at different angles (with liquid nitrogen cooling to ensure record-level resolution, also thanks to the front-end electronics developed in-house).

In another thesis on methodical-instrumental aspects, for the PIXE¹² we built an X-ray detector with wavelength dispersion, which had a spectacular energy resolution despite maintaining a *set-up* with external beam.

These activities underscore the importance we have always given not only to the application aspects, but also to those of method and technology: if we don't keep such developments alive, the standard application techniques become rapidly obsolete.

Obviously, however, the applications also forged ahead, often connected with other graduation or doctoral theses of students both from Florence (including Silvia Nava, in the field of studies on pollution, and Alba Santo in the petrographic field) and from other universities.

da quella di laurea di Stefano Mazzoni, nell'ambito dell'esperimento SEDUR, che vide il ritorno di Nello Taccetti al KN3000: misurammo sezioni d'urto di BS elastico non Rutherford di protoni su nuclei leggeri, necessarie per risultati quantitativi nelle misure IBA con scattering di particelle. Per SEDUR montammo la terza linea di fascio in uscita dal magnete *switching*, installandoci una camera di misura con 16 rivelatori al silicio a diversi angoli (raffreddati all'azoto liquido per avere risoluzione a livelli record, grazie anche a elettronica *front-end* sviluppata in casa).

In un'altra tesi su aspetti metodologici-strumentali, per la PIXE¹², si costruì un rivelatore X a dispersione di lunghezza d'onda, con risoluzione energetica spettacolare pur mantenendo un set-up con fascio esterno.

Queste attività sottolineano l'importanza che abbiamo sempre dato non soltanto agli aspetti applicativi, ma anche a quelli metodologici e tecnologici; se non si mantengono vivi questi sviluppi, le tecniche applicative standard diventano rapidamente obsolete.

Naturalmente però continuarono anche proprio le applicazioni, spesso collegate ad altre tesi di laurea o dottorato di studenti sia fiorentini (fra cui Silvia Nava – nel campo degli studi sull'inquinamento – e Alba Santo – in campo petrografico) che di altre Università.

Mi fermo qui col racconto dei tempi "pionieristici". Altre misure importanti e che ci hanno dato visibilità, in particolare quelle sugli inchiostri dei manoscritti galileiani, sono degli anni immediatamente successivi e sono state decisive per portare alla nascita formale del nuovo laboratorio INFN con accresciute potenzialità, anche nel campo delle datazioni. Ne scriverò se possibile in una prossima...

I shall interrupt here my story of the 'pioneering' times. Other important measurements that gave us visibility, in particular those on the inks of Galileo's manuscripts, date to the years immediately following and were decisive in leading to the formal foundation of the new INFN Laboratory with boosted potential even in the field of dating. I shall if possible write about this in a future ... episode, to round off the story and map out the progress of applied nuclear physics in Florence right through to the most recent activities, involving the decisive contribution of a new generation of young protagonists.

Pier Andrea Mandò graduated in physics in 1973. After initial activities in experimental basic nuclear physics he has progressively devoted himself to applications of nuclear techniques to sectors such as cultural assets and the environment. He is Professor of Applied Physics at the University of Florence and directs the local section of the INFN.

Note

¹ Particle-Induced X ray Emission.

² Particle-Induced Gamma ray Emission.

³ Backscattering Spectrometry.

⁴ Nuclear Reaction Analysis.

puntata, completando il racconto e tracciando il percorso della fisica nucleare applicata a Firenze fino alle attività più recenti, che hanno visto il contributo decisivo di una nuova generazione di giovani protagonisti.

Pier Andrea Mandò, laureato in fisica nel 1973, dopo un'iniziale attività in fisica nucleare sperimentale di base si è progressivamente dedicato alle applicazioni di tecniche nucleari in settori quali beni culturali e ambiente. È ordinario di Fisica Applicata nell'Università di Firenze e dirige la locale Sezione INFN.

Note

¹ Particle-Induced X ray Emission.

² Particle-Induced Gamma ray Emission.

³ Backscattering Spectrometry.

⁴ Nuclear Reaction Analysis.

⁵ Gli irraggiamenti avvenivano al reattore della Casaccia, e a Firenze effettuavamo la spettrometria gamma; l'esperienza degli anni da fisico nucleare di base mi aiutò a migliorare la sensibilità per la determinazione di alcuni elementi, usando uno schermo attivo antiCompton fatto costruire su nostro progetto da una ditta che produceva scintillatori NaI(Tl).

⁶ Prima, per essere sicuri di analizzare un punto preciso si doveva fare una sorta di scan e solo a posteriori si capiva, dalle variazioni degli spettri X, quando si era passati sopra il dettaglio che interessava: molto time-consuming!

⁵ The radiation took place at the Casaccia reactor, and the gamma spectrometry was performed in Florence. My years of experience as a pure nuclear physicist helped me to improve the sensitivity for the determination of certain elements, using an active antiCompton shield built to our design by a firm that produced NaI(Tl) scintillators.

⁶ Previously, in order to be certain of analysing a specific point, we had to perform a sort of scan and only after that, through the variations of the X spectra, were we able to see when we had passed over the detail of interest: very time-consuming!

⁷ With fine targets, such as PM filters, it was also possible to use a Faraday cup placed immediately behind the target to measure the beam current.

⁸ At the time, apart from a pre-filtering of the large-sized component, the particulate dimension was not distinguished (PM10, PM2.5, etc.); now obviously we use samplers with "size fractionation".

⁹ Now that the central heating systems are all methane-fuelled, the surplus of sulphur in winter has disappeared, just as the high levels of lead and bromide have disappeared with the progressive introduction of lead-free petrol.

¹⁰ That is, the horizontal ruling lines and the vertical boundary lines to the right and left of the column of writing.

¹¹ To help us out during this period, we were joined by a couple of young physicists who had come to us for several months' internship (Raffaella Cambria from Milan and Maurice Grange from the Louvre laboratories).

¹² Thesis by Pino Tesauro, which I supervised jointly with Giuliano Parrini.

⁷ con bersagli sottili, come i filtri con il PM, per misurare la corrente di fascio si poteva usare anche una *Faraday cup* piazzata subito dietro il bersaglio.

⁸ All'epoca, a parte un prefiltraggio della componente molto grossa, non si discriminava la dimensione del particolato (PM10, PM2.5, etc.); oggi ovviamente usiamo campionatori con "size fractionation".

⁹ Oggi che i riscaldamenti sono tutti a metano, il surplus di zolfo durante l'inverno è scomparso, così come gli alti livelli di piombo e bromo sono scomparsi con l'introduzione progressiva delle benzine verdi.

¹⁰ cioè le linee "rettrici" orizzontali, e quelle di giustificazione a sinistra e a destra della colonna di scrittura.

¹¹ A darci man forte in quel periodo si aggiunsero giovani fisici che erano venuti da noi per alcuni mesi di stage (Raffaella Cambria da Milano, Maurice Grange dai laboratori del Louvre).

¹² Pino Tesauro, di cui fui relatore insieme a Giuliano Parrini.