

## NASCITA A PISA DELLA SPERIMENTAZIONE IN “FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI”

*Carlo Bemporad*

**23/11/2017**

*Vengono esaminate le fasi iniziali della “Fisica Sperimentale delle Particelle Elementari” a Pisa e se ne segue brevemente lo sviluppo fino a circa gli anni '80. Una attenzione particolare viene data agli “Esperimenti senza Acceleratori” e a quelli di “Fisica dei Neutrini”, eseguiti mediante raggi cosmici, a reattori o ad acceleratori (esperienze afferenti alla Commissione Scientifica II). Ciò rispecchia la ben nota ripartizione delle attività dell'INFN fra le varie Commissioni Scientifiche Nazionali. La fisica afferente alla Commissione Scientifica II verrà seguita dai suoi inizi fino a tempi a noi più prossimi.*

La “Fisica delle Particelle” non ha certo avuto origine a Pisa, ma è piuttosto da ricollegarsi con le attività del gruppo formatosi a Roma intorno ad Enrico Fermi <sup>1</sup>. Altre attività seminali sono state gli studi dei raggi cosmici, iniziati e potenziati in Italia principalmente ad opera di Bruno Rossi, Gilberto Bernardini ed altri a Firenze, Milano, Torino, Padova. Nel dopoguerra alcune di queste attività proseguirono nei nuovi laboratori dei Sabbioni e della Testa Grigia (1948). Con la creazione dell'INFN nel 1951 questo Istituto provvide ad una coordinazione delle ricerche, inizialmente fra il 1951 e il 1952. Un primo riordino dell'Istituto portò alla creazione delle sezioni di Roma, Firenze, Padova, Milano, Torino. Nel 1954 fu istituita a Pisa la “Sezione Sincrotrone, poi trasferita a Frascati. Finalmente nel 1956 furono aggiunte le nuove sezioni di Bologna e Pisa. Questo ritardo, fra l'istituzione delle prime sezioni INFN e l'aggiunta della sezione di Pisa, rispecchia in qualche modo la scarsa presenza di Pisa nelle attività legate alla “nuova fisica”.

Risulta quindi sorprendente l'esplosivo sviluppo e sempre maggiore radicamento a Pisa delle iniziative riguardanti la “Fisica delle Particelle”.

---

<sup>1</sup>Dovute alla lungimiranza e alle iniziative di Orso Mario Corbino.



Figura 1: *La nascita della Fisica delle Particelle*, ispirata da: *La nascita di Venere*, Alexandre Cabanel (1862) Musée d'Orsay.

Uno dei fattori che ha facilitato il potenziamento della “Fisica delle Particelle Elementari” in ambito nazionale e quindi anche a Pisa, è stata l’intelligente politica dell’INFN nello stabilire le sue sezioni presso le principali università del Paese; questo è stato, in un certo senso, più importante della nascita dei Laboratori Nazionali, più legati alla gestione delle macchine acceleratrici o, precedentemente, alla gestione delle strutture legate alle ricerche sui raggi cosmici. La simbiosi fra le Università e l’INFN se da un lato metteva a disposizione degli Istituti di Fisica universitari importanti risorse finanziarie e strumentazione specifica per la ricerca, gli istituti universitari mettevano a contatto con l’INFN un grande numero di studenti selezionati ed interessati a questo campo di studi.

Il brusco cambiamento di passo, verificatosi a Pisa, è da ricondursi alla temporanea presenza nell’università toscana di alcuni ricercatori, provenienti da altre istituzioni: Marcello Conversi (dal 1951 al 1959), Giorgio Salvini (1952-1955), Carlo Franzinetti (1955-1962); presenze quindi limitate nel tempo, specie se confrontate con quella di Luigi Puccianti (dal 1917 al 1947) il bravo fisico del periodo prebellico [1].

Questi nuovi professori chiamati a Pisa portavano un bagaglio di conoscenze e di contributi ben riconosciuti in un contesto internazionale; i loro collegamenti con i migliori ricercatori operanti nel campo, sarebbero risultati preziosi per le nuove leve in formazione.

Credo sia utile esaminare brevemente le caratteristiche di questi personaggi.

*MARCELLO CONVERSI* [2], (Fig. 2).

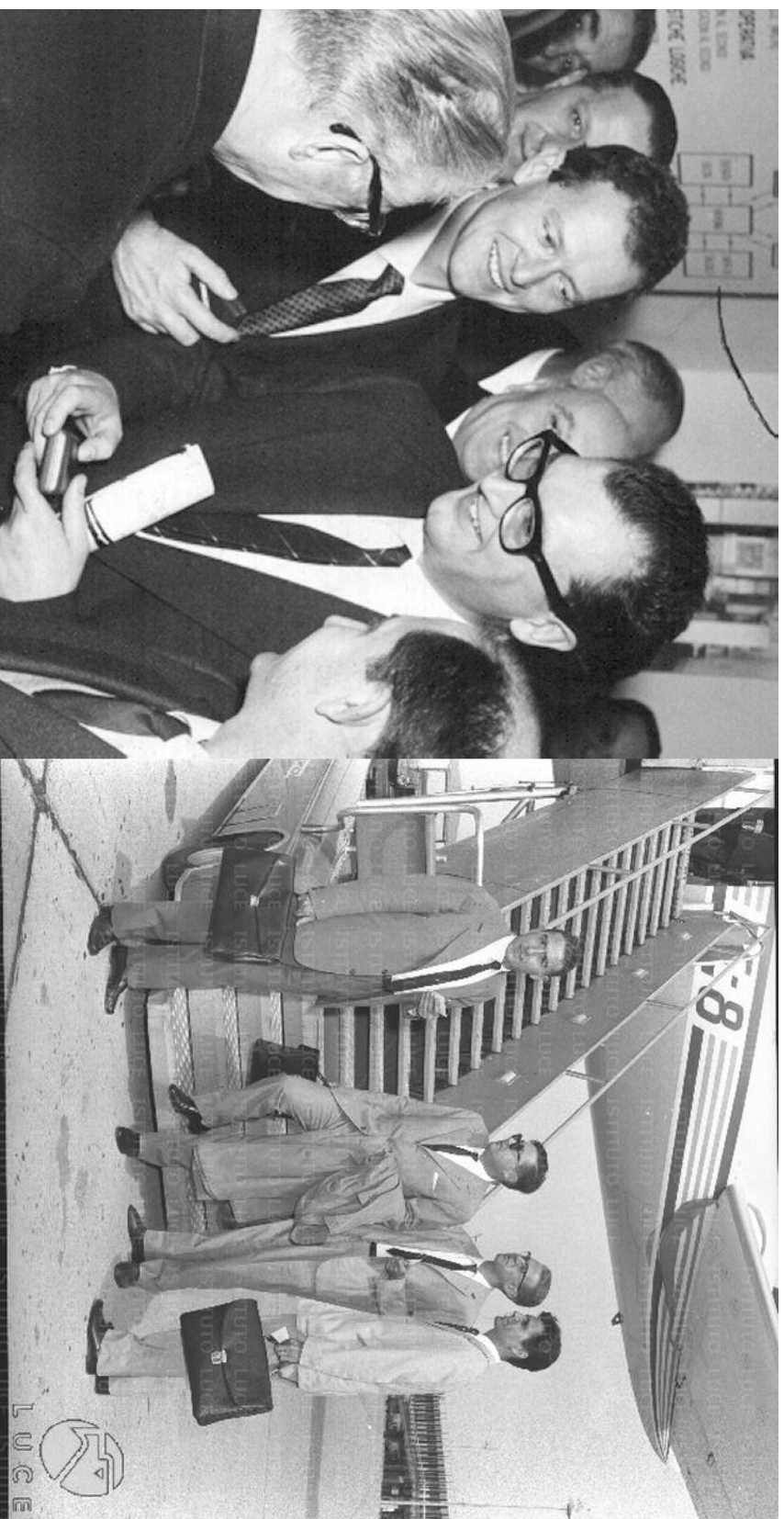
Laureato a Roma durante la guerra nell'istituto nel quale erano presenti Edoardo Amaldi, Gilberto Bernardini, Gian Carlo Wick e brevemente Fermi, aveva eseguito il famoso esperimento "Conversi, Pancini, Piccioni" che dimostrò la natura leptonica del mesone  $\mu$  [3, 4]. Il profondo significato del risultato dell'esperimento fu messo in luce da Fermi; Luis Alvarez, nella sua relazione al Nobel, lo considera come l'iniziatore della moderna fisica delle particelle. Per la realizzazione di questo esperimento e la necessaria separazione fra mesoni positivi e negativi, furono utilizzate le lenti magnetiche ideate da Luigi Puccianti, professore a Pisa; la "teoria" relativa al loro funzionamento fu sviluppata da Gian Carlo Wick [5]<sup>2</sup>.

Dopo la guerra Conversi passò alcuni anni negli Stati Uniti eseguendo esperimenti di raggi cosmici, ad alta quota e su aerei, con sistemi di contatori Geiger. Chiamato a Pisa, in un Istituto nel quale la fisica più moderna era praticamente assente, si può ben dire che egli ne sia stato l'iniziatore, avvalendosi anche di studenti eccezionali. Furono eseguiti esperimenti, al laboratorio della Testa Grigia, sulla componente nucleonica dei raggi cosmici [6], poi una ricerca, nel laboratorio dei Sabbioni, di una particella di  $550 m_e$ — precedentemente segnalata dal fisico russo Alihanian e rivelatasi inesistente[7, 8].

Importantissima successivamente la collaborazione con Jack Steinberger per una prima esposizione di una camera a bolle ad idrogeno presso il Cosmotrone di Brookhaven, di cui si parlerà estesamente in seguito. Ma uno dei maggiori contributi di Conversi durante la sua stagione pisana, prima del trasferimento a Roma, è stata l'invenzione, insieme ad Adriano Gozzini, dei "Flash Tubes". Questo dispositivo tracciante, una "Camera Odoscopica", è stato un importante precursore delle Camere a Scintilla; è stato impiegato in molti studi sullo sviluppo di sciami cosmici estesi da parte del gruppo di Kiel in Germania e del gruppo di Durham in Inghilterra [9, 10]. Una sua applicazione

---

<sup>2</sup>Bruno Rossi fu il primo ad impiegarle in esperimenti di raggi cosmici.



*Figura 2: A sinistra: Inaugurazione del calcolatore CEP (1951). In prima fila: Giovanni Gronchi di spalle, Marcello Conversi, Giuseppe Cecchini, Alfonso Caracciolo. A destra: Partenza per gli Stati Uniti, Giorgio Salomi, Giorgio Ghigo, Carlo Bernardini, Gianfranco Corazza. (1961).*

è stata più recentemente realizzata da un gruppo di Pisa operante ad ADONE [11].

Una importante funzione fu svolta da Conversi nel periodo della costruzione del primo calcolatore elettronico italiano, quello realizzato a Pisa su suggerimento di Fermi; Conversi fu chiamato a presiedere (fra il 1955 e il 1969) il Comitato Direttivo del CISE (Centro Studi Calcolatori Elettronici), dal quale poi nacque l'Istituto per l'Elaborazione dell'Informazione del CNR.

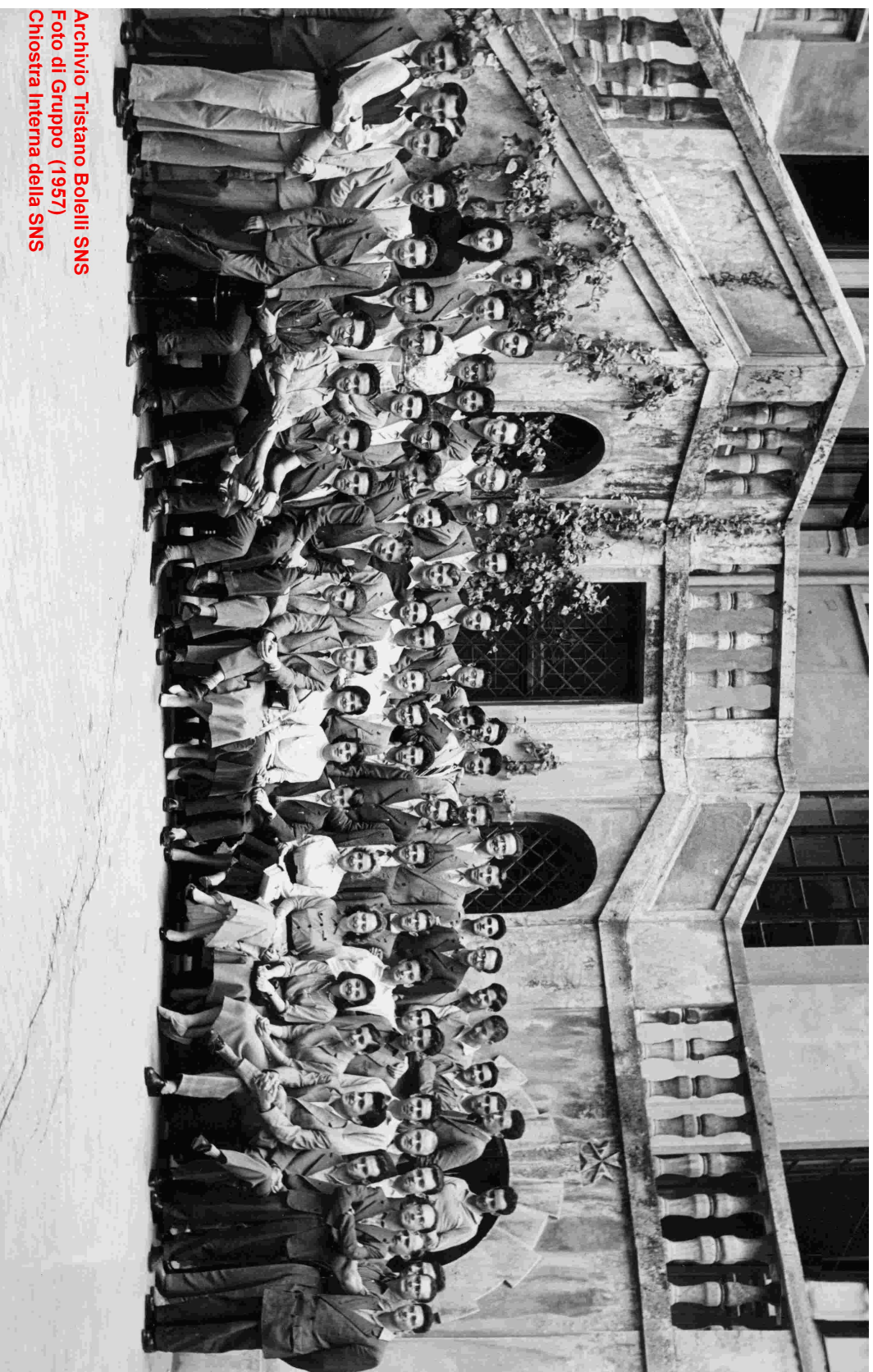
*GIORGIO SALVINI*, (Fig. 2).

Le prime ricerche di Giorgio Salvini furono nel campo dei raggi cosmici, nel periodo 1944-1952; a Milano sino al 1949, e poi negli Stati Uniti.

Durante il suo periodo pisano Giorgio Salvini si dedicò completamente alla formazione del Gruppo Sincrotrone, al progetto di questa prima macchina italiana e agli sviluppi tecnici ad essa necessari. Non ebbe perciò modo di impegnarsi nelle ricerche in fisica delle particelle elementari, alle quali potè di nuovo dedicarsi a Frascati con il nuovo sincrotrone appena avviato. Salvini e tutto il Gruppo Sincrotrone si trasferirono a Roma e Frascati (1954) appena ebbe inizio la costruzione della macchina. A Pisa Salvini svolse attività di docente sia presso l'Università che presso la Scuola Normale; attraverso i concorsi di ammissione alla Scuola Normale contribuì a selezionare alcuni validi fisici che formarono il primo nucleo pisano di ricercatori in fisica delle particelle (Fig. 3).

*CARLO FRANZINETTI*, (Fig. 4).

Subito dopo la guerra Carlo Franzinetti collaborò con Cecil Frank Powell presso l'Università di Bristol; potè quindi impadronirsi della "Tecnica delle Emulsioni Nucleari". Tornato in Italia, formò a Roma un gruppo di emulsioni in collaborazione con Edoardo Amaldi, Carlo Castagnoli, Augusta Manfredini, Giustina Baroni ed altri. Franzinetti fu uno dei coordinatori di una prima grande collaborazione internazionale formata per esporre emulsioni ai raggi cosmici, a grande altezza mediante palloni areostatici, la famosa esposizione G-Stack, con la quale poterono essere prodotte e studiate particelle di vario tipo: pioni, mesoni K, Iperoni [12]. I palloni furono lanciati da vari porti del mediterraneo raggiungendo tipicamente altezze fra i 25 e i 30 Km. Carlo Franzinetti e Giacomo Morpurgo scrissero un primo importante lavoro sulle proprietà delle particelle strane [13]. È qui opportuno citare due lavori di rassegna, da parte di Charles Peyrou e Luisa Bonolis, riguardanti l'impatto della ricerca mediante raggi cosmici sulla fisica delle particelle [14, 15].



**Archivio Tristano Bolelli SNS**  
**Foto di Gruppo (1957)**  
**Chiostra Interna della SNS**

9

Figura 3: Foto dei normalisti, della Classe di Lettere e della Classe di Scienze, alla SNS nel 1957. In prima fila in basso e a sinistra sono riconoscibili Halo Mammeli e Vittorio Silvestrini, al centro Carlo Rabbia. Archivio Tristano Bolelli, SNS. Cortesia: Maddalena Taglioli, Archivistica.



Figura 4: Ernesto Corinaldesi e Carlo Franzinetti alla cena in onore di Adriano Gozzini, neoprofessore a Pisa (1959). (Cortesia: Silvia Gozzini).

A Roma Franzinetti, in collaborazione con Bella, cercò di sviluppare la tecnica degli Spark Counters, iniziata da Keuffel, per il possibile tracciamento di particelle; lo studio, benchè interrotto, fu un passo importante verso la realizzazione delle camere a scintilla. A Pisa, Franzinetti, come esperto dei meccanismi di scarica nei gas, potè dare contributi allo sviluppo dei Flash Tubes di Conversi e Gozzini. Splendido docente, uomo dai vasti interessi, a Pisa Carlo Franzinetti e il biologo Giovanni Moruzzi cercarono di formare gruppi misti di ricerca comprendenti sia fisici che biologi, dando inizio a una pionieristica scuola di biofisica. Franzinetti è stato importantissimo nel programmare ed attuare sistematicamente una “sprovincializzazione” della ricerca pisana quasi obbligando tutti i giovani ricercatori a passare dei periodi all’estero ed adoprandosi a trovare le opportune collocazioni; i contatti con l’estero erano certamente iniziati durante la direzione di Marcello Conversi, ma in maniera meno sistematica. Di conseguenza Luciano Bertanza passò un periodo presso il laboratorio di Brookhaven, Italo Mannelli passò dei periodi presso l’MIT e Brookhaven, Paolo Franzini andò all’Università di Columbia, Giorgio Bellettini passò un periodo al CERN nel gruppo di Giuseppe Cocconi, Carlo Bemporad passò un periodo presso la Tufts University di Boston e il Cambridge Electron Accelerator. I rapporti di collaborazione fra le istituzioni ospitanti e Pisa continuarono spesso ben oltre il periodo di permanenza all’estero.

Come già ricordato la moderna fisica delle particelle trovò in Marcello Conversi il suo iniziatore in ambito pisano. Durante i primi anni di direzione e subito dopo l’invenzione della camera a bolle da parte di Glaser (1952), Giuseppe Martelli, assistente di Conversi, e Luciano Bertanza appena laureato, iniziarono una attività sperimentale volta a sviluppare piccole camere a bolle a liquido pesante. Alcuni lavori sulla termodinamica dei liquidi pesanti e sulla costruzione delle camere furono pubblicati a quel tempo [16, 17].

Dopo il periodo di ricerca mediante raggi cosmici, nei laboratori della Testa Grigia e dei Sabbioni, è nella collaborazione con Jack Steinberger e la partecipazione ai lavori centrati sull’uso di una delle prime camere a bolle a idrogeno liquido, esposta al Cosmotrone di Brookhaven, che si consolidò (circa 1958) a Pisa un gruppo di “camera a bolle ” composto dai primi eccezionali allievi di Conversi: Paolo Franzini, Italo Mannelli, Carlo Rubbia, Vittorio Silvestrini, Luigi di Lella e nel tempo alcuni altri [18], (Fig. 3).

Importanti risultati emersero da queste iniziali attività: la dimostrazione della non conservazione della parità nei decadimenti iperonici (Fig. 5)[19], la



determinazione degli spin della  $\Lambda^0$  e della  $\Sigma^-$  [20], la misura della vita media di  $\Lambda^0$ ,  $\Theta^0$ ,  $\Sigma^-$  [21]. Per una bibliografia completa degli esperimenti del gruppo di camera a bolle si rimanda al lavoro di Bigi e Flaminio: *Activities and publications of the Pisa "Bubble Chamber Group"; (1953-1988)* [18]. Una piccola

### Demonstration of Parity Nonconservation in Hyperon Decay

F. Eisler, R. Plano, A. Prodell, N. Samios, M. Schwartz, J. Steinberger (Columbia U. & Brookhaven), P. Bassi, V. Borelli, G. Puppi, G. Tanaka P. Woloschek, V. Zoboli (Bologna U.), M. Conversi, P. Franzini, I. Mannelli, R. Santangelo, V. Silvestrini (Pisa U.), D.A. Glaser, C. Graves, M.L. Perl (Michigan U.) [Hide](#)

1957

**Phys.Rev. 108 (1957) 1353-1355**

Also in "Bologna 1984, Proceedings, Fifty years of weak-interaction physics" 600-601

DOI: [10.1103/PhysRev.108.1353](https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1353)

Conference: [C84-05-26](#), p.600-601

Figura 5: *Articolo sulla violazione della parità.*

camera a bolle a ciclo rapido (5 espansioni al secondo), costruita interamente a Pisa, fu utilizzata in un esperimento presso il sincrotrone nazionale. Servì a determinare la polarizzazione del protone di rinculo nella fotoproduzione di mesoni  $\pi^0$  in idrogeno [22, 23].

La necessità di analizzare un numero sempre crescenti di eventi e la necessità di aumentare la precisione delle misure, spinse il gruppo di camera a bolle pisano ad impegnarsi nella costruzione di vari proiettori in successione: "Frankenstein", "mangiaspago", etc. collegandoli poi on-line (1965) con il nuovo computer CEP costruito a Pisa; questo fu poi sostituito da un IBM-1800 (1968). La costituzione del Centro Nazionale Analisi Fotogrammi (CNAF) a Bologna e la disponibilità del suo "Flying Spot Digitizer" spostò a Bologna, per Pisa e per molti altri gruppi italiani, l'esecuzione delle misure di precisione degli eventi. Le nuove attività coinvolsero molto nuovo personale, fisici, ingegneri, tecnici, "scanners". Citandone alcuni: Roberto Pazzi, Paolo Lariccia, Gianni Gennaro, Piero Salvadori, Roberto Ruberti, Carlo Guidi, Luciano Zaccarelli, Roberto Bertelli. Il lavoro svolto resta documentato da una ricchissima serie di articoli e da una serie di dettagliate note interne; per un esame completo si rimanda di nuovo al lavoro di Bigi e Flaminio [18].

Dagli anni '70 fino al termine della fisica perseguita mediante camera a bolle (1987), Pisa condusse molti esperimenti in grandi collaborazioni, centrate tutte sul CERN, utilizzando prima la camera a idrogeno da 81 cm di

Saclay, poi la camera a idrogeno da 2 m (1973) ed infine la grande camera europea BEBC (1974); furono usati sia riempimenti di idrogeno che di deuterio liquidi. Le prime misure riguardarono l'annichilazione di antiprotoni con produzione di stati mesonici [24], poi esperimenti di diffusione o di interazione di mesoni  $K^-$  [25], infine, con BEBC, esperimenti per lo studio di particelle "charmate" prodotte da fasci di neutrini, poi esperimenti per lo studio delle interazioni di corrente carica e di corrente neutra con neutrini e antineutrini [26, 27], infine esperimenti sulle possibili oscillazioni neutriniche [28].

L'inizio della sperimentazione con elettronica e rivelatori a Pisa è certamente dovuta alla iniziativa di Carlo Franzinetti, in coincidenza con la costruzione del Sincrotrone e con la volontà di iniziare una sperimentazione di Pisa a Frascati. Franzinetti, impegnato in esperimenti con camera a bolle, non partecipò alla sperimentazione al Sincrotrone, ma creò le condizioni perché questa avvenisse, preoccupandosi, per prima cosa, della assunzione a Pisa di alcuni giovanissimi fisici provenienti da altre istituzioni: Giorgio Bellettini e Carlo Bemporad da Roma e Lorenzo Foà "prestato" inizialmente da Firenze ed infine trasferitosi a Pisa. Fu così possibile la preparazione contemporanea di alcuni esperimenti: un piccolo esperimento di elettrodinamica sulla annichilazione di positroni in volo, condotto da Pierluigi Braccini, Arnaldo Stefanini, Gabriele Torelli, Romana Torelli Tosi e l'ospite rumeno Ion X. Ion [29]; un esperimento per la misura dell'"Effetto Primakoff", suggerito dal teorico Giacomo Morpurgo [30] e condotto da Giorgio Bellettini, Carlo Bemporad, Pierluigi Braccini e Lorenzo Foà [31],[32], (Fig. 6), (Fig. 7), assai impegnativo, anche dal punto di vista costruttivo, sia riguardo alla meccanica che all'elettronica.

Sempre a Frascati, Bellettini, Bemporad, Braccini e Foà hanno anche condotto un esperimento per lo studio della fotoproduzione su idrogeno di pioni neutri nella regione della seconda risonanza pione-nucleone [33]. Tutte queste attività ebbero un inizio, di studio, attività di laboratorio e costruzione degli apparati, fra il 1961 e 1962; implicarono molti sviluppi tecnici: la costruzione di contatori di Čerenkov integrali, di una prima elettronica veloce a semiconduttori, di uno speciale bersaglio a idrogeno liquido.

Credo sia utile mettere in evidenza una delle caratteristiche di queste iniziative (sia per gli esperimenti di elettronica e rivelatori, ma anche in parte per gli esperimenti di camera a bolle): erano portate avanti da giovani tutti intorno ai 25 anni di età, quindi da poco laureati e provvisti di scarsa esperienza. . . , per una sperimentazione all'elettrosincrotrone nazionale, a quella che era allora la

## Primakoff effect and $\pi^0$ lifetime

G. Bellettini, C. Bemporad, P.L. Braccini (Pisa U. & INFN, Pisa), L. Foa (INFN, Florence)

1965 - 32 pages

**Nuovo Cim. 40A (1965) no.4, 1139-1170**

DOI: [10.1007/BF02824673](https://doi.org/10.1007/BF02824673)

### Abstract (Springer)

The results of an experiment to measure the  $\pi^0$  lifetime via the inverse decay process ("Primakoff effect") are presented. The coherent photoproduction of neutral pions in the reaction  $\gamma + \text{Pb} \rightarrow \pi^0 + \text{Pb}$  has been measured with very high angular resolution with a  $\pi^0$  detector containing 10 independent counting channels, at the two mean energies 950 and 1000 MeV, using the bremsstrahlung beam of the Frascati electron synchrotron. The angular distributions show a characteristic bumping around the forward direction, giving conclusive evidence for the existence of the Primakoff effect. The results are interpreted in terms of two amplitudes—the electromagnetic and the nuclear one—adding up coherently to give the over-all coherent cross-section. Such a cross-section is expressed in terms of four unknown parameters: the lifetime  $\tau$ , the phase  $\delta$  between the electromagnetic and nuclear amplitude, the strength  $C$  of the nuclear amplitude, and the nuclear radius  $R_0$ . Neutral-pion reabsorption inside nuclear matter is taken into account, and a  $\chi^2$  analysis of the data is done in terms of  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $C$ , and  $R_0$ . The best fit  $\tau$  value is  $(0.73 \pm 0.105) \cdot 10^{-16}$  s. Systematic errors, as well as the sensitivity of the results to the model used to interpret the data, are extensively discussed and conservatively taken into account.

Figura 6: *Articolo sulla misura della vita media del  $\pi^0$ .*

macchina più performante, in energia e intensità. Per la visione ed apertura di Carlo Franzinetti è stato possibile a Pisa quanto non sarebbe stato possibile ad esempio a Roma, un centro assai più strutturato: una totale libertà di iniziativa e azione affidata a dei giovanissimi, contando più sulla loro volontà di emergere e cimentarsi, che sulla loro esperienza precedente. Bisogna inoltre anche dire che la fisica delle particelle italiana era stata centrata sulla sperimentazione con raggi cosmici e quindi, i fisici italiani intorno al sincrotrone, a parte qualche rara eccezione, erano digiuni di sperimentazione ad acceleratori e si trovavano comunque ad affrontare problemi imprevisti, dovuti alla "grande" energia ed intensità della nuova macchina.

Un'altra caratteristica della sociologia pisana è stata l'"apertura al mondo" a partire dalla "sprovvincializzazione", voluta sempre da Franzinetti, con le permanenze, quasi imposte, dei ricercatori pisani in altri laboratori. Il fatto poi che, a differenza di Roma, Pisa non avesse un acceleratore sotto casa, ha reso questa caratteristica internazionalizzazione più o meno permanente, come confermato dalle varie proposte di esperimenti, iniziative e collaborazioni nelle quali Pisa è stata sempre più coinvolta all'estero.

Ma le collaborazioni presso i laboratori esteri hanno costretto i fisici pisani a passare fuori sede molto del loro tempo, certamente quello durante i periodi



*Figura 7: Il gruppo di Pisa durante l'esperimento al sincrotrone. Da sinistra: Pierluigi Braccini, Alberto Bechini, Carlo Betti, Antonio Mariotti, Lorenzo Foa, Carlo Bemporad, Giorgio Bellezzini, il direttore dei LNF Italo Federico Quercia, l'operatore del sincrotrone Ed Gradi.*

di montaggio e di esecuzione degli esperimenti, riducendo il contributo nella didattica universitaria, ma mantenendo Pisa sempre aggiornata sui progressi scientifici e tecnologici del campo. Bisogna anche notare ed esser grati ai fisici dei gruppi di camera a bolle che, pur coinvolti in collaborazioni internazionali, hanno sempre avuto una presenza in sede ben maggiore di quella possibile ai fisici impegnati in esperienze con elettronica e rivelatori; questo ha permesso un loro prezioso impegno nella didattica della quale hanno costituito lo “zoccolo duro...”.

Come già accennato, molte delle attività svolte in Italia dal primo nucleo di sperimentatori in Fisica delle Particelle furono alternate con permanenze individuali presso laboratori esteri. Si passò poi ad una seconda serie di esperimenti, col coinvolgimento dei fisici pisani in iniziative per lo più basate in laboratori esteri mediante collaborazioni internazionali: CERN, DESY, SERPUKHOV, DARESBUURY; ciò ha inizialmente caratterizzato Pisa nella comunità facente capo all'INFN.

Dato il notevole numero di esperimenti della seconda fase, la trattazione sarà necessariamente molto più succinta. Italo Mannelli e parte del gruppo di camera a bolle iniziarono (1965) prima a Brookhaven [34], poi al CERN e successivamente a Serpukhov una serie di esperimenti, non più di camera a bolle, in varie collaborazione con Saclay, Karlsruhe, Wien, CERN, Serpukhov [35, 36, 37, 38, 39]. Le misure riguardarono o processi di diffusione o produzione di risonanze mesoniche, iniziati da  $\pi^-$ , a varie energie, usando anche bersagli di idrogeno polarizzato.

Gherardo Stoppini si trasferì a Pisa (1964) con parte del suo gruppo di Roma. Sempre in collaborazione con Edoardo Amaldi fu portata avanti la sperimentazione al Sincrotrone con esperimenti di elettroproduzione [40]. Le ben note vicende legate al 1968 e le grandi difficoltà che resero assai problematica la prosecuzione del lavoro nei laboratori nazionali, fecero decidere parte del gruppo: Marcello Giorgi, Arnaldo Stefanini, Alberto Del Guerra, Adalberto Giazotto, ad approfittare dell'avvio del sincrotrone di Daresbury per portare le esperienze di elettroproduzione in Inghilterra [41, 42].

Carlo Bemporad, Pierluigi Braccini e Lorenzo Foà decisero trasferirsi a DESY (1965), dove era stato appena avviato il nuovo sincrotrone da 6 GeV di energia, per eseguire una misura della vita media del mesone  $\eta^0$  mediante l'effetto Primakoff [43]; fu anche svolta un'altra misura di vita media del  $\pi^0$  e

uno studio dei decadimenti del mesone  $\phi^0$ . Dopo un periodo passato individualmente al CERN, Carlo Bemporad iniziò con un nuovo gruppo una serie di esperimenti presso l'anello di accumulazione  $e^+e^-$  ADONE di Frascati (1971). Furono misurate le caratteristiche della risonanza  $J/\Psi$  e furono sistematicamente ricercate altre risonanze strette [44, 45].

Giorgio Bellettini, dopo un periodo passato al CERN nel gruppo di Cocconi, iniziò una serie di esperimenti ai quali si associarono Lorenzo Foà e Pierluigi Braccini al termine degli esperimenti a DESY (1970) [46]. Seguì un esperimento all'anello di accumulazione ISR del CERN (1972), nel quale, fra molte altre cose, fu dimostrata la inaspettata risalita della sezione d'urto pp ad alte energie [47].

Una cerimonia tenuta presso la Scuola Normale per il settantesimo compleanno di Gilberto Bernardini ha fornito l'occasione per una foto di gruppo nella quale compaiono, insieme a molti altri, alcuni dei protagonisti delle attività fin qui riportate (Fig. 8).

Riporto anche un elenco delle persone riconosciute nella foto, sperando di non aver fatto errori. Ordine all'incirca: dall'alto verso il basso e da sinistra a destra.

MARTINUS VELTMAN, GIAN CARLO WICK, PIETRO MENOTTI, LYMAN SPIZER, Porzione di LUIGI RADICATI DI BROZOLO, MARIA ITALA FERRERO, GIUSEPPE PIERAZZINI, GIAN CARLO PUPPI, ENNIO BERTOLUCCI, ARNALDO STEFANINI, RAUL GATTO, ALBERTO DEL GUERRA, ANGELO SCRIBANO, ADALBERTO GIAZOTTO, JOHN BELL, Porzione di CARLO BEMPORAD, MARCELLO GIORGI, MARIO CALVETTI, CARLO RUBBIA (nobel), GIUSEPPE FIDECARO, ITALO MANNELLI, MARIA FIDECARO, GIGI ROLANDI, GENNARO BROSCO, GIAMPAOLO GORINI, EMILIO ZAVATTINI, UGO AMALDI, LORENZO FOA, EMILIO PICASSO, PIERLUIGI BRACCINI, RAFAEL ARMENTEROS, GIACOMO MORPURGO, DANIELE AMATI, STEFANO FANTONI, T.D. LEE (nobel), GIORGIO BELLETTINI, JOHN ADAMS, LUCIANO BERTANZA, GIORGIO SALVINI, CARLO FRANZINETTI, LEON LEDERMAN (nobel), EDWIN GOLDWASSER, GILBERTO BERNARDINI, MARCELLO CONVERSI, NESTORE BERNARDO CACCIAPUOTI, BRUNO ROSSI, SERGIO FUBINI.



Figura 8: *Foto di gruppo in occasione dei settant'anni di Gilberto Bernardini. Archivio Storico della Scuola Normale (1976). Cortesia: Maddalena Taglioli, Archivista.*

## La Ri-nascita degli Studi sulla Radiazione Cosmica e i Laboratori del Gran Sasso.

Causa di tutto ciò è stata la crescente consapevolezza della interdisciplinarietà fra vari campi di fisica: la Fisica delle Particelle, la Fisica della Radiazione Cosmica, l'Astrofisica, la Cosmologia, etc.

Il problema dell'origine e dell'accelerazione dei raggi cosmici era ancora largamente aperto, specie per le altissime energie, ben oltre quelle raggiungibili mediante gli acceleratori. I raggi cosmici, che avevano permesso in tempi passati molte delle scoperte in fisica delle particelle, mantenevano ancora una loro capacità di esplorazione. Si parlava di una possibile ricerca e identificazione di sorgenti della radiazione cosmica. Si cominciavano a dibattere i problemi relativi alla "Materia Oscura" e all'"Energia Oscura" con l'ipotesi di nuove particelle ad es.: WIMPS, neutralini, monopoli, etc.

Alcuni dei nuovi esperimenti per la ricerca di eventi rari, potevano essere condotti esclusivamente in condizioni di "silenzio cosmico", cioè l'abbattimento dei fondi mediante gli schermaggi naturalmente realizzati negli esperimenti sotterranei. Esempi iniziali furono le esperienze estere volte a mettere in evidenza il decadimento del protone, previsto dalle teorie GUT.

Altre motivazioni, che si sono andate precisando nel corso degli anni, erano legate all'"Astrofisica dei Neutrini". Forse i neutrini, con la loro bassa capacità di interazione, avrebbero potuto permettere una maggior comprensione del funzionamento del sole (e di altre stelle) aprendo una finestra osservativa sulle zone più interne delle fornaci stellari. Si ipotizzava la enorme emissione di neutrini nel caso di fenomeni rari come l'esplosione di alcuni tipi di supernove. È interessante notare come negli stessi corsi universitari si iniziasse ad introdurre materiale riguardante i raggi cosmici ed argomenti di astrofisica. Un intero corso specifico di "Fisica Astroparticellare" fu per la prima volta tenuto nel 2002<sup>3</sup>.

L'occasione per il passaggio dalle parole ai fatti fu colta dall'INFN, su iniziativa di Antonino Zichichi, allora Presidente dell'ente, quando iniziò lo scavo del traforo del Gran Sasso (circa 1982); si riuscì a pianificare la costruzione e il finanziamento, da parte del governo, di un laboratorio sotterraneo al centro

---

<sup>3</sup>Recentemente e forse più correttamente "Fisica Astroparticellare" è frequentemente sostituito da "Fisica Cosmoparticellare".



del tunnel. La realizzazione dei Laboratori del Gran Sasso ha posto l'INFN all'avanguardia delle ricerche eseguibili in un laboratorio sotterraneo, un grande successo quindi. Spiace dire che, come molte iniziative legate ai lavori pubblici italiani, la realizzazione della autostrada A24 Roma-Sulmona-Giulianova, è stata condotta in condizioni di scarsa trasparenza, aumento dei costi, dissipazioni di denaro pubblico. Ancora oggi, percorrendo l'autostrada, si notano difetti di costruzione, impiego di materiali scadenti, etc. Ma sul successo, anche in campo internazionale, del Laboratorio del Gran Sasso, non ci sono dubbi!

### *L'Esperimento MACRO*

L'INFN organizzò (1983) a Saint Vincent, a Frascati e all'Aquila dei congressini tematici relativi al Gran Sasso. In ambito pisano, invitammo Giuseppe Cocconi a tenere alcune stimolanti lezioni sulla fisica dei raggi cosmici. Si formò un piccolo gruppo di persone interessate a questi argomenti e si prese contatto con Enzo Iarocci dei Laboratori di Frascati per il progetto MACRO. L'iniziale gruppo pisano comprendeva: Carlo Angelini, Alessandro Baldini, Carlo Bemporad, Anne Marie Cnops, Enzo Flaminio, Gianrossano Giannini, Roberto Pazzi. La collaborazione MACRO comprese inizialmente circa una metà di istituzioni italiane e circa una metà di istituzioni statunitensi: Bari, Bologna, Caltech, CERN, CNR, Drexel, LNF, Indiana, Michigan, Pisa, Roma, Texas A&M, Torino, Virginia Tech, circa 70 fisici. La proposta per MACRO fu messa a punto nel 1984 [48].

Gli scopi dichiarati di MACRO erano: la ricerca dei Monopoli Magnetici, l'Astronomia Neutrinica (Sorgenti di neutrini di alta energia, Neutrini da collassi stellari, Oscillazioni dei neutrini), lo studio dei Muoni Cosmici (Muoni singoli, multipli, Muoni da sorgenti di raggi gamma di alta energia), la ricerca di Particelle Esotiche.

Il programma è stato eseguito con successo. MACRO, un apparato modulare in sei supermoduli, ha iniziato le misure col suo primo SM nel 1989, il sesto SM è entrato in funzione nel 1991, MACRO ha terminato le sue misure alla fine del 2000.

MACRO, legato all'avvio del Laboratorio del Gran Sasso, è stato la prima impresa italiana su larga scala relativa alla "Fisica Cosmoparticellare". Esperimenti su alcune tematiche relative ai raggi cosmici erano stati precedentemente eseguiti; in Italia MACRO è stato preceduto da NUSEX nel traforo del Monte Bianco; nel mondo ricordiamo gli esperimenti per la ricerca del decadimento

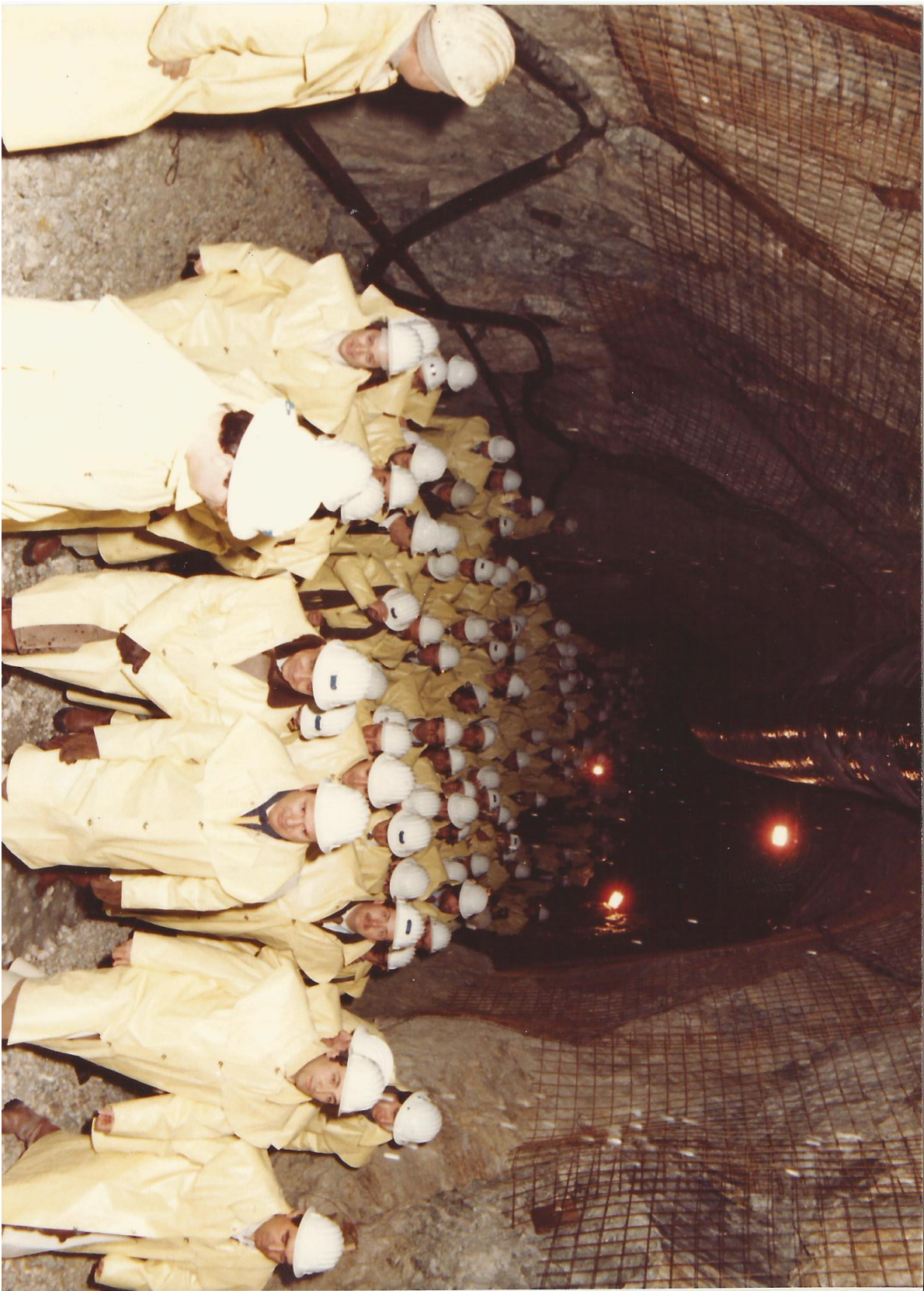


Figura 9: Una delle prime visite agli scavi per il laboratorio del Gran Sasso; Antonino Zichichi conduce la marcia... (1982).

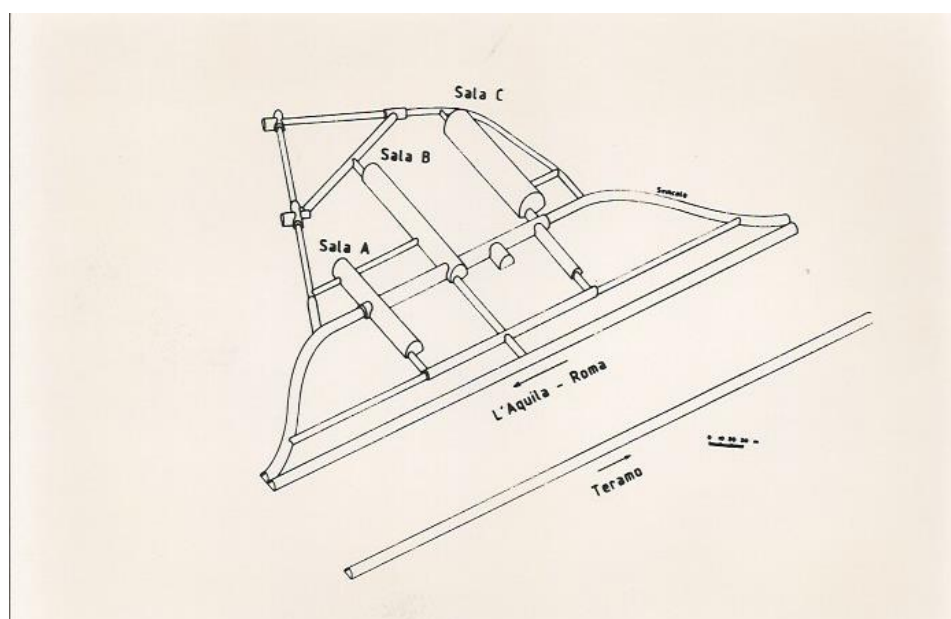


Figura 10: *Schema del laboratorio sotterraneo. MACRO ha occupato la sala B.*

del protone previsto dalle teorie GUT (uno dei temi anche di NUSEX) quali SOUDAN (1983), IMB (1982), KAMIOKA (1984). Va ricordato che la ricerca dei monopoli magnetici è legata a quella del decadimento del protone, i monopoli sono infatti previsti agire da catalizzatori dei decadimenti.

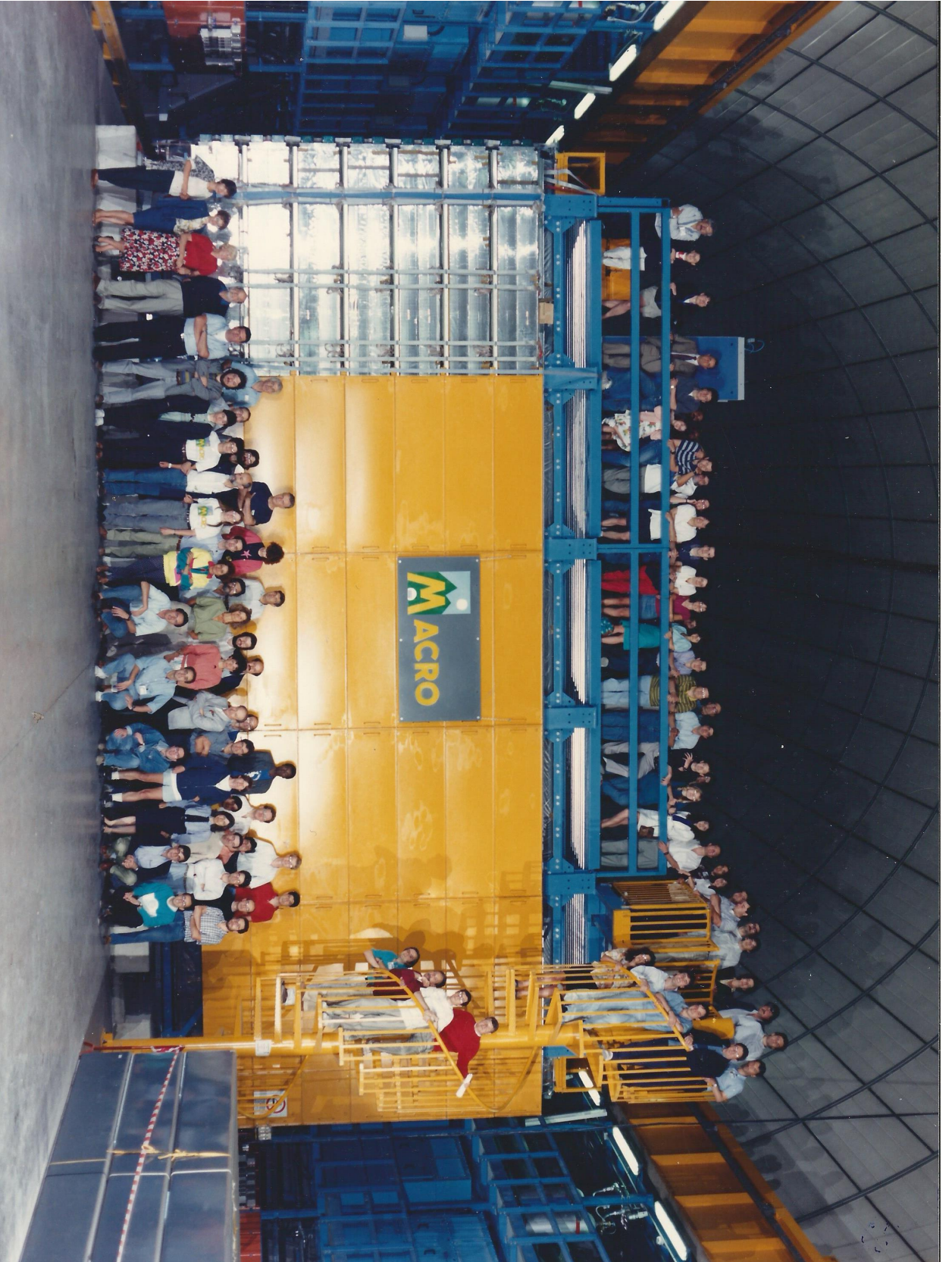
Gli inizi di MACRO, come per ogni grande impresa, sono stati abbastanza faticosi. Al primo nucleo composto dai Laboratori Nazionali di Frascati e dalle sezioni di Bologna, Roma, Pisa, si aggiunsero alcune altre istituzioni, fino al momento della sottomissione della proposta all'INFN. Non ricordo in dettaglio come fosse diviso il lavoro; ricordo solo le grandi linee: tutto il rivelatore tracciante, basato sui tubi a streamer, sarebbe stato costruito dai LNF (coadiuvati da altre istituzioni per le parti delle alte tensioni, dell'elettronica di lettura, del sistema di trigger); i contatori a scintillazione avrebbero dovuto essere progettati e costruiti a Pisa; Bologna avrebbe dovuto costruire uno dei sistemi di ricerca dei monopoli magnetici, basato sul loro tracciamento in fogli di vari tipi di plastiche. Tutto ciò dovette essere ridiscusso quando si prospettò l'ingresso di una grande collaborazione di circa sei università americane coordinate dal Barry Barish. La prospettata internazionalizzazione del laboratorio

e dell'esperimento era certamente ben vista da tutti noi, ma le discussioni fra i gruppi italiani e quelli statunitensi furono assai complesse e accese. Questo fu certamente legato al modo di presentarsi degli americani, coordinati da Barish. Barry Barish, bravissimo fisico, come si rivelò ampiamente anche durante l'esperimento, seguendo un copione americano assai diffuso nel modo di condurre le trattative internazionali, si comportava come se il Gran Sasso fosse "terreno di conquista", irritando molti fra gli italiani. Una parte del gruppo di Torino decise perfino di ritirarsi dalla collaborazione . . . Io stesso presi in considerazione una rinuncia a quell'impegno, pensando ad altre possibilità, in questo, devo dire, frenato da mio collega Gianrossano Giannini, che evidentemente teneva veramente molto a MACRO. Io, da buon responsabile, operante per il bene di tutti, inghiottii il rospo e si procedette. . . Non ho mai capito bene perché gli americani avessero scelto quel tipo di comportamento; ritengo che uno spirito eccessivamente competitivo sia un po' nel DNA dei fisici statunitensi. Bisogna anche notare che, mentre fino ad allora erano stati i fisici italiani a partecipare a sperimentazioni presso acceleratori americani, era la prima volta che una grande collaborazione USA proponeva di venire a fare un esperimento in Italia!. Al di là della politica e della diplomazia, agli effetti pratici si arrivò alla decisione di dividere in due la costruzione di MACRO: tutta la parte tracciante sarebbe stata responsabilità italiana, tutta la parte basata sui contatori a scintillazione sarebbe stata responsabilità americana. Questo pose Pisa in una posizione ibrida, in quanto la ricerca dei collassi stellari gravitazionali, il tema dichiarato di maggior interesse per Pisa, era ovviamente basato sull'uso dei contatori a scintillazione che Pisa non avrebbe potuto costruire. Fu però sottoscritto un accordo per il quale Pisa avrebbe avuto una specie di monopolio sul tema della rivelazione dei neutrini da collasso stellare gravitazionale. L'accordo, scritto su un pezzaccio di carta da me e Barish alla presenza di Enzo Iarocci, fu affidato a Enzo Iarocci; il pezzo di carta non fu più rivisto e il patto non fu rispettato! Questo perché nel 1987 furono per la prima volta rivelati i neutrini emessi dalla supernova SN1987A dagli esperimenti IMB e KAMIOKA (con MACRO non ancora in funzione) e gli americani vollero allora duplicare, contrariamente agli accordi, tutta una elettronica di rivelazione dei collassi, parallela a quella costruita da Pisa.

Bisogna dire che durante l'esperimento le cose procedettero in modo ragionevole e con animi più rilassati. Pisa non costruì i contatori, ma partecipò utilmente al loro progetto anche mediante misure sui prototipi. Il gruppo pisano progettò e costruì un ottimo sistema di rivelazione dei "burst" di neutrini da collasso e così via. . . Come risulterà dal seguito, i contributi del gruppo di



Figura 11: MACRO durante la costruzione del primo supermodulo.



*Figura 12: La collaborazione su MACRO completato (1991).*

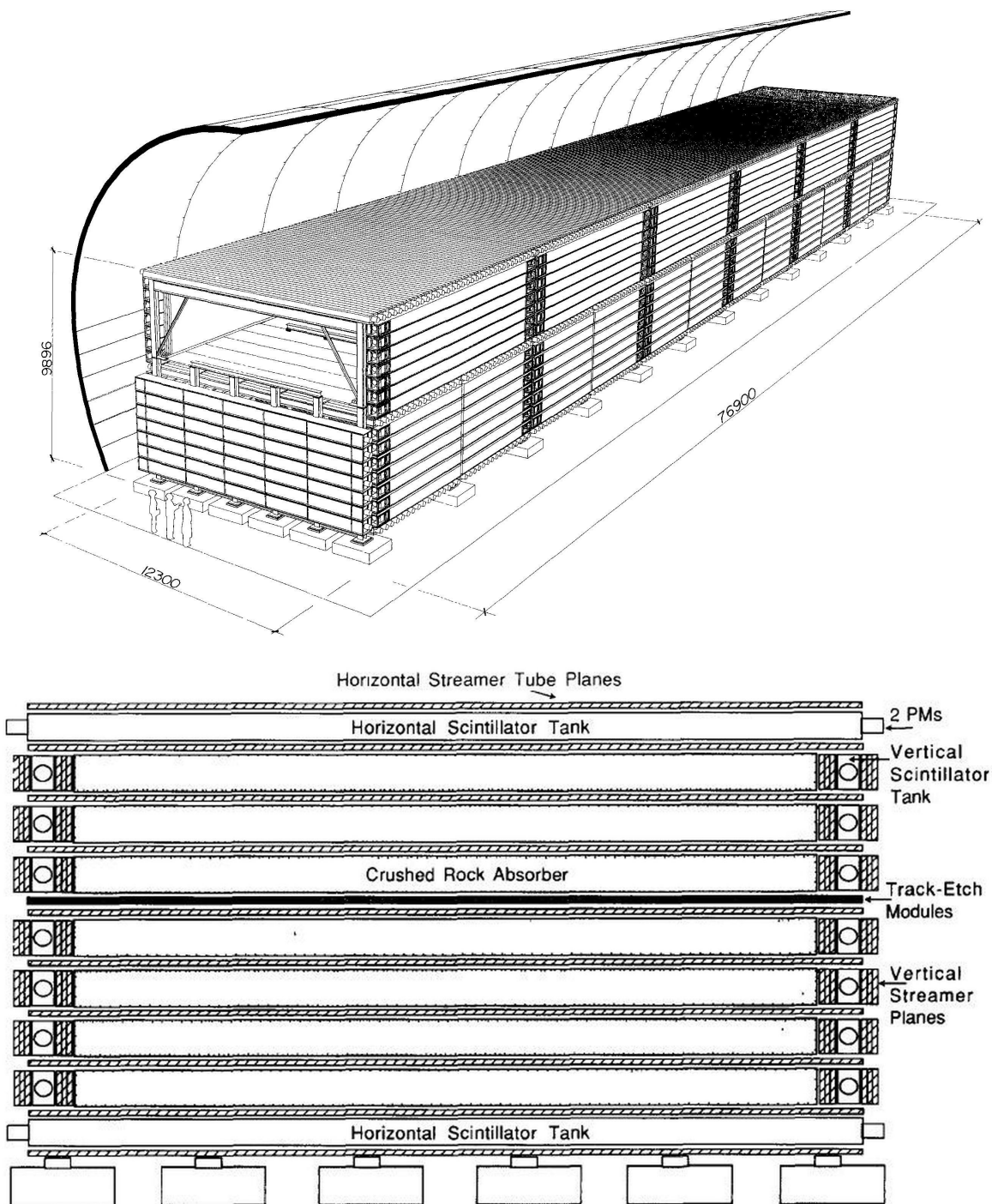


Figura 13: *MACRO illustrato in forma schematica.*

Pisa furono sempre di grande qualità, tali da imporsi alla stima di tutta la collaborazione; e infine le relazioni sul campo con i fisici americani e con Barish furono in generale assai soddisfacenti; la collaborazione funzionava!

Vale la pena di elencare le più importanti caratteristiche di MACRO. Protetto da uno spessore di roccia equivalente di almeno 3200 m.w.e. (metri di acqua equivalente). Occupante un volume di  $75.6 \times 12 \times 4.8 \text{ m}^3$ . Contenente 290 contatori a scintillazione, ognuno di  $11.9 \times 0.75 \times 0.26 \text{ m}^3$ . Considerando i contatori a scintillazione contenuti nella parte superiore chiamata ATTICO, la massa totale installata di scintillatore era di 560 tonnellate. Tubi a streamer per un totale di circa 31200 fili. Strato di plastica per la rivelazione dei monopoli circa  $920 \text{ m}^2$ . I muoni singoli raggiungenti MACRO erano circa 700/h. Gli eventi di neutrino rivelati nel caso dell'esplosione di una supernova al centro della galassia sarebbero stati circa 125.

A MACRO sono stati dedicati circa 15 anni della nostra vita, mi sembra quindi opportuno che per un impegno così lungo non siano solo riportati i problemi costruttivi, le misure, i risultati, ma anche notizie più generali su questa avventura: come l'abbiamo vissuta... E di avventura si è trattato, diversa dalla installazione di un esperimento, in genere di molto minor durata, sul "floor" di uno dei tanti acceleratori frequentati precedentemente. È stato il primo grande esperimento di "Fisica senza Acceleratori", l'iniziatore di una serie di esperimenti di questo tipo sia per Pisa che per l'INFN.

Va detto che questo tipo di ricerca fisica richiede il formarsi di una nuova cultura. Sì, in MACRO c'era la fisica dei muoni di grandissima energia, si usavano contatori a scintillazione, streamer tubes e elettronica come negli esperimenti ad acceleratori, ma... la nuova cultura era quella delle tante nuove tematiche di tipo astrofisico. Dal punto di vista sperimentale poi l'impatto maggiore era con misure a bassi livelli di fondo, la necessità di una conoscenza approfondita della radioattività ambientale e dei modi di controllarla. Ne siamo divenuti buoni specialisti e ciò è stato utile anche in esperimenti successivi.

Alla proposta di esperimento contribuì inizialmente un gruppo francese con base al CERN, sotto la leadership di Paul Musset, ben noto fisico, fra i costruttori di Gargamelle, la grande camera a bolle a liquido pesante, e fra gli scopritori delle correnti neutre. I francesi però obiettavano all'uso dell'acro-



nimo MACRO, in quanto giudicato imbarazzante <sup>4</sup>. Musset morì in un incidente di montagna poco dopo la scrittura della proposta, all'età di 52 anni, età alla quale è certamente sconsigliabile iniziare a fare scalate impegnative nelle alpi. . . In conseguenza della sua scomparsa tutto il gruppo francese si ritirò dall'esperimento e MACRO si chiamò MACRO. . . .

Un episodio iniziale, certamente assai meno grave, ma che mi riguardava personalmente, avvenne durante uno dei primi viaggi da Pisa al Gran Sasso. Avevo una nuovissima auto, una Fiat UNO che mi abbandonò sul grande raccordo anulare nei pressi di Roma, un sabato pomeriggio. La macchina era sotto garanzia, ma non avevamo possibilità di soccorso stradale e dovevamo rientrare a Pisa; dovemmo quindi affidarci ai poi famosi "Falchi del Raccordo Anulare", un gruppo di meccanici che percorreva continuamente il raccordo alla ricerca di cadaveri di auto, per poi trasportarli in una loro officina. Ero in compagnia di Gianrossano Giannini e dovemmo fermarci in un albergo fino al giorno dopo, quando la macchina ci fu restituita, pagando un prezzo esorbitante (e ovviamente non più in garanzia).

Le macchine private furono poco dopo sostituite da un pulmino Fiat DUCATO. Non fu facile ottenerlo dall'INFN e durante i tanti anni di uso le regole riguardo all'affidamento di mezzi ai gruppi sperimentali cambiarono frequentemente, sempre complicandosi. Dopo uno o due anni il DUCATO ci venne anche rubato proprio mentre parcheggiato in Aquila città; per fortuna era assicurato e poté essere sostituito rapidamente.

Non pensiate che MACRO fosse nato sotto una cattiva stella, tutt'altro, ma certo durante un esperimento così lungo, era inevitabile collezionare vari e diversificati incidenti. Visto che ci sono, continuo sul tema. Un incendio! Durante la costruzione dell'apparato una grande quantità di residui cartacei e di cartoni era stata accumulata sotto l'edificio (elettronica, computer e sala conteggio) in fondo alla galleria B. Le istruzioni erano che in caso di incendio si dovesse abbandonare al più presto la galleria in quanto questa veniva invasa da un gas anticombustione irrespirabile; c'erano pochi secondi per abbandonare i luoghi dopo l'allarme. Vale la pena di notare che se il gas veniva scaricato il suo ripristino avrebbe richiesto tempi molto lunghi, dell'ordine dei mesi. L'incendio scoppiò perché un automezzo tranciò un cavo ad alta corrente giacente sul pavimento in prossimità del deposito dei cartoni. Avremmo dovuto fug-

---

<sup>4</sup>"macrò" significa "magnaccia" proprio in francese. . . .)

gire immediatamente, ma Gianrossano Giannini afferrò un estintore e riuscì a estinguere l'incendio prima che il gas venisse scaricato. L'episodio fu tenuto un po' nell'ombra, dato che non avevamo rispettato le regole. . . Io però scrissi la nota interna MACRO 4/86, *Proposte, ad uso della collaborazione MACRO, per alcune norme di sicurezza . . .*

Non sempre le iniziative di Gianrossano erano lodevoli. Ad esempio: volle installare un dispositivo acustico segnalante la registrazione di ogni evento dell'esperimento (un'emissione sonora ogni qualche secondo); venivano emessi suoni diversi a seconda della tipologia dell'evento. All'inizio era divertente, ma poi "il mostro" continuava ad imperversare la notte, tutte le notti, impedendo anche un breve appisolamento durante le lunghe veglie. Approfittando di una assenza di Gianrossano l'oggetto fu fatto sparire. Gianrossano protestò, ma dovette cedere.

Va precisato che dopo alcuni anni, fu possibile controllare l'esperimento direttamente dalle sedi decentrate dell'INFN quindi il lavoro notturno in galleria non fu più necessario. Naturalmente c'erano anche persone in turno nella zona dei laboratori che avrebbero potuto eseguire interventi in caso di necessità urgenti. Credo che MACRO sia stato uno dei primi esperimenti controllabili in modo remoto.

Altri eventi rimarchevoli, legati a cause ambientali, furono dovuti ad alcune intense nevicate; in genere avevano luogo verso la fine dell'inverno. Ci successe di restare bloccati in albergo, il Fiordigigli a Fonte Cerreto, vicino alla stazione della funivia (allora non ancora ricostruita e riattivata), fino all'arrivo degli spazzaneve; ma quando questo succedeva bisognava aspettare assai. . . , c'era tutta la regione montana da ripulire, un lavoro di due giorni almeno. Una di queste intense nevicate iniziò mentre eravamo al lavoro nel tunnel; ci avvertirono e pensammo bene di fare ritorno in albergo. Il tunnel autostradale, con i lavori ancora in corso, aveva il manto stradale non asfaltato ed era scarsamente illuminato. Quando raggiungemmo l'uscita non si vedeva assolutamente niente: un muro bianco impenetrabile e neve in caduta. Chissà perché avessero però chiusa la sbarra di ingresso al tunnel, bianca e totalmente invisibile! Ci andammo a sbatter contro, per fortuna a velocità non troppo alta. Il parabrezza, (guidava il solito Gianrossano), si infranse ed io mi ritrovai la sbarra a pochi centimetri dal mio naso. Anche la risalita all'albergo non fu semplice.

Ho esaurito la lista delle “disgrazie”? Forse no. Ce ne fu una che, per così dire, si dimostrò distribuita nel tempo. Le centinaia di contatori a scintillatore liquido erano costruiti assai bene in una spessa plastica; contenevano circa due tonnellate di scintillatore ognuno. Nel corso dei mesi e degli anni, alcuni contatori iniziarono a gocciolare molto lentamente, in genere dalle estremità. La cosa era imbarazzante; si formavano delle piccole pozze di liquido maleodorante e ormai c'erano anche visitatori in giro. Si iniziarono a vedere dei recipienti di raccolta del liquido; furono anche unificati come tipologia: erano di latta, della capienza di qualche litro. Ci fu rivelato che erano di produzione USA ed erano ex contenitori di patatine fritte. Ci siamo sempre chiesti chi fosse costretto a mangiarne via via il contenuto . . .

La regione del Gran Sasso e la zona dell'Aquila erano certamente inusuali come collocazione di un laboratorio e di esperimenti di fisica. Quali erano le mie impressioni? L'Abruzzo mi apparve bellissimo e interessante. Nonostante l'autostrada, in parte ancora in costruzione, la regione era ancora abbastanza isolata, lontana e non semplice da raggiungere. Venendo dalla Toscana si entrava in un luogo di caratteristiche ben diverse; che in un Paese, tutto sommato relativamente poco esteso, si avesse anche una tale diversificazione, era per me sorgente di meraviglia. Non mi riferisco solo al diverso ambiente naturale, ma anche alle caratteristiche storiche, ancora, a guardar bene, percepibili: una terra, la Toscana col ricordo dei suoi liberi comuni, e l'Abruzzo, a lungo parte di un grande regno con feudi, feudatari e sparsi castelli. Il carattere della popolazione mi appariva quello associabile ad una civiltà largamente contadina; forse mi colpì come un po' rozzo e schivo; col tempo emerse invece la sensazione di una diffusa gentilezza e di un alto senso dell'ospitalità. Lo stacco era più percepibile se, come mezzo di trasporto, si usava la corriera Roma-L'Aquila. Dalla stazione Termini alla stazione Tiburtina, poi l'attesa della corriera. Salendo sul mezzo si entrava già un po' in Abruzzo; bastava guardarsi intorno fra i pendolari condividenti con me il tragitto. E poi il lungo percorso in salita fino all'Aquila. All'Aquila non era finita; per raggiungere Fonte Cerreto, vicino al paesino di Assergi ed ai Laboratori, bisognava affidarsi ad un altro raro mezzo, talvolta sostituito, per disperazione, da un taxi. L'Albergo Fiordigigli <sup>5</sup> a Fonte Cerreto, ad alcuni chilometri dal laboratorio, è stato per molti anni la nostra base logistica; non solo per noi, ma per molti altri gruppi INFN. È stato anche un esempio della già menzionata ospitalità abruzzese; il personale era veramente molto amichevole e pieno di attenzioni. L'atmosfera era un po' quella

---

<sup>5</sup>Questo nome poetico era semplicemente quello dei proprietari . . .

di un rifugio di montagna. In genere raggiungevamo il Fiordigli alla fine di una lunga giornata nel laboratorio sotterraneo; col buio si percorreva la strada nel bosco, talvolta incontrando una volpe solitaria, abbacinata dai fari del pulmino. Una rapida cena e poi a nanna; si mangiava bene e alcuni dei piatti appresi in quei soggiorni sono entrati a far parte dei miei menu familiari <sup>6</sup>. Nell'albergo talvolta avemmo dei cori di montagna poiché veniva anche usato per delle riunioni conviviali del Club Alpino Aquilano. . . Dopo cena era usuale fare una passeggiata digestiva lungo la strada risalente a Campo Imperatore. Allontanandosi dalle luci di Fonte Cerreto e in assenza di luna, si piombava in un buio totale, e attraverso l'aria cristallina si potevano ammirare degli incredibili cieli stellati e una via lattea ormai invisibile in altre località più inquinate.

Benchè la nostra presenza in Abruzzo sia stata tanto lunga, presi dal lavoro, abbiamo fatto ben poco turismo; per esempio: non sono mai più risalito sul Gran Sasso, che pure avevo frequentato da adolescente. Io un po' di turismo l'ho voluto fare, ma allora non sovrapposto al lavoro, in occasioni di vacanze. Molti dei paesini della zona: Paganica, Rocca Calascio, Assergi, Santo Stefano di Sessanio, Bominaco e poi più distanti: Castelli, Teramo, Sulmona, hanno begli ambienti naturali e ci sono interessanti monumenti, chiese, castelli. L'Aquila, specie quella notturna, l'abbiamo frequentata. A me piaceva aggirarmi nella parte storica, chiese, piazze, palazzi, respirando nel freddo invernale l'odore della legna bruciata nei camini. In compagnia, abbiamo frequentato i buoni ristoranti. Talvolta di giorno, prima di ripartire per Pisa, facevamo incetta di dolci, salumi e vini: il "Parrozzo", i torroni delle sorelle Nurzia, le mortadelle di Campotosto, un po' di zafferano e perché no, del Montepulciano d'Abruzzo, davvero non male.

Noi durante l'esperimento abbiamo passato quasi tutto il tempo nel laboratorio sotterraneo; il laboratorio esterno è divenuto agibile durante la nostra permanenza, ma è stato utilizzato solo dall'amministrazione, dagli uffici tecnici, dai pochi fisici dipendenti del laboratorio, e alcune stanze, certo poco frequentate, religiosamente riservate ad Antonino Zichichi, al Presidente dell'INFN, etc.

Le prime prove dei contatori a scintillazione e alcune misure preliminari di radioattività sono state da noi fatte in un camion-laboratorio, di proprietà di Frascati, stazionato nel tunnel autostradale. Erano ancora in corso gli scavi

---

<sup>6</sup>ad esempio: Le Linguine Tonno e Limone.



Figura 14: *Permanenze del gruppo di Pisa al Fiordigigli.*

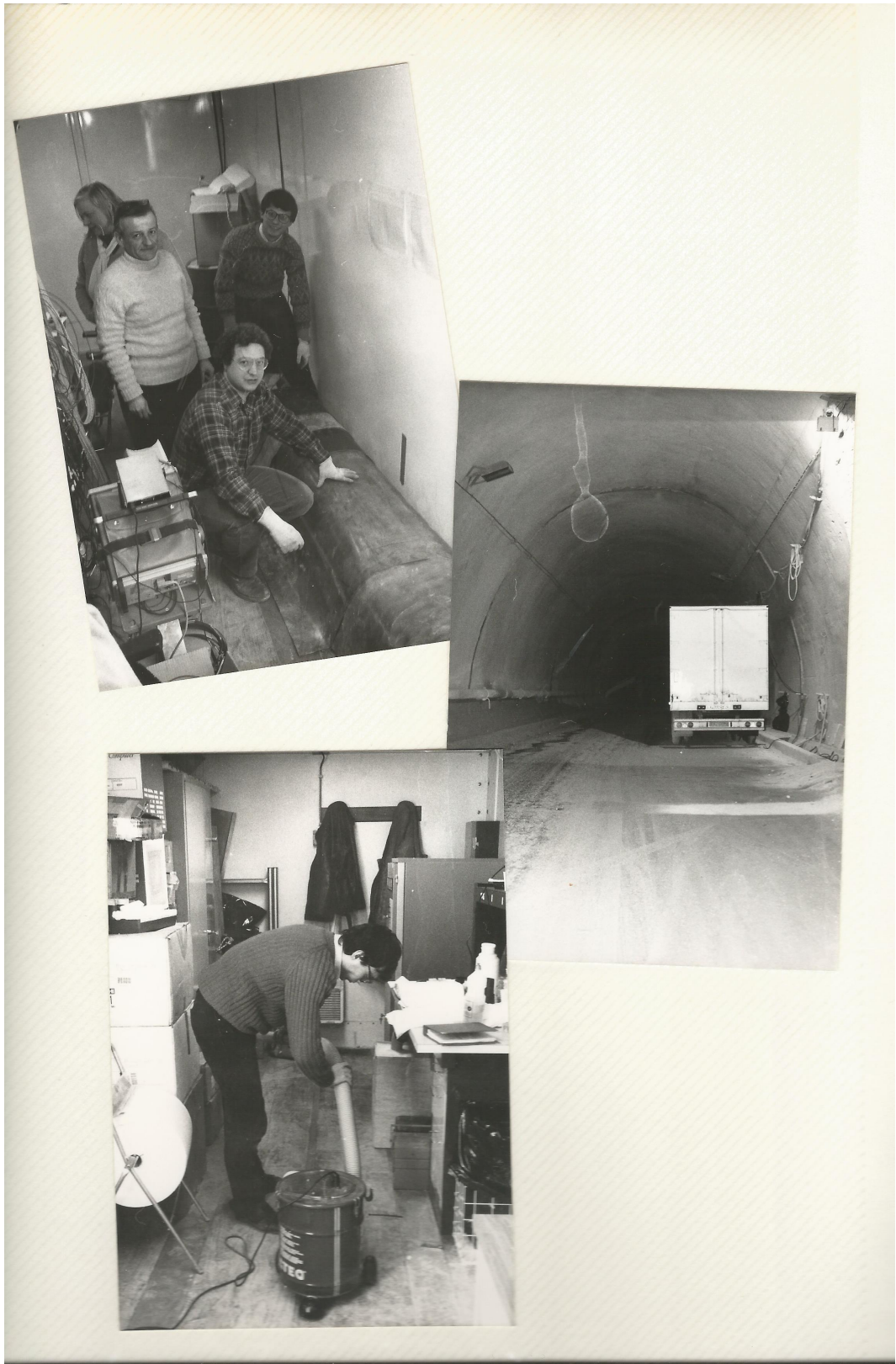


Figura 15: *Lavoro nel camion laboratorio per le prime misure di radioattività e per lo studio dei contatori a scintillazione.*

delle sale sperimentali e, di tanto in tanto, venivano fatte esplodere mine che ci costringevano a metterci rapidamente al riparo. La temperatura era molto bassa ovunque, molto rumore, camion e macchine in spostamento nel tunnel buio, spesso con luci difettose. C'era dappertutto una grande quantità d'acqua e si sguazzava con gli stivaloni di protezione. Ci sono voluti anni e il completamento di MACRO per avere un ambiente un po' più caldo e liberato dall'acqua<sup>7</sup>. Naturalmente avevamo alcuni vantaggi: eravamo protetti dai raggi cosmici e stavamo in un ambiente con radioattività molto ridotta. . .

Per molti anni, durante la costruzione di MACRO, abbiamo raggiunto il laboratorio sotterraneo con un percorso ad ostacoli. Era in funzione un solo tunnel autostradale, non ancora aperto al pubblico e con fondo stradale non ancora asfaltato. Era percorso da grossi mezzi come camion e escavatrici, spesso con fari e luci di posizione in dubbie condizioni; percorrere il tunnel era quindi abbastanza pericoloso. Più tardi, quando l'autostrada l'Aquila-Teramo fu aperta, con i due tunnel funzionanti in direzioni apposte, il percorso per raggiungere il laboratorio sotterraneo divenne più lungo. Infatti eravamo costretti a percorrere tutto il primo tunnel da Assergi verso Teramo, sbucando sul lato teramano; si doveva poi percorrere una bretella, alla quale avevamo il permesso d'accesso, che permetteva di ripercorrere parte del secondo tunnel verso l'Aquila fino a raggiungere l'ingresso al laboratorio; si facevano parecchi chilometri; ciò prendeva tempo e le operazioni di immissione in autostrada richiedevano molta attenzione. . .

Durante la durata dei lavori, sia per l'autostrada che per il laboratorio, il numero di fisici in giro, per la costruzione dell'esperimento o per delle misure preliminari, era decisamente piccolo rispetto al numero degli operai. Quindi, con apprezzata ospitalità abruzzese, gli operai cominciarono ad invitarci per il fine settimana a quelli che furono chiamati "Pecora Party", all'esterno del laboratorio sotterraneo. Erano dei semplici raduni dove veniva arrostita una pecora, forse c'era anche un po' di formaggio e certo del vino, e si chiudeva la settimana piacevolmente. La pecora non era semplice da digerire, ma l'elettricista del cantiere produceva e metteva a disposizione un liquore a base di genziana, capace di far digerire anche i sassi.

Durante l'esperimento organizzammo alcune visite universitarie ai laboratori. Lo scopo era quello di render nota la nostra attività sperimentale ed

---

<sup>7</sup>L'acqua era sempre molto vicina. Il rivestimento delle sale sperimentali la convogliava ai lati e la nascondeva.

anche di allettare qualche potenziale laureando. Tipicamente si iniziava con una visita ai Laboratori di Frascati, con lo svolgimento di alcune lezioni introduttive seguite dalla vera e propria visita. Ci si spostava poi al Gran Sasso con sistemazione in albergo, seguita, il giorno dopo, da alcune lezioni nel laboratorio esterno e dall'effettiva visita a tutti gli esperimenti in corso. Fummo accolti anche dal Centro Spaziale del Fucino per le comunicazioni via satellite. Poi offrimmo una serata di osservazioni astronomiche dall'osservatorio di Collurania, sul versante teramano del Gran Sasso <sup>8</sup>: Luna, Saturno, nebulose varie. La gita era ovviamente condita da pranzetti e cene. Il tutto era per noi piacevole, ma certo abbastanza faticoso; fra l'altro tenere a freno dei diciottenni ansiosi anche di divertirsi in modi più terreni (poco disponibili vicino al Gran Sasso), ci ha messo talvolta in stati d'ansia... Comunque dei laureandi si sono effettivamente associati a noi.

Una visita che coronò la costruzione di MACRO fu quella di Bruno Pontecorvo e di alcuni fisici russi che lo accompagnavano. Pontecorvo era per tutti noi una figura mitica. Era uno dei "Ragazzi di Via Panisperna" e allievo di Fermi; fu successivamente il fisico che ebbe un ruolo determinante nello sviluppo della fisica dei neutrini. Io l'avevo già incontrato in un'altra occasione, ma vederlo sul tetto di MACRO e potergli illustrare l'esperimento mi fece certo molto piacere. Forse però la visita fece il maggior effetto sui membri più giovani del gruppo di Pisa.

#### *I Monopoli Magnetici*

Passo ad esaminare brevemente i risultati ottenuti da MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory). La motivazione principale e dichiarata dell'esperimento era la ricerca dei monopoli magnetici di grande unificazione nella radiazione cosmica, in un grande intervallo di massa e di velocità; questa fu perseguita mediante varie tecniche (contatori a scintillazione, tubi a streamer, tracciatori a fogli di plastica). Il limite superiore stabilito da MACRO per il flusso di monopoli è ancora imbattuto dopo circa 20 anni [49].

#### *Neutrini da Collapsi Stellari Gravitazionali*

Questa era la tematica principalmente al centro degli interessi pisani. Si noti bene che abbiamo cominciato ad occuparcene nel 1983, ben prima della esplosione della SN1987A e della rivelazione dei neutrini da parte di KAMIOKA II e IMB3; sfortunatamente nel 1987 MACRO non era ancora in funzione...

---

<sup>8</sup>diretto dal pisano prof. Vittorio Castellani



Le esplosioni di SN galattiche con emissione di neutrini rivelabili sulla terra sono ahime molto poche, forse fra i 2 e i 10 eventi per secolo! Bisogna quindi avere fortuna e negli undici anni di raccolta dati di MACRO la nostra non è stata sufficiente. Tuttavia il sistema di rivelazione da noi progettato e messo in funzione aveva molti aspetti innovativi e ha certo avuto qualche impatto sui progetti successivi [50].

Le caratteristiche essenziali nella emissione dei neutrini da una SN al centro della galassia sono: una durata di emissione di circa 10 s, neutrini (e antineutrini di tutti i sapori) emessi in uno spettro continuo di energia media 10 MeV, un centinaio di eventi dovuti a  $\bar{\nu}_e$  previsti e completamente ricostruiti in MACRO. Un evento è per definizione la rivelazione del positrone dalla reazione  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ , seguito da dall'emissione di un  $\gamma$  dalla reazione  $n + p \rightarrow d + \gamma$   $E_\gamma = 2.2 \text{ MeV}$ , essendo i protoni contenuti nello scintillatore di tipo  $(CH_2)_n$ . Il tempo medio di cattura del neutrone prodotto è  $\approx 200 \mu\text{s}$ . Il sistema di acquisizione deve essere capace di registrare tutti gli eventi della raffica neutrinica.

Fu deciso di progettare un circuito, asservito ad ogni contatore, capace di ricostruire e di registrare gli eventi. Il circuito, ideato da Gianrossano Gianini, fu realizzato con il contributo di tutto il gruppo, ma con il particolare impegno di Marco Grassi e Roberto Pazzi<sup>9</sup>. Era un compatto e complesso modulo CAMAC "multistrato", uno dei primi realizzato di quella complessità e prestazioni (Fig. 16).

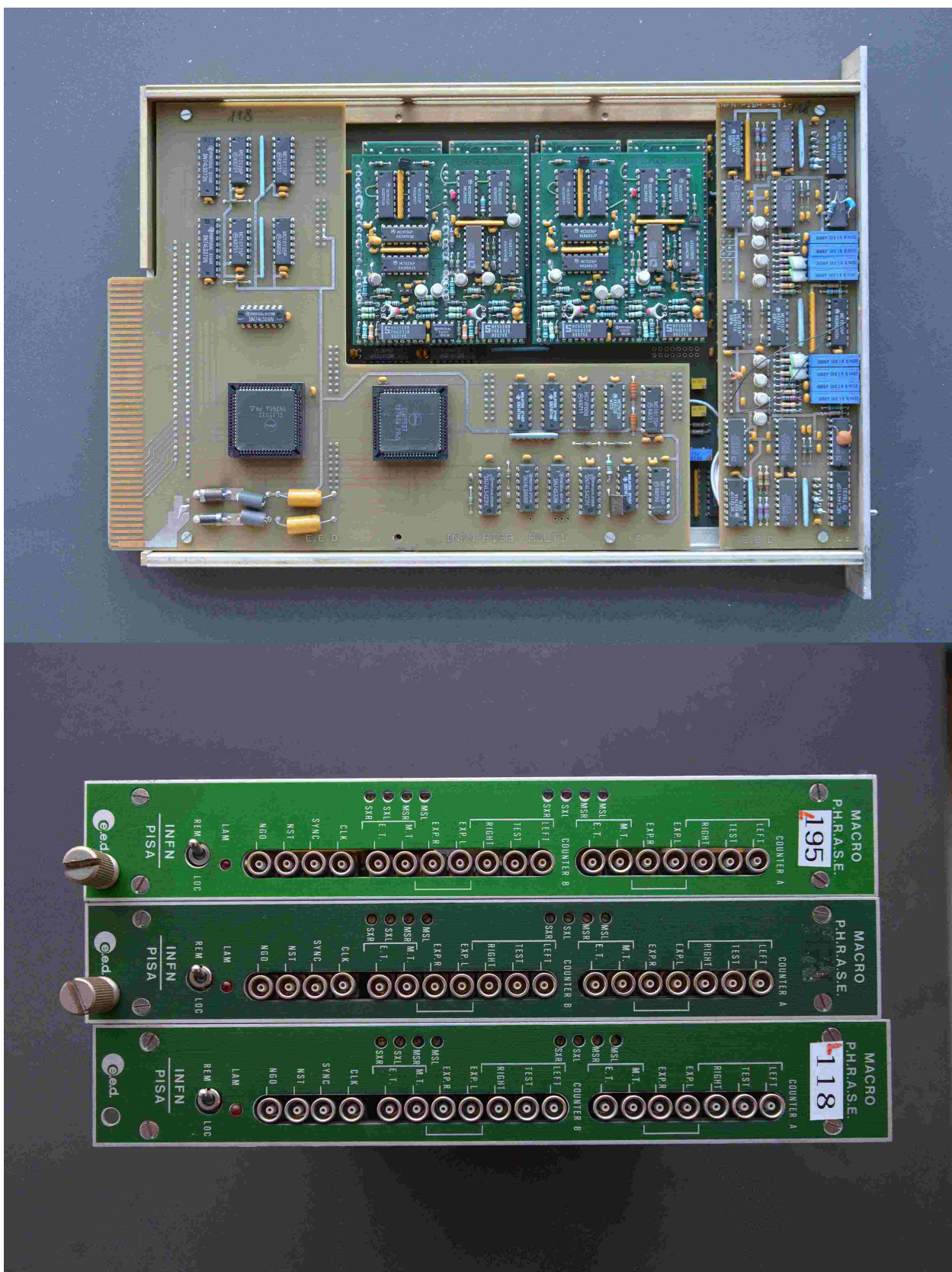
Ho ritrovato la chiara e succinta descrizione delle sue proprietà e funzioni e mi sembra opportuno riportarla [51], (Fig. 17). Come emerge dalla descrizione, dopo la rivelazione dell'evento primario la soglia in energia di acquisizione viene abbassata a 1 MeV per 800  $\mu\text{s}$ , in modo tale da rivelare il fotone da 2.2 MeV derivante dalla cattura neutronica. Mentre i  $\approx 10 \text{ MeV}$  dell'evento primario sono al di sopra delle energie raggiunte dalla radioattività ambientale, nella zona dei 2.2 MeV la radioattività è ben presente e rappresenta il principale contributo al fondo.

PHRASE, controllabile da calcolatore anche in remoto da Pisa, ha funzionato perfettamente. Credo di non essere ingiusto dicendo che ha surclassato il parallelo sistema americano ERP, che, fra l'altro, ha sempre dovuto dipendere, per le sue calibrazioni e la definizione della scala di energie, dai dati elaborati

---

<sup>9</sup>L'importante aiuto tecnico fu fornito da Fabio Gherarducci e Aldo Tazzioli.

Figura 16: I frontali e le “viscere” del modulo PHRASE (≈ 1987). (foto: cortesia di Giuseppe Fausto).



## PHRASE FUNCTIONS AND DESIGN

"PHRASE" (Pulse Height Recorder And Synchronous Encoder), is a CAMAC circuit designed to record pulse shapes at high sampling speeds (100 MHz); actually the name reminds also that by putting together time WORDs a PHRASE is obtained.

Each circuit has two sections: "COUNTER A" and "COUNTER B"; each section deals with a single MACRO counter.

For each counter, the signals from the photomultipliers are sent to the "LEFT" and "RIGHT" inputs of a PHRASE section.

PHRASE performs the following functions:

It gives an output trigger signal (Energy Trigger) when a threshold condition is satisfied on the energy released by an event in a MACRO counter. This is hardware accomplished by compensating for the counter light attenuation properties, and by discriminating on analog signals proportional to event energies.

It digitizes and stores pulse shapes if an Energy Trigger was generated. The circuit, while waiting to be read out by CAMAC, can store a maximum of fifteen events, occurring within up to ~1 second.

The time of each event, associated with the Atomic Clock time, is measured with high precision (about 1.6 ns) and stability. The time difference between the counter photomultiplier pulses is also measured with the same high accuracy.

After each Energy Trigger, the circuit energy threshold is lowered to a second and independently pre-settable value during a so called special time; during this time interval, that we choose to be ~500  $\mu$ sec (although it could be ~1 sec), other events may be collected and stored.

Figura 17: *Le prestazioni di PHRASE.*

da PHRASE. La costruzione del sistema PHRASE è stata una importante e indovinata realizzazione, veramente all'avanguardia di quanto si faceva nel campo, ma, oltre all'hardware, il software messo a punto per ottimizzare le sue prestazioni è stato una importante parte del suo successo e della qualità dei dati. Un esperimento di lunghissima durata deve, lungo il suo percorso, garantire una estrema stabilità di comportamento, una buona equilibratura L/R dei due fotomoltiplicatori di ogni contatore, una buona ricostruzione on-line degli eventi in posizione e tempo e, soprattutto, una buona misura dell'energia rilasciata nel contatore. Dopo vari studi, individuammo nella riga  $\gamma$  di radioattività naturale del  $^{208}\text{Tl}$  con  $E_\gamma = 2.62 \text{ MeV}$  un riferimento energetico, sempre a disposizione, che permetteva la sicura definizione della "scala di energia" di ogni contatore. Un esempio di spettro in energia della radioattività misurata in un contatore di MACRO, nel quale emerge la riga del Tallio, è mostrato in Fig. 18. Il nostro collega Roberto Pazzi, ahime scomparso, ha per anni seguito, con pazienza certolina e giorno per giorno, questo tipo di calibrazione per i circa 300 contatori a scintillazione dell'esperimento, assicurando la qualità dei dati al nostro e ad altri gruppi della collaborazione <sup>10</sup>.

Visto che il sistema PHRASE era in grado di riconoscere on-line l'esplosione di una supernova e di rivelarne i neutrini, il relativo monitor fu connesso ad un sistema di allarme che, tramite un telefono cellulare, in realtà all'epoca una valigetta di discreto volume, era sempre al seguito di uno di noi, a turno. L'allarme ci avrebbe permesso di avvisare gli astronomi per una loro osservazione della supernova nel visibile. Ottenere il permesso dell'INFN per l'uso del telefono cellulare non fu impresa facile. . . In Fig. 19 è mostrato il monitor e la lettera che il Presidente dell'INFN, Luciano Maiani, scrisse al direttore della sezione di Pisa, Giuseppe Pierazzini, per autorizzare il telefonino per MACRO. Qualche allarme fasullo, necessitante ulteriore analisi, ci raggiunse nel tempo.

Altro importante risultato fu l'aver individuato un metodo per dimostrare la capacità e l'efficienza di MACRO e PHRASE nell'individuare gli eventi da collasso, cioè l'evento primario associato al positrone e l'evento secondario associato alla cattura ritardata del neutrone (questo in attesa di un reale collasso . . .). Il metodo faceva uso di una sorgente Am/Be emettente un  $\gamma$  da  $4.4 \text{ MeV}$  ed un neutrone correlato, ambedue rivelati nello scintillatore [52], (Fig. 20).

La zona del laboratorio sotterraneo occupata dal MACRO era a bassa radioattività naturale, questo sia per il tipo di roccia che per il pavimento ed i

---

<sup>10</sup>Successivamente fu usato anche un altro metodo di calibrazione, basato sulla misura della velocità di conteggio della radioattività al di sopra di una prefissata soglia in energia.

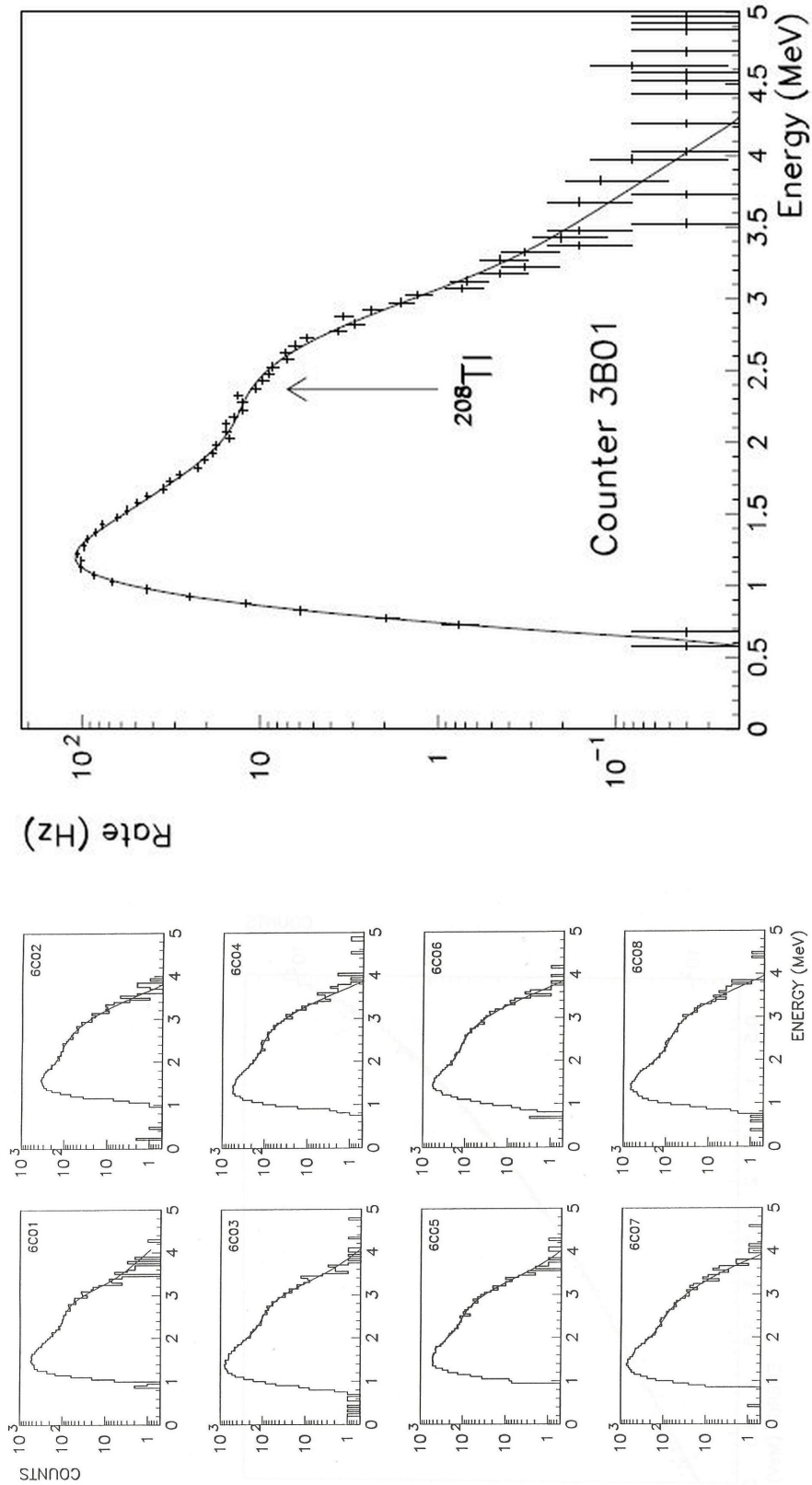


Figura 18: La riga a 2.62 MeV del  $^{208}\text{Tl}$  come misurata in alcuni contatori a scintillazione di MACRO.

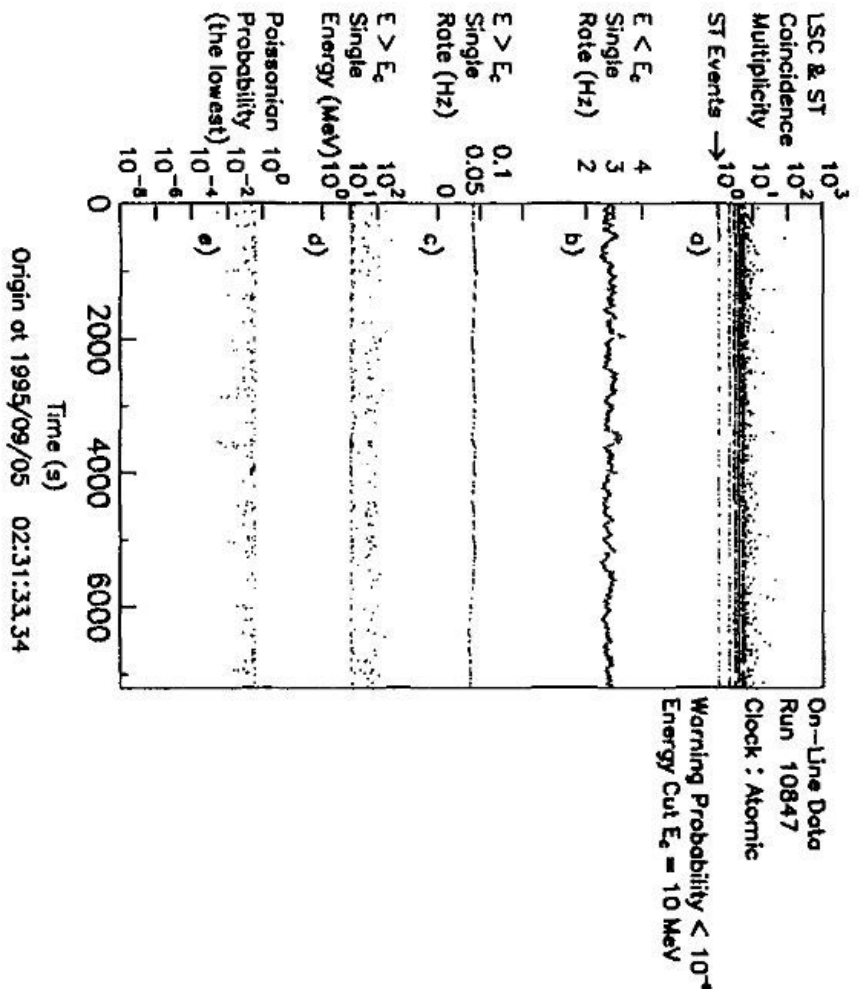


Figura 19: Il monitor on-line dei collassi e la lettera di Maiami autorizzante l'uso del telefonino....

P.T.M.  
Baldoni

**ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE**  
L. PRESIDENTE

04.07.98 015591  
Fascicolo: 015591  
No. di Serie: 01-2004-142421 Firenze Italia

**ESPRESSO**

PISA  
- 8 Lug 1998  
783

Programo Prof. G. M. Paganini  
Direttore della Sezione di Pisa  
Via Livornese, 58/7/a  
56100 S. Piero a Grado (PI)

Caro Paganini,  
con riferimento alla Tua richiesta del 20/3/96 prot. 684, ed alla luce di quanto disposto con circolare di questo Istituto Presidenza del 21 aprile 1995, prot. 7518/17, Ti autorizzo ad utilizzare un telefono cellulare nell'ambito dell'esperimento MACRO.

Resta inteso che l'uso del telefono deve essere rigorosamente limitato a quanto da Te descritto nella lettera di richiesta.

Cordialmente

IL PRESIDENTE  
Prof. L. Baldoni  
*L. Baldoni*

Centro Ricerca 94 - CODICE FISCALE 01559100000  
Tel. 0423/111111  
Telex 310231

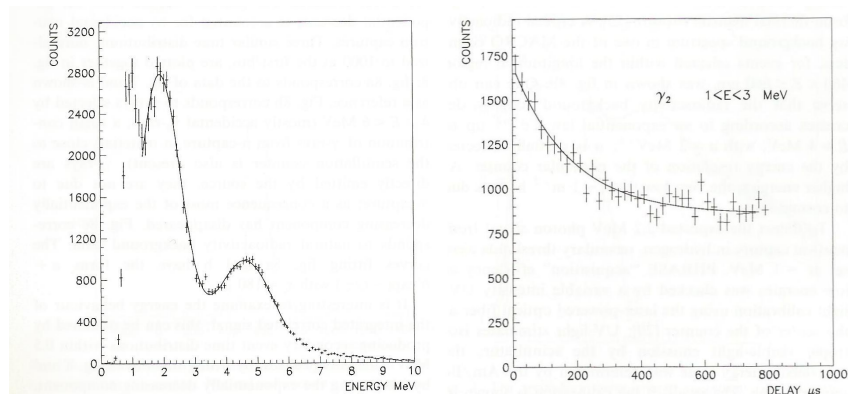


Figura 20: La risposta dei contatori alla sorgente di Am/Be. Sono visibili la riga a 4.4 MeV e quella a 2.2 MeV dovuta alla cattura del neutrone nello scintillatore. La figura di destra rende evidente la correlazione temporale fra le due righe, mostrando il ritardo dell'evento secondario rispetto all'evento primario.

rivestimenti in cemento, del tipo a bassa radioattività. Tuttavia la radioattività presente costituiva un fondo importante di  $\gamma$ , alle basse energie di interesse per la rivelazione dei collassi stellari; inoltre i contatori a scintillazione dell'esperimento non erano in alcun modo schermati e protetti. Si cominciò a considerare un qualche modo di ridurre i fondi di radioattività. Decidemmo pertanto di fare una prova su una scala significativa, sovrapponendo al pavimento sotto l'apparato uno schermo di protezione. Questa fu davvero una bella avventura! Decidemmo che lo schermo dovesse riguardare 10 m dei circa 100 m di lunghezza di MACRO ( $\approx 120 m^2$ ) e per realizzare tale schermo decidemmo di usare centinaia di tavole di legno (un materiale a basso Z, con radioattività naturale molto minore della roccia e del cemento. Dove mai procurarsi le tavole? Riuscimmo a chiederle in prestito per alcuni giorni ad un grosso cantiere dell'Aquila, per la cronaca: gestito da un ramo della famiglia Fiordigigli, nostri albergatori, ma anche imprenditori. Le tavole furono portate in galleria e restava ora il problema di inserirle sotto MACRO. Era una impresa per fisici non claustrofobici, dato che lo spazio fra l'apparato e il cemento del pavimento era inferiore al metro. Carlo Bemporad e Alessandro Baldini provvidero alla bisogna, alla debole luce di torce elettriche e fra la polvere; mi sembra di ricordare che ciò prese due giorni. . . Le misure mostrarono una cospicua riduzione della radioattività registrata da MACRO nella zona coperta dalle tavole. Presentammo i risultati alla collaborazione, ma infine fu deciso di non produrre

l'enorme schermaggio che sarebbe stato necessario per tutto l'apparato, dato il costo e le difficoltà di realizzazione <sup>11</sup>.

Altro sviluppo interessante, tentato per la rivelazione dei neutrini da collasso, fu quello associato alla ricerca di acqua pesante (per circa 100 tonnellate). Ciò avrebbe permesso lo studio delle reazioni di corrente neutra e una maggiore comprensione della emissione dei diversi tipi di neutrino nei collassi stellari. Un primo tentativo fu il rivolgersi al Canada. Il Canada ha alcuni reattori che usano l'acqua pesante come moderatore e inoltre ne sono produttori. L'acqua pesante era all'epoca usata nell'esperimento canadese SUDBURY, permettendo i suoi strepitosi risultati. A noi, non canadesi, richiesero dei prezzi proibitivi, sia per una vendita, che per un prestito temporaneo <sup>12</sup>. Poi cominciammo a cercare in Russia. All'inizio sembrava che qualcosa si potesse ottenere. Ospitai a Pisa due ben noti fisici russi: Lev Mikaelyan e Sergei Fayans, con i quali iniziammo a trattare. Erano persone simpaticissime e con Lev avemmo poi una lunga e piacevole collaborazione nel successivo esperimento CHOOZ. La trattativa non andò a buon fine; la Russia aveva difficoltà economiche crescenti e cominciava a vendere i suoi beni ad alto prezzo. Davanti alle richieste, crescenti nel tempo e non direttamente dipendenti da Mikaelyan e Fayans, dovemmo rinunciare. Peccato però! Provammo a ripiegare sull'uso di carbonio (che emette una riga da 15.1 MeV da una reazione indotta da correnti neutre); ma anche questo progetto era assai complesso e difficilmente compatibile con la struttura di MACRO.

In relazione al tema dei collassi e come prova di un buon clima di lavoro italo-americano durante l'esperimento, inserisco un episodio interessante: Barry Barish di Caltech e responsabile del gruppo americano, inviò a Pisa per qualche mese una sua dottoranda, Kate Scholberg, perché imparasse ad utilizzare i dati del sistema PHRASE. Ospitammo Kate e le rendemmo la permanenza la più piacevole possibile. Kate completò poi la sua tesi di dottorato (1996) utilizzando anche i dati di PHRASE. La cosa notevole è che la Scholberg ha sempre continuato a lavorare nel campo delle supernove e dei loro neutrini e, più in generale, in fisica dei neutrini, divenendone una specialista. È ora professore presso la Duke University. Dopo la visita di Kate, fu Fabrizio Cei a recarsi, per circa sei mesi, presso Greg Tarlè, membro di MACRO e professore alla Università del Michigan. Fabrizio aveva appena terminata la sua

---

<sup>11</sup>Si sarebbe probabilmente trattato di una grande vasca contenente acqua per una altezza di una quarantina di centimetri.

<sup>12</sup>Anche l'acqua pesante in SUDBURY era in prestito. . . .



tesi di dottorato sulla ricerca dei collassi stellari gravitazionali, la prima tesi di “Astroparticelle” presentata a Pisa, poi pubblicata dalla Scuola Normale [53].

*Le Oscillazioni Neutriniche ed altra fisica*

Oltre ai temi relativi ai collassi stellari gravitazionali e alla ricerca dei monopoli magnetici di grande unificazione, MACRO ha potuto fornire alcuni rilevanti risultati: ha raccolto un gran numero di eventi dovuti ad interazione di neutrini, in particolare di quelli provenienti dal basso, ed ha fornito una chiara prova delle oscillazioni neutriniche [54], in accordo, ma con risultati di minor qualità di quelli ottenuti da SUPERKAMIOKANDE. Ha fornito informazioni sulla distribuzione in energia e sulla composizione in massa dei raggi cosmici primari [55], ha ricercato sorgenti puntiformi di raggi cosmici [56], ha messo in evidenza delle differenze stagionali nel flusso sotterraneo dei raggi cosmici [57]. Ha posto limiti sul flusso di particelle esotiche quali WIMPs e neutralini [58].

Mi piace metter in evidenza un risultato per me affascinante: l’aver misurato, per la prima volta, una diminuzione dell’intensità dei raggi cosmici in corrispondenza dell’assorbimento da parte della luna [59]; l’“Ombra della Luna”!, vista da un rivelatore sotterraneo. Non è stata solo una curiosità...; la misura ha permesso di conoscere quale fosse la risoluzione angolare di MACRO nel determinare la direzione di provenienza di un muone cosmico; ciò è di ovvio interesse nella ricerca di sorgenti puntiformi di raggi cosmici.

Come già accennato MACRO è stato il primo ambizioso esperimento in fisica “Astroparticellare” nel quale Pisa abbia fatto un notevole investimento. Molti altre iniziative sono nate a Pisa successivamente. È difficile dire quale sia il momento nel quale un esperimento abbia inizio; si comincia a pensarci, a fare studi preliminari, ma se l’iniziativa è ambiziosa, la ricerca di una collaborazione, di finanziamenti per delle prove, fino alla scrittura di una proposta più impegnativa, può richiedere molto tempo. Mi sembra che l’effettivo “inizio” debba identificarsi con la data di sottomissione di una proposta ufficiale. Esaminerò gli esperimenti afferenti alla Commissione Scientifica II, nei quali vi sia una partecipazione dell’INFN di Pisa. Un elenco di iniziative, (quelle più propriamente di “Cosmoparticelle” sono asteriscate), con la loro approssimativa data di inizio, è il seguente:

- \*\*\*MACRO 1983
- \*\*\*VIRGO 1989 (IRAS 1985)
- GAL 1992
- PVLAS 1994
- \*\*\*CLUE 1995
- NOMAD 1996
- CHOOZ 1998
- \*\*\*GLAST/FERMI 2001
- \*\*\*MAGIC 2002
- \*\*\*AMS2 2002
- \*\*\*ANTARES 2006
- \*\*\*NEMO 2006
- GINGER
- \*\*\*CALET
- \*\*\*CREAM
- AXIONS
- ...

Mi sembra interessante far notare che, in maniera assolutamente non pianificata, Pisa, patria di Galileo, si è trovata a fare alcuni esperimenti in fisica della gravitazione. Mi riferisco a MACRO (1989) e alla sua ricerca dei collassi stellari gravitazionali, a GAL (1992) e alla ricerca di una possibile violazione della universalità di  $g$  (indipendenza dalla composizione del corpo in caduta libera), e finalmente all'esperimento VIRGO per la ricerca delle onde gravitazionali (2003). Un nuovo progetto, GINGER, in sviluppo ora a Pisa e al Gran Sasso, riguarda il tentativo di misura terrestre dell'effetto Lense-Thirring.

*Il Progetto VIRGO (Fig. 21)*

L'iniziativa in Italia degli studi per la rivelazione di onde gravitazionali con

metodi interferometrici è certamente dovuta a Adalberto Giazotto [60], un fisico con una preparazione abbastanza fuori dall'ordinario; infatti Giazotto, che ha a lungo partecipato ad esperimenti di alte energie a Frascati, Daresbury, CERN, è anche padrone di una notevole cultura di tipo teorico.

Gli studi di Giazotto per la realizzazione di un interferometro di grandi dimensioni e capace di raggiungere le basse frequenze risalgono ai primi anni '80<sup>13</sup>. Bisogna notare che Pisa non aveva alcuna precedente esperienza nel campo della rivelazione delle onde gravitazionali; gli esperimenti esistenti, condotti esclusivamente con antenne a barra, erano invece già in corso a Roma, Padova, Legnaro, Frascati nel 1982; Edoardo Amaldi ne è stato l'iniziatore in Italia. Quindi Giazotto si è trovato a dissodare un terreno che, per quel che riguarda gli interferometri a Pisa ed in Italia, era sostanzialmente vergine. Il puntare immediatamente ad un obiettivo ambizioso, per le dimensioni e la sensibilità dell'interferometro, era certo per Giazotto frutto della sua precedente esperienza nel campo della alte energia, dove le dimensioni e le tecnologie usate negli esperimenti erano assai avanzate. Bisogna notare che, a differenza di altre iniziative, lo sviluppo di prototipi di minori dimensioni non avrebbe permesso il raggiungimento delle sensibilità minime necessarie alla rivelazione di eventi astrofisici.

La prima sperimentazione volta alla riduzione del rumore sismico a basse frequenze fu associata alla iniziativa IRAS (1984), che portò all'invenzione e allo sviluppo dei "Superattenuatori" (1987) da parte del gruppo comprendente allora Raffaele Del Fabbro, Angela Di Virgilio, Adalberto Giazotto, Hans Kautzky, Vinicio Montelatici, Diego Passuello [61], (Fig. 22).

L'inizio di una collaborazione italo/francese con Alain Brillet, da tempo interessato alla rivelazione interferometrica delle onde gravitazionali, portò infine alla scrittura della proposta congiunta VIRGO (1989) che l'INFN e i presidenti Nicola Cabibbo e Luciano Maiani presero in seria considerazione. Una prima espressione di interesse da parte dell'INFN e del francese CNRS fu firmata nel 1991; l'approvazione del progetto VIRGO fu infine firmata dagli stessi enti nel 1994. I tempi così lunghi per raggiungere l'approvazione erano in parte dovuti alle difficoltà logistiche e alla necessità di espropriare terreni per la costruzione del laboratorio e dell'interferometro nei dintorni di Cascina, ma anche alla complessità del progetto, al volersi assicurare pienamente della sua realizzabi-

---

<sup>13</sup>I progetti per interferometri di grandi dimensioni sono stati sviluppati nello stesso periodo anche negli Stati Uniti.



Figura 21: *L'interferometro e il laboratorio nella piana di Cascina.*

# The Super-Attenuator

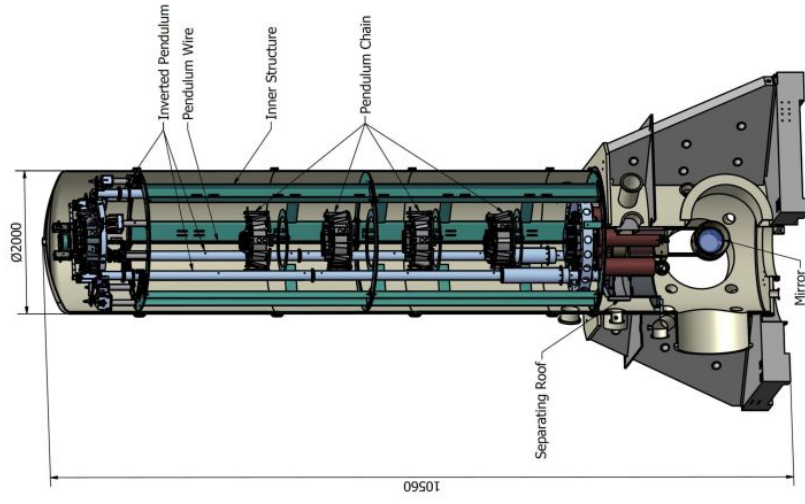
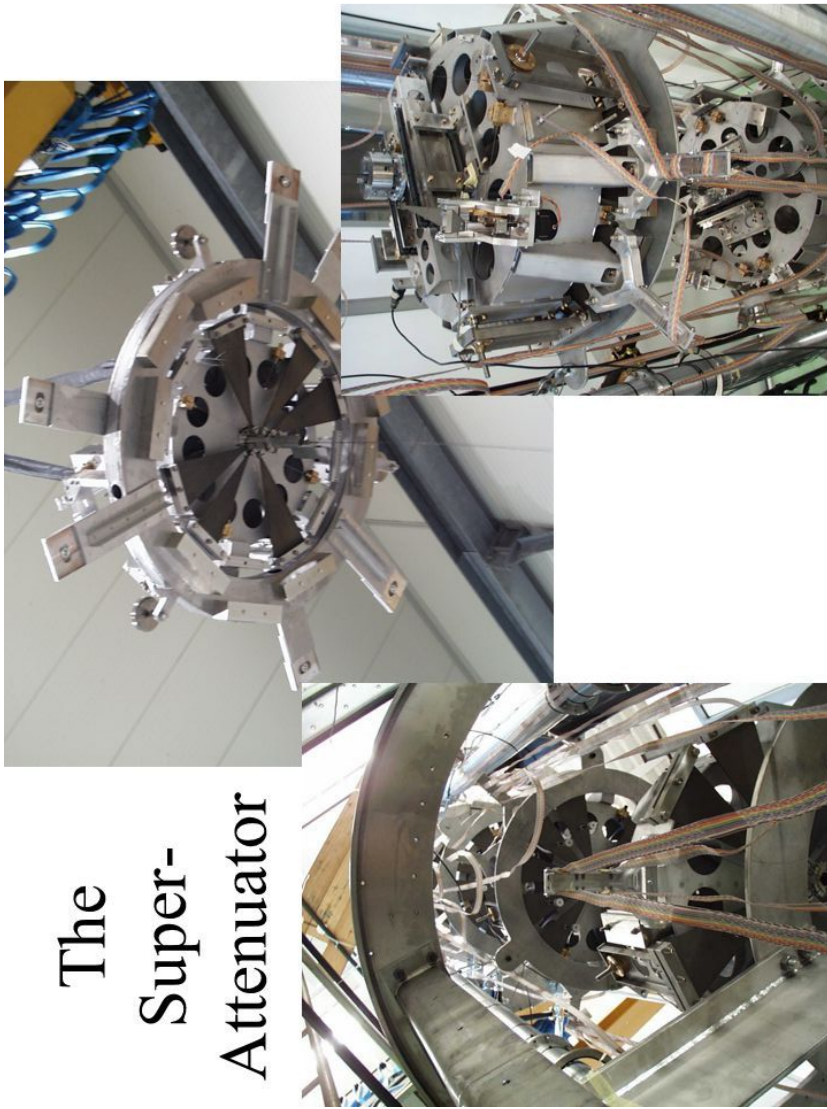


Figura 22: Il superattenuatore; dettagli e insieme schematico.

lità.

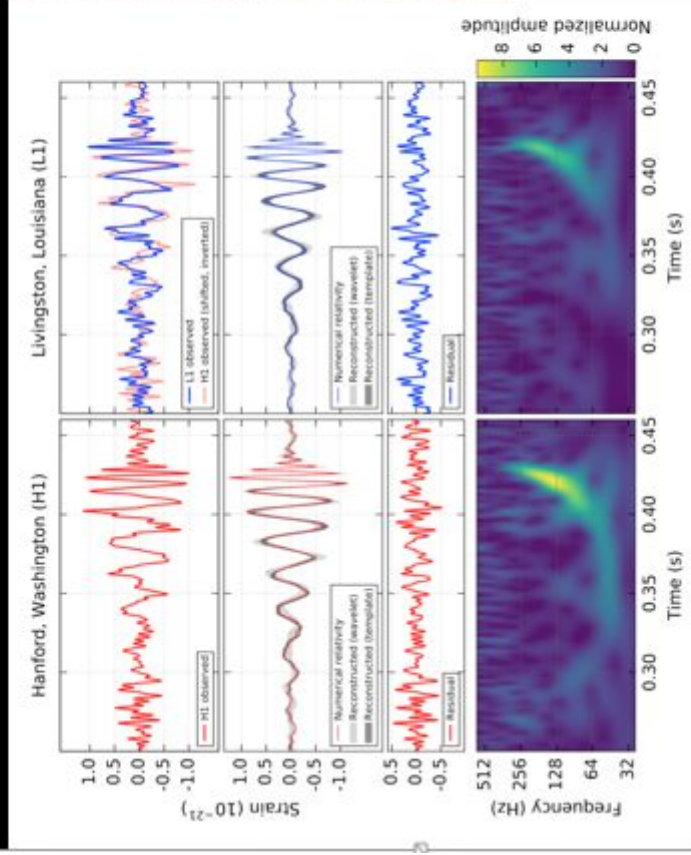
Dalle prime idee (1980), alla proposta (1989), alla approvazione del progetto (1994), al termine della costruzione (2003), ad una prima entrata in funzione (2007): si tratta di un lasso di tempo lunghissimo; rappresenta una frazione importante di una vita umana; richiede doti di dedizione, impegno, resistenza, indubbiamente legate agli aspetti di un progetto tanto ambizioso, ma che ha finito per richiedere straordinarie qualità agli stessi sperimentatori proponenti. Si tratta probabilmente della più complessa iniziativa nata e infine realizzata a Pisa. I particolari accordi di collaborazione che legano VIRGO agli interferometri americani LIGO e il trionfo della scoperta delle onde gravitazionali (2016) sono il coronamento di un lungo impegno e l'inizio di una nuova fase nelle ricerche astrofisiche [62]. I segnali ottenuti dai due interferometri di LIGO, cioè “La Scoperta delle Onde Gravitazionali”, sono mostrati in Fig. 23.

ADVANCED VIRGO, con la sua aumentata sensibilità, è rientrato in funzione dall'estate del 2017 (Fig. 24).

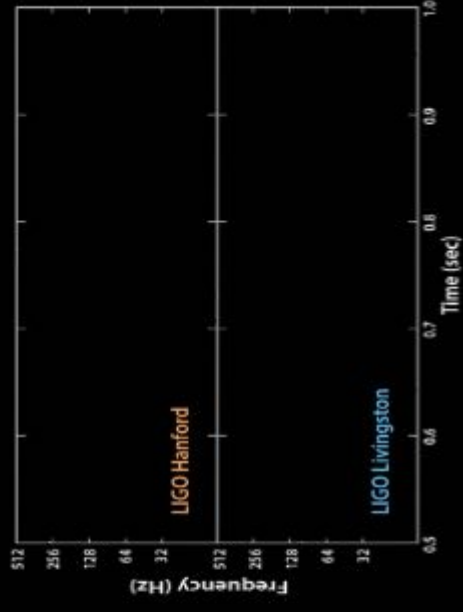
A mio parere, fra i tanti progressi in fisica delle particelle ottenuti con il contributo pisano, la scoperta delle onde gravitazionali è probabilmente quello di maggiore importanza. Negli ultimi cento anni la nostra conoscenza dell'universo ha fatto progressi grandiosi. Siamo in grado di esplorare strutture e corpi celesti a distanze sempre più grandi e a tempi sempre più remoti. Ciò è stato ottenuto utilizzando una varietà di mezzi: lo spettro elettromagnetico, dalle microonde ai gamma di altissima energia, i neutrini, i raggi cosmici. Le onde gravitazionali completano questo quadro e promettono di estendere ulteriormente le nostre conoscenze. In un tempo assai breve, dopo il raggiungimento delle sensibilità di disegno, si è potuto osservare, per così dire in diretta, la fusione di due grandi buchi neri, poi il collasso di un sistema binario di stelle di neutroni e ci sono ora indizi di coincidenze fra un evento rivelato tramite onde gravitazionali e l'emissione di un “gamma ray burst”. Le osservazioni di fenomeni cosmici mediante segnali multipli è una delle maggiori speranze di progresso per l'astrofisica; le onde gravitazionali completano i mezzi osservativi già a nostra disposizione; l'indagine astrofisica si basa ora su tutte e quattro le interazioni fondamentali.

Non va taciuto il fatto che la prima rivelazione di onde gravitazionali ha fornito una grande prova della validità della relatività generale a regime di campi gravitazionali ultra intensi. Questa prova non poteva che venire dall'os-

# GW150914: The First Binary Black Hole Merger



Andy Bohn, François Hébert, and William Drowe, [SXS Collaboration](#)



Abbott, et al. [LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger" \*Phys. Rev. Lett.\* 116, 061102 \(2016\)](#)

Figura 23: I segnali dal collasso gravitazionale di due buchi neri, ottenuti dai due interferometri di LIGO.



## VIBRATION ISOLATION

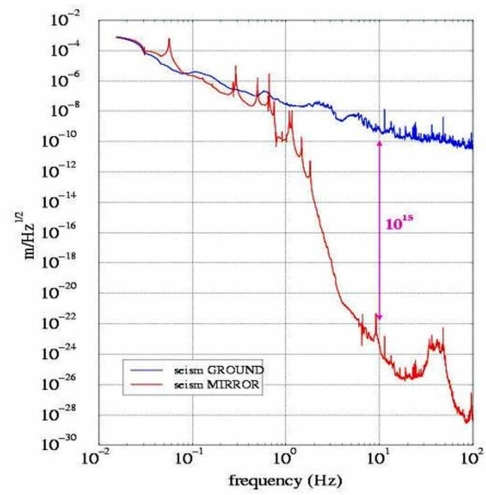
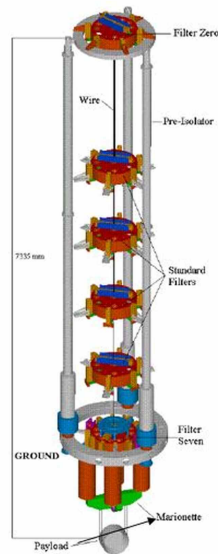


Figura 24: In alto: Il tubo a vuoto relativo ad un braccio dell'interferometro. In basso: Il superattenuatore e la sensibilità attesa per ADVANCED VIRGO.



servazione di catastrofi cosmiche come appunto la fusione di due buchi neri. Fino a tempi relativamente recenti è stato usuale e possibile provare la validità delle teorie fisiche mediante esperimenti di laboratorio, ripetuti e migliorati nel tempo. Ciò è evidentemente impossibile per la relatività generale in regime di campi intensi. Che la natura ci abbia fornito un modo di controllare in dettaglio le previsioni dei calcoli analitici e dei calcoli numerici riguardanti la relatività generale ha del miracoloso!

Mi appare opportuno mostrare un confronto fra il costo totale di VIRGO (INFN+CNRS) e quello di molte altre importanti iniziative ed esperimenti. È interessante notare come nel campo della fisica astroparticellare si siano potuti raggiungere risultati assai importanti con costi tutto considerato modesti, (Fig. 25).

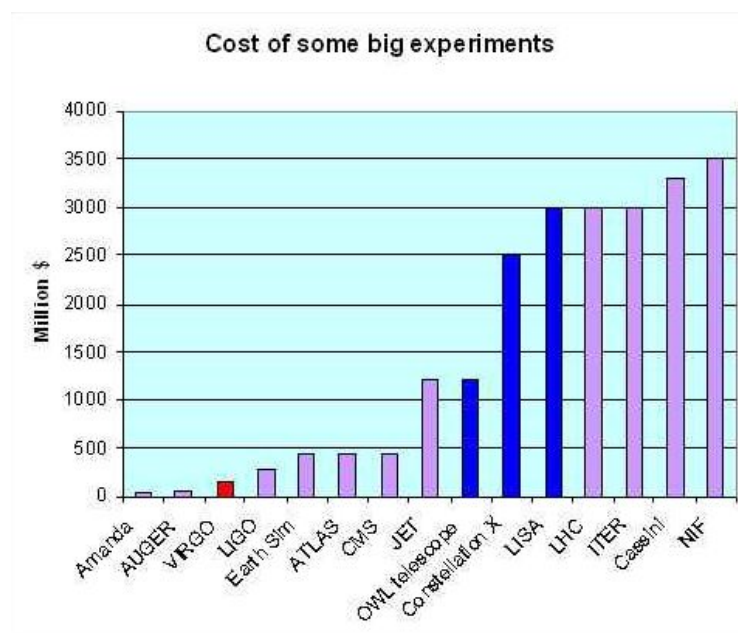


Figura 25: Il costo totale di VIRGO (INFN e CNRS) confrontato con quello di altre importanti iniziative e esperimenti; da *The Gravitational Voice*, January 2007, P. La Penna.

### *Il Progetto FERMI/GLAST*

L'esplorazione astrofisica ha utilizzato i fotoni, in un vasto intervallo di energie,

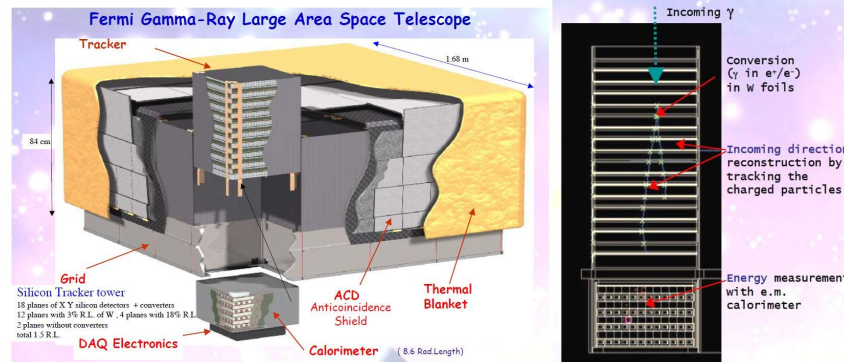


Figura 26: Uno schema del LAT (Large Area Telescope) per Raggi Gamma di FERMI. A destra: Uno schema del modo di rivelazione dei gamma.

come “messaggeri” preferenziali; i più diretti concorrenti per il raggiungimento di distanze estreme, sono i neutrini ed ora anche le onde gravitazionali. Ma sono i fotoni che per ora permettono il raggiungimento di alte statistiche, elevate risoluzioni energetiche ed angolari, grande angolo solido di osservazione.

L’esperimento FERMI, piazzato dalla NASA ad un altezza di 550 Km, segue una serie di precedenti telescopi spaziali: HUBBLE, CHANDRA, EGRET, etc. ed è quello che in questo momento è attivo. La determinante partecipazione di Pisa in questa impresa riguarda principalmente la parte denominata “Large Area Telescope (LAT)” [63], basata sulla tecnologia dei rivelatori al silicio, inizialmente ampiamente sviluppata a Pisa. Il LAT copre le energie dei gamma comprese fra 20 MeV e 300 GeV. Uno schema del LAT è mostrato in Fig. 26 insieme ad uno schema del modo di rivelazione dei gamma.

FERMI ha prodotto una ricchissima quantità di dati, ad esempio: delle dettagliate mappe in raggi gamma del cielo [64], mappe della distribuzione di Gamma-Ray Bursts (GRB) [65], scoperta di pulsars e supernova remnants emettenti gamma [66], la scoperta delle enormi “Bolle di FERMI” [67] associate alla regione del centro galattico e, probabilmente, la recente rivelazione di un GRB in coincidenza con uno degli eventi gravitazionali di LIGO. La missione spaziale IXPE, in studio avanzato, potrebbe completare le esplorazioni di FERMI con la misura della polarizzazione della radiazione gamma [68, 69].

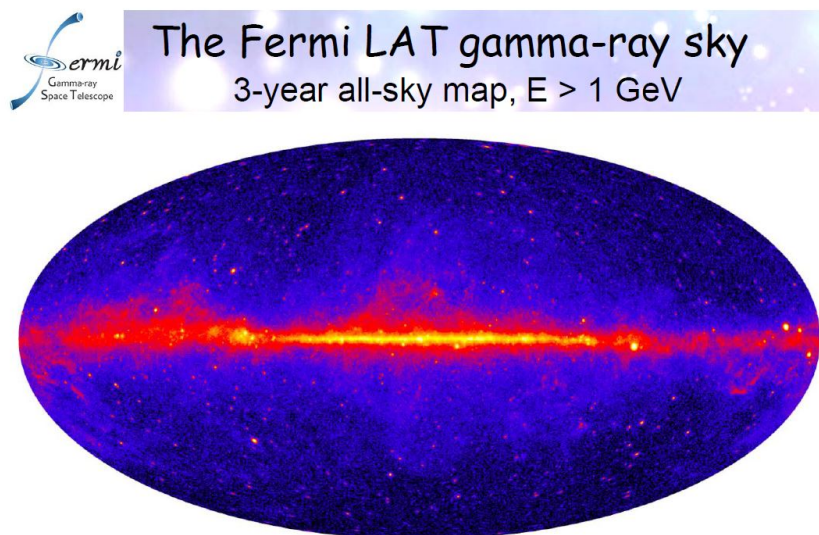


Figura 27: Una mappa in raggi gamma del cielo, osservata da FERMI.

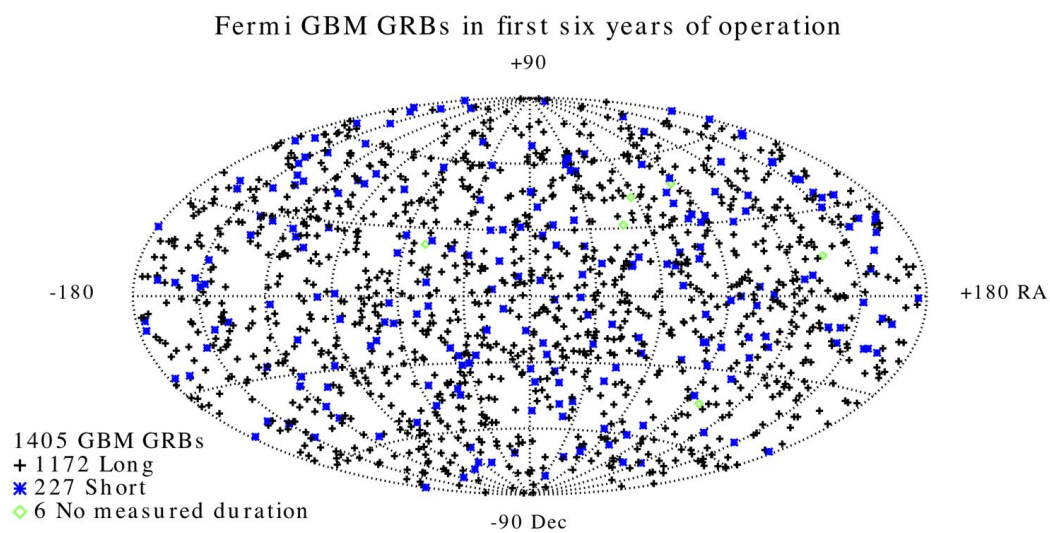


Figura 28: Una mappa celeste dei GRB, osservata da FERMI.

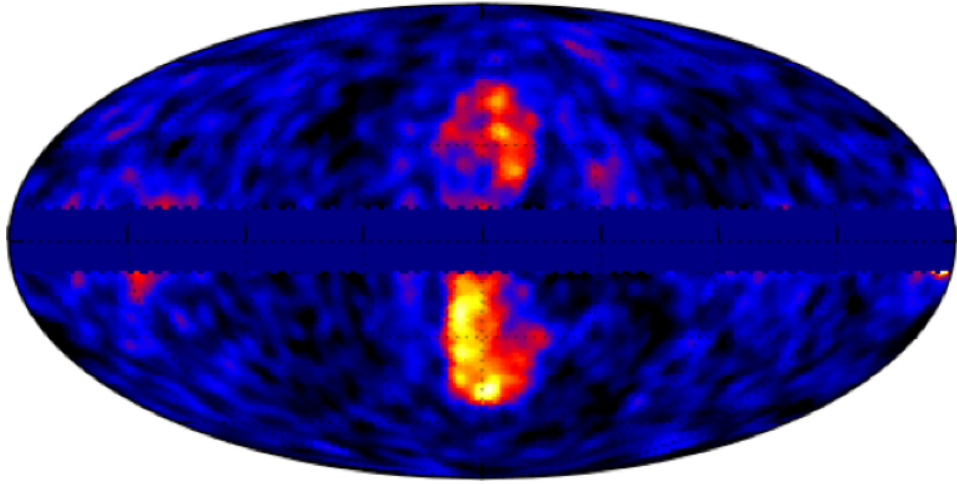


Figura 29: Le gigantesche “Bolle di Fermi” nella regione del centro galattico.

#### *Il Telescopio MAGIC*

MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope)(Fig. 30) è uno strumento terrestre di nuova generazione, con uno specchio di  $234 m^2$ , costruito nelle Canarie e sensibile a Gamma con  $E_\gamma > 30 GeV$ . Telescopi Cherenkov, quali HESS e HEGRA, sono stati costruiti ed hanno operato precedentemente; uno: CLUE [70], è stato costruito da un gruppo di Pisa. Le caratteristiche innovative di MAGIC [71] hanno permesso lo studio di nuclei galattici attivi (AGN) quali AGN 1ES 2344+514 e AGN 1ES1959+650, di Markarian 421 [72] e della Crab Nebula [73].

#### *L'esperimento PVLAS*

Questo esperimento, veramente molto difficile, intrapreso circa nel 1994 e basato su una iniziale proposta di Enrico Iacopini e Emilio Zavattini [74], intendeva mettere in evidenza l'“Anisotropia del Vuoto” sotto l'azione di un forte campo magnetico; poiché il vuoto può fluttuare in coppie virtuali  $e^+e^-$ , queste possono essere polarizzate dalla presenza del campo magnetico, causando quindi una asimmetria. L'esperimento è tuttora in corso e, negli anni, alcuni ricercatori pisani, esperti di ottica, vi sono stati coinvolti: Erseo Polacco e Salvatore Carusotto. Data la difficoltà delle misure, la riduzione degli errori sistematici ha preso tempi lunghissimi e sfortunatamente è anche stato pubblicato un falso segnale. Ora l'apparato, dopo esser stato completamente ridisegnato, ha fornito misure e risultati affidabili [75]; la sensibilità dell'esperimento ri-

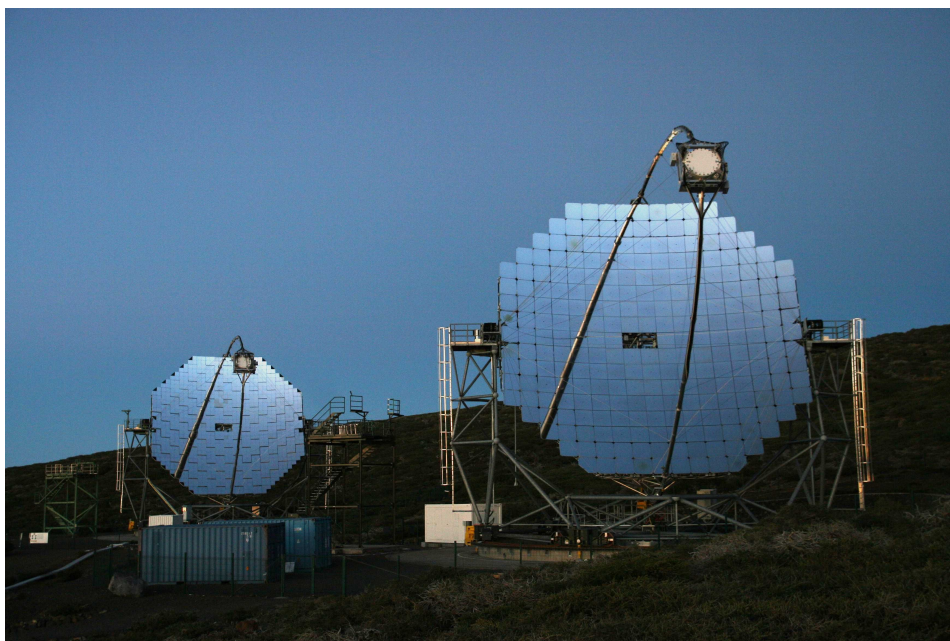


Figura 30: *I telescopi di MAGIC.*

sulta però ancora insufficiente—di circa un fattore 10, a mettere in evidenza il segnale predetto dalla teoria. La cosa sorprendente è che recentemente si è avuta una osservazione indiretta della anisotropia del vuoto mediante la misura della polarizzazione della luce emessa da una stella di neutroni [76]; inoltre l'esperimento ATLAS ha messo in evidenza il processo correlato: la diffusione luce-luce [77].

#### *Lo spettrometro magnetico ALPHA (AMS)*

Questo apparato, montato sulla stazione spaziale internazionale, nella sua seconda fase di funzionamento ha potuto utilizzare una calorimetro elettromagnetico progettato e costruito a Pisa (2002). L'esperimento, indagante principalmente la quantità di antimateria presente nell'universo, ha determinato, con elevata precisione, i flussi di  $e^+$ , di  $e^-$  [78] di protoni [79] ed elio [80] nella radiazione cosmica.

#### *Il Telescopio ANTARES*

ANTARES [81] è il primo telescopio sottomarino operante nel Mediterraneo ad una profondità di circa 2500 m. È costituito da 12 stringhe verticali, equi-

paggiate ognuna con 25 fotomoltiplicatori. L'esperimento ha misurato il flusso e lo spettro dei muoni atmosferici [82] e dei  $\nu_\mu$  [83] in un grande intervallo di energie. L'ambizioso progetto NEMO, il naturale successore di ANTARES, è attualmente in un avanzato stato di sviluppo.

Negli anni le iniziative in fisica cosmoparticellare si sono succedute numerose, ad es., oltre agli esperimenti già citati, gli esperimenti CALET, sulla stazione spaziale internazionale, e CREAM mediante lancio di palloni in Antartide. Anche il campo della fisica dei neutrini è stato ampiamente esplorato, ad es. mediante gli esperimenti NOMAD e CHOOZ. Visto che NOMAD sarà trattato da Luigi di Lella durante il congressino sulla storia della fisica a Pisa [84], sembra opportuno riportare anche notizie sull'esperimento CHOOZ.

### *L'esperimento CHOOZ*

Le prime discussioni sull'esperimento avvennero quando era ancora in corso MACRO al Gran Sasso; richiesero solo qualche breve viaggio negli USA e a Parigi. Poi ci fu tutta la fase di disegno e preparazione delle apparecchiature, con frequenti viaggi per lo più a Parigi. Il montaggio e l'esecuzione dell'esperimento avvenne invece nel villaggio di Chooz, vicino a Givet, prossimo alla frontiera Franco-Belga, nella regione "Champagne-Ardenne". Di CHOOZ ho parlato con dovizia in "Storie di Uomini e Quarks" [85] e non voglio qui discuterne la fisica e ripetermi. È stato un importante esperimento, ben condotto e con buoni risultati molto apprezzati; i principali sono riportati nelle pubblicazioni: [86, 87, 88]. Vale forse la pena di citare una realizzazione tecnica, ad opera di Alessandro Baldini, Marco Grassi e Donato Nicolò, una vera "prima", non citata altrove: lo sviluppo di un trigger di secondo livello capace di ricostruire in maniera molto rapida l'energia e la posizione di ogni evento, il tutto basato su una "neural network" implementata in un processore parallelo <sup>14</sup>[89].

Nel periodo dell'esperimento io sono sempre stato ospitato nel Chateau d'Aviette, che il Consiglio Regionale delle Ardenne e il suo presidente, senatore Jacques Sourdille, ci avevano messo a disposizione. L'origine della cosa era stata la visita al Laboratorio del Gran Sasso fatta da tutti i membri del Consiglio in pulman dalla Francia. Li portammo in visita a MACRO e offrimmo loro un buon rinfresco. Si erano poi messi in testa di cenare nell'albergo sul Gran Sasso, quello dove era stato prigioniero Mussolini. Il segretario del senatore

---

<sup>14</sup>Il CNAPS/VME della Adaptiv Solutions.



Figura 31: *Chateau d'Aviette.*

aveva visto sulla carta che l'albergo era vicinissimo al laboratorio; e lo era, ma in linea d'aria. . . . Per raggiungerlo, con loro sgomento, dovemmo fare almeno una trentina di chilometri su una pessima strada di montagna; per tutto il viaggio la moglie del senatore, una materna e simpatica signora, non fece altro che chiedermi informazioni sulle famiglie nobili italiane! Figurarsi! Arrivammo a tarda sera, ma la cena fu molto piacevole. Alla fine, eravamo tutti ormai leggermente brilli, il senatore si alzò e da vecchio volpone politico si rivolse ai membri del Consiglio dicendo: “. . . ora voi non mi negherete l'uso del castello d'Aviette per questi nostri ospiti. . .”. Detto fatto vennero iniziati i lavori di restauro e trasformazione e dopo circa sei mesi il castello col suo bellissimo parco ci fu messo a disposizione. L'edificio, donato al Consiglio Regionale, era ridotto in pessimo stato e inizialmente non sapevano bene cosa farne. Per noi fu una pacchia! Non avevamo l'uso del torrione dove si era installata la famiglia del guardiano la cui moglie si occupava delle pulizie. Noi facevamo cucina; avevamo colleghi francesi esperti in cucina francese e vini, gli italiani se la cavavano bene ed erano particolarmente richiesti per gli spaghetti e il caffè; c'erano poi i russi che bevevano come spugne, ma di tanto in tanto facevano anche dei buoni borsch. Tutti diffidavano degli americani in cucina; gli si lasciò fare solo dei cheese cakes. Nel castello erano presenti circa dieci persone per volta, secondo le necessità dell'esperimento. L'edificio (Fig.31) era in collina, immerso in un grande parco secolare e degradante verso la Mosa.

C'erano querce e faggi, ma anche molti alberi da frutta, un po' inselvatichiti, ma ancora produttivi, mele in particolare. Davanti all'ingresso del castello si apriva una grande terrazza panoramica, dove, meteo permettendo, digerivamo e prendevamo il caffè. Il tempo era spesso brumoso e spesso piovoso. Tuttavia ricordo che, al termine di una buona cena, i nostri colleghi francesi decisero di traversare la Mosa a nuoto, andata e ritorno; per la verità non erano tipi particolarmente atletici e noi li guardavamo un po' inorriditi e sorpresi per questa “follia”—ah questi “Galli!”. Si buttarono, traversarono, ritornarono. . . e tutto si svolse bene, a parte il fatto che furono morsi non è ben chiaro da che, forse da pesci. La zona collinare del castello era coperta da fitti boschi, ricchissimi di frutti durante i mesi estivi; ma c'erano dappertutto dei gran cartelli che diffidavano dal mangiarli perché diffusori di una pericolosa malattia provocante cisti negli organi interni, potenzialmente mortali! . . .

Parlando più in generale della regione limitrofa, la trovavo bella, ma non ridente e piuttosto scura. Givet è contornata da grandi cave di ardesia, non so quanto ormai importanti, ma scure certamente. Tutta la zona di frontiera, anche in passato, era fortificata; a Givet c'è il grandioso Fort de Charlemont





*Figura 32: Una buona parte della collaborazione davanti all'ingresso del castello.*

(Fig.33), costruito circa nel 1550 da Carlo V per difendere i paesi bassi spagnoli dai francesi. Zona di frontiera significa letteralmente che è sempre stata



Figura 33: *Il forte di Charlemont dominante Givet.*

in guerra, con perdite territoriali da una parte e dall'altra, non solo nel 1500, ma in una infinità di guerre dai tempi antichi a quelli recenti.

Nel secolo XIX e parte del XX le Ardenne sono state importanti perché ricche di miniere di carbone e poi sede di industrie pesanti. Queste attività sono quasi scomparse e la regione si è impoverita. Pur nel relativamente breve periodo passato nella regione abbiamo visto varie attività chiudersi a Givet, comprese una biblioteca, un negozio di libri e uno di cioccolata. . .

Completamente diversa la situazione nelle Ardenne Belghe, al di là della frontiera. Le Ardenne da quella parte sono una zona di grande turismo e di villeggiatura per i belgi, quindi una zona ricca e molto curata, in netto contrasto con la parte francese. La parte belga l'abbiamo molto frequentata; era vicina e la birra dei conventi era da sogno! Tutte le volte c'era da sottoporsi, con il nostro pulmino italiano, a delle ispezioni doganali accurate; fra l'altro la frontiera a Givet è considerata la porta di ingresso della droga in Francia. . . Tutto questo terminò improvvisamente e in modo per noi incomprensibile, da un giorno all'altro; scomparsi i doganieri dalle due parti, le barre, le garitte, etc. Ci fu poi spiegato che era entrato in funzione il trattato di Schengen!

Dimenticavo di dire che proprio all'inizio dell'esperimento, il senatore Sourdille, presidente della regione, ci portò in pulman a fare un giro per la Champagne-Ardennes, partendo dalla cittadina di Charleville-Mézière, antico feudo dei Gonzaga di Nevers, patria di Rimbaud, dove si tiene il festival della marionetta. Durante il percorso il senatore ci illustrò tutti i progetti economici della regione, le industrie attive, i lavori idraulici, gli edifici pubblici in costruzione, etc. Io rimasi sbalordito dalle conoscenze estremamente dettagliate di Sourdille e pensai che fosse invidiabile avere un politico così padrone degli argomenti riguardanti il suo collegio elettorale. Lessi poi che Sourdille, in origine un chirurgo oculista, aveva avuto una carriera di tutto rispetto, sia durante la guerra, resistente e rifugiato in Inghilterra con de Gaulle, poi a lungo medico in Africa; successivamente iniziò una carriera politica nel partito gollista. Era decisamente qualcuno che conosceva il fatto suo e che, in particolare, vedeva come di grande interesse il contributo che noi potevamo dare al progresso della regione...; di qui tutte le facilitazioni che mise in atto per il nostro esperimento. Per associazione di idee e sempre in tema di visite, mi viene in mente la prima visita ufficiale che facemmo al sito della centrale di CHOOZ (Fig.34): c'erano i responsabili della collaborazione, parecchi colleghi italiani, francesi e americani; c'era pure il senatore Sourdille e alcuni dirigenti della centrale. Fummo portati in giro dappertutto e per visitare certe parti dovvemmo cambiarci di abito e calzature ed indossare particolari tute. Questo avveniva spostandosi da uno stanzone all'altro, in zone maggiormente controllate, alle quali si poteva accedere attraverso speciali porte di sicurezza. C'era quindi una fase supposta breve, fra la svestizione e la vestizione con la tuta, nella quale si doveva rimanere in mutande e maglietta. La cosa impreveduta è che il sistema di sicurezza si bloccò e dovvemmo rimanere in mutande per un bel pezzo prima di poter proseguire. Era tutto molto ridicolo e leggermente imbarazzante. Anche imbarazzante il fatto che un sistema di sicurezza si bloccasse così...

Ritorno alla nostra vita quotidiana nel castello. Piacevole era il relax serale intorno al caminetto, aiutato spesso da una bottiglia di vino francese (Fig.35). L'interno dell'edificio era vietato ai fumatori; il divieto era associato all'apparizione di sigarette accese nel vano delle finestre; dietro una sigaretta appariva di solito Lev Mikaelyan, fumatore a catena di sigarette russe, puzzolenti. Nella Fig.36 si può vedere Lev Mikaelyan e Carlo Bemporad a colloquio. Lev, uno degli anziani del gruppo russo, era un bravissimo fisico, esperto in reattori ad un livello da noi mai raggiunto. Probabilmente aveva vissuto la prima fase di costruzione dei reattori russi con Kurchatov. Il problema era che difficilmente si riusciva a parlare con lui di un tema di fisica diverso... Era simpatico però



*Figura 34: Veduta aerea della centrale di CHOOZ. A destra, sotto la montagna c'è l'ingresso alla caverna dell'esperimento.*

ed è stato nostro ospite a Pisa quando cercavo di ottenere dai russi un grande quantitativo di acqua pesante per MACRO.



Figura 35: *Al castello relax serale. Nella foto, da sinistra Rick Steinberg, Chuck Lane, Henry Sobel.*

Non rinuncio a mostrare l'interno di CHOOZ, con l'“uovo” contenente lo scintillatore al gadolinio, coperto dai fotomoltiplicatori (Fig.37); a lato si vede il logo dell'esperimento, accettato fra varie proposte; ma gli italiani, maestri nel design, non potevano non vincere la gara. . . . All'inizio di CHOOZ commisi un'ingenuità, dovuta alla ovvia inesperienza. La centrale si era brevemente fermata per un guasto e noi avevamo bisogno di misurare i fondi dell'esperimento, cioè quello che si contava quando la centrale era spenta. Ma per fare la misura occorrevano molte ore. Telefonai quindi al controllo della centrale e parlando con uno degli ingegneri chiesi che l'interruzione fosse prolungata per alcune ore. Mi trattò a pesci in faccia! Noi potevamo usare i neutrini perché loro non sapevano che farne, ma quanto a fermare la centrale ero uno sconsiderato. Venni dopo a sapere che l'elettricità prodotta in un giorno corrispondeva a



Figura 36: *Al castello Lev Milaelyan, fumante, a colloquio con Carlo Bemporad.*

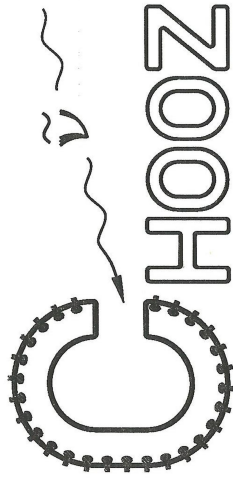
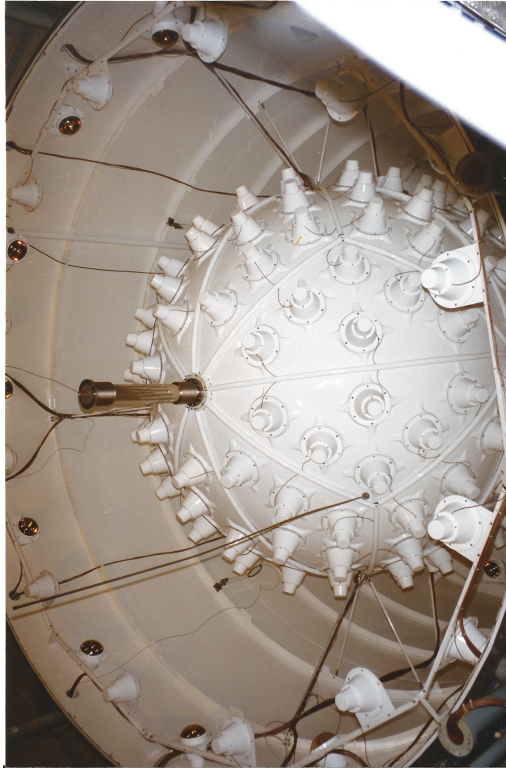


Figura 37: La parte centrale di CHOOZ. Il simbolo dell'esperimento; lo avevamo disegnato noi pisani. . .

molti milioni di euro, quindi fermare la centrale per la richiesta di un fisico ospite era fuori questione; anzi: “Come mi permettevo di disturbarlo!”. Fu una magra che ovviamente non venne ripetuta. Mi viene qui da dire che l’esperimento con i suoi successi, spesso riportati dalla stampa, nazionale e locale, deve aver contribuito a rivalutarci assai.

La zona delle Ardenne è sempre stata attraversata da guerre, da quella dei trenta anni—Rocroi è vicina a Givet, alle guerre di Luigi XIV, alla guerra franco-prussiana, alla prima ed alla seconda guerra mondiale. Tutto il territorio è pieno di cimiteri militari, qualcuno ben tenuto, altri un po’ trascurati. Ne visitai due o tre e ne rimasi impressionato; io, docente universitario, sempre a contatto con i giovani, vedevo il risultato di infinite stragi di ventenni. Quando me ne capitò l’occasione convinsi i miei colleghi, ricercatori, neolaureati, laureandi a visitare con me uno dei più grandi di questi luoghi. Mi sembrò che anch’essi fossero profondamente colpiti. Quale migliore lezione a favore di una Europa unita, senza più guerre!

Girare per le Ardenne può servire a riaffermare l’appartenenza ad una comune patria europea. Ricordo che, nelle vicinanze di Dinant, la prima cittadina belga oltre frontiera, andai a visitare con i miei colleghi un piccolo museo. Il curatore ci portò un po’ in giro; gli dissi che venivamo da Pisa e iniziammo a parlare di Dante e di Arrigo VII del Lussemburgo. Si entusiasmò e cominciò a recitare in italiano lunghi e pertinenti passi della Divina Commedia; confesso che restammo tutti piacevolmente sorpresi.

Dinant è una graziosa cittadina, attraversata dalla Mosa e da un certo traffico di chiatte mercantili. È la patria di Adolphe Sax, l’inventore del saxofono e il primo avamposto belga, provenendo da Givet, nel quale apprezzare delle birre superlative! Sulla strada da Givet a Dinant si costeggiava un lungo roccione sul quale aveva trovato la morte in un incidente alpinistico Alberto I del Belgio, appassionato scalatore. Durante la nostra permanenza ci lanciammo anche in esplorazioni più lunghe. Visitammo il villaggio di Redu con le sue molte decine di rivenditori di libri usati in varie lingue, per noi una interessante scoperta, qualcosa che si è poi diffusa anche altrove. Altra visita interessante fu quella a Boullion, il feudo ed il castello di Goffredo di Buglione, in una zona piuttosto bella. Goffredo era il nipote della Contessa Matilde di Toscana; divenne capo della prima crociata perché era un importante gentiluomo fiammingo, ma anche perché parlava molte lingue e poteva tenere a bada quel coacervo di uomini di diversa provenienza. Per finanziare la crociata decise di impegnare il suo castello, cedendolo al vescovo di Liegi. Il Vescovo se lo tenne perché Gof-



fredo, dopo aver espugnato Gerusalemme ed essere stato nominato Protettore del Santo Sepolcro—non aveva voluto essere nominato Re, vi morì nel 1100 a quaranta anni. Quando visitai Gerusalemme ero intenzionato a trovarne la tomba, ma scoprii che era stata distrutta. Comunque: io lavoravo a CHOOZ, a due passi da Bouillon, ed ero andato a presentare i risultati dell’esperimento a Gerusalemme, in aereo. . . Certo Godefroid de Bouillon aveva avuto una vita più movimentata e io lo considero un uomo in qualche modo “moderno”, il CEO di una delle prime multinazionali. . . Bruxelles cominciammo a frequen-



Figura 38: *Il castello di Godefroid de Bouillon.*

tarla quando finalmente venne attivato un collegamento aereo low-cost fra Pisa e Bruxelles-Charleroi. Poi affittavamo un’auto e proseguivamo per Givet, finendola con gli estenuanti viaggi in pulmino fra Pisa e CHOOZ; ci volevano ben due giorni, ma all’inizio dovevamo anche portare del materiale. Bruxelles è veramente una città magnifica, che ovviamente non descriverò. Nei frequenti viaggi era divenuto prassi acquistare per i parenti scatole delle famose pralines belghe e anche molti manufatti di “arazzo”: custodie per occhiali, borse e similia.

Durante l'esperimento convincemmo il presidente dell'INFN, Luciano Maiani, a venire a visitare CHOOZ; venne, stette quasi sempre attaccato al telefonino, ma infine partecipò alla presentazione ufficiale dell'esperimento che feci in francese davanti ai rappresentanti della regione, a quelli di *électricité de France* e degli enti scientifici INFN e IN2P3; un bell'impegno, credo apprezzato.

A CHOOZ ricevemmo altre visite di tipo più professionale. Prima quella della televisione francese che girò un documentario sull'esperimento, poi la visita di alcuni colleghi cinesi, quelli che ora stanno facendo l'esperimento di Daya Bay. A distanza di circa 20 anni dal nostro, il loro esperimento ha avuto un grande successo. Il governo cinese ha fatto un colossale investimento su Daya Bay. A CHOOZ i cinesi erano venuti per proporci di collaborare. Lavorare in Cina però non appariva come molto allettante per i miei colleghi; anche i francesi lasciarono cadere la proposta. La cosa ebbe un seguito: durante un congresso, mi sembra a Helsinki, venni contattato dal presidente dell'Accademia delle Scienze cinese, che mi propose di nuovo una collaborazione per Daya Bay e gli esperimenti di neutrino in Cina. Ma a quel punto avevamo cominciato a investire su MEG a Zurigo. A posteriori gli esperimenti cinesi sono risultati dei capolavori, da premio Nobel. Certo, il merito va ai cinesi; gli italiani avrebbero potuto partecipare, ma in un ruolo probabilmente di minor rilievo. Daya Bay ha e avrà una parte importante nella "storia della fisica". Il fatto che si fossero dati da fare per contattarci lo apprezzammo; era la prova che avevamo conquistato una certa notorietà e stima da parte dei colleghi, con un esperimento ben condotto e di costo ben più modesto.

#### *Gli esperimenti "Galileiani" a Pisa*

Vorrei ora ritornare agli esperimenti riguardante il campo gravitazionale, che ho precedentemente chiamato di tipo "galileiano", nei quali Pisa si è trovata coinvolta. Il Progetto VIRGO è già stato ampiamente trattato. L'esperimento GAL [90], iniziato nel 1992, ha indagato la validità dell'universalità di  $g$  studiando la caduta dei gravi con un apparato facente uso di moderni metodi ottici. Si è cercato di mettere in evidenza una eventuale dipendenza di  $g$  dalla composizione del grave in caduta. Il risultato: l'universalità di  $g$  non appare violata.

Un nuovo progetto è ora in fase di studio per la misura dell'effetto Lense-Thirring mediante l'esperimento di laboratorio GINGER [91, 92]. Si tratta di un sistema di giroscopi laser di grande area col quale si vogliono mettere in evidenza le modifiche previste dalla relatività generale per il campo gravi-

tazionale di un corpo in rotazione rispetto al campo dello stesso corpo non ruotante. Misure su prototipi sono già da tempo in corso.

### *Conclusioni*

Quando si esamina un lungo periodo storico, come si è tentato di fare in questo scritto, riveste un certo significato il riconoscere come si sia modificato nel tempo il peso dei vari tipi di sperimentazione fisica.

Durante i primi anni cinquanta gli esperimenti erano essenzialmente dedicati allo studio dei raggi cosmici; solo qualche misura di fisica nucleare ha fatto uso di acceleratori elettrostatici. Dopo l'entrata in funzione del sincrotrone nazionale a Frascati nel 1959 ci fu una concentrazione di esperimenti intorno a quella macchina, l'inizio in Italia della fisica con acceleratori; contemporaneamente iniziarono gli esperimenti di camere a bolle con esposizioni anche presso acceleratori americani. Molti degli esperimenti negli anni seguenti furono eseguiti ad energie crescenti presso il CERN, presso acceleratori europei in Francia, Germania, Inghilterra, Russia e presso macchine americane.

Uno spostamento verso tematiche di fisica non richiedenti l'uso di acceleratori avvenne a Pisa con la proposta VIRGO e con l'avvio dell'esperimento MACRO presso il Laboratorio del Gran Sasso. Il periodo successivo ha visto una continuità nella realizzazione di importanti progetti presso il CERN e presso FERMILAB, ma anche l'esecuzione di esperimenti per un rinnovato studio della radiazione cosmica, di misure presso reattori nucleari, di esperimenti spaziali.

L'evoluzione verificatasi a Pisa ha portato ad un crescente impegno in esperimenti "non ad acceleratori", che riguardano ora un 40% dei fisici della sezione, mentre un 60% dei fisici sono tuttora impegnati in misure ad acceleratori.

Non sono ovviamente in grado di predire il futuro a lungo termine . . . , né sono in grado di predire quale sarà il ruolo dello studio delle "interazioni fondamentali", dizione forse oggi più appropriata che non la fisica delle particelle elementari, rispetto ad altri campi di fisica quali la "struttura della materia", la "fisica medica", etc. L'evoluzione della fisica è determinata dalle nuove scoperte, dalle possibilità legate ai progressi tecnici, da nuovi interessi, dalla evoluzione della stessa società. Quindi anche se "Il futuro ha un cuore antico", citando Carlo Levi [93], non ci resta che attivamente operare ed ogni tanto cercare di avere una visione più ampia di quanto ci circonda.

## Ringraziamenti

Marco Grassi, giovanissimo al tempo di MACRO, ha condiviso con me ed altri alcune delle avventure descritte in questo scritto. Gli sono grato per aver presentato, in qualità di Direttore della Sez. INFN, alcune parti del presente materiale durante il Congressino “Fisici e Fisica a Pisa nel Novecento”.

# Bibliografia

- [1] C. Luperini, P. Rossi, La Fisica pisana dal 1861 al 1982, Annali di Storia delle Università italiane, Volume 14, (2010)
- [2] C. Rubbia, Marcello Conversi, Rend. Suppl. Acc. Lincei, Commemorazione tenuta nella seduta del 21 Aprile 1990.
- [3] M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, On the Disintegration of Negative Mesons, Phys.Rev.71, 209 (1947)
- [4] M. Conversi, The period which preceded and led to the 1946 discovery of the leptonic nature of the “mesotron”: Some personal recollections, Proceedings of the International Symposium on the History of Particle Physics, FERMILAB May 28-31, 1980.
- [5] G. Bernardini et al., Researches On the Magnetic Deflection of the Hard Component of Cosmic Rays, Phys.Rev.68, 109 (1945)
- [6] M. Conversi et al., Sul rapporto tra i numeri di neutroni e di protoni e su alcune proprietà della componente nucleonica a 3500 m s.l.d.m., Nuovo Cimento. X 898, (1953)
- [7] M. Conversi et al., Dispositivo atto a selezionare nella radiazione cosmica eventuali particelle di massa intorno a  $550 m_e$ , Nuovo Cimento XII 130, (1959)
- [8] M. Conversi et al., Ricerca sulla esistenza di particelle di massa intorno a  $550 m_e$  nella radiazione cosmica, Nuovo Cimento XII 148, (1959)
- [9] M. Conversi, The “Hodoscope Chamber”: a New Instrument for Nuclear Research, Nuovo Cimento II, 189 (1955)
- [10] M. Conversi et al., A New Type of Hodoscope of High Spacial Resolution, Suppl. Nuovo Cimento IV 234, (1956)

- [11] C. Bemporad et al., Investigation and Improvement of “Flash Tube Hodoscope” Properties, International Conference on Instrumentation, INFN/TC-73/3 234, (1973)
- [12] E. Amaldi et al., Report on the Expedition to the Central Mediterranean for the Study of Cosmic Radiation, CERN/16, (1952)
- [13] C. Franzinetti e G. Morpurgo, An introduction to the physics of the new particles, Suppl. Nuovo Cimento 6, 469 (1957)
- [14] Ch. Peyrou, The Role of Cosmic Rays in the Development of Particle Physics, <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00222361>, (1982)
- [15] L. Bonolis, I signori dei raggi cosmici. Dai laboratori terrestri alla fisica nello spazio, La Fisica della Scuola XLIV, 4 Supplemento, (2011)
- [16] L. Bertanza, G. Martelli, A. Zacutti, Some Measurements on Overheated Liquids, Nuovo Cimento XI, 250, (1954)
- [17] L. Bertanza, G. Martelli, A. Zacutti, Operation Conditions of a Bubble Chamber, Nuovo Cimento X, 487, (1955)
- [18] A. Bigi, V. Flaminio, Activities and publications of the Pisa “Bubble Chamber Group”; (1953-1988), unpublished (2004).
- [19] F. Eisler et al., Demonstration of Parity Nonconservation in Hyperon Decay, Phys. Rev. 108, 1353, (1957)
- [20] F. Eisler et al., Experimental Determination of the  $\Lambda^0$  and  $\Sigma^-$  Spins , Nuovo Cimento X , 222, (1958)
- [21] F. Eisler et al., Lifetime of  $\Lambda^0$ ,  $\Theta^0$  and  $\Sigma^-$  , Nuovo Cimento X, 150, (1958)
- [22] L. Bertanza et al., A Rapid Cycling Bubble Chamber, Nuclear Instruments 9, 403 (1960)
- [23] L. Bertanza et al., A Bubble Chamber Experiment to Measure the Polarization of the Recoil Proton in the Photoproduct of  $\pi^0$  Mesons from Hydrogen, Nuovo Cimento XIX, 853 (1961)
- [24] A. Bettini et al., Annihilation Into Pions of the antiproton-neutron System from Antiprotons at Rest in Deuterium, Nuovo Cimento X, 642 (1967)

- [25] L. Bertanza et al., Study of the Reactions  $K_L^0 p \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^0$  and  $\Sigma^0 \pi^+$  in the c.m. Energy Range 1490-1700 MeV, Nucl. Phys. B110, 1 (1976)
- [26] D. Allasia et al., Measurement of the ratios of antineutrino-n to antineutrino-p charged current cross sections at high energies, Phys. Lett. 107B, 148 (1981)
- [27] L. Bertanza et al., Measurement of the neutral current coupling constants in neutrino and antineutrino interactions with deuterium, Phys. Lett. 133B, 129 (1983)
- [28] C. Angelini et al., New experimental limits on  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  oscillations, Phys.Lett. 179B, 307 (1986)
- [29] P.L. Braccini et al., Annihilation in Flight of 800 MeV Positrons, Nuovo Cimento XXIX, 1215, (1963)
- [30] G. Morpurgo, Theory of the Coulomb Photoproduction of  $\pi^0$  at High Energy on the Determination of the  $\pi^0$  Lifetime, Nuovo Cimento XXXI, 569, (1964)
- [31] G. Bellettini et al., Primakoff Effect and  $\pi^0$  Lifetime, Nuovo Cimento XL, 1139, (1965)
- [32] G. Bellettini et al., A Precision Detector for High-Energy Neutral Pions, Nuovo Cimento XLIV A, 946, (1966)
- [33] G. Bellettini et al., Single- $\pi^0$  Photoproduction from Hydrogen Around the "Second Resonance", Nuovo Cimento XLIV A, 239, (1966)
- [34] I. Mannelli et al.,  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  Charge-Exchange Scattering at High Energy, Phys. Rev.L. 14, 408 (1965)
- [35] P. Bonamy et al.,  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  polarization at 5.9 and 11.2 GeV/c, Phys.Lett. 23, 501 (1966)
- [36] P. Bonamy et al., Measurement of the polarization parameter in the reaction  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  and  $\pi^- + p \rightarrow \eta + n$  at 5.9 and 11.2 GeV/c, Nucl.Phys. B16, 335 (1970)
- [37] W.D. Apel et al., Results on the production cross-sections  $\pi^- + p \rightarrow +$  neutrals and  $\pi^- + p \rightarrow \chi^0 + n$  at 3.8, 6, 8 and 12 GeV/c Phys. Lett. 46B, 459 (1973)

- [38] Serpukhov-CERN Collaboration, Observation of a Spin 4 Neutral Meson with 2-GeV Mass Decaying in  $\pi^0 \pi^0$ , Phys.Lett. 57B, 398 (1975)
- [39] W.D. Apel et al., Study of the reaction  $\pi^- + p \rightarrow \omega + n$  at 3, 8, 6 and 8 GeV/c, Phys. Lett. 55B, 111 (1975)
- [40] M. Balla et al., A measurement of pion electroproduction cross-section near threshold, Lett. Nuovo Cimento 1, 247, (1969)
- [41] D.R. Botterill et al., The total cross-section for  $\pi^+$  electroproduction on hydrogen near threshold, Phys.Lett. 45 B, 405, (1973)
- [42] A. Del Guerra et al., The pion form-factor at a timelike momentum transfer of approximately 1/fermi-squared from  $\pi^+$  electroproduction at threshold, Phys.Lett. 50 B, 487, (1974)
- [43] C. Bemporad et al., Experimental Determination of the eta lifetime by the Measurement of the Primakoff Effect, Phys.Lett. 25B, 380 (1967)
- [44] C. Bacci et al., Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of the New 3.1-GeV Particle Produced in  $e^+ e^-$  Annihilation, Phys.Rev.Lett. B33, 1408 (1974)
- [45] G. Barbiellini et al., Search for J/Psi Like Resonance Below 3-GeV in  $e^+e^-$  Annihilation, Phys.Lett. 64B, 359 (1976)
- [46] M. Borghini et al., Measurement of the polarization parameter in  $\pi^+p$  elastic scattering at 10, 14 and 17.5 GeV/c and for  $t > 2$  GeV/c-squared, Phys.Lett.36B., 493 (1971)
- [47] S. Amendolia et al., Measurement of the total proton proton cross-section at the ISR, Phys.Lett.44B., 119 (1973)
- [48] The MACRO Coll., A Large Area Detector Dedicated to Monopole Search, Astrophysics, and Cosmic Ray Physics at the Gran Sasso Laboratory, Servizio Documentazione dei LNF, (1984)
- [49] The MACRO Collaboration, Final results of magnetic monopole searches with the MACRO experiment, Eur.Phys.J. C25, 511, (2002)
- [50] The MACRO Collaboration, Search for stellar gravitational collapses with the MACRO detector, Eur.Phys.J. C37, 265, (2004)



- [51] Pisa MACRO Group, PHRASE, MACRO Internal note 17/89, (August, 1989)
- [52] A. Baldini et al., The use of the reaction  ${}^9\text{Be}(\alpha, \gamma n){}^{12}\text{C}$  to determine the energy scale and the efficiency at low energies of stellar collapse neutrino detectors, *Nuclear Instruments A305*, 475, (1991)
- [53] Fabrizio Cei, Search for Neutrinos from Stellar Gravitational Collapse with the MACRO Experiment at Gran Sasso, *Tesi di perfezionamento, Scuola Normale Superiore*, (1996)
- [54] The MACRO Collaboration, Measurements of the atmospheric muon neutrino oscillations, global analysis of the data collected with the MACRO detector, *Eur.Phys.J. C36*, 323, (2004)
- [55] The MACRO Collaboration, High energy cosmic ray physics with underground muons in MACRO I and II, *Phys.Rev. D56*, 1407 and 1418, (1997)
- [56] The MACRO Collaboration, Search for cosmic ray sources using muons detected by the MACRO experiment, *Astropar.Phys. 18*, 615, (2003)
- [57] The MACRO Collaboration, Seasonal variations in the underground muon intensity as seen by MACRO, *Astropar.Phys. 7*, 109, (1997)
- [58] The MACRO Collaboration, Limits on dark matter WIMPs using upward-going muons in the MACRO detector, *Phys. Rev. D60*, 082002, (1999)
- [59] The MACRO Collaboration, Observation of the shadowing of cosmic rays by the moon using a deep underground detector, *Phys. Rev. D59*, 012003, (1999)
- [60] A. Giazotto, Interferometric detection of gravitational waves, *Physics Reports 182*, 365, (1989)
- [61] R. Del Fabbro et al., Three-dimensional seismic super-attenuator for low frequency gravitational wave detection, *Physics Letters A124*, 253, (1987)
- [62] B.P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett. 116*, 061102, (2016)

- [63] W.B. Atwood et al., The Large Area Telescope on the FERMI Gamma-Ray Space Telescope Mission, *Astrophysical Journal* 697, 1071, (2009)
- [64] F. Acero et al., FERMI Third Source Catalog, *Astrophysical Journal Suppl.* 218, 23, (2015)
- [65] M. Ackermann et al., The first FERMI Large Area Telescope Gamma-Ray Burst Catalog, *Astrophysical Journal Suppl.* 209, 11, (2013)
- [66] A.A. Abdo et al., The second FERMI Large Area Telescope Catalog of gamma-ray pulsars, *Astrophysical Journal Suppl.* 208, 17, (2013)
- [67] M. Ackermann et al., The spectrum and morphology of the FERMI Bubbles, *Astrophysical Journal* 793, 64, (2014)
- [68] P. Soffitta et al., Astronomical X-ray polarimetry based on photoelectric effect with microgap detectors, *Nuclear Instruments A*469, 164, (2001)
- [69] M.C. Weisskopf et al., The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE), *Proceedings of SPIE* 9905, 990517-1, (2016)
- [70] D. Aleksandreas et al., The CLUE experiment operating with 4 telescopes in La Palma, *Nuclear Instruments A*409, 488, (1998)
- [71] J. Aleksic et al., The major upgrade of the MAGIC telescopes *Astroparticle Physics* 72, 61, (2016)
- [72] J. Albert et al., Observations of Mkn 421 with the MAGIC Telescope, *Astrophysics J.* 663, 125, (2007)
- [73] J. Aleksic et al., Measurement of the Crab Nebula spectrum over three decades in energy with the MAGIC telescopes, *Journal of High Energy Astrophysics* 5-6, 30, (2005)
- [74] E. Iacopini e E. Zavattini, Experimental method to detect the vacuum birefringence induced by a magnetic field, *Phys. Letters B* 85, 151, (1979)
- [75] F. Della Valle et al., The PVLAS experiment: measuring vacuum magnetic birefringence and dichroism with a birefringent Fabry-Perot, *Eur.Phys.J. C* 76:2 (2016)
- [76] R.P. Mignani et al., Evidence for vacuum birefringence from the first optical polarimetry measurement of the isolated neutron star RXJ1856.5-3754, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 465, 492, (2017)

- [77] The ATLAS Coll., Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC, *Nature Physics* 13, 852, (2017)
- [78] M. Aguilar et al., Precision Measurement of the  $(e^+ + e^-)$  Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, *Phys. Rev. Letters* 113, 30221102, (2014)
- [79] M. Aguilar et al., Precision Measurement of the Proton Flux in Primary Cosmic Rays from Rigidity 1 GV to 1.8 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, *Phys. Rev. Letters* 114, 171103, (2015)
- [80] M. Aguilar et al., Precision Measurement of the Helium Flux in Primary Cosmic Rays of Rigidities 1.9 GV to 3 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, *Phys. Rev. Letters* 115, 211101, (2015)
- [81] J.A. Aguilar et al., ANTARES: the first undersea neutrino telescope, *Nuclear Instruments A656*, 11, (2011)
- [82] J.A. Aguilar et al., Measurement of the atmospheric muon flux with a 4 GeV threshold in the ANTARES neutrino telescope, *Astroparticle Physics* 33, 86, (2010)
- [83] S. Adrian-Martinez et al., Measurement of the atmospheric  $\nu_\mu$  energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope, *Astroparticle Physics* 35, 634, (2012)
- [84] L. di Lella, Congressino “Fisici e Fisici a Pisa nel Novecento”, (novembre 2017)
- [85] a cura di: C. Bemporad e L. Bonolis, *Storie di Uomini e Quarks*, Ed. Società Italiana di Fisica , (2012)
- [86] M. Apollonio et al., Search for neutrino oscillations on a long baseline at the CHOOZ nuclear power station, *European Physics Journal C27*, 331, (2003)
- [87] M. Apollonio et al., Determination of neutrino incoming direction in the CHOOZ experiment and supernova explosion location by scintillator detectors, *Physical Review D61*, 012001, (2000)

- [88] D. Nicolò, Search for neutrino oscillations in a long baseline experiment at the CHOOZ nuclear reactors, Tesi di Perfezionamento, Scuola Normale Superiore, (1999)
- [89] A. Baldini et al., The neural-network-based second-level trigger developed for the Chooz experiment, Nuclear Instruments A389, 141, (1997)
- [90] S. Carusotto et al.,  $g$ -universality test with a Galileo's type experiment, Nuovo Cimento 111B, 1259, (1996)
- [91] A. Di Virgilio et al., A Laser gyroscope system to detect the Gravitomagnetic effect on Earth, International Journal of Modern Physics D19, 2331, (2010)
- [92] N. Beverini et al., Measuring general relativity effects in a terrestrial lab by means of laser gyroscopes, Laser Physics 24, 074005, (2014)
- [93] C. Levi, Il future ha un cuore antico, Edizioni Einaudi,(1956)