

LA NASCITA E GLI SVILUPPI DELLA RICERCA SUI PLASMI E SULLA FUSIONE NUCLEARE IN ITALIA *

di Luisa Bonolis e Franca Magistrelli

In questo articolo viene brevemente riportata la storia della nascita e dello sviluppo della ricerca sui plasmi e sulla fusione nucleare in Italia. Si è curata in particolare la ricostruzione della fondazione del Laboratorio Gas Ionizzati; ricostruzione basata esclusivamente su testimonianze dirette nonché su fonti documentarie di archivio. Per quanto riguarda lo sviluppo successivo, si è prevalentemente presa in considerazione la ricerca svolta impiegando dispositivi basati sul confinamento magnetico del plasma, facendo notare l'importanza della linea dei tokamak compatti ad alto campo magnetico; linea che potrebbe condurre alla realizzazione, in laboratorio, di un plasma in condizioni di ignizione. Questo lavoro, pur nella sua brevità, fornisce nelle sue linee essenziali un resoconto che, tra l'altro, serve bene a compensare le diverse lacune e distorsioni dalle quali è spesso affetta l'informazione corrente in proposito.

1. INTRODUZIONE

Lo studio della fusione nucleare è di grande importanza sia sul piano puramente scientifico che su quello applicativo.

Per quanto attiene agli aspetti puramente scientifici del problema, basti pensare all'astrofisica e al fatto che a reazioni di fusione è dovuta l'energia irradiata dalle stelle, in particolare dal nostro Sole.

Per quanto invece riguarda gli aspetti applicativi, l'aver sulla Terra dei dispositivi nei quali si producono reazioni di fusione permette, oltre allo studio dei fenomeni fisici fondamentali, lo svolgimento di un programma di ricerca che possa in definitiva condurre alla realizzazione di un reattore a fusione, e quindi alla utilizzazione di questo tipo di energia.

Nella storia della fisica la fusione nucleare fa il suo ingresso negli anni '20. Nel 1920 l'astronomo inglese Arthur Eddington avanzò l'ipotesi che l'energia emanata dal Sole fosse dovuta a reazioni di fusione. Successivamente, nel 1929, R. d'E. Atkinson e F.G. Houtermans pubblicarono un lavoro scientifico in proposito [1]. La loro teoria fu perfezionata da C.F. von Weizsäcker [2], da G. Gamow e E. Teller [3] e da H.A. Bethe [4]. Negli anni '30 gli scienziati presero quindi in considerazione la possibilità di ottenere anche sulla Terra energia da fusione nucleare. Tuttavia, le reazioni di fusione che hanno luogo nelle stel-

le hanno tempi caratteristici dell'ordine di miliardi di anni e la potenza liberata per unità di massa è molto piccola. Se la potenza totale da esse liberata è enorme ciò è dovuto al fatto che anche la loro massa è enorme.

Per produrre sulla Terra energia da fusione devono quindi essere prese in considerazione altre reazioni con tempi caratteristici molto più brevi. E poiché comunque bisogna poter portare i nuclei interagenti ad energie elevatissime, la cosa sembrò impossibile. Sono però stati i progressi successivamente ottenuti nello sviluppo di energia da fissione a riportare l'interesse sulla possibilità di ottenere energia da processi di fusione.

Infatti, come è ben noto, nel 1945 venne realizzata la prima esplosione nucleare (bomba A); e successivamente, nel 1952, negli USA sotto la guida di Teller, venne realizzata la prima esplosione termonucleare (bomba H). In essa veniva utilizzata l'energia prodotta da un'esplosione nucleare per innescare reazioni di fusione. Nel 1953 anche i russi realizzarono un'esplosione termonucleare.

Le prime ricerche sulla fusione furono quindi effettuate a scopo militare ed erano di conseguenza coperte da segreto. E in ogni caso si trattava di realizzare la produzione di energia da fusione sotto forma esplosiva, cioè incontrollata. Ciò però fece sì che avessero inizio anche ricerche riguardanti la fusione termonucleare controllata.

Negli anni '50, in un periodo in cui la fusione termonucleare iniziava ad essere percepita come

* Questo stesso testo è stato pubblicato dal Massachusetts Institute of Technology come rapporto MIT(LNS) Report HEP 11/01".

una sorgente potenziale di energia pulita, il mondo era ancora diviso in due sistemi rivali. A causa delle armi nucleari recentemente sviluppate, le industrie militari lavoravano in condizioni di estrema segretezza, e qualsiasi ricerca nucleare era automaticamente ritenuta di interesse militare. Tuttavia, da ambo le parti gli scienziati si resero conto che la fusione nucleare a confinamento magnetico, unico sistema di confinamento esistente all'epoca, non presentava alcuna potenziale utilizzazione a scopi militari. Il confinamento inerziale, effettivamente utilizzabile per scopi militari, fece la sua comparsa sulla scena solamente negli anni '60.

Nel 1956, una delegazione sovietica guidata da Nikita Krushev (primo segretario del partito comunista sovietico), Nikolai A. Bulganin (primo ministro dell'URSS) e dallo scienziato Igor V. Kurchatov (il leader della ricerca atomica sovietica) visitò la Gran Bretagna nel tentativo di attenuare la guerra fredda. Il 25 aprile Kurchatov fece un discorso sorprendentemente aperto e approfondito sui problemi della fusione termoneucleare controllata che contribuì alla declassificazione della ricerca in questo settore da parte del Regno Unito e degli Stati Uniti. Nella seconda conferenza sugli usi pacifici dell'energia atomica tenuta a Ginevra nel 1958 fu deciso di togliere ogni vincolo di segretezza sulla fusione termoneucleare controllata. Da allora la ricerca fusionistica ha avuto un ruolo centrale nell'ambito del problema energetico.

Da quanto detto risulta quindi evidente che anche la storia della ricerca fusionistica ha una notevole importanza. Con questo articolo si vuole appunto fornire al lettore una ricostruzione della nascita e dello sviluppo della ricerca sui plasmi e sulla fusione in Italia. Tale ricostruzione appare opportuna anche perché il racconto di queste vicende è spesso affetto da omissioni e distorsioni; sia per ciò che riguarda gli inizi (vedi ad esempio le bibliografie [5] e [6]), sia per quanto concerne la storia più recente o attuale (ricerca con grandi tokamak e con tokamak compatti ad alto campo magnetico, storia del tokamak FT di Frascati, storia di Ignitor).

I motivi che hanno spinto le due autrici a collaborare per ricostruire questa storia sono di natura diversa, ma convergono in una comune finalità.

Luisa Bonolis si occupa da molti anni di storia della fisica italiana del novecento, con particolare attenzione agli sviluppi delle ricerche che hanno avuto luogo tra Roma e Frascati nella seconda

metà del secolo scorso [7]. Consultando i documenti esistenti negli archivi del Dipartimento di Fisica dell'Università La Sapienza di Roma, essa ha messo insieme una vasta raccolta di materiale riguardante in particolare la nascita delle ricerche sulla fisica dei plasmi e sulla fusione in Italia, e quindi la fondazione del Laboratorio Gas Ionizzati. La disponibilità di questa documentazione pone in parte rimedio alla irreperibilità di buona parte dei rapporti di attività che un tempo esistevano tanto nello stesso Laboratorio che nella sede centrale del CNEN. I documenti ritenuti più significativi a questo scopo sono elencati in ordine cronologico nell'Appendice che chiude questo lavoro, unitamente a documenti diversamente reperiti. Alcuni di essi verranno citati nel testo con la sigla corrispondente.

Franca Magistrelli è stata il primo collaboratore del professor Bruno Brunelli. Dapprima, negli anni 1956-1957, nell'avvio della ricerca sui plasmi e successivamente, nel 1958, nella fondazione del Laboratorio Gas Ionizzati. Ai fini storici, sono significativi a questo riguardo i suoi primi due contratti di lavoro con il CNRN. Attualmente essa è l'unica persona ancora in vita in grado di fornire una testimonianza diretta su questi eventi dei quali è stata tra i protagonisti.

L'unione tra queste due diverse competenze e storie professionali ha reso possibile la stesura di questo articolo che, basandosi esclusivamente su testimonianze dirette e fonti documentarie d'archivio, fornisce nelle sue linee essenziali la storia dello sviluppo della ricerca sui plasmi e sulla fusione nucleare in Italia.

Poiché questo articolo si rivolge prevalentemente ad un pubblico di non addetti ai lavori, si ritiene opportuno premettere, nel prossimo paragrafo, alcuni cenni sulla fusione termoneucleare controllata. Lo si farà nel modo più semplice possibile, senza troppo entrare nei dettagli della fisica che è alla base del funzionamento dei vari dispositivi.

2. IL PROBLEMA DELLA FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA

È noto che se si fornisce sufficiente energia a dei nuclei di elementi leggeri essi possono "fondersi" e che in questo processo si libera energia che può quindi venire utilizzata. Le reazioni di

fusione che realisticamente vengono considerate ai fini pratici coinvolgono gli isotopi dell'idrogeno (il deuterio e il trizio) e l'elio-3. Fra queste reazioni quella che ha più possibilità di essere innescata a temperature raggiungibili in un ipotetico reattore a fusione è la reazione deuterio-trizio che genera neutroni con un'energia di circa 14 MeV e particelle α , con un'energia di circa 3,5 MeV. Fissiamo quindi per il momento la nostra attenzione su questa reazione.

Per risolvere il problema della fusione termoneucleare controllata si può quindi pensare di realizzare in un primo tempo un plasma¹ di deuterio-trizio avente una densità di particelle n elevata ($\geq 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) e una temperatura T sufficientemente alta (100-1000 milioni di gradi centigradi) per dare ai nuclei di deuterio e trizio l'energia necessaria per vincere la repulsione elettrostatica, e di confinarlo per un tempo τ sufficientemente lungo per dare modo alle reazioni di fusione di verificarsi. In un reattore i neutroni generati nelle reazioni di deuterio e trizio sfuggendo dal plasma verrebbero catturati in un mantello posto attorno al plasma stesso, nel quale essi rigenererebbero il trizio per reazione con il litio contenuto nel mantello.

Questa rigenerazione si rende necessaria perché il trizio, essendo radioattivo con un tempo di dimezzamento piuttosto breve (~ 12 anni), non esiste in natura in quantità significative. Il calore prodotto dai neutroni verrebbe prelevato e usato per produrre elettricità con un convenzionale ciclo termico. Le particelle α , elettricamente cariche, possono invece essere confinate all'interno del plasma e quindi cedergli la loro energia, riscaldandolo ulteriormente. Se questa energia viene prodotta in quantità sufficiente, cioè se il numero delle reazioni è abbastanza elevato, è possibile superare le perdite di energia che il plasma subisce verso l'esterno. La situazione in cui la potenza di fusione prodotta uguaglia quella che si deve iniettare per riscaldare e confinare il plasma viene detta pareggio (*breakeven*). Naturalmente questa condizione va superata perché ciò che conta ai fini pratici è la produzione netta di energia. La situazione da raggiungere in definitiva è quella in cui la potenza fornita al plasma dalle particelle α (che è circa 1/5 della potenza

totale di reazione) è sufficiente per compensare le perdite di energia. In queste condizioni di ignizione il plasma è in grado di auto sostenersi. Per raggiungere questa situazione è necessario, come è logico e come sopra accennato, che la temperatura, la densità e il tempo di confinamento siano sufficientemente grandi, o lo sia una qualche loro combinazione. Esiste a questo riguardo il ben noto criterio di Lawson che, in base a considerazioni di bilancio energetico e tenendo conto delle perdite, stabilisce per il prodotto $n\tau$ un valore non inferiore a circa $10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$, ferma restando l'esigenza di una temperatura elevata.

Dimostrare la fattibilità scientifica della fusione termoneucleare controllata significa riuscire a portare il plasma in condizioni di ignizione in una esperienza di laboratorio. È importante chiarire il significato di questa terminologia, valida per ogni nuova idea tecnologica, perché molto spesso essa viene usata in modo improprio. E anche su questo si tornerà più avanti. Solo dopo avere raggiunto questo fondamentale traguardo si potrebbe pensare al reattore prototipo e successivamente al reattore commerciale.

Da anni nelle macchine a fusione esistenti nel mondo e operanti con solo deuterio si producono reazioni di fusione alle quali è ovviamente associata una produzione di energia. Però la fattibilità scientifica della fusione termoneucleare controllata resta ancora da dimostrare, nel senso che l'ignizione, come pure il pareggio, non è stata a tutt'oggi realizzata.

Il confinamento di un plasma, che ha luogo spontaneamente nelle stelle a causa della rilevante forza di gravità connessa con le enormi masse in giuoco, può ottenersi in laboratorio con due diversi sistemi:

a) *confinamento inerziale* – In questo sistema si comprime a densità elevatissima (maggiore di circa mille volte la densità di un liquido) una pallina di deuterio-trizio per mezzo di fasci laser o di particelle cariche. I tempi di compressione sono brevissimi, per modo che il combustibile, vincolato dalla sua stessa inerzia, brucia prima di potersi disperdere. Il criterio di Lawson viene soddisfatto con densità di plasma maggiori di 10^{24} cm^{-3} e con tempi di confinamento minori di 10^{-10} s ;

¹ *Plasma* (detto anche "quarto stato della materia") è in pratica un gas completamente ionizzato, cioè una miscela globalmente neutra di ioni ed elettroni.

b) *confinamento magnetico* - Qui il plasma, essendo una miscela di particelle cariche, viene tenuto lontano dalle pareti del contenitore da opportuni campi magnetici. In questo caso si può avere, tipicamente, un tempo di confinamento di 1 s con una densità dell'ordine di 10^{14} cm^{-3} .

Fra i vari dispositivi che sfruttano il confinamento magnetico del plasma, quello che finora è sembrato il più promettente e che è stato maggiormente studiato è il tokamak del quale diamo

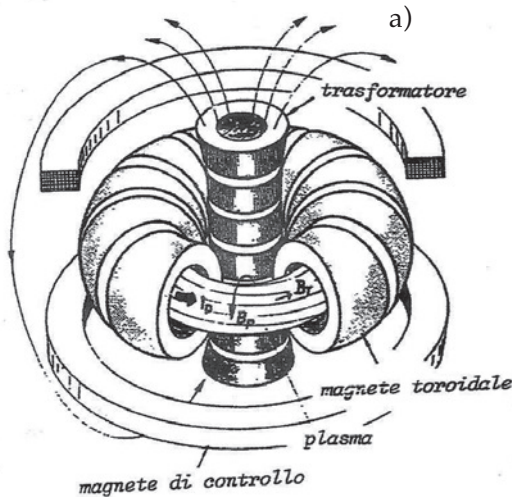


Fig. 1

Il trasformatore centrale induce la corrente I_p che riscalda il plasma e genera il campo magnetico B_p , che naturalmente è diverso da zero solo per il tempo limitato in cui varia la corrente nel primario del trasformatore. Il magnete toroidale produce poi il campo magnetico toroidale B_T . Le linee di forza del campo magnetico risultante hanno una configurazione elicoidale che è richiesta per ragioni di equilibrio e di stabilità. In Fig. 1 sono anche mostrate le bobine che producono un campo magnetico di controllo che serve per centrare il plasma nella camera di scarica.

Per ottenere le condizioni di ignizione di un plasma in un dispositivo tokamak si può pensare di seguire due diverse linee; linee che corrispondono a due diversi modi per ottenere valori elevati del prodotto $n\tau$.

Si può infatti cercare di realizzare tempi di confinamento lunghi con densità basse. Ciò richiede macchine di grandi dimensioni, intendendo per grandi dimensioni quelle di un tokamak avente un raggio maggiore di circa 2 metri,

quindi un brevissimo cenno. Nella Fig. 1 ne è data una rappresentazione schematica.

Il plasma contenuto in una opportuna camera da vuoto ha una configurazione toroidale che può essere a sezione circolare con raggio maggiore R_0 e raggio minore a (vedi Fig. 2a). Per migliorare alcune caratteristiche del tokamak però, in molti casi si fa in modo che la colonna di plasma abbia una sezione elongata con raggi minori a e b (vedi Fig. 2b).

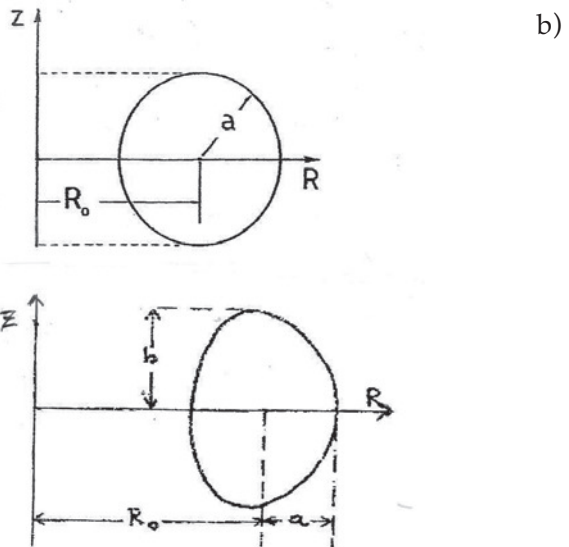


Fig. 2

e conduce di conseguenza a tempi di costruzione e a costi molto elevati. Inoltre le incognite a cui si va incontro in termini di comportamento fisico del plasma e di probabilità di ignizione sono rilevanti.

La linea alternativa è quella di realizzare tempi di confinamento più brevi con densità elevate. Le minori dimensioni del dispositivo rendono qui possibile l'applicazione di campi magnetici più alti; si possono quindi sostenere maggiori densità della corrente che circola nel plasma, da cui la possibilità di ottenere più elevate densità di plasma. Vengono così prodotti "plasma termonucleari", nei quali il riscaldamento è dovuto essenzialmente alle particelle α . Nelle macchine più grandi ed a più bassa densità, è necessario l'impiego di fonti esterne di riscaldamento (fasci di neutri, radiofrequenze, etc.); e questo fa sì che il plasma prodotto non sia effettivamente un plasma termonucleare. Si può fra l'altro vedere che valori elevati del campo magnetico e dimensioni compatte della macchi-

na rendono possibile spingere la corrente di plasma a valori piuttosto elevati senza incorrere in instabilità.

È poi di grandissima importanza il fatto, verificato sperimentalmente, che in macchine ad elevata densità il grado di impurezza del plasma (cioè la percentuale di elementi pesanti in esso presenti) è praticamente trascurabile. Poiché prevalentemente agli elementi pesanti sono collegate le perdite di energia per irraggiamento, una presenza apprezzabile di questi elementi può, da sola, pregiudicare il raggiungimento delle condizioni di ignizione.

Naturalmente la necessità di operare con campi magnetici e con correnti elevate comporta problemi tecnologici che divengono importanti qualora si abbia a che fare con un reattore anziché con una macchina sperimentale. D'altra parte è logico assumere come obiettivo prioritario la dimostrazione della fattibilità scientifica della fusione nonché lo studio del comportamento, attualmente incognito, di un plasma ignito, rimandando ad una fase successiva la trattazione dei problemi reattoristici. E in questa strategia è evidente il vantaggio delle macchine compatte.

In base a quanto detto ci si sarebbe dovuti aspettare che la ricerca con i tokamak si fosse orientata prevalentemente sui dispositivi compatti; e invece quello che è avvenuto, come si vedrà, è esattamente il contrario.

Prima di chiudere questo paragrafo è opportuno accennare brevemente al problema della scelta del combustibile da impiegare. Come si è detto, è ragionevole pensare di utilizzare la reazione DT – che è più facile da innescare rispetto ad altre reazioni coinvolgenti elementi leggeri (deuterio-elio3, protone-litio6, protone-boro11, ecc.) – solo per una fase sperimentale in una macchina progettata per l'ignizione. Ciò perché i neutroni da 14 MeV prodotti nelle reazioni DT, essendo neutri, sfuggono dal plasma e arrivano sulle strutture della macchina attivandole e dando così luogo a problemi di sicurezza ed ambientali. Per cui non si può parlare di energia pulita (senza con questo voler fare confronti con l'energia da fissione). E quanti più neutroni si producono, e quanto più essi sono energetici, tanto meno pulita è l'energia che si produce.

Si può pensare però di raggiungere temperature più grandi, cioè sufficienti a portare all'ignizione un plasma di deuterio-elio3 (plasma

D³He). La reazione D³He, oltre a non coinvolgere il trizio, non origina neutroni (se non quelli, in numero minore, generati in reazioni collaterali e secondarie) ma solo particelle α e protoni. Non ci sono quindi problemi connessi con l'attivazione dei materiali strutturali. Inoltre le particelle α e i protoni, essendo particelle cariche, potrebbero essere utilizzati direttamente per ricavare energia elettrica (conversione diretta), senza passare per un ciclo termico con la conseguente perdita di rendimento della macchina.

In questo tipo di reattore non occorrerebbe più quindi circondare il plasma con un mantello e si otterrebbe così una riduzione notevole delle difficoltà tecnologiche. Inoltre, poiché il processo di conversione diretta richiede di convogliare le particelle cariche verso un qualche dispositivo apposito, il carico termico sulle pareti risulterebbe alleggerito.

3. STORIA DELLA RICERCA FUSIONISTICA IN ITALIA

La ricerca sulla fusione nucleare in Italia è stata ed è condotta con il contributo scientifico, tecnico ed economico di università, industrie ed enti nazionali di ricerca (ENEA, CNR, INFN). Attualmente esiste una Associazione Italiana per la Fusione, rappresentata dall'ENEA, comprendente il Consorzio RFX di Padova, l'Istituto di Fisica del Plasma del CNR di Milano, il Consorzio Universitario CREATE del Politecnico di Torino, e le Università di Catania e di Roma Tor Vergata.

L'importanza delle ricerche sul plasma era già stata riconosciuta dal consiglio di presidenza del CNRN nella primavera del 1956 e pertanto era stata inclusa una previsione di spesa di 5 miliardi nel "piano dei 100 miliardi" presentato alle autorità del governo al principio dell'estate dello stesso anno (A16).

Per inciso, il 24 agosto 1956 il professor Felice Ippolito fu nominato Segretario Generale del CNRN.

Il 5 febbraio 1957 fu varata la legge n. 19 che stanziava nuovi fondi (3 miliardi e 300 milioni) impegnando il governo (art. 2) al varo di una legge che regolasse i numerosi problemi del settore nucleare.

Nel maggio del 1957 il professor Enrico Persico lanciò l'idea di partire in Italia con un programma di ricerca sui plasmi. Da tempo egli

sentiva questa necessità, tanto è vero che ne aveva parlato con Enrico Fermi durante il suo ultimo viaggio in Italia nel 1954, immediatamente prima della sua precoce scomparsa. Egli intendeva con questo iniziare a riempire il vuoto culturale esistente in Italia a questo riguardo. Per motivi anche storici, per anni e anni la ricerca italiana era stata fondamentale orientata verso la fisica delle particelle elementari e delle alte energie, penalizzando così altri importanti settori della fisica che invece venivano investigati in altre parti del mondo. A questo riguardo Persico era in sintonia con Edoardo Amaldi, che fin dagli anni '50 si adoperò per allargare l'orizzonte culturale della fisica, favorendo lo sviluppo e l'apertura di nuove linee di ricerca.

In questo articolo si vuole raccontare come ha avuto inizio e come si è sviluppata fino ad ora in Italia la ricerca sui plasmi e sulla fusione nucleare. Lo si farà suddividendo il racconto secondo le diverse aree geografiche.

3.1. ROMA - FRASCATI

3.1.1. Gli inizi - La fisica del Plasma

Nel 1956, all'Istituto di Fisica dell'Università di Roma, la cattedra di Fisica Superiore era tenuta da Persico. Annesso a questa cattedra esisteva un laboratorio dove operavano due ricercatori: Bruno Brunelli e Franca Magistrelli. In particolare era stata realizzata una sorgente di ioni a radiofrequenza nel contesto degli studi di ottica elettronica, materia alla quale Persico in quel periodo era interessato. Su questa sorgente svolgeva la sua tesi di laurea lo studente Alberto De Angelis.

Il plasma contenuto nella sorgente era quindi allora solo un mezzo per poter estrarne un fascetto di ioni con convenienti caratteristiche. E tuttavia c'era un plasma in laboratorio. Fu un po' questo lo spunto per decidere di partire con un programma di ricerca sui plasmi.

A Brunelli, Magistrelli e De Angelis si erano ben presto aggiunti i fisici Sergio Segre, che aveva svolto la sua tesi di laurea in astrofisica, e Ugo Ascoli che dal 1° novembre del 1957 operava a mezzo tempo come distaccato dalle Ferrovie dello Stato. Si trattava quindi di far nascere attorno a tale gruppetto un gruppo più consistente costituito anche da personale tecnico e

amministrativo. Di conseguenza bisognava formulare un programma con relativo preventivo di spesa da sottoporre alla approvazione del CNRN per ottenere il necessario finanziamento. A questo riguardo è significativo il documento A8 dell'Appendice che dà la situazione dei lavori all'1 ottobre 1957. In questo documento si legge che Ippolito, in attesa della legge stralcio, decise di anticipare la somma di 10 milioni di lire per tre mesi, allo scopo di tenere in vita le attività del gruppetto. A Magistrelli, così come al tecnico di laboratorio che lavorava nel gruppo, venne prudenzialmente fatto un contratto di sei mesi a partire dal 15 ottobre 1957 (A10). In questo contratto si legge: *"La S.V. è assunta a contratto presso il Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari in qualità di fisico, alle dipendenze del prof. Bruno Brunelli (...)"*.

A questo punto era naturalmente necessario dare inizio ad un'opera di reperimento di validi ricercatori. Inoltre, poiché in Italia non esisteva all'epoca alcuna competenza sulla fisica del plasma e della fusione, era indispensabile riuscire ad utilizzare le competenze di scienziati stranieri. E per fare ciò bisognava per prima cosa effettuare visite a laboratori esteri significativi operanti nel settore; cosa che fu efficacemente fatta da Brunelli (A1).

Bisognava poi invitare esperti stranieri a tenere presso l'Istituto di Fisica seminari e corsi sulla fisica del plasma.

Infine era essenziale ottenere la collaborazione di brillanti ricercatori che potessero operare presso il laboratorio per periodi più o meno lunghi.

Tutto ciò risulta chiaramente dai documenti in Appendice che dimostrano anche come siano state importanti in proposito le azioni svolte da Amaldi e, più ancora, da Persico.

Corsi sulla fisica del plasma furono tenuti dai professori David Bohm dell'Università di Bristol, Otto Klemperer dell'Imperial College di Londra e Jirka G. Linhart del CERN di Ginevra. Quest'ultimo, come si vedrà fra breve, entrò a far parte definitivamente del Laboratorio Gas Ionizzati.

Nella fase di formazione del laboratorio, altri collaboratori stranieri sono stati il prof. Franco Rasetti, che a quell'epoca si trovava presso la Johns Hopkins University di Baltimora, il quale si trattenne per circa un anno, e John Allen di Harwell il quale si trattenne per sei anni. Negli anni successivi ci fu un costante flusso di vali-

dissimi ricercatori stranieri che collaborarono per periodi più o meno lunghi.

All'inizio di novembre del 1957 Persico lasciò la cattedra di Fisica Superiore per passare a quella di Fisica Teorica, la qual cosa comportò la chiusura del laboratorio di Fisica Superiore. Tuttavia egli continuò efficacemente la sua opera di contatti esterni e restò vicino al laboratorio plasmi seguendone le attività.

Alla fine di novembre 1957 venne redatto dal CNRN il documento: "C.N.R.N. - Laboratorio Gas Ionizzati - Resoconti organizzativi e scientifici" (A12). Su questo documento vale la pena di soffermarsi perché si tratta della prima relazione di attività di quello che sarebbe poi diventato il Laboratorio Gas Ionizzati. Vediamone l'indice:

- A) relazione generale;
- B) relazione sui lavori sperimentali e teorici;
- C) relazione sugli studi (seminari, raccolta bibliografica, informazioni);
- D) relazione sulla organizzazione del laboratorio;
- E) osservazioni.

Nelle sezioni A e B sono citati degli allegati che però non sono risultati reperibili.

A pagina 6 di questo documento si legge che in data 18 ottobre 1957 il Presidente e il Segretario Generale del CNRN firmarono il documento costitutivo del "gruppo di ricerca sui gas ionizzati".

Nei primi mesi del '58 questo gruppo di ricerca, guidato da Brunelli, si trasformò nel Laboratorio Gas Ionizzati con Direttore Bruno Brunelli. Franca Magistrelli ricevette di conseguenza un secondo contratto, annuale, con decorrenza 15 aprile 1958, nel quale si legge: "La S.V. è assunta a contratto presso il Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari in qualità di Fisico, alle dipendenze del Laboratorio Gas Ionizzati" (A26).

Come risulta dalle relazioni relative ai trimestri luglio-agosto-settembre (A32) e ottobre-novembre-dicembre (A39) 1958, del Laboratorio Gas Ionizzati facevano parte i fisici J.E. Allen, U. Ascoli, A. De Angelis, F. Magistrelli e S. Segre. Al direttore B. Brunelli si affiancavano quali consulenti scientifici Enrico Persico e Edoardo Amaldi. Il personale tecnico era rappresentato da A. Bernardini, L. Capuani, A. Mola, F. Pieralisi.

Naturalmente con il passare del tempo questo Laboratorio continuò ad evolversi e ad ingran-

dirsi, sia in programmi che in personale, per cui era necessario trovare per esso una adeguata sede definitiva. Realisticamente le scelte sarebbero potute cadere su uno dei due centri di Casaccia e di Frascati; in quest'ultimo già esistevano i Laboratori Nazionali dell'INFN, dove era entrato in funzione il sincrotrone alla fine degli anni '50 e dove stava per essere costruito AdA, il primo anello di collisione materia-antimateria ideato da Bruno Touschek.

Anche se, per diversi motivi, la scelta più logica sarebbe stata quella della Casaccia, una serie di considerazioni e di interventi portò in definitiva a decidere per il centro di Frascati. Tutto ciò è ben descritto in una intervista a Brunelli riportata nel volume *Energia, ambiente, innovazione: dal Cnrn all'Enea*, a cura di Giovanni Paoloni [8].

Accadde poi che nel 1959 fossero presi contatti con EURATOM, contatti che portarono alla realizzazione di un contratto fra EURATOM e CNEN (nel 1960 il CNRN si era trasformato in CNEN). Quindi, quello che nell'estate del 1960 si spostò da Roma a Frascati era il Laboratorio Gas Ionizzati dell'EURATOM-CNEN, composto da alcune decine di persone, con programmi di ricerca ben definiti ed articolati in gruppi, con efficienti servizi tecnici e amministrativi, completamente autonomo (a parte i servizi di Centro come mensa, guardiana, riscaldamento, etc.) rispetto ai preesistenti laboratori di Frascati dell'INFN. Direttore di questo Laboratorio era Bruno Brunelli, suo fondatore. Questa situazione rimase immutata fino all'estate del 1970.

Vediamo ora brevemente quale è stata la ricerca svolta nel Laboratorio durante tutti gli anni '60.

Data anche la presenza di alcuni ricercatori dipendenti dall'EURATOM, le attività furono suddivise in tre diversi filoni:

1) Il Programma A, svolto da personale CNEN.

Esso comprendeva:

- Studi riguardanti la conversione diretta di energia, sia per via termoionica che per via magnetoidrodinamica. Alla fine solo quest'ultimo metodo fu portato avanti e costituì l'attività di un Laboratorio a sé stante; per cui il Laboratorio Gas Ionizzati si trasformò nei Laboratori Gas Ionizzati. A seguito di questo i ricercatori che costituivano il gruppo conversione termoionica abbandonarono i Laboratori;

- l'esperimento chiamato CARIDDI, consistente in un dispositivo del tipo θ -pinch¹ in cui veniva studiata la propagazione di onde d'urto senza collisioni in un campo magnetico;
 - alcuni esperimenti avevano poi riguardato fin dall'inizio le condizioni al contorno di un plasma in presenza di campo magnetico; studi che venivano condotti prevalentemente in archi a vapori di mercurio. Successivamente il lavoro di questo gruppo di ricerca si orientò su esperimenti riguardanti le onde nei plasmi, eseguiti su plasmi quiescenti;
 - la ricerca, di notevole importanza, condotta in quello che era nato nel 1958 come il Gruppo di Ottica e Spettroscopia, nel quale per diversi mesi era venuto a lavorare Franco Rasetti. In questo gruppo fu realizzato l'esperimento "Hot-Ice", nel quale si studiava l'interazione con la materia costituita da un cilindretto di deuterio solido con un fascio laser di potenza. Questa ricerca si pone nel filone degli studi sulla produzione di energia da fusione mediante confinamento inerziale: studi che sono proseguiti negli anni a Frascati.
- 2) Il Programma B, condotto per la maggior parte da ricercatori EURATOM sotto la guida di Linhart, comprendeva essenzialmente due esperimenti:
- MIRAPI (MInimum RAdius PInch); Plasma Focus - Si produceva l'implosione di una cortecchia cilindrica di plasma verso l'asse di simmetria (Z-pinch cavo) mediante la scarica di un banco di condensatori. Questo esperimento si trasformò in un Plasma Focus, nel quale, operando con deuterio si producevano per reazione di fusione 10^{11} neutroni per impulso.
 - MAFIN (MAGnetic Field INTensification) - Qui elevati campi magnetici (dell'ordine dei milioni di gauss) venivano ottenuti mediante l'impiego di esplosivi. Questo esperimento naturalmente non veniva

condotto nei laboratori di Frascati, ma in un apposito bunker costruito a Colleferro.

- 3) Il Gruppo Teorico, che svolgeva appunto ricerca teorica in buona parte riguardante gli esperimenti che venivano condotti in laboratorio.

3.1.2. Fisica della fusione nucleare

Verso la fine degli anni '60 la ricerca nel Laboratorio Gas Ionizzati sempre di più si orientò verso lo studio della fusione termonucleare controllata, concentrandosi in particolare, nell'ambito del confinamento magnetico, su dispositivi di tipo tokamak. Nel 1968 infatti era apparso chiaro dalla ricerca che si svolgeva nel mondo che le configurazioni toroidali, in particolare i tokamak, avevano superiori qualità e permettevano di studiare importanti aspetti della fisica dei plasmi termonucleari.

La ricerca sul confinamento magnetico svolta a Frascati ha riguardato e riguarda sia i tokamak compatti ad alto campo magnetico che i grandi tokamak.

A) Ricerca con Tokamak Compatti

Nell'ambito di questo filone di ricerca sono stati realizzati i tokamak FT e FTU, ed è stato progettato il tokamak Ignitor.

- FT - Nella tarda estate del 1968 Coppi e Brunelli, durante la Conferenza IAEA a Novosibirsk, a causa di un disguido nelle prenotazioni, si trovarono a condividere la stessa stanza di albergo.

Essi ebbero così l'occasione per cominciare a parlare della possibilità di avviare a Frascati una linea di ricerca sui plasmi confinati magneticamente; argomento sul quale a Frascati non esisteva ancora alcuna tradizione.

Queste conversazioni continuarono successivamente, e furono seguite da un seminario di Coppi all'Università di Roma riguardante le linee sperimentali più promettenti ai fini di un ulteriore sviluppo finalizzato a produrre plasmi capaci di bruciare per reazioni di fusione.

¹ Uno dei primi sistemi per confinare un plasma portandolo ad elevati valori di densità e temperatura, è stato quello basato sull'effetto di compressione (*pinch effect*). Si sfrutta qui l'interazione tra la corrente che fluisce in un tubo di scarica e il campo magnetico generato dalla corrente stessa. Questa interazione genera, come è noto, una forza che comprime il plasma verso l'asse del tubo. Esistono due tipi di pinch. Nello *Z-pinch* un campo elettrico applicato lungo l'asse del tubo produce una corrente che a sua volta dà luogo ad un campo magnetico azimutale. Nel *θ -pinch* invece, il campo magnetico è creato da una corrente che fluisce in direzione azimutale in una bobina posta al di fuori del tubo di scarica.

Nel 1969 Coppi passò al MIT di Boston dove effettuò il progetto e iniziò lo sviluppo di ALCA-TOR, un tokamak capace di studiare nuovi regimi di confinamento grazie alla combinazione di alti campi magnetici, dimensioni compatte, e dell'invenzione di un sistema di campi magnetici poloidali chiamato comunemente "air-core transformer".

Nel frattempo egli aderì alla proposta fattagli da Brunelli e dal professor Carlo Salvetti, allora vice-presidente del CNEN, di pensare a un esperimento con plasmi toroidali da realizzare a Frascati. Questo studio condusse alla realizzazione del tokamak che sarebbe poi stato chiamato FT (Frascati Torus).

La realizzazione di FT comportava naturalmente un notevole cambiamento nella struttura e nella organizzazione del Laboratorio. Si trattava infatti di passare da un programma consistente in vari esperimenti di dimensioni relativamente piccole ad un altro costituito da un'unica macchina di notevoli dimensioni sulla quale si dovevano concentrare gli sforzi di tutto il Laboratorio, fatta eccezione del programma Hot-Ice che rimaneva inalterato.

Nell'estate del '70 purtroppo Brunelli abbandonò la direzione dei Laboratori Gas Ionizzati e fu sostituito dall'ing. Romano Toschi che in precedenza dirigeva il Laboratorio Conversione Diretta.

Nel 1971 Coppi accettò l'invito di Salvetti di trascorrere, nell'estate, un periodo di circa due mesi a Frascati. Alla fine di questo periodo egli arrivò alla definizione di tutti i parametri essenziali della macchina [9]. Principale collaboratore di Coppi in questo lavoro fu Giovan Battista Righetti.

La macchina FT è entrata in funzione nel 1977. Dal 1981 al 1983 FT ha detenuto il record di parametro di confinamento più elevato: circa 4×10^{13} s/cm³ con una temperatura ionica un po' superiore ad 1 keV.

- *FTU* – Alla fine degli anni '80 venne varato il progetto FTU (FT Upgrade) avente lo scopo di studiare il riscaldamento del plasma con sistemi a microonde. FTU è entrato in funzione nel 1990 ed è tuttora operante.

- *Ignitor* – Nel 1976 Coppi concepì l'idea di proseguire sulla sua linea dei dispositivi compatti ad alto campo magnetico, andando oltre la realizzazione della macchina ALCATOR A del MIT, con la progettazione di una macchina, da

lui chiamata Ignitor, il cui scopo è quello, importantissimo, di realizzare e studiare un plasma in condizioni di ignizione. A questo proposito, nel capitolo 7 ("The entrepreneurs") del libro *The man-made sun* di T. A. Heppenheimer [10], l'autore racconta come e quando Coppi abbia concepito l'idea di Ignitor: "Coppi was a man who could easily bubble over with ideas, and right then he was particularly ebullient. He wanted to follow up his Alcator success by building a new tokamak, which he called the Ignitor".

Nel 1976 Coppi propose la realizzazione di questa macchina in Italia, e per la sua progettazione mise insieme un gruppo di individui di diverse affiliazioni (enti scientifici, università, industrie) sia italiane che estere. Questo gruppo, di cui egli era il "principal investigator" e del quale dirigeva quindi tutto il lavoro scientifico-tecnico, faceva capo, sul piano gestionale, all'allora CNEN. Questa situazione è rimasta immutata nel tempo anche se, naturalmente, la composizione del gruppo è cambiata con il passare degli anni.

Ignitor è concepito per produrre plasmi ad alta densità. Quello delle macchine ad alta densità è uno dei maggiori filoni di ricerca negli Stati Uniti e il maggiore in Italia. Ora questa linea è stata riscoperta sperimentalmente in Giappone ed è intensamente seguita per lo studio di reattori di potenza funzionanti in questi regimi. Attualmente Ignitor è l'unico dispositivo in grado di raggiungere e studiare sperimentalmente le condizioni di ignizione in un plasma di deuterio-trizio con l'impiego di tecnologie oggi disponibili e sulla base delle attuali conoscenze di fisica del plasma. Un successo di questo esperimento equivarrebbe quindi alla dimostrazione della fattibilità scientifica della fusione termonucleare controllata. Un esperimento inteso a produrre un plasma ignito, quale appunto è appunto Ignitor, *deve necessariamente precedere la progettazione di un reattore a fusione.*

In macchine compatte ad alta densità e alto campo magnetico, quali ALCATOR ed Ignitor, vengono prodotti "plasmi termonucleari", nei quali il riscaldamento è dovuto essenzialmente alle particelle α .

Una critica che spesso viene fatta, erroneamente, a Ignitor è che in esso il tempo di bruciamento è troppo breve per essere di interesse reattoristico. E qui sta appunto l'equivoco. In una

critica di questo tipo si ignora il fatto che Ignitor *non è un reattore*, bensì un esperimento concepito in modo che il suo tempo di bruciamento superi tutti gli intrinseci tempi fisici [11]. Un ipotetico futuro reattore potrebbe anche essere assai diverso da Ignitor; magari non essere neppure un tokamak. Potrebbe per esempio essere uno stellarator, un dispositivo che è tornato alla ribalta da diversi anni. Si pensi al W7-X tedesco [12] e all'LHD giapponese [13].

I parametri principali di Ignitor sono:

$$\begin{array}{lll} R_0=1,32 \text{ m} & a=0,47 \text{ m} & b=0,86 \text{ m} \\ B_T=13 \text{ T} & & I_p=11 \text{ MA} \end{array}$$

Attualmente di Ignitor esiste un progetto e sono stati costruiti, in scala 1:1, i prototipi dei suoi principali componenti.

Accenniamo ora ad altre possibilità che verrebbero offerte dall'esperimento Ignitor.

Vi sarebbe intanto un interesse puramente scientifico riguardante gli studi di astrofisica. Infatti, dagli esperimenti di accensione di cui Ignitor è il prototipo, ci si può attendere di ottenere, sulla base di passate esperienze, anche importanti contributi alla comprensione di fenomeni di rilievo in astrofisica, per esempio nell'ambito dei brillamenti solari e della dinamica dei plasmi con alte energie che costituiscono la principale componente di materia luminosa negli ammassi di galassie.

Nella prospettiva, poi, di identificare e costruire un reattore che produca energia, è evidente che la "Fisica del Reattore" (usando una terminologia ben nota nel campo dei reattori a fissione) che emergerà dagli esperimenti con Ignitor sarà direttamente applicabile al reattore di potenza.

Infine, una possibile utilizzazione a termine relativamente breve di un reattore a fusione può essere la produzione di neutroni al fine di generare materiale fissile.

La filiera delle macchine con alti campi magnetici rappresentata da Ignitor offre, al momento, l'unica possibilità di svilupparsi in una linea di reattori che minimizzano l'uso del trizio (cosiddetti *tritium poor*). Infatti le difficoltà associate a miscele combustibili al 50/50 deuterio-trizio sono ben note (80% dell'energia fornita attraverso neutroni veloci, incertezza sulla fattibilità di un metodo affidabile per la produzione di trizio, ecc.). Inoltre rimane attraente anche l'i-

dea di sviluppare reattori a deuterio-elio3, come dimostrato dalle recenti dichiarazioni di interesse dei gruppi cinesi e indiani responsabili per le due rispettive missioni di esplorazioni del suolo lunare. Uno degli scopi dichiarati è infatti l'estrazione di elio3, il combustibile più "appetibile" per la fusione nucleare.

Si noti a questo riguardo che Coppi ha dedicato molto tempo allo studio del dispositivo da lui chiamato Candor, tokamak compatto ad alto campo magnetico funzionante con deuterio-elio3 [9].

Per l'ubicazione di Ignitor in Italia esistono in realtà diversi siti dotati di nodi di potenza a cui poter allacciare una macchina come Ignitor, che ha bisogno di potenze elevate. Uno dei siti privilegiati è Caorso, nei pressi di Piacenza, dove c'è un reattore smontato nonché un edificio dove, con opportune modifiche, si potrebbe alloggiare la macchina. Quindi Caorso si presenta come il sito naturale per realizzare un tokamak capace di accendere.

Quanto poi al costo di Ignitor, esso è senz'altro di gran lunga inferiore a quello prevedibile per un grande tokamak. Non esiste al momento un altro approccio basato sul confinamento magnetico capace di arrivare a studiare plasmi in condizioni di ignizione.

Per la realizzazione di Ignitor si è aperta di recente una ulteriore possibilità. Infatti, il 26 aprile 2010 si è tenuto a Milano un summit Italia-Russia con lo scopo di procedere con il programma Ignitor. I partecipanti a questo summit erano: per parte russa il primo ministro Putin, il primo ministro aggiunto I. Sechin, il ministro per l'energia S. Shmatko, il vice ministro per l'istruzione e la ricerca S.N. Mazurenko. Per parte italiana: il primo ministro Berlusconi, il consigliere del primo ministro per gli esteri V. Valentini, il ministro per l'istruzione e la ricerca M. Gelmini. L'accordo è stato firmato dai ministri Gelmini e Mazurenko. In base a questo accordo Ignitor sarà costruito nel sito di Troitsk, vicino Mosca.

B) Ricerca con i Grandi Tokamak

Dopo la realizzazione di FT, la ricerca fusionistica portata avanti dall'ENEA (nel 1982 il CNEN si era trasformato in ENEA), iniziò a orientarsi prevalentemente verso il filone dei grandi tokamak stabilendo delle collaborazioni in campo internazionale riguardanti i tokamak JET (Joint European Torus) e ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

- *JET* – È il grande tokamak realizzato dalla Comunità Europea nel centro di Culham in Inghilterra. Ha cominciato a operare nel 1983 ed è tuttora operante con i seguenti parametri caratteristici:

$$R_0=2,96 \text{ m} \quad a=0,96 \text{ m} \quad b=2,1 \text{ m} \\ I_p=6 \text{ MA} \quad B_T=4 \text{ T}$$

- *ITER* – È scaturito nel 1985 da un incontro tra Reagan e Gorbachev. Inizialmente si doveva trattare di un tokamak di grandissime dimensioni ($R_0 \approx 6 \text{ m}$) con un costo dichiarato di 10 miliardi di dollari e, secondo i proponenti, era previsto che avrebbe raggiunto l'ignizione. Successivamente difficoltà insorte, non solo di carattere economico ma anche di carattere tecnico-scientifico (dimostrata insorgenza di instabilità [14] [15]), hanno portato alla decisione di progettare un tokamak ridimensionato (*ITER-FEAT*) dichiaratamente non inteso per il raggiungimento dell'ignizione. Non esiste a tutt'oggi un progetto definitivo; tuttavia i parametri caratteristici dovrebbero essere:

$$R_0=6,2 \text{ m} \quad a=2 \text{ m} \quad I_p=15 \text{ MA} \\ B_T=5,3 \text{ T}$$

Attualmente all'impresa partecipano 7 partner (UE, USA, Russia, Giappone, Cina, India e Corea del Sud). Come sito è stato scelto, nel 2005, il centro nucleare di Cadarache, in Francia.

Quando, nel 2006, il progetto fu varato, si prevedeva che il costo per la costruzione sarebbe stato di 5 miliardi di euro. Ma attualmente questo costo è stato ufficialmente valutato a 15 miliardi di euro [16]. La EU, contribuente principale al progetto, dovrà di conseguenza pagare assai di più dei 2,7 miliardi di euro inizialmente previsti.

- *Altre proposte*: FT3/FAST - Dopo una prima proposta del tokamak FT3 nel 2006 [17], nel 2008 l'ENEA ha proposto la realizzazione di un tokamak simile a FT3, denominato FAST (Fusion Advanced Studies Torus) [18]. Questo tokamak dovrebbe funzionare con solo deuterio ed avrebbe lo scopo di simulare la dinamica delle particelle α usando deuteroni veloci accelerati con riscaldamento ausiliario o con sistemi *current*

drive. I parametri che caratterizzano questa macchina dovrebbero essere:

$$R_0=1,82 \text{ m} \quad a=0,64 \text{ m} \quad I_p=6,5 \text{ MA} \\ B_T=7,5 \text{ T}$$

Si tratterebbe, secondo i proponenti, di una facility satellite di ITER., da realizzarsi prima di questo e quindi entro il 2019, che dovrebbe poi funzionare in parallelo con esso. Sempre secondo i proponenti, FAST dovrebbe abbreviare il tempo necessario ad ITER per effettuare il suo programma scientifico. Il costo di FAST sarebbe di 326 M€; ma è probabile che un'analisi dei costi aggiornata, che tenga anche conto di tutto quanto è necessario per questo impianto (p. es. il potenziamento della rete elettrica di connessione del Centro di Frascati con la rete elettrica nazionale), porti a cifre ben maggiori di questa.

A parte ogni considerazione di carattere economico, sulla proposta di questa macchina si possono anche fare diverse obiezioni di carattere scientifico, in quanto FAST non è progettato per produrre plasmi capaci di bruciare per reazioni di fusione [19].

3.2. Istituto di Fisica del Plasma "Piero Caldirola", Milano

L'Istituto venne costituito nel 1970 come Laboratorio di Fisica del Plasma ed Elettronica Quantistica sotto la direzione del professor Piero Caldirola, con due sezioni distinte, una dedicata al plasma presso l'Università di Milano, e una all'elettronica quantistica presso il Politecnico di Milano. Nel 1975 le due sezioni divennero autonome e quella dei plasmi mantenne la denominazione di Laboratorio di Fisica del Plasma. Nel 1976 iniziò la collaborazione europea nell'ambito della associazione EURATOM-CNR, costituita insieme all'Istituto Gas Ionizzati di Padova. Nell'ambito di questa associazione fu realizzato il tokamak THOR [20], che operò fino al 1989, e che era caratterizzato dai seguenti parametri:

$$R_0=0,2 \text{ m} \quad a=0,16 \text{ m} \quad I_p=0,05 \text{ MA} \\ B_T=1,1 \text{ T}$$

Nel 1985 si costituì l'associazione EURATOM-ENEA-CNR. Nell'ottobre 2001 l'Istituto venne confermato nella denominazione attuale di Istituto di Fisica del Plasma "Piero Caldirola" (IFP).

L'esperienza acquisita su THOR ha consentito di progettare, scientificamente e tecnologicamente, l'esperimento di riscaldamento addizionale del tokamak FTU, con finanziamento prioritario EURATOM.

Sempre per quanto attiene alla ricerca fusio-nistica con dispositivi tokamak è stata consistente l'attività riguardante la progettazione di Ignitor nell'ambito del gruppo di lavoro, guidato da Coppi, del quale si è già parlato.

3.3. Consorzio RFX, Padova

Il Consorzio RFX di Padova [21] è stato costituito alla fine degli anni '70 dall'ENEA, dal CNR (in particolare dall'Istituto Gas Ionizzati), dall'Università di Padova e dalle Acciaierie Venete S.p.A., nel quadro dell'associazione con EURATOM. Attualmente operano nel Consorzio 150 persone (80 ricercatori). Nel 2006 sono entrate nel Consorzio 20 dipendenti dell'INFN.

Scopo di questo Consorzio era quello di sperimentare su un dispositivo del tipo RFP (Reversed Field Pinch) [21]. Negli anni dal 1974 al 1984 erano state realizzate le macchine ETA-BETA I e ETA-BETA II. In questa seconda in particolare si è studiata la cosiddetta "fase quiescente", precedentemente apparsa nella macchina ZETA inglese [21].

I risultati ottenuti hanno incoraggiato la costruzione della macchina RFX (Reversed Field Experiment), più grande. Nel 1984 la realizzazione di RFX fu approvata con il supporto di EURATOM; i finanziamenti furono assicurati per il 45% da EURATOM e per il 55% da ENEA. La costruzione è durata dal 1985 al 1991 e ha comportato una spesa di 100 miliardi di lire. Parametri caratteristici sono raggio maggiore del toro 2 m, raggio minore del toro 0,5 m, massima corrente di plasma 1 MA, massimo campo magnetico toroidale 0,7 T. RFX è la prima macchina di tipo RFP di grandi dimensioni che raggiunge una corrente di plasma di 1 MA e la sostiene per qualche decimo di secondo.

Nel 1999 un incendio distrusse buona parte degli impianti elettrici di alimentazione. Nel 2004, dopo la ricostruzione, si è realizzato l'RFX mod. Con questa macchina è stata acquisita una notevole esperienza nella tecnologia del controllo attivo della instabilità magnetoidrodinamica del plasma, controllo realizzato mediante un opportuno sistema di bobine magnetiche disposte sulla camera toroidale.

Il Consorzio contribuisce poi al programma ITER, in particolare con dispositivi di riscaldamento del plasma mediante iniezione di atomi neutri (Neutral Beam Injection, NBI) [21].

4. CONCLUSIONI

È trascorso più di mezzo secolo da quando all'Istituto di Fisica della Università di Roma il gruppetto di ricercatori costituito da Brunelli, Magistrelli e De Angelis, su ispirazione di Persico, diede inizio ad una attività di ricerca riguardante la fisica del plasma. E, come si è visto, questo gruppetto si ampliò ben presto fino a diventare, agli inizi del 1958, il Laboratorio Gas Ionizzati del CNRN con sede provvisoria a Roma e poi, nel 1960, il Laboratorio Gas Ionizzati EURATOM-CNEN, con sede definitiva a Frascati.

Questo rapido progresso iniziale è da attribuirsi in buona parte all'entusiasmo e alla originalità dei componenti del Laboratorio, ma soprattutto alla efficacia e alla saggezza della direzione del professor Bruno Brunelli.

Con pari entusiasmo e pari originalità si è poi continuato a lavorare al Laboratorio Gas Ionizzati praticamente per tutti gli anni '60.

A questo proposito è significativa la testimonianza di A. Baños jr. dell'Office Naval Research di Londra, incaricato di visitare i laboratori di tutto il mondo per stilare rapporti tecnici sull'attività di ricerca. Baños aveva visitato una prima volta il laboratorio sui plasmi all'Istituto di Fisica di Roma nel 1958. Successivamente, nel 1968, era tornato a visitare a Frascati il Laboratorio Gas Ionizzati EURATOM-CNEN. Dopo questa seconda visita egli scrisse un rapporto (A59) di cui riportiamo alcuni passaggi dalle considerazioni introduttive:

"At that time, spring of 1958, there was at the Institute a small plasma physics laboratory with a total scientific staff of three persons: Dr. Bruno Brunelli, in charge of the group; Dr. Sergio Segre working on the theory of hydromagnetic shocks, and Dr. F. Magistrelli who had already initiated her experimental studies of waves in plasma columns.

Today Brunelli is Director of the Laboratori Gas Ionizzati and his scientific staff numbers more than a hundred qualified researchers. It was extremely gratifying to return to Rome ten years later to find such a fine laboratory at Frascati, where Brunelli, Segre, Magistrelli, and their collaborators are engaged in

what appears to us to be a most significant and pertinent research program, theoretical and experimental, in basic and applied plasma physics."

Baños ricavò una notevole impressione dalla sua visita ai Laboratori ("we came home duly impressed from our visit"), come appare evidente dalle considerazioni conclusive:

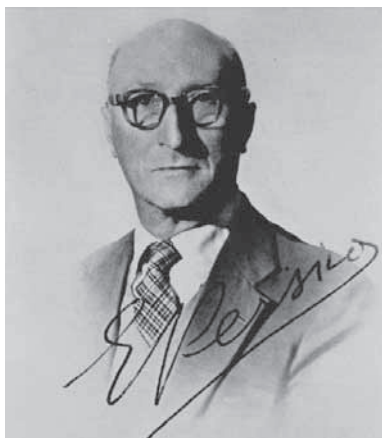
"We had visited similar laboratories in the Soviet Union, in the Scandinavian countries, in the Continent of Europe, and of course, in the United Kingdom. As stated in the introduction to Section 4, we believe that the Frascati Laboratory has achieved, for its limited size and scope, an enviable reputation for scientific excellence that places Frascati among the leading plasma physics laboratories of the world."

Purtroppo l'entusiasmo che aveva caratterizzato lo svolgimento della ricerca durante questi primi tredici anni è andato col tempo attenuandosi, schiacciato ormai da una "globalizzazione"

che ha portato tutto il mondo della ricerca fusionistica ad orientarsi, prevalentemente, su programmi basati su dispositivi di enorme mole e impegno finanziario, ma di discutibile utilità, dal momento che essi non mirano al raggiungimento dell'ignizione. Va tuttavia riconosciuto che l'ENEA ha riservato un certo spazio alla progettazione della macchina Ignitor. Però lo ha fatto con scarsa efficienza gestionale, senza dare a questo programma l'attenzione che avrebbe meritato.

In questo lavoro si è voluto ripercorrere la storia della ricerca fusionistica in Italia a partire dai suoi inizi. E così è stato possibile riempire alcune lacune e correggere alcune distorsioni che molte volte inquinano l'informazione corrente.

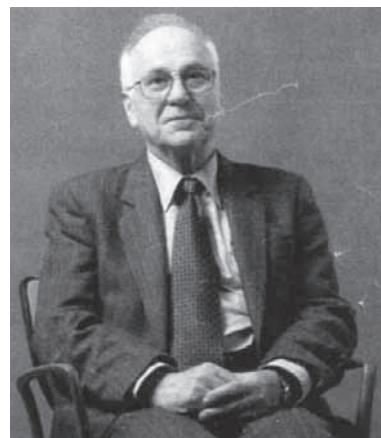
In particolare, si è voluto anche mettere bene in luce l'importanza del ruolo svolto nella nascita e nello sviluppo della ricerca fusionistica italiana da tre personaggi di grande rilievo. Parliamo naturalmente dei professori Enrico Persico, Bruno Brunelli, Bruno Coppi.



Enrico Persico



Bruno Brunelli



Bruno Coppi

APPENDICE

Alcuni documenti relativi all'inizio della ricerca sui plasmi e sulla fusione nucleare in Italia. La nascita del Laboratorio Gas Ionizzati

A1 – 1957, 23 giugno: B. Brunelli, "Relazione sulle visite ai laboratori stranieri di ricerca su plasmi ad alta temperatura".

A2 – 1957, 24 luglio: Promemoria sulle conclusioni raggiunte nella riunione organizzativa del laboratorio "Plasmi" tenuta in tale data nella stanza del prof. Edoardo Amaldi.

A3 – 1957, 25 luglio: E. Persico a G. Bernardini. In vista di fondi stanziabili in base alla legge per l'energia nucleare si parla della formazione di un gruppo di ricerca da parte del CNRN.

A4 – 1957, 29 luglio: E. Persico a J. Kistemaker (Amsterdam), in vista della visita di Brunelli per i giorni 3, 4 e 5 settembre.

A5 – 1957, 13 agosto: B. Brunelli a E. Amaldi. Relazione su una lettera del dr. L. Reynolds del CERN il quale ha fornito nomi di fisici inglesi. Parla anche della visita del dr. J.G. Linhart del CERN in settembre.

A6 – 1957, 13 agosto: B. Brunelli a E. Persico. Comunica a Persico il programma delle lezioni di Linhart.

A7 – 1957/11/9-1958/6/6: Gruppo di lettere firmate da Reynolds, Persico, dr. J. Allen (Harwell), dr. W. Fry (Harwell), prof. F. Ippolito (segretario generale del CNRN), riguardanti la possibilità che Allen trascorra un lungo periodo di lavoro nel laboratorio plasmi.

A8 – 1957, settembre/ottobre: "Organizzazione del Laboratorio sui Gas Ionizzati", Relazione preparata da Brunelli sulla situazione alla data 1/10/1957.

A9 – 1957, ottobre: Scambio di lettere tra il prof. F. Rasetti (Johns Hopkins University, Baltimora) e Persico, riguardanti la venuta di Rasetti a Roma.

A10 – 1957, 15 ottobre: Data di inizio del primo contratto di lavoro del CNRN alla dr. F. Magistrelli, della durata di sei mesi, per lavorare alle dipendenze del prof. Brunelli.

A11 – 1957, 17 novembre: Inizio di una corrispondenza fra Persico e il prof. D. Bohm (Università di Bristol) per invitarlo a tenere a Roma lezioni sui plasmi.

A12 – 1957, 30 novembre: C.N.R.N – Laboratori gas ionizzati – Resoconti organizzativi e scientifici, relazione.

A13 – 1957, 3 dicembre: G. Righini a E. Persico. Invito a tenere un seminario ad Arcetri riguardante le proprietà di un plasma.

A14 – 1957, dicembre 9 e 19: Scambio di lettere tra Persico e il dr. A. Baños jr. (Università della California) relative a una visita a Roma con borsa Fulbright.

A15 – 1957, 11 dicembre: Inizio di uno scambio di lettere tra il prof. O. Klemperer (Imperial College, Londra) e Amaldi e Persico, relative a seminari da tenere a Roma.

A16 – 1958, gennaio: Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari – Programma di ricerche sul plasma – Com.RF/04/58. Resoconto delle attività svolte dal gruppo nel corso del primo anno.

A17 – 1958, 18 gennaio: CNRN, Laboratorio Gas Ionizzati – Relazione di Brunelli con bozza manoscritta allegata.

A18 – Foglio manoscritto con appunti di Persico.

A19 – 1958, 27 febbraio: G.B. Adams (CERN) a E. Persico. Adams chiede a Persico se vuole partecipare a un gruppo di discussione al CERN il 14 e 15 marzo 1958. Risposta di Persico il 4 marzo: ringrazia e annuncia che dirà qualcosa sul problema del confinamento (vedi lavoro J.G. Linhart e E. Persico, "Plasma loss from magnetic bottles", *Il Nuovo Cimento* 8 (5) 1958, 740-753).

A20 – 1958, 10 marzo: E. Persico a J.G. Linhart. Partecipazione di Persico all'incontro di Ginevra.

A21 – 1958, 15 marzo: Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari. Laboratorio Gas Ionizzati. Bilancio

preventivo relativo al periodo 15/3-30/6/1958.

A22 – 1958, 25 marzo: B. Ferretti (CERN) a E. Persico. Invito a tenere una lezione sui plasmi. Risposta di Persico in data 27 marzo: ringrazia, ma è appena stato al CERN su invito di Adams.

A23 – 1958, 28 marzo: E. Amaldi a W. Fry (Harwell). Chiede suggerimenti per una possibile collaborazione con Allen, che è propenso a lavorare presso il Laboratorio Gas Ionizzati.

A24 – 1958, 2 aprile: P. Capron (Centre de Physique Nucléaire, Heverle-Louvain) a E. Amaldi: Annuncia l'inizio di un programma sui plasmi in Belgio e chiede informazioni. Amaldi risponde in data 2 aprile dicendo che una sua visita sarà gradita.

A25 – 1958, 3 aprile: L.A. Radicati (Università di Pisa) a E. Persico. Invito a tenere a Pisa un seminario sulla fisica del plasma il 14 maggio. Risposta affermativa di Persico il 10 aprile.

A26 – 1958, 15 aprile: Data di inizio del secondo contratto di lavoro del CNRN a F. Magistrelli della durata di un anno.

A27 – 1958, 6 giugno: E. Persico a G. Polvani (SIF): Riguarda il lavoro di S. Segre: "On the formation of the hydrodynamic shock waves". Risposta di Polvani in data 11 giugno, ha ricevuto il lavoro.

A28 – 1958, 12 giugno: J. G. Linhart a E. Persico. Parla della successiva scuola di Varenna sui plasmi. Risposta di Persico in data 6 giugno.

A29 – 1958, 31 luglio-17 settembre: J.B. Adams a E. Persico. Corrispondenza in cui si discute la necessità di avviare un gruppo di studio sui problemi della fusione.

A30 – 1958, 8 settembre: "Programma futuro di ricerche sul plasma". Relazione stilata successivamente alla conferenza di Ginevra del 1958 sugli usi pacifici dell'energia nucleare, in cui il Gruppo fa uno schema dei futuri programmi alla luce delle discussioni avvenute nel corso dell'evento.

A31 – 1958, 24 settembre: E. Amaldi a M. Boella (Istituto Galileo Ferraris, Torino). chiede esperti in elettronica, elettrotecnica e microonde.

A32 – Relazione trimestrale sull'attività svolta dal Laboratorio Gas Ionizzati nel periodo luglio-agosto-settembre 1958. CNRN Bollettino Interno N. 37, 16 marzo 1959.

A33 – 1958, 13 ottobre: E. Persico a N. Carrara (Centro di Studio Microonde, Firenze). Chiede nominativi di persone che potrebbero lavorare al Laboratorio Gas Ionizzati. Risposta di Carrara in data 22 ottobre: ha sentito anche A. Gozzini di Pisa, ma non hanno al momento persone disponibili.

A34 – 1958, 25 novembre: R. Latham (Imperial College, Londra) a E. Amaldi. Allega il programma degli incontri sulla fisica del plasma organizzati all'Imperial College a partire dal 24 ottobre.

A35 – 1958, 9 dicembre: E. Persico a A. Simon (Oak Ridge National Laboratory). Ringrazia per il lavoro di Simon "Diffusion of arc plasmas across a magnetic field".

A36 – 1958, 11 dicembre: CERN Study Group on Fusion. Relazione sulla situazione internazionale.

A37 – 1958, 12 dicembre: G. Vendryes di Saclay a E. Persico. Allega il programma sull'insegnamento della fisica dei plasmi a Saclay.

A38 – 1958, 19 dicembre: I.F. Denisse (Observatoire de Paris) a E. Persico. Chiede di fare una conferenza a Saclay. Persico risponde in data 8 gennaio 1959 dicendo che non può a causa di impegni vari.

A39 – 1958: Relazione trimestrale sull'attività svolta dal Laboratorio Gas Ionizzati nel periodo ottobre-novembre-dicembre 1958. CNRN Bollettino Interno N. 45, 14 aprile 1959.

A40 – 1959, 19 gennaio: J. Adams a E. Persico, riguardo la direzione della scuola di Varenna.

A41 – 1959, 27 gennaio: E. Amaldi a L. Biermann (Max Planck Institut für Physik, Göttingen). Riguarda la venuta a Roma di quest'ultimo per seminari e lezioni.

A42 – 1959, 6 febbraio: D. Palumbo (EURATOM) a E. Persico. Chiede nominativi di persone disposte a lavorare sui plasmi nell'ambito di un contratto EURATOM-CEA. Risposta di Persico in data 28 febbraio, per il momento negativa.

- A43** – 1959, 4 giugno: E. Amaldi a L. Gratton (Osservatorio Nazionale, Cordoba, Argentina). Offre a quest'ultimo un contratto di 3 anni con il CNRN per lavorare nel Laboratorio Gas Ionizzati.
- A44** – 1959, 10 giugno: P. Hubert (Commissariat a L'Énergie Atomique, Centre d'Études Nucléaires de Fontenay-aux-Roses) a E. Persico. Si dichiara lieto di ricevere la visita di quattro persone del Laboratorio Gas Ionizzati.
- A45** – 1959, 8 luglio: R. Latham e H. I. Pain a E. Amaldi. Informazioni sulla conferenza della Physical Society on the Physics of High Temperature Plasmas, che si terrà all'Imperial College nei giorni 17 e 18 settembre.
- A46** – 1959, 17 luglio: E. P. Gray (Johns Hopkins University, Silver Springs) a E. Persico. Interessato a visitare il Laboratorio Gas Ionizzati il 9 settembre. Persico risponde in data 22 luglio, dicendo che non sarà a Roma, ma che saranno presenti Brunelli e altri membri del laboratorio. In data 4 agosto Gray chiede materiale (report, libri, ecc) riguardante la fisica dei plasmi.
- A47** – 1959, 21 luglio: E. Persico a F. Scandone e G. Toraldo di Francia (Istituto Nazionale di Ottica, Firenze). Parla del termine della collaborazione di Rasetti con il gruppo che si occupa di ottica e spettroscopia del plasma e della necessità di sostituirlo con un fisico maturo. Chiede suggerimenti. Persico scrive a Scandone il 5 settembre e a G. Righini in data 15 settembre riguardo lo stesso problema.
- A48** – 1959, 31 luglio: J. Adams a E. Persico. Riguarda il meeting di Harwell e la Società Europea per la ricerca termonucleare. Persico ad Adams il 10 settembre sulla costituzione di questa società.
- A49** – 1959, estate: Programma di corsi e seminari a Monaco.
- A50** – 1959, 24 agosto: B. Brunelli a E. Persico. Parla del congresso di Uppsala e di colloqui con Hubert e con Palumbo, del contratto e della richiesta da presentare al comitato di gestione.
- A51** – 1959, 7 settembre: G. Wataghin (Università di Torino) a E. Persico. Possibile permanenza presso il Laboratorio Gas Ionizzati dell'ing. G. Gambirasio del Politecnico di San Paolo.
- A52** – 1959, 7 settembre: E. Persico a F. Ippolito (Segretario Generale del CNRN). Sul gruppo di studio del CERN e la Società Europea sulla fusione termonucleare controllata.
- A53** – 1959, 28 ottobre: B. Bertotti da Princeton a E. Persico. Descrive i lavori che il gruppo teorico del Project Matterhorn sta svolgendo.
- A54** – 1959, 4 novembre: E. Persico a N. Carrara (Firenze). Invia un rapporto del Laboratorio Gas Ionizzati e parla di giovani ricercatori proposti da Carrara. Risposta di Carrara a Persico in data 1 dicembre: deve riferire su attività svolte in Italia su vari argomenti alla assemblea generale dell'Union Radio-Scientifique Internazionale e vuole illustrare anche il lavoro del Laboratorio Gas Ionizzati.
- A55** – 1959, 19 novembre: E. Persico a M. Picone (Direttore dell'Istituto per le Applicazioni del Calcolo, Roma). Richiesta di studiare un sistema di equazioni differenziali.
- A56** – 1960, 11 gennaio: A. Rylov (IAEA) a E. Persico. Proposta di far nascere un nuovo giornale sulla fisica del plasma. Risposta di Brunelli, anche a nome di Persico, in data 31 marzo, esprimendo parere negativo.
- A57** – 1960, agosto: Copertina del corso di fisica del Plasma della Danish Atomic Energy Commission.
- A58** – 1960, 30 settembre: B. Bertotti a E. Persico da Princeton. Esprime la sua intenzione di lavorare sui plasmi a Roma l'anno successivo. Risposta di Persico in data 8 ottobre: "Il gruppo plasma di Roma si è trasferito in apposito edificio a Frascati (vicino al sincrotrone) e io ho cessato di occuparmene".
- A59** – 1968, 21 agosto: Rapporto di A. Baños dell'Office of Naval Research (London) circa la sua visita al Laboratorio Gas Ionizzati – associazione EURATOM-CNEN.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. d'E. Atkinson e F.G. Houtermans, *Zeitschr. für Physik*, **54** (1929) 656
- [2] C.F. Weizsäcker, *Zeitschr. für Physik*, **38** (1937) 176
- [3] G. Gamov and E. Teller, *Phys. Rev.*, **53** (1938) 608
- [4] H.A. Bethe, *Phys. Rev.*, **55** (1939) 434
- [5] ENEA e Comune di Frascati, "50 anni dei Laboratori Nazionali del Sincrotrone di Frascati", 7/12/07
- [6] S. Martellucci, *Energia, Ambiente e Innovazione*, **1** (2009) 54
- [7] L. Bonolis e C. Bernardini, *Enrico Fermi: his work and legacy*, Edizione inglese del volume *Conoscere Fermi* (Società Italiana di Fisica & Springer Verlag, 2004)
L. Bonolis, Majorana. Il genio scomparso, collana "I grandi della scienza" (Le Scienze, Milano, giugno 2002), p. 111
L. Bonolis, Bruno Pontecorvo, from slow neutrons to oscillating neutrinos, *American Journal of Physics*, **73** (2005) 487-499
L. Bonolis, Bruno Touschek vs. Machine Builders. AdA, the first matter-antimatter collider, *La Rivista del Nuovo Cimento*, **11** (2005) 1-60
L. Bonolis e M.G. Melchionni (a cura di), *Fisici italiani del tempo presente. Storie di vita e di pensiero* (Marsilio, Venezia, 2003) p. 462
L. Bonolis (a cura di), *Maestri e allievi nella fisica italiana del Novecento*, (20 autori, pp. 650, Pavia 2008)
- [8] *Energia, ambiente, innovazione: dal Cnrn all'Enea*, a cura di G. Paoloni. Edizioni Laterza, 1992, p. 245
- [9] F. Bombarda e B. Coppi, "Regimi ad alta densità per reattori a fusione a confinamento magnetico", ENEA-MIT, XCV Congresso Nazionale S.I.F., Bari, 28 settembre-3 ottobre 2009
- Lettera del prof. B. Coppi al prof. L. Paganetto, presidente ENEA, in data 14/4/08
- The American Physical Society, Assegnazione del premio Maxwell 1987 per la fisica del plasma al prof. B. Coppi
- B. Coppi, *Sistemaricerca*, **18**, maggio 1987, p. 17
- Fusion, "Frascati Tokamak Approaches Fusion Conditions", June 1981, p. 19
- [10] T.A. Heppenheimer, *The man-made sun*, Little, Brown & Company, 1984, p. 237
- [11] B. Coppi and the Ignitor Project, MIT/LNS Report, #04,14, Cambridge, MA
- [12] B.M. Schwarzschild, "Garching shows stellarators may be good after all", *Physics Today*, August 1980, pp.17-19
- [13] NIFS 2008-2009, National Institute for Fusion Science
- [14] J. Glanz, *Science*, **274** (1996) 1600
- [15] J. Glanz and A. Lawler, *Science*, **279** (1998) 20
- [16] G. Brumfield, *Nature*, **646** (2010) 532
Nature, **465** (2010) 532
- [17] ENEA, FT3 – A facility in support of a fast track to fusion energy, DRAFT 1/3/06
- [18] Italian Association of Fusion, FAST (Fusion Advanced Studies Torus) – A proposal for a facility in support of the development of fusion energy, 18/05/08
- [19] B. Coppi, Senato della Repubblica – Indagini conoscitive, "Le ricerche italiane relative alla fusione nucleare", Vol. I, p. 387, ottobre 2009

[20] THOR, Tabelle Tokamak, <http://www.toodlepip.com/tokamak/table-of-tokamaks.pdf>

[21] Consorzio RFX, Fisica ed ingegneria della fusione: la ricerca verso una nuova fonte di energia, settembre 2007, <http://www.igi.pd.cnr.it/wwwedu/index.html>

LUISA BONOLIS

Autrice di vari lavori sulla storia della fisica del Novecento, ha pubblicato una biografia di Ettore Majorana (Le Scienze, 2002), ha curato con C. Bernardini il volume Enrico Fermi: his work and legacy (Società Italiana di Fisica & Springer Verlag, 2004) e ha realizzato una serie di lunghe interviste raccolte nei volumi Fisici italiani del tempo presente. Storie di vita e di pensiero (curato con M. G. Melchionni, Marsilio 2003) e Maestri e allievi nella fisica italiana del '900 (Compositori, Pavia 2008).

Contatti:

E-mail: luisa.bonolis@roma1.infn.it

FRANCA MAGISTRELLI

Laureata in Fisica presso l'Università di Roma nel 1951. Libera docenza in Fisica Generale nel 1966. Attualmente pensionata. All'Istituto di Fisica, dal 1951 al 1957 si è occupata di datazione di materiali archeologici con il metodo del C¹⁴ e ha svolto un'attività sperimentale riguardante l'ottica elettronica con il prof. E. Persico. Dal 1957 ha poi collaborato strettamente con il prof. B. Brunelli nella fondazione dei Laboratori Gas Ionizzati che si sono trasferiti a Frascati nel 1960. In questi laboratori ha svolto un'attività sperimentale riguardante la fisica del plasma. Dal 1981 collabora con il prof. B. Coppi nel contesto del progetto Ignitor. Dal 1983 fino al pensionamento è stata Direttore Responsabile della rivista VUOTO, Scienza e Tecnologia, organo ufficiale dell'AIV (Associazione Italiana Vuoto).

Contatti:

Via Francesco Ferrara, 6 - 00191 Roma

Tel.-Fax: 06 3290763

E-mail: franca_magistrelli@tiscali.it