



# Dai fasci di elettroni ai fasci di fotoni

In questo articolo cerco di rievocare al meglio gli eventi e le emozioni che io, insieme ai miei colleghi, sperimentammo in quel periodo in cui io, giovane ricercatore, lavoravo al Centro di Frascati del CNEN. Verso la metà degli anni 70 le attività di fisica delle alte energie svolte in Frascati vennero trasferite dal CNEN all'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) e il personale ebbe la possibilità di scegliere se continuare a lavorare al CNEN (ovviamente in un differente campo di ricerca) o continuare a lavorare nel campo delle alte energie, ma presso l'INFN. Decisi di rimanere al CNEN e, conseguentemente, dovetti cambiare campo di ricerca. Passai così dagli acceleratori di particelle di alta energia ai laser, campo di ricerca nel quale proprio in quel tempo stava partendo un nuovo interessante progetto sulla "separazione isotopica dell'uranio tramite radiazione laser". L'articolo è concentrato sulle attività di ricerca teorica e sperimentale sviluppate negli anni 70 e 80 presso il centro di Frascati del CNEN su un laser molto particolare che si prevedeva di utilizzare in quel progetto. In questo tipo di laser il mezzo attivo non è costituito da atomi o molecole ma da un fascio di "elettroni liberi" fatto correre lungo una struttura magnetica spazialmente periodica: questo laser è il "Laser ad Elettroni Liberi"

DOI 10.12910/EAI2015-089

■ A. Renieri

## Premessa

In questo articolo ho riportato i miei ricordi di "giovane ricercatore" nel CNEN di Frascati negli anni 70 e 80. Ammetto che molte considerazioni che vi troverete sono affette da quel "senno di poi" che affligge tipicamente tutti i ricordi dei tempi passati (parliamo di un periodo di circa 10 anni a partire da più di 40 anni fa). Spero però di essere riuscito, almeno in parte, a rendere "intelligibile" l'atmosfera, gli entusiasmi, le soddisfazioni e, ahimè, anche le delusioni di quegli anni.

## Dai fasci di elettroni...

È l'anno 1976. Una grossa rivoluzione sta avvenendo nei Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell'allora Comita-

to Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), oggi ENEA. Le attività di ricerca nel campo delle particelle elementari svolte da sempre sotto la direzione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) vengono scorporate dal CNEN e assegnate (laboratori e personale) direttamente all'INFN. Le procedure per tale trasferimento di attività prevedono la libera scelta del personale, che può optare di restare nel CNEN, ovviamente in altri ambiti di ricerca, o accettare il passaggio all'INFN, mantenendo gli stessi impegni di lavoro già svolti presso il CNEN. Per molti di noi la scelta non fu facile, specialmente per chi era impegnato in attività di supporto, come, nel mio caso, quelle relative agli acceleratori di particelle. Le prospettive di lavoro a Frascati nel campo degli acceleratori non erano a quel tempo così rosee. Pochi anni prima era stato affossato il Progetto Superadone, che avrebbe permesso di mantenere a Frascati le attività di ricerca sugli anelli di accumulazione elettrone-positrone ( $e^- e^+$ ) ai livelli raggiunti con la realizzazione negli anni 60, su ideazione di Bruno Touschek, di ADA, primo anello ad essere realizzato nel mondo, e poi di Adone, che aveva

Contact person: Alberto Renieri  
kristinalb@libero.it



fatto seguito alla macchina francese ACO, acceleratore alla cui realizzazione il Gruppo Adone aveva dato importanti contributi.

Proprio in Adone io mossi i primi passi nel mondo degli acceleratori ed ebbi la ventura di seguire, anche con trepidazione, la travagliata messa in operazione della macchina. Si era nel 1968 e un gravissimo problema affliggeva l'anello di accumulazione elettroni-positroni: non si riuscivano ad iniettare i positroni! La notizia filtrò in qualche modo all'esterno e Adone ebbe l'onore di un lungo e ben documentato articolo su *Playmen*, con un titolo in linea con la scelta editoriale di quel giornale: "Adone impotente". In quel frangente ben capii cosa volesse dire "ricerca".

Due fisici teorici (Claudio Pellegrini e Matthew Sands) capirono velocemente il problema: una instabilità di fascio dovuta all'accoppiamento tra i moti longitudinali e trasversali (rispetto alla traiettoria) delle particelle accumulate nell'acceleratore (instabilità testa-coda). Non solo capirono il problema, ma trovarono anche il colpevole, cioè chi provocava quell'accoppiamento. Si trattava degli elettrodi che dovevano servire a modificare le traiettorie degli elettroni e positroni, in modo da far sì che le collisioni avvenissero ad angolo e non "frontali". Tolti gli elettrodi tutto funzionò perfettamente. Era, se ben ricordo, la vigilia del Natale del 1968 quando si riuscì finalmente ad iniettare in modo sostanziale i positroni nella macchina. Sembrava un caso da manuale, preparato apposta per istruire me, giovanissimo "macchinista". Di Adone si parlò nuovamente nella stampa, ma con tutt'altro tono. La notorietà così acquisita aveva anche un prezzo. Le lettere di cultori di fisica "non convenzionale" (tipo: moto perpetuo, non è vero che non si può superare la velocità della luce, il motore ad acqua...) arrivavano copiose. Una fu anche indirizzata al "Prof. Adone", e dunque la nostra macchina acquisì anche titoli accademici. Nel 1976, ci si trovò, come prima detto, di fronte alla scelta se restare nel CNEN o passare all'INFN. La mia scelta fu di lasciare il Gruppo Adone, al quale era legata tutta la mia attività di ricerca fin dal lavoro di preparazione della Tesi di Laurea. Fui spinto a questa sofferta decisione (ero e sono poi rimasto sempre molto legato ai colleghi del gruppo Adone e alla comunità dei "macchinisti") da due considerazioni:

- Le scarse prospettive di realizzazione di una nuova macchina acceleratrice nel futuro prossimo: avevo con

entusiasmo collaborato alla preparazione della proposta del progetto Superadone e la delusione per la bocciatura fu forte. In effetti a Frascati si dovettero attendere molti anni prima di partire con un nuovo progetto di punta in questo campo (Dafne negli anni 90).

- L'interesse crescente che vi era per le sorgenti laser, anche in relazione alle attività legate ad importanti sviluppi nel campo dell'energia nucleare. Tale opzione stava allora nuovamente prendendo quota in Italia dopo la crisi energetica seguita alla guerra del Kipur del 1973 tra Egitto, Siria e Israele, crisi provocata dal blocco delle esportazioni di petrolio verso USA e Olanda dai paesi arabi aderenti all'OPEC e dal susseguente innalzamento vertiginoso (circa triplicato) del prezzo del petrolio.

Cominciò così per me, e per molti altri colleghi che presero la mia stessa decisione, una nuova avventura in un campo nuovo, stimolante, ma anche abbastanza per noi sconosciuto: dovevamo ricominciare da capo per inserirci a pieno titolo in questa nuova (per noi) comunità. Comunità che in realtà fu fin dall'inizio molto ben disposta verso noi nuovi adepti. Furono organizzati in Frascati corsi "accelerati" di ottica quantistica, tenuti da docenti ben felici di aprirci le porte del loro mondo. Eravamo però una anomalia, come fu rimarcato in una comunicazione al Congresso della Società Italiana di Fisica del 1978 a Trento, dove, presentando lo stato delle ricerche in Italia sull'ottica quantistica, si citarono le attività di un gruppo di "fisici disoccupati delle alte energie" in Frascati.

### ...ai fasci di fotoni

Nel centro di ricerca del CNEN di Frascati le ricerche nel campo dei laser erano attive, nella "Divisione Gas Ionizzati", fin dall'inizio dello sviluppo di questa tecnologia. Erano nate per sviluppare sia nuovi sistemi diagnostici nel campo della fisica dei plasmi sia per lo studio dell'interazione laser-materia finalizzata alla realizzazione di sistemi di fusione inerziale. I programmi di ricerca nei quali stavano per impegnarsi i ricercatori e i tecnici che avevano optato per il CNEN riguardavano in parte i temi prima menzionati, in parte un nuovo tema, sempre legato alle problematiche energetiche, *l'arricchimento isotopico foto assistito. È su questo tema che fui io impegnato fin dall'inizio e il decollo di una delle attività nelle quali era*

questo tema articolato cercherò di tratteggiare nel seguito di questo articolo.

### L'arricchimento isotopico dell'uranio

Per poter sfruttare il processo di fissione nucleare ai fini di produzione di energia è necessario disporre di combustibile nucleare opportunamente "arricchito" dell'isotopo  $^{235}\text{U}$ , unico isotopo fissile esistente allo stato naturale, rispetto all'isotopo  $^{238}\text{U}$ , che non è fissile. Il rapporto tra i due isotopi nell'uranio naturale è oggi circa 0,71% (tale rapporto varia col tempo a causa della diversa emivita dei due isotopi). I metodi classici per l'arricchimento isotopico dell'uranio, arricchimento che per gli impieghi in campo energetico tipicamente deve essere di circa il 3% rispetto allo 0,71% naturale, sfruttano la differente massa dei due isotopi in processi di diffusione o di centrifugazione.

In Europa il combustibile nucleare veniva a quei tempi prodotto dal consorzio EURODIF che, utilizzando il processo di diffusione del gas  $\text{UF}_6$ , arrivava ad un arricchimento di circa il 3-5%. L'Italia era uno dei partner di EURODIF e utilizzava il combustibile lì prodotto per alimentare le sue centrali elettronucleari allora in attività. Ma, oltre al combustibile arricchito, all'Italia spettavano anche le corrispondenti "code" di arricchimento, cioè l'uranio impoverito (depleto) che restava dopo il processo di arricchimento. Si stimava in circa 20.000 tonnellate la dimensione di queste code. Tale materiale conteneva ancora quantità importanti di  $^{235}\text{U}$ , una frazione rispetto all'isotopo  $^{238}\text{U}$  dell'ordine del 0,25-0,4% contro il circa 0,71% dell'uranio naturale. E dunque queste code costituivano una piccola "miniera di uranio" a disposizione per ulteriori utilizzi. Il valore "commerciale" era all'epoca stimato in svariate migliaia di miliardi di lire. Non era possibile sfruttare tali code per ottenere ulteriore materiale arricchito mediante il processo di diffusione in quanto, a quei livelli di abbondanza isotopica residua del  $^{235}\text{U}$ , si arriva a saturazione. Vi era però un altro metodo di arricchimento allora in corso di investigazione in vari paesi, in particolare a Los Alamos negli USA, l'*arricchimento isotopico foto assistito*, che prometteva più alta efficienza ed economicità, oltre a non essere soggetto a saturazione. Tale processo permette di arricchire l'uranio sia in forma metallica (vapori di uranio) sia in forma molecolare ( $\text{UF}_6$ : esafluoruro di uranio).

### L'arricchimento isotopico foto assistito

Il processo di arricchimento isotopico foto assistito sfrutta il piccolo "shift isotopico" delle righe spettrali dell'atomo di uranio (o dei suoi composti, in particolare l'esafluoruro di uranio  $\text{UF}_6$ ) dovuto alla differenza di massa (tre neutroni rispetto a 238 tra protoni e neutroni) tra i due isotopi  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ . Caratteristica di tale processo è di non essere soggetto a saturazione. È dunque il processo ideale per sfruttare le code di arricchimento. Va anche detto che, per la stessa ragione, è anche ideale per scopi non pacifici, e, come vedremo, questo si rivelerà per noi un grosso problema.

Nel seguito mi concentrerò esclusivamente sulla attività nella quale fui io impegnato: lo sviluppo del laser di alta potenza media per il processo di arricchimento dell'uranio in forma molecolare nel medio infrarosso (MIR). Altri importantissimi studi per la separazione isotopica nell'IR dell' $\text{UF}_6$  partendo da esperimenti su molecole con struttura simile sono descritti in questo volume [1].

### Il laser di alta potenza media nel MIR

Una prima cosa ci fu molto chiara fin dall'inizio di questa avventura, e ci stimolò oltremodo a tentare l'impresa: un laser operante nel MIR in grado di soddisfare tutte le richieste poste dal processo di arricchimento non esisteva ancora.

Un laser adeguato per essere utilizzato proficuamente in un impianto di arricchimento doveva in primo luogo essere accordabile con continuità attorno alla lunghezza d'onda di  $16\ \mu\text{m}$  con larghezza di riga sufficientemente stretta ( $\Delta\nu/\nu < 10^{-3}$  che è l'ordine di grandezza dello *shift* isotopico nel  $\text{UF}_6$ ) in modo da poter eccitare selettivamente solo la molecola contenente uno dei due isotopi dell'uranio e di essere in grado di produrre un fascio di radiazione di adeguata potenza media (dell'ordine di 0,1-1 kW). Deve infine avere una efficienza il più possibile elevata al fine di garantire una adeguata economicità del processo di arricchimento.

Il nostro primo impegno fu dunque di riuscire a individuare quale tipo di sorgente presentasse le potenzialità di raggiungere, con opportuna attività di ricerca e sviluppo, le caratteristiche richieste. Sembrava non vi fossero a breve scelte percorribili tranne una. Nel 1976 era stato annunciato da un gruppo di ricerca presso l'Univer-

sità di Stanford, guidato da un giovane ricercatore, John Madey, il successo di un esperimento di amplificazione di radiazione laser, alla lunghezza d'onda di 10,6  $\mu\text{m}$  generata da un laser  $\text{CO}_2$ , realizzato con un dispositivo "non convenzionale", nel quale il mezzo attivo non era costituito da atomi e molecole ma da elettroni liberi di alta energia fatti passare lungo una struttura magnetica periodica ("Ondulatore") [2]. L'anno dopo [3] lo stesso gruppo annunciò la prima operazione alla lunghezza d'onda di 3,417  $\mu\text{m}$  di un oscillatore laser basato su tale dispositivo. Il nome dato a questo nuovo laser fu FEL (Free Electron Laser, cioè laser ad elettroni liberi). Una delle caratteristiche peculiari del FEL è la sua accordabilità. Con una opportuna scelta del passo e del campo magnetico dell'ondulatore e dell'energia del fascio di elettroni, è possibile, in linea di principio, coprire un vastissimo campo spettrale che, con la tecnologia attuale, è arrivato fino ai raggi X [4].

#### *Il laser ad elettroni liberi (FEL): Si parte per una avventura che ancora continua*

La decisione di partire con una attività di ricerca e sviluppo nel campo dei FEL fu presa in breve tempo, malgrado tutte le possibili controindicazioni che tale impresa presentava. In particolare:

- Esisteva all'epoca un solo dispositivo di tipo FEL, quello di Stanford. Vi erano molti dubbi sui risultati ottenuti e non era affatto chiaro quali fossero i limiti di quel dispositivo, specialmente in termini di potenza media ed efficienza. Per di più aveva operato con successo solo per un periodo molto limitato: per anni il gruppo di Madey non riuscì a rimmetterlo più in funzione (ma questo noi non lo potevamo prevedere).
- Il FEL non è un dispositivo "da laboratorio", infatti è tipicamente di grandi dimensioni, molto costoso e di difficile operazione: in particolare utilizza fasci di elettroni di energia relativamente elevata (per la regione spettrale di nostro interesse alcune decine di MeV), e dunque necessita di sistemi di protezione per le radiazioni ionizzanti e di un sistema di controllo remoto di tutte le operazioni (quelle ottiche comprese).

Ma a favore del FEL vi erano due aspetti per noi importantissimi:

- La "totale" accordabilità.
- L'alta potenza media e di picco che si poteva preve-

dere di conseguire, dato il livello allora raggiunto dalla tecnologia di produzione e accelerazione dei fasci di elettroni relativistici, e una prevista "sufficiente" efficienza di trasferimento di energia (fascio elettroni)  $\rightarrow$  (fascio laser).

Fu dunque realmente una scommessa l'esserci impegnati in tale impresa. Una spinta particolare ci venne dall'entusiasmo col quale questa idea fu portata avanti dall'allora Capo del Laboratorio Sviluppo Laser 2, della Divisione "Nuove Attività" (DNA), dove nel 1976 avevo iniziato la mia nuova esperienza di lavoro, una persona alle cui ampie capacità di visione si deve tanta parte dello sviluppo sia delle attività di ricerca in Frascati sia di molte delle imprese nelle quali prima il CNEN poi l'ENEA sarà poi negli anni successivi coinvolto, questa persona era Angelo Marino.

In realtà va detto che non si partiva "al buio". A Frascati avevamo tutte le competenze necessarie per tale impresa, sia riguardo agli acceleratori di elettroni (ex gruppo macchina Sincrotrone e "transfughi" dal gruppo Adone, come il sottoscritto), sia riguardo alle tecnologie necessarie alla realizzazione di magneti speciali, come gli ondulatori. Riguardo alle tecnologie ottiche si aveva il valido supporto di colleghi che avevano sviluppato la loro esperienza nel campo lavorando nei progetti della Divisione Gas Ionizzati.

#### *Chi non conosce la storia è condannato a ripeterla*

Come si è accennato nel paragrafo precedente, nel 1977 i meccanismi di funzionamento del FEL non erano affatto chiari. Madey aveva ricavato le relazioni fondamentali che legavano lunghezza d'onda e guadagno laser alle caratteristiche del fascio di elettroni e dell'ondulatore utilizzando un approccio quantistico [5]. Ma alla fine la costante di Planck scompariva, il che faceva supporre che tale dispositivo fosse puramente classico, come in effetti fu poco dopo dimostrato dal gruppo teorico dell'allora "Optical Sciences Center" di Tucson in Arizona (ora "College of Optical Sciences"), guidato da Marlan Scully [6].

La fine degli anni 70 vide i primi gruppi che avevano iniziato a lavorare nel campo dei FEL impegnati in accanite discussioni sulla natura di tale dispositivo. In realtà la storia del FEL inizia molto tempo prima dell'esperimento di Stanford, ma questo lo sapevano gli esperti di tubi a microonde, non gli esperti di ottica quantistica o di



acceleratori di particelle! Fortunatamente ci fu alla fine l'incontro tra esperienze diverse, incontro che portò a un benefico travaso interdisciplinare di conoscenze. In particolare vennero riportati alla luce i lavori pubblicati molti anni prima da H. Motz e collaboratori [7], nei quali veniva descritto un dispositivo per la produzione di microonde da elettroni preventivamente impacchettati fatti passare lungo l'asse di un magnete ondulatore. Questo dispositivo fu dagli autori chiamato Ubitron. Il FEL non è altro che un Ubitron nel quale si utilizzano elettroni relativistici e una cavità ottica per realizzare il processo di emissione stimolata, superando così le difficoltà legate al pre-impacchettamento di elettroni a lunghezze d'onda ottiche, difficoltà ben evidenziate dallo stesso Motz. Si evitò così di "riscoprire l'acqua calda" e ci si poté concentrare sugli aspetti di questa particolare tecnologia ancora allora effettivamente oscuri.

### Le attività teoriche sui FEL a Frascati

Con riferimento ad un unico esperimento si iniziò a Frascati, nell'ambito del Progetto AIFA (Arricchimento Isotopico Foto Assistito), una attività teorica volta a chiarire se le prestazioni di un FEL operante nel MIR potessero essere adeguate per il processo di separazione isotopica.

#### *Analisi classica e quantistica*

Non si partì da soli. Una scelta autarchica sarebbe stata velleitaria e sicuramente inefficace. Esisteva già da qualche anno un'importante collaborazione tra la DNA e l'allora Laboratorio di Elettronica Quantistica del CNR di Firenze (LEQ, poi, dopo varie trasformazioni organizzative, confluito nell'IFAC, Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"). La collaborazione riguardava il campo dei laser dye (a colorante organico) e ad eccimeri, (cioè basati sull'utilizzo di composti eccitati di gas nobile), campo esplorato nel CNEN al fine dello sviluppo di laser per l'arricchimento isotopico foto assistito dell'uranio metallico nella regione spettrale UV-Visibile sempre nell'ambito del Progetto AIFA. Ebbi la fortuna di poter lavorare sulla teoria del FEL con Arturo Bambini del LEQ e, in seguito, con Stig Stenholm, del "Research Institute for Theoretical Physics" dell'Università di Helsinki (Finlandia). Ricordo con nostalgia le giornate "fiorentine" passate

a lavorare con Arturo. Come ebbe a dire un collega del LEQ a mia moglie che chiedeva di me, passavamo il tempo a "stropicciarci con una hamiltoniana", che era poi quella che descriveva il nostro modello di FEL.

Un primo successo di questa collaborazione fu una trattazione classica della teoria FEL [8]. I risultati confermarono i precedenti lavori che indicavano tale dispositivo come puramente "classico", ma con una particolare scelta del modello. La scelta del sistema di riferimento solidale col fascio di elettroni (descritto da quella hamiltoniana con la quale ci si stropicciava) permise di approssimare il campo dell'ondulatore come una onda elettromagnetica (vista la velocità degli elettroni nel sistema di riferimento del laboratorio molto prossima a quella della luce) e di trattare il processo FEL come diffusione all'indietro dei "fotoni dell'ondulatore" stimolata dai fotoni laser co-propagantesi (nel laboratorio) con il fascio di elettroni. Tale modello si rivelò molto efficace per una analisi quantistica della radiazione prodotta, aspetto questo che era, all'epoca, molto dibattuto (...è il FEL un laser? ...è la radiazione prodotta coerente?).

Nel frattempo la DNA si arricchiva di nuove giovani e valenti forze, sia sul versante teorico sia su quello sperimentale. In particolare sul versante teorico si dimostrò, come già accennato, estremamente efficace il modello prima descritto per l'analisi delle caratteristiche di coerenza quantistica della radiazione generata da dispositivi FEL [9] (uso il plurale, ma va ricordato che allora di dispositivi ce n'era uno solo, quello di Stanford!). In seguito si aggiunsero alla DNA contributi di alta eccellenza della allora "Divisione Calcolo" del CNEN di Bologna, che, in collaborazione con i colleghi di Frascati e sotto il generoso impulso di Pier Luigi (Gigi) Ottaviani, portò allo sviluppo di nuovi codici di simulazione del processo FEL (tra i quali spicca Prometeo [10]), codici apprezzati e, da allora fino ad oggi, ininterrottamente e largamente utilizzati in campo nazionale e internazionale.

La collaborazione tra Frascati e Bologna prima che un rapporto di lavoro tra colleghi fu un incontro tra amici. Si andava a Bologna per lavorare, ma anche per passare delle belle serate insieme. L'ospitalità di Gigi era poi proverbiale. Ci teneva a prepararci lui direttamente delle favolose cene a base di pesce. Lui affermava di aver imparato a cucinare il pesce così bene dai bagnini della sua città natale, Cattolica.

### *FEL in Anello di Accumulazione*

Un problema aperto, di grande importanza pratica per noi del CNEN impegnati nel progetto AIFA, era quello relativo alla potenza media ed alla efficienza che ci si poteva aspettare nelle migliori condizioni da un FEL. La domanda era: quanta energia possiamo al massimo trasferire dal fascio di elettroni al fascio laser? Nel caso di un FEL a “singolo passaggio”, cioè nel quale il fascio di elettroni viene sfruttato solo una volta e poi mandato a morire in un pozzo di spegnimento, l’efficienza è limitata dalla larghezza di riga omogenea che è proporzionale all’inverso del doppio del numero di periodi dell’ondulatore. Ciò in quanto la perdita di energia del fascio di elettroni nel passaggio lungo l’ondulatore provoca uno spostamento della riga di risonanza. Se tale spostamento è maggiore della larghezza di banda della curva di guadagno gli elettroni escono di risonanza e non cedono più energia al fascio di fotoni. Con i valori tipici in gioco, questa efficienza è di qualche percento. Ovviamente l’efficienza totale del FEL dipenderà dalle perdite nella cavità ottica, dall’efficienza con la quale viene prodotto il fascio di elettroni, oltre che dalla potenza eventualmente impegnata per gli altri impianti di cui si compone il sistema, come, in particolare, i magneti e, eventualmente, la criogenia.

L’idea più immediata che viene alla mente per aumentare l’efficienza (fascio di elettroni)→(fascio laser) è quella di utilizzare più volte il fascio di elettroni, invece di mandarlo a morire subito dopo il primo passaggio nell’ondulatore. Dispositivi di questo genere esistevano già e a Frascati si era all’avanguardia nel campo: erano gli anelli di accumulazione (che in seguito denomineremo più brevemente SR (Storage Ring)), dove è possibile “accumulare” fasci di elettroni che rimangono per ore a circolare nella macchina con perdite molto limitate. È necessario solo rifornire quell’energia che perdono per irraggiamento nei magneti curvanti con opportune cavità acceleranti a radio-frequenza.

L’idea di utilizzare uno SR era stata formulata già da Madey, che aveva proposto di utilizzare delle strutture già esistenti (il doppio SR per elettroni di Cornell) per assemblare un primo prototipo di FEL di questo tipo. La dinamica di un fascio di elettroni in SR nel quale era operante una sorgente FEL, era però ancora tutta da chiarire. Un primissimo tentativo fu fatto da Matthew Sands (University of California, Santa Cruz (UCSC)) pochi mesi

dopo il primo esperimento di amplificazione FEL a Stanford. Si era nel dicembre del 1975, pochi mesi prima della divisione dei laboratori di Frascati tra CNEN ed INFN, e Sands era ospite presso il gruppo Adone, presso il quale io ancora lavoravo. Spesso era in Italia (nel 1968, con Claudio Pellegrini, aveva individuato nell’effetto testa coda il problema che impediva di accumulare stabilmente i positroni in Adone, come già detto nel paragrafo “Dai fasci di elettroni...”).

In Italia amava di tanto in tanto tornare e, viceversa, con piacere accoglieva noi ospiti italiani nella sua bella casa a Santa Cruz in California. Aveva una personalità e una competenza poliedriche. Partecipò giovanissimo al progetto Manhattan in Los Alamos, fu collega di Richard Feynman, per cui curò la stesura delle famose “Lectures on Physics”, e che convinse nel 1965 ad accettare il Premio Nobel che Feynman disdegnava insieme alla corrispondente notorietà (gli fece capire che non accettandolo avrebbe avuto ancora maggiore notorietà). Infine era un grande esperto di macchine acceleratrici e, in particolare, di SR. Aveva anche un aspetto molto particolare, accentuato dalla fascia che a volte portava, con orgoglio, sulla fronte, a ricordo delle sue origini (la nonna era una indiana d’America). Era reduce da Stanford dove aveva appena appreso i risultati ottenuti dal gruppo di Madey. Il risultato di quel primo studio non fu mai pubblicato, ma rimase come Memorandum Interno del Progetto Adone [11]. Fu in quella occasione che io sentii per la prima volta parlare di FEL (l’articolo [2] nel quale veniva annunciato il successo dell’esperimento di amplificazione ottenuto a Stanford non era ancora stato pubblicato). I risultati ottenuti da Sands erano notevoli. L’obiettivo del suo lavoro era di ricavare le condizioni di equilibrio e stabilità di un sistema SR-FEL. Nell’articolo dimostrava che una trattazione linearizzata del processo portava a determinare una dispersione in energia del fascio di elettroni fuori dal dominio in cui l’approssimazione lineare era valida, e dunque vi era la necessità di una trattazione completa non lineare.

Come prima cosa per affrontare il problema era necessaria una analisi multimodale del processo FEL, nella quale il fascio laser venisse correttamente descritto nella sua struttura spaziale e temporale. Il lavoro che si fece in quegli anni portò alla formulazione della “Teoria Classica Multimodale del FEL” [12], che fu la base per la trattazione in termini di “Supermodi” della pro-

pagazione dell'impulso ottico lungo un amplificatore FEL [13]. La dinamica del sistema accoppiato SR-FEL poteva ormai essere affrontata con gli strumenti giusti. Si arrivò così a formulare prima la teoria di un amplificatore FEL operante in uno SR [14] e poi ad una trattazione completa di un oscillatore SR-FEL [15]. Furono così ricavate le condizioni di equilibrio e stabilità per il fascio di elettroni circolante nello SR e per il fascio laser nel FEL.

Il risultato che a noi di più premeva era quello relativo alla efficienza e alla conseguente potenza media del FEL. Purtroppo risultò che l'efficienza era ancora data dalla larghezza di riga omogenea. Ciò in quanto la potenza media FEL risultò proporzionale alla potenza irradiata dal fascio di elettroni lungo la macchina per emissione di sincrotrone nei magneti curvanti e in eventuali altri dispositivi magnetici, potenza che va restituita al fascio di elettroni, tramite le cavità acceleratrici a radio frequenza, se si vuole mantenere stabilmente il fascio accumulato nella macchina.

La ragione di questo fatto nasce dal "riscaldamento" provocato dall'interazione FEL, dovuto al processo di "randomizzazione" generato dal moto di sincrotrone (il moto longitudinale degli elettroni accumulati nello SR). Ad ogni passaggio il singolo elettrone è soggetto ad una variazione di energia e impulso che dipendono dalla fase di ingresso nell'ondulatore rispetto al campo elettromagnetico della radiazione laser intrappolata nella cavità ottica. Nel viaggio dell'elettrone lungo il resto della macchina tale "ricordo di fase" si "perde" a causa del moto di sincrotrone, che genera spostamenti di fase molto maggiori della lunghezza d'onda della radiazione prodotta dal FEL. Tale "riscaldamento" è contrastato solo dal "damping di radiazione", dovuto all'irraggiamento di luce di sincrotrone negli elementi magnetici della macchina, di qui la dipendenza della potenza FEL dalla potenza totale irradiata. La costante di proporzionalità è ancora data dalla larghezza di riga omogenea in quanto per spostamenti in energia oltre tale valore l'elettrone non è più in risonanza e pertanto non partecipa più al processo di cessione di energia al campo laser.

E dunque, in definitiva, l'utilizzo di uno SR non porta ad un aumento dell'efficienza rispetto ad un dispositivo che utilizzi il fascio di elettroni solo per un passaggio, contrariamente a quanto prima ipotizzato da molti,

compreso noi di Frascati. Si era arrivati addirittura a pensare che l'interazione FEL potesse "raffreddare" il fascio di elettroni!

Quello che si ottenne a Frascati costituì una pietra miliare per i FEL operanti in SR. I risultati ottenuti in [15] furono poi verificati sperimentalmente per la prima volta nella sorgente SR-FEL realizzata negli anni 80 a Orsay in Francia [16], e poi in tutte le altre sorgenti SR-FEL realizzate successivamente in Giappone, negli USA, in Unione Sovietica, in Germania e in Italia. Questo lavoro fu anche parte della motivazione del "International FEL Prize" conferito agli autori di quelle ricerche nel 1994 [17].

### *Il Progetto LEDA*

Torniamo a quegli anni e alle richieste del Progetto AIFA, cioè un fascio laser accordabile attorno a  $16 \mu\text{m}$  di lunghezza d'onda con larghezza di riga minore di 0,1 % e con potenza media dell'ordine del kW. Si provò, utilizzando la teoria appena sviluppata, a progettare un SR-FEL che soddisfacesse quelle caratteristiche. Il risultato fu la proposta di progetto "LEDA" (acronimo, ad essere sinceri un po' forzato, da "Laser ad Elettroni Da Accumulatore") [18]. LEDA è uno SR per elettroni operante all'energia di 750 MeV di tipo "race-track".

Le lunghe sezioni dritte della struttura "race track", permettono di alloggiare, oltre all'ondulatore del FEL, le cavità acceleranti e gli elementi di focalizzazione (quadrupoli) e di correzione (sestupoli), anche vari tripletti di magneti curvanti ad alto campo (Wiggler) al fine di aumentare considerevolmente la potenza media irradiata dagli elettroni per emissione di sincrotrone e dunque di aumentare di conseguenza la potenza media di uscita del FEL, che veniva stimata dell'ordine di alcuni kW, con larghezza di riga minore dello 0,01%, in linea dunque con le richieste del progetto AIFA. Anche la stabilità dell'energia della macchina doveva, ovviamente, rientrare in tali limiti, per cui un progetto definitivo avrebbe dovuto poi anche affrontare in modo prioritario tale aspetto. Ma un progetto definitivo non fu mai fatto. LEDA nacque e morì nel giro di un anno. La ragione era semplice: vista l'inutilità di utilizzare uno SR per alzare l'efficienza del sistema, appariva più appetibile sviluppare un FEL a singolo passaggio, certamente meno costoso e più semplice da operare.

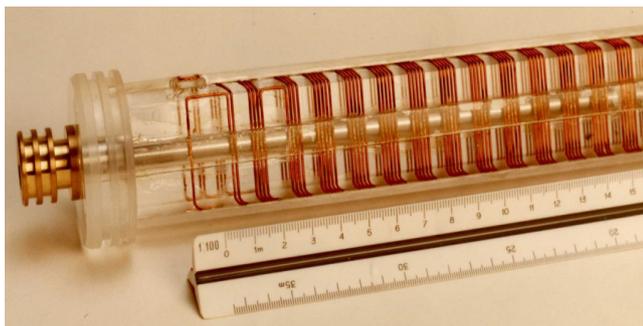
## L'oscillatore FEL

Si era così arrivati alla primavera del 1979. Molti aspetti della dinamica FEL erano stati chiariti ed era ormai tempo di partire a Frascati col programma sperimentale (va ricordato che il progetto AIFA era in attesa delle sorgenti adeguate per la separazione isotopica). Nella primavera del 1985 fu raggiunto il primo obiettivo: la messa in operazione del primo oscillatore FEL in Italia [19]. Il fascio di elettroni era prodotto dal microtrone [20, 21] che, dalla fine degli anni 60, fu l'iniettore dello storico Sincrotrone di Frascati fino alla sua chiusura. L'ondulatore scelto era un elettromagnete lineare impulsato (Figura 1).

Ovviamente per il tipo di ondulatore scelto si poteva solo lavorare ad impulso singolo, ma in questa fase non si era interessati alla potenza media, ma solo alla dinamica dell'impulso laser. La lunghezza d'onda di operazione fu scelta coincidente con quella del laser CO<sub>2</sub> (≈10,6 μm). In Figura 2 è mostrata la foto dell'apparato appena montato. Il microtrone è sullo sfondo, mentre al centro si vede l'ondulatore impulsato. In primo piano campeggia il magnete curvante (di colore blu) che serve a deflettere gli elettroni verso il pozzo di spegnimento (di colore bianco).

Nella Figura 3 si vede la foto della sala di controllo del nostro FEL, dove campeggiano strumentazioni degli anni 80, che ben figurerebbero oggi in un museo. Infine, nella Figura 4 è riportata la tipica potenza di uscita dell'impulso laser prodotto.

Questo successo ci spronò a passare rapidamente alla fase realizzativa della sorgente per il progetto AIFA. Tale sorgente avrebbe operato con più alto guadagno, mag-



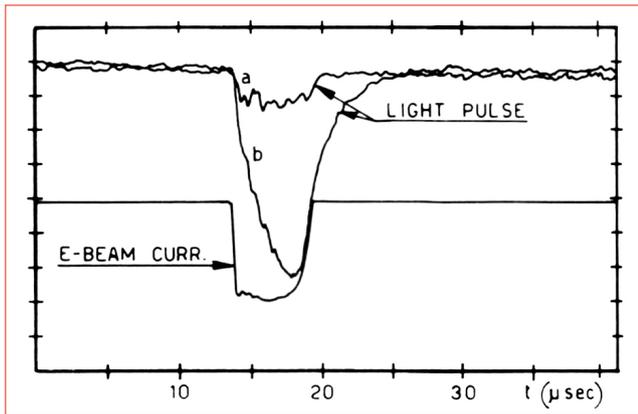
**FIGURA 1** Ondulatore lineare impulsato utilizzato per il primo oscillatore FEL in Italia



**FIGURA 2** Apparato sperimentale



**FIGURA 3** Sala controllo FEL. Da sinistra a destra: Eugenio Fiorentino, Alberto Renieri, Elio Sabia



**FIGURA 4** Potenza di uscita dell'impulso di luce (LIGHT PULSE) a 10,6  $\mu\text{m}$ : (a) sotto soglia. (b) sopra soglia alla corrente media di 60 mA

giore durata del microimpulso e più alta frequenza di ripetizione. Ma la sorgente operante alla faticosa lunghezza d'onda di 16  $\mu\text{m}$  non vide mai la luce.

## Il nucleare in Italia

A metà degli anni 80 due fatti portarono ad un cambiamento radicale dei programmi FEL all'ENEA (la nuova denominazione del CNEN). Il primo era collegato alla natura stessa del processo di arricchimento. Il processo di arricchimento isotopico foto assistito (obiettivo del Progetto AIFA) fu considerato "pericolosamente proliferante" in quanto potenzialmente utilizzabile per la produzione di materiale fissile a scopi bellici. In effetti, come già sottolineato alla fine del paragrafo sull'arricchimento isotopico dell'uranio, tale processo non è soggetto a saturazione, inoltre non richiede grandi impianti e dunque può facilmente sfuggire ad azioni di controllo da parte degli enti internazionali vigilanti. L'attività di sviluppo di sorgenti laser per l'arricchimento nella regione dei 16  $\mu\text{m}$  fu "sconsigliata" proprio per tali implicazioni. Questo tipo di suggerimento ci arrivò dopo una "visita" effettuata a Frascati da Edward Teller (allora "Direttore Emerito" dei Laboratori di Livermore dove, agli inizi degli anni 50,

aveva ideato e realizzato la bomba all'idrogeno, e consigliere del presidente Reagan). L'incontro ebbe un che di surreale. Dopo la visita dei laboratori ci fu richiesto di descrivere le nostre attività (purtroppo tutte fortemente indiziate di essere "proliferanti"). Teller ascoltò ma non commentò. Un secondo evento si verificò proprio poco tempo dopo il successo del nostro primo FEL.

Nel 1986 vi fu l'incidente nucleare di Chernobyl il cui impatto emotivo porterà, attraverso un referendum, alla moratoria delle attività nucleari in Italia, moratoria che poi si tramuterà (almeno fino ad oggi e con alterne vicende), in uno stop praticamente definitivo. Tutto ciò portò ad un radicale mutamento dei programmi nucleari dell'ENEA e, in particolare, alla chiusura del Progetto AIFA.

## Conclusioni

Ci si trovò così a mezza strada. La realizzazione della sorgente FEL a 16  $\mu\text{m}$  fu interrotta, ma non furono interrotte le attività sui laser ad elettroni liberi. Forti dell'esperienza maturata in quegli anni, furono prese altre strade di grande interesse, in particolare verso la realizzazione di sorgenti operanti sia nell'infrarosso lontano, fino ai THz [22], sia, a partire dagli anni 2000, nella regione UV - X [23]. Queste attività, che hanno fatto tesoro di quanto sviluppato in quei primi 10 anni di lavoro, sono state portate avanti (e lo sono tuttora) nell'ambito di vaste collaborazioni, nazionali e internazionali, con il supporto sia dei programmi nazionali sia dei programmi quadro dell'Unione Europea.

## Ringraziamenti

Un mio caldo ringraziamento va in primo luogo a tutti quei colleghi con i quali ho avuto l'onore di collaborare e che mi hanno permesso di vivere l'affascinante avventura che ho cercato di descrivere al meglio in questo articolo. Un ringraziamento particolare va poi Giuseppe (Pino) Dattoli col quale ho condiviso in tutti questi anni passioni, dispiaceri, ma anche gioie, che il nostro lavoro di fisici ci ha riservato. Lo ringrazio infine anche per avere avuto la pazienza di leggere criticamente le bozze di questo scritto, dandomi i suoi preziosi suggerimenti. ●

Alberto Renieri  
già ENEA, Centro Ricerche Frascati

## From Electron Beams to Photon Beams

*In this article I try to report at the best the events and the emotions I experienced, together with my colleagues, when I was a young researcher working at the Frascati Center of CNEN. In the middle of 70's the high energy physics activities carried out in Frascati were transferred from CNEN to INFN (Istituto Nazionale Fisica Nucleare) and the personnel had the chance to chose to continue to work at the CNEN (obviously in a different research field) or to continue to work in high energy physics, but at the INFN. I decided to remain at the CNEN and, consequently, I had to change my research activity. I moved from the high energy accelerators research field to the lasers research field in which, at that time at the CNEN, a new interesting project on "uranium laser isotope separation" was just starting. This article is focused on the theoretical and experimental development activity, carried out in the years 70's-80's at the CNEN Frascati Center, on a quite particular kind of laser to be utilized in that project. In this laser the active medium is not made of atoms or molecules but is a beam of free electrons running along a spatially periodic magnetic structure: this laser is the "Free Electron Laser".*

- [1] R. Fantoni, E. Borsella, A. Palucci, A. Giardini, *Laser e molecole: la stagione dei multifotoni a Frascati negli anni 70 e 80*, pagg. 29-37 in questo volume
- [2] L.R. Elias, W.M. Fairbank, J.M.J. Madey, H.T. Schwettman and T.I. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **36**, 717 (1976)
- [3] D.A.G. Deacon, L.R. Elias, J.M.J. Madey, G.J. Ramian, H.T. Schwettman and T.I. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **38**, 892 (1977)
- [4] P. Emma et al. *Nat. Photon.* **176**, 1038 (2010)
- [5] J.M.J. Madey, *J. of Appl. Phys.* **42**, 1906 (1971)
- [6] F.A. Hopf, P. Meystre, M.O. Scully and W.L. Luisell, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 1342 (1976)
- [7] H. Motz, *J. of Appl. Phys.* **22**, 527 (1951); H. Motz, W. Thon and R.N. Whithurst, *J. of Appl. Phys.* **24**, 826 (1953)
- [8] A. Bambini and A. Renieri, *Lett. Nuovo Cimento* **21**, 399 (1978); A. Bambini, A. Renieri and S. Stenholm, *Phys. Rev.* **A19**, 2013 (1979)
- [9] R. Bonifacio, G. Dattoli, A. Renieri and F. Romanelli, *Optics Comm.* **34**, 240 (1980); G. Dattoli, A. Renieri and F. Romanelli, *Optics Comm.* **35**, 245 (1980); G. Dattoli, M. Richetta, *Optics Comm.*, **50**, 165 (1984)
- [10] G. Dattoli, M. Galli and P.L. Ottaviani, ENEA Internal Report No RT/INN/93/09
- [11] M. Sands, Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN, Progetto ADONE – Memorandum Interno " Storage-Ring-Laser (Summary of what I know), **T-73**, 29/12/1975
- [12] G. Dattoli and A. Renieri, *Lett. Nuovo Cimento* **24**, 121 (1979); G. Dattoli, A. Marino and A. Renieri, *Opt Commun.* **35**, 407 (1980)
- [13] G. Dattoli, J.C. Gallardo, T. Hemsen, A. Renieri and A. Torre, *Phys. Rev.* **A37**, 4326 (1988); G. Dattoli, T. Hemsen, L. Mezi, A. Renieri and A. Torre, *Phys. Rev.* **A37**, 4334 (1988)
- [14] A. Renieri, *Il Nuovo Cimento* **53B**, 160 (1979)
- [15] G. Dattoli and A. Renieri, *Il Nuovo Cimento* **59B**, 1 (1980)
- [16] M. Billardon, P. Elaume, J.M. Ortega, C. Bazin, M. Bergher, Y. Petroff and M. Velghe, *Nucl. Instr. and Meth.* **A237**, 244 (1985)
- [17] P. Sprangle, Chairman FEL-Prize Committee, *Nucl. Instr. and Meth.* **A358**, p. ix (1995)
- [18] R. Barbini, G. Dattoli, T. Letardi, A. Marino, A. Renieri and G. Vignola, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS26**, 3836 (1979)
- [19] U. Bizzarri, F. Ciocci, G. Dattoli, A. De Angelis, E. Fiorentino, G.P. Gallerano, I. Giabbai, G. Gordano, T. Letardi, A. Marino, G. Messina, A. Mola, L. Picardi, A. Renieri, E. Sabia and A. Vignati, *Nucl. Instr. and Meth.* **A250**, 254 (1986)
- [20] U. Bizzarri and A. Vignati, *Il Nuovo Cimento* **68A**, 513 (1970)
- [21] U. Bizzarri and A. Vignati, CNEN Report **80.41/p**, Centro di Frascati, Frascati, Rome, Italy (1980) and *Lett. Nuovo Cimento* **31**, 277 (1981)
- [22] F. Ciocci, G. Dattoli, A. De Angelis, A. Di Pace, A. Doria, L. Giannessi, G.P. Gallerano, A. Renieri, E. Sabia, A. Torre and D.A. Jaroszynski, *Nucl. Instr. and Meth.* **A296**, 75 (1990)
- [23] A. Renieri, *Nucl. Instr. and Meth.* **A507**, 507 (2003)