

a.

E luce fu

Elettroni accelerati per illuminare la materia.

di Emilio Burattini

Una carica elettrica accelerata emette radiazione elettromagnetica: questo fenomeno era noto fin dal 1887 quando fu studiato da Joseph Larmor e, successivamente, da Alfred Lienard che affrontò, in particolare, il caso della radiazione emessa da un elettrone in moto su una traiettoria circolare per effetto di un'accelerazione centripeta. Ma fu solo nel 1947 che un gruppo di ricercatori del *General Electric Research Laboratory*, coordinati da Frank Elder, osservò per la prima volta la parte visibile della radiazione emessa da un fascio di elettroni accelerati nel piccolo sincrotrone da 70 MeV del Laboratorio di Schenectady, a New York. Da quel momento in poi, la radiazione elettromagnetica emessa da particelle cariche in moto in un campo magnetico, ha preso il nome di *radiazione di sincrotrone* o *luce di sincrotrone*, indipendentemente dal tipo di acceleratore che la produce.

La potenza emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica da parte di elettroni accelerati, già oggetto di accurate ricerche teoriche negli anni '20 e '30, fu oggetto di studi sistematici solo dopo il 1947 e fu lo stesso gruppo di Elder che determinò, per la prima volta, la distribuzione spettrale, ossia la potenza trasportata dal fascio di radiazione in funzione della lunghezza d'onda. Nella seconda metà degli anni '50, la radiazione di sincrotrone era utilizzata in un piccolo numero di laboratori nel mondo per condurre esperimenti pionieristici, quasi esclusivamente nel campo della spettroscopia di assorbimento nella regione dei raggi X "mollini", che hanno lunghezze d'onda comprese tra i 20 e i 60 nanometri (un nanometro è un milionesimo di millimetro). Si utilizzava, però, la radiazione emessa da acceleratori la cui attività era dedicata quasi esclusivamente a esperimenti nel campo della fisica delle alte energie. Oggi la situazione è radicalmente mutata: migliaia di ricercatori, infatti, lavorano in circa 40 laboratori dove operano acceleratori progettati, costruiti e ottimizzati per produrre luce di sincrotrone. La luce di sincrotrone possiede delle caratteristiche che la rendono una sorgente di radiazione elettromagnetica unica e, per alcuni versi, insostituibile: alcune di queste sono la distribuzione spettrale continua e senza strutture, che si estende dal lontano

infrarosso ai raggi X, l'elevata intensità che, nella regione dei raggi X, può essere anche diversi ordini di grandezza più alta di quella di una sorgente convenzionale e l'elevata collimazione sul piano verticale. Osservando, infine, la radiazione lungo una direzione complanare al piano dell'orbita degli elettroni essa risulta polarizzata linearmente.

Si può concludere che nessuna altra sorgente di radiazione elettromagnetica presenta, tutte insieme, le molteplici e straordinarie caratteristiche della luce di sincrotrone. Solo con essa è possibile, per esempio, ottenere intense righe monocromatiche di raggi X. Data la richiesta crescente di fasci di raggi X sempre più intensi, iniziò nel 1976, sulla base di una collaborazione internazionale, la realizzazione di strutture magnetiche multipolari a campo alterno installate sugli acceleratori che consentissero di ottenere o fasci di fotoni di energia e intensità più alta, come accade nel caso dei *wiggler*, o fasci di fotoni quasi monocromatici, come accade negli ondulatori (vd. "Fel, la luce del futuro" p. 40, ndr). Le linee di ricerca in cui si fa uso della luce di sincrotrone sono diventate davvero numerose: dalla scienza dei materiali alla biofisica, dalla cristallografia alla microingegneria, dalla radiologia alla biomedicina, campo questo in cui l'uso della luce di sincrotrone ha consentito, nell'ultimo decennio, di

raccogliere risultati di grande interesse scientifico. Un esempio è dato dal programma di ricerche nel campo della mammografia con luce di sincrotrone, appunto, partito agli inizi degli anni '90 ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. Qui, per la prima volta, usando un fascio di raggi X monocromatico si è dimostrato che la mammografia con luce di sincrotrone consente di ottenere immagini con elevato contrasto e grande risoluzione dove è possibile osservare, all'interno di una lesione neoplastica, strutture di dimensioni inferiori al millimetro permettendo in tal modo di arrivare a diagnosi precoci della eventuale patologia presente (vd. "Il meglio della fisica per la mammografia" p. 41, ndr). Il poter disporre, infine, di intensi fasci monocromatici di raggi X molli permette la realizzazione di strutture di dimensioni inferiori al micron, ossia al millesimo di millimetro, mediante processi litografici a raggi X. La moderna microingegneria realizza, infatti, con questa tecnica apparati funzionanti, come per esempio sensori, attuatori meccanici e motori.

Biografia

Emilio Burattini insegna fisica all'Università di Verona. Ha svolto la maggior parte della sua carriera scientifica ai Laboratori di Frascati nello studio e nelle applicazioni della radiazione di sincrotrone.

b.



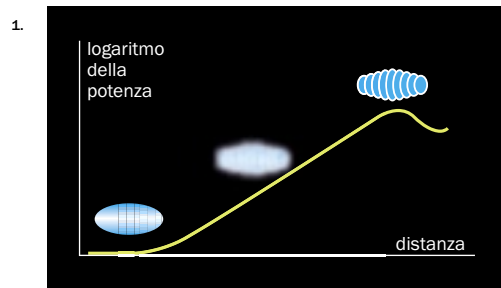
a.

La radiazione elettromagnetica.

b.

Grazie alla luce di sincrotrone è possibile ottenere immagini di qualità migliore, utilizzando dosi di radiazione simili o inferiori a quelle utilizzate nella radiografia convenzionale. Il confronto tra le due immagini della lucertola parla chiaro: quella ottenuta da radiazione monocromatica di luce di sincrotrone con energia pari a 17 KeV permette di vedere perfino ciò di cui la lucertola si era nutrita.

[as] Fel, la luce del futuro



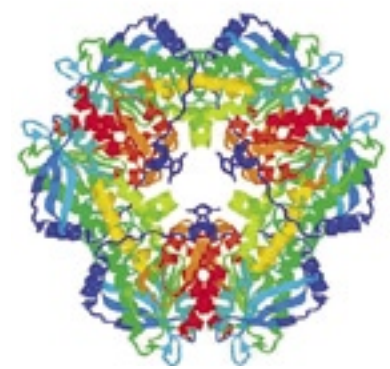
1. Schema di funzionamento di un Fel. A sinistra, propagazione del fascio di elettroni all'interno di un ondulatore. A destra, è riportato l'andamento della potenza emessa lungo l'ondulatore ed è, inoltre, rappresentato l'effetto di progressivo "impacchettamento" del fascio di elettroni.

2. Immagine di una proteina "vista" con la luce di sincrotrone. Grazie a questo tipo di radiazione è stato possibile svolgere studi che hanno portato all'assegnazione di ben tre premi Nobel per la chimica. Le molecole per essere viste però devono essere prima cristallizzate e quindi non si trovano più nel loro stato naturale. Con il laser a elettroni liberi, invece, la cristallizzazione non sarà più necessaria grazie all'alto flusso di fotoni che questo dispositivo è in grado di fornire.

Sarà il super microscopio del futuro. Si chiama Fel (*Free Electron Laser*), è un fascio di luce di sincrotrone molto intenso che, per le sue particolari caratteristiche, consentirà di fotografare molecole e proteine durante la loro attività, cosa finora impossibile. Questo strumento favorirà dunque un grande avanzamento nella ricerca in diverse discipline, tra cui le nanotecnologie e la medicina. Il Fel è una sorgente di luce di sincrotrone in grado di produrre radiazione elettromagnetica monocromatica di lunghezza d'onda inferiore a un milionesimo di millimetro, ovvero raggi X. Questi dispositivi consistono essenzialmente in un lungo magnete, detto "ondulatore", caratterizzato da un campo magnetico sinusoidale prodotto da una serie di piccoli magneti ("calamite" lunghe circa 1 cm, piccole ma potentissime) con polarità alternata, in cui viene iniettato un fascio di elettroni di alta densità di carica. All'interno di questa struttura magnetica, gli elettroni emettono radiazione di lunghezza d'onda,

Biografia
Massimo Ferrario si occupa della fisica dei fasci di elettroni ad alta brillantezza. È responsabile per i Lnf del progetto Fel Sparx e coordina il gruppo di fisica di macchina del progetto Fel Sparx.

Link sul web
www.lnf.infn.it/acceleratori/sparx
www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls
xfel.desy.de
flash.desy.de
www.elettra.trieste.it/FERMI/



detta di *risonanza*, direttamente proporzionale al periodo dell'ondulatore e inversamente proporzionale al quadrato dell'energia degli elettroni (che in genere è maggiore di 1 GeV). Proprio quest'ultima dipendenza consente di variare la lunghezza d'onda cambiando l'energia del fascio iniettato nell'ondulatore. In una prima fase, detta di *letargia*, l'interazione tra il fascio di elettroni e la radiazione emessa dal fascio stesso mentre viaggia all'interno dell'ondulatore produce una ridistribuzione spaziale degli elettroni in tanti piccoli pacchetti, di lunghezza esattamente pari alla lunghezza d'onda di risonanza. In questo modo miliardi di elettroni si auto-organizzano per partecipare all'emissione di radiazione in fase tra loro, con una crescita esponenziale della potenza emessa. Il processo si arresta quando viene raggiunta la fase di saturazione, quando cioè gli elettroni hanno convertito in energia elettromagnetica una frazione (circa il 10%) della loro energia cinetica iniziale per cui non risulta

più soddisfatta la condizione di risonanza. Il flusso di fotoni emesso da un Fel è di parecchi ordini di grandezza maggiore di quello prodotto dalle attuali sorgenti di luce di sincrotrone a raggi X. In Italia si sta lavorando per realizzare due Fel, dotati di differenti caratteristiche e che quindi copriranno differenti regioni dello spettro di radiazione: il progetto Sparx, che produrrà radiazione tra 10 e 1 nm, risultato della collaborazione tra Infn, Cnr, Enea e Università di Roma "Tor Vergata" e finanziato in parte dal Miur, dalla Regione Lazio e dalla Comunità Europea. E il progetto Fermi, presso l'acceleratore Elettra di Trieste, che produrrà radiazione tra 100 e 10 nm, finanziato dal Miur, dalla Regione Friuli, dal consorzio Sincrotrone Trieste e dalla Comunità Europea. In futuro il nostro Paese, quindi, potrebbe essere uno dei pochi dotati di tutti i tipi più avanzati di sorgenti Fel, con notevoli vantaggi per la ricerca e per la tecnologia industriale. [Massimo Ferrario]

[as] Il meglio della fisica per la mammografia

La diagnosi precoce del cancro al seno salva la vita: per questo motivo si lanciano programmi di *screening* mammografico. A Trieste, negli ultimi due anni, le donne tra i 50 e i 70 anni sono state reclutate per una mammografia di controllo: su 10.000 esami, sono circa 100 i casi di tumore maligno. Per arrivare a questi 100 è, però, necessario un passo intermedio. Dopo il primo esame, infatti, sono circa 500 i casi in cui si manifestano anomalie sospette nelle immagini mammografiche: queste pazienti sono allora richiamate per successivi approfondimenti che, nella maggior parte dei casi, si concludono con la biopsia, un esame molto invasivo. Per evitarlo si cerca di migliorare la mammografia, agendo sia sulla sorgente dei raggi X che sul rivelatore (dal sistema schermo-pellicola a un rivelatore digitale d'alta risoluzione spaziale).

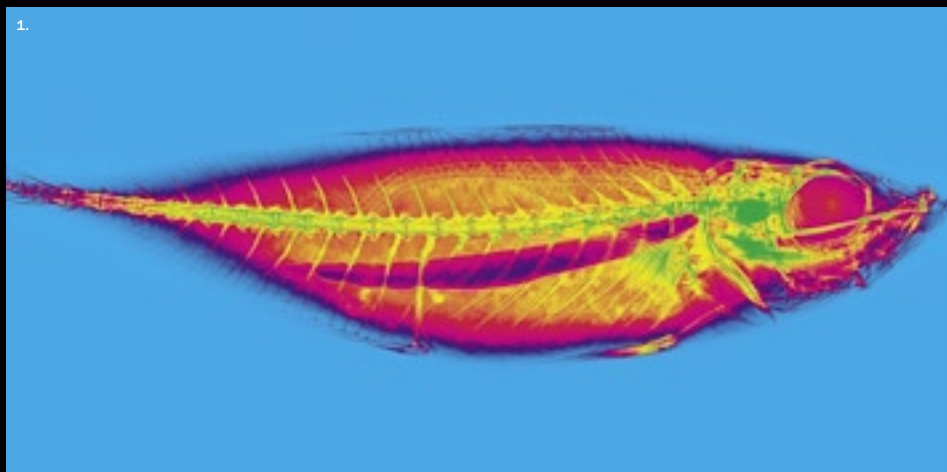
Abbiamo costruito, al Laboratorio Elettra, la linea di luce Syrmep (*Synchrotron Radiation for Medical Physics*). Questa sorgente di raggi X è particolarmente adatta per i tessuti molto trasparenti, come quelli del seno. Rispetto alla mammografia tradizionale, la radiazione è molto più intensa e si può selezionare

l'energia del fascio più adatta al singolo esame, ottenendo così una riduzione della dose assorbita. Questa sorgente ha inoltre un alto grado di "coerenza": tutti i punti del fronte d'onda sono cioè "in fase". La rivelazione della lesione non si basa, perciò, solamente sul diverso grado d'assorbimento dei raggi X da parte dei tessuti, come nella mammografia convenzionale, ma anche sul fatto che la radiazione impiega tempi diversi ad attraversare tessuti diversi. I vari punti del fronte d'onda non sono più in fase e si ha una distorsione del fronte dell'onda emergente. Si produce così il cosiddetto *contrasto di fase*, che può essere osservato ponendo un rivelatore ad alta risoluzione spaziale in un'opportuna posizione dopo l'oggetto da radiografare. I dettagli sono più definiti ed i contorni della lesione meglio evidenziati, fornendo una migliore immagine per la diagnosi.

Oggi, questo tipo di mammografia non si avvia a sostituire la mammografia convenzionale, ma viene proposto come approfondimento in casi d'incertezza: utilizzarlo come primo esame non è possibile per i limiti posti dalle strutture disponibili in relazione all'alto numero delle potenziali utenti. [Edoardo Castelli]

1.
Radiografia di un pesce con luce di sincrotrone in contrasto di fase realizzata dall'esperimento Syrmep della Sezione Infn di Trieste.

2.
Radiografie con raggi X di una spiga, in contrasto di fase (immagine di sinistra) e in assorbimento (immagine di destra). Le radiografie sono state raccolte presso la linea di luce di sincrotrone Syrmep di Trieste, grazie al rivelatore digitale Picasso, sviluppato dall'Infn. È evidente come nel primo caso l'immagine sia molto più nitida e dettagliata.



Biografia

Edoardo Castelli svolge attività di ricerca in fisica medica, dedicandosi all'imaging in mammografia digitale con radiazione di sincrotrone.

Link sul web

www.ts.infn.it/physics/esperimenti/picasso.html

www.ts.infn.it/physics/esperimenti/picasso/la-collaborazione-picasso.html

www.ts.infn.it/physics/esperimenti/picasso/alcune-immagini.html

www.elettra.trieste.it

