

Elettroni brillanti

Radiazione di sincrotrone nei free electron laser

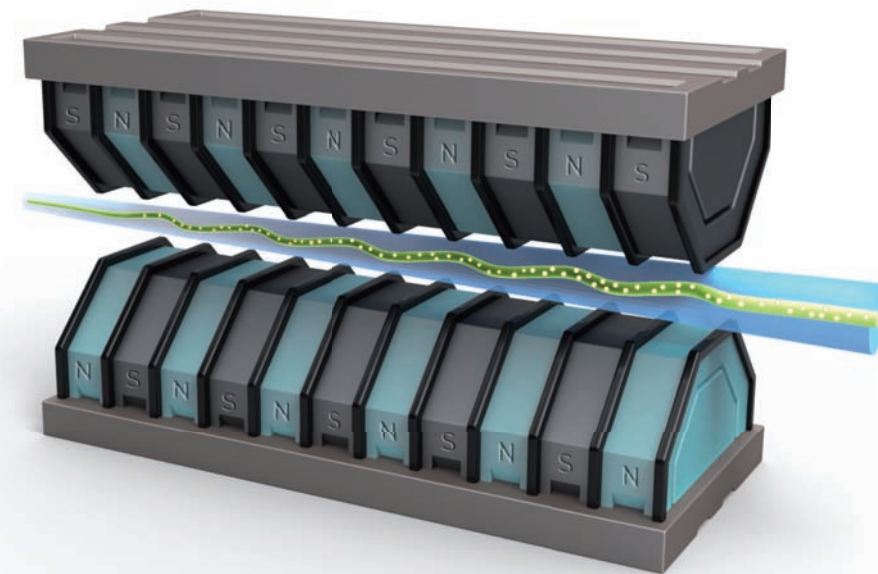
di Luca Serafini

Che un elettrone sottoposto ad accelerazione fosse in grado di emettere radiazione elettromagnetica era già stato previsto da Larmor alla fine dell'ottocento e poi da Liénard pochi anni più tardi per elettroni in moto relativistico, cioè con velocità prossime a c , la velocità della luce nel vuoto (300.000 km/s). Ma si dovette attendere fino al 1947, perché si verificasse la prima osservazione sperimentale di tale fenomeno grazie allo sviluppo degli acceleratori di particelle. Un operatore del sincrotrone da 70 MeV, l'acceleratore di elettroni costruito nei laboratori della General Electric a New York subito dopo la guerra, osservando dei lampi di luce provenire dall'interno della ciambella (la camera da vuoto), arrivò a pensare che una

scarica elettrica lo stesse danneggiando e corse a spegnere la macchina. Solo più tardi i fisici del laboratorio si resero conto che quei lampi di luce visibile erano radiazione emessa dagli elettroni, che chiamarono *luce di sincrotrone*. La scoperta fu resa possibile dall'installazione di obli di vetro nella ciambella metallica, altrimenti opaca alla radiazione di sincrotrone nello spettro visibile. Ciò che accadeva all'elettrone si può capire immaginando che, essendo esso una particella carica, è sempre associato a un campo elettrico e magnetico, prodotti dalla sua carica e dalla corrente che esso genera quando si propaga nello spazio con una certa velocità. Se il moto è uniforme, questo campo elettrico e magnetico resta "agganciato"



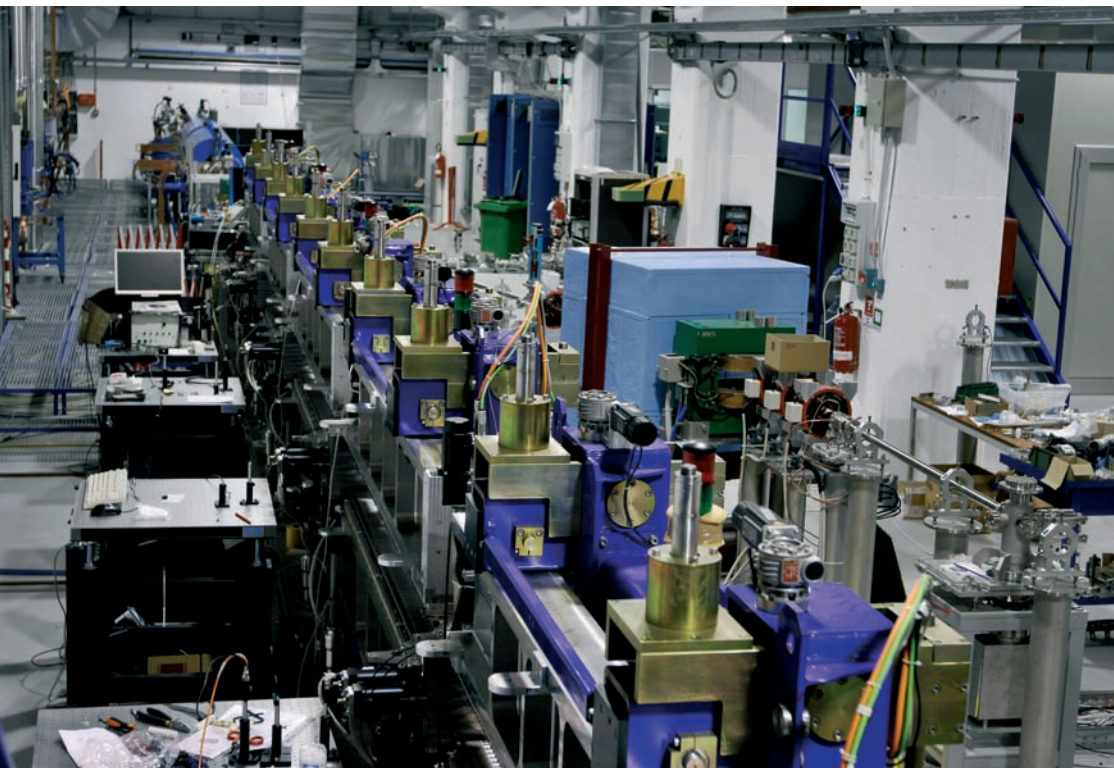
a. Espansioni polari dell'ondulatore magnetico di Sparc nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn (vd.p. 30): il periodo dell'ondulatore (cioè la distanza tra due poli nord successivi, individuabile come la distanza tra due viti contigue) è pari a 2,8 cm.



b. Schema di emissione di radiazione di sincrotrone da ondulatore. Si noti la traiettoria sinusoidale (lo "slalom") compiuta dagli elettroni per effetto del campo magnetico alternato e il sottile cono di emissione della radiazione.

all'elettrone, come se fosse uno schermo rigido che si estende nello spazio e che si propaga con l'elettrone stesso. Cosa accade quando l'elettrone viene deflesso su una traiettoria curva, ad esempio da campi magnetici imposti dall'esterno mediante magneti, come accade negli acceleratori? Magari insieme a un gran numero di altri elettroni, costituendo così un fascio? Parte di quel campo di velocità si "distacca" dall'elettrone stesso e si propaga autonomamente nello spazio sotto forma di un'onda elettromagnetica (o fotone) che trasporta energia e interagisce con l'ambiente circostante. Quest'onda di luce di sincrotrone può essere rivelata ed essere utilizzata con grande profitto, scientificamente parlando, per realizzare immagini di oggetti microscopici (proteine, macromolecole, virus ecc.) e per studiare la materia solida e le sue proprietà. È questo che avviene di routine nei laboratori di luce di sincrotrone. Tuttavia, l'emissione di luce da parte dell'elettrone in moto curvilineo avviene in modo prolungato durante tutta la traiettoria curva. Per questo motivo la radiazione viene emessa "sparpagliata" lungo tutte le direzioni corrispondenti alle tangenti alla traiettoria, il che impedisce di ottenere un fascio di luce-radiazione ben collimato in un'unica direzione abbastanza definita (per

approfondire vd. "Luce di sincrotrone e sci: una curiosa analogia" in questo articolo su www.asimmetrie.it). Per rimediare a questa limitazione si sono sviluppati i cosiddetti *magneti ondulatori*, formati da una successione di un gran numero di calamite con polarità alternata, in modo che l'elettrone sia costretto a percorrere una traiettoria sinusoidale, una sorta di slalom (vd. fig. b). Le emissioni di radiazione prodotte da ciascun semiperiodo di oscillazione si sommano in fase, producendo dopo centinaia di oscillazioni un fascio di radiazione emesso in un piccolo angolo solido. E la frequenza della radiazione prodotta dall'elettrone nell'ondulatore dipende dalla frequenza di oscillazione della sua traiettoria a una data energia. Ad esempio, un fascio di elettroni che si propaga in un ondulatore magnetostatico di 2 cm di periodo (il doppio della distanza tra un polo sud e il successivo polo nord), all'energia di 150 MeV, produrrà una radiazione di sincrotrone di lunghezza d'onda pari a 0,5 micrometri, che coincide proprio con la frequenza della luce verde. Questo fenomeno risonante è tale che, sotto opportune condizioni di intensità del fascio di elettroni, la radiazione di sincrotrone emessa riesce a forzare gli elettroni del fascio a impacchettarsi sulla scala della lunghezza



c. L'apparato Sparc, situato all'interno di un bunker sotterraneo (per la schermatura delle radiazioni prodotte) nei Laboratori di Frascati.

d'onda della radiazione stessa. Si ha in tal modo la produzione di radiazione Fel (*Free Electron Laser*), in cui la radiazione di sincrotrone viene emessa dagli elettroni del fascio "all'unisono", cioè con i pacchetti d'onda dei singoli elettroni in fase gli uni con gli altri. Il fascio di radiazione prodotto si dice coerente ed è analogo a quello di un laser atomico (quello descritto a p. 24, ndr). La sua brillantezza, ovvero la sua intensità divisa per l'angolo di emissione, risulta in tal modo altissima, fino a 10 ordini di grandezza superiore a quella della radiazione di sincrotrone convenzionale. Il fenomeno sopra descritto porta infatti a una crescita esponenziale della potenza della radiazione Fel durante la propagazione del fascio di elettroni nell'ondulatore. Questo, insieme al fatto che gli impulsi di radiazione Fel possono essere corti fino a poche decine di femtosecondi (rispetto alle decine di picosecondi della radiazione di sincrotrone), fa sì che si possano condurre esperimenti senza

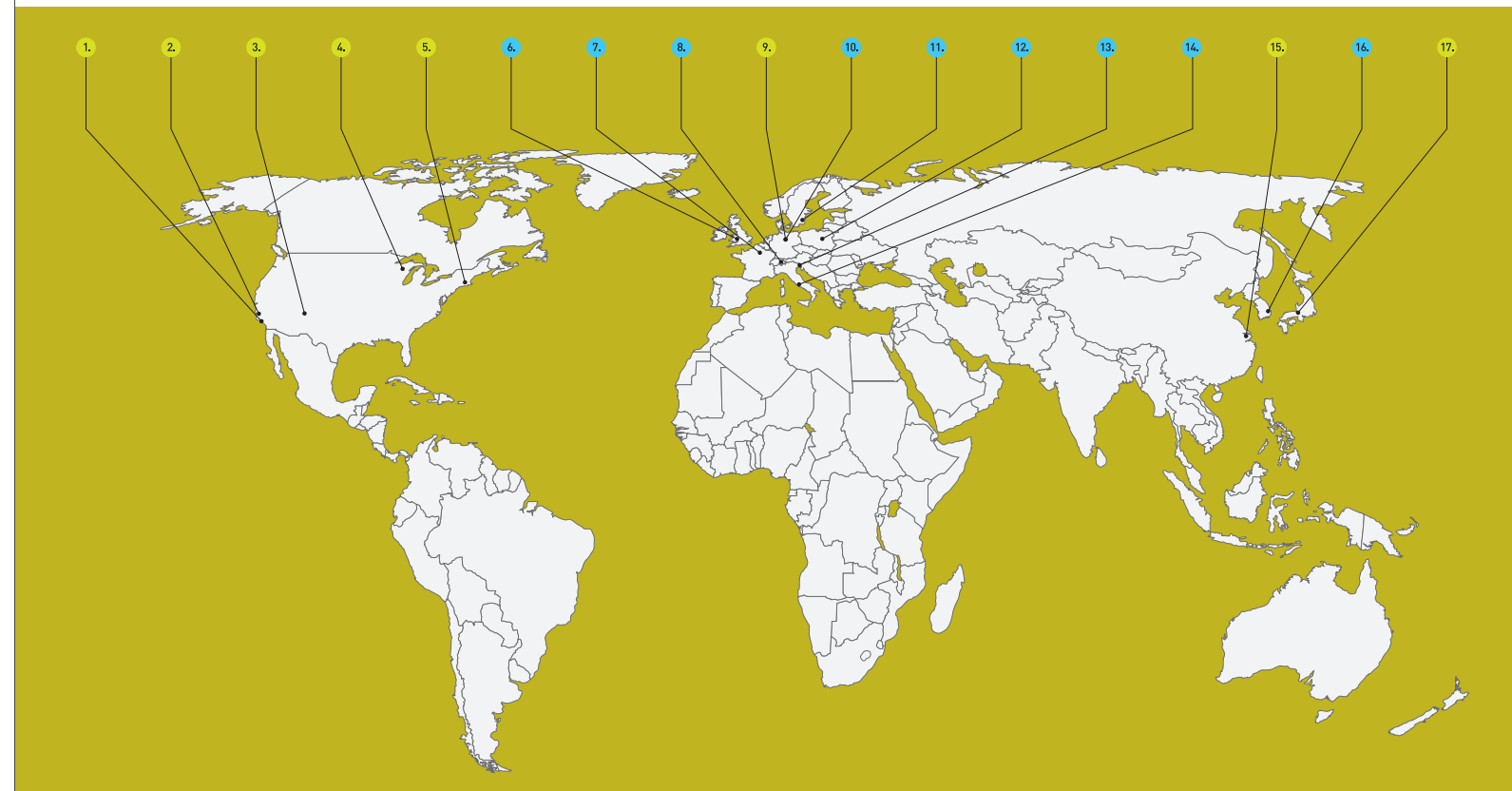
precedenti di "imaging" di singole molecole organiche, proteine, virus ecc. Lo sforzo italiano in questo settore in grande evoluzione è rappresentato dai progetti Sparc, SparX e Fermi. I primi due sono condotti presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn, da parte di una collaborazione tra l'Infn, l'Enea, il Cnr e l'Università di Tor Vergata, mentre il Fel del progetto Fermi è stato messo recentemente in funzione a Trieste dalla Sincrotrone Trieste. Il progetto Sparc ha sviluppato e messo in funzione un acceleratore lineare per produrre fasci di elettroni di altissima brillantezza, necessari per pilotare i Fel (vd. fig. c). Il progetto SparX punta alla messa in funzione presso i Laboratori Infn di Frascati di un Fel basato su un acceleratore lineare di elettroni da 750 MeV, per produrre radiazione Fel fino a lunghezze d'onda di 5 nanometri, che corrispondono a un'energia dei fotoni di circa 250 eV. Mentre le macchine di luce di sincrotrone, inclusi i Fel, studiano la materia a livello atomico, siamo oggi agli

albori dello sviluppo di una nuova generazione di macchine per produrre luce di sincrotrone per la fisica nucleare e subnucleare, le cosiddette macchine per la fotonica nucleare. Tali macchine produrranno fasci di fotoni gamma con energie comprese da 500 keV a 15-20 MeV. Per arrivare a produrre fasci a questa frequenza si sostituirà sostanzialmente l'ondulatore magnetico con un ondulatore elettro-magnetico, rappresentato da un impulso laser di alta energia. I fasci di elettroni con energie comprese tra 500 e 900 MeV, collidendo con impulsi laser dell'energia di alcuni joule e di durata di pochi picosecondi, produrranno appunto fasci gamma ad altissima brillantezza, di grandi potenzialità per la fisica nucleare e per l'ingegneria nucleare. Si aprirà così la porta a nuovi studi e a nuove applicazioni strategiche nel campo del trattamento e screening delle scorie nucleari, del monitoraggio di materiali *fissili* pericolosi (come p.es. l'uranio, il torio ecc.) e della produzione di radio-farmaci di tipo nuovo.

I Free Electron Laser (Fel) nel mondo

- | | | | |
|--|---|---|--|
| 1. UCLA-FEL - 1st SASE Free Electron Laser
UCLA - University of California
Los Angeles (Stati Uniti) | 6. NLS - New Light Source
sito da definire (Gran Bretagna) | 11. MAX-IV
Max-Lab
Lund (Svezia) | 16. PAL-XFEL
Pohang Accelerator Laboratory
Pohang (Corea del Sud) |
| 2. LCLS - Linac Coherent Light Source
SLAC National Accelerator Laboratory
Stanford (Stati Uniti) | 7. ARC EN CIEL - Accelerator Radiation Complex for
Enhanced Coherent Extended Light
sito da definire (Francia) | 12. POLFEL - POLish Free Electron Laser
IPJ/IEA
Swierk (Polonia) | 17. SCSS - Spring-8 Compact Sase Source
Spring-8
Hyogo (Giappone) |
| 3. A FEL - Advanced Free-Electron Laser
LANL - Los Alamos National Laboratory
Los Alamos (Stati Uniti) | 8. SwissFEL
Paul Scherrer Institut
Villigen (Svizzera) | 13. FERMI
Elettra
Trieste (Italia) | |
| 4. LEUTL - Low Energy Undulator Test Line
Argonne National Laboratory
Argonne (Stati Uniti) | 9. FLASH - Free-Electron LASer Hamburg
Deutsches Elektronen-Synchrotron
Amburgo (Germania) | 14. SPARX - Sorgente Pulsata Autoamplificata di Radiazione X
INFN - Laboratori Nazionali di Frascati
Frascati (Italia) | |
| 5. VISA/HGHH - Visible to Infrared SASE Amplifier
Brookhaven National Laboratory
Long Island - New York (Stati Uniti) | 10. XFEL
Deutsches Elektronen-Synchrotron
Amburgo (Germania) | 15. SDUV - Shanghai Deep Ultra-Violet FEL
Shanghai Institute of Applied Physics
Shanghai (China) | |

● Laboratori esistenti
● Nuovi progetti



d. Distribuzione planetaria dei Fel a corta lunghezza d'onda (dall'ultravioletto lontano ai raggi X).

Presso i Laboratori di Frascati è in corso un'attività che fa da precursore a questo nuovo filone di ricerca: il progetto PlasmonX, che prevede la messa in funzione di un laser denominato Flame. Interagendo con il fascio di elettroni prodotto da Sparc, l'esperimento, in corso di realizzazione e previsto in funzione entro la fine del 2011, porterà alla generazione di fasci di raggi X monocromatici fino a 500 keV. Nell'ambito dello stesso apparato sperimentale è già partita la campagna di esperimenti per l'accelerazione a plasma di fasci di elettroni, che permetterà di raggiungere energie di varie centinaia di MeV su pochi millimetri di plasma. Seppure indipendente dal filone della fotonica, questa attività di studio di nuovi metodi di accelerazione è molto sinergica con essa e utilizza tecniche e strumentazione condivise. Essa ha come obiettivo la produzione di fasci di elettroni che potrebbero, a loro volta, avere caratteristiche determinanti per la produzione dei fasci gamma per la fotonica nucleare.

Biografia

Luca Serafini è ricercatore presso la sezione dell'Infn di Milano e responsabile scientifico del progetto Sparc. Oggi è coordinatore della collaborazione Li2Fe (Laboratorio Interdisciplinare e Integrato con Fotoni ed Elettroni).

Link sul web

www.inf.infn.it/acceleratori/life
www.inf.infn.it/acceleratori/sparc
www.sparx-fel.it, rivista *Asimmetrie*
 anno 3 numero 6/4.08 pag.40
www.elettra.trieste.it/fermi