

LNF-10/ 18 (IR)

23 Giugno 2010

POTENZIALITÀ DI UNA SORGENTE DI NEUTRONI PER MISURE DI TEMPO DI VOLO DA INSTALLARE SU SPAR-X

Sergio Bartalucci

INFN - Laboratori Nazionali di Frascati,

Via Enrico Fermi 40, I – 00044 Frascati (ROMA), Italy

Sommario

Il progetto SPAR-X prevede la realizzazione nell'Area di Ricerca Romana di un Linac ad elettroni di elevatissima potenza di picco, ma anche di notevole potenza media, tale da aprire la possibilità di generare fasci secondari di particelle senza interferire con l'operazione principale della macchina. Nell'articolo si analizzano le potenzialità di SPAR-X quale sorgente di neutroni per misure con il metodo del tempo di volo, la cui importanza è sottolineata dal crescente interesse a livello mondiale per nuovi dati nucleari e verrebbe ad inserirsi perfettamente nel quadro programmatico che punta al rilancio dell'Energia Nucleare in Italia. Una sorgente di neutroni di basso costo ma con prestazioni in termini di intensità e risoluzione energetica all'altezza degli standard mondiali appare perfettamente realizzabile.

Keywords: Photoneutron, Linac, Time-of-flight, Nuclear Data

PACS: 01.52.+r; 29.25.Dz

*Published by
Servizio Informazione e Documentazione Scientifica dei LNF
Ufficio Biblioteca e Pubblicazioni*

1 – INTRODUZIONE

La realizzazione di una sorgente di neutroni basata su di un Linac ad elettroni appare a tutt'oggi un'opzione largamente praticabile per la misura ad alta risoluzione di sezioni d'urto con il metodo del tempo di volo, anche in confronto alle molto più potenti sorgenti di neutroni di spallazione [1]. Questo perchè la vera figura di merito per molti esperimenti non è semplicemente il massimo flusso ottenibile, ma il flusso ad una data risoluzione energetica, che dipende essenzialmente da 2 parametri:

1. lo 'spread' temporale del fascio primario incidente sul bersaglio dove si producono i neutroni;
2. l'allungamento del cammino dei neutroni dovuto allo scattering all'interno del bersaglio e degli altri elementi (moderatore, evtl. schermature) attraversati prima di arrivare al rivelatore o al campione da irradiare con i neutroni stessi.

I vantaggi nell'uso di un fascio primario di elettroni rispetto ad uno adronico (protoni, deuteroni) sono dati quindi da dimensioni spazio-temporali molto più contenute della sorgente di neutroni, che risulta in una risoluzione energetica decisamente superiore e permette di utilizzare percorsi di volo più brevi, con un aumento del flusso neutronico disponibile. Inoltre, se il Linac è dedicato ad applicazioni non-distruttive del fascio primario, quali il Free-Electron-Laser, la sorgente di neutroni può essere operata in simultanea con esso, senza interferenze con l'attività principale. Un ulteriore vantaggio risiede nell'alta energia del fascio primario, che permette un rilascio di potenza termica nel bersaglio più graduale e quindi mantiene l'incremento di temperatura entro livelli tali da garantirne la stabilità, cosa più difficile in macchine di alta corrente ma di bassa energia, che non possono usare metalli solidi a temperatura ambiente per tale scopo.

2 – NEUTRONI DA SPAR-X

La sorgente di neutroni pertanto viene ad integrarsi perfettamente con progetti in corso che interessano i LNF come SPARX-FEL, che prevedono la costruzione di un Linac di alta energia, ma potrebbe senz'altro essere già implementata sul Linac dei LNF, operando in parassitaggio rispetto all'iniezione di DAΦNE.

Nel presente documento si considerano però soltanto le prestazioni che la Facility potrebbe fornire se installata sulle varie versioni dell'Acceleratore Lineare di SPARX-FEL. Esso può fornire fasci di energia compresa tra 0.76 e 2.64 GeV ed in particolare le energie prescelte sono di 1.5 GeV per le beamline VUV-EUV e EUV-Soft X-ray e di 2.4 GeV per l'ondulatore per Hard X-ray [2]. I parametri di fascio nel caso di bassa energia sono desunti dalle Tabelle 1-2 (p. 15 in [2]) e sono qui sotto riportati:

<i>Energy [GeV]</i>	1.5
<i>Current [nA]</i>	100
<i>Charge [nC/bunch]</i>	1
<i>Emittance [mm•mrad]</i>	1
<i>Bunch FWHM τ [ps]</i>	0.517
<i># of bunches/s $\Rightarrow f_{rep}$ [Hz]</i>	100

Come risulta dai lavori già pubblicati, l'intensità di produzione neutronica per elettrone incidente è di 0.328 n/e⁻ all'energia di 1.0 GeV per un bersaglio seminfinito di Tantalio

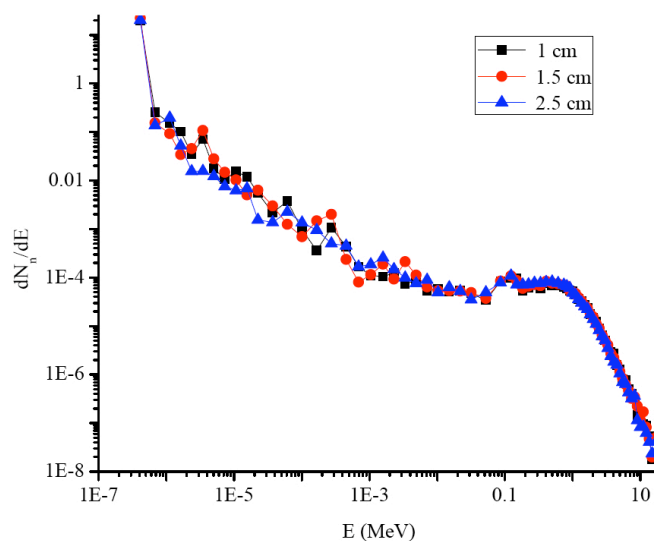
(formula di Swanson). Trovandoci nella zona di alta energia dove l'intensità prodotta per unità di potenza incidente è pressochè costante, si può 'scalare' il suddetto valore all'energia di 1.5 GeV per ottenere infine un valore di 0.492 n/e^- , il che vuol dire che si ottengono circa $3 \cdot 10^9$ neutroni da ogni bunch di 1 nC di elettroni.

Scalando i risultati delle ultime simulazioni [3], che indicano una fluensa di $2.35 \cdot 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{e}^-$ all'energia di 1 GeV e alla distanza di 1 m, si ottiene una fluensa di $1.47 \cdot 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{bunch}$ a 1.5 GeV. Questo valore (riferito ad un *target* di raggio 1 cm e lunghezza $15 X_0$) è da considerare molto buono se moltiplicato per una frequenza di ripetizione di 100 Hz, tenuto conto che flussi dell'ordine di $10^6 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ sono generalmente considerati più che sufficienti per misure di dati nucleari con il metodo del tempo di volo.

Per quanto riguarda l'alta energia, sono previsti 2 modi di operazione per SPARX, come descritto nella seguente tabella ([2], tab. 3-4):

<i>Energy [GeV]</i>	Normal	Multibunch
	2.4	2.4
<i>Current [nA]</i>	100	10^7
<i>Charge [nC/bunch]</i>	1	1
<i>Emittance [mm•mrad]</i>	1	1
<i>Bunch FWHM τ [ps]</i>	0.2	0.2
<i># of bunches/s $\Rightarrow f_{rep}$ [Hz]</i>	100	-
<i>Pulse train length [ns]</i>	-	390
<i>Macropulse f_{rep} [Hz]</i>	-	100
<i>Bunch rep. rate f_0 [Mhz]</i>	-	10

Nel modo 'normale', l'unico data significativo è la riduzione di lunghezza del pacchetto a 0.2 ps., che comunque non ha alcuna influenza sul fascio neutronico prodotto, essendo il contributo del fascio alla risoluzione energetica importante soltanto per energie del neutrone $> 100 \text{ keV}$.



Nel modo 'multibunch' si pensa di realizzare treni di bunch molto corti (200 fs) con un limite massimo di 10 bunch per macroimpulso, che ha una frequenza di ripetizione di 100 Hz, e quindi una corrente media massima di $1 \mu\text{A}$, che è poi quella d'interesse per determinare l'intensità della sorgente neutronica. In questo caso la vicinanza temporale dei 'burst' di

neutroni prodotti può rendere necessaria l'introduzione di filtri per eliminare i neutroni più lenti generati dal bunch precedente.

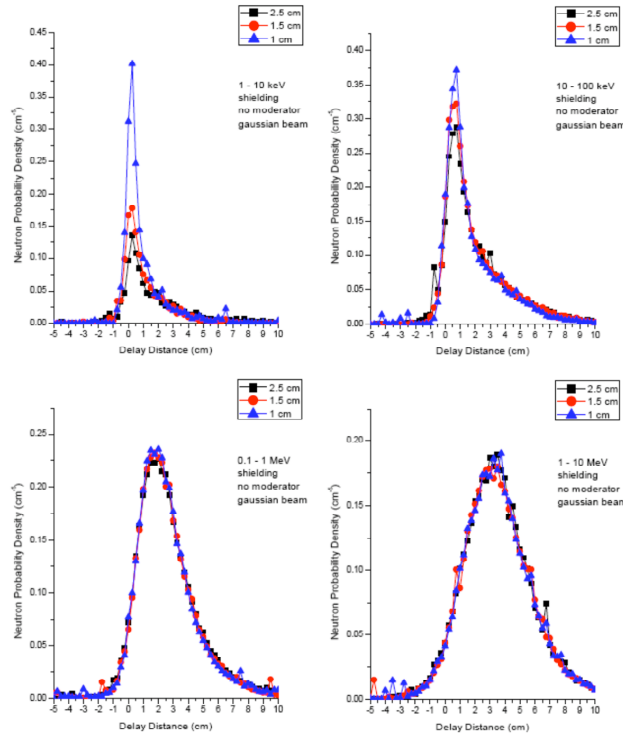
Lo spettro neutronico (non moderato) ottenibile è riportato in Fig. per 3 valori delle dimensioni radiali del bersaglio (nr. di neutroni per elettrone incidente e per unità di intervallo d'energia a 1 m di distanza).

3 – RISOLUZIONE

La risoluzione energetica di una facility per misure con il metodo del tempo di volo (TOF) è data da:

$$\frac{\delta E_n}{E_n} = 2 \left\{ \sqrt{\left[\frac{\delta L}{L} \right]^2 + \left[\frac{\delta t}{t} \right]^2} \right\}$$

dove il primo termine sotto radice è il contributo dell'allungamento del cammino (*delay distance*) dei neutroni rispetto al valore nominale L e il secondo esprime lo spread temporale relativo del fascio primario. A questo bisogna naturalmente aggiungere altri termini come soprattutto la risoluzione dei rivelatori usati per misurare il tempo di volo. La risoluzione dipende in generale dall'energia finale del neutrone, ma la si può esprimere in funzione della sola *delay distance*, il che permette di utilizzare intervalli di energia abbastanza larghi, se la sezione d'urto totale elastica è abbastanza indipendente dall'energia nella zona in esame e per i materiali prescelti.



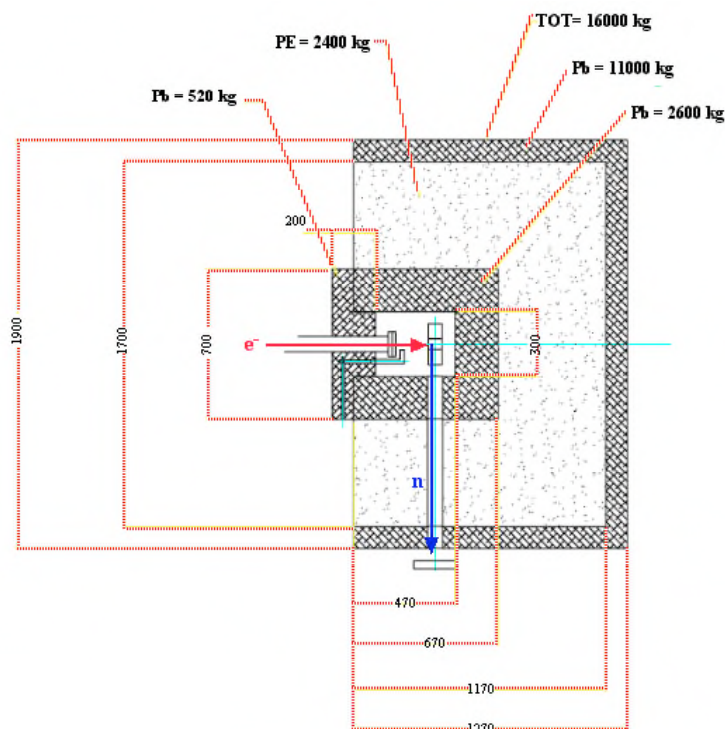
Nella Figura seguente sono raffrontate le risoluzioni ottenibili per i 3 bersagli già considerati nei 4 intervalli d'energia più significativi.

La distribuzione spazio-temporale del fascio primario è inclusa nella simulazione:

$$(\sigma_{x,y} = 2 \text{ mm}, \sigma_t = 1 \text{ ns})$$

ma essa pesa di più nella zona di energia più alta, da 100 keV a 10 MeV. Come si vede una risoluzione del 3-4% è ottenibile nella regione da 0.1 a 1 MeV, che è quella dove il flusso è massimo. Ad energie più basse si hanno risultati anche migliori. Un valore inferiore al 5% per misure di sezione d'urto è da considerarsi più che dignitoso, secondo gli standard mondiali. Per un'interpretazione più ampia e approfondita delle distribuzioni di *delay distance* si rimanda a [3].

Come si è detto, la sorgente di neutroni viene ad integrarsi nel beam dump analogamente a quanto già realizzato per la sorgente di foto-neutroni installata sull'acceleratore ELBE presso il laboratorio FZD in Germania. Lo schema di principio è riportato qui sotto ed è il risultato di un lungo lavoro di ottimizzazione.



Il dose rate ottenuto sommando il contributo neutronico e fotonico ad 1 m di distanza è $\sim 6 \cdot 10^{-20}$ Sv/e⁻.

4 – OBIETTIVI

Le prestazioni ottenibili nelle varie configurazioni di lavoro per SPARX sono riassunte nella seguente tabella:

<i>Energia (GeV)</i>	1.5	2.4	2.4
<i>Fluenza/bunch (n/cm²) • 10⁴</i>	1.47	2.35	2.35
<i>Flusso medio (n/cm²/s) • 10⁶</i>	1.47	2.35	9.17
<i>Risoluzione a 10 keV (%)</i>	≤ 5	≤ 5	≤ 5

In tutte le configurazioni la realizzazione di un flusso integrato medio non inferiore a $\sim 10^6$ n/(cm²•sec), con una risoluzione energetica ≤ 5 % a E_n = 10 keV ottenibile ad 1 m di distanza dall'asse del fascio, appare un obiettivo senz'altro alla portata delle tecnologie esistenti. Quindi è possibile anche allargare gli obiettivi ad altri settori d'indagine che richiedono flussi in quest'ordine di grandezza, come

- 1) Sviluppo strumentazione per nuove e esistenti sorgenti di spallazione e test di rivelatori di nuova concezione.
- 2) Test di Fisica fondamentale: violazione dell'invarianza temporale nel decadimento β , misura del momento di dipolo magnetico del neutrone, lunghezza di scattering n-n (charge independence).
- 3) Dosimetria neutronica: dati di elettroproduzione di neutroni ad acceleratori medicali, caratterizzazione delle dosi ricevute dagli equipaggi dell'aviazione civile
- 4) Neutronica per applicazioni biomediche: radioterapia, microdosimetria.
- 5) Caratterizzazione di materiali per ricerca in fusione nucleare.

Con questi obiettivi di fondo è stato portato avanti il programma di ricerca e sviluppo, già parzialmente finanziato negli anni 2005-2007 dalla CSN5 con la sigla PNF. Avendo come criterio la massima risoluzione energetica ottenibile con il minor fondo possibile e basandosi su estese simulazioni con i codici FLUKA e soprattutto MCNP, si è proceduto ad ottimizzare le varie componenti della sorgente, quali il 'target', il moderatore, la struttura schermante ed il 'beam dump', il collimatore, etc.

Con la presente proposta sperimentale si chiede di passare alla fase realizzativa, per la quale sono già stati attivati contatti con ditte specializzate.

Il programma di lavoro, una volta approvato il progetto, potrebbe articolarsi come segue:

- 0-6° mese) Definizione del progetto ingegneristico con la ditta fornitrice - simulazioni finali per l'ottimizzazione dei collimatori - design dei monitors di fascio;
- 6°-12° mese) Supervisione della costruzione dell'apparato - Completamento del lavoro di simulazione - test su fasci esterni dei monitors di fascio;
- 12°-18° mese) Installazione ed integrazione dell'apparato - preparazione
- per la caratterizzazione sperimentale dei parametri di fascio: flusso, profilo spazio-temporale, risoluzione energetica, fondi - sviluppo di elettronica veloce per la caratterizzazione dei fasci di neutroni;
- 18°-24° mese) Commissioning della facility.

5 – CONCLUSIONI

Si ritiene che la *facility* proposta, oltre a costituire una valida soluzione per il Beam Dump che deve comunque essere realizzato, verrebbe ad accrescere il valore aggiunto di un grande progetto come SPAR-X, senza in alcun modo interferire o disturbare l'operazione del medesimo in quanto X-Fel, cosa che invece non ha equivalenti nel mondo, dove le sorgenti di neutroni utilizzano solo acceleratori dedicati, in tutto od in parte.

Se si considera il crescente interesse nella comunità scientifica per le sorgenti neutroniche, e il crescente fabbisogno di dati nucleari nei più disparati settori (vedi [1] per un'ampia rassegna), e lo si inquadra nel progetto di rilancio dell'energia nucleare in Italia, che può tradursi anche in un aumento dei finanziamenti per attività mirate di R&D, ecco che la realizzazione di questa facility appare come un'occasione da non perdere assolutamente, nè per la comunità scientifica di SPAR-X nè per il Paese.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Bartalucci et al., "A Photo-neutron facility for time-of-flight measurements", LNF-09/ 6 (IR), June 11, 2009.
- [2] SPARX-FEL, Scientific Case, Version 1.0, 15.07.2009.
- [3] S. Bartalucci et al., Optimization of a Linac-based neutron source for time-of-flight measurements, LNF-10/01 (P), February 4, 2010.