

NEUCAL

proposta alla CSN V dell'INFN
Firenze, 04/07/2008

Introduzione

Lo scopo di questa proposta di R&D è lo sviluppo di tecniche di rivelazione di neutroni in connessione con calorimetri compatti per la discriminazione, con un alto potere di reiezione, degli sciami elettromagnetici da quelli adronici.

Il problema di discriminare con un alto potere di reiezione particelle elettromagnetiche (come elettroni e positroni) da quelle adroniche (come antiprotoni e protoni) si presenta in tutti gli esperimenti in cui è necessario identificare un piccolo segnale immerso in grande fondo. Esempi tipici sono gli esperimenti di ultima generazione per la misura delle componenti di antimateria nei raggi cosmici come PAMELA e AMS, o la proposta CALET per la misura della componente di elettroni ad altissima energia. Anche esperimenti su acceleratori ad alta energia, come LHCf, possono avere la stessa problematica.

L'idea della tecnica di discriminazione calorimetrica attraverso la misura della componente neutronica, nasce dall'esperienza dell'esperimento PAMELA su satellite. Il rivelatore principale per la discriminazione delle particelle in PAMELA è formato da un calorimetro elettromagnetico a campionamento, con strati di tungsteno come assorbitore alternati a rivelatori al silicio. Sotto il calorimetro è posto un rivelatore di neutroni con tubi ad ^3He e moderatori di polietilene. L'analisi dati mostra chiaramente che la rivelazione della quantità di neutroni prodotti dagli sciami è una quantità che può essere molto utile per la identificazione del tipo di particella che ha prodotto lo sciame all'interno del calorimetro.

Obiettivo di questo progetto è lo studio dell'ottimizzazione della rivelazione dei neutroni in un calorimetro allo scopo di massimizzare la capacità di discriminazione. Tale studio porterà all'ideazione di un prototipo, utile per convalidare lo studio attraverso l'analisi dei dati ottenuti per mezzo di un test su fascio (possibilmente fatto al CERN).

Il progetto quindi si divide in tre fasi da svilupparsi in due anni di lavoro:

1. Studio, attraverso l'uso di strumenti di simulazione (principalmente FLUKA), delle problematiche relative alla rivelazione di neutroni in un calorimetro e studio delle informazioni che tale rivelazione deve ottenere per ottimizzare il potere di discriminazione. In particolare si dovrà mettere in evidenza l'utilità di una segmentazione spaziale, di una rivelazione temporale dei segnali e in quali regioni energetiche è preferibile focalizzare la misura.
2. Scelta dei tipi di rivelatori per neutroni. La strategia base di questo progetto è quella di cercare di usare rivelatori di neutroni presenti in commercio. Quindi, in base ai risultati ottenuti nella fase 1, verranno scelti i rivelatori fra quelli attualmente disponibili. I vari rivelatori scelti dovranno essere caratterizzati attraverso misure da effettuarsi con fasci di neutroni.
3. Costruzione di un prototipo che consenta l'acquisizione di dati per mezzo di un test su fascio di protoni e elettroni ad alta energia. Ciò sarà utile per convalidare i risultati ottenuti con la simulazione, e verificare la possibilità di usare questa tecnica per la discriminazione fra particelle elettromagnetiche ed adroniche.

L'applicabilità di questa tecnica ha una duplice funzione: aumentare la capacità di discriminazione di un calorimetro compatto oppure, a parità di potere di rivelazione, ridurre il peso dell'apparato. Quest'ultima applicazione è di particolare importanza per esperimenti nello spazio, o che volano su palloni, a causa dei vincoli di massa (e di costo) che tali progetti hanno.

Fase 1: la simulazione

L'utilizzo di tecniche di simulazione Montecarlo fornirà un aiuto indispensabile in tutte le fasi di ideazione, progettazione ed ottimizzazione dei rivelatori.

Il primo obiettivo che la simulazione dovrà essere in grado di conseguire è rappresentato dalla conoscenza dettagliata del flusso di neutroni che accompagna lo sviluppo di sciami adronici ed elettromagnetici a varie energie. La molteplicità, l'energia ed il tempo di arrivo dei neutroni ai rivelatori sono le informazioni che la simulazione dovrà fornire nella primissima fase del progetto. La simulazione della rivelazione dei neutroni nelle diverse configurazioni di rivelatori proposti rappresenterà il passo immediatamente successivo.

La simulazione della fenomenologia dei neutroni non potrà tuttavia essere scorrelata dalla simulazione dei rilasci elettromagnetici dei medesimi sciame nei calorimetri convenzionali. Solo confrontando i segnali prodotti sia nei calorimetri che nei rivelatori di neutroni sarà infatti possibile determinare l'effettiva capacità di quest'ultimi nel contribuire alla desiderata rivelazione.

Il software di simulazione FLUKA [*FLUKA: A multi-particle transport code CERN-2005-010*] è stato scelto come strumento principale di indagine. Esso coniuga l'esigenza di una corretta simulazione del passaggio delle particelle nei rivelatori con l'esigenza di una dettagliata simulazione dei processi coinvolti nella produzione e trasporto di neutroni durante lo sviluppo di sciame adronici (produzione diretta e spallazione) ed elettromagnetici (principalmente "giant resonance").

[*A.Fassò, A.Ferrari, P.R.Sala, Proc. 3rd Specialists' Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF 3), Tohoku University, Sendai, Japan, 12-13 May 1997, OECD-NEA 1998, p.61*]; *H.M.Araujo et al., Nucl.Instrum.Meth.A545:398-411, 2005* ; *A.Borio di Tigliole et al, Nucl.Instrum.Meth.A469:347-353 2001*].

La possibilità di utilizzare ulteriori software di simulazione dei rivelatori come GEANT4, o codici esclusivamente dedicati al trasporto di neutroni, verrà ulteriormente indagata.

Come semplice esempio, durante gli studi preparatori che hanno condotto alla stesura di questa proposta, è stata realizzata una simulazione preliminare del rivelatore CALET attraverso l'utilizzo del programma FLUKA. CALET si prefigge di riconoscere elettroni di alta energia nei raggi cosmici grazie ad un'elevatissima rivelazione di protoni e nuclei. Tale rivelazione dovrebbe avvenire attraverso lo studio della topologia dei rilasci di carica in un calorimetro di BGO con spessore 30cm ($1,4 \lambda$). Nella figura 1 è mostrato il risultato della simulazione per protoni interagenti da 1 TeV e per elettroni da 400 GeV (energie alle quali corrisponde un simile rilascio medio di energia nel calorimetro). Lo spettro dei neutroni che fuoriescono dal calorimetro nei due casi è mostrato in figura 2 mentre la distribuzione dei tempi di arrivo è mostrata in figura 3. Ulteriori simulazioni sono in corso per stabilire la correlazione tra numero di neutroni emergenti e topologia del rilascio di energia nel calorimetro.

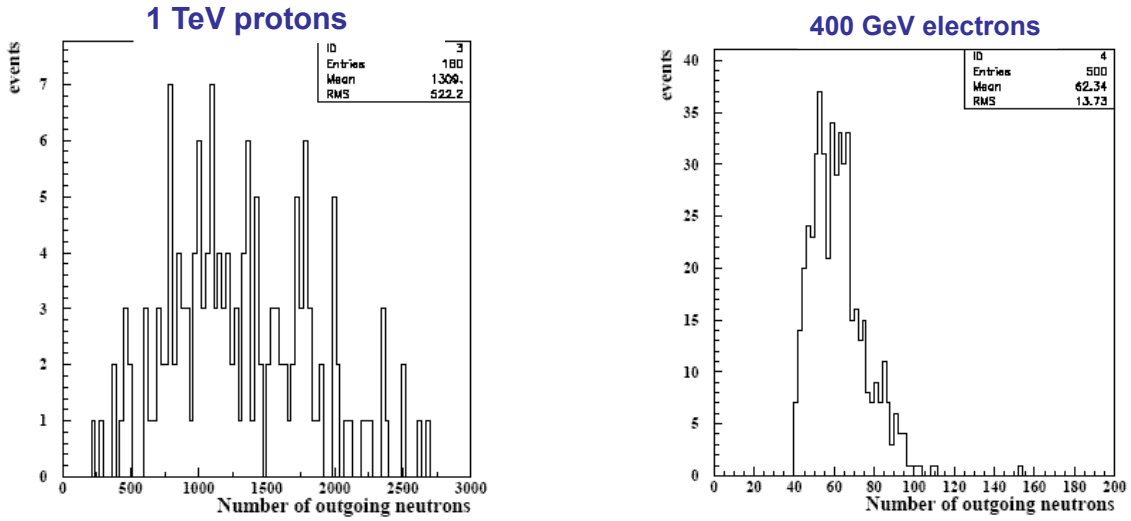


Figura 1. Distribuzione della molteplicità di neutroni per evento che fuoriescono dal calorimetro di per protoni da 1 TeV ed elettroni da 400 GeV.

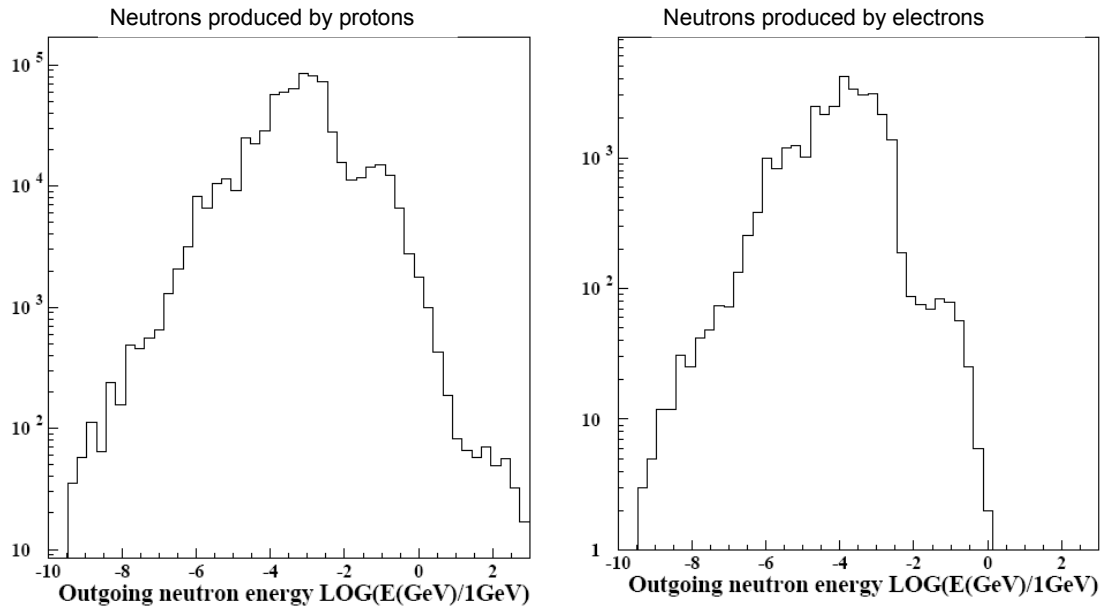


Fig 2. Spettro energetico dei neutroni che fuoriescono dal calorimetro. La percentuale di neutroni con energia minore di 1MeV è circa 60% nel caso dei protoni e circa 85% nel caso degli elettroni.

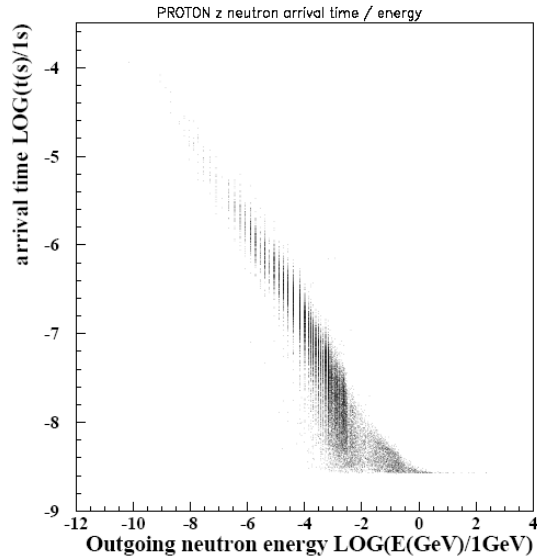


Fig 3. Distribuzione dei tempi di arrivo dei neutroni all'esterno del calorimetro per sciami da protoni. La scala dei tempi ha origine nell'istante di ingresso della particella primaria nel calorimetro.

Fase 2: i rivelatori

La tipologia di rivelatore per neutroni che ci proponiamo di investigare è basata fondamentalmente su un approccio “multi-layered” con l'utilizzo di moderatori attivi intervallati a rivelatori di neutroni termici. Lo scopo principale è migliorare in maniera sensibile l'efficienza di rivelazione sia per i neutroni termici sia per quei neutroni più energetici che caratterizzano gli sciami adronici nei calorimetri usati in fisica delle alte energie. Il tutto ovviamente nel minor volume possibile.

In effetti, esistono in commercio vari tipi di rivelatori singoli per neutroni termici: i classici tubi proporzionali riempiti con He3 o BaF3, rivelatori con rivestimenti interni in polietilene, rivelatori a fissione, rivelatori con rivestimenti interni in B10 (Boro 10).

Questi costituiscono l'armamentario standard di chi voglia rivelare neutroni in una centrale nucleare o in un complesso di medicina nucleare o presso un acceleratore. Soffrono però di una bassa sensibilità, di una risposta temporale in generale molto lenta e di scarsissima risoluzione spaziale.

Tipicamente le sensibilità per rivelatori di dimensioni standard (lunghezza dell'ordine di 10 cm per 2 cm di diametro) si aggirano attorno a pochi cps/nv (Counts per second/thermal neutron flux[cm²/s]). Questa sensibilità cresce enormemente al decrescere dell'energia dei neutroni. Ad esempio per rivelatori ad He3 la sensibilità è circa 5000 volte maggiore per neutroni

termici che per neutroni con energie del MeV. Infatti la sezione d'urto dell'He3 per neutroni di 2 MeV è di circa 0.9 barns mentre a 10 eV sale a 280 barns e a 0.025 eV arriva a 5000 barns. [*Radiation detection and measurement, G. Knoll*].

Ditte come Saint-Gobain, Canberra, Eljen Technology, hanno a catalogo vari rivelatori che spaziano nelle categorie sopra elencate (vedere per esempio la figura 4).



Figura 4. Contatori He3 proporzionali della St. Gobain.

In generale le ditte sono anche disponibili a realizzare rivelatori di diversa forma e quindi a realizzare tubi di diametro e lunghezze diversi.

Un'altra classe di rivelatori, usata anche per rivelare neutroni veloci (~MeV) è costituita dagli scintillatori plastici o liquidi (ad esempio il BC-702 caricato con Li6). Questi possono rivelare i neutroni tramite una reazione nucleare oppure rivelare il segnale dato dal protone di rinculo durante il processo di moderazione. In tabella 1 mostriamo un estratto del catalogo degli scintillatori sempre della St. Gobain.

Product Data Sheets

Scintillator	Type	Decay Time ns	Gamma Ray Response	Loading Elements	Application
BC-702	Disc	110	Very small	${}^6\text{Li}$	Thermal Neutron, Gamma Insensitive
BC-704	Rectangular	110	Very small	${}^6\text{Li}$	Thermal Neutron, Radiography
BC-720	Disc	110	Very small	H	Fast Neutron, Gamma Insensitive
GS20	Glass	Various	Small	${}^6\text{Li}$	Thermal Neutron
KG2	Glass	Various	Small	${}^6\text{Li}$	Thermal Neutron
BC-408	Plastic	2.4	Yes	H	Fast Neutron, Time of Flight
BC-501A	Liquid	3.2	Yes	H	Fast Neutron, Gamma PSD
BC-509	Liquid	3.1	Yes	F	Neutron Insensitive
BC-523A	Liquid	3.7	Yes	${}^{10}\text{B}$	Neutron Spectroscopy
BC-521 BC-525	Liquid	3.8	Yes	Gd	Neutrino Experiments

Tabella 1. Estratto del catalogo degli scintillatori sempre della St. Gobain.

È evidente la grande varietà di prodotti presenti sul mercato da cui cominciare lo studio per un rivelatore compatto. Nella fattispecie gli scintillatori (quelli per neutroni veloci) possono anche svolgere funzione di moderatore.

Studieremo quindi delle combinazioni di rivelatori tali da poter ottenere una buona efficienza sia per neutroni termici che per neutroni veloci, unita a una ottima risoluzione temporale (dell'ordine di 10 ns) con la possibilità di segmentare spazialmente i vari elementi.

L'idea di base è quella di realizzare dei multistrati con moderatori attivi (scintillatori) e tubi a gas ($\text{He}3$), vedi figura 5.

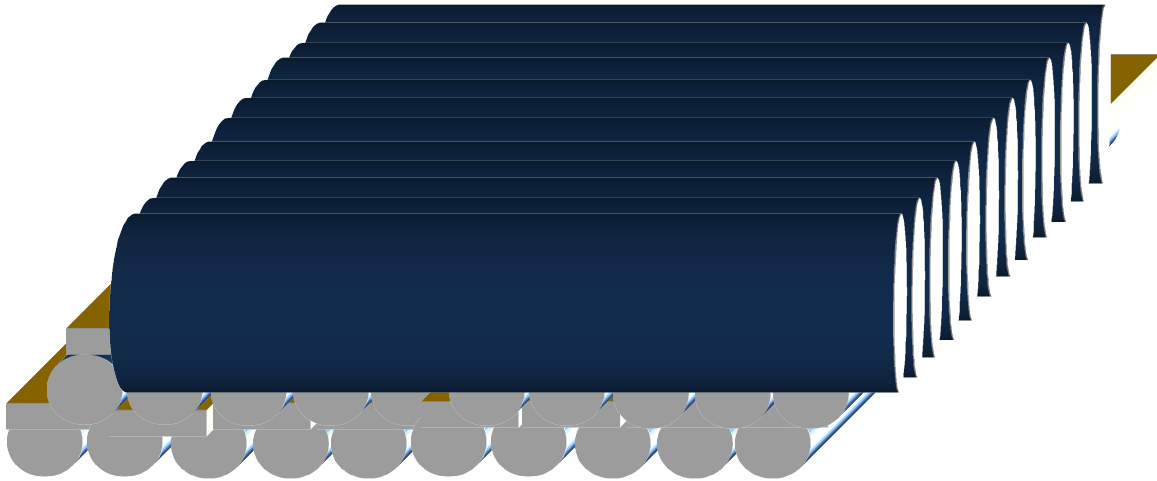


Figura 5. Sandwich di tubi a He3 (blu) e scintillatore veloce (ocra) che funge da moderatore attivo.

Una volta che i rivelatori sono stati scelti e acquistati, dovranno essere caratterizzati per mezzo dell'analisi dati acquisiti su fascio di neutroni. Varie facilities per test beams potranno essere prese in considerazione, per esempio il neutron beams a Svedberg Laboratory a Uppsala in Svezia (fino a 180 MeV) o al CYClotron di Louvain la Neuve in Belgio (10-70 MeV).

Fase 3: prototipo e test su fascio

L'ultima parte di questo progetto riguarda la realizzazione di un prototipo, composto dalla combinazione di un calorimetro compatto e da rivelatori di neutroni opportunamente scelti. L'ideazione di questo prototipo usufruirà dei risultati ottenuti sia attraverso la simulazione della fase 1 sia dalla caratterizzazione dei rivelatori a neutroni caratterizzati nella fase 2. Lo scopo principale di questo prototipo è quello verificare la capacità complessiva di discriminazione di un rivelatore di questo genere, e convalidare i risultati ottenuti per mezzo della simulazione. Si rende necessario quindi illuminare il prototipo con fasci ad alta energia sia di protoni sia di elettroni in modo da produrre sciami adronici ed elettromagnetici e verificarne la capacità di discriminazione. Il luogo più adatto per questo tipo di test appare essere il CERN. Lo schema di massima del prototipo è mostrato in figura 6.

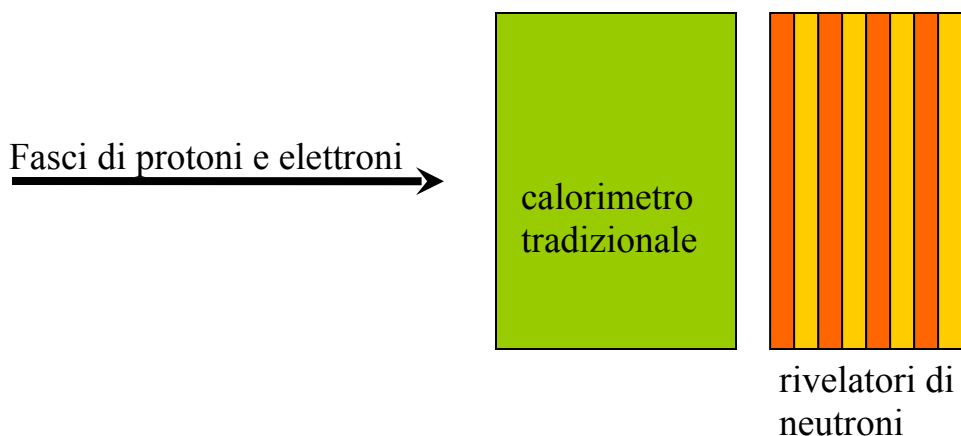


Figura 6. Schema generale del prototipo del rivelatore NEUCAL da provare su fascio.

Sviluppo temporale del progetto

Il progetto ha uno sviluppo temporale articolato in due anni.

Gennaio 2009 – Marzo 2009	prima fase di studio dei rivelatori attraverso la simulazione
Aprile 2009 – Agosto 2009	preparazione del primo test su fascio di neutroni per caratterizzare i rivelatori scelti
Agosto 2009 – Ottobre 2009	analisi dei dati raccolti e preparazione di un secondo test su fascio di neutroni
Novembre 2009 – Dicembre 2009	secondo test di caratterizzazione e analisi dati su fascio di neutroni
Gennaio 2010 – Marzo 2010	studio e progetto del prototipo di rivelatore complessivo (calorimetro + rivelatore di neutroni)
Aprile 2010 – Ottobre 2010	costruzione del prototipo e test su fascio di elettroni e protoni ad alta energia
Novembre 2010 – Dicembre 2010	analisi dati del test su fascio e confronto con i risultati ottenuti dalla simulazione

Partecipanti al progetto

....

Stima dei costi

Il profilo dettagliato di spesa per realizzare il piano di lavoro descritto in precedenza è riportato nei moduli dei preventivi.

Qui indichiamo solo le linee guida che sono state utilizzate.

1) La prima parte del lavoro di prototipaggio e R&D è finalizzata alla produzione di un modulo di prova (xxx indicare cosa si intende).

Per questo modulo di prova sono necessari:

- 4 fotomoltiplicatori multianodo (con 2x2 anodi), con relativi partitori resistivi
- 4 fotomoltiplicatori singolo-anodo, con relativi partitori resistivi
- 8 tubi a ^3He
- Scintillatore liquido e plastico nelle tipologie proposte descritte in precedenza
- Scheda VME di digitalizzazione veloce (500MS/s o 1 GS/s, 4/8 canali)
- Scheda VME di digitalizzazione più lenta (100 MS/s, 8/16 canali)
- Materiale di consumo per realizzazione di parti meccaniche e per le schede elettroniche di servizio necessarie.

Si chiedono quindi subito i fondi per realizzare questa prima parte.

- 2) I fondi per realizzare il prototipo completo vengono chiesti in parte nei preventivi 2009, Sub Judice alla effettiva realizzazione e verifica di funzionalità del primo modulo di prova, e in parte nei preventivi del 2010.
- 3) I fondi per la produzione dell'elettronica che verrà utilizzata nel test su fascio previsto per il secondo anno saranno chiesti nei preventivi del 2010.