



Gruppo III – Fisica Nucleare Sperimentale

Simulazioni di background del rivelatore BaF₂- n_TOF del CERN

Dott. Enrico Billi

23 Aprile 2007

Simulazioni di background del rivelatore BaF₂-n_TOF del CERN

E. Billi, C. Massimi, G. Vannini, Collaborazione n_TOF

INDICE

I. Introduzione

II. Geant4 e la cattura neutronica

1. Introduzione
2. La cattura neutronica
3. La struttura di Geant4
4. Le classi per la cattura neutronica

III. Le modifiche apportate

1. Introduzione
2. Spettri discreti
3. Spettri continui

Conclusioni

Bibliografia

I. Introduzione

In questa relazione sono descritte le attività di implementazione del codice Monte Carlo Geant4 per simulare le prestazioni del calorimetro elettromagnetico a 4 π (Total Absorption Calorimeter, TAC) della *facility* n_TOF del CERN.

Le motivazioni scientifiche delle ricerche sulla fisica dei neutroni compiuta dalla collaborazione n_TOF riguardano sia la nucleosintesi stellare sia le future tecnologie nel campo dell'energia nucleare. L'obiettivo primario è quello di misurare sezioni d'urto assolute di cattura neutronica e di fissione indotta da neutroni in un ampio intervallo energetico (1 eV < E_n < 250 MeV).

Le simulazioni Monte Carlo sono importanti in quanto forniscono una stima dell'efficienza di rivelazione e consentono di osservare la risposta dell'apparato di misura in condizioni ben definite. Lo studio dei dati forniti dalle simulazioni porta quindi ad una migliore comprensione della risposta dei rivelatori e fornisce molte informazioni utili da utilizzare durante la fase di analisi dati. Il codice Geant4 è il programma leader per la simulazione della risposta dei rivelatori.

Il Gruppo III del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna ha riscontrato che l'attuale versione del codice Geant4 non descrive correttamente le cascate elettromagnetiche dovute alla cattura neutronica alle basse energie (E_n < 20 MeV).

Purtroppo tali cascate sono di fondamentale importanza per determinare la sezione d'urto assoluta di cattura neutronica (n, γ), esse infatti sono utilizzate come marcatori per le reazioni di cattura.

Utilizzando la tecnica calorimetrica si ha un picco nella distribuzione dei segnali corrispondente all'energia totale della reazione, ma altre reazioni sono in competizione (urto elastico, anelastico, fissione ecc...) producendo un "fondo" che interferisce nella ricostruzione della sezione d'urto in fase di analisi dati.

Per poter simulare le reazioni indotte da neutroni di interesse per la collaborazione n_TOF è stata avviata una convergenza di sforzi con la collaborazione Geant4 per modificare il codice sorgente e riprodurre correttamente le cascate elettromagnetiche prodotte nelle reazioni di cattura. I dati forniti dalle simulazioni sono stati analizzati per mezzo del codice di analisi dati del CERN ROOT. Entrambi i programmi sono stati eseguiti sul sistema operativo Scientific Linux Cern 3 (SLC3).

II. Geant 4 e la cattura neutronica

1. Introduzione

In questo capitolo si vuole dare una visione di insieme della struttura delle classi del codice Monte Carlo Geant4 relative alla fisica dei neutroni e delle caratteristiche delle cascate dovute alla cattura neutronica. Il codice Geant4 è stato sviluppato orientandosi per la fisica delle alte energie, ma

grazie alla sua struttura modulare, alla ampia generalità ed astrattezza si è in grado di definire a posteriori nuove *classi* e *metodi* per la fisica nucleare delle basse energie. Per la fisica nucleare delle basse energie la collaborazione internazionale del CERN n_TOF studia le reazioni indotte da neutroni (cattura e fissione). Nei prossimi paragrafi saranno descritte le caratteristiche delle reazioni di cattura neutronica e di come tali reazioni sono state implementate nel codice Geant4. Si definiranno in dettaglio la struttura delle *classi* in C++ e i *metodi* con cui sono state implementate le reazioni di cattura valide nel range energetico 10⁻⁴-2 \times 10⁷ eV. Alla fine del capitolo saranno descritti in dettaglio alcuni banchi presenti nelle diverse *classi* del codice sorgente.

2. La cattura neutronica

La cattura neutronica da parte di un nucleo (Z,N) produce un nucleo eccitato (Z,N+1) la cui energia di eccitazione è data dalla somma dell'energia cinetica del neutrone incidente e l'energia di legame del neutrone nel nucleo formatosi:

$$E_{\text{tot}} = T_n + S_n$$

dove E_{tot} è l'energia totale della reazione, T_n è l'energia cinetica del neutrone incidente e S_n è l'energia di legame per il nucleo formatosi dalla reazione di cattura [1, 2, 3]. Il nucleo formatosi dissipa la propria energia di eccitazione con una cascata elettromagnetica. Lo spettro di tale cascata dipende dalle caratteristiche dell'isotopo (Z,N+1), quindi per riprodurre col metodo Monte Carlo uno spettro elettromagnetico è necessario conoscere, oltre all'energia totale della reazione, le sue caratteristiche (i livelli nucleari, il numero di gamma medio emesso o *molteplicità*, lo spettro di diseccitazione, le probabilità delle transizioni, ecc.) [8].

Ogni isotopo presenta uno spettro di decadimento- γ con caratteristiche particolari però si possono suddividere tali spettri in due categorie:

- *discreti*: si hanno tipicamente per nuclei leggeri dove l'ampia spaziatura tra i livelli vincola in modo sensibile lo spettro della cascata anche per energie di eccitazione elevate;
- *continui*: tipici per i nuclei medio-pesanti dove la densità dei livelli per una reazione di cattura è tale da produrre uno spettro continuo o non strettamente vincolato dalla struttura dei livelli e quindi simile a quello di un sistema in equilibrio termico.

Due esempi di questa differente tipologia sono il ¹³C (discreto) e ¹⁹⁸Au (continuo). Nel caso del primo isotopo i livelli sotto l'energia di legame sono pochi e ben separati quindi la cascata presenterà dei picchi ben definiti, mentre per l'oro si possono vedere che i livelli conosciuti arrivano solo a 1.5 MeV come energia di eccitazione, la densità dei livelli diventa sempre più elevata in funzione dell'energia di eccitazione.

A seconda del tipo di spettro è necessario sviluppare algoritmi appropriati per la simulazione delle cascate elettromagnetiche. Se nel primo caso è ancora possibile riprodurre la cascata passo passo calcolando le singole transizioni dalla struttura dei livelli nucleari, nel secondo caso l'unico approccio praticabile è l'utilizzo di modelli statistici.

Definite quindi le caratteristiche fisiche di base di una cascata elettromagnetica nei prossimi paragrafi vedremo come sono strutturate le classi in C++ del codice Geant4 e dove sarà necessario intervenire per correggere le eventuali lacune e/o errori del codice stesso.

3. La struttura di Geant4

Come è stato detto precedentemente, sebbene il codice Geant4 sia stato pensato per la fisica delle alte energie, in particolare per i progetti del LHC,

durante lo sviluppo del codice si è seguita una filosofia di generalizzazione e astrazione delle specifiche parti in modo da consentire il miglioramento nel tempo del codice stesso [4, 5, 6, 7].

La collaborazione Geant4 è suddivisa in vari gruppi sparsi per il mondo per lo sviluppo in parallelo delle diverse parti del codice. Ogni gruppo è responsabile dell'implementazione e della validazione di modelli e algoritmi Monte Carlo introdotti nelle diverse versioni.

Prima di addentrarci nella descrizione dettagliata del codice forse sarà opportuno definire la differenza principale tra la versione in Fortran (Geant3) e l'attuale versione in C++ (Geant4). Il Fortran è un linguaggio *Procedurale*, mentre il C++ è *Object Oriented*, queste due tipologie non sono scorrelate tra loro, ma la seconda è l'evoluzione della prima, vediamo in dettaglio in che modo.

Nei linguaggi procedurali l'elemento base del programma è la *routine* o *procedure*, in particolare un programma viene spezzato in *routine* per elaborare in modo più strutturato e schematico le informazioni. I linguaggi procedurali permettono quindi di gestire meglio un numero complesso di operazioni su una struttura di dati più o meno semplice.

Ma quando anche la struttura dei dati da elaborare diventa complessa, come ad esempio l'insieme dei gradi di libertà di un sistema fisico, ecco che risulta più comodo legare in un'unica struttura tutti quei dati e tutte quelle procedure collegate a livello logico.

Nei linguaggi *Object Oriented* l'elemento base del programma non è più la *routine*, ma la *classe* o *classe di oggetti*. Una *classe* è sostanzialmente l'unione tra una struttura di dati e tutte quelle routine per elaborare i dati stessi. Le diverse *classi* comunicano tra loro attraverso *metodi*, i *metodi* di una *classe* non possono intervenire direttamente sui dati contenuti all'interno di un'altra. In questo modo le diverse parti del codice diventano "scatole nere", modificare una particolare parte del codice risulta molto più semplice in quanto non comporta più modificare direttamente l'intero codice sorgente, ma solo una serie limitata di *metodi* contenuti all'interno di un numero ristretto di *classi*. Ora si vuole analizzare le diverse parti del codice per poi studiare in dettaglio quelle *classi* e quei *metodi* per la fisica dei neutroni.

Tutti i processi fisici di base di Geant4 implementati in linguaggio C++ sono sotto forma di *classi* e sono contenuti nella cartella /source/processes. Tali processi sono divisi in 7 categorie:

- electromagnetic;
- hadronic;
- decay;
- photolepton-hadron;
- optical;
- parameterization;
- transportation.

Ogni *classe* di un particolare processo fisico (diffusione elastica, annichilazione, ecc.) contiene i metodi e le procedure per richiamare i diversi modelli in base all'energia della reazione e al tipo di particelle coinvolte.

Nella cartella /hadronic sono contenute le *classi* per la simulazione dei processi nucleari e subnucleari tra nucleoni e adroni. Le *classi* per la gestione dei processi nucleari sono:

- *G4ElectronNuclearProcess*;
 - *G4PhotoNuclearProcess*;
 - *G4HadronElasticProcess*;
 - *G4HadronCaptureProcess*;
- *G4HadronFissionProcess*;

Per quanto riguarda i processi inelastici ogni particella (neutrone, protone, ecc...) o nucleo (deuterio, trizio, ione generico) hanno una classe specifica per la gestione di tali processi, ad esempio:

- *G4ProtonInelasticProcess*;
- *G4NeutronInelasticProcess*;
- *G4DeuteronInelasticProcess*;

- *G4IonInelasticProcess*;

Come è già stato detto precedentemente la *classe* di un processo richiama i modelli per la simulazione del processo fisico alle diverse energie di reazione. Ogni modello è presente all'interno del codice a sua volta sotto forma di *classe*. La *classe* di ogni processo ha tre *metodi* o *routine* di base per discriminare quale modello di debba applicare durante la simulazione:

- *IsApplicable()*: per determinare se un modello è applicabile per una determinata energia o tra due particelle;
- *GetMicroscopicCrossSection()*: per calcolare la lunghezza di attenuazione;
- *DoIt()*: per simulare il processo fisico e fornire gli stati finali;

Quindi la *classe* di un determinato processo fisico, ad esempio quello di diffusione elastica, utilizza questi tre *metodi* per interrogare le *classi* dei diversi modelli ed applicare alla simulazione quello più opportuno. Per quanto riguarda il processo di cattura radioattiva vediamo ora in dettaglio quali sono i modelli implementati e disponibili nelle attuali versioni. La versione a cui si fa riferimento da qui in avanti è la Geant4.8.1.

4. La classi per la cattura neutronica

La simulazione del processo di cattura neutronica da parte dei nuclei è definita da due modelli presenti sotto forma di *classi* la cui validità dipende, come per altri modelli di Geant4, dall'energia della reazione:

- *G4LCapture*: simula la cattura neutronica per energie superiori ai 20 MeV;
- *G4NeutronHPCapture*: utilizza i dati tabulati nelle librerie internazionali (ENDF/B-VI, JENDL, ecc...) con energia tra 10^4 eV ai 20 MeV;

La *G4LCapture* è un modello che riproduce le cascate in modo approssimato, in particolare, si ha una sezione d'urto comune a tutti in nuclei ed una cascata elettromagnetica ad energia fissata con gamma prodotti isotropicamente. Questa classe è stata implementata per la fisica delle alte energie dove le caratteristiche specifiche di un nucleo non sono di particolare interesse.

La *G4NeutronHPCapture* utilizza le sezioni d'urto tabulate e i dati relativi alle cascate elettromagnetiche di vari isotopi di uso più comune per i rivelatori della fisica nucleare, i dati fanno riferimento a diverse librerie internazionali, ma il formato dei dati è quello della libreria ENDF/B-VI [9].

I dati specifici delle catture neutroniche sono salvati nella cartella /data/G4NDL (Geant4 Neutron Data Library). Per completezza precisiamo che i dati relativi ai livelli di eccitazione nucleare di buona parte degli isotopi conosciuti ed estratti dalla libreria NUDAT sono contenuti nella cartella /data/PhotonEvaporation.

I dati sono continuamente aggiornati e ampliati con nuovi isotopi tra una versione e l'altra. In particolare, nella /data/G4NDL sono presenti due sottocartelle:

- /CrossSection : contiene le sezioni d'urto le sezioni d'urto tabulate degli isotopi e degli elementi naturali più usati nei rivelatori;
- /FS : dove sono registrati i dati relativi agli spettri dei raggi- γ delle cascate elettromagnetiche di alcuni degli isotopi presenti nella cartella precedente.

I dati presenti nella /FS si riferiscono agli spettri specifici alle cascate dovute alla cattura neutronica estrapolati e/o presi direttamente dalle librerie internazionali. Per quegli isotopi che non sono presenti ancora nella /G4NDL sono disponibili i dati relativi ai livelli di eccitazione nucleare e le relative probabilità di transizione nella cartella /data/PhotonEvaporation.

Per calcolare le sezioni d'urto e fornire i raggi- γ di diseccitazione il codice Geant4 in fase di esecuzione della classe *G4NeutronHPCapture* richiama altre due classi:

- *G4NeutronHPCaptureData*: contiene i metodi per ottenere la sezione d'urto dai file contenuti nella cartella /CrossSection;
- *G4NeutronHPCaptureFS*: fornisce i metodi per inizializzare, elaborare e restituire gli stati finali contenuti nella /FS durante l'esecuzione della simulazione.

La classe *G4NeutronHPCaptureFS* dopo aver calcolato la cinematica dell'urto richiama il metodo *GetPhotons()* della classe *G4NeutronHPPHotonDist* per la produzione dell'intera cascata.

La *G4NeutronHPPHotonDist* gestisce la ricostruzione della intera cascata basandosi sulle distribuzioni tabulate presenti nella /data/G4NDL/FS per il nucleo bersaglio interessato nella reazione o altrimenti richiamando la classe per la produzione di cascate elettromagnetiche *G4PhotonEvaporation*.

Per quanto riguarda gli spettri discreti si è riscontrata l'assenza di un metodo per la produzione di tali cascate e il formato dei dati presenti non consente una ricostruzione attraverso metodi Monte Carlo, mentre per gli spettri continui presenti nella /data/G4NDL/FS i metodi presenti nella *G4NeutronHPPHotonDist* non hanno condizioni sull'energia dei gamma emessi, l'unica cosa fissata è la molteplicità della cascata. Per quegli isotopi di cui non sono presenti i dati si deve considerare il fatto che la libreria /data/PhotonEvaporation attualmente contiene i file relativi ai nuclei con $Z > 10$, quindi è necessario che gli spettri per i nuclei leggeri non coperti dalla /data/PhotonEvaporation debbano essere assolutamente presenti nella /data/G4NDL/FS.

Gli unici metodi presenti per la simulazione delle cascate dovute alla cattura neutronica risultano essere quelli per gli spettri continui per cui inizialmente si sono studiati tali metodi per capire come estrarre le informazioni utili dai dati tabulati nei file.

I dati tabulati forniscono la molteplicità media in funzione dell'energia del neutrone incidente, quindi per mezzo della tecnica Monte Carlo il metodo *GetPhotons()* genera una molteplicità casuale secondo la distribuzione di Poisson.

Successivamente lo stesso metodo cerca la distribuzione dei gamma emessi compatibile con l'energia del neutrone incidente (tale distribuzione viene registrata in una classe chiamata *G4NeutronHPVector*).

Nella classe *G4NeutronHPVector* è definito il metodo *Sample()* che estrae dalla distribuzione una energia per il gamma che la cascata deve emettere. Il metodo *GetPhotons()* richiama iterativamente il metodo *Sample()* per estrarre l'energia dei fotoni dell'intera cascata. Analizzando in dettaglio il loop per la produzione dei gamma si nota che non c'è nessuna condizione sulla energia dei gamma emessi, l'unica cosa fissata in tutta la generazione della cascata elettromagnetica è la molteplicità della cascata stessa.

Dopo l'analisi del metodo esistente per la simulazione delle cascate con spettro continuo si è proceduto allo studio per correggere tale metodo ed elaborare un algoritmo che consentisse di elaborare gli spettri discreti.

II. Le modifiche apportate

1. Introduzione

Nel primo capitolo è stata descritta la struttura generale delle classi per i processi fisici, per quanto riguarda la cattura neutronica nell'ultimo paragrafo si sono introdotte le classi che gestiscono direttamente lo sviluppo delle cascate elettromagnetiche, in particolare: *G4NeutronHPPHotonDist* e *G4NeutronHPVector*. La classe *G4NeutronHPPHotonDist*, evocando il metodo *GetPhotons()*, in base al tipo di cascata (discreta o continua) elabora i dati attraverso diversi algoritmi e richiamando classi e metodi particolari.

I due metodi però non pongono condizioni sull'energia della cascata producendo cascate non corrette. In questo capitolo verranno descritte le modifiche apportate al codice sorgente di Geant4 per la produzione di cascate corrette sia per gli spettri discreti sia per quelli continui in cui la conservazione dell'energia della reazione venga rispettata.

2. Spettri discreti

Per quanto riguarda la produzione delle cascate da spettri discreti ci si è basati sul formato dei dati già presenti nella cartella /data/G4NDL/FS.

In questi file è presente il numero dei gamma in elenco, l'energia dei gamma e la probabilità di emissione in funzione dell'energia del neutrone incidente. Questo semplice formato non permette però di discriminare quali transizioni, ossia quali di questi gamma, possono essere in successione e non da il valore dell'energia di legame del neutrone.

Si sono quindi apportate alcune modifiche importanti nel formato dei file per poter sviluppare un algoritmo che consentisse una corretta simulazione delle cascate. In ogni file contenente uno spettro discreto si sono introdotti (Fig.3.1) i livelli di eccitazione del nucleo sotto l'energia di legame del neutrone (a), una serie di valori che definiscono una distribuzione uniforme per l'emissione dei gamma (b) e i gamma con le relative probabilità di emissione (c).

```

3 11.8969
1
1 0.494639E+07 4
1
4 2
0.385400E+07 1.000000 0.368440E+07 1.000000 0.308800E+07 1.000000
0. 1.000000
1
1 2
1
2 2
0.100000E-04 1.000000 0.200000E+08 1.000000
10
1
10 2 7
0.494639E+07
1
7 1
0.100000E-04 0.680000 21000.0 0.250000 40000.0 0.110000
80000.0 0.140000 97000.0 0.700000E-01 200000. 0.800000E-01
0.230000E+08 0.800000E-01
0.385400E+07 7
1
7 1
0.100000E-04 0. 21000.0 0.500000E-01 40000.0 0.250000E-01
60000.0 0.563000E-01 97000.0 0.500000E-01 200000. 0.813000E-01
0.200000E+08 0.813000E-01
0.368440E+07 7
1
7 1
0.100000E-04 0.320000 21000.0 0.137800 40000.0 0.938000E-01
80000.0 0.302000 97000.0 0.685000E-01 200000. 0.766000E-01
0.200000E+08 0.766000E-01
0.308800E+07 7
1
7 1
0.100000E-04 0. 21000.0 0.562200 40000.0 0.771200
80000.0 0.701700 97000.0 0.811500 200000. 0.762100
0.200000E+08 0.762100

```

Figura 3.1: Formato dei dati relativi alle cascate elettromagnetiche dovute alla cattura su ^{12}C sono presenti le specifiche per questo isotopo: l'energia di legame e i livelli eccitati (a), parametri per le distribuzioni gamma (b), le probabilità di emissione in funzione dell'energia del neutrone (c).

Adottata questa modifica nei file di partenza si è quindi sviluppato un algoritmo Monte Carlo per la generazione delle cascate che tiene conto della energia totale della cascata e i livelli di eccitazione del nucleo per riprodurre uno spettro il piu' verosimile.

3. Spettri continui

Particolarmente elaborato è invece l'algoritmo implementato per la produzione delle cascate con uno spettro continuo. Esso come nel caso precedentemente è stato implementato aggiornando il codice sorgente già esistente.

Il formato dei file per questo tipo di cascate (Fig. 3.2) comprende una tabella con le molteplicità medie in funzione dell'energia del neutrone incidente. Successivamente sono definiti i parametri per la distribuzione dei gamma emessi introdotti nei file descritti nel paragrafo precedente. Di seguito sono presenti le distribuzioni dei gamma delle diverse cascate in funzione dell'energia del neutrone incidente.

```

1 195.274 0.550000E+05
1
1 0. 43
1
43
0.100000E+04 2.82140 0.253000E-01 2.82140 10000.0 3.96400
100000. 4.11600 200000. 4.33400 400000. 4.59200
600000. 4.82700 800000. 4.87700 0.100000E+07 4.76500
0.125000E+07 4.90700 0.150000E+07 5.04900 0.175000E+07 5.15700
0.200000E+07 5.24800 0.225000E+07 5.34300 0.250000E+07 5.43700
0.275000E+07 5.53100 0.300000E+07 5.63000 0.325000E+07 5.73900
0.350000E+07 5.84600 0.375000E+07 5.94900 0.400000E+07 6.05300
0.425000E+07 6.16500 0.450000E+07 6.29300 0.475000E+07 6.44200
0.500000E+07 6.62500 0.550000E+07 7.13500 0.600000E+07 7.52000
0.650000E+07 6.77000 0.700000E+07 5.66000 0.800000E+07 3.74000
0.900000E+07 2.38000 0.100000E+08 1.76000 0.110000E+08 1.47000
0.120000E+08 1.33000 0.130000E+08 1.27000 0.140000E+08 1.27000
0.160000E+08 1.14000 0.180000E+08 1.04000 0.200000E+08 2.37000
0.220000E+08 2.89000 0.240000E+08 3.65000 0.270000E+08 4.65000
0.300000E+08 5.67000
1
1
1 2
1
1 2
0.100000E-04 1.00000 0.200000E+08 1.00000
35
1
35 2
0.100000E-04 1
1
21
0.
0.954400E-06 300000. 0.282500E-06 400000. 0.282900E-06
500000. 0.716030E-07 600000. 0.716030E-07 700000. 0.457110E-07
800000. 0.189820E-07 0.100000E+07 0.178940E-06 0.120000E+07 0.877870E-07
0.140000E+07 0.646940E-07 0.160000E+07 0.111920E-06 0.180000E+07 0.135810E-06
0.200000E+07 0.248200E-06 0.230000E+07 0.169030E-06 0.300000E+07 0.826990E-07
0.350000E+07 0.701370E-07 0.400000E+07 0.705030E-07 0.450000E+07 0.135820E-06
0.500000E+07 0.794190E-07 0.600000E+07 0.636120E-07 0.700000E+07

```

Figura 3.2: Formato dei dati relativi alle cascate elettromagnetiche dovute alla cattura su ¹⁹⁷Au sono presenti le specifiche per questo isotopo: la molteplicità media, i parametri per le distribuzioni gamma, le probabilità di emissione in funzione dell'energia dei raggi-γ.

L'algoritmo per la produzione di tali cascate prenderà quindi in *input* l'energia del neutrone per estrarre dalla prima tabella la molteplicità media. Tale molteplicità verrà utilizzata da un metodo Monte Carlo per la selezione di una molteplicità basandosi su una distribuzione di *Poisson*. Estratta tale molteplicità il Metodo Monte Carlo sviluppato ad hoc seleziona i gamma della cascata. Ulteriori implementazioni sono in fase di sviluppo del codice come l'introduzione del primo livello eccitato come energia di soglia per l'ultima transizione quando la molteplicità è maggiore di 1. Uno studio meticoloso è necessario per testare la ricostruzione fedele della distribuzione della cascata per il caso specifico del continuo.

Conclusioni

Dopo aver compiuto queste prime modifiche del codice si è voluto testarne l'affidabilità. A tale proposito si è presa la simulazione del TAC (Total Absorption Calorimeter) della *facility* n_TOF e si sono compiute simulazioni in cui neutroni da 4.9 eV andavano ad incidere su un bersaglio di ¹⁹⁷Au. Negli istogrammi presentati possiamo vedere gli spettri dell'energia totale ricostruita compiute con il codice Geant4 senza le modifiche apportate (Fig. 4.1) e con il nuovo metodo (Fig. 4.2).

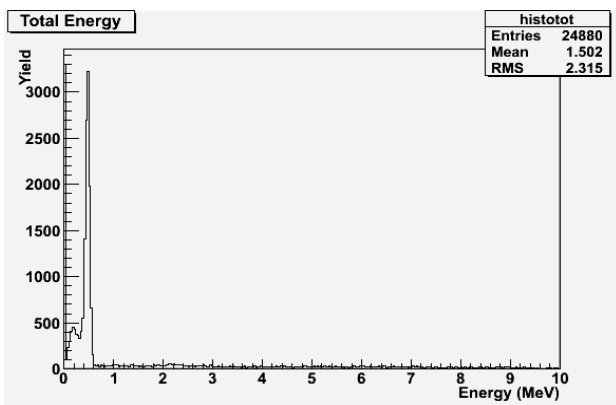


Figura 4.1: Spettro dell'energia totale ricostruita nel range energetico da 0 a 10 MeV utilizzando il metodo *Sample()* non modificato, come si può vedere le cascate non sono riprodotte fedelmente in quanto non è presente il picco a 6.5 MeV. L'unico picco presente è a 511 keV dovuto al contributo dei positroni.

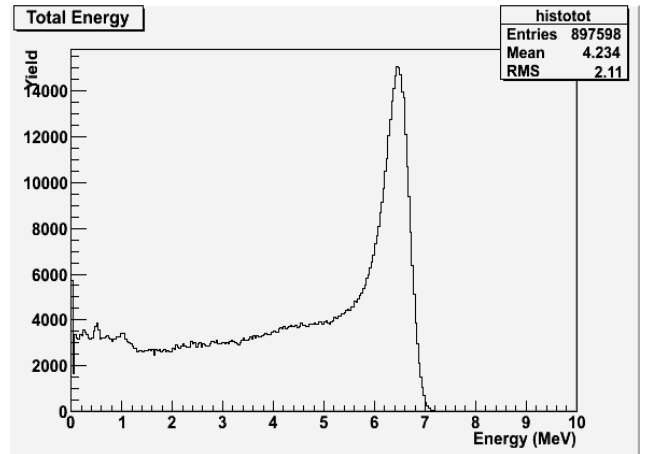


Figura 4.2: Spettro dell'energia totale ricostruita nel range energetico da 0 a 10 MeV utilizzando il nuovo metodo *Sample()*; le modifiche apportate assicurano che la cascata abbia sempre la stessa energia totale della cascata a 6.5 MeV, la coda a più basse energie è dovuta alla perdita di alcuni gamma da parte del TAC.

La modifica della classe per la cattura neutronica permette ora di studiare i segnali dovuti alla cattura dei neutroni in ogni materiale che compone il rivelatore, in questo caso il TAC presso la *Facility* n_TOF al CERN. In Fig. 4.3 si può vedere lo spettro dell'energia totale ricostruita per neutroni incidenti su ¹⁹⁷Au nell'intervallo energetico da 1-100eV. Si può vedere che oltre al picco a 6.5 MeV sono presenti altri picchi riscontrati anche sperimentalmente. La simulazione permette di isolare i diversi segnali in base al volume in cui è avvenuta la cattura, così facendo si è in grado di quantificare il contributo dei segnali di background dovuti ai neutroni diffusi dal campione.

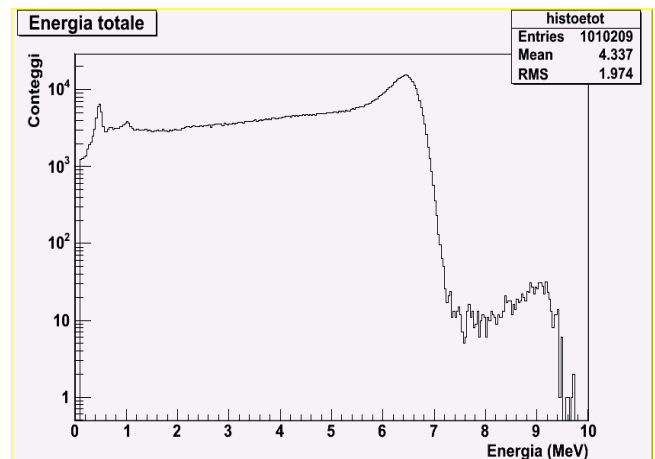


Figura 4.3: Spettro dell'energia totale ricostruita per neutroni incidenti nell'intervallo energetico da 0-100eV, i picchi con energia maggiore o minore a 6.5 MeV sono dovuti ai neutroni diffusi sul TAC.

In Fig. 4.4 sono mostrati i diversi contributi dell'energia totale ricostruita dal TAC con diversi colori in base al volume dove è avvenuta la cattura: l'assorbitore in rosso, le capsule di carbonato di boro in verde, i cristalli scintillatori al BaF₂ in giallo e il bersaglio di ¹⁹⁷Au in blu. Non considerando tagli sull'energia totale ricostruita si riscontra che i neutroni diffusi producono il 2% dei segnali, se però si considera solo l'intervallo [3.5,7.5] MeV si ottiene un contributo di 1.41%, quindi un abbattimento di un ordine di grandezza del fondo.

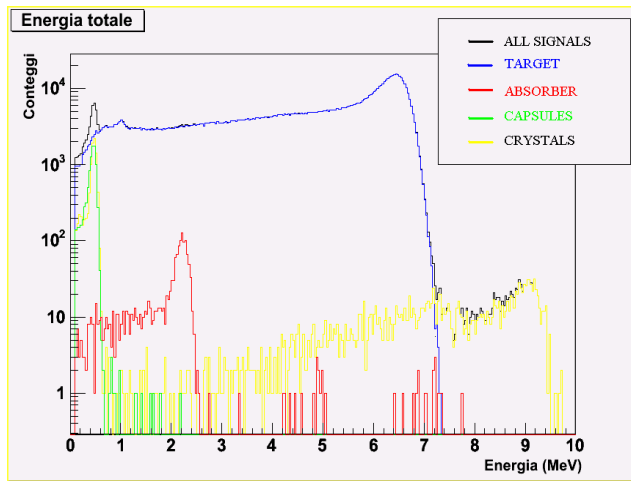


Figura 4.4: Spettro dell'energia totale ricostruita per neutroni incidenti nell'intervallo energetico da 0-100eV, in diversi colori sono visibili i diversi contributi dovuti alla cattura su: bersaglio di ^{197}Au (blu) assorbitore (rosso), capsule (verde), cristalli al BaF_2 (giallo).

Bibliografia

- [1] J.M. Blatt, V.F. Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics, Dover Publications Inc., New York, 1979;
- [2] L.V. Groshev, V.N. Lutsenko, A.M. Demidov, V.I. Pelekhov, Atlas of γ -ray spectra from radiative capture of thermal neutrons, Pergamon Press, London, 1959;
- [3] M.N. de Mévergnies, P. Van Assche, J. Vervier, Nuclear Structure Study with Neutrons, Proceedings of the International Conference on the Study of Nuclear Structure with Neutrons, Antwerp, 1966;
- [4] Geant4 Collaboration, Geant4 User's Guide : For Application Developers, Geant4 User's Documents, CERN;
- [5] Geant4 Collaboration, Geant4 User's Guide : For Toolkit Developers, Geant4 User's Documents, CERN;
- [6] Geant4 Collaboration, Physics Reference Manual, Geant4 User's Documents, CERN;
- [7] Geant4 Collaboration, Software Reference Manual, Geant4 User's Documents, CERN;
- [8] W. J. Metzger, Statistical Methods in Data Analysis, Katholieke Universiteit Nijmegen, Netherlands, 2002;
- [9] M. Herman, ENDF - 6 Formats Manual, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton (NY), 2005;