

Esperienze didattiche di rivelazione di raggi gamma con un rivelatore a scintillazione

Lorenzo SANTI

Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, DMIF, Università di Udine

Marisa Michelini, *Università di Udine*

Sergej Faletič, *Università di Ljubljana*

Motivazioni e contesto

Perché fare una misura di rivelazione gamma?

- La rivelazione della radiazione gamma è uno strumento di indagine sempre più importante in fisica, in particolare in astrofisica. In questo ambito, un progetto sviluppato anche a Udine: Hermes, rete di mini satelliti in orbita con telescopi gamma (studio dei Gamma Ray Burst ed eventi multimessaggero astrofisici).
- Perché: carattere interdisciplinare della fisica coinvolta
- Perché: coinvolge l'applicazione di concetti di base della fisica classica e moderna nei principi di misurazione e nelle analisi
- Perché: costituisce un'attività formativa in fisica orientante soprattutto per la fisica sperimentale

Appropriarsi della fisica significa avere occasione di sperimentare una indagine fisica.

Nell'organizzare una misura di rivelazione di radiazione è necessaria la comprensione di numerosi argomenti

- Processi di interazione radiazione-materia
- Ruolo del principio di conservazione dell'energia nell'investigazione del mondo microscopico
- La fisica del rivelatore
 - Caratterizzazione della radiazione incidente mediante l'energia rilasciata nel materiale attivo
 - Tarature e controlli
 - Parametri da cui il processo dipende

La rivelazione della radiazione nella didattica hands-on

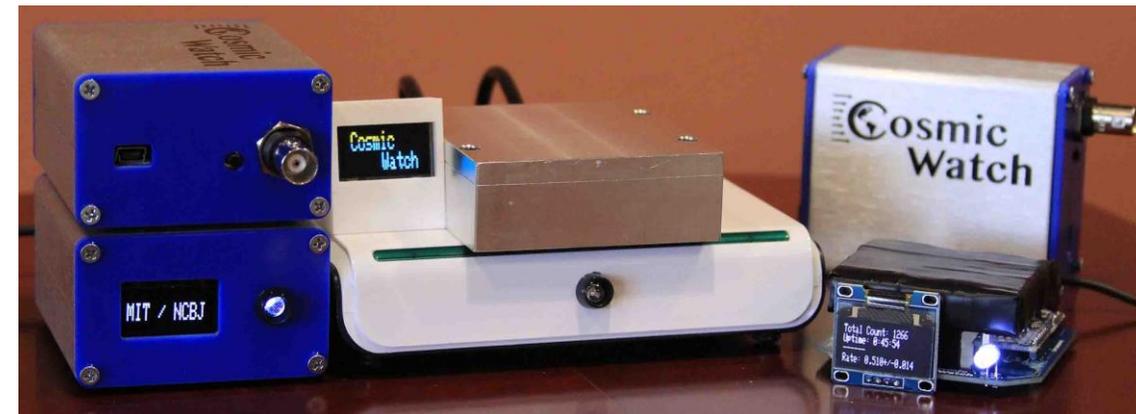
Negli ultimi anni lo sviluppo dei rivelatori a stato solido ha rivoluzionato il panorama dei dispositivi didattici disponibili

- Kit «chiavi in mano» commerciali

(in figura il kit Gamma Ray della CAEN
<https://www.caen.it/subfamilies/educational-kits/>
)

- Progetti educational «fai-da-te» (DIY), da realizzare con materiali commerciali

(in figura il kit CosmicWatch, realizzato dal MIT
<http://www.cosmicwatch.Ins.mit.edu/about>)



Esiste ora la possibilità di una attività hands-on sicura e veloce

Il dispositivo utilizzato nel nostro percorso

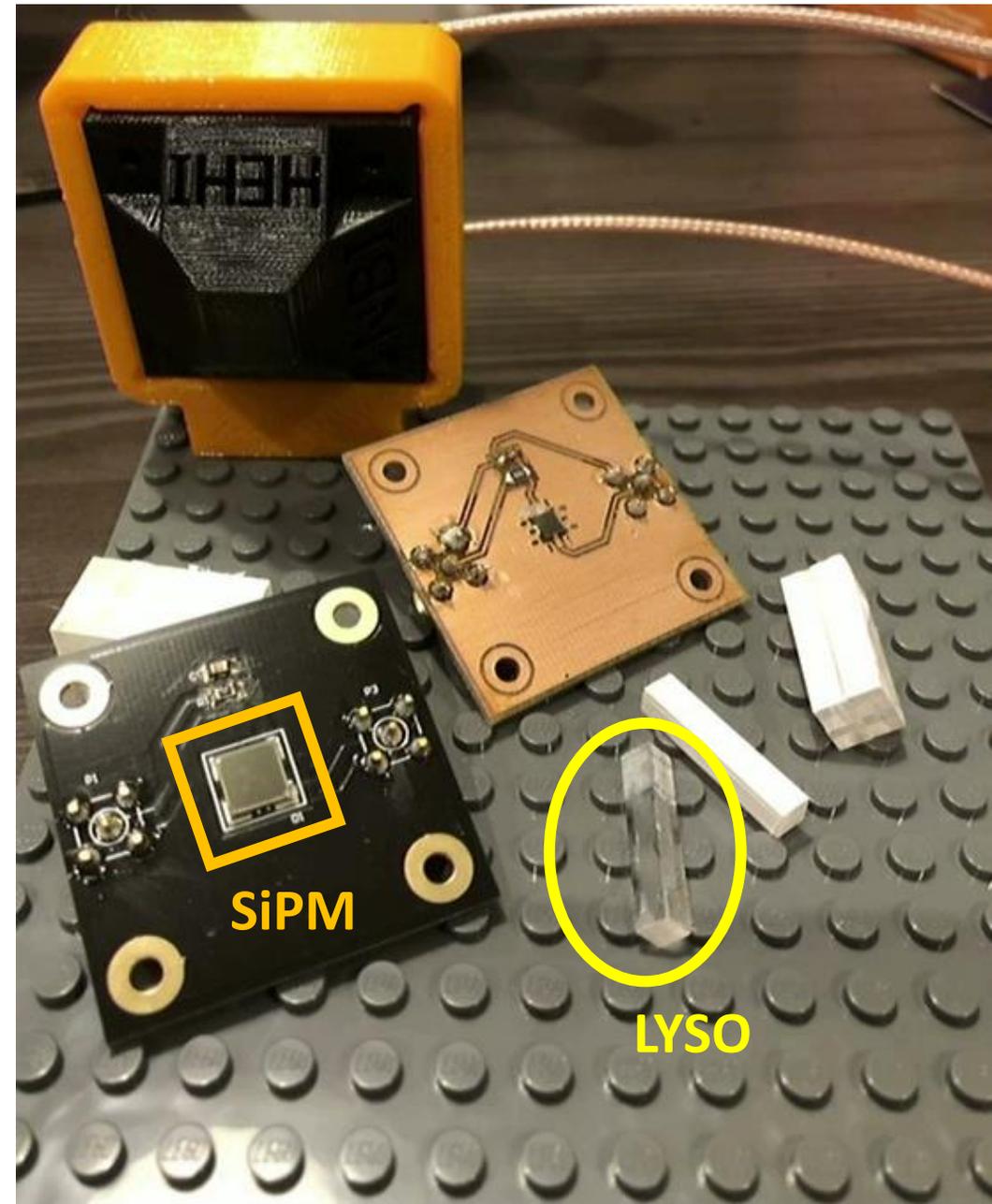
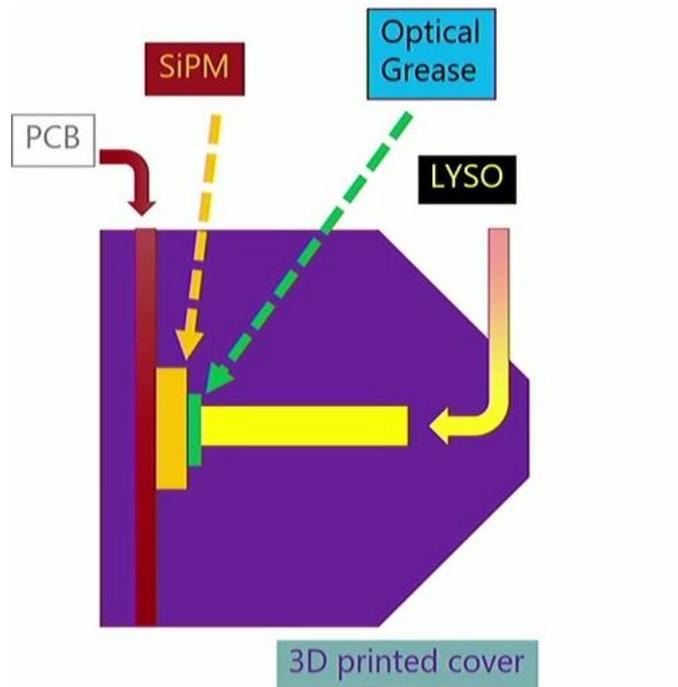
Sviluppato da Ian G. Bearden (Niels Bohr Institute, Copenhagen), è un dispositivo DIY costituito da uno scintillatore inorganico, letto da un fotomoltiplicatore al silicio (SiPM).

- scintillatore: cristallo LYSO (Ortosilicato di Lutezio e Ittrio, drogato con Cesio)

È lo scintillatore con la maggiore resa di luce (fino a 40k fotoni per MeV di energia rilasciata nel materiale), particolarmente adatto alla rivelazione gamma, specialmente nella PET.

Il cristallo utilizzato è di dimensioni relativamente piccole, 0.4x0.4x2.5 cm.

- SiPM: Matrice di pixel, ognuno dei quali costituisce un fotodiodo SPAD (Single Photon Avalanche Diode).
«Conta» i fotoni in arrivo sul dispositivo, fornendo un segnale analogico proporzionale al loro numero.

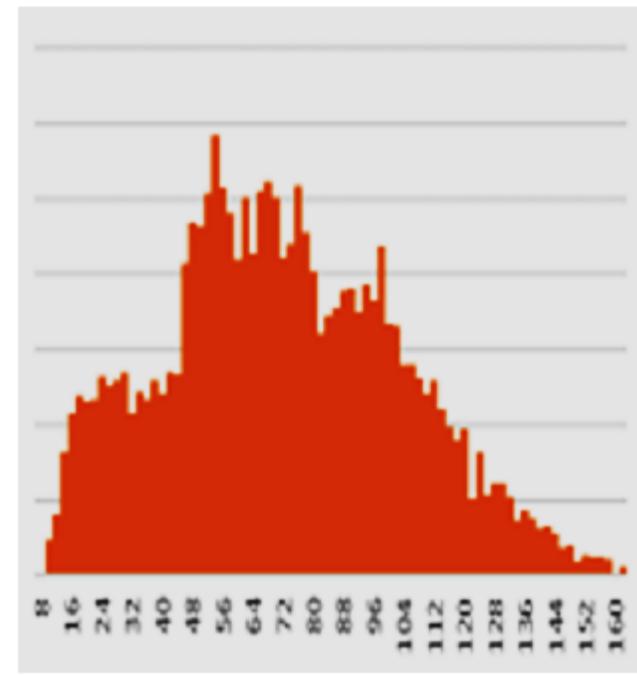
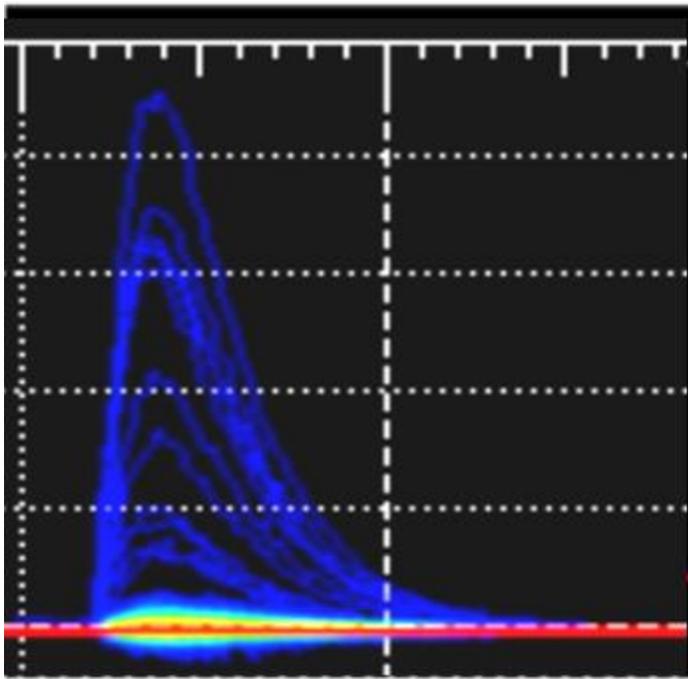




Il segnale è acquisito da una interfaccia (Analog Discovery 2)

Funziona da oscilloscopio leggibile da computer via USB

Dati visualizzabili con il software Waveforms, che permette con scripts di effettuare semplici analisi (istogrammi, combinazioni logiche dei segnali ...)

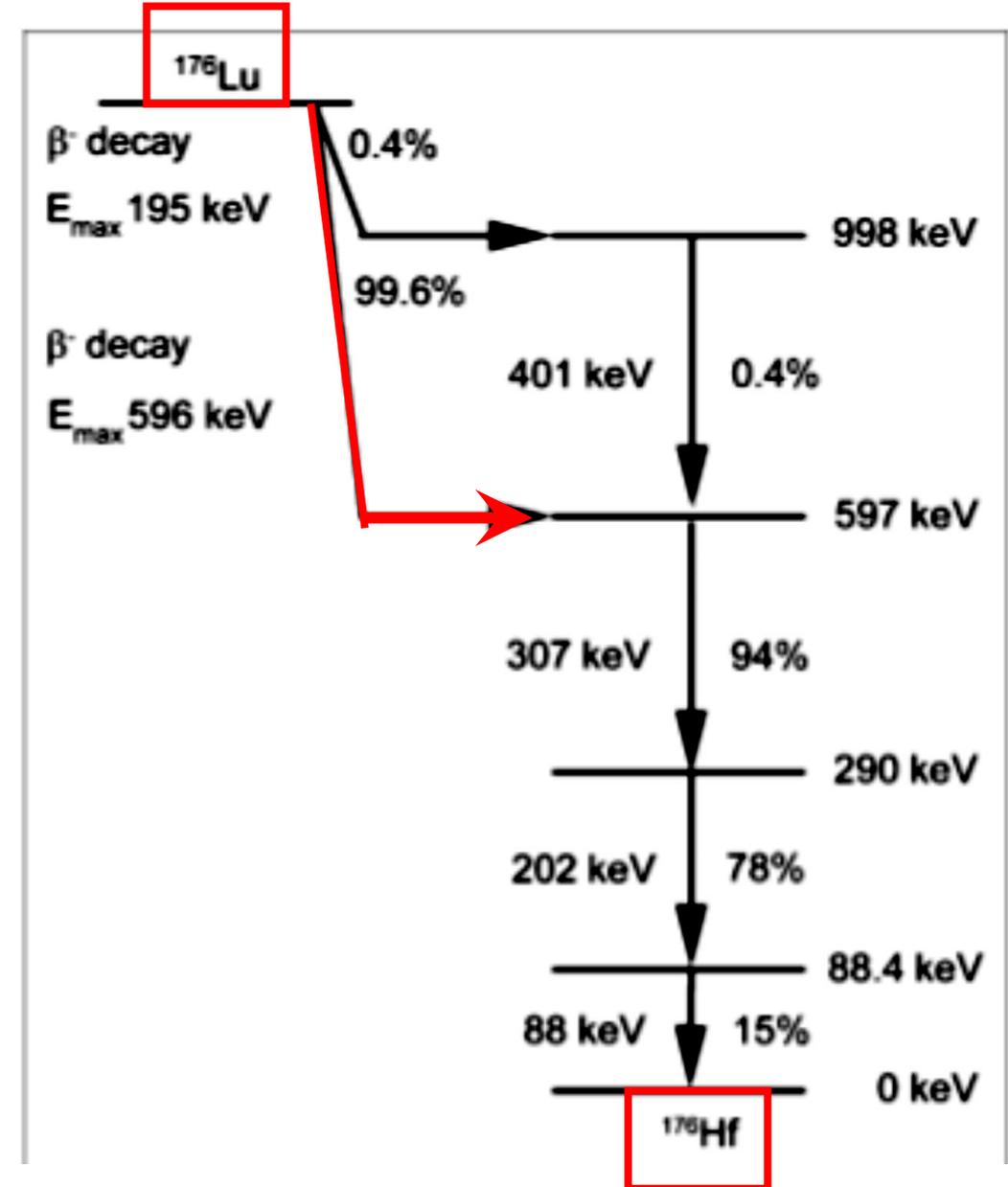
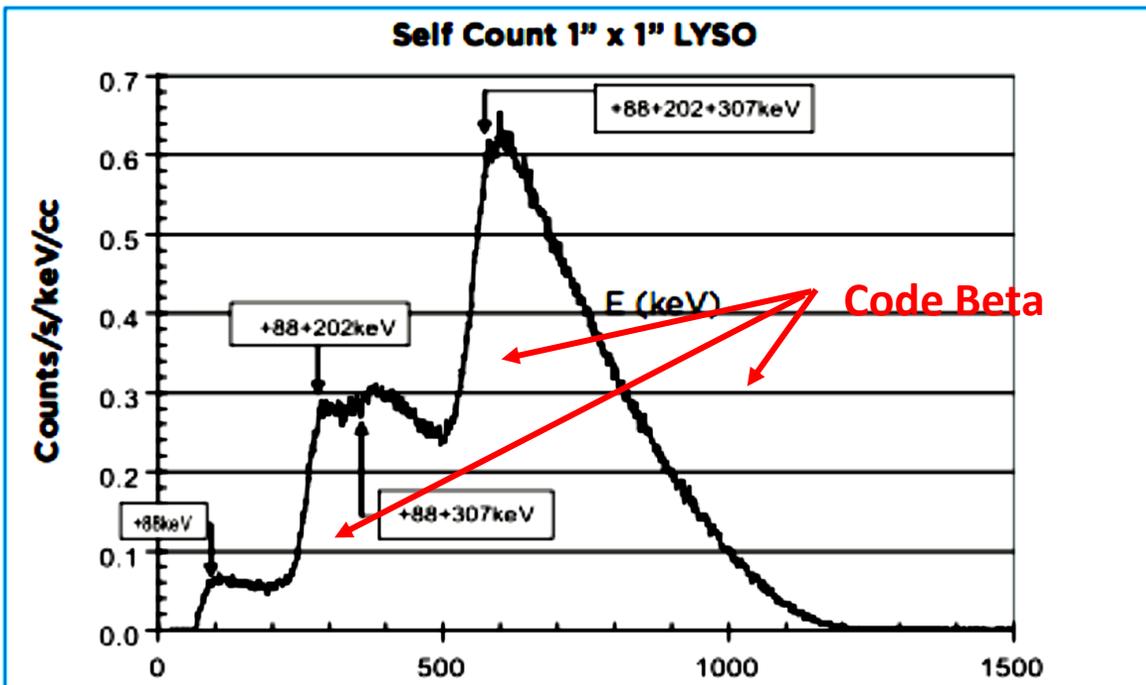


LYSO è uno scintillatore con un fondo naturale gamma interno, dovuto al decadimento dell'isotopo ^{176}Lu

→ Questa caratteristica permette di acquisire spettri gamma senza l'uso di sorgenti radioattive esterne e quindi può essere liberamente usata nelle classi.

Questo viene pagato in termini di complessità dello spettro risultante, che è la sovrapposizione della componente beta e quella di una cascata di decadimenti gamma

→ Vantaggio didattico come opportunità di imparare come identificare le componenti di uno spettro



Il percorso è stato testato in quattro diverse occasioni

- Classe di studenti di scuola superiore a Treviso (N=17)
- Moduli formativi di orientamento a Udine (N=21)
- Scuola Estiva per studenti di scuola superiore a Udine (N=32)
- Scuola Estiva per studenti di scuola superiore a Ljubljana (N=17)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE | TID - TAVOLO DI INNOVAZIONE DIDATTICA | OFFICIO EDUCATIVO REGIONALE FOR LA PRIMA UNIVERSITÀ | U.R.D.F. | Dipartimento di Scienze Matematiche, Informatiche e Fisiche - DMIF | PIANO LAVORO SCIENTIFICO PROGETTO EIPFO

LA FISICA DELLO SPAZIO pone nuove sfide che richiedono strumenti e tecniche di misura sempre più avanzati. Una delle frontiere della moderna astrofisica riguarda lo studio di processi altamente energetici e tuttora largamente incompresi, come i Gamma Ray Bursts (GRB). Tali eventi, tra i più energetici osservati nell'Universo, sono associati a collassi di stelle massicce o alla fusione di oggetti compatti quali buchi neri o stelle di neutroni. Studiare tali fenomeni richiede l'utilizzo di rivelatori operanti nelle bande dei raggi X e gamma posti al di fuori dell'atmosfera terrestre. Un ambizioso progetto dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) all'Università di Udine oltre a progettare e testare i rivelatori, sta coordinando la messa in orbita di un innovativo telescopio costituito da uno sciami di nanosatelliti che verranno lanciati a partire dal 2020: il progetto H.E.R.M.E.S. (High Energy Rapid Modular Ensemble of Satellites).

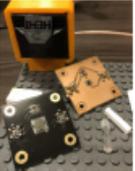


SPETTROSCOPIA GAMMA: UN'ATTIVITA' DIDATTICA CON LABORATORIO
Liceo Scientifico L da Vinci TREVISO
10 maggio 2019 ore 14:30-18:30

L'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica ha deciso di costruire una proposta didattica basata su esperimenti in cui si utilizzano rivelatori di radiazione gamma. Tali rivelatori a scintillazione implementano in modo semplice tutti i componenti presenti all'interno di rivelatori professionali e si prestano ad essere maneggiati dagli studenti per raccogliere ed analizzare dati relativi a decadimenti nucleari. Gli studenti interessati alla tematica potranno cimentarsi in misure di laboratorio che coinvolgono fasi di progettazione, raccolta e analisi critica dei dati, affrontando le problematiche e le potenzialità associate a rivelatori di questo tipo, con il valore aggiunto della consapevolezza legata all'obiettivo scientifico di tali studi.

Gli studenti partecipanti impareranno dapprima come si prevede uno spettro ottico dai livelli energetici atomici e viceversa. Impareranno anche come si formano gli spettri dei raggi beta e come costruire uno spettro composto da decadimenti beta e gamma simultanei. Useranno queste conoscenze per identificare livelli energetici nucleari di una sorgente radioattiva (^{17}F). Impareranno inoltre come separare il fondo indesiderato dai dati rilevanti usando due rivelatori in modalità di coincidenza. Infine scopriranno il collegamento tra la misura di coincidenza e le misure proposte dal telescopio satellitare H.E.R.M.E.S. per esaminare le predizioni della relatività generale.

PROGRAMMA
Ore 14:30 - Introduzione (Marisa Michelini, UniUD)
Ore 15:00 - La spettroscopia in astrofisica e gli spettri ottici (Daniele Buongiorno, UniUD)
Ore 15:30 - I rivelatori a scintillazione (Lorenzo Santi, UniUD)
Ore 16:00 - Esperimenti con i rivelatori GAMMA (Sergej Faletić, UniLjubljana, SLO)
Ore 17:00 - Esperimenti con i rivelatori Gamma della CAEN (Cristina Mattone, CAEN)
Ore 18:00 - Discussione



Il numero di posti disponibili è limitato. Gli interessati sono pregati di iscriversi entro il 3/5/19
Responsabili dell'attività: Marisa Michelini, Sergej Faletić, Daniele Buongiorno, Lorenzo Santi

Per ulteriori informazioni: Antonella Archidiacono – LS L da Vinci, Treviso
ldifo@uniud.it, anto.archidiacono@gmail.com

Il percorso didattico

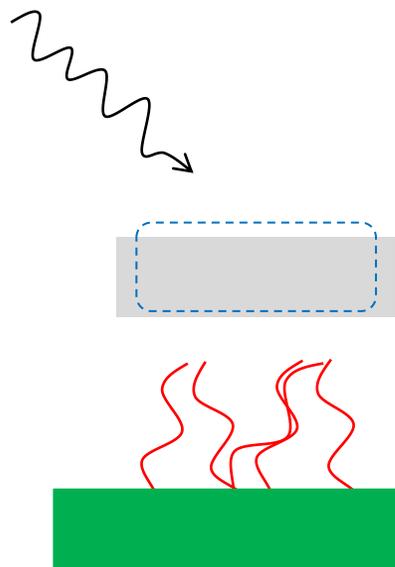
(fil rouge: la conservazione dell'energia nella interpretazione dei contributi spettrali)

Comprende

- Principi di rivelazione: la costruzione del grafico conteggi – energia dalle distribuzioni delle ampiezze nel tempo per i segnali acquisiti da un rivelatore
- Interpretazione delle linee spettrali ottiche mediante le transizioni tra i livelli energetici elettronici nell'atomo
- Previsione dello spettro nel caso due fotoni acquisiti contemporaneamente
- Previsione del contributo per un decadimento beta
 - Il conflitto con i dati sperimentali: l'ipotesi del (anti)neutrino
- La combinazione degli spettri in energia di decadimenti beta e gamma
- Lo spettro combinato in presenza di più picchi gamma
- Acquisizione dello spettro da eventi interni e sua analisi

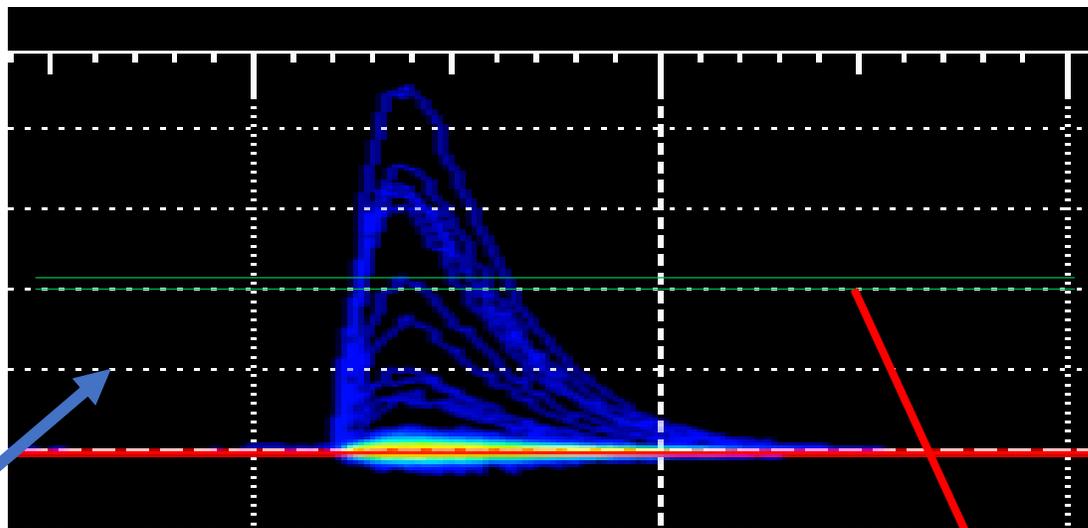


La costruzione del grafico conteggi – energia



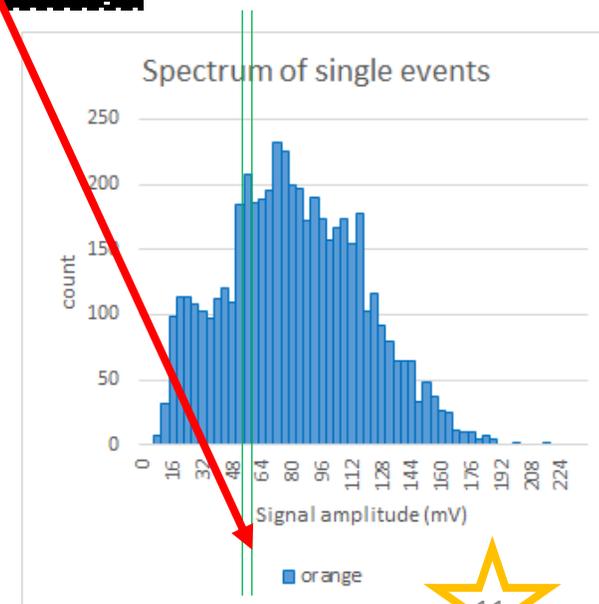
Il fotone gamma perde energia nello scintillatore producendo uno sciame di fotoni che generano un impulso sul SiPM, di ampiezza proporzionale all'energia rilasciata dal gamma.

**Attività pratica
con piccoli numeri di segnali**



Ogni impulso sul SiPM viene registrato sull'oscilloscopio.

Definito un insieme di intervalli di ampiezze, si contano il numero di eventi con ampiezze che ricadono in ciascun intervallo. I risultati vengono poi istogrammati



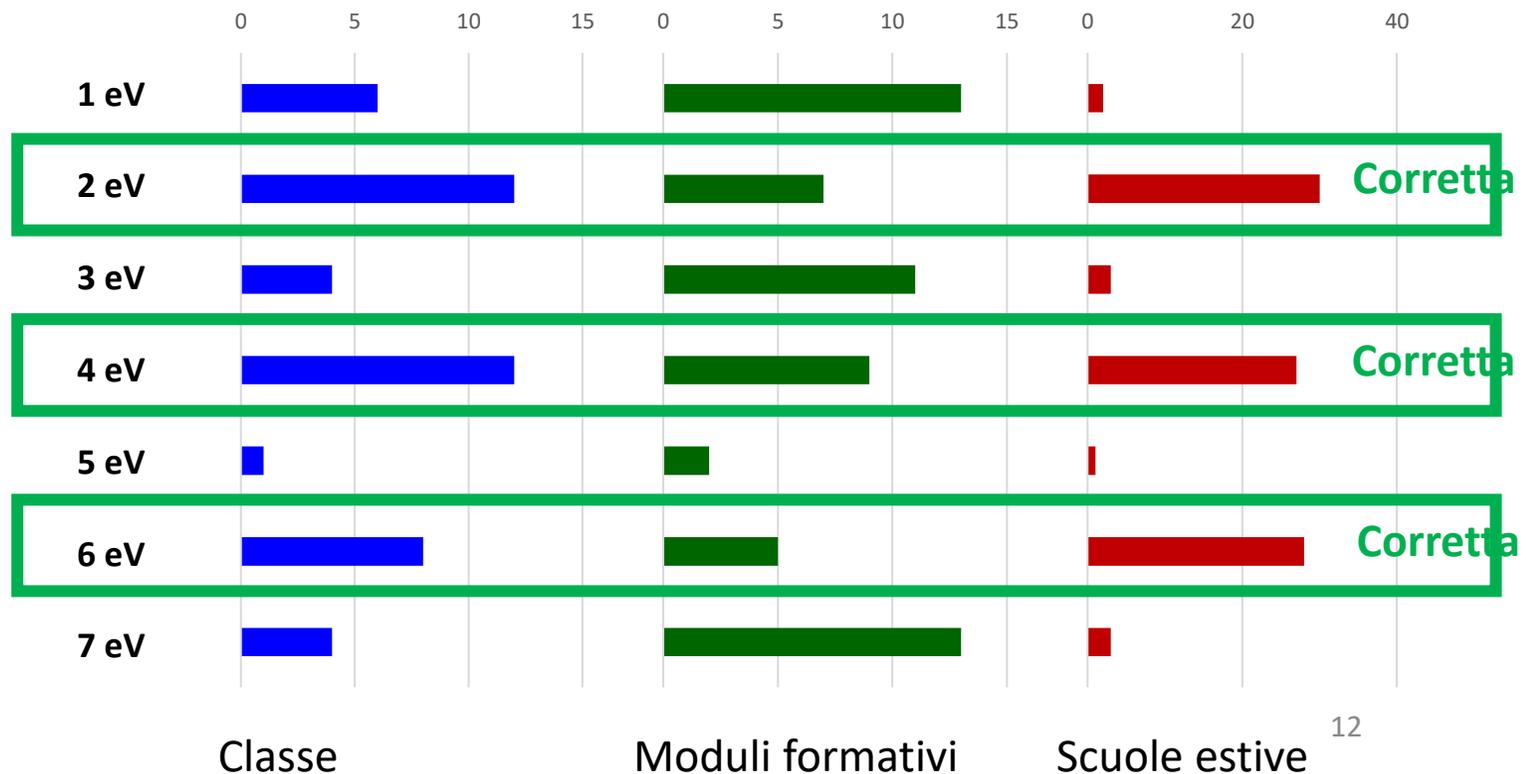
La cascata dei decadimenti gamma-introduzione

Attività preliminare di spettroscopia atomica.

Interpretazione delle linee spettrali mediante le transizioni tra i livelli energetici elettronici dell'atomo.

Qui di seguito l'esito del test finale dell'attività

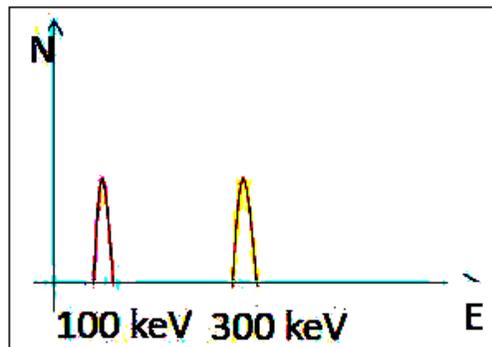
Un atomo con livelli energetici 1eV, 3eV e 7eV emette fotoni. Che linee ti attendi di vedere nello spettro di emissione?



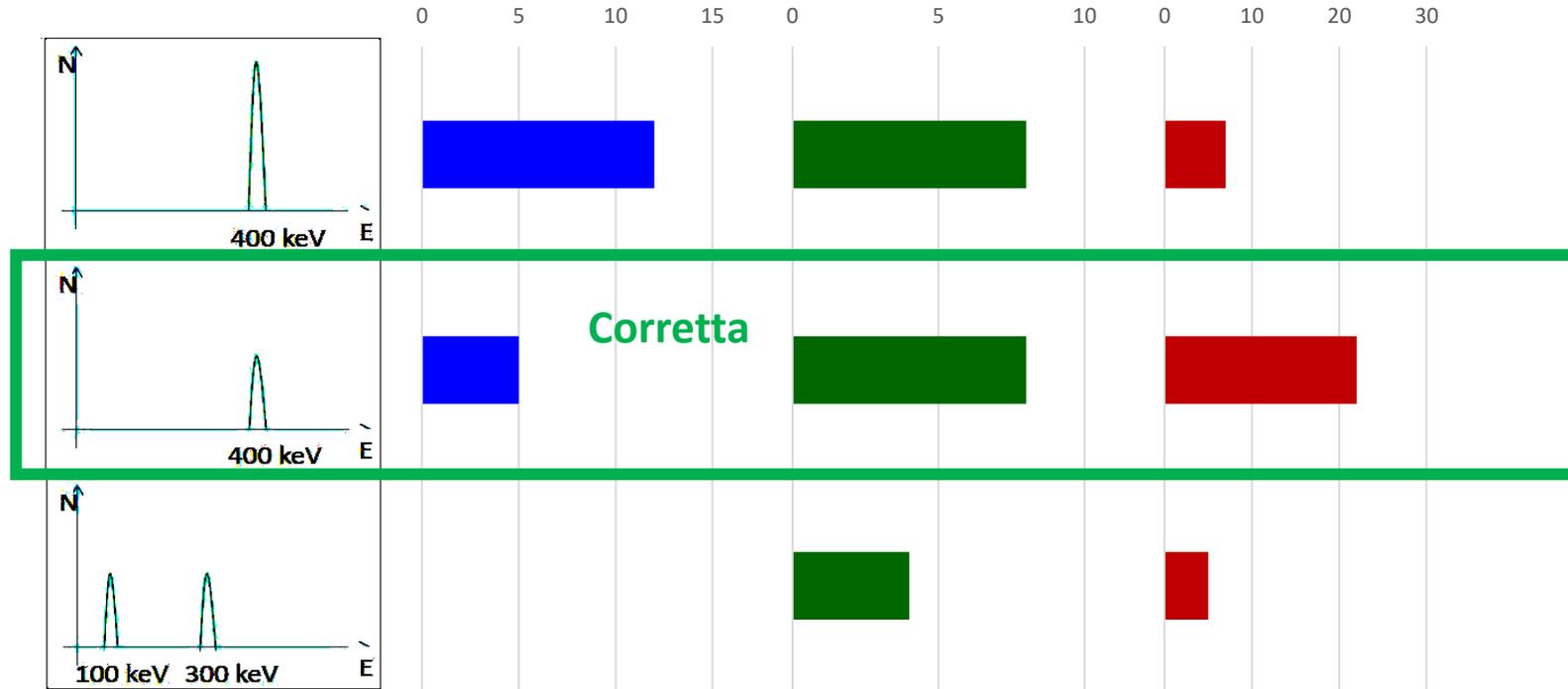
Lo spettro nel caso due fotoni acquisiti contemporaneamente

Nel caso di decadimenti gamma nucleari, è frequente l'emissione quasi contemporanea di due o più fotoni, rilevati come un unico evento.

La composizione delle loro energie fa sorgere dei problemi di interpretazione degli spettri risultanti.



Se due gamma di energia diversa vengono acquisiti nello stesso evento, quale è lo spettro che ti aspetti di acquisire complessivamente?



Classe

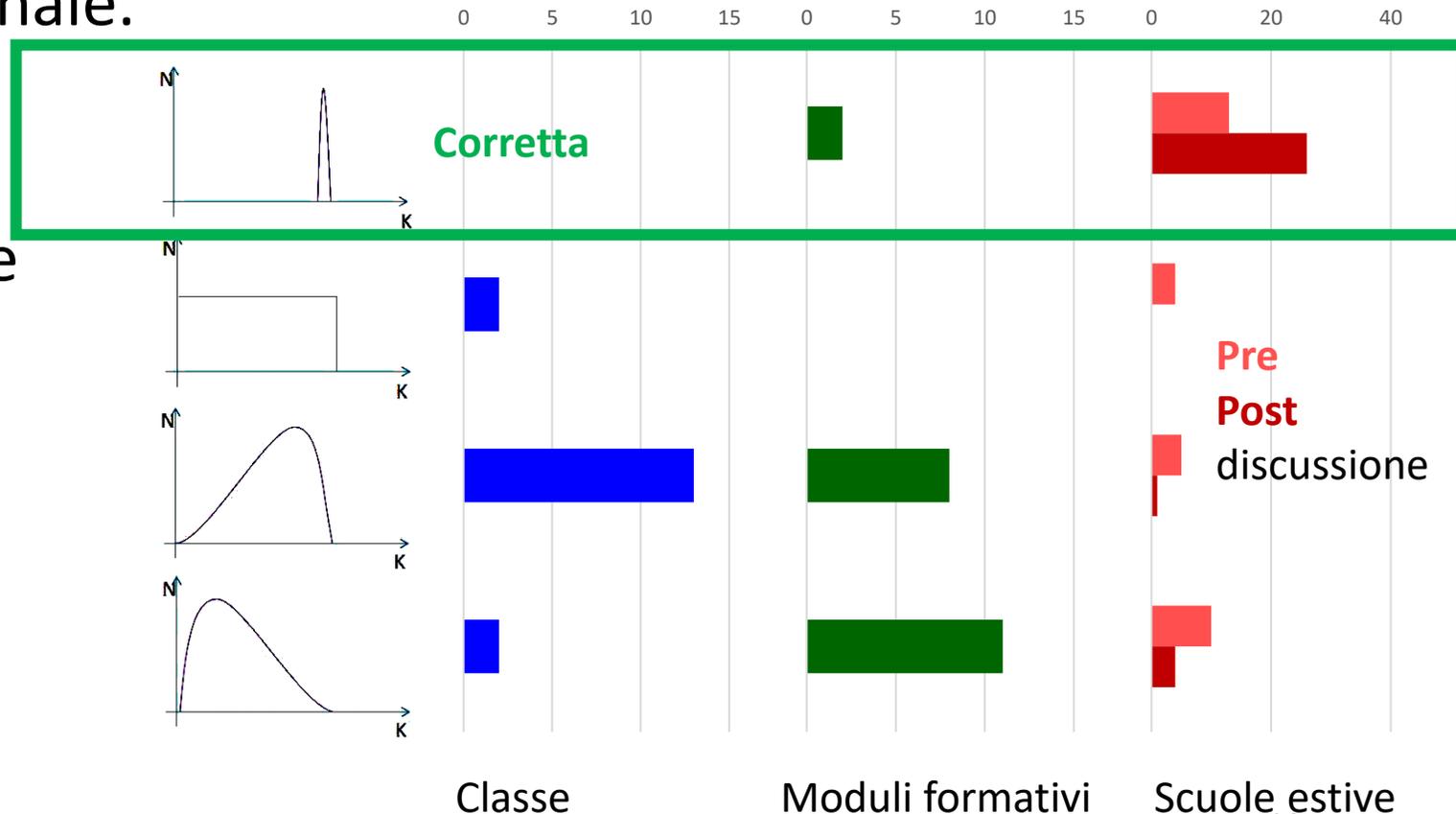
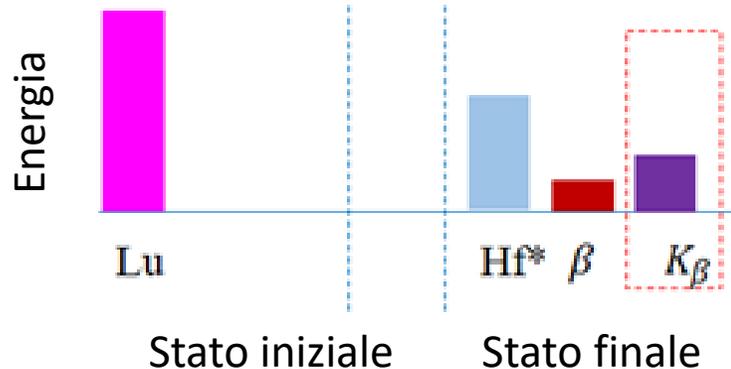
Moduli formativi

Scuole estive

Il decadimento beta

Si considera il decadimento beta $\text{Lu} \rightarrow \text{Hf}$, quando solo un elettrone viene rivelato nello stato finale.

Prevedere l'energia misurata dell'elettrone, fatta salva la conservazione dell'energia totale.

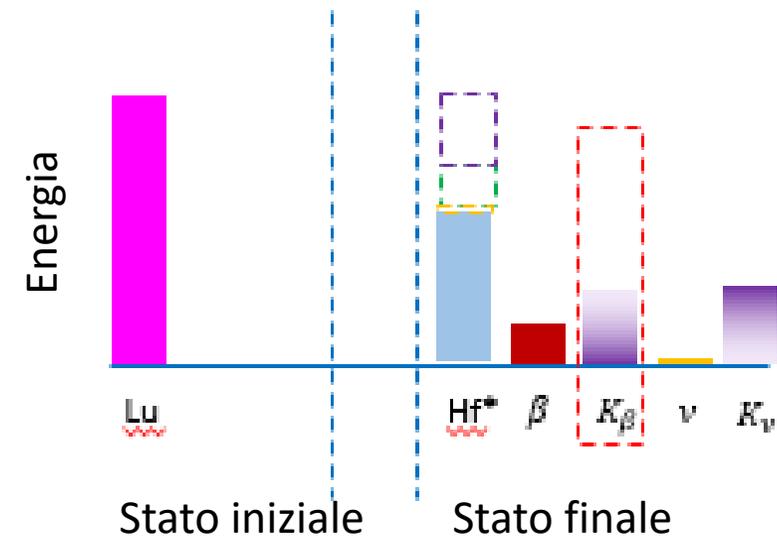
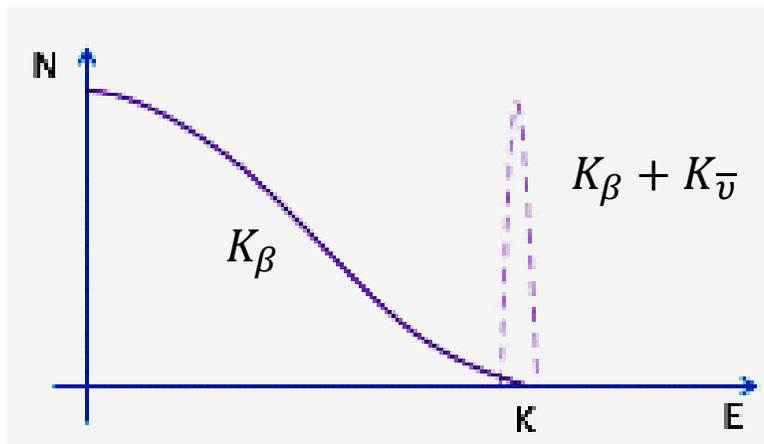


L'antineutrino

La previsione secondo la conservazione dell'energia confligge con i risultati sperimentali: l'elettrone emesso nel decadimento ha una distribuzione energetica continua.

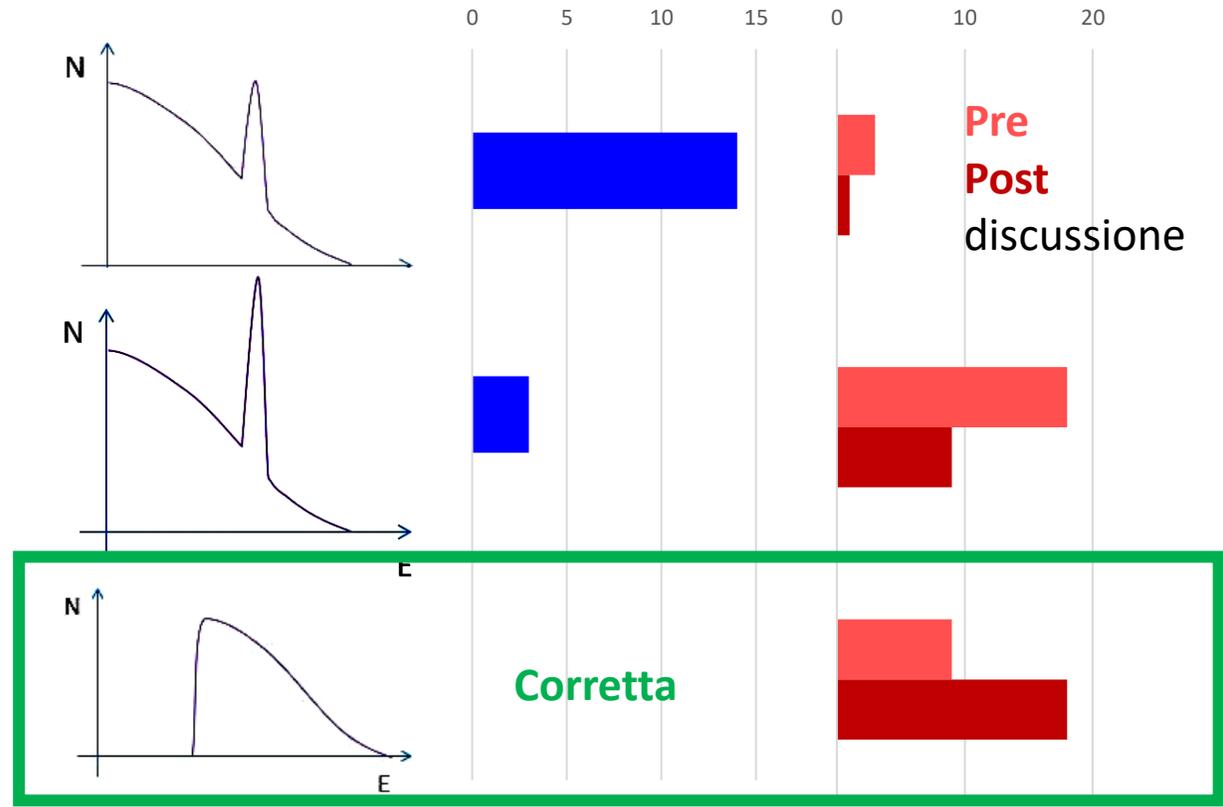
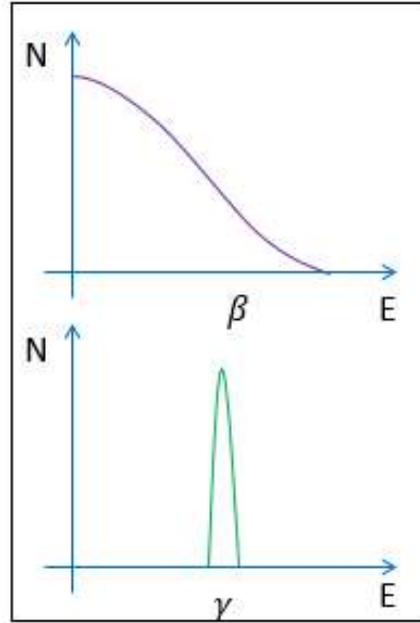
Risultato che aveva messo in crisi la fisica dell'inizio del secolo scorso.

Un modello teorico del decadimento beta, formulato da Fermi, risolse questo problema, prevedendo l'esistenza di una particella emessa nel decadimento assieme all'elettrone, che assorbe parte dell'energia a disposizione. Tale particella, l'antineutrino, è di rivelazione estremamente difficile e l'energia ad essa associata normalmente non compare nel bilancio delle energie misurate, giustificando così la natura continua dello spettro osservato



La combinazione decadimento beta + decadimento gamma

Se un fotone gamma ed un elettrone del decadimento beta sono rivelati nello stesso evento, che spettro in energia ti aspetti su un gran numero di eventi?



Classe

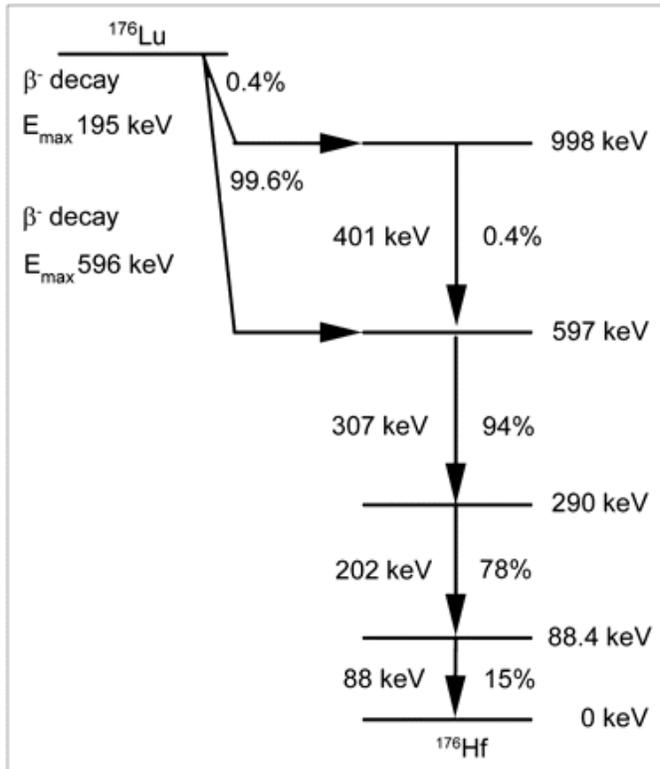
Scuole estive

Corretta

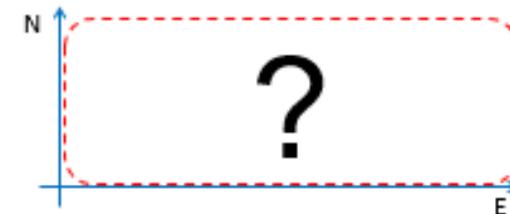
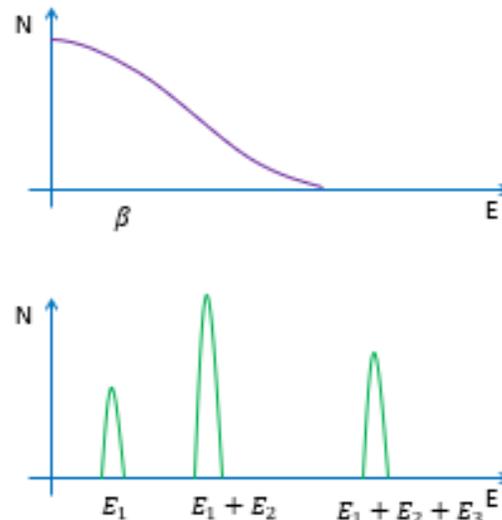
Spettri per scintillatori di piccole dimensioni

In piccoli scintillatori (come nel nostro dispositivo) uno o più gamma possono sfuggire al cristallo, sottraendo al rivelatore la corrispondente energia.

→ Lo spettro energetico presenta più picchi gamma, derivanti da combinazioni variabili di fotoni rilevati.



La attività:
Prevedere la forma dello spettro complessivo



La maggior degli studenti fanno previsioni coerenti con la forma effettiva dello spettro sperimentale



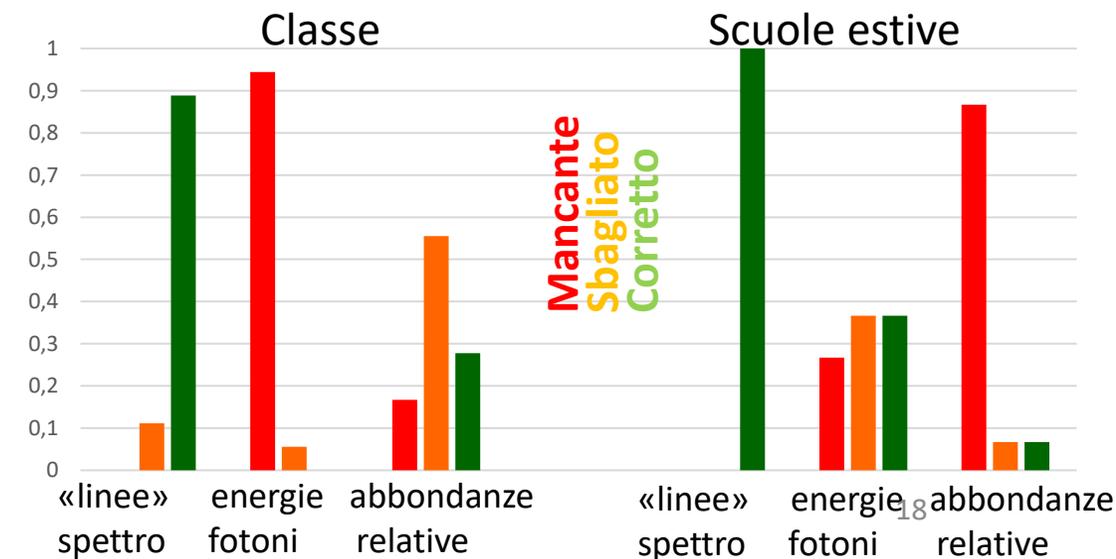
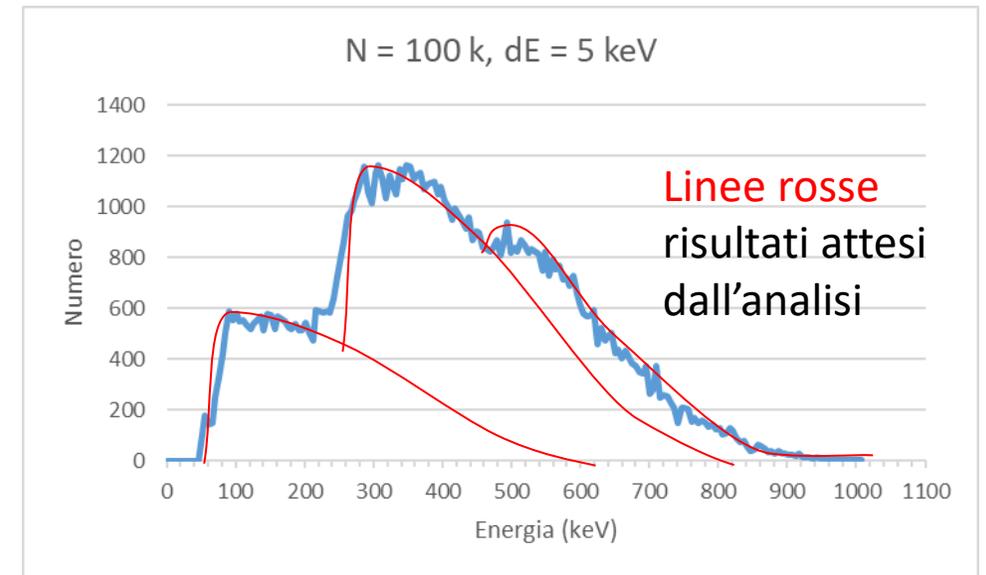
Acquisizione di eventi interni LYSO

Nelle attività più lunghe è possibile effettuare una presa dati con una statistica sufficiente per una analisi dello spettro ricavato.

Agli studenti viene richiesto di identificare i contributi allo spettro delle diverse combinazioni di fotoni gamma assorbiti nel rivelatore

I risultati mostrano che alla fine del percorso gli studenti

- sono capaci di identificare le varie componenti («linee» spettro),
- Hanno ancora difficoltà nell'identificare le energie dei fotoni coinvolti e nel valutare correttamente le abbondanze relative delle componenti dello spettro.



Conclusioni

Il tempo è poco per conclusioni dettagliate, ma la presentazione congiunta di passi concettuali e dati degli studenti ha già messo in evidenza:

- la potenzialità didattica del percorso sperimentato, oltre che dell'esperimento allestito
- le questioni da approfondire in questo campo

Grazie per l'attenzione

Jan G. Bearden *Low Cost Gamma Ray Detectors for Outreach and Education* CERN 2018-10-25 PER Seminar

<http://cds.cern.ch/record/2645007>

Ian G. Bearden: *Low Cost Gamma Spectrometers for Outreach and Education*, GIREP-ICPE-EPEC-MPTL 2019 Conference, Budapest (2019).