



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Caratterizzazione di una nuova catena di acquisizione digitale per rivelatori complementari allo spettrometro gamma a tracciamento AGATA, installato presso i LNL

Relatore

Prof. Daniele Mengoni

Correlatori

Dr. Alain Goasduff

Dr. Luca Zago

Laureando

Jacopo Fanini

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Abstract	1
2	Hardware & software	3
2.1	Il rivelatore AGATA	3
2.2	La catena elettronica	4
2.3	L'ancillare SPIDER	5
2.4	Il sistema di acquisizione dati	5
3	Il commissioning II	6
4	Analisi dei dati	7
4.1	Efficienza di SPIDER	7
4.2	Spettri energetici di AGATA	10
4.2.1	Run 22	10
4.2.2	Run 13	12
4.2.3	Run 38	14
5	Conclusioni e prospettive future	17

Capitolo 1

Abstract

AGATA rappresenta lo stato dell'arte nella rivelazione di raggi γ provenienti da transizioni tra livelli energetici di un nucleo atomico. Per fare ciò, il rivelatore viene spesso accoppiato con degli strumenti ancillari, in grado di rendere le misure effettuate significativamente più informative. Uno di questi ancillari è SPIDER, un dispositivo in grado di segnalare il passaggio di ioni pesanti e misurare la loro energia. Dato l'alto livello di complessità degli strumenti fisici in questione, il loro funzionamento avviene grazie ad un'elettronica tecnologicamente molto avanzata e a software realizzati appositamente per questo esperimento.

Lo scopo di questa tesi è lo studio e la caratterizzazione della nuova catena elettronica di SPIDER e la valutazione dell'accoppiamento AGATA-SPIDER, e si inserisce all'interno dei test preliminari svolti ai Laboratori Nazionali di Legnaro atti a verificare il corretto funzionamento degli apparati sperimentali prima dell'inizio della nuova campagna di presa dati.

Capitolo 2

Hardware & software

2.1 Il rivelatore AGATA

AGATA (Advanced GAMMA Tracking Array) [1] è uno spettrometro per raggi γ in funzione attualmente ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) ed è frutto di una collaborazione di 40 istituti di ricerca europei.

Il rivelatore sarà costituito da 180 cristalli esagonali di Germanio iperpuro (HPGe), aggregati in cluster tripli (ATC, AGATA Triple Cluster) nei criostati. Attualmente ai LNL sono montati 33 cristalli, in grado di fornire una copertura dell'angolo solido di circa 1π . La particolare forma dei cristalli è stata studiata tramite simulazioni Monte Carlo per massimizzare la copertura geometrica dell'angolo solido e, di conseguenza, l'efficienza. Ciascun cristallo, incapsulato ermeticamente in una protezione di Alluminio, ha una massa complessiva di circa 2 kg per 90 cm di lunghezza ed è segmentato in sei settori azimutali e sei settori longitudinali (36 segnali). L'energia totale depositata in ogni cristallo viene raccolta nel contatto centrale con due guadagni diversi, dunque l'elettronica ha il compito di gestire fino a 38 segnali per ciascun cristallo, ovvero 114 per ciascun ATC.

I criostati sono divisi in due parti separate: una mantiene i cristalli di HPGe alla temperatura di 90 K, l'altra raffredda una parte dell'elettronica di preamplificazione (i FET, Field Effect Transistors) a 130 K, temperatura alla quale ha il minimo rumore. Nel criostato viene mantenuta una pressione inferiore a 10^{-6} mbar. Le altre parti del preamplificatore sono situate esternamente e connesse al criostato tramite fili con bassa conduttività termica. Il dewar del criostato triplo contiene 4.5 litri di azoto liquido, sufficienti a mantenere la temperatura desiderata per 8 ore continuative.

Nel complesso, la risoluzione (FWHM, Full Width at Half Maximum) dell'energia totale depositata nel core di ogni cristallo risulta essere di 2.35 keV (1.35 keV) a 1.33 MeV (122 keV), mentre la risoluzione media dei 36 segmenti è 2.10 keV (1.20 keV), in linea con le specifiche richieste in fase di progettazione. [1]

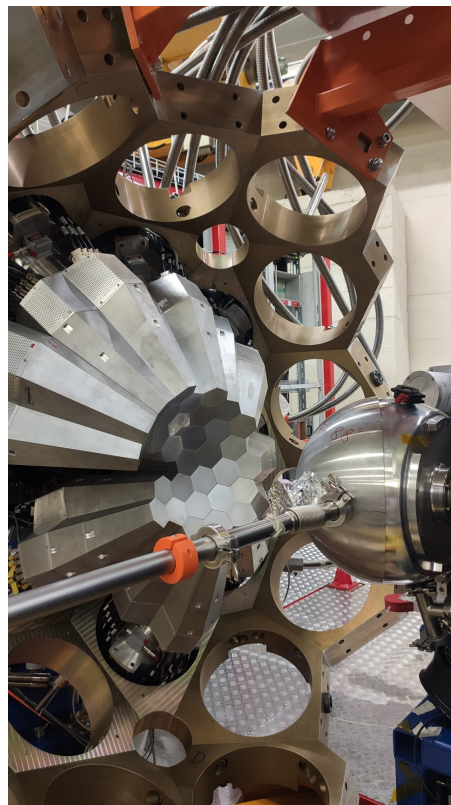


Figura 2.1: Particolare del rivelatore AGATA. Si possono vedere gli ATCs con la meccanica di sostegno e la camera di reazione

2.2 La catena elettronica

La catena elettronica di front-end (FEE, Front-End Electronics) di AGATA, operativa ai LNL da quest'anno, è innovativa. Essa ha lo scopo di digitalizzare i segnali e processarli in tempo reale, determinando l'energia depositata dall'interazione tra il raggio γ in ogni segmento del cristallo e l'energia totale rilasciata nel cristallo stesso. In seguito, attraverso l'analisi della forma dell'impulso (PSA, Pulse-Shape Analysis) è possibile ricostruire i punti di interazione del raggio γ nel cristallo, con una precisione sulla loro posizione dell'ordine di qualche millimetro. [1]

Ogni cristallo è collegato a un digitalizzatore composto da 3 schede di 12 canali ciascuna (schede segmenti), 1 scheda di 2 canali (scheda core) e infine una scheda di controllo. Tutte le schede vengono collegate tramite 4 fibre ottiche a una scheda di pre-processamento.

Il digitalizzatore, raffreddato ad acqua, riceve l'output dei 38 pre-amplificatori e trasforma il segnale analogico in segnale digitale ad un rate di 100 MHz attraverso dei convertitori analogico-digitali (ADCs, Analog to Digital Converters). Per semplificare l'accoppiamento di AGATA con altri rivelatori, sulla scheda core è stata implementata un'uscita logica che permette di ottenere un segnale di fast trigger.

L'elettronica di pre-processamento, sfruttando le schede GGP (Global Gigabit Processor), seleziona i dati eliminando quelli in cui non sono registrate interazioni γ , riducendo il volume degli stessi di un fattore 100. La GGP interroga quindi il GTS (Global Trigger and Synchronization) che esegue il trigger e la sincronizzazione temporale dei dati. Infine, grazie al modulo AGAVA (AGATA VME Adapter) è possibile accoppiare il trigger di AGATA con diversi rivelatori complementari che permettono di effettuare un'analisi spettroscopica più approfondita.

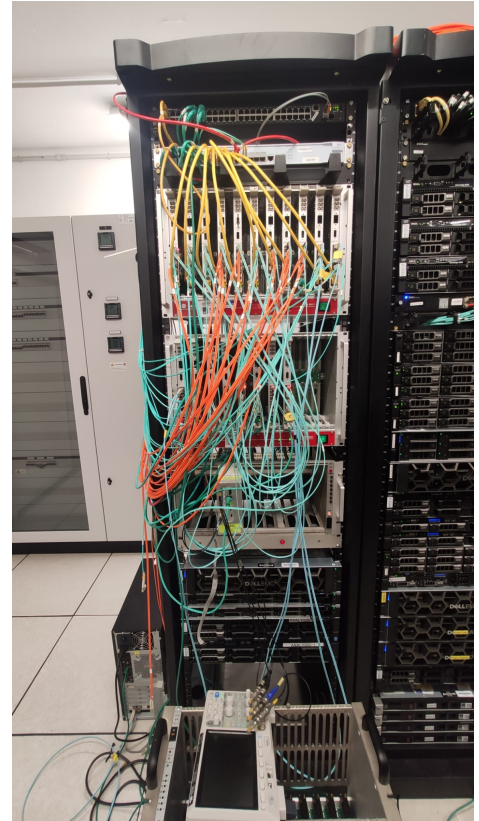


Figura 2.2: Sistema di distribuzione di clock (GTS) di AGATA installato nella sala informatica



Figura 2.3: Scheda GGP, parte dell'elettronica di pre-processamento

2.3 L'ancillare SPIDER

Il rivelatore SPIDER (Silicon P*I*e D*E*tectoR) [2] è costituito da un massimo di 8 settori in silicio indipendenti, ciascuno segmentato in 8 segmenti anulari lungo l'angolo polare. Tale settore è presentato Fig. 2.5 con evidenziata la sua segmentazione. Il numero di settori azimutali è variabile per permettere di adattare le dimensioni del rivelatore a camere di scattering di grandezze differenti. In particolare, nell'accoppiamento SPIDER-AGATA si sfrutta la configurazione con 7 settori, dimodochè il rivelatore risulti avere una forma conica. Tale conformazione, presentata in Fig. 2.4, risulta essere il miglior compromesso tra copertura angolare del rivelatore e risoluzione angolare dello stesso.

La risoluzione energetica di SPIDER, misurata con una sorgente α tripla di ^{239}Pu - ^{241}Am - ^{244}Cm , è di circa 18 keV per una particella α di circa 5.5 MeV. [2]

SPIDER viene accoppiato ad AGATA per rivelare particelle cariche in misure di eccitazioni coulombiane nucleari a bassa energia: ad esempio, è spesso utilizzato per valutare posizione ed energia degli ioni del fascio incidente che interagiscono elasticamente con il bersaglio (diffusione Rutherford).

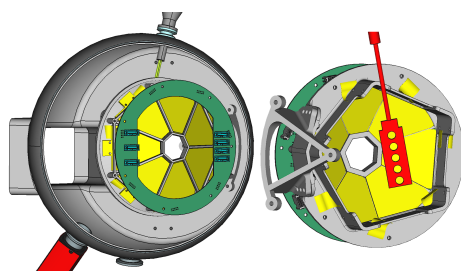


Figura 2.4: Ricostruzione 3D di SPIDER nella camera di reazione nella configurazione a 7 settori. Si noti la presenza del portabersaglio. Immagine da [2].

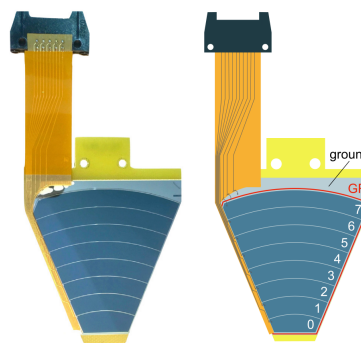


Figura 2.5: Particolare di una strip di SPIDER con parte dell'elettronica di acquisizione dati. Immagine da [2].

2.4 Il sistema di acquisizione dati

La DAQ dei rivelatori ancillari di AGATA [7,8] è scritta in C++ ed è basata su XDAQ, un software sviluppato appositamente al CERN per il processamento dei dati negli esperimenti di fisica a medio ed alte energie, che mette a disposizione delle librerie e dei servizi funzionali al soddisfacimento dei principali requisiti di una DAQ, come l'interoperabilità tra i vari nodi e la scalabilità. In particolare, l'architettura della DAQ è derivante dall'esperienza pregressa avuta con il rivelatore di raggi γ GALILEO [3], per il quale sono stati in passato elaborati alcuni blocchi funzionali fondamentali nella gestione del flusso degli eventi provenienti dai rivelatori. I dati raccolti dai digitalizzatori e pre-processati dalla GGP sono vagliati da applicazioni consecutive con diverse funzioni, scritte anch'esse in C++:

- Read-out unit (RU): si occupa della ricezione dei dati dalla GGP;
- Local filter unit (LF): esegue l'analisi di primo livello attraverso diversi algoritmi configurabili dall'utente che operano sui dati acquisiti, inoltre cura la formattazione dei dati provenienti dal rivelatore;
- Builder unit (BU): si occupa dell'ordinamento temporale dei segnali e del merging degli eventi provenienti dalle diverse RUs.

È inoltre possibile, in alternativa alla lettura online dei dati dai digitalizzatori, fare in modo che le RUs ricevano i dati da file offline.

Ogni applicazione può scrivere i dati su disco. In questo modo si riesce a seguire agevolmente il flusso dei dati ed è più semplice risolvere eventuali problematiche.

Capitolo 3

Il commissioning II

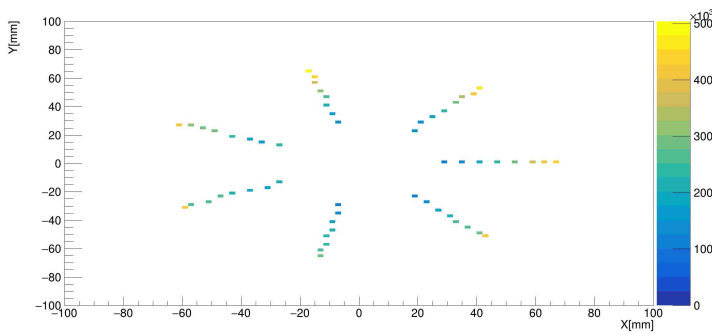


Figura 3.1: Posizione spaziale e intensità degli eventi registrati di SPIDER nella run 38 del commissioning II

Il rivelatore AGATA è da poco ritornato ai Laboratori Nazionali di Legnaro ed è operativo da maggio 2022 per una campagna sperimentale di presa dati della durata prevista di tre anni. Ogni volta che un rivelatore viene spostato e riassembleto, è necessario testare preliminarmente il suo corretto funzionamento, svolgendo esperimenti di cui i risultati sono ben noti. Questa fase preparatoria viene chiamata commissioning. In particolare, dato l'elevato grado di complessità di AGATA, si è deciso di effettuare tre esperimenti di commissioning per testarne accuratamente i rivelatori, l'elettronica, i componenti

meccanici e l'accoppiamento con i diversi rivelatori ancillari.

Il lavoro di questa tesi si concentra sull'analisi dei dati raccolti durante il commissioning II, svolto a maggio 2022. Un fascio di Nichel (^{58}Ni) di energia 230 MeV proveniente dall'acceleratore elettrostatico a doppio stadio TANDEM ha colpito un bersaglio di Platino (^{196}Pt) con spessore 1 mg/cm^2 ; in un secondo momento, un fascio (ancora di ^{58}Ni) con energia 190 MeV ha colpito un bersaglio di Stagno (^{116}Sn) con spessore 2 mg/cm^2 . La linea di fascio $+20^\circ$ in sala sperimentale I è stata equipaggiata con AGATA abbinato a SPIDER, per rivelare i fotoni e le particelle cariche provenienti dal punto di interazione.

fascio	energia (MeV)	bersaglio	spessore (mg/cm^2)	spessore (μm)
^{58}Ni	230	^{196}Pt	1	0.47
^{58}Ni	190	^{116}Sn	2	2.75

Tabella 3.1: Diverse tipologie di fascio e bersaglio usati nel commissioning II

In particolare, in questi esperimenti si è deciso di lavorare ad energie tali da permettere un'eccitazione coulombiana del nucleo (Coulomb excitation): i due nuclei entrano in contatto solamente tramite i loro campi elettromagnetici e tutte le altre modalità di interazione (forza forte, forza debole) risultano essere trascurabili [4]. Questa tecnica, che consente di studiare principalmente le proprietà collettive dei nuclei, come ad esempio la forma, richiede fasci di bassa energia (pochi MeV per nucleone), dal momento che la sezione d'urto del processo di eccitazione coulombiana, essendo molto grande (dell'ordine del barn), permette di compensare la bassa intensità. Per assicurarsi che la collisione avvenga per mezzo di interazioni coulombiane si sfrutta il cosiddetto criterio di Cline, che afferma che se la minima distanza tra le superfici di collisione dei due nuclei in gioco è maggiore di 5 fm, i contributi di interazione nucleare non coulombiana alla sezione d'urto sono inferiori allo 0.5 %.

Capitolo 4

Analisi dei dati

4.1 Efficienza di SPIDER

La prima parte del lavoro consiste nell'analisi della statistica dei dati (offline ed online) in uscita da RU, LF e BU per la run 22 del commissioning II con SPIDER, con lo scopo di valutare criticamente la trasmissione dei dati ed eventuali eventi persi nel corso dell'analisi sfruttando i files scritti dal sistema di acquisizione come mostrato nella Fig. 4.1.

Partendo dai dati letti da file binari (offline), si è calcolato il rapporto tra i conteggi ottenuti nei diversi canali di SPIDER in uscita dalla RU e in uscita dal LF. Si è quindi calcolata la media tra tutti i tassi di trasmissione dei singoli canali per avere un valore rappresentativo del tasso di trasmissione globale di SPIDER ottenendo

$$\epsilon_{LF/RU} \approx 45\%$$

Concretamente, ciò significa che più della metà dei dati vengono esclusi nel passaggio da RU a LF. Studiando approfonditamente il funzionamento del LF, si è notato come in esso sia presente una restrizione sui valori dell'ampiezza del segnale, dal momento che accetta solo ampiezze maggiori di una soglia individuata dall'utente per ogni canale. Tale soglia serve per tagliare parte del rumore dell'elettronica senza perdere nessun dato significativo.

È stato quindi ricalcolato il tasso di trasmissione, imponendo nell'analisi le stesse soglie nei dati della RU. Si ottiene allora

$$\epsilon_{LF/RU_s} = 99.9\%$$

Si nota quindi un miglioramento considerevole nella trasmissione media dei dati, che risulta essere molto prossimo al valore ideale di 100%.

Per caratterizzare completamente il tasso di trasmissione dei dati nei tre software, è stato quindi calcolato il rapporto tra i conteggi ottenuti dai diversi canali elettronici di SPIDER dopo la BU e quelli in uscita dalla RU. Si ottiene

$$\epsilon_{BU/RU_s} \approx 115\%$$

Chiaramente, il risultato è privo di senso fisico. Il numero sovrastimato di conteggi ottenuti nella BU deriva dal fatto che sono presenti degli eventi idle, ossia degli "eventi fittizi" di ampiezza nulla generati dal LF. Infatti, se la frequenza di trigger di un singolo rivelatore si riduce al di sotto di una certa soglia, il LF è programmato per generare, per quello specifico rivelatore, questi eventi fittizi ad una frequenza programmabile e tale da evitare il blocco della BU. È dunque necessario imporre che le ampiezze degli eventi in uscita dalla BU siano strettamente positive, in modo tale da eliminare tutti

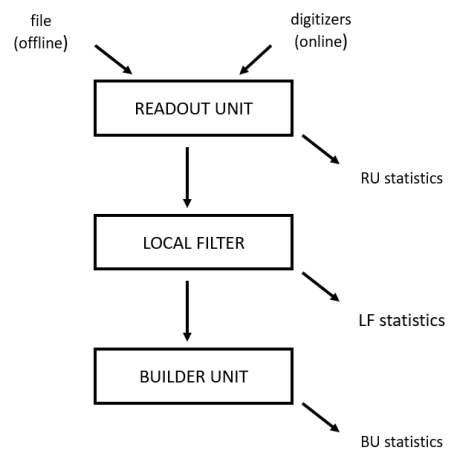
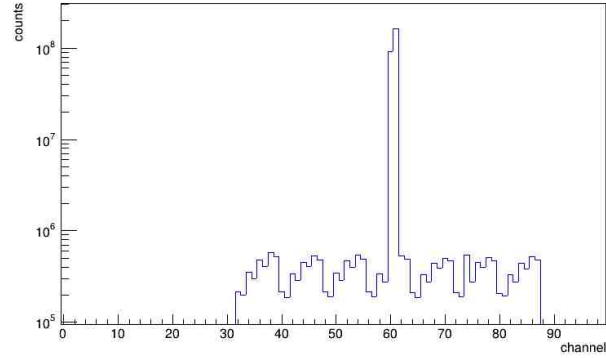


Figura 4.1: Sequenza delle applicazioni principali del DAQ

Figura 4.2: Conteggi in funzione dei canali di SPIDER nella BU. Si noti la presenza di conteggi anomali in due canali, dovuti ad una non perfetta taratura del trigger degli stessi, che fa sì che essi triggerino sul rumore anziché sul segnale



gli eventi idle. Con tale condizione, il tasso di trasmissione medio risulta essere

$$\epsilon_{BU>0/RU_s} = 99.9\%$$

In particolare, la trasmissione è del 100% per tutti i canali, eccetto tre (per i quali comunque essa si rivela essere almeno del 99.999%). Si può quindi affermare che, per la lettura da file offline, i software analizzati siano ben ottimizzati.

Prima di verificare il buon funzionamento dei software nel caso di lettura dai digitalizzatori (online), si è deciso di visualizzare l'andamento dei conteggi in funzione dei canali dell'ADC, per assicurarsi che gli spettri siano uniformi per tutti e tre i programmi e non vi siano irregolarità. In particolare, si è preso arbitrariamente in considerazione il canale 44 di SPIDER.

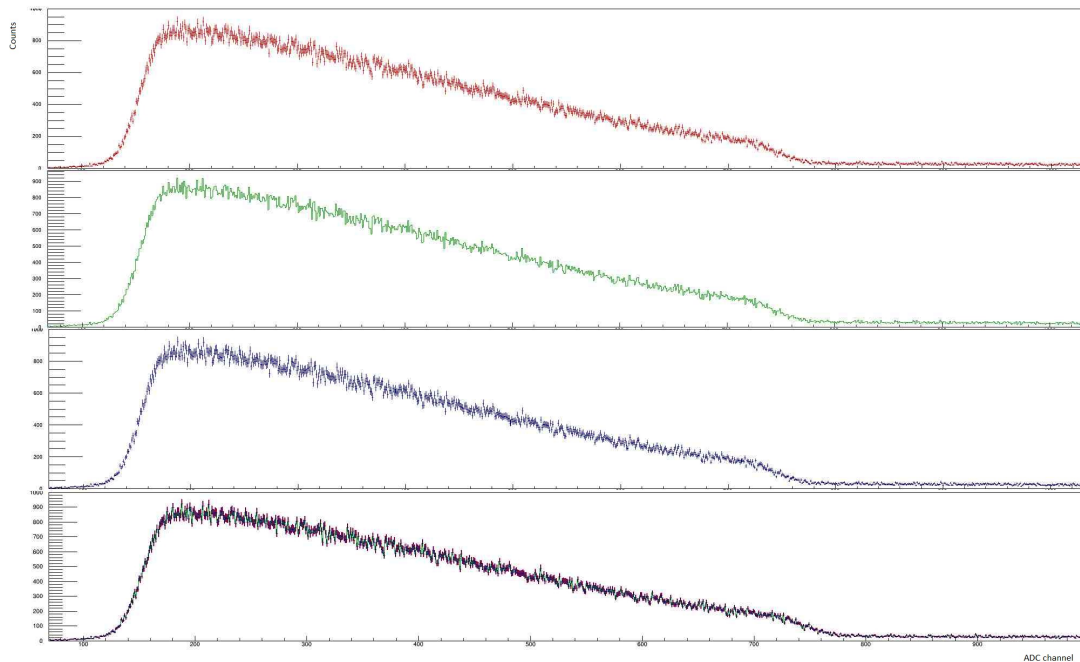


Figura 4.3: Conteggi del canale 44 in uscita dai programmi di preprocessingo, in funzione dei canali dell'ADC. Partendo dall'alto: RU, LF, BU, sovrapposizione

Come si può vedere dalla figura soprastante, confrontando gli spettri non sono presenti evidenti difformità, quindi i dati analizzati sono fisicamente coerenti. Questo fatto non fa altro che confermare il buon funzionamento dei diversi attori della DAQ perlomeno nel processamento dei dati offline da file binari.

Per l'analisi dei dati online, si è presa in considerazione sempre la run 22, calcolando il rapporto tra gli eventi in uscita dalla BU e quelli in uscita dalla RU (con la solita condizione sulle ampiezze). Il

tasso di trasmissione medio ottenuto risulta

$$\eta_{BU/RU_s} \approx 150\%$$

È evidente come anche in questo caso il risultato non abbia significato fisico. Procedendo in maniera analoga a quanto visto per i dati offline, si impone che le ampiezze degli eventi in uscita dalla BU siano strettamente positive, ottenendo

$$\eta_{BU>0/RU_s} \approx 7\%$$

Dal risultato ottenuto si deduce che la maggior parte degli eventi hanno ampiezza nulla. Questo è sintomo di un problema nella catena di acquisizione dati, dal momento che nella lettura degli eventi online la maggior parte degli stessi vengono persi e sostituiti da eventi idle.

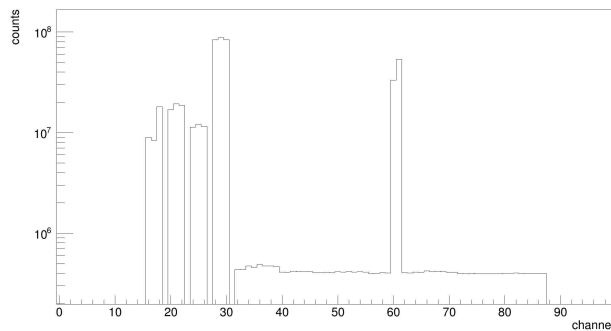


Figura 4.4: Conteggi di SPIDER (e DANTE) in funzione dei canali in uscita dalla BU con dati online

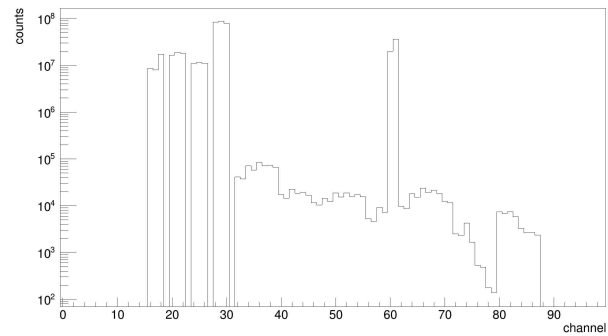


Figura 4.5: Conteggi di SPIDER (e DANTE) in funzione dei canali in uscita dalla BU con dati online imponendo che l'energia sia positiva

Nelle figure sopra si nota come i conteggi di SPIDER in uscita dalla BU, con l'eccezione dei due canali problematici già discussi in precedenza, siano pressochè costanti, mentre imponendo la condizione sulla positività dell'ampiezza si ottiene uno spettro che non ha significato fisico, manifesto di un problema nella DAQ. Si noti che la presenza di problemi era attesa, dal momento che in questo lavoro si analizza per la prima volta la catena di acquisizione dati e l'accoppiamento di AGATA e SPIDER dal loro ritorno ai LNL.

4.2 Spettri energetici di AGATA

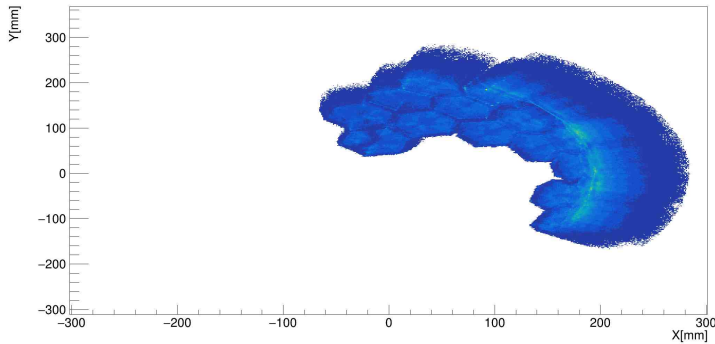


Figura 4.6: Posizione spaziale degli eventi registrati da AGATA nella run 38 del commissioning II

zione di eccitazione coulombiana di ^{58}Ni su ^{196}Pt e ^{116}Sn . Tale software è in grado inoltre di effettuare la correzione Doppler degli spettri sia rispetto al Nichel sia rispetto ai bersagli.

Dal momento che la precedente analisi ha dimostrato che sono presenti delle problematiche di software quando i dati dei canali elettronici di SPIDER sono processati online, si è deciso dunque di prendere in esame solamente i dati offline da file binari.

Grazie ad un software ad hoc, è stata svolta la calibrazione energetica dei dati raccolti da AGATA e SPIDER durante il commissioning II per riuscire a identificare adeguatamente le linee energetiche corrispondenti alle transizioni nucleari indotte dalla rea-

4.2.1 Run 22

Si è quindi presa in considerazione la già citata run 22, ottenendo il seguente spettro, in cui sono già state identificate le principali transizioni nucleari confrontando i risultati ottenuti con i dati presenti in letteratura.

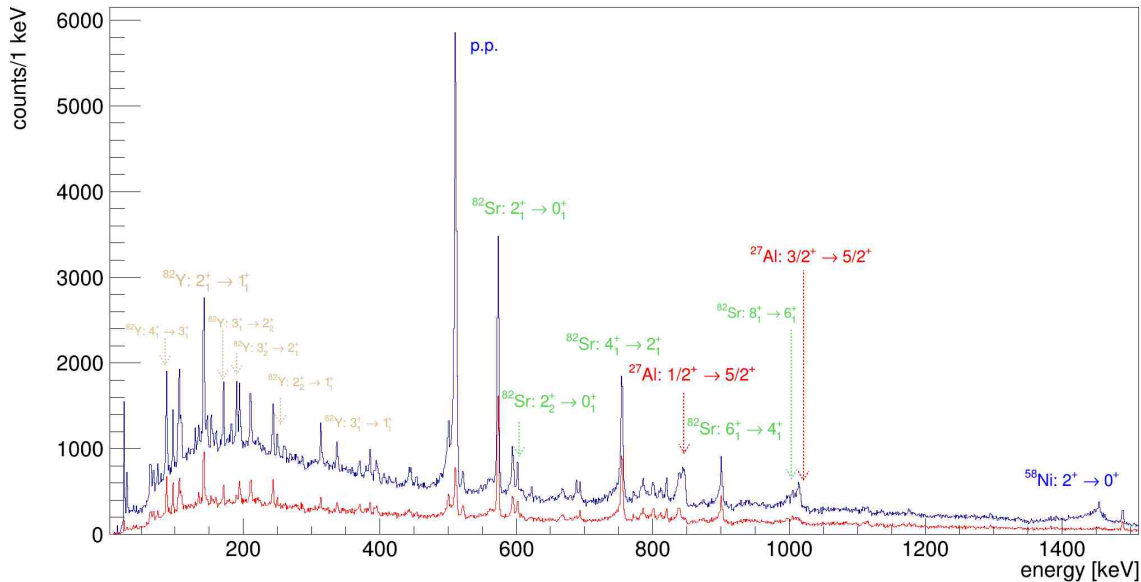
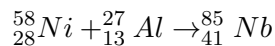


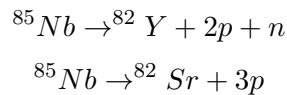
Figura 4.7: Spettro senza correzione Doppler. In blu lo spettro di AGATA, in rosso lo spettro di AGATA in coincidenza con SPIDER

I risultati esposti in tabella e visualizzati nel grafico sono inattesi, dal momento che, eccettuata l'unica transizione del Nichel e la ben nota produzione di coppie elettronica, la quale viene meno nello spettro di coincidenza AGATA-SPIDER, le transizioni nucleari che compongono lo spettro coinvolgono principalmente nuclei diversi da proiettile (^{58}Ni) e bersaglio (che nel caso della run 22 dovrebbe essere ^{116}Sn). Studiando attentamente le componenti dello spettro, si è arrivati alla conclusione che in tale esperimento il fascio non è stato ben collimato e indirizzato verso il bersaglio, bensì ha colpito il supporto dello stesso, che è composto di Alluminio. Questo spiega la presenza di righe spettrali corrispondenti a livelli energetici nucleari del ^{27}Al .

Per capire il motivo per cui nello spettro siano visibili delle righe legate a Stronzio e Ittrio si è simulata la reazione di Nichel su Alluminio usando il software LISE++ [5]. In particolare, in tale processo avviene la fusione dei due nuclei



Il Niobio prodotto ha un'energia di eccitazione così alta (è un cosiddetto "nucleo composto") che per diseccitarsi emette nucleoni. Tale reazione, che viene detta evaporazione, può dare luogo a diversi nuclei figli. In particolare, i prodotti di evaporazione più probabili sono proprio ^{82}Y (36%) e ^{82}Sr (26%). Le reazioni di evaporazione sono le seguenti



Questo chiarifica il motivo per cui lo spettro mostra le transizioni nucleari di ^{82}Sr e ^{82}Y . Si noti che questi ultimi, essendo nuclei pesanti, perdono energia molto velocemente nel passaggio attraverso la materia, quindi decadono a riposo, per cui è più agevole identificare le loro transizioni nucleari nello spettro senza correzione Doppler.

Dal momento che, nonostante gli inattesi risultati ottenuti confermino il buon funzionamento generale di AGATA e del suo ancillare SPIDER, lo scopo del commissioning II è, come già detto, la verifica di eventuali problemi in AGATA-SPIDER nello studio delle eccitazioni coulombiane, si è deciso di esaminare altri due run:

- Run 13, con bersaglio di ^{196}Pt ;
- Run 38, con bersaglio di ^{116}Sn .

energy (keV)	nucleus	transition
87.5	^{82}Y	$4_1^+ \rightarrow 3_1^+$
142.3	^{82}Y	$2_1^+ \rightarrow 1_1^+$
171.4	^{82}Y	$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$
194.6	^{82}Y	$3_2^+ \rightarrow 2_1^+$
250.2	^{82}Y	$2_2^+ \rightarrow 1_1^+$
313.7	^{82}Y	$3_1^+ \rightarrow 1_1^+$
511	/	pair production
573.64	^{82}Sr	$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$
602.15	^{82}Sr	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$
754.9	^{82}Sr	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$
900.84	^{82}Sr	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$
1013.36	^{82}Sr	$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$
843.76	^{27}Al	$1/2^+ \rightarrow 5/2^+$
1014.52	^{27}Al	$3/2^+ \rightarrow 5/2^+$
1454.28	^{58}Ni	$2^+ \rightarrow 0^+$

Tabella 4.1: Classificazione delle principali transizioni nucleari visibili. Le energie corrispondono ai valori di riferimento presi per l'analisi dello spettro [12]

4.2.2 Run 13

Per quanto riguarda la run 13, si è studiato dapprima lo spettro privo di correzione Doppler.

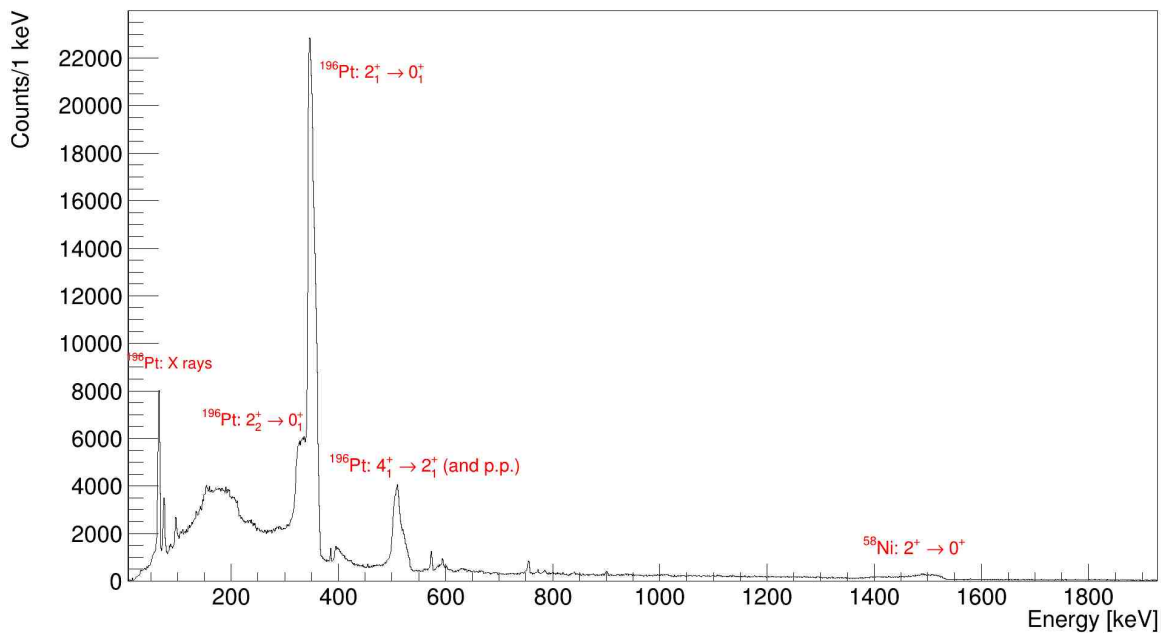


Figura 4.8: Spettro senza correzione Doppler di AGATA in coincidenza con SPIDER

Lo spettro evidenzia, oltre alla solita transizione del Nichel, alcune transizioni nucleari del Platino e apparentemente risultano visibili anche alcune sue emissioni atomiche (raggi X). Lo spettro non rende comunque agevole l'identificazione delle transizioni nucleari e si è reso necessario valutare la correzione Doppler, sia per il ^{58}Ni , che per il ^{196}Pt .

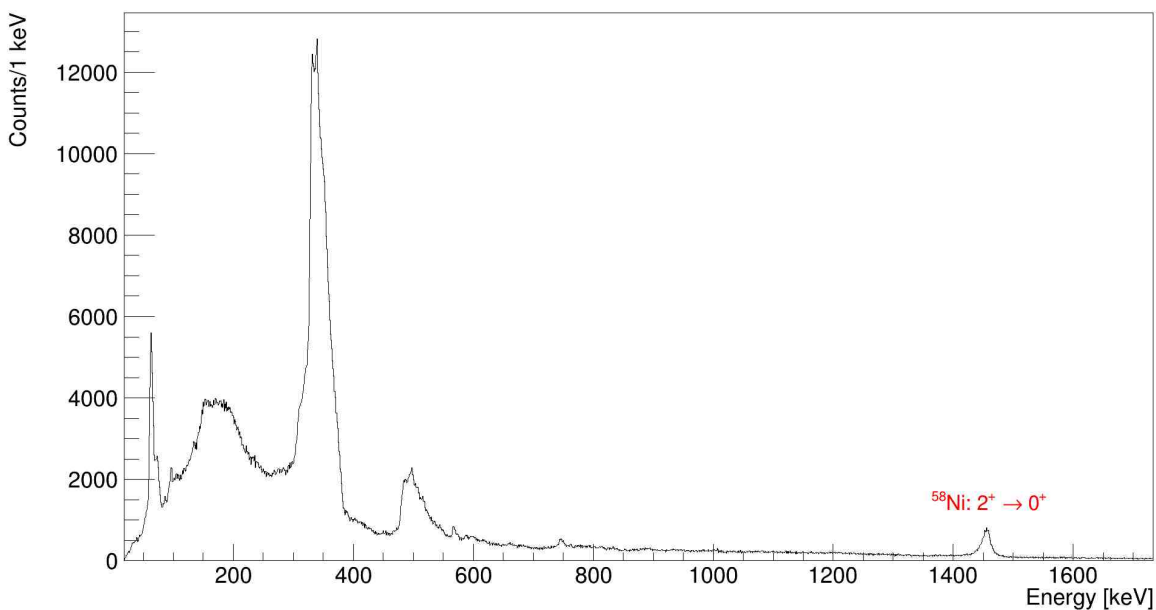


Figura 4.9: Spettro Doppler corretto per il ^{58}Ni di AGATA in coincidenza con SPIDER

Dallo spettro soprastante si riesce ad identificare con precisione la transizione $2^+ \rightarrow 0^+$ del ^{58}Ni , che dai dati presenti in letteratura dovrebbe trovarsi ad un'energia di 1454.28 keV. [12]

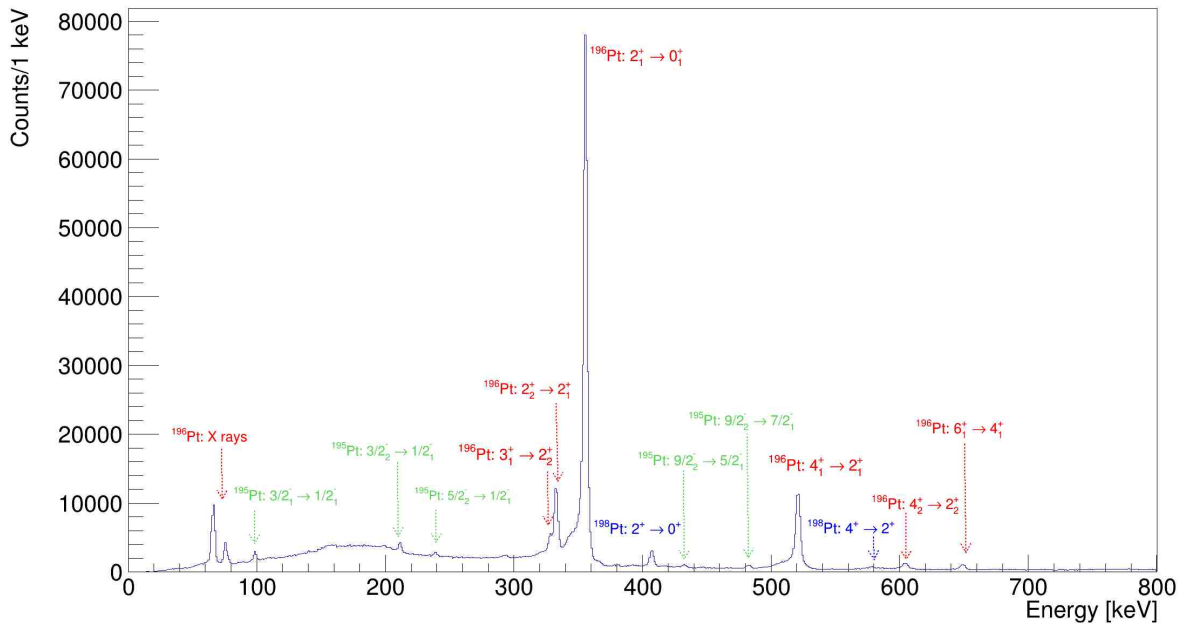


Figura 4.10: Spettro Doppler corretto per il ^{196}Pt di AGATA in coincidenza con SPIDER

Grazie alla correzione Doppler per il bersaglio di Platino, lo spettro risulta essere molto informativo: è possibile identificare varie transizioni del ^{196}Pt e, dal momento che il campione di materiale bersaglio presenta spesso delle impurità sottoforma di isotopi dell'elemento costitutivo principale, sono state rivelate alcune righe spettrali nucleari del ^{195}Pt e del ^{198}Pt .

A differenza di quanto avvenuto per la run 22, in tal caso si può certamente affermare che il fascio di ioni di ^{58}Ni è stato ben collimato ed ha colpito efficacemente il bersaglio, non essendo presenti transizioni legate alla fusione del ^{58}Ni con l' ^{27}Al .

Visto l'ottimo spettro ottenuto, è stato possibile stimare la velocità media del ^{196}Pt nella transizione $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$. Sfruttando la nota formula dell'effetto Doppler relativistico

$$E_r = \frac{E_s}{\gamma(1 - \beta \cos \theta_r)}$$

è possibile effettuare il fit dell'energia misurata da AGATA in funzione dell'angolo θ_r (ovvero l'angolo tra il raggio γ emesso e la direzione di rinculo del nucleo), in modo da trovare il valore ottimo della velocità β , che risulta essere, in unità della velocità della luce c

$$\beta \simeq 0.04$$

Si noti che tale stima è molto approssimativa, per questo si è deciso di non computare l'errore ad essa associato.

energy (keV)	nucleus	transition
66.832	^{196}Pt	X
75.748	^{196}Pt	X
326.349	^{196}Pt	$3_1^+ \rightarrow 2_2^+$
332.983	^{196}Pt	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$
355.684	^{196}Pt	$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$
521.175	^{196}Pt	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$
604.616	^{196}Pt	$4_2^+ \rightarrow 2_2^+$
649.3	^{196}Pt	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$
98.857	^{195}Pt	$3/2_1^- \rightarrow 1/2_1^-$
211.407	^{195}Pt	$3/2_2^- \rightarrow 1/2_1^-$
239.261	^{195}Pt	$5/2_2^- \rightarrow 1/2_1^-$
432.86	^{195}Pt	$9/2_1^- \rightarrow 5/2_1^-$
481.17	^{195}Pt	$9/2_2^- \rightarrow 7/2_1^-$
407.21	^{198}Pt	$2^+ \rightarrow 0^+$
577.82	^{198}Pt	$4^+ \rightarrow 2^+$

Tabella 4.2: Classificazione delle principali transizioni visibili. Le energie corrispondono ai valori di riferimento presi per l'analisi dello spettro [12]

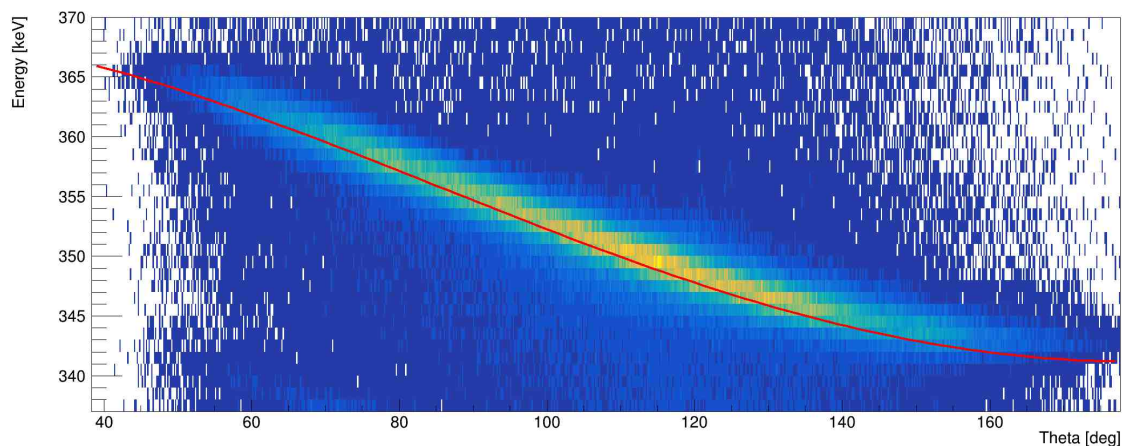


Figura 4.11: Corrispondenza tra fit (in rosso) e dati per la stima della velocità del ^{196}Pt

I nuclei di ^{196}Pt , dopo essere stati colpiti dal fascio di ^{58}Ni , si muovono ad una velocità che è circa un ventesimo della velocità della luce e tale risultato è in linea sia con le aspettative teoriche, sia con i dati presenti in letteratura. [12]

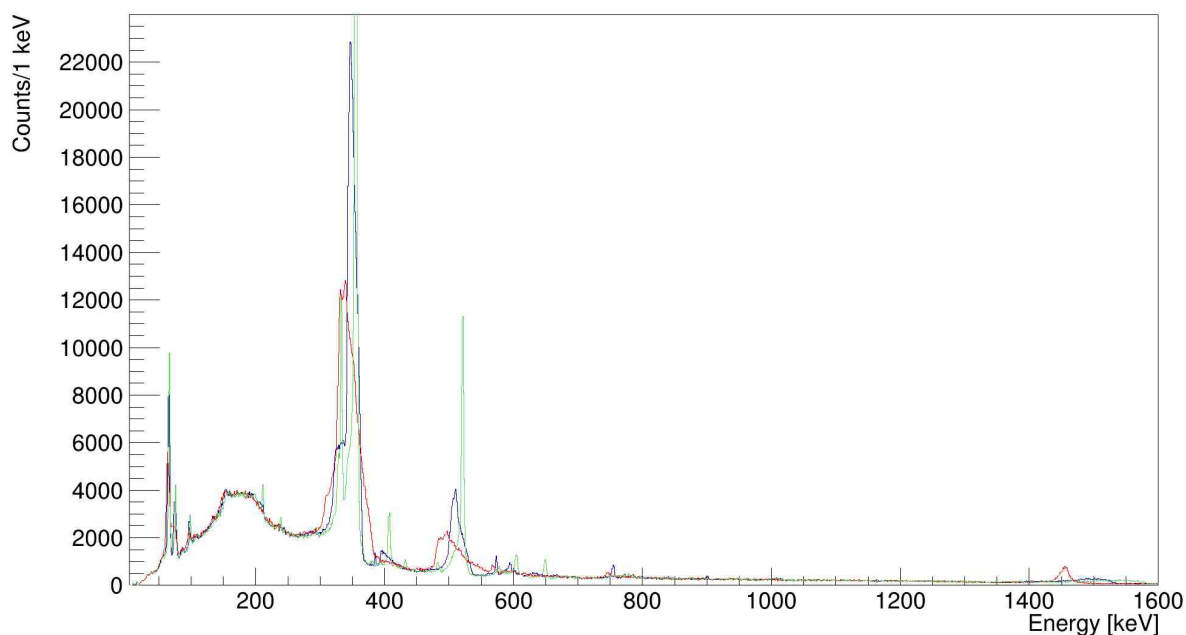


Figura 4.12: Spettro non Doppler corretto (blu), spettro Doppler corretto per il ^{58}Ni (rosso), spettro Doppler corretto per il ^{196}Pt (verde)

4.2.3 Run 38

Analogamente a quanto fatto in precedenza, si è inizialmente studiato lo spettro senza correzione Doppler

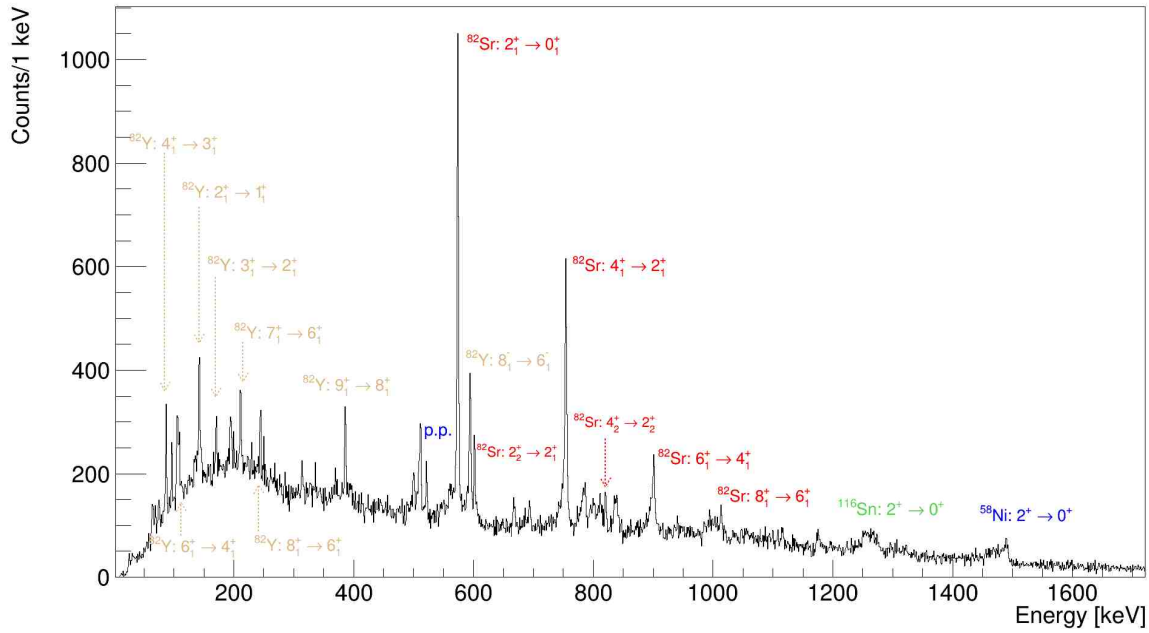


Figura 4.13: Spettro senza correzione Doppler di AGATA in coincidenza con SPIDER

Anche in questo caso, come avvenuto nella run 22, si nota subito che il fascio di ^{58}Ni non ha colpito con precisione il bersaglio di ^{116}Sn , dal momento che risultano ben visibili diverse righe spettrali corrispondenti a eccitazioni di nuclei derivanti dalla fusione tra l'Alluminio che compone il supporto del target e gli ioni di Nichel e la successiva evaporazione del ^{85}Nb (i già citati ^{82}Sr e ^{82}Y). Si nota tuttavia un picco nello spettro attorno all'energia di 1300 keV, che potrebbe essere associabile ad una transizione del bersaglio di ^{116}Sn . Per confermare l'ipotesi, risulta utile visualizzare lo spettro con applicata la correzione Doppler per lo ^{116}Sn .

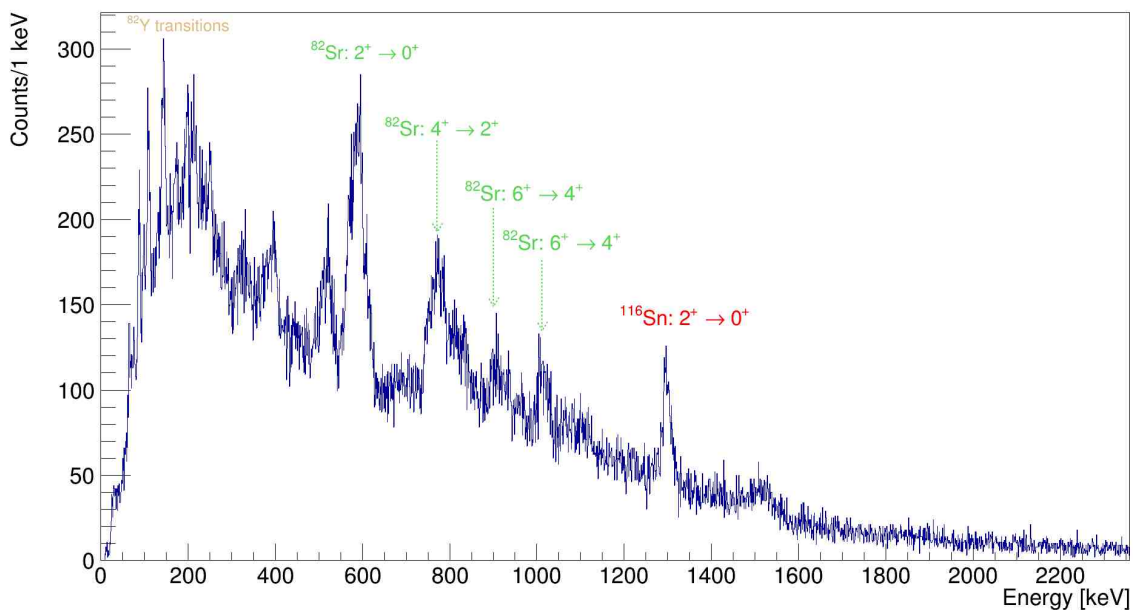


Figura 4.14: Spettro Doppler corretto per lo ^{116}Sn di AGATA in coincidenza con SPIDER

È ora ben evidente come il picco sopra citato corrisponda proprio alla transizione $2^+ \rightarrow 0^+$ dello ^{116}Sn . Questo significa che il fascio ha colpito principalmente il supporto di Alluminio, ma anche in parte il bersaglio, visto che sono presenti sia le transizioni dei prodotti della reazione di fusione del ^{58}Ni con il ^{27}Al , sia una transizione nucleare legata al bersaglio di ^{116}Sn .

energy (keV)	nucleus	transition
87.5	^{82}Y	$4_1^+ \rightarrow 3_1^+$
106.4	^{82}Y	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$
142.3	^{82}Y	$2_1^+ \rightarrow 1_1^+$
171.4	^{82}Y	$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$
211.3	^{82}Y	$7_1^+ \rightarrow 6_1^+$
243.9	^{82}Y	$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$
395.5	^{82}Y	$9_1^+ \rightarrow 8_1^+$
511	/	pair production
573.64	^{82}Sr	$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$
594.3	^{82}Y	$8_1^- \rightarrow 6_1^-$
602.15	^{82}Sr	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$
754.9	^{82}Sr	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$
820.25	^{82}Sr	$4_2^+ \rightarrow 2_2^+$
900.84	^{82}Sr	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$
1013.36	^{82}Sr	$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$
1293.558	^{116}Sn	$2^+ \rightarrow 0^+$
1454.28	^{58}Ni	$2^+ \rightarrow 0^+$

Tabella 4.3: Classificazione delle principali transizioni visibili. Le energie corrispondono ai valori di riferimento presi per l'analisi degli spettri [12]

Capitolo 5

Conclusioni e prospettive future

Il lavoro sperimentale svolto mostra come i tre software di processamento degli eventi lavorino ottimamente quando i dati sono forniti offline, mentre sono presenti ancora delle problematiche importanti se il passaggio dei dati avviene direttamente dai digitalizzatori. Si può comunque affermare che, grazie alle modifiche compiute sui software derivanti dall'analisi effettuata in questo lavoro, sono stati apportati dei miglioramenti significativi ai programmi della DAQ che permetteranno di raggiungere un migliore tasso di trasmissione dei dati.

Restringendosi ai dati offline, dal momento che gli spettri ottenuti per le run prese in considerazione sono in linea con le aspettative teoriche e con i risultati presenti in letteratura, si può affermare che il commissioning II ha avuto esito positivo e che il rivelatore AGATA ed il suo ancillare SPIDER sono pronti per la campagna sperimentale in avvio ai Laboratori Nazionali di Legnaro. Rimane comunque ancora molto lavoro da fare per migliorare i software nel pre-processamento dei dati online.

Le opportunità di ricerca che AGATA offre sono innumerevoli [6]. Di seguito sono citate solo le principali:

- studiare l'evoluzione della struttura a shell dei nuclei;
- comprendere l'origine microscopica della deformazione nucleare;
- ricercare forme nucleari estreme ed esotiche;
- testare le predizioni teoriche su pelle protonica e neutronica.

Queste ed altre sfide saranno affrontate dalla collaborazione AGATA nel corso dei prossimi anni.

Bibliografia

- [1] S. Akkoyun, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 668 (2012) 26
- [2] M. Rocchini, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 971 (2020) 164030
- [3] A. Goasduff, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 1015 (2021) 165753
- [4] M. Rocchini, M. Zielinska, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Physics 2021, 3, 1237
- [5] O. B. Tarasov, D. Bazin, Nucl. Instrum. Meth. B 376 (2016) 185
- [6] W. Korten et al., Eur. Phys. J. A (2020) 56
- [7] A. Goasduff et al., LNL Annual Report (2020) 52
- [8] S. Brambilla et al., LNL Annual Report (2020) 121
- [9] M. Balogh et al., LNL Annual Report (2021) 16
- [10] F. C. L. Crespi et al., LNL Annual Report (2021) 39
- [11] W. Raniero et al., LNL Annual Report (2021) 25
- [12] <https://www.nndc.bnl.gov/>