

Un classico esperimento di *Entanglement* di fotoni γ rivisitato con tecnologie *low cost*

Lodovico Lappetito¹

¹Progetto PhysicsOpenLab [1]

Abstract

This work describes the design and construction of a *low cost* apparatus for the experimental verification of *quantum entanglement*. The verification method is based on the detection of gamma photons emitted by the annihilation of the positron. The origin of these photons from a single annihilation event means that the two gamma photons are part of a *single global quantum state*: they are basically *entangled photons*. The polarization of the two photons is out of phase by a factor $\pi/2$ and this can be detected using *Compton scatterers* that act as *polarizers*. The detection of these scattered photons, with coincidence technique, allows us to make a first verification of the dependence of the event count on the mutual orientation of the detectors. This dependence on the orientation of the detectors is considered a first verification of the entangled state of the two photons. For the detection we used *SiPM* photosensors which allow small dimensions, low cost and simple driving electronics compared to classic PMTs. For Pulse acquiring and coincidence detection we used a PSoC microcontroller.

1. Introduzione

Molti studiosi ritengono che il fenomeno dell'*entanglement* sia una caratteristica assolutamente centrale all'interno della costruzione concettuale della meccanica quantistica. Non si tratterebbe quindi di una conseguenza bizzarra della teoria che interessa solo pochi teorici bensì di un aspetto fondamentale, la cui comprensione può contribuire a gettare luce sugli aspetti più misteriosi e contraddittori della fisica dell'estremamente piccolo. L'*entanglement* inoltre è alla base di alcune fra le più promettenti e rivoluzionarie tecnologie quantistiche che stanno nascendo in questi ultimi anni, fra le quali citiamo il *computer quantistico* ed il cosiddetto *teletrasporto quantistico*. Siamo consapevoli che l'*entanglement* quantistico sia un argomento particolarmente “ostico” che rientra nell'ambito della fisica avanzata, se non della fisica di frontiera, sia teorica che sperimentale. Nell'ultimo periodo ci sono state però alcune iniziative che hanno cercato di affrontare e, in un certo senso, “sdoganare” l'argomento *entanglement*, realizzando sperimentazioni alla portata anche di piccoli laboratori con limitate possibilità [15][16].

Il progetto che proponiamo in questo lavoro si inserisce in questo filone: si tratta di un apparato per la dimostrazione sperimentale della correlazione angolare tra fotoni γ prodotti da annichilazione e diffusi per effetto Compton. Si tratta in pratica della rivisitazione del classico esperimento di Wu-Shaknov del 1949 [17]. Le prove vengono eseguite posizionando i due rilevatori paralleli e poi ortogonali fra loro e registrando gli eventi di coincidenza che si verificano tra gli impulsi rilevati dai sensori. Confrontando i ratei degli eventi di coincidenza che si verificano nelle due configurazioni si può dimostrare la correlazione angolare fra i due fotoni γ , che dovrebbero risultare polarizzati linearmente ed ortogonali fra loro. Questa evidenza sperimentale è compatibile con l'ipotesi che i due fotoni γ siano *entangled* fra loro.

2. Cenni Teorico/Storici sul fenomeno dell'*Entanglement*

L'*entanglement quantistico* o *correlazione quantistica* è un fenomeno quantistico, privo di analogo classico, per cui in determinate condizioni lo stato quantico di un sistema non può essere descritto singolarmente, ma solo come sovrapposizione di più sistemi. Da ciò consegue che la misura di un'osservabile in un sistema determina istantaneamente il valore anche per gli altri.

Poiché risulta possibile che sistemi come quelli descritti si trovino spazialmente separati, l'*entanglement* implica in modo controintuitivo la presenza di *correlazioni a distanza* (teoricamente senza alcun limite) tra le loro quantità fisiche, determinando il carattere *non locale* della teoria. Il termine "entanglement" (letteralmente, in inglese, groviglio, intreccio) fu introdotto da Erwin Schrödinger in una recensione del famoso articolo sul paradosso EPR (*Einstein-Podolsky-Rosen*), che nel 1935 rivelò a livello teorico il fenomeno [10]. L'indagine su questo fenomeno quantistico è proseguita a livello teorico, citiamo in particolare l'analisi approfondita fatta da Bohm e Aharonov nel loro lavoro del 1957 [11]. Sono inoltre stati proposti anche dei metodi per una verifica sperimentale, citiamo in particolare il lavoro di Wheeler del 1946 [12], seguito dagli approfondimenti di Pryce e Ward (1947) [13] e Hartland (1947) [14] sulla correlazione angolare della radiazione γ prodotta da annichilazione e diffusa per effetto Compton. Nel 1964 John Bell ha formulato il suo famoso teorema che dimostra matematicamente il carattere *non locale* della meccanica quantistica e fornisce dei criteri rigorosi (*disuguaglianza di Bell*) per la verifica sperimentale di questa tesi [18].

Secondo la meccanica quantistica è possibile realizzare un insieme costituito da due particelle caratterizzato da determinati valori *globali* di alcune osservabili. Ciò comporta che il valore misurato per una particella influenzi istantaneamente il corrispondente valore dell'altra, in modo tale da mantenere invariato il valore globale iniziale. Ciò rimane vero anche nel caso in cui le due particelle si trovino distanziate, senza alcun limite spaziale. In pratica due particelle che dovrebbero possedere tale caratteristica si possono ottenere facendole interagire opportunamente o acquisendole da un processo naturale che le origini nel medesimo istante (ad esempio un singolo *decadimento radioattivo*), in modo che le due particelle siano descritte da uno *stato quantico globale* definito, pur mantenendo singolarmente carattere indefinito fino all'esecuzione di una misura.

La meccanica quantistica si è dimostrata in grado di produrre corrette previsioni sperimentali fino ad una precisione mai raggiunta prima e le correlazioni associate al fenomeno dell'*entanglement* quantistico sono state *effettivamente osservate*. All'inizio degli anni '80 Alain Aspect e altri hanno svolto una serie di esperimenti particolarmente accurati che hanno provato che le correlazioni misurate seguono le previsioni della meccanica quantistica e rispettano la disuguaglianza di Bell. Più recentemente (1998) Zeilinger e altri hanno migliorato tali esperimenti confermando ancora che i risultati sono in accordo con le previsioni teoriche.

3. Setup per la rivisitazione dell'esperimento di Wu-Shaknov

La verifica sperimentale che ci proponiamo di portare a termine è la ripetizione del famoso esperimento di Wu-Shaknov del 1949 [17] con il quale si intende dimostrare la correlazione angolare dei fotoni gamma emessi dalla annichilazione del positrone e successivamente diffusi per effetto *Compton*. Sappiamo che nella annichilazione del positrone vengono emessi due fotoni gamma da 511 KeV. Per il principio di conservazione della quantità di moto, i due fotoni gamma vengono emessi sulla stessa linea ma in direzioni opposte (Fig. 1 a). Da considerazioni teoriche [12] risulta anche che hanno spin sfasati di $\pi/2$. I due fotoni che risultano dalla annichilazione del positrone hanno tutte le "carte in regola" per costituire un *unico sistema quantistico*, da cui discende che i due fotoni gamma sono *entangled* fra loro.

Nella nostra versione dell'esperimento abbiamo utilizzato una sorgente radioattiva di ^{22}Na da 1 μCi (Fig. 2 a) posta fra due schermi di piombo forati nella parte centrale con lo scopo di dare luogo a due fasci collimati (Fig. 1 b). L'isotopo ^{22}Na decade beta generando positroni che si annichilano producendo due fotoni γ da 511 KeV che vengono emessi in direzioni opposte. All'uscita dei fori nei lingotti di piombo sono collocati due *diffusori Compton*, in pratica due cilindretti di ferro. Lateralmente ai diffusori sono collocati i rivelatori basati su scintillatore LYSO e sensore SiPM, in modo da captare la radiazione diffusa ad un angolo approssimativamente di 90° (angolo θ in Fig. 1 a). Un rivelatore viene mantenuto in posizione fissa, mentre l'altro viene posto *parallelo* al primo e successivamente *ortogonale* (angolo ϕ in Fig. 1 a). I due rivelatori vengono fatti funzionare in *coincidenza* in modo da rilevare soltanto le coppie di fotoni generate da una stessa annichilazione. I due fotoni gamma prodotti dalla annichilazione hanno spin sfasati di $\pi/2$ ed il loro stato di fotoni *entangled* dovrebbe far sì che questa correlazione angolare si manifesti con differenti tassi di conteggio in relazione alla posizione relativa dei due rivelatori. In particolare, il tasso di conteggio maggiore si dovrebbe avere quando i due rivelatori sono posizionati *ortogonali* e minimo quando sono *paralleli*, il rapporto tra i due tassi di conteggio dovrebbe avere un valore pari a 2 [17].

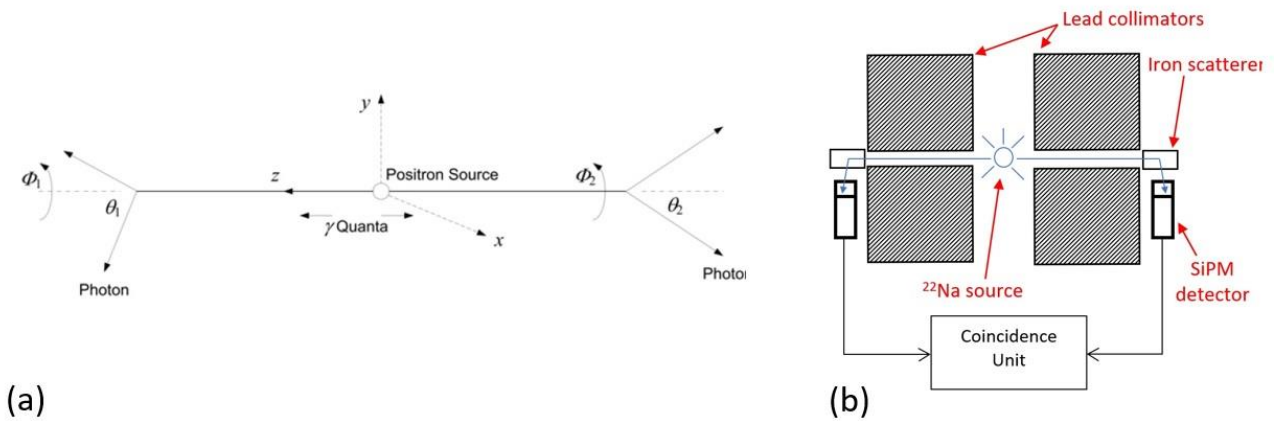


Fig. 1 – (a) Schema di principio dell'esperimento [13] (b) Setup sperimentale

I due schermi di piombo hanno dimensioni 150 mm x 150 mm con 50 mm di spessore, il foro di collimazione ha diametro di 10 mm, mentre i diffusori Compton hanno diametro 12 mm e lunghezza 30 mm (Fig. 2 b).

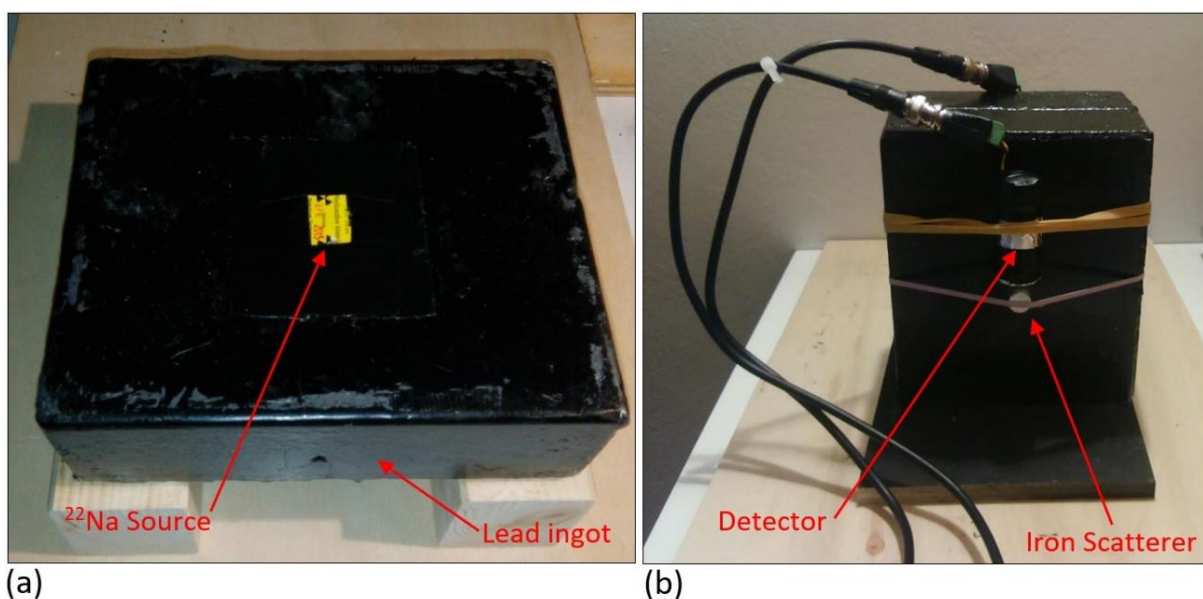


Fig. 2 – (a) Schermo di piombo e sorgente radioattiva ^{22}Na (b) Collimatori di piombo con detector e diffusori Compton posizionati

4. Rilevazione ed Acquisizione degli Impulsi

L'apparato sperimentale di rilevazione ed acquisizione degli impulsi è essenzialmente costituito da una coppia di rilevatori a scintillazione, da una elettronica di frontend che effettua l'amplificazione degli impulsi prodotti dai SiPM e da un microcontrollore PSoC che registra gli impulsi, individua gli eventi di coincidenza e ne fa il conteggio.

Cristallo Scintillatore LYSO

Come scintillatori abbiamo adottato dei cristalli LYSO sia perché sono facilmente reperibili a basso costo sul mercato online del surplus e sia perché sono particolarmente adatti alla nostra applicazione. Si trovano facilmente nella forma a parallelepipedo a base quadrata con lato di 4 mm (Fig. 4 a). Queste dimensioni si adattano perfettamente alle dimensioni del fotorilevatore SiPM. Il LYSO (ortosilicato di Lutezio ed Yttrio) è un cristallo scintillatore che offre alta densità, buona risoluzione energetica e tempo di decadimento radiativo molto breve. È molto usato nelle applicazioni che richiedono elevata risoluzione temporale e buona risoluzione energetica, ad esempio la PET time-of-flight, nella quale sta progressivamente soppiantando il tradizionale materiale BGO [2].

Caratteristiche dello scintillatore LYSO	
Materiale	Ortosilicato di Lutezio e Yttrio – LYSO
Dimensioni	4 mm x 4 mm x 22 mm
Densità ρ	7,4 g/cm ³
Spettro di emissione	350 nm – 650 nm
Massimo di emissione	420 nm
Durata impulso (FWHM)	40 – 44 ns
Resa quantica	25000 photons/MeV

Tabella I – Caratteristiche dello scintillatore LYSO [2]

Il cristallo LYSO contiene l'elemento Lutezio il quale è composto da due isotopi di cui uno è stabile, il ¹⁷⁵Lu (con abbondanza naturale del 97,5%) mentre l'altro, il ¹⁷⁶Lu (con abbondanza naturale del 2,5%) decade beta con emivita di $3,78 \times 10^{10}$ anni. A causa del contenuto di Lutezio quindi, il cristallo LYSO risulta essere debolmente radioattivo. Possiamo determinare il livello di radioattività del nostro cristallo LYSO con i seguenti calcoli:

Massa del cristallo = Volume x $\rho = 0,4^2 \times 2,2 \times 7,4 = 2,6$ g, di cui il 24% è Lutezio = 0,625 g

Di questa quantità circa il 2,5% è ¹⁷⁶Lu con emivita di $3,78 \times 10^{10}$ anni

Ci sono quindi $N = 6,02 \times 10^{23} \times 0,625 \times 0,025/176 = 5,34 \times 10^{19}$ nuclei di ¹⁷⁶Lu

La costante di disintegrazione $\lambda = \ln 2 / (3,154 \times 10^7 \times 3,78 \times 10^{10}) = 5,81 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$

Quindi la radioattività del cristallo vale $N\lambda = 31$ Bq o CPS (*counts per seconds*)

A partire da questo dato possiamo determinare la probabilità che si verifichino eventi di *coincidenza casuale* tra gli impulsi rilevati da due cristalli LYSO. Supponendo che gli impulsi prodotti dai cristalli vengano rilevati con efficienza del 100% e alimentino l'unità di coincidenza con un tempo di risoluzione di 40 ns, il tasso di probabilità di una coincidenza casuale vale:

$2\tau C_1 C_2 = 2 \times 40 \times 10^{-9} \times 31 \times 31 = 0,77 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ o circa 1 conteggio ogni 217 minuti.

Fotorilevatore SiPM

Per la rilevazione della emissione luminosa del cristallo scintillatore abbiamo adottato il fotorilevatore SiPM. I SiPM, acronimo di *Silicon Photomultipliers* (Fig. 3), costituiscono la più moderna tipologia di fotorilevatori a stato solido. Si tratta di dispositivi costituiti da una matrice di

fotodiodi a valanga, detti pixel, operanti in *modalità Geiger* e collegati fra di loro in parallelo su un comune substrato di Silicio [3] [8] [9].

Un fotodiodo operante in regime Geiger è un fotodiodo a valanga polarizzato ad una tensione inversa maggiore della tensione di breakdown. In questo modo, nella zona di svuotamento, si ha un forte campo elettrico in grado di trasferire al singolo portatore un elevatissimo valore di energia cinetica. Questa energia rende il processo di ionizzazione per impatto e moltiplicazione a valanga dei portatori, innescabile anche solo da una singola coppia elettrone-lacuna. È chiaro che un fotodiodo in cui l'arrivo di un fotone ha innescato il processo a valanga in regime Geiger, non ha possibilità di rilevare l'arrivo di un successivo fotone. È necessario quindi un meccanismo che arresti la valanga, abbassando il campo elettrico nella regione di svuotamento ad un valore tale da non consentire più la moltiplicazione per impatto dei portatori. Questo effetto si ottiene con l'utilizzo di un circuito di spegnimento, detto *quenching circuit*. Il più semplice circuito di quenching è costituito da una resistenza in serie alla giunzione del fotodiodo, questo elemento di quenching è integrato direttamente nel chip. L'effetto di amplificazione è dovuto al processo a valanga che produce una corrente di scarica "macroscopica" anche con un solo pixel attivo. Il collegamento in parallelo di tutti i pixel produce una corrente di uscita proporzionale al numero di fotodiodi attivati dai fotoni incidenti sulla superficie attiva del rivelatore.

Uno dei principali svantaggi del sensore SiPM sono gli impulsi di background che si manifestano anche in assenza di fotoni incidenti. Si tratta di pixel che si attivano per effetto termico, la probabilità che questo accada non è trascurabile alla temperatura ambiente di 300 °K. Questi impulsi corrispondono alla attivazione di un solo pixel (l'attivazione termica di due pixel nello stesso istante è molto rara e può essere trascurata) e, dato che la corrente è comunque molto piccola, possono essere facilmente esclusi dal processo di rilevazione implementando nel nostro microcontrollore un filtro a soglia. Le caratteristiche del sensore SiPM sono riassunte nella Tabella II.

Caratteristiche del fotorilevatore SiPM	
Modello	Advansid ASD-NUV4S-P
Dimensioni Area Attiva	4 mm x 4 mm
Spettro di sensibilità	350 nm – 900 nm
Massimo di sensibilità	420 nm
Tempo di risposta	70 ns
Gain	~ 10 ⁶
Tensione di lavoro	~ 30 V

Tabella II – Caratteristiche del sensore SiPM [3]



Fig. 3 – Dettaglio del fotorilevatore SiPM

Il cristallo LYSO ed il SiPM sono stati accoppiati utilizzando una colla ottica al fine di fare il *matching* degli indici di rifrazione tra il cristallo e la superficie del sensore (Fig. 4 b). Il cristallo LYSO è stato poi avvolto con nastro di teflon bianco in modo da aumentare la riflettività e quindi

l'efficienza di rilevazione da parte del sensore SiPM (Fig. 4 a). SiPM e LYSO sono stati poi inseriti in un tubo di plastica ricoperto con nastro adesivo e nastro di alluminio, in modo da evitare che la luce ambientale raggiunga il sensore.

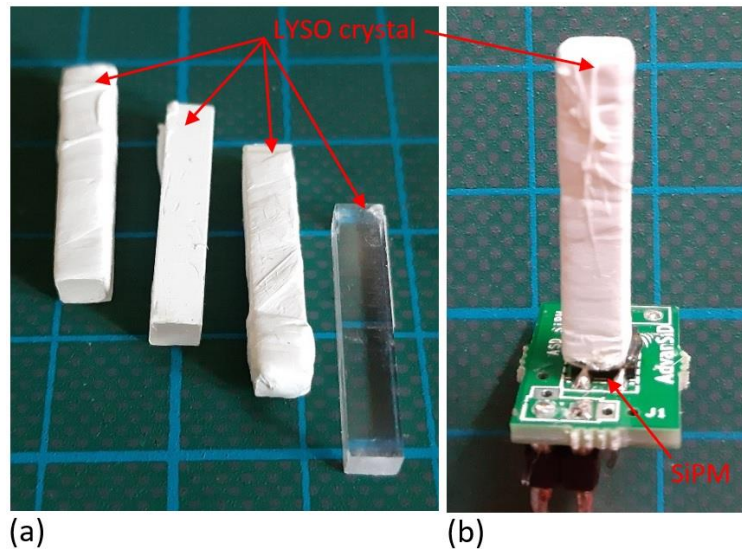


Fig. 4 – (a) Cristalli LYSO (b) Cristallo LYSO accoppiato con il SiPM

Polarizzazione del SiPM ed Amplificatore a Transimpedenza

Il SiPM da noi adottato va polarizzato inversamente con una tensione continua di valore compreso tra 28 V e 32 V. La tensione di polarizzazione deve essere regolabile, stabilizzata e a *basso rumore*. Per generare la tensione di polarizzazione abbiamo utilizzato il modulo HV80A del produttore *AiT Instruments* che consente di ottenere una tensione regolabile con precisione da 10 V a 80 V con un ripple inferiore a 0,5 mV. Il modulo ha anche altre interessanti caratteristiche, per una descrizione dettagliata rimandiamo al *datasheet* del prodotto [4].

Per l'acquisizione degli impulsi prodotti dal sensore SiPM abbiamo adottato la scheda di valutazione ASD-EP-EB-PZ (*evaluation board*) proposta dallo stesso fornitore dei SiPM (Fig. 5). Si tratta di un amplificatore a transimpedenza (convertitore corrente - tensione) con una uscita (OUT 1) direttamente proporzionale al segnale generato dal SiPM ed una seconda uscita (OUT 2) che fornisce il segnale differenziato, utile per quelle applicazioni che hanno necessità di timing molto precisi. Nella nostra applicazione abbiamo utilizzato solo l'uscita con il segnale proporzionale.

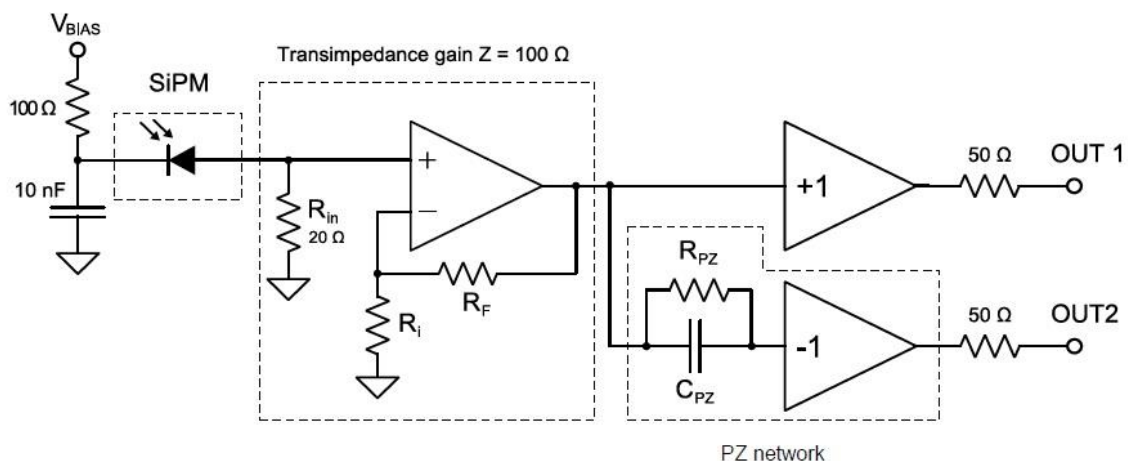


Fig. 5 – Scheda Advansid ASD-EP-EB-PZ: schema di principio della elettronica di frontend per la lettura del segnale generato dal SiPM

Microcontrollore PSoC

PSoC è un acronimo e significa *Programmable System on Chip*. È un microcontrollore prodotto dalla *Cypress Semiconductor* che combina sia componenti digitali che componenti analogici. Questo fatto lo rende particolarmente adatto all'utilizzo in ambito sperimentale perché permette di fare "quasi tutto" all'interno di un solo chip. Uno dei principali vantaggi dello PSoC è che si possono combinare circuiti logici e digitali in un singolo chip insieme ad un processore relativamente potente che permette di acquisire e successivamente elaborare i dati acquisiti.

Ci sono vari tipi di PSoC: PSoC 1, 3, 4, 5 con caratteristiche differenti l'uno dall'altro, noi ci siamo orientati su uno dei modelli più potenti, il PSoC 5, caratterizzato da un processore ARM da 32 bit. Il suo utilizzo è notevolmente facilitato dalla scheda di prototipazione CY8CKIT-050 (Fig. 6), disponibile ad un prezzo accessibile. Questa scheda kit di prototipazione permette l'utilizzo di un potente processore a 32 bit con grande storage ed una ampia dotazione di componenti analogici e digitali [6].

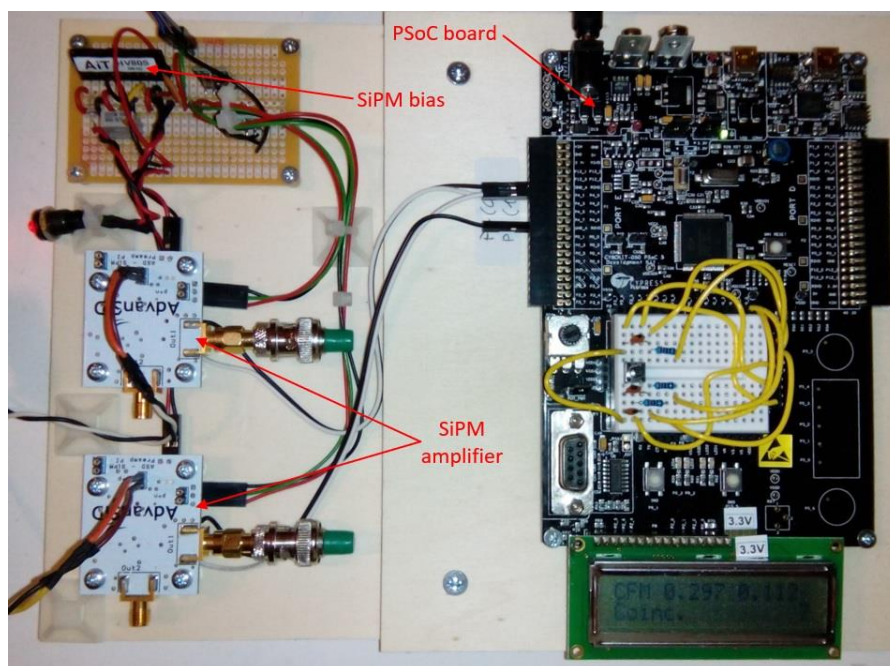


Fig. 6 – Elettronica di frontend e PSoC board

Firmware PSoC

Il firmware per il nostro microcontrollore viene creato con lo strumento free PSoC Creator fornito sempre dalla Cypress. PSoC Creator è un IDE (Integrated Design Environment) che consente la programmazione di hardware e firmware, la compilazione e il debug dei sistemi PSoC. Le applicazioni vengono create combinando gli oltre 150 componenti analogici e digitali pronti per l'utilizzo. La programmazione dello PSoC avviene a due livelli: vi è un livello grafico nel quale vengono inseriti e collegati fra loro i componenti già disponibili nella libreria del microcontrollore e vi è un livello di programmazione in codice sorgente C nel quale vengono inserite le istruzioni per la gestione dei componenti. Per tutti i dettagli si può fare riferimento alla documentazione ufficiale dello PSoC Creator [7].

Nel nostro apparato lo scopo del microcontrollore PSoC è principalmente quello di acquisire i segnali impulsivi che superano un livello di soglia configurabile (in modo da escludere gli impulsi dovuti al rumore), contarli ed individuare gli eventi di coincidenza temporale. In maggiore dettaglio i compiti che vengono eseguiti dallo PSoC sono i seguenti:

- Acquisire gli impulsi dai due canali A e B che superano il livello della soglia e, per ognuno di essi, generare un impulso di durata fissa di 40 ns;
- Individuare le coincidenze temporali tra gli impulsi sui canali A e B. Questo viene realizzato con una porta logica AND;
- Contare gli impulsi e calcolare rateo e varianza;
- Contare gli eventi di coincidenza e calcolare rateo e varianza;
- Visualizzare i dati su LCD;

Tra le varie funzionalità realizzate, descriviamo con maggiore dettaglio la parte di acquisizione degli impulsi (Fig. 7 a) perché ci sembra quella più significativa. Gli impulsi provenienti dai canali A e B vengono inviati a due comparatori con isteresi che producono un impulso solo se l'ampiezza del segnale di ingresso supera la soglia configurata. Dato che gli impulsi prodotti dai comparatori possono avere durata variabile, a valle è posizionato un flip-flop D-type con una rete RC esterna, in modo da ottenere un impulso "pulito" con durata fissa e prestabilita di 40 ns, che viene inviato ai circuiti interni di conteggio ed alla porta AND per la determinazione degli eventi di coincidenza temporale (Fig. 7 b). Gli impulsi vengono anche inviati ad output digitali di controllo per fare le opportune verifiche con l'oscilloscopio.

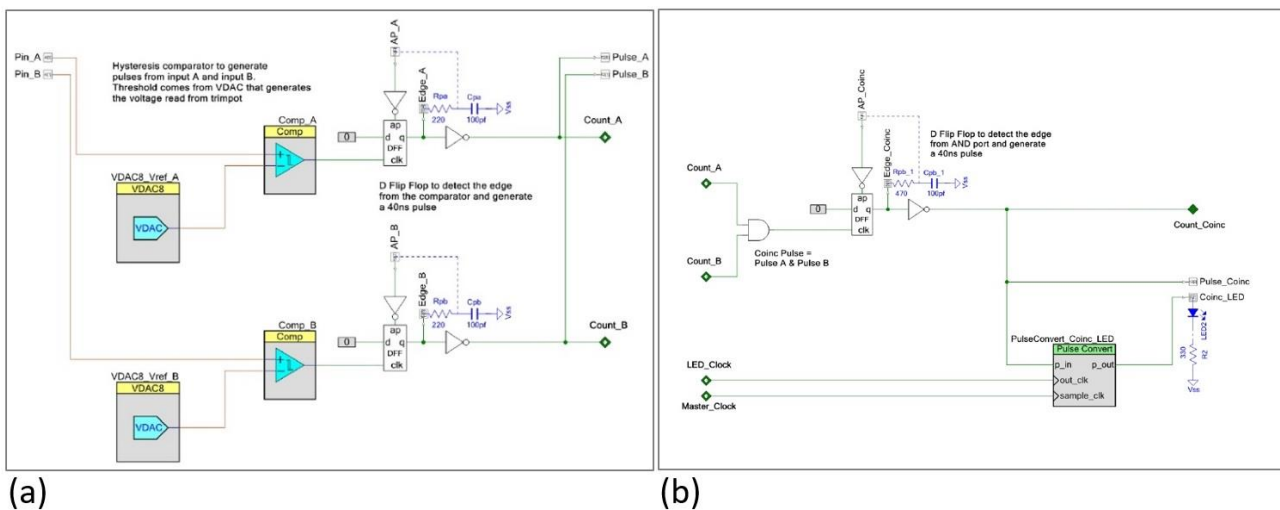


Fig. 7 – (a) Circuito interno PSoc per l'acquisizione degli impulsi (b) Circuito interno PSoc per la determinazione degli eventi di coincidenza

Analisi degli Impulsi

Gli impulsi generati dai fotorelevatori SiPM, amplificati dalla elettronica di frontend e processati dallo PSoc sono stati accuratamente controllati al fine di verificare il buon funzionamento dei vari step di elaborazione del segnale e la correttezza delle assunzioni fatte sul timing degli impulsi. Gli impulsi prodotti dal SiPM e successivamente amplificati hanno tipicamente ampiezza di 200 - 500 mv e durata (FWHM) di circa 100 ns (Fig. 8 a). Il passo successivo è il comparatore interno al PSoc che produce un impulso squadrato, leggermente ritardato rispetto all'impulso originale (Fig. 8 b).

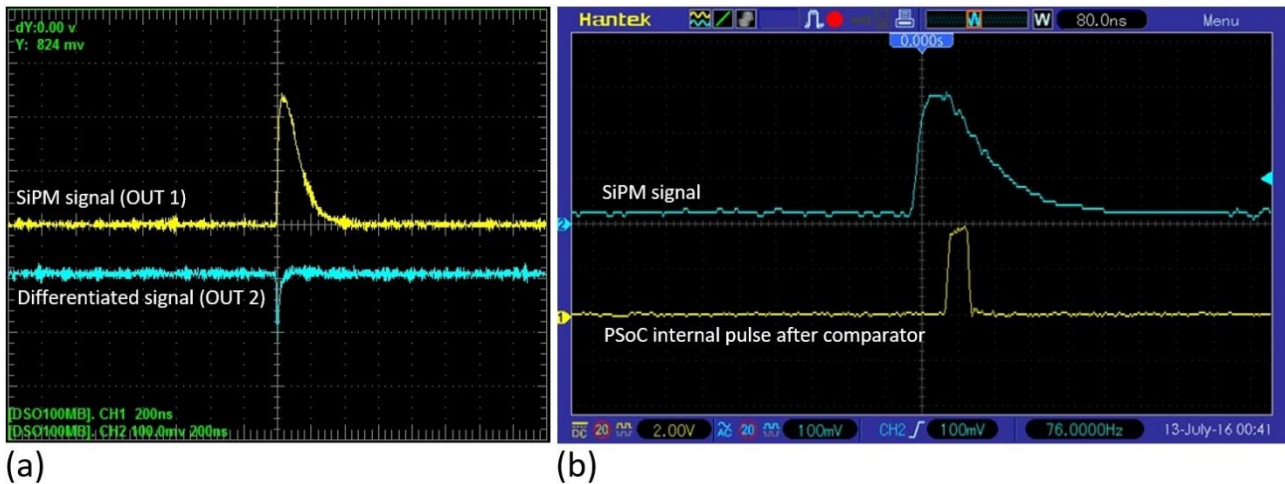


Fig. 8 – (a) Impulso SiPM e impulso differenziato (b) Impulso SiPM e impulso prodotto dal comparatore

Il PSoC produce poi, con il flip-flop D-type e la rete RC esterna, un impulso con durata fissa di 40 ns e ritardato rispetto all'impulso originale. È importante verificare che il ritardo rispetto all'impulso originale del SiPM rimanga costante da impulso ad impulso. In pratica va verificato che il *jitter* temporale sia limitato entro valori di poche decine di nanosecondi in modo da influire solo in maniera marginale sulla determinazione degli eventi di coincidenza. Queste verifiche hanno permesso di stimare per il *jitter* temporale un valore minore di 20 ns (Fig. 9 a). L'evento di coincidenza si verifica quando i due impulsi, provenienti dai canali A e B, accadono nello stesso istante temporale con una tolleranza pari alla durata dell'impulso (Fig. 9 b).

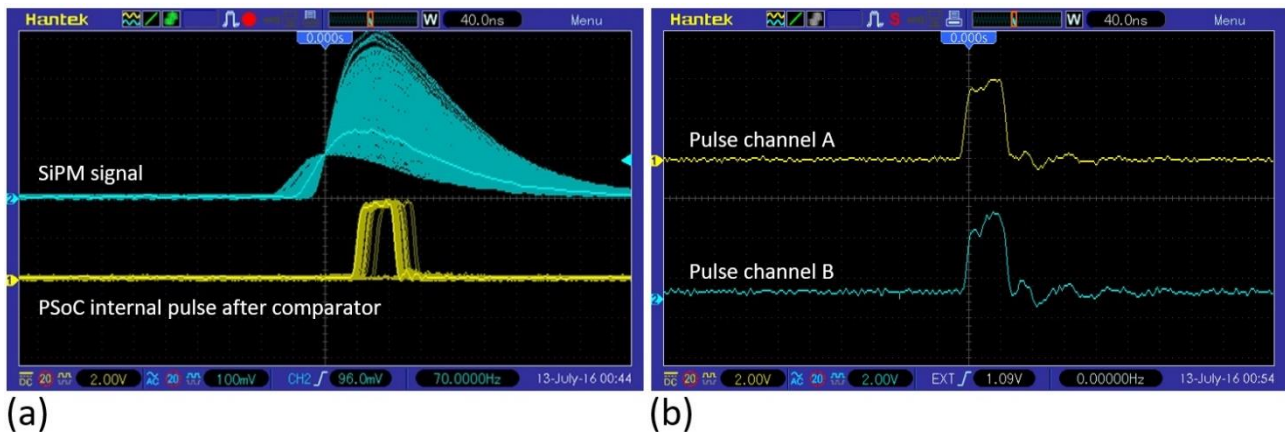


Fig. 9 – (a) Valutazione del *jitter* temporale (b) Evento di coincidenza tra due impulsi

5. Risultati delle Misurazioni

Le misure sono state fatte disponendo i rilevatori prima paralleli fra loro e poi ortogonali. Nelle due posizioni è stato prima registrato il tasso delle coincidenze casuali, cioè senza i diffusori Compton in posizione. Dato che la sorgente radioattiva è piuttosto debole è stato necessario prolungare la misura per molto tempo in modo da raccogliere un numero di eventi tale da ridurre l'errore statistico a valori accettabili. I risultati delle misurazioni sono raccolti nelle tabelle III e IV.

Rilevatori Paralleli

Misura Background	
Durata misura	104049 s
Rateo detector A	85,4 s ⁻¹
Rateo detector B	90,8 s ⁻¹
N eventi di coincidenza	158
Rateo eventi di coincidenza	0,091 ± 0,007 min ⁻¹
Misura con Diffusore Compton e Sorgente	
Durata misura	87613 s
Rateo detector A	88,8 s ⁻¹
Rateo detector B	91,6 s ⁻¹
N eventi di coincidenza	260
Rateo eventi di coincidenza	0,178 ± 0,011 min ⁻¹
Rateo coincidenze corretto per il background	0,087 ± 0,013 min⁻¹

Tabella III – Dati ottenuti nella misurazione con rilevatori paralleli

Rilevatori Ortogonali

Misura Background	
Durata misura	90874 s
Rateo detector A	87,3 s ⁻¹
Rateo detector B	91,5 s ⁻¹
N eventi di coincidenza	100
Rateo eventi di coincidenza	0,066 ± 0,007 min ⁻¹
Misura con Diffusore Compton e Sorgente	
Durata misura	87126 s
Rateo detector A	88,6 s ⁻¹
Rateo detector B	92,5 s ⁻¹
N eventi di coincidenza	333
Rateo eventi di coincidenza	0,229 ± 0,013 min ⁻¹
Rateo coincidenze corretto per il background	0,163 ± 0,015 min⁻¹

Tabella IV – Dati ottenuti nella misurazione con rilevatori ortogonali

Facendo il rapporto tra i dati misurati nelle due configurazioni otteniamo i seguenti dati:

$$\text{Detector } // = 0,087 \pm 0,013$$

$$\text{Detector } \perp = 0,163 \pm 0,015$$

$$\text{Detector } \perp / \text{Detector } // = \mathbf{1,87 \pm 0,32}$$

Questi valori sono compatibili con le previsioni teoriche (e con le verifiche sperimentali fatte ad esempio nell'esperimento di Wu-Shaknov [17]) che stabiliscono un rateo di conteggio maggiore nel caso in cui i detector siano ortogonali. Questo è una conferma che i fotoni gamma emessi sono polarizzati su piani sfasati di $\pi/2$. Questo risultato è compatibile con l'ipotesi che i due fotoni gamma siano una coppia di *fotoni entangled*.

Conclusioni

L'apparato che abbiamo realizzato ha permesso la verifica sperimentale del fenomeno dell'entanglement. Per una verifica più rigorosa la misura andrebbe però fatta con un numero maggiore di rivelatori su angolazioni diverse: questo permetterebbe la verifica della disuguaglianza di Bell. Al fine di accorciare il tempo di misura è consigliabile utilizzare una sorgente radioattiva ad attività maggiore, ad esempio 10 μCi . Il risultato ottenuto ci ha comunque permesso di esplorare numerosi aspetti di fisica avanzata mentre l'approccio *open source* e *low cost* ha permesso di contenere notevolmente i costi della realizzazione, stimati inferiori ai 500 €.

Ringraziamenti

Si ringrazia la AdvanSiD per aver fornito i moduli SiPM utilizzati nelle prove effettuate. Si ringrazia il Prof. Clifford John Bland per i suggerimenti, il supporto e le simulazioni della diffusione Compton.

Bibliografia e Sitografia

- [1] physicsopenlab.org (2021)
- [2] LYSO-Scintillator datasheet, Saint Gobain (2021)
- [3] SiPM ASD-NUV4S-P datasheet, Advansid (2021)
- [4] HV80A datasheet, AiT Instruments (2021)
- [5] ASD-EP-EB-PZ SiPM Evaluation board datasheet, Advansid (2021)
- [6] PSoC 5lp CY8C58LP Family datasheets, Cypress Semiconductor Corporation (2020)
- [7] www.cypress.com/products/psoc-creator-integrated-design-environment-ide (2021)
- [8] Bondarenko G. et al, "Limited Geiger-mode microcell silicon photodiode: new results" *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **442** 187– 92 (2000)
- [9] Knoll G.F., *Radiation Detection and Measurement 4th Edition* (John Wiley & Sons, Inc.) 2010, p. 305-307, p. 235-253
- [10] Einstein A., B. Podolsky and N. Rosen., *Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?* *Phys. Rev.* **47**: 777-780 (1935)
- [11] Bohm D. and Y. Aharonov, *Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen and Podolsky*, *Phys. Rev.* **108**: 1070-1076 (1957)
- [12] Wheeler, J.A. *Polyelectrons*. *Annals of the New York Academy of Sciences* **48**: 219-238 (1946)
- [13] Pryce, M.H.L. and J.C. Ward. *Angular correlation effects with annihilation radiation*. *Nature* **160**: 435 (1947)
- [14] Hartland, S.S., Pasternack S. and Hornbostel J., *Angular Correlation of Scattered Annihilation Radiation*, *Phys. Rev.* **73,5** (1948)
- [15] Prutchi D. and Prutchi S. R., *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects* (John Wiley & Sons, Inc.) 2012, p. 203-243
- [16] Musser G., *Do-it-yourself quantum spooky action*, *Scientific American* (2011)
- [17] Wu C.S. and I. Shakhov. *The angular correlation of scattered annihilation radiation*. *Phys. Rev.* **77**: 136 (1950)
- [18] Bell, J.S. 1964. *On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox*. *Physics* **1**: 195-200