

29/05/2017 al 12/06/2017

GOCCE DI LUCE

La natura quantistica della luce e le
sue meraviglie



A cura di Matteo Aiani (3SD), Barraco Fabio
Mattia (3B), Alessandra Caprioli (3B) e
Andrea Iaconis (3SC).

UNIVERSITÀ INSUBRIA DI COMO

LA STRUTTURA E GLI UTENTI E LE FIGURE PROFESSIONALI

La struttura che ci ha ospitato durante il periodo di alternanza scuola lavoro è stata l'Università degli Studi dell'Insubria (Ente pubblico di formazione superiore). Le sue finalità generali sono l'alta formazione, la ricerca scientifica e il trasferimento di tecnologia per favorire lo sviluppo tecnologico delle imprese. Questo tipo di ambiente permette il lavoro di diverse figure in particolare il personale si divide in professori, che si occupano della ricerca, e il personale tecnico amministrativo che svolge compiti di supporto docenti e di gestione della struttura.

Il plesso si divide in tre sedi: due a Como collocate rispettivamente in via Valleggio e a sant'Abbondio, e una a Varese. All'interno di esse si distinguono inoltre i vari dipartimenti dotati a loro volta di aule, laboratori e studi per il personale docente. L'organizzazione interna dell'università è mostrata nella figura a.

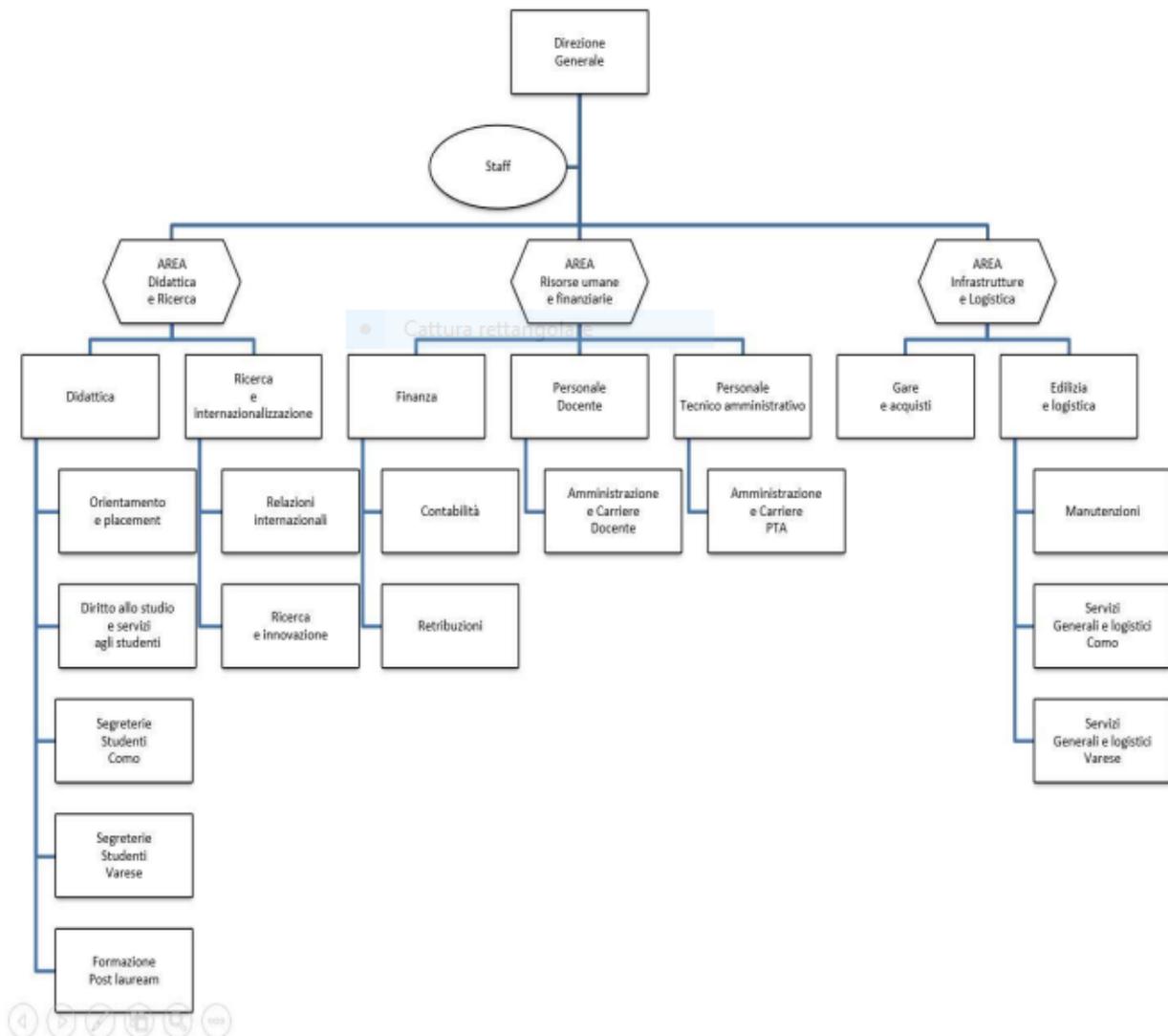


Figura a

A livello promozionale informativo l'Università ha un sito web e una pagina Facebook con cui divulgare nuove scoperte e tenere i contatti la città e gli istituti di istruzione. Molto spesso, infatti, vengono organizzati campi studio estivi per liceali, progetti di ASL e eventi divulgativi sul territorio. Un esempio è il festival della luce, la cui locandina è mostrata nella figura b.



Figura b

Noi siamo stati ospitati nel dipartimento di scienze e alta tecnologia (via Valleggio), che si articola in diversi laboratori e studi, tra i quali vi è quello in cui abbiamo lavorato ovvero il laboratorio di rivelatori al silicio. Questo è coordinato dal prof. Massimo Caccia e comprende varie figure professionali che ci hanno seguito durante il percorso di stage; tra questi ricordiamo i dottorandi Luca Malinverno e Massimiliano Antonello, la borsista Samuela ed il prof. Romualdo Santoro. Ognuno di essi ha un ruolo preciso nell'ambito della ricerca che si diversifica a seconda del settore. In particolare Luca si occupa della sicurezza, Massimiliano studia l'antimateria e Samuela si occupa di fisica medica. Si tratta, inoltre, di ragazzi giovanissimi che hanno concluso da poco il loro percorso di studi e che, grazie all'università e alla collaborazione con alcune ditte, possono studiare e permettere l'innovazione in vari ambiti.

DESCRIZIONE ED ELABORAZIONE



Figura c: strumentazione tecnica utilizzata durante lo stage

Nel corso dei dieci giorni di alternanza scuola lavoro ci siamo occupati principalmente di studiare un fenomeno utilizzando il metodo scientifico sperimentale e seguendo lezioni teoriche sui vari studi del dipartimento. Il nostro obiettivo era studiare la natura della luce a livello quantistico per capirne le proprietà statistiche. Per fare ciò abbiamo utilizzato un SiPM (silicon photomultiplier), sensore in silicio con una superficie di $1,69 \text{ mm}^2$ contenente 667 celle, il quale riceve gocce di luce provenienti da un led costruito da un ricercatore di nome Alexander Martemiyarov (Sasha), un ricercatore

senior all'Università di Mosca che ha un contratto con l'Università dell'Insubria per poter lavorare anche in Italia. Il sensore è collegato ad un modulo (PSAU) che fornisce al SiPM l'alimentazione necessaria al funzionamento, amplifica il segnale dal sensore e genera la condizione di attivazione della sua digitalizzazione (TRIGGER).

La PSAU può essere collegata ad un oscilloscopio o ad un Digitizer, il quale digitalizza i dati per trasmetterli al computer.

Il rivelatore utilizzato ha una sensibilità del singolo fotone e funziona grazie ad un meccanismo a “valanga”. In particolare, quando un fotone colpisce una cella libera un elettrone che viene accelerato a causa di un campo elettrico; grazie all’energia accumulata strappa un elettrone all’atomo con cui interagisce.

Si ha quindi una moltiplicazione esponenziale che porta ad una quota di circa 10^6 elettroni.

L’analisi dati al computer ci consentiva di rilevare le valanghe primarie innescate dai fotoni interagenti con il sensore.

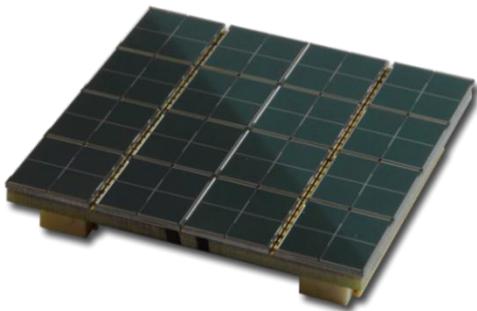


Figura d: sensore

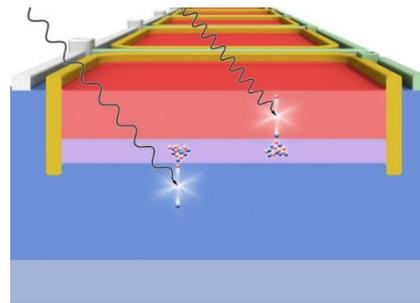


Figura e: processo moltiplicativo degli elettroni

Il grafico risultante è istogramma composto da varie gaussiane che raffigurano l’accensione delle varie celle ad intervalli di tempo diversi. Quando scatta l’impulso nel grafico osserviamo un calo dei millivolt seguiti da una concavità verso l’alto fino a riagganciarsi alla linea vicino a 0. Dal pannello di controllo potevamo scegliere i valori dei vari parametri che ci hanno permesso di raccogliere le nostre misurazioni. In particolare per poter leggere questi grafici abbiamo dovuto introdurre alcuni concetti di probabilità e statistica che non avevamo ancora assimilato a livello scolastico. Il primo passaggio consisteva nel dare significato al concetto di probabilità che matematicamente è il rapporto tra il numero di casi favorevoli e il numero di casi osservati. [1]

$$P = \frac{n_{eventi\ favorevoli}}{n_{eventi\ possibili}} \quad [1]$$

Dopo qualche esercizio applicativo essa ci è stata molto utile per capire con quale frequenza si accendevano un dato numero di celle. Successivamente abbiamo introdotto lo scarto quadratico medio che ci è servito per calcolare gli errori in modo dignitoso e preciso. Dopo aver ricavato il valore medio delle nostre misure [2], abbiamo calcolato i vari scarti [3] ed infine δ . [4]

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad [2]$$

$$\tilde{\Delta}_i = x_1 - \bar{x} \quad [3]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \tilde{\Delta}_i^2} \quad [4]$$

L'ultima parte della lezione di probabilità si incentrava, invece sulla distribuzione di Poisson che ci ha concesso di verificare la congruità del modello con i dati sperimentali. [5]

$$p(n) = e^{-\mu} \frac{\mu^n}{n!} \quad [5]$$

Infine è stato utile conoscere le proprietà della funzione che abbiamo preso in considerazione: la curva di Gauss (figura f). Si tratta di una funzione molto utilizzata nelle indagini statistiche poiché tutte le misure di elementi naturali si distribuiscono in questo modo, ed è proprio per questo che è stata molto utile per studiare i comportamenti del nostro fascio luminoso. L'equazione di questa curva è molto complessa, ma permette di evidenziarne alcune proprietà: [6]

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad [6]$$

Esempio di funzione di Gauss

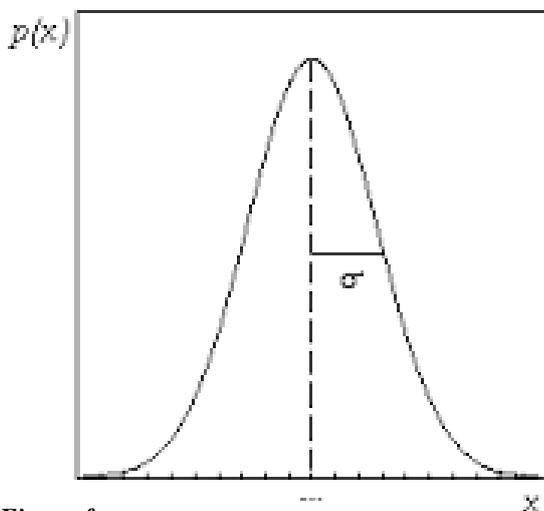


Figura f

Come si vede dall'immagine la campana ha una parte centrale con concavità verso il basso (pancia) e due parti con concavità verso l'alto (code). L'area sottesa al grafico è però il dato più importante a livello informativo, poiché rappresenta la probabilità che la x assume in un dato intervallo. [7]

$$A = h\sqrt{2\pi}\sigma \quad [7]$$

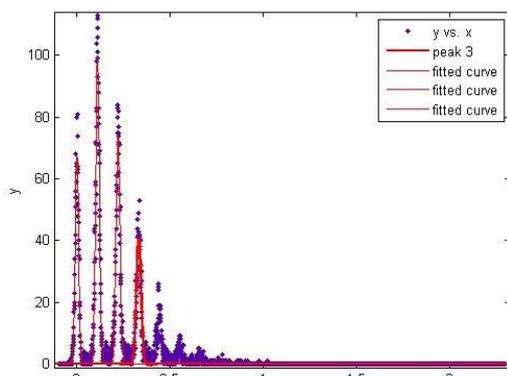
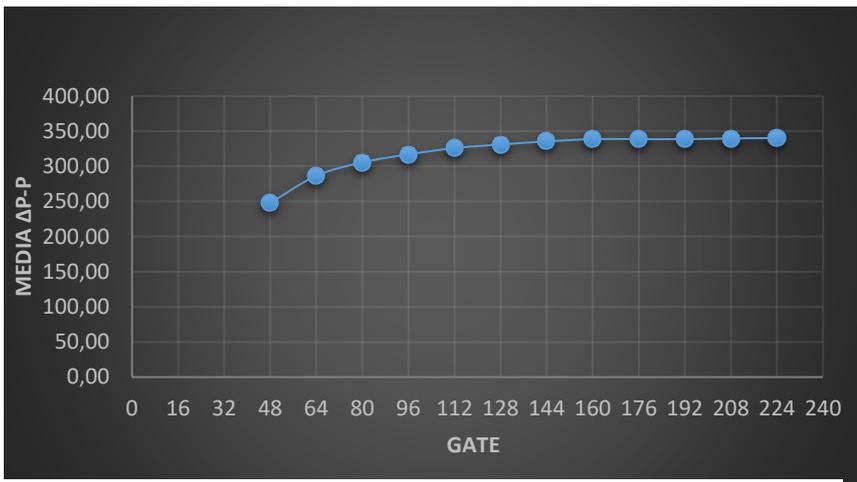


Figura g

Il nostro compito principale durante le settimane di alternanza è stato quello di caratterizzare un sensore in modo da capirne le condizioni ottimali di lavoro, e poter, in questo modo, capire la natura probabilistica delle gocce di luce del nostro led.

Per prima cosa abbiamo studiato come varia la distanza tra i picchi delle gaussiane (Δp) nell'istogramma all'aumentare dell'intervallo di integrazione della luce nel sensore (Gate).

Come si può notare dalla figura g l'istogramma è composto da varie gaussiane che rappresentano ognuna la probabilità con le quali ciascuna cella si accede.



Come si può notare dalla figura h il $\Delta p-p$ aumenta al crescere del valore del gate.

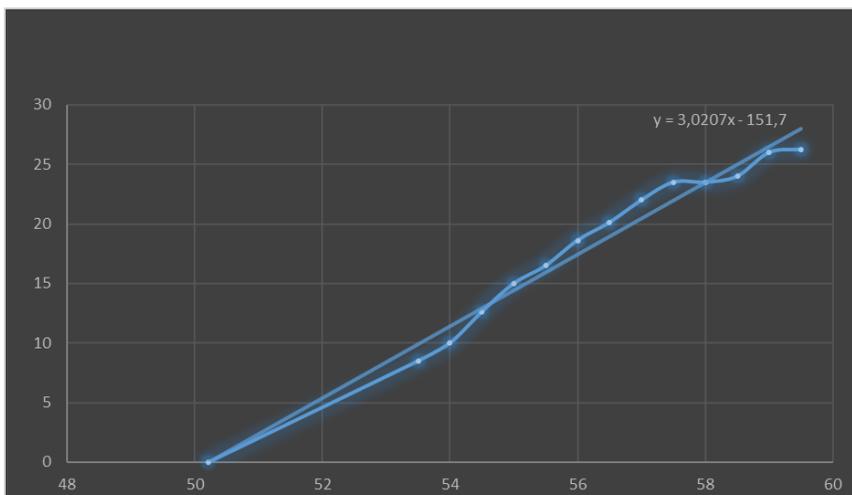
Per acquisire questo grafico abbiamo misurato i primi tre $\Delta p-p$ di ogni istogramma (per ogni valore del gate) e ne abbiamo fatto la media, in modo da avere un valore unico. Successivamente abbiamo calcolato lo scarto quadratico medio.

Figura h

Successivamente abbiamo cercato di capire l'importanza del campo elettrico nel quale viene accelerato l'elettrone e quindi del V_{bias} , l'elettricità fornita.

Abbiamo notato che l'aumento di questa può avere due effetti: il primo è quello di aumentare il fattore moltiplicativo del fenomeno a valanga

Il secondo passaggio della caratterizzazione è stato quindi quello di trovare la relazione tra lo stesso $\Delta p-p$ e il voltaggio fornito.



Come si può notare dal grafico ottenuto (figura i) il $\Delta p-p$ e il V_{bias} sono legati da una proporzionalità diretta. Il procedimento mediante il quale abbiamo raccolto i vari dati è molto simile a quello dell'esperimento precedente: cambiando progressivamente il voltaggio abbiamo preso i valori dei $\Delta p-p$. Osservando il grafico possiamo inoltre scoprire il valore di breakdown del sensore, ovvero il valore di voltaggio al di sotto del quale il

Figura i

sensore è spento e le gaussiane dell'istogramma non sono più distinguibili.

Il nostro V_{br} è 50.22Volt e per calcolarlo abbiamo intersecato il nostro grafico con l'asse dei V_{bias} (asse delle x) in modo da poter osservare per quale valore del voltaggio la differenza tra un picco e l'altro fosse 0.

Il passaggio successivo è stato quello di verificare come gli eventi stocastici influiscono sulle misure.

Abbiamo quindi cercato di calcolare la frequenza dei DCR (dark count rate), ovvero quegli eventi causati dalla temperatura elevata che provoca l'accensione di una o più celle nonostante queste non siano state attivate dalla presenza di fotoni. Ecco i nostri dati presi dall'oscilloscopio (figura l)

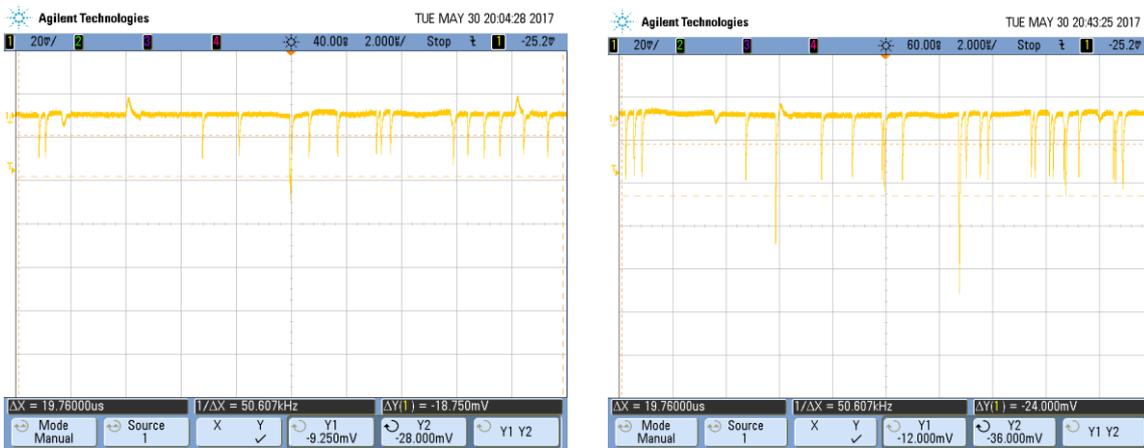


Figura l

Per verificare come questi eventi cambino in funzione del voltaggio abbiamo usato l'oscilloscopio e un metodo molto semplice; dopo aver scelto una finestra temporale di 20μs abbiamo contato, per ogni valore di V; il numero di eventi stocastici che accendevano una o due celle. Dopo una serie di misurazioni abbiamo notato che la frequenza dei DCR aumenta esponenzialmente all'aumentare del voltaggio. (figura m)

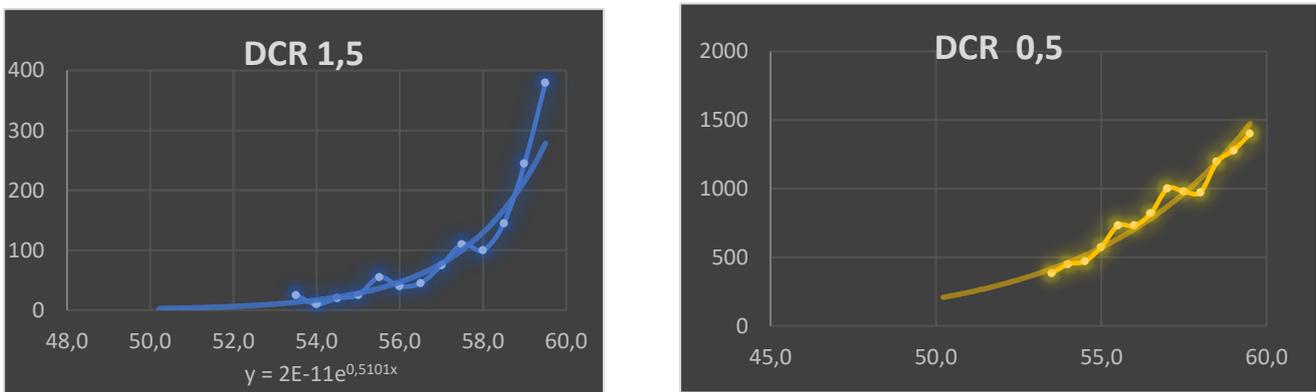


Figura m

Oltre ai DCR abbiamo, inoltre, notato che erano presenti altri tipi di eventi stocastici abbiamo quindi introdotto il cross-talk, errore dovuto alla creazione di valanghe secondarie oltre alla primaria nella cella colpita. Esso viene calcolato con la seguente formula [8] e il grafico che rappresenta il suo andamento è mostrato nella figura n.

$$x_{talk} = \frac{DCR (n \geq 2)}{DCR (n \geq 1)} \quad [8]$$

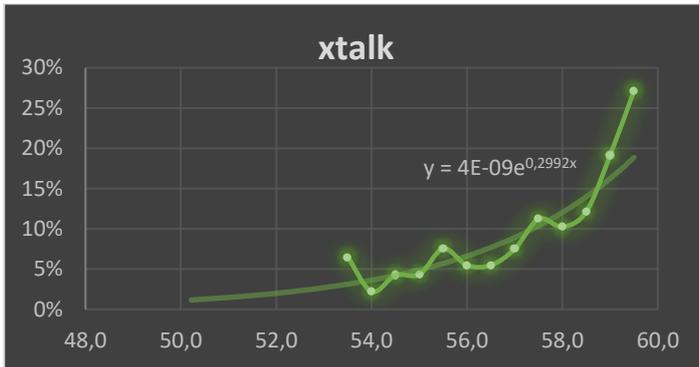


Figura n: anche questo grafico ha un andamento esponenziale.

Vbias	DCR 0,5	DCR 1,5	xtalk
53,5	385	25	6%
54,0	450	10	2%
54,5	470	20	4%
55,0	575	25	4%
55,5	730	55	8%
56,0	730	40	5%
56,5	820	45	5%
57,0	1000	75	8%
57,5	980	110	11%
58,0	975	100	10%
58,5	1195	145	12%
59,0	1280	245	19%
59,5	1400	380	27%

L'ultimo passo per concludere il nostro lavoro è stato quello di unire tutti i dati presi nei giorni precedenti per studiare il potere risolutivo (R) del sensore e scoprire successivamente come esso varia in funzione del Vbias. Abbiamo infatti notato nel corso dei nostri esperimenti che all'aumentare del voltaggio aumentano il Δp e gli errori.

Il vertice del grafico ottenuto è il nostro punto ottimale di lavoro in cui le gaussiane sono ben distinte ed è quindi più semplice capirne le caratteristiche. [9] oppure [10]. Nel primo caso abbiamo preso in considerazione la distanza tra un picco e l'altro e la deviazione standard, nel secondo caso la distanza tra un picco e l'altro e la larghezza a mezza altezza (FWHM).

$$R = \frac{\Delta p p}{\sqrt{\sigma_n^2 - \sigma_0^2}} \quad [9]$$

$$R = \frac{\Delta p p}{FWHM_{P_1} + FWHM_{P_2}} \quad [10]$$

Dopo i nostri calcoli abbiamo notato che qualcosa era andato storto poiché il grafico ottenuto era

quello delle nostre aspettative. Inoltre il prof aveva riscontrato alcune anomalie nella variazione della standard deviazione forse dovute alle variazioni di temperatura subite nel corso dell'esperimento. Per risolvere il problema abbiamo ripreso i dati scegliendo un metodo diverso: per evitare variazioni di temperatura abbiamo acquisito gli spettri gaussiani di ogni voltaggio sul computer. Successivamente li abbiamo analizzati tramite MATLAB che ha potuto fornirci tutte le informazioni che ci servono.

Anche questa volta abbiamo però ottenuto un grafico poco soddisfacente, il prof ha allora ipotizzato che, per questo sensore, la parabola fosse un po' "piatta" e ci ha chiesto, dunque, di prendere più dati.

Questo è il grafico finale che abbiamo ottenuto. Come possiamo notare R aumenta insieme al voltaggio ma inizia a calare dopo il valore di 55, questo è dovuto all'aumento dei fenomeni stocastici. Il nostro punto di lavoro ottimale è quindi a 55 Volt. (figura o)

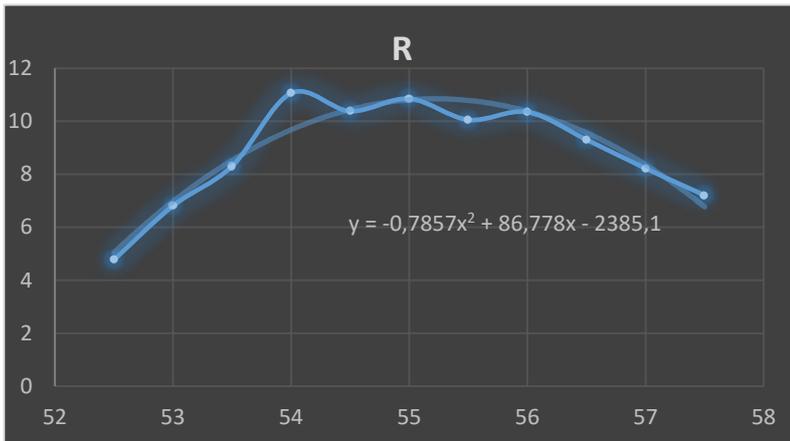


Figura o

Una volta caratterizzato il sensore abbiamo potuto studiare, grazie ad esso, le proprietà statistiche della luce; in particolare volevamo capire se la distribuzione delle gocce di luce fosse poissoniana.

Per fare questo siamo ricorsi al test del chi quadrato e abbiamo quindi calcolato le probabilità sperimentali e teoriche con le quali si accendevano un dato numero di celle.[11]

Lo spettro analizzato aveva però un picco 0 troppo basso che poteva creare complicazioni. (figura p) Abbiamo quindi ripreso i dati con due intervalli di integrazione diversi.

$$\chi^2 = \frac{(p_{exp} - p_{th})^2}{p_{th}} \quad [11]$$

P sperimentale	0,35953	0,362964	0,190408	0,072309	0,01479	1
μ	1,022959	1,013453	1,658588	2,62681	4,213776	
P poisson	0,35953	0,367846	0,261898	0,218437	0,194292	
χ^2	0,00	0,00	0,02	0,10	0,17	0,28

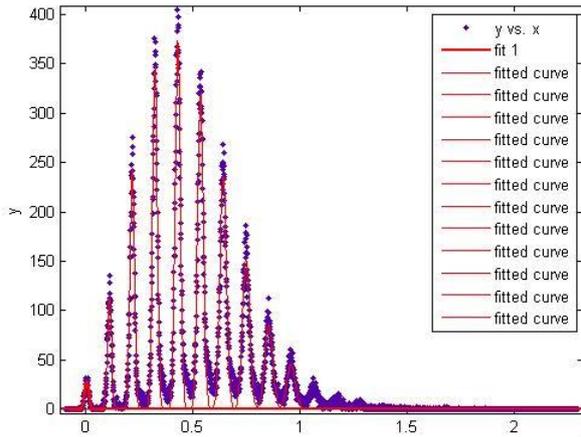


Figura p

Nonostante questo il prof non era ancora pienamente convinto dei nostri dati e ha allora deciso di eseguire un altro fit con Matlab utilizzando un metodo sicuramente più professionale che ha deciso di non spiegarci perché troppo complesso. In realtà dai nostri grafici (figura q) sembra che le due distribuzioni si differenziano, con i grafici più professionali (figura r) abbiamo in realtà scoperto che le differenze sono equivalenti agli errori.

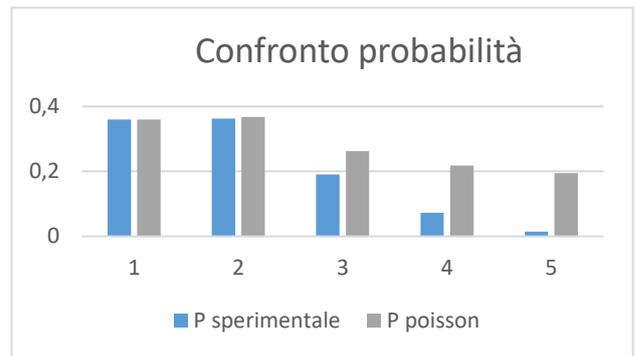
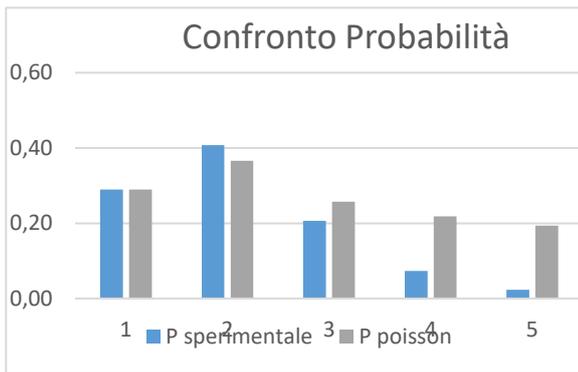


Figura q

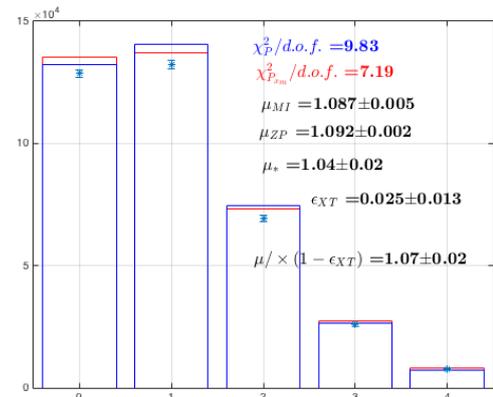
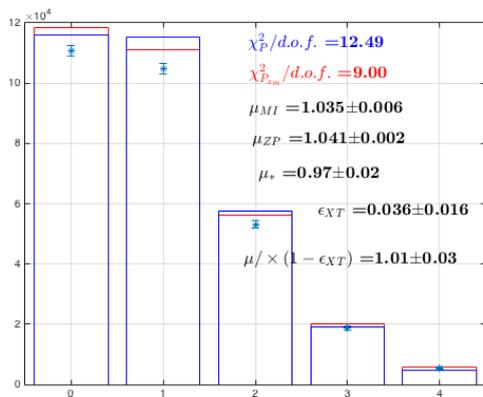


Figura r

Abbiamo quindi scoperto che, con il nostro sensore, la luce ha una distribuzione poissoniana e che quindi le gocce di luce hanno la stessa distribuzione delle gocce di pioggia.

Durante il nostro stage oltre ad eseguire gli esperimenti sopra citati abbiamo ascoltato alcune lezioni tenute dai dottorandi che ci hanno spiegato il loro compito all'interno del laboratorio. Il primo tra tutti a parlarci è stato Luca, il quale appunto si occupa di creare sistemi per rilevare materiale radioattivo



Figura s

Prevenire tutto ciò è fondamentale in quanto se queste bombe venissero fatte esplodere si andrebbero a danneggiare le città e morirebbero molte persone innocenti.

Come si può notare dalle figure t ed u esiste già un sistema che è stato ideato da Luca insieme al Pentagono e che è già stato utilizzato a New York. Infatti questo strumento è stato dato a tutte le forze dell'ordine, ai taxi, ecc per individuare la presenza di persone in possesso di materiale radioattivo e quindi poterle fermare in tempo, poiché i dati vengono inviati al pentagono. Naturalmente la sicurezza non è del



Figura t

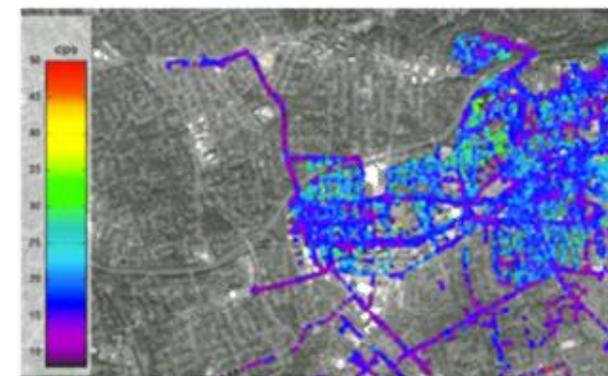


Figura u

100% perchè la città è molto grande e le persone sono numerose. Ecco la cartina di New York che rappresenta le zone sorvegliate:

La seconda lezione è stata tenuta dal professor Romualdo che ci ha introdotto la calorimetria. Inizialmente però ha dovuto spiegarci come si compone il singolo atomo, che come tutti sappiamo è formato da neutroni, protoni ed elettroni. In realtà il professore ha precisato l'esistenza di altre particelle molto più piccole: i quark (figura v). Queste particelle subatomiche, scoperte negli ultimi decenni del '900, per ora sono considerate le particelle indivisibili e fondamentali dell'atomo e, pur essendo molto piccole, possiedono caratteristiche straordinarie; la loro forza di legame cresce in modo lineare a differenza di tutti gli altri elementi in cui invece aumenta in modo esponenziale; inoltre se si cerca di separarli nel momento in cui si sta per rompere il legame l'energia liberata è talmente forte da formare tra i due quark presi in considerazione un quark e un anti-quark. In questo modo quindi il legame non si riesce a distruggere in alcun modo, in quanto la forza attrattiva tra le particelle aumenta al crescere del raggio che le separa.

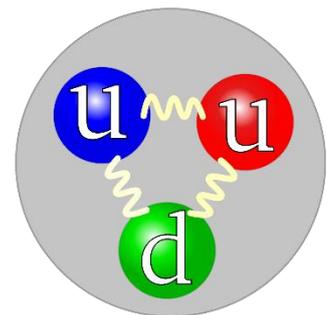


Figura v

Dopo questa parte introduttiva, siamo passati a parlare della calorimetria e in particolare dell'acceleratore di particelle. In questa macchina si fa aumentare la velocità per esempio dei protoni in modo che possano collidere tra di loro. Questa collisione non porta alla distruzione di quest'ultimi ma alla liberazione di una grande quantità di energia che viene misurata attraverso dei rivelatori di vertice che vengono posti vicini al punto dell'impatto. Più lontano vengono invece posti dei rivelatori massivi che invece permettono alle particelle neutre, che non vengono rilevate subito, di interagire e quindi di dividersi in cariche positive e cariche negative. Nella figura z si può osservare proprio uno strumento composto dall'alternarsi di materiale scintillante (che produce energia) e un rivelatore massivo (costituito per esempio da piombo).

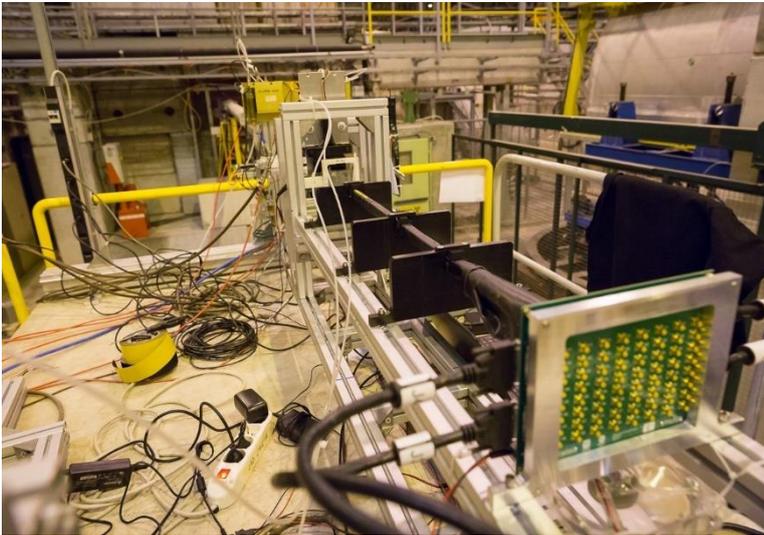
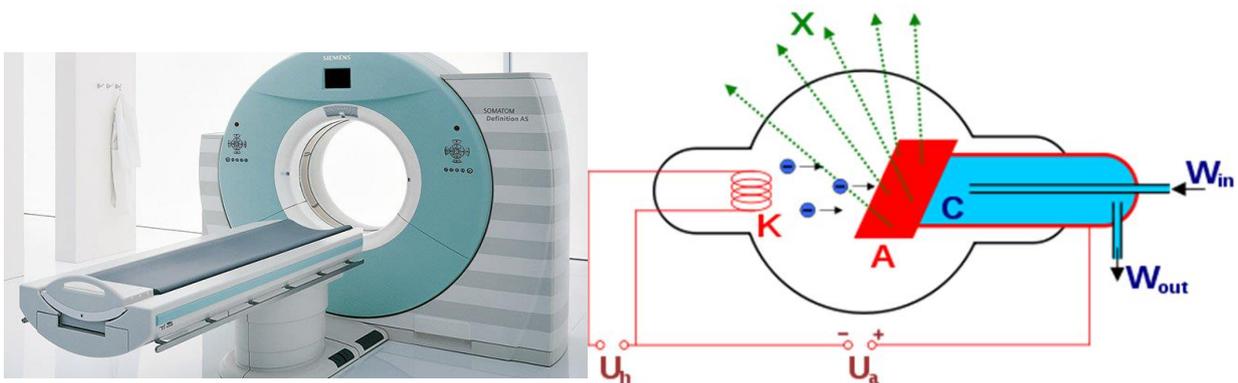


Figura z



Successivamente è stato il turno di Samuela che, essendo impegnata con un lavoro molto importante, non aveva potuto descriverci il suo compito prima. I suoi studi riguardano la fisica medica, disciplina molto importante poiché applica i principi della fisica in ambito sanitario permettendo un maggior benessere del paziente. In particolare Samuela ci ha presentato i vari esami in cui interviene la figura del fisico medico affiancata da quella del medico vero e proprio. Un esempio è la TAC (tomografia assiale computerizzata, figura a1), una metodica diagnostica per immagini che sfrutta lech radiazioni ionizzanti (raggi X, figura b1), che in fisica sono quella porzione dello spettro elettromagnetico con una lunghezza d'onda compresa approssimativamente tra 10 nanometri (nm) e 1/1000 di nanometro, e che consente di riprodurre sezioni o strati corporei del paziente per effettuare elaborazioni tridimensionali.

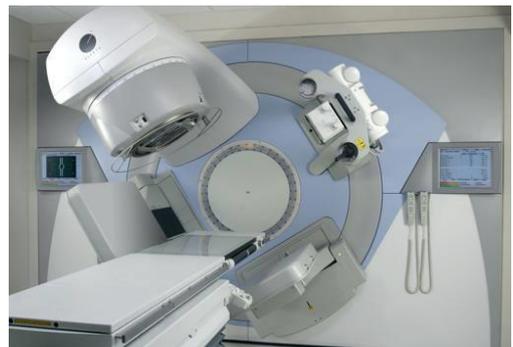


Figura a1

Successivamente ritroviamo la radioterapia che utilizza una quantità notevole di raggi γ , normalmente nocivi per le nostre cellule, per eliminare le cellule tumorali senza andare ad arrecare danno agli altri tessuti.

Figura b1

Sempre in ambito tumorale ritroviamo un altro esame molto importante che permette di localizzare il tumore per poterlo analizzare e, successivamente, asportare. In particolare in questo caso si somministra al paziente uno zucchero associato ad un materiale radiattivo il ^{18}F che essendo un isotopo è molto instabile e decade naturalmente in circa 6 ore. A questo punto lo zucchero va ad accumularsi nelle cellule tumorali che hanno un alto metabolismo e, dal decadimento dell'atomo del ^{18}F si originano un

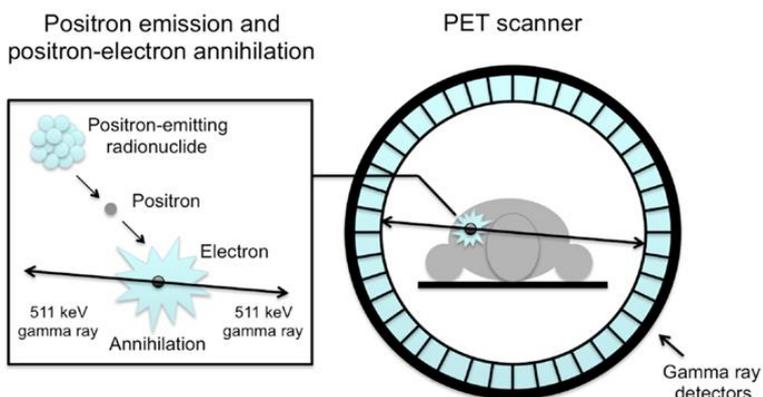


Figura c1

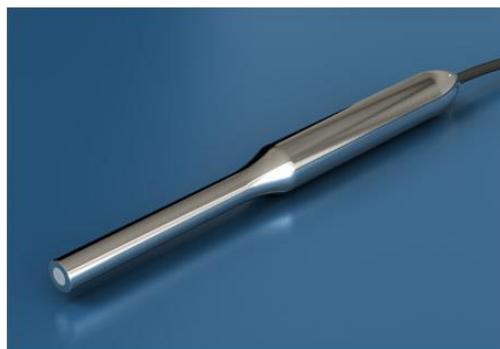


Figura d1

elettrone ed un positrone (l'antielettrone che possiede la stessa massa di e , ma ha spin opposto e carica positiva). Dallo scontro di queste particelle si originano due raggi γ con la stessa direzione e verso opposto (figura c1). Dall'intersezione di questi raggi si evidenzia il centro della zona affetta da tumore. Infine ci è stato spiegato un progetto molto interessante di cui si è occupata Samuela. Si tratta di una penna che associa il materiale scintillante e i SiPM e permette di localizzare il tumore nel momento dell'operazione in modo di asportarlo totalmente. In particolare esistono due versioni di questa penna ed entrambe implicano la somministrazione di materiale radioattivo al paziente. Dopo aver rilevato le radiazioni l'una

emette dei suoni l'altra manda l'immagine ad uno schermo di dimensioni maggiori, dove si evidenzia la posizione della massa tumorale. (figura d1).

Infine l'ultima lezione teorica è stata tenuta da Massimiliano che si occupa di studiare la costante gravitazionale dell'antimateria. In realtà l'idea di fondo è molto molto semplice: si pensa infatti di ottenere tramite degli esperimenti un atomo di antidrogeno per poi farlo cadere e ottenere i dati necessari per concludere gli studi. Il problema risiede nel riuscire ad ottenere un atomo di antidrogeno che, essendo antimateria, annichilisce molto facilmente. L'esperimento che ha permesso la creazione di questi atomi si chiama ATHENA e si è svolto a CERN di Ginevra nel 2002. Tramite il mescolamento di antiprotoni e positroni, confinati grazie all'utilizzo di potenziali elettrici e campi magnetici sono stati creati degli atomi di antidrogeno all'interno di un cilindro. Gli antiprotoni sono stati forniti dall'acceleratore AD, mentre i positroni sono stati generati da una sorgente di sodio

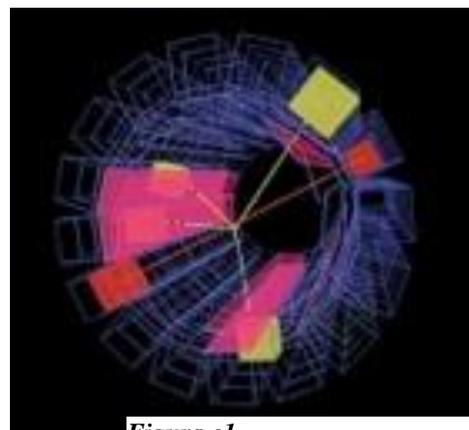


Figura e1

radioattivo.

A questo punto è partito il progetto AEGIS che ha come obiettivo quello di dimostrare la validità del principio di equivalenza tra materia e antimateria grazie all'utilizzo dell'acceleratore AD. (figura e1)

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La mia esperienza all'università Insubria di Como è stata molto positiva. Dapprima bisogna precisare che il contesto in cui si viene inseriti è accogliente e familiare, e le persone che ci hanno seguito sono state molto disponibili e gentili nei nostri confronti nonostante la differenza di età e di competenze. Per quanto riguarda il nostro lavoro è stato davvero fantastico condurre gli esperimenti in gruppo e in autonomia, Ritengo infatti che siano questi i fondamenti su cui si basa la mia esperienza di alternanza: il lavoro di gruppo mi ha permesso di comprendere le modalità lavorative tipiche del laboratorio, mentre l'autonomia mi ha permesso di vivere fino in fondo l'esperienza lavorativa. Tramite le lezioni teoriche, inoltre, sono venuta in contatto con vari ambiti nei quali viene applicata la fisica. In particolare sono stata colpita dalla lezione riguardante la fisica medica: mi ha davvero affascinato come i principi della fisica possano essere utilizzati in ambito sanitario per migliorare il benessere dei pazienti e credo che questa sia la facoltà adatta a me. In realtà avevo preso già in considerazione la facoltà di fisica, ma, come mi succede spesso, l'avevo quasi scartata perché troppo difficile. Tramite quest'esperienza ho però imparato dalle testimonianze dei dottorandi che la cosa che conta di più è la passione che chiunque mette per poter raggiungere il proprio obiettivo. Le competenze si acquisiscono con il tempo.