

Tirocinio formativo
Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica
Pavia 2009

S. Altieri P. Baesso S. Bortolussi A. de Bari
A. Fontana M. Fraternali M. A. Gadan P. Montagna
A. Tamborini P. Vitulo C. Viviani

13 agosto 2009

Indice

1	Suddivisione degli studenti e calendario delle esperienze	3
2	Descrizione delle attività	4
2.1	Interazione radiazione-materia (Montagna)	4
2.2	Acceleratori per la salute: adroterapia (Montagna)	5
2.3	Misure di radioattività con rivelatori al Ge (Fontana)	5
2.4	Misure di concentrazione di Radon in aria (de Bari)	8
2.5	Calibrazione e misure (Fraternali)	9
2.6	Introduzione agli strumenti (Baesso, Viviani, Vitulo)	10
2.7	Catene di acquisizione (Baesso, Viviani, Vitulo)	10
2.8	Risonatore di Helmholtz (Baesso)	11
2.9	Plateau di efficienza di fotorivelatori (Tamborini)	12
2.10	Coeff. attenuazione lineare nel Pb (Vitulo)	12
2.11	Test di stress di materiali (Baesso)	13
2.12	Cenni di elettronica e filtri RC-CR (Baesso, Viviani)	14
2.13	Riflettometria (Viviani)	14
2.14	Visita al L.E.N.A.	15
2.15	Boron Neutron Capture Therapy (Bortolussi, Gadan, Altieri)	15
2.16	Neutronigrafia (Bortolussi, Gadan, Altieri)	16
2.17	Generatore di Van de Graaff (Tamborini)	16
2.18	Distribuzione angolare dei raggi cosmici (Vitulo)	18
2.19	Razzi ad acqua (Baesso, Viviani, Vitulo, Tamborini)	19
3	Conclusioni	19

Di seguito viene presentato un riepilogo del programma svolto durante le due settimane di tirocinio di formazione presso il Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica dell'Università degli Studi di Pavia e vengono descritte le esperienze che sono state sottoposte ai tirocinanti. Il filo conduttore delle esperienze proposte è stato *l'approccio scientifico* al problema sotto esame: agli studenti veniva proposto un quesito legato al mondo della fisica e veniva richiesto loro di formulare delle ipotesi e di verificarne la bontà attraverso le apparecchiature di laboratorio. In questo modo lo studente non è solo l'esecutore di un esperimento *preconfezionato* ma viene invitato a decidere come si svolgerà l'esperienza, a definire l'approccio al problema e a trarre le conclusioni dai dati ottenuti. Per tale ragione si è verificato spesso che due gruppi di studenti, posti davanti alla medesima esperienza, abbiano ottenuto risultati differenti e siano giunti a conclusioni diverse¹. Riteniamo che questo approccio sia vantaggioso per due motivi fondamentali: da un lato, favorisce l'aspetto di *scambio di esperienze* tra i gruppi, che sono così stimolati a discutere e confrontarsi anche tra loro, costituendo di fatto una piccola comunità scientifica. In secondo luogo questo metodo fa in modo che l'esperienza da svolgere sia nuova per ogni gruppo e che gli studenti non "sappiano già in anticipo" ciò che succederà². I tirocinanti sono inoltre stati invitati a seguire alcuni seminari il cui scopo principale era quello di fornire nozioni di base su argomenti specifici trattati durante le due settimane.

1 Suddivisione degli studenti e calendario delle esperienze

I 12 studenti coinvolti nel progetto, provenienti da 7 diversi istituti, sono stati suddivisi in due gruppi, denominati A e B. Tale suddivisione, oltre a favorire gli aspetti pratici di gestione degli spazi, ha consentito di svolgere diverse attività in parallelo, coinvolgendo tutti gli studenti e ottimizzando il lavoro dei tutor. Per favorire la creazione di nuovi rapporti sociali (e l'aspetto di scambio di esperienze cui si è accennato in precedenza) si è cercato di separare studenti provenienti dal medesimo istituto.

STUDENTE	ISTITUTO	GRUPPO
Suvighi Paolo Pietro	<i>Lic. Sc. "Copernico", Pavia</i>	A
Facchetti Mattia	<i>Lic. Sc. "Copernico", Pavia</i>	B
Passoni Marco	<i>Lic. Sc. "Copernico", Pavia</i>	A
Barbieri Sofia	<i>Lic. Sc. "Taramelli", Pavia</i>	B
Nordio Maria	<i>Lic. Sc. "Taramelli", Pavia</i>	A
Betta Alberto	<i>Ist. Istr. Sup. "Faravelli", Broni</i>	B
Crivelli Federico	<i>Ist. Istr. Sup. "Maserati", Voghera</i>	A
Introini Viola	<i>Lic. Class. Sc. "Cairolì", Vigevano</i>	B
Poma Martina	<i>Ist. Istr. Sup. "Omodeo", Mortara</i>	A
Fiorani Giulia	<i>Ist. Istr. Sup. "Omodeo", Mortara</i>	B
Erbetta Maria	<i>Liceo Sc. "G. Ferrari", Borgosesia</i>	A
Ventura Ilaria	<i>Liceo Sc. "G. Ferrari", Borgosesia</i>	B

¹Diverse ma ugualmente corrette da un punto di vista fisico.

²Poche cose sono in grado abbattere la soglia di attenzione di uno studente come il credere di sapere già tutto.

Giorno	Gruppo A	Gruppo B
Lun 15	1 - Inter. radiazione-materia 5 - Calibrazione e misure	1 - Inter. radiazione-materia 6 - Introduzione agli strumenti
Mar 16	4 - Misure Radon in aria 14 - Visita al L.E.N.A.	7 - Catene di acquisizione 14 - Visita al L.E.N.A.
Mer 17	16 - Neutronigrafia 3 - Misure radioattività Ge	8 - Risuonatore di Helmholtz 5 - Calibrazione e misure
Gio 18	15 - Seminario BNCT 6 - Introduzione agli strumenti	15 - Seminario BNCT 16 - Neutronigrafia
Ven 19	7 - Catene di acquisizione 8 - Risuonatore di Helmholtz	3 - Misure radioattività Ge 9 - Plateau fotorivelatori
Lun 22	9 - Plateau fotorivelatori 10 - Coeff. attenuazione Pb	4 - Misure Radon in aria 13 - Riflettometria
Mar 23	17 - Van de Graaff 13 - Riflettometria	10 - Coeff. attenuazione Pb 11 - Stress materiali
Mer 24	18 - Distr. angolare cosmici 10 - Distr. angolare cosmici	17 - Van de Graaff 12 - Filtri elettronici RC-CR
Gio 25	2 - Seminario adroterapia 12 - Filtri elettronici RC-CR	2 - Seminario adroterapia 18 - Distr. angolare cosmici
Ven 26	19 - Razzi ad acqua	19 - Razzi ad acqua

Tabella 1: Riassunto delle esperienze svolte

2 Descrizione delle attività

Ai tirocinanti sono state proposte diverse esperienze, seminari ed una visita guidata (Tab. 1) articolati in modo da introdurre vari argomenti di fisica (dinamica, acustica, elettromagnetismo, radioattività, fisica delle particelle, ecc.). Allo stesso tempo sono stati introdotti concetti legati al lavoro di un fisico, con particolare attenzione ad attività quali la calibrazione degli strumenti, l'utilizzo di moduli elettronici e l'analisi degli errori nelle misure. Durante il tirocinio si è scelto di far utilizzare gli strumenti necessari direttamente agli studenti, anche se sempre sotto il controllo di un tutor e in completa sicurezza.

Le diverse attività sono qui descritte brevemente:

2.1 Interazione radiazione-materia (Montagna)

All'inizio dello stage, prima che gli studenti affrontassero le esperienze di laboratorio, si è ritenuto utile un seminario introduttivo³ sulle principali proprietà che caratterizzano il passaggio di particelle e radiazioni nei mezzi materiali. L'esposizione è stata necessariamente molto divulgativa, in quanto i tirocinanti non avevano ancora le necessarie conoscenze di elettromagnetismo. Partendo dalle particelle atomiche e nucleari (protone, neutrone, elettrone), ed esaminandone le proprietà note dalla fisica e dalla chimica, quali massa, carica, velocità ed energia, si sono guidati gli studenti a distinguere i differenti meccanismi di trasporto nella materia delle particelle cariche e neutre, e delle radiazioni

³Uno schema della presentazione si può trovare sul sito:
<http://www.pv.infn.it/montagn1/Trasp/RadiazioneMateria-StageFisica-giu09.pdf>

corpuscolari ed elettromagnetiche. In questo modo, si sono presentati successivamente i principali processi di interazione delle radiazioni ionizzanti, dalla ionizzazione coulombiana alla bremsstrahlung, dalla cattura neutronica alle interazioni fotoniche (effetto fotoelettrico, effetto Compton, produzione di coppie) fino all'annichilazione materia-antimateria.

2.2 Acceleratori per la salute: adroterapia (Montagna)

Come è noto, a Pavia è in fase di avanzata costruzione il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO⁴), che certamente nei prossimi anni porrà la nostra città tra i pochissimi centri al mondo in grado di effettuare terapie tumorali con ioni carbonio, e si configura quindi come uno dei più notevoli esempi di interazione multidisciplinare tecnologicamente avanzata, dove la fisica si pone a servizio della medicina utilizzando le più sofisticate tecniche dell'ingegneria e delle scienze applicate. Si è ritenuto pertanto che nell'esperienza di formazione proposta agli studenti non potesse mancare una breve presentazione del CNAO⁵, inserita in un contesto più ampio dell'impiego di macchine acceleratrici sia per la ricerca di base che per quella applicata. Così si sono presentate le principali proprietà fisiche che stanno alla base della nuova terapia tumorale con adroni (protoni e ioni carbonio), con i relativi vantaggi e svantaggi a confronto con la radioterapia convenzionale, alcuni cenni sui centri attualmente esistenti in Italia e nel mondo, e le principali caratteristiche del nuovo centro che sarà operativo nei prossimi anni a Pavia. Nel contempo, si è approfittato per uno sguardo alle principali proprietà degli acceleratori di particelle, con particolare riferimento al ciclotrone (uno dei quali è in funzione a Pavia ed è stato visto dagli studenti) e al sincrotrone. Dopo una breve introduzione relativa al nuovo acceleratore Large Hadron Collider (LHC) del CERN sono state presentate, in modo informale, alcune modalità di lavoro tipiche degli esperimenti di fisica delle particelle ai grandi acceleratori.

2.3 Misure del fondo di radioattività gamma con rivelatori al germanio (Fontana)

L'attività ha l'obiettivo di familiarizzare gli studenti con il concetto di radioattività naturale, con i principi fisici del decadimento radioattivo e con le tecniche elementari di misurazione nucleare, con particolare enfasi al decadimento gamma. Il lavoro è stato suddiviso in due parti: una introduzione teorica agli argomenti e una verifica pratica degli stessi, con l'obiettivo di identificare sperimentalmente alcuni nuclidi fondamentali. Nella prima parte sono state introdotte le nozioni basilari del decadimento radioattivo: attraverso l'esame della carta dei nuclidi di Karlsruhe, sono stati illustrati l'instabilità nucleare, i vari modi di decadimento di un nucleo, la legge del decadimento radioattivo e sono stati mostrati esempi di radioattività naturale e di radioattività artificiale (con un breve cenno agli incidenti nucleari più famosi). Si è poi passati all'esame dettagliato delle famiglie radioattive di ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th e all'identificazione degli elementi primordiali (in particolare ^{40}K). Infine si sono descritti i metodi di rivelazione della radioattività: dopo un richiamo ai meccanismi di interazione

⁴www.cnao.it

⁵Uno schema della presentazione si può trovare sul sito:
<http://www.pv.infn.it/montagn1/Trasp/Adroterapia-StageFisica-giu09.pdf>

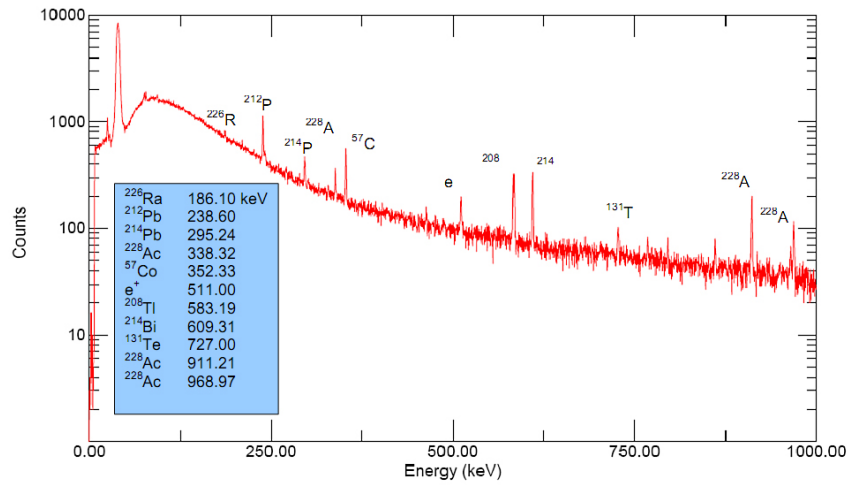


Figura 1: Identificazione dei diversi picchi dovuto alla radiazione ambientale naturale.

tra raggi gamma e materia, sono stati illustrati i principi di funzionamenti di scintillatori e di rivelatori a stato solido e sono state introdotte le nozioni di risoluzione ed efficienza di un rivelatore, illustrando in particolare i vantaggi dei rivelatori al germanio iperpuro. Nella seconda parte si è svolta un'introduzione alla strumentazione disponibile in laboratorio: un cristallo di tipo High Purity Germanium (HPGE) con elettronica associata e sistema di refrigerazione portatile, un crate NIM con alimentatore HV, amplificatore e analizzatore multicanale, un oscilloscopio e un PC per l'acquisizione e l'analisi dei dati. Dopo aver assemblato la catena di acquisizione elettronica, il sistema, già calibrato in precedenza con due sorgenti di ^{137}Cs e ^{60}Co , è stato utilizzato per misurare il fondo naturale di radiazione gamma presente in laboratorio: sono stati osservati con l'oscilloscopio i segnali di uscita dal preamplificatore e dall'amplificatore e successivamente analizzato lo spettro energetico dei segnali acquisito con il multicanale. Sono stati così individuati i picchi corrispondenti ai vari nuclidi (Fig. 1) nel range di energia 0-3000 keV e si è verificata la loro appartenenza ad una delle famiglie radioattive naturali o al gruppo di elementi primordiali, illustrando in maggior dettaglio il caso del ^{40}K (Fig. 2) e del ^{208}Tl (Fig. 3). Infine, come ultima prova, dopo aver fatto allontanare gli studenti a distanza di sicurezza, è stata avvicinata al rivelatore una sorgente di calibrazione artificiale: questo ha permesso di studiare l'aumento di attività in funzione della distanza dal rivelatore e di ripetere la calibrazione in energia del sistema.

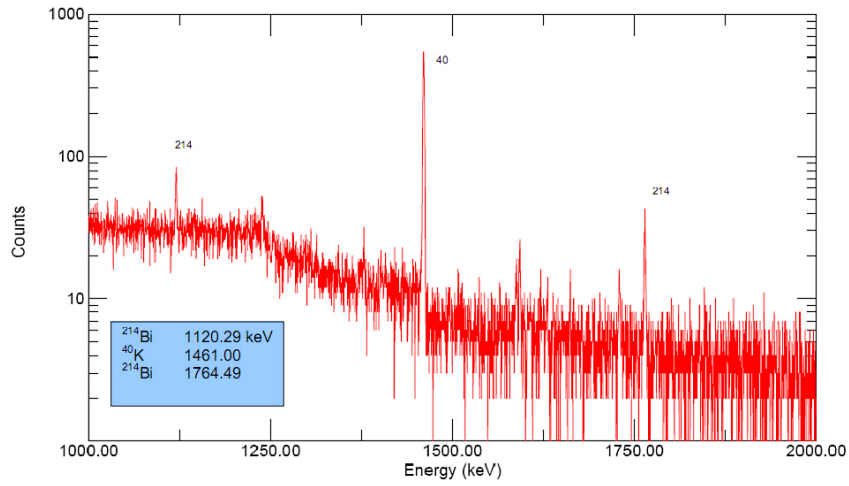


Figura 2: Dettaglio del picco legato al decadimento del ^{40}K .

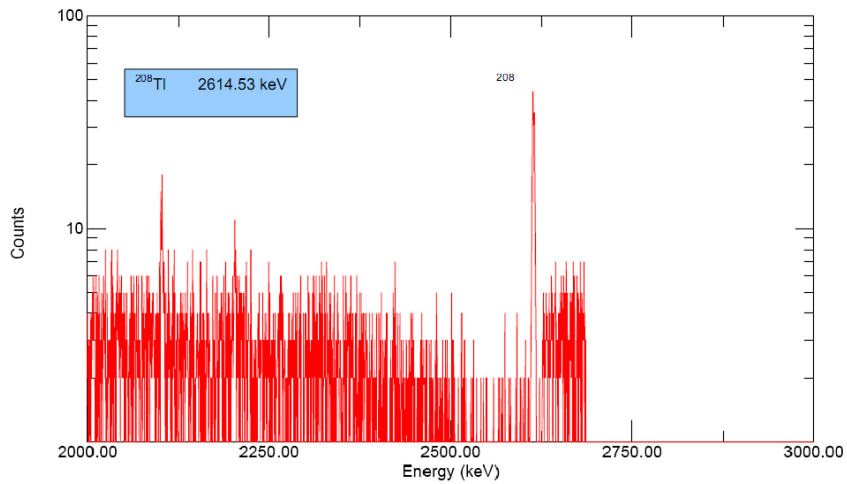


Figura 3: Dettaglio del picco legato al decadimento del ^{208}Tl .

2.4 Misure di concentrazione di Radon in aria (de Bari)

L'esperienza è iniziata da un approccio teorico con una breve introduzione su tre catene radioattive naturali, spiegando lo svolgersi delle catene in base a successivi decadimenti α e β . In particolare si è mostrata la comparsa naturale di alcuni isotopi radioattivi del Radon⁶.

Aiutandosi con tabelle e schemi, è stata spiegata la ragione di produzione del radon e si è sottolineata la particolare pericolosità del ^{222}Rn che, con il suo tempo di dimezzamento di 3.82 giorni, può diffondersi nell'atmosfera ed essere respirato dagli esseri viventi. Partendo da questi spunti, ai tirocinanti è stato anche introdotto il concetto di *equilibrio secolare* e si è mostrato come la popolazione di radioisotopi dipenda dai loro tempi di decadimento. Ai tirocinanti è stata quindi mostrata e descritta una cella di Lucas⁷ accoppiata a un fotomoltiplicatore e a un successivo stadio di acquisizione, come mostrato in Fig.5. La misurazione del radon è stata effettuata trasferendo nella cella di Lucas parte di gas disciolto in un volume d'acqua. Questa operazione è stata effettuata facendo fluire dell'azoto nell'acqua contenente radon.



Figura 4: Cella di Lucas Pylon.

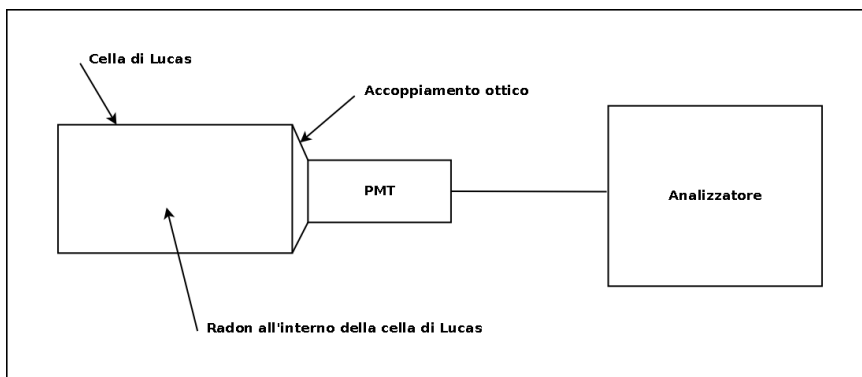


Figura 5: Schema della strumentazione che utilizza una cella di Lucas come rivelatore del radon.

Una volta connessa la cella di Lucas (Fig. 4) allo strumento per la degasificazione si è atteso un tempo di circa cinque minuti, in modo che l'efficienza di trasferimento arrivasse a circa 85-95%, e si è campionato un volume d'acqua di circa 190 ml. In seguito, terminata la fase di flussaggio, la cella di Lucas è

⁶Come ^{222}Rn (da ^{238}U), ^{219}Rn (da ^{235}U) e ^{220}Rn (da ^{232}Th)

⁷La cella di Lucas è un contenitore al cui interno viene spalmato un leggero strato di ZnS attivato con Ag. Il solfuro di zinco è conosciuto da tempo come scintillatore: le particelle alfa che colpiscono il ZnS(Ag) emettono fotoni nel blu, con un massimo a 450 nm.

stata scollegata dal degassificatore e connessa all'analizzatore (Fig. 6) che si è provveduto a calibrare in precedenza con uno standard di riferimento di ^{222}Rn .

La misurazione è proseguita per circa quattro ore, affinché il numero di conteggi fosse tale da ottenere adeguato un rapporto segnale/rumore. E' stato fatto notare agli studenti che, considerando l'esiguo tempo disponibile per la misura del radon in acqua e l'impossibilità di protrarre per giorni le misure fino a che queste raggiungano un valore statistico accettabile, l'esperienza ha avuto il solo valore di mostrare la teoria, la strumentazione e le metodologie in atto. Coscienti di questo, si possono accettare le misure a indicazione dell'ordine di grandezza in gioco: queste sembrano essere nel range di qualche becquerel per litro nei punti di raccolta utilizzati.



Figura 6: PMT e analizzatore, Portable Radiation Monitor Pylon mod. AB-5.

2.5 Calibrazione e misure (Fraternali)

Gli studenti hanno svolto alcune esperienze allo scopo di prendere confidenza con l'uso della strumentazione e verificare alcune leggi fisiche da loro già incontrate nel corso degli studi. Dopo aver illustrato loro il principio di funzionamento di un microscopio e di uno spettroscopio ai tirocinanti è stato chiesto di eseguirne la taratura per poi effettuare alcune misure. Con il microscopio, hanno dapprima dovuto confrontare la scala impressa nell'oculare con una scala nota, incisa in un micrometro. Una volta tarata la scala, hanno misurato i diametri di alcune cellule contenute in appositi vetrini. Questo ha consentito di introdurre il concetto di risoluzione di uno strumento e di incertezza nella misura di una grandezza fisica. Con lo spettroscopio, costituito da un prisma ottico che disperde la luce, hanno potuto osservare le righe spettrali di una sorgente di vapori di mercurio, sovrapposte alla scala dello strumento che ne misurava le deviazioni angolari. Da questa osservazione, e da una tabella che riportava le lunghezze d'onda dello spettro del mercurio, hanno dovuto risolvere il problema di tarare lo strumento, correlando la posizione sulla scala angolare con un valore di lunghezza d'onda. In questo caso, a differenza di quanto avevano visto nella taratura del microscopio, la risposta dello strumento non è lineare, e occorre fare una curva di taratura mediante un grafico. Abbiamo dato loro un foglio di carta millimetrata, e con quello hanno cercato di capire come procedere all'operazione di taratura. Questo è servito anche come spunto didattico per illustrare l'esecuzione di un grafico che riporta la relazione tra dati di grandezze misurate. Una volta ottenuto il grafico di taratura, gli studenti l'hanno usato per misurare la lunghezza d'onda di alcune righe di una sorgente di vapori di sodio. Abbiamo inoltre proposto una esperienza con un apparato dotato di sensori di moto e di forza, che rende possibile la visualizzazione di moti sullo schermo di un computer. Gli studenti hanno studiato il moto di un oscillatore, realizzato con un carrello posto su una guida inclinata e vincolato a un estremo mediante una molla, il moto accelerato di un carrello che scende lungo una guida inclinata e il moto di un pendolo. Abbiamo chiesto loro di interpretare i fenomeni

osservati basandosi sulle conoscenze relative alle leggi del moto e di interpretare i risultati rispondendo a una serie di domande⁸. Un'altra esperienza consisteva nella verifica di alcune leggi di termodinamica quali la legge di Boyle e la legge che regola le trasformazioni adiabatiche di un gas perfetto. Mediante un cilindro pieno d'aria (approssimabile a un gas perfetto) dotato di un pistone, era possibile simulare una trasformazione isoterma eseguendo una compressione molto lenta e una adiabatica eseguendo una compressione molto rapida. Degli appositi sensori di temperatura, pressione e volume permettevano di visualizzare l'andamento delle tre grandezze termodinamiche durante le trasformazioni, e di disegnare i grafici che gli studenti avevano appreso nei libri di testo. In questo modo gli studenti hanno dovuto porsi in un atteggiamento di *ricerca* proprio dell'indagine sperimentale.

2.6 Introduzione agli strumenti (Baesso, Viviani, Vitulo)

La conoscenza della strumentazione presente in laboratorio è essenziale alla comprensione delle esperienze effettuate. Durante il tirocinio formativo sono stati utilizzati strumenti quali oscilloscopi (per l'osservazione dei segnali), generatori di tensione e di corrente (usati per fornire l'alimentazione agli strumenti), generatori di segnali (utili per generare segnali variabili nel tempo), rivelatori di particelle (scintillatori accoppiati a fotomoltiplicatori) e moduli elettronici (di tipo NIM: Nuclear Instrumentation Module). Gli studenti hanno appreso come creare dei segnali elettrici attraverso il generatore di segnali e come impostare le caratteristiche del segnale: ampiezza, periodo, frequenza, tipo di segnale, ecc... Il segnale è stato quindi visualizzato attraverso un oscilloscopio, dando la possibilità agli studenti di acquisire le necessarie competenze per poter selezionare il livello di trigger, la scala dei tempi e delle ampiezze e per poter utilizzare autonomamente le funzioni di base dello strumento. Sono quindi state illustrate le caratteristiche dei segnali NIM, descritti i moduli elettronici e le loro funzionalità.

2.7 Catene di acquisizione (Baesso, Viviani, Vitulo)

Un aspetto importante nell'attività di un laboratorio di fisica nucleare è l'acquisizione, la digitalizzazione e l'analisi dei segnali provenienti dai rivelatori di particelle. Ai tirocinanti è stata illustrata la differenza tra segnale analogico (proveniente direttamente dai rivelatori di particelle) e segnale digitale (formato da livelli logici) e le operazioni da compiere per poter analizzare e contare i segnali. In questo modo hanno appreso i concetti di soglia di discriminazione e di larghezza del segnale ed hanno regolato queste caratteristiche in modo da ottimizzare l'acquisizione. Hanno poi costruito una catena elettronica utilizzando moduli NIM quali discriminatori (utilizzati per la digitalizzazione del segnale), coincidenze (utilizzati come logica AND e OR) e contatori (per il conteggio dei segnali) utilizzandola quindi per contare il numero di particelle che attraversano un rivelatore. È stata sottolineata la necessità di utilizzare più segnali provenienti da diversi rivelatori per poter eliminare il rumore intrinseco e calcolata la probabilità di coincidenze casuali non causate da eventi reali. Attraverso brevi

⁸Per esempio: il periodo del sistema massa-molla dipende dall'ampiezza dello spostamento iniziale? E dalla massa? Cosa succede cambiando la massa del pendolo? Come si può misurare l'accelerazione di gravità con metodi diversi?

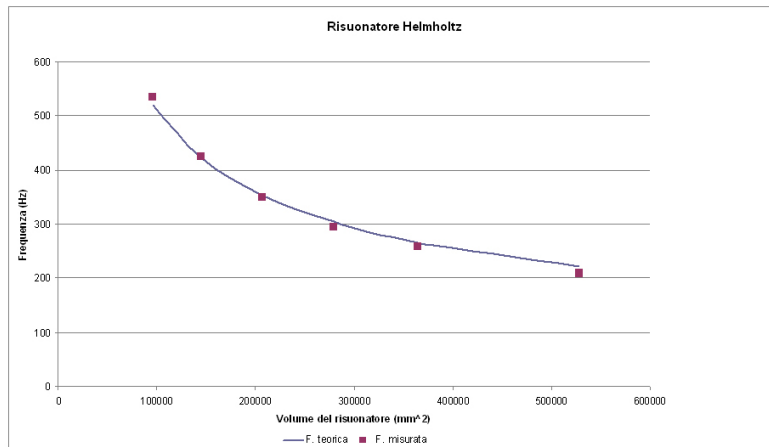


Figura 8: Relazione tra volume V della cavità risonante (nel nostro caso una bottiglia) e la frequenza f della nota emessa. I dati, ottenuti dagli studenti, sono confrontati con la curva teorica $f = A/\sqrt{V}$, dove A dipende dal risonatore.

prese dati gli studenti hanno infine individuato la presenza di una radiazione di fondo proveniente da tutte le direzioni ma il cui flusso aumenta in corrispondenza della verticale alla superficie terrestre. I tutor hanno così avuto modo di spiegare l'esistenza dei raggi cosmici, le loro caratteristiche e le particolarità di questa radiazione cosmica.

2.8 Risonatore di Helmholtz (Baesso)

Dopo un breve ripasso del concetto di onda sonora e dei suoi parametri fisici, gli studenti hanno imparato che far suonare una bottiglia vuota soffiandoci dentro può essere un buon modo per misurare la velocità del suono. Utilizzando l'oscilloscopio e un altoparlante riconvertito in microfono (indagando così anche sul funzionamento di questi oggetti apparentemente banali) e una bilancia di precisione hanno effettuato una serie di misurazioni volte a determinare il legame matematico tra frequenza del suono prodotto e volume di aria nella bottiglia, che veniva variato aggiungendo opportune quantità di acqua (Fig. 7). I dati ricavati sono stati confrontati con quelli previsti dalla legge di Helmholtz per il risonatore (Fig. 8).



Figura 7: Una delle fasi di misurazione della velocità del suono.

Successivamente, i dati ottenuti sono stati utilizzati per ottenere una stima della velocità del suono: dopo aver effettuato diverse misurazioni e aver tenuto conto degli errori, i ragazzi sono arrivati a determinare tale velocità con una precisione sufficiente per essere confrontata coi valori presenti sui libri di testo⁹, confermando così la bontà della loro misura. Nell'ultima parte dell'attività, gli studenti hanno avuto modo di utilizzare la scheda audio di un computer come stazione di acquisizione e analisi sonora, imparando a livello intuitivo il significato di *spettro* di un segnale (Fig. 9).

Hanno così avuto modo di vedere il significato di *timbro* sonoro, confrontando una stessa nota prodotta da strumenti diversi. Approfittando della familiarità di alcuni studenti con gli strumenti musicali, sono stati messi in risalto alcuni aspetti matematici della musica, come il rapporto tra frequenze di accordi consonanti, la costituzione della scala cromatica e l'andamento logaritmico di alcuni fenomeni acustici.

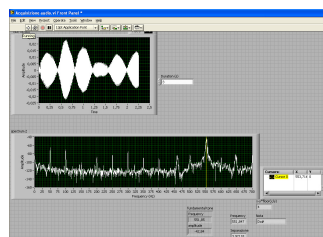


Figura 9: Pannello per l'analisi sonora. È visibile la forma d'onda registrata (sopra) e il relativo spettro di frequenze (sotto).

2.9 Plateau di efficienza di fotorivelatori (Tamborini)

È stato spiegato il funzionamento degli scintillatori plastici e dei fotomoltiplicatori (è stato mostrato un pezzo di materiale scintillante plastico e spiegato brevemente il processo di interazione tra particelle e scintillatore), mostrando agli studenti la costituzione interna di questi ultimi, utilizzando un fototubo precedentemente estratto dall'involucro esterno. L'esperienza consiste nella taratura dei fototubi, ovvero nella ricerca della tensione ottimale alla quale lavorano tali strumenti. La determinazione della tensione di lavoro è di fondamentale importanza per la buona riuscita di un esperimento. Dopo avere effettuato i collegamenti dei fototubi all'alta tensione si è costruita la catena elettronica per l'analisi del segnale (utilizzando moduli NIM) e si sono effettuate misure di conteggio della componente muonica dei raggi cosmici variando la tensione di alimentazione dei fototubi. Gli studenti hanno così costruito la curva dei conteggi in funzione dell'alta tensione utilizzando un foglio di calcolo di Excel (un esempio è mostrato in Fig. 10).

2.10 Coefficiente di attenuazione lineare per i fotoni nel piombo (Vitulo)

Sfruttando una sorgente di calibrazione in grado di emettere raggi gamma di energia nota, i tirocinanti hanno potuto verificare l'effetto di schermatura offerto da diversi materiali. I tirocinanti hanno allestito un sistema di scintillatori interfacciati a un calcolatore, in modo da poter misurare l'energia rilasciata nei

⁹Il gruppo A ha ottenuto $v = 330 \pm 17 \text{ m/s}$ mentre il gruppo B ha ottenuto $v = 337 \pm 10 \text{ m/s}$.

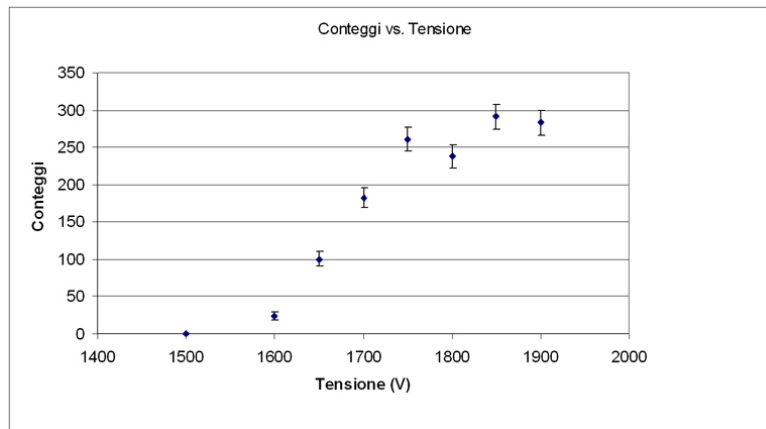


Figura 10: Andamento dell'efficienza di un fotorelevatore in funzione della tensione di alimentazione. Dati ricavati dagli studenti.

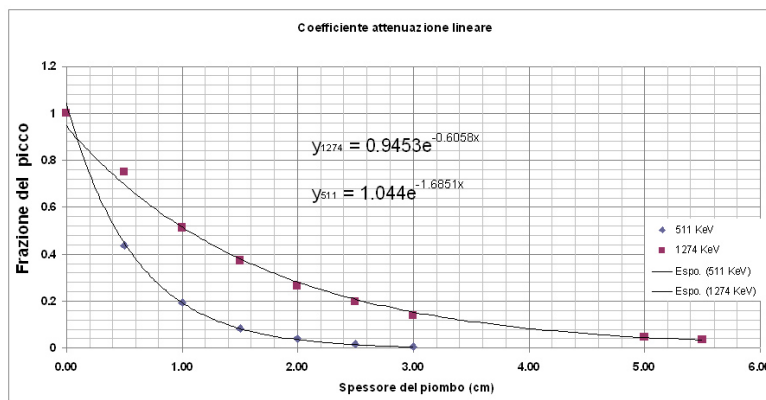


Figura 11: Grafico normalizzato del flusso di fotoni attraverso uno spessore x di piombo. Le due curve rappresentano fotoni di energia diversa.

rivelatori dalle radiazioni incidenti e il numero di fotoni incidenti in un certo periodo. Questo spettro di energia è stato misurato variando di volta in volta lo spessore di piombo interposto tra sorgente e scintillatori. Ai tirocinanti è stato dato il compito di raccogliere i dati e analizzarli. In questo modo hanno potuto verificare la legge di attenuazione esponenziale della radiazione e hanno misurato il coefficiente di assorbimento nel piombo per fotoni da 511 keV e da 1274 keV (Fig. 11). L'esperienza è stata usata come occasione per chiarire alcuni concetti fondamentali dei decadimenti radioattivi e della radioattività in generale.

2.11 Test di stress di materiali (Baesso)

In questa esperienza i tirocinanti hanno allestito un semplice apparato di test per verificare la deformazione di alcuni campioni di materiali sottoposti a stress

di trazione.

Impiegando dei sensori di forza e spostamento interfacciati a un computer appositamente configurato, hanno verificato la legge di elasticità dei materiali in esame, ricavando per ciascuno di essi il modulo di Young (Fig. 12). Tale valore è stato calcolato come pendenza della retta che interpola i dati nella zona di linearità. Procedendo con l'esperimento si è verificata la presenza di una zona di allungamento anomalo, indice che il materiale ha raggiunto il limite di carico e che è prossimo alla rottura. Gli studenti stessi hanno tratto diverse importanti conclusioni sulle caratteristiche di comportamento dei materiali plastici e sull'effetto che alcuni trattamenti termici, come la tempra, possono avere sui metalli.

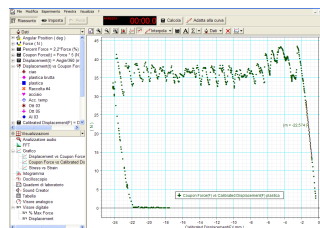


Figura 12: Esempio di dati ricavati per lo stress di un campione di plastica. Nella zona lineare è stato calcolato il modulo di Young.

2.12 Cenni di elettronica e filtri RC-CR (Baesso, Viviani)

Nonostante gli studenti non avessero ancora affrontato il programma scolastico di elettromagnetismo, sono stati invitati a studiare un semplice circuito costituito da condensatori e resistenze per verificare in quale modo tale circuito potesse influenzare un segnale elettrico sinusoidale. La prima parte dell'esercitazione è stata dedicata a una breve introduzione dei concetti di resistenza e capacità e all'utilizzo dei numeri complessi per risolvere semplici problemi di natura elettrica. In seguito sono stati invitati a realizzare un sistema costituito da generatore di segnale, filtro RC (e in seguito CR) e oscilloscopio. Raccogliendo il valore di tensione in uscita dal filtro e confrontandolo con quello in ingresso al variare della frequenza, hanno avuto modo di verificare come un circuito elettrico possa essere utilizzato per rimuovere disturbi e tensioni indesiderate oppure per selezionare particolari intervalli di frequenze, come nel caso dei sintonizzatori radio.

La Fig. 13 mostra uno dei diagrammi di Bode ottenuto dai tirocinanti. Da tale diagramma hanno ricavato la frequenza di taglio f_c che è stata poi confrontata con quella calcolata dai componenti ottenendo un valore accurato al 12 %¹⁰.

2.13 Riflettometria (Viviani)

Durante l'esperienza di riflettometria sono stati analizzati gli aspetti riguardanti il trasferimento dei segnali elettrici lungo una linea di trasmissione. Particolare risalto è stato dato al differente comportamento di un segnale trasmesso in una linea che presenti anomalie, come interruzioni o cortocircuiti, in rapporto ad uno trasmesso in una linea correttamente terminata. Attraverso l'utilizzo dell'oscilloscopio si è quindi verificata la possibilità di misurare la distanza alla quale è presente l'anomalia utilizzando la distanza temporale tra l'invio del segnale e la sua riflessione, analizzando anche le differenze tra queste due situazioni. Dopo

¹⁰Si consideri che i normali componenti elettronici hanno una tolleranza del 10 % sul valore nominale.

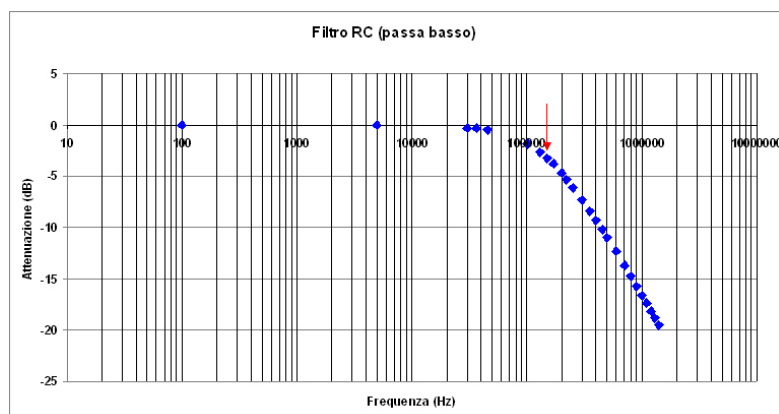


Figura 13: Andamento dell'attenuazione in funzione della frequenza per un circuito RC. La freccia rossa indica la frequenza di taglio ottenuta graficamente $f_c \approx 140\text{kHz}$

aver spiegato il metodo statistico della correlazione gli studenti hanno quindi controllato la possibilità di rivelare la presenza di piccoli fori o distorsioni del cavo segnale non individuabili direttamente.

2.14 Visita al L.E.N.A.

I tirocinanti sono stati accompagnati al Laboratorio di Energia Nucleare Applicata (LENA) dove hanno assistito a un seminario relativo al funzionamento e alla tipologia del reattore nucleare in funzione presso la struttura. Sono state inoltre illustrate alcune delle finalità scientifiche di un reattore il cui scopo primario non sia la produzione di energia. Una volta terminato il seminario, e dopo aver elencato loro le norme fondamentali di radioprotezione, ai tirocinanti è stata data la possibilità di porre domande e dubbi, lasciando loro ampio spazio per la discussione. In seguito sono stati accompagnati nella sala di controllo, dove hanno assistito a una breve spiegazione delle principali apparecchiature in uso e della loro funzione. La visita è proseguita con una breve passeggiata in cima al reattore stesso, dove gli studenti hanno avuto modo di osservare di persona il suggestivo fenomeno della radiazione Cherenkov, caratterizzato da un tenue bagliore blu nell'acqua di raffreddamento.

2.15 Boron Neutron Capture Therapy (Bortolussi, Gadan, Altieri)

La Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) è un tipico esempio di ricerca multidisciplinare, in quanto coinvolge fisici, medici, biologi, chimici e ingegneri. In questo senso abbiamo ritenuto che fosse particolarmente interessante, per gli studenti, vedere come si possano coniugare diversi ambiti scientifici per un'applicazione medica. La ricerca sulla BNCT a Pavia sfrutta il reattore TRIGA Mark II come sorgente neutronica. Il seminario ha fornito una presentazione generale su cosa sia la BNCT, perché venga considerata una valida alternativa di trattamento medico e quali siano gli strumenti richiesti per poterla applicare. Il seminario ha inoltre toccato i vari aspetti della BNCT a Pavia, soprattutto

l'applicazione clinica avvenuta negli anni 2001 e 2003 quando è stato effettuato l'irraggiamento del fegato espianato di due pazienti. Gli studenti hanno dimostrato interesse e hanno posto domande pertinenti alla fine del seminario.

2.16 Neutronigrafia (Bortolussi, Gadan, Altieri)

Collegandosi alle spiegazioni fornite durante il seminario sulla BNCT, agli studenti è stata proposta un'attività per illustrare la neutronigrafia.

Gli studenti sono stati divisi in due gruppi e accompagnati al LENA, è stato mostrato loro come si sviluppa una pellicola neutronigrafica. La neutronigrafia è una fase molto importante del lavoro di ricerca in BNCT, essendo una tecnica per visualizzare e misurare la distribuzione di boro nei campioni biologici. A Pavia viene usata come metodo di ricostruzione di immagini: fettine sottili di tessuto trattate con boro sono depositate su film sensibili alla radiazione carica e irraggiate nel reattore. Le particelle cariche uscenti nell'interazione dei neutroni con il boro presente nei tessuti lasciano tracce latenti nel film. Un adeguato processo di sviluppo permette di rendere visibili tali tracce creando una vera e propria fotografia della distribuzione del boro.

Confrontando tali immagini con immagini istologiche di fettine contigue a quelle irraggiate si può verificare se un tessuto ha assorbito più boro rispetto ai tessuti adiacenti¹¹. Ai tirocinanti è stato presentato il metodo di lavoro e alcune immagini già sviluppate, in modo che fosse chiaro quale fosse il risultato finale. Gli studenti hanno assistito allo sviluppo di alcuni campioni che erano stati precedentemente preparati ed irraggiati e in seguito hanno assistito alla preparazione dei film. Infine, dopo l'estrazione del campione, hanno assistito all'asciugatura e hanno osservato il risultato a occhio nudo e al microscopio, confrontando quindi una serie di immagini neutronigrafiche accoppiate con i relativi vetrini istologici (Fig. 14). Riteniamo che le attività proposte abbiano risvegliato interesse negli studenti, soprattutto perché così sono venuti a conoscenza di applicazioni meno note della fisica nucleare, dedicate allo studio di problemi che interessano gran parte della società.

2.17 Generatore di Van de Graaff (Tamborini)

Il generatore di Van de Graaff è una macchina elettrostatica in grado di accumulare su una sfera di materiale conduttore una quantità elevata di cariche elettriche tale da raggiungere tensioni dell'ordine di 10^6 V. Agli studenti è stato

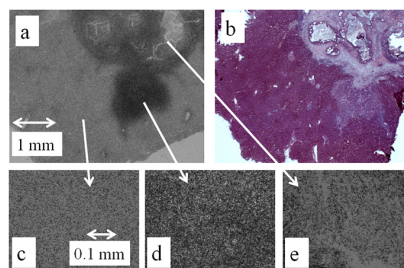


Figura 14: Esempio di neutronigrafia (a) e preparazione istologica (b) di due fettine di tessuto tagliate in successione. I riquadri (c) (d) ed (e) mostrano in dettaglio la diversa densità di tracce ottenuta nelle aree occupate da tessuto sano, tumore attivo e necrosi. L'immagine (a) dimostra come sia possibile ottenere immagini della distribuzione di boro che ricalcano la morfologia del tessuto, provando così l'assorbimento selettivo del boro nel tumore.

¹¹Evidenziando quindi la presenza di massa tumorale.

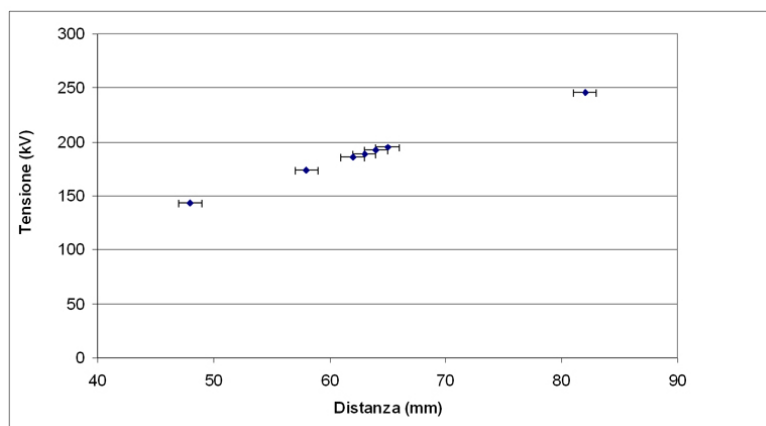


Figura 15: Stima della tensione agli elettrodi del generatore al variare della distanza tra essi (assumendo nota la rigidità dell'aria).

mostrato il principio fisico su cui si basa il generatore e sono state effettuate alcune dimostrazioni qualitative di fenomeni elettrostatici. In particolare è stato mostrato loro il processo di generazione di scintille attraverso l'avvicinamento al generatore di un conduttore collegato a terra. Agli studenti è stato mostrato il fenomeno della rottura di un dielettrico (che nel nostro caso è l'aria) e della scintilla che si verifica di conseguenza. In seguito è stato accennato il meccanismo responsabile dell'effetto punta attraverso l'utilizzo di una girandola metallica dotata di punte e posta su perno conduttore. Gli studenti sono stati invitati a proporre le loro spiegazioni in merito al fenomeno fisico di rotazione della girandola senza presenza di forze evidenti. Utilizzando dei tubi al neon, ai tirocinanti è stato descritto il processo di ionizzazione e si è accennato brevemente ai fenomeni di eccitazione/diseccitazione delle molecole di gas. È stato mostrato che la lampada si accende se posta nel campo elettrico del generatore. Per mostrare il concetto di superfici equipotenziali gli studenti sono stati invitati a toccare il generatore rimanendo in piedi su un blocco isolante di legno, verificando così che impedendo il passaggio alla corrente si evita anche la dispersione delle cariche. In seguito, utilizzando dei pezzi di fogli di alluminio e del filo di nylon, sono stati illustrati i concetti di linee di campo e di forza Coulombiana, mostrando che i pezzetti tendono ad allinearsi secondo linee perpendicolari alla superficie del conduttore e a disporsi in modo da massimizzare la distanza dagli altri pezzi di alluminio. È stata poi effettuato la misura della tensione accumulata sul generatore, attraverso la conoscenza della costante dielettrica dell'aria e la misura della distanza limite, tra generatore e conduttore metallico, dopo la quale scocca la scintilla tra di essi (Fig. 15).

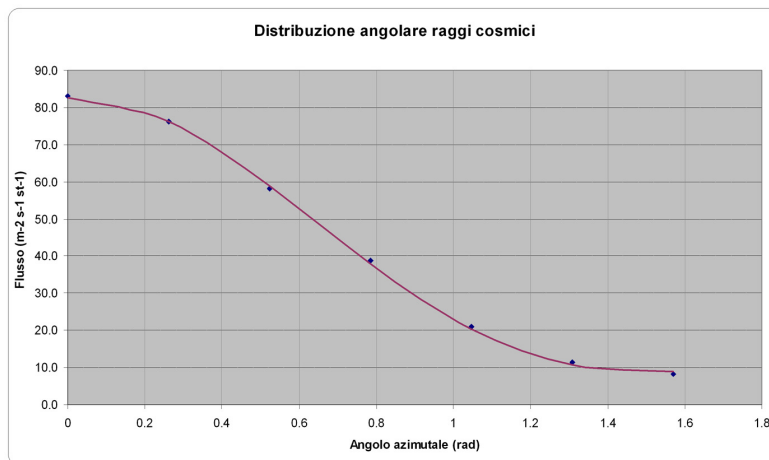


Figura 17: Flusso dei raggi cosmici in funzione dell'angolo azimutale θ . La curva descritta è del tipo $F(\theta) = A * \cos^n(\theta) + k$, dove n è un coefficiente che varia tra 2 e 3,5. Gli studenti hanno determinato un valore di 2,7.

2.18 Distribuzione angolare dei raggi cosmici (Vitulo)

Ormai ben consci della presenza di *raggi cosmici* (cfr. 2.7) agli studenti è stato proposto di misurare come varia il flusso di questa radiazione in funzione dell'angolo azimutale.

Questa misura, di notevole interesse da un punto di vista delle implicazioni fisiche, è stata effettuata utilizzando un sistema di tre scintillatori disposti a telescopio e montati su un supporto in grado di ruotare attorno all'asse trasversale (Fig. 16). In funzione di ogni posizione angolare (tra 0° e 90° in passi da 15°) è stata effettuata una misura del flusso di raggi cosmici. Tale misura è stata poi corretta utilizzando le nozioni di angolo solido, preventivamente discusse col tutor. Di particolare interesse per questa misura è la determinazione del coefficiente n (si veda Fig. 17). I tirocinanti hanno determinato tale valore ricorrendo a metodi di interpolazione e minimizzazione dell'errore.



Figura 16: Foto del telescopio di rivelatori.

2.19 Razzi ad acqua (Baesso, Viviani, Vitulo, Tamborini)

In corrispondenza dell'ultimo giorno di tirocinio abbiamo voluto realizzare un'esperienza che servisse da *gran finale* e che coinvolgesse entrambi i gruppi.

Partendo da una spiegazione di alcuni concetti fondamentali di dinamica, moto del proiettile e aerodinamica, gli studenti sono stati invitati a realizzare il proprio razzo ad acqua e a testarlo in una gara di volo (Fig. 18). Il lavoro di gruppo è stato affiancato a discussioni coi tutor sui motivi fisici delle scelte effettuate. Ogni razzo è stato poi testato più volte, per vedere come le modifiche apportate influissero sulla traiettoria di volo e sulla stabilità.

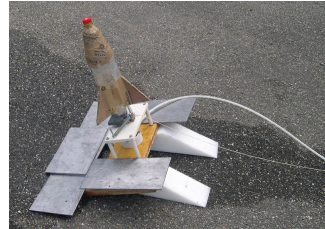


Figura 18: Il razzo A, immortalato poco prima del lancio che ne ha decretato la vittoria: ha volato per oltre 8 secondi prima che se ne perdessero le tracce sul tetto del laboratorio.

3 Conclusioni

Durante i primi giorni del tirocinio a ogni partecipante è stato sottoposto un questionario di valutazione. Tale questionario, assolutamente anonimo, è stato pensato per fornire agli organizzatori una base da cui partire per migliorare le esperienze proposte e la modalità di lavoro. Gli studenti sono stati invitati a riconsegnare il questionario alla fine delle due settimane e di seguito viene fornito un resoconto delle risposte.

Domanda	Voto				
	1	2	3	4	5
1- Il tirocinio ha realizzato le tue aspettative?	-	-	3	1	6
2- Come ne valuti l'organizzazione?	-	-	-	6	4
3- In relazione alle tue conoscenze, il tirocinio ti ha causato difficoltà?*	3	1	4	2	-
4- Come valuteresti il livello di interesse delle attività e dei contenuti proposti?	-	-	1	4	5
5- Come valuteresti il livello di utilità delle attività e dei contenuti?	-	-	1	4	5
6- Credi che tecnologie e materiali impiegati fossero adeguati ai fini delle attività?	-	-	3	3	4
7- Come valuteresti la competenza dei tutor?	-	-	-	-	10
8- Come valuteresti la disponibilità dei tutor?	-	-	-	-	10
9- Esprimi un giudizio complessivo di soddisfazione	-	-	-	4	6

Tabella 2: Riepilogo risultati dei questionari. Per ogni domanda, 1 corrisponde al voto peggiore, 5 al massimo grado di soddisfazione.

*Si noti che per la domanda 3, il voto 1 corrisponde a "nessuna difficoltà" mentre 5 significa "molte difficoltà".

Si può notare come i dieci questionari riportino giudizi generalmente positivi. Riteniamo che questo fatto, unito ai commenti degli studenti raccolti durante le

due settimane, sia indicativo di un buon grado di soddisfazione dei tirocinanti. La modalità anonima di raccolta dei questionari, effettuata lasciando che gli studenti decidessero se e quando imbucare i fogli in un apposito raccoglitore, non ci ha consentito di verificare che tutti i questionari fossero restituiti. Per questa ragione solo 10 dei 12 tirocinanti hanno risposto alla valutazione.