

I raggi cosmici

Un percorso didattico
per vedere l'invisibile

a cura di **Maria Giuseppina Liber**

ideatore e coordinatore
del progetto **Vittorio Napoli**

© Editore Provincia Autonoma di Trento - IPRASE del Trentino
Tutti i diritti riservati

Prima pubblicazione settembre 2007

Stampa: Centro Duplicazioni della Provincia Autonoma di Trento

I raggi cosmici
Un percorso didattico per vedere l'invisibile

a cura di Maria Giuseppina Liber
ideatore e coordinatore del progetto Vittorio Napoli

p. 96; cm 297
ISBN 978-88-7702-199-1

In copertina particolare dell'immagine a p. 10

Gruppo di lavoro di ricerca didattica

Lorenzo Bonfatti,¹ Maria Giuseppina Liber,² Fabrizio Logiurato,³ Vittorio Napoli,³ Antonia Romano.⁶

Gruppo di lavoro di consulenza scientifica

Luigino Bazzanella,⁴ Lorenzo Bonfatti,¹ Andrea Cristofori,⁴ Silvia Defrancesco,³ Luigi Maria Gratton,³ Fabrizio Logiurato,³ Vittorio Napoli,³ Elena Pizzinini.⁵

¹ Istituto Istruzione Superiore Floriani Riva del Garda.

² Responsabile metodologico del progetto.

³ Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche, Università degli Studi di Trento.

⁴ Liceo Scientifico "G. Galilei" Trento.

⁵ Liceo Scientifico "L. da Vinci" Trento.

⁶ IPRASE del Trentino.

INDICE

Premessa	A. Romano	5
Presentazione	M. G. Liber	7
Prologo	V. Napoli	9

PRIMA PARTE: LA PROPOSTA DIDATTICA

Capitolo 1

Il progetto in sintesi

L. Bonfatti, M. Liber, F. Logiurato, V. Napoli		13
1.1. Motivazione		13
1.2. Classe in cui si intende realizzarlo		13
1.3. Struttura del percorso e tempi		14
1.4. Risultati attesi		14
1.5. Discipline coinvolte		14
1.6. Metodologia		15
1.7. Tappe del percorso di insegnamento-apprendimento		15
1.8. Referente		17

Capitolo 2

I contenuti del progetto: indicazioni operative e materiali didattici

L. Bonfatti, M. Liber, F. Logiurato, V. Napoli		19
Il problema: vedere l'invisibile		19
2.1. Che cosa sai?		20
2.2. Una proposta di lavoro		22
2.3. Devi sapere che... Lezioni in laboratorio I		23
2.3.1. Radiazioni e Luce		23
2.3.2. La descrizione delle particelle: onda o corpuscolo?		25
2.4. Restringiamo il campo di indagine... Lezioni in laboratorio II		27
2.4.1. La camera a nebbia		27
2.4.2. Rivelatori di raggi cosmici		28
2.5. Approfondiamo		30
2.6. Prova anche tu...		31
2.7. Comunica il sapere		32
2.8. Che cosa abbiamo fatto e perché		32
2.9. Verifica sommativa		33

SECONDA PARTE: GLI APPROFONDIMENTI

Capitolo 3

Materiale didattico allegato

F. Logiurato, V. Napoli	37
3.1. I raggi cosmici: storia di un enigma lungo un secolo (<i>approfondimento teorico</i>)	37
3.2. Esperimenti di spettroscopia (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	43
3.3. Descrizione delle particelle: onde o corpuscoli? (<i>approfondimento teorico</i>)	45
3.4. Visualizzazione 3D del cammino della luce (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	57
3.5. Il fotomoltiplicatore (<i>approfondimento teorico</i>)	58
3.6. La camera a nebbia (<i>approfondimento teorico</i>)	61
3.7. Esperimenti sulla condensazione del vapor acqueo (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	72
3.8. Allestimento della camera a nebbia (camera di Langsdorf) (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	75
3.9. L'elettroscopio di Wulf (<i>approfondimento teorico</i>)	79
3.10. Il contatore Geiger (<i>approfondimento teorico</i>)	81
3.11. La camera a scintilla (<i>approfondimento teorico</i>)	83
3.12. Esperimenti di scarica nei gas (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	85
3.13. Costruzione di una semplice camera a scintilla (spark-chamber) (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	86
3.14. Il rivelatore Čerenkov (<i>approfondimento teorico</i>)	88
3.15. Il rivelatore di muoni a luce Čerenkov (Esperimento Kamiokande) (<i>appuntamento in laboratorio</i>)	94

Premessa

La proposta didattica illustrata in questo volume nasce dalla necessità di affrontare l'insegnamento delle scienze nelle scuole superiori dedicando un'attenzione particolare alla fisica delle particelle, una parte del programma che può essere molto coinvolgente, sia perché si tratta di un insieme di argomenti di cui si sente parlare o si legge spesso, sia perché l'"invisibile" ha sempre suscitato negli uomini il fascino del mistero, la curiosità della scoperta, il desiderio di vedere oltre i propri occhi.

Il testo è articolato in due sezioni: la prima parte illustra l'attività didattica proponendone tempi e modalità, nella seconda sono raccolti spunti di approfondimento e proposte di laboratorio. Il tutto arricchito da riferimenti a testi ed articoli da proporre come spunti per impostare ricerche e discussioni con l'aiuto di materiale che si può scaricare dal sito: http://www.iprase.tn.it/prodotti/materiali_di_lavoro/fisica/index.asp

La discussione rappresenta il punto di forza del modulo didattico, in cui la condivisione delle riflessioni, dei dubbi, delle conclusioni alle quali si giunge è considerata condizione necessaria per un apprendimento efficace da realizzare attraverso processi di costruzione attiva di saperi.

Antonia Romano
IPRASE del Trentino

Presentazione

La realizzazione di questo progetto, voluto e sostenuto dall'IPRASE, evidenzia la scelta strategica che lo ha ispirato e le ipotesi che ne hanno orientato lo sviluppo: da una parte la consapevolezza dell'importanza che hanno le discipline scientifiche nel panorama formativo oggi, e della necessità di potenziarne la ricerca didattica a tutti i livelli; dall'altra il riferimento costante e deliberato ad un preciso modello di professionalità docente: quello che realizza, con una felice sintesi di obiettivi, contenuti e metodi, *una mediazione culturale* fra il mondo della ricerca e il mondo della formazione.

Da un lato, infatti, il docente è "esperto" della disciplina, nel senso che ne conosce i linguaggi, i metodi, le teorie, gli strumenti, i problemi, è in grado di collocarla nel panorama culturale più ampio degli altri saperi e di riconoscerla come uno strumento prezioso per costruire modelli interpretativi e conoscitivi della realtà che indaga. In questo senso conosce la disciplina come *oggetto culturale*, che nasce, si sviluppa e si innesta nel mondo della ricerca scientifica.

Ma contemporaneamente si pone *in dialogo con lo studente*, cioè con un soggetto che cerca nella istruzione e nella formazione un ambiente in cui entrare in contatto con i saperi per comprenderli, elaborarli, dare loro un significato in vista della costruzione della propria identità e della acquisizione di strumenti adeguati per la futura crescita umana e professionale. Per questo importante obiettivo il docente usa la disciplina come *strumento formativo*, e la scompone e la ricomponne finalizzandola all'apprendimento, nella consapevolezza della complessità dei processi che deve sostenere e modulare: sul piano strettamente cognitivo, su quello operativo e su quello relazionale. Di fronte alle grosse sfide della società complessa e in rapido cambiamento, egli non può che porsi nell'ottica del *professionista riflessivo*, che, da un lato, si confronta con la ricerca a tutti i livelli, sul piano scientifico culturale e sul piano didattico e formativo, dall'altro trova nella verifica della pratica didattica i criteri di validazione o di falsificazione dei modelli scelti, muovendosi così secondo la prassi della ricerca - azione .

In questa proposta didattica si ritrova la duplice valenza del sapere, inteso sia come *oggetto scientifico* sia come *strumento di formazione*. Come oggetto scientifico, la tematica dei raggi cosmici è stata affrontata da un gruppo di ricerca che ha visto impegnati operatori della scuola superiore e docenti della facoltà di fisica dell'Università di Trento. Essi hanno messo a fuoco una tematica che normalmente viene solo sfiorata dai programmi tradizionali, ma che sta diventando sempre più significativa sia sul piano teorico che su quello delle applicazioni tecnologiche. Il gruppo ha quindi fatto una proposta per quanto riguarda l'adeguamento del curriculum di fisica ai risultati della ricerca in questo campo: ha individuato fenomeni, teorie, tecniche di laboratorio e applicazioni stimolanti per avvicinare gli studenti al "mondo dell'invisibile". Un gruppo più ristretto si è occupato della disciplina come strumento formativo ed ha costruito un percorso attento alla dimensione dell'apprendimento, riferendosi come ipotesi di lavoro alle teorie costruttiviste della conoscenza. Dall'in-

tegrazione di questi due approcci è nato questo modulo didattico, che proponiamo alla scuola trentina perché ne faccia oggetto di sperimentazione e ne renda operative le valenze culturali e formative che sicuramente contiene.

Le logiche e le motivazioni delle scelte fatte sono più esplicitamente declinate durante il percorso che viene qui proposto, e le schede illustrative di ogni tappa vogliono essere una chiave di lettura delle strategie adottate, oltre che una guida operativa per il docente.

Vale la pena sottolineare che le attività didattiche si muovono su più linee parallele e fra loro coerenti: quella attenta ai contenuti di conoscenza, quella centrata sul metodo con cui la scienza si muove e propone le sue risposte, quella infine, e non ultima, attenta a modulare apprendimenti significativi. Di qui l'attenzione alla conoscenza implicita, tacita, il più delle volte ingenua, che il soggetto possiede rispetto a temi e problemi di carattere scientifico, specialmente quando, come in questo caso, non ne fa esperienza direttamente con i sensi. Di qui un percorso che accompagna la mente gradualmente all'esplorazione di fenomeni nuovi, alla ricerca di una spiegazione coerente, alla verifica sperimentale delle ipotesi, alla scoperta delle molteplici, affascinanti applicazioni delle teorie, alla riflessione sul metodo e sui suoi risultati. Così si alternano momenti esplorativi a momenti di informazioni strutturate e di laboratorio, ma anche lavori di gruppo che aprono spazi di riflessione e di confronto, per alimentare una ricerca rispetto a un ambito di fenomeni di grande complessità.

Ci sembra che una sequenza didattica così pensata risponda agli obiettivi specifici di ogni insegnamento scientifico, almeno se si conviene che fare scienza è educare a:

- confrontare i propri schemi di pensiero, desunti dal senso comune, con quelli dell'esperienza scientificamente fondata;
- costruire un sistema coerente di concetti, di teorie, di linguaggi, di problemi aperti;
- riconoscere e praticare le procedure del metodo scientifico e riconoscerne la specificità e la validità;
- gestire il "conflitto cognitivo" che nasce dall'assunzione di un problema, per la distanza che si avverte fra il già dato e l'imprevisto: apprendere a fare ipotesi, a confutarle o validarle, a recuperare l'errore, ad accettare l'incertezza;
- rinforzare e sostenere atteggiamenti e comportamenti improntati a curiosità, fiducia, confronto e collaborazione;
- individuare i problemi che nascono nel rapporto scienza – natura – società.

Un ringraziamento particolare ai colleghi del gruppo didattico, coi quali la mia collaborazione è stata più stretta e più stimolante e in particolare al dott. Vittorio Napoli, ideatore e coordinatore del progetto, per la disponibilità e l'entusiasmo con le quali ha portato a buon fine questa avventura.

Maria Giuseppina Liber
Responsabile metodologica del progetto

Prologo

Come tutte le storie, c'è una genesi. Posso collocarla, senza ombra di dubbio, nel giorno in cui il professore di Fisica 1¹ (primo anno di Università, corso di laurea in Astronomia, Università di Padova), tra una formula di Meccanica e l'altra, ci parlò dei suoi esperimenti sui raggi cosmici presso il laboratorio, in quota, sulla Marmolada. Al quarto anno (nel frattempo ero passato a Fisica) ci venne data la possibilità, come studenti del corso di Laboratorio di Fisica, di proporre un esperimento a piacere. Avremmo potuto progettarlo, assemblarlo e svolgere delle misure: il tutto con le nostre mani (e il nostro cervello!).

Lanciai la proposta di rivelare e misurare il flusso dei raggi cosmici che ogni giorno (e ogni notte) ci investe "incessantemente". In tre² mettemmo letteralmente "in piedi" una struttura "a scaffale" che ospitava quattro scintillatori plastici in coincidenza, contornati da cavi, generatori di tensione, circuiti elettronici, display. Sembrava un vero laboratorio di ricerca e noi che giocavamo a fare gli scienziati, finalmente! Non avevamo mai studiato i raggi cosmici nello specifico, né teoricamente, né sperimentalmente e la nostra relazione di Laboratorio (che ci impegnò "sensibilmente" per più di un anno) assunse tutti i caratteri di una tesi di laurea.

La nostra soddisfazione fu quella di riuscire a costruire da soli lo strumento di ricerca, di "osservare" i raggi cosmici, contarli e farci anche qualche esperimento "classico". Tutto questo circa 25 anni fa.

Oggi si parla ancora di raggi cosmici e questo percorso didattico indica anche il perché è importante parlarne ancora.

Vittorio Napoli

Ideatore e coordinatore del progetto

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento per il sostegno e i consigli a Lorenzo Biondani, Franco Buratti, Beniamino Danese, Riccardo Dezulian, Stefano Oss, Ernesto Passante, Sandro Pedrotti, Paolo Pendenza, Leonardo Ricci, Claudio Salomon, Luigi Sansoni.

¹ Prof. Claudio Manduchi, al quale va tutta la mia riconoscenza e ammirazione per aver saputo destare la curiosità sui raggi cosmici, e non solo.

² Oltre al sottoscritto, il "gruppo raggi comici" era formato da Lucio Saggese e Andrea Dall'Osso.

*“Il vero viaggio di scoperta
non è cercare nuove terre,
ma avere nuovi occhi”.*
Marcel Proust (1871-1922)



Un ciottolo su un tronco lungo una spiaggia (Sicilia - costa nord).

*Nuovi occhi per osservare la Natura e i fenomeni che contiene.
Nuovi occhi per “vederci chiaro” anche nei dibattiti e nelle decisioni in cui, come cittadini, siamo e saremo coinvolti in prima persona. “Vederci chiaro” al lume del metodo scientifico che, se non può dare risposte assolute e durature, può mettere in guardia da abbagli, truffe e manipolazioni.*

Prima parte

La proposta didattica

Capitolo 1 Il progetto in sintesi

1.1. MOTIVAZIONE

Questo lavoro è una proposta di percorso tematico da inserire nei programmi di fisica delle scuole secondarie di II grado. L'argomento che viene affrontato, i raggi cosmici, è interessante per molti motivi. Innanzitutto, i raggi cosmici fanno parte di quella fisica del secolo appena passato, con importanti sviluppi ancora in atto, che nella maggior parte dei casi non viene affrontata nelle classi. La sua analisi ha segnato passi fondamentali nel progresso della fisica, si pensi ad esempio alla scoperta dell'antimateria o del muone, la prima nuova particella oltre il protone, il neutrone e l'elettrone. Ma ancora oggi i raggi cosmici rappresentano uno strumento importante per la scienza, come nella ricerca di stati esotici della materia, per esempio di nuove particelle non ancora rivelate con gli acceleratori e forse troppo pesanti per essere mai prodotte con essi, o nel verificare le teorie dell'evoluzione delle stelle, delle galassie e dello stesso universo.

In secondo luogo, il percorso che qui proponiamo non necessita di conoscenze matematiche avanzate, ed è quindi accessibile alla maggior parte degli studenti. La maggior parte degli esperimenti sono estremamente semplici e realizzati con materiali facilmente reperibili. Gli stessi studenti, guidati dagli insegnanti, potranno essere personalmente partecipi di quel metodo sperimentale che è alla base del lavoro scientifico.

Elemento qualificante del progetto è infine la sua capacità di approntare un ambiente di apprendimento che guidi studenti ed insegnanti ad un approccio al sapere scientifico inteso come approfondimento culturale e non solo come studio strettamente disciplinare.

L'esplorazione teorico-sperimentale del tema trattato è frutto del lavoro d'equipe di un gruppo di docenti e di tecnici di scuola superiore, di dottorandi, di ricercatori e di professori universitari che hanno prodotto il materiale tecnico di consultazione che sta alla base del presente progetto.

1.2. CLASSE IN CUI SI INTENDE REALIZZARLO

Considerati i concetti fisici trattati, il progetto è preferibilmente rivolto ad una classe del quinto anno di Scuola Secondaria di II grado.

1.3. STRUTTURA DEL PERCORSO E TEMPI

Il percorso presenta margini di flessibilità:

- le prime cinque fasi sono pensate come attività irrinunciabili, destinate a tutta la classe;
- la fase n. 6 prevede approfondimenti differenziati, da affidare a sottogruppi sulla base degli interessi prevalenti, con un lavoro svolto prevalentemente a casa o in attività pomeridiane extracurricolari che i singoli allievi possono finalizzare al percorso individuale che caratterizza l'esame di maturità.
- le fasi n. 7 ed 8 concludono il percorso recuperando il lavoro dei gruppi.

Il tempo necessario per lo sviluppo del modulo completo è di circa 15 ore.

1.4. RISULTATI ATTESI

Durante il percorso didattico si attivano le condizioni perché gli allievi:

- apprendano i fondamenti della fisica dei raggi cosmici, le loro proprietà basilari, i problemi aperti e lo stato delle conoscenze nel settore, le applicazioni tecnologiche;
- comprendano meglio il ruolo dei modelli nella ricerca scientifica;
- vivano, ricostruendolo nell'esperienza di apprendimento, il percorso tipico della ricerca scientifica: dal problema alle ipotesi, alla raccolta dati, alla verifica sperimentale, alla interpretazione dei risultati fino al riconoscimento del modello esplicativo;
- riconoscano il valore delle teorie scientifiche e la loro valenza sociale e culturale, in particolare riguardo alla possibilità di distinguere tra scienza e pseudoscienza;
- documentino i risultati del proprio apprendimento.

1.5. DISCIPLINE COINVOLTE

Fisica, filosofia, chimica, geografia astronomica, biologia, scienze (ove presenti nel curriculum).

In base alla disponibilità di tempi e strumenti, i docenti potranno sviluppare le attività del presente percorso distribuendole sulle diverse materie con eventuali compresenze. Ad esempio, i raggi cosmici sono presenti in cosmologia, geofisica, fisica nucleare, archeologia, nella datazione dei sedimenti marini, (considerando le mutazioni genetiche indotte dalle interazioni dei raggi cosmici) nella biofisica, inoltre offrono l'occasione di interessanti riflessioni filosofiche sugli interrogativi sollevati dal dualismo onda-corpuscolo, dalla teoria dei quanti e dai modelli teorici della struttura della materia e della radiazione.

1.6. METODOLOGIA

Il percorso di insegnamento previsto in questo modulo si snoda attraverso le tappe necessarie per avviare e sostenere nell'allievo apprendimenti significativi, cioè stabili - perché consapevoli - e corretti - perché in sé coerenti e organizzati secondo i criteri della scientificità - e permettergli così di superare lo stadio delle conoscenze ingenuie, il più delle volte improprie, del sapere spontaneo. Questo processo richiede una attenzione continua da parte del docente perché da un lato sia rispettata e valorizzata la disciplina, in tutta l'ampiezza e la ricchezza delle sue dimensioni (cognitiva, operativa e di valori), dall'altra che siano correttamente modulati i processi di problem solving affinché assicurino i risultati voluti.

L'ampiezza del tema e la ricchezza dei suoi possibili sviluppi hanno suggerito di scomporre il percorso, tenendo conto dei vincoli di tempo e di risorse di una classe-tipo, in tre fasi: in una prima si acquisiscono i contenuti di base indispensabili, seguono poi momenti di approfondimento differenziati per aree di interesse, che si recuperano infine in un momento di sintesi e di raccordo.

1.7. TAPPE DEL PERCORSO DI INSEGNAMENTO-APPRENDIMENTO

Per quanto riguarda il percorso didattico, si è scelta la modalità dell'apprendimento guidato per problemi; le strategie messe in atto, gli strumenti e i tempi previsti sono pertanto strettamente finalizzati a far sì che l'allievo:

- prenda coscienza di una situazione problematica;
- formuli domande pertinenti;
- ricerchi risposte utili in ciò che è già noto;
- si avvalga di strumenti nuovi e di formulazione di ipotesi;
- correli i dati in funzione delle domande poste;
- controlli e verifichi le ipotesi;
- comunichi i risultati;
- generalizzi e applichi le nuove conoscenze a situazioni diverse e correlate;
- avvii un ipotetico nuovo percorso di indagine.

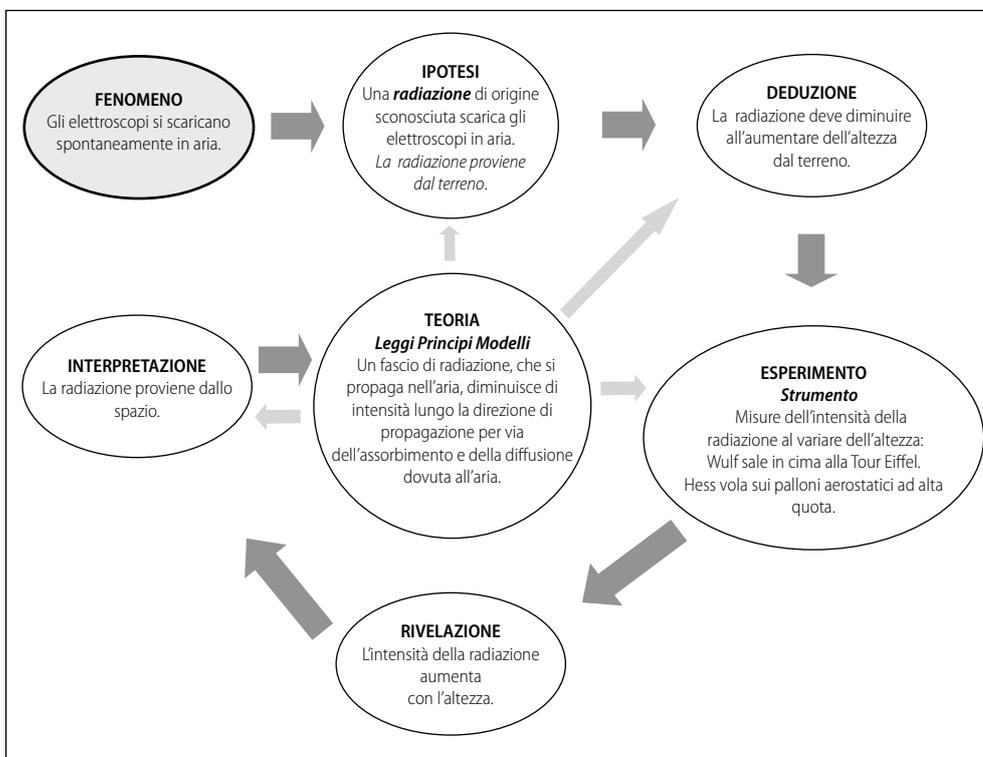
Nel caso del tema in esame la ricerca di nuovi dati dà spazio all'attività sperimentale tipica della fisica, che - a sua volta - ricorre ad un continuo riferimento a modelli teorici i quali aiutano a interpretare quelle tracce che l'invisibile lascia nella concretezza dell'esperienza.

Gli argomenti sono presentati in una prospettiva che ha cercato di tenere conto del contesto storico-sociale entro il quale è maturata la loro invenzione, nella consapevolezza che *“se la storia fosse considerata come qualcosa di più che un deposito di aneddoti o una cronologia, potrebbe produrre una trasformazione decisiva dell'immagine della scienza dalla quale siamo dominati”* (T. Khun). La scienza è così vista come un edificio che viene continuamente trasformato, nelle sue parti e a volte anche nelle

sua fundamenta. Esso non è una struttura finita per sempre. Come afferma Freeman Dyson “*Se una teoria è insegnata e imparata dogmaticamente così come avviene ora, senza considerare le sue origini, allora corre il pericolo di fossilizzarsi e di risultare alla fine di ostacolo a un progresso successivo*”. Il ricorso alla storia della scienza non è solo un espediente narrativo per raccontare aneddoti e attrarre l’attenzione degli studenti, ma è fondamentale per far maturare in essi quello spirito critico senza il quale non vi è continuo sviluppo scientifico.

Nella mappa che segue vi è un esempio dei concetti fondamentali, relativi ai contenuti e al metodo, attorno ai quali si sviluppa il percorso di apprendimento. Ne “I contenuti del progetto” si possono individuare in modo più analitico e sequenziale.

Mapa concettuale



Un esempio di metodo scientifico all'opera: la scoperta dei raggi cosmici da parte di Wulf ed Hess

Nello schema viene evidenziato l'interscambio continuo tra teoria ed esperimento, un passaggio spesso trascurato. Come affermato da Duhem, ogni esperimento è “carico” di teoria e può essere interpretato solo alla luce di un modello teorico. La teoria entra con le sue leggi fisiche nella formulazione delle ipotesi, nella deduzione delle predizioni e nell'interpretazione dei risultati. La teoria entra anche nello strumento di misura, poiché esso è progettato per reagire a proprietà dedotte da un modello. Allo stesso tempo, la teoria può essere influenzata dai risultati sperimentali, essere falsificata o corroborata dall'esperimento.

Nel capitolo successivo sono presentate le indicazioni di lavoro e la stima dei tempi di esecuzione.

Ognuna delle “lezioni in laboratorio” può essere suddivisa in due sezioni di due ore ciascuna, in funzione della disponibilità di tempo della classe.

Gli esperimenti e la descrizione dei concetti fisici possono essere accompagnati da documenti e presentazioni PowerPoint scaricabili dalla rete. Ogni diapositiva è accompagnata da alcune annotazioni a margine che si sperano utili per orientare l'insegnante nel commento durante la lezione. Ove possibile, alla presentazione delle singole apparecchiature è preferibile far seguire (quando non addirittura precedere!) l'esecuzione degli specifici esperimenti che possono essere realizzati facendo riferimento alle allegate schede di laboratorio.

1.8. REFERENTE

Per eventuali approfondimenti relativi al progetto rivolgersi all'ideatore e coordinatore:

dott. *Vittorio Napoli*

C.P. 633 succ. 9

38100 Trento

telefono: 0461 935731

e-mail: raggicosmici(at)yahoo.it

napoli(at)science.unitn.it

Capitolo 2

I contenuti del progetto: indicazioni operative e materiali didattici

IL PROBLEMA: VEDERE L'INVISIBILE

Il titolo “vedere l'invisibile” evidenzia la particolare difficoltà che lo studente incontra nell'approccio ad un campo di esperienza particolarmente esposto a suggestioni, emozioni e pre-concezioni. Si è dato per questo ampio spazio all'analisi e all'esplicitazione del “sapere ingenuo” che nella mente dell'allievo spesso si accompagna alla problematica delle radiazioni e che spesso è veicolato da una pubblicitaria non specializzata.

Nelle pagine che seguono approfondiamo metodologie e contenuti di alcune delle “tappe” del percorso che qui abbiamo appena tratteggiato.

Fasi dell'apprendimento	Contenuti in sintesi	Situazioni di lavoro	Stima dei tempi
Che cosa sai?	“A ruota libera” (brainstorming)	Raccolta di immagini mentali attorno all'evocatore radiazioni invisibili.	½ ora
Una proposta di lavoro	Contratto formativo	Illustrazione della proposta di lavoro: oggetto (le radiazioni e i raggi cosmici), obiettivi, strumenti, modalità, tempi	½ ora
Devi sapere che...	Lezioni in laboratorio I	Dal visibile all'invisibile: le radiazioni e i loro effetti, in natura, sul vivente, negli impieghi tecnologici	2+2 ore
Restringiamo il campo di indagine...	Lezioni in laboratorio II	I raggi cosmici: che cosa sono, breve storia della ricerca. Come si rivelano?	2+2 ore
Approfondiamo	Lavoro di gruppo, intergruppo e sintesi	a. Metodo scientifico, interazione fra esperimento e teoria, ruolo del laboratorio, natura della conoscenza scientifica.	3 ore

Fasi dell'apprendimento	Contenuti in sintesi	Situazioni di lavoro	Stima dei tempi
		b. Ricadute in campo sociale, rischi e benefici delle radiazioni, ricerca pura (astrofisica) e applicata (tecnologia).	
Prova anche tu...	Ricerca a gruppi su approfondimenti differenziati per interesse	Temi di ricerca: a. Esperimento con il rivelatore Čerenkov ad acqua. b. Scienza e pseudo-scienza: curarsi con i raggi cosmici? c. La natura della conoscenza scientifica. d. Le applicazioni tecnologiche delle radiazioni.	Attività pomeridiana
Comunica il sapere	Intergruppo	I gruppi di lavoro degli studenti comunicano tra loro e all'insegnante i risultati delle loro ricerche.	2 ore
Che cosa abbiamo fatto e perché	Ricostruzione del prodotto e del processo	a. Sintesi del percorso di apprendimento. b. Problemi incontrati. c. Interesse, risultati ottenuti.	1 ora
Verifica sommativa: prove individuali, mappa concettuale di sintesi			TEMPO TOTALE: 15 ore

2.1. CHE COSA SAI?

“A ruota libera” (brainstorming): raccolta di immagini mentali attorno all'evocatore radiazioni invisibili

tempo: ½ ora

Obiettivi

L'attività si propone di ricavare una mappa relativa alle immagini, ai concetti, alle suggestioni che certamente accompagnano il tema “radiazioni invisibili” nella mente degli allievi del gruppo classe. L'ipotesi è che lo sforzo di esplicitarle e di raccoglierle in un prodotto sintetico, come quello offerto da una mappa concettuale, costituisca per tutti un momento a forte valenza metacognitiva che consente di raggiungere la consapevolezza dei contenuti mentali impliciti.

Essa permette infatti all'insegnante e agli allievi di:

- individuare le conoscenze già presenti nella classe.
- Riconoscere il loro livello di elaborazione (*sapere ingenuo o sapere esperto?*)
- Cogliere le percezioni, le emozioni e le pre-concezioni che accompagnano i fenomeni legati al microcosmo.
- Ipotizzare, *a partire da ciò che già si sa*, un successivo percorso di ricerca.

Operazioni

L'insegnante:

- scrive alla lavagna *il concetto evocatore* “radiazioni invisibili” ed invita gli studenti a scrivere, a loro volta, su un foglietto, almeno tre concetti che la parola chiave ha loro spontaneamente suggerito. Relativamente a ciascun concetto ogni studente dovrà condensare in un sostantivo l'idea che è pervenuta nella sua mente a seguito della “tempesta” evocata. Tempo concesso: cinque minuti.
- Dopo il tempo previsto, invita gli studenti a comunicare i sostantivi che hanno pensato e che, scritti alla lavagna, diventano le *parole – oggetto* della mappa. Mentre le trascrive le ordina accostandole le une alle altre secondo criteri (per es. le fonti di radiazioni, la loro natura, gli effetti, le modalità di propagazione, l'uso che se ne può fare, le emozioni che inducono...).
- Esplicita i criteri usati e li motiva: essi servono a dare ordine al prodotto, ma anche ad individuare le diverse dimensioni della realtà da indagare e a suggerirne una analisi più completa.
- Al termine della raccolta, partendo dal prodotto della classe, ancora grezzo, invita gli allievi a formulare proposizioni (afferentive o interrogative) che colleghino le parole della mappa, trasformandola così in un intreccio di percorsi possibili, evidenziati da una serie di frecce accompagnate da *parole di connessione* (verbi, connettivi, avverbi...).
- A questo punto costruisce e fa costruire *le domande* che daranno l'avvio al percorso di apprendimento.

Attenzioni formative

La costruzione di una mappa di concetti, così come è stata descritta, ha, oltre alla valenza cognitiva già illustrata, una forte valenza formativa.

Nelle varie fasi del lavoro, infatti, l'insegnante potrà sottolineare come siano importanti ed apprezzati i contributi di tutti e di ciascuno per ricostruire un sapere comune, portato dall'esperienza, rispetto al quale il percorso di apprendimento possa risultare davvero significativo. Farà riconoscere che la mente “ospita” conoscenze, suggestioni, impressioni, emozioni in un gioco di grande complessità, di cui occorre tenere conto.

Potrà evidenziare il ruolo particolare che i concetti hanno nello strutturare la conoscenza e come l'organizzazione del pensiero, a partire dagli stessi concetti – oggetti, sia diversa per ciascuna mente e rifletta, legittimamente e fortunatamente, ciascuna identità.

Gli allievi potranno così fare esperienza di quanto possa essere difficile dare voce e nome a ciò che è implicito nella mente e si misureranno nel rispetto e nella valorizzazione delle diversità cognitive.

2.2. UNA PROPOSTA DI LAVORO

Contratto formativo: presentazione agli studenti del progetto didattico

tempo: ½ ora

Obiettivi

- Coinvolgere e motivare all'apprendimento;
- responsabilizzare;
- chiarire le diverse attività e gli strumenti proposti;
- impostare relazioni fra partner che collaborano, con ruoli chiari e condivisi.

Operazioni

L'insegnante:

- a) Fa riconoscere il problema:
 - richiama la realtà del mondo invisibile nel quale siamo immersi e al quale non si accede direttamente con i sensi; esso rischia di rimanere in gran parte misterioso a meno che non lo si avvicini con occhi e strumenti diversi.
 - Propone un percorso di apprendimento per scoprire e capire il mondo delle radiazioni cosmiche: i loro effetti nella natura e nel corpo umano e il loro impiego nella tecnologia.
- b) Raccoglie le aspettative:
 - invita gli allievi a dichiarare le loro aspettative e le loro emozioni. Può essere elaborata una tabulazione alla lavagna rispetto alla proposta di lavoro: che cosa vorrei... che cosa non vorrei...;
- c) Riconverte le aspettative e propone un percorso:
 - illustra le varie tappe del percorso e i risultati attesi, le principali attività, i metodi, gli strumenti, i soggetti da coinvolgere, il prodotto da ottenere.
- d) Sollecita condivisione ed impegno:
 - individua e discute le opportunità, i vincoli e i ruoli da assumere per ottimizzare i risultati.
 - Chiede assunzione di responsabilità.

2.3. DEVI SAPERE CHE... Lezioni in laboratorio I

Dal visibile all' invisibile: le radiazioni e i loro effetti

tempo: 2+2 ore

2.3.1. Radiazione e luce

Lo scopo di questa prima sezione è quello di introdurre la classe al mondo delle radiazioni.

Partendo dal mondo conosciuto del visibile, si varca la soglia del “mondo invisibile” attraverso semplici esempi presi da ciò che ci circonda e facili esperimenti.

Si comincia con una breve descrizione dell'occhio umano, visto come strumento di osservazione/rivelazione dei segnali che arrivano a noi dall'ambiente ma anche delle “illusioni” di cui il cervello si rende protagonista. Con l'aiuto dell'arcobaleno atmosferico si entra nel mondo invisibile degli altri tipi di radiazione elettromagnetica: dalle onde radio ai raggi gamma.

Viene visualizzato lo spettro di diverse sorgenti luminose con il classico prisma di Newton, con reticoli olografici e con un semplice reticolo costituito da un CD a cui è stata rimossa la pellicola-etichetta (fig. 1).

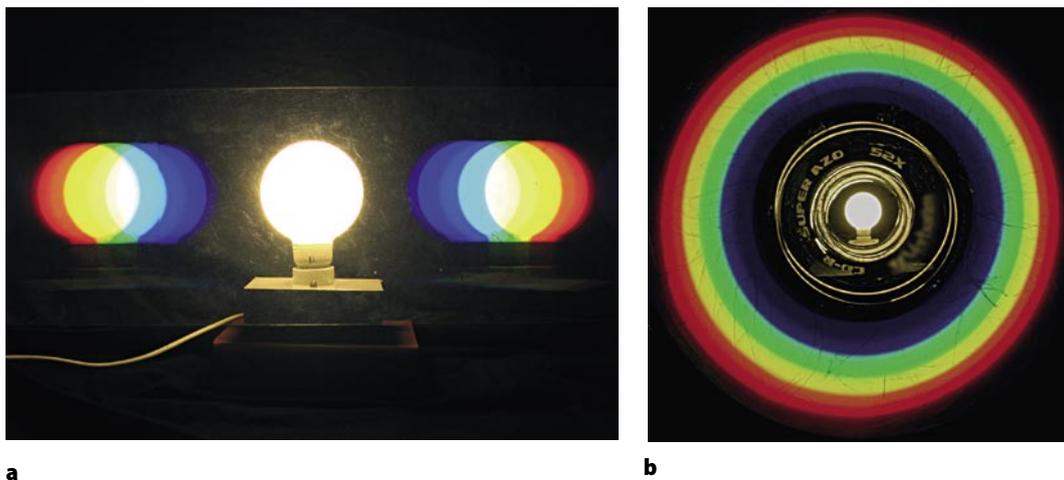


Figura 1: Esperimenti di diffrazione della luce da una lampada a fluorescenza. A sinistra attraverso un reticolo di diffrazione (diffraction grating film), a destra attraverso la superficie di un CD a cui è stato tolto il rivestimento protettivo (foto Laboratorio di comunicazione delle scienze fisiche).

L'osservazione attraverso i reticoli della luce emessa dai tubi di Plucker, tubi di vetro contenenti gas rarefatti, permette di esaminare direttamente gli spettri atomici di alcuni elementi. I tubi di Plucker divengono luminosi a causa di una scarica elettrica che eccita i gas contenuti. Nella lezione l'accensione dei tubi viene effettuata grazie al campo elettrico che circonda una sfera al plasma giocattolo. Questo dà occasione di descrivere l'origine dei fenomeni luminosi legati al fulmine e alle aurore boreali e di introdurre il tema della pericolosità delle radiazioni.

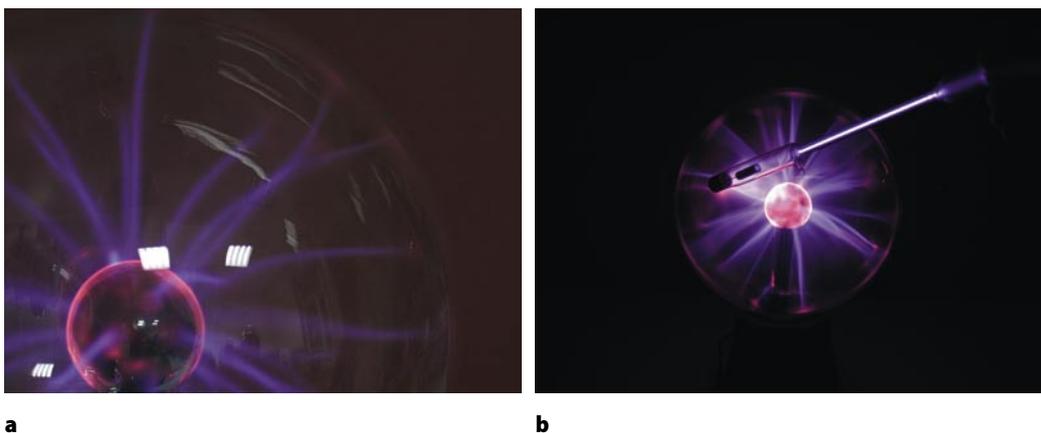


Figura 2: Nella sfera le scariche violette vengono causate da un flusso di elettroni che eccita il gas in esso contenuto. Gli elettroni partono dall'elettrodo centrale a potenziale negativo per scaricarsi sulla superficie in vetro a potenziale più alto. Un tubo di Plucker contenente argon è eccitato dalla tensione elettrica presente anche al di fuori della sfera (foto F. Logiurato).

Seguono alcuni esperimenti elementari che rendono manifesta l'esistenza di altre forme di radiazione oltre quella visibile. Le esperienze sono eseguite con la radiazione infrarossa emessa da un telecomando (fig. 3), e con la radiazione ultravioletta emessa da una lampada UVA (ottenibile da una lampada a fluorescenza opportunamente modificata).

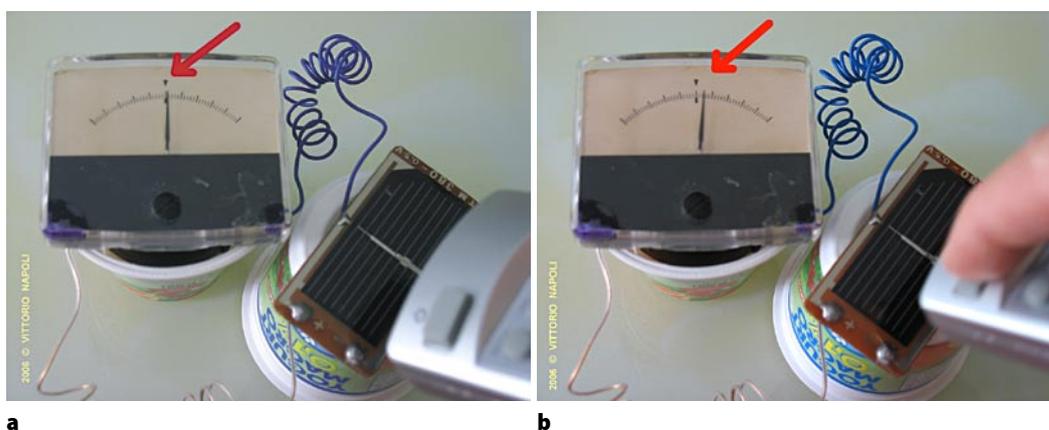


Figura 3 a, b: Un amperometro rileva (freccia rossa) la corrente generata in una cella solare quando viene colpita dalla luce infrarossa del segnale di un telecomando. Da sinistra a destra nelle foto: amperometro, cella solare e telecomando (Foto: V. Napoli).

La visione delle persone in una stanza buia è resa possibile tramite una termocamera a raggi infrarossi (fig. 4).



Figura 4: Il monitor (a destra) visualizza il volto di una persona ripresa con una telecamera a raggi infrarossi (a sinistra). Il colore blu ha una "temperatura" inferiore a quella del colore giallo (Foto: V. Napoli).

Infine si richiamano il modello atomico di Bohr e quello basato sull'equazione di Schrodinger. Inoltre vengono introdotti i concetti fondamentali che regolano l'emissione e l'assorbimento della luce.

Un fenomeno di risonanza meccanica ottenuto con pendoli accoppiati illustra la selettività che hanno gli atomi di emettere ed assorbire luce solo a particolari frequenze. Una simulazione Java delle transizioni atomiche descrive invece il fenomeno reale di interazione degli atomi con le onde elettromagnetiche.

Descrizione della presentazione Power Point disponibile in rete

La presentazione introduce gli studenti al mondo della luce, dei colori e della radiazione. Accompagna la lezione precedentemente descritta con immagini di fenomeni luminosi presi dal mondo naturale.

2.3.2. La descrizione delle particelle: onda o corpuscolo?

Si introduce l'argomento con un brevissimo accenno alla teorie della luce nell'antichità per arrivare all'epoca di Newton. Newton considerava la luce come costituita da un flusso di corpuscoli. Viene presentato qualche semplice esperimento di ottica geometrica che sembra supportare la concezione Newtoniana (vedi fig. 4). Gli esperimenti sono compiuti in un acquario con un nebulizzatore a ultrasuoni: la nebbia prodotta da esso diffonde la luce e ne rivela i cammini.

Si accenna alle idee di Huygens il quale riteneva invece che la luce fosse un fenomeno ondulatorio. La diatriba tra Newton e Huygens sembrò risolta in favore di quest'ultimo grazie alla scoperta di Young del fenomeno di diffrazione della luce.

Vengono quindi presentati esperimenti di diffrazione con materiali poveri: CD, tessuti, colino da tè fungono da reticoli di diffrazione. Si eseguono anche esperimenti di diffrazione e interferenza della luce nell'acquario (fig. 5 a, b, c).

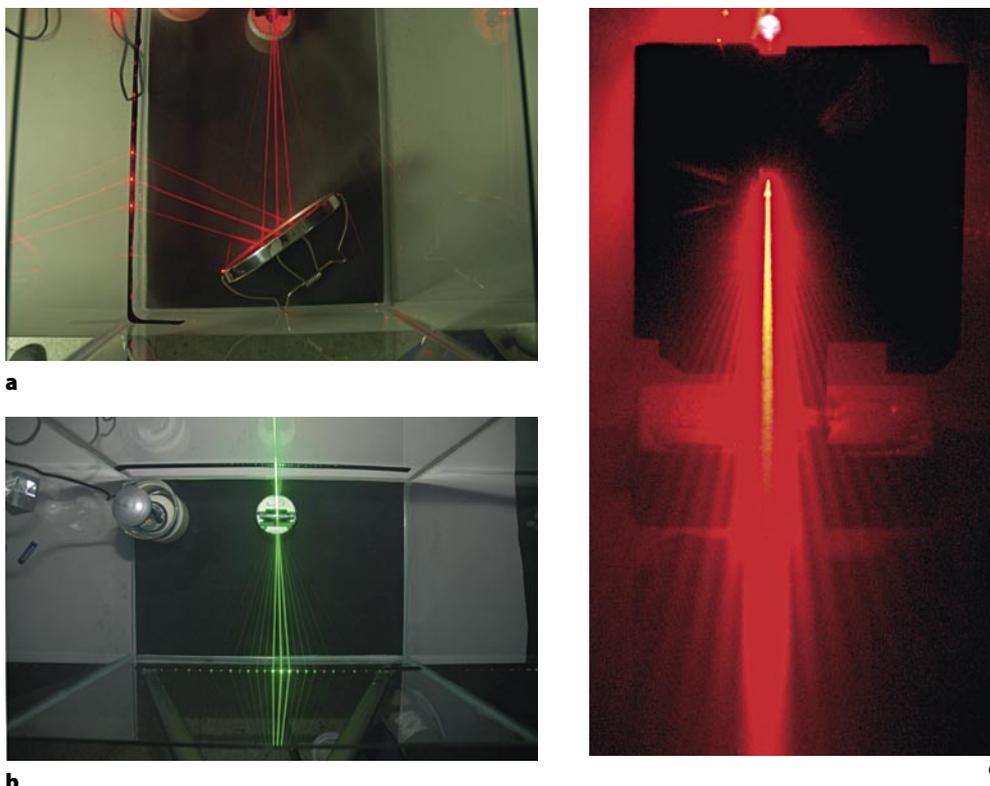


Figura 5 a, b, c: Esperimenti di ottica geometrica e ondulatoria in un acquario riempito di acqua nebulizzata. La nebbia è prodotta da un piccolo ed economico nebulizzatore a ultrasuoni. Nella prima foto a sinistra abbiamo un esempio di applicazione dell'ottica geometrica: la riflessione da uno specchio. Nelle due foto, sotto e accanto, sono rappresentati esperimenti di ottica ondulatoria, rispettivamente la diffrazione da un reticolo e da una singola fenditura. (foto: Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

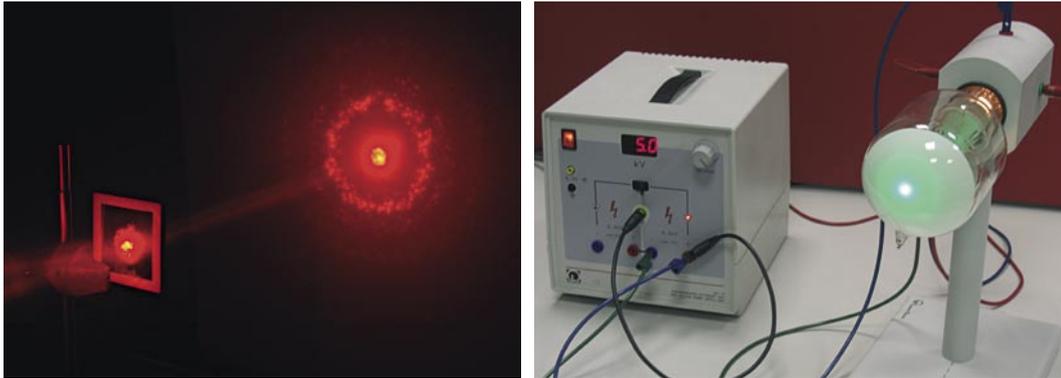
Un esperimento della singola fenditura variabile con il calibro introduce alla comprensione delle condizioni del passaggio dall'ottica geometrica a quella ondulatoria. Una simulazione Java dell'ondoscopio virtuale aiuta a tale scopo. La luce appare dunque una manifestazione ondulatoria. Si fa un salto temporale accennando ai risultati di Maxwell ed Hertz i quali identificano le onde elettromagnetiche con la luce.

Tuttavia un esperimento moderno della doppia fenditura a bassa intensità luminosa rimescola le idee. Dell'esperimento viene presentata una simulazione. La luce sembra propagarsi come un'onda ma nei detector arrivano corpuscoli: i fotoni. Si introduce così il dualismo onda corpuscolo. Si accenna all'effetto fotoelettrico e al fotomoltiplicatore come rivelatore di luce.

Si passa ad analizzare il comportamento delle altre particelle, ad esempio l'elettrone. Con l'esperimento del tubo a raggi catodici, si introduce l'aspetto corpuscolare di esso e la deflessione di un fascio di elettroni dai campi magnetici. Tramite la de-

flessione degli elettroni sullo schermo di un televisore a raggi catodici si visualizza il campo di un magnete. Si introduce l'ipotesi di de Broglie: anche l'elettrone e tutte le altre particelle possiedono la doppia natura ondulatoria e corpuscolare della luce. Questo è il fondamento della teoria dei quanti.

Una simulazione ottica della diffrazione di Laue e di Debye-Scherrer introduce all'esperimento di Thomson sulla diffrazione di elettroni da un policristallo (fig. 6). Cenno al problema aperto dell'interpretazione del dualismo onda-corpuscolo.



a **b**
Figura 6 a,b: Esperimenti di diffrazione con laser ed elettroni. Con il tubo a diffrazione (ditta Leybold) viene mostrato l'aspetto ondulatorio degli elettroni (a destra). Un'analogia ottica (a sinistra, con luce laser) per mezzo di reticoli ridotti in frammenti aiuta gli studenti a comprendere l'origine delle figure di diffrazione da policristalli (foto: Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

Descrizione della presentazione Power Point disponibile in rete

La presentazione introduce il problema del dualismo onda-corpuscolo con un approccio storico. Esso accompagna con immagini dei personaggi e degli apparati sperimentali il percorso didattico appena esposto seguendone il cammino. Nel ppt sono disponibili quelle immagini di fenomeni ottici e quantistici non riprodotti in questo laboratorio.

Testi allegati disponibili

Il dualismo onda-corpuscolo (in questa pubblicazione ed in rete).

Il fotomoltiplicatore.

2.4. RESTRINGIAMO IL CAMPO DI INDAGINE... Lezioni in laboratorio II

I raggi cosmici: cosa sono, come si rivelano

tempo: 2+2 ore

2.4.1. La camera a nebbia

In questa lezione vengono introdotte per la prima volta le tecniche di visualizzazione del cammino delle particelle elementari e dei raggi cosmici. In par-

ticolare viene descritto lo schema di funzionamento della camera a nebbia, o camera di Wilson, e alcune delle sue varianti come la camera di Langsdorf.

Seguendo il pensiero di Charles T. R. Wilson e le tappe che hanno portato il fisico scozzese alla sua invenzione, si eseguono parallelamente alcuni esperimenti che chiariscono i concetti fisici via via coinvolti. Tali esperienze sono eseguibili con materiali facilmente reperibili e hanno collegamenti con la meteorologia e la termodinamica. Ad esempio viene creata una piccola nuvola in bottiglia (vedi fig. 6), o si osserva la condensazione del vapor acqueo su piccoli grani di sale.



Figura 7 a, b, c: Come creare una nuvola in bottiglia. Si inserisce un fiammifero appena spento nella bottiglia. Questa viene poi chiusa con un tappo su cui è applicata una valvola per camera ad aria di bicicletta. Con una pompa si immette dell'aria nella bottiglia. La brusca espansione dell'aria provocata dal rapido svitamento del tappo causa l'abbassamento di temperatura e la condensazione del vapor acqueo sui corpuscoli di fumo (foto F. Logiurato).

Negli esperimenti viene evidenziata l'importanza dei nuclei di condensazione per la formazione delle goccioline d'acqua che compongono la nebbia e le nuvole.

Attraversando la camera a nebbia le particelle cariche lasciano dietro di sé una scia di ioni. È su questa scia che condensa la nebbia creando una traccia visibile del loro cammino. In laboratorio, con una camera a diffusione di Langsdorf, si osservano le tracce lasciate dalle particelle α e β emesse da un campione radioattivo ed i muoni, le prime particelle dei raggi cosmici ad essere state scoperte. Utilizzando il campo di un grande magnete è possibile anche osservare la curvatura delle scie dovuta alla forza di Lorentz.

Descrizione della presentazione Powerpoint disponibile in rete:

La presentazione segue il percorso della lezione con immagini degli apparati originali. In particolare è presente un'animazione che descrive la costruzione e il funzionamento della camera di Langsdorf.

Testi allegati disponibili:

La camera a nebbia.

2.4.2. Rivelatori di raggi cosmici

In quest'ultima sezione viene presentata una breve storia della ricerca sui raggi cosmici. Essa si dipana attorno agli apparati sperimentali ideati nel corso del tempo e alle vicende dei loro costruttori. Dalle prime ricerche di Wulf eseguite col suo

elettroscopio, alle avventurose ascensioni in pallone di Victor Hess. Non mancano anche qui gli esperimenti: alcune esperienze illustrano gli effetti della radiazione sugli elettroscopi carichi.

Un altro fondamentale dispositivo ancora oggi estremamente utile è il contatore Geiger. Ne viene illustrata qualche applicazione, come la misura della radioattività di alcune sorgenti debolmente radioattive e la penetrabilità delle radiazioni α e β . Il suo funzionamento è invece spiegato con semplici esperimenti, quali scariche elettriche provocate in una lampadina e l'accensione dei tubi di Plucker o di lampade a basso consumo nel campo elettrico di una sfera al plasma (vedi fig. 7).

Il contatore Geiger è costituito principalmente da un cilindro metallico e da un filo coassiale dello stesso materiale. Tra i due conduttori vi è un'alta differenza di potenziale e il cilindro è riempito di gas. Il passaggio di una particella carica nel contatore ionizza il gas e innesca una scarica tra il cilindro ed il filo. Tale scarica segnala l'avvenuto passaggio della particella.

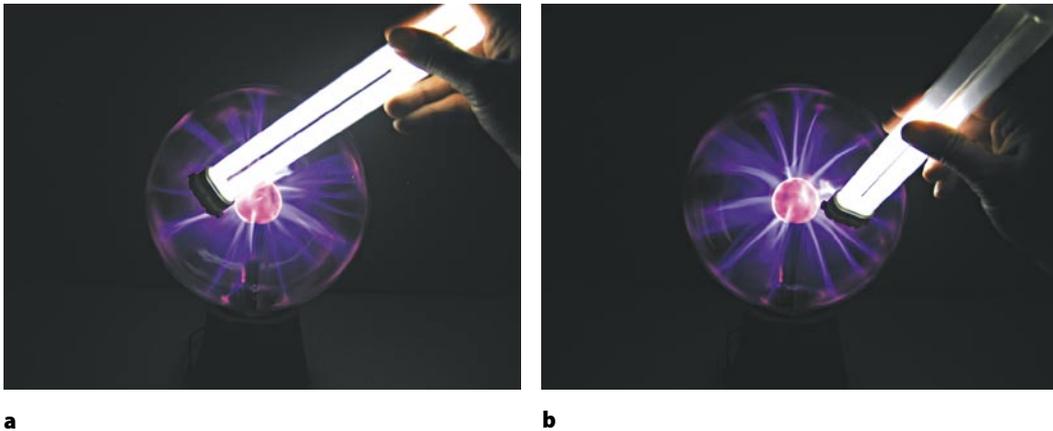


Figura 8 a, b: Esperimenti con la sfera al plasma. Il campo elettrico al di fuori della sfera genera una differenza di tensione capace di provocare una scarica elettrica in un tubo al neon. (foto F. Logiurato).

Queste ultime esperienze introducono al funzionamento dell'ultimo rivelatore di muoni che affronteremo: la camera a scintilla. Di questo apparato viene presentata una versione semplificata facilmente costruibile in un laboratorio scolastico.

Infine si conclude il gruppo di lezioni con un breve resoconto sugli esperimenti e sulle scoperte più recenti dell'astrofisica sull'origine dei raggi cosmici.

Descrizione della presentazione Power Point disponibile in rete

La presentazione accompagna e segue quella degli esperimenti fondamentali e le vicende dei fisici protagonisti della storia dei raggi cosmici.

Testi allegati disponibili (alcuni in questa pubblicazione e alcuni in rete)

- L'elettroscopio di Wulf
- Il contatore Geiger
- Una camera a scintilla.

- Il rivelatore Cerenkov (Esperimento *KamioKanne*).

2.5. APPROFONDIAMO...

tempo: 3 ore

Gli approfondimenti di questa fase possono essere condotti da gruppi che lavorano in parallelo sui temi proposti: i risultati sono comunicati a tutta la classe (intergruppo) e organizzati nella sintesi dell'insegnante.

- Metodo scientifico, interazione fra esperimento e teoria, ruolo del laboratorio, natura della conoscenza scientifica.
- Tre proposte di lettura - vedi allegati in rete:
 - “La comparsa della conoscenza” di Peter Atkins.
 - “Conoscenza oggettiva?” di Marcello Cini.
 - “Teoria ed esperienza” di Georges Lochak.
- Ricadute in campo sociale, rischi e benefici delle radiazioni, ricerca pura (astrofisica) e applicata (tecnologia).
- Alcuni indirizzi web a cui fare riferimento:
 - <http://ulisse.sissa.it/Answer.jsp?questionCod=59703415>
 - <http://www.tempomedico.it/news01/695cell.htm>

Qualche lettura utile

Battiston R. e Fiandrini E., “Messaggeri del cosmo”, *Le Scienze*, n. 427, marzo 2004, p. 62

Nella prima metà del Novecento sono stati determinanti per la nascita della fisica delle particelle: ora i raggi cosmici tornano alla ribalta anche grazie a nuovi esperimenti spaziali di alta precisione.

Joshi C., “Acceleratori al plasma”, *Le Scienze*, n. 453, maggio 2006, p. 84

Una nuova tecnica per costruire acceleratori di particelle sfruttando lo stato ionizzato della materia promette di aprire la strada a un gran numero di applicazioni, dallo studio dei materiali alla cura di alcuni tipi di tumore.

Marrocchesi P. S. e Maestro P., “Cacciatori di raggi cosmici”, *Le Scienze*, n. 446, ottobre 2005, p. 60

Una nuova generazione di strumenti, lanciati nella stratosfera a bordo di palloni, sta allargando la frontiera della ricerca sulla natura delle particelle che bombardano incessantemente l'atmosfera.

Meshik A. P., “Un antico reattore naturale”, *Le Scienze*, n. 449, gennaio 2006, p. 84

Due miliardi di anni fa, in un giacimento di uranio in Africa, si scatenarono reazioni spontanee di fissione nucleare. Ma i dettagli di questo straordinario fenomeno si stanno chiarendo solo ora.

2.6. PROVA ANCHE TU...

Ricerca a gruppi su approfondimenti differenziati per interesse

L'insegnante fornisce ai singoli gruppi i testi su cui lavorare. I gruppi, in questa fase del percorso, preparano le loro ricerche in orario extrascolastico. In classe sono presentati e condivisi i risultati delle ricerche (cfr. successivo punto 7).

Possibili temi di ricerca:

- Esperimento con il rivelatore Čerenkov ad acqua (Esperimento “Kamiokande”).
- La teleterapia. Curarsi con i raggi cosmici.
- La natura della conoscenza scientifica.
- Le applicazioni tecnologiche delle radiazioni.

Alcune proposte di lettura

Brambilla E., “Un piccolo acceleratore stermina le cellule impazzite”, *Le Scienze*, numero 339, novembre 1996, p. 83

Un piccolo acceleratore di elettroni rivoluziona l'uso della “Intra-Operative Radio Therapy (IORT).

Brambilla E., “Curarsi con le paticelle”, *Le Scienze*, n. 339, novembre 1996, p. 118

Nei fasci di particelle si cela una risorsa contro il tumore destinata a migliorare largamente la radioterapia attuale.

Cooper M., “Antenne intelligenti”, *Le Scienze*, n. 420, agosto 2003, p. 100

Le schiere adattive di antenne possono migliorare enormemente le comunicazioni senza cavo collegando utenti in movimento mediante connessioni virtuali.

Hannum W. H., Marsh G. E. e Stanford G. S., “La nuova generazione di reattori nucleari”, *Le Scienze*, n. 452, aprile 2006, p. 62

I reattori a neutroni veloci potrebbero estrarre molta più energia dal combustibile nucleare riciclato, minimizzare il rischio di proliferazione di armi e ridurre di molto il tempo di isolamento delle scorie radioattive.

Minoia C., Grandolfo M., Comba P., Rossi P. e Oleari F., “Campi elettromagnetici”, *Le Scienze*, n. 398, ottobre 2001, p. 96

Un'analisi dello stato delle conoscenze per verificare quali sono le certezze, i dubbi e gli ulteriori indirizzi della ricerca scientifica.

Parker Eugene N., “Uno scudo per gli astronauti”, *Le Scienze*, n. 455, luglio 2006, p. 66

I raggi cosmici danneggiano il DNA. Se non troveremo un metodo per proteggerci da essi dovremo rinunciare ai viaggi umani nello spazio.

Per aiutare gli studenti nell'analisi dei testi si propongono due possibili griglie di lettura:

1. Nel testo che hai letto:
 - a. Sottolinea i termini che appartengono al linguaggio scientifico e di cui conosci il significato e inquadra quelli “ambigui” o “non chiari”.
 - b. Individua le affermazioni che non possono essere provate scientificamente.

- c. Analizza le relazioni di causa - effetto presenti nel testo: sono coerenti dal punto di vista scientifico, cioè l'effetto è davvero deducibile dalla causa?
 - d. Valuta se le affermazioni di tipo scientifico presenti nel testo sono corrette? Hai modo di verificarlo?
 - e. Confronta le tue riflessioni nel gruppo di lavoro e discutine con l'insegnante.
2. Dopo aver letto attentamente i testi, rispondi alle seguenti domande:
- a. Quali "oggetti d'indagine" privilegia la scienza?
 - b. Quali "operazioni" compie su ciò che indaga?
 - c. Quali sono gli elementi essenziali del suo metodo?
 - d. Quali caratteri ha la conoscenza scientifica? E, in particolare, essa risente delle concezioni del mondo culturalmente dominanti?
 - e. Dall'analisi di questi punti deduci ciò che distingue l'approccio scientifico dagli altri modi di accostarsi alla conoscenza della natura.

2.7. COMUNICA IL SAPERE

Intergruppo

tempo: 2 ore

Ciascun gruppo comunica agli altri il risultato delle proprie riflessioni. Ognuno di essi potrebbe comporre un breve ppt e nominare un suo rappresentante che espone brevemente la ricerca a tutta la classe. Uno studente della classe potrebbe fare da chairman e introdurre il lavoro di ogni gruppo.

Al termine di ogni presentazione l'insegnante lascia spazio alle domande di chiarimento e rinforza i punti che ritiene significativi, integrandoli, se necessario.

2.8. CHE COSA ABBIAMO FATTO E PERCHÉ

Ricostruzione del prodotto e del processo

tempo: 1 ora

- a. Sintesi del percorso di apprendimento.
- b. Problemi incontrati.
- c. Interesse, risultati ottenuti.

In una prima fase di interazione con la classe, l'insegnante raccoglie gli elementi di verifica secondo i punti indicati, poi li ordina e li organizza per favorire una chiara consapevolezza del percorso fatto. Per quanto riguarda i risultati di apprendimento, una verifica può essere ricavata con una mappa concettuale da confrontare con quella iniziale.

2.9. VERIFICA SOMMATIVA

Prove individuali

Si lascia alla libertà dell'insegnante la composizione della verifica che sarà costruita adeguandola alle specifiche caratteristiche del gruppo alunni.

tempo totale: 15 ore

Seconda parte

Gli approfondimenti

Capitolo 3

Materiale didattico allegato

3.1. I RAGGI COSMICI: STORIA DI UN ENIGMA LUNGO UN SECOLO

Approfondimento teorico

L'invisibile pioggia di particelle che arriva a terra in ogni istante è un messaggio che l'universo regala agli scienziati per parlare di sé. Raggi cosmici, questo è il loro nome, ed evoca la loro provenienza, ma non la loro origine, ricorda i raggi del sole, ma non si tratta solo di fotoni. Da quasi 100 anni è noto che la Terra è perennemente esposta ad una radiazione naturale proveniente dal cosmo, detta appunto *radiazione cosmica*.

La sorgente dei raggi cosmici non è ancora certa. Nelle fasi attive il Sole, emette raggi cosmici di bassa energia, ma questi eventi sono di gran lunga troppo poco frequenti per spiegare la gran quantità di raggi cosmici rivelati. Neppure le altre stelle simili al Sole sono quindi sorgenti di energia sufficiente.

Le tre ipotesi fondamentali sull'origine dei raggi cosmici sono l'ipotesi "locale", quella "galattica" e quella "universale". Tali ipotesi corrispondono ad una prima rudimentale localizzazione del luogo d'origine: il sistema solare, la Galassia e l'intero Universo. La seconda ipotesi è quella che raccoglie il consenso della maggior parte degli studiosi.

Similmente alle "stelle cadenti", i raggi cosmici penetrano l'atmosfera del nostro pianeta urtando gli atomi in essa contenuti. Se i nostri occhi avessero la sensibilità di un rivelatore di luce di Čerenkov, vedremmo dei bagliori bluastri nel cielo notturno... uno spettacolo probabilmente più raccapricciante, e nel contempo affascinante, delle "lacrime di S. Lorenzo" delle notti di metà agosto.

Quando furono scoperti era il 1912. Allora l'unica particella nota era l'elettrone, Niels Bohr non aveva ancora presentato la sua teoria atomica e la descrizione quantistica del microcosmo era ancora lontana.

In quel periodo si indagava sulla natura della radioattività, un fenomeno su cui si era casualmente imbattuto il fisico francese Henry Becquerel alla fine dell'800. Si era scoperto che le radiazioni emesse dalle sostanze radioattive avvicinate ad un elettroscopio erano in grado di scaricarlo. Venne dunque ipotizzato che la scarica spontanea degli elettroscopi fosse dovuta alla radiazione sprigionata da qualche elemento radioattivo del terreno.

Tuttavia gli esperimenti del gesuita Theodor Wulf, compiuti in cavità sotterranee e perfino sulla tour Eiffel, avevano dato risposte che facevano dubitare di quest'origine. Infatti, in tal caso si sarebbe dovuto registrare un significativo aumento della radioattività nelle grotte o nei pressi del suolo, risultato che non venne osservato dal religioso.

Intorno al 1910 l'austriaco Victor Hess iniziò una serie sistematica di avventurosi voli in pallone per individuare la sorgente della radioattività. Hess trovò che la

radiazione tendeva ad aumentare con la quota. Egli dedusse dunque che una forte radiazione ionizzante doveva penetrare dall'alto l'atmosfera della Terra: "I risultati delle presenti osservazioni possono essere spiegati ammettendo la presenza di una radiazione estremamente energetica che penetra l'atmosfera e che, interagendo con essa, provoca la ionizzazione dell'aria così come essa viene osservata".

Osservazioni compiute sia di giorno che di notte, e durante le eclissi solari, lo portarono inoltre a concludere che la fonte principale della radiazione non poteva essere il nostro Sole.

Per il fisico Austriaco si trattava di raggi gamma, gli stessi osservati nel decadimento radioattivo naturale; della stessa idea era l'americano Robert Millikan, che nel 1925 coniò per essi il termine *cosmic radiation* o *cosmic rays*. Di diverso parere era Arthur Compton, secondo il quale i raggi cosmici erano costituiti prevalentemente da particelle cariche. Impilando contatori Geiger a formare "telescopi", Walther Bothe e Werner Kolhörster nel 1928 ottennero un primo importante indizio del fatto che i raggi cosmici potessero essere costituiti da particelle cariche. Nello stesso periodo l'italiano Bruno Rossi dimostrò che, se la radiazione è di un particolare tipo di carica, vi deve essere una asimmetria nella distribuzione d'arrivo dei raggi cosmici sulla Terra, dovuta al campo magnetico terrestre. In particolare, nel caso di cariche positive, un maggior flusso proveniente da ovest. L'effetto venne effettivamente osservato da diversi fisici e dallo stesso Compton, mostrando così che la radiazione è in maggior misura composta da particelle cariche positive.

Fino agli anni '50, i raggi cosmici rimasero la sola sorgente naturale di particelle di alta energia in grado di produrre nuove specie di particelle. Essi permisero molti fondamentali avanzamenti della fisica: ricordiamo, ad esempio, la scoperta dell'antimateria, del pione e del muone, e la verifica dell'equivalenza massa-energia.

Nel 1932 Carl Anderson osservò delle particelle cariche positivamente che lasciavano nella camera a nebbia traccia simili a quelle degli elettroni, ma che nei campi magnetici si muovevano nel verso opposto. I suoi risultati furono convalidati nel 1933 da Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini che riconobbero in esse l'antielettrone o positrone, proposto teoricamente da Paul Dirac, osservando la conversione di fotoni di alta energia in coppie elettrone-positrone. Nel 1936 Anderson scoprì anche il muone.

Particella predetta nel 1936 da Hideki Yukawa nella sua teoria dell'interazione forte, il pione si osservò solo nel 1947 da parte di Cecil Frank Powell, Occhialini e Cesar Lattes, utilizzando speciali emulsioni fotografiche per registrare la produzione di pioni da parte dei raggi cosmici e il loro successivo decadimento in muoni.

L'osservazione di sciame di particelle suggerì che gli stessi raggi cosmici, così come arrivavano a terra, dovevano essere il prodotto di interazioni e decadimenti successivi generati nell'interazione con l'atmosfera. La distinzione tra raggi cosmici primari e secondari e di livelli successivi emerse rapidamente.

Nel 1938 Pierre Auger, utilizzando un gruppo di contatori di Geiger, registrò l'arrivo simultaneo di molte particelle. Si trattava della radiazione secondaria prodotta dall'interazione di quella primaria con l'atmosfera. I protoni, interagendo con i nuclei, generano nuove particelle in un processo a cascata.

Dall'analisi degli sciami, Auger ricavò che nella radiazione primaria possono essere presenti particelle con energie anche di 10^{15} eV. Campagne di osservazioni più recenti, realizzate con grandi schiere di rivelatori, hanno mostrato l'esistenza di sciami generati da una radiazione primaria di 10^{20} eV (l'energia equivalente alla massa di una palla da baseball!).

In seguito esperimenti compiuti in alta quota hanno verificato che la radiazione penetrante l'atmosfera è costituita prevalentemente da protoni, ma contiene in minor percentuale anche nuclei, neutrini, elettroni, positroni, fotoni e varie altre particelle.

Si pose inevitabilmente la questione sull'origine e la provenienza dei raggi primari. Si proposero come possibili sorgenti e sede dell'accelerazione dei raggi cosmici inizialmente il Sole (Teller), poi la galassia (Fermi) e infine Cocconi nel 1956 notò che la componente più energetica aveva caratteristiche extragalattiche. Era necessario aspettare l'inizio della conquista dello spazio per comprendere più a fondo la provenienza dei raggi cosmici.

Mentre sulla composizione dei raggi cosmici oggi sappiamo molto, la loro genesi, e soprattutto il fenomeno fisico che è la fonte della loro energia, sono ancora oggetto di dibattito. Tuttavia, l'avvento dell'astronomia a raggi X e a raggi gamma, sembra aver recentemente sollevato almeno una parte del velo che ricopre di mistero la loro origine.

La maggior parte dei raggi cosmici hanno energie che vanno tra i 100 MeV e i 10 GeV, che corrispondono rispettivamente alle energie di protoni che viaggiano al 43% e al 99,6% della velocità della luce. L'estensione a terra degli sciami può essere di diversi chilometri quadrati e le particelle secondarie prodotte alcuni miliardi. La composizione degli sciami è molto varia: neutrini, radiazione elettromagnetica di alta energia, nucleoni, mesoni e leptoni, come i muoni rivelati nella nostra esperienza.

Per ciò che riguarda le sorgenti di raggi cosmici, le ipotesi che godono di maggior credito sono le seguenti:

Per energie	10^9 - 10^{10} eV:	origine solare.
Per energie	10^{10} - 10^{15} eV:	origine galattica (esplosione di supernove).
Per energie	10^{15} - 10^{19} eV:	origine extragalattica (esplosione di supernove, nuclei galattici attivi, pulsar e buchi neri).
Per energie	$>10^{19}$ eV:	origine extragalattica (forse quasar).

10^9 - 10^{10} eV: I raggi cosmici di più bassa energia provengono dalla superficie del nostro Sole.¹ Essi sono prevalentemente composti da elettroni e protoni e costituiscono quel che è comunemente denominato vento solare. Le particelle vengono emesse dalla corona solare. Il flusso del vento solare diviene più intenso nei periodi di massima attività del Sole (circa ogni 11 anni), in corrispondenza dei quali sono più frequenti le eruzioni solari e vi è un aumento del numero delle macchie solari.

¹ Spesso si intendono per raggi cosmici soltanto le radiazioni extrasolari, cioè provenienti da sorgenti poste al di fuori del nostro sistema solare.

L'interazione del vento solare con l'atmosfera della Terra è responsabile delle aurore boreali e australi. Gli elettroni del vento solare vengono catturati dal campo magnetico terrestre. Accelerati dal campo magnetico si concentrano verso i poli del campo dove interagiscono con l'atmosfera. Le particelle collidono con gli atomi e le molecole di cui è composta l'aria provocandone l'eccitazione. Il successivo ritorno dei sistemi eccitati allo stato fondamentale causa l'emissione di luce.

Le aurore sono principalmente visibili alle alte latitudini e si creano tra i 100 e i 1000 km dalla superficie terrestre.



Figura 1: Un esempio di aurora boreale. Il colore delle aurore dipende dal gas eccitato dal vento solare. Il colore verde è dato dall'eccitazione dell'ossigeno in forma atomica, il colore rosso dall'ossigeno molecolare (ozono), mentre il blu è dovuto all'azoto. L'eccitazione del gas è funzione delle energie possedute dalle particelle che compongono il vento solare, per la maggior parte elettroni (foto Wikipedia).

10^{10} - 10^{15} eV: Le particelle cariche dei raggi cosmici sono deviate dai campi magnetici (in particolare da quello terrestre) ed è molto difficile una volta arrivate al suolo ricostruire la loro traiettoria e dunque risalire alla loro sorgente. Mentre i raggi gamma, essendo neutri, non subiscono l'effetto dei campi magnetici. Inoltre, data la loro elevata energia (i loro fotoni hanno energie >1 keV) interagiscono poco con la materia e il mezzo interstellare. Queste loro caratteristiche permettono di individuare e analizzare le sorgenti che li emettono, anche se queste sono situate molto lontane da noi. Varie possono essere le cause che portano all'emissione di raggi gamma:

- **Radiazione di bremsstrahlung:** quando una particella carica viene frenata dall'interazione con un mezzo, nella decelerazione emette radiazione elettromagnetica (radiazione di frenamento).
- **Radiazione di sincrotrone:** una carica in un campo magnetico esegue un moto accelerato elicoidale e dunque irradia. Se il campo magnetico è molto intenso può emettere radiazione gamma.
- **Effetto Compton inverso:** Un fotone interagendo con un elettrone può acquistare energia dall'elettrone (anziché cederla, come avviene nell'effetto Compton canonico). Gli elettroni altamente energetici dei raggi cosmici interagendo con la radiazione di fondo o con la radiazione stellare possono trasformare questa in radiazione gamma.

- **Radiazione di annichilazione:** particelle e antiparticelle quali l'elettrone e il positrone interagendo tra loro possono annichilirsi producendo due fotoni gamma.
- **Interazione tra protoni:** i protoni dei raggi cosmici possono interagire con altri protoni creando mesoni. Nel loro decadimento i mesoni producono raggi gamma.

Recenti osservazioni sembrano verificare un modello secondo il quale i raggi cosmici sono accelerati ad alte energie nell'onda d'urto che segue la formazione di una supernova. Fino a pochi anni fa vi era evidenza solo dell'accelerazione degli elettroni. Telescopi spaziali e nuovi telescopi terrestri, capaci di rivelare la radiazione gamma, hanno dimostrato che le supernove agiscono da acceleratori anche per la parte di raggi cosmici composta da protoni. L'analisi dello spettro energetico dei raggi gamma ha permesso di escludere che si tratti di radiazione dovuta all'accelerazione di elettroni. La loro origine è da ricercarsi invece nel decadimento dei pioni prodotti dall'interazioni dei protoni di alta energia col mezzo interstellare.

Nel 1989 il telescopio Whipple ha rivelato la radiazione gamma proveniente dalla Nebulosa del Granchio, i resti di una supernova risalente, secondo gli annali cinesi, al 1054 d.c. Nel 2004 l'osservatorio H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) in Namibia, ha registrato per la prima volta l'immagine di un resto di una supernova nella banda della radiazione gamma. Questo risultato viene considerato la prima prova certa che le supernove sono da considerarsi una fonte dei raggi cosmici.

L'osservatorio H.E.S.S. è costituito da quattro telescopi Cerenkov, ciascuno dei quali possiede uno specchio di 107 metri quadrati. Lo specchio convoglia la luce Cerenkov nel piano focale del telescopio, dove è situato un rivelatore di fotoni. L'uso di diversi telescopi permette di individuare la direzione di provenienza dei raggi gamma. H.E.S.S. ha individuato 8 fonti di radiazioni gamma: 3 sono associabili a resti di supernove, 3 a stelle pulsar, mentre altre 2 hanno origine sconosciuta e non hanno una controparte nelle onde radio o nei raggi X.

I raggi gamma vengono rivelati indirettamente: interagendo con gli atomi dell'atmosfera essi producono uno sciame di particelle cariche che per effetto Cerenkov emette un lampo di luce blu. Un serie di detectors registra la radiazione Cerenkov e individua la direzione del fotone gamma che l'ha originata.

10^{15} - 10^{19} eV: Alcuni modelli fanno provenire i raggi cosmici di queste energie da nuclei galattici attivi. Al centro delle galassie, buchi neri in rotazione con masse milioni di volte il nostro Sole ingoiano la materia circostante. Durante l'accrescimento, lungo l'asse di rotazione del buco nero, si producono dei getti di materia diretti al di fuori della galassia. Questi getti di materia di alta energia, osservabili tramite la radioastronomia, sarebbero le sorgenti dei raggi cosmici.

Altre spiegazioni teoriche chiamano in causa gli intensi campi magnetici delle pulsar. Tuttavia i meccanismi che provocano l'accelerazione delle particelle non sono ancora del tutto chiariti.

$>10^{19}$ eV: L'origine dei raggi cosmici con energie intorno o superiori a 10^{20} eV si presenta come un enigma ancora maggiore. Certamente essi richiedono sorgenti straordinarie, ma il problema è ancora più complicato dall'esistenza di un limite teorico all'energia dei raggi cosmici. Infatti i fisici Kenneth Greisen, Georgi Zatsepin e Vadim Kuzmin hanno dimostrato che i raggi cosmici interagendo con la radiazione cosmica di fondo del Big Bang perdono energia. Inoltre, assumendo che la radiazione cosmica sia costituita da protoni, hanno stabilito che se tali protoni provengono da distanze cosmologiche, non possono superare una certa soglia di energia (GZK cut-off).

Un'ipotesi avanzata è che essi possano provenire da quasar relativamente vicine a noi, contenenti buchi neri dotati di grande massa (almeno 100 milioni di masse solari) e in rotazione. Il loro campo magnetico potrebbe accelerare i protoni fino alle energie richieste. Ricercatori della NASA e della Princeton University hanno studiato tra diverse migliaia di galassie quelle che potrebbero essere i resti di quasar entro una distanza di circa 160 milioni di anni luce da noi (50 Mpc, tale distanza corrisponde ad un limite d'energia GZK per i raggi cosmici di 10^{20} eV). Essi hanno individuato 12 possibili sorgenti e messo a confronto la loro posizione con le direzioni di provenienza degli eventi ad alta energia osservati dall'esperimento giapponese AGASA (Akeno giant air shower array). L'analisi dei dati sembra indicare una correlazione non casuale tra alcune galassie e diversi sciami osservati. Altri modelli suggeriti chiamano in gioco lo scontro tra galassie o il decadimento di particelle durante il Big Bang.

Cinquant'anni di missioni spaziali non sono poi molti, ma hanno permesso agli scienziati di studiare oggetti celesti come buchi neri, stelle di neutroni, supernove e quasar lontane nello spazio e nel tempo.

Ai raggi cosmici l'onore di essere i messaggeri di quell'informazione che la tecnologia non potrà mai realizzare, una macchina del tempo, efficiente e poco dispendiosa, a disposizione degli scienziati e di tutti gli interessati a leggere il libro dell'universo, delle sue leggi e della sua storia.

Siti internet su cui trovare documenti utili

- Un'introduzione breve ma completa dei raggi cosmici:
http://www.pa.iasf.cnr.it/IASF/outreach/varie/Maccarone_RaggiCosmici.pdf
- Sull'astronomia a raggi gamma:
<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>
- Sull'origine e la natura dei raggi cosmici:
<http://www.unam.na/research/hess/>
<http://web.ticino.com/cagnotti/articoli/raggicostmici.rtf>
- Per le cause fisiche delle aurore si può consultare:
http://it.wikipedia.org/wiki/Aurora_boreale
- Altri siti sulle aurore, ricchi di immagini suggestive:
<http://www.racine.ra.it/planet/testi/aurora.htm>
<http://www.phy6.org/outreach/edu/aurora.htm>

- Il sito ufficiale della NASA da cui è possibile trarre notizie e immagini sulla ricerca spaziale:
http://www.nasa.gov/mission_pages/exploration/main/index.html
- Foto e informazioni di astrofisica dal telescopio spaziale Hubble:
<http://www.vialattea.net/hubble/indici/buchineri.htm>
- Per informazioni su pulsar, buchi neri e altri oggetti del cielo si può consultare l'enciclopedia on-line wikipedia:
<http://it.wikipedia.org/wiki/Astrofisica>
http://it.wikipedia.org/wiki/Buco_nero
<http://it.wikipedia.org/wiki/Pulsar>
<http://it.wikipedia.org/wiki/Quasar>

Un classico sulla cosmologia e la fisica dei buchi neri è il libro:

Hawking S. (2000), *Dal big bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*, BUR Biblioteca Universale Rizzoli, Milano

3.2. ESPERIMENTI DI SPETTROSCOPIA

Appuntamento in laboratorio

Materiali utilizzati:

- Reticoli di diffrazione, acquistabili ad esempio dalla ditta Edmund o dalla Rainbow Symphony, Inc.: <http://www.rainbowsymphony.com>
- Varie sorgenti luminose: lampade a incandescenza, lampade a scarica e tubi di Plucker.
- Per il reticolo e la costruzione di un semplice spettroscopio: CD-R, tubi di cartone e nastro isolante nero.

In questa esperienza gli studenti osservano attraverso vari tipi di reticoli di diffrazione gli spettri di diverse sorgenti luminose, quali lampade a incandescenza, a fluorescenza e tubi a scarica di Plucker.

I tubi di Plucker, contenenti gas di atomi o di molecole, danno righe spettrali molto nette e ben separate. Lo spettro delle lampade a incandescenza è invece continuo e tende a quello di un corpo nero per alte temperature del filamento di tungsteno.

La lampada a fluorescenza è invece una lampada a scarica. Infatti una scarica elettrica eccita il gas in esso contenuto, in genere mercurio. Dunque le righe osservate dovrebbero essere discrete come quelle degli atomi, in particolare per il mercurio si dovrebbe osservare una riga blu molto intensa. Tuttavia il rivestimento della lampada non ha il solo compito di diffondere la luce, come avviene per le lampade a incandescenza. Esso è composto da una sostanza fluorescente che ha il ruolo di assorbire la luce ad alte frequenze e riemetterla a frequenze più basse. Lo spettro del mercurio risulta così modificato, esso diviene simile a quello della lampada a incandescenza, ma con un pas-

saggio da un colore all'altro molto più netta (vedi foto in “contenuti del laboratorio”). Ad occhio nudo noi vediamo la somma dei colori della lampada come luce bianca.

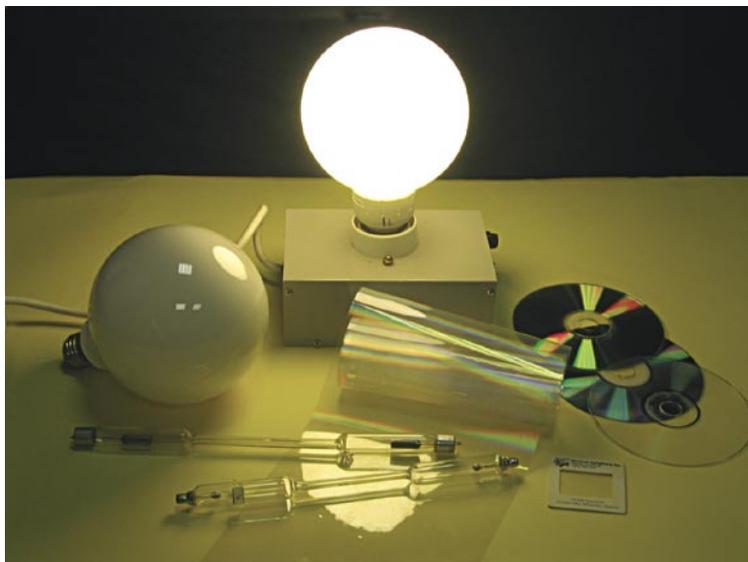


Figura 1: Vari reticoli e sorgenti di luce utilizzate. In primo piano abbiamo i tubi di Plücker e un reticolo di diffrazione (diffraction grating film) venduto a rotoli dalla ditta Edmund (foto F. Logiurato).

È possibile anche utilizzare la superficie di un CD come reticolo di diffrazione, sia in riflessione che in trasmissione. Per la costruzione di un reticolo in trasmissione è necessario togliere la pellicola-etichetta.

Questa operazione è più o meno facile, dipende dalla tecnica di fabbricazione del CD. Ad esempio, noi consigliamo i CD-R (recordable) della Verbatim, aventi l'etichetta che ricopre completamente il disco. Si consiglia di eseguire con un taglierino una piccola incisione partendo dal foro centrale del disco, cercando poi di sollevare l'etichetta mantenendo la lama radente alla sua superficie. A volte rimane una patina di colore che può essere tolta semplicemente lavando il CD con acqua e sapone.



a

b

Figura 2: A sinistra è riprodotto un CD parzialmente sbucciato. La pellicola funziona come un reticolo di diffrazione in riflessione. A destra abbiamo uno spettroscopio in trasmissione costruito con un CD e un tubo di cartone. Il tubo è lungo circa 40cm, mentre la fessura all'estremità è di qualche millimetro. L'oculare dell'osservatore corrisponde al CD (foto F. Logiurato).

Con il CD trasparente si può costruire un rudimentale spettroscopio. Basta applicare il CD ad una apertura di un tubo di cartone, avendo prima cura di chiudere l'altra estremità lasciando una fessura (per esempio adoperando un nastro isolante nero). Prima di applicare definitivamente il CD occorre orientarlo nella giusta posizione, in modo tale da vedere chiaramente lo spettro di una sorgente luminosa.

3.3. DESCRIZIONE DELLE PARTICELLE: ONDE O CORPUSCOLI?

Approfondimento teorico

La teoria dei quanti

Spesso le proprietà delle radiazioni elettromagnetiche vengono descritte con grandezze proprie di un modello ondulatorio (si pensi alla lunghezza d'onda o alla frequenza); in altre circostanze si parla invece di oggetti corpuscolari, i fotoni (per esempio quando un fotomoltiplicatore rivela della radiazione). Questo modo di esprimersi, che può sembrare confuso e contraddittorio, ha la sua origine nel fatto che in effetti la luce possiede proprietà che appartengono sia alle onde che ai corpuscoli. In certe situazioni essa è descrivibile tramite un modello ondulatorio e in altre con un modello corpuscolare.

Si deve al fisico francese Louis de Broglie la grande intuizione che questa strana caratteristica della luce potesse essere condivisa da tutta la materia. Infatti, come i primi esperimenti negli anni '20 hanno dimostrato per gli elettroni, fino ad arrivare ai giorni nostri per grandi molecole, tutta la materia partecipa della simmetria onda-corpuscolo. Tale dualismo è il tratto distintivo della teoria quantistica, la migliore teoria fisica attualmente a nostra disposizione per la descrizione dei fenomeni microscopici.

Occorre sottolineare che questo comportamento rimane anche oggi sotto vari aspetti misterioso e pone tuttora problemi irrisolti che ostacolano una chiara e completa comprensione della fisica dei quanti. Nonostante ciò, la meccanica quantistica per il suo profondo potere esplicativo e per le sue innumerevoli applicazioni tecnologiche rappresenta una teoria di grandissimo successo.² Dunque diviene fondamentale parlando di particelle conoscere almeno i tratti distintivi della fisica dei quanti.

Descriviamo un'esperienza che ben si presta ad illustrarne i principi fondamentali: si tratta dell'esperimento di interferenza della doppia fenditura. Come ha espresso Richard Feynman nelle sue mirabili lezioni introduttive alla fisica dei quanti:

Sceghieremo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in maniera classica, e che contiene in sé il cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene il solo mistero. [Feynman 1965]

² Tanto per citare alcuni esempi, la fisica dei semiconduttori, su cui è basata la microelettronica dei computer e dei telefoni cellulari, le celle solari, i CCD e in generale la tecnologia dei materiali, il laser con le sue innumerevoli applicazioni nel campo medico e industriale.

Dirigiamo un fascio di luce di una certa lunghezza d'onda contro uno schermo dotato di due piccole fenditure. Come ha mostrato Thomas Young nel 1801, la luce che attraversa lo schermo mostra uno schema di frange luminose e scure che sono facilmente riconducibili alla natura ondulatoria della luce.

Le onde che oltrepassano le due fenditure in certi punti dello spazio interferiscono costruttivamente, in altri punti distruttivamente, in modo del tutto analogo a quel che avviene su una superficie d'acqua.

Ma un fenomeno inaspettato accade se inviamo contro le fenditure luce d'intensità molto bassa e riveliamo la luce che attraversa lo schermo con una lastra fotografica. Osserviamo l'immagine d'interferenza formarsi per punti: la luce sembra arrivare sullo schermo sotto forma di corpuscoli, che accumulandosi formano l'immagine delle frange che con luce intensa appariva continua (fig. 2).

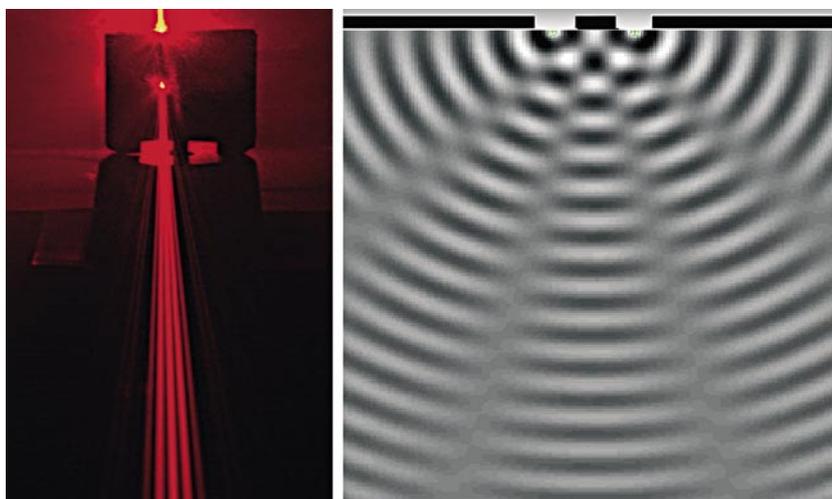


Figura 1: Il fascio laser nella foto incide contro uno schermo in cui sono praticate due fenditure. La luce che oltrepassa le fenditure mostra i tipici effetti di interferenza delle onde. Nel disegno a destra è rappresentata l'interferenza di onde su una superficie d'acqua (foto: Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

La luce si comporta nei nostri rivelatori come se fosse costituita da corpuscoli, e tuttavia non può avere una natura completamente corpuscolare. Infatti chiudendo una delle fenditure lo schema di interferenza scompare; perché vi sia interferenza qualcosa deve passare simultaneamente per entrambe le fenditure, azione che un corpuscolo non può fare.

In qualche modo la luce deve partecipare di entrambe le proprietà delle onde e dei corpuscoli. Questo dualismo onda-corpuscolo è una proprietà di tutta la materia. Le particelle sembrano propagarsi come onde ma vengono osservate come corpuscoli. L'evoluzione nel tempo delle onde di materia di de Broglie è determinata dall'equazione di Schroedinger.

Le particelle della luce, i fotoni, si accumulano sulla lastra fotografica nelle zone dove vi è maggiore intensità luminosa, cioè dove l'ampiezza dell'onda elettromagnetica è grande. Le zone buie, dove l'interferenza è distruttiva, corrispondono a regioni

con pochi fotoni. Ciò ha suggerito a Born l'interpretazione statistica dell'onda ψ di de Broglie e dell'equazione di Schroedinger, l'equazione fondamentale della meccanica quantistica: la probabilità di trovare una particella intorno ad un certo punto dipende dall'ampiezza della ψ in quel punto: più è grande l'ampiezza, maggiore sarà la probabilità di trovare la particella.

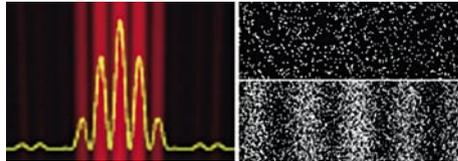


Figura 2: Ponendo una lastra fotografica trasversale al fascio luminoso, si osservano le frange di interferenza. Inviando luce a bassa intensità si scopre che essa interagisce con la lastra sotto forma di oggetti localizzati. Le frange sono formate da punti discreti (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

Prima dell'arrivo nei rivelatori una particella si trova ovunque nell'onda, non possiede una posizione definita. Si dice che è in uno stato di sovrapposizione della posizione.

L'interpretazione più diffusa di questo fenomeno³ assume che nell'atto di misura della posizione la particella salti, tra tutte le posizioni possibili, in un ben definito luogo con una probabilità calcolabile dall'ampiezza della funzione d'onda. In quell'istante il sistema non segue più l'evoluzione regolata dall'equazione di Schroedinger, subisce “un salto quantico”. Interagendo col dispositivo misuratore la funzione d'onda collassa e diventa diversa da zero solo in un regione ristretta in un intorno della particella.⁴

Il principio di indeterminazione e le tracce nella camera a nebbia

È importante notare che se nell'esperimento delle due fenditure tentiamo di scoprire quale strada hanno preso con certezza le particelle, da quale fenditura sono passate, allora l'interferenza scompare. L'aspetto ondulatorio sparisce per lasciare il posto alla sola natura corpuscolare. Lo strumento di misura che individua il cammino delle particelle trasforma completamente lo stato del sistema. Possiamo scegliere se osservare la figura di interferenza oppure scoprire da quale delle due fenditure le particelle sono passate, ma non possiamo mai conseguire contemporaneamente entrambi gli obiettivi: ogni tentativo di seguire il loro cammino distrugge l'interferenza.

³ È la cosiddetta interpretazione di Copenaghen, dal nome della città nella quale hanno lavorato Bohr e Heisenberg, i due maggiori proponenti di questa formulazione.

⁴ Al processo di misurazione va iscritta la parte più vaga dell'attuale teoria quantistica: questa non dà alcun criterio che prescriva come e perché avviene il collasso della funzione d'onda, né definisce cos'è un apparato di misura. Il problema ha generato varie formulazioni alternative della meccanica quantistica (come approfondimento è possibile consultare, per esempio, il libro di Ortoli e Pharabod “il cantico dei quanti”).

L'impossibilità di osservare simultaneamente le due caratteristiche ondulatorie e corpuscolari della materia è un principio generale della teoria quantistica detto principio di complementarità. Il principio di complementarità, introdotto da Bohr, afferma che gli oggetti quantistici possono manifestare il loro doppio comportamento solo in differenti e incompatibili condizioni sperimentali. In un esperimento possiamo osservare solo l'aspetto ondulatorio oppure solo quello corpuscolare.

Ognuna delle due rappresentazioni ondulatorie e corpuscolari prese separatamente dà soltanto una descrizione parziale della realtà. Entrambe le descrizioni classiche sono necessarie per una descrizione completa dei fenomeni quantistici. Tuttavia i concetti di corpuscolo e onda appaiono antitetici: uno si riferisce ad entità discrete e ben localizzate nello spazio, l'altro ad entità continue ed estese. Ma poiché non è possibile rivelare i due comportamenti in un medesimo esperimento, secondo Bohr i due modelli devono considerarsi non contraddittori, ma complementari.

Una particella non è completamente un'onda né è completamente un corpuscolo: *La soluzione delle difficoltà è che i due modelli mentali che gli esperimenti portano a formarci (quello ondulatorio e corpuscolare) sono entrambi incompleti e hanno solo la validità di analogie che sono accurate unicamente in certi casi limite.* [Heisenberg 1930]

I confini di applicabilità dei due modelli sono quantitativamente stabiliti dalle relazioni di incertezza di Heisenberg. Per introdurre il principio di Heisenberg, adopereremo un altro famoso esempio: l'esperimento della singola fenditura.

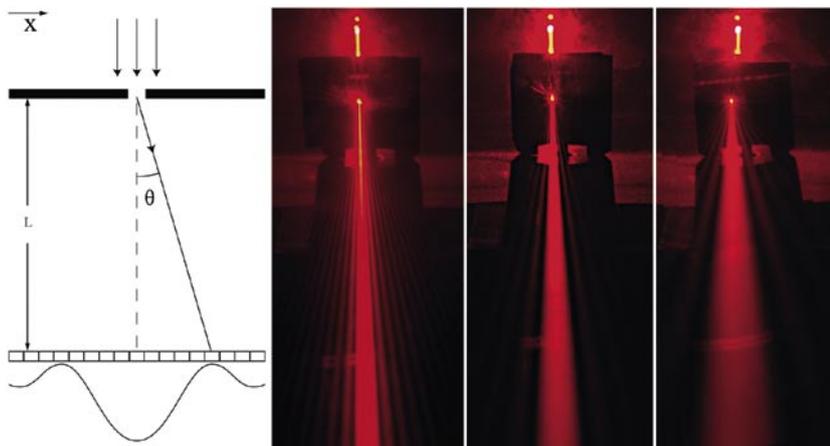


Figura 3: Un fascio di particelle viene diretto perpendicolarmente contro una fenditura. Secondo il modello ondulatorio esse subiscono un effetto di diffrazione. Secondo il modello corpuscolare esse acquistano una componente trasversale dell'impulso. Nelle foto è rappresentato un laser che incide contro uno schermo avente una fenditura. Passando da sinistra a destra si hanno fenditure sempre più strette. Ciò provoca l'allargamento del fascio di diffrazione (foto Laboratorio di comunicazione delle Scienze Fisiche).

Dirigiamo un fascio di elettroni contro uno schermo su cui è praticata una fenditura di larghezza d . Supponiamo che tutte le particelle siano preparate con il medesimo impulso di modulo p diretto ortogonally allo schermo (fig. 3). Nel passaggio

attraverso la fenditura si assiste ad un allargamento del fascio con caratteristiche tipiche dei fenomeni ondulatori di diffrazione. Perciò le particelle, *se considerate come corpuscoli classici con ben definite traiettorie*, devono cambiare direzione acquistando una componente p_x del momento parallela alla fenditura. La grande maggioranza di loro viaggia in un angolo compreso tra θ e $-\theta$, dove θ individua la direzione dell'allargamento del fascio (minimo del fascio diffratto).

Fissiamo ora l'attenzione su un singolo elettrone. Possiamo immaginare lo schermo con la fenditura come uno strumento che misura la posizione della particella. La coordinata x della particella durante l'attraversamento della fenditura sarà conosciuta con un'incertezza $\Delta x \cong d$.

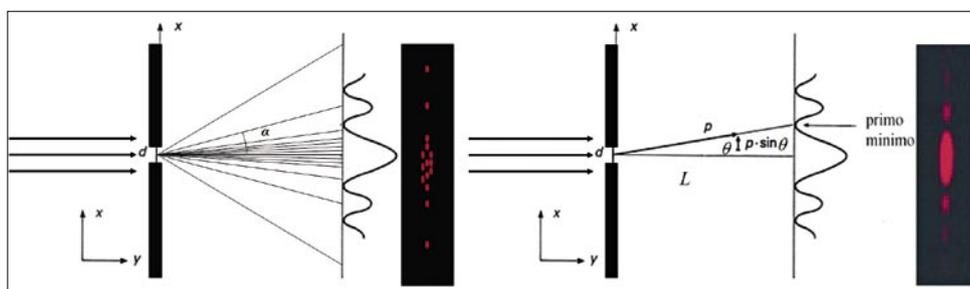


Figura 4: Il momento p_x di una particella può essere misurato rivelando la sua posizione sul secondo schermo: esso sarà $p_x = p \sin \alpha$. Se x è la posizione della particella sullo schermo 2 e l'angolo α è piccolo, allora $\alpha \cong x/L$. In corrispondenza del primo minimo: $p_x = p \sin \theta$.

Ora entra in campo il modello ondulatorio. Dalla teoria delle onde sappiamo che l'apertura del fascio diffratto centrale aumenta al diminuire della larghezza della fenditura e al crescere della lunghezza d'onda, secondo la relazione $\sin \theta = \lambda/d$. Dunque più tentiamo di misurare precisamente la posizione x diminuendo d , più il fascio si allarga e aumenta la nostra incertezza sulla conoscenza del momento p_x della singola particella, all'istante del suo passaggio attraverso lo schermo. Il momento p_x della particella può essere successivamente misurato osservando la posizione raggiunta da essa su uno schermo a distanza L dalla fenditura (vedi figura 4).

Per l'incertezza acquistata dal momento lungo x , possiamo considerare che essa sia $\Delta p_x \cong p \sin \theta$, poiché la maggior parte delle particelle sono rivelate tra i primi due minimi; assumiamo anche che il modulo dell'impulso dei corpuscoli non cambi nell'urto con la fenditura, essendo lo schermo di massa molto maggiore rispetto agli elettroni.

Ma l'equazione di de Broglie associa a particelle d'impulso p un fenomeno ondulatorio di lunghezza d'onda λ , dove $p = h/\lambda$. Sostituendo $\sin \theta = \lambda/d$ e $p = h/\lambda$ in $\Delta p_x \cong p \sin \theta$, si ha $\Delta p_x \cong h/d$, per cui ricordando che abbiamo assunto per l'incertezza sulla posizione $\Delta x \cong d$, si ricava la relazione di Heisenberg:

$$(1) \quad \Delta x \Delta p_x \cong h,$$

dove $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ joule·s è la costante di Planck.⁵

⁵ Naturalmente valgono relazioni analoghe anche per le altre coordinate x e y .

In generale si dimostra che il prodotto delle incertezze non può essere minore di una grandezza dell'ordine della costante di Planck, per cui la (1) rappresenta il prodotto minimo che si può avere tra le incertezze di posizione e impulso. Dunque più diviene minore l'incertezza sulla posizione più diviene grande quella sull'impulso, e viceversa.

Nell'attraversamento della fenditura la quantità di moto trasversale della particella, immaginata come un corpuscolo classico, è modificata di un valore a priori non calcolabile, se non con un'incertezza fissata dalla (1):

Il principio di incertezza stabilisce che una osservazione della posizione cambia il momento di una quantità sconosciuta e indeterminabile in modo tale che dopo aver eseguito l'esperimento la nostra conoscenza del moto è limitata dalle relazioni di incertezza. [Heisenberg 1930]

Posso considerare $\Delta x \cong d$ come l'incertezza sulla conoscenza della posizione della particella e $\Delta p_x \cong h/d$ come l'incertezza minima sulla predizione del valore del suo impulso. Similmente posso affermare che dopo una misura di posizione su un singolo sistema eseguita con una imprecisione Δx , la mia conoscenza dell'impulso diviene incerta di almeno $\Delta p_x \cong h/d$. Allora potremmo dire che meglio conosco la posizione di una particella in un certo istante meno so dove andrà a finire dopo.

Potrebbe sembrare che l'esistenza delle relazioni di incertezza implichi una perturbazione ineliminabile dell'osservazione sul moto della particella, ma che questa possieda, come i corpuscoli classici, una ben definita traiettoria e sempre ben definiti valori della posizione e dell'impulso. Lo strumento di misura perturba tali valori rendendoli inconoscibili come condizioni iniziali del moto con precisione assoluta.

Al contrario gli effetti di interferenza e diffrazione indicano che il modello corpuscolare della materia ha una validità circoscritta. I limiti di applicabilità del modello corpuscolare sono calcolati da quello ondulatorio (e viceversa). L'elettrone acquista un ben definito momento o una ben definita posizione solo durante il collasso della funzione d'onda, in relazione alla grandezza che desideriamo misurare e dunque dell'apparato col quale esso interagisce. La misura crea una perturbazione dello stato quantistico e non delle proprietà classiche del sistema. Secondo Heisenberg, prima dell'osservazione posizione e momento sono soltanto potenzialità opposte e indeterminate. In questo senso il principio di incertezza è un principio di indeterminazione.

Nelle equazioni della meccanica classica una conoscenza esatta della velocità (e quindi dell'impulso) e della posizione in un certo istante sono entrambe necessarie per la descrizione precisa del moto successivo del sistema. Le relazioni di incertezza pongono dei limiti invalicabili alla conoscenza acquisibile delle condizioni iniziali dei sistemi. Questa imprecisione delle condizioni iniziali ha come effetto un'incertezza nella descrizione deterministica classica della loro evoluzione temporale. Da ciò segue la necessità di adottare una descrizione probabilistica dei fenomeni.

Ora è possibile chiedersi: se le particelle possiedono anche una natura ondulatoria e valgono le relazioni di incertezza di Heisenberg, perché le traiettorie che si osservano nella camera a nebbia o nella camera a bolle sembrano così ben definite e assomigliano in tutto alle traiettorie dei corpuscoli classici?

Ciò è dovuto all'estrema piccolezza della costante di Planck h . Il valore estremamente esiguo di h rende conto, almeno in parte,⁶ anche del comportamento classico degli oggetti macroscopici. Infatti, ricordando la relazione che lega l'impulso alla velocità $p_x = mv_x$ (per semplicità ci limitiamo al solo caso unidimensionale), abbiamo $\Delta x \Delta v_x = h/m$, per cui alla nostra scala gli effetti del principio di Heisenberg sulle incertezze delle condizioni iniziali sono sicuramente trascurabili. Ad esempio, se $\Delta x_x = 0,1 \text{ mm}$ e la massa dell'oggetto è $m = 1 \text{ mg}$, l'incertezza sulla velocità è dell'ordine di 10^{-23} m/s . In generale la teoria classica permette, alla nostra scala di grandezze, predizioni estremamente precise, nonostante le relazioni di incertezza.

Secondo l'ottica ondulatoria gli effetti di diffrazione e interferenza sono trascurabili, e si riduce alla descrizione dell'ottica geometrica, quando le lunghezze d'onda del fenomeno ondulatorio sono molto minori delle dimensioni in gioco: $\lambda \ll L$.

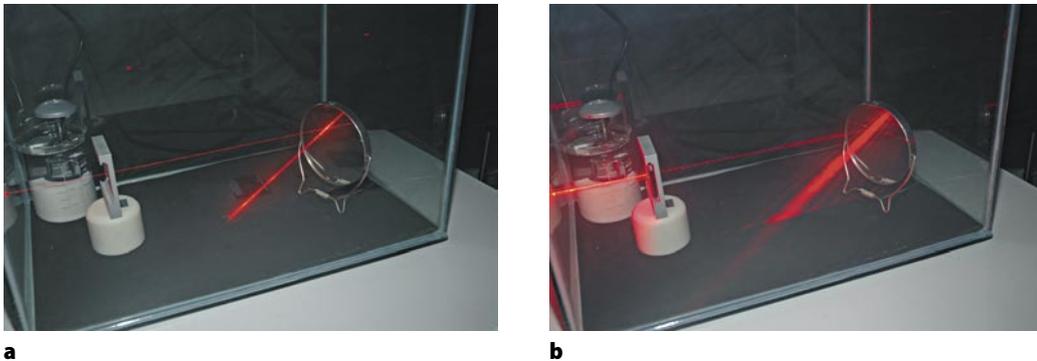


Figura 5: Nella figura a sinistra un fascio laser di luce rossa, largo alcuni millimetri, oltrepassa uno schermo di qualche centimetro di apertura e si riflette su uno specchio: siamo certamente nel regime dell'ottica geometrica. A destra lo stesso fascio prima di arrivare allo specchio incide contro una fenditura di $0,04 \text{ mm}$, dunque dalle dimensioni non lontane da quelle della lunghezza d'onda del laser. Assistedo infatti ad un fenomeno ondulatorio di diffrazione col conseguente allargamento del fascio (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

Nell'ottica geometrica i raggi, cioè le normali ai fronti d'onda, si possono identificare con le traiettorie di corpuscoli classici. Ricordando che i limiti di validità del modello corpuscolare sono dovuti proprio al fatto che le particelle posseggono anche delle proprietà ondulatorie, possiamo chiederci qual è l'ordine di grandezza della lunghezza d'onda di un oggetto macroscopico.

Se per esempio il corpo precedente viaggiasse alla velocità di 1 cm/s , avremmo, per la relazione di de Broglie $\lambda = h/p$, una lunghezza d'onda $\lambda = 10^{-25} \text{ m}$. Questa è certamente molto più piccola delle dimensioni degli oggetti macroscopici, per cui gli effetti ondulatori di interferenza e diffrazione sono sicuramente irrilevanti: un uomo che attraversa una porta difficilmente osserverà su se stesso effetti di diffrazione.

⁶ Il "limite classico" della meccanica quantistica, cioè il passaggio dal mondo microscopico delle particelle elementari, degli atomi e delle molecole, al mondo macroscopico degli oggetti accessibili ai nostri sensi, è tutt'ora oggetto di intenso studio sia teorico che sperimentale. In effetti è su questa linea di confine che risiedono i maggiori misteri della teoria dei quanti, quali il già accennato problema del collasso della funzione d'onda.

Torniamo al problema delle tracce nella camera a nebbia. Ciascuna traccia è formata da una serie di goccioline le quali individuano con una certa inaccuratezza la posizione della particella e il suo cammino. Dunque la traccia equivale all'esecuzione di una successione di osservazioni spazialmente intervallate della posizione della particella. La larghezza trasversale delle scie è dell'ordine del millimetro, dunque macroscopica. Inoltre la larghezza delle tracce ci dà una misura dell'incertezza con la quale viene rivelata la posizione della particella. L'incertezza relativamente grande della posizione per una particella microscopica fa sì che la corrispondente incertezza sull'impulso in generale sia piccola rispetto al valore del modulo dell'impulso.⁷ Cioè, se x è la direzione trasversale in un certo punto della traiettoria, l'associata incertezza minima sull'impulso è

$$\Delta p_x \cong h/\Delta x$$

e

$$\Delta p_x \ll p.$$

Ma il rapporto $\Delta p_x/p$ ci dà anche una stima dell'allargamento delle possibili traiettorie dovuto alle proprietà ondulatorie (vedi la figura 4 per un fascio di particelle e ricorda la relazione $\Delta p_x = p \sin \theta$). Per cui, se $\Delta p_x/p \ll 1$, ci aspettiamo che per una singola particella la traccia non cambi bruscamente direzione. Infatti, dalla relazione di de Broglie $p = h/\lambda$ e dalla relazione $\Delta p_x \cong h/\Delta x$ segue che per la disuguaglianza $\Delta p_x \ll p$ deve essere anche

$$\lambda \ll \Delta x,$$

condizione che in ottica corrisponde proprio alla possibilità di trascurare gli effetti ondulatori e di utilizzare una descrizione corpuscolare delle traiettorie, i raggi dell'ottica geometrica.

Dal punto di vista del formalismo quantistico, il moto della particella nella camera a nebbia è descritto dalla funzione d'onda ψ . Essa, quando è diversa da zero in una regione delimitata dello spazio, è rappresentata da un "pacchetto d'onde" (si pensi ad una piccola perturbazione che si muove sull'acqua). Un pacchetto d'onde può considerarsi come la somma di tante onde piane che interferiscono costruttivamente nella regione in cui la funzione d'onda è diversa da zero, e distruttivamente in tutto il resto dello spazio dove essa è nulla.

Un teorema della teoria quantistica dimostra che il centro del pacchetto, cioè il punto in cui è massima la probabilità di trovare la particella, si muove tracciando la traiettoria di un corpuscolo classico. Quando in una misurazione che localizza la particella l'incertezza Δx è grande rispetto alle dimensioni trasversali del pacchetto, secondo l'equazione di Schrödinger la condizione $\Delta p_x \ll p$ è soddisfatta. Allora il moto del pacchetto è poco disturbato dall'osservazione e il suo centro continua a seguire la traiettoria classica. Dunque approssimativamente la traccia corrisponde al percorso classico di un corpuscolo.

Se invece il requisito $\Delta p_x \ll p$ non si verifica, allora nel processo di misurazione, e quindi nell'interazione con le goccioline di nebbia, la particella può cambiare la

⁷ Per i muoni esso è in genere elevato poiché la maggior parte di loro arrivano a terra con velocità prossime a quella della luce.

sua direzione di propagazione (si pensi all'esperimento della singola fenditura). Ciò effettivamente accade per particelle dotate di scarsa energia, le cui tracce nella camera a nebbia sembrano seguire traiettorie a zig zag. In analogia all'esperimento della singola fenditura, possiamo pensare a tale effetto come a un fenomeno di diffrazione del pacchetto d'onde durante la localizzazione della particella.

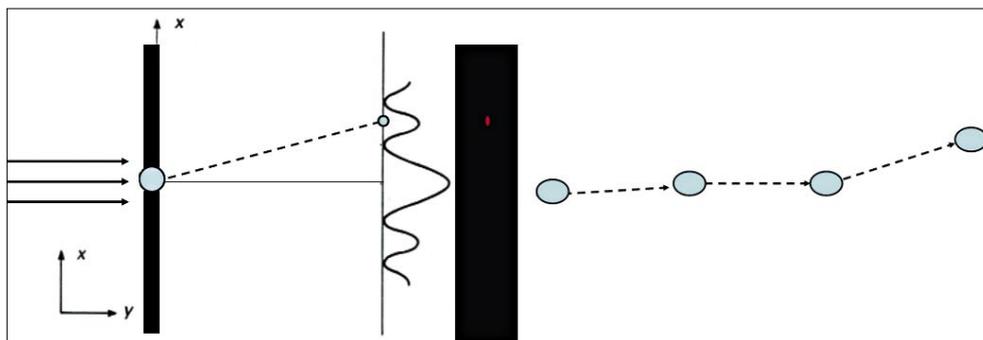


Figura 6: In termini del modello corpuscolare una particella che attraversa la fenditura interagisce con essa acquistando un impulso trasversale: più è piccolo il modulo dell'impulso e maggiore sarà la probabilità per la particella di essere deviata dalla traiettoria iniziale. In termini ondulatori un impulso minore corrisponde ad una lunghezza d'onda maggiore e dunque ad un effetto di diffrazione più accentuato. Possiamo paragonare le misure di posizione della particella sulla fenditura e sul secondo schermo a due misure successive di posizione ottenute con le goccioline d'acqua nella traccia della camera a nebbia (figura a destra).

Il dualismo onda-corpuscolo per gli elettroni

Le prime conferme sperimentali della natura ondulatoria dell'elettrone arrivarono poco anni dopo l'apparizione nel 1923 delle audaci ipotesi di de Broglie.

Attorno al 1910, seguendo il suggerimento di Max von Laue, Friedrich e Knipping avevano utilizzato un cristallo come reticolo di diffrazione per i raggi x ottenendo la prima prova sperimentale della loro natura ondulatoria. In precedenza erano stati eseguiti vari tentativi infruttuosi di osservazione degli effetti di diffrazione dei raggi x con reticoli ottici. Si era giunti allora alla conclusione che ciò poteva esser dovuto alla piccolissima lunghezza d'onda di questi.

Però, secondo von Laue, se i raggi x avessero avuto una lunghezza d'onda dell'ordine della distanza tra gli atomi nei cristalli, cioè di circa 1 angstrom, un cristallo avrebbe potuto funzionare come un reticolo di diffrazione tridimensionale. L'idea di von Laue fu verificata con successo dai due suoi colleghi Friedrich e Knipping.

Se un elettrone seguisse la relazione di de Broglie, ad una velocità v della particella dovrebbe corrispondere una lunghezza d'onda $\lambda = h/mv$, dove m è la massa dell'elettrone. Ad un elettrone con energia cinetica di circa 1000 eV dovrebbe perciò essere associata una lunghezza d'onda di $\lambda \approx 0,1 \text{ \AA}$ vicina alle dimensioni del passo reticolare di un cristallo.⁸ Come con i raggi x , si potrebbe dunque tentare di mostrare la diffrazione di un fascio di elettroni per mezzo di un reticolo cristallino.

⁸ La verifica è facile: basta ricavare la velocità dall'equazione $\frac{1}{2}mv^2 = 1000eV$ e sostituirla nella relazione di de Broglie $\lambda = h/mv$.

Guidati da questa argomentazione, nel 1926 Davisson e Germer eseguirono l'esperimento osservando la diffrazione di elettroni per riflessione dalla faccia di un cristallo. Qualche mese dopo George P. Thomson verificò la diffrazione di elettroni da polveri cristalline e da sottili fogli metallici. Le tecniche impiegate da Thomson, perfezionate e semplificate, sono oggi spesso adottate nella dimostrazione didattica della diffrazione da elettroni.⁹

Descriviamo brevemente questo modello di apparato (vedi la figura 7). Un filamento incandescente riscalda una lamina che emette elettroni per effetto termoionico. Gli elettroni vengono poi accelerati fino ad energie dell'ordine di $10^3 eV$ da una differenza di potenziale e diretti contro una sottile pellicola di cristallo. Il fascio diffratto di elettroni viene infine intercettato da uno schermo ricoperto di materiale fluorescente, il quale, eccitato dall'urto con gli elettroni, emette luce visibile nel punto d'impatto delle particelle.

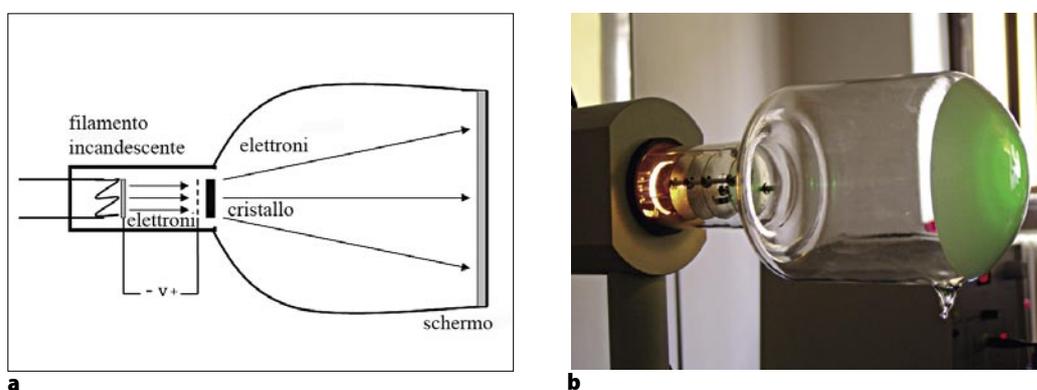


Figura 7: Schema dell'apparato utilizzato da Thomson (a sinistra) ed il reale tubo a diffrazione (a destra) (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

La sottile pellicola cristallina che funge da reticolo di diffrazione è un policristallo di grafite. In un policristallo la struttura cristallina non è regolare: possiamo pensare ad esso come ad un agglomerato di piccoli cristalli assemblati insieme con una orientazione casuale.

⁹ A questo scopo la ditta Leybold fornisce un tubo a diffrazione elettronico del tipo utilizzato da G. P. Thomson.

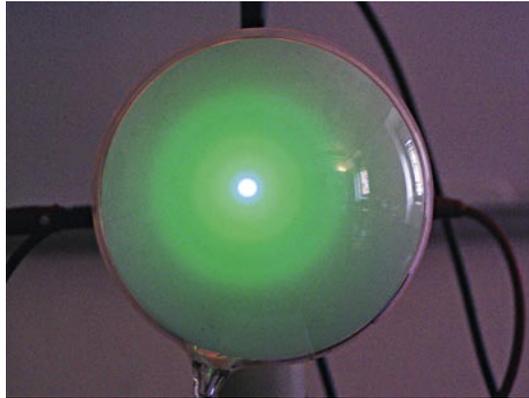


Figura 8: La diffrazione ad anelli concentrici del fascio di elettroni. La figura è del tutto simile a quella ottenuta per mezzo dei raggi x col metodo delle polveri cristalline di Debye-Scherrer (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

La diffrazione del fascio di elettroni è dunque simile a quello subito da un fascio di raggi x secondo il metodo di Debye-Scherrer delle polveri cristalline.

Se l'energia degli elettroni è adeguata, sullo schermo fluorescente si forma uno schema di diffrazione ad anelli. Ciò prova l'aspetto ondulatorio degli elettroni. Il raggio degli anelli e la loro distanza relativa dipendono dall'energia degli elettroni e dalla struttura del cristallo.

Possiamo dare una spiegazione intuitiva che renda ragione del particolare schema di diffrazione con un'analogia ottica. Consideriamo la figura di diffrazione ottenuta con un reticolo bidimensionale ottico. Questo può essere immaginato come una serie di punti di diffusione della luce disposti in maniera regolare ai vertici di un reticolo quadrato. La sua struttura ricorda dunque la disposizione degli atomi nel piano di un cristallo. Un laser sarà diffratto in una serie di fasci secondo uno schema che dipende dalla struttura del reticolo (vedi la figura 9).

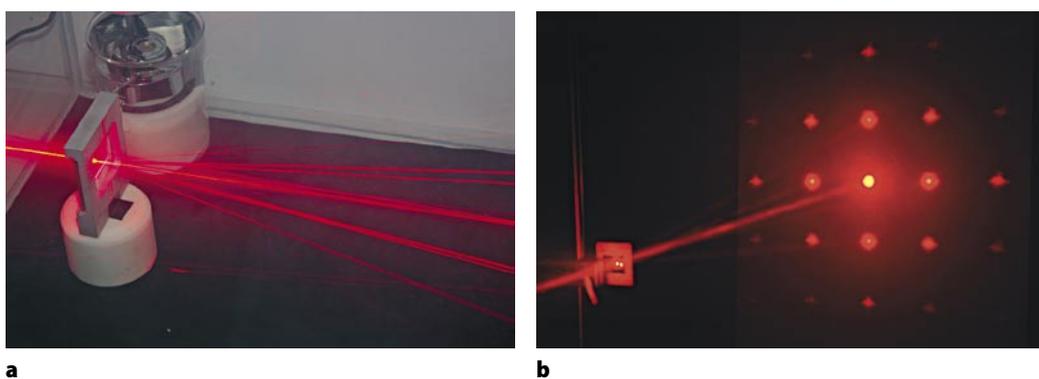


Figura 9: Diffrazione da un reticolo bidimensionale di un fascio laser di luce rossa. Uno schermo è disposto parallelamente al reticolo e ortogonalmente al fascio. Dall'analisi dello schema di diffrazione è possibile risalire alla particolare struttura del reticolo (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

Ora prendiamo il medesimo reticolo e riduciamolo in piccoli frammenti (ad esempio in quadratini di circa 2 mm di lato). Raccogliamo i piccoli pezzi di reticolo

in un telaio per diapositive in modo da ricoprire una certa area in modo casuale (vedi la figura 9 a sinistra). Allarghiamo il diametro del fascio laser con una lente e dirigiamo il laser contro la diapositiva in modo da colpire una buona parte dei frammenti (ma senza uscire dalla zona in cui vi sono pezzi di reticolo). Quello che si osserva sullo schermo è una successione di anelli di diffrazione del tutto simile ha quello esibito dai raggi x e dagli elettroni.

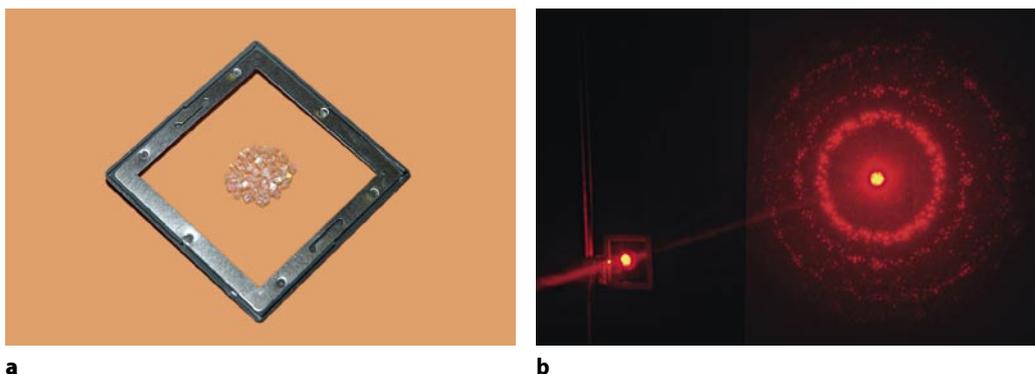


Figura 10: Il reticolo è ridotto in piccoli frammenti (foto di sinistra). Il fascio del laser, dal diametro allargato da una lente, incide sull'insieme dei pezzi di reticolo orientati in modo casuale. Il risultato sarà un insieme di fasci diffratti che disegnano sullo schermo una serie di cerchi concentrici (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

Infatti il reticolo spezzettato simula la struttura del policristallo e delle povere cristalline. Ciascun frammento di reticolo o di cristallo genera un suo disegno di diffrazione. La somma degli schemi di diffrazione di tutti i reticoli o di tutti i cristalli, essendo questi molti e disposti casualmente, e dunque in modo omogeneo in ogni direzione, genera gli anelli.

Come si può notare, ogni spot di diffrazione in figura 9 sta su un anello. Ed in effetti, se si ruota il reticolo intero della figura 9, si vede ruotare anche tutta la figura di diffrazione e gli spot si muovono circolarmente.

BIBLIOGRAFIA

- Per una introduzione divulgativa ai fondamenti della teoria dei quanti si può consultare: **Ortoli S. e Pharabod J. P.** (1991), *Il cantico dei quanti*, Edizioni Teoria, Roma-Napoli
- Di livello un po' più avanzato è: **Baggott J.** (1994), *The meaning of quantum theory*, Oxford University Press, Oxford
- Un'altra introduzione alla teoria quantistica, nella quale si può trovare anche una trattazione della diffrazione di elettroni da reticolo è: **Wichmann E. V. H.** (1976), *La fisica di Berkeley, Vol. 4: Fisica quantistica*, Zanichelli, Bologna

3.4. VISUALIZZAZIONE 3D DEL CAMMINO DELLA LUCE

Appuntamento in laboratorio

Materiali utilizzati:

- Un nebulizzatore a ultrasuoni (reperibile nei grandi magazzini, in negozi “New Age”, o in rete).
- Un acquario o una scatola trasparente di circa 40x30x30 cm.
- Un piccolo contenitore per il nebulizzatore (le dimensioni dipendono dal tipo di nebulizzatore).
- Sorgenti luminose: faretto, lampade, puntatori laser di vario colore da 5mW o anche di potenza minore.
- Dispositivi ottici vari: lenti, specchi, reticoli di diffrazione, schermi con fenditure.

In passato per visualizzare i raggi di luce sono state adoperate diverse semplici tecniche quali la diffusione della luce da polvere di gesso o da fumo. Il mezzo qui adottato fa uso invece della diffusione causata da una nebbia di acqua nebulizzata. La nebbia è prodotta da un nebulizzatore ad ultrasuoni¹⁰ (ultrasonic mist-maker) immerso in un contenitore colmo d’acqua. All’interno del dispositivo un elettrodo ceramico vibra ad alta frequenza (circa 1 MHz) generando ultrasuoni. Questi provocano la frammentazione della superficie del liquido e la nebulizzazione dell’acqua.

Tale tecnica produce una nebbia continua e omogenea che permette la formazione di immagini luminose, stabili e non discontinue. Per ovviare alla dispersione della nebbia e assicurarne l’omogeneità, il nebulizzatore è posto in una scatola dalle pareti trasparenti (un acquario può essere ottimamente adattato al nostro scopo). Inoltre, per evitare fastidiose riflessioni, con una stoffa nera adesiva si possono ricoprire le pareti della scatola che non intervengono nella visione diretta.

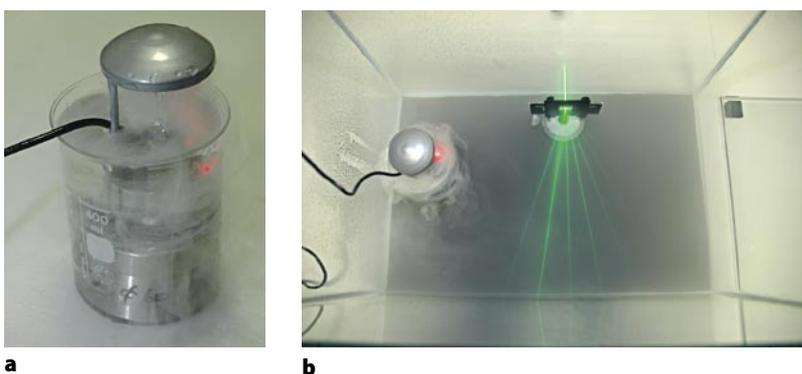


Figura 1: Il nebulizzatore e l’apparato sperimentale completo. L’immagine a destra riproduce la diffrazione da reticolo della luce di un puntatore laser verde (foto Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche).

¹⁰ Per maggiori particolari sul mist-maker vedi per esempio: <http://www.physlink.com/estore/cart/UltrasonicMistMaker.cfm>.

3.5. IL FOTOMOLTIPLICATORE

Approfondimento teorico

Il fotomoltiplicatore è un rivelatore di fotoni. Il principio su cui si fonda il suo funzionamento è l'effetto fotoelettrico: l'emissione di elettroni da parte di qualsiasi materiale quando sottoposto a radiazione elettromagnetica. Le seguenti leggi sperimentali sono alla base del fenomeno:

1. Per ogni sostanza esiste una frequenza della radiazione elettromagnetica, detta frequenza di soglia, al di sotto della quale non vi è emissione di elettroni, indipendentemente dall'intensità della radiazione incidente.
2. Il numero di elettroni emessi per unità di tempo da una data superficie della sostanza è proporzionale all'intensità della radiazione incidente su tale superficie.
3. L'energia cinetica degli elettroni emessi dipende dalla frequenza della radiazione incidente e cresce linearmente con questa, mentre è indipendente dall'intensità della radiazione.

Nel 1905 Einstein propose una spiegazione delle caratteristiche sperimentali della fotoemissione degli elettroni dai metalli. Sulla base dell'ipotesi con la quale Planck aveva formulato la descrizione teorica dello spettro del corpo nero, egli suppose che l'energia del campo elettromagnetico potesse essere trasportata per quantità discrete (fotoni) $E = h\nu$. Assumendo che un elettrone all'interno del metallo assorba un quanto di energia e che estrarre l'elettrone dal metallo richieda del lavoro contro le forze che lo tengono legato ad esso, Einstein scrisse per l'energia cinetica dell'elettrone la relazione:

$$E_{cin} = h\nu - W$$

dove W è il lavoro di estrazione ed è una costante caratteristica del materiale. Secondo il modello di Einstein, l'energia cinetica cresce linearmente con la frequenza, mentre il numero di elettroni emessi è proporzionale al numero di fotoni incidenti.

In un tubo fotomoltiplicatore i fotoni arrivano su di una superficie di vetro per essere convogliati contro una sottile lamina interna semitrasparente di metallo alcalino¹¹ (vedi figura 1).

¹¹ Si utilizza un metallo alcalino dato il suo basso lavoro di estrazione.

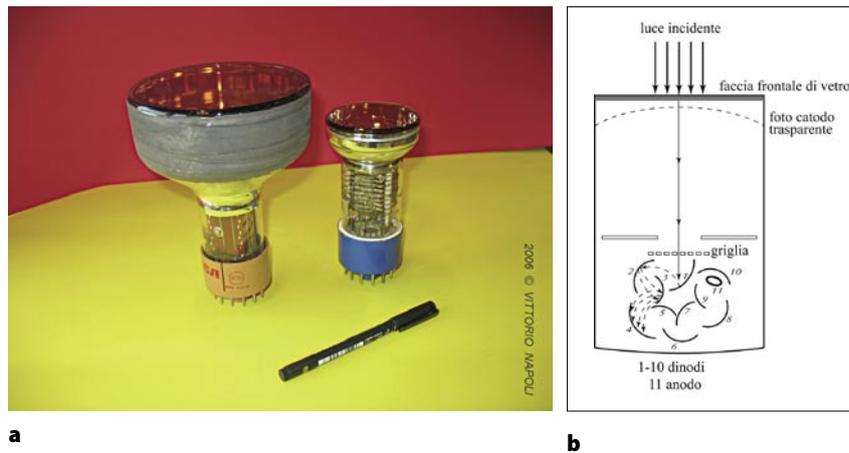


Figura 1: Tipici esempi di fotomoltiplicatori. A destra lo schema di funzionamento: il singolo elettrone emesso dalla lamina del fotocatodo genera ulteriori elettroni con un processo a cascata.

La lamina emette elettroni per effetto fotoelettrico. Essi vengono poi accelerati e focalizzati su di un primo dinodo da un campo elettrico. Gli elettroni emessi per urto da tale dinodo vengono anch'essi accelerati e focalizzati su di un altro dinodo, e così via fino ad essere raccolti da un anodo. Ogni elettrone che colpisce il primo dinodo genera altri elettroni al secondo dinodo, ciascuno dei quali al terzo dinodo ne genera altri. Il processo continua lungo tutta una serie di dinodi. Il risultato finale di questo processo a valanga è un segnale elettrico rivelabile. Per un elettrone prodotto per effetto fotoelettrico da un fotone, al primo dinodo sono estratti alcuni elettroni. Dopo una quindicina di stadi, in funzione delle tensioni applicate da dinodo a dinodo, (dell'ordine delle centinaia di Volt) il numero di elettroni finale può arrivare anche a 10^9 .

Un tipico fotomoltiplicatore può misurare fotoni in un intervallo di lunghezze d'onda di 100-1000 nm. Per rilevare luce ultravioletta la finestra del tubo deve essere costruita con materiale ottico opportuno (il vetro scherma l'ultravioletto), per esempio quarzo. Un parametro tipico di un fotomoltiplicatore è l'efficienza quantistica (Quantum efficiency, Q. E.), definita come il rapporto tra il numero di elettroni emessi dal fotocatodo e il numero di fotoni incidenti. Essa si aggira attorno all'1-10%. Il tempo di risposta dello strumento è di 1-15 ns.

Accoppiando il fotomoltiplicatore ad un materiale luminescente è possibile utilizzare tale strumento anche per rivelare particelle cariche. Il dispositivo così composto viene denominato contatore a scintillazione. Il primo contatore a scintillazione, lo spintariscopio, fu costruito da William Crookes nel 1903. Lo scintillatore era costituito da uno schermo di solfuro di zinco. Un microscopio e l'occhio umano fungevano da fotomoltiplicatore. Con lo spintariscopio Ernst Rutherford e i suoi collaboratori studiavano i decadimenti radioattivi e osservavano le radiazioni α . Le particelle cariche eccitavano il solfuro di zinco. Questo, nella diseccitazione, emetteva nella zona dell'interazione una debole luce osservabile tramite un microscopio.

Nei moderni contatori a scintillazione il passaggio di una particella carica provoca l'eccitazione degli atomi o delle molecole di un materiale luminescente. I fotoni generati vengono poi indirizzati tramite una guida di luce ad un fotomoltiplicatore (figura 2). Esistono scintillatori di vari tipi. Gli scintillatori più usati sono di materiale plastico, quale il polistirene, per le buone prestazioni e la facile lavorabilità.

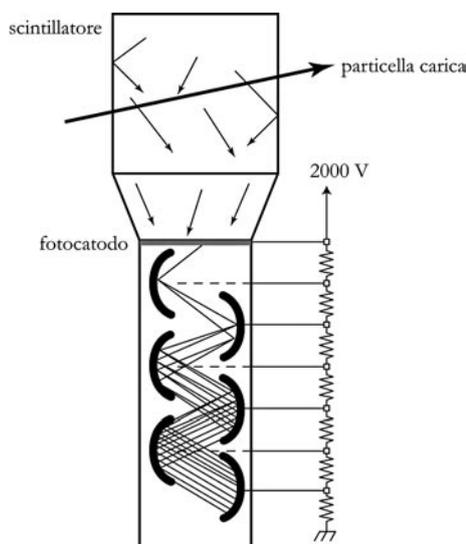


Figura 2: Schema di un contatore a scintillazione: una particella incidente eccita gli atomi o le molecole dello scintillatore che, tornando nello stato fondamentale, emettono luce. I fotoni indirizzati verso il fotocatodo da una guida di luce vengono trasformati in un segnale elettrico dal fototubo.

BIBLIOGRAFIA

- Una descrizione elementare del funzionamento dei fotomoltiplicatori e di altri rivelatori usati nella fisica delle particelle si può trovare nel libro di carattere divulgativo: **Grilli M.** (2002), *Oltre l'atomo. Cento anni di particelle*, edizioni Dedalo, Bari
- Per una trattazione più accurata si può consultare il volume di livello preuniversitario (si raccomanda anche l'ultimo capitolo sul concetto di particella elementare): **Wichmann E. V.** (1976), *La Fisica di Berkeley 4, Fisica Quantistica*, Zanichelli Editore, Bologna
- In rete una descrizione dettagliata delle caratteristiche dei fotomoltiplicatori si può trovare nel sito:
<http://www.ct.infn.it/~rivel/Tipi/PM/fotomoltiplicatori.html>
<http://dept.physics.upenn.edu/balloon/phototube.html>
- Più notizie sugli scintillatori si possono trovare invece in:
<http://www.ct.infn.it/~rivel/Tipi/Scint/scintillatori.html>
- Sugli scintillatori, fototubi e altri detectors utilizzati in fisica delle particelle:
<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/applications/phototubes.html>

3.6. LA CAMERA A NEBBIA

Approfondimento teorico

La camera a nebbia è un dispositivo capace di visualizzare le traiettorie delle particelle cariche. È uno strumento fondamentalmente semplice: consiste di un contenitore trasparente riempito con vapore (ad esempio vapore di alcool o d'acqua) mantenuto in particolari condizioni di pressione e temperatura.

Una particella carica, avente sufficiente energia, ionizza lungo il suo cammino gli atomi del mezzo all'interno del dispositivo. Gli ioni prodotti fungono da nuclei di aggregazione per il vapore, il quale condensa in goccioline di nebbia creando una scia lungo la traiettoria della particella. Illuminando intensamente la camera, per via della diffusione della luce da parte delle piccole gocce, la traccia luminosa della nebbia rende la traiettoria osservabile ad occhio nudo.

La camera di Wilson

La prima camera a nebbia fu costruita nel 1900 dal fisico scozzese Charles Thomson Rees Wilson. L'interesse iniziale di Wilson era rivolto non ai metodi di rivelazione delle particelle, ma alla formazione delle nuvole.

Nel 1894 Wilson passò qualche settimana nella stazione meteo in cima al Ben Nevis, il monte più alto della Scozia, per compiere alcune ricerche sui fenomeni atmosferici.¹² Affascinato da strani effetti generati dalla luce sulle nubi attorno alla montagna, egli si propose di studiare tali manifestazioni in laboratorio. Ma come primo passo Wilson doveva essere capace di riprodurre una nuvola artificiale.

Vent'anni prima, un altro scozzese, l'ingegnere John Aitken, con una semplice tecnica ideata in Francia, aveva riprodotto delle nubi in miniatura e investigato sulla loro origine. Aitken dirigeva un getto di vapor acqueo all'interno di un grande vaso di vetro. Nel contenitore il vapore condensava in piccole gocce di nebbia.¹³ L'ingegnere notò che la formazione della nebbia era favorita dalla presenza di polvere nell'aria. Infatti, filtrando l'aria dalla polvere, immettendo cioè aria pura nel vaso, la nebbia non veniva quasi affatto generata. La ragione del fenomeno risiedeva nel fatto che le particelle di polvere agiscono da punti di attrazione per le molecole d'acqua, le quali condensano attorno ad esse.

In un successivo esperimento, Aitken pose dell'acqua sul fondo del vaso e attese finché al suo interno non si fosse raggiunta la condizione di saturazione del vapor

¹² Il monte Ben Nevis, oltre ad essere conosciuto per essere la montagna più alta della Scozia, è rinomato per il perenne cattivo tempo che imperversa sulle sue pendici. Wilson, all'epoca del suo soggiorno sul Ben Nevis, era un giovane ricercatore nel Cambridge Laboratory diretto da J. J. Thomson, lo scopritore dell'elettrone.

¹³ La nebbia e le nuvole sono composte da piccole gocce d'acqua. Esse appaiono bianche perché le goccioline diffondono la luce solare in eguale maniera per tutte le lunghezze d'onda del visibile (per intenderci, diffondono tutti i colori), come un foglio di carta bianca.

acqueo.¹⁴ Poi, con una repentina espansione del volume del contenitore, egli raffreddò l'aria nel recipiente. Come nell'esperimento precedente, Aitken poté verificare che con aria normale si assisteva alla formazione della nebbia, mentre con aria pura no. Il raffreddamento dell'aria, con la perdita di energia cinetica delle molecole d'acqua, permetteva a queste di aggregarsi attorno ai corpuscoli di polvere.

L'esperienza riproduceva abbastanza fedelmente quel che avviene in natura: il vapore prodotto dalla superficie delle acque sale verso l'alto incontrando aria via via più fredda. Le molecole d'acqua interagendo con questa perdono energia cinetica e si aggregano sui nuclei di condensazione formando le goccioline che compongono le nuvole (vedi la figura 1a, b, c).



Figura 1: Le nuvole si costituiscono per condensazione del vapor acqueo su corpuscoli di polvere (pollini, terriccio, fumo, sali, etc.). Nella foto a sinistra, una superficie cosparsa di granelli di sale è posta in un recipiente chiuso avente dell'acqua sul fondo. L'acqua evapora e nel contenitore si forma del vapor saturo. Il vapore condensa attorno ai grani di sale sciogliendoli (al centro) e formando delle goccioline (a destra) (Foto: V. Napoli)

Wilson riprodusse il procedimento utilizzato da Aitken per creare le nuvole in bottiglia. In uno dei suoi esperimenti egli fece subire alla propria “camera a nebbia”¹⁵ diverse veloci espansioni, una successiva all'altra. Queste, secondo il fisico scozzese, avrebbero dovuto ripulire la camera dalla polvere. Infatti, ad ogni espansione, il vapore raffreddandosi condensava e le goccioline ricadevano sul fondo della camera. Dunque, dopo ciascuna espansione, l'aria all'interno doveva diventare sempre più pura, se i nuclei di condensazione erano dovuti solo alla polvere. Un po' come la pioggia ripulisce l'aria delle nostre città dalle polveri sottili facendole cadere al suolo.

Tuttavia Wilson notò che un certo numero di goccioline continuava a formarsi, anche dopo molte espansioni ripetute. Egli dunque ipotizzò che potessero esistere nuclei di condensazione di altra natura, oltre ai corpuscoli di polvere, che non venivano eliminati né dalla sua procedura né dal filtraggio dell'aria. Secondo Wilson, questi nuovi “agenti di nucleazione” potevano essere degli ioni prodotti naturalmente nell'aria.

¹⁴ Parte del liquido contenuto in un recipiente chiuso evapora occupando lo spazio disponibile. La condizione di vapore saturo si verifica quando dalla superficie del liquido sfuggono tante molecole quante ne rientrano. Si tratta di un equilibrio statistico: in media il numero di molecole nella fase gassosa non cambia. Si dice anche che un volume d'aria è sovrassaturo di vapore quando abbassando la temperatura, o aggiungendo altro vapore, si provoca la condensazione del vapore.

¹⁵ In inglese “cloud chamber”, una traduzione letterale darebbe “camera a nuvola”.

Wilson espose la sua camera ad una sorgente di raggi x .¹⁶ E un'espansione che precedentemente aveva prodotto solo una leggera nebbiolina, questa volta creò una gran quantità di goccioline: le radiazioni dovevano aver prodotto tantissimi punti di condensazione. Una seguente espansione, tolta la sorgente di raggi x , non produceva più il medesimo abbondante numero di gocce: indizio che i nuclei di condensazione sopravvivevano in aria solo per un tempo limitato. Un'esposizione ad una sorgente di Uranio radioattivo diede effetti simili ai raggi x .

Il fisico scozzese allora suppose che i punti di condensazione fossero ioni positivi e negativi prodotti dalle radiazioni nell'interazione con l'aria. Per controllare la sua ipotesi egli creò un opportuno campo elettrico attorno alla camera ed effettivamente verificò che le goccioline di nebbia si formavano in quantità molto minore: gli ioni venivano spazzati via dalla camera attratti dai poli opposti del campo elettrico.

Per diversi anni Wilson si dedicò a ricerche sulla carica dell'aria atmosferica.¹⁷ Ma nel 1910 costruì una nuova più perfezionata camera a nebbia (figura 2) con la quale riuscì ad osservare per la prima volta le tracce delle traiettorie di particelle cariche.

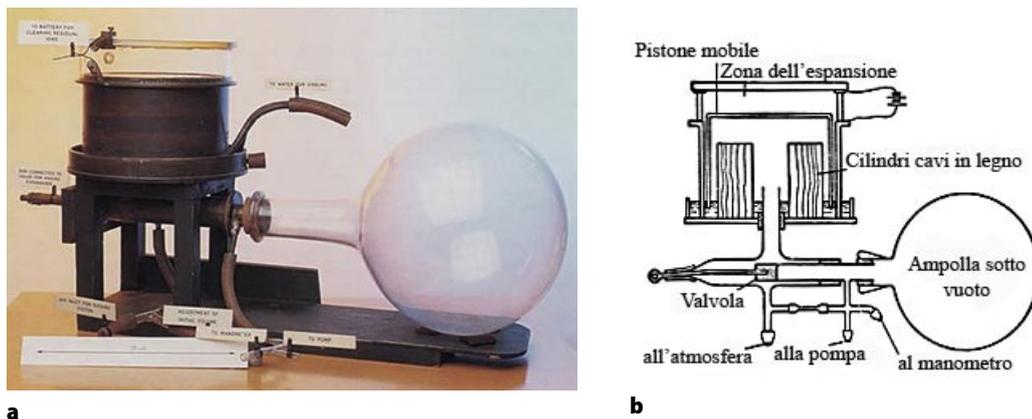


Figura 2: La camera a nebbia costruita da Wilson.

Egli escogitò un nuovo sistema d'espansione studiato in modo tale che questa sia molto veloce¹⁸ ma che allo stesso tempo non crei turbolenze che possano distorcere le traiettorie. Il cuore del dispositivo, dove avviene la formazione della nebbia, è un cilindro di vetro chiuso alla sommità. Il fondo della camera è costituito dall'estremità chiusa di un altro cilindro interno di ottone, che funge da pistone. Le basi dei due cilindri pescano liberamente in una bacinella piena d'acqua che mantiene la camera satura di vapore. L'espansione viene ottenuta per mezzo di un artificio: un'ampolla, in cui è stato fatto precedentemente il vuoto, è posta tramite una valvola in comunica-

¹⁶ Qualche anno prima il fisico tedesco Wilhelm Röntgen aveva scoperto i raggi x .

¹⁷ Poco più tardi Hess dimostrerà che gli ioni presenti normalmente nell'aria sono dovuti alla ionizzazione provocata dai raggi cosmici.

¹⁸ La velocità dell'espansione è importante affinché il gas nella camera raffreddandosi non abbia tempo di riscaldarsi acquistando calore dall'ambiente. Questo tipo di espansione si dice adiabatica.

zione con l'interno del cilindro di ottone. L'aspirazione dell'aria dentro di esso provoca una differenza di pressione che spinge verso il basso il fondo della camera. Il raffreddamento dell'aria con l'espansione, e il raffreddamento conseguente del vapore, causa la condensazione del vapore (l'aria in questa condizione si dice sovrasatura).

Inoltre un campo elettrico attorno alla camera raccoglie gli ioni presenti nell'aria e fa in modo che le cariche presenti siano principalmente quelle prodotte al momento del passaggio delle particelle ionizzanti.

Nel 1911 Wilson presentò le prime foto delle traiettorie delle particelle alla Royal Society (vedi la figura 3).



Figura 3: La prima fotografia scattata da Wilson. Il dispositivo che metteva in atto l'espansione era connesso ad un meccanismo che faceva scattare anche una macchina fotografica. Nella foto si osservano le tracce delle particelle α e β emesse da una sorgente radioattiva di radio (la sorgente è la piccola macchia bianca a sinistra). La scia lasciata dalle particelle β è flebile, mentre le particelle α lasciano una traccia molto più evidente.

Le particelle cariche con abbastanza energia, interagendo con gli atomi e le molecole d'aria, strappano da essi degli elettroni lasciando sul loro cammino una coda di ioni negativi (gli elettroni) e positivi (gli atomi e le molecole ionizzate). Durante l'espansione le molecole del vapor acqueo condensano attorno agli ioni formando una traccia visibile di goccioline.

Wilson osservò per prima cosa le tracce delle radiazioni emesse da un sale di radio. In assenza di radiazioni ionizzanti si formava solo una leggera nebbiolina, mentre alla presenza della sorgente radioattiva erano visibili delle scie ben evidenti, create dalle radiazioni α e β .

In seguito si scoprì che le particelle α corrispondono a nuclei d'elio, mentre le β ad elettroni. Poiché i nuclei d'elio hanno una carica doppia e una massa che è varie migliaia di volte più grande rispetto agli elettroni, hanno anche un potere ionizzante molto maggiore in confronto a questi. Quindi le scie lasciate dalle particelle α sono più spesse e nette di quelle lasciate dalle particelle β .

Successivamente Wilson prese anche foto degli effetti provocati nella camera dalla radiazione x . Un fascio di raggi x produce uno sciame di macchioline di nebbia, di piccole scie che a volte vanno dritte e a volte piegano. Ciò, secondo il fisico scozzese, era un evidente dimostrazione della capacità ionizzante dei raggi x . Lungo il loro cammino essi cedono energia agli elettroni dei diversi atomi che compongono l'aria.

Gli elettroni, espulsi dagli atomi a varie energie, sono a loro volta la causa di altre ionizzazioni che provocano le piccole scie di condensazione.

La camera di Wilson è stato uno strumento straordinario per lo studio delle particelle. Essa venne definita da Rutherford *il più originale e meraviglioso strumento nella storia della scienza*. Il dispositivo di Wilson ha permesso la verifica dell'effetto Compton,¹⁹ la scoperta del positrone e del muone da parte di Anderson, la successiva rivelazione della creazione di coppie elettrone-positrone e della loro annichilazione compiuta da Occhialini e Blackett e l'osservazione della fissione dei nuclei atomici realizzata da Cockcroft e Walton (per citare solo gli esperimenti più importanti).



Figura 4: Una versione modificata della camera di Wilson è stata ideata da Schurholz. Nella variante semplificata di Schurholz, l'espansione della camera a nebbia è provocata manualmente agendo con una piccola pompa (Foto: V. Napoli).

La camera a diffusione

Lo strumento costruito da Wilson, sebbene notevole, ha un difetto: non permette un'analisi dei fenomeni continua nel tempo: essa funziona soltanto per brevi intervalli di tempo. Una volta esaurito l'effetto dell'espansione, la camera cessa di operare. Nel 1936 il fisico statunitense Alexander Langsdorf, uno dei padri della bomba atomica, ovviò a questo inconveniente concependo un nuovo tipo di camera a nebbia, ancora più semplice di quella di Wilson. Il dispositivo di Langsdorf può reagire alle radiazioni anche per lunghi periodi. Con essa è stato possibile osservare agevolmente i muoni dei raggi cosmici.

Nell'apparato di Langsdorf il raffreddamento è provocato non da un'espansione, ma mettendo a contatto il fondo della camera con una sorgente capace di assorbire calore, come ad esempio del ghiaccio secco (anidride carbonica ghiacciata). Mentre il vapore utilizzato è quello di un alcool, in genere alcool metilico (vedi la figura 5).

¹⁹ Per le loro ricerche Wilson e Arthur Compton ricevettero insieme il premio Nobel nel 1927.

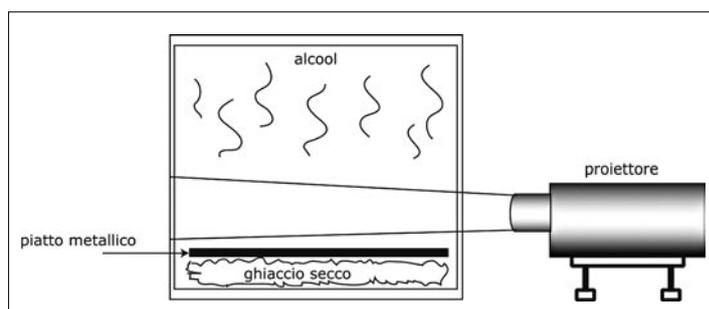


Figura 5: Una tipica camera a nebbia a diffusione utilizzata nella didattica. Il ghiaccio secco viene posto nel recipiente al di sotto della scatola trasparente, in contatto con il fondo metallico della scatola. La nebbia viene illuminata da una forte sorgente luminosa, come ad esempio quella di un proiettore per diapositive.

Il vapore di alcool cala dall'alto del contenitore (in genere uscendo da un tessuto inzuppato). Poiché la zona superiore della camera è circa a temperatura ambiente, mentre il fondo è alla temperatura del ghiaccio secco (-78 centigradi), si realizza all'interno di essa un gradiente di temperatura, cioè la temperatura dell'aria dentro la camera cambia al variare dell'altezza passando dalla temperatura del ghiaccio secco a quella ambiente. Il vapore di alcool diffonde verso il basso nella camera e venendo a contatto con l'aria più fredda comincia a condensare formando delle goccioline di nebbia. Esiste inoltre uno strato al di sopra del fondo in cui l'aria è troppo fredda e l'alcool non può esistere nella fase di vapore e condensa. In quella zona il vapore raggiunge la condizione di sovrasaturazione e l'alcool si trova soltanto sotto forma di nebbia.

Le particelle cariche che attraversano la camera nella regione di sovrasaturazione ionizzano l'aria e gli ioni prodotti costituiscono i nuclei di condensazione per il vapore di alcool. Come per la camera di Wilson, le scie di nebbia più spesse rendono visibili le traiettorie delle particelle.

Se sono assenti sorgenti radioattive, le sole scie che si osservano sono provocate dai muoni dei raggi cosmici.

La maggior parte delle tracce dei muoni procedono lungo una direzione rettilinea. Tuttavia qualche volta strisce di nebbia cambiano direzione improvvisamente. Questo accade quando i muoni decadono trasformandosi ad esempio in un elettrone e in uno o due neutrini. I neutrini, essendo neutri, non sono rivelabili dalla camera, mentre l'elettrone provoca la propria scia di condensazione. Altre volte la traccia segue una linea irregolare, a zig zag. Ciò succede per i muoni a bassa energia, i quali subiscono maggiormente gli effetti delle interazioni con gli atomi d'aria nella camera. Se invece i muoni hanno abbastanza energia, nell'urto con un atomo possono espellere un elettrone che può divenire capace di provocare una scia, allora le strisce di nebbia si diramano raddoppiandosi (figura 6).

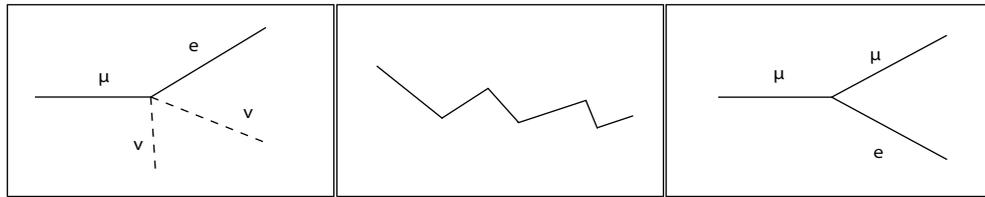


Figura 6: Oltre alla traiettorie rettilinea si possono osservare diverse altre tipologie di tracce.

Le particelle con velocità e cariche diverse producono tracce diverse, a causa del loro differente potere ionizzante. A parità di velocità, una particella con carica maggiore ionizza di più di una particella con carica minore. Ciò si spiega naturalmente considerando che le forze elettriche esercitate tra la carica e gli elettroni delle molecole sono proporzionali alla carica elettrica della particella. A parità di carica invece una particella lenta ionizza di più di una veloce. Questo perché per la particella lenta è più lungo l'intervallo di tempo in cui essa interagisce con una molecola. Nella figura 7 abbiamo esempi di tracce provocate da diversi tipi di radiazioni.

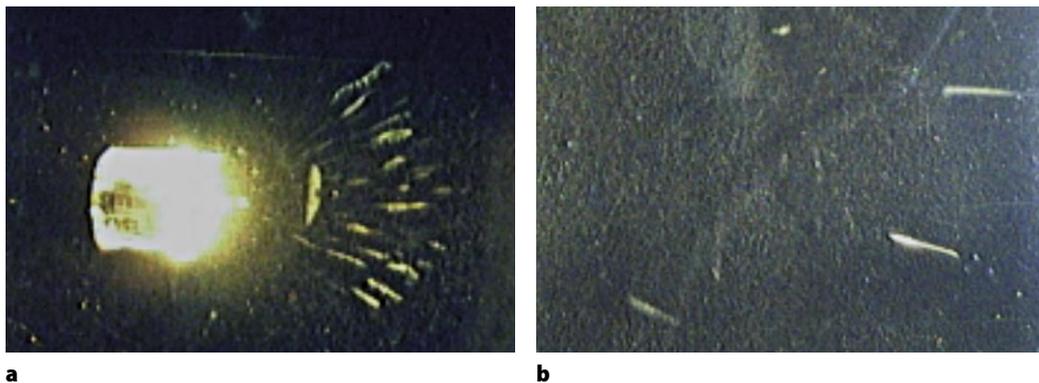


Figura 7: Nella foto a sinistra una sorgente radioattiva è posta nel centro della camera a nebbia. Le tracce lasciate dalle particelle α si distinguono nettamente, mentre quelle delle β sono più piccole e sfumate. Nell'immagine a destra si distinguono le scie provocate dai muoni (Foto: L. Bazzanella A. Cristofori).

Un'applicazione della camera a nebbia: la scoperta dell'antimateria

Tra le più notevoli scoperte realizzate con la camera a nebbia vi è certamente quella dell'antimateria. Nel 1932 il fisico americano Carl D. Anderson osservò tra i raggi cosmici la prima particella di antimateria (o antiparticella): il positrone. L'esistenza dell'antimateria era stata prevista teoricamente qualche anno prima dal fisico inglese Paul A. M. Dirac.

Gli oggetti della fisica microscopica devono essere descritti dalla meccanica dei quanti. L'equazione fondamentale che corrisponde nel micromondo alla seconda legge di Newton è l'equazione di Schrodinger. Tuttavia tale equazione non dà risultati consistenti quando le particelle hanno velocità prossime a quelle della luce, cioè in condizioni dove vale la teoria della relatività di Einstein.

Nel 1928 Dirac generalizzò l'equazione di Schroedinger per rendere la teoria dei quanti compatibile con la relatività. Tra le conseguenze teoriche dell'equazione di Dirac vi era che ad ogni particella deve corrispondere un'antiparticella, con stessa massa, stesso spin, ma di carica opposta. Il positrone è l'antiparticella dell'elettrone: ha la stessa massa, il medesimo spin, ma la sua carica è positiva.

All'epoca della sua scoperta Anderson era un giovane dottorando sotto la guida di Robert A. Millikan. Nell'ambito della sua campagna di ricerca sulla natura dei raggi cosmici, Millikan aveva affidato ad Anderson il compito di costruire una camera a nebbia immersa in un inteso campo magnetico. Con tale espediente i due fisici intendevano analizzare l'energia dei raggi cosmici secondari. Infatti una particella di carica q in moto con velocità \vec{v} in un campo magnetico \vec{B} è soggetta alla forza di Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}.$$

Tale forza è proporzionale all'intensità del campo magnetico, alla carica elettrica, alla velocità della particella ed è diretta perpendicolarmente sia alla velocità che al vettore del campo magnetico. Inoltre il suo verso dipende dal segno della carica.²⁰

Consideriamo il moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme. Supponiamo anche per semplicità che la velocità sia ortogonale al campo magnetico. La forza di Lorentz cambia allora la direzione del moto senza cambiare l'energia cinetica della particella e il modulo della sua velocità. Pertanto la particella esegue nel campo magnetico un moto circolare uniforme, a meno che non intervengano effetti dissipativi dovuti al mezzo nel quale la carica si muove. Ricordando l'espressione per l'accelerazione centripeta nel moto circolare, dall'espressione della forza di Lorentz abbiamo per i moduli:

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB.$$

Dunque il raggio della traiettoria è pari a:

$$r = \frac{mv}{|q|B}.$$

Esso è direttamente proporzionale alla quantità di moto e alla velocità, ed inversamente proporzionale al valore della carica elettrica e all'intensità del campo magnetico.

Scrivendo l'accelerazione centripeta in forma vettoriale $\vec{a} = \vec{\omega} \times \vec{v}$, da un confronto con la forza di Lorentz $m\vec{a} = q\vec{v} \times \vec{B}$, si ottiene facilmente che la velocità angolare della particella è:

$$\vec{\omega} = -(q/m)\vec{B}.$$

²⁰ In generale, se insieme al campo magnetico è presente anche un campo elettrico, la forza di Lorentz diviene $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, nella notazione del S.I.

Quindi la velocità angolare ha la medesima direzione del campo magnetico, ma un verso che è funzione del segno della carica elettrica: ha lo stesso verso per cariche negative e verso opposto per quelle positive (figura 8).²¹

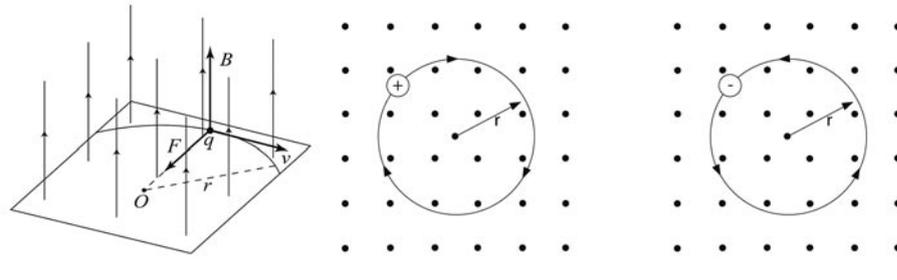


Figura 8: Una particella carica in moto all'interno di un campo magnetico è soggetta alla forza di Lorentz. Se il campo magnetico è uniforme e la velocità ortogonale al campo, la traiettoria della particella è circolare. Considerando il campo magnetico ortogonale ed uscente dal foglio, la traiettoria è percorsa in senso orario dalle cariche positive e in senso antiorario dalle cariche negative. Il valore del raggio della traiettoria ci dà inoltre informazione sulla quantità di moto posseduta dalla particella.

Ciò che Anderson rivelò col suo dispositivo fu che la camera era percorsa sia da cariche positive che negative. Inizialmente Millikan e Anderson pensarono fossero protoni, le uniche particelle positive conosciute a quel tempo.

Una frazione delle particelle era dovuta certamente a protoni, ma l'analisi delle tracce rivelava che la maggior parte doveva essere costituita da particelle molto più leggere. Per esser certo che si trattasse di particelle cariche positivamente, Anderson inserì una lastra di piombo nella camera. Nell'attraversamento della lastra una particella perde energia e quindi velocità, per cui il raggio della traiettoria circolare deve diminuire. Egli ottenne la fotografia riportata in figura 9.

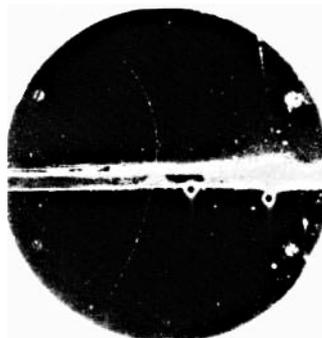


Figura 9: La foto della traccia del positrone scattata da Anderson. La banda orizzontale è l'immagine in sezione della lastra di piombo. L'intenso campo magnetico di 25000 Gauss era prodotto da un grande elettromagnete e la camera era inserita tra le sue spire (foto Wikipedia).

²¹ Le formule precedenti valgono in regime non relativistico, cioè per velocità basse rispetto alla velocità della luce.

Come si può notare, la parte superiore della traiettoria è più curva: la particella era dunque in movimento dal basso verso l'alto (rispetto alla pagina), perché nell'attraversare la lastra di piombo ha perso parte della sua energia. Dunque, poiché il campo magnetico era diretto ortogonalmente alla pagina ma con il verso entrante, non vi era dubbio che la particella possedesse una carica positiva.

Uno studio dettagliato della scia mostrava che la massa doveva essere simile a quella dell'elettrone. Lo stesso Anderson diede il nome alla nuova particella: positrone (da positive electron). Poco dopo, sempre con la camera a nebbia, egli scoprì anche l'esistenza dei muoni.

Nel caso generale in cui la velocità delle cariche non è esattamente ortogonale al campo magnetico, si può mostrare che le particelle seguono una traiettoria di tipo elicoidale. Nella figura 10 è rappresentato il campo magnetico terrestre e alcuni possibili cammini seguiti dalle particelle cariche dei raggi cosmici. In generale le particelle che si muovono sul piano equatoriale magnetico subiscono la maggiore deviazione, essendo le loro velocità ortogonali alle linee del campo. Inoltre più una particella è lenta e maggiormente viene deviata. Le cariche positive e negative vengono deviate in direzioni opposte. Ciò è responsabile dell'asimmetria est-ovest del flusso dei raggi cosmici, essendo questi composti prevalentemente da cariche positive.

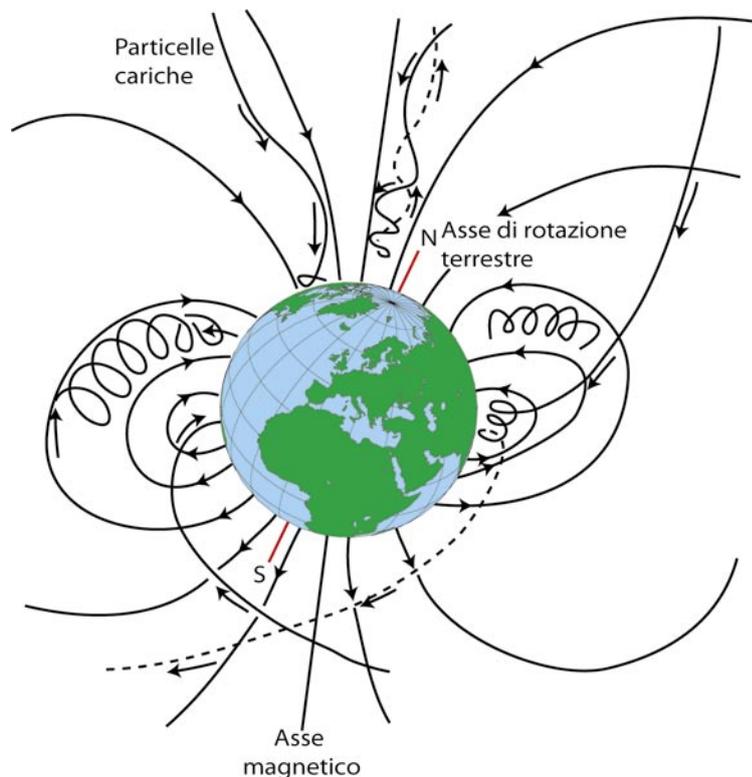


Figura 10: Possibili traiettorie seguite dai raggi cosmici nel campo magnetico della terra. Vi sono delle regioni, dette fasce di Van Allen, in cui le particelle cariche possono rimanere intrappolate per lungo tempo. Le cariche si accumulano attorno ai poli magnetici, dove interagendo con i gas dell'atmosfera provocano il fenomeno luminoso delle aurore boreali.

Un altro strumento per rivelare le tracce: la camera a bolle

La camera a nebbia rimase uno strumento fondamentale per la fisica delle particelle fino agli anni '50, quando venne soppiantata dalla camera a bolle. Questa venne inventata dal fisico americano Donald Glaser (si dice mentre contemplava le bollicine di un boccale di birra).

Nel dispositivo di Glaser le tracce sono visualizzate dalle scie di bollicine che si formano in un liquido trasparente (ad esempio xeno, propano o idrogeno liquido). Per osservare il passaggio delle particelle nella camera, viene velocemente abbassata la pressione in modo da portare il liquido al di sopra del punto di ebollizione. In tale situazione altamente instabile esso è detto surriscaldato. La particella carica ionizza gli atomi o le molecole del liquido e gli ioni prodotti fungono da centri di ebollizione, attorno ai quali si creano piccole bolle di vapore. La striscia di bollicine, illuminata con luce di forte intensità, individua il percorso delle particelle. Una macchina fotografica registra l'immagine delle tracce prima che l'ebollizione si propaghi nel resto della camera.

Nella camera a bolle la superiore densità del liquido rispetto all'aria permette di osservare con maggior probabilità l'interazione dei raggi cosmici e delle radiazioni con la materia. Inoltre, per il medesimo motivo, essa consente uno studio delle tracce con maggior precisione e definizione. Ad esempio, nella figura 11 si può analizzare la trasformazione di due fotoni γ in due coppie elettrone-positrone. Uno dei fotoni, oltre a convertirsi in un elettrone ed un positrone, ha espulso da un atomo un elettrone che ha provocato la lunga scia attraversante la camera.

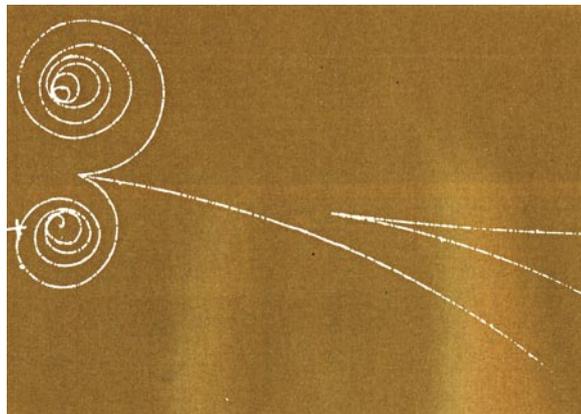


Figura 11: Interazione di due raggi γ con il liquido di una camera a bolle. I due raggi entrano nella camera da sinistra e si trasformano in due coppie elettrone-positrone. Il dispositivo è inserito in un campo magnetico diretto ortogonalmente alla foto e col verso entrante nella pagina (foto Wikipedia).

Il segno delle cariche è dedotto dal verso di percorrenza delle circonferenze. Le tracce formano delle spirali poiché le particelle perdono energia interagendo col liquido (ricordiamo che il raggio delle traiettorie è proporzionale alla velocità delle particelle).

BIBLIOGRAFIA

- Per l'uso della camera a nebbia nello studio delle particelle, si può consultare un classico sulla storia dei raggi cosmici:
Rossi B. (1971), *I raggi cosmici*, Einaudi, Torino
- Una introduzione elementare sulle proprietà dell'acqua con delle belle foto:
Wick W. (1997), *A drop of water*, Scholastic Inc., New York
- Come introduzione semplice alla fisica delle particelle si possono leggere i libri (tuttavia il secondo è un po' datato):²²
Grilli M. (2002), *Oltre l'atomo. Cento anni di particelle*, edizioni Dedalo, Bari
Ford K. F. (1975) *La Fisica delle particelle*, Biblioteca della EST, Mondadori, Milano
- Sul moto delle particelle cariche in un campo magnetico rimandiamo al libro (di livello universitario, ma la parte di nostro interesse è comprensibile anche con una preparazione minore):
Alonso M. e Finn E. (1984), *Elementi di fisica per l'università, campi e onde*, Vol. 2, Masson Italia Editore, Milano
- Sulla formazione delle nuvole e la pioggia si può consultare in rete:
http://www.meteo.it/meteorologia/piogge/436_awEpson.htm
- Un ottimo sito per la storia della camera a nebbia è:
http://www.phy.cam.ac.uk/camphy/cloudchamber/cloudchamber_index.htm
- Una spiegazione dettagliata su come costruire in casa una camera a diffusione si può trovare in:
<http://www.cosmicrays.org/muon-cloud-chamber.php>
- Nei seguenti siti sono scaricabili delle belle immagini di tracce nella camera a nebbia:
<http://www.telatomic.com/cloudchamber.html>
<http://www.lateralscience.co.uk/cloud/diff.html>

3.7. ESPERIMENTI SULLA CONDENSAZIONE DEL VAPOR ACQUEO

Appuntamento in laboratorio

Esperimento n. 1

Materiali utilizzati:

- Pompa di bicicletta
- Valvola per camera ad aria di bicicletta

²² I libri di divulgazione sulla fisica delle particelle in generale soffrono di un comune difetto: insistono molto sulla zoologia, sulla classificazione delle particelle elementari, e trattano piuttosto superficialmente le loro interazioni. In particolare utilizzano una descrizione esclusivamente corpuscolare della materia, trascurando l'aspetto ondulatorio e il concetto di campo, consegnando così un'immagine completamente parziale dei fenomeni.

- Bottiglia di plastica trasparente con tappo
- Fiammiferi

Si presentano alcune esperienze dirette ad illustrare l'importanza dei nuclei di condensazione per la formazione della nebbia e delle nuvole. Si fanno osservare inoltre gli effetti di una forte espansione adiabatica e di un elevato gradiente termico. Questi esperimenti introducono al funzionamento della camera ad espansione di Wilson e della camera a diffusione di Langsdorf.

Nella prima esperienza viene generata una nuvola in un contenitore. Del fumo viene immesso in una bottiglia (per esempio buttandovi un fiammifero appena spento, oppure bruciando il fiammifero sull'imboccatura del contenitore capovolto). Quindi la bottiglia viene chiusa con un tappo su cui è inserita una valvola per camere ad aria di biciclette, in modo che l'aria possa solo entrare (fig. 1).

Con una pompa si immette aria. Infine la bottiglia viene bruscamente aperta. Il vapor acqueo dentro di essa, per via della forte espansione dell'aria e del repentino abbassamento di temperatura, condensa sui corpuscoli di fumo (vedi foto nei "i contenuti del progetto").

È possibile eseguire una variante di questo esperimento senza immettere fumo nella bottiglia, quel che si osserva è che senza particelle di fumo non si forma una condensazione evidente.

**a****b**

Figura 1: Gli oggetti utilizzati per l'esperimento. Nella foto a destra si può notare come la valvola è inserita nel tappo. (Foto: F. Logiurato).

Esperimento n. 2

Materiali utilizzati:

- Acqua
- Sale
- Contenitori vari, come, ad esempio un piatto ed un bicchiere
- Un sostegno per i granelli di sale, ad esempio un tappo

In un piatto col fondo pieno d'acqua viene posto un sostegno sul quale sono sparsi alcuni granelli di sale. Un bicchiere (o qualche altro contenitore) che pesca nell'acqua ricopre il sale. Dopo un certo tempo, l'acqua evaporata nel bicchiere, raggiunge la tensione di vapore saturo e comincia a condensare sui granelli. Le molecole d'acqua, fortemente polari, sciolgono il cristallo di sale (ricordiamo che il cloruro di sodio è un cristallo ionico) e in corrispondenza dei granelli si formano delle goccioline d'acqua.

Perché il fenomeno sia evidente può esser necessario aspettare anche un paio d'ore (la fisica sperimentale spesso richiede pazienza!). Nel frattempo l'insegnante può andare avanti con la lezione. Per affrettare i tempi si può utilizzare acqua tiepida, in modo da raggiungere prima la condizione di saturazione. Questa dipende dal volume del recipiente, dall'umidità presente inizialmente e dalla temperatura dell'acqua.



Figura 2: L'apparato sperimentale al completo (Foto: V. Napoli).

Esperimento n. 3

Materiali utilizzati:

- Acqua calda e ghiaccio
- Una padella e un piatto
- Un fornello per il riscaldamento dell'acqua

Infine abbiamo un semplice esempio di condensazione del vapore dovuto ad un gradiente termico. Si pone una certa quantità d'acqua a scaldare in una padella, mentre in un piatto è messo del ghiaccio (per fare il ghiaccio si può sistemare nel freezer lo stesso piatto colmo d'acqua).

Ponendo il piatto poco sopra la padella, si osserva il vapor acqueo condensare nella zona d'aria fredda attorno al piatto.



Figura 3: Nella foto la condensazione del vapor acqueo è molto meno evidente che ad occhio nudo. Se anche il piatto è stato in ghiacciaia, il vapore condensa principalmente sotto di esso. Sul fondo del piatto compaiono pian piano delle goccioline d'acqua che ricadono nella padella (piove!). (Foto: F. Logiurato)

Il “fumo” che esce dalle pentole d'acqua bollente è vapore che condensa incontrando aria fredda.

Affinché il fenomeno dovuto al raffreddamento causato dal ghiaccio sia evidente, si aspetti che l'acqua messa a scaldare sul fornello cominci a “fumare”. Quindi si tolga la padella dal fuoco e si attenda il suo raffreddamento. Quando poi la condensa non sarà più visibile, porre il piatto col ghiaccio sopra la padella: il vapore tornerà a condensare.

3.8. ALLESTIMENTO DELLA CAMERA A NEBBIA (CAMERA DI LANGSDORF)

Appuntamento in laboratorio

Materiali utilizzati:

- Camera a nebbia di Langsdorf: alcool, ghiaccio secco, faretto, specchio riflettore (per la luce solare), magneti (per la deviazione delle cariche), sorgente radioattiva (ad es.: Ra 226 – attività 3.3 k Bq)
- Camera a espansione portatile

La camera a nebbia ha avuto un ruolo molto importante sin dagli inizi della esplorazione del mondo subatomico. Infatti, dal momento del suo primo utilizzo per rivelare tracce di particelle nel 1911, ha permesso di visualizzare ogni tipo di fenomeno subatomico.

La camera a nebbia descritta in questo testo è in dotazione al Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento e permette di visualizzare le traiettorie delle particelle cariche, radiazione naturale e quella cosmica. Come illustrato in fig. 1, lo strumento si presenta

come una scatola metallica rettangolare munita di una finestra di vetro trasparente sulla faccia superiore. La scatola è divisa in due vani: uno inferiore, in cui viene posto il supporto col ghiaccio secco e uno superiore, in cui sono presenti i vapori di alcool e dove si formano le scie di condensazione causate dal passaggio delle particelle subatomiche.

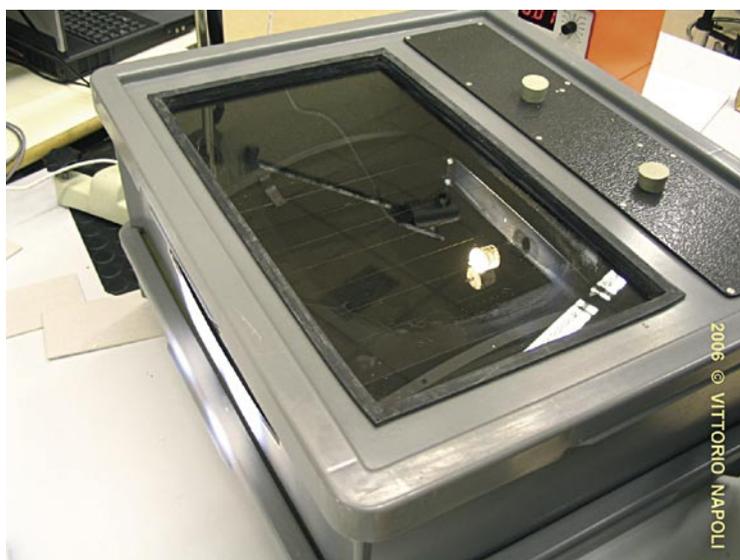


Figura 1: La camera a nebbia in dotazione (Foto: V. Napoli)

Nel vano superiore il raffreddamento è provocato portando a contatto il fondo con del ghiaccio secco e il vapore utilizzato è quello di un alcool metilico, versato in una apposita vaschetta dalla zona superiore. Diamo ora alcune indicazioni su come allestire la camera di Langsdorf in dotazione.

Un modo molto pratico per procurarsi del ghiaccio secco (anidride carbonica allo stato solido), consiste nel raccogliere in un sacchetto di stoffa il getto di un estintore per incendio a CO_2 (fig. 2 e 3).



Figura 2: Raccolta dell'anidride carbonica.



Figura 3: Il sacchetto di stoffa riempito di CO_2 (Foto: V. Napoli).

Il ghiaccio secco viene versato su un supporto di polistirolo che ne assicura l'isolamento. Nel caso illustrato, è presente un grosso magnete (in nero) che viene utilizzato per mostrare la curvatura delle tracce lasciate dalle particelle cariche più lente, in presenza di un campo magnetico.



Figura 4: Si versa l'anidride carbonica sul supporto di polistirolo recante il magnete (Foto: V. Napoli).



Figura 5: L'anidride carbonica viene compattata (Foto: V. Napoli).

L'anidride carbonica secca, che ha la consistenza di una meringa, viene compattata sul supporto e attorno al magnete utilizzando un foglietto rigido isolante (di plastica o di legno) avendo la precauzione di non toccare il magnete con le mani. Infatti, qualsiasi oggetto metallico raffreddato dall'anidride carbonica secca (-78°C) è in grado di provocare "ustioni" alla regione di pelle con cui viene a contatto.

Il supporto così preparato viene alloggiato nel vano inferiore camera (fig.6), a diretto contatto, assicurato da una molla di acciaio, col fondo del vano superiore.



Figura 6: Vano inferiore (Foto: V. Napoli).



Figura 7: Chiusura della camera (Foto: V. Napoli).

La finestra rettangolare indicata dalla freccia rossa (fig. 7) permette il passaggio del fascio di luce che illumina le tracce. Nell'esperimento illustrato, per illuminare la camera a nebbia, si è fatto uso sia di due faretto sia della radiazione solare riflessa da uno specchio. Quest'ultima soluzione ha dato un risultato migliore.



Figura 8: Chiusura della camera e spot dei faretto (Foto: V. Napoli).

Per creare il vapore sovrassaturo, viene versato dell'alcol nell'apposito contenitore della camera e, per aumentare la quantità di vapore, si pone nella camera una spugna o una pezzuola imbevuta di alcol.

Per osservare le tracce lasciate dalla radiazione cosmica, si oscura il locale dove si opera e ci si sporge sulla lastra di vetro che copre il vano superiore. Le tracce di condensazione del vapore sovrassaturo innescata dagli ioni generati dal passaggio delle particelle cariche non tarderanno ad apparire (fig. 9 e 10). È possibile riprendere le scie con un apparecchio fotografico digitale in automatico, escludendo il flash oppure con un tradizionale apparecchio a pellicola (sensibilità: 100 ASA) variando i tempi di esposizione da 1/10 a 1/60 di secondo, apertura diaframma F:4, a seconda dell'illuminazione.

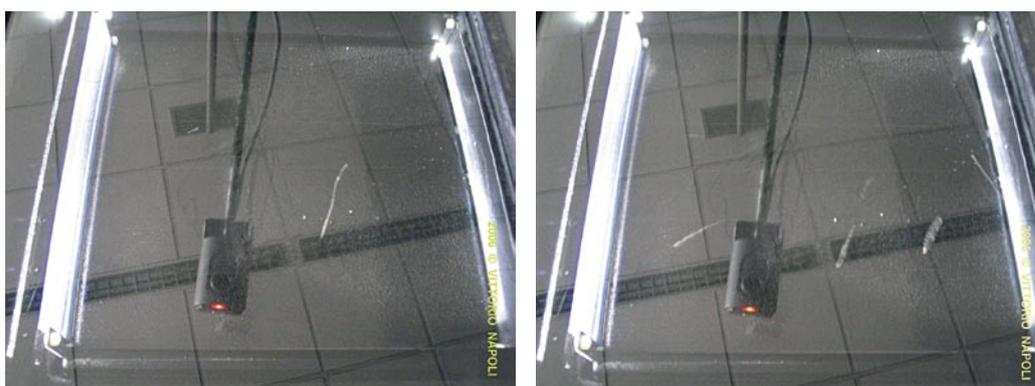


Figura 9 e 10: Tracce di condensazione lasciate dai muoni cosmici (Foto: V. Napoli).

Utilizzando una sorgente radioattiva (cilindretto metallico sul tappo di sughero), si possono visualizzare i raggi alfa e beta.



Figura 11: Sorgente radioattiva utilizzata (Ra 226 – attività 3.3 k Bq) (foto: L. Bazzanella, A. Cristofori).
Figura 12: Tracce di particelle alfa e beta (Foto: V. Napoli).

Nelle fig. 13, 14 è visualizzata una camera a espansione in plexiglass di ridotte dimensioni. Per questo dispositivo, le condizioni di sovrasaturazione del vapore dell'alcol, di cui è imbevuta la spugna situata sotto il disco nero, vengono causate da una rapida espansione del vapore all'interno della camera quando si aziona il pomello cavo di gomma (in arancione) sottostante la camera.

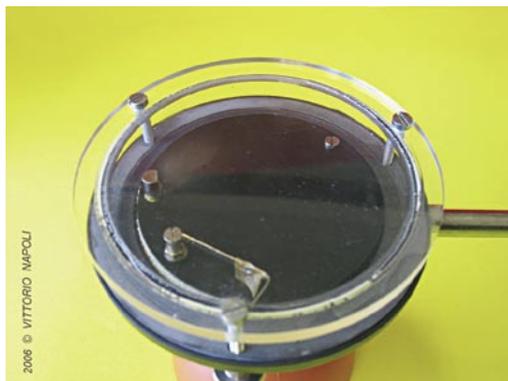


Figura 13 e 14: Camera a nebbia tascabile a espansione (Foto: V. Napoli).

3.9. L'ELETTROSCOPIO DI WULF

Approfondimento teorico

Verso la fine dell'800 si conosceva che la radiazione emessa da sostanza radioattive era in grado di scaricare gli elettroscopi. La velocità di scarica veniva considerata un indice dell'intensità della radiazione incidente. Theodor Wulf, un prete gesuita tedesco, intendendo studiare la ragione del fenomeno, costruì attorno al 1910 elettroscopi adatti a compiere misure più precise e quantitative rispetto a quelli già esistenti. A quell'epoca egli insegnava nel college gesuita di Valkenburg, nel sud dell'Olanda, una zona ricca di cave e miniere. Secondo la spiegazione più accettata, la

radiazione responsabile dello scaricamento degli elettroscopi era dovuta a sorgenti naturali presenti nel terreno o nelle rocce. Wulf pensò di sottoporre a verifica tale ipotesi eseguendo misure con i suoi nuovi elettroscopi nelle cave sotterranee di Valkenburg. Il gesuita, con meraviglia, contrariamente a ciò che si poteva intuire, trovò un abbassamento della radioattività. Con l'appoggio di alcuni colleghi dell'università di Parigi, egli eseguì misure della radiazione anche in cima alla Tour Eiffel. Sebbene le incertezze sui dati fossero tali da non poter concludere che vi fosse un aumento, tuttavia non si registrava neanche una netta diminuzione della radiazione all'aumentare con l'altezza.

Wulf formulò allora l'ipotesi che la principale sorgente della radiazione provenisse dall'alto, dall'atmosfera o dallo spazio. Esperimenti realizzati in alta montagna e quelli considerati veramente conclusivi eseguiti in pallone da Victor Franz Hess, di poco successivi, confermarono definitivamente l'ipotesi di Wulf: era nata la fisica dei raggi cosmici.

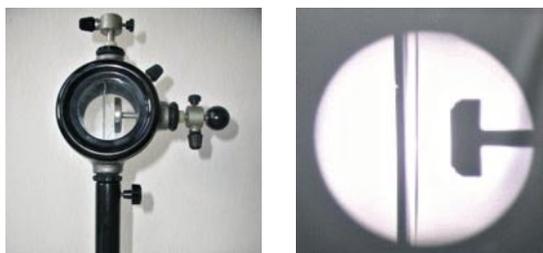


Figura 1: Una versione dell'elettroscopio di Wulf. Molti dei primi esperimenti sui raggi cosmici utilizzarono gli elettroscopi inventati da Wulf. Gockel, Hess, e Kohlhoester nelle loro ascensioni in pallone per misurare la dipendenza della radiazione cosmica in funzione dell'altezza, si servirono di tali dispositivi.

Nell'elettroscopio di Wulf le foglioline d'oro dell'elettroscopio tradizionale sono sostituite da una lamina di metallo e da una fogliolina di platino (figura 1). Il platino è mantenuto in tensione verso la lamina da un filo di silice. Nelle misure di radioattività l'elettroscopio è caricato costantemente tramite una tensione elettrica. La strisciolina di platino e la lamina si respingono e il platino toccando il cosiddetto disco di influenza (il disco verticale visto in sezione nella figura a destra) carica un elettrodo conduttore esterno isolato dal resto dell'elettroscopio (di forma sferica nella nostra immagine). Quando il conduttore ha la medesima tensione elettrica dell'elettroscopio, la fogliolina si stacca. Essa tocca nuovamente il disco d'influenza, e dunque il conduttore, solo se quest'ultimo viene scaricato. Se della radiazione ionizzante incide continuamente sull'elettrodo, si ha un ricorrente processo di scarica, da parte della radiazione, e carica, da parte della fogliolina e l'elettroscopio. La strisciolina di platino si muoverà a scatti qua e là tra il disco d'influenza e la lamina. Il numero degli scatti della fogliolina per unità di tempo ci darà una misura dell'intensità della radiazione. Maggiore è il numero degli scatti, più veloce è la scarica dell'elettrodo e dunque più intensa la radiazione.

BIBLIOGRAFIA

- Sull'utilizzo degli elettroscopi nei primi esperimenti sui raggi cosmici si può consultare il libro:
Rossi B. (1971), *I raggi cosmici*, Einaudi, Torino
- Notizie di Theodor Wulf si trovano nel sito:
http://en.wikipedia.org/wiki/Theodor_Wulf
- Un sito che descrive molti esperimenti con gli elettroscopi, dove imparare anche a costruirli:
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/maussion/elecstat/PagesFr/04Scope.html>
- Sulla storia e le applicazioni degli elettroscopi e le scoperte di Alessandro Volta:
http://www.aei.it/ita/museo/mbi_stru.htm

3.10. IL CONTATORE GEIGER

Approfondimento teorico

Il contatore Geiger è stato il primo strumento in grado di rivelare e allo stesso tempo di contare le particelle delle radiazioni. La sua ideazione risale al 1908 e si deve al fisico tedesco Hans Geiger, che a quel tempo risiedeva in Inghilterra per completare i suoi studi nel laboratorio di Rutherford.²³ Geiger lavorò al perfezionamento del suo dispositivo per più di vent'anni. Lo strumento che conosciamo oggi fu costruito da Geiger assieme al suo studente Müller intorno al 1928, per questo il rivelatore viene spesso denominato contatore di Geiger-Müller.

Per il suo basso costo e la sua portabilità è un dispositivo ancora oggi largamente utilizzato per rivelare bassi livelli di radioattività, quando non sono richieste analisi accurate delle energie trasportate dalle radiazioni.

Il contatore Geiger è costituito da un cilindro metallico mantenuto a potenziale negativo, che funge da catodo, e da un filo metallico posto lungo il suo asse a potenziale positivo (l'anodo, vedi fig. 1). Il cilindro è in genere incapsulato in un involucro di vetro contenente un gas nobile (per esempio neon o argon) a bassa pressione. Esso può misurare da pochi a qualche decina di centimetri di diametro ed essere altrettanto lungo.

²³ È lo stesso Geiger che con Ernest Marsden, sotto la guida di Rutherford, compirà nel 1912 il celebre esperimento sulla struttura atomica, nel quale radiazioni α vengono sparate contro gli atomi di una sottile lamina d'oro.

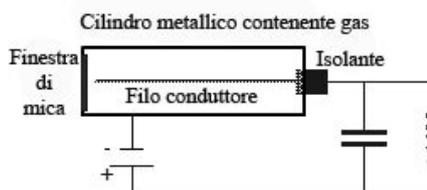


Figura 1: Schema di un contatore Geiger. Il cilindro costituisce la cosiddetta camera di ionizzazione del rivelatore. Nel disegno è rappresentato anche parte del circuito elettronico. Una particella ionizzante provoca il passaggio di corrente tra il filo e il cilindro producendo ioni nel gas. Il condensatore si carica per via degli elettroni raccolti dal filo metallico (collettore) e ai suoi capi si registra un impulso di tensione. La carica elettrica accumulata sul condensatore si scarica poi tramite la resistenza, riportando il rivelatore nella condizione di reagire ad una nuova ionizzazione. Un ulteriore circuito trasforma il segnale elettrico in segnale acustico od ottico ed informa del transito della particella.

Quando una particella ionizzante penetra nel cilindro, uno o più elettroni possono essere espulsi dagli atomi del gas. Se tra il cilindro ed il filamento vi è un'opportuna differenza di potenziale (tipicamente dell'ordine dei 1000 V) gli elettroni vengono accelerati verso il filamento provocando a loro volta ulteriore ionizzazione e istaurando un processo a valanga.²⁴ Il gas dielettrico, inizialmente ad alta resistenza, diviene altamente conduttore e sede di una scarica elettrica. Il filamento-anodo può raccogliere così una gran quantità di elettroni rispetto a quelli inizialmente prodotti dalla particella ionizzante. Nel circuito del contatore passerà così un impulso elettrico che viene trasformato in un segnale luminoso o acustico (il classico tic, tic, tic,...), il quale avverte lo sperimentatore dell'avvenuto passaggio della radiazione nel contatto Geiger.

Perché il contatore Geiger funzioni adeguatamente, la differenza di potenziale tra anodo e catodo deve essere ben calibrata: infatti, se fosse troppo bassa non si creerebbe il processo a valanga di elettroni, se d'altra parte fosse troppo alta, darebbe origine a scariche elettriche all'interno del gas anche in assenza del passaggio di radiazioni ionizzanti, dovute alla ionizzazione del gas causata dallo stesso potenziale. Quest'ultimo fenomeno è proprio quel che avviene nelle lampade a fluorescenza di basso consumo (vedi l'allegato sulla camera a scintilla).

La particella ionizzante può cedere parte della sua energia nella ionizzazione degli atomi o delle molecole del gas, ma anche semplicemente eccitando questi, che possono quindi emettere luce tornando ad un livello energetico più basso. Per tale motivo la quantità di elettroni raccolti dall'anodo non è necessariamente proporzionale all'energia della particella ionizzante. Dunque il contatore Geiger non può dare informazioni precise sull'energia posseduta dalle particelle.

I rivelatori Geiger sono in grado di rivelare particelle ionizzanti di adeguata energia, in particolare le radiazioni α , β , e γ prodotte nei decadimenti radioattivi, come anche i raggi X. Data la bassa penetrabilità della radiazione β (elettroni), il cilindro metallico del dispositivo viene in genere chiuso con una lamina di mica²⁵ di piccolissimo spessore (fig. 2).

²⁴ L'effetto degli ioni positivi è trascurabile, essendo dotati di una massa molto maggiore di quella degli elettroni e dunque molto più lenti di questi ultimi.

²⁵ La mica è un minerale di bassa densità e facilmente sfaldabile in fogli estremamente sottili.



Figura 2: Due contatori Geiger, in primo piano sono visibili le finestre di mica che chiudono i rivelatori (Foto: V. Napoli).

Esistono contatori Geiger modificati che possono rivelare anche i neutroni. Nel gas all'interno del cilindro del dispositivo viene inserito del fluoruro di boro. I neutroni, interagendo con i nuclei del boro, generano per fissione radiazione α ionizzante che a sua volta provoca la scarica nel contatore.

3.11. LA CAMERA A SCINTILLA

Approfondimento teorico

La camera a scintilla (in inglese spark chamber) è un ulteriore dispositivo che permette di rivelare il cammino delle particelle ionizzanti. Dagli anni '70 essa ha soppiantato la camera a bolle. La camera a scintilla è basata sul medesimo principio di funzionamento del contatore Geiger.

Una serie di piatti, o di griglie di fili, sono mantenuti ad alto potenziale col segno che cambia con periodicità (ad esempio, un piatto è un catodo, il piatto adiacente è un anodo e il successivo è di nuovo un catodo, e così via); tra i piatti è presente un gas ad alta pressione. Quando una particella col suo passaggio ionizza il gas tra due piatti, gli ioni del gas innescano tra di essi una scarica elettrica. Se i piatti sono disposti in maniera opportuna, la traccia di scintille tra i vari piatti individua il percorso della particella.

Sebbene la camera a bolle permetta una migliore definizione dei cammini e una maggiore visualizzazione dei dettagli delle interazioni, la camera a scintilla ha vari vantaggi pratici. Poiché una scintilla provoca una scarica tra i due piatti e quindi un passaggio di corrente, la traccia della particella può essere registrata automaticamente e anche analizzata da un calcolatore in tempo reale.

Ciò è molto utile nella ricerca di tracce particolari tra miriadi di scie di particelle, come spesso accade negli esperimenti di fisica delle alte energie. Le tracce possono essere dunque registrate elettronicamente e non sono necessarie foto per la loro analisi come avviene nella camera a bolle.

Un rudimentale dispositivo che illustra i principi di funzionamento della camera a scintilla può essere facilmente costruito utilizzando dei vecchi tubi a luce fluorescente.²⁶ Posizioniamo alcuni tubi uno sopra l'altro e attorcigliamo del filo elettrico attorno ad essi in modo da creare delle zone successive ad alto voltaggio (vedi la figura 1 e la scheda sperimentale per i particolari dell'assemblaggio).

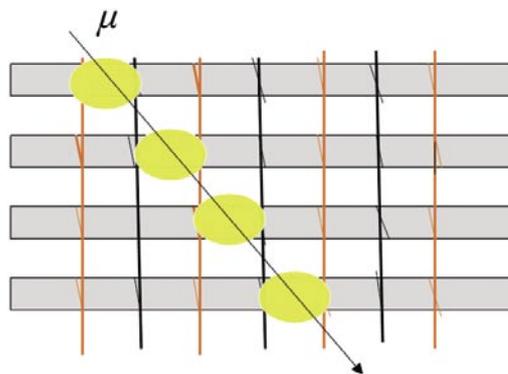


Figura 1: Schema di una camera a scintilla.

Ad esempio, poniamo a massa il conduttore nero e ad alto potenziale il conduttore rosso. Se una particella carica abbastanza energetica, ad esempio un muone dei raggi cosmici, attraversa un tubo, il gas presente nella lampada si può ionizzare innescando una scarica visibile in una delle sue sezioni. Se il muone attraversa varie lampade potremo seguirne il percorso per mezzo delle successive accensioni da esso provocate.

Difficilmente la radioattività di fondo potrà innescare più di un'accensione: perciò se si illuminano più tubi possiamo essere abbastanza certi che stiamo osservando muoni.

BIBLIOGRAFIA

- Maggiori notizie sulla struttura ed il funzionamento delle camere a scintilla si possono trovare in:
<http://www.ep.ph.bham.ac.uk/general/SparkChamber/indexhh.html>

²⁶ Sono i cosiddetti tubi al Neon. Si tratta di lampade a scarica. All'interno del tubo è presente un gas nobile (in genere Argon o Neon) e vapore di Mercurio. La luce viene emessa dal vapore di Mercurio il quale viene eccitato innescando una scarica elettrica nel tubo. La vernice fluorescente con cui è rivestita la lampada trasforma la luce quasi monocromatica del Mercurio in luce bianca.

- Per i dettagli sulla costruzione della camera a scintilla con le lampade fluorescenti rimandiamo al sito:
<http://www.cosmicrays.org/muon-spark-chamber.php>

3.12. ESPERIMENTI DI SCARICA NEI GAS

Appuntamento in laboratorio

Materiali utilizzati:

- Un accendigas piezoelettrico
- Tubi al neon, lampadine, tubi di Plucker
- Sfera al plasma giocattolo

In questa scheda si descrive come eseguire dei semplici esperimenti sulle scariche elettriche nei gas utilizzando lampadine, tubi al neon, accendigas piezoelettrici e una sfera al plasma giocattolo.

Sull'estremità di un accendigas piezoelettrico sono presenti due elettrodi. All'atto dell'accensione viene stabilita un'alta differenza di potenziale che fa scoccare una scintilla tra di essi. È possibile costruire un piccolo generatore di alta tensione togliendo l'involucro metallico che tocca uno degli elettrodi e saldando un filo conduttore ad uno di essi. Con l'accendigas sono eseguibili molti spettacolari esperimenti. Ad esempio, ponendo gli elettrodi ai capi di un tubo al neon se ne può provocare l'accensione; oppure è possibile osservare coi propri occhi i piccoli fulmini che si creano in una lampadina, mettendo in tensione il filamento di tungsteno ed il bulbo.



Figura 1: Con la tensione di un accendigas elettrico si possono creare scariche in una lampadina o in un tubo al neon. (Foto: F. Logiurato).

Interessanti esperimenti sono eseguibili anche con la sfera al plasma giocattolo (vedi foto all'interno di "i contenuti del progetto"). Ad esempio, si possono accendere i tubi di Plucker o i tubi al neon con la tensione del campo elettrico generato al suo esterno. In particolare si può sperimentare come, se i tubi sono troppo lontani, non vi è innesco della scarica: segno che la differenza di potenziale tra i capi dei tubi non è sufficientemente alta.

3.13. COSTRUZIONE DI UNA SEMPLICE CAMERA A SCINTILLA (SPARK-CHAMBER)

Appuntamento in laboratorio

Materiali utilizzati:

- Tre o quattro tubi al neon anche esausti
- Cavo di rame
- Generatore di alta tensione
- Supporti e connettori

L'apparato descritto può essere assemblato con materiali facilmente reperibili. L'unico strumento non "casalingo" consiste in un generatore di alta tensione che dovrebbe essere in dotazione in ogni laboratorio di fisica. Una avvertenza importantissima è che, date le tensioni di corrente in gioco, la costruzione e il funzionamento dell'apparato devono, almeno inizialmente, essere supervisionati da personale tecnico specializzato.

Il principio che interviene in questa esperienza è lo stesso che presiede a qualche piccolo esperimento del percorso, come la scarica elettrica in una lampadina con l'accendigas piezoelettrico. Per questo si rimanda al paragrafo 3.12.

Gli elementi base sono costituiti da tubi fluorescenti (impropriamente detti "al neon") che possono essere anche obsoleti o difettosi, purché integri, senza perdite del gas in esso contenuto (un buon esempio di riciclaggio a fini scientifici). Questi tubi, con un semplice assemblaggio, offrono la possibilità di visualizzare i muoni cosmici. Per l'esperimento sono sufficienti anche due tubi. Tuttavia si consiglia di usarne tre o quattro per rendere più alta la probabilità di aver visualizzato i muoni e non fonti di radiazione naturale.

Disponete i tubi parallelamente su un supporto isolante (ad esempio, su un telaio di legno) e avvolgeteli, uno a uno, con una "piattina" da elettricista scoperta (filo conduttore intrecciato a sezione rettangolare), come illustrato in fig.1. Il potenziale tra i fili può andare tra 100V a 1000V, in funzione della spaziatura tra gli elettrodi, del diametro dei tubi e dal numero di giri dei fili attorno ad essi.



Figura 1: Una semplice camera a scintilla costruita con dei tubi a luce fluorescente. (Foto: L. Bazzanella, A. Cristofori).

Collegate i fili al generatore di alta tensione, rispettando i colori: nero = terra; rosso = alta tensione. Per esempio, il primo filo si pone a terra, al secondo si dà tensione, il terzo a terra, al quarto si dà tensione e così via. Accendete il gruppo di alimentazione ed aumentate la tensione. A seconda delle caratteristiche dei tubi, del filo conduttore e del numero di giri attorno ai tubi, si presenteranno dei flash deboli in ogni segmento che si trova fra una tensione di 100V a circa CC 1000V. Non appena i muoni attraversano i tubi, il gas all'interno verrà ionizzato. Le particelle ionizzate vengono accelerate dal forte campo elettrico producendo una cascata di particelle e un debole flash (la scintilla) all'interno di ogni tubo. Per vedere i deboli flash, l'esperimento deve essere eseguito nell'oscurità.

Usate filo conduttore isolato di $\sim 5\text{mm} \times 0.8\text{ mm}$ (usato per collegare). Utilizzare i tubi spessi di diametro di 38 mm (quelli da 26 mm sembrano non funzionare). Inoltre la lunghezza del tubo è critica: provare almeno con tubi da 1200 mm di lunghezza.

Se vi procurate i vecchi tubi da un centro di riciclaggio, controllare se sono per luce visibile. Molti tubi da 38 mm sono tubi UV utilizzati per i solarium (cabine d'abbronzatura). Questi non funzionano, poiché la luce ultravioletta è invisibile ai nostri occhi.

Un esempio di collegamento

La seguente messa a punto sembra funzionare:

- filo conduttore di 0.8 mm x di 5 mm;
- tre giri attorno ad ogni tubo;
- distanza tra un filo e l'altro di circa 12cm;
- tensione CC di circa 850 V.

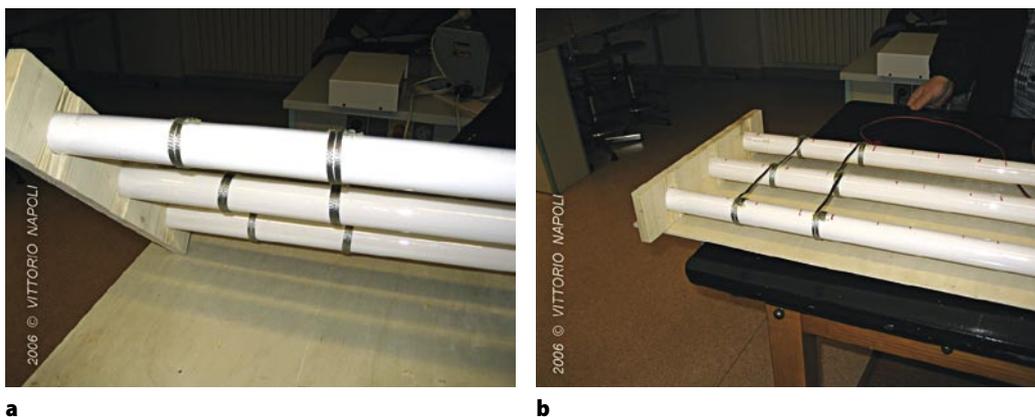


Figura 2: Esempio di collegamento dei tubi a fluorescenza (Foto: V. Napoli).

Osservazioni:

Per qualche motivo soltanto i segmenti esterni hanno mostrato dei flash. Il motivo di questo comportamento deve essere ancora determinato. Gli eventi erano di circa 1 flash ogni 2-3 secondi. Le rilevazioni di muoni (flash simultanei in 2 segmenti) avvenivano circa 30 ± 15 secondi.

Fate molta attenzione quando si ha a che fare con le alte tensioni!

3.14. IL RIVELATORE ČERENKOV

Approfondimento teorico

Secondo la teoria della relatività è impossibile, per un corpo dotato di massa, superare o eguagliare la velocità della luce. Accelerare fino alla velocità della luce una particella con massa inerziale non nulla richiederebbe una quantità di energia infinita. Tuttavia, se quella particella viaggia in un mezzo, allora è possibile che la velocità della particella sia maggiore della velocità che la luce possiede all'interno di quel mezzo. Se la particella è carica allora la sostanza può emettere radiazione. Questo effetto è stato scoperto nel 1934 dal fisico russo Pavel Alekseevic Čerenkov, dal quale prende il nome.

Čerenkov intendeva studiare la luminescenza emessa da certe soluzioni liquide quando vengono sottoposte ai raggi γ di una sorgente di radio.²⁷ Egli si accorse che accanto alla luminescenza era presente un'altra forma di radiazione emessa dai

²⁷ La luminescenza è la proprietà che manifestano alcuni materiali di assorbire radiazione elettromagnetica e riemetterla in parte a più basse lunghezze d'onda, nella regione del visibile. Uno di questi materiali è il fosforo (il suo nome deriva dal greco: *phos* sta per luce e *phoros* per portatore). La fosforescenza e la fluorescenza sono esempi di luminescenza.

solventi stessi. Čerenkov verificò che molti liquidi puri, come l'acqua e il benzolo, emettono una luce blu se irraggiati. Al contrario della luminescenza, che è diffusa uniformemente su tutte le direzioni, la radiazione rivelata da Čerenkov veniva emessa lungo la direzione dei raggi γ .

La spiegazione del fenomeno venne trovata pochi anni dopo da altri due fisici russi: Il'ja Mikhailovic Frank e Igor Evgenevic Tamm. Secondo i due scienziati la causa diretta della radiazione era dovuta non ai raggi γ , ma alle particelle cariche prodotte da questi nel mezzo. Consideriamo lo schema nella figura 1a. Supponiamo che un elettrone sia in moto con velocità costante in un solido o in un liquido (che per semplicità immagineremo composti da molecole non polari). Poiché l'elettrone è carico, esso lungo il cammino polarizza il mezzo, cioè deforma gli orbitali delle molecole che lo costituiscono: le cariche positive sono attratte dall'elettrone, mentre le cariche negative ne vengono respinte. Nelle molecole si creano quindi dei dipoli elementari.

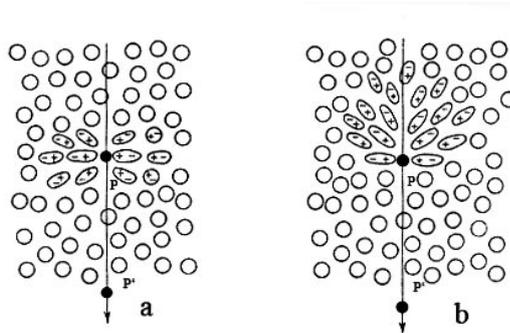


Figura 1: L'effetto di polarizzazione provocato da una carica negativa in moto all'interno di un dielettrico. La struttura della polarizzazione dipende dalla velocità della particella: più la particella è veloce, più si rompe la simmetria della polarizzazione lungo la direzione ortogonale al moto.

Ma nel passaggio dell'elettrone dal punto P al punto P' i dipoli scompaiono e le molecole tornano nello stato originale. Durante il movimento di redistribuzione delle cariche ognuna di esse si comporta come una piccola antenna ed emette un breve impulso elettromagnetico.

Tuttavia, per via della simmetria della polarizzazione, a grandi distanze dalla zona polarizzata la somma degli impulsi di tutte le molecole dà luogo ad un campo di radiazione pressoché nullo.

Ma la situazione muta se l'elettrone si muove molto velocemente (vedi figura 1 b). Infatti la polarizzazione delle molecole richiede un certo tempo per sparire e quindi può permanere anche quando l'elettrone è già lontano da esse. Se la particella carica è abbastanza veloce, è possibile che si crei una simmetria tale nel mezzo polarizzato per cui gli impulsi elettromagnetici dei singoli dipoli si sommano non distruttivamente e possa propagarsi un campo di radiazione rivelabile (In figura 2 abbiamo un esempio di luce Čerenkov).

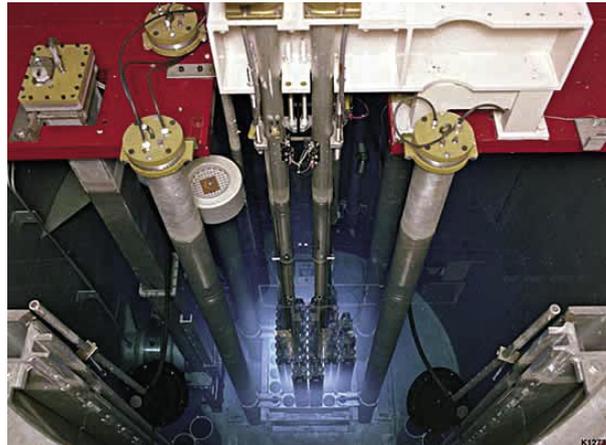


Figura 2: La radiazione Čerenkov all'interno di un reattore a fissione nucleare. Nel processo di fissione dell'Uranio vengono rilasciati prodotti altamente radioattivi. Questi generano per decadimento beta elettroni fortemente energetici. L'interazione di tali elettroni con l'acqua che circonda il nucleo del reattore crea la luce bluastra dell'effetto Čerenkov (foto: Wikipedia).

Una trattazione elementare del fenomeno può essere eseguita tramite il principio di Huygens. Consideriamo i singoli impulsi come le onde componenti un fronte d'onda totale (figura 3). Sia v_s la velocità della particella carica nel mezzo e $L = v_s t$ lo spazio percorso da essa nel tempo t (ad esempio, per andare dal punto A al punto B). Se $v = c/n$ è la velocità della luce nel mezzo, dove n è l'indice di rifrazione di questo, nel tempo t un'onda ha compiuto il cammino vt . Dalla figura si evince che affinché si crei il fronte d'onda costruttivo deve essere soddisfatta l'equazione $v_s t \sin \alpha = vt$, dove α è l'angolo di apertura del cono. Dunque la condizione di interferenza costruttiva si ha per:

$$v_s \sin \alpha = c/n$$

Dalla relazione precedente segue inoltre che affinché vi sia radiazione Čerenkov una condizione necessaria è che $v_s \geq c/n$ (essendo $\sin \alpha \leq 1$), cioè la velocità della carica deve essere maggiore della velocità della luce nel mezzo, come supposto inizialmente.

Notiamo infine che l'angolo di apertura α del cono è legato alla velocità della particella. Per cui conoscendo per altre vie la massa di questa, dalla forma del cono è possibile risalire alla sua energia.

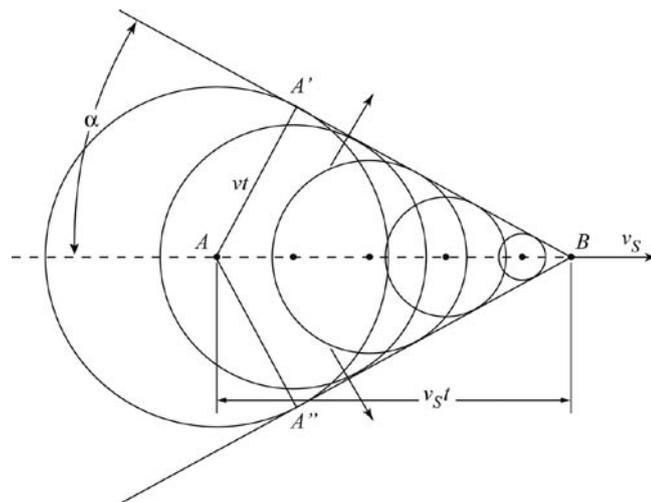


Figura 3: Le onde dei singoli impulsi elettromagnetici si devono sommare in fase per generare il fronte d'onda. Si noti come certi raggi delle singole onde sferiche (nel piano rappresentate da circonferenze) giacciono sulla direzione di propagazione del fronte d'onda e sono ortogonali ad esso. L'involuppo delle onde di Huygens genera un impulso di radiazione localizzato attorno ad una superficie conica. Tale cono ha il vertice sulla particella e ne accompagna il moto.

Il fenomeno che genera la radiazione Čerenkov è analogo a quel che avviene in meccanica quando un corpo si muove in un mezzo con una velocità superiore a quella delle onde elastiche del mezzo. Ad esempio, le onde che compaiono sulla superficie dell'acqua provocate da un motoscafo (o da un cigno come nella figura 4 a sinistra), si costituiscono in una configurazione che richiama la forma dell'impulso elettromagnetico di Čerenkov.

Un effetto simile accade anche durante il volo nell'aria di una pallottola (vedi figura 4 a destra) o di un aereo supersonico. Le onde sonore prodotte da tali oggetti vengono compresse attorno ad una superficie conica, detta cono di Mach. Quando un osservatore viene colpito da questa onda d'urto ode il caratteristico sibilo della pallottola o, nel caso dell'aereo supersonico, un vero e proprio boato (sonic boom).

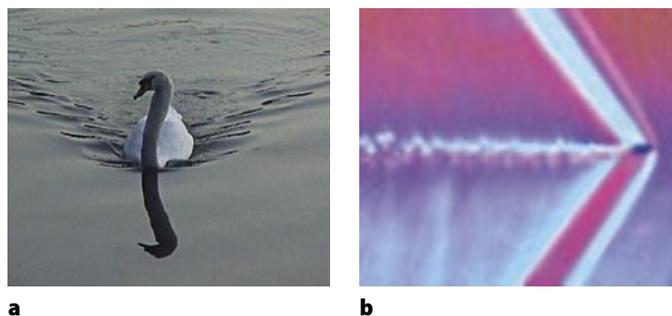


Figura 4: Due esempi di cono di Mach. Nel 1887 il fisico e filosofo austriaco Ernst Mach fu il primo ad ottenere una foto dell'onda d'urto generata dal moto di un proiettile, che in suo onore è stata chiamata col suo nome. Egli sfruttò la dipendenza dell'indice di rifrazione dalla densità dell'aria. Una sorgente luminosa di alta intensità illuminava per un brevissimo intervallo di tempo la pallottola e ne proiettava l'ombra su uno schermo (foto: Wikipedia).

In figura 5 è riprodotta la foto di un aereo al momento di superare la barriera del suono. In particolari condizioni di umidità e temperatura dell'aria, la bassa pressione dietro l'onda d'urto provoca la condensazione del vapore in una nuvola.



Figura 5: Un aereo militare nell'istante in cui supera la barriera del suono. Particolari condizioni di bassa pressione e umidità, al momento della creazione dell'onda d'urto, provocano la condensazione del vapor acqueo (foto: Wikipedia).

Un detector Čerenkov è qualsiasi dispositivo che si avvale dell'effetto Čerenkov per rivelare particelle. In genera è costituito di un contenitore riempito di acqua pura che funge da dielettrico polarizzabile. La luce provocata dal passaggio di una particella carica con sufficiente velocità viene raccolta da uno o più fotomoltiplicatori, che quindi segnalano la presenza della particella nel rivelatore (figura 6).

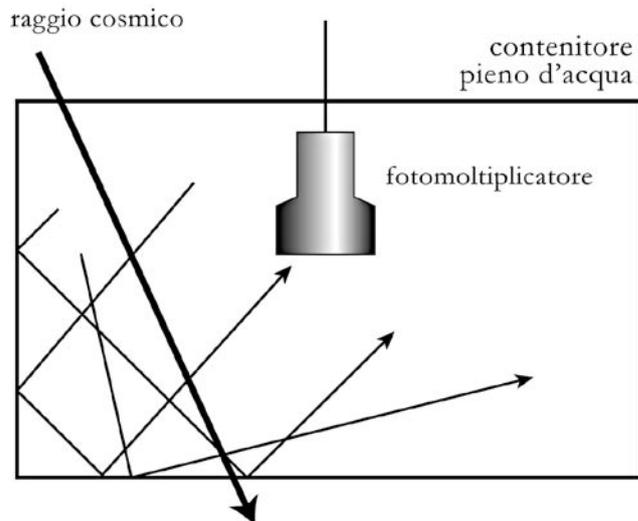


Figura 6: Schema di un rivelatore Čerenkov. Un contenitore dalle pareti speculari è riempito di acqua pura. Quando un raggio cosmico attraversa il recipiente, un fotomoltiplicatore raccoglie la luce generata da esso per effetto Čerenkov.

Due importanti rivelatori di neutrini utilizzano l'effetto Čerenkov: il Kamiokande e il SuperKamiokande, realizzati nelle miniere di Kamioka in Giappone. I neutrini interagiscono debolmente con la materia, tuttavia è possibile che qualche neutrino altamente energetico ionizzi un atomo e trasferisca buona parte della sua energia ad

un elettrone. In tal caso l'elettrone può causare la luce Čerenkov. I detector giapponesi sono enormi recipienti contenenti acqua purissima; le loro superfici sono disseminate di migliaia di fotomoltiplicatori. Il SuperKamiokande è alto circa 40 metri ed è di pari diametro (figura 7).

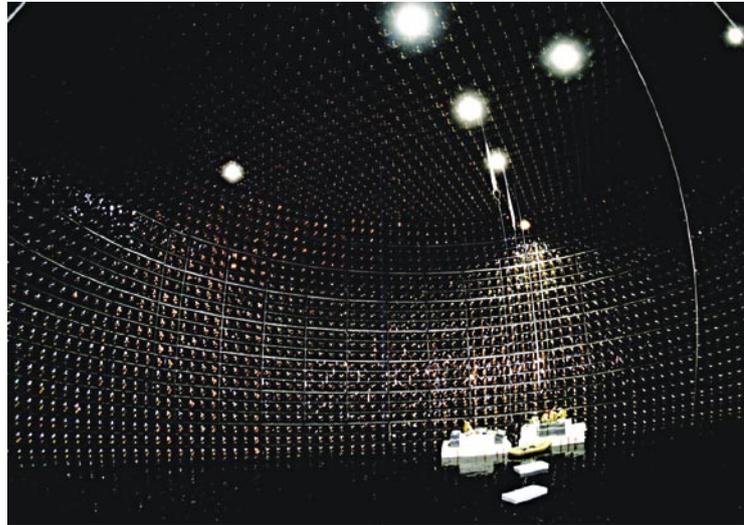


Figura 7: L'interno del rivelatore Čerenkov SuperKamiokande. Le piccole sagome sulla destra riproducono delle persone su dei canotti (foto: Wikipedia).

Nel 1987 con il Kamiokande fu rivelato per la prima volta un flusso di neutrini proveniente dall'esplosione di una supernova, mentre nel 1988 vennero osservati neutrini provenienti dal Sole. I detector Kamiokande sono costruiti in grandi cavità sotterranee per schermarli da altre forme di raggi cosmici. In tal modo sono raggiungibili dai soli neutrini.

BIBLIOGRAFIA

- La teoria dell'effetto Čerenkov è ad esempio descritta nel libro (introduzione alla fisica atomica di livello universitario, ma abbastanza elementare):
Spolskij E. V. (1986), *Fisica atomica*, vol. 1, Edizioni Mir
- Per l'effetto Čerenkov si può consultare in rete:
http://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Cerenkov
- Sulla formazione del cono di Mach e l'effetto Doppler ad esso collegato:
<http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/doppler/doppler.html>
- Per foto e spiegazioni del sonic boom:
<http://www.sky-flash.com/boom.htm>
- Due brevi introduzione alla fisica delle particelle:
http://www.lns.cornell.edu/~nbm/NBM_INTRO_TO_HEP1.htm
<http://www.physics.fsu.edu/users/ProsperH/AST3033/theory.htm>

- Il sito didattico del CERN sulla fisica delle particelle con links a vari altri siti:
<http://particleadventure.org/particleadventure/other/othersites.html>

3.15. IL RIVELATORE DI MUONI A LUCE ČERENKOV (ESPERIMENTO KAMIOKANNE)

Appuntamento in laboratorio

Materiali utilizzati:

- Due contenitori “thermos”
- Due fotomoltiplicatori
- Elettronica
- Generatore di bassa e alta tensione
- Oscilloscopio

È possibile utilizzare una bottiglia “thermos” per rivelare i raggi cosmici? Qualcuno pensa di sì!

Il progetto (chiamato KamioKanne) è nato presso Università di Mainz, in Germania. Le parti principali di questo rivelatore sono: una bottiglia thermos (o due) a pareti interne di vetro riflettente, un fotomoltiplicatore (o due) e un sistema di conteggio eventi. La bottiglia viene riempita di acqua distillata e il rivelatore è pronto!

Le particelle relativistiche attraversando l’acqua dei contenitori “thermos” producono la luce Čerenkov che viene rivelata ed amplificata dal fotomoltiplicatore.



Figura 1 e 2: Contenitori “thermos” e fotomoltiplicatori (Foto: V. Napoli).

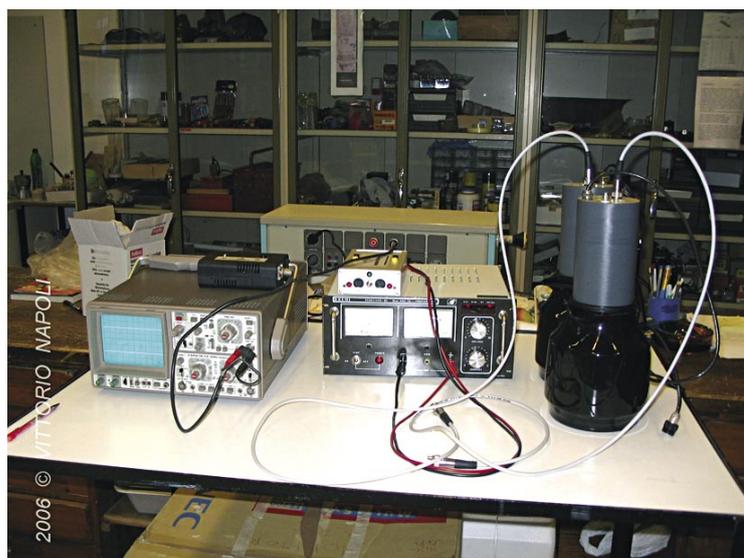


Figura 3: Il rivelatore Kamiokande assemblato (Foto: V. Napoli).

