

Interazione Radiazione-Materia

Patrizia Caccia, Alberto Ghioni, Roberto Squellati
Laboratorio didattico del corso di “Teorie quantistiche” – Prof. Giliberti
SILSIS-MI – V Ciclo – Anno Accademico 2004/05

31 ottobre 2005

Indice

1	Introduzione	2
2	Approccio pedagogico generale all’insegnamento scientifico	2
2.1	Lo studio delle rappresentazioni mentali	2
2.2	Le concezioni difformi	3
2.3	Genesi e natura delle concezioni difformi	4
2.4	Un caso “limite”: la meccanica quantistica	5
3	Scansione percorso didattico	5
3.1	Prerequisiti	5
3.2	Destinatari	6
3.3	Collocazione e scansione temporale	6
3.4	Modalità didattiche	6
4	Effetto fotoelettrico	6
4.1	Conservazione dell’energia ed effetti di soglia	6
4.2	Esperimento di Lenard	7
4.2.1	Materiale necessario per l’esperimento	7
4.2.2	Svolgimento dell’esperienza	8
4.3	Interpretazione teorica	10
5	Reazioni fotochimiche	13
5.1	Processo fotosintetico	14
5.2	Fotodissociazione	15
5.3	Luce e tessuto vivente	15
5.4	Processo fotografico	16
5.5	Sterilizzazione γ e radioterapia	16
6	Effetto Compton	17
6.1	Spiegazione mediante il concetto di fotone	18
6.2	Spiegazione come doppio effetto Doppler	21
7	Ritorno alla visione corpuscolare?	23
8	Test di valutazione	25
8.1	Prima dell’esposizione	25
8.2	A conclusione del percorso didattico	25

1 Introduzione

Il presente lavoro vuole essere una proposta alternativa all'insegnamento della *fisica moderna*, nell'ottica che verrà illustrata, specificatamente per quanto riguarda l'**interazione radiazione-materia**.

La motivazione primaria di tale lavoro risiede nel fatto che molti studi sulla didattica della fisica moderna hanno evidenziato la grande difficoltà degli studenti di scuola superiore ad affrontare alcuni dei principali aspetti concettuali della fisica quantistica. Inoltre quanto attualmente disponibile (libri di testo, materiale multimediale) sovente non è utile a chiarire tali punti cruciali in quanto basato su quel tipo di approccio che le ricerche indicano come poco adeguato.

Il materiale è elaborato in modo tale da essere consultabile da un docente in quelle parti riguardanti in modo specifico le motivazioni e le modalità didattiche, ma allo stesso tempo contiene i capisaldi di uno sviluppo didattico concreto, con indicazioni precise sui tempi di attuazione, sulle modalità espositive e di laboratorio, sulla collocazione didattica, riportando trattazioni complete usufruibili direttamente in classe.

Ci è parso opportuno premettere alla trattazione specifica dell'argomento una breve "cornice introduttiva" sugli studi pedagogici che sottendono le elaborazioni didattiche proposte, in modo da fornire all'insegnante un quadro più completo e una motivazione meglio argomentata del percorso che si intende seguire.

2 Approccio pedagogico generale all'insegnamento scientifico

"Come dovrei insegnare le discipline scientifiche?" .

Questa semplice domanda ha lasciato un segno profondo in innumerevoli generazioni di studiosi senza produrre una risposta altrettanto semplice.

"Che progressi sono stati fatti nelle tecniche d'insegnamento? Che consigli possono essere dati agli insegnanti in servizio e quelli in fase di tirocinio?" .

Cercando una risposta dal punto di vista puramente pedagogico emerge che quest'ultima non sia univoca, ma che siano state formulate molte teorie che riguardano lo sviluppo cognitivo e l'insegnamento. Ognuna di tali teorie è stata elaborata per "funzionare" in specifiche circostanze, ottenendo nel proprio ambito d'applicazione risultati soddisfacenti. Tuttavia sorge naturale domandarsi perché ne esistano così tante. Una risposta molto sintetica potrebbe essere che sono dovute alla molteplice capacità d'invenzione della collettività umana e all'impossibilità di essere certi che un particolare approccio sia errato solamente sulla base di test empirici.

Qual è dunque la relazione tra la teoria pedagogica e la pratica dell'educazione? Diversi autori esprimono punti di vista differenti. Quanto sono esplicite le teorie in relazione con le strategie educative? Si differenziano a questo riguardo? Può una stessa teoria suggerire più di una strategia e allo stesso tempo essere coerente? Vi è una sovrapposizione nei suggerimenti proposti dalle varie teorie?

Non è semplice rispondere a tali domande.

Nel nostro itinerario d'indagine, che ha come obiettivo un nuovo approccio all'insegnamento della fisica quantistica operiamo una scelta nel variegato panorama degli studi pedagogici, scegliendo come guida lo studio delle rappresentazioni mentali, di cui introdurremo nei prossimi paragrafi i fondamentali rudimenti. In particolare ci concentreremo su quelle che in pedagogia sono note come *concezioni difformi*.

2.1 Lo studio delle rappresentazioni mentali

Lo sviluppo di tutta la scienza (e quindi anche della fisica) passa attraverso l'attenta osservazione della realtà e la formulazione di teorie, che spieghino i fenomeni osservati e ne ipotizzino di nuovi, suscettibili di una verifica sperimentale. Il *corpus* di tutte le conoscenze scientifiche acquisite fino a questo momento ha quindi una sua attendibilità e coerenza logica, che si basa su elaborazioni astratte del pensiero umano e che trova conferma nei dati sperimentali. Chiameremo questo insieme con il nome di *concezioni scientifiche accreditate*, o brevemente *concezioni accreditate*.

L'insegnamento scientifico ha quindi il compito di trasmettere le concezioni accreditate alle generazioni future, in modo che possano proseguire con l'indagine della Natura sulla strada intrapresa da Galileo più di tre secoli fa e da molti altri prima di lui (greci, arabi, Ruggero Bacon, ...). Tuttavia la natura delle concezioni accreditate è molto spesso quanto di più controintuitivo si possa immaginare. Come ben sa chiunque si confronti con l'insegnamento di materie scientifiche, uno dei punti cruciali che ostacola il processo di apprendimento degli studenti è l'interferenza tra il nuovo modello che viene proposto dall'insegnante e le concezioni già presenti nella mente degli alunni. Diviene quindi molto importante individuare quelle che in pedagogia sono definite *concezioni difformi*, o in altri termini l'insieme di tutte le concezioni che si discostano da quelle accreditate.

Dal punto di vista pedagogico, l'analisi e l'interpretazione delle concezioni difformi rientra nell'ambito più ampio che studia le *rappresentazioni mentali*. Si tratta di un campo di ricerca che ha preso piede soprattutto

negli ultimi trent'anni, principalmente ad opera di specialisti nei diversi settori scientifici interessati in particolar modo al miglioramento della didattica. La letteratura presenta soprattutto due materie sulle quali sono stati condotti studi riguardanti le rappresentazioni mentali: la *fisica* e la *biologia*. Per quanto riguarda la fisica, gli argomenti affrontati sono: *meccanica*, *termologia*, *teoria dei gas perfetti*, *ottica geometrica* ed *elettricità*. In ambito biologico la *definizione di essere vivente*, *l'ereditarietà*, *l'evoluzione*, i *comportamenti animali*, la *salute* e *l'alimentazione*. Per quanto riguarda le altre discipline, segnaliamo la recente comparsa di alcune pubblicazioni riguardanti *l'ambiente* e le *fonti d'energia*, mentre non esistono ricerche sistematiche sulle rappresentazioni mentali nel piano umanistico.

Per delineare brevemente l'evoluzione degli studi sulle rappresentazioni mentali, basterà ricordare che per molto tempo sono state indagate solo le rappresentazioni mentali dei bambini. Infatti si riteneva che solo queste ultime si discostassero in modo significativo dalle concezioni accreditate e potessero perciò evidenziare aspetti rilevanti dello sviluppo cognitivo e dell'apprendimento. Tuttavia nel periodo dal '75 al '80 l'interesse si è spostato su soggetti di età più avanzata, tra cui alunni della scuola secondaria, studenti universitari e persone in età adulta. Tali studi hanno evidenziato il perdurare della difformità dalle concezioni accreditate. In particolare un'estensione delle ricerche ad insegnanti di scuola superiore, a ricercatori e professori universitari, ha evidenziato come rappresentazioni mentali erronee tendano a essere ancora presenti, indipendentemente dal bagaglio culturale dell'individuo.

2.2 Le concezioni difformi

Tra le rappresentazioni mentali le più interessanti sono senza dubbio le *concezioni difformi*, in quanto il loro studio conduce all'individuazione dei fattori che caratterizzano lo sviluppo mentale. Vale la pena osservare che una ricerca pedagogica sulle rappresentazioni mentali può ritenersi esaustiva solamente quando sia completata da uno studio sulle concezioni conformi, in quanto limitarsi alle concezioni difformi mette in evidenza le divergenze, trascurando le convergenze.

Approfondiamo quindi l'analisi delle concezioni difformi. Una prima classificazione le divide in *preconcezioni*, se sussistono prima dello studio di un argomento (tipiche dei bambini), e in *misconcezioni*, se consistono in una errata concezione delle nozioni studiate (tipiche quindi dell'età scolare e adulta). La ricerca ha messo in evidenza che le concezioni difformi hanno in comune le seguenti caratteristiche.

- *Sono generali*: si presentano con frequenze statistiche significative rispetto a certi parametri, di cui i fondamentali sono *i temi trattati*, *i contesti* della loro trattazione, *il tipo di istruzione* posseduta dai soggetti esaminati, *l'età* (ma è un dato spurio in quanto in correlazione con l'istruzione conseguita), *la familiarità* e *lo stato psicologico* dell'individuo soggetto ad indagine (rilassatezza o ansia). Di solito sono anche *tipiche*: per questo motivo le concezioni difformi *sono prevedibili*.
- *Sono resistenti al cambiamento*, ed è questo il dato che più colpisce i ricercatori. Infatti la difformità rispetto alle concezioni accreditate viene sostituita, tramite l'insegnamento, da un nuovo concetto conforme. Normalmente, nel lasso di tempo immediatamente successivo all'insegnamento, gli studenti sono in grado di rielaborare i concetti, ad esempio tramite degli esercizi, ottenendo risultati coerenti. **Tuttavia basta che intercorra un periodo sufficientemente lungo e lo studente tende a ritornare alla condizione di difformità pre-esistente all'insegnamento.** Quest'ultima caratteristica fa chiaramente capire che la difficoltà a discostarsi dalle concezioni difformi è probabilmente legata alla natura dei processi di integrazione del pensiero. Le ristrutturazioni persistenti del modo di concepire la realtà *richiedono tempi molto lunghi*, che consentano riattivazioni reiterate, tipicamente su una scala temporale di anni, non di mesi o settimane. Sul piano didattico si può quindi osservare che l'utilizzo di esercizi appositi rinforza a breve termine i concetti acquisiti, ma avendo un campo di applicazione ristretto e ripetitivo, *non bastano per collegare i concetti appresi a situazioni di varietà e vastità comparabili a quelle ordinarie*. Inoltre **la resistenza delle concezioni difformi ad essere modificate tramite l'insegnamento è in gran parte funzione della didattica.** In particolare l'acquisizione sarà molto diversa *qualora vengano o meno presentate situazioni collegate alla vita quotidiana riconducibili all'applicazione dei concetti acquisiti dalla teoria*. Le conferme esplicite sul piano percettivo giocano quindi un ruolo fondamentale nella modificazione permanente del pensiero. Infine è sempre necessario tener presente fenomeni fondamentali della conoscenza quali *l'assimilazione* (deformazione delle idee per adeguarle alle proprie strutture cognitive) e la *dissonanza cognitiva* (deformazione delle idee per adeguarle alle proprie credenze). Entrambi *sono processi inconsapevoli e inducono ad alterare non solo le idee, ma anche i dati oggettivi*, e quindi vanno ad incidere in modo significativo nel processo di apprendimento, a qualunque età esso avvenga.
- *Ricordano teorie scientifiche storicamente superate*, ovvero in buona sostanza si ha una similarità di vedute tra gli studenti odierni e gli studiosi del passato. L'origine di tale similarità risiede principalmente in

un'analisi della realtà ad uno stesso livello (principalmente il piano percettivo) e in un analogo modo di affrontare le tematiche incontrate. Tuttavia lo scopo di uno studioso, del passato come contemporaneo, è quello di elaborare una teoria in grado di dar ragione dei fatti osservati sperimentalmente. Come già ricordato, una teoria scientifica è di per sé un insieme di idee estremamente controintuitive se osservate nel contesto storico in cui sono state formulate. Alcune teorie del passato potrebbero non apparire controintuitive ad uno studente contemporaneo proprio perché estrapolate dal loro contesto. Le concezioni individuali sono acquisite dalla maggioranza degli individui per una parte mediante interazioni con ciò che storicamente è stato elaborato e per una parte sono di natura idiosincratice, dovuta alle esperienze strettamente personali e alla mentalità degli ambienti socioculturali nei quali si è cresciuti (le proporzioni di tali contributi possono variare considerevolmente da singolo a singolo). Tuttavia le concezioni difformi degli studenti attuali non possono essere messe in relazione con le teorie in quanto le teorie sono formulate in modo da consentire una verifica sistematica (sia empirica sia logica) mentre le concezioni difformi bastano a se stesse. Infatti se dovessimo tracciare un *identikit* di un qualsiasi studioso del passato o del presente, si scorgerebbero dei tratti comuni: è una delle persone più colte della propria epoca, è dedito alla ricerca, si avvale di ampie conoscenze dei risultati matematici. Al contrario il neofita ha conoscenze matematiche scarse (se non nulle), non è consapevolmente impegnato nella costruzione di una teoria, è solitamente circondato da un gran numero di apparati tecnologici e ha un contatto molto superficiale con le idee scientifiche.

Delineate quindi le caratteristiche delle concezioni difformi, passiamo in rassegna **i fattori che contribuiscono a generarle**.

2.3 Genesi e natura delle concezioni difformi

In primo luogo, le concezioni difformi *sono legate all'esperienza nel quotidiano, che privilegia il piano percettivo rispetto alla riflessione astratta*. In base a quanto si può constatare con la percezione, le proprietà degli oggetti, la loro natura e i loro comportamenti si presentano molto diversi da come diventa necessario concepirli sul piano scientifico. Sottolineiamo che l'integrazione dei dati esterni con le immagini interiori non riguarda solo le conoscenze accreditate, bensì qualsiasi tipo di rappresentazione interiore, anche la più rudimentale. In conclusione è comprensibile che il piano percettivo, nella misura in cui si rifà a concezioni diverse da quelle accreditate, suggerisca concezioni difformi e le confermi.

Anche il *senso comune* ha un ruolo importante nella genesi delle concezioni difformi: *“Impariamo ad interpretare la realtà sulla base dei suggerimenti espressi dai comportamenti e dai discorsi altrui”*. Il senso comune ha una sua sistematicità e una sua coerenza: si affida a *rappresentazioni omogenee* rispetto a criteri quali *l'immediatezza percettiva* – che ovviamente è un piano di riferimento diverso da quello scientifico – ha *un alto tasso di riferimenti impliciti* e una *forte dipendenza dalle suggestioni emotive*. Essendo tali caratteristiche le più familiari, le adottiamo inconsapevolmente.

Spostiamo ora l'attenzione sulla natura delle concezioni difformi. In genere si ritiene che la rappresentazione della realtà in maniera diversa dalle concezioni accreditate possa dipendere da due fattori: dalla *la mancanza di certe nozioni*, o da *errori di ragionamento*. Tuttavia nel momento in cui si prende in considerazione la capacità di *eseguire delle procedure*, si va a indagare un tipo di competenza che si pone all'incrocio tra le conoscenze dei contenuti e le capacità logiche dell'individuo. Una procedura, o una deduzione, può essere appresa, e quindi si configura come una conoscenza, ma allo stesso tempo coinvolge il ragionamento, che contribuisce alla sua costruzione (o ricostruzione). Si pensi ad esempio alla dimostrazione di un teorema: innanzitutto è richiesta la conoscenza dell'emunciato (e quindi una nozione), ma questa da sola non basta per formulare la dimostrazione, che coinvolge il ragionamento deduttivo. Il ruolo essenziale di specifiche procedure nell'acquisizione di determinate conoscenze è estremamente evidente nello studio della matematica, ma si tratta di una condizione che ha una validità molto più generale. A questo punto si pone quindi il problema di capire come vadano considerati gli errori di ragionamento riguardanti specifiche operazioni elaborate nell'ambito di una disciplina. Evidentemente nel momento in cui mancano le relative conoscenze sono indistinguibili dall'ignoranza. Si tenga infatti presente che le concezioni scientifiche del passato e le teorie oggi superate erano dovute alla mancanza tanto di strumenti di ragionamento quanto di conoscenze attualmente disponibili. Tutti i modi di ragionare ritenuti attualmente validi sono dei prodotti storici messi a punto progressivamente, a partire sia da dati fattuali sia da elaborazioni del pensiero. Tornando all'ambito didattico, in base a quanto appena riportato, possiamo affermare che è *assurdo parlare di formazione spontanea dei concetti scientifici*. E in effetti è praticamente impossibile immaginare gli aspetti della realtà che sfuggono alla percezione senza integrare quest'ultima con le rispettive conoscenze scientifiche.

Infine segnaliamo come la *commistione di conoscenze formali e informali* ha un ruolo di primo piano nella

generazione di concezioni difformi, insieme alla commistione di registri linguistici eterogenei, dovuta al fatto che molti termini scientifici hanno sinonimi di uso comune con significati diversi da quelli tecnici.

Da quando riportato emerge chiaramente come lo studio delle rappresentazioni mentali, e soprattutto delle concezioni difformi, sia uno strumento estremamente prezioso per l'insegnante, in quanto fornisce a priori indicazioni circa gli schemi mentali utilizzati dagli studenti (e quindi anche i possibili fraintendimenti). Noti questi ultimi, risulterà più facile impostare l'approccio didattico, di qualunque natura esso sia.

2.4 Un caso “limite”: la meccanica quantistica

Da quanto introdotto appare quindi chiaro come la “modellizzazione impropria” di un qualsiasi fenomeno fisico, mutuata dall'esperienza o dal precedente iter formativo (la scuola elementare e media), alteri in modo significativo la possibilità di apprendere correttamente i nodi concettuali consoni alle concezioni accreditate. A maggior ragione tale discorso vale per la meccanica quantistica. Si osservi ad esempio come la maggioranza delle persone adulte *pensi all'atomo solamente in termini del modello di Bohr* (l'elettrone visto come una sferetta in moto attorno al nucleo, sulla scorta di un modello planetario) che è **fondamentalmente errato**, in quanto porta ad attribuire all'elettrone “proprietà impossibili”.

Il modello della materia su scala microscopica delineato dalla meccanica quantistica, in cui tutti gli elementi presentano “proprietà corpuscolari o ondulatorie” a seconda della situazione sperimentale, si estranea quindi dalle categorie classificatorie tipiche della concezione comune (o particella o onda, o materia o energia). Per gli stessi fisici tale comportamento è difficile da conciliare con la visione del mondo acquisita con lo studio della fisica classica, senza contare che **ogni** previsione della meccanica quantistica si basa **solo** sull'interpretazione fisica di “oggetti matematici” estremamente sofisticati. In questo ambito l'intuizione, nel senso classico che le attribuiamo, ha un ruolo pressoché nullo.

D'altro canto la meccanica quantistica ha fondamentale importanza per la tecnologia moderna (laser, semiconduttori, transistor, ...) per cui coloro che si accostano allo studio della fisica, anche in prospettiva di un lavoro in ambito tecnologico, necessitano di conoscere molto bene i suoi principi fondamentali. Per questo motivo è importante che *gli studenti conoscano e discutano queste idee anche negli ultimi anni di scuola superiore*.

Per imparare la meccanica quantistica, gli studenti devono quindi essere in grado di assimilare nuovi modelli non più basati su esperienze sensoriali ma che richiedono una notevole capacità di astrazione. Inoltre ci si scontra con le difficoltà legate al formalismo matematico utilizzato, che, essendo molto avanzato, viene spesso semplificato nei libri di testo scolastici. Questo non comporta solamente una diminuzione delle nozioni proposte agli studenti, ma pone anche seri problemi didattici.

Il nostro intento è quindi di mostrare come *sia possibile dare una spiegazione esauriente dell'interazione tra radiazione e materia*, partendo da osservazioni sperimentali, *senza dover utilizzare un linguaggio matematico sofisticato e senza dover introdurre modelli semplificati* che entrano in contrasto con le previsioni della meccanica quantistica nella sua formulazione completa.

3 Scansione percorso didattico

3.1 Prerequisiti

Fisica

- *Principi di conservazione*: quantità di moto ed energia.
- *Meccanica ondulatoria*: principio di sovrapposizione, interferenza, diffrazione (eventualmente effetto Doppler).
- *Ottica materiale*: in particolare interazione onda materiale - onda materiale.
- *Elettrostatica e circuiti elettrici* in corrente continua.

Matematica

- *Algebra elementare*.
- *Trigonometria piana*.
- *Fondamenti di calcolo vettoriale*.

3.2 Destinatari

Il percorso è pensato per una classe V *liceo scientifico* tradizionale o P.N.I., tuttavia è proponibile anche in una classe IV di liceo scientifico qualora siano stati discussi, almeno a livello qualitativo, il concetto di potenziale elettrostatico e di corrente elettrica (limitando la schematizzazione dei circuiti elettrici impiegati nell'apparato sperimentale).

3.3 Collocazione e scansione temporale

COLLOCAMENTO DEL PERCORSO DIDATTICO: al termine dell'*elettrodinamica* (tipicamente alla conclusione del I quadrimestre di una classe V). I TEMPI DI ATTUAZIONE potranno essere, indicativamente, i seguenti:

- Test introduttivo: 1/2 h.
- Effetti di soglia in fisica classica: 1/2 h.
- Attività di laboratorio:
 - Esperienza qualitativa con l'elettroscopio: 1 h.
 - Esperimento di Lenard: 2 h.
- Spiegazione dell'*effetto fotoelettrico* in base al concetto di fotone: 2 h.
- Fenomeni spiegabili mediante il fotone: *fotosintesi clorofilliana, fotodissociazione, processo fotografico, ...* 2 h.
- Spiegazione dell'*effetto Compton* in base al concetto di fotone: 2 h.
 - FACOLTATIVO – Spiegazione dell'effetto Compton in base all'effetto Doppler e raffronto tra la descrizione classica e quantistica: motivazioni della scelta operata in favore della meccanica quantistica e significato generale di un modello o di una teoria in fisica. 2 h
- Paradossi derivanti da un ritorno ingenuo alla teoria corpuscolare: 1 h.
- Test finale: 1 h.

Computo complessivo delle ore da impiegare: 11 h (13 h con la parte facoltativa).

3.4 Modalità didattiche

- Presentazione e attuazione di esperimenti in laboratorio.
- Lezione frontale in classe.
- Test di valutazione della comprensione prima e dopo il ciclo di lezioni.

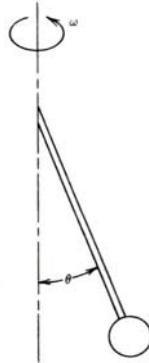
4 Effetto fotoelettrico

4.1 Conservazione dell'energia ed effetti di soglia

Nello studio della fisica abbiamo finora incontrato un'ampia varietà di fenomeni, che sono stati inquadrati in diversi ambiti (meccanica, termodinamica, acustica, ottica, elettromagnetismo). In tutti i casi è sempre stato soddisfatto il principio di conservazione dell'energia. Vediamo ora, tramite due esempi controposti, come pur valendo tale principio, si può essere in presenza o meno di quello che definiamo "effetto di soglia".

Esempio 1 Prendiamo in considerazione un fornello elettrico la cui temperatura di funzionamento sia regolabile mediante un termostato. Supponiamo di regolare tale termostato ad una temperatura pari a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e di porre sul fornello un recipiente contenente acqua distillata. Si osserverà, al passare del tempo, un abbassamento del livello dell'acqua: sia abbassano che alzando la temperatura del fornello (senza giungere all'ebollizione dell'acqua). Il processo tuttavia si verifica con ritmi temporali differenti: il tasso di abbassamento del livello aumenta all'aumentare della temperatura.

Esempio 2 Un pesetto di massa m è fissato all'estremità di un'asta rigida sottile di lunghezza ℓ . La massa dell'asta è trascurabile rispetto a quella del pesetto. Quest'ultimo e l'asta formano un pendolo conico che può essere posto in rotazione con velocità angolare ω attorno ad un asse verticale che attraversa il perno all'estremità dell'asta (vedi figura)



Indichiamo con θ l'angolo che l'asta forma con la verticale e con T la tensione a cui l'asta è sottoposta. Dal diagramma delle forze della figura abbiamo

$$T \cos \theta - mg = 0 \quad (1)$$

e

$$T \sin \theta = m\ell\omega^2 \sin \theta \quad (2)$$

Combinando tra loro le equazioni (1) e (2) otteniamo

$$\cos \theta = \frac{g}{\ell\omega^2}. \quad (3)$$

L'equazione (3) mostra che, per valori di ω minori di $\omega_0 = \sqrt{g/\ell}$, $\cos \theta$ sarebbe maggiore di 1. Quindi, l'equazione non avrebbe significato. La soluzione analitica mostra che il pendolo non inizia ad allontanarsi dalla sua posizione verticale fino a quando la velocità angolare ω non supera la frequenza angolare naturale del pendolo stesso. In effetti questo è ciò che accade, come può essere facilmente confermato da una osservazione sperimentale.

La differenza sostanziale tra i due esempi, entrambi analizzati a livello macroscopico, non risiede nel differente ambito (termico il primo, meccanico il secondo), quanto dal manifestarsi improvviso di un effetto nel secondo esempio diversamente dal primo.

Si osserva infatti che al di sotto del valore critico ω_0 della velocità angolare il pendolo ruota semplicemente su se stesso, mentre per $\omega \geq \omega_0$ la fenomenologia del moto è radicalmente diversa: il valore assunto dalla velocità angolare è dunque il discriminante fra due situazioni nettamente differenti. Chiamiamo ω_0 *valore di soglia*.

Il secondo esempio riportato mette quindi in evidenza, compatibilmente con il principio di conservazione dell'energia, l'esistenza di quello che fisicamente viene detto *effetto di soglia* (in questa particolare situazione la grandezza che conduce a tale effetto è la velocità angolare); non è necessariamente vera l'affermazione *Natura non facit saltum*.

A nostro avviso è importante portare l'attenzione sulla presenza di effetti di soglia in modo tale che gli alunni siano in grado di riconoscerli anche in altri contesti. Inoltre ci è parso utile evidenziarlo nell'ambito di fenomeni completamente descrivibili dalla fisica classica, in modo da non legare "automaticamente" la presenza di un effetto di soglia alla quantizzazione di una grandezza fisica.

4.2 Esperimento di Lenard

4.2.1 Materiale necessario per l'esperimento

Prima di discutere in classe, dal punto di vista teorico, questo tipo di interazione radiazione-materia, riteniamo opportuno mostrare sperimentalmente agli alunni l'esistenza di questo nuovo fenomeno, cercando di risalire alle

grandezze fisiche fondamentali che ne determinano l'evoluzione. Per prima cosa svolgeremo un esperimento qualitativo in modo da darne un'idea generale; successivamente riprodurremo l'esperienza di Lenard, in modo da dedurre dei risultati quantitativi, che poi analizzeremo teoricamente.

Codici riferiti al catalogo Phywe 2002:

- lampada a vapori di mercurio ad alta pressione (08147.00): intensità luminosa 600 cd/cm^2 , corrente di funzionamento 1 A;
- un portalampana su asta (06176.00), un'impedenza per lampade spettrali (13662.93);
- lastra di zinco per effetto Hallwachs (06760.00);
- elettroscopio di Kolbe (07120.00);
- cellula fotoelettrica (06778.00), con catodo a solfuro di piombo;
- lastra di plexiglass (filtro UV);
- generatore di Van de Graaf (07645.97);
- alimentatore universale (13672.93);
- multimetro digitale (07134.00).

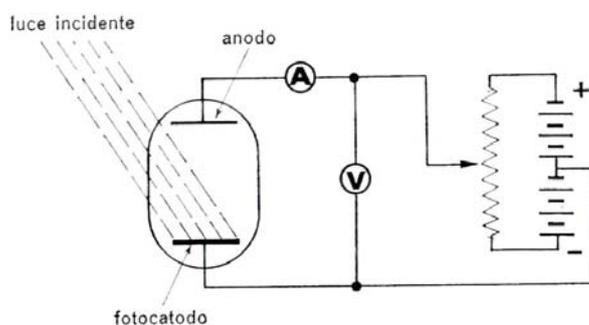
4.2.2 Svolgimento dell'esperienza

Innanzitutto bisogna provvedere a pulire molto accuratamente la lastra di zinco, in quanto la presenza di un piccolo strato di metallo ossidato è sufficiente a impedire il corretto svolgimento dell'esperienza. Inoltre si provvede a caricare negativamente la lastra e a metterla in contatto con l'elettroscopio, mediante il generatore di Van de Graaf¹. È importante far osservare che il sistema elettrostatico è con ottima approssimazione isolato (l'indicatore rimane pressoché immobile per periodi di tempo lunghi, dell'ordine di qualche minuto) e che l'entità dell'effetto misurato dipende in modo spiccato dalle condizioni atmosferiche, in special modo dall'umidità presente nell'aria.

A questo punto si accende la lampada e illuminando la lastra di zinco. L'effetto visivo sarà un rapido e repentino scaricarsi dell'elettroscopio. Per rafforzare la convinzione che la scarica repentina sia stata causata dall'illuminazione, si carica nuovamente la lastra e si interpone essa e la lampada uno schermo di plexiglass trasparente (schermo UV): si osserva che la scarica in questo caso non avviene. Allo stesso modo si può far osservare come la scarica non avvenga illuminando la lastra di zinco con qualsiasi lampada a luce visibile (ad incandescenza, neon, alogena, ...).

Il punto cruciale dell'esperienza è sottolineare l'esistenza di un effetto soglia: si deve mettere in luce come la scarica dell'elettroscopio NON avvenga anche per illuminazioni prolungate o particolarmente intense con lampade a luce visibile (ad esempio con più lampade contemporaneamente).

Fatto questo, si passa all'esperienza di Lenard vera e propria. Innanzitutto è necessaria una spiegazione della effettiva struttura della cellula fotoelettrica, mediante uno schema esplicativo².

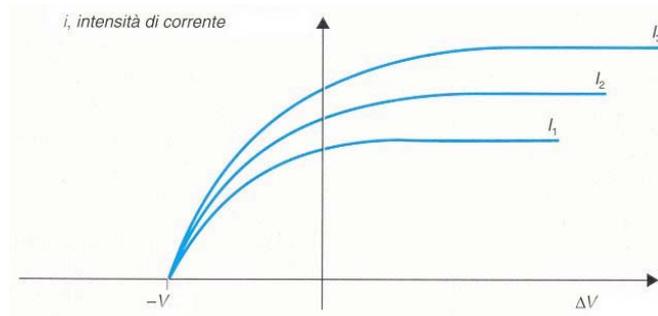


¹Il fatto che la lastra di zinco venga caricata serve solamente a rendere l'effetto fotoelettrico più evidente. Infatti se la lastra fosse lasciata neutra, sarebbe necessaria un'illuminazione di elevata intensità per osservare un sensibile discostamento dell'indicatore dalla posizione di riposo; infatti caricandosi positivamente, la lastra tende a scaricarsi più in fretta catturando cariche negative dall'aria circostante.

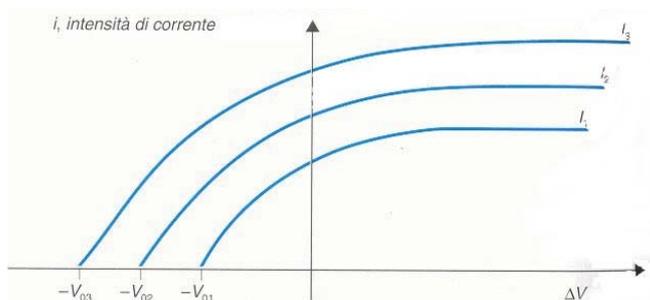
²Si osservi a questo proposito che gli studenti delle classi medie superiori hanno in generale un'esperienza molto limitata nell'interpretazione degli schemi di semplici circuiti elettrici. Il circuito di una cellula fotoelettrica, come quella utilizzata nell'esperimento, offre una valida opportunità per vedere applicate le conoscenze di elettromagnetismo in contesto più ricco di quelli usualmente analizzati a lezione. L'insegnante può quindi sfruttare l'occasione per integrare settori della disciplina che solitamente non vengono affrontati congiuntamente (in questo caso l'elettromagnetismo e la fisica moderna).

Per prima cosa si illumina la fotocellula (e quindi la lastra di metallo) con la luce proveniente da una lampadina ordinaria e si constata che in questo caso non si registra passaggio di corrente. Quindi, come evidenziato nell'esperimento precedente, l'illuminazione con luce visibile non altera lo stato elettrico della fotocellula. A questo punto si illumina la fotocellula con la lampada a mercurio e si osserva un passaggio di corrente nel circuito. Provvediamo quindi ad interporre fra l'apertura della fotocellula e la lampada a mercurio la lastra di plexiglass: si osserverà nel circuito un annullamento dell'intensità di corrente. A questo punto variamo l'intensità di illuminazione che arriva sulla fotocellula cambiando la distanza fra la lampada e la fotocellula stessa. Infatti, ipotizzando che l'emissione della sorgente sia isotropa e non avvalendosi di lenti atte a focalizzare il fascio emergente, basta variare la mutua distanza tra sorgente e rivelatore per variarne l'intensità.

In questo modo si vedrà che all'aumentare dell'intensità luminosa corrisponde un aumento dell'intensità di corrente. Per visualizzare quantitativamente questo effetto, rappresentiamo le misure effettuate su di un sistema di riferimento cartesiano sul quale vengono riportate in ascissa la differenza di potenziale e in ordinata l'intensità di corrente. È importante in questo frangente far notare che non c'è un effetto di soglia per quanto riguarda il legame fra intensità di illuminazione e intensità di corrente. Successivamente si agisce sul generatore di tensione variando la d.d.p. nella cellula fotoelettrica, in particolar modo ponendo attenzione alla placca su cui non incide il fascio di radiazione. Facciamo rappresentare agli studenti l'andamento dell'intensità di corrente in funzione della d.d.p. e fissata l'intensità luminosa. Si commentano i grafici ottenuti con la classe.



Fatto questo ci si chiede cosa accadrebbe nel caso in cui si potesse sostituire la lastra metallica nel dispositivo con un'altra di materiale diverso. Per concludere la discussione, non potendo effettuare direttamente la sostituzione, si può proporre alla classe il seguente grafico, dove le tre curve corrispondono a tre differenti metalli.



L'effetto osservato, che coinvolge le sostanze luce e corrente, è detto *effetto fotoelettrico* ed è noto fin dalla metà del XIX secolo.

Dopo aver mostrato alla classe la fenomenologia di tale effetto è importante riassumere e riprendere in modo chiaro i risultati a cui si è giunti sperimentalmente, in modo da poter rendere possibile un'analisi quantitativa e renderne possibile una comprensione completa. Per questo motivo riportiamo sinteticamente e precisamente le "leggi" che sembrano regolare l'effetto fotoelettrico:

1. L'effetto ha luogo solamente se la frequenza della radiazione incidente supera un certo valore ν_0 caratteristico del metallo usato e detto *soglia fotoelettrica*.
2. Esiste un valore negativo della differenza di potenziale al di sotto del quale non si ha alcun passaggio di corrente. Invece per d.d.p. superiori la corrente aumenta fino a raggiungere un valore massimo, indipendente dalla d.d.p. applicata.

3. Fissata una frequenza, superiore a quella di soglia, l'intensità di corrente che si osserva è proporzionale all'intensità della sostanza luminosa incidente.
4. L'effetto è pressoché istantaneo.

4.3 Interpretazione teorica

Ora che abbiamo verificato e sottolineato, tramite il primo esperimento qualitativo e la riproduzione di quello di Lenard, che a partire da una sostanza materiale (la lastra di metallo) e da una luminosa (la radiazione proveniente dalla lampada), a seguito della loro interazione si può ottenere della materia elettronica (corrente), possiamo cercare di dare una spiegazione quantitativa dell'evidenza sperimentale, generalizzando il concetto di quanto alla radiazione e.m. Mostriamo infatti come sia possibile estendere l'idea di interazione materiale per quanti a quella tra radiazione e materia.

Come primo passo consideriamo il seguente esempio che mostra la necessità di andare oltre la visione ondulatoria della luce.

Esempio 3 *Si consideri una lastra di potassio posta a 1 m di distanza da una sorgente luminosa di potenza pari a 1 W, che illumina una zona circolare della lastra di raggio prossimo a quello del quanto materiale, pari a circa 10^{-10} m. Sapendo che l'energia necessaria per permettere la fuoriuscita dalla superficie di potassio di materia elettronica è circa $3,4 \cdot 10^{-19}$ J, dopo quanto tempo si dovrebbe osservare l'effetto?*

L'area della superficie su cui incide la radiazione prodotta dalla sorgente luminosa è pari a $\pi \cdot 10^{-20}$ m², quindi l'energia che incide sulla lastra per unità di tempo è data da

$$\mathcal{P} = \frac{1 \text{ W}}{4\pi \text{ m}^2} (\pi \cdot 10^{-20} \text{ m}^2) = 2,5 \cdot 10^{-21} \frac{\text{J}}{\text{s}}.$$

Supponendo che tutta questa potenza venga assorbita dalla lastra, il tempo τ richiesto è dato da

$$\tau = \frac{3,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{2,5 \cdot 10^{-21} \text{ J/s}} = 1,4 \cdot 10^2 \text{ s} \simeq 2 \text{ min}.$$

Questo valore è però in netto disaccordo con i risultati che si ottengono sperimentalmente: per qualunque materiale, l'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui si comincia ad illuminarlo e l'istante in cui si osserva l'emissione di materia elettronica è di diversi ordini di grandezza inferiore al valore calcolato, anche quando si utilizzano intensità di illuminazione estremamente basse. Gli esperimenti più recenti hanno portato, per tale intervallo di tempo, ad un limite superiore pari a 10^{-9} s. Questo significa che la modellizzazione della luce che abbiamo sfruttato non è idonea a spiegare e rappresentare questi tipi di situazioni ed effetti.

Appare quindi evidente che per spiegare l'effetto fotoelettrico non si può sfruttare una visione delle radiazioni e.m. strettamente ondulatoria, ma bisogna andare oltre a questa concezione.

Per spiegare questo effetto è utile introdurre, accanto al quanto materiale, una nuova entità quantizzata, legata alla radiazione e.m., che entrerà in gioco solo nel momento dell'interazione e che chiamiamo *fotone* . Andremo ora a mostrare come gli effetti osservati sperimentalmente possono essere spiegati in termini di interazioni elementari tra quanti materiali e quanti di luce, e come un modello quantizzato di questo tipo porti a due punti fondamentali:

1. *la spiegazione corretta e completa dei risultati sperimentali;*
2. *la previsione dell'esistenza di una funzione universale che determina il legame tra il potenziale di arresto e la frequenza della radiazione luminosa.*

Il primo passo per questa trattazione consiste nel comprendere quali siano le caratteristiche salienti dei quanti di luce: dobbiamo perciò risalire a quelle grandezze che permettono una classificazione delle sostanze luminose.

Considerando una determinata sostanza luminosa o elettromagnetica, possiamo associarle dei valori della frequenza, della quantità di moto, dell'energia e della polarizzazione. Quali o quale tra queste quantità sono fondamentali per i nostri scopi? La *polarizzazione* va esclusa essendo legata essenzialmente alla struttura matematica del campo della sostanza elettromagnetica. Rimangono da considerare la *frequenza*, l'*energia* e la *quantità di moto*. Quest'ultime due sono direttamente proporzionali e sono connesse all'intensità della sostanza

luminosa o, in modo più intuitivo, alla sua “quantità”. Come l’aver tanti o pochi atomi di idrogeno, ad esempio, non fa variare il quanto “atomo di idrogeno”, anche nel caso della sostanza luminosa, l’aver alta o bassa intensità non fa cambiare il quanto di luce associato. Si ha quindi che la grandezza che stabilisce e fissa il tipo di sostanza luminosa è la **frequenza**. Siamo così giunti a concludere che come un quanto di materia caratterizza in generale una certa sostanza grazie al valore del suo rapporto *carica/massa*, così fa un quanto di luce tramite la frequenza. Fissato, quindi, un certo valore della frequenza, è stabilito anche il tipo di sostanza luminosa che, interagendo con altre sostanze, scambia in modo quantizzato energia. “L’atomo” di luce è quindi strutturalmente legato alla quantità di energia E , dipendente dalla frequenza ν , che viene scambiata a seguito dell’interazione, in modo quantizzato; si ha cioè $E = g(\nu)$ dove g è la funzione che lega E e ν che dobbiamo determinare (il caso più semplice di dipendenza che si potrebbe ottenere è, ovviamente, la proporzionalità diretta...). Con questa nuova assunzione possiamo affermare che durante l’interazione radiazione-materia³, come quella mostrata sperimentalmente, si ha uno scambio tra quanti materiali e quanti di luce caratterizzati dall’energia $g(\nu)$.

In questo modo, *i quanti di energia (fotoni) interagiscono con i quanti della materia elettronica (elettroni)*. L’energia di un elettrone sarà, quindi, la somma dell’energia di legame ($-W_0$) che lo confina nel metallo e dell’energia $g(\nu)$ fornitagli da un fotone. Così ogni quanto della materia elettronica che verrà osservato avrà una energia cinetica K che non può superare il valore

$$K_{\max} = g(\nu) - W_0.$$

Vediamo se questa relazione può spiegare i risultati dell’esperimento di Lenard e quali informazioni si possono ricavare sulla funzione incognita $g(\nu)$; riscriviamo, per comodità, i risultati fenomenologici ricavati, commentandoli singolarmente.

1. *L’emissione di materia elettronica si ha solo se la sostanza luminosa (radiazione) è caratterizzata da una frequenza superiore ad un valore ν_0 (dipendente dal metallo), indipendentemente dalla intensità della radiazione.*

L’esistenza di una frequenza ν_0 , detta *frequenza di soglia*, è inspiegabile basandosi sui principi della fisica classica. Secondo le leggi dell’elettromagnetismo, infatti, la radiazione luminosa trasporta un’energia che è direttamente proporzionale alla sua intensità e quindi ci si aspetterebbe un’intensità e non una frequenza di soglia. Tenendo conto di quello che abbiamo sopra riportato si può affermare che, se non si ha l’emissione di materia elettronica, significa che l’energia cinetica che possono acquistare gli elettroni al momento dell’interazione è inferiore a quella di legame. Questo implica che si deve avere $g(\nu) < W_0$, per valori della frequenza inferiori a ν_0 , cioè la $g(\nu)$ deve essere una funzione crescente della frequenza.

2. *Fissata una frequenza, superiore a quella di soglia, l’intensità di corrente che si osserva è proporzionale all’intensità della sostanza luminosa incidente.*

Questo risultato viene spiegato semplicemente tenendo conto del fatto che durante l’interazione si ha una proporzionalità diretta tra il numero di quanti delle due sostanze luminosa e elettronica (intensità di corrente \propto numero di elettroni \propto numero di fotoni \propto intensità sostanza luminosa).

3. *Esiste un valore negativo della differenza di potenziale, detto $-V_a$, al di sotto del quale non si ha alcuna emissione di materia elettronica (corrente). Per d.d.p. superiori a $-V_a$ la corrente aumenta fino a raggiungere un valore indipendente dalla d.d.p applicata.*

Questo risultato porta ad affermare che la materia elettronica è caratterizzata da una energia cinetica che può assumere un valore massimo pari a $K_{\max} = eV_a$, dove con e abbiamo indicato la carica del quanto della sostanza elettronica. Inoltre il valore che può assumere K_{\max} , fissato il materiale, è indipendente dall’intensità della sostanza luminosa incidente, ma aumenta al crescere della sua frequenza. Quest’ultima osservazione può essere spiegata dal fatto che l’energia che cede ogni fotone viene trasferita ad un solo elettrone, non venendo suddivisa in più parti. Tenendo inoltre conto di quanto appena affermato, teoricamente deve valere

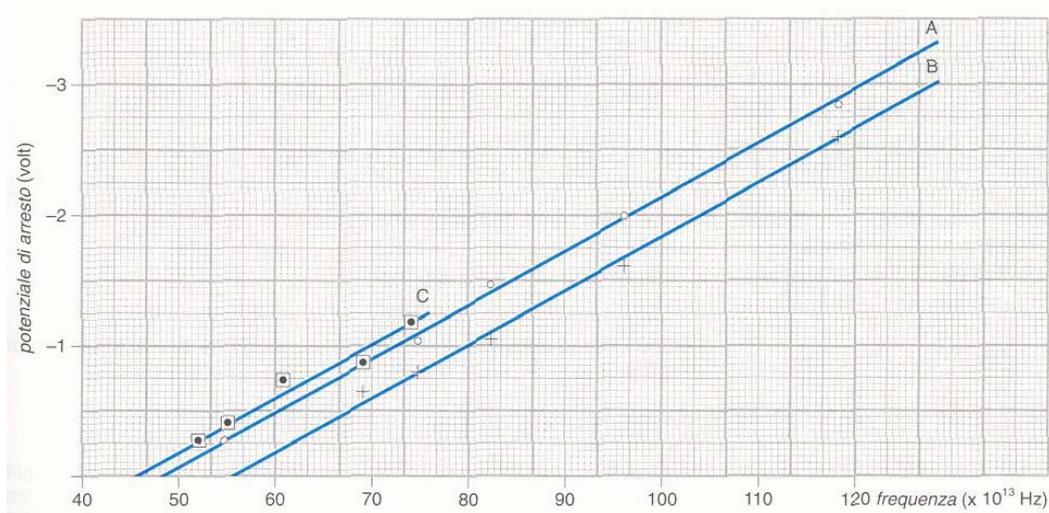
$$K_{\max} = eV_a = g(\nu) - W_0$$

da cui si ricava molto semplicemente che

³Si osservi che l’interazione che stiamo considerando è a tutti gli effetti a tre corpi: i quanti della sostanza luminosa incidente (i fotoni), i quanti della sostanza materiale della lamina e gli elettroni.

$$V_a = \frac{g(\nu)}{e} - \frac{W_0}{e}$$

e quindi, a meno di una costante additiva data dal termine $-W_0/e$, rappresentando nel piano cartesiano (ν, V_a) la curva $V_a = V_a(\nu)$, che determina il potenziale di arresto in funzione della frequenza ν della sostanza luminosa incidente, si deve ottenere la stessa curva per tutti i tipi di materiali (quindi a meno di una traslazione verticale data da $-W_0/e$).



Questo risultato fu confermato, attorno al 1915, dalle esperienze di laboratorio eseguite da Millikan, che verificò anche l'universalità della funzione $g(\nu)$. Rappresentando nel piano la funzione $V_a(\nu)$ si ottengono in tutti i casi delle rette, le cui intercette dipendono dal valore assunto dal rapporto $-W_0/e$ (e quindi dal materiale costituente la lamina metallica), ma con identici coefficienti angolari, come riportato nella figura precedente, dove sono rappresentati gli andamenti del potenziale di arresto in funzione della frequenza in tre situazioni differenti. Le rette indicate con A e B si riferiscono ai dati ottenuti da Millikan nei casi in cui le lamine fossero, rispettivamente, di sodio e di litio; la terza retta è invece ricavata da una serie di misurazioni fatte nel caso di una lamina di potassio illuminata da luce visibile. Questo tipo di andamento delle funzioni $V_a(\nu)$ è spiegabile solo assumendo

$$g(\nu) = k \cdot \nu$$

dove k è una costante ancora da determinarsi. In questo modo si ottiene una dipendenza lineare tra la frequenza ν della radiazione luminosa incidente e il potenziale di arresto V_a :

$$V_a = \frac{k}{e}\nu - \frac{W_0}{e} = h\nu - \frac{W_0}{e}$$

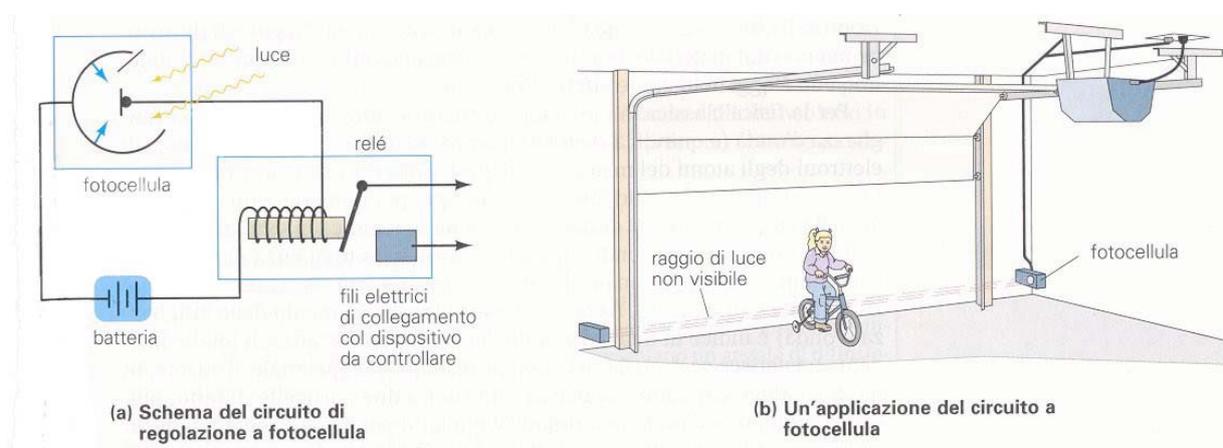
dove abbiamo definito una nuova costante $h = k/e$. Il valore della costante h è poi stato stabilito essere pari a $6,626 \cdot 10^{-34}$ J · s e viene chiamata *costante di Planck*; per completezza osserviamo che i valori tipici di V_a sono dell'ordine dell'elettronvolt.

Siamo così giunti ai due obiettivi che ci eravamo proposti all'inizio di questa trattazione. L'idea di *fotone*, che entra in gioco al momento di un'interazione, si è quindi rivelata adeguata per spiegare l'interazione radiazione-materia, così come lo è quella del quanto materiale per le interazioni tra le sostanze materiali.

È importante osservare che esistono molte applicazioni pratiche dell'effetto fotoelettrico: l'energia solare è, ad esempio, trasformata in energia elettrica tramite delle celle fotoelettriche che si utilizzano, ad esempio, negli esposimetri fotografici, sfruttando la proprietà di poter ottenere una corrente di intensità proporzionale a quella della radiazione luminosa incidente; anche l'accensione automatica delle luci stradali avviene grazie a tipi di sensori che sfruttano questo effetto.



Un altro importante impiego dell'effetto fotoelettrico che andremo ad analizzare più nel dettaglio è quello dato dalle fotocellule ad esempio di cancelli ed ascensori.



Nella prima delle due immagini precedenti è mostrato, in modo schematico, il circuito che regola il funzionamento della cellula fotoelettrica. Sfruttando l'effetto fotoelettrico, nel circuito circola corrente solo quando la radiazione luminosa (luce) colpisce la superficie della fotocellula. Quando il flusso di luce viene interrotto, il circuito che contiene il relé (l'interruttore magnetico che sovraintende il funzionamento del meccanismo) si apre bloccando il passaggio della corrente. Un dispositivo di questo tipo viene sfruttato, come mostrato nella seconda delle figure precedenti, per l'apertura e la chiusura delle porte di un garage, assicurando un blocco della chiusura della porta ogni qualvolta venga interrotto il fascio della radiazione (luce non visibile, in questo caso) presente tra le due fotocellule. Potendo utilizzare anche radiazioni non visibili (poiché la frequenza di soglia di alcuni metalli è al di fuori del campo della luce visibile), lo stesso tipo di dispositivo viene sfruttato nei sistemi di allarme antifurto.

5 Reazioni fotochimiche

Il concetto di fotone, così come è stato introdotto, è certamente molto fecondo per poter interpretare e capire con più chiarezza una serie di interazioni fra materia e luce, ad esempio le *reazioni fotochimiche*. Queste ultime sono quelle particolari reazioni chimiche che possono essere provocate o facilitate dall'azione della luce: tra esse ricordiamo la trasformazione del "fosforo bianco" in "fosforo rosso", la combinazione del cloro con l'idrogeno, la produzione dell'ozono dall'ossigeno, la decomposizione degli alogenuri di argento sfruttati in fotografia, la fotosintesi clorofilliana. Alcune di queste reazioni sono note dallo studio della chimica, dove il concetto di fotone è spesso utilizzato impropriamente (vedi sezione sugli errori riscontrati nei libri) e può dar luogo a concezioni erranee. Cercheremo perciò di portare degli esempi di reazioni fotochimiche e di darne la corretta interpretazione da un punto di vista didattico utilizzando il concetto di fotone introdotto nel paragrafo precedente.

Le leggi della fotochimica dicono che l'attività fotochimica delle diverse radiazioni generalmente aumenta con la frequenza, che deve superare un certo valore affinché nella sostanza colpita dalla radiazione avvenga una trasformazione. Così i raggi infrarossi esercitano raramente un'azione chimica, mentre i raggi ultravioletti sono molto attivi; anche per queste interazioni occorrerà parlare di effetti di soglia. Vedremo inoltre che, come nell'effetto fotoelettrico, se la radiazione è in grado di innescare la reazione chimica, allora questo avverrà anche per illuminazioni con debole intensità luminosa (esempio del processo fotografico).

5.1 Processo fotosintetico

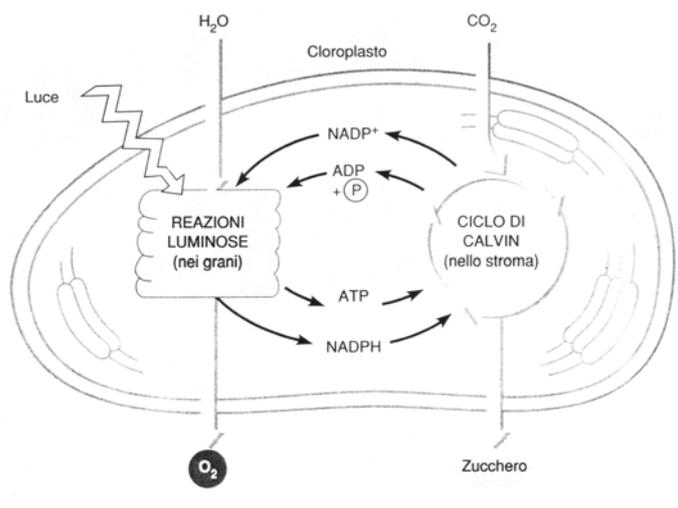
Certamente una delle reazioni fotochimiche più conosciute ed importanti per la vita sul nostro pianeta è la *fotosintesi* che sfrutta la radiazione luminosa proveniente dal Sole. Quest'ultima è un processo fisico-chimico grazie al quale le piante, le alghe e i batteri (detti per l'appunto *fotosintetici*) riescono a sopravvivere, rendendo possibile la sintesi di sostanze organiche. In tali organismi il processo fotosintetico produce O_2 e riduce la quantità di CO_2 in atmosfera (*oxygenic photosynthesis*). Anni di ricerca hanno portato alla conclusione che la struttura e le funzioni della fotosintesi sono simili nelle piante, nelle alghe e in alcuni tipi di batteri, così che le interazioni chimiche sono comuni per tutte queste varietà di sostanze viventi. Altri tipi di batteri sfruttano invece la luce per produrre composti organici e non ossigeno (*anoxygenic photosynthesis*)⁴. Il processo di fotosintesi risulta essere così indispensabile per la sopravvivenza di tutti gli organismi; inoltre i combustibili fossili utilizzati per produrre energia impiegabile nelle attività della nostra società, sono stati prodotti da antichi organismi fotosintetici.

Sebbene la fotosintesi avvenga su scala microscopica (pochi μm), il processo ha un grande effetto sull'atmosfera ed il clima della Terra, come mostreremo nel § 7.2 dedicato alla fotodissociazione. Viceversa, anche la "performance" degli organismo fotosintetici dipende dal clima terrestre.

Il processo di fotosintesi che viene solitamente introdotto a livello scolastico è la *fotosintesi clorofilliana*, studiata sin dal 1770, quando il chimico inglese Joseph Priestly fece degli esperimenti che le piante rilasciano il "tipo di aria" (l'ossigeno, in termini moderni) che permette la combustione. In tutti i libri di chimica il processo della fotosintesi viene riassunto nella formula



Questa formula chimica rappresenta solo il bilancio complessivo della reazione di fotosintesi: essa infatti è molto più complessa e coinvolge una serie di numerose reazioni intermedie. La fotosintesi non è un processo unico, ma presenta due stadi, ciascuno composto da diverse tappe. Le tappe del primo stadio sono note come *reazioni luminose*: questo tipo di reazioni trasforma l'energia luminosa in energia chimica e genera ossigeno gassoso come prodotto di rifiuto. Ciò avviene mediante un complesso sistema di membrane (membrane fotosintetiche), composte da proteine che regolano il passaggio di materiale elettronico. Le tappe del secondo stadio sono note come *ciclo di Calvin*, in cui una serie ciclica di reazioni assemblano molecole di zucchero a partire dalla CO_2 e dai prodotti energetici della fase luminosa.



L'interazione fra luce e materia interviene dunque solo nella fase iniziale della fotosintesi.

L'assorbimento di radiazione e.m. nella fotosintesi avviene quasi totalmente per frequenze corrispondenti alla luce visibile, a parte quelle corrispondenti al colore verde (come si può facilmente intuire dal fatto che è il colore prevalentemente riflesso dalle foglie). Questa evidenzia il fatto che nel processo di fotosintesi non sono coinvolte frequenze infrarosse o ultraviolette.

All'interno della foglia l'assorbimento vero e proprio della luce avviene grazie a particolari quanti materiali (o *molecole*) chiamati *pigmenti*: quelli presenti nei vegetali sono principalmente la *clorofilla* (che si distingue

⁴Alcuni batteri fotosintetici, di origine molto antica precedenti a quelli aerobici, riescono a sfruttare l'energia della radiazione luminosa per estrarre dalle sostanze materiali, oltre all'acqua, anche materia elettronica.

ulteriormente in clorofilla *a*, *b* e *c*⁵), i *carotenoidi* e le *ficobiline*. Ognuno di questi pigmenti ha un ruolo importante nel processo di fotosintesi, ma è la clorofilla che riesce ad assorbire l'energia luminosa trasformandola in energia chimica. I pigmenti vengono a formare quello che viene chiamato *sistema antenna*, legato, grazie ad altre sostanze, alle membrane fotosintetiche. Per spiegare in che modo avviene l'assorbimento della luce da parte della clorofilla è utile a questo punto far ricorso al concetto di fotone. L'interazione fra materia e luce avviene in modo quantizzato con uno scambio di energia tra un quanto di luce (fotone) e un quanto materiale (il pigmento): in questo modo si ha un nuovo quanto materiale caratterizzato da un'energia maggiore rispetto a quella iniziale della clorofilla. In una successiva interazione materia-materia, la molecola di clorofilla cede energia interagendo con una molecola di *ATP* o di *NADP* (a seconda del tipo di clorofilla) che successivamente daranno luogo al secondo stadio del processo di fotosintesi, il ciclo di Calvin, in cui avverrà la sintesi del glucosio.

È importante sottolineare come questo scambio di energia tra le diverse sia molto rapido (dell'ordine dei picosecondi) e altamente specifico, come mostrò Rudolph A. Marcus nei suoi studi che lo portarono a vincere il premio Nobel per la chimica nel 1992.

5.2 Fotodissociazione

La fotodissociazione è un altro processo in cui si ha interazione fra luce e materia: la luce interagisce con una sostanza materiale formando due nuove sostanze materiali. In genere la luce che può indurre fotodissociazione deve avere una elevata energia, perciò non tutto lo spettro luminoso è coinvolto in questo tipo di interazione (tipicamente è coinvolta la radiazione UV).

Un noto esempio di fotodissociazione è quello legato alla distruzione e alla formazione dell'ozono in alta atmosfera (tra i 30 km e i 50 km). L'ozono è una sostanza caratterizzabile da un particolare odore intenso, è usato negli ospedali come disinfettante ed è uno dei principali inquinanti delle nostre città nel periodo estivo, e si forma in seguito a reazioni innescate dal gas di scarico dei mezzi di trasporto. L'ozono è presente anche in alta atmosfera e il suo processo di interazione con la luce è molto importante per la sopravvivenza della vita sulla Terra, in quanto è in grado di assorbire gran parte della radiazione ultravioletta proveniente dal Sole, che altrimenti raggiungerebbe la superficie terrestre e interagirebbe con la materia determinando gravi problemi soprattutto per gli esseri viventi (vedi paragrafo sulla luce e il tessuto vivente). È noto a tutti il problema del buco dell'ozono che nel periodo primaverile si forma nelle zone antartiche e in corrispondenza dell'Europa e dell'America del Nord: esso consiste in un assottigliamento (in Antartide in modo molto più pronunciato) dello strato di ozono stratosferico e in un conseguente aumento delle radiazioni ultraviolette che giungono sulla superficie.

Osservando il processo di fotodissociazione dell'ozono possiamo notare che se la radiazione incidente ha una lunghezza d'onda superiore ai 300 nm non avviene nulla: anche in questo processo è presente un effetto di soglia. Il concetto di fotone in questa situazione ancora una volta aiuta a spiegare in maniera molto semplice il modo in cui avviene la reazione di fotodissociazione: un quanto della radiazione luminosa e un quanto della sostanza ozono interagiscono dando vita a due nuove sostanze materiali caratterizzabili come *ossigeno molecolare* (è l'ossigeno che noi respiriamo e ci permette di vivere) e *ossigeno atomico*. Il fotone della radiazione ultravioletta, mediante un'interazione di tipo radiazione-materia, cede istantaneamente tutta la sua energia alla molecola di ozono (O_3 , quanto della sostanza ozono) che successivamente si scinde in una molecola di ossigeno (O_2 , quanto della sostanza ossigeno molecolare) e in un atomo di ossigeno O (quanto della sostanza ossigeno atomico), tramite un'interazione chiaramente di tipo chimico.

Contemporaneamente a questo processo vi è quello che attraverso interazioni chimiche (materia-materia) e altri processi di fotodissociazione (che coinvolgono la luce e l'ossigeno molecolare) portano alla formazione di ozono. Grazie a questi processi gran parte della radiazione ultravioletta viene assorbita negli strati più alti dell'atmosfera; se qualche altra reazione inficia il processo di formazione dell'ozono (come avviene in particolar modo in primavera nelle regioni sopraccitate) si ha un assottigliamento dello strato e la formazione del cosiddetto "buco".

5.3 Luce e tessuto vivente

La radiazione ultravioletta che non viene assorbita dallo strato di ozono può raggiungere la superficie della Terra e interagire con la materia. Interessante è il caso in cui questa radiazione colpisce il tessuto vivente, come il *tessuto epiteliale* degli uomini. L'interazione fra la luce e i tessuti viventi è molto complessa. Analizzeremo solo quella parte dello spettro luminoso che corrisponde alla radiazione ultravioletta.

⁵Vi possono poi essere ulteriori distinzioni fra i vari tipi di clorofilla: la clorofilla *a*, ad esempio, si distingue in clorofilla *P680* e clorofilla *P700* a seconda che siano in grado di assorbire luce di frequenza di 680 nm e 700 nm rispettivamente

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti la radiazione UV, interagendo con la materia, può indurre il processo di fotodissociazione: il quanto dell'onda luminosa, il fotone, interagisce con un quanto del tessuto epiteliale, una molecola (possono essere molecole di diverse sostanze materiali appartenenti al tessuto), formando così molecole diverse. Interagendo con altra materia queste nuove sostanze prodotte dalla fotodissociazione causano infiammazione ed eritemi della pelle e, nel caso di interazione con il DNA, vi è anche la possibile insorgenza di tumori. La pelle perciò reagisce alla presenza della radiazione ultravioletta producendo un pigmento che assorbe la radiazione UV senza dissociarsi e danneggiare il resto del tessuto. Questo pigmento, chiamato *melanina*, è il responsabile della colorazione scura della pelle (l'abbronzatura) dopo lunghe esposizioni alla radiazione.

5.4 Processo fotografico

Il processo fotografico è un particolare esempio di applicazione molto concreta (e visibile!) delle reazioni fotochimiche. All'interno della macchina fotografica tradizionale la pellicola è l'elemento fisico dove si va a fissare l'immagine che abbiamo inquadrato attraverso l'obiettivo. I raggi luminosi che provengono dal soggetto inquadrato attraversano il diaframma e, in base al movimento più o meno rapido dell'otturatore, giungono in quantità maggiore o minore sulla pellicola, impressionandola. La pellicola è costituita da una serie di strati; il primo è di materiale sintetico e funge da supporto agli altri. Su di esso infatti viene stesa l'*emulsione* vera e propria che è in genere composta da sali d'argento sensibili alla luce. Questi ultimi, mescolati in una gelatina secca, una volta colpiti dalla radiazione luminosa subiscono una trasformazione chimica. È in questo momento che avviene una interazione fra materia e luce del tipo descritto nel paragrafo precedente: si ha una fotodissociazione generata in questo caso da luce visibile. La molecola di alogenuro di argento (quanto della materia che interagisce con la luce) assorbe l'energia di un fotone e si scinde dando origine a due nuovi quanti: l'alogeno e l'argento metallico, che si depositano così nella pellicola. Come nell'effetto fotoelettrico è interessante notare in questo caso una proporzionalità diretta fra l'intensità luminosa e la quantità di argento metallico depositato: in base alla densità del deposito sarà possibile ottenere con una camera oscura un'immagine negativa del soggetto inquadrato.

L'annerimento diretto dell'alogenuro di argento, detto effetto *print-out*, è stato il primo metodo utilizzato per ottenere delle immagini agli albori della fotografia, ma aveva l'inconveniente di richiedere tempi di posa lunghissimi. Fin dai primi tempi della fotografia, però, si scoprì che non era necessario attendere la formazione di un'immagine visibile sul materiale sensibile: anche dopo una breve esposizione era possibile, con un opportuno trattamento chimico, ottenere un'immagine perfettamente formata. In effetti anche nel corso di una esposizione molto breve (quindi con bassa intensità di illuminazione e similmente a quello che accade nel processo fotoelettrico) si verifica la fotodissociazione del bromuro d'argento in quantità molto piccola ma tale da formare un'immagine debolissima, non visibile a occhio nudo, detta *immagine latente*. Trattando questa con particolari sostanze chimiche (chiamati rivelatori) si ottiene la formazione dell'immagine visibile, che risulta costituita da un insieme di granuli d'argento originati dalla riduzione dei singoli cristalli di alogenuro. Sono questi che conferiscono all'immagine la caratteristica struttura granulosa.

Nell'effetto *print-out* l'energia necessaria per la trasformazione dell'alogenuro in argento metallico è fornita interamente dalla radiazione assorbita dall'emulsione, mentre nel secondo caso la radiazione cede solo la piccola quantità di energia necessaria alla formazione dell'immagine latente. Il rivelatore fornisce in un secondo tempo la quantità di energia necessaria per portare a termine il processo, con un effetto di amplificazione di circa un milione di volte. Dopo la formazione dell'immagine occorre allontanare l'alogenuro d'argento rimasto inutilizzato (*fissaggio*), oppure renderlo insensibile alla luce (*stabilizzazione*).

È importante far notare come anche nel processo fotografico *sia presente un effetto di soglia*: la fotodissociazione non avviene con luce di lunghezza d'onda superiore (al limite uguale) a quella del rosso, come testimonia anche il fatto che nella camera oscura, durante lo sviluppo delle pellicole, per non rovinare l'immagine latente, viene utilizzata una luce rossa di debole intensità.

5.5 Sterilizzazione γ e radioterapia

Analizziamo ora una particolare interazione fra la luce e la materia vivente: quella che coinvolge la radiazione γ , cioè quella più energetica conosciuta. I processi che vedremo macroscopicamente sono molto diversi fra loro (la *sterilizzazione* e la *radioterapia*), ma possiamo spiegarli con una interazione fra luce e materia in modo relativamente semplice.

Osservando che grandi dosi di radiazione sono in grado di uccidere ogni tipo di batterio, fungo o insetto, dall'inizio della seconda metà del secolo scorso si cominciò ad impiegare la radiazione per sterilizzare strumentazione medica, come siringhe, bendaggi, strumenti per trasfusione e un gran numero di altri strumenti

utilizzati nella pratica medica. Le dosi, per inattivare batteri e virus, devono essere sufficientemente elevate e sono dell'ordine da 20 a 40 kGy. Per questi scopi si utilizzano sorgenti di ^{60}Co (da 1000 a 10.000 TBq) che emettono raggi γ (con energia di 1,17 e 1,33 MeV). L'applicazione di questo metodo di sterilizzazione ha avuto un ruolo importantissimo nella riduzione delle infezioni. Quasi subito si passò dalla sterilizzazione della strumentazione medica alla sterilizzazione dei cibi. Il metodo è utile anche nei casi in cui già sia utilizzata la tecnica di refrigerazione o quella dei conservanti chimici. Per molti prodotti alimentari, come il pesce, pollame, verdura, frutta e spezie, l'irradiazione aumenta la sicurezza e dà maggiore garanzia di preservare la qualità. Le dosi impiegate per i prodotti alimentari (da 5 a 10 kGy) sono generalmente inferiori a quelle usate nella sterilizzazione della strumentazione medica. L'irradiazione è attualmente una delle tecniche preferite per eliminare microbi infettivi, come la salmonella.

Nella radioterapia lo scopo è quello di distruggere con la radiazione le cellule cancerogene salvaguardando il più possibile le circostanti cellule sane. È necessaria pertanto una attenta analisi tra rischi e benefici. Essendo le cellule cancerogene localizzate all'interno del corpo, è inevitabile che la radiazione, prima di raggiungere il bersaglio costituito dal tessuto malato, investa anche tessuti sani. Si tratta pertanto di scegliere il tipo più opportuno di radiazione e seguire un rigoroso protocollo di irraggiamento. Anche per la radioterapia non sono sufficienti radiazioni con basso contenuto energetico: occorre radiazione di tipo γ . Una delle tecniche più note in radioterapia sono i cosiddetti γ -knife, fasci di raggi γ molto intensi prodotti da sorgenti di ^{60}Co in grado di operare quasi come un coltello e distruggere un tumore localizzato all'interno dell'organismo, anche in organi molto delicati come il cervello.

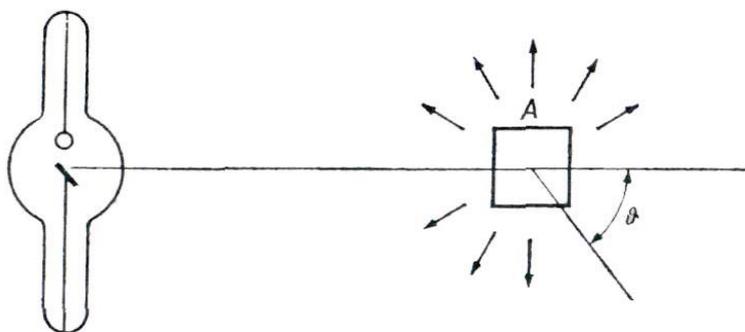
L'analisi di tutte queste tecniche è molto complicata, ma anche molto interessante e andrebbe debitamente approfondita; quello che a noi interessa però è analizzare come avviene l'interazione tra questa particolare radiazione e.m. e la materia vivente: il risultato di questa interazione è ancora materia, senza più alcuna caratteristica di vita. Ancora una volta l'interazione fra la materia e la luce avviene in maniera quantizzata: il quanto della radiazione, il fotone γ , trasferisce la sua energia al quanto della materia, la molecola di DNA della cellula, che può fotodissociarsi o trasformarsi in un'altra molecola, non più attiva dal punto di vista biologico. Si ha così la formazione di una nuova sostanza materiale, diversa dal DNA, che determina la morte della cellula.

Possiamo notare come l'interazione sia localizzata, in quanto la morte del batterio o della cellula tumorale avviene in un punto preciso del tessuto. È questa un'ulteriore conferma dell'aspetto quantizzato dell'interazione radiazione-materia.

6 Effetto Compton

Dopo aver preso in esame l'effetto fotoelettrico ed aver visto come sia utile al fine della sua spiegazione ricorrere al concetto di fotone, vogliamo ora introdurre un nuovo fenomeno la cui spiegazione può essere parimenti fornita sfruttando il quanto di radiazione. Cominciamo quindi con l'illustrarne la situazione sperimentale in cui si palesa il fenomeno in esame⁶.

Supponiamo di far incidere della radiazione e.m. monocromatica ad alta frequenza, ad esempio raggi X o γ di lunghezza d'onda λ^7 , su di un campione di materia. Si supponga di misurare, mediante un rivelatore, la lunghezza d'onda della radiazione diffusa a diversi angoli θ rispetto alla direzione del fascio incidente.



L'analisi sperimentale mette in luce i seguenti fatti salienti.

⁶Per quanto riguarda la terminologia impiegata, utilizzeremo il termine *elettrone* per riferirci al quanto del campo elettronico. Si rammenti che il quanto ha una propria esistenza **solo** all'atto dell'interazione.

⁷In questo tipo di trattazione è più comodo identificare una radiazione e.m. in base alla lunghezza d'onda λ piuttosto che in base alla frequenza ν . Questo è possibile in quanto, per un'onda e.m. che propaga nel vuoto $c = \lambda\nu$, dove c è la velocità della luce.

1. La radiazione e.m. diffusa *non è più monocromatica come quella incidente*, ma è formata da onde distinte e molto ravvicinate: una prima emissione ha lunghezza d'onda λ (esattamente pari alla lunghezza d'onda della radiazione incidente) ed è presente a qualunque angolo d'osservazione θ , una seconda emissione ha lunghezza d'onda $\lambda' > \lambda$ ($\lambda' \simeq \lambda$). Quindi lo spettro di diffusione mostra due righe vicinissime, una identica a quella incidente, l'altra spostata verso lunghezze d'onda maggiori: *il secondo tipo di emissione trasporta quindi minor energia e quantità di moto rispetto alla radiazione incidente*.
2. λ' dipende dall'angolo θ secondo la legge (deducibile sperimentalmente)

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c(1 - \cos \theta) \quad (4)$$

dove λ_c è una costante che ha le dimensioni di una lunghezza e che assume valore pari a $0,024 \text{ \AA}$.

3. La relazione (4) può essere riscritta come

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos \theta) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos \theta)}. \quad (5)$$

Quindi la variazione $\Delta\lambda$ è *indipendente dalla lunghezza d'onda della radiazione e.m. incidente*.

4. Cambiando la tipologia di materiale che viene irraggiato si osserva che *la variazione della lunghezza d'onda in funzione di θ è indipendente dalla natura della sostanza diffondente*. Non ha quindi importanza alcuna lo stato della materia in esame: il fenomeno si presenta allo stesso modo per i gas, i liquidi e i solidi.

Abbiamo già avuto modo di osservare, discutendo l'effetto fotoelettrico, che se si vuole preservare la validità delle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto per i processi di interazione radiazione-materia, un elettrone "libero" non può interagire con un'onda e.m. (assorbendo un quanto del campo e.m.: il fotone, per l'appunto) perché violerebbe i principi di conservazione testé enunciati. Inoltre se la radiazione incidente trasporta un'energia molto superiore all'energia necessaria per avere una fuoriuscita di materiale elettronico dalla sostanza, l'effetto fotoelettrico non può aver luogo, ossia non è possibile che il fotone venga semplicemente assorbito dall'elettrone⁸. Siamo quindi di fronte ad un nuovo tipo di fenomeno, che venne indicato con il nome di *effetto Compton* (dal nome del fisico statunitense che per primo lo studiò e lo interpretò all'inizio degli anni '20 del secolo scorso). Vediamo ora come sia possibile interpretare tale effetto, sia sulla base del modello quantistico che di quello classico.

6.1 Spiegazione mediante il concetto di fotone

Studiando l'effetto fotoelettrico siamo giunti alla conclusione che è possibile supporre che la radiazione e.m. interagisca con le particelle del campo elettronico, gli elettroni, mediante un singolo quanto, il fotone. L'energia e la quantità di moto che caratterizzano il fotone all'atto dell'interazione sono risultate essere pari a:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{e} \quad |\mathbf{p}| = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (6)$$

dove h è una costante universale, detta costante di Planck, e c è la velocità della luce. La principale differenza emersa, rispetto al punto di vista classico, è *il legame esistente tra energia e frequenza* (o equivalentemente tra *energia e lunghezza d'onda*) della radiazione elettromagnetica. Vediamo come tale legame può essere utile per spiegare l'effetto Compton.

Supponiamo di modellizzare, a livello microscopico, l'interazione radiazione-materia come un *singolo urto elastico tra un fotone e un elettrone*. Precisiamo immediatamente che tale schematizzazione è, per certi versi, "strana": la meccanica classica descrive i processi d'urto tra due oggetti dotati di massa (ad esempio due palle da biliardo) ai quali sono associate grandezze quali l'energia e la quantità di moto, mentre in questo caso abbiamo l'urto tra un "oggetto" dotato di massa (l'elettrone) e un "oggetto" che è privo di massa (il fotone). Tuttavia, visto che sperimentalmente emerge in modo chiaro che la luce trasporta energia e quantità di moto, ipotizziamo che sia valido schematizzare l'interazione elementare tra fotone ed elettrone come un urto meccanico, di tipo elastico.

Dalla meccanica elementare sappiamo che in un urto elastico si conservano sia l'energia sia la quantità di moto degli elementi costituenti il sistema (nel nostro caso il fotone e l'elettrone). Prima dell'interazione è l'onda

⁸Da un punto di vista energetico, questa situazione si presenta qualora l'energia associata ai fotoni incidenti supera 1 keV.

e.m. che trasporta energia e quantità di moto, che indicheremo con E e \mathbf{p} (associati, dal nostro punto di vista, al solo fotone dell'interazione). Dopo l'interazione parte dell'energia e della quantità di moto vengono trasferiti all'elettrone (inizialmente supposto "libero e fermo"⁹): denoteremo quindi con E_e e \mathbf{p}_e rispettivamente l'energia e la quantità di moto dell'elettrone dopo l'urto. Per le leggi di conservazione, il fotone sarà a sua volta dotato di energia E' e di quantità di moto \mathbf{p}' . L'angolo di osservazione θ altro non è che la direzione a cui viene osservata l'onda e.m. (e quindi la direzione in cui il fotone viene deviato) rispetto alla direzione iniziale.

Le leggi di conservazione ci portano quindi a impostare il sistema di equazioni:

$$\begin{cases} E = E_e + E' \\ \mathbf{p} = \mathbf{p}_e + \mathbf{p}' \end{cases} \quad (7)$$

Si osservi che la seconda equazione può essere riscritta come

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{p} - \mathbf{p}'$$

per cui, sapendo che l'angolo tra p e p' è θ , è possibile applicare il teorema di Carnot ottenendo per i moduli

$$p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta.$$

Prima di procedere ulteriormente è necessario precisare un aspetto del problema legato all'energia trasportata dall'onda e.m. (e quindi associata al fotone interagente). Se si suppone che durante l'interazione solamente una piccola frazione dell'energia del fotone venga trasferita all'elettrone, l'energia e la quantità di moto possono essere trattate classicamente. Viceversa, se si suppone che la frazione di energia trasmessa all'elettrone sia consistente, è necessario ricorrere ai risultati della *teoria della relatività ristretta* per rendere conto correttamente del fenomeno osservato. Tuttavia, nonostante il diverso riferimento teorico, in entrambi i casi *si perviene al medesimo risultato*; ci concentreremo solamente sulla deduzione approssimata, ritenendola tuttavia valida in generale.

Supponiamo quindi che il fotone trasferisca una piccola parte dell'energia all'elettrone. Il sistema (7) può essere riscritto come

$$\begin{cases} E = \frac{p_e^2}{2m_e} + E' \\ p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta \end{cases}$$

dove l'energia cinetica che l'elettrone acquisisce a causa dell'urto può essere espressa come

$$E_e = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{2m_e} (mv_e)^2 = \frac{p_e^2}{2m_e}$$

in quanto, per definizione, $\mathbf{p} = m\mathbf{v} \rightarrow p = mv$. Ricordando ora che per il fotone valgono le relazioni (6), il sistema può essere riscritto come

$$\begin{cases} p_e^2 = 2m_e(E - E') \\ p_e^2 = \frac{1}{c^2} (E^2 + E'^2 - 2EE' \cos \theta) \end{cases}.$$

Possiamo quindi uguagliare i secondi membri ed ottenere la relazione

$$2m_e(E - E') = \frac{1}{c^2} (E^2 + E'^2 - 2EE' \cos \theta)$$

che, dividendo primo e secondo membro per $2m_eEE'$, può essere ricondotta alla forma

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{2mc^2} \left(\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - 2 \cos \theta \right). \quad (8)$$

⁹Si osservi che, nell'ambito della teoria quantistica dei campi, è possibile descrivere l'effetto Compton senza ricorrere ad una modellizzazione particellare.

Denotiamo ora con

$$\varepsilon = E - E' \quad (9)$$

la frazione di energia ceduta dalla radiazione e.m. alla particella. Viste le nostre ipotesi deve valere

$$\varepsilon \ll E,$$

per cui, considerando la quantità

$$\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} = \frac{E^2 + E'^2}{EE'},$$

ricavando dalla (9) l'espressione di E' e sostituendola in tale relazione, si ha

$$\frac{E^2 + (E - \varepsilon)^2}{E(E - \varepsilon)} = \frac{2E^2 + \varepsilon^2 - 2E\varepsilon}{E(E - \varepsilon)} = \frac{2E(E - \varepsilon) + \varepsilon^2}{E(E - \varepsilon)} = 2 + \frac{\varepsilon^2}{E(E - \varepsilon)}.$$

Vista l'ipotesi $\varepsilon \ll E$, osserviamo che

$$\frac{\varepsilon^2}{E(E - \varepsilon)} \simeq 0$$

per cui possiamo concludere che

$$\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} = 2 + \frac{\varepsilon^2}{E(E - \varepsilon)} \simeq 2.$$

La (8) diventa quindi

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} \simeq \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta).$$

Tenendo ora presente il legame tra energia e lunghezza d'onda per un fotone, espresso dalla prima delle formule (6), e ricordando quanto affermato circa la validità generale della formula (senza considerare approssimazioni), otteniamo in definitiva

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta),$$

che altro non è se non legge dedotta sperimentalmente per la variazione della lunghezza d'onda in funzione dell'angolo di osservazione θ . Si presti attenzione alla costante moltiplicativa che compare a secondo membro. In essa appaiono due costanti universali (la costante di Planck h e la velocità della luce c) e una terza costante, che specifica il tipo di particella coinvolta nel processo d'urto. Nel nostro caso abbiamo ipotizzato l'urto elastico di un fotone con un elettrone "libero", per cui il parametro massa esprime proprio la massa dell'elettrone. Sostituendo i valori numerici, possiamo agevolmente ricavare

$$\frac{h}{m_e c} \simeq 0,024 \text{ \AA},$$

per cui si ottiene anche una perfetta corrispondenza numerica con la relazione sperimentale. Si osservi infine che la massima variazione di lunghezza d'onda, dovuta all'effetto Compton, si ha per un angolo di osservazione pari a 180° , in corrispondenza del quale si ha

$$\Delta\lambda_{\max} = \frac{2h}{m_e c},$$

che classicamente può essere interpretata come un urto perfettamente centrale in cui si ha massimo trasferimento di energia e quantità di moto all'elettrone "fermo e libero".

L'introduzione del quanto di radiazione elettromagnetica permette inoltre di spiegare la presenza di una riga diffusa che mantiene la medesima lunghezza d'onda λ . In tal caso l'elettrone non può più essere considerato "libero", ma si deve considerare l'atomo (quanto materiale) come un "oggetto" unico con cui la radiazione e.m.

interagisce. Conseguentemente, la massa coinvolta nel processo d'urto sarà quella dell'intero atomo, per cui migliaia di volte maggiore rispetto alla massa del singolo elettrone. Per questo motivo, la relazione di variazione della lunghezza d'onda per effetto Compton con un quanto materiale di generica massa M sarà

$$\Delta\lambda = \frac{h}{Mc} (1 - \cos\theta)$$

per cui se $M \gg m_e$ si avrà

$$\frac{h}{Mc} \simeq 0$$

rendendo quindi conto dell'evidenza sperimentale.

In virtù di quanto detto è facilmente interpretabile il motivo per cui, incidendo su di una superficie metallica, la radiazione e.m. venga riflessa o diffusa senza cambiare colore (si rammenti che nel visibile una variazione di lunghezza d'onda corrisponde ad un'alterazione del colore della luce). In entrambi i casi, la massa dell'“oggetto” che subisce l'urto ad opera della radiazione e.m. è enormemente maggiore rispetto a quella di un singolo elettrone libero, per cui l'effetto non è rivelabile. Analiticamente si può considerare $M \rightarrow \infty$, da cui $\lambda_c \rightarrow 0$.

Per quanto riguarda la terminologia, si tenga presente che la quantità

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} \tag{10}$$

prende il nome di *lunghezza d'onda Compton*.

Concludendo, il concetto di fotone è stato in grado di fornire un'interpretazione teorica dell'effetto Compton, in perfetta corrispondenza con i dati sperimentali. Si tenta presente, comunque, che *il fotone non deve essere pensato come una particella avente un'esistenza ad di fuori del processo di interazione*, pena l'incorrere in paradossi che non trovano alcuna spiegazione accettabile.

6.2 Spiegazione come doppio effetto Doppler

Solitamente quando si introduce l'effetto Compton si afferma che tale fenomeno non è spiegabile in base alla fisica classica, per cui bisogna necessariamente ricorrere al concetto di fotone per fornirne un'interpretazione teorica. In realtà è possibile spiegarlo ricorrendo solamente a nozioni di fisica classica, precisamente mediante un *doppio effetto Doppler*.

Analizzando la deduzione del fenomeno fatta nel paragrafo precedente, si può facilmente constatare che molti degli aspetti considerati non implicano necessariamente un'interpretazione quantistica. Si osservi infatti che:

- l'elettrone che rincula è supposto libero,
- solo una frazione dell'energia incidente (supposta associata al fotone) è trasferita all'elettrone,
- la relazione che esprime la frazione di energia ceduta è una funzione continua dell'angolo di rinculo e della frequenza
- la variazione della lunghezza d'onda è una funzione continua dell'angolo osservato.

L'unico riferimento, in un certo senso “nascosto”, che ci rimanda alla teoria quantistica è la presenza della costante di Planck, che appare nella relazione (10).

Per spiegare il fenomeno si potrebbe semplicemente supporre che l'elettrone dapprima assorba tutto il fotone incidente (acquistando quindi tutta la sua energia e la quantità di moto) e successivamente emetta nuovamente radiazione con energia inferiore, “trattenendo per sé” solo una parte dell'energia e della quantità di moto ricevuta. Tuttavia questa ipotesi sembra “accettare per vero” quanto in realtà dovrebbe essere provato, visto che sperimentalmente non si osserva alcun intervallo di tempo in cui possano essere associate al *solo* elettrone un'energia o una quantità di moto pari a tutta quella trasportata dal fotone. Inoltre lo stesso esperimento eseguito da Compton era basato sulla diffrazione (alla Bragg), quindi un effetto ondulatorio, per misurare le lunghezze d'onda effettivamente coinvolte. Nei suoi studi e pubblicazioni sui raggi X , lo stesso Compton discusse con molta attenzione un'interpretazione del fenomeno basato su un duplice effetto Doppler. Curiosamente, pur essendo corretta, Compton la respinse ritenendola erronea (apparentemente basandosi su motivazioni sbagliate). In seguito molti altri fisici pubblicarono derivazioni teoriche dell'effetto Compton come conseguenza di un doppio effetto Doppler, di cui riportiamo i capisaldi.

Si supponga che la radiazione incidente si muova lungo la direzione individuata da $\theta = 0^\circ$, che gli elettroni al momento dell'interazione possano essere pensati dotati di una certa velocità iniziale, in generale diversa da zero. Supporremo inoltre che l'elettrone¹⁰ si allontani approssimativamente lungo la direzione $\theta = 0^\circ$. È a questo punto necessario far ricorso alla relazione generale¹¹ che fornisce lo spostamento Doppler per la luce

$$\lambda' = \lambda \frac{1 - \beta \cos \delta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (11)$$

dove λ è la lunghezza d'onda incidente, λ' la lunghezza d'onda osservata, δ è l'angolo tra la direzione della luce che propaga verso l'osservatore e la direzione di moto dell'emettitore e $\beta = v/c$, dove c è la velocità della luce e v è la velocità della sorgente. La lunghezza d'onda λ_1 che colpisce l'elettrone che rincula è correlata a λ_0 , la lunghezza d'onda incidente nel sistema di riferimento del laboratorio, dalla relazione

$$\lambda_1 = \lambda_0 \frac{1 + \beta_0}{\sqrt{1 - \beta_0^2}},$$

dove $\beta_0 = -\beta \cos \delta$, con $\delta = 180^\circ$, per cui si ha in questo caso $\beta_0 = -\beta \cos 180^\circ = \beta$, ove l'indice zero viene messo a pedice per distinguere tale quantità dalla β della più generale relazione (11). La lunghezza d'onda emessa verso l'osservatore, λ_2 , subisce un ulteriore effetto Doppler, così che

$$\lambda_2 = \lambda_0 \frac{(1 + \beta_0)(1 - \beta_0 \cos \theta)}{1 - \beta_0^2}$$

che conduce a

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} (1 - \cos \theta).$$

Tale equazione è identica alla (5) qualora si ponga

$$\lambda_c = \frac{\lambda_0 \beta_0}{1 - \beta_0}. \quad (12)$$

Introducendo inoltre

$$\alpha = \frac{h\nu_0}{m_e c^2} = \frac{\lambda_c}{\lambda_0}$$

la (12) può essere scritta come

$$\beta_0 = \frac{\alpha}{1 + \alpha},$$

che Compton stesso osservò essere

“la velocità che l'elettrone deve avere affinché si osservi un cambiamento di lunghezza d'onda in accordo con i dettami dell'effetto Doppler”.

Si osservi tuttavia che, in accordo con l'insistenza di Bohr sul fatto che le semplici derivazioni non possono mai costituire la dimostrazione di una teoria, è quindi chiaro che, nonostante l'impatto storico del lavoro di Compton, la derivazione della sola relazione (5) non può costituire una prova cruciale per stabilire quale sia corretto tra il modello a fotone e il modello ondulatorio, questione che invece può essere stabilita in ultima analisi basandosi solamente sull'evidenza sperimentale.

Esperimenti con strumentazioni attuali hanno verificato la simultaneità dell'apparizione dell'elettrone di rinculo e della radiazione diffusa entro un intervallo temporale di $5 \cdot 10^{-10}$ s e indicano un valore della lunghezza

¹⁰Si osservi che, anche in questo caso, l'elettrone è considerato come il quanto materiale che viene coinvolto nell'interazione, e che quindi “assumee esistenza” solamente all'atto dell'interazione.

¹¹Si osservi che la relazione è stata dedotta nell'ambito della teoria della relatività ristretta. Infatti, per velocità prossime a quelle della luce, la legge galileiana di composizione delle velocità perde validità e deve essere sostituita con le più generali trasformazioni di Lorentz.

d'onda in accordo con le deduzioni teoriche. Si può quindi osservare come, in questa situazione specifica, non c'è una immediata e chiara distinzione tra le implicazioni dei due differenti approcci, che può essere sviluppata solamente con un'accurato studio della singola interazione. In realtà, senza tali indagini, vi è sicuramente un elemento di circolarità nell'affermazione storica che l'effetto Compton sia un'evidenza definitiva della natura corpuscolare della radiazione e.m., almeno al momento dell'interazione. Come lo stesso Compton osservò

“La chiara sovrapposizione dei principi della fisica classica e della fisica quantistica suggerisce come in questo caso si possa presentare un utile campo di studio per approfondire le connessioni tra questi due punti di vista differenti”.

A prescindere dalle conferme sperimentali può l'esistenza di una duplice derivazione dell'effetto Compton, basata sulla visione ondulatoria classica e sul concetto quantistico di fotone, essere considerata una conferma definitiva della natura corpuscolare della radiazione?

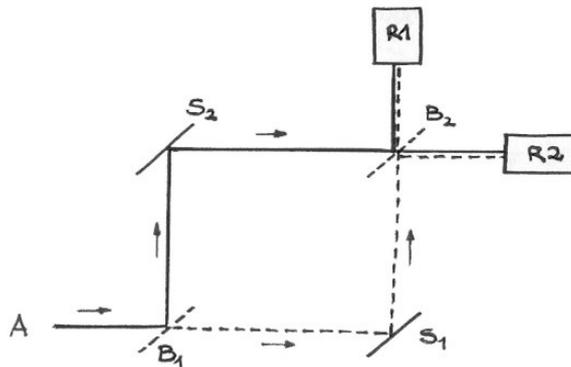
Si può ritenere che un qualsiasi modello che renda conto dei fenomeni osservati, non violi le leggi di conservazione e non sia inconsistente con le precedenti leggi della fisica, possa essere un buon punto di partenza per la derivazione di equazioni che quantifichino l'interazione tra materia e radiazione. Tuttavia è da sottolineare come l'accordo tra le equazioni e i risultati sperimentali debba essere considerato una conferma della fondamentale alla validità del modello solo qualora non sia circoscritto al fenomeno in esame, ma sia in grado di fornire l'interpretazione teorica corretta in altri ambiti.

Infatti, per quale motivo si preferisce il modello quantistico, basato sul fotone, a quello ondulatorio? Perché il modello quantistico è in grado di fornire una spiegazione anche per l'effetto fotoelettrico (e altre molteplici evidenze sperimentali), mentre quello ondulatorio no. Tuttavia nel prossimo paragrafo mostreremo come sia necessario evitare una visione troppo ingenua della natura quantizzata dell'interazione.

7 Ritorno alla visione corpuscolare?

Nelle sezioni precedenti abbiamo mostrato che, a seguito di una interazione tra una sostanza materiale e la radiazione luminosa, per spiegare certi effetti, sia necessario introdurre il concetto di quanto di luce, cioè di quello che viene comunemente chiamato *fotone*. Si è quindi evidenziato come la radiazione e.m. nelle interazioni presenti degli aspetti corpuscolari e quantistici. È necessario sottolineare alla classe come questi aspetti non siano presenti durante la propagazione libera del campo in considerazione. Se non è ben chiaro questo concetto si può facilmente cadere in errore e non si riuscirebbero più a spiegare alcuni effetti osservabili sperimentalmente. Non bisogna, perciò, giungere ad una teoria generalizzata e ingenua dei quanti.

Per comprendere quanto detto riportiamo il seguente esempio; esso mette in evidenza come i quanti siano indispensabili nello spiegare un processo di interazione e non sia necessario supporre che la luce, propagandosi liberamente nello spazio, sia composta da tanti piccoli corpuscoli.



Consideriamo un particolare apparato sperimentale: l'interferometro di Mach-Zender, che come riportato nella figura, è composto da due specchi completamente riflettenti S_1 e S_2 , due specchi semiriflettenti B_1 e B_2 e due rivelatori R_1 e R_2 . Si nota subito che questo dispositivo non è dotato di schermi su cui si possono osservare delle possibili figure di interferenza, ma di rivelatori. Questo significa che gli esperimenti produrranno degli effetti che devono essere “dedotti” dalle letture che vengono fatte dai due rivelatori, dove giungono i fasci coerenti che si sono generati a causa delle riflessioni e rifrazioni che subisce la radiazione luminosa prodotta dalla sorgente A.

Analizziamo cosa viene rivelato dai due apparecchi R_1 e R_2 , ricordando che ogni volta che il fascio luminoso subisce una riflessione, si sfasa di $\pi/2$ rispetto al fascio incidente.

Nel caso del rivelatore R_1 si ha l'interferenza della parte del fascio incidente che ha seguito il percorso $A \rightarrow B_1 \rightarrow S_1 \rightarrow B_2 \rightarrow R_1$ e quello che ha percorso $A \rightarrow B_1 \rightarrow S_2 \rightarrow B_2 \rightarrow R_1$. Nel primo caso il fascio, dopo essere stato suddiviso in due parti grazie a B_1 , subisce una riflessione totale su S_1 (si ha uno sfasamento di $\pi/2$), e giunge in R_1 a seguito di una trasmissione in B_2 . Il secondo percorso è quello della parte di fascio generato da A che ha subito una riflessione in B_1 , con conseguente sfasamento di $\pi/2$ e poi è stato riflesso sia da S_2 che da B_2 , sfasandosi ulteriormente di π ($\pi/2 + \pi/2$); quindi questo secondo fascio giunge in R_1 con uno sfasamento totale di $3\pi/2$ rispetto alla radiazione iniziale generata da A . Possiamo così concludere che sull'apparecchio R_1 si ha un'interferenza distruttiva, non rivelandosi quindi alcun segnale, perché i due fasci incidenti su esso sono in opposizione di fase ($\Delta\phi = 3\pi/2 - \pi/2 = \pi$).

Allo stesso modo è facile stabilire cosa viene rivelato da R_2 , dove incidono i segnali che seguono i percorsi $A \rightarrow B_1 \rightarrow S_1 \rightarrow B_2 \rightarrow R_2$ e $A \rightarrow B_1 \rightarrow S_2 \rightarrow B_2 \rightarrow R_1$. Il primo di questi coincide con il primo del caso precedente a meno della riflessione dovuta allo specchio B_2 (nel caso sopra considerato si aveva trasmissione), che comporta un ulteriore sfasamento di $\pi/2$, da aggiungersi a quello dovuto a S_1 . Lo sfasamento totale di questo fascio è quindi pari a π . Il segnale che segue il secondo percorso si differenzia, invece, dal secondo analizzato per R_1 in quanto non subisce una riflessione in B_2 , ma una trasmissione. Questo equivale ad affermare che il fascio che segue quest'ultimo percorso ha uno sfasamento totale di π rispetto al fascio generato in A . Sullo strumento R_2 giungono quindi due fasci coerenti con una differenza di fase $\Delta\phi$ pari a $\Delta\phi = \pi - \pi = 0$, cioè si ha interferenza costruttiva e quindi viene rivelato un certo segnale. Abbiamo così spiegato in modo molto semplice il funzionamento dell'interferometro di Mach-Zender, molto importante in quanto è la base della quasi totalità degli esperimenti di ottica materiale.

Avendo ben chiaro come lavora questo interferometro, proviamo a simulare un esperimento dove la radiazione prodotta in A abbia un'intensità molto bassa. Supponendo che la luce che propaga sia composta da fotoni, questo equivale ad avere un solo fotone per volta che si muove nell'apparato sperimentale. Sotto queste condizioni, l'analisi che dobbiamo fare avrà un carattere leggermente diverso da quello precedente, dovendo ora considerare il moto di corpuscoli e non la propagazione di un'onda.

Considerando lo specchio B_1 e i diversi fotoni che vanno a raggiungerlo, si può supporre, senza ipotesi particolari, che metà di essi lo superano, raggiungendo S_1 , mentre l'altra metà viene riflessa andando verso lo specchio S_2 . Questo comportamento ha una verifica sperimentale: mettendo un rivelatore tra B_1 e S_1 ed un altro tra B_1 e S_2 , si ha che ad ogni uscita di un fotone da A , scatta, a caso solo uno dei due rivelatori. La stessa cosa avviene ovviamente per lo specchio semiriflettente B_2 : metà dei fotoni provenienti da S_1 va verso R_1 , l'altra metà verso R_2 ; metà dei fotoni provenienti da S_2 va verso R_1 , l'altra metà verso R_2 . I fotoni iniziali, provenienti da A , vengono quindi divisi in due parti dallo specchio B_1 che a loro volta vengono suddivise da B_2 . Si hanno così quattro "gruppi" di fotoni; due raggiungono il rivelatore R_1 , altri due R_2 . Si può quindi concludere che R_1 e R_2 rivelano lo stesso numero (circa) di fotoni e quindi si ha un risultato diverso da quello analizzato in precedenza. In realtà, però, quanto abbiamo appena mostrato non accade nella realtà. Il nostro esperimento teorico è errato: esperienze di laboratorio mostrano che nel caso di radiazione con bassissima intensità, il risultato ottenuto è il medesimo che con alta intensità; solo il rivelatore R_2 riceve un segnale.

Tutto questo implica che il supporre la radiazione luminosa composta da fotoni mentre propaga liberamente nello spazio è un'ipotesi scorretta. Possiamo attribuire una traiettoria al fascio di luce (in generale ad un campo), pensare che propaghi lungo i cammini ottici possibili, mentre questo non è plausibile per i fotoni, ai quali non è quindi naturale associare una propria cinematica. Infatti nel caso che abbiamo appena analizzato

1. non si ha un segnale in entrambi i rivelatori \rightarrow il singolo fotone non segue nessuno dei due cammini;
2. mettendo un rivelatore tra B_1 e S_1 ed un altro tra B_1 e S_2 , ne scatta uno solo alla volta \rightarrow il singolo fotone non segue entrambi i cammini;
3. mettendo dei rivelatori all'esterno dell'apparato sperimentale non si rileva alcun fotone \rightarrow i fotoni non seguono percorsi diversi da quelli considerati;
4. i fotoni escono da A , venendo rivelati \rightarrow seguono qualche cammino.

Osserviamo che vi sono altri esperimenti che mostrano come gli aspetti corpuscolari di una radiazione siano presenti solo durante delle interazioni e non nella propagazione libera, descritta in termini ondulatori. Si deduce quindi che non ci deve essere un ritorno totale alla visione corpuscolare, ma una diversificazione nell'analisi delle diverse situazioni.

8 Test di valutazione

8.1 Prima dell'esposizione

Il test è pensato per verificare la solidità della conoscenza dei prerequisiti richiesti per lo studio dell'interazione radiazione-materia; non sono presenti domande sull'elettrostatica e sui circuiti in quanto riteniamo possa essere sufficiente per l'insegnante la verifica fatta nel corso del primo quadrimestre attraverso i compiti in classe standard.

Rispondi alle seguenti domande aperte e a scelta multipla:

1. Elenca almeno tre fenomeni ondulatori, ad eccezione delle onde sulla superficie di un liquido, presenti in natura.
2. Spiega brevemente i fenomeni che evidenziano la natura ondulatoria della luce.
3. Riassumi schematicamente i principali risultati discussi a proposito degli esperimenti con *onde materiali*, soffermandoti in particolare sul concetto di quanto materiale.
4. In riferimento all'intensità di illuminazione di una superficie si può affermare che essa è:
 - (a) direttamente proporzionale alla superficie e inversamente proporzionale alla distanza della superficie dalla sorgente
 - (b) direttamente proporzionale alla superficie e inversamente proporzionale al quadrato della distanza di essa dalla sorgente
 - (c) direttamente proporzionale alla intensità luminosa della sorgente e inversamente proporzionale alla distanza della superficie dalla sorgente
 - (d) direttamente proporzionale alla intensità luminosa della sorgente e inversamente proporzionale al quadrato della distanza di essa dalla sorgente
5. Per i fenomeni ondulatori vale, *in linea di principio*, il teorema di conservazione dell'energia?
 - (a) sì, sempre
 - (b) no, mai
 - (c) dipende dal tipo di onda
 - (d) dipende dal mezzo in cui l'onda si propaga
 - (e) dipende sia dal tipo di onda che dal mezzo in cui si propaga
6. L'effetto Doppler si verifica:
 - (a) quando sia la sorgente sia il ricevitore del segnale non cambiano la loro posizione reciproca
 - (b) solo quando sorgente e ricevitore si avvicinano
 - (c) solo quando sorgente e ricevitore si allontanano
 - (d) quando sorgente e ricevitore sono in moto l'uno rispetto all'altro

8.2 A conclusione del percorso didattico

1. Descrivi brevemente (a tua scelta) una delle reazioni fotochimiche analizzate in classe utilizzando il concetto di fotone introdotto.
2. Una lastra conduttrice, illuminata da una sorgente luminosa, emette per effetto fotoelettrico. Se avviciniamo la sorgente luminosa alla lastra
 - (a) viene emessa più materia elettronica per unità di tempo
 - (b) non cambia la quantità di materia elettronica emessa
 - (c) la materia elettronica ha maggior energia cinetica
 - (d) diminuisce la quantità di materia elettronica emessa

- (e) non si osserva materia elettronica
3. Una lastra conduttrice emette materia elettronica per effetto fotoelettrico quando è illuminata con luce azzurra. Quando è illuminata con luce rossa non si ha alcun effetto. Questo accade perché
- l'intensità della luce rossa è troppo bassa
 - la frequenza della luce rossa è troppo bassa
 - con la luce rossa aumenta l'energia necessaria per avere fuoriuscita di materia elettronica
 - la materia elettronica emessa è troppo esigua per essere osservata
 - viene riflessa dalla lastra e non si ha interazione
4. Nell'effetto Compton, il massimo spostamento della lunghezza d'onda λ dei raggi X si verifica quando l'angolo di diffusione è
- 0°
 - 45°
 - 90°
 - La variazione di λ è indipendente dall'angolo di diffusione
 - Con i raggi X non si ha alcun spostamento
5. Il valore della costante h di Plank è pari a
- $6,626 \cdot 10^{19} \text{ Js}$
 - $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$
 - $6,626 \cdot 10^{34} \text{ J}$
 - $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}$
 - $6,626 \cdot 10^{-19} \text{ J/s}$
6. Il lavoro di estrazione di un determinato metallo è $2,00 \text{ eV}$. Se il metallo viene illuminato da luce monocromatica con lunghezza d'onda di 550 nm , qual è la velocità massima della materia elettronica emessa? Qual è in questo caso il potenziale di arresto?
7. Stabilisci se i seguenti fenomeni osservati nell'effetto fotoelettrico sono spiegabili tramite la fisica classica
- La corrente osservata è direttamente proporzionale all'intensità della luce
 - L'energia cinetica massima della materia elettronica dipende dalla frequenza della luce, ma non dalla sua intensità
 - Indipendentemente dall'intensità della radiazione incidente, non si ha alcuna emissione nel caso di luce che abbia frequenza inferiore a una data frequenza di soglia
 - Anche se l'intensità della luce è molto bassa si osserva immediatamente una fotoemissione quando la frequenza della radiazione è maggiore di un certo valore
8. Per quanto riguarda l'effetto fotoelettrico, se non si introducesse l'interazione quantizzata, la fisica classica prevedeva
- che non si avesse alcuna emissione di materia elettronica al di sotto della frequenza di soglia
 - che la corrente osservata fosse direttamente proporzionale all'intensità della radiazione incidente
 - che l'energia cinetica dei quanti-elettroni osservati dipendesse dalla frequenza, ma non dall'intensità della luce
 - che si osservasse immediatamente della materia elettronica
9. Se una radiazione elettromagnetica è composta di quanti, perchè non rileviamo la presenza di tali pacchetti discreti di energia quando, ad esempio, ascoltiamo la radio?

10. Per quanto riguarda i danni biologici provocati dalla ionizzazione, è più pericoloso essere investiti da raggi X a bassa intensità o illuminati con maggiore intensità da luce rossa? Come si spiega questo paradosso? Serve l'idea di fotone?
11. L'effetto Compton fu osservato per
- (a) la luce visibile
 - (b) la radiazione infrarossa
 - (c) la luce ultravioletta
 - (d) i raggi X
12. Nell'effetto Compton, se aumenta l'angolo di deviazione, come varia la frequenza dei raggi X deviati con quell'angolo?
- (a) Aumenta
 - (b) Diminuisce
 - (c) Non varia
 - (d) Varia in modo casuale
 - (e) Non si può dire nulla a questo proposito
13. È vero che un fotone è un elettrone privato della sua carica?
14. Spiega il meccanismo di soglia nell'effetto fotoelettrico
15. Quando un certo materiale viene illuminato con una radiazione di lunghezza d'onda pari a 680 nm e poi pari a 420 nm , si trova che nel secondo caso l'energia cinetica massima della materia elettronica emessa è 1,8 volte maggiore di quella che hanno nel primo caso. Qual è il lavoro di estrazione del materiale considerato?