

Rutherford e Van de Graaf nella tecnica RBS: un ponte di collegamento tra la ricerca e la didattica della fisica

La fisica dei materiali con la tecnica RBS nei laboratori nazionali di Legnaro dell'INFN e come le scoperte del secolo scorso aiutano gli scienziati di oggi e possono creare un ponte tra la ricerca e la fisica in classe.

Rutherford and Van de Graaf: what is the actual situation after a century? The physics of materials with the RBS technique in Legnaro labs and how the discovery of the last century can help today scientists and build a link between research and high school physics.

G. Fiamingo^a, K. Di Francescantonio^b, M. Morandini^c, M.C. Mocci^d, M.N. Ostili^e

^a LSS Fratelli Vianeo di Tropea (VV)

^b IIS G. L. Lagrange di Milano (MI)

^c ITI G. Marconi di Pontedera (PI)

^d IIS G. A. Pischredda di Bosa (OR)

^e LSS G. Galilei di Terni (TR)

RIASSUNTO

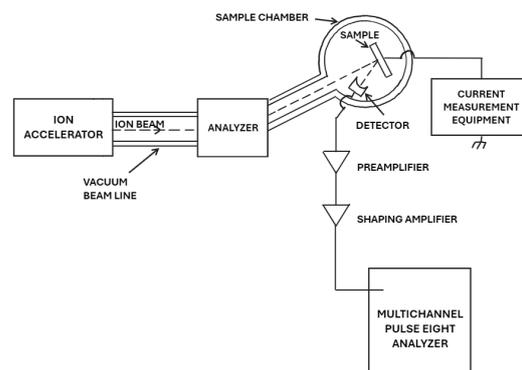
Lo scopo di questo articolo è quello di presentare il valore e l'utilità dell'esperienza scientifica vissuta dagli autori, docenti di scuola secondaria di secondo grado, durante l'edizione del corso residenziale Programma INFN Docenti (PID) presso i laboratori nazionali di Legnaro (LNL) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) nell'ottobre 2023. In particolare, l'attenzione è focalizzata sull'attività di laboratorio di fisica dei materiali con l'impiego dell'acceleratore elettrostatico di Van de Graaf a singolo stadio CN e la stazione sperimentale dedicata alla tecnica RBS (**R**utherford **B**ackscattering **S**pectrometry), nota anche come EBS (**E**lastic **B**ackscattering **S**pectrometry). Durante questa esperienza, noi docenti abbiamo esaminato il complesso apparato sperimentale, abbiamo acquisito una visione pratica e dettagliata del suo funzionamento e siamo stati utenti dell'acceleratore. Abbiamo discusso i risultati ottenuti analizzando un campione noto di ossido di silicio SiO₂ depositato su substrato di silicio (Si), abbiamo valutato le implicazioni sulla ricerca scientifica applicata nel campo delle indagini sulla fisica dei materiali e abbiamo estrapolato le ricadute pedagogiche sulla didattica della fisica nelle scuole superiori.

INTRODUZIONE

La **RBS** è una tecnica quantitativa di analisi che fornisce informazioni sugli strati superficiali di un materiale senza provocare alcun danno al campione analizzato. Tale tecnica trae origine dagli esperimenti eseguiti da Rutherford e dai suoi assistenti Geiger e Marsden nel 1909-1912 e consiste nell'inviare un fascio collimato di particelle ad alta energia su un campione, per poi misurare con un rivelatore l'energia degli ioni retro diffusi nell'urto. L'energia delle particelle *backscattered* dipende dalla massa degli atomi bersaglio e dalla profondità all'interno del campione da cui la particella è stata respinta. Pertanto, dalla posizione, dall'altezza e dalla larghezza dei picchi nello spettro di energia delle particelle raccolte dal rivelatore si ricavano informazioni sulla composizione elementare del campione (analisi qualitativa) e sulla distribuzione in profondità degli elementi in esso contenuti. Nel nostro esperimento abbiamo usato un fascio di forma circolare con diametro circa 5 mm, costituito da particelle alfa, ovvero ioni leggeri 4He^+ , con un'energia dell'ordine dei MeV (milioni di ¹elettronvolt). Il bersaglio utilizzato è stato un campione noto di SiO_2 (circa 700 nm) cresciuto su un substrato di silicio monocristallino (circa 500 μm). Il *detector* degli ioni retro diffusi utilizzato è stato un rivelatore al silicio, orientato di un angolo $\theta=170^\circ$ rispetto al fascio incidente. Nell'articolo sono esposti i punti chiave della tecnica RBS, l'esperienza diretta condotta sul target scelto per la parte pratica con i relativi dati sperimentali, le possibili applicazioni pratiche e le considerazioni emerse durante la discussione con i ricercatori responsabili del progetto. Noi docenti analizziamo anche l'importanza di questo tipo di esperienza sia per ampliare il nostro

orizzonte culturale, sia per potenziare l'offerta didattica e le attività di orientamento nelle classi. Infatti, uno degli scopi principali di questo articolo è proprio quello di rafforzare il legame tra università, mondo della ricerca e scuola secondaria di II grado, per esempio atualizzando argomenti "classici" come Rutherford e Van de Graaf allo stato dell'arte della scienza moderna, come è avvenuto per i docenti che hanno preso parte ai corsi PID a Legnaro.

Schema dell'apparato sperimentale RBS



Schema semplificato dell'apparato sperimentale RBS

Nel corso di questo esperimento, abbiamo impiegato l'acceleratore elettrostatico di particelle **Van De Graaf CN** per generare fasci di ioni leggeri 4He^+ ad alta energia (3.1 MeV). Questo acceleratore è un *Van de Graaf single end*, ben noto per la sua capacità di accumulare carica e generare così un'elevata differenza di potenziale tra il terminale in cui si trova la sorgente ionica e il riferimento di terra. Il compito di questo apparato è di accelerare il fascio degli ioni indirizzati sul campione, in modo tale da raggiungere un'energia sufficiente a creare urti significativi con gli atomi del bersaglio.

¹ 1 eV è l'energia cinetica acquisita da un elettrone accelerato a una differenza di potenziale di 1 volt.

Quando gli ioni positivi vengono accelerati fino a un'energia E_0 e raggiungono il bersaglio, si possono verificare diverse interazioni, come urti elastici o anelastici. Gli urti elastici sono interazioni nucleo-nucleo e avvengono con una certa probabilità, detta sezione d'urto. Questi eventi provocano la retrodiffusione dello ione proiettile con una determinata energia dipendente dalle masse coinvolte nell'urto, secondo la conservazione dell'energia cinetica del sistema. Le particelle che non subiscono urti elastici penetrano all'interno del materiale bersaglio, perdendo così parte della loro energia nell'interazione con le nuvole elettroniche. Gli ioni subiscono una continua perdita di energia, finché non avviene un urto in profondità nel materiale o una perdita completa di energia. Nella tecnica RBS il rivelatore misura l'energia di tutte le particelle backscattered, cioè non solo quelle che hanno urtato elasticamente la superficie del campione ma anche quelle che sono andate incontro a urti anelastici più in profondità.

Il rivelatore è un dispositivo in silicio cristallino drogato con giunzioni p-n e viene polarizzato per generare una zona di svuotamento. Quando una particella attraversa tale zona, viene prodotta una determinata quantità di coppie elettroni-lacune; il numero di questi portatori di carica generati è direttamente proporzionale all'energia della particella incidente (retro diffusa). Le coppie elettroni-lacune generate nel detector al silicio vengono separate dalla d.d.p. applicata e generano un impulso di corrente, direttamente proporzionale all'energia della particella incidente. Questo segnale di corrente viene amplificato e convertito con un preamplificatore, chiamato *charge sensitive preamplifier*. All'uscita del preamplificatore si ottiene un segnale di tensione. Successivamente un ulteriore dispositivo della catena elettronica amplifica il segnale di tensione e lo forma

come una curva gaussiana adatta all'ingresso di un convertitore analogico digitale (ADC). L'altezza della gaussiana è direttamente proporzionale all'energia della particella retro diffusa, ovvero all'integrale della carica generata dalle coppie elettrone-lacuna. La gaussiana viene quindi analizzata da un multicanale *multichannel analyzer* (MCA), il quale produce uno spettro di energia: La lettura analitica dello spettro fornisce le informazioni richieste sulla composizione del bersaglio e sulla distribuzione spaziale degli elementi al suo interno (*depth profiling*).

Descrizione acceleratore CN

L'acceleratore CN è uno dei sei attivi presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Si tratta di un acceleratore elettrostatico di Van de Graaff in operazione dal 1961.

Le sue caratteristiche si possono così riassumere:

- **Tipo di Acceleratore:** Van de Graaff elettrostatico.
- **Energia:** Può raggiungere energie fino a 6 MeV, tipicamente utilizzate per esperimenti di fisica nucleare di bassa energia.
- **Particelle accelerate:** protoni e alpha (singola carica o doppia carica).
- **Fasci:** continuo o pulsato.

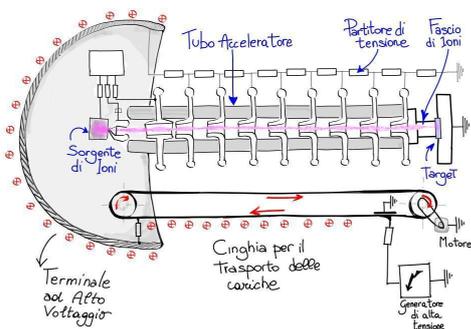
Le principali **applicazioni:**

- Studi di reazioni nucleari a basse energie.
- Analisi di materiali mediante tecniche come RBS.
- Sviluppo di tecniche di spettroscopia nucleare.
- Ricerca in fisica applicata, come studi sui materiali irraggiati.

- Sviluppi e qualifica di nuovi rivelatori di particelle.

L'acceleratore CN è stato fondamentale per molte ricerche iniziali nel campo della fisica nucleare e continua a essere utilizzato per progetti di ricerca specifici, grazie alla sua versatilità e affidabilità. Nell'esperimento RBS l'acceleratore serve 7 beamlines (linee di fascio) e ogni beamline a cascata ospita due o tre stazioni sperimentali.

La figura seguente ne mostra le parti principali:



Componenti principali dell'Acceleratore CN:

1. **Generatore di Alta Tensione:** fornisce l'energia necessaria per caricare la cinghia.
2. **Cinghia Trasportatrice:** trasporta la carica dal generatore fino al terminale.
3. **Terminale di Alta Tensione:** accumula la carica fino a raggiungere la tensione desiderata.
4. **Generatore Stabile (Light Voltage):** assiste nella generazione di carica in modo più controllato rispetto al semplice strofinio.
5. **Partitori di Resistenze:** è una sequenza di resistenze tra il terminale e la massa che aiuta nella divisione della tensione e nella focalizzazione del fascio.

6. **Sorgente di Ioni:** produce il fascio di particelle, che può contenere tracce di vari elementi.
7. **Selettore di Velocità con Magnete:** seleziona solo le cariche desiderate, filtrando le altre.

Queste componenti lavorano insieme per produrre un fascio di ioni altamente focalizzato e con determinata energia, utilizzabile per una varietà di esperimenti di fisica nucleare e interdisciplinare.

L'acceleratore CN si basa sul principio dell'accumulo di carica elettrica su un conduttore mediante un nastro trasportatore isolato. Il processo comincia con un generatore di alta tensione che fornisce carica a una cinghia fatta di materiale isolante, la quale trasporta le cariche fino al terminale. Questo processo prosegue fino al raggiungimento della tensione desiderata. A differenza del classico acceleratore di Van de Graaff, dove la carica viene generata solo per strofinio, qui c'è l'ausilio di un generatore stabile (light voltage). Tra il terminale e la massa si trova una sequenza di resistenze che servono da partitori di tensione e aumentano la focalizzazione del fascio.

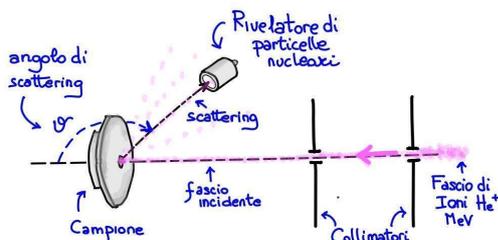
Il terminale ad alto voltaggio serve per creare il campo elettrico che accelera gli ioni emessi dalla sorgente. Tuttavia, poiché la sorgente può contenere tracce di elementi non desiderati, il fascio in uscita generalmente possiede un range di energie piuttosto ampio. Grazie a un selettore di velocità con magnete, vengono selezionate solo le cariche dotate di energie entro il range desiderato.

Descrizione esperimento RBS

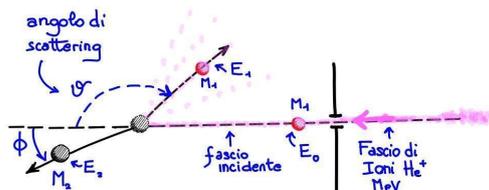
Questo esperimento (vedi figg. 1A-1B) è regolato dalle leggi di conservazione dell'energia cinetica e della quantità di moto nelle collisioni tra due corpi: un fascio

di proiettili ciascuno dei quali dotato di energia E_0 e massa M_1 viene indirizzato verso un bersaglio con massa M_2 , con $M_1 < M_2$. Quando la particella proiettile interagisce elasticamente con l'atomo del bersaglio, questa viene retrodiffusa con una determinata energia.

Misurando l'energia della particella retro diffusa è possibile ricavare la massa della particella bersaglio M_2 . Quest'ultima può essere determinata attraverso i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto.



Strumentazione per generazione segnale: Rivelatore e relativa geometria di scattering



Modello interpretativo per ricavare informazioni sull'energia dello ione retrodiffuso

Fig. 1A: *Strumentazione per generazione segnale. Rivelatore e relativa geometria di scattering*
 Fig. 1B: *Modello interpretativo per ricavare informazioni sull'energia dello ione retrodiffuso*

Fattore cinematico K

Per descrivere il rapporto tra l'energia E_1 del proiettile che rincula e l'energia iniziale E_0 del proiettile prima dell'urto, si utilizza il fattore cinematico K . Per $M_1 < M_2$ si ottiene:

$$K(\theta, M_1, M_2) = \frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{\sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right)^2$$

dove E_0 , M_1 , θ sono parametri sperimentali preimpostati, E_1 è l'energia dello ione diffuso che viene misurata dal detector durante l'esperimento. La formula del fattore cinematico K è stata ricavata applicando il principio di conservazione dell'energia cinetica considerando un urto di tipo elastico, e il principio di conservazione della quantità di moto in entrambe le sue componenti, orizzontale e verticale. In base al valore dell'energia di uscita E_1 misurata dal detector, note la massa dello ione M_1 e l'energia iniziale E_0 , possiamo ricavare la massa M_2 e risalire quindi alla composizione elementare del campione.

Gli urti elastici non sono localizzati esclusivamente sulla superficie del bersaglio, ma anche all'interno del campione, a varie profondità. Quando uno ione attraversa la materia, si verifica una perdita di energia, dovuta appunto all'interazione con i gusci elettronici degli atomi, fino a quando lo ione si ferma oppure, interagendo con un nucleo, viene respinto indietro. La perdita di energia (*stopping power*) dipende principalmente dal materiale attraversato, oltre che dalla massa e dall'energia della particella proiettile. Man mano che quest'ultima penetra sempre più all'interno del materiale del campione, si avrà una diminuzione progressiva di energia.

L'energia della particella retro diffusa negli urti con gli atomi più interni al materiale in esame risulterà sempre più ridotta, producendo un segnale nel multichannel analyzer ai canali più bassi, corrispondenti a minori energie. Con un'opportuna calibrazione energetica della

strumentazione (keV/ch) è possibile assegnare la posizione in profondità dell'elemento all'interno del campione, in funzione dell'energia persa.

L'output viene visualizzato sullo schermo come uno spettro chiamato *spettrometria di retrodiffusione*.

Sezione d'urto, calcolo della dose e perdita di energia non elastica.

Con sezione d'urto si intende la probabilità che avvenga un urto elastico tra il proiettile incidente e l'atomo bersaglio. In base a questa probabilità si riesce a fare un'analisi quantitativa sul numero di atomi per unità di superficie presenti nel bersaglio, consentendo di determinare la composizione del materiale in termini di elementi e della loro distribuzione. Per determinare il numero di particelle per unità di area che raggiungono il rivelatore, si utilizza la formula di Rutherford, per un rivelatore posto ad un angolo θ rispetto alla direzione del fascio incidente:

$$N(\theta) = \frac{N_i N t Z^2 k^2 e^4}{4 r^2 E_k^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

dove

- N_i = numero di particelle incidenti
- N = numero di atomi per unità di volume del bersaglio
- t = spessore del bersaglio
- Z = numero atomico del bersaglio
- e = carica dell'elettrone
- k = costante di Coulomb
- r = distanza tra il bersaglio e il detector
- E_k = energia cinetica delle particelle incidenti
- θ = angolo di scattering

A livello sperimentale possiamo solo contare la frequenza di conteggi del nostro detector, che essendo un oggetto reale, con area definita e posto in una geometria spaziale sperimentale definita, campiona

solo una frazione delle particelle retrodiffuse. La relazione

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2 E \sin^2 \theta} \right)^2 \frac{(\cos \theta + (1 - \mu^2 \sin^2 \theta)^{1/2})^2}{(1 - \mu^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}$$

dove $\mu = \frac{M_1}{M_2}$ cioè $M_1 \ll M_2$

indica la sezione d'urto differenziale che va integrata sull'angolo solido del sistema di rivelazione, centrato sull'angolo θ .

Poiché nella spettrometria di retrodiffusione l'angolo solido Ω è sempre piccolo (nell'ordine di circa $10^{-3} sr$) si definisce una sezione d'urto differenziale media:

$$\sigma(E, \theta) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega$$

dove $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{Nt} \left[\frac{dQ}{d\Omega} / Q \right]$.

Q è il numero totale di particelle che hanno colpito il bersaglio, dQ il numero di particelle registrate dal detector, N la densità volumetrica degli atomi nel bersaglio e t il suo spessore. Questa formula indica il numero di particelle che entrano in un angolo solido $d\Omega$ e di conseguenza fornisce informazioni sul numero di atomi presenti in un campione per unità di superficie. Il numero totale di particelle rilevate A può essere ricavato dalla relazione seguente:

$$A = \sigma \Omega \cdot Q \cdot Nt$$

dove

Q è il numero totale di particelle che ha colpito il bersaglio;

Nt è la densità superficiale degli atomi (*numero di atomi/cm²*).

Questa equazione mostra che, quando σ e Ω sono note, se misuro il numero di particelle incidenti sul bersaglio e il numero di particelle giunte al rivelatore, è possibile determinare il numero di atomi per unità di area nel bersaglio.

Se le particelle incidono su un campione sottile, esiste una probabilità non nulla che esse riescano ad attraversare il bersaglio. Quando una particella attraversa un bersaglio di spessore Δx , essa perde parte della sua energia cinetica in maniera non elastica. Attraverso il rapporto $\Delta E/\Delta x$ si determina il tasso di perdita di energia dopo l'attraversamento del bersaglio, perdita che dipende dall'energia cinetica del proiettile e dalla composizione del target (fig. 2)

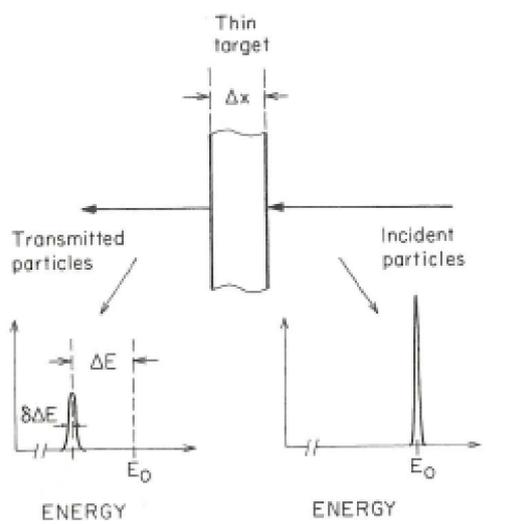


Fig. 2 Un fascio monocromatico di energia E_0 perde energia attraversando un film sottile di spessore Δx .

Esempio di attività sperimentale: Analisi di un campione noto di SiO_2 depositato su substrato di silicio.

Questa attività si divide in tre fasi:

1. Valutazione del differente fattore cinematico tra elementi con massa diversa.
2. Valutazione della perdita di energia (stopping power).
3. Osservazione dello spettro simulato basato su formule teoriche (RBS)

teorico) a confronto con lo spettro acquisito con risonanza (EBS reale).

Fase 1.

Valutazione del differente fattore cinematico

Abbiamo applicato la tecnica RBS a un campione noto di biossido di silicio (SiO_2) depositato su un substrato di silicio (vedi figura). Il fascio incidente è costituito da ioni He^+ a 3,1 MeV, mentre il rivelatore è orientato con un angolo $\theta=170^\circ$ rispetto al fascio incidente.



L'obiettivo primario di questa attività sperimentale è stato valutare il differente fattore cinematico K di elementi con diverse masse atomiche presenti nel campione.

In generale, l'analisi della posizione dei vari segnali nello spettro di backscattering ci permette di definire con precisione la massa degli elementi che compongono il nostro campione. Come già visto sopra, il rapporto tra l'energia E_1 dello ione catturato dal rivelatore e l'energia iniziale E_0 dello ione prima dell'urto è:

$$K_{M_2}^{\square} = \frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right)^2$$

che implica $E_1 = K_{M_2}^{\square} E_0$. Poiché il nostro era un campione dalla composizione nota, conoscendo le masse degli elementi coinvolti abbiamo potuto calcolare i fattori cinematici teorici dell'ossigeno e del silicio:

$$K_O^{\square} \approx 0,358 \qquad K_{Si}^{\square} \approx 0,563$$

grazie ai quali è stato possibile prevedere la posizione dei segnali sullo spettro RBS, rispettivamente a circa 1110 keV e 1750

keV. La figura sotto (Fig. 3) mostra lo spettro RBS ottenuto, in cui in effetti abbiamo trovato i segnali attesi, riconducibili al backscattering degli ioni incidenti sugli atomi di ossigeno e di silicio del layer di SiO₂.

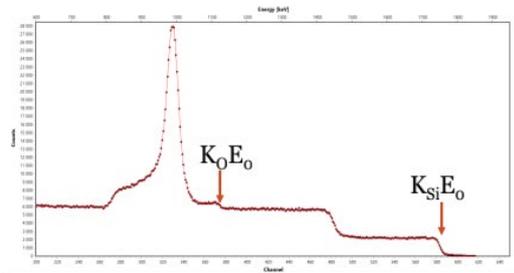


Fig. 3: Spettro RBS. Differenza di spessore tra il film di SiO₂ (~700 nm) e lo spessore del substrato di silicio (~ 500 μm)

Fase 2.

Valutare lo stopping power

Oltre ai segnali attesi dovuti agli urti degli ioni con gli atomi di silicio e di ossigeno, lo spettro RBS presenta un segnale in più, intorno ai 1450 keV, riconducibile al backscattering dovuto agli atomi di silicio del substrato. Questo segnale è distinto rispetto a quello intorno ai 1750 keV perché gli ioni incidenti sul substrato hanno perso energia durante l'attraversamento dello strato di SiO₂. Questa perdita di energia ΔE è misurabile sullo spettro e dipende dal cosiddetto stopping power del materiale, cioè dal "rallentamento" dello ione che interagisce in maniera non elastica con il materiale attraversato. La figura sotto (Fig. 4), mette in evidenza questa perdita di energia.

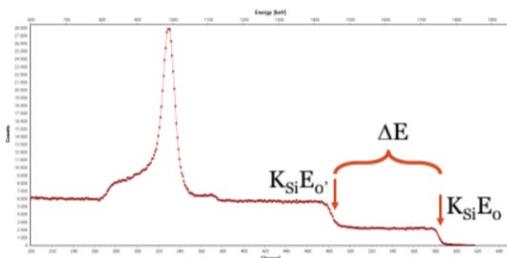


Fig. 4: Spettro RBS. Perdita di energia dello ione che attraversa il primo substrato SiO₂

Lo stopping power è definito come la perdita di energia per unità di lunghezza percorsa dallo ione nel materiale, cioè:

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

La valutazione dello stopping power è fondamentale per comprendere come gli ioni incidenti perdono energia mentre attraversano un materiale. In generale, lo stopping power è un parametro chiave nell'analisi dei materiali tramite la spettroscopia RBS. Infatti, misurare la perdita di energia degli ioni e comparare i risultati con le previsioni teoriche permette di ottenere una caratterizzazione accurata del campione, fornendo informazioni dettagliate sulla sua composizione chimica e sulla distribuzione degli elementi in funzione della profondità.

Utilizzo di Software per il Calcolo

Per calcolare lo stopping power in modo accurato, vengono utilizzati software specializzati come SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter). SRIM è in grado di simulare il percorso degli ioni nel materiale e fornire una stima dettagliata della perdita di energia in funzione della profondità.

Validazione dei Risultati

Per valutare la correttezza della misura, è fondamentale comparare i risultati ottenuti sperimentalmente con i risultati teorici. Questo confronto può essere effettuato utilizzando le previsioni del software SRIM o altre fonti teoriche di stopping power. La validazione dei risultati sperimentali rispetto ai calcoli teorici assicura la precisione delle misure e la correttezza delle interpretazioni.

Fase 3.

Osservare lo spettro simulato basato su formule teoriche (RBS teorico) e spettro acquisito con risonanza (EBS reale)

Nell'ambito di un'attività sperimentale di spettroscopia RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) e EBS (Elastic Backscattering Spectrometry), è cruciale confrontare lo spettro teorico con lo spettro sperimentale. Questo confronto permette di validare i risultati sperimentali e ottenere una comprensione più accurata delle proprietà del campione.

Per ottenere lo spettro teorico, è possibile utilizzare il software di simulazione SRIM.

Confronto tra Spettri

Per confrontare lo spettro teorico con quello sperimentale, si utilizzano software di grafica e di analisi. Due opzioni comunemente utilizzate sono MATLAB e SIMNRA

- MATLAB è un potente strumento di calcolo numerico e grafico che permette di importare, elaborare e visualizzare dati. Utilizzando MATLAB, è possibile sovrapporre lo spettro teorico e quello sperimentale per analizzare le differenze e le somiglianze. La variazione nell'altezza dei picchi e la forma complessiva degli spettri possono essere analizzate per valutare la precisione delle simulazioni e l'accuratezza dei dati sperimentali.
- SIMNRA è un software specificamente progettato per l'analisi RBS e EBS. Permette di simulare spettri teorici e confrontarli direttamente con i dati sperimentali. SIMNRA include strumenti per la deconvoluzione dei picchi, la

correzione dello stopping power e la modellizzazione della distribuzione di profondità degli elementi nel campione. Questo rende SIMNRA particolarmente utile per l'interpretazione dettagliata dei dati RBS/EBS.

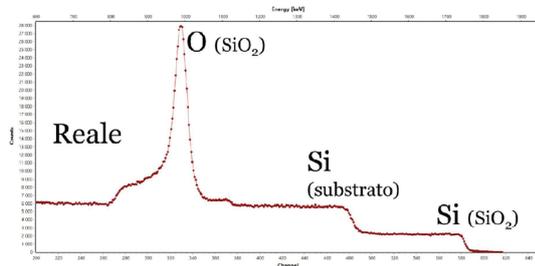
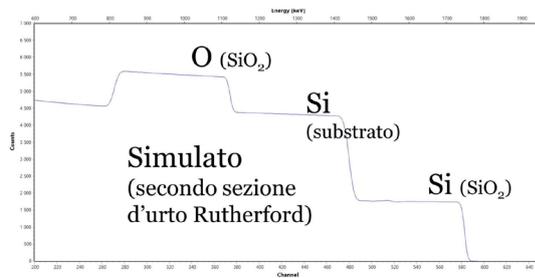
In generale, per fare un confronto tra gli spettri si procede in questo modo:

- importazione dei dati dello spettro teorico e sperimentale in MATLAB o SIMNRA;
- sovrapposizione degli spettri per visualizzare le differenze e le somiglianze;
- analisi delle differenze in altezza, forma e posizione dei picchi;
- uso di strumenti di analisi per identificare le cause delle differenze, come variazioni nella composizione del campione o errori sperimentali.

Infine, il confronto consente di:

- apportare eventuali correzioni necessarie basate sulle analisi.
- ripetere la simulazione e l'acquisizione se necessario, per ottenere una migliore corrispondenza tra spettro teorico e sperimentale.

In conclusione, il confronto tra lo spettro teorico ottenuto tramite simulazioni SRIM e lo spettro sperimentale acquisito è essenziale per validare i risultati di un esperimento di spettroscopia RBS/EBS.



Esempi di spettri sperimentale (sotto) e simulato con software (sopra)

Aspetti RBS di interesse dal punto di vista didattico:

La trattazione dell'analisi **RBS** nel contesto didattico rappresenta una straordinaria opportunità di arricchimento dell'insegnamento scientifico, per diverse ragioni. Innanzitutto, consente di spiegare in modo convincente l'esistenza del nucleo atomico sulla base dei dati sperimentali, proprio come ha fatto Rutherford con i suoi esperimenti pionieristici. In aggiunta, dal punto di vista epistemologico, stimola gli studenti a una riflessione sul processo di costruzione della conoscenza scientifica. Oltre a ciò, i docenti possono utilizzare i dati sperimentali come un ottimo strumento didattico. Infatti, l'analisi degli spettri energetici in classe offre al docente un'occasione unica per far comprendere concetti cruciali di meccanica classica, come gli urti elastici e il frenamento anelastico, permettendo al contempo un approfondimento della trattazione matematica del fattore cinematico e della sezione d'urto. Questa metodologia, oltre ad ampliare la conoscenza degli studenti, fornisce loro un contesto completo per

l'applicazione dei principi fisici fondamentali. Inoltre, presentare alla classe l'RBS con un impianto teorico basato completamente sulla fisica classica, è un elemento significativo. In questo modo, infatti, gli studenti acquisiscono la consapevolezza che esistono dei contesti in cui la meccanica classica può essere applicata con successo anche al mondo microscopico, nonostante le leggi predominanti della meccanica quantistica. La padronanza dell'argomento da parte dei docenti diventa elemento fondamentale nel trasmettere la metodologia RBS nei programmi di studio, offrendo agli studenti una solida base per esplorare le frontiere della fisica moderna.

Applicazioni pratiche RBS per la società:

Industria Elettronica: Analisi di film sottili nei dispositivi elettronici come microchip e transistor per garantire la qualità e la corretta composizione dei materiali utilizzati.

Medicina e Biologia: Rilevamento di tracce di elementi in campioni biologici, aiutando nella comprensione di processi biochimici e nell'identificazione di eventuali sostanze nocive o anomalie. Sviluppa nuovi materiali per diagnostica, analisi a terapia in campo della medicina nucleare. Ottimizza la produzione di radionuclidi

Archeologia: Analisi della composizione superficiale di reperti archeologici per comprendere la storia e l'origine dei materiali utilizzati nelle antiche civiltà.

Industria Nucleare: Verifica della composizione di materiali utilizzati nei reattori nucleari per garantire la sicurezza e l'efficienza del processo di fissione nucleare.

Materiali per Energia Solare: Studio della composizione di film sottili nei pannelli solari per ottimizzare l'efficienza della conversione dell'energia solare in elettricità.

Settore Aerospaziale: Analisi della composizione di materiali utilizzati nella costruzione di satelliti geostazionari. L'irraggiamento di qualche ora con fasci di ioni corrisponde a 10-15 anni di attività nello spazio.

Analisi di Superfici Metallurgiche: Verifica della composizione di rivestimenti metallici per migliorare la resistenza all'usura e alle corrosioni in diverse applicazioni industriali.

IMPLICAZIONI DIDATTICHE E FORMATIVE

Considerazioni generali

L'esperienza avuta nei laboratori di Legnaro può suggerire un approccio differente da proporre come filosofia di studio e analisi laboratoriale di alcuni concetti e fenomeni fondamentali della fisica moderna. Non solo contenuti, in verità, ma anche un raccordo con la vita quotidiana dei ricercatori impegnati nei vari fronti di indagine, attraverso la conoscenza diretta delle attività specifiche che essi effettuano (modellizzazione, progettazione, ideazione e costruzione di apparati sperimentali, controllo e validazione, sessioni di misure, analisi dati, presentazione e discussione dei risultati, documentazione).

Rilevanza didattica e formativa del RBS.

L'inclusione dell'analisi di Rutherford Back Scattering (RBS) nella didattica offre diverse opportunità per arricchire

l'apprendimento degli studenti attraverso collegamenti multidisciplinari e stimolanti.

La parte più importante consiste nel poter integrare concetti di fisica classica con gli aspetti rilevanti di meccanica quantistica e relativistica. Il modello semplificato dell'atomo e delle interazioni di particelle esterne tramite l'urto inquadra oltre alla cinematica e alla dinamica dell'urto anche tutti gli aspetti conservativi dell'energia e della quantità di moto, anche in regime relativistico.

I collegamenti con particolari aspetti della fisica quantistica, quali p.e. la sezione d'urto considerata dal punto di vista probabilistico, consentono di introdurre quantità e caratteristiche dell'RBS utilizzate normalmente nella ricerca, come il fattore cinematico e il potere frenante. Di seguito forniamo un possibile elenco di spunti relativi ai contesti di carattere disciplinare motivazionale e didattico-formativo che sono coinvolti nell'attività sperimentale, proposte che potrebbero essere anche inserite nel curriculum degli studenti come

attività di ricerca didattica per gli insegnanti e di orientamento per gli studenti stessi.

Aspetti Disciplinari

Campo di Applicazione dei Modelli:

- Approfondimento degli aspetti legati agli urti e alla struttura dell'atomo.

Dinamica:

- Conservazione dell'energia, della quantità di moto e del momento angolare.
- Studio della cinematica dell'urto.

Fisica Quantistica:

- Collegamento con la fisica quantistica attraverso la trattazione probabilistica della sezione d'urto e l'introduzione di invarianti relativistici.

Introduzione a Concetti di Ricerca:

- Fattore cinematico, sezione d'urto, e potere frenante come elementi di ricerca.

Aspetti motivazionali

Le applicazioni pratiche di questa attività possono suscitare i seguenti interessi:

- Connessione con attività quotidiane dei ricercatori.
- Applicazioni nelle nuove tecnologie, come nel settore dei beni culturali e ambientali.

Aspetti didattici.

Analisi Fenomenologica:

- Acquisizione di conoscenze attraverso diversi contesti di analisi fenomenologica.

Collegamento Macroscopico-Microscopico:

- Collegamento con la descrizione classica del comportamento macroscopico e la descrizione quantistica delle proprietà microscopiche.

Competenze Interpretative:

- Acquisizione di competenze interpretative per connettere misure espresse graficamente a caratteristiche fisiche degli oggetti basate su modelli.

Aspetti epistemologici e di orientamento

Conoscenza di Procedure:

- Utilizzo di procedure ampiamente utilizzate nella storia (modello atomico), tecnologia (proprietà dei materiali), e ricerca fondamentale.

Interpretazione dei Modelli:

- Osservazione del ruolo interpretativo dei modelli e del loro campo di applicabilità.

Conoscenza delle Attività di Ricerca:

- Familiarità con una possibile attività di ricerca di un fisico.

Proposta di attività didattica

Sebbene l'attrezzatura per l'effettuazione dell'analisi RBS non sia alla portata di un laboratorio scolastico, è possibile simulare l'analisi RBS utilizzando dei modelli matematici. L'attività può così essere suddivisa

Simulazione dell'Analisi RBS:

- Utilizzare modelli matematici per simulare l'analisi RBS.
- Fornire documenti/articoli sull'urto elastico, anelastico e sulla determinazione di massa e profondità di un atomo o elemento

campione da uno spettro energetico.

Attività Interpretativa:

- determinare la massa e la profondità di un atomo o di un elemento campione da uno spettro energetico.
- Chiedere agli studenti di interpretare gli spettri energetici in termini di urti elastici o frenamento anelastico.

I materiali da fornire ai ragazzi devono comprendere:

- Documenti sull'urto elastico, anelastico
- Modello matematico di analisi RBS.
- Spettri energetici relativi al caso in esame (formato elettronico o cartaceo).

Conclusioni

La valenza formativa di esplorare temi come l'analisi di Rutherford Back Scattering (RBS) risiede principalmente nella consapevolezza della continua ricerca e scoperta nella struttura atomica e nucleare. Nonostante i notevoli progressi compiuti, molte domande rimangono aperte e nuove sfide emergono costantemente, creando un ambiente stimolante per gli studenti. Questo aspetto offre loro una prospettiva di un futuro ancora inesplorato, invitandoli ad abbracciare la metodologia scientifica come strumento chiave per indagare le incognite.

Nell'ambito dell'insegnamento scientifico, è cruciale bilanciare la trattazione di fenomeni noti e consolidati con esperienze pratiche. I programmi scolastici, spesso

concentrati su teorie già validate, possono essere arricchiti dall'inclusione di attività laboratoriali che permettano agli studenti di esplorare direttamente i concetti, familiarizzare con l'ambiente dei laboratori scientifici e interagire con ricercatori. Questo approccio non solo amplia la comprensione degli studenti ma rafforza anche il loro interesse nei confronti delle materie scientifiche.

In prospettiva, l'integrazione di esperienze laboratoriali come parte integrante del curriculum assume un ruolo centrale. Questo non solo enfatizza l'importanza del metodo scientifico, spesso trascurato in classe, ma rivitalizza anche l'insegnamento delle discipline scientifiche. Rendere l'indagine pratica una componente curricolare fondamentale è essenziale per restituire vitalità all'insegnamento scientifico, conferendo alla scienza il suo ruolo cruciale nel progresso, nel benessere sociale, nella democrazia e nell'uguaglianza. In questo modo, si incoraggia una generazione di studenti a diventare non solo consumatori di conoscenza scientifica, ma attivi partecipanti nel plasmare il futuro della ricerca e dell'innovazione.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori e le autrici di questo articolo ringraziano tutto lo staff PID Legnaro 2023, in particolare il dott. Giorgio Chiarelli, la dott.ssa Luisa Pegoraro, il dott. Andrea Gozzelino, il dott. Matteo Campostrini, nonché tutti i ricercatori e i tecnici che hanno permesso con la loro presenza e professionalità di poter vivere

un'esperienza di grande valenza scientifica, formativa e umana.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- E. Rutherford, "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom" Phil. Mag. Series 6, vol. 21, pag. 669688 (1911).
- W-K. Chu, J W Mayer, M-A. Nicolet "Backscattering Spectrometry", Academic Press, New York 1978.
- F. Corni, G. Ottaviani, M. Michelini, G.L. Michelutti, L. Santi, A. Stefanel, "Rutherford Backscattering Spectrometry: a technique worth introducing into pedagogy", GIREP 1995 Book, pag. 266.
- F.Corni, "Un'introduzione alla Rutherford Backscattering Spectrometry", La Fisica nella Scuola XXIX (1996), pag. 103.
- F. Corni, M. Michelini, L. Santi, F. Soramel, A. Stefanel, "The concept of the cross section", GIREP 1995 Book, pag. 192.