



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA “ETTORE MAJORANA”
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Relazioni di Laboratorio di Fisica 3

LE QUATTRO COSE

Anno Accademico 2024 – 2025

Indice

Indice	i
Sommario	ii
1 Implementazione Numerica della Formula di Bethe–Bloch	1
1.1 Il modello	1
1.2 La simulazione	2
2 Misura di resistenze con un multimetro digitale	5
2.1 Il multimetro	5
2.2 Resistori	5
Bibliografia	7

Sommario

IN QUESTO documento sono raccolte le quattro relazioni brevi da svolgere durante il corso annuale di *Laboratorio di Fisica 3* del Corso di Laurea in *Fisica* presso l'Università degli Studi di Catania.

Le esperienze sono esposte nei quattro capitoli seguenti:

1. *Implementazione numerica della formula di Bethe–Bloch.* Attraverso un codice in C che implementa numericamente la formula di Bethe–Bloch ho simulato il passaggio di una particella α a 5 MeV attraverso un sottile foglio di alluminio, realizzando un grafico che rappresenta l'energia della particella e la quantità di energia ceduta in funzione della distanza percorsa dentro il materiale.
2. *Misura di temperature con Arduino.* Attraverso l'uso di un microcontrollore Arduino, un sensore di temperatura e un semplice codice ho misurato la variazione di temperatura di una stanza in seguito all'accensione del riscaldamento. Nella relazione analizzo qualitativamente i dati raccolti ed estrapolo una possibile funzione che ne modelli l'andamento.
3. *Misura di resistenze con un multimetro digitale.*
4. *Accettanza geometrica di un rivelatore.*

1 Implementazione Numerica della Formula di Bethe–Bloch

1.1 Il modello

Come descritto dal Particle Data Group [1], la formula di Bethe–Bloch è un modello sperimentale che descrive la perdita di energia di particelle cariche pesanti di media energia—come protoni e particelle α —nella materia:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \log \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right], \quad (1.1)$$

dove β e γ sono le usuali quantità relativistiche mentre il resto dei simboli sono esplicitati in Tab. 1.1. La perdita di energia media data dalla (1.1) è misurata in $\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$ ma può essere portata in MeV cm^{-1} moltiplicando entrambi i membri per la densità volumica ρ del bersaglio misurata in g cm^{-3} . La quantità W_{\max} è la massima energia che una particella carica può cedere a un elettrone e si

Simbolo	Definizione	Valore o unità di misura
$m_e c^2$	massa a riposo dell'elettrone $\times c^2$	0.510 998 950 00(15) MeV
r_e	raggio classico dell'elettrone $e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2.817 940 322 7(19) fm
N_A	numero di Avogadro	$6.022 140 857(74) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ρ	densità	g cm^{-3}
x	massa per unità di area	g cm^{-2}
M	massa della particella incidente	$\text{MeV } c^{-2}$
E	energia della particella incidente $\gamma M c^2$	MeV
W_{\max}	massima energia trasferibile per collisioni	MeV
z	numero di carica della particella incidente	
Z	numero atomico del bersaglio	
A	numero di massa atomica del bersaglio	
K	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$	0.307 075 $\text{MeV mol}^{-1} \text{cm}^2$
I	energia media di eccitazione	eV
$\delta(\beta\gamma)$	correzione di ionizzazione	

Tabella 1.1: Notazione e unità di misura per la formula di Bethe–Bloch. Si tratta di un riassunto della tabella del PDG [1].

esprime come

$$W_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \gamma m_e/M + (m_e/M)^2}. \quad (1.2)$$

La (1.1) e la (1.2) sono valide nell'approssimazione $0.1 \lesssim \beta\gamma \lesssim 1000$ poiché al limite inferiore la velocità del proiettile diventa confrontabile con la “velocità” degli elettroni atomici mentre al limite superiore gli effetti radiativi non sono più trascurabili.

1.2 La simulazione

Ho scelto di simulare la perdita di energia di una particella α a 5 MeV attraverso un foglio di alluminio di spessore¹ 0.018 mm. Per realizzare la simulazione ho scritto un codice in C che implementa la (1.1) in modo approssimato.

1.2.1 Descrizione del codice e dei calcoli

Il programma inizia richiedendo da tastiera il numero di intervalli N in cui suddividere lo spessore del materiale; gli altri dati sono tutti precompilati come costanti.

Assumiamo che in ciascun intervallo di spessore² ds tutte le quantità variabili di nostro interesse siano costanti—velocità, energia, perdita di energia *et cetera*. Dalla teoria della relatività ristretta scriviamo per l' n -esimo intervallo

$$\begin{aligned} E_n &= T_n + Mc^2, \\ E_n &= \gamma_n Mc^2, \end{aligned}$$

dove M è la massa a riposo della particella incidente, T_n la sua energia cinetica ed E_n la sua energia totale. Note queste ultime due quantità, è possibile calcolare il fattore di Lorentz γ_n e β_n^2 come

$$\gamma_n = \frac{T_n + Mc^2}{Mc^2}, \quad \beta_n^2 = 1 - \frac{1}{\gamma_n^2}.$$

Le quantità appena descritte sono calcolate attraverso il codice nelle righe ??–??.

Noti γ_n e β_n , è possibile calcolare la perdita di energia media per unità di lunghezza attraverso la (1.1) moltiplicata per ρ . Possiamo in particolare calcolare l'energia cinetica con cui la particella α entra nello strato successivo, T_{n+1} come

$$T_{n+1} = T_n + dT_n = T_n + \rho \left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle_n ds,$$

¹Dopo aver provato con uno spessore di 0.016 mm e aver constatato che la curva risultava tagliata—la particella non cedeva tutta l'energia all'alluminio—ho scelto di aumentare di poco lo spessore per il gusto di un grafico più completo.

²Ricordo che in questo caso la x non indica una distanza.

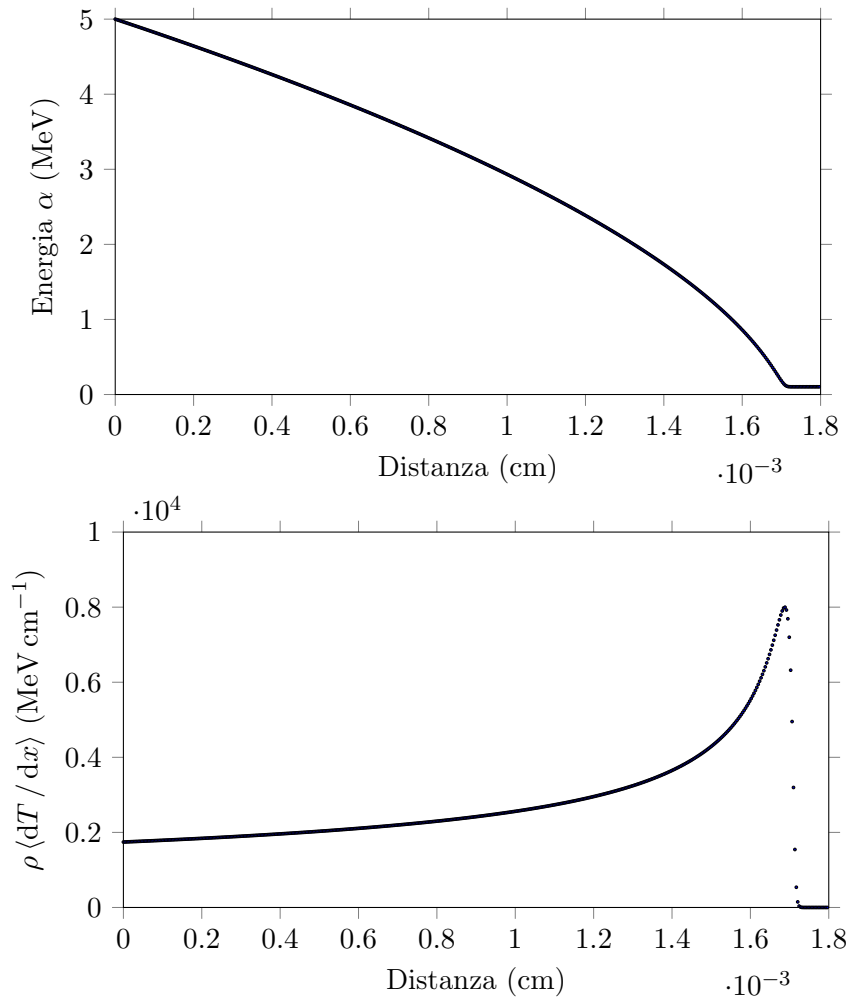


Figura 1.1: In alto l'energia della particella α che diminuisce man mano che la particella penetra l'alluminio. In basso il potere d'arresto con l'evidente picco di Bragg.

essendo naturalmente $dT_n \leq 0$. Il calcolo di $\rho |\langle -dE / dx \rangle_n|$ è svolto dalla funzione `bethe()` chiamata alla riga ?? e definita alla riga ??, con l'ausilio della funzione `wmax()` che in particolare calcola il termine W_{\max} .

Il calcolo viene quindi ripetuto a partire dalla nuova energia T_{n+1} per ottenere la perdita di energia attraverso il successivo strato. Per ogni reiterazione il codice stampa su un file la distanza totale percorsa, l'energia cinetica della particella e la quantità $|dT_n| = \rho |\langle -dE / dx \rangle_n|$.

1.2.2 Risultati della simulazione

Osserviamo adesso i dati che si ottengono inserendo nel programma un numero arbitrariamente alto di step pari a 500. In Fig. 1.1 sono riportati in due grafici i valori dell'energia cinetica della particella α e del potere d'arresto del materiale al variare della distanza percorsa.

Dal primo grafico risulta evidente la decrescita dell'energia della particella. Si nota che l'energia cinetica non si annulla del tutto, nonostante si avvicini ragionevolmente a 0 MeV: questo può essere dovuto a imprecisioni nel codice come il modo in cui vengono gestiti valori di T negativi e valori di dT che farebbero aumentare l'energia.

Nel secondo grafico invece è riportato l'andamento del potere d'arresto, detto comunemente *curva di Bragg*. L'energia depositata dalla particella α è inversamente proporzionale al quadrato della velocità, per questo subito prima del totale arresto si osserva il massimo deposito di energia nel tratto di grafico detto *picco di Bragg*.

2 Misura di resistenze con un multimetro digitale

TRA LE ESPERIENZE svolte con il multimetro digitale riporto la misura delle resistenze di alcuni materiali, tra cui anelli metallici, il corpo umano e alcuni resistori.

Ai resistori dedico una sezione più approfondita in quanto ho preso 50 misure su resistori distinti—ma teoricamente con resistenza uguale—per verificare la distribuzione delle misure di resistenza.

2.1 Il multimetro

Lo strumento utilizzato per l'interezza dell'esperienza è un multimetro digitale della serie *DVM841* della *Velleman*[®] [2]. Il multimetro è in grado di misurare tensione e corrente continua e alternata, resistenza, frequenza e temperatura. Avendo una risoluzione di 2000 punti, il display del multimetro può visualizzare un massimo di 1999 unità.

2.2 Resistori

Il kit presenta 50 resistori distinti—come quelli in Fig. 2.1—il cui codice colore restituisce un valore¹ teorico di $820\,\Omega \pm 5\%$, ovvero $820(40)\,\Omega$.

Ho effettuato le misure impostando il multimetro in modalità *ohm*, alla portata di $2\,\text{k}\Omega$, poggiando i puntali sui terminali di ciascun resistore e aspettando di volta in volta che la lettura si stabilizzasse. I dati raccolti sono riportati in ordine crescente in Tab. 2.1.

Notiamo subito che la resistenza media è $R_m = 808.6\,\Omega$ con una deviazione standard di $\sigma_R = 2.3\,\Omega$, valori che rientrano nell'intervallo fornito dal costruttore. Tuttavia, il fatto che tutte le singole misure siano inferiori a $820\,\Omega$ suggerisce la presenza di un errore sistematico—ad esempio una staratura dello strumento: se si trattasse di oscillazioni delle stesse resistenze dovute alla costruzione, mi aspetterei letture sia al di sopra che al di sotto del valore di riferimento; è poco probabile che tutte le resistenze devino dal valore teorico allo stesso modo.

¹Lo si può dedurre da qualunque legenda fedele allo standard IEC 60062.

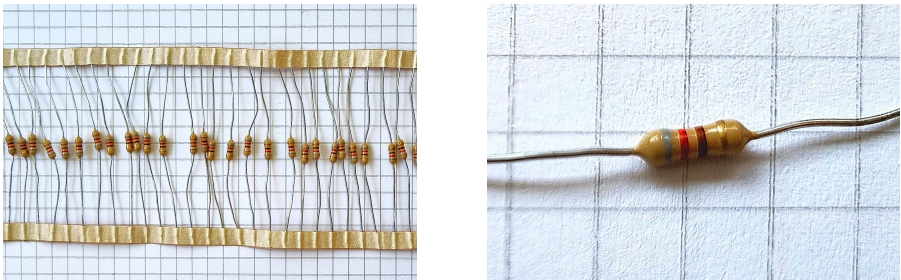


Figura 2.1: A sinistra alcuni dei 50 resistori da $820\,\Omega$. A destra un dettaglio dove è visibile il codice colore.

Resistenze (Ω)									
797	806	806	807	807	807	807	807	807	807
807	808	808	808	808	808	808	808	808	808
808	808	808	809	809	809	809	809	809	809
809	809	809	809	809	809	810	810	810	810
810	810	810	811	811	812	812	812	812	813

Tabella 2.1: Misure di resistenza effettuate su 50 resistori distinti.

Bibliografia

- [1] S. Navas et al. «Review of Particle Physics». In: *Phys. Rev. D* 110 (3 2024), p. 030001. DOI: [10.1103/PhysRevD.110.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.110.030001>.
- [2] Velleman. *DVM841 Digital Multimeter*. Velleman. 2021. URL: https://www.velleman.eu/downloads/0/illustrated/illustrated_manual_dvm841.pdf.