

Ivano Lombardo

# Problemi di fisica nucleare e subnucleare



**cea**

casa editrice ambrosiana

Ivano Lombardo

# Problemi di fisica nucleare e subnucleare

## Se vuoi accedere alle risorse online riservate

1. Vai su **my.zanichelli.it**
2. Clicca su *Registrati*.
3. Scegli *Studente*.
4. Segui i passaggi richiesti per la registrazione.
5. Riceverai un'email: clicca sul link per completare la registrazione.
6. Cerca il tuo codice di attivazione stampato in verticale sul bollino argentato in questa pagina.
7. Inseriscilo nella tua area personale su **my.zanichelli.it**

Se sei già registrato, per accedere ai contenuti riservati di altri volumi ti serve solo il relativo codice di attivazione.

**cea**

casa editrice ambrosiana

© 2021 CEA – Casa Editrice Ambrosiana, viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI) [42016]  
CEA – Casa Editrice Ambrosiana è un marchio editoriale di Zanichelli editore S.p.A.

I diritti di elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche), i diritti di noleggio, di prestito e di traduzione sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale con esclusione quindi di strumenti di ordine collettivo) possono essere effettuate, nel limite del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941, n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati SIAE o con altre modalità indicate da SIAE.

Per riproduzioni ad uso non personale (per esempio: professionale, economico o commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense o simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume. Le richieste per tale tipo di riproduzione vanno inoltrate a:

Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi), Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano  
e-mail: autorizzazioni@clearedi.org e sito web: www.clearedi.org

L'autorizzazione non è concessa per un limitato numero di opere di carattere didattico riprodotte nell'elenco che si trova all'indirizzo <https://www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi>. L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La riproduzione degli esemplari esistenti nelle biblioteche di tali opere è consentita, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71-ter legge diritto di autore. Per permessi di riproduzione, anche digitali, diversi dalle fotocopie, rivolgersi a: [segreteria\\_cea@ceaedizioni.it](mailto:segreteria_cea@ceaedizioni.it)

.....  
*Realizzazione editoriale:* Epitesto, Milano

*Disegni:* dell'autore

*Copertina:* Anchora, Milano

*Immagine di copertina:* © Anchora, Milano  
.....

Prima edizione: gennaio 2021

Ristampa: **prima tiratura**

5    4    3    2    1                    2021    2022    2023    2024    2025

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra loro. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.

Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro rivolgersi a:

CEA – Casa Editrice Ambrosiana  
viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI)  
fax 02 52202260 e-mail: [segreteria\\_cea@ceaedizioni.it](mailto:segreteria_cea@ceaedizioni.it)

Sul sito [online.universita.zanichelli.it/lombardo](http://online.universita.zanichelli.it/lombardo) è possibile verificare se sono disponibili errata corrige o aggiornamenti per questo volume.

Stampa:

per conto di Zanichelli editore S.p.A.  
Via Irnerio 34, 40126 Bologna

# Indice generale

Prefazione	IX	9 Funzionamento di una camera a ionizzazione	36
<b>CAPITOLO 1 Elementi di statistica</b>		10 Perdita di energia di $^3\text{He}$ in silicio	38
1 Ottimizzazione di tempi di misura	1	11 Tempo di frenamento di una particella carica	40
2 Statistiche gaussiane: errore sulla media	2	12 Risoluzione energetica di un rivelatore al germanio	42
3 Misure di decadimenti di una sorgente	3	13 Spessore morto di un rivelatore al silicio	45
4 Approssimazione della distribuzione di Poisson con quella di Gauss	4	14 Assorbimento $\gamma$ da una serie di materiali	47
5 Media ed errore sulla media di una serie di misure	5	15 Efficienza di un rivelatore plastico per neutroni	48
6 Esperimenti nulli: limite inferiore e livello di confidenza	6	16 Sensibilità di un contatore per neutroni al $^{10}\text{B}$	49
7 Inefficienza di un circuito contatore ( <i>scaler</i> )	8	17 Attenuazione di un fascio di neutroni	51
8 Regola del $3\sigma$	9	18 Attenuazione di raggi $\gamma$ provenienti da una sorgente	52
9 Compatibilità tra misure	9	19 Risposta di un rivelatore $\gamma$	53
10 Misure ripetute di conteggi radioattivi	10	20 Contatore Cherenkov a riflessione totale	55
11 Distribuzione dell'intervallo	11	21 Tempi di volo tra particelle diverse	57
12 Applicazione della legge dell'intervallo	12	22 Separazione di isobari con spettrometro magnetico	58
13 Legge dell'intervallo in un decadimento a cascata	14	23 Legge di Barber nei settori magnetici	59
14 Limite critico e limite di rivelabilità	16	24 Spettrometro magnetico a campo uniforme	60
15 Eventi ad alta molteplicità in un multi-rivelatore	18	25 Distanza tra due traiettorie in un campo magnetico	62
16 Calibrazioni in energia e propagazione degli errori statistici	20	26 La saetta di una particella in una camera a nebbia	64
17 Una distribuzione uniforme di neutroni	21	27 Analisi del picco somma in un decadimento a due fotoni	65
<b>CAPITOLO 2 Rivelatori di particelle</b>		28 Coincidenze casuali	66
1 Attività di una sorgente, angoli solidi e statistica	25	29 Tempo morto non estensibile	68
2 Attività di una sorgente e stima dei conteggi di fondo	26	30 Tempo morto estensibile	69
3 Calcolo di efficienza di un contatore di particelle	28	31 Misura del tempo morto: metodo delle due sorgenti	70
4 Perdita di energia di elettroni	29	32 Tempo morto in misure con reazioni nucleari	71
5 Sciami elettromagnetici	29	33 Uno <i>shaper</i> (formatore) CR-RC a due stadi	73
6 Energia di un raggio $\gamma$ misurata per conversione in elettroni	31	34 Sensibilità di un preamplificatore di carica	76
7 Un galleggiante "alternativo"	32	35 <i>Walk</i> di un segnale proveniente da un amplificatore veloce	77
8 Un contatore proporzionale: distanza di moltiplicazione	34		

- 36 Catena elettronica in misure di tempo di volo 78  
 37 Catena elettronica per coincidenze  $\gamma$ - $\gamma$  81

### CAPITOLO 3 Acceleratori di particelle

- 1 Irraggiamento in un acceleratore van de Graaf 83  
 2 Un sincrotrone per protoni 85  
 3 Un sincrociclotrone 86  
 4 Caratteristiche di un fascio tandem 88  
 5 Un van de Graaf a cinghia 89  
 6 Un LINAC per elettroni 91  
 7 Due LINAC per ioni pesanti 93  
 8 Accelerazione di elettroni con un betatrone 95

### CAPITOLO 4 Decadimenti radioattivi

- 1 Un radionuclide nel circolo sanguigno 97  
 2 Calore dal decadimento  $\beta^-$  nel trizio 97  
 3 Energia dal decadimento  $\alpha$  del  $^{238}\text{Pu}$  99  
 4 Ionizzazione dell'aria per radioattività 100  
 5 Visione probabilistica del decadimento radioattivo 101  
 6 Statistica nel decadimento radioattivo di una sostanza 102  
 7 Energetica classica e relativistica di un decadimento nucleare 102  
 8 Decadimento sequenziale 104  
 9 Equilibrio secolare 106  
 10 Equilibrio secolare ed età dei minerali 107  
 11 Il duro lavoro di Madame Curie 109  
 12 Decadimento triplo in breve tempo con sostanza separata 110  
 13 Decadimento multiplo con  $\lambda$  uguali 112  
 14 Costante di decadimento apparente in un decadimento sequenziale 112  
 15 Produzione di materiale radioattivo 114  
 16 Produzione e trasporto di bersagli radioattivi 116  
 17 Radioattività e diramazioni 118  
 18 Rapporto di diramazione e produzione di un radioisotopo 120  
 19 Radioattività e diramazioni del  $^{40}\text{K}$  122  
 20 Cattura in cascata di neutroni 123  
 21 Penetrabilità di una barriera rettangolare 124  
 22 Decadimento  $\alpha$  e legge di Geiger-Nuttal 129  
 23 Decadimento  $\alpha$ : barriere a confronto 132  
 24 Decadimento  $\alpha$ : applicazione della legge di Geiger-Nuttal 134  
 25 Penetrazione di una barriera triangolare 136

- 26 Decadimento  $\alpha$ : *hinderance* centrifuga 137  
 27 Decadimento  $\alpha$  verso stati eccitati nella teoria di Gamow 140  
 28 Decadimento  $\alpha$  e profondità della buca nucleare 141  
 29 Valor medio dell'energia cinetica degli elettroni nel decadimento  $\beta$  144  
 30 Decadimento  $\beta$  e soglie di reazione di scambio di carica 146  
 31 Determinazione della costante di Fermi da decadimento  $\beta$  147  
 32 Stime di sezioni d'urto deboli dalla cattura  $K$  del  $^7\text{Be}$  151  
 33 Energia coulombiana e decadimento  $\beta$  153  
 34 Transizioni gamma e vite medie di stati del  $^{73}\text{Br}$  155  
 35 Decadimento  $\beta$  e  $\gamma$  in cascata 156  
 36 Decadimento  $\alpha$  ed emissione  $\gamma$  associata 159  
 37 Decadimento  $\beta$  ed emissione  $\gamma$  160  
 38 Radioattività con emissione di clusters pesanti 161

### CAPITOLO 5 Struttura nucleare

- 1 Formula di Weizsacker e *neutron drip-line* 167  
 2 Formula di Weizsacker e decadimento  $\alpha$  168  
 3 Formula di Weizsacker e nuclei  $\beta$ -stabili 169  
 4 Stima del parametro di fissilità 171  
 5 Sottostati magnetici di un nucleone in un nucleo 173  
 6 *Splitting* per accoppiamento spin-orbita 174  
 7 Calcolo di un *gap* nel modello a shell 176  
 8 Libero cammino medio di un nucleone e modello a shell 177  
 9 Accoppiamento di nucleoni e principio di Pauli 179  
 10 Stati eccitati del  $^{17}\text{O}$  e modello a shell 180  
 11 Modello a shell ed emissione gamma 181  
 12 Modello a shell, decadimento beta e regole di Nordheim 182  
 13 Costante di accoppiamento di Gamow-Teller 184  
 14 Applicazione del modello a shell 187  
 15 Modello a shell e momento di quadrupolo elettrico dei nuclei 188  
 16 Struttura del  $^{137}\text{Ba}$  nel modello a shell 190  
 17 Determinazione di uno spin incognito con le regole di selezione 192  
 18 Stati a particella singola: limiti di Wigner 193  
 19 Una buca deformata 194

20	Momento di inerzia di un nucleo a cluster	197	19	Sezioni d'urto risonanti e formula di Breit-Wigner	261
21	Correlazioni angolari $\gamma - \gamma$	198	20	<i>Strength</i> di una risonanza isolata	263
22	Misure di vite medie di stati eccitati col metodo del plunger	200	21	Sfasamento nello scattering elastico di neutroni	264
23	Emissione ed assorbimento $\gamma$ con rinculo	201	22	Sfasamenti e sezioni d'urto elastiche	266
24	Assorbimento risonante che segue un decadimento $\beta$	203	23	Soglia di una reazione $(p,n)$ generica	268
25	Elettroni nel nucleo	205	24	Funzione di deflessione di sfera dura	269
26	Azione meccanica di un nucleone	206	25	<i>Orbiting e rainbow</i> classico	270
27	Decadimenti da uno stato isomerico	208	26	Bilancio dettagliato	271
28	Rinculo nucleare nel decadimento $\beta$	210	27	Fusione incompleta	273
29	Momento magnetico classico del protone	212	28	Una reazione diretta	274
30	Un esperimento alla Stern-Gerlach	214	29	Decadimenti a tre corpi di massa identica: Diagramma di Dalitz	276
31	Struttura iperfine degli spettri atomici	216	30	Decadimento sequenziale di uno stato nucleare	278
32	Effetto Zeeman nucleare	218			
33	Campo magnetico di dipolo: limite microscopico	219			
34	Struttura iperfine: riga a 21 cm dell'idrogeno	221			
35	Diffusione elastica di elettroni e raggio di cariche di un nucleo	224			

## CAPITOLO 6 Reazioni nucleari

1	Esperimento alla Geiger-Marsden	227	1	Energia disponibile nel centro di massa in collisioni a bersaglio fisso	281
2	Scattering Rutherford di particelle $\alpha$	228	2	Decadimenti asimmetrici di particelle	282
3	Q-valori e misura di masse atomiche	230	3	Soglia di reazione a bersaglio fisso: calcolo "all'antica"	283
4	Q-valore e velocità relativa	231	4	Energia di soglia per antiprotoni con moto di Fermi	284
5	Cinematica non-relativistica di reazioni nucleari	232	5	Collisione particella-fotone	286
6	Relazioni cinematiche in collisioni relativistiche	234	6	Massa invariante e decadimento di particelle	287
7	Soglie di reazioni nucleari e subnucleari	239	7	Sistema obliquo di due fotoni	288
8	Soglie relativistiche: produzione di particelle	242	8	Produzione di coppie su nuclei e su elettroni	289
9	Cinematica inversa: doppia soluzione cinematica	243	9	Annichilazione "sghemba" di elettroni e positroni	290
10	Un allarme per neutroni emessi in reazioni nucleari	245	10	Decadimento in volo di un kaone	291
11	Cinematica di scattering inelastico relativistico <i>versus</i> non-relativistico	247	11	Massa invariante e decadimenti in volo	293
12	Tempo di accumulo in una reazione di bassa energia	249	12	Sciami elettromagnetici nel decadimento del $\pi^0$	295
13	Erosione di un bersaglio di boro per bombardamento con neutroni	251	13	Processi elettromagnetici ad alta energia e loro sezione d'urto	296
14	Attivazione di una camera di reazione	252	14	Luminosità in esperimenti a bersaglio fisso e colliders	297
15	Occhio ai neutroni!	253	15	Reazioni con antiprotoni	298
16	Vita media del positrone in un mezzo materiale	255	16	Un collider asimmetrico $e^+e^-$	301
17	Stime di raggi nucleari con lo scattering diffrazionale da neutroni	257	17	Luminosità integrata e numero di eventi di reazione	301
18	Nucleo composto e reazioni nucleari	260	18	Sezione d'urto Lorentz-invariante	302
			19	Effetto Compton con bersaglio mobile	304
			20	Modulo della velocità relativa relativistica	305
			21	Volume dello spazio delle fasi nel decadimento del pione	306
			22	Regola di Sargent e vite medie	308
			23	Una sorgente $\gamma$ in moto relativistico	309
			24	Velocità relativa relativistica	311

## CAPITOLO 7 Particelle subnucleari

25	Decadimento del positronio	312
26	Collisioni n-p: scambio pionico	315
27	Risonanze nucleari e particellari	316
28	Parità del pione	317
29	Scattering Bhabha e Møller	319
30	Diagrammi di Feynman nella annichilazione $e^+e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$	319
31	Processi di produzione di un bosone $W$ ed $n$ gluoni	320
32	Rapporto $R$ in collisioni $e^+e^-$	321
33	Decadimenti proibiti	323
34	Diagrammi di Feynman di reazioni	326
35	Altri diagrammi di Feynman	327
36	Vertici di modello standard	328
37	Vertici di modello standard 2	328
38	Produzione e decadimento di coppie $W^+ W^-$ al LEP2	329
39	Oscillazioni di stranezza e decadimento di un fascio di $K^0$	330
40	Stato legato dall'interazione debole	332
41	Fisica ai colliders $e^+e^-$	333
42	Elementi di matrice $CKM$	334
43	Decadimento e massa del tauone	336
44	Atomi muonici	337
45	Rapporto di diramazione del decadimento del $\pi^-$	338
46	Scattering di alta energia elettrone-positrone	339
47	<i>Running</i> di $\alpha_S$ - Libertà asintotica	341
48	Eccitazione di risonanze barioniche nello scattering $e + p$	342
49	Fattori di colore e stabilità mesonica	342
50	Funzioni di struttura del protone	344
51	Isospin e sezione d'urto di formazione di $\Delta^0$ e $\Delta^{++}$	345
52	Canali di isospin in sistemi di due particelle	347
53	Decadimento della particella $\Lambda$	348
54	Rapporto di diramazione nel decadimento della $\Delta^0$	350
55	Decadimento del protone	351
56	Un nucleo e un ipernucleo	352
57	Produzione di ipernuclei e regole di selezione	353
58	Decadimento del mesone $D^0$	354
59	Decadimento del protone in teorie di grande unificazione	355
<b>CAPITOLO 8 Astrofisica nucleare e subnucleare</b>		
1	Raggio di una stella di neutroni	357
2	Stati eccitati e temperatura di un nucleo	358
3	Sezione d'urto e fattore astrofisico	358
4	Distruzione di un elemento radioattivo nelle stelle	360
5	Calcolo del picco di Gamow per reazione a bassa energia	362
6	Catena $p - p$ nel Sole	363
7	Grandezze di Planck	365
8	Età dell'universo e legge di Hubble	366
9	Densità critica dell'universo	367
10	Un sistema binario di stelle di neutroni	369
11	Onde gravitazionali irraggiate da Sirio	371
12	Riduzione del periodo di rivoluzione di un sistema binario per irraggiamento di onde gravitazionali	372
13	Materia oscura e velocità di rivoluzione delle stelle	373
14	Terremoto in una stella di neutroni	374
15	Stime di densità di una stella di neutroni	375
16	Emissione di fotoni da una nana bianca	376
17	Deflessione newtoniana della luce da parte di una stella	378
18	Effetto Sunyaev-Zeldovich	379
19	Collisione di un nucleo con un fronte d'onda d'urto	382
20	Misure di intensità di raggi cosmici e della loro curvatura	384
21	Intensità di raggi cosmici al livello del mare	385
22	Tasso di reazioni di neutrini in acqua	387
23	Scoppi di supernova e limiti alla massa dei neutrini	388
24	Rivelazione di materia oscura	390
25	Oscillazioni di neutrino	391
<b>CAPITOLO 9 Fisica nucleare applicata</b>		
1	Produzione di neutroni con acceleratori	395
2	Termalizzazione di neutroni	397
3	Un reattore nucleare omogeneo e finito	399
4	Un fusto di combustibile nucleare	401
5	Raggio critico di un reattore a uranio arricchito	403
6	Neutroni in colonna termica	405
7	Diffrazione di neutroni lenti da cristalli	407
8	Reattori a fusione e criterio di Lawson	409
9	Elettroni nell'uranio	410
10	Emissione spettrale di idrogeno $^1\text{H}$ e deuterio $^2\text{H}$	411
11	Risonanza magnetica nucleare	412
12	Dose assorbita in acqua	414
13	Emissione di radon in ambienti chiusi	415
14	Rateo di dose equivalente di una sorgente $\gamma$	416
15	Una seduta di adroterapia	418
16	Un radionuclide in circolo biologico (scintigrafia)	419
17	Produzione di radiofarmaco per la PET	420

18	Radiodattazione col carbonio-14	421	7	Formula semi-empirica delle masse (von Weizsacker)	430
19	Una misura PIXE "storica"	422	8	Orbitali del modello a shell a particelle indipendenti	430
20	Analisi di leghe con il metodo RBS	424	9	Coefficienti di Clebsch-Gordan	430
<b>Appendice</b>			10	Proprietà di alcuni mesoni	432
<b>Formulario, tabelle e riferimenti bibliografici</b>			11	Proprietà di alcuni barioni	433
1	Funzionamento di alcuni tipi di acceleratore	427	12	Integrale gaussiano	434
2	Dosimetria delle radiazioni	428	13	Alcune costanti di uso comune	435
3	Funzionamento di alcuni tipi di rivelatore	428	14	Alcuni riferimenti bibliografici	436
4	Classificazione dei decadimenti beta	429	<b>Indice analitico</b>		
5	Stime di Weisskopf	429	437		
6	Stime di Schmidt dei momenti magnetici nucleari	429			



## Prefazione

Al terzo anno di studi del corso di laurea in Fisica, negli atenei italiani è previsto l'insegnamento di un corso istituzionale di Fisica Nucleare e Subnucleare. La didattica di tale corso è molto impegnativa, perché spesso, sia per la vastità degli argomenti affrontati, sia per il ristretto numero di ore, sia per le diverse sensibilità (nucleare, particellare, teorica, applicativa) del docente, si corre il rischio di svolgere un insegnamento troppo sbilanciato su alcuni argomenti della fisica subatomica, e carente su altri. Molte sedi italiane, inoltre, storicamente non prevedevano lo svolgimento di un esame scritto per il superamento della materia. Questa scelta andava a tutto svantaggio degli studenti che, mancando delle abilità di soluzione di esercizi su questo ambito della fisica, si trovavano poi spesso ad avere lacune nel prosieguo dei loro studi. Per fortuna negli ultimi anni questo indirizzo è andato modificandosi, e sempre più sedi impongono la risoluzione di un compito scritto per accedere all'esame orale di questo insegnamento. L'esercizio alla soluzione di questo tipo di problemi è inoltre spesso fondamentale per il superamento di esami di accesso al dottorato, alle scuole di specializzazione e finanche, per certi versi, alle prove per l'ingresso nei ruoli di ricercatore negli atenei e negli enti pubblici di ricerca. Sfortunatamente, a fronte di una crescente richiesta di sussidi didattici per l'esercitazione degli studenti, uno scarso numero di essi è oggi a loro disposizione; in special modo mancano libri di problemi di fisica nucleare e subnucleare, scritti e svolti *in lingua italiana*, che si sforzino di toccare, con *eguale dignità*, tutte le tematiche connesse a un corso elementare di fisica subatomica.

Con queste considerazioni in mente ho intrapreso, qualche anno addietro, la stesura di questo testo. Gli argomenti sono stati suddivisi in nove capitoli, ciascuno rappresentativo di una particolare area della materia. Grande rilievo è stato dato allo svolgimento completo degli esercizi, al calcolo numerico di stime e ordini di grandezza, alla spiegazione delle approssimazioni effettuate. Inoltre, ho cercato di rendere quanto più evidenti possibile le strette *analogie* tra la fisica del nucleo e delle particelle elementari, fornendo così una visione d'insieme della materia quanto più possibile *omogenea*.

Spero dunque che questo testo possa trovare il favore degli studenti e dei docenti del terzo anno del corso di laurea in Fisica, che possa essere in qualche modo utile anche agli studenti di Chimica e di Ingegneria che si occupano di tecniche nucleari, e che li porti a consolidare la padronanza dei concetti fondamentali della fisica subatomica, in modo *operativo*, mediante la risoluzione degli esercizi. Consapevole del fatto che in un testo così complesso si annidino inevitabilmente imprecisioni ed errori, sarò grato a chi volesse indicarmeli, in modo da rendere disponibile sul sito del libro una *errata corrige* aggiornata e facilmente accessibile.

Per quanto arduo da intraprendere, il lavoro è stato reso ancora più stimolante grazie all'opportunità che ho avuto di svolgere le esercitazioni del corso di Elementi di Fisica Nucleare e Subnucleare presso l'Università di Napoli Federico II, e più recentemente, anche presso l'Università di Catania. Sono pertanto debitore ai colleghi docenti Prof. Leonardo Merola ed Elio Rosato (Napoli) e Francesca Rizzo (Catania) per l'opportunità che ho avuto

di confrontarmi con gli studenti, passaggio fondamentale per realizzare un testo che ambisca ad avere efficacia didattica. Allo stesso modo sono debitore verso i colleghi ricercatori delle collaborazioni sperimentali Chimera e Nucl-ex dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e Indra del CNRS francese per tutte le attività scientifiche di fisica nucleare che ho avuto il piacere di condividere negli ultimi quindici anni; esse hanno giocato un importante ruolo nella stesura dei problemi presenti in questo libro. Devo inoltre un ringraziamento particolare al Dr. Daniele Dell'Aquila (Sassari) per le notevoli discussioni intercorse su un buon numero di problemi presenti in questo testo e al Prof. Mariano Vigilante (Napoli) per l'interessamento alla realizzazione di quest'opera. Infine, il ringraziamento più grande va a mia moglie Erica Helena, che mi ha molto aiutato durante la lunga fase di trascrizione e revisione del manoscritto e che è stata sempre comprensiva e disponibile a prendersi carico delle molteplici incombenze che io non potevo onorare perché impegnato a lavorare a questo testo.

Catania, Giugno 2020  
Ivano Lombardo

**Ivano Lombardo** è attualmente Ricercatore di ruolo presso la Sezione di Catania dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, dove svolge prevalentemente attività di ricerca nell'ambito della struttura e della dinamica dei nuclei mediante reazioni nucleari ad energie basse ed intermedie. Laureatosi all'Università di Catania nel 2007, ha conseguito il dottorato di ricerca nello stesso ateneo nel 2011. È stato poi Assegnista di ricerca e Ricercatore universitario del settore FIS/01 presso l'Università di Napoli Federico II fino al 2017. Ha al suo attivo circa centonovanta pubblicazioni nell'ambito della fisica nucleare sperimentale ed applicata, è stato *spokesman* di dodici esperimenti approvati presso laboratori di ricerca nazionali ed internazionali, è stato relatore di sedici tesi di laurea e di dottorato, ed è co-autore di un libro di problemi di fisica generale.

# Capitolo 1

## Elementi di Statistica

### PROBLEMA 1 OTTIMIZZAZIONE DI TEMPI DI MISURA

Uno sperimentatore ha a disposizione un tempo complessivo  $T$  per effettuare sia una misura di conteggi provenienti da un campione radioattivo che una misura dei conteggi di fondo registrati dal rivelatore. Se da una misura preliminare sono stati stimati  $A_c$  conteggi per unità di tempo dovuti al campione (in presenza di fondo) e  $A_f$  conteggi per unità di tempo dovuti al fondo, qual è la miglior suddivisione dell'intervallo di tempo  $T$  che permette di *minimizzare* l'errore sulla stima della frequenza dei conteggi dovuti al campione  $A$ ?

**RISOLUZIONE** Indichiamo con  $N_c$  i conteggi dovuti al campione più il fondo e con  $N_f$  i conteggi dovuti al solo fondo. Essendo questi valori soggetti a fluttuazioni regolate dalla *statistica di Poisson*, segue che le deviazioni standard su di essi sono date da  $\sigma_c = \sqrt{N_c}$  e  $\sigma_f = \sqrt{N_f}$ . Se scomponiamo l'intervallo di tempo  $T$  che abbiamo a disposizione nei due sotto-intervalli in cui effettuare le misure con e senza campione inserito,  $T = t_c + t_f$ , seguirà che i tassi di conteggi saranno:

$$A_c = \frac{N_c}{t_c} \pm \frac{\sigma_c}{t_c} = \frac{N_c}{t_c} \pm \frac{\sqrt{N_c}}{t_c}$$

$$A_f = \frac{N_f}{t_f} \pm \frac{\sigma_f}{t_f} = \frac{N_f}{t_f} \pm \frac{\sqrt{N_f}}{t_f}$$

Indicando con  $A$  la frequenza dei conteggi dovuti al campione al netto del fondo, avremo che:

$$A = A_c - A_f$$

e che l'errore sulla frequenza dei conteggi dovuti al campione è dato dalla formula di propagazione degli errori statistici<sup>1</sup>:

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial A_c}\right)^2 \sigma_{A_c}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial A_f}\right)^2 \sigma_{A_f}^2} = \sqrt{\sigma_{A_c}^2 + \sigma_{A_f}^2} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N_c}}{t_c}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_f}}{t_f}\right)^2} = \sqrt{\frac{N_c}{t_c^2} + \frac{N_f}{t_f^2}}$$

---

<sup>1</sup> Essendo le misure effettuate sul campione più fondo e sul fondo *indipendenti* tra loro, non appare alcun *termine di covarianza* nella legge di propagazione degli errori.

## Capitolo 2

# Rivelatori di particelle

### PROBLEMA 1 ATTIVITÀ DI UNA SORGENTE, ANGOLI SOLIDI E STATISTICA

Una sorgente di  $^{137}\text{Cs}$  emette isotropicamente raggi  $\gamma$  da 662 keV, che vengono rivelati da un cristallo di NaI(Tl), che ha un'efficienza intrinseca di rivelazione al picco fotoelettrico data dalla formula  $\epsilon(E_\gamma) = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{E_\gamma}{1 \text{ MeV}}} \cdot e^{-\frac{E_\gamma}{1 \text{ MeV}}}$ . Il rivelatore ha forma cilindrica e la sua faccia di entrata ha un *diametro* di 8 cm. Essa si trova a 12 cm dalla sorgente, che può essere supposta *puntiforme*. In questa condizione si registra un tasso di conteggi *netti* sotto al picco fotoelettrico pari a  $75.37 \text{ s}^{-1}$ . Si stimi l'*attività* della sorgente. Per *quanto tempo* dobbiamo effettuare la misura se vogliamo che la stima dell'attività sia soggetta a un *errore statistico* inferiore allo 1‰?

**RISOLUZIONE** A 662 keV, l'efficienza *intrinseca* del rivelatore al *picco fotoelettrico* è pari a:

$$\epsilon(E_\gamma) = 0.8 \cdot \sqrt{0.662} \cdot e^{-0.662} = 0.336 = 33.6\%$$

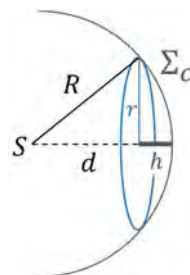
Per determinare l'efficienza *geometrica* del rivelatore dobbiamo determinare l'angolo solido  $\Delta\Omega$  sotteso dalla superficie del rivelatore. Esso è uguale al rapporto tra la superficie della calotta sferica avente come area di base la superficie della faccia di entrata del rivelatore e il quadrato del raggio  $R$  della sfera cui la calotta appartiene (*vedi figura*):

$$\Delta\Omega = \frac{\Sigma_c}{R^2}$$

Dalla geometria sappiamo che  $\Sigma_c = 2\pi R h$  e poiché  $R = \sqrt{r^2 + d^2}$  e  $h = R - d = \sqrt{r^2 + d^2} - d$ , avremo che:

$$\begin{aligned}\Delta\Omega &= \frac{\Sigma_c}{R^2} = \frac{1}{R^2} \cdot 2\pi\sqrt{r^2 + d^2} \cdot (\sqrt{r^2 + d^2} - d) = \\ &= 2\pi \left( \frac{r^2 + d^2}{r^2 + d^2} - \frac{d\sqrt{r^2 + d^2}}{r^2 + d^2} \right)\end{aligned}$$

$$\boxed{\Delta\Omega = 2\pi \left( 1 - \frac{d}{\sqrt{r^2 + d^2}} \right)}$$



## Capitolo 3

# Acceleratori di particelle

### PROBLEMA 1 IRRAGGIAMENTO IN UN ACCELERATORE VAN DE GRAAF

Un acceleratore *van de Graaf*, avente un tubo accelerante lungo 3.5 m, accelera deutoni portandoli all'energia di 3 MeV. Quanto vale il potenziale a cui si trova il terminale? Quanto vale la perdita di energia dovuta all'irraggiamento di onde elettromagnetiche? La massa del deutone è pari a  $1876 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ .

**RISOLUZIONE** La velocità che raggiungono i deutoni che hanno un'energia cinetica di 3 MeV si può ottenere una volta stimato il fattore  $\gamma$  relativistico. Siccome l'energia cinetica:

$$K = E - mc^2 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

segue che:

$$\gamma - 1 = \frac{K}{mc^2} = \frac{3 \text{ MeV}}{1876 \frac{\text{MeV}}{c^2} \cdot c^2} = 0.0016 \quad \rightarrow \quad \gamma = 1.0016$$

Siccome  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ , segue immediatamente che  $\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \gamma^{-2}} = \sqrt{0.0319} = 0.0565$ .

Questo vuol dire che i deutoni si muovono a una velocità massima del 5.6% la velocità della luce e quindi il problema dell'irraggiamento di onde elettromagnetiche durante la fase di accelerazione si può affrontare *non relativisticamente*. In questo caso, la *formula di Larmor* indica che la potenza irradiata da una carica accelerata è pari a:

$$\mathcal{P} = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (1)$$

dove  $a$  è l'*accelerazione* della particella. In un acceleratore van de Graaf si può fare ragionevolmente l'assunzione che la particella si muova, in *prima approssimazione*, di moto *uniformemente accelerato*. Il processo di accelerazione si può descrivere utilizzando la *conservazione dell'energia*; se supponiamo che alla *sorgente* i deutoni abbiano energia cinetica *nulla*:

$$K_s + U_s = K_f + U_f \quad \rightarrow \quad K_f = -\Delta U = U_s - U_f \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2}mv^2 = U_s - U_f$$

Un acceleratore van de Graaf accelera ioni positivi, e nel caso del presente problema,  ${}^2_1\text{H}_1^+$ . La sorgente di tali ioni viene posta all'interno del *terminale* dell'acceleratore, che si trova al potenziale positivo  $+V_s$ , mentre alla fine della sua lunghezza, il tubo accelerante è posto a potenziale nullo  $V_f = 0 \text{ V}$ .

## Capitolo 4

# Decadimenti radioattivi

### PROBLEMA 1 UN RADIONUCLIDE NEL CIRCOLO SANGUIGNO

Il radionuclide  $^{24}\text{Na}$  decade  $\beta^-$  con un tempo di dimezzamento di 15 h. Una piccola quantità di soluzione che contiene  $0.05 \mu\text{Ci}$  di  $^{24}\text{Na}$  viene iniettata nelle vene di una persona. Trascorse quattro ore e mezza dall'iniezione, l'attività volumica di un campioncino di sangue della persona viene misurata sperimentalmente, ed è pari a  $8 \text{ pCi}/\text{cm}^3$ . Quanti litri di sangue contiene il corpo della persona? Si assuma che la soluzione iniettata si sia distribuita in modo *uniforme* nel circolo sanguigno della persona e che il  $^{24}\text{Na}$  non sia stato espulso *biologicamente* dal circolo sanguigno, finendo tra i liquidi della vescica.

**RISOLUZIONE** Detta con  $A_0 = 0.05 \mu\text{Ci}$  l'attività iniziale di tutta la soluzione iniettata, essa varierà nel tempo seguendo la legge del decadimento esponenziale:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

La costante di decadimento  $\lambda$  del  $^{24}\text{Na}$  vale  $\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{15 \text{ h}} = 0.0462 \text{ h}^{-1}$ .

Dopo quattro ore e mezza dall'iniezione, l'attività di tutta la soluzione si sarà ridotta a un valore:

$$A(t = 4.5 \text{ h}) = 0.05 \mu\text{Ci} \cdot e^{-0.0462 \text{ h}^{-1} \cdot 4.5 \text{ h}} = 0.0406 \mu\text{Ci}$$

Sapendo che, dopo quattro ore e mezza, l'attività per unità di volume è pari a  $\mathcal{A} \equiv \frac{A}{V} = 8 \text{ pCi}/\text{cm}^3$ , possiamo ricavare subito il volume del sangue  $V$  in circolazione nella persona, trascurando il piccolissimo effetto di diluizione del sangue dovuto all'iniezione della soluzione:

$$V = \frac{A(t = 4.5 \text{ h})}{\mathcal{A}(t = 4.5 \text{ h})} = \frac{0.0406 \mu\text{Ci}}{8 \text{ pCi}/\text{cm}^3} = 5075 \text{ cm}^3 = 5.075 \text{ dm}^3 = 5.075 \text{ L}$$

un quantitativo ragionevole per un individuo sano.

### PROBLEMA 2 CALORE DAL DECADIMENTO $\beta^-$ DEL TRIZIO

Il trizio  $^3_1\text{H}$  decade per emissione  $\beta^-$  con un tempo di dimezzamento di 12.323 anni. Un campione di un composto contenente 0.1 g di trizio viene inserito dentro un piccolo calorimetro da laboratorio, e si misura sperimentalmente una potenza prodotta dal campione

## Capitolo 5

# Struttura nucleare

### PROBLEMA 1 FORMULA DI WEIZSACKER E NEUTRON DRIP-LINE

Si determini la funzione implicita che descrive la *neutron drip-line* (ossia l'insieme dei nuclidi della carta di Segrè per i quali l'energia di separazione di un neutrone è *nulla*). Si utilizzi la *formula semi-empirica delle masse* in cui, per semplicità, si trascuri il termine di *accoppiamento*.

**RISOLUZIONE** Trascurando il termine di accoppiamento, la *formula semi-empirica delle masse* si scrive:

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A}$$

L'*energia di separazione* di un neutrone è l'energia necessaria per *staccare* un neutrone da un nucleo di dato numero di massa e numero atomico  $(A, Z)$ :

$$\begin{aligned} S_n &= -\{m(A, Z) - m(A - 1, Z) - m_n\}c^2 = \\ &= -[Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B(A, Z) - Zm_p c^2 - (N - 1)m_n c^2 + B(A - 1, Z) - m_n c^2] \\ S_n &= B(A, Z) - B(A - 1, Z) \end{aligned}$$

Ipotizziamo che  $B(A, Z)$  sia una funzione continua delle variabili  $A$  e  $Z$ . Se sviluppiamo in *serie di Taylor* una funzione a due variabili otteniamo che:

$$f(x + \delta x, y + \delta y) \approx f(x, y) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y$$

Da cui:

$$B(A - 1, Z) \approx B(A, Z) + \frac{\partial B}{\partial A} \cdot (-1) \quad \text{e quindi} \quad S_n \approx \frac{\partial B}{\partial A}.$$

Effettuiamo dunque la *derivata parziale* della formula semi-empirica delle masse:

$$\begin{aligned} S_n = \frac{\partial B}{\partial A} &= a_V - \frac{2}{3} a_S A^{-\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} a_C Z^2 A^{-\frac{4}{3}} - a_A \frac{2A(A - 2Z) - (A - 2Z)^2}{A^2} = \\ &= a_V - \frac{2}{3} a_S A^{-\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} a_C Z^2 A^{-\frac{4}{3}} - \frac{a_A}{A^2} (2A^2 - 4AZ - A^2 + 4AZ - 4Z^2) = \\ &= a_V - \frac{2}{3} a_S A^{-\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} a_C Z^2 A^{-\frac{4}{3}} - a_A \left[ 1 - \frac{4Z^2}{A^2} \right] \end{aligned}$$

## Capitolo 6

# Reazioni nucleari

### PROBLEMA 1 ESPERIMENTO ALLA GEIGER-MARSDEN

Una sorgente radioattiva di particelle  $\alpha$  da 5.5 MeV viene collimata in una maniera tale che un fascetto quasi-parallelo di 50 000 particelle  $\alpha$  al secondo possano colpire un sottile foglio d'oro, spesso 0.2  $\mu\text{m}$ . In base alla legge di Rutherford, quante particelle  $\alpha$  al secondo ci si aspetta che vengano deflesse nell'emisfero all'indietro, ovvero ad angoli polari  $\theta > 90^\circ$ ? Si trascuri il rinculo del nucleo di oro e si considerino  $\rho_{\text{Au}} = 19\,300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $m_{\text{Au}}^{\text{mol}} = 197 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ,  $Z_{\text{Au}} = 79$ .

**RISOLUZIONE** Se si trascurano i rinculi del nucleo d'oro, la sezione d'urto di *scattering Rutherford* nel laboratorio diviene identica a quella valida per il sistema di riferimento del centro di massa:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(ke^2 Z_1 Z_2)^2}{16E^2} \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

dove  $E$  è l'energia cinetica delle particelle  $\alpha$ . Prima di effettuare i calcoli, esprimiamo la costante  $ke^2$  in unità di misura maneggevoli in ambito *nucleare*:

$$\begin{aligned} ke^2 &= 9 \cdot 10^9 \cdot (1.6 \cdot 10^{-19})^2 \text{ J m} = 9 \cdot 10^9 \cdot 2.56 \cdot 10^{-38} \text{ J m} = \\ &= 9 \cdot 2.56 \cdot 10^{-29} \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{ MeV} \cdot 10^{15} \text{ fm} = 1.44 \text{ MeV fm} \end{aligned}$$

Nell'ipotesi di *bersaglio sottile*, se immaginiamo di porre un rivelatore di particelle  $\alpha$  a un certo angolo  $\theta$  e che sottende un angolo solido infinitesimo  $d\Omega$ , il numero infinitesimo di particelle deflesse elasticamente che finiranno nel rivelatore saranno:

$$dN = N_i \frac{d\sigma}{d\Omega} \mathcal{N} d\Omega \quad (1)$$

dove  $N_i$  è il numero di particelle incidenti sul bersaglio ed  $\mathcal{N}$  è il numero di atomi per unità di superficie del bersaglio (*densità numerica areale*). Nel nostro caso:

$$\mathcal{N} = \frac{n_{\text{atomi}}}{A} = \frac{m N_A}{m_{\text{Au}}^{\text{mol}}} \cdot \frac{1}{A} = \frac{\rho_{\text{Au}} V N_A}{m_{\text{Au}}^{\text{mol}} \cdot A} = \frac{\rho_{\text{Au}} N_A t}{m_{\text{Au}}^{\text{mol}}}$$

essendo  $m$  la massa,  $A$  l'area,  $V$  il volume della porzione di fogliolino d'oro bombardato,  $t$  il suo spessore ed  $N_A$  il numero di Avogadro. Con i dati del problema, questa quantità vale:

$$\mathcal{N} = \frac{19.3 \cdot 10^3 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 0.2 \cdot 10^{-6}}{0.197} \text{ m}^{-2} = 1.18 \cdot 10^{22} \frac{\text{atomi}}{\text{m}^2}$$



## Capitolo 7

# Particelle subnucleari

### PROBLEMA 1 ENERGIA DISPONIBILE NEL CENTRO DI MASSA IN COLLISIONI A BERSAGLIO FISSO

A quanto ammonta l'energia nel centro di massa di una collisione in cui un fascio di protoni da 7 TeV urta su un bersaglio d'idrogeno fermo? Quanto vale il rapporto di tale valore di energia nel centro di massa rispetto a quello ottenibile in un *collider*, in cui due fasci hanno entrambi energia di 7 TeV?

**RISOLUZIONE** I diagrammi delle collisioni nei riferimenti del laboratorio e del centro di massa sono mostrati a lato. Nella soluzione del problema porremo per comodità  $c = 1$ . Nel caso del riferimento del centro di massa, per definizione, l'impulso totale è *nulla*. Quindi la massa invariante al quadrato sarà:



$$M^2 = (\Sigma E'_i)^2 - (\Sigma \vec{p}'_i)^2 = (\Sigma E'_i)^2$$

dove l'indice primato ricorda che ci stiamo riferendo a quantità calcolate nel riferimento del centro di massa. Dunque, nel centro di massa, la massa invariante è:

$$M = \Sigma E'_i$$

ed è quindi la somma delle energie delle particelle nel centro di massa, ed è dunque essa stessa l'energia disponibile nel centro di massa (che si indica di solito con  $\sqrt{s}$ ):

$$\sqrt{s} = M = \Sigma E'_i$$

Siccome  $M$  è invariante, la possiamo calcolare anche nel caso del riferimento del laboratorio (dove useremo quantità *non primato* per le grandezze fisiche in gioco):

$$M^2 = (\Sigma E_i)^2 - (\Sigma \vec{p}_i)^2 = (E_p + m_B)^2 - p_p^2 = E_p^2 + 2m_B E_p + m_B^2 - p_p^2$$

e usando la relazione di *mass-shell* sul proiettile:

$$M^2 = m_B^2 + m_p^2 + 2m_B E_p$$

da cui otteniamo subito:

$$\sqrt{s} = M = \sqrt{m_B^2 + m_p^2 + 2m_B E_p}$$

## Capitolo 8

# Astrofisica nucleare e subnucleare

### PROBLEMA 1 RAGGIO DI UNA STELLA DI NEUTRONI

Si stimi il raggio di una stella di neutroni, avente densità media pari a due volte quella della materia nucleare ordinaria e avente una massa pari a 1.5 volte quella del Sole. Si assumano  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$  kg,  $r_0 = 1.25$  fm.

**RISOLUZIONE** La densità della materia nucleare ordinaria si può stimare facilmente: detti con  $m$  la massa di un nucleo costituito da  $A$  nucleoni, e con  $V$  il suo volume, avremo:

$$\rho = \frac{m}{V} \simeq \frac{A \cdot m_n}{V}$$

dove  $m_n$  è la massa media di un nucleone,  $m_n = 1.67 \cdot 10^{-27}$  kg. Supponendo che il nucleo sia sferico e che valga la formula dei raggi, avremo poi che:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (r_0 \sqrt[3]{A})^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

e quindi:

$$\rho = \frac{1}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A} \cdot A \cdot m_n = \frac{1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1.333 \cdot 3.14 \cdot (1.25 \cdot 10^{-15} \text{ m})^3} = 2.04 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dunque, il volume della stella di neutroni, che assumeremo essere sferica, di massa pari a 1.5 volte quella del Sole, sarà:

$$V_{stella} = \frac{m_{stella}}{\rho_{stella}} = \frac{1.5 M_{\odot}}{2 \cdot \rho} = \frac{1.5 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{2 \cdot 0.204 \cdot 10^{18} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 7.35 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$$

cui corrisponde un raggio:

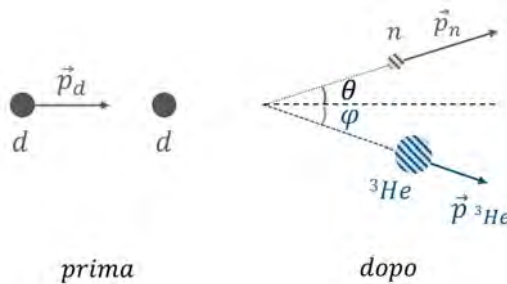
$$R_{stella} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V_{stella}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 7.35 \cdot 10^{12} \text{ m}^3}{12.56}} = \sqrt[3]{1.75 \cdot 10^{12} \text{ m}^3} = 12051 \text{ m} \simeq 12 \text{ km.}$$

## Capitolo 9

# Fisica nucleare applicata

### PROBLEMA 1 PRODUZIONE DI NEUTRONI CON ACCELERATORI

Si vogliono produrre *neutroni* utilizzando deutoni accelerati a bassa energia, mediante la reazione  $d + d \rightarrow n + {}^3_2\text{He}$  ( $Q = +3.27$  MeV). Ricavare una relazione non-relativistica che leghi il  $Q$ -valore all'energia di bombardamento, all'energia dei neutroni emessi e all'angolo di emissione dei neutroni. Dove possibile, si faccia uso delle masse approssimate (dai numeri di massa) dei nuclei piuttosto che delle masse esatte. Se i deutoni sono accelerati a energia  $E_d = 2$  MeV, quale sarà l'energia dei neutroni emessi a  $20^\circ$  nel laboratorio?



**RISOLUZIONE** Per definizione, il  $Q$ -valore della reazione è pari alla differenza tra la somma delle energie cinetiche dei prodotti di reazione e la somma delle energie cinetiche dei reagenti. Indicata con  $E$  l'energia cinetica, avremo dunque che:

$$Q = E_{{}^3_2\text{He}} + E_n - E_d \quad (1)$$

(il deutone-bersaglio è fermo;  $E_d$  qui indica senza ambiguità l'energia cinetica del deutone-proiettile). La conservazione della quantità di moto impone inoltre che:

$$\begin{cases} p_d = p_n \cos \theta + p_{{}^3_2\text{He}} \cos \varphi \\ 0 = p_n \sin \theta - p_{{}^3_2\text{He}} \sin \varphi \end{cases} \rightarrow \begin{cases} p_{{}^3_2\text{He}} \cos \varphi = p_d - p_n \cos \theta \\ p_{{}^3_2\text{He}} \sin \varphi = p_n \sin \theta \end{cases}$$

Quadrando e sommando le due equazioni del sistema, otterremo:

$$p_{{}^3_2\text{He}}^2 = p_d^2 - 2p_d p_n \cos \theta + p_n^2 \cos^2 \theta + p_n^2 \sin^2 \theta = p_d^2 + p_n^2 - 2p_d p_n \cos \theta$$

# Problemi di fisica nucleare e subnucleare



## Risorse online

A questo indirizzo si può accedere al sito di complemento al libro [online.universita.zanichelli.it/lombardo](http://online.universita.zanichelli.it/lombardo)



## Ebook

L'intero libro in formato elettronico, con possibilità di evidenziare, commentare e personalizzare il testo



Per l'accesso registrarsi su [my.zanichelli.it](http://my.zanichelli.it)

e abilitare le risorse.

Maggiori informazioni nelle pagine iniziali del libro.

*Problemi di fisica nucleare e subnucleare* è un libro che offre a chi studia un gran numero di esercizi, completamente svolti e commentati, in tutti gli ambiti della fisica subatomica. Si articola in nove capitoli, ciascuno rappresentativo di una particolare area della fisica nucleare e subnucleare: elementi di statistica, rivelatori di particelle, acceleratori, decadimenti radioattivi, struttura nucleare, reazioni nucleari, particelle subnucleari, astrofisica nucleare e subnucleare, fisica nucleare applicata. È corredato da un'appendice che mette a disposizione, in maniera agile, formule, tabelle e dati numerici utili alla risoluzione degli esercizi.

Lo scopo principale di quest'opera è portare gli studenti a consolidare le conoscenze della fisica subatomica in maniera operativa, mediante la soluzione ragionata dei problemi. Il testo si propone inoltre di toccare tutte le tematiche connesse a un corso elementare di fisica nucleare e subnucleare, così da fornire una rappresentazione ampia e variegata delle aree del sapere che orbitano attorno alla fisica dei nuclei e delle particelle subnucleari, sia da un punto di vista fenomenologico sia dal punto di vista applicativo. È stato fatto un grande lavoro per armonizzare tra loro i vari argomenti trattati nel testo, perché chi studia potesse avere una visione quanto più possibile unitaria e coerente della materia. Il testo si rivolge principalmente agli studenti del corso di laurea in Fisica, ma può essere utilmente consultato, almeno su parte degli argomenti, anche da studenti dei corsi di laurea in Chimica e Ingegneria.

## L'autore

**Ivano Lombardo** è attualmente ricercatore presso la Sezione di Catania dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, dove svolge attività di ricerca sulla fisica dei nuclei. Come ricercatore dell'Università di Napoli Federico II e docente a contratto dell'Università di Catania ha svolto attività didattiche di Fisica Generale e Nucleare per i corsi di laurea e di dottorato in Fisica, Chimica e Ingegneria.

LOMBARDO\*ES FISICA NUCLEARE(CEA LUM)  
**ISBN 978-88-08-42016-9**



9 788808 420169

2 3 4 5 6 7 8 9 0 (64D)