
Hanno Krieger

Strahlungsquellen für Technik und Medizin

3. Auflage

 Springer Spektrum

Inhalt

Abschnitt I: Teilchenbeschleuniger

1	Überblick über die Strahlungsquellen	9
1.1	Einsatzbereiche ionisierender Strahlungsquellen	9
1.2	Arten ionisierender Strahlungsquellen	13
2	Grundlagen zur Teilchenbeschleunigung und Strahloptik	17
2.1	Relativistische Energien und Massen	17
2.2	Prinzip der Beschleunigung geladener Teilchen	20
2.3	Grundlagen zur Strahloptik mit elektrischen und magnetischen Feldern	27
2.3.1	Wirkung elektrischer Felder auf geladene Teilchen	29
2.3.2	Wirkung magnetischer Felder auf geladene Teilchen	34
2.3.3	Teilchenführung mit Magnetfeldern	40
2.3.4	Schwache und starke Fokussierung mit Magnetfeldern*	43
	Aufgaben	49
3	Elektronen- und Ionenquellen	50
3.1	Elektronenquellen	50
3.1.1	Die Kathoden von Röntgenröhren	50
3.1.2	Fokussierung der Elektronenstrahlenbündel	57
3.1.3	Elektronenkanonen für Beschleuniger	60
3.2	Quellen für positive Ionen	65
3.2.1	Einschlussquellen für hohe Ionenströme	69
3.2.2	Die Plasmatronen	71
3.2.3	Die Penning-Ionenquellen	72
3.2.4	Die HF-Ionenquellen	74
3.2.5	Elektronenstrahl-Ionenquellen	78
3.3	Quellen für negative Ionen	81
	Aufgaben	88
4	Die Röntgenröhre	89
4.1	Röntgenspektren	92
4.1.1	Entstehung der Röntgenbremsstrahlung	92
4.1.2	Intensitätsspektren der Röntgenbremsstrahlung*	93

4.1.3	Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Röntgenbremsstrahlung	99
4.1.4	Charakteristische Röntgenstrahlung	102
4.2	Filterung von Röntgenspektren	105
4.3	Darstellung von Röntgenspektren im Wellenlängenbild	116
4.4	Abbildungseigenschaften von Röntgenstrahlern	117
4.5	Extrafokalstrahlung	121
4.6	Winkelverteilungen von Röntgenstrahlung	123
4.7	Bauformen von Röntgenröhren	126
4.8	Technische Aspekte beim Anodenaufbau von Röntgenröhren	134
4.9	Theorie zur thermischen Belastbarkeit der Anoden von Röntgenröhren*	142
	Aufgaben	147
5	Gleichspannungsbeschleuniger	148
5.1	Cockcroft-Walton-Beschleuniger	148
5.2	Marx-Generatoren	150
5.3	Van de Graaff-Beschleuniger	151
5.4	Gleichspannungsbeschleuniger mit HF-Generatoren	155
	Aufgaben	158
6	Hochfrequenzgeneratoren	159
6.1	Das Magnetron	159
6.2	Klystrons	161
7	Hohlwellenleiter und Hohlraumresonatoren*	167
7.1	Hohlwellenleiter*	167
7.2	Hohlwellenleiter mit Irisblenden*	169
7.3	Hohlraumresonatoren*	170
	Aufgaben	174
8	Linearbeschleuniger	175
8.1	Phasenfokussierung in Linearbeschleunigern*	176
8.2	Beschleuniger mit Wideröe-Struktur	178
8.3	RFQ-Beschleuniger	180
8.4	Beschleuniger mit Alvarez-Struktur	182
8.5	Elektronenlinearbeschleuniger	184
8.5.1	Energiegewinn der Elektronen bei der Hochfrequenzbeschleunigung*	184

8.5.2	Das Wanderwellenprinzip	185
8.5.3	Das Stehwellenprinzip	187
8.5.4	Vergleich von Wander- und Stehwellenprinzip	190
Aufgaben		194
Medizinische Elektronenlinearbeschleuniger		195
9.1	Anforderungen an medizinische Elektronenbeschleuniger	195
9.2	Aufbau von medizinischen Elektronenlinearbeschleunigern	197
9.3	Der Strahlerkopf im therapeutischen Elektronenbetrieb	199
9.3.1	Umlenkung und Fokussierung des Elektronenstrahlenbündels	201
9.3.2	Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels	204
9.3.3	Kollimation des Elektronenstrahls	212
9.4	Der Strahlerkopf im Photonenbetrieb	216
9.4.1	Bremsstrahlungserzeugung und Auslegung des Bremstargets	216
9.4.2	Homogenisierung des Photonenstrahlenbündels	219
9.4.3	Kollimation des Photonenstrahlenbündels	224
9.5	Das Doppeldosismonitorsystem	231
9.6	Keilfilter zur Formung von Photonenfeldern	233
9.7	Portal-Imaging-Systeme	244
9.8	Strahlenschutzprobleme an medizinischen Elektronenlinearbeschleunigern	248
9.8.1	Baulicher Strahlenschutz	249
9.8.2	Apparativer Strahlenschutz	250
9.8.3	Materialaktivierungen	252
9.9	Das Cyberknife	256
Aufgaben		263
Ringbeschleuniger		264
10.1	Einteilung der Ringbeschleuniger	264
10.2	Das Betatron	265
10.3	Zyklotrons	271
10.3.1	Funktionsweise und Bauformen von klassischen Zyklotrons	271
10.3.2	Relativistische Zyklotrons	277
10.3.3	Zyklotrons für die Protonentherapie	283
10.4	Mikrotrons	294
10.5	Synchrotrons	301

10.5.1 Die räumliche Fokussierung der Teilchen im Synchrotron*	304
10.5.2 Phasenfokussierung relativistischer Teilchen im Synchrotron*	306
10.6 Das Rhodotron für industrielle Anwendungen	308
Aufgaben	310
11 Synchrotronstrahlung und Speicherringe*	311
11.1 Entstehung der Synchrotronstrahlung*	311
11.2 Speicherringe zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung*	315
Aufgaben	319
 Abschnitt II: Kernreaktoren und Neutronenquellen	
12 Kernreaktoren	320
12.1 Grundlagen zur Kernspaltung	320
12.1.1 Spaltbare Materialien	320
12.1.2 Neutroneninduzierte Kernspaltung	322
12.1.3 Spaltfragmentverteilungen	329
12.2 Funktionsweise von Kernreaktoren	331
12.3 Überblick über technische Bauformen von Kernreaktoren	339
12.4 Sonderformen von Kernreaktoren	342
12.4.1 Die Garching-er Forschungsreaktoren	342
12.4.2 Der natürliche Reaktor in Gabun	348
Aufgaben	351
13 Neutronenquellen und ihre Anwendungen	352
13.1 Überblick über die Neutronenquellen	352
13.2 Energie von Neutronen	354
13.3 Reaktor-neutronen	356
13.4 Neutronenquellen mit spontanen Spaltern	358
13.5 Neutronenerzeugung mit geladenen Teilchen aus Beschleunigern	359
13.5.1 Spallationsquellen	359
13.5.2 Neutronen-Fusionsgeneratoren mit Deuterium und Tritium	361
13.5.3 Zyklotron-Neutronenquellen	364
13.6 Neutronenquellen über den Kernphotoeffekt	367
13.7 Radioisotop-Neutronenquellen vom Typ (α, n)	368

13.8	Anwendungen von Neutronenstrahlungen	372
13.8.1	Neutronen-Aktivierungsanalysen	372
13.8.2	Schwächung von thermischen Neutronen*	375
13.8.3	Bildgebung mit Neutronen	379
13.8.4	Anwendung von Neutronen in der Medizin	382
	Aufgaben	384

Abschnitt III: Radionuklide und ihre Anwendungen

14	Radionukliderzeugung	385
14.1	Spezifische Aktivität radioaktiver Strahler*	386
14.2	Erzeugung neutronenreicher Nuklide durch Kernspaltung	389
14.3	Neutronenaktivierungen	389
14.4	Erzeugung von Positronenstrahlern	395
14.5	Radionuklidgeneratoren	397
14.5.1	Der Molybdän-Technetiumgenerator	398
14.5.2	Weitere Radionuklidgeneratoren*	402
	Aufgaben	406
15	Radionuklide in der Medizin	407
15.1	Radionuklide für strahlentherapeutische Anwendungen	407
15.2	Radionuklide für die Nuklearmedizin	411
	Aufgaben	415
16	Kobaltbestrahlungsanlagen für die Medizin	416
16.1	Kobaltstrahler	416
16.2	Konventionelle isozentrische Kobaltanlagen	419
16.3	Das stereotaktische Kobaltbestrahlungsgerät Gammaknife	422
	Aufgaben	424
17	Afterloadinganlagen für die Medizin	425
17.1	Prinzip des medizinischen Afterloadings	425
17.2	Strahlungsquellen für das medizinische Afterloading	427
17.3	Erzeugung der therapeutischen Dosisleistungsverteilungen	429
	Aufgaben	432

18 Technische Anwendungen von Radionukliden	433
18.1 Radionuklidbatterien	433
18.2 Materialprüfungen	436
18.3 Füllstandsmessungen und Ionisationsrauchmelder	439
18.4 Strahlensterilisation	440
18.5 Kunststoffherzeugung und Modifikation	442
Aufgaben	445
Abschnitt IV: Anhang	
19 Tabellenanhang	446
19.1 Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI, abgeleitete Einheiten	446
19.2 Physikalische Fundamentalkonstanten	450
19.3 Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	451
19.4 Strahlungsfeldgrößen	452
19.5 Elemente des Periodensystems	453
19.6 Daten zur Kernspaltung	456
19.6.1 Relative Spaltausbeuten bei der thermischen Spaltung von ^{235}U für bestimmte Massenzahlen A und die wichtigsten Spaltfragmente	456
19.6.2 Neutronenzahlen pro Spaltakt und Neutroneneinfangquerschnitte	459
19.7 Überblick über die Dosisgrößen	460
20 Literatur	462
20.1 Lehrbücher und Monografien	462
20.2 Wissenschaftliche Einzelarbeiten	464
20.3 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	469
20.4 Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Strahlungsquellen	472
20.5 Wichtige Internetadressen	473
21 Aufgabenlösungen	476
Sachregister	497