RADIOAKTIVE ISOTOPE

IHRE HERSTELLUNG UND ANWENDUNG

VON

KURT SCHMEISER

RADIOAKTIVE ISOTOPE

IHRE HERSTELLUNG UND ANWENDUNG

VON

DR. KURT SCHMEISER

KNAPSACK-GRIESHEIM A. G., WERK KNAPSACK BEI KÖLN
FRÜHER INSTITUT FÜR PHYSIK AM MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MED. FORSCHUNG
HEIDELBERG

MIT 193 ABBILDUNGEN

SPRINGER-VERLAG
BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG
1957

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag oHG. Berlin · Göttingen · Heidelberg 1957

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinn der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg

Vorwort

Die schnelle Entwicklung der Kernphysik und die Möglichkeit, auf künstlichem Wege radioaktive Isotope in größerer Menge herzustellen, hat sich auf viele Gebiete, sei es in der Chemie, Medizin, Biologie, Geologie, Mineralogie u. a. oder bei technischen Problemen, günstig ausgewirkt. Die Zahl der Anwendungsbeispiele ist heute schon fast unübersehbar, immer neue Möglichkeiten der Anwendung ergeben sich. Es ist ein großer Vorteil der radioaktiven Nachweismethode, daß sich die meisten Untersuchungen mit verhältnismäßig einfachem experimentellem Aufwand lösen lassen. Jedoch setzt dies eine eingehende Kenntnis der Nachweismethoden und ihre experimentelle Beherrschung voraus. Die hierzu erforderlichen Grundlagen soll das vorliegende Buch vermitteln. Es ist hervorgegangen aus einer Zahl von größeren Übersichtsbeiträgen, welche der Verfasser in Zeitschriften und Handbüchern gegeben hat, und aus einer fast zehnjährigen experimentellen Tätigkeit auf diesem Gebiet. Leider ist durch eine übermäßig starke, berufliche Inanspruchnahme die Fertigstellung des Manuskriptes etwas verzögert worden.

Einleitend wird ein kurzer Überblick gegeben über den Aufbau des Atoms und über damit zusammenhängende Fragen. Anschließend wird die Erscheinung der Radioaktivität, soweit es für das Verständnis des Folgenden notwendig ist, behandelt. Es wurde als zweckmäßig erachtet, dem eigentlichen Thema, nämlich der Messung von radioaktiven Präparaten, einen in sich abgeschlossenen Überblick über die Herstellungsmöglichkeiten radioaktiver Isotope voranzustellen. Erfahrungsgemäß tauchen nämlich bei der Anwendung radioaktiver Isotope, besonders bei medizinischen und biologischen Problemen, Fragen auf, welche ohne diese Kenntnisse vielfach nur unbefriedigend beantwortet werden können. Daß über die Wirkungsweise der verschiedenen Meßgerätetypen berichtet wird, ist selbstverständlich. Den Ausführungen über die praktische Ausmessung von α-, β- oder γ-Strahlern sind jeweils einige Grundtatsachen über das Verhalten der betreffenden Strahlung in Materie vorangestellt. Der Autoradiographie ist ein besonderer Abschnitt gewidmet. Der Abschnitt über Strahlenschutz ist textlich kurz gehalten, dürfte aber bei der reichhaltigen Beigabe von Tabellen und Abbildungen ausreichend sein. Den Abschluß des Buches bildet eine kleine Zusammenstellung von verschiedenartigen Anwendungsbeispielen.

Köln a. Rh., im Juni 1957

K. Schmeiser

Inhaltsverzeichnis

Seite

I. Grundbegriffe des Atomaufbaues und der Radioaktivität sowie Möglichkeiten zur Herstellung künstlich radioaktiver Isotope 1

A. Atomaufbau und Isotopie 1

1. Protonen und Neutronen als Bausteine von Atomkernen 1
2. Kernladung und Atommasse 2
3. Symbolische Schreibweise für Atomkerne 2
4. Begriff der Isotopie, stabile Isotope 4
5. Isotopenhäufigkeit 7
6. Atomgewicht und Isotopengewicht 8
7. Massendefekt, Bindungsenergie, Packungsanteil 10

B. Radioaktivität, radioaktive Familien 11

1. Natürliche Radioaktivität 11
2. Zerfallsgesetz 11
3. Berechnung der von einem radioaktiven Präparat bis zum völligen Zerfall emittierten Zerfallsteilchen 14
4. Zerfallskurve eines Gemisches zweier Radioisotope verschiedener Halbwertzeit 14
5. Statistische Natur des radioaktiven Zerfalls 15
6. Mutter- und Tochtersubstanzen. Radioaktive Familien 15
7. Die verschiedenen Zerfallsarten bei natürlich radioaktiven Isotopen 18
   a) α-Zerfall 18
   b) β-Zerfall 20

C. Umwandlung von Atomkernen, künstliche Herstellung radioaktiver Isotope 20

1. Erste Atomkernumwandlung 20
2. Wärmetönung 22
3. Verschiedene Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung radioaktiver Isotope 22
   a) Umwandlung von stabilen Atomkernen in radioaktive Atomkerne mit Hilfe natürlicher α-Strahlen 22
   b) Erzeugung von Radioisotopen mit Hilfe von künstlich beschleunigten, geladenen Teilchen (Van de Graaff-Generator, Kaskadengenerator, Zyklotron) 22
   c) Atomumwandlung mittels Neutronen 25
   d) Atomumwandlung mittels γ-Strahlen 26
   e) Uran-Kernspaltung. Radioaktive Spaltprodukte 27

4. Umwandlungswahrscheinlichkeit 44
   a) Definition des Wirkungsquerschnittes 44
   b) Schwellenenergie, Coulombscher Potentialwall, Anregungskurve . 44
   c) Elastische Zusammenstöße, thermische Neutronen 45
   d) Wirkungsquerschnitt für Neutronen, unelastische Stöße, Neutroneneinfang 45

5. Uranmeiler, Pile 47
   a) Physikalische Vorgänge im Pile 47
   b) Erzeugung von Radioisotopen im Pile mit Hilfe der Überschußneutronen 49

Seite

α) Die beiden Hauptumwandlungstypen 49
β) Spezifische Aktivität, trägerlose Präparate 50
γ) Sättigungsmenge, maximale Bestrahlungszeit 51
δ) Markierte, chemische Verbindungen 52

6. Herstellung radioaktiver Isotope im Zyklotron 53
a) Trägerlose Substanzen 53
b) Wirkungsweise eines Zyklotrons 54
c) Gleichzeitige Erzeugung mehrerer Arten von Radioisotopen . . . 54
d) Anregungskurven 56

D. Eigenschaften künstlich erzeugter β-Strahler 58
1. Größe der Halbwertzeit 58
2. Verschiedene Absorbierbarkeit der ausgesandten Strahlung 58
3. Verschiedene Zerfallsarten 58
a) Der β^-- und β^+-Zerfall 58
b) K-Einfang 59
c) γ-Emission, Kern-γ-Strahlung 60
d) Kernisomerie 60
e) Innerer Photoeffekt, Konversionselektronen 60
f) Zerfallschemata 61

II. Nachweisgeräte für radioaktive Strahlung 62

A. Ionisationskammer 63
1. Aufbau und Wirkungsweise 63
2. Messung der gesammelten elektrischen Ladung 65
3. Nulleffekt einer Ionisationskammer 66
4. Elektroskop 66

B. Geiger-Müllersches Zählrohr 67
1. Prinzipieller Aufbau eines Zählrohrs. Zählrohrcharakteristik 67
2. Entladungsmechanismus beim Geiger-Müller-Zählrohr 68
3. Zeitlicher Verlauf des Zählrohrimpulses und der Zählrohrspannung. Begriff der Totzeit und Erholungszeit 69
4. Nachentladungen beim Geiger-Müller-Zählrohr 70
5. Nicht selbstlöschende und selbstlöschende Zählrohre 71
6. Lebensdauer von selbstlöschenden Zählrohren 72
7. Der Nulleffekt eines Geiger-Müller-Zählrohres 72

C. Proportionalzählrohre, Vor- und Nachteile derselben 74

D. Szintillationszähler 76
1. Die große γ-Nachweis-Empfindlichkeit als Ausgangspunkt für die rasche Entwicklung des Szintillationszählers 76
2. Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise eines Szintillationszählers 77
3. Eigenschaften der Leuchtstoffe, Lichtleiter, physikalische und technische Ausbeute 78
4. Empfindlichkeit von Photozelle bzw. Photomultiplier 80
5. Charakteristik des Szintillationszählers 82
6. Nulleffekt beim Szintillationszähler 82
7. Vorteile des Szintillationszählers 84

E. Einige Bemerkungen über Impulsverstärker 84

III. Durchgang von β-Teilchen durch Materie 85

A. Verhalten monoenergetischer Elektronen 85
1. Streuung von Elektronen 85
2. Primäre, sekundäre und totale Ionisation 85

Seite

3. Anregung von Atomen 86
4. Energieverlust homogener Elektronen durch Ionisation 86
5. Abhängigkeit der Ionisationsdichte von der Elektronenenergie . . . 86
6. Absorption von monoenergetischen Elektronen 87
7. Energieverteilung bei monoenergetischen Elektronen nach Durchlaufen einer bestimmten Absorberdicke 88

B. Zerfallselektronen 88

1. Vergleich mit monoenergetischen Elektronen 88
2. Absorptionsgesetz 89
3. Maximale Reichweite von Zerfallselektronen 91

IV. Nachweis von β-Strahlen 93

A. Allgemeine Bemerkungen 93

1. Hohe Empfindlichkeit des radioaktiven Nachweises 93
2. Relative und absolute Messung 95
3. Standardpräparate 96

B. Zählrohrmessungen von radioaktiven Präparaten in fester Form . . . 96

1. Einleitende Bemerkungen 96
2. Versuchsanordnung 98
3. Abhängigkeit des Meßeffektes vom Abstand des Präparates vom Zählrohr 99
4. Geometriefaktor, punktförmige und kreisförmige Präparate 100
5. Änderung der Impulshäufigkeit bei seitlicher Verschiebung des Präparates 102
6. Absorption von β-Strahlen 102
   a) Absorptionsgesetz 102
   b) Gleichzeitige Bestimmung zweier Radioisotope in ein und demselben Präparat 102
   c) Absorption der β-Strahlen im Zählrohrfenster und in der Luftschicht 103
   d) Einfluß des schrägen Durchgangs der β-Teilchen durch Luftschicht und Zählrohrfenster 104
7. Selbstabsorption von β-Strahlen 106
   a) Begriffsbestimmung 106
   b) Selbstabsorption bei dünner Präparateschicht 106
   c) Dicke Schicht 106
   d) Selbstabsorption für verschieden dicke Präparate 107
   e) Berechnung des Selbstabsorptionskoeffizienten 108
   f) Abhängigkeit des Selbstabsorptionskoeffizienten von der Geometrie der Meßanordnung und von der Art des Nachweisgerätes 108
8. Selbststreuung 109
9. Rückstreuung 111

C. Messung von Präparaten in flüssiger Form 112

1. Bestimmung der Aktivität kleiner Proben 112
2. Messung von Flüssigkeitsproben von etwa 15 cm³ Volumen 114
   a) Veallscher Flüssigkeitszähler 114
   b) Einfluß verschiedener Flüssigkeitsdichte auf den Meßeffekt . . . 116
   c) Nulleffekt des Veallschen Zählers 116
3. Aktivitätsmessung großer Flüssigkeitsmengen 117
4. Messung von flüssigen radioaktiven Proben mit dem Szintillationszähler 118

D. Messung gasförmiger Proben 119

1. Vorteile und Nachteile des Gaszählers 119
2. Nachweisempfindlichkeit von Gaszählern 120

Seite

3. Geiger-Müller-Zählrohre als Gaszähler 122
a) Geeignete Gasfüllung des Zählers 122
b) Definiertes Zählvolumen und Randeffekt 123
c) Wandeffekt 123
4. Proportionalzähler zur Ausmessung gasförmiger radioaktiver Präparate 124
5. Messung gasförmiger, radioaktiver Proben mit der Ionisationskammer 126
6. Messung von Tritiumpräparaten 128

E. Zählverluste durch begrenztes Auflösungsvermögen 129
1. Ermittlung der Zählverluste 129
2. Experimentelle Bestimmung der Totzeit 129
3. Direkte Bestimmung der Zählverluste 130
4. Verminderung der Zählverluste durch Verwendung von Untersetzern 130

F. Genauigkeit radioaktiver Messungen 131
1. Statische Natur der Radioaktivität 131
2. Mittlerer statistischer Fehler, wahrscheinlicher und 9/10-Fehler . . . 132
3. Berechnung des mittleren statistischen Fehlers, wenn die gesuchte Größe von mehreren Einzelmessungen abhängt 134
4. Berücksichtigung des Nulleffektes bei der Berechnung des mittleren statistischen Fehlers 134
5. Günstige Aufteilung der Gesamtmeßdauer auf Präparatmessung und Nulleffektmessung 135
6. Bestimmung des mittleren statistischen Fehlers für den Quotienten zweier Differenzen 136
7. Bestimmung des mittleren statistischen Fehlers für eine Meßgröße, bei welcher infolge der Totzeit der Zählanordnung eine Korrektur an dem beobachteten Meßeffekt vorgenommen werden muß. 137
8. Mittlerer statistischer Fehler für Ratemeter und Ionisationskammer 137

V. Wechselwirkung von γ-Strahlung mit Materie und Nachweis derselben . . 138

A. Absorption von γ-Strahlung 138
1. Absorption durch photoelektrischen Effekt, Compton-Effekt und Paarbildung 138
2. Absorptionsgesetz. 139
3. Energieverteilung der γ-Quanten 139
4. Compton-Absorption und Compton-Streuung. 141

B. Nachweis von γ-Strahlung mit Geiger-Müller-Zählrohren und Szintillationszählern 145
1. Zweckmäßigkeit der Messung von γ-Strahlung 145
2. Gamma-Ansprechwahrscheinlichkeit von Geiger-Müller-Zählrohren 145
3. Gamma-Messungen mit dem Geiger-Müller-Zählrohr 147
a) Bestimmung der Jod 131-Speicherung durch die Schilddrüse . . . 147
b) Nachweis sehr energiearmer γ-Strahlung mit Hilfe eines Zinnzählrohres 148
4. Gamma-Empfindlichkeit von Szintillationszählern 150
5. Messung der Jod 131-Aufnahme durch die Schilddrüse als Beispiel des γ-Nachweises mit dem Szintillationszähler 150
6. Verwendung des Szintillationszählers zur Bestimmung der Intensität zweier γ-Strahler eines radioaktiven Präparates. 154
7. Richtungsempfindliche Szintillationszähler 156

VI. Wechselwirkung von α-Strahlen mit Materie und Nachweis von α-Strahlen 157

A. Wechselwirkung mit Materie 157
1. Einleitende Bemerkungen 157
2. Ionisation und Anregung durch α-Teilchen 158

Seite

3. Energieverlust von α-Teilchen 158
4. Streuung von α-Teilchen 159
5. Atomares Bremsvermögen von α-Teilchen, Luftäquivalent 159
6. Reichweite von α-Teilchen 159

B. Nachweis von α-Teilchen 163

1. Übersicht 163
2. A-Nachweis mit dem Proportionalzähler 163
3. A-Nachweis mit der Ionisationskammer 165
4. A-Nachweis mit den Szintillationszählern 165

VII. Absolute Messungen 166

A. Vergleich der Meßgröße mit der Impulshäufigkeit eines Eichpräparates bekannter Aktivität 166

B. Methoden zur direkten Bestimmung der absoluten Stärke eines radioaktiven Präparates 166

1. Berücksichtigung der Selbstabsorption, Streuung, Absorption, des Zerfallsschemas u. a. 166
2. Doppelzählrohre 166
3. Koinzidenzmethode 168

C. Einfluß des Zerfallsschemas auf die Impulshäufigkeit 169

VIII. Autoradiographie 171

A. Methode, Anwendungsbereich, Vorteile der Autoradiographie 171

B. Physikalische Grundlagen 172

1. Photographischer Vorgang 172
2. Photographische Emulsionen 173
3. Auflösungsvermögen 173
4. Beeinflussung des Auflösungsvermögens 175
5. Abschätzung der günstigsten Belichtungsdauer 177

C. Herstellung von Gewebeschnitten 178

1. Fixieren 179
2. Entwässern 180
3. Einbetten von Präparateschnitten 180
4. Schneiden von Präparaten mit Hilfe eines Mikrotoms 181
5. Färbung der Präparateschnitte 182

D. Die verschiedenen Techniken zur Herstellung von Autoradiogrammen 182

1. Kontaktmethode 182
   a) Große und dicke Gewebeproben 182
   b) Dünne Präparateschnitte 183
2. Coated-Methode 185
   a) Normalmethode 185
   b) Umkehrmethode 186
3. Stripping-Film-Methode 186
4. Finksche Methode 190
5. Autoradiographie unter Verwendung flüssiger Emulsionen (wet-process-autoradiography) 190

E. Artefakte 192

F. Quantitative Autoradiographie 192

1. Vergleichsmessung mit Autoradiogrammen, welche mit Strahlungsquellen bekannter Aktivität aufgenommen worden sind 192
2. Auszählung der ausgeschiedenen Silberkörner 193

Seite

3. Photometrische Bestimmung der Schwärzung in einem Autoradiogramm 194
4. Beobachtung und Auswählen der entwickelten Körner einzelner Bahnspuren 194

IX. Strahlenwirkung, Strahlenschutz, Laboreinrichtungen 194

A. Strahlenwirkung 194
1. Allgemeines 194
2. Strahlungseinheiten 195
3. Toleranzdosis 205

B. Strahlenschutz 206

C. Vorsichtsmaßnahmen. Laboreinrichtungen 208

X. Anwendungsbeispiele für radioaktive Methoden 212

A. Beispiele mit radioaktiver Markierung 212
1. Einfaches Tracerbeispiel 212
2. Radioaktive Überwachung einer Ofenausmauerung 214
3. Synthese und Resorbierbarkeit einer mit C^{14} markierten organisch-chemischen Verbindung, radioaktiv kontrolliert 215
4. Studium des Oxydationsmechanismus von Propen durch alkalisches Permanganat 217
5. Bildung im Osotriazol aus Osazonen 218
6. Kontrolle der chemischen Trennung zweier Substanzen 218

B. Quantitative Analyse mit Hilfe von radioaktiven Isotopen 219
1. Verdünnungsanalyse 219
2. Inverse Verdünnungsanalyse 219
3. Radiometrische Korrektion 220

C. Aktivierungsanalyse 220
1. Methode 220
2. Empfindlichkeit und Vorteile der Methode 221
3. Beispiele 223
a) Bestimmung von Verunreinigungen durch Aufnahme der Zerfallskurve der induzierten Aktivität 223
b) Analyse eines Kalium-Natriumgemisches mit Hilfe von Absorptionsmessungen 223

D. Verknüpfung der Aktivierungsanalyse mit papierchromatischer und elektrophoretischer Trennung chemischer Verbindungen 225
Die verschiedenen Methoden der Papierchromatographie in Verbindung mit markierten Substanzen 225

E. Einige technische Anwendungsbeispiele 227
1. Dichtebestimmung mit Hilfe von radioaktiven Isotopen 227
2. Behälterstandsmessungen 228
3. Dickenmessung 229
4. Gamma-Radiographie 230
a) Methode 231
b) Strahlungsquellen 231
c) Abbildungsschärfe von Materialfehlern 235
d) Belichtungsdauer 236
e) Strahlenschutz 239
f) Aufnahmetechnik 240
g) Grenzen der γ-Radiographie 242

Sachverzeichnis 244

I. Grundbegriffe des Atomaufbaues und der Radioaktivität sowie Möglichkeiten zur Herstellung künstlich radioaktiver Isotope

A. Atomaufbau und Isotopie

1. Protonen und Neutronen als Bausteine von Atomkernen

Im Jahre 1913 machten GEIGER und MARSDEN[1] eingehende Versuche über die Streuung von α-Teilchen an Atomen. Die Versuchsanordnung war einfach. *A*-Strahlen durchsetzen einen schmalen Spalt, hinter dem sich in etwa 50 cm Entfernung ein Zinksulfidschirm befindet. Beim Auftreffen eines α-Teilchens leuchtet dieser auf. Verläuft der Vorgang im Vakuum, so beobachtet man auf dem Zinksulfidschirm ein scharf begrenztes Spaltbild, weil die Bahn des α-Teilchens ungestört und deshalb geradlinig ist. Das ändert sich bei Zwischenschalten von Materie z. B. in Form einer dünnen Goldfolie. Es treten nunmehr Streuungen des α-Teilchens an den Atomen des Folienmaterials auf, die beobachtbaren Ablenkungen der α-Teilchen von ihrer geradlinigen Bahn sind verhältnismäßig klein und verschieden groß (*Gausssche Winkelverteilung*). Es gibt dabei einen wahrscheinlichsten, mittleren Ablenkwinkel *(Streuwinkel)*, der bei einer Dicke der Goldfolie von $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ cm etwa 2° beträgt.

Gelegentlich, unter 10000 Fällen etwa einmal, findet man aber auch sehr große Streuwinkel (90° und mehr), welche von einem einzigen elastischen Zusammenstoß mit einer auf engstem Raum konzentrierten Masse herrühren müssen. RUTHERFORD schloß aus diesem Befund, daß die Masse des Atoms auf ein äußerst kleines Volumen konzentriert und ebenso wie das α-Teilchen positiv geladen ist. Nach dieser Auffassung besteht ein Atom aus einem positiv geladenen *Atomkern*, der nahezu die gesamte Masse des Atoms trägt, und negativ geladenen Elektronen *(Hüllenelektronen)*, welche das Atom nach außen hin elektrisch neutral erscheinen lassen und den Atomkern umgeben, ähnlich wie die Planeten die Sonne.

Der Radius des Atomkernes ist von der Größenordnung 10^{-13} cm und beträgt für ein Atom mit dem Atomgewicht A

$$r = 1{,}45 \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-13} \text{ cm}.$$

Für das Element Argon mit $A = 40$ z. B. ist $r = 4{,}8 \cdot 10^{-13}$ cm. Zum Vergleich sei der Atomradius von Argon angegeben; er beträgt $R = 1{,}3 \cdot 10^{-8}$ cm $= 3 \cdot 10^{4}\, r$.

Auf die Tatsache, daß die Zahl Z der Hüllenelektronen identisch mit der positiven Kernladungszahl ist, hat als erster BROEK[2] hingewiesen. Die experimentelle

[1] GEIGER, H., u. E. MARSDEN: Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A 82, 495 (1909). — Phil. Mag. 25, 604 (1913). — GEIGER, H.: Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A 83, 492 (1910).
[2] BROEK, A. VAN DEN: Physik. Z. 14, 32 (1913).

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook

Bestätigung hierzu gelang MOSELEY[1]. Es bedurfte der Entdeckung des Neutrons durch CHADWICK[2] im Jahre 1932, nach systematischen Vorversuchen von BOTHE und BECKER[3] und JOLIOT-CURIE[4], ehe HEISENBERG[5] die beiden Elementarteilchen *Protonen* (p) und *Neutronen* (n) als die einzigen Bausteine (Nukleonen) aller Atomkerne postulieren konnte.

Protonen sind identisch mit den Atomkernen des leichten Wasserstoffs. Sie sind einfach positiv geladen, ihre Masse beträgt, bezogen auf die Masse des Sauerstoffs = 16000, 1,00758 entsprechend $1{,}67248 \cdot 10^{-24}$ g. Die Masse des neutralen Wasserstoffatoms (Proton plus Hüllenelektron) ist 1,00813 entsprechend $1{,}67339 \cdot 10^{-24}$ g. Neutronen sind etwa ebenso schwer wie Protonen ($m_n = 1{,}00896$ entsprechend $1{,}67477 \cdot 10^{-24}$ g, s. Tabelle 1), sie sind aber, wie schon der Name sagt, elektrisch neutral.

Zum Verständnis des Aufbaues von Atomkernen aus positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen müssen wir gewisse Kernkräfte zwischen Protonen und Neutronen annehmen, welche nicht elektrischer Natur sind, über deren Eigenschaften wir aber bis heute noch keine vollkommene Vorstellung besitzen. Bis zu Entfernungen von etwa 10^{-12} cm vom Kernmittelpunkt sind allein die abstoßenden COULOMB-*Kräfte* zwischen den Protonen wirksam, in größerer Kernnähe überwiegen die erwähnten Kernkräfte, welche die Nukleonen eines Atomkernes zusammenhalten *(Kohäsionskräfte)*.

2. Kernladung und Atommasse

Die Zahl der Protonen bestimmt die *Kernladung* und ist identisch mit der Ordnungszahl Z des betreffenden chemischen Elementes. Die positive Kernladung beträgt also $Z \cdot e$, wobei e gleich dem elektrischen Elementarquantum ist ($e = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten). Das Gewicht der Atomkerne ist von der Zahl der Protonen und der Zahl der Neutronen abhängig. Die Summe beider Zahlen (Gesamtzahl der Nukleonen) nennt man *Massenzahl*. Definitionsgemäß ist diese eine ganze Zahl.

3. Symbolische Schreibweise für Atomkerne

Zur Kennzeichnung der verschiedenen Atomkerne ordnet man jedem Symbol A eines chemischen Elementes 2 Indices zu. Die übliche Schreibweise von beispielsweise

$$_4\mathrm{Be}^9$$

sagt aus, daß wir es mit einem Berylliumkern zu tun haben, der 4 Protonen (Index links unten = Zahl der Protonen) und 5 Neutronen in sich vereint, also die Massenzahl 9 (Index rechts oben) besitzt.

Die symbolische Schreibweise wird in der Fachliteratur nicht einheitlich gehandhabt. Häufig erscheint die Massenzahl links, statt rechts oben vom

[1] MOSELEY, H. G. J.: Phil. Mag. **26**, 1024 (1913); **27**, 703 (1914).
[2] CHADWICK, J.: Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A **136**, 692 (1932). — Nature **129**, 312 (1932).
[3] BOTHE, W., u. H. BECKER: Z. Physik **66**, 289 (1930).
[4] CURIE, J., u. F. JOLIOT: C. r. Acad. Sci. Paris **194**, 273, 708, 876 (1932).
[5] HEISENBERG, W.: Z. Physik **77**, 1 (1932).

Tabelle 1. *Zusammenstellung von Ruhmasse, Atom- und Isotopengewicht für wichtige Elementarteilchen* (nach H. WATZLAWEK[1])

Elementarteilchen	Symbol	Ruhmasse	Atomgewicht	Isotopengewicht	Elektrische Ladung
		$1\,\mathrm{ME} = \frac{m_{\text{Sauerstoff}}}{16} = 1{,}661 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g}$			
Elektron β-Teilchen J. W. HITTORF 1869 J. PERRIN 1895 PH. LENARD 1899	β, e^-	$m_e = (9{,}108 \pm 0{,}010) \cdot 10^{-28}$	$A_e = 0{,}000549$	—	$e = (4{,}802 \pm 0{,}004) \cdot 10^{-10}$ Elektrost. Einheiten
Positron P. A. M. DIRAC 1928 C. D. ANDERSON 1932	e^+	m_e	A_e	—	$+e$
Proton H^+-Teilchen E. MARSDEN 1914	${}_1p^1$, ${}_1H^1$	$m_p = (1{,}672 \pm 0{,}010) \cdot 10^{-24}$ $m_H = (1{,}673 \pm 0{,}010) \cdot 10^{-24}$	$A_p = 1{,}00758 \pm 0{,}00002$ $A_H = 1{,}008131 \pm 0{,}00002$	$1{,}008131 \pm 0{,}0032$	$+e$
Neutron J. CHADWIK 1932	${}_0n^1$	$m_n = (1{,}675 \pm 0{,}010) \cdot 10^{-24}$	$A_n = 1{,}00896 \pm 0{,}00006$	$1{,}008945 \pm 0{,}025$	0
Deuteron F. G. BRICKWEDDE G. M. MURPHY H. UREY 1932	${}_1d^2$, ${}_1H^2$ ${}_1D^2$	$m_d = (3{,}345 \pm 0{,}020) \cdot 10^{-24}$ $mD = (3{,}346 \pm 0{,}020) \cdot 10^{-24}$ Deuterium	$A_d = 2{,}01418 \pm 0{,}00002$ $AD = 2{,}01473 \pm 0{,}00002$ Deuteron	$2{,}014725 \pm 0{,}0064$	$+e$
α-Teilchen He-Kern H. BECQUEREL 1896	${}_2\alpha^4$, ${}_2He^4$	$m_\alpha = (6{,}647 \pm 0{,}040) \cdot 10^{-24}$ $m_{He} = (6{,}649 \pm 0{,}040) \cdot 10^{-24}$	$A_\alpha = 4{,}00279 \pm 0{,}00007$ $A_{He} = 4{,}00389 \pm 0{,}00007$	$4{,}0003860 \pm 0{,}031$	$+2e$
Photon Licht- bzw. γ-Quant. M. PLANCK 1900 A. EINSTEIN 1905	γ	Masse $m = \frac{h\nu}{c^2} = 7{,}36 \cdot 10^{-48} \cdot \gamma$ $h = (6{,}62 \pm 0{,}01) \cdot 10^{-27}$ ergsec $c = (2{,}99774 \pm 0{,}00001) \cdot 10^{10}$ cm/sec	$A_\nu = \frac{16\,m_\nu}{m_0} = \frac{16\,h\nu}{m_0 c^2}$ $= 4{,}42 \cdot 10^{-24} \cdot \nu$ ν in Hertz (sec^{-1})	—	0

[1] WATZLAWEK, H.: Lehrbuch der technischen Kernphysik. Wien 1948.

chemischen Symbol, im obigen Beispiel also

$$^{9}_{4}\mathrm{Be}.$$

Allgemein gilt für einen Atomkern mit p Protonen und n Neutronen die Schreibweise

$$_{p}A^{n+p},$$

wobei A das Symbol des betreffenden chemischen Elementes bedeutet.

4. Begriff der Isotopie, stabile Isotope

Neben dem Wasserstoffatom, dessen Kern allein aus einem Proton besteht, gibt es in der Natur eine zweite Wasserstoffatomart *(Deuterium)*, welche etwa doppelt so schwer ist. Der Kern dieses *schweren Wasserstoffs*, *Deuteron* genannt, enthält neben dem Proton noch ein Neutron. Solche Atomarten des gleichen chemischen Elementes (gleiche Ordnungszahl, also gleiche Zahl von Protonen im Kern) mit verschiedener Atommasse (Atomgewicht) nennt man *Isotope*. Da sich die Eigenschaften dieser in der Natur vorkommenden Isotope ohne äußeren Einfluß auch über längere Zeit nicht ändern, nennt man sie *stabile Isotope*.

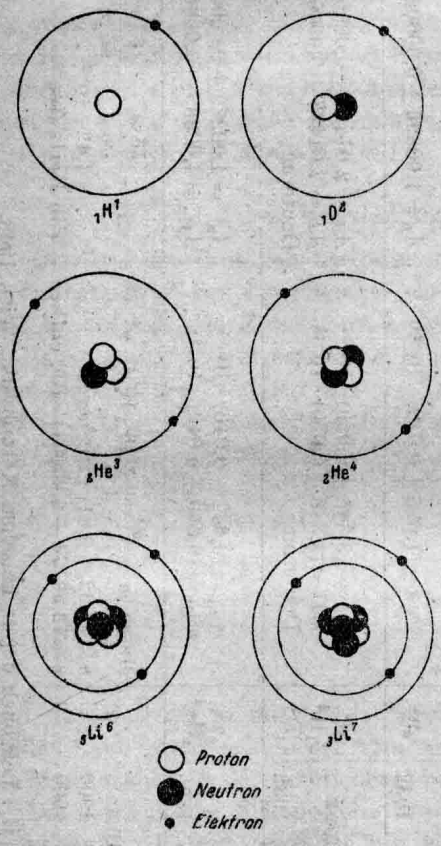

Abb. 1. Schematische Darstellung des Aufbaues einiger Atomkerne aus Neutronen und Protonen[1]

In Abb. 1 sind die stabilen Isotope der ersten drei chemischen Elemente des periodischen Systems (s. Abb. 2 und Tabelle 2) schematisch dargestellt. Das leichte und das schwere Wasserstoff-Isotop haben wir schon erwähnt. Das Element Helium, an zweiter Stelle im periodischen System rangierend, besitzt ebenfalls zwei stabile Isotope. Die Atomkerne beider Heliumarten enthalten, weil sie dem gleichen chemischen Element angehören, 2 Protonen, dagegen ist die Zahl der Neutronen für beide Isotope verschieden, nämlich 1 bzw. 2 und damit auch die Massenzahl, nämlich 3 bzw. 4. Entsprechend der Ordnungszahl $Z = 2$ besitzt ein Heliumatom außerdem 2 Hüllenelektronen. Auch diese sind in Abb. 1 (als kleine Punkte) eingezeichnet. Bei den beiden Lithium-Isotopen $_3Li^6$ und $_3Li^7$ sind im Kern 3 Protonen mit 3 bzw. 4 Neutronen vereint, die Massenzahl beträgt 6 bzw. 7.

[1] Schmeiser, K.: In: Künstliche radioaktive Isotope. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1953.

	0. Gruppe	1. Gruppe Neben-	1. Gruppe Haupt-	2. Gruppe Neben-	2. Gruppe Haupt-	3. Gruppe Neben-	3. Gruppe Haupt-	4. Gruppe Neben-	4. Gruppe Haupt-	5. Gruppe Neben-	5. Gruppe Haupt-	6. Gruppe Neben-	6. Gruppe Haupt-	7. Gruppe Neben-	7. Gruppe Haupt-	8. Gruppe	0. Gruppe
			1 H *1,0080*		—		—		—		—		—		—		2 He *4,003*
1	2 He *4,003*		3 Li *6,940*		4 Be *9,013*		5 B *10,82*		6 C *12,010*		7 N *14,008*		8 O *16,000*		9 F *19,00*		10 Ne *20,183*
2	10 Ne *20,183*		11 Na *22,997*		12 Mg *24,32*		13 Al *26,98*		14 Si *28,09*		15 P *30,975*		16 S *32,066*		17 Cl *35,457*		18 Ar *39,944*
3	18 Ar *39,944*	29 Cu *63,54*	19 K *39,100*	30 Zn *65,38*	20 Ca *40,08*	21 Sc *44,96*	31 Ga *69,72*	22 Ti *47,90*	32 Ge *72,60*	23 V *50,95*	33 As *74,91*	24 Cr *52,01*	34 Se *78,96*	25 Mn *54,93*	35 Br *79,916*	26 Fe 27 Co 28 Ni *55,85 58,94 58,69*	36 Kr *83,80*
4	36 Kr *83,80*	47 Ag *107,880*	37 Rb *85,48*	48 Cd *112,41*	38 Sr *87,63*	39 Y *88,92*	49 In *114,76*	40 Zr *91,22*	50 Sn *118,70*	41 Nb *92,91*	51 Sb *121,76*	42 Mo *95,95*	52 Te *127,61*	43 Tc *[99]*	53 J *126,91*	44 Ru 45 Rh 46 Pd *101,7 102,91 106,7*	54 X *131,3*
5	54 X *131,3*	79 Au *197,2*	55 Cs *132,91*	80 Hg *200,61*	56 Ba *137,36*	57 La *138,92*	81 Tl *204,39*	72 Hf *178,6*	82 Pb *207,21*	73 Ta *180,88*	83 Bi *209,00*	74 W *183,92*	84 Po *216*	75 Re *186,31*	85 At *[210]*	76 Os 77 Ir 78 Pt *190,2 193,1 195,23*	86 Rn *222*
6	86 Rn *222*		87 Fr *[223]*		88 Ra *226,05*	89 Ac *227*	58-71 Seltene Erden*	90 Th *232,12*		91 Pa *231*		92 U *238,07*					

* Seltene Erden: 58 Ce *140,13* | 59 Pr *140,92* | 60 Nd *144,27* | 61 Pm *[145]* | 62 Sm *150,43* | 63 Eu *152,0* | 64 Gd *156,9* | 65 Tb *159,2* | 66 Dy *162,46* | 67 Ho *164,94* | 68 Er *167,2* | 69 Tm *169,4* | 70 Yb *173,04* | 71 Lu *174,99*

Transurane: 93 Np *[237]* | 94 Pu *[242]* | 95 Am *[243]* | 96 Cm *[243]* | 97 Bk *[245]* | 98 Cf *[246]*

Abb. 2. Periodisches System der Elemente. Die oberen ganzen Zahlen bedeuten die Ordnungsnummern der Elemente, die darunterstehenden geben die Atomgewichte an. Eckige Klammern bedeuten, daß das Atomgewicht dieses künstlich gewonnenen Elementes nur für das Produkt des derzeit wichtigsten Darstellungsprozesses gilt (nach SCHWARZENBACH[1])

[1] SCHWARZENBACH, G.: Allgemeine und anorganische Chemie. Stuttgart: Georg Thieme 1942.

Die Isotopie ist schon recht lange bekannt. Während SODDY[1] bereits im Jahre 1910 auf das Vorhandensein verschiedener Atomarten ein und desselben che-

Tabelle 2. *Atomgewichte der chemischen Elemente*

	Symbol	Ordnungszahl	Atomgewicht		Symbol	Ordnungszahl	Atomgewicht
Actinium	Ac	89	227,0	Neon	Ne	10	20,183
Aluminium	Al	13	26,97	Neptunium	Np	93	238
Americium	Am	95	—	Neutron	Nn	0	1,0
Antimon	Sb	51	121,76	Nickel	Ni	28	58,69
Argon	Ar	18	39,944	Niob	Nb	41	92,91
Arsen	As	33	74,91	Osmium	Os	76	190,2
Astatin	At	85	—	Palladium	Pd	46	106,7
Barium	Ba	56	137,36	Phosphor	P	15	30,98
Beryllium	Be	4	9,02	Platin	Pt	78	195,23
Blei	Pb	82	207,21	Plutonium	Pu	94	238
Bor	B	5	10,82	Praseodym	Pr	59	140,92
Brom	Br	35	79,916	Protaktinium	Pa	91	231
Cadmium	Cd	48	112,41	Quecksilber	Hg	80	200,61
Caesium	Cs	55	132,91	Radium	Ra	88	226,05
Calcium	Ca	20	40,08	Radon	Rn	86	222
Cassiopeium	Cp	71	174,99	Rhenium	Re	75	186,31
Cer	Ce	58	140,13	Rhodium	Rh	45	102,91
Chlor	Cl	17	35,457	Rubidium	Rb	37	85,48
Chrom	Cr	24	52,01	Ruthenium	Ru	44	101,7
Curium	Cm	96	—	Samarium	Sm	62	150,43
Dysprosium	Dy	66	162,46	Sauerstoff	O	8	16,0000
Eisen	Fe	26	55,85	Scandium	Sc	27	45,10
Erbium	Er	68	167,2	Schwefel	S	16	32,06
Europium	Eu	63	152,0	Selen	Se	34	78,96
Fluor	F	9	19,00	Silber	Ag	47	107,880
Gadolinium	Gd	64	156,9	Silicium	Si	14	28,06
Gallium	Ga	31	69,72	Stickstoff	N	7	14,008
Germanium	Ge	32	72,60	Strontium	Sr	38	87,63
Gold	Au	79	197,2	Tantal	Ta	73	180,88
Hafnium	Hf	72	178,6	Technetium	Tc	43	—
Helium	He	2	4,003	Tellur	Te	52	127,61
Holmium	Ho	67	163,5	Terbium	Tb	65	159,2
Indium	In	49	114,76	Thallium	Tl	81	204,39
Iridium	Ir	77	193,1	Thorium	Th	90	232,12
Jod	J	53	126,92	Thulium	Tm	69	169,4
Kalium	K	19	39,096	Titan	Ti	22	47,90
Kobalt	Co	27	58,94	Uran	U	92	238,07
Kohlenstoff	C	6	12,010	Vanadium	V	23	50,95
Krypton	Kr	36	83,7	Wasserstoff	H	1	1,0080
Kupfer	Cu	29	63,57	Wismut	Bi	83	209,00
Lanthan	La	57	138,92	Wolfram	W	74	183,92
Lithium	Li	3	6,940	Xenon	X	54	131,3
Magnesium	Mg	12	24,32	Ytterbium	Yb	70	173,04
Mangan	Mn	25	54,93	Yttrium	Y	39	88,92
Molybdän	Mo	42	95,92	Zink	Zn	30	65,38
Natrium	Na	11	22,997	Zinn	Sn	50	118,70
Neodym	Nd	60	144,27	Zirkonium	Zr	40	91,22

[1] SODDY, F.: Trans. Chem. Soc. 99, 72 (1911).

mischen Elementes aufmerksam gemacht hatte, konnte THOMSON[1] mit einem *Massen-Elektroskop* nachweisen, daß das Element Neon 2 Isotope mit der Masse 20 bzw. 22 besitzt.

5. Isotopenhäufigkeit

Einige Jahre später hat ASTON[2] eine große Reihe von chemischen Elementen auf ihre Isotopie untersucht. Zu diesem Zweck lenkte er Atomstrahlen verschiedener chemischer Elemente durch elektrische und magnetische Felder ab, so daß Atomarten verschiedener Massen voneinander getrennt nachgewiesen werden konnten (s. Abb. 3). ASTON konnte mit dieser Methode *(Massenspektroskopie)* sehr genaue Massenangaben für die einzelnen Isotope machen. Darüber hinaus gestatteten seine Meßergebnisse Aussagen über die relative Isotopenhäufigkeit, mit welcher die einzelnen Isotope eines chemischen Elementes in der Natur vorkommen.

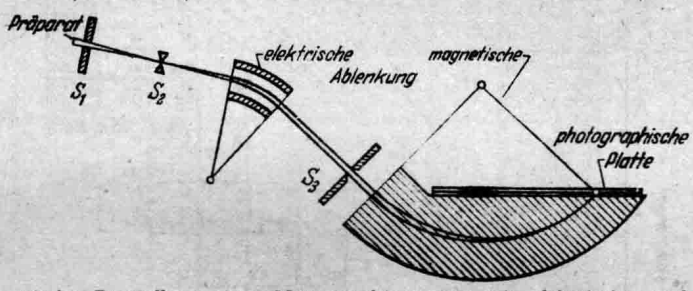

Abb. 3. Schematische Darstellung eines Massenspektrometers mit elektrischer und magnetischer Ablenkung (nach K. T. BAINBRIDGE und E. B. JORDAN[3])

Diese Häufigkeit wird im allgemeinen in Prozenten ausgedrückt, bezogen auf die Gesamtzahl der insgesamt in einer Mischung der verschiedenen Isotopenarten eines chemischen Elementes vorhandenen Atome (*atomare Häufigkeit*, *Atom-%*). Die atomare Häufigkeit des leichten Wasserstoffs im natürlichen Wasserstoff ist 99.8%; der schwere Wasserstoff kommt nur mit einer relativen Häufigkeit von etwa 0,02% in der Natur vor. Für die beiden bekannten Chlorisotope, Cl^{35} und Cl^{37}, kennen wir die relativen Häufigkeiten 75,4% und 24,6%.

Ohne äußere Einwirkung sind die relativen Häufigkeiten der einzelnen Isotopen eines chemischen Elementes überall auf der Erde gleich groß. Es gibt aber eine Reihe von physikalischen Methoden, das eine oder andere Isotop eines Elementes *anzureichern*. Wir können in diesem Zusammenhang nicht auf einzelne Methoden eingehen[4].

Abb. 4 zeigt den Anfang einer Isotopenkarte, in welcher den gestrichelten Feldern die stabilen Isotopen zugeordnet sind, und zwar nach der Zahl der Protonen (Abszisse) und der Zahl der Neutronen (Ordinate) geordnet *(p-n-Darstellung)*. Die relative Häufigkeit ist als Prozentzahl mit eingetragen, dazu links oben in der Ecke jeden Feldes die Massenzahl M (Protonen plus Neutronen).

[1] THOMSON, J. J.: Rays of positive electricity. New York: Longmans Green & Co. 1913.
[2] ASTON, F. W.: Phil. Mag. 38, 709 (1919).
[3] BAINBRIDGE, K. T., u. E. B. JORDAN: Phys. Rev. 50, 282 (1936).
[4] Über stabile Isotope und ihre Anwendung als Indikatoren kann man z. B. nachlesen bei: MAURER, W., u. K. SCHMEISER, Handbuch der Physiologisch- und Pathologisch-Chemischen Analyse, Hoppe-Seyler/Thierfelder, Bd. II/2, S. 687ff. Berlin: Springer 1955.

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com