

Neuere Ergebnisse kernphysikalischer Forschung

Autor(en): **Scherrer, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden
Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences
Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **121 (1941)**

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90430>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Neuere Ergebnisse kernphysikalischer Forschung

Von

Prof. Dr. P. SCHERRER

1. Kernbausteine und Kernkräfte

Die Physiker sind heute der Ansicht, dass das ganze materielle Naturgeschehen auf die durch Felder vermittelte Wechselwirkung weniger einfacher Elementarbausteine der Materie zurückgeführt werden könne. Diese *Elementarteilchen*, denen wir nach der Wellenmechanik zugleich Korpuskel- und Wellennatur zuschreiben müssen, teilen wir willkürlich in leichte und schwere Teilchen ein.

Zur Gruppe der *leichten Elementarteilchen* gehören vor allem die *Elektronen*. Sie kommen sowohl negativ geladen als Negatonen $-\epsilon$, als auch positiv geladen als Positonen $+\epsilon$ vor. Die Masse eines Elektrons beträgt in Atomgewichtseinheiten 0,000543. (Masse des Sauerstoffatoms willkürlich = 16,000 gesetzt.) Ein Elektron ist also zirka 2000mal leichter als ein Wasserstoffatom. Neben diesen leichten Elektronen existieren die sogenannten *Mesonen* oder schweren Elektronen. Sie tragen dieselben Ladungen wie die Elektronen, sind aber zirka 160mal schwerer als diese. Zu den leichten Teilchen wollen wir auch die Lichtquanten oder *Photonen* zählen: Das sind die Elementarteilchen, welche die Energieübertragung bei allen Arten elektromagnetischer Strahlung vermitteln, also bei γ -Strahlen, Röntgenlicht, ultraviolettem, sichtbarem und ultrarotem Licht. Als letztes bekanntes leichtes Teilchen ist noch das hypothetische *Neutrino* zu nennen, dessen Existenz nur indirekt aus Experimenten erschlossen wird und das bis jetzt nicht direkt sichtbar gemacht werden kann. Photonen und Neutrini sind ungeladen und haben die Ruhmasse null, d. h. sie existieren nur in

Bewegung, und ihre Masse ist einfach durch ihre kinetische Energie (resp. ihren Impuls) bedingt.

Daneben kennen wir zwei *schwere Elementarteilchen*, nämlich das *Proton* p und das *Neutron* n . Das Proton besitzt dieselbe positive Ladung wie das positive Elektron, das Neutron ist ungeladen. Die beiden Teilchen haben in Atomgewichtseinheiten ungefähr die Masse 1, d. h. sie sind ziemlich genau gleich schwer wie das Wasserstoffatom.

Alle diese Elementarteilchen besitzen einen Drall, dessen Betrag für die Teilchen, genau wie z. B. ihre Masse oder ihre Ladung, charakteristisch ist. Der Drall ist quantisiert und ist ein ganzes Vielfaches einer naturgegebenen Grundeinheit

$$\frac{h}{4\pi} = \frac{\text{Planckkonst.}}{4\pi}$$

Unter diesen Bausteinen der Materie darf man sich aber nicht unzerstörbare, unveränderliche Teilchen vorstellen, deren Zahl in der Natur konstant bleibt; es gibt mannigfache *Umwandlungsprozesse*, welche die Elementarteilchen ineinander überführen: Bei der « *Paarerzeugung* oder *Materialisation* des Lichts » verwandelt sich ein Proton (z. B. ein Lichtquant der γ -Strahlung, das dabei verschwindet) in ein Elektronenpaar $+\varepsilon$ und $-\varepsilon$. Bei diesen Umwandlungsprozessen gelten die Erhaltungssätze für elektrische Ladung und für Masse + Energie: d. h. es entsteht immer ein + und ein —Elektron zugleich, und die Energie des Lichtquants findet sich genau wieder in der Masse und der kinetischen Energie des gebildeten Elektronenpaares. (Wir haben hier einen schönen experimentellen Beweis für die Äquivalenz von Energie und Masse. Masse und Energie sind nur verschiedene Namen für dieselbe Naturgrösse: deswegen gibt es einen festen Umrechnungsfaktor zwischen den beiden Grössen:

$$\text{Masse} = \frac{\text{Energie}}{[\text{Lichtgeschwindigkeit}]^2} \cdot)$$

Der Umkehrprozess zur Paarerzeugung ist die « *Annihilation der Materie* » oder *Paarvernichtung*, bei welchem sich ein +- und ein —Elektron in, gewöhnlich zwei, Lichtquanten auflösen, wobei die Ladung der Elektronen spurlos verschwindet. Die Paarvernichtung ist der Grund dafür, dass positive Elektronen nur vorübergehend vorkommen: sie finden in der Materie stets negative

Elektronen und zerstrahlen. Ebenso kann das *Meson* sich spontan, nach Art eines radioaktiven Prozesses, in ein gewöhnliches Elektron und ein Neutrino umwandeln. Dieser Prozess wird in der Höhenstrahlung, wo das Meson frei vorkommt, häufig beobachtet.

Auch zwischen den beiden schweren Elementarteilchen, dem Proton und dem Neutron, gibt es Übergänge. Es sind dies die sogenannten β -Prozesse, bei welchen die β -Strahlen der radioaktiven Elemente entstehen: Das Neutron kann sich spontan in ein Proton umwandeln, wobei ein negatives Elektron und ein Neutrino ausgesandt werden. Da die Masse des Neutrons 1,00895 beträgt, ist sie hinreichend, um diejenige des entstehenden Protons und Elektrons (1,00759 resp. 0,00054) zu decken. Es bleibt noch ein Masseüberschuss, welcher als kinetische Energie dem Elektron und dem Neutrino zugute kommt. Auch das Proton kann sich, allerdings nur unter Energiezufuhr, in ein Neutron und ein positives Elektron umwandeln.

Das Atom ist, wie wir seit Rutherfords klassischen Untersuchungen sicher wissen, ein « *Kernatom* ». Es besteht aus einem kleinen, schweren und positiv geladenen *Kern*, welcher von der weit ausgedehnten, nur die leichten negativen Elektronen enthaltenden *Hülle* umgeben ist. Der Kern enthält nur schwere Elementarteilchen, Protonen und Neutronen, er enthält keine Elektronen. Aus der Tatsache, dass das Atomgewicht von Proton und Neutron fast genau 1 ist, erklärt sich die ziemlich genaue Ganzzahligkeit der Atomgewichte der einzelnen Atomsorten. Die Zahl Z der Protonen, welche die Ladung des Kerns bestimmt, ist gleich der Atomnummer des Elementes im periodischen System. Diese *positive Kernladung* ist deshalb absolut ausschlaggebend für das *chemische Verhalten* des Atoms, weil sie die Zahl und Anordnung der negativen Elektronen in der Atomhülle bestimmt und die chemischen Prozesse sich ja ausschliesslich in der Elektronenhülle abspielen. Die Zahl der Neutronen im Kern ist ungefähr gleich der der Protonen, bei schweren Elementen etwas grösser. Um die Zahl der Protonen und Neutronen in einem Kern direkt ablesen zu können, wird die Zahl der Protonen links unten neben das chemische Symbol des Elementes gesetzt und das rohe Atomgewicht (Zahl der Protonen + Zahl der Neutronen) rechts oben vermerkt. Z. B. bedeutet ${}_8\text{O}^{16}$ einen Sauerstoffkern, der acht Protonen und acht Neutronen enthält, dessen rohes Atomgewicht also 16 beträgt.

Die positiven Protonen des Kerns müssen sich nach dem Coulombschen Gesetz bei den kleinen Abständen von der Grössenordnung $3 \cdot 10^{-13}$ cm, die ihnen im Kern zur Verfügung stehen, äusserst stark abstossen. Diese Abstossung erreicht für ein mittleres Atomgewicht zirka 20 kg-Gewicht für ein Proton, das ist für ein so kleines Gebilde eine ungeheure Kraft. Infolge dieser Abstossung würde der Atomkern auseinanderfliegen, wenn nicht starke Anziehungskräfte zwischen den Kernbestandteilen wirksam wären. Tatsächlich wissen wir heute, dass zwischen den Kernbausteinen primär eine ungeheuer starke, aber äusserst kurzreichweitige Anziehungskraft vorhanden ist; diese Anziehungskraft hat mit der elektrischen Coulomb-Wechselwirkung nichts zu tun. Die Theorie dieser Kernkräfte wird heute ausserordentlich intensiv bearbeitet. Es ist äusserst wahrscheinlich, dass diese Kräfte den Charakter von Austauschkräften haben. Solche kurzreichweitige Austauschkräfte, die allein auf Grund der klassischen Partikelvorstellung überhaupt nicht verstanden werden können, ergeben sich bei einer konsequenten Anwendung der Quantenmechanik « von selbst ». Die Anziehung zwischen Proton und Neutron zum Beispiel kommt dadurch zustande, dass in sehr rascher Folge die Ladung des Protons auf das Neutron übergeht und das Proton dadurch zum Neutron wird und umgekehrt. In ähnlicher, jedoch komplizierterer Weise ziehen sich auch Proton-Proton und Neutron-Neutron an. Die elektrische Coulomb-Abstossung der Protonen ist dieser Anziehung einfach überlagert. Solche Platzwechselkräfte spielen auch bei der chemischen Bindung eine Rolle; die starke Anziehung der zwei Wasserstoffatome im Wasserstoffmolekül wird durch den raschen Platzwechsel der beiden Hüllenelektronen des Wasserstoffmoleküls quantitativ erklärt.

Beim Aufbau eines Atomkerns aus Proton und Neutron wird wegen dieser starken Anziehung zwischen den Kernbausteinen sehr viel Energie frei; dieselbe Energie würde man wieder aufwenden müssen, um einen Atomkern in seine Bestandteile zu zerreißen.

Für einfache Überlegungen stellt man sich den Atomkern am besten als ein geladenes, kleines *Flüssigkeitströpfchen* vor. Genau wie im gewöhnlichen Flüssigkeitstropfen die Moleküle infolge ihrer gegenseitigen Anziehung (Van der Waals-Kräfte) zusammenhalten, so halten auch Protonen und Neutronen infolge ihrer Anziehung

zusammen. Bei der Anlagerung eines Wassermoleküls an ein Wassertröpfchen gewinnt man Energie, es wird die Kondensationswärme frei. Umgekehrt muss man beim Verdampfen eines Moleküls vom Tröpfchen weg die Verdampfungswärme aufwenden. Diese Energie beträgt pro Wassermolekül 0,4 eV.¹ Analog gewinnt man bei der Anlagerung eines Neutrons oder Protons an einen Atomkern infolge der kurzreichweitigen Kernkraft einen grossen Energiebetrag als « Kondensationswärme ». Allerdings ist derselbe viel grösser als im Falle eines Wassermoleküls, nämlich zirka 8 Millionen eV. Die Anlagerungsenergie eines Kernbausteins wird oft in Form von γ -Strahlen vom Kern ausgesandt, oft aber erleidet der Kern nach Anlagerung eines Protons oder Neutrons andere, radioaktive Umwandlungen, bei denen die Anlagerungsenergie wieder frei wird.

Die beim Aufbau eines Kerns freiwerdenden Energien sind so gross, dass sie leicht wägbare Beträge erreichen und direkt als sogenannter « *Massendefekt* » in Erscheinung treten: Der Kern wiegt weniger als die ihn zusammensetzenden Bestandteile: Ein Teil der Masse ist eben bei der Bindung als Energie fortgegangen. So beträgt z. B. die Masse der vier Elementarteilchen, 2 Protonen und 2 Neutronen, aus denen der Heliumkern aufgebaut ist, 4,03308 Atomgewichtseinheiten, während der Heliumkern nur 4,00276 Atomgewichtseinheiten wiegt. Die Massendifferenz, zirka $30,3 \frac{\text{mg}}{\text{Mol He}}$, ist also bei der Bindung in Form von Energie ausgestrahlt worden. Dieser freigewordene Energiebetrag entspricht nach dem Äquivalenzprinzip von Energie und Masse ungefähr 28 Millionen eV/He-Kern oder 600,000,000 Kcal/ 4 g He. Berechnet man auf Grund des Tröpfchenmodelles die Bindungsenergien für verschiedene Atomkerne, indem man nur kurzreichweitige Anziehung und Coulomb-Abstossung berücksichtigt, so erhält man sehr gute Uebereinstimmung zwischen den berechneten und beobachteten Massendefekten.

Man kann sich nun durch Zusammenlagerung einer beliebigen Zahl von Protonen und Neutronen Kerne aufgebaut denken und

¹ In der Kernphysik rechnet man immer mit dem Elektronvolt, eV, als Energie-Einheit. 1 eV ist die Energie, welche ein Elektron beim Durchfallen einer Potentialdifferenz von 1 Volt erhält: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulb.Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \dots 10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$.

fragen, ob diese Kerne in der Natur vorkommen. Tatsächlich gibt es zwischen dem leichtesten Element, dem Wasserstoff, und dem schwersten, dem Uran, nur etwa *285 stabile Atomkernsorten*. Die meisten Kerne, welche wir ad hoc aufbauen, sind instabil: sie gehen von selbst in stabile Kerne tieferer Energie über. Es gilt auch hier dasselbe Gleichgewichtsprinzip wie in der Statik, nämlich der Satz, dass der Gleichgewichtszustand des Kerns der Zustand der tiefsten Energie ist.

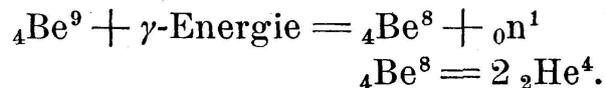
Denken wir uns einmal einen Kern aus sieben Neutronen aufgebaut, so hält diese Anordnung von Teilchen zunächst fest zusammen, weil die Neutronen sich ja äusserst stark anziehen. Es gibt aber einen energetisch tieferen Zustand, in welchen dieser Kern übergehen wird: einige der Neutronen müssen sich in Protonen verwandeln, wobei negative Elektronen abgespalten werden und Energie frei wird. Unser nur aus Neutronen bestehender Kern würde in einen stabilen Lithiumkern ${}_3\text{Li}^7$, bestehend aus drei Protonen und vier Neutronen, übergehen. Weil mit wachsender Kernladung infolge der grösser werdenden Coulomb-Energie sich die Kernenergie wieder erhöht, gehen nicht *alle* Neutronen in Protonen über, sondern nur deren drei. Auch ein Kern, den wir uns aus lauter Protonen aufgebaut denken, wäre nicht stabil. Er könnte, ebenfalls unter Energieabgabe, in den ${}_3\text{Li}^7$ -Kern übergehen, indem sich vier Protonen unter Emission von positiven Elektronen in Neutronen umwandeln. Der Übergang Proton—Neutron erfordert zwar etwas Energie, aber diese Energie könnte dem Coulombschen Energievorrat, der sich ja bei Abnahme der Ladung vermindert, entnommen werden. Auch wird die Packung des Kerns bei Abnahme der Coulomb-Abstossung unter Energieabgabe etwas dichter.

Ausser der durch die Kräfte bedingten potentiellen Energien besitzen die Kernbausteine auch grosse kinetische Energien. Ähnlich den Elektronen der Hülle, die sich ja auch in einer starken, durch die Gesetze der Quantenmechanik bestimmten Bewegung befinden, ist auch die kinetische Energie von Protonen und Neutronen im Kern sehr gross. Man versinnbildlicht sich diese Energien oft dadurch, dass man die sogenannte Entartungstemperatur der Bewegung angibt. In einem Wassertropfen von Zimmertemperatur wäre die Translationsenergie eines Moleküls $\simeq 10^{-14}$ erg, entsprechend einer Temperatur von 300° abs. In der Elektronen-

hülle beträgt die mittlere Energie eines Elektrons zirka 10^{-9} erg entsprechend einer « scheinbaren Temperatur » von 10^7 °. Im Kern beträgt die Translationsenergie eines Teilchens zirka 10^{-5} erg entsprechend einer scheinbaren Temperatur von 10^{11} ° abs. Diese enorme « Entartungstemperatur » erklärt die Tatsache, dass man den Kern mit den uns zur Verfügung stehenden Temperaturen überhaupt nicht beeinflussen kann.

2. Kernumwandlung

a) Im Prinzip kann man eine Kernumwandlung hervorbringen durch blosse *Energiezufuhr*. Genau so, wie bei einem Wassertropfen durch Erwärmung einige Wassermoleküle verdampfen, so können auch beim Kern durch Energiezufuhr Neutronen oder Protonen zur « Verdampfung » gebracht werden. Nur müssen die Energiebeträge beim Kern natürlich ganz bedeutend grösser sein. Zum Beispiel lässt sich durch Bestrahlung des Beryllium-Atomkerns mit γ -Strahlen des Radiums ein Neutron verdampfen, nach dem Schema :



Aus dem Berylliumkern mit dem Atomgewicht 9 entstehen der isotope Berylliumkern mit dem Atomgewicht 8 und ein Neutron. Beryllium 8 ist instabil und spaltet in zwei Heliumkerne auf. Dieser sogenannte « Kernphotoeffekt » ist bei sehr vielen Kernen beobachtet worden. Leider sind die natürlichen γ -Strahlen wenig energiereich (max. 2,62 MeV); man kann aber heute mit Hilfe von Atomumwandlungsprozessen sehr energiereiche γ -Strahlen von 17 MeV herstellen, welche für diese Prozesse viel geeigneter sind.

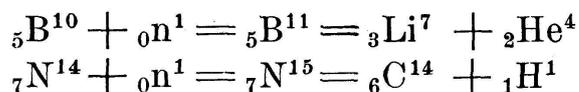
b) Eine andere Kernreaktion ist die einfache *Anlagerung eines Neutrons* an einen vorhandenen stabilen Atomkern. Z. B. kann man so aus leichtem Wasserstoff sogenannten « schweren Wasserstoff » oder Deuterium vom Atomgewicht 2 herstellen nach dem Schema :



Bei dieser Anlagerung wird die Energie in Form von Photonen (γ -Strahlen) frei.

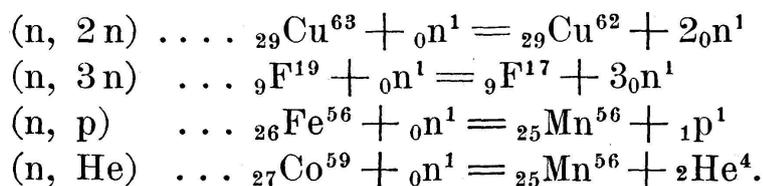
c) Neutronen-Einbau in einen bestehenden Kern führt häufig auch zu sogenannten *Austauschreaktionen* : Die Anlagerung des

langsamen Neutrons führt zu einem Zwischenkern, der nicht stabil ist, sondern sofort in zwei Teile zerfällt. Beispiele für solche Prozesse sind :



(Das Neutron wird im ersten Fall gegen einen He-Kern, im zweiten Fall gegen ein Proton ausgetauscht.) Die Zwischenkerne sind nicht die gewöhnlichen Bor¹¹- und Stickstoff¹⁵-Kerne, welche auch stabil vorkommen, sondern « angeregte Kerne », welche beim Neutron-Einbau einen Energieüberschuss bekommen haben. Ein solcher angeregter Kern ist vergleichbar einem überhitzten Wassertropfen. Genau wie ein solches plötzlich teilweise verdampft, stösst der angeregte Kern ein Teilchen ab. Er kann auch unter Aussendung von γ -Quanten in den Grundzustand übergehen, doch ist dies seltener.

d) Durch Beschiessung mit sehr *schnellen* energiereichen *Neutronen* kann man natürlich jeden Kern auf mannigfache Weise zum Zerfall bringen. Die Energie des hineingeschossenen Neutrons « erhitzt » den Kern so stark, dass er zum Teil « verdampft ». So gibt es (n, 2 n)- oder (n, 3 n)-Reaktionen, bei welchen ein Neutron hineingeschossen und dadurch zwei oder drei Neutronen zur Verdampfung gebracht werden. Ebenso sind sehr viele (n, p)-, (n, d)- und (n, He)-Reaktionen bekannt, das sind Prozesse, wo ein Neutron in den Kern hineingeschossen wird und dieses gegen ein Proton p, gegen ein Deuteron d oder gegen ein He-Teilchen He ausgetauscht wird. Je nach dem Kern sind natürlich die Energieverhältnisse ganz verschieden. Beispiele :



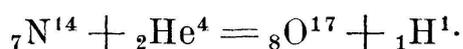
Diese Kernumwandlungen mit schnellen und langsamen Neutronen sind wohl im Prinzip die einfachsten. Das Neutron, welches sich einem Kern nähert, erfährt keine Kraft, bis es in unmittelbare Nähe des Atomkerns gelangt. Dann erst wird es von der oben besprochenen Kernkraft erfasst und in den Kern hineingerissen. Nun stehen dem Physiker aber für Kernumwandlungen nicht ohne weiteres Neutronen zur Verfügung, denn diese kommen

nicht frei in der Natur vor: Freie Neutronen haben ja in der Materie nur eine kurze Lebensdauer, weil sie von Atomkernen gierig verschluckt werden.

e) Der Physiker muss für seine Atomumwandlungsprozesse von natürlich vorkommenden stabilen Atomkernen ausgehen. Er muss sie zur Berührung bringen, damit sie miteinander reagieren und Bestandteile austauschen können.

Wegen der positiven Ladungen der Atomkerne stossen sich diese gegenseitig stark ab, und zur Überwindung der Abstossung müssen die Kerne grosse kinetische Energien zur Verfügung haben: Wir kennen leider bis heute kein anderes Mittel, die Kerne zur Berührung zu bringen, als die primitive *Beschiessung ruhender Atomkerne* mit äusserst rasch bewegten anderen Atomkernen. Die Benützung dieser rasanten Geschosse zur künstlichen Atomumwandlung hat zur Vorstellung von der « *Atom-Zertrümmerung* » geführt, obwohl natürlich solche Kernreaktionen auch eintreten würden, wenn man zwei Kerne mit grosser Kraft, aber ohne jede Geschwindigkeit zur Berührung bringen würde. Man spricht also besser von Kernreaktionen als von Atomzertrümmerungen.

Die erste Atomumwandlung dieser Art wurde von Rutherford durchgeführt: er benützte die schnellen ${}_2\text{He}^4$ -Kerne, welche vom RaC' als α -Strahlen ausgesandt werden und die eine Energie von 7,83 MeV¹ besitzen, zur Beschiessung von Stickstoff, und er konnte folgende Kernreaktionen beobachten:



Mit α -Strahlen gelingt es, bei sehr vielen leichten Elementen Kernreaktionen hervorzubringen. Bei der Untersuchung dieser Prozesse hat die Wilsonsche Nebelkammer unschätzbare Dienste geleistet, weil sie gestattet, die Bahnen der an den Reaktionen beteiligten Kerne direkt sichtbar zu machen und die Energien und Impulse der Teilchen zu messen.

Will man die für Kernreaktionen nötigen schnell fliegenden Atomkerne *künstlich* herstellen, so muss man Apparaturen haben, in welchen Atomkerne mittels sehr hoher Spannungen beschleunigt werden. Es sind in den letzten Jahren eine grosse Reihe von

¹Ein solcher He-Kern hat zirka $\frac{1}{15}$ der Lichtgeschwindigkeit, d. h. 20,000 km/Sek. = 72,000,000 km/h.

Anlagen gebaut worden, in denen mit Hilfe von *Transformatoren und Gleichrichtern* oder nach dem *elektrostatischen* Prinzip mit schnell laufenden Bändern hohe Gleichspannungen von mehreren Millionen Volt erzeugt werden können. In Kanalstrahlröhren werden dann Teilchenstrahlen, bei welchen die Einzelteilchen Energien von mehreren Millionen eV erhalten, hergestellt. Vorläufig liegt die Grenze solcher Anlagen bei etwa 4 Millionen Volt.

Eleganter und wirkungsvoller ist als Höchstgeschwindigkeitsgenerator das *Cyclotron*, bei dem eine relativ niedrige, aber hochfrequente Wechselspannung mehrmals hintereinander denselben Atomkern beschleunigt. Das immer schneller fliegende Teilchen muss dabei stets wieder im richtigen Synchronismus in das beschleunigende elektrische Wechselfeld zurückgelenkt werden. Diese Umlenkung geschieht durch ein starkes Magnetfeld.

Die Eidgenössische Technische Hochschule besitzt ein Cyclotron, mit welchem Deutonen auf 14 MeV und α -Teilchen auf 24 MeV beschleunigt werden können. Der von M. F. O.¹ gebaute Magnet wiegt 40 Tonnen. Er hat einen Poldurchmesser von 90 cm und gibt bei einer Poldistanz von 15 cm eine Feldstärke von 18,000 Amp./cm. Die Erregerleistung des Magneten beträgt 200 kW.

Die *Hochfrequenzanlage* des Cyclotrons wurde von B. B. C.² gebaut. Es handelt sich um einen Kurzwellengenerator mit einer Leistung von 40 kW bei 20 m Wellenlänge: In einer Steuerstufe werden elektrische Schwingungen erzeugt, deren Frequenz durch passende Massregeln besonders konstant gehalten wird. In zwei weiteren Stufen wird diese Erregerschwingung unter zweimaliger Frequenzverdopplung verstärkt und dabei die nötige Steuerleistung von zirka 1 kW für die Endstufe erreicht.

Die Endstufe enthält zwei demontierbare, nicht abgeschmolzene B. B. C.-Hochleistungsröhren. Es handelt sich dabei um wassergekühlte, durch Holweck-Pumpen evakuierte Trioden. Sie arbeiten in Gegentaktschaltung Klasse C.

Die Cyclotronkammer wurde im Physikalischen Institut der E. T. H. entworfen. Sie weist gegenüber bekannten Konstruktionen wesentliche Änderungen auf. Der Hochfrequenzteil in der Kammer, mit den Beschleunigungselektroden, ist als verkürztes Lecher-

¹ Maschinenfabrik Oerlikon, Oerlikon.

² Brown Boveri, Baden.

System von der effektiven Länge $\frac{\lambda}{2}$ ausgebildet. Diese Anordnung bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich: 1. eine symmetrische Spannungsverteilung längs des Beschleunigungsspalt, 2. die Möglichkeit einer stabilen Befestigung der Elektroden unter Wegfall von Isolatoren (die beiden Enden des Systems befinden sich auf Erdpotential), 3. Möglichkeit einer genauen Anpassung des Systems an die Energiezuleitung, 4. die Hochfrequenz wird an einer Stelle eingeführt, wo die Spannung am Lecher-System zirka 25mal niedriger ist, als an den Ablenkelektroden; das Lecher-System wirkt also als Transformator für die Ablenkspannung. Die Ionen werden in einer kleinen Gaskammer durch einen Nieder-voltbogen erzeugt. Die ganze Beschleunigungskammer wird durch eine im Institut gebaute, selbsttätig fraktionierende Ölpumpe von 1000 Liter/Sek. Saugleistung evakuiert.

Das grösste bisher gebaute Cyclotron (in Berkeley, Kalifornien) hat einen Magneten von 400 Tonnen Gewicht und 2,5 m Poldurchmesser. Mit dieser Apparatur wurden schnelle Deutonen von 16 MeV und He-Kerne von 32 MeV Energie erhalten. Das Cyclotron dient namentlich auch als stärkste Neutronenquelle und zur Herstellung künstlich radioaktiver Substanzen. Meist wird die Kernreaktion ${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{D}^2 = {}_2\text{He} + {}_0\text{n}^1$ zur Neutronenherstellung benützt, die eine sehr hohe Ausbeute an Neutronen liefert. Für ein noch grösseres Cyclotron, das hauptsächlich biologischen und medizinischen Zwecken dienen soll und dessen Magnet 4000 Tonnen wiegt, liegt ein Projekt vor; es soll in Berkeley in zirka 3—4 Jahren fertiggestellt werden.

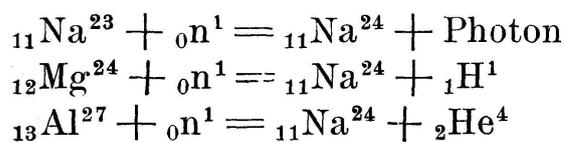
Bis heute wurden mit diesen Apparaturen die mannigfaltigsten Kernreaktionen durchgeführt, Energietönungen gemessen und eine sehr grosse Reihe von neuen, bisher unbekanntem Atomarten hergestellt.

3. Künstlich radioaktive Stoffe

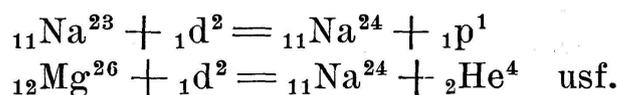
Unter diesen künstlich hergestellten Atomen sind hauptsächlich interessant die *künstlich radioaktiven Atomarten*, von denen heute über 300 bekannt sind: Sehr viele der bei Kernreaktionen entstehenden Atome sind nicht im stabilen Gleichgewicht; sie gehen, meist durch die oben erwähnte Umwandlung von Proton-Neutron oder Neutron-Proton, in stabilere Elemente über. Da-

bei werden positive oder negative Elektronen emittiert, oft auch γ -Strahlen. Sehr interessant ist für den Physiker, dass auch die Herstellung der natürlichen radioaktiven Elemente Radium E (β -Strahler) und Polonium (α -Strahler), ausgehend vom nicht radioaktiven Wismut, gelingt.

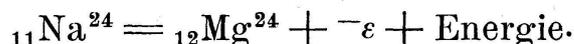
Als Beispiel eines künstlich hergestellten radioaktiven Elementes sei das radioaktive Natrium erwähnt, welches das Atomgewicht 24 hat, während das bekannte stabile Natrium das Atomgewicht 23 besitzt. Man kann dieses Na^{24} durch viele Umwandlungsprozesse herstellen, z. B. mittels Neutronen durch Anlagerung oder Austausch :



oder mittels Deutonen



Das radioaktive ${}_{11}\text{Na}^{24}$ zerfällt als β -Strahler nach dem Schema



Die ausgesandten Elektronen haben eine Energie von maximal 1,4 MeV; daneben werden auch γ -Strahlen beobachtet. Die Halbwertszeit beträgt 14,8 Stunden, d. h. von einem Präparat ist nach zirka 15 Stunden die Hälfte der Atome zerfallen, nach zweimal 15 Stunden ist nur noch ein Viertel der radioaktiven Atome da usf.

Diese künstlich radioaktiven Elemente sind berufen, in der Chemie und namentlich in der Biologie und Medizin eine hochbedeutende Rolle zu spielen. In der Biologie des Stoffwechsels und in der pharmazeutischen Chemie ist wohl seit der Entdeckung des Mikroskops keine so wichtige Erfindung mehr gemacht worden wie diejenige der künstlichen Radioaktivität.

Die Anwendbarkeit der radioaktiven Atome in Chemie und Biologie beruht darauf, dass sich ein radioaktives Element von seinem stabilen Isotop chemisch und physiologisch *überhaupt nicht* unterscheidet, so lange als die Wirkung der radioaktiven Strahlung vernachlässigt werden kann. Das radioaktive Natrium benimmt sich chemisch ganz genau so wie gewöhnliches Natrium.

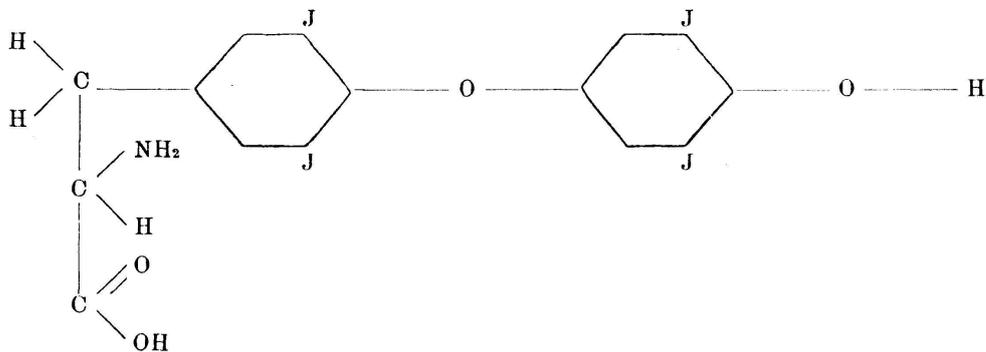
Doch sind Atome des radioaktiven Elementes durch ihre Radioaktivität gezeichnet, sozusagen mit einem kleinen Anhängeschild versehen, an dem man sie jederzeit von den chemisch gleichen, stabilen Atomen unterscheiden kann. Es ist klar, dass man durch radioaktive Messungen leicht die Verteilung in den verschiedenen Geweben verfolgen kann, welche eine kleine Menge von, als NaH_2PO_4 zugeführtem, radioaktivem Phosphor erfährt. Schon vorher im Körper vorhandener, gewöhnlicher Phosphor stört bei diesen Messungen nicht, weil sich der frisch zugeführte durch seine Radioaktivität sofort vom schon vorhandenen Phosphor unterscheiden lässt.

Eines der interessantesten Beispiele der Verwendung dieser markierten Atome bildet die Anwendung radioaktiven Kohlenstoffs bei der Untersuchung des Assimilationsvorganges in der grünen Pflanze. Mit Hilfe der radioaktiven Methode, die ja etwa ein millionmal empfindlicher ist als die chemische Methode, konnte gezeigt werden, dass die klassische Theorie der Assimilation unrichtig ist. Diese klassische Theorie nimmt an, dass CO_2 von der grünen Pflanze nur bei Belichtung aufgenommen und zu Formaldehyd und Sauerstoff reduziert werde: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Licht} = \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$. Mit Hilfe von Kohlensäure, in welcher der Kohlenstoff durch radioaktiven Kohlenstoff ersetzt ist, kann leicht gezeigt werden, dass die Pflanze die Kohlensäure schon *im Dunkeln* bindet, und zwar wird der aus der Kohlensäure stammende radioaktive Kohlenstoff in einer Karbonsäure $\text{R}-\underset{\text{OH}}{\text{C}}=\text{O}$ quan-

titativ wieder gefunden. R ist dabei ein Radikal vom Molekulargewicht ~ 1000 . Erst unter der Einwirkung des Lichts wird bei Gegenwart von Chlorophyll die COOH -Gruppe dieser Säure zu einer Alkoholgruppe reduziert, wobei Sauerstoff abgespalten wird: $\text{R}-\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{Licht} = \text{RC}=\underset{\text{OH}}{\text{H}} + \text{O}_2$. Mit Hilfe der radio-

aktiven Messungen kann nachgewiesen werden, dass bei Gerste z. B. die von der Pflanze aufgenommene Kohlensäure in zwei Stunden zu 20% in Zucker umgewandelt wird. Es ist klar, dass diese Untersuchungen ohne radioaktiven Kohlenstoff niemals hätten durchgeführt werden können. Man hätte ja die aus der Kohlensäure stammenden C-Atome nicht von den vielen schon in der Pflanze vorhandenen C-Atomen unterscheiden können.

Von grosser Wichtigkeit sind die künstlich radioaktiven Elemente auch bei Stoffwechseluntersuchungen beim Menschen geworden. Man kann jetzt durch Einverleibung von Stoffen mit radioaktiv markierten Elementen die Aufnahme, den Transport und die Verarbeitung dieser Stoffe oder Medikamente im Organismus mit Leichtigkeit verfolgen. Dabei braucht man, wegen des hochempfindlichen Nachweises, welcher bei radioaktiven Substanzen mit Hilfe von Zählrohren heute möglich ist, dem Organismus nur äusserst geringe Mengen zuzuführen. Solche Untersuchungen können oft am intakten Körper vorgenommen werden, weil die γ -Strahlen des radioaktiven Elementes infolge ihres grossen Durchdringungsvermögens aus dem Organismus herauskommen und aussen mit Hilfe von Zählrohren nachgewiesen werden können. Als Beispiel sei die Jodaufnahme und -verarbeitung durch die Schilddrüse erwähnt. Es ist bekannt, dass die Jodkonzentration in allen Geweben des menschlichen Körpers, mit Ausnahme der Schilddrüse, ausserordentlich niedrig ist. In der Schilddrüse aber, wo sie 10,000mal grösser ist als anderswo, wird das Jod zu Thyroxin



verarbeitet, einer organischen Jodverbindung, welche die Verbrennungsgeschwindigkeit im Körper regelt: Bei Thyroxin-Mangel wird die Sauerstoffaufnahme des Körpers gering und der ganze Stoffwechsel verlangsamt. Bei übermässiger Thyroxinproduktion werden die Sauerstoffaufnahme und die Verbrennung stark gesteigert. Wenn man dem Körper einige Milligramm Kaliumjodid mit radioaktivem Jod zuführt, so kann man mit Hilfe eines Zählrohres in der Halsgend die Ankunft des radioaktiven Jods in der Schilddrüse schon nach einigen Minuten feststellen. Bei normalen Versuchsindividuen wird nach ein bis zwei Tagen eine Sättigung der Schilddrüse mit Jod erreicht: ungefähr 4% des zugeführten Jodes finden sich in der Schilddrüse wieder, während

der Rest vom Körper zum grössten Teil ausgeschieden wird. Bei Personen mit Basedowscher Krankheit, bei denen die Schilddrüse übermässig stark arbeitet, ist die Jodaufnahme äusserst gesteigert. Schon nach wenigen Stunden hat ihre Schilddrüse zirka 12—15 % des zugeführten radioaktiven Jods aufgenommen, aber ebenso rasch wird das Jod, zu Thyroxin verarbeitet, in den Blutkreislauf zurückgeführt, wo es dann den gesteigerten Stoffwechsel hervorruft. Bei Individuen mit unternormaler Schilddrüse bleibt die Jodaufnahme sehr gering.

Die Einlagerung radioaktiver Substanzen in den Körper ist oft äusserst selektiv; so wird z. B. Radiostrontium fast ausschliesslich in den Knochen eingebaut. Es besteht so die Hoffnung, dass man gewisse Organe selektiv radio-therapeutisch behandeln kann, ohne andere Organe zu schädigen; doch liegt bis jetzt noch wenig Versuchsmaterial in dieser Richtung vor. Sehr interessante Versuche existieren über die Aufnahme und den Einbau des Phosphors in Pflanzen, ebenso über den sehr kompliziert, in Stufen verlaufenden Einbau radioaktiven Eisens im Hämoglobin des Bluts.

Natürlich haben die künstlich radioaktiven Stoffe, wie das radioaktive Natrium und der Radiophosphor, von welchen man sehr aktive, starke Präparate herstellen kann, schon grosse Bedeutung für therapeutische Zwecke erlangt.

In der Metallurgie wird Anwendung von den radioaktiven Metallen gemacht, um Mischungs-, Selbstdiffusions- und Ausscheidungsvorgänge zu untersuchen.

4. Energietönungen

Leider gelingt es bis heute nicht, grössere wägbare Mengen eines Elementes umzuwandeln; immer handelt es sich um sehr geringe, chemisch oft gerade nachweisbare Substanzmengen. Dies wird von den Physikern nicht als Übelstand empfunden, weil die Natur dem Techniker ja übergenug Stoffe und Ersatzstoffe zur Verfügung stellt. Jedoch ist es sehr bedauerlich, dass die enormen, bei Kernreaktionen auftretenden *Wärmetönungen* nicht technisch nutzbar gemacht werden können; denn für die Energie gibt es keinen Ersatzstoff. Ganz besonders gross ist diese Wärmetönung bei der Spaltung des Urankerns. Uran ist das letzte Element im periodischen System; der Urankern ${}_{92}\text{U}^{235}$ besteht aus 92 Protonen

und 143 Neutronen. Man kann auf Grund des einfachen Tröpfchenmodells leicht einsehen, dass ein solcher Kern nahe der Stabilitätsgrenze ist und dass die elektrischen Coulombschen Abstossungskräfte hier bei der hohen Kernladung beinahe so stark sind, dass sie gegenüber den anziehenden Kernkräften das Übergewicht erlangen. Tatsächlich genügt die Hinzufügung eines langsamen Neutrons zum Kern, um die Form-Instabilität des Urans 235 herbeizuführen. Der Kern zerspaltet nach Anlagerung des Neutrons in zwei kleinere Kerne. Diesen Zerfall hat man sich so vorzustellen, dass das durch Energiezufuhr labil gewordene Kerntröpfchen sich infolge der Abstossungskräfte einschnürt und in zwei Tröpfchen zerteilt. Dabei « verdampfen » meist noch zwei bis drei Neutronen. Sind die beiden kleineren Kerne entstanden, so fahren sie wegen der starken Coulomb-Abstossung auseinander. Dabei erhalten sie ganz enorme kinetische Energien: die pro zerfallendes Uran-Atom frei werdende Energietönung beträgt zirka 160 MeV. Könnte man ein Kilogramm Uran auf diese Weise zum Zerfall bringen, so würden zirka 16 Milliarden Kcal frei, entsprechend der Verbrennungswärme von 2 Millionen Kilogramm Kohle.

Es ist klar, dass die Physiker eifrig nach einem Wege suchen, diese Energien nutzbar zu machen. Es sind dabei aber enorme Schwierigkeiten zu überwinden: Einmal geht die Uran-Umwandlung in der geschilderten Art *nur bei einem* von den drei Isotopen, aus denen das natürliche Uran aufgebaut ist: Uran besteht aus drei Uran-Atomsorten mit den Atomgewichten 238, 235 und 234. Das Uran 235, welches sich so leicht spalten lässt, kommt aber in diesem Gemisch nur zu 0,7 % vor. Man versucht heute, mit neuentwickelten Isotopen-Trennverfahren das U^{235} stark anzureichern. Wenn man U^{235} hätte, müsste man aber den Zerfall der Atome als Kettenreaktion zum Ablauf bringen, d. h. die beim Zerfall eines Atoms auftretenden Neutronen müssten sofort weitere Atome zum Zerfall bringen, so dass die Reaktion, einmal eingeleitet, von selbst sukzessive die ganze Uranmenge durchlaufen würde. Man weiss schon heute, dass nur langsame Neutronen den Uran-Zerfall bewirken: Daher ist fast sicher, dass die Reaktion durch die, infolge der hohen auftretenden Temperaturen, immer schneller werdenden Neutronen selbsthemmend verlaufen würde. Dieser Umstand ist sehr erwünscht, weil dann eine Explosion bei der Einleitung der Uran-Spaltung nicht eintritt, sondern die Energieent-

wicklung nach Art der Verbrennung von Kohle langsam vor sich geht.

Wir wissen heute mit Sicherheit, dass Kern-Umwandlungsprozesse im Energiehaushalt der Sterne die mächtigen Energiequellen bilden, welche vielmillionenmal mehr Energie liefern als chemische Reaktionen dies tun können. Im Falle der Sonne, die ja durch Strahlung so enorme Energiemengen verliert, dass sie, wenn sie aus Kohle und Sauerstoff bestünde und die Energie durch Verbrennung erzeugt würde, nur 3000 Jahre Energie abgeben könnte, kennt man die Prozesse, welche sich abspielen, genau. Es wird mit Hilfe von Kohlenstoff als Katalysator Wasserstoff in Helium umgewandelt. Der Prozess verläuft in fünf Stufen, und er entwickelt pro g umgewandelten Wasserstoff zirka 150,000,000 Kcal. (Die Verbrennungswärme pro Gramm Wasserstoff beträgt nur 48 Kcal.) Trotz der enormen Temperatur von zirka 20,000,000°, welche im Sonnenmittelpunkt herrschen muss, geht der Ablauf dieser Kernreaktionen zum Glück nur langsam vor sich, denn nur wenige Atomkerne haben die hohe Geschwindigkeit, welche nötig ist, um die Coulomb-Abstossung zu überwinden und Kernreaktionen auszulösen.

Auch das Aufflammen der Supernovae, wo Sterne plötzlich unter ungeheurer Ausstrahlung in ein neues Gleichgewicht übergehen und dabei bis 100,000,000fache Sonnenintensität erreichen, lässt sich auf Grund kernphysikalischer Ueberlegungen genau verstehen.

Die Untersuchungen über künstliche Atomumwandlung werden, namentlich in amerikanischen Instituten mit ihren riesigen Mitteln und Mitarbeiterstäben, enorm rasch gefördert. Die physikalische Erkenntnis ist durch die vielen gelösten Kernprobleme in kurzer Zeit in ungeahntem Masse erweitert und bereichert worden, namentlich hat unser Wissen über die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen sehr an Tiefe gewonnen. Es bleibt eine spannende, aber leider nicht mit Sicherheit zu beantwortende Frage, ob dieses Gebiet nicht schon in nächster Zeit auch für die Technik fruchtbar gemacht werden kann.