

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 91 (1973)
Heft: 34

Artikel: Über wissenschaftliche Probleme und praktische Anwendungen der Kernphysik
Autor: Lang, Jürg
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-71962>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Über wissenschaftliche Probleme und praktische Anwendungen der Kernphysik

DK 539.1

Nach einem Vortrag von Prof. Dr. Jürg Lang, ETHZ, gehalten in der SIA-Fachgruppe der Ingenieure der Industrie (FII) am 8. Jan. 1973, bearbeitet von Anna Sigrist, dipl. phys. ETHZ, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Laboratorium für Kernphysik der ETHZ

Kernphysik und Hochenergiephysik befassen sich mit dem Aufbau der Materie sowie der Struktur der Atomkerne und der Elementarteilchen; insbesondere sucht man Antworten auf die folgenden Fragen:

1. Gibt es einfache, elementare Bausteine, aus denen Atome und Atomkerne zusammengesetzt werden können? Welche Eigenschaften (Grösse, Masse, Ladung) haben diese Grundbausteine?
2. Welche Kräfte wirken zwischen diesen Elementarbausteinen? Von welcher Grössenordnung und Reichweite sind sie?
3. Gibt es ein mathematisches Verfahren, mit dem die Eigenschaften aller zusammengesetzten Körper berechnet werden können? Kann ein theoretisches Modell für Atome und Kerne aufgestellt werden?

Aufbau der Atome

Um die Antworten zu diesen Fragen zu finden, tragen wir zuerst einige wichtige Grundlagen zusammen. Der theoretische Unterbau der Kernphysik wird einerseits durch die Relativitätstheorie und andererseits durch die Quantenmechanik

geliefert. Um 1905 zeigte Albert Einstein (1879–1955) in seiner Relativitätstheorie, dass die klassischen Vorstellungen einer absoluten Zeit und eines absoluten Raumes nicht richtig sind. Dazu kam die fundamentale Idee, dass jede Masse eine Form von Energie darstelle und umgekehrt, dass jede Energie in eine Masse verwandelbar sei:

$$E = M \cdot c^2$$

E ist die Energie, M die Masse und $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit. Als Konsequenz dieser Gleichung ist die Erzeugung von beliebigen Teilchen zu nennen, falls sie nicht durch andere Erhaltungssätze verboten wird. Ein solches System kann aus einem Teilchen und seinem Antiteilchen bestehen. Teilchen und Antiteilchen besitzen wohl dieselbe Masse, aber gewisse Eigenschaften, z.B. die Ladung, sind entgegengesetzt.

In der Quantenmechanik kommt neben der Dualität Partikel-Welle der Schrödingerschen Wellengleichung für ein Teilchen, die Erwin Schrödinger 1926 aufgestellt hat, sehr grosse Bedeutung zu. Die Schrödingergleichung wird durch die Wellenfunktion, meist mit dem Buchstaben ψ bezeichnet, die vom Ort und von der Zeit abhängig ist, gelöst. ψ ist keine

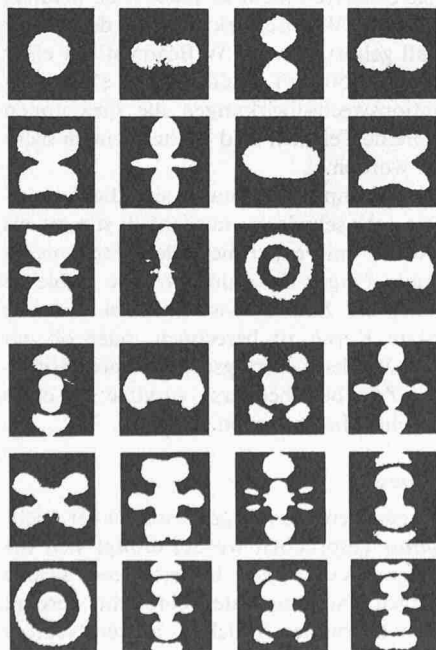


Bild 1. Modelle von Elektronenverteilungen

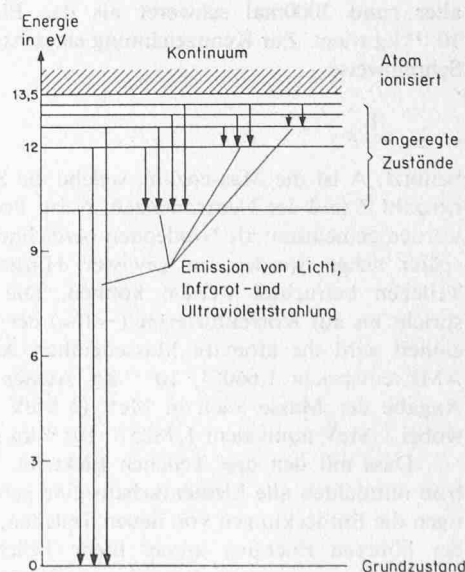


Bild 2. Spektrallinien des Wasserstoffatoms

direkt messbare Grösse, aber das Quadrat von ψ stellt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens in Funktion des Ortes dar. Ohne grosse Schwierigkeiten kann man die Schrödingergleichung für das eine Elektron im Wasserstoffatom, dem einfachsten Atom, lösen. Die Kraft, die auf das Elektron wirkt, ist die bekannte Coulombkraft. Aus der Gleichung erhält man als Lösung einen Satz von Wellenfunktionen, die sogenannten Eigenfunktionen, aus denen wiederum die Aufenthaltswahrscheinlichkeit berechnet werden kann. In Bild 1 sind Modelle der so erhaltenen Elektronenverteilungen zu sehen.

Mit den Lösungen sind die Energieeigenwerte für die Zustände, in denen sich das Elektron befinden kann, verknüpft. Dieses Schema der Energieniveaus stimmt mit demjenigen aus dem Atommodell von *Niels Bohr* (1885–1962) überein und ist in Bild 2 zu sehen. Zum Niveauschema ist noch zu bemerken, dass das in der Kernphysik übliche Energiemass das Elektronvolt (eV) ist. 1 eV ist dem Wert $1,60219 \cdot 10^{-19}$ Joule äquivalent.

Beim Übergang von einem angeregten Zustand auf einen anderen wird Strahlung von einer diskreten Frequenz absorbiert oder emittiert. Die Frequenz und die Energie der Strahlung sind zueinander proportional:

$$E = h \cdot \nu$$

E ist die Energie, ν die Frequenz und $h = 6,62599 \cdot 10^{-34}$ Joule $\cdot$ s ist das Plancksche Wirkungsquantum.

An dieser Stelle kann der Erfolg der theoretischen Physik in der Quantenelektrodynamik erwähnt werden. Es gelang nämlich, die kleine Aufspaltung eines bestimmten Energieniveaus des Wasserstoffatoms mit unerhörter Genauigkeit und in Übereinstimmung mit dem experimentellen Wert zu berechnen. Diese Lambsche Verschiebung, die von *Willis E. Lamb* 1947 beobachtet wurde, ist eine der am genauesten bekannten Grössen der Physik.

Doch zurück zum Bau der Atome: Wie erwähnt, besitzt das Wasserstoffatom ein Hüllenelektron und als Kern ein Proton. Betrachtet man schwerere Atome, so stellt man fest, dass im Atomkern ausser Protonen noch Neutronen vorhanden sind. Kerndurchmesser liegen in der Grössenordnung von 10^{-15} m, Atomdurchmesser in derjenigen von 10^{-10} m. Das Heliumatom z.B. besitzt zwei Elektronen, und sein Kern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Das Neutron, das 1932 vom englischen Physiker *James Chadwick* entdeckt wurde, ist ein ungeladenes Teilchen mit einer Masse von $2 \cdot 10^{-27}$ kg; diese ist vergleichbar mit der Protonenmasse, aber rund 2000mal schwerer als das Elektron, das etwa 10^{-30} kg wiegt. Zur Kennzeichnung eines Atomkernes wird die Schreibweise

$${}^A_Z N$$

benutzt. A ist die Massenzahl, welche die Summe der Protonenzahl Z und der Neutronenzahl N ist. Proton und Neutron werden gemeinsam als Nukleonen bezeichnet, weil sie, wie wir später sehen werden, in gewisser Hinsicht als identische Teilchen betrachtet werden können. Die Massenzahl entspricht bis auf Korrekturterme ($\sim 1\%$) der Masse. Als Masseneinheit wird die atomare Masseneinheit AME gebraucht: 1 AME entspricht $1,66053 \cdot 10^{-27}$ kg. Ausser der AME ist die Angabe der Masse auch in MeV (1 MeV = 10^6 eV) üblich, wobei 1 MeV äquivalent $1,78257 \cdot 10^{-30}$ kg ist.

Dass mit den drei Teilchen Elektron, Proton und Neutron mitnichten alle Elementarbausteine gefunden sind, bestätigen die Entdeckungen von neuen Teilchen, wobei im Bereich der höheren Energien immer mehr Teilchen auftreten. Es besteht eine so grosse Anzahl von Elementarteilchen, dass man bald vor dem Problem steht, was nun die eigentlichen

Tabelle 1. Übersicht über Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen

Wechselwirkung	Stärke	Reichweite	Austauschteilchen
Gravitationswechselwirkung	10^{-40}	unendlich	Graviton
schwache Wechselwirkung	10^{-5}	$< 10^{-14}$ cm	W-Boson
Coulombwechselwirkung	10^{-2}	unendlich	Photon (γ)
starke Wechselwirkung (Kernwechselwirkung)	1	$\sim 10^{-13}$ cm	Mesonen ($\pi^\pm, \pi^0, \eta, \dots$)

Grundbausteine sind. Doch verschieben wir diese Überlegungen bis zum Schluss dieser Zusammenfassung und wenden wir uns dem zweiten Fragenkomplex, den Wechselwirkungen, zu.

Bis heute sind uns vier Wechselwirkungen bekannt; sie sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Unter der Stärke, die für die starke Wechselwirkung mit Hilfe der sogenannten Störungsrechnung als 1 berechnet wird, versteht man eine relative Grösse, welche die Kraftwirkung zwischen zwei Teilchen erfasst. Die Reichweite gibt die Entfernung an, die durch die Kraft erschlossen wird. Erläutern wir diese Begriffe am bekannten Gesetz von *Charles Coulomb* (1736–1806): Zwei gleich geladene Körper stossen sich ab, zwei entgegengesetzt geladene ziehen sich an. Obwohl hier die Reichweite unendlich angegeben wird, sind die Coulombkräfte nur auf kleine Entfernungen wirksam, da die Abschirmeffekte der Umgebung sehr gross sind. Im Gegensatz zur elektrischen Kraft ist die Gravitationskraft so schwach, dass sie im Bereich der Elementarteilchen nicht festgestellt werden kann. Sie wirkt aber über grösste Entfernungen auf neutrale Körper und ist notwendig, um das Universum zusammenzuhalten.

Diese Kräfte werden nun als Austausch von Partikeln interpretiert. Die Austauschteilchen der Kernkräfte, die später noch erklärt werden, sind die Mesonen, die vom japanischen Physiker *Hideki Yukawa* 1935 eingeführt wurden. Die Bindungskraft zwischen zwei Nukleonen, seien es Protonen oder Neutronen, kommt durch den Wechsel eines Mesons vom einen Nukleon zum anderen zustande. Doch scheinen nicht dieselben Mesonen für die Wechselwirkung auf kürzere oder weitere Entfernungen verantwortlich zu sein. Überdies existieren über hundert Mesonen, und diese Vielfalt trägt dazu bei, dass die starke Wechselwirkung so kompliziert ist. Für die Coulombkraft sind als Austauschpartikel γ -Quanten mit der Ruhemasse 0 – d.h. sie existieren nicht in Ruhe – zu nennen. Als Träger der schwachen Wechselwirkung, zu denen der später erklärte β -Zerfall gehört, werden W-Bosonen mit einer vermuteten Masse von etwa 50 GeV (1 GeV = 10^9 eV) postuliert, für die Gravitationswechselwirkungen die Gravitonen mit der Ruhemasse 0. Beide Teilchen sind bis heute noch nicht experimentell bestätigt worden.

In der theoretischen Kernphysik gestaltet sich die Aufstellung von Kernmodellen sehr schwierig; tatsächlich stimmt bis jetzt kein einziges Modell mit experimentellen Ergebnissen zufriedenstellend überein. Es gilt die grundsätzliche Frage zu klären, ob die Kenntnis der Kräfte zwischen zwei Teilchen genügt, um komplizierte Kerne zu berechnen, oder ob ein weiteres Teilchen in der Wechselwirkungsregion einen störenden Einfluss hat. Zur Zeit bestehen erst Ansätze zu einer solchen Theorie von Vielteilchensystemen.

Radioaktive Zerfallsprozesse

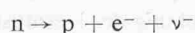
Da immer von experimentellen Ergebnissen, aber nicht von den Methoden selbst gesprochen wurde, drängt sich die Frage auf, wie man denn Kernphysik betreibt und welche technischen Einrichtungen und Apparate gebraucht werden. Die für Kernreaktionen benötigten Teilchen, ausser Neutro-

nen, müssen grosse Energiebeträge von einigen MeV aufweisen, um überhaupt in die Nähe eines Atomkernes zu gelangen. Als Kriterium ist die Wellenlänge zu nennen, die kleiner als das System, dessen Einzelheiten untersucht werden wollen, sein muss. – Man denke nur an das Elektronenmikroskop, das ein 100mal grösseres Auflösungsvermögen als das gewöhnliche Lichtmikroskop erreicht. – Die Energien, die bei chemischen Reaktionen entstehen, sind in der Grössenordnung von eV; d.h. chemische Prozesse sind als Lieferanten für hochenergetische Teilchen auszuschliessen. Als andere Quelle käme die kosmische Strahlung in Betracht. Hier liegen die Schwierigkeiten darin, dass alle möglichen Partikeln, doch nur mit geringer Häufigkeit, vorkommen. Eine auch heute oft gebrauchte natürliche oder künstlich herstellbare Teilchenquelle sind die radioaktiven Substanzen. Zu den weitaus wichtigsten Lieferanten von hochenergetischen Teilchen gehören die Teilchenbeschleuniger, die später im Detail beschrieben werden.

Radioaktivität ist spontane Emission von α -, β - und γ -Teilchen: Sie stellt einen statistischen Vorgang dar, der einen exponentiellen Ablauf aufweist. Als Einheit der Aktivität braucht man das Curie, genannt nach *Marie Curie* (1867–1934): 1 Curie ist die Menge einer radioaktiven Substanz, in der die Zahl der Zerfälle pro Sekunde $3,7 \cdot 10^{10}$ beträgt.

Die α -aktiven Präparate emittieren, wie der Name sagt, α -Teilchen oder Heliumkerne (2mal positiv geladene Heliumionen). Zu den α -Quellen gehören Uran- und Plutoniumisotope. (Isotope sind Kerne mit konstanter Protonenzahl, aber veränderlicher Massenzahl). Bild 3 zeigt ein Poloniumpräparat, dessen ausgesandte α -Teilchen in einer Nebelkammer nachgewiesen werden. Die Nebelkammer ist mit übersättigtem Dampf einer organischen Flüssigkeit gefüllt und dient dem direkten Nachweis von geladenen hochenergetischen Teilchen. Das Ion, in unserem Fall das α -Teilchen, ionisiert aufgrund seiner hohen Energie die Gasatome längs seiner Bahn, die als Kondensationskerne wirken und um die sich Flüssigkeitströpfchen bilden können. Durch starke Beleuchtung kann man diese Bahnen sichtbar machen.

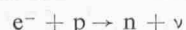
Beim β -Zerfall entsteht aus einem Neutron ein Proton, während ein Elektron und ein Antineutrino ausgesandt werden:



Beim β^+ -Zerfall wandelt sich ein Proton im Kern (freie Protonen sind stabil!) in ein Neutron um, unter Emission von Positron und Neutrino:



Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons, das Antineutrino dasjenige des Neutrinos. Das Neutrino, das die Ruhemasse 0 hat, wurde 1930 von *Wolfgang Pauli* (1900 bis 1958) postuliert, aber erst 1953 experimentell bestätigt. β -aktive Quellen sind alle Kerne, die «zuviel» Neutronen enthalten, unter anderen Lutetium- und Kupferisotope; β^+ -Quellen sind zum Beispiel Natrium- und Cobaltisotope. Bei einer weiteren Zerfallsart, dem Elektroneneinfang, wird vom Kern ein Elektron aus der Hülle absorbiert und dabei ein Proton unter Aussendung eines Neutrinos in ein Neutron umgewandelt:



γ -Emission tritt auf, wenn ein Atomkern von einem angeregten Zustand in den Grundzustand fällt. Wir können hier zum anfangs erwähnten Atomniveauschema ein analoges für den Kern aufbauen. Anstelle von Licht, Ultraviolett und Röntgenstrahlung tritt Emission von γ -Quanten oder von Elektronen und Positronen auf. Bild 4 zeigt ein solches Kernniveauschema.

Der wesentliche Unterschied zu einem Atomspektrum liegt in der Grössenordnung der Niveaubstände: die Zu-

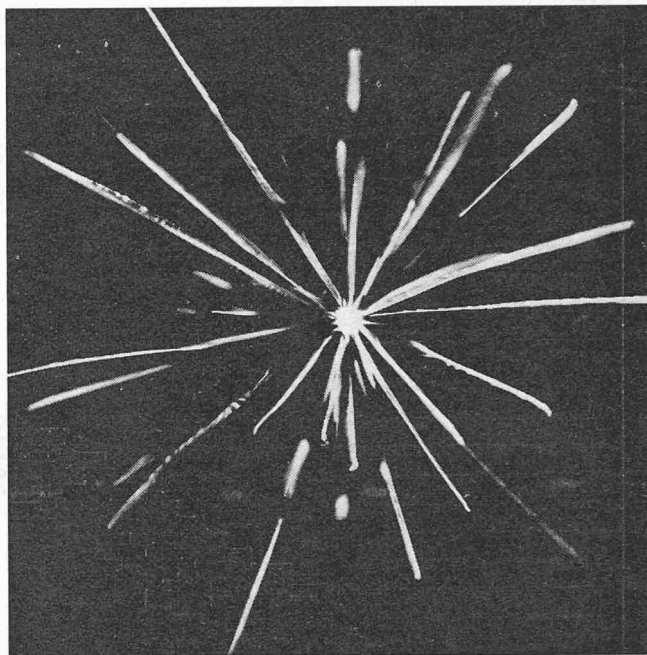


Bild 3. Poloniumpräparat in der Nebelkammer

stände liegen nicht einige eV, sondern einige MeV auseinander. Um ein Nukleon aus dem Kernverband zu lösen, müssen Energien von MeV aufgebracht werden. Diese hohen Energiebeträge sind der Grund dafür, dass die Elemente im Bereich der klassischen Methoden als unwandelbar angesehen werden können.

Nach dieser Aufzählung von verschiedenen Zerfällen liegt die Frage nahe, wo stabile Kerne zu finden sind. Betrachten wir das in Bild 5 angegebene Diagramm. Als Achsen sind Neutronenzahl N und Protonenzahl Z gewählt. Aus der Darstellung liest man heraus, dass der schwerste stabile Kern Wismut mit $Z = 83$ und $N = 126$ ist. (Stabile Kerne haben einen Überschuss an Neutronen.) Doch vermuten die Kernphysiker aus verschiedenen Gründen, dass stabile Isotope auch jenseits von $Z = 103$ vorhanden sind, die wahrscheinlich in unserem Planetensystem nicht natürlich vorkommen.

Eine wichtige Reaktion, die nur schwere Kerne umfasst, ist die Kernspaltung. Die schwersten Kerne wie Plutonium und Uran können, wenn auch selten, spontan spalten; schwere Kerne aber erst, wenn ihnen etwas Energie zugeführt worden

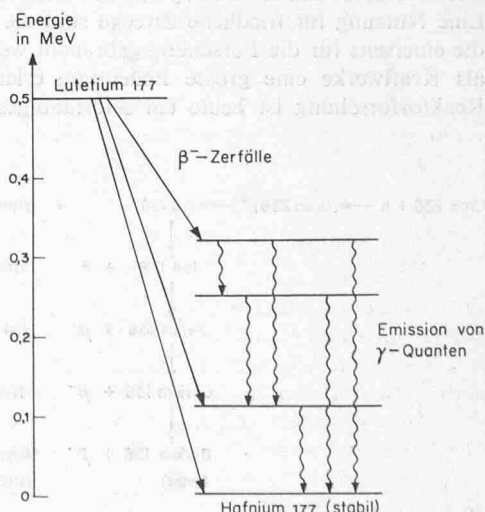


Bild 4. Zerfallsschema von Lutetium 177

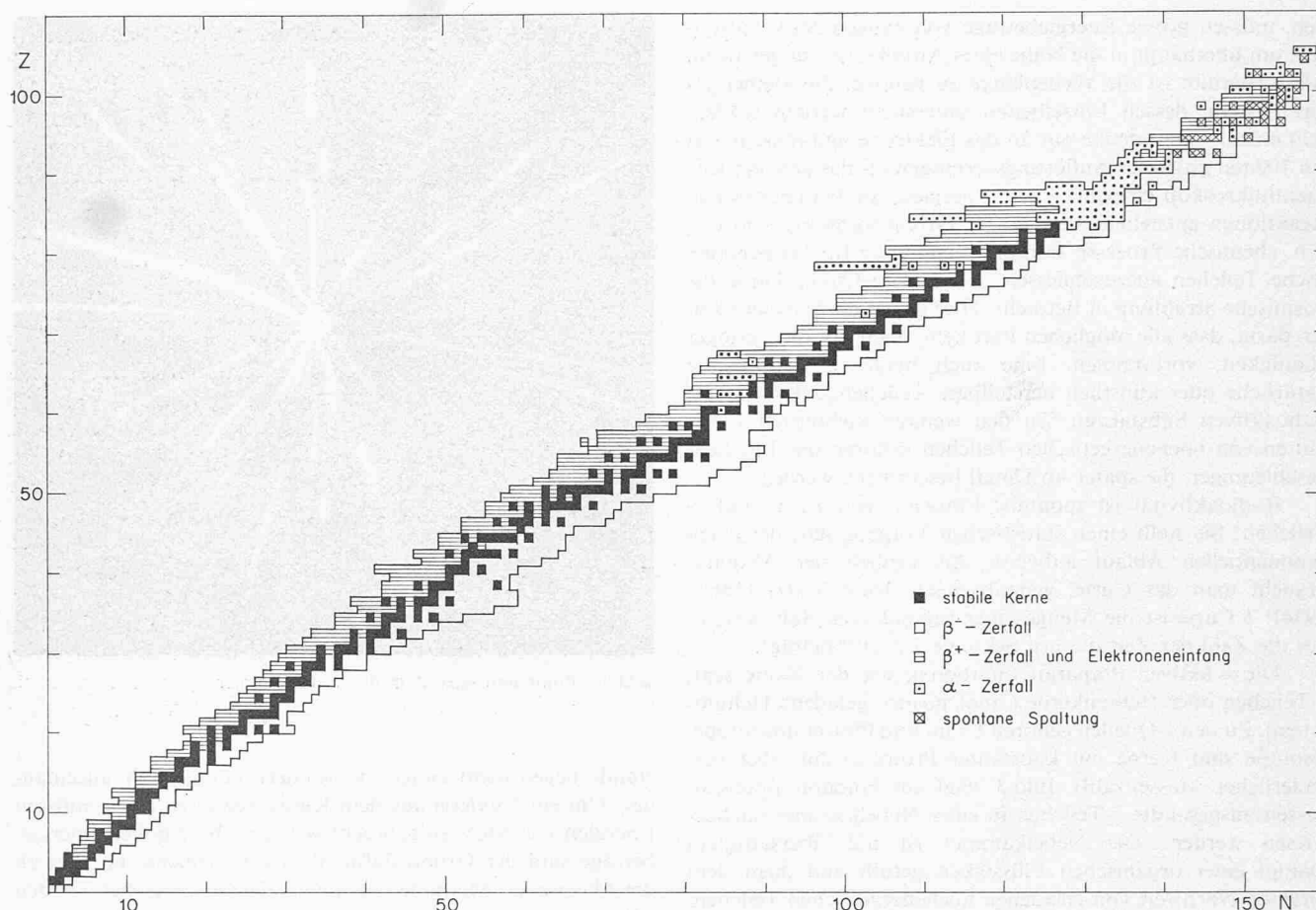


Bild 5. Isotopentafel

ist. Ein Beispiel einer Spaltung, die durch thermische Neutronen mit einer Energie von etwa 0,0025 eV induziert wird, ist diejenige von Uran 235 in radioaktives Jod und Yttrium. Die Reaktionsgleichung ist in Bild 6 dargestellt, wobei das Sternchen einen angeregten Zustand bedeutet.

Der beträchtliche Energiebetrag, der bei der Spaltung eines einzigen Urankerns gewonnen wird, beträgt 200 MeV, umgerechnet $3,2 \cdot 10^{-11}$ Joule. Bei der Spaltung von 1 g Uran in einem Tag erhält man eine Leistung von 1 MW. Den Energiegewinn wirtschaftlich auszunützen, liegt natürlich auf der Hand. Als zweiter Punkt ist zu beachten, dass bei der Spaltung unter den Endprodukten Neutronen zu finden sind. Dieser Umstand lässt die Möglichkeit einer Kettenreaktion zu. Eine Nutzung für friedliche Zwecke sind die Kernreaktoren, die einerseits für die Forschung gebraucht werden, andererseits als Kraftwerke eine grosse Bedeutung erlangen haben. Die Reaktorforschung ist heute ein selbständiges Wissensgebiet,

das nicht mehr zur eigentlichen Grundlagenforschung gehört und mit dem sich hauptsächlich Ingenieure und nicht Physiker beschäftigen.

Zu den wichtigsten Aufgaben im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Nutzen ist die Erforschung der Kernfusion zu zählen. Unter Fusion versteht man den Prozess, zwei leichte Teilchen zu einem ganzen zu verschmelzen. Eine mögliche Reaktion ist



d.h. zwei Deuteronen (je ein Proton und ein Neutron) verbinden sich zu einem α -Teilchen; dabei wird Energie frei. Da es sich im Unterschied zur Spaltung, bei der sehr schwere Kerne mit Massen von 240 AME betroffen sind, bei der Fusion um Kerne mit der totalen Masse von nur 4 AME handelt, ist die Energiebilanz wesentlich günstiger. Für die praktische Verwendung sprechen noch mehr Vorteile: Einerseits dürften

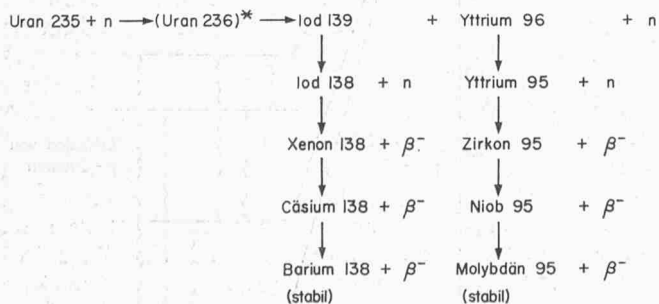


Bild 6. Induzierte Spaltung von Uran 235

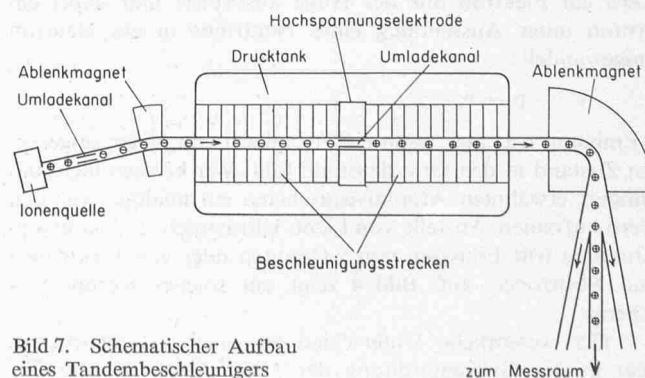


Bild 7. Schematischer Aufbau eines Tandembeschleunigers

...der Welt ständig wächst, in absehbarer Zeit erschöpft werden. Leider stösst die Verwendung von Fusionsreaktionen auf ungeheure technische Schwierigkeiten und kann bis heute noch nicht im Labor durchgeführt werden, da sehr hohe Temperaturen bis 10^8 °C und ein enorm grosser Druck erforderlich sind. (Kernfusionen liefern übrigens die Sonnenenergie.) Die Abwärme, die gleich wie bei Spaltungsreaktoren auftritt, wird auch bei Fusionsreaktoren eine problematische Erscheinung sein.

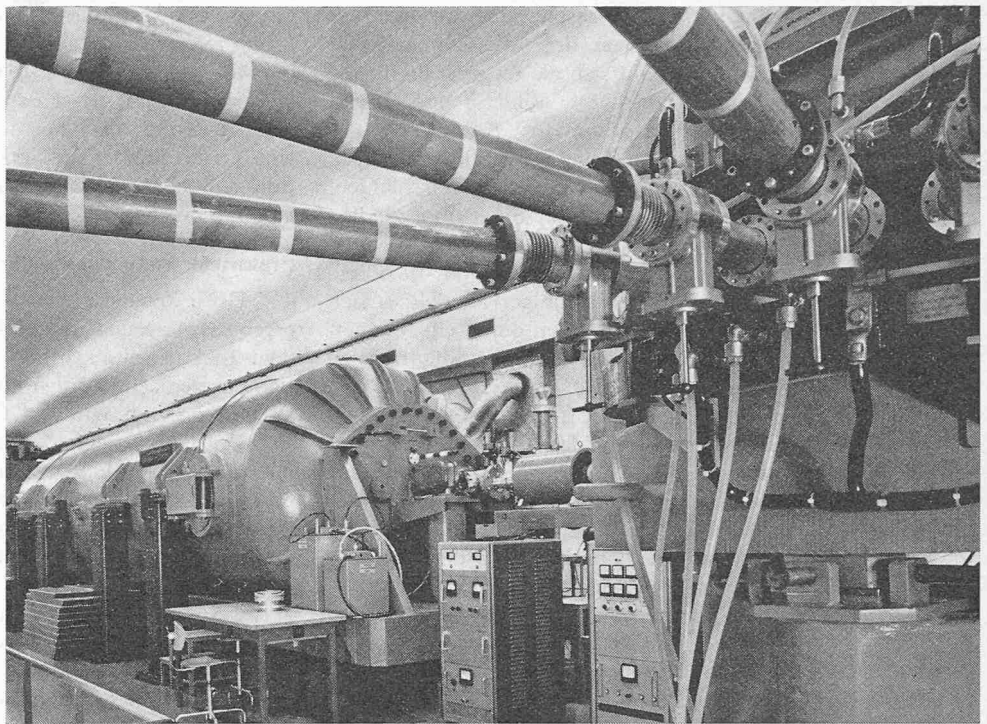


Bild 8. Tandembeschleuniger im Laboratorium für Kernphysik an der ETHZ

wesentlich weniger radioaktive Rückstände erzeugt werden; andererseits sind die Rohstoffe für die Kernfusion beinahe unbegrenzt, diejenigen für die Kernspaltung aber können, wenn der Energiebedarf der Welt ständig wächst, in absehbarer Zeit erschöpft werden. Leider stösst die Verwendung von Fusionsreaktionen auf ungeheure technische Schwierigkeiten und kann bis heute noch nicht im Labor durchgeführt werden, da sehr hohe Temperaturen bis 10^8 °C und ein enorm grosser Druck erforderlich sind. (Kernfusionen liefern übrigens die Sonnenenergie.) Die Abwärme, die gleich wie bei Spaltungsreaktoren auftritt, wird auch bei Fusionsreaktoren eine problematische Erscheinung sein.

Teilchenbeschleuniger

Zum weitaus grössten Teil wird kernphysikalische Forschung mit Teilchenbeschleunigern betrieben. Betrachten wir den Aufbau eines Tandem-Linearbeschleunigers in Bild 7: Die aus der Ionenquelle extrahierten negativen Ionen, z.B. H⁻-Ionen (H = Wasserstoff), werden in einem elektrischen Feld beschleunigt und gelangen in einen Umladekanals, wo sie zu positiven Ionen, in unserem Fall zu Protonen, umgeladen werden. Nun durchlaufen sie nochmals ein Gleichspannungspotential, werden dann in einem Magnetfeld abgelenkt und zu den eigentlichen Experimenten geführt. Bei diesem System sind Ionenquelle und Messraum auf Erdpotential und für die

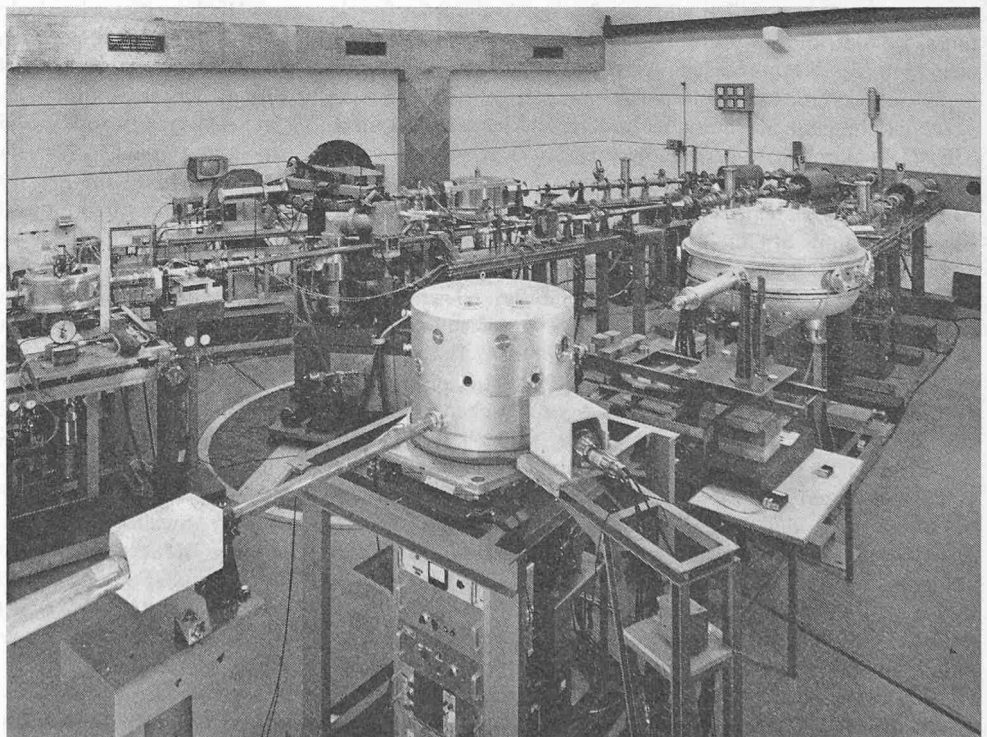


Bild 9. Der Messraum im Laboratorium für Kernphysik an der ETHZ

Wissenschaftler zugänglich; die Hochspannung, auf der sich der Umladekanale befindet, ist von der Grösse von 5 MV ($1 \text{ MV} = 10^6 \text{ Volt}$). Daraus ergibt sich als Endenergie für die Protonen ein Wert von 10 MeV. Die Bilder 8 und 9 sind Aufnahmen aus dem Laboratorium für Kernphysik der ETHZ. Bild 8 zeigt links den mit Isoliergas gefüllten Tank, in dem die Ionen in Röhren die Hochspannung durchlaufen, rechts den Analysiermagneten, von dem die Rohre zu den verschiedenen Messplätzen führen. Auf Bild 9 ist der Messraum mit den Streukammern und Messapparaturen zu sehen.

Um eine andere Art von Beschleuniger handelt es sich beim Synchrotron. Hier werden die Ionen durch ein Magnetfeld auf kreisförmigen Umlaufbahnen gehalten und durch eine auf die Umlauffrequenz abgestimmte Wechselspannung auf sehr hohe Energien gebracht. Beim CERN-Protonensynchrotron (CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) beträgt der Durchmesser des Ringes 200 m und die für Protonen erreichbare Energie liegt bei 28 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$).

Die gesamten Apparaturen, durch welche die Teilchenstrahlen geführt werden, sind evakuiert, um Stösse mit Luft- und anderen Gasmolekülen, die die Messungen verunmöglichen würden, zu vermeiden. Im Messraum werden die Ionenstrahlen auf sogenannte Targets (englisch: Zielscheiben), die aus festen Stoffen oder aus Gas bestehen können, gelenkt. Die Wahrscheinlichkeit, dass nun eine Reaktion infolge der Wechselwirkung zwischen Targetteilchen und Ionen des Strahls stattfindet, wird durch den Reaktionswirkungsquerschnitt gegeben. Die Analyse dieser Wirkungsquerschnitte gehört zur Hauptaufgabe des Kernphysikers. Für die Messungen sind umfangreiche Apparaturen, wie Teilchendetektoren, Mehrkanalanalysatoren und eine aufwendige Elektronik nötig, für die Auswertung wird meist ein leistungsfähiger Computer gebraucht.

Theoretische Modelle

Neben den technischen Anwendungen, die später besprochen werden, sind die experimentellen Ergebnisse für die theoretische Kernphysik von grosser Bedeutung. Besondere Aufmerksamkeit wird den Problemen der Kernwechselwirkung geschenkt, die trotz jahrelangen, intensiven Bemühungen nur grob bekannt ist. Sicher weiss man, dass die Nukleon-Nukleon-Kraft wesentlich stärker als die Coulombkraft sein muss, da sich die im Kern vorhandenen positiven Protonen abstossen, der Kern aber dennoch zusammengehalten werden kann. Schwierigkeiten treten auf, wenn man Streuexperimente von Nukleonen an Kernen oder andern Nukleonen analysiert. Man stellt nämlich fest, dass die Nukleon-Kern-Kraft – und vor allem die Nukleon-Nukleon-Kraft – nicht nur vom Abstand der Teilchen, sondern auch von deren Energie und Eigendrehimpuls abhängig ist. Weiter scheinen die Vorgänge in der Umgebung eine Rolle zu spielen. Als Tatsache steht hingegen ausser der kurzen Reichweite die Gleichheit der Kraft zwischen den Nukleonen, seien es zwei Protonen, zwei Neutronen oder ein Proton und ein Neutron, fest, d.h. die Kernkraft ist ladungsunabhängig, und Neutron und Proton können in dieser Hinsicht als identische Teilchen betrachtet werden.

Eine wichtige Frage befasst sich mit der Gültigkeit von Erhaltungssätzen und Symmetrioperationen in der Quantenmechanik. Aus der Mechanik sind uns die Erhaltung des Impulses, des Drehimpulses und der Energie bekannt. Dazu kommen noch drei weitere Symmetriegesetze für Parität, Ladungskonjugation und Zeitumkehr. Der rein formale Begriff des Paritätsprinzips sagt aus, dass das Spiegelbild eines physikalischen Prozesses wieder einen möglichen physikalischen Prozess darstellt. Die Ladungskonjugation ist die Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen. Die Zeitumkehr

besagt, dass im mikrophysikalischen Bereich jedes physikalische Ereignis in bezug auf den zeitlichen Ablauf umkehrbar sein soll. Ein grosser Teil von Experimenten befasst sich mit der Verifizierung dieser Erhaltungssätze. Überraschend wurde beim β -Zerfall, also bei den schwachen Wechselwirkungen, eine Verletzung der drei quantenmechanischen Symmetrioperationen festgestellt. Hingegen sind bei den Kern- und Coulombwechselwirkungen alle Forderungen erfüllt.

Praktische Anwendungen der Kernphysik

Doch wenden wir uns von den theoretischen Forschungsergebnissen ab und den praktischen Anwendungen zu. Neben dem Elektronenmikroskop, mit dem sogar einzelne Atome sichtbar gemacht werden können, kommt der Tracermethode in Medizin, Biologie und Chemie grosse Bedeutung zu. Da sich die Isotope eines Elementes in ihrem chemischen und biologischen Verhalten praktisch nicht voneinander unterscheiden, ist es möglich, einem Element ein nicht natürlich vorkommendes Isotop beizumischen und mit Hilfe dieser markierten Atome, der sogenannten Tracer, die ablaufenden Ereignisse zu verfolgen. Als Tracer werden vorwiegend radioaktive Substanzen gebraucht, da diese sehr leicht nachzuweisen sind. Neben Diffusionsvorgängen können die Wanderung von Nahrungsmitteln und Medikamenten im menschlichen Organismus und Stoffwechselvorgänge genau kontrolliert werden. Ein anderes kernphysikalisches Messverfahren ist die Altersbestimmung von organischen und anorganischen Stoffen. Mit der C^{14} -Methode (C: Kohlenstoff) kann das Alter von Holz, Pflanzen und Tieren gefunden werden. Das C^{14} wird durch die kosmische Strahlung in der Luft gebildet und beispielsweise durch einen Baum mit der Nahrung aufgenommen. Nach dessen Absterben kann die Aktivitätsabnahme des radioaktiven C^{14} gemessen und so auf die Zeit des Todes des Baumes geschlossen werden. Das Alter von Gesteinen lässt sich auf etwas andere Art bestimmen. Durch quantitative chemische Analysen wird der Gehalt an radioaktivem Uran und Thorium und derjenige an ihrem einen Zerfallsprodukt, nämlich Blei, in den Mineralien ermittelt. Mit Hilfe des Zerfallsgesetzes und unter Beachtung einer kleineren Korrektur kann so das Alter des betreffenden Gesteins berechnet werden. Für das Alter der Erde erhielt man einen Wert von $4,5 \cdot 10^9$ Jahren.

Hochenergetische Teilchenstrahlen, vor allem Protonen oder Neutronen, dienen zu einer sehr genauen chemischen Analyse von Substanzen. In der zu untersuchenden Probe werden Kernreaktionen erzeugt oder Kerne angeregt und deren Ausgangsprodukte beobachtet. Da die Energien der emittierten Teilchen für jedes betroffene Element verschieden sind, kann man im Prinzip ein einzelnes Atom nachweisen, und man erreicht so eine ausserordentlich hohe Analysenempfindlichkeit. Der Ort der Atome lässt sich durch Oberflächenanalyse feststellen. Dabei werden die gestreuten Teilchen untersucht; auf diese Weise erhält man nicht nur Informationen über die in der Probe vorkommenden Elemente, sondern bei dünnen Schichten auch Angaben über die Verteilung der Verunreinigungen als Funktion des Ortes.

Da ionisierende Strahlung die normale Lebenstätigkeit von Organismen stört, nützt die Strahlenbiologie diesen Umstand technisch aus. Als Beispiele sind die Sterilisation von Nahrungsmitteln, die damit nicht gekocht werden müssen, und die Sterilisierung von medizinischen Instrumenten zu nennen. In der Nuklearmedizin nimmt die Krebsforschung eine wichtige Stellung ein: Hier muss eine sorgfältige Auswahl und Dosierung der Strahlung getroffen werden, um nur kranke Zellen, unter keinen Umständen aber gesunde Gewebe, zu zerstören.

Für einen weiteren Zweck, für die Durchleuchtung von dicken Materialien, sind vorwiegend Röntgen- und γ -Strahlen

gebräuchlich. Da Teilchen in kompakten Materialstellen eine kleinere Reichweite als in Gasen haben, können so Einschlüsse und Luftblasen gefunden werden. Zum Beispiel werden Müonen-Strahlen von den Archäologen verwendet, um eine möglicherweise noch unbekannte Schatzkammer in der Cheopspyramide zu entdecken.

Elementarteilchen

Doch kehren wir zum Schluss noch kurz auf die anfangs gestellte und bis jetzt offengebliebene Frage nach den Grundbausteinen der Materie zurück. Wie erwähnt, sind eine erstaunliche Anzahl von verschiedenartigsten Teilchen entdeckt worden. Falls genügend Energie vorhanden ist und keine Erhaltungssätze verletzt werden, können sich diese Partikeln ineinander umwandeln. Obwohl alle Teilchen, ausser Proton, Elektron, Photon und Neutrino, weiter zerfallen, sind sie doch in bezug auf Kernreaktionen, die zwischen 10^{-19} und 10^{-22} Sekunden dauern, als stabil anzusehen. In Tabelle 2 sind deshalb nur Partikeln mit einer Lebensdauer unter 10^{-19} Sekunden als Elementarteilchen eingetragen. Übrigens zerfällt selbst das freie Neutron mit einer mittleren Lebensdauer von 16 Minuten in ein Proton, Elektron und Antineutrino. Die bis heute gefundenen Elementarteilchen – wir wollen diesen Namen vorläufig beibehalten – werden in vier Gruppen eingeteilt:

- Photon
- Leptonen (sehr leichte Teilchen)
- Mesonen (leichte Teilchen)
- Baryonen (schwere Teilchen)

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Elementarteilchen. Mit einem Teilchen wird zugleich das Antiteilchen aufgeführt. Die Masse ist in MeV, die Lebensdauer in Sekunden und die Ladung in Einheiten der Elementarladung $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Coulomb angegeben. Als weitere in der Quantenmechanik und Kernphysik häufig gebrauchte Eigenschaft ist der Spin oder Eigendrehimpuls eines Teilchens zu nennen, der durch die Spinquantenzahl charakterisiert wird. Quantenzahlen werden gebraucht, um den physikalischen Zustand und sein Verhalten mathematisch zu erfassen. Ausser der Quantenzahl für den Spin gibt es solche, die in Tabelle 2 aber nicht aufgeführt sind, für Parität, Isospin, Strangeness (Fremdheit), Baryonenzahl usw.

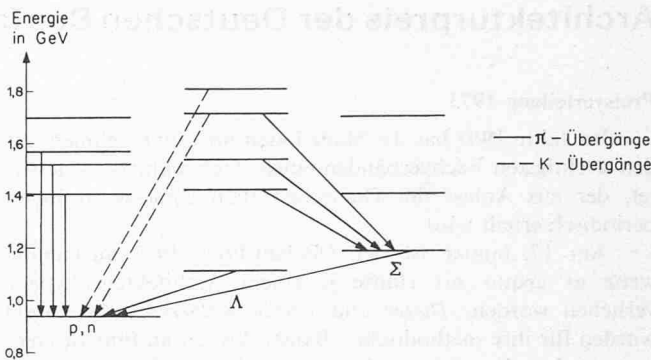


Bild 10. Baryonenspektrum

Ausser diesen verhältnismässig langlebigen Partikeln existieren zusätzlich noch Hunderte von kurzlebigen Mesonen und Baryonen. Nicht nur die Vielfalt der Elementarteilchen ist erstaunlich, sondern auch der Umstand, dass sich viele dieser Teilchen als angeregte Zustände von anderen auffassen lassen. Der Gedanke liegt also nicht fern, ein zum Atom- und Kernspektrum analoges Teilchenspektrum aufzustellen. In Bild 10 ist ein vereinfachtes Teilchenspektrum zu sehen. Verschieden sind wiederum die Niveauabstände, die hier in der Grössenordnung von einigen hundert MeV liegen.

Die oben erwähnten Feststellungen stehen mit der Idee eines starren und unveränderlichen Grundbausteines der Materie in Widerspruch und lassen Zweifel an der Existenz von solchen Elementarteilchen zu. Dass sie, in Analogie zu Atom und Atomkern, aus noch kleineren Teilchen aufgebaut sind, ist eine von theoretischen Physikern aufgestellte Hypothese. Es sind Teilchen mit Ladungen von $\frac{1}{3}e$ und $\frac{2}{3}e$, einem Bruchteil der Elementarladung, vorgeschlagen. Ob diese Teilchen, die den hübschen Namen Quark – aus Finnegans Wake, einem Werk von James Joyce – tragen, tatsächlich existieren, ist jedoch sehr ungewiss. Auch wenn die Quarks nicht gefunden werden, eröffnet doch die Lösung von vielen anderen theoretischen und experimentellen Problemen, die nur teilweise erwähnt worden sind, interessante und neue Gebiete für die kernphysikalische Forschung der Zukunft.

Adresse der Verfasserin: Fr. Anna Sigrüst, dipl. phys. ETH, Laboratorium für Kernphysik der ETH Zürich, Hönggerberg, 8049 Zürich.

Tabelle 2: Hauptdaten von Elementarteilchen

Klasse	Name	Symbol Teilchen/Antiteilchen	Masse in MeV	Lebensdauer in s	Ladung in e	Spin
	Photon	$\gamma = \bar{\gamma}$	0	stabil	0	1
Leptonen	Neutrino	$\nu = \bar{\nu}$	0	stabil	0	$\frac{1}{2}$
	Elektron	$e^- = e^+$	0,51	stabil	-1 +1	$\frac{1}{2}$
	Müon	$\mu^- = \mu^+$	106	10^{-6}	-1 +1	$\frac{1}{2}$
Mesonen	Pion	$\pi^0 = \bar{\pi}^0$	135	10^{-16}	0	0
		$\pi^+ = \pi^-$	140	10^{-8}	+1 -1	0
	Kaon	$K^+ = \bar{K}^-$	494	10^{-8}	+1 -1	0
		$K^0 = \bar{K}^0$	498	$10^{-8} - 10^{-10}$	0	0
	Eta	$\eta = \bar{\eta}$	548	10^{-19}	0	0
Baryonen	Proton	$p = \bar{p}$	938	stabil	+1 -1	$\frac{1}{2}$
	Neutron	$n = \bar{n}$	939	10^3	0	$\frac{1}{2}$
	Lambda	$\Lambda = \bar{\Lambda}$	1116	10^{-10}	0	$\frac{1}{2}$
	Sigma	$\Sigma^+ = \bar{\Sigma}^-$	1189	10^{-10}	+1 -1	$\frac{1}{2}$
		$\Sigma^0 = \bar{\Sigma}^0$	1192	10^{-14}	0	$\frac{1}{2}$
		$\Sigma^- = \bar{\Sigma}^+$	1197	10^{-10}	-1 +1	$\frac{1}{2}$
		$\Xi^0 = \bar{\Xi}^0$	1311	10^{-10}	0	$\frac{1}{2}$
	Xi	$\Xi^+ = \bar{\Xi}^-$	1321	10^{-10}	-1 +1	$\frac{1}{2}$
		$\Xi^- = \bar{\Xi}^+$	1321	10^{-10}	-1 +1	$\frac{1}{2}$
	Omega	$\Omega^- = \bar{\Omega}^+$	1680	10^{-10}	-1 +1	$\frac{3}{2}$
		$\Omega^+ = \bar{\Omega}^-$	1680	10^{-10}	-1 +1	$\frac{3}{2}$