

where \hbar is Planck's constant. Each resonance is characterized by one value of angular momentum. If the angular momentum is an odd multiple of $\hbar/2\pi$, the application of quantum mechanics to the problem predicts that the resonance should be unobserved for a scattering angle of 90° . This is clearly the case for the resonance at 7.0 MeV. For each value of the angular momentum (except $J = 0$) there is a predictable scattering angle (or a set of angles) for which the resonance should not be observed. For instance the fact that the resonance at 4.3 MeV is not observed for a scattering angle of 149.5° labels it as a resonance of angular momentum $4 \cdot (\hbar/2\pi)$. Once the angular momenta of the resonances are known, the resonance shapes and amplitudes at all other scattering angles is predictable. The solid line of Figure 6 shows that the predicted scattering agrees well with the measurements.

From experiments of this type one now has a large amount of information on the position, the lifetime and the angular momentum of excited states of nuclear. There remains the problem of explaining why the excited states of nuclei occur where they do. The treatment of this problem has met so far only with very limited success.

Zusammenfassung

Nach einem Überblick über die RUTHERFORDSche Theorie der Ablenkung von α -Teilchen im elektrostatischen Feld des Atomkernes wird auf kürzliche Streuexperimente hingewiesen. Die Streuung von α -Teilchen an schweren Kernen ist einem optischen Beugungsphänomen ähnlich. Resonanzen wie sie in der Streuung an leichten Kernen beobachtet werden, sind akustischen Resonanzen vergleichbar.

Hochenergiephysik

Von P. PREISWERK*

Einleitung

Kurz vor der letzten Jahrhundertwende wurde das erste Elementarteilchen, das Elektron entdeckt. Heute ist die Zahl der bekannten und vermuteten Elementarteilchen auf 32 angestiegen. Wesentlich für deren Entdeckung war die Entwicklung der Experimentiertechnik, die Instrumente geschaffen hat, die gestatten Elementarprozesse, Zusammenstöße zwischen Elementarteilchen und Zerfallsprozesse einzeln zu registrieren, zu beobachten und im Experiment zu untersuchen. Neben dem Auffinden dieser Teilchen selbst ist die Beobachtung, dass im Stoß zweier Teilchen neue entstehen können, dass die Elementarteilchen selbst umwandelbar sind, eine der fundamentalen Entdeckungen unseres Jahrhunderts.

Die Schwelle der Erzeugung von Teilchen ist durch die Ruhmasse der Teilchen bestimmt. Viele dieser Teilchen und Prozesse treten deshalb erst in Erscheinung, wenn die Stossenergie sehr hoch ist; auf hohe Stossenergien sind die Physiker bei der Untersuchung der kosmischen Strahlung gestossen.

Kosmische Strahlung

So kann man den Beginn der Geschichte der Hochenergiephysik willkürlich mit der Entdeckung der kosmischen Strahlung, die vor einem halben Jahrhundert gemacht worden war, gleichsetzen. VICTOR HESS schloss aus Beobachtungen der Ionen in der Luft, in verschiedenen Höhen über dem Erdboden, dass aus dem Welt Raum eine ionisierende Strahlung in die Erdatmosphäre eindringt. Es dauerte Jahre ehe die Natur dieser Pri-

märstrahlung, die wie wir heute wissen, vorwiegend aus energiereichen Protonen besteht, eindeutig erkannt worden war, da sie sich als von der komplexen, in der Atmosphäre erzeugten Sekundärstrahlung verdeckt erwies.

In dieser Sekundärstrahlung wurde erstmals das Positron beobachtet, ebenso die Mesonen – die leichten Muonen, die geladenen Pionen, die schweren K -Mesonen – und fast alle heute bekannten Hyperonen. Beobachtet wurden Entstehungs- und Zerfallsprozesse. Das Positron und der Materieerzeugungsprozess des Elektron-Positron-Paars war in der relativistischen Quantumtheorie DIRAC enthalten. Die Mesonen hatte YOKAWA – vor ihrer Entdeckung – als die schweren Quanten des Kernfeldes zur Deutung der Kernkräfte erfunden. Die ersten entdeckten Mesonen, die Muonen, hatten allerdings keineswegs die von YOKAWA erwarteten Eigenschaften; sie sind dem Elektron viel ähnlicher. K -Mesonen und Hyperonen zeigten Eigenschaften die zu der Bezeichnung «fremdartiger Teilchen» führte, einem Namen, der ihnen auch heute noch anhaftet. In einer ersten Periode der neuen Forschungsrichtung, der «heroischen», stiegen die Physiker mit ihren Messapparaten auf hohe Berge um «näher an die Primärstrahlung zu kommen», sie begaben sich in Tunnels, um die Absorption durchdringender Komponenten zu studieren, fuhren auf Schiffen, um die geographische Intensitätsverteilung zu registrieren und führten Dauermessungen, um Korrelationen mit der Sonnen- und Sternzeit festzustellen, die Herkunft der Strahlen zu eruieren.

* CERN, Genf

Eine zweite Periode begann als es im Jahre 1948 in Berkeley erstmals gelang mit dem Synchrotron (380 MeV α -Strahlen) künstliche Mesonen zu erzeugen. Seitdem hat sich die Forschung in diesem Gebiet in zwei Richtungen spezialisiert; die eine zielt weiterhin auf die Erforschung der kosmischen Strahlung, die andere betreibt Hochenergiephysik mit Hilfe der Beschleuniger.

Die Untersuchungen der ersten Richtung konzentrieren sich einerseits immer mehr auf die Prozesse, die von Partikeln mit Energien, die die Beschleuniger nicht erreichen, hervorgerufen werden und andererseits auf die Primärstrahlung als Naturphänomen um unter anderem mehr über ihren Entstehungsmechanismus und den Entstehungsort zu erfahren. Vermutet wird, dass die Teilchen statistisch in inhomogenen magnetischen Wolken, die sich nach Sternexplosion aufbauen, beschleunigt werden.

Die zweite Richtung kann die neuen Teilchen und ihre Prozesse dank der grossen Strahlungsintensitäten und der grösseren Bewegungsfreiheit, die Laboratorien bieten, mit grösserer Genauigkeit in quantitativer Weise studieren.

Doch auch die erste Richtung treibt dem steten Ziel besserer Beobachtungsmethoden zu: es werden Laboratoriumsinstrumente in den Raum ausserhalb der absorbierenden Atmosphäre, auch ausserhalb des magnetischen Feldes der Erde, in den freien Raum geschickt. In der zukünftigen Geschichte der Erforschung der kosmischen Strahlung wird wohl wieder eine heroische Periode eintreten, wenn bemannte Beobachtungs-Aussenstationen errichtet werden.

Teilchenbeschleuniger

Je höher die Geschwindigkeit eines Teilchenstromes, desto kürzer ist die zugeordnete Wellenlänge und in um so kleinere räumliche Dimensionen kann mit «Teilchenmikroskop» hineingesehen werden. Ladungen und Materie finden sich in den Elementarteilchen in kleinen Volumina konzentriert. Diese Konzentration von Materie in kleinen Bezirken setzt das Vorhandensein starker Kräfte voraus. Die ersten Geschosse der Kernphysik waren die α -Teilchen radioaktiver Substanzen. Sie haben eine Energie von einigen Millionen Elektronenvolt. Mit ihnen hat RUTHERFORD Atome abgetastet, dabei den Atomkern entdeckt und später die erste künstliche Kernumwandlung vollzogen. In den Höhenstrahlen wurden Primärteilchen bis zu einigen 10^{18} eV ermittelt. Diese enorme Energiekonzentration vergegenwärtigt man sich besser, wenn die Energie in mkg ausgedrückt wird (10^{18} eV entspricht 0,1 mkg) und wenn man bedenkt, dass diese Energie auf ein Teilchen, das eine Masse von 10^{-27} kg hat, konzentriert ist.

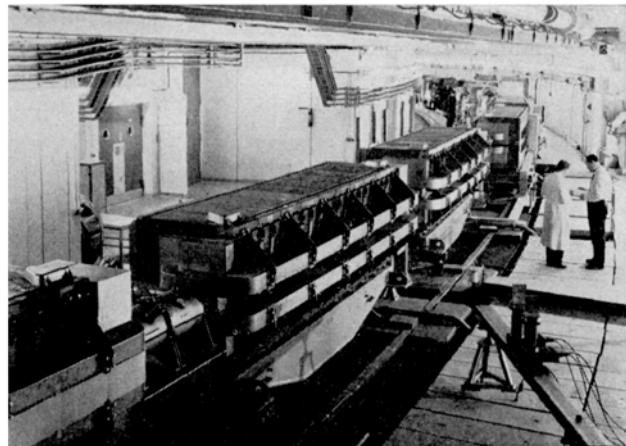


Abb. 1: Ringtunnel des 25 GeV CERN Proton-Synchrotrons mit Einheiten des Magneten

Mit Beschleunigern hat man Energien über 10 GeV (10^{10} Elektronenvolt) erreicht. Der gegenwärtige „Weltrekord“ liegt bei 28 GeV.

Die α -Teilchen radioaktiver Substanzen unterliegen ausserhalb des Kernes auf kurzer Strecke der Abstösung der Coulombkräfte der Kernladungen. Die kosmischen Strahlen scheinen in schwachen Feldern grosser räumlicher Ausdehnung ihre enorme Energie zu gewinnen. Die in Beschleunigern verwendeten und erreichten Feldstärken liegen zwischen diesen beiden Extremen. Schon früh hat COOLIDGE mit Röntgenröhren die Erfahrung gemacht, dass für einstufige Beschleunigungsstrecken eine praktische Grenze, bedingt durch die Oberflächen-Isolationsfähigkeit der Röhre, von rund 400000 Elektronenvolt besteht. Technische Schwierigkeiten setzen auch mehrstufigen Beschleunigern mit elektrostatischem Feld bei einigen Millionenvolt eine Grenze. Die hohen Beschleunigungen werden mittels elektrischen Wechselfeldern erzielt. In den Betatrons wird die Induktionswirkung von veränderlichem magnetischem Flux ausgenützt. In den Resonanzbeschleunigern durchlaufen die Teilchen mehrmals Sektoren in Phase mit dem elektrischen Wechselfeld, so dass sie immer wieder eine Beschleunigung erfahren.

An Resonanzbeschleunigern sind entwickelt worden: die Linearbeschleuniger mit in Hohlleitern erregten elektrischen Wechselfeldern, die Cyclotrons mit einem konstanten magnetischen Führungsfeld, in dem die Teilchen auf einer Spiralfahrt immer wieder zum selben Beschleunigungsspalt gelangen, die Synchrotrons mit zeitlich veränderlichem Magnetfeld, in dem die Teilchen auf konstantem Radius geführt werden, in Phase mit den Beschleunigungsfeldern.

Mehrere Beschleuniger, die Teilchen über 1 GeV (10^9 eV) liefern, sind in Betrieb und weitere projektiert oder im Bau. So steht seit 1952 das 3 GeV Cosmotron in Brookhaven in Betrieb, seit 1954 das 6 GeV Beva-

tron in Berkeley, seit 1957 das 10 GeV Synchrophasotron in Dubna, seit 1958 der 3 GeV «Saturn» in Saceley bei Paris und seit Ende 1959 das 25 GeV CERN Protonensynchrotron. In Brookhaven geht ein 30 GeV Synchrotron der Vollendung entgegen und das Forschungsinstitut für elektrophysikalische Ausrüstung in Leningrad baut ein 50 GeV Synchrotron (Synchrophasotron) mit einem Radius von 167 m. In Stanford ist ein Elektron-Linearbeschleuniger geplant, der in einer ersten Etappe 20 GeV, in einer zweiten 40 GeV geben soll. Der Beschleunigungstank soll eine Länge von 3,3 km aufweisen.

Bis jetzt sind die Anstrengungen, die der Übergang zu Energien höherer Größenordnung verlangte, durch das Auffinden qualitativ neuer physikalischer Phänomene belohnt worden. Wir erwähnten das Cyclotron, womit die ersten künstlichen Mesonen erzeugt wurden und auch die Entdeckung des neutralen Pions gemacht wurde. Das Cosmotron in Brookhaven brachte die künstliche Erzeugung von *K*-Mesonen und von Hyperonen und fundamentale Aufschlüsse über deren Produktion und Zerfall. Mit dem Bevatron wurde das erste Hauptziel, die Erzeugung von Antinukleonen, auf das hin es gebaut wurde, erreicht, ferner wurde ein neues Hyperon gefunden. Mit den höheren Energien kann man zumindest die Erzeugung weiterer Antihyperonen erwarten.

Der Übergang von 10 GeV Beschleunigern zu solchen von 30 GeV ist technisch sinnvoll ermöglicht worden durch die Anwendung von Magnetfeldern mit alternierendem Gradienten. Mit diesem Prinzip lässt sich eine starke Fokussierung der Strahlen mit kleinen Schwingungsamplituden erreichen, so dass man mit wesentlich kleineren Strahlkammern und damit auch leichteren Magneten auskommt. So wiegt der Magnet des 25 GeV CERN Synchrotron mit alternierendem Gradienten 3300 t, während der Magnet des russischen 10 GeV Synchrotrons 35000 t schwer ist.

Der Erzeugung höherer Energien durch Extrapolation der heutigen Beschleuniger ist noch keine prinzipielle Grenze gesetzt. Bei jedem weiteren Schritt erhebt sich jedoch die Frage, ob dieser Schritt auch sinnvoll wäre. Neben dem enormen Aufwand, den eine Vergrößerung der Dimensionen brauchte, mag man aus anderen Gründen zögern. Die für eine Reaktion massgebende, im Schwerpunktssystem der kollidierenden Teilchen verfügbare Energie wächst nur langsam mit der Teilchenenergie mit der Quadratwurzel der Energie (relativistischen Transformation) an. Außerdem sind die Teilchen mit höherer Energie im Laboratoriumssystem immer schwieriger zu identifizieren. Vielleicht treten keine neuen Elementarprozesse auf, sondern nur Prozesse mit komplexerer Multiplizität. Um darauf antworten zu können, wird man vielleicht abwarten müssen, bis Ergebnisse von Versuchen mit Beschleunigern vorliegen, bei denen zwei entgegen-

gerichtete Strahlen kollidieren. Ein solcher Beschleuniger entspräche, wenn jeder der beiden Strahlen 25 GeV Protonen lieferte, einem Beschleuniger mit einem Teilchenstrahl von 12000 GeV der auf eine ruhende Treffplatte fiele.

Man überlegt sich auch, ob tiefgekühlte Spulen zur Erzeugung von grösseren magnetischen Führungsfeldern als sie mit Eisen erreichbar sind, angewandt werden können. Die Apparatdimensionen würden verkleinert. Ferner wird untersucht, ob die Plasmaberührungen für Hochenergiebeschleuniger neue Möglichkeiten bieten.

Nachweisinstrumente

Die klassischen Instrumente, deren sich die Höhenstrahlforschung bediente, finden auch mit den Beschleunigern immer noch Anwendung. Als wichtigste Entwicklung der visuellen Technik, die die Teilchenspuren über die Ionisationspuren sichtbar macht, ist neben der Wilsonkammer und den photographischen Platten, die Blasenkammer getreten. In einer überhitzten Flüssigkeit bilden sich Dampfblasen an den von einem durchgegangenen Teilchen erzeugten Ionen. Eine mit Flüssigkeit gefüllte Kammer hat gegenüber einer gasgefüllten Wilsonkammer den Vorteil, dass die Flüssigkeit wegen ihrer grossen Dichte selbst als Treppplatte benutzt werden kann und dass gleichzeitig die erzeugten Sekundarteilchen mit grosser Wahrscheinlichkeit innerhalb der Kammer ihrerseits zu Reaktionen kommen können. Mit flüssigem Wasserstoff gefüllte Kammern enthalten keine komplexen Kerne, ein Vorteil der die Interpretation der beobachteten Spuren erleichtert. Aufnahmen lassen sich in rascher Aufeinanderfolge machen.

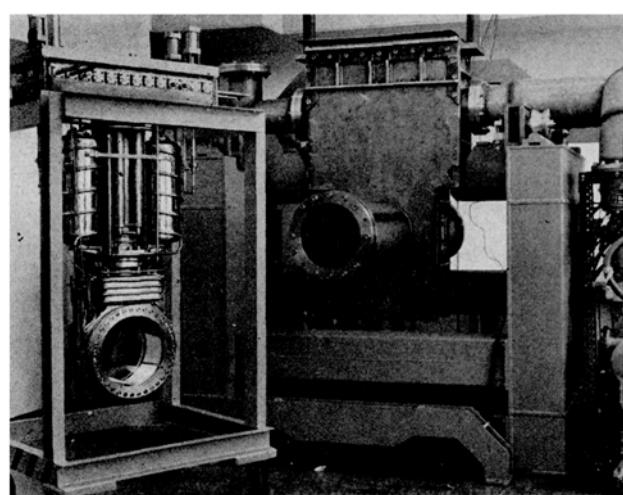


Abb. 2: Wasserstoff-Blasenkammer (30 cm CERN-Kammer)



Abb. 3: Beispiel einer Wasserstoff-Blasenkammer-Aufnahme: Spuren von 330 MeV-Pionen

In *a* findet die Reaktion $\pi^+ + p^+ \rightarrow n^0 + \pi^+ + \pi^+$ statt (Spuren der beiden geladenen π^+ sichtbar) in *b* zerfällt eines der π^+ in $\mu^+ + \nu$ (Spuren des μ^+ sichtbar) in *c* zerfällt das Muon in $e^+ + \nu + \bar{\nu}$ (Spur des Positrons sichtbar). Die Kammer war in einem magnetischen Feld, die Teilchenspuren sind daher gekrümmt (Photo CERN)

Die Zählertechnik ist schon lange mit dem Scintillationszähler wesentlich erweitert worden. Die hohen Intensitäten der Strahlen, die im allgemeinen in kurzen Impulsen zusammengedrängt sind, stellen hohe Forderungen an das Auflösungsvermögen der Zähler und der Zählelektronik. Neuerdings sucht man Scintillationskammern zu entwickeln, für die das räumliche Auflösungsvermögen so gross ist, dass Teilchenspuren registriert werden können und dieses Charakteristikum mit der Zeitauflösung von Teilchenzählern verbunden wird.

Neben den Scintillationszählern hat der Cerenkov-Zähler grosse Bedeutung erlangt. Er registriert das Licht, das ein Teilchen in einem Medium als Bugwelle

aussendet. Der Brechungsindex muss derart sein, dass die Teilchengeschwindigkeit grösser ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium. Die Trennung oder Unterscheidung der Teilchen bei relativistischer Geschwindigkeit ist eine äusserst schwierige, für quantitative Messungen aber unerlässliche Aufgabe. Eine Trennung nach Impuls und nach Geschwindigkeit hat zu erfolgen.

Die Schwierigkeiten, die man antrifft, kann man sich am folgenden Fall vergegenwärtigen. Wollte man in einem durch ein Magnetfeld nach Impuls getrennten Strahl von Teilchen des Impulses von 25 GeV/c Pionen von Protonen durch ihre Flugzeit unterscheiden, müsste für eine Flugstrecke von 1 km eine Flugzeitdifferenz von $2 \cdot 10^{-9}$ s festgestellt werden.

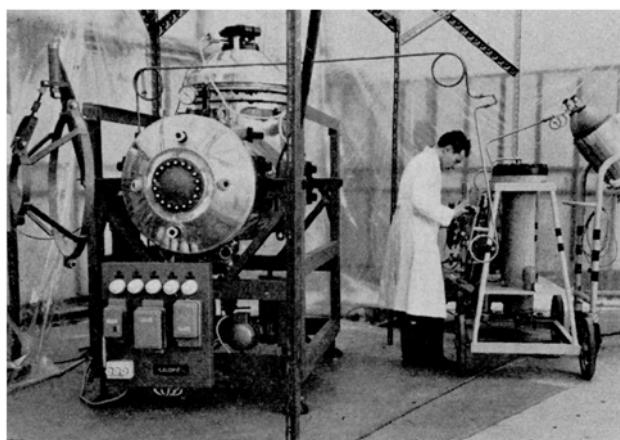


Abb. 4: Gas-Cerenkov-Zähler (CERN)

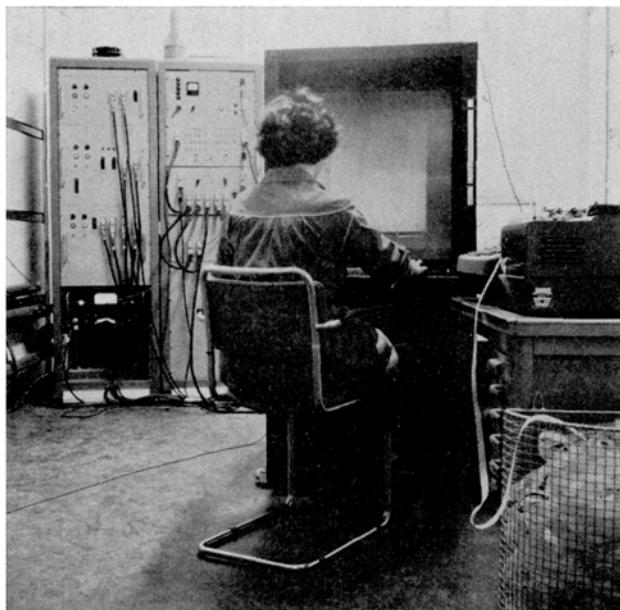


Abb. 5: Auswertegerät für Teilchenspuren (Verziffernder Projektionsapparat CERN)

Die Geschwindigkeit von 25 GeV/c Protonen weicht nur um rund $\frac{6}{10} \%$ von der Lichtgeschwindigkeit ab.

Mit einem mit Gas (C_2H_4) gefüllten Cerenkov-Zähler lassen sich im Impulsbereich von mehreren GeV/c Teilchen verschiedener Geschwindigkeit aussieben. Man registriert Licht, das nur unter einem wohldefinierten Winkel emittiert wird. Durch Variieren des Gasdruckes und dadurch auch des Brechungsindexes können mit demselben Zähler verschiedene Teilchengeschwindigkeiten ausgesucht werden.

Mit Blasenkammeraufnahmen oder mit Registrierungen komplizierter Zähleranordnungen wird in kurzer Zeit eine grosse Zahl von Informationen angesammelt. Ihre Auswertung wird in steigendem Masse auto-

matisiert. Es sind Geräte zur automatischen Ausmessung von Spuren entwickelt worden, und von den Rechenmaschinen werden Auswerteprogramme durchgeführt.

Organisation der Forschung

Die physikalische Forschung stand an der Wiege der Industrialisierung, heute haben Praktiken der Industrie in die physikalische Forschung Eingang gefunden. Viele Experimente werden von Physikern und Ingenieuren gemeinsam durchgeführt. Der Bau der grossen Beschleuniger, der komplizierten und kostspieligen Messinstrumente, die Durchführung von Experimenten und deren Auswertung übersteigt im allgemeinen die Fähigkeit und den Rahmen der Universität, der Zelle der Forschung von ehemals. In einzelnen Grossstaaten konnten sich einige Institute wie das Radiation Laboratory in Berkeley an eine solche Aufgabe wagen. In Brookhaven beteiligen sich mehrere Universitäten. CERN ist das erste Beispiel eines internationalen Forschungsinstitutes. Für die Universitäten stellt sich heute die Frage, wie weit neben der Schulung auch noch Forschung betrieben werden kann. Für die Forschungsinstitute stellt sich die Aufgabe, in der Spezialistenansammlung eine universelle physikalische Schule ständig zu erneuern.

Elementarteilchen

In der Tabelle sind, nach der Ruhmasse geordnet, die heute bekannten Elementarteilchen aufgeführt: das Photon, die Leptonen, die Mesonen, die Baryonen (Nukleonen und Hyperonen). Die Bezeichnung Elementarteilchen bringt zum Ausdruck, dass bei der Analyse der Naturprozesse die sogenannten Teilchen nicht einfach aus übrigen aufgebaut erscheinen und beschrieben werden können.

Die Kräfte in der Natur können als Nahwirkung zwischen Teilchen beschrieben werden, wobei die gegenseitige Wechselwirkung zweier Systeme vom Austausch von Zwischenteilchen herführt, die ihrerseits in Kontakt-Wechselwirkung mit den beiden Systemen stehen.

Die stärksten in der Natur beobachteten Wechselwirkungen sind die von Pionen und K -Mesonen mit den Baryonen. Ihr Austausch gibt Anlass zu den starken Kernkräften, die die Nukleonen im Kern zusammenhalten. Der Austausch findet nur über kurze Strecken statt, die Reichweite der Kernkräfte ist klein.

Von mittlerer Stärke sind die Wechselwirkungen zwischen Photonen und geladenen Teilchen, es sind die elektromagnetischen Wechselwirkungen, die die Atome und Moleküle zusammenhalten und Anlass zu den optischen Erscheinungen geben.

	Name	Symbol	Ruhmasse in c^2/MeV	Mittlere Lebensdauer in sec	Zerfallsprodukte	Ladungs- zah			Isotopen- Spin	Fremdheit S	Antiteilchen			
						Q	B	J			Q	B	T_z	S
Leptonen	Photon	γ	0	∞	stabil	0	0	1						
	Neutrino	ν	0	∞	stabil	0	0	$1/2$			$\bar{\nu}$	0	0	
	Elektron	e^-	0,51	∞	stabil	-1	0	$1/2$			e^+	+1	0	
Mesonen	Muon	μ^-	106	$2 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu + \bar{\nu}$	-1	0	$1/2$			μ^+	+1	0	
	Pion	π^0	135	$< 4 \cdot 10^{-16}$	$\gamma + \gamma$	0	0	0	0	0	π^0	0	0	0
		π^+	140	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu; e^+ + \nu$	+1	0	0	1	+1	π^-	-1	0	-1
		π^-	140	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^- + \nu; e^- + \nu$	-1	0	0	-1	0	π^+	+1	0	+1
Nukleonen	K-Meson	K^+	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu, 2\pi, 3\pi$	+1	0	0	$+1/2$	1	K^-	-1	0	$-1/2$
		K^0	498	$\begin{cases} 1,0 \cdot 10^{-10} \\ 0,9 \cdot 10^{-7} \end{cases}$	$e^+ + \pi^0 + \nu; \mu^+ + \pi^0 + \nu$	0	0	0	$-1/2$	1	\bar{K}_0	0	0	$+1/2$
					$\pi^+ + \pi^-, \pi^0 + \pi^0$									
Hyperonen	Proton	p^+	938	$\infty (> 10^{28})$	stabil	+1	1	$1/2$	$+1/2$	0	\bar{p}^-	-1	-1	$-1/2$
	Neutron	n^0	940	$1,0 \cdot 10^3$	$p^+ + e^- + \nu$	0	1	$1/2$	$-1/2$	0	\bar{n}^0	0	-1	$+1/2$
	A^0	1115	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$p^+ + \pi^-; n^0 + \pi^0$	0	1	$1/2$	0	0	-1	\bar{A}^0	0	-1	0
	Σ^+	1190	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$p^+ + \pi^0; n^0 + \pi^+$	+1	1	$1/2$		+1	-1	$(\bar{\Sigma}^-)$	-1	-1	-1
	Σ^0	1192	$< 10^{-11}$	$A^0 + \gamma$	0	1	$(1/2)$	1	0	-1	$(\bar{\Sigma}^0)$	0	-1	0
	Σ^-	1196	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$p^0 + \pi^-$	-1	1	$1/2$		-1	-1	$(\bar{\Sigma}^+)$	+1	-1	+1
	Ξ^0	1311	?	$A^0 + \pi^0$	0	1	$(1/2)$	$+1/2$	-2		$\bar{\Xi}^0$	0	-1	$-1/2$
	Ξ^-	1319	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$A^0 + \pi^-$	-1	1	$1/2$	$-1/2$	-2		$(\bar{\Xi}^+)$	+1	-1	$+1/2$

Schwach sind die Wechselwirkungen, bei denen ein Neutrino emittiert oder absorbiert wird. Sie sind verantwortlich für den β -Zerfall des Neutrons und die meisten spontanen Umwandlungen der anderen Elementarteilchen.

Die schwächsten Wechselwirkungen sind die der Gravitation, die nur zwischen grossen Massen in Erscheinung treten. Vielleicht existiert auch für sie ein Teilchen, das die Kräfte übermittelt.

Von den drei ersten, in der Natur realisierten Klassen, ist die der elektromagnetischen Wechselwirkungen am längsten und besten bekannt. Die Aussagen die die Quantenelektrodynamik, die quantentheoretische Erweiterung der Maxwell'schen Elektrodynamik, liefert, sind bis jetzt auch in Einzelheiten in exakter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen gefunden worden. Aber es ist eine wesentliche Frage, wie weit die Theorie, die mit Punktladung operiert auch bei den sehr kleinen Dimensionen (10^{-14} cm), zu denen die hochenergetischen Teilchen Zugang geben, noch anwendbar ist.

Die beiden anderen Klassen sind noch wesentlich weniger bekannt. Ihre Beschreibung mit Hilfe der quantentheoretischen Feldtheorie, des einzigen bisher zur Verfügung stehenden theoretischen Apparates, hat sich bei der Fermischen Theorie des β -Zerfalls und bei der späteren Anwendung auf andere schwache Prozesse sehr bewährt. Sie gibt auch in der Erweiterung von YOKAWA wenigstens eine qualitative Beschreibung des Pion-Nukleonsystems.

Ein grosser Fortschritt wurde erreicht als es gelückte, phänomenologisch die Nukleonen und Hyperonen in ein Schema (Gell-Mann, Nishijima) – dessen tiefere Bedeutung allerdings noch nicht erkannt ist – einzurichten, den Teilchen Quantenzahlen zuzuordnen und deren Auswahlregeln bei Reaktionen zu formulieren.

Kurz nach der Entdeckung des Neutrons ist der Begriff des Isotopen Spin T , dessen Formalismus dem des gewöhnlichen Spin J ähnlich ist, eingeführt worden. Er charakterisiert die beiden Nukleonen, die ähnlichen Teilchen Proton und Neutron, als verschiedene Ladungszustände derselben Einheit.

Die Zahl der Ladungszustände ist gegeben durch $2T + 1$. Das Nukleon hat zwei Komponenten, T ist $1/2$ mit $T_z = +1/2$ für das Proton, $T_z = -1/2$ für das Neutron. Die Pionen haben 3 Ladungszustände: $T = 1$ ist ihnen daher zugeordnet worden mit $T_z = +1(\pi^+)$, $T_z = 0(\pi^0)$, $T_z = -1(\pi^-)$.

Die Deutung der Reaktionen, an denen K -Mesonen und Hyperonen beteiligt sind, führte zur Entdeckung einer neuen Quantenzahl der «Fremdheitsquantenzahl» S und zu der in der Tabelle angegebenen Zuordnung.

In starken Wechselwirkungen bleibt die neue Quantenzahl erhalten ($\Delta S = 0$), aber nicht bei den schwachen Wechselwirkungen, die verantwortlich für den Zerfall sind ($\Delta S = 1$). Diese Zuordnung und Regel erklärt unter anderem warum die Reaktion $N + N = N + \Lambda + K$ stattfindet, aber die Reaktion $N + N = \Lambda + N$ nicht beobachtet wird. Im ersten Fall gilt $\Delta S = 0$, im zweiten wäre $\Delta S = -1$.

Fremdheitsquantenzahl S , Isotopen Spin T und die Baryonenzahl B (1 für Baryonen, 0 für alle anderen Teilchen) sind mit der Ladungszahl Q durch die Relation

$$Q = T_z + (B + S)/2$$

verbunden.

Das Schema liess noch ein Teilchen erwarten ($T_z = 1/2$, $S = -2$, $B = 1$). Es ist letztes Jahr entdeckt worden. Das Schema hat sich bisher in vollem Einklang mit den experimentellen Befunden gezeigt.

Die Erhaltung der Fremdheitsquantenzahl gilt nur für gewisse Klassen von Wechselwirkungen. Das ist auch der Fall für die Parität. Es erregte Aufsehen als vor einigen Jahren entdeckt wurde, dass die Parität bei den schwachen Wechselwirkungen nicht erhalten bleibt, dass keine links-rechts Symmetrie bei ihnen besteht.

Es ist eine allgemeine Eigenschaft der heutigen Feldtheorie, dass sie jedem Teilchen ein Antiteilchen zuordnet, das entgegengesetzte Ladung, gleiche Masse und gleichen Spin hat. Das magnetische Moment ist bei Teilchen und Antiteilchen entgegengesetzt errichtet, relativ zur Spinrichtung. Falls das Teilchen instabil ist, hat das Antiteilchen dieselbe Zerfallskonstante. Die Tabelle zeigt, dass fast alle Antiteilchen gefunden wurden. Das π^0 ohne Ladung und mit Spin 0 ist sein eigenes Antiteilchen.

Im Paarerzeugungsprozess bei dem ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron, entsteht, zeigt sich, dass der Erhaltungssatz der Ladung wirksam ist. Die Ladungszahl Q definiert als die Zahl der positiven Ladungen vermindert um die Zahl der negativen ($Q = q^+ - q^-$) bleibt in einem isolierten System konstant. Dieser Satz scheint absolut zu gelten. Ebenso absolut scheint die Erhaltung der Baryonenzahl $B = N - \bar{N}$ zu gelten ($B = 0$ für Leptonen und Mesonen, $B = 1$ für Baryonen, N = Zahl der Baryonen, \bar{N} = Zahl der Antibaryonen).

Zusammengesetzte Gebilde

Unter den Elementarteilchen sind nur das Elektron, Proton und das Photon und das Neutrino in freiem isolierten Zustand stabil. Das freie Neutron ist instabil, hat aber eine relativ lange Lebensdauer und im Kernverband eine gleiche Stabilität wie das Proton. Proton, Neutron und Elektron sind die Bausteine der Atome und Moleküle.

Auch mit instabilen Teilchen hat man zusammengesetzte Gebilde gefunden. Die stabilisierenden Bindungskräfte sind aber nicht ausreichend, die Lebensdauer des gebundenen Zustands wesentlich über die des freien instabilen Teilchens zu verlängern.

Schon lange ist das Positronium ein «Positron-Elektron Atom» bekannt, Muonen und Pionen können als Hüllenteilchen von Atomkernen gebunden werden und kurzzeitig bilden sich Mesonenatome. Im normalen Kern kann ein Nukleon durch ein Hyperon ersetzt werden unter Bildung eines Hyperkernes. Interessant ist das Beispiel des Hyperwasserstoffs, der aus 1 Proton, 2 Neutronen und 1 Λ^0 besteht. Das gewöhnliche H_1^4 Isotop aus 1 Proton und 3 Neutronen existiert nicht, weil das dritte Neutron wegen des Pauli-Ausschliessungsprinzips keinen tiefen Zustand besetzen kann. Für das Λ^0 neben 2 Neutronen besteht dieses Verbot nicht.

In den ersten Dezennien unseres Jahrhunderts schien die Analyse der Struktur der Materie eine Grenze erreicht zu haben, indem die komplexen Naturphänomene auf die Bewegungen und Änderungen der Anordnungen weniger gegebener Einheiten zurückgeführt waren. Mit der Entdeckung neuer Elementarteilchen und neuer Prozesse ist das Bild wieder verwirrter geworden, die Natur erwies sich als noch vielfältiger.

Gibt es neben den nun bekannten Elementarteilchen neue Kategorien, die vielleicht erst bei Stößen noch höherer Energie in Erscheinung treten? Sind die Gesetze der Erhaltung der Ladung, der Erhaltung der Baryonenzahl, der Erhaltung der Energie, des Impulses und der Erhaltung des Spins, die Gesetze, die alle bei starken, mittelstarken und schwachen Wechselwirkungen gelten, universell gültig oder gibt es schwächere Wechselwirkungen bei denen sie verletzt werden?

Spannende Fragen, die Hoffnung in der Vielfältigkeit der Elementarteilchen auf eine tiefere Symmetrie zu stossen, die Aussicht die gesamten Naturphänomene dann besser zu verstehen, spornen die Physiker bei ihrer Forschung weiterhin an.

Summary

Short Review of the actual state of High Energy Physics: Cosmic ray research—Accelerators for high energy particles—Instruments for detection of fast particles—Classification of elementary particles.