

2 Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

In der Geschichte der Kernforschung war 1932 ein großartiges Jahr; ein Kollege von Rutherford bezeichnete es als *annus mirabilis*. Cockcroft und Waltons geglückte künstliche Umwandlung war nur einer von vielen Fortschritten. Während diese beiden noch mit der Fertigstellung ihres *Atomzertrümmers* im Cavendish beschäftigt waren, machte James Chadwick im gleichen Institut eine andere weitreichende Entdeckung.

Zwei Jahre zuvor hatten zwei deutsche Wissenschaftler, Walther Bothe und Herbert Becker, ein Bestrahlungsexperiment mit Alphateilchen ähnlich dem von Rutherford ausgeführt, aber mit einer Probe aus dem Leichtmetall Beryllium, wobei etwas Neuartiges auftrat, etwas anderes als die von Rutherford beobachteten Protonen oder was sonst damals bekannt war. Man sprach von *Berylliumstrahlung*, die die bemerkenswerte Eigenschaft besitzt, Materie praktisch ungehindert zu passieren.

Dann wurde eine weitere, ungewöhnliche Eigenschaft der Berylliumstrahlung entdeckt, und zwar von Marie Curies Tochter Irène und deren Mann, Frédéric Joliot, im *Institut de Radium* in Paris. Frédéric wurde mit 25, und mit bis dahin nur geringen Kenntnissen über die Radioaktivität, Maries persönlicher Assistent, und 1926, ein Jahr später, heiratete er Irène. Kurz darauf sagte ihm ein alter Freund: „Du bist zu spät zur Radioaktivität gekommen. Die radioaktiven Zerfallsreihen . . . sind bekannt und es gibt kaum noch was zu tun . . .“ Kann man sich noch mehr irren?

Unbeirrt nutzten die Joliot den besonderen Reichtum des Instituts: einen großen Vorrat an Radium. Im Jahr 1929 beschlossen sie, *zur Beschleunigung wichtiger Entdeckungen* daraus eine größere Menge des hoch-radioaktiven Elements Polonium herzustellen. Als es soweit war, mischten sie Polonium mit Beryllium zur Herstellung eines starken *Berylliumstrahlers*, um dessen Wirkung auf Wasserstoff zu testen, der in Paraffinwachs chemisch gebunden war. Sie fanden eine neue Eigenschaft dieser Strahlung heraus, nämlich die, daß sie Protonen, also Wasserstoffatomkerne, mit großer Geschwindigkeit aus dem Wachs herausstößt.

Was war nun diese rätselhafte *Berylliumstrahlung* mit derart ungewöhnlichen Eigenschaften? Mit Rutherfords Unterstützung machte sich Chadwick an die Lösung dieses Rätsels. Er wies nach, daß das Curie'sche Phänomen mit einer rollenden Billardkugel verglichen werden kann, die eine ruhende

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

stößt, und rechnete aus, daß die Berylliumstrahlung aus „Teilchen etwa der Protonenmasse, aber ohne (elektrische) Ladung“ besteht. Diese neuen Teilchen nannte er Neutronen, weil sie elektrisch neutral sind.

Die Theoretiker stießen einen Seufzer der Erleichterung über diese Entdeckung aus, denn sie gab ihnen endlich einen sinnvollen Ansatzpunkt zur Erklärung des Kernbaus: Protonen und Neutronen haften mit sehr starken Kräften zusammen. Bereits 1920 hatte Rutherford eine derartige Eingebung gehabt, als er meinte, daß Teilchen von der Art dieser Neutronen „für die Erklärung des Atomkerns der schwereren Elemente nahezu unabdingbar“ seien.

Obwohl das damals noch nicht erkannt werden konnte, so war doch die Entdeckung des Neutrons ein wesentlicher Schritt zur Nutzung der Kernenergie.

Bald darauf, im gleichen Jahr 1932, verkündete Harold C. Urey zusammen mit zwei anderen amerikanischen Kollegen die Existenz eines Wasserstoffisotops mit etwa der doppelten Protonenmasse. Die Anwesenheit von schwerem Wasserstoff im normalen Wasserstoff sowie von schwererem Wasser im gewöhnlichen Wasser war für die wissenschaftliche Welt eine ziemliche Überraschung. Der natürliche Anteil des schweren Wasserstoffs, den man Deuterium nannte, ist klein, – etwa ein Teil in 5000, – was weitgehend erklärt, warum die Entdeckung so lange auf sich warten ließ.

Im gleichen Jahr 1932 gab es in Amerika noch eine weitere Entdeckung. Vier Jahre zuvor hatte Paul Dirac, ein begabter, junger Mathematiker in Cambridge aus seinen theoretischen Überlegungen heraus vorhergesagt, daß es ein Teilchen wie das Elektron, aber mit entgegengesetzter Ladung geben müsse, – positiv statt negativ. Diese Theorie erwies sich nun als richtig, denn Diracs Teilchen wurden von Carl D. Anderson als Folgeprodukte beim Eindringen der sogenannten Höhenstrahlung, die beständig aus dem Weltall auf die Erdkugel trifft, in die irdische Atmosphäre gefunden. Dieser Befund wurde bald darauf im *Cavendish* mithilfe verbesserter Methoden bestätigt, und zwar von Patrick Blackett (der im Zweiten Weltkrieg für Anwendungen der Naturwissenschaften bei Heeres- und Marineunternehmungen ausgezeichnet wurde) und Giuseppe Occhialini. Diese Teilchen werden Positronen genannt.

Die Entdeckungen von 1932 lieferten zwei neue Teilchenarten für Bestrahlungsexperimente, Neutronen und Deuteronen (die Kerne des schweren Wasserstoffs). Außerdem hatte der Amerikaner Ernest O. Lawrence 1930 einen Teilchen-Beschleuniger, das Zyklotron, erfunden. Die Fähigkeiten dieses Mannes für den Aufbau derartiger Maschinen erwiesen sich später beim Wettlauf um die Atombombe als wichtig. Seit etwa 1933 wurde das Zyklotron erfolgreich für die Beschleunigung von Protonen und Deuteronen auf hohe Energien und damit indirekt auch für die Erzeugung von Neutronen für Bestrahlungsexperimente verwendet.

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

Tabelle 2. 1932 bekannte Elementarteilchen

Teilchen	Masse	Elektrische Ladung
Leicht	Elektron	$-e$
	Positron	$+e$
Schwer	Proton	1836 m
	Neutron	1839 m

Ein Proton und ein Elektron, mit gleichen, aber entgegengesetzten Ladungen bilden das elektrisch neutrale Wasserstoffatom, in dem der Kern, das Proton, fast die gesamte Masse besitzt. Protonen und Neutronen sind die Bausteine der Atomkerne.

Die Kernphysiker verwendeten schon damals zwei weitere Teilchen, nämlich Deuteronen (*schwere* Wasserstoffkerne) und Alphateilchen (Heliumkerne, die von einigen radioaktiven Substanzen ausgestrahlt werden).

Cockcroft sagte von dieser erstaunlichen Epoche, „Wir lebten in einer goldenen Zeit für die Physik mit ihrer schnellen Folge von Entdeckungen“, und Chadwick kennzeichnete ihre damalige Einstellung durch die Beschreibung dieser Forschung „als einer Art Sport. Es war ein Wettkampf mit der Natur“.

Erstaunlicherweise waren auf der ganzen Welt nur wenige Leute daran beteiligt. Insgesamt etwa hundert in den beiden führenden Zentren, dem *Cavendish* sowie dem *Institut de Radium*, und vielleicht noch einmal doppelt so viel Leute in kleineren Gruppen in anderen Laboratorien. Forschungsnachrichten flossen zwischen ihnen ungehindert hin und her, und über nationale Grenzen hinweg hatten sie ein Gefühl der Zusammengehörigkeit. Man sprach gelegentlich von einer wissenschaftlichen Internationalität.

Bald darauf warf Hitlers Machtergreifung in Deutschland 1933 jedoch finstere Schatten über diesen Schauplatz. Ein früher Schock war der Ausschluß Einsteins aus der Preußischen Akademie der Wissenschaften, weil er Jude war. In ganz Deutschland begann die Entfernung von Juden aus ihren Ämtern und viele von ihnen verließen das Land einschließlich solcher Wissenschaftler, die im bevorstehenden Krieg für die Nazis von unschätzbarem Wert gewesen wären.

Aber die Fortschritte in der Kernphysik gingen weiter. Das Jahr 1934 bescherte eine weitere ungeheuer wichtige Entdeckung, und wiederum durch Alphastrahlung. Der erste Schritt erfolgte im Verlauf einer Versuchsreihe, die Frédéric und Irène Joliot mit ihrer starken Poloniumquelle machten. Sie bemerkten, daß einige bestrahlte Proben außer den vertrauten Protonen und Neutronen auch Positronen lieferten, jene Teilchen, die Anderson zwei Jahre zuvor in der Höhenstrahlung entdeckt hatte. Es war das erste Mal, daß Posi-

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

tronen bei Kernreaktionen im Laborversuch auftauchten. Als sie über diese unerwarteten Befunde 1934 auf einer internationalen Tagung in Brüssel berichteten, begegneten sie Zweifeln. Sie waren ziemlich deprimiert, aber kein geringerer als Bohr nahm das Paar beiseite und ermutigte sie, dran zu bleiben. Ein paar Wochen später hatten sie ihren wesentlichen Durchbruch.

Joliot sagte zu einem Kollegen: „Ich bestrahle diese Probe mit Alphateilchen aus meiner Strahlenquelle. Sie können den Geiger-Zähler knistern hören. Jetzt entferne ich die Strahlenquelle, aber das Knistern hört nicht auf, sondern läuft weiter.“ Die bestrahlte Aluminiumprobe sandte weiterhin Positronen aus. Es vergingen einige Minuten, wobei der Effekt allmählich abklang und schließlich ganz verschwand.

Dies bedeutete, daß das Aluminium radioaktiv geworden war. Es handelte sich um das erste Beispiel künstlicher Radioaktivität, was ein Mitarbeiter als eine Alchemie bezeichnete, die sich steuern und regeln läßt. Eine kurzlebige radioaktive Substanz (nämlich ein Phosphorisotop) war bei der Einwirkung von Alpha-Teilchen auf Aluminium entstanden. Zwei andere Elemente, Bor und Magnesium, zeigten ähnliche Ergebnisse. Das Phänomen der Radioaktivität, das bis dahin eigentlich nur bei einigen etwas exotischen Elementen beobachtet worden war, war jetzt auf einige andere dem Chemiker bekannte ganz gewöhnliche Elemente erweitert worden.

Marie Curie war aufgewühlt. Später schrieb Joliot: „Den Ausdruck der intensiven Freude, die sie überkam, werde ich nie vergessen ... Zweifellos war dies die letzte große Genugtuung in ihrem Leben“. Einige Monate später starb sie an Leukämie.

Zu einem seiner jungen Assistenten, dem Deutschen Wolfgang Gentner, sagte Joliot: „Beim Neutron kamen wir zu spät. Beim Positron kamen wir zu spät. Aber jetzt sind wir da!“ Ein Jahr später wurde den Joliot für ihre Entdeckung der Nobelpreis verliehen.

Hinsichtlich dieser Entwicklung bezeichnete es Blackett als *Treppenwitz der Wissenschaftsgeschichte*, daß niemand vor ihnen das Experiment durchgeführt hatte, weder absichtlich noch zufällig. Der ganze Witz hatte doch nur darin bestanden, die Probe nach dem Entfernen der Alphaquelle noch weiter zu beobachten. Aber nachdem das Eis gebrochen war, wurde künstliche Radioaktivität in Hülle und Fülle gefunden. Cockcroft und seine Mitarbeiter erzeugten sie mit ihrem Protonenbeschleuniger, und die Amerikaner mit dem Zyklotron. Letzteres erwies sich jahrelang als das bestgeeignete Hilfsmittel.

Joliot'sche Experimente reizten auch einen Italiener, Enrico Fermi, ein Mann, der nur ganze acht Jahre später den ersten künstlichen Kernreaktor bauen sollte. Ihm kam die Idee, daß Neutronen besser für Bestrahlungsexperimente geeignet sein könnten als Alphateilchen. Da sie keine elektrische Ladung besitzen, werden sie von den Kernen weder abgestoßen noch angezogen. Andererseits werden Alphateilchen von Kernen abgestoßen, weil sie

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

positiv geladen sind und gleiche Ladungen sich abstoßen. Alphateilchen müssen also eine hohe Energie besitzen, um so die Abstoßung zu überwinden und den Kern zu treffen. Tatsächlich können sie nur dann mit Erfolg eingesetzt werden, wenn die Kernladung und damit die Abstoßung klein ist, was ihre Wirksamkeit auf nur einige wenige Elemente einengt.

Fermi hatte gerade eine mühsame theoretische Arbeit abgeschlossen und war froh, von der trocknen Mathematik zu einer Labortätigkeit wechseln zu können. Weder er noch irgend jemand sonst hatte in Rom Erfahrung bezüglich der benötigten Geräte, aber er ging mutig ans Werk, bastelte sich seinen eigenen Geigerzähler (damals konnte man ihn ja nicht kaufen) und fertigte sich eigene Neutronenquellen mithilfe von einem Gramm Radium im Keller des Gesundheitsamtes an. Dann beschoß er damit systematisch ein Element nach dem anderen vom leichten Wasserstoff angefangen bis hin zu immer schwereren Elementen. Bei den ersten sechs Versuchen geschah gar nichts, und er war nahe daran aufzugeben, als beim siebten Versuch mit dem Element Fluor ein starker Effekt erzeugt wurde, ebenso wie bei vielen anderen Elementen danach.

Er rief mehrere Kollegen zu Hilfe. Emilio Segrè schickte er mit einer Einkaufsliste fort und dem Auftrag, alle chemischen Elemente zu kaufen, die es in Rom gab. Segrè war der Erste, der von der größten Chemikalienfirma der Stadt die seltenen Alkalimetalle Rubidium und Cäsium anforderte.

Insgesamt gelang es Fermi beinahe wie am Fließband, mehr als 60 der 90 bekannten Elemente zu testen, und mehr als 40 davon wurden unter dem Einfluß von Neutronen radioaktiv. Ihren ersten Bericht zu diesem Thema reichten die Italiener im Mai 1934 zur Veröffentlichung in einer Zeitschrift ein, also nur vier Monate nach der Pioniertat der Joliot. Selbst für eine wohlausgestattete, eingeübte Arbeitsgruppe wäre dies eine bemerkenswert kurze Zeit gewesen, und das gleich beim ersten Startversuch! Dies unterstreicht aber auch die Einfachheit der experimentellen Methoden der Vorkriegszeit.

Noch im gleichen Jahr machte die Gruppe in Rom eine andere wichtige Entdeckung. Bruno Pontecorvo hatte sich ihnen angeschlossen, – ein frisch diplomierter, überschwenglicher junger Mann, der einige Jahre später abfallen und von Harwell¹ in die UdSSR gehen sollte. Pontecorvo und Edoardo Amaldi, ein anderes Mitglied des Teams, schoben eine Neutronenquelle in eine Silberröhre, um sie zu aktivieren, und erhielten ganz ausgefallene Ergebnisse. Beispielsweise wurde eine größere Radioaktivität erzeugt, wenn die Aktivierung auf einem Holztisch statt auf einer Metallplatte vorgenommen wurde. Nach mehreren solchen zufällig ausgewählten Experimenten machte Fermi ihnen den Vorschlag, die Aktivierung im Inneren eines großen Paraf-

¹ Das britische Atomforschungszentrum (d. Übers.).

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

finwachsklotzes auszuführen. Dadurch wuchs die Aktivität phantastisch an, etwa um das Hundertfache, wie durch Zauberei.

Wie alle anderen so war auch Fermi zwar überrascht, aber während der Mittagspause stellte er eine mögliche Erklärung auf. Seine Vorstellung war zum einen, daß die Neutronen die ursprünglich hohe Geschwindigkeit durch wiederholte Stöße gegen die Protonen im Paraffinwachs verlieren, und zum anderen, daß langsame Neutronen eine viel größere Wirkung entfalten können als schnelle. Seine Überlegung war, daß Wasserstoff-Atome die Neutronen effektiver bremsen würden als jedes andere Element, denn sie besäßen in etwa die gleiche Masse. (Dieses Argument ist nicht selbstverständlich, aber mit dem Modell der Billardkugeln leicht mathematisch nachweisbar.)

Eine einfache Nachprüfung bot sich von selbst an: Man wiederhole das Experiment in Wasser, das ja pro Liter etwa ebensoviel Wasserstoffatome enthält wie Paraffinwachs. Am gleichen Nachmittag wurden die Neutronenquelle und das Silberrohr in den Goldfischeich im Garten hinter dem Labor versenkt, und wiederum wurde die gleiche hohe Aktivität erreicht. Eine weitere Reihe von Experimenten ergab, daß der Effekt nicht auf Silber beschränkt ist; die meisten der von Neutronen hervorgerufenen Aktivitäten wurden durch wasserstoffhaltige Substanzen verstärkt.

Materialien wie Wasser und Paraffin, die Neutronen bremsen, wurden fortan *Moderatoren* genannt (sie *moderieren* die Neutronengeschwindigkeit), und sie sind für Kernreaktoren von großer Wichtigkeit. Diese Anwendung lag 1934 aber noch in weiter Ferne. Die unmittelbare Bedeutung der römischen Entdeckungen lag in dem Umstand, daß künstlich radioaktive Elemente von da ab einfach und in Mengen für Untersuchungen und Anwendungen hergestellt werden konnten. Man brauchte kein eigenes Zyklotron zu haben. Ebenso wie für die Physiker wurden diese Materialien jetzt auch für die Chemiker und Biologen nützlich.

Im nächsten Jahr verlangsamte sich in Rom der Fortschritt der Entdeckungen, und Segrè fragte Fermi nach dem Warum. Das lag z. T. daran, daß sie auf ihrem speziellen Forschungsgebiet den Rahm abgeschöpft hatten. Fermi schlug Segrè vor, sich umzuschauen, was in der Welt so vor sich ging, – damals, zu Zeiten von Mussolinis unheilvollem abessinischen Abenteuer, gar nicht zu reden von den Nazigeschehnissen in Deutschland. Sie waren tatsächlich alle so verängstigt, daß sie sich gar nicht mehr mit ganzem Herzen an die Wissenschaft gefesselt fühlten. Drei Jahre später, nach der Verleihung des Nobelpreises, gab Fermi dem Druck nach und zog von Italien in die USA; denn seine Frau war Jüdin.

Andere Gruppen wiederholten die italienischen Entdeckungen mit Begeisterung, unter ihnen die Männer um Bohr in Kopenhagen. Bohr war damals in seinem eigenen Land zu einer Legende geworden. Als der führende dänische Gelehrte wohnte er im Ehrenhaus auf dem Gelände der Carlsberg-

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

Brauerei bei freiem Pils und Lagerbier, und sogar die Straßenbahnschaffner wußten über ihn Bescheid. Seine Kollegen erhoben sich respektvoll, wenn er in den Speisesaal trat, wogegen er scheu auf der Schwelle stehen blieb. Aber in seinen persönlichen Freundschaften und seiner vollständigen, fast ehrfurchtsvollen Hingabe an die Geheimnisse der Natur konnte ihn nichts beirren.

Als das Zeitschriftenheft der *La Ricerca Scientifica* mit den Arbeiten von Fermi und seinen Mitarbeitern in Bohrs Institut ankam, versammelten sich alle um Otto Frisch, einen relativ jungen österreichischen Juden, der als einziger italienisch lesen konnte. Frisch war als Naziflüchtling gerade erst auf Bohrs Einladung hin im Institut angekommen, nachdem er zuvor noch ein Jahr bei Blackett in London gewesen war, der ihn in die experimentelle Kernphysik eingeführt hatte. Er war für Schlüsselstellungen bei der Entdeckung der Kernspaltung und der Projektierung der Atombombe ausersehen.

In Kopenhagen war die umgehende Reaktion auf die italienischen Berichte „Wir brauchen eine eigene, starke Neutronenquelle“. Entsprechend stellte man einen Antrag über 100000 Kronen für den Kauf von $\frac{6}{10}$ g Radium zu Bohrs 50. Geburtstag am 7. Oktober 1935. Sie wurden mit fein gemahlenem Beryllium zu einer Neutronenquelle vermischt. Frisch, der mit dieser speziellen Aufgabe betraut worden war, benutzte diese Quelle sofort zu eigenen Untersuchungen über die Durchlässigkeit verschiedener Stoffe für Neutronen.

Bohr verfolgte die Ergebnisse mit großer Aufmerksamkeit. Die Muster, die sich dabei nacheinander abzeichneten, entzogen sich mehrere Monate lang jeder Erklärung. Bei einem Institutskolloquium Ende 1935 unterbrach ein aufmerksamer, aber verlegener Bohr den Vortragenden. Dann hörte er mitten in einem Satz auf und setzte sich wieder hin, so als wäre ihm nicht wohl. Einen Augenblick später stand er wieder auf und sagte mit einem Lächeln „Jetzt verstehe ich es“.

Dies war der Anfang für ein neues Bild vom Kernbau, das Bohr sich mit seinen Kollegen in dem folgenden Jahr erarbeitete. Er nahm an, daß der Kern aus einer Gruppe kleiner Kugeln besteht, – den Protonen und Neutronen, – die zwar zusammenhalten, wenn sie sich berühren, aber doch nicht so fest, daß sie sich nicht gegeneinander bewegen könnten. Das entspricht genau dem Bild eines Tropfens einer Flüssigkeit, eine Ansammlung kleiner klebriger Gegenstände (Atome oder Moleküle), die sich ständig um sich herum bewegen wie Gamow es schon 1928 vorgeschlagen hatte. Bohr wies besonders darauf hin, daß zwischen dem Einfangen eines Neutrons im Kern und dem nächsten Reaktionsschritt eine Pause eintreten muß. Man könnte danach erwarten, daß der Kern wirklich Tröpfcheneigenschaften besitzt.

Diese Flüssigkeitstropfen-Analogie läßt sich erstaunlich weit ausbauen. Wir können von Teilchen sprechen, die von außen auf dem Tropfen *konden-*

Die frühen 30er Jahre: Ein goldenes Zeitalter der Atomphysik

Tabelle 3. Wichtige Daten des *Goldenen Zeitalters* der Kernphysik

1930	Lawrence erfindet das Zyklotron.
1932	Cockcroft und Walton erzielen eine Kernumwandlung mithilfe eines Teilchenbeschleunigers (<i>Atomzertrümmerer</i>). Chadwick entdeckt das Neutron. Urey entdeckt den schweren Wasserstoff. Anderson entdeckt das Positron.
1934	Die Joliot-Curies entdecken die künstliche Radioaktivität.
1935	Fermi führt den Begriff des Moderators für die Abbremsung von Neutronen ein.
1936	Bohr veröffentlicht sein Modell des Atomkerns.

sieren, und von Teilchen aus dem Inneren, die aus ihm *verdampfen*. Wir können von einer *Temperaturerhöhung* sprechen, wenn wir seine innere Energie erhöhen, wodurch seine Teilchen befähigt werden, leichter zu verdampfen. Wir können von einer *Oberflächenspannung* des Kerns sprechen, die dazu beiträgt, den Kern zusammenzuhalten.

Einige Jahre später verhalf das Modell des *Flüssigkeitströpfchens* zu einer anschaulichen Beschreibung des Kernspaltungsprozesses.