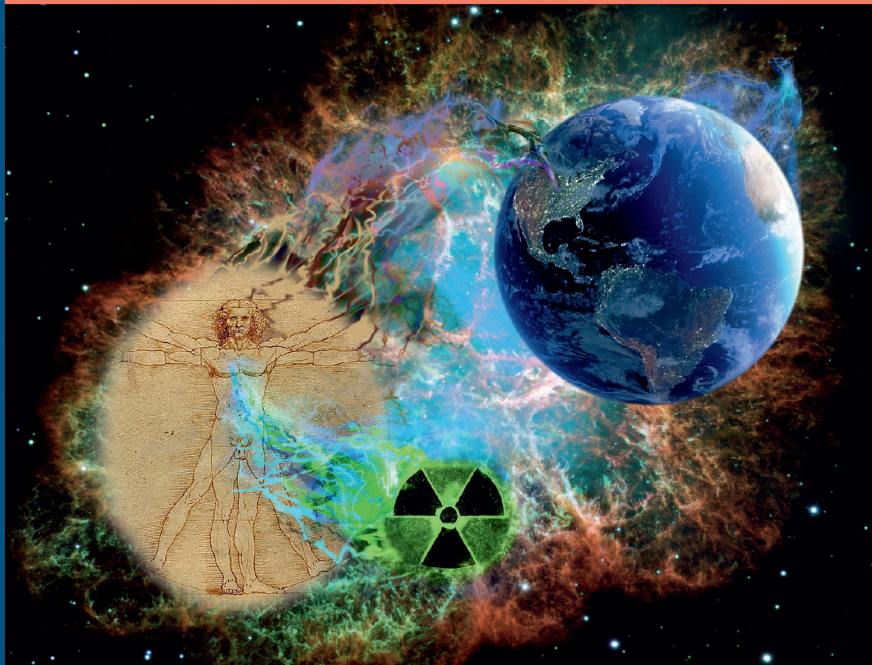


Michael Wiescher

# Radioaktivität

Ursprung und Auswirkungen eines  
Naturphänomens



Michael Wiescher

Radioaktivität

Michael Wiescher

# Radioaktivität

Ursprung und Auswirkungen eines Naturphänomens

Für meine Kusinen

Brigitte Roos und Ulrike Bäumle

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische  
Daten sind im Internet über <http://dnd.d-nb.de> abrufbar

wbg Academic ist ein Imprint der wbg

© 2020 by wbg (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt

Die Herausgabe des Werkes wurde durch die  
Vereinsmitglieder der wbg ermöglicht.

Umschlagsabbildung: Shutterstock – Erd-Grafik, ESA/Hubble (Crab Nebula via Wikipedia),  
creation/design – Hrair Aprahamian

Satz und eBook: Satzweiss.com Print, Web, Software GmbH

Gedruckt auf säurefreiem und

alterungsbeständigem Papier

Printed in Germany

Besuchen Sie uns im Internet: [www.wbg-wissenverbindet.de](http://www.wbg-wissenverbindet.de)

ISBN 978-3-534-40453-7

Elektronisch sind folgende Ausgaben erhältlich:

eBook (PDF): 978-3-534-40455-1

eBook (epub): 978-3-534-40454-4



# Inhaltsverzeichnis

## Teil 1: Grundlagen und Formalismus

1	Einleitung .....	10
1.1	Wissenschaftsentwicklung im frühen 20. Jahrhundert.....	10
1.2	Die erste Forschergeneration und ihre Ergebnisse.....	13
1.3	Physikalische Interpretation der Radiumchemie .....	17
1.4	Frühe Atommodelle und die Struktur des Atomkerns.....	22
1.5	Frühe Anwendung radioaktiver Strahlung.....	27
1.6	Kollaboration und Kommunikation.....	30
1.7	Grundlagenforschung und Anwendung.....	32
	Weiterführende Literatur .....	35
2	Das natürliche Phänomen der Radioaktivität .....	37
2.1	Die vier Grundkräfte .....	38
2.2	Das Bohr'sche Atommodell.....	39
2.3	Die Struktur des Atomkerns.....	43
2.4	Energie und Bindung des Atomkerns .....	47
2.5	Der radioaktive Zerfall.....	52
2.6	Isotope, Isotone, Isobare .....	60
	Weiterführende Literatur .....	65
3	Zerfallsgesetze.....	66
3.1	Die Aktivität einer radioaktiven Substanz.....	66
3.2	Das Zerfallsgesetz .....	69
3.3	Zerfallsformalismus.....	72
3.4	Natürliche Zerfallssequenzen.....	74
3.5	Kernreaktionen und künstliche Radioaktivität.....	77
3.6	Teilchenbeschleuniger.....	80
3.7	Kernspaltung und künstliche Erzeugung von Radio-Isotopen an Reaktoren .....	83
	Weiterführende Literatur .....	92
4	Dosimetrie und Biologie .....	93
4.1	Absorption und Tiefenwirkung von Strahlung.....	99
4.2	Dosimetrie .....	104

4.3	Strahlungsmessungen und Strahlungsdetektoren .....	113
4.4	Chemische und biologische Wirkungen.....	120
4.5	Strahlenschäden, Strahlenkrankheit und Strahlentod.....	132
	Weiterführende Literatur .....	150
Teil 2: Natürliche Radioaktivität		
5	Das radioaktive Universum .....	152
5.1	Der Nachweis kosmischer Radioaktivitäten.....	152
5.2	Der Ursprung der Elemente .....	163
5.3	Der Ursprung der kosmischen Strahlung.....	180
5.4	Kosmische Neutrino-Strahlung .....	184
5.5	Kosmische Photonen.....	186
	Weiterführende Literatur .....	190
6	Unser radioaktiver Planet.....	191
6.1	Die Entwicklung des Planetensystems .....	195
6.2	Radioaktivität im frühen Sonnensystem .....	198
6.3	Die Struktur der Erde .....	202
6.4	Radioaktivität als geologischer Motor.....	208
6.5	Radiogene Radioaktivität an der Erdoberfläche .....	217
6.6	Geologische Formationen mit hoher Radioaktivitätskonzentration .....	224
6.7	Die Entwicklung der Atmosphäre .....	231
6.8	Die radioaktive Atmosphäre.....	236
6.9	Kosmische Strahlung und das erdmagnetische Feld.....	243
6.10	Die kosmische Strahlung und das Klima.....	251
	Weiterführende Literatur .....	256
7	Der radioaktive Mensch .....	257
7.1	Der radioaktive Körper .....	257
7.2	Radioaktivität im menschlichen Ernährungskreislauf .....	265
7.3	Der Ursprung des Lebens .....	274
7.4	Zellen als selbstorganisierende Systeme .....	284
7.5	Von der Mutation zur Evolution.....	290
7.6	Radioaktive Katastrophen in der Erdgeschichte.....	296
7.7	Radioaktivität als Teil unseres Daseins .....	307
	Weiterführende Literatur .....	309

8 Radioaktivität in niederer Dosis.....	310
8.1 Strahlungsdosis und Strahlungswirkung .....	311
8.2 Statistische Untersuchungen zur natürlichen Strahlungsdosis.....	318
Weiterführende Literatur .....	337
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	338
Danksagung .....	340



Teil 1

Grundlagen und Formalismus

# 1 Einleitung

Die Entdeckung der Radioaktivität und die Interpretation dieses Naturphänomens gelten als einer der großen Erfolge der Naturwissenschaften zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Der Begriff *Radioaktivität* wurde zum Schlüsselwort in der modernen Physik, das nicht nur in der Wissenschaftsgeschichte, sondern auch in der und für die Politik- und Sozialgeschichte eine enorme Rolle spielt. Radioaktivität ist und bleibt Gegenstand gesellschafts- und wirtschaftspolitischer Auseinandersetzungen. Sie betreffen einen physikalischen Prozess, der zum Fundament der modernen Naturwissenschaften zählt und die neue, revolutionäre Theorie der Quantenphysik experimentell bestätigte.

Dieses Buch soll weder Lehrbuch der Kernphysik noch wissenschaftshistorische Darstellung sein, sondern möglichst unvoreingenommen die Rolle von Kernphysik und Radioaktivität im täglichen Leben und Dasein der Menschen darstellen. Das Naturphänomen Radioaktivität bietet, wie alles in der Natur Vorkommende, bei kleiner Dosierung Vorteile, ist aber in großen Mengen gefährlich. Obwohl häufig bestritten, trifft auch für Radioaktivität der Satz zu, der Paracelsus<sup>1</sup> zugeschrieben wird: *Omnia sunt venena, nihil est sine veneno. Sola dosis facit venenum* (Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift. Allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist).

Radioaktivität gehört zur Chemie unserer Körper und ist womöglich Grund und Ursprung unserer Entwicklung als biologische Wesen. Wir unterliegen täglich radioaktivem Einfluss. Radioaktivität können wir nutzen, müssen uns aber mit ihren großen Gefahren und Risiken auseinandersetzen. Vorher sollten wir sie jedoch verstehen. Das Buch möchte deshalb Ursprung und Rolle der Radioaktivität in unserem heutigen Dasein soweit wie möglich allgemeinverständlich darstellen.

## 1.1 Wissenschaftsentwicklung im frühen 20. Jahrhundert

Die Entdeckungsgeschichte der Radioaktivität beschränkt sich zumeist auf die Geschichte der beteiligten Forscher. Dabei entsteht oft der Eindruck, dass sich die Erkenntnisse herausragender Persönlichkeiten auf eine Folge zufälliger Beobachtungen und zusammenhangloser Entdeckungen reduzieren. Das ist nicht der Fall: Die Erforschung der Radioaktivität ist die Geschichte effektiven Informationsaustauschs innerhalb einer eng vernetzten, kleinen Gruppe

---

<sup>1</sup> Theophrastus Bombast von Hohenheim (1493–1541), deutscher Arzt und Reformator der Medizin.

von Forschern, die gezielt zu neuen Experimenten und Entdeckungen führte. Dieses Vorgehen war und ist auch heute noch die Arbeitsweise innerhalb der Wissenschaftlergemeinschaft. Der Unterschied zu früher: E-Mail und Internet haben diese wissenschaftsinterne Kommunikation erheblich beschleunigt.

Erstaunlich bleibt jedoch, wie schnell sich die Beteiligten im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert gegenseitig informieren konnten, obwohl sich der wissenschaftliche Austausch auf handgeschriebene Briefe und publizierte Ergebnisse in Fachzeitschriften beschränkte. Fachzeitschriften als wissenschaftliches Kommunikationsmittel entstanden vorwiegend zu Beginn des 19. Jahrhunderts und entwickelten sich schnell zum idealen Medium für Bekanntmachung, Verbreitung und Diskussion neuer wissenschaftlicher Ergebnisse und Thesen. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war das System fest etabliert; nur die Transportgeschwindigkeiten von Schiff und Eisenbahn bewirkten Zeitverzögerungen. Heute diktiert lediglich die Zeit, die Forscher benötigen, um ihre Ergebnisse ins Internet zu stellen, das Tempo der Wissensübermittlung.

Eine im renommierten Wissenschaftsperiodikum *Nature* veröffentlichte Analyse der Korrespondenzen von Charles Darwin (1809–1882) und Albert Einstein (1879–1955), den wohl bekanntesten Forscherpersönlichkeiten des 19. und 20. Jahrhunderts, zeigt, dass ihr Kommunikationsverhalten mathematisch mit ähnlichem Formalismus beschrieben werden kann wie das moderne Kommunikationsverhalten per Internet<sup>2</sup>. Darwin schrieb mindestens 7591 Briefe und erhielt 6530; Einstein verschickte über 14 500 Briefe und erhielt mehr als 16 200 – jeweils in den letzten 30 Jahren ihrer wissenschaftlichen Karrieren. Dieser Austausch konnte nur durch strenge Priorisierung aufrechterhalten werden, indem die als wichtig erachteten Briefe zuerst und überhaupt beantwortet wurden. In beiden Fällen lag die Rate der Antworten bei 25 bis 30 Prozent, wobei die Zeitskala für die Antwort dem jeweiligen Stellenwert entsprach, den die Forscher dem Problem und dem Schreiber zumaßen.

Ähnliches Verhalten prägt unsere heutige E-Mail-Kommunikation. Das heißt, dass Forscher schon um 1900 in eng vernetzten Gruppen arbeiteten und Anregungen und Ideen innerhalb ihrer spezifischen Forschergruppe folgten. Das ist heute nicht anders. Der Umfang der Forschergruppen bleibt ungefähr konstant, bedingt durch zunehmende Spezialisierung, die direkt mit der wachsenden Komplexität des Forschungsgebietes korreliert. Befassten sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts nur wenige Forscher mit Radioaktivität, sind es gegenwärtig Tausende, die aber in Hunderten kleiner, hochspezialisierter Gruppen zu verschiedenen Aspekten dieser Thematik arbeiten. Innerhalb solch kleiner Gruppen kann die Kommunikationszeit sehr weit optimiert werden.

---

<sup>2</sup> Die Angaben folgen: João Gama Oliveira & Albert-László Barabási: Human dynamics: Darwin and Einstein correspondence patterns. *Nature* 437, S. 1251 (2005).

Ein Beispiel für die Kommunikationsdichte der Kernphysikergemeinde ist die Vermutung des Ehepaars Irène Joliot-Curie (1897–1956, die Tochter von Marie und Pierre Curie) und Frédéric Joliot-Curie (1900–1958) im Januar 1934, dass der radioaktive Stickstoff-13 durch Bombardierung von Bor mit Alpha-Teilchen erzeugt werden kann<sup>3</sup>. Dieses Ergebnis war am 15. Januar 1934 in den wöchentlichen Sitzungsberichten der *Académie des Sciences* zu lesen und am 10. Februar in der *Nature* veröffentlicht worden. Schon Ende Februar 1934 wiederholten drei unabhängige Institute in Cambridge, Großbritannien, am *California Institute for Technology* (Caltech, Pasadena) und in Berkeley, Kalifornien, USA, das Experiment, publizierten die Ergebnisse und bestätigten die Vermutung der Joliot-Curies. Auch die Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn (1879–1968) und Fritz Straßmann (1902–1980) im Dezember 1938 wurde schnell in die USA kommuniziert. Ende desselben Monats interpretierten Lise Meitner (1878–1969) und ihr Neffe Otto Frisch (1904–1979) in ihrem Exil in Schweden die chemischen Beobachtungsergebnisse von Otto Hahn und Fritz Straßmann als Resultat einer Kernspaltungsreaktion. Niels Bohr (1885–1962), von Frisch in Kopenhagen informiert, reiste im Januar 1939 in die USA und teilte den Kernphysikern an der *Columbia University*, New York, wie dem kurz zuvor emigrierten italienischen Kernphysiker Enrico Fermi (1901–1954) die Ergebnisse mit. Hahn und Straßmann publizierten sie Anfang Januar in der deutschen Fachzeitschrift *Naturwissenschaften*. Joliot in Paris erkannte nach Erhalt des Journals die Bedeutung der Entdeckung. Am 26. Januar 1939 wurde das Experiment in Kopenhagen, Paris und an der *Columbia University* wiederholt und sein Ergebnis bestätigt.

Die Forschung zur Radioaktivität bietet auch ein Beispiel für die Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in praktische oder ökonomisch vorteilhafte Anwendungen. Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) beobachtete Ende 1895, dass bestimmte, zuvor unbekannte Strahlen Materialien verschiedener Dichte durchdrangen und sich durch die unterschiedliche Absorption auf einer Fotoplatte visualisieren ließen. Das wurde sofort als Möglichkeit für die Medizin erkannt, Körperteile ohne operativen Eingriff zu untersuchen. Innerhalb weniger Jahre entwickelte sich die Röntgendiagnostik zu einem weltweit blühenden Medizin-Gewerbe. Die Gefahren intensiver Röntgenstrahlung wurden jedoch nicht gleich erkannt und weit unterschätzt. Das führte in vielen Fällen zu schweren Schädigungen bei den diagnostizierenden Ärzten und Technikern (Abbildung 1-1).

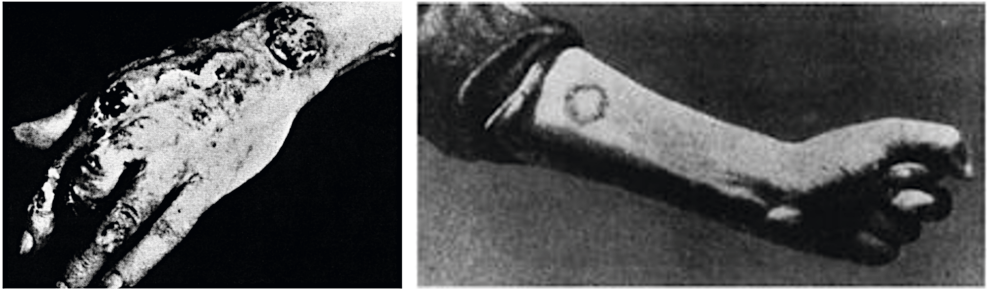
Aber auch die radioaktive Strahlung aus dem Zerfall der Atomkerne fand schnell eine Anwendung. Schon Pierre Curie (1859–1906) beobachtete die Verbrennungsmerkmale auf der Haut – eine Folge intensiver Strahlung. Über längere Zeiträume hinweg trug er Radiumgestein an der Haut, um Dauer und Wirkung der Strahlung im Selbstversuch zu bestimmen. Das

---

<sup>3</sup> Dies ist das erste Mal, dass Radioaktivität künstlich durch menschliche Aktivität erzeugt wurde, allgemein als anthropogene Radioaktivität bezeichnet.



berühmteste Beispiel ist die Verbrennungsstelle an seinem inneren Arm (Abbildung 1-1). Das brachte schon Pierre Curie auf den Gedanken möglicher Anwendung für medizinische Zwecke, zum Beispiel die Zerstörung unerwünschter Gewebewucherungen von der Warze bis zum Tumor.



*Abb. 1-1: Links: Hautkrebs an der linken Hand eines frühen Röntgenarztes nach mehr als 15 Jahren Arbeit mit Röntgenquellen zur medizinischen Untersuchung. Rechts: Verbrennung am inneren Arm von Pierre Curie nach Selbstversuch mit einer Radiumprobe, die er für mehrere Tage am Arm trug.*

Dies sei den Ausführungen zur Entdeckungsgeschichte der Radioaktivität und ihrer Anwendungen vorausgeschickt. Es macht deutlich, dass eine kleine, aber international eng vernetzte Forscher-Gemeinschaft ihre Untersuchungen auf den neuesten Ergebnissen aufbaute, um die physikalischen Grundlagen zu verstehen, aber auch mögliche Anwendungen zu entwickeln und zu nutzen.

## 1.2 Die erste Forschergeneration und ihre Ergebnisse

Die Entdeckung der Radioaktivität wird oft als glücklicher Zufall dargestellt. Der französische Physiker Henri Becquerel (1852–1908) hatte sich schwach leuchtende, phosphoreszierende Mineralien besorgt, unter anderem Uransalze. Er wollte weiterführende Versuche zu Natur und Ursprung von Röntgenstrahlung<sup>4</sup> machen. Sie rief bei bestimmten Materialien fluoreszierende Effekte hervor, brachte sie also zum Leuchten. Becquerel wollte herausfinden, ob auch das Sonnenlicht Röntgenstrahlung enthält und dadurch die Leuchtkraft dieser so bestrahlten Materialien erhöht werden kann. In der Tat wiesen die Versuche mit einer empfindlichen

---

<sup>4</sup> In der englischsprachigen Literatur wird vornehmlich die von Röntgen selbst eingeführte Bezeichnung x-Strahlen oder x-rays verwandt.

Fotoplatte nach Sonnenlichtbestrahlung ein schwaches Leuchten nach. Dieser Effekt wird heute gezielt als Thermolumineszenz in der Archäometrie zur Altersbestimmung kristalliner Materialien verwendet.

Im Frühjahr 1896 hatte Becquerel diese Uranproben gemeinsam mit lichtempfindlichen Fotoplaten in seiner Schublade eingeschlossen. Als er nach einigen Tagen die Platten herausnahm, fand er sie wesentlich stärker belichtet als erwartet vor. Deutlich zeigten sie die Silhouette der uranhaltigen Proben. Er schloss daraus, dass diese Belichtung direkt durch unsichtbare Strahlung der Mineralien herrühren müsse. Aus diesem Grund gilt die Entdeckung als glücklicher Zufall. Im gewissen Sinne ist das korrekt, aber Henri Becquerel folgte einem Plan, der durch Entdeckung der Röntgenstrahlung und ihrer Eigenschaften inspiriert war. Er deutete seine Beobachtung schnell als Zeichen einer neuen Strahlungsart. Die Physikergemeinschaft war durch diese Ergebnisse hochmotiviert, das neuartige Phänomen weiter zu erforschen und nach Eigenschaften und Ursprüngen dieser neuen Art der Strahlung zu fragen. Becquerels korrekte Interpretation der belichteten Fotoplaten als Signatur einer neuen Art von Strahlung war der entscheidende Schritt.

Maria Salomea Skłodowska, besser bekannt als Marie Curie (1867–1934), war 1891 aus Warschau nach Paris zum Studium der Physik gekommen. Dort hatte sie bei der Suche nach einem Arbeits- und Promotionsplatz den jungen französischen Physiker Pierre Curie kennengelernt und geheiratet. Marie Curie war von den Ergebnissen Henri Becquerels fasziniert und versuchte zusammen mit ihrem Mann, neben dem Uran weitere Stoffe zu finden, die die neue, geheimnisvolle Strahlung aussenden. Diese Arbeiten verlangten eine zeitraubende chemische Aufbereitung mineralogischer Proben, darunter große Mengen uranhaltiger Rohmaterialien. Marie Curie fand heraus, dass außer Uran auch das Element Thorium die rätselhafte Strahlung aussandte. Thorium war 1815 in Norwegen im Gestein einer Kupfermine gefunden und nach dem germanischen Gott Thor benannt worden. Curies Entdeckung deutete darauf hin, dass radioaktive Stoffe in alten Gesteinen eingebettet sein könnten. Das Ehepaar Curie erweiterte die Suche auf andere Mineralien. Sie entdeckten, dass Pechblende (Uraninit) vielfach intensiver als Uran oder Thorium strahlt. Dieses uranhaltige Material verwendete die böhmische Glasindustrie zur Färbung von Kristallgläsern. Marie Curie und ihr Mann ließen sich große Mengen aus der böhmischen Bergbaustadt Sankt Joachimsthal (heute: Jáchymov, damals Österreich-Ungarn, heute Tschechien) schicken und begannen ausführliche Experimente, um Art und Verhalten der Strahlung zu bestimmen.

Die Curies benutzten keine fotografischen Platten, sondern eine Methode, die auf der von ihnen entdeckten Ionisation<sup>5</sup> von Gasen durch radioaktive Strahlung beruht. Hohe Radioaktivität

---

<sup>5</sup> Ionisation heißt, dass aus der Hülle des neutralen Atoms ein Elektron herausgeschlagen wird, das als unabhängiges, negativ geladenes Teilchen einen elektrischen Strom erzeugt.

erzeugt elektrischen Strom, der direkt gemessen werden kann. Das Forscher-Ehepaar arbeitete mit rein chemischen Verfahren und entdeckte, dass außer Uran zwei weitere Bestandteile der Pechblende strahlten. Das erste war ein metallisches Element, das die Curies Radium, das Strahlende, nannten. Dem zweiten Element gaben sie den Namen Polonium, zu Ehren des Herkunftslandes von Marie Curie. Als es darum ging, spezielle Eigenschaften wie Atomgewicht und chemisches Bindungsverhalten zu bestimmen, waren große Mengen Pechblende erforderlich, in Chargen zu jeweils 20 kg aufbereitet. Marie Curie extrahierte mit verschiedenen Verfahren metallische Bestandteile aus der Pechblende. Pierre Curie untersuchte die jeweilige Radioaktivität des entsprechenden Metalls. Dabei benutzte er neben dem Ionisationsmeter auch fluoreszierenden Materialien wie Zinksulfid  $ZnS$ , die, durch Strahlung angeregt, zu leuchten beginnen.



Abb. 1-2: Henri Becquerel (links) und das Ehepaar Curie teilten sich 1903 den Nobelpreis für Physik

Die Ergebnisse dieser Arbeiten legte Marie Curie im Juni 1903 als Doktorarbeit unter dem schlichten Titel *Recherches sur les substances radioactives* (Forschungen zu radioaktiven Substanzen) vor. Sie beschrieb nicht nur die chemische Separierung der neuen radioaktiven Substanzen, sondern diskutierte auch die dafür entwickelten Nachweistechniken sowie Beobachtungen zur zeitlichen Variation der radioaktiven Komponenten und der Charakteristik der Strahlung selbst. Außerdem beschrieb sie die lumineszierenden Eigenschaften der Strahlung sowie deren Durchdringen von Materialien und Ablenkung in elektrischen Feldern. Nach den 1898 veröffentlichten Arbeiten des neuseeländischen Physikers Ernest Rutherford (1871–1937) bildete das die Basis für die Klassifikation der Strahlung in  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung. Das Gutachterkomitee

schrieb, dass es sich bei der Arbeit um die größte wissenschaftliche Leistung handele, die je in einer Doktorarbeit vorgelegt worden sei. Noch im gleichen Jahr erhielten Henri Becquerel und das Ehepaar Curie in Stockholm den Nobelpreis für Physik. Ein Jahr später lag Marie Curies Dissertation, in viele Sprachen übersetzt, der Wissenschaftsgemeinschaft vor.

Pierre Curie war insbesondere an möglichen Anwendungen der Strahlung interessiert, nicht zuletzt vom raschen Erfolg der Röntgenstrahlung in der medizinischen Diagnostik motiviert. Curie dachte an direkte Anwendung in der Krebstherapie und führte verschiedene Selbstversuche aus. So band er einen mit Radiumsalzen gefüllten Behälter für zehn Stunden an seinen Arm und beobachtete die Entwicklung der durch die intensive Strahlung entstandenen Brandwunde über mehrere Wochen. Er notierte, wie das Gewebe zerstört wurde und nach 50 Tagen nur eine graue Narbe zurückblieb. Daraus schloss er, dass die Strahlung auch Krebsgewebe zerstören könne, was in den darauffolgenden Jahren zu ersten Ansätzen der sogenannten Brachytherapie<sup>6</sup> in der Krebsbehandlung führte.

Um die Strahlung zu quantifizieren, führte Marie Curie die erste Einheit für die Intensität radioaktiver Strahlung ein: Als 1 Curie (Ci) gilt die Strahlenmenge, die 1 g Radium emittiert. Diese Definition gibt nur die Strahlenmenge pro Zeit oder Aktivität an und sagt nichts über die Art der Strahlung und ihre Auswirkung auf chemische oder biologische Materialien wie den menschlichen Körper aus. Heute gilt neben dem Ci eine andere Einheit für die Strahlung, die sich weniger an chemischen Begriffen wie die Menge des strahlenden Materials, sondern am physikalischen Prozess des radioaktiven Zerfalls eines Elements orientiert, der Strahlung erzeugt. Diese physikalische Einheit ist das nach dem Entdecker der Radioaktivität benannte Becquerel (Bq), das einem Zerfallsprozess pro Sekunde und damit einem emittierten radioaktiven Strahlungsteilchen pro Sekunde entspricht. Ein Gramm Radium hat 37 Milliarden Zerfälle pro Sekunde, meist ausgedrückt als  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfälle/s. Das entspricht  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq oder 37 GBq<sup>7</sup>. Wenn man davon ausgeht, dass die Curies ungefähr zehn Tonnen Pechblende von 158 kBq/g chemisch aufbereitet hatten, setzten sie sich unbewusst der Gefahr einer Strahlung von zirka 1,58 Tera-Becquerel (TBq) aus – eine enorme Strahlendosis, wenn man bedenkt, dass das Reaktorunglück von Tschernobyl eine Strahlungsmenge von ungefähr 26 Tbq freigesetzt hat. Die 1,58 TBq sind vermutlich eine Unterschätzung, denn die Curies führten mit dem extrahierten Stoff zahllose Experimente durch, die die Dosis erheblich erhöht haben dürften. Dies belegt ihr Nachlass: Der Wohnbereich und die Notizen der Curies sind nach wie vor hochkontaminiert und werden heute aufgrund der gesetzlichen Strahlenschutzbestimmungen ohne

---

<sup>6</sup> Dabei wird radioaktiv strahlendes Material so nahe wie möglich zum Tumor platziert, um einen maximalen Bestrahlungs- und Zerstörungseffekt zu bewirken.

<sup>7</sup> Vielfach verwandte Größeneinheiten für physikalische Einheiten:  $10^{-15} \equiv$  femto (f),  $10^{-12} \equiv$  pico (p),  $10^{-9} \equiv$  nano (n),  $10^{-6} \equiv$  micro ( $\mu$ ),  $10^{-3} \equiv$  milli (m),  $10^3 \equiv$  kilo (k),  $10^6 \equiv$  Mega (M),  $10^9 \equiv$  Giga (G)  $10^{12} \equiv$  Tera (T),  $10^{15} \equiv$  Peta (P)

Schutzkleidung nicht zugänglich gemacht. Selbst Marie Curies Kochbuch ist radioaktiv ver-seucht, was vermuten lässt, dass auch das Essen nicht unbetroffen blieb.

Die Folgen blieben nicht aus: Verbrennungen an Fingern und Händen, Müdigkeit und an-dere Symptome, die man heute der sogenannten Strahlenkrankheit zuschreibt. Kollegen wie Ernest Rutherford beobachteten das zunehmende Zittern von Pierre Curies Händen, die kaum mehr Materialien halten konnten. Pierre Curie starb 1906 an den Folgen eines Verkehrsunfalls. Geistesabwesend überquerte er eine Straße und geriet unter die Räder eines schwerbeladenen Pferdefuhrwerks. Man vermutet, dass diese Unachtsamkeit eine Folge überhöhter Strahlendosis gewesen sein könnte, der er durch Selbstversuche mit großen Mengen Radium am Körper aus-gesetzt war, um die Verbrennungswirkung der Strahlung direkt zu untersuchen<sup>8</sup>. Marie Curies Hände waren durch die permanente Bestrahlung, während der chemischen Arbeiten zuneh-mend vernarbt. Gegen Ende ihres Lebens galten sie als verkrüppelt und konnten kaum mehr Instrumente halten. Marie Curie starb 28 Jahre nach dem Tode ihres Mannes am 4. Juli 1934 an Leukämie, vermutlich die Langzeitfolge der enormen Strahlenbelastung<sup>9</sup>.

### 1.3 Physikalische Interpretation der Radiumchemie

Wie die Arbeiten von Marie und Pierre Curie die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen zur Radioaktivität dominierten, spielte der in Neuseeland geborene Physiker Ernest Rutherford eine vergleichbare Rolle in der physikalischen Interpretation des Phänomens. Schon damals versuchten viele Forscher, den Geheimnissen der Radioaktivität auf die Spur zu kommen. Ihre Beiträge sollten nicht unterschätzt werden, doch erst Rutherford zog die richtigen Schlüsse aus der Interpretation der Daten. Ihm verdanken wir die Charakterisierung der Radioaktivität als physikalischen Zerfallsprozess eines Atomkerns. Er beschrieb auch den Atomkern selbst als

---

<sup>8</sup> Richard F. Mould: Pierre Curie, 1859–1905. *Curr Oncol.* 14(2), 2007, S. 74–82.

<sup>9</sup> Der 2004 erschienene Roman *Das Buch von Blanche und Marie* von Per Olov Enquist beschreibt die Geschichte von Blanche Wittman (1859–1913), einem im Paris der Jahrhundertwende bekannten Hyp-nose-Medium. In ihrer zweiten Karriere soll die Laborassistentin später die Geliebte von Marie Curie gewesen sein. Das Buch beschreibt, dass die bei ihrer Arbeit entstandene Strahlenbelastung so extrem war, dass erst die Arme und später auch ein Bein von Blanche Wittman amputiert werden mussten und sie nur noch als Torso bis zu ihrem qualvollen Tod weiterexistierte. Dieses Buch erzeugte große Auf-regung. Nachfolgende Untersuchungen ergaben aber, dass eine Blanche Wittman nie als Assistentin im Institut der Marie Curie angestellt war. Die Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 16. März 2005 schreibt, dass *die Tagebücher der Blanche, die das Gravitationszentrum des Romans bilden*, niemals existiert hätten und die Geschichte vom qualvollen Strahlentod wohl mehr dichterischer Freiheit als histo-rischer Wahrheit zu verdanken sei.

kleines Zentralteilchen in der mikro-planetarischen Leere der Elektronenhülle des Atoms. Er gilt deswegen zu Recht als der Vater der modernen Kernphysik.

Schon als Doktorand von Joseph John Thomson (1856–1940) am *Cavendish Laboratory* in Cambridge befasste sich Rutherford kritisch mit der Ionisation von Gasen durch Strahlungsteilchen<sup>10</sup>. Im Rahmen dieser Forschung untersuchte er auch das Vermögen radioaktiver Strahlung, Materialien zu durchdringen. Auf der Basis seiner Ergebnisse postulierte er 1898, nachdem er eine Stelle an der kanadischen *McGill University* in Montreal angenommen hatte, die Existenz von zwei Strahlungskomponenten, die er der Einfachheit halber als  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung bezeichnete, wobei die  $\alpha$ -Strahlung im Gegensatz zur  $\beta$ -Strahlung nur sehr geringes Durchdringungsvermögen besitzt. Ein Jahr später gelang der Nachweis unterschiedlicher Ladung beider Teilchen, da magnetische Felder sie in verschiedene Richtungen ablenkten. 1900 entdeckte der französische Physiker und Chemiker Paul Villard (1860–1934) eine dritte Komponente, die sich nicht durch Magnetfelder ablenken ließ und ein sehr hohes Durchdringungsvermögen aufwies. Diese dritte Strahlungsart nannte Rutherford  $\gamma$ -Strahlung. 1907 kehrte er aus Kanada zurück, um eine Professorenstelle an der *University of Manchester* anzunehmen. Dort konzentrierte er seine Forschung darauf, zusammen mit seinen Studenten die Identität der verschiedenen Strahlungsarten festzustellen. In den folgenden Jahren wurde die positiv geladene  $\alpha$ -Strahlung als Kerne des Edelgaselements Helium identifiziert. Ebenso wurde gezeigt, dass die negativ geladene  $\beta$ -Strahlung aus Elektronen besteht. Kurz vor Beginn des Ersten Weltkrieges bestätigte Rutherford die Vermutung, dass es sich bei  $\gamma$ -Strahlung ähnlich wie bei Röntgenstrahlung um eine sehr energiereiche elektromagnetische Strahlungswelle handelt.

Neben dieser Klassifizierung der Strahlung gab es allerdings noch eine weitere Beobachtung, die Henri Becquerel, Marie und Pierre Curie, Ernest Rutherford und andere Forscher bei der Untersuchung des Strahlungsverhaltens von Uran, Radium und Thorium verblüfften: die zeitliche Variation der Strahlung. In manchen Fällen schien die Strahlungsintensität abzunehmen, in anderen zuzunehmen. Auch schien Strahlung aus den Proben als chemisch inaktives Gas zu entweichen. Diese Änderungen wurden genau vermessen; die Ergebnisse zeigten, dass sowohl die Abnahme wie auch der Anstieg einer Strahlungsart eine charakteristische exponentielle Zeitabhängigkeit aufwies.

Schon an der McGill University suchte Rutherford mit seinem Studenten, dem Engländer Frederick Soddy (1877–1956), nach einer Lösung, um nicht nur den Mechanismus, der die Strahlung hervorrief, sondern auch den Grund für diese zeitabhängigen Änderungen in der Strahlungsart und Intensität zu verstehen. Die frühen Beobachtungen von Becquerel

---

<sup>10</sup> Für diese Arbeiten erhielt Thomson 1906 den Nobelpreis für Physik.

und anderen Forschern am Uran sowie eigene Experimente mit Thorium schienen zu zeigen, dass sich die Menge der verschiedenen radioaktiven Elemente verändert und auch auf die Natur der Strahlung auswirkt. Basierend auf diesen Beobachtungen entwickelte Rutherford die Hypothese, dass die Radioaktivität mit der Umwandlung von Elementen verknüpft ist. Demnach emittiert ein radioaktives Element Strahlung und verändert im Fall von  $\alpha$ -Strahlung Masse und Ladungszahl, so dass graduell mit dem Zerfall ein neues Element entsteht. Ähnliches gilt für die  $\beta$ -Strahlung, wobei nur die Ladungszahl verändert wird, die Masse allerdings mehr oder weniger konstant bleibt. Auch dies führt zur Bildung eines neuen Elements. Dabei wird das zerfallende Element als radioaktiver Mutterkern und das sich aufbauende Element als Tochterkern bezeichnet. In einem noch heute lesenswerten Buch veröffentlichte Ernest Rutherford 1904 eine Zusammenfassung des Forschungsstands zur Radioaktivität.<sup>11</sup> Darin beschreibt er nicht nur die physikalischen Prinzipien, Charakteristiken und das technische Design der Instrumente, die für die Messung der Strahlung verwendet wurden, sondern auch die zahllosen Experimente und Informationen, die insbesondere in Europa zur raschen Entwicklung des Forschungsstands beitrugen. Rutherford fasste die Beobachtungsergebnisse zusammen und lieferte neben dem Zerfallsgesetz auch eine erste Interpretation der Zerfallsreihen, bei der allerdings noch viele Mütter- und Töchter-Elemente unbekannt und unbenannt blieben.

Was Rutherford und andere Forscher als Variation in der Strahlung und den damit assoziierten Elementen beobachtet hatten, kennen wir heute als natürliche Zerfallsreihen. Ausgehend vom langsamen Zerfall langlebiger Uran- und Thorium-Atome, bauen sie neue radioaktive Elemente auf, die wiederum zerfallen. Dies bildet eine Kette von Zerfällen, die erst mit dem Aufbau des stabilen Atomkerns von Blei ihren Endpunkt findet. Die Zerfallskette selbst besteht aus Sequenzen von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfällen. Das erklärt den Massenunterschied sowie den Unterschied in der Ladungszahl zwischen den schweren Uran- und Thorium-Atomkernen und den wesentlich leichteren Blei-Kernen. Der Chemiker und Rutherford-Schüler Frederick Soddy formulierte später die sogenannten radioaktiven Verschiebungssätze, die über die Änderung von Massen- und Ordnungszahl den schrittweisen Ablauf der Zerfallsprozesse in den Zerfallsreihen beschreiben. Dieses Verfahren wird noch heute bei der Suche nach superschweren neuen Elementen angewandt. Soddy gilt deswegen als einer der Väter der Kernchemie.

Diese Entdeckung schien den Traum der mittelalterlichen Alchemisten zu erfüllen, durch Transmutation von Elementen neue Elemente wie Gold zu schaffen. Beobachtet wurde jedoch keine künstlich stimulierte Transmutation, sondern ein natürlicher, langsam ablaufender

---

<sup>11</sup> Ernest Rutherford: Radio-Activity. Cambridge University Press, 1904.



Prozess, bei dem schwere Elemente durch Aussendung energiereicher Strahlung sich langsam in weniger schwere Elemente verwandeln. Dieser Prozess findet in allen uranhaltigen Mineralien des Felsgesteins statt.

Rutherford und Soddy waren sich der Bedeutung ihrer Entdeckung bewusst, als sie 1901 nachwiesen, dass sich das radioaktive Thorium durch Zerfall in Radium verwandelte<sup>12</sup>. Als Soddy das realisierte, rief er spontan aus: *Rutherford, this is transmutation!* Rutherford fuhr ihn an: *For Christ's sake, Soddy, don't call it transmutation. They'll have our heads off as alchemists.*<sup>13</sup>

Irène und Frédéric Joliot-Curie gelang es 1933 zum ersten Mal, radioaktive Elemente künstlich zu erzeugen – eine wissenschaftliche Revolution. Durch den Beschuss von verschiedenen Materialien wie Bor, Aluminium und Magnesium mit  $\alpha$ -Teilchen aus radioaktiven Quellen konnten sie neue radioaktive Produkte erzeugen, die sie bei näherer Analyse als neue Isotope der Elemente Stickstoff, Phosphor und Silizium identifizierten. Aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeiten kommen sie nicht in der Natur vor. Dies war der erste Schritt zur Erzeugung künstlicher oder anthropogener Radioaktivität. Im Gegensatz zur radiogenen und kosmogener Radioaktivität beruht sie nicht auf natürliche Erzeugungsprozesse wie dem Zerfall langlebiger Aktinoiden<sup>14</sup> im Erdreich (radiogene Radioaktivität) oder der Produktion durch hochenergetische kosmische Strahlung (kosmogene Radioaktivität). Das künstliche Erzeugen radioaktiver Elemente durch Kernreaktionen läutete eine neue Ära ein. Künstliche (oder anthropogene) Radioaktivität nahm in der Entwicklung der Menschheit und ihren Erfahrungen immer mehr Raum ein. Heute, im beginnenden 21. Jahrhundert, kommt rund 50 Prozent der radioaktiven Strahlung, der der Durchschnittsmensch ausgesetzt ist, von künstlich in Kernreaktoren oder Teilchenbeschleunigern hergestellten radioaktiven Elementen, kurz Radio-Isotopen her.

---

<sup>12</sup> Muriel Howarth: *Pioneer Research on the Atom: The Life Story of Frederick Soddy*. New World, London 1958, S. 83–84; Lawrence Badash: *Radium, Radioactivity and the Popularity of Scientific Discovery*. *Proceedings of the American Philosophical Society* 122, 1978: 145–54; Thaddeus J. Trenn: *The Self-Splitting Atom: The History of the Rutherford-Soddy Collaboration*. Taylor & Francis, London 1977, S. 42, 58–60, 111–117.

<sup>13</sup> *Um Himmels Willen, Soddy, bezeichne es nicht als Transmutation, die denken, wir wären Alchemisten und reißen uns den Kopp ab.*

<sup>14</sup> Der Begriff Aktinoide (früher Aktinide) umfasst eine Gruppe ähnlicher schwerer Elemente. Zugerechnet werden ihr das Actinium und die 14 im Periodensystem folgenden Elemente: Thorium, Protactinium, Uran und die darauffolgenden Transurane Neptunium, Plutonium, Americium, Curium, Berke-  
lium, Californium, Einsteinium, Fermium, Mendelevium, Nobelium und Lawrencium, die alle zumeist nur künstlich durch Bestrahlung hergestellt werden können.





*Abb. 1-3. Nobelpreisverleihung 1935 – von links: James Chadwick (Physik) für die Entdeckung des Neutrons, das Ehepaar Irène und Frédéric Joliot-Curie (Chemie) für die Entdeckung künstlicher Radioaktivität, Hans Spemann (Medizin). (Quelle: atomicheritage.org)*

Bei ihren Versuchen zur Herstellung künstlicher Radioaktivität produzierte das Ehepaar Joliot-Curie 1928 eine neue Art des  $\beta$ -Zerfalls, bei dem Positronen – elektronenartige Teilchen mit positiver Ladung – anstelle von negativ geladenen Elektronen abgestrahlt werden. Sie erkannten allerdings nicht die Bedeutung dieser Entdeckung. Erst 1932 wurden die Positronen bei der Untersuchung von kosmischer Strahlung am *California Institute for Technology* (Caltech) durch den jungen Physiker Carl David Anderson (1905–1991) als die Antiteilchen von Elektronen identifiziert. Dies war die erste Entdeckung des Phänomens der Antimaterie<sup>15</sup>. Seither unterscheidet man beim radioaktiven Zerfall zwischen  $\beta^+$ - und  $\beta^-$ -Strahlung.

---

<sup>15</sup> Die Atome der Antimaterie setzen sich aus Antiteilchen zusammen: Elektronen stehen Positronen mit positiver Ladung gegenüber, analog Protonen Antiprotonen mit negativer Ladung und Neutronen Antineutronen. Neben der Ladung unterscheiden sich die Teilchen der normalen Materie von ihren

Das Ehepaar Joliot-Curie übersah bei seinen Versuchen ein weiteres Teilchen, das zwar experimentell extrem schwierig zu messen ist, aber von Ernest Rutherford schon lange erwartet und vorhergesagt worden war. Es handelt sich um das Neutron – ein Teilchen, das eine ähnliche Masse wie das Proton besitzt, aber nicht elektrisch geladen ist. Ohne elektrische Ladung wirkte es nur wenig direkt auf die damals gängigen Instrumente. Das Neutron war der Schlüssel zum ersten Verständnis der Struktur des atomaren Kerns. Es hat 30 Jahre intensiver Forschungstätigkeit gekostet, diesen Schlüssel zu finden.

## 1.4 Frühe Atommodelle und die Struktur des Atomkerns

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts herrschte große Unsicherheit über die mikroskopische Struktur der Materie. Die naturwissenschaftliche Gemeinde war sich nicht einmal absolut sicher, ob die antike Idee stimme, die Grundstruktur von Materie sei atomaren Charakters, setze sich also aus kleinsten unteilbaren Teilchen zusammen. So hatten es die antiken griechischen Philosophen Leukippos (lebte im 5. Jahrhundert v. u. Z.) und sein Schüler Demokritos (460/459–gegen 370) postuliert. Die humanistische Prägung des ausgehenden 19. Jahrhunderts gab den antiken Ideen einen hohen Stellenwert und beeinflusste die Fragestellungen und Interpretationen sehr, wie die Auseinandersetzung zwischen den zwei großen österreichischen Physikern Ernst Mach (1838–1916) und Ludwig Boltzmann (1844–1906) widerspiegelt. Dabei betrachtete Boltzmann das Atom als kleinstes Teilchen, auf dem sich die Materie aufbaut<sup>16</sup> wohingegen Mach einen anti-atomistischen Standpunkt (*Haben Sie schon mal eins gesehen?*) einnahm und die Energie als maßgebliches Medium des Universums postulierte.

Doch wenn man das Atom als Urbaustein annimmt, ergeben sich sofort Fragen, wie sich die Materie aus den Atomen zusammensetzt, und was die Struktur des Atoms als kleinstes Elementarteilchen ausmacht. Das Atom war neutral und musste sich deswegen gleichmäßig aus entgegengesetzt geladenen Teilchen zusammensetzen. Joseph Thomson interpretierte die im 19. Jahrhundert von Julius Plücker (1801–1868) und Johann Wilhelm Hittorf (1824–1914)

---

Antiteilchen durch die Umkehr anderer wichtiger Quantencharakteristiken. Teilchen und Antiteilchen vernichten sich gegenseitig und werden beim Zusammentreffen vollständig in  $\gamma$ -Strahlung umgewandelt, deren Energie gemäß  $E=mc^2$  der Masse der beiden Teilchen entspricht. Dies ist die Grundlage der Positron-Emission-Tomographie (PET), heute eine wichtige Methode in der medizinischen Diagnostik. Neben den Positronen können heute auch schwerere Antiteilchen hergestellt werden, allerdings nicht in den Mengen, die Dan Brown in seinem Roman *Illuminati* vorhergesagt hat.

<sup>16</sup> Carlo Cercignani: Ludwig Boltzmann, The Man Who Trusted Atoms. Oxford University Press (1998).

entdeckten Kathodenstrahlen als Strom negativer Teilchen mit kleiner Masse, den Elektronen. Ihnen mussten nun positiv geladene Teilchen großer Masse entgegengestellt werden, um das notwendige Atomgewicht zu erreichen.

Joseph Thomson, einer der führenden Denker seiner Zeit, gilt als Lehrer der gesamten nachfolgenden Forschergeneration, insbesondere seines Doktoranden Ernest Rutherford. Thomson spekulierte 1904 über das sogenannte Plumpudding-Modell (Rosinen-Brot) des Atoms, in dem die negativen Elektronen in einer Masse positiv geladener Teilchen eingebettet waren – wie die Rosinen im Pudding. Damit neutralisierten sich die entgegengesetzten Ladungen. Dank des großen Ansehens und des noch größeren intellektuellen Einflusses von Thomson auf die Physikergemeinde blieb diese Modell trotz verschiedener Unstimmigkeiten für fast zehn Jahre das allgemein akzeptierte Modell des Atoms, bis es durch das Rutherford-Modell abgelöst wurde.



*Abb. 1-4: Von links: Joseph J. Thomson und die beiden von ihm nach Cambridge gehaltenen Physiker Ernest Rutherford und Francis Aston im Jahre 1921. Aston (1877–1945) war der Erfinder des Massenspektrometers, mit dem in den folgenden Jahrzehnten die Massen zahlreicher Atome mit bis dahin nicht erreichbarer Präzision gemessen werden konnten.*

*(Quelle: AIP Emilio Segrè Visual Archives, Gift of C.J. Peterson)*

Trotzdem meldeten sich zunehmend Stimmen des Zweifels. Der österreichische Physiker Arthur Erich Haas (1884–1941) postulierte 1908 eine modifizierte Form des Thomson-Modells: In ihm waren die Elektronen an der Oberfläche einer positiv geladenen Kugel angeordnet. Er konnte damit zum erstenmal die Verbindung zwischen Spektrallinien des Wasserstoffs und einem Atommodell zeigen. Ebenso gab er den Radius des Wasserstoffs an, der mit dem später formulierten Bohr-Radius gut übereinstimmte.<sup>17</sup> Der französische Physiker Jean Perrin (1870–1942) spekulierte zur gleichen Zeit über eine besondere Anordnung der Elektronen, die seiner Ansicht nach, ähnlich wie Planeten um die Sonne, auf Bahnen um einen atomaren Kern kreisen sollten. Dies war eine schöne Theorie, aber nach dem damaligen Verständnis der klassischen Elektrodynamik würden solche kreisenden Elektronen als elektrischer Strom kontinuierlich elektromagnetische Strahlung abgeben, Energie verlieren und in den Kern stürzen.

Ernest Rutherford war mit all diesen Theorien wohlvertraut. Er galt als begnadeter Experimentator und setzte sich daran, durch experimentelle Untersuchungen direkt Informationen über die Struktur des Atoms zu gewinnen. In dem von ihm entwickelten experimentellen Aufbau bestrahlte er eine dünne Goldfolie mit  $\alpha$ -Teilchen aus einer Uranprobe. Eine Blende bündelte sie zu einem genau definierten Strahl. Im Rahmen dieses Experiments, in mehreren Versuchsreihen zwischen 1908 und 1913 durchgeführt, beobachteten Rutherford, sein deutscher Assistent Hans Geiger (1882–1945)<sup>18</sup> und sein Student Ernest Marsden (1889–1970) das Streuverhalten der Teilchen als Funktion des Streuwinkels. Als Nachweis benutzten sie Zinksulfid, das schon von den Curies zur Messung der Strahlung benutzt worden war. Die  $\alpha$ -Teilchen durchquerten die Goldfolie zumeist ungehindert, aber der durch Blenden konzentrierte Strahl weitete sich aus. Zudem beobachteten die Forscher auch einige wenige  $\alpha$ -Teilchen, die zurückgestreut wurden. Rutherford verglich dies mit einer Gewehrkugel, die an einem dünnen Stück Papier zurückprallt. Daraus schloss er, dass die Masse der Goldfolie nicht gleichmäßig dicht verteilt sein kann, sondern sich auf wenige punktuelle Zentren hoher Dichte beschränkt, die manchmal von der  $\alpha$ -Strahlung getroffen werden und zum Rückprall führen. Aus den gewonnenen Daten zur Winkelverteilung der gestreuten  $\alpha$ -Teilchen schloss Rutherford, dass die Masse des Goldatoms sich in seinem Inneren, im sogenannten Atomkern, konzentriert. Dessen Radius ließ sich aus den Streudaten abschätzen. Demnach musste der Atomkern des Goldes ungefähr 10 000-mal kleiner sein als das Goldatom mit seiner vollen Elektronenhülle. Das waren revolutionäre Ergebnisse, die bis heute unser Verständnis vom Atomkern prägen. Das Phänomen der Rutherford-Streuung wird heute zur Analyse von Materialien und dünnen Schichten genutzt, vornehmlich in der Elektronikindustrie.

---

<sup>17</sup> Michael Wiescher: Arthur E. Haas, His Life and Cosmologies. *Physics in Perspective* 19 (2017), S. 3–59.

<sup>18</sup> Hans Geiger entwickelte den Geigerzähler, der noch heute als Standardinstrument bei der Messung radioaktiver Strahlung gilt.

Das beschreibt die interne Struktur des Atoms: ein kleiner, positiv geladener Kern mit einer negativ geladenen Elektronenhülle. Die Struktur dieser Hülle ergab sich aus dem Bohr-Modell. 1913 entwickelte es der dänische Physiker Niels Bohr nach dessen einjährigem Besuch von Rutherford am Cavendish-Labor. Darin baute er auf dem Rutherford'schen Konzept des Wasserstoffatoms auf und wies den Elektronen feste Bahnen in der Hülle um den Atomkern zu. Als Kern nahm er den positiv geladenen Wasserstoffkern. Die Bahnen waren durch die Quantenregeln von Max Planck (1858–1947) fest bestimmt; Energie konnte nur durch den Übergang eines Elektrons von einer in die andere Bahn verändert werden (vgl. Kapitel 2.2). Dieses Modell umging elegant die Schwierigkeiten des vorher postulierten Modells von Jean Perrin, der seine Umlaufbahnen im Rahmen der klassischen Elektrodynamik nicht stabilisieren konnte. Mit dem Bohr-Modell waren auch grundsätzliche Fragen zur Atomhülle geklärt. Zahllose spektroskopische Beobachtungen der emittierten und absorbierten elektromagnetischen Strahlung bestätigten diese Erkenntnis in den folgenden Jahren und Jahrzehnten.

Die Frage nach den positiv geladenen Kernen anderer Atome blieb offen. Rutherford postulierte 1919, dass alle Atomkerne aus einem Konglomerat positiv geladener Wasserstoffkerne bestehen müssten, und bezeichnete diese positiven Teilchen als Protonen. Jedoch bestand eine erhebliche Diskrepanz; die Masse aller Protonen im Atomkern entsprach nur der Hälfte der Masse des Atoms. Da die Elektronen nur eine geringe Masse hatten, 2000-mal kleiner als die Masse des Protons, konnten sie weitgehend vernachlässigt werden. Irgendetwas fehlte. Rutherford postulierte deshalb 1920 ein Teilchen, das ungefähr die gleiche Masse wie ein Proton haben sollte, aber keine elektrische Ladung, um die Erhaltung von Masse und neutraler Ladung zu erfüllen. Dieses Teilchen nannte er Neutron.<sup>19</sup>

Für mehr als zehn Jahre blieb das Neutron ein imaginäres Teilchen. Da es keine elektrische Ladung haben sollte, war ein Nachweis mittels Ablenkung in elektrischen oder magnetischen Feldern nicht möglich. Erst dem Rutherford-Schüler James Chadwick (1891–1974) gelang 1932 der Nachweis mittels Kernreaktionen, die schon die Joliot-Curies durchgeführt hatten. Chadwick hatte vor dem Ersten Weltkrieg mit Hans Geiger in Deutschland gearbeitet, um die Funktion des Geigerzählers kennen- und nutzen zu lernen. Vom Kriegsausbruch überrascht, wurde er 1914 interniert und konnte erst nach Ende des Kriegs nach Cambridge zurückkehren. Er blieb jedoch in enger Verbindung mit Geiger, der ihm 1930 einen seiner Zähler zur Verfügung stellte. Im Experiment bombardierte Chadwick eine dünne Folie aus dem leichten Material Beryllium mit  $\alpha$ -Teilchen aus einer Uranquelle und registrierte eine hochenergetische Strahlung. Sie war bei ähnlichen Experimenten der Joliot-Curies und anderen Kernforschern

---

<sup>19</sup> E. Rutherford: Nuclear Constitution of Atoms. Proceedings of the Royal Society A. 97 (686), 1920, S. 374.



beobachtet und als  $\gamma$ -Strahlung interpretiert worden. Diese Strahlung ließ Chadwick auf eine Paraffinschicht aufprallen, hinter der er den Geigerzähler aufstellte. Die Strahlung schlug Protonen aus dem Paraffin heraus, die der Geigerzähler als geladene Teilchen nachweisen konnte. Bei derart starkem Impuls- und Energieübertrag konnte es sich nicht um  $\gamma$ -Strahlung handeln, sondern um energetisch neutrale Teilchen, die eine den Protonen vergleichbare Masse aufweisen. Das lang vorhergesagte Neutron war durch internationale Kollaboration gefunden worden.



*Abb. 1-5: Treffen alter Freunde und Kollegen auf der Tagung der Deutschen Bunsengesellschaft (Bunsentagung) zur Radioaktivität 1932 in Münster. Von links: Die Rutherford-Schüler James Chadwick, Georg von Hevesy, Hans Geiger mit Frau Lili Geiger, zudem Lise Meitner, Ernest Rutherford und Otto Hahn. Rechts die beiden österreichischen Physiker und Radiumforscher Stefan Meyer und Karl Prziham, die die kernphysikalische Gemeinschaft mit radioaktiven Stoffen aus den reichen Beständen des Instituts für Radiumforschung der Universität Wien versorgten. (Quelle: wikipedia.org).*

Damit war das Grundkonzept des Atomkerns festgelegt: Er setzt sich aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen zusammen. Mit diesem Modell konnten weitgehend die Eigenschaften des Atomkerns beschrieben werden (vgl. Kapitel 2).

## 1.5 Frühe Anwendung radioaktiver Strahlung

Neben den Forschungsarbeiten zum Verständnis von Atom und Atomkern entwickelte sich eine zweite Forschungsrichtung. Sie war schon mit den Arbeiten von Wilhelm Conrad Röntgen und Pierre Curie eingeschlagen worden, die mögliche Anwendungen von Strahlung in der Medizin erkannt hatten. Während Röntgenstrahlung wegen ihrer durchdringenden Eigenschaften vor allem zur verbesserten medizinischen Diagnostik beitrug, schien die höherenergetische radioaktive Strahlung zahllose therapeutische Anwendungsmöglichkeiten zu bieten.

Dieser Gedanke von Radioaktivität als neuem Wunderheilmittel ließ eine Strahlungsindustrie unkontrolliert heranwachsen. Das führte von Radon-Heilbädern in Europa und den USA zur Behandlung rheumatischer Leiden bis zur direkten Tumorbestrahlung mit radioaktiven Quellen. Daneben entstand eine gesundheitskosmetische Industrie. Sie lieferte zum Beispiel radioaktive Zahnpasta, deren Strahlen sanft das Zahnfleisch massieren sollten, aber auch ein Instrument, das unerwünschte Körperbehaarung durch radioaktive Bestrahlung entfernte. Dieser unkontrollierten Strahlenindustrie boten sich ein reiches Betätigungsfeld und eine Vielzahl technischer Entwicklungsmöglichkeiten mit teilweise verheerenden Folgen für die nichtsahnende Kundschaft. Die Schäden traten oft erst nach vielen Jahren auf, je nach Dosis der jeweiligen Bestrahlung. Die möglichen Gefahren intensiver radioaktiver Bestrahlung drangen erst langsam ins Bewusstsein der Bevölkerung. Als sie aber realisiert wurden, schlug die frühere Euphorie in die allgemeine Furcht um, mit der man der Radioaktivität in den folgenden Jahrzehnten begegnete. Allerdings blieb weitgehend unbekannt, was die biologischen Strahlenschäden verursachte und worin die biochemischen Auswirkungen bestanden. Die Begründung lieferte die neue Wissenschaft der Genetik, die sich parallel zur und unabhängig von der Kernphysik entwickelte. In den 1920er Jahren wurde die Wirkung radioaktiver Strahlung auf genetische Mutationsprozesse entdeckt. Das sollte in den folgenden Jahrzehnten die allgemeine Betrachtung der Radioaktivität erheblich beeinflussen.

Neben den und vielleicht auch wegen der zahllosen kommerziell motivierten Aktivitäten gab es ernsthafte Forschung zur Wechselwirkung zwischen radioaktiver Strahlung und biologischen Systemen. Im Mittelpunkt standen Fragen nach den biologischen Auswirkungen der Strahlung sowie der Aufnahme und Verteilung radioaktiver Elemente in den biochemischen Prozessen von Pflanze, Tier und Mensch. Pierre Curie hatte nur die zerstörerische Kraft dieser Strahlung gesehen, die ihm als vorteilhaft für die gezielte Vernichtung schadhafter Gewebe und Tumoren erschien. Die sekundären Effekte, die viel weiterreichende Konsequenzen in sich trugen, waren im frühen 20. Jahrhundert weitgehend unbekannt. Dazu bedurfte es genauerer Studien in Bezug auf die verschiedenen Wechselwirkungsmöglichkeiten zwischen radioaktiver Strahlung und radioaktiven Materialien mit biologischen Systemen. Das erste bezieht

sich direkt auf die biochemischen Prozesse, die durch einen plötzlichen Energietransfer in die molekulare Struktur eines biologischen Systems ausgelöst werden, das zweite auf die langsameren physiochemischen Prozesse zur Aufnahme radioaktiver Materialien durch biologische Systeme. Die Frage nach den Auswirkungen auf den menschlichen Körper war natürlich die wichtigste, aber der stand aus naheliegenden Gründen derartigen Untersuchungen nicht zur Verfügung.<sup>20</sup> Diese Experimente wurden zumeist an Bakterien, Insekten und Pflanzen vorgenommen. Aus den Resultaten hoffte man, direkt auf komplexere biologische Lebewesen schließen zu können.

Zwei Forscher traten besonders hervor und hatten großen Einfluss auf die spätere Entwicklung des Gebiets: der ungarische Kernphysiker Georg de Hevesy (1885–1966) und der amerikanische Genetiker Hermann Muller (1890–1967). Hevesy hatte zeitweise eng mit Rutherford zusammengearbeitet und von ihm wichtige Anstöße in seinen Forschungen zur Pflanzenaufnahme von Radioaktivität erhalten. Muller machte sich durch seine Untersuchungen strahlungsbedingter Mutationen an Bakterienkulturen und Fruchtfliegen einen Namen.

Georg de Hevesy<sup>21</sup> war ein junger ungarischer Chemiker, der 1911 sein Studium in Freiburg abschloss und nach Manchester wechselte, um mit Ernest Rutherford zu arbeiten. Dieser forderte ihn heraus, eine chemische Methode zu finden, um ein unbekanntes Radium-Zerfallsprodukt, das als Radium D bezeichnet wurde, vom Bleiuntergrund zu separieren: *If you are worth your salt, you separate radium D from all that nuisance of lead.* Hevesy versuchte dies zwei Jahre ergebnislos, was im Nachhinein nicht wundert. Radium D ist heute als Blei-Isotop  $^{210}\text{Pb}$  identifiziert und besitzt deswegen die gleichen chemischen Eigenschaften wie stabiles Blei. Bei diesen Untersuchungen kam Hevesy jedoch auf die Idee, radioaktive Isotope, die chemisch nicht getrennt werden konnten, als Indikator zu nutzen, um Materialien durch dynamische Entwicklungsprozesse verschiedenster Art zu verfolgen.

Ein oft erzähltes Beispiel<sup>22</sup> ist sein Experiment, mit dem er seiner Vermieterin nachwies, dass sie entgegen ihren Versicherungen kein frisches Fleisch servierte, sondern das an den Vortagen nicht gegessene Fleisch als Hackbraten oder Gulasch ihrem Mieter erneut vorsetzte. Hevesy platzierte eine kleine, aber nachweisbare Menge radioaktiven Materials in sein nicht verspeistes

---

<sup>20</sup> Die einzige direkte Quelle zu den Auswirkungen radioaktiver Strahlung unterschiedlicher Intensität auf den menschlichen Körper waren die Langzeituntersuchungen an den Opfern der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki. Da die genaue Strahlendosis, der die Opfer ausgesetzt waren, nicht bekannt oder nur schwer feststellbar war, wurden die Ergebnisse um die aus Tierversuchen ergänzt. Dazu setzte man verschiedene Tierarten der Strahlung von Explosionen im Rahmen des Atombomben-Testprogramms aus.

<sup>21</sup> Hilde Levi: George de Hevesy. Adam Hilger, Bristol 1985.

<sup>22</sup> William G. Myers: Georg Charles de Hevesy: The Father of Nuclear Medicine. In: The Journal of Nuclear Medicine 20 (6), 1979, S. 590–594.



Fleisch am Tellerrand und wies am darauffolgenden Tag triumphierend nach, dass der angeblich frische Hackbraten strahlte. Diese Methoden wandte Hevesy mit zunehmendem Erfolg an, um pflanzliche und tierische Prozesse zu verfolgen. In den 1920er Jahren, als er bei Niels Bohr in Kopenhagen arbeitete, benutzte er radioaktive Bleisalzlösungen, um die Wasseraufnahme in Pflanzen zu verfolgen und die Dauer der Verteilung von radioaktivem  $^{212}\text{Pb}$  in Stängeln und Blättern zu vermessen. Er injizierte Kaninchen radioaktives Bismut  $^{210}\text{Bi}$  und Blei  $^{210}\text{Pb}$ , um Verteilung und Ablagerung der Stoffe in verschiedenen Organen zu bestimmen. Hevesy scheute auch nicht vor Selbstversuchen zurück, als er das neu entdeckte Deuterium, ein Isotop des Wasserstoffs, nutzte, um den Wasserkreislauf im menschlichen Körper zu untersuchen. Er trank mit Deuterium angereichertes Wasser HDO (anstelle von  $\text{H}_2\text{O}$ ) und wies es in seinem Urin nach. Daraus ermittelte er, dass ein typisches Wassermolekül im Durchschnitt 12 bis 14 Tage im Körper verbleibt, bevor es ausgeschieden wird – ein dauernder Wasserkreislauf. Radioaktiven Phosphor  $^{32}\text{P}$  nutzte er, um die verschiedensten Prozesse des Stoffwechsels im menschlichen Körper zu verfolgen. Für all diese Versuche benutzte Hevesy die von Hans Geiger entwickelten und stetig verbesserten Geigerzähler, um die radioaktiven Isotope im Körper lokalisieren zu können. Durch seine Bemühungen zeigte er, dass der Körper ein dynamisches biologisches System ist, das im ständigen Wechsel und Austausch mit der äußeren Umgebung steht. Die von ihm entwickelten Methoden legten die Grundlagen für die Strahlenmedizin in der heutigen medizinischen Diagnostik. Georg de Hevesy erhielt 1943 den Nobelpreis für die Nutzung von Radio-Isotopen als Indikatoren für chemische Prozessabläufe.

Hermann Muller war kein Chemiker, sondern hatte an der *Columbia University* in New York Biologie studiert und wurde 1916 promoviert. Er stand von der Ausbildung her außerhalb der eng vernetzten Gemeinschaft von Kernchemikern und Kernphysikern um Rutherford<sup>23</sup>. Schon als Student interessierte er sich sehr für die neue Wissenschaft der Vererbungslehre oder Genetik von Gregor Mendel (1822–1884) und deren Gesetzmäßigkeiten. Mit der Genetik waren im frühen 20. Jahrhundert die Fragen nach Mutationen und ihren Ursachen verbunden. Muller verfolgte die Problematik im Lauf seines Lebens mit langwierigen Untersuchungen an Fruchtfliegen (*Drosophila*). In den späten 1920er Jahren begann er mit Röntgenstrahlen und radioaktiven Quellen zu experimentieren, um die Auswirkungen der Strahlung auf die Mutationsraten zu untersuchen. Er zeigte 1927, dass eine hohe Dosis Röntgenstrahlung eine höhere Rate tödlicher Mutationen<sup>24</sup> bewirkte, als bei unbestrahlten Fruchtfliegen zu beobachten war. Diese Versuche waren vermutlich von der Idee motiviert, dass die natürliche Mutationsrate, die Muller bei seinen *Drosophila*-Untersuchungen

---

<sup>23</sup> Elof Axel Carlson: *Genes, radiation, and society: the life and work of H. J. Muller*. Cornell University Press, Ithaca NY 1981.

<sup>24</sup> Mutationen, die zum Absterben der genetisch beeinflussten Chromosomen führten.

festgestellt hatte, durch die radiogene und kosmogene Radioaktivität unserer Umwelt ausgelöst werden könnte.

In späteren Versuchen zeigte Muller, dass die Anzahl der Mutationen linear mit der Strahlungs-dosis anstieg – eine Beobachtung, die ihn überzeugte, dass diese Linearität auch in Bereichen gültig war, die er experimentell nicht untersuchen konnte<sup>25</sup>. Dies galt seiner Ansicht weniger bei somatischen, körperintern reparablen Schädigungen, sondern vor allem bei Erbzellen. Deren Schädigung durch Strahlung führt im Erbgut unausweichlich zu Mutationen. Projiziert man die gemessene Linearitätskurve auf einen Nullwert externer künstlicher radioaktiver Strahlung, bleibt eine durch natürliche Strahlenbelastung bedingte Mutationsrate. Dieser Wert liegt allerdings unterhalb der von Muller beobachteten Mutationsrate bei der Fruchtfliege. Daraus schloss Muller, dass die natürliche Strahlung nicht die Erklärung für die beobachteten Mutationsraten kann, sondern andere statistische Fehlprozesse bei der Zellteilung die Ursache sein müssten (vgl. Kapitel 8.1). Steigt die Strahlenbelastung allerdings an, kann das durchaus zu Mutationen führen. 1946 erhielt Hermann Muller den Medizin-Nobelpreis für seine Entdeckung, dass Röntgenstrahlung zu Mutationen im genetischen Erbgut führen kann. Seine wissenschaftlichen Ergebnisse überzeugten Muller von den Gefahren radioaktiver Strahlung. In den Nachkriegsjahren, insbesondere unter dem Eindruck des Atombomben-Abwurfs auf Hiroshima und Nagasaki, entwickelte er sich zu einem starken Kritiker des Gebrauchs von Radioaktivität. Er nutzte sein hohes Ansehen in der Wissenschaftsgemeinde, um sich für gesetzliche Regulierungen und Grenzwerte einzusetzen, die noch heute Gültigkeit besitzen – in den USA und weltweit.

## 1.6 Kollaboration und Kommunikation

Die enge wissenschaftliche Kommunikation und der freie Austausch von Ideen und Ergebnissen in der Kernphysik beschränkte sich jedoch nicht allein auf wissenschaftliche Resultate, sondern umfasste auch wissenschaftliche Geräte und Technologien. Ein klassisches Beispiel ist der Fall des deutschen Physikers Hans Geiger (vgl. Abbildung 1-5). Nach seiner Promotion in Erlangen 1906 wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter<sup>26</sup> von Ernest Rutherford in Manchester. Dort entwickelte er den Geigerzähler, das wohl bekannteste und einflussreichste Instrument in der Geschichte der Radioaktivität. Er nahm am berühmten Rutherford-Streuxperiment teil, das die

---

<sup>25</sup> Neue Forschungen deuten allerdings sehr wohl auf Schwelleneffekte bei niedriger Dosis hin, z. B. Koana T, Takashima Y, Okada MO, Ikehata M, Miyakoshi J, Sakai K.: A threshold exists in the dose-response relationship for somatic mutation frequency induced by X-irradiation of *Drosophila*. *Radiat Res* 161, 391 (2004).

<sup>26</sup> Im modernen Sprachgebrauch der Wissenschaft war Geiger ein Postdoc.