

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

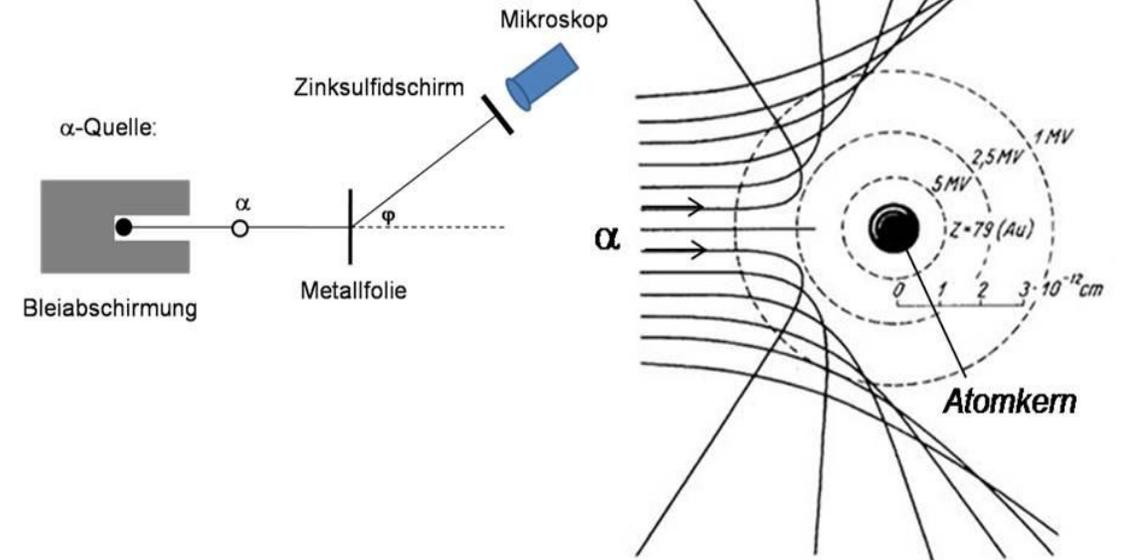
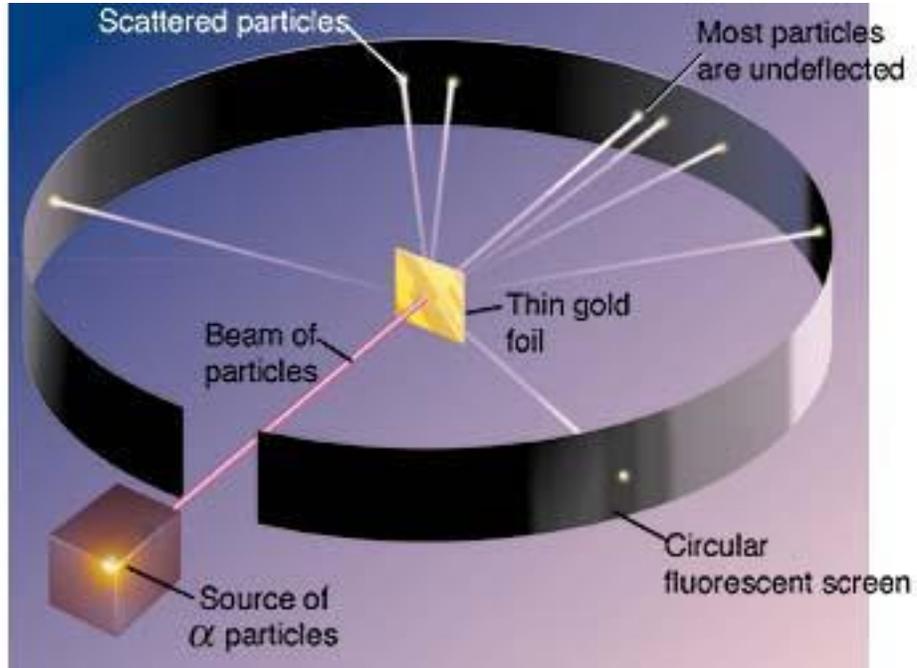
Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

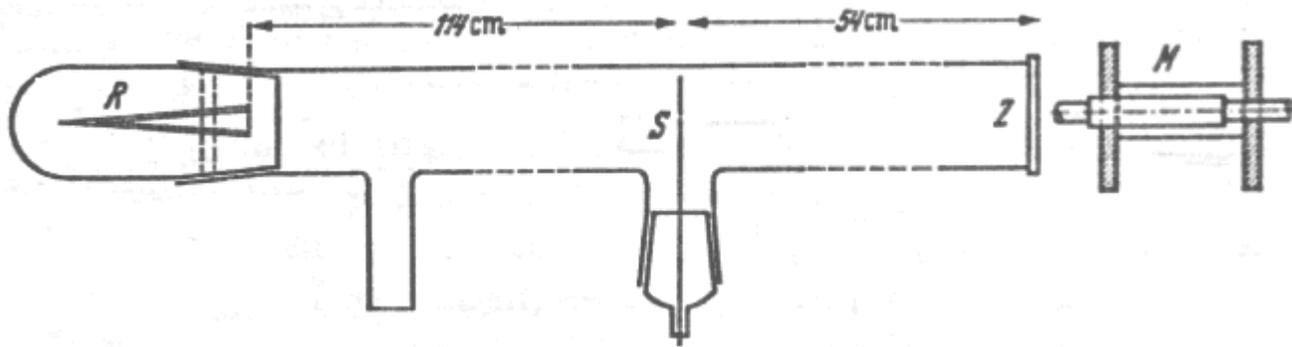
<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

# Entdeckung des Atomkerns durch Rutherford (1911)



Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldkernen

# Streuung von Alphateilchen – Geigers Messungen aus dem Jahre 1908



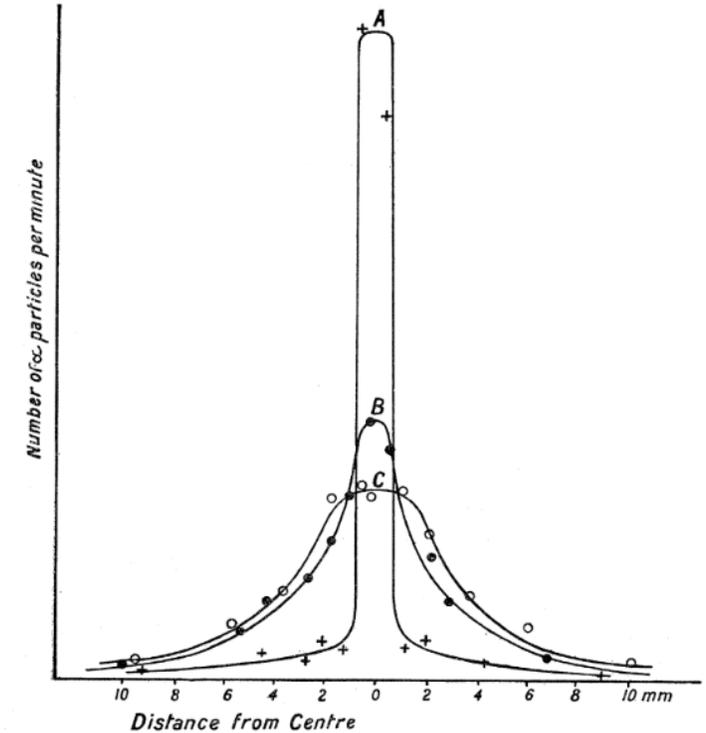
This apparatus was described in a 1908 paper by Hans Geiger. It could only measure deflections of a few degrees.

R: radioaktive Quelle

S: Spalt, auf den eine Folie aufgebracht werden konnte.

Z: Zinksulfidschirm

M: Beobachtungsmikroskop



Verteilung der  $\alpha$ -Teilchen auf dem Schirm

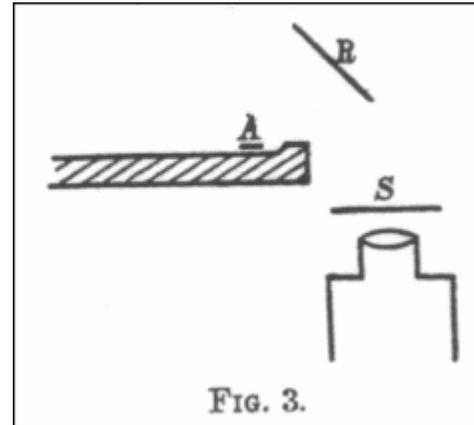
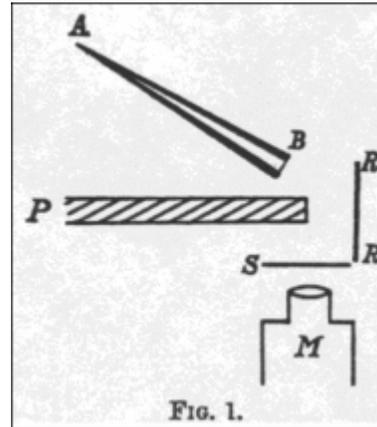
A: ohne Goldfolie

B: mit einer Goldfolie

C: mit zwei Goldfolien

## Streuung von Alphateilchen – Geiger und Marsden, Ergebnisse 1909

AB: Gemischte Quelle:  
Ra Em, Ra A und Ra C



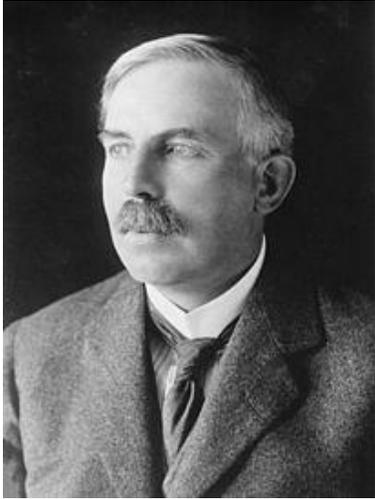
A: Reine Ra C-Quelle

In these experiments, alpha particles emitted by a radioactive source (A) were observed bouncing off a metal reflector (R) and onto a fluorescent screen (S) on the other side of a lead plate (P).

Folgende Punkte wurden mit den beiden Apparaturen untersucht:

1. Der relative Betrag der Reflexion bei verschiedenen Metallen,
2. der relative Betrag der Reflexion bei einem Metall in Abhängigkeit von der Dicke,
3. der Anteil der auftreffenden  $\alpha$ -Teilchen, der reflektiert wurde.

**Ergebnis:** Mit der Apparatur aus Fig. 3 wurde gemessen, dass an einer dünnen Platinfolie **von 8000  $\alpha$ -Teilchen eins** reflektiert wurde.

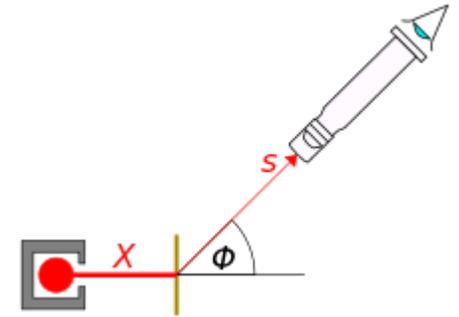


Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)

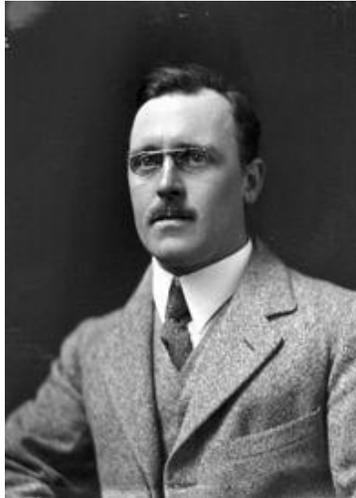
## Streuung von Alphateilchen: Rutherford (1911), Geiger und Marsden (1913)

Rutherford developed a mathematical equation that modeled how the foil should scatter the alpha particles if all the positive charge was concentrated in a single point at the center of an atom.

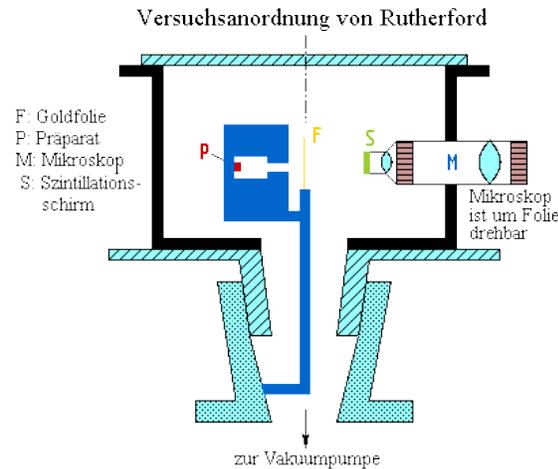
$$s = \frac{Xnt \csc^4 \frac{\phi}{2}}{16r^2} \cdot \left( \frac{2Q_n Q_\alpha}{mv^2} \right)^2$$



Hans Geiger  
(1882 – 1945)



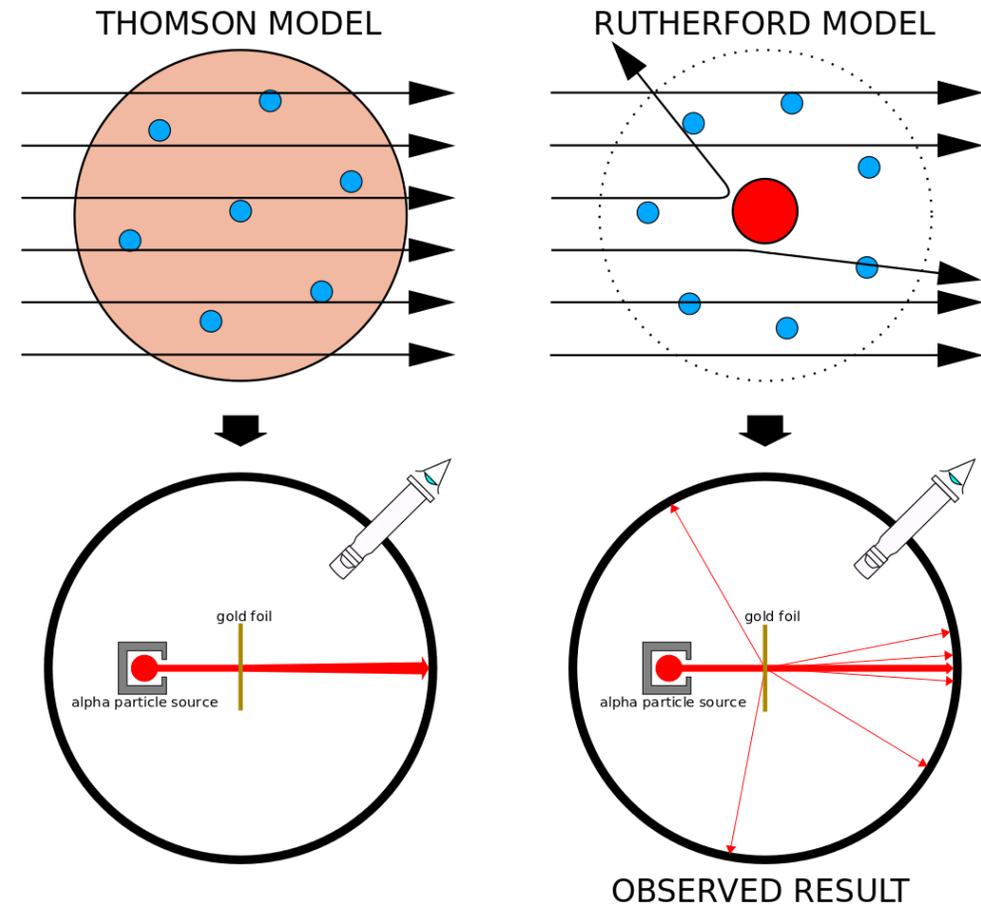
Ernest Marsden  
(1889 – 1970)



This apparatus was described in a 1913 paper by Geiger and Marsden. It was designed to accurately measure the scattering pattern of the alpha particles produced by the metal foil (F). The microscope (M) and screen (S) were affixed to a rotating cylinder and could be moved a full circle around the foil so that they could count scintillations from every angle.

## Streuung von Alphateilchen im Thomson- und im Rutherfordmodell

*Left:* Had Thomson's model been correct, all the alpha particles should have passed through the foil with minimal scattering.  
*Right:* What Geiger and Marsden observed was that a small fraction of the alpha particles experienced strong deflection.



## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlerzerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Ernest Rutherford (1871 – 1937)



- 1871 In der Nähe von Nelson (NZ) geboren  
Studium am Canterbury College in Christchurch
- 1895 Stipendium für weitere Studien in England, wo er zu J. J. Thomson nach Cambridge ging; Arbeiten auf dem Gebiet der radioaktiven Strahlung
- 1898 Professur in Montreal, Kanada
- 1907 Rückkehr nach England auf einen Lehrstuhl in Manchester; berühmte Versuche: Identifikation der  $\alpha$ -Strahlung und Entdeckung des Atomkerns
- 1908 Nobelpreis für Chemie
- 1912 Zusammenarbeit mit Niels Bohr
- 1914 In den Adelsstand erhoben
- 1919 Nachfolger von J. J. Thomson als Leiter des Cavendish-Laboratoriums
- 1920 Voraussage des Neutrons
- 1925 Präsident der Royal Society
- 1932 Erhielt er die Baronie: First Baron of Nelson and Cambridge
- 1937 beigesetzt in der Westminster Abbey in der Nähe von Newtons Grab

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlerzerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

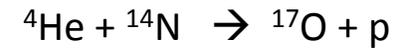
Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

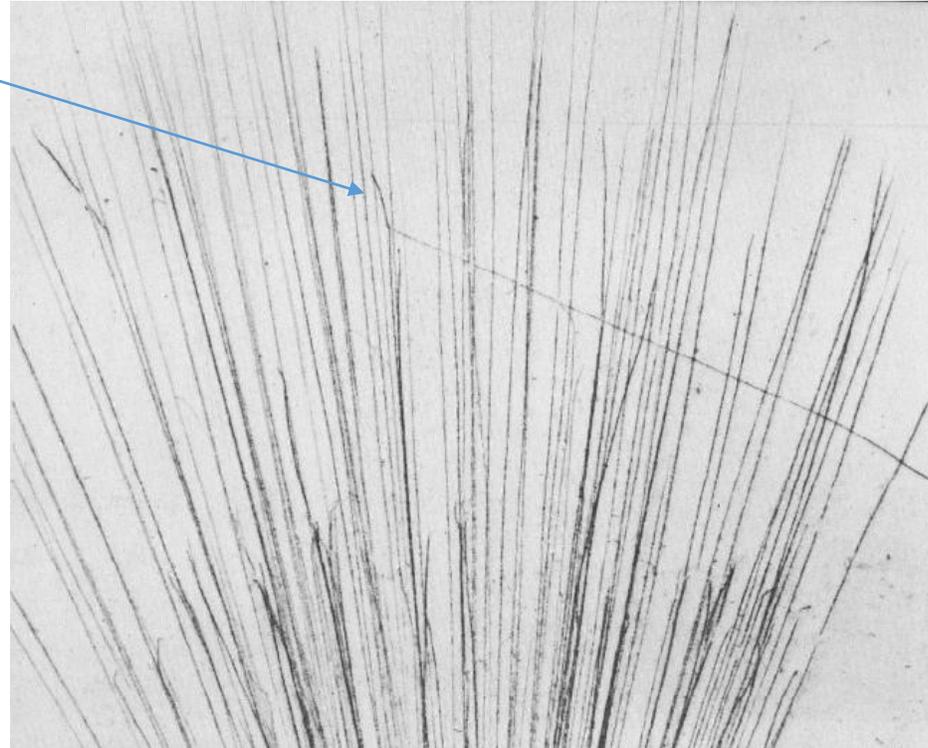
<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

# Erste beobachtete Kernreaktion Rutherford 1919



Spur des  
Sauerstoffkerns



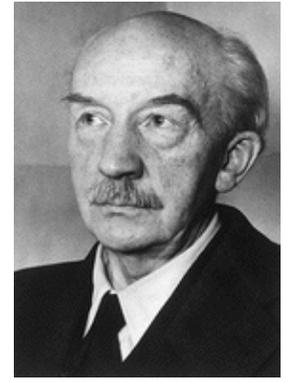
Protonenspurr

# Entdeckungsgeschichte des Neutrons

- 1920 **Rutherford** vermutete ein neutrales Teilchen mit etwa die Masse des Protons
- 1930 **Bothe** und **Becker** entdeckten beim Beschuss von Beryllium mit den Alphateilchen eine elektrisch neutrale durchdringende Strahlung.
- 1931 **Irene und Frederic Joliot-Curie** ließen diese Strahlung auf Paraffin auftreffen und messen in einer dahinter aufgestellten Ionisationskammer einen beachtlichen Strom. Deutung als Comptoneffekt an Protonen.
- 1932 **Chadwick** glaubte nicht an einen "Comptoneffekt beim Proton". Er nahm an, dass die "Beryllium-Strahlung" aus Neutronen besteht. Es gelang ihm experimentell nachzuweisen, dass das Neutron in etwa die Protonenmasse besitzt.



Ernest Rutherford  
1871 - 1937



Walter Bothe  
1891 - 1957

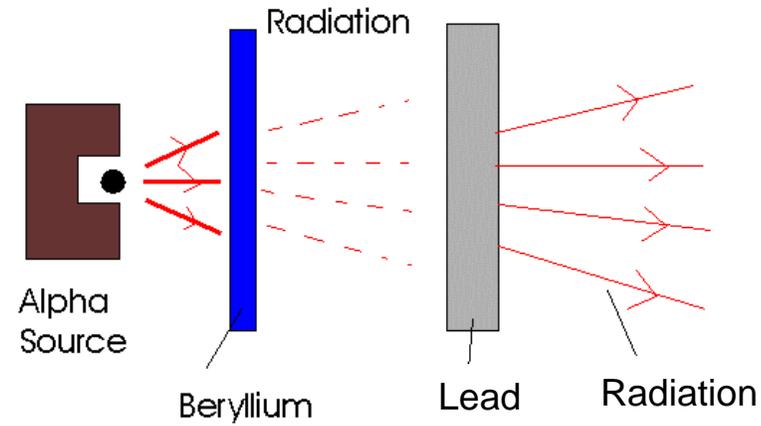


Irène Joliot-Curie  
(1897 – 1956)  
Frédéric Joliot  
(1900 – 1958)

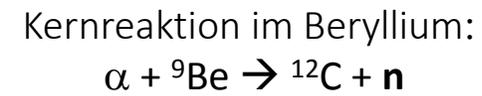
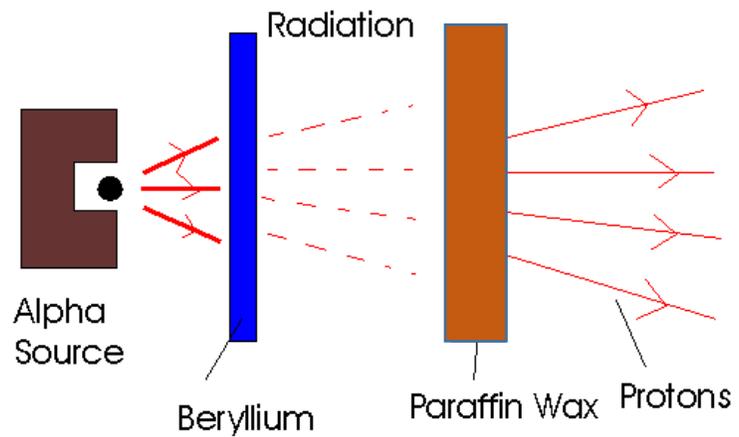


James Chadwick  
1891 -1974  
Nobelpreis 1935

# Entdeckung des Neutrons (1932)

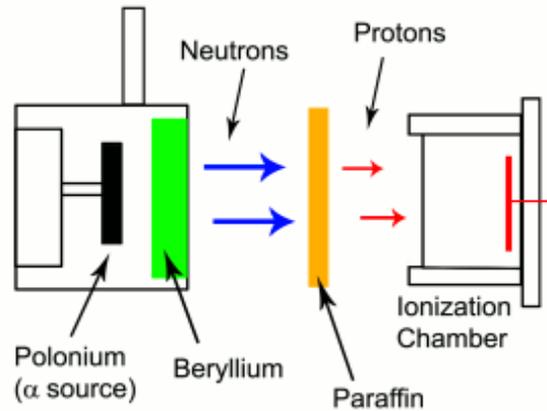


James Chadwick  
(1891 – 1974)  
Nobelpreis 1935



Das Neutron ist das erste künstlich erzeugte, in der Natur nicht frei vorkommende Teilchen.

## Chadwicks Apparatur zum Nachweis der Neutronen



The neutron ionization detection chamber used by Chadwick to discover the neutron. A polonium alpha emitter source is placed behind a sample of beryllium. When beryllium is hit by the alpha particles, neutrons are emitted. The neutrons then hit a piece of paraffin, which ejected protons into the ionization chamber. By observing the speed of these protons, Chadwick was able to calculate the mass of the neutron to be roughly the same as the proton.



## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 **Kernspaltung**
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Ba-Chlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).



Enrico Fermi

## 1934 beginnt der Weg zur Kernspaltung

Um auch bei schwereren Elementen durch Kernreaktionen künstliche Radioaktivität zu erzeugen, beschießt Fermi in Rom 68 Elemente mit Neutronen und beobachtet bei 47 eine Kernumwandlung. Dabei stellt er fest, dass langsame Neutronen von Kernen besser eingefangen werden als schnelle. Beim Beschuss von Uran vermutet er, auf diese Weise Transurane erzeugen zu können.

Nobelpreis für Physik 1938

## Historisches Umfeld

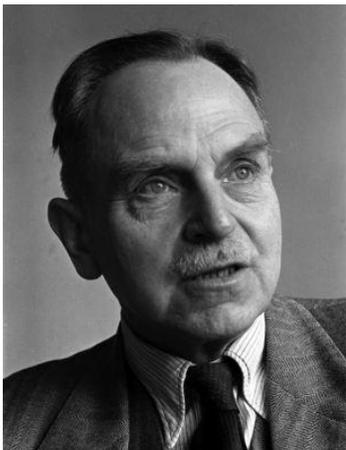
- 1922 Mussolini Ministerpräsident in Italien; schleichende Einführung der faschistischen Diktatur, Judenverfolgung ab 1938
- 1933 Hitler deutscher Reichskanzler, nationalsozialistische Diktatur, Judenverfolgung, Anschluss Österreichs 1938
- 1936 Beginn des Spanischen Bürgerkriegs, Sieg von General Franco 1939

In Berlin beginnen Lise Meitner, Otto Hahn und Fritz Strassmann im KWI für Chemie ebenfalls mit dem Beschuss von Uran mit Neutronen.

Nach dem Anschluss Österreichs flieht Lise Meitner im Sommer 1938 nach Schweden.

Gegen Jahresende sind sich Hahn und Strassmann sicher, in den Reaktionsprodukten Barium gefunden zu haben, was sie allerdings nicht erklären können.

Kurz nach Weihnachten 1938 gelingt es Lise Meitner und ihrem Neffen Otto Frisch, die Berliner Ergebnisse mit Hilfe des Tröpfchenmodells als Kernspaltung zu erklären.



Otto Hahn und Fritz Strassmann

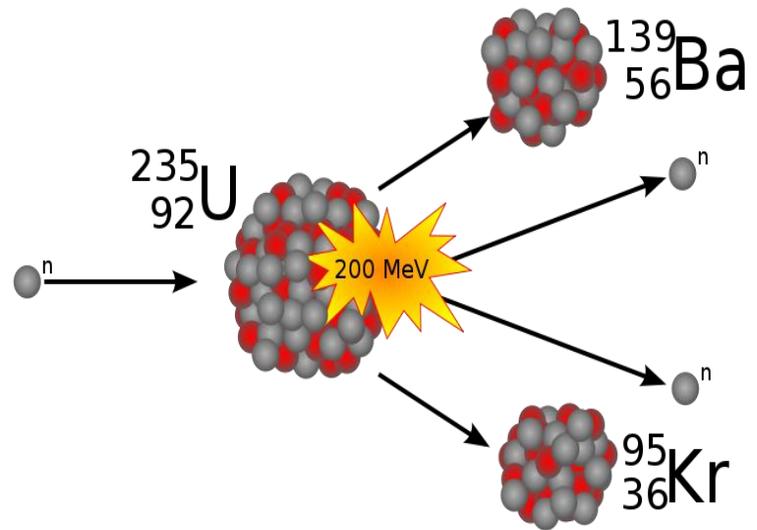


Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie

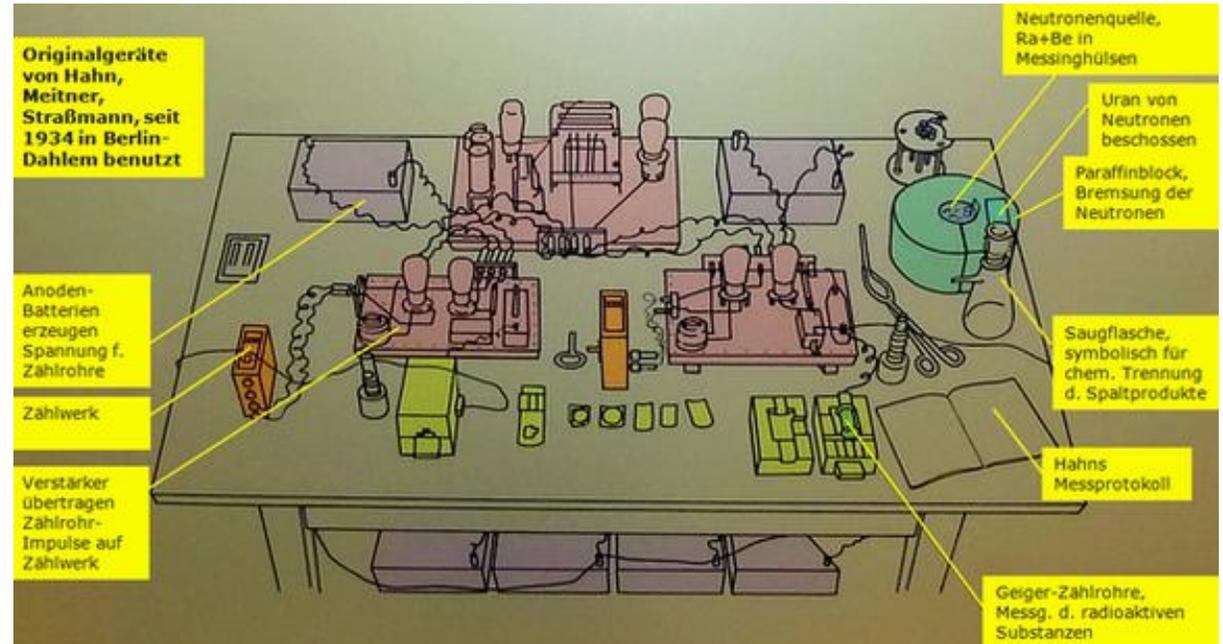


Lise Meitner und Otto Frisch

# Kernspaltung



Beispiel für eine Kernspaltung



Nuclear fission experimental setup, reconstructed at the Deutsches Museum, Munich, Germany

## Besonderheiten bei der Entdeckung der Kernspaltung

- Die Uranspaltung wurde nicht von Physikern, sondern von Chemikern entdeckt.
- Sie wurde nicht an den Großgeräten gefunden, sondern mit Neutronenquellen, kleinen mit Beryllium und Radium gefüllten Röhren.
- Es gab keine theoretische Vermutung, auf Grund derer sie entdeckt wurde.
- Weder die Relativitätstheorie noch die Quantenmechanik spielte eine (entscheidende) Rolle, sondern das Interesse an der Radioaktivität und eine hohe Experimentierkunst.
- Auf dem Weg zur Entdeckung der Spaltung spielten 3 Frauen (Marie Curie, Irène Joliot-Curie und Lise Meitner) eine wichtige Rolle.

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Ba-Chlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Otto Hahn (1879 - 1968)



1879 In Frankfurt am Main geboren

1897 Studium der Chemie an der Uni Gießen, Abschluss mit Promotion

1905 Arbeit bei Ernest Rutherford in Kanada

1907 Beginn der Zusammenarbeit mit Lise Meitner in Berlin

1910 Hahn wird Professor

1912 Eröffnung des KWI für Chemie in Berlin, Hahn Leiter der Abteilung für Radioaktivität

1929 Direktor des KWI für Chemie

1934 Nach dem Ausschluss von Lise Meitner Austritt aus der Universität Berlin

1938 Entdeckung der Kernspaltung

1945 Internierung in England

1946 Rückkehr nach Göttingen, Präsident der KWG, Nobelpreis für Chemie

1948 Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

1957 Göttinger Erklärung gegen die Atombewaffnung der Bundesrepublik

1968 Tod durch Herzversagen

## Lise Meitner (1878 – 1968)



- 1878 Geboren in Wien
- 1901 Externe Reifeprüfung nach privater Vorbereitung  
danach Studium der Physik, Mathematik und Philosophie an der  
Universität Wien
- 1906 Promotion in Physik, als 2. Frau an der Uni Wien
- 1907 Wechsel nach Berlin zur weiteren wissenschaftlichen Ausbildung,  
Zusammentreffen mit Otto Hahn
- 1912 (Inoffizielle) Assistentin bei Max Planck, ein Jahr später wiss. Mitglied  
am KWI
- 1914 Während des Krieges Röntgenschwester an der Front
- 1918 Eigene radiophysikalische Abteilung am KWI
- 1922 Habilitation, anschließend Dozentin
- 1926 a.o. Professorin für experimentelle Kernphysik
- 1933 Entziehung der Lehrbefugnis
- 1938 Emigration über Holland nach Schweden, von dort erste physikalische  
Deutung der Kernspaltung

## Otto Hahn und Lise Meitner



Im Kaiser Wilhelm Institut für Chemie (1913)



Bei der Einweihung des Hahn-Meitner-Instituts (1959)



Fritz Strassmann (1950)

*„Ach, ich dachte schon, den Strassmann gibt es gar nicht!“*

Begrüßung in Kopenhagen durch Niels Bohr im Jahre 1960

## Fritz Strassmann (1902 – 1980)

- 1920 Abitur in Düsseldorf; danach Studium der Chemie an der Technischen Hochschule in Hannover
- 1929 Promotion; im gleichen Jahr Stipendiat bei Otto Hahn im KWI für Chemie in Berlin
- 1932 Nach Auslaufen des Stipendiums Weiterarbeit ohne Bezahlung
- 1934 Ablehnung eines finanziell reizvollen Angebots der Privatwirtschaft, da dafür ein Eintritt in eine NS-Organisation notwendig gewesen wäre.  
Im gleichen Jahr Austritt aus dem Berufsverband der Chemiker  
Wegen seiner ablehnenden Haltung gegen das NS-Regime war für ihn eine Habilitation unmöglich.  
Zusammenarbeit mit Hahn und Meitner bei der Untersuchung der Reaktionsprodukte aus dem Beschuss von Uran mit Neutronen
- 1935 Assistent am KWI
- 1938 Zusammen mit Otto Hahn Entdeckung der Kernspaltung; Weiterarbeit an den Spaltprodukten
- 1944 Evakuierung des KWI nach Tailfingen
- 1946 Neugründung der Universität Mainz durch die Franzosen; Berufung von Fritz Strassmann zum Ordinarius und Direktor des Instituts für anorganische Chemie  
Leitung des KWI
- 1966 Enrico Fermi Preis der US Atomic Energy Commission (zusammen mit Hahn und Meitner)
- 1985 Posthum Ehrung als „Gerechter der Völker“, weil er 1943 in seiner Wohnung eine ihm kaum bekannte Jüdin versteckte.

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlerzerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Dirac Gleichung (1928)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \phi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \phi.$$

Schrödinger Gleichung  
 $\phi(x,t)$  ist eine skalare Funktion

$$\left( \beta mc^2 + c(\alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \alpha_3 p_3) \right) \psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} \quad \text{Dirac Gleichung}$$

$P_n = i \hbar \partial / \partial x_n$      **Die  $\alpha_n$  sind 4x4 Matrizen!**

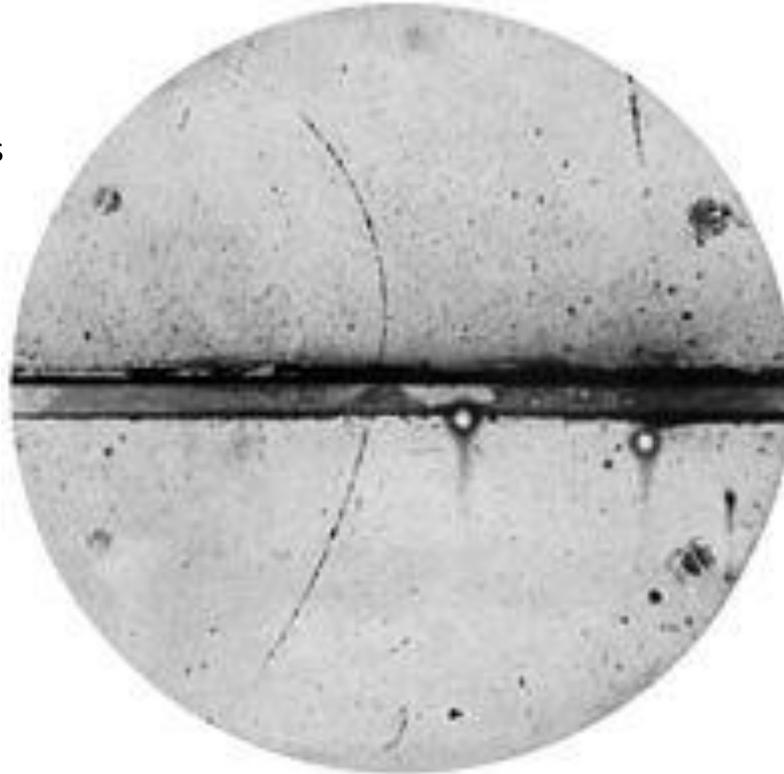
Die Wellenfunktion  $\psi(x,t)$  ist keine skalare Funktion sondern ist ein sog. Spinor mit 4 Komponenten.

Komponenten 1 und 2: Wellenfunktion für ein Teilchen mit Masse  $m$ , **Ladung  $e$** , **Spin  $\frac{1}{2}$**  und magn. Moment  $e\hbar/2mc$ .  $\rightarrow$  Elektron

Komponenten 3 und 4: Wellenfunktion für ein Teilchen mit Masse  $m$ , **Ladung  $-e$** , **Spin  $\frac{1}{2}$**  und magn. Moment  $e\hbar/2mc$ . Reales Teilchen?

# Die Entdeckung des Positrons

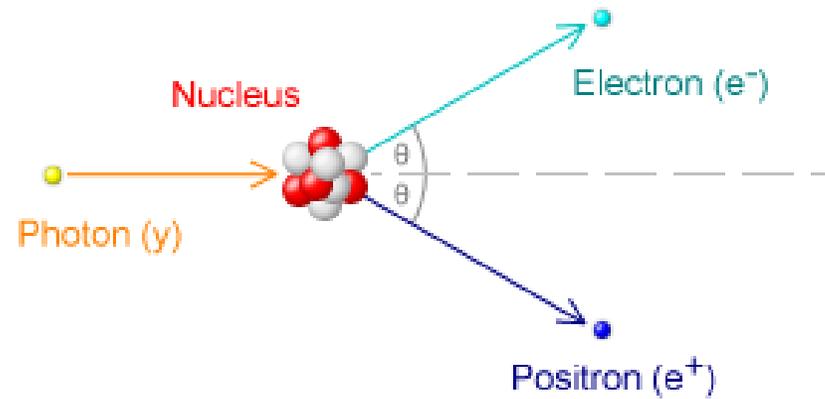
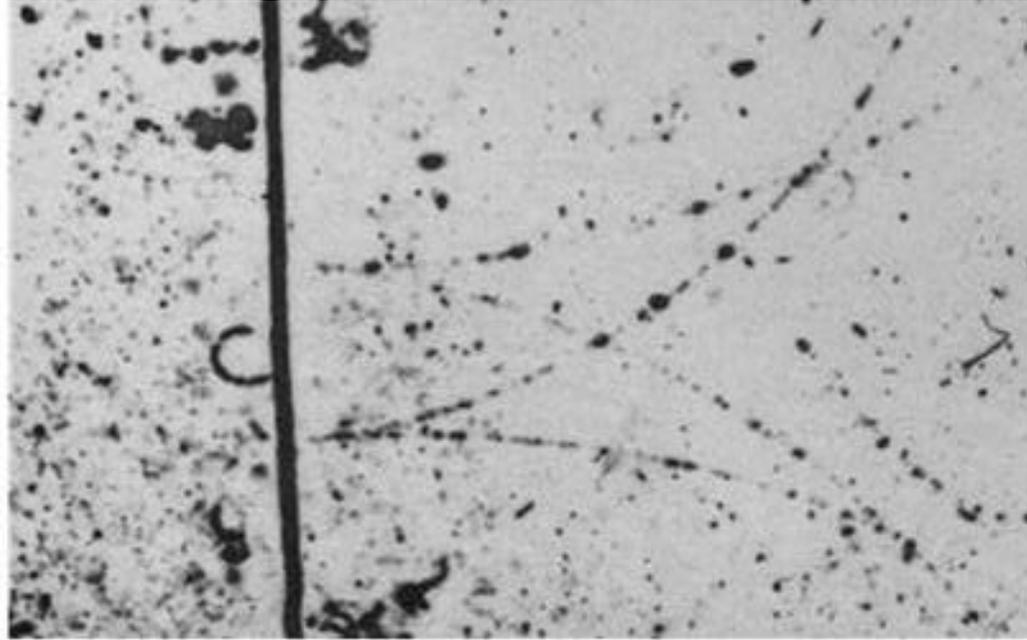
Spur eines geladenen Teilchens im Magnetfeld. Da die Krümmung oberhalb der Bleiplatte stärker ist als unten, muss das Teilchen von unten eingefallen und positiv geladen sein.



6 mm dicke Bleiplatte

Cloud chamber photograph by Carl D. Anderson of the first positron ever identified. Anderson discovered the positron on August 2, 1932, for which he won the Nobel Prize for Physics in 1936. Anderson also coined the term *positron*.

# Erzeugung zweier Elektron-Positron-Paare in einer Nebelkammer



## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 **Quanten-Elektrodynamik**
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

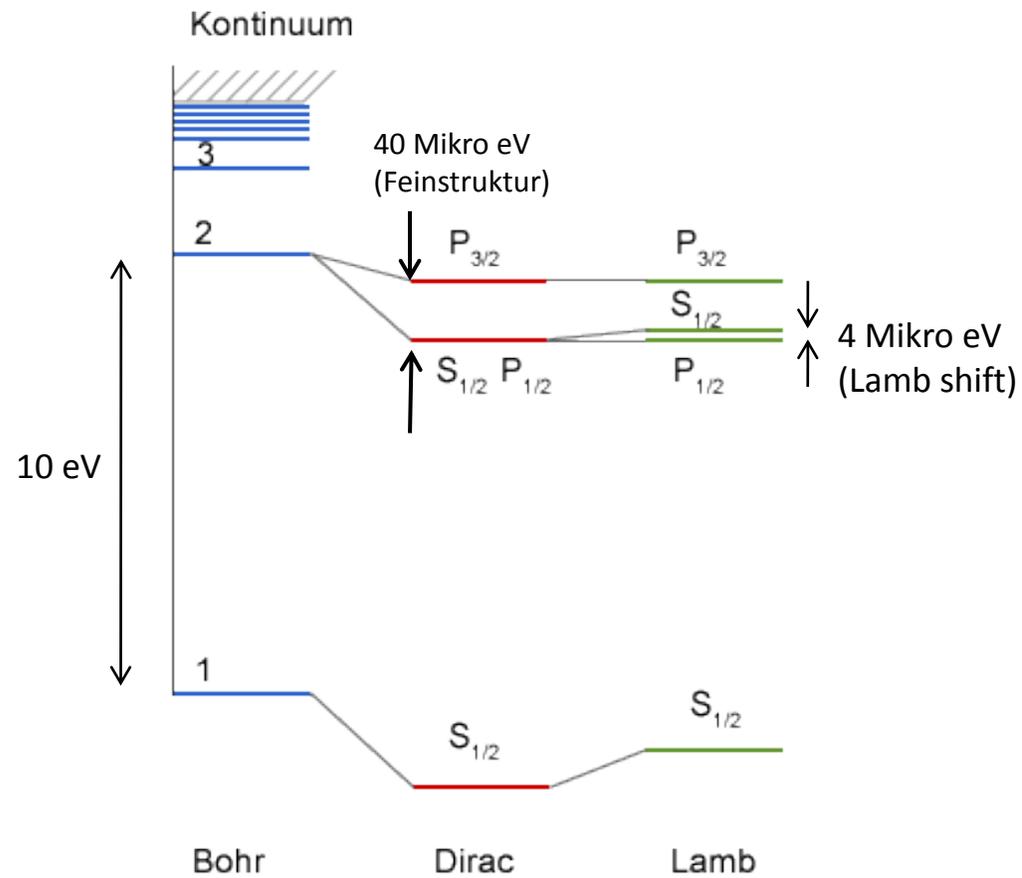
Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

# Lambshift



Spektrum des Wasserstoffatoms

Willis E. Lamb, Robert C. Retherford: *Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method*. In: *Physical Review*. 72, Nr. 3, 1947, S. 241–243. Nobelpreis 1955

## **1947 Konferenz auf Shelter Island bei New York**

Lamb präsentiert seine Messungen

Auf der Rückreise von der Konferenz gelingt Bethe die erste Berechnung

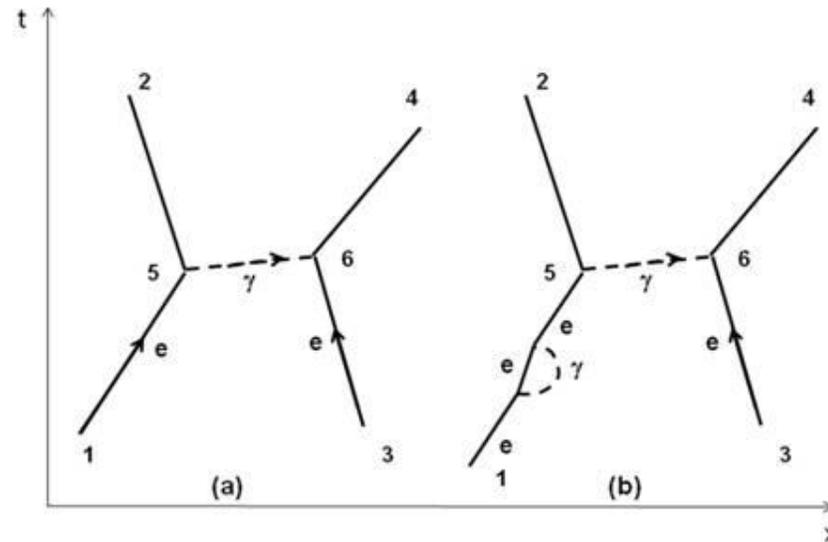
Entwicklung der Quantenfeldtheorie durch Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga und Freeman Dyson.

Die elektromagnetischen Felder werden quantisiert, d.h. als eine Überlagerung von Erzeugungs- und Vernichtungs-Operatoren von Photonen dargestellt. → Entwicklung in Feynman Diagrammen

1965 Nobelpreis an Feynman, Schwinger und Tomonaga

# Feynman-Diagramme

Abstoßung zwischen zwei Elektronen  
durch den Austausch eines Photons



# Die Genauigkeit der Quantenelektrodynamik am Beispiel des g-Faktors des Müons

Experiment:  $g = 2.0023318416(13)$

Theorie (QED):  $g = 2.0023318361(10)$

Differenz:  $\Delta g = 0.0000000054(16)$

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \mu_B$$

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman**
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

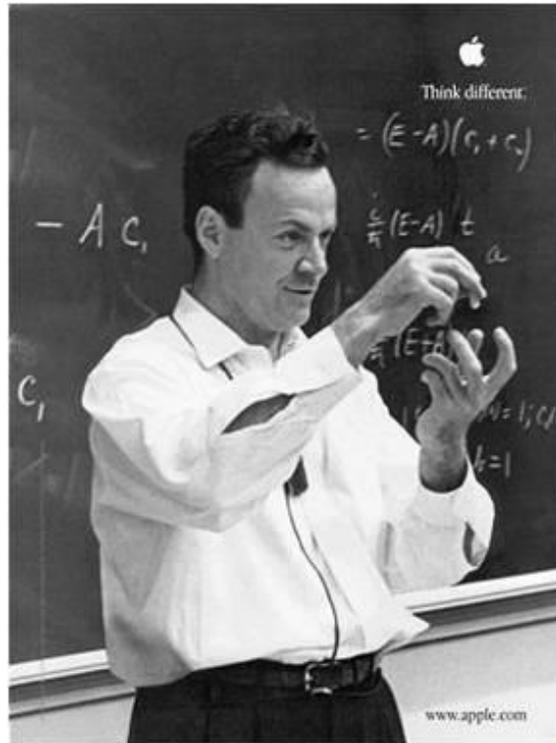
Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Richard Feynman (1918 – 1988)



- 1918 Geboren in New York
- 1935 Studium der Physik am MIT, Promotion in Princeton
- 1943 Manhattan Project in Los Alamos
- 1945 Assoc. Professor an der Cornell University
- 1950 Professor am CalTec in Berkeley, Feynman Lectures
- 1965 Nobelpreis für Physik
- 1988 Gestorben in Los Angeles

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlerzerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

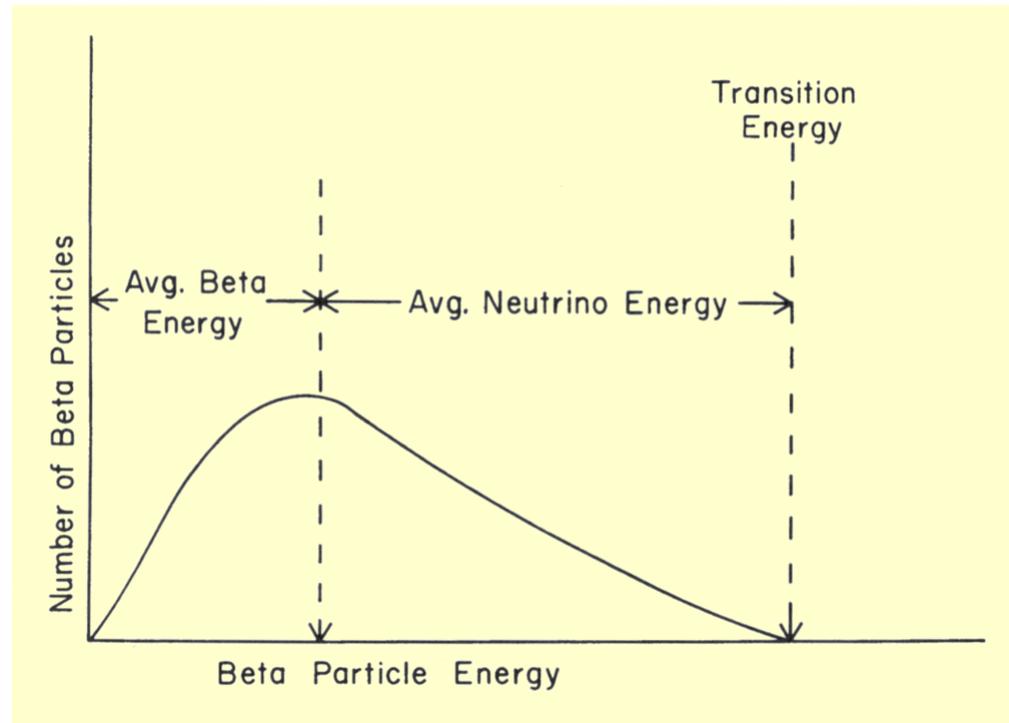
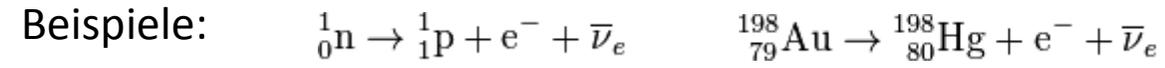
Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Energiespektrum der Elektronen beim Beta Zerfall



Betaspektrum schematisch: Zahl der Elektronen pro Zeiteinheit und pro Energieeinheit als Funktion ihrer kinetischen Energie

# Paulis Hypothese der Emission eines zusätzlichen neutralen Teilchens beim $\beta$ -Zerfall

*Original - Photographie of No. 0373*  
Abschrift/15.12.56 FN

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Uraniastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst  
anzuhören bitte, Ihnen das Nähere auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energienatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

## Wolfgang Pauli (1900 – 1958)

Offener Brief vom 04.12.1934 an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen:

*„Liebe radioaktive Damen und Herren, wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des Näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts... des kontinuierlichen Betaspektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen... dass beim Betazerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron [später Neutrino genannt] emittiert wird... Also, liebe Radioaktive, prüfet und richtet. - Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dezember in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin... “*

Der Energiesatz war gerettet, aber auf Kosten eines unsichtbaren Teilchens, von dem Pauli selbst später sagte: *"Ich habe etwas Schreckliches getan. Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann."*

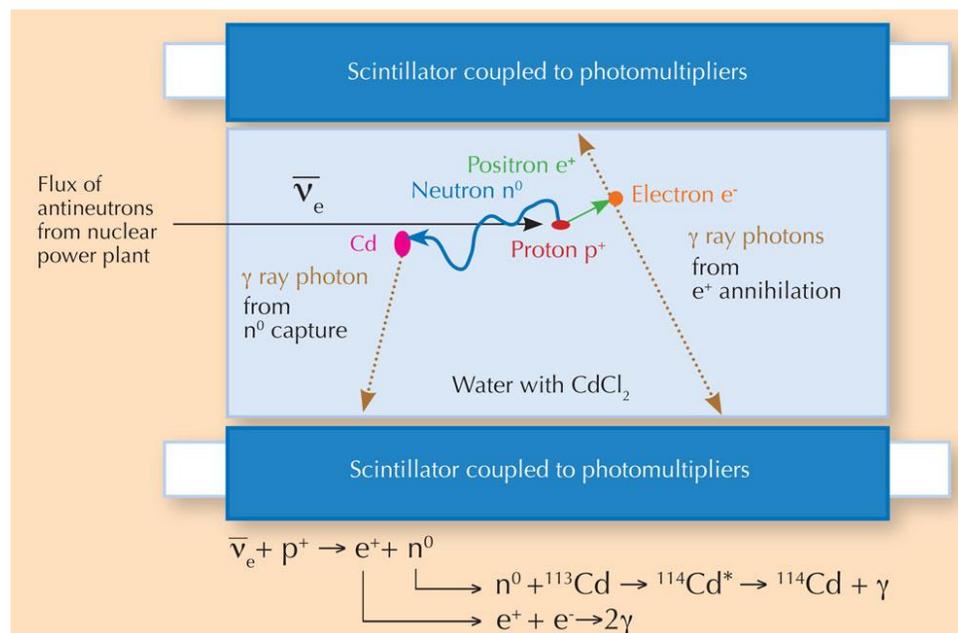


Wolfgang Pauli  
im Jahre 1926

## Cowan-Reines-Neutrinoexperiment - „Detecting the Poltergeist“

Stufe 1: Antineutrinos (Fluss  $10^{13}/\text{cm}^2\text{s}$ ) aus einem Reaktor fallen auf ein Proton und in einem inversen  $\beta$ -Zerfall entstehen ein Neutron und ein Positron  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

Stufe 2: Das Positron wird durch die Vernichtungsstrahlung nachgewiesen, und das Neutron wird von einem Cadmium Kern eingefangen und zeitverzögerte  $\gamma$ -Strahlung wird nachgewiesen.  $n + {}^{108}\text{Cd} \rightarrow {}^{109m}\text{Cd} \rightarrow {}^{109}\text{Cd} + \gamma$  Rate: 3 Ereignisse/Stunde



Juni 1956: Telegramm an Pauli: We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected  $6 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$ .

1995 Nobelpreis an Reines

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

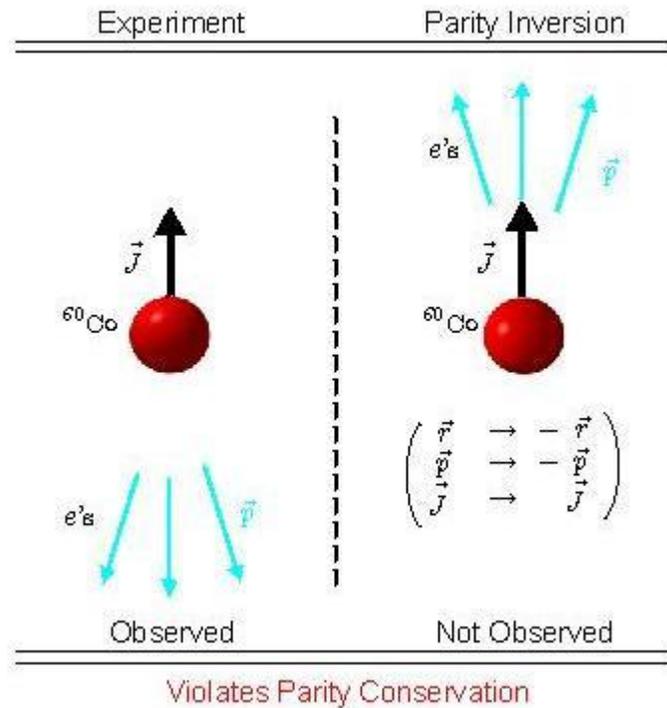
Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

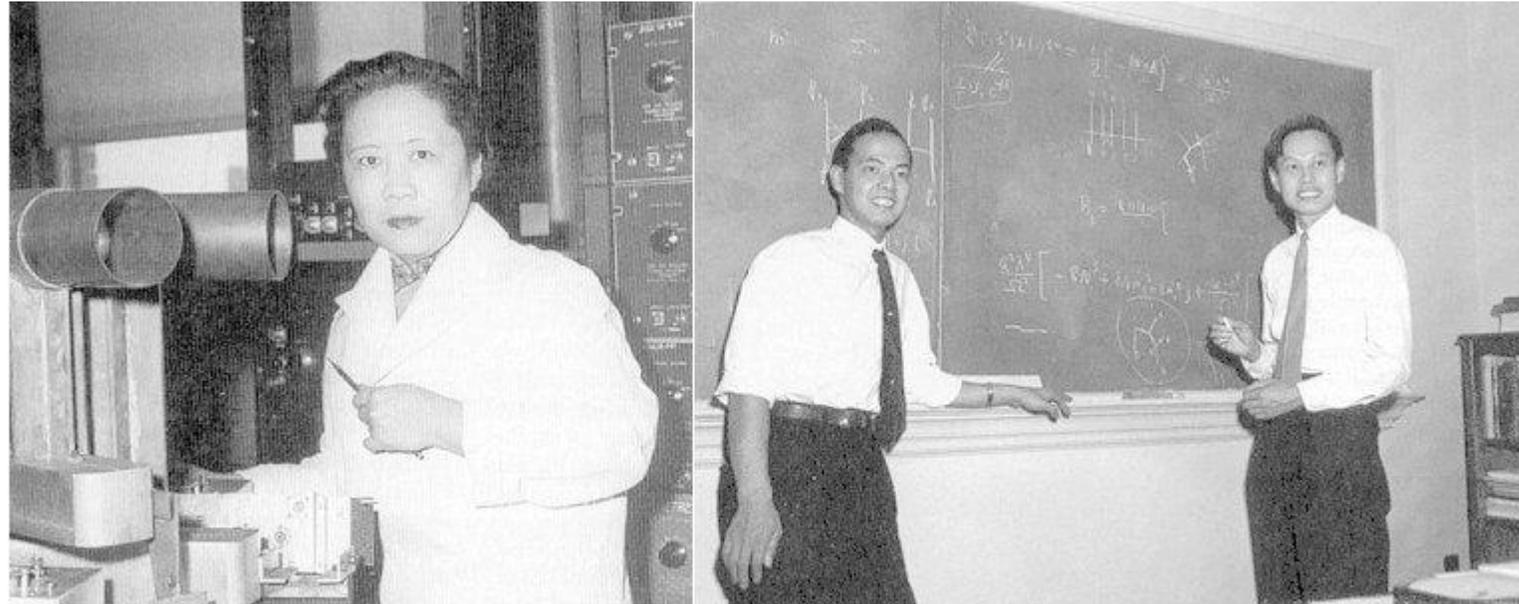
# Die Verletzung der Parität bei der schwachen Wechselwirkung

1. Hypothese Lee und Yang zur Lösung des Theta-Tau Rätsels
2. Experiment Wu et al.



## Die Chinesen sind an der Vorfront der Physik angekommen

(In China geboren, in den USA studiert und gearbeitet)



**C. S. Wu**

1912- 1997

**T. D. Lee**

geb. 1926

**C. N. Yang**

geb. 1922

Okt. 1956: Paper, in dem Lee und Yang die Hypothese der Paritätsverletzung formulieren  
Jan. 1957: Paper mit dem experimentellen Nachweis der Paritätsverletzung durch Wu et al.  
Herbst 1957: Nobelpreis an Lee und Yang (und nicht an Wu)

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 **Teilchen Beschleuniger**
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaecäsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Teilchenbeschleuniger

Das Werkzeug der Hochenergiephysiker zur Erzeugung von Teilchen mit sehr hohen Energien

- hoher Impuls bedeutet kleine Wellenlänge und damit gute Auflösung, da  $\lambda = h/p$
- hohe (Schwerpunkts-) Energien bieten die Möglichkeit zur Erzeugung neuer Teilchen

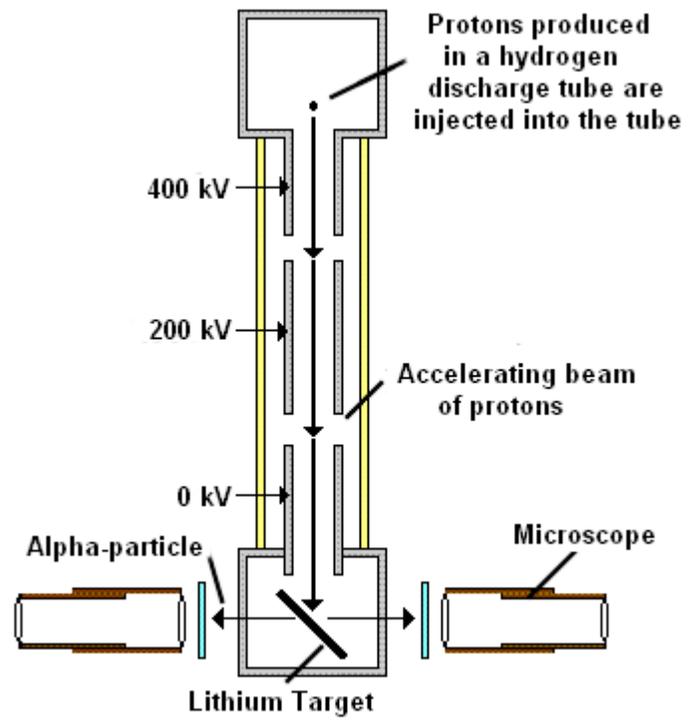
1932 erster Linearbeschleuniger von Cockroft und Walton (600 keV) (Nobelpreis 1951)

1932 erstes Zyklotron von Ernest Lawrence (Nobelpreis 1939)

[1943 erstes Zyklotron in Heidelberg, gebaut von Wolfgang Gentner und Walter Bothe]

1945 erstes Elektronen Synchrotron von Edwin McMillan (320 MeV)

(Er erhielt 1951 zusammen mit Glenn Seaborg den Nobelpreis für Chemie für die erste Herstellung eines Transurans.)



Linearbeschleuniger von Cockroft und Walton (600 keV)

## Zyklotron

(Energien von einigen 10 MeV)

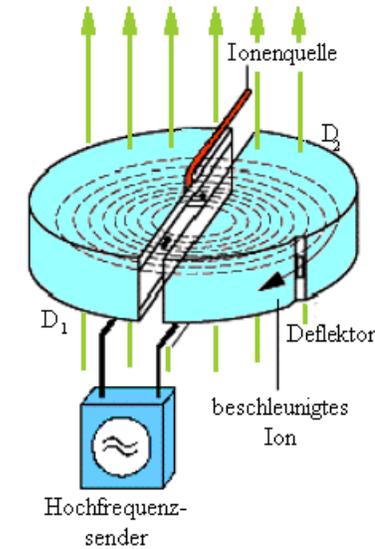
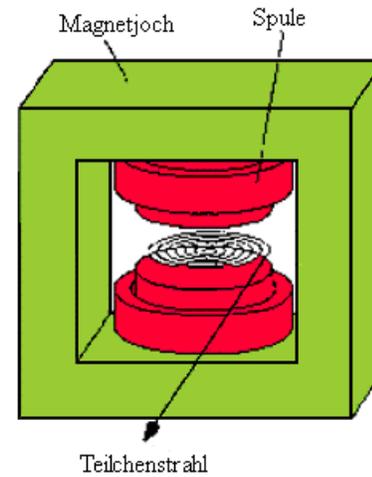
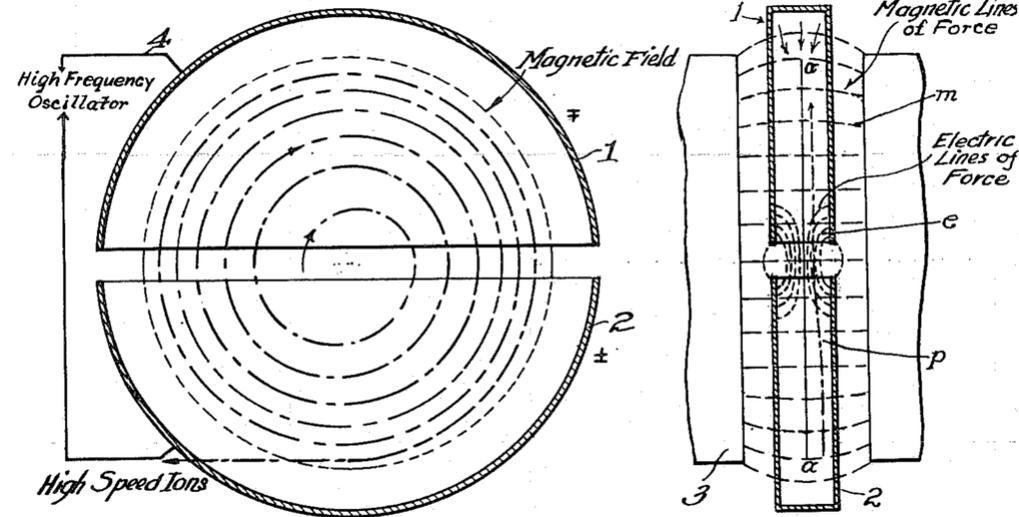
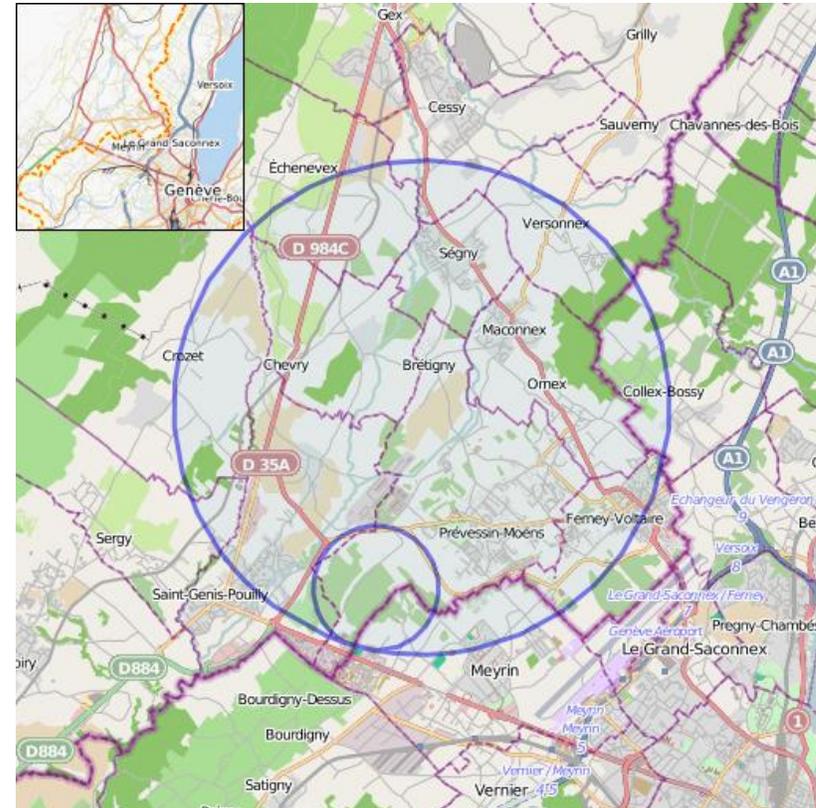
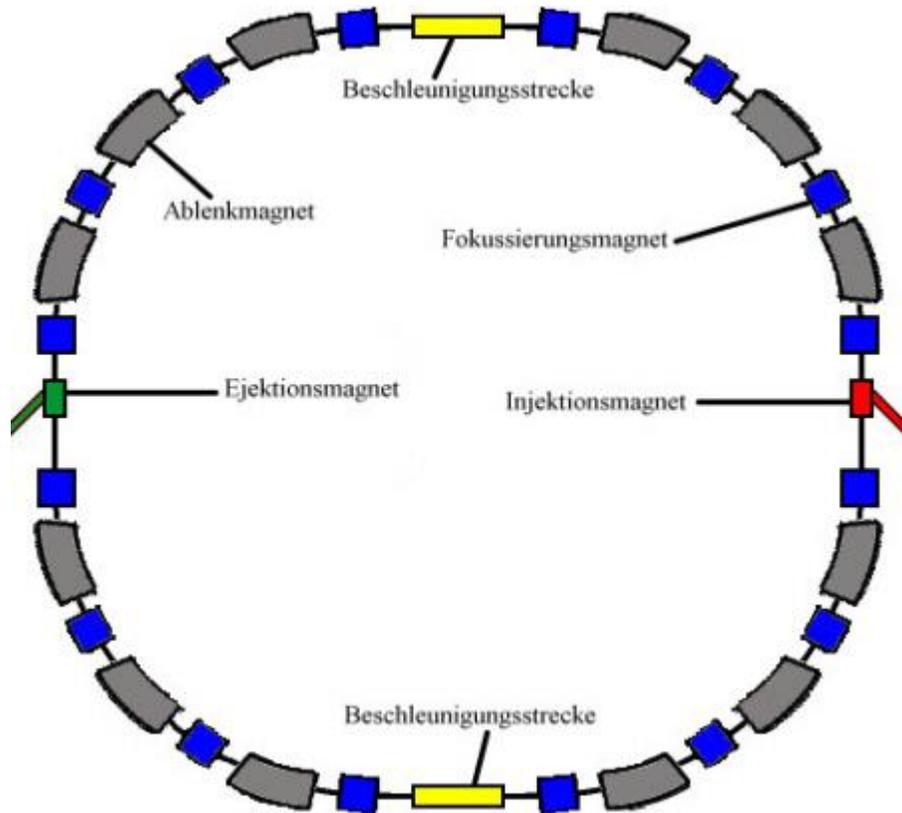


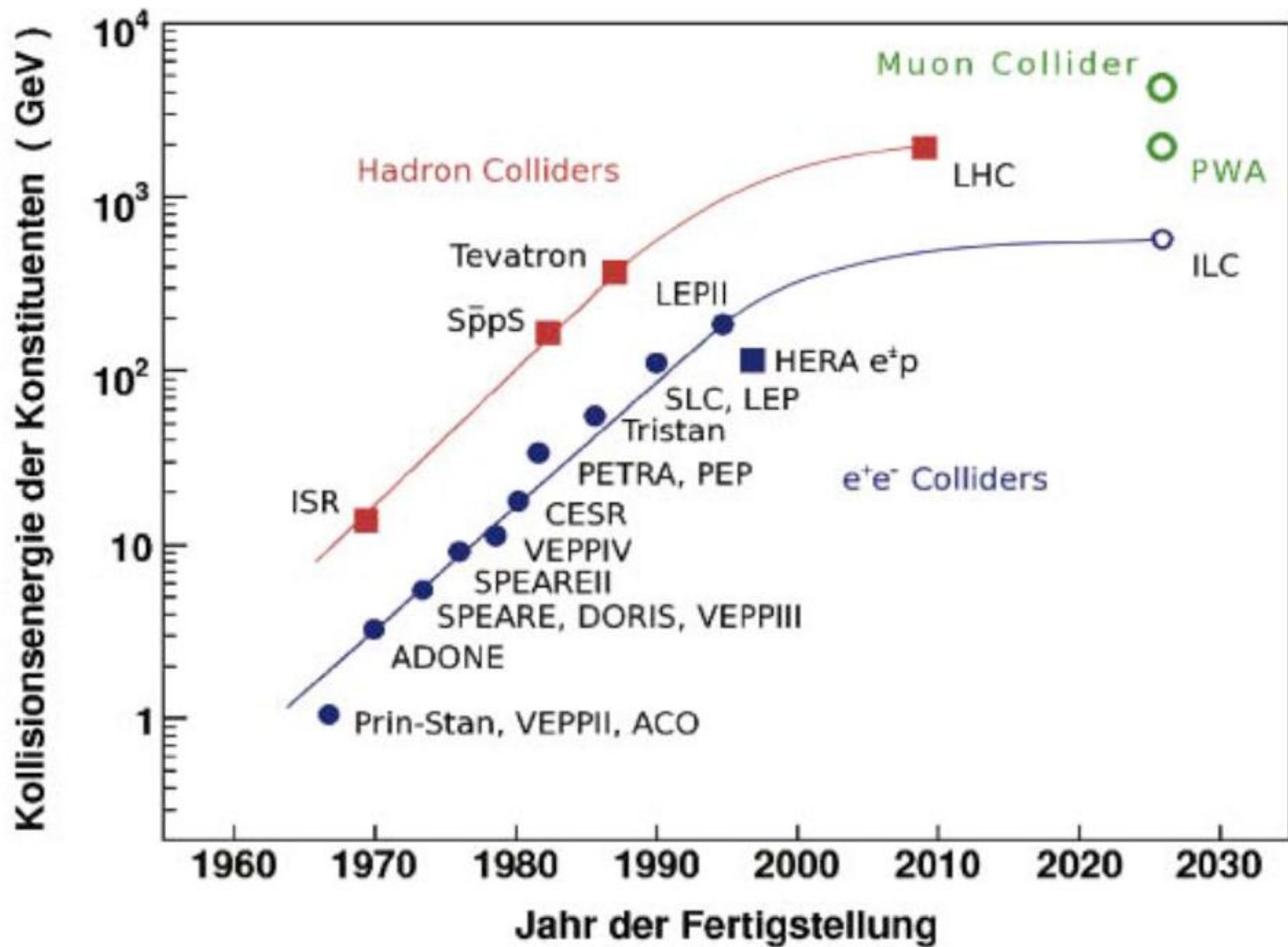
Diagram of cyclotron operation from Lawrence's 1934 patent. The "D" shaped [electrodes](#) are enclosed in a flat [vacuum chamber](#), which is installed in a narrow gap between the two [poles](#) of a large magnet.



Synchrotron ( GeV und TeV, je nach Stärke der Magnetfelder in den Ablenkmagneten und nach dem Durchmesser des Rings)



Large Hadron Collider bei Genf  
(Durchmesser 8 km; supraleitende Magnete)

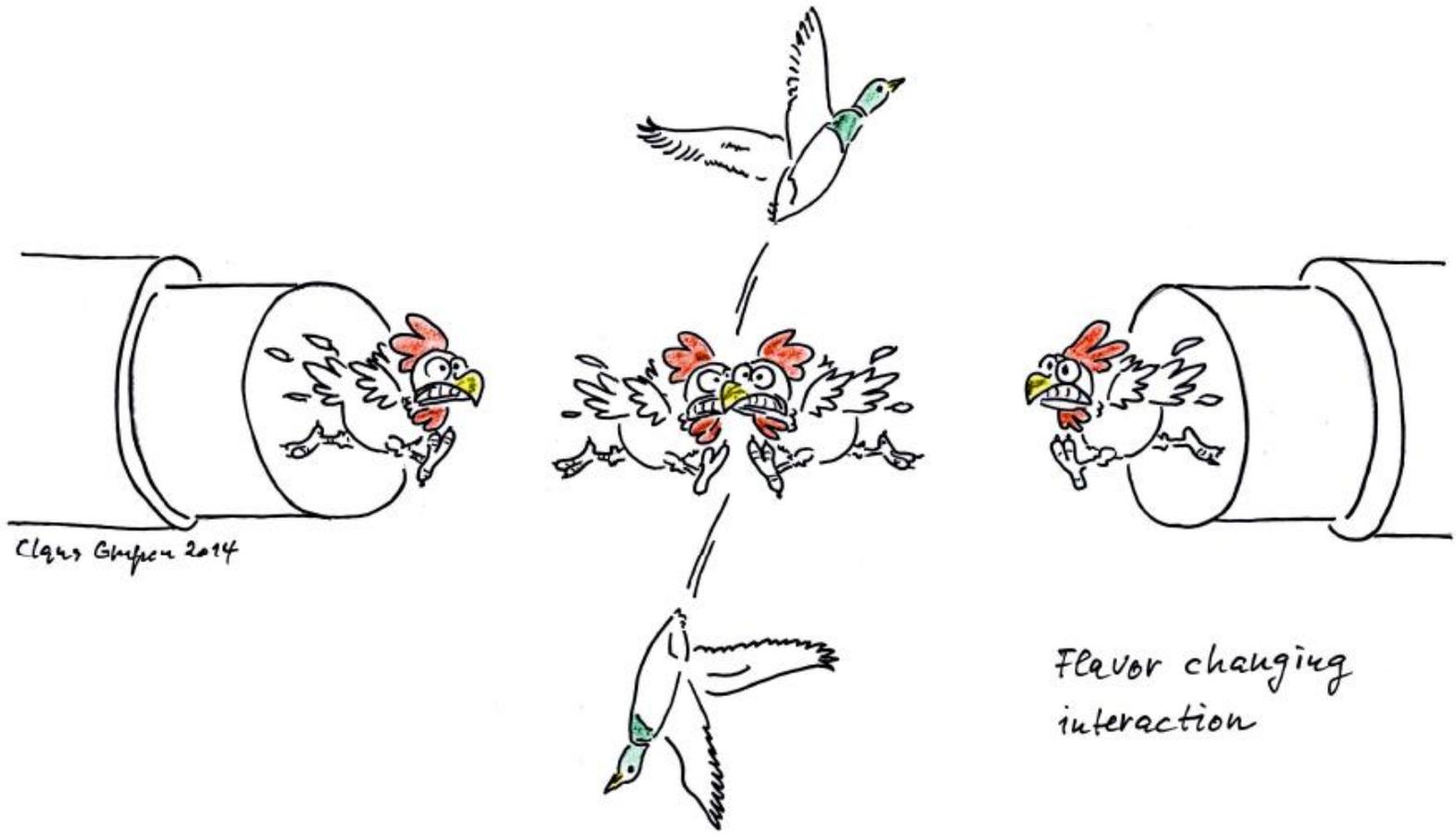




LHC

SPS

CERN Meyrin - PS



Clas Gispou 2014

Flavor changing  
interaction

vom der Fertigung

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaärsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Ist das Proton zusammengesetzt?

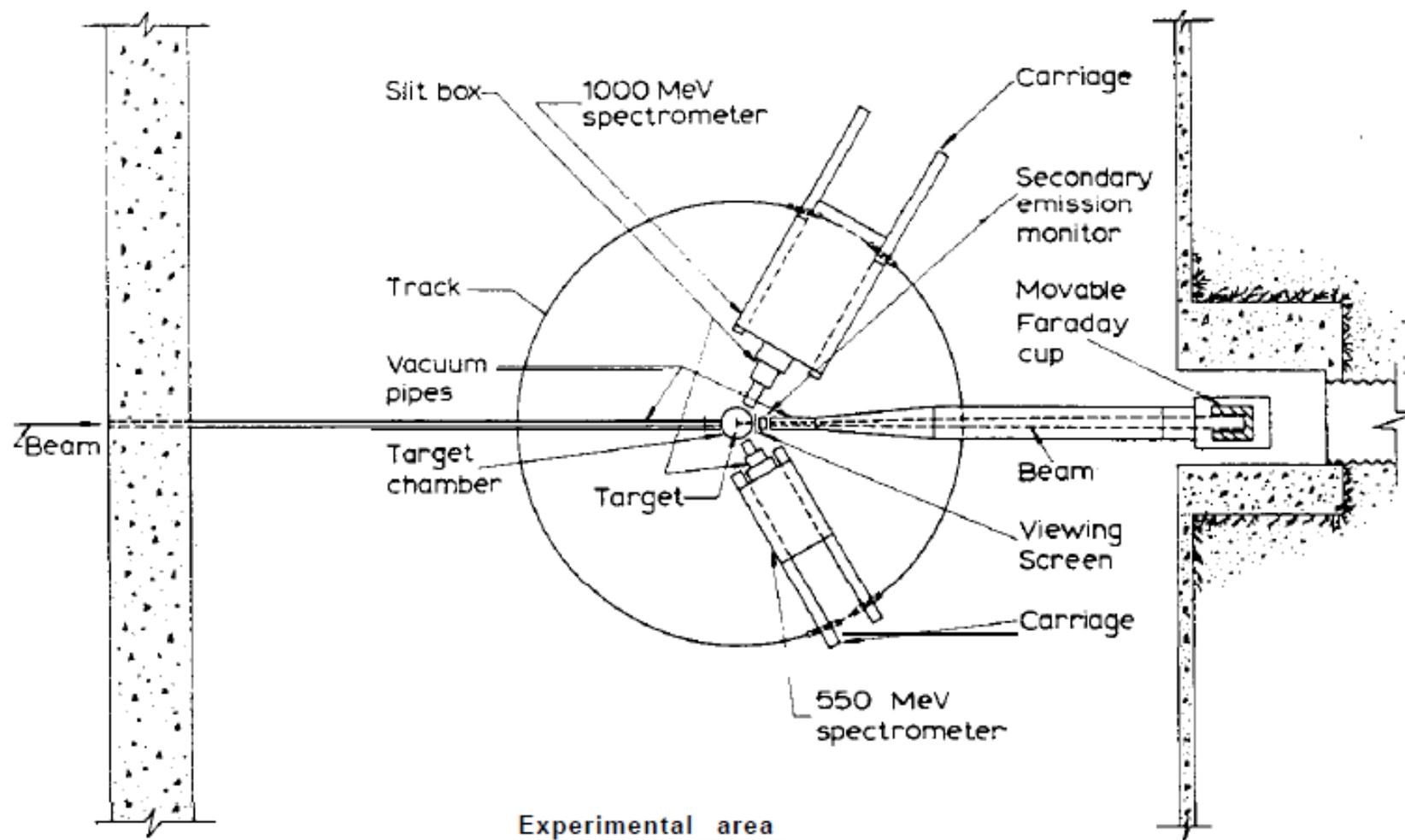
Erster Hinweis: der g-Faktor des Protons ist nicht 2 (wie beim Elektron) sondern  $g = 5.58$  : Experiment von Otto Stern 1933 mithilfe eines Stern-Gerlach Experiments für Wasserstoff Moleküle. Er fand  $g = 5$ .  
Nobelpreis 1943

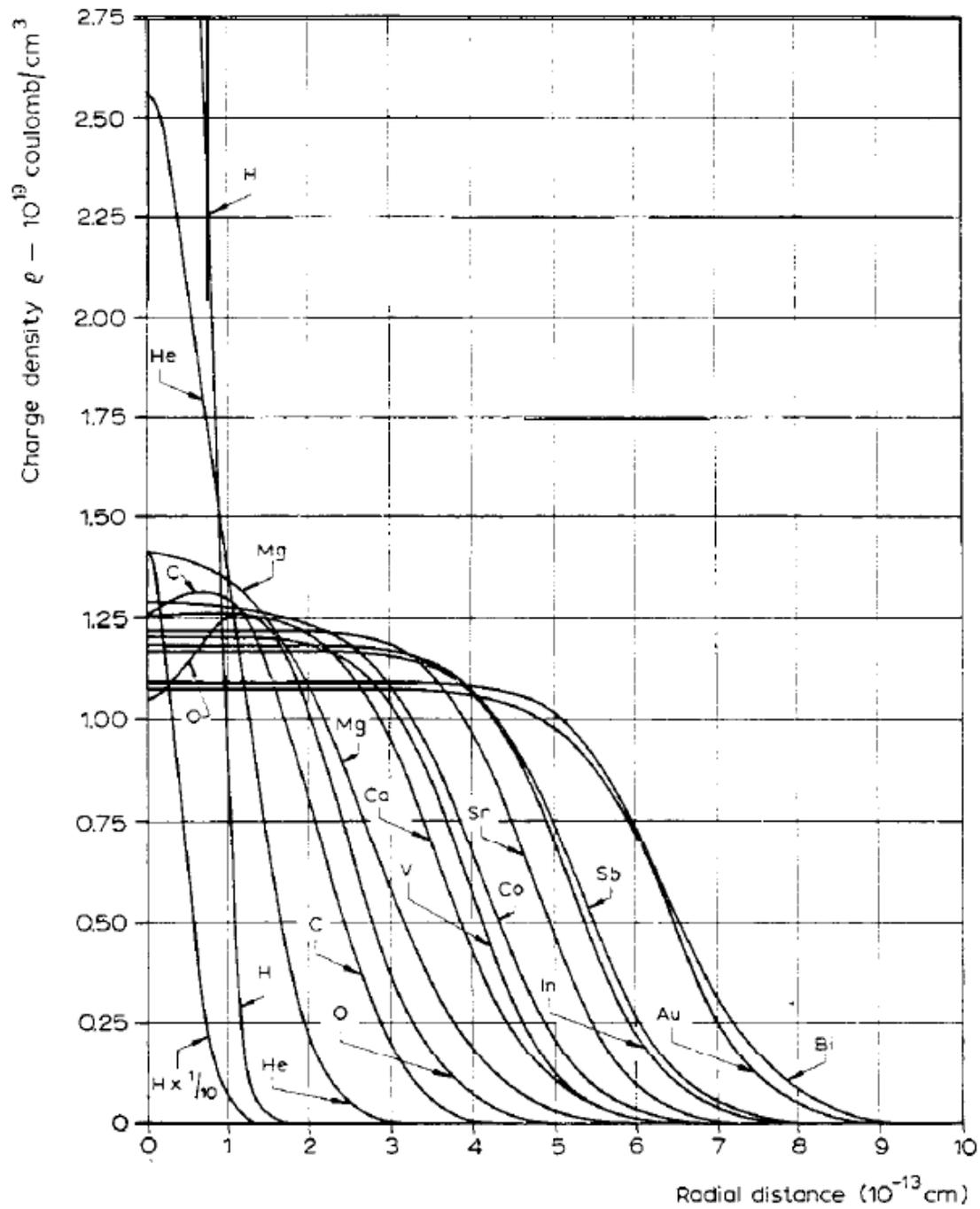


Zweiter Hinweis: Das Proton ist nicht punktförmig, sondern ausgedehnt mit einem Radius von etwa  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ .  
Experiment: elastische Streuung von hochenergetischen Elektronen an Protonen (Robert Hofstadter geb 1915; Nobelpreis 1961)



# Hofstadter's experimenteller Aufbau





Ladungsverteilung  
verschiedener Atomkerne

## 8. Atomkerne und Elementarteilchen

- 8.1 Rutherfords Streuexperimente
- 8.2 Ernest Rutherford
- 8.3 Die Entdeckung des Neutrons
- 8.4 Kernspaltung
- 8.5 Otto Hahn und Lise Meitner
- 8.6 Die Entdeckung des Positrons
- 8.7 Quanten-Elektrodynamik
- 8.8 Richard Feynman
- 8.9 Die Entdeckung des Neutrinos (Paulis Voraussage und Reines Nachweis)
- 8.10 Die Verletzung der Parität im  $\beta$ -Zerfall
- 8.11 Teilchen Beschleuniger
- 8.12 Hinweise auf eine Struktur des Protons
- 8.13 Nachweis der Quarks und Gluonen im Proton

### Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle<sup>1</sup>.

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

In einer vor kurzem an dieser Stelle erschienenen vorläufigen Mitteilung<sup>2</sup> wurde angegeben, daß bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen außer den von MEITNER, HAHN und STRASSMANN im einzelnen beschriebenen Trans-Uranen — den Elementen 93 bis 96 — noch eine ganze Anzahl anderer Umwandlungsprodukte entstehen, die ihre Bildung offensichtlich einem sukzessiven zweimaligen  $\alpha$ -Strahlenerfall des vorübergehend entstandenen Urans 239 verdanken. Durch einen solchen Zerfall muß aus dem Element mit der Kernladung 92 ein solches mit der Kernladung 88 entstehen, also ein Radium. In der genannten Mitteilung wurden in einem noch als vorläufig bezeichneten Zerfallsschema 3 derartiger isomerer Radiumisotope mit ungefähr geschätzten Halbwertszeiten und ihren Umwandlungsprodukten, nämlich drei isomeren Actiniumisotopen, angegeben, die ihrerseits offensichtlich in Thorisotope übergehen.

Zugleich wurde auf die zunächst unerwartete Beobachtung hingewiesen, daß diese unter  $\alpha$ -Strahlenabspaltung über ein Thorium sich bildenden Radiumisotope nicht nur mit schnellen, sondern auch mit verlangsamt Neutronen entstehen.

Der Schluß, daß es sich bei den Anfangsgliedern dieser drei neuen isomeren Reihen um Radiumisotope handelt, wurde darauf begründet, daß diese Substanzen sich mit Bariumsalzen abscheiden lassen und alle Reaktionen zeigen, die dem Element Barium eigen sind. Alle anderen bekannten Elemente, angefangen von den Trans-Uranen über das Uran, Protactinium, Thorium bis zum Actinium haben andere chemische Eigenschaften als das Barium und lassen sich leicht von ihm trennen. Dasselbe trifft zu für die Elemente unterhalb Radium, also etwa Wismut, Blei, Polonium, Ekaärsium.

Es bleibt also, wenn man das Barium selbst außer Betracht läßt, nur das Radium übrig.

Im folgenden soll kurz die Abscheidung des Isotopengemisches und die Gewinnung der einzelnen

Glieder beschrieben werden. Aus dem Aktivitätsverlauf der einzelnen Isotope ergibt sich ihre Halbwertszeit und lassen sich die daraus entstehenden Folgeprodukte ermitteln. Die letzteren werden in dieser Mitteilung aber im einzelnen noch nicht beschrieben, weil wegen der sehr komplexen Vorgänge — es handelt sich um mindestens 3, wahrscheinlich 4 Reihen mit je 3 Substanzen — die Halbwertszeiten aller Folgeprodukte bisher noch nicht erschöpfend festgestellt werden konnten.

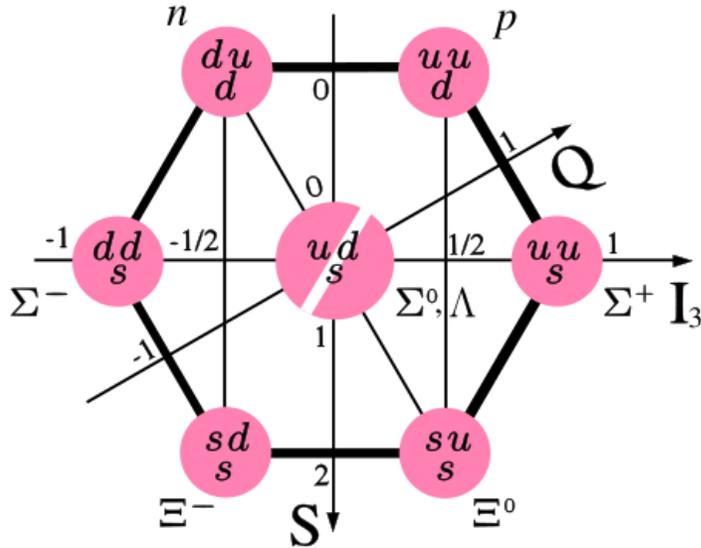
Als Trägersubstanz für die „Radiumisotope“ diente naturgemäß immer das Barium. Am nächstliegenden war die Fällung des Bariums als Bariumsulfat, das neben dem Chromat schwerstlösliche Bariumsalz. Nach früheren Erfahrungen und einigen Vorversuchen wurde aber von der Abscheidung der „Radiumisotope“ mit Bariumsulfat abgesehen; denn diese Niederschläge reißen neben geringen Mengen Uran nicht unbedeutliche Mengen von Actinium- und Thoriumisotopen mit, also auch die mutmaßlichen Umwandlungsprodukte der Radiumisotope, und erlauben daher keine Reindarstellung der Ausgangsglieder. Statt der quantitativen, sehr oberflächenreichen Sulfatfällung wurde daher das in starker Salzsäure sehr schwer lösliche Bariumchlorid als Fällungsmittel gewählt; eine Methode, die sich bestens bewährt hat.

Bei der energetisch nicht leicht zu verstehenden Bildung von Radiumisotopen aus Uran beim Beschießen mit langsamen Neutronen war eine besonders gründliche Bestimmung des chemischen Charakters der neu entstehenden künstlichen Radioelemente unerlässlich. Durch die Abtrennung einzelner analytischer Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane eine Aktivität stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodischen Systems (Trägersubstanz Zr) gefunden. Eingehender untersucht wurden zunächst die Bariumfällungen, die offensichtlich die Anfangsglieder der beobachteten isomeren Reihen enthielten. Es soll gezeigt werden, daß Transurane, Uran, Protactinium, Thorium und Actinium

<sup>1</sup> Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem. Eingegangen 22. Dezember 1938.

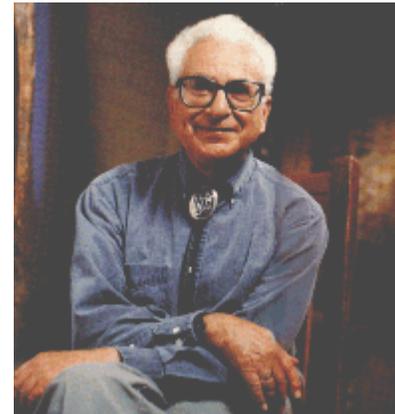
<sup>2</sup> O. HAHN u. F. STRASSMANN, Naturwiss. 26, 756 (1938).

## Das Oktett der Baryonen



Die Massen der Nukleonen (n, p) sind etwa  $1000 \text{ MeV}/c^2$ ,  
 die Massen der  $\Sigma$ - und  $\Lambda$ - Baryonen etwa  $1200 \text{ MeV}/c^2$  und  
 die Massen der  $\Xi$ -Teilchen etwa  $1320 \text{ MeV}/c^2$ .

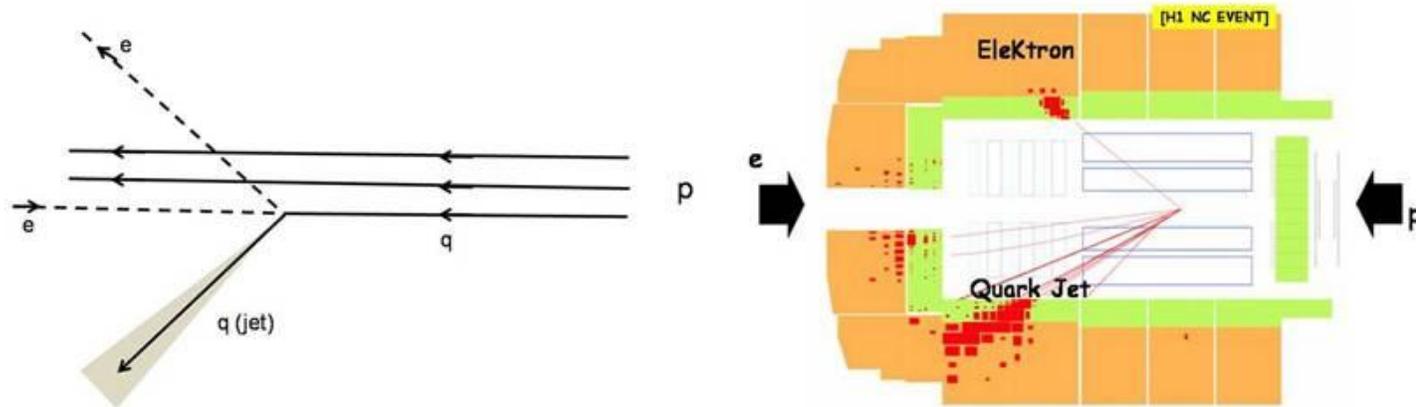
Das Klassifikationssystem SU(3) wurde  
 1961 von Gell-Mann und Nishijima  
 eingeführt  
 1964 postulierten Gell-Mann und Zweig  
 die Existenz von Quarks. Auch das Wort  
 „Quark“ geht auf Gell-Mann zurück.  
 Nobelpreis 1969



Murray Gell-Mann geb. 1929

# Elektron - Proton - Stoß

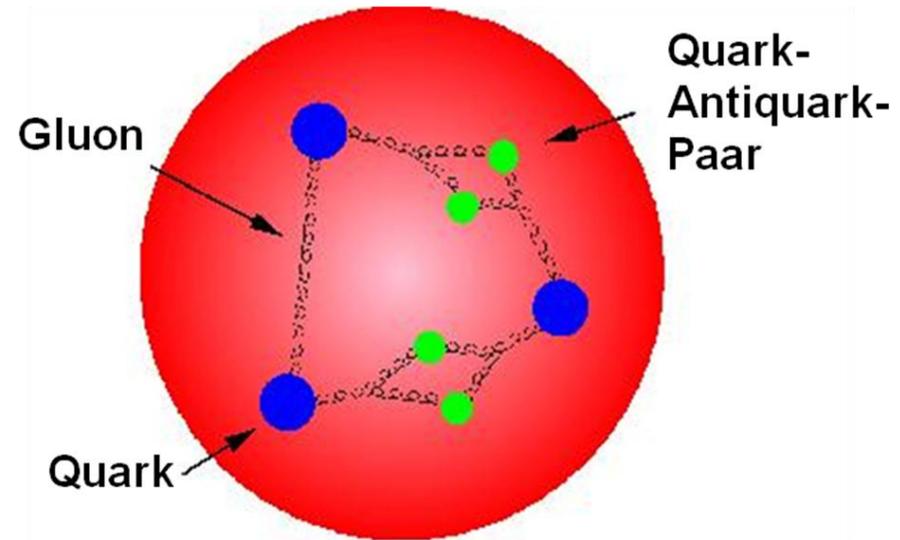
Hierbei wird ein Quark aus dem Proton herausgeschlagen.

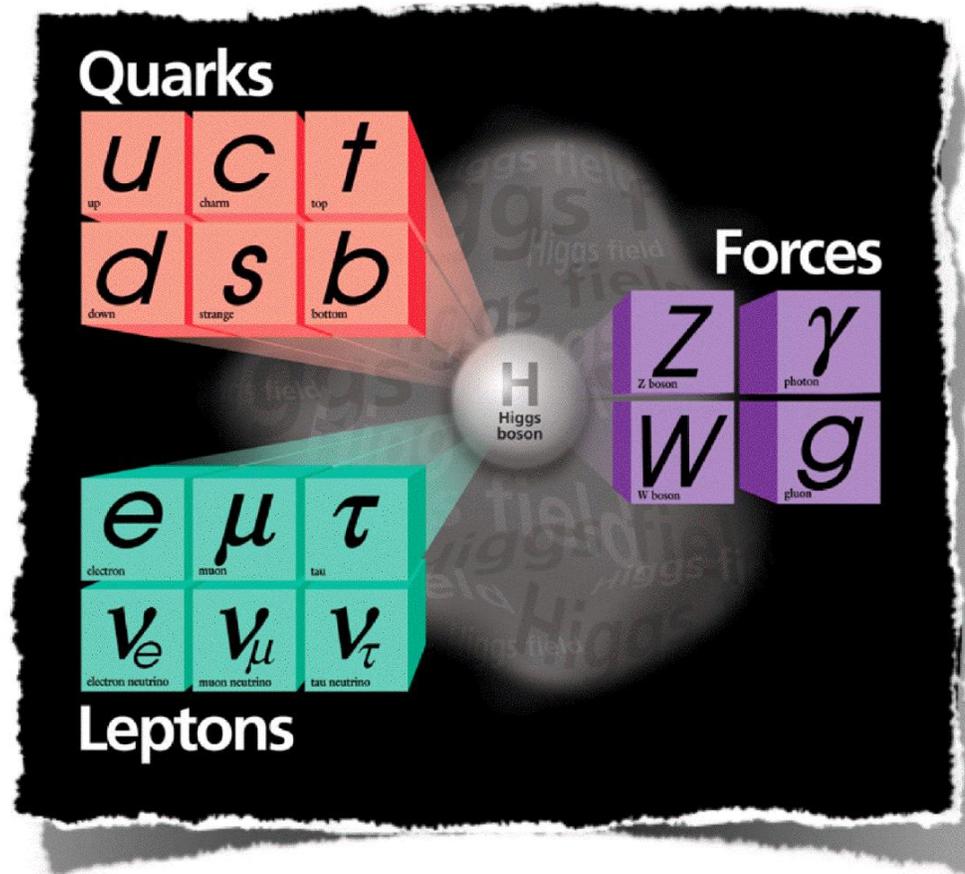


Links: schematische Darstellung.

Rechts: die Spuren eines Ereignisses am DESY in Hamburg

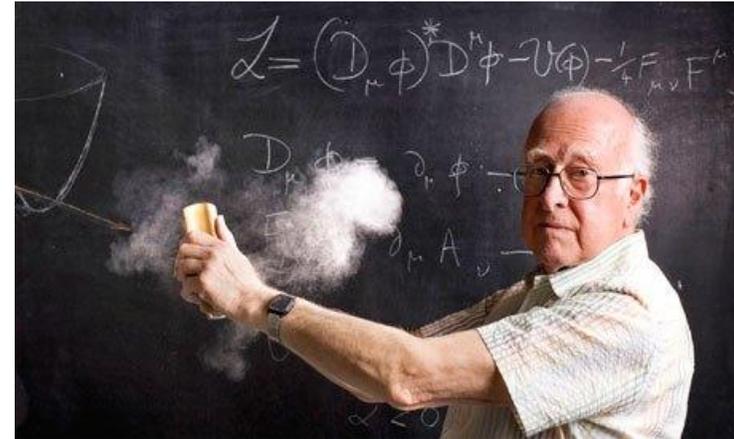
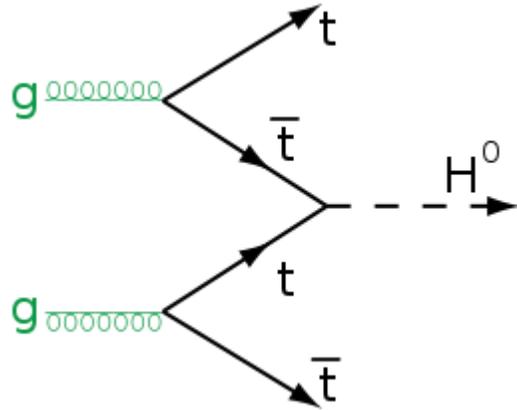
## Die innere Struktur des Protons



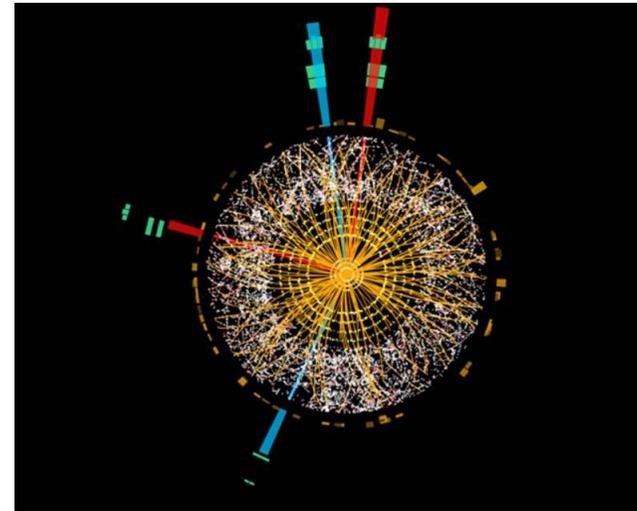
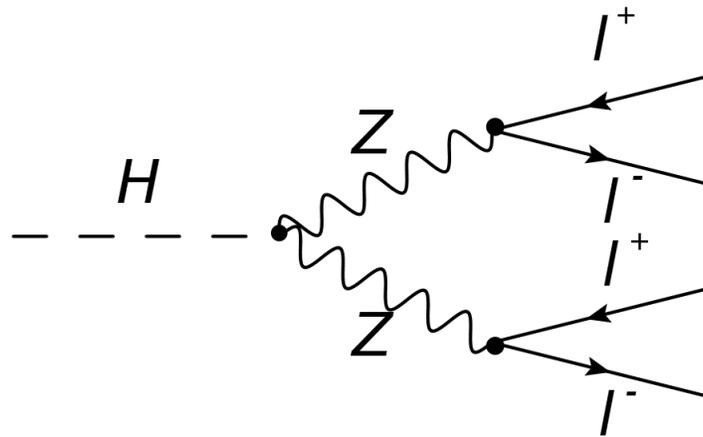


Die Konstituenten der Materie nach dem Standard Modell der Elementarteilchen

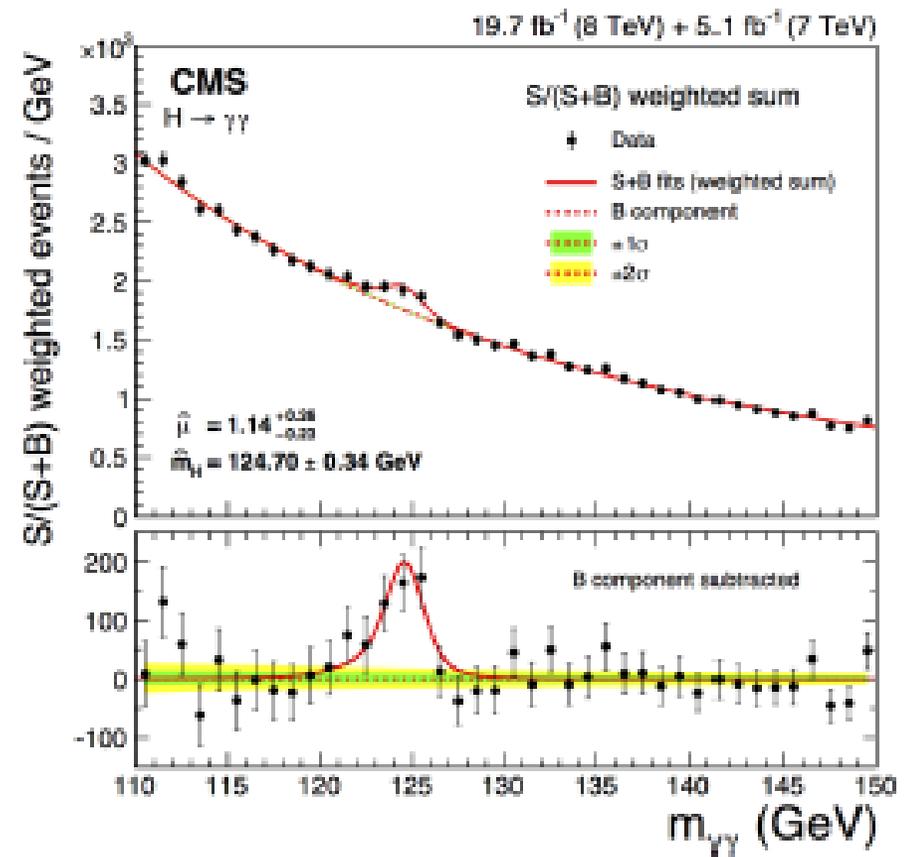
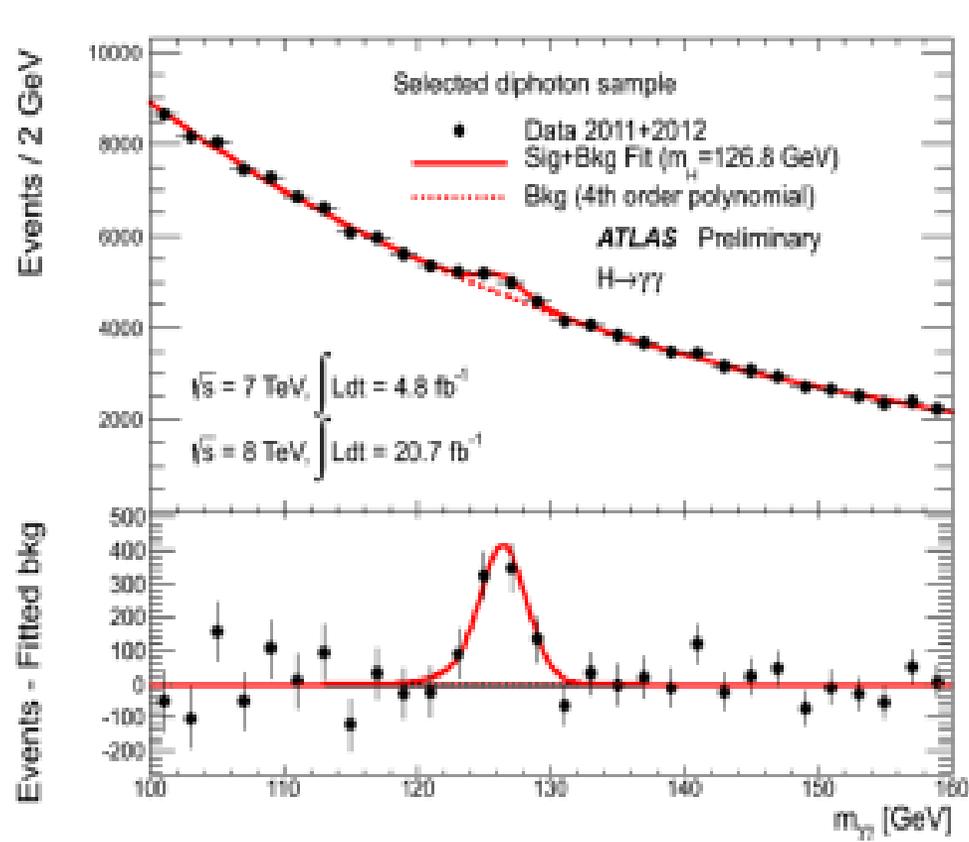
# Das Higgs Boson



Peter Higgs geb. 1929; Higgs Mechanismus 1964;  
Nobelpreis mit Englert 2013



Zerfall eines Higgs-Bosons in 4 Leptonen



- Higgs-Teilchen zweifelsfrei nachgewiesen
- der Werte der Masse hat interessante Implikationen:
  - ➔ das Standardmodell gilt eventuell bis zu sehr hohen Energien
  - ➔ das Universum ist vielleicht nur meta-stabil ...