

# Physik V: Kerne und Teilchen

---

Ulrike Thoma

**Vorlesungen:** Montag 8:15 - 10:00 Uhr  
Mittwoch 8:15 - 10:00 Uhr

**Übungen:** Donnerstag / Freitag

**Vorlesungen:**

**Erste Vorlesung:** Mo. 07.10.

**Letzte Vorlesung:** Mi. 29.01.

**Weihnachtsferien:** 24.12 - 06.01. (einschließlich)

**Vorschlag: stattdessen:** 23.12. - 05.01. ? → Ja

**Vorlesungsstil:** Folien + Tafel

Folien → Webseite (Folien - kein Vorlesungsskript!)

Tafel → mitschreiben

1

# Physik V: Kerne und Teilchen

---

**Vorlesungen:** Montag 8:15 - 10:00 Uhr  
Mittwoch 8:15 - 10:00 Uhr

**Übungstermine:** Donnerstag 10:15 - 12:00 Uhr  
12:15 - 14:00 Uhr (eCampus)  
Freitag 12:15 - 14:00 Uhr  
14:15 - 16:00 Uhr

**Übungszettel:**

- Ausgabe Montag via eCampus (erster Zettel: kommende Woche),
- Abgabe am darauf folgenden Dienstag vor 10:00 Uhr  
max. 2 Personen gemeinsam, online-Abgabe via eCampus
- Korrektur bis Do./Fr., Besprechung in den Übungen

**Zulassung zur Klausur:**

- ≥ 50% der Punkte aus den Übungen (bitte aktive Teilnahme (Vorrechnen!))  
**Klausur allein entscheidet über Bestehen**

**Klausur-Termine:** Mi. 05.02.2025, 13 Uhr / Mo. 17.03.2025, 13 Uhr

2

## Webseite:

- Folien
- Übungszettel

↔ [ecampus.uni-bonn.de](http://ecampus.uni-bonn.de)

(physik511: Physik V (Kerne und Teilchen))

Studierende Physik-Lehramt:

Bitte in der Pause kurz nach vorne kommen:

→ Absprache Termin Lehramtsübung ↔ Maike Hansen  
(Weniger LP → weniger Aufgaben zu bearbeiten)

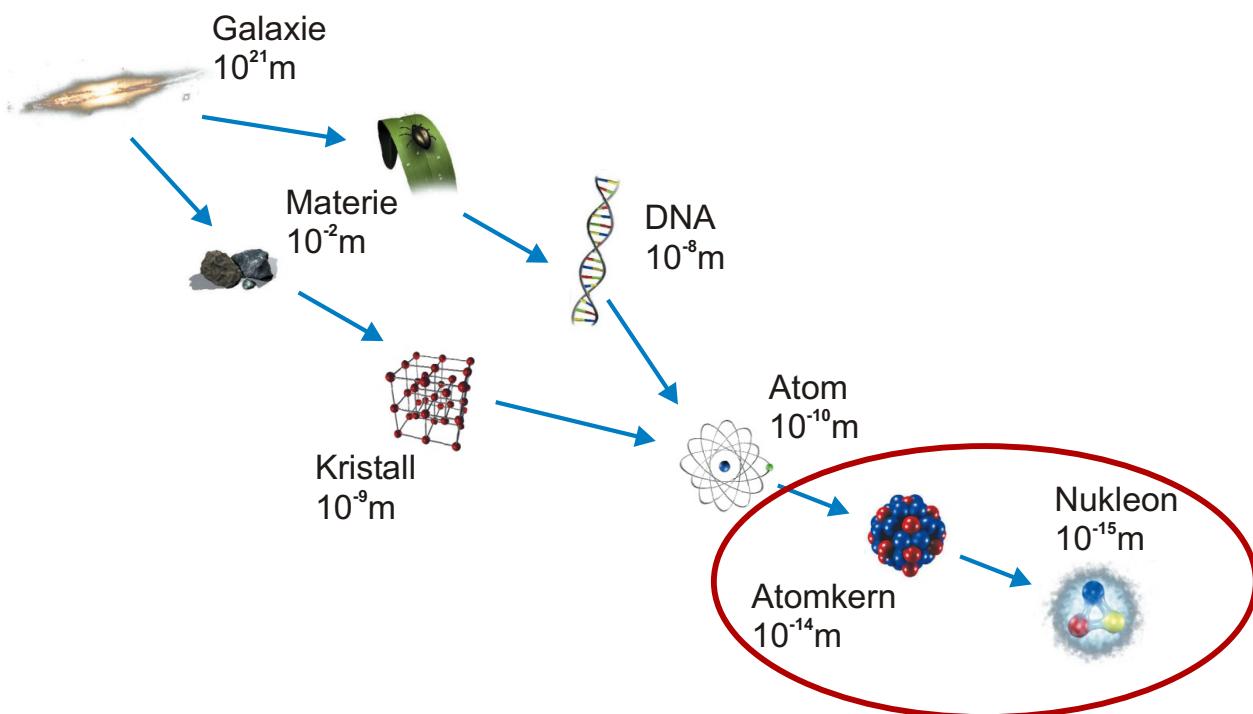
→ Termin: Do. 12:00 - 13:30 Uhr

3

# Physik V: Kerne und Teilchen

---

## Ziel der Vorlesung:



⇒ Einführung in die Kern- und Teilchenphysik

↔ weiterführende/vertiefende Vorlesungen: Masterstudium

4

# Ziele der Vorlesung

---

## Einführung in:

- wesentlichen Konzepte der Kern- und Teilchenphysik
- Standard-Modell der Teilchenphysik
- Eigenschaften der fundamentalen Leptonen, Quarks und Eichbosonen
- Struktur und Eigenschaften der Mesonen und Baryonen
- Atomkerne: Modelle und Eigenschaften
- Radioaktive Zerfälle, Kernspaltung, Kernfusion
- Symmetrien in der Kern-/Teilchenphysik
- Allgemeine Eigenschaften der starken und elektroschwachen Wechselwirkung
- Experimentelle Techniken und Detektoren
- .....

5

# Physik V: Kerne und Teilchen

---

## Literatur:

- Povh, Rith, Scholz, Zetsche: **Teilchen und Kerne**  
Sehr gut lesbare erste Einführung in die Kern- und Teilchenphysik
- D. H. Perkins: **Hochenergiephysik**  
Standard-Einführung
- D. Griffiths: **Introduction to Elementary Particles**  
Sehr gutes Lehrbuch, eher auf der etwas theoretischeren Seite
- Halzen, Martin: **Quarks and Leptons**  
Sehr gutes Lehrbuch, vertiefend, eher theoretisch
- T. Mayer-Kuckuk: **Physik der Atomkerne**  
Kernphysik
- W. R. Leo: **Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments**  
H. Kolanoski, N. Wermes: **Particle Detectors, Fundamentals and Applications**  
Sehr gute Bücher zum Nachweis von Teilchen / Detektoren mit sehr vielen Details
- • •

6

- Historische Einführung
- Rutherford-Streuung
- Wirkungsquerschnitt, Luminosität
- Das Standardmodell der Teilchenphysik - ein erster kurzer Einblick -
- Wechselwirkung durch Teilchenaustausch
- Natürliche Einheiten
- Vierervektoren
- Teilchen mit kurzer Lebensdauer - Breit-Wigner-Resonanzkurve

7

## Einführung - historisch -

---

Aus was besteht die Welt?

- Gibt es fundamentale Elemente?
- Gibt es fundamentale Kräfte?

Ein erster Versuch: *Empedokles, Aristoteles et. al.*

- Feuer, Wasser, Erde, Luft (+Äther) und deren Mischung  
↔ heute ~ Aggregatzustände: fest, flüssig, gasförmig,  
Plasma (+ Raum)



Ein zweiter Versuch: *Demokrit et. al.*

- Atome ↔ Idee des Unteilbaren  
das Kleinste, Unveränderbare, Unteilbare

Verschiedene Atome haben eine unterschiedliche Form, Größe und Gewicht  
Deren Eigenschaften und Bewegung bestimmt was in der Natur passiert.

Heute: Demokrits Atome ⇒ Fundamentale Teilchen

Heute: Quarks und Leptonen: aber sind sie wirklich fundamental?

# Einführung - historisch -

Ein dritter Versuch: J. Dalton 1808

ELEMENTS		
• Hydrogen	W	Strontian
○ Azoite	5	Barytes 68
● Carbon	5	Iron 50
○ Oxygen	7	Zinc 56
○ Phosphorus	9	Copper 56
⊕ Sulphur	13	Lead 90
⊖ Magnesia	20	Silver 190
⊖ Lime	24	Gold 190
⊖ Soda	28	Platina 190
⊖ Potash	42	Mercury 167

- Substanzen können in chemischen Reaktionen in andere Substanzen umgewandelt werden
- aber: z.B. Gold kann nicht produziert werden  
⇒ Chemische Elemente
- mehr als 100 Elemente wurden gefunden mit unterschiedlichen Eigenschaften: Masse, Größe
- Elemente ändern ihre Identität in chemischen Reaktionen nicht

9

# Einführung - historisch -

Das Periodensystem: Mendeleev (1869)

Haupt -		Das Periodensystem der Elemente																		
		gruppen																		
		Atommasse in u → 27,0																		
		Ordnungszahl (Protonenzahl) → 13 Al ← Elementsymbol																		
1	1 H	fest	flüssig	gasförmig	radioaktiv	10,8	12,0	14,0	16,0	19,0	20,2	2	He	2	2	2	2	2	2	
2	6,9 3 Li	9,0 4 Be				27,0	28,1	31,0	32,1	35,5	39,9	3	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	3	
3	23,0 11 Na	24,3 12 Mg	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIIB	8 VIIIB	9 VIIIB	10 VIIIB	11 IIB	12 IIB	4	27,0	28,1	31,0	32,1	35,5	39,9	
4	39,1 19 K	40,1 20 Ca	47,9 22 Ti	50,9 23 V	52,0 24 Cr	54,9 25 Mn	55,8 26 Fe	58,9 27 Co	58,7 28 Ni	63,5 29 Cu	65,4 30 Zn	69,7 31 Ga	72,6 32 Ge	74,9 33 As	79,0 34 Se	79,9 35 Br	83,8 36 Kr	83,8 37 Rb	87,6 38 Sr	
5	85,5 37 Rb	87,6 38 Sr	88,9 39 Y	91,2 40 Zr	92,9 41 Nb	95,9 42 Mo	99 43 Tc	101,1 44 Ru	102,9 45 Rh	106,4 46 Pd	107,9 47 Ag	112,4 48 Cd	114,8 49 In	118,7 50 Sn	121,8 51 Sb	127,6 52 Te	126,9 53 I	131,3 54 Xe	131,3 55 Cs	137,3 56 Ba
6	132,9 55 Cs	137,3 56 Ba	178,5 57 bis 71 La-Lu	180,9 72 Hf	183,8 73 Ta	186,2 74 W	190,2 75 Re	192,2 76 Os	195,1 77 Ir	197,0 78 Pt	200,6 79 Au	204,4 80 Hg	207,2 81 Tl	209,0 82 Pb	209 83 Bi	209 84 Po	210 85 At	222 86 Rn	222 87 Fr	226 88 Ra
7	223 87 Fr	226 88 Ra	261 89 bis 103 Ac-Lr	262 104 Rf	263 105 Db	262 106 Sg	265 107 Bh	268 108 Hs	269 109 Mt	272 110 Uuu	277 111 Uuu	289 112 Uub	289 114 Uug	289 116 Uuh	293 114 Uuo	293 118 Uuo				
	Lanthoide	138,9 57 La	140,1 58 Ce	140,9 59 Pr	144,2 60 Nd	147 61 Pm	150,4 62 Sm	152,0 63 Eu	157,3 64 Gd	158,9 65 Tb	162,5 66 Dy	164,9 67 Ho	167,3 68 Er	168,9 69 Tm	173,0 70 Yb	175,0 71 Lu				
	Actinoide	227 89 Ac	232 90 Th	231 91 Pa	238 92 U	237 93 Np	244 94 Pu	243 95 Am	247 96 Cm	247 97 Bk	251 98 Cf	252 99 Es	257 100 Fm	258 101 Md	259 102 No	260 103 Lr				

⇒ Ordnungsschema für die chemischen Elemente

Beobachtete Systematik:

⇒ Elemente sind keine fundamentalen Teilchen sondern aus kleineren Bausteinen zusammengesetzt

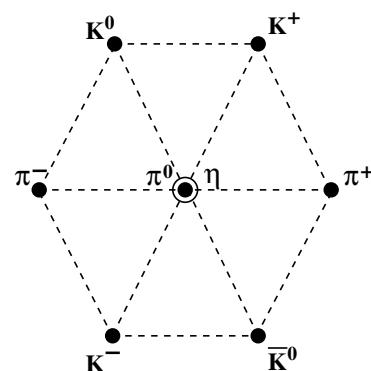
Ordnungsschema für Hadronen (Mesonen und Baryonen)

→ Erster Hinweis auf die Existenz von Quarks

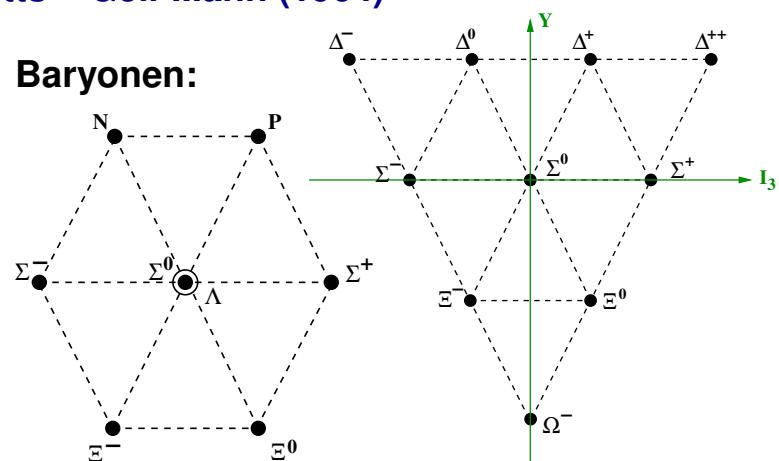
10

## Mesonen und Baryonen Multipletts – Gell-Mann (1964)

**Mesonen:**



**Baryonen:**



**Gell-Mann  $\Leftrightarrow$  Es gibt eine Symmetriegruppe, die die charakteristischen Quantenzahlen der beobachteten Teilchen beschreibt: SU(3)**

$\Rightarrow$  Hadronen können in Multipletts eingesortiert werden

**Fundamentale Darstellung der SU(3) = Basiszustände der Dimension 3**

$\Rightarrow$  Hypothetische Teilchen: QUARKS (u, d, s)

**Mesonen  $q\bar{q}$ -Zustände, Baryonen  $qqq$ -Zustände**

= Erste Hinweise auf die Existenz von Quarks!

11

## Einführung - historisch -

### Entdeckung der Röntgenstrahlung (1895 Röntgen):



Abb. I.8 Eine der allerersten Aufnahmen von Röntgen mit Hilfe der von ihm entdeckten X-Strahlen oder »Röntgenstrahlen«. Sie zeigt die Knochen einer Hand. Das am 22. Dezember 1895 aufgenommene Bild wird heute im Deutschen Museum in München aufbewahrt.

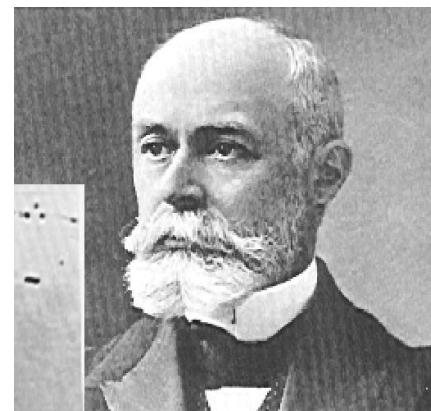
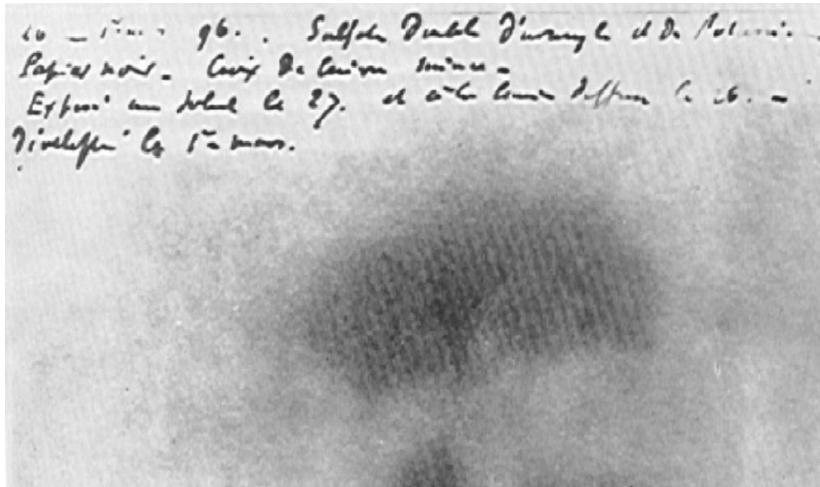


$\Rightarrow$  Erstes Röntgenbild

12

## Einführung - historisch -

### Entdeckung der Radioaktivität (1896 Becquerel):



⇒ Photoplatten unter einem Uran-Salz Block → Abbild des Blocks

↔ Strahlung "ohne Licht"

( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th}$  :  $\alpha$ -Strahlung)

13

## Einführung - historisch -

### Entdeckung des Elektrons (1897 Thomson):

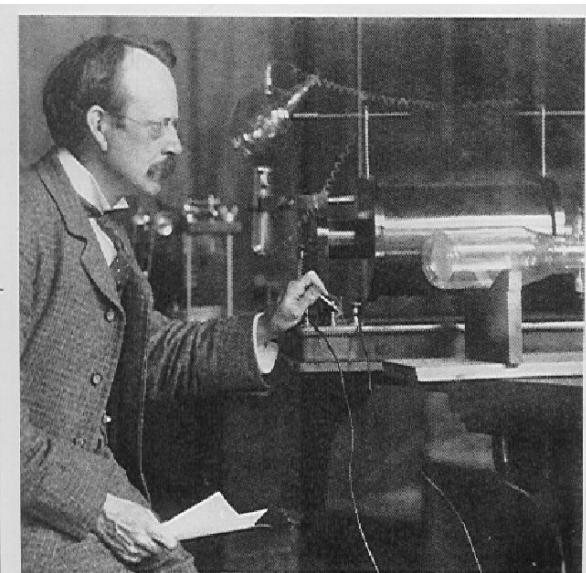


Abb. 1.5 Joseph John Thomson (1856–1940), der für seine Untersuchungen des Elektrons und der Isotope berühmte englische Physiker. Er leitete als dritter Direktor das Cavendish-Laboratorium. Ein Foto im Maxwell-Hörsaal des Laboratoriums zeigt ihn bei der Betrachtung einer Kathodenstrahlröhre. Allem Anschein nach war Thomson etwas ungeschickt, aber er verstand die Möglichkeiten einer Apparatur sehr genau. (Cavendish-Laboratorium, Universität Cambridge)

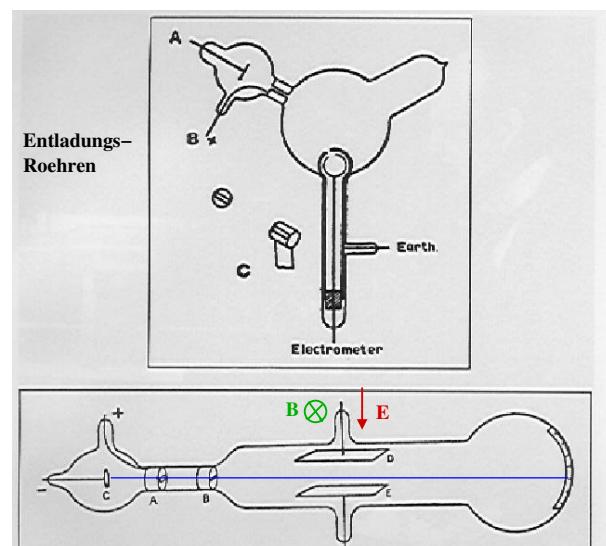


Abb. 1.6 (a) Darstellung einer von Thomsens Entladungsrohren aus dem *Philosophical Magazine* (44, 293 [1897]). Die von der Kathode A erzeugten Elektronen können durch einen außen angebrachten Magneten abgelenkt und in einen Kollektor (Faraday-Käfig) geleitet werden, der an ein Elektrometer angeschlossen ist, das die Gesamtladung misst. (b) Eine andere von Thomsens Entladungsrohren aus demselben Journal. Das von der Kathode C emittierte Strahlenbündel wird in A und B gebündelt und passiert zwischen D und E ein elektrisches Feld. Senkrecht dazu wird durch außerhalb der Röhre angebrachte Spulen ein Magnetfeld erzeugt.

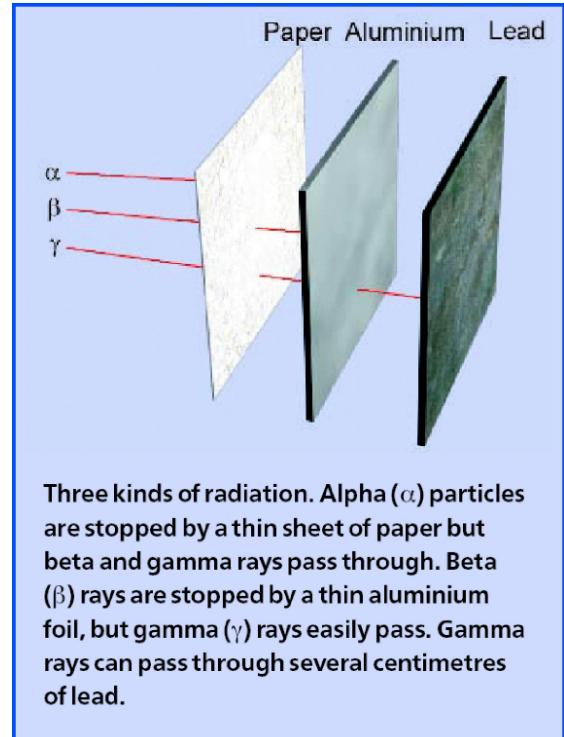
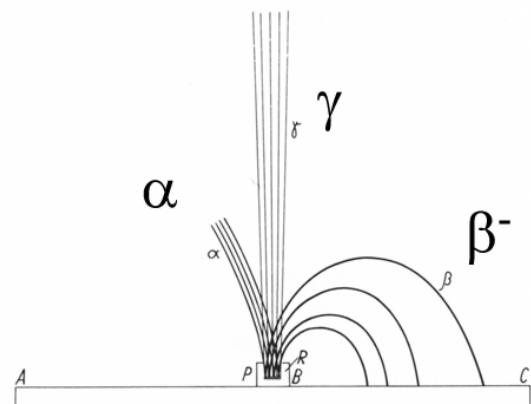
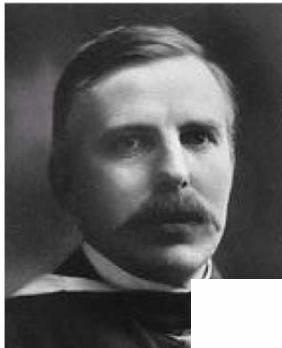
Thomson:

"Alle Atome enthalten diese Teilchen" ⇒ Thomsons Atom-Modell

14

## Einführung - historisch -

### Discovery of $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ -radiation (1897 Rutherford):



⇒ Unterschiedliche Strahlungsarten existieren

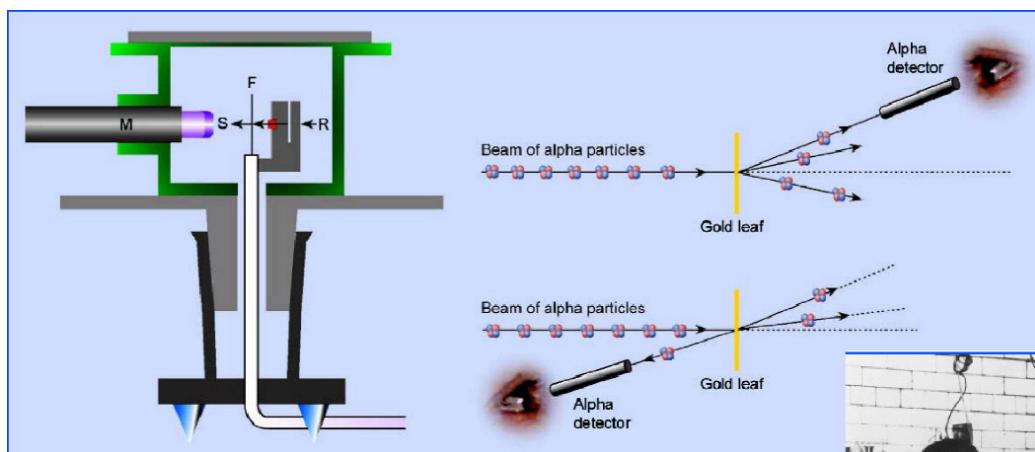
⇒ Elemente ändern ihre Identität!

Proton noch nicht entdeckt - erst 1919

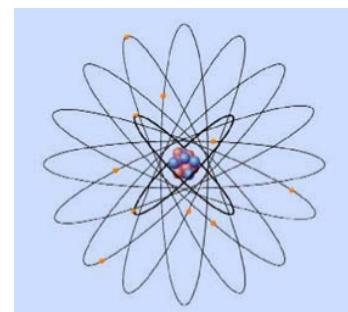
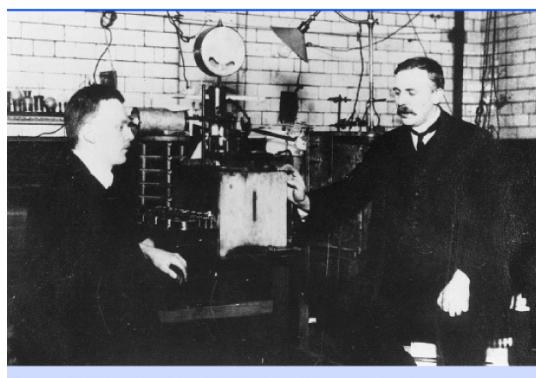
15

## Einführung - historisch -

### Entdeckung des Atomkerns (Rutherford, Geiger, Marsden 1908 - 1913):



Radium:  $\alpha$ -Quelle  
 $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ :  
4,8 MeV, 6 MeV



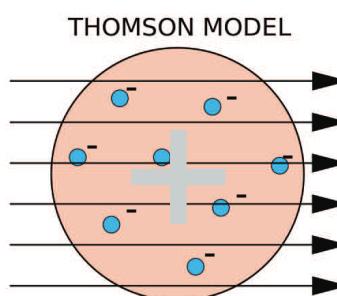
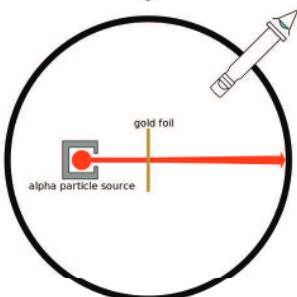
Basis für das Bohr'sche Atommodell

Hans Geiger, 1882-1945, left, with Ernest Rutherford, 1871-1937, in Rutherford's laboratory in Manchester. This picture was taken at about the time of the discovery of the nucleus. (source: Museum/Science and Society Picture Library)

16

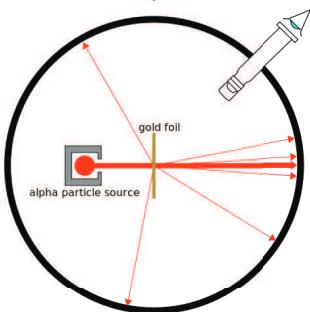
# Das Rutherford Streuexperiment

**Erwartung nach Thomson-Atom-Modell:**  
(negative und positive Ladungen gleichmäßig im Atom verteilt)



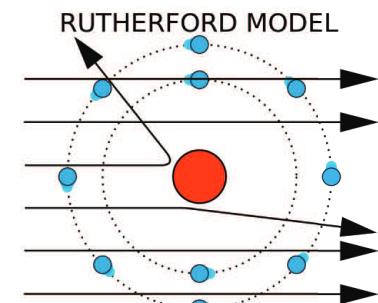
**Erwartung:**  
 $\alpha$ -Teilchen werden unter Vorwärtswinkeln gestreut  
**Analogie:**  
Schuss durch den Sandsack, Projektil fliegt nach vorn, geringe Ablenkung

**Beobachtung:**



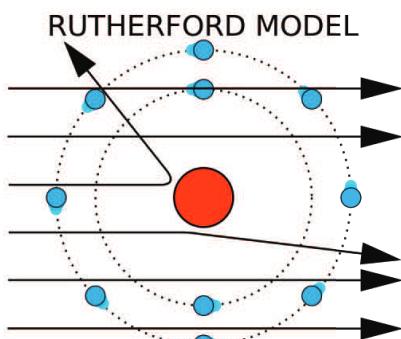
**Seltene Ergebnisse**, bei denen  $\alpha$ -Teilchen unter großen Winkeln ( $\Theta \geq 90^\circ$ ) gestreut werden

**Analogie:**  
Schuss durch den Sandsack, Projektil prallt an Eisenkern im Sandsack zurück  $\Rightarrow$  **Rutherford Modell**



17

## Das Rutherford Streuexperiment



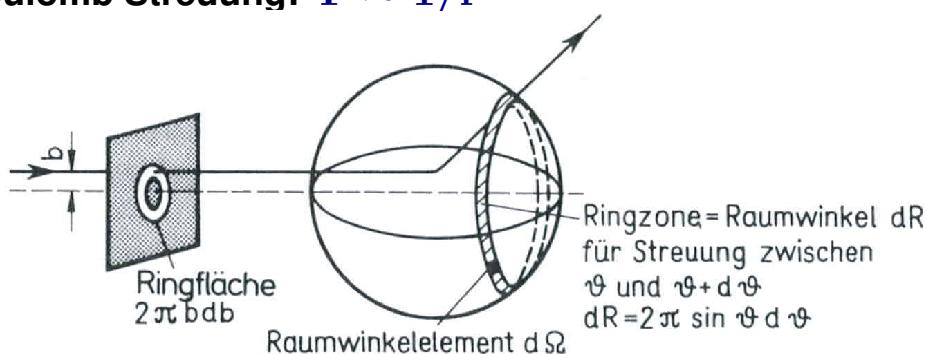
$\Leftrightarrow$

**Masse und positive Ladung in einem kleinen Raumgebiet konzentriert**  
 $\rightarrow$  **Atomkern**

**Vergleich Experiment**  
 $\Leftrightarrow$  **theoretische Erwartung**

$\Leftrightarrow$  **wie oft werden Teilchen in Rückwärtsrichtung gestreut?**

**Rutherford: Annahme:** positive Ladung ist im Zentrum des Atoms konzentriert  
 $\Rightarrow$  **Coulomb Streuung:**  $F \sim 1/r^2$



b: Stoßparameter

18

# Der Wirkungsquerschnitt

## 1) Der Wirkungsquerschnitt im Allgemeinen

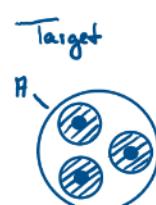
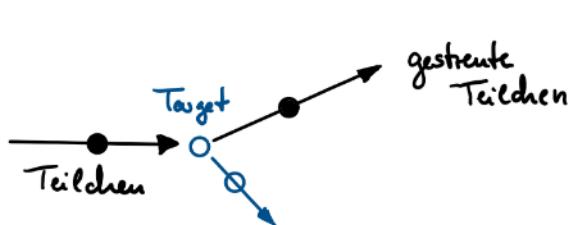
Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion eines bestimmten Typs passiert

↔ Information über die auftretenden Prozesse und Wechselwirkungen

## 2) zurück zur Rutherfordstreuung

19

## Wirkungsquerschnitt, Luminosität



jedem Streuzentrum ist  
eine Fläche  $\sigma$  zugeordnet  
wenn  $\sigma$  getroffen wird → Reaktion

### Einlaufender Fluß

$$\phi = n_a \cdot v = \frac{\text{Anzahl der einlaufenden Teilchen}}{\text{Einheitsfläche} \cdot s}$$
$$\left[ \frac{\#}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right] = \left[ \frac{\#}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

$$\phi \cdot A = \dot{N}_{in} = \frac{\# \text{ einlaufender Teilchen}}{\text{s}}$$

$$\# \text{ gestreuter Teilchen / s} = ?$$

$$\phi \cdot N_t \cdot \sigma \quad \leftarrow \text{Region in der etwas passiert}$$

$N_t$ : Anzahl (#) Streuzentren

$$\phi \cdot N_t \cdot \sigma = \dot{N}_s \doteq \frac{\# \text{ gestreute Teilchen}}{\text{s}}$$

20

# Wirkungsquerschnitt, Luminosität

$$\dot{N}_s = \underline{\sigma} \cdot \phi \cdot N_t \quad \leftarrow \text{Luminositaet } L = \phi \cdot N_t$$

Reaktionsrate (hängt nur vom Strahl und Target ab)

$$\frac{\dot{N}_s}{\dot{N}_{in}} = \frac{\phi \cdot N_t \cdot \sigma}{\phi \cdot A} = \frac{N_t \cdot \sigma}{A} \quad \hat{=} \quad \begin{array}{l} \text{Wahrscheinlichkeit dass eine} \\ \text{Streuung passiert} \end{array}$$

## Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma = \frac{\dot{N}_s / N_t}{\dot{N}_{in} / A} = \frac{\# \text{ gestreute Teilchen}/(\text{s} \cdot \text{Targetteilchen})}{\# \text{ einlaufende Teilchen}/(\text{s} \cdot \text{Flaeche})}$$

$$\sigma = \frac{N_s}{N_{in} \cdot \text{Targetteilchen}/\text{cm}^2}$$

$\Rightarrow \sigma : [\text{cm}^2] \hat{=} \text{ Fläche} \leftrightarrow \text{vom Prozess abhängig!}$

21

## Wirkungsquerschnitt

### Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma = \frac{N_s}{N_{in} \cdot \text{Targetteilchen}/\text{cm}^2} \quad \Rightarrow \quad \sigma : [\text{cm}^2] \hat{=} \text{Flaeche}$$

typischerweise gemessen in "barn"  $1 \text{b} = 10^{-24} \text{cm}^2$

Beispiele:

- thermische Neutronen auf Cd:  $2.4 \cdot 10^4 \text{ b}$  ( $n + {}^{113} \text{Cd} \rightarrow {}^{114} \text{Cd} + \gamma$ )
- Neutrinos an Protonen:  $\approx 7 \cdot 10^{-14} \text{ b}$  ( $E_\nu = 10 \text{ GeV}$ )

Im Allgemeinen  $\neq$  geometrische Größe der Teilchen!

### Luminosität:

$$L = \phi \cdot N_t = \frac{N_{in}}{A \cdot s} \cdot N_t = \frac{N_{in}}{s} \cdot \frac{N_t}{A}$$

Fluss Target-  
(Strahl) teilchen      Strahl-  
strom      Target-  
flächendichte

### Integrierte Luminosität:

$$\int L dt \Leftrightarrow [1/m^2, 1/pb] \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Vergleich aufgenommener Datenmengen - Wieviele Reaktionen} \\ \text{mit einen bestimmten } \sigma \text{ wurden im Exp. produziert} \end{array}$$

22

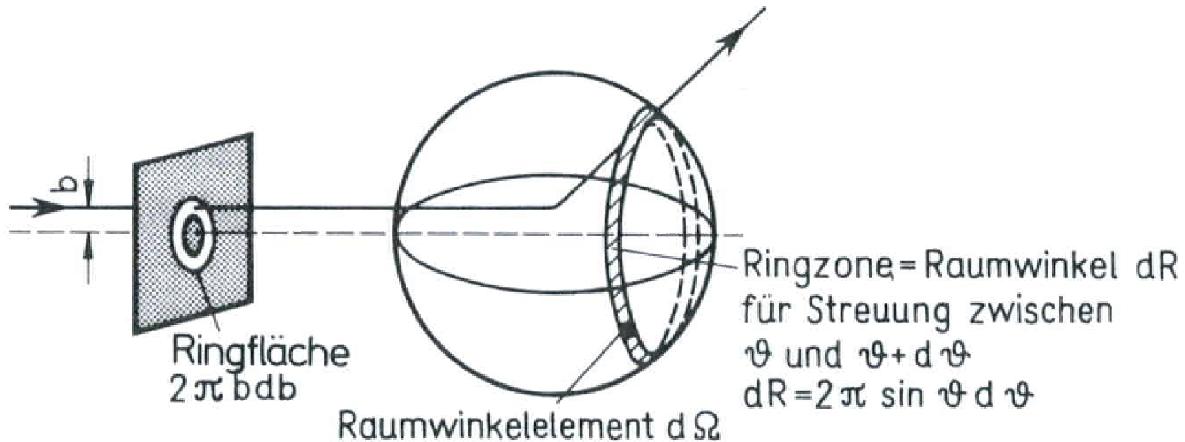
# Wirkungsquerschnitt

---

$$\int \dot{N}_s dt = \int \sigma L dt$$

Frage: Wenn 2 Experimente mit dem gleichen  $\int L dt$  die gleiche Reaktion messen, beobachten Sie dann auch real die gleiche Anzahl von Ereignissen in Ihrem Experiment?

**Totaler Wirkungsquerschnitt  $\Rightarrow$  Differentieller Wirkungsquerschnitt**



$\Leftrightarrow$  Winkelverteilungen essentiell!

23

## Differentieller Wirkungsquerschnitt

---

$$\dot{N}_s = \sigma \cdot L \quad \text{Reaktionsrate}$$

**Teilchen, die in den Detektor gestreut wurden:**

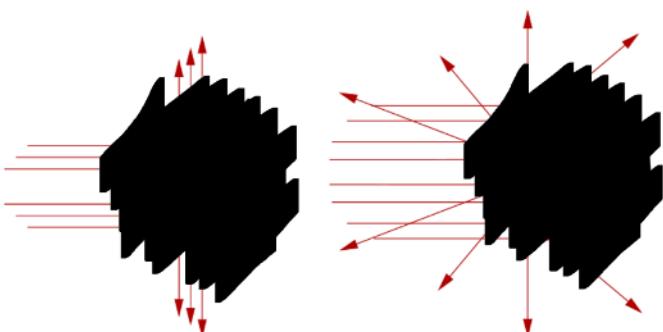
$$\dot{N}_s^{Det} = L \cdot \frac{d\sigma(E, \theta, \varphi)}{d\Omega} \cdot \Delta\Omega$$

differentieller Wirkungsquerschnitt      Raumwinkel, der von Detektor abgedeckt wird

$\Leftrightarrow$  Winkelverteilungen: essentiell! um den jeweiligen Prozess zu verstehen

**Mechanik:**

$\rightarrow$  triviales Beispiel: Streuung von kleinen Kugelchen an einem unbekannten Objekt:



Wie könnte das Objekt aussehen?

24

# Differentieller Wirkungsquerschnitt

$$\dot{N}_s = \sigma \cdot L \quad \text{Reaktionsrate}$$

Teilchen, die in den Detektor gestreut wurden:

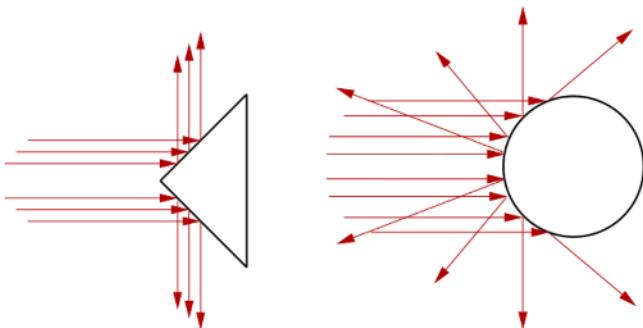
$$\dot{N}_s^{Det} = L \cdot \frac{d\sigma(E, \theta, \varphi)}{d\Omega} \cdot \Delta\Omega$$

differentieller Wirkungsquerschnitt      Raumwinkel, der von Detektor abgedeckt wird

⇒ Winkelverteilungen: essentiell! um der jeweiligen Prozess zu verstehen

Mechanik:

→ triviales Beispiel: Streuung von kleinen Kugelchen an einem unbekannten Objekt:



25

# Differentieller Wirkungsquerschnitt

$$\dot{N}_s = \sigma \cdot L \quad \text{Reaktionsrate}$$

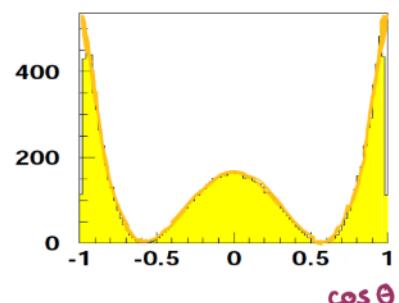
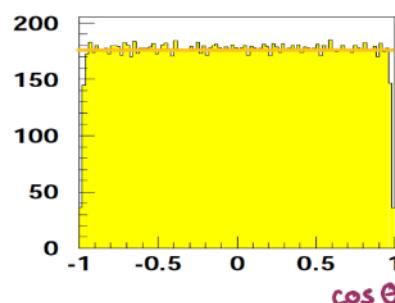
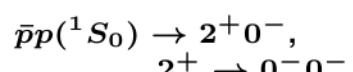
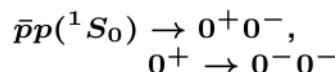
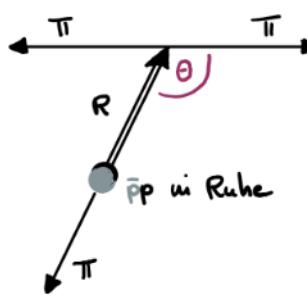
Teilchen, die in den Detektor gestreut wurden:

$$\dot{N}_s^{Det} = L \cdot \frac{d\sigma(E, \theta, \varphi)}{d\Omega} \cdot \Delta\Omega$$

differentieller Wirkungsquerschnitt      Raumwinkel, der von Detektor abgedeckt wird

⇒ Winkelverteilungen: essentiell! um der jeweiligen Prozess zu verstehen

Beispiel - Teilchenphysik:



⇒ Winkelverteilung: Information über Spin und Parität des zerfallenden Teilchens  
(Untersuchung von Objekten und Wechselwirkungen z.B. Rutherford Streuung)

26

# Der Wirkungsquerschnitt

## 1) Der Wirkungsquerschnitt im Allgemeinen

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion eines bestimmten Typs passiert

↔ Information über die auftretenden Prozesse und Wechselwirkungen

## 2) zurück zur Rutherfordstreuung

- Überprüfung der theoretischen Erwartung (Coulombstreuung am schweren Atomkern) anhand des Experimentes

⇒ **Differentieller Wirkungsquerschnitt für die Rutherford-Streuung = ?**

