

1. Einführung

"Klassische Physik" \longleftrightarrow "Moderne Physik"
 behandelt 'normale' Systeme
 was Größe, Masse, Geschwindigkeit betrifft

Klassische Mechanik

Newton's Gesetze 1686

Thermodynamik

1780-1860 Thompson, Joule
 Gibbs, Carnot, Boltzmann

Elektromagnetismus

Maxwell Gleichungen
 ca. 1860

↳ Optik

Relativitätstheorie

Einstein 1905 & 1915

Quantenphysik

1920-1930 de Broglie, Bohr
 Pauli, Schrödinger, Born
 Heisenfeld, Dirac ...

→ Atomphysik

→ Kernphysik

→ Teilchenphysik

→ ^{Phys.} Chemie, Festkörperphysik
 ...

i) Relativitätstheorie: in Systemen, bei denen hohe* Geschwindigkeiten auftreten, müssen Gesetze der klassischen Mechanik modifiziert werden.

* hoch: nicht vernachlässigbar klein gegenüber Lichtgeschwindigkeit $c = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

ii) Quantenphysik: Wenn sehr kleine Systeme betrach-

set werden, die aus wenigen Teildien bestehen (Atome, Elektronen...), werden Gesetze der klassischen Physik ersetzt durch neue Gesetze:

Newton'sche Mechanik \rightarrow Quantenmechanik
bzw. relativistische "

1.1. Einheiten

generelle SI - Einheiten m, kg, s, C
aber

- für Teilchen von Beschleunigern bequemer statt Energieeinheit J das Elektronvolt zu benutzen

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

kinetische Energie, die ein einfach geladenes Teilchen beim Durchqueren einer Potentialdifferenz von 1 Volt gewinnt

- Einheitsladung $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$e^2 / 4\pi\epsilon_0 = (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2 (8.988 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})$$

$$= \underbrace{1.440 \text{ eV} \cdot \text{nm}}_{\text{Atomphysik}} = \underbrace{1.440 \text{ keV} \cdot \text{fm}}_{\text{Kern u. Teilchenphysik}}$$

"Energie \times Länge"

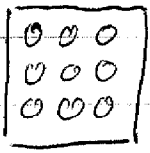
- Masse: kg Masse \cdot (Geschwindigkeit)² = Energie
wir werden sehen, daß es nützlich ist Massen mit der Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat zu multiplizieren, mc^2 , und in dieser Energieeinheit zu benutzen.

$$\text{z.B. } m_e c^2 = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 8.199 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0.511 \text{ MeV}$$

$$m_p c^2 = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1.505 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 938.3 \text{ MeV}$$

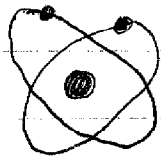
1.2. Grundbausteine der Materie

Materie

 $(10^{-6} - \text{viele}) \text{ m}$

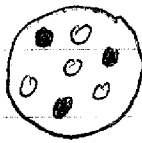
Festkörperph.
Materialwiss

Atom

 $(10^{-9} - 10^{-10}) \text{ m}$

Atomphysik
Chemie

Atomkern

 $(10^{-14} - 10^{-15}) \text{ m}$

Kernphysik

Nukleon

 $0.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

Teilchenphysik

echte Elementarteilchen

Quark, Elektron, ...

 $\leq 10^{-18} \text{ m}$

Das Konzept eines ultimativen Teilchens, das nicht weiter unterteilt werden kann, keine Struktur hat, eines sogenannten 'Atoms' (griechische ἄτομος) bereits bei Anaxagoras und etwas später Demokrit (5 Jh. vor Chr.).

ab wenig quantitativ bis zu exp. Resultaten der Chemie des 17. u. 18. Jahrhunderts

'Gesch der definierten Proportionen': Verhältnisse der Massen von Elementen, die eine chemische Verbindung eingehen, ist konstant

z.B. H_2O 2:16, NaOH 23:16:1, NaCl 23:35

Dalton 1807: Atome eines jeden Elements haben definierte Masse

großer Schritt vorwärts: Amedeo Avogadro 1811

gleiche Volumina von Gasen bei einer bestimmten Temperatur und bestimmten Druck enthalten eine gleiche Anzahl von Molekülen (Atomen)

"Avogadro Zahl N_A " oder "Loschmidt'sche Zahl"
atomare Massenzahl A , A g eines Elements enthalten gleiche Zahl von Atomen, N_A ; wurde ab

erst etwa 50 Jahre später zum ersten Mal abgeschätzt.

Bestimmung:

i) optisch durch Rayleigh Streuung von Licht an kleinsten Teilchen (Molekülen)

$$I/I_0 = \exp(-N \cdot V) \quad N \text{ Anzahl Teilchen pro Volumen} \\ V \text{ Volumen}$$

über Dichte ρ und Molekulargewicht M

$$N_A = N \cdot M / \rho \quad \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{Teilchen}}{\text{mol}}$$

ii) Brownsche Bewegung (Robert Brown 1827)

mit Mikroskop beobachtet er kleine am unregelmäßige Zufallsbewegung von mikroskopischen Pollenkörnern in Wasser.

Ungewissheit organischer Materie? später selbst Beobachtung für anorganische Suspensionen in Flüssigkeiten und Gasen.

Korrekte Erklärung durch Einstein 1905

Fluktuationen durch zufällige Zusammenstöße mit Molekülen der Flüssigkeit

⇒ Fig. 1-1

"random walk" Problem $\langle s^2 \rangle = N l^2$

mittl. quad. Entfernung N Schritte von Länge l

$$s_{\text{rms}} = \text{const} \sqrt{t / N_A} \cdot r \quad \text{Zeit } t \quad \text{Teilchen m. Radius } r$$

Einstein's Gleichung 1908 durch Perrin verifiziert mit Harzkugeln gleichmäßiger Grösse (μm) und genaue Messung von s_{rms} als Funktion von T für Kugeln versch. Grösse und versch. Flüssigkeiten

$$N_A = 6 \cdot 10^{23}$$

später genau $N_A = 6.022137 \cdot 10^{23}$

⇒ Fig. 1-2

damit kann man Massen einzelner Atome aus Atom- und Molekulargewicht bestimmen.

atomare Masseneinheit: definiert als $1/12$ der Masse eines ^{12}C -Atoms.

$$1/12 m_{^{12}\text{C}} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$$

einfache Abschätzung der Grösse eines Atoms:

z. B. Blei $A = 207.2 \text{ g/mol}$ $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$

$$N_A V_{\text{Atom}} = A / \rho \rightarrow V_{\text{Atom}} = 3.03 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$$

$$\text{Durchmesser } d_{\text{Atom}} \approx \sqrt[3]{V_{\text{Atom}}} = 0.3 \text{ nm} = 3 \text{ \AA}$$

obere Grenze, da dichte Packung von Würfeln eingenommen

⇒ Fig. 1-3

1.3 Das Elektron

Studium von sogenannten Kathodenstrahlröhren im 19. Jh.

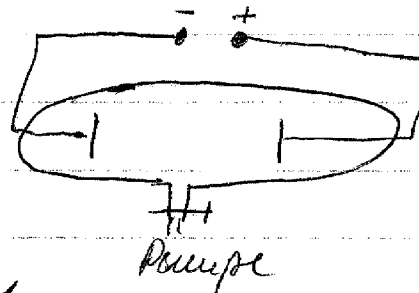
Gasentladungsröhren

Gas bei niedrigem

Druck, wenige Torr

typische Spannungen einige

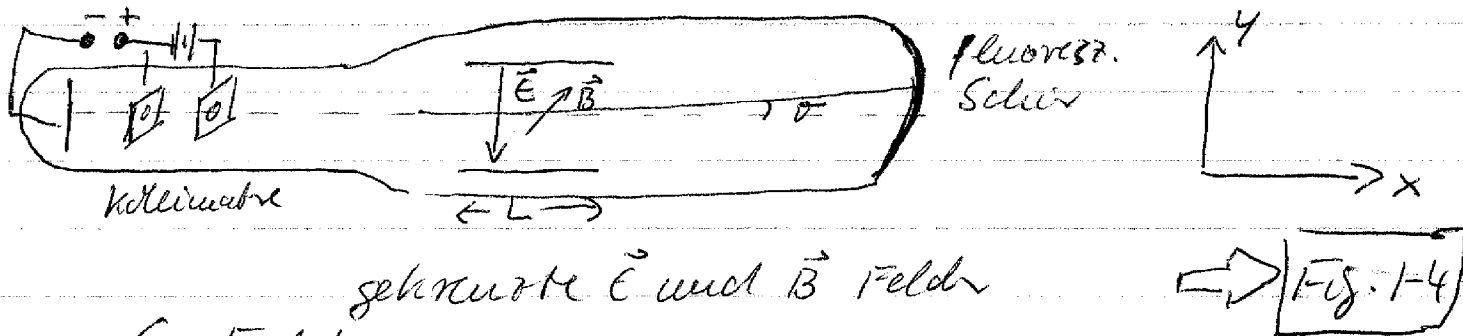
Hundert Volt → Glühkathode



Strahlung bewegt sich von einer Elektrode zur anderen. Durch Manipulation von Hochdrücken werden die Elektroden → Strahlung kommt von der Kathode.

J. J. Thompson 1897: Strahlung besteht aus negativ geladenen Teilchen, bald danach 'Elektronen' genannt (siehe auch Stoney 1874: Ladungsträger)

port in ionischer Ladung, F/HA Faraday Konst.
 div. durch Abschätzung von Avogadro Zahl)
genaue Bestimmung von q/m durch Thompson



mit E -Feld:

durch Besch. zwischen Kollimatoren haben Elektronen
 definierte Geschwindigkeit v_x

\rightarrow Zeit zwischen Deflektorplatten $t_p = \frac{L}{v_x}$

vertikale Geschwindigkeit nach

$$\text{Deflektor } v_y = \underbrace{\frac{q \cdot \Delta V}{m d}}_{a_y} \cdot \underbrace{\frac{L}{v_x}}_{t_p}$$

$$q/m = v_x v_y \frac{d}{\Delta V} \cdot \frac{1}{L} \quad (1) \quad v_x / v_y = \tan \vartheta \quad \text{Ablenkwinkel gemessen auf Schirm}$$

Messung von v_x mit gekreuzten E und B -Feldern
 (Wiener Filter):

$$B = B_z \quad q v_x B_z = q \frac{\Delta V}{d} \quad \text{keine Ablenkung (2)}$$

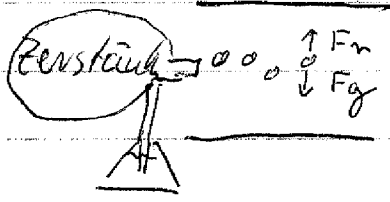
$$v_x \text{ von (2) } \sim (1) \quad \frac{q}{m} = \frac{\Delta V}{d} \frac{1}{L B^2} \tan \vartheta$$

$$q/m = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

\Rightarrow Fig 1-5

Bestimmung der Elementarladung: Millikan 1909

Fallgeschwindigkeit von Öltröpfchen (geladen) in E -Feld



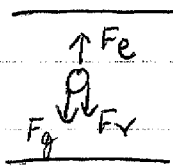
Tröpfchen erreichen konstante Geschw.
wenn $F_g = F_r$ $mg = 6\pi\eta r v_T$ $\textcircled{*}$

Dichte von Öl $\rho = 3 \text{ m} / (4\pi r^3)$

$$\leadsto r = \sqrt{\frac{9 v_T \eta}{2 g \rho}}$$

Radius der Öltröpfchen
typischer Wert $r = 3 \mu\text{m}$

mit E-Feld



fi das gleiche Tröpfchen

$$qE = mg + 6\pi\eta r v_e$$

$$\text{mit } 6\pi\eta r = mg / v_T \leadsto$$

$$q = \frac{mg(1 + v_e/v_T)}{E}$$

Beobachtung fi einige Minuten $q = n \cdot e$
Ladung ist ganzzahliges Vielfaches eines
Wertes, der Elementar- oder Elementarladung e

$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

elektrische Ladung ist diskret (oder quantisiert)
nicht kontinuierlich

Kombination von Thompson und Millikan
ergibt Masse des Elektrons $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
 $= 0.511 \text{ MeV}$

$\textcircled{*}$ für die sehr kleinen Tröpfchen musste Stokes'sches
Gesetz von Millikan korrigiert werden: (einige %)

$$6\pi\eta r \rightarrow 6\pi\eta r (1 + b/\rho r)^{-1} \quad \rho = \text{Druck (cm Hg)} \quad r \text{ in m}$$

$$b = 6.17 \cdot 10^{-6}$$

1.4. Atomkern, Proton, Neutron

Zu Studien der Kathodenstrahlung beobachtet: es gibt auch Strahlung, die sich entgegengesetzt bewegt "positive Strahlen" (Goldstein 1886) wird auch von E- und B-Feldern abgelenkt daher können ebenfalls v und q/m bestimmt werden $\rightarrow v$ und q/m viel kleiner als für Elektronen! Die grössten Werte werden für Wasserstoff gefunden und stimmen mit dem Wert für q/m aus der Elektrolyse für Wasserstoffionen überein.

1920 nennt Rutherford den Wasserstoffkern "Proton"
 $m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0.9383 \text{ GeV}/c^2$

Atomkern entdeckt durch Rutherford-Streuung 1912 (Geiger und Marsden auf Vorschlag von Rutherford) \rightarrow Kapitel 6

mit Kenntnis der Ladungszahl des Atomkerns und der Massen schloss Rutherford 1920 auf die Existenz eines weiteren neutralen Teilchens mit einer Masse ähnlich der Protonenmasse

Neutron, entdeckt 1932 durch Chadwick
 $m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0.9395 \text{ GeV}/c^2$

Wir hatten oben aber gesehen: atomare Masseneinheit $1u = 931.4 \text{ MeV}$. Woher kommt die Differenz? Atomkerne "wiegen" weniger als die Masse ihrer Konstituenten

Bindungsenergie

$E_B / A \approx (m_p - u) c^2 \approx 7 \text{ MeV}$ pro Nukleon
also im % Bereich

1.5. Röntgenstrahlung und natürliche Radioaktivität

1895 entdeckt Roentgen beim Studium von Kathodenstrahlung, daß beim Auftreffen der Kathodenstrahlen auf Glaswand des Vakuumröhrens und auf eine Matte eine neue, durchdringende Strahlung entsteht. X-Strahlung oder Roentgenstrahlung
bereits 1896 etabliert daß es sich um elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen sehr viel kürzer als UV-Strahlung handelt.

→ Kapitel 8

Wenige Monate nach Roentgens Entdeckung entdeckt H. Becquerel beim Studium von fluoreszierenden Objekten die natürliche Radioaktivität - innerhalb kurzer Zeit nach Durchdringungstest und Verhalten im Magnetfeld charakterisiert als α -, β -, γ -Strahlen.