

Klassische Physik

- Mechanik
- Wärmelehre und statistische Physik
- Elektrodynamik

Physik 1-3

Quantenphysik

- Quantisierung der Materie
- Quantisierung der Ladung
- Quantisierung der Energie

Physik 4

Moderne Themen der Physik

- Kern- und Teilchenphysik
- Quantenelektronik
- Festkörperphysik
- Astrophysik

Kernfächer

Themen der Vorlesung Physik 4:

- Struktur der Materie
 - Atome
 - Photonen
 - Elektronen
- Grundlegende Aspekte der Quantenmechanik
- Eindimensionale Probleme
 - Teilchen im Potentialtopf
 - Tunnel-Effekt
 - Harmonischer Oszillator
- Wasserstoff Atom
- Spin

- Quanteninformation
 - Superposition und Verschränkung
 - Anwendungen: Teleportation, Kryptographie
- Grundlagen der Atomphysik
 - Zeeman und Stark Effekt
 - Mehrelektronenatome und Moleküle
- Quantenstatistik
 - Fermionen, Bosonen
 - LASER

- Einige Grundlegende Aspekte der Festkörperphysik und der Kernphysik

Kapitel 1: Das Atom

Atom: kleinster unveränderbarer Bestandteil eines chemischen Elements

Charakteristische Eigenschaften von Atomen: Masse, Volumen, Ladung

1.1 Bestimmung der Atommasse

expt. Befund: Alle Atome haben Massen ungefähr einem vielfachen der Masse des Wasserstoff Atoms.

Stickstoff $A_{rel}(N) \approx 14$

Sauerstoff $A_{rel}(O) \approx 16$

Anhaltspunkte: chemische Reaktionen, Elektrolyse, etc.

atomare Masseneinheit: Definition: $1 u = 1/12 m(^{12}C) = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Energieäquivalent: $1 u = 931 \text{ MeV}/c^2$

Avogadro: Ein **Mol** eines Stoffes enthält genau so viele Gramm wie das relative Atomgewicht angibt.

1 Mol Kohlenstoff ^{12}C wiegt 12 gr

Avogadro Konstante (auch Loschmidt Zahl): Zahl der Atome in einem Mol einer Substanz

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$$

1.2 Experimentelle Bestimmung der Avogadro-Konstanten N_A :

Allgemeine Gaskonstante R

Boltzmann Konstante $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$$k_B = \frac{R}{N_A}$$

Experimentelle Bestimmung von R aus Druck-Volumen (P - V) Diagramm eines idealen Gases bei fester Temperatur T .

Zustandsgleichung für ideale Gase

$$pV = nRT$$



Experimentelle Bestimmung von k_B :

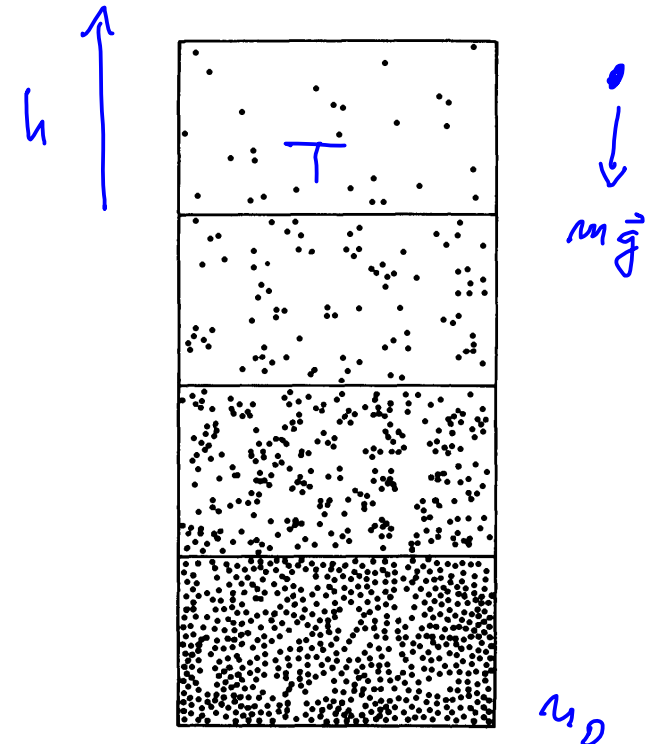
Dichteverteilung in einer Suspension kleiner Schwebeteilchen unter gleichzeitige Wirkung von

- Gravitation
- Brown'sche Molekularbewegung

Teilchendichte n_h bei Höhe h

$$n_h = n_0 e^{-\frac{mgh}{k_B T}}$$

Spezialfall der Boltzmann-Verteilung (siehe Übung)



1.3 Methoden zur Bestimmung von Atommassen

1.3.1 Massenspektroskopie

Parabelmethode: Räumliche Trennung von geladenen Teilchen mit verschiedenem Massen zu Ladungsverhältnis q/m in parallel ausgerichteten elektrischen E und magnetischen Feldern B

nach Thomson:

elektrische Wechselwirkung: $m \ddot{y} = q E$

magnetische Wechselwirkung: $m \ddot{x} = q v B$

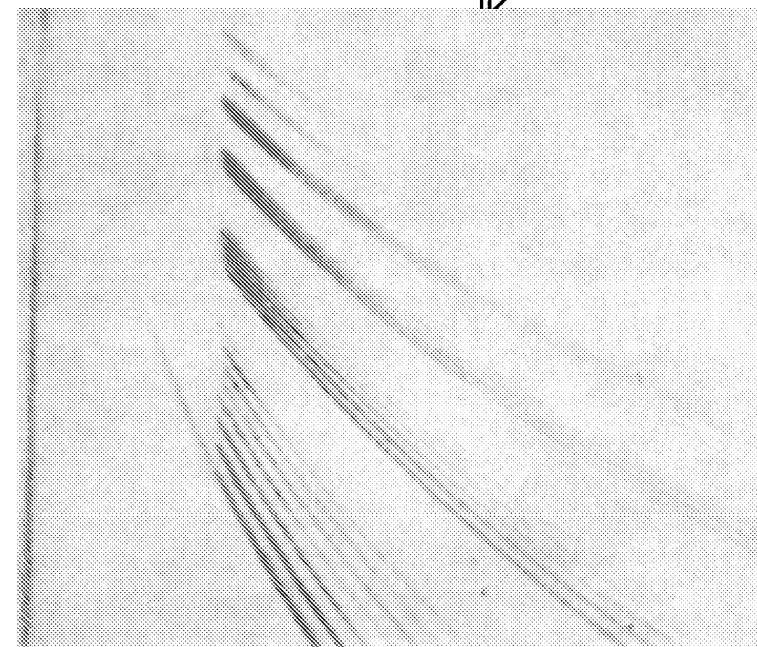
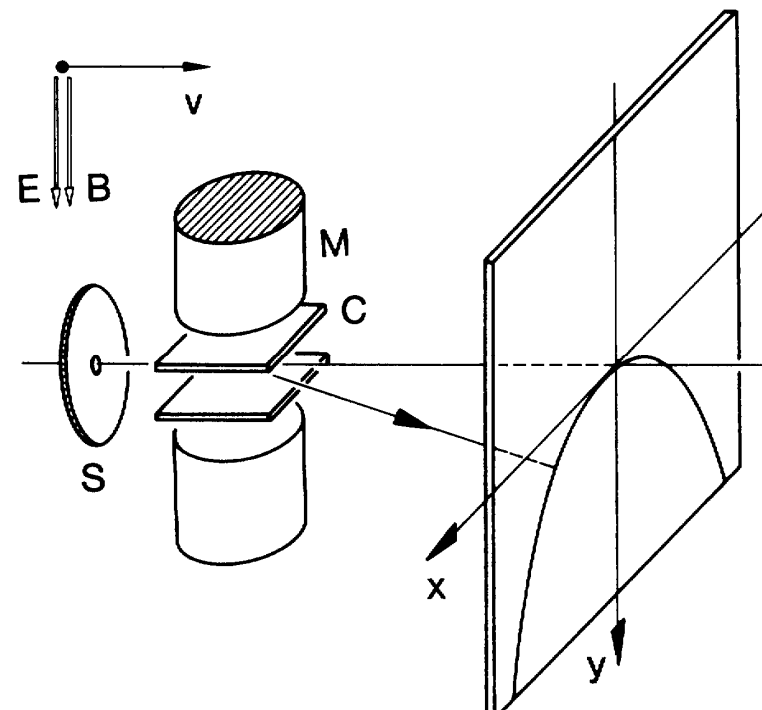
in Näherung für grosse Zyklotronradien: $r \approx \frac{m v}{q B}$

Parabelform: $y = \frac{2 E}{L^2 B^2} \frac{m}{q} x^2$

bekannte Groessen

Massen zu Ladungsverhältnis

Beispiel: Trennung verschiedener Kohlenwasserstoff-Ionen



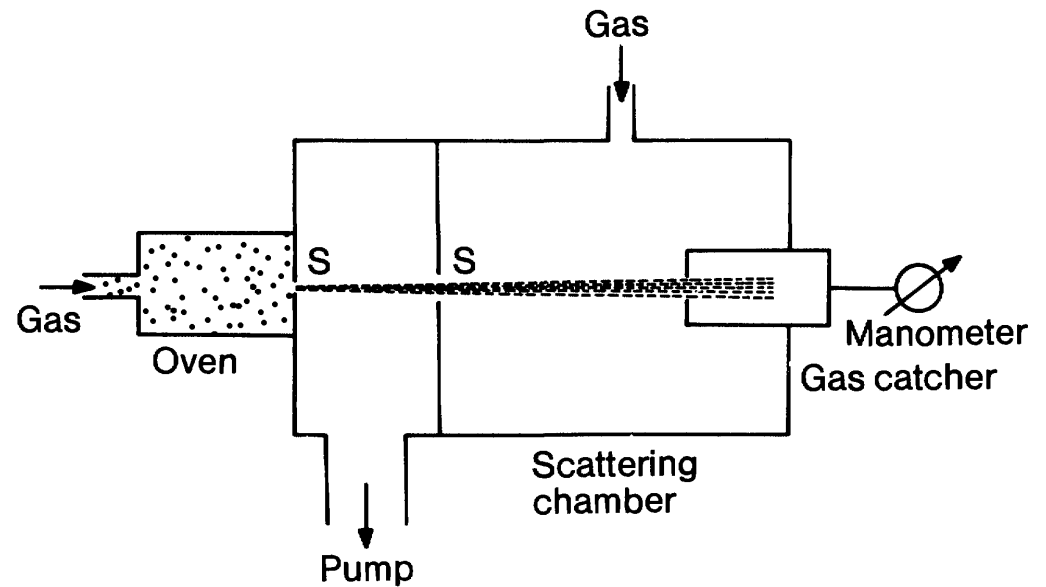
12 C⁺ 13 CH⁺ 14 CH₂⁺ 15 CH₃⁺ 16 CH₄⁺

1.4 Experimentelle Bestimmung der Grösse von Atomen

1.4.1 Streuexperimente

Streuung von Atomen an Atomen.

Messaufbau: Atome aus einer mit Blenden kollimierten Quelle von Atomen streuen an kalten Atomen in einer Streukammer. Die nicht oder unwesentlich abgelenkten Atome werden in einem Detektor detektiert.



1.4.2 Der Wirkungsquerschnitt

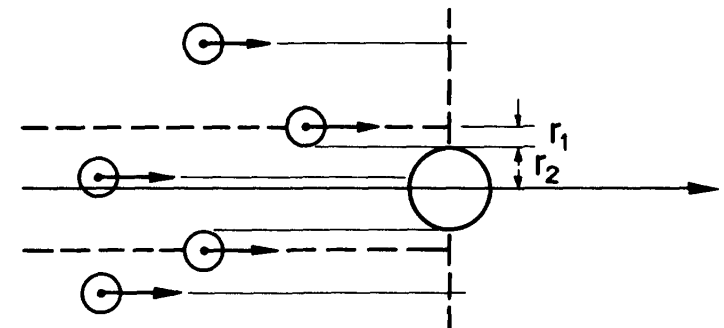
Die Stosswahrscheinlichkeit zweier Atome hängt von Ihrer Grösse ab.

Streuproblem: Ein Teilchenstrahl mit Dichte N_0 Strahlquerschnitt A und Teilchenradius R trifft auf eine dünne Schicht der Dicke Δx von Atomen mit Radius r und Dichte n .

Wie viele Teilchen aus dem Strahl stossen mit Teilchen in der Folie zusammen? Welcher Anteil der Atome aus dem Strahl können die Schicht nicht ungestört durchdringen?

Stossfläche σ .

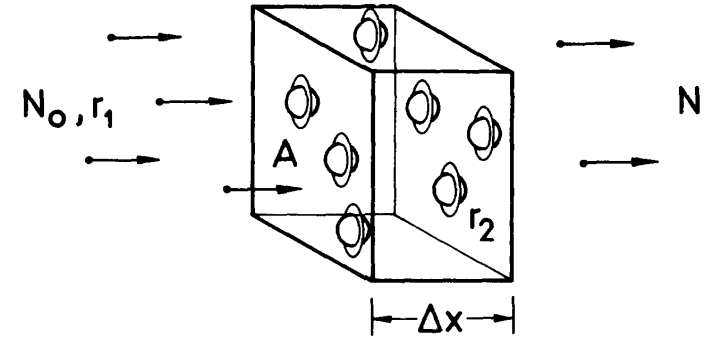
$$\sigma = \pi (r + R)^2$$



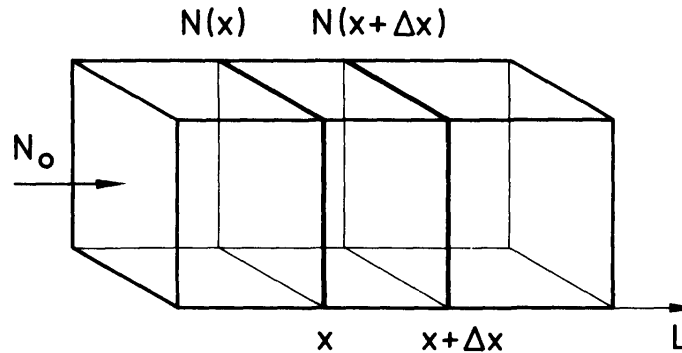
Stosswahrscheinlichkeit W :

$$W = \frac{\sum_i \sigma_i}{A}$$

Gesamtfläche A



Streuung an einer dicken Schicht:



Anteil der gestreuten Teilchen:

$$\frac{dN}{N} = -n\sigma dx$$

Zahl der gestreuten Teilchen:

$$N_0 (1 - e^{-n\sigma L})$$

mikroskopischer Streuquerschnitt σ
und makroskopischer Streukoeffizient α :

$$\alpha = n \sigma$$

Mittlere freie Weglänge λ : die Strecke nach der nur noch $1/e$ ($\sim 37\%$) der Teilchen nicht gestreut worden sind.

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{e} = e^{-n \sigma \lambda}$$

$$\lambda = \frac{1}{n \sigma}$$

Bestimmung des Atomradius r aus Messung freier Weglänge λ für Streuung von Atomen der selben Spezies.

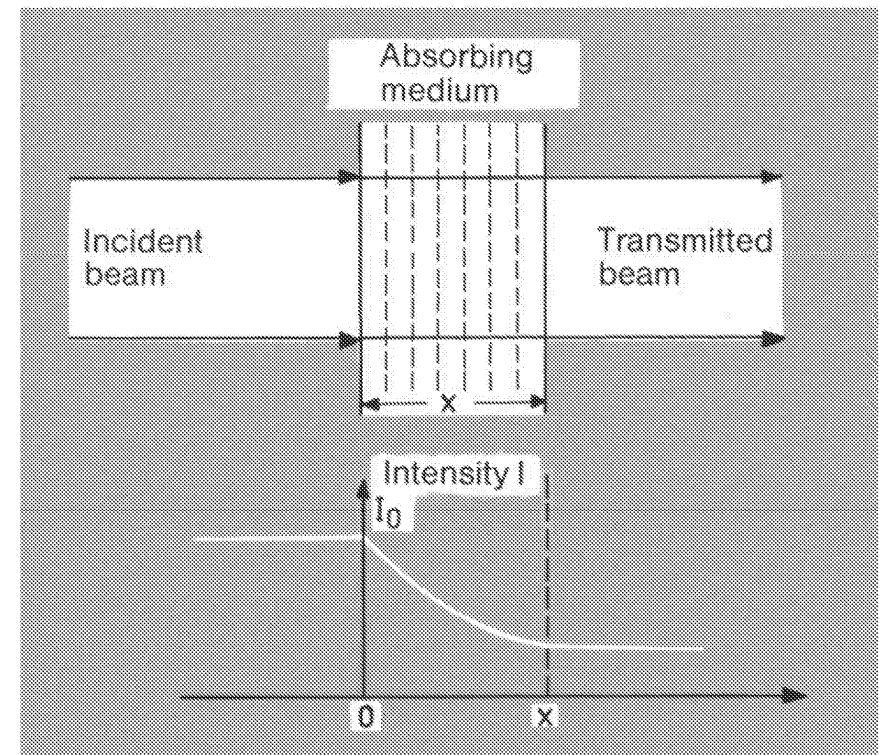
$$\lambda = \frac{1}{n 4 \pi r^2} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{1}{n 4 \pi \lambda}}$$

Der Wirkungsquerschnitt ist ein sehr nützlicher Begriff. Mit seiner Hilfe kann man die Stärke der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Objekten (z.B. Atomen, Elektronen, Photonen) beschreiben.

Beersches Gesetz

Dämpfung der Intensität eines einfallenden Lichtstrahls in Abhängigkeit von der Dicke der durchlaufenen Schicht eines Gases von Atomen oder Molekülen.

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$



1.4.3 Atomgrößen aus Kovolumen

Van der Waals Gleichung für reale Gase

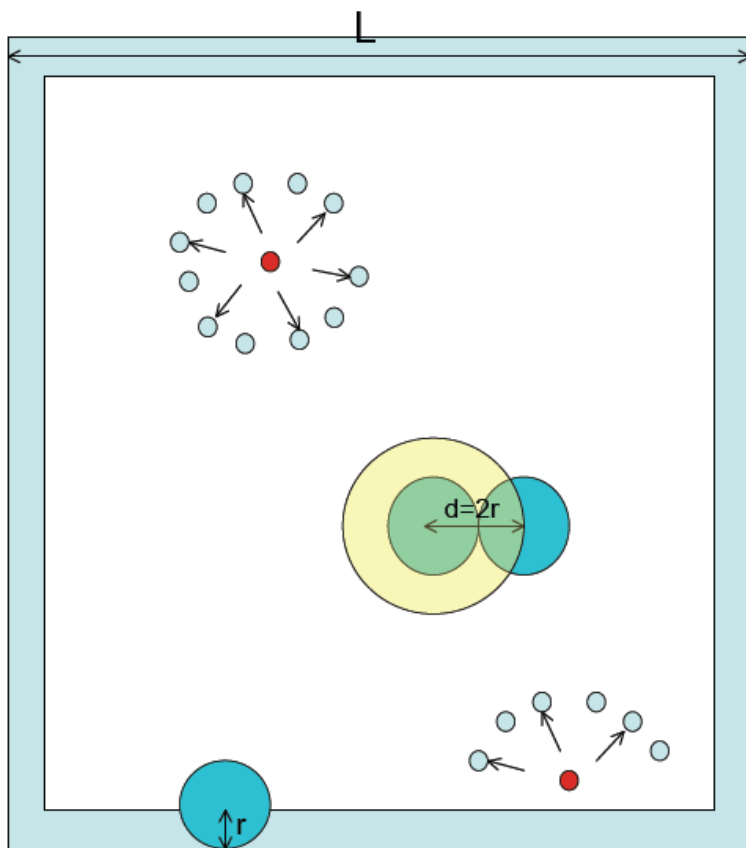
$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = n R T$$

Binnendruck

Eigenvolumen

Eigenvolumen b der Atome:

$$b = 4 \frac{4\pi}{3} r^3 N_A$$



p-V Diagramm eines realen Gases:

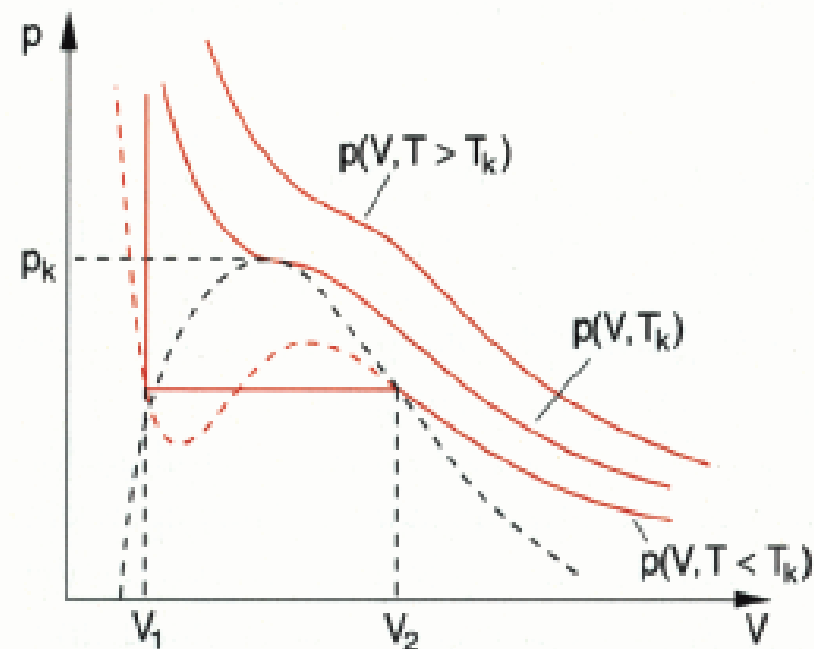


Abb. 10.70. Verlauf der van-der-Waals-Isothermen $p(V)$ in der Umgebung des kritischen Punktes (p_k, T_k)

aus Demtröder, Experimentalphysik 1

1.4.4 Atomgrösse aus Röntgenbeugung an Einkristallen

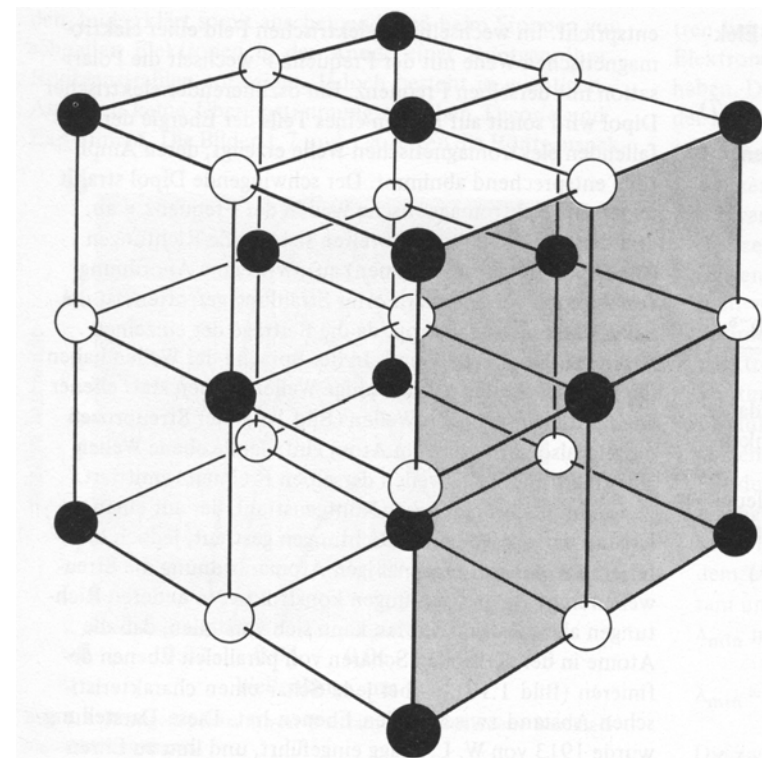
Betrachte Beugung an einfach kubischem Gitter. Atome sind im Kristall auf der Subnanometerskala regelmässig angeordnet.

Technik wird ausgiebig in der Festkörperphysik angewandt. (siehe Lit.: Ibach-Lüth, Kap. 2 & 3)

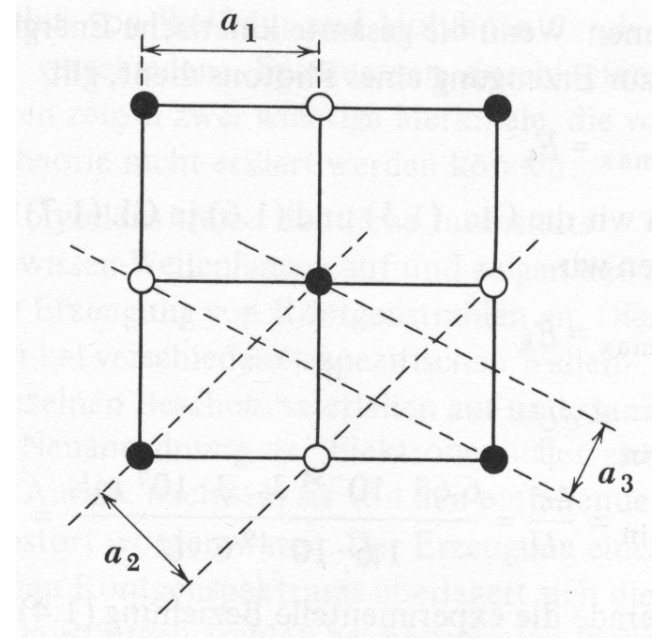
NaCl Einkristall, einfach kubisches Gitter:

Analogie zur Optik:

- Beugung an einem regelmässigen Gitter mit Periode a
- Wellenlänge λ der Strahlung (0.01 nm to 10 nm) muss vergleichbar zur Gitterkonstanten a sein.
- Übung: Beugung am Spalt, Interferenz am Doppelspalt, Interferenz am Gitter

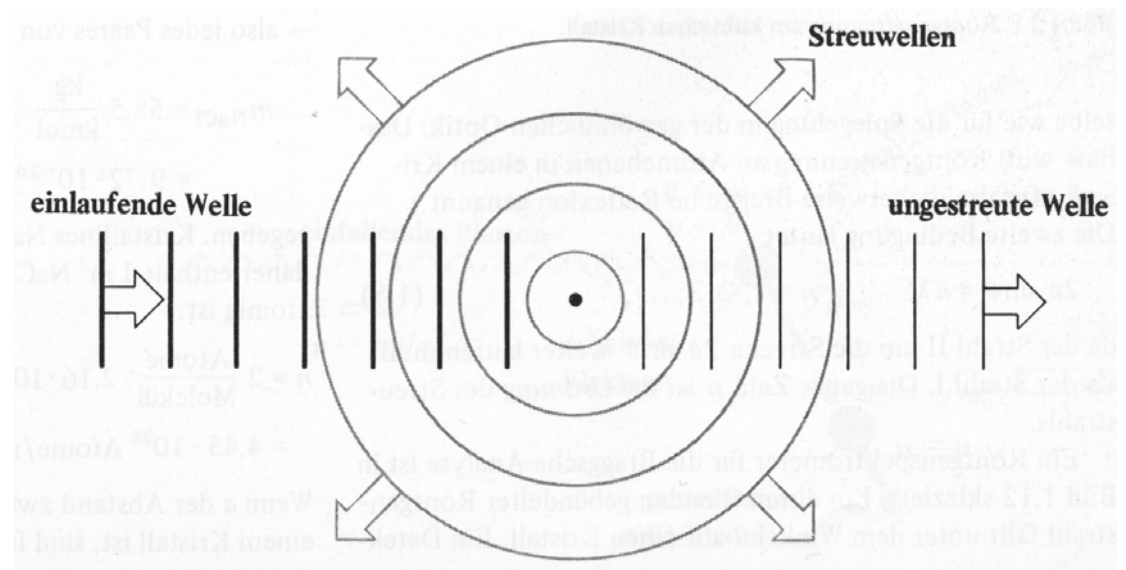


Braggsche Gitterebenen



Prinzip von Huygens:

- Streuung der Röntgenstrahlung von einem Punkt-Objekt (ein einzelnes Atom).
- Gestreute Wellen der Punktquellen interferieren.
- Konstruktive Interferenz tritt nur in bestimmte Richtungen auf.
- Berechne diese Richtungen.

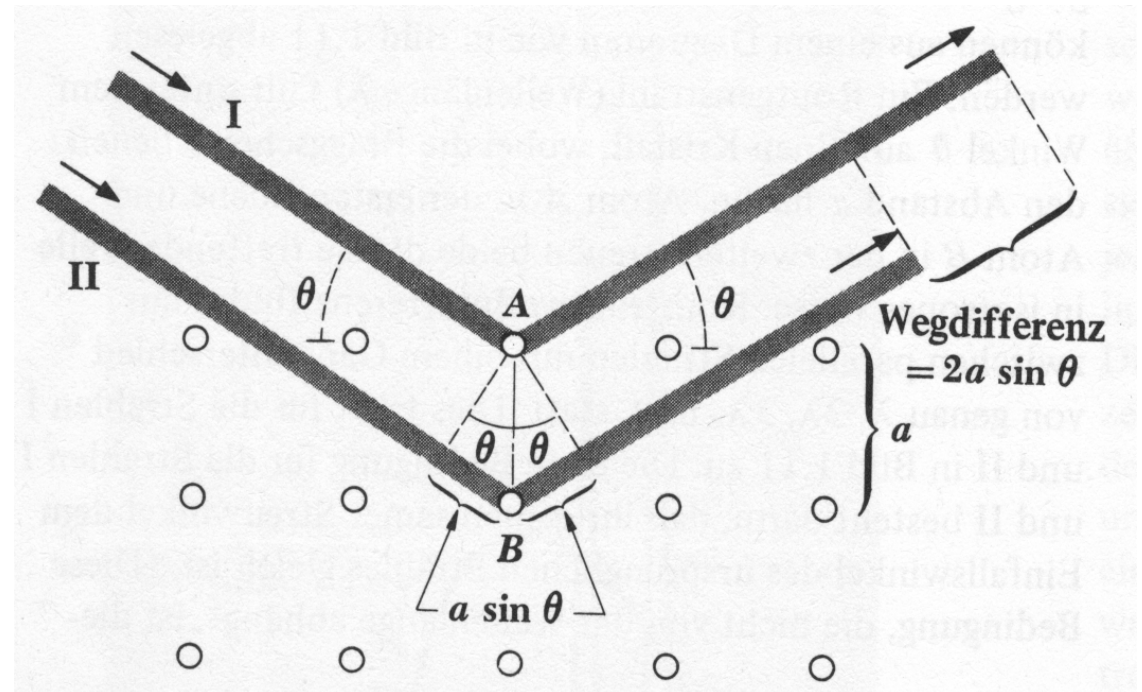


Braggsche Interferenzbedingung

1. Betrachte zwei Strahlen mit dem selben Einfall- und Ausfallwinkel θ .
2. Wegunterschied der beiden Strahlen muss zu konstruktiver Interferenz führen, d.h. ein vielfaches der Wellenlänge der Röntgenstrahlung sein.

$$2a \sin \theta = n \lambda$$

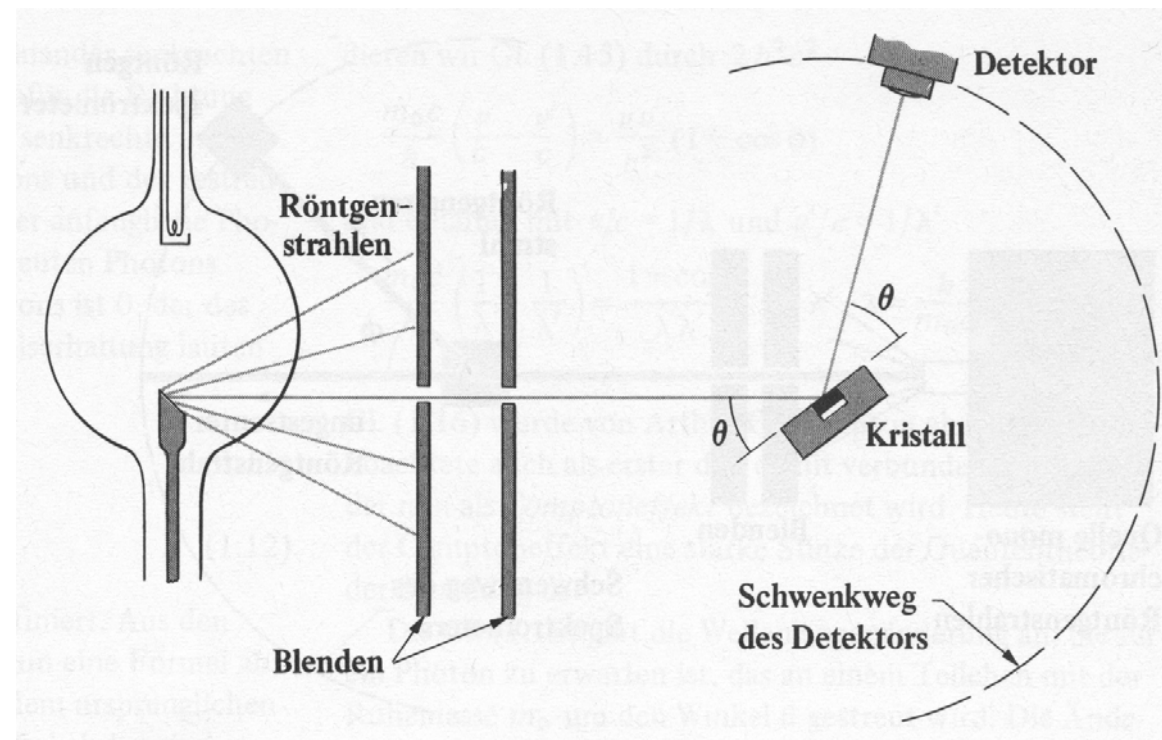
$$\text{für } n = 1, 2, 3, \dots$$



Nur wenn beide Bedingungen erfüllt sind ist konstruktive Interferenz zu beobachten.

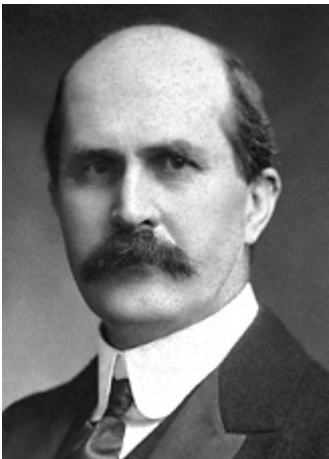
Messaufbau zur Röntgenbeugung:

- Übung: Bestimme die Gitterkonstante a des kubischen Gitters von NaCl ausgehend von seiner Dichte ρ und der molaren Masse. Unter welchen Winkeln treten Intensitätsmaxima in der Röntgenbeugung auf?
- Ebenfalls: Bestimmung der Wellenlänge bei bekannter Gitterkonstante.



Nobel Preis in Physik (1915)

Sir William Henry Bragg



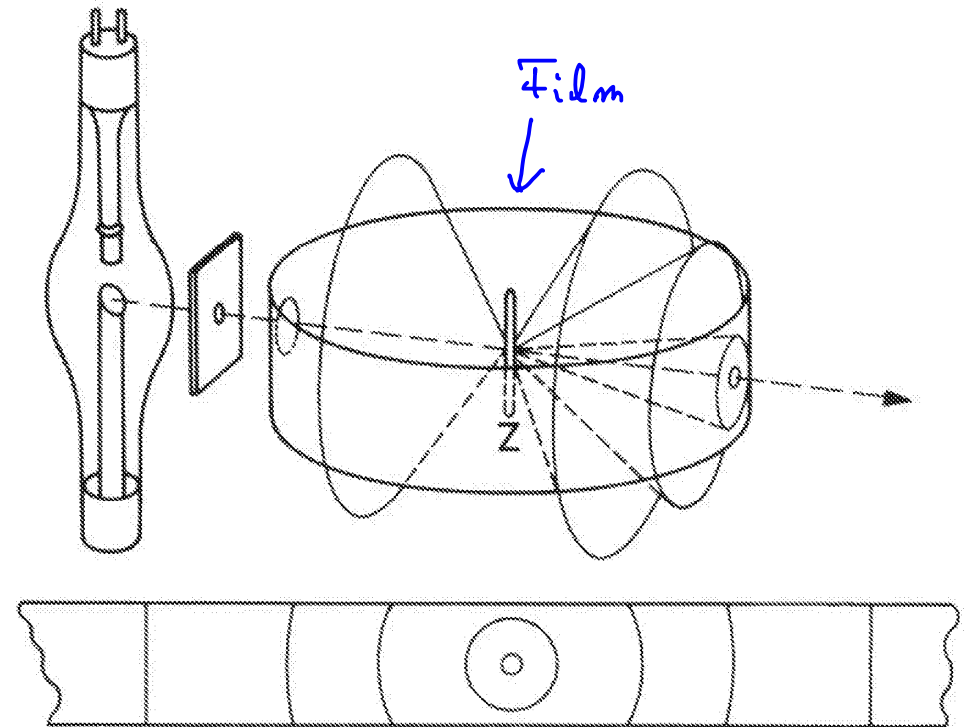
William Lawrence Bragg



"for their services in the analysis of crystal structure by means of X-rays"

Ein Beispiel zur Röntgenbeugung: Debye-Scherrer Verfahren

- Beugung an polykristalliner oder pulverförmiger Probe (Z)
- monochromatische Röntgenquelle mit Hilfe von Filter oder unter Nutzung charakteristischer Röntgenlinien (Erklärung folgt in späterer Vorlesung)
- Interferenzmaxima liegen auf Kegeln



typisches Ergebnis:

- Konstruktive Interferenz unter Streuwinkeln die mit verschiedenen Gitterebenen im Kristall identifiziert werden können. Abbildung auf photographischem Film.

