

1.5 Methoden zur Abbildung einzelner Atome

Optische Abbildung:

Kann man einzelne Atome 'sehen' ?

Auflösungsvermögen:

Kleinster Abstand d zweier Strukturen die noch als getrennt abgebildet werden können.

optisches Mikroskop bei Wellenlänge ($\lambda \sim 400 - 800 \text{ nm}$) mit Brechungsindex ($n \sim 1$ in Luft) und Abbildungswinkel ($\sin(\alpha) \sim 1$):

$$d \sim \frac{\lambda}{n \sin \alpha}$$

siehe z.B. Hecht-Zajac: Optics

Auflösungsgrenze $d \sim 500 \text{ nm}$, vgl. Atomabstand im Kristall $\sim 0.3 \text{ nm}$

- aber z.B. optische Abbildung eines einzelnen Ions in einer elektromagnetischen Falle ($d \sim 500 \text{ nm}$)

Moderne Methoden:

- Mögliche Themen für Vorträge in der Übungsgruppe.
- Röntgenstrahlung
- TEM: Transmissions-Elektronenmikroskop ($d \sim 0.2 \text{ nm}$)
- Raster-Tunnelmikroskop, STM: Scanning Tunneling Microscope ($d \sim 0.1 \text{ nm}$)
- Raster-Kraftmikroskop, AFM: Atomic Force Microscope ($d \sim 0.1 \text{ nm}$)

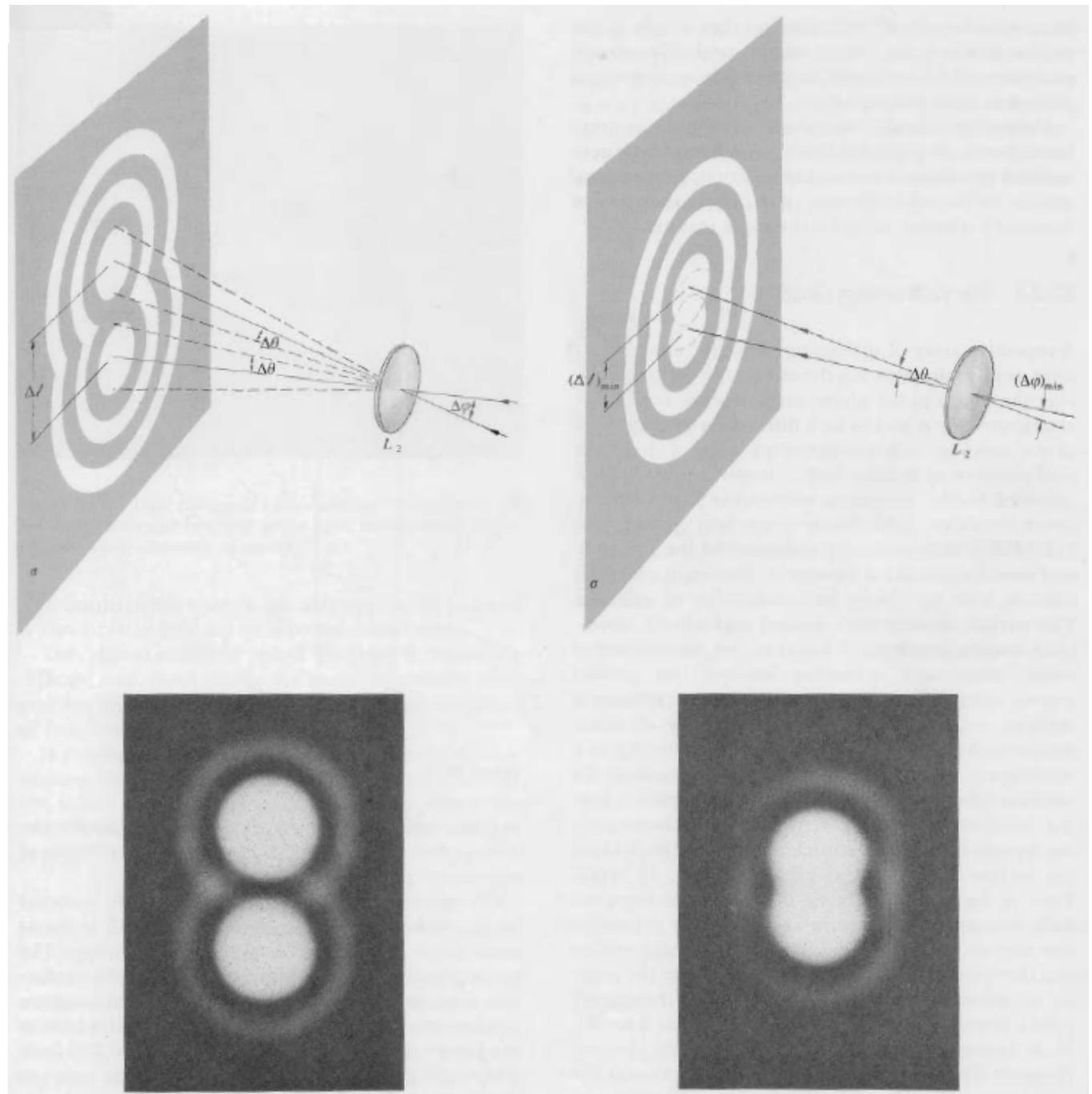
Optisches Auflösungsvermögen:

- Abbildung zweier Punktquellen im Winkelabstand $\Delta\varphi$ führt zu zwei überlappenden Beugungsmustern mit der Winkelbreite $\Delta\theta$ des ersten Beugungsmaximums.
- Das Auflösungsvermögen ist als der Winkelabstand der beiden Punktquellen definiert, bei dem das Maximum des Beugungsmusters der ersten Quelle in das erste Minimum des Musters der zweiten Quelle fällt.

$$\Delta\varphi_{\text{min}} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

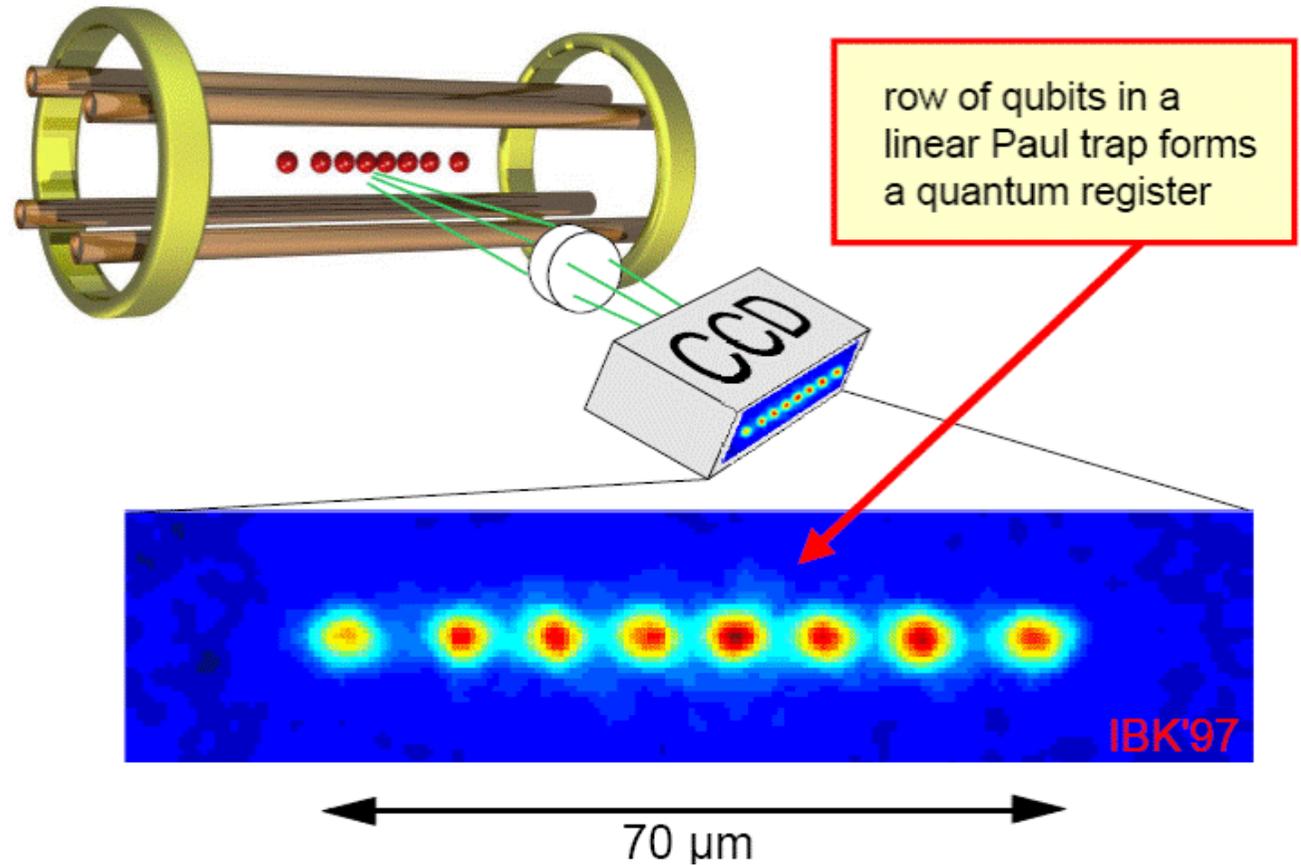
D : Durchmesser der Linse
(oder der Blende)

λ : Wellenlänge des Lichts



Beispiel Abbildungstechniken mit atomarer Auflösung: Ionenfalle

Positiv geladene Ionen in elektromagnetischer Falle:



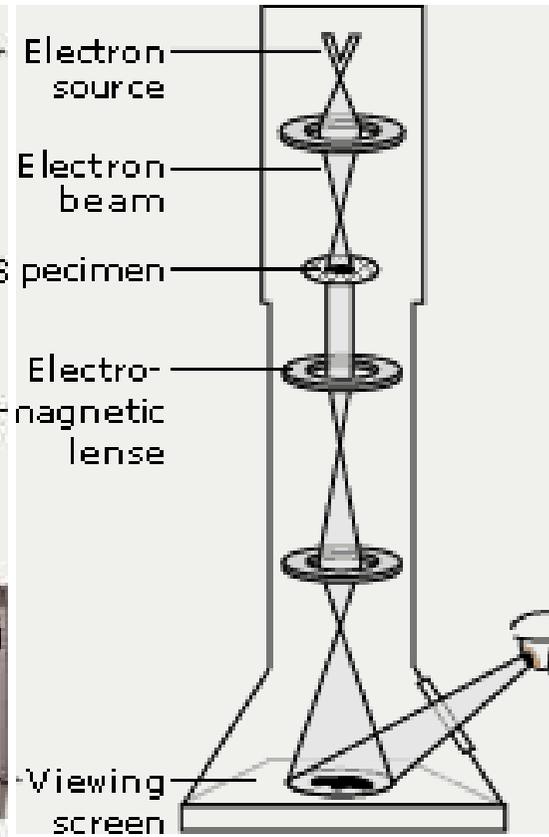
optische Abbildung mit Laser-Licht:

- Abbildung einzelner aber weit voneinander entfernter Ionen.
- Auflösung optisch begrenzt.

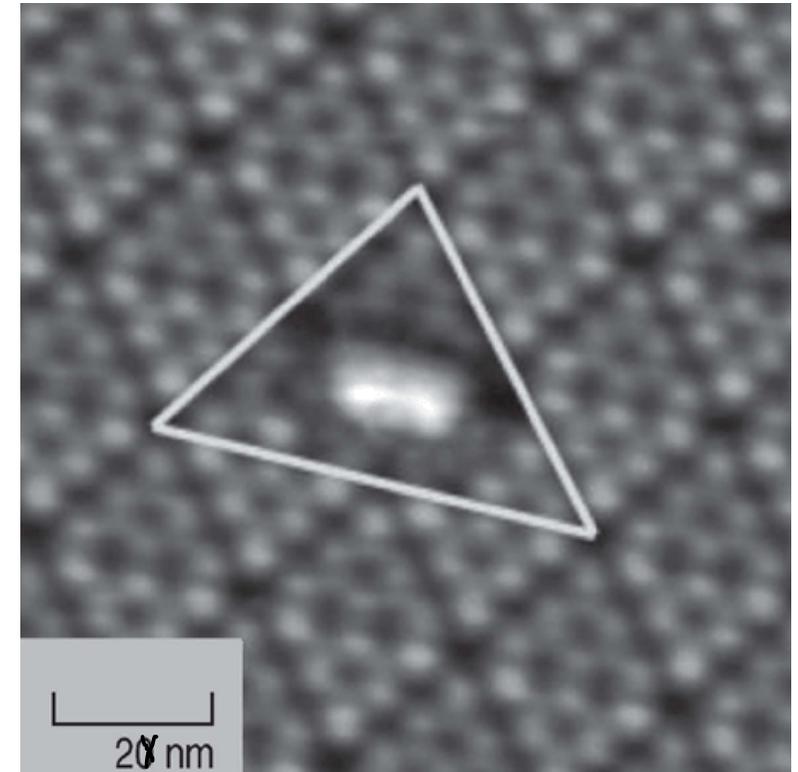
Beispiel Abbildungstechniken mit atomarer Auflösung: Transmissions-Elektronenmikroskop



TEM-Apparatur



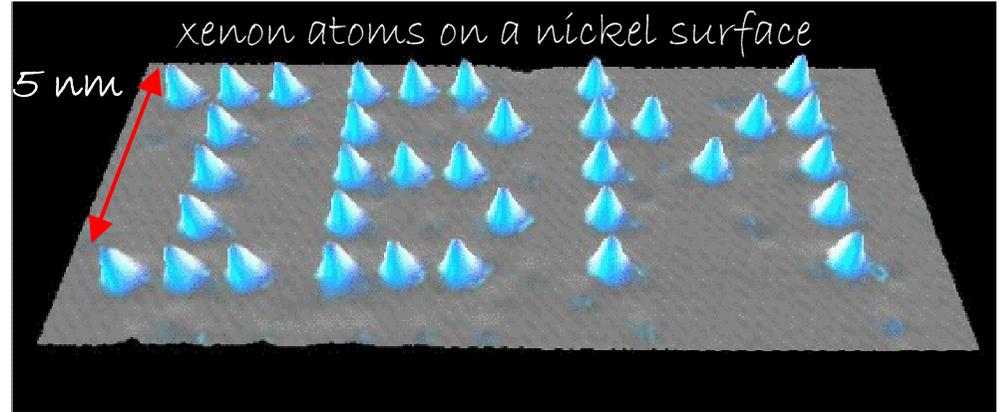
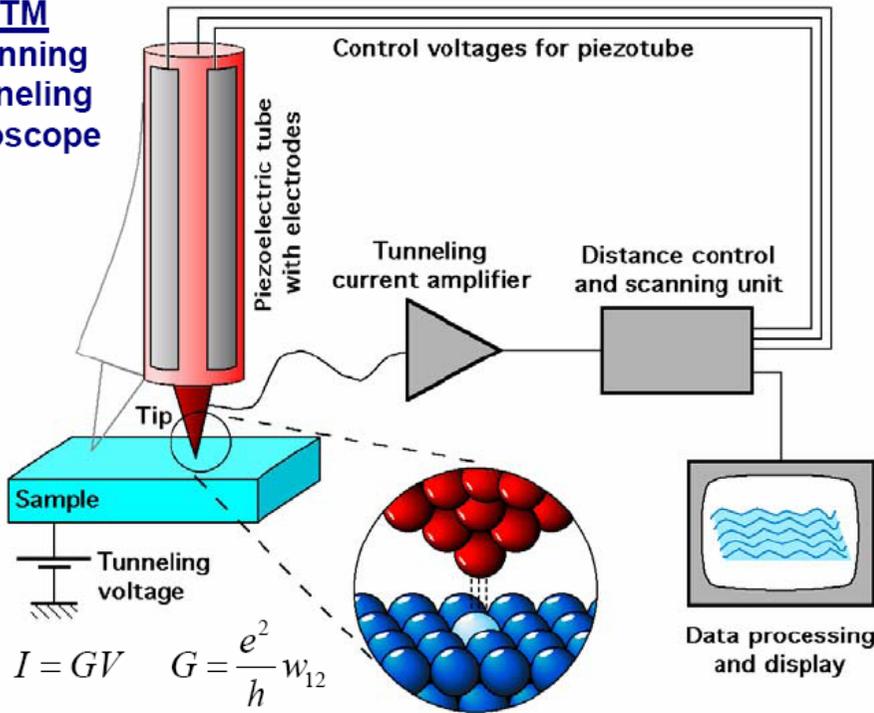
Funktionsprinzip



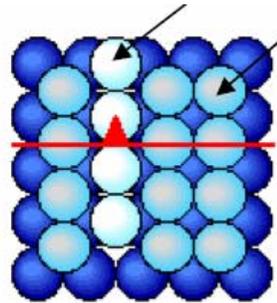
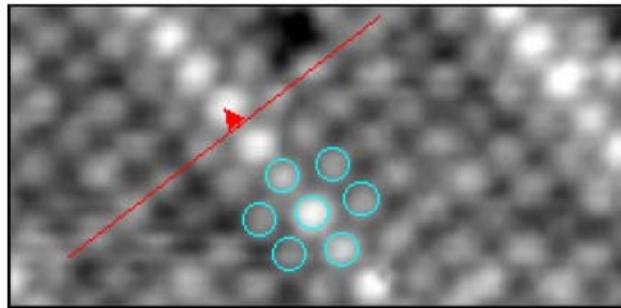
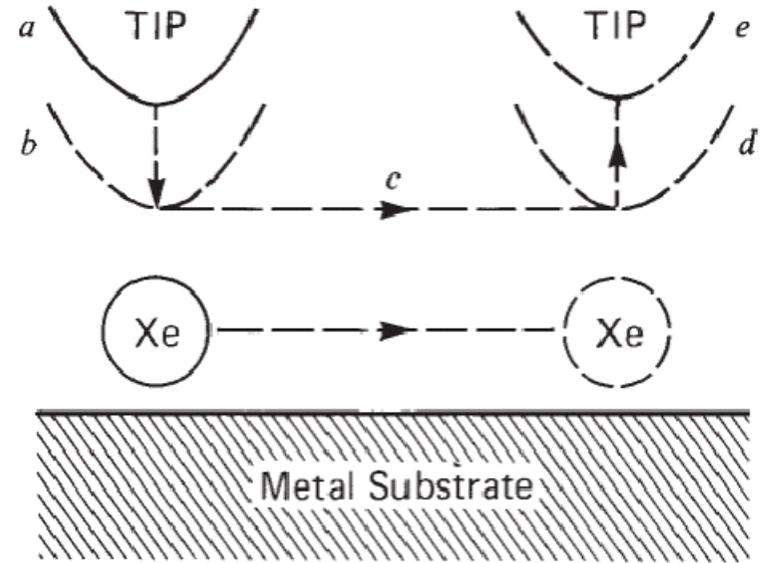
Einzellige Ti Atome auf Si(111)

Scanning Tunneling Microscope (STM)

STM
Scanning
Tunneling
Microscope



moving individual atoms around one by one



D.M. Eigler, E.K. Schweizer. Positioning single atoms with a STM. *Nature* 344, 524-526 (1990)

Kapitel 2: Kernstruktur des Atoms

2.1 Durchgang von Elektronen durch Materie

Elektronen erzeugt im Kathodenstrahlrohr wechselwirken mit Gasatomen im Rohr.

Elektronen können hinter dünnem Fenster auf Szintillationsschirm sichtbar gemacht werden.

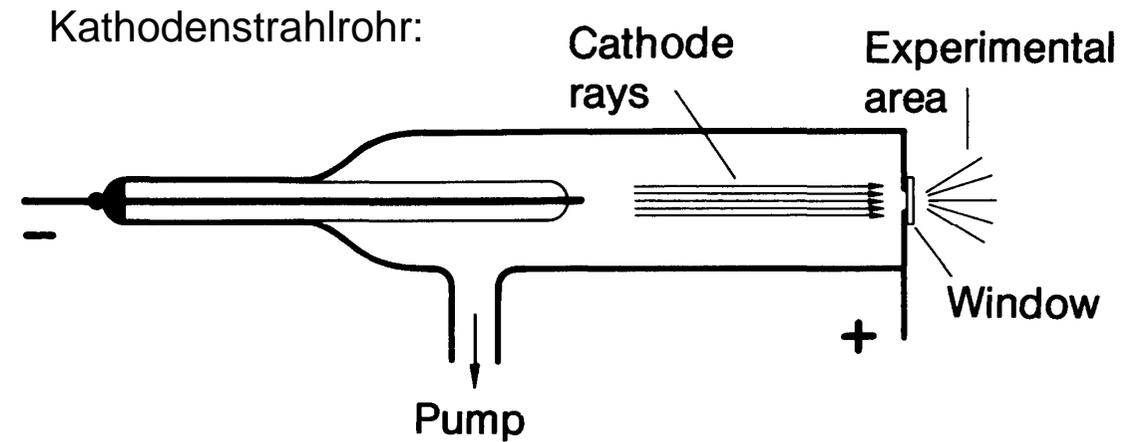
Messung der Elektronenintensität I hinter dem Fenster in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung V_{+-} .

Aus Streuexperimenten bestimmte Stossradien R für Elektronen zeigen starke Abhängigkeit von der Elektronengeschwindigkeit v ausgedrückt im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit c .

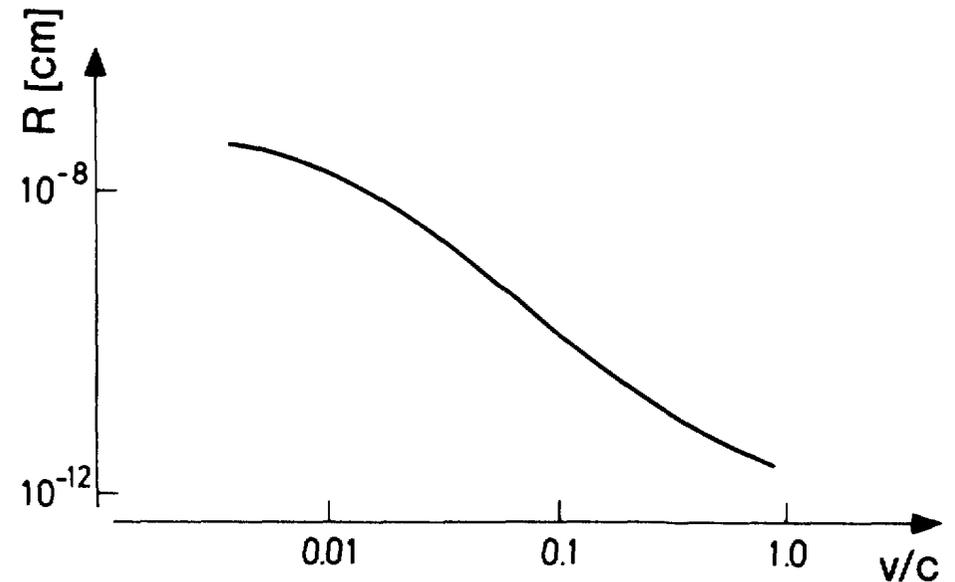
- langsame Elektronen wechselwirken stark mit Elektronen in der Atomhülle
- schnelle Elektronen wechselwirken schwach

$$\alpha = n \sigma = n \pi (r_1^2 + r_2^2)$$

Folgerung: Für Elektronen mit hoher Energie wird die Wechselwirkung mit Atomen schwach, der Streuquerschnitt σ reduziert sich um 10^{-8} , d.h. das Atom ist für schnelle Elektronen fast durchsichtig.

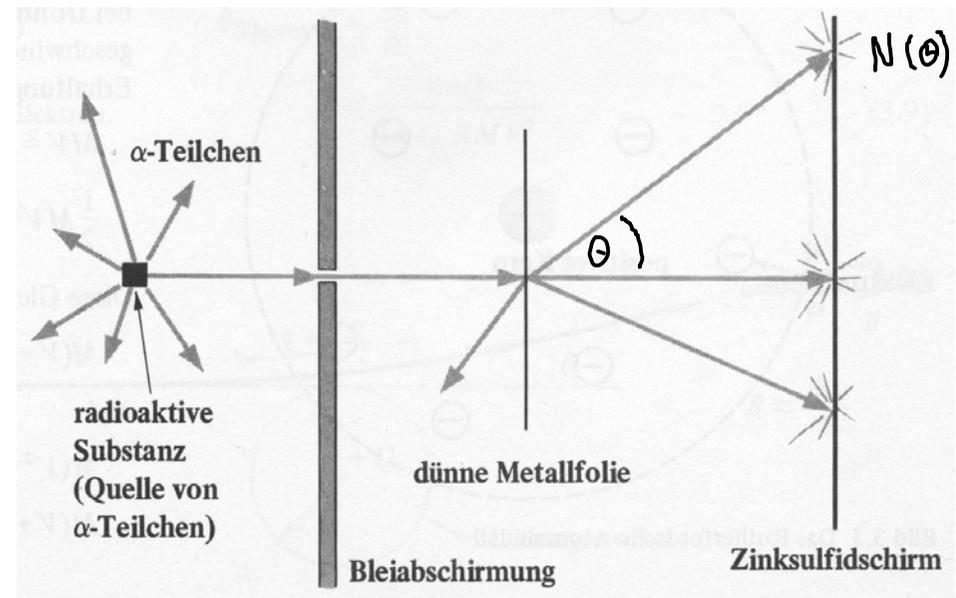


$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad \alpha = \alpha(V_{+-})$$

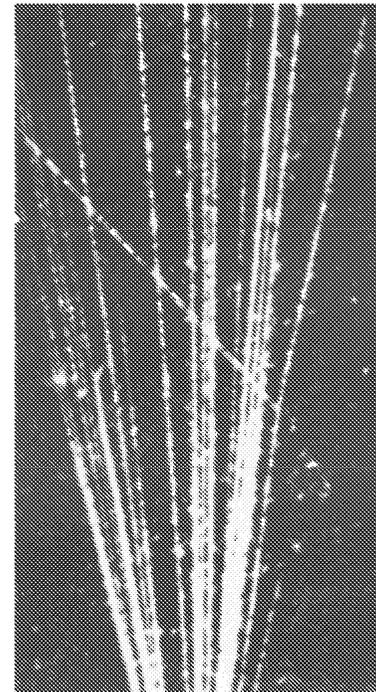


2.2 Durchgang von α -Teilchen durch Materie: Rutherford Streuung

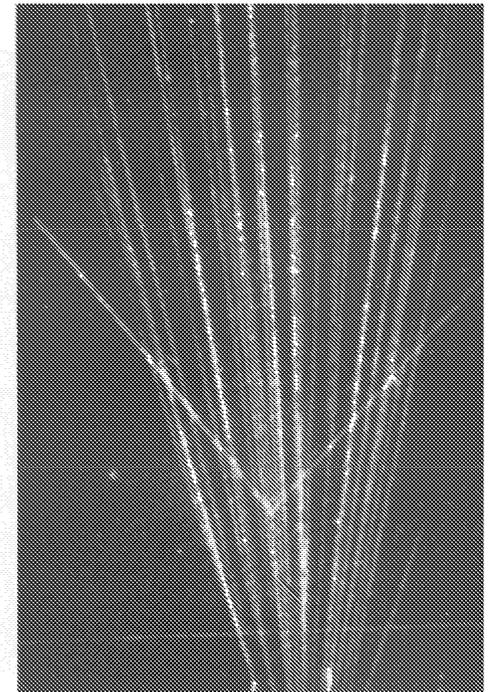
- Rutherfords Idee: Streuung von α -Teilchen (grosse Masse, Energie und Impuls = gute Auflösung) an einer dünnen Gold Folie, um die Struktur des Atoms zu untersuchen.
- Experiment von Geiger and Marsden (1911) (Grafik).
- α -Teilchen sind voll ionisierte Helium Atome (He^{2+}) mit hoher Energie ($\sim 5 \text{ MeV}$), die in nuklearen Zerfällen schwerer Atomkerne erzeugt werden können.
- Sie haben eine grosse freie Weglänge von $\sim 3.5 \text{ cm}$ in Luft.
- Detektion gestreuter α -Teilchen durch Lichtemission auf einem fluoreszierenden Schirm.
- Nebelkammerspuren von α -Teilchen (siehe Abb.):



in H:

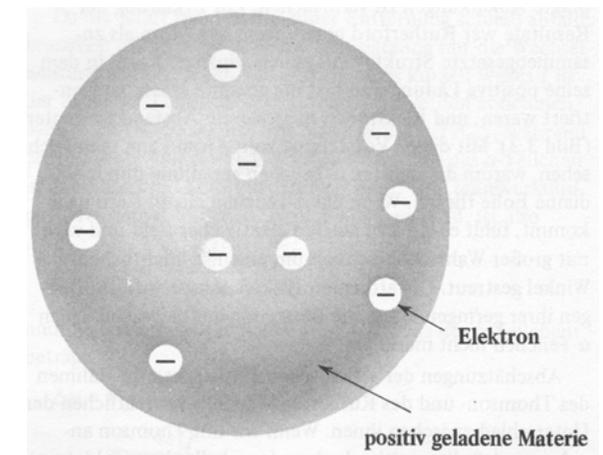


in He:



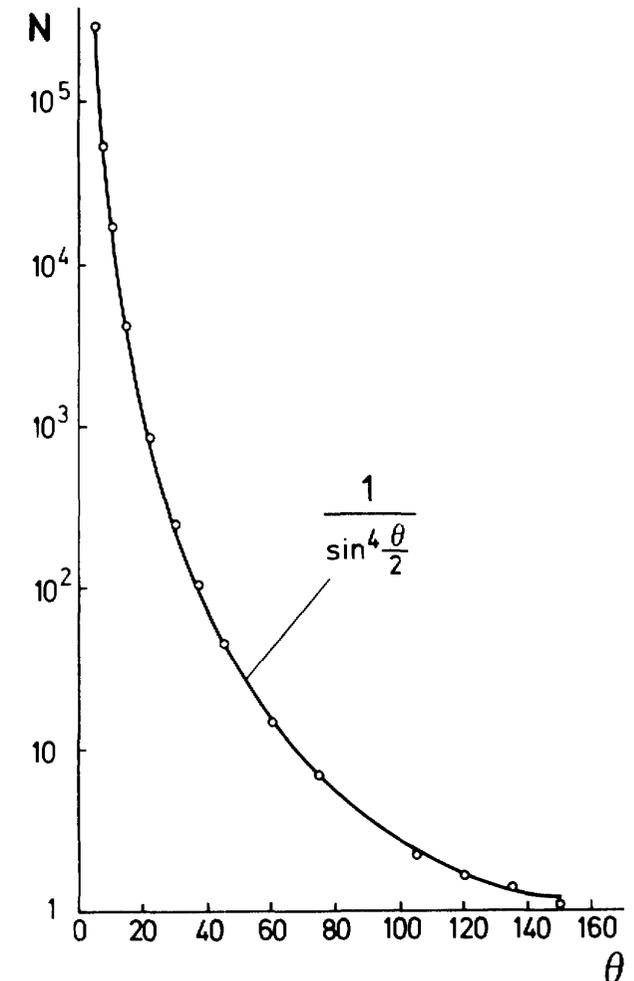
Erwartung für im Atom gleich verteilte Ladung (Thompson-Modell) :

- Stoss mit Elektronen:
Die meisten α -Teilchen sollten fast ohne Ablenkung durch die dünne Metallfolie treten, da Streuung mit den viel leichteren Elektronen nur zu kleinen Ablenkwinkeln führt.
- Stoss mit im Atom gleich verteilter positiver Ladung sollte ebenfalls klein sein.



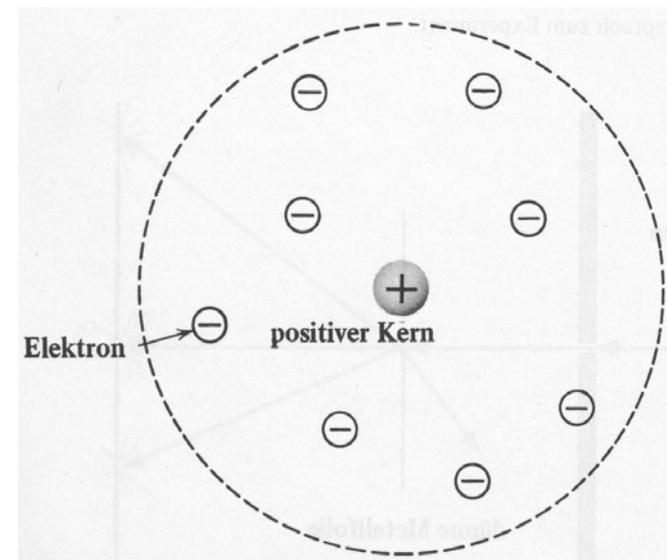
Beobachtung:

- charakteristische starke Winkelabhängigkeit der Streuung
- grosse Streuwinkel kommen vor
- beachte logarithmische Skala



Das Rutherford Atommodell:

- Rutherford erwartete, dass die positive Ladung Ze und fast die gesamte Masse m des Atoms in einem Kern im Zentrum konzentriert sei.
- Diese Idee konnte durch Streuung von α -Teilchen an Atomkernen überprüft werden.
- Zwei Schritte: Berechne Streuwinkel θ und Winkelverteilung $N(\theta)$ der gestreuten Teilchen.



2.2.1 Berechnung des Streuwinkels θ :

Annahmen:

- α -Teilchen und Atomkern sind punktförmig Teilchen mit Ladung $+2e$ und $+Ze$.
- Der Atomkern bleibt in Ruhe beim Stoss, da er schwerer als das α -Teilchen ist und ausserdem in das Kristallgitter der Folie eingebaut ist.
- Die einzige Wechselwirkung ist elektrostatisch ($\sim 1/r$ Coulomb-Potential, $1/r^2$ Kraft) und führt zu einer hyperbolischen Bahn des α -Teilchen mit dem Kern im äusseren Fokus

$$\vec{F} = \frac{2eZe}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \vec{r}$$

- b ist der Stossparameter und θ der Streuwinkel

