

Welleneigenschaften des Elektrons und Quantenmechanik

Im Jahr 1924 stellte **Louis de Broglie** in seiner Dissertation die Vermutung auf, dass Elektronen Welleneigenschaften besitzen.

Wenn man dem Photon sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften zuschreiben kann, warum sollte dies nicht auch für Materie – insbesondere für Elektronen – gelten?

Seine Vermutung war in hohem Maße spekulativ, da es zu dieser Zeit keinerlei Hinweise auf Welleneigenschaften des Elektrons gab.

Für die Frequenz und die Wellenlänge des Photons wählte de Broglie die Gleichung:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{pc}{h}$$

und

$$\frac{pc}{h} = f \Rightarrow \frac{p}{h} = \frac{f}{c} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p},$$

wobei p der Impuls und E die Energie des Elektrons sind.

Die Gleichung für die Frequenz ist identisch mit der von Planck bzw. Einstein verwendeten Gleichung für die Energie des Photons.

De Broglies Gleichungen sollten für beliebige Materie gelten. Für makroskopische Objekte

sind die aus $\lambda = \frac{h}{p}$ berechneten Wellenlängen jedoch so klein, dass Welleneigenschaften wie

Interferenz und Beugung nicht beobachtbar sind.

Für niederenergetische Elektronen bietet sich jedoch ein völlig anderes Bild. Betrachten wir ein nichtrelativistisches Elektron mit kinetischer Energie

$$E_{kin} = \frac{m}{2} v^2 = \frac{mv \cdot v}{2} = \frac{mv \cdot m \cdot v}{2m} = \frac{p^2}{2m}.$$

Sein Impuls ist:

$$p = \sqrt{2mE_{kin}}$$

Und seine Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_{kin}}} = \frac{hc}{\sqrt{2mc^2 E_{kin}}}.$$

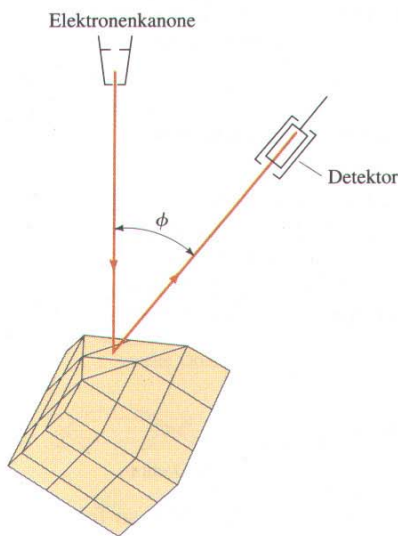
Wir benutzen $hc = 1240 eV \cdot nm$ und $mc^2 = 0,511 MeV$ und erhalten

$$\lambda = \frac{1,226}{\sqrt{E_{kin}}} nm \quad (E_{kin} \text{ in } eV).$$

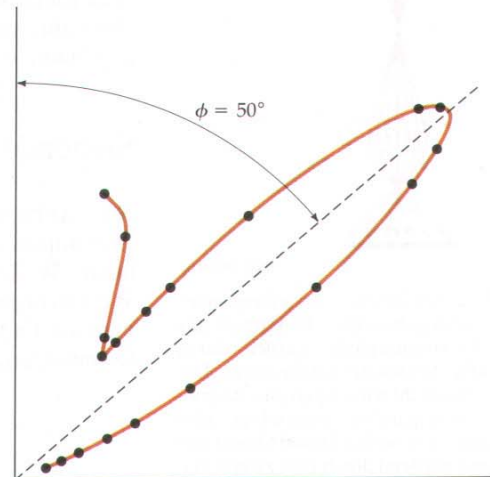
Wie man an der Gleichung ablesen kann, besitzen Elektronen mit Energien in der Größenordnung von $10 eV$ eine Wellenlänge von einigen Nanometern. Dies entspricht etwa dem Gitterabstand von Atomen in einem Kristall. Elektronen sollten daher in der selben Weise von Kristallen gestreut werden wie Röntgenstrahlen derselben Wellenlänge.

Beugungs- und Interferenzeffekte von Elektronen wurden zuerst im Jahre 1927 von **C.J. Davisson** und **L.H. Germer** entdeckt, indem sie Elektronen auf einen Nickelkristall schossen.

Sie beobachteten abhängig vom Streuwinkel Maxima und Minima in der Intensitätsverteilung der gestreuten Elektronen.



35.15 Das Davisson-Germer-Experiment. Elektronen aus einer Elektronenquelle prallen auf einen Kristall und werden in einem Winkel ϕ eingestellten Detektor gestreut.



35.16 Winkelabhängigkeit der Intensität der gestreuten Elektronen beim Davisson-Germer-Experiment. Interpretiert man die Intensitätsverteilung als Beugungsmuster, so kann man die Wellenlänge der einfallenden Elektronen aus dem bekannten Gitterabstand und der Position des Maximums berechnen. Das Ergebnis stimmt mit der De-Broglie-Wellenlänge des Elektrons überein.

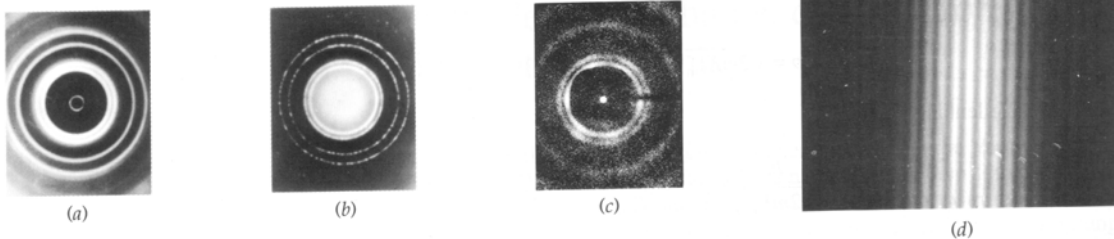
Im selben Jahr beobachtete G.P.Thomson, der Sohn von J.J.Thomson, die Beugung von Elektronen beim Durchdringen von Metallfolien, die viele kleine, zufällig orientierte Kristalle enthalten.

Das resultierende Beugungsmuster solcher Folien besteht aus einer Reihe konzentrischer Kreise. Dieses wurde später auch für andere Elementarteilchen beobachtet.

Dieses Experiment ist ein analoges Experiment zum Doppelspaltexperiment des Lichtes.

Resultat:

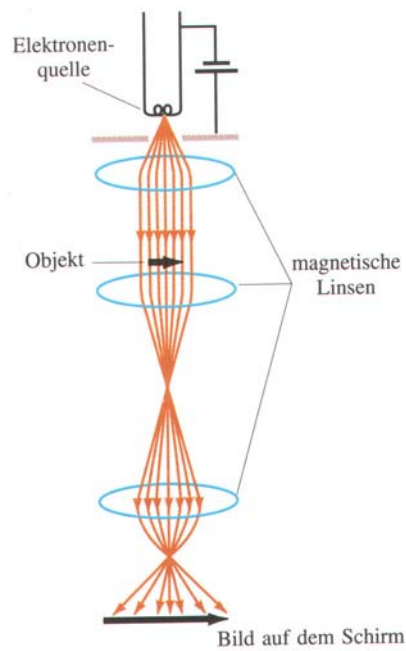
35 Ursprünge der Quantentheorie



35.17 Beugungsmuster von a) Röntgenstrahlung und b) Elektronen, die auf eine Aluminiumfolie treffen, und c) Neutronen, die auf polykristallines Kupfer prallen. d) Beugungsmuster eines Elektronenstrahls an einem Doppelspalt. Das Muster ist dasselbe

wie für Photonen. (Teilbilder a und b: aus *PSSC Physics*, 2nd edition, 1965, D.C. Heath and Company, and Education Development Center, Inc., Newton, MA; Teilbild c: © C. G. Shull; Teilbild d: © Claus Jönsson)

Kurz nach der Entdeckung der Welleneigenschaften des Elektrons kam die Vermutung auf, dass man statt Licht auch Elektronen zur Abbildung von Objekten verwenden kann



35.18 Schematische Darstellung eines Elektronenmikroskopes. Elektronen aus einer Elektronenquelle werden durch eine hohe Spannung beschleunigt. Der Elektronenstrahl wird durch eine magnetische Linse parallel ausgerichtet, trifft dann auf das zu beobachtende Objekt und wird anschließend durch eine zweite magnetische Linse fokussiert. Die dritte magnetische Linse übernimmt die Aufgabe des Okulars im herkömmlichen Mikroskop. Sie projiziert den Elektronenstrahl auf einen fluoreszierenden Schirm, auf dem das Objekt betrachtet werden kann.

Ernst Ruska erhielt für die Entwicklung des Elektronenmikroskops **1986** den Nobelpreis für Physik.