

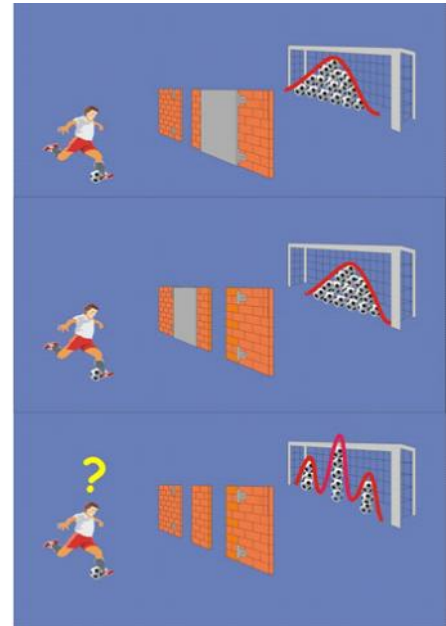
Makroskopische Objekte (Teilchen)
werden vollständig durch Newton-Gl.
beschrieben

$\vec{x}(t)$ Ortsvektor \approx $\vec{p}(t)$ Impulsvektor

Dies gilt für Teilchen mit $\text{Dim.} \geq \mu\text{m}$

"Nanoteilchen" sind nicht mehr
durch diese klassische Betrachtung
beschreibbar

Neue Phänomene, wie z. Bsp
Beugung am Spalt (Doppelspalt)
treten für solche "Teilchen" auf.

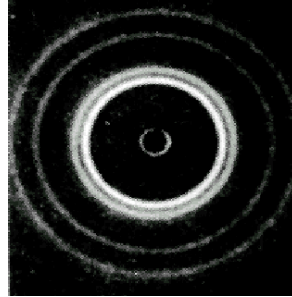


Welle - Teilchen Dualismus



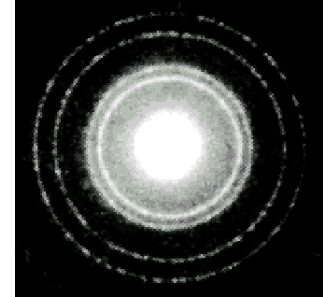
Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie
1892-1987

"Wellen" ↔ "Teilchen"



Röntgenbeugung an Al-Folie

$$\vec{x}, \vec{p}$$



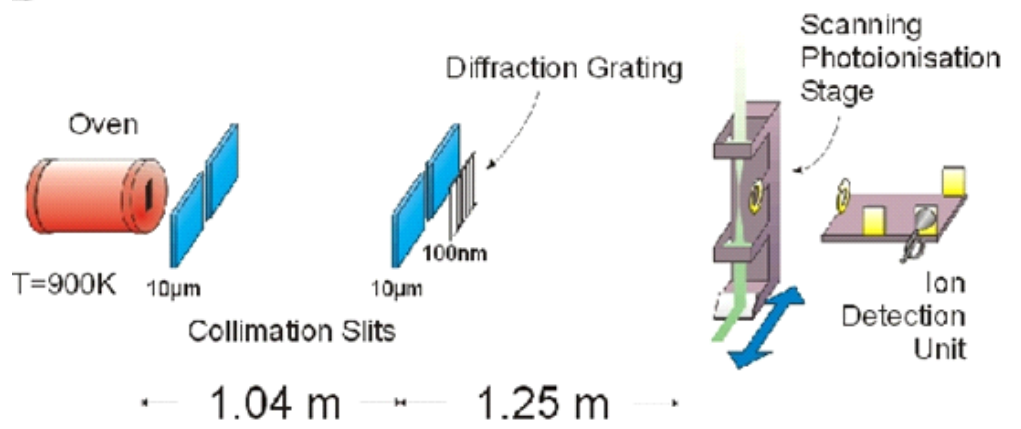
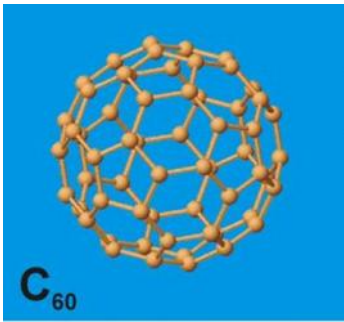
Elektronenbeugung an Al-Folie

$$\lambda, \nu$$

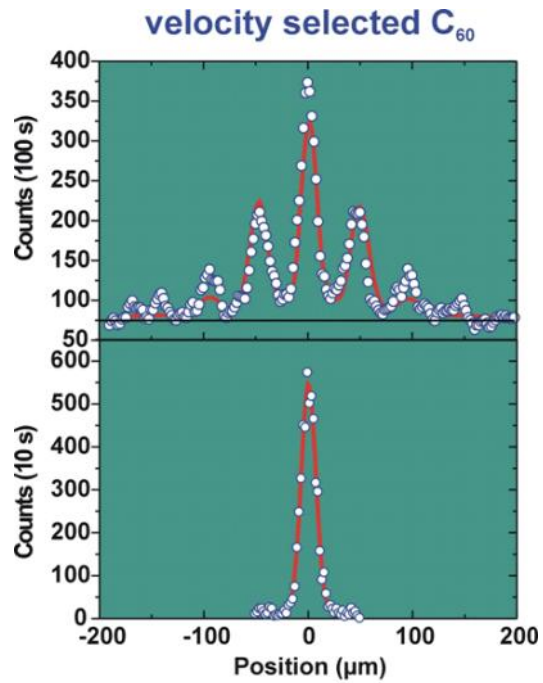
De Broglie-Beziehungen:

$$\frac{1}{2} m v^2 = E_{kin} = h \cdot \nu$$

$$|mv| = |p| = h \cdot \frac{1}{\lambda} = h \cdot \tilde{\nu} \quad \text{Wellenzahl}$$



Anton Zeilinger, Markus Arndt, Universität Wien



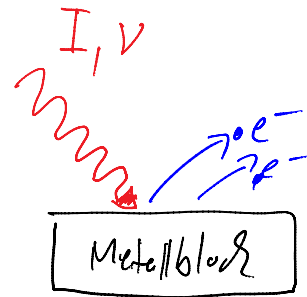
Nature 401, 680-682 (1999)

Interferenz-Erscheinungen von Fullerenen
bei der Beugung am Spalt

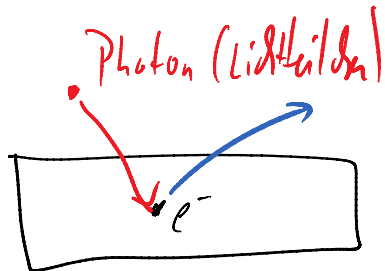
Nairz, Arndt, Zeilinger: unpublished



Photoeffekt



Albert Einstein
1879-1955

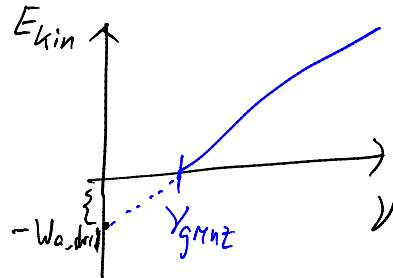


Photon:

$$m_{\text{photon}} = 0, \quad v_{\text{photon}} = c$$

$$E_{\text{kin}} = h \cdot \nu$$

$$p_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda}$$



$$E_{\text{kin}}^{e^-} = h \cdot \nu - W_{\text{ausstatt}}$$

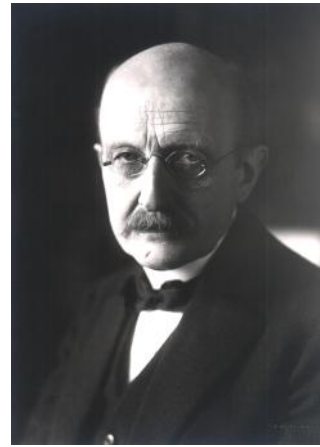
Die Wärmestrahlung schwarzer Körper

Energiedichte $\rho = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc/\lambda T} - 1} \right)$ Planck'sches Strahlungsgesetz



Gesamtenergie $E = \int_0^\infty \rho d\lambda \sim T^4$ Stefan-Boltzmann Gesetz

$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$ Planck-Konstante
 $\hbar = h/2\pi$



Max Planck
1858-1947
Nobelpreis für Physik 1918

Neuer Formalismus für Quanten-Objekte:



Erwin Schrödinger
1887-1961
Nobelpreis für Physik 1933

① Vollständige Beschreibung eines qm-Objektes ist durch Wellenfunktion: $\psi(\vec{x}, t)$ Zahl, komplex

$\psi(\vec{x}, t) = \psi_R(\vec{x}, t) + i \psi_I(\vec{x}, t)$

$\psi^*(\vec{x}, t) = \text{komplex konjugierte Zahl} = \psi_R(\vec{x}, t) - i \psi_I(\vec{x}, t)$

Bsp:
 $t=0$
 $\vec{x}=(0,0,0)$
 $\psi(0,0,0) = \frac{3+i}{5}$

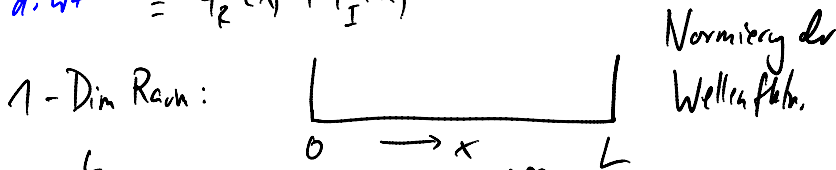
stetig differenzierbar nach $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial t}$



Max Born (1882-1970)
Nobelpreis für Physik 1954

Aufenthaltswahrscheinlichkeit qm-Teilchen irgendwo im Raum

Bohr'sche Wahrscheinlichkeit = $\psi^*(\vec{x}) \cdot \psi(\vec{x}) = (\psi_R(\vec{x}) - i \psi_I(\vec{x})) (\psi_R(\vec{x}) + i \psi_I(\vec{x}))$
 $= \psi_R^2(\vec{x}) + \psi_I^2(\vec{x})$
 d. WF = $\psi_R^2(x) + \psi_I^2(x)$



$\int_0^L \psi^*(x) \psi(x) dx = 1$ allgemein $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*(x) \psi(x) dx = 1$

1 Dimensional (x-Richtung) $[\psi(x)] = \frac{1}{\sqrt{m}}$
 3 Dimensional (x, R, y, z) $\left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} \text{Dimension der Wellenfunkt.}$

3 Dimensional (x, y, z)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*(x, y, z) \psi(x, y, z) dx dy dz = \underline{1}$$

3D- ψ : $[\psi(x, y, z)] = \frac{1}{m^{3/2}}$

Dimension der
Wellenfunktion

Erwartungswerte von klassischen Observablen (Ort x , Impuls p) aus ψ :

mittlerer Ort des q_m -Teilchens

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*(x) \cdot x \cdot \psi(x) dx$$

mittlerer Impuls des q_m -Teilchens $p = m \cdot v$

$$\bar{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*(x) \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}\right) \psi(x) dx$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$$

$$\bar{E}_{kin} = \int \psi^*(x) \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\right) \psi(x) dx$$