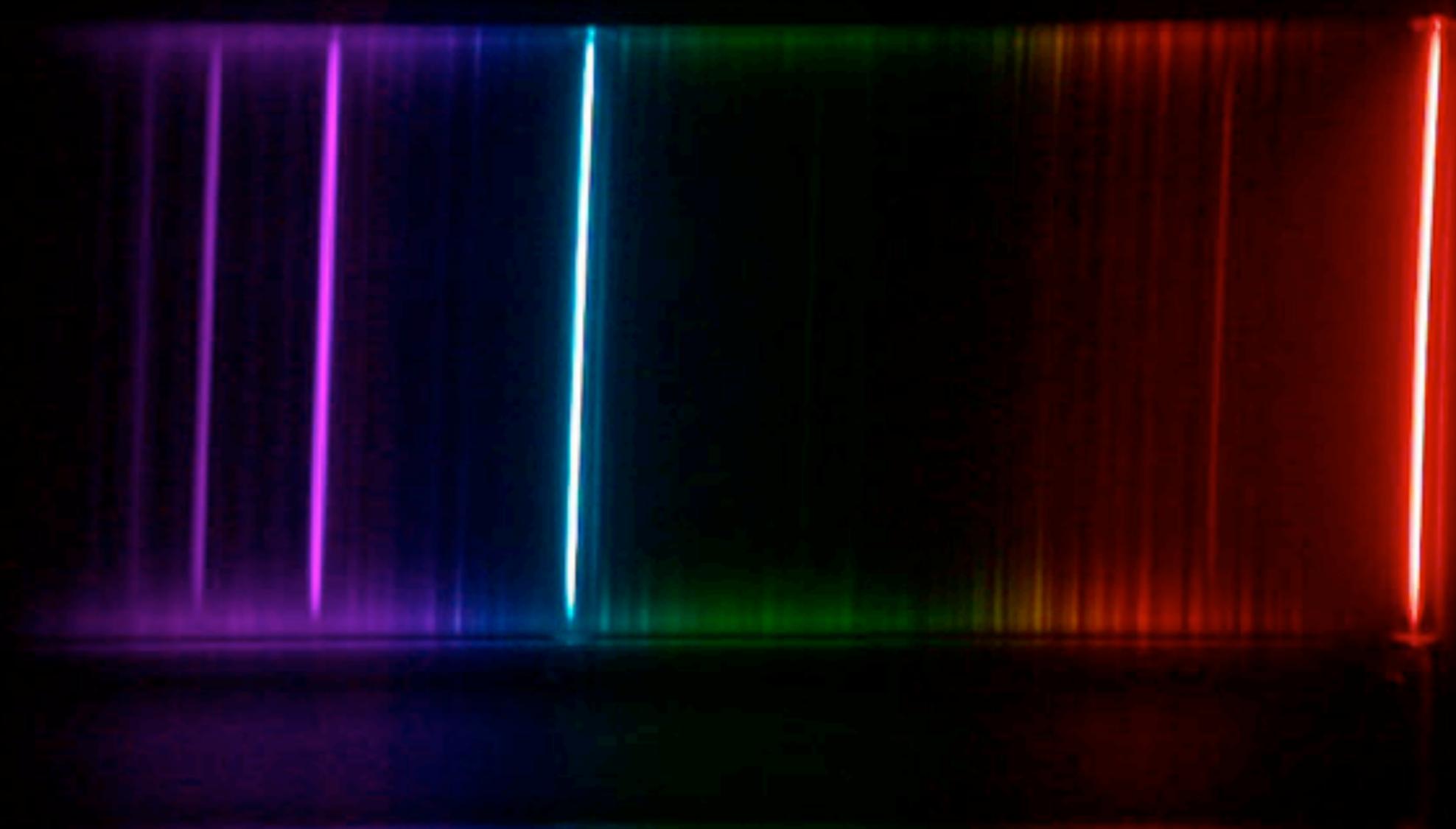


Geschichte der Quantenmechanik



ca. 1900-1925

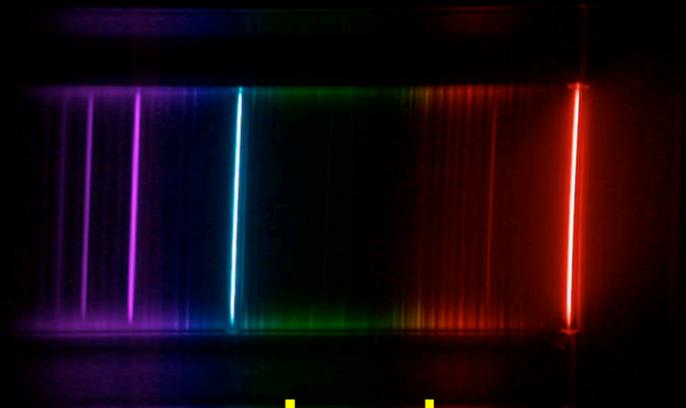
Krise der klassischen Physik

1874

Philipp von Jolly (Physik-Prof. Univ. München) erklärt Planck, dass
*...in dieser Wissenschaft schon fast alles erforscht sei,
und es gelte, nur noch einige unbedeutende Lücken zu schließen.*

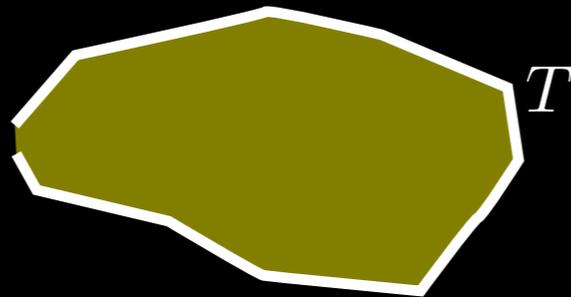
Krise der klassischen Physik

- Hohlraumstrahlung, UV-Katastrophe **Max Planck**
- Photoeffekt **Albert Einstein**
- Spezifische Wärme **Albert Einstein**
- Stabilität der Atome, Atomspektren **Niels Bohr**
- Welle-Teilchen-Dualismus **Louis de Broglie**
- Atomspektren, Spin **Wolfgang Pauli**
- Formulierung der Quantenmechanik
Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Born, von Neumann, Jordan

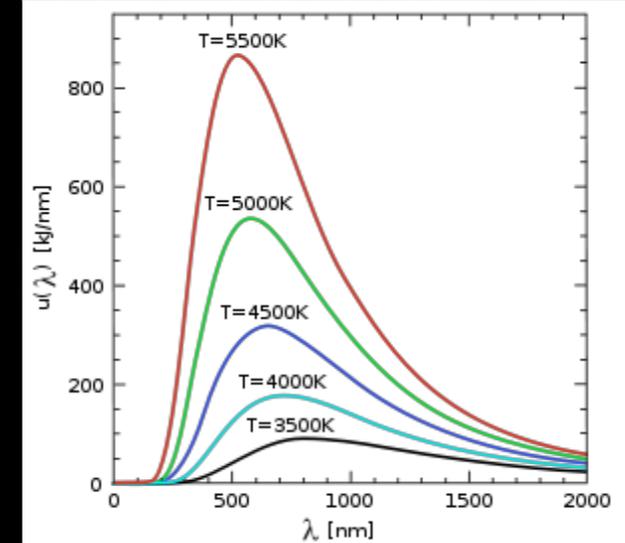
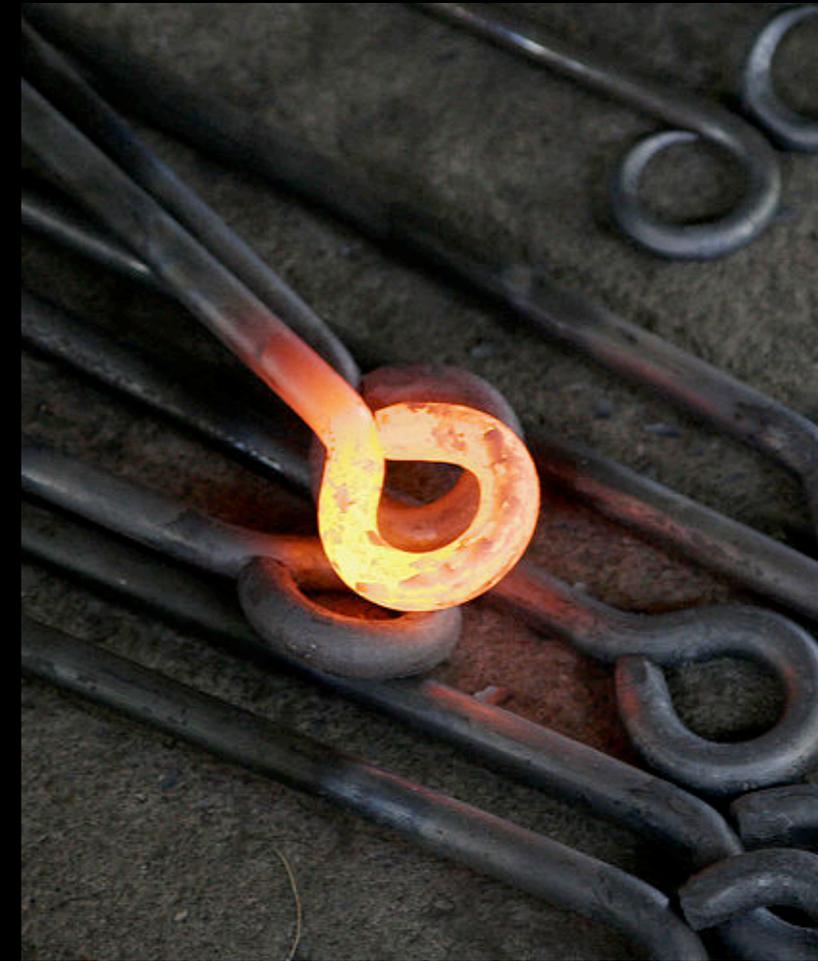


Hohlraumstrahlung

- Gustav Kirchhoff 1859:
Wie hängt Intensität der Abstrahlung eines schwarzen Körpers von der Frequenz ab?
- *schwarzer Körper*: idealer Absorber, z.B. Kavität, Ofen, glühendes Metall, Universum, ...

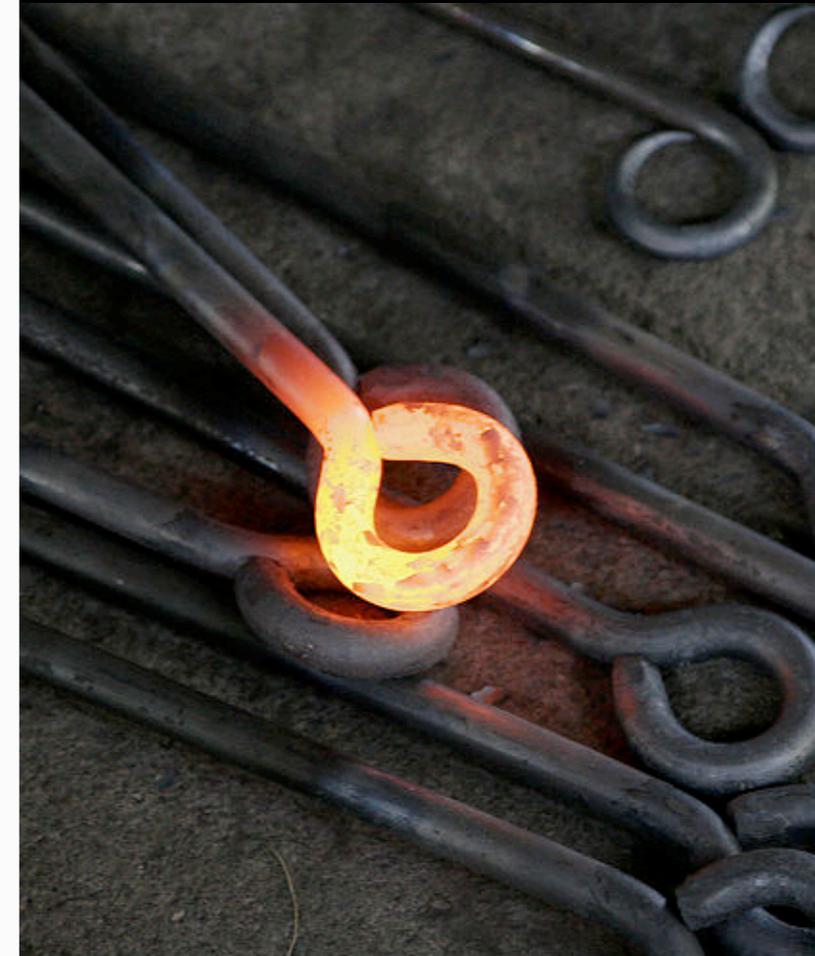
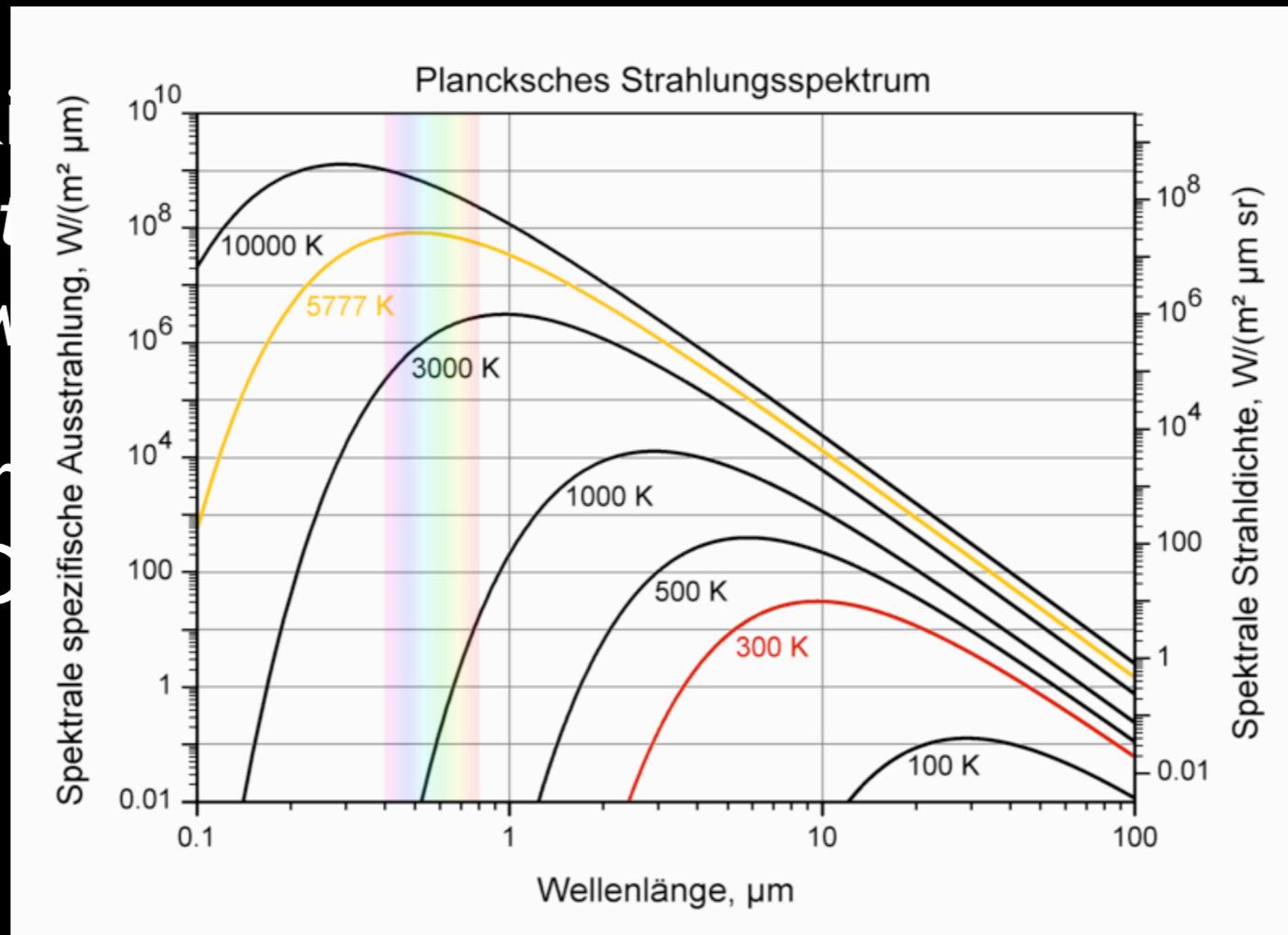


- Kirchhoff: Intensität (bzw. Energiedichte) ist eine **universelle** Funktion $u(\nu, T)$ der Frequenz ν (oder Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{\nu}$) und der Temperatur T . **Erklärung?**

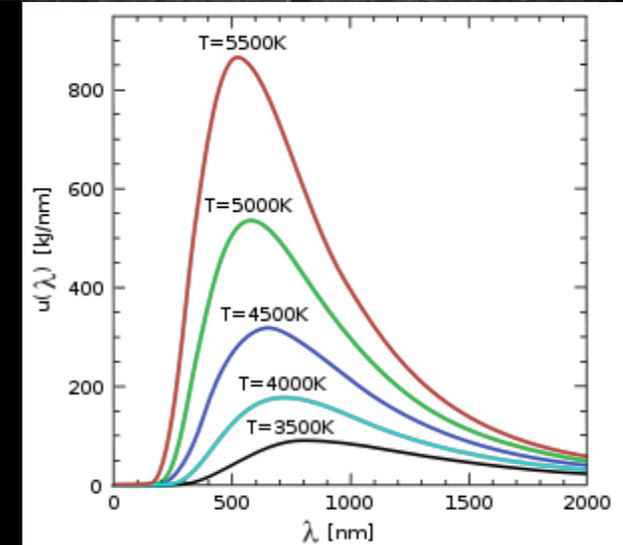


Hohlraumstrahlung

- Gustav Kirchhoff: Wie hängt die Intensität eines schwarzen Körpers von der Temperatur der Kavität, ρ und λ ab?



- Kirchhoff: Intensität (bzw. Energiedichte) ist eine **universelle** Funktion $u(\nu, T)$ der Frequenz ν (oder Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{\nu}$) und der Temperatur T . **Erklärung?**





Max Planck

1858-1947

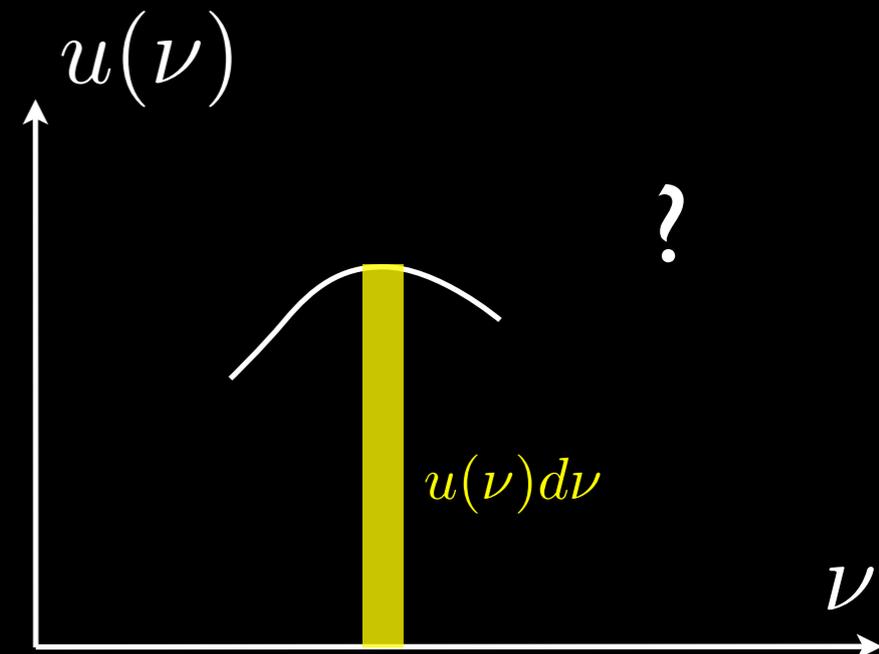
Nobelpreis Physik 1918



- widmet sich ab 1894 dem Problem der Hohlraumstrahlung
Wie hängt Intensität der Abstrahlung eines schwarzen Körpers von der Frequenz ab?
- Elektrizitätsgesellschaften:
Maximale Lichtemission bei fester Energie?

Plancksches Strahlungsgesetz

- Kirchhoff 1859: *Wie hängt Intensität der Abstrahlung eines schwarzen Körpers von der Frequenz ab?*
- “klassische” Antwort: Rayleigh-Jeans $u(\nu) = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2$ $\langle E \rangle$
- Problem: $U = \int_0^\infty u(\nu) d\nu \rightarrow \infty$ UV-Katastrophe, Widerspruch zu Stefan-Boltzmann



Plancksches Strahlungsgesetz



- Kirchhoff 1859: Wie hängt Intensität der Abstrahlung eines schwarzen Körpers von der Frequenz ab?

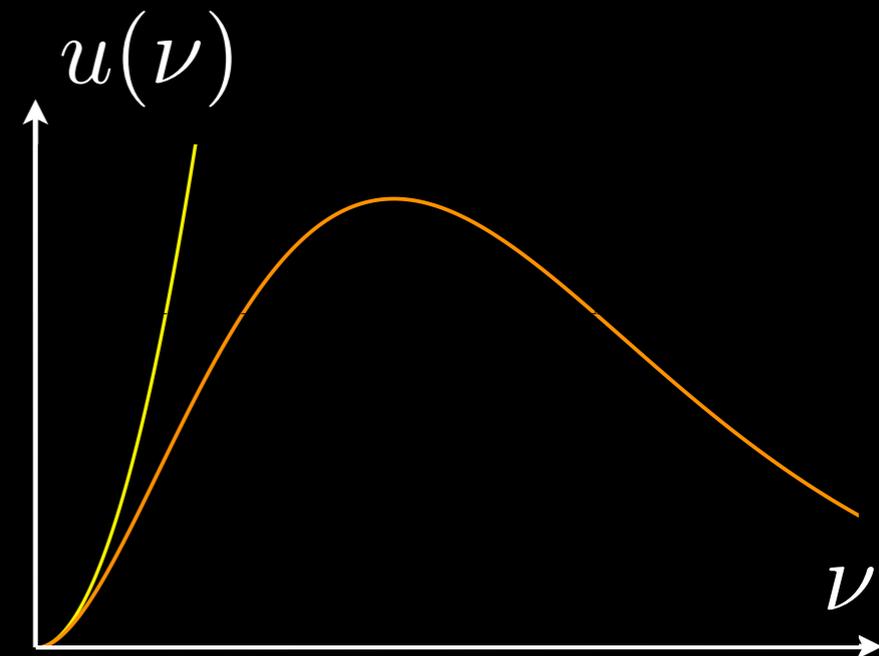
- “klassische” Antwort: Rayleigh-Jeans $u(\nu) = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2$ $\langle E \rangle$

- Problem: $U = \int_0^\infty u(\nu) d\nu \rightarrow \infty$ UV-Katastrophe, Widerspruch zu Stefan-Boltzmann

- Wilhelm Wien 1893 $u(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} F(\nu/T) \nu^3$
(NP 1911)

$$F(x \gg 1) \sim e^{-cx}$$

- Planck 1900 $u(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \nu^2$ $\langle E \rangle$



Annahme: $E_n = nh\nu$ „... ein Akt der Verzweiflung...“

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$

„... eine rein formale Annahme, ich dachte mir eigentlich nicht viel dabei ...“

Albert Einstein 1879-1955

Nobelpreis Physik 1921



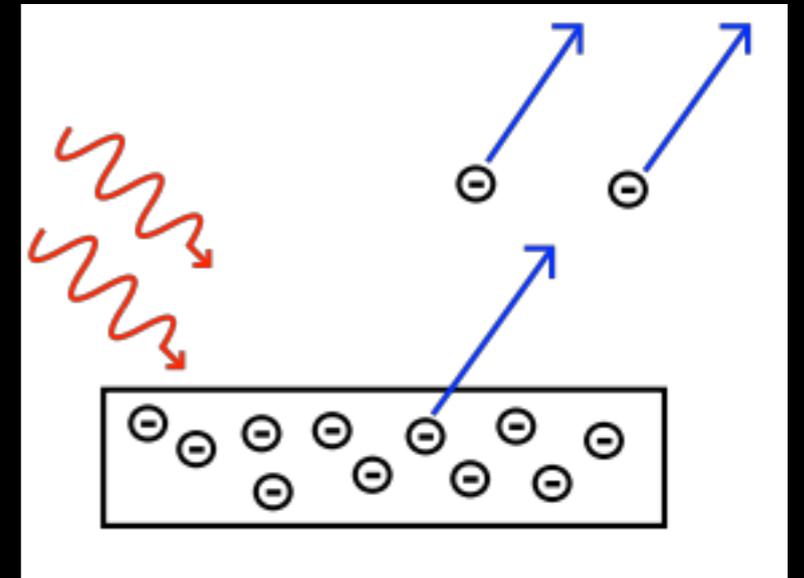
- 1905 Doktorat in Physik, Universität Zürich
- 1905 *annus mirabilis*: Photoeffekt, Brownsche Bewegung, Relativitätstheorie, $E=mc^2$
- postuliert Lichtquanten (Photonen)
- Idee wird von Planck und anderen abgelehnt, Akzeptanz nach Messungen des Photoeffekts (Millikan, 1916) und Compton-Effekts
- 1906 anomale Spezifische Wärme von Festkörpern



A. Einstein 1905

Photoelektrischer Effekt

- entdeckt 1887 von Heinrich Hertz
- Elektronen (e^-) werden von elektromagnetischer Strahlung (z.B. Röntgen) aus Metall (z.B. Li) gelöst



- ➡ Energie einzelner e^- unabhängig von Intensität der Strahlung
- ➡ Anzahl e^- erhöht sich mit Intensität der Strahlung
- ➡ Energie einzelner e^- hängt von Frequenz der Strahlung ab
- sehr schwierig mit klass. ED zu erklären (Maxwell-Theorie)
- Ausweg (Einstein): $E = h\nu - A$
- Experiment: Millikan 1916. Unabhängige Bestimmung von h .

Spez. Wärme v. Festkörpern

- makroskopisches System mit kanonischen Variablen q_i, p_i
 - W'keit, System im Phasenraumvol. $q_i \dots q_i + dq_i, \dots$? Boltzmann:
$$P(q_1, \dots, q_S, p_1, \dots, p_S) dq_1 \dots dq_S dp_1 \dots dp_S = e^{-H(q_1, \dots, q_S, p_1, \dots, p_S)/kT}$$
 - Äquipartitionsgesetz (Dulong-Petit) $H = \sum_i (\alpha_i q_i^2 + \beta_i p_i^2)$
$$U = \langle H \rangle = \frac{1}{2} kT \sum_i (\alpha_i + \beta_i)$$
 - spez. Wärme $c_V = \frac{\partial U}{\partial T} = \text{const.}$
- stimmt bei tiefen Temperaturen nicht!
- Einstein: einfaches Modell für Gitterschwingungen $c_V \sim e^{-T_E/T}$
 - Debye: besseres Modell $c_V \sim (T/T_D)^3$



Niels Bohr

1885-1962

Nobelpreis Physik 1922



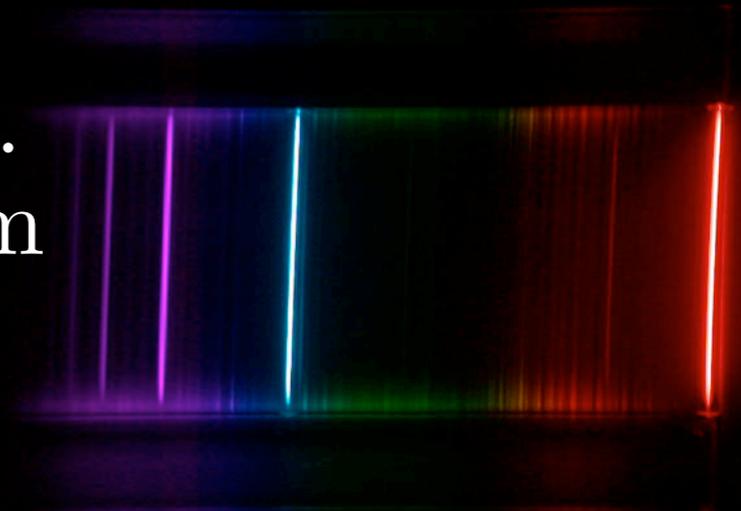
- Postdoc bei J.J.Thomson (Trinity College, Cambridge) und Ernest Rutherford (Manchester)
- gründet 1921 Institut für Theoretische Physik (heute Niels Bohr Institut) an der Universität Kopenhagen mit Unterstützung der Carlsberg Brauerei
- flieht im 2. Weltkrieg über Schweden und England in die USA, am Bau der US Atombombe beteiligt
- Sohn Aage Bohr, NP in Physik 1975

Bohr'sches Atommodell

- erhitztes Gas emittiert Licht mit charakteristischem Spektrum

- Balmer 1885 $\lambda = \frac{n^2}{n^2 - 4} \lambda_0$ $n = 3, 4, 5, \dots$
 $\lambda_0 = 364.6 \text{ nm}$

- Rydberg 1888 $\frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$



- Bohr 1913

- Werte möglicher Energie sind quantisiert: E_1, E_2, \dots

- Atom emittiert Licht bei Übergang von einem Energiezustand (n) in einen anderen (m), wobei $h\nu = E_m - E_n$

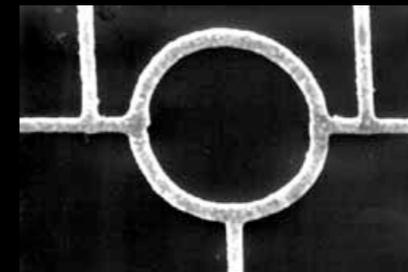
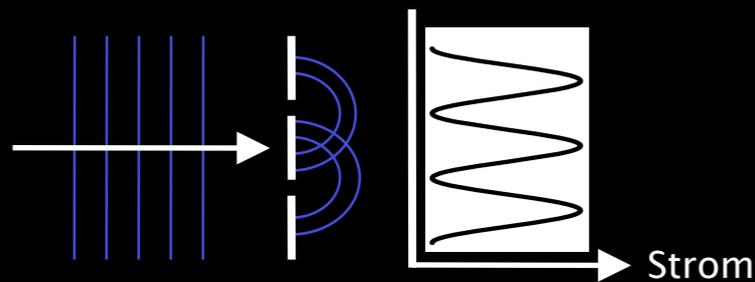
- Atom in stationärem Zustand bewegt sich gem. klass. Mechanik

- $n \gg 1$: Konsistenz mit klassischer Physik (Korrespondenzprinzip)



Louis de Broglie 1892-1987

Nobelpreis Physik 1929



Aharonov-Bohm Ring
ø 800 nm, Breite 70 nm
Ch. Schönberger
(Basel)

- Bohr-Sommerfeld: Quantisierung bei periodischer Bewegung
- 1924 Doktorarbeit über Elektronenwellen, allg. Materiewellen

$$p = \hbar k$$

- Anwendung: Elektronenmikroskop



Wolfgang Pauli

1900-1958

Nobelpreis Physik 1945



- Spin des Elektrons: Atomspektren
- Pauli 1924:
zweiwertiger QM Freiheitsgrad
- + Ausschlussprinzip:
Periodensystem
- Kronig 1925: Eigendrehung
- Goudsmit & Uhlenbeck 1925
- 1927: Erklärung des Stern-Gerlach Versuchs von 1922

Werner Heisenberg



Erwin Schrödinger



Paul Dirac



Max Born



John von Neumann



Pascual Jordan

