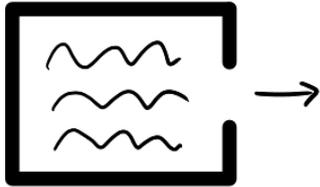
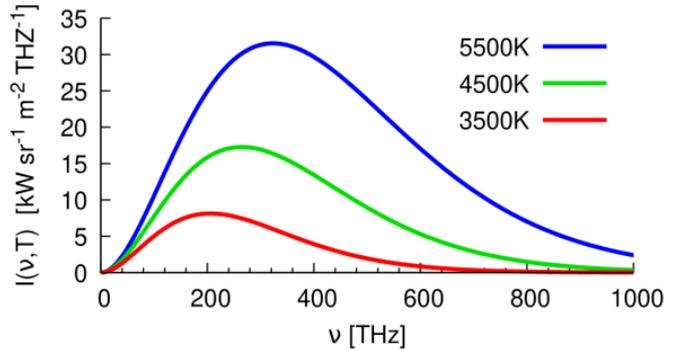


Záření absolutně černého tělesa



dutina o teplotě T



Planckův rozdělovací zákon

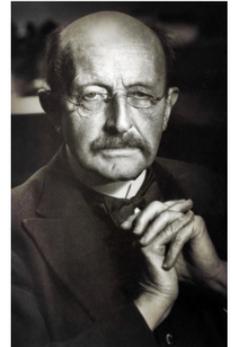
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

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

- předpoklad: energie záření předávána po kvantech

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

- uvedení zákona v roce 1900 považováno za okamžik zrodu kvantové fyziky



Max Planck
(1858-1947)
NC 1918

Ueber eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung; von M. Planck.

(Vorgetragen in der Sitzung vom 19. October 1900.)

(Vgl. oben S. 181.)

Die von Hrn. KURLBAUM in der heutigen Sitzung mitgeteilten interessanten Resultate der von ihm in Gemeinschaft mit Hrn. RUBENS auf dem Gebiete der längsten Spectralwellen ausgeführten Energiemessungen haben die zuerst von den Herren LUMMER und PRINGSHEIM auf Grund ihrer Beobachtungen aufgestellte Behauptung nachdrücklich bestätigt, dass das WIEN'sche Energieverteilungsgesetz nicht die allgemeine Bedeutung besitzt, welche ihm bisher von mancher Seite zugeschrieben worden war, sondern dass dies Gesetz vielmehr höchstens den Charakter eines Grenzgesetzes hat, dessen überaus einfache Form nur einer Beschränkung auf kurze Wellenlängen bez. tiefe Temperaturen ihren Ursprung verdankt.¹⁾ Da ich selber die Ansicht von der Notwendigkeit des WIEN'schen Gesetzes auch an dieser Stelle vertreten habe, so sei es mir gestattet, hier kurz darzulegen, wie sich die von mir entwickelte elektromagnetische Theorie der Strahlung zu den Beobachtungsthat-sachen stellt.

Planck, M. (1900a). "Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung".

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 2: 202–204

Planck, M. (1900b). "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum".

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 2: 237.

Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum; von M. Planck.

(Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.)

(Vgl. oben S. 235.)

M. H.! Als ich vor mehreren Wochen die Ehre hatte, Ihre Aufmerksamkeit auf eine neue Formel zu lenken, welche mir geeignet schien, das Gesetz der Verteilung der strahlenden Energie auf alle Gebiete des Normalspectrums auszudrücken¹⁾, gründete sich meine Ansicht von der Brauchbarkeit der Formel, wie ich schon damals ausführte, nicht allein auf die anscheinend gute Uebereinstimmung der wenigen Zahlen, die ich Ihnen damals mitteilen konnte, mit den bisherigen Messungsergebnissen²⁾, sondern hauptsächlich auf den einfachen Bau der Formel und insbesondere darauf, dass dieselbe für die Abhängigkeit der Entropie eines bestrahlten monochromatisch schwingenden Resonators von seiner Schwingungsenergie einen sehr einfachen logarithmischen Ausdruck ergibt, welcher die Möglichkeit einer allgemeinen Deutung jedenfalls eher zu versprechen schien, als jede andere bisher in Vorschlag gebrachte Formel, abgesehen von der WIEN'schen, die aber durch die That-sachen nicht bestätigt wird.



Max Planck – Revolutionär wider Willen

Am 19. Oktober 1900 beginnt unbemerkt eine Revolution in der Physik. An diesem Tag stellt Max Planck ein neues Strahlungsgesetz vor. Es beschreibt die Energieverteilung der Wärmestrahlung. Später wird klar, dass dieses Gesetz mit der klassischen Physik unvereinbar ist. Es erfordert eine Revolution im Verständnis von Strahlung und Energie: Die Strahlung besteht aus Energiepaketen, den Quanten.

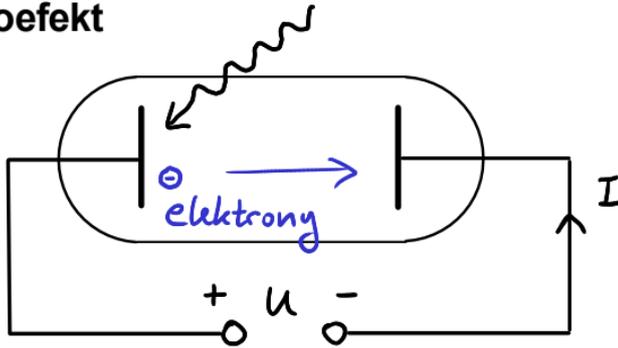


The inaugural award: Max Planck (left) presents Albert Einstein (right) with the Max Planck medal of the German Physical Society, 28 June 1929, in Berlin, Germany.



Max-Planck-Medaille
höchste DPG-Auszeichnung
für Theoretische Physik

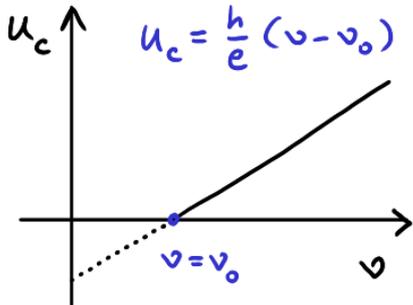
Fotoefekt



- elektrony vyletující vlivem ozařemí z kovové elektrody jsou bržděny napětím U

- kritické napětí U_c

$U > U_c \rightarrow$ proud ustane



1) elektrony vyletují pokud $\nu > \nu_0$
(závisí na materiálu)

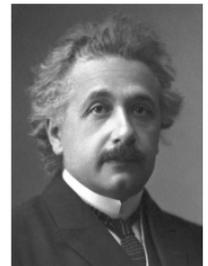
2) lineární závislost U_c na ν

$$U_c = \frac{h}{e} (\nu - \nu_0) \rightarrow h\nu = \phi_0 + eU_c$$

3) $I \sim$ osvětlení

\rightarrow světlo předává energii po kvantech $h\nu$

Albert Einstein (1879-1955) NC 1921

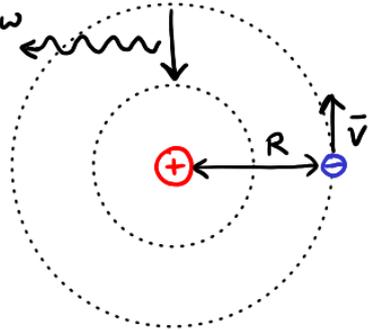


Spektra atomů a Bohrův model

atom vodíku - dvoučásticová soustava z elektronu a protonu se vzájemnou coulombovskou interakcí



Niels Bohr
(1885 - 1962)
NC 1922



$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R^2} = \mu \frac{v^2}{R}$$

redukovaná hmotnost $\mu = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p}$

- rovnice připouští libovolné R , vstoupí ovšem dodatečně

kvantovací podmínka $\oint \vec{p} \cdot d\vec{r} = 2\pi n\hbar \rightarrow \mu v \cdot 2\pi R = 2\pi n\hbar$

→ povolené poloměry trajektorií a povolené energie

$$R_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{\mu e^2} n^2$$

← 0.0529 nm

$$E_n = - \frac{\mu e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

← 13.6 eV

(dávají správné energie přechodů včetně izotopového jevu)

Hypotéza všeobecného vlnově-částicového dualismu

- zaření černého tělesa a fotoefekt ukazovaly na dvojitou povahu světla - vlnově-částicový dualismus
- LdB jej ve své dizertaci zobecnil na další částice

$$\bar{p} = \hbar \bar{k} \quad E = \hbar \omega$$

nerelativistický případ $E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow \omega = \frac{\hbar}{2m} k^2$

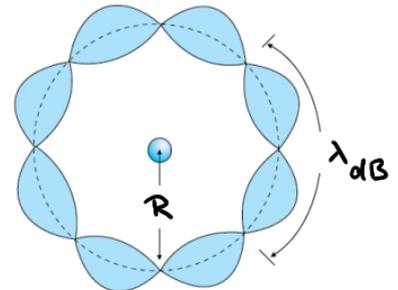
relativistický případ $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \rightarrow \omega = ck$ pro $m = 0$ (foton)

- interpretace kvantovací podmínky u vodičů:

- vlnová povaha elektronů potvrzena jejich difrakcí na krystalu niklu (Davisson & Germer, 1927)



Louis de Broglie
(1892-1987)
NC 1929



Schrödingerova rovnice a vlnová mechanika

1925/6 - E. Schrödinger sestavil vlnovou rovnici, již vyhovovaly deB. vlny a vyřešil ji pro atom vodíku

nestacionární SR

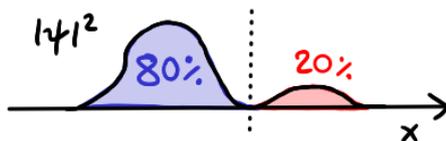
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

stacionární SR

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi = E\Psi$$

- interpretace vlnové funkce

$|\psi(\vec{r}, t)|^2$ je hustota pravděpodobnosti výskytu částice v různých místech prostoru



Erwin Schrödinger
(1887 - 1961)
NC 1933



Max Born
(1882 - 1970)
NC 1954

Maticová formulace kvantové mechaniky

- paralelní útok na tajemství kvantového světa - rok 1925

- 1) W. Heisenberg řeší kvantově mechanicky 1D HO a vyhýbá se přitom používání trajektorií, pracuje s kvantovými přeskoky mezi stavy
- 2) M. Born v nich rozpoznává matice a s P. Jordanem a později i W.H. formulují maticovou mechaniku
- 3) 1926 - W. Pauli pomocí maticové mechaniky popsal atom vodíku



Werner Heisenberg
(1901-1976)
NC 1932



Max Born
(1882-1970)
NC 1954



Pascual Jordan
(1902-1980)



Wolfgang Pauli
(1900-1958)
NC 1945

Abstraktní formalismus

Hilbertův prostor \mathcal{H}

$$\psi(x,t) = \langle x | \psi(t) \rangle$$

$$\varphi(k,t) = \langle k | \psi(t) \rangle$$

$$\{c_n(t) = \langle n | \psi(t) \rangle\}$$

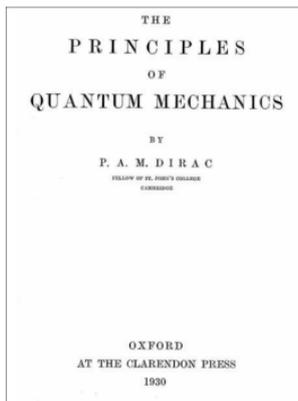
stav $|\psi(t)\rangle$

$$\text{Schr.r.: } i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$



Paul Dirac
(1902 - 1984)

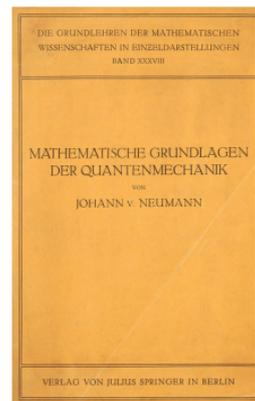
NC 1933



1930



John von Neumann
(1903 - 1957)



1932