

VAROVÁNÍ

Přemýšlení o kvantové mechanice způsobuje nespavost

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

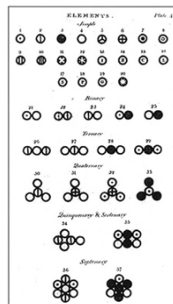
1

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

2

John Dalton atom vstupuje do chemie



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

3/32

D.I.Mendělejev periodický systém prvků

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H																		
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	Uu	Uu	Uu	Uu



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa 4/32

Objevitelé spekter atomů



- Robert Bunsen
(30. 3. 1811 – 16. 8. 1899)
chemik
- Gustav Kirchhoff
(12. 3. 1824 – 17. 10. 1887)
fyzik

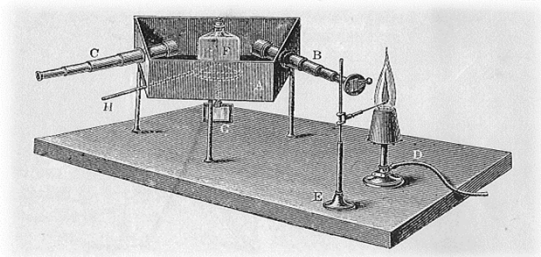
Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa 5

Bunsenův kahan



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa 6

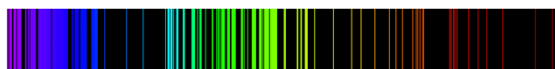
První spektrometr Bunsena a Kirchhoffa



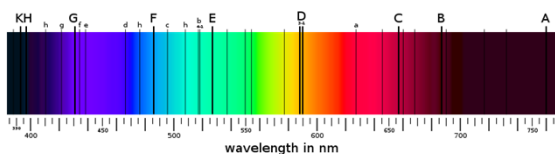
Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

7

Emisní a absorpční spektra



Emisní spektrum železa



Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

8

Joseph John Thomson 18. 12. 1856 – 30. 8. 1940

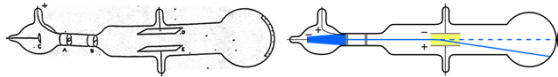


- Objevitel elektronu
- Spolutvůrce hmotové spektroskopie
- [Nobelova cena za fyziku 1906](#)

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

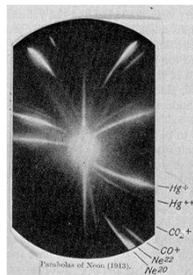
9

Katodové paprsky a elektron



- Katodová trubice (náčrt J. J. Thomsona)
- Chod elektronů v katodové trubici při zapnutí vychylovacího napětí
- [historie objevu elektronu](#)

Hmotový spektrograf



Fotografická deska ukazující isotopy neonu Ne^{20} a Ne^{22}

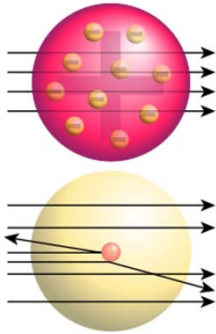
Ernest Rutherford

(30. 8. 1871 – 19. 10. 1937)



- Zabýval se radioaktivitou
- [Objevil atomové jádro](#)
- Vychoval mnoho vynikajících fyziků
- [Nobelova cena za chemii 1908](#)

Geigerův – Marsdenův experiment



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

13

Otázky kolem atomů a molekul

- Chemikové (19. století)
 - Co jsou a jak vypadají atomy?
 - Jak vznikají, proč a jak reagují molekuly?
- Fyzikové (20. století)
 - Existence, struktura a stabilita atomů
 - Struktura spekter atomů a molekul
 - Platnost klasické fyziky v mikrosvětě

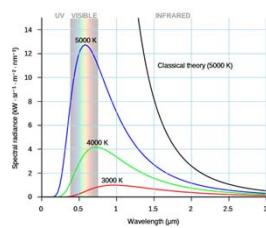
Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

14

Absolutně černé těleso



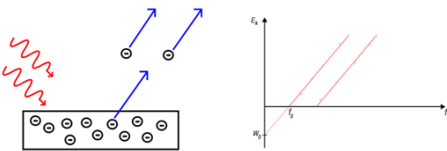
Max Planck



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

15

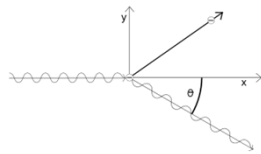
Fotoefekt



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

16

Comptonův jev



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

17

Délky, energie a počty v mikrosvětě

- Vlnová délka žlutého světla:
 $0,000\ 000\ 5\ \text{m} = 5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$
- Průměr atomu: $0,000\ 000\ 000\ 1\ \text{m} = 1 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$
- Průměr jádra: $0,000\ 000\ 000\ 000\ 001\ \text{m} = 1 \cdot 10^{-15}\ \text{m}$
Jádro ~ fotbalový míč, atom ~ Praha
- E. na ohřátí 1 litru vody o 1 stupeň
 $\sim 4\ 000\ \text{J} = 4 \cdot 10^3\ \text{J}$
- E. ch. vazby $\sim 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 72\ \text{J}$
 $= 7,2 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 4,5\ \text{eV}$ (H_2)
- „Žlutý“ foton $\sim 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 4\ \text{J}$
 $= 4 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 2,5\ \text{eV}$
- Ve 12 g uhlíku je $\sim 6 \cdot 10^{23}$ atomů (Avogadrovo číslo)

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

18

Jak měřit v mikrosvětě ?

- Nemáme smysly schopné vnímat mikrosvět
- Problém měřidel:
Jak vyrobit „pravítka“ na atom ?
- Neostré hranice objektů:
Kde končí atom?
- Neumíme izolovat systém od okolí
- Měření vždy ovlivní to, co měříme

Experiment v mikrosvětě

- Měření způsobuje obrovské změny
- Jedno měření = jedno číslo
- Opakování stejného měření dává různá čísla
- Statistické zpracování výsledků:
 - četnost výsledků jednotlivých měření
 - střední hodnota = průměr všech výsledků

Matematický formalismus

- Liší se od nekvantové fyziky
- Základem je statistický a pravděpodobnostní popis
- Vlnová funkce, operátory, ...
- Několik ekvivalentních formalismů (reprezentací), vhodných pro různé situace

Vlna nebo kulička?

Světlo jako vlna

Fotoefekt
Albert Einstein
(1905)

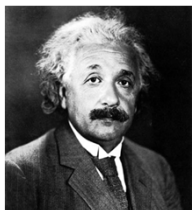
Světlo jako
kulička (foton)

Elektron jako vlna

de Broglie (1924)
Germer, Davisson (1927)
G. Thompson

Elektron jako kulička

Teorie



A. Einstein



Louis de Broglie

Experiment

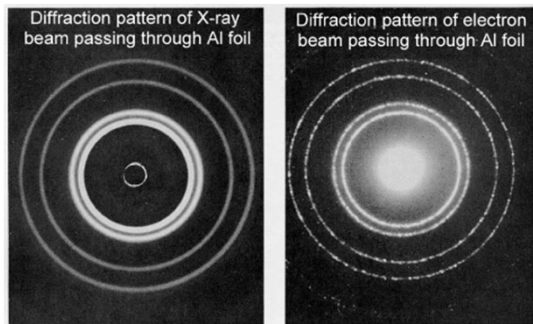


George Paget
Thomson



Lester Germer a Clinton
Joseph Davisson

Vlnové vlastnosti částic



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa 25

Vlnové vlastnosti mikroobjektů

- Hmotné objekty (elektrony, atomy, molekuly, ...) vykazují vlnové vlastnosti
- vlnová délka elektronu (dle de Broglieho)

$$\lambda = h/p = h/(mv)$$
- Elektron urychlený napětím 1V

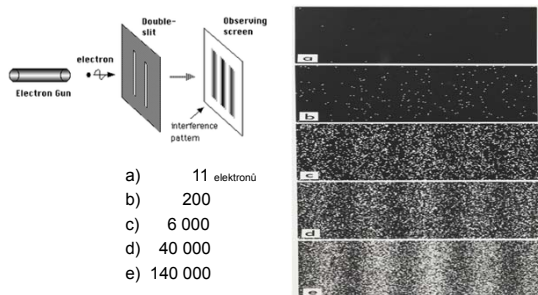
$$\lambda = 0,000\,000\,001\,2\text{ m}$$

$$= 1,2 \times 10^{-9}\text{ m}$$

$$\cong 10\text{krát chemická vazba}$$

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa 26

Dvojtěrbinový experiment - simulace



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa 27

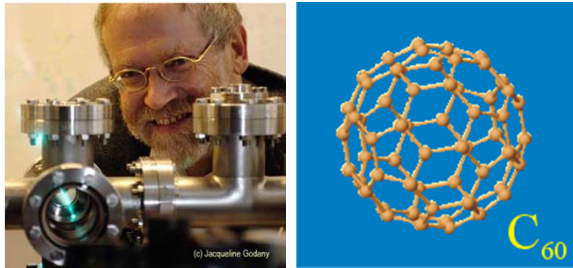
Ohyb (nejen) molekul fullerenu na mřížce

- Ohyby elektronů, neutronů apod. na (krystalové) mřížce podrobně testovány 20. až 80. letech 20. století
- **Fulleren** – komplikovaný objekt, 1 300 000× těžší než elektron, **bude také vykazovat vlnové chování ???**
- Prof. Anton Zeilinger (Universität Wien), <http://www.quantum.at>

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

28

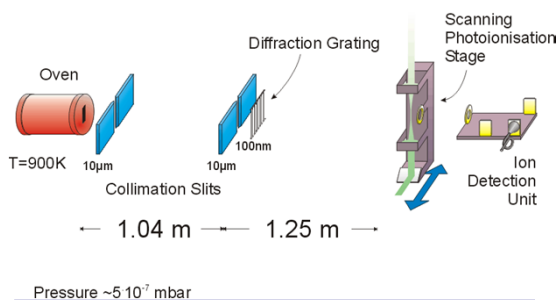
Ohyb molekul fullerenu na mřížce



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

29

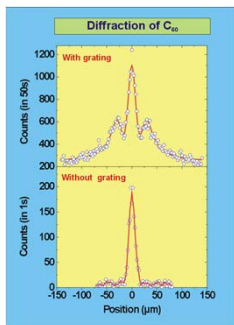
Ohyb molekul fullerenu na mřížce



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

30

Ohyb molekul fullerenu na mřížce



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

31

Tunelový jev

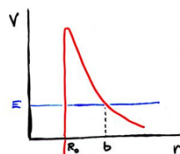
- Částice mohou projít bariérou (i takovou, kterou by „klasické“ částice neprošly)
- Množství prošlých částic závisí na tloušťce bariéry exponenciálně, tj. **malé změny tloušťky znamenají velké změny v počtu prošlých částic** = velké změny v době života

Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

32

Alfa rozpad

- Z jader vylétávají alfa částice = jádra helia
- Velké rozdíly v době života
miliardtiny sekundy až miliardy let
- Nukleony v jádře
 - uvnitř se pohybují volně
 - nemohou ven (bariéra)



Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice – Vojtěch Kapsa

33

Nerozlišitelnost částic

- Pokud si částice stejného druhu (např. elektrony) pro výpočet očíslojí, nesmí předpověděné experimentální výsledky záviset na způsobu očíslování
- Dvě třídy částic: **fermiony** (elektron, proton, neutron, ...) a **bosony** (foton, ${}^2_4\text{He}$, ...)
- Nerozlišitelnost je odpovědná např. za chemickou vazbu, supravodivost a supratekutost

Relace neurčitosti

- Existují dvojice kanonicky sdružených veličin, např.
 - x-složka souřadnice a x-složka hybnosti (x, p_x)
 - x-složka momentu hybnosti a y-složka momentu hybnosti (l_x, l_y)
- Principiálně nemohou současně přesně změřit obě kanonicky sdružené veličiny
- Mírou nepřesnosti jsou relace neurčitosti

Principy kvantové teorie

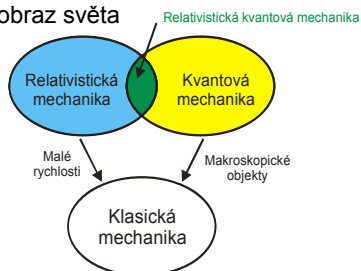
- Chování částic se někdy více blíží chování „kuliček“, jindy zase „vln“. Nelze ale vést striktní hranici mezi těmito typy chování.
- Často jsou povolené jen některé hodnoty energie i jiných veličin (kvantování).
- Některé charakteristiky nelze současně určit s libovolně vysokou přesností (relace neurčitosti).

Principy kvantové teorie

- Obvykle nelze předpovědět jednoznačně výsledek konkrétního měření. Lze určit jen možné výsledky, jejich četnost a střední hodnotu.
- Měření často zničí původní stav.
- Částice stejného druhu jsou nerozlišitelné.

Kvantová mechanika

- Speciální a obecná teorie relativity dovršily klasický obraz světa



Zdroje informací

- stránky profesora Pavla Cejnara: <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/cejnar/prednasky/nefyz.html>
- Stránky RNDr. Zdeňky Koupilové <http://kdf.mff.cuni.cz/~koupilova/>
- stránky profesora Zeilingera: <http://www.quantum.at>
- Feynmanovy přednášky z fyziky
- Halliday, Resnick, Walker: Fyzika
- Polkinghorne: Kvantový svět
- Malíšek: Co víte o dějinách fyziky
- Štoll: Dějiny fyziky
