

Kvantová fyzika



24.1 Planckova hypotéza



Nernst, Einstein, Planck, Millikan, Laue - 1931

24.1 Planckova hypotéza

Max Planck (1858 – 1947)

- 1899 – objev kvantové konstanty h a přirozených jednotek
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Veličina	Jednotka	Hodnota v SI ^[1]
Planckova délka	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1,616\ 255(18) \times 10^{-35} \text{ m}$
Planckův čas	$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5,391\ 247(60) \times 10^{-44} \text{ s}$
Planckova hmotnost	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2,176\ 434(24) \times 10^{-8} \text{ kg}$
Planckův náboj	$q_P = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$	$1,875\ 546\ 038\ 42(15) \times 10^{-18} \text{ C}$
Planckova teplota	$T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}}$	$1,416\ 784(16) \times 10^{32} \text{ K}$

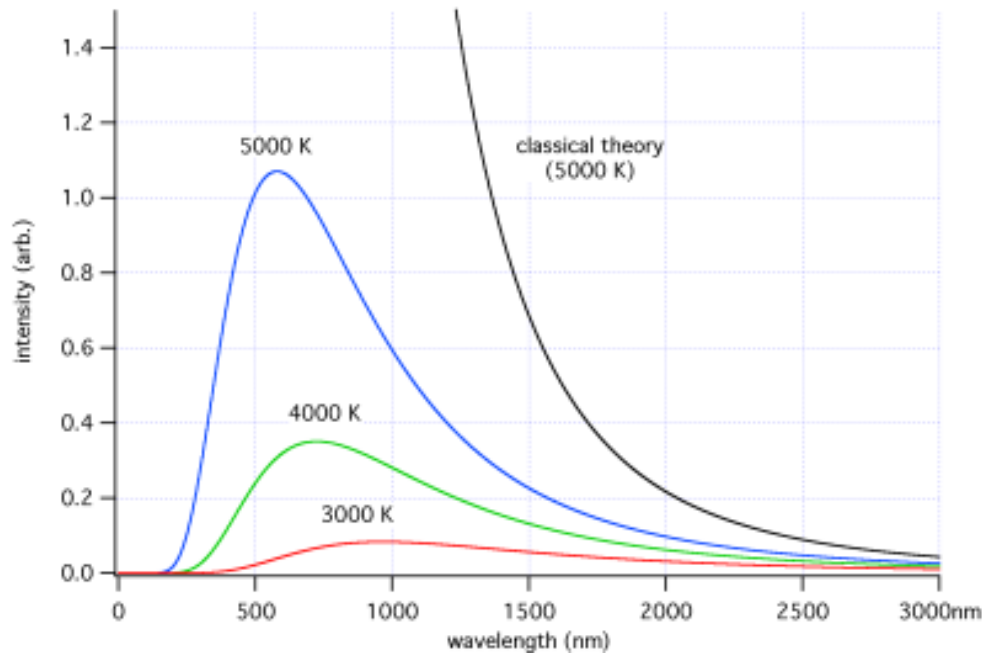
Planckova hustota: $\rho_P = \frac{m_P}{l_P^3} = \frac{c^5}{\hbar G^2} \approx 5,15500 \cdot 10^{96} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Planckův tlak: $P_P = \frac{F_P}{l_P^2} = \frac{c^7}{\hbar G} \approx 4,63309 \cdot 10^{113} \text{ Pa}$

24.1 Planckova hypotéza

Max Planck (1858 – 1947)

- 1900 – zákon vyzařování černého tělesa, NC 1918



- Energie není vyzařována spojitě, ale po částech, tzv. kvantech energie – celočíselné násobky hf
- 1 eV (elektronvolt) = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J**

Spektrální hustota vyzařování - H

$$H = \frac{2h}{c^2} f^3 \cdot e^{-\frac{hf}{kT}}$$

Energie fotonu - E [E] = J = eV

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

Hybnost fotonu - p

$$p = mc = \frac{h}{\lambda}$$

24.2 Fotoelektrický jev

Albert Einstein (1858 – 1947)

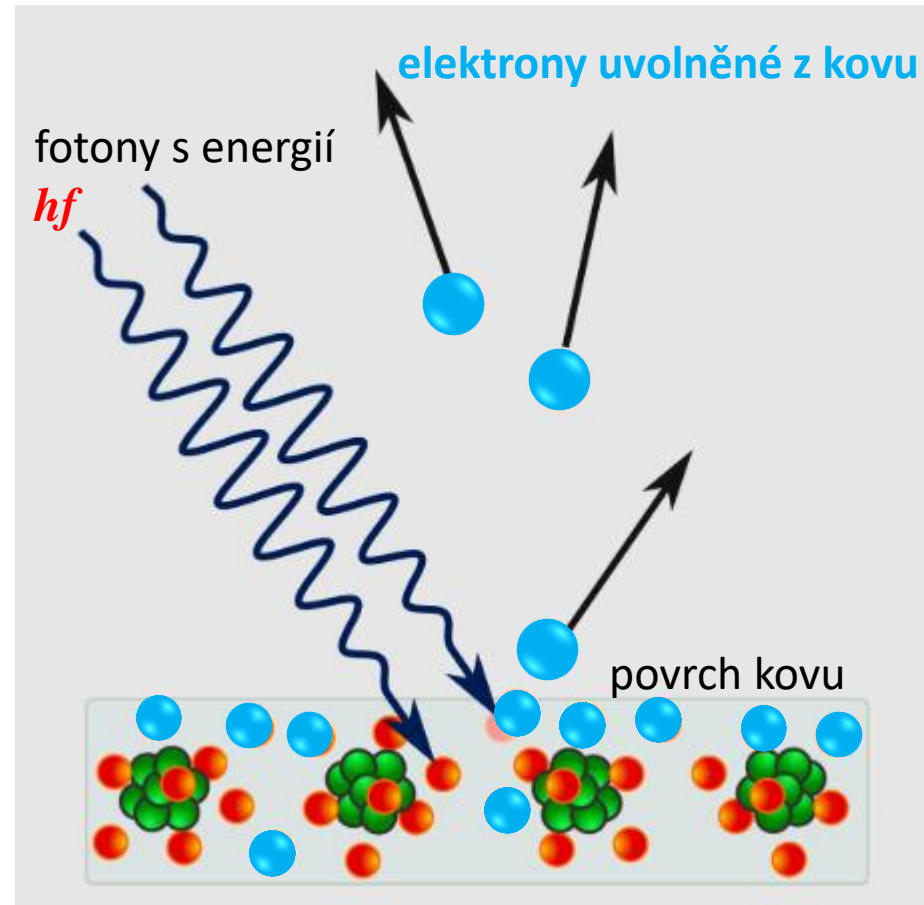
- 1905 – vysvětlení fotoelektrického jevu pomocí kvant energie, NC 1921

Vnější fotoelektrický jev

- záření o určité **mezní frekvenci** f_m dopadající na kov uvolňuje z kovu elektrony (pro $f < f_m$ fotoefekt nenastane)
- **Př.:** Zn osvětlený UV se nabije kladně
- počet uvolněných elektronů je úměrný intenzitě záření
- **kinetická energie elektronů** je přímo úměrná frekvenci záření a **nezávisí na intenzitě záření**

Rovnice fotoelektrického jevu

$$hf = W_v + \frac{1}{2} m_e v^2$$



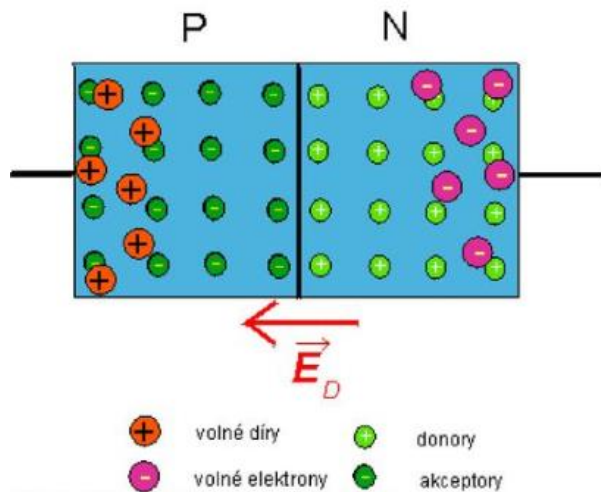
W_v - výstupní práce elektronu z kovu

24.2 Fotoelektrický jev

Vnitřní fotoelektrický jev

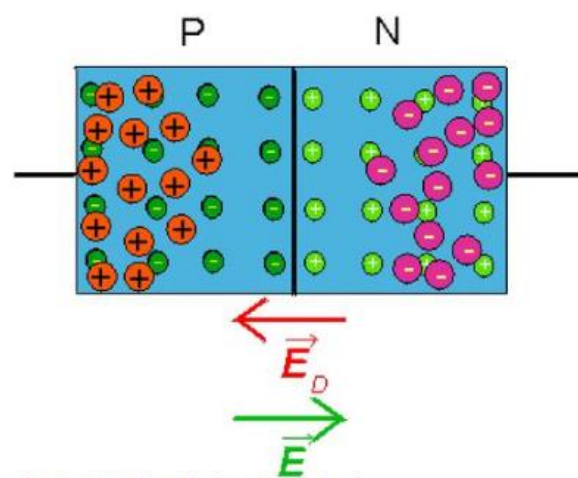
- záření o určité **frekvenci** f_m dopadající na polovodič uvolní ze struktury polovodiče (Si) elektrony
- **Př.:** fotodioda, fotorezistor, FVE
- elektrický proud je úměrný intenzitě záření

Nezapojená fotodioda



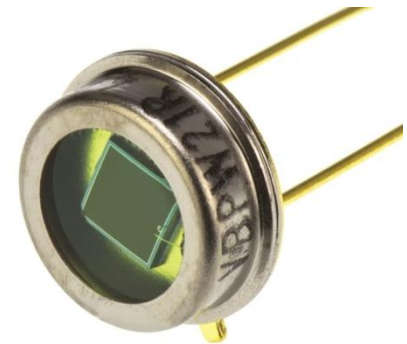
obr. 2: PN přechod v rovnovážném stavu

Zapojená fotodioda



obr. 3: Stav fotodiody při osvětlení

fotodioda

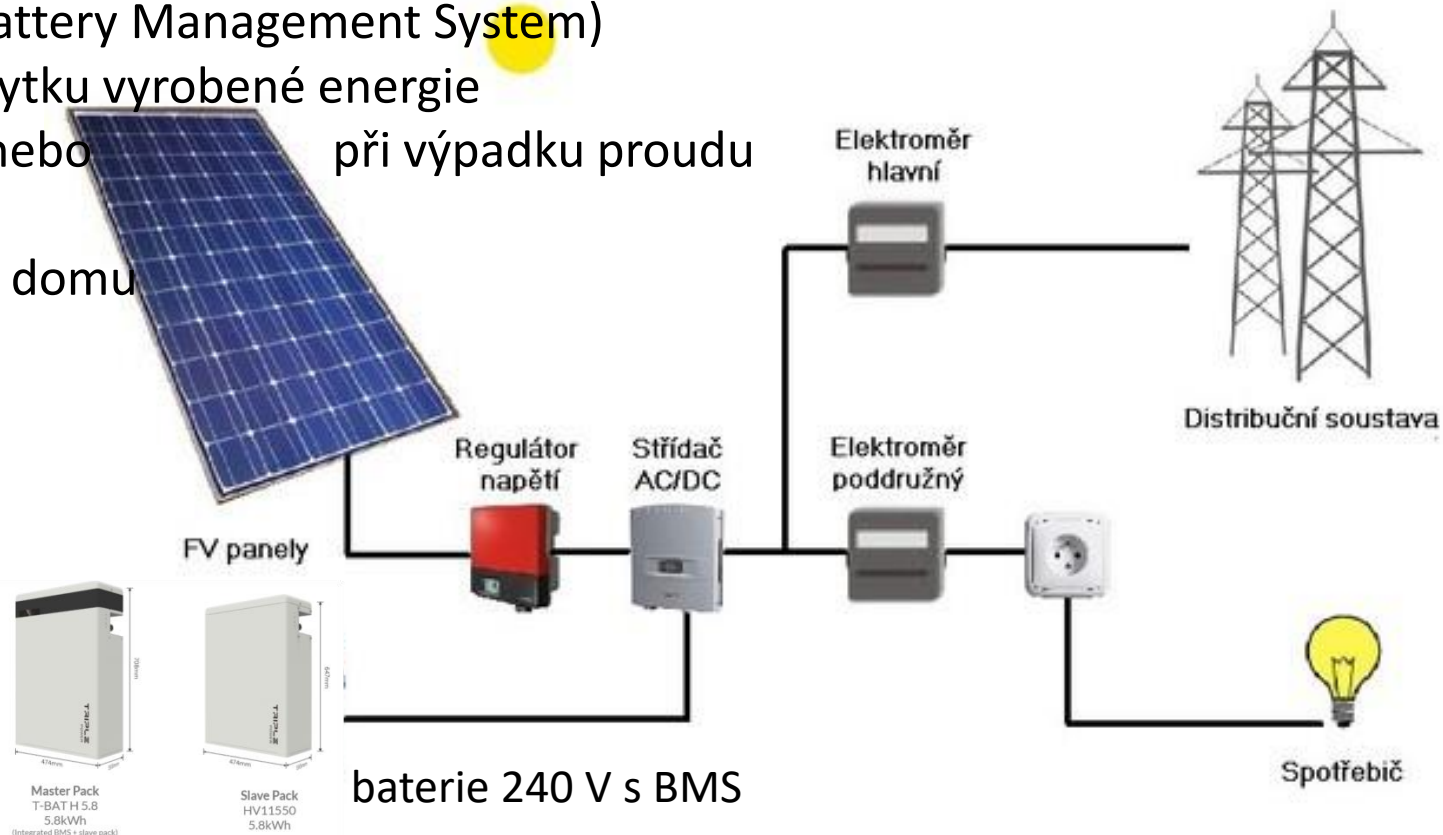


fotorezistor

24.2 Fotoelektrický jev

Princip FVE

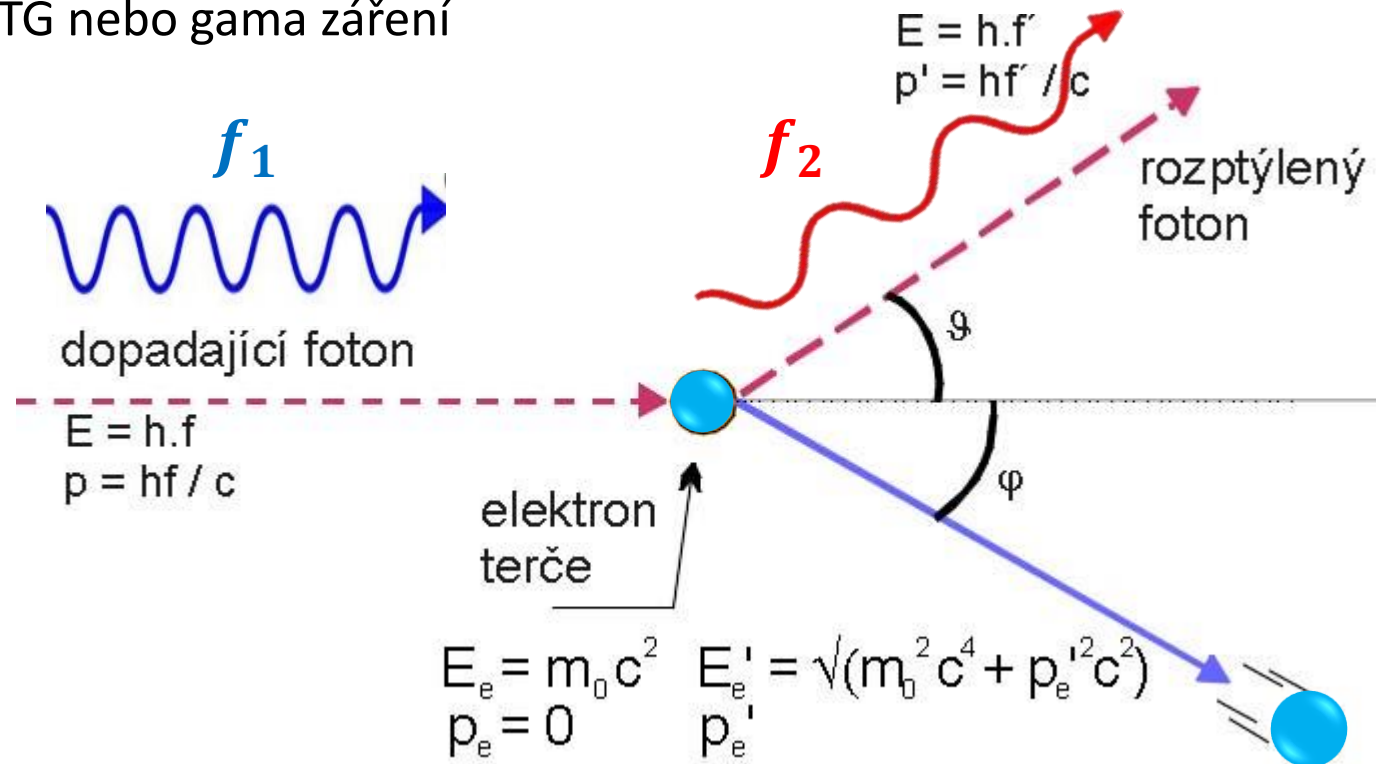
- **fotovoltaické panely** (starší p-type, novější n-type s účinností až 25 %) → složeny z křemíkových článků (malých fotodiód) → na výstupu 1 panelu je stejnosměrné napětí 12 V, 24 V nebo 48 V → panely zapojeny do série: 12 panelů = $12 \cdot 48 = 576$ V
- **střídač** – mění ss napětí na střídavé 3 x 240 V/50 Hz
- **baterie s BMS** (Battery Management System) → ukládání nadbytku vyrobené energie → využití v noci nebo při výpadku proudu
- **4Q elektroměr** → měří spotřebu domu a přetoky do DS



24.3 Částicově-vlnový dualismus

Comptonův jev

- rozptyl RTG záření na grafitové destičce
- po nárazu fotonu s vysokou energií hf_1 na **elektron v klidu** ztratí foton část své energie, kterou předá elektronu → ten získá kinetickou energii
- **rozptýlený foton má** menší energii hf_2 a tedy **větší vlnovou délku**
- **tento jev lze vysvětlit pouze tím, že RTG záření má částicovou povahu**
- jev pozorujeme u RTG nebo gama záření



24.3 Částicově-vlnový dualismus

De Broglieovy vlny

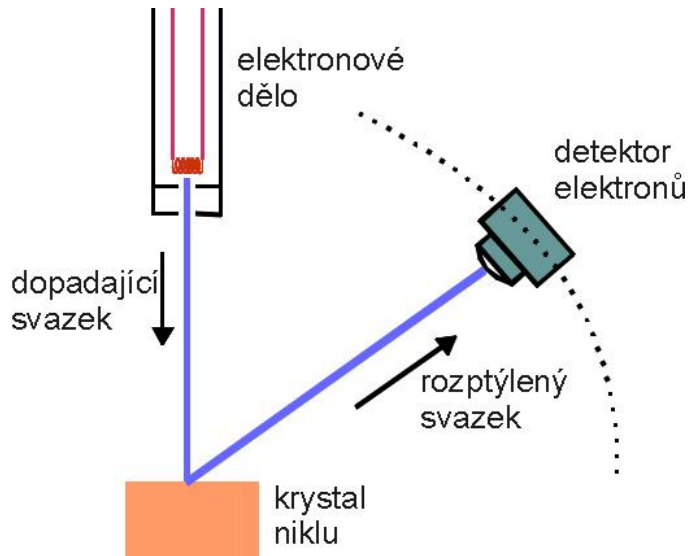
1924 – hypotéza o vlnových vlastnostech nejen fotonu, ale libovolné částice

De Broglieho vlnová délka

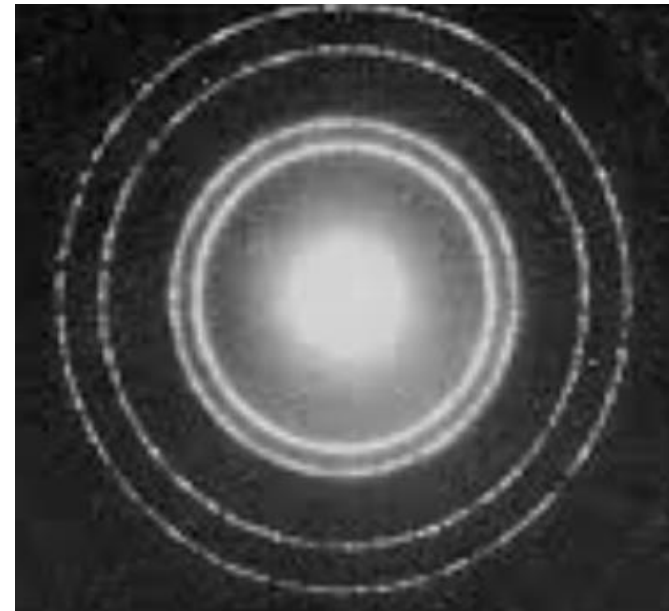
$$\lambda_D = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- pomocí **druhé mocniny de Broglieovy vlny** částice lze určit **pravděpodobnost výskytu částice v určitém místě prostoru**

- 1927: **Davissonův-Germerův experiment:** rozptyl elektronů na monokrystalu niklu



Uspořádání experimentu



Ohybový obrazec dokazující vlnovou povahu elektronů

24.3 Částicově-vlnový dualismus

Heisenbergovy relace neurčitosti

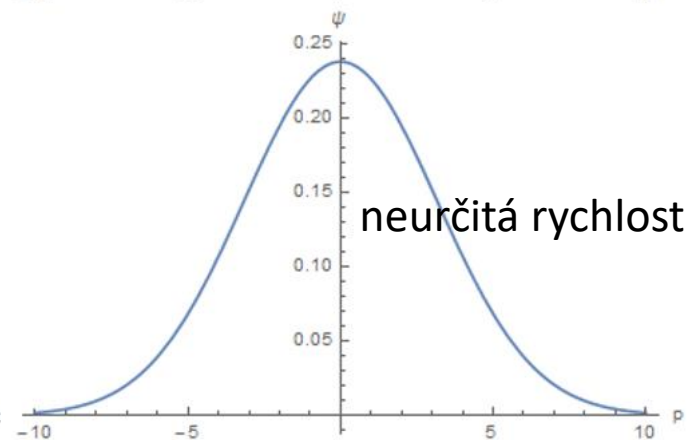
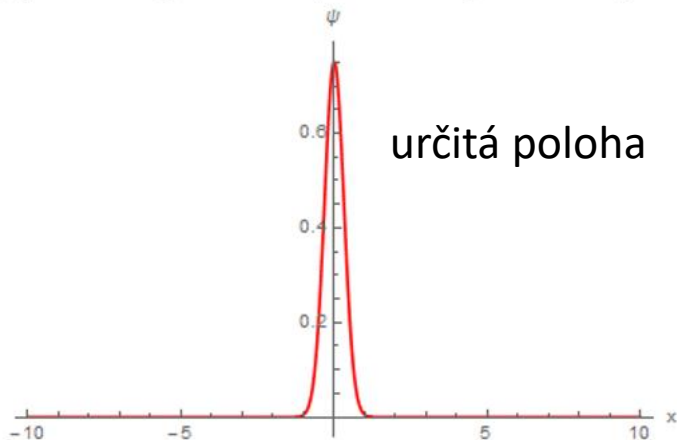
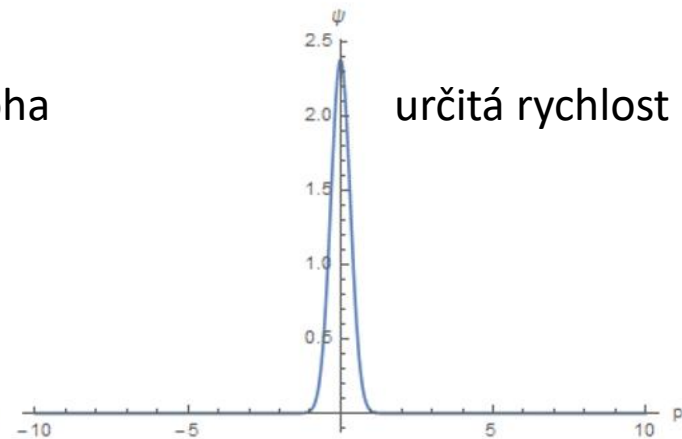
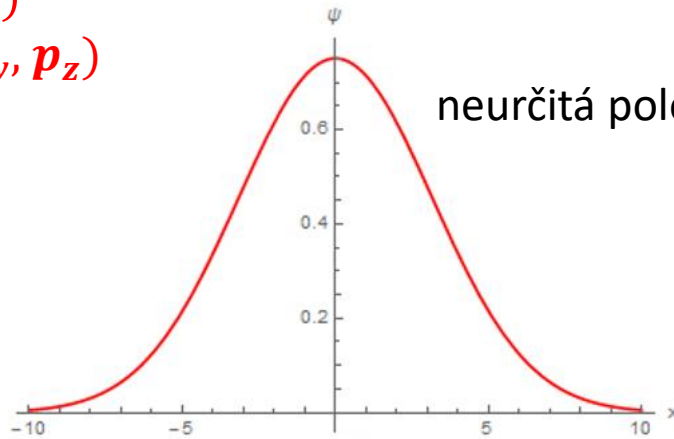
1927 – omezení pohybu částic z pohledu kvantové fyziky

$$\Delta r \Delta p \geq h$$

- čím přesněji změříme polohu, tím neurčitější bude rychlost částice
- čím přesněji změříme rychlost, tím neurčitější bude poloha částice

$$\mathbf{r} = (x, y, z)$$

$$\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$$



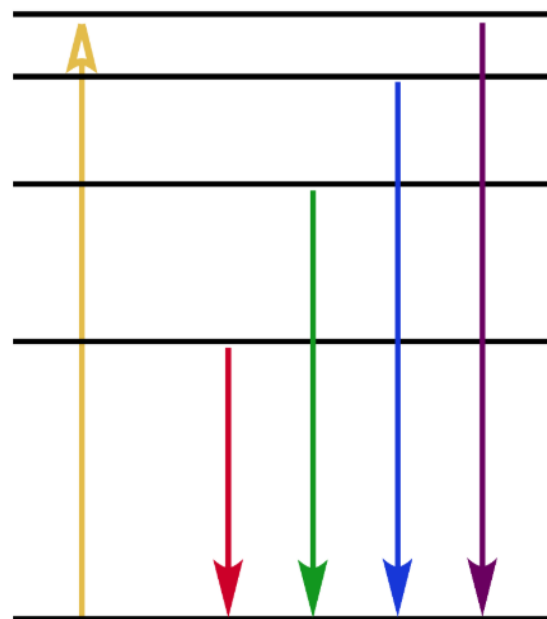
24.4 Emise a absorpce světla. Laser.

Bohrův model atomu vodíku

Emisní spektrum vodíku



$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$$



Excitovaný stav		Základní stav
6	410 nm	2
5	434 nm	2
4	486 nm	2
3	656 nm	2

Absorbovaná energie Emitovaná energie Energetická hladina

- atom H₂ v **základním stavu**
→ $n = 1, E_1 = -13,53 \text{ eV}$
- excitované stavy**
→ $n > 1, E_2 = -3,39 \text{ eV}, E_3 = -1,81 \text{ eV}, E_4 = -0,84 \text{ eV}$
- vlnová délka emitovaného fotonu při přechodu z E_m na E_n

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = E_m - E_n$$

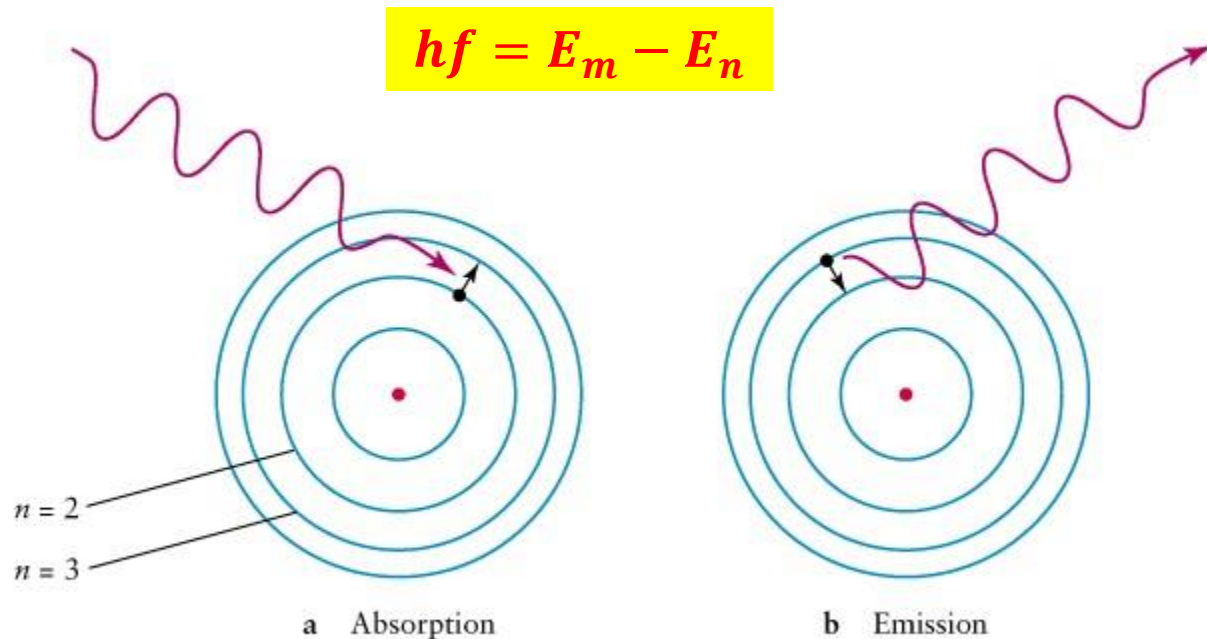
$$\lambda = \frac{hc}{E_m - E_n}$$

- Př. $\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 299792458}{(-0,84 + 3,39) \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} =$
 $= \mathbf{486 \text{ nm}}$

24.4 Emise a absorpce světla. Laser.

Emise a absorpce světla

- nastává při vzájemné interakci světla s látkou
- energie fotonu musí být rovna rozdílu energií daných dvou energetických hladin



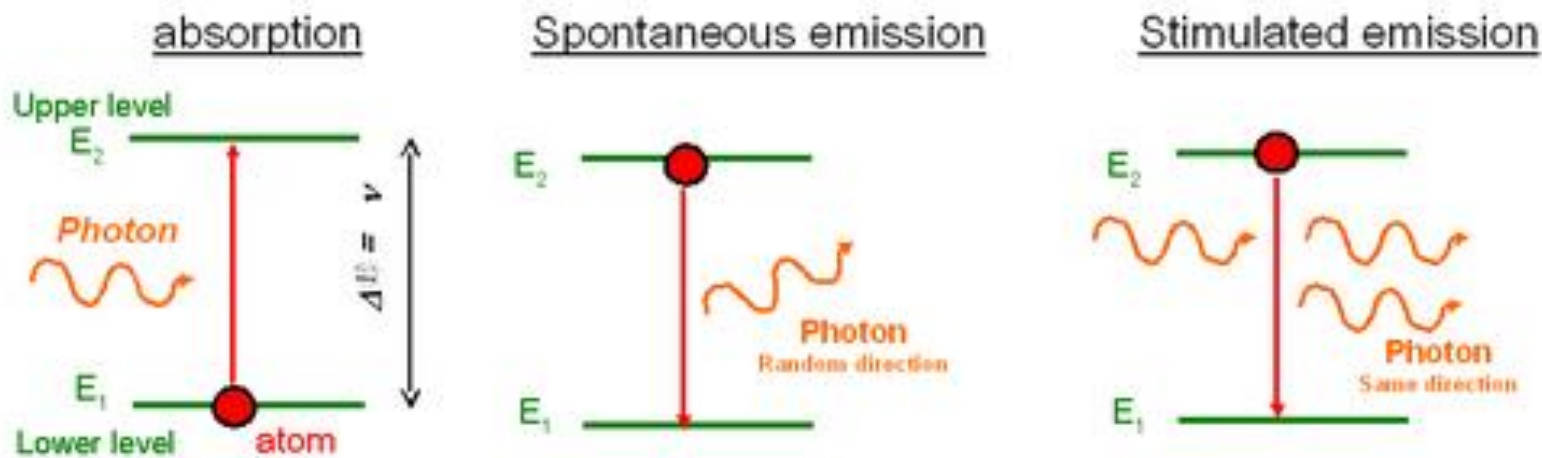
Absorpce fotonu atomem
elektron přejde z nižší na vyšší
energetickou hladinu

Emise fotonu z atomu
elektron přejde z vyšší na nižší
energetickou hladinu

24.4 Emise a absorpce světla. Laser.

LASER

- **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**
- zesílení světla stimulovanou emisí záření
- NC 1964: Basov, Prochorov, Townes
- Pozn.: před laserem již existoval MASER v oblasti mikrovln
- **Stimulovaná emise**: nastává u excitovaných atomů, kdy vlivem vnějšího působení fotonů s energií rovné rozdílu energetických hladin, dojde k přechodu elektronů do základního stavu, přičemž dojde k vyzáření fotonu o stejné frekvenci jakou měl vnější stimulující foton

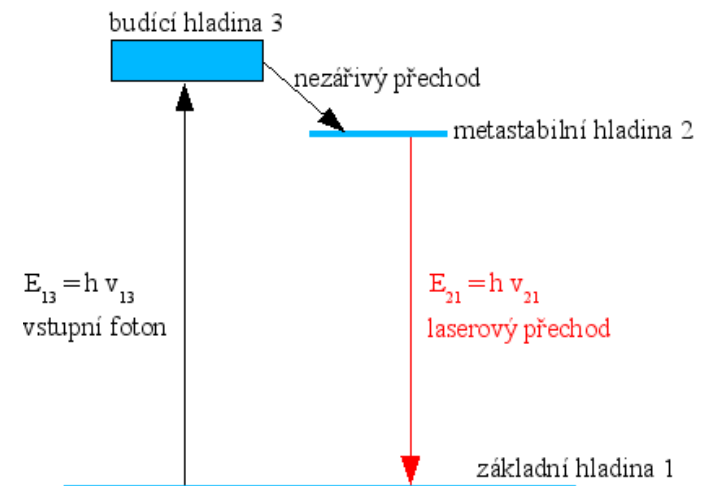
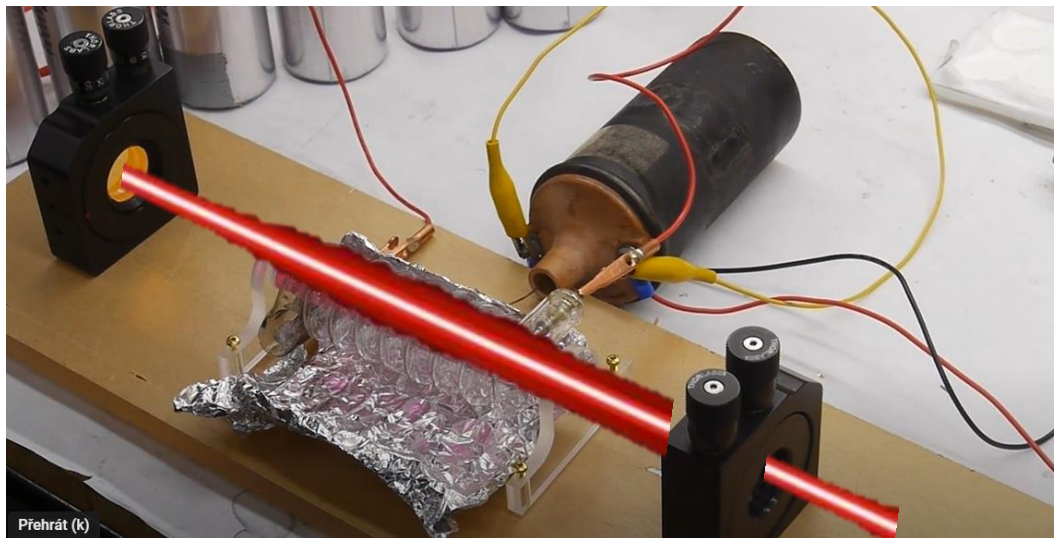
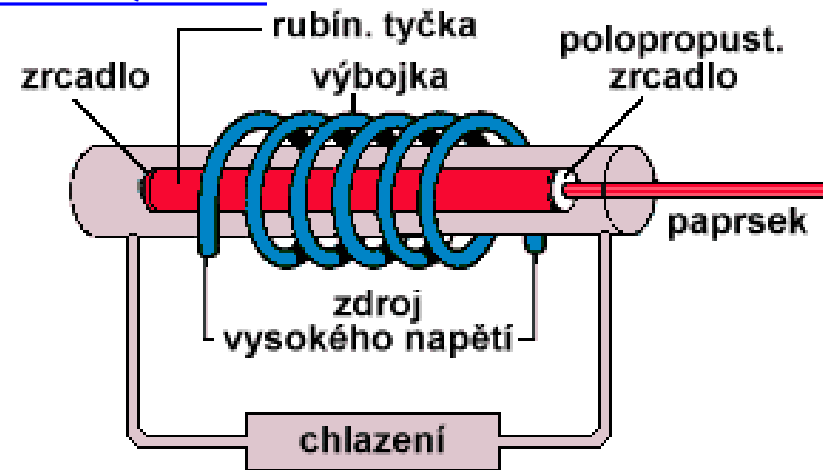


24.4 Emise a absorpce světla. Laser.

Princip rubínového laseru

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=VSdUQ4oNKil>

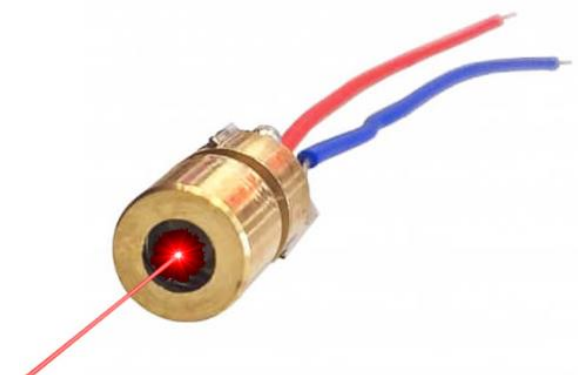
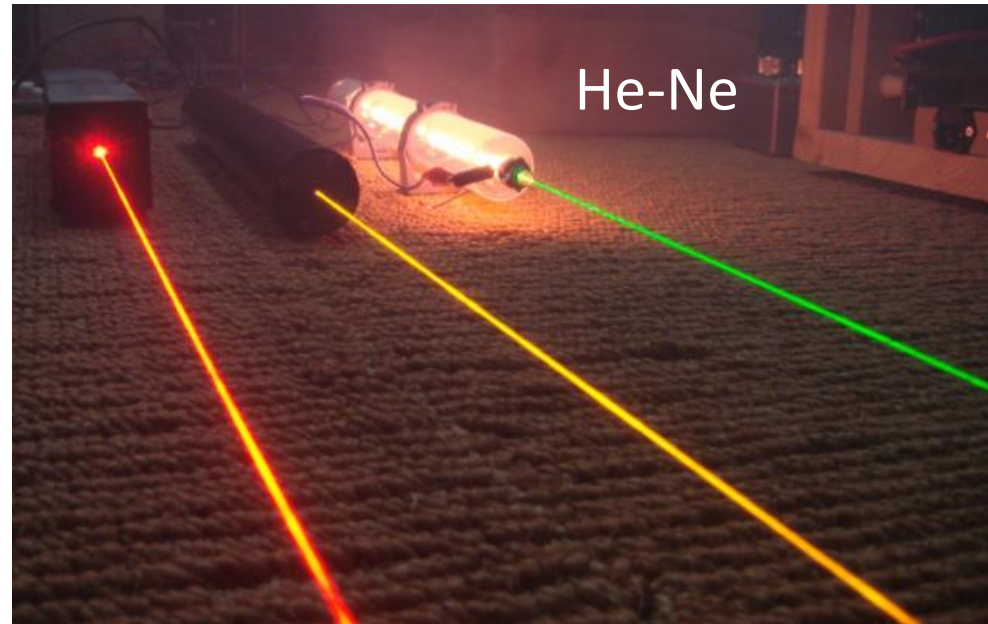
- **pevnotátkový laser – krystal rubínu**
- **dvě rovnoběžná zrcadla – násobí odrazy světla**
- **výbojka – excituje atomy rubínu**
- **metastabilní hladina** – zachytává elektrony ze spontánní emise a následně umožňuje lavinovitý přechod velkého množství elektronů při stimulované emisi



24.4 Emise a absorpce světla. Laser.

Druhy laserů

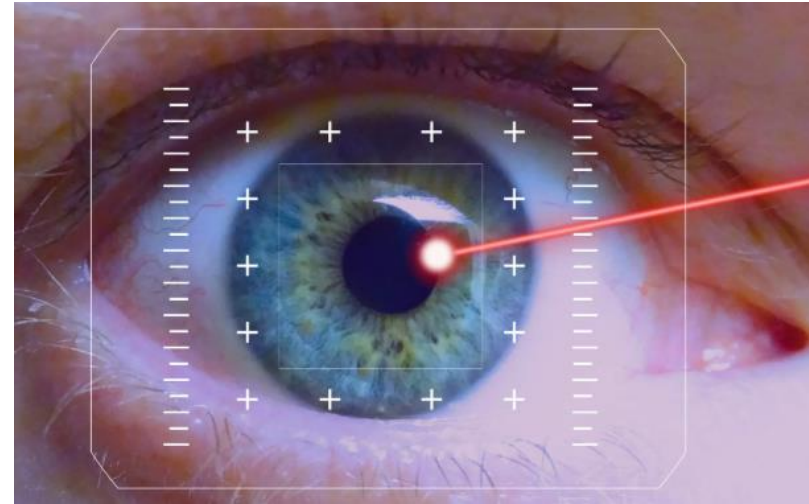
- **pevnolátkový** – krystal rubínu
- **plynný** – He-Ne
- **kapalinový** – dají se přeladit na různou frekvenci
- **polovodičový** – laserová dioda



24.4 Emise a absorpce světla. Laser.

Využití laserů dle typu prostředí

- **pevnolátkový** – řezání a svařování oceli
- **plynný** – CO₂ – řezání, vrtání a svařování kovů
- **kapalinový** – spektroskopie
- **polovodičový** – laserová ukazovátka, školní pomůcky, dálkoměry, medicína



Další využití laserů

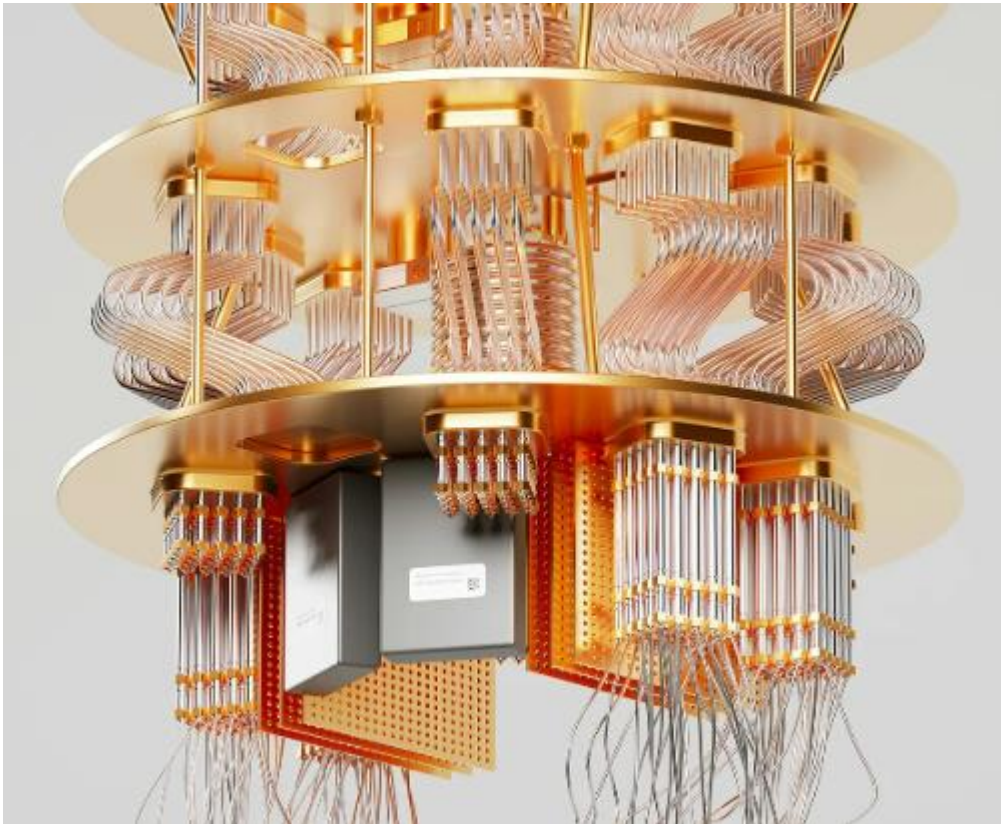
- **Astronomie, geodézie** – měření vzdálenosti družic, Měsíce
- **Archeologie, meteorologie** – LIDAR – skenování povrchu nebo atmosféry laserovým paprskem, lze např. digitálně odstranit horní vrstvy stromů a uvidět základy bývalých staveb (Peru, Mexiko, Egypt, atd. – chrámy, zaniklá města)
- **Vojenské aplikace** – laserově naváděné střely, projekt SDI, laserové dělo LaWS na USS Ponce
- **Elektronika** – CD, DVD, tiskárny, projektory



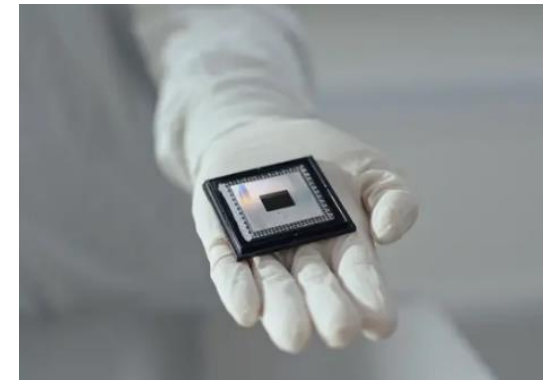
24.5 Kvantová fyzika v praxi

Kvantové počítače

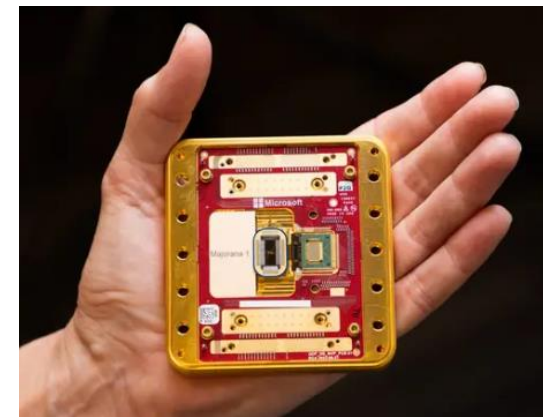
- **qubit** – kvantový bit může mít libovolnou hodnotu mezi 0 a 1 → 10^{28} operací/1s (klasický: 10^{10} op/s)
- **kvantový čip** → **Google Willow (2024)** – početní úlohu trvající nejrychlejšímu super počítači déle než je stáří vesmíru (10^{10} roků = 10^{20} s) vyřešil za 4-5 minut
→ **Microsoft Majorana 1 (2025)** – Majorana 1 musí být uložena v kryogenním zařízení s nepřetržitým chlazením. Qubity jsou v něm udržovány při teplotě pod -270 °C (cca teplota vesmíru).



Kvantový počítač



Kvantový čip Willow



Majorana 1

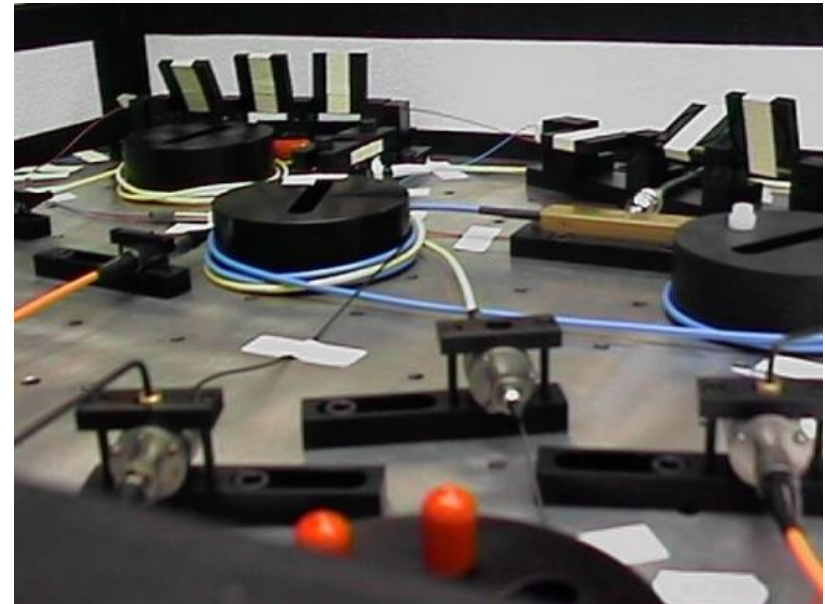
24.5 Kvantová fyzika v praxi

Využití kvantových počítačů

- meteorologie – přesné předpovědi počasí
- zdravotnictví – opravy genetického kódu – prodloužení života v řádu desítek let
- šifrování – okamžité prolomení libovolné šifry
- astrofyzika – řešení kvantových rovnic složitých systémů včetně přesného řešení Einsteinových rovnic gravitačního pole
- nové vědní obory – ve spojení s AI

Kvantová kryptografie

- nejbezpečnější způsob šifrování – používají tzv. **kvantový klíč pro Vernamovu šifru, nepřenáší se zpráva, ale klíč**
- umí odhalit odposlech přenosu zprávy – dojde ke změně kvantových stavů částice (fotonu), která přenáší informaci
- PŘF UPOL
- PŘ.: šifrovací přístroje id Quantique, MagiQ, SECOQC



24.5 Kvantová fyzika v praxi

Kvantová kryptografie

Vernamova šifra

- jednorázová tabulková šifra (1917)
- posun každého znaku zprávy o náhodně zvolený počet míst v abecedě (prakticky nerozluštitelná)
- klíč je dlouhý jako přenášená zpráva a je vytvořen generátorem náhodných čísel
- klíč je jednorázový
- používá se ke kódování hot line mezi USA a Rusem (SSSR)

VERNAMOVA ŠIFRA

TEXT (26 písmen abecedy):

Zpráva:	V	E	R	N	A	M
Klíč:	7	23	11	5	0	16
Šifra:	C	B	C	S	A	C



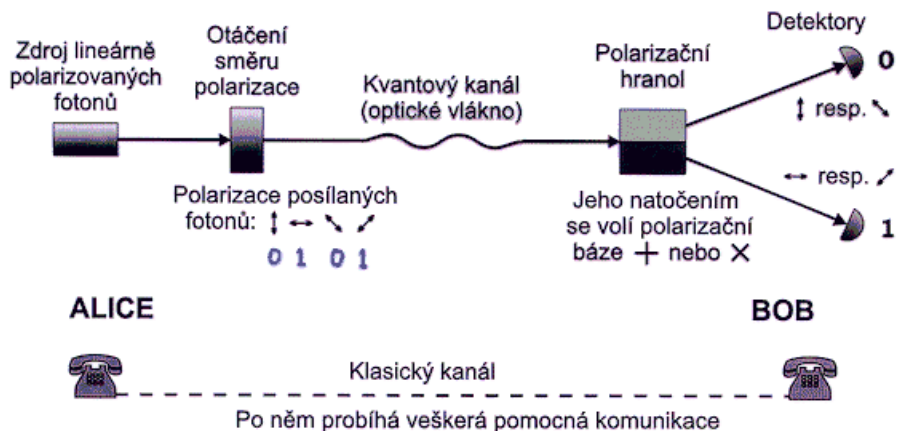
BINÁRNÍ SEKVENCE:

Zpráva:	1	1	1	1	0	0	0	0	↓
Klíč:	1	0	1	0	0	1	1	0	↓↑
Šifra:	0	1	0	1	0	1	1	0	↑

šifrovací a dešifrovací předpis:

11	→	0
10	→	1
01	→	1
00	→	0

(XOR)



24.5 Kvantová fyzika v praxi

Další kvantové aplikace

- **Fotonásobič** – zesílí slabé elmg. záření na měřitelný el. Proud
→ **princip fotoelektrického jevu**
- **CCD snímače** – přeměňuje energii světla na energii el.signálu
→ **princip fotoelektrického jevu**
→ fotoaparáty, videokamery, hvězdářské dalekohledy (4 Mpx/30 cm²)
- **Noktovizor** – princip podobný fotonásobiči. Př.: ozbrojené složky
- **Elektronový mikroskop** – SEM, TEM
- **Kvantové senzory** – využití nanočástic
→ kosmické sondy (mikrogravitace), autonomní vozidla, detektory otřesů, IoT, separace virů
- **Výroba polovodičů**
→ **laserové diody**

