

FYZIKA MIKROSVĚTA 1

KVANTOVÁ FYZIKA

se zabývá mikrofyzikálními objekty.

Atomová fyzika (fyzika elektronového obalu)

- popisuje stavbu atomu a chemické vazby,
- zařazuje prvky do periodické soustavy,
- vysvětluje spektra prvků, emisi a absorpci světla.

Jaderná fyzika se zabývá

- stavbou atomových jader,
- jadernými reakcemi,
- radioaktivitou.

Fyzika elementárních částic

- studuje stavbu a reakce mikroobjektů.

Fyzika pevných látek

- se zabývá strukturou a vlastnostmi PL, které lze vysvětlit jen za pomoci kvantové fyziky.

1. ATOMY A MOLEKULY

Látky se jeví jako spojité, ale jsou dělitelné.

Atomisté – antičtí filozofové \approx 400 př. n. l.

Demokritos, Epikuros, Leukippos...

- pouze spekulace – látky jsou dělitelné až na atomy (ty již nejsou dělitelné...)

Chemický atomismus (1803 J. Dalton – atomová teorie)

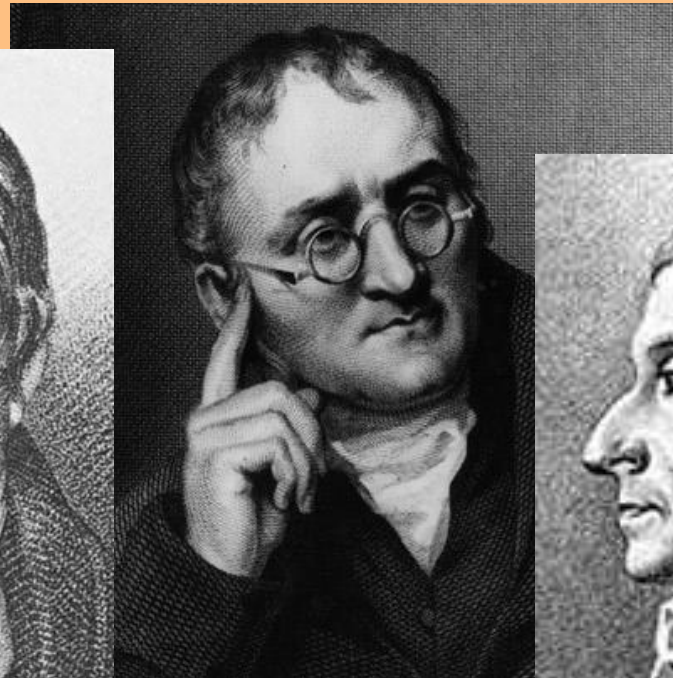
1. Prvky se skládají z nedělitelných atomů. (Dnes – atomy jsou dělitelné...)
Atomy téhož prvku jsou stejné.
Atomy různých prvků mají odlišné vlastnosti.
2. Při chemických reakcích se atomy přeskupují, ale nemění se, nevznikají ani nezanikají.
3. Při slučování atomů vznikají molekuly chemických sloučenin a v dané sloučenině připadá na atom jednoho prvku vždy stejný počet atomů jiného prvku.

Proust Joseph Louis - zákon stálých poměrů slučovacích.

Dalton John – zákon násobných poměrů slučovacích.

Gay-Lussac Louis – v reakci, stejné nebo násobné objemy.

Avogadro Amadeo – ve stejných objemech různých plynů je při stejném tlaku a teplotě vždy stejný počet molekul.



Pozorované jevy v 19. stol.: katodové paprsky

- ionizují plyny
- vyvolávají světélkování
- zahřívají látky
- pronikají Al plíškem
- odchylují se v elektrickém a magnetickém poli
- při dopadu na anodu vyvolávají RTG záření

Objev elektronu

1897 – hypotéza o elektronu

Thomson Joseph John

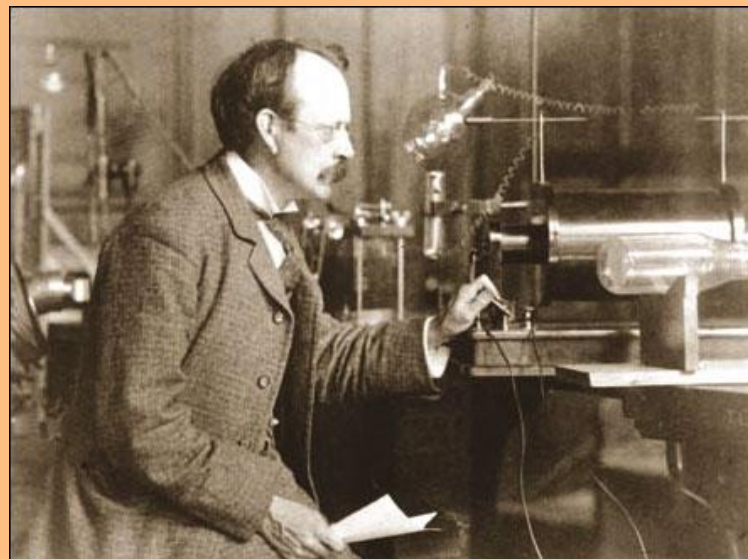
určil měrný elektrický náboj, q_e/m_e

uvolňují se

- z katody, záporně nabitě zinkové destičky po dopadu světla,
- z rozžhaveného kovového drátu,
- při radioaktivním rozpadu beta

1910 Millikan Robert – millikanův pokus

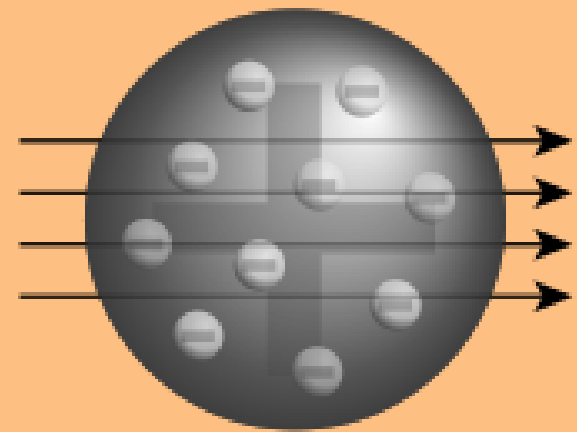
kapičky oleje nesoucí elektrický náboj se vznášejí mezi deskami nabitého kondenzátoru
→ elektrický náboj je kvantován



MODELY ATOMU

THOMSONŮV MODEL (PUDINKOVÝ)

kladný náboj je rozložen rovnomerně
v celém objemu atomu, záporné elektrony
jsou rozmístěny jako rozinky.

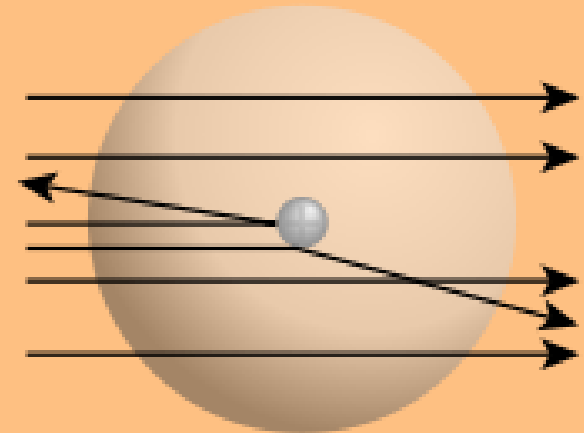


RUTHERFORDŮV MODEL (PLANETÁRNÍ)

založený na experimentu:

rozptyl radioaktivních α částic
při průchodu zlatou fólií

1. téměř veškerá hmotnost je soustředěna v jádře (ve středu atomu),
kolem jako planety krouží elektrony v elektronovém obalu
2. kladný náboj jádra = zápornému náboji elektronového obalu;
atom je neutrální



Předpokládal i existenci neutrálních částic.

(Neutrony objeveny 1932. James Chadwick – NC 1935)

Z ≥ 1 protonové (atomové) číslo, pořadové číslo v periodické tabulce

N ≥ 0 neutronové číslo

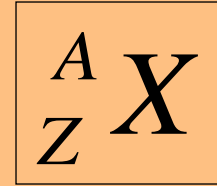
A – nukleonové (hmotnostní) číslo

$$A = Z + N$$

X – chemický prvek

tvořen atomy s tímž nábojem jádra Ze

bez ohledu na hmotnost



Nuklidy – stejné A i Z. (Př. lehký a těžký vodík.)

Izotopy – různé nuklidy jednoho prvku

2 nuklidy stejného prvku nelze chemicky odlišit, jen fyzikálně na základě rozdílných hmotností.

Porovnání hmotností

$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{kg}$$

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{kg}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{kg}$$

Náboj

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

–

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

(hmotnostní spektrometry – k určování hmotnosti nuklidů)

KVARKY

- elektron je dále nedělitelný
- protony a neutrony jsou složené z kvarků

1961 NC **Robert Hofstadter**

ostřeloval svazkem elektronů protony a neutrony.

Uvnitř protonu a neutronu jsou tři shluky elektrického náboje (+) i (-) takové, že výsledný náboj

- protonu je kladný
- neutronu nulový

Kvarková hypotéza předpověděla existenci dalších částic.

Zatím se nepodařilo kvarky z nukleonů uvolnit.

Asi nemohou samostatně existovat.(Jako jeden konec provázku...)



VAZEBNÁ ENERGIE

Jádro a elektrony jsou v atomu vázány přitažlivými elektrickými silami.

Nukleony jsou v jádře vázány jadernými silami.

Vazebná energie E_v = práci, kterou bychom museli vykonat, abychom soustavu rozložili na jednotlivé části.

- měříme v elektronvoltech $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$
- každé změně energie odpovídá změna hmotnosti

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Je-li vazebná energie soustavy:

kladná, soustava je stabilní

- k rozložení na části musíme dodat energii
- po rozložení bude klidová hmotnost větší, než původní klidová hmotnost soustavy
- složením poklesne hmotnost a uvolní se energie

$$\sum_k m_{0k} > m_{Osoustavy}$$

záporná, soustava je nestabilní

- rozpadem se uvolní energie
- součet klidových hmotností částí je menší než hmotnost soustavy
- chceme-li opět složit, musíme dodat energii

$$\sum_k m_{0k} < m_{Osoustavy}$$

hmotnostní úbytek B

$$E_v = B \cdot c^2$$

Δm – úbytek klidové hmotnosti odpovídající vazebné energii

- soustava je tvořena částicemi o hmotnostech m_1, m_2, \dots, m_k
- soustava jako celek má hmotnost m

$$B = \Delta m = (m_1 + m_2 + \dots + m_k) - m$$

B při chemických reakcích je neměřitelně malý $\approx 10^{-36}$ kg.

Energetická bilance se vyjadřuje energií reakce E_r

$$E_r = \left[(m_1 + m_2 + \dots + m_n) - (m'_1 + m'_2 + \dots + m'_m) \right] c^2$$

n částic,

které do reakce vstupují

m částic,

které z reakce vystupují

- **exoenergetická reakce** - E_r je kladná, energie se uvolňuje
- **endoenergetická reakce** - E_r je záporná, (disociační)
energie se váže do struktur

Vazebná energie nukleonů

(jaderná energie) je řádově 10^6 větší než energie chemická, měří se v MeV.

$$m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

$$m_p c^2 = 938,28 \text{ MeV}$$

$$m_n c^2 = 939,57 \text{ MeV}$$

Vazebná energie kvarků je v řádech GeV

2. POHYB V MIKROSVĚTĚ

Kvantové fyzice předcházelo studium záření černého tělesa.

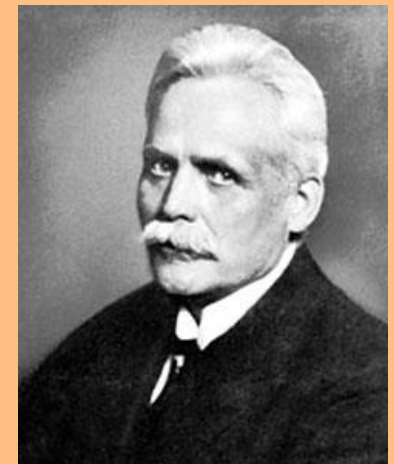
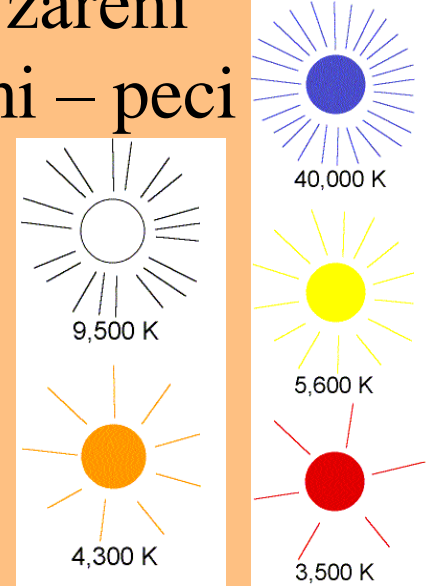
Elektromagnetické záření vydávají všechna tělesa.

Chladná vyzařují infračervené záření okem neviditelné, tělesa zahřátá nad $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ září viditelně.

Při dopadu na jiná tělesa se záření pohltí nebo odrazí.

Rovnovážné záření – záření černého tělesa

- rovnováha mezi vyzařováním a pohlcováním záření
- vzniká v uzavřené dutině se zahřátými stěnami – peci
- př. Slunce - vyzařuje rovnovážné záření
- závisí na teplotě (červené, oranžové, bílé),
ne na chemickém složení
- je spojité
- má různou intenzitu
(která roste s T^4 – Stefanův-Boltzmannův zákon)
- maximální energie je vyzařována
na určité vlnové délce
(s rostoucí T klesá λ ,
Wilhelm Wien - posunovací zákon)
- experimentálně ověřeno



PLANCKOVA KVANTOVÁ HYPOTÉZA

14. 12. 1900 (NC 1918)

Elektromagnetické vlnění
je vyzařováno nebo pohlcováno atomy
vždy po celistvých dávkách – (kvantech) energie.

$$E = h \cdot f$$

($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js Planckova konstanta)

Energie je úměrná frekvenci.

FOTOELEKTRICKÝ JEV - fotoefekt

1. Vnitřní fotoelektrický jev

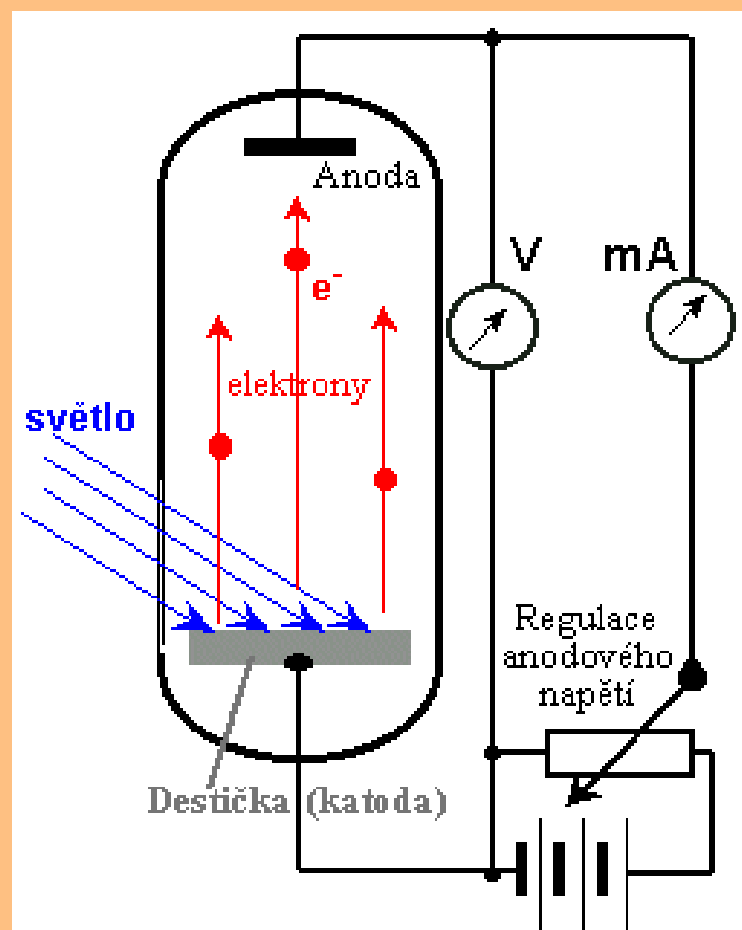
elektrony uvolněné z vazeb zůstávají uvnitř látky.
(polovodiče → generace elektron – díra)

2. Vnější fotoelektrický jev

uvolňování elektronů z látky
působením elektromagnetického
záření.

Záření dopadá na kovovou katodu,
uvolňují se elektrony,
které dopadají na anodu.

Obvodem protéká elektrický proud.

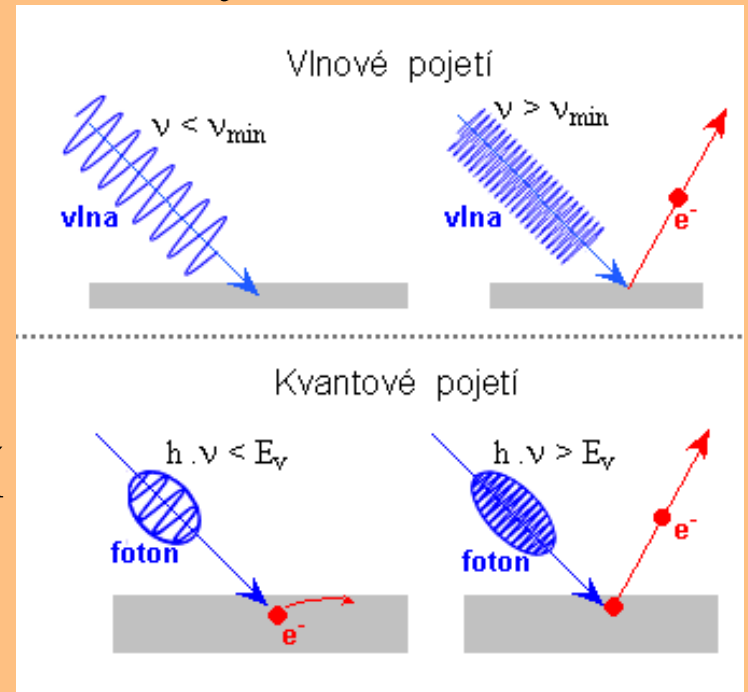


Zákony fotoefektu

1. Rychlost emitovaných elektronů (tedy i E_k)
 - nezávisí na intenzitě dopadajícího záření,
 - ale jen na frekvenci a materiálu katody.

2. Pro každý kov existuje mezní frekvence f_0 dopadajícího záření. (Mezní vlnová délka λ_0 .)
Elektron se uvolní, je-li $f \geq f_0$.

3. Je-li $f > f_0$, pak proud protékající obvodem je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření.



Využití fotoefektu

snímací elektronky televizních kamer
expozimetry

sluneční baterie
počítání výrobků

Einsteinova teorie fotoefektu (1921 NC)

Elektromagnetická vlna se chová jako proud částic – světelných kvant – fotonů.

Fotony

- ve vakuu se pohybují rychlostí c
- klidová hmotnost je nulová
- mají energii
- mají hybnost

$$E = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = h \frac{f}{c} = m \cdot c$$

Při fotoefektu foton odevzdá celou svou energii jedinému elektronu v kovu.

Zbytek je jeho kinetická energie.

$$E = h \cdot f = W_v + E_k$$

- $W_v = h \cdot f_0$ výstupní práce nutná k uvolnění elektronu
- $E_k = 1/2 m v^2$ kinetická energie elektronu

Počet uvolněných elektronů (velikost proudu) závisí na počtu kvant, tedy na intenzitě záření.

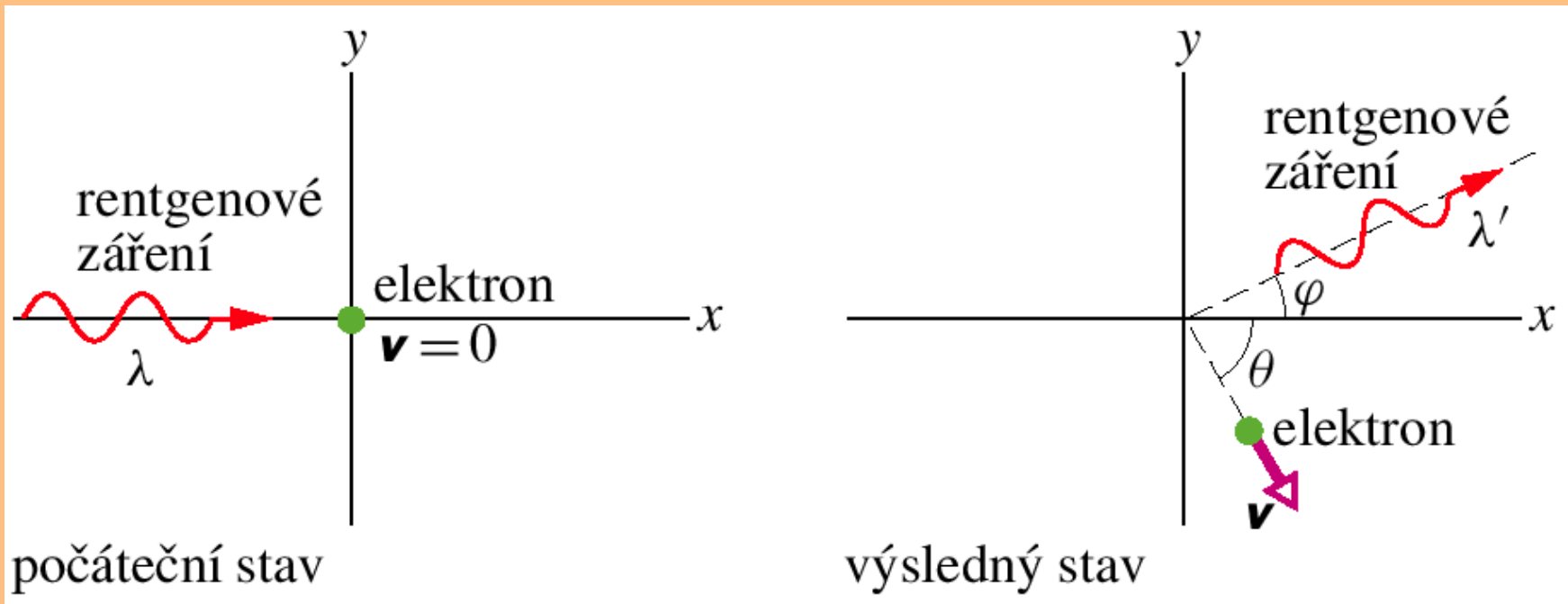
COMPTONŮV JEV 1922 (potvrdil existenci fotonů.)

je pružný rozptyl fotonů RTG záření na volných elektronech (Rentgenové záření nechal dopadat na uhlíkovou destičku).

Rozptyl fotonu lze pokládat za pružnou srážku dvou částic a ze zákona zachování energie plyne:

$$hf = hf' + E_k$$

Platí tedy $f' < f$, $\lambda' > \lambda$.



2 teorie podstaty světla

- Huygensova vlnová – světlo je vlnění
- Newtonova korpuskulární – světlo je proud částic

vlnová povaha – záření je elektromagnetické vlnění

- ohyb
- interference
- lom

částicová povaha – záření má charakter částic, fotonů

- Planckova kvantová teorie
- Einsteinův fotoefekt
- Comptonův jev

Tento rozpor se nazývá
korpuskulárně vlnový dualismus.

VLNOVÉ VLASTNOSTI ČÁSTIC

- **Faraday** – proměnné magnetické pole vytváří pole elektrické
 - **Maxwell** předpokládal – proměnné elektrické pole vytváří pole magnetické
-

Světlo je vlna, má energii a hybnost, přenáší se pomocí částic. **Louis de Broglie** předpokládal (1924) – částice látky (elektrony, atomy, molekuly) s nenulovou klidovou hmotností mají vlnové vlastnosti, tedy i λ .

$$f = \frac{E}{h} = \frac{m \cdot c^2}{h}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

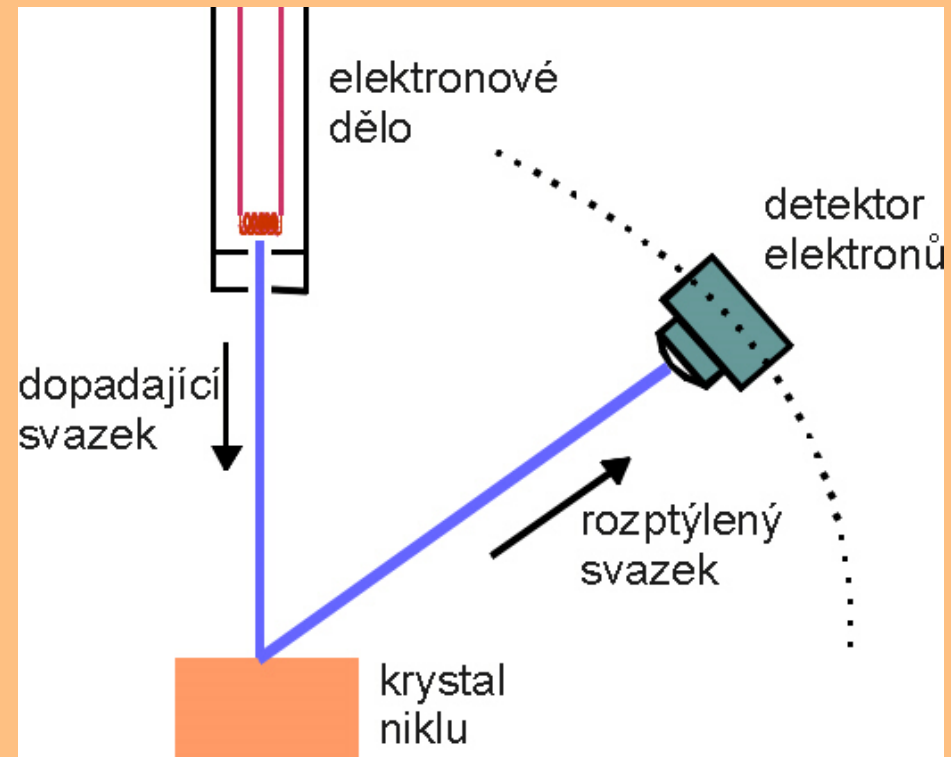
Toto vlnění se označuje jako de Broglieho vlny.

Experimentální potvrzení de Broglieho hypotézy:

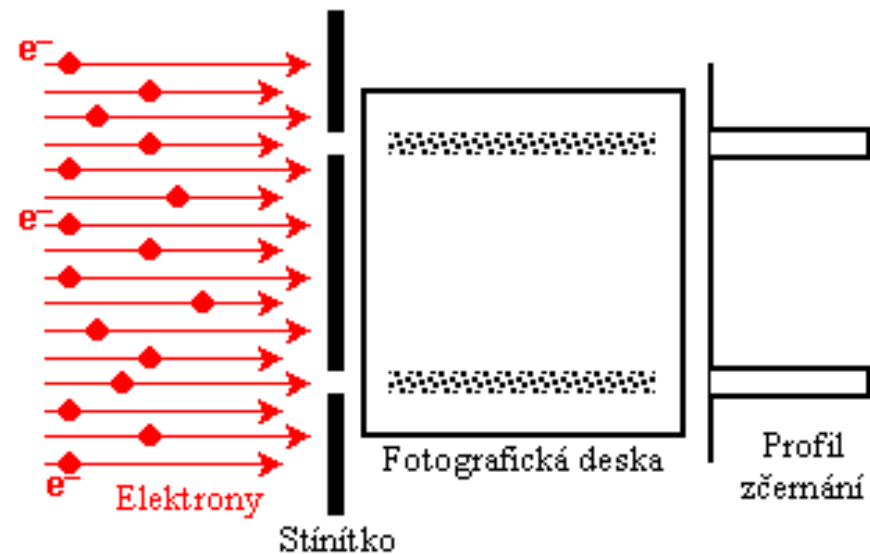
G. Davisson, L. Germer (1927)

při rozptylu elektronů na monokrystalu niklu.

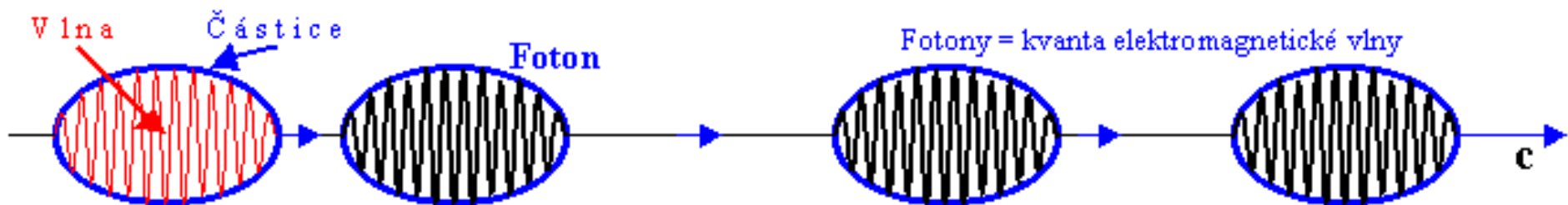
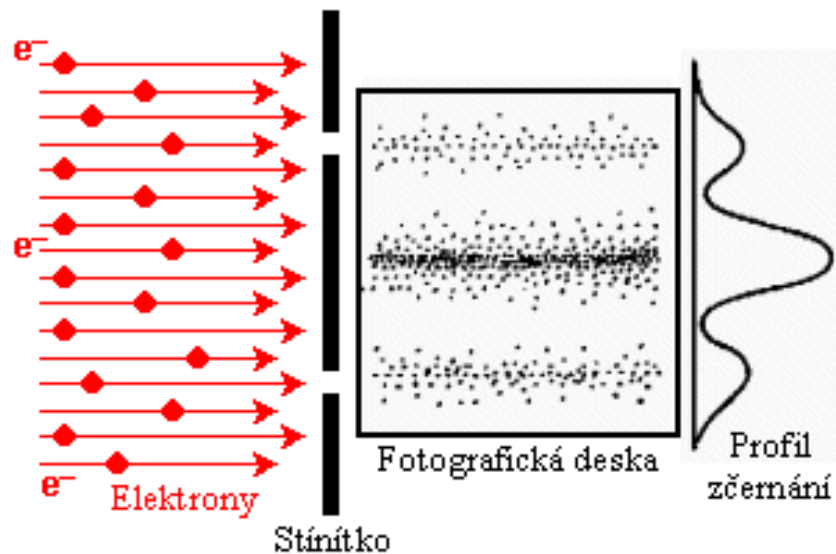
Pomocí de Broglieho vln se dá určit pravděpodobnost, se kterou se částice bude nacházet v určitém místě prostoru.



Klasické chování elektronů



Kvantové chování elektronů



KVANTOVÁ MECHANIKA

Popisuje stav mikročástic pomocí vlnové funkce $\Psi(\mathbf{x},z,y,t)$ (Ne polohou a hybností).

Schredingerova rovnice - NC 1933

(hustota pravděpodobnosti výskytu)

$|\Psi(\mathbf{x},z,y,t)|^2$ druhá mocnina vlnové funkce – udává pravděpodobnost, že se částice v čase t nachází na místě xyz . (Max Born – NC 1954)

Vlnové vlastnosti způsobují, že pohyb částic má pravděpodobnostní charakter.

- Částice se nepohybují po určitých trajektoriích určitými rychlostmi.
- Výsledek jejich pohybu můžeme pouze předvídat.

Heisenbergova relace neurčitosti

- mikročástici nelze současně přiřadit polohu a hybnost.
(Je-li hybnost určena přesně, nelze určit polohu a naopak.)
- Oblast s největší pravděpodobností výskytu je tzv. atomový orbital.

Pohybuje-li se částice v omezeném prostoru, vedou její vlnové vlastnosti ke kvantování energie.

Stavu s danou hodnotou energie říkáme kvantový stacionární stav.

3. ATOMOVÁ FYZIKA

KVANTOVÁNÍ ENERGIE ATOMŮ

- planetární model odporoval zákonům klasické fyziky.
- Elektron pohybující se po kružnici kolem jádra by vyzařoval spojité spektrum elektromagnetického záření, tím by ztrácel energii, přibližoval by se k jádru a měl by s ním splynout.
- Atom by byl nestabilní.
- Atomy jsou stabilní a mají čárové spektrum.

- **Fraunhoferovy čáry**
- černé čáry ve spojitém slunečním spektru - označeny písmeny
- odpovídají absorpčnímu spektru některých prvků (přítomných ve vnějších vrstvách Slunce a v zemské atmosféře)

SPEKTRÁLNÍ SÉRIE ATOMU VODÍKU

skupiny vlnových délek v atomových spektrech

Pro frekvenci čar
v sérii platí

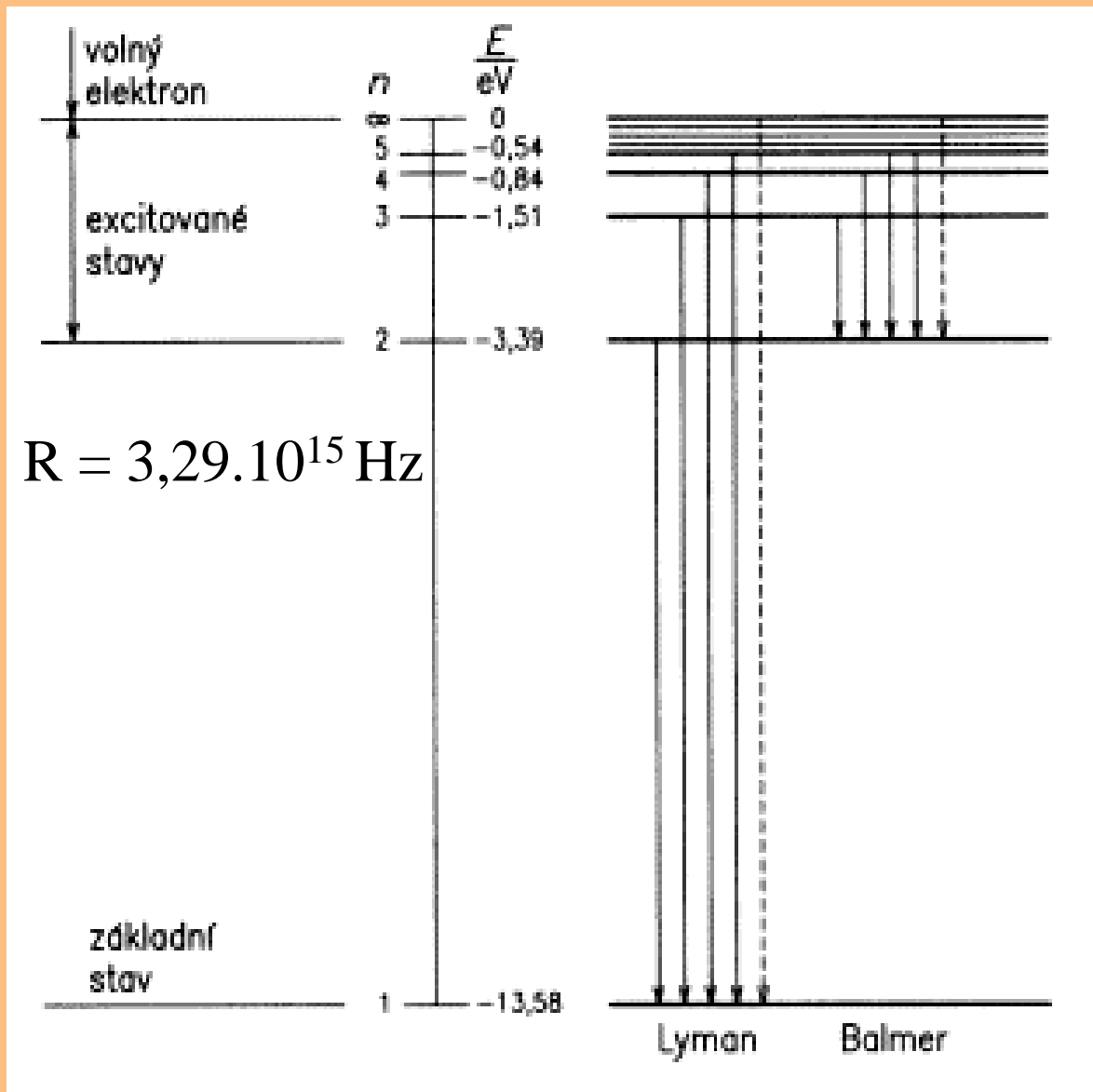
$$f = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Rydbergova frekvence

$n > m$ $n, m = 1, 2, 3, \dots$

Př. Balmerova $m = 2$

Lymanova $m = 1$



$$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

BOHRŮV KVANTOVÝ MODEL ATOMU VODÍKU

- Atom je stabilní soustava složená z + jádra a - el. obalu.
- Elektron se může pohybovat bez vyzařování kolem jádra jen po určitých drahách.

Bohrovy postuláty

1. Atom se může nacházet pouze v jistých kvantových stavech. Každý kvantový stav má přesně určenou hodnotu energie.
2. Při přechodu atomu ze stavu s energií E_n do stavu s nižší energií E_m vyzařuje atom záření s frekvencí f_{nm} .
(Při pohlcení takového záření přejde atom ze stavu o energii E_m do stavu s E_n .)

$$hf_{nm} = E_n - E_m$$

- Základní stav $n = 1$ $E_1 = -13,53 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)
- Excitovaný stav $n > 1$
- Bohrov model je přechodem mezi mechanickým a kvantovým modelem.

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

ATOM VODÍKU

Kvantový stacionární stav je určen kvantovými čísly.

1. hlavní kvantové číslo n – určuje energii a velikost atomového orbitalu $n = 1, 2, 3, \dots$ slupky K L M N
(oblast s vysokou 90% - 99% pravděpodobností výskytu elektronů)
2. vedlejší kvantové číslo l – určuje tvar atomového orbitalu $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ podslupky s p d f g h
(vyjadřuje orbitální moment hybnosti)
3. magnetické kvantové číslo m – určuje prostorovou orientaci orbitalu $m = 0, +1, -1, +2, -2, \dots, +l, -l$ $(2l+1)$ hodnot
(vyjadřuje magnetický dipólový moment)
4. spinové magnetické kvantové číslo m_s – zdvojnásobuje počet kvantových stavů $m_s = +0,5, -0,5$
(vyjadřuje moment hybnosti elektronu v orbitalu)

MENDĚLĚJEVOVA PERIODICKÁ SOUSTAVA

Princip nerozlišitelnosti částic

Elektrony nelze odlišit.

Kvantová čísla popisují stavy, ne elektrony.

Pauliho vylučovací princip (Wolfgang 1925)

v daném systému nemohou existovat současně 2 elektrony ve stejném kvantovém stavu, tzn. se stejnými kvantovými čísly.

- platí pro fermiony = elektrony, protony, neutrony
- neplatí pro bosony = fotony (nelze u nich vytvářet struktury)

Vysvětluje zákonitosti periodické soustavy prvků.

Princip minimální energie (pro stavbu el. obalu)

Energetické hladiny s nižší energií se obsazují dříve než hladiny s vyšší energií.

Valenční vrstva – poslední vrstva, kde jsou tzv. valenční elektrony, které určují chemické vlastnosti prvku.

(Hladina s vyšším n může mít menší energii než s nižším n .)

Elektronová konfigurace

je celková soustava elektronů, které vytvářejí elektronový obal. Znázorňuje se rámečkovými diagramy.

Př.

atom uhlíku C $(1s)^2(2s)^2(2p)^2$ – počet elektronů v podslupce

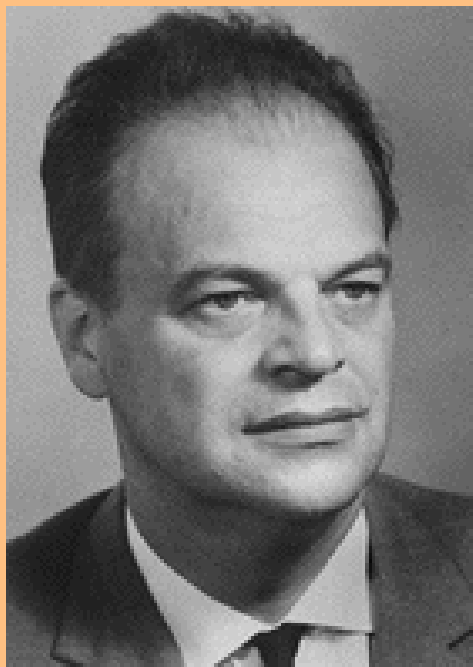
excitovaný stav C $(1s)^2(2s)^1(2p)^3$

LASER

pracuje na principu stimulované emise záření.

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

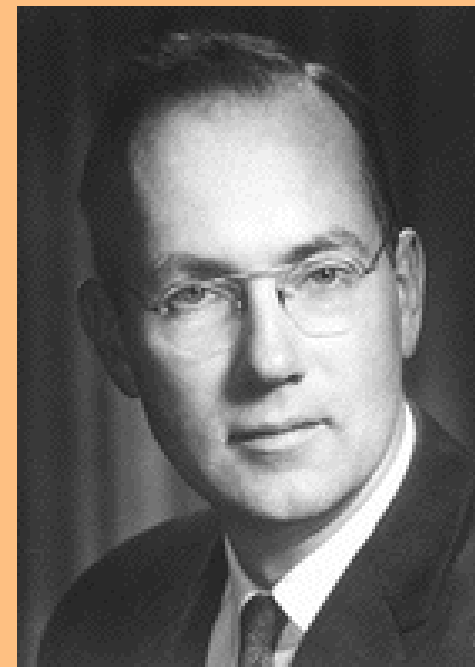
zesilování světla stimulovanou emisí záření



N. G. Basov



A. N. Prochorov



Ch. J. Townes

Nobelova cena v roce 1964.

LASER

Při vzájemné interakci světla s látkou může nastat:

1. absorpce světla

Látka pohlcuje dopadající fotony světla a elektrony v atomech látky přecházejí na vyšší energetické hladiny.

2. spontánní (samovolná) emise světla

Elektrony samovolně přecházejí z vyšší energetické hladiny na nižší. Tento děj není vyvolán vnějším působením.

3. stimulovaná (vynucená) emise světla

Nastává u excitovaných atomů látky vnějším působením. Přechod z excitovaného stavu do stavu s nižší energií je vyvolán působením elektromagnetického pole

$$E_{\text{stimulujícího fotonu}} = E_{\text{vznikajícího fotonu}}$$

- má rezonanční charakter, může ji vyvolat jenom foton se stejnou frekvencí, jakou má vznikající foton
- Stimulující foton a vznikající foton mají stejný směr, frekvenci a fázi, jsou koherentní.
- Dopadající záření se procesem stimulované emise záření zesiluje.

$$E_{\text{sf}} = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

$$E_{\text{vf}} = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

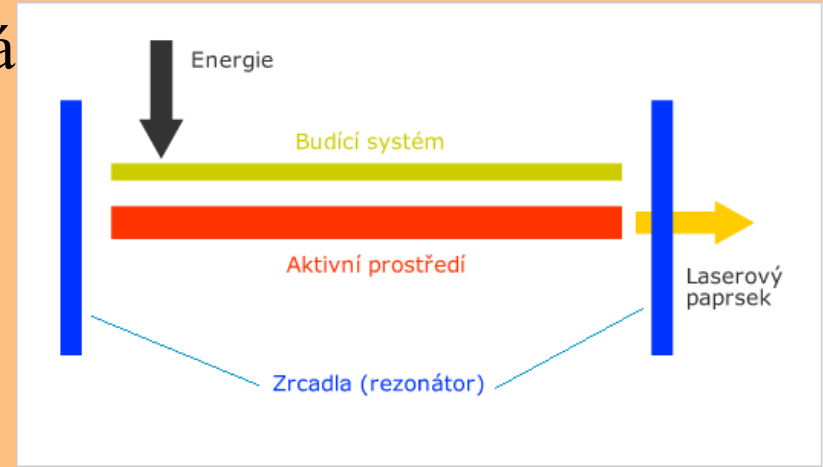
LASERY

Princip:

(1) zdroj energie - výbojka, která svítí do tzv.

(2) aktivního prostředí - látka, která má oddělené kvantové energetické hladiny elektronů.

Bývá umístěné v rezonátoru, prostoru mezi dvojicí zrcadel.



Jedno z nich odráží veškeré světlo (3) a druhé bývá polopropustné (4).

- Energie zdroje vybudí elektrony v aktivním prostředí, které přejdou do vyšší energetické hladiny.
- Při přechodu na nižší energetickou hladinu dochází k uvolnění fotonů. Tok fotonů je díky rezonátoru stále zesilován, stimulován zdrojem energie a vzniká výsledný laserový paprsek (5).

Rozdělení podle různých hledisek

1. podle aktivního prostředí

- plynový laser – plyn nebo směs plynů
- pevnolátkový laser – monokrystal
- diodový laser – polovodič (1962)
- kapalinový laser
- plazmatický laser

2. podle vlnových délek optického záření, které vysílají

- infračervené lasery
- lasery viditelného pásma
- ultrafialové lasery
- rentgenové lasery

3 . podle délky impulsu

- lasery s dlouhými impulsy
- s krátkými impulsy
- s velmi krátkými impulsy (pikosekundové, femtosekundové)

U laserů rozeznáváme tři základní parametry.

1. **Vlnová délka** určuje, v jaké části spektra se bude laserový paprsek pohybovat..

Podle vlnové délky se také dělí lasery na

- termální (IR), vlnová délka vyšší než 630 nm,
- lasery pracující ve viditelném světle (380 - 630 nm)
- lasery pracující v UV oblasti (pod 380 nm).

2. **Výkon** laseru je množství vyzářené energie za určitý čas, označuje se ve wattech (W).

Množství vyzářené energie se udává v joulech (J).

3. **Účinnost** je poměr mezi množstvím energie dodané do zařízení a množstvím energie, které z něho vystupuje.

Do laseru musíme přivádět více energie než jí získáme, ale vyplatí se to. Laser opouští paprsek zvláštních a pro nás výhodných vlastností. Jsou to

- monochromaticnost (jednobarevnost),
- koherence (uspořádanost),
- malá divergence (rozbíhavost).

LASERY - uplatnění

- **v průmyslu** (např. řezání, svařování, obrábění materiálů)
- **geodézii** (přesné měření), 1969 měření vzdálenosti Měsíce od Země
- **lékařství** (léčení očních vad, léčba problematické pleti, řezání a vypalování v chirurgii), 1961 jím byl poprvé zničen menší nádor
- **armádě Vietnam 1967** (navádění raket –1991 v Perském zálivu.)
- **při ochraně soukromí** (snímání otisků prstů, sítnice nebo při zabezpečení důležitých objektů).
- **světelné efekty** – laserová show - 1971
- **holografie** – 1971
- **v obchodech při čtení čárových kódů** – 1974
- **laserové tiskárny** – 1975 IBM
- **optické mechaniky CD 1984, DVD 1996, Blu-ray 2008**
- **přenos informací - 1988 je Severní Amerika spojena s Evropou optickým kabelem**
- **při přednáškách a prezentacích (ukazovátka)**
- **optické myši**