

Úvod do laserové techniky

Interakce záření s látkou
Detekce optického záření

Jan Šulc

Katedra fyzikální elektroniky
České vysoké učení technické v Praze
jan.sulc@fjfi.cvut.cz

12. října 2016

Světlo jako elektromagnetické záření

- ▶ Světlo – periodické harmonické kmity *elektrického a magnetického pole*
- ▶ Intenzita elektrického **pole** E [V/m] × Intenzita **záření** I [W/m²]
- ▶ Superpozice elektromagnetických vln – interference, koherence
- ▶ Rezonátor × optický rezonátor – rezonance, stabilita

Látka jako soubor kvantových soustav

- ▶ Modelem látky je soubor kvantových soustav
- ▶ Kvantová soustava (atom, iont, molekula) se řídí zákony kvantové mechaniky
 - ▶ Existence diskrétních energetických hladin
 - ▶ Výměna energie po kvantech
- ▶ Populace energetických hladin a Boltzmannovo rozdělení

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} < 1 \quad \text{vždy pro } E_1 < E_2$$

- ▶ Inverze populace hladin, buzení a relaxace kvantových soustav
- ▶ Kvantové přechody, jejich pravděpodobnost a šířka energetické hladiny

Klasický přístup

- ▶ Záření je elektromagnetická vlna a látka se skládá elektricky z nabitých částic
- ▶ Vzájemné působení popisují (klasické) *fenomenologické* Maxwellovy rovnice
- ▶ Velikost silového působení určuje náboj a intenzita pole
- ▶ Šíření záření v prostředí bez absorpce

Kvantový přístup

- ▶ Prostředí tvoří soubor kvantových soustav, pole tvoří fotony
- ▶ **Foton** – nejmenší částice (kvantum) elektromagnetického záření. Podle kvantové mechaniky není možné dělit energii nesenou elektromagnetickým zářením do nekonečna.
 - ▶ Vlnová délka λ
 - ▶ Vlnový vektor $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$
 - ▶ Frekvence $\nu = c/\lambda$
 - ▶ Energie $E = h\nu$
 - ▶ Hybnost $\vec{p} = \hbar\vec{k}$
 - ▶ $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js
- ▶ Interakci popisuje Schrödingerova rovnice
- ▶ Poloklasická teorie (látka je popsána kvantově, záření je popsáno klasicky jako vlna, ale energie se předává po kvantech)
- ▶ Kvantová elektrodynamika (až na jádro a gravitaci vše)

Základní stav kvantové soustavy je stav s nejnižší energií. Pro izolovanou soustavu je základní stav nejpravděpodobnějším stavem.

Excitovaný stav kvantové soustavy je takový, kdy je její energie vyšší než v základním stavu. Energie kvantové soustavy může nabývat různých hodnot z určité **množiny povolených stavů**. Excitovaný stav není trvalý a kvantová soustava po čase samovolně přechází do stavu s nižší energií.

Excitace je děj, při kterém **kvantová soustava přechází ze stavu s nižší energií do stavu s vyšší energií**. Aby tento děj nastal musí kvantová soustava přijmou zcela **přesné množství tzv. excitační energie** charakteristické pro daný přechod, odpovídající rozdílu energie kvantové soustavy před a po excitaci.

Deexcitace je opačný proces k excitaci (mohlo by se použít i označení **relaxace**).

Podmínka rezonance

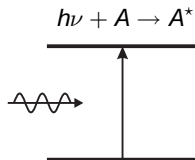
- ▶ Interakce optického záření s látkou má kvantový charakter
- ▶ Energie mezi prostředím a zářením se vyměňuje po kvantech (fotonech), jejichž velikost závisí na frekvenci záření
- ▶ Energie fotonu $E = h\nu$ se musí rovnat rozdílu energie počátečního a konečného stavu kvantové soustavy $\Delta E = E_n - E_m$
- ▶ Podmínka rezonance (Bohrův vztah):

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

Tři základní procesy nastávající při interakci kvantové soustavy (atomu) s elektromagnetickým polem – **zářivé přechody**

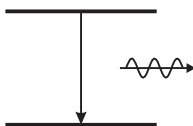
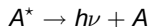
- ▶ **Absorpce** fotonu kvantovou soustavou
- ▶ **Spontánní emise** fotonu kvantovou soustavou
- ▶ **Stimulovaná emise** fotonu kvantovou soustavou

Absorpce fotonu nastává, pokud dojde k jeho **pohlcení** při interakci s kvantovou soustavou.



- ▶ Energie fotonu musí být kvantovou soustavou pohlcena **bezezbytku**.
- ▶ **Foton zaniká** a jeho energie je využita pro excitaci kvantové soustavy.
- ▶ Pro kvantovou soustavu v daném stavu musí existovat takový přechod, aby excitační energie byla přesně rovna energii absorbovaného fotonu.
- ▶ Kvantová soustava se musí nacházet ve stavu odpovídajícímu dolní energetické hladině tohoto přechodu.
- ▶ Po absorpci fotonu se **energie kvantové soustavy zvýší**.

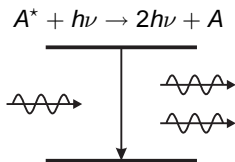
Spontánní emise (nebo jen emise) fotonu je děj opačný absorpci fotonu.



- ▶ Při deexcitaci je **energie kvantové soustavy uvolněna formou elektromagnetického záření** – fotonu.
- ▶ Při jednom deexcitačním přechodu **je uvolněn právě jeden foton** a jeho energie se bezezbytku rovná rozdílu energie kvantové soustavy na počátku a na konci tohoto děje.
- ▶ Emitovaný foton má **s výjimkou energie ostatní vlastnosti**, jako je směr šíření, fáze a polarizace, **zcela náhodné**.
- ▶ Po spontánní emisi fotonu se **energie kvantové soustavy sníží**.

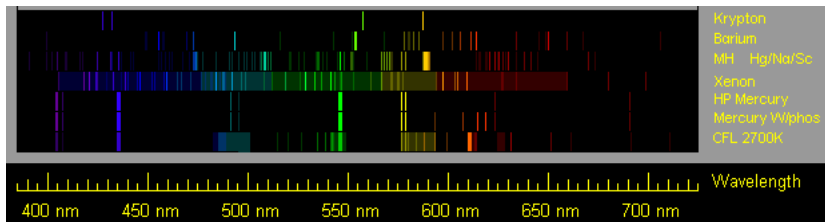
Stimulovaná emise

Stimulovaná emise je proces **vyzáření (emise) fotonu** excitovanou kvantovou soustavou, **vyvolaný interakcí s fotonem vnějšího (stimulujícího) záření.**



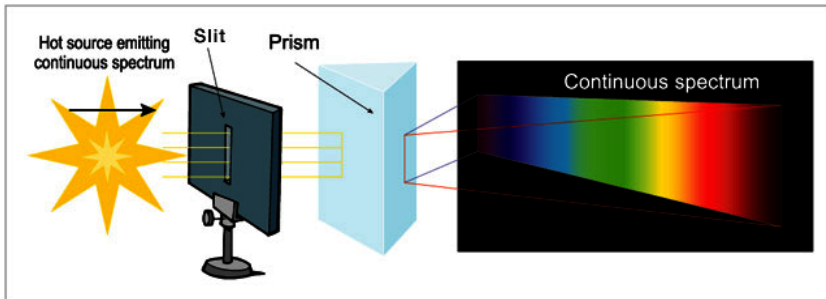
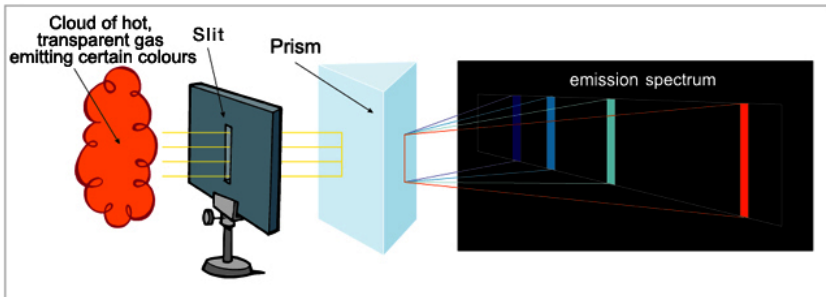
- ▶ Nutná podmínka vzniku stimulovaná emise je, aby se energie stimulujícího fotonu rovnala energii některého přechodu excitované kvantové soustavy.
- ▶ Kvantová soustava musí být před tímto procesem ve stavu odpovídajícím horní energetické hladině přechodu.
- ▶ Zásadní je, že **všechny vlastnosti** (frekvence, fáze, polarizace a směr šíření) **nově emitovaného a stimulujícího fotonu jsou totožné.**
- ▶ Po stimulované emisi fotonu se **energie kvantové soustavy snižší.**
- ▶ Proces je podstatou zesilování světla v laserech.

Emisní spektrum (zářivka)

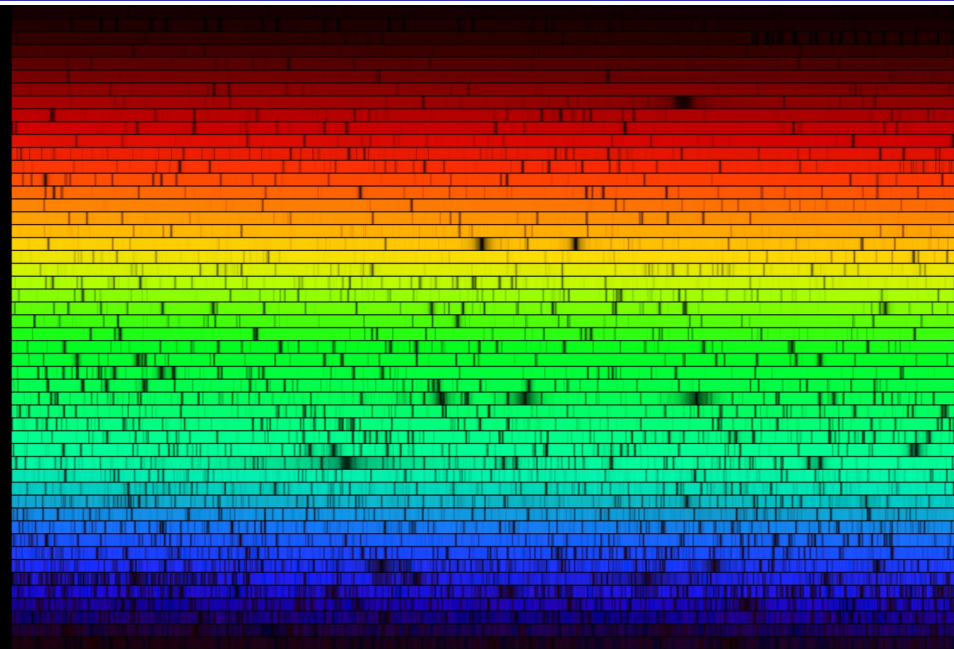


- ▶ Volné atomy a volné ionty v excitovaných kvantových stavech vysílají elektromagnetické záření zcela určitých hodnot kmitočtu – elektromagnetické spektrum se v tomto případě nazývá emisní.
- ▶ Je nespojité – čárové (pásové).
- ▶ Spektrální čára, odpovídající jediné hodnotě kmitočtu, by měla být nekonečně úzká. Ve skutečnosti je však její šířka konečná s určitým rozložením intenzity záření.
- ▶ Každému prvku přísluší charakteristické rozložení spektrálních čar, přičemž jejich šířka a rozložení intenzity záření závisí na vnějších podmínkách.

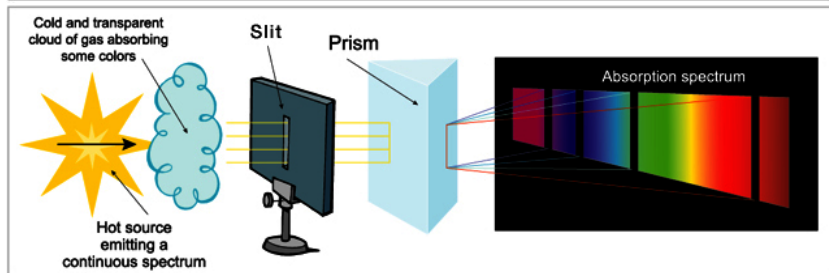
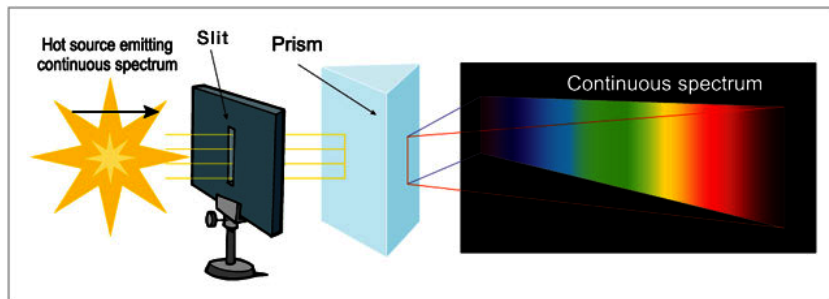
Emisní spektrum látky



Emisní spektrum hvězdy (Slunce)

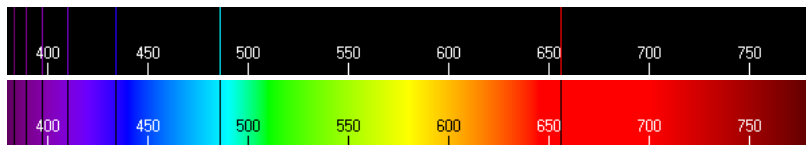


Emission spectrum of a substance



Absorpční spektrum (spektrum hvězd)

Emisní a absorpční spektrum vodíku – Balmerova série vodíku



- ▶ Prochází-li elektromagnetické záření se spojitém spektrem prostředím, ve kterém jsou volné atomy, některé fotony procházejícího záření se v prostředí pohltí a jejich energie se spotřebuje na excitaci atomů.
- ▶ Hodnoty kmitočtu pohlcených (absorbovaných) fotonů jsou shodné s hodnotami kmitočtu, odpovídajícími čárám ve spektru emisním.
- ▶ Absorpční spektrum je spojitě s tmavými absorpčními čarami odpovídajícími hodnotám kmitočtu pohlcených fotonů; má také hrany sérií. Hrana odpovídá fotonu s energií potřebnou k úplnému odtržení elektronu od atomového jádra.

Podmínka rezonance mezi kvantovým přechodem a frekvencí elektromagnetického pole **je podmínka nutná, nikoliv postačující** pro procesy absorpce, emise a stimulované emise. Pravděpodobnost těchto dějů udávají v případě rezonance tzv. **Einsteinovy koeficienty**.

Objemová spektrální hustota záření $u(\nu)$ je energie záření z jednotkového intervalu frekvencí v jednotkovém objemu prostoru

Uvažujeme kvantové přechody v jednoduchém dvouhladinovém systému $n > m$,
 $E_n > E_m$, např. $m = 1$ a $n = 2$

Populace n -té energetické hladiny N_n

Einsteinův koeficient spontánní emise A_{nm} v součinu s hustotou populace příslušné hladiny N_n udává změnu (pokles) populace této hladiny za jednotku času v důsledku spontánní emise fotonu a následného přechodu na m -tou hladinu.

- ▶ Obsazení vyšší hladiny klesá (-):

$$\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{\text{spont } n \rightarrow m} = -A_{nm}N_n$$

- ▶ Obsazení nižší hladiny roste (+):

$$\left(\frac{dN_m}{dt}\right)_{\text{spont } n \rightarrow m} = +A_{nm}N_n = -\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{\text{spont } n \rightarrow m}$$

- ▶ Každému přechodu odpovídá emise jednoho fotonu, takže hustota spontánně emitovaných fotonů odpovídající přechodu (deexcitaci) $n \rightarrow m$ je úměrná $A_{nm}N_n \Rightarrow$ emisní spektrum (fluorescence).

Einsteinovy součinitele (koeficienty)

Einsteinův koeficient absorpce B_{mn} charakterizuje proces absorpce fotonu, který vede k excitaci kvantové soustavy z m -té hladiny na n -tou hladinu.

- ▶ Počet kvantových soustav které v důsledku tohoto procesu změni svůj stav, tj. přejdou z hladiny m na hladinu n je úměrný součinu $B_{mn}N_m u(\nu_{mn})$.
- ▶ Obsazení nižší hladiny klesá:

$$\left(\frac{dN_m}{dt}\right)_{\text{abs } m \rightarrow n} = -B_{mn}N_m u(\nu_{mn})$$

- ▶ Obsazení vyšší hladiny roste:

$$\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{\text{abs } m \rightarrow n} = B_{mn}N_m u(\nu_{mn}) = -\left(\frac{dN_m}{dt}\right)_{\text{abs } m \rightarrow n}$$

- ▶ Každému přechodu odpovídá úbytek fotonu z elektromagnetického pole \Rightarrow absorpční spektrum.

Einsteinův koeficient stimulované emise B_{nm} charakterizuje deexcitaci kvantové soustavy a následnou emisi v důsledku interakce s fotonu vhodným rezonančním fotonem.

- ▶ Počet kvantových soustav, které v důsledku tohoto procesu změni svůj stav, tj. přejdou z vyšší hladiny n na hladinu m je přitom úměrný součinu $B_{nm}N_n u(\nu_{nm})$.
- ▶ Obsazení vyšší hladiny klesá:

$$\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{\text{stim. em. } n \rightarrow m} = -B_{nm}N_n u(\nu_{nm})$$

- ▶ Obsazení nižší hladiny roste:

$$\left(\frac{dN_m}{dt}\right)_{\text{stim. em. } n \rightarrow m} = B_{nm}N_n u(\nu_{nm}) = -\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{\text{stim. em. } n \rightarrow m}$$

- ▶ V důsledku každého přechodu přibude v elektromagnetickém poli jeden foton se stejnými vlastnostmi, jako foton, který přechod stimuloval \Rightarrow zesilování světla.

Einsteinovy součinitele (koeficienty)

Proces	Koeficient	Pravděpodobnost za 1 s
Spontánní emise	A_{nm}	$N_n A_{nm}$
Absorpce	B_{mn}	$N_m B_{mn} u(\nu_{mn})$
Stimulovaná emise	B_{nm}	$N_n B_{nm} u(\nu_{mn})$

- ▶ Zakázané \times povolené přechody
- ▶ Doba života na n -té hladině $1/\tau_n = \sum_{0 \leq m < n} A_{nm}$
- ▶ Pořadí indexů mn nebo nm udává směr procesu
- ▶ Rezonanční frekvence $\nu_{mn} \equiv \nu_{nm}$, tj. $u(\nu_{nm}) \equiv u(\nu_{mn})$
- ▶ vzájemné vztahy mezi koeficienty lze získat s pomocí vlastností rovnovážného záření (tzv. **záření černého tělesa**)

Rovnovážné záření – záření černého tělesa

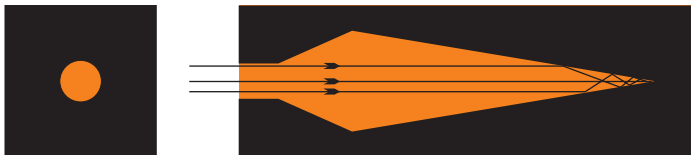
Tepelné záření vzniká přeměnou energie tepelného pohybu částic tělesa na energii záření (pokud $T > 0$ částice tělesa, obvykle nabité, se pohybují; srážky znamenají nerovnoměrný pohyb; *nerovnoměrný pohyb nabitých částic vede k emisi elektromagnetického záření*, přičemž jeho frekvence závisí na zrychlení nebo zpomalení částice, což je náhodná veličina, takže tepelné záření má spojité spektrum).

Černé těleso pohltí veškeré dopadající záření a žádné neodrazí, takže pokud by samo nezářilo (což ale může), jevílo by se jako dokonale černé (Měsíc je bílý proto, že odráží sluneční záření a ne proto, že by sám svítil).

Rovnovážné záření je záření ideálního černého tělesa, které je v termodynamické rovnováze s okolím. Jeho vlastnosti (objemová spektrální hustota) nezáleží na materiálu a struktuře černého tělesa, pouze na jeho teplotě.

Rovnovážné záření – záření černého tělesa

Model černého tělesa – dutina s černými matnými stěnami s malým otvorem na pozorování, udržovaná při konstantní teplotě. Dopadající paprsky jsou pohlceny a nemohou ovlivnit vlastní emisi černého tělesa.



Praktická realizace – sklářská pec



Rovnovážné záření je tepelné záření černého tělesa, které je v termodynamické rovnováze se svým okolím (energie přijatá = energie uvolněná). Experimentálně bylo zjištěno, že:

1. **spektrum** rovnovážného záření **závisí jen na** termodynamické **teplotě** (materiál **černého** tělesa na něj nemá vliv);
2. toto spektrum je prostá funkce vlnové délky s jedním maximem, které se s rostoucí teplotou posouvá k fialové části spektra – **Wienův posunovací zákon** (1893):

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (\mu\text{m}, \text{K});$$

3. energie vyzařená černým tělesem za jednotku času z jednotkové plochy je přímo úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty – **Stefan-Boltzmanův zákon** (1879):

$$Q = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2, \text{K}),$$

kde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ je Stefan-Boltzmanova konstanta;

4. na základě klasických představ o interakci záření s látkou se chování černého tělesa nedá vysvětlit.

- ▶ Planckův zákon (1900)

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left[\frac{h\nu}{kT}\right] - 1}$$

resp.:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{h}{\exp\left[\frac{hc}{kT\lambda}\right] - 1}$$

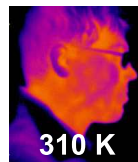
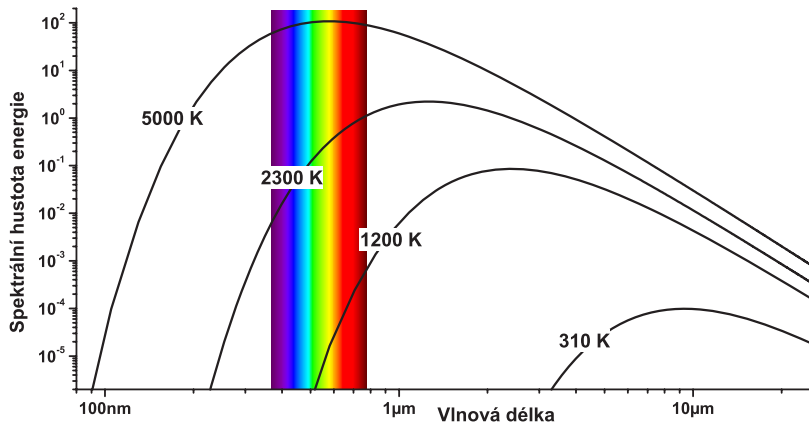
- ▶ Položíme-li derivaci = 0 (maximum), dostaneme Wienův posunovací zákon

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (\mu\text{m}, \text{K});$$

- ▶ Integrací (celkový výkon) Stefan-Boltzmanův zákon

$$Q = \sigma T^4 \quad (\text{Wm}^2, \text{K}),$$

Spektrální hustota energie



Vztahy mezi Einsteinovými koeficienty (1916)

- ▶ Uvažujeme prostředí tvořené souborem dvouhladinových kvantových systémů (1 – základní hladina, 2 – excitovaný stav) interagující s rovnovážným zářením
- ▶ Uvažujme termodynamickou rovnováhu – prostředí je v rovnováze s okolním zářením a jak rozložení záření, tak obsazení hladin se nemění, tj.:

$$\begin{aligned}\frac{dN_2}{dt} &= \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{spont}} + \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{abs}} + \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{stim}} = \\ &= -A_{21}N_2 + B_{12}N_1u(\nu_{21}, T) - B_{21}N_2u(\nu_{21}, T) \equiv 0\end{aligned}$$

- ▶ V termodynamické rovnováze je poměr obsazení hladin daný Boltzmannovým rozdělovacím zákonem, tj.:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right] = \exp\left[-\frac{h\nu_{21}}{kT}\right]$$

- ▶ Po dosazení:

$$u(\nu_{21}, T) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \exp\left[\frac{h\nu_{21}}{kT}\right] - 1}$$

- ▶ Porovnáním s Planckovým zákonem:

$$B_{21} = B_{12}, \quad A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21} \quad \text{platí obecně...}$$

- ▶ Detekce záření je zjišťování přítomnosti optického záření v daném místě a v daném čase
- ▶ Optické záření – elemag. vlna $\lambda \sim 10^{-6}$ m, $\nu \sim 10^{15}$ Hz – fotony $E = h\nu$
- ▶ Přímá detekce $\vec{E}(x, y, z, t)$ optického záření není možná (? nanotechnologie)
- ▶ Detekovat lze pouze intenzitu optického záření

$$I(t) = \frac{1}{2} c \epsilon \mathcal{E}(t)^2 \quad \text{Intenzita záření } I \text{ [W/m}^2\text{]}$$

- ▶ Minimální detekovatelná energie je energie jednoho fotonu $E \sim 10^{-19}$ J ~ 1 eV
- ▶ **Detekce záření je založena na absorpci fotonů kvantovými systémy a následné konverzi excitační energie na jinou, lépe zpracovatelnou formu.**
 - ▶ elektrický signál – fotobuňka
 - ▶ teplo – pyrodetektor
 - ▶ změna chemického složení detektoru – fotografický materiál
 - ▶ nervový vzruch – oko
 - ▶ foton jiné vlnové délky – noktovizor

Základní parametry optických detektorů

Konverzní účinnost – charakterizuje účinnost procesu konverze energie během procesu detekce. **Kvantová účinnost detektoru** – souvisí s pravděpodobností absorpce fotonu a následnou emisí – v případě fotoelektrického jevu = počet uvolněných elektronů ku počtu dopadajících fotonů

Časová odezva – rychlost, s jakou probíhá přeměna energie v detektoru; rychlost, s jakou detektor zpracovává optický signál, respektive reaguje na jeho změnu. Charakteristická doba odezvy (Δt).

Minimální detekovatelný výkon a detektivita – Detektivita D udává vztah mezi minimálním detekovatelným výkonem P_{\min} a šířkou pásma detektoru $\Delta f \simeq 1/\Delta t$:

$$D = \frac{\sqrt{\Delta f}}{P_{\min}}$$

Spektrální charakteristika – udává citlivost detektoru pro různé vlnové délky elmag. záření. Spektrálně selektivní \times neselektivní detektor

Šumové charakteristiky – všechny detektory vykazují určitý šum (např. „tepelný“ šum) – parazitní náhodnou odezvu která nesouvisí s detekovaným signálem a způsobuje chyby při detekci. Důležitý je poměr signál – šum a parametr NEP (*noise equivalent power*).

Linearita odezvy – velikost signálu je přímo úměrná intenzitě záření (počtu fotonů).

Ideální detektor

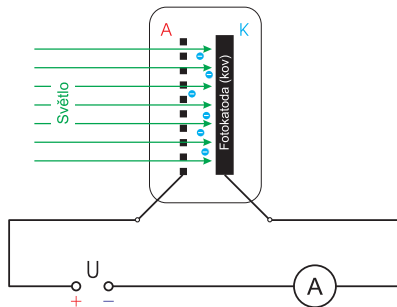
- ▶ Velmi citlivý – nízký P_{\min}
- ▶ Velká účinnost konverze – detekuje každý foton
- ▶ Okamžitá odezva na změnu optického signálu
- ▶ Spektrálně neselektivní
- ▶ Zanedbatelný šum
- ▶ Lineární

...NEEXISTUJE...

...ZATIM...

Fotoelektrický jev

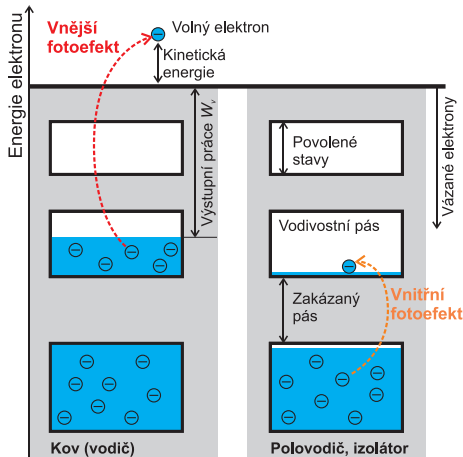
- ▶ Dopadem optického záření (obvykle UV) na kovovou fotokatodu (např. zinek) může dojít k uvolnění (fotoemisi) elektronů a k průchodu proudu obvodem. Experimentálně bylo zjištěno toto:



1. Pro každý kov existuje určitá **kritická (mezní) frekvence ν_c** , při které dochází k uvolňování elektronů. Pro menší frekvenci již k emisi elektronů nedochází bez ohledu na intenzitu záření.
2. Počet uvolněných elektronů (velikost „fotoproudu“) pro $\nu > \nu_c$ je úměrný intenzitě.
3. Energie uvolněných fotoelektronů je přímo úměrná frekvenci záření. Nezávisí na intenzitě elemag. pole.

- ▶ **Klasická fyzika** nedokáže fotoefekt vysvětlit.
 - ▶ Pro vytržení elektronu z kovu by měla být rozhodující amplituda elektrického pole, tedy intenzita záření.
 - ▶ Není důvod pro existenci mezní frekvence.
- ▶ Pozorován byl i tzv. vnitřní fotoefekt – nárůst vodivosti polovodičů (selen) po dopadu světla

Kvantová teorie fotoelektrického jevu (A. Einstein 1905)



- ▶ Elektron je v kovu vázaný. Pro jeho uvolnění je potřeba určitá minimální energie – výstupní práce W_v .
- ▶ Foton, který má vyvolat emisi elektronu musí mít minimálně energii W_v .
- ▶ Pokud je energie fotonu větší, případně přebytek energie na kinetickou energii volného elektronu. Platí zákon zachování energie:

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

- ▶ Pokud je energie fotonu menší, k fotoemisi nemůže dojít \Rightarrow **mezní frekvence $\nu_c = W_v/h$.**

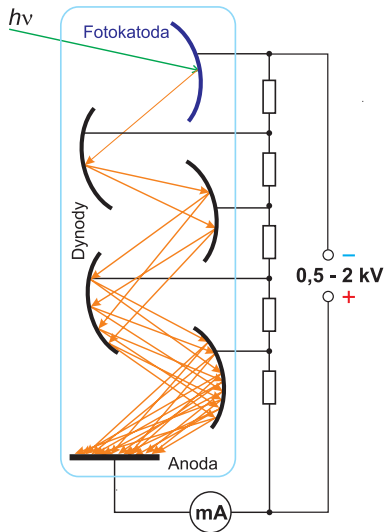
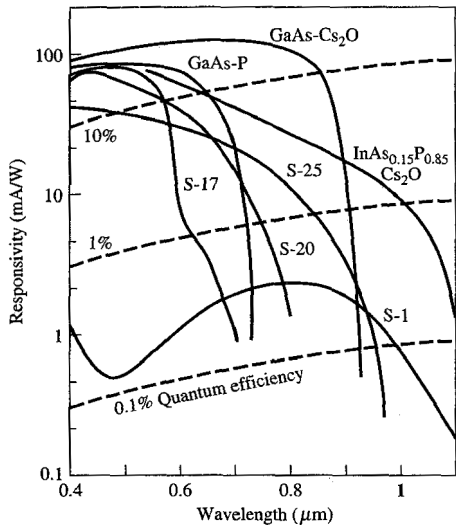
- ▶ **Mezní vlnová délka** – fotoefekt je obecně spektrálně selektivní

$$\lambda \leq \lambda_v = \frac{hc}{W_v}$$

- ▶ V případě vnitřního fotoelektrického jevu odpovídá výstupní práci šířka „zakázaného“ pásu

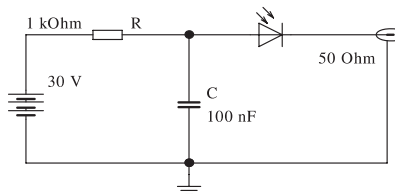
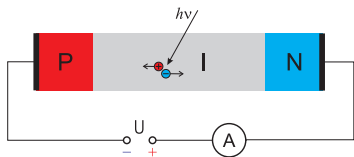
Detektory využívající vnější fotoelektrický efekt

- ▶ Klíčová je volba fotokatody – speciální materiály s co nejnižší výstupní prací (alkalické kovy)
- ▶ Vakuová fotodioda, fotonásobič



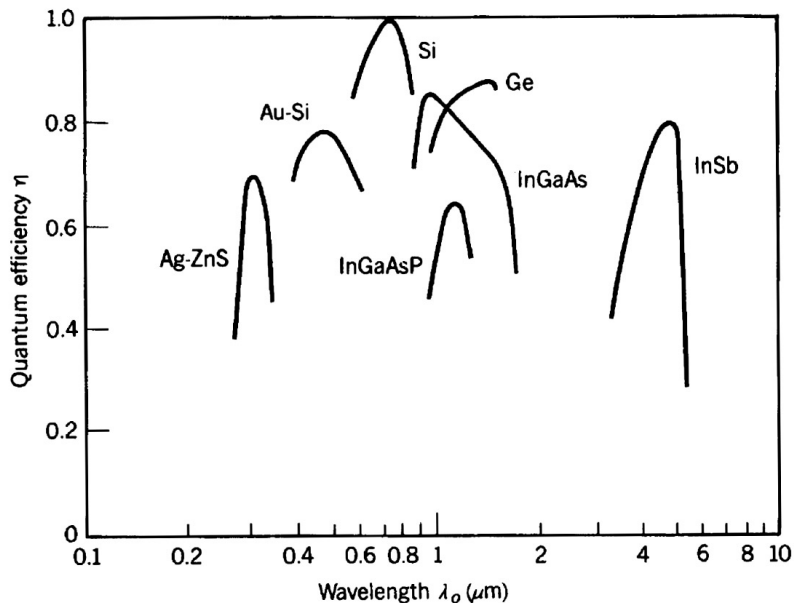
Detektory využívající vnitřní fotoelektrický efekt

- ▶ **Fotovodivostní detektor** generace páru elektron-díra v polovodiči (selen, Si, InAs, nízká teplota)
- ▶ **Fotorezistor** změna pohyblivosti nosičů náboje – polovodivé sloučeniny (PbS), nelineární odezva
- ▶ **Polovodičová fotodioda** – vnitřní fotoelektrický jev + řízení PN-přechodu – speciální struktura zvyšuje citlivost, rychlost (PIN-dioda Si), heterostruktury (slitiny GaInAsSb/GaAlAsSb, InAs/InAsSbP), lineární odezva



- ▶ **Lavinový detektor** speciální struktura fotodiody zvyšuje kvantový výtěžek sekundární lavinovou generací nosičů náboje (citlivá, rychlá, nelineární)
- ▶ **Matice detektorů – CCD, CMOS** 1D, 2D, záznam obrazu, mezní vlnová délka pro křemík je cca 1180 nm, pro $\lambda > \lambda_c$ je průhledný – neabsorbuje – „nevidí“.
- ▶ **Fotočláanky** přechod kov-polovodič – přímá konverze světla na elektrický proud

Kvantová účinnost polovodičů



Optické záření – fotony →

- absorpce systémem kvantových soustavou a jejich excitace →
 - postupná relaxace do základního stavu →
 - zářivé i **nezářivé přechody** →
 - fotony a fonony →
- luminiscence (světlo) a mechanický pohyb mikročástic (**teplo**)

Záření je absorbováno, energie elektromagnetického pole je částečně přeměněna na tepelnou energii (pohyb), což vede k ohřevu části detektoru – detekuje se změna teploty.

- ▶ Rychlost odezvy závisí na tepelné kapacitě detektoru
- ▶ Spektrální citlivost závisí na absorpčních schopnostech detektoru

Kalorimetr – absolutní měření tepla a energie

$$\Delta Q = Cm\Delta T$$

Termočlánek – měření rozdílu teplot díky vzniku termoelektického napětí na rozhraní dvou různých kovů

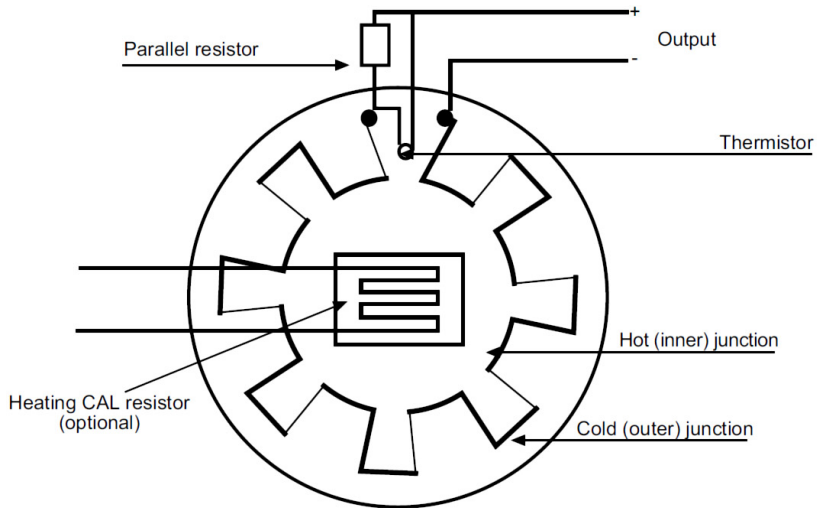
Bolometr – měří teploty na základě měření odporu vodiče (odpor s teplotou roste v důsledku kmitů mřížky)

Termistor – využívá silnou nelineární závislost odporu některých materiálů (polovodičů) na teplotě – odpor s teplotou klesá díky tepelné excitaci vodivostního pásu

Pyroelektrický detektor – založen na pyroelektrickém jevu – zahřátím nebo ochlazením krystalu se změní elektrická polarizace dipólů uvnitř krystalu a na stěnách krystalu se objevuje náboj.

- ▶ Lithium tanatalát
- ▶ Zirkon-titanová keramika
- ▶ Polyvinilfluorid

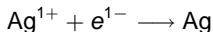
Termočlánkový tepelný detektor – zapojení



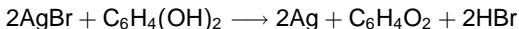
- ▶ Vnitřní fotoelektrický jev
- ▶ Nelineární proces (denzitometrie)
- ▶ Velká plocha a rozlišení, RTG

Černobílá negativní fotografická emulze

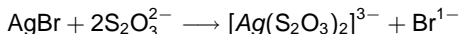
- ▶ AgBr absorbuje světlo pro $\lambda_c \leq 460$ nm
- ▶ Expozice – světlem se rozkládá halogenid stříbra, redukuje se atomární kovové stříbro (latentní, zárodečný obraz):

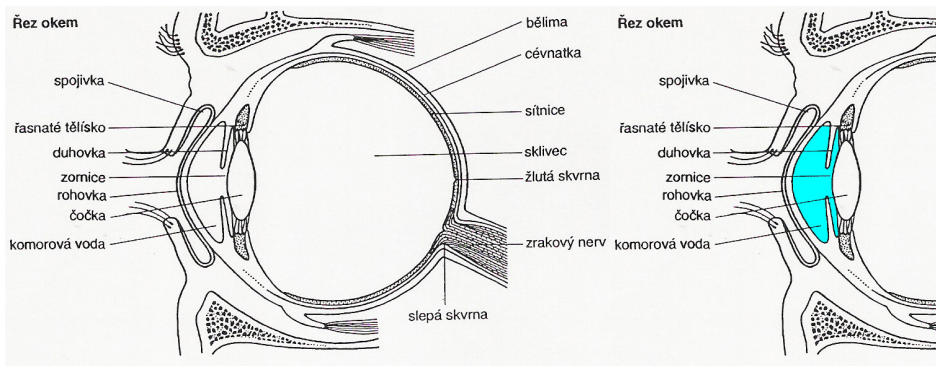


- ▶ Vyvolávání – redukce stříbra z AgBr v okolí zárodků

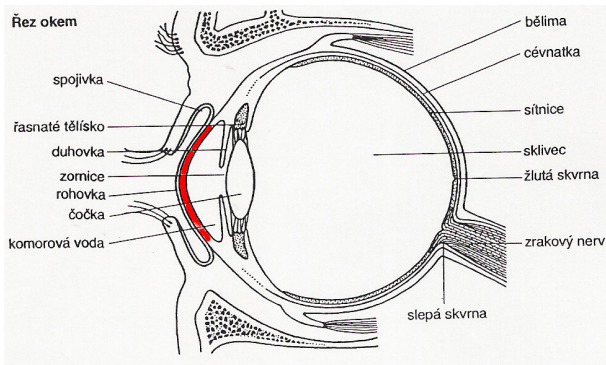


- ▶ Ustalování – thiosíran převádí zbylý nerozpustný halogenid na rozpustnou komplexní sloučeninu, která se pak odstraňuje vypíráním v čisté vodě:

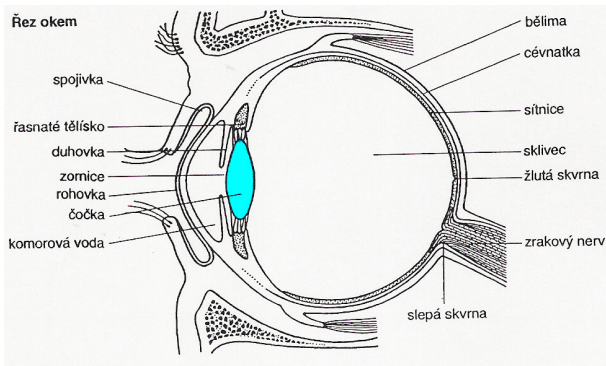




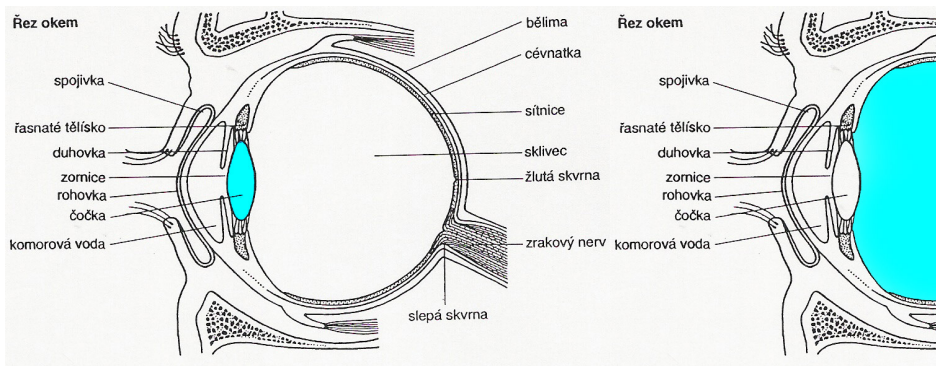
Oční koule (bulbus oculi) je mírně asymetrická koule, jejíž sagitální průměr je okolo 24–25 mm, transversální průměr je asi 24 mm. Hloubka přední komory, v níž je komorová voda, je 3,5 mm. Mezi komorovou vodou a čočkou je **duhovka** (iris), sloužící jako clona. Její radiální a kruhová svalová vlákna dokážou měnit průměr otvoru – **zornice** (zřítelnice, pupilla) v intervalu od 2 mm do 6 mm v závislosti na dopadajícím světelném toku.



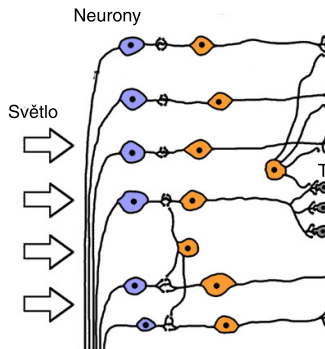
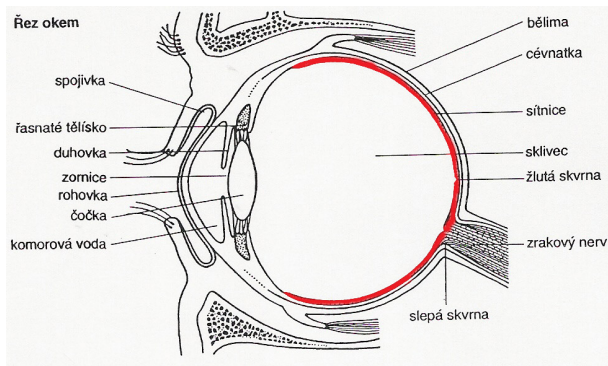
Rohovka (cornea) je průhledná část vnějšího povrchu, která kryje zornici a duhovku. Tloušťka 0,8 mm. Rohovka je zároveň první a nejsilněji lámavá plocha optického aparátu, podílí se spolu s přední a zadní plochou čočky na vytvoření ostrého obrazu na sítnici. Předpokladem její průhlednosti je její neustálé zvlhčování.



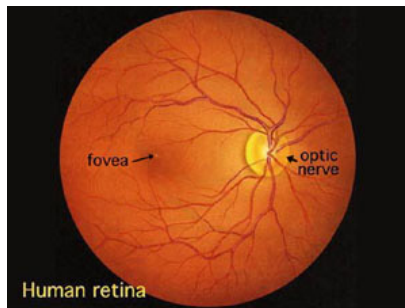
Čočka (lens crystalina) je nehomogenní těleso tvaru dvojbypuklé čočky z tuhé, rosolovité, dokonale průhledné hmoty. Je asi 4 mm silná, její povrchové části mají index lomu 1,38 a vnitřní části 1,41. Během života přibývají na čočce vrstvy, které s přibývajícím stářím tvrdnou a snižují akomodaci oka. Optická mohutnost samotné čočky je 18 D.



Akomodace je změna vyklenutí čočky, a tedy její optické mohutnosti. Oko akomodované na dálku má ohniskovou vzdálenost 0,017 m a optická mohutnost 58,8 D. Optická mohutnost rohovky je 42 D, čočky 18 D a kapalin (komorové vody, sklivce) 2–3 D. Akomodací na blízko se může zvětšit mohutnost u 10-letého člověka až o 15 D. Tato akomodační šíře činí u 45-letého člověka už jenom 4 D a u 60-letého nejvýše 1 D.



Sítnice (retina) vystýlající vnitřní povrch cévnatky je 0,2 mm až 0,4 mm silná. Tvoří ji 11 vrstev. Dva typy receptorů: **tyčinky** ($1,3 \times 10^8$, $\varnothing 2 \mu\text{m}$) slouží pro vnímání světla, **čípky** ($5 - 7 \times 10^6$, $\varnothing 4 \mu\text{m}$) jsou receptory barevného vidění. Místem nejostřejšího vidění je tzv. žlutá skvrna o průměru 1 mm. V ní převládají čípky. Sítnice je citlivá na barevné spektrum v intervalu vlnové délky 400 až 750 nm (velmi citlivé oko až v rozmezí 380–780 nm). Citlivost oka je největší pro 555 nm (zelená barva).



Žlutá skvrna (fovea) je místo na sítnici o průměru cca 0,2–0,5 mm. Nachází se na ose oka, je to místo nejostřejšího vidění, kterým my lidé ostříme. Na 1 mm^2 připadá asi 150 000 čípků (odpovídá rozlišení asi 10 000 dpi!), nejsou zde skoro žádné tyčinky. Žlutá skvrna slouží k ostrému a barevnému dennímu vidění. Vysoké rozlišení podporuje i fakt, že každý čípek ve žluté skvrně má svůj vlastní optický nerv (vlákno).

Slepá skvrna místo bez čípků a tyčinek, kde zrakový nerv opouští bulbus – je asi 5 mm vzdálená od žluté skvrny.






- ▶ Existují tři základní procesy interakce kvantových soustav s elektromagnetickým zářením:
 1. Absorpce (fotonu)
 2. Spontánní emise (fotonu)
 3. Stimulovaná emise (fotonu)
- ▶ Každému procesu odpovídá změna vnitřní energie kvantové soustavy.
- ▶ Platí rezonanční podmínka (Bohrův vztah):

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

- ▶ Pravděpodobnost těchto procesů vyjadřují Einsteinovy koeficienty B_{mn} , A_{nm} a B_{nm} ($n > m$)
- ▶ Ze znalosti průběhu spektrální charakteristiky záření černého tělesa lze odvodit vztah mezi B_{mn} , A_{nm} a B_{nm} . Pro systém nedegenerovaných hladin platí:

$$B_{mn} = B_{nm}, \quad A_{nm} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{nm}.$$

- ▶ Detekce záření – konverze na lépe zpracovatelnou formu energie
- ▶ Detekujeme intenzitu záření, resp. fotony
- ▶ Parametry detektorů (účinnost konverze, časová odezva, citlivost, šum)
- ▶ Detektory založené na fotoefektu (vnitřní, vnější)
- ▶ Detektory využívající konverzi záření na teplo
- ▶ Oko

-  VRBOVÁ M., JELÍNKOVÁ H., GAVRILOV P.: *Úvod do laserové techniky*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 1994 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>)
-  VRBOVÁ M. a kol.: *Lasery a moderní optika - Oborová encyklopedie*, Prometheus, Praha, 1994
-  Sochor V.: *Lasery a koherentní svazky*, Academia, Praha, 1990
-  Engst P., Horák M.: *Aplikace laserů*, SNTL, Praha, 1989
-  Přednášky, cvičení: <http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>