

# FRET

Förster resonance energy transfer

Fluorescence Resonance Energy Transfer

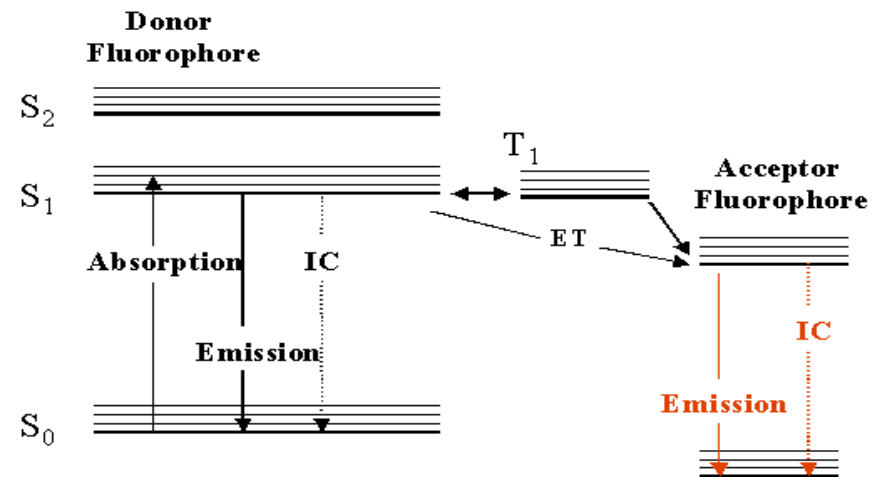
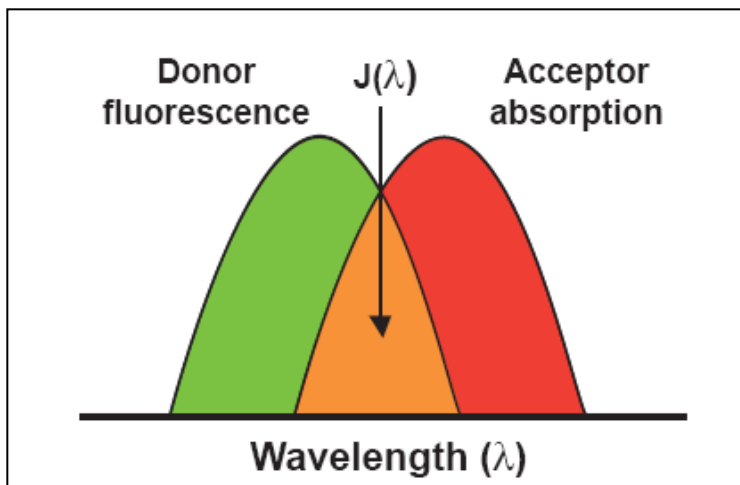
# FRET

- **FRET je Förster Resonance Energy Transfer**
- **Transfer** – Försterův rezonanční energetický transfér (Theodor Förster, 1910-1974)
- Někdy nazýván také **Fluorescence Resonance Energy Transfer** (hlavně v chemické analýze a biologii, kde je sledována výsledná luminiscence)
- přenos energie mezi dvěma fluorofory vzdálenými 10-100 Å

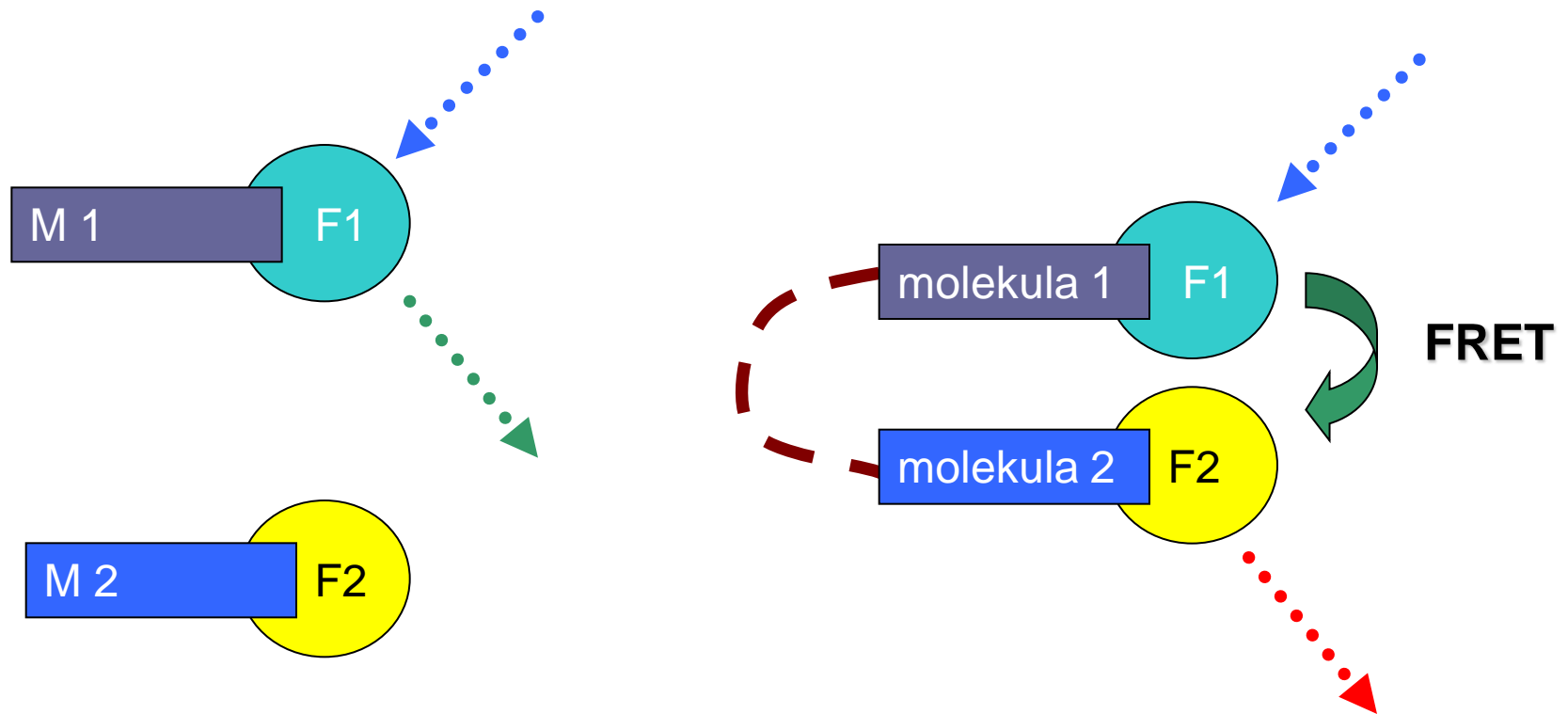
1. první fluorofor (donor) je excitován specifickou vlnovou délkou
2. místo fluorescence je energie přenesena na druhý fluorofor (akceptor)
3. Akceptor vyzáří přijatou energii ve formě světla

Podmínky:

- a) vzdálenost mezi molekulami je menší, než 100 Å
- b) emisní spektrum donoru se překrývá se absorpčním (excitačním) spektrem akceptoru
- c) molekuly mají stejně orientovány dipólové momenty



# Využití FRET: schéma



# Základní vztahy

- účinnost FRET  $E$  je definována:

$$E = 1 - \tau'_D / \tau_D$$

- kde  $\tau'_D$  a  $\tau_D$  jsou fluorescenční časy vyhasínání v přítomnosti a bez přítomnosti akceptoru

$$E = 1 - F'_D / F_D$$

- $F'_D$  a  $F$  jsou intensity fluorescence v přítomnosti a bez přítomnosti akceptoru

# Základní vztahy

- účinnost ( $E$ ) závisí na vzdálenosti mezi donorem a akceptorem ( $r$ )

$$E = \frac{1}{(1 + (r/R_0)^6)}$$

- $R_0$  je Försterova vzdálenost při které je účinnost přenosu 50%

$$R_0^6 = 8.8 \times 10^{23} \kappa^2 n^{-4} Q_0 J$$

- $R_0$  závisí na integrálu překryvu emisního spektra donoru a absorpčního spektra akceptoru ( $J$ )
- $\kappa^2$  je faktor zahrnující dipólové orientace, pro volně rotující molekuly je většinou 2/3
- $n$  je refrakční index,  $Q_0$  je kvantový výtěžek samotného donoru

# FRET

Donor	Acceptor	$R_0$ (Å)	Ref
Fluorescein	Tetramethylrhodamine	49-56	13
IAEDANS <sup>†</sup>	FITC	49	13
IAEDANS <sup>†</sup>	5-(Iodoacetamido)fluorescein	49	13
Fluorescein	Fluorescein	44	13
EDANS	DABCYL	33	In House
Tryptophan	IAEDANS <sup>†</sup>	22	7
Tryptophan	Dansyl	21-24	7
Tryptophan	Pyrene	28	7
Dansyl	Fluorescein	33-41	14
Naphthalene	Dansyl	22	13
Pyrene	Coumarin	39	13
B-Phycoerythrin	Cy5	79	13

# FRET

Quencher (Acceptor)	$\lambda_{\text{max}}$ (in nm)	Amine-Reactive	Thiol-Reactive	Carboxy-Reactive (NH <sub>2</sub> -Containing)	Recommended FRET Donor
DNP	348	DNP-X, acid; DNP-X, SE	DNP C2 maleimide	DNP C2 amine	Abz, Abz(N-Me), MCA, Trp
DABCYL	485	DABCYL; DABCYL, SE	DABCYL C2 maleimide	DABCYL C2 amine	EDANS, AMCA, HiLyte Fluor™ 430
DABCYL Plus™	486	DABCYL Plus™ acid; DABCYL Plus™, SE	DABCYL Plus™ C2 maleimide	DABCYL Plus™ C2 amine	EDANS, AMCA, HiLyte Fluor™ 430
QXL™ 490	488	QXL™ 490, acid; QXL™ 490, SE	QXL™ 490 C2 maleimide	QXL™ 490 C2 amine	EDANS, AMCA, HiLyte Fluor™ 430
QXL™ 520	508, 530	QXL™ 520, acid; QXL™ 520, SE	QXL™ 520 C2 maleimide	QXL™ 520 C2 amine	FAM, FITC, Rh6G HiLyte Fluor™ 488
QXL™ 570	538, 577	QXL™ 570, acid; QXL™ 570, SE	QXL™ 570 C2 maleimide	QXL™ 570 C2 amine	Cy3, TAMRA, ROX, HiLyte Fluor™ TMR
QXL™ 610	594, 628	QXL™ 610, acid; QXL™ 610, SE	QXL™ 610 C2 maleimide	QXL™ 610 C2 amine	ROX, Texas Red®, HiLyte Fluor™ TR
QXL™ 670	665	QXL™ 670, acid; QXL™ 670, SE	QXL™ 670 C2 maleimide	QXL™ 670 C2 amine	Cy5, HiLyte Fluor™ 647

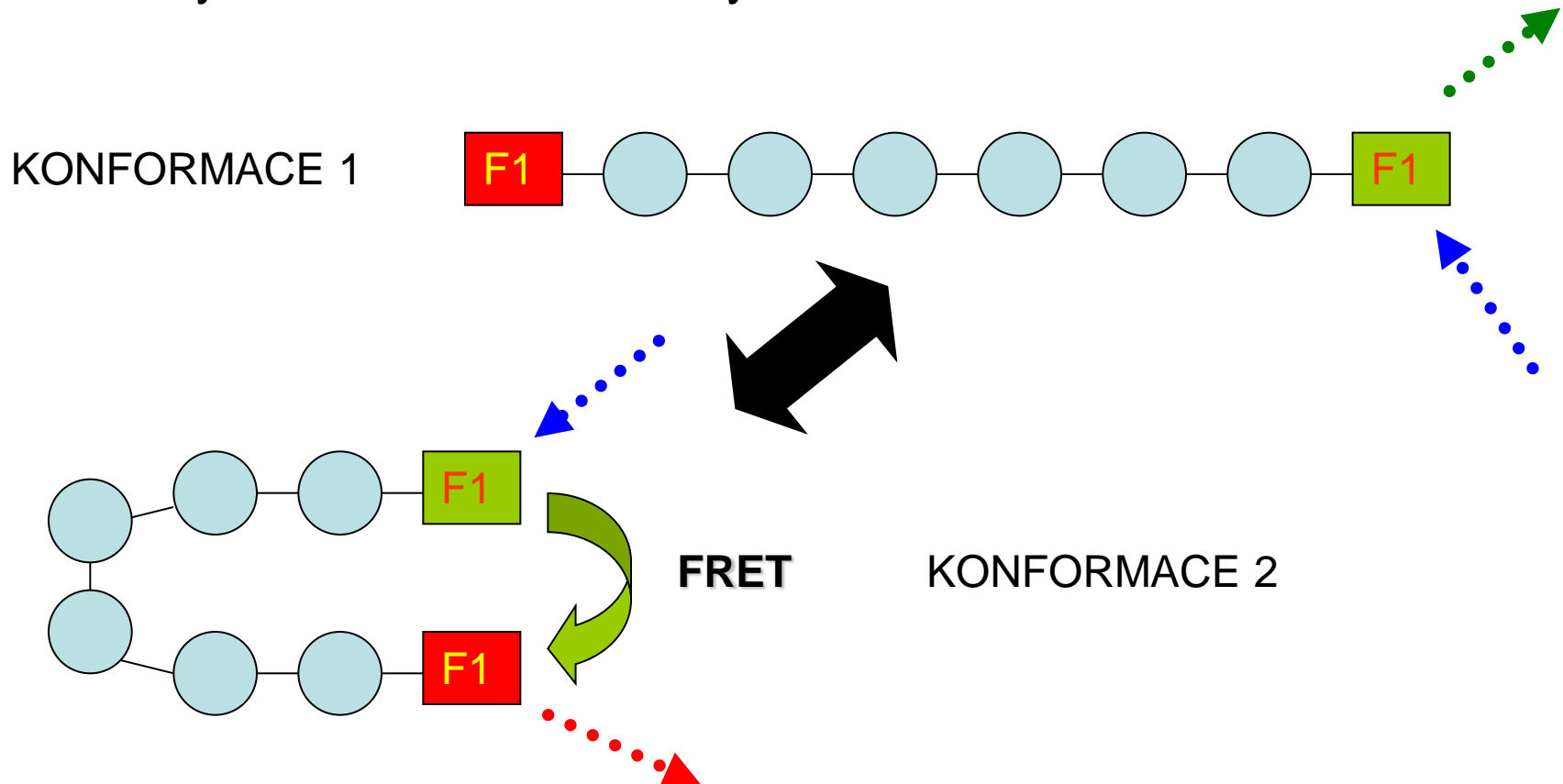


# Aplikace

- sledování strukturních a konformačních změn (dvě molekuly (případně dvě části molekuly) jsou označeny donorem a akceptorem a sledujeme zda dochází k výměně energie
- sledujeme: studium struktury proteinů, polynukleotidů, DNA, protein-protein interakce, DNA-protein interakce, atd.
- analytické aplikace

# Sledování změn konformace molekuly

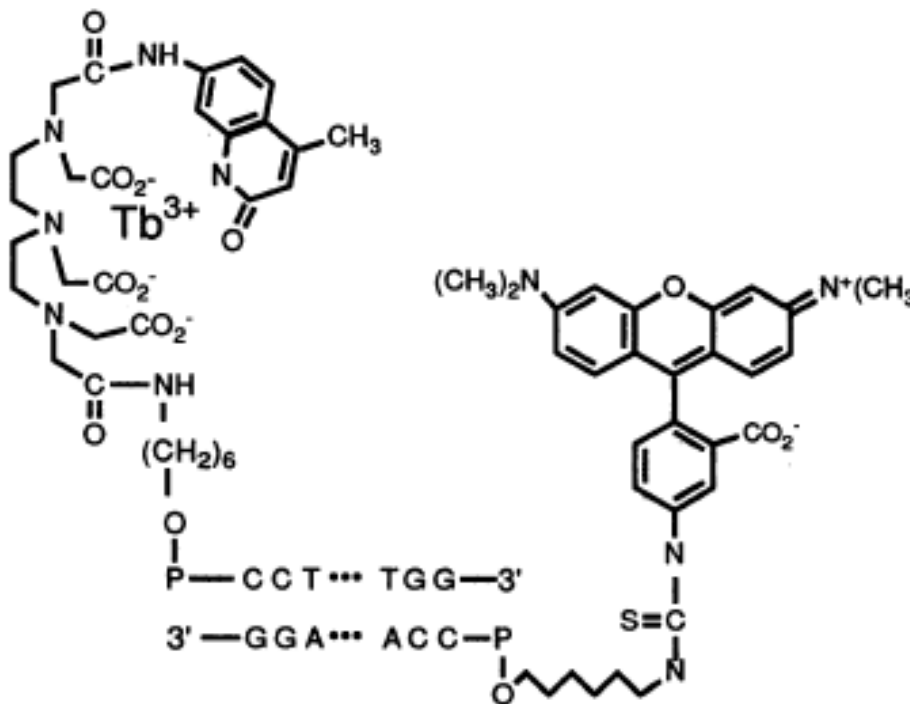
- např. sledování změn struktury proteinu, případně jiných biopolymerů
- nevýhoda: ovlivnění struktury navázáním fluoroforů



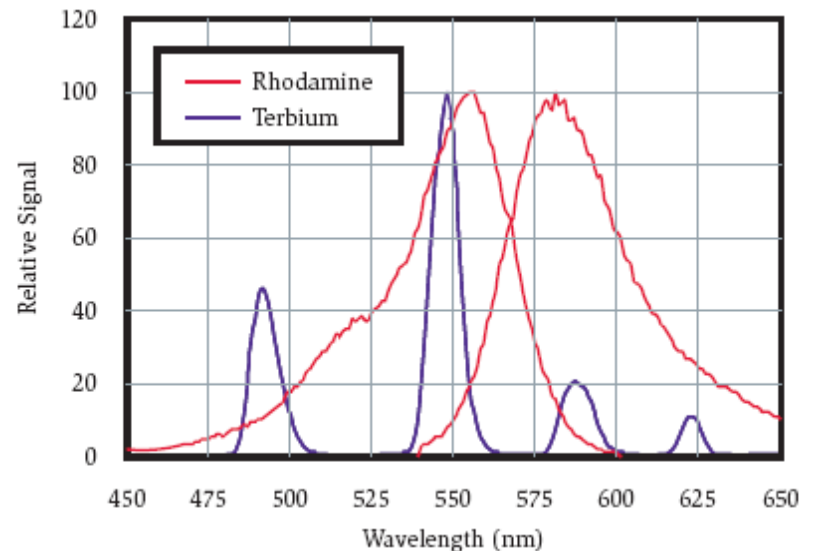
# Sledování interakcí mezi vlákny DNA

## DNA

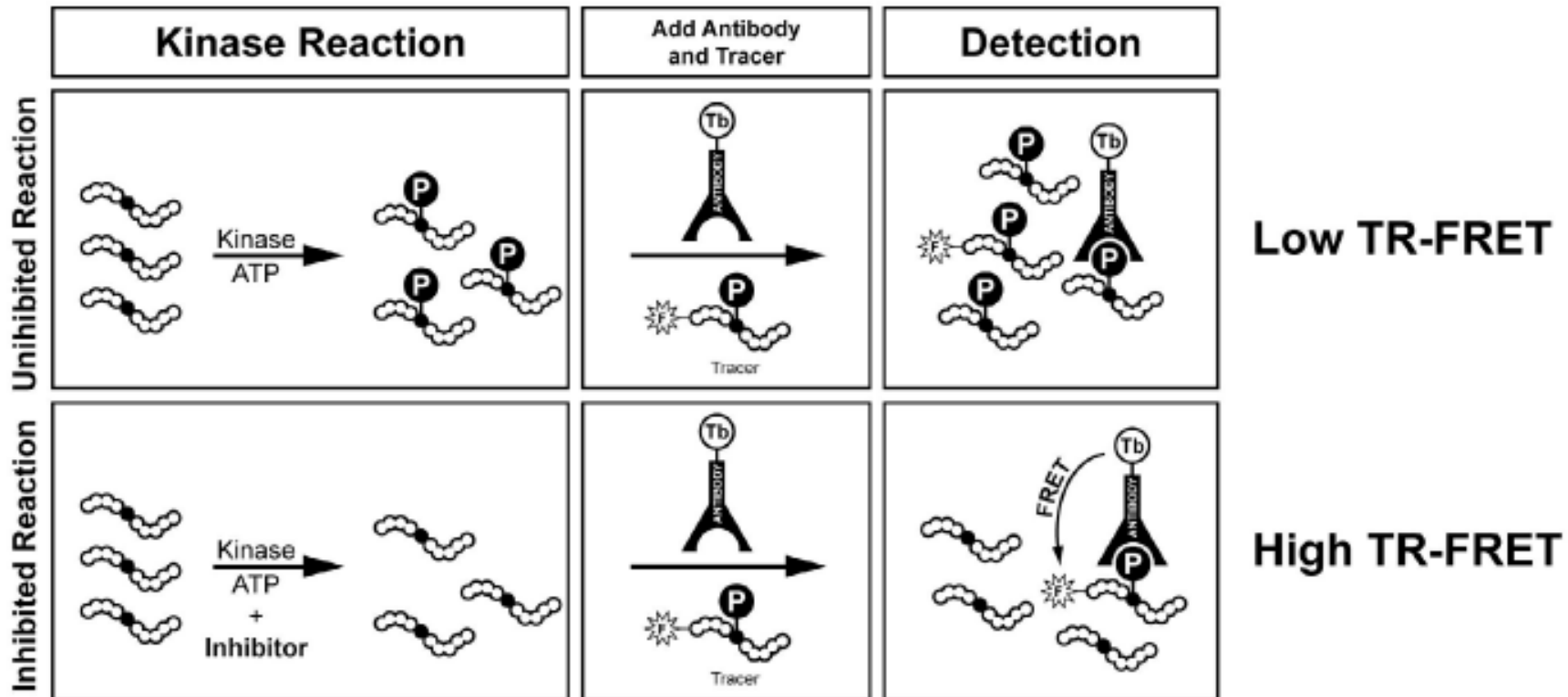
- vzdálenost mezi vlákny DNA spojenými vodíkovými můstky je 30-60 Å
- na větší vzdálenosti: donor obsahuje Ln<sup>3+</sup>



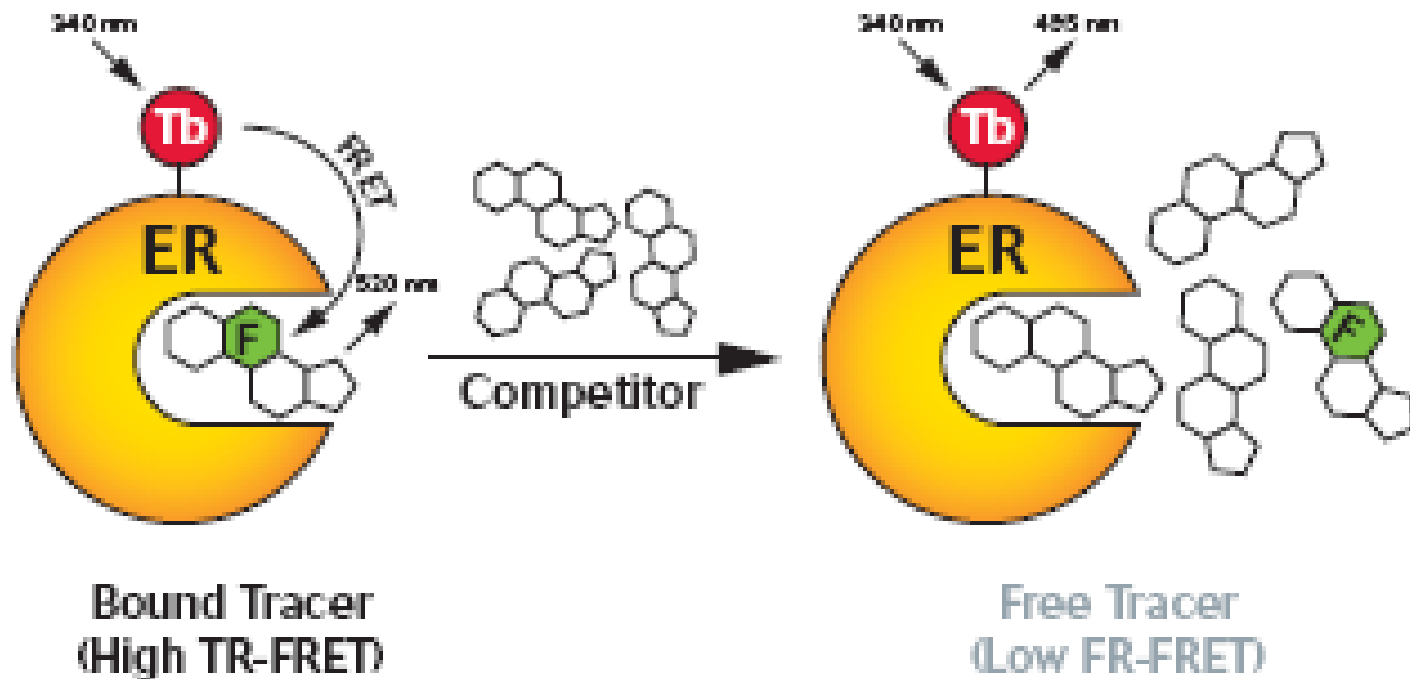
$$E = 1 - \tau'_D / \tau_D$$



# Analytické aplikace FRET



# Analytické aplikace FRET



# BRET

- BRET: Bioluminescence Resonance Energy Transfer
- Využití metody FRET je při analýze někdy limitováno potřebou excitace „vnějším“ světelným zdrojem („photobleaching“, excitace jiného fluoroforu)
- v případě BRET je zdrojem světla bioluminiscenční reakce (nejčastěji se využívá luciferasa z *renilla reniformis*)
- sledování interakcí v živých organismech

# Homo-FRET

- Studium interakce dvou prakticky totožných fluoroforů
- Po excitaci může dojít k přenosu energie, ale světlo emitované akceptorem bude mít stejnou vlnovou délku jako světlo vyzářené donorem
- Proto se sleduje zda dochází k polarizaci světla (využití fluorescenční anizotropie)
- Většinou se to týká studia biologických vzorků (např. proteinů)

# Bimolecular fluorescence complementation

- Alternativou k FRET (nebo BRET) je BiFC
- Pro studium interakce proteinů nebo jiných biomolekul
- Dvě biomolekuly jsou označeny komponentami, které při interakci vytvoří fluoreskující komplex
- Fluoreskující komplex je vytvořen po cyklizační reakci
- Nejčastěji se využívá YFP





Chemiluminescence

# Chemiluminescence

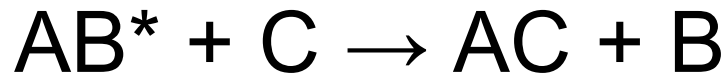
- zdrojem excitace je chemická reakce
- Základní schéma možné reakce



- z reakce jedné molekuly ~ jeden foton
- při reakci se dále uplatňují katalyzátory, kovy (a ionty kovů), vnější prostředí (zejména hydrofobicita)
- téměř vždy se jedná o **OXIDACI**

[http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Chemoluminescent\\_reaction.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Chemoluminescent_reaction.jpg)

# Excitovaný meziprodukt



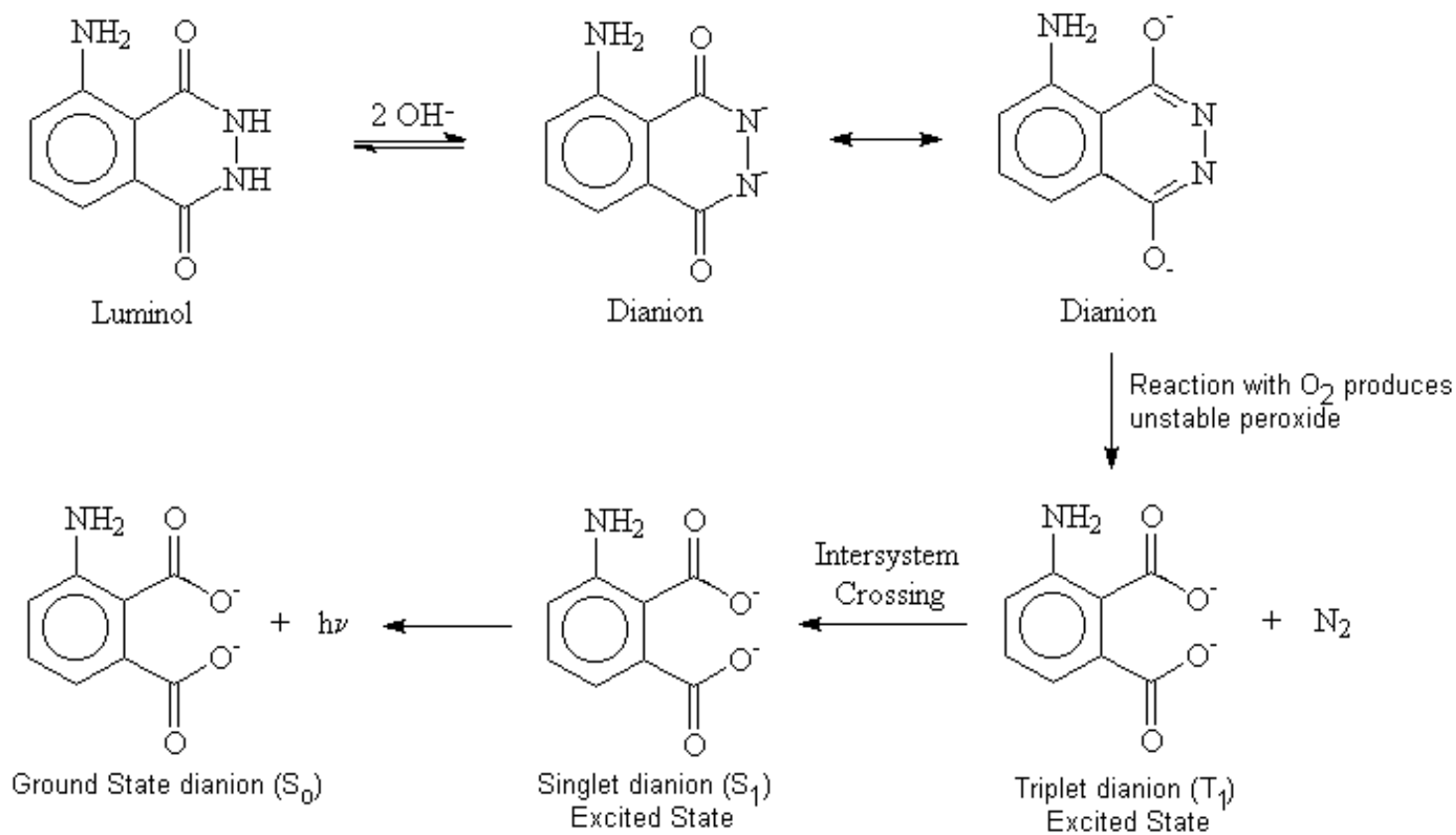
...a další možnosti de-excitace

# Chemiluminiscenční reakce

- zpravidla oxidační, exotermická reakce s přebytkem energie, kterou je možné využít k excitaci molekuly (nejlépe bez „zbytečných“ energetických ztrát)
- emise fotonů musí být umožněna při návratu elektronů do základního energetického stavu
- intenzita chemiluminiscence je dána vztahem:

$$I_{CHL} = \Phi_{CL}(-dA/dt)$$

# Příklad chemiluminiscenční reakce – oxidace luminolu kyslíkem



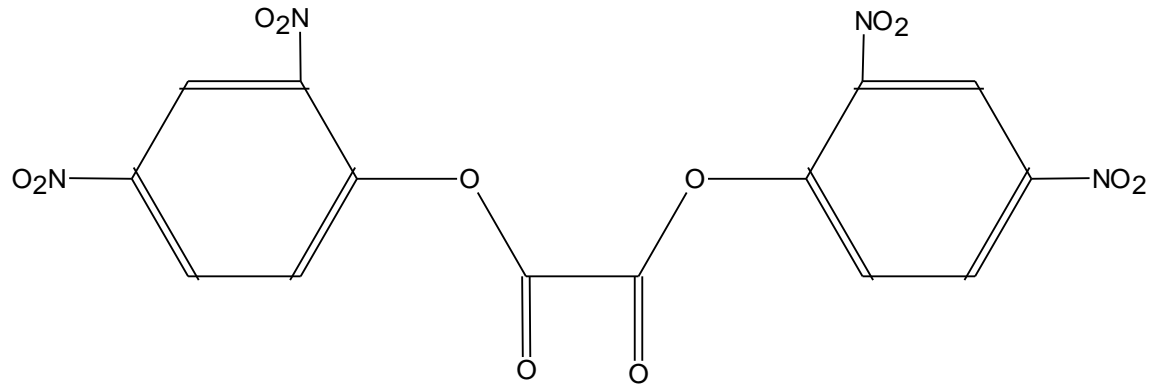
# Chemiluminiscenční reakce

- reakce luminolu v zásaditém prostředí s kyslíkem (peroxid, vzdušný kyslík) → modře fluoreskující roztok
- jestliže jsou v roztoku obsaženy také  $\text{Fe}^{2+}$ , nebo  $\text{Cu}^{2+}$  (katalýza reakce) dochází k zvýšení intenzity luminiscence

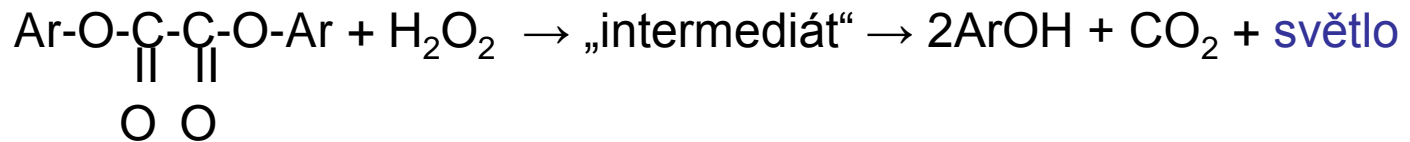


<http://people.howstuffworks.com/luminol.htm>

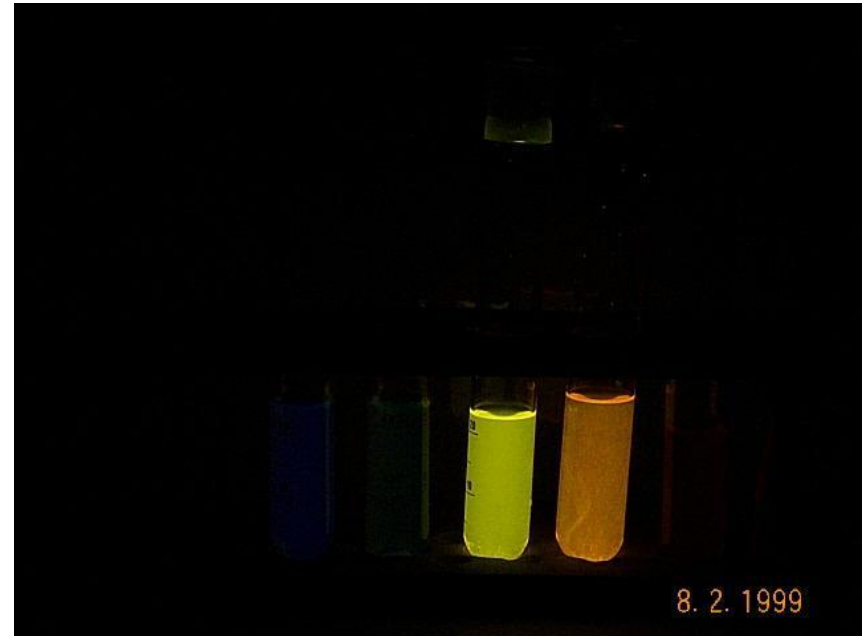
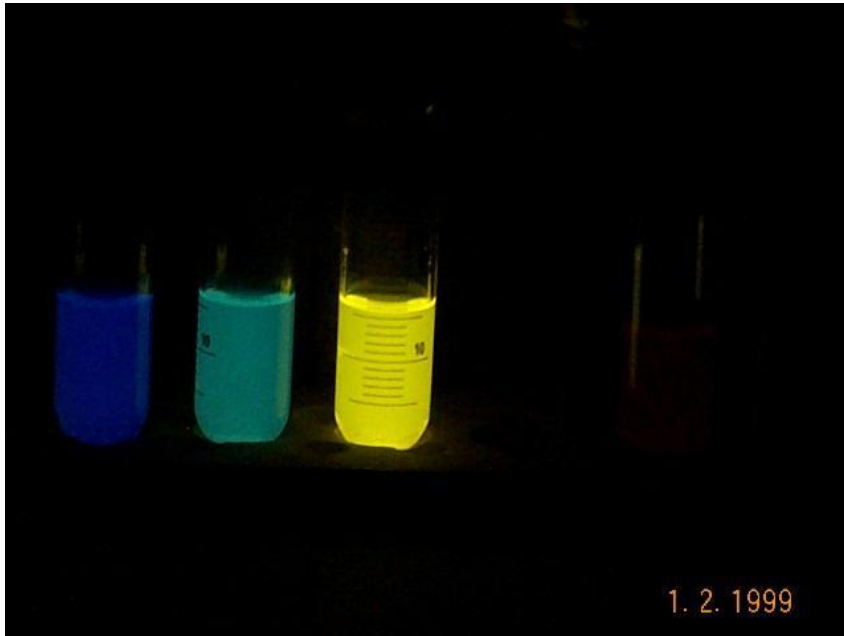
# Barevná chemiluminiscenční světla



bis(2,4-dinitrophenyl)ethanedioate (DNPO)



# Barevná chemiluminiscenční světla



Vhodné fluorofory: rhodamin B (červená barva), rhodamin 6G (oranžová), rubren (žlutá), 9,10 – bis fenylethynyl atracén (zelená), 9,10 – difenylatracén, další...



# Chemiluminiscence v analytické chemii

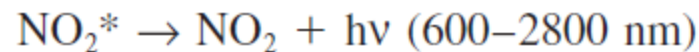
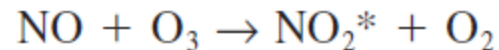
1. přímá analýza – chemiluminiscenční činidlo přímo reaguje s analytem
2. nepřímá analýza – reakce chemiluminiscenčního činidla je katalyzována/inhibována nebo jinak ovlivněna analytem

# Přímá analýza

- analyt je oxidován pomocí oxidačního činidla:  $\text{KMnO}_4$ , peroxid,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ ,  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ , tris (2,2'-bipyridin)ruthenium(III) komplex, jodistan N-bromosukcinimid
- analytem mohou být například fenoly, polyfenoly (quercetin, katechin, atd.), indoly – alkaloidy (brucin, strychnin, atd.), heterocykly (penicilin, atd.)
- Lze využít zesilovačů: polyfosfáty
  - oxidační činidla v reakcích vedoucích k CL produktům  $\text{KMnO}_4$  ( $\text{MnO}_2$ ),  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  tris(2,2'-bipyridin)ruthenium(III) komplex, jodistan N-bromosukcinimid
  - nejběžnější oxidace  $\text{KMnO}_4$  v kyselém prostředí - nejčastěji  $\text{H}_2\text{SO}_4$  využití zesilovačů CL
    - polyfosfáty (stabilizace meziproductů)
    - kyselina mravenčí
    - formaldehyd, glutaraldehydanalyty - fenoly, polyfenoly (quercetin, katechin, diethylstilbestrol), indoly (alkaloidy - psilocin, brucin, strychnin, reserpin), heterocykly (peniciliny, cefalosporiny, fenothiaziny)

# Oxidace v plynné fázi

- Jedna z nejstarších známých chemiluminiscenčních reakcí – „hoření“ bílého fosforu
- Elementární bílý fosfor se na vlhkém vzduchu oxiduje a dochází k emisi zeleného světla
- Podobnou reakcí je oxidace oxidu dusnatého ozónem
- Využívá se pro stanovení NO ve vzduchu
- Lze stanovovat i NO<sub>2</sub> (redukce na NO a následná oxidace)
- LOD mohou být až 1ppb NO

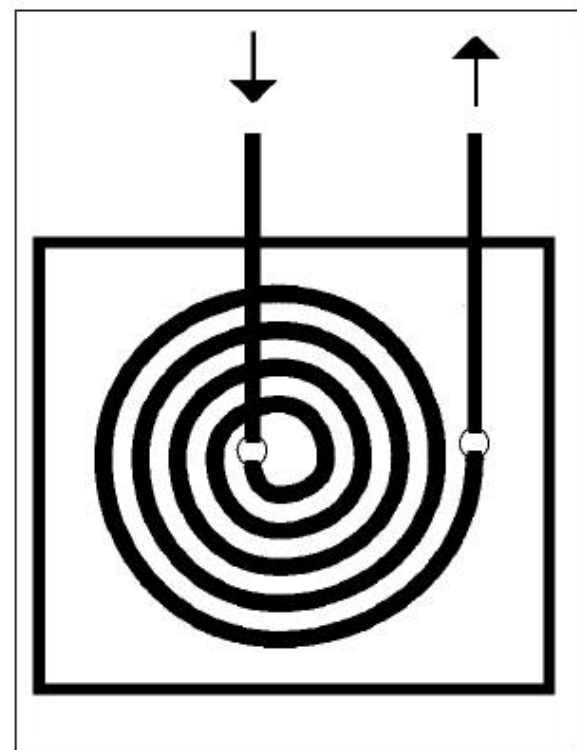
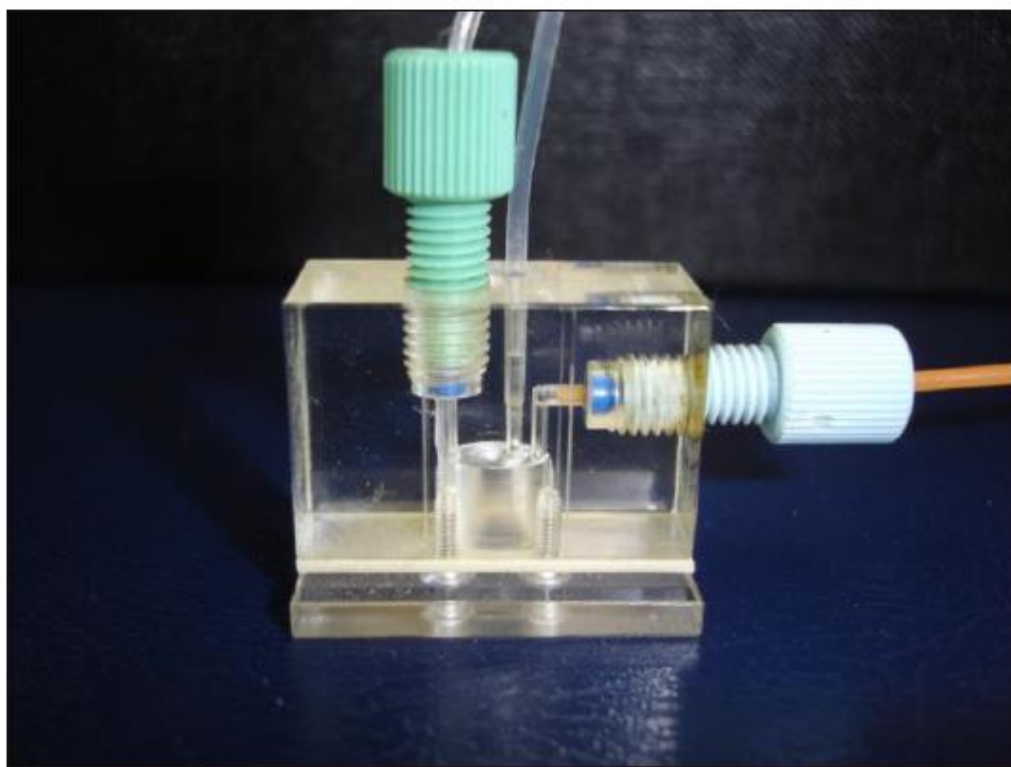


# Chemiluminiscenční analýza – příklady stanovení

Analýza plynů: NO, ozón, po převedení i další dusíkaté sloučeniny, síra a její sloučeniny



# Instrumentace pro chemiluminiscenční analýzu



*Ref: H. Sklenářová, Škola molekulové spektrometrie (2013)*



**Elektroluminiscence**

# Elektroluminiscence

- materiál emituje světlo působením procházejícího proudu, nebo působením elektrického pole
- většinou se jedná o tzv. radiační rekombinaci (zánik páru díra-volný elektron)
- příklady elektroluminiscenčních materiálů: ZnS dopovaný Ag, nebo Cu

# Electroluminescence

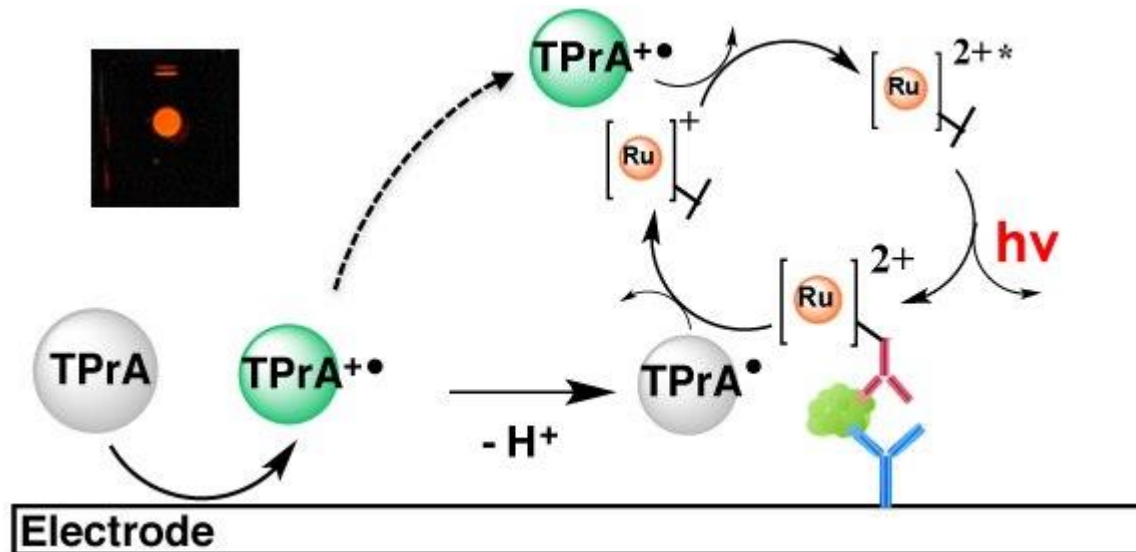
- Electroluminescence is the result of [radiative recombination](#) of [electrons](#) & [holes](#) in a material, usually a [semiconductor](#). The excited electrons release their energy as [photons](#) - light. Prior to recombination, electrons and holes may be separated either by [doping](#) the material to form a [p-n junction](#) (in semiconductor electroluminescent devices such as [light-emitting diodes](#)) or through excitation by impact of high-energy electrons accelerated by a strong electric field (as with the [phosphors](#) in [electroluminescent displays](#)).
- It has been recently shown that as a solar cell improves its light-to-electricity efficiency (improved open-circuit voltage), it will also improve its electricity-to-light (EL) efficiency



# Electrogenerated chemiluminescence (ECL)

- is a kind of luminescence produced during electrochemical reactions in solutions. In electrogenerated chemiluminescence, electrochemically generated intermediates undergo a highly exergonic reaction to produce an electronically excited state that then emits light upon relaxation to a lower-level state. This wavelength of the emitted photon of light corresponds to the energy gap between these two states. ECL excitation can be caused by energetic electron transfer (redox) reactions of electrogenerated species. Such luminescence excitation is a form of [chemiluminescence](#) where one/all reactants are produced electrochemically on the electrodes.
- ECL is usually observed during application of potential (several volts) to electrodes of electrochemical cell that contains solution of luminescent species (polycyclic aromatic hydrocarbons, metal complexes, Quantum Dots or Nanoparticles [\[4\]](#)) in aprotic organic solvent (ECL composition). In organic solvents both oxidized and reduced forms of luminescent species can be produced at different electrodes simultaneously or at a single one by sweeping its potential between oxidation and reduction. The excitation energy is obtained from recombination of oxidized and reduced species.
- In aqueous medium, which is mostly used for analytical applications, simultaneous oxidation and reduction of luminescent species is difficult to achieve due to electrochemical splitting of water itself so the ECL reaction with the coreactants is used. In the later case luminescent species are oxidized at the electrode together with the coreactant which gives a strong reducing agent after some chemical transformations (the oxidative reduction mechanism).

- ECL proved to be very useful in analytical applications as a highly sensitive and selective method. It combines analytical advantages of chemiluminescent analysis (absence of background optical signal) with ease of reaction control by applying electrode potential. As an analytical technique it presents outstanding advantages over other common analytical methods due to its versatility, simplified optical setup compared with [photoluminescence](#) (PL), and good temporal and spatial control compared with [chemiluminescence](#) (CL). Enhanced selectivity of ECL analysis is reached by variation of electrode potential thus controlling species that are oxidized/reduced at the electrode and take part in ECL reaction<sup>[7]</sup> (see [electrochemical analysis](#)).
- It generally uses Ruthenium complexes, especially  $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]^{2+}$  (which releases a photon at ~620 nm) regenerating with TPrA ([Tripropylamine](#)) in liquid phase or liquid–solid interface. It can be used as monolayer immobilized on an electrode surface (made e.g. of [nafion](#), or special thin films made by Langmuir–Blogett technique or self-assembly technique) or as a coreactant or more commonly as a tag and used in [HPLC](#), Ru tagged antibody based immunoassays, Ru Tagged DNA probes for [PCR](#) etc., [NADH](#) or  $\text{H}_2\text{O}_2$  generation based biosensors, oxalate and organic amine detection and many other applications and can be detected from picomolar sensitivity to dynamic range of more than six orders of magnitude. Photon detection is done with [photomultiplier tubes](#) (PMT) or silicon [photodiode](#) or gold coated [fiber-optic](#) sensors. The importance of ECL techniques detection for bio-related applications has been well established.<sup>[8]</sup> ECL is heavily used commercially for many clinical lab applications.<sup>[9][10][11]</sup>



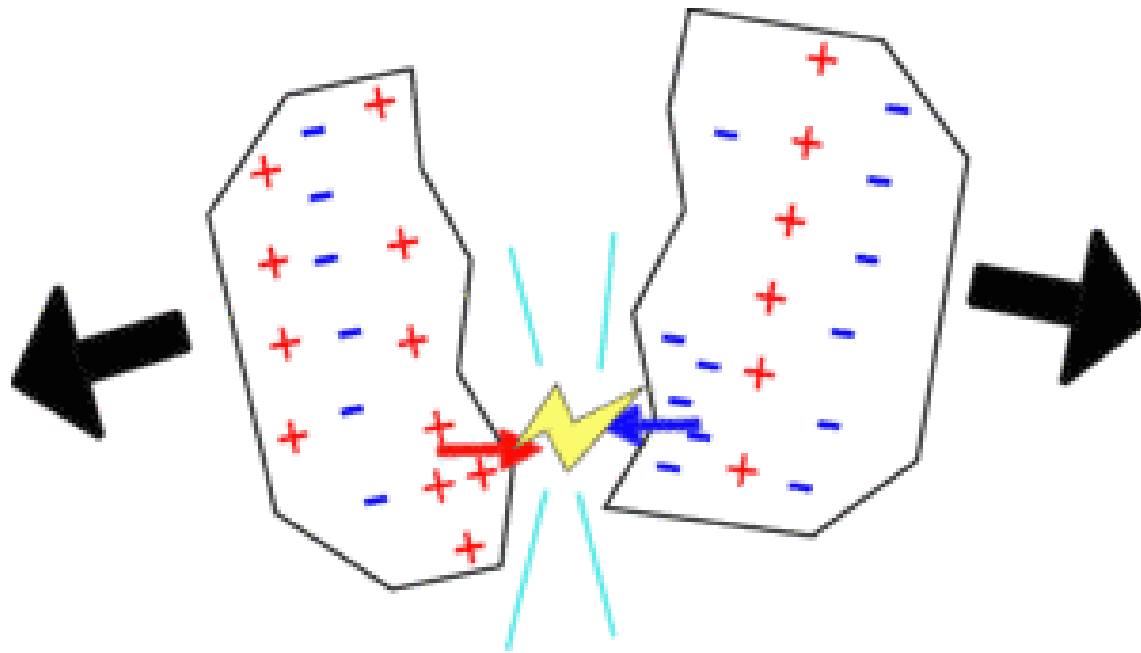


Triboluminescence

# Triboluminescence

- při škrábání, drcení, nebo tření může dojít k přerušení asymetrických vazeb krystalu (cukr, diamant)
- náboj je po přerušení asymetrických vazeb nerovnoměrně rozložen
- při vyrovnání nábojů v krystalu dochází k luminiscenci

# Triboluminescence

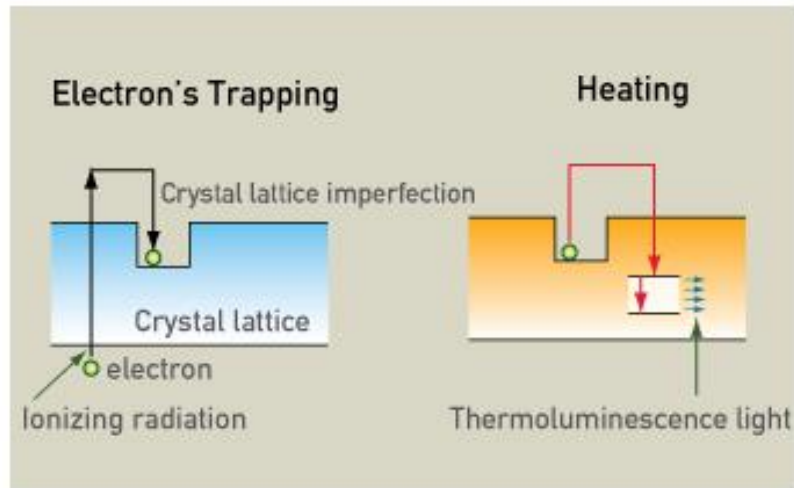


# Thermoluminiscence

- přírodní krystalické materiály obsahují poruchy v krystalické mřížce (např. obsahují volné ionty, které narušují elektrické pole krystalu)
- jestliže se vytvoří tzv. potenciálová díra v elektrickém poli, může se v ní usadit volný elektron (elektronová past)
- tento volný elektron může být excitován (vesmírné záření, radioaktivita) a v elektronové pasti může být jeho energie zachována i stovky, nebo tisíce let
- termoluminiscenční datování: zahříváním, nebo po ozáření silným světlem získá elektron v tzv. dlouhodobé elektronové pasti dostatek energie, aby se uvolnil
- uvolněná energie se měří
- vhodné pro datování látek, které byly v minulosti ozářeny
- nutná složitá kalibrace

# Thermoluminescence

## TL-Thermoluminescence



# Thermoluminescence dating

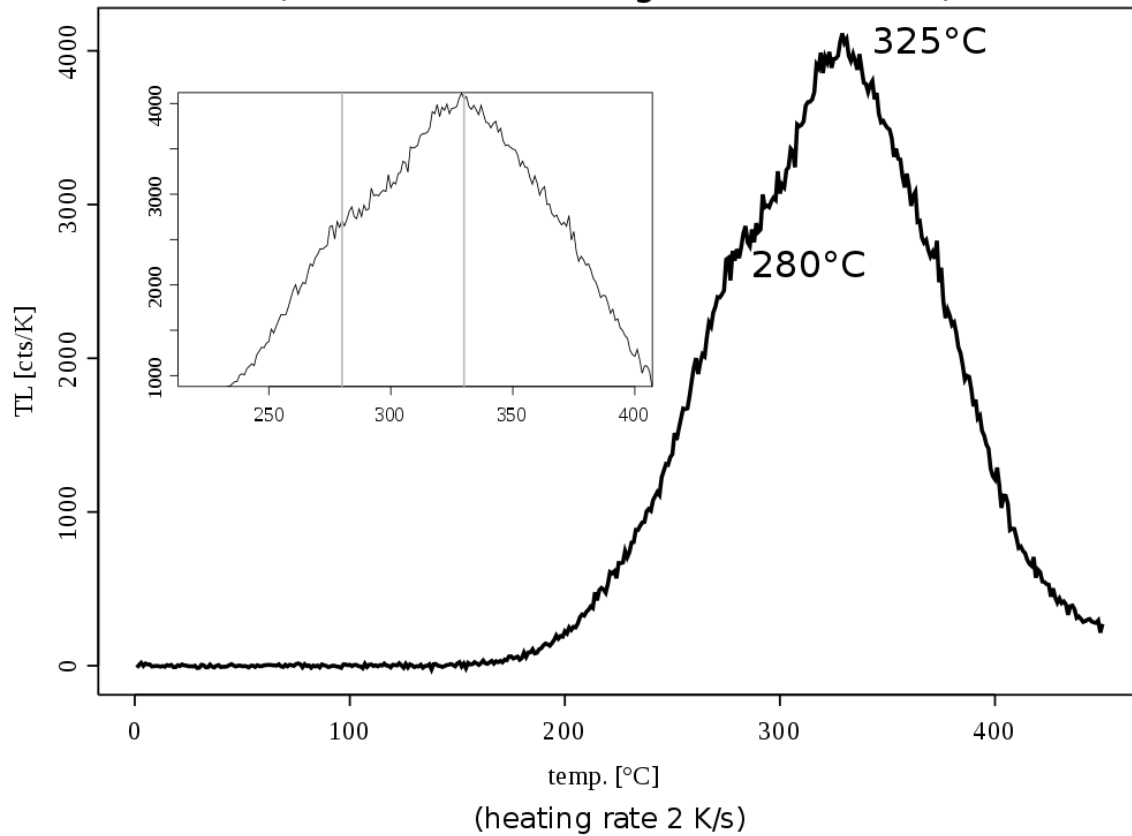
The amount of luminescence is proportional to the original dose of radiation received





# Quartz UV NET NTL Curve

(detection wavelength: 290-370 nm)



[https://www.youtube.com/watch?v=tW8q\\_JfmcBUhttps://www.youtube.com/watch?v=hPtCvReouCM](https://www.youtube.com/watch?v=tW8q_JfmcBUhttps://www.youtube.com/watch?v=hPtCvReouCM)

<https://www.youtube.com/watch?v=FDAFZuxMdyE>

<https://www.youtube.com/watch?v=rV4cwUkHXdY>

<https://www.youtube.com/watch?v=tltOOpyJP5k>

[https://www.youtube.com/watch?v=IB\\_g2ddZZYk](https://www.youtube.com/watch?v=IB_g2ddZZYk)

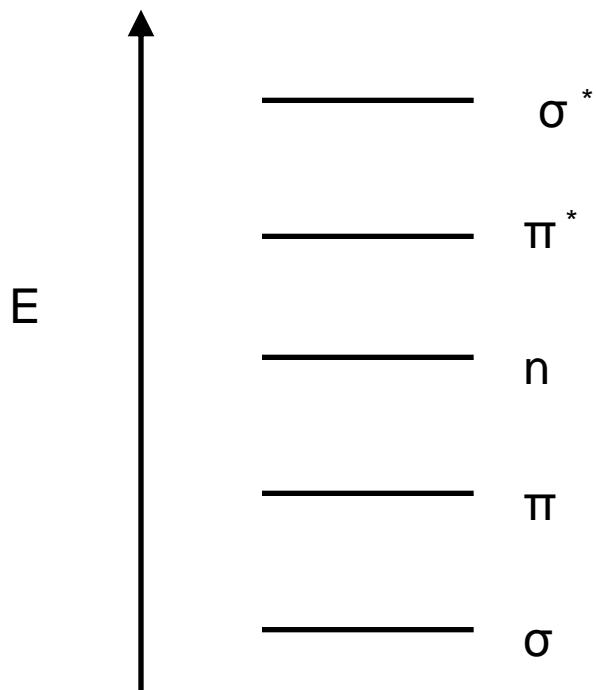
<https://www.youtube.com/watch?v=LQBjRF9mX1Y>

<https://www.youtube.com/watch?v=FGzRvYU0e3Q>

<https://www.youtube.com/watch?v=0BOjTMkyfIA>

# Luminiscence a struktura látek

# Typy přechodů



*hladiny energií molekulových orbitalů*

# Struktura organických molekul a luminiscence – základní pravidla

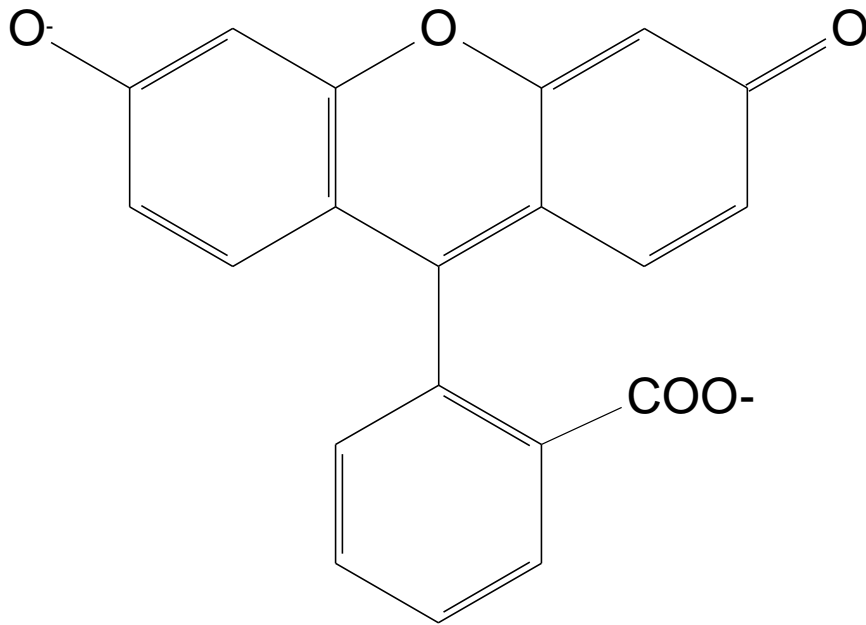
1. luminiscenci většinou nepozorujeme u uhlovodíků bez dvojných vazeb ( $\sigma \rightarrow \sigma^*$  přechod)
2. luminiscence je vzácná také u nearomatických uhlovodíků s dvojnými vazbami, někdy pozorujeme slabou fluorescenci molekul obsahujících karbonylovou skupinu v UV oblasti (přechod  $n \rightarrow \pi^*$ ), nebo u vysoce konjugovaných (ale nearomatických) molekul (vitamín A)
3. většina aromatických uhlovodíků jeví dobrou luminiscenci ( $\pi \rightarrow \pi^*$  přechod)

# Základní pravidla

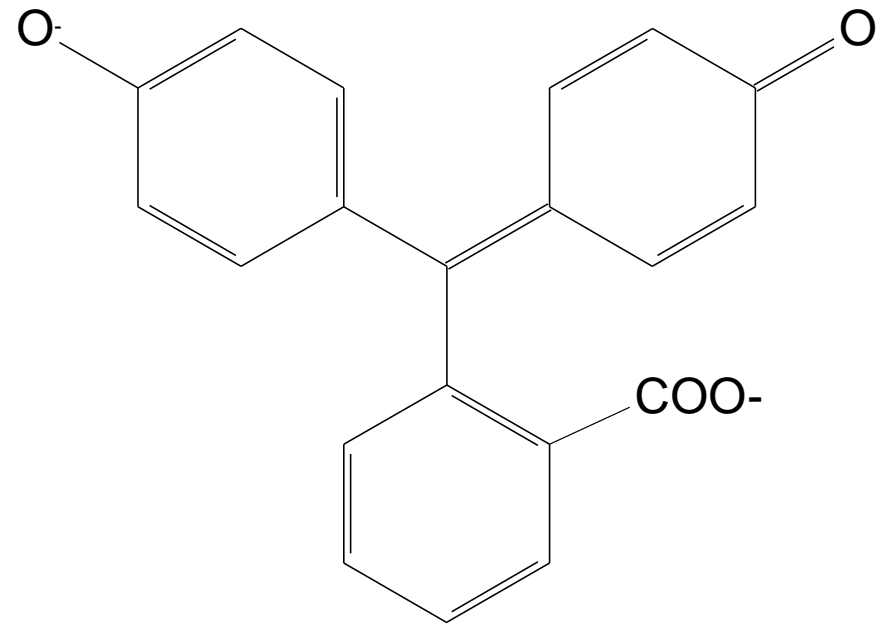
4. Aromatické systémy s přechody  $n \rightarrow \pi^*$  zvyšují intenzitu fluorescence (molekuly obsahují atomy s nevazebnými elektrony – N, O, S). U jednoduchých molekul obsahujících karbonylovou skupinu (např. benzofenony), nebo heteroatomy (pyrimidin, pyrazin) je často pozorována i fosforescence.
5. Skupiny připojené na aromatické jádro často silně ovlivňují fluorescenční vlastnosti molekuly. Tyto skupiny mohou měnit polohu nejnižší vibrační hladiny excitovaného stavu (týká se to jak  $n \rightarrow \pi^*$ , tak i  $\pi \rightarrow \pi^*$  přechodů) – viz. tabulka.

<b>skupina</b>	<b>vliv na <math>\Phi_F</math></b>	<b>vliv na <math>\Phi_P</math></b>
alkyl	nepatrný	zvýšení
hydroxo, methoxo	zvýšení	zvýšení
Karboxylová, keto	velké snížení	velké zvýšení
Nitro, nitroso	snížení	zvýšení
amino	zvýšení	zvýšení
sulfhydrylová	snížení	-
sulfonová	nepatrný	-
kyano	zvýšení	-
X	snížení	zvýšení

6. molekuly s planární a rigidní strukturou mají vyšší kvantový výtěžek, než molekuly s velkým stupněm volnosti (konjugace takových systémů je vyšší, interakce se solventem je nižší (fluorescein x fenolftalein, různá fluorescence isomerů též molekuly)).



Fluorescein (výborné fluorescenční vlastnosti)



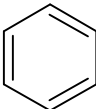
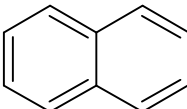
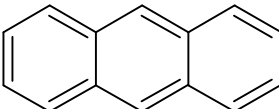
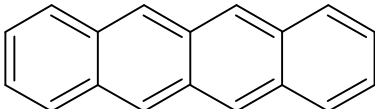
Fenolftalein (barevný, ale nefluoreskující indikátor)



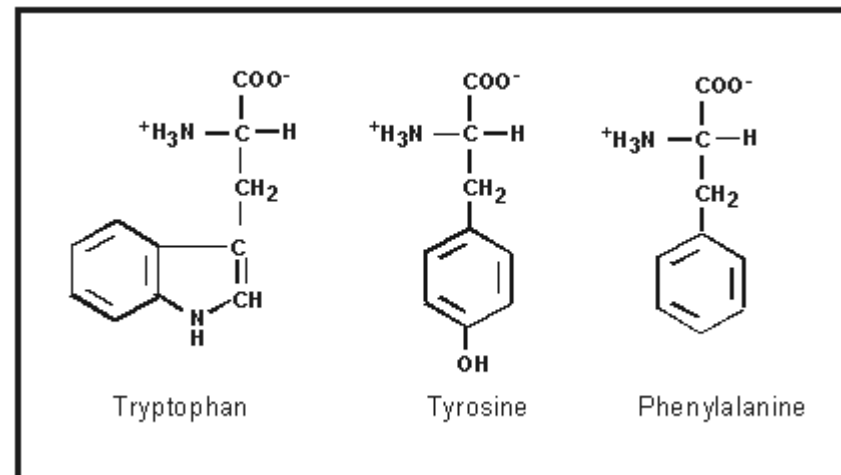
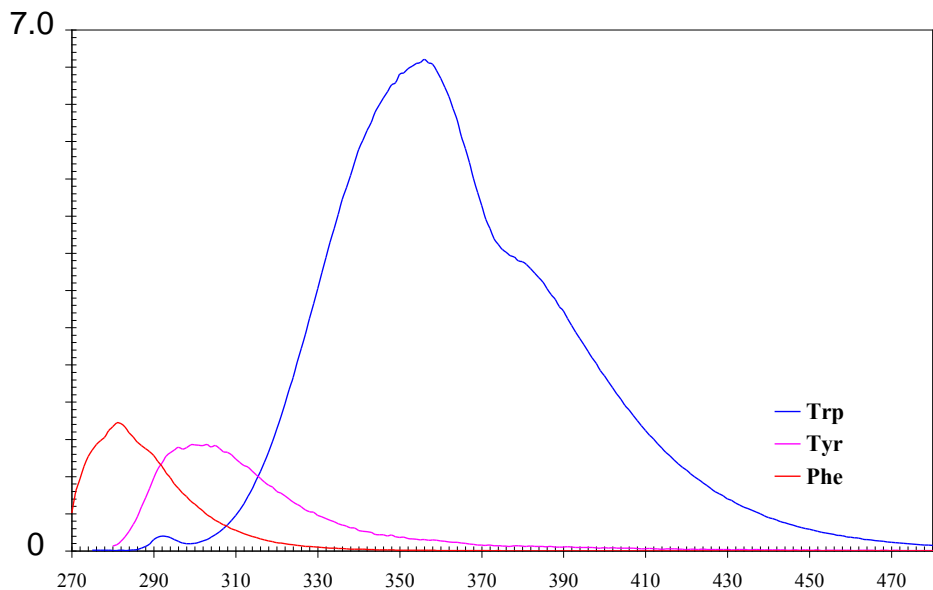
6. jestliže je na aromatickém jádře halový prvek můžeme pozorovat tzv. efekt těžkého atomu: přítomnost těžkého prvku zvyšuje pravděpodobnost přechodu na  $S_0 \rightarrow T_1$ , což má vliv na zvýšení  $\Phi_p$ .
  
7. jestliže jsou aromatická jádra téže molekuly oddělena alkylovou skupinou je systém slabě, nebo vůbec konjugován (menší kvantový výtěžek, nižší vlnová délka emise).

# Luminiscence a struktura

přechod  $\pi \rightarrow \pi^*$  čím více je v molekule konjugovaných vazeb, tím vyšší má emitované záření vlnovou délku

Vzorec	Název	$\lambda_{\text{ex}}$	$\lambda_{\text{em}}$	$\Phi_{\text{F}}$	$\Phi_{\text{P}}$
	Benzén	205	278	0.11	0.26
	Nafatlén	286	321	0.29	0.1
	Antracén	365	400	0.46	<0.01
	Naftacén	390	480	0.60	-

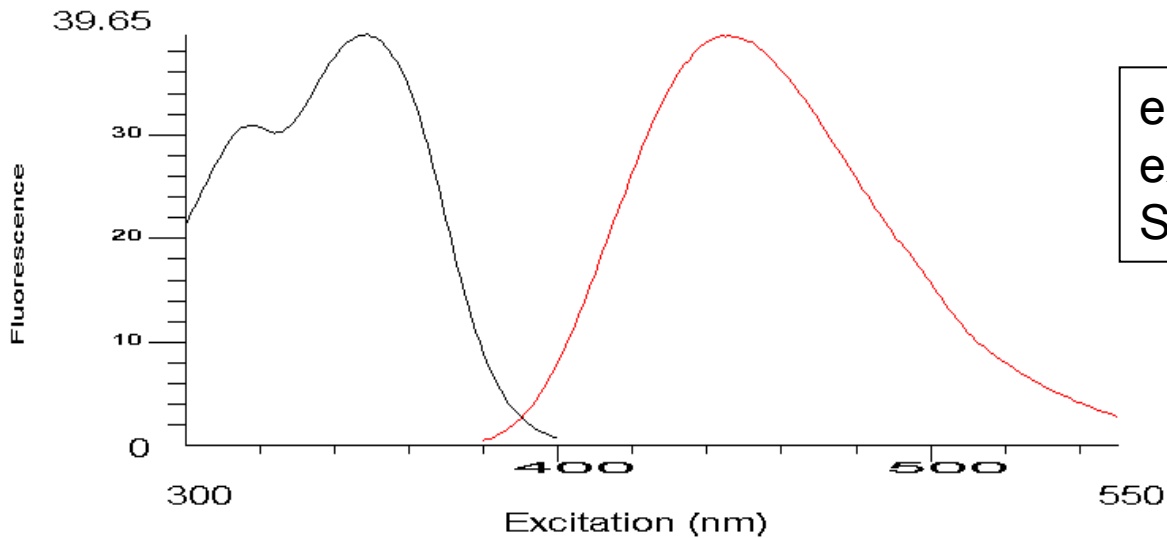
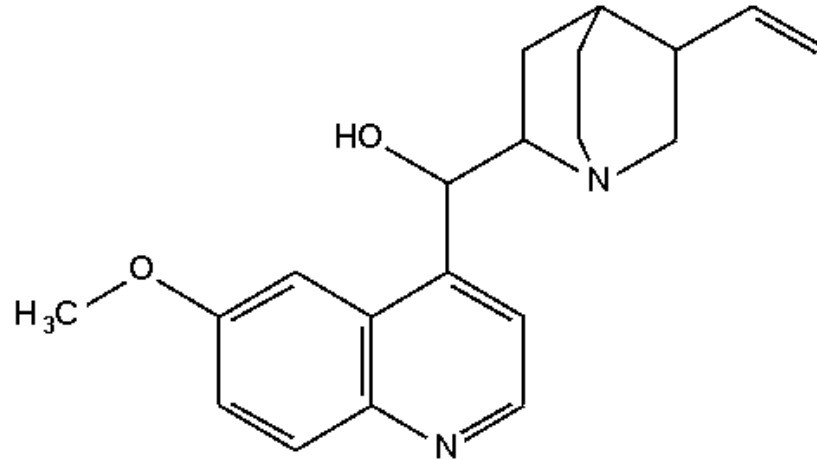
# Luminiscence organických molekul: ukázky



Aminokyselina	Absorpce		Fluorescence	
	Vln.délka (nm)	Abs. koeficient	Vln.délka (nm)	Kvantový výtěžek
Tryptofán (Trp)	280	5,600	348	0.20
Tyrosin (Tyr)	274	1,400	303	0.14
Fenylalanin (Phe)	257	200	282	0.04

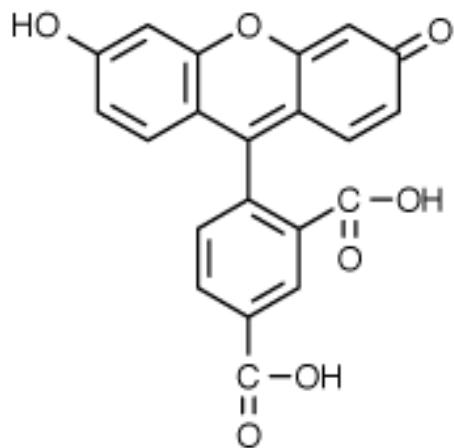
1. P. Pekárková, Bakalářská práce, 2005  
 2. www.biotek.com

# Chinin

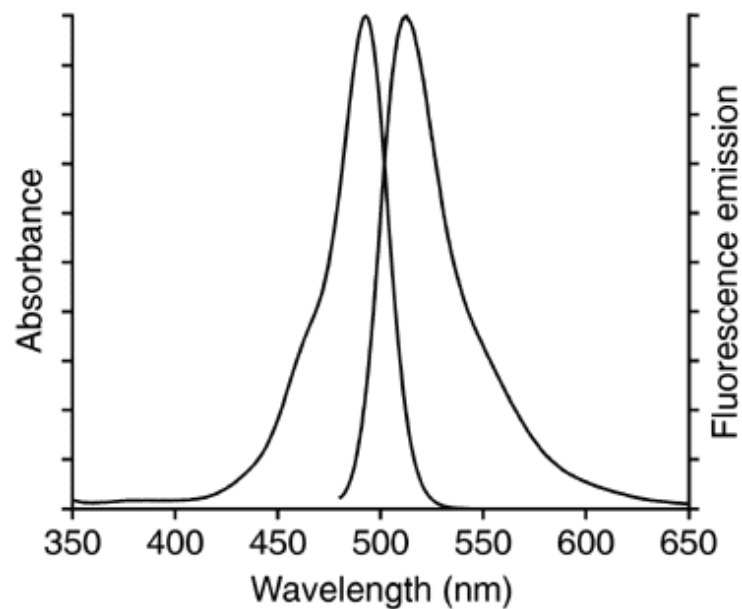


emisní maximum: **446 nm**  
excitační maximum: **349 nm**  
Stokesův posun: **97 nm**

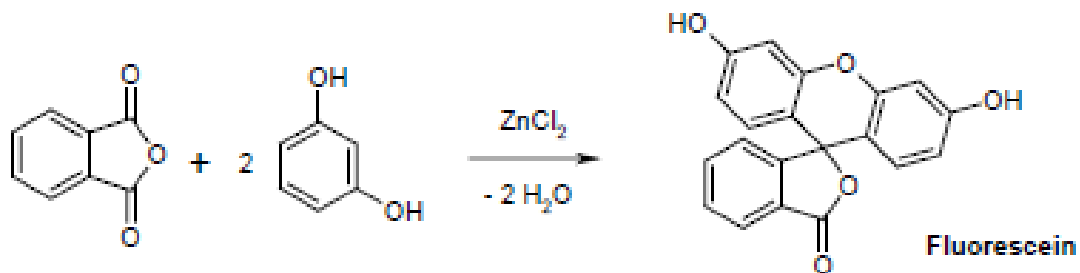
# Deriváty fluoresceinu



excitační maximum: 494 nm  
emisní maximum: 520 nm



# Syntéza fluoresceinu



Kondenzační reakce ftalanhydridu (půl lžičky) s resorcinolem (půl lžičky)

# Aplikace fluorescenční spektroskopie v hydrogeologii





# Migrace podzemních vod

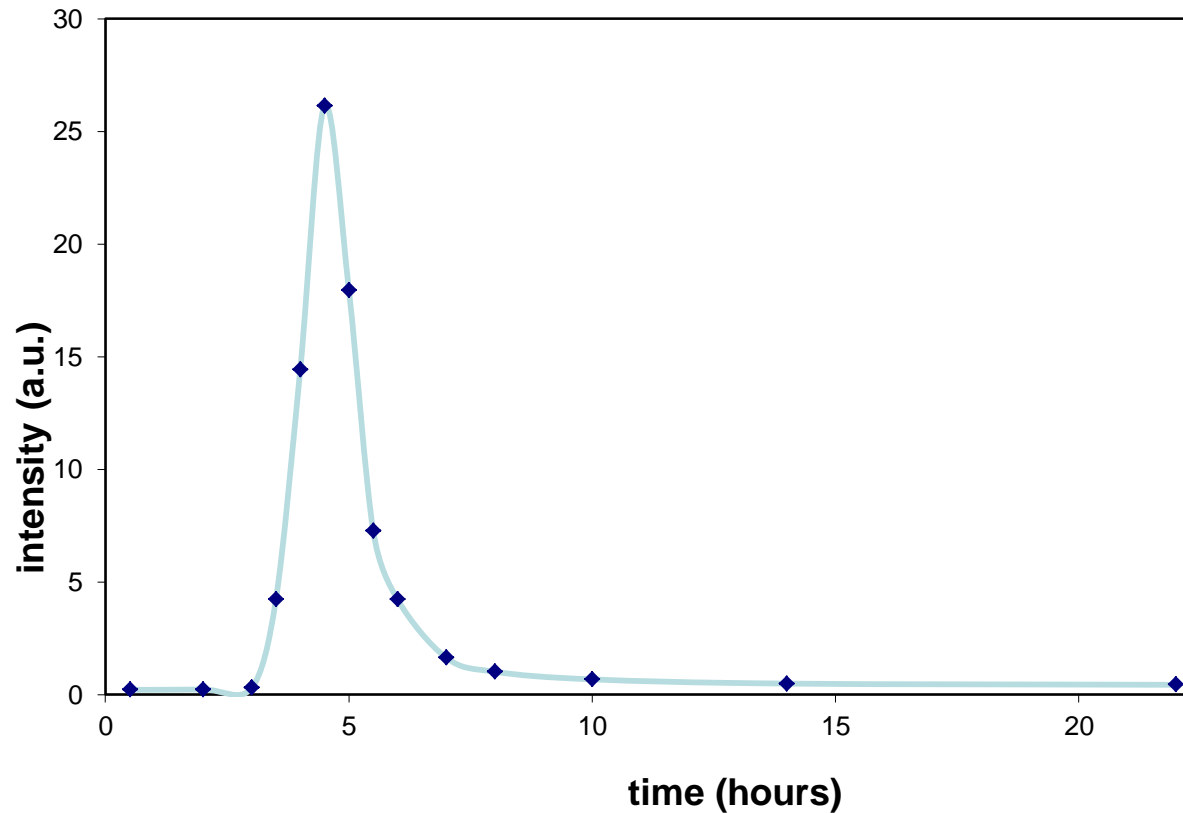
- sledování a objasnění systému podzemních řek a potoků v krasových oblastech (propadání a vývěry...)
- sledování toku vody z kontaminovaných míst (např. úložiště odpadů, skládek, atd.)



# Fluorescenční „značkovače“ podzemních vod

- fluorescenční „značkovače“ (**tracer**) jsou obvykle ve vodě rozpustné, silně fluoreskující látky (fluorescein, rhodamin, eosin, erythrosin, atd.)
- jestliže dochází k velikému zředění barviva, lze použít např. hydrofobní sběrné patrony
- k detekci lze použít jak LIF, tak spektrofluorimetr vybavený lampou (i detekce několika barviv zároveň)
- lze sledovat i časový průběh průchodu barviva potokem/řekou. Z rychlosti průtoku, zředění značkovače, vzdálenosti a dalších faktorů lze usuzovat na charakter, délku, případně členitost podzemního systému.

# Mapování podzemních vod



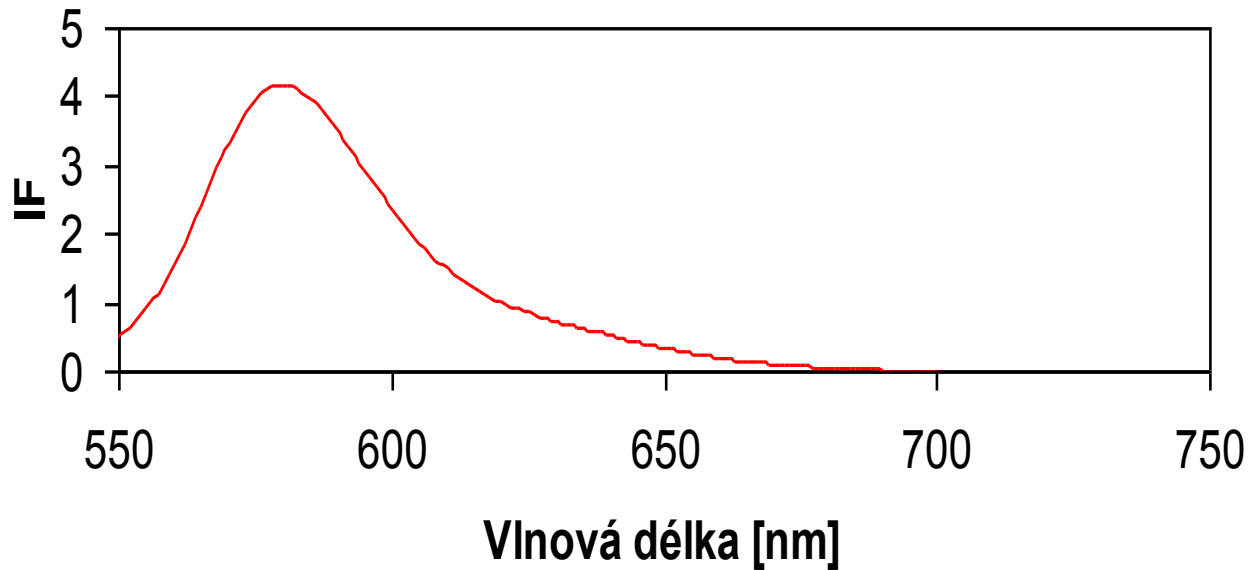
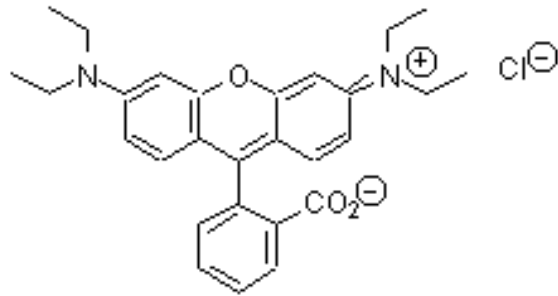
# ***„Mapování“ podzemních vod***



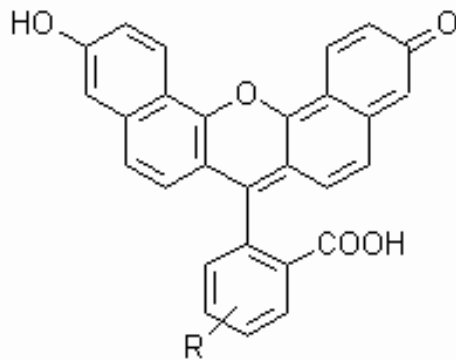
# Fluorescein na Den svatého Patrika



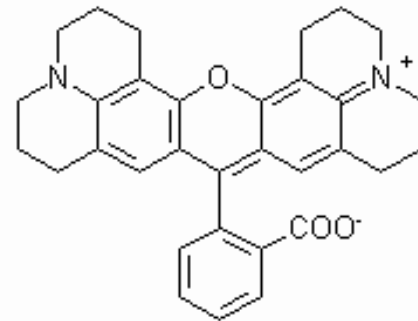
# Deriváty rhodaminu



# Fluorofory s emisním maximem v oblasti kolem 600nm



R = COOH ABSORPCE 598 nm (49000)  
EMISE 668 nm



ABSORPCE 568 nm (98000)  
EMISE 595 nm

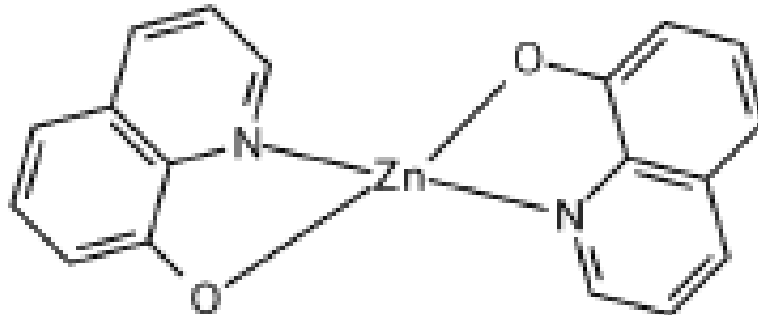
# Luminiscence anorganických „species“ v roztoku

1. slabě fluoreskující ligand má komplexaci lepší fluorescenční vlastnosti (nebo obráceně...)
2. ionty kovů (zejména f-prvky), nebo jejich „species“ jeví fluorescenci (někdy také fosforescenci) v roztoku i bez komplexace
3. „anorganická“ luminiscence pochází z komplexů z nefluoreskujícími ligandy



# Zlepšení luminiscečních vlastností po komplexaci (1)

- kov nijak neovlivňuje fluorescenční vlastnosti, jen stabilizuje organické ligandy tak, aby byl upřednostněn zářivý proces deexcitace
- kov může také v některých případech zhaset luminiscenci
- obou jevů lze využít pro analytické stanovení, nejedná se však o příliš selektivní metodu



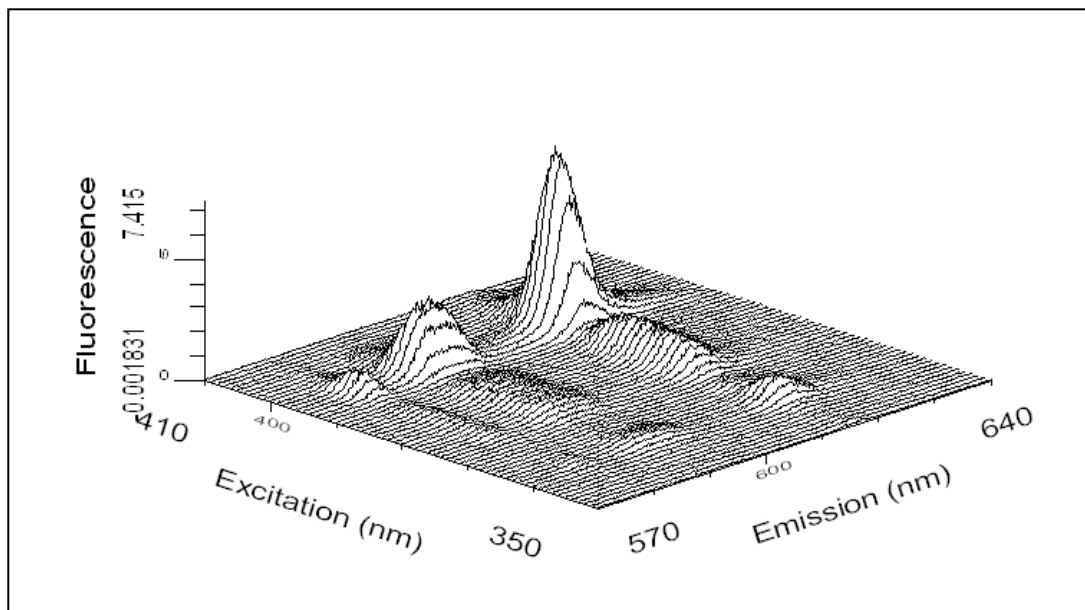
# Luminiscence anorganických „species“ – luminiscence nekomplexovaných iontů v roztoku (2)

- lanthanité ionty (např.  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$ , a další)
- některé aktinoidy (např.  $\text{UO}_2^+$ ,  $\text{Th}(\text{I})$ )
- závisí i na okolí „species“ – pH, komplexace, teplota, atd.
- jedná se o přechody mezi f-f, případně d-f elektronovými přechody
- pro emisní spektra jsou obvyklé ostré píky, čas vyhasínání luminiscence je extrémně dlouhý (až ms)

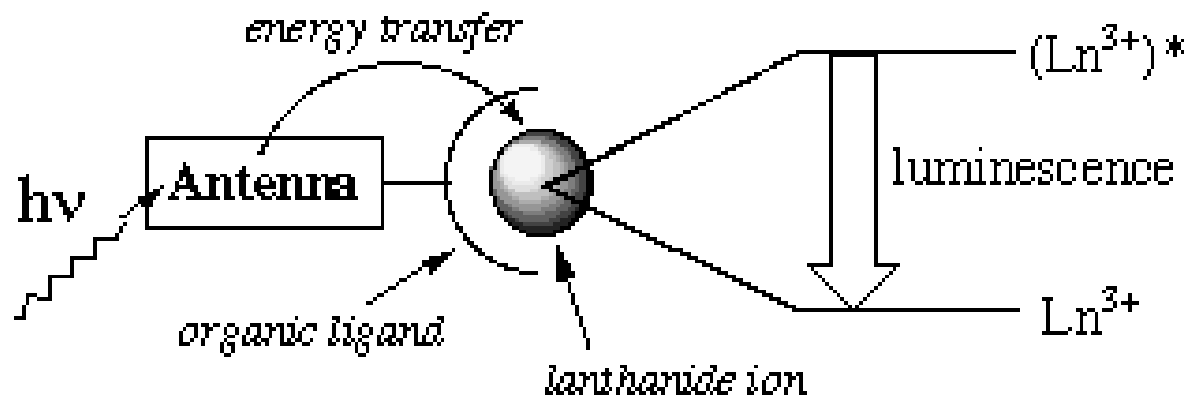
# Luminiscence Lanthanoidů(III)

Některé komplexy Ln(III) mají velmi neobvyklé spektrální vlastnosti:

- dlouhý čas vyhasínání luminiscence
- Stokesův posun může být i více než 100 nm
- emisní spektrum obsahuje ostré píky



# Anténový efekt (antenna effect)



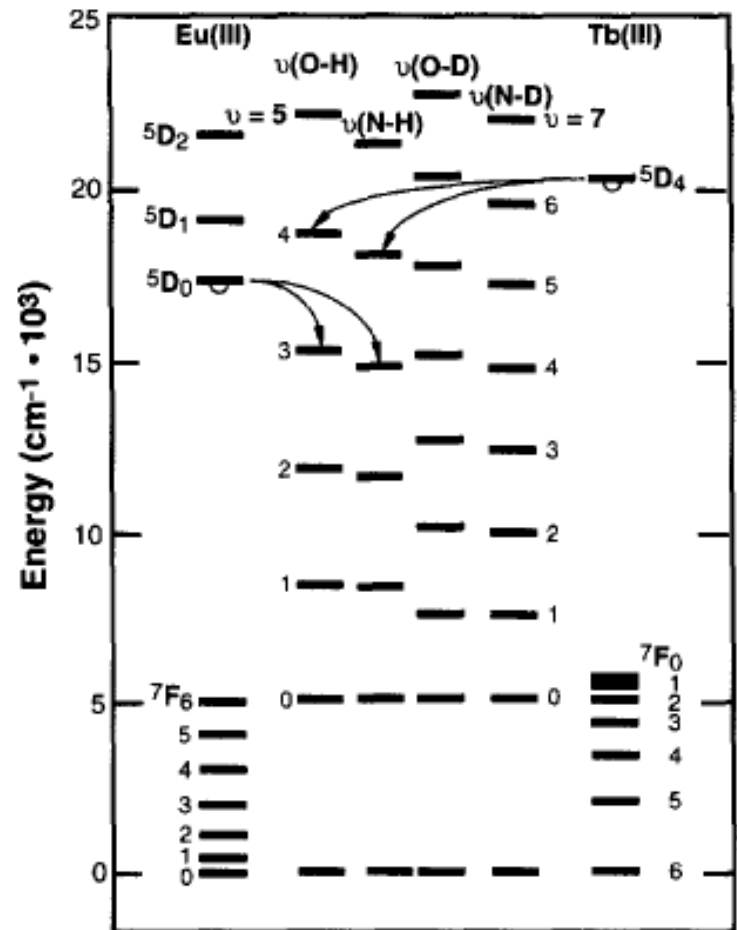
Lanthanide	Transition	Wavelength (nm)	Lifetime (ms)
Sm	$^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$	594	0.0023
Eu	$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$	616	0.11
Gd	$^6P_{7/2} \rightarrow ^7S_{7/2}$	310	2.3
Tb	$^5D_4 \rightarrow ^7F_5$	543	0.4
Dy	$^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$	479	0.0024

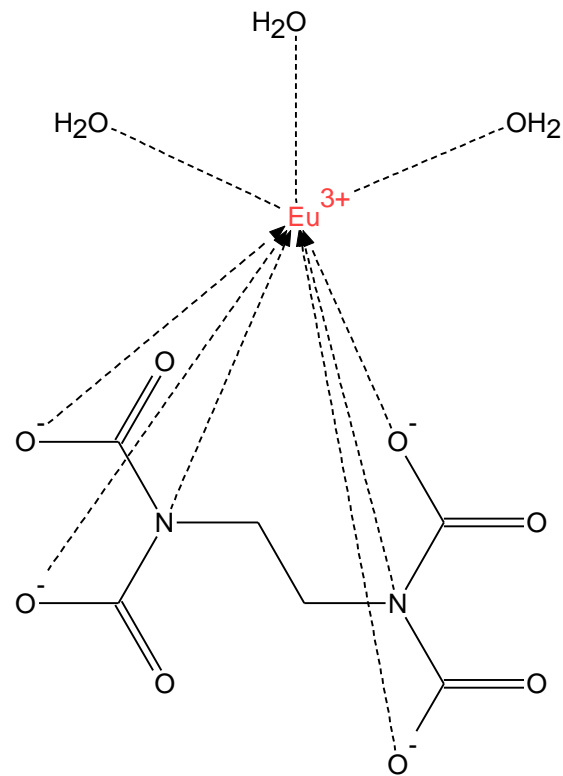
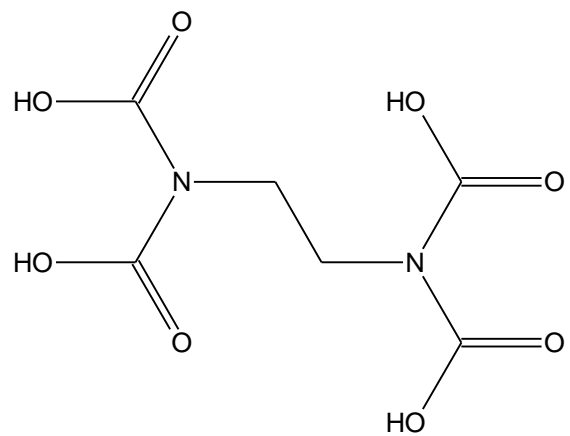
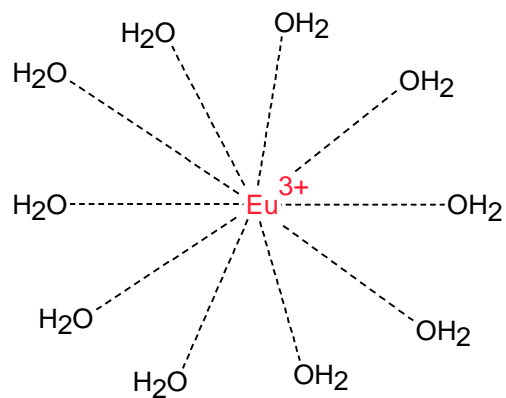
# Koordinace molekuly vody do vnitřní sféry $\text{Ln}^{3+}$

$$q = 1.05 \times (\tau_{\text{H}_2\text{O}}^{-1} - \tau_{\text{D}_2\text{O}}^{-1})$$

$$q = 1.05 \times (\tau_{\text{H}_2\text{O}}^{-1} - 0.7)$$

$$q = 1.11 \times (\tau_{\text{H}_2\text{O}}^{-1} - \tau_{\text{D}_2\text{O}}^{-1} - k_{\text{XH}})$$





$\text{Eu}(\text{EDTA})^-$ , pH = 10.0,  $q = 3$ , CN = 6

EDTA+  $[\text{Eu}(\text{H}_2\text{O})_9]^{3+}$ , pH = 1.5,  $q = 9$ , CN = 0

# Komplexy s nefluoreskujícími ligandy (3)

Většinou jde o tzv. C-T (charge-transfer) přechody: přenos náboje mezi ligandem a iontem kovu, dochází k přechodu elektronu z orbitalu atomu s výrazně vyšší elektronovou hustotou do orbitalu jiného atomu s menší elektronovou hustotou (buď přechod M-L, nebo L-M), tyto přechody mají vysokou intenzitu v porovnání s přechody d-d.

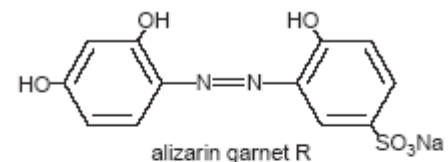
# Komplexy s nefluoreskujícími ligandy

- jde o poměrně specifické chelatční reakce
- iontem je často diamagnetický kov
- vznik fluoreskujících komplexů je často používán v analytické chemii pro svoji specifitu

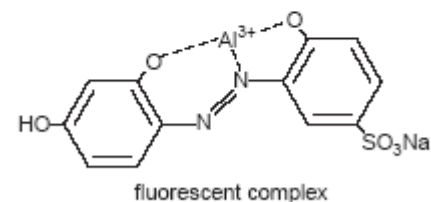


# Komplexy s nefluoreskujícími ligandy – příklady

Komplexující činidlo	Iont kovu
8-hydroxychinolin	$\text{Al}^{3+}$ , $\text{Be}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Li}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ a další
Flavonal	$\text{Zr}^{2+}$ , $\text{Sn}^{4+}$
2-(o-hydroxyfenyl) benzoaxazol	$\text{Cd}^{2+}$
1,10 - fenntrolin	$\text{Ln}^{3+}$
Různá azobarviva	$\text{Al}^{3+}$ , $\text{Be}^{2+}$ , $\text{In}^{3+}$ , $\text{Hf(IV)}$ , $\text{Th(IV)}$ , $\text{Sc}^{3+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Sn(IV)}$ , $\text{Y}^{3+}$
Benzoin	$\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ , $\text{Zn}^{2+}$



(a)

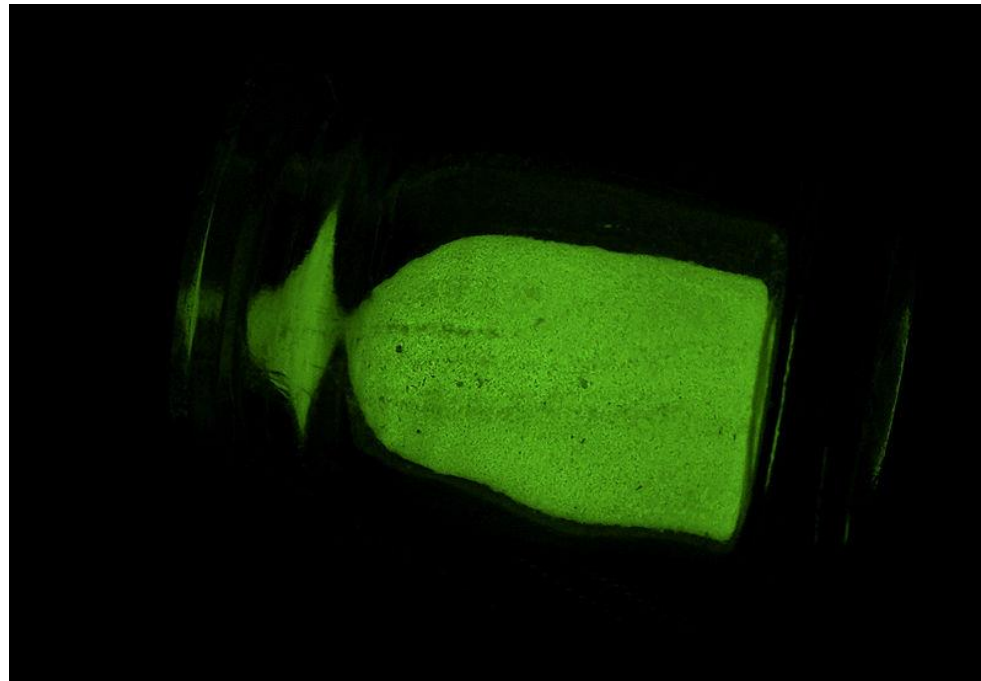


(b)

# Luminiscence pevných látek

- luminiscence většiny molekul v pevném stavu je podobná luminiscenci v roztoku
- vibrační přechody jsou omezeny, proto není luminiscence pevných vzorků tolik závislá na teplotě a píky emisního spektra jsou zpravidla ostřejší
- zvláštním příkladem „inorganic condensed matters“ (fosfory)

# Anorganické luminiscenční materiály „fosfory“



# Luminescence of **localized centers** and **semiconductors**

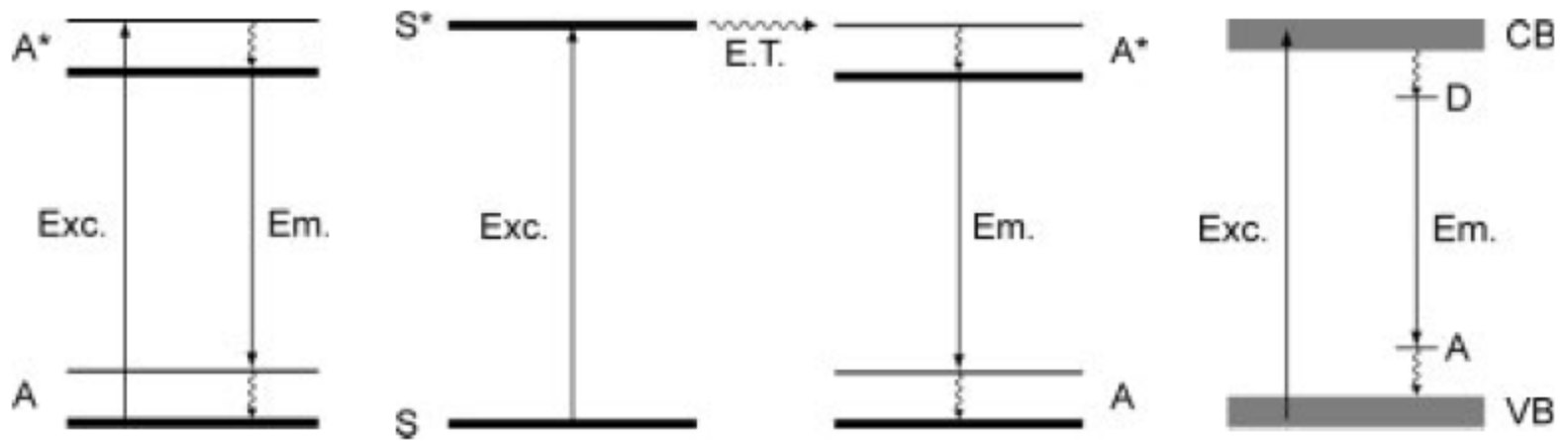


Fig. 1. Schemes illustrating the underlying physical processes of luminescence on isolated centers (left, middle) and in semiconductors (right).

# Localized centers

Transitions between ion levels (f-f transitions, charge transfer, etc.). Excitation and emission can be both localized to the same center

# Princip

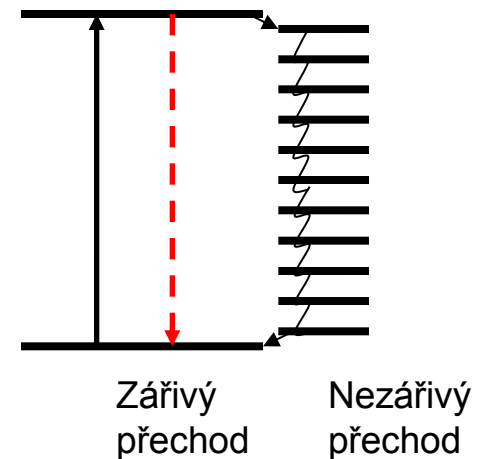
Anorganický fosfor obsahuje:

**Aktivátor** (*activator*) – zpravidla iont kovu, např.  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ , a další

Aktivátor absorbuje energii (např. UV záření), dojde k excitaci a následné luminiscenční emisi, ionty aktivátoru jsou rozptýlené v matici

**Maticе/matrice** (*host lattice*) – většinou průzračná krystalická látka, např.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , atd.

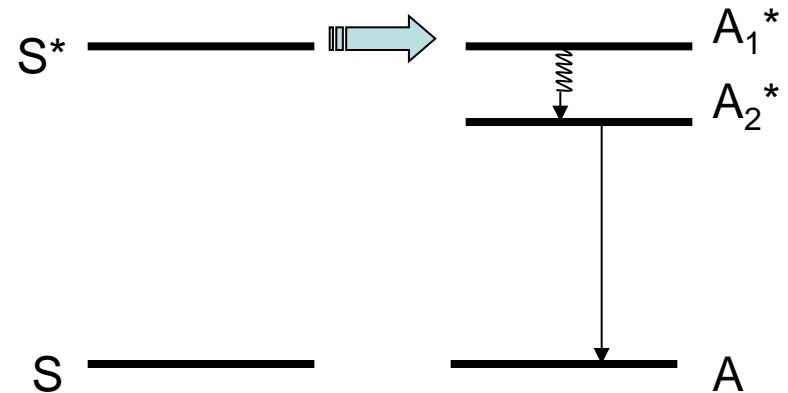
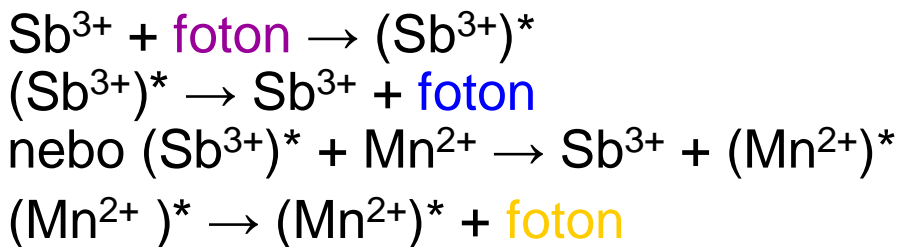
Pro luminiscenční vlastnosti je klíčový aktivátor, matice ovlivňuje hlavně účinnost celého procesu (dobrý „host“ neodebírá aktivátoru energii)



# Ca<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F: Sb<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>

Matrice může obsahovat dva i více iontů (např. „**lampový fosfor**“ Ca<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F: Sb<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>)

Ultrafialové záření je absorbováno pouze Sb<sup>3+</sup> a přijatá energie je pak vyzářena ve formě světla (emise modrého světla) nebo předána na Mn<sup>2+</sup> (energetický přenos) a pak vyzářena ve formě žlutého světla. Sb<sup>3+</sup> tedy funguje jako zesilovač pro Mn<sup>2+</sup>.





- Matrice také může někdy sloužit jako „zesilovač“ (**sensitizer**)
- Ultrafialové záření excituje vanadyl (**host lattice**), ale energie je předána na  $\text{Eu}^{3+}$
- Podobným příkladem je  $\text{ZnS}:\text{Ag}^+$



# Solid luminescent materials

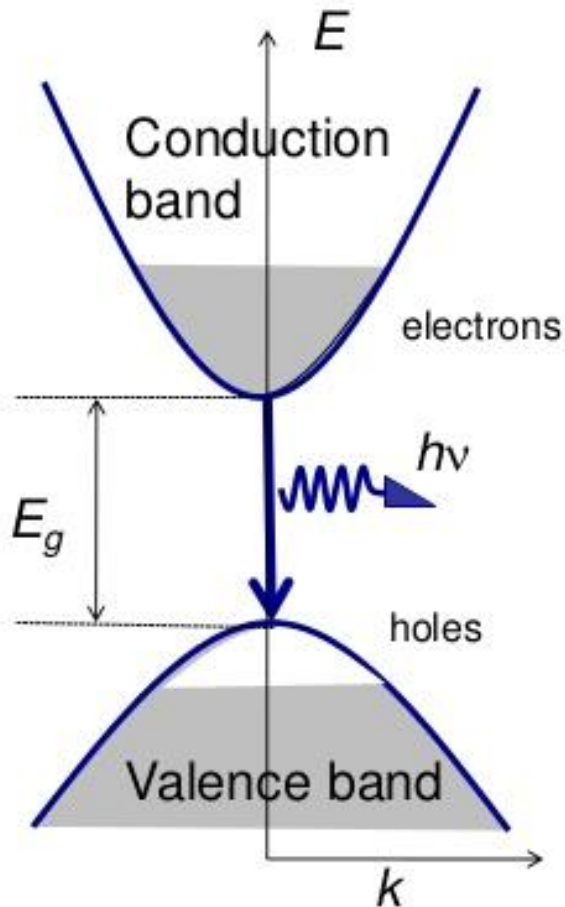
Year	Kind of discovery	Excitation source	Type of luminescent material	Emission color
~1600	Stone of Bologna	sunlight	BaSO <sub>4</sub> (BaS)	yellow
1858	Geißler's tube	gas-discharge (Hg)		UV
1859	Becquerel	gas-discharge (Hg)	ZnS	yellow-white
1895	X-rays (by Röntgen)		none (photographic plate)	
1896	X-ray intensifier (by Pupin)	X-ray	CaWO <sub>4</sub>	blue
1896	Fluorescent lamp (by Edison)	gas-discharge (Hg)	CaWO <sub>4</sub>	blue
1897	Braun's tube	cathode-ray	CaWO <sub>4</sub>	blue
1916	Neon discharge lamp (by Claude)	gas-discharge (Ne)	none	red
1925	Black-and-white television	cathode-ray	ZnS:Ag <sup>+</sup> ; (Zn,Cd)S:Ag <sup>+</sup>	blue; yellow
1937	Neon discharge lamp (by Claude)	gas-discharge (Ne)	CaWO <sub>4</sub> ; Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> :Mn <sup>2+</sup>	blue; green
1938	Fluorescent lamp	gas-discharge (Hg)	MgWO <sub>4</sub> ; (Zn,Be) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> :Mn <sup>2+</sup>	blue-green; green-red
1941	Radar screen	cathode-ray	(Zn,Cd)S:Cu <sup>+</sup> ,Al <sup>3+</sup>	green
1946	Insect lamps	gas-discharge (Hg)	CaWO <sub>4</sub>	blue
1960	Color television	cathode-ray	ZnS:Ag <sup>+</sup> ; (Zn,Cd)S:Cu <sup>+</sup> ,Al <sup>3+</sup> ; (Zn,Cd)S:Ag <sup>+</sup>	blue; green; red
1960	Laser (by Maiman)	gas-discharge (Hg)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Cr <sup>3+</sup>	red
1972	Computed tomography (by Houndsfield)	X-ray	NaI:Tl <sup>+</sup>	green
1972	Rare-earth phosphors	gas-discharge (Hg)	Sr <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>5</sub> Cl:Eu <sup>3+</sup> ; LaPO <sub>4</sub> :Ce <sup>3+</sup> ,Tb <sup>3+</sup> ; Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Eu <sup>3+</sup>	blue; green; red

# Examples of the most important „phosphors“

Emission colour	Application			
	Cathode Ray Tube	Plasma Display Panel	Fluorescent Lamp	X-ray-Intensifying / Scintillation
blue	ZnS:Ag <sup>+</sup> ,Cl <sup>-</sup>	BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub> :Eu <sup>2+</sup>	BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub> :Eu <sup>2+</sup> Sr <sub>4</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>25</sub> :Eu <sup>2+</sup> Sr <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>5</sub> Cl:Eu <sup>2+</sup>	NaI:Tl <sup>+</sup> Ba(F,Br):Eu <sup>2+</sup> (storage phosphor) LaBr <sub>3</sub> :Ce <sup>3+</sup> Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce <sup>3+</sup> / Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce <sup>3+</sup> LuAlO <sub>3</sub> :Ce <sup>3+</sup> YTaO <sub>4</sub> :Nb <sup>5+</sup>
green	ZnS:Cu <sup>+</sup> ,Au <sup>+</sup> ,Al <sup>3+</sup> ZnS:Cu <sup>+</sup> ,Al <sup>3+</sup>	BaAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub> :Mn <sup>2+</sup> Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> :Mn <sup>2+</sup> BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub> :Eu <sup>2+</sup> ,Mn <sup>2+</sup>	GdMgB <sub>5</sub> O <sub>10</sub> :Ce <sup>3+</sup> ,Tb <sup>3+</sup> LaPO <sub>4</sub> :Ce <sup>3+</sup> ,Tb <sup>3+</sup> CeMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub> :Tb <sup>3+</sup>	CsI:Tl <sup>+</sup> Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb <sup>3+</sup>
yellow			Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce <sup>3+</sup>	
red	Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Eu <sup>3+</sup>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Eu <sup>3+</sup>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Eu <sup>3+</sup> (Y,Gd)(P,V)O <sub>4</sub> :Eu <sup>3+</sup>	
white			Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl):Sb <sup>3+</sup> ,Mn <sup>2+</sup>	

# Interband Semiconductor Luminescence

## Direct-gap materials



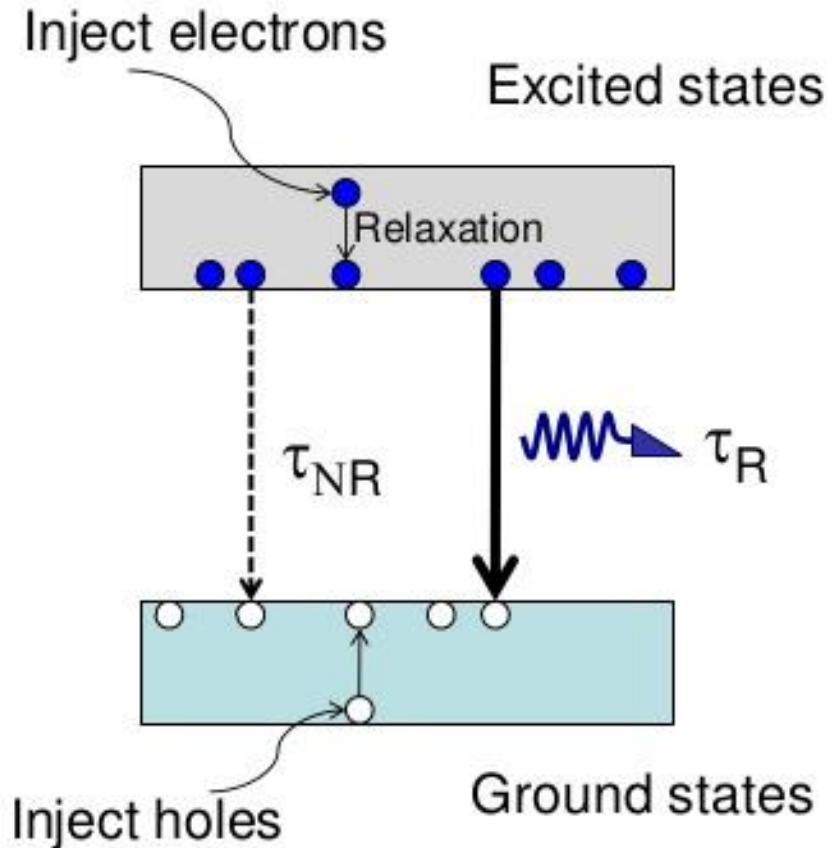
Photons emitted when electrons at the bottom of the conduction band recombine with holes at the top of the valence band.

Since momentum of the photon is negligible compared to that of the electron,  $e$  and  $h$  have same  $k$ -vector.

Energy of luminescence close to energy-gap.

Examples: GaAs, GaN, GaInP

# Luminescence from a semiconductor



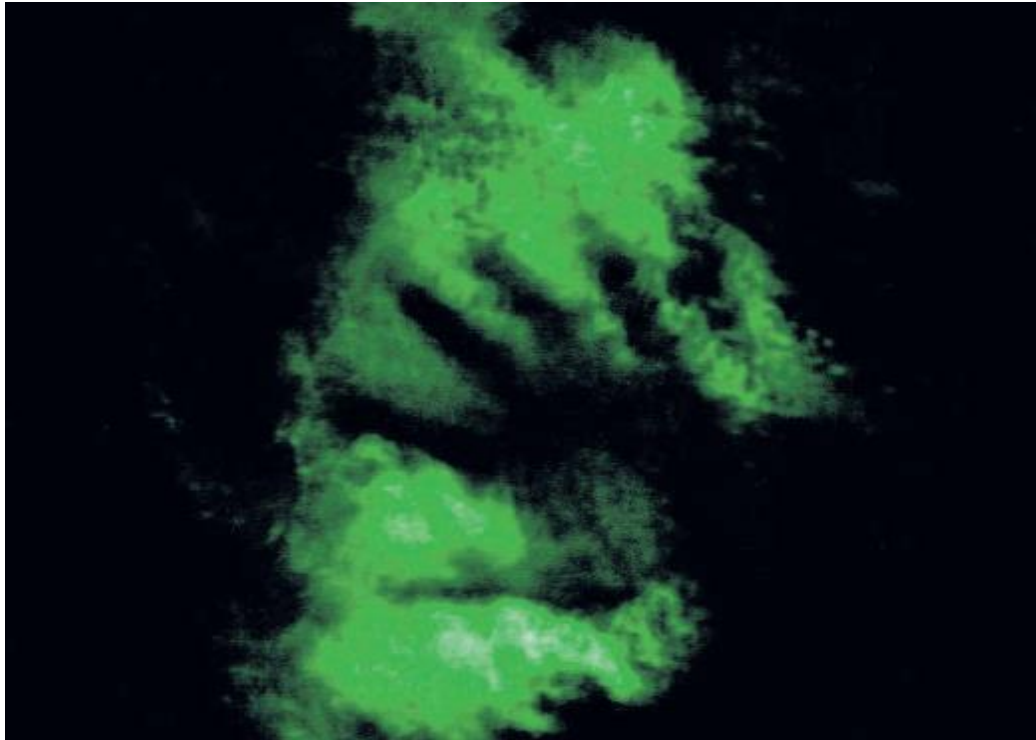
Rapid relaxation and thermalisation  
Applies for electrons and holes.

Recombination of electrons and  
holes can result in luminescence.

This often different from absorption.

Radiative and non-radiative processes  
compete.

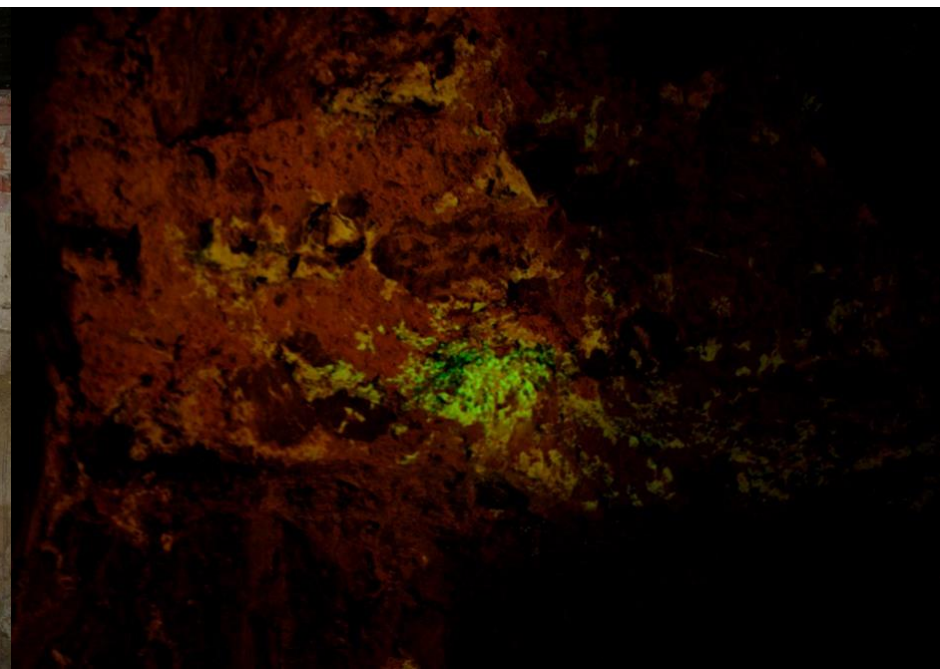
# Jihlavské podzemí



<http://www.youtube.com/watch?v=mQWh8Oc0kDU>



Místnost s fosforeskujícím nátěrem na hradě Špilberk



# Excimery a excioplexy

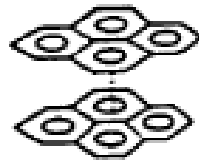
- excimer (excitovaný dimer) se tvoří, jestliže spolu reagují dvě excitované částice



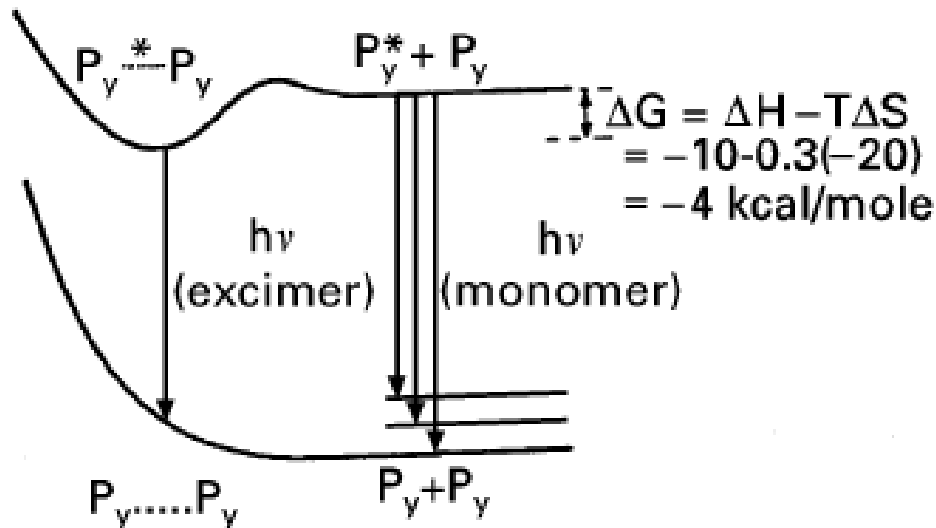
- jestliže se jedná o dvě různé excitované „species“, tak vzniká excioplex



# Excimery a exciptyxy



Face to face excimer





# Excimery a excioplexy

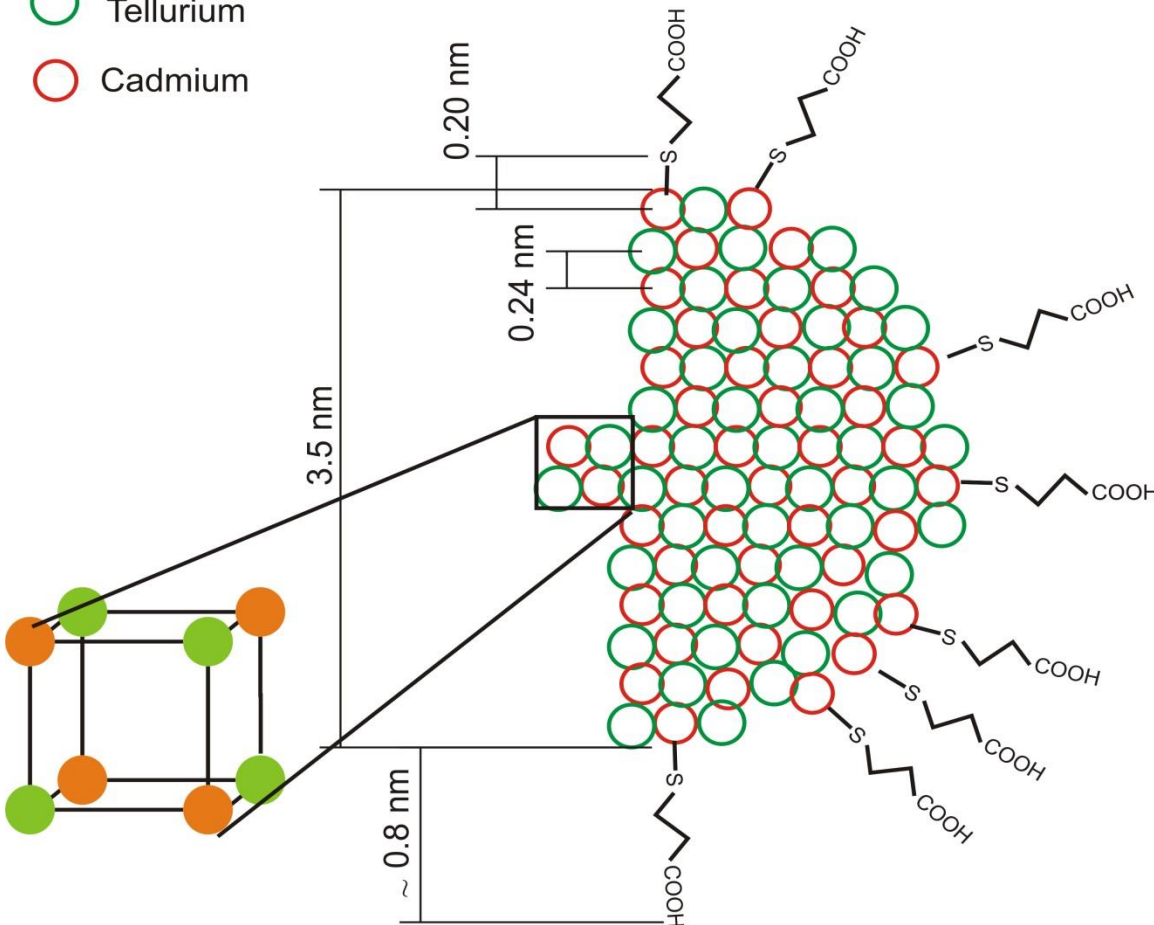
- zářivá deexcitace excimeru (fluorescence)
- nezářivá deexcitace
- excimer reaguje s jinou molekulou (např. Diels-Alderova reakce)

# Kvantové tečky (quantum dots)

- agregovaný shluk stovek až tisíců atomů
- jejich vodivostní a spektrální vlastnosti jsou velmi odlišné od chování samotných atomů – tvorba nových degenerovaných orbitalů
- polovodičové nanokrystaly
- „laditelná“ fluorescence
- nejčastěji jde o kovové atomy (např. Cd, Au, Zn) rozptýlené v přebytku jiných atomů (S, Se, As, atd.)

# Struktura kvantových teček

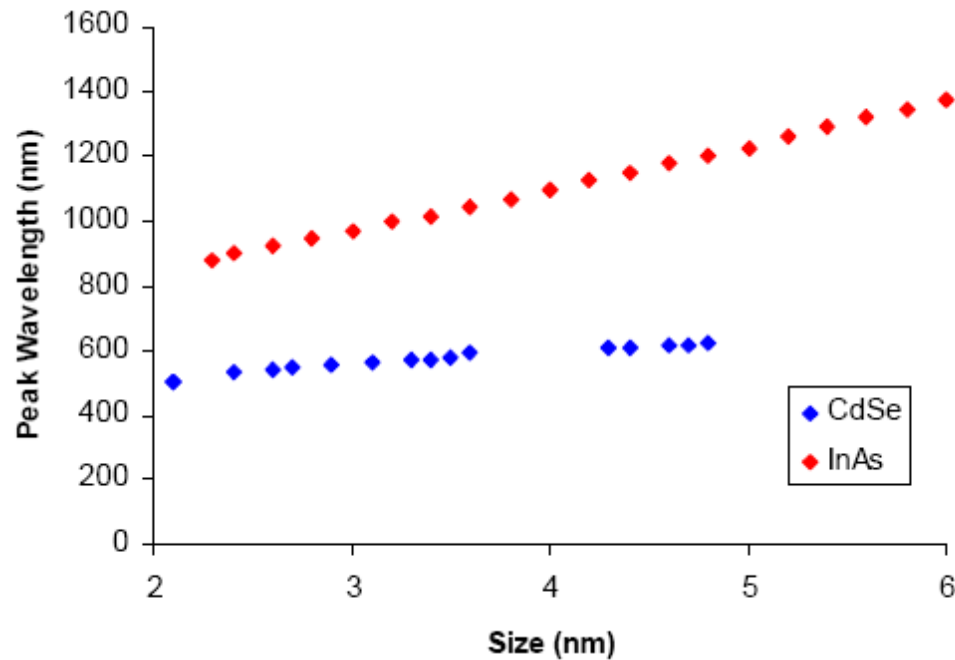
-  Tellurium
-  Cadmium



- velikost částice: 3,5 nm
- CdTe – kubická krystalová mřížka
- délka vazeb:  
Cd-S = 0,2 nm  
Cd-Te = 0,24 nm
- počet krystalových jednotek v jedné nanočástici:  
~ 203
- přibližná molekulová hmotnost:  
~ 200 000 g/mol

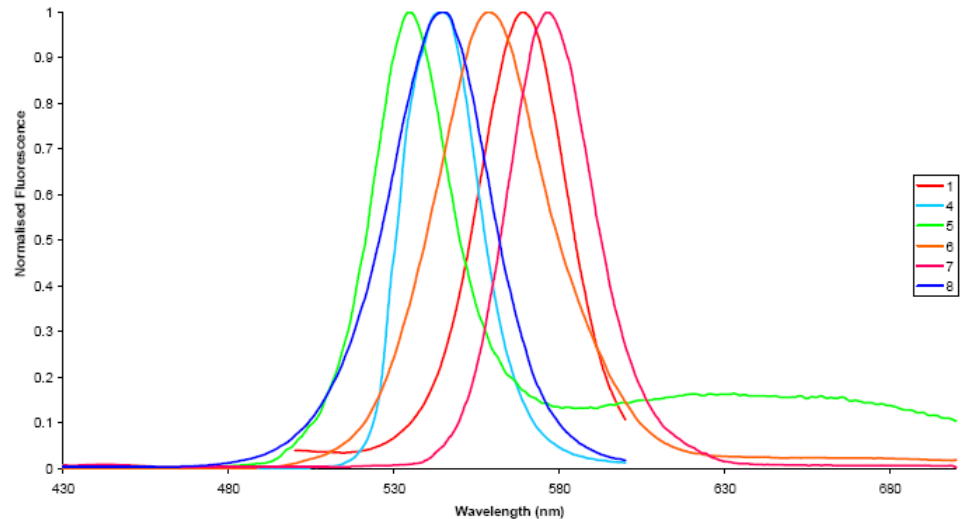
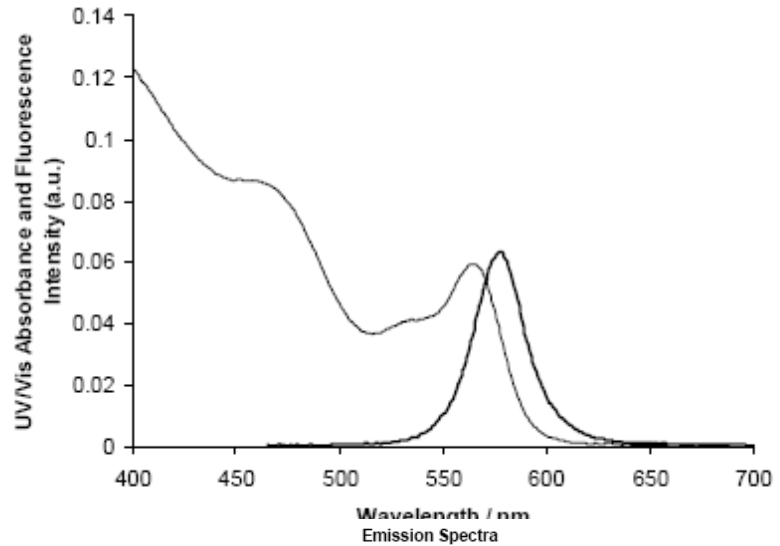
# Fluorescenční vlastnosti kvantových teček

- podle složení atomů a postupu přípravy lze ovlivnit jejich emisní a excitační spektra



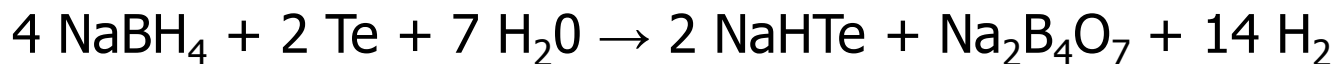
# Fluorescenční vlastnosti kvantových teček

- „laditelná“ fluorescence
- úzké emisní pásy
- široké pásmo absorpce
- špatná rozpustnost
- použití: fluorescenční standardy, optické prvky, značení biomolekul...



# Příprava kvantových teček rozpuštěných ve vodě

1. stupeň:



2. stupeň:



CdTe nanočástice se vytvoří  
po několikahodinovém zahřívání.



# Zdroje světla

**vlastní** - za vlastní zdroje označujeme taková tělesa nebo látky, v jejichž struktuře dochází ke vzniku světla. Za vlastní zdroj světla tedy můžeme považovat např. Slunce, žárovku, plamen atd.

**nevlastní** - látky, které samy světlo nevytvářejí, ale pouze odrážejí a rozptylují dopadající světlo, se označují jako nevlastní zdroje. Mezi nevlastní zdroje lze zařadit např. Měsíc, mraky, všechny osvětlené předměty apod. Tyto zdroje lze dále rozlišovat jako:

- reflektory - odražeče, neprůhledné, pro dané záření

- refraktory - "ohýbače" / "lamače", čiré, stínítka / matnice, poloprůhledné difuzéry.

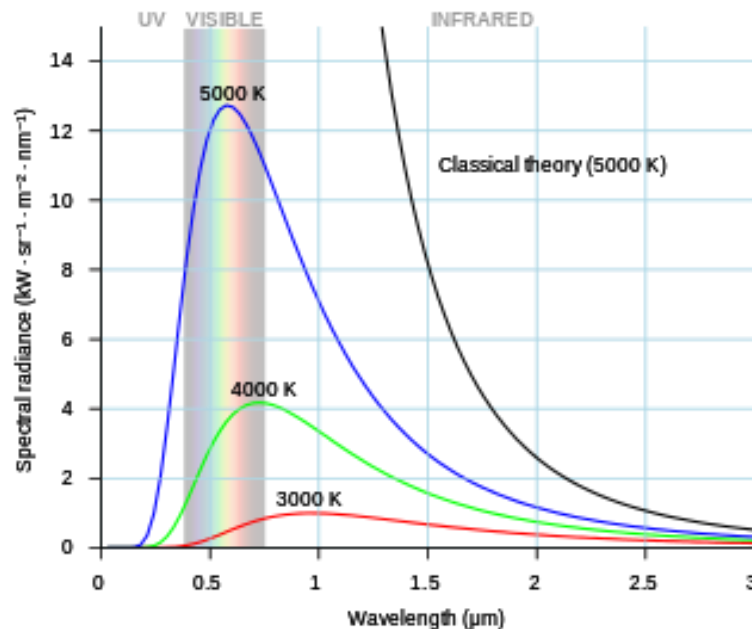
# Přírodní zdroje

- K přírodním zdrojům patří například:
- Kosmická tělesa
  - Primární zdroje - Slunce, hvězdy: Skutečně světlo vytvářejí.
  - Sekundární zdroje - Měsíc: Pouze odráží světlo z jiných zdrojů, samy nesvítí.
- Chemické reakce - oheň, chemiluminiscence
- Biologické zdroje
  - Primární zdroje - bioluminiscence: světlušky, různé mořští živočichové, houby
  - Sekundární zdroje - odrazy očí viditelné ve tmě nebo při záblesku: nebo iridescence i obecně
- Elektrické výboje - elektrický proud v plynech (oblouk, výboj, blesk)
- Tektonické jevy - žhnoucí láva

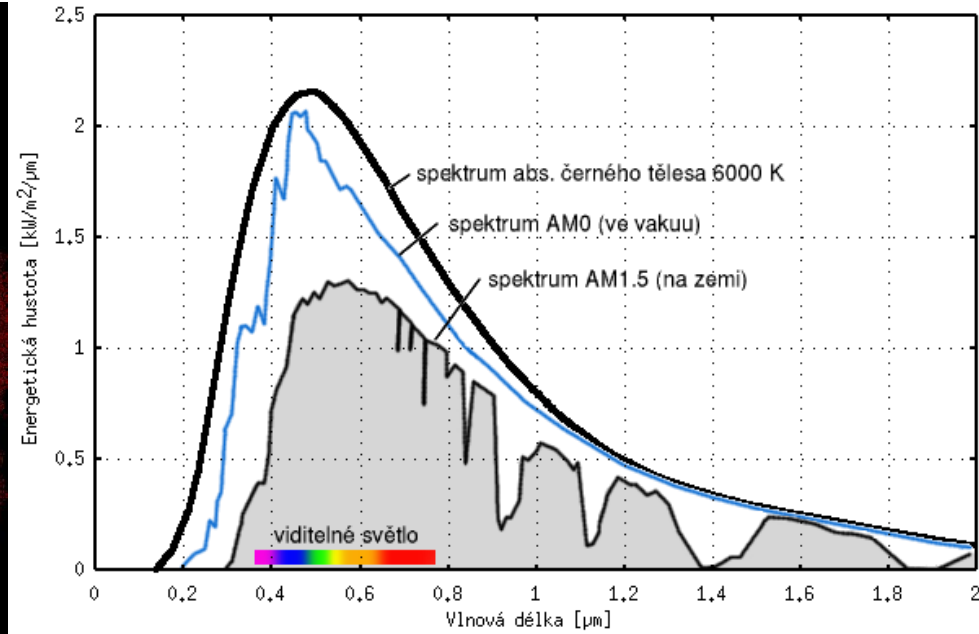
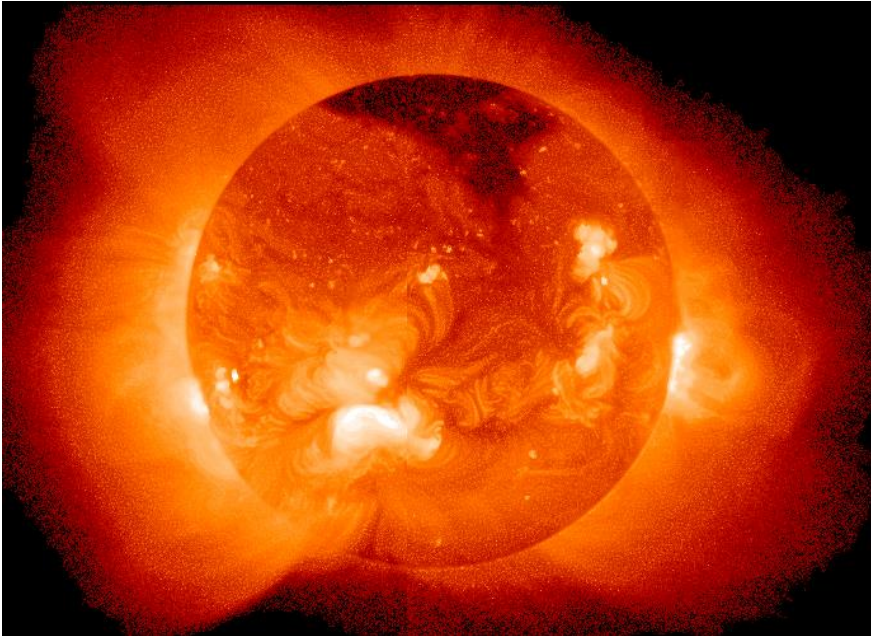


# Záření černého tělesa

- **Absolutně černé těleso, černé těleso** a nebo **černý zářič** je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek, dopadající na jeho povrch. Absolutně černé těleso je současně ideální zářič, ze všech možných těles o stejné teplotě vysílá největší možné množství zářivé energie. Celkové množství energie, které se vyzáří z povrchu absolutně černého tělesa za jednotku času a rozložení intenzity záření podle vlnových délek závisí jen na jeho teplotě. Záření Slunce se poměrně dobře blíží záření absolutně černého tělesa s teplotou přibližně 5800 Kelvinů, reliktní záření odpovídá záření absolutně černého tělesa s teplotou 2,7 K. Tento fyzikální pojem zavedl Gustav Kirchhoff v roce 1862.



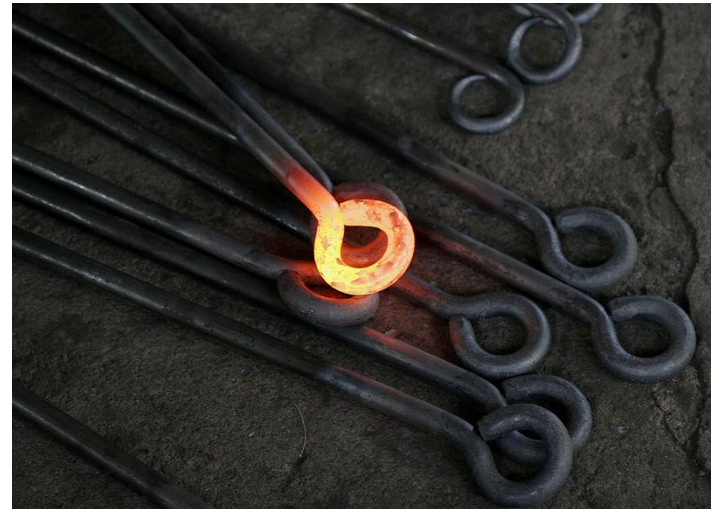
# Slunce



# Teplotní zdroje světla

Inkandescence je jev vyzařování světla, způsobeného tepelným buzením. V těchto zdrojích vzniká světlo jako jedna ze složek elektromagnetického záření vyvolaného vysokou teplotou povrchu nějakého tělesa.

Patří sem oheň (svíčka, lampa), v němž září: rozžhavené částice (nejčastěji uhlíku), slabě i žhavé plyny.



# Elektroinkandescence

- Vzniká průchodem elektrického proudu pevnou vodivou látkou s vysokou teplotou tání např. platina, wolfram, atd. Pevná látka se rozžhává na požadovanou teplotu, při které dochází k emisi viditelného záření
- Klasická žárovka svítí díky rozžhavenému (obvykle wolframovému) vláknku, v němž jsou elektrony vázané v atomech vlákna tepelně excitovány z nižších orbitálních hladin na vyšší; fotony zde vznikají při přeskokách elektronů mezi hladinami.
- Společnou vlastností teplotních zdrojů je:
  - velmi nízká účinnost přeměny jiného druhu energie na světlo (8%)
  - velký podíl energie vyzářené v podobě tepla (hlavní část – 92%)
  - spojitě rozložení světla ve spektru podle fyzikální křivky teplotního zářiče
  - subjektivně příjemné vnímání světla lidským okem
  - závislost barvy světla na teplotě zářiče
  - závislost účinnosti zdroje na teplotě zářiče.



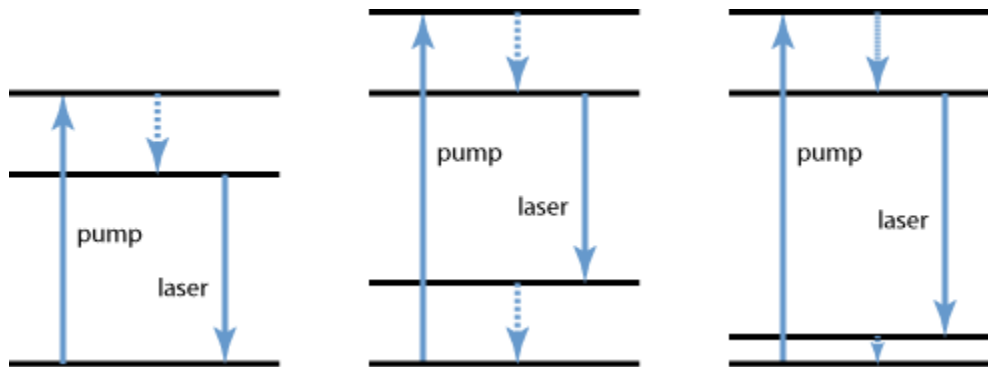
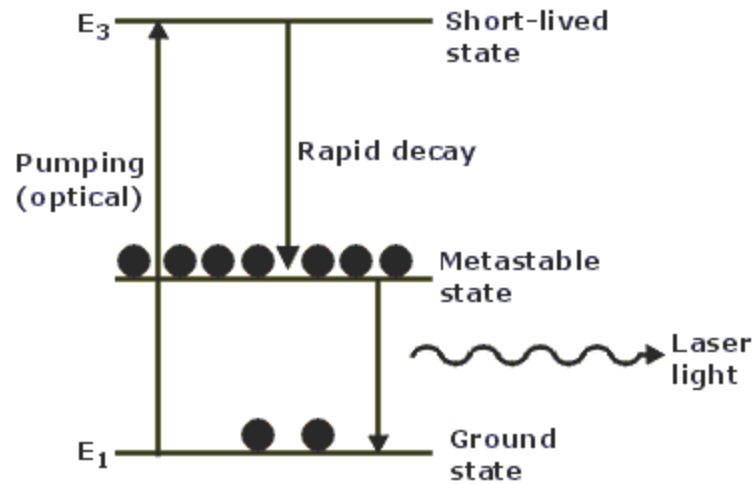
# Elektrické zdroje světla s nespojitým spektrem

- Na rozdíl od teplotních zdrojů zde vzniká světlo jinými mechanismy. Obvykle jde o proud fotonů jednotlivě vyzářených při návratu elektronů z nestabilních poloh ve vyšších hladinách do stabilní polohy v nižší hladině v elektronovém obalu nějakého atomu. Protože energie uvolňovaná vracejícími se elektrony je kvantovaná velikostí „skoku“ mezi hladinami, mají i energie fotonů nespojitý průběh, rozdělený do tzv. emisních spektrálních čar nebo pásů.

# LASER



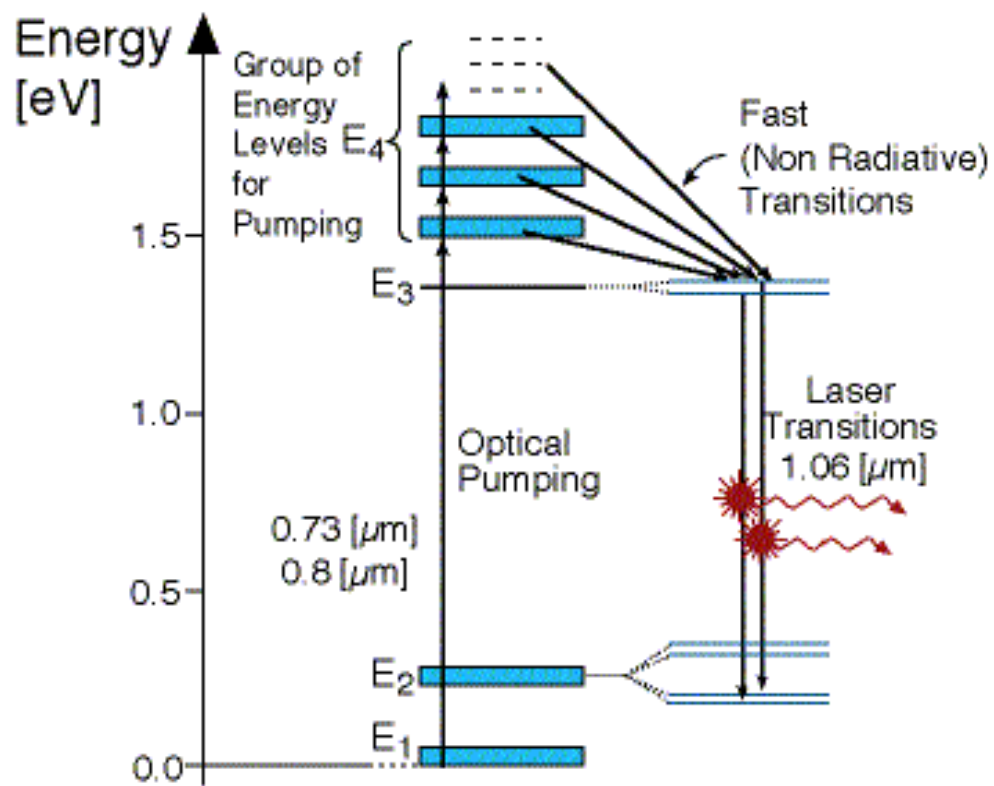
# Princip laseru



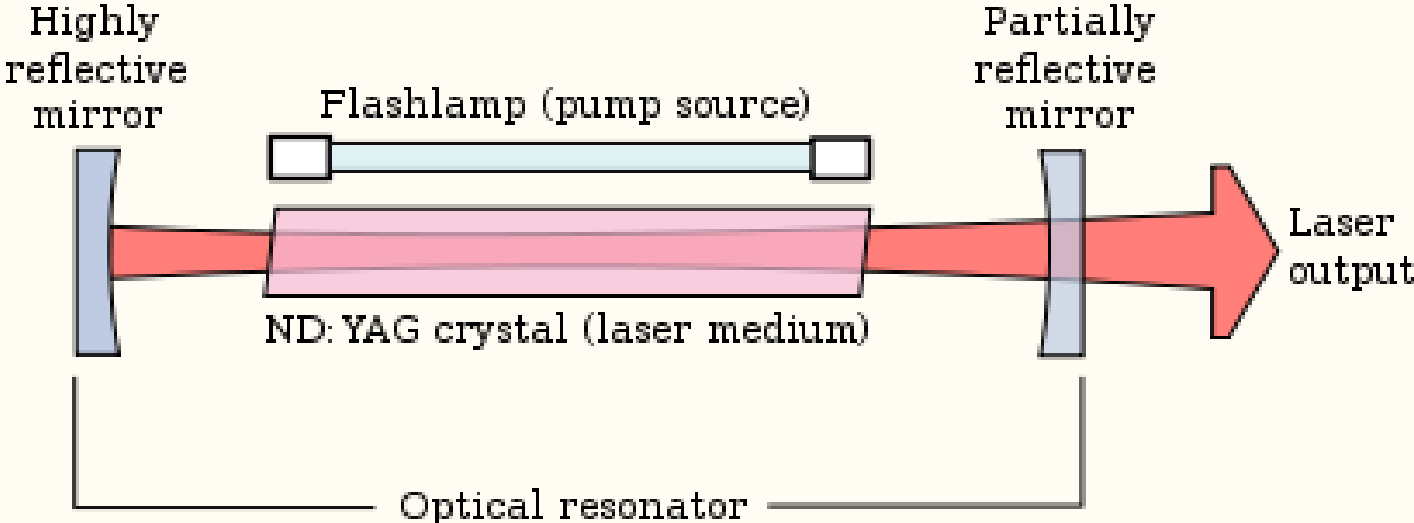
# Princip laseru



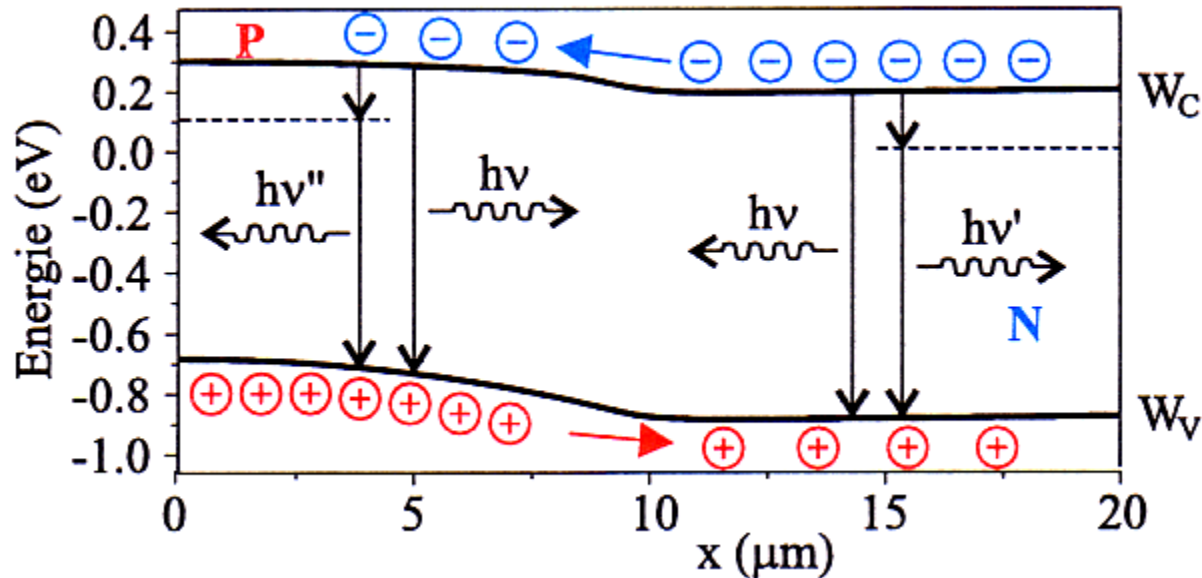




# Nd:YAG solid-state laser



# LED



Na rozdíl od žárovky fungují LED a LD na **principu elektroluminiscence** polovodičových materiálů. Zde vzniká světlo v důsledku přeskoků elektronů z vyšších energetických pásů do nižších. Rozdíl energie mezi dnem vodivostního a vrchem valenčního pásu pak odpovídá energii vyzářené ve formě fotonu. K tomuto jevu obecně dochází u všech diod, ale pouze v některých případech dojde ke vzniku světelného záření, jinak se elektrická energie mění na tepelnou nebo naopak vzniká neviditelné ultrafialové záření.

Při průchodu elektrického proudu diodou v propustném směru se energie elektronu při mezipásové rekombinaci může uvolnit ve formě fotonu o energii  $W = h \cdot \nu$ , kde  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je frekvence fotonu. K přechodu může dojít také prostřednictvím příměsových hladin v zakázaném pásu. Emitované záření má pak o něco menší energii  $h \cdot \nu'$ , resp. větší vlnovou délku

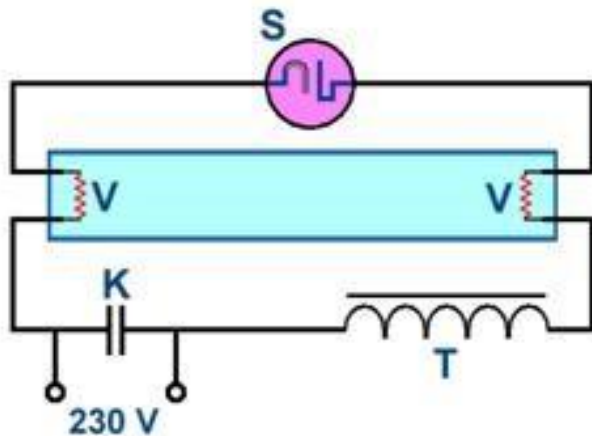
# Halogenové žárovky

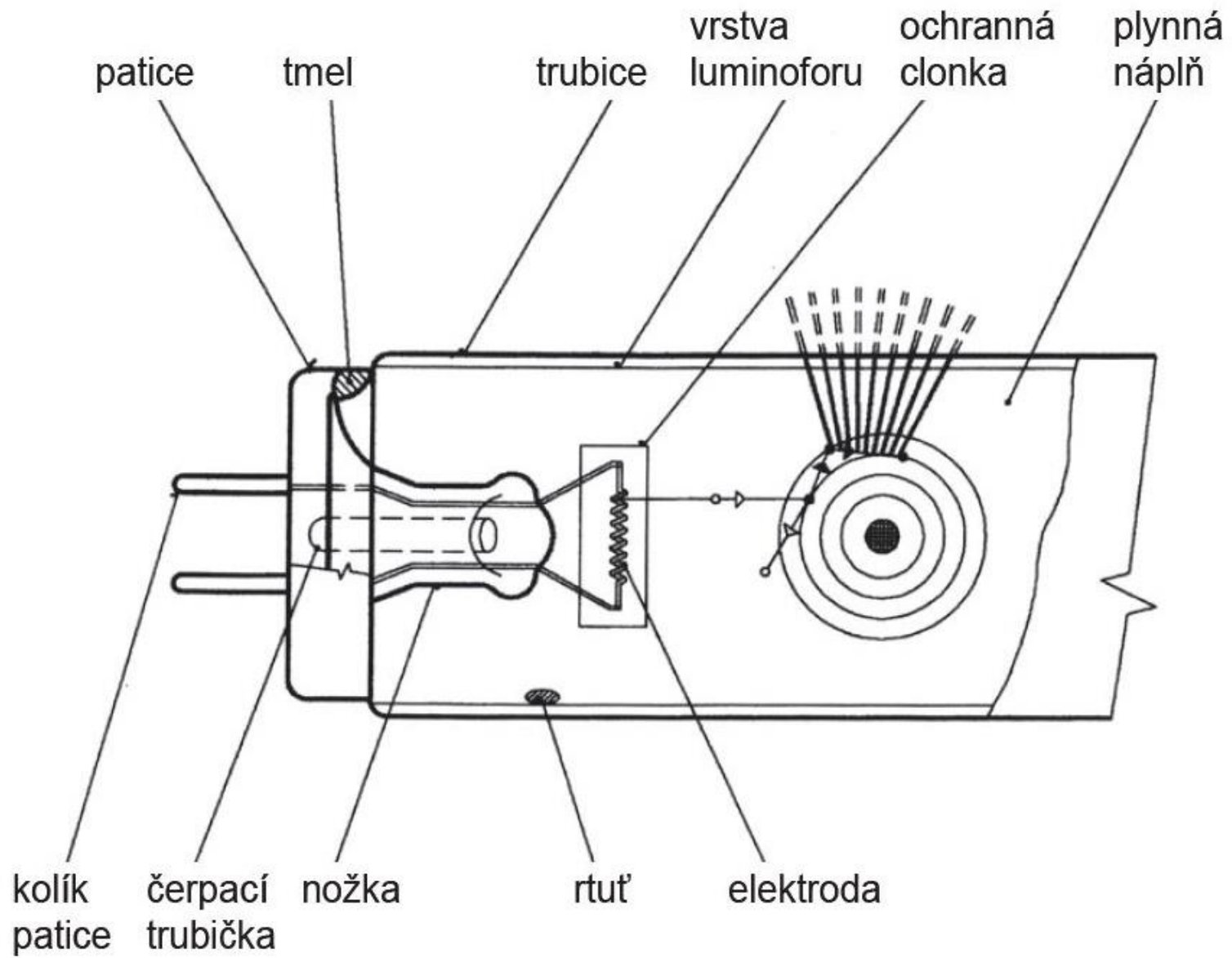
- Halogenové žárovky jsou zdokonalené klasické žárovky. V prostředí baňky jsou halogeny, které pomáhají snižovat odpařování vlákna, a dosahuje se tak vyšší účinnosti. Halogenové žárovky mají světlo podobné klasickým žárovkám.
- O 25-30 % nižší spotřeba energie oproti normální žárovce
- Rychlý start, delší životnost



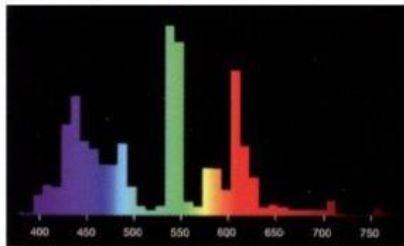
# Zářivky

- Zářivka je tvořena především dlouhou trubicí, která je naplněna směsí rtuťových par a argonu. Na koncích trubice jsou elektrody, které jsou pokryty bariem. Z katody, která je rozžhavena asi na  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  emitují elektrony a směřují k opačně nabitě anodě. Elektrické pole je urychluje. Díky tomu, že je trubice vakuovaná (tlak uvnitř je asi  $400\text{ Pa}$ ), je dráha elektronů, než narazí do nějakého atomu, dostatečně dlouhá, aby elektron získal dostatečnou energii k vyražení dalšího elektronu z atomu. Takto dochází k lavinovité ionizaci a vzniká tzv. doutnavý výboj.
- Někdy energie elektronu nestačí na ionizaci, ale dojde k excitaci – elektron se dostane na vyšší hladinu a posléze zase sestoupí na základní hladinu a následuje emise fotonu
- Emitované fotony mají vln. délku  $254\text{ nm}$  (UV světlo)
- Stěny zářivky jsou pokryty luminiscenčním materiálem, který je excitován fotony a emitovány jsou fotony s vyšší vlnovou délkou (viditelné záření)

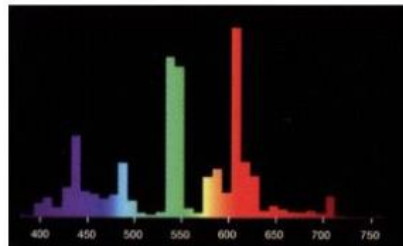




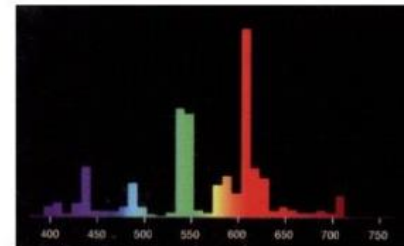
# Zářivky - luminifory



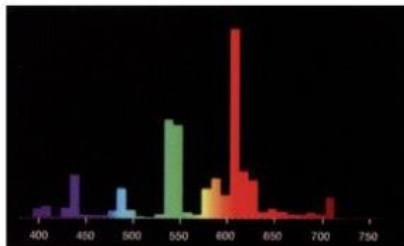
a)



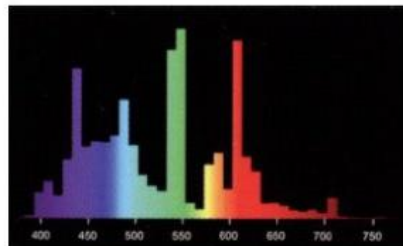
b)



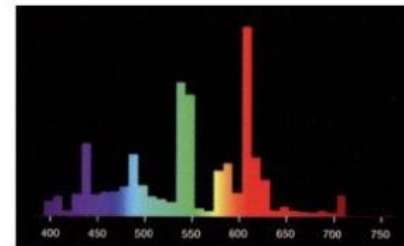
c)



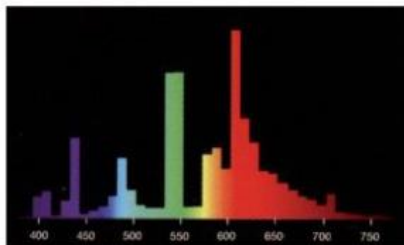
d)



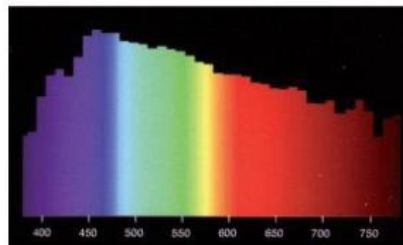
e)



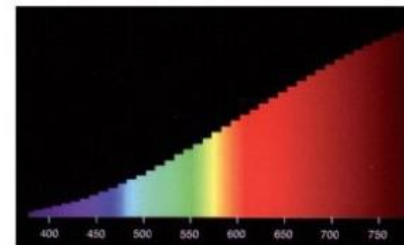
f)



g)



h)



i)

a – žářivka 865 chladně bílá s třípásmovým luminoforem  
b – žářivka 840 neutrálně bílá s třípásmovým luminoforem  
c – žářivka 830 teple bílá s třípásmovým luminoforem  
d – žářivka 827 typu Interner s třípásmovým luminoforem  
e – žářivka 965 chladně bílá (denní) de luxe

f – žářivka 940 neutrálně bílá de luxe  
g – žářivka 930 teple bílá de luxe  
h – denní světlo D65  
i – běžná žárovka

# Úsporné kompaktní zářivky, tzv. „úsporky“

- Fungují jako zářivky
- Úspora 80 % energie, volba barvy světla
- (údajně) delší výdrž
- Pomalý náběh, obsahuje rtuť a lanthanoidy (nutnost recyklace)
- Neekologická výroba!





# Svíčka



# Použití luminiscenční spektroskopie v analytické chemii

# Luminiscenční analýza

Kvantitativní analýza:

$$F = k \varphi \Phi_0 2.3 c l \varepsilon$$

Vysoká citlivost metody:

- použití laserů
- odezva na relativně malé změny v okolí

# Luminiscenční stanovení

- nativní luminiscence
- tvorba luminiscenčních komplexů
- luminiscenční značky
- luminiscenční sondy
- propojení s dalšími metodami

# Vnitřní a vnější luminiscence

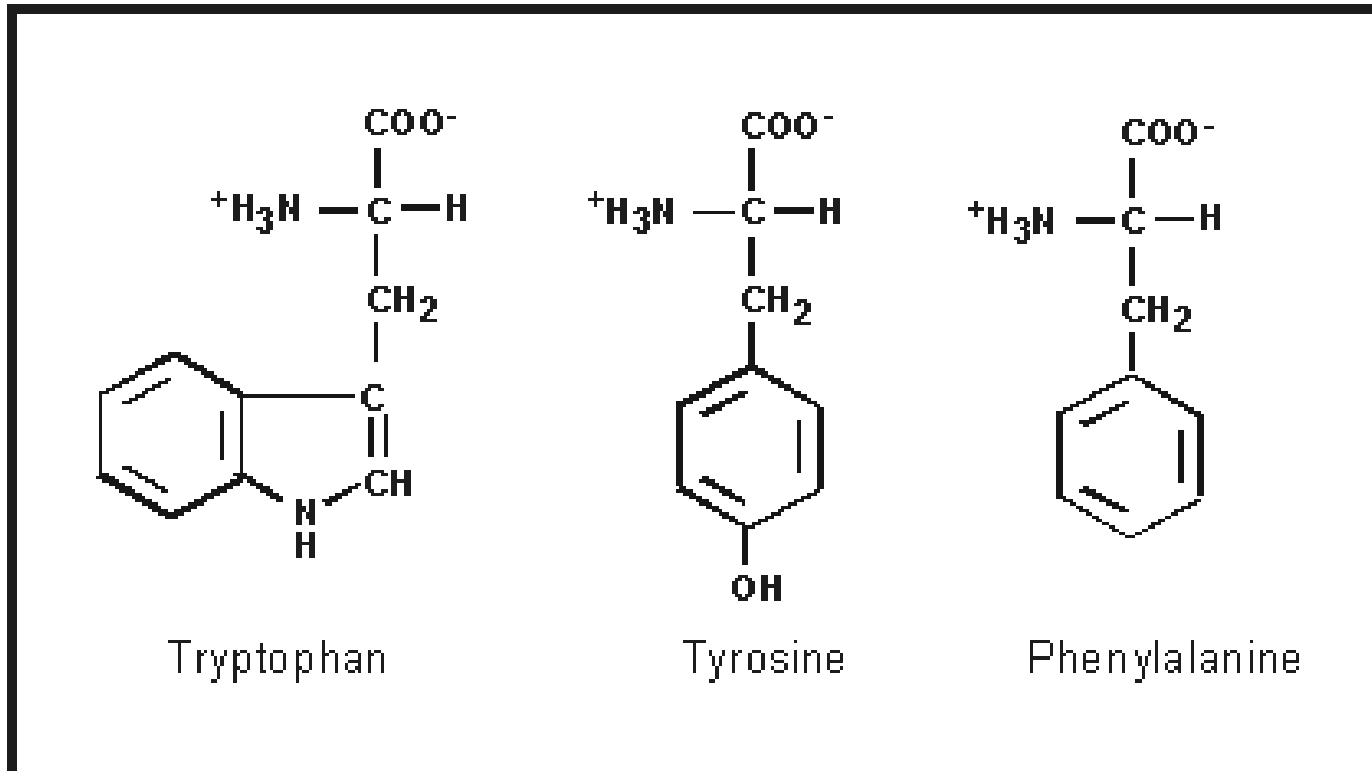
- vnitřní/**intrinsic** (nativní luminiscence) – molekuly lze stanovit bez výrazného zásahu do sledovaného systému, zpravidla aromatické látké
- vnější/**extrinsic** luminiscence – do sledovaného systému přidáme fluoreskující činidlo(barvivo), jehož fluorescence bude závislá na koncentraci analytu, případně se na něj naváže

# Nativní luminiscence

Class	Compounds <sup>a</sup>
aromatic amino acids	phenylalanine (F) tyrosine (F) tryptophan (F, P)
vitamins	vitamin A (F) vitamin B <sub>2</sub> (F) vitamin B <sub>6</sub> (F) vitamin B <sub>12</sub> (F) vitamin E (F) folic acid (F)
catecholamines	dopamine (F) norepinephrine (F)
pharmaceuticals and drugs	quinine (F) salicylic acid (F, P) morphine (F) barbiturates (F) LSD (F) codeine (P) caffeine (P) sulfanilamide (P)
environmental pollutants	polycyclic aromatic hydrocarbons: pyrene (F) benzo[a]pyrene (F) organothiophosphorous pesticides (F) carbamate insecticides (F) DDT (P)

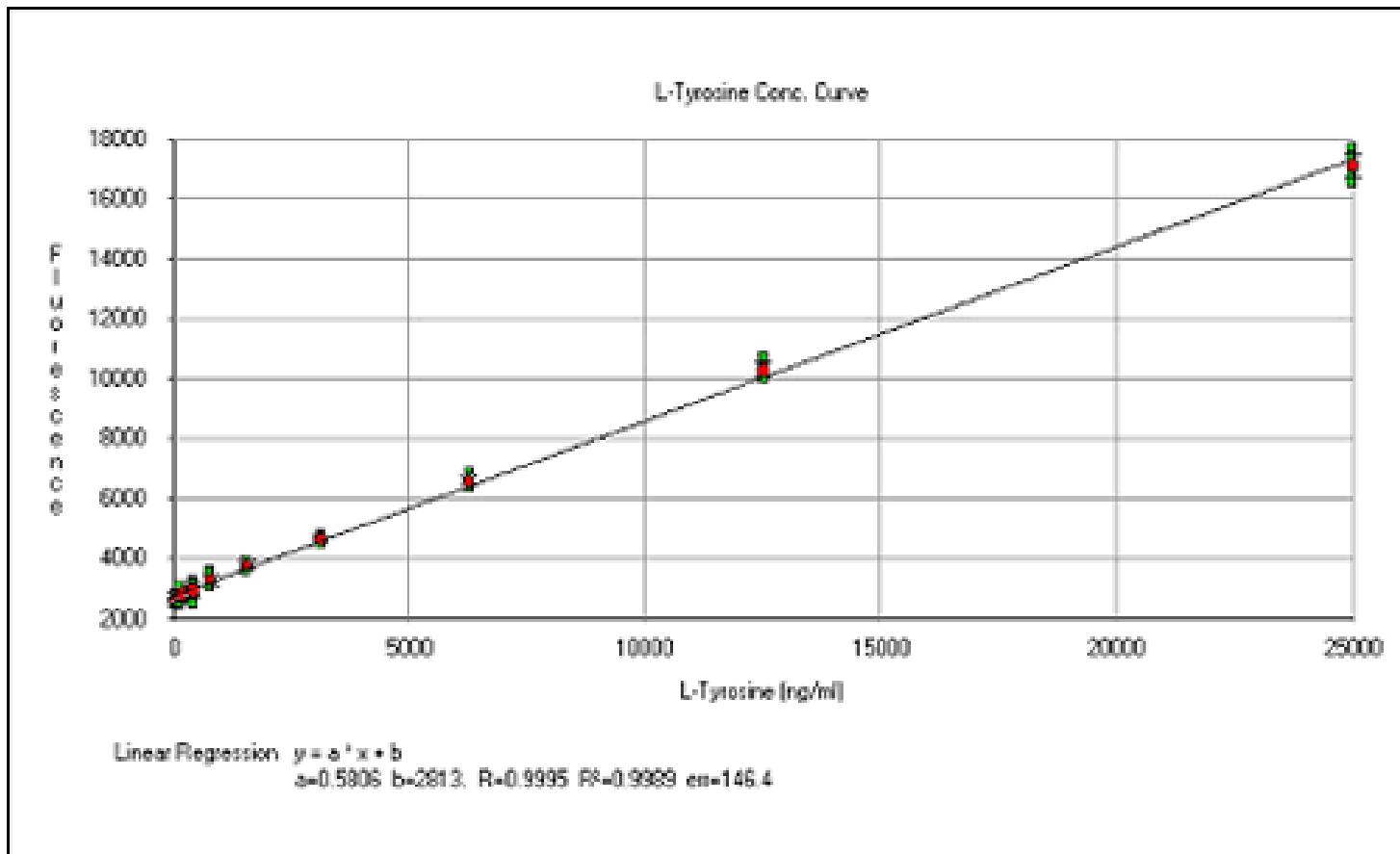
<b>sloučenina</b>	$\lambda_{\text{ex}}^{\text{max}}$ (nm)	$\lambda_{\text{em}}^{\text{max}}$ (nm)
indole group	270-290	330-350
LSD	325	365
quinine	347	448
papaverine	315	347
berberine	352 a 432	548
caffeine	270	303
purine	265	380
adenosine	272	390
cytosine	267	313
uracil	258	309
3-hydroxocoumarin	316	372
riboflavin	370 a 440	565
GFP	400 a 475	510
nicotineamids	470	515
cyanocobalamin	275	305
calciferol	348	420
retinol	325	470

# Peptidy, proteiny, AK

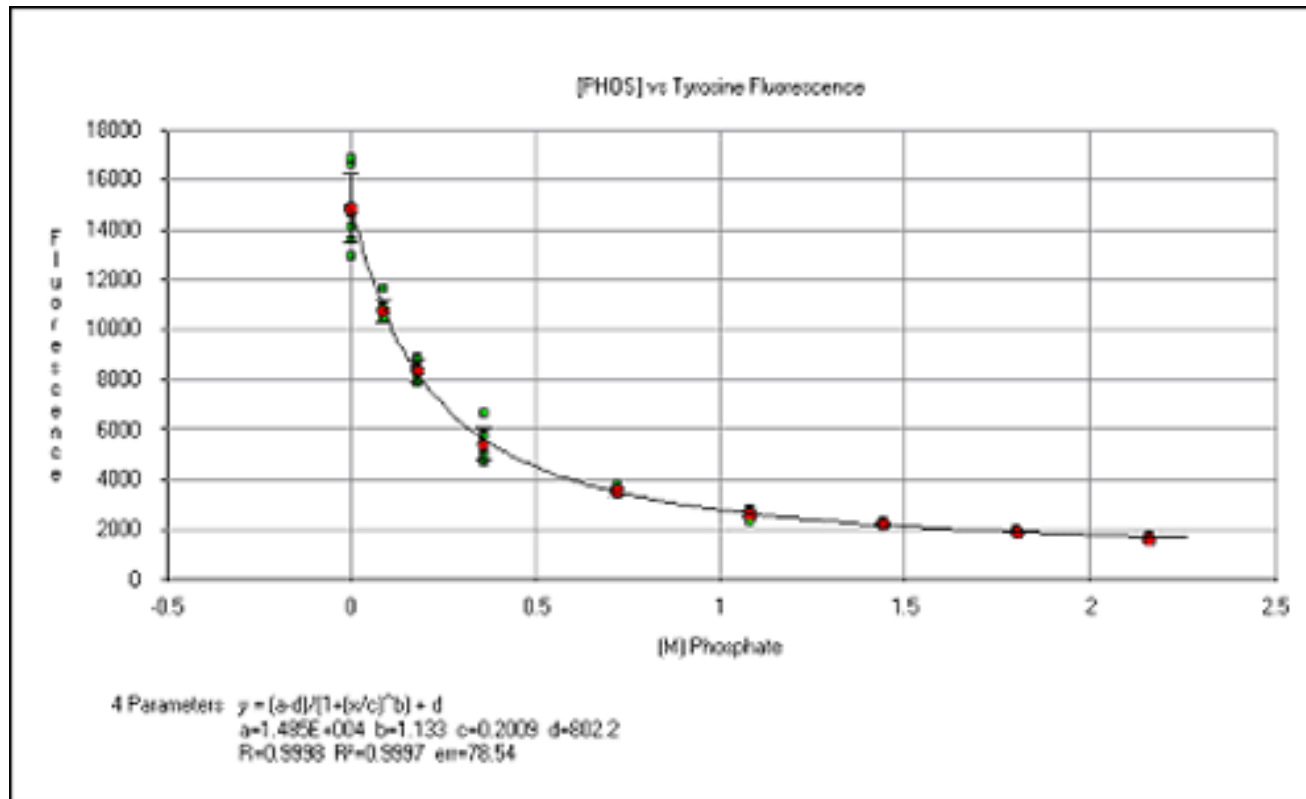




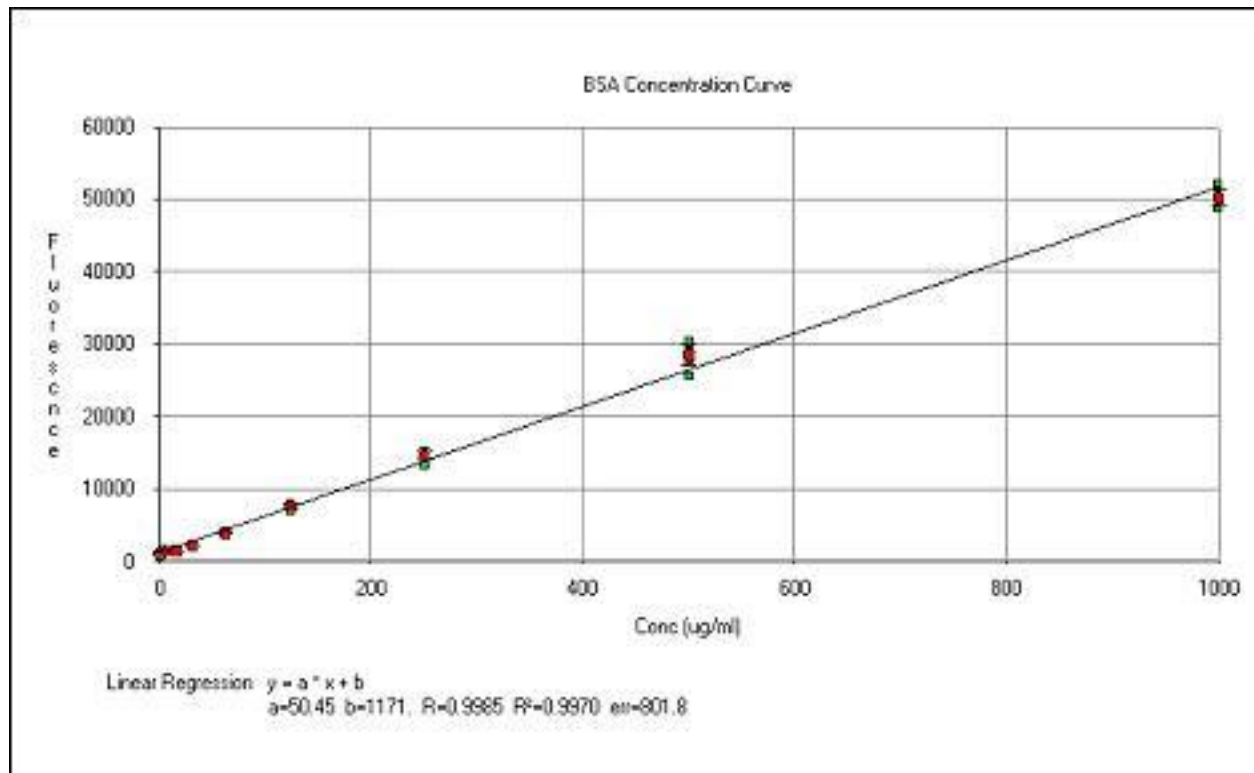
# Stanovení aminokyselin



# Stanovení aminokyselin



# Stanovení proteinů



# Nativní fluorescence proteinů – vliv polariry okolního prostředí

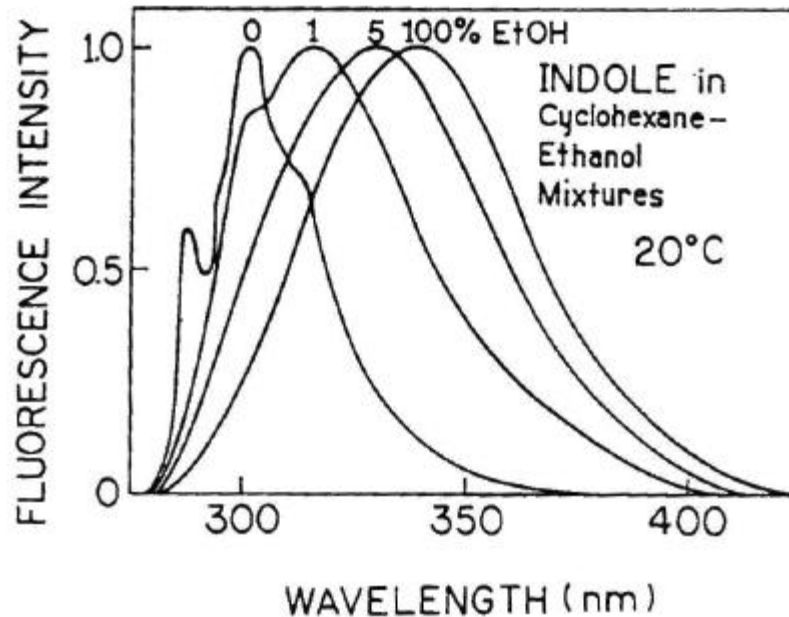
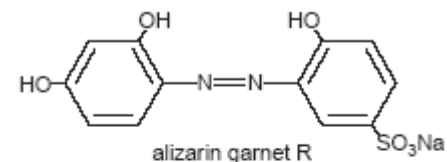


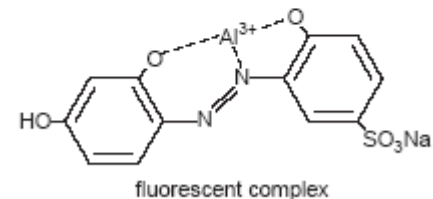
Figure 16.5. Emission spectra of indole in cyclohexane, ethanol, and their mixtures at 20 °C. From Ref. 23.

# Stanovení anorganických iontů

Komplexující činidlo	Iont kovu
8-hydroxychinolin	$\text{Al}^{3+}$ , $\text{Be}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Li}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ a další
Flavonal	$\text{Zr}^{2+}$ , $\text{Sn}^{4+}$
2-(o-hydroxyfenyl) benzoaxazol	$\text{Cd}^{2+}$
1,10 - fenntrolin	$\text{Ln}^{3+}$
Různá azobarviva	$\text{Al}^{3+}$ , $\text{Be}^{2+}$ , $\text{In}^{3+}$ , $\text{Hf}(\text{IV})$ , $\text{Th}(\text{IV})$ , $\text{Sc}^{3+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Sn}(\text{IV})$ , $\text{Y}^{3+}$
Benzoin	$\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ , $\text{Zn}^{2+}$



(a)



(b)

# Fluorescenční značky a sondy

- **fluorescenční značky** (fluorescent labels) jsou vnější (extrinsic fluorescence) fluorofory, které se ke sledovaným biomolekulám (proteinům, peptidům, ligandům, oligonukleotidům a jiným) vážou kovalentní vazbou
- **fluorescenční sondy** (fluorescent probes) jsou vnější fluorofory, které se ke sledované struktuře vážou nekovalentně a často přitom mění své fluorescenční vlastnosti.

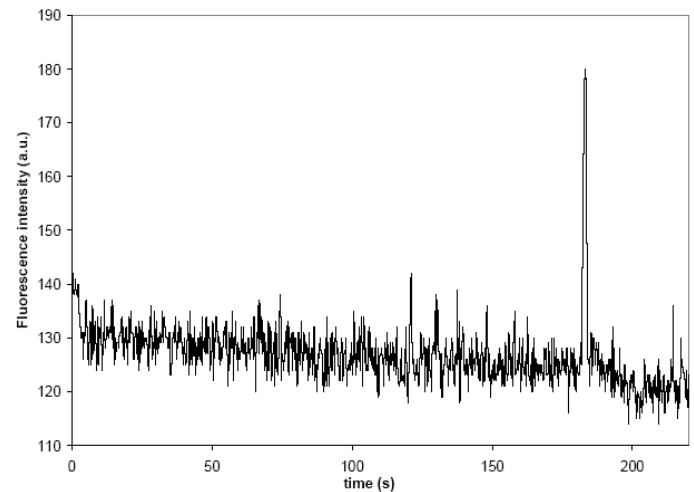
# Derivatizace fluoroforem

Vnitřní (nativní) x vnější luminiscence

luminiscenční značky a sondy

Molekuly bez vlastní (vnitřní, nativní, přirozené) luminiscence lze derivatizovat luminiscenčními značkami

Omezení: lze detekovat i jednotlivé molekuly („single molecule detection“) obsahující silné luminofory, problém je jejich navázání na analyt...



Rhodamin B ( $c = 1 \times 10^{-12} \text{ mol.l}^{-1}$ )

# Výběr fluorescenčních značek

kritéria pro výběr:

**spektrální vlastnosti** (excitace, emise, kvantový výtěžek atd.)

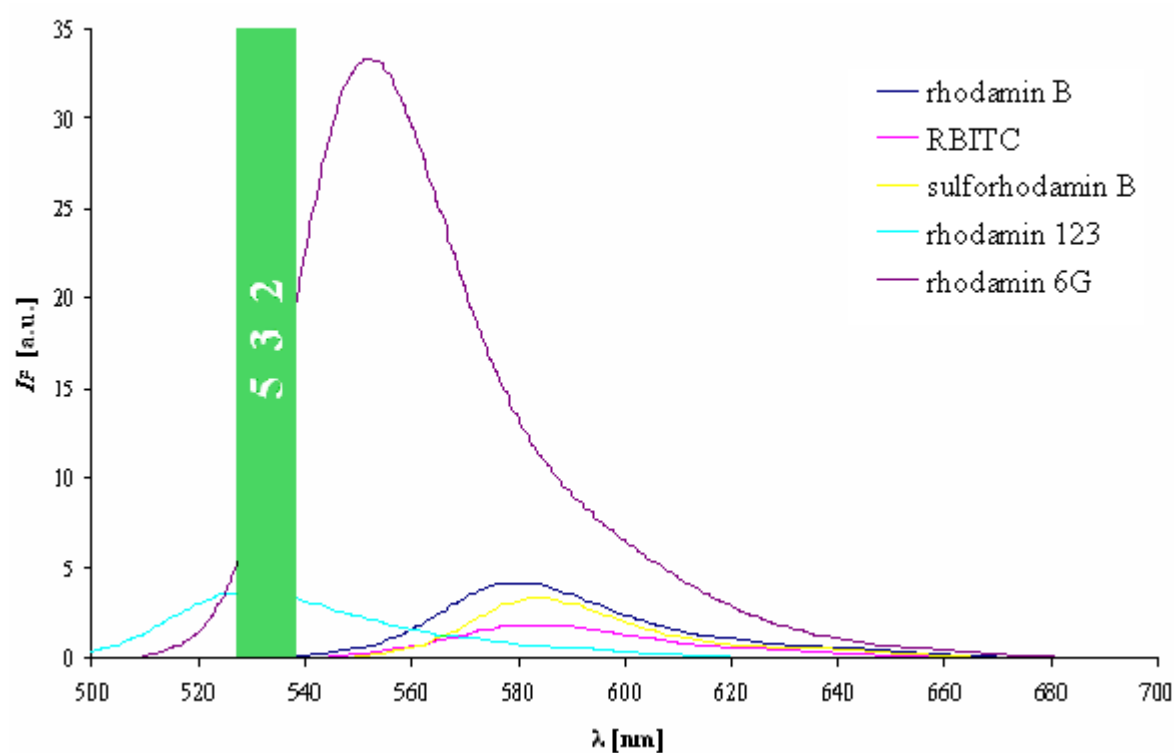
**vazebné místo** (-NH<sub>2</sub>, -SH skupina a další)

**podmínky reakce** (pH, koncentrace...)

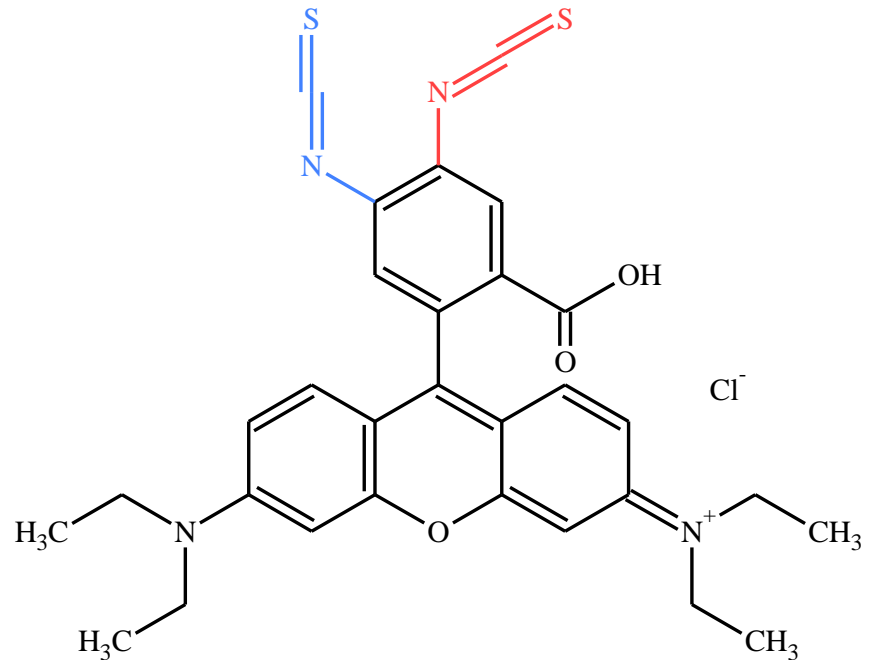
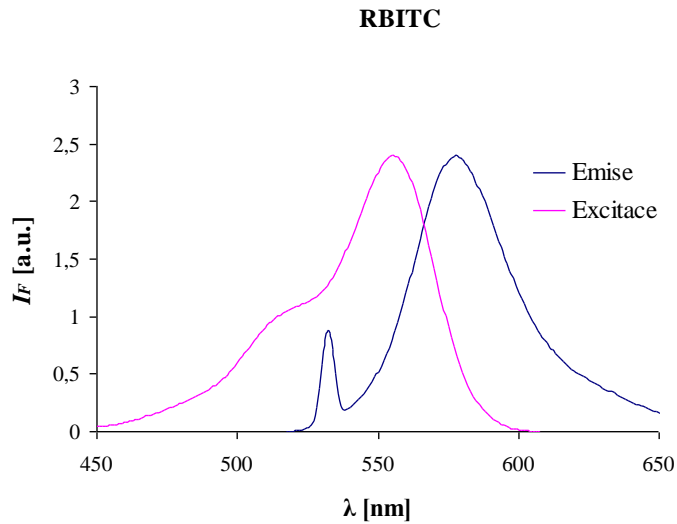
**hydrofobicita**



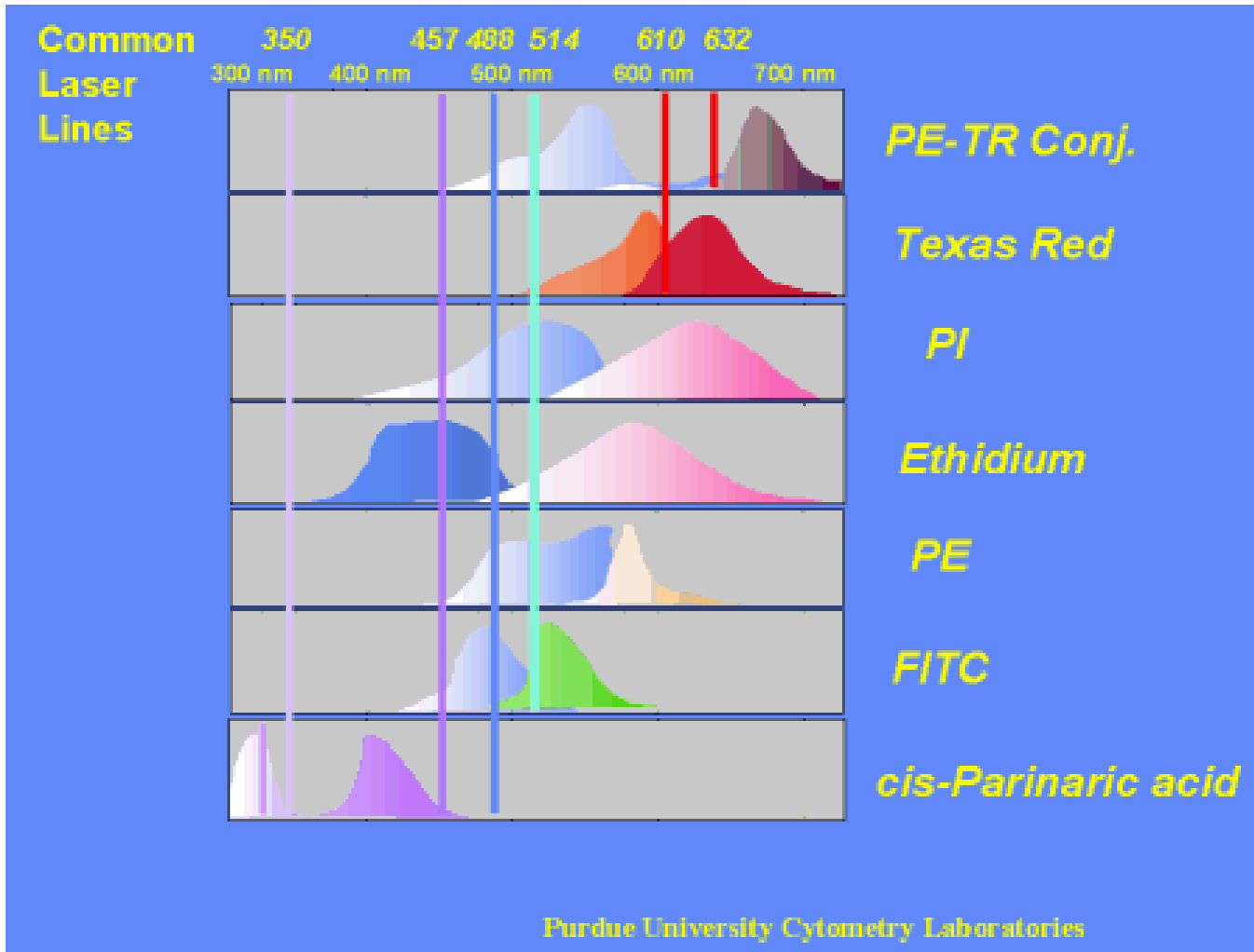
# Výběr luminiscenčního barviva – spektrální vlastnosti



# Výběr luminiscenčního barviva – spektrální vlastnosti

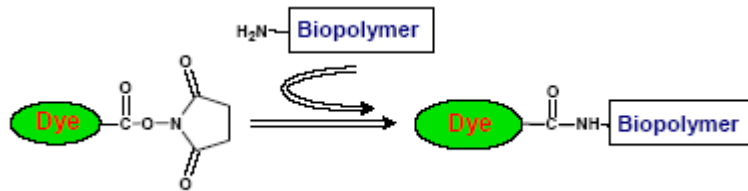


# Výběr fluorescenčních barviv



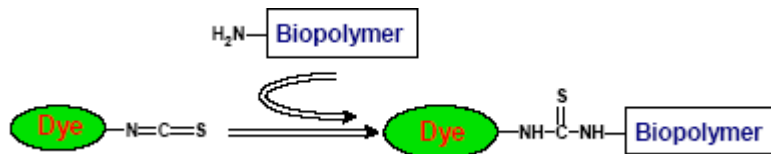
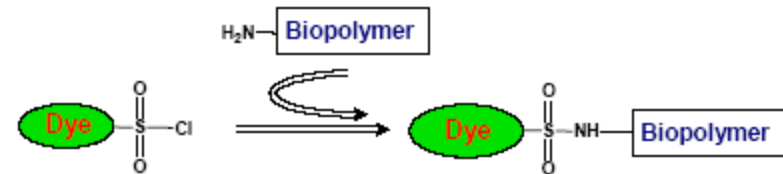
# Fluorescenční značky – vazebná místa

## amino-reaktivní značky



sukcinimidyl estery (Rh6GSE)

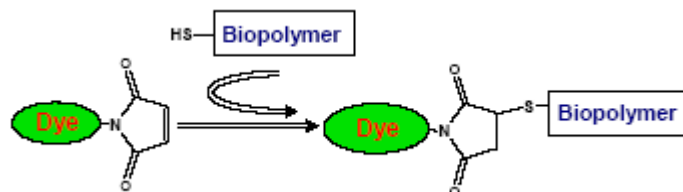
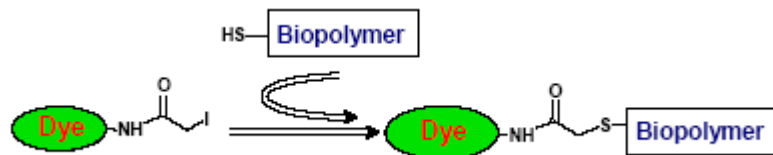
sulfonyl chloridy



isothiokyanáty (FITC, RBITC)

# Fluorescenční značky – vazebná místa

## thiol-reaktivní značky



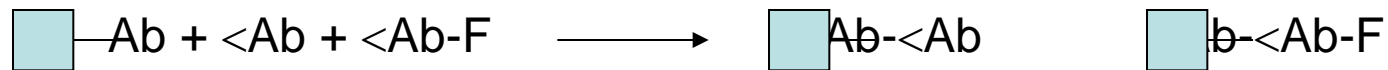
# Fluorescenční metody v imunoanalýze

## Imunoanalytické metody:

- dříve hlavně tvorba precipitátu
- dnes značené hlavně různým způsobem značené reaktanty (antigeny a protilátky)
- radiometricky, enzymaticky, fluorescenčně (luminiscenčně) značené reaktanty
- enzymové metody mohou mít luminiscenční detekci

# Fluorescenční imunoanalýza (FIA)

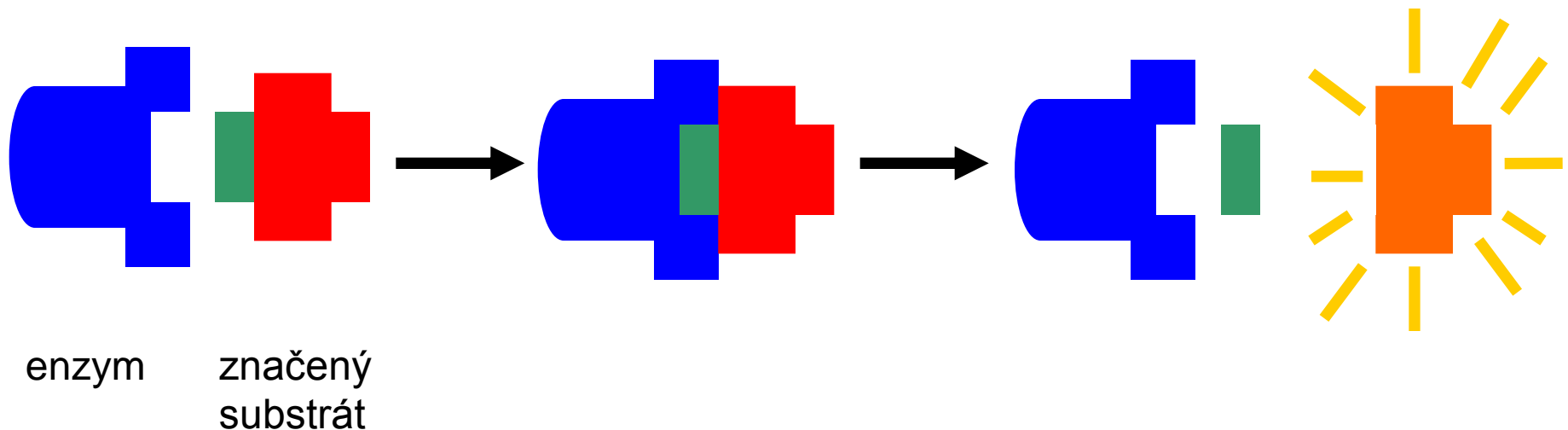
- poprvé použity v roce 1964
- často ovlivněna fluorescencí matrice a samotného vzorku
- může být použita i **TR-FIA** (Time Resolved Fluorescence Immuno Assay). Tato metoda využívá jako značek chelátů s lanthanitých kationtů ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  a dalších)
- FIA lze provádět v homogenním i heterogenním prostředí, v kompetitivním i nekompetitivním uspořádání



ukázka kompetitivní FIA v heterogenním prostředí

# Fluorogenní substráty – stanovení enzymatické aktivity

Princip: volný fluorofor má jiné luminiscenční vlastnosti, než když je navázaný na biomolekulu. Fluorofor je na biomolekulu navázán vazbou, kterou štěpí stanovovaný enzym.



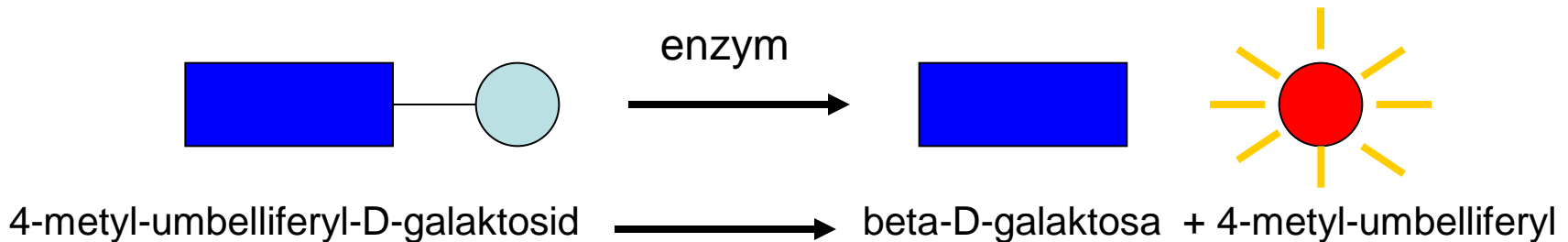


# Fluorimetrická EIA

- Enzymoimunoanalýza v homogenním (EIA) a heterogenním prostředí (ELISA)

Existuje několik možností:

- antigen je značen enzymem
- antigen značený enzymem se sráží s protilátkou
- nesražený antigen s enzymem lze stanovit takto:

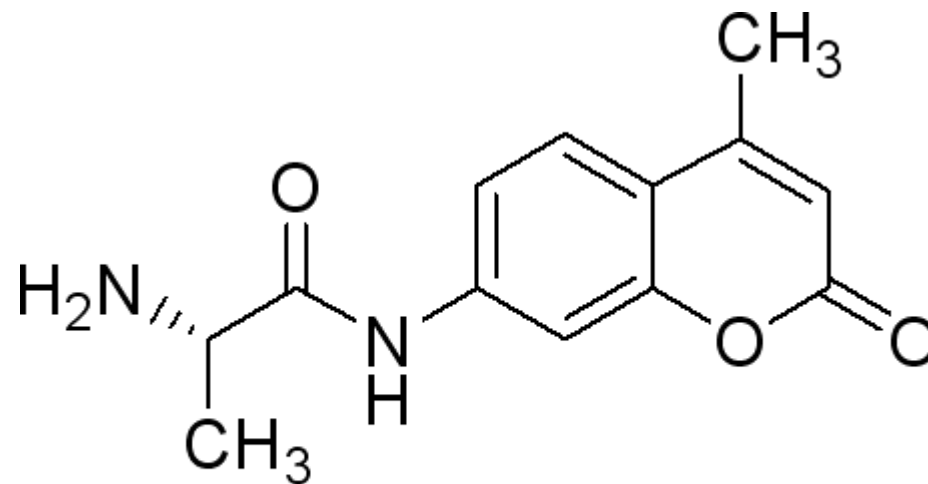


# Dělení fluorescenční imunoanalytických metod

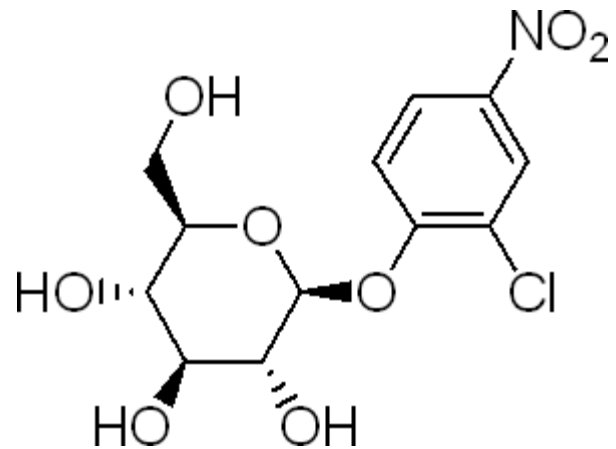
- Fluorescence Immuno Assay (FIA)
- Fluorescence Polarization Immuno Assay (FPIA)
- Time Resolved Fluorescence Immuno Assay (TR-FIA)
- Elektroluminiscenční, chemiluminiscence a další
- Enzymatické metody s luminiscenční detekcí

# Radiometrická vs. fluorescenční detekce v imunoanalýze

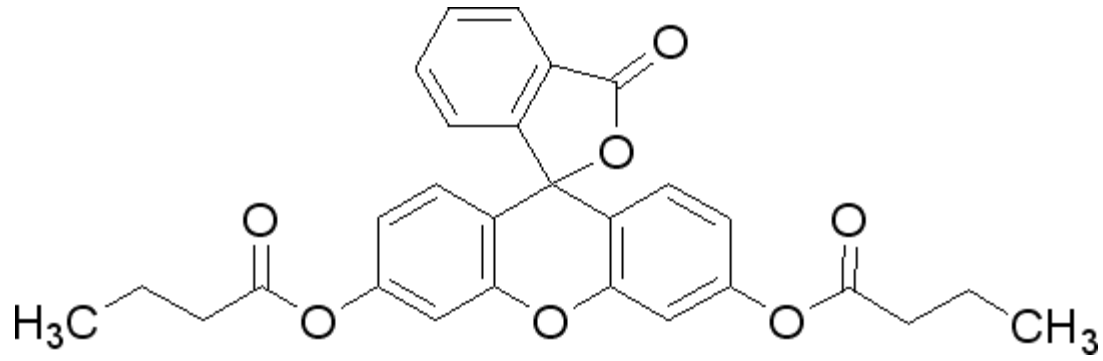
- dříve byla nejcitlivější metodou RIA, ale s příchodem levných laserů je rozšířenější luminiscenční detekce
- detekční limity obou metod jsou srovnatelné (až  $10^{-12}$  g.l<sup>-1</sup>), ale luminiscenční detekce je bezpečnější a levnější



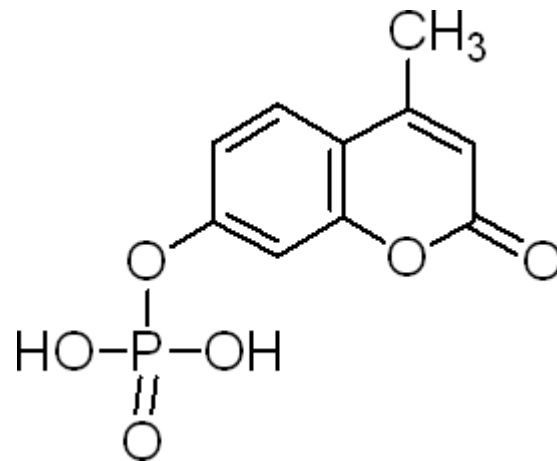
L-Alanine 7-amido-4-methylcoumarin: fluorogenní substrát  
pro stanovení Aminopeptidáz



2-Chloro-4-nitrophenyl-β-D-glucopyranoside: fluorogenní substrát  
pro stanovení β-Glucosidase

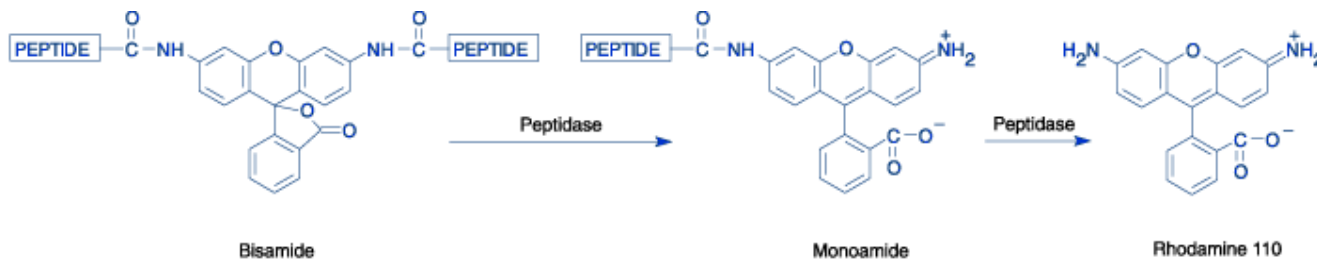
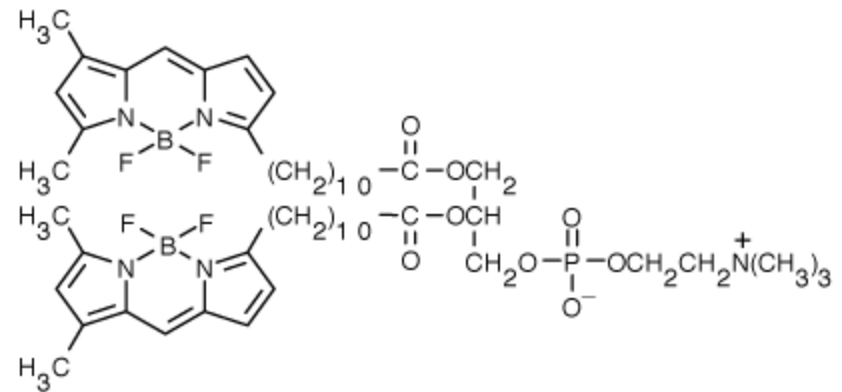
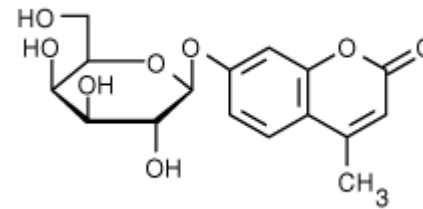
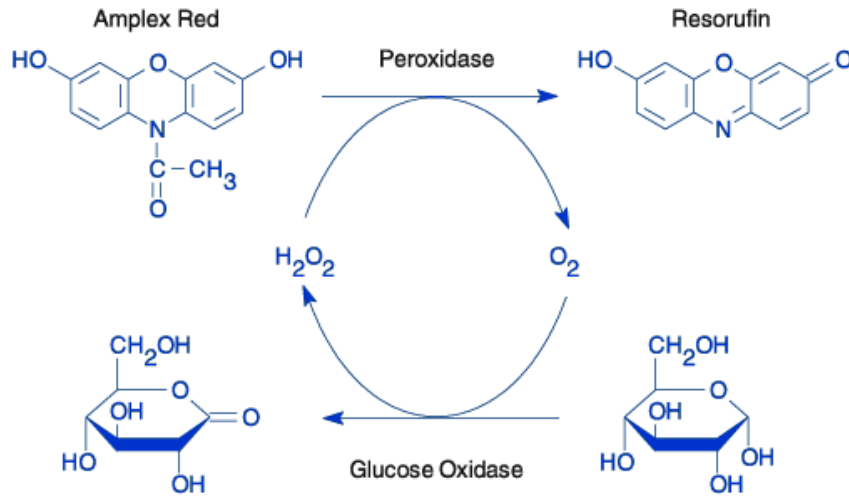


Fluorescein dibutylate: fluorogenní substrát pro stanovení esteráz a lipáz



4-Methylumbelliferyl phosphate: fluorogenní substrát pro stanovení fosfatázy

# Fluorogenní substráty





# Použití luminiscenční spektroskopie v analytické chemii

# Luminiscenční analýza

Kvantitativní analýza:

$$F = k \varphi \Phi_0 2.3 c l \varepsilon$$

Vysoká citlivost metody:

- použití laserů
- odezva na relativně malé změny v okolí

# Luminiscenční stanovení

- nativní luminiscence
- tvorba luminiscenčních komplexů
- luminiscenční značky
- luminiscenční sondy
- propojení s dalšími metodami

# Vnitřní a vnější luminiscence

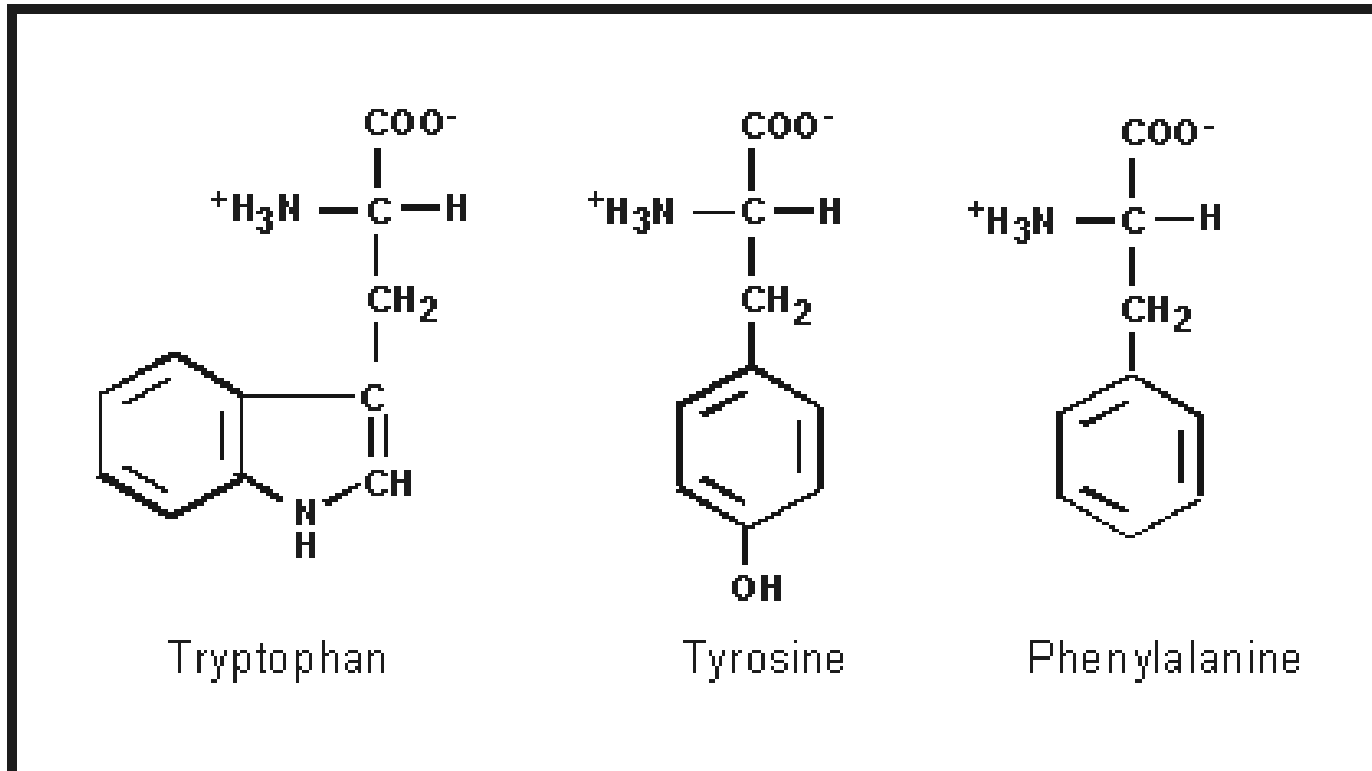
- vnitřní/**intrinsic** (nativní luminiscence) – molekuly lze stanovit bez výrazného zásahu do sledovaného systému, zpravidla aromatické látké
- vnější/**extrinsic** luminiscence – do sledovaného systému přidáme fluoreskující činidlo(barvivo), jehož fluorescence bude závislá na koncentraci analytu, případně se na něj naváže

# Nativní luminiscence

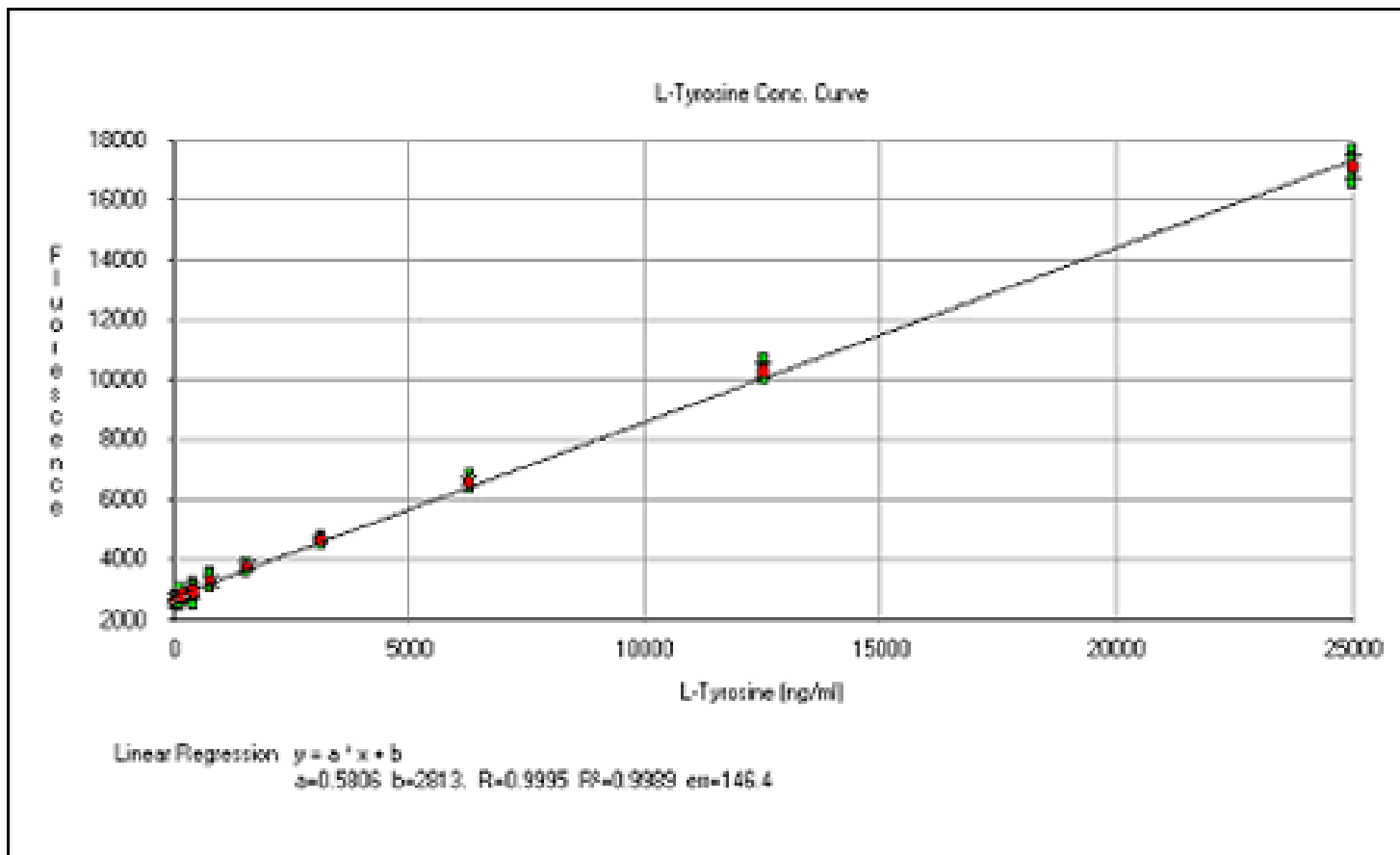
Class	Compounds <sup>a</sup>
aromatic amino acids	phenylalanine (F) tyrosine (F) tryptophan (F, P)
vitamins	vitamin A (F) vitamin B <sub>2</sub> (F) vitamin B <sub>6</sub> (F) vitamin B <sub>12</sub> (F) vitamin E (F) folic acid (F)
catecholamines	dopamine (F) norepinephrine (F)
pharmaceuticals and drugs	quinine (F) salicylic acid (F, P) morphine (F) barbiturates (F) LSD (F) codeine (P) caffeine (P) sulfanilamide (P)
environmental pollutants	polycyclic aromatic hydrocarbons: pyrene (F) benzo[a]pyrene (F) organothiophosphorous pesticides (F) carbamate insecticides (F) DDT (P)

<b>sloučenina</b>	$\lambda_{\text{ex}}^{\text{max}}$ (nm)	$\lambda_{\text{em}}^{\text{max}}$ (nm)
indole group	270-290	330-350
LSD	325	365
quinine	347	448
papaverine	315	347
berberine	352 a 432	548
caffeine	270	303
purine	265	380
adenosine	272	390
cytosine	267	313
uracil	258	309
3-hydroxocoumarin	316	372
riboflavin	370 a 440	565
GFP	400 a 475	510
nicotineamids	470	515
cyanocobalamin	275	305
calciferol	348	420
retinol	325	470

# Peptidy, proteiny, AK

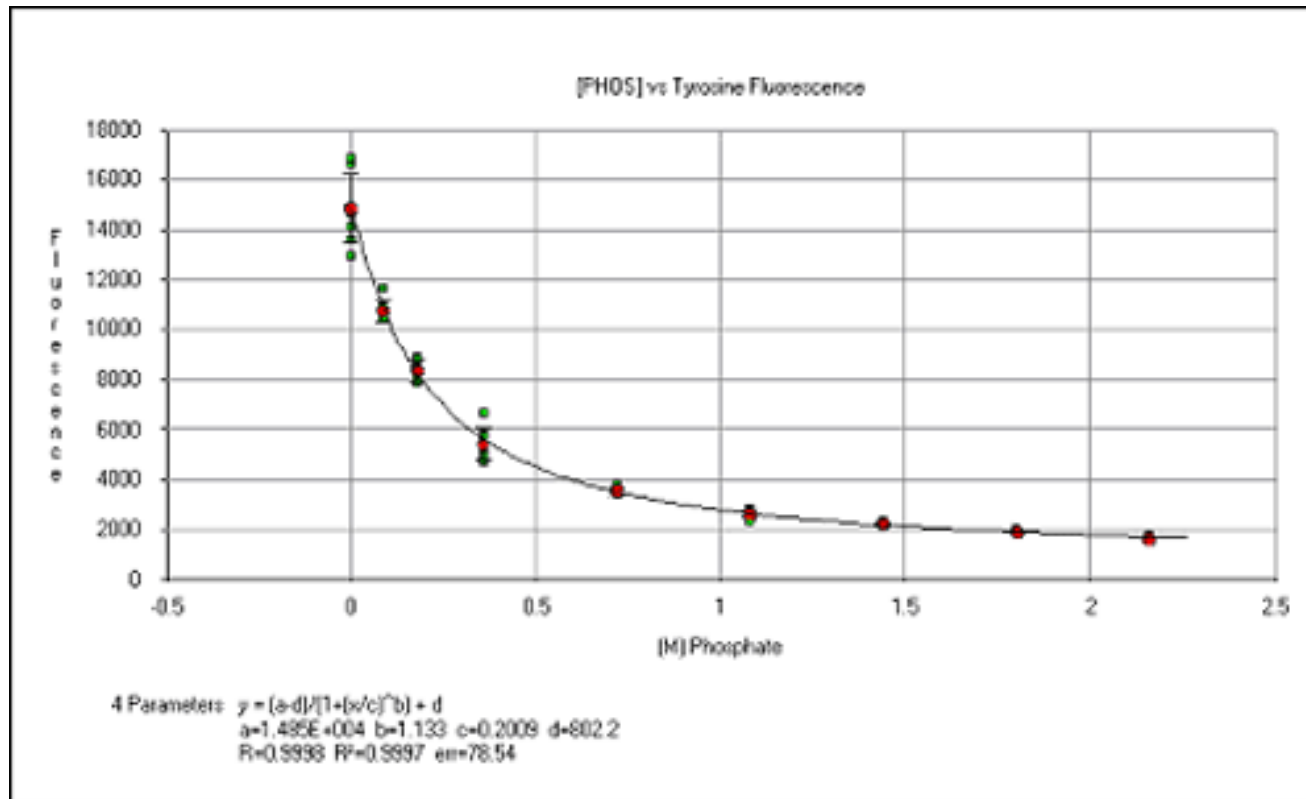


# Stanovení aminokyselin

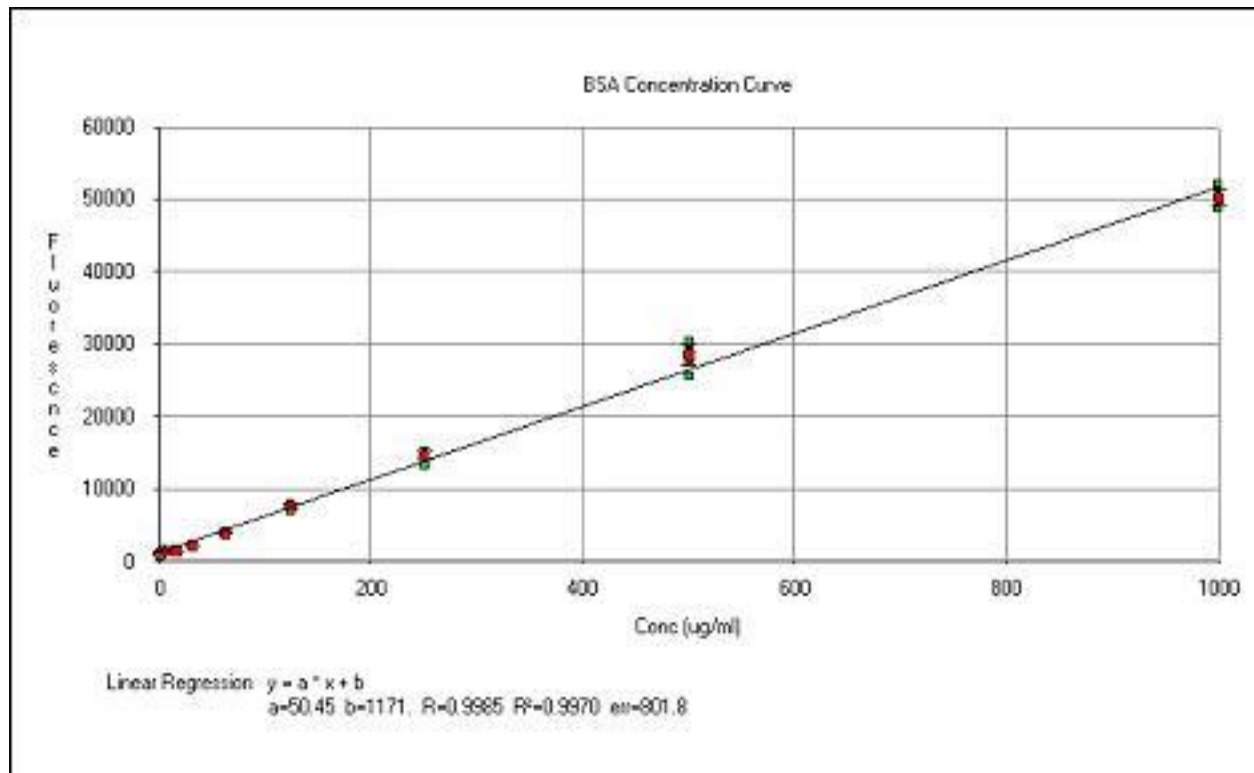




# Stanovení aminokyselin



# Stanovení proteinů



# Nativní fluorescence proteinů – vliv polariry okolního prostředí

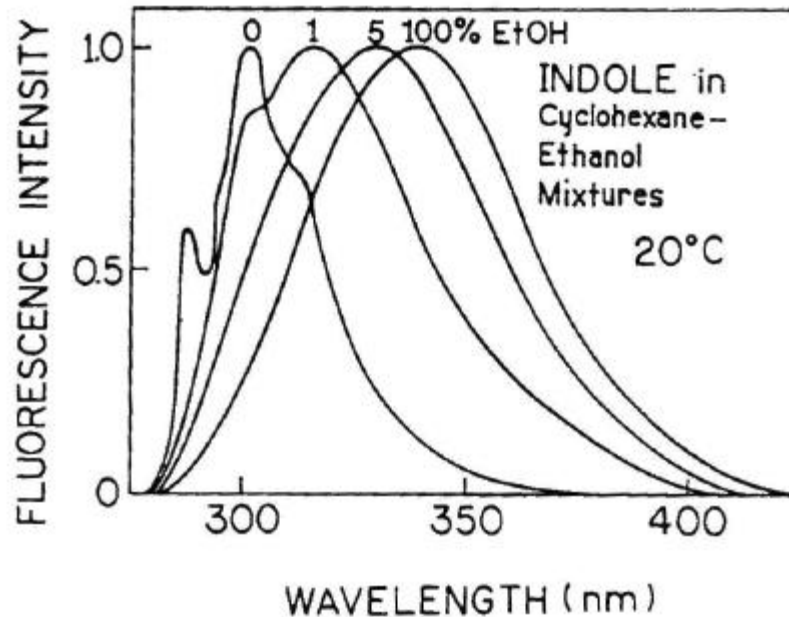
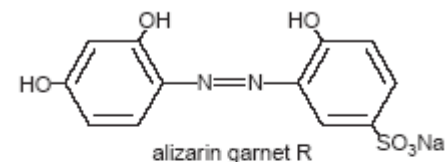


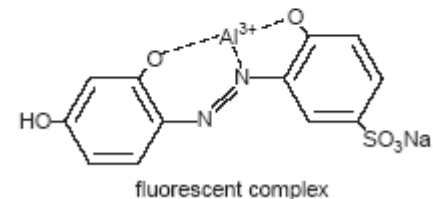
Figure 16.5. Emission spectra of indole in cyclohexane, ethanol, and their mixtures at 20 °C. From Ref. 23.

# Stanovení anorganických iontů

Komplexující činidlo	Iont kovu
8-hydroxychinolin	$\text{Al}^{3+}$ , $\text{Be}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Li}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ a další
Flavonal	$\text{Zr}^{2+}$ , $\text{Sn}^{4+}$
2-(o-hydroxyfenyl) benzoaxazol	$\text{Cd}^{2+}$
1,10 - fenntrolin	$\text{Ln}^{3+}$
Různá azobarviva	$\text{Al}^{3+}$ , $\text{Be}^{2+}$ , $\text{In}^{3+}$ , $\text{Hf}(\text{IV})$ , $\text{Th}(\text{IV})$ , $\text{Sc}^{3+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Sn}(\text{IV})$ , $\text{Y}^{3+}$
Benzoin	$\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ , $\text{Zn}^{2+}$



(a)



(b)

# Fluorescenční značky a sondy

- **fluorescenční značky** (fluorescent labels) jsou vnější (extrinsic fluorescence) fluorofory, které se ke sledovaným biomolekulám (proteinům, peptidům, ligandům, oligonukleotidům a jiným) vážou kovalentní vazbou
- **fluorescenční sondy** (fluorescent probes) jsou vnější fluorofory, které se ke sledované struktuře vážou nekovalentně a často přitom mění své fluorescenční vlastnosti.

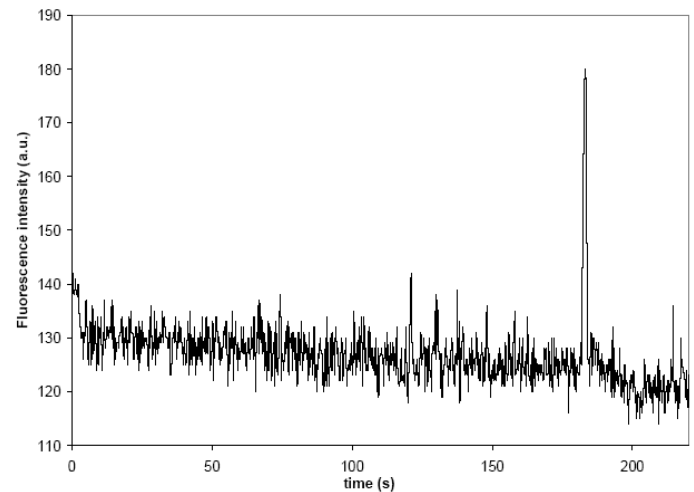
# Derivatizace fluoroforem

Vnitřní (nativní) x vnější luminiscence

luminiscenční značky a sondy

Molekuly bez vlastní (vnitřní, nativní, přirozené) luminiscence lze derivatizovat luminiscenčními značkami

Omezení: lze detekovat i jednotlivé molekuly („single molecule detection“) obsahující silné luminofory, problém je jejich navázání na analyt...



Rhodamin B ( $c = 1 \times 10^{-12} \text{ mol.l}^{-1}$ )

# Výběr fluorescenčních značek

kritéria pro výběr:

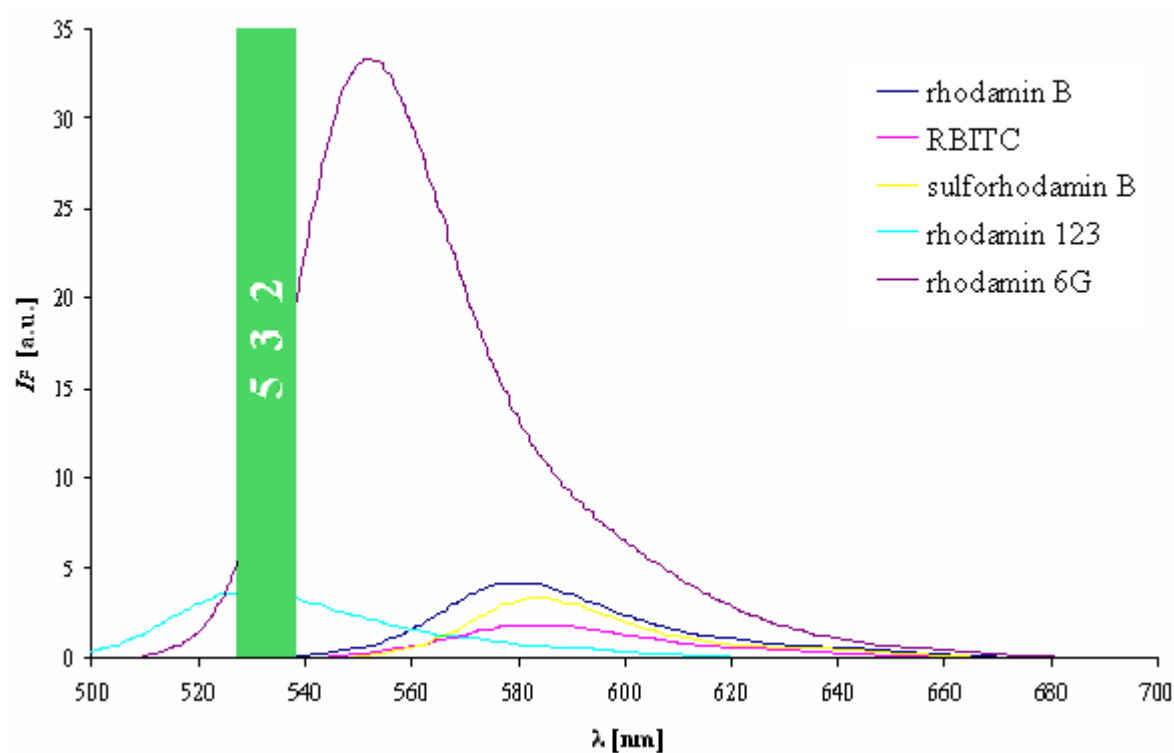
**spektrální vlastnosti** (excitace, emise, kvantový výtěžek atd.)

**vazebné místo** (-NH<sub>2</sub>, -SH skupina a další)

**podmínky reakce** (pH, koncentrace...)

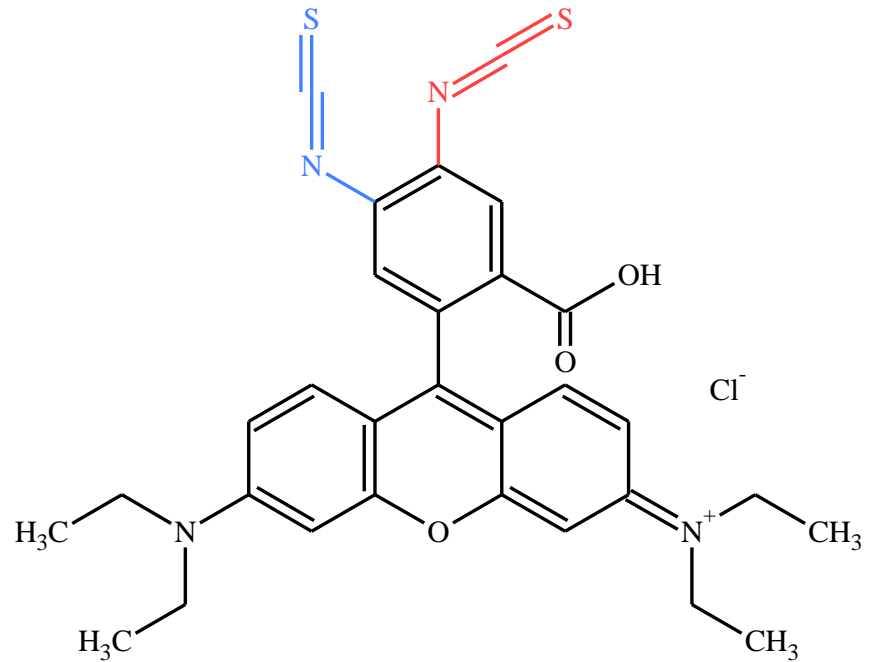
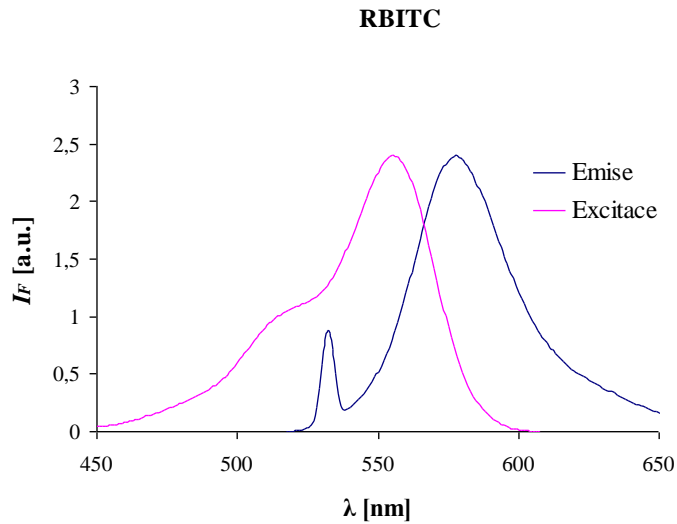
**hydrofobicita**

# Výběr luminiscenčního barviva – spektrální vlastnosti

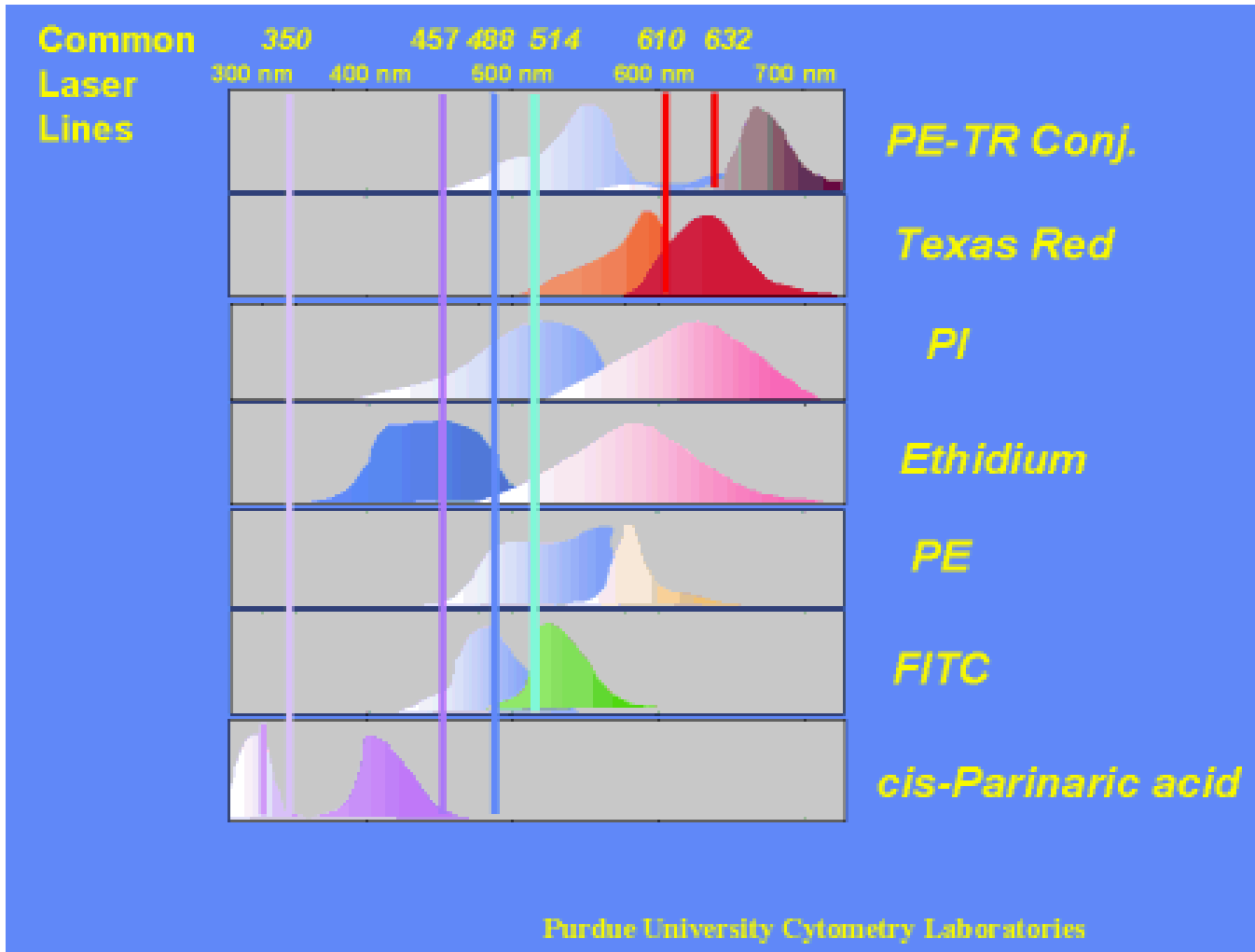




# Výběr luminiscenčního barviva – spektrální vlastnosti

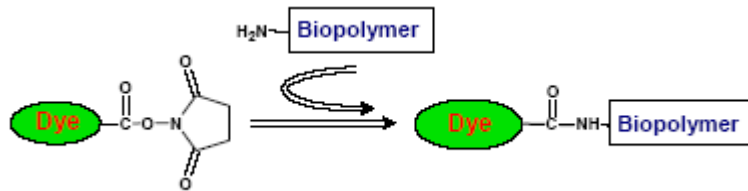


# Výběr fluorescenčních barviv



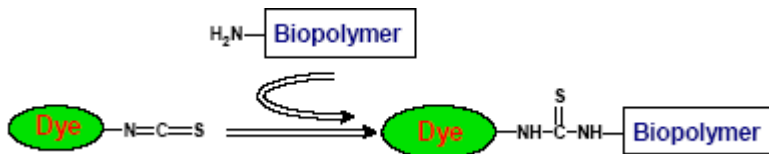
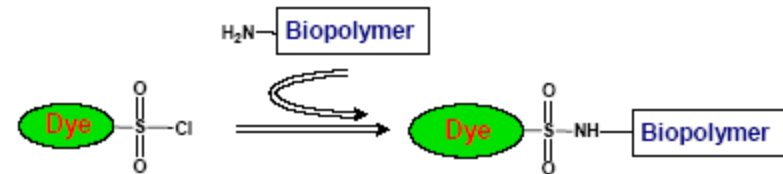
# Fluorescenční značky – vazebná místa

## amino-reaktivní značky



sukcinimidyl estery (Rh6GSE)

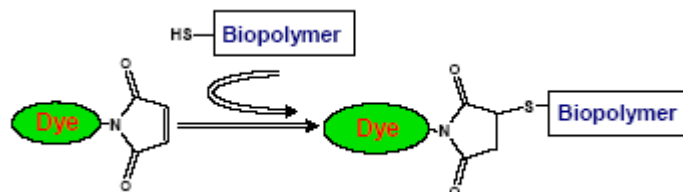
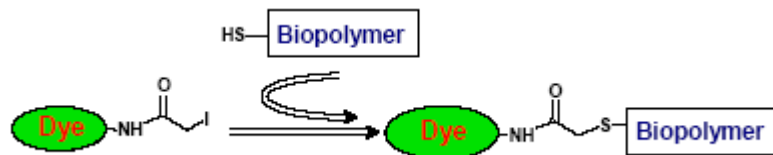
sulfonyl chloridy



isothiokyanáty (FITC, RBITC)

# Fluorescenční značky – vazebná místa

## thiol-reaktivní značky



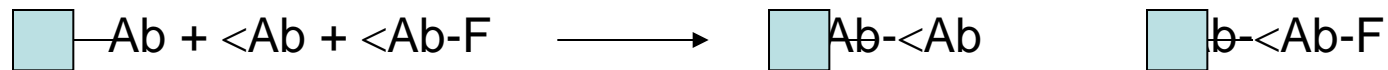
# Fluorescenční metody v imunoanalýze

## Imunoanalytické metody:

- dříve hlavně tvorba precipitátu
- dnes značené hlavně různým způsobem značené reaktanty (antigeny a protilátky)
- radiometricky, enzymaticky, fluorescenčně (luminiscenčně) značené reaktanty
- enzymové metody mohou mít luminiscenční detekci

# Fluorescenční imunoanalýza (FIA)

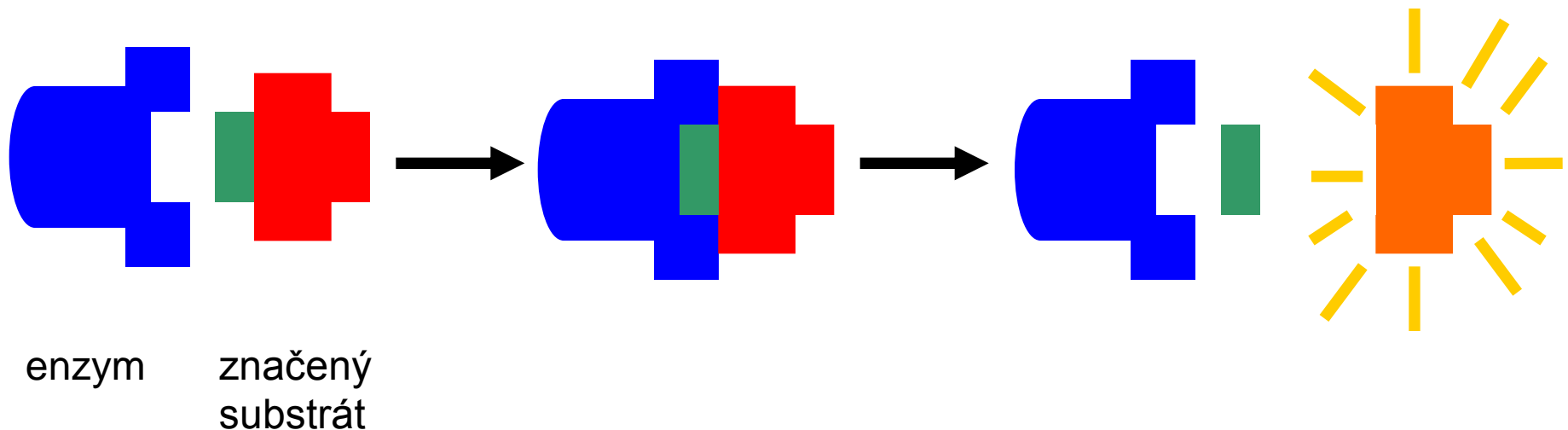
- poprvé použity v roce 1964
- často ovlivněna fluorescencí matrice a samotného vzorku
- může být použita i **TR-FIA** (Time Resolved Fluorescence Immuno Assay). Tato metoda využívá jako značek chelátů s lanthanitých kationtů ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  a dalších)
- FIA lze provádět v homogenním i heterogenním prostředí, v kompetitivním i nekompetitivním uspořádání



ukázka kompetitivní FIA v heterogenním prostředí

# Fluorogenní substráty – stanovení enzymatické aktivity

Princip: volný fluorofor má jiné luminiscenční vlastnosti, než když je navázaný na biomolekulu. Fluorofor je na biomolekulu navázán vazbou, kterou štěpí stanovovaný enzym.

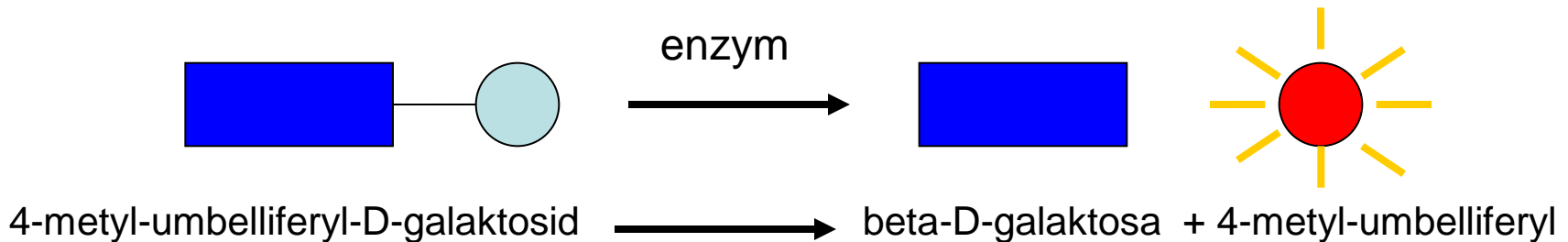


# Fluorimetrická EIA

- Enzymoimunoanalýza v homogenním (EIA) a heterogenním prostředí (ELISA)

Existuje několik možností:

- antigen je značen enzymem
- antigen značený enzymem se sráží s protilátkou
- nesražený antigen s enzymem lze stanovit takto:



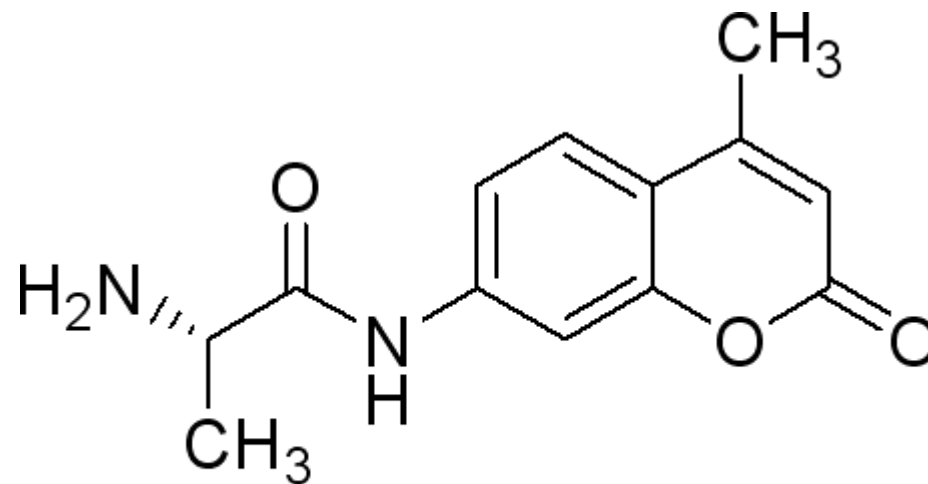


# Dělení fluorescenční imunoanalytických metod

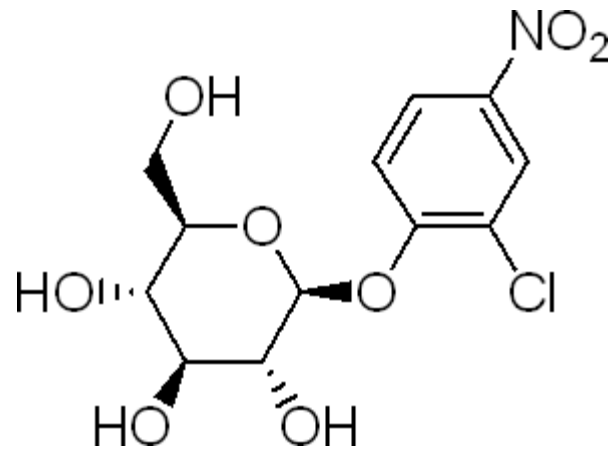
- Fluorescence Immuno Assay (FIA)
- Fluorescence Polarization Immuno Assay (FPIA)
- Time Resolved Fluorescence Immuno Assay (TR-FIA)
- Elektroluminiscenční, chemiluminiscence a další
- Enzymatické metody s luminiscenční detekcí

# Radiometrická vs. fluorescenční detekce v imunoanalýze

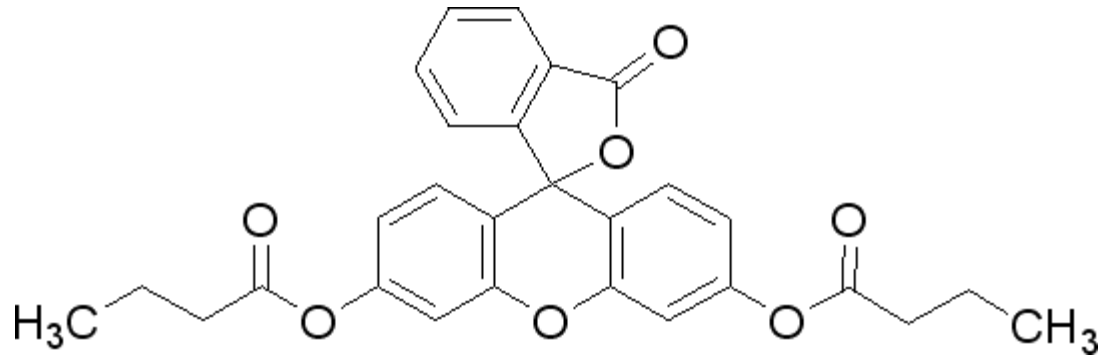
- dříve byla nejcitlivější metodou RIA, ale s příchodem levných laserů je rozšířenější luminiscenční detekce
- detekční limity obou metod jsou srovnatelné (až  $10^{-12}$  g.l<sup>-1</sup>), ale luminiscenční detekce je bezpečnější a levnější



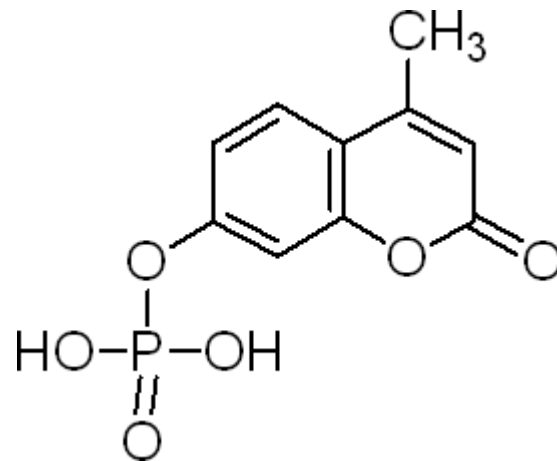
L-Alanine 7-amido-4-methylcoumarin: fluorogenní substrát  
pro stanovení Aminopeptidáz



2-Chloro-4-nitrophenyl- $\beta$ -D-glucopyranoside: fluorogenní substrát  
pro stanovení  $\beta$ -Glucosidase

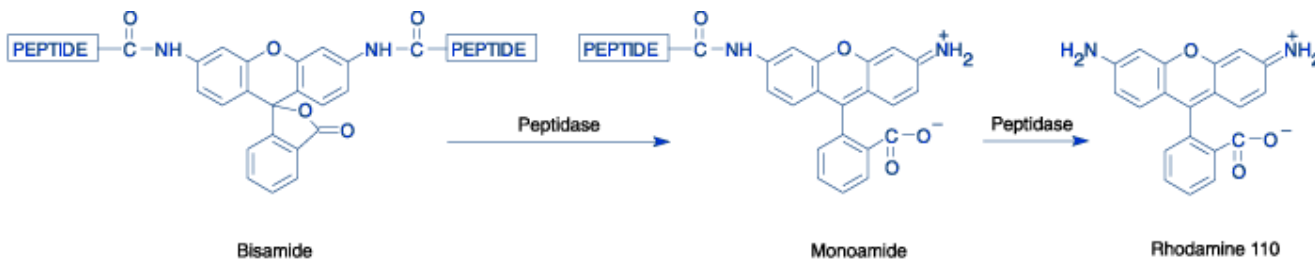
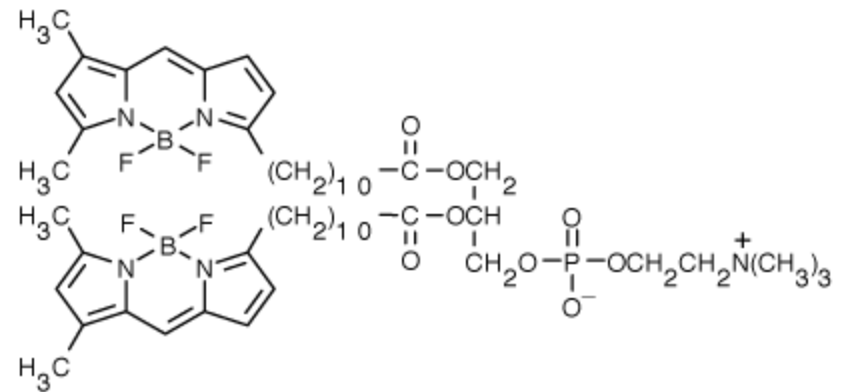
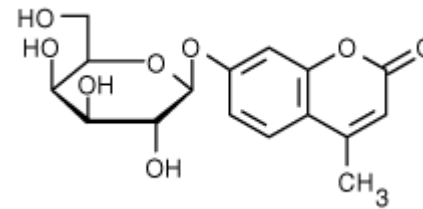
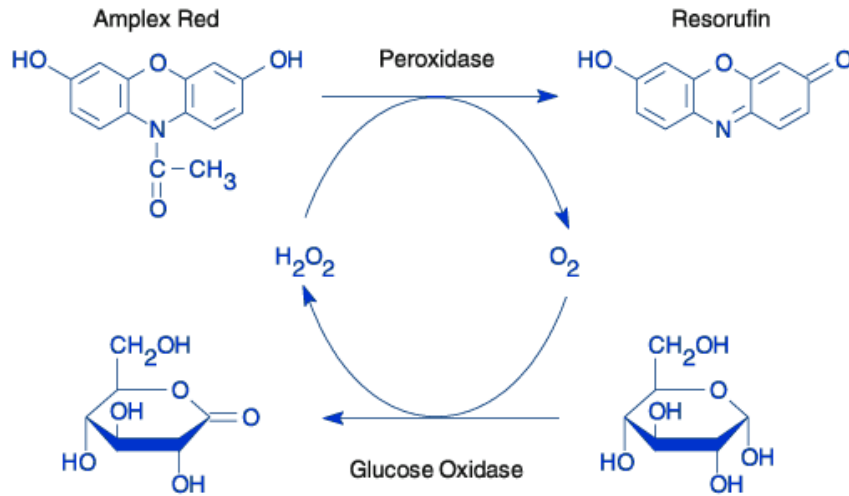


Fluorescein dibutylate: fluorogenní substrát pro stanovení esteráz a lipáz

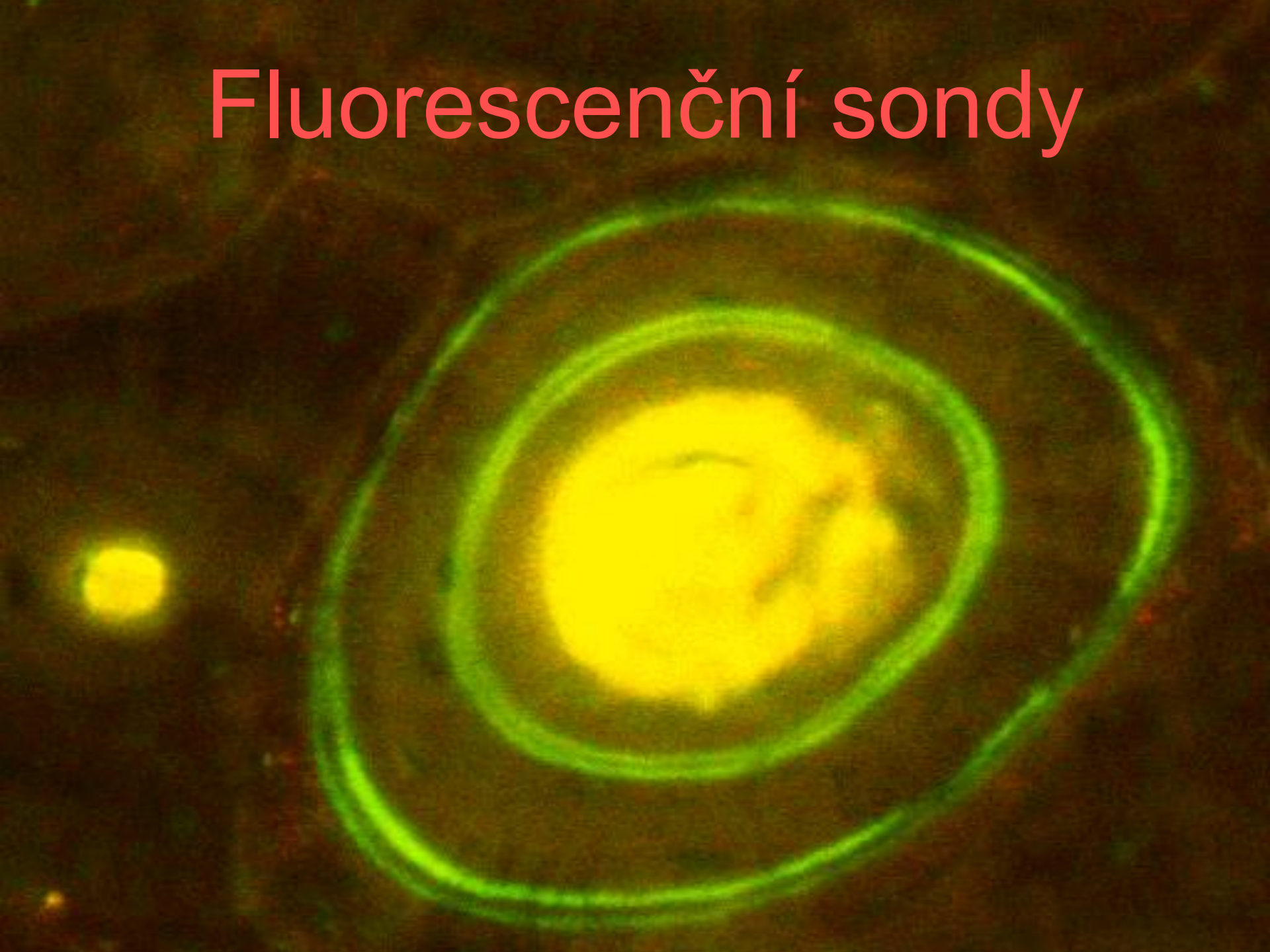


4-Methylumbelliferyl phosphate: fluorogenní substrát pro stanovení fosfatázy

# Fluorogenní substráty



# Fluorescenční sondy





# Fluorescenční sondy

- vnější fluorofory, které se ke sledovaným molekulám, iontům, atd. váží nekovalentní vazbou
- změna fluorescenční vlastností (intenzita emise, posun emisního maxima, změna času vyhasínání)
- Princip: různý vliv na Franck-Condonův excitovaný stav

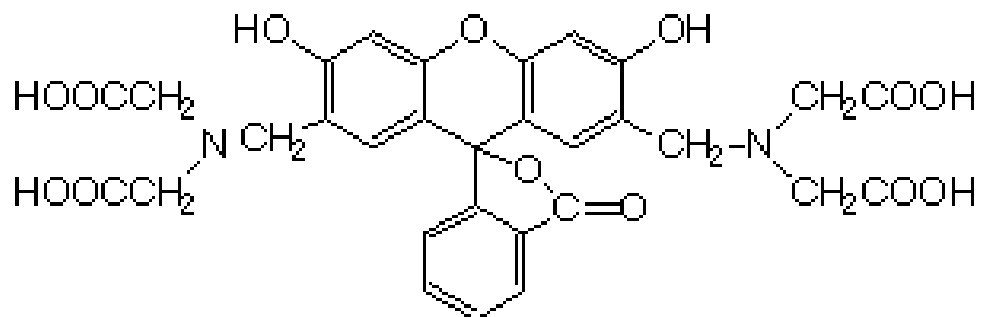
# Fluorescenční sondy pro využití v analytické chemii, medicíně a biologii

- kromě měření emisních spekter se využívá zejména fluorescenční mikroskopie, zhášení (emise i času vyhasínání)
- fluorescenční indikátory: sondy citlivé na určitou látku (většinou anion, či kation)
- sondy pro polaritu prostředí
- membránové sondy
- fluorescenční sondy pro nukleové kys.
- další
- [www.molecularprobes.com](http://www.molecularprobes.com)

# Indikátory pro anorganické ionty

- **disociační konstanta** – musí být srovnatelná s měřenou koncentrací kationu (koncentrace menší než desetina nebo větší než desetinásobek disociační konstanty způsobují příliš malé změny v pozorovaném signálu)
- pro sondy, u kterých dochází k nárůstu intenzity fluorescence platí vztah:

$$C_a = K_d (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I)$$



# Indikátory pro anorganické ionty

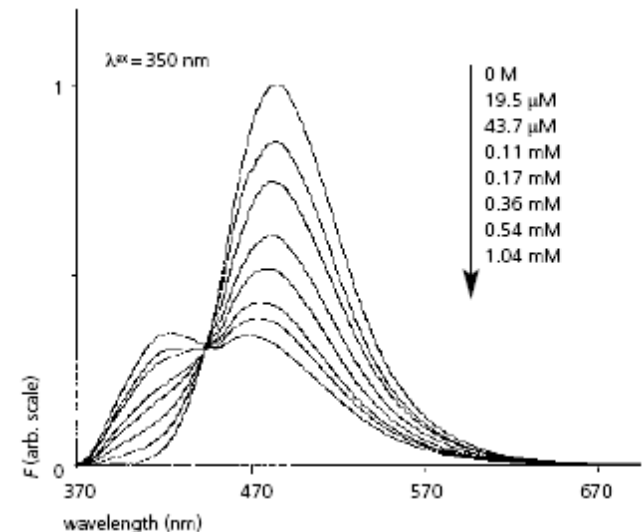
pro sondy, které vykazují spektrální posun se používá:

$$c_a = K_d (S_F(\lambda_2)/S_B(\lambda_2)) (R - R_{\min})/(R_{\max} - R)$$

kde  $R = I(\lambda_1)/I(\lambda_2)$  je poměr intenzit pro dvě excitační vlnové délky  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ ,  $R_{\min}$  a  $R_{\max}$  jsou poměry pro sondu volnou a plně obsazenou analytem,

$S_F(\lambda_2)/S_B(\lambda_2) = \varepsilon_F \Phi_F / \varepsilon_B \Phi_B$ ,  $\varepsilon$  - extinkční koeficienty,  $\Phi$  - kvantové výtěžky sondy

excitované při  $\lambda_2$ .

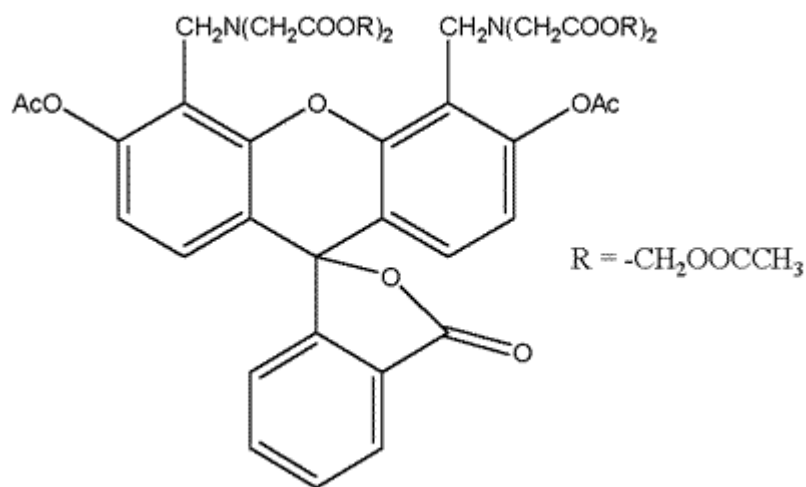


# Indikátory pro anorganické ionty

- nejčastěji indikátory  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  nebo  $\text{K}^+$
- indikátory jsou zpravidla chelatační činidla
- různé obchodní názvy (např. Fura-2, Calcium Green, Indo, atd.)

# Stanovení $\text{Ca}^{2+}$

- stanovení  $\text{Ca}^{2+}$  pomocí fluorexonu (calceinu)
- analytické stanovení  $\text{Ca}^{2+}$  (i v přítomnosti  $\text{Mg}^{2+}$ ) – vymizení fluoreskujícího komplexu  $\text{Ca}^{2+}$ -fluorexon při titraci pomocí EDTA v zásaditém prostředí



(ion-free reference solution) →

EGTA  
+  
TPEN

Ca<sup>2+</sup> | Ba<sup>2+</sup> | Mn<sup>2+</sup> | Fe<sup>2+</sup> | Co<sup>2+</sup> | Ni<sup>2+</sup> | Cu<sup>2+</sup> | Zn<sup>2+</sup> | Cd<sup>2+</sup> | Hg<sup>2+</sup> | Pb<sup>2+</sup>

Calcium  
Green-5N

Calcium  
Green-2

Fluo-4

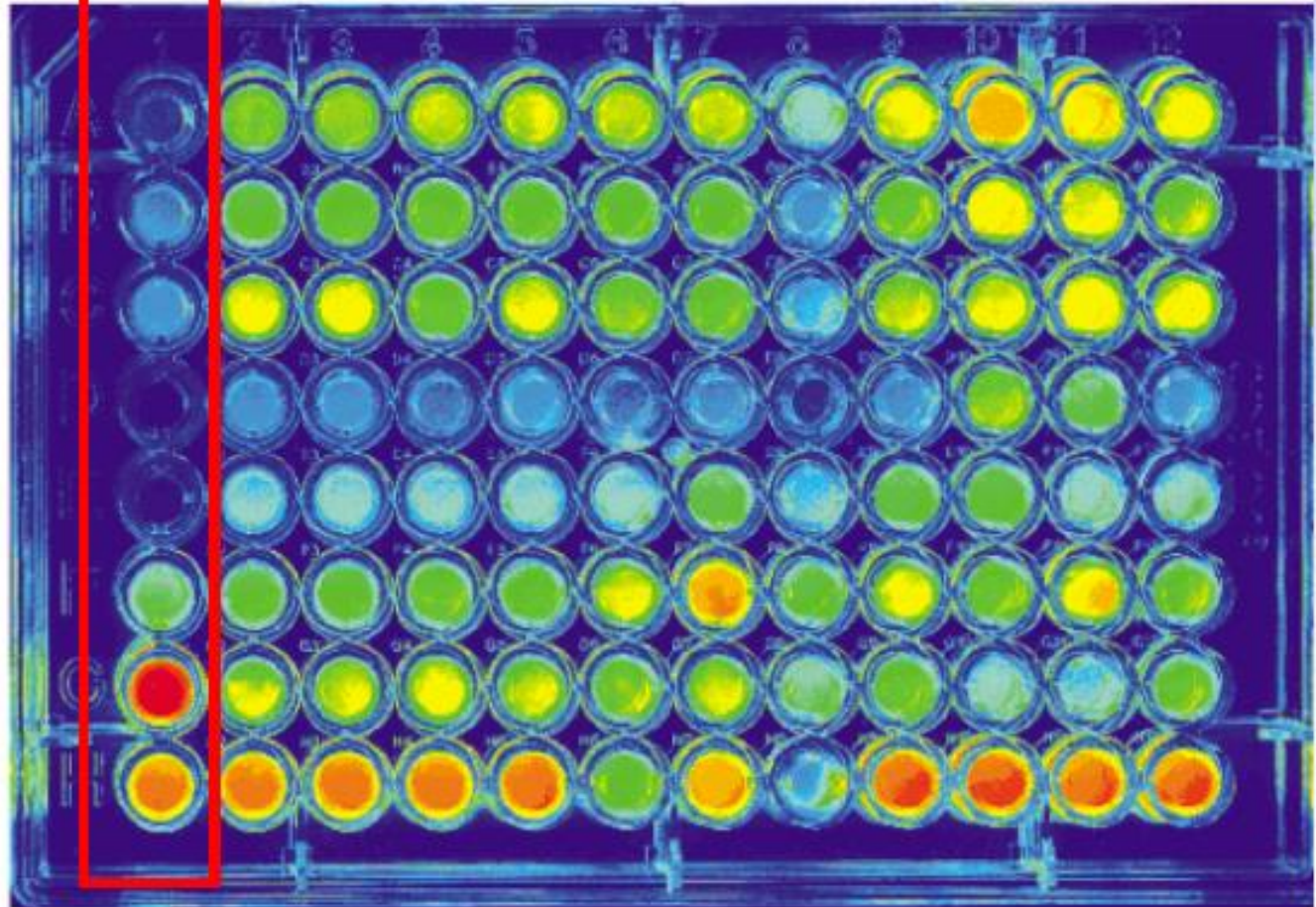
Fluo-5N

FluoZin-1

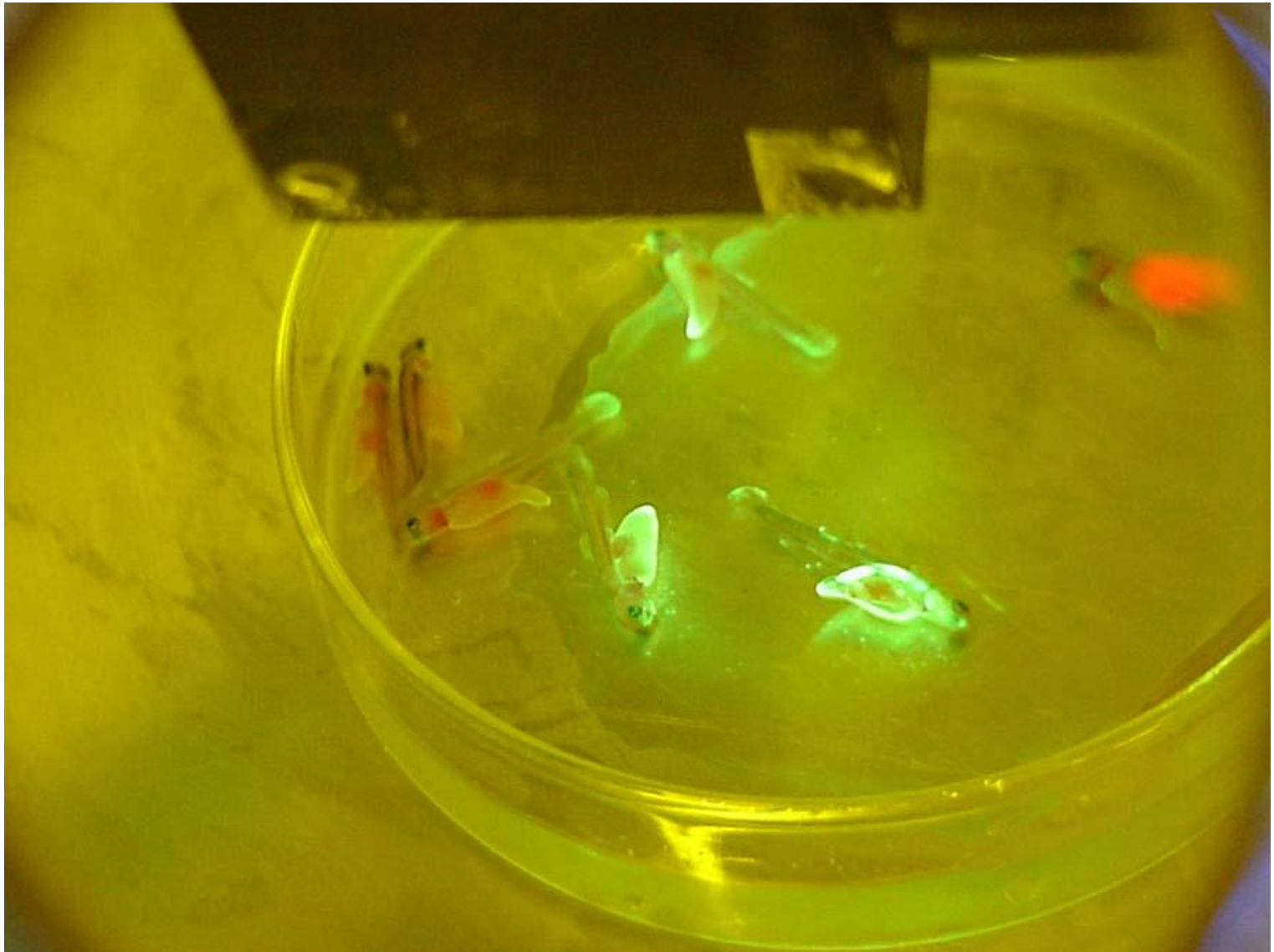
Newport  
Green DCF

Phen  
Green FL

Calcein



(Fluorescence: high = red > orange > yellow > green > blue = low).

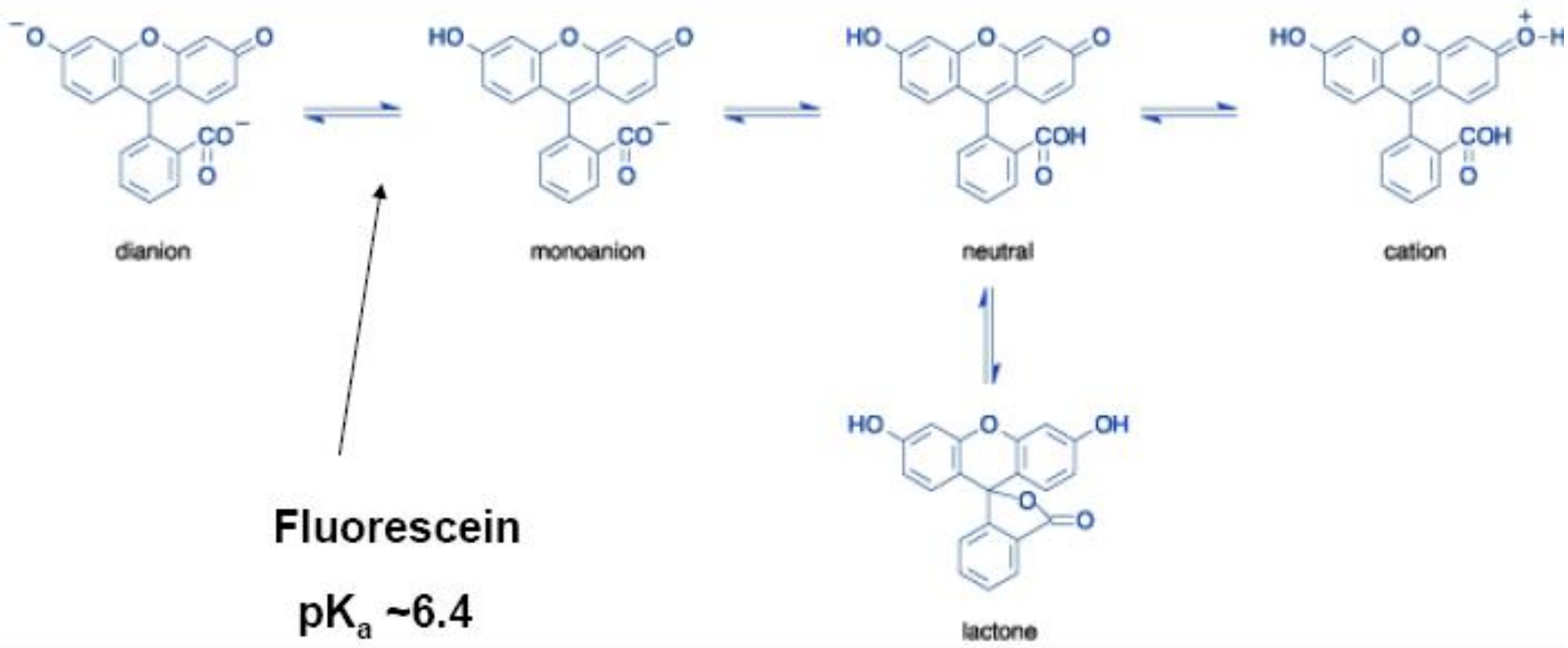


Calceinem značený losos...



# Indikátory pH

- použití pH indikátorů: kam nemůžeme dát pH elektrodu – např. buňky, živé tkáně, atd.
- buněčné pH se pohybuje mezi 6.8 – 7.4
- možnost měřit pH na dvě desetinná místa

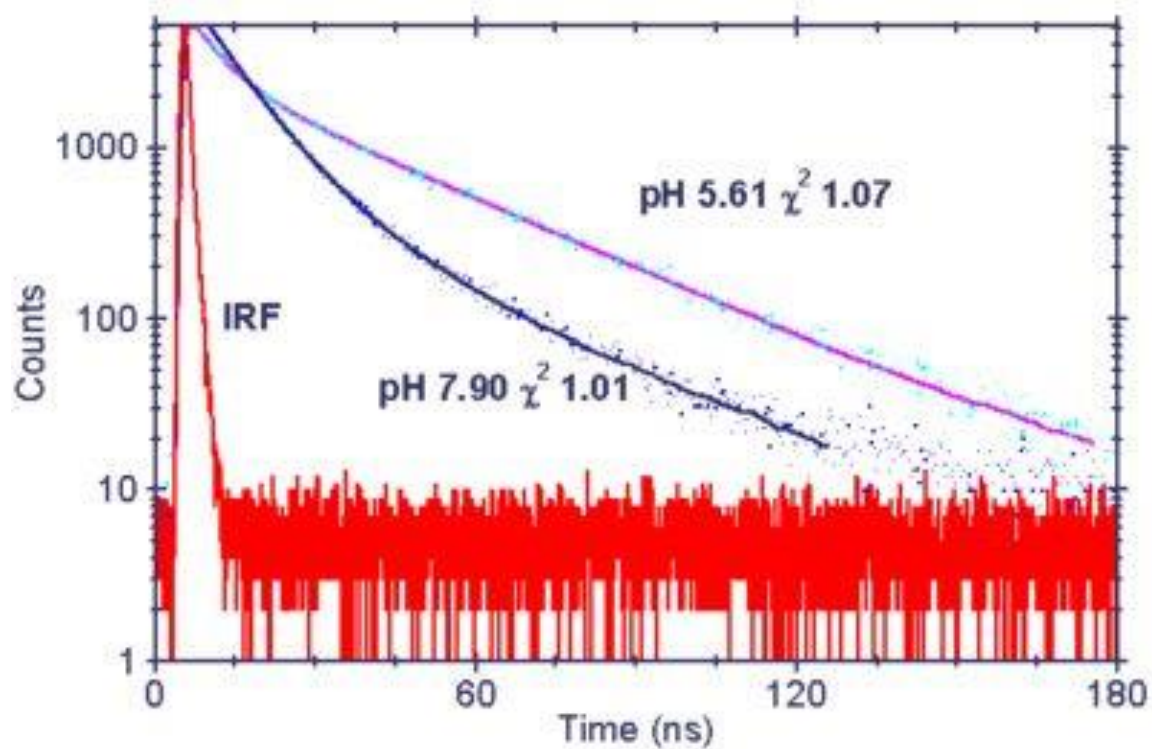


# Indikátory pH

fluorofor	rozsah pH	způsob měření
<b>SNAFL indikátory</b>	7,2-8,2	Ex 490/540 nebo Em 540/630
<b>SNARF indikátory</b>	6,0-8,0	Em 580/640
<b>HPTS (pyranin)</b>	7,0-8,0	Ex 450/405
<b>BCECF</b>	6,5-7,5	Ex 490/440
<b>Fluoresceiny a karboxyfluoresceiny</b>	6,0-7,2	Ex 490/450
<b>LysoSensor Green DND-189</b>	4,5-6,0	Em 520
<b>Oregon Green indikátory</b>	4,2-5,7	Ex 510/450 nebo Ex 490/440
<b>LysoSensor Yellow/Blue DND-160</b>	3,5-6,0	Em 450/510

# „lifetime“ pH indikátory

- čas vyhasínání ovlivněn hodnotou pH
- výhoda: při měření tau nezáleží na koncentraci indikátoru

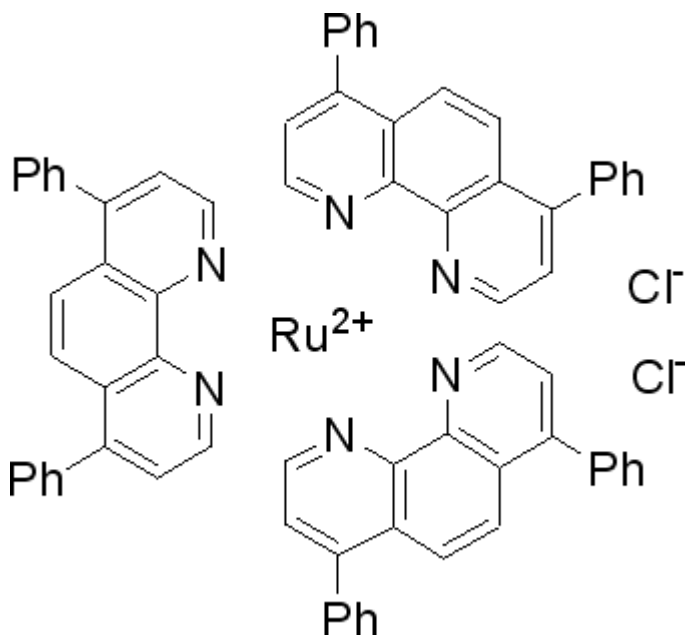


# Sondy pro detekci plynů rozpuštěných v biologických kapalinách

- nejčastěji detekce  $O_2$ , nebo NO
- „lifetime“ sondy
- nejčastěji na principu oxidace centrálního iontu obsaženého v sondě, nebo dynamickém zhášení kyslíkem
- luciferin, luminol...

# Rutheniové sondy

Ukázka: kyslíkové sondy používané k detekci kyslíku v kůži ([www.molecularprobes.com](http://www.molecularprobes.com))



Tris(4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline)ruthenium(II) dichloride (abs.  $\lambda_{\max}$  455 nm, luminescence  $\lambda_{\max}$  613 nm)

# Sondy pro měření polaroty prostředí

- Často se mění i kvantový výtěžek a doba vyhasínání fluorescence
- Polarita prostředí ovlivňuje většinu fluoroforů (např. tryptofánu)
- Polarita blízkého okolí fluoroforu může být dána konformací biomolekuly

# Příklad sondy pro studium polarity prostředí

Typickými sondami pro dynamickou polaritu jsou **1-anilinaftalén-8-sulfonát (ANS)** a **2-*p*-toluidinaftalén-6-sulfonát (TNS)**. S rostoucí polaritou prostředí se emisní spektrum posouvá k vyšším vlnovým délkám.

Fluoresceční vlastnosti ANS v různých prostředích

rozpouštědlo	$\lambda_{em}^{max}$ (nm)	kvantový výtěžek	doba dohasínání (ns)
oktanol	464	0,646	12,3
propanol	466	0,476	10,2
metanol	476	0,216	6,05
voda	515	0,004	0,55



# Membránové fluorescenční sondy

- membránové struktury obvykle neobsahují fluorofory (většinou se jedná o nepolární uhlovodíkové řetězce – zbytky mastných kyselin), proto se jejich vlastnosti zkoumají pomocí sond
- transport a metabolismus lipidů v živých buňkách
- recyklace synaptosomů
- přenos signálu zprostředkovaný lipidy
- membránový potenciál
- interakce léčiv s membránou
- transport membránou
- mikroviskozita membrán a teplotní fázové přechody

# Rozdělení membránových sond

1. fluorescenčně značené lipidy
2. malé lipofilní organické fluorofory

# Fluorescenčně značené lipidy

- **mastná kyselina** je označena vhodným fluoroforem (nitrobenzoxadiazol (NBD), BODIPY, pyrén nebo dansyl)
- **fosfolipid** jsou značený buď v oblasti polárních hlaviček (dansyl, NBD, BODIPY, fluorescein, tetrametylrhodamin, Oregon blue, Oregon green, Texas red a dalšími), nebo v oblasti zbytků mastných kyselin (DPH, NBD, pyrén, BODIPY)
- značení **sflingolipidů, steroidů, triglyceridů, lipopolysacharidů**

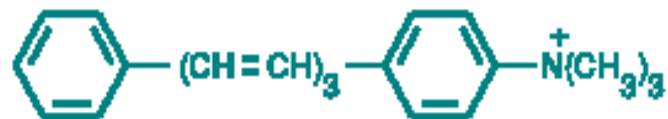
# Malé lipofilní, nebo amfifilní organické fluorofory

- malé molekuly, které podávají informaci o charakteristikách svého mikrookolí, jako je polarita, viskozita a uspořádání lipidů.
- typickým příkladem je nepolární sonda **DPH** (1,6-difenyl-1,3,5-hexatrien) – je ve vodě nerozpustná, fluoreskuje jen v nepolárním prostředí biologických membrán

# Ukázky nepolárních malých sond

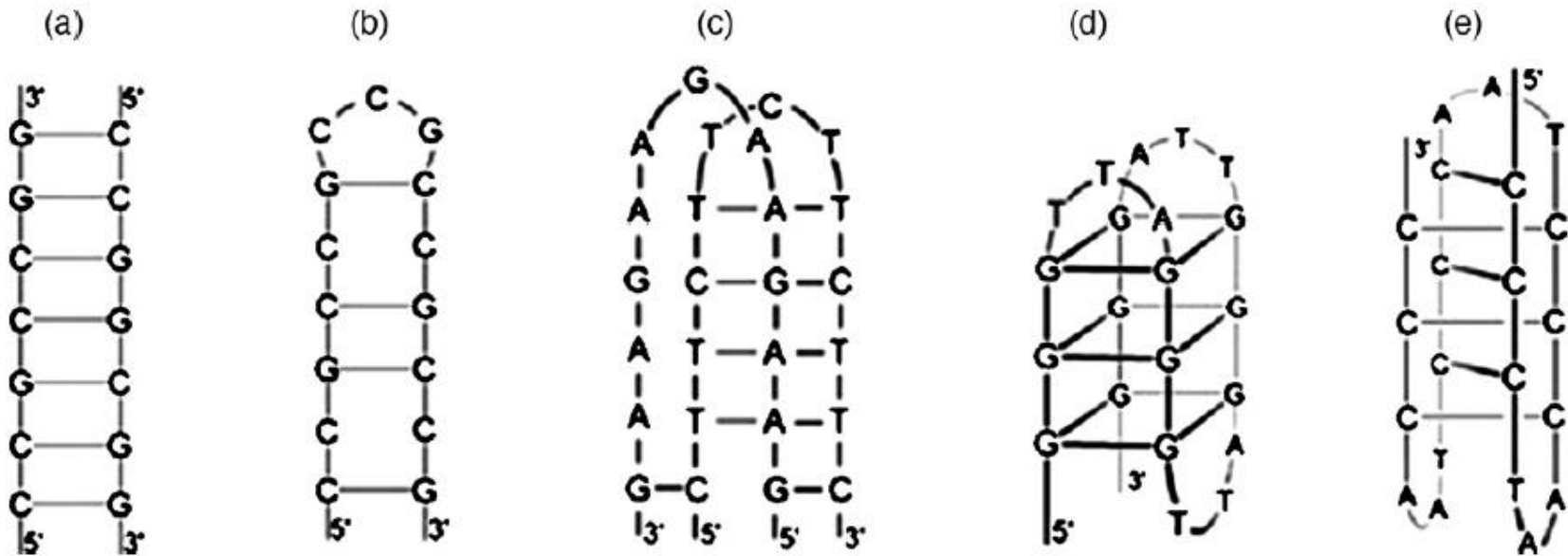


DPH



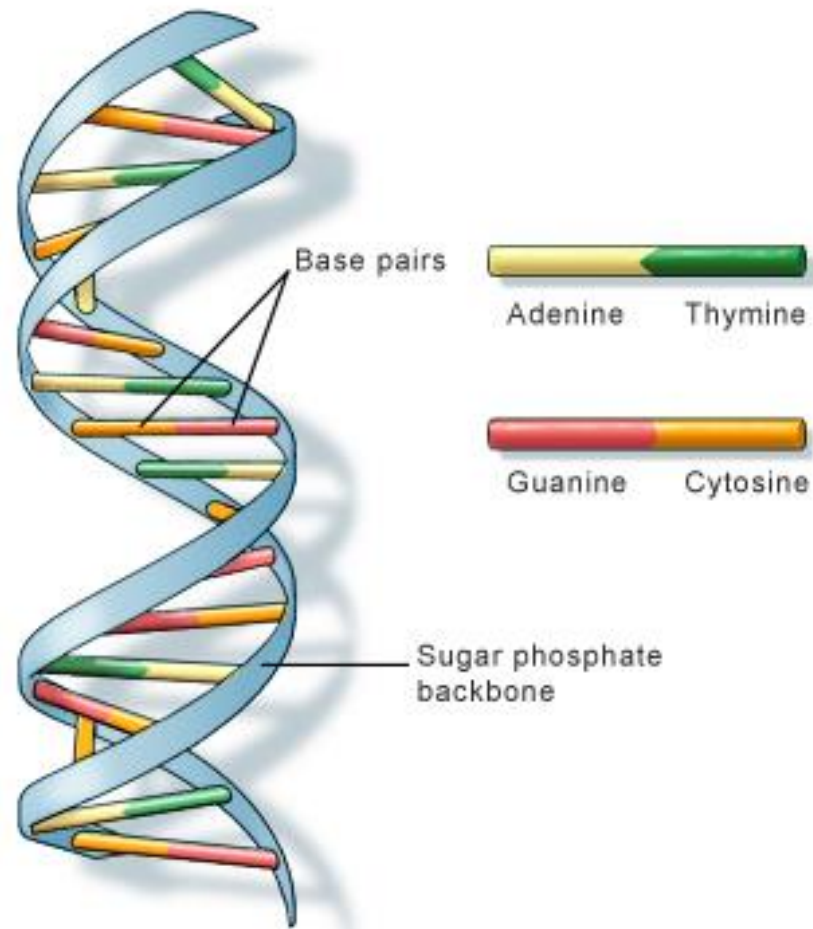
# Fluorescenční sondy pro NK

- Vizualizace a identifikace RNA a DNA (nukleové báze jeví jen slabou luminiscenci)

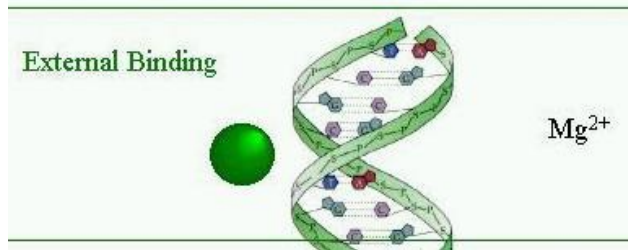


a) Duplex-dvoušroubovice (antiparalelní, intermolekulární), b) hairpin-vlásenka (antiparalelní, intramolekulární), c) triplex (paralelní, intermolekulární), d) G-kvadruplex (antiparalelní, intramolekulární), e) i-motiv (intramolekulární)

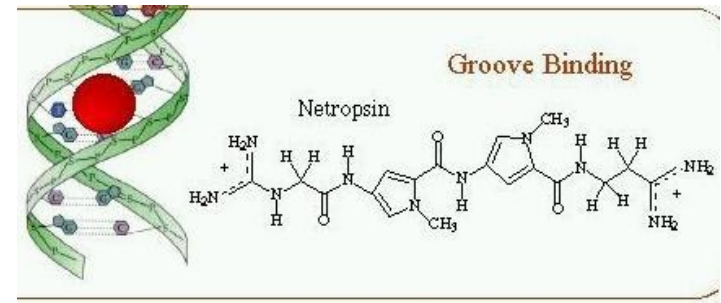
# Dvoušroubovicová DNA (helix, duplex, B-DNA, atd.)



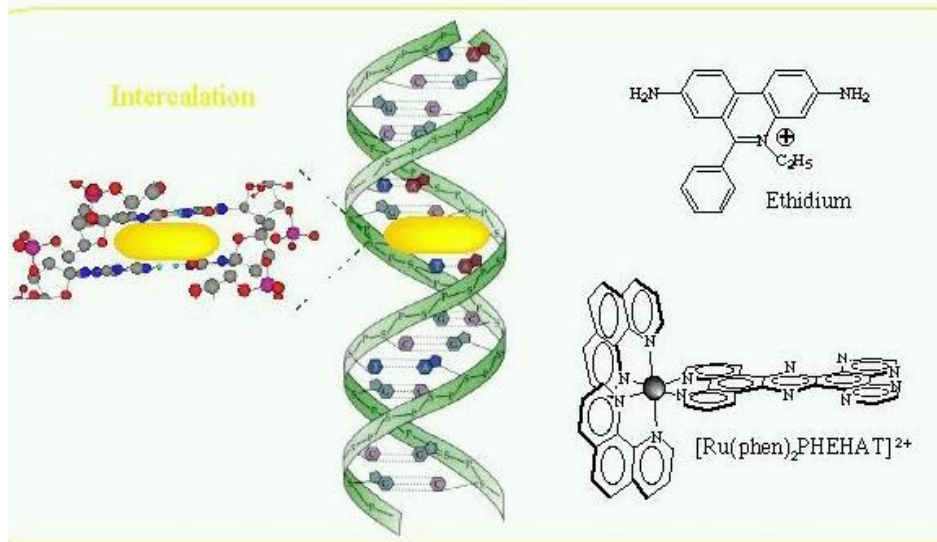
# Vazebné možnosti



„vnější vazba“ – atmosféra + iontů kolem – nabitá DNA



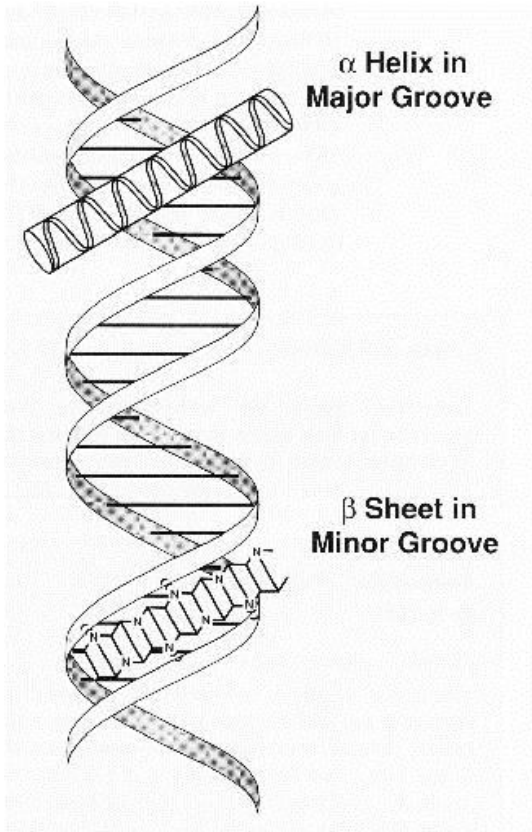
„vazba ve žlábků“ – van der Waalsovský kontakt s léčivem ve žlábků



„interkalace“ – vmezeření planárního aromat. systému mezi páry bází



# Interakce ve žlábcích



## Velký žábek:

interaguje s  $\alpha$  helixy. Helix se orientuje podél osy žábku, postranní řetězce tvoří H-vazby s bázemi, event. kontakty s fosfát. skupinami.

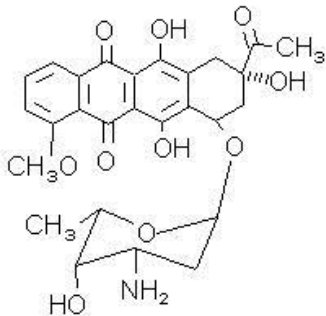
## Malý žábek:

interaguje s  $\beta$  skládanými listy. List leží podél osy žábku, tvoří H-vazby k dusíkům amino skupin a k fosfátum.

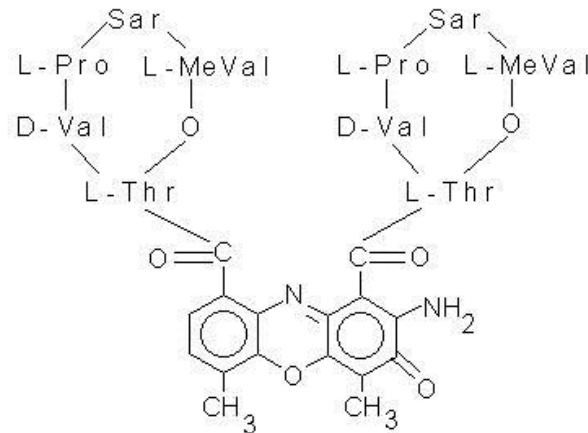
# Interkalace

= interakce s DNA – léčivo (planární aromatická molekula) se váže mezi 2 sousední páry bazí, aniž přeruší W-C páry  $\Rightarrow$  deformace cukr fosfátové páteře

## Př. interkalátory



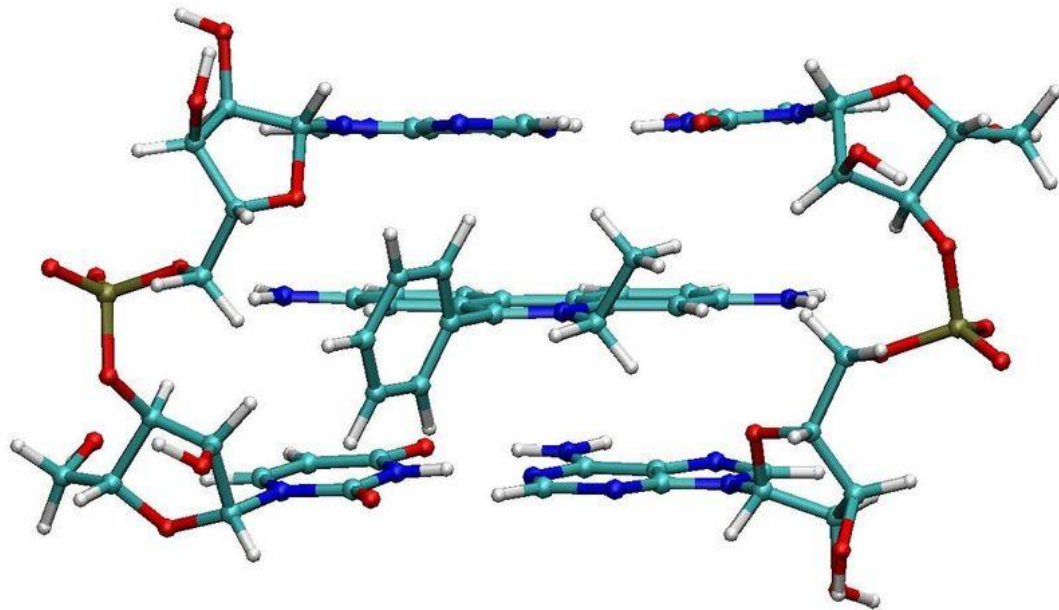
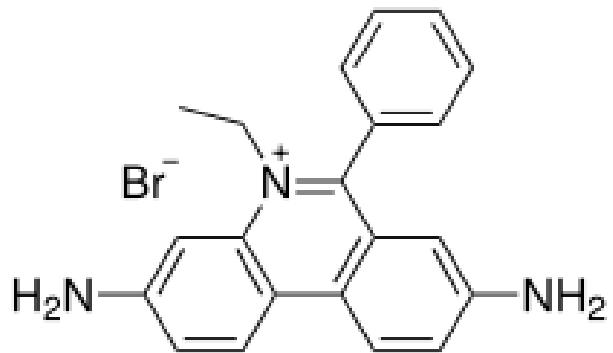
daunomycin  
(skupina  
antracyklinů)



aktinomycin D  
(peptidové antibiotikum s  
phenoxazonovým arom.  
systémem)



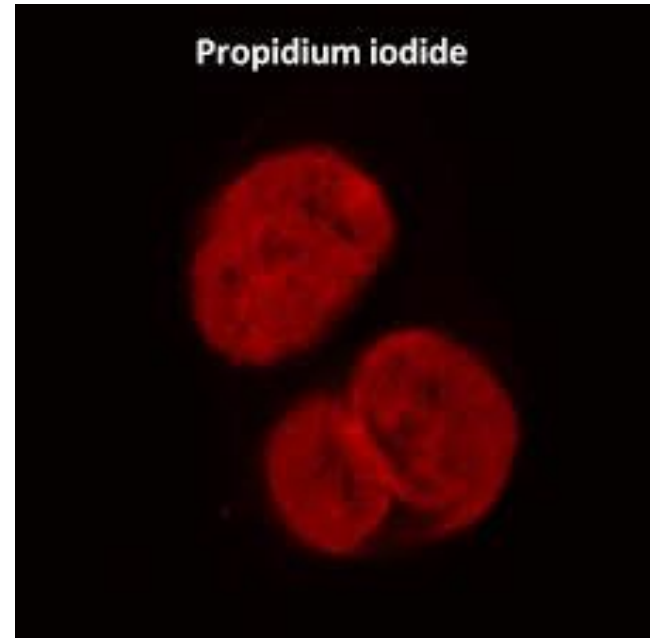
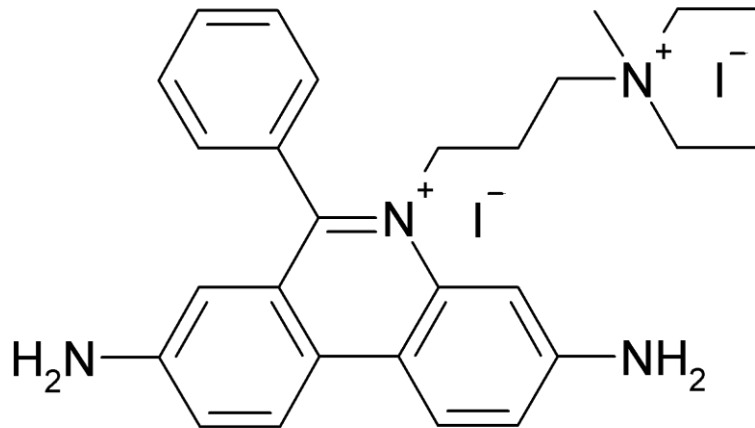
ethidium bromid



## Ethidium bromid interkalovaný mezi pár adenin-uracil

- ethidium bromid: ve vodě fluoreskuje jen slabě, při interakci s DNA se intenzita fluorescence zvýší 30x a čas vyhasínání se zvýší z 1.7 ns na 20 ns.

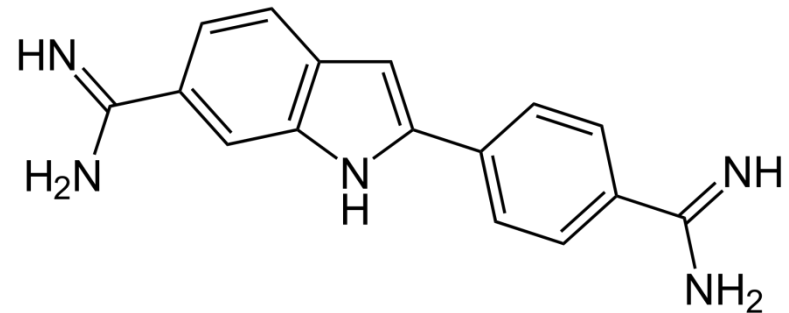
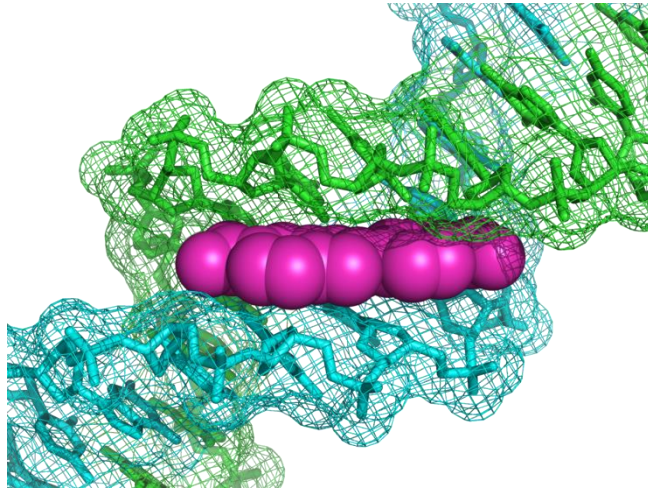
# Propidium iodid

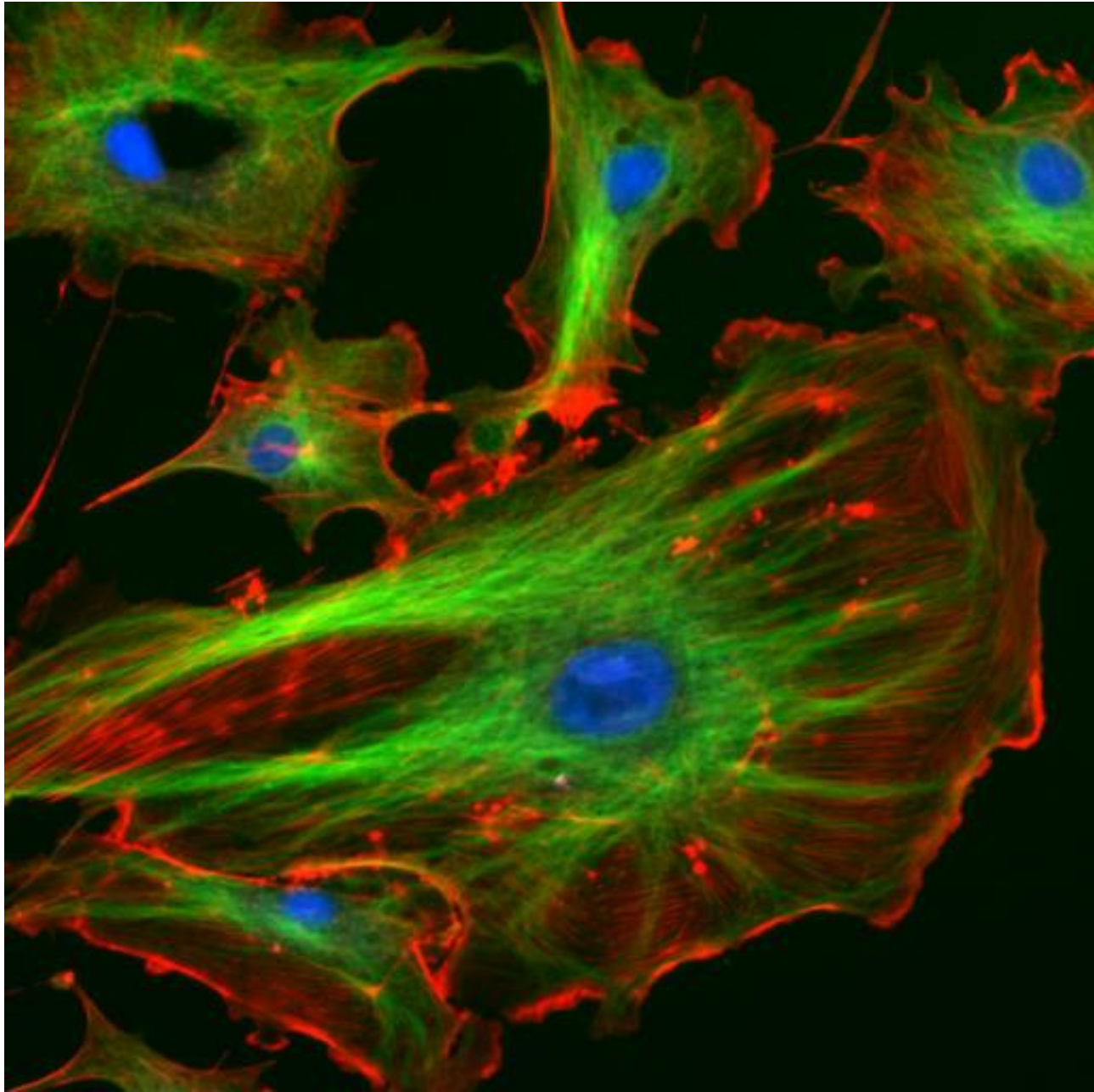


- Interkalační DNA sonda (493/636 nm)
- Neprochází membránou

# DAPI

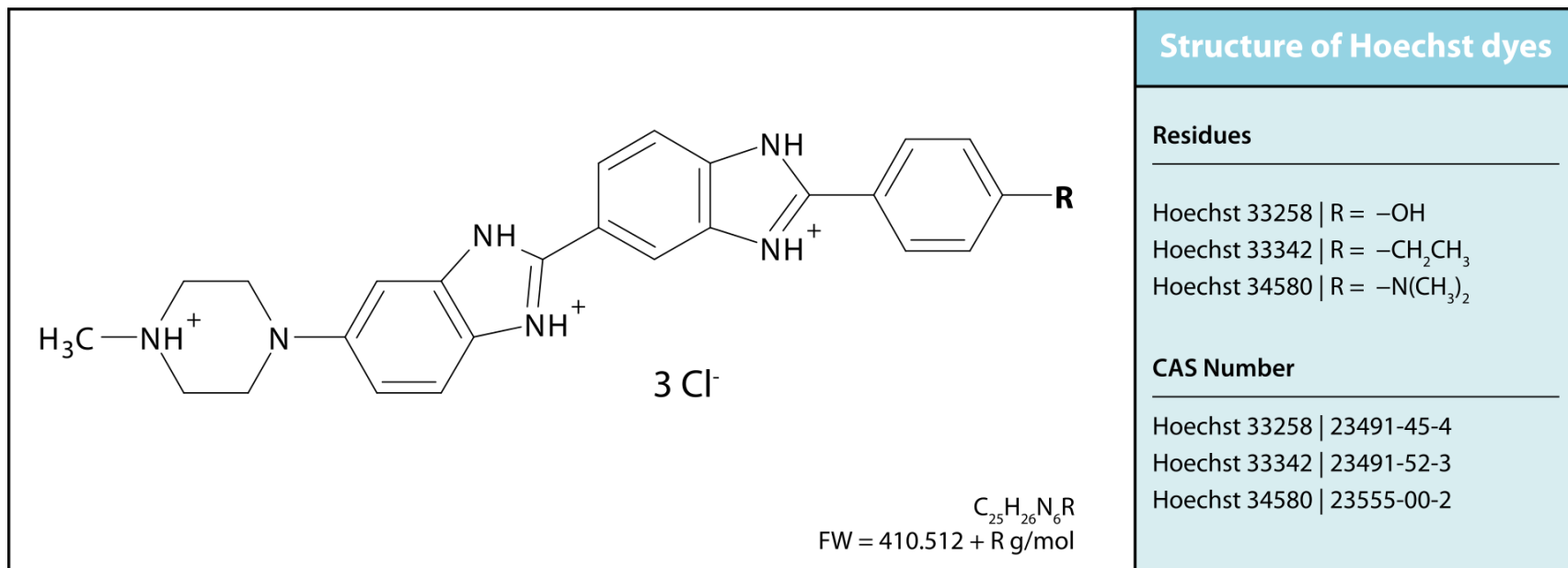
- 4',6-diamidin-2-fenylindol
- váže se na AT bohaté oblasti v DNA (poměru 1 molekula DAPI na 3 AT-páry)
- schopnost procházet buněčnou membránou a vázat se do jádra
- po vazbě DAPI na DNA se až 20× zesiluje intenzita fluorescence
- vazba do malého žlábků
- excitační / emisní - 358 nm / 461 nm
- váže se i na RNA (slabší fluorescence, emise – 500 nm)





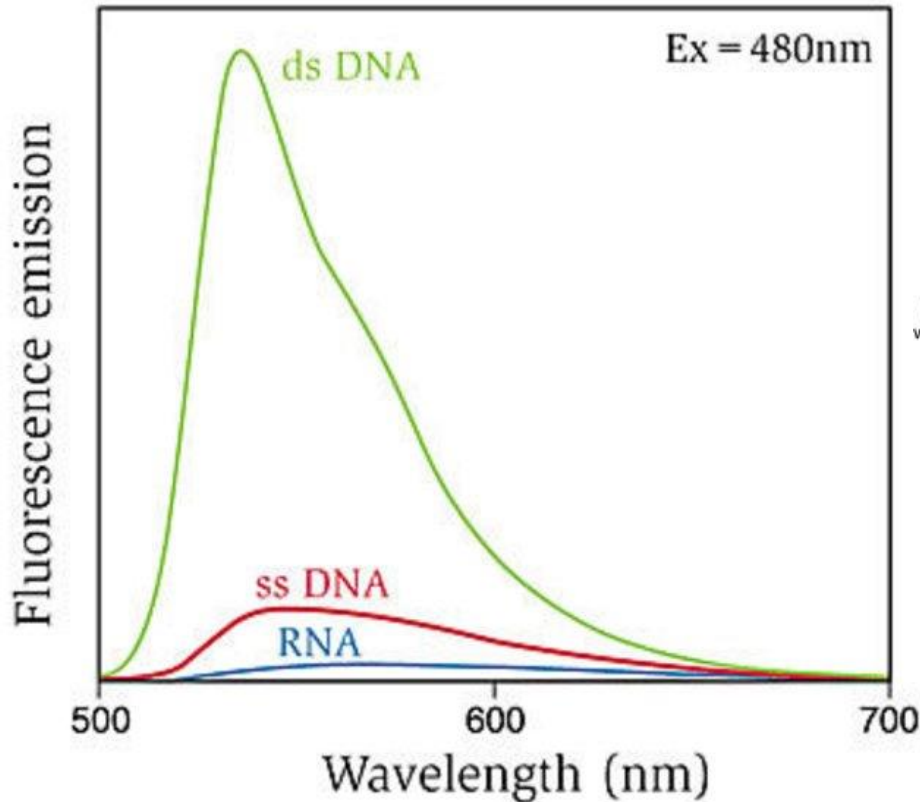
# Hoechst Dyes

- strukturně podobná barviva **Hoechst 33258**, **Hoechst 33342** a Hoechst 34580
- 350/460 nm (s DNA), bez DNA kolem 510-540 nm
- intenzita je závislá i na pH
- vazba do malého žlábků dsDNA mezi A-T
- buněčný cyklus (nízká toxicita)

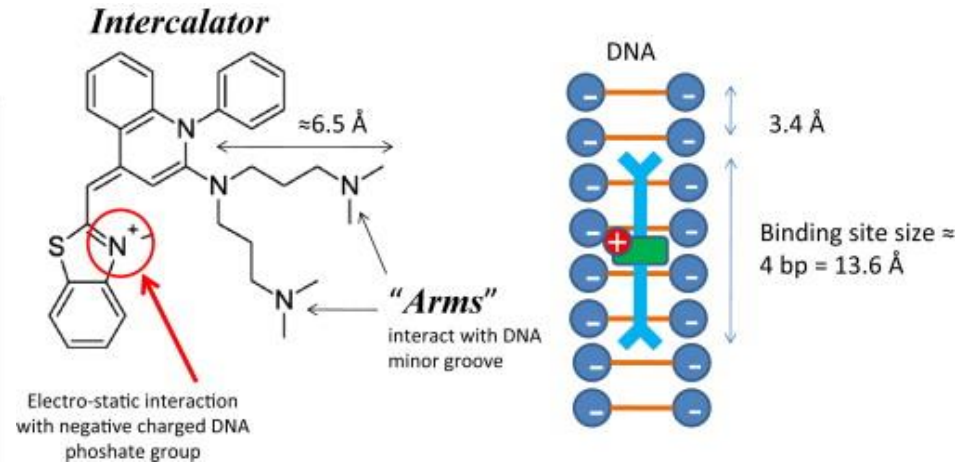


# PicGreen dyes

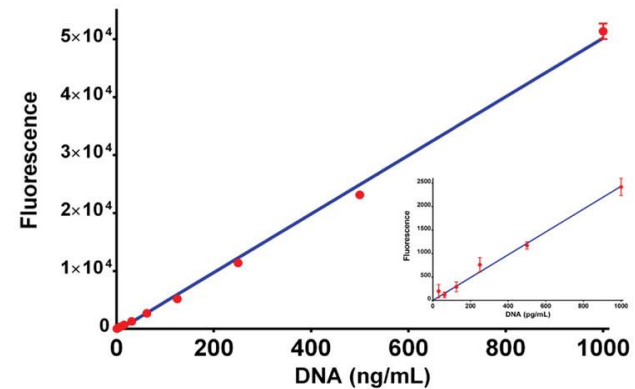
Figure 2 - dsDNA specificity



Fluorescence enhancement of the PicoGreen® Quantitation Reagent upon binding dsDNA, ssDNA and RNA.



- ultracitlivé stanovení DNA





# Příklady sond pro NK

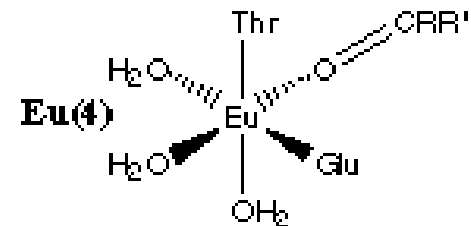
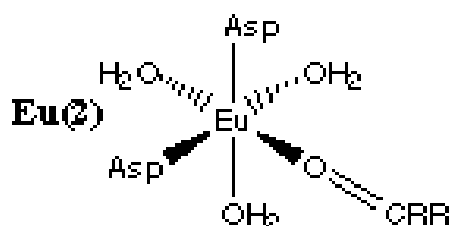
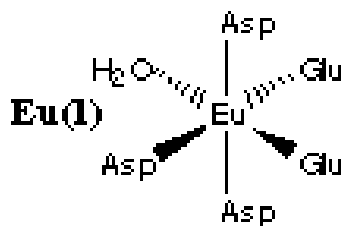
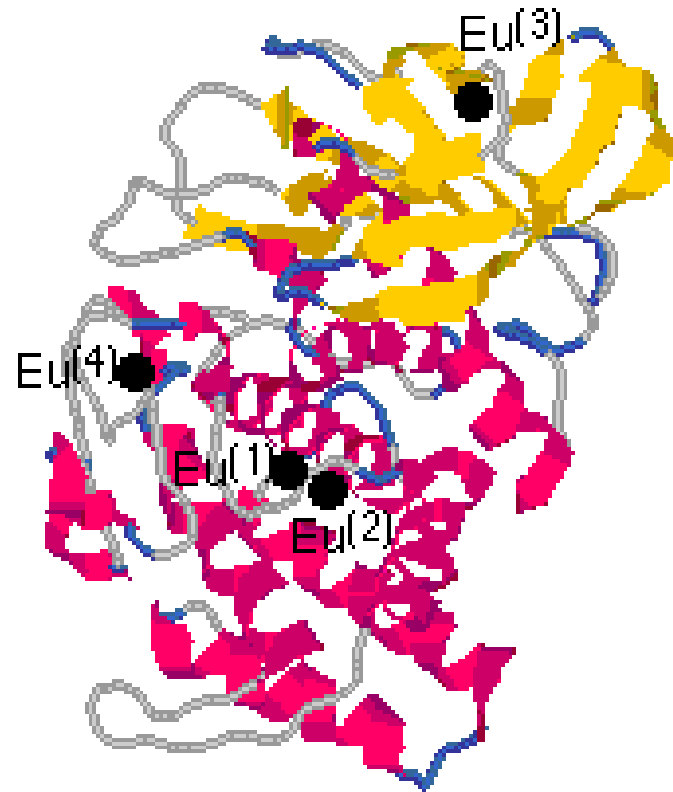
fluorofor	$\lambda_{\text{ex}}^{\text{max}}$ (nm)	$\lambda_{\text{em}}^{\text{max}}$ (nm)	použití
Akridinová oranž (DNA)	500	526	prostupuje; RNA/DNA; průtoková cytometrie
Akridinová oranž (RNA)	460	650	
Ethidium bromid	518	605	neprostupuje; vmezeřování do dsDNA; barvení mrtvých buněk; elektroforéza; průtoková cytometrie; ...
Propidium jodid	535	617	neprostupuje; barvení mrtvých buněk
DAPI	358	461	částečně prostupuje; buněčný cyklus; AT-selektivní; ...
Hoechst 33342	350	461	prostupuje; AT-selektivní; selektivní vazba k dsDNA; buněčný cyklus; ...
PicoGreen	502	523	ultracitlivá kvantifikace roztoků dsDNA
OliGreen	498	518	ultracitlivá kvantifikace roztoků ssDNA a oligonukleotidů
RiboGreen	500	520	ultracitlivá kvantifikace roztoků RNA
TOTO-1	514	533	neprostupuje membránu; vysoká afinita pro nukleové kyseliny
SYTO 85 orange	567	583	prostupuje membránou

# Studium vazných míst biomolekul

- „calcium binding sites“ – místa v proteinech, kde se váže  $\text{Ca}^{2+}$
- při studiu interakcí je možné nahradit vápenaté ionty  $\text{Ln}^{3+}$  (nejčastěji  $\text{Eu}^{3+}$ , nebo  $\text{Tb}^{3+}$ )
- $\text{Ln}^{3+}$  mají podobné vlastnosti jako  $\text{Ca}^{2+}$ , ale mají výborné luminiscenční vlastnosti
- podobný iontový poloměr
- koordinační číslo  $\text{Ca}^{2+}$  (až 8) je podobné kordinačnímu číslu  $\text{Ln}^{3+}$  (až 9)
- preference koordinace „tvrdými donory“
- $\text{Ln}^{3+}$  váže  $10^5$  silněji než  $\text{Ca}^{2+}$
- $\text{Ln}^{3+}$  ligandová výměna je 100x pomalejší, než výměna  $\text{Ca}^{2+}$
- jestliže  $\text{Ln}^{3+}$  nahradí  $\text{Ca}^{2+}$  v katalytickém místě, rychlost reakcí poklesne

# Studium vazebných míst $\text{Ca}^{2+}$

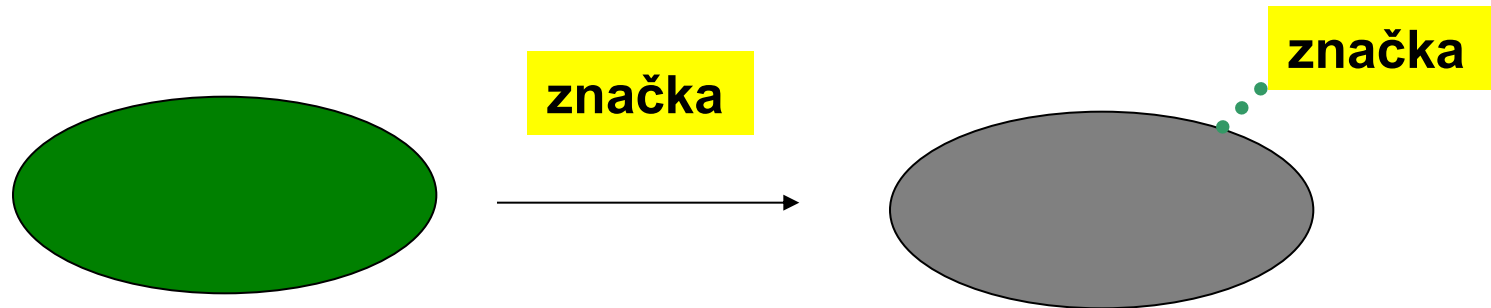
- protein thermolysin
- z luminiscenčních spekter a časů vyhasínání lze určit polohu  $\text{Eu}^{3+}$  (resp.  $\text{Ca}^{2+}$ ) v biomolekule



# Vnější fluorofory: shrnutí

# Vnější fluorofory

- **značky** (derivatizace, „labels“, „tags“) – kovalentní vazba
- **sondy** (indikátory, „probes“) – různé typy nekovalentních interakcí

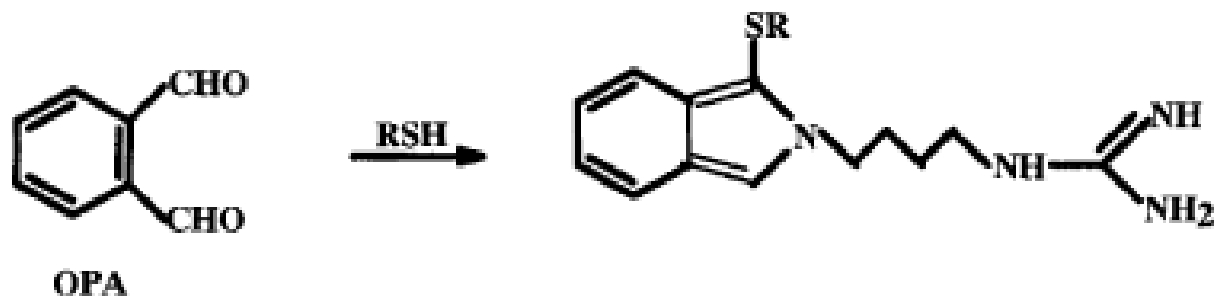


# Důvody pro použití značek a sond

- zvýšení citlivosti
- **získání informace** o koncentraci analytu, o struktuře látky, o funkci molekuly v systému...
- **odvozené metody** (FRET, FIA, EIA, atd.)
- **kombinace** značek a sond (FISH, fluorescenční mikroskopie)

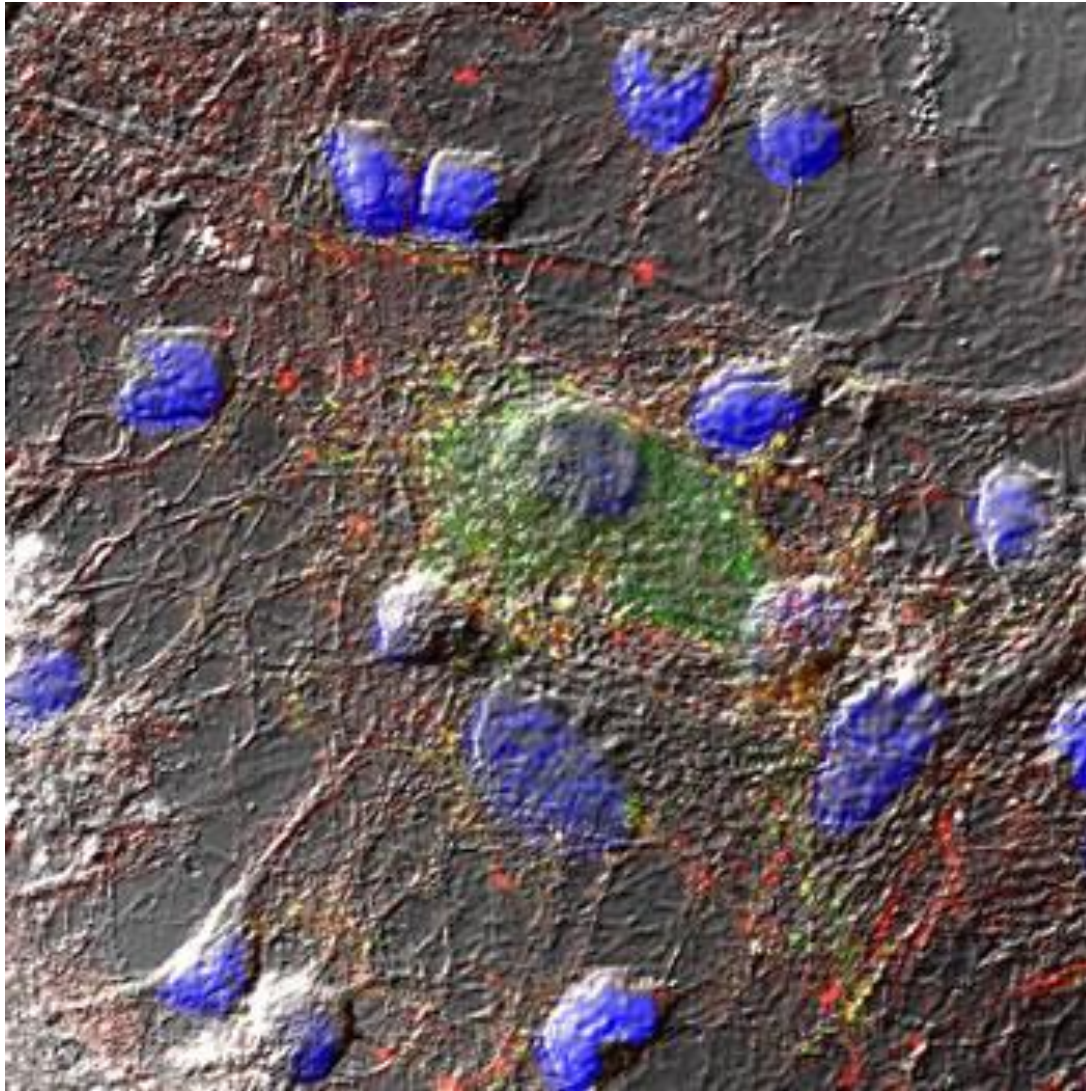
# Značky

- značení molekul: „steady state“ luminiscenční spektroskopie, časově rozlišená luminiscence, luminiscenční detekce ve spojení se separačními technikami, fluorescenční mikroskopie, fluorescenční anizotropie...
- značení peptidů, proteinů, protilátek, antigenů, enzymů, NK, membrán, buněk, tkání, celých organismů...
- použití také „in vivo“
- využití: chemie, fyzika, biologie, medicína...

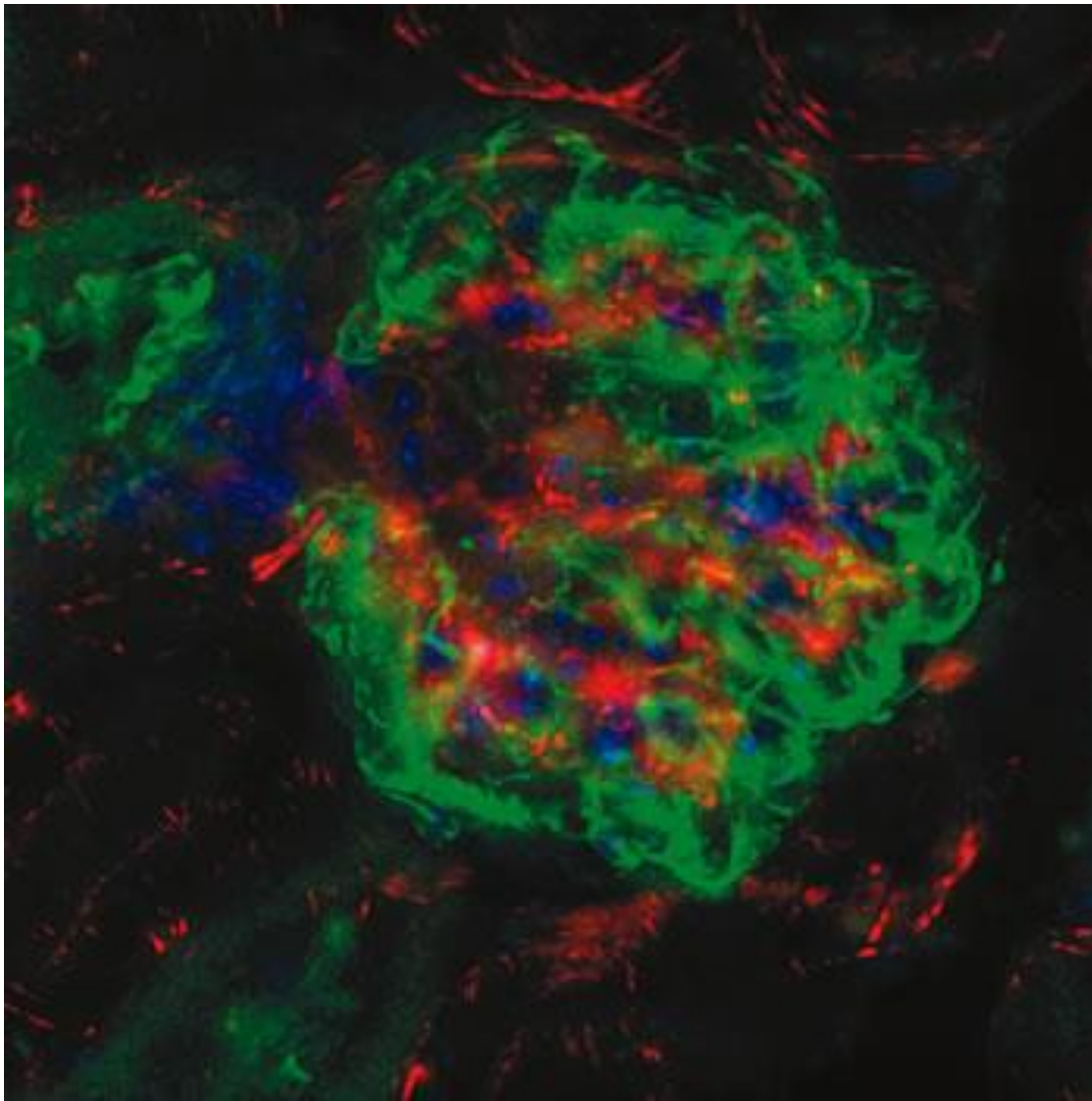


Ukázka derivatizačního činidla pro LIF – HPLC (CE)





převzato z <http://www.fluorescence-microscopy.com>

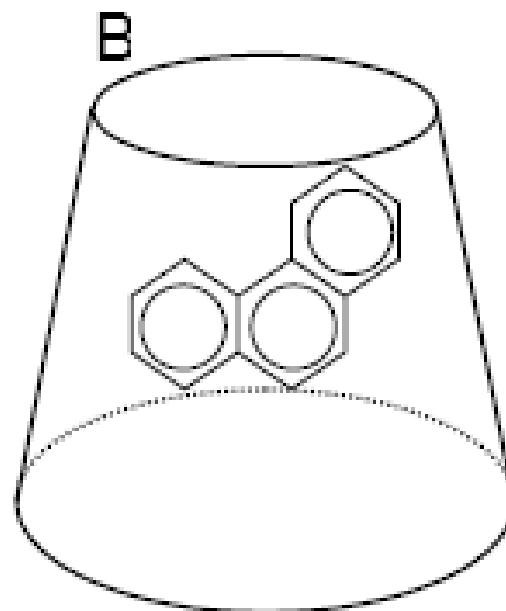
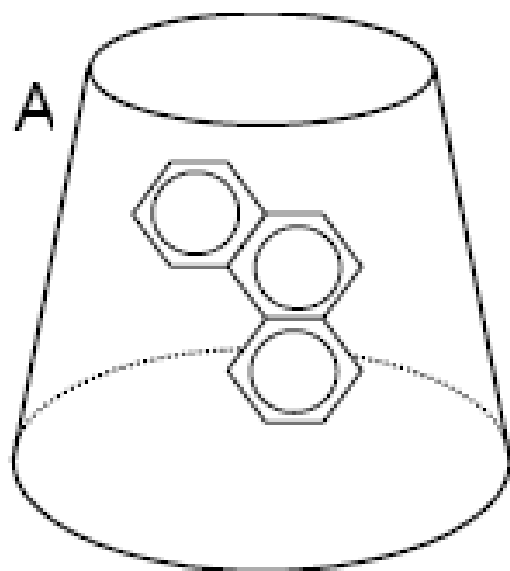


**Myší játra značená různými fluorofory...**

převzato z <http://www.fluorescence-microscopy.com>

# Sondy

- využití: analytická chemie – detekce menších částic (ionty, malé molekuly), biologie a medicína (snadnější přístup např. do buněk)
- různé detekční systémy (mikroskopie, spektroskopie, „steady state“, časově rozlišena, atd.)
- použití „in vivo“
- membrány opticky aktivních senzorů



Axialní, nebo ekvatoriální inkluze

# Fluorescenční optické senzory

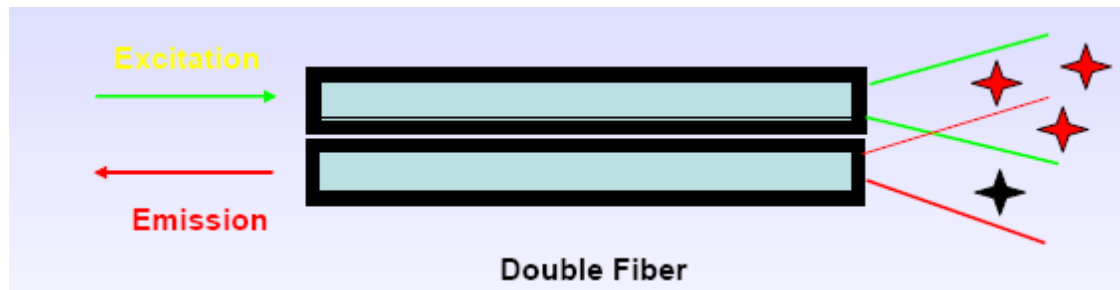
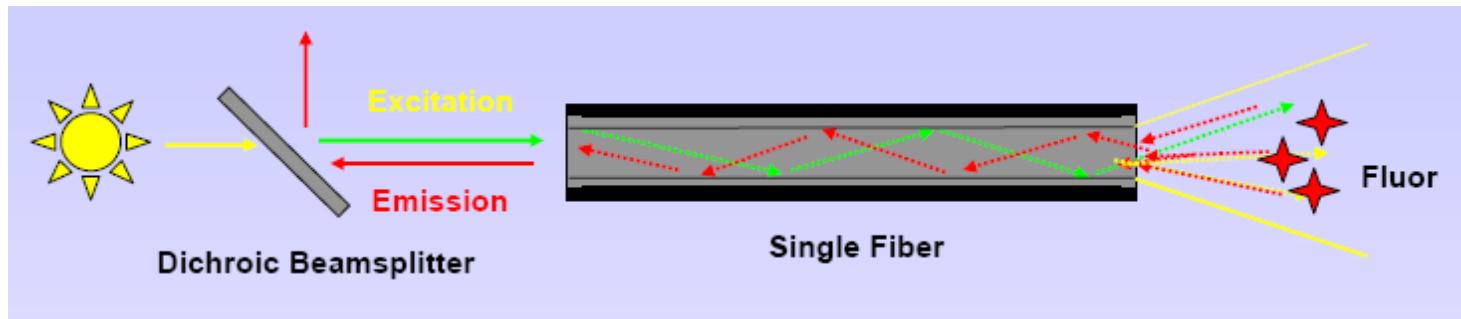
Fluorescence-based optical  
sensors

# Fluorescenční optické senzory

- alternativa k optickým senzorům s chromofory
- pasivní a aktivní optické senzory
- senzory iontů, molekul
- různé typy interakcí...

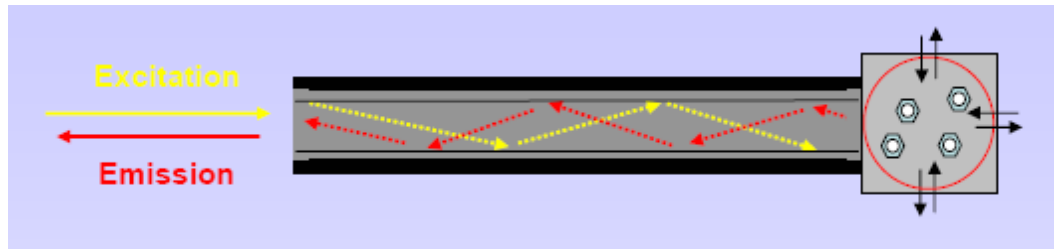
# Pasivní senzory

- pasivní senzory excitují a sbírají světlo s roztoku, nebo povrchu, se kterým jsou v kontaktu

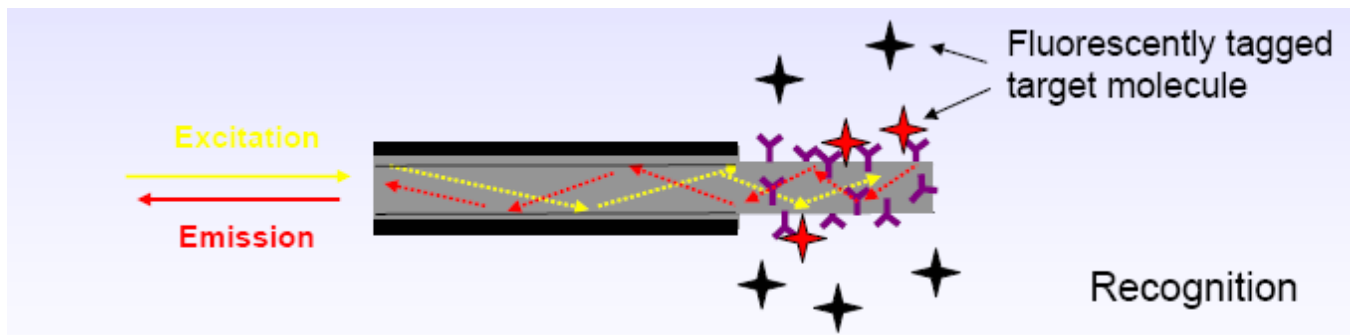


# Aktivní senzory

- v koncové části senzoru je polopropustná, nebo propustná membrána, za kterou se nachází fluorofor, který může reagovat s analytem v roztoku



- např. v senzoru se mohou nacházet např. značené protilátky



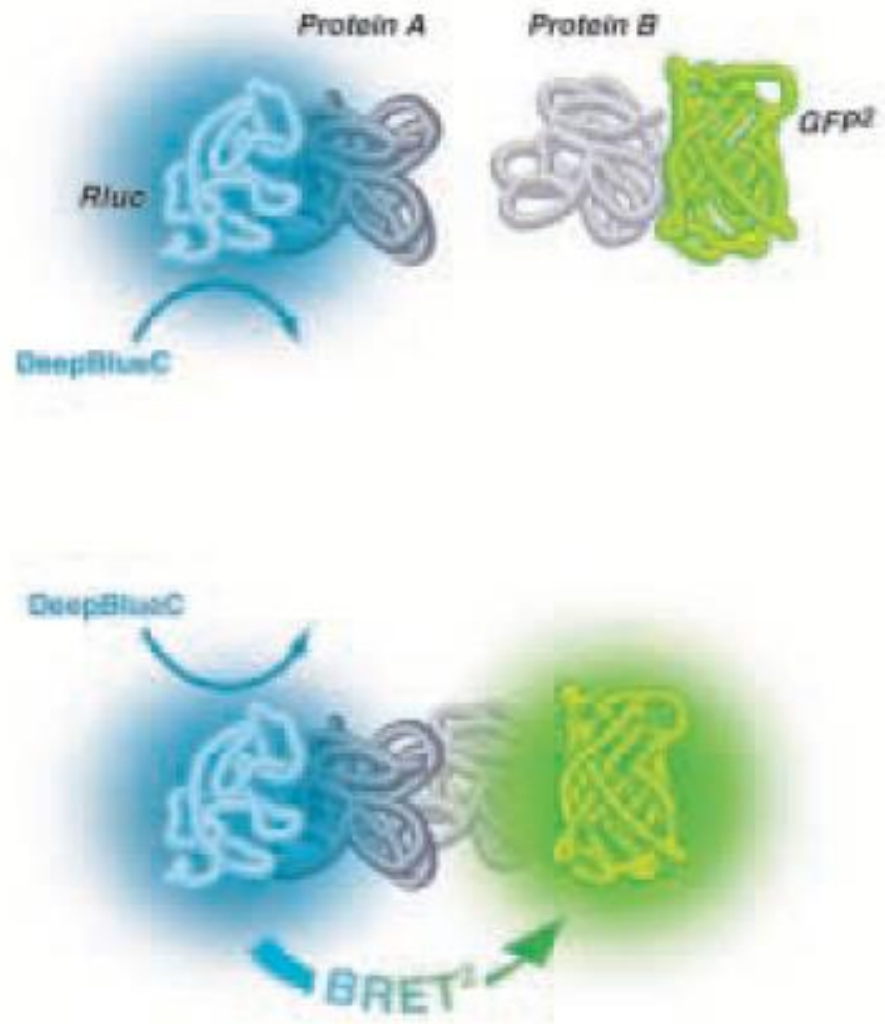


# Odvozené techniky

- FRET
- BRET
- FISH
- FIA
- EIA
- a další

# BRET

- podobně jako u FRET záleží na vzdálenosti mezi fluorofory – jestliže je dostatečně krátká, probíhá výměna energie (dojde k vyzáření světla druhým fluoroforem)
- u metody BRET je donorem energie luciferázou katalyzovaná oxidace coelenterazinu (z mořského koníka *Renilla*)
- jestliže je v blízkosti GFP, dojde k přenosu a následnému vyzáření zeleného světla
- možné i použití jiných molekul, např. derivátu coelenterazinu DeepBlueC (Packar Bioscience, USA)



# Fluorescence In Situ Hybridization (FISH)



není Fish jako FISH...

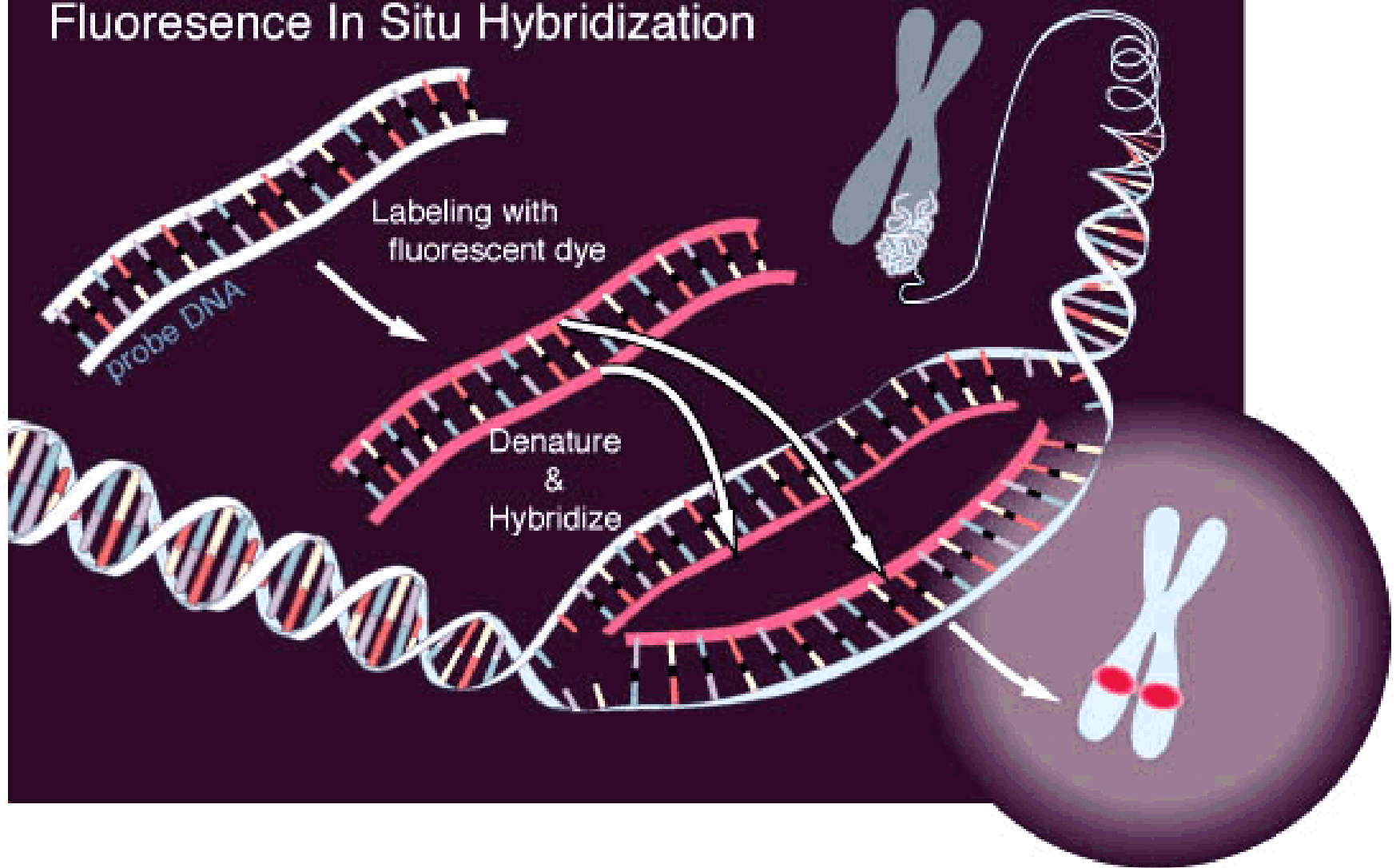
# FISH

- Fluorescence In Situ Hybridization je cytogenetická metoda, která umožňuje detekci a lokalizaci konkrétních sekvencí DNA v chromosomech
- tato metoda je určena k mapování genů a sledování chromosomálních abnormalit, atd.
- pro detekci se využívá fluorescenční mikroskopie

# FISH

- krátký jednovláknový (single stranded) úsek DNA, který je komplementární k hledané sekvenci, je označen fluorescenční značkou
- v rozpletených úsecích DNA dochází k navázání na komplementární části
- dochází k nalezení a označení části sekvence, která kóduje zkoumaný úsek

# Fluorescence In Situ Hybridization

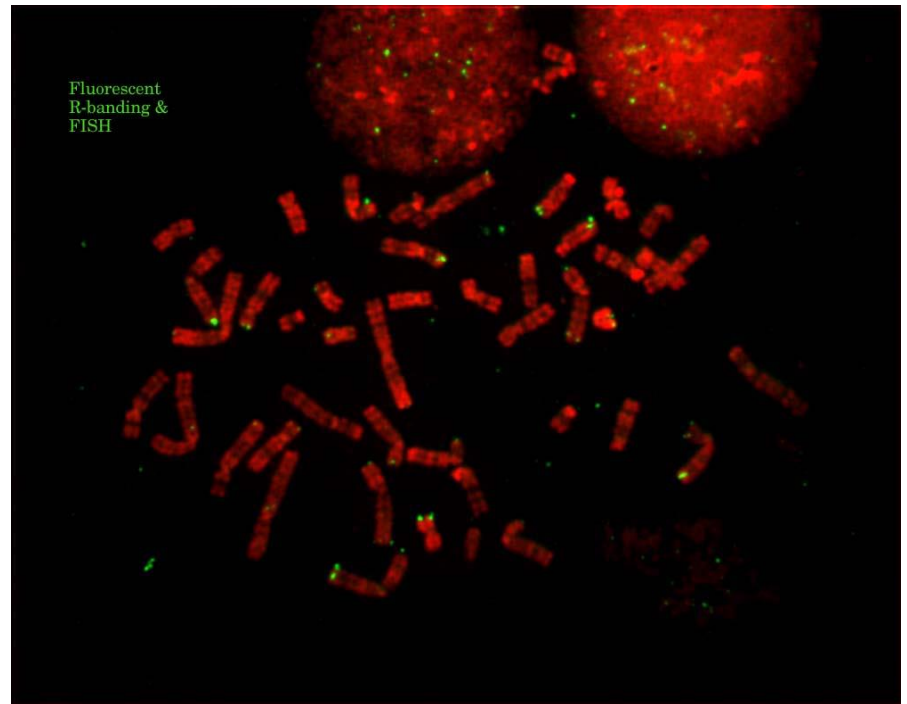
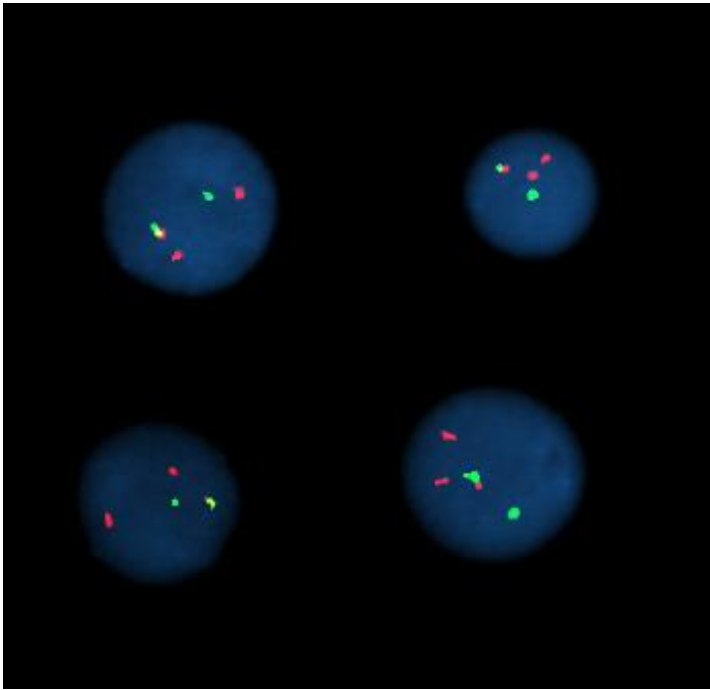


# Typy FISH

- **Locus specific probes:** jestliže izolujeme malý kousek genu a chceme vědět v kterém chromosomu se nachází
- **Centrometric repeat probes:** chromosomy obsahují opakující se sekvence. Jedním typem sondy lze obarvit velkou část chromosomu. Každý chromosom může mít jinou barvu...
- **Whole chromosome probes:** soubor více sond, které hybridizují chromosom po celé jeho délce. Tvorba tzv. spektrálního karyotu



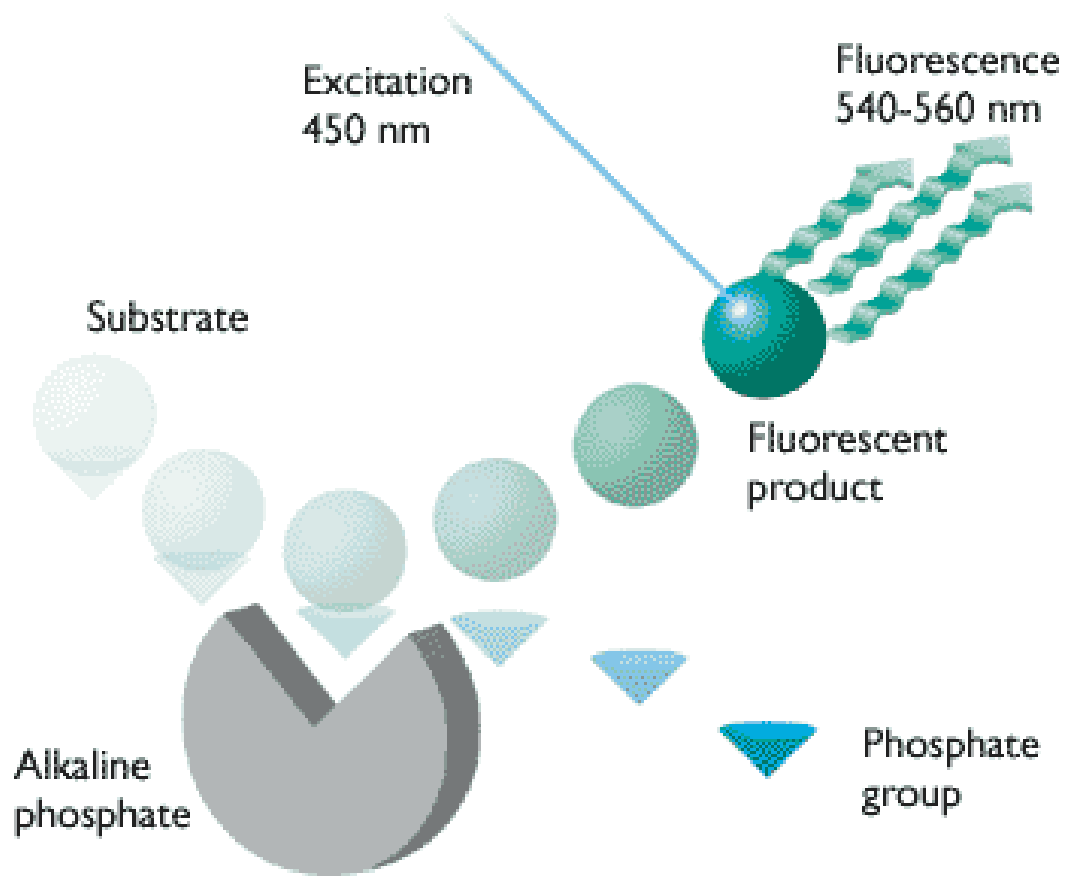
# Ukázky FISH





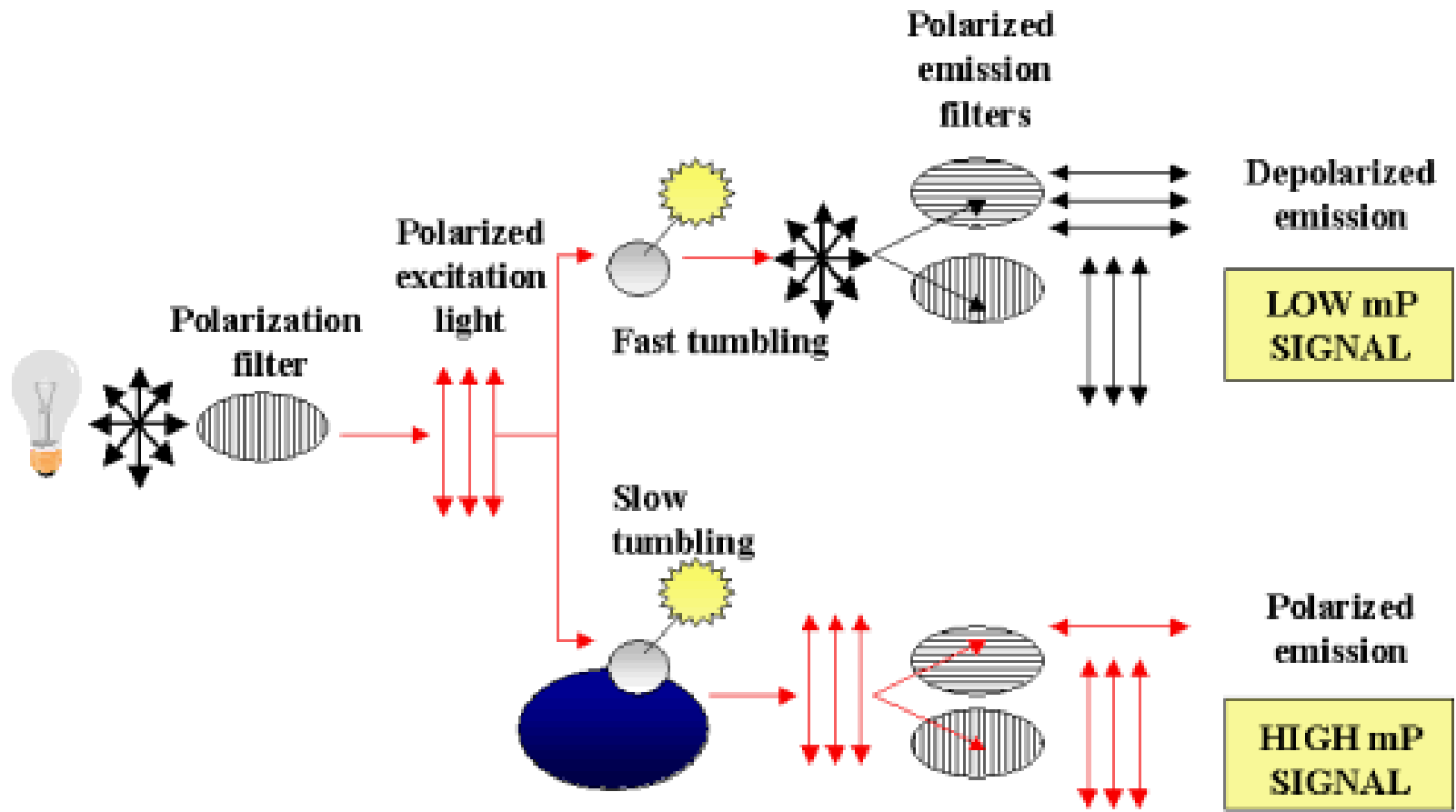
# Bioanalytické metody

- FIA
- EIA



převzato z <http://www.amershambiosciences.com>

# Polarizovaná fluorescence a fluorescenční anizotropie



# Fluorescenční anizotropie

- je-li roztok fluoroforů excitován lineárně polarizovaným zářením, potom budou excitovány pouze ty molekuly, které mají nenulový průmět svého absorpčního přechodového momentu do směru polarizace (**fotoselekce**)
- je-li průměrná rotační relaxační doba (charakterizující rotační difúzi v roztocích) mnohem delší než doba dohasínání fluorescence, potom také výsledná fluorescence bude polarizována
- bude-li naopak průměrná rotační relaxační doba mnohem kratší než doba dohasínání fluorescence, potom anizotropie systému klesne ještě před emisí na limitní hodnotu (v izotropním systému o malé viskozitě až na nulu)
- pokud jsou doba dohasínání fluorescence a rychlost molekulární reorientace srovnatelné, potom bude polarizace fluorescence modulována molekulárním pohybem a analýza časové závislosti emisní anizotropie bude poskytovat informaci o anizotropii systému, v němž se fluorofor nachází

# Fluorescenční anizotropie

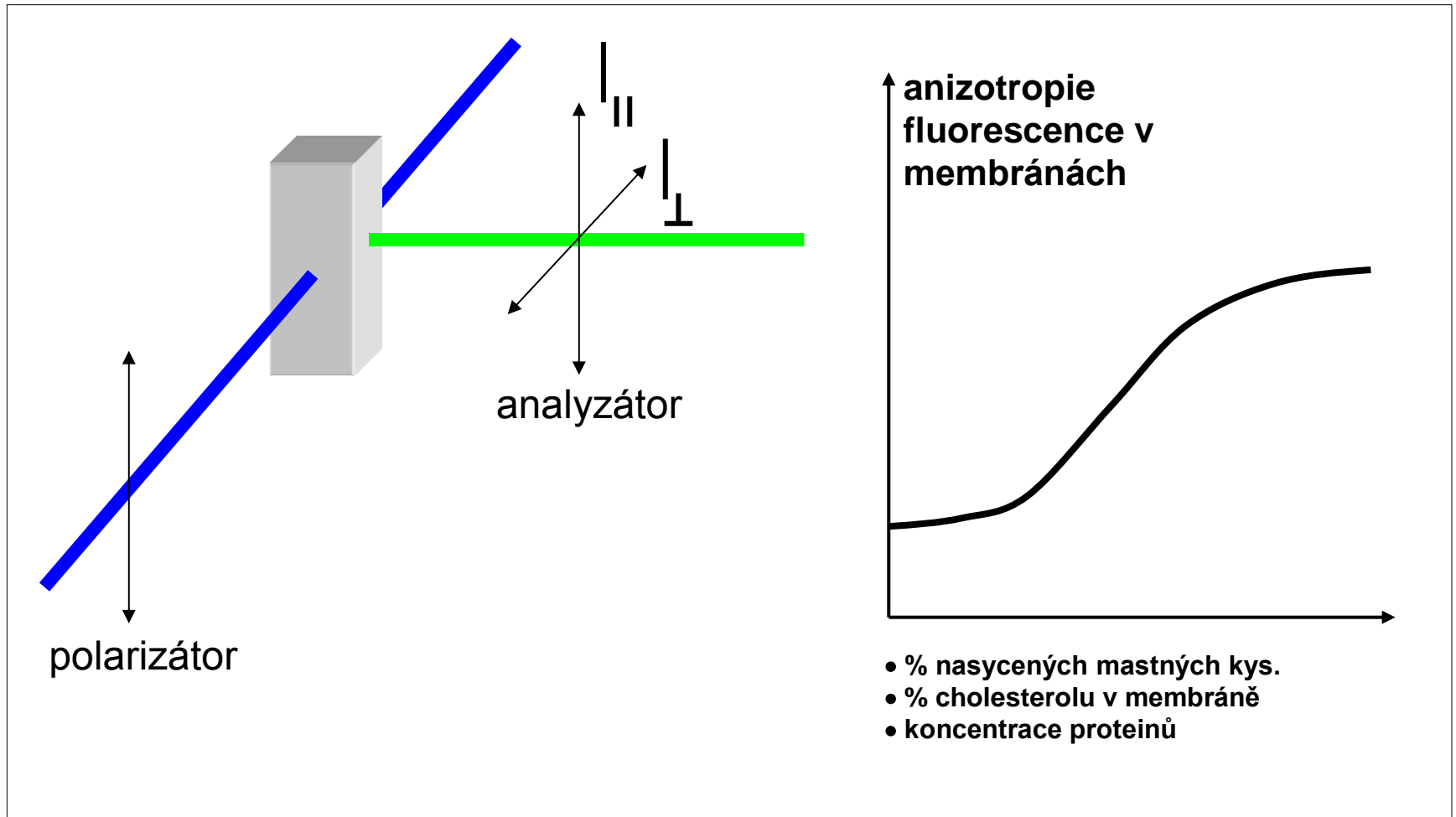
- Měření polarizace fluorescence poskytuje informace o molekulární orientaci a pohyblivosti a procesech, které je modulují, např.:
- fluidita membrán
- interakce ligand - receptor
- proteolýza
- interakce protein - DNA
- kontrakce svalů
- aktivita proteinkináz



stupeň polarizace  $p = (I_{||} - I_{\perp}) / (I_{||} + I_{\perp})$

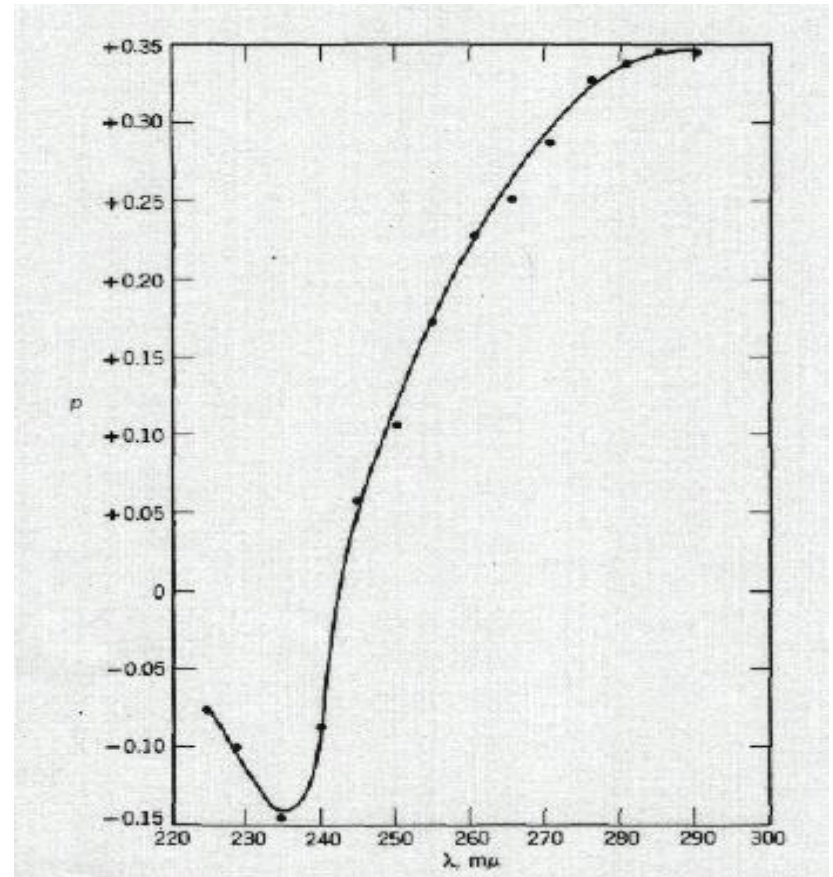
anizotropie

$$r = (I_{||} - I_{\perp}) / (I_{||} + 2 I_{\perp})$$



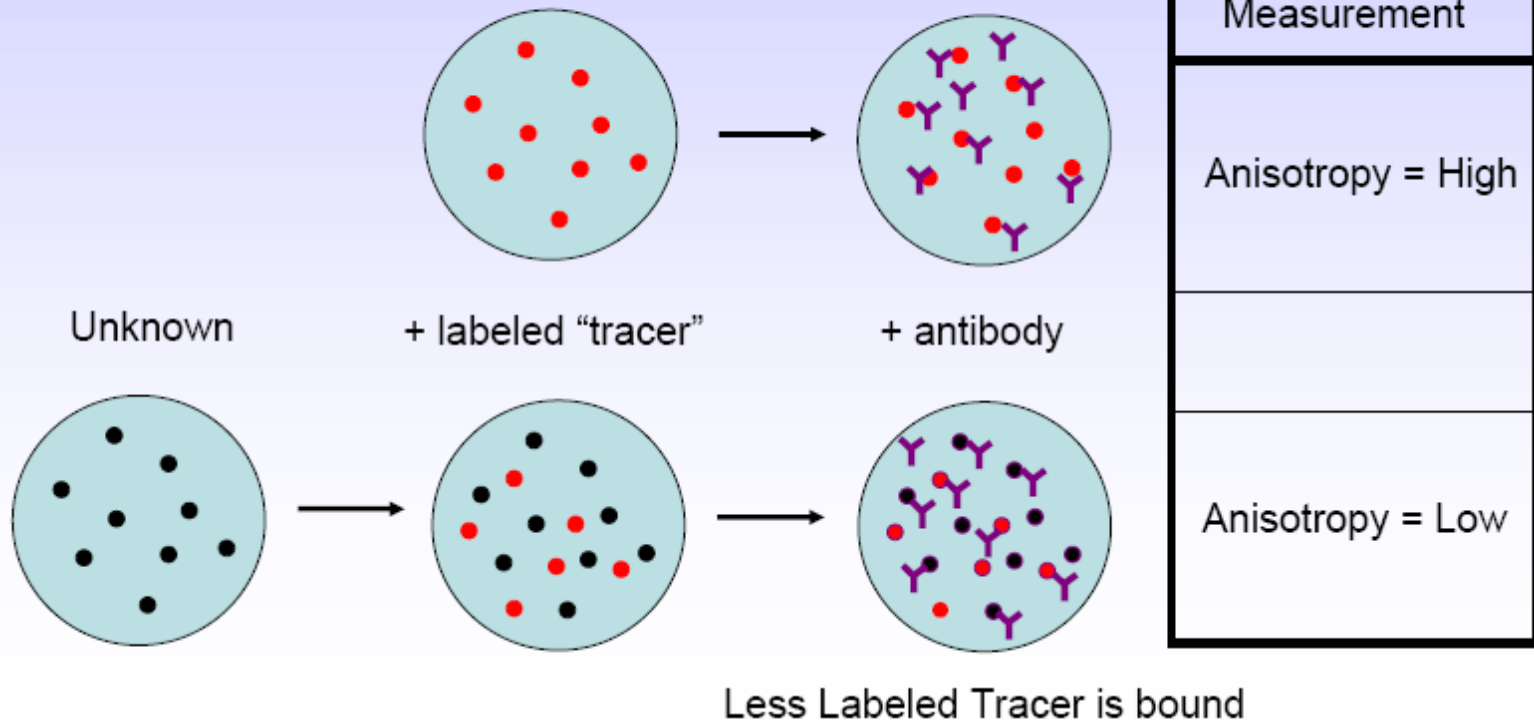
# Polarizační spektra

Polarizační spektra fluorescence jsou závislosti stupně polarizace nebo anizotropie na vlnové délce při konstantní vlnové délce excitujícího nebo emitovaného záření.

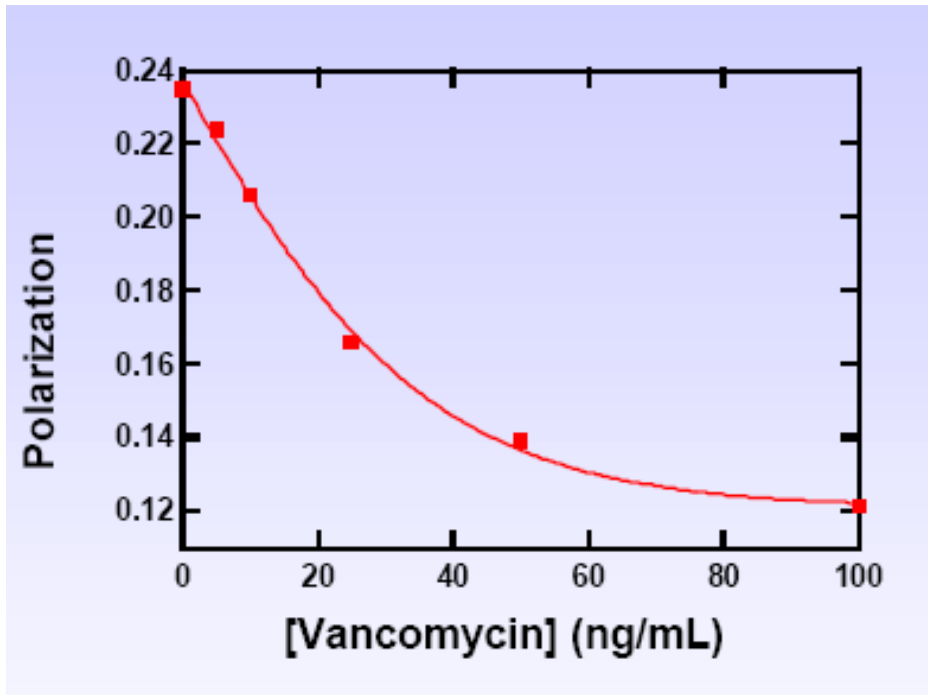


# Imunoanalýza – polarizace luminiscence

## 1. The simple binding competition assay:



# Polarizace luminiscence - aplikace



Vancomycin (ng/mL)	Polarization	[Tracer] bound (%)
0	0.234	100
5	0.223	91
10	0.207	76
25	0.167	41
50	0.139	16
100	0.119	0

Vancomycin – kalibrační křivka

# Fluorescenční korelační spektroskopie

Fluorescenční korelační spektroskopie (FCS) je technika při níž jsou měřeny spontánní fluktuace intenzity fluorescence v mikroskopickém objemu (kolem 10-15 l) určeném fokusovaným excitačním laserovým paprskem. Malé, rychle difundující fluorofory způsobují rychlé fluktuace intenzity fluorescence – oproti konvenční fluorimetrii nedochází ke způměrování těchto difúzně závislých fluktuací. Časová závislost intenzity fluorescence je potom analyzována pomocí dočasné autokorelační funkce, která obsahuje informaci o rovnovážných koncentracích, reakčních kinetikách a difúzních rychlostech molekul ve vzorku

# Fluorescenční korelační spektroskopie - aplikace

- fragmentace nukleových kyselin
- hybridizace nukleových kyselin
- tvorba produktů PCR
- laterální oddělení lipidů v dvojvrstvách
- difúze molekul v jádře a cytoplazmě
- interakce protein-protein
- vazebná rovnováha pro léčiva a jiné ligandy
- shlukování (clustering) membránových receptorů

# Aplikace fluorescenční spektroskopie v hydrogeologii



# Migrace podzemních vod

- sledování a objasnění systému podzemních řek a potoků v krasových oblastech (propadání a vývěry...)
- sledování toku vody z kontaminovaných míst (např. úložiště odpadů, skládek, atd.)

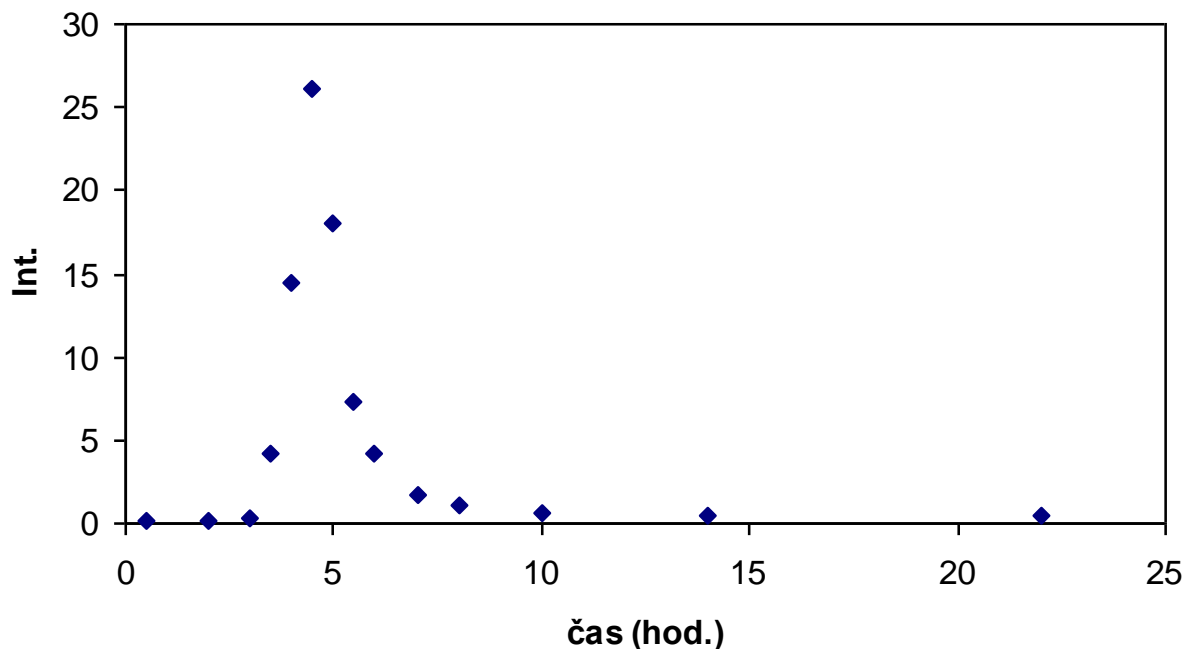




# Fluorescenční „značkovače“ podzemních vod

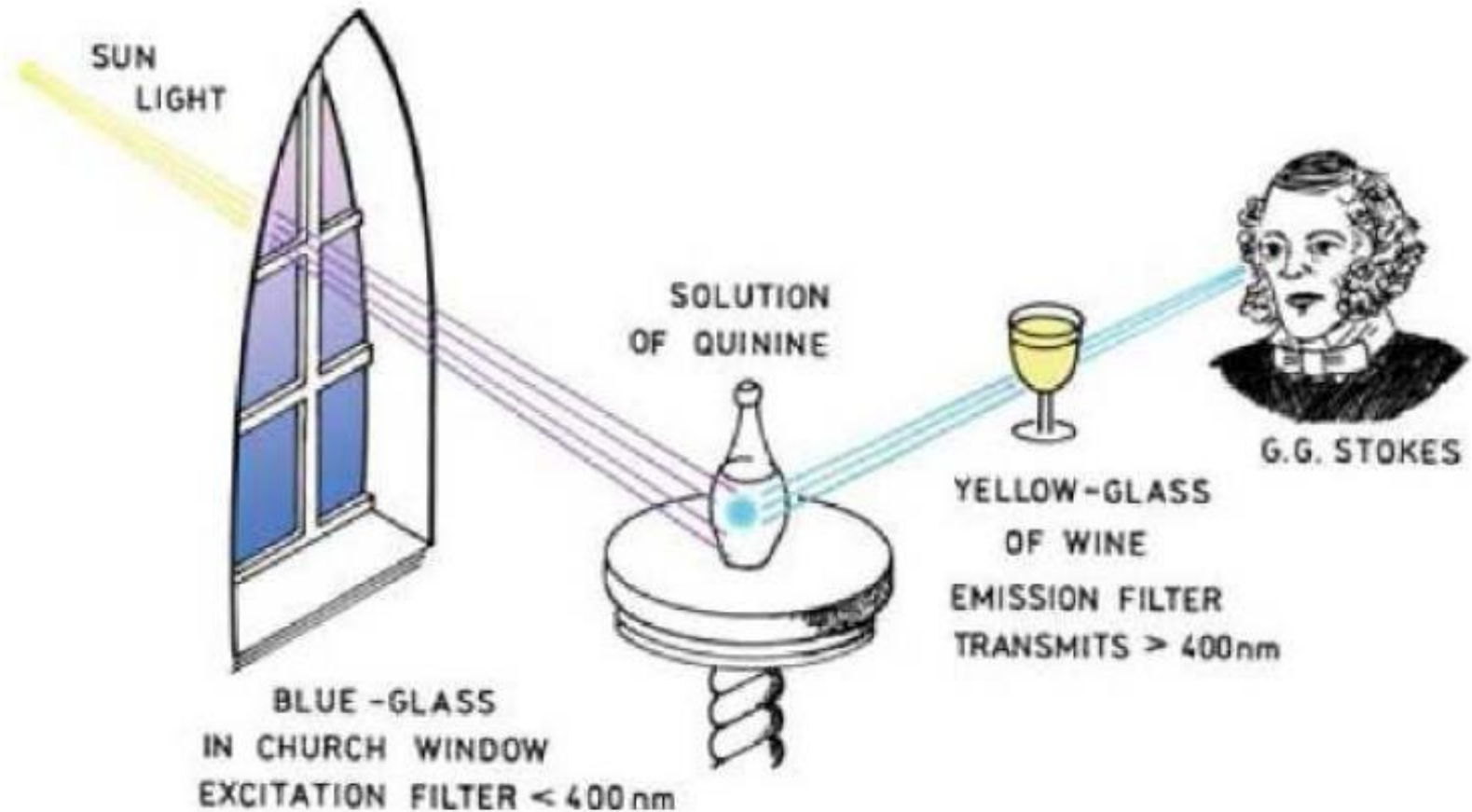
- fluorescenční „značkovače“ (**tracer**) jsou obvykle ve vodě rozpustné, silně fluoreskující látky (fluorescein, rhodamin, eosin, erythrosin, atd.)
- jestliže dochází k velikému zředění barviva, lze použít např. hydrofobní sběrné patrony
- k detekci lze použít jak LIF, tak spektrofluorimetr vybavený lampou (i detekce několika barviv zároveň)
- lze sledovat i časový průběh průchodu barviva potokem/řekou. Z rychlosti průtoku, zředění značkovače, vzdálenosti a dalších faktorů lze usuzovat na charakter, délku, případně členitost podzemního systému.

# Příklad

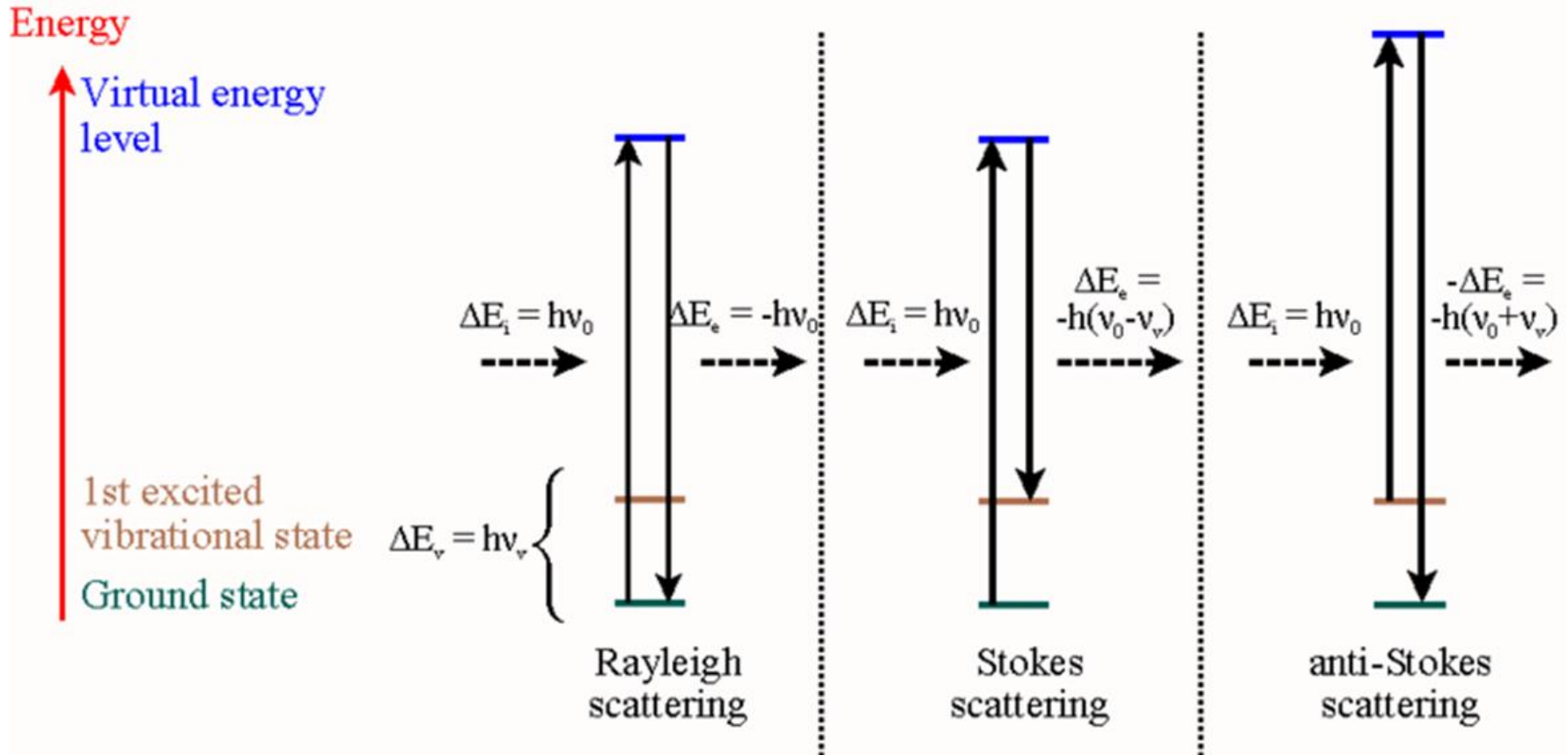


Závislost intenzity fluorescence fluoresceinu na čase ve vzorcích vody odebraných z potoka v Moravském Krasu - 50g fluoresceinu bylo rozpuštěno v potoce před propadáním nedaleko jeskyně Byčí skála a odběrem vody z okolních potoků byla prokázána propojenost systému podzemních vod.

# Stokesův posun



# Ramanův a Rayleigho rozptyl



# Rayleigho rozptyl

- **Rayleighův rozptyl** je rozptyl světla na molekulách plynu případně na jiných částicích podstatně menších než vlnová délka
- při Rayleighově rozptylu se frekvence záření (vlnová délka) nemění
- světlo rozptylují přímo molekuly (vzduchu, plynu, atd.) a intenzita rozptýleného světla silně závisí na jeho vlnové délce (je nepřímo úměrná její čtvrté mocnině)
- to znamená, že modré světlo s krátkou vlnovou délkou se rozptyluje více než světlo **červené**



# „Klasický televizor“ - CRT

**Cathod Ray Tube** - katodová trubice paprsků

princip fungování

vakuová elektronka

elektronové paprsky jsou vystřelovány z **elektronového děla** (u barevného monitoru tři děla - RGB)

o správné usměrnění svazku paprsků se starají **vychylovací cívk**y

před dopadem na obrazovku procházejí paprsky **maskou**

maska zajistí, že paprsky dopadnou na správné místo v tzv. **luminiscenční vrstvě** - nátěru svítících bodů (stínítku)

existují různé typy masek i způsobů nanesení luminoforu - Delta, Inline, Trinitron, Flatron, Quntrix, QuinatrixF a další

**úhlopříčka** - vzdálenost dvou protilehlých vrcholů obrazovky, udává se v palcích (viditelná úhlopříčka je obvykle menší)

15", 17", 19", 21" - úhlopříčky běžně používaných monitorů

**rozlišení** - počet zobrazitelných pixelů, udává se jako počet pixelů na řádku krát počet řádků, většinou je poměr šířky a výšky obrazovky 4:3

800 × 600, 1024 × 768, 1280 × 1024, 1600 × 1280 - optimální rozlišení pro příslušné délky

úhlopříčky

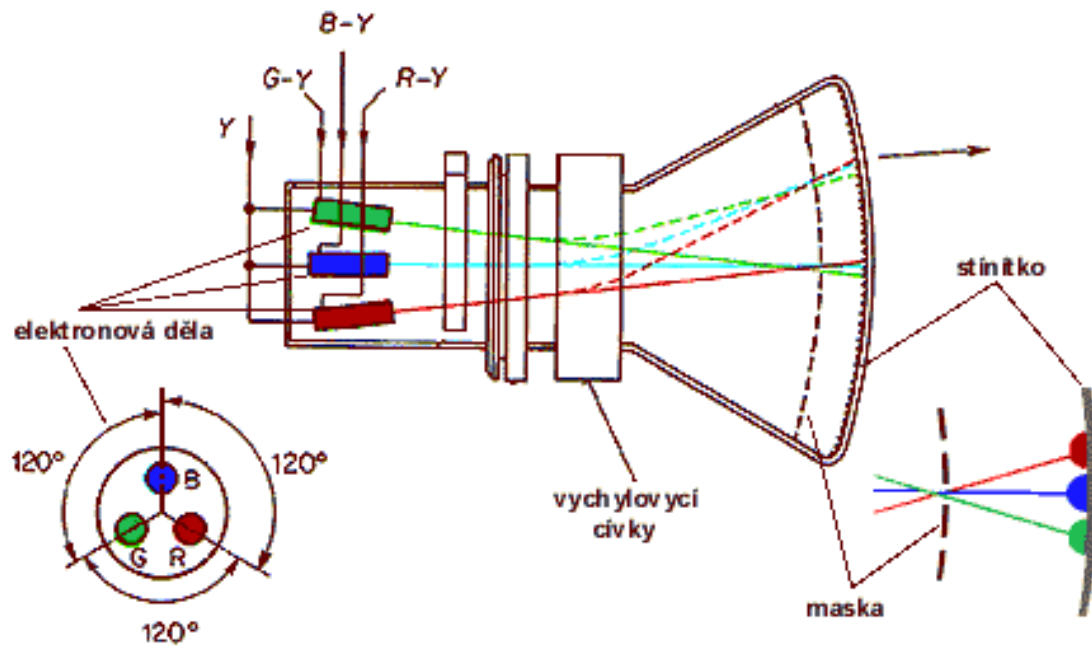
**velikost (rozteč)** luminiscenčních bodů - dnes běžně kolem 0,25 mm

**obnovovací frekvence** (Refresh Rate, V-Sync)

udává jak rychle dokáže monitor překreslit všechny pixely na všech řádcích - paprsek putuje po řádcích zleva doprava a odshora dolů

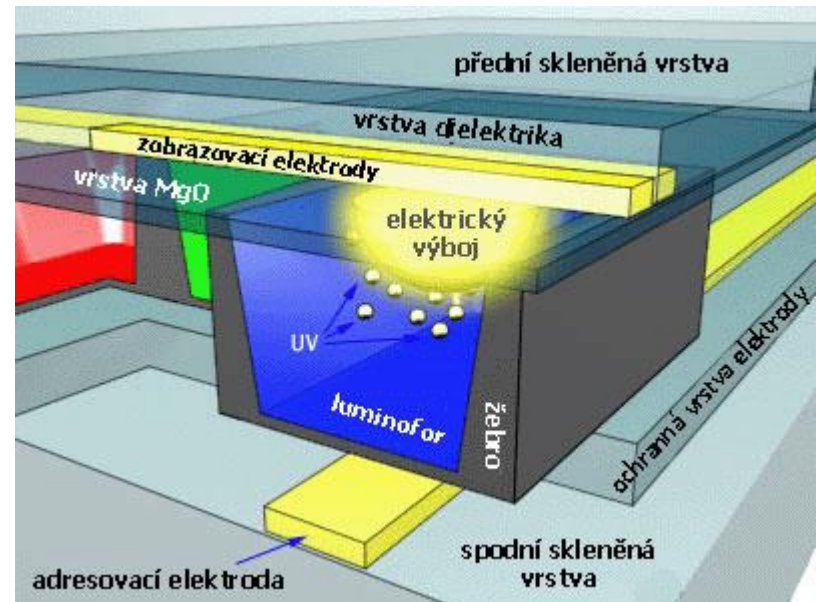
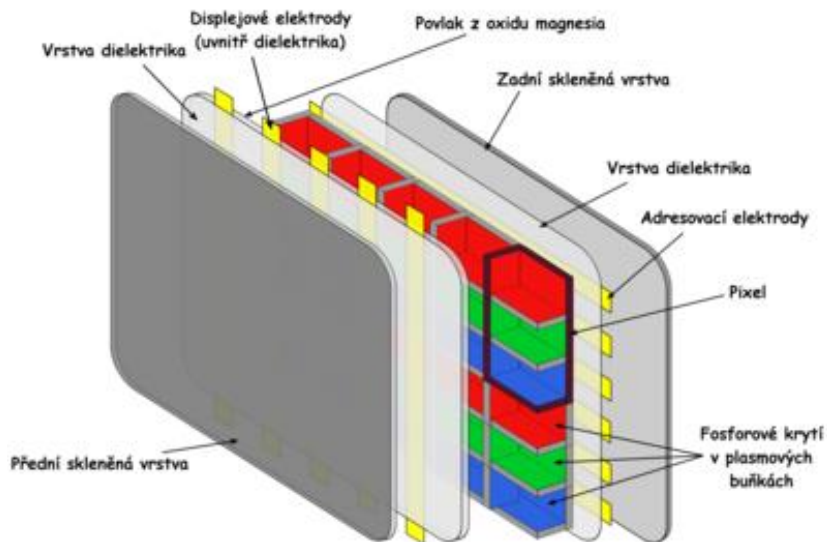
dolní ergonomická hranice je 75 Hz, při níž je celá obrazovka překreslena 75-krát za sekundu

# CRT



# Plazmová televize

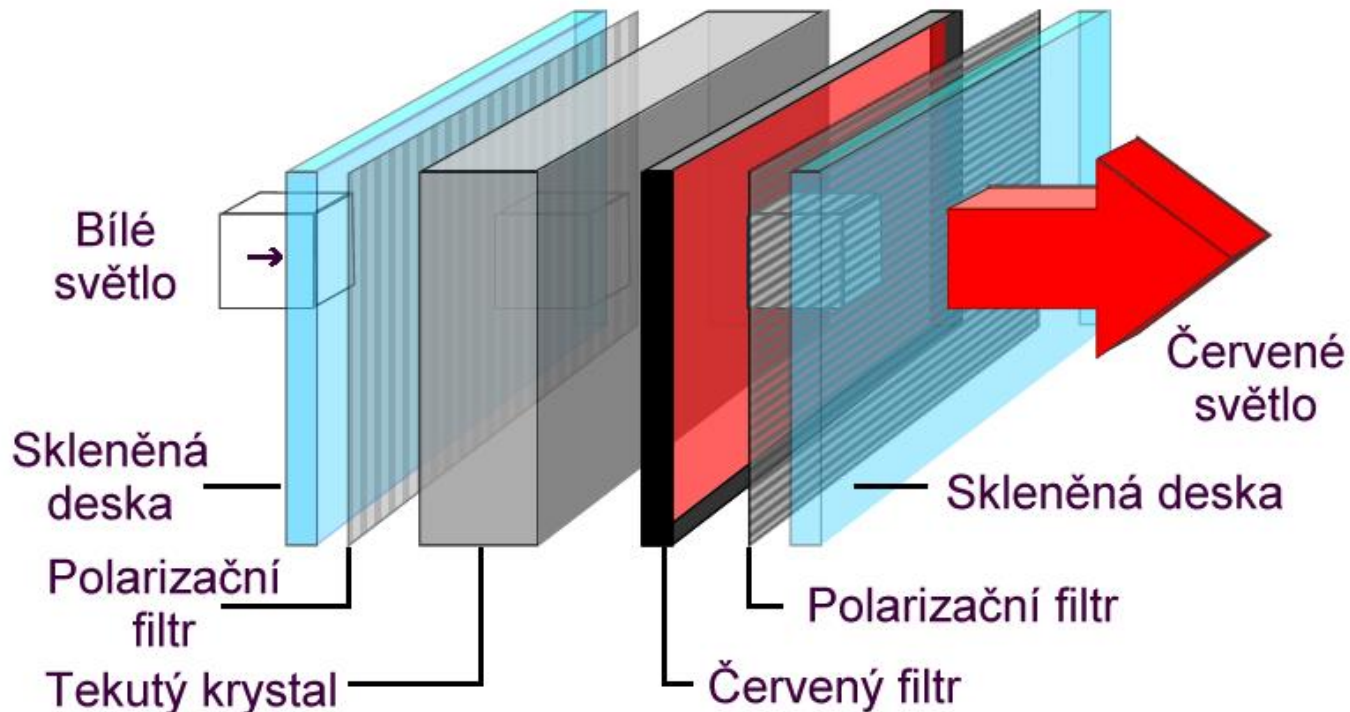
Mezi skleněné desky je umístěno **velké množství** vzájemně oddělených **buněk naplněných plynem**. Po přivedení napětí na **elektrody** v buňce dojde k **výboji** a vznikne **ultrafialové** (okem neviditelné) záření, které dopadá na **vrstvu luminoforu**, která vyzařuje **světlo dané barvy**. **Intenzita** (jas) každého bodu se ovládá **množstvím výbojů** za jednotku času.



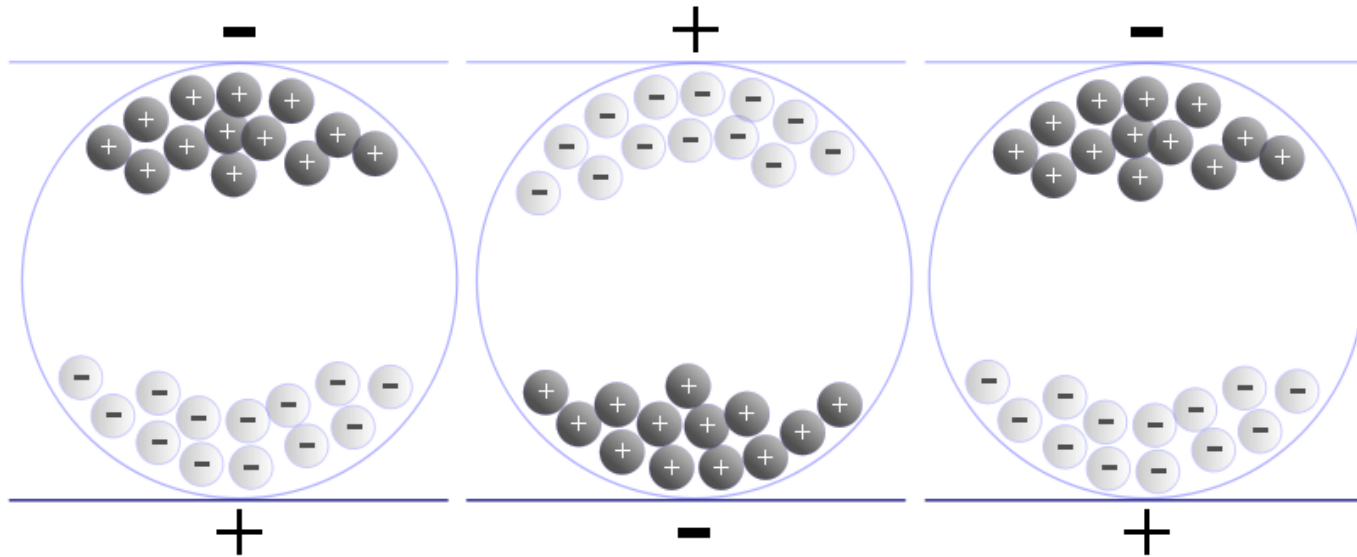


# LCD

U LCD (Liquid Crystal Display) obrazovky je **každý pixel** tvořen **trojicí subpixelů**. Zezadu je displej **prosvěcován zdrojem bílého světla** (zářivka, výbojka, nebo LED diody). Před každý subpixelem je **barevný filtr** tvořící základní **barvy RGB**. Viz například **červený subpixel**:

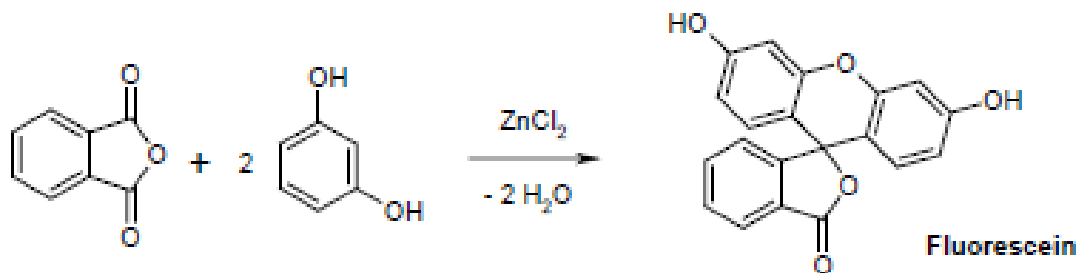


# "Elektronický papír"



"Elektronický papír" používá k zobrazování mikrokapsule obsahující černé a bílé kuličky s elektrickým nábojem. Přivedením impulzu napětí na elektrody se opačné póly přitáhnou a kuličky se přeskupí. Tak zůstanou až do další změny. Na změnu stavu je zapotřebí jen zanedbatelné množství energie a zobrazovač nepotřebuje podsvícení - navíc je dobře čitelný i na přímém slunci. Změna je ale příliš pomalá (řádově 0,5 s), proto se tyto zobrazovače používají například v elektronických čtečkách knih nebo v digitálních hodinkách, kde není potřeba zobrazovat rychlé změny.

# Syntéza fluoresceinu

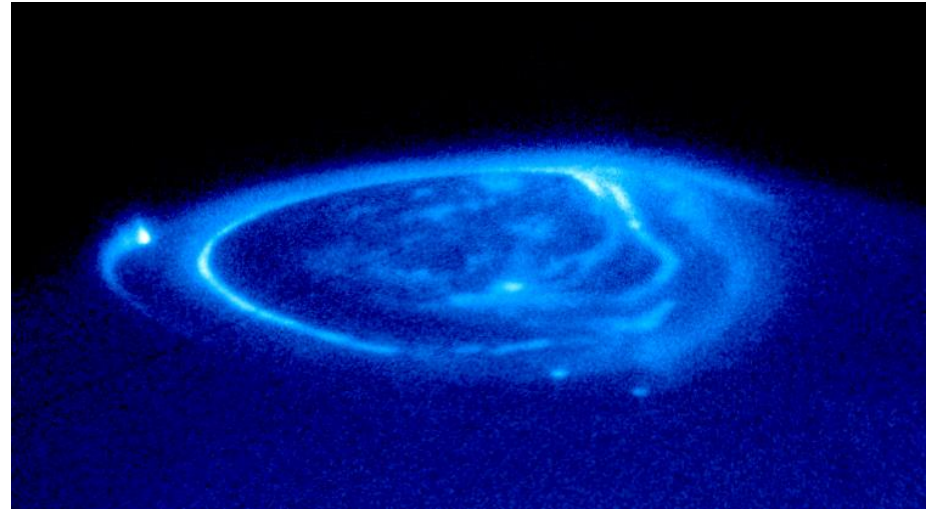


Kondenzační reakce ftalanhydridu (půl lžičky) s resorcinolem (půl lžičky)

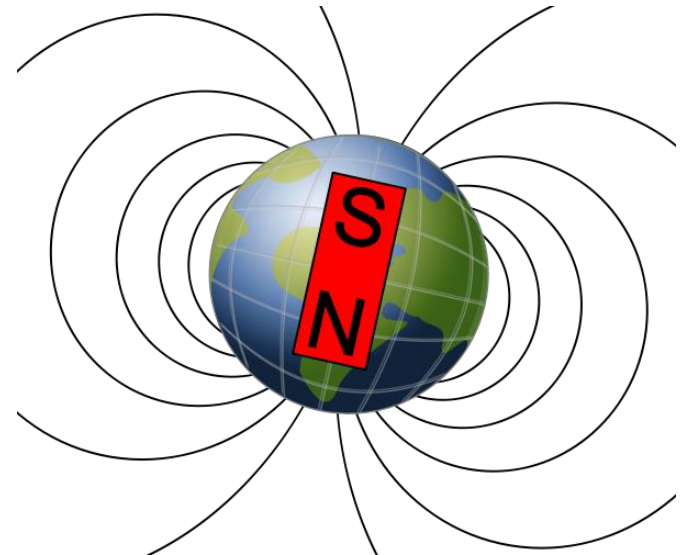
# Fluorescein na Den svatého Patrika



# Jak vzniká polární záře?



Na Slunci vznikají vlivem nerovností v magnetickém poli sluneční skvrny. U těchto skvrn vznikne jedna masivní protuberance (erupce). Mrak částic slunečního větru tvořený protony, elektrony a alfa částicemi letí vesmírem (rychlostí řádově 0,1 % rychlosti světla) a pokud se na své cestě setká s magnetickým polem Země, tak ho ono pole většinu odrazí dál do vesmíru, ale část ho zachytí a stáčí po spirálách směrem k magnetickým pólům Země. Tam sluneční vítr interaguje s atmosférou a vzniká polární záře. Urychlené částice narážejí do molekul plynů v atmosféře a excitují je. Po následné de-excitaci jsou vyzářeny fotony (kyslík – 557,7 nm).





Děkuji za pozornost...

