

# Luminescencja i jej wykorzystanie w praktyce



**Łukasz Gąsiorowski**

**2009**

# Plan prezentacji:

1. Krótki wstęp.
2. Luminescencja.
3. Rodzaje luminescencji.
4. Luminofory.
5. Podstawowe charakterystyki luminescencji.
6. Luminescencja w przyrodzie.
7. Zastosowanie luminescencji.
8. Bibliografia.

# Krótki wstęp

Energia absorbowana przez układ musi zostać wyemitowana:

- w postaci luminescencji,
- zmieniona na ciepło,
- zużyta na reakcje fotochemiczne lub zmiany konformacyjne (w cząsteczce),
- przekazana innemu układowi.

# Luminescencja

**Luminescencja** (lumen po łacinie znaczy światło), jest to promieniowanie, które nie jest pochodzenie termicznego.

Według Wawiłowa: „Luminescencja to nadwyżka promieniowania ciała nad promieniowaniem temperaturowym tego samego ciała w danej części widmowej i w danej temperaturze, która ponadto charakteryzuje się skończonym czasem świecenia, to znaczy nie zanika natychmiast po przerwaniu wzbudzenia.”

Określana bywa jako bardzo czuła metoda badawcza pozwalająca zidentyfikować różne substancje.

# Rodzaje luminescencji

Ze względu na czynnik wzbudzający do świecenia

- ✓ chemiluminescencja
- ✓ elektroluminescencja
- ✓ elektronoluminescencja
- ✓ fotoluminescencja
- ✓ radioluminescencja
- ✓ rentgenoluminescencja
- ✓ sonoluminescencja
- ✓ tryboluminescencja
- ✓ termoluminescencja

Ze względu na czas trwania

- fluorescencję
- fosforescencję

# Rodzaje luminescencji

✓ **Chemiluminescencja** to świecenie wywołane reakcjami chemicznymi, np. podczas utleniania fosforu białego lub luminolu, testu wstępnej identyfikacji krwi. Zjawisko to można także zaobserwować w niektórych układach biologicznych (robaczki świętojańskie).



# Rodzaje luminescencji

- ✓ **Rentgenoluminescencja**-  
świecenie wywołane przez  
promieniowanie  
rentgenowskie. Wykazuje  
ją na przykład wolframian  
wapnia  $\text{CaWO}_4$ , który  
znalazł zastosowanie przy  
produkcji ekranów  
wzmacniających.



# Rodzaje luminescencji

- ✓ **Tryboluminescencja** (z greki: tribein - trzeć) - świecenie kosztem energii mechanicznej. Wywołana czynnikiem mechanicznym, np. tarciami, zginaniem, ciśnieniem, uderzeniem, ściskaniem. Powstaje np. przy zgniataniu kostki cukru lub potrząsaniu słoika z kryształami kwasu antranilowego.



# Rodzaje luminescencji

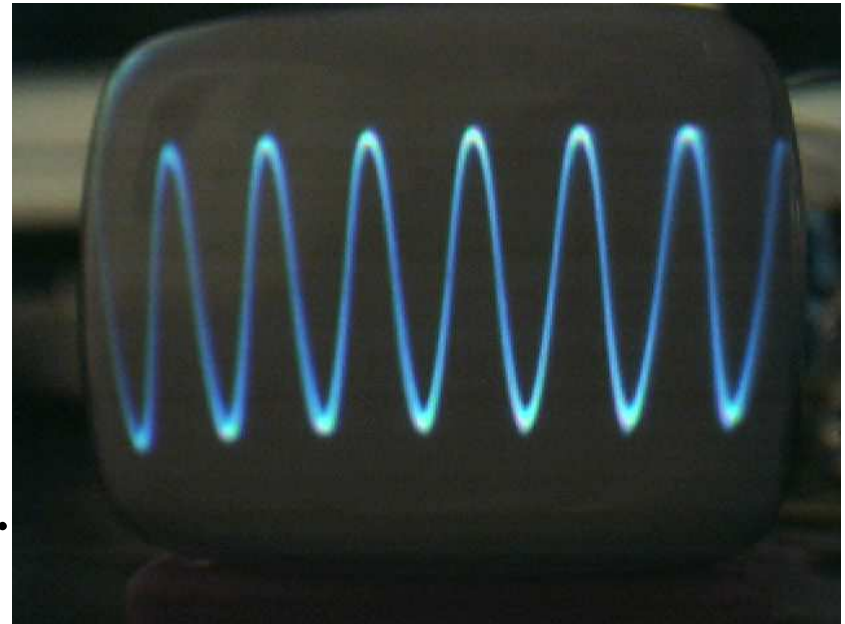
- ✓ **Radioluminescencja** - luminescencja wywołana przez promieniowanie  $\alpha, \beta, \gamma$  lub promieniowanie kosmiczne a także fragmenty rozszczepień jąder atomowych.
- ✓ **Sonoluminescencja** – luminescencja wywołana ultradźwiękami.

# Rodzaje luminescencji

✓ **Elektroluminescencja**, luminescencja gazów zachodząca pod wpływem wyładowania elektrycznego. Zachodzi również dla niektórych ciał stałych (elektroluminoforów) wywołana działaniem zmiennego lub stałego pola elektrycznego. Wykorzystywana m.in. w lampach jarzeniowych, kondensatorach elektroluminescencyjnych, w przetwornikach obrazu oraz w urządzeniach pamięciowych.

# Rodzaje luminescencji

- ✓ **Elektronoluminescencja**  
(katodoluminescencja) –  
świecenie pod wpływem  
elektronów przyspieszanych  
napięciem między elektrodami.

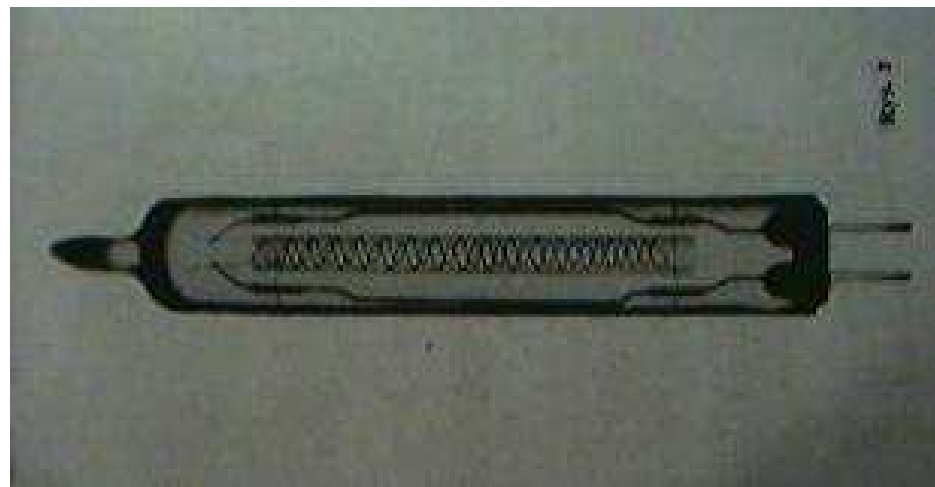


Ten rodzaj wzbudzenia ma liczne zastosowania w kineskopach, oscyloskopach, mikroskopach elektronowych itp.

# Rodzaje luminescencji

- ✓ **Termoluminescencja** – następuje po uprzednim naświetleniu substancji i następnie jej ogrzaniu. Mamy tu do czynienia z gromadzeniem energii świetlnej i wypromieniowaniu jej gdy tego chcemy- w momencie podgrzania.

Termoluminescencję wykazuje na przykład fluorek wapnia  $\text{CaF}_2$ , wobec czego znajduje on zastosowanie do budowy dozymetrów.

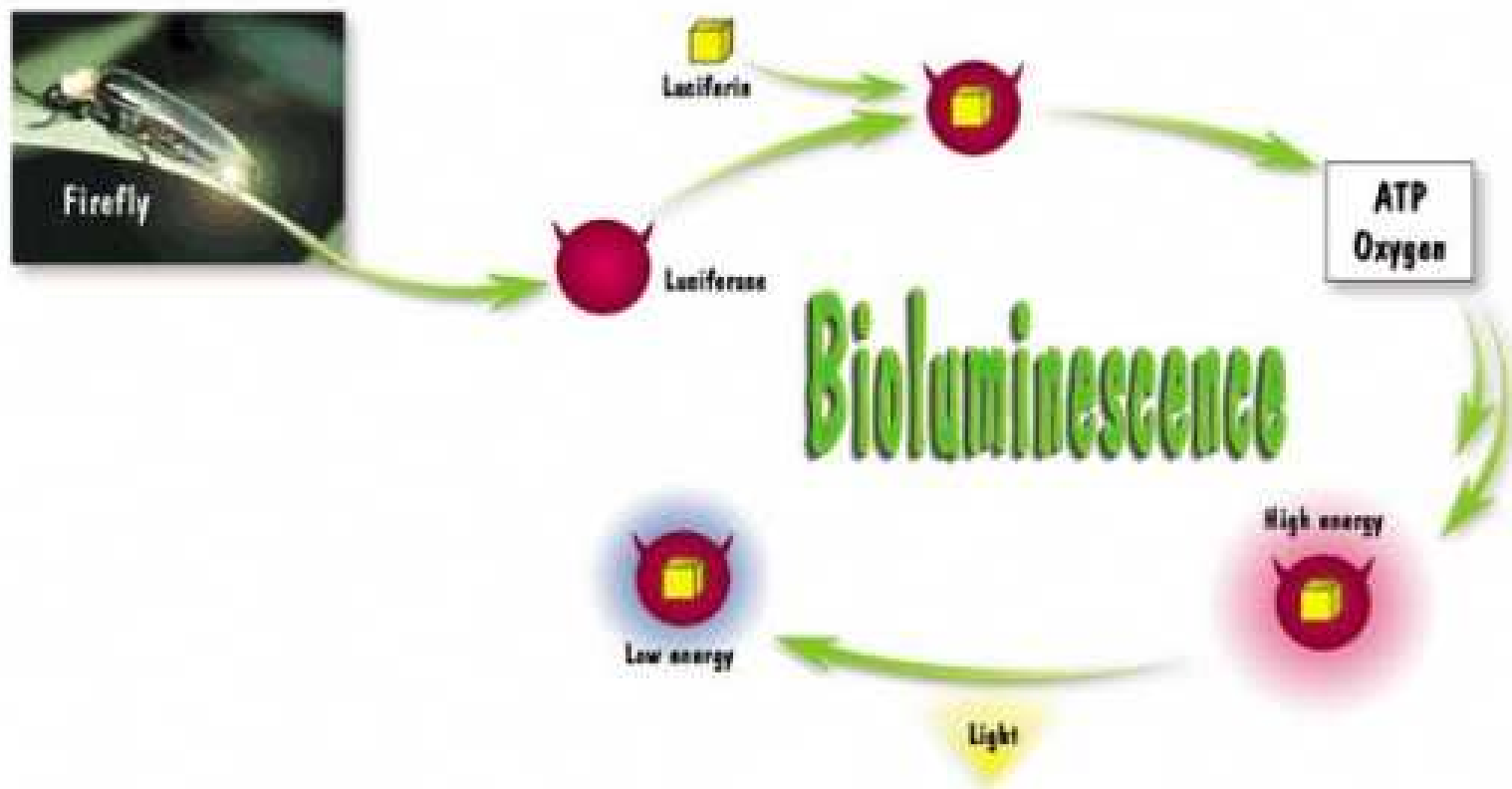


# Rodzaje luminescencji

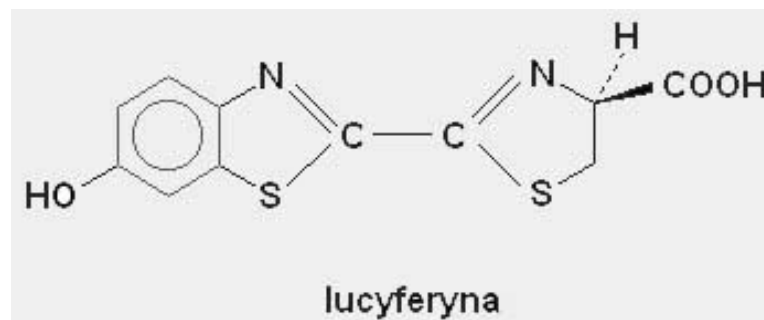
- ✓ **Bioluminescencja** jest to odmiana chemiluminescencji. Polega na emisji światła podczas reakcji biochemicznych. Zdolność do bioluminescencji posiadają wszystkie żywe komórki. Wszystkie żywe organizmy wykazują bioluminescencję, jest ona zbyt słaba by ją zauważyć.



# Bioluminescencja



Emisja światła jest często reakcją enzymatyczną, polegającą na utlenianiu lucyferyny przez lucyferazę.



# Bioluminescencja

Przypuszczalnie zjawisko bioluminescencji pojawiło się, kiedy pierwotna, beztlenowa atmosfera Ziemi zaczęła zmieniać skład, upodabniając się do tej, którą mamy obecnie. Dla ówczesnych organizmów tlen był śmiertelną trucizną, a luminescencja sposobem pozbycia się go z wnętrza komórki. Z czasem przystosowały się one do obecności tlenu. Dziś bioluminescencja służy do sygnalizacji godowej, przywabiania zdobyczy lub, jak w przypadku grzybów, ułatwia rozmnażanie.

# Rodzaje luminescencji

- ✓ **Fotoluminescencja** wywołana przez pochłonięcie promieniowania elektromagnetycznego z obszaru widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni. Pochłonięta energia jest następnie wyemitowana także w postaci światła, na ogół o energii mniejszej niż energia światła wzbudzającego.





# Fotoluminescencja

Zjawiska fotoluminescencyjne można podzielić według czasu pomiędzy pochłonięciem a wyemitowaniem energii na **fluorescencję i fosforescencję**.

Z **fluorescencją** (świecenie krótkotrwałe) mamy do czynienia jeśli od pochłonięcia przez cząsteczkę światła do emisji nie upłynęło więcej niż  $10^{-8}$ s.

W przypadku gdy czas pomiędzy pochłonięciem a wyemitowaniem jest dłuższy niż  $10^{-8}$ s to zjawisko to nosi nazwę **fosforescencji** (świecenie długotrwałe), dochodzącej do kilku godzin a nawet dni.

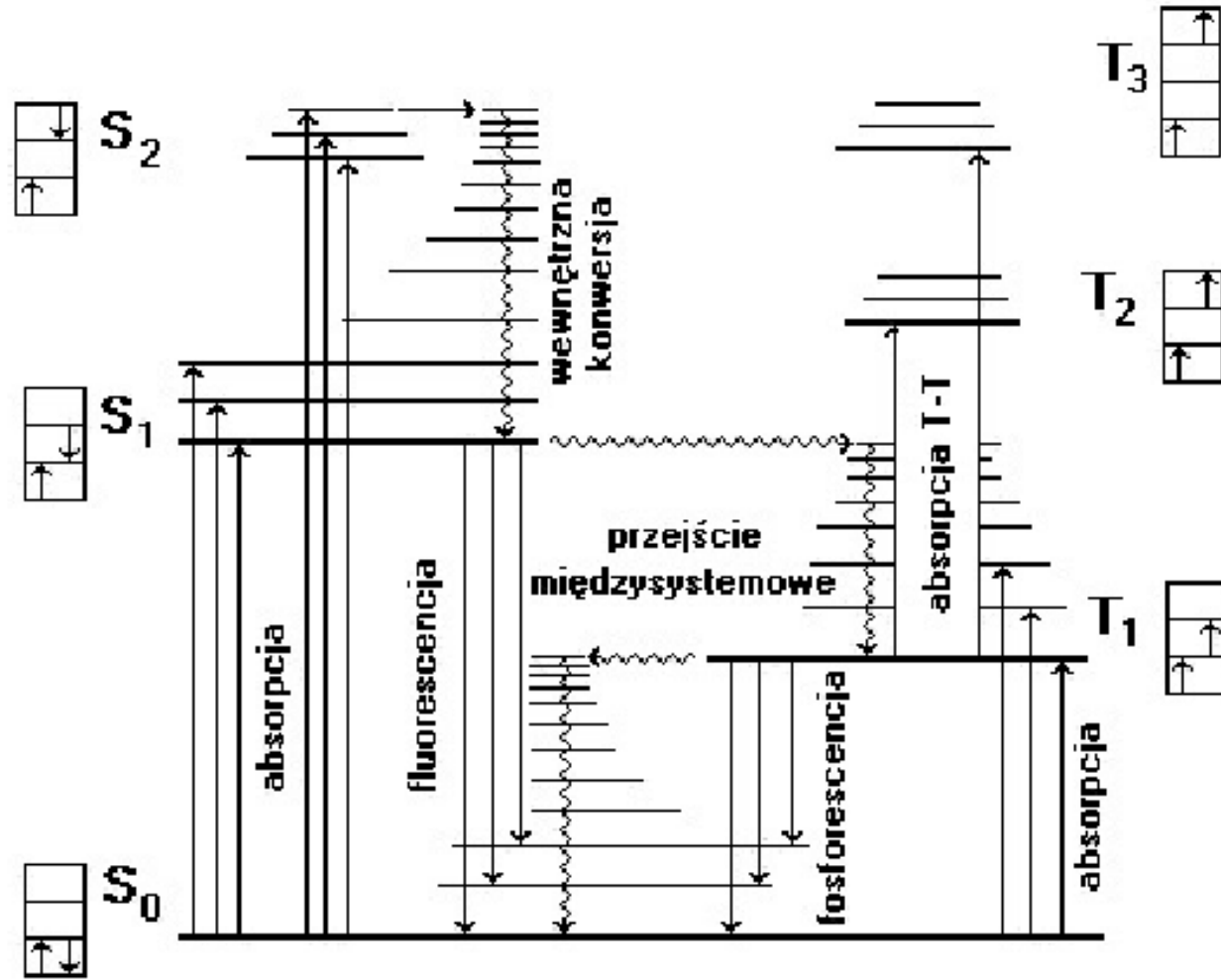
# Fotoluminescencja

**Fluorescencja** występuje przy przejściu samorzutnym z wyższego poziomu energetycznego elektronu na niższy.

**Fosforescencja** zaś powstaje przy udziale energii cieplnej ośrodka. Warunkiem wystąpienia tego zjawiska jest istnienie poziomów metatrwałych.

Fotoluminescencję wykazuje wiele substancji, jak choćby organiczne barwniki stosowane w odblaskowych flamastrach czy luminofory stosowane w świetlówkach - rurach fluorescencyjnych.

# Diagram Jabłońskiego



# Diagram Jabłońskiego

Całkowitą energię cząsteczki  $E$  można zdefiniować jako sumę składników odpowiadających trzem rodzajom ruchu w cząsteczce.

$$E = E_e + E_{osc} + E_{rot} \quad (E_e \gg E_{osc} > E_{rot})$$

Z tego względu każda cząsteczka posiada charakterystyczny dla siebie układ poziomów energetycznych – elektronowych, oscylacyjnych, rotacyjnych.

**Fluorescencja** - zjawisko przejścia cząsteczki z poziomu zerowego wzbudzonego stanu singletowego  $S_1$  na dowolny poziom oscylacyjno-rotacyjny stanu podstawowego  $S_0$ .

**Fosforescencja** - zjawisko przejścia cząsteczki z poziomu zerowego stanu trypletowego  $T_1$  na dowolny poziom oscylacyjno-rotacyjny singletowego stanu podstawowego  $S_0$ .

# KRYSTALOLUMINESCENCJA

To świecenie podczas krystalizacji i narastania kryształów. Stan krystaliczny ma niższą energię niż roztwór, stąd część energii jest wypromieniowywana w postaci światła. Właściwości takie wykazuje wiele substancji, jednak luminescencja jest niezauważalna dla oka ludzkiego (ultrasłaba). Inaczej jest gdy krystalizacja ma gwałtowny przebieg (krystalizacja z r-ru przesyconego). Krystaloluminoforem jest NaCl. Jeśli do nasyconego r-ru NaCl dodać stężonego kwasu solnego tak, by ciecze się nie zmieszały i następnie wstrząsnąć probówką to następuje gwałtowna krystalizacja ze względu na przekroczony iloczyn rozpuszczalności, której towarzyszy niebieski błysk.

kryształ halitu  
(soli kamiennej)



# Luminescencja minerałów

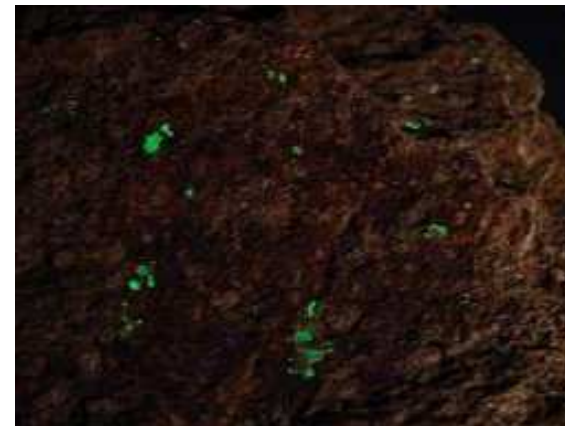
Fosforescencję pod wpływem naświetlania promieniami U.V. wykazują m.in.: diament, baryt oraz bezbarwne kryształy gipsów z Dobrzynia nad Wisłą, które od momentu wyłączenia lampy świecą jeszcze przez kilka sekund białoniebieskim światłem.



Luminescencja minerału zazwyczaj związana jest z nieznaczną domieszką obcych pierwiastków - aktywatorów (np.: Mn w kalcyście) lub obecnością defektów sieciowych, jonów międzywęzłowych, dyslokacji, etc.; istnieją również czyste substancje o dużej zdolności świecenia.

## Minerały wykazujące zjawisko fotoluminescencji:

- Kalcyt - żółta, pomarańczowa, czerwona;
- Cyrkon - żółta, złocista;
- Fluoryt - fioletowa, jasnożółta;
- Scheelit - niebieska (tylko w dalekim ultrafiolecie);
- Topaz - żółta (tylko w dalekim ultrafiolecie);
- Gips - białoniebieska;
- Autunit - jaskrawa zielonożółta;
- Dolomit – pomarańczowa;
- Anglezyt - jasna pomarańczowa;
- Waryscyt – jasnozielona;
- Apatyt - różowa, czerwona;



# Luminofony

Luminofony są to substancje syntetyczne, wykazujące luminescencję.

Luminofony można podzielić na:

- organiczne,
- nieorganiczne.

Ze względu na rodzaj wzbudzania luminofony można podzielić na fotoluminofony, katodoluminofony, rentgenoluminofony oraz elektroluminofony.



Do luminoforów nieorganicznych należą przede wszystkim:

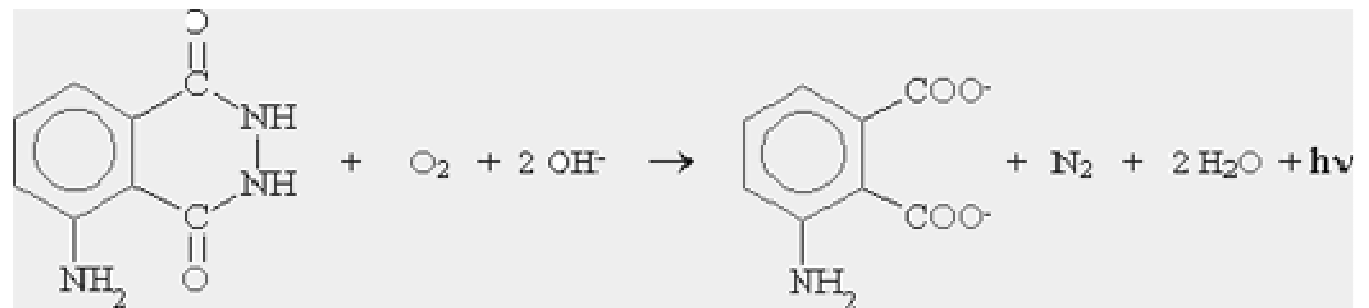
- wolframiany (np. wapnia  $\text{CaWO}_4$ )
- krzemiany (np. cynku i berylu  $\text{ZnSiO}_4 + \text{BeSiO}_4$ ,
- siarczki (np. wapnia  $\text{CaS}$ , strontu  $\text{SrS}$ ,) selenki, np. cynku  $\text{ZnSe}$
- tellurki (np.  $\text{ZnTe}$ ),
- tlenki (np.  $\text{ZnO}$ ),
- halofosforany wapnia,
- inne (np. platynocyjanek baru, tantalanian itru).

Z luminoforów organicznych można wymienić pochodne diksantyleny, benzo- i naftodialdazyn, rodaminę, eozyne, fluoresceinę, uraninę i inne.

# Luminol

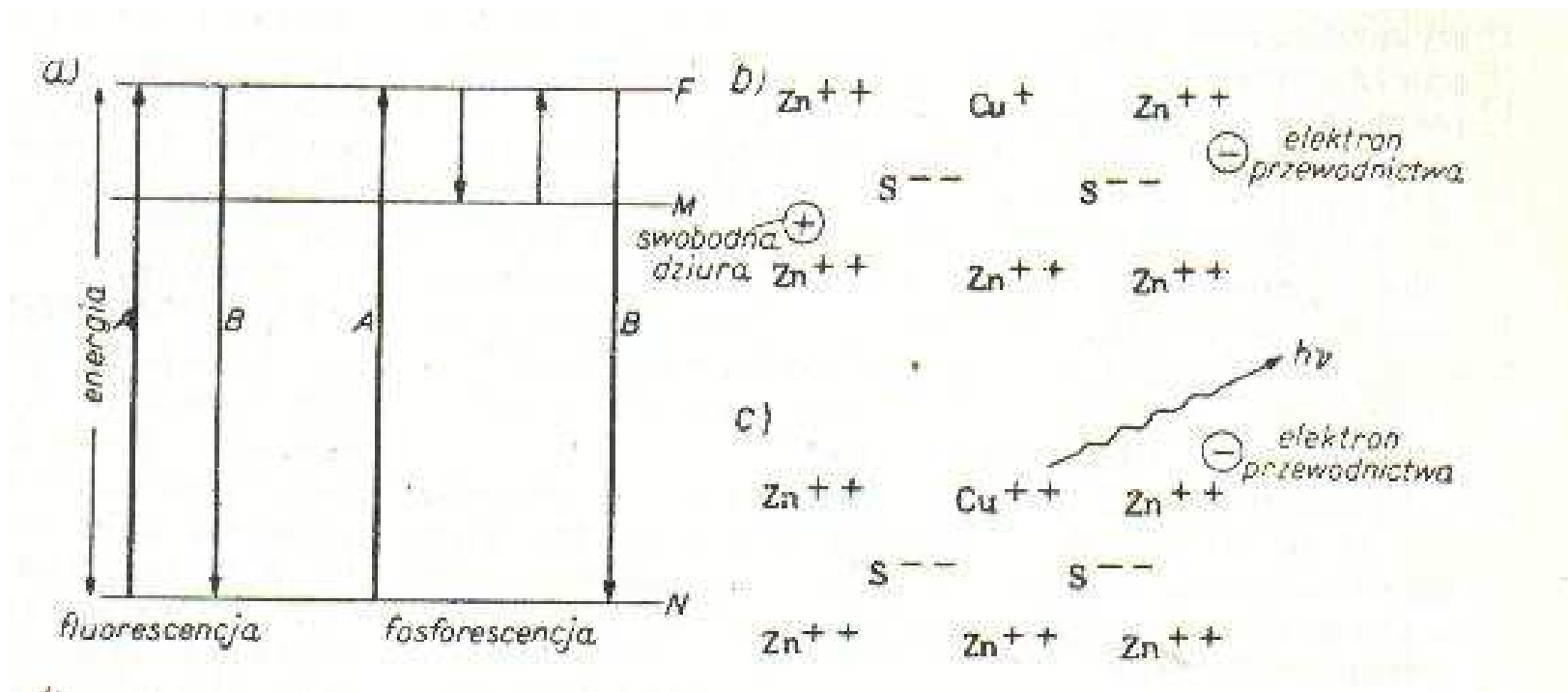
W warunkach laboratoryjnych jest to substancja o najsilniejszych właściwościach luminescencyjnych. Luminol jest hydrazylem kwasu 3-nitroftalowego.

Jego luminescencyjne właściwości odkryto w 1928 roku. Reakcja utleniania luminolu:



# Mechanizm działania luminoforów na przykładzie ZnS

Po wzbudzeniu cząsteczki część elektronów nie wraca do stanu podstawowego od razu (co odpowiadałoby fluorescencji), lecz osiągają stan metastabilny.



# Mechanizm działania luminoforów

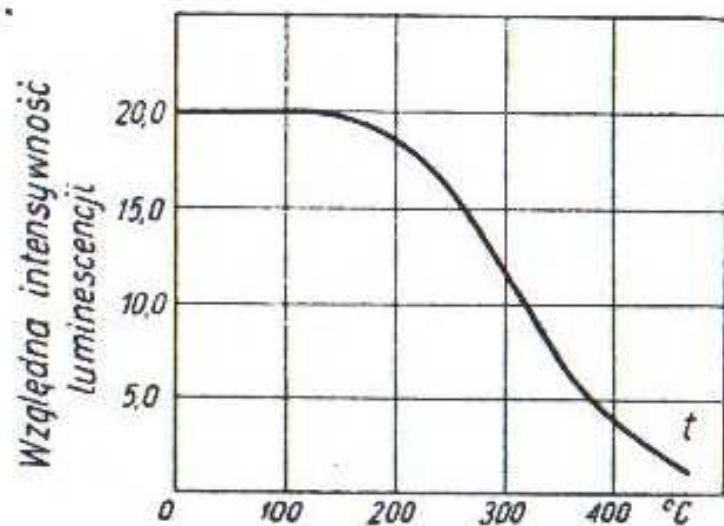
Z tego stanu elektrony mogą być przeniesione na wyższy poziom kosztem energii cieplnej i dopiero z niego może nastąpić powrót do stanu podstawowego z emisją światła.

Obecność aktywatora - domieszki w kryształach jest często korzystna, gdyż taki obcy atom może się jonizować dostarczając dziur. Dziura taka z elektronem przewodnictwa może ulegać rekombinacji, czemu towarzyszy emisja fotonu.

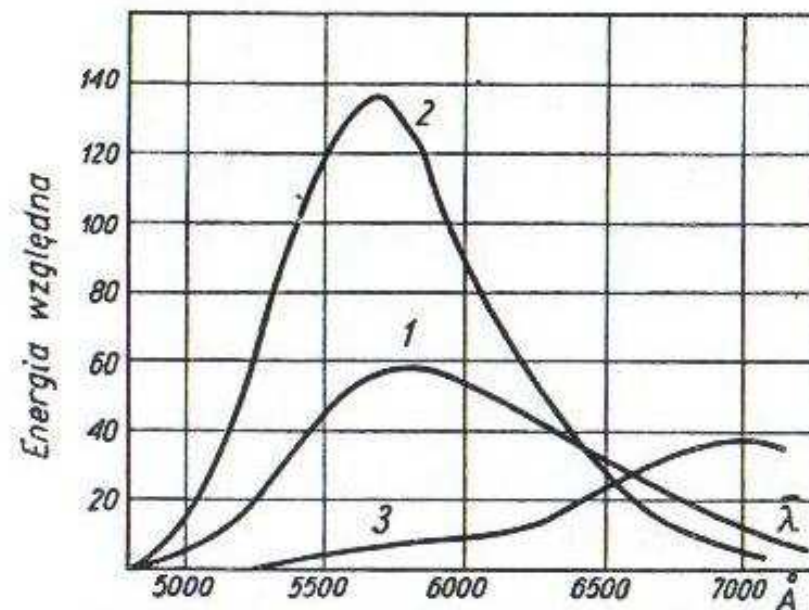
Atom domieszki stanowi tzw. centrum świecenia lub centrum emisji.

# Mechanizm działania luminoforów

Widmo świecenia zależy od aktywatora, zaś czas wygasania (poświaty) zależy od ilości defektów w strukturze - pułapek.



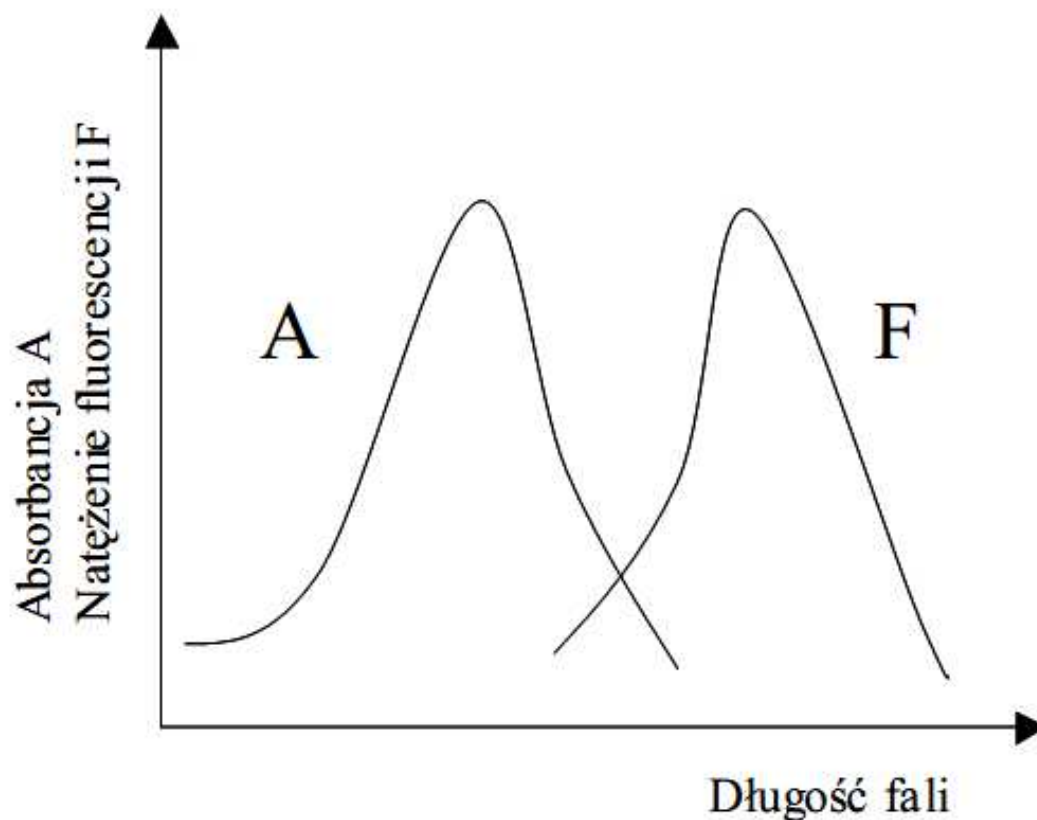
Rys. 232. Zależność wydajności świetlnej luminescencji ZnS-CdS luminofora od temperatury



Rys. 235. Charakterystyka widmowa świecenia luminoforów ZnS·CdS  
1 — bez aktywatora, 2 — aktywowany 0,0001% Ag, 3 — aktywowany 0,02% Cu

# Podstawowe charakterystyki luminescencji

Świecenie roztworów charakteryzują cztery zasadnicze cechy: widma absorpcji i emisji, wydajność, czas trwania (czas zaniku świecenia) oraz anizotropia emisji (polaryzacja).



# Podstawowe charakterystyki luminescencji

Moment przejścia wyznacza liczbę zachodzących procesów emisji i absorpcji w jednostce czasu pomiędzy stanami podstawowymi i wzbudzonymi.

$$\vec{D}_{mn} = \int \varphi_m^* \vec{D} \varphi_n d\tau \quad d_i = \sum_i r_i q_i$$

Moment przejścia jest wektorem, który dla określonego przejścia elektronowego w drobinie ma określony kierunek.

Przejście, którego moment jest bliski zeru określa się jako przejście wzbronione.

Prawdopodobieństwo przejścia, które determinuje intensywność pasma, zależy od kwadratu wartości bezwzględnej momentu przejścia.  $p_{pr} \sim |D_{mn}|^2$

Prawdopodobieństwo wzbudzenia zależy od kwadratu kąta pomiędzy momentami przejścia absorpcji i emisji

$$p_{wz} \sim \cos^2 \alpha, \text{ gdzie } \alpha = \angle (D_a, D_e)$$

# Podstawowe charakterystyki luminescencji

$$\Phi_f = \frac{I_f}{I_a}$$

gdzie:  $\Phi_f$  – wydajność kwantowa fluorescencji

$I_f$  – natężenie promieniowania emisji

$I_a$  – natężenie promieniowania  
wzbudzającego

Związek chemiczny	$\Phi_f$
9-aminoakrydyna (woda)	0,98
9-aminoakrydyna (etanol)	0,99
fluoresceina (0,1 N NaOH)	0,92
tryptaflawina (woda)	0,54
antracen (benzen)	0,29
antracen (heksan)	0,33

Prawo Wawiłowa:

Wydajność kwantowa fluorescencji nie zależy od długości fali światła wzbudzającego.

Wydajność kwantowa dla wielu roztworów barwników szybko maleje wraz ze wzrostem długości fali światła wzbudzającego.

Czym większe stężenie w roztworach barwników, tym silniejszy spadek wydajności kwantowej.

Zwiększenie temperatury roztworu powoduje wzrost wydajności.



# Wydajność kwantowa

Wydajność kwantowa określa część energii reakcji, która jest wypromieniowywana w postaci światła, a tym samym określa prawdopodobieństwo zajścia emisji promienistej.

Wydajność kwantowa jest równa jedności, gdy zajściu jednego elementarnego aktu reakcji towarzyszy emisja jednego kwantu światła. W środowisku wodnym wynosi ona zaledwie ok. 0,1%, w rozpuszczalnikach organicznych ok. 1%, natomiast reakcja enzymatycznego utleniania lucyferyny przekracza 90% wydajności kwantowej, co oznacza, że prawie cała energia reakcji jest wypromieniowywana w postaci światła.

# Podstawowe charakterystyki luminescencji

Anizotropia emisji opiera się na następujących założeniach:

1. Nie istnieją zależności fazowe między światłem wzbudzającym fotoluminescencję roztworu i światłem emitowanym przez drobiny luminezujące.
2. Nie istnieją zależności fazowe pomiędzy światłem emitowanym przez różne drobiny.
3. Kierunek momentu przejścia odpowiedzialnego za emisję nie zależy od sposobu wzbudzenia. Natomiast zależy wyłącznie od stanów drobiny, pomiędzy którymi zachodzi przejście.

# Anizotropia emisji

$$r = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + 2I_{\perp}}, \quad - \text{ anizotropia emisji}$$

Mechanizm zaniku fluorescencji opisuje funkcja:

$$I(t) = I_o \exp(-t / \tau)$$

Doświadczalnie wyznaczona anizotropia emisji  $r(t, n, T)$  zależy od wielu statystycznie niezależnych czynników i można ją przedstawić jako:

$$r(t, n, T) = r_o W_r(t, T) W_1(t, n)$$

Występuje także graniczna wartość anizotropii emisji:

$$r_o = 0,6 \cos^2 \alpha - 0,2 \quad -0,2 < r_o < 0,4$$

# Anizotropia emisji

Maksymalną anizotropię fluorescencji otrzymujemy wtedy, gdy nie występują żadne czynniki depolaryzujące.

Do tych czynników zalicza się:

- drgania torsyjne molekuł,
- obroty termiczne drobin
- migrację energii wzbudzenia pomiędzy drobinami,
- fluorescencję wtórną.

$$6D = \frac{k_B T}{V \eta}$$

równanie dyfuzji opisujące bronowskie ruchy rotacyjne luminezujących molekuł.

# Anizotropia emisji

Lepkość - opór jaki występuje podczas ruchu jednych części (warstw) ośrodka względem innych:  $\eta = \frac{F}{S \frac{dv}{dz}}$

W wyniku wzbudzenia, gdy  $t = 0$  anizotropia fluorescencji zanika wykładniczo:

$$r(t) = r_0 e^{-6Dt}$$

Pomiary anizotropii wykonuje się często przy ciągłym naświetlaniu. Wówczas liczy się średnią czasową wartość funkcji  $r(t)$ :  $\langle r \rangle = \frac{\int_0^{\infty} r(t) I(t) dt}{\int_0^{\infty} I(t) dt} = \frac{r_0}{1 + 6D\tau}$

Równanie Perrina:

$$\frac{r_0}{\langle r \rangle} = 1 + \frac{\tau}{\tau_D}$$

$$\tau_D = \frac{1}{6D} = \frac{V\eta}{k_B T}$$

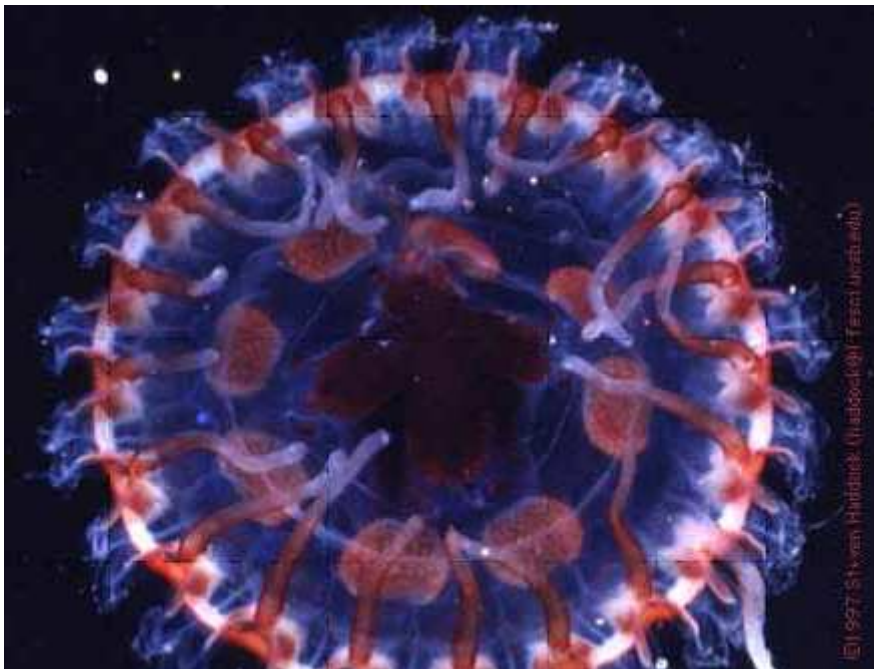
czas relaksacji  
rotacyjnej molekuł  
luminezujących

# Luminescencja w przyrodzie

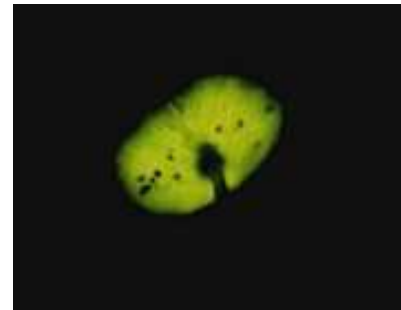
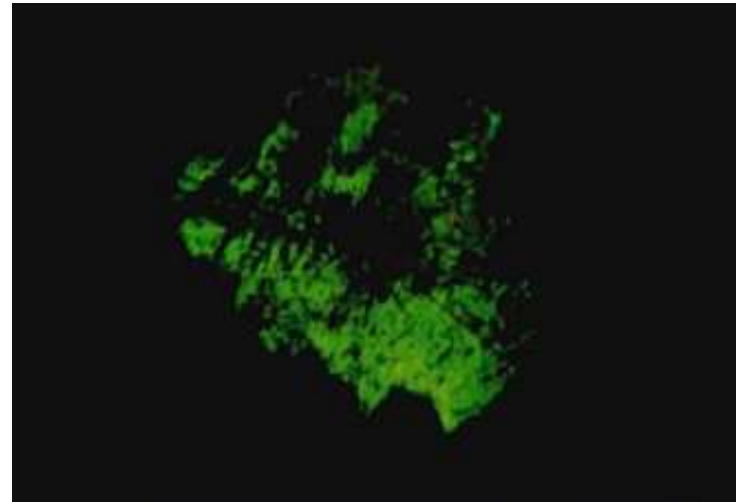
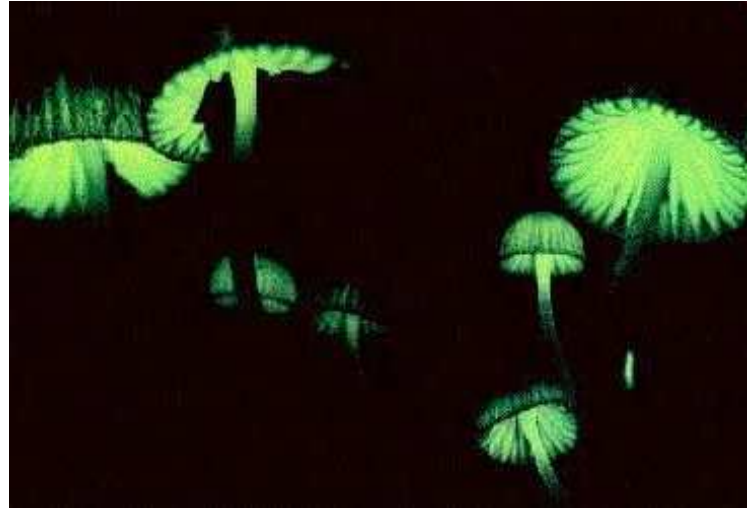


Tajemnice zwierząt

# Świeca meduzy

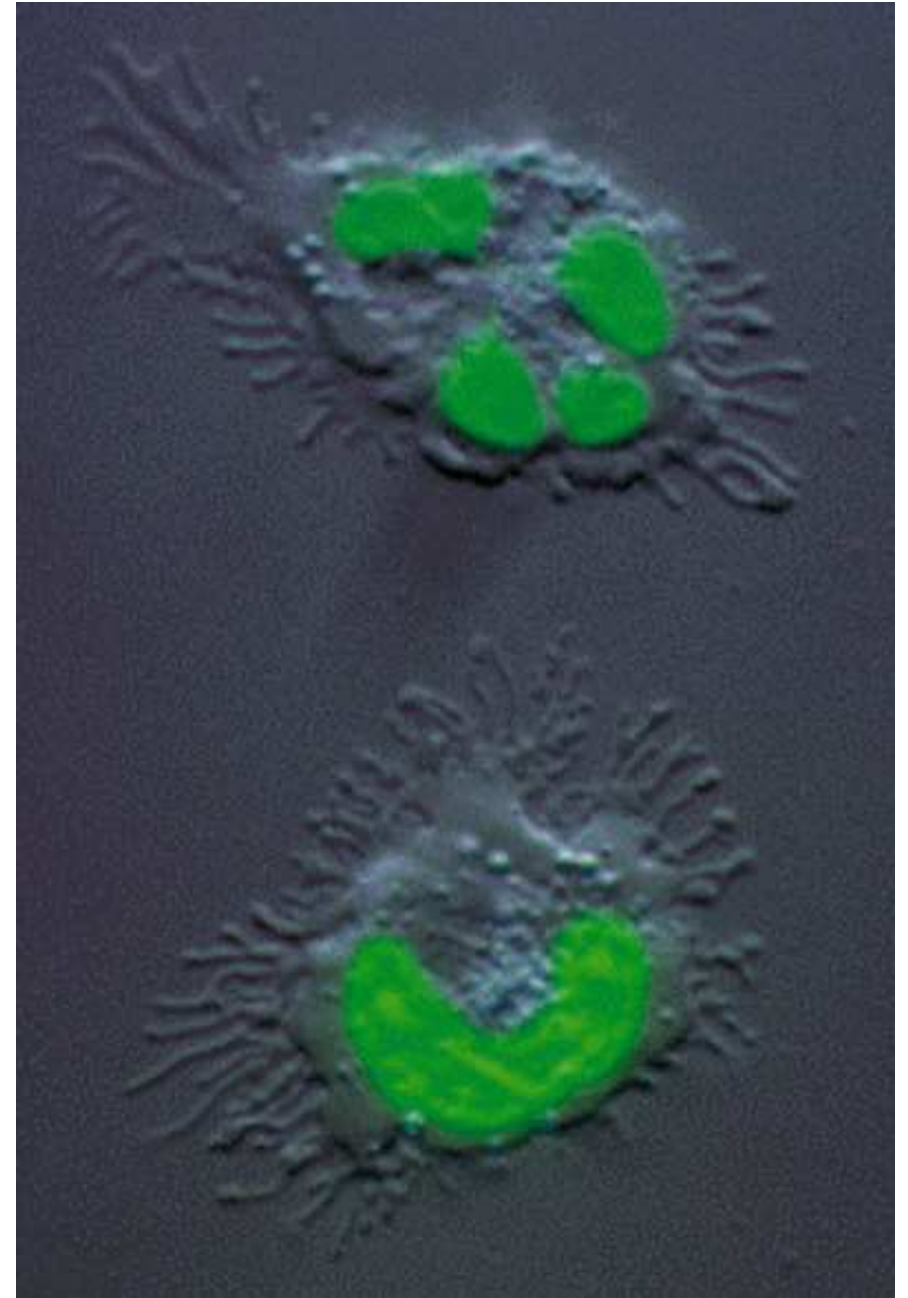
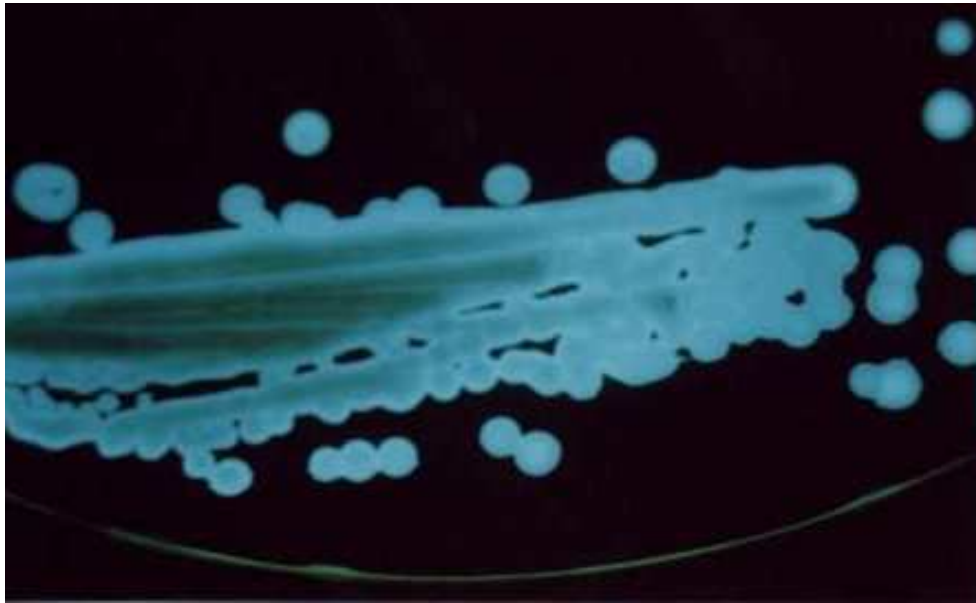
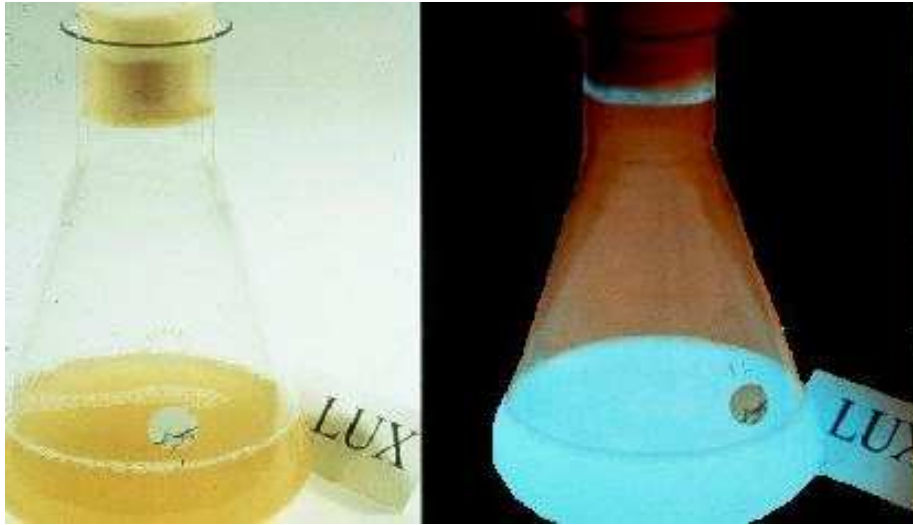


# Świecające grzyby

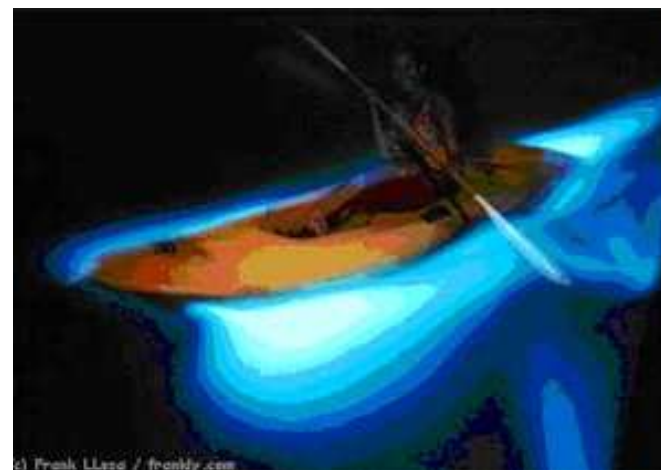
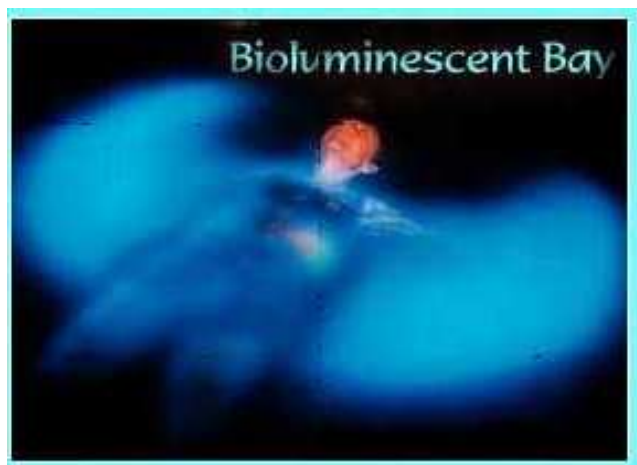
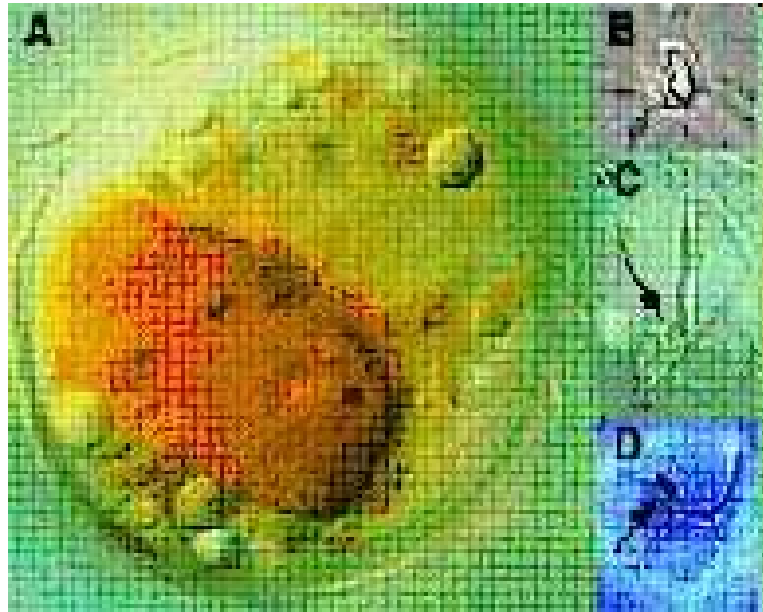




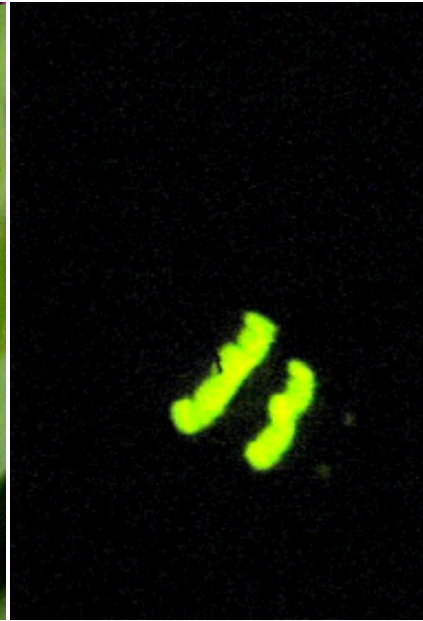
# Świeca bakterie



# Świecące glony



# Świecące owady



# Zastosowanie luminescencji

Luminoforescencja stosuje się w licznikach scyntylicyjnych, lampach fluorescencyjnych, oscyloskopowych, jarzeniowych, do produkcji farb malarskich i drukarskich, mas fosforyzujących (zastępujących trujący fosfor biały), do pokrywania znaków drogowych itp.

Zjawisko fotoluminescencji wykorzystuje się między innymi do poszukiwania minerałów i ich złóż w warunkach terenowych.

# Zastosowanie luminescencji



W typowej lampie jarzeniowej rura wyładowcza wypełniona jest parami rtęci. Kiedy prąd elektryczny płynie przez pary rtęci, zaczyna wydobywać się promieniowanie ultrafioletowe.

Promieniowanie pada na luminofor, którym pokryta jest rura od wewnątrz, i pobudza go do świecenia przez fluorescencję.

Promieniowanie UVC wykorzystuje się na przykład w warunkach laboratoryjnych do sterylizacji czyli odkażania i zabijania chorobotwórczych mikroorganizmów jak np. bakterii.

# Zastosowanie luminescencji

Zjawisko fluorescencji wykorzystuje się m. in. w:

- spektrofluorymetrii,
- mikroskopii fluorescencyjnej,
- mikroskopia konfokalna,
- cytofluorymetria przepływowa.

Wykorzystanie anizotropii fluorescencji:

- badania płynności błony,
- wyznaczenie szybkości transportu.

# Zastosowanie luminescencji

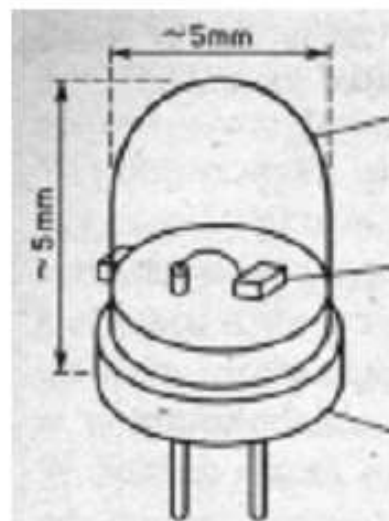
Chemiluminescencja znajduje zastosowanie np. w niektórych metodach detekcji HPLC (wysokosprawnej chromatografii cieczowej), elektroforezie kapilarnej CE, technikach przepływowych. Ponadto chemiczne latarki (np. typu Cyalume) znajdują zastosowanie w ratownictwie, grotolastwie, policji i wojsku, takie latarki mogą świecić nawet 12h.

Elektroluminescencja wykorzystywana bywa m.in. w lampach jarzeniowych, kondensatorach elektroluminescencyjnych, w przetwornikach obrazu oraz w urządzeniach pamięciowych.

# LED – dioda elektroluminescencyjna



Dioda elektroluminescencyjna wykonana jest z małego kawałka monokrystalicznego półprzewodnika, w którym wytworzono złącze p–n przymocowane do podstawki z doprowadzeniami, pokrytej osłoną z żywicy zwykle w kształcie kuli.



**Pokrywka z przezroczystej żywicy**

**Płytkę półprzewodnika ze złączem emitującym promieniowanie**

**Podstawka**



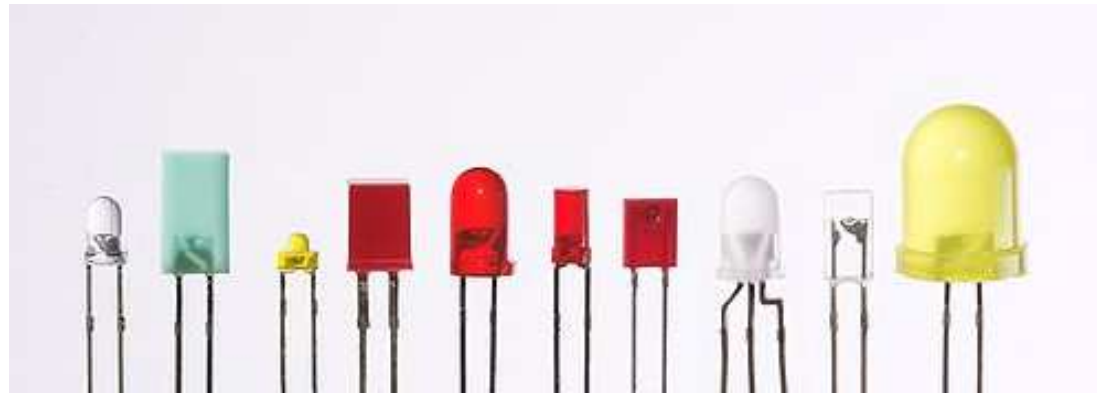
# **LED – dioda elektroluminescencyjna**

Działanie diody LED opiera się na zjawisku rekombinacji promienistej, tj. przeskoku elektronu z wyższego poziomu energetycznego na niższy i oddaniu energii w postaci promieniowania. Jest to zjawisko luminescencji, która w przypadku LED, występuje pod wpływem przepływu prądu w diodzie p-n, spolaryzowanej w kierunku przewodzenia i dlatego nazywa się elektroluminescencją, a dioda świecąca diodą elektroluminescencyjną.

# LED – dioda elektroluminescencyjna

Materiał	$E_g [eV]$	Domieszka	Zakres
$GaAs$	1.443	$Si$	IR
$GaP$	2.26	$N$	Zielony
$GaP$	2.26	$N, N$	Żółty
$GaP$	2.26	$Zn, O$	Czerwony
$GaAs_{0.6}P_{0.4}$	2.1		Czerwony
$GaAs_{0.35}P_{0.65}$	2.1	$N$	Pomarańczowy
$GaAs_{0.15}P_{0.85}$	2.1	$N$	Żółty
$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	2.1	$Zn$	Czerwony
$Ga_xAl_{1-x}As (1 < x < 0.7)$	2.1	$Si$	IR

# LED – dioda elektroluminescencyjna



- **IR** – emitujące promieniowanie podczerwone – wykorzystywane w łączach światłowodowych, a także w urządzeniach zdalnego sterowania.
- **HBLED**, *High Brightness LED* – diody o wysokiej jasności świecenia; za takie uważa się, których jasność przekracza 0,2 cd; znajdują one zastosowanie w miejscach, gdzie zwykle używa się tradycyjnych źródeł światła – w sygnalizacji ulicznej, w oświetleniu pojazdów, w latarkach.
- **RGB LED** – dioda mająca struktury do generowania trzech podstawowych barw (czerwony, zielony, niebieski), a co za tym idzie, przez możliwość ich mieszania, praktycznie dowolnej barwy.
- **RGBA LED** – rozszerzenie struktury RGB o dodatkową diodę o kolorze bursztynowym (ang. Amber) powiększającą osiągalną przestrzeń barw.
- **warm white LED** – LED generująca światło bardzo zbliżone do światła żarówki (temperatura barwy 3500 K, odpowiednio dobrana jaskrawość).

# LED – dioda elektroluminescencyjna

Diody LED stanowią w obecnej chwili najbardziej trwałe źródła światła. Niektóre diody LED mogą świecić nieprzerwanie nawet do 100 000 godzin!!! Przy standardowej eksploatacji oznacza to używanie diody przez okres ponad 10 lat. Parametrem określającym żywotność Led-ów jest czas, w jakim następuje 50-procentowy spadek strumienia świetlnego w stosunku do stanu początkowego. Prawidłowo użytkowane diody nie przepalają się gwałtownie, lecz ich strumień świetlny stopniowo słabnie.

# Wielkości fizyczne w dziedzinie LED

- **strumień świetlny** emitowany przez źródło światła mierzony w lumenach [lm], to całkowity energetyczny efekt jego promieniowania widzialnego (o zakresie długości fali od 380 do 780 nm), równoważny mocy;
- **światłość**, podawana w kandelach [cd], to strumień świetlny odniesiony do danego kąta bryłowego;
- **luminancja**, której jednostką jest kandela na metr kwadratowy [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ], to światłość odniesiona do powierzchni;
- **natężenie oświetlenia**, określane w luksach [lx], to powierzchniowa gęstość strumienia świetlnego (strumień odniesiony do powierzchni);
- **skuteczność oświetlenia** źródła, wyrażona w lumenach na wat [ $\text{lm}/\text{W}$ ], to strumień świetlny odniesiony do pobranej przez jego źródło mocy elektrycznej.

# Bibliografia

- [1]. A. Kawski, „*Fotoluminescencja roztworów*”, PWN, Warszawa 1992;
- [2]. A. Kawski, A. Kubicki, „*Aparatura i metody badań luminescencji*”, Gdańsk 1987;
- [3]. J. I. Pankove, „*Zjawiska optyczne w półprzewodnikach*”, WNT, Warszawa 1974;
- [4]. <http://vmc.org.pl>;
- [5]. <http://www.neoled.pl/technika-led/>;
- [6]. <http://nauka.katalogi.pl/bioluminescencja>;

# Bibliografia

- [7]. P. Turbak, T. Winiarski, „*Luminescencja cienkich warstw i kryształów*” – instrukcja do ćwiczenia;
- [8]. <http://www.wikipedia.pl>;
- [9]. <http://www.sol3.eu>;
- [10]. prof. A. Balter, „*Pomiar stopnia polaryzacji luminescencji cząsteczek organicznych w zależności od lepkości roztworu*” – instrukcja do ćwiczenia z II PF;
- [11]. <http://geogut.pl/luminescencja>.