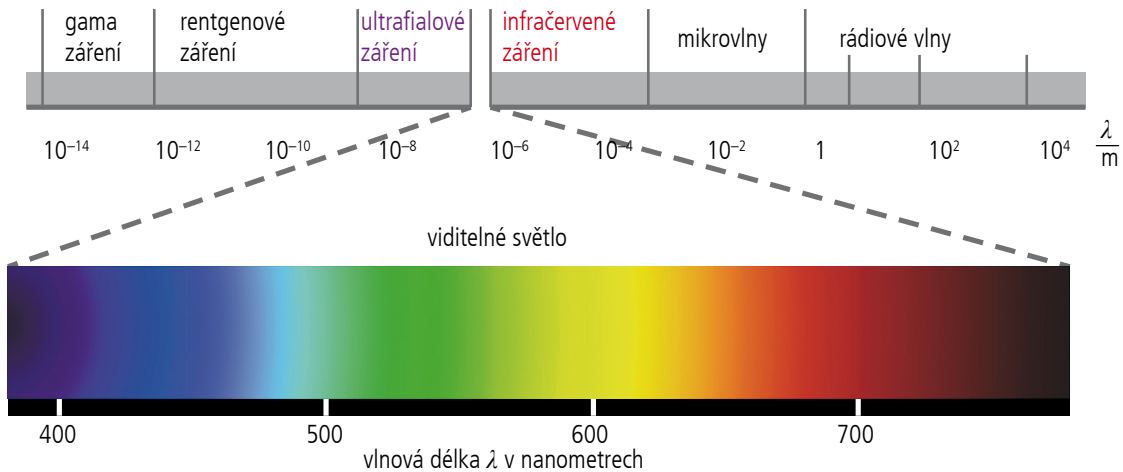




Citlivost oka ve světle kvantové mechaniky

Jana Pekařová¹, Gymnázium J. K. Tyla v Hradci Králové

Viditelná oblast spektra slunečního záření je přibližně 380 nm až 780 nm (obr. 1). Na to, proč právě tuto oblast vidíme, lze v hrubých rysech odpovědět pomocí základních poznatků fyziky mikrosvěta, uváděných v gymnaziálních učebnicích [1]. Zrakovými receptory (fotoreceptory) v lidském oku jsou tyčinky a čípky. Tyčinky umožňují černobílé vidění, proto se uplatňují zejména za šera a za tmy. Čípky pak při intenzivnějším světle zajišťují vidění barevné. Pro zodpovězení uvedené otázky se budeme věnovat tyčinkám, u čípků pak jde o obdobný princip.

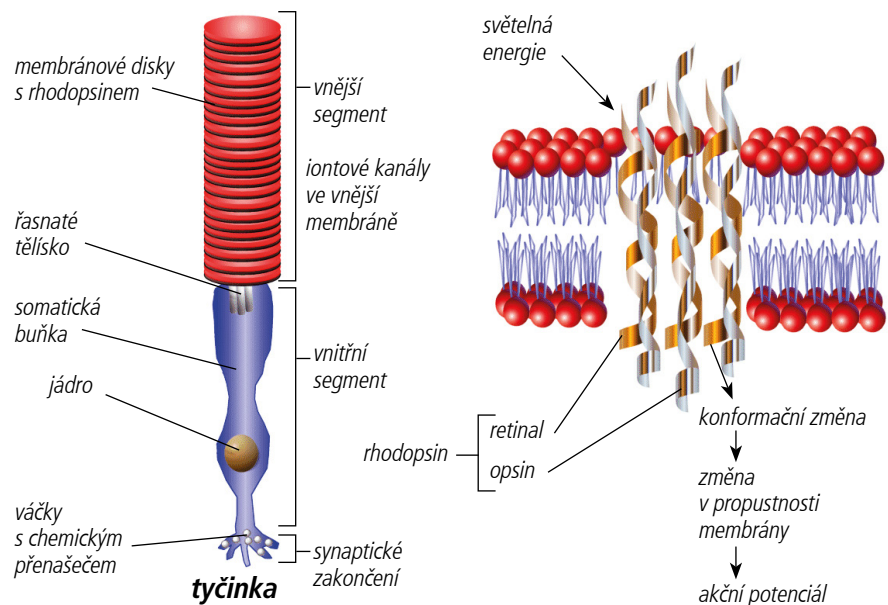


Obr. 1 – spektrum záření (podle [7])

Tyčinky obsahují bílkovinu rhodopsin, pigment citlivý na světlo. Při adaptaci na tmu se koncentrace rhodopsinu v tyčinkách zvyšuje. Rhodopsin vzniká syntézou bezbarvého proteinu opsinu a derivátu vitamínu A, retinalu. Proto je důležitou prevencí proti šerosleposti konzumace potravy, z níž může organismus potřebný vitamín A získat [2]. Rhodopsin je více či méně citlivý na všechny vlnové délky viditelného spektra. Maximum citlivosti se u něj pohybuje kolem 500 nm [3]. Stavbu tyčinky a procesy, které se v ní odehrávají, popsané v následujícím textu, znázorňuje obrázek 2.

Čím je vyvolán zrakový vjem? Do oka pronikají fotony světelného záření a každý z nich způsobí konformační změnu molekuly rhodopsinu, což je zrakový pigment tyčinek. Konformační změna ovlivní klidový potenciál buňky a vzápětí se vytvoří elektrický signál, který je přenášen zrakovými nervy do

Čím je vyvolán zrakový vjem? Do oka pronikají fotony světelného záření a každý z nich způsobí konformační změnu molekuly rhodopsinu, což je zrakový pigment tyčinek. Konformační změna ovlivní klidový potenciál buňky a vzápětí se vytvoří elektrický signál, který je přenášen zrakovými nervy do



Obr. 2 – stavba tyčinky a schematické znázornění vzniku akčního potenciálu absorpcí světelného záření retinalovou částí rhodopsinu (podle [4])

¹ pekarova@gjkt.cz

mozku. V mozku je pak zpracován a vytvořen obraz pozorovaného předmětu. Základem pro odstartování celého řetězce dějů tedy je, aby molekula rhodopsinu absorbovala foton (a tím mohlo dojít ke konformační změně). Kvantová fyzika vymezuje, při jaké vlnové délce přijímaného elektromagnetického záření může k absorpci fotonu dojít. Klade požadavek na energii fotonu.

Nejprve dochází k absorpci fotonu retinalovou částí rhodopsinu. Přijetí fotonu způsobí změnu konfigurace retinalu a ta pak vyvolá konformační změnu celého proteinu (molekuly rhodopsinu). Retinal si můžeme představit jako jednorozměrnou potenciálovou jámu o šířce L (odpovídající délce uhlíkového řetězce retinalu), v níž je „uvězněn“ elektron [5].

V tomto případě musíme vzít v úvahu, že elektron je částicí, jejíž pohyb je omezen jen na určitou část prostoru, může proto nabývat jen určitých dovolených hodnot energie, tj. energie je kvantována. Pro možné hodnoty energie částice v jednorozměrné potenciálové jámě v idealizovaném případě platí [1]

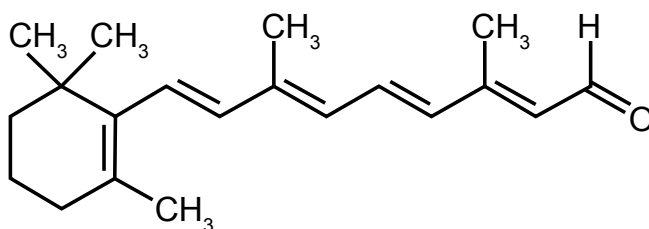
$$E_n = \frac{h^2}{8 \cdot m \cdot L^2} \cdot n^2, \quad (1)$$

kde h označuje Planckovu konstantu, m hmotnost částice (v našem případě elektronu) a n je přirozené číslo. Elektron může získat energii pohlcením fotonu jen tehdy, může-li přitom přejít z jedné hladiny energie na druhou. Jakou energii musí mít foton, aby mohl být absorbován molekulou rhodopsinu?

Pokud řetězec obsahuje N atomů uhlíku, N elektronů v základním stavu zaplní prvních $\frac{N}{2}$ dostupných hladin energie (na každé hladině mohou být jen dva elektrony, neboť pro obsazování hladin platí Pauliho princip) a první neobsazená hladina odpovídá $\frac{N}{2} + 1$. Minimální energie potřebná k přechodu elektronu ze základního stavu na první neobsazenou hladinu potom je

$$E = E_{\frac{N}{2}+1} - E_{\frac{N}{2}} = \frac{h^2}{8 \cdot m \cdot L^2} \cdot \left[\left(\frac{N}{2} + 1 \right)^2 - \left(\frac{N}{2} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Vyhledáme-li v odborné literatuře či na vhodných internetových stránkách strukturní vzorec retinalu (obr. 3), můžeme do vzorce dosadit vhodné hodnoty. Obdržený výsledek pak použijeme pro výpočet odpovídající energie.



Obr. 3 – strukturní vzorec retinalu (podle [6])

Ze strukturního vzorce určíme délku L řetězce. Délka jednoduché vazby mezi uhlíky je 0,15 nm a dvojně 0,13 nm. Vzdálenost uhlíku a kyslíku je 0,12 nm. Sečtením jednotlivých vzdáleností mezi atomy dojdeme k délce řetězce $L = 1,39 \text{ nm}$.² Počet N uhlíků v řetězci je 10.³ Dosadíme do (2) a dostaneme

2 V řetězci je 5 jednoduchých vazeb o celkové délce $5 \cdot 0,15 \text{ nm}$, tj. 0,75 nm. Dvojně vazby mezi uhlíky jsou v řetězci 4, dávající celkem $4 \cdot 0,13 \text{ nm}$, tj. 0,52 nm. Dvojnou vazbu mezi uhlíkem a kyslíkem obsahuje řetězec jednu, a její délka je 0,12 nm. Délka celého řetězce pak je $(0,75 + 0,52 + 0,12) \text{ nm}$, tedy 1,39 nm.

3 Pozn. redakce: Uhlíkový řetězec znázorněný střídáním jednoduché a dvojně vazby je ve skutečnosti tvořen tzv. konjugovanou vazbou. U ní jsou vzdálenosti všech atomů stejné a všechny vazební elektrony jsou rovnocenné. Každý atom přispívá k této vazbě jedním elektronem delokalizovaným podél celého řetězce. Jde o analogickou situaci jako u benzenového jádra s tím rozdílem, že u benzenu a dalších arenů je řetězec uhlíkových atomů stočen do kruhu.



$$E = \frac{(6,626 \cdot 10^{-34})^2}{8 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,39 \cdot 10^{-9})^2} \cdot \left[\left(\frac{10}{2} + 1 \right)^2 - \left(\frac{10}{2} \right)^2 \right] \text{ J},$$

$$E = 3,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Vlnová délka pro foton s touto energií pak je podle definice $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$,

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E}, \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,43 \cdot 10^{-19}} \text{ m},$$

$$\lambda \doteq 580 \text{ nm}.$$

Výsledná vlnová délka neodpovídá přesně skutečné vlnové délce, kterou světločivné orgány našeho oka nejlépe absorbují. Připomeňme si, že v literatuře uváděná hodnota maximální spektrální citlivosti tyčinek je v okolí 555 nm. Ovšem nezapomínejme, že jsme k výpočtu použili velmi zjednodušená přiblížení.

Použitá metoda odhadu velikosti vlnové délky záření absorbovaného vizuálním pigmentem je názorná pro pochopení určitých dějů probíhajících v tyčinkách nebo čípcích. To, jakou vlnovou délku světla zrakový pigment přijme, závisí na délce molekuly daného pigmentu (šířce potenciálové jámy). V tyčinkách a čípcích lidského oka však nedochází k vytváření takové chemické struktury, která by zachytila záření z oblastí mimo viditelné světlo (včetně infračervené anebo ultrafialové). Proto vidíme zhruba v intervalu 380 nm až 780 nm.

Literatura

- [1] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia – fyzika mikrosvěta*. Praha: Prometheus, 1994. 183 s.
- [2] *Vnímání barev*. Dostupné na internetu: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/publikace/Jancovic1.html>>
- [3] NOVOTNÝ, Ivan, HRUŠKA, Michal. *Biologie člověka*. Praha: Fortuna, 1995. 135 s.
- [4] *Eyes!* Dostupné na internetu: <<http://cas.bellarmino.edu/tietjen/images/Eyes!.htm>> [cit. 21. února 2008].
- [5] LECAR, Harold, NOSSAL, Ralph. *Molecular and Cell Biophysics*. Addison. Redwood City: Wesley Publishing Company, 1991. 307 s.
- [6] ŠKÁRKA, Bohumil, FERENČÍK, Miroslav. *Biochémiá*. Bratislava: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. 744 s.
- [7] *Princip fungování fotovoltaiiky*. Dostupné na internetu: <<http://www.czechsolar.cz/fotovoltaiika/princip-fungovani/>>

Poznámka: Obsah článku se stal součástí disertační práce autorky – PEKAŘOVÁ, Jana. *Biologie jako zdroj motivace ve výuce fyziky*: disertační práce. Hradec Králové: Univerzita Hradec Králové, Pedagogická fakulta, 2011. 173 s.