



**GYMNÁZIUM F. X. ŠALDY**

PŘEDMĚTOVÁ KOMISE FYSIKY

---

# Elektromagnetické spektrum

*Poznámky & ilustrace*

Gymnázium F. X. Šaldy • Honsoft

Verze 1.0 • listopad 2006

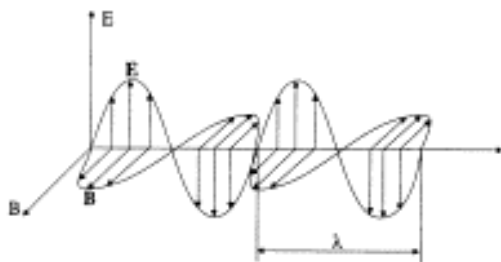
# ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ (ZÁŘENÍ)

**Elektromagnetické vlnění** (jinak: **elektromagnetické záření**) má dvě navzájem neoddelitelné složky. Elektrickou složku charakterizuje vektor intenzity elektrického pole **E**, magnetickou složku vektor magnetické indukce **B**. Vektory **E** a **B** jsou navzájem kolmé, mají souhlasnou fázi a jejich kmity probíhají kolmo ke směru, kterým se vlnění šíří.

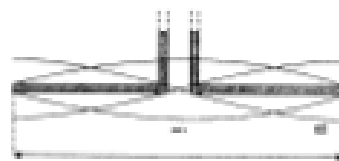
Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné a má vlastnosti vlnové (odraz, lom, interference, difrakce, polarizace) a kvantové (fotoelektrický jev). Šíří se vakuem rychlostí  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Mezi frekvencí kmitání, vlnovou délkou a rychlostí šíření je vztah:

$$c = \lambda \cdot f$$

📖 Zopakujte si pojmy související s vlnovou podstatou světla.



OBR. 1

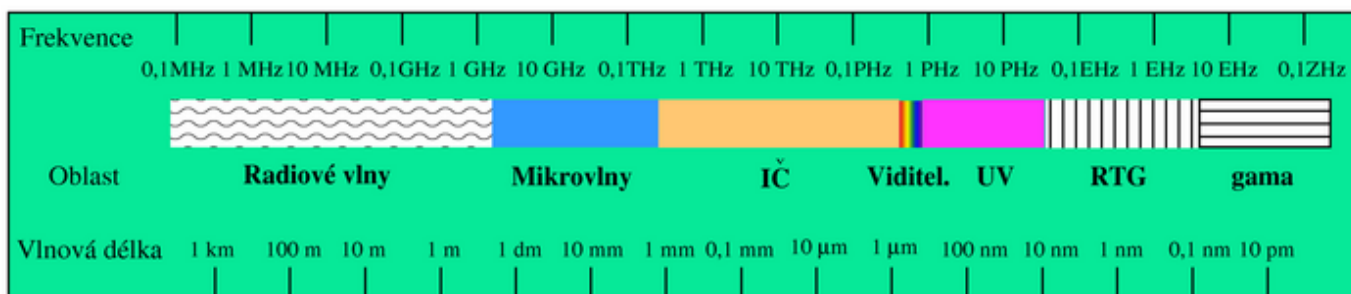


OBR. 2

# SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ

Elektromagnetická záření různých vlnových délek tvoří **spektrum elektromagnetického záření** (někdy zvané Maxwellova duha). Podle vlnové délky resp. frekvence rozlišujeme několik druhů elektromagnetického záření; jejich přehled je v OBR. 3–4.

Mezi jednotlivými druhy elektromagnetického záření není ostrá hranice, přechody mezi nimi jsou plynulé nebo se oblasti jednotlivých druhů záření i překrývají. Název vlnění určujeme totiž také podle původu, nikoli jen podle frekvence. Například některé záření gama může mít delší vlnovou délku než některé rentgenové záření. To je možné proto, že záření gama je jméno pro vlnění vzniklé při jaderném štěpení a jiných jaderných procesech, zatímco rentgenové záření vzniká jako brzdné záření či charakteristické záření elektronu (viz další výklad).



OBR. 3

# ROZHLASOVÉ VLNY (RADIOVÉ VLNY)

**Rozhlasové vlny (radiové vlny)** mají vlnové délky  $\lambda = 10^3 \text{ m}$  až  $10^{-1} \text{ m}$ , tedy 1 km až 1 dm. Zdrojem ráiových vln je elektromagnetický oscilátor. Do prostoru se vlnění dostává přes anténu – **elektromagnetický dipól** (OBR. 2). Kolem dipólu se vytvoří elektromagnetické pole se složkou elektrickou a magnetickou – šíří se prostorem a přenáší energii kmitů oscilátoru. Podrobněji byla problematika popsána v učivu o oscilačních obvodech.

Podle vlnové délky se rádiové vlny dělí na:

**Dlouhé vlny** (DV, LF) o frekvencích  $f = 150 - 300$  kHz, tedy vlnových délkách  $\lambda = 2000 - 1000$  m. Dlouhé vlny se šíří na velké vzdálenosti a lze je zachytit všude, i v údolích, kam se kratší vlnové délky nedostanou. Na dlouhých vlnách vysílá mj. ČRo1 Radiožurnál.

**Střední vlny** (SV, MW, AM):  $f = 0,5 - 2$  MHz;  $\lambda = 600 - 150$  m. Na středních vlnách vysílá tradičně ČRo2 Praha.

**Krátké vlny** (KV, HF) o frekvencích  $f = 6 - 20$  MHz a vlnových délkách  $\lambda = 50 - 15$  m se odrážejí od ionosféry, takže mají velký dosah. Byly (a jsou) proto používány k vysílání do cizích zemí (Svobodná Evropa, Hlas Ameriky, BBC). **Ionosféra** začíná ve výšce 60 – 80 km nad zemským povrchem, obsahuje určité množství molekul vzduchu rozštěpených na ionty a volné elektrony, proto se chová jako vodivá plocha. Stav ionosféry se mění vlivem slunečního záření, proto se mění i podmínky šíření krátkých vln v různých denních a nočních dobách.

**Velmi krátké vlny** (VKV, FM) o frekvencích  $f = 20 - 300$  MHz a vlnových délkách  $\lambda = 15 - 1$  m se používají k přenosu televizního signálu a stereofonního rozhlasového vysílání FM (87,5 – 108 MHz).

Vysílač a přijímač musí být přibližně v přímce, na které není překážka. (Proto se dnes používají satelity.) Pásmo se dělí na dvě části: Very High Frequency (VHF; o frekvencích 30 - 300 MHz, frekvenčně modulované rozhlasové vysílání a některé televizní kanály), Ultra High Frequency (UHF; o frekvencích 0,3 – 3 GHz; vysílají se na nich další televizní kanály). Na VKV vysílají dnes téměř všechny české rozhlasové stanice.

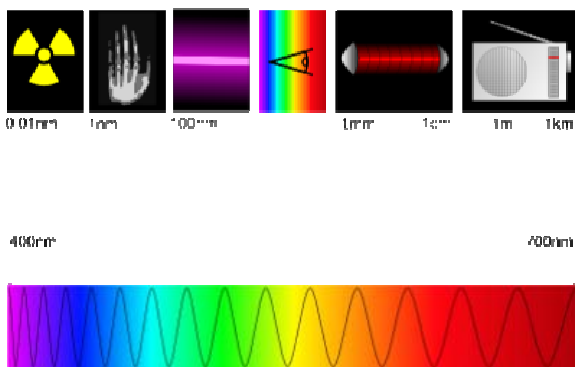
Poznámka o uvedených zkratkách: Na prvním místě uvádíme českou zkratku, která je utvořena podle vlnové délky (např. dlouhé vlny). Druhá zkratka je anglická; je zpravidla utvořena podle frekvence (dlouhým vlnám odpovídá nízká frekvence). Konečně zkratky AM resp. FM označují amplitudovou resp. frekvenční modulaci. Amplitudová modulace se používá na dlouhých, středních a krátkých vlnách; frekvenční modulace na velmi krátkých vlnách. Protože se však dnešní přijímače zpravidla již nevybavují tunerem pro DV a KV, užívá se těchto zkratek fakticky pro označení středních a velmi krátkých vln.

V pásmu na rozhraní rádiových vln a mikrovln jsou frekvence pro **mobilní síť GSM** (900 a 1800 MHz).

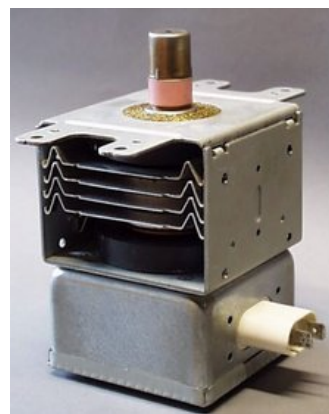
📖 **Fyzikální seminaristé!** Zopakujte si učivo o RLC obvodu a o elektromagnetické vlně, modulaci, televizi, rozhlasu, mobilních komunikacích. Prostudujte si prezentace svých kolegů ze semináře.

📖 **Fyzikální seminaristé!** Zopakujte si učivo o záření absolutně černého tělesa a přečtěte si tyto další informace:

Ve 30. letech 20. století zjistil inženýr Bellových laboratoří Karl Jansky pravidelné rušení na rádiových vlnách. Zdroj poruch zdánlivě obíhal kolem Země s periodou 23 h 56 min; Jansky zjistil, že zdroj leží kdesi ve středu Mléčné dráhy v souhvězdí Střelce. Astronomové jeho zjištění nevěnovali pozornost; teprve v 60. letech došlo k „rentgenovému mapování“ oblohy a bylo objeveno velké množství rádiových zdrojů. Problémem je, že vzhledem k velké vlnové délce záření je nutno pracovat s anténami velkých rozměrů. Takové má např. americká anténní soustava VLA v Novém Mexiku (19 km × 21 km × 21 km). V roce 1965 američtí radioastronomové A. Penzias a R. Wilson zjistili, že ze všech směrů ve vesmíru k nám rovnoměrně přichází slabé rádiové záření, jehož „teplota“ odpovídá asi 3 K. Ve skutečnosti jde o původně horké záření o teplotě 3000 K, ochlazené vinou rozpínání vesmíru. Ze studia tohoto záření lze odhadnout rozmístění objektů v dávném vesmíru. Autoři objevu byli oceněni Nobelovou cenou za fyziku (1978).



OBR. 4



OBR. 5

# MIKROVLNY

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny o vlnových délkách  $\lambda = 10^{-1} - 10^{-4}$  m, tedy 1 dm až 0,1 mm. Leží ve spektru mezi rádiovými vlnami a infračerveným zářením.

**Mikrovlnná trouba.** Mikrovlny jsou absorbovány molekulami tekutin, jež mají dipólový moment, zvláště vody; toho se využívá k ohřívání v mikrovlnné troubě. Mikrovlnné záření je v pokrmu schopno rozkmitat částice. Přitom mikrovlny pronikají dovnitř pokrmu, a tím dochází k relativně velmi rychlému zahřátí celku. Mikrovlnné záření je generováno pomocí magnetronu a vyzařováno do ohřívacího prostoru trouby. Ten má kovový povrch, kterým záření nemůže proniknout. Dvířka jsou pokryta kovovou mřížkou, jejíž otvory jsou mnohem menší než vlnová délka mikrovlnného záření, představuje proto stejnou překážku pro vlny jako plný kov. Ohřívací prostor má rozměry odpovídající celým násobkům poloviny vlnové délky použitého záření, takže dochází ke vzniku stojatého vlnění. K nejúčinnějšímu ohřevu proto dochází v kmitnách vlnění. Aby byl ohřev pokrmů rovnoměrnější, umísťují se zpravidla na otočný podnos; otáčení zajišťuje, že kmitny postupně procházejí různými místy pokrmu.

📖 Zopakujte si pojmy kmitna, uzel, stojaté vlnění.

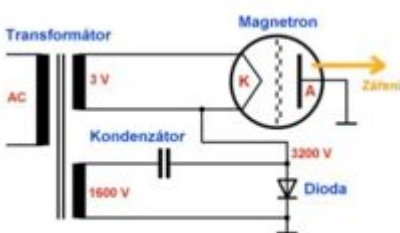
**Magnetron** je generátor mikrovlnného záření (OBR. 5, 6). V mikrovlnné troubě je to energetický zdroj, pomocí něhož jsou generovány elektromagnetické vlny zahřívající potraviny. Od druhé světové války je magnetron používán u některých druhů radarů. Základ magnetronu tvoří velmi silný permanentní magnet ve tvaru prstence. Tímto magnetickým prstencem je obklopena vakuová trubice s rezonančními komorami, uvnitř které je z jedné strany žhavicí katoda a z druhé vlnodod, který přenáší mikrovlnné záření do požadovaného směru.

Na katodu je přiváděno žhavicí napětí řádově několik voltů (3 V), zatímco na anodu magnetronu napětí v řádu kilovoltů (3200 V). Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou přitahovány směrem k anodě, ale silné magnetické pole mění jejich trajektorii na kruhovou. Proud elektronů indukuje v rezonačních komorách vysokofrekvenční kmity, které jsou odváděny vlnododem.

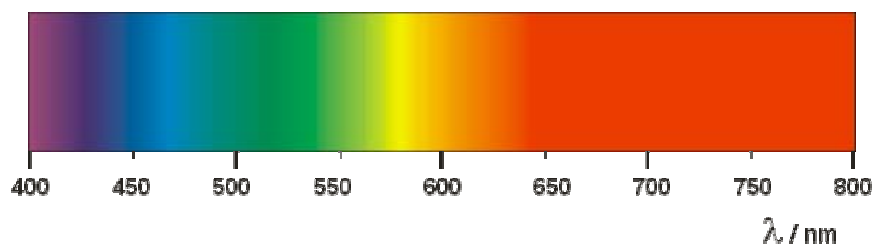
Oscilace magnetronu jako první pozoroval a popsal již ve 20. letech Augustin Žáček, profesor Univerzity Karlovy; první jednoduché dvoupólové magnetrony však byly vyrobeny Albertem Hullem ve firmě General Electric roku 1920. Vývoji pomohli Britové v druhé světové válce díky vynálezu radaru.

Mikrovlny se rovněž využívají pro bezdrátovou komunikaci zvanou **Wi-Fi**.

Pokud je živá tkáň vystavena účinkům tohoto záření, dochází v ní k nadměrnému vývoji tepla v důsledku rozkmitání molekul vody a vzniklé teplo může tkáň poškodit. Jako první zaznamená mikrovlnné účinky oko, kdy vystavený jedinec přestává již po chvíli vidět v důsledku zahřívání sklivce. Dále dochází k poškození vnitřních orgánů bohatých na vodu, v poslední fázi dochází k popálení kůže a celkové destrukci tkání. Bezpečnou ochranou před mikrovlnným zářením je vrstva vody – vodní bariéra.



OBR. 6



OBR. 7

# INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ

**Infračervené záření** charakterizováno vlnovými délkami  $\lambda = 10^{-4} - 7,6 \cdot 10^{-7}$  m, tedy 0,1 mm – 760 nm. Někdy je označováno IR (infrared) záření nebo tepelné záření. Pomocí infračerveného záření se šíří teplo, a to i vakuem (zahřívání povrchu Země slunečním zářením). Původem IR záření jsou změny

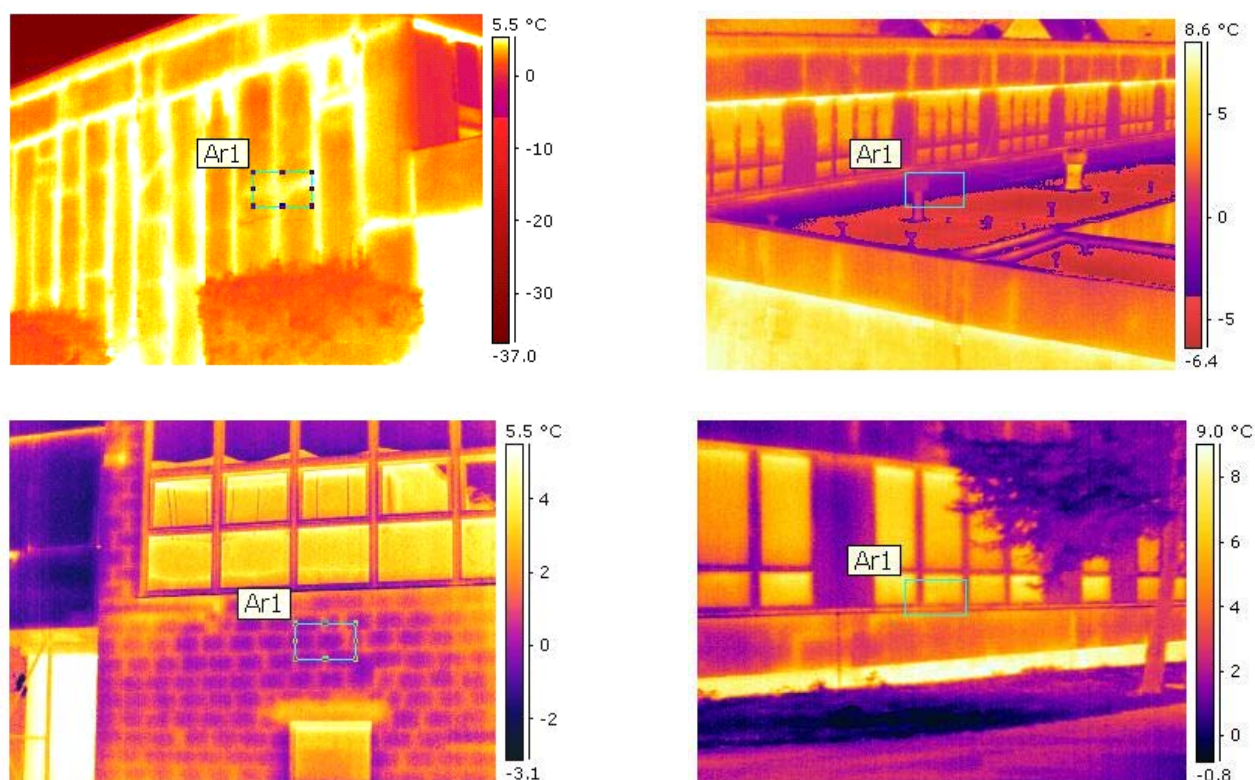
elektromagnetického pole vyvolané pohybem molekul. Pohyb molekul je způsoben vnitřní energií – závisí tedy na teplotě.

Vlastnosti:

1. Není viditelné okem. Využívá se v **dálkových ovladačích**, protože neruší televizní či rozhlasový signál a zároveň záření nevnímáme. Infračervené záření z dálkových ovladačů vysílají LED diody.
2. Proniká **mlhou** a znečištěným ovzduším. Lze užít k „vidění v mlze“ (infralokatory).
3. Pomocí vhodných přístrojů lze (lidským okem neviditelné IR záření) zachytit: **brýle pro noční vidění**, funkce **videokamer pro noční natáčení** (jako osvětlení slouží IR záření, okem vnímáme jen tmou, ale kamera zachytí zřetelně osvětlené předměty; podobně infračervenými brýlemi lze pozorovat v naprosté tmě). Snímky objektů v oblasti IR záření slouží také k posuzování stavu tepelné izolace objektů.

Takovému posouzení budovy gymnázia F. X. Šaldy se věnuje práce Arnošta Hlaváčka [Hla06], z níž je i převzata kolekce termogramů v OBR. 8. Autor v práci uvádí: „Termografické měření bylo uskutečněno infračervenou kamerou FLIR Therma CAM B4 v průběhu října. Měření musí probíhat nejlépe v době, kdy je největší rozdíl teplot uvnitř a vně budovy. Na termogramech jsou uvedeny charakteristické detaily úniku tepla zjištěné při termografickém měření. První dva termogramy ukazují obrovské úniky tepla kolem panelů štítu tělocvičny a nad okny tělocvičny a také v ploše ozdobné mozaiky u vchody do budovy. Další termogram ukazuje naprosto nedostatečnou tepelnou izolaci přístavby bývalé kotelny. Povšimnout si můžeme toho, že jsou vidět prakticky všechny tvárnice zdiva, mezi kterými maltou ve spárách zdiva prostě uniká teplo. Poslední termogram ukazuje na absenci tepelné izolace v detailu styku podlahy a podezdívky. Také jsou patrné desky polystyrenu zateplení parapetních panelů.“

4. Při pohlcování IR záření probíhá tepelná výměna – energie elektromagnetického vlnění se mění na vnitřní energii pohlcujícího tělesa: **infrazářiče** (slouží k vytápění).



OBR. 8

## SVĚTLO

**Viditelné světlo** je omezeno vlnovými délkami  $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-7} - 3,9 \cdot 10^{-7}$  m, tj. 760 nm – 390 nm. Světlo vyvolává v lidském oku světelný vjem. Pomocí světla získáváme informace o světě kolem nás. U světla rozeznáváme jeho intenzitu – jiná je v poledne a jiná při stmívání – a barvu – závisí na vlnových délkách obsažených ve světle.



Světelné spektrum je část elektromagnetického spektra, ve kterém je zobrazena závislost barev světla na vlnových délkách: červená (650 nm) → oranžová (600 nm) → žlutá (580 nm) → zelená (525 nm) → modrá (450 nm) → fialová (400 nm). Uvedené vlnové délky jsou střední vlnové délky pro dané barvy (viz OBR. 7).

📖 Zopakujte si učivo o zdrojích světla (přirozené, umělé; chromatické, monochromatické).

## ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ

**Ultrafialové záření (UV)** je vymezeno vlnovými délkami  $\lambda = 3,9 \cdot 10^{-7} - 10^{-8}$  m, tj. 390 nm – 10 nm. Je to tedy elektromagnetické záření o vlnové délce kratší, než má světlo fialové barvy. Jeho nejkratší vlnové délky zasahují do oblasti rentgenového záření.

Zdrojem jsou tělesa zahřátá na velmi vysokou teplotu: hvězdy (Slunce), elektrický oblouk (sváření), a dále rtuťové výbojky (horské slunce).

📖 Zopakujte si konstrukci a funkci rtuťové výbojky.

Vlastnosti:

1. Reaguje s **fotografickou deskou**.
2. Způsobuje v menších dávkách **zhnědnutí kůže** a produkci vitamínu D, ve vyšších dávkách rakovinu kůže (fotony UV záření mohou poškodit DNA, což může způsobit jak odumření buňky, tak i její nekontrolovanou reprodukci – **rakovinu**); způsobuje zánět spojivek (proto je nutné chránit oči před účinky ultrafialového záření brýlemi se skly, popř. plastem a filtrem).
3. Působí jako **desinfekce** – ničí mikroorganismy (sterilizace).
4. Při dopadu na určité látky se mění na viditelné světlo (ochranné prvky bankovek). Vyvolává **luminiscenci**.
5. Je pohlcováno obyčejným sklem; křemenné sklo UV záření nepohlcuje (baňky výbojek).

Jako přirozená ochrana proti UV záření slouží **ozónová vrstva**. Vrstva atmosféry s velkou koncentrací ozonu  $O_3$  (ozónosféra) se nachází ve výšce 22 km až 25 km a zamezuje pronikání ultrafialového záření k zemskému povrchu. Tím umožňuje existenci života na Zemi. Některé plynné sloučeniny fluoru (tzv. freony), které unikají do ovzduší při určitých výrobních postupech nebo při používání sprejů, se s ozonem v atmosféře slučují. Tím se zmenšuje koncentrace ozonu v ozónosféře a snižuje se její schopnost pohlcovat ultrafialové záření. V atmosféře vznikají ozónové díry, jimiž v některých oblastech ultrafialové záření proniká ve větší míře až k povrchu Země. Podobný účinek na ozónosféru mají i oxidy dusíku obsažené v plynech, které se do ovzduší dostávají při činnosti spalovacích motorů dopravních prostředků.

## RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ

**Rentgenové záření** (dříve paprsky X; označení X-rays se dosud užívá v USA) má ještě kratší vlnovou délku než ultrafialové záření a zaujímá poměrně širokou oblast spektra ( $\lambda = 10^{-8} - 10^{-12}$  m, tj. 10 nm – 1 pm). Rentgenové záření delších vlnových délek se označuje jako měkké záření a oblast rentgenového záření krátkých vlnových délek se označuje jako tvrdé záření. To představuje pro lidský organizmus značné nebezpečí.

Rentgenové záření vzniká ve speciálních elektronkách – **rentgenových trubicích (rentgenkách)**. Její základní části (OBR. 9) jsou katoda K (obvykle žhavena), která emituje elektrony, anoda a antikatoda (svírá s přímkou katoda-anoda úhel  $45^\circ$ , je zhotovená z wolframu). Mezi katodou a anodou je velký potenciálový rozdíl (10 kV až 400 kV), takže se emitované elektrony pohybují se značným zrychlením; dopadají však na antikatodu. Ta je tvořena masivním tuhým tělesem, aby se příliš nezahřívala; bývá chlazená nebo se otáčí.

Vzniká rentgenové záření dvojího typu:

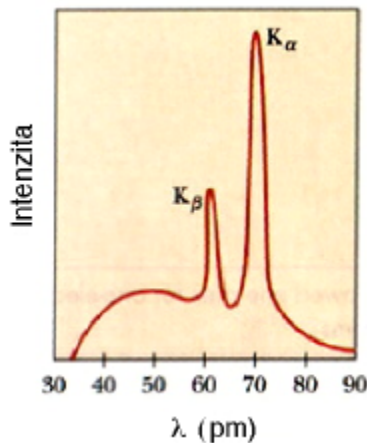
**Brzdné záření** vzniká při zabrzdění svazku elektronů pevnou látkou, na kterou dopadají. Zabrzdění elektronu jako zrychlený pohyb (se záporným zrychlením) elektrického náboje vede podle teorie

elektromagnetického pole ke vzniku elektromagnetického záření. Toto záření má spojité spektrum („základní křivka“ v OBR. 10).

**Charakteristické záření** vzniká tak, že dopadlý elektron, který má dostatečnou kinetickou energii, vyrazí z vnitřního obalu atomu látky, na kterou dopadne, elektron. Elektron z vnějšího obalu, který ho nahradí, vyše při tomto přechodu elektromagnetické záření zcela určité vlnové délky. Proto je spektrum tohoto záření diskrétní; popsáním případům odpovídají („lokální“) maxima, označovaná počestným patvarem *píky* („výřůstky“ v OBR. 10).



OBR. 9



OBR. 10



OBR. 11

Vlastnosti:

1. Reaguje s fotografickou deskou.
2. Ionizuje vzduch; způsobuje **ionizaci** některých látek
3. **Diagnostika.** Při průchodu látkou se rentgenové záření pohlcuje a jeho energie se mění ve vnitřní energii látky. Pohlcování záření značně závisí na protonovém čísle  $Z$  chemického prvku v periodické soustavě. Prvky s vyšším číslem  $Z$  pohlcují rentgenové záření více. Tento poznatek se široce využívá v lékařství.

Rentgenové záření se pohlcuje 150krát více v kostech složených hlavně z fosforečnanu vápenatého než ve svalech, jejichž převažující složkou je voda. Proto se na rentgenovém snímku jeví kosti světlejší než tkáň. Tento princip se ve zdokonalené podobě využívá v počítačové tomografii (CT – *Computed Tomography*; A. Cormack, G. Hounsfield, 1979 Nobelova cena za lékařství a fyziologii). Princip počítačového tomografu spočívá ve vytváření souborů rentgenových snímků částí těla po jednotlivých vrstvách kolmých k ose pacientova těla a širokých několik milimetrů (název zařízení je odvozen z řec.  $\tau\omicron\mu\eta$  – řez). Pacient leží na lůžku, kolem kterého se postupně otáčí v rozsahu  $180^\circ$  rám nesoucí jednak zdroj rentgenového záření, jednak soustavu detektorů, které jsou rozmístěny na opačné straně rámu. Při otáčení rámu prochází rentgenové záření tělem v různých směrech a po jeho průchodu jsou měnící se hodnoty intenzity zeslabeného záření zachyceny detektory. Získané hodnoty jsou zpracovány počítačem do výsledného obrazu.

Rentgenové záření je pro lidský organizmus velmi nebezpečné. Proto musejí být při práci s rentgenovými diagnostickými přístroji dodržována velmi přísná bezpečnostní opatření (stínění materiály, kterými rentgenové záření nepronikne, např. olovenými plechy) a doba ozařování musí být co nejkratší. Toho se dosahuje hlavně tím, že se na minimum zkracuje doba ozáření při získávání rentgenového snímku nebo jeho počítačového záznamu.

4. Tvrdé RTG záření se využívá k **léčbě** zhoubných nádorů (ničí buňky).
5. **Defektoskopie, zkoumání struktury.** RTG záření je pohlcováno v závislosti na tloušťce látky – tak je možno zjistit výskyt trhlin nebo vzduchových bublin v kovových odlitcích. Rentgenové záření se uplatňuje i při práci restaurátorů uměleckých děl. Tam je použití rentgenu založeno na tom, že malíři jako barvy používali různé sloučeniny olova, které také různým způsobem rentgenové záření pohlcují. Pomocí rentgenových snímků tak lze nejen zjistit přemalování některých detailů obrazu, ale třeba i kopii nebo padělek výtvarného díla.

6. **Rentgenová astronomie** se zabývá studiem zdrojů rentgenového záření ve vesmíru, jejichž existence souvisí s různými stadii vývoje hvězd. Rentgenové záření vysílají např. zbytky po výbuchu supernov (neutronové hvězdy).

7. **Rentgenová strukturní analýza.** Tato metoda zkoumání krystalů již byla popsána v kapitole *Vlnové vlastnosti světla*.

Fysik Johann Wilhelm Hittorf (1824–1914) pozoroval vakuovou trubici vyzařující záření na záporné elektrodě. Toto záření způsobovalo při dopadu na stěnu trubice světélkování. Roku 1876 je Eugene Goldstein pojmenoval „katodové záření“. Později anglický fyzik William Crookes studoval výboje v řídkých plynech a zkonstruoval Crookesovu trubici, skleněnou trubici s elektrodami naplněnou zředěným plynem, v němž při přiložení vysokého stejnosměrného napětí dojde k výboji doprovázenému zářením. Když umístil neexponované fotografické desky nedaleko od trubice, na desce se objevily šmouhy, přestože tento efekt nechtěl zkoumat. Roku 1892 Heinrich Hertz demonstroval, že katodové záření může procházet velmi slabou kovovou překážkou (jako je hliníková destička). Philip Lenard, žák Heinricha Hertze, dále prozkoumával tento efekt. Vyvinul vlastní verzi katodové trubice a zkoumal průchod katodového záření rozličnými materiály.

V dubnu 1887 Nikola Tesla začal zkoumat rentgenové záření pomocí vysokého napětí, vakuových trubic vlastní konstrukce a Crookesových trubic. Z jeho technické dokumentace plyne, že vymyslel a vyrobil trubici s jedinou elektrodou, ostatní trubice na zkoumání rentgenového záření měly dvě elektrody. Jeho další experimenty ho vedly k varování vědecké komunity před biologickými riziky rentgenového záření.

8. listopadu 1895 Wilhelm Conrad Röntgen, německý vědec, začal provádět a zaznamenávat experimenty s rentgenovým zářením ve vakuové trubici. Röntgen 28. prosince 1895 napsal zprávu „O novém druhu paprsků“. Toto je první formální a veřejně známá kategorizace rentgenového záření. Röntgen o záření psal jako o paprscích X, neboť šlo o doposud neznámé záření, avšak mnoho kolegů se domnívalo, že by se mělo jmenovat po Röntgenovi. Röntgen za své objevy obdržel vůbec první Nobelovu cenu za fyziku. V OBR. 11 je snímek rukou Berthy Röntgenové, jeden z prvních rentgenových snímků

Roku 1895 Thomas Alva Edison zkoumal schopnost materiálů fluoreskovat, když jsou vystaveny rentgenovému záření. Výzkum záření ukončil roku 1903, potom, co zemřel jeden z jeho foukačů skla, který zkoušel trubice na své ruce, čímž si přivodil rakovinu. Obě ruce mu byly amputovány v marné snaze ho zachránit.

Roku 1906 fyzik Charles Glover Barkla objevil rozptyl rentgenového záření v plynech a využil ho při zkoumání vlastností látek. Určil tak například počet elektronů v atomu uhlíku. Rovněž dokázal polarizovat rentgenové záření, čímž potvrdil, že má stejné vlastnosti jako viditelné světlo. Za své objevy získal roku 1917 Nobelovu cenu za fyziku. Byla mu amputována ruka v důsledku nádoru z ozáření.

Objev rentgenového záření vzbudil zájem dalších badatelů. Německý fyzik Max von Laue (1879–1960) prokázal v roce 1912 interferenci rentgenového záření při jeho průchodu krystalem. Rentgenové záření bylo dvěma šterbinami soustředěno do úzkého svazku, který procházel krystalem. Na fotografické desce umístěné za krystalem se po vyvolání objevil interferenční obrazec rentgenového záření, tzv. laueogram.

V padesátých letech 20. století byl sestrojen rentgenový mikroskop.

## ZÁŘENÍ GAMA

**Záření gama ( $\gamma$ )** zčásti zasahuje vlnovou délkou do oblasti rentgenového záření ( $\lambda < 10^{-12}$ , tj.  $\lambda < 1$  pm) a na krátkovlnném konci elektromagnetického spektra uzavírá. Na rozdíl od rentgenového záření, které vzniká při energetických přeměnách v elektronovém obalu atomu, jsou zdrojem záření gama radioaktivní přeměny v jádrech atomů. Vlastnosti tohoto záření se studují v chemii či v jaderné fyzice.

📖 Zopakujte si vlastnosti jaderného záření.

Zdrojem jaderného vlnění jsou změny elektromagnetického pole při jaderných reakcích. Radioaktivní záření  $\gamma$  neexistuje samovolně, ale doprovází záření  $\alpha$  nebo  $\beta$  (jsou vyzařovány **radionuklidy**). Záření  $\gamma$  je nejpronikavější jaderné záření; lze je zeslabit silnou vrstvou železobetonu nebo materiálem obsahujícím jádra těžkých prvků (Pb). V magnetickém a elektrickém poli se neodchyluje – to je důkazem, že se jedná o druh elektromagnetického vlnění.

Vlastnosti:

1. Má silné **ionizační účinky** a v důsledku fotoefektu uvolňuje z látek nabitě částice.
2. Podobně jako rentgenové záření je pohlcováno podle struktury – používá se v defektoskopii (zjišťování vad v součástkách; záření je pronikavější než rentgenové záření, takže stačí menší dávky; pro získání tohoto záření stačí radioaktivní látka, proto je  $\gamma$  záření pro defektoskopii výhodnější než rentgenové záření).



3. Způsobuje genetické změny, **nemoci z ozáření** (po genetických změnách buněk může dojít k rakovinnému bujení). Přestože může samo způsobovat rakovinu, používá se při jejím léčení. Přístroj gama nůž využívá několika paprsků záření zaměřených na místo nádoru, aby zničil zhoubným bujením zasažené buňky.

4. Vysokoenergetická povaha záření gama z něj činí účinný prostředek hubení bakterií, čehož se využívá například při sterilizaci lékařských nástrojů nebo při ošetřování potravin, zejména masa a zeleniny, aby déle zůstalo čerstvé.

Záření  $\gamma$  objevil francouzský chemik a fyzik Paul Ulrich Villard roku 1900 při studiu uranu. Pomocí aparatury, kterou si sám sestavil, pozoroval, že není ohýbáno magnetickým polem.

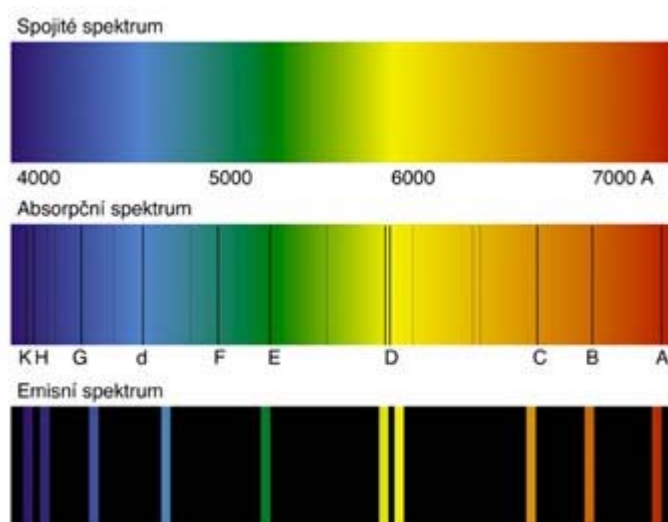
Zpočátku se myslelo, že záření  $\gamma$  je částicové povahy stejně jako  $\alpha$  a  $\beta$ . Britský fyzik William Henry Bragg roku 1910 ukázal jeho vlnový charakter tím, že ionizuje plyn obdobně rentgenovému záření. V r. 1914 Ernest Rutherford a Edward Andrade dokázali změřením jeho vlnové délky pomocí rentgenové krystalografie, že záření gama je druh elektromagnetického záření. Pojmenování „záření gama“ zavedl Ernest Rutherford jako obdobu alfa a beta záření ještě v době, kdy nebyl znám rozdíl ve fyzikální podstatě těchto druhů záření.

## SPEKTRA LÁTEK

Spektrum světla vyzařovaného látkou (obr. 12) nazýváme **emisní spektrum**. Zářící páry prvků vytvářejí charakteristické emisní spektrum, v němž vidíme jen určité spektrální čáry o diskrétních vlnových délkách. Např. v parách sodíku pozorujeme dvojici (tzv. dublet) spektrálních čar žluté barvy o vlnových délkách 589,0 nm a 589,6 nm (při menší rozlišovací schopnosti spektroskopu však splývá dublet v jedinou čáru). Takové spektrum označujeme jako **čárové spektrum**.

Rozžhavené pevné látky (např. vlákno žárovky) vyzařují světlo všech vlnových délek. Při rozkladu tohoto světla vzniká **spojité spektrum**.

Látka však může záření také pohlcovat. Když jí prochází složené světlo se spojitým spektrem, světlo některých vlnových délek je látkou pohlceno a vzniká absorpční spektrum. Jestliže světlo prochází např. sodíkovými parami, pohltí se ze spojitého spektra ty vlnové délky, které by sodík sám vyzařoval, a vznikne **absorpční spektrum**.



OBR. 12

Charakter absorpčního spektra má i sluneční spektrum, které obsahuje řadu temných čar. Jejich původ vysvětlujeme tím, že záření z vnitřní vrstvy Slunce (fotosféry) prochází okrajovou vrstvou (chromosférou), která má nižší teplotu. Spektrum záření fotosféry je spojitě a při průchodu chladnější chromosférou nastává absorpce záření určitých vlnových délek. V odpovídajících místech spektra se pak objevují temné čáry, které poprvé popsal německý fyzik Joseph von Fraunhofer (1814). Na vzniku absorpčních čar se podílí také atmosféra Země.

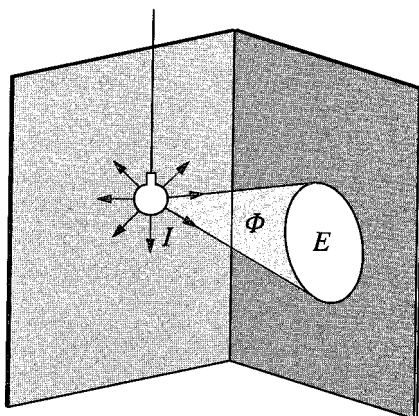
Zvláštním druhem spektra je **pásové spektrum**, které je tvořeno velkým množstvím čar ležících v těsné blízkosti. Tyto skupiny čar tvoří charakteristické pásy, oddělené temnými úseky. Zdrojem pásového spektra jsou zářící molekuly látek.

Záření, které látky za určitých okolností vyzařují, je důležitým zdrojem informací o složení látky. Z tohoto hlediska se studiem záření zabývá rozsáhlý obor – spektrální analýza. Základním přístrojem spektrální analýzy je **spektroskop**, který je založen na rozkladu světla buď optickým hranolem (hranolový spektroskop), nebo difrakční mřížkou (mřížkový spektroskop). Oba principy rozkladu světla jsme studovali již dříve.

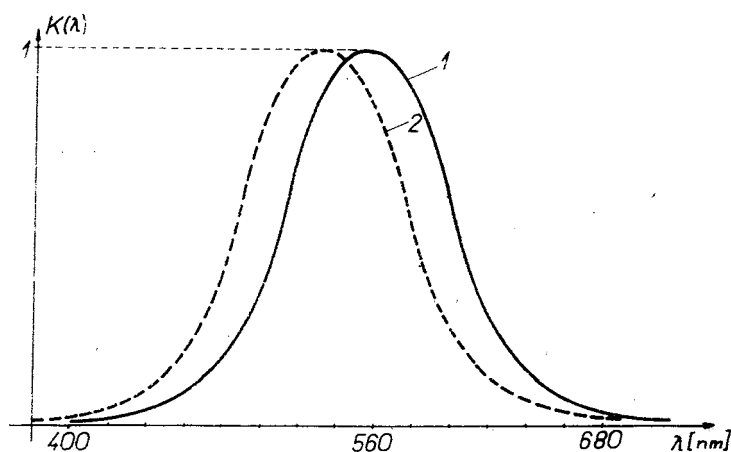
**Spektrální analýza** studuje chemické složení látek na základě poznatku, že poloha čar ve spektru přesně určuje obsah chemických prvků ve zkoumané látce. Podobně se pomocí charakteristických pásů pásového spektra určuje i přítomnost molekul v látce. Kromě toho lze na základě intenzity spektrálních čar stanovit množství prvku (např. ve slitině kovu). Na tom je založena kvantitativní spektrální analýza. Metody spektrální analýzy umožňují zjišťovat velmi malé hmotnosti daného prvku v látce. Moderní přístroje používají mřížky na odraz s velkým počtem vrypů na mm délky mřížky a spektrum je pomocí snímače CCD převedeno na elektrický signál, který je zpracován a vyhodnocen počítačem. Metoda se uplatňuje při analýze složení látek v chemii, metalurgii, lékařství, potravinářství, kriminalistice.

Spektrální analýzou spektra hvězd lze určit prvky, které se nacházejí ve svrchních částech těchto hvězd. Díky Dopplerově jevu jsou jejich čary posunuty oproti čarám získaným v laboratoři; z posunu spektrálních čar tak lze spočítat rychlost vzdalování či přibližování objektu (a určit rychlost rozpínání vesmíru).

 **Fyzikální seminaristé!** Zopakujte si Dopplerův jev včetně příslušných vztahů.



OBR. 13



OBR. 14

# RADIOMETRIE A FOTOMETRIE

Elektromagnetické záření můžeme posuzovat dvěma způsoby: jednak z hlediska *přenášení energie*, jednak z hlediska *zrakových vjemů*. Prvním typem úvah se zabývá **radiometrie**, druhým **fotometrie**. Protože jedině (viditelné) světlo vyvolává vjem v lidském zraku, je fotometrie „radiometrií omezenou na viditelné světlo“.

Ve fotometrii je definována řada fyzikálních veličin, kterými jsou popisovány vlastnosti zdrojů světla, přenos světla volným prostorem a děje spojené s dopadem světla na osvětlené předměty. Nyní si všimněme tří nejdůležitějších veličin, jejichž konkrétní fyzikální význam naznačuje jednoduchý příklad osvětlení místnosti žárovkou (OBR. 13). Jsou to následující fotometrické veličiny: svítivost  $I$  vyjadřuje vlastnost zdroje světla, světelný tok  $\Phi$  se vztahuje k přenosu světla prostorem, osvětlení  $E$  určuje účinky světla při jeho dopadu na povrch tělesa.

Těmto fotometrickým veličinám odpovídají veličiny radiometrické:<sup>1)</sup> zářivost  $I_e$ , zářivý tok  $\Phi_e$ , intenzita ozáření (stručně: ozářenost)  $E_e$ . Význam veličin je analogický (i označení je podobné, liší se jen indexem); veličiny se však týkají přenosu energie v rozsahu celého spektra, nejen ve viditelném světle.

Než začneme s jednotlivými veličinami, zastavme se ještě u měření prostorových úhlů. Jednotkou prostorového úhlu je steradián. **Steradián** je prostorový úhel kužele, který vytíná na povrchu koule se středem ve vrcholu kužele plochu, jejíž obsah je roven plošnému obsahu čtverce s délkou stran rovnající se poloměru koule. (Tedy: Je-li poloměr oné koule  $r$ , je uvažovaný obsah  $r^2$ . „Plný“ prostorový úhel je potom  $4\pi$  sr.) Prostorové úhly se obvykle značí řeckými písmeny z konce abecedy, např.  $\Omega$ .

## Radiometrické veličiny

**Zářivá energie**  $Q_e$  je energie vyslaná, přenesená nebo přijatá formou elektromagnetického záření. Jednotkou je (samozřejmě) joule.<sup>2)</sup>

**Zářivý tok** (též: **zářivý výkon**)  $\Phi_e$  je výkon vyslaný, přenesený nebo přijatý formou elektromagnetického záření. Jednotkou je watt. Souvislost se zářivou energií je zřejmá:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}. \quad (1)$$

Přenášeli-li se energie v čase rovnoměrně, je zářivý tok roven podílu zářivé energie  $Q_e$  a doby  $t$ , po kterou se energie přenáší.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Název *radiometrické veličiny* může být zavádějící: jedná se totiž o veličiny popisující celé elektromagnetické spektrum, nejen radiové vlny.

<sup>2)</sup> V tomto textu značíme energii poněkud netradičně  $Q$ , aby se označení nepletlo s označením ozářenosti  $E_e$  či osvětlení  $E$ .

<sup>3)</sup> Ve vztahu (1) a podobně v mnoha dalších vztazích se objevuje symbol  $d/dt$  značící derivaci „podle času“. Tento symbol potřebuje závažný komentář.

Matematictí seminaristé, kteří se již seznámili se základy diferenciálního počtu, uvedený symbol (snad) v matematice nepoužívali. Vznikl historickým vývojem, kdy se počítalo s „nekonečně malými veličinami“. Toto období bylo již dávno překonáno: v diferenciálním počtu se symbol neužívá vůbec, v integrálním počtu jen jako neoddělitelná součást označení Newtonova (nebo nějakého jiného) integrálu. Ve fyzikální literatuře je však symbol velmi

**Zářivost**  $I_e$  je podíl té části zářivého toku, jež vychází ze zdroje nebo jeho elementu v daném směru do elementárního prostorového úhlu, a velikosti tohoto elementu prostorového úhlu:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}. \quad (2)$$

Jednotkou zářivosti (dle uvedeného vztahu) je watt na steradián.

**Intenzita ozáření** (stručně: **ozářenost**)  $E_e$  je určena podílem zářivého toku  $\Phi_e$  a obsahu plošky  $S$ , na kterou tok dopadá:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (3)$$

Jednotkou je  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**Dávka ozáření (expozice)**  $H_e$  je časový souhrn ozařování vztažený na jednotku plochy. Musíme tedy „sečíst“ intenzity ozáření ve všech jednotlivých okamžicích, tedy integrujeme:

$$H_e = \int_0^{t_{max}} E_e(t) dt; \quad (4)$$

$t_{max}$  je celková doba ozáření. V případě, že intenzita ozáření je konstantní, dostaneme řešením integrálu výraz  $E_e \cdot t$  pro  $t$  v mezích od 0 do  $t_{max}$ , tedy součin  $E_e \cdot t_{max}$ .<sup>4)</sup>

Existují ještě další radiometrické veličiny – např. intenzita vyzařování, hustota zářivé energie, spektrální hustota zářivé energie, emisivita, zář – ale čtenáře, který baží po jejich definicích, odkážeme raději na literaturu.

## Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny popisují tu část spektra elektromagnetického vlnění, která vyvolává vjem v lidském zraku.<sup>5)</sup>

Již jsme uvedli, že výkon přenášený elektromagnetickým vlněním je popsán zářivým výkonem  $\Phi_e$ . Z tohoto výkonu však *jen jistá část* odpovídající viditelnému světlu vyvolá vjem v oku; navíc tato část je pro každou vlnovou délku světla jiná. Znamená to tedy, že zářivý tok musíme vynásobit jistým koeficientem, který vyjadřuje, jak vlnění působí na zrak; tento koeficient se nazývá **světelná účinnost zdroje** a značí se  $K$ . Je tedy

$$\Phi = K\Phi_e, \quad (5)$$

častý, proto na něj zde musíme upozornit. Protože energie  $Q_e$  ve vztahu je závislá na čase, je „jeho funkcí“. Proto matematicky korektně píšeme  $Q_e(t)$ . Pak lze napsat derivaci tak, jak je v matematice obvyklé – totiž pomocí čárky. Víme totiž, „podle čeho máme derivovat“ – podle času. Vztah (1) tak má v solidním zápisu podobu:

$$\Phi_e(t) = Q'_e(t).$$

Ve středoškolské fyzice se při řešení příkladů bez derivací zpravidla obejdeme; vzhledem k „rovnoměrným změnám“ uvažovaných veličin vystačíme s prostým dělením.

Pokud některého „nematematického čtenáře“ zápisy s derivacemi iritují, může si všude místo  $d/dt$  představit  $\Delta/\Delta t$ .

<sup>4)</sup> Čtenář, který se fyzikou v dalším studiu nehodlá zabývat, nechť předcházející „integrační pasáž“ laskavě přeskočí.

<sup>5)</sup> Varujeme se formulace *působí na lidský zrak*. Např. rentgenové záření, záření  $\gamma$  či mikrovlnné záření na lidský zrak sice působí (a to destruktivně!), ale žádný zrakový vjem nevyvolává.

kde  $\Phi$  je nová veličina popisující tu část zářivého výkonu, která způsobuje zrakový vjem; nazývá se **světelný tok**  $\Phi$ . Jednotkou je **lumen** (z lat. *lumen* – světlo, záře, lesk).

$K$  je ovšem funkcí vlnové délky.  $K$  se určuje experimentálně na vzorku pokusných lidí. Oko je nejcitlivější na žlutozelené světlo s vlnovou délkou  $\lambda = 555$  nm; pro tuto vlnovou délku má graf závislosti  $K$  na  $\lambda$  maximum. Platí  $K_{max} = 683$  lm/W. Jinak řečeno: Přenášíme-li při vlnové délce 555 nm (tedy při frekvenci  $540 \cdot 10^{12}$  Hz) světelný výkon 1 W, odpovídá tomu světelný tok 683 lm. Navíc je zřejmé, že např. pro rádiové či rentgenové záření je  $K = 0$ , protože toto záření žádný zrakový vjem nevyvolává. Graf světelné účinnosti  $K$  v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  je v OBR. 14; křivka 1 platí pro vidění za dne, křivka 2 pro vidění za soumraku.

**Svítivost** je fotometrická veličina charakterizující vysílání světla z bodového světelného zdroje. Je dána (analogicky jako zářivost) vztahem

$$I = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}. \quad (6)$$

Jednotkou svítivosti je kandela (cd). **Kandela** (z lat. *candela* – svíčka) je základní jednotkou SI; je definována takto: „Kandela je svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monofrekvenční záření o kmitočtu  $540 \cdot 10^{12}$  Hz a jehož zářivost v tomto směru je 1/683 wattů na steradián.“ Svítivost 1 cd zhruba odpovídá svítivosti plamene parafínové svíčky.

Protože kandela je základní jednotka soustavy SI, je třeba ostatní jednotky vyjádřit pomocí kandel: je tedy  $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$ . Můžeme dále říci, že 1 lumen je světelný tok vyzařovaný bodovým všesměrovým zdrojem o svítivosti 1 kandel do kužele, který vymezuje na kulové ploše s poloměrem 1 metr, jejíž střed je ve světelném zdroji, kulový vrchlík o obsahu  $1 \text{ m}^2$ . Poznamenejme, že celkový světelný tok bodového zdroje je  $4\pi I$ .

**Osvětlení** (také: **osvětlenost**)  $E$  je určeno podílem světelného toku  $\Phi$  a obsahu plošky  $S$ , na kterou tok dopadá:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (7)$$

Jednotkou je **lux** (lx); název z lat. *lux* – světlo, záře, oheň. Je zřejmě  $\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2} = \text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$ ; slovy řečeno: Plocha o obsahu  $1 \text{ m}^2$  má osvětlení jednoho luxu, dopadá-li na ni rovnoběžně světelný tok 1 lumen.

Např. z experimentu plyne, že osvětlení  $E$  uvažované plochy závisí na svítivosti zdroje  $I$ , vzdálenosti  $r$  této plochy od světelného zdroje a na úhlu dopadu světla  $\alpha$  na tuto plochu:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha. \quad (8)$$

Nejlépe je tedy osvětlena plocha, na kterou světelné paprsky dopadají kolmo ( $\alpha = 0^\circ$ ). Když se úhel dopadu světla zvětšuje, osvětlení se naopak zmenšuje, a když jsou paprsky s osvětlovanou plochou rovnoběžné ( $\alpha = 90^\circ$ ), je osvětlení plochy nulové.

Několik příkladů osvětlení přirozenými zdroji: Slunce v letní poledne za bezmračného počasí 100 000 lx; Slunce v zimním období 10 000 lx; oblačná obloha v létě 5 000–20 000 lx; oblačná



obloha v zimě 1 000-2 000; Měsíc v úplňku na noční obloze 0,2 lx, bezoblačná noc bez Měsíce 0,0003 lx.

Dostatečné osvětlení patří k základním požadavkům na hygienu práce. Například ke čtení je nutné osvětlení asi 500 lx, rýsování nebo montáž drobných objektů vyžaduje až 1 500 lx, ale k osvětlení schodiště postačuje 15 lx. Citlivost oka je značná; oko je schopno rozlišit předměty již při osvětlení  $3 \cdot 10^{-5}$  lx.

K měření osvětlení se v praxi používají přístroje založené na přímé přeměně energie záření v elektrickou energii (fotoelektrický jev – viz seminář). Samostatný přístroj pro měření osvětlení je **luxmetr**. Obsahuje čidlo s polovodičovým fotoelektrickým prvkem, na němž vzniká elektrické napětí úměrné osvětlení. Jeho velikost čteme na stupnici přístroje přímo v luxech. Často však je čidlo pro měření osvětlení (popř. světelného toku) zabudováno přímo do optického přístroje. Je např. součástí fotografických přístrojů a videokamer vybavených automatikou, která podle úrovně osvětlení automaticky upravuje velikost vstupního otvoru objektivu čili clonu.

**Osvit** (nebo: **expozice**)  $H$  je časový souhrn osvětlení vztažený na jednotku plochy. Musíme tedy „sečíst“ osvětlení ve všech jednotlivých okamžicích, tedy integrujeme:

$$H = \int_0^{t_{max}} E(t) dt; \quad (9)$$

$t_{max}$  je celková doba osvětlení. Jednotkou je luxsekunda (lx·s). O výpočtu integrálu platí též poznámka jako u vztahu (4).

## MALÝ SLOVNÍČEK POJMŮ

Uvádění anglických ekvivalentů českých pojmů probíraných v textu není v dnešní době snobismem, nýbrž nutností. Z důvodů „lepší čitelnosti“ textu nejsou anglické pojmy uváděny na příslušných místech textu, ale souhrnně zde v závěru.

Pojmy jsou řazeny zhruba v tom pořadí, v jakém se v textu postupně objevují. Všechny anglické termíny jsou převzaty z publikace [VSF].

dlouhé vlny	long waves
střední vlny	middle waves
krátké vlny	short waves
velmi krátké vlny	ultrashort waves
mikrovlny	microwaves
infračervené záření	infrared radiation
světlo	light
ultrafialové záření	ultraviolet radiation
rentgenové záření	X-rays
záření gama	gamma radiation
radiometrie	radiometry

zářivá energie	radiant energy
zářivý tok	radiant power, radiant energy flux
ozáření	irradiance
zářivost	radiant intensity
dávka ozáření	radiance exposure
fotometrie	photometry
světelný zdroj	light source
světelný tok	luminous flux
svítivost	luminous intensity
osvětlení	illuminance
osvit	light exposure

## LITERATURA

- [OP] Lepil, O.: Fyzika pro gymnázia: Optika. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2002.
- [Štr79] Štrba, A.: Všeobecná fyzika 3 – Optika. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979.
- [Wag95] Wagner, J. – Kopal, A.: Fyzika II. Liberec: PF TU, 1995.
- [Gry89] Grygar, J. – Železný, V.: Okna vesmíru dokořán. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1989.
- [Hor61] Horák, Z. – Krupka, F. – Šindelář, V.: Technická fyzika. 3. vyd. Praha: SNTL, 1961.
- [Lau59] Laue, M. von: Dějiny fyziky. 1. vyd. Praha: Orbis, 1959.
- [Hla06] Hlaváček, A.: Historie a současnost budovy naší školy pohledem fyziky [maturitní práce]. Liberec: Gymnázium F. X. Šaldy, 2006.
- [Wik] Otevřená encyklopedie Wikipedia [cit. 2006-11-20]. URL: <<http://www.wikipedia.cz>>
- [VSF] Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.

## Zdroje obrázků

- [OP] 13
- [Štr79] 14
- [Hla06] 8
- [Wik] 3–7; 11–12

Ostatní obrázky byly čerpány z archivu předmětové komise fyziky; jejich původní zdroj není autorovi textu znám.