

ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ, RADIOMETRIE A FOTOMETRIE



Gymnasium F. X. Šaldy
Liberec
Honsoft 2022

FYSIKA
pro 3. ročník

SEMINÁŘ
z fyziky

Obsah

ÚVOD

ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

Úvod nejen historický 7

Vlnový popis elektromagnetického záření 8

SPEKTRUM ELEKTRO- MAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ

Rozhlasové (rádiové) vlny 9

Mikrovlny 12

Infračervené záření 14

Světlo 14

Ultrafialové záření 14

Rentgenové záření 15

Záření gama 17

RADIOMETRIE A FOTOMETRIE

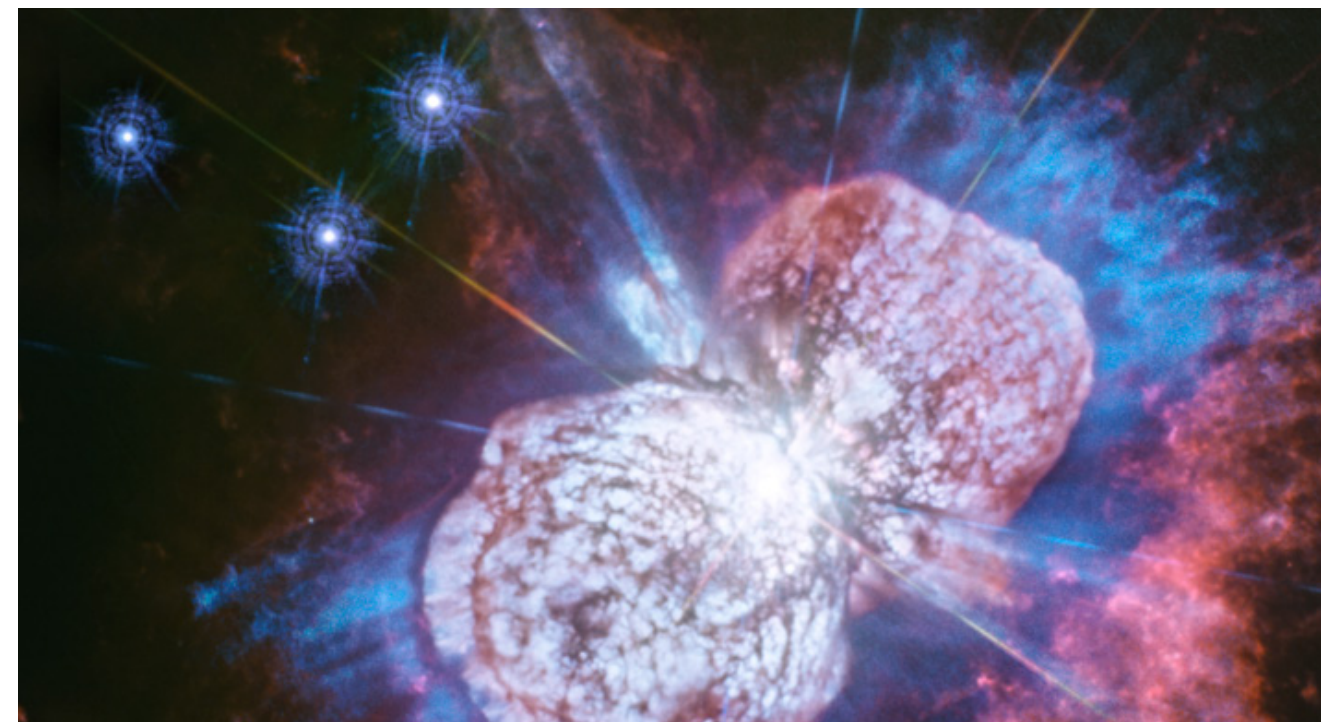
Radiometrické veličiny 18

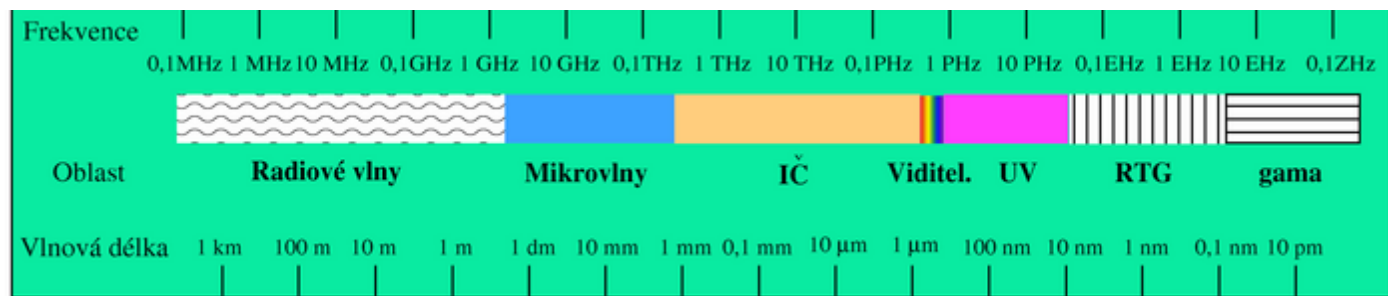
Fotometrické veličiny 19

LITERATURA

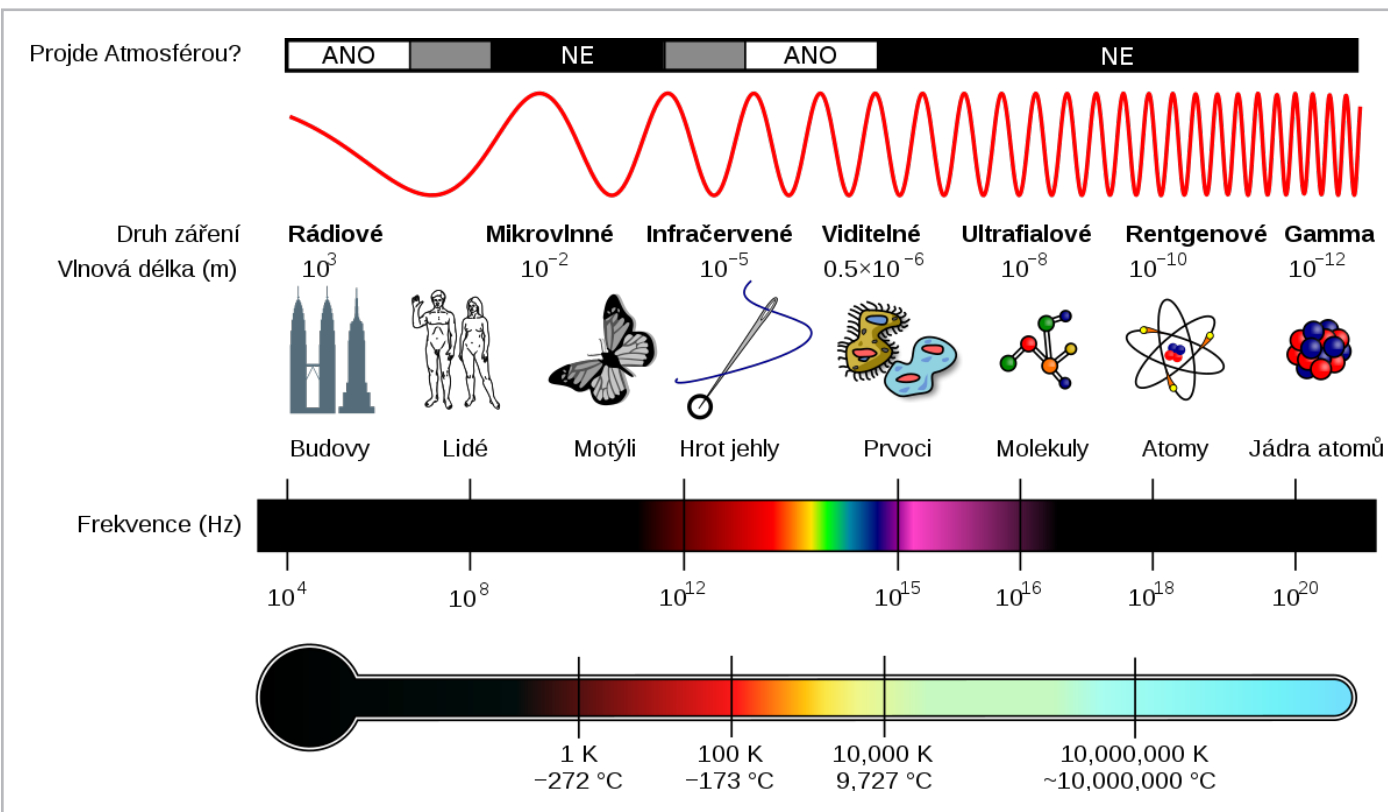
Použitá literatura 22

Zdroje obrázků 22

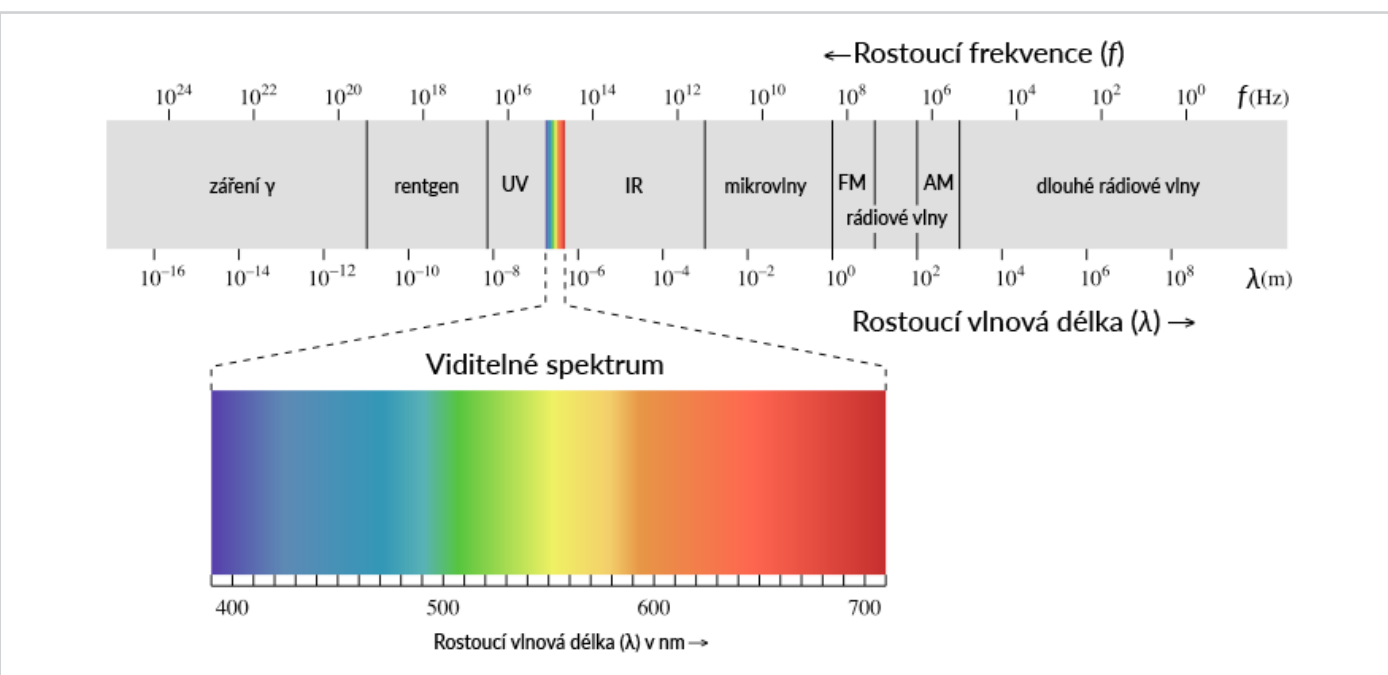




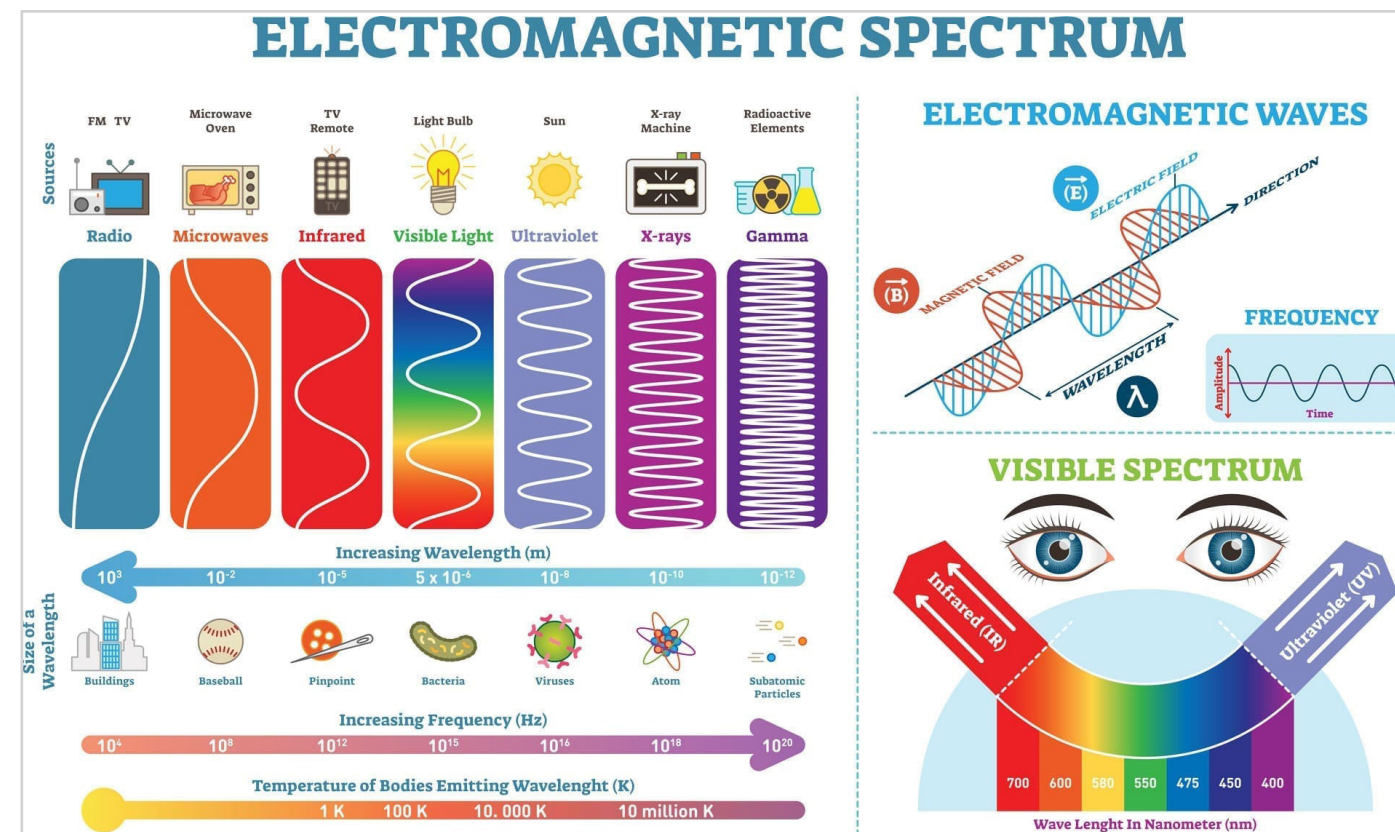
OBR. 1



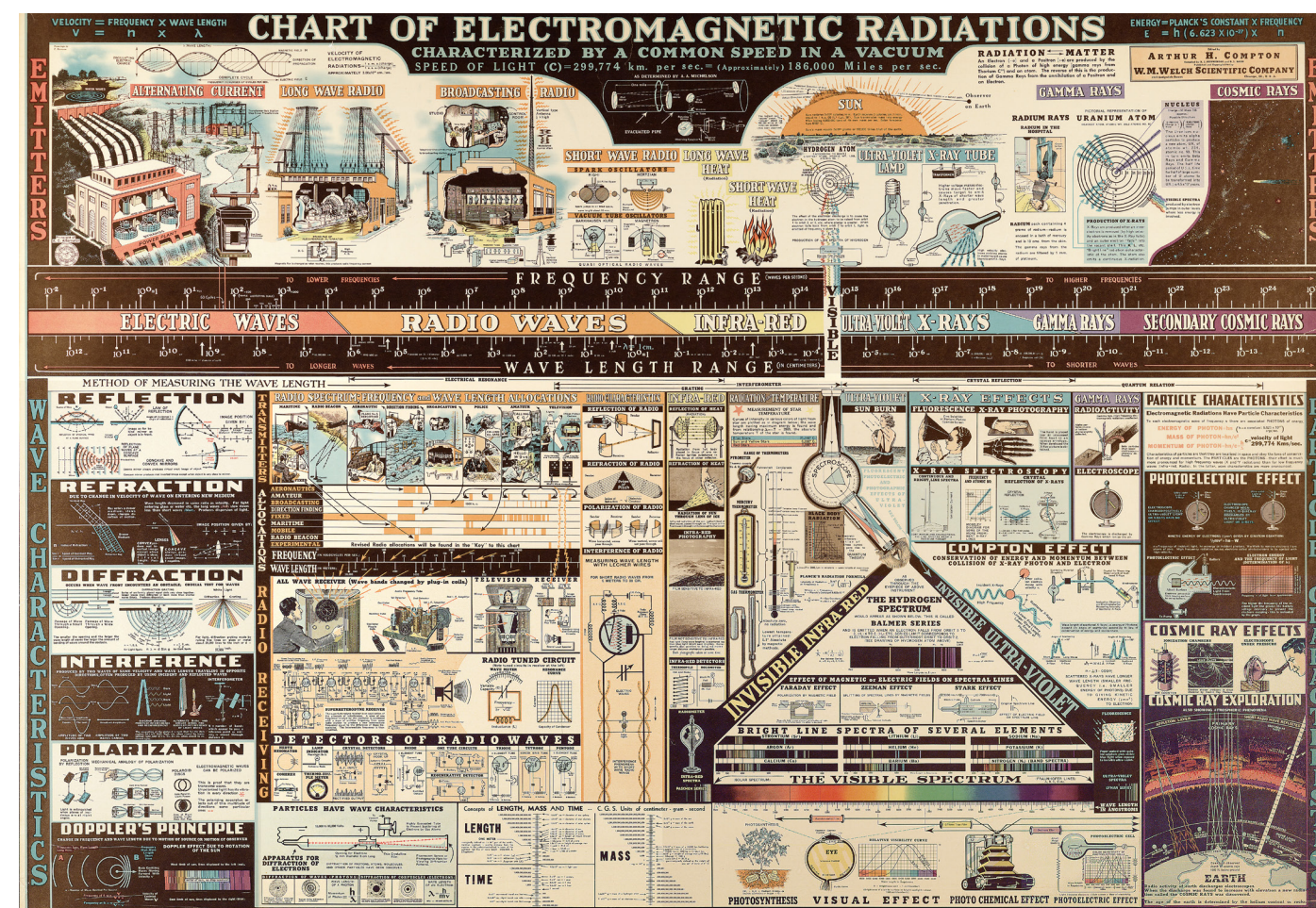
OBR. 2



OBR. 3



OBR. 4



OBR. 5

Úvod



Optika

Studijní materiály
Gymnasia F. X. Šaldy

■ KE STUDIJNÍMU TEXTU PATŘÍ

sbírka úloh
rozcestník odkazů na animace
a videa

„*War es ein Gott, der diese Zeilen schrieb?*“ napsal prý Ludwig Boltzmann o Maxwellových rovnicích, jak se traduje ve fyzikálně-historické literatuře. Jde o parafrázi slov, která pronáší Faust v úvodu první části Goethova dramatu: „*War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?*“

Ve skutečnosti Ludwig Boltzmann v úvodu ke svému spisu *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes* z roku 1893 cituje Fausta přesně a obsáhleji: *War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb, / Die mit geheimnissvoll verborg'nem Trieb / Die Kräfte der Natur um mich enthüllen / Und mir das Herz mit stiller Freude füllen?*

Ať už šlo o Maxwellovy řádky či znaky (obojí má dobrý smysl, byť Maxwellovým rovnicím do dnešní elegantní podoby chyběla stručnost vektorového zápisu), otevřela se tímto objevem cesta ke komplexnímu popisu elektromagnetického vlnění.

Tento učební text je určen pro povinné hodiny fyziky, nikoliv pro seminář. Proto se zde čtenář Maxwellovými rovnicemi zabývat nemusí. Naopak mu bude nabídnuta řada aplikací, s nimiž se denně setkává a bez nichž si svůj život asi ani neumí představit.

Vyučovací hodiny je lépe věnovat spíše řešení problémů než obkreslování obrázků. Proto jsou zde takovéto obrázky a základní poznámky shrnuty; studenti/studentky budou moci méně psát a více přemýšlet. Učební materiál tak slouží jako pomocný, faktografický text k výuce fyziky v gymnasiu. Problémy, motivační otázky a příklady nejsou součástí tohoto textu; v hodinách jsou zadávány jinak. Ve vyučovacích hodinách je probírané učivo také doplněno experimenty.

Faktografický text nepřináší (ostatně ani přinášet nemůže) pranic originálního. Jde o kompilaci několika pramenů uzpůsobenou studentům gymnasia; seznam těchto pramenů je připojen v závěru. Tam je také přehled zdrojů použitých ilustrací.

První verze tohoto textu byla napsána v roce 2006. Na začátku roku 2022 byl text významně aktualizován. Nově zařazené exkursy v postranních pruzích doplňují výklad fotografiemi konkrétních zařízení či připojují stručné historické poznámky.

Prosím čtenáře, aby upozornili na případně nalezené chyby. A přeji jim i onu „tichou radost“ z poznání, o níž se píše v úvodním citátu.

V Liberci 22. 2. 2022
(není to „magické datum“, ale den 165. narozenin Heinricha Hertze)

J. V.

Elektromagnetické záření

ÚVOD NEJEN HISTORICKÝ

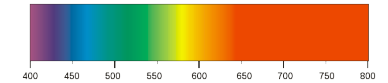
Optika patří spolu s akustikou k nejstarším fyzikálním oborům; řada otázek z těchto oborů byla řešena (a vyřešena) již v antice. S tématem našeho učebního textu souvisí především snaha o vysvětlení některých atmosférických jevů, zejména duhy. Úplnou teorii předložil RENÉ DESCARTES a nezávisle na něm také český myslitel JAN MAREK MARCI (*Kniha o duze nebeské a o původu jejích barev*, 1648). Disperzi (rozklad světla) popsal ISAAC NEWTON, který experimentálně ukázal, že jednotlivé barevné složky bílého světla jsou dále nerozložitelné. Od počátku 19. století však lidstvo provází otázka, zda je *něco* také „za okraji“ tohoto spektra.

V roce 1800 britský astronom WILLIAM HERSCHEL (mj. objevitel planety Uran) rozkládal barevné světlo hranolem na spektrum. Teploměrem testoval jednotlivé barevné části, aby zjistil, které z nich nesou největší množství tepla. Při pokusu posunul teploměr až za konec červené složky světla a očekával, že tepelný efekt vymizí. Navzdory předpokladu teplota vzrostla ještě více než v kterémkoliv z předchozích případů. Herschel tuto „neviditelnou složku světla“ pojmenoval *calorific rays*.

O rok později německý fyzik JOHANN WILHELM RITTER provedl rozklad světla optickým hranolem a na různá místa pokládal proužky papíru namočené do roztoku chloridu stříbrného. Proužky nejvíce zčernaly až za fialovým koncem spektra a Ritter tak objevil, že tam dopadá neviditelné záření účinkující na fotoemulzi; nazval je *de-oxidierende Strahlen*.

V roce 1873 JAMES CLERK MAXWELL ve spisu *A Treatise on Electricity and Magnetism* shrnul své dosavadní objevy: elektrické a magnetické jevy jsou projevy téže podstaty, jíž je elektromagnetické pole; změny tohoto pole lze popsat vlnovou rovnicí. Také světlo je svou podstatou elektromagnetické vlnění. — Maxwellovy závěry, dnes uváděné formě čtyř Maxwellových rovnic a pokládáné ze jeden z největších fyzikálních objevů celých lidských dějin, nebyly dlouho přijaty. Až v roce 1887 HEINRICH HERTZ provedl experimenty prokazující šíření elektromagnetických vln v prostoru; ukázal také, že pro tyto vlny platí analogické zákony jako pro světlo (např. zákon odrazu a lomu). Nedlouho poté, v roce 1894, italský vynálezce a politik MARCHESE GUGLIELMO MARCONI uskutečnil „veřejné“ rádiové spojení prostřednictvím svého bezdrátového telegrafu. (Předpokládá se, že skutečně první rádiové spojení provedl v rámci svých experimentů NIKOLA TESLA.)

Od 60. let 19. století probíhalo studium katodového záření ve vakuových trubcích a trubcích naplněných řídkými plyny. (Čtenářkám a čtenářům se doporučuje připomenout si příslušnou kapitolu z učebního textu *Vedení elektrického proudu v plynech a ve vakuu*.) Elektrony (tehdy ovšem ještě neznámé) tvořící záření se pohybovaly trubcí, dopadaly na sklo a vyvolávaly luminiscenci. V roce 1895 WILHELM CONRAD RÖNTGEN jednu takovou trubici zabalil do černého kartonu. V úplné tmě pak pozoroval světélkování luminiscenční látky na stole mimo trubici, a to dokonce ve velké vzdálenosti. V trubici tak musely vzniknout „jakési nové paprsky jiné povahy“ (nebylo možné je vychýlit magnetickým polem); nazval je paprsky X.



Spektrum přirozeného zdroje světla



WILLIAM HERSCHEL



HEINRICH RUDOLF HERTZ



MARCHESE GUGLIELMO MARCONI

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

Maxwellovy rovnice



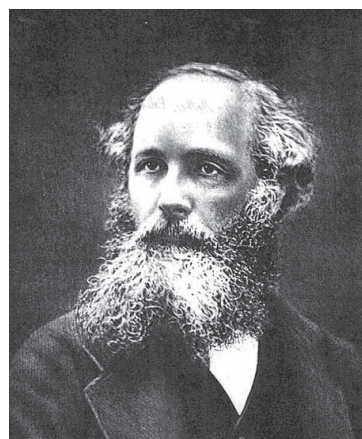
Broom Bridge, Dublin

„Here as he walked by on the 16th of October 1843 Sir William Rowan Hamilton in a flash of genius discovered the fundamental formula for quaternion multiplication

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$$

& cut it on a stone of this bridge.“

Kvaterniony (čtyřsložková zobecnění komplexních čísel) byly prvním matematickým nástrojem pro formulaci Maxwellových rovnic. Dnes jsou tyto rovnice vyjádřeny pomocí (tehdy ještě neznámých) vektorů a vektorových operátorů.



JAMES CLERK MAXWELL

Skotský fyzik, autor obecného popisu elektromagnetického pole. Zabýval se i teorií barev, pořídil první barevnou fotografii. Zdokonalil kinetickou teorii plynů (Maxwellovo rozdělení, Maxwellův démon).

Počátkem roku 1896 se HENRI BECQUEREL dozvěděl o Röntgenově objevu záření. Inspirován tímto objevem vzápětí sám pozoroval zčernání fotografické desky, na níž byla položena nádoba se solí uranu. Postupnými pokusy dokázal, že záření způsobuje právě uran. Podle chování rozlišil dva různé typy záření.

Při experimentech v letech 1899–1900 ERNEST RUTHERFORD a PAUL VILLARD nezávisle zkoumali tuto nová, jaderná záření z hlediska chování v elektrickém a magnetickém poli; při tom Villard objevil další typ záření, které magnetickým polem vychylováno nebylo. Jaderná záření byla po řadě označena řeckými písmeny α , β , γ .

V roce 1900 sám HENRI BECQUEREL na základě měření měrného náboje identifikoval záření β jako proud elektronů (elektron byl objeven tři roky předtím, v roce 1897). V roce 1908 ERNEST RUTHERFORD ukázal, že záření α je tvořeno jádry helia. O záření γ bylo dokázáno, že je druhem elektromagnetického vlnění; byla změřena jeho vlnová délka.

Od 20. let 20. století je obraz elektromagnetického spektra úplný. Pro jednotlivé složky bylo dokázáno, že splňují Maxwellovy rovnice a byla určena jejich vlnová délka. Některé dostaly nové názvy: *calorific rays* dnes známe jako infračervené záření, *de-oxidierende Strahlen* jako záření ultrafialové. Naopak záření γ zůstal jeho pracovní, nesystematický název dodnes.

Duha se rozšířila na obě strany: K počtě Maxwella, který vše předem předpověděl a spočítal, se celé elektromagnetické spektrum někdy nazývá **Maxwellova duha**.

Různě konstruovaná přehledná zobrazení (OBR. 1–5) jsou umístěna na prvních stránkách tohoto učebního textu.

VLNOVÝ POPIS ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ

Elektromagnetické záření (jinak: **elektromagnetické vlnění**) má dvě navzájem neoddelitelné složky. Elektrickou složku charakterizuje vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} , magnetickou složku vektor magnetické indukce \mathbf{B} . Vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} jsou navzájem kolmé, mají souhlasnou fázi a jejich kmity probíhají kolmo ke směru, kterým se vlnění šíří (OBR. 6).

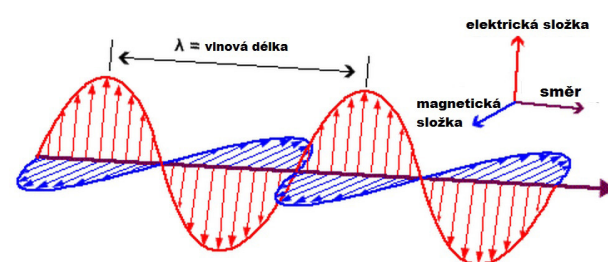
Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné a má vlastnosti vlnové (odraz, lom, interference, difrakce, polarizace) i kvantové. Šíří se vakuem rychlostí c o velikosti (přesně)

$$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}; \quad (1)$$

často se počítá se zaokrouhlenou hodnotou $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Mezi frekvencí kmitání, vlnovou délkou a rychlostí šíření je vztah:

$$c = \lambda \cdot f. \quad (2)$$



OBR. 6

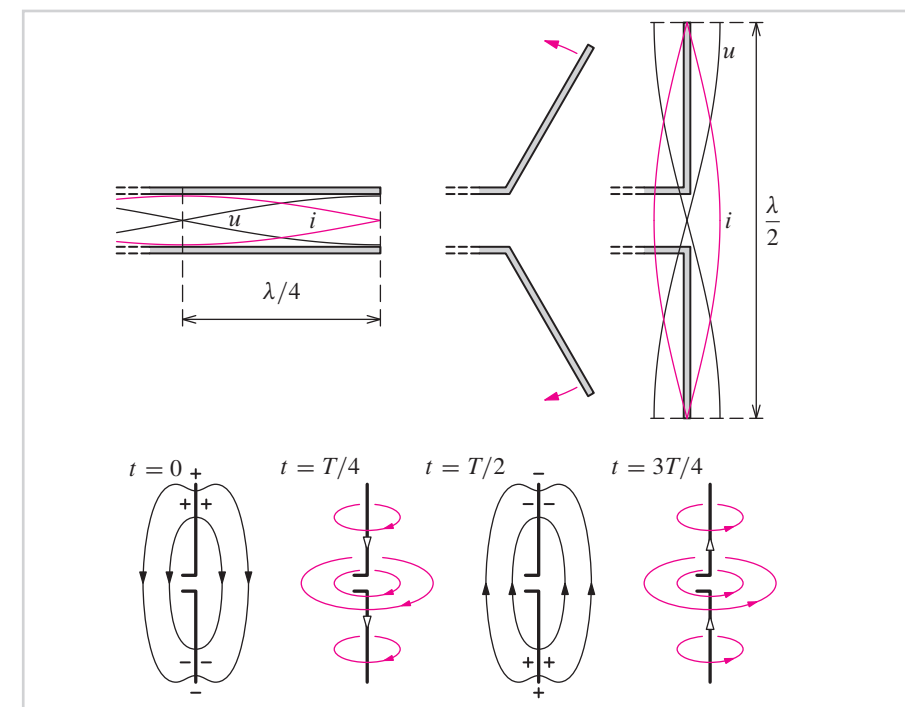
Spektrum elektromagnetického záření

Elektromagnetická záření různých vlnových délek tvoří **spektrum elektromagnetického záření** (někdy také zvané **Maxwellova duha**). Podle vlnové délky, resp. frekvence rozlišujeme několik druhů elektromagnetického záření; jejich přehled je v OBR. 1–5.

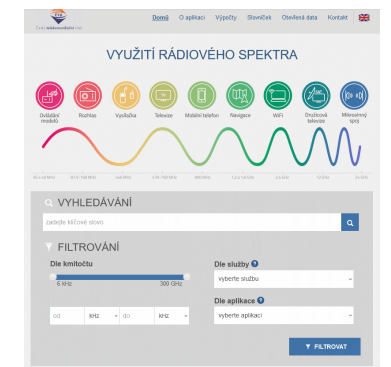
Mezi jednotlivými druhy elektromagnetického záření není ostrá hranice, přechody mezi nimi jsou plynulé nebo se oblasti jednotlivých druhů záření i překrývají. Název vlnění určujeme totiž také podle původu, nikoli jen podle frekvence. Například některé záření gama může mít delší vlnovou délku než některé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

ROZHLASOVÉ (RÁDIOVÉ) VLNY

Zdrojem rádiových vln je elektromagnetický oscilátor (v principu jde o elektrický obvod tvořený cívku a kondenzátorem). Do prostoru se vlnění dostává přes anténu – **elektromagnetický dipól** (OBR. 7). Kolem dipólu se vytvoří elektromagnetické pole se složkou elektrickou a magnetickou – šíří se prostorem a přenáší energii kmitů oscilátoru. Podrobněji je problematika popsána ve studijních materiálech *Elektromagnetické kmitání a vlnění* určených pro fyzikální seminář.



OBR. 7



Národní kmitočtová tabulka

Výklad v našem učebním textu je nutně zjednodušen. Vyhláška 105/2010 Sb. (v platném znění k 14. 12. 2021) uvádí národní kmitočtovou tabulku, která má 120 stran. — Pro přesnější informace je možno využít aplikaci na adrese <https://spektrum.ctu.cz/>.

0.003 MHz	Very Low Frequency (VLF)
0.03 MHz	Low Frequency (LF)
0.3 MHz	Medium Frequency (MF)
3 MHz	High Frequency (HF)
30 MHz	Very High Frequency (VHF)
300 MHz	Ultra High Frequency (UHF)
3 000 MHz	Super High Frequency (SHF)
30 000 MHz	Extra High Frequency (EHF)

Přehled frekvencí rozhlasového a mikrovlnného vlnění



RKS Topolná

Dlouhovlnný vysílač, který sloužil k rozhlasovému vysílání po celém území Československa. Sestává ze dvou stožárů umístěných u obce Topolná v okrese Uherské Hradiště. Každý ze stožárů je 270 m vysoký a je opatřen vysílači schopnými až výko-

nu 1500 kW. RKS Topolná byl v provozu od roku 1951. Vodní elektrárna Spytihněv sloužila pro tento vysílač jako záložní zdroj energie. Jako poslední byl z tohoto vysílače šířen program stanice Český rozhlas Radiožurnál na frekvenci 270 kHz; vysílání bylo ukončeno 31. 12. 2021.



DCF77

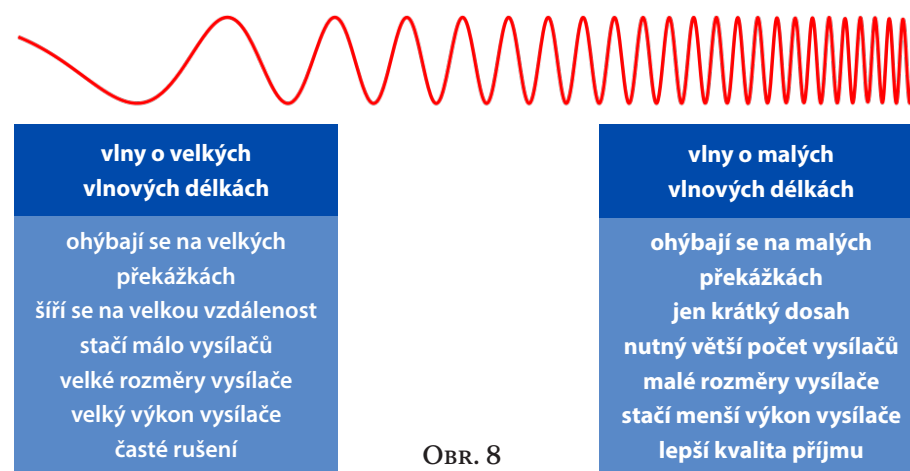
Rádiová stanice vysílající tzv. frankfurtský časový signál. Časový údaj vychází z měření cesiových atomových hodin z Fyzikálně-technického institutu v Braunschweigu a je vysílán na dlouhých vlnách 77,5 kHz z vysílače v Mainflingu. Dosah vysílače je okolo 1500–2000 km. Od roku 2007 obsahuje signál DCF77 informaci o předpovědi počasí; tuto informaci využívá řada domácích meteorologických stanic.



Lavinový vyhledávač, „pípák“

Autentický, ale velmi užitečný popis z webu horydoly.cz: „Pípáky fungují na mezinárodně sjednocené frekvenci 457 kHz. Znamená to, že se navzájem vyhledává každý přístroj s jakýmkoliv jiným, ať už ho vyrobil nebo provozuje kdokoli a kdekoliv. — Když spadne lavina a zavalí člověka, ostatní své pípáky okamžitě přepnou na příjem a zachytí signál vysílajícího pípáku, který má na sobě zasypaný. Podle intenzity signálu se orientují a přibližují k zasypanému. Nakonec propíchnou sněhovou sondou, a když se jim podaří napíchnout tělo, okamžitě ho vyhrabou pomocí sněhových lopat. — Rádiový signál vysílače vypadá podobně jako siločáry elektromagnetického pole, které nám ukazovali fyzikáři ve škole. Znamená to, že pípák nás tedy nevede k zasypanému přímo, ale po křivce.“

Z poznatků o ohybu vlnění a ze zákona zachování energie můžeme odvodit:



OBR. 8

Výjimkou z tohoto schématu jsou krátké vlny, jak bude dále vysvětleno.

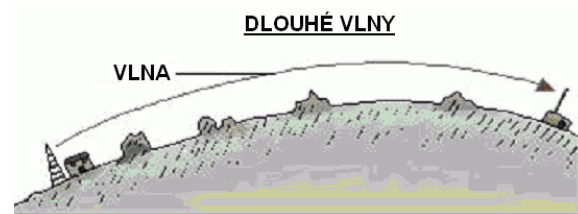
Podle vlnové délky se rádiové vlny dělí do pěti hlavních komunikačních pásem:

Dlouhé vlny

Dlouhé vlny (DV, *long wave* LW, *low frequency* LF) o frekvencích 30–300 kHz, tedy o vlnových délkách 10–1 km, se šíří na velké vzdálenosti; k pokrytí území stačí malé množství vysílačů. Vysílání je náchylné k rušení různými atmosférickými jevy.

Užití:

- **rozhlasové vysílání** – spíše historický význam (1. polovina 20. století), dnes používáno jen na rozlehlých, málo obydlených územích, v ČR se již neuvádí;
- námořní a letecké **radiomajáky**;
- **lavinové vyhledávače**, česky slangově „pípáky“, pracující jako vysílače či přijímače na frekvenci 457 kHz;
- **časové standardy** (v ČR zejména DCF77, tzv. frankfurtský časový signál) používané k synchronizaci rádiových hodin, hodinek, budíků a jiných zařízení, která potřebují přesný kmitočet či čas.



OBR. 9

Střední vlny

Střední vlny (SV, *medium wave* MW, *medium frequency* MF, amplitudová modulace AM): frekvence 0,3–3 MHz, vlnové délky 1000–100 m.

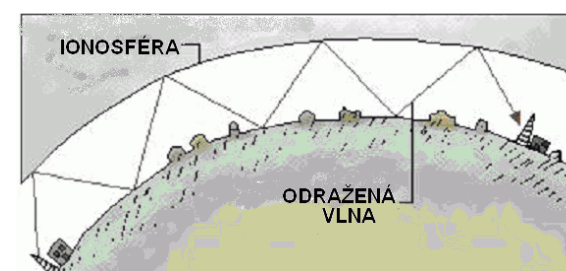
Užití:

- **rozhlasové vysílání** – v ČR nyní v provozu 3 poslední vysílače;
- **lodní radiostanice**;
- **radioamatérské pásmo** 160 m (pásmo je na samém okraji středních vln, často bývá řazeno již do vln krátkých) – radioamatér je držitel radioamatérské licence, který ve svém státě získal od příslušného úřadu povolení k vysílání na určených pásmech; každý držitel radioamatérské

licence obdrží i svoji volací značku – celosvětově unikátní kombinaci písmen a číslic; radioamatéři se snaží kontaktovat navzájem, přijímat jiné amatérské vysílání apod.; organizuje se řada celoplanetárních soutěží.

Krátké vlny

Krátké vlny (KV, *short wave* SW, *high frequency* HF) o frekvencích 3–30 MHz a vlnových délkách 100–10 m mají mimořádnou vlastnost, díky níž se částečně vymykají klasifikaci uvedené výše: odrážejí se od ionosféry. 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, která krátké vlny odráží (OBR. 10.). Při vhodném nasměrování vysílače mají krátké vlny mimořádný dosah (tisíce až desetitisíce kilometrů), lze je pak užít i k mezikontinentálnímu vysílání. Stav ionosféry se ovšem mění vlivem slunečního záření, proto se mění i podmínky šíření krátkých vln v různých denních a nočních dobách.



OBR. 10

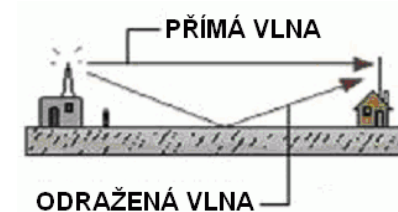
Prostřednictvím krátkých vln se vysílají zahraniční programy rozhlasových stanic do zemí, kde je omezená svoboda projevu nebo kde je zavedena cenzura. Pro Československo před rokem 1989 takto vysílaly např. stanice Svobodná Evropa a Hlas Ameriky. V období Protektorátu Čechy a Morava byla provedena rozsáhlá opatření k úpravě rozhlasových přijímačů a ke znemožnění příjmu krátkovlnného vysílání (např. ze Spojeného království – „Volá Londýn“).

Velmi krátké vlny

Velmi krátké vlny (VKV, *very high frequency* VHF, frekvenční modulace FM) o frekvencích v rozsahu 30–300 MHz a vlnových délkách 10–1 m se dnes používají především k přenosu rozhlasového a televizního vysílání. Vysílač a přijímač musejí být přibližně v přímce, na které není překážka.

Užití:

- **analogové stereofonní rozhlasové vysílání** s frekvenční modulací (FM); 87,5–108 MHz);
- **analogové televizní vysílání** (v ČR ukončeno v roce 2011);
- **digitální rozhlasové vysílání** v normě DAB (174–240 MHz);
- **bezdrátové mikrofony**;
- **ovládání modelů** (lodí, letadel).

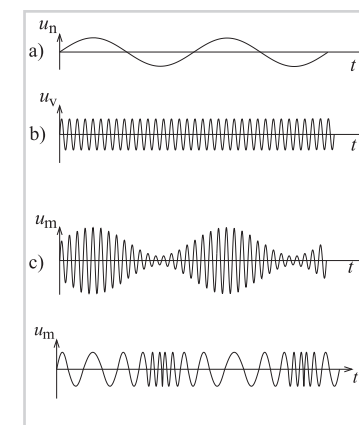


OBR. 11



Nariadení říšského protektora v Čechách a na Moravě o zařízení pro krátkovlnný příjem

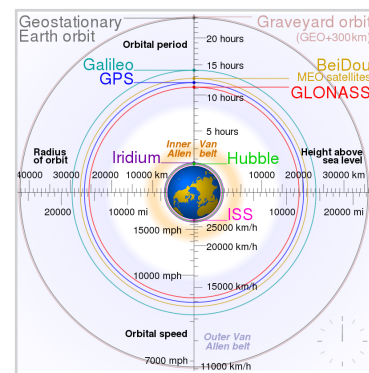
Vydáno dne 10. března 1943. Podle tohoto nařízení byli všichni obyvatelé protektorátu povinni ve stanovených lhůtách odevzdat své rozhlasové přijímače k odstranění části pro krátkovlnný příjem úředně stanoveným odborným personálem. Úřední potvrzení o odstranění krátkovlnného příjmu si musel každý uschovat. Celkem bylo v celém protektorátu odevzdáno a upraveno více než 1 milion přístrojů. — Od vydání tohoto nařízení do konce války bylo v pankrácké věznici popraveno 23 osob za „rozhlasové zločiny“: příjem cizího rozhlasu a šíření jeho zpráv.



Amplitudová a frekvenční modulace

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 zkratk fakticky pro označení středních a velmi krátkých vln.

Při amplitudové modulaci se mění amplituda nosné vlny v závislosti na amplitudě nízkofrekvenčního signálu zvukového záznamu. Při frekvenční modulaci se mění frekvence nosné vlny v závislosti na amplitudě nízkofrekvenčního signálu.



Trajektorie některých družic v centrálním gravitačním poli Země



KARL JANSKY

Objevitel prvního rádiového vesmírného zdroje. Níže replika jeho antény.



PERCY SPENCER

Americký konstruktér se během druhé světové války zabýval zdokonalováním magnetronů, což jsou elektronky, které slouží jako generátor mikrovlnného záření v radarech. Jednoho dne zjistil, že se mu během práce rozpustila čokoláda v kapse a po krátkém uvažování přišel na to, že za to mohou mikrovlny, které čokoládu roztáhly. Poté s úspěchem provedl další experimenty s ohřevem potravin, a tak se zrodila mikrovlnná trouba.

Ultrakrátké vlny

Ultrakrátké vlny (UKV, ultra high frequency UHF) o frekvencích v rozsahu 300–3000 MHz (vlnové délky 1–0,1 m) využívá „dnešní občan v běžném životě“ nejčastěji:

- digitální televizní vysílání DVB-T2 (470–694 MHz);
- digitální mobilní sítě GSM (900 a 1800 MHz pro 2G sítě, 2100 MHz pro 3G sítě), LTE – přenos dat v těchto mobilních sítích;
- přenos signálu z navigačních systémů (americký NAVSTAR GPS, evropský Galileo, ruský ГЛОНАСС, čínský BeiDou) do koncových zařízení (mobilní telefon, autonavigace, fotoaparát apod.);
- signál systému dálkového ovládní centrálního zamykání automobilu (433,92 MHz).

Rádiová astronomie*

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 „rádiovému mapování“ oblohy a bylo objeveno velké množství rádiových zdrojů. Vzhledem k velké vlnové délce rádiového záření je nutno pracovat s anténami velkých rozměrů. Takové má např. americká anténní soustava VLA v Novém Mexiku (19 km × 21 km × 21 km; viz OBR. 12).



OBR. 12

V roce 1965 američtí radioastronomové ARNO ALLAN PENZIAS a ROBERT WOODROW 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).

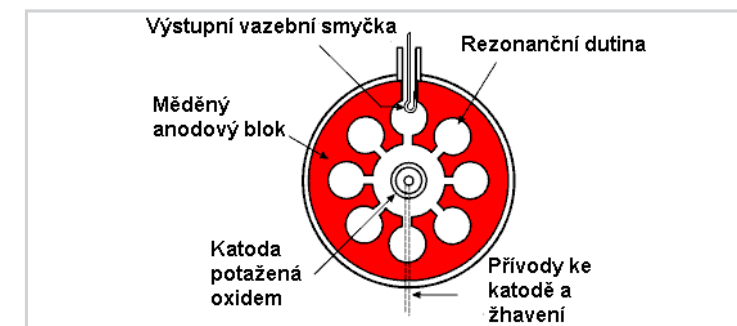
MIKROVLNY

Mikrovlny (microwaves) jsou elektromagnetické vlny o vlnových délkách 1 m až 1 mm, tomu odpovídají frekvence 300–300 000 MHz. Mikrovlnná oblast se (částečně) překrývá s oblastí ultrakrátkých vln; mikrovlny jsou proto někdy řazeny mezi vlny rádiové, jindy se vyčleňují samostatně.

Radiolokátor (také radar, z angl. *radio detecting and ranging*) je zařízení pro určování vzdálenosti, popř. polohy pozemních a vzdušných „cílů“ pomocí odrazu zpravidla centimetrových elektromagnetických vln vyzařovaných směrovou anténou. Měření vzdálenosti je založeno na určení doby, která uplyne

od vyslání impulsu elektromagnetických vln ke zjišťovanému objektu a jeho opětovnému příjmu po odrazu od povrchu objektu. Podle účelu se konstruuji radary vojenské, radary pro leteckou či lodní dopravu, radary policejní (k měření rychlosti automobilů) či meteoradary k monitorování oblačnosti.

Mikrovlnné trouby využívají zpravidla elektromagnetické záření o frekvenci 2,450 GHz, jíž odpovídá vlnová délka cca 12 cm (srovnejte s rozměry mikrovlnné trouby!). Mikrovlny jsou absorbovány molekulami kapalin, jež mají nenulový dipólový moment, zvláště molekulami vody; mikrovlny jsou schopny takové molekuly rozkmitat. 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 nejučinnějšímu ohřevu proto dochází v kmitnách vlnění. Aby byl ohřev pokrmů rovnoměrnější, umísťují se pokrmy na otočný podnos; otáčení zajišťuje, že kmitny postupně procházejí různými místy pokrmu.



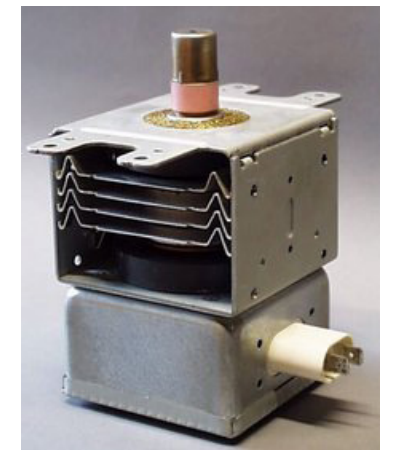
OBR. 13

Magnetron je generátor mikrovlnného záření užívaný v radarech a mikrovlnných troubách (OBR. 5). 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 vlnovod, který přenáší mikrovlnné záření do požadovaného směru. Na katodu je přiváděno žhavicí napětí řádově několik voltů, zatímco na anodu napětí v řádu kilovoltů. Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou přitahovány směrem k anodě, ale silné magnetické pole mění jejich trajektorii na kruhovou. Proud elektronů indukuje v rezonančních komorách vysokofrekvenční kmity, které jsou odváděny vlnovodem.

Zdravotní důsledky působení mikrovlnného záření: Pokud je živá tkáň vystavena účinkům mikrovlnného 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 k popálení kůže a celkové destrukci tkání. Bezpečnou ochranou před mikrovlnným zářením je vrstva vody – vodní bariéra.

Mikrovlnnou oblast spektra dále využívá:

- **bezdrátová komunikace** elektronických zařízení (různé standardy, např. Wi-Fi či Bluetooth, užívána je frekvence 2400 MHz, pro Wi-Fi nově navíc 5000 MHz; detaily protokolů přenecháváme semináři z informatiky), vč. komunikace s drony;
- **satelitní televizní vysílání** (pásmo kolem 12 GHz, resp. 22 GHz).



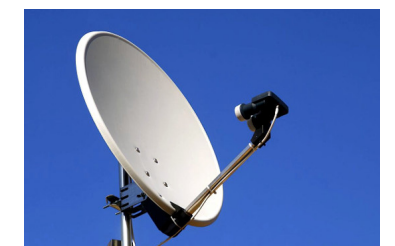
Magnetron

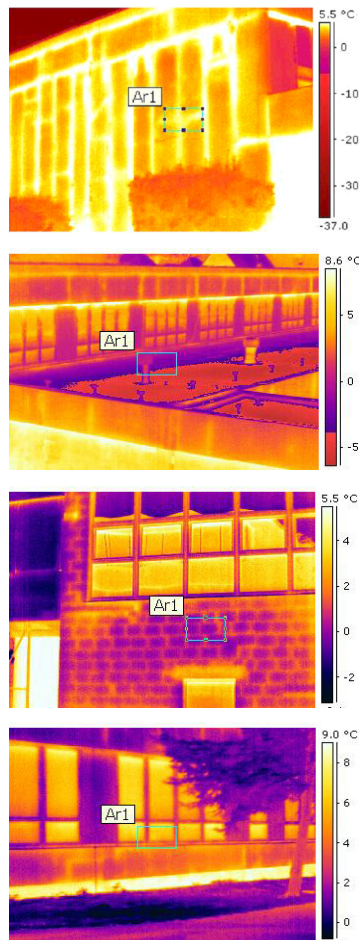
Oscilace magnetronu jako první pozoroval a popsal již ve 20. letech 20. století AUGUSTIN ŽÁČEK, profesor Univerzity Karlovy; první jednoduché dvoupólové magnetrony však byly vyrobeny ALBERTEM HULLEM ve firmě General Electric roku 1920. Vývoji pomohli Britové v druhé světové válce díky vynálezu radaru.



HARALD MODROZUB

HARALD BLÁTAND (angl. HARALD BLUETOOTH; cca 911–986) byl dánský král v letech 958 až 986 a norský král v letech 974 až 986. Využil svých diplomatických schopností k tomu, aby válčí kmeny přistoupily k diskusi a ukončily vzájemné rozpře. Právě této analogie bylo využito pro název technologie Bluetooth.





Termogramy školní budovy

Tepelnému posouzení budovy Gymnasia F. X. Šaldy (před rekonstrukcí) se věnovala seminární práce ARNOŠTA HLAVÁČKA z roku 2006, z níž je převzata kolekce termogramů.

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 vchodu 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 uniká teplo. Poslední termogram ukazuje na absenci tepelné izolace v detailu styku podlahy a podezdívky. Také jsou patrné desky polystyrenu použité při zateplení parapetních panelů.“

INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ

Infračervené záření (*infrared radiation*, IR) je charakterizováno vlnovými délkami 1 mm až 760 nm, tedy frekvencemi 300 GHz–395 THz. Nejčastěji vzniká jako tepelné záření vycházející ze zahřátých těles (i z lidského těla). Pomocí infračerveného záření se šíří teplo, a to i vakuem (zahřívání povrchu Země slunečním zářením).

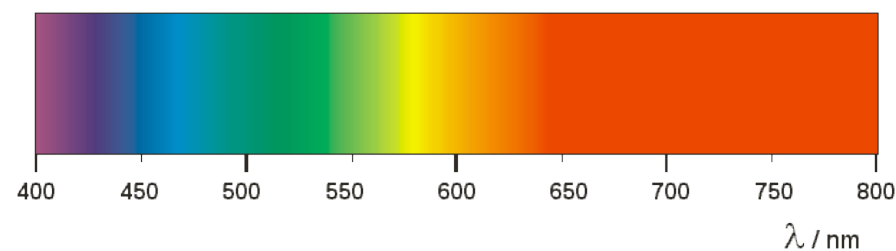
Vlastnosti:

- Není viditelné okem. Využívá se v běžných **dálkových ovladačích** domácí elektroniky, protože neruší televizní či rozhlasový signál a zároveň je člověk nevnímá. Infračervené záření z dálkových ovladačů vysílají infračervené LED.
- Proniká mlhou a znečištěným ovzduším. Lze je proto užít k „vidění v mlze“ (**infralokatory**).
- Pomocí vhodných přístrojů lze (lidským okem neviditelné IR záření) zachytit: tak fungují brýle pro **noční vidění** či videokamery pro noční natáčení (jako osvětlení slouží IR záření, oko vnímá jen tmou, ale kamera zachytí zřetelně osvětlené předměty; podobně infračervenými brýlemi lze pozorovat v naprosté tmě). Snímky objektů v oblasti IR slouží také k posuzování stavu tepelné izolace objektů.
- Při pohlcování IR (jakož i jiného elektromagnetického záření) probíhá tepelná výměna – energie elektromagnetického vlnění se mění na vnitřní energii pohlcujícího tělesa; tak pracují různé **infražářiče**.

SVĚTLO

Viditelné světlo je omezeno vlnovými délkami 760–390 nm (odpovídající frekvence 395–770 THz). Světlo vyvolává v lidském oku světelný vjem. 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.

Podrobněji se světlu věnujeme v optice.



OBR. 14

ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ

Ultrafialové záření (*ultraviolet radiation* UV) je vymezeno vlnovými délkami 390–10 nm (odpovídající frekvence 770 THz–30 PHz). Je to tedy elektromagnetické záření o vlnové délce kratší, než má světlo fialové barvy. Jeho nejkratší vlnové délky zasahují do oblasti rentgenového záření. Vzniká jako tepelné záření těles, jež jsou zahřata na teplotu vyšší, než odpovídá teplotě těles vyzařujících viditelné světlo; zdrojem ultrafialového záření jsou hvězdy či elektrický oblouk (využívaný při sváření), a dále rtuťové výbojky

či speciální trubice, podobné trubícím zářivkovým, které jsou konstruovány tak, aby produkovaly určitou část spektra UV záření (UV-A, UV-B). Používají se jako hlavní součást **solárií**.

Trubice produkující zdraví škodlivé UV-C záření se používají k desinfekci a hubení nežádoucích organismů např. v ordinacích (při zapojení přístroje nesmí být nikdo přítomen, škodí i domácím zvířatům, rybám v akváriu či rostlinám).

Vlastnosti:

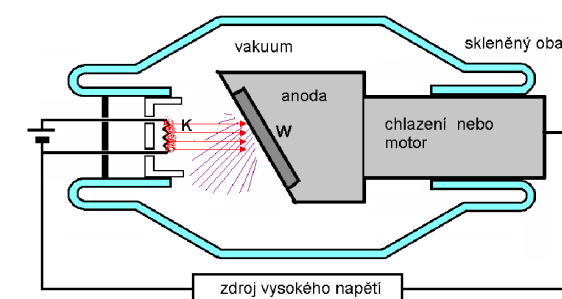
- Reaguje s fotografickou deskou.
- Způsobuje v menších dávkách **zhnědnutí kůže** a produkci vitamínu D, ve vyšších dávkách **rakovinu kůže** (fotony UV záření mohou poškodit DNA, což může způsobit jak odumření buňky, tak i její nekontrolovanou reprodukci – rakovinu); je častou příčinou zánětu spojivek (proto je nutné chránit oči před účinky ultrafialového záření brýlemi se skly, popř. plastem a filtrem).
- Působí jako **desinfekce** – ničí mikroorganismy (**sterilizace**).
- Vyvolává **luminiscenci** – záření luminoforů v oblasti viditelného světla (ochranné prvky bankovek, luminiscence krevních stop či stop spermatu využívaná v kriminalistice).
- Je pohlcováno obyčejným sklem; křemenné sklo UV záření nepohlcuje (proto se používá k výrobě baněk výbojek).

Jako přirozená ochrana Země proti UV záření slouží **ozonová vrstva**. Vrstva atmosféry s velkou koncentrací ozonu O_3 (ozonosféra) se nachází ve výšce 22 km až 35 km a zamezuje pronikání ultrafialového záření k zemskému povrchu. Tím umožňuje existenci života na Zemi. Některé plynné sloučeniny fluoru (freony), které unikají do ovzduší při určitých výrobních postupech, se s ozonem v atmosféře slučují. Tím se zmenšuje koncentrace ozonu v ozonosféře a snižuje se její schopnost pohlcovat ultrafialové záření. V atmosféře vznikají ozonové díry, jimiž v některých oblastech ultrafialové záření proniká ve větší míře až k povrchu Země.

RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ

Rentgenové záření (dříve **paprsky X**; *X-rays*) má ještě kratší vlnovou délku než ultrafialové záření a zaujímá poměrně širokou oblast spektra 10 nm–1 pm (frekvence 30 PHz až 30 EHz). 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 trubcích** neboli **rentgenkách**. Základní části rentgenky (OBR. 15) jsou katoda K (obvykle žhavena), která emituje elektrony, a anoda A, zhotovená z wolframu. Mezi katodou a anodou je velké napětí (10 kV až 400 kV), takže se emitované elektrony pohybují se značným zrychlením. Velkou rychlostí



OBR. 15



Solárium

Solárium horizontální konstrukce s trubicemi, jež produkují UV záření.



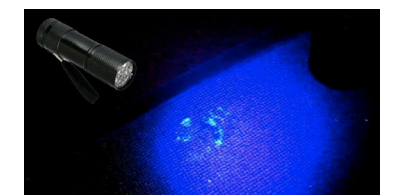
UV-C lampa

Germicidní lampa. UV-C záření ničí viry a bakterie.



Ochranné prvky bankovek

Bankovka 2000 Kč osvětlená UV lampou.



UV detekce spermatu

Při ohledávání místa činu nebo při detekci stop spermatu v laboratoři se velmi často používají UV lampy emitující světlo o vlnové délce 440–450 nm. Při osvětlení suchých stop spermatu ve většině případů dojde k excitaci fluoroforů seminální tekutiny (molekuly fravínu a cholinu) a je emitována charakteristická fluorescenční světla od modré do žluto-oranžové barvy. Vyhledání stop spermatu pomocí speciálních svítidel však nelze považovat za průkaz spermatu. Falešně pozitivní výsledky může vykazovat například moč a v některých případech i vaginální výtoky. Falešně negativní výsledky naopak můžeme získat, pokud byl vzorek před expozicí UV světla vystaven působení vysoké teploty, vlhkosti, oxidačních činidel nebo mikroorganismů.



Rentgentka s rotační anodou



Rentgenový snímek, který pořídil WILHELM CONRAD RÖNTGEN

Často se mylně uvádí, že jde o snímek ruky jeho manželky. Ve skutečnosti byl rentgenován RUDOLF ALBERT VON KOELLIKER, anatom a fyziolog. Rentgenový snímek ruky své manželky Röntgen předtím skutečně pořídil, je však méně kvalitní než tento nejčastěji prezentovaný snímek.



Rentgen chrupu v policejním vyšetřování

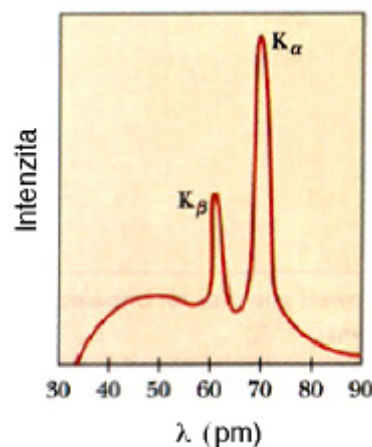
Z tiskové zprávy:

Policisté stále neznají totožnost ženy, kterou téměř před rokem našli mrtvou... — Již dříve kriminalisté uvedli, že neznámá dobře pečovala o svůj chrup. Nyní zveřejnili rentgenový snímek jejích zubů a obrací se především na zubaře, zda nepoznají svoji práci a tím by pomohli ztotožnit mrtvou ženu. „To že nepatří do sociálně slabších vrstev potvrzuje skutečnost, že se starala i o svůj chrup, dokonce mohla pravidelně navštěvovat dentální hygienistku,“ popsala policejní mluvčí.

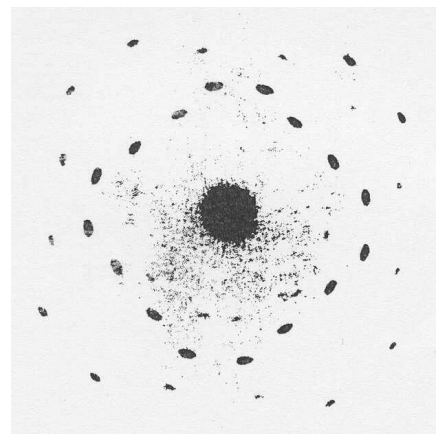
dopadají anodu; energie elektronů se mění jednak na rentgenové záření, jednak na teplo, kterým se anoda zahřívá. Aby se zabránilo jejímu přehřátí, otáčí se, nebo je dokonce chlazená protékající vodou.

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. 16).
- **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, vyšle při tomto přechodu elektromagnetické záření zcela určité vlnové délky. Proto je spektrum tohoto záření diskrétní; popsáním případům odpovídají („lokální“) maxima, označovaná obvykle počestným patvarem píky (viz také OBR. 16).



OBR. 16



OBR. 17

Vlastnosti a využití:

- Reaguje s fotografickou deskou. Ionizuje vzduch; způsobuje **ionizaci** některých látek
- **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. Prvky s vyšším číslem Z pohlcují rentgenové záření více. Tento poznatek se široce využívá v lékařství. Rentgenové záření se pohlcuje 150× více v kostech složených hlavně z fosforečnanu vápenatého než ve svalech, jejichž převážující složkou je voda. Proto se na rentgenovém snímku jeví kosti světlejší než tkáň.
- **Výpočetní tomografie** (angl. *computed tomography* CT) je radiologická vyšetřovací metoda, která pomocí rentgenového záření umožňuje neinvazivní zobrazení vnitřních orgánů a tkání ve 3D projekci. Princip tomografu spočívá ve vytváření souborů rentgenových snímků části těla po jednotlivých vrstvách kolmých k ose pacientova těla a širokých několik milimetrů (název zařízení je odvozen z řec. η τομή – řez). Pacient leží na lůžku, kolem kterého se postupně otáčí v rozsahu 180° 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 měřeny 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. olověnými plechy) a doba ozáření musí být co nejkratší. Toho se dosahuje hlavně tím, že se na minimum zkracuje doba ozáření při získávání rentgenového snímku nebo jeho počítačového záznamu.

- Tvrdé rentgenové záření se využívá k **léčbě zhoubných nádorů** (ničí buňky).
- **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 rentgenů 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.
- **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).
- **Rentgenová strukturní analýza** je metoda zkoumání vnitřní struktury pevných látek na základě ohybových obrazců, které vznikají difrakcí rentgenového záření na krystalové mřížce pevné látky (OBR. 17). Tato metoda zkoumání krystalů je podrobněji popsána ve studijním materiálu *Vlnové vlastnosti světla*.

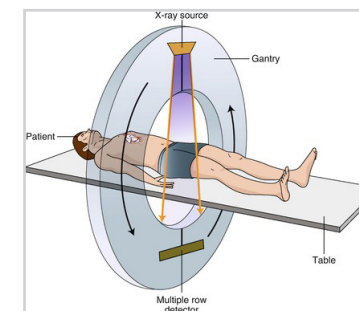
ZÁŘENÍ GAMA

Záření gama (γ) má vlnové délky menší než 1 pm (tomu odpovídají frekvence vyšší než 30 EHz) a na krátkovlnném konci elektromagnetické spektrum uzavírá. Na rozdíl od rentgenového záření, které vzniká při energetických přeměnách v elektronovém obalu atomu, jsou zdrojem záření gama radioaktivní přeměny v jádrech atomů.

Zdrojem jaderného vlnění jsou změny elektromagnetického pole při jaderných reakcích. Radioaktivní záření γ neexistuje samovolně, ale doprovází záření α nebo β (tato záření jsou vyzařována radionuklidy). Záření γ 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.

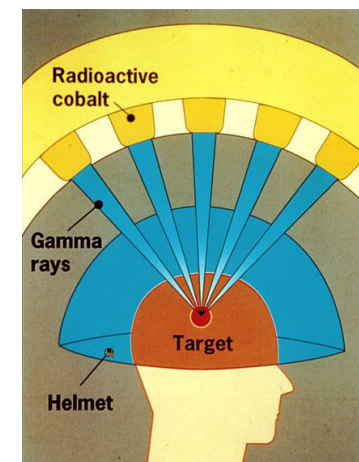
Vlastnosti:

- Má silné **ionizační účinky** a v důsledku fotoefektu (viz studijní materiál *Fysika mikrosvětla*) uvolňuje z látek nabitě částice.
- Podobně jako rentgenové záření je látkou pohlcováno v závislosti na její struktuře – 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 γ záření pro defektoskopii výhodnější než rentgenové záření).
- 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.
- 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, zeleniny a koření, aby déle zůstaly čerstvé.



Výpočetní tomografie

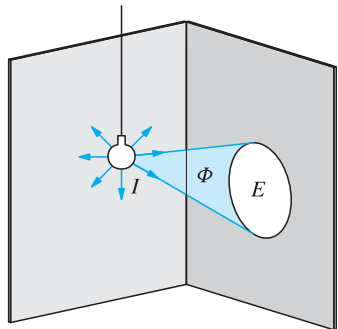
Vynálezci metody jsou ALLAN MCLEOD CORMACK a GODFREY NEWBOLD HOUNSFIELD (Nobelova cena za lékařství a fyziologii, 1979).



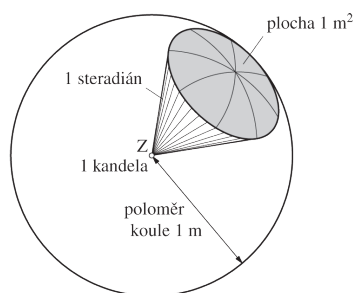
Leksellův gama nůž

Přístroj, který se používá v radiochirurgii pro ozáření lézí v mozku. Přístroj umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti zaměření ošetřované léze. Přístroj využívá záření gama izotopu ^{60}Co . Hlava pacienta je upevněna do speciální helmy, v níž je umístěno 201 kobaltových zářičů, které jsou všechny zaměřeny na jedno místo, které ozáří. Díky slabému záření se ale nepoškodí okolní tkáň, léčebné účinky má jen na místo, kam směřují všechny zářiče.

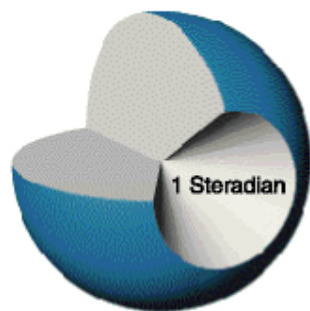
Radiometrie a fotometrie



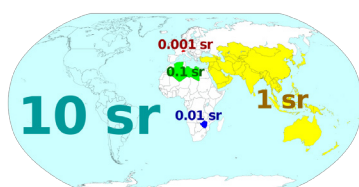
OBR. 21



OBR. 22



Model prostorového úhlu 1 sr



Prostorové úhly odpovídající rozloze barevně vyznačených ploch na povrchu Země

Celému povrchu odpovídá prostorový úhel 4π sr, tj. cca 12,566 sr.

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. 21). Jsou to následující fotometrické veličiny: svítivost I popisuje zdroj světla, světelný tok Φ se vztahuje k přenosu světla prostorem, osvětlení E určuje účinky světla při jeho dopadu na povrch tělesa.

Těmto fotometrickým veličinám odpovídají veličiny radiometrické: zářivost I_e , zářivý tok Φ_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.

Celkový přehled všech veličin je v OBR. 25 na konci učebního textu.

Než začneme s výkladem jednotlivých veličin, zastavme se ještě u měření prostorových úhlů (OBR. 22). 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 4π sr.) Prostorové úhly se obvykle značí řeckými písmeny z konce abecedy, např. Ω .

RADIOMETRICKÉ VELIČINY

Zářivá energie Q_e je energie vyslaná, přenesená nebo přijatá formou elektromagnetického záření. Jednotkou je joule. (V tomto textu značíme energii poněkud netradičně Q , aby se označení nepletlo s označením ozářenosti E_e či osvětlení E .)

Zářivý tok (též: **zářivý výkon**) Φ_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.

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 Φ_e a obsahu plošky S , na kterou tok dopadá:

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

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

Dávka ozáření (**expoziční**) H_e je časový souhrn ozářování vztahovaný 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 $E_e \cdot t_{max}$.

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

Matematická poznámka

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 neuzívá vůbec, v integrálním počtu jen jako neoddelitelná součást označení Newtonova (nebo nějakého jiného) integrálu. Ve fyzikální literatuře je však symbol velmi 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 $\Delta/\Delta t$. □

FOTOMETRICKÉ VELIČINY

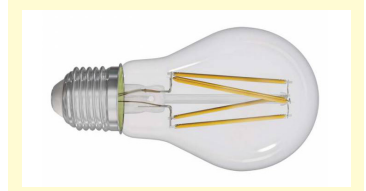
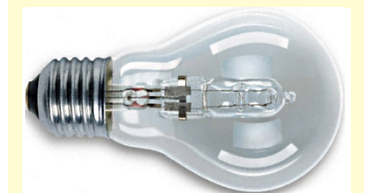
Fotometrické veličiny popisují tu část spektra elektromagnetického vlnění, která vyvolává vjem v lidském zraku. (Varujeme se formulace *působí na lidský zrak*. Např. rentgenové záření, záření γ či některé mikrovlnné záření na lidský zrak sice působí, a to destruktivně, ale žádný zrakový vjem nevyvolává.)

Nejčastější zdroje světla v domácnosti

Pro každý zdroj uvádíme světelnou účinnost ve lm/W. Užité vlastnosti světelných zdrojů však určují ještě další parametry, např. barevný tón světla, životnost světelného zdroje, pokles světelného výkonu v závislosti na době svícení apod.

Celkové srovnání ze spotřebitelského webu je uvedeno dole. Na základě dosavadních zkušeností lze předpokládat, že doba životnosti kompaktních zářivek a LED zdrojů je zde nadhodnocena.

Po řadě shora dolů: wolframová žárovka (9,5 lm/W), halogenová žárovka (10,5 lm/W), kompaktní zářivka (58 lm/W), LED zdroj (83 lm/W). Ve stejném pořadí (zleva doprava) jsou světelné zdroje uvedeny ve srovnávací tabulce.



Účinnost	NEJMENŠÍ	NEJLÉPŠÍ	NEJLÉPŠÍ	NEJLÉPŠÍ
TYP ŽÁROVKY	STANDARD	HALOGEN	CFL	LED
LUMENS	40 W	29 W	9 W	8 W
450	40 W	29 W	9 W	8 W
800	60 W	43 W	14 W	13 W
1100	75 W	53 W	19 W	17 W
1600	100 W	72 W	23 W	20 W
ŽIVOTNOST	1 rok	1-3 roky	6-10 let	15-25 let
ÚSPORA	×	až 30 %	až 70 %	až 80 %



Vývoj definice kandely

Nejprve byla kandela zavedena jako svítivost svíčky definovaného složení. Typů referenčních svíček však existovalo několik, a navíc bylo složité zachovat stejné podmínky hoření.

Jednotka byla předefinována jako svítivost 1/600 000 m² povrchu absolutně černého tělesa ve směru kolmém k tomuto povrchu při teplotě tuhnutí platiny (1768 °C) při normálním tlaku (101 325 Pa). Tato definice byla přijata na XIII. generální konferenci pro míry a váhy v roce 1967. Současná definice platí od roku 1979, resp. 2019.



Ukázka obalu zdroje světla

Uvedeny jsou (shora dolů, zleva doprava) tyto údaje: typ patice (závit), příkon, barva světla (dle záření absolutně černého tělesa v kelvinech), světelný tok (v lumenech), příkon klasické žárovky (ve wattch), jejíž světelný tok odpovídá prezentovanému zdroji světla.

ANSI lumen

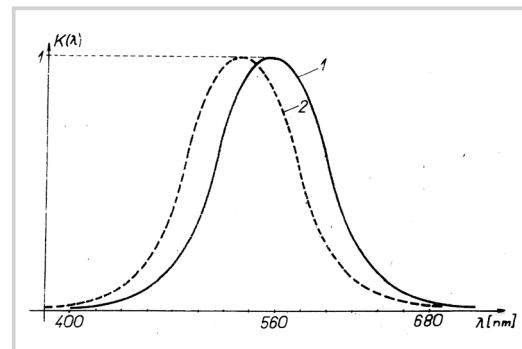
Metodika měření světelného toku projektorů. Obraz je rozdělen na devět shodných obdélníků; světelný tok v ANSI lm je průměr hodnot světelného toku v těchto obdélnících. Světelný tok v jistém obdélníku se vypočte jako součin osvětlenosti (v lx) naměřené ve středu tohoto obdélníku a obsahu jeho plochy.

Již jsme uvedli, že výkon přenášený elektromagnetickým vlněním je popsán zářivým výkonem Φ_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

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

kde Φ je nová veličina popisující tu část zářivého výkonu, která způsobuje zrakový vjem; nazývá se **světelný tok** Φ . 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 λ 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 λ je v OBR. 23; křivka 1 platí pro vidění za dne, křivka 2 pro vidění za soumraku.



OBR. 23

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

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

Jednotkou svítivosti je kandela (cd). **Kandela** (z lat. *candela* – svíčka) je základní jednotkou SI; od roku 2019 je definována takto:

Kandela, značka „cd“, je jednotka svítivosti v SI. Je definována stanovením pevné číselné hodnoty světelné účinnosti monochromatického záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz (K_{cd}), která je rovna 683, je-li vyjádřena v jednotce $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, která je rovna $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ nebo $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány prostřednictvím h , c a Δf_{CS} .

Tato nová definice je obsahově totožná s předchozí definicí z roku 1979, která je ovšem „čtivější“:

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 parafrínové svíčky ve vodorovném směru.

Protože kandela je základní jednotka soustavy SI, je třeba ostatní jednotky vyjádřit pomocí kandely: 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 kandely do kužele, který vymezuje na kulové ploše s poloměrem 1 metr, jejíž střed je ve světelném zdroji, kulový vrchlík o obsahu 1 m². Poznamenejme, že celkový světelný tok bodového zdroje je $4\pi I$.

Osvětlení (také: **osvětlenost**) E je určeno podílem světelného toku Φ 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 $\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2} = \text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$; slovy řečeno: Plocha o obsahu 1 m² má osvětlení jednoho luxu, dopadá-li na ni (rovnoběžně s kolmicí dopadu) světelný tok 1 lumen.

Mj. z experimentu plyne, že osvětlení E uvažované plochy závisí na svítivosti zdroje I a vzdálenosti r této plochy od zdroje:

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

Úhel dopadu se měří, jak je v optice obvyklé, tedy mezi dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu (OBR. 24). Nejlépe je tedy osvětlena světelného zdroje a na úhlu dopadu světla α na tuto plochu: 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 (pak $\alpha = 90^\circ$), je osvětlení plochy nulové.

Několik příkladů osvětlení přirozenými zdroji: Slunce v letní poledne za bezmračného počasí dává osvětlení 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 0,000 3 lx.

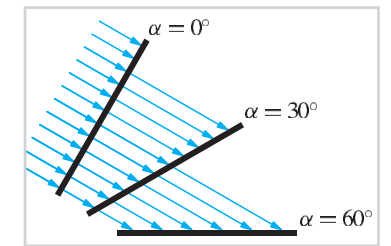
Dostatečné osvětlení patří k základním požadavkům na hygienu práce. Například ke čtení je nutné osvětlení asi 500 lx, rýsování nebo montáž drobných objektů vyžaduje až 1 500 lx, ale k osvětlení schodiště postačuje 15 lx. Citlivost oka je značná; oko je schopno rozlišit předměty již při osvětlení $3 \cdot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

K měření osvětlení se v praxi používají přístroje založené na přímé přeměně energie záření v elektrickou energii (využívají **fotoelektrický jev** – viz studijní materiály *Fysika mikrosvěta*). Samostatný přístroj pro měření osvětlení je **luxmetr**.

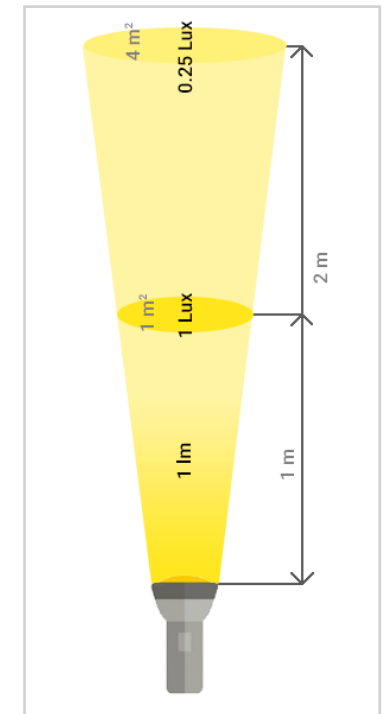
Osvit (nebo: **expoze**) H je časový souhrn osvětlení vztážený na jednotku plochy. Musíme tedy „sečíst“ osvětlení ve všech jednotlivých okamžicích, tedy integrujeme:

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

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



OBR. 24



Jednoduchá demonstrace závislosti ve vzorci (8)



Luxmetr

Samostatný přístroj pro měření osvětlení. 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 automatickou, která podle úrovně osvětlení automaticky upravuje velikost vstupního otvoru objektivu čili clonu.

Literatura

POUŽITÁ LITERATURA

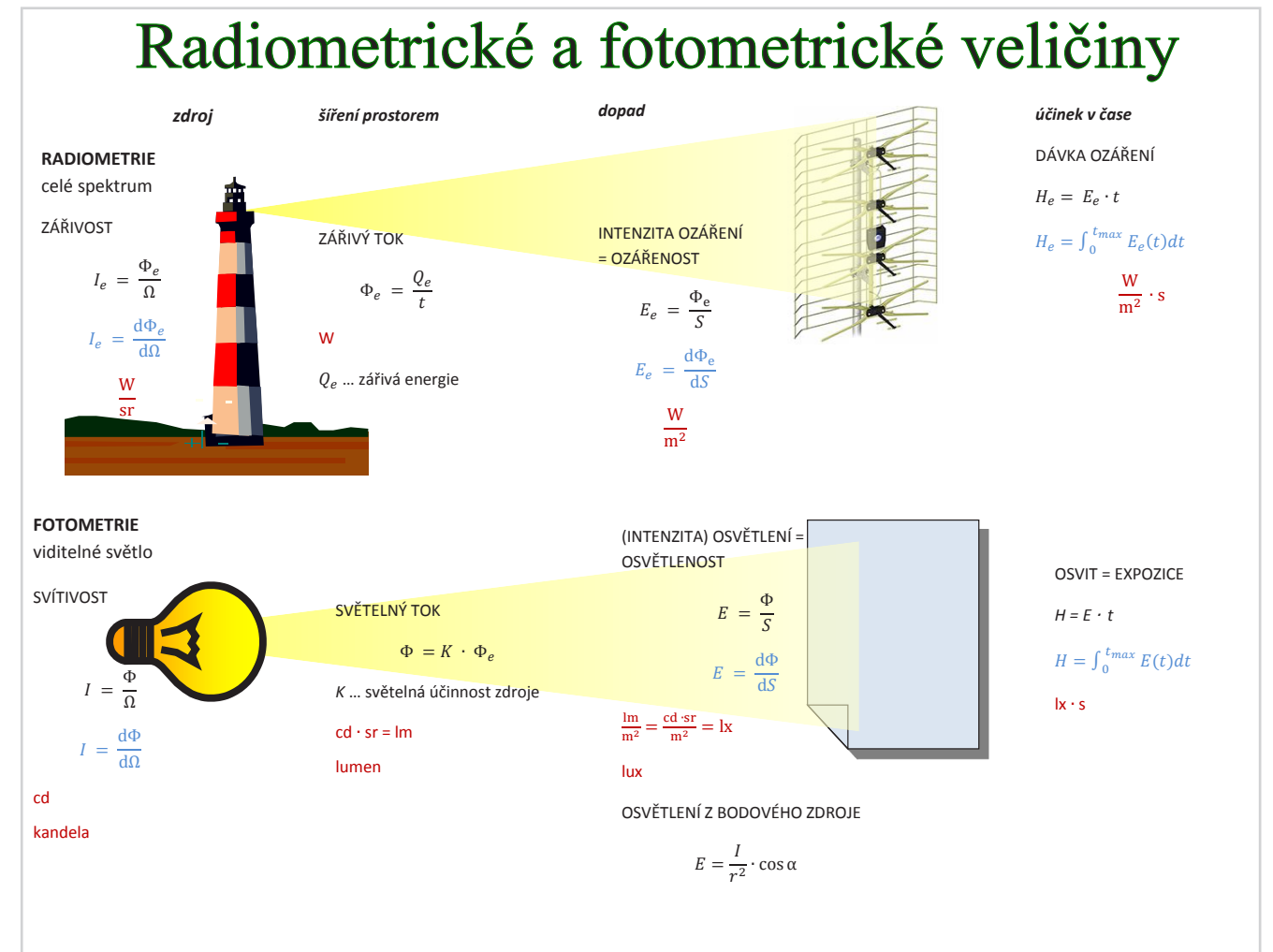
- [EM] Lepil, O. – Šedivý, P.: *Fyzika pro gymnázia: Elektřina a magnetismus*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1995.
- [EM'] Lepil, O. – Šedivý, P.: *Fyzika pro gymnázia: Elektřina a magnetismus*. 5. vyd. Praha: Prometheus, 2007. ISBN 978-80-7196-202-1.
- [OP] Lepil, O.: *Fyzika pro gymnázia: Optika*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2002.
- [OP'] Lepil, O.: *Fyzika pro gymnázia: Optika*. 5. vyd. Praha: Prometheus, 2018.
- [Štr79] Štrba, A.: *Všeobecná fyzika 3 – Optika*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979.
- [Hor61] Horák, Z. – Krupka, F. – Šindelář, V.: *Technická fyzika*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1961.
- [Wag95] Wagner, J. – Kopal, A.: *Fyzika II*. Liberec: PF TU, 1995.
- [Lau59] Laue, M. von: *Dějiny fyziky*. 1. vyd. Praha: Orbis, 1959.
- [Što09] Štol, I.: *Dějiny fyziky*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2009.
- [Gry89] Grygar, J. – Železný, V.: *Okna vesmíru dokořán*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1989.
- [Hla06] Hlaváček, A.: *Historie a současnost budovy naší školy pohledem fyziky* [maturitní práce]. Liberec: Gymnázium F. X. Šaldy, 2006.
- [VSF] *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurs*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.
- [Wik] *Otevřená encyklopedie Wikipedia* [cit. 2022-02-22]. <<http://www.wikipedia.org>>

ZDROJE OBRÁZKŮ

Číslované obrázky: 1 https://wikisofia.cz/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_z%C3%A1kladn%C3%ADn%C5%99en%C3%AD | 2, 3, 13, 14 [Wik] | 4 <https://br.pinterest.com/pin/344877283971250995/> | 5 ? | 6 <https://elektro.tzb-info.cz/13319-ucinky-elektromagnetického-pole-na-lidsky-organismus> | 7 [EM] | 9–11 <http://www.ok1ike.nagano.cz/soubory/radiovlny.htm> | 12 <https://public.nrao.edu/news/the-very-large-array-astronomical-shapeshifter/> | 15 <https://www.med.muni.cz/biofyz/files/vlzl/lectures/rtg-zobrazeni-18.pdf> | 16 http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbc/rtg_difrakce/3.html | 17 http://rtg.fbmi.cvut.cz/index.php%3Foption=com_content&view=article&id=53&Itemid=59.html | 21–22, 24 [OP] | 23 [Štr79] | 25 Michela Řehánková

Ostatní obrázky dle stran: 1 <https://www.belairfineart.com/fr/artistes/tous/nick-veasey/> | 9 <https://spektrum.ctu.cz/> | 10 <https://www.quillcz.cz/lavinove-vyhledavace/pieps-pro-bt-lavinovy-vyhledavac/> | 11 <https://www.fronta.cz/dotaz/trest-smrti-za-poslech-ciziho-rozhlasu>; [EM] | 12 <https://www.massmoments.org/moment-details/percy-spencer-inventor-of-microwave-oven-born.html> | 14 [Hla06] | 15 <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=212>; <https://www.dnacentrum.cz/spermatest/lokalizace-stop-spermatu/>; <https://www.ebay.com/itm/153777057868> | 16 https://www.idnes.cz/pardubice/zpravy/utonula-zena-pardubice-rentgen-zubu.A180217_112902_pardubice-zpravy_bse; <https://www.xray.cz/kryst/difrakce/fiala2/topografie.htm> | 17 <https://www.sciencephoto.com/media/126975/view/gamma-knife> | 18 https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/RYSER/ch07.html | 19 <https://www.chatar-chalupar.cz/cim-nahradit-zarovky/>; <https://www.sporivec.cz/domacnost/led-zarovky> | 20 <https://www.shineretrofits.com/lighting-center/faq/what-is-the-difference-between-lumens-and-candelas/>; <https://www.thebeautyofsouls.com/wattage-lampen-vergelijken> | 21 <https://www.outdoorking.cz/porozumejte-pojmum-svetelneho-vykonu/>; <https://eshop.hurikan.cz/conrad-digitalni-luxmetr-voltcraft-ms-1300/>; obrázky v přehledu neuvedené jsou převzaty z [Wik].

Na poslední straně: Pohled z vyhlídky Máj na řeku Vltavu. Foceno v infračervené části spektra.
Autor: Michal Kupsa, www.michalkupsa.cz.



OBR. 25



*Vlnový popis
elektromagnetického záření
Spektrum elektromagnetického záření
Rozhlasové (rádiové) vlny
Mikrovlny
Infračervené záření
Světlo
Ultrafialové záření
Rentgenové záření
Záření gama
Radiometrické veličiny
Fotometrické veličiny*

Studijní text Gymnasia F. X. Šaldy shrnuje základní poznatky o elektromagnetickém spektru a uvádí základní veličiny fotometrické a radiometrické.

Relativně rozsáhlé exkursy v postranních pruzích stránek usazují téma výkladu do širších fyzikálních, obecně přírodovědných či historicko-společenských souvislostí.

K tématu studijního textu je připravena sbírka úloh a rozcestník s odkazy na doporučené animace a videa.

www.gfxs.cz

