

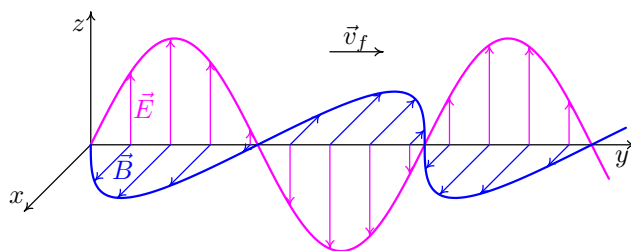
3 Elektromagnetické vlny ve vakuu

Od mechanických vln s pružinkami a závažími se nyní přesuneme k vlnám elektromagnetickým. Setkáváme se s nimi na každém kroku – radiové vlny, mikrovlny, světlo nebo třeba rentgenové záření jsou příklady elektromagnetických vln.

3.1 Popis elektromagnetických vln

Při elektromagnetickém vlnění se nehýbají žádné částice, nekmitají žádné oscilátory. To, co se "hýbe", přesněji zvětšuje a zmenšuje, je elektrické a magnetické pole.

Na obrázku 12 vidíme elektromagnetickou vlnu, která se šíří **vakuumem**. Je složena z vlny elektrické intenzity¹ \vec{E} (na obrázku kmitající svisle zobrazena růžově) a magnetické indukce \vec{B} (modře, kmitající vodorovně). V elektromagnetické vlně ve vakuu vektory \vec{E} a \vec{B} kmitají **ve fázi** (kmitají „spolu“)



obr. 12: Elektromagnetická vlna v jediném okamžiku

a oba tvoří příčné vlnění. Délky vektorů \vec{E} a \vec{B} srovnávat nemůžeme. Elektrickou intenzitu měříme ve voltech na metr ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) a jednotkou magnetické indukce je tesla (T).

V elektromagnetické vlně v každém okamžiku (s výjimkou nulových bodů) vektory \vec{E} , \vec{B} a vektor fázové rychlosti \vec{v}_f (v tomto pořadí) tvoří **pravotočivou soustavu souřadnic**. Představme si hodinky ukazující přesně tři hodiny. Malá ručička mířící ke třetí hodině představuje směr prvního vektoru, velká ke dvanáctce ukazuje jako druhý vektor. Pokud třetí vektor soustavy vystupuje z hodinek přímo k nám, pak tyto tři vektory tvoří pravotočivou soustavu souřadnic. Když třetí vektor směřuje za hodinky, soustava je levotočivá. Na určení pravotočivosti se často používá pravá ruka. Zahnuté prsty ukazují směr od prvního vektoru k druhému a natažený palec pak určuje vektor třetí.

3.2 Střídavé elektrické a magnetické pole

Elektrické pole vlny z obrázku 12 kmitá rovnoběžně s osou z a šíří se ve směru osy y . Amplitudu označíme E_A (elektrické pole pak nabývá hodnot v rozmezí $\langle -E_A, E_A \rangle$). Rovnice popisující kmitání elektrické intenzity na obrázku 12 je analogická s rovnicí

¹Správný název veličiny \vec{E} je **intenzita elektrického pole**. Pro stručnost budeme v celém textu používat běžné, ale nepřesné pojmenování, elektrická intenzita.

pro mechanické vlny

$$E_z = E_A \sin(\omega t - ky). \quad (15)$$

Složky elektrické intenzity do osy x a y jsou stále nulové (pole kmitá pouze podél osy z). Vektor \vec{E} můžeme zapsat

$$\vec{E} = (E_x, E_y, E_z) = (0, 0, E_A \sin(\omega t - ky)). \quad (16)$$

Podobně zapíšeme vektor magnetické indukce. Vektor \vec{B} kmitá podél x a šíří se stejně jako \vec{E} , ve směru y . Složku x vektoru magnetické indukce vyjádříme

$$B_x = B_A \sin(\omega t - ky). \quad (17)$$

B_A značí amplitudu magnetického pole. Celý vektor \vec{B} má tvar

$$\vec{B} = (B_x, B_y, B_z) = (B_A \sin(\omega t - ky), 0, 0). \quad (18)$$

Pro délky vektorů \vec{E} a \vec{B} v elektromagnetické vlně platí vzájemný vztah

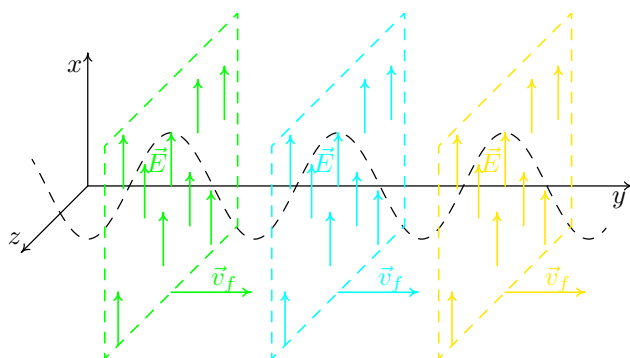
$$|\vec{E}| = c|\vec{B}|, \quad (19)$$

který si nebudeme odvozovat. Konstanta c je rychlost světla ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), kterou se budeme zabývat v příští části. Rovnost (19) platí pro velikosti vektorů \vec{E} a \vec{B} v libovolném okamžiku, tedy i v momentě, kdy jsou oba vektory maximální

$$E_A = cB_A. \quad (20)$$

V některých obrázcích bude kvůli přehlednosti elektromagnetická vlna zakreslena bez své magnetické složky, pouze pomocí elektrického pole a směru fázové rychlosti \vec{v}_f . Chybějící magnetická složka vlny se dá do takového obrázku jednoznačně zakreslit. Vektor \vec{B} je kolmý na \vec{E} i \vec{v} a dohromady (v tomto pořadí \vec{E} , \vec{B} a \vec{v}) tvoří pravotočivou soustavu souřadnou.

Ve většině případů budeme uvažovat **rovinnou** elektromagnetickou vlnu. Elektrické a magnetické pole rovinné vlny působí ve všech bodech prostoru, nejen na přímce, jak je na obr. 12. Její vlnoplochy jsou navzájem rovnoběžné roviny, kolmé na směr fázové rychlosti vlny. V každém místě jedné vlnoplochy je elektrická (i magnetická) složka stejně velká. Na obrázku 13 je elektromagnetická rovinná vlna (zakreslená pouze pomocí elektrické složky). Zobrazené barevné vlnoplochy jsou místa s maximální E (i B).



obr. 13: Rovinná elektromagnetická vlna

3.3 Rychlost elektromagnetických vln

Každá elektromagnetická vlna se ve vakuu šíří rychlostí, kterou označujeme písmenem c ,

$$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}. \quad (21)$$

Hodnota $3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se od přesné liší pouze o 0,07 %.

Této rychlosti sice říkáme rychlost světla, ale šíří se jí všechny typy elektromagnetických vln (radiové, mikrovlny, infračervené...). Pro libovolné vlnění platí vztah (9) $v_f = \lambda f$. Pro elektromagnetické vlnění pak platí

$$c = \lambda f. \quad (22)$$

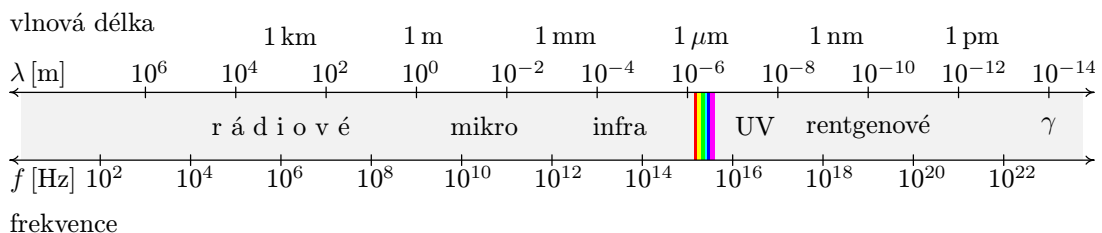
Jelikož c je konstanta, roste-li frekvence f , klesá vlnová délka λ a naopak. Známe-li vlnovou délku elektromagnetické vlny ve vakuu, pomocí vztahu (22) jednoznačně určíme její frekvenci a naopak.

3.4 Spektrum elektromagnetických vln

Nejdůležitější dělení elektromagnetických vln je podle vlnové délky (resp. frekvence). Některé typy vln jsme uvedli už na začátku této části. Všechny dohromady tvoří **spektrum** elektromagnetických vln. Hranice mezi jednotlivými typy nejsou ostré – jeden volně přechází v druhý nebo se mohou i překrývat.

Elektromagnetické vlny s vlnovou délkou řádově od centimetrů až po kilometry nazýváme **radiové**. Pro televizní vysílání se využívají vlny o vlnové délce 0,1 m až 1 m. Mobilní telefony vysílají a přijímají elektromagnetické vlny s vlnovou délkou 33 cm nebo 16 cm. Jejich frekvence je 0,9 nebo 1,8 GHz (elektrické i magnetické pole kmitne řádově 10^9 krát za 1 s).

Vlnová délka v řádu desítek centimetrů až milimetrů odpovídá **mikrovlnám**. Večeři v mikrovlnce nám ohřívají vlny s vlnovou délkou přibližně 12 cm. Bezdrátové připojení k internetu WiFi pracuje na podobné frekvenci 2,4 GHz ($\lambda \doteq 13$ cm).



obr. 14: Spektrum elektromagnetických vln

Na mikrovlny navazují **infračervené** vlny s vlnovými délkami přibližně mezi 1 mm a 770 nm. Infračervené vlny vyzařují všechna teplejší tělesa. Čím je větší teplota tělesa, tím je kratší vlnová délka vyzařovaných vln. Lidi nebo zvířata můžete

vidět infračerveným dalekohledem i ve tmě, protože z nich sálají vlny s jinou vlnovou délkou než z jejich studeného okolí. Dalekohled infračervené vlny převede na vlny pro nás viditelné. Tělesům s teplotou přibližně 900 K odpovídají už tak krátké vlnové délky, že je dokáže vnímat naše oko (na infračervené vlny navazuje viditelné světlo), například kovář ková tak horké podkovy, že svítí červeně.

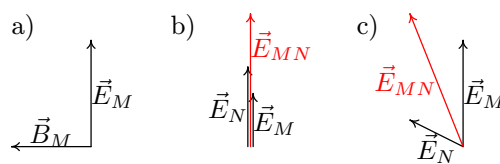
Pro člověka je důležitá velmi uzounká oblast vlnových délek od 390 nm do 770 nm, které připadají **viditelnému světlu**. Červené barvě odpovídají nejdelší vlnové délky, které můžeme vidět. O něco kratší vlnovou délku má oranžové světlo, ještě kratší žluté světlo, pak zelené a modré. Nejkratší viditelné vlnové délky patří fialové barvě. Lidské oko nejcitlivěji reaguje na žlutozelenou barvu o vlnové délce kolem 550 nm. Téměř 2 miliony „žlutozelených vlnek“ se vejdu do jednoho metru, elektrické pole kmitne řádově 1 000 000 000 000 000krát každou sekundu.

Kratší vlnové délky (řádově 100 nm = 10^{-7} m), které naše oko už nevnímá, patří **ultrafialovému záření**. Na ultrafialové vlny (angl. ultraviolet, zkr. UV) ze Slunce reaguje naše kůže zhnědnutím (nebo zčervenáním). Ještě kratší vlnové délky (10^{-8} m až 10^{-12} m) odpovídají **rentgenovým vlnám**. Vlnami s vlnovou délkou z intervalu (10^{-10} m, 10^{-12} m) se rentgenuje v nemocnici – vlny prochází svalovou hmotou, ale od kostí se odráží. Elektromagnetické vlny o vlnové délce kolem 10^{-14} m nazýváme **γ -záření**. Takové vlny vznikají například při rozpadu atomových jader.

Spektrum elektromagnetických vln není omezené, vlnová délka i frekvence může mít libovolnou kladnou hodnotu.

3.5 Skládání elektromagnetických vln

Představme si, že elektromagnetická vlna, nazvaná písmenem M , se šíří přímo proti nám. Vektor její elektrické intenzity \vec{E}_M kmitá ve svislém směru nahoru a dolů a vektor magnetické indukce \vec{B}_M kmitá vodorovně doleva a doprava (obr. 15a). Nyní si představme, že s vlnou M se k nám stejným směrem šíří také elektromagnetická vlna N , která má stejnou vlnovou délku (tudíž i frekvenci) jako M . (Vlny na obrázcích 15b a 15c k následujícím příkladům jsou namalované bez vektorů magnetické indukce \vec{B} .)



obr. 15: Elektrická a magnetická složka vln; skládání dvou vln

Příklad první

Vektory elektrických intenzit obou vln \vec{E}_M i \vec{E}_N kmitají ve fázi ve svislém směru, situaci znázorňuje obr. 15b. Vektor \vec{E} výsledné vlny bude kmitat také ve svislém

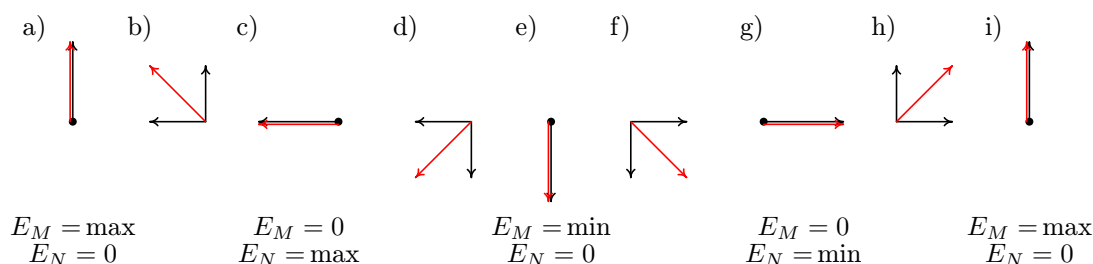
směru. V libovolném čase jeho délku získáme sečtením okamžitých délek vektorů \vec{E}_M a \vec{E}_N . Jeho amplituda bude rovna součtu amplitud vln M a N ($E_A = E_{MA} + E_{NA}$).

Příklad druhý

Elektrické pole vlny M necháme kmitat svisle. Vektor \vec{E}_N vlny N bude kmitat "šikmo" a ve fázi s M . V každém čase výsledný vektor \vec{E} vznikne vektorovým součtem vektorů \vec{E}_M a \vec{E}_N , jak vidíme na obr. 15c.

Příklad třetí

Představme si, že vektor elektrického pole vlny M stále kmitá nahoru a dolů. Elektrická složka vlny N kmitá vodorovně, doprava a doleva. Amplitudy obou vlny mají stejnou velikost ($E_{MA} = E_{NA}$). A teď pozor: Elektrické intenzity vln M a N nekmitají ve fázi, jsou navzájem posunuté o čtvrt kmitu (o úhel $\frac{\pi}{2}$) tak, že vlna M jde před vlnou N . Na obrázku 16 vidíme, jak to vypadá ve vybraných časech. Když je M v maximu, N teprve otáčku začíná (16a); M klesne na nulu a N právě došla do maxima (16c); M je v maximální záporné hodnotě, N je na nule (16e); M je v rovnovážné poloze, N je v maximální záporné hodnotě (16g)... tak stále.



obr. 16: Kruhově polarizovaná vlna složená ze dvou lineárně polarizovaných

Stejně jako v předchozích případech vektor \vec{E} složené vlny vznikne vektorovým součtem vektorů \vec{E}_M a \vec{E}_N . Výsledkem je, že vektor \vec{E} této složené vlny bude mít stále stejnou délku a jeho koncový bod bude obíhat po kružnici s poloměrem rovným amplitudě vlny M (či N). Kdybychom se nedívali přímo zepředu (jak se vlna šíří přímo na nás), jako trajektorii bychom viděli šroubovici (běhá po kružnici a přitom se rovnoměrně posunuje).

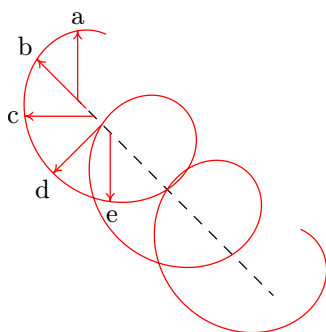
3.6 Polarizované vlny

V této kapitole se odkazujeme na příklady z minulé části o skládání vln. Výsledné vlny z prvního i druhého příkladu jsou vlny **lineárně polarizované**, to znamená,

že vektor jejich elektrické intenzity kmitá pouze v jedné rovině. V prvním příkladu výsledný vektor \vec{E} kmital ve svislé rovině, ve druhém příkladu v rovině „šikmé“.

Lineárně polarizované nebyly jenom dvě výsledné vlny, ale také vlny M a N ze všech tří příkladů (vlna M kmitala vždy svisle, N nejdřív svisle, pak šikmo a nakonec vodorovně).

Ve třetím příkladě složením vln M a N vychází vlna **kruhově polarizovaná**. Výsledný vektor \vec{E} má stále stejnou délku a z pohledu zepředu opisuje kružnici.



obr. 17: Kruhově polarizovaná vlna

V prostoru běží po šroubovici, kterou zobrazuje obrázek 17 – polohy a až e odpovídají obrázkům 16a až 16e, další polohy nejsou označeny kvůli přehlednosti obrázku.

Je-li ve vlně lineárně polarizovaný vektor elektrické intenzity, musí být lineárně polarizovaný i její vektor magnetické indukce. Rovina polarizace \vec{B} je kolmá na rovinu polarizace \vec{E} . Je-li \vec{E} kruhově polarizované, potom i konec vektoru \vec{B} běhá po kružnici, resp. po šroubovici.

Kdyby ve třetím příkladě byla amplituda jedné vlny menší než amplituda vlny druhé, vznikla by **elipticky polarizovaná** vlna. Koncový bod vektoru \vec{E} by z pohledu zepředu běhal po elipse. Pro $\vec{E}_{MA} < \vec{E}_{NA}$ by elipsa ležela, v opačném případě by stála jako vejce na špičce.

3.7 Nepolarizované vlny

Když rozsvítíme doma lustr, světlo ze žárovky se rozšíří všemi směry. Můžeme si představit, že vlákno žárovky je složeno z obrovského množství malinkatých, navzájem nezávislých zdroječků elektromagnetického vlnění, které nekmitají ve fázi. Z každého zdroječku vychází nějak polarizovaná elektromagnetická vlna. Každou jednotlivou vlnu bychom snadno popsali rovnicí. Ovšem složením takového množství různě posunutých vln, jejichž vektory \vec{E} kmitají do všech stran, vzniká chaotické kmitání \vec{E} do všech směrů. Takové vlnění nazýváme **nepolarizované**. Světlo, se kterým se běžně setkáváme (ze Slunce, ze žárovek...), je nepolarizované.