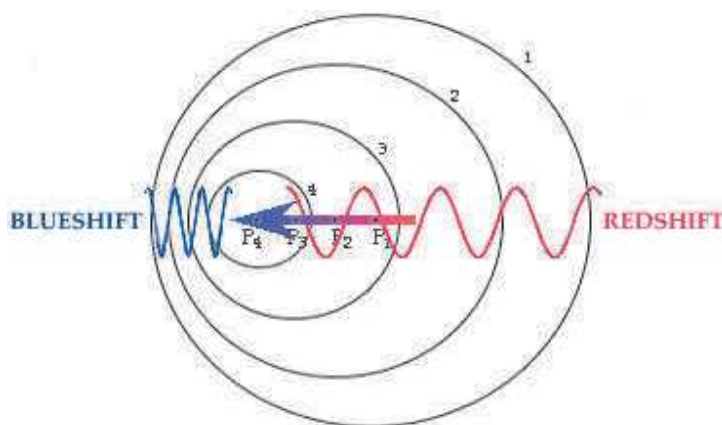


1.6. Laserová dopplerometrie

1.6.1. Dopplerův jev

Dopplerův jev (také nazývaný Dopplerův posuv nebo dopplerovský posuv) je změna frekvence vlnění vysílaného zdrojem, jenž je v relativním pohybu vzhledem k pozorovateli (příjemci, posluchači, detektoru). Při vzájemném přibližování zdroje a pozorovatele dochází ke „zhušťování“ vln a tím ke zkrácování vlnové délky a zvyšování frekvence, naopak při vzájemném vzdalování zdroje a pozorovatele dochází k „natahování“ vln a tím k prodlužování vlnové délky a snižování frekvence (viz obrázek 1.11).

Efekt se týká nejen zvuku, ale i světla a dalších druhů vlnění. Rozhodující veličinou je poměr vzájemné rychlosti zdroje a pozorovatele v k rychlosti šíření daného druhu vlnění, tedy v případě světla $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz *Vybrané fyzikální konstanty* na straně xvii), v případě zvuku ve vzduchu je rychlost šíření vlnění okolo $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. (Rychlost zvuku závisí na termodynamickém stavu vzduchu, a v jiných materiálech, ať už plynných, kapalných či pevných se liší, mnohdy i řádově [7].)



Obrázek 1.11. Schematické znázornění Dopplerova jevu. Zdroj vlnění se pohybuje zprava doleva ve směru šipky. Číslo vlnoploch koresponduje s čísly pozic zdroje, z nichž byly odpovídající vlnoplochy emitovány. Pozorovatel vlevo, k němuž se zdroj přibližuje, naměří vyšší frekvenci než je vlastní frekvence zdroje ν_0 (střed viditelné oblasti se posouvá k modrému konci spektra, proto modrý posuv, blueshift). Pozorovatel vpravo, od něž se zdroj vzdaluje, naměří nižší frekvenci než je vlastní frekvence zdroje ν_0 (střed viditelné oblasti se posouvá k červenému konci spektra, proto červený posuv, redshift).

Přesněji řečeno, rozhodující veličinou je průmět vzájemné rychlosti zdroje a pozorovatele do spojnice mezi nimi, takzvaná radiální komponenta vzájemné rychlosti

$$v_r = v \cos \theta, \quad (1.18)$$

kde θ je úhel sevřený vektorem mířícím od zdroje k pozorovateli (vlnovým vektorem vlnění) a vektorem rychlosti v (viz též obrázek 1.12). Radiální komponenta vzájemné rychlosti je kladná při vzdalování ($0 \leq \theta < \pi/2$), záporná při přibližování ($\pi/2 < \theta \leq \pi$). Odtud je rovněž jasné, proč v běžném životě pozorujeme Dopplerův jev jen v akustice. Je totiž poměrně snadné pohybovat se rychlostí takovou, aby její poměr k rychlosti zvuku ve vzduchu za obvyklých podmínek měl dostatečnou hodnotu, než v případě poměru k rychlosti světla.¹⁵

Označíme-li ν_0 frekvenci vysílanou zdrojem, pak frekvence ν přijímaná pozorovatelem je

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + \frac{v_r}{c}}, \quad (1.19)$$

kde v_r je projekce (1.18) relativní rychlosti pozorovatele a zdroje do spojnice mezi nimi. V případě, že v_r je mnohem menší než c , lze vztah (1.19) s přesností do členů prvního řádu přepsat ve tvaru

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{v_r}{c}\right), \quad (1.20)$$

a pro změnu frekvence $\Delta\nu \equiv \nu - \nu_0$ platí

$$\Delta\nu = -\nu_0 \frac{v_r}{c}. \quad (1.21)$$

Při vzdalování zdroje a pozorovatele ($v_r > 0$) tedy dochází k poklesu pozorované frekvence, při přibližování ($v_r < 0$) ke zvýšení pozorované frekvence. Pohybuje-li se zdroj vůči pozorovateli striktně transversálně ($\theta = \pi/2$), je projekce relativní rychlosti v_r nulová a ke změně frekvence nedochází. Striktně řečeno, v relativistickém případě má vztah pro Dopplerův jev tvar

$$\nu = \nu_0 \frac{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{1 + \frac{v_r}{c}}, \quad (1.22)$$

¹⁵ Dánský meteorolog Buys-Ballot provedl k ověření Dopplerova jevu slavný pokus. Posadil skupinu hudebníků do vlaku. Prikázal strojvedoucímu rozjet vlak na nejvyšší možnou rychlost, zatímco on sám zaujal pozici pozorovatele na nástupišti. Hudebníci v rychle jedoucím vlaku hráli tón konstantní výšky, a při míjení nástupiště byl Buys-Ballot schopen změřit velikost Dopplerova jevu (změny výšky tónu) [28].

který dává pro transversální pohyb nenulovou změnu frekvence (v čitateli zlomku není projekce v_r , nýbrž celková velikost rychlosti). Tomuto jevu se nesprávně říká příčný Dopplerův jev. Ve skutečnosti však s Dopplerovým jevem nemá nic společného, jedná se o relativistický jev známý jako dilatace času. Pro řadu aplikací, kdy $v \ll c$, je kvadrát v čitateli (odpovídající dilataci času) druhého řádu velikosti vzhledem k Dopplerově jevu (jmenovatel) a lze jej bezpečně zanedbat. Pro ilustraci, při měření průtoku krve je rychlost řádu $10^{-1} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, takže dopplerovský člen v/c je řádu 10^{-9} , kdežto relativistický člen $(v/c)^2$ je řádu 10^{-18} , což je zcela zanedbatelné oproti dopplerovskému členu.

Pro interaktivní znázornění Dopplerova jevu doporučujeme vyzkoušet tyto demonstrace:

- <http://demonstrations.wolfram.com/IntroductionToTheDopplerEffect/>
- <http://demonstrations.wolfram.com/TheDopplerEffect/>
- <http://demonstrations.wolfram.com/DopplerEffect/>

1.6.2. Měření rychlosti pomocí Dopplerova jevu

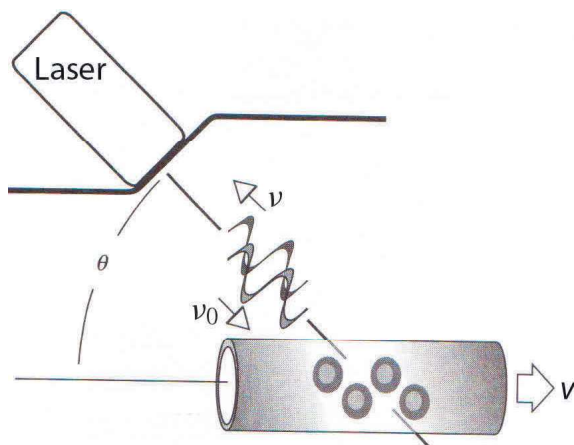
Uvažujme uspořádání podle obrázku 1.12 na straně 30. Zdroj záření (typicky laser) vysílá fotony na frekvenci ν_0 , jež se odráží (mimo jiné) od objektů pohybujících se rychlostí v (např. od krevních erytrocytů). Vektor v svírá se spojnicí laser-objekt úhel θ . Dopplerův jev se tedy uplatňuje dvakrát. Odrážející objekt pohybující se vůči zdroji radiální rychlostí (1.18) „vnímá“ frekvenci posunutou o hodnotu $\Delta\nu$ a sám se stává zdrojem odraženého záření o frekvenci $\nu_1 = \nu_0 + \Delta\nu$, jenž je následně detekováno v tomtéž zařízení, které obsahuje i zdroj původního záření. Protože se detektor pohybuje vůči odrážejícímu objektu opět se stejnou radiální rychlostí, bude detekovaná frekvence ν dána uplatněním na „novou“ frekvenci ν_1 danou (1.19), tj.

$$\nu = \frac{\nu_0}{\left(1 + \frac{v_r}{c}\right)^2}. \quad (1.23)$$

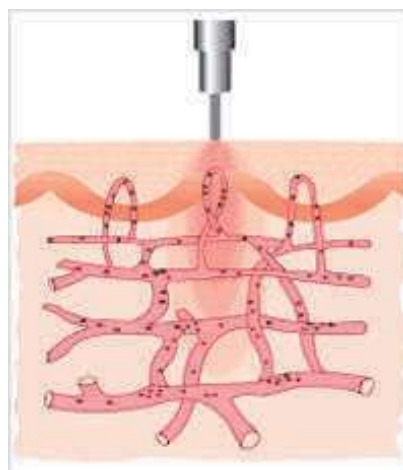
Je-li Dopplerův posuv $\Delta\nu$ malý vůči původní frekvenci ν_0 (což je obvyklý případ), dostaneme pro frekvenční posuv odraženého záření na detektoru linealizovaný vztah [7]

$$\Delta\nu = -2\nu_0 \frac{v_r}{c} = -2\nu_0 \frac{v \cos \theta}{c}. \quad (1.24)$$

Posun frekvence ν (1.24) závisí na úhlu dopadu θ . Často nás nezajímá hodnota rychlosti, ale spíše míra perfuze, tj. součin rychlosti a množství tekutiny přité-



Obrázek 1.12. K principu dopplerovské velocimetrie (dopplerometrie). Fotony jsou přijímány pohybujícími se objekty se změněnou frekvencí. Tyto objekty se samy stávají pohybujícími se zdroji záření se změněnou frekvencí. Detektor, vůči němuž se tyto sekundární zdroje pohybují, přijímá dvakrát změněnou frekvenci oproti frekvenci původní. Upraveno podle [7].



Obrázek 1.13. Princip laserového dopplerovského perfuzního zobrazování (LDPI). Laserové záření proniká do kůže, kde je rozptýleno jednak statickými, jednak pohyblivými strukturami (krevními elementy). Intenzita a dopplerovský frekvenční posuv záření rozptýleného zpět do detektoru je podrobena analýze, na jejímž základě je stanovena krevní perfuze. Upraveno podle [29].

kající k vyšetřovanému povrchu a zase od něho odtékající zpět.¹⁶ V takovém případě bude část fotonů pronikajících do vyšetřované matrice (kůže) a rozptýlených pohyblivými elementy (typicky erythrocyty) podléhat dopplerovskému posuvu, zatímco část fotonů rozptýlených statickými strukturami nebude mít frekvenci změněnu (viz obrázek 1.13). Část záření rozptýlená zpět do fotodetektoru v blízkosti zdroje (laseru) bude tedy tvořena směsí dopplerovsky posunutých a neposunutých fotonů. Kromě toho bude posun individuálního fotonu záviset na rychlosti v i na úhlu θ . Za předpokladu stacionárního proudění se úhel θ efektivně vystředuje. Výsledkem je deformace spektra původního monochromatického záření.

¹⁶ Perfuze – průtok krve (nebo jiné tekutiny) tkání, orgánem. Dostatečná perfuze krve je nezbytná pro jejich správnou funkci, zabezpečuje zásobení kyslíkem a živinami a odplavení zplodin látkové výměny. Je ovlivňována krevním tlakem, činností srdce, množstvím krve a tekutin v organismu, místním stavem a potřebami (vazokonstrikcí, vazodilatací, řízení nervově či humorálně [30].

Smísení fotonů s různými hodnotami Dopplerova posuvu ve fotodetektoru způsobí modulaci proudu produkovaného fotodetektorem: větší Dopplerův posuv vyvolá vyšší frekvenci proudu, zatímco magnituda fluktuující části proudu je úměrná počtu pohyblivých rozptylových center. Z proměnného proudu fotodetektoru je pak po filtraci možné odvodit signál úměrný perfuzi, tj. průměrné rychlosti krát koncentrace rozptylových center [14].

Pro úplnost zmíníme technologii monitorování perfuze LASCA,¹⁷ která není založena na Dopplerově jevu jako LDPI. Metoda LASCA kombinuje vysoké rozlišení a rychlost, a její podstata metody LASCA spočívá v následujícím: tkáň ozářená laserovým svazkem vytváří na svém povrchu interferenční vzorek (*speckle pattern*). Pokud je ozářená tkáň statická, je specklový vzorek konstantní. Obsahuje-li však tkáň pohybující se částice, jako jsou krevní elementy, bude specklový vzorek v čase fluktuovat. Systém PeriCam PSI tyto změny specklových obrazců zaznamenává CCD kamerou.

V závislosti na míře pohybu v zobrazované oblasti se liší míra fluktuací (čím více je v oblasti, do níž svazek proniká a v níž se rozptyluje, pohybu, tím více bude interferenční obrazec fluktuovat). Úroveň rozostření je kvantifikována specklovým kontrastem. Bylo zjištěno, že kontrast je korelován s krevní perfuzí. Specklový kontrast je definován jako poměr mezi směrodatnou odchylkou intenzity a střední intenzitou. Čím více se snímaný objekt pohybuje, tím více bude obraz rozostřený a směrodatná odchylka intenzity bude klesat, proto bude specklový kontrast nižší a naopak, při absenci pohybu bude specklový kontrast vyšší, protože směrodatná odchylka se bude zvyšovat, přičemž průměrná intenzita zůstane beze změny. Systém PeriCam PSI zaznamenává krevní perfuzi pomocí arbitrárních perfuzních jednotek (PU). K přesnému srovnání výsledku je každý přístroj výrobcem kalibrován (kalibrační sada je součástí PeriCam PSI a umožňuje tak průběžnou kalibraci a nastavení) [31]. Kvalita skenů pořízených metodou LASCA nedosahuje rozlišení LDPI, ale má velkou výhodu v kratším čase pořízení skenu.

¹⁷ *Laser Speckle Contrast Analysis*, laserová specklová analýza kontrastu.