



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

TENTO PROJEKT JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY.

# ÚVOD DO LÉKAŘSKÉ BIOFYZIKY pro studenty se spec. potřebami při studiu

HANA SOCHOROVÁ



PODPORA TERCIÁRNÍHO VZDĚLÁVÁNÍ  
STUDENTŮ SE SPECIFICKÝMI  
VZDĚLÁVACÍMI POTŘEBAMI  
NA OSTRAVSKÉ UNIVERZITĚ V OSTRAVĚ

CZ.1.07/2.2.00/29.0006

OSTRAVA, SRPEN 2013

**Studijní opora je jedním z výstupu projektu ESF OP VK.**

<b>Číslo Prioritní osy:</b>	7.2
<b>Oblast podpory:</b>	7.2.2 – Vysokoškolské vzdělávání
<b>Příjemce:</b>	Ostravská univerzita v Ostravě
<b>Název projektu:</b>	Podpora terciárního vzdělávání studentů se specifickými vzdělávacími potřebami na Ostravské univerzitě v Ostravě
<b>Registrační číslo projektu:</b>	CZ.1.07/2.2.00/29.0006
<b>Délka realizace:</b>	6.2.2012 – 31.1.2015
<b>Řešitel:</b>	PhDr. Mgr. Martin Kaleja, Ph.D.

**Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.**

**Název:** Úvod do lékařské biofyziky pro studenty se spec. potřebami při studiu  
**Autor:** Hana Sochorová

Studijní opora k inovovanému předmětu: *Základy biofyziky*  
(KVM/BFYZZ, BFYZK, MBFRA, MBFRK)

Jazyková korektura nebyla provedena, za jazykovou stránku odpovídá autor.

**Recenzent:** *RNDr. Hana Materová*  
*Fakultní nemocnice Ostrava*

© Hana Sochorová  
© Ostravská univerzita v Ostravě  
ISBN 978-80-7464-332-3



## OBSAH:

Úvod.....	8
<b>1 Biofyzika a její postavení v systému věd .....</b>	<b>9</b>
1.1 Dělení biofyziky .....	11
1.2 Biologický systém a jeho regulace .....	12
Shrnutí kapitoly .....	14
<b>2 Hmota, její stavba a vlastnosti .....</b>	<b>15</b>
2.1 Existence hmoty, základní interakce .....	16
2.2 Atom.....	17
2.3 Molekula.....	20
2.4 Molekulová biofyzika .....	21
Shrnutí kapitoly .....	29
<b>3 Člověk jako termodynamický systém.....</b>	<b>31</b>
3.1 Základní pojmy a zákony termodynamiky .....	32
3.2 Aplikace poznatků termodynamiky .....	33
3.3 Termodynamika živých systémů.....	38
Shrnutí kapitoly .....	42
<b>4 Mechanické vlastnosti tkání a orgánů.....</b>	<b>45</b>
4.1 Mechanické vlastnosti biologických systémů .....	46
4.2 Biomechanika lidského těla .....	47
4.3 Mechanická funkce srdečně cévního systému .....	55
4.4 Biomechanika dýchání .....	60
4.5 Působení mechanických faktorů na organismus .....	66
Shrnutí kapitoly .....	71
<b>5 Elektrické a magnetické vlastnosti tkání .....</b>	<b>73</b>
5.1 Elektrické projevy buňky .....	74
5.2 Elektrické a magnetické vlastnosti tkání a orgánů .....	75
5.3 Účinky elektrického proudu a magnetického pole .....	80
Shrnutí kapitoly .....	82
<b>6 Účinky elektromagnetického pole na organismus.....</b>	<b>83</b>
6.1 Energie elektromagnetického pole .....	84
6.2 Účinky elektromagnetického záření/vlnění.....	86
6.3 Záření neionizující.....	93
Shrnutí kapitoly .....	98
<b>7 Smyslové vnímání.....</b>	<b>101</b>
7.1 Vnímání zrakových podnětů .....	104
7.2 Vnímání akustických signálů .....	117
Shrnutí kapitoly .....	131
<b>8 Fyzikální principy vybraných diagnostických metod .....</b>	<b>135</b>
8.1 Biologické signály.....	136
8.2 Metody měřicí a záznamové .....	140
8.3 Metody zobrazovací .....	154

Shrnutí kapitoly .....	164
<b>9 Léčebné metody využívající fyzikální působení .....</b>	<b>167</b>
9.1 Využití částí spektra elektromagnetického vlnění .....	168
9.2 Využití mechanického působení .....	172
Shrnutí kapitoly .....	173



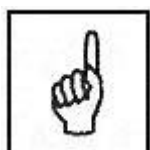
## Vysvětlivky k používaným symbolům



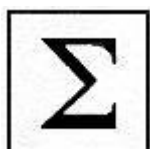
**Průvodce studiem** – vstup autora do textu, specifický způsob, kterým se studentem komunikuje, povzbuzuje jej, doplňuje text o další informace.



**Příklad** – objasnění nebo konkretizování problematiky na příkladu ze života, z praxe, ze společenské reality apod.



**K zapamatování**



**Shrnutí** – shrnutí předcházející látky, shrnutí kapitoly.



**Literatura** – použitá ve studijním materiálu, pro doplnění a rozšíření poznatků.



**Kontrolní otázky a úkoly** – prověřují, do jaké míry studující text a problematiku pochopil, zapamatoval si podstatné a důležité informace a zda je dokáže aplikovat při řešení problémů.



**Úkoly k textu** – je potřeba je splnit neprodleně, neboť pomáhají k dobrému zvládnutí následující látky.



**Korespondenční úkoly** – při jejich plnění postupuje studující podle pokynů s notnou dávkou vlastní iniciativy. Úkoly se průběžně evidují a hodnotí v průběhu celého kurzu.



**Otázky k zamyšlení**



**Část pro zájemce** – přináší látku a úkoly rozšiřující úroveň základního kurzu. Pasáže i úkoly jsou dobrovolné.

# Úvod

Cílem kurzu určeného studentům nelékařských zdravotnických bakalářských oborů je seznámení se základy oboru lékařské biofyziky. Výběr témat a jejich výklad je veden snahou usnadnit pochopení látky i studentům, kteří v průběhu středoškolské výuky měli fyziku pouze v omezeném či malém rozsahu. Z hlediska struktury a obsahu textu byly kapitoly voleny tak, aby poskytly základ zejména k výuce dalších kurzů oboru. V rámci studia předmětu jsou studenti zapsáni také v e-learningovém kurzu, který výklad doplňuje o multimediální animace, ukázková videa a zajímavé odkazy v prostředí webových stránek. V kurzu také studenti najdou místo pro odevzdání korespondenčních úkolů, průběžné sebehodnotící testy, diskuze a závěrečné hodnotící testy.

Tato studijní opora není vědeckým typem odborného textu, jedná se o oporu studenta ve smyslu jeho provázení studiem. Primární odborné prameny zde nejsou průběžně citovány a jsou souhrnně uvedeny na konci textu. U jednotlivých kapitol jsou uváděny další doporučené zdroje ke studiu.

## **Po prostudování textu budete znát:**

- jak lze na živé organismy aplikovat poznatky z mechaniky a termodynamiky
- jaké jsou elektrické a magnetické vlastnosti tkání a seznámíte se s účinky elektromagnetického pole na živé organismy
- jak se projeví fyzikální zákony ve smyslovém vnímání a interpretaci podnětů v organismu
- fyzikální principy základních diagnostických a léčebných metod

## **Získáte:**

- představu o tom, co je náplní vědního oboru lékařská biofyzika a jaké je postavení biofyziky v systému ostatních věd
- schopnost orientovat se v základních biofyzikálních pojmech
- informace o propojení biofyziky s ostatními disciplínami, jako je biologie, fyziologie, biochemie a další
- informace o další doporučené literatuře nebo elektronických zdrojích k dalšímu studiu a individuálnímu prohlubování znalostí



# 1 Biofyzika a její postavení v systému věd

**V této kapitole se dozvíte:**

- Čím se zabývá biofyzika
- Jak se tento obor historicky vyvíjel
- Které významné objevy můžeme do tohoto oboru zařadit

**Po jejím prostudování byste měli být schopni:**

- vysvětlit co je biofyzika,
- objasnit, jak je propojená s ostatními vědními obory

**Klíčová slova kapitoly:** biofyzika, biologický systém, regulace, řízení

## **Průvodce studiem**

*Tato kapitola je úvodní kapitolou ke studijnímu textu. Je velmi stručná, k prostudování vám stačí několik minut. Seznámíte se s tím, co biofyzika zkoumá, na co se zaměřuje a jaký je její hlavní cíl. V kapitole je uvedeno i několik významných objevů, které z dnešního pohledu můžeme řadit právě do oboru biofyziky.*



Biofyzika je mezioborová disciplína (hraniční obor) zkoumající biologické objekty a problémy fyzikálními metodami. Termín biofyzika se začal objevovat počátkem 20. století, ale už dávno předtím byla provedena řada studií na pomezí biologie a fyziky, které z dnešního pohledu pod toto označení spadají. Biofyzika je jedním z moderních vědních oborů, které vycházejí z biologie, fyziologie, fyzikální chemie i matematiky.

Výzkum elektřiny v živých organismech započal v 18. století Ital Luigi Galvani. Německý lékař a fyzik Hermann von Helmholtz změřil v 19. století rychlost šíření nervového vzruchu. Významné pro rozvoj biofyziky jsou i jeho studie fyziologie vidění a vnímání zvuků. Při výzkumu mechanismu fungování svalů přispěl k moderní formulaci zákona zachování energie.

Na tyto a řadu dalších prací navázaly výzkumy ve 20. století:

- Švédský oftalmolog Allvar Gullstrand popsal na fyzikálních principech fungování oka. Položil tak základ modernímu očnímu lékařství. V roce 1911 obdržel za svoji práci Nobelovu cenu.
- Za objasnění fyziologie vnitřního ucha byly vědcům maďarského původu Robertu Báránymu a Georg von Békésymu rovněž uděleny Nobelovy ceny v letech 1914 a 1961.
- Do období okolo roku 1920 spadá vývoj diagnostických metod elektrokardiografie a elektroencefalografie, vycházejících z empirického pozorování souvislostí měřitelných elektrických veličin a stavu fungování srdce a mozku jakožto životně významných orgánů.
- Britové Alan Lloyd Hodgkin a Andrew Huxley se zabývali měřením a vysvětlením mechanismu šíření elektrických potenciálů na neuronech, John Carew Eccles prozkoumal a vysvětlil fungování nervových spojů – synapsí. Tyto studie jsou dodnes platným základem pro chápání fungování nervového systému. Jejich autorům byla v roce 1963 udělena Nobelova cena.

Pojem biofyzika bývá často chápán v podstatně širším smyslu. Uvedeme zde alespoň několik příkladů, co do něj bývá zahrnováno nebo s ním spojováno:

- Výzkum reakce živých organismů na široké spektrum elektromagnetického záření. Kromě klasické radiologie sem spadá i léčba světlem - fototerapie.
- Studie spadající do biomechaniky představují další velmi rozsáhlou oblast, která zahrnuje např. výzkum letu ptáků nebo hmyzu, plavání ryb a vodních savců, nebo popis fungování krevního oběhového systému - hemodynamika.
- Nejruznější diagnostické a terapeutické postupy a metody, využívající fyzikálních principů, např. sonografie, rentgenová počítačová tomografie, laserová chirurgie apod.

## Část pro zájemce

*Významnou osobností v oblasti československé biofyziky byl prof. MUDr. RNDr. F. Herčík (1905–1966, biolog, biofyzik, profesor Masarykovy univerzity, zakladatel československé radiobiologie, zakladatel a první ředitel Biofyzikálního ústavu ČSAV v Brně), který v 70. letech 20. století přepracovává koncepci výuky lékařské fyziky.*



Biofyzika tedy zkoumá živý systém fyzikálními metodami a z pohledu fyzikálních zákonitostí. Jejím základním úkolem je, aby na konkrétních biologických systémech ukázala, jakým způsobem fyzikální a fyzikálněchemické procesy probíhající v těchto systémech, které se řídí stejnými zákony jako v neživé přírodě, přecházejí v kvalitativně nové biologické jevy. Tyto procesy probíhají v živých systémech za podmínek, jaké se v neživé přírodě nevyskytují.



Biofyzika jako vědní obor interdisciplinární obor obsahuje prvky více disciplín, na rozhraních kterých vzniká, nebo využívá jejich metodické přístupy.

Jsou to především

- matematika,
- fyzika,
- fyzikální chemie,
- biochemie,
- biologie
- a fyziologie.

Využíváním přesných a citlivých kvantitativních metod výzkumu vyzdvihuje biofyzika biologii a medicínu do oblastí tzv. exaktních věd.

### 1.1 Dělení biofyziky

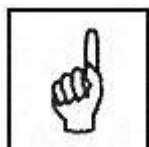
Podle metod výzkumu se biofyzika dělí na:

- **teoretickou**, která zkoumá vývoj nových kvantitativních postupů, umožňující matematickou interpretaci biologických jevů,
- **experimentální**, která zkoumá kvalitativní a kvantitativní stránku fyzikálních a fyzikálně-chemických procesů v živé hmotě a různých formách energie a vzájemné působení živých soustav a

- **aplikovanou**, která se zabývá konkrétním rozpracováním výsledků biofyzikálního výzkumu v různých oborech lidské činnosti.

Součástí aplikované biofyziky je také oblast lékařské biofyziky. Zahrnuje biofyzikální problémy, které mají bezprostřední vztah k zdraví a nemoci člověka. Je to především studium fyzikálních a fyzikálně-chemické podstaty fyziologických a patologických procesů a s ní souvisejícími principy diagnostiky a terapie.

Další rozdělení biofyziky je možné podle toho, na jaké „velikostní“ úrovni se systémem zabývá. Dělíme ji pak na:



- molekulární biofyziku,
- biofyziku buňky,
- biofyziku složitých systémů.

**Molekulární biofyzika** studuje stavbu a fyzikálně-chemické vlastnosti biologicky aktivních molekul, především bílkovin a nukleových kyselin. Zabývá se poznáním fyzikálních mechanismů zodpovědných za biologickou funkčnost molekul. Je spojena s oborem molekulární biologie a biochemie.

**Biofyzika buňky** se zabývá stavbou a funkcí buňky a jejich systémů. Její hlavní úkoly jsou spojeny se studiem membrán a bioenergetických procesů. Biofyzika buňky zahrnuje např. studium generování a šíření nervového impulsu, fotobiologické procesy (proces vidění) apod.

**Biofyzika složitých systémů** je převážně teoretická a je věnována všeobecným fyzikálně-biologickým problémům a matematickému modelování. Její současné směry jsou následující:

- termodynamika nevratných procesů a kinetické modelování
- teorie excitovaných prostředí, součástí které je i teorie biologických oscilačních procesů
- všeobecná teorie bioenergetických jevů
- modelování procesu biologického růstu

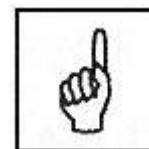
## 1.2 Biologický systém a jeho regulace

V obecné teorii systémů se rozlišují tři základní typy: systém izolovaný, uzavřený a systém otevřený (podrobněji kapitola o termodynamice). Systémy

izolované a uzavřené se nacházejí ve stavu termodynamické rovnováhy, nebo k tomuto stavu směřují. Živé systémy jsou systémy otevřené a uspořádané (organizované); to znamená, že se nacházejí ve stavu vzdáleném od termodynamické rovnováhy. Biologický systém jako celek můžeme posuzovat z pohledu změny hmoty, energie, informací.

Pokud biologický systém takto posuzujeme, je stejně jako jiné systémy charakterizován závislostí mezi vstupními a výstupními veličinami. Zdrojem informací je biosignál vyvolaný existencí živého organismu. Zajímají nás signály, které systém nějakým způsobem ovlivnil a hledáme vztah mezi veličinou vstupní a výstupní. Pro hodnocení stavu systému si vybíráme ty dvojice veličin, které mají vliv na řízení a na regulační pochody.

**Řízení** je proces, který vyvolá změny v chování daného systému, ke kterým dochází na základě předané informace. Řízení je buď ovládané – bez zpětné vazby – nebo regulované – se zpětnou vazbou. **Regulace** je proces, který minimalizuje rozdíly mezi skutečnou a požadovanou hodnotou regulované veličiny.



Transformace je závislost hodnot výstupní proměnné na hodnotách vstupní proměnné a můžeme rozlišit:

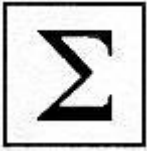
- lineární systémy (přímka, ideální případ),
- nelineární systémy.

Základní druhy transformací jsou zesílení nebo zeslabení vstupní proměnné, její časové zpoždění, provedení logické operace, selektivní propustnost, též deformace vstupní proměnné atd. Se všemi těmito transformacemi se u biologických systémů setkáváme.

Zpětná vazba představuje působení výstupní veličiny systému na vlastní vstup.

U **kladné zpětné vazby** působí odchylka výstupní veličiny tak, že veličina vstupní je trvale zesilována nebo zeslabována (kumulační účinek, nežádoucí pro řízení dynamických systémů). U **záporné zpětné vazby** působí změna výstupní veličiny proti směru veličiny vstupní a tím změnu vstupní veličiny minimalizuje (účinek kompenzační, umožňuje regulaci). Záporná zpětná vazba je základem pro udržení homeostázy, stálosti vnitřního prostředí organismu, které je nezbytnou podmínkou jeho fungování a existence, i když se vnější podmínky mění.

## Shrnutí kapitoly



- Biofyzika zkoumá živý systém fyzikálními metodami a z pohledu fyzikálních zákonitostí.
- Základním úkolem biofyziky je na konkrétních biologických systémech ukázat, jakým způsobem fyzikální a fyzikálněchemické procesy v těchto systémech probíhají.
- Tyto procesy se odehrávají v živých systémech za podmínek, které se v neživé přírodě nevyskytují.
- Projevy života jsou na vyšší úrovni specificky organizované fyzikální a chemické procesy, které vytvářejí složité autoregulační celky, řídicí se biologickými zákonitostmi.



### Kontrolní otázky a úkoly:

1. Čím se zabývá biofyzika?
2. Jak můžeme rozdělit biofyziku podle metod výzkumu?
3. Co studuje molekulární biofyzika?
4. Jak byste charakterizovali biosignál?
5. Jaký je rozdíl mezi pojmy řízení a regulace?



### Otázky k zamyšlení:

1. Které další neuvedené objevy např. z fyziologie byste také zařadili do biofyziky?

## 2 Hmota, její stavba a vlastnosti

### V této kapitole se dozvíte:

- jaká je základní struktura látek,
- jaké jsou síly působící mezi atomy,
- co určuje Gibsovo fázové pravidlo,
- v jaké podobě se s jednotlivými skupenstvími setkáme v živém organismu,
- co nám říká Daltonův a Henryův zákon,
- jaký vliv má v organismu povrchové napětí kapalin,
- co je to viskozita,
- jaké jsou hlavní funkce vody v organismu,
- jaké rozeznáváme typy disperzních soustav,
- co se děje na rozhraní fází.

### Po jejím prostudování byste měli být schopni:

- vysvětlit co je to hmota a v jakých formách může existovat,
- vysvětlit důsledky vybraných zákonů, které se této problematice týkají,
- charakterizovat vlastnosti jednotlivých skupenství hmoty a děje na jejich rozhraní.

**Klíčová slova kapitoly:** elementární částice, atom, atomové jádro, elektronový obal atomu, mezimolekulové síly, skupenství, fáze, Gibsovo fázové pravidlo, Daltonův zákon, Henryův zákon, voda, povrchové napětí, viskozita, disperzní soustava

### Průvodce studiem

*Tato kapitola se věnuje hmotě jako takové – dozvíte se, v jaké formě může hmota existovat, jak může být uspořádána, jakými silami je držena pohromadě a jaké to vše má důsledky v živých organismech.*

*Na zvládnutí této kapitoly budete potřebovat asi 2,5 hodiny, tak se pohodlně usadte a nenechte se nikým a ničím rušit.*



## 2.1 Existence hmoty, základní interakce

### 2.1.1 Formy existence hmoty

*Formy existence  
hmoty*

Hmota může existovat ve dvou základních formách – jako látka nebo jako pole (záření).

**Látka** je tvořená elementárními částicemi s klidovou hmotností (atomy, molekulami...). Fyzikální objekty se mohou nacházet v různých skupenstvích, mají hmotnost, el. náboj, tvar, rozměr...

**Pole** je oblast působení určitých sil (gravitační síly – gravitační pole, magnetické síly – magnetické pole, elektrické síly – elektrické pole). Nejlépe prozkoumané a matematicky popsané je pole elektromagnetické.

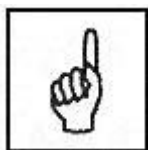
### 2.1.2 Základní interakce

*Základní  
interakce*

umožňují popsat všechny známé způsoby vzájemného silového působení částic a pole. Tradičně fyzici uvažují o čtyřech: gravitaci, elektromagnetické síle, slabé interakci a silné interakci. Nyní se zdá, že alespoň tři z nich jsou různé aspekty jedné síly.

Základní interakce:

- **silná interakce** – udržuje celistvost atomového jádra, drží nukleony a kvarky u sebe v jádrech atomů,
- **slabá interakce** – působí na všechny leptony a kvarky. Je to jediná síla působící na neutrino, umožňuje leptonům a kvarkům interagovat, je zodpovědná za některé atomární jevy jako rozpad beta,
- **elektromagnetická interakce** – elektromagnetická síla působící mezi elektricky nabitými částicemi; je rozdělována na elektrostatickou sílu, působící na nabitá tělesa v klidu, a kombinaci elektrické a magnetické síly působící na tělesa pohybující se relativně vůči sobě,
- **gravitační interakce** – je nejslabší interakce, ale má největší dosah, její účinek není vyrušen účinky opačně nabitých těles jako je tomu u elektromagnetické síly, působí univerzálně na všechny látky a energie.



### 2.1.3 Elementární částice hmoty

Označení elementární částice může být pojato různě. Přívlastek elementární znamená doslova základní. Běžně se s tím spojuje upřesnění „dále nedělitelný“



S vývojem poznání se několikrát ukázalo, že částice považované za nedělitelné mají vnitřní strukturu a skládají se z částic ještě základnějších. To, které částice jsou elementární, závisí tedy na aktuálním stavu poznání. V nejjednodušším pohledu jsou za elementární částice považovány protony, neutrony a elektrony jako základní stavební kameny atomů.

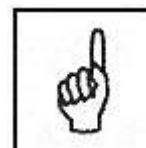
Tzv. *standardní model částicové fyziky* je teorie, která popisuje silnou, slabou a elektromagnetickou interakci a elementární částice, které tvoří veškerou hmotu. Byla zformulována v letech 1970 až 1973. Jedná se o kvantovou teorii pole, která je v souladu jak s kvantovou mechanikou, tak i se speciální teorií relativity. Standardní model vesmíru byl v roce 2004 nejobecnějším výsledkem dosavadního fyzikálního výzkumu a lze jej shrnout do jediné věty:

*Veškerá známá hmota ve vesmíru se skládá ze šesti druhů kvarků a šesti druhů leptonů a všechny jevy, které ve vesmíru pozorujeme, dovedeme vysvětlit pomocí čtyř druhů interakcí.*

Kvantová teorie rozlišuje dva druhy elementárních částic: fermiony a bosony. Fermiony mají poločíselný spin a podléhají Pauliho vylučovacímu principu a Fermi-Diracově statistice. Bosony mají celočíselný spin a podléhají Bose-Einsteinově statistice. Zjednodušeně řečeno, jsou fermiony elementárními částicemi hmoty (látkové částice, kvarky a leptony včetně elektronu) a bosony částicemi zprostředkujícími interakce (polní částice, foton).

#### Elementární částice

- Fermiony
  - Kvarky (z nich jsou složeny protony a neutrony)
  - Leptony (např. elektron, částice nepodléhající jaderným silám)
- Bosony (např. foton)
- Částice hypotetické



## 2.2 Atom

Atom je základní částice běžné hmoty, částice, kterou už chemickými prostředky dále nelze dělit a která definuje vlastnosti daného chemického

*Modely atomu*

prvku. Atom se skládá z atomového jádra obsahujícího protony a neutrony a obalu obsahujícího elektrony.

Základní struktura atomu je složena z atomového jádra a elektronového obalu. O atomovém jádru se v roce 1906 jako první zmiňuje E. Rutherford a vytváří první představu o struktuře atomu (**planetární model**). Tento model měl však zásadní problémy, které překonala kvantová teorie, podle které je elektromagnetické záření vysíláno i pohlcováno po nedělitelných množstvích, kvantech. V roce 1913 vytvořil Niels Bohr podle této teorie **Bohrův model atomu**. Podle tohoto modelu obíhají elektrony atomové jádro jen na některých dovolených drahách, vyzařování energie není spojitě, elektrony mohou pouze za určitých podmínek „přeskočit“ z jedné energetické hladiny do jiné.

Pro elektronový obal, platí při zaplňování energetických hladin (obsazování elektrony) tzv. Pauliho vylučovacího princip (nemohou v elektronovém obalu existovat dva elektrony, jejichž všechna kvantová čísla by byla totožná) a zásada, že systém je stabilní, je-li jeho celková energie minimální. Při absorpci energie přejde elektron na hladinu s vyšší energií a nachází se v tzv. excitovaném stavu. Extrémním případem excitace je pak ionizace, situace kdy elektron opustí atomový obal.

Moderní **kvantově mechanický model atomu** pak vznikl na základě de Broglieho teorie částicových vln a Schrödingerovy rovnice, podle které elektron (stejně jako všechny ostatní částice) není popisován jako hmotný bod, ale jako vlnová funkce definující pravděpodobnosti výskytu elektronu v různých místech prostoru. Dráhy Bohrova modelu byly opuštěny a nahrazeny neostře definovanými oblastmi, ve kterých se elektron s určitou pravděpodobností nalézá, tzv. orbitaly. Tento model je sice hůře pochopitelný, ale dokáže však vysvětlit mnoho atomových vlastností, které byly dřívějšími teoriemi nepředpověditelné.



Zavzpomínejte, jaké jsou hodnoty (napište si, řešení najdete konci kapitoly):  
průměr atomu (řádově)  
průměr atomového jádra (řádově)  
hmotnost protonu  
hmotnost neutronu  
hmotnost elektronu

## Atomové jádro

Atomové jádro je složeno z protonů (počet  $Z$ ) a neutronů (počet  $N$ ), které souhrnně označujeme jako nukleony (počet  $A$ ).

Platí  $Z + N = A$  (hmotnostní číslo)

V atomovém jádře je soustředěna téměř veškerá hmotnost atomu. Počet protonů v jádře určuje zařazení atomu v periodické soustavě prvků. Pro elektricky neutrální atom platí, že počet protonů se rovná počtu elektronů.

### 2.2.1 Radioaktivita, ionizující záření

Atomové jádro je víceméně stabilní. Nestabilní atomové jádro prochází samovolnou přeměnou, tento jev známe pod názvem radioaktivita a tato jádra nazýváme radionuklidy. Radioaktivita (radioaktivní rozpad) je samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká ionizující (v látkovém prostředí vyvolá tvorbu iontů) záření. Změní-li se počet protonů v jádře, dojde ke změně prvku. Radioaktivitu objevil v roce 1896 Henri Becquerel u solí uranu. K objasnění podstaty radioaktivity zásadním způsobem přispěli francouzští fyzikové Pierre Curie a Maria Curie-Skłodowska.

Izotopy jsou atomy se stejným počtem protonů a různým počtem neutronů (známe cca 280 přírodních izotopů). Izobary pak mají stejný počet nukleonů, liší se počtem protonů. Izomery mají stejné číslo  $Z$  i  $N$ , ale různý energetický stav jádra.

Přirozená radioaktivita je důsledkem samovolného rozpadu atomového jádra. Přirozeně radioaktivních je mnoho látek v přírodě (takové látky se pak označují jako radioaktivní látky), včetně tkání živých organismů.

Umělou radioaktivitu získávají prvky transmutací, vlivem řetězové reakce nebo působením urychlených částic. Umělá radioaktivita je tedy podmíněna přeměnou jádra způsobenou vnějšími vlivy, např. při ostřelování částicemi  $\alpha$ . Takováto jádra v přírodě běžně neexistují, byla vytvořena uměle. Zákonitosti rozpadu těchto uměle vytvořených jader jsou shodné se zákony popisujícími rozpad přirozeně radioaktivních jader.

Radioaktivita má pravděpodobnostní charakter. Vlastnosti radioaktivního rozpadu lze zkoumat pomocí statistických metod:

- **poločas rozpadu** je doba, za kterou dojde k rozpadu poloviny z původního počtu atomů radionuklidu,

*Radioaktivita  
přirozená a  
umělá*

- **střední doba života** je čas, po němž klesne původní počet atomových jader  $n_0$  na hodnotu  $n = n_0/e$ .
- **aktivita (radioaktivita) A** charakterizuje rychlost radioaktivní přeměny, klesá s časem, jednotkou aktivity je becquerel (Bq), popř. curie (Ci).

### Druhy radioaktivní přeměny

- ALFA

záření  $\alpha$  je proud jader helia ( $\alpha$ -částic) a nese kladný elektrický náboj, má nejkratší dosah (lze ho zastavit např. i listem papíru), nukleonové číslo atomu  $> 150$ ,

- BETA

jádro vyzáří pozitron nebo elektron, nebo zachytí elektron, lze ho zachytit 1 cm plexiskla nebo 1 mm olova,

- GAMA

pokud má jádro nadbytek energie, je z jádra atomu vyzářen foton, (např. po emisi jiného druhu záření), záření  $\gamma$  je elektromagnetické záření vysoké frekvence, proud velmi energetických fotonů; nemá elektrický náboj, jeho pronikavost je velmi vysoká, pro odstínění se používají štíty z kovů velké hustoty (např. olovo) nebo slitin kovů velké hustoty,

- Neutronové záření

je proud neutronů, nemá elektrický náboj, pohltí jej tlustá vrstva vody nebo betonu.

## 2.3 Molekula

Molekula je vícejaderná částice (obsahuje více než jedno jádro atomu), která je buď elektricky neutrální nebo má kladný či záporný náboj. Vlastnosti molekul jsou dány:

- druhem atomů
- charakterem vazeb mezi atomy

Vzájemné působení molekul pak vyvolává další vazebné a nevazebné interakce.

*Celková energie systému částic může být vyšší nebo nižší než energie jednotlivých neinteragujících částic. To je ovlivňováno vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi*

(popř. skupinami částic). Pokud interakce mezi částicemi snižuje celkovou energii, pak dochází ke vzájemnému přitahování částic, a ty mohou vytvořit stabilní systém. Jestliže interakce mezi částicemi celkovou energii zvyšuje, nemohou stabilní systém vytvořit. Molekula tedy může vzniknout pouze tehdy, pokud jsou atomy, vzájemně přitahovány, takže celková energie molekuly je nižší než energie samostatných atomů.

Jednotlivé části molekuly (tedy atomy) drží pohromadě síly, které nazýváme chemické vazby. Chemická vazba je založena na interakci částic, které tvoří jednotlivé atomy. Chemickou vazbu můžeme charakterizovat podle rozdílu elektronegativit iontů jako kovovou, kovalentní, polární nebo iontovou.

Kromě chemických vazeb se v biologických strukturách uplatňují významně nekovalentní (tzv. slabé) chemické interakce:

- vodíkový můstek (vodíková vazba) – ovlivňuje vlastnosti vody, významně se podílí na formování struktury bílkovin;
- silové působení mezi elektrostatickými dipóly – van der Waalsovy síly – ovlivňují strukturu biopolymerů a interakce na biologických membránách;
- hydrofobní interakce – projeví se ve vodním prostředí.

## 2.4 Molekulová biofyzika

V běžné praxi rozlišujeme tři skupenství látek (fáze). Fází se v širším významu myslí vymezená homogenní část systému (např. systém složený ze dvou kapalných fází, olej a voda). Fáze označujeme:

- Tuhá (pevná fáze) – s – solidus
- Kapalná fáze – l – liquidus
- Plynná fáze – g – gasiformis

Za čtvrté skupenství bývá považováno plazma (směs vysoce ionizovaných částic a elektronů).

### 2.4.1 Gibsovo fázové pravidlo

Pokud máme systém složený z více fází, pak počet stavových proměnných (teplota, tlak, koncentrace), které lze nezávisle pozměnit, aniž by se změnil počet fází systému, se nazývá počet stupňů volnosti.



$$v = k - f + 2$$

$k$  = počet složek

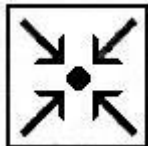
$f$  = počet fází

*Příklad:*

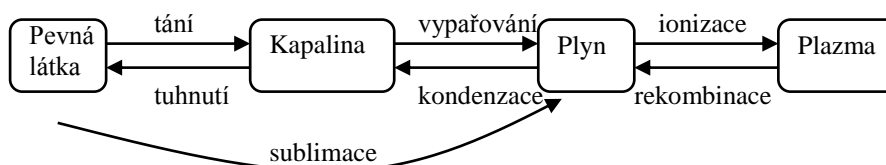
*Trojný bod vody*

$$v = 1 - 3 + 2 = 0$$

*Systém má 0 stupňů volnosti, nelze měnit teplotu ani tlak.*



### 2.4.2 Přeměny skupenství



Změny skupenství – fázové přechody – jsou provázeny spotřebou nebo uvolňováním energie. Kvantitativní charakteristikou je tzv. skupenské teplo. Skupenská tepla tání a vypařování vody jsou poměrně vysoká – to má velký biologický význam (uchování života pod ledem, termoregulace).

### Plyn, kapalina a pevná látka v živém organismu

- Plyn – dýchací systém, rozpuštěný v disperzních soustavách
- Kapalina – voda
- Pevná látka – biopolymery

### 2.4.3 Molekulové vlastnosti plynů

Molekuly plynu jsou řídké rozloženy, lze zanedbat jejich vlastní objem a vzájemné přitažlivé síly. Mají různou rychlost, tedy různou kinetickou energii. Zavádíme tzv. střední kvadratickou rychlost, což je rychlost, kterou by měly všechny molekuly, kdyby celková energie systému byla stejná.

Ze vztahu pro střední kvadratickou rychlost

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

vyplývá, že kinetická energie jedné molekuly je

$$E_0 = \frac{1}{2} m v_k^2 = \frac{3}{2} k T$$



Střední kinetická energie jedné molekuly  $E_0$  je přímo závislá na termodynamické teplotě  $T$ . Boltzmanova konstanta  $k$  má hodnotu  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

U monoatomových plynů se dodaná energie použije na translační pohyb, pro víceatomové plyny se spotřebuje i na rotaci a vibraci částic.

### 2.4.3.1 Parciální tlak, Daltonův zákon

Parciální tlak je tlak jedné ze složek směsi plynů. Plyny jsou dokonale mísitelné, jejich směsi vytvářejí souvislé fáze. Platí Daltonův zákon aditivity parciálních tlaků:

***Celkový tlak směsi plynů je roven součtu parciálních (dílčích) tlaků jednotlivých plynů.***

Hodnoty parciálních tlaků dýchacích plynů ( $p_{\text{O}_2}$ ,  $p_{\text{CO}_2}$ ) jsou určující veličiny, které řídí jejich výměnu při dýchání: tlakový gradient  $\text{O}_2$  směřuje z atmosférického vzduchu do tkání, gradient  $\text{CO}_2$  je obrácený.

#### Úkol

Zjistěte, zda nějaký obdobný zákon platí také pro objemy parciálních složek směsi plynů.

### 2.4.3.2 Henryův zákon (Rozpustnost plynů v kapalinách)

Mnoho plynů se fyzikálně rozpouští v kapalinách, aniž s nimi chemicky reaguje. Množství rozpuštěného plynu závisí na druhu obou složek, na teplotě a tlaku plynu nad kapalinou.

Pro objem rozpuštěného plynu platí

$$V_p = V_k \cdot \lambda \cdot p$$

$V_k$  je objem kapaliny,  $\lambda$  je konstanta charakterizující vztah obou látek,  $p$  je parciální tlak plynu nad kapalinou.

Rozpustnost plynů v kapalinách klesá se zvyšující se teplotou, zahříváním plyn z kapaliny vytěsníme. Při náhlém poklesu tlaku plynu nad kapalinou (dekompresi) dojde k prudkému uvolnění plynu z kapaliny ve formě bublin.



Tzv. kesonová nemoc je uvolnění dusíku do krve ve formě bublinek, ke kterému dojde při náhlém poklesu tlaku. Důsledkem je zpěnění krve, krev se stává stlačitelnou, srdce pracuje naprázdno. Kromě toho dusíkové bublinky způsobí embolii.

#### 2.4.4 Vlastnosti kapalin

V kapalinách se již projevuje vzájemná soudržnost molekul, kapaliny si zachovávají vlastní objem, jsou málo stlačitelné, mají menší objemovou závislost na teplotě. Výjimečně se zde objevují uspořádané struktury, tzv. kapalně krystaly (mají význam v termografii, mění prostorové uspořádání molekul v závislosti na teplotě).

Molekulové síly v kapalině jsou krátkodosahové – poloměr jejich působení označíme  $r_m$ . Povrchová vrstva kapaliny je pak tvořena molekulami, jejichž vzdálenost od povrchu je menší než  $r_m$ . Povrchová vrstva se chová jako napjatá pružná blána.

Sečteme-li působící síly, výsledná síla u molekul v povrchové vrstvě směřuje do kapaliny, kolmo k volnému povrchu. Povrchová energie je energie, kterou mají molekuly v povrchové vrstvě navíc proti molekulám uvnitř kapaliny.

Každý systém se snaží dostat do stabilního rovnovážného stavu s co nejmenší energií. Důsledkem je snaha o snížení povrchové energie tím, že kapalina se snaží zaujmout tvar, který bude mít nejmenší povrch. Při daném objemu je to tvar koule (nepůsobí-li vnější síly, přejde do rovnovážného stavu s nejnižší energií). Proto kapky zajímají kulovitý tvar, který se ale v gravitačním poli deformuje.

Povrchové napětí  $\sigma = \Delta F / \Delta S$  (povrchová síla působící ve směru tečny k povrchu) závisí na druhu kapaliny, prostředí nad povrchovou vrstvou, klesá s teplotou. Snižuje se např. saponáty nebo působením žlučových kyselin při trávení tuků. Při dýchání přítomnost povrchově aktivní látky v plicích sklípcích (tenzid) umožňuje vyrovnání vnitřních tlaků uvnitř alveolů a tím rovnoměrné plnění vdechovaným vzduchem. Tenká vrstva kapaliny v pohrudniční dutině způsobuje adhezi (přilnavost) mezi poplicnicí a pohrudnicí



Povrchové napětí na hladině vody udrží minci.  
Zdroj: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=103>



### 2.4.4.1 Viskozita kapalin

Viskozita (vnitřní tření, vazkost) je také projevem působení kohezních (soudržných) sil. Můžeme si jí představit jako odpor proti přemísťování molekul při toku kapaliny. Nejrychleji proudí kapalina uprostřed trubice, plocha obalující čela proudnic má tvar rotačního paraboloidu.

Mezi sousedními vrstvami kapaliny proudícími různou rychlostí vzniká plošné silové působení – tečné napětí  $\tau$ . Rozdíl rychlostí dvou sousedních vrstev vztažený k jejich vzdálenosti se nazývá gradient rychlosti ( $\Delta v/\Delta y$ ). Isaac Newton stanovil pro tečné napětí vztah:

$$\tau = \eta \cdot \Delta v/\Delta y, \text{ kde } \eta \text{ je tzv. dynamická viskozita.}$$

Kapaliny, pro které tato lineární závislost platí, jsou nazývány newtonovské.

Pro emulze, koloidní roztoky (krev) však tato lineární závislost neplatí.

Pro viskozitu suspenze  $\eta_s$  byl Einsteinem odvozen vztah, kde  $\eta$  je viskozita suspenzního prostředí,  $k$  je konstanta fyzikální vlastnosti částic a  $c$  je objemová koncentrace částic.

$$\eta_s = \eta \cdot (1+k \cdot c)$$

$$\eta_s > \eta$$

Viskozita suspenze bude tedy vždy vyšší než viskozita suspenzního prostředí.

Viskozita obecně je značně teplotně závislá, s rostoucí teplotou viskozita (odpor) klesá.

Jednotkou viskozity je  $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  nebo  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

### 2.4.4.2 Voda a její funkce v organismu

Voda má pro živé organismy zcela zásadní význam. Polární charakter molekul vody je příčinou vysoké relativní permitivity vody. Je dobrým rozpouštědlem polárních látek, iontové sloučeniny se v ní disociují na ionty. Voda má vysokou měrnou tepelnou kapacitu a má vysokou hodnotu povrchového napětí.

#### Funkce vody v organismu

Voda tvoří 60 % hmotnosti těla dospělého člověka. V organismu plní voda svoji funkci především jako:

- Rozpouštědlo
- Prostředí pro biochemické reakce

Viskozita



- Reagující složka v mnoha reakcích
- Prostředí pro transportní procesy
- Ovlivňuje mechanické vlastnosti buněk a tkání
- Uplatňuje se při termoregulaci
- Podílí se na tvorbě a stabilizaci molekulárních struktur

#### 2.4.4.3 Anomálie vody

#### *Anomálie vody*

Voda má v blízkosti bodu tání zcela neobvyklé vlastnosti. Mezi 0 °C a 4 °C je koeficient teplotní roztažnosti záporný. To znamená, že s rostoucí teplotou se objem zmenšuje. Voda v pevném stavu – led – má hustotu menší než kapalina téže teploty. Proto také, na rozdíl od ostatních látek, zvýšení tlaku (tedy snaha zmenšit objem a zvýšit hustotu) snižuje bod tání.

#### 2.4.5 Pevnolátkové skupenství v živém organismu

V případě pevných látek je vazba mezi molekulami nejtěsnější. V živém organismu se setkáme s pevnolátkovou strukturou zejména v opěrné soustavě. Z tohoto pohledu je pro popis vlastností pevnolátkových struktur v živém organismu nejaktuálnější studium vlivu působících sil a vznikajících deformací (pružné a nepružné vlastnosti, pevnost, elasticita...).

#### 2.4.5.1 Biopolymery a jejich struktura

#### *Biopolymery*

V živých systémech se setkáváme se třemi základními typy biopolymerů:

- Polysacharidy
- Bílkoviny
- Nukleové kyseliny

Rozměry molekul jsou tak velké, že mnohé mohou být pozorovány elektronovým mikroskopem. Jejich vodné roztoky mají vlastnosti koloidních roztoků. Jsou tvořeny jednoduchými i rozvětvenými řetězci svých stavebních jednotek:

- Homopolymery – mají identické stavební jednotky
- Heteropolymery – ve struktuře se opakují nejméně dvě různé stavební jednotky

*Polysacharidy* plní zásobní a v některých případech strukturní funkci.

Zásobním polysacharidem člověka je glykogen, řetězec tvořený glukózovými jednotkami.

*Bílkoviny* plní funkci zásobní pouze nouzově, většinou mají jiné specifické funkce – strukturní funkce (kolagen), plní úlohu enzymů, hormonů a protilátek, plní transportní funkce, motorické funkce (aktin, myosin). Strukturními jednotkami bílkovin jsou aminokyseliny vázané peptidovou vazbou.

*Nukleové kyseliny* jsou tvořeny pentofosfátovým řetězcem a dusíkatými bázemi – cytosin, thymin, uracil, adenin a guanin a svou úlohu plní při uložení a předávání genetické informace.



#### 2.4.6 Disperzní systémy

Disperzní systém je soustava obsahující alespoň dvě fáze nebo dvě složky (jedna – podíl je rozptýlena v druhé – prostředí). Dvoufázový disperzní systém je heterogenní, protože mezi disperzními podíly existují v disperzním prostředí jasné hranice. Systém sestávající se naopak ze dvou složek v jedné fázi je homogenní (cukr rozpuštěný ve vodě) a jeho složky nejsou opticky rozlišitelné. Rozlišujeme disperzní prostředí (spojité) a disperzní podíl (částice).

Podle velikosti částic disperzního podílu dělíme disperzní soustavy na:

- Disperze analytické (pravé roztoky)
- Koloidní
- Hrubé

Vlastnost	Hrubá disperze	Koloidní roztok	Pravý roztok
Velikost částic	nad 1 $\mu\text{m}$	1 nm až 1 $\mu\text{m}$	pod 1 nm
Počet atomů v částici	nad $10^9$	$10^3$ – $10^9$	$1$ – $10^3$
Rozlišitelnost	světelný mikroskop	TEM (transmisní elektronový mikroskop)	STM (skanovací tunelový elektronový mikroskop)
Filtrovatelnost	na papíru	na poloprop. membráně	–
Difuzibilita	–	malá	velká
Osmotický tlak	–	malý	velký
Interakce částic se světlem	odraz	rozptyl	–



### Koloidní disperze (soustavy)

Větší část vnitřního prostředí organismu má charakter koloidních roztoků. Jsou to většinou koloidní roztoky makromolekulární, vodné roztoky biopolymerů, zejména bílkovin a nukleových kyselin. Koloidní roztoky mají některé anomální hydrodynamické vlastnosti – mají velkou viskozitu, jsou pružné. Jejich elektrické vlastnosti jsou závislé na povaze disperzního prostředí a disperzního podílu. Koloidní roztoky mohou absorbovat světlo různých vlnových délek (spektroskopické metody), lze na nich pozorovat i rozptyl světla (Tyndallův jev).

### Označování disperzních soustav

Disperzní prostředí	Disperzní podíl	Disperzní systém
Plyn	Kapalina	Aerosol
Plyn	Pevná látka	Aerosol
Kapalina	Plyn	Pěna
Kapalina	Kapalina	Emulze
Kapalina	Pevná látka	Suspenze
Pevná látka	Plyn nebo kapalina	Inkluze



### 2.4.7 Jevy na rozhraní fází

V hraniční vrstvě mezi dvěma fázemi (fázové rozhraní) se uplatňuje řada biofyzikálně významných jevů. Mechanické vlastnosti se projeví zejména na rozhraní kapalina-plyn (povrchové napětí). V místech, kde se toto rozhraní stýká s pevnou látkou, dochází podle vzájemného poměru působících sil k jevu kapilární elevace nebo kapilární deprese. S rostoucí teplotou hodnota povrchového napětí klesá.

Tzv. povrchově aktivní látky jsou látky, které po přidání způsobí pokles povrchového napětí (tenzidy – např. žlučové kyseliny při trávení tuků). Povrchové napětí existuje i mezi dvěma nemísitelnými kapalinami (olej a voda).

*Tenzidy*

Snaha soustředit rozpuštěnou látku z roztoku v povrchu kapaliny se nazývá adsorpce. Adsorpce je separační proces, jehož principem je hromadění plynné látky ze směsi plynů nebo rozpuštěné látky v kapalině (adsorbátu) na povrchu pevné látky (adsorbentu) účinkem mezipovrchových přitažlivých sil. Proti tomuto ději působí difuze a výsledkem je pak ustanovení tzv. adsorpční rovnováhy. K adsorpci tedy dochází i na rozhraní mezi kapalinou a pevnou látkou, množství adsorbované látky je úměrné velikosti povrchu. Adsorpce se využívá v praxi například při odstraňování organických látek, těžkých kovů z odpadních i pitných vod, dehydratace plynů atd. Jako adsorbent se používá aktivní uhlí – produkt vyráběný z uhlí, dřeva nebo kokosových ořechů. Aktivní uhlí má pórovitou strukturou a velký vnitřní povrch (400-1500 m<sup>2</sup>/g). Může adsorbovat široké spektrum látek.

*Adsorpce*

## Shrnutí kapitoly

- Hmota může existovat ve dvou základních formách – jako látka nebo jako pole (záření). Základní interakce umožňují popsat všechny známé způsoby vzájemného silového působení částic a pole. Látka je složena z molekul, atomů a ty dále z elementárních částic. Charakter vazeb a interakcí mezi složkami hmoty ovlivňuje její strukturu a vlastnosti.
- Kromě chemických vazeb se v biologických strukturách uplatňují významně tzv. slabé chemické interakce. V běžné praxi rozlišujeme tři skupenství látek (fáze), fáze se v širším významu myslí vymezená homogenní část systému.
- Gibsovo fázové pravidlo určuje počet stavových proměnných, které lze nezávisle pozměnit, aniž by se změnil počet fází systému. Daltonův zákon aditivity parciálních tlaků říká, že celkový tlak směsi plynů je roven součtu parciálních (dílčích) tlaků jednotlivých plynů. Henryův zákon se týká rozpustnosti plynů v kapalinách.
- Povrchové napětí kapalin má v lidském organismu velký význam. Voda představuje 60 % hmotnosti těla dospělého člověka a plní v organismu řadu důležitých funkcí (rozpuštědlo, transport, reagující složka, termoregulace...). Systém ze dvou druhů částic nebo dvou fází nazýváme disperzní soustava.



**Řešení úkolu k textu**

průměr atomu řádově  $10^{-10}$  m

průměr atomového jádra řádově  $10^{-15}$  m

hmotnost protonu  $1,6725 \cdot 10^{-27}$  kg

hmotnost neutronu  $1,6748 \cdot 10^{-27}$  kg

hmotnost elektronu  $9,1091 \cdot 10^{-31}$  kg

**Kontrolní otázky a úkoly:**

1. Jaký je rozdíl mezi přirozenou a umělou radioaktivitou?
2. Na čem především závisí střední kinetická energie molekul?
3. Co se stane s plynem rozpuštěným v kapalině při zahřívání systému?
4. Co je to tzv. kesonová nemoc?
5. Jaké mohou být důsledky tzv. anomálie vody?
6. Jaké jsou nejvýznamnější funkce vody v organismu?
7. Jaké kapaliny označujeme jako newtonovské? Je takovou kapalinou krev?
8. Co způsobí povrchově aktivní látky?
9. Které vlastnosti pevnolátkového skupenství jsou v živém organismu nejsledovanější?
10. Jak označujeme disperzní soustavy podle disperzního podílu a disperzního prostředí?
11. Kdy dochází k efektu adsorpce?

**Citovaná a doporučená literatura**

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3
- ULLMANN, V. *Jaderná a radiační fyzika* [online] Dostupné z <<http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>> [cit 24.8.2011]

### 3 Člověk jako termodynamický systém

#### V této kapitole se dozvíte:

- jak si představit lidský organizmus jako termodynamický systém
- jak organizmus reguluje teplotu
- jaký je fyzikální význam bazálního metabolismu
- jak probíhá difuze v roztocích
- co říká Fickův difuzní zákon
- co je to osmotický tlak a jaký je jeho význam v organismu
- jak probíhá dialýza
- jak se buňka chová jako systém
- jaký je rozdíl mezi aktivním a pasivním transportem

#### Po jejím prostudování byste měli být schopni:

- vysvětlit, čím je živý organismus z pohledu termodynamiky specifický
- objasnit jak lze v živém organismu aplikovat základní termodynamické zákony
- vysvětlit, jaké jsou důsledky platnosti termodynamických zákonů v živém organismu

**Klíčová slova kapitoly:** otevřený systém, vnitřní energie, teplota, teplo, bazální metabolismus, difuze, osmotický tlak, dialýza

#### Průvodce studiem

*Termodynamika je obor fyziky, který se zabývá teplem a tepelnými jevy a jejich důsledky. V neživých systémech je tato teorie dobře popsána a formulována do tří základních zákonů (tři termodynamické věty). Jak ale můžeme tyto zákonitosti aplikovat na živý systém? Vždyť jeho chování zdánlivě těmto zákonům odporuje? V čem je rozdíl? A jaké jsou důsledky platnosti těchto zákonitostí? Na tyto otázky najdete odpovědi v následující kapitole, na jejíž zvládnutí budete potřebovat asi 4 hodiny.*



### 3.1 Základní pojmy a zákony termodynamiky

Termodynamika je obor fyziky, který se zabývá teplem a tepelnými jevy. Sleduje např. jak se stlačením látka zahřeje, jak se dodáním tepla zvýší její teplota apod. Termodynamika tedy zkoumá vzájemné vztahy mezi veličinami, které charakterizují makroskopický stav systému a změny těchto veličin při fyzikálních dějích, které jsou obvykle spojeny s výměnou tepla s okolím soustavy.

Termodynamický stav soustavy je charakterizován stavovými veličinami – **termodynamická teplota, objem, tlak. Izolovaná soustava** je taková soustava, ve které nedochází k výměně částic ani energie s okolím. **Uzavřený systém** vyměňuje s okolím pouze energii. **Otevřený systém**, což se týká také systémů „živých“, si vyměňuje s okolím energii i částice. Změna stavu soustavy se nazývá termodynamický děj.

Rovnovážný stav je takový stav, do kterého systém dospěje, izolujeme-li ho od okolí a necháme ho dostatečně dlouhou dobu se vyvíjet, až se přestane měnit. Rovnovážný stav je stav s největší pravděpodobností výskytu, nedochází ke změnám, je popsán stavovými veličinami. Tento stav bude odpovídat nejpravděpodobnějšímu uspořádání, kdy je největší dezorganizovanost a entropie dosahuje maximální hodnoty.

#### Entropie

je obecně veličina udávající míru neuspořádanosti zkoumaného systému nebo také míru neurčitosti daného procesu. Entropie je kritérium samovolnosti děje pouze pro adiabatické děje.

Většina dějů probíhá za podmínek odlišných (konstantní tlak = izobarický děj, konstantní teplota = izotermický a konstantní objem = izochorický). Problém pro tyto podmínky vyřešil v roce 1875 J. W. Gibbs, který odvodil novou funkci, které říkáme **Gibbsova energie** a značíme ji  $G$ . Gibbsova volná energie (volná entalpie) je jedním z termodynamických potenciálů, tedy extenzivní stavová termodynamická veličina s rozměrem energie. Vzhledem k tomu, že je vhodná pro posuzování termodynamické rovnováhy soustav při konstantním tlaku a teplotě, je často využívána pro charakteristiku přirozeného směru chemických reakcí - které zpravidla probíhají při atmosférickém tlaku a teplotě prostředí.

*Termodynamický systém*





## Vnitřní energie

Za vnitřní energii soustavy považujeme součet celkové kinetické a celkové potenciální energie částic soustavy. Ke změnám vnitřní energie může dojít konáním práce, působením okolních těles na soustavu, soustava může konat práci, tepelnou výměnou (vedením).

## Termodynamické zákony

Základními termodynamickými zákony jsou zákon zachování hmoty a první, druhá a třetí věta termodynamiky (zákon zachování energie pro tepelné děje).

**První** termodynamický zákon říká, že změna vnitřní energie soustavy je rovna součtu práce vykonané okolními tělesy působícími na soustavu silami a tepla odevzdaného okolními tělesy soustavě. Tedy stanoví, jakým způsobem může dojít ke změně vnitřní energie.

**Druhý** termodynamický zákon upřesňuje, jakým směrem tato změna energie proběhne – při tepelné výměně těleso o vyšší teplotě nemůže (samovolně) přijímat teplo od tělesa o nižší teplotě, tedy není možné bez dodání energie (tepla), aby chladnější těleso předávalo teplo teplejšímu tělesu, nebo-li není možné převést jeden druh (teplo) energie na druhý (práce) beze ztrát.

**Třetí** termodynamický princip, třetí termodynamický zákon, se týká vlastností látek při termodynamických teplotách blízkých 0 K. Tento princip lze vyjádřit různými formulacemi. Nejčastěji je používána formulace: Žádným postupem, ať jakkoli idealizovaným, nelze u žádné soustavy dosáhnout snížení její teploty na hodnotu 0 K konečným počtem operací.

*Termodynamické zákony*

## 3.2 Aplikace poznatků termodynamiky

### 3.2.1 Teplo a teplota

#### Teplo a teplota

Teplo je forma energie, teplota je stav systému. Teplo je určeno energií, kterou při tepelné výměně odevzdá teplejší těleso chladnějšímu. Charakterizuje děj, nikoli stav.

Teplotu jako stavovou veličinu vždy určujeme pomocí jiné veličiny, která je teplotou definovatelně ovlivněna, porovnáváme ji s teplotou typickou pro určitý stav systému (teplota varu vody ...).

Teplotu subjektivně odvozujeme od smyslových pocitů. Stupnicí u nás standardně používanou pro kvantifikaci teploty je stupnice Celsiova, teplotu udáváme ve °C.

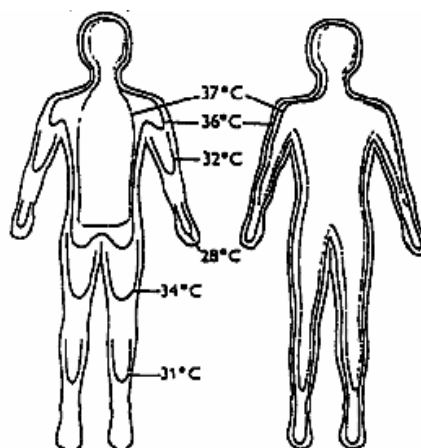
### Tepelná pohoda organismu

V živém organismu dochází k neustálé výměně látek, energie a informace s okolím. Teplo v organismu vzniká převážně jako vedlejší produkt, pouze výjimečně cíleně. Ke ztrátě tepla v organismu dochází přímými mechanizmy (vyzařování, vedení, proudění) a nepřímými ztrátami (odpařování z plic, pocení - evaporace).

### Regulace teploty v organismu

Termostatické centrum pro regulaci tělesné teploty je umístěno v hypotalamu a je nastaveno na 36,5 °C. Hlavním regulačním mechanismem je záporná zpětná vazba (viz kapitola 7.1). Informace o teplotě hluboko uložených orgánů je získávána z teploty protékající krve, informace o teplotě periferie z čidel chladu a teploty v kůži. Organismus reguluje odvod tepla do okolí.

Tělesné jádro a slupka v chladu a v teple



### Regulace teploty

Mechanismy snížení teploty:

- vazodilatace,
- znatelné pocení,
- omezení produkce tepla.



Mechanismy zvýšení teploty:

- vazokonstrikce,
- zvýšení produkce tepla:
  - chladovým třesem,
  - zvýšením metabolismu,
  - „husí kůže“, zvýšení izolační schopnosti.

### Měření teploty - termometrie

Teplota se neměří přímo, využívá se známých fyzikálních jevů, které prokazují závislost jiných fyzikálních veličin na teplotě:

- teplotní délková a objemová roztažnost,
- závislost měrného odporu vodičů a polovodičů,
- termoelektrický jev,
- závislost vlnové délky vyzařování na povrchové teplotě zdroje.

Termografie je metoda, která podává informaci o rozložení teplot na povrchu zkoumaného tělesa, používá metody kontaktní a bezkontaktní (viz kapitola 8).

## 3.2.2 Termodynamické vlastnosti roztoků

### 3.2.2.1 Difuze v roztocích

Difuze je transportní děj, projev snahy termodynamického systému o dosažení rovnovážného stavu, při němž budou v objemu vyrovnány koncentrace jednotlivých složek. Při difuzi mají částice rozpuštěné látky snahu se rovnoměrně rozptýlit v celém objemu kapaliny. Kvantitativně se hodnotí tzv. hustota difuzního toku (množství látky v molech, které projde za časovou jednotku plošnou jednotkou rozhraní). Difuze má značný biologický význam, patří mezi základní mechanismy pasivního transportu látek.

*Fickův difuzní zákon* říká, že hustota difuzního toku je lineární funkcí koncentračního gradientu, konstantou úměrnosti je difuzní koeficient, který je závislý na teplotě – s rostoucí teplotou se difuze zrychluje.

Při prosté difuzi látky přecházejí samovolně (Brownovým pohybem) z prostředí, kde je jejich koncentrace vyšší směrem tam, kde byla dosud jejich koncentrace nižší. Nedifunduje jen jedna látka do druhé. Proces je pro látku a rozpouštědlo vzájemný.



*Fickův difuzní zákon*



**Difuze je obecný jev, který probíhá v plynech, kapalinách i pevných látkách.**

### 3.2.2.2 Osmotický tlak

Osmóza je určitým specifickým případem difuze. Osmotický tlak (osmóza) je jedním z významných jevů, který lze vysvětlit na základě zákonů termodynamiky. Budeme-li mít nádobu rozdělenou na dvě části polopropustnou membránou (propouští pouze molekuly rozpouštědla), bude se systém snažit dostat do termodynamické rovnováhy vyrovnaním koncentrací v obou částech – při konstantním objemu prostoru způsobí nárůst tlaku v prostoru s vyšší koncentrací rozpouštěné látky. Osmotický tlak je tlak toku rozpouštědla pronikajícího přes semipermeabilní (polopropustnou) membránu do roztoku, ve kterém je vyšší koncentrace rozpouštěných molekul nebo iontů. *Osmotický tlak je vnější tlak, kterým je nutno působit na roztok, aby se tlak páry rozpouštědla nad tímto roztokem zvýšil na hodnotu tlaku páry nad čistým rozpouštědlem.*

*Osmotický tlak (definice)*

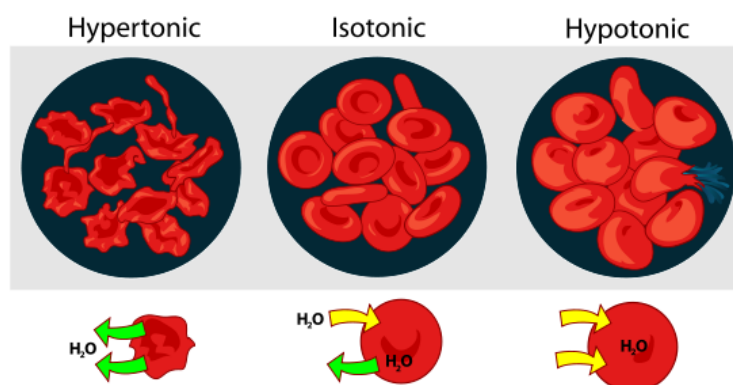
### Fyziologický význam osmotického tlaku

Udržování stálého osmotického tlaku je jednou ze základních podmínek zachování stálosti vnitřního prostředí organismu – homeostázy. Na změny osmotického tlaku reagují speciální buňky v ledvinách a hypotalamu – osmoreceptory. Z nich vycházejí podněty pro stimulaci nebo potlačení sekrece hormonálních látek, které hospodaření s vodou a solemi řídí (antidiuretický hormon, aldosteron).

Izotonické roztoky jsou ty, které mají osmotický tlak stejný s krevní plasmou (přibližně výpočet osmotického tlaku fyziologického roztoku). Roztoky s vyšším osmotickým tlakem nazýváme hypertonické, s nižším hypotonické. Osmotický tlak krevní plasmy a nitrobuněčné tekutiny je asi 770 kPa. Hodnota osmolární koncentrace plasmy podléhá v organismu přísné regulaci.



*Je-li např. erytrocyt vystaven působení hypotonického roztoku, voda vstupuje do jeho nitra (endoosmóza). Výsledkem je zvětšování erytrocytu, které může vést až k prasknutí (hemolýza). Obecně se tento děj nazývá plazmoptýza.*



Erytrocyt v hypertonickém, isotonickém a hypotonickém prostředí.  
Zdroj: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Osmotic\\_pressure\\_on\\_blood\\_cells\\_diagram.svg](http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Osmotic_pressure_on_blood_cells_diagram.svg)

### 3.2.2.3 Dialýza

Dialýza je děj, při kterém jsou od sebe odděleny látky s různou rozpustností a velikostí. Jde obdobně jako u osmózy o princip polopropustné membrány. Látky s rozdílnou koncentrací v krvi a v roztoku přecházejí z oblasti s vysokou koncentrací do oblasti s nízkou koncentrací. Přes membránu procházejí pouze analyticky disperzních látky, látky tvořící koloidní roztok přes membránu neprocházejí.

V medicíně se tento jev využívá pro náhradu přirozené funkce ledvin u pacientů, kteří ji ztratili buď dočasně nebo trvale. Ledviny, pokud fungují správně, odstraňují z krve odpadní produkty (draslík, močovinu apod.) a zbavují tělo přebytečné vody. Dialýza nahrazuje obě tyto funkce. Na jedné straně této membrány protéká krev, na druhé je dialyzační roztok.

Princip hemodialýzy spočívá v difúzi rozpuštěných látek přes semipermeabilní membránu (polopropustný filtr). Používá se tzv. protisměrný (protiběžný) tok, kdy dialyzační roztok (obvykle o průtoku 500-800 ml/min) protéká podél membrány v opačném směru než jakým teče krev, při němž nastává největší lokální rozdíl koncentrací a dialýza je tak nejúčinnější.

Látky s vysokou koncentrací v krvi (např. močovina) rychle přechází přes membránu do dialyzačního roztoku, kde je jejich koncentrace nulová.

Postupem času by se koncentrace na obou stranách membrány vyrovnaly, proto je nutné přivádět na membránu stále nový dialyzační roztok.

*Dialýza*

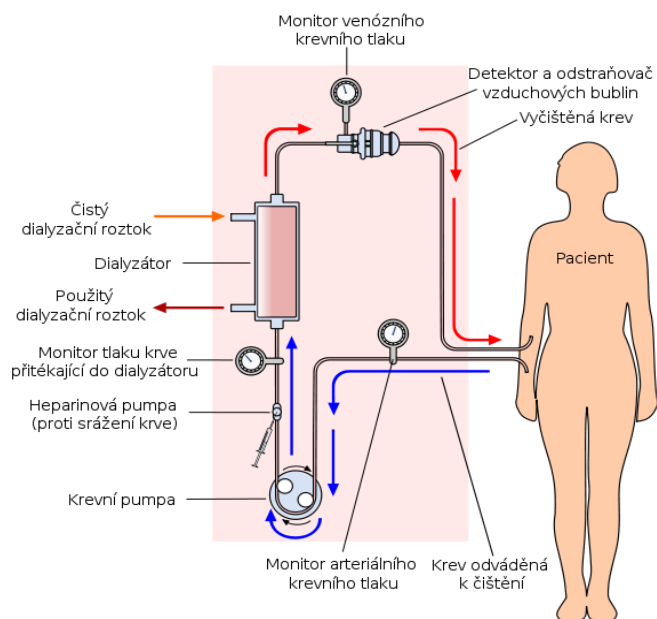


Schéma hemodialýzy.

Zdroj: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Hemodialysis-cs.svg>

### 3.3 Termodynamika živých systémů

#### Člověk jako termodynamický systém

Živé organismy jsou otevřené systémy – vyměňují s okolím částice i energii.

Živé systémy se nacházejí stále v nerovnovážném stavu, všechna odvození je tedy nutno aplikovat pouze přibližně. Systém může konat práci, lze konat práci na něm, může přijímat a odevzdávat teplo.

Živé organismy jsou z hlediska termodynamiky otevřené systémy vzdálené od termodynamické rovnováhy, které jsou regulovány a řízeny. Exaktní termodynamická teorie takových systémů nebyla dosud vytvořena.

#### 3.3.1 Bazální metabolismus

Rovnovážný stav je stav (viz výše), do kterého systém dospěje, izolujeme-li ho od okolí a necháme ho dostatečně dlouhou dobu se vyvíjet, až se přestane měnit. V otevřeném biologickém systému jako celku nemůžeme očekávat termodynamickou rovnováhu, neboť systém v termodynamické rovnováze nemůže vykonávat práci. Schopnost vykonávat práci však biologické systémy potřebují k udržení životních funkcí.

V otevřených systémech se ale může vytvořit jistý stacionární stav, ve kterém si parametry systému uchovávají konstantní hodnotu vyvážeností výměny látek

a energií s okolím. Vývoj a růst organismů je doprovázen růstem složitosti jejich organizace a z hlediska klasické termodynamiky tato situace vypadá jako samovolné snižování entropie živých systémů, což je zřejmě v rozporu s II. větou termodynamiky.

Ve fyziologii se používá pojmu, který je svým pojetím blízký pojetí stacionárního stavu v termodynamice nevratných procesů. Jde o **bazální metabolismus**. Bazální metabolismus měřený pomocí rychlosti produkce tepla nebo dýchání, představuje nejnižší metabolismus živočicha ve stavu klidu. Je tedy charakterizován minimální rychlostí produkce tepla (minimem funkce vnější disipace = rozptýlení energie), což odpovídá pojetí stacionárního stavu.

### 3.3.2 Buňka jako biofyzikální systém

Buňka je základní stavební a funkční jednotkou těl organismů (ne tzv. nebuněčných, jako jsou viry, viroidy a virusoidy). Je obklopená membránou a uvnitř obsahuje koncentrovaný vodný roztok různých látek tzv. cytoplazmu. Buňka obvykle obsahuje genetický materiál a je schopná se dělit. Některé organismy jsou pouze jednobuněčné (např. bakterie či různí prvoci), jiné organismy jsou mnohobuněčné (např. živočichové, vyšší rostliny). Stavba a funkce buněk mohou být velice rozmanité, buňky se liší podle druhu, ale i v rámci mnohobuněčného těla. Podle složitosti vnitřní struktury dělíme buňky na prokaryontní (jednodušší) a eukaryontní se složitější organelovou vnitřní strukturou. Obvyklá velikost buňky se pohybuje řádově v rámci mikrometrů.

*Buňka*

#### 3.3.2.1 Cytoplazma

Základní cytoplazma je nitrobuněčné prostředí potřebné pro existenci buňky jako celku i pro činnost buněčných organel. Je většinou v tekutém nebo gelovitém stavu. Skládá se hlavně z vody (70 – 85 %), anorganických látek, organických sloučenin a biopolymerů. Mezi nejdůležitější patří ionty draselné, hořečnaté, fosforečnaté, síranové a hydrogenuhličitanové. Bílkoviny jsou velmi významnou složkou cytoplazmy (10 až 20 %). Rozdělujeme je na dva typy, strukturální bílkoviny a globulární bílkoviny, což jsou především enzymy. Lipidy jsou zastoupeny 2 % a tvoří zásobník energie. Sacharidy se hlavně podílejí na výživě buňky a jejich maximálně 1 % hmotnosti buňky. Základní cytoplazma je bezbarvá a dobře propouští viditelné světlo.

*Cytoplazma*

V některých případech obsahuje různé pigmenty, proto absorbuje některé vlnové délky. Základní cytoplasma je elastická. Ve stavu gelu je cytoplasma elastičtější než ve stavu rosolu. Viskozita je vyšší než u vody, závisí na typu buňky, teplotě i okolním prostředí. Hodnota pH je poměrně stálá a mírně kyselá (asi 6,8).

### 3.3.2.2 Plazmatická membrána

*Plazmatická  
membrána*

odděluje cytoplazmu od okolního prostředí a zajišťuje výměnu látek, energie a informace s okolím. Tloušťka membrány je asi 8 nm. Biologická membrána je v neustálém pohybu. Základem plazmatické membrány je dvojvrstva lipidů (fosfolipidy a cholesterol jako tmelící materiál) obsahující různé typy bílkovin. Periferní bílkoviny jsou pevně spojeny s povrchem membrány, fungují většinou jako enzymy nebo receptory. Integrální bílkoviny prostupují dvojvrstvou, tvoří iontové kanály nebo mediátory pro aktivní přenos látek. Propustnost membrány závisí na množství pórů. Membránový charakter má také většina buněčných organel. Hlavně endoplazmatické retikulum se systémem kanálků, které slouží k transportu látek do různých částí buňky a Golgiho systém, který naopak pomocí kanálků odvádí látky z buňky ven. Další membránovou strukturou jsou mitochondrie, které produkují většinu buněčného ATP a ribozomy potřebné k syntéze bílkovin.

### Buňka jako systém

Z termodynamického hlediska je buňka otevřený systém, u kterého dochází k trvalé výměně látek, energie a informací s okolím. Plazmatická membrána svým aktivním působením umožňuje dosáhnout vyšší koncentraci některých látek uvnitř buňky.

### 3.3.2.3 Transport látek

Transport látek uvnitř buněk i mezi buňkami je základem všech metabolických pochodů.

Pasivní transport definujeme jako přenos látek po energetickém gradientu:

*Pasivní  
transport*

- Základními gradienty v buňce jsou gradienty koncentrační a energetické.
- Funguje na principu difúze a osmózy.



- Difúze je nerovnovážený termodynamický proces charakterizovaný Fickovými zákony (výpočet toku iontů přes membránu).
- Osmóza je přenos molekul rozpouštědla (zpravidla vody) přes polopropustnou membránu podle koncentračního gradientu.
- Pasivní transport je spontánní izotermický proces, při kterém roste entropie (systém přechází do pravděpodobnějšího, méně uspořádaného stavu).

Aktivní transport definujeme jako přenos molekul a iontů proti elektrochemickému gradientu, který je realizován s pomocí energie metabolických procesů:

- Nerovnoměrné rozdělení látek v částech buňky a mezi buňkou a okolím je podmínkou správného fungování buněk.
- Tento stav homeostázy se snaží udržet dva mechanismy: selektivní propustnost membrán a mechanismy aktivního transportu.
- Aktivní transport se oproti pasivnímu uskutečňuje proti směru koncentračního spádu a k tomu potřebuje energii z metabolických procesů v membráně. Při přenosu nabitých částic přes elektricky polarizovanou membránu je třeba ještě přičíst práci pro překonání elektrického gradientu (při souhlasném směru obou gradientů).

*Aktivní  
transport*

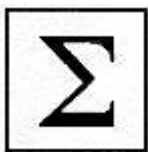
Buňky vzrušivých tkání mají schopnost odpovídat na podráždění (podnět), což se projevuje fyzikálněchemickými procesy a funkčními změnami membrány.

Jednou ze základních změn je změna elektrického stavu membrány. Tato potenciálová změna se nazývá akční potenciál. Fyzikálně jde o změnu polarizace napětí. Tento tzv. akční potenciál vzniká v místě podráždění a šíří se po membráně nervového nebo svalového vlákna dále.

### ***Modelování elektrických vlastností buněčné membrány***

*Pro zkoumání chování biologických membrán při simulacích a modelech živých systémů, kdy potřebujeme simulovat elektrické vlastnosti buněčné membrány, zařazujeme do modelu RC obvod – pro simulaci membrány v podmínkách fyziologického klidu.*





## Shrnutí kapitoly

- Člověk jako termodynamický systém je otevřený systém – vyměňuje si neustále s okolím částice i energii. Živé systémy se nacházejí stále v nerovnovážném stavu, všechna odvození je tedy nutno aplikovat pouze přibližně. Systém může konat práci, lze konat práci na něm, může přijímat a odevzdávat teplo. Pro existenci živého organismu má význam hodnota teploty (jedna ze stavových veličin). Organismus si teplotu reguluje.
- Projevem snahy termodynamického systému o dosažení rovnovážného stavu je difuze, jeden z nejvýznamnějších transportních mechanismů v organismu. Také další významný jev, osmotický tlak, je možno vysvětlit na základě zákonů termodynamiky, obdobně i proces dialýzy.
- V otevřených systémech se ale může vytvořit stacionární stav, ve kterém si parametry systému uchovávají konstantní hodnotu vyvážeností výměny látek a energií s okolím. Z termodynamického hlediska je také buňka otevřený systém, u kterého dochází k trvalé výměně látek, energie a informací s okolím. Stálost buněčného prostředí je udržována mechanismy aktivního a pasivního transportu látek.

## Kontrolní otázky a úkoly:



1. Jakým typem systému je živý organismus:  
izolovaný – uzavřený – otevřený?
2. Jaké jsou mechanismy regulace teploty v organismu?
3. Jaké znáte další teplotní stupnice?
4. Vysvětlete, proč dochází k difuzi.
5. Jaký je fyziologický význam osmotického tlaku?
6. Jak byste vysvětlili pojem bazální metabolismus?
7. Popište složení strukturu a biofyzikální funkci biologických membrán.
8. Definujte pasivní transport, vysvětlete způsob přenosu látky při difúzi.
9. Popište aktivní transport.
10. Popište elektrický model simulující pasivní elektrické vlastnosti buněčné membrány.



**Citovaná a doporučená literatura**

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3
- Ústav lékařské chemie a biochemie, 2. LF UK. *Biochemie I*. [online]. 2008 [cit. 2011-08-24]. Základy termodynamiky. Dostupné z WWW: <<http://www.lf2.cuni.cz/Ustavy/biochemie/vyuka/termod.htm>>.

**Elektronické zdroje (animace)**

Termodynamická rovnováha

- <http://jersey.uoregon.edu/vlab/Thermodynamics/index.html>

Aktivní a pasivní transport

- <http://programs.northlandcollege.edu/biology/Biology1111/animations/transport1.html>

Osmóza

- [http://www.concord.org/~btinker/workbench\\_web/models/osmosis.swf](http://www.concord.org/~btinker/workbench_web/models/osmosis.swf)

## 4 Mechanické vlastnosti tkání a orgánů

### V této kapitole se dozvíte:

- čím se zabývá biomechanika, jak určuje základní mechanické parametry lidského těla (těžiště, moment setrvačnosti ...)
- jaké jsou mechanické parametry kostí, šlach a vazů
- jaké jsou mechanické parametry svalu
- o mechanice srdečně cévního systému
- co říká Hagenův-Poiseuilleův zákon
- jaké zákony se uplatňují při dýchání
- jak vzniká lidský hlas

### Po jejím prostudování byste měli být schopni:

- popsat, jak se pohybují jednotlivé segmenty lidského těla
- vysvětlit na základě jakých zákonů mechaniky se řídí proudění krve v cévách a do jaké míry tyto zákony v živých organizmech můžeme aplikovat
- popsat, jakým způsobem dochází ke vzniku hlasu a jak to souvisí s dýcháním

**Klíčová slova kapitoly:** biomechanika, těžiště, šlachy, vazy, deformace, Hookův zákon, modul pružnosti, sval, srdce, cévy, krev, Hagenův-Poiseuilleův zákon, dýchání, hlas

### Průvodce studiem

*Mechanika je základní kapitolou všech učebnic fyziky. Základní zákony mechaniky známe dobře i z praktického života. Ale podobně jako v předchozí kapitole o termodynamice, i v této oblasti jsou živé systémy specifické, vnášejí do problematiky jiné situace, mají zvláštní vlastnosti, schopnost adaptace, jinak reagují na podněty. Pokusíme se tedy alespoň stručně tyto vztahy vysvětlit.*

*Na zvládnutí této kapitoly budete potřebovat asi 4 hodiny, tak se pohodlně usadte a nenechte se nikým a ničím rušit.*



## 4.1 Mechanické vlastnosti biologických systémů

Mechanické vlastnosti biomateriálů jsou do značné míry dány stavbou a uspořádáním tkáně. Základním stavebním prvkem jsou vlákna elastinu a kolagenu. Elastin se vyznačuje značnou schopností pružných deformací (až 150 %), kolagen naopak značnou tuhostí a pevností v tahu. Míra zastoupení jednotlivých vláken a jejich prostorové uspořádání výrazně určují výsledné mechanické vlastnosti, které jsou navíc ovlivněny množstvím amorfni mezibuněčné hmoty.

Biologické tkáně se vyznačují viskoelastickými vlastnostmi a nelineárním průběhem zátěžové křivky. Pro technické materiály je zátěžová křivka lineární a po zavedení poměrných veličin napětí (síla na plochu) a poměrné deformace (změna délky dělená původní délkou) je snadno popsatelná lineárním Hookovým zákonem. Viskoelastická modifikuje poddajnost biologických struktur (biomateriálů). Variabilita těchto vlastností je značně široká: od reálné newtonovské kapaliny (synoviální tekutina, krev, lymfa, atd.), přes různé typy měkkých tkání až po rozdílnost kostí.

Mezi základní mechanické vlastnosti patří:

- tuhost, tj. schopnost odolávat deformacím,
- pevnost neboli mez pevnosti je mezní zatížení, které pokud je překročeno způsobí destrukci materiálu
- elasticita (pružnost) je schopnost materiálu vrátit se po odeznění vnější zátěže do původního tvaru,
- plasticita (tvárnost) naopak schopnost materiálu uchovat deformaci i po vymizení vnější zátěže,
- mez pružnosti je hraniční hodnota napětí tvořící přechod mezi deformacemi pružnými a plastickými,
- odolnost proti vrypu nazýváme tvrdostí materiálu.
- biologická pevnost je hraniční napjatost (rozložení napětí v tělese), která působí-li po určité době či opakovaně, způsobí spontánní snižování mechanických vlastností a resorpci biologického materiálu.

*Základní  
mechanické  
vlastnosti tkání*

*Reologie*

Reologie se zabývá obecnými mechanickými vlastnostmi látek, vztahy mezi napětím, deformacemi a rychlostí deformace a z toho u kapalin vyplývajícími

dalšími hydrodynamickými vztahy. Reologie je obor mechaniky zabývající se deformací a tokem látek vlivem napětí, která na něj působí.

## 4.2 Biomechanika lidského těla

Biomechanika je transdisciplinární obor, který se zabývá mechanickou strukturou, mechanickým chováním a mechanickými vlastnostmi živých organismů a jeho částí, a mechanickými interakcemi mezi nimi a vnějším okolím. Jedním z hlavních cílů biomechaniky je studium odezvy živé tkáně na vnější energetické působení z hlediska fyziologického, přičemž předpokládáme, že živá tkáň je v podstatě kompozitní materiál s řízenými vlastnostmi.

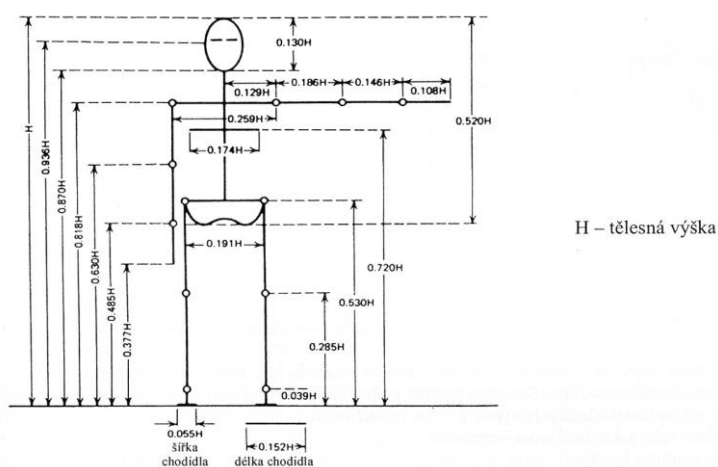
Materiál neživé přírody je relativně málo organizovaný (např. struktura a stavba krystalů) a neschopný samovývoje, smysl a funkci mu přiděluje pouze člověk. Naproti tomu biologický materiál je vysoce organizovaný se schopností samovývoje, reprodukce a možností přizpůsobení se okolí.

Při zkoumání biomechanických zákonitostí si vytváříme modely. Pro zkoumání mechaniky pohybu těla si lidské tělo představíme jako soustavu jednotlivých segmentů.

### 4.2.1 Segmenty lidského těla

**Velikosti segmentů** stanovíme např. podle tělesné výšky (viz obrázek), hmotnost segmentů pak zpravidla jako procento z celkové hmotnosti.

**Délka segmentů** vyjádřená pomocí tělesné výšky:



Zdroj: JANURA, M. Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka

### Hmotnost segmentů

Hmotnost segmentů těla lze zjistit na základě znalosti celkové hmotnosti a výšky jedince dvěma užívanými postupy.



- Méně přesný postup vychází ze znalosti procentuálního rozdělení celkové hmotnosti, publikované výsledky jednotlivých autorů se však značně liší.
- Přesnější je metoda založena na výzkumu Zaciorského a Selujanova (1979), kteří na základě výzkumu 100 osob radioizotopickou metodou experimentálně stanovili koeficienty B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub> a B<sub>2</sub> pro každý segment. Pro vyjádření hmotnosti daného segmentu pak platí jednoduchá rovnice  $m_i = B_{0i} + B_{1i} \cdot m + B_{2i} \cdot v$

kde m (kg) je celková hmotnost a v (cm) je výška pokusné osoby.

Všechny výše uvedené hodnoty byly zjišťovány experimentálně, jejich zobecnění je tedy provedeno s jistou pravděpodobností a zatíženo určitou chybou měření. Platí pro dospělou „normální“ populaci.

### Hustota

Průměrná hustota lidského těla je blízká hustotě vody a závisí zejména na objemu vzduchu v plicích.

$$\rho = m / V \quad (\text{hmotnost/objem})$$

Například (hustota celého těla, jednotlivé segmenty se liší)

$$\rho_{LT} = 0,69 + 0,9 \cdot c \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde

c – vypočteme podle vzorce

m – hmotnost těla v kg

TV – tělesná výška v m

$$c = \frac{TV}{\sqrt[3]{m}}$$

### Těžiště a jeho poloha

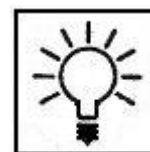
Těžiště je působíště tíhové síly. Těžiště používáme, pokud pohyb těla redukuje na pohyb hmotného bodu. V základním anatomickém postavení (stoj spojný se vzpřímenou hlavou, ruce podél těla, dlaně dopředu) se těžiště nachází v malé pánvi ve výšce druhého nebo třetího křížového obratle. U mužů (ne obecně) je o 1–2 % výše, u dětí je také výše, v průběhu růstu se posouvá směrem dolů. V některých polohách s těžiště nachází mimo tělo. Těžiště jednotlivých segmentů se nachází zpravidla na jejich ose. Pro určení těžiště těla



se používají různé postupy, např. skládání rovnoběžných vektorů – působení tíhové síly na jednotlivé segmenty.

### Otázka k zamyšlení:

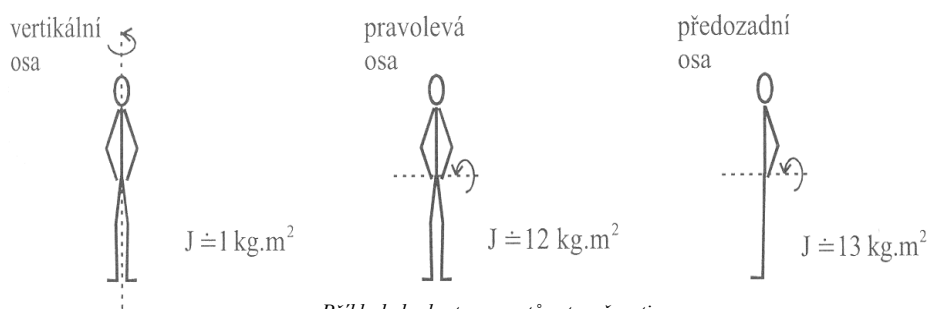
Zamyslete se nad důvodem posunu těžiště těla u dětí s růstem směrem dolů.



#### 4.2.2 Moment setrvačnosti

Při řešení pohybových úloh nás zajímá další fyzikální veličina – moment setrvačnosti. Tato fyzikální veličina vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu. Velikost záleží na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení. Body tělesa s větší hmotností a umístěné dál od osy mají větší moment setrvačnosti. Je dán rozložením hmotnosti vzhledem k ose.

$J = m \cdot r^2$  – moment setrvačnosti vzhledem k ose otáčení.



Příklady hodnot momentů setrvačnosti.

Zdroj: JANURA, M. Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka

Tato veličina se vyskytuje ve většině rovnic řešících rotaci člověka, resp. veličin souvisejících s rotací. Podle zákona o zachování momentu hybnosti izolované soustavy je možno využít změn velikosti momentu setrvačnosti v letových fázích rotačního pohybu ke změnám úhlové rychlosti během letu (salta, vruty, přemety), tj. přiblížením hmotností některých segmentů těla k ose otáčení (neboli zmenšením celkového momentu setrvačnosti) zvýšit rychlost rotace a naopak.

#### Aplikace ve sportu

Naprostá většina sportovních pohybů jsou pohyby složené z posuvných a otáčivých - noha cyklisty se otáčí okolo osy pedálů a posouvá s bicyklem, tělo skokana do vody se může otáčet okolo podélné osy (vruty) i příčné osy

(překoty) a při tom posuvným pohybem padá po parabolické dráze, diskář nebo kladivář provádí otočky kolem své osy a při tom se posouvá k bodu odhodu. Krasobruslař může při piruetě zvýšit rychlost svého otáčení pouhým připažením, aniž by musel dále zvyšovat svou kinetickou energii, což je umožněno závislostí momentu setrvačnosti na rozložení hmoty vzhledem k ose otáčení.



Krasobruslař se rozjíždí, rozpaží ruce a zpočátku se roztáčí s roztaženými rukama, stojí na jedné noze a druhou unoženou vyvolává vnější tečnou sílu mezi bruslí a ledem. Odrazí se tak, aby si od země nabral určitý moment hybnosti, točí se obloukem a zůstává se točit na místě. Pak připaží a přinoží, tím se podstatná část jeho hmoty dostala mnohem blíže k ose otáčení. Tak se zmenšil poloměr setrvačnosti na polovinu, musí se tedy zečtyřnásobit počet otáček - čímž zrychlí svou rotaci. Pokud chce piruetu rychle ukončit, postupuje obráceně. Obdobně se chová při skoku s rotací, zvláště čtverném, neboť čas pro 8 rotací, tentokrát volně nad ledem, má omezen.

## Biomechanické systémy

Biomechanika zkoumá mechanické parametry kostí, šlach a vazů, chrupavek, kloubních spojení, svalů.

Pohybový systém dělíme na podsystemy:

- pasivní podsystem
- aktivní podsystem

### 4.2.3 Pasivní podsystemy

Neprodukují energii, neslouží jako primární zdroj energie k vykonání pohybu.

Patří sem kosterní soustava, šlachy, vazy, chrupavky, klouby.

Jejich funkce spočívá především v tom, že:

- slouží jako konstrukční prvky,
- vytvářejí mechanickou podporu,
- umožňují přenos mechanické energie,
- akumulují mechanickou energii,
- chrání vnitřní orgány.



## Síly pružnosti, meze

Síly pružnosti jsou síly, kterými na sebe působí částice v deformovaném tělese; zabraňují tělesu, aby se neustále deformovalo, mají stejnou velikost jako síla působící na těleso a působí opačným směrem (zákon akce a reakce). *Mez pružnosti* je největší hodnota normálového napětí, při kterém je deformace tahem ještě pružná. Po překročení *meze pevnosti* pak dojde k porušení soudržnosti materiálu.

*Mez pružnosti  
a pevnosti*

Velikost zátěže reprezentuje hodnota napětí, tj. hodnota síly působící na jednotu plochy:

$$\sigma = F/S \text{ [Pa]}$$

Deformace materiálu, ke které dochází, je lineární nebo smyková:

Velikost deformace uvádíme:

- absolutní  $\Delta l = l - l_0$
- relativní  $\varepsilon = \Delta l/l_0$

*Napětí na mezi pevnosti a moduly pružnosti pro některé tkáně:*

Tkáň	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Diafýza femuru podélně	170 – 209 (tlak) 132 – 133 (tah)	17 550 – 35 300 (tlak) 16 840 (tah)
krut	133	–
Tibie	195 – 204 (tlak) 157 (tah)	28 010 – 30 600 (tlak) 23 830 (tah)
Fibula	125 (tlak)	–
Humerus	135 (tlak)	–
Radius	117 (tlak)	–
Ulna	126 (tlak)	–
Kloubní chrupavka	68 (tlak)	–
Achillova šlacha	35 – 56 (tah)	–
Šlachy, vazy	pásmo 42 – 210 (u dospělých)	–



Zdroj: JANURA, M. Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka

## Kosti

Pro deformaci pevných látek platí Hookův zákon:

$$\sigma_N = E \cdot \varepsilon \quad E - \text{modul pružnosti v tahu [Pa] (Youngův modul)}$$

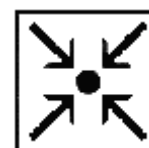
Příklad hodnot modulu pružnosti (hodnoty v MPa):

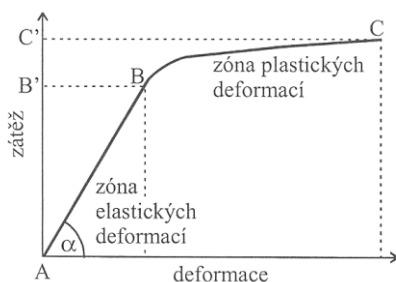
ocel 170 000

sklo 70 000

kompaktní kost 15 700 (12 700 – 19 400)

Vztah mezi velikostí zatížení tahem a deformací kosti (tg  $\alpha$  definuje modul pružnosti):





B – přechod mezi elastickou a plastickou deformací  
 C – mezní bod, ve kterém dochází k poškození kosti  
 B' – mez kluzu  
 C' – mez pevnosti

Zdroj: JANURA, M. Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka

### Wolfův zákon o transformaci kostí

Základní mechanickou vlastností kostní tkáně je její pevnost. Působením síly se kosti deformují. Pro strukturu kostí platí Wolfův zákon o transformaci kostí – struktura kostí se trvale přizpůsobuje změně působících sil. Vzhledem k principu přestavby kostní tkáně v závislosti na mechanickém působení je kostní tkáň nehomogenní a anizotropní. Při zatížení v podélném směru kosti, může být mez pevnosti až 10krát vyšší než ve směru radiálním a tangenciálním. Záleží i na způsobu zatížení. V tlaku je pevnost kosti nejvyšší, o třetinu nižší v tahu a jen třetinová ve smyku.

Kosti jsou namáhány určitými směry v závislosti na své funkci. Dlouhé kosti jsou namáhány v tahu a tlaku a tomu jsou přizpůsobeny strukturou, např. jsou uprostřed duté, což zajistí vyšší odolnost proti ohybu, ale je zde naopak malá pevnost v torzi. Cyklická zátěž kostí se projeví únavovými a adaptačními jevy.

### Šlachy a vazy

Šlachy mají za úkol především přenos svalové síly na kost nebo chrupavku, umožňují uložení elastické energie. Vazy stabilizují kloub, podílejí se na spojení kostí, limitně vymezují pohyblivost kloubních spojení. Šlachy a vazy jsou ze 70 % tvořeny vodou, v pevné části ze 75 % kolagenem.

Pevná část se skládá z dvou typů vláken:

- elastinová vlákna jsou schopna 150 – 200% pružné deformace, mají menší pevnost,
- kolagenní vlákna – mají větší pevnost a tuhost, protažení kolem 10 %.

S rostoucím věkem dochází ke snížení meze pevnosti v tahu!

Zastoupení jednotlivých typů vláken se liší v různých vazech v těle (např. u vazů spojujících obratlové oblouky je zastoupení elastických vláken až 70 %).

Rozdíl mezi vazem a šlachou je hlavně v uspořádání vláken, což má tyto praktické důsledky:



- vazy jsou méně pevné a křehčí,
- vazy lépe odolávají mimoosové zátěži,
- šlachy mají jeden dominantní směr (působení svalové síly v tahu).

Funkci šlachy je třeba posuzovat v závislosti na kontrakci svalu,

k maximálnímu zatížení šlachy dochází při maximální kontrakci svalu.

Velikost pevnosti šlachy v tahu je asi dvojnásobná než u příslušného svalu. Při zranění je proto častější ruptura svalu než přetržení šlachy. Biomechanické vlastnosti šlach a vazů jsou ovlivněny věkem, mírou pohybové aktivity, léky, těhotenstvím.

### **Chrupavka**

Mechanické vlastnosti chrupavky jsou dány uspořádáním vláken a tekutiny mezibuněčné hmoty. V chrupavce vlákna kolagenu a elastinu tvoří pórovitou substanci prostoupenou tekutinou, která tvoří až 80 % hmotnosti chrupavky.

Hlavní funkce jsou:

- přenášení tlakového zatížení v kloubním spojení
- tlumení rázových zatížení
- snižování koeficientu tření

### **Kloubní spojení**

Tvar styčných ploch v kloubním spojení určuje stupeň volnosti pohybu v daném kloubu. Otáčivý pohyb v kulovém kloubu nazýváme cirkumdukce.

Pohyb v kloubu j navíc je omezován kloubním pouzdrem.

#### **4.2.4 Svalový subsystém**

Svaly tvoří 40 – 45 % hmotnosti lidského těla. Je to jediný aktivní subsystém pohybového systému člověka, pro který je typickým jevem produkce síly.

Základními vlastnostmi svalu jsou:

- dráždivost,
- vodivost,
- stažlivost,
- přizpůsobení tvaru a možnosti regenerace.



Anatomickou jednotkou kosterního svalu je příčně pruhované svalové vlákno. Funkční jednotkou je motorická jednotka, tj. skupina svalových vláken inervovaných jedním motoneuronem (nejmenší část svalu, která může kontrahovat nezávisle). Hlavním projevem mechanické funkce svalových vláken je jejich zkrácení – stah, kontrakce. Plní dvě základní funkce: fixační a kinetickou.

V lidském organismu dochází k řadě přeměn energie. Hlavním zdrojem energie je chemická energie uložená v potravě (cukry, tuky, bílkoviny). Tělo tyto látky přemění ve speciální energetickou látku adenosintrifosfát (ATP). Jejím štěpením v různých místech těla se energie uvolňuje a pokrývá energetické potřeby organismu. Energetické bilance jsou důležité v oblasti výživy organismu. Teplo vzniká v organismu jako vedlejší produkt chemických reakcí a též při práci svalů. Měření vykonané mechanické práce svalů a některých orgánů má opět význam při diagnóze stavu lidského organismu.

### **Síla svalu**

#### *Svalová síla*

Svaly jsou složeny ze svalových vláken obsahujících svalové buňky. Buňky se smršťují a tak vzniká tahová nebo tlaková síla. Při této kontrakci se spotřebovává chemická energie a vzniká odpadové teplo. Měří se síla svalů ruky, kousacích svalů atd. Chlapci ve věku 15 až 18 let stisknou rukou silou 390 N až 490 N, dívky 290 N až 390 N. Práváci mívají v průměru o 50 N větší sílu v pravé ruce. U leváků nemusí být levá ruka silnější. Sílu stisku ruky měříme dynamometrem. Žvýkáci svaly člověka vyvinou sílu až 4 000 N. Tato silová měření jsou významná v neurologii a ve sportovním lékařství.

Sval se při kontrakci zkracuje o 30 – 40 % své délky. Posoudit nebo změřit svalovou sílu je neskutečně, závisí na řadě faktorů:

- na počtu svalových vláken,
- na délce svalu,
- na počtu aktivovaných motorických jednotek,
- je výsledkem působení elastické složky svalu a šlachy.

### **Mechanické vlastnosti svalu**

#### *Pevnost*

Pevnost svalu v tahu v klidu je 0,26 až 0,9 MPa, pevnost maximálně kontrahovaného svalu je různá pro různé svaly 1,25 MPa (menší než u šlach).

### Výkon při svalové kontrakci

Výkon těla či jeho orgánů je měřen zejména ve sportovním lékařství. Při zátěžovém měření EKG měřený člověk obvykle šlape na rotopedu, takže lze měřit jeho okamžitý výkon, který je přibližně 50 W až 150 W. Klidový (bazální) výkon celého lidského organismu je asi 100 W a mírně klesá s věkem. Na lidském těle se určují výkony některých orgánů, zejména svalových. Celkový výkon srdce na čerpání krve a na stálé napětí svalů je přibližně 13 W. Ze znalosti energetických poměrů v organismu můžeme stanovit i účinnost některých fyziologických dějů. Účinnost svalové práce je asi 20 %, 80 % energie se mění na teplo. Jen asi 10 % výkonu srdce je určeno na čerpání krve, téměř 90 % je spotřebováno na napětí srdečního svalu. Výkon při svalové kontrakci můžeme odvodit ze zjednodušených vstupních podmínek:

$$P = M \cdot \omega ,$$

kde  $M$  je moment svalové síly,  $\omega$  je úhlová rychlost v kloubu.

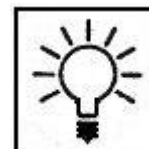
*Výkon*

### Účinnost svalové kontrakce

Účinnost je poměr spotřebované energie k energii dodané. Maximální účinnost v lidském svalu při delší práci je asi 15 – 17 %.

*Účinnost*

Vzpomenete si, jaká je účinnost parního stroje a spalovacího motoru?  
Srovnejte s účinností svalu při delší práci.



## 4.3 Mechanická funkce srdečně cévního systému

Z hydrodynamického hlediska je srdečně cévní systém uzavřený systém, který tvoří tři složky:

- srdce – hlavní motorický orgán, koná práci, je zdrojem mechanické energie;
- cévy – rozvodový systém, uplatňují se zde zákony proudění;
- krev – pohyblivá složka, zajímají nás mechanické vlastnosti tekutiny zejména s ohledem na její pohyb.

Krevní oběh slouží k přenosu všech živin a krevních plynů obsažených v krvi do všech tkání a odvádění metabolických produktů z tkání do míst vylučování. Krevní oběh rozlišujeme velký (srdce – tělo) a malý (srdce – plíce). Je jednosměrný.



**Krev proudí díky tlakovým rozdílům mezi tepennou a žilní částí systému, způsobených činností srdce.**

#### 4.3.1 Srdce

Srdce pracuje jako píst, který při každém pohybu vytlačí tlakem  $p$  objem krve  $\Delta V$ .

Součástí této práce je i práce „kinetická“ udělující danému objemu kinetickou energii:

$$W_k = \frac{1}{2} \rho v^2 \Delta V$$

Normální hodnoty jsou:

$$p = 13,3 \text{ kPa} \quad \rho = 1,06 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$$

$$V = 70 \text{ ml} \quad v = 0,5 \text{ m s}^{-1}$$

Normální tlak v aortě je při stahu komorové svaloviny (systola) cca 16 kPa, při uvolnění (diastola) cca 10,5 kPa.

#### Srdeční práce

Levá komora při systole vykoná práci  $W = 0,93 \text{ J}$ . Práce pravé komory činí 20 % práce komory levé. Celková mechanická práce je pak rovna 1,12 J. Kromě toho musí srdce konat práci potřebnou k udržení svalového tonu. Celkový srdeční výkon je 13 W (13 % celkového klidového výkonu organismu). Práce, kterou srdce vykoná za 60 let života, je větší než 2 GJ.

*Srdeční práce  
a výkon*

#### 4.3.2 Cévy

Cévy tvoří rozvodovou část uzavřeného oběhu. V živém organismu při proudění musíme brát do úvahy schopnost cév měnit aktivně i pasivně svůj objem. Cévní stěna obsahuje vlákna elastinu, kolagenu, hladkého svalstva, podle jejich poměrného zastoupení se pak liší projev mechanických vlastností:

- tepny s převahou elastických vláken – pružnickové – vyrovnávají pulsační proud krve, mají málo vláken hlad. svalstva, nemohou aktivně měnit

*Mechanické  
vlastnosti cév*



světlost, velké a středně velké tepny,

- tepny s převahou hladkého svalstva ve stěně (oblast arteriol) – muskulární – mohou měnit průsvit cévy, mohou ovlivnit krevní průtok a periferní odpor.

### **Mechanické vlastnosti cév**

Cévní odpor závisí především na geometrických poměrech cév. Odpory jednotlivých úseků se řadí do série, tím získáme celkový periferní odpor.

Rozhodující význam má úsek arteriol (cca 40 %). Vazodilatace vede ke snížené periferního odporu, vazokonstrikce ho zvyšuje.

Napětí cévní stěny jako součin hydrostatického tlaku krve uvnitř cévy a jejího poloměru vyjadřuje Laplaceův zákon (*Napětí stěny roztaženého dutého tělesa je přímo úměrné součinu tlaku uvnitř tělesa a poloměru křivosti tělesa a nepřímo úměrné tloušťce stěny*). Podle něho jsou cévy o malém poloměru i při relativně vysokém hydrostatickém tlaku krve chráněny před protržením nízkým napětím svých stěn.

Míru elasticity cévní stěny udává koeficient objemové roztažnosti (elasticity) E.

$$E = \Delta p / \Delta V \quad (p - \text{tlak, } V - \text{objem}).$$

### **Proudění krve v cévách**

Podle svých fyzikálních vlastností, geometrie cévy a tlakových gradientů určujících rychlost může krev proudit buď laminárně nebo turbulentně (tvoří se víry, šelest). Reynolds zjistil, že kritický bod přechodu závisí na poloměru, rychlosti, hustotě a viskozitě kapaliny. V organismu za fyziologických podmínek převažuje v cévním systému proudění laminární.

Reynoldsovo číslo  $R_e$  je bezrozměrné číslo charakterizující chování proudící kapaliny. Podle jeho hodnoty lze usuzovat na to, zda bude proudění laminární nebo turbulentní.  $R_e$  závisí přímo úměrně na rychlosti, hustotě kapaliny a poloměru trubice, nepřímo úměrně na viskozitě kapaliny.

Pro různé typy potrubí a různé typy kapalin se stanovují experimentálně kritické hodnoty Reynoldsova čísla. Je-li hodnota Reynoldsova čísla nižší než kritická hodnota odpovídající danému uspořádání, je proudění laminární. Je-li hodnota Reynoldsova čísla vyšší, je proudění turbulentní.

*Laminární a  
turbulentní  
proudění*

Za fyziologických podmínek je tok krve v cévách laminární – rovnoběžný s podélnou osou cévy. Rychlost proudění závisí na vzdálenosti od stěny cévy, čím blíže, tím je proudění pomalejší. Turbulence se objevují zejména za zúžením cévy (ateroskleróza) nebo při stavech se sníženou viskozitou krve (anémie).

Pro tok krve v cévách můžeme uvažovat, že v přiblížení platí rovnice kontinuity

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

a Bernoulliho zákon (součet kinetické a potenciální energie tekutiny je v každém bodě systému konstantní).



#### **K zamyšlení:**

Jestliže je celkový průřez vlásečnic asi 300krát větší než průřez aorty, jaká bude střední rychlost krevního proudu ve vlásečnicích, když v aortě je  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ?

Pro **průtočný objem** platí zákon Hagenův-Poiseuilleův [Puazejův]:

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta \Delta l}$$

Průtočný objem je úměrný  $r^4$  a tlakovému spádu, nepřímo úměrný viskozitě a délce trubice. Hlavním principem regulace průtoku krve je změna odporu řečiště a z předchozího vztahu vyplývá, že nejúčinnějším nástrojem změny odporu je **změna poloměru cévy**.

Všechny uvedené zákony se skutečným poměrům pouze blíží. Krev není ideální ani Newtonovská kapalina, stěny cév nejsou dokonale hladké.

#### **Proudění krve v kapilárách**

Z funkčního hlediska představují kapiláry nejvýznamnější část krevního oběhu. Přes kapilární stěny dochází k prostupu živin a kyslíku z krve do intersticiální tekutiny a opačným směrem prostupují rozpadové produkty a  $\text{CO}_2$ .

Kapilární stěna funguje jako dialyzační membrána, která má různě velké póry v různých tkáních. Základními mechanismy prostupu jsou filtrace a resorpce (difuzní mechanismy). Látky prostupují ve směru koncentračního gradientu.

*Regulace  
průtoku krve  
cévami*

### 4.3.3 Mechanické vlastnosti krve

Krev je koloidní disperzní soustava obsahující roztok anorganických i organických látek a suspenzi krevních elementů (červené a bílé krvinky, krevní destičky). Proto není krev newtonovskou kapalinou, ale řadíme ji do skupiny látek viskózně elastických. V systému působí jednak čistě mechanické síly tření, jednak elektrické síly, neboť na membránách krvinek a vnitřním povrchu cév vznikají elektrické dvojvrstvy. Všechny tyto síly působí proti mechanickému proudění.

#### Hustota

Hustota krve je poměr hmotnosti krve k objemu, který tato krev zaujímá. Závisí na počtu a velikosti erytrocytů, koncentraci hemoglobinu a koncentraci plasmatických proteinů.

*Hustota krve*

Normativní hodnoty jsou:

plná krev: 1052 - 1063 kg/m<sup>3</sup>

plazma: 1027 kg/m<sup>3</sup>

erytrocyty: 1090 kg/m<sup>3</sup>

#### Viskozita

Viskozita (také vazkost) je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší odpor pohybu kapaliny nebo těles v kapalině.

*Viskozita krve*

Definována jako odpor kapaliny kladený síle, která se jí snaží rozpohybovat. Hodnota viskozity krve závisí na hematokritu (viz viskozita suspenze).

Viskozita krve je asi 4,5krát vyšší, než viskozita vody.

Viskozita obecně, a tím i viskozita krve, jejíž velký podíl je tvořen vodou, je značně teplotně závislá.

## VODA

Teplota [°C]	Dynamická viskozita [mPa.s]
0	1,787
5	1,519
10	1,307
20	1,002
30	0,798
40	0,653
50	0,547
60	0,467
70	0,404
80	0,355
90	0,315
100	0,282

*Viskozita krve při 37 °C je v rozmezí 3,0 až 3,6 mPa.s*



Krev v oběhovém systému nezachovává konstantní teplotu 37 °C. V periferních částech organismu může její teplota klesnout až na několik stupňů Celsia.

V takovém případě vzroste viskozita několikanásobně.

Organismus musí disponovat kompenzačními mechanismy, jimiž bude omezovat zvýšené nároky na srdeční práci v důsledku nárůstu viskozity krve na periferii (zmenšení průřezu, otevření cév pro spojení arteriálního a venózního úseku...).

#### 4.4 Biomechanika dýchání

Dýchání je jedna ze základních funkcí životních funkcí organismu. Dýchání je proces příjmu kyslíku a jeho dopravy do tkání a odvod oxidu uhličitého z tkání a z organismu.

Dýchání rozlišujeme:

- vnější – výměna O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> mezi alveolami a krví
- vnitřní – výměna O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> mezi tkáněmi
- buněčné – při něm přeměnu energie zajišťují mitochondrie v buňkách

Při dýchání se uplatňuje několik fyzikálních zákonů:

- stavová rovnice
- Daltonův zákon

- Henryův zákon
- Fickovy zákony

#### 4.4.1 Mechanika dýchání

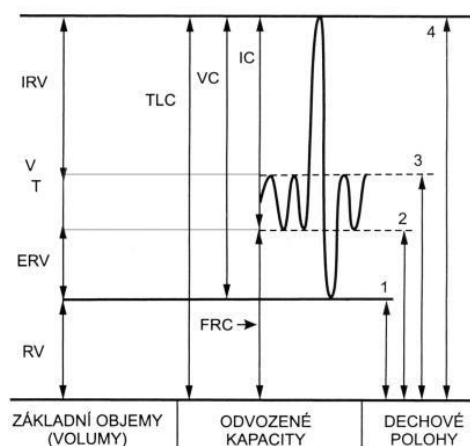
Při dýchání plicé následkem negativního pleurálního tlaku sledují objemové změny hrudníku, tím vznikají rozdíly tlaku mezi alveolárními prostory a vnějším prostředím. Při inspiraci a expiraci se uplatňuje směr tlakového gradientu (tlakový spád). Inspirace je děj aktivní, expirace za normálních okolností pasivní.

#### K zamyšlení:

Při jaké situaci není exspirace pouze pasivní děj?



#### Dechové objemy



Zdroj: [http://is.muni.cz/elportal/estud/fsps/js07/fyzio/texty/resources/dechove\\_objemy.jpg](http://is.muni.cz/elportal/estud/fsps/js07/fyzio/texty/resources/dechove_objemy.jpg)

- Objem vdechnutého a vydechnutého vzduchu v klidu je dechový objem (VT). Normální hodnota kolem 500 ml.
- Objem vzduchu získaný usilovným nádechem po nádechu klidném označujeme jako inspirační rezervní objem (IRV). Norma je kolem 3 litrů.
- Po klidném výdechu můžeme vydechnout další objem vzduchu (do 1500 ml), tzv. expirační rezervní objem (ERV).
- I poté v plicích zůstává určité množství vzduchu (reziduum), proto hovoříme o reziduálním plicním objemu (RV).



### Dechové kapacity

Množství vzduchu, které vydechneme maximálním výdechem po maximálním nádechu je vitální kapacita ( $VT + IRV + ERV = VC$ ). Její průměrná hodnota je 4 až 5 l u žen a 5 až 6 l u mužů.



Součet

- $VC + RV = TLC$  – totální plicní kapacita.
- $ERV + RV = FRC$  – funkční reziduální kapacita.
- $VT + IRV = IC$  – inspirační kapacita.

### Výměna plynů, dýchací svaly

Fyzikální jev proudění do místa nižšího tlaku se uplatní při výměně plynů mezi vnějším prostředím a alveolárními prostory. Při prostupu mezi alveolární stěnou a krevním objemem se uplatní difuze, stejně jako při přestupu z krve do buňky.

Výměnu plynů zajišťují svými kontrakcemi dýchací svaly – bránice (z 60 %) a mezižeberní svaly. Aktivita obou svalových dýchacích systémů může být různá (brániční nebo žeberní dýchání).

### Difuze

Jev difuze je základním mechanismem pasivního transportu látek.  $CO_2$  za normální tělesné teploty difunduje 20krát rychleji než  $O_2$ . Pro zajištění dynamické rovnováhy je menší difuzibilita  $O_2$  vyvážena jeho větším tlakovým spádem.

### Tonutí

Při tonutí s vdechnutím vody nebo tekutiny do plic se vdechnutá voda se v plicích vstřebává.

- **Sladká voda** po vstřebání naředí krev a zvýší její objem. Může tím poškodit červené krvinky při nižším osmotickém tlaku naředěné krve.
- **Slaná voda** naopak svou koncentrací zadržuje vodu v plicích, což vede k otoku plic.

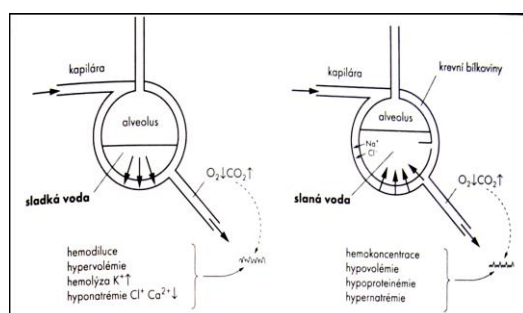
V případě, že do plic pronikne **sladká voda**, je blokován přestup kyslíku z plic do krve. I po vytažení tonoucího z vody se rozvíjejí další závažné změny.

Sladká voda v plicích je oproti krvi hypotonická, to znamená, že krev je

*Tonutí ve  
sladké a slané  
vodě*

slanější, dochází k přestupu vdechované sladké vody z plic přes plicní alveoly do krevního oběhu, naředění a zvětšení objemu krve, což vede k postupnému pravostrannému srdečnímu selhávání, otokům končetin a rozpadu červených krvinek. Většina těchto změn se plně rozvine za šest hodin po tonutí. Proto každý tonoucí i po rychle a úspěšně poskytnuté první pomoci patří vždy do rukou lékaře.

**Slaná voda** je oproti krvi hypertonická, to znamená, že vdechovaná voda je slanější než krev, dochází k „nasávání“ krve do plic, což vede k okamžitému edému plic, nemožnosti přestupu kyslíku do krve, vykašlávání zpěněné krve, snížení okysličení mozku a k poruše vědomí. Po tonutí či po malém vdechnutí slané vody musí následovat hospitalizace a sledování stavu postiženého v nemocnici. Pokud by se toto zanedbalo, mohlo by se u tonoucího objevit tzv. sekundární tonutí.



## Dýchací odpory

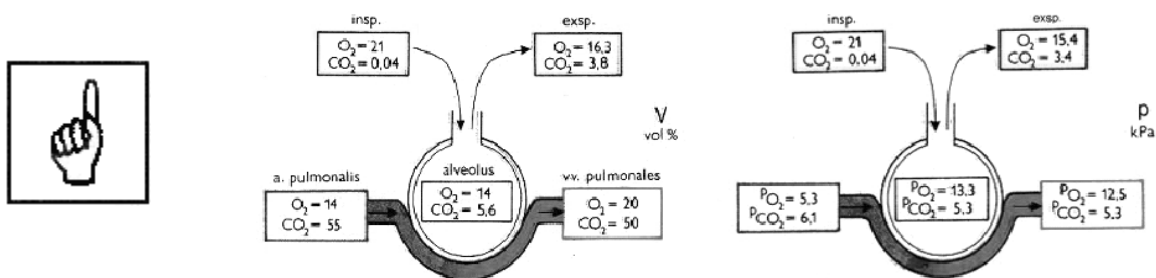
Inspirace probíhá vždy proti odporu, který je dán elasticitou plicní tkáně a povrchovým napětím plicních alveolů. Při nádechu se překonává elastický odpor plic a hrudníku (je překonáván činností dýchacích svalů), neelastický odpor tkání (tření) a proudový odpor dýchacích cest (stoupá u patologických stavů, za klidových podmínek je zanedbatelný).

## Dýchací práce

$$W = p \cdot V$$

je práce potřebná k překonání všech dýchacích odporů, tlak je součet tlaků k překonání všech odporů.

Výměna plynů mezi vnějším a vnitřním prostředím probíhá na základě gradientu parciálních tlaků.



Normální hodnoty obsahu (V) a parciálního tlaku (p) kyslíku a oxidu uhličitého ve vdechovaném a vydechovaném vzduchu, v alveolárním vzduchu a v arteriální a venózní krvi.  
(podle TROJAN, Fyzulógia 1, Osveta 1992)

#### 4.4.2 Lidský hlas

Hlas se tvoří v dýchacím ústrojí, které anatomicky zahrnuje plíce, průdušky, průdušnici, hrtan, hltan a ústní a nosní dutinu. Při výdechu proudí vzduch ven z plic přes průdušky a průdušnici do hrtanu. V hrtanu jsou umístěny hlasivky, jejichž kmity modulují proud vzduchu, a tím vytvářejí periodické změny vzdušného tlaku – vzniká akustický signál.

Z širšího hlediska hlasové ústrojí tvoří tři systémy – dýchací, fonační a artikulační:

- **Dýchací systém** dodává hlasovému ústrojí potřebnou energii. Tvoří ho plíce, průdušky, průdušnice, mezižeberní svaly a bránice.
- **Fonační ústrojí** je součástí hrtanu, který je umístěn na přední straně krku; nahoře vyúsťuje do hltanu, kde je připevněn širokým vazem ke kosti jazykové a s tou dalšími svaly a vazy ke spodině ústní, dole přechází v průdušnici.
- Na správné artikulaci a rezonanci se podílejí hltan a dutiny ústní, nosní a lebeční. Rezonanci ovlivňují i plicní sklípky, průdušky a průdušnice.

#### Hlasové ústrojí

Hrtan je složen z chrupavek, vazů, svalstva a sliznice. Kloubní spojení párových hlasivkových chrupavek s chrupavkou prstencovou patří k nejsložitějším kloubním mechanismům v lidském těle a umožňuje velmi rozmanité pohyby.



Tyto pohyby mají velký význam pro tvoření a úpravu hlasu, protože jsou přenášeny na hlasové vazy. Prostor mezi vnitřními stěnami chrupavky štítné a dvěma hlasovými vazy vyplňuje z velké části svalová hmota. Tím se vytvářejí dva jednotné valy hlasových rtů – hlasivky. Veškeré změny v postavení hlasivek jsou ovládány svalstvem. Zvuk hlasu tvoří periodické vlnění sloupce vzduchu nad hlasivkami.

*Vzduchový proud vydechovaný z plic průduškami do průdušnice dospěje až k hlasové štěrbině, která je v tomto okamžiku uzavřena hlasivkami. Pod nimi se zvyšuje tlak a dochází k prudkému zhušťování vzduchu. V určitém okamžiku tlak přemůže napětí sevřených hlasivek, ty povolí a rozestoupí se do stran. Přitom proud vzduchu vnikne do dutin nad hlasivkami, na jejichž vzdušný obsah narazí. Následně se však ihned sníží tlak v průdušnici a hlasivky se znovu sevřou, tím pod nimi opět nastane zhuštění vzduchu, který k nim proudí. Popsaný děj se velmi rychle opakuje. Vznikají tak pravidelné nárazy přerušovaného výdechu na vzdušný obsah dutin, který se rozkmitá a vznikne hlas. Pro tvorbu hlasu je tedy důležitý jednak tlak výdechového proudu vzduchu, jenž rozráží hlasovou štěrbinu a oddaluje hlasivky od střední čáry, a dále pružnost hlasivek, která zajistí, že se oddálené hlasivky vrátí zpět ke středu a uzavřou štěrbinu.*

Tón, který vzniká činností hlasivek, ještě není lidským hlasem, ale pouze jeho základní součástí. Tento základní tón má podobné akustické vlastnosti jako každý jiný fyzikální tón, tedy výšku, intenzitu a barvu. Samotný základní tón zní poměrně slabě, řezavě a vůbec nepřipomíná lidský hlas. Teprve v ústní dutině se zvuk formuje v hlásky, řeč nebo zpěv.

*Na proces formování samohlásek je možné se dívat ze dvou hledisek. Lze sledovat proces formování výsledné akustické vlny, nebo proces formování výsledného frekvenčního spektra. Zmíněné dva přístupy odráží dvě klasické teorie tvorby hlasu, které byly formulovány už v minulém století německým fyzikem H. Helmholtzem a německým fyziologem L. Herrmannem. V minulosti probíhaly četné diskuze, která z těchto teorií je správná. V dnešním světle je zřejmé, že obě teorie jsou v podstatě ekvivalentní a jen vyjadřují různý úhel pohledu na tentýž problém.*



Průměrná výška hlasu při zpěvu je individuální a je podmíněná anatomickým utvářením hrtanu a fonačního ústrojí. Všeobecně lze říci, že hrtany prostorné, velké, s dlouhými hlasivkami vydávají hlas spíše hlubší, naopak hrtany malé, s krátkými hlasivkami spíše hlas vyšší. Pohyby hlasivek a jejich nastavení lze regulovat pomocí množství svalů, jež jsou upnuty na chrupavčitou kostru hrtanu. Pomocí svalů je také možno měnit napětí hlasivek a tak ovlivňovat frekvenci kmitů při jejich rozechvění vzdušným proudem. Muži jsou schopni měnit tóny v rozsahu základních frekvencí přibližně 70 – 500 Hz, ženy v rozsahu 150 – 1000 Hz, přičemž zde bývají výrazné individuální rozdíly. Změna výšky hlasu je provázána i změnou celkového postavení hrtanu, ten je totiž schopen vertikálního pohybu – při stoupající tónové řadě se jeho poloha zvyšuje a při klesající snižuje.

*Brocova oblast v mozku*

*Lidské řečové schopnosti kontrolují tři různá centra v kůře levé mozkové hemisféry.*



*Dvě z nich jsou pojmenovány po vědci, který je v 19. století objevil. V roce 1861 pitval pařížský chirurg jménem Paul Broca muže, jehož jediným projevem během života byl nesmyslný zvuk „tan“. Tento člověk rozuměl všemu, co mu kdo říkal, ale sám mohl odpovídat vždy a stále jen pomocí gest a onoho slůvka „tan“. Pitva odhalila, že Tan (jak byl muž pojmenován) postrádal nepatrný kousek mozkové tkáně v dolní levé oblasti čelního mozkového laloku. Dnes se mu říká Brocova oblast a je jednoznačně prokázáno, že právě tato součást motorické kůry kontroluje pohyby našich rtů, jazyka i hlasivek a řídí proud slovních signálů z mozku k ústům.*

## 4.5 Působení mechanických faktorů na organismus

### 4.5.1 Silové deformační působení

Silové deformační působení (mechanická zátěž) okolního prostředí na živý organismus vyvolá jeho specifickou odezvu. Vyvolává adaptační mechanismy, které mohou mít charakter regeneračních a revitalizačních procesů a na druhé straně mohou ve své negativní formě vést k patologické odezvě organismu, provokovat degenerativní procesy, způsobit orgánovou dysfunkci apod.

Celková odezva organismu se pak může pohybovat v široké škále reakcí v jeho

chování (reakce psychické, fyziologické, pohybové, atd.), či struktury (reakce morfologické, biochemické, atd.). Podle úrovně zátěže, jejím časovém průběhu a reakce organismu pak můžeme hovořit o zátěži podprahové, monotónní, silově rizikové, rázové, vibrační, atd.

Silová zátěž podle velikosti, časového průběhu a směru silového zátěžového pole vytváří různé druhy mechanického namáhání. Rozeznáváme pět základních druhů: **tah, tlak, ohyb, smyk a krut**. V reálných situacích zatížení biologických tkáňových struktur je nejčastěji prostorovou kombinací více způsobů zatížení. V tomto případě se sčítají shodné typy namáhání působící ve stejném směru. Průběh napětí a jeho velikost závisí také na velikosti a tvaru průřezu tělesa.

Mechanické vibrace, které působí na organismus, představují vibrační zátěž, která má specifické účinky na jednotlivé na jeho části. Působení může být celotělové (případ akustického podnětu) nebo směřované do vyhraněných lokalit. Vnímavost k vibracím je dána především rezonančními charakteristikami orgánů a orgánových struktur.

Působení vnějších sil na jakékoliv těleso způsobuje uvnitř tělesa mechanické napětí. Obecná vnější síla může představovat jak ojedinelou sílu, tak spojitě zatížení na danou plochu či objem nebo působení dvojice sil (momentové zatížení). V důsledku vnitřního napětí působícího v tělese, dochází k příslušné deformační odezvě závislé na mechanických vlastnostech materiálu.

Tolerance organismu na zátěž je schopnost organismu odolávat a přizpůsobovat se do určité míry účinku mechanické zátěže. Limity tolerance ohraničují pásmo fyziologické zátěže. Tyto limity jsou součástí kritérií řady ergonomických, bezpečnostních a hygienických norem. Jsou proměnné v průběhu života, mění se s biologickým věkem a jsou závislé na charakteru a historii zátěže, době trvání, atd. Konkrétní hodnoty vycházejí jednak z mezních hodnot charakteristických materiálových a reologických veličin tkáňových a orgánových struktur, a dále pak z patofyziologických a klinických poznatků o vlivu vystavení zátěži na dysfunkci a strukturální patologické změny.

#### 4.5.2 Tlak a podtlak

Na úrovni hladiny moře je normální atmosférický tlak 101,3 kPa, což představuje 760 mm rtuťového sloupce. Atmosférický tlak je tlak, který vzniká v plynu jeho vlastní tíhou. Ten závisí na nadmořské výšce, hustotě vzduchu,

*Mechanické  
namáhání*

*Tolerance  
mechanické  
zátěže*

teplotě vzduchu a také na gravitaci. Působí všemi směry tak, jako se částice pohybují všemi směry.

#### 4.5.2.1 Vliv podtlaku

S rostoucí nadmořskou výškou atmosférický tlak klesá exponenciálně.

V našich nadmořských výškách je při normálním atmosférickém tlaku nasycení arteriální krve kyslíkem až 97%. Do výšky 5 000 m je nasycení krve kyslíkem 80%, pak podstatně klesá, protože klesá i atmosférický tlak. Žije-li člověk dlouhodobě ve vysokých nadmořských výškách (vesnice v horách - Andy, Tibet), přizpůsobí se nižšímu parciálnímu tlaku kyslíku například stavbou těla a to tak, že mívají větší hrudník a menší tělo.

#### ***Krevní doping***

*Roku 1972 doktor Bjorn Ekblöm ze stockholmského Institutu gymnastiky a sportů odebral čtyřem atletům krev, odstranil z ní červené krvinky a poté je uložil do chladu. Po nějaké době je vrátil sportovcům zpět do krevního oběhu a pozoroval zvýšení výkonnosti sportovců.*

*Je to infuze krve nebo krevních derivátů přímo do žíly sportovce. Způsobuje zvýšení hladiny hematokritu a vzrůst transportní kapacity krve pro kyslík.*

*Tělo sportovce však může na krevní doping reagovat velmi individuálně. Může se stát, že výsledek bude zcela opačný, než byl záměr a dojde ke zhoršení výkonnosti sportovce. Rápidní nárůst červených krvinek v krvi také může zvýšit viskozitu krve, snížit výkonnost srdečního svalu a snížit rychlost proudění krve. Vlivem těchto faktorů může dojít ke snížení aerobní kapacity, kterou lze považovat za hlavní ukazatel vytrvalostních schopností sportovce.*

#### **Výšková hypoxie**

Při náhlém přechodu do výšky nad 2500 m dochází často k nevolnostem, což je zapříčiněno nedostatkem kyslíku. Hlavními příznaky výškové hypoxie jsou bolesti hlavy, závratě, zvracení, zkrácený dech, bušení srdce, slabost, atd. Příznaky ustupují po 3 - 4 dnech.

Vysokohorská nemoc je dalším stupněm výškové hypoxie. Znamená prohloubení dechových i oběhových potíží, pokles mentální výkonnosti. Na extrémní horské výšky se nelze nijak adaptovat.



### Podtlakové komory

Podtlakové komory navozují podobný efekt jako vysokohorské prostředí. Využívá se u nemocných, u kterých je třeba zvýšit sekreci z dýchacích cest a usnadnit vykašlávání.

#### 4.5.2.2 Vliv přetlaku

Na každých 10 m hloubky se tlak zvyšuje o 98 kPa (735 mm Hg) nad hodnotu atmosférického tlaku působícího na úrovni vodní hladiny. Při příliš rychlém vynoření difúze nestačí a ve tkáních i v krvi vznikají bubliny dusíku. Vliv přetlaku se se uplatňuje především při potápění. Dýchání je ztíženo, jelikož se při vdechu musí překonávat tlak vody na hrudník. Rychlé vynořování z velké hloubky způsobuje syndrom zvaný kesonová nemoc.

Při přetlaku ve středoušní dutině dochází k vyklenutí bubínku. To se nazývá dysbarismus. Při negativním středoušním tlaku, ke kterému dochází u sestupu letadla, se bubínek vpáčí a k vyrovnání tlaku dochází až po polknutí.

#### *Hyperbarická komora*

*Hyperbarická komora nebo také dekompresivní komora je léčebná metoda, která využívá přetlaku. Slouží ke zvýšení kyslíku v tkáních a jejímu následnému prosycení hemoglobinu. Normální vzduch obsahuje téměř 21 % kyslíku a 78 % dusíku. Při hyperbaroxii se vdechovaná koncentrace kyslíku blíží 100 %, je tedy 5x vyšší než ve vzduchu. Pracovní tlak v hyperbarické komoře je přitom 2,5–3 násobně vyšší než atmosférický tlak. Výrazně podporuje léčbu u mnoha onemocnění. Například u diabetických defektů, postradiačního poškození, náhlé hluchoty, ischemických vředů a defektů.*



#### 4.5.3 Stav beztíže

Stav beztíže je stav, během kterého na předmět nebo organismus nepůsobí tíha. Často je mylně spojen s nepůsobením gravitace, ale stav beztíže může vyvolat jakýkoliv pohyb, který je vykonáván se zrychlením odpovídajícím směru a velikosti gravitačního pole.

Stav beztíže lze tak zažít při libovolném výskoku nebo pádu, s tou výhradou, že v pozemských podmínkách odpor vzduchu neumožňuje dodržet zrychlení

odpovídající gravitaci (parabolický let, vzdušný tunel, na zlomek sekundy se dá zažít při skákání na trampolíně a samozřejmě v kosmu).

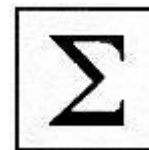
Předpokladem pro zvládnutí stavu beztlíže je zejména odolnost vestibulárního systému, kde se nachází centrum rovnováhy. Centrum rovnováhy složené z polokruhovitých kanálků a váčků registruje polohu a pohyb hlavy a těla, podílí se na udržování rovnováhy, vzpřímeného postoje a orientaci v prostoru.

V rovnovážně-polohovém orgánu se volně pohybují otolity (tělíška tvořená  $\text{CaCO}_3$ ), které tlačí na smyslové buňky a tím udávají směr tíže. V beztlížném stavu však otolity začnou dráždit smyslové buňky náhodně, což má za následek mořskou nemoc, pocity tupého tlaku v hlavě, případně žaludeční nevolnost.

Ve stavu beztlíže dochází k odkrvení dolních partií těla a srdce s větší intenzitou pumpuje krev do horních partií, tedy hlavně do hlavy, důsledkem jsou migrény, zčervenání až opuchnutí tváří. V průběhu několika dní až týdnů se však cévy adaptují a objem krve se zmenší. Vlivem beztlížného stavu dochází také díky snížené zátěži k odvápnění kostí (proto astronauti musí pravidelně cvičit).

## Shrnutí kapitoly

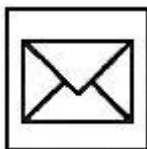
- Mechanickou strukturou, mechanickým chováním, mechanickými vlastnostmi živých organismů a jeho částí a mechanickými interakcemi mezi nimi a vnějším okolím se zabývá biomechanika. Při zkoumání mechanických zákonitostí živého organismu (lidského těla) pracujeme vždy s určitým přiblížením.
- Mezi tzv. pasivní podsystemy patří kosterní soustava, šlachy, vazy, chrupavky, klouby. Biologické materiály jsou viskoelastické, nehomogenní, anizotropní, adaptabilní. Vazy jsou méně pevné a křehčí než šlachy, lépe odolávají mimoosové zátěži.
- Aktivním subsystemem pohybového systému člověka, pro který je typickým jevem produkce síly, je systém svalový.
- Krevní oběh je uzavřený systém, který tvoří tři složky - srdce (hlavní motorický orgán, koná práci), cévy (uplatňují se zde zákony proudění) a krev (zajímají nás mechanické vlastnosti tekutiny).
- Při dýchání se uplatňuje několik fyzikálních zákonů - stavová rovnice, Daltonův zákon, Henryův zákon a Fickovy zákony. Při inspiraci a expiraci se uplatňuje směr tlakového gradientu (tlakový spád). S dýcháním úzce souvisí i schopnost vydávat zvuky.
- Působení vnějších sil na jakékoliv těleso způsobuje uvnitř tělesa mechanické napětí.



## Kontrolní otázky a úkoly:

1. Jak můžeme určit hustotu lidského těla?
2. Jaké jsou hlavní funkce pasivních biomechanických podsystemů?
3. Jaké jsou rozdíly v mechanických vlastnostech šlachy a vazy?
4. Jakou práci koná srdce?
5. Co je to Reynoldsovo číslo a jaký má význam?
6. Které biofyzikální zákony se uplatňují při dýchání?
7. Která veličina je zásadní pro určení „směru“ dýchání?





### Korespondenční úkoly

1. Spočítejte hmotnosti segmentů vašeho těla podle obou metod – procentuální i Zaciorského.



### Citovaná a doporučená literatura

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3
- Biomechanika : KOMPENDIUM Patobiomechanika a Patokinesiologie [online]. [cit. 2011-08-25]. Dostupné z WWW: <<http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendum/biomechanika/index.php>>.
- JANURA, M. Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka, Olomouc: UP v Olomouci, 2004, ISBN 80-244-0644-6
- TRNA, J.; TRNOVÁ, E. Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání [online]. 2005 [cit. 2011-08-25]. Měříme lidské tělo. Dostupné z <[http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh\\_10/10\\_03\\_Trna.html](http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh_10/10_03_Trna.html)>.
- ROSINA, J. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích [online]. 2007 [cit. 2011-08-26]. Biofyzika tkání a orgánů. Dostupné z WWW: <[http://www.zsf.jcu.cz/structure/departments/kra/informace-pro-studenty/ucebni\\_texty/studijni-obor-radiologicky-asistent/rosina\\_biofyzika-tkani-a-organu.doc](http://www.zsf.jcu.cz/structure/departments/kra/informace-pro-studenty/ucebni_texty/studijni-obor-radiologicky-asistent/rosina_biofyzika-tkani-a-organu.doc)>.

### Elektronické zdroje, animace:

- <http://www.ftvs.cuni.cz/elstudovna/>
- <http://fyzweb.cz/materialy/sily/ucinky/ucinky.php>
- <http://ucebnice.euromise.cz/index.php?conn=0&section=biomech&node=node10>
- <http://www.exploratorium.edu/sport/>
- <http://www.biomotionlab.ca/>



## 5 Elektrické a magnetické vlastnosti tkání

**V této kapitole se dozvíte:**

- jaké jsou elektrické vlastnosti buňky
- jak živý organismus vede stejnosměrný a střídavý proud
- jaké jsou aktivní elektrické projevy tkání
- jaké jsou účinky elektrického proudu na organismus, jak se elektrický proud a magnetismus využívají v terapii

**Po jejím prostudování byste měli být schopni:**

- objasnit, kde mohou mít v živém organismu elektrické a magnetické signály zdroj
- vysvětlit jak se stejnosměrný a střídavý elektrický proud tkáněmi šíří,
- objasnit a zdůvodnit efekt působení elektrického proudu,
- vysvětlit, jaké jsou představy o účincích působení vnějšího magnetického pole,
- charakterizovat tkáně s ohledem na jejich schopnost vést elektrický proud

**Klíčová slova kapitoly:** buňka, elektrický proud, stejnosměrný a střídavý proud, klidový a akční potenciál,

### **Průvodce studiem**

*Následující kapitola se zabývá vznikem a šířením elektromagnetických jevů v organismu. Před zahájením studia kapitoly si zopakujte a ujasněte pojmy: elektrické napětí, proud, odpor, vodivost, připomeňte si, v jakých jednotkách se uvádějí a jak spolu souvisejí. Doporučené zdroje pro toto opakování najdete v seznamu literatury.*

*Na zvládnutí této kapitoly pak budete potřebovat asi 4 hodin/y.*



Elektrické jevy jsou neoddelitelnou součástí projevů živých organismů. Rozdělujeme je na jevy pasivní (ukazují chování tkání a orgánů v elektrickém poli) a jevy aktivní – jevy spojené s aktivitou organismu (jevy na membránách buněk). Zkoumáme i magnetické signály tkání. Oba jevy využíváme v diagnostice i v terapii.

### 5.1 Elektrické projevy buňky

Povrch buňky je tvořen membránou, která se elektricky projevuje kapacitou v rozmezí 0,1 až 3  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$  s povrchovým odporem 10  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ . Uvnitř buňky je intracelulární tekutina, vně extracelulární tekutina, obě mají měrný odpor 1 až 3  $\Omega\text{m}$  a relativní permitivitu  $\epsilon_r = 80$ . Buněčnou tkáň lze modelovat paralelním RC obvodem, ve kterém R je přímo úměrný převrácené hodnotě vodivosti a C je úměrná  $\epsilon$ . Tento model má význam pro začlenění do měřicích obvodů diagnostických nebo terapeutických přístrojů.



#### Biologické membrány

Povrch buňky je tvořen biologickou membránou. Membrána je tvořena uspořádanými lipidy a proteiny s malým množstvím cukrů (dvojvrstvá membránových lipidů se zanořenými proteiny). Funkce membránových proteinů je zajištění procesů spojených s transportem a rozpoznáváním. Hlavní funkce membrány jsou propustnost, řízený transport, zpracování informací a elektrické vlastnosti.

#### Klidový membránový potenciál (KMP)

Umístíme-li jednu mikroelektrodu do nitra buňky a druhou do vnějšího prostředí (tj. do elektrolytu) obklopujícího buňku, naměříme prakticky vždy nějaké malé elektrické napětí. Jeho hodnoty se liší podle druhu buňky a biologického druhu. Velikost naměřeného napětí se většinou pohybuje kolem několika milivoltů, v buňkách nervových (membrána axonu) však naměříme za klidových podmínek napětí kolem 60 mV a na buňce svalové kolem 90 mV (rejnok 200 mV). Udržování nerovnoměrného rozdělení iontů na rozhraní buněčné membrány je zajištěno pomocí mechanismu aktivního transportu (viz kapitola 3.3.2).

*Klidový  
membránový  
potenciál  
KMP*

V tomto pojetí však pojem potenciál neodpovídá zcela fyzikální definici. Membránový potenciál je z fyzikálního hlediska vlastně **napětí**, vyjadřuje rozdíl mezi elektrochemickým potenciálem intracelulární a extracelulární strany buněčné membrány. Klidové napětí přibližně odpovídá hodnotě rovnovážného potenciálu  $K^+$  iontů. Fyzikálně jde o tedy elektrochemické napětí, tj. práci, kterou vykonají elektrochemické síly při přemístění 1 molu ionizované látky (při 1 elementárním náboji na částici) z jedné strany buněčné membrány na stranu opačnou.

KMP vykazují všechny živé buňky, jeho hodnota kolísá v závislosti na typu buňky od -9 mV (erytrocyty) až k -100 mV (neurony). Záporné znaménko vyjadřuje, že cytoplazmatická strana membrány je polarizována záporně.

### **Akční membránový potenciál (AP)**

Vzrušivost je schopnost buněk odpovědět na podráždění. Při tzv. podprahovém podnětu dojde ke krátkodobé změně potenciálu a pak se vrací na původní úroveň. Malé náhodné depolarizace membrány nezpůsobují vznik akčních potenciálů.

Při prahovém podnětu dojde ke změně membránového potenciálu, změně propustnosti membrány pro ionty, změně polarizace – vzniká tzv. akční potenciál. Činnostním neboli akčním potenciálem tedy rozumíme rychlou změnu napětí na membráně některých buněk.

Významnou vlastností akčního potenciálu je schopnost se šířit. Membrány umožňující jeho šíření se označují jako vzrušivé. Akční potenciál může být vyvolán různými chemickými činiteli nebo i malou změnou elektrického napětí na membráně.

*Akční  
membránový  
potenciál  
AP*

## **5.2 Elektrické a magnetické vlastnosti tkání a orgánů**

### *5.2.1 Pasivní elektrické vlastnosti tkání*

Z hlediska proudů a elektrických polí je živý organizmus složitá heterogenní soustava. Její elektrické vlastnosti jsou ovlivňovány existencí membránových a akčních potenciálů, jevy spojenými s funkcí orgánů, je to komplikovaný vodič el. proudu (buňky, mezib. tekutina). Z hlediska přiblížení běžné fyzice nejlépe vyhovuje představa **vedení proudu v kapalinách**.

*Elektrická  
vodivost*

Fyzikální veličina charakterizující pevnou nebo kapalnou látku z hlediska její schopnosti vést elektrický proud je elektrická vodivost. Je základní vlastností roztoků elektrolytů, tj. látek, ze kterých disociací (štěpením) vznikají elektricky nabitě částice ionty

Základní jednotkou vodivosti je siemens na metr,  $S \cdot m^{-1}$ .

Měrná vodivost mezibuněčného prostředí i základní cytoplazmy buněk je v rozmezí 0,2 až  $1,0 S \cdot m^{-1}$ . Největší odpor kladou buněčné membrány ( $10^6$  až  $10^8$ krát nižší než měrná vodivost mezibuněčného prostředí i cytoplazmy). Lze si tedy tkáň představit jako suspenzi nevodivých tělísek v roztoku elektrolytu.

Tkáně živých organismů můžeme podle elektrických vlastností rozdělit na tři skupiny:

*Tkáně podle elektrických vlastností*

- suspenze buněk a bílkovinných molekul tekuté konzistence (krev, lymfa)
- suspenze v pevném stavu (játra, svaly, kůže)
- tkáně s malým obsahem vody (tuk, kosti)

#### *Vedení stejnosměrného proudu*



Volnými nosiči náboje jsou ionty, průchod stejnosměrného proudu tedy vyvolává přesuny hmoty. Stejnosměrný (ss) proud prakticky nepropouští vazivo a tuková tkáň. Nejlepšími vodiči ss proudu jsou krev, svaly, mozkomíšní mok. Účinky ss proudu jsou především elektrolytické, dráždivé pouze při zapnutí nebo vypnutí. Tepelný účinek je zanedbatelný, projeví se jen při velkých hodnotách proudu.

Elektrický odpor závisí na funkčním stavu tkáně. Nedostatek kyslíku vede ke vzestupu odporu. Při zástavě životních pochodů dochází k poklesu odporu, příčinou je rozpad buněčných membrán.

#### *Vedení střídavého proudu*



Odpor střídavému proudu kladou buněčné membrány, tento odpor klesá s rostoucí frekvencí – membrána se chová jako biologický kondenzátor, jehož kapacita se s rostoucí frekvencí zmenšuje.

Účinky střídavého proudu závisí na frekvenci:

- dráždivý účinek s frekvencí roste asi do 100 Hz,
- při vyšších frekvencích dráždivý účinek klesá,
- účinky vysokofrekvenčních proudů jsou jenom tepelné.

Střídavý proud nemá elektrolytické účinky.

Živá tkáň se v elektrickém poli chová jako zvláštní druh vodiče, od standardních vodičů ho odlišuje makro i mikroskopická nehomogenost. Proud se do organismu dostává cestou nejmenšího odporu - přes vlasové folikuly nebo vývody potních žláz. V organismu prochází různými prostředímí, z nichž každé má určitou měrnou vodivost - čím vyšší, tím lépe vedou.

### 5.2.2 Aktivní elektrické projevy tkání

Základním aktivním elektrickým projevem je existence membránového napětí (KMP – viz výše). Určité klidové napětí je vlastností všech biologických membrán. Činnostní napětí je vlastností vzrušivých tkání (nervová, svalová), je to změna vznikající v důsledku podráždění.

Dráždivost je schopnost odpovědět na podráždění, vede ke změně klidového potenciálu (změna musí dosáhnout prahové hodnoty) a způsobí vznik akčního potenciálu (AP), změní se propustnost pro některé ionty, především  $\text{Na}^+$ .

#### 5.2.2.1 Aktivní elektrické projevy orgánů

Při zkoumání elektrických projevů orgánů dochází k interferenci a prostorové sumaci jednotlivých elementárních činnostních potenciálů buněk. Výsledný elektrický projev je ovlivněn i pasivními elektrickými vlastnostmi a vlastnostmi okolních tkání.

#### *Činnostní potenciály svalové*

Kosterní sval tvoří s nervem, který jej inervuje, funkční celek. Jeho základním prvkem je motorická jednotka (skupina svalových vláken inervovaná jedním neuronem). Na podráždění přicházející nervovým vláknem odpovídá motorická jednotka stahem. Přenos podráždění na svalové vlákno závisí jednak na dráždivosti motorického neuronu, jednak na funkčním stavu nervosvalového spojení, přestavovaného nervosvalovou ploténkou. Sval se zachovalou inervací

*Činnostní  
potenciály  
svalové*

je drážděn vždy nepřímo tj. prostřednictvím motorického nervu. Při poruše tohoto nervu lze sval podráždit přímo, je ale třeba vyšší intenzity dráždícího impulsu. Na každé podráždění odpovídá sval vznikem činnostního potenciálu. Hladký sval se od příčně pruhovaného liší z elektrofyziologického hlediska dvěma vlastnostmi: nereaguje na přímé podráždění a jeho reakce na nepřímé podráždění je pomalejší a přetrvává déle.

Záznam elektrické aktivity kosterního svalu se nazývá elektromyogram (EMG).

#### *Elektrické projevy srdečního svalu*

*Elektrické  
projevy  
srdečního  
svalu*

Srdce je dutý svalový orgán uzpůsobený k dlouhodobému vykonávání mechanické práce. Je tvořen speciální příčně pruhovanou svalovinou, jejíž elektrofyziologickou zvláštností je dlouhá doba trvání činnostního potenciálu (cca 80 až 100krát delší než u kosterních svalů).

Každé vlákno myokardu prochází čtyřmi fázemi:

- polarizací (povrch vlákna je nabit kladně),
- depolarizací (povrch vlákna postupně mění polaritu),
- transpolarizací (povrch vlákna je nabit záporně),
- repolarizací (postupný návrat k původní polaritě).

Svalovina srdečních předsíní a komor představuje z funkčního hlediska dva samostatné oddíly. Vznik podráždění a jeho rozvod v srdeční svalovině zajišťuje zvláštní vodivý systém. Místem primární automacie je sinoatriální uzel v oblasti pravé předsíně. Odtud se podráždění šíří svalovinou předsíní k uzlu atrioventrikulárnímu v oblasti septa na rozraní předsíní a komor. Ten je výchozím bodem vodivého systému komor – Hisova svazku a Purkyňových vláken. Tento vodivý systém zajišťuje rozvod podráždění po komorové svalovině a tím i správnou hemodynamickou funkci srdečních komor. Grafický záznam elektrické aktivity srdeční se nazývá elektrokardiogram – EKG a patří k základním diagnostickým metodám (viz kapitola 7).

#### *Činnostní potenciály mozkové*

*Činnostní  
potenciály  
mozkové*

Také činnost nervových buněk CNS je provázena elektrickými jevy, které lze zaznamenat a diagnosticky využít. Základem elektrické aktivity nervových buněk je depolarizace a následná repolarizace jejich buněčné membrány, která

se šíří z těla buňky do jejich výběžků (dendritů a neuritů). Mozková tkáň obsahuje velké množství synapsí, které jsou zdroji elektrických potenciálů. Sumací elementárních dějů vzniká obraz elektrické aktivity mozku (EEG). Při zkoumání elektrické aktivity mozkové kůry využíváme často evokované potenciály – zjišťujeme a snímáme odpověď na podráždění.

#### *Další činnostní potenciály*

Všechny orgány lidského těla, které obsahují ve větším počtu svalové a nervové buňky, jsou při své činnosti zdrojem elektrické aktivity. Snímáme např. činnostní potenciály dělohy při porodu (EHG), žaludeční stěny během peristaltiky, sítnice při osvitě (ERG).



#### *Projevy spojené s recepcí zvuku*

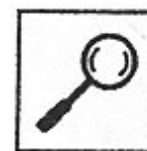
Elektrickým projevem zvukového podráždění Cortiho orgánu je kochleární mikrofonní potenciál – vzniká mechanickou deformací vlásků receptorových buněk (ohnutí vlásků vede k depolarizaci).

### **5.2.3 Magnetické signály tkání**

Při pohybu elektrických nábojů vzniká indukované magnetické pole. V lidském organismu vznikají velmi slabá magnetická pole, dlouho trvalo, než se podařilo je detekovat a měřit. Tato slabá pole jsou rušena okolním magnetickým polem, je třeba použít při měření stíněné prostory. Pro vznik magnetického signálu je rozhodující velikost proudů protékajících uvnitř tkáně – může signalizovat poruchu.

#### **Magnetoencefalografie**

*Podobně jako u jiných elektrických proudů vznikají mezi neurony slabá magnetická pole. Magnetoencefalografie proměřuje magnetická pole detektory, které jsou uloženy kolem hlavy a kalkulují lokalizace a intenzity neurálních proudů, které daly polím vznik. Tato pole mají intenzitu zhruba jedné biliontiny pole zemského - je proto k jejich detekci třeba silné clonění a detektory musí být vysoce vnímavé. Tyto podmínky splňuje v současné době extrémně senzitivní kvantové zařízení SQUID. Dokáže odkrýt kupř. pohyb malého magnetu čtvrt míle vzdáleného. S milimetrovými a milisekundovými*



*prostorovými rozlišovacími schopnostmi demonstruje magnetoencefalografie neurální aktivitu přímo tam, kde se odehrává.*

*Magnetoencefalografie se už klinicky osvědčila jako užitečná u neinvazivních studií epilepsie, migrény a u diabetického kómatu. Je také schopna zaregistrovat mozkové odpovědi na stimulaci, podobně jako PET a funkční MR.*

*Postup je schopen sledovat odpovědi mozku na různé typy stimulací.*

*Ačkoliv jsou magnetoencefalografie i magnetokardiografie stále ještě v počátcích svého využití, jejich sdružení, známé pod pojmem „zobrazení magnetických zdrojů“ je velmi slibné a mnoho vědců v něm vidí do budoucna vážný příslib. Ve stadiu výzkumu je také opačný proces alternativa k elektrošokům, kdy se na přesně vymezený mozkový okrsek aplikuje rapidně se měnící intenzita pole silného extrakraniálního magnetu.*

### **5.3 Účinky elektrického proudu a magnetického pole**

**Účinky elektrického proudu** na organismus mohou být jak negativní (úraz elektrickým proudem, poškození organismu), tak pozitivní (léčebné metody využívající elektrický proud). Roli hraje typ proudu, jeho intenzita, napětí, odpor tkáně, cesta, kterou proud v organismu prochází. Negativní účinky způsobují tepelné poškození, křeče kosterního svalstva, fibrilaci srdečních komor. Celkový negativní účinek závisí na:

- typu proudu
- intenzitě proudu
- napětí
- odporu tkáně
- cestě proudu v organismu



*Obecně uváděné bezpečné hodnoty jsou u*

- *ss proudu do 25 mA*
- *st proudu 50 Hz do 10mA*

*Hodnoty, které neovlivní srd. aktivitu, mohou podráždit dýchací svaly:*

- *ss do 80 mA*
- *st do 25 mA*

*Vznik nebezpečí arytmie až fibrilace:*

- *ss 80 - 300 mA*
- *st 25 – 80 mA déle než 30 s*

*Fibrilace, ireverzibilní poškození mozku*

- *ss 300 mA až 3 A*
- *st 80 mA až 1 A déle než 0,3 s*

*Zástava srdeční činnosti, blokáda dých. centra, křeče:*

- *větší intenzita než 3 A*



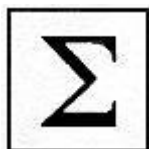
### **Účinky magnetického pole**

Magnetické pole působí svými účinky na jiná pole (elektrická), rozlišujeme magnetická pole stálá a proměnná. Tkáně lidského organismu jsou složeny téměř výhradně z diamagnetických a paramagnetických látek. V silném homogenním magnetickém poli se orientují diamagnetické a paramagnetické molekuly tak, aby minimalizovaly své volné energie. Magnetická pole mohou ve tkáních vyvolávat elektrická napětí a proudy (účinkem Lorentzovy síly na pohybující se elektrické náboje nebo dle Faradayova zákona působením proměnlivého magnetického pole). Tato indukovaná napětí však jsou podstatně nižší než membránové potenciály.

Důsledkem působení magnetického pole je změna koncentrace a orientace molekul a z toho vyplývající změna kinetiky chemických reakcí. Můžeme uvažovat působení nepřímé, přes volné radikály, vznikající jako důsledek magnetochemických reakcí.

Obecně lze říci, že stálé magnetické pole vyšších intenzit metabolické pochody tlumí, proměnné stimuluje. Tyto změny jsou přechodné.

Interakcí magnetických polí s lidskými tkáněmi se využívá diagnosticky i léčebně. Diagnostickou metodou je MRI a léčebnou magnetoterapie.



### Shrnutí kapitoly

- Elektrické jevy rozdělujeme na jevy pasivní (ukazují chování tkání a orgánů v elektrickém poli) a jevy aktivní – jevy spojené s aktivitou organismu.
- Stejnosměrný proud prakticky nepropouští vazivo a tuková tkáň.
- Odpor střídavému proudu kladou buněčné membrány, odpor klesá s rostoucí frekvencí.
- Základním aktivním elektrickým projevem je vznik membránového napětí. Činnostní napětí je vlastností vzrušivých tkání (nervová, svalová).
- Účinky elektrického proudu na organismus mohou být jak negativní, tak pozitivní.



### Kontrolní otázky a úkoly:

1. Jak lze elektricky modelovat buněčnou tkáň?
2. Vede vazivo stejnosměrný elektrický proud?
3. Jaká je závislost odporu buněčné membrány na frekvenci střídavého proudu?
4. Které tkáně mají schopnost vyvinout činnostní potenciál?
5. Jaké jsou především účinky vysokofrekvenčních střídavých proudů na organismus?

### Citovaná a doporučená literatura



- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3
- <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/elektr.htm>

## 6 Účinky elektromagnetického pole na organismus

**V této kapitole se dozvíte:**

- jak na lidský organismus působí elektromagnetické záření
- co je ionizující záření, jaké jsou jeho účinky a ochrana před ním
- jaké jsou účinky optického záření
- jaké vlastnosti a účinky má záření laserové

**Po jejím prostudování byste měli být schopni:**

- vysvětlit odlišnosti působení ionizujícího a neionizujícího záření,
- vysvětlit, proč jsou účinky ionizujícího záření na lidský organismus negativní,
- popsat rozdíl mezi ultrafialovým a infračerveným zářením

**Klíčová slova kapitoly:** elektromagnetické pole, energie, ionizující záření, dozimetr, mikrovlny, ultrafialové a infračervené záření, laser

### **Průvodce studiem**

*Pole je prostor, ve kterém působí síly – v případě elektromagnetického pole síly elektrické a magnetické, vzájemně neoddělitelné. V této kapitole se zaměříme na skutečnost, že člověk se neustále nachází v prostoru působících elektromagnetických sil. Jaké jsou důsledky? Domníváte se, že negativní? A co třeba světlo? To je také elektromagnetické záření ☺*

*Pusťte se tedy do studia, na zvládnutí této kapitoly budete potřebovat asi 4 hodiny.*





Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které odpovídá míře působení elektrické a magnetické síly v prostoru. Šíří se prostorem ve formě elektromagnetického vlnění. Prostředím se přenáší elektromagnetická energie, elektromagnetické vlnění se šíří i ve vakuu. Šíří se jako vlnění postupné příčné. Elektrickou složku charakterizuje vektor elektrické intenzity  $E$ , magnetickou vektor magnetické indukce  $B$ . Vektory  $E$  a  $B$  jsou navzájem kolmé, jejich kmity mají souhlasnou fázi a probíhají kolmo ke směru, kterým se vlna šíří. Podle kvantové teorie světla je možné každé elektromagnetické vlnění popsat jako proud oddělených fotonů, tj. kvant elektromagnetické energie. Fotony jsou elementární částice nelátkové povahy, nelze je vnímat našimi smysly, ale lze je matematicky popsat a prokázat jejich existenci experimentálně. Mají nulovou klidovou hmotnost a pohybují se rychlostí světla  $c$ .

## 6.1 Energie elektromagnetického pole

*Energie  
elektromag. vlnění*

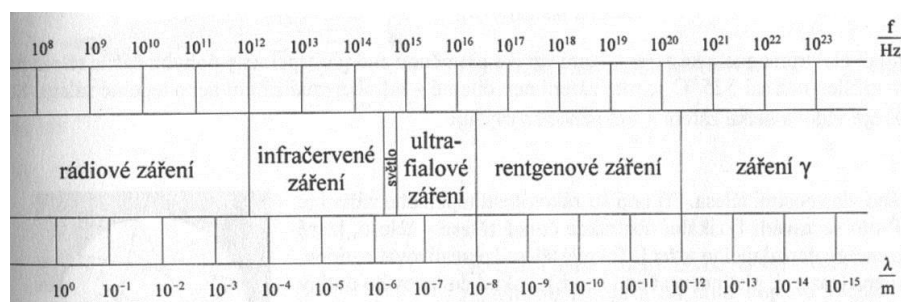
Společnou vlastností elektromagnetického záření je přenos energie. Všechna tělesa vysílají elektromagnetické vlny, které mají původ v přeměně energie tepelného pohybu částic v energii záření. Planck svou kvantovou hypotézou vyslovil předpoklad, že záření vydávané a pohlcované jednotlivými atomy nemůže mít libovolnou energii, ale vždy je vyzařováno nebo pohlcováno v určitých dávkách (kvantech).

Energie záření je úměrná frekvenci a konstantou úměrnosti je tzv. Planckova konstanta  $h$ :

$$E = h \cdot f \qquad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Podle kvantové teorie světla je možné každé elektromagnetické vlnění popsat jako proud oddělených fotonů, tj. kvant elektromagnetické energie.

Elektromagnetické spektrum podle vlnových délek při šíření ve vakuu:



Měřením energie přenášené elektromagnetickými vlnami se zabývá **radiometrie**. Hodnotí veličiny jako

- zářivá energie – celková energie přenášená elmag. zářením
- zářivý tok – energie vyzářená za jednu sekundu
- zářivost – energie vyzářená za jednu sekundu do jednotkového prostorového úhlu
- intenzita vyzařování – zářivý tok vysílaný z plochy zdroje o obsahu  $1 \text{ m}^2$

Fotometrie pak zkoumá energetické působení elektromagnetických vln z viditelného pásma na oko a optické přístroje (zabývá se veličinami jako jsou světelný tok, svítivost, intenzita osvětlení).

**Fotometrie** měří veličiny:

*Světelný tok* – světelná energie vyzářená do určitého prostorového úhlu, schopnost zářivého toku vyvolat světelný vjem.

Jednotkou je lumen [lm]. (1 lm je světelný tok, který vyzařuje ze všesměrového světelného zdroje o svítivosti 1 cd do prostorového úhlu 1 sr.)

*Svítivost I* je světelná energie, kterou vysílá zdroj do celého prostoru. Vyjadřuje rozložení světelného toku do prostoru. Jednotkou je kandela [cd] – základní jednotka SI (svítivost 100W žárovky je 200 cd).

*Kandela je svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření o kmitočtu  $540 \cdot 10^{12}$  hertzů a jehož zářivost v tomto směru je  $1/683$  wattu na steradián. Starší definice - 1 cd je svítivost  $1/60 \text{ cm}^2$  povrchu absolutně černého tělesa při teplotě tuhnoucí platiny za normálního tlaku ( $1768 \text{ }^\circ\text{C}$ ).*

*Osvětlení* – účinek světla na určité ploše (jednotkou je lux [lx]). Osvětlení závisí na svítivosti zdroje, vzdálenosti plochy od zdroje a na úhlu dopadu světla ( $E = I \cos\alpha / r^2$ ). Funkce luxmetru jako měřicího přístroje je založena na fotoelektrickém efektu. Doporučené hodnoty osvětlení jsou pro čtení 100 lx, pro jemné práce 200 lx.





*Informace o radiometrických a fotometrických veličinách (definice, jednotky), v angličtině:*

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/radphocon.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/photomcon.html#c1>

## 6.2 Účinky elektromagnetického záření/vlnění

Vlnění se může chovat jako proud částic a částice naopak mají vlnové vlastnosti. Neznamená to ale, že rozdíl mezi částicemi a vlnami je zcela setřen. Existuje jedno důležité kritérium, podle něhož spolehlivě poznáme, zda záření má vlnovou či korpuskulární podstatu: je jím klidová hmotnost kvant tohoto záření. Klidová hmotnost je hmotnost částice měřená v inerciální vztažné soustavě, v níž je částice v klidu.

### Záření vlnové/vlnění

klidová hmotnost = 0

Kvanta tohoto záření nemají klidovou hmotnost, jsou to kvanta vlnění pohybující se rychlostí světla; pokud je zabrzdíme, odevzdají veškerou svou energii a zaniknou. V jaderné fyzice do této skupiny patří pouze elektromagnetické záření, jehož kvanta jsou fotony, v obecné teorii relativity a kvantové gravitaci pak ještě gravitační vlny. Pokud převažuje vlnový charakter, používá se obvykle místo označení záření přímo označení vlnění.

*Záření nebo vlnění?*

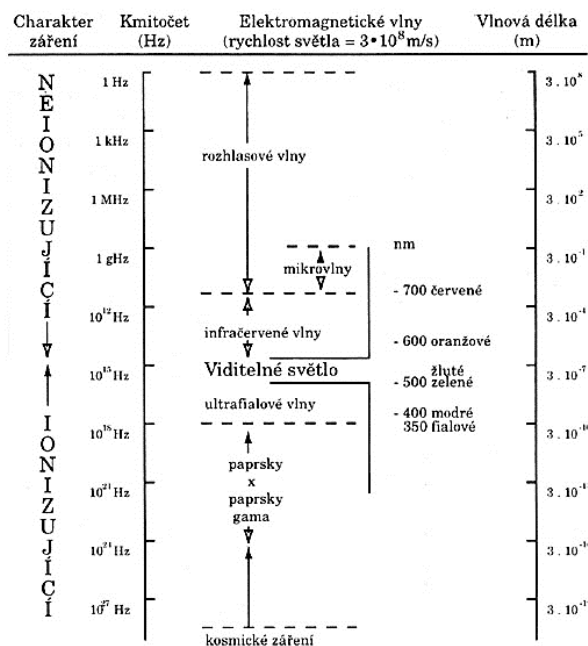
### Záření korpuskulární

klidová hmotnost > 0

Kvanta tohoto záření mají nenulovou klidovou hmotnost, jedná se o proud hmotných částic pohybujících se rychlostí menší než rychlost světla, které si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu. Patří sem záření  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , protonové záření, neutronové záření, neutrinové záření a řada dalších druhů záření vznikajícího při vysokoenergetických srážkách elementárních částic (m-mezonové a p-mezonové záření, ...).

Podle účinků (v podstatě podle energie) dělíme záření na:

- ionizující,
- neionizující.



*Hraniční  
frekvence  
ionizujícího a  
neionizujícího  
záření*

### 6.2.1 Ionizující záření

Ionizující záření je souborné označení pro záření, jehož kvanta mají dostatečnou energii na to, aby přímo či nepřímo odtrhaly (tj. ionizovaly) podél své dráhy elektrony z elektronového obalu molekul. Tímto procesem vzniká z dané molekuly kladný iont, zatímco uvolněný elektron reaguje s další molekulou a dává iont záporný – vzniká iontový pár. Iontové záření je tedy přenos energie, který může být buď ve formě hmotných částic, či ve formě vln elektromagnetického záření. Nicméně z hlediska Einsteinova principu duality je možné každé částici připsat i vlnovou délku (u mikročástic nacházíme chování částicové i vlnové), takže název ionizující záření zahrnuje obě entity.

S ohledem na charakter ionizačního procesu lze ionizující záření rozdělit na přímo ionizující a nepřímo ionizující.

**Přímo ionizující záření** je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částicemi alfa a beta ap.), které mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohly vyvolat ionizaci.

**Nepřímo ionizující záření** zahrnuje nenabité částice (fotony, neutrony ap.), které samy prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímo ionizující nabitě částice. Ionizace prostředí je pak způsobena těmito sekundárními částicemi.



Zdrojem ionizujícího záření mohou být radionuklidy (přírodní nebo umělé) nebo generátory (RTG lampa, urychlovače apod.).

### 6.2.2 Účinky ionizujícího záření

Primární účinek spočívá v interakci s elektronovým obalem atomů, jejímž důsledkem je excitace nebo ionizace. Tyto primární účinky jsou spouštěcím mechanismem celé řady fyzikálních, fyzikálně-chemických, biochemických a biologických reakcí.

Fáze postupného působení ionizujícího záření:

*Fáze působení  
ionizujícího  
záření*

1. fyzikální – dochází k absorpci energie, trvá krátký časový úsek,
2. fyzikálně-chemická – probíhají mezimolekulární reakce,
3. biochemická – tvorba chemických radikálů a jejich interakce především s NK a bílkovinami,
4. biologická – komplex interakcí, podle úrovně buněčné organizovanosti, může trvat i léta.

Doba, která uplyne od okamžiku absorpce ionizujícího záření do vzniku změn biologických je velmi krátká. Časový rozvoj biologických změn je mnohem delší.

*Biologické účinky ionizujícího záření jsou*

*Biologické  
účinky  
ionizujícího  
záření*

*přímé* – zahrnují fyzikální a fyzikálně-chemický proces, vedou bezprostředně ke změnám, podstatou je fyzikální přenos energie, převládají u buněk s nízkým obsahem vody (teorie zásahová)

*nepřímé* – zprostředkovány produkty radiolýzy vody, zejména volnými radikály, u buněk s vysokým obsahem vody (teorie radikálová)

Oba mechanismy (přímý i nepřímý) se projevují společně, s různou účinností, v závislosti na celkové dávce záření a způsobu aplikace použitým druhu ionizujícího záření a na metabolickém stavu ozářeného organismu. Citlivost buněk vůči ionizujícímu záření závisí na mnoha dalších okolnostech, na schopnosti buňky reparovat radiační poškození – je více vyvinuta u mnohobuněčných organismů.

*Dávka* je veličina, která udává, kolik energie ionizujícího záření pohltí 1 kg látky. Jednotkou je 1 Gy (gray). Dávka ionizujícího záření, která způsobí smrt, se nazývá letální.



*Dávkový ekvivalent* je veličina, která vyjadřuje biologickou účinnost jednotlivých druhů záření. Každému druhu záření přísluší tzv. jakostní faktor  $q$ . Dávkový ekvivalent se vypočítá jako součin dávky záření a jakostního faktoru. Jednotkou je 1 Sv (sievert), častěji mSv.

### *Účinky ionizujícího záření*

*stochastické*: mohou vznikat při jakékoliv dávce (bezprahové působení), jsou podmíněny vyvolanou poruchou DNA vedoucí ke karcinogenezi. Riziko vzniku tumoru se na 1 Sv odhaduje kolem 6 %.

*deterministické*: vznikají až při překročení prahové dávky (která je velmi vysoká, v řádech jednotek Sv), mají charakteristický obraz a při lékařském ozáření by k nim nikdy nemělo dojít. Jedná se například o akutní nemoc z ozáření, radiační dermatitidu, dřevňový útlum, popáleniny.

*Účinky  
stochastické a  
deterministické*

Účinky ionizujícího záření na lidské zdraví jsou důsledkem poškození buněk, tkání a orgánů. Lze je rozdělit do následujících šesti skupin:

1. Akutní nemoc z ozáření
2. Akutní lokální změny.
3. Poškození vyvíjejícího se plodu v těle matky.
4. Nenádorová pozdní onemocnění.
5. Zhoubné nádory (rakovina).
6. Genetické změny.

### 6.2.3 Detekce ionizujícího záření

Využívá účinků ionizujícího záření, například schopnosti ionizovat plyny, vyvolat zčernání fotografické emulze nebo způsobit změny v polovodičových materiálech. Měření se provádí v ionizačních komůrkách, Geiger-Müllerovou trubicí, polovodičovými detektory, scintilátory a dalšími přístroji.

*Fotografická emulze*: jedná se o nejstarší metodu zjišťování přítomnosti radioaktivního záření. Zdokonalené emulze se používají např. v defektoskopii nebo v dozimetrii. Použití fotografické emulze je univerzální metodou registrace záření a výskytu částic (dozimetrie, detekce).

*Ionizační detektory*: využívá se ionizačních účinků záření v plynech nebo pevných látkách. Tyto detektory mají široké využití při měření dávek záření,



*Detekce  
ionizujícího  
záření*

počtu a energie částic apod. Ionizační komůrka zaznamená přítomnost ionizujících částic (například v osobních dozimetrech), Geiger-Müllerův čítač slouží k měření počtu částic vysílaných radioaktivním zdrojem.

*Scintilátory:* dopadem částice nebo záření se v luminiscenčních krystalech uvolňují fotony, ve spojení s fotonásobičem se jedná o velmi citlivé detekční zařízení. Scintilátorem je možno zjistit nejen přítomnost částice, ale i její energii.

Člověk nemá schopnost přímo detekovat působící ionizující záření, vystavení jeho vlivu se projeví až následně vyvolanými účinky. Měření se tedy realizuje pomocí příslušných fyzikálních metod a vhodné přístrojové techniky. Detektor ionizujícího záření je takové zařízení, které je schopno detekovat (měřit) ionizující záření. Detektory umožňují zkoumat vlastnosti tohoto záření a využívat jej v řadě vědecko-technických, průmyslových a medicínských aplikací. Detektory ionizujícího záření nám poskytují kvantitativní informace o intenzitě, energii, prostorové distribuci a příp. dalších vlastnostech záření.

Detektory ionizujícího záření se rozdělují podle principu detekce na:

- fotografické,
- elektronické
- materiálové detektory.

Podle časového průběhu detekce na detektorů kontinuální a kumulativní (integrální) detektory. Podle komplexnosti měřené informace na detektory záření, udávající pouze intenzitu záření, resp. počet kvant záření, bez informace o druhu záření a jeho energii. Mezi tyto nejjednodušší detektory patří filmové a termoluminiscenční dozimetry, ionizační komory a Geigerův-Müllerův počítač.

### **Dozimetr**

#### *Osobní dozimetr*

Osobní dozimetrie slouží k měření absorbované dávky záření. Informace o jednotlivých typech ionizujícího záření získáváme díky interakci látky s vhodnou absorbující látkou – detektorem.

Filmový dozimetr či emulzní detektor je přístroj pro detekci částic ionizujícího záření pomocí fotochemické reakce materiálu, který obsahuje halogenidy stříbra (bromid stříbrný, AgBr). Ve světlotěsně uzavřeném pouzdře je umístěno políčko fotografického filmu s emulzí se zvýšeným obsahem AgBr. Pracovník

nosí zařízení na přední straně pláště okénkem dopředu a film je po měsíci odeslán k analýze. Vyrábějí se v rozměru 3x4 cm. Dozimetr je umístěn ve světlotěsném papírovém obalu, pokryt obalem z umělé hmoty a má okénko na přední části. Na filmu se v místě ozáření vyredukuje stříbro (Ag) a povrch materiálu po vyvolání zešedne či zčerná. Míra ztmavnutí je přímo úměrná množství ionizujícího záření, které přes přístroj prošlo. Přístroj se používá k monitorování dávky záření u pracovníků v prostředí se zvýšeným výskytem nebezpečné ionizace. Pokud jsou delší dobu vystaveni záření, jejich detektor je příliš černý a musejí být přeřazeni na jiné pracoviště (radiologové, pracovníci v jaderné elektrárně, námořníci v jaderné ponorce atd.). Výhodou filmových dozimetrů je nízká finanční náročnost, lehká manipulace, uspokojivá přesnost. Nevýhodou je omezená životnost a zvýšená náchylnost k poškození vlhkostí a vyššími teplotami.

#### 6.2.4 Ochrana před ionizujícím zářením

*Fyzikální:*

- vzdálenost – expozice se snižuje s druhou mocninou vzdálenosti,
- čas – zkrácení doby pobytu,
- stínění – **interakce záření s látkou:**
  - záření  $\alpha$  – oděv, papír, plexisklo,
  - záření  $\beta$  – plexisklo, hliník, olovo,
  - záření  $\gamma$  – ocel, olovo, beton.



*Chemická:*

tzv. radioprotektivní látky, blokují volné radikály, omezují tvorbu toxických produktů

*Biologická:*

je nespecifická, zlepšování stavu výživy, zvyšování odolnosti.

#### 6.2.5 Neionizující záření

Neionizující pole a záření reprezentují elektrické a magnetické pole, elektromagnetické záření včetně viditelného světla, ultrafialového a infračerveného záření a laserového záření. Označení pole lze použít zcela



obecně, pojem záření při relativně vyšších kmitočtech (od desítek kHz). Dále do této skupiny řadíme rádiové záření a mikrovlny.

V přírodě se můžeme setkat se zářením z oblasti radiovln, které se vyskytují ve formě elektromagnetických pulzních vln na čelech studených front a za bouří.

U umělých zdrojů se jedná o elektromagnetické záření vznikající jako výsledek činnosti oscilačních obvodů a vysílacích antén. V průmyslu se radiovlny a mikrovlny objevují ve vysílání rozhlasu a televize, dále v různých technologických postupech jako jsou například některé způsoby tepelného ohřevu, použití vysokoteplotní plasmy, různé generátory mikrovln, magnetické rezonanční zobrazování (MRI) a v počítačích.

### Účinky neionizujícího záření

Globální účinky neionizujícího záření vyvolávají u lidí neuropsychické potíže, nspecifického charakteru. Ženy bývají citlivější než muži. Biologické účinky elektrických a magnetických polí a elektromagnetických vln se dají rozdělit na tepelné a netepelné. Netepelné účinky jsou typické pro nízkofrekvenční elektrická a magnetická pole. Jsou dány vznikem elektrických proudů v těle. Za prahovou hodnotu se uvádí proudy procházející tělem něco nad několik málo mA, nebo proudová hustota  $10^{-1} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  a intenzita elektrického pole uvnitř těla nad 10 V/m. Při vysokých intenzitách nad 100 kHz dochází k tepelným účinkům záření. Ohřívání tkáně těla je prokázaným důsledkem vlivu vysokofrekvenčních elektromagnetických polí a může vést k těžkým poraněním a popáleninám, zvláště citlivé jsou oči.

Biologické účinky jsou závislé:

- na intenzitě – čím větší je intenzita pole a tedy indukované napětí,
- na časovém průběhu – pole pulzního charakteru jsou účinnější než pole nepulzní,
- vlnové délce: cm a dm vlny mohou pronikat hlouběji do tkání (do 500 Hz), mm vlny jsou plně absorbovány kůží (nad 3000 MHz), magnetické pole o pulzech totožných s  $\alpha$  vlnami člověka (8–14 Hz) vyvolává rezonanční jevy působící změny toku  $\text{Ca}^{2+}$  v mozku a krvi,
- pohlcené energii – velikost tělem pohlcené energie podmíněná magnetickou složkou pole vzrůstá úměrně čtverci lineárních rozměrů těla,

- gradientu a lokalizaci – nehomogenní pole jsou účinnější než homogenní (obratlovci mají nejcitlivější hlavu),
- expozici – **neexistuje úměrnost mezi délkou expozice a účinkem.**

Principy ochrany vychází ze stejných zásad jako u záření ionizujícího:

- ochrana časem – snížením expoziční doby,
- ochrana vzdáleností – pro vzdálenou oblast ubývá výkonová hustota se čtvercem vzdálenosti,
- ochrana stíněním – princip elektromagnetického stínění – Faradayova klec (odstiňuje vř pole).

## 6.3 Záření neionizující

### 6.3.1 Optické záření

Optické záření nemá ionizační účinky. Hlavní mechanismy účinku závisí na vlnové délce:

- Ultrafialové záření – má fotochemické účinky (1 nm až 380 nm)
- Viditelné záření (380 nm až 780 nm) zprostředkovává zrakový vjem
- Infračervené záření – **má tepelné účinky (780 nm až 1 mm)**

Označení	Oblast	Vlnová délka v nm
UV záření	UV-C	100-280
	UV-B	280-315
	UV-A	315-380
viditelné světlo	fialová	380-420
	modrá	420-490
	zelená	490-560
	žlutá	560-590
	oranžová	590-620
	červená	620-780
infračervené záření	IR-A	780-1400
	IR-B	1400-3000
	IR-C	3000-1mm

Rozdělení spektra

optického záření.

K optickému záření

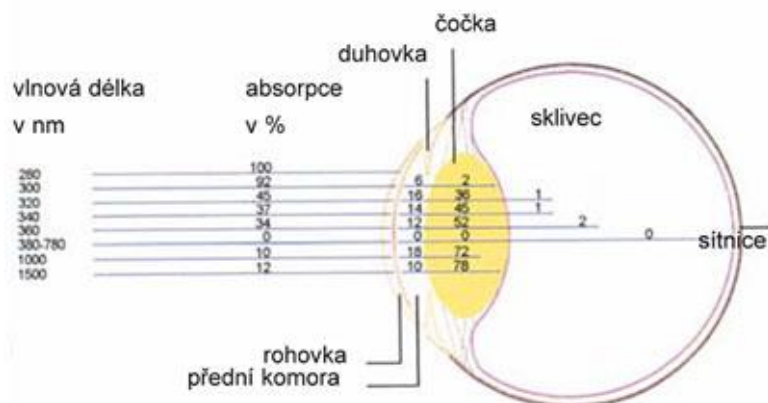
zahrnujeme i

ultrafialovou a

infračervenou oblast.



### Účinky optického záření na oko



Největší část záření pod 400 nm se k sítnici vůbec nedostane. První tkáň, na kterou záření dopadne, je rohovka, která absorbuje úplně všechno UV záření pod 300 nm a je hlavním filtrem pro UV-B záření. V komorové vodě je především absorbováno infračervené – IR záření. Čočka pohlcuje celé UV-A záření a zbytky UV-B záření, jehož vlnové délky leží nad 300 nm. Ty IR paprsky, které se dostaly přes komorovou vodu a čočku, jsou zachyceny ve sklivci a odtud jsou po přeměně v teplo snadno odvedeny.

Biologické účinky závisí na vlastnostech zdroje záření, době působení a optických vlastnostech tkáně. Jestliže atom nebo molekula pohltí určité kvantum energie – zvýší vlastní energii. Účinek optického záření závisí na energii působících fotonů. Nejdůležitější funkcí viditelného světla je účast ve fotosyntéze. Viditelné světlo se využívá i v terapii – vliv na psychiku člověka.

### Ultrafialové záření



Nejcitlivější na jeho působení jsou nenasycené organické sloučeniny – bílkoviny (aminokyseliny tyrozin a tryptofan), nukleové kyseliny (dusíkaté báze), některé pigmenty. Pronikavost UV záření je malá – jen povrchové vrstvy lidského organismu.

Biologické účinky ultrafialového záření:

- účinky na kůži – erytém (zčervenání), následuje pigmentace, která brání dalšímu ozáření, 90 % kožních nádorů vzniká na nekrytých místech kůže,
- syntéza vitamínu D,

- účinek na oko – může dojít k poškození rohovky (použití ochranných brýlí),
- baktericidní účinky – vlnové délky kratší než 280 nm, používá se ke sterilizaci prostorů.

ULTRAFIALOVÝ OBOR – DĚLENÍ V BIOLOGII					
Vlnová délka (nm)	Frekvence (PHz)	Energie (eV)	Teplota (kK)	Pásmo	Poznámka
100÷280	1.07÷3	4.4÷12.4	51÷140	UVC	Škodlivé pro člověka
280÷320	0.94÷1.07	3.9÷4.4	45÷51	UVB	Pomáhá produkci vitamínu D
320÷340	0.88÷0.94	3.6÷3.9	42÷45	UVA1	Způsobuje opálení kůže, které ji chrání před poškozením. Dělení na UVA1 a UVA2 souvisí s různou reakcí DNA na UV ozáření
340÷400	0.75÷0.88	3.1÷3,6	36÷42	UVA2	

### *Infračervené záření*

Objevitelem infračerveného záření v roce 1800 byl britský astronom William Frederic Herschel. K objevu infračervených paprsků mu pomohlo zjištění enormního nárůstu teploty v červeném pásmu viditelného světla při rozložení slunečního světla skleněným hranolem, které signalizovalo přítomnost pro lidské oko ještě dalšího, ale už neviditelného záření.



Biologické účinky infračerveného záření:

Při pohlčení pokožkou vzniká tepelný erytém, má krátkou dobu trvání, velmi malou pigmentaci. Zvyšuje citlivost kůže k UV záření. Dlouhodobý pobyt může vést ke změně aktivity enzymových systémů. Působení na oko se může projevit očním zákalem vyvolaným tepelnými účinky.

Všechna tři IČ pásma mají účinky tepelné.

- Pásmo IR-A – obsaženo ve slunečním světle, pronikavé, prochází sklem a je málo absorbováno vodou,
- Pásmo IR-B – žárovky, výbojky, prochází sklem, silně pohlcováno vodou,
- Pásmo IR-C – topná tělesa, nejdelší vlnové délky, pohlcováno sklem i vodou.

### 6.3.2 Mikrovlnné a radiové záření

Expozice neionizujícím elektromagnetickému poli není nový jev, i když před příchodem průmyslové revoluce byly zdroje expozice omezeny pouze na přírodní elektromagnetické záření, přičemž světlo je jeho nejznámější formou. V průběhu 20. století jsme si v důsledku stoupající poptávky spotřeby elektřiny a technologického pokroku vyrobili velké množství umělých zdrojů záření. V konečném důsledku je každý vystaven jeho působení jak doma, tak i v zaměstnání. A to v podobě stejnosměrného elektrického a magnetického pole, střídavého nízkofrekvenčního elektrického a magnetického pole a vysokofrekvenčního pole. Zdrojem je výroba a přenos elektrické energie, používání domácích elektrických přístrojů, telekomunikace, rozhlasové a televizní vysílání.

#### *Rádiové vlny*

Rozhlasové vlny (radiové vlny) mají vlnové délky  $\lambda = 10^3$  m až  $10^{-1}$  m, tedy 1 km až 1 dm. Zdrojem rádiových vln je elektromagnetický oscilátor. Do prostoru se vlnění dostává přes anténu – elektromagnetický dipól. Kolem dipólu se vytvoří elektromagnetické pole se složkou elektrickou a magnetickou – šíří se prostorem a přenáší energii kmitů oscilátoru.

V pásmu na rozhraní rádiových vln a mikrovln jsou frekvence pro mobilní sítě GSM (900 a 1800 MHz). Od roku 2000 platí v ČR nařízení vlády č. 480/2000 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, které připouští i jeho tepelné účinky.

#### *Mikrovlny*

Mikrovlny jsou elektromagnetickým vlněním o vlnové délce ležící mezi 1 m a 1 mm (300 MHz až 300 GHz), jsou tedy ohraničené z jedné strany infračerveným zářením a z druhé strany rádiovými vlnami.

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.



### 6.3.3 Laserové záření

Zvláštním typem optického záření je záření laserové. Tradiční světlo (např. ze žárovky, sluneční) je směsí všech barev a rozptyluje své paprsky všemi směry. Laserové světlo je monochromatické (jediná vlnová délka) a vyznačuje se dokonalou polarizací a koherencí (jeho vlny jsou shodně orientovány v čase a prostoru).

Původ slova LASER pochází z anglického Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla pomocí stimulované emise záření). Laser je označován také jako kvantový generátor světla.

#### Princip činnosti laseru

Nejprve dojde k vybuzení atomů do vyšší, nestabilní energetické hladiny dodáním energie. Při přechodu do nižšího stabilního energetického stavu atom svou energii vyzáří. Vyzářená energie má formu elektromagnetického záření o přesně dané frekvenci – vlnové délce.

Typy laserů dělíme podle:

- aktivního prostředí (pevnotátkové, kapalinové, plynové)
- způsobu čerpání energie (opticky, elektricky, chemicky...)
- frekvence (infračervené, viditelné...)
- využití

#### *Biologické účinky laserového záření*

Patří do oblasti optického spektra.

- tepelné účinky – chirurgický laser,
- netepelné účinky
  - fotodynamické účinky,
  - biostimulační (zvýšené prokrvení, zvýšená syntéza kolagenu, zrychlená regenerace),
  - analgetické (změna buněčného metabolismu v ozářeném místě, snížení dráždivosti),
- protizánětlivé účinky (**aktivace monocytů a makrofágů**).



*Pokud laser pracuje na určitých vlnových délkách, na které je schopno se oko soustředit a které mohou být dobře soustředěny sítnicí a rohovkou oka, tak vysoká koherence a malý rozptyl laserového paprsku může u některých typů laserů způsobit, že je přijímaný paprsek soustředěn pouze do extrémně malého bodu na sítnici. To vede k bodovému přehřátí sítnice a k trvalému poškození zraku.*



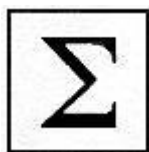
*Lasery jsou rozděleny do bezpečnostních tříd:*

- *třída I: možný trvalý pohled do svazku laserových paprsků*
- *třída II: kontinuální a viditelné záření, přímý pohled do zdroje možný, oko ochrání mrkací reflex*
- *třída III:*
  - a) totéž jako třída II, ale oko již může být poškozeno za pohledu do zdroje pomocí optické soustavy (např. dalekohled)*
  - b) nebezpečí poškození oka, nutno používat ochranné pomůcky (i při pozorování odrazu), max. emise 0,5 W*
- *třída IV: totéž jako třída III b), emise překračuje výkon 0,5 W*

*Běžně dostupné lasery bývají maximálně ve třídě III (optické soustavy CD přehrávačů).*

*Výkonné lasery (třídy IV) jsou schopné způsobit popáleniny, řezné nebo tržné rány; případně způsobit požár. Řada laserů je buzena nebezpečnými látkami nebo vysokým napětím v řádu desítek kilovoltů.*

## **Shrnutí kapitoly**



- Společnou vlastností elektromagnetického záření je přenos energie.
- Fotometrie zkoumá energetické působení elektromagnetických vln z viditelného pásma na oko a optické přístroje (zabývá se veličinami jako jsou světelný tok, svítivost, intenzita osvětlení).
- Podle účinků (v podstatě podle energie) dělíme záření na ionizující a neionizující.
- Primární účinek ionizujícího záření spočívá v interakci s elektronovým obalem atomů, jejímž důsledkem je excitace nebo ionizace. Tyto primární účinky jsou spouštěcím mechanismem celé řady fyzikálních, fyzikálně-chemických, biochemických a biologických reakcí.

- Optické záření nemá ionizační účinky. Hlavní mechanismy účinku závisí na vlnové délce.

**Kontrolní otázky a úkoly:**

1. Které veličiny měří fotometrie?
2. Jaké vlnové délky elektromagnetického záření zahrnujeme do záření optického? Jak se optické záření podle vlnových délek dělí?
3. Která část oka může být nejvíce poškozena UV zářením?
4. Čím může být nebezpečné neionizující záření v oboru radiových vln a mikrovln?
5. Kdo objevil existenci infračerveného záření?
6. Vysvětlete, proč laserové záření obsahuje jen jednu vlnovou délku.

**Úkoly k textu**

1. Jak „nebezpečné“ je laserové ukazovátko používané ve výuce?

**Odpověď**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Otázky k zamyšlení:**

1. Jaký je váš názor na problematiku škodlivosti mikrovlnného záření? Máte doma mikrovlnnou troubu? Využíváte jí často?



**Citovaná a doporučená literatura**

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3

**Elektronické zdroje**

- <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>
- <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/urychl/k22.htm>

## 7 Smyslové vnímání

### V této kapitole se dozvíte:

- co rozumíme pojmem smyslové vnímání
- jak si lze lidské oko představit jako optický systém
- jaký je proces vnímání optické informace
- jaké má tento optický systém vady a jak je možné tyto vady korigovat
- jak vzniká prostorový vjem
- jak zvuk působí na živé organismy
- jak člověk vnímá akustické signály
- jaká je anatomie sluchového orgánu
- jaké jsou účinky ultrazvuku a infrazvuku na živé organismy
- jak získáváme informace o rovnováze

### Po jejím prostudování byste měli být schopni:

- vysvětlit jak funguje oko jako optická soustava a jak vzniká v oku obraz vnějšího světa
- objasnit proč slyšíme jenom určité frekvence zvuku

**Klíčová slova kapitoly:** světlo, oko, model oka, vidění, zraková vada, korekce optické vady, fyziologická akustika, zvuk, hladina hlasitosti, výška tónu, sluchové kůstky, ultrazvuk, infrazvuk, vnímání rovnováhy

### Průvodce studiem

*Zrak a sluch jsou naše nejdůležitější smysly, pomocí kterých získáváme informace o vnějším světě. Ale jaký je princip vzniku těchto „informací“? A co v případě, že ne vše funguje tak, jak by mělo? Proč někdo potřebuje brýle? Budu je potřebovat taky? A proč starší lidé hůř slyší některé tóny? A jak to, že někdo rozezná tóny a někdo jiný ne? Podklady pro odpovědi na tyto otázky můžete najít v další kapitole, na jejíž zvládnutí budete potřebovat asi 5 hodin. Bude vhodné si studium rozdělit podle podkapitol a mezi nimi si udělat větší pauzu.*





Smyslovým vnímáním rozumíme obecně příjem a uvědomování si informací přicházejících z vnějších i vnitřního prostředí organismu. Informace z vnějšího prostředí získává organismus především prostřednictvím zraku, sluchu, čichu, chuti a hmatu. Neméně významné jsou však i podněty přicházející z nitra organismu (informace o poloze těla, o pasivním i aktivním pohybu...).

### *Pět smyslů*

Smysl je schopnost organismu přijímat určitý druh informací z okolí – např. koncentraci určité chemické látky, přítomnost světla nebo charakteristiku vlnění okolního vzduchu. Tato informace je většinou přijímána specializovaným orgánem, který se pak označuje jako smyslový orgán. Tradičně se rozlišuje pět základních smyslů: chuť, čich, sluch, hmat a zrak. Všechny pět základních smyslů má své receptory, které umožňují vnímat okolí organismu. Proto se nazývají exteroceptory. Chuť a čich jsou chemoreceptorové smysly, sluch a hmat jsou mechanoreceptorové a zrak je fotoreceptorový smysl. Funkce těchto receptorů spočívá v přeměně působícího podnětu v elektrický signál umožňující snazší přenos a zpracování informace.

*Mezi podnětem a počítkem proběhne řada dílčích jevů až po analýzu poskytující informaci o kvalitě, kvantitě a lokalizaci podnětu. Důležitý je vztah podnětu a počítku vzhledem k jejich intenzitě. Obecně roste intenzita počítku s intenzitou podnětu, pro postižení celého rozsahu vnímání (od prahu vnímání až po práh bolesti), nemůže jít o lineární závislost. Tzv. Weberův-Fechnerův zákon předpokládá, že intenzita počítku je úměrná logaritmu intenzity podnětu. V poslední době je vztah mezi oběma veličinami vyjadřován mocninou jejich funkce (tzv. Stevensův zákon).*

*Weber-Fechnerův zákon charakterizuje vztah mezi fyzikální intenzitou podnětu působícího na receptor a subjektivním vjemem intenzity (počítkem), které toto působení vyvolá. Pojmenován je po německém lékaři E. H. Weberovi (1795–1878) a německém psychologovi G. Th. Fechnerovi (1801–1887).*

*Vztah lze pak chápat tak, že subjektivně vnímaná malá změna počítku je přímo úměrná malé změně intenzity podnětu a nepřímo úměrná intenzitě počítku. To znamená, že například přidáme-li ke třem gramům závaží jeden gram, bude subjektivně vnímaná změna hmotnosti poměrně dobře patrná; přidáme-li ale*

*Weber-  
Fechnerův  
zákon*



*jeden gram ke třem kilogramům, bude již subjektivně vnímaná změna hmotnosti nepatrná.*

*Důvodem pro takovéto chování receptorů je zřejmě především to, že je umožněn současně vysoký rozsah vnímaných fyzikálních intenzit a vysoká rozlišovací schopnost alespoň při nízkých intenzitách.*

## 7.1 Vnímání zrakových podnětů

### 7.1.1 Světlo a jeho podstata

Část fyziky, která se zabývá světlem, jeho šířením v různých prostředích a na jejich rozhraních, vzájemným působením světla a látky, podstatou světla a dalších jevů, které se světlem souvisejí, se nazývá optika.

Světlo je částí spektra elektromagnetického záření. Tzv. optické záření je v rozsahu vlnových délek:

- viditelné 50 % (365–780 nm)
- infračervené 45 % (780 nm–1 mm)
- ultrafialové 5 % (100–365 nm)

Podle toho, které vlastnosti světla popisujeme a hodnotíme, můžeme volit různé přístupy:

- Geometrická optika vychází z toho, že pokud jsou rozměry zobrazovaných mnohem větší, než je jeho vlnová délka, je vlnová povaha světla jen slabě rozeznatelná. Jeho chování může být popsáno pomocí paprsků splňujících geometrické zákony.
- Vlnová optika respektuje vlnový charakter světla, při popisu lze použít Huygensův princip.
- Elektromagnetická optika je založena na Maxwellových rovnicích jako obecném popisu elektromagnetického pole a v souladu s tím charakterizuje světlo pomocí vektorových veličin; představuje nejpřesnější teorii světla v rámci klasické fyziky.
- Kvantová optika respektuje fakt, že v oblasti světla existují významné jevy, které nejsou popsatelné klasickou fyzikou a je pro ně třeba použít kvantový přístup – kvantovou elektrodynamiku.

*Různé přístupy  
k popisu  
optických jevů*

### 7.1.2 Oko jako optický systém

Pod pojmem optický systém si obvykle představujeme nějaký optický přístroj, tedy uměle vytvořené zařízení vytvářející optické zobrazení s cílenými vlastnostmi. Má za úkol zobrazit skutečný předmět na předepsaném místě v předepsané velikosti, v praxi je tvořena kulovými a rovinnými plochami, méně často asférickými. Za optický systém lze tedy považovat i oko – má za úkol v předepsaném místě (na sítnici) zobrazit obraz okolního světa.



Celý proces vidění můžeme definovat jako příjem a zpracování informace, zprostředkované fotony viditelného světla, tj. elektromagnetického záření o vlnových délkách 380 – 780 nm. Je to složitý fyzikální, fyziologický a psychologický proces. V oku, z biofyzikálního hlediska nejlépe prozkoumané části zrakového analyzátoru, optickou a fotochemickou cestou vzniká primární obraz vnějšího světa. Informace zachycená a zpracovaná okem se dále dostává do mozku po optické dráze a ve zrakovém centru v mozkové kůře je zpracována.

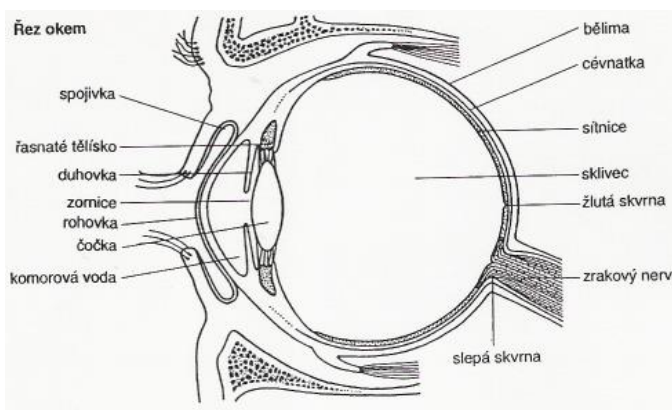
### 7.1.2.1 Anatomie oka

Lidské oko je kulovitý orgán (bulbus oculi) o průměru asi 24 mm, chráněný kostěným obalem očníce, pohyb bulbu je umožňován šesti okoohybnými svaly. Vnější obal tvoří neprůhledná bělma (sclera), která přechází v přední části oka v průhlednou rohovku (cornea). Rohovka má menší poloměr zakřivení než bělma. Přední viditelná část bělimy je kryta spojivkou (conjunctiva). Stěna oční koule je tvořena třemi vrstvami: bělma, střední cévnatka (choroidea) a vnitřní sítnice (retina). Cévnatka v přední části oka přechází v řasnaté tělísko (corpus ciliare) a duhovku (iris) s kruhovým otvorem – zornicí (pupila). Řasnaté těleso obsahuje akomodační svaly, které napomáhají při akomodaci čočky. Vlastní oční čočka (lens crystalina) je zavěšena za duhovkou na jemných vláknkách vycházejících z řasnatého tělesa.

Prostor mezi rohovkou a duhovkou se nazývá přední komora oční, prostor mezi duhovkou a čočkou je označován jako zadní komora oční. Vnitřek oka vyplňuje sklivec (corpus vitreum). Nervová vlákna sítnice se sbíhají do oblasti zadního pólu oka, odkud vychází zrakový nerv (nervus opticus).

Sítnice obsahuje světlocitlivé buňky (fotoreceptory) tyčinky (75 – 150 milionů, slouží k vidění za šera) a čípky (3,5 – 7 milionů, slouží k vidění za denního světla). Místo na sítnici (na optické ose), kde je koncentrace čípků nejvyšší, se nazývá žlutá skvrna. Místo výstupu očního nervu, kde nejsou žádné fotoreceptory, nazýváme slepá skvrna.





Schematický řez okem.

Zdroj: <http://fyzika.gbn.cz/phprs/rservice.php?akce=tisk&cislocianku=2004112001>

### 7.1.2.2 Zpracování optické informace

Vidění je složitý fyziologický proces, který se skládá z několika biofyzikálních a biochemických pochodů. Nejdůležitější část se odehrává ve fotoreceptorech. Při zpracování optické informace hraje velmi důležitou roli sítnice, jejíž hlavní funkcí je absorpce světla ve fotoreceptorech a převod akčních potenciálů ze sítnice dále. Receptory v sítnici jsou tyčinky a čípky. Světelná energie se při dopadu ve fotoreceptorových buňkách absorbuje a mění na energii chemickou. Sítnice je různě citlivá na různé vlnové délky světla.

*Sítnice,  
receptory v  
sítnici*

Čípky zprostředkují vidění za vyšší světelné intenzity, umožňují detailní vnímání tvarů a barev. Uplatňují se při adaptaci oka na světlo. Vidění adaptovaného oka se nazývá fotopické a nastupuje při jasu vyšším než  $10^2 \text{ cd.dm}^{-2}$ .

Tyčinky umožňují vidění nebarevné a vstupují do činnosti při nízkých intenzitách světla. Mají rozhodující úlohu při adaptaci na tmou. Vidění oka adaptovaného na tmou se nazývá skotopické a zcela převládne při jasu nižším než  $10^{-3} \text{ cd.dm}^{-2}$ .

Pohybuje-li se hodnota jasu mezi uvedenými hodnotami, jsou v činnosti oba druhy receptorů a vidění se nazývá mezopické.

Oblasti vidění:

- fotopické (denní) – čípky, citlivost má maximum na 555 nm
- mezopické – při snížené intenzitě, čípky i tyčinky, max. při 509 nm
- skotopické (noční) – tyčinky, ztráta barevného vidění

Oko obsahuje světlolomný a světločivný aparát:

- **Světlolomný aparát** je tvořen rohovkou a čočkou, dále k němu patří komorová voda a sklivec.
- **Světločivný aparát** je tvořen receptory v sítnici – tyčinkami a čípkami. Na ně navazují bipolární buňky, ekvivalentní druhému neuronu, potom gangliové buňky (třetí neuron), které vedou vzruch do podkorových center a čtvrtý neuron spojující podkoří se zrakovou kůrou. Světelná energie se při dopadu na sítnici absorbuje ve fotoreceptorových buňkách a přitom se přemění na energii chemickou.

*Světlolomný a světločivný aparát oka*

### 7.1.2.3 Světlolomný aparát – vytvoření obrazu

#### Gullstrandův model oka

Při vytváření obrazu musí světelný paprsek projít cestou k sítnici čtyřmi optickými prostředími. Jsou to:

- rohovka,
- komorová voda,
- čočka,
- sklivec.

Každé z těchto prostředí má určité optické vlastnosti. Rohovka má z hlediska optického systému oka největší lomivost. Refrakční hodnota rohovky kolísá mezi +40 až +45 D. Lomivost čočky dosahuje jen asi poloviny této hodnoty. Převaha vlivu rohovky je dána rozdílem v indexu lomu mezi vzduchem a komorovou vodou. Čočka je obklopena komorovou vodou a sklivcem, které mají hodnotu indexu lomu téměř stejnou. Nebereme ohled na rozdíly v zakřivení přední a zadní plochy rohovky, na rozdíly v indexu lomu jádra a okraje čočky.

Jednotkou lomivosti je dioptrie D (vedlejší jednotka SI), fyzikální rozměr  $m^{-1}$ , je to převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti.

**Oko je považováno za centrovanou optickou soustavu se schopností automatického zaostřování.**

Švédský oftalmolog Allvar Gullstrand (Nobelova cena za medicínu 1911) vytvořil zjednodušený model oka, který vychází z představy oka jako centrované optické soustavy se schopností automatického zaostřování. Nebere



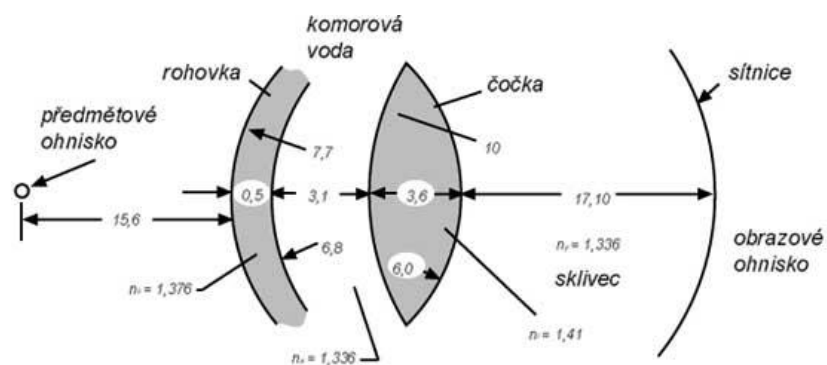
v úvahu rozdíly v zakřivení přední a zadní plochy rohovky a rozdíl v indexu lomu jádra a okraje čočky.

Gullstrandův model má tyto základní parametry:



Indexy lomu	rohovka	1,376
	komorová voda	1,336
	čočka	1,413
	sklivec	1,336
Optické mohutnosti	rohovka	42,70 D
	čočka uvnitř oka	21,70 D
	oko jako celek	60,50 D
Poloměr křivosti	rohovka	1,80 mm
	přední plocha čočky	10,00 mm
	zadní plocha čočky	-6,00 mm
Poloha ohnisek	ohnisko předmětové	-14,99 mm
	ohnisko obrazové	23,90 mm
	poloha sítnice	23,90 mm

Znaménka odpovídají tzv. znaménkové konvenci. Uvedený model dobře odpovídá optické soustavě skutečného oka a umožňuje dostatečně přesné výpočty.



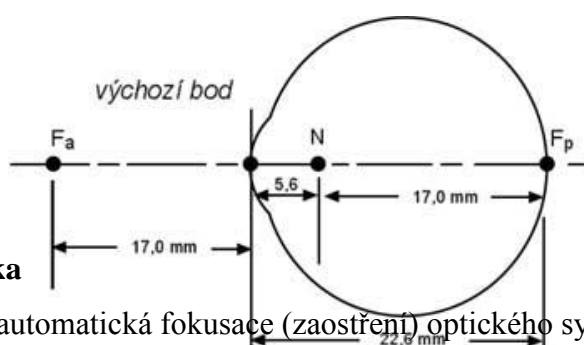
Gullstrandův model oka

### Model tzv. redukovaného oka

Snaha o zjednodušení vedla k představě tzv. redukovaného oka podle Donderse. Celý optický systém je nahrazen jednou kulovou lomnou plochou o  $r = 6,0$  mm, oddělující vnější prostředí o  $n = 1,0$  od homogenního vnitřního prostředí o  $n = 1,336$  s jedním uzlovým bodem 17 mm před sítnicí. Optická mohutnost tohoto systému je 59 D, což zhruba odpovídá optické mohutnosti normálního oka. Redukované oko se pro přesnější výpočty nehodí.

Rozměry redukovaného oka vycházejí z výchozího bodu na vrcholu rohovky a jsou při indexu lomu optických médií 1,333 udávány v mm takto:

- uzlový bod rohovky 5,65 mm
- přední ohnisková vzdálenost 17,00 mm
- zadní ohnisková vzdálenost 22,60 mm.



### Akomodace oka

Akomodace je automatická fokusace (zaostření) optického systému oka, tj. schopnost oční čočky měnit svoji optickou mohutnost v závislosti na vzdálenosti pozorovaného objektu. Dosahuje se toho především zvětšením zakřivení přední plochy čočky. Pro každé oko existují dva základní fixační body – bod blízký, který je viděn ostře s maximální akomodací a bod daleký, který je ostře viděn bez akomodace. Rozdíl hodnot vzdáleností obou bodů se nazývá akomodační šíře oka.

Poloha blízkého bodu se s věkem mění, blízký bod se vzdaluje (čočka již není schopná se dostatečně zakřivit).

### Rozlišovací mez vidění

Důležitým parametrem každé optické soustavy je její rozlišovací mez. Bod se na sítnici emetropického oka zobrazuje vlivem vlnové povahy světla jako malý difrakční kroužek. Oko dokáže rozlišit dva body, pokud mezi jejich obrazy na sítnici leží alespoň jeden neosvětlený čípek.



Protože průměr čípku je přibližně 0,005 mm a vzdálenost sítnice od obrazového uzlového bodu oka přibližně 17 mm, musí být úhlová vzdálenost obou právě ještě rozlišných bodů

*Rozlišovací  
mez*

$$\psi = 0,005 / 17 = 0,003 \text{ rad} = 1'$$

Veličina  $\psi$  se nazývá rozlišovací mez, je závislá na kontrastu, na jasů a na počtu pozorovaných podrobností.

#### 7.1.2.4 Světločivný aparát – fotoreceptory

*Funkce tyčinek*

Tyčinky jsou rozmístěny ve všech částech sítnice, obsahují pigment rodopsin (tzv. zrakový purpur), který se působením světla rozkládá na retinal a opsin – reverzibilní rychlá reakce; při silném osvětlení se ale mění na retinol a tato reakce je reverzibilní pomalu (pomalejší adaptace na tmou po předchozím osvětlení). Při avitaminóze A je v tyčinkách nedostatečné množství rodopsinu, což se projeví šeroslepostí (porucha vidění za šera).

*Funkce tyčinek  
a čípků*

*Funkce čípků*

Čípky mají různý tvar, jejich největší koncentrace je v tzv. žluté skvrně (místo nejostřejšího vidění) a směrem k periférii sítnice klesá. Čípky zajišťují fotopické vidění a jsou odpovědné za zrakovou ostrost, rozeznávají intenzitu, barvu i sytost.

Mechanismus vnímání barev není zcela objasněn, nejvíce zastánců má tzv. trichromatická teorie. Trichromatická teorie předpokládá, že v sítnici existují tři druhy čípků s různou spektrální citlivostí (pro **červenou, zelenou a modrou barvu**). Zcela rovnoměrné podráždění všech druhů čípků pak vyvolá vjem bílé barvy. Schopnost správného vnímání barev lidským okem se nazývá barvocit.



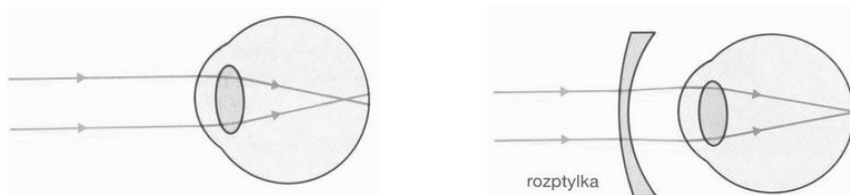
#### Otázka k zamyšlení:

Domníváte, že vnímání barev je ovlivněno intenzitou osvětlení?

### 7.1.3 Vady oka a jejich korekce

#### 7.1.3.1 Krátkozrakost

Krátkozrakost se projevuje tím, že blízké objekty jsou viděny bez problémů, ale čtení písma na tabuli či ukazatelů na silnici činí potíže. Název „myopie“ pochází z řeckého pojmenování „zavřené oči“. Toto označení vyplývá z jednoho z příznaků krátkozrakosti. Tím je mhouření očí při pohledu do dálky. Při krátkozrakosti je optická mohutnost rohovky a čočky větší než by odpovídalo délce oka. Světelné paprsky procházející optickým aparátem oka se střetávají před sítnicí a obraz na ní je neostřý. Záleží tedy i na tvaru oční bulvy, která je v tomto případě příliš dlouhá.

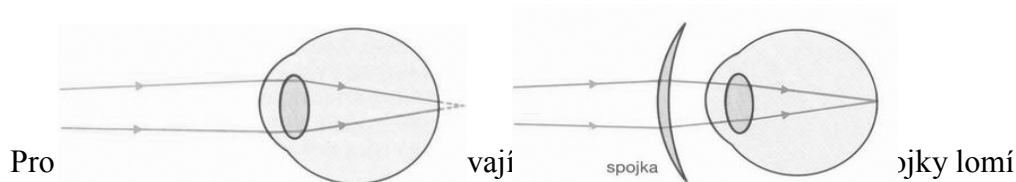


Pro korekci vady se používají konkávní čočky, které pomohou zaostřit světelné paprsky na sítnici.

#### 7.1.3.2 Dalekozrakost

Dalekozrakost se projevuje tím, že vzdálené objekty jsou viděny bez problémů, ale je problém zaostřit na bližší předměty. Dalekozrakost se též odborně nazývá hypermetropie a hyperopie.

Při dalekozrakosti je optická mohutnost rohovky a čočky menší než by odpovídalo délce oka. Světelné paprsky procházející optickým aparátem oka se střetávají za sítnicí a obraz na ní není ostrý. Záleží tedy i na tvaru oční bulvy, která je v tomto případě příliš krátká. Proč se tvar (délka oka) různí přesně není známo, ale sklon k dalekozrakosti je vrozený.



Pro vají spojky lomí světlo více a zaostřují jej na sítnici. Pokud vada není spojena s jinými problémy, jako například astigmatismus, je možné nosit pouze brýle na čtení.

### 7.1.3.3 Vetchozrakost



Presbyopie se projevuje tím, že oko v určitém věku ztrácí schopnost zaostřit na bližší objekty. Tuto refrakční vadu odborníci nazývají presbyopie (odvozenina od řeckého výrazu pro "staré oko") nebo česky vetchozrakost. Presbyopie je spojena se stárnutím a v určitém věku brýle začínají být nevyhnutelné.

S věkem lidské tkáň ztrácí svoji elasticitu. Čočka ztratí část své elasticity, zhorší se její schopnost měnit optickou mohutnost a zaostřovat na různě vzdálené objekty. Ztráta elasticity je postupná. V poslední době se objevuje názor, že presbyopie je způsobena primárně zvyšováním objemu čočky, čímž dochází k uvolnění svalů, které čočku přidržují. Tím je znemožněna jejich funkce měnit tvar čočky.

Pružnost čočky se snižuje již v mládí. Věk, kdy zpozorujeme presbyopii, se různí, ale obvykle se to stává kolem 40. roku života. Presbyopie postihuje každého a není známa žádná prevence. Obvykle se presbyopie koriguje předepsáním brýlí, které pomohou zaostřit nablízko.

### 7.1.3.4 Astigmatismus



Pokud má člověk zkreslený nebo zamlžený obraz na libovolnou vzdálenost, může se tím projevovat astigmatismus. I v případě, že vidění je celkem ostré, ale je pociťována bolest hlavy, únava, mhouření či podráždění očí, může to být známka slabého astigmatismu. Přítomnost astigmatismu ověří oční prohlídka, včetně testu vidění nablízko i do dálky.

Astigmatismus je jedna z refrakčních vad, které způsobují nepřesné zaostření světla na sítnici. Astigmatismus se často vyskytuje spolu s krátkozrakostí nebo dalekozrakostí.

Na předním povrchu oka je průzračná rohovka, skrz kterou se do oka dostává světlo. Rohovka vykonává většinu "refrakční práce" oka. Čočka, která je umístěna za rohovkou, dále upřesňuje paprsky, aby došlo k jejich zaostření do bodu místa nejostřejšího vidění. Normálně má rohovka hladký, pravidelný tvar ve všech směrech a světlo vcházející do oka se lomí stejně ve všech rovinách a směrech. Při astigmatismu je povrch rohovky zakřiven v jedné rovině více než ve druhé. Světlo dopadající na místa s větším zakřivením se lomí jiným způsobem než u míst s menším zakřivením. Tato abnormalita může mít za následek vidění podobné pohledu do nerovného zrcadla.



Astigmatismus je velmi obvyklý. Téměř každý má určitý stupeň astigmatismu, většinou hodnoty astigmatismu nejsou tak vysoké, aby způsobovaly jakékoliv potíže. Oční odborník doporučí nosit brýle nebo kontaktní čočky. Čočky, které jsou potřeba při astigmatismu, se nazývají torické čočky a mají dodatečný parametr zvaný cylindr. Tyto čočky lomí světlo v jedné ose jinak než ve druhé, a tím vyrovnají nepravidelnost rohovky.

### 7.1.3.5 Poruchy barevného vidění

Barva předmětu představuje vjem vznikající souhrou tří jevů:

- Barva souvisí s vlastnostmi pozorovaného objektu.
- Barva souvisí se zdroji osvětlení scény a jejich vlastnostmi.
- Barva souvisí s mechanismy vnímání člověkem.

Barva charakterizuje vjem pozorovatele na základě (viditelného) záření původně přicházejícího ze světelného zdroje (směs záření o různých vlnových délkách) a změněného díky vlastnostem pozorovaných objektu. Vnímání barvy člověkem přidává subjektivní vrstvu nad objektivní fyzikální pozorování, tj. vlnovou délku elektromagnetického záření.

Barva tedy představuje psychofyzikální jev. Sama o sobě barva neexistuje, jde o lidský vjem. Lidský vizuální systém není příliš přesným absolutním měřičem barvy.

O barevném vjemu rozhoduje vedle našeho oka a světla i samotný předmět, který zrakem vnímáme a který „má“ určitou barvu. Fyzikální a chemické složení předmětu nebo jeho povrchových vrstev způsobuje různou interakci světelného záření s předmětem, která pak určuje kvalitu podráždění sítnice a vyvolává v mozku určitý barevný vjem.

Neschopnost vidění barev v celém spektru – úplná barvoslepost – je velmi řídká, častěji se jedná o poruchy ve vnímání určitých barev. Je to zpravidla porucha dědičná, neprogresivní. Získané poruchy se pak mohou objevit ve stáří, u neuropatií, sítnicových zánětů, glaukomu a po podávání některých léků, zejména kardiak.

Jsou porušeny čípky a jejich funkce – jelikož čípky kromě vnímání barev zajišťují též zrakovou ostrost, je i zraková ostrost snížena.

*Poruchy  
barevného  
vidění*

Fyziologický stav správného barevného vidění se nazývá trichromazie – v oku jsou tři skupiny sítnicových čípků s pigmenty reagujícími na modrou, zelenou a červenou barvu.

Anomálie se nazývají:

- protanomálie (vidí hůře červenou barvu)
- deuteranomálie (vidí hůře zelenou barvu)

Chybí-li úplně jedna skupina pigmentu, mluvíme o dichromazii a podobně i v této skupině:

- protanopie (nevidí červenou barvu)
- deuteranopie (nevidí zelenou barvu)
- tritanopie (modrou), zřídka.

Lidé s velmi vzácnou monochromazií mají pouze jeden čípkový pigment. V populaci se frekvence výskytu poruch barvocitu odhaduje na 8,5 % (8 % muži a 0,5 % ženy). Nejčastěji se jedná o deuteranomálii.



### Otázka k zamyšlení

Už jste se někde na diskotéce nebo v kině setkali s tím, že na WC bylo modré osvětlení?

Zkuste se zamyslet nad možným důvodem, který nesouvisí jenom s estetickým dojmem. S využitím [www stránek](#) najdete odpověď jistě rychle.



### **Optické klamy**

Proces zrakového vnímání ovlivňuje optická soustava oka a dále biochemické a elektrofyziologické pochody ve zrakové dráze. Zrakový vjem je vyhodnocen za účasti podkorových nervových center i mozkové kůry. Pozorováním se vytváří zkušenost.

Za optický klam je považována každá rozdílnost mezi předmětem a vjemem jeho obrazu, který se vytváří optickou soustavou oka a je dále zpracován vyšší nervovou činností. K popisu vlastností subjektivního zrakového vjemu je statisticky zpracovat a vyhodnotit reakce velkého počtu pozorovatelů. Mezi některými optickými vlastnostmi předmětů, které se podílejí na množství a jakosti světla jimi vysílaného, odpovídajícími zrakovými odezvami byly nalezeny a stanoveny víceméně pevné vazby.

Kromě toho existuje řada optických jevů, které jsou označovány jako zrakové klamy v pravém slova smyslu. Jsou nedílnou součástí lidského života a je třeba o nich vědět a počítat s nimi.

Optické klamy můžeme rozdělit např. podle příčiny nesouhlasu.

Pokud je příčina vzniku jediná, lze zrakové klamy rozdělit na:

1. fyziologické klamy
2. geometrické klamy
3. psychologické klamy

**Fyziologické zrakové klamy** jsou klamy, které souvisejí s:

- iradiací - světlá plocha na tmavém pozadí se zdá být větší než tmavá plocha na světlém pozadí
- kontrastem - šedá plocha na světlejším pozadí má jinou světlost (tj. propouští nebo rozptylně odráží větší či menší část dopadajícího světla)

Mezi **geometrické optické klamy** patří ty, které jsou založeny na geometrických vlastnostech zobrazených předmětů, na nichž se podílejí geometrická zobrazení. Přejít mezi klamy geometrickými a psychologickými tvoří klamy perspektivní. Jedná se v podstatě o pozorování soustav čar a jimi ohraničených rovinných útvarů a o jejich výklad, při němž dochází ke konfrontaci s životní zkušeností.

**Psychologické klamy** se převážně uplatňují při pozorování rovinných předloh, které svou konfigurací mají vyjadřovat průmět trojrozměrného tělesa a jimž



*tuto prostorovou povahu přisuzujeme. Jedná se o skupinu klamů, k nimž patří rozhodování označovaná jako obrazová inverze. Vznikají vždy, když kresba (obraz) připouští různý výklad prostoru.*



### **Vnímání plynulých dějů**

*Krátkodobý zrakový vjem při běžném osvětlení předmětu se zachová po dobu asi 0,1 s. Toto zachování vjemu je potřebné pro každodenní život a umožňuje vnímat posloupnost rychle se střídajících obrazů (film, televize) jako plynulý děj.*

#### 7.1.4 Prostorové vidění

Zobrazená informace se přenáší zrakovým nervem do mozku v podobě impulsů. Každé oko vnímá sledované předměty z trochu jiného úhlu a vysílá tedy do mozku nepatrně odlišné informace. V raném věku dítěte se mozek učí tyto dva odlišné obrazy skládat dohromady, díky složení dvou obrazů lze sledované předměty vnímat prostorově. Významnou roli hraje zkušenost.

Prostorové vidění je umožněno současným pozorováním oběma očima. Oční rozestup  $b$  se u lidí pohybuje v rozmezí 55 až 72 mm, jako střední hodnota se uvažuje 65 mm. Předmět ležící ve vzdálenosti  $d$  vidíme pod stereoskopickou paralaxou  $= b / d$

Stereoskopicky lze rozlišovat předměty až do vzdálenosti, která se nazývá poloměr stereoskopického vidění a jedná se o největší vzdálenost, kterou ještě rozlíšíme od nekonečna. Rozdíl stereoskopických paralax dvou předmětů musí být větší než mez stereoskopického vidění. Výpočtem pro střední hodnoty vzdálenosti očí můžeme stanovit hodnotu asi 1,5 km.

Hloubkou stereoskopického vidění se rozumí taková nejmenší vzdálenost dvou předmětů, které lze ještě hloubkově rozeznat (pokud je tedy rozdíl jejich stereoskopických paralax větší než mez stereoskopického vidění) při akomodaci oka na vzdálenost  $d$ .

*Prostorové  
vidění*

## 7.2 Vnímání akustických signálů

Zvukem označujeme mechanické kmity pružného prostředí, jejichž kmitočet je v mezích slyšitelnosti lidského ucha, tj. od 16 Hz do 20 kHz.

Akustika je obor zabývající se fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem. Fyziologická akustika se zabývá vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu.

Při průchodu zvukové vlny vzduchem se pravidelně střídají oblasti vyššího a nižšího tlaku a nakonec uvedou do kmitavého stavu ušní bubínek - zvuk je slyšet.

V akustice se obvykle pojednává i o vzniku, vlastnostech a účinku ultrazvuku (a infrazvuku), mechanického vlnění s velmi vysokou (pro infrazvuk nízkou) frekvencí, na kterou už lidské ucho nereaguje.



### Hladina intenzity, výška tónu

Zvuk vnikající do sluchového orgánu prochází převodní soustavou do vnitřního ucha, kde se mění na nervové impulsy. Akustickému ději odpovídá sluchový vjem.

Základní fyzikální vlastnosti zvuku	Odpovídající vlastnosti sluchového vjemu
intenzita	hlasitost
kmitočet	výška zvuku
skladba*	barva zvuku*

\* přirozený zvuk není jednoduchý tón; buď neperiodický šum nebo složené tóny obsahují základní frekvenci a vyšší harmonické frekvence – určuje zbarvení zvuku

### 7.2.1 Vnímání akustických signálů

#### Hlasitost

Hlasitost je subjektivně vnímaná intenzita, subjektivní vjem zvuku odrážející fyzikální intenzitu zvuku (není úměrná intenzitě, roste s ní, ale závisí i na

kmitočtu a skladbě zvuku). Vztah mezi podněty a počitky vyjadřuje obecně Weber-Fechnerův zákon o počitcích – *přírůstek počitku je úměrný relativní změně intenzity zvuku  $\Delta I/I$ .*

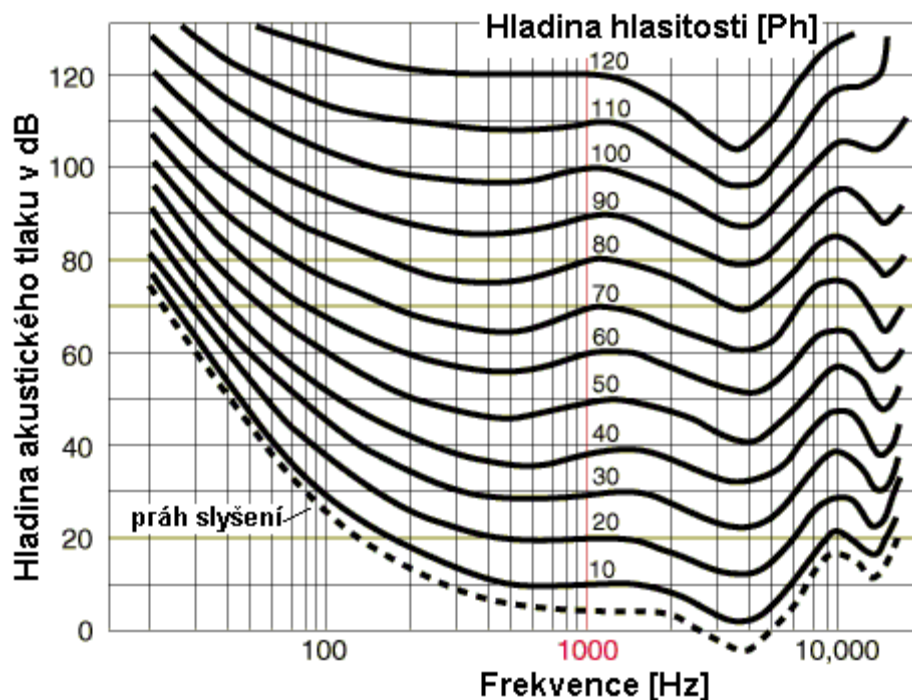
Hlasitost

$$H = k \cdot \log I/I_0$$

- $I$  je intenzita,  $I_0$  je minimální intenzita, při které zvuk zaslechneme,  $k$  – konstanta
- roste-li intenzita zvuku lineárně, pak hlasitost roste pouze logaritmicky
- předpokládá se referenční platnost pro 1 kHz
- byla ustanovena empirická jednotka 1 son, která odpovídá hlasitosti, kterou vnímá průměrný posluchač oběma ušima při referenčním tónu a hladině intenzity 40 dB

### Hladina hlasitosti

Tóny různých kmitočtů mají různý práh slyšitelnosti a různý průběh hlasitosti - křivky stejné hlasitosti byly stanoveny subjektivním srovnáním a byla definována jednotka hlasitosti 1 fon. Hladina hlasitosti ve fonech souhlasí číselně s hladinou intenzity zvuku tónu 1 kHz v dB, tedy pouze při frekvenci 1 kHz odpovídají fóny decibelům.



*Hladiny  
hlasitosti ISO*

*Hladiny hlasitosti ISO*

*Zdroj: [http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)*

Z grafu je patrné, že pro nízké a vysoké frekvence je při stejné intenzitě vjem hlasitosti nižší (pro stejnou hlasitost je nutná vyšší intenzita zvuku), pro frekvence do cca 5 kHz naopak vyšší.

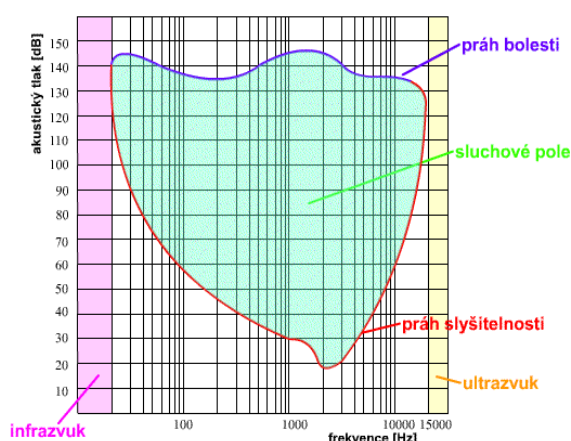
### Sluchové pole (oblast slyšitelnosti)

Rozsah hlasitosti sluchového vjemu je omezen dvěma hodnotami:

Sluchový podnět musí dosáhnout určité intenzity, aby vůbec způsobil sluchový vjem. Tato minimální intenzita pro určitý zvuk se nazývá **sluchový práh** a je nejmenší možnou hlasitostí daného zvuku.

Maximální hlasitost je dána tolerancí sluchového orgánu vůči zvuku. Při určité velké intenzitě zvuku jsou drážděna nejen zakončení sluchového nervu, ale i nervů hmatových, takže zvuk způsobuje ve sluchovém orgánu i hmatový vjem. Tato intenzita zvuku se nazývá **práh hmatový**. Při něm mohou zjistit přítomnost zvuku i osoby úplně hluché (je to kolem 120 dB). Při dalším zvýšení intenzity se podráždí ve sluchovém orgánu četná nervová zakončení pro vnímání bolesti a dosahuje se tzv. **prahu bolesti** (kolem 140 dB). Při prahu hmatovém a zvláště při prahu bolesti dochází po krátké době k poškození sluchového orgánu, který tak velké intenzity nesnáší. Práh sluchu a práh hmatový ve všech frekvencích vymezují tzv. oblast slyšitelnosti neboli sluchové pole.

Práh sluchu, práh hmatový a práh bolesti je možno stanovit nejen pro čisté tóny, jak se obvykle děje, ale též pro zvuky složité. Tak máme práh pro slyšení řeči, pro slyšení rovnoměrného spojitého hluku apod.



Sluchové pole

Sluchové pole

Zdroj: [http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)

Tvar sluchového pole je individuální pro každého člověka. Maximální citlivost sluchu spadá do oblasti mezi 500 až 4000 Hz, pro nižší a vyšší frekvence prudce klesá.

### Výška tónu a kmitočet zvuku

Výška tónu je jednou ze subjektivních veličin sluchového vjemu; podle ní můžeme daný zvuk zařadit do stupnice od tónů hlubokých k vysokým. Výška tónu je pojem fyziologický, který je paralelní k fyzikální frekvenci (kmitočtu) tónu nebo zvuku. Není však s frekvencí totožný, třebaže se někdy s ní zaměňuje. Výška tónu sice závisí převážně na frekvenci zvuku, ale do jisté míry i na intenzitě. Frekvence v jejím určení však převládá a proto výšku posuzujeme nejčastěji podle frekvence čistého tónu, s nímž má zkoumaný zvuk stejnou výšku.



Rozsah výšky tónu je určen dolní a horní hranicí sluchu. Dolní hranice se udává obvykle 16 Hz, tj. kmitů za sekundu. Dolní hranici je těžko stanovit, neboť sluchový orgán má při velmi hlubokých tónech tolik zkreslení, že nemůžeme do ucha zavést čistý tón nízké frekvence. Při frekvenci 10 Hz již rozpoznáváme jednotlivé nárazy a nevnímáme zvuk jako tón. Horní hranici sluchu lze určit přesně a udává se obvykle na 20 000 Hz. U dětí je ještě vyšší, u starých lidí se snižuje asi k 11 000 Hz.

#### *Závislost výšky tónu na intenzitě*

Jestliže hlubší tón zesílíme v intenzitě při zachování frekvence, připadá nám silnější zvuk nižší. Nejvýraznější je tento jev asi při frekvenci 100 Hz, kdy se nám zdá, zesílíme-li zvuk ze 40 dB na 100 dB, jako by se frekvence tónu snížila asi o 10%. Poklesla tedy výška tónu při zvětšení intenzity zcela výrazně. Jinak je tomu u tónu vysokých, nad 4 000 Hz. Při zvětšování intenzity u nich subjektivní výška stoupá, takže zvuk s větší intenzitou se nám zdá vyšší, než skutečně je.

Proto při stanovení subjektivní výšky nějakého tónu musíme srovnávat tento zkoumaný tón s normálem, který má standardní hladinu hlasitosti, a to 40 dB. Naproti tomu, chceme-li určit kmitočet určitého zvuku, srovnáme jej sluchem s normálem, který má asi stejnou hlasitost jako zkoumaný zvuk. (Odchytky však v praxi až na frekvenci kolem 100 Hz nejsou velké.)



Výšku tónu můžeme určit několika způsoby, buď podle kmitočtu čistého tónu, který zní stejně vysoko, nebo podle znalosti hudebních intervalů anebo konečně čistě subjektivním hodnocením. Podle toho rozpoznáváme výšku tónu absolutní, relativní a subjektivní.

Absolutní výška tónu je dána frekvencí (kmitočtem) čistého tónu, o němž pozorovatel s normálním sluchem usoudí, že zní stejně vysoko jako zkoumaný zvuk. Jednotkou je tedy Hz, stejně jako pro kmitočet. Srovnávací tón má být při tomto určení ve standardní hladině 40 dB, neboť jinak může dojít ke změně výšky. Absolutní výšku je možno též vyjádřit hudebním tónem, zařazením zvuku do hudební stupnice nebo určíme, mezi kterými dvěma sousedními tóny se daný zvuk nachází. Osoby s absolutním hudebním sluchem mohou určit přímo absolutní výšku tónu, kterou si pamatují neomezeně dlouho. Protože to jsou obvykle osoby hudebně vzdělané, určují absolutní výšku zařazením do hudební stupnice.

Relativní výška tónu je vyjádřena hudebním intervalem proti základnímu tónu hudební stupnice. Relativní výšku tónu mohou určit osoby s dobrým (nikoliv absolutním) hudebním sluchem, mají-li příslušné hudební vzdělání a předvedli se jim současně základní tón stupnice nebo nějaký jiný referenční tón.

Jednotkou pro relativní výšku je jeden tón a měří se na jeho zlomky (půltón, čtvrttón apod.) nebo násobky, které se označují latinskými řadovými číslicemi: prima, sekunda, tercie, kvartu, kvinta, sexta, septima a oktáva. Hudební interval je poměr dvou kmitočtů.

Nejjednodušší poměr má oktáva – 2 : 1.

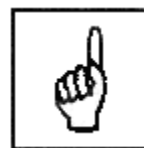
## 7.2.2 Biofyzikální funkce ucha

### 7.2.2.1 Anatomie sluchového orgánu

Sluchový orgán se dělí po anatomické stránce na tři části: zevní, střední a vnitřní ucho.

Zevní ucho se skládá z boltce a zvukovodu. Boltce má význam pro směrový efekt sluchového orgánu. Svaly pohybující boltcem, které u zvířat přispívají k poznání směru zvuku, u člověka zanikly. Zevní zvukovod je kanálek vystlaný kůží, probíhající směrem dovnitř a poněkud dopředu. Skládá se ze zevní části

*Výšky tónu:  
absolutní,  
relativní*



chrupavčité a vnitřní kostěné. Je mírně nerovný, ale nerovnost se dá tahem za boltec vyrovnat, takže při vhodném osvětlení můžeme vidět na bubínek. Délka zvukovodu je asi 25 mm, šířka 7 až 8 mm, průřez je oválný. Objem zvukovodu je kolem  $1,2 \text{ cm}^3$ .

Střední ucho je uloženo v tzv. dutině bubínkové, což je dutinka nepravidelně oválného tvaru ve skalní kosti. Od zvukovodu ji dělí bubínek.

Bubínek je blanka z tenkého vaziva, oddělující zevní a střední ucho. Vertikální průměr je asi 9 až 10 mm, horizontální o něco méně. Plocha činí asi  $55 \text{ mm}^2$ .

Tvar bubínku je kónický, obrácený hrotem dovnitř. Radiálním směrem shora je na bubínek přirostlá rukojeť kladívka.

Sluchové kůstky jsou tři. Kladívko, kovadlinka a třmínek. Kladívko je rukojetí vrostlé do bubínku, takže sleduje jeho vibrace. Směrem nahoru od rukojeti se kladívko ztlušťuje v hlavičku, mezi hlavičkou a rukojetí je ztenčený krček. S hlavičkou kladívka je skloubena kovadlinka, jejíž tělo vybíhá ve dva výběžky. Ke krátkému výběžku jsou upevněny závěsné vazy, dlouhý probíhá směrem dolů asi rovnoběžně s rukojetí kladívka a je sklouben s hlavičkou třetí kůstky, třmínkem. Třmínek je zakončen oválnou ploténkou, která má délku asi 3 mm, plochu asi  $3,2 \text{ mm}^2$ . Ploténka třmínku je přirostlá na blanku oválného okénka, která je mnohem menší než bubínek a která odděluje střední ucho od vnitřního. Kůstky koncentrují zvukový tlak (pákový princip 1:1,3, hydraulický princip 1:14 - poměr tlaků 1:18,3). Mechanickým přenosem zmenší ztráty vzniklé při přechodu zvukového vlnění ze vzduchu do vody (tekutina labyrintu).

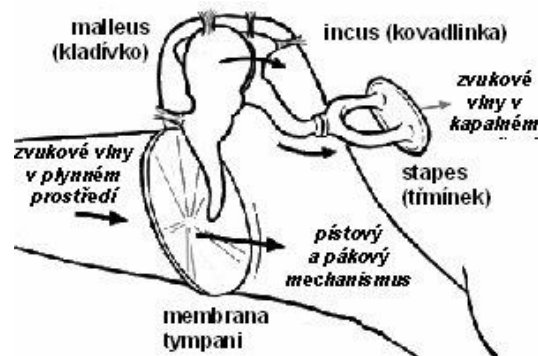


Schéma středního ucha

Zdroj: <http://www.fbmi.cvut.cz/esf-realizovane/nw.fbmi.cvut.cz/e/pousek21/1980a.jpg>

Ke střednímu uchu patří ještě sluchová trubice (Eustachova trubice), která vede z přední části dutiny bubínkové do nosohltanu. Za klidu je uzavřena a otevírá

se při polknutí. Svaly středního ucha jsou dva velmi malé svalíky. Napínač bubínku probíhá vedle sluchové trubice, jeho šlacha se otáčí kolem zvláštního výběžku a upíná se na krček kladívka. Druhým svalem je třmínkový sval (musculus stapedius), který se upíná na třmínek a druhým koncem do stěny dutiny bubínkové. Mají za úkol ochranu sluchu při přílišném hluku.

Vnitřní ucho je uloženo ve složitě uspořádaných kanálcích ve skalní kosti, jež se nazývají labyrint. V kostěném labyrintu je uložen blanitý labyrint, což jsou vlastně dva smyslové orgány. V polokruhovitých chodbičkách a v předsíni je takzvané vestibulární ústrojí, ústrojí rovnováhy, které zpravuje člověka o poloze a pohybu hlavy. Sluchovou část vnitřního ucha představuje hlemýžď.



Model ucha

Zdroj: <http://www.helago-cz.cz/public/content-images/cz/product/6881.jpg>

*Kanálek hlemýždě má 3 1/2 závitů prostorové spirály. Je podélně neúplně rozdělen kostěnou lištou, která vybíhá k vnitřní stěně. Rozdělení je dokončeno blanitým hlemýžděm, který je napjat mezi touto lištou a zevní stěnou kanálku. Kanálek hlemýždě je tak rozdělen ve dvě patra (scala vestibuli, scala tympani), která jsou vyplněna tekutinou, perilymfou. Toto rozdělení kanálku hlemýždě není úplné, ve vrcholu jsou obě patra propojena.*

*Blanitý hlemýžď leží na bazální membráně, která tvoří jeho dolní stěnu. Bazální membrána je na začátku hlemýždě úzká, směrem k vrcholu se rozšiřují. Na bazální membráně je Cortiho orgán, vlastní smyslové ústrojí. Opěrnými pilíři Cortiho orgánu jsou Cortiho sloupce, které se o sebe vrcholy opírají. Na obě strany od nich jsou umístěny vláskové buňky, které leží v pohárcích zvláštních podpůrných buněk. Vláskové buňky jsou na vnitřní straně v jedné řadě, na zevní ve 3-5 řadách. Nad vláskovými buňkami leží krycí membrána,*



kteřá se volně dotýká jejich vlásků. Z vláskových buněk vedou jemné fibrily nervových vláken směrem ke středu hlemýždě, kde se spojují v mohutný kmen nervový a tvoří sluchový nerv. K němu se přikládají i vlákna nervová z ústrojí rovnováhy.

Sluchový nerv zakončuje v prodloužené míše v tzv. jádrech sluchového nervu, což je nahromadění nervových buněk. Odtud vede sluchová dráha do vyšších podobných center ve středním mozku a v mezimozku, přičemž se vlákna z pravého a levého ucha částečně překřížují na druhou stranu. Sluchová dráha končí pak v mozkové kůře, kde je sluchovým vjemům vyhrazena zvláštní oblast ve spánkovém laloku velkého mozku.



### Otázka k zamyšlení

Zevní zvukovod plní z akustického hlediska funkci rezonátoru. V jakém frekvenčním rozsahu bude maximum rezonance (lidské ucho bude na tyto frekvence nejcitlivější) při běžné délce zvukovodu asi 2,5 cm? Zvýšení intenzity dosahuje asi 12 dB.

### 7.2.2.2 Vnímání zvuku



Zevní ucho vede zvukové vlny k bubínku, přičemž má zřetelný směrový efekt. Zvukovod je namířen na stranu a trochu dozadu. Optimální poměr poslechu je však ze strany a trochu zepředu. Tato nevelká změna směru je způsobena patrně boltcem.

Důležitost má též akustický stín hlavy, která stíní zvuky dopadající z opačného směru. Směrový efekt zevního ucha se však projevuje jen u vysokých tónů, tóny hluboké (do 200 Hz) vnímáme ze všech směrů ve stejné intenzitě.

Směrového efektu zevního ucha využíváme, i když si to často neuvědomujeme. Chceme-li pozorně naslouchat nějakým zvukům, neposloucháme zpříma, ale nastavíme šikmo jedno nebo druhé ucho tak, aby i vysoké tóny bylo slyšet v optimální intenzitě, abychom slyšeli plný obraz daného zvuku.

Střední ucho má činnost převodní a činnost ochrannou. Převodní činnost je realizována vibracemi řetězu kůstek, jimiž se přenáší chvění bubínku na oválné okénko. Sluchové kůstky konají malé pohyby kolem osy procházející asi tělem kovadlinky. Kloub mezi kovadlinkou a třmínkem dovoluje jen malý pohyb,

*Převodní  
systém  
středního ucha*

takže při přenosu vibrací se chovají první dvě kůstky jako jediný element.

Třmínek se rozechvěje; pohyby třmínku v oválném okénku nejsou čistě pístové, mají i rotační složku s osou při dolním okraji okénka.

Význam středního ucha je v tom, že působí jako akustický transformátor mezi vzduchem a tekutinou labyrintu, jež mají značně rozdílný vlnový odpor.

Zvuková energie se sbírá z poměrně velké plochy bubínku a koncentruje se na malou plošku oválného okénka. Tím se na jednoduchém hydraulickém principu zvětší zvukový tlak (při menší výchylce) a zvuková energie přechází beze ztráty do tekutiny labyrintu. Proto také při poškození středního ucha nastává nedoslýchavost.

*Ochranná funkce středního ucha.* Tuto funkci vykonávají středoušní svaly, napínač bubínku a třmínkový sval. Přejde-li do sluchového orgánu nějaký silný zvuk, oba tyto svaly se okamžitě smrští (se zpožděním jen několika milisekund). Tím se zvětší napětí bubínku i oválného okénka a ztíží se přenos hlavně hlubokých tónů.

Sluchová trubice spojuje střední ucho s nosohltanem. Jejím účelem je zajistit přiměřený tlak v dutině bubínkové, neboť jinak jsou kmity bubínku značně utlumeny a sluch se velmi zhorší. Za klidu je sluchová trubice uzavřena a otevírá se pohyby svalů při polknutí a při zívnutí. Přitom se tlak v uchu a v nosohltanu vyrovná. Člověk samovolně polyká asi každou minutu a tím je řádné provzdušení středního ucha zajištěno. Při změnách barometrického tlaku (v letadle apod.) je třeba častěji polykat.

V hlemýždi nastává přeměna mechanických vibrací v nervové vzruchy, které jsou pak vedeny do ústředního nervstva. Mimo to se v hlemýždi rozvrstvějí tóny podle kmitočtu, provádí se tu frekvenční analýza zvukového podnětu.

Jakým způsobem se analýza v hlemýždi provádí, o tom existují četné tzv. teorie slyšení; těch je velké množství, z čehož je patrné, že dodnes nevíme do všech podrobností, jak hlemýžď pracuje, i když víme o jeho činnosti velmi mnoho.

*Helmholtzova rezonanční teorie je klasická teorie slyšení z minulého století, která ještě donedávna byla uznávána a která dnes neplatí do podrobností, ale některé skutečnosti Helmholtzem předpokládané jsou potvrzeny.*

*Zvukové vlny se dostávají do předsíně (vestibula) vnitřního ucha kmitáním třmínku. Strídavé tlakové změny se šíří do hlemýždě, do jeho scala vestibuli.*



*Pohybu tekutiny v tuhém kostěném pouzdře jsou umožněny tím, že kulaté okénko povoluje tlaku a představuje tak poddajnost stěn labyrintu. Když se třmínek vmáčkne dovnitř, jde kulaté okénko ven a opačně, obě okénka pracují v protitaktu. Přitom se rozkmitá bazální membrána, která odděluje obě patra kanálku hlemýždě. Při pohybech bazální membrány se dotýkají smyslové buňky svými vlásky bazální membrány a jsou tím drážděny. Podráždění se odvádí nervovými vlákny do sluchového nervu a nervem do mozku. Bazální membrána je na začátku hlemýždě úzká, u vrcholu široká. Helmholtz předpokládal, že je napjatá v příčném směru, takže se chová jako by se skládala z příčných strun různé délky, které jsou naladěny na různé tóny. Na začátku hlemýždě rezonují struny bazální membrány na vysoké tóny, směrem k vrcholu postupně na hlubší a hlubší tóny. Je to teorie řady izolovaných rezonátorů.*



*Výška tónu se podle Helmholtze pozná podle toho, které místo v hlemýždi je podrážděno. Patří mezi tzv. teorie místní. Každé výšce tónu přísluší určité smyslové buňky, určitá nervová vlákna a určitá místa v hlemýždi i v ústředním nervstvu.*

*Z Helmholtzovy teorie bylo potvrzeno, že existuje místní rozdělení kmitů v hlemýždi podle výšky tónů. Uznává se též dráždění smyslových buněk relativními pohyby proti krycí membráně. Rezonanci fibril jako samostatných rezonátorů však nelze dobře udržet, neboť fibrily nebyly moderními metodami prokázány; bylo zjištěno, že bazální membrána není vůbec napjatá v příčném směru a že mechanické kmity v hlemýždi při kvantitativním rozboru, hlavně pokud jde o fázové poměry, odporují rezonančnímu principu v pojetí Helmholtzově (řada izolovaných rezonátorů).*

*Proto byly hledány jiné teorie. Je jich velké množství a dnes se zdá, že nejbližší pravdě jsou tzv. vlnové teorie nebo hydrodynamické, které vysvětlují kmitání v hlemýždi jako šíření vlny v trubici s pružnou stěnou. Touto pružnou stěnou je bazální membrána. Po bazální membráně se při vychýlení třmínku šíří rozruch asi podobně jako po stěně cévy pulsová vlna rychlostí poměrně malou, takže vlnová délka i při hlubokých tónech je menší než délka hlemýždě (30 mm). To umožňuje vznik jakýchsi rezonancí s maximem při určité frekvenci na určitém místě.*

*Békésy navrtal do labyrintu otvory, zatmelil do stěny hlemýždě okénka a pozoroval kmity mikroskopem ve stroboskopickém světle. Mohl tak vyměřit*

*maxima kmitání na určitých místech. Zjistil, že při hlubokých tónech kmitají partie u vrcholu, při vysokých tónech hned na začátku. Rezonanční křivky jsou však poměrně ploché a jedním tónem je podrážděna dosti široká oblast. V místech největší výchylky viděl Békésy víry kapaliny a považuje je za původce podráždění.*

*Ranko předpokládá, že vlna postupuje po bazální membráně proměnlivou rychlostí, na začátku rychle, směrem k vrcholu pomaleji. Tím se vlnová délka kmitů zkracuje. Dosáhne-li na některém místě určitého poměru k průřezu kanálku hlemýždě, zruší se postup vlny v kanálku. V tomto místě, v tak zvané přechodové zóně, se dráždí smyslové buňky. Přechodová zóna vzniká pro různé tóny na různých místech.*

*Frekvenční teorie, kterých je rovněž celá řada, předpokládají, že se výška tónu nerozpozná podle místa podráždění, nýbrž podle frekvence nervových impulsů. Při každé periodě jsou vysílány vzruchy do ústředního nervstva, a tak je reprodukována frekvence a částečně i tvar zvukové vlny. Ústřední nervstvo přímo vnímá periodičnost. Souhlas frekvence nervových vzruchů s frekvencí zvuku až do určité meze potvrdili Wever a Bray zápisem tzv. akčních potenciálů ve sluchovém nervu.*

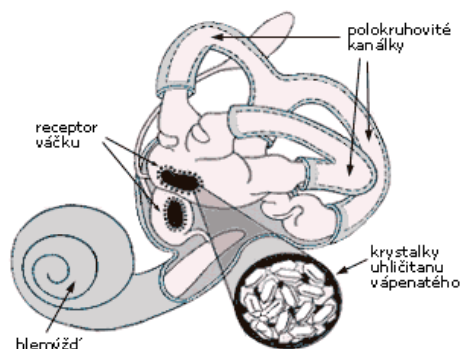
*Směšené teorie předpokládají, že se oba principy, jak místní rozvrstvení, tak i přímo poznání frekvence se při sluchových vjemech kombinují.*

### 7.2.2.3 Vnímání rovnováhy

Ve vnitřním uchu jsou kromě částí spojených s plněním sluchové funkce také oddíly spojené s plněním funkce udržování rovnováhy. K nim patří předsíň (vestibulum) tvořená kulovitým váčkem (sacculus), vejčítým váčkem (utricle) a třemi polokruhovitými kanálky (ducti semicirculares) s rozšířenými váčky.

V každém ze tří oddílů jsou různé typy citlivých vláskových buněk (crista ampularis) reagující na pohyb endolymfy, na gravitační pole nebo na zvukové vibrace.





Ústrojí vnímání rovnováhy

Zdroj: <http://www.vertigoacademy.cz/zavrat/zavrat/121/stavba-vnitřního-ucha>

Polokruhovitě kanálky mají v místech rozšíření svazky vláskových buněk. Pohyb hlavy je doprovázen odpovídajícím pohybem endolymfy, která ohýbá v různých směrech řasinky, díky čemuž je přijímána informace o pohybech hlavy v jakékoliv prostorové rovině. Oba vřáčky jsou zodpovědné za získávání informací o změnách polohy hlavy v gravitačním poli a o lineárních zrychleních. Vlastní citlivé vláskové buňky se nacházejí v místech nazývaných macula sacculi a macula utriculi.

Tato místa jsou pokryta krystaly uhličitánu vápenatého, tzv. otolity. Při změně polohy hlavy vlivem gravitace dochází k ohýbání pod nimi ležících citlivých vláskových buněk.

Beztížný stav způsobuje krátkodobé i dlouhodobé fyziologické změny v živých organizmech. U člověka se v rovnovážno-polohovém centru začnou otolity volně pohybovat, na Zemi tlačí na smyslové buňky a tím udávají směr tíže. V beztížném stavu však otolity začnou dráždit smyslové buňky zcela náhodně, což má za následek mořskou nemoc, pocity tupého tlaku v hlavě, případně žaludeční nevolnost.

### 7.2.3 Působení extrémních frekvencí zvuku na živé organismy

#### 7.2.3.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk spadá do oblasti akustiky a náleží mu celý frekvenční rozsah nad slyšitelností lidského ucha. V ultrazvukové technice se stanovila tato hranice nad 20 kHz. Účinky ultrazvuku při šíření ve sledovaném prostředí, závisí na intenzitě (resp. amplitudě), frekvenci kmitů a na vlastnostech prostředí.



Ultrazvukové interakce:

pohlcená ultrazvuková energie vyvolá v biologických systémech změny – využití v ultrazvuku terapii a chirurgii.

Dělení biologických účinků z hlediska mechanismu působení ultrazvuku:

- Kavitační účinky
- Tepelné účinky
- Mechanické, chemické apod.

Kavitace

Kavitací se rozumí fyzikální jev v kapalině, při kterém vznikají, vyvíjejí se a zanikají kavitační bubliny (průměr řádově v  $\mu\text{m}$ ). Kavitace vzniká v proudících kapalinách nebo při pohlcení ultrazvukových vln v kapalině v místech, kde dochází k náhlým tlakovým změnám. Kavitace působí na urychlení chemických reakcí, způsobuje změny vlastností biomakromolekul. Kavitací může dojít k poruše až zániku buněk (využití v chirurgii). Kavitační práh je definován hodnotou akustického tlaku nebo intenzity, při kterých dochází ke kavitaci.

*Účinky  
ultrazvuku*

Tepelné účinky ultrazvuku

Zvýšení lokální teploty ve tkáni je důsledek absorpce ultrazvukové energie. Ke vzniku teplotního rozdílu dochází na rozhraní různých akustických impedancí tkání (využití analgetického účinku ultrazvuku ve fyzioterapii). Absorpce ultrazvuku ve tkáních je závislá na: frekvenci, kinetické viskozitě a termoregulačním mechanismu kůže (zajišťuje převod tepla do ostatních tkání těla).

Mechanické a chemické účinky ultrazvuku

- Primární mechanické účinky – „mikromasáž“ ovlivňuje funkci permeabilních membrán (zvýšení propustnosti).
- Dochází k urychlení difúzních procesů mezi buňkami a tkáněmi, prokrvení tkáně a látkové výměny.

- Při vyšších intenzitách (uzv. chirurgie) dojde k nevratným změnám – poškození buněk (erytrocyty – hemolýza).

#### Biochemické hledisko

- Dochází ke změně specifické aktivity enzymů, nukleových kyselin, protilátek, imunokomplexů.
- Mění se vazby na prostředí, disociační a elektrochemické vlastnosti (stimulace a inhibice tkání).



#### Rizika ultrazvukových aplikací

Základní kritérium posuzování rizika - velikost intenzity ultrazvuku. Podle

WHO z r. 1976: Při diagnostických postupech ultrazvuku v rozsahu

1–20 MHz: práh  $1 \text{ kW/m}^2$  ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) při expozičních časech 1–500 s.

Dávka by tak měla být nižší než  $105 \text{ J/m}^2$ . Aplikovaná intenzita nemá překročit  $30 \text{ kW/m}^2$  při maximální expoziční době 15 minut.

#### 7.2.3.2 Infrazvuk

Infrazvuk je zvuk o frekvenci nižší než 16 Hz, lidské ucho ho není schopné zaznamenat. Vzniká např. při zemětřesení, při nárazech silného větru, v bouři.

Přesná hranice mezi slyšitelným zvukem a infrazvukem neexistuje, ale udává se mezi 16 až 20 Hz. Spodní hranice se udává mezi 0,001 a 0,2 Hz. Je známo, že velryby, sloni, hroši, nosorožci, okapi a aligátoři používají infrazvuk k dorozumívání.

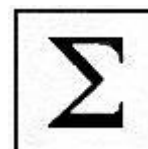
Infrazvuk sice nevnímáme sluchem, ale působí negativně na psychiku, může způsobovat bolesti hlavy. Nejvíce nebezpečné jsou frekvence 5 až 7 Hz, které odpovídají frekvenci mozkových vln. Přestože infrazvuk neslyšíme, může způsobit závratě, při vysoké intenzitě perforaci kochleární membrány nebo infarkt. Vnímaví jedinci pociťují tlak v uších (pocit zalehnutého ucha) tlak na citlivé oblasti pokožky, jako např. obličej, hřbet ruky. Protože infrazvuk je druh akustické energie, založený na šíření tlakových vln, je pravděpodobné, že působí na orgány, které jsou v kontaktu s atmosférou, tj. pokožka, dýchací a sluchové orgány. Lidské vnímání infrazvuku cestou sluchu vyžaduje však určitou minimální, relativně vysokou hladinu akustického tlaku.

*Infrazvuk*

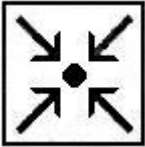
Vlny akustického signálu v přírodě ve frekvenční oblasti 0,05 až 20 Hz jsou obvykle na úrovni 80–90 dB. Při bouřích, přechodech front dosahuje až 120 dB. S infrazvukem se můžeme setkat i např. v dopravních prostředcích, zejména u kolejových vozidel. Hodně diskutované téma je přítomnost infrazvukových vln v důsledku činnosti větrných elektráren a jeho negativní důsledky.

## Shrnutí kapitoly

- Zrak a sluch jsou naše dva nejdůležitější smysly.
- Proces vidění je složitý fyzikální, fyziologický a psychologický proces. Z biofyzikálního hlediska jde příjem a zpracování informace, zprostředkované fotony viditelného světla, tj. elektromagnetického záření o vlnových délkách 380 – 780 nm.
- V oku optickou a fotochemickou cestou vzniká primární obraz vnějšího světa. Informace zachycená a zpracovaná okem se dále dostává do mozku po optické dráze a ve zrakovém centru v mozkové kůře je zpracována.
- Švédský oftalmolog Alva Gullstrand vytvořil zjednodušený model oka, který vychází z představy oka jako centrované optické soustavy se schopností automatického zaostřování.
- Nedopadá-li obraz předmětu přesně na sítnici, projevují se oční vady (krátkozrakost, dalekozrakost, vetchozrakost, astigmatismus). Korekce vad spočívá v posunu obrazu na sítnici pomocí čočky.
- Principem vnímání zvukových podnětů je mechanické vlnění vnikající do sluchového orgánu prochází převodní soustavou do vnitřního ucha, kde se mění na nervové impulsy. Zvukem označujeme mechanické kmity pružného prostředí, jejichž kmitočet je v mezích slyšitelnosti lidského ucha, tj. od 16 Hz do 20 kHz.
- Akustickému ději odpovídá sluchový vjem: intenzitě odpovídá hlasitost (subjektivně vnímaná intenzita), frekvenci odpovídá výška tónu a kmitočtové skladbě odpovídá barva zvuku.



- Rozsah hlasitosti sluchového vjemu je omezen dvěma hodnotami – prahem sluchovým (minimální hodnoty) a prahem hmatovým (práh bolesti).
- Ultrazvuk spadá do oblasti akustiky a náleží mu celý frekvenční rozsah nad slyšitelností lidského ucha. V ultrazvukové technice se stanovila tato hranice nad 20 kHz. Účinky ultrazvuku při šíření ve sledovaném prostředí, závisí na intenzitě (resp. amplitudě), frekvenci kmitů a na vlastnostech prostředí.
- Ve vnitřním uchu je také ústrojí pro vnímání rovnováhy.



#### Příklad:

1. Zvonění, které slyší pouze vyvolení. Otestujte svoje uši

[http://mobil.idnes.cz/zvoneni-ktere-slysi-pouze-vyvoleni-otestujte-svoje-usi-ped-/telefony.aspx?c=A060526\\_093301\\_telefony\\_dno](http://mobil.idnes.cz/zvoneni-ktere-slysi-pouze-vyvoleni-otestujte-svoje-usi-ped-/telefony.aspx?c=A060526_093301_telefony_dno)

1. Poškáďte teenagera zvukem, který dospělí neslyší

[http://mobil.idnes.cz/poskadlete-teenagera-zvukem-ktery-dospeli-neslysi-f8y-/mob\\_tech.aspx?c=A090120\\_191838\\_mob\\_tech\\_apo](http://mobil.idnes.cz/poskadlete-teenagera-zvukem-ktery-dospeli-neslysi-f8y-/mob_tech.aspx?c=A090120_191838_mob_tech_apo)

#### Kontrolní otázky a úkoly:

1. Z jakých vrstev je tvořena stěna oční koule?
2. Jakými prostředími prochází světelný paprsek při průchodu okem?
3. Jaké nedostatky má Gullstrandův model oka?
4. Jak byste korigovali myopii?
5. Objasněte schopnost oka akomodovat.
6. Při jakých frekvencích kmitů pružného prostředí dochází u člověka ke zvukovému vjemu?
7. Jak je označováno kmitání nad a pod touto hranicí?
8. Jaké vlastnosti sluchového vjemu odpovídají fyzikálním charakteristikám kmitání – intenzitě, frekvenci a skladbě?
9. Vysvětlete pojem práh slyšení a práh bolesti.
10. Jaký je hlavní úkol kůstek střední ucha při vnímání akustických signálů?
11. Jak získáváme informaci o poloze hlavy?



### **Úkoly k textu**

Ověřte si svůj barvocit

<http://www.ulekare.cz/kalkulacky/test-barvosleposti-21>

a otestujte svůj sluch (potřebujete kvalitní sluchátka a tiché prostředí kolem)

<http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/hearing.html>



**Zde si запиšte výsledky vašeho měření:**

**Citovaná a doporučená literatura**

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3
- České vysoké učení technické v Praze, Centrum podpory výuky, Výukové programy na nosiči VHS: A 031 Akustika – Úvod, R: Jaroslav Losert, OP: Oldřich Zadražil, Rv: 1996, Tm: 26 min.
- České vysoké učení technické v Praze, Centrum podpory výuky, Výukové programy na nosiči VHS: A 032 Akustika - Hluk a sluch, R: Jaroslav Losert, OP: Oldřich Zadražil, Rv: 1997
- MERHAUT, J. Teoretické základy elektroakustiky, Praha: Academia, 1985, kapitola Fyziologická akustika

**Elektronické zdroje, animace**

- <http://www.brailnet.cz/sons/docs/zrak/index.htm>
- <http://www.4oci.cz/>
- <http://www.zrak.cz/>
- <http://www.tutis.ca/Senses/index.htm>, kapitoly 1, 3, 4, 9, 10 a 11
- [http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)
- <http://www.vertigoacademy.cz/zavrat/zavrat/121/stavba-vnitriho-ucha>

## 8 Fyzikální principy vybraných diagnostických metod

### V této kapitole se dozvíte:

- co je to biosignál a jak s ním můžeme pracovat
- jaké jsou principy měřicích a záznamových metod pro měření mechanických veličin, elektrických veličin, optických vlastností
- jaké jsou principy zobrazovacích metod (USG, RTG, CT, SPECT, PET, MRI)

### Po jejím prostudování byste měli být schopni:

- vysvětlit princip nejběžnějších diagnostických postupů využívajících fyzikální principy interakce s biologickým materiálem
- objasnit principy diagnostických zobrazovacích metod (skiografie, MRI, ultrazvuková diagnostika, termografie apod.)

**Klíčová slova kapitoly:** biosignál, řízení, regulace, měření, záznam, elektrodiagnostické metody, mikroskopie, detekce, zobrazování, ultrazvuk, rentgenové záření, CT, radionuklid, SPECT, PET, MRI

### Průvodce studiem

*Moderní diagnostické metody (zejména ty, jejichž výstupem je nějaké zobrazení) jsou většinou založeny na využití fyzikálních dějů, které jsou aplikovány ve spojení s živou hmotou (in vivo nebo in vitro). Jde vlastně o aktuální využití poznatků biofyziky v medicínské praxi. Měli byste znát alespoň základní principy těchto metod, vědět k čemu je možné je využít, co vlastně ukazují a jaký je dopad jejich využití pro pacienta. Ostatně i vy sami se s nimi v životě můžete často setkat ...*

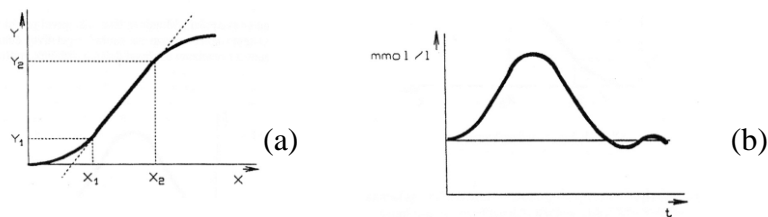
*Na zvládnutí této kapitoly budete potřebovat asi 4 hodiny, tak se pohodlně usadte a nenechte se nikým a ničím rušit.*



## 8.1 Biologické signály

Zdrojem informací o zkoumaném biologickém systému je biosignál, vyvolaný existencí živého organismu. Biologický systém je stejně jako jiné systémy charakterizován závislostí mezi vstupními a výstupními veličinami. Vstupní veličiny jsou nezávislé na systému, výstupní veličiny jsou závislé na veličinách vstupních a na systému. Na systém působí více veličin – vybíráme ty dvojice, které mají vliv na řízení a na regulační pochody.

Podle vztahu vstupních a výstupních veličin posuzujeme vlastností systémů. Statické systémy jsou popsány statistickými charakteristikami nebo lineárními rovnicemi (a). Dynamické systémy jsou popsány pomocí diferenciálních rovnic (př. glykemická křivka, (b)).



### Řízení a regulace

Řízení je definováno jako změny v chování daného systému, ke kterým dochází na základě předané informace. Řízení může být ovládané (bez zpětné vazby) a regulované – se zpětnou vazbou. Regulace je proces, který minimalizuje rozdíly mezi skutečnou a požadovanou hodnotou regulované veličiny.



### Regulace

Homeostáza je schopnost udržovat důležité veličiny vnitřního prostředí relativně stálé, což je důležité pro zachování životních funkcí. Organismus se přizpůsobuje vnějším podmínkám. Udržování homeostázy je zabezpečeno regulačním systémem.



## Regulační systém

Zjednodušený model:

Regulovaná soustava RS

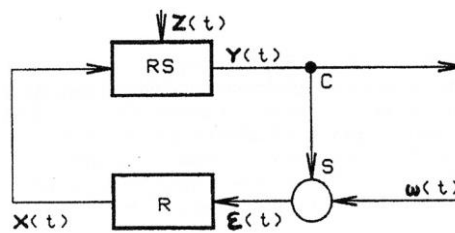
Poruchová veličina  $z(t)$

Regulovaná veličina  $y(t)$

C - čidlo

Řídící veličina  $\omega(t)$

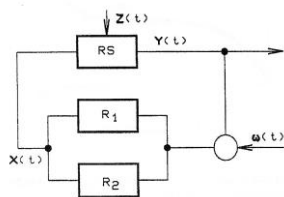
Regulační odchylka  $\varepsilon(t)$



V sumačním bodě S se porovná regulovaná veličina s řídicí veličinou, získaná regulační odchylka se pak v regulátoru transformuje na akční veličinu  $x(t)$ .

Akční veličina působí proti vzniku poruchy, minimalizuje regulační odchylku – regulace zápornou zpětnou vazbou.

*Příklad: regulace teploty organismu*



*V případě, že na organismus působí zvýšená teplota – porucha  $z(t)$ , přenese se toto zvýšení teploty krevním oběhem do hypotalamu, kde jsou umístěna termoregulační centra (zjednodušeně). Termostatické centrum je nastaveno na  $37^{\circ}\text{C}$ , což představuje řídicí veličinu  $\omega(t)$ . Může být ovlivněna pyrogenními látkami. Porovnáním vznikne odchylka, která oživí regulátor: centrum pro odevzdávání tepla  $R_1$  (pocení, rozšíření kožních cév). Působí-li snížená teplota, uvede se do činnosti centrum pro zachování tepla  $R_2$  (vazokonstrikce). Postupně dochází k minimalizaci odchylky.*

## Biosignály

Lidský organismus je otevřený dynamický systém, který přijímá, zpracovává a vysílá informace. Vysílané informace odrážejí stav organismu, jsou základem pro stanovení diagnózy. Proces vedoucí ke stanovení diagnózy se nazývá diagnostika.



*Diagnóza*

*diagnóza zkr. dg. – rozeznání nemoci a její pojmenování. Stanovení d. je předpokladem správné léčby. Vychází ze základních příznaků nemoci a posouzení okolností, které by s nimi mohly být v příčinném vztahu viz anamnéza, fyzikálního vyšetření pacienta a laboratorních či přístrojových vyšetření, která odrážejí celkový stav organismu i jednotlivých orgánů a která mohou event. odhalit i příčinu onemocnění.*

*(<http://lekarske.slovniky.cz/>)*

Biosignály vznikající v organismu jeho aktivní činností nazýváme biosignály vlastní:



Druh projevu	Způsob snímání	Diagnostická metoda
Mechanické projevy: Pohyb Rychlost Tlak Výkon	Mechanoelektrické měniče	Spirometrie Fonokardiografie Apexkardiografie Tonometrie Ergometrie
Tepelné projevy: Teplota tělesného jádra Povrchové rozložení teplot Vyzařování IČ záření	Teploměry Kapalné krystaly Detektory IČ záření Kalorimetr	Termometrie Kontaktní termografie Termovize Metabolická měření
Aktivní elektrické projevy	Elektrody	Elektrokardiografie (EKG) Elektromyografie (EMG) Elektroencefalografie (EEG) Elektroretinografie (ERG)
Magnetické projevy	Kvantový magnetometr (SQUID)	Magnetokardiografie (MKG) Magnetomyografie (MMG) Magnetoencefalografie (MEG)
Faktory vnitřního prostředí (pH, pO <sub>2</sub> , pCO <sub>2</sub> )	elektrody	Monitorování vnitřního prostředí

*Převzato: HRAZDIRA, I.; MORNSTEIN V. Lékařská biofyzika a přístrojová technika*

Pokud organizmus svou činností ovlivňuje (moduluje) impuls vyslaný do organismu z vnějšího zdroje, nazýváme tyto biosignály modulované (zprostředkované).

Modulovaná veličina	Způsob modulace	Snímací zařízení	Diagnostická metoda
Rentgenové záření	Útlum (absorpce)	Fotografický film Fluorescenční detektor Výpočetní technologie	Skiografie Skioskopie Výpočetní tomografie (CT)
Jaderné záření	Rozložení aktivity radionuklidu Emise fotonů Emise positronů	Scintilační detektory	Pohybová scintigrafie Gama kamera SPECT PET
Viditelné záření	Odraz světla Lom světla	Oko Fotografická kamera videokamera	Endoskopické metody
Ultrazvuk	Odraz Změna frekvence	Piezoelektrická měnič	Ultrasonografie Dopplerovské metody
Elektrický proud	Elektrická vodivost Reakce na stimulaci	Elektrody	Reopletysmografie Chronaximetrie
Elektromagnetické pole	Rezonanční radiofrekvenční impuls	Měřicí cívky	Magnetická rezonanční tomografie (MRI)



(převzato: HRAZDIRA, I.; MORNSTEIN V. Lékařská biofyzika a přístrojová technika)

## Zpracování biosignálů

Zpracování biosignálů probíhá ve třech krocích:

1. snímání,
2. zesílení a úprava,
3. zobrazení a záznam.

### Snímače a měniče

Elektrické biosignály můžeme snímat přímo, snímačem je elektroda. Pro snímání neelektrických biosignálů použijeme měnič, abychom získali signál elektrický. Používáme měnič:

- mechanoelektrický
- termoelektrický
- fotoelektrický
- radioelektrický

### *Zpracování biosignálů*

Ve druhé kroku dochází k zesílení a elektronické úpravě signálu. Signál je zesílen v zesilovači a dále zpracováván v podobě analogové nebo digitální. Analogové zpracování se dnes většinou používá jen pro proces snímání biosignálu, přeměnu neelektrického signálu na elektrický. Signál je dále digitalizován pro zpracování signálu počítačem.

### *Zobrazení a záznam*

Výstup zobrazení signálu je buď grafický (zapisovače) nebo obrazový (kamera).

Záznam může být dočasný nebo trvalý.

## **8.2 Metody měřící a záznamové**

Do této kapitoly patří metody:

- měření mechanických veličin,
- měření teploty,
- elektrodiagnostické metody,
- optické metody,
- detekce ionizujícího záření.

### **8.2.1 Měření mechanických veličin**

Mechanické projevy představují významnou skupinu biosignálů, přinášejí řadu cenných diagnostických informací.



#### **Měření tlaku**

Mechanoelektrické měniče jsou vhodné pro přímá měření tlaku:

- odporové – změna odporu vodiče v důsledku tvarových změn, dnes již málo užívané
- indukční – změny indukčnosti cívky v závislosti na poloze jejího jádra
- kapacitní – závislost kapacity deskového kondenzátoru na vzdálenosti desek
- piezoelektrické – nejuniverzálnější

Piezelektrické měniče využívají elektricky anizotropní krystal, ve kterém působením vnějšího tlaku dochází k posunu el. nábojů v kryst. mřížce, což se projeví vznikem elektrického napětí úměrného velikosti působícího tlaku.

#### *Měření tlaku krve*

Při metodě přímé zavedeme katetr do krevního řečiště, pro měření se využívá kapacitní nebo piezelektrický měnič. Při metodě nepřímé, neinvazivní, využíváme různé fyzikální principy, její použití je omezeno jen na některé artérie.

#### **Otázka k zamyšlení:**

Ve fyziologii jste si v praxi měření tlaku vyzkoušeli nejpoužívanější metodou Riva-Rocciho, kdy jste odečítali hodnoty systolického a diastolického tlaku poslechem tzv. Korotkovových ozev. Zamyslete se nad tím, co tyto zvuky způsobuje? Jaký fyzikální jev?



#### *Jiná měření tlaku*

*Nitrooční tlak* lékař měří při podezření na nějakou oční vadu, zvýšení nebo snížení může zjistit už při palpaci (pohmatu), dnes se ale především v očních ordinacích a na klinikách používá speciální oftalmologický manometr, který s velkou přesností změří hodnotu tlaku.

Pro jeho měření využíváme neinvazivní principy, např. tonometr s indukčním snímačem, kterým působíme na povrch znečitlivělé rohovky. Dnes nejčastější metodou vyšetření nitroočního tlaku je bezkontaktní tonometrie. Prudké fouknutí vzduchu oploští rohovku, že čím je nitrooční tlak vyšší, tím hůř lze rohovku oploštit.

*Nitroplícní tlak* se měří spíše z výzkumných než diagnostických důvodů, nejčastěji katétrem.

*Nitrohruďní tlak* se měří pomocí katetru, k jeho změnám dochází za přítomnosti výpotku nebo při pneumotoraxu.

#### **Mechanická práce a výkon**

Mechanická práce a výkon se měří ve fyziologii, sportovním a pracovním lékařství.



práce  $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$  [J]

výkon  $P = W / t$  [W]

Pro měření používáme bicyklový ergometr. Práci lze měřit i kalorimetrickou metodou, vycházející z předpokladu, že se všechny formy práce organismu přemění na teplo.

### Mechanické vlastnosti kapalin

Z mechanických vlastností kapalin nás zajímá:

- hustota,
- viskozita,
- proudění.



#### Měření hustoty

Výpočet hustoty podle základního vzorce  $\rho = m / V$  je principem tzv. pyknometru. Pyknometr je skleněná nádobka definovaného objemu. Váží se bez vzorku, pak se naplní vzorkem a zváží se znovu. Rozdíl naměřených hodnot (= hmotnost vzorku) dělený objemem nádoby je hustota vzorku. Jednoduchý ponorný hustoměr je založen na závislosti plynoucí z Archimédova zákona. Ponorný hustoměr (aerometr) je skleněné těleso, které se ponoří do vzorku. Po krátkém ustalovacím čase bude plavat na určité úrovni (když je hmotnost ponorného hustoměru rovná vztlakovému efektu). Čím vyšší je hustota vzorku, tím méně se ponorný hustoměr ponoří. Hladina kapaliny označuje hustotu na kalibrované škále.

Jiný princip využívají digitální hustoměry. Dutá skleněná trubice vibruje při určité frekvenci. Tato frekvence se změní, když se trubice naplní vzorkem. Čím vyšší je hmotnost vzorku, tím nižší je frekvence. Změřená frekvence se pak přepočte na hustotu.



#### Různé principy měření hustoty

[http://cs.mt.com/cz/cs/home/supportive\\_content/product\\_information\\_faq.Comparison\\_measurement\\_methods\\_for\\_DERE.twoColEd.html](http://cs.mt.com/cz/cs/home/supportive_content/product_information_faq.Comparison_measurement_methods_for_DERE.twoColEd.html)

#### Měření viskozity

K měření viskozity používáme viskozimetry, které jsou založeny na různých principech:

- výtokové – měří dobu průtoku při konstantním přetlaku laminárním prouděním definovaného objemu kapaliny kapilárou,
- tělískové – měří rychlost pádu tělíska v kapalině (viskozita je nepřímo úměrná rychlosti pádu), nebo výstup bubliny v kapalině,
- rotační – měří sílu působící kapaliny, jsou velmi přesné, ale používají se pouze k technickým účelům
- ultrazvukové – útlum ultrazvukových kmitů ocelového jazýčku ponořeného v kapalině.

### Měření proudění

V medicíně se nejčastěji měří proudění krve v cévách. Využívá ultrazvuku a tzv. Dopplerova jevu.

### Dopplerův jev:

**Zdroj akustického signálu se pohybuje relativně vůči pozorovateli. Přibližuje-li se zdroj zvukového vlnění, vnímá pozorovatel vyšší kmitočet, vzdaluje-li se zdroj, vnímá kmitočet nižší.**

Základními odrazovými strukturami v proudící krvi jsou erythrocyty. Kmitočet odražené vlny se liší od kmitočtu vysílaného. Rozdíl mezi frekvencí vysílané a přijaté vlny je úměrný rychlosti pohybující se krve. Vysílací frekvence se pohybuje v rozmezí 2 – 10 MHz.

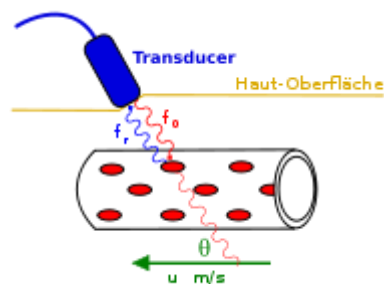


Schéma Dopplerovského měření rychlosti proudění krve

Zdroj: [http://cs.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9ka%C5%99sk%C3%A1\\_ultrasonografie](http://cs.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9ka%C5%99sk%C3%A1_ultrasonografie)

### Mechanické vibrace a zvuk

Měří a hodnotí se ozvy a šumy v kardiovaskulárním systému, používáme upravené mikrofony (fonokardiografie). Mezi metody hodnotící zvuk patří perkuse – poklep, která zjišťuje kvalitu ozev, při patologických změnách se liší svou ozvučností.

### 8.2.2 Měření teploty

Řada patologických procesů je spojena se změnami teploty těla, měření teplota je jedním ze základních diagnostických procesů. Teplota se neměří přímo, využívá známých fyzikálních jevů, které prokazují závislost jiných fyzikálních veličin na teplotě:

- teplotní délková a objemová roztažnost,
- závislost měrného odporu vodičů a polovodičů,
- termoelektrický jev,
- závislost vlnové délky vyzařování na povrchové teplotě zdroje.

Bezkontaktní měření teploty je založeno na měření intenzity infračerveného záření vyzařované povrchem. Z důvodu rychlého, jednoduchého a hygienického způsobu měření se dnes ve zdravotnictví s tímto způsobem měření tělesné teploty běžně setkáme. Měříme buď teplotu na čele nebo teplotu ušního bubínku (ušní bezkontaktní teploměry).



### 8.2.3 Elektrodiagnostické metody

Měříme signály aktivní – detekce, záznam a analýza elektrických napět'ových změn vznikajících při činnosti vzrušivých tkání (svalová, nervová) – nebo pasivní (vyšetření schopnosti tkání reagovat na elektrické podněty).

#### Aktivní elektrodiagnostické metody

##### *Elektrokardiografie EKG*

je nejstarší elektrodiagnostická metoda. Membrána vláknů myokardu prochází během srdečního cyklu čtyřmi fázemi elektrických změn (viz kapitola 5.2.2.1). Napět'ové změny při depolarizaci a repolarizaci se šíří k povrchu těla, odkud je můžeme snímat. Snímáme prostřednictvím končetinových svodů (nejstarší), které umíst'ujeme na pravé a levé zápěstí a dolní část levého bérce. Při rozpažení tvoří snímací body rovnostranný trojúhelník, srdce leží přibližně v

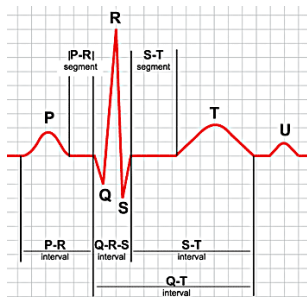
**EKG**



jeho středu. Snímání je možné také prostřednictvím 6 svodů hrudních, které rozmístíme na hrudní stěně v oblasti srdce (V1 - V6).

V klinické praxi používáme 12svodový záznam, který má 3 končetinové svody bipolární (zachycují rozdíl mezi dvěma aktivními elektrodami), 3 končetinové svody unipolární (zachycují potenciální rozdíl mezi aktivní elektrodou a elektrodou indifferenční) a 6 unipolárních hrudních svodů. Pod elektrody dáváme vrstvu vodivého gelu.

Grafický záznam elektrické srdeční aktivity v čase se nazývá elektrokardiogram, při jeho hodnocení posuzujeme tvar, časové úseky, amplitudy.



- vlna P (depolarizace síní)
- kmit QRS (depolarizace komor, překrývá repolarizaci síní)
- vlna T (repolarizace komor)



EKG záznam. Zdroj: [http://www.yarousch.cz/studium/image/ekg\\_krivka\\_normal.gif](http://www.yarousch.cz/studium/image/ekg_krivka_normal.gif)

Historicky zavedl elektrokardiografii jako klinickou metodu r. 1906 holandský lékař E. W. Einthoven (1860-1927). V roce 1924 dostal Nobelovu cenu za medicínu. Podrobněji na [http://en.wikipedia.org/wiki/Willem\\_Einthoven](http://en.wikipedia.org/wiki/Willem_Einthoven).



### Elektromyografie EMG

Elektromyografie patří mezi vyšetřovací techniky, které lékaři napomáhají hodnotit funkční stav pohybového systému a jeho inervace. K vyšetření se používá přístroj zvaný elektromyograf. Měří a registruje činnostní potenciály kosterních svalů, snímá povrchové nebo intramuskulární svalové aktivity. Zaznamenává změnu elektrického potenciálu, ke které dochází při svalové aktivaci.

EMG

Měří se rychlost vedení vzruchu ve stimulovaném nervu a velikost elektrické odpovědi na stimulaci ve svalu nebo v jiném místě nervu. Elektrickou

svalovou aktivitu lze zaznamenávat buď jehlovými elektrodami zavedenými skrz kůži do svalu nebo povrchovými elektrodami umístěnými na kůži nad bříškem svalu. Jehlová elektromyografie měří vzruchy na menších svalových oblastech na tzv. motorických jednotkách (motorická jednotka je soubor svalových vláken zásobených jedním nervovým vláknem). EMG signál získaný pomocí povrchových elektrod však ve srovnání s jehlovými elektrodami umožňuje globálnější posouzení EA svalu díky větší ploše, ze které je záznam získáván. Rovněž je snadněji použitelný při různých pohybových aktivitách. Výsledkem vyšetření je EMG křivka.

### *Elektroencefalografie EEG*

#### EEG

EEG je standardní neinvazivní metodou funkčního vyšetření elektrické aktivity centrálního nervového systému. Sumační signály z neuronů jsou snímány elektrodami z povrchu hlavy. Slouží k záznamu elektrické aktivity mozku, která má původ ve změnách polarizace neuronů mozkové kůry. Používají se povrchové elektrody, unipolární i bipolární, 16 kanálů. Zachycená napětí dosahují hodnot 5 až 200  $\mu\text{V}$ , frekvence 1 až 60 Hz. Hodnocení spočívá v amplitudové a frekvenční analýze signálu.

Základní typy EEG vln:

- Vlny alfa:  $f = 8-13$  Hz, amplituda do 50  $\mu\text{V}$ , rytmus charakteristický pro tělesný i duševní klid;
- Vlny beta:  $f = 15-20$  Hz, amplituda 5-10  $\mu\text{V}$ , rytmus zdravého člověka v bdělém stavu;
- Vlny théta:  $f = 4-7$  Hz, amplituda nad 50  $\mu\text{V}$ , fyziologický u dětí, u dospělého člověka patologický;
- Vlny delta:  $f = 1-4$  Hz, amplituda 100  $\mu\text{V}$ , za normálních okolností v hlubokém spánku, v bdělém stavu je patologický.



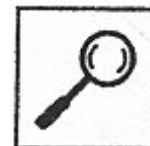
### *Elektroretinografie ERG*

je metoda, která detekuje a registruje elektrické aktivity sítnice oka. Snímají se pomocí unipolárních svodů; diferentní elektroda bývá zabudována do kontaktní čočky, indiferentní se přikládá na spánek. Zaznamenávané napětí má hodnotu 0,4 – 1,1 mV.

*Celoplošný, světlem vyvolaný elektroretinogram (ERG) je záznam difúzní elektrické odpovědi generované fotoreceptory a nervovými buňkami sítnice.*

*Tato elektrická odpověď je výsledkem změn pohybu iontů v sítnici, zvláště draslíkových a sodíkových, vyvolaných světelným podnětem. Tyto sítnicové elektrické potenciály mohou být zaznamenány u všech obratlovců i u řady bezobratlých organismů.*

*Poprvé sejmul potenciály z rybiho oka v roce 1865 švédský fyziolog Holmgren, který je však mylně považoval za akční potenciály zrakového nervu.*



### *Elektrohysterografie EHG*

je metoda registrující elektrické děje v děloze během kontrakcí.

### **Pasivní elektrodiagnostické metody**

Mezi pasivní elektrodiagnostické metody patří vyšetření nervosvalové dráždivosti – schopnosti tkáně reagovat na elektrické podněty. Používá se k diagnostice periferních paréz (hodnotí stupeň postižení, průběh a výsledek terapie).

Využívá stejnosměrný proud, který má dráždivé účinky jen při změně, používá se pro kvalitativní hodnocení. Nízkofrekvenční proudy se používají pro kvantitativní elektrodiagnostiku:

- stanovení prahové intenzity (reobáze)
- stanovení času potřebného k vyvolání podráždění při použití proudu o velikosti dvojnásobku prahové hodnoty (chronaxie)

### **8.2.4 Optické metody**

Optické metody jsou založené na interakci biologického materiálu se světlem. Patří sem mikroskopie, refraktometrie, polarimetrie, spektrofotometrie, nefelometrie a turbidimetrie.

Optické přístroje dělíme na dvě skupiny:

- Přístroje zobrazovací – cílem je získat více informací o sledovaném předmětu. Podle toho zda je obraz skutečný nebo neskutečný dělíme tyto přístroje na objektivní a subjektivní.
- Přístroje laboratorní, které využívají vlastnosti světla a jeho interakce s prostředím k měřicím účelům.

#### 8.2.4.1 Přístroje zobrazovací



##### Metody mikroskopie

- optická mikroskopie
- elektronová mikroskopie
- akustická mikroskopie

##### *Optický mikroskop*

Klasický optický mikroskop je dvoustupňová soustava, která je složena z objektivu, okuláru a osvětlovací soustavy. Objektiv vytváří skutečný, zvětšený a převrácený obraz, který okulárem pozorujeme jako lupou. Výsledný obraze je neskutečný, zvětšený a převrácený. Kondenzor umožňuje dokonalé osvětlení zorného pole.

*Mikroskopie*

##### *Rozlišovací mez mikroskopu*

Mají-li zobrazované předměty velikost srovnatelnou s vlnovou délkou, začne docházet k ohybovým jevům, které zobrazení znehodnotí. Ernst Karl Abbé stanovil, že vzdálenost dvou bodů, které je možno rozlišit, je přímo úměrná vlnové délce použitého světla, nepřímo úměrná indexu lomu prostředí mezi objektivem a krycím sklíčkem preparátu. Imerzní objektivy mezi čelem objektivu a krycím sklíčkem nemají vzduch, ale imerzní kapalinu (př. cedrový olej,  $n=1,52$ ), což vede ke zvýšení rozlišovací schopnosti.

##### *Zobrazovací metody světelné mikroskopie:*

- metoda světlého pole – pozorujeme procházející nebo odražené světlo od preparátu;



- metoda temného pole – paprsky osvětlující preparát nevstupují do objektivu, pozorujeme paprsky předmětem rozptýlené, lomené, po ohybu;
- metoda fázového kontrastu – používáme pro biologické preparáty, zviditelnění objektů, které se od okolí liší indexem lomu;
- ultrafialová mikroskopie – zvýšení rozlišovací schopnosti, záznam fotograficky, optika z křemenného skla;
- infračervená mikroskopie – pro silné preparáty, záznam na IČ citlivé materiály;
- polarizační mikroskopie – kombinace světelného mikroskopu a polarimetru;
- interferenční mikroskopie – pozoruje fázový rozdíl paprsků;
- fluorescenční mikroskopie – biologické objekty, intenzivní světelný zdroj.

Optické vady mikroskopových objektivů:

- Otvorová vada (sférická)
- Barevná vada (chromatická)

Obě vady se korigují, podle stupně korekce se objektivy dělí na achromáty, semiapochromáty, apochromáty, planachromáty, planapochromáty.

### *Elektronová mikroskopie*

využívá pro zobrazení předmětů urychlené elektronové svazky. I elektronům lze přisoudit vlnovou délku (de Broglieova hmotnostní vlna), vysoce urychlené elektrony mají kratší vlnovou délku

( $\lambda = h / m \cdot v$ ). Chod paprsků ovlivňujeme elektrostatickými nebo magnetickými čočkami. Rozlišovací schopnost je desetiny nm.

TEM – transmisní elektronová mikroskopie využívá průchodu elektronového svazku objektem, vyžaduje vysoké vakuum, vzorky jsou ultratenké řezy, náročné na přípravu, umístění ve vakuu.

REM – rastrovací elektronová mikroskopie využívá principu, kdy úzký elektronový paprsek přejíždí povrch preparátu po řádcích. Má nižší rozlišení než TEM, umožňuje pozorovat trojrozměrnou strukturu.





#### Akustická mikroskopie

Využívá akustických kmitů o extrémně vysoké frekvenci (1,55 GHz, rychlost  $550 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , vln. délka  $1 \mu\text{m}$ ). Detektory jsou piezoelektrické snímače, poskytují informace především o mechanických vlastnostech prostředí.

### Endoskopie

Endoskopie je metoda umožňující prohlédnutí vnitřních tělesných dutin nebo dutých orgánů. Do těchto dutin se endoskop zavádí přirozenými otvory (např. ústy, konečníkem, močovou trubicí) či otvory uměle pro tento účel vytvořenými (u laparoskopie, mediastinoskopie).

#### Endoskopie

Její rozvoj byl ovlivněn technickým vývojem v oblasti optiky (ohebná vlákna vedoucí světlo) a videotechniky. Jde o řadu vyšetření nazývaných podle vyšetřovaného orgánu (vyšetření žaludku – gastrokopie, průdušek – bronchoskopie, močových cest – cystoskopie aj). Kromě pohledu umožňuje též odběr vzorků (biopsie) k dalšímu vyšetření.

Endoskopie ohebnými (flexibilními) přístroji je pro pacienta poměrně málo zatěžující. Vedení optického signálu vláknem je založeno na principu úplného odrazu světla.

#### 8.2.4.2 Přístroje laboratorní

##### Refraktometr

Refraktometrie je metoda, která se používá k měření indexu lomu látek, nejčastěji kapalin. Refraktometry jsou optické přístroje, které slouží k měření indexu lomu. Index lomu se měří buď pomocí lomu světla nebo pomocí interference. Nepřímo můžeme stanovit koncentrace roztoků. Index lomu  $n$  je poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v daném prostředí



$$n = c/v .$$

Při přechodu světla z opticky řidšího do opticky hustšího nastává lom světla ke kolmici a při přechodu z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí nastává lom od kolmice. Úplný odraz nastane, je-li úhel lomu větší než  $90^\circ$ , světlo pak neprochází do druhého prostředí. K úplnému odrazu dojde, když je

úhel dopadu větší než tzv. mezní úhel. Index lomu  $n$  závisí na vlnové délce záření – při průchodu prostředím se bílé světlo rozloží na jednotlivé složky (tento jev se nazývá disperze světla).

*Různé principy měření indexu lomu*

[http://cs.mt.com/cz/cs/home/supportive\\_content/product\\_information\\_faq.Comparison\\_measurement\\_methods\\_for\\_DERE.twoColEd.html](http://cs.mt.com/cz/cs/home/supportive_content/product_information_faq.Comparison_measurement_methods_for_DERE.twoColEd.html)



## Polarimetr

Polarimetrie je metoda měření stáčení roviny lineárně polarizovaného světla opticky aktivními látkami nebo jejich roztoky. Velikost úhlu stočení je závislá na koncentraci.

Polarizace světla je jev, při kterém se projevuje příčný charakter světelného vlnění. U lineárně polarizované vlny vektory elektrické intenzity a magnetické indukce kmitají ve stále stejných rovinách.

Polarizovat znamená vybrat ze všech kmitových rovin pouze jednu. Polarizovat můžeme pouze vlnění příčné. Nepolarizované světlo – vektor  $E$  kmitá v rovině kolmé ke směru šíření světla, ale v různých směrech. Polarizované světlo – vektor  $E$  kmitá jen po jedné přímce.

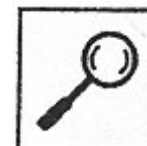
Přirozené světlo lze polarizovat odrazem a lomem, dvojlomem a absorpcí (polaroidy). Odražené světlo je zcela polarizováno pouze při určitém úhlu dopadu ( $\alpha_B$  - Brewsterův neboli polarizační úhel, který závisí na indexu lomu  $n = \tan \alpha_B$ ).



### *Polarizace světla*

*V roce 1669 udělal Erasmus Bartholinus (1625-1698) podivuhodný objev. Zjistil, že krystal islandského vápence může rozložit dopadající světelný paprsek ve dva podružné paprsky, které se rozdílně lámou. Pozorujeme-li tímto krystalem jeden předmět, vidíme jeho obraz dvojitě. Tyto paprsky se liší svou polarizací. Směr polarizace odpovídá směru kmitání elektrického pole. V dvojlomném krystalu působí rozdílný směr polarizace rozdílný index lomu (tzv. optická anizotropie). Přirozené světlo není polarizováno, to znamená, že sestává z vln všech možných polarizačních směrů.*

*Videoukázka: <http://www.aldebaran.cz/animace/dvojlom.avi>*



Oko nerozliší světlo polarizované a přirozené, k tomu používáme polarizátor a analyzátor. Při otočení analyzátoru o 90° pole ztmavne. Podle úhlu natočení roviny polarizovaného světla po průchodu roztokem měříme koncentrace látek schopných stáčet rovinu polarizovaného světla (např. koncentrace glukózy v moči).

### Spektrofotometr

Spektrofotometrie je metoda, která se používá pro stanovení koncentrací látek absorbujících nebo vyzařujících IČ, viditelné nebo UV světlo.

Spektrofotometry jsou absorpční (využívají selektivní pohlcování vlnových délek), které se skládají ze zdroje světla – monochromátoru – vzorku a detektoru. Emisní spektrofotometry využívají vyzařování charakteristických vlnových délek látky v plameni. V moderních přístrojích jsou klasické zdroje záření často nahrazeny lasery.



#### *Absorpční spektrofotometrie*

měří úbytek intenzity světla procházejícího velmi tenkou vrstvou absorbujícího roztoku, který je úměrný intenzitě  $I$  světla vstupujícího, koncentraci roztoku  $c$ , tloušťce vrstvy  $dx$  a konstantě  $k$ :

Lambert-Beerův zákon

$$I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon c x}$$

$\epsilon$  – absorpční koeficient, najdeme ho v tabulkách, závisí na vlnové délce světla

### Nefelometr a turbidimetr

Tyto přístroje využívají rozptylu záření na heterogenních částicích v koloidních roztocích; velikost částic je srovnatelná s vlnovou délkou zdroje. Prochází-li světlo zakaleným prostředím, pak se na malých částicích ohýbá a rozptyluje – cesta svazku je viditelná.

Nefelometrie se používá ke stanovení koncentrací disperzí v kapalinách, měří se absorbance světla, srovnává se s intenzitou světla v kapalině o známých





vlastnostech. Turbidimetrie měří poměr intenzity světla rozptýleného a dopadajícího.

### 8.2.5 Detekce ionizujícího záření

Detektory ionizujícího záření slouží ke zjištění přítomnosti ionizujícího záření a obvykle i měření intenzity. Dozimetrie měří energii absorbovanou v prostředí. Využívají se principy tepelné (v lékařství zřídka), elektrické, optické (optoelektronické) a chemické.

#### *Chemické a fotochemické detektory*

Fotografické metody jsou založeny na schopnosti ionizujícího záření způsobovat zčernání fotografické emulze, využívají se v osobních dozimetrech. Chemická dozimetrie využívá hodnocení chemických reakcí iniciovaných zářením (radiolýzou vody vznikají volné radikály a ty dále reagují).



#### *Elektrické metody*

využívají schopnosti záření při své cestě látkovým prostředím tvořit ionty. Historicky prvním detektorem založeným na tomto principu je elektroskop. Mezi nejdůležitější detektory patří Geiger-Müllerův počítač. Používá se pro měření nízkých intenzit částicového záření. Jako detektory se používají také polovodiče, u kterých ionizací dochází ke zvýšení vodivosti.

#### *Optické detektory*

jsou v medicíně nejdůležitější zařízení pro detekci ionizujícího záření. Jsou součástí výpočetních tomografů a gama-kamer. U scintilačního počítače při absorpci ionizujícího záření dochází ke scintilaci, tj. vzniku malých záblesků viditelného světla (důsledek deexcitačních a rekombinačních procesů). Jedna strana pouzdra scintilátoru je průhledná – spojená s okénkem fotonásobiče (speciální vakuová elektronka k měření slabých světelných toků). Pro měření se využívá fotoelektrického jevu – elektrony vyražené z fotokatody jsou dále přitahovány a urychlovány dalšími elektrodami (dynody) – zesílený napěťový impuls je detekován a počítán. Velikost napěťového pulsu závisí na energii částice – lze proměřovat i energetická spektra záření.

### 8.3 Metody zobrazovací

Moderní zobrazovací metody umožňují lékařům pohlédnout do nitra lidského těla bez nutnosti invazivního zásahu. Mimo endoskopických metod, kdy můžeme obraz vyšetřované části pozorovat přímo, u ostatních zobrazovacích metod je nutné původní signál převést do formy viditelného obrazu.

Patří sem termografické zobrazovací metody, ultrazvukové a dopplerovské zobrazovací metody, rentgenové zobrazovací metody, výpočetní tomografie, radionuklidové metody, NMR.



Charakteristiky používaného záření a vlnění v diagnostickém zobrazování					
Druh záření	gama záření	rentgenové záření	infračervené záření	rozhlasové vlny	ultrazvukové vlnění
vlnová délka (m)	$10^{-13} - 10^{-12}$	$10^{-10}$	$10^{-5}$	$1 - 10^4$	$10^{-4}$
mechanismus vzniku	přechody v jádře	přechod vnitřních elektronů v atomu	vibrace molekul	pohyb elektronů	mechanické vlnění hmotného prostředí
umělý zdroj	betatron radioizotopy	rentgenka	tělesa s teplotou $> 0$ (K)	elektrický obvod	piezoelektrický krystal
detekce	ionizační, scintilační polovodičové detektory		termočlánky polovodičové detektory	elektrický obvod	piezoelektrický krystal
zobrazovací metoda	nukleární medicína	klasická radiografie, CT, DSA	termografie	magnetická rezonance	sonografie
	elektromagnetické záření				mechanické vlnění

(DSA – digitální substrakční angiografie)

### 8.3.1 Metody využívající mechanické vlnění

#### Ultrazvuková diagnostika

Ultrazvuk je mechanické vlnění způsobené oscilací částic v prostředí.

Ultrazvukové vlny mají frekvenci vyšší než 20 kHz. K lékařské aplikaci je vhodné frekvenční pásmo mezi 2 a 30 MHz. Užití ultrasonografie je limitováno fyzikálními parametry tkání - nelze vyšetřovat porézní tkáně (kosti, plíce), které velmi účinně tlumí přenos ultrazvukové energie a vytváří akustický stín. Naopak měkké tkáně a dutiny vyplněné tekutinou jsou pro sonografii velmi vděčným objektem.

V medicíně se využívá vlnění podélné, s frekvencí  $10^6$  až  $10^7$  Hz

$$\lambda = v \cdot T = v/f$$

Rychlost šíření  $v = \sqrt{K/\rho}$ ,  $K$  = modul objem. pružnosti

v měkkých tkáních organismu  $v = 1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Ultrazvukové (USG) vlnění se odráží, láme nebo ohýbá na rozhraní dvou prostředí s různou akustickou impedancí.

#### Šíření USG vlnění

USG vlnění se šíří tkání rychlostí danou obsahem vody ve tkáni. Kapaliny jsou nejvodivějším prostředím, protože hustota a soudržnost elementárních částic je větší a jejich elasticita je též velká. V kapalinách se šíří jen podélné vlnění, protože většina kapalin neklade odpor při namáhání smykem. Živá tkáň se svými vlastnostmi více blíží kapalině a z toho důvodu se v ní také šíří pouze podélné ultrazvukové vlny.

Tuhé látky mají velkou hustotu a soudržnost elementárních částic, elasticita tohoto prostředí je malá. V prostředí s větší hustotou se ultrazvuk šíří rychleji, avšak prostředí mu klade větší odpor a tím omezuje dosah šíření vln. V plynech je rychlost šíření ultrazvukových vln malá, protože soudržnost a hustota elementárních částic je malá.

Pro rozhraní dvou prostředí můžeme spočítat poměr  $R$  z hodnot akustické impedance na rozhraní dvou prostředí.

Pokud:

$R = 0$  homogenní prostředí, nedochází k odrazu

$R \rightarrow 0$  měkké tkáně s podobnou impedancí

$R \rightarrow 1$  rozhraní měkká tkáň a kost nebo vzduch



Šíření  
ultrazvuku ve  
tkáních

Na rozhraní plyn/tuk se odrazí asi 98% a na rozhraní kost/tuk asi 50% ultrazvukové energie. Z toho vyplývá, že plyn ve střevě a větší množství tuku v mezenteriu prakticky znemožňuje vyšetření velké části břišní dutiny. K minimalizování ztrát při přenosu ultrazvukové energie do vyšetřované oblasti je nutno mezi sondu a kůži pacienta aplikovat vhodné imerzní prostředí (speciální gely, oleje, tuky, voda), které navíc vyrovná případné nerovnosti.

### *Ultrazvukový přístroj*

Ultrazvukové přístroje dělíme na diagnostické a terapeutické (sem řadíme např. přístroje fyzioterapeutické, ultrazvukové rozbíječe kamenů – tzv. lithotripty, a odstraňovače zubního kamene). Diagnostické ultrazvukové přístroje slouží ke zjišťování informací o interakci ultrazvukové energie s tkání, jejíž fyzikální vlastnosti ji ovlivňují. Tím zprostředkují přenos diagnostické informace. Každý ultrazvukový přístroj musí obsahovat tyto hlavní funkční bloky: sondu, elektronickou aparaturu, zobrazovací jednotku (monitor) a ovládací panel.



*Ultrazvukový 3D záznam*  
Zdroj: [http://mm.denik.cz/21/06/ultrazvuk3d\\_130511\\_denik\\_clanek\\_solo.jpg](http://mm.denik.cz/21/06/ultrazvuk3d_130511_denik_clanek_solo.jpg)



*Ultrazvukový záznam*  
Zdroj: <http://www.zdn.cz/clanek/postgradualni-i-medicina/vaginalni-porod-po-cisarskem-rezu-449541>

## **8.3.2 Metody využívající elektromagnetické vlnění**

### **8.3.2.1 Využití ionizujícího záření**

#### **Rentgenové zobrazovací metody**

V roce 1895 Wilhelm Conrad Röntgen pořídil první snímek části lidského těla. Výhodou zobrazování rentgenovým zářením je jeho relativně nízká cena a přesnost, nevýhodou je zátěž pacienta ionizujícím zářením. Principem tvorby obrazu je rozdílná absorpce a rozptyl rentgenového záření v různých částech lidského těla.

### *Rentgenové záření (RTG)*

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění o vlnové délce  $10^{-9}$  až  $10^{-12}$  m. Rentgenové záření proniká hmotou i vakuem, jeho intenzita slábne se čtvercem vzdálenosti od zdroje záření a šíří se přímočaře. Rtg záření má luminiscenční, fotochemický a biologický efekt a vyvolává ionizaci.

Je to záření brzdné, vzniká všude tam, kde rychle letící elektrony (pod anodovým napětím nejméně 15 kV) zabrzdí o pevnou plochu, 99 % energie elektronů se přemění na teplo, jen 1 % na rentgenové záření. V radiologii se používá jako zdroj záření rentgenka, kde zdrojem elektronů je žhavená spirálka katody a brzdnou plochou anoda.



### *Rentgenka*

Rentgenka je skleněná baňka s velmi vysokým vakuem. Uvnitř nesmí zůstat žádné částice vzduchu, protože by se ionizovaly a elektrony by se nekontrolovaně přidávaly do proudu směřujícího na anodu. Katoda je záporná elektroda, jejíž hlavní částí je spirálka z wolframu. Žhavicím proudem se spirálka zahřeje na 1 800°C, uvolňují se elektrony, které vytvářejí elektronový mrak. Fokusační misky jej stahují do úzkého svazku, protože elektrony jsou odpuzovány záporným napětím na misce.

Po zapojení anodového napětí, které je mezi anodou a katodou (v diagnostice se používá 40-120 kV), elektrony letí na anodu, kde se zabrzdí a vzniká rentgenové záření. Anoda musí být z kovu o vysokém bodu tání, nejmodernější anody jsou pokryty vrstvou grafitu.

*Energie záření* je nepřímo závislá na vlnové délce. Čím je kratší vlnová délka, tím má záření větší E, tím je tvrdší. Naopak měkké záření má delší vlnovou délku, je méně průrazné, více se absorbuje.

*Intenzita záření* ubývá se čtvercem vzdálenosti, zvětšíme-li vzdálenost z 50 cm na 100 cm, intenzita záření se sníží čtyřikrát a naopak. Velikost intenzity záření závisí hlavně na množství elektronů dopadajících na anodu v rentgence, tedy na žhavicím proudu. Zeslabení RTG záření závisí hlavně na tloušťce vrstvy, kterou prochází.



### *Absorpce rentgenového záření*

Procházející svazek rentgenového záření je zeslaben

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

$I$  – intenzita záření po průchodu vrstvou,  $I_0$  – vstupující intenzita

$d$  – tloušťka vrstvy

$\mu$  – absorpční koeficient

Tento koeficient závisí především na tzv. efektivním protonovém čísle prostředí, které je dáno průměrem protonových čísel přítomných prvků s přihlédnutím k jejich relativnímu zastoupení. Závisí také na energii procházejícího záření a druhu interakce fotonů s prostředím.

### *Vznik rentgenového obrazu*



Absorpce rtg záření závisí na třetí mocnině vlnové délky a na třetí mocnině atomového čísla. Rozdíl v absorpci záření v jednotlivých tkáních lidského těla je základem vzniku obrazu na filmu nebo obrazovce. Tkáň obsahující převážně těžké prvky – jako je vápník – absorbuje velké množství záření a na filmu nebo obrazovce CT je potom bílá. Naopak tkáň, kde je podstatnou součástí voda nebo lehké prvky, jsou na snímku tmavé. Rentgenové záření na filmu redukuje Ag, které je po vyvolání na filmu černé. V molekulách AgBr, které nejsou osvíceny zářením, se stříbro neredukuje a místo zůstává bílé.

### *Rentgenový snímek:*



RTG snímek, Zdroj: [http://www.kardio-motol.cz/dbpic/rtg\\_plice-](http://www.kardio-motol.cz/dbpic/rtg_plice-)

## Výpočetní tomografie (CT)

(CT – computerised/computed tomography)

První snímek byl tímto postupem vytvořen v r. 1971. Za její objev obdržel v r. 1979 Angličan Hounsfield Nobelovu cenu. Obraz není stínem na filmu, ale jde o matematickou rekonstrukci příčného řezu tělem pacienta – obraz je získán z řady rentgenových projekcí získaných postupně z různých úhlů.

Výpočetní tomografie kombinuje klasické rentgenové vyšetření s počítačovým systémem, který informace zpracovává (vypočítává obraz).

Snímek se tedy neexponuje na rentgenový film (jako u obyčejného RTG vyšetření), ale z jednotlivých řezů snímku je matematicky spočítán.

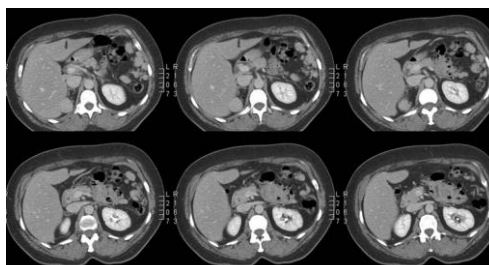
Pokročilejší počítačové programy umí z CT snímků vytvořit i trojrozměrný obraz skenovaného objektu.

CT vyšetření lze rozdělit na nativní a s kontrastem. Při CT vyšetřeních s kontrastem se člověku píchne do žíly kontrastní látka.

Výhodou je, že CT umožňuje zobrazit a rozlišit i málo kontrastní měkké tkáně. To je dáno tím, že scintilační detektory jsou velmi citlivé, citlivější, než emulze klasického filmu. Geometrická rozlišovací schopnost je u výpočetní tomografie menší než 0,5 mm.



CT přístroj, Zdroj: <http://fnch.nic.in/CT-Scan.jpg>



CT snímek, Zdroj: <http://gamma.wustl.edu/si005ct194.gif>

## Radionuklidové zobrazovací metody

Nukleární medicína má význam v diagnostice, terapii a lékařském výzkumu. Hlavní oblasti diagnostického využití radionuklidů jsou stopování (tracing), radioimmunoassay, vyšetřování fyziologie orgánů a zobrazení orgánů nebo částí těla.

Radionuklidové vyšetřovací metody in vivo jsou takové metody, při nichž je pacientovi podáno do organismu radioaktivní farmakum. Pak je proměřována radioaktivita buď přímo v pacientovi nebo v odebraném vzorku.

Radionuklidové vyšetřovací metody in vitro jsou takové metody, kdy je pacientovi odebrán vzorek jeho biologického materiálu a ten je následně pracován.



#### Stopování a radioimmunoassay

Při tzv. stopování je radionuklid zaveden do organismu a poté je sledován, zjišťuje se radioaktivita ve vzorcích získaných z organismu.

Radioimmunoassay – RIA – je metodou klinické biochemie a hematologie, užívá se pro stanovení velmi malých množství látek, např. hormonů.

Radionuklid je aplikován mimo tělo (vyšetření in vitro).

U obou metod se používají zejména beta zářiče, protože detektor může být přiblížen těsně ke vzorku (zdroji záření).

#### Scintilační počítač



Scintilační počítač je zařízení, které umožní detekci záření pouze z určitého úhlu (má olověný kolimátor), takže odstíní rušivé záření. Impulsy detektoru jsou zaznamenány a zapisovány.

Využívají se dva způsoby měření:

- detektor je stabilní – měří se radioaktivita v jednom místě v závislosti na čase;
- detektor se pohybuje – získá se „mapa“ rozložení radionuklidu.

Používá se k vyšetření ledvin, štítné žlázy; používají se zářiče gama jódu-131 a technecium-99.

#### Gama-kamera

je v podstatě scintilační detektor, ke scintilacím dochází v rozměrném scintilátoru (krystalu jodidu sodného). Pro získání obrazu musí definovaný bod scintilátoru odpovídat definovanému bodu části těla – toho se dosáhne kolimátory. Gama kameru lze použít pro sledování rychlých procesů (např. průtok krve).

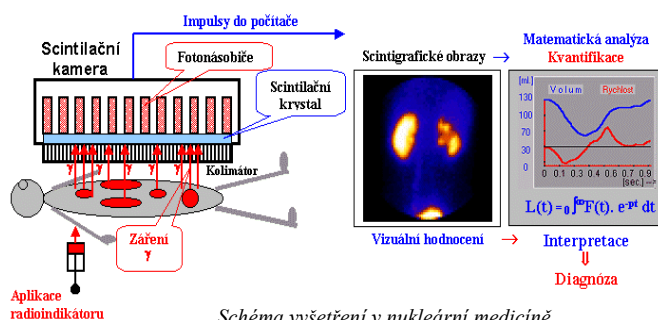


Schéma vyšetření v nukleární medicíně

Zdroj: <http://astronuklfvzika.cz/>



*SPECT a PET*

SPECT (jednofotonová emisní výpočetní tomografie) a PET (pozitronová emisní tomografie) patří k nejpokročilejším diagnostickým radionuklidovým metodám. Zatímco u CT je zdroj záření mimo tělo pacienta, zde je uvnitř těla, avšak způsob získání obrazu příčného řezu je obdobný.

*SPECT*

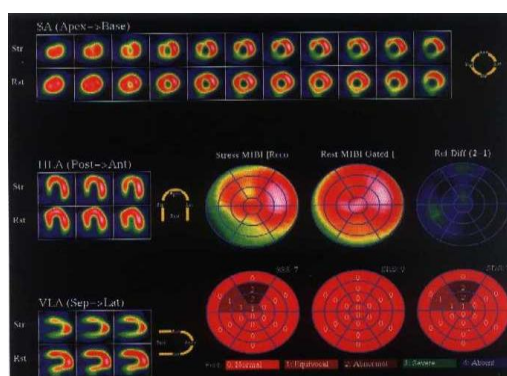
Při vyšetření pomocí SPECT je do těla zaváděn radionuklid emitující záření gama. Jednotlivé fotony jsou detekovány z různých směrů, což umožňuje dvourozměrnou rekonstrukci.

Při záznamu buď detektor krouží kolem těla, kolem vyšetřovaného krouží gama-kamera nebo jsou scintilační detektory uspořádány kolem těla do kruhu nebo čtverce. Používají se běžné zdroje záření gama (jód-131, technecium-99).

*PET*

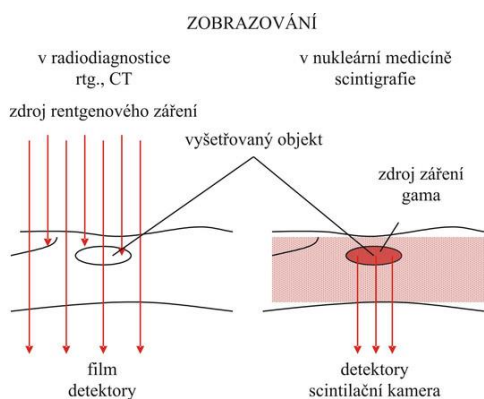
Při vyšetření pomocí PET se používají pozitronové zářiče. Radionuklidy biogenních prvků C, O, N mají velmi krátké poločasy rozpadu, zdroje radionuklidů musí být k dispozici v blízkosti.

Pozitrony urazí jen krátkou dráhu, rychle anihilují za vzniku dvou kvant záření gama – obě musí být současně detekována. PET je jedna z mála metod pro sledování vyšší nervové činnosti na úrovni mozkových center a lze ji použít i pro zobrazení funkční. PET má vyšší rozlišovací schopnost než SPECT.



Zobrazení SPECT kamerou. Zdroj: <http://astronuklfyzika.cz/>

K pochopení rozdílu mezi radiodiagnostickým (klasickým rentgenovým a CT) vyšetřením a nukleární medicínou poslouží následující obrázek.



### 8.3.2.2 Využití neionizujícího záření

#### Magnetická rezonanční tomografie – MRI

##### (Magnetic Resonance Imaging)

Metoda magnetická rezonanční tomografie je založena na analýze jevu nukleární magnetické rezonance (NMR) v živých objektech. Vložíme-li atomová jádra s nenulovým magnetickým momentem do vnějšího silného stacionárního homogenního magnetického pole, budou mít snahu orientovat svůj vlastní magnetický moment ve směru vektoru  $B$  vnějšího pole.

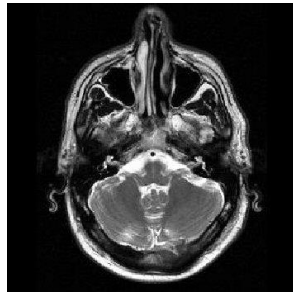
Systém přijme kvantum elektromagnetické energie a přitom se dostane do vyššího energetického stavu. Návrat do základního stavu je možný jednak vyzářením kvanta elektromagnetické energie (signál NMR) a jednak relaxací (není spojena s emisí záření).



##### *MRI – princip získání obrazové informace*

Jevu NMR lze dosáhnout působením vnějšího pole s konstantní  $B$  a hledáním energie (frekvence) elektromagnetického vlnění schopnou vyvolat jadernou rezonanci nebo pracujeme s konstantní energií elektromagnetického záření (frekvencí) a hledáme hodnotu  $B$  (toho se využívá v MRI) – použijeme nehomogenní magnetické pole, vytvoříme gradient pole. Musí být dodrženy přísné požadavky na stínění vyšetřovací místnosti.

MRI má velký klinický význam, poskytuje vysoce kontrastní zobrazení měkkých tkání, nevyužívá ionizujícího záření. Má však vysokou pořizovací cenu a provozní náklady.



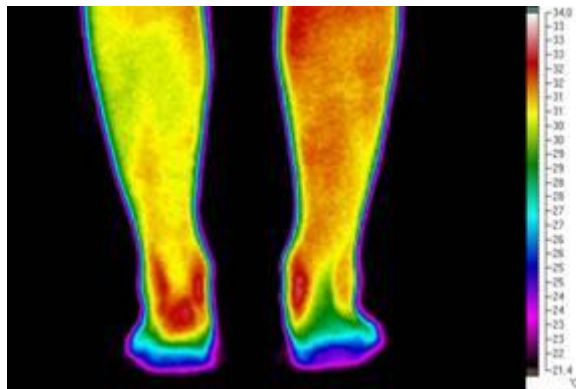
Výsledný obraz vyšetření NMR. Zdroj: [http://www.mr-tip.com/exam\\_gifs/brain\\_mri\\_transversal\\_t2\\_001.jpg](http://www.mr-tip.com/exam_gifs/brain_mri_transversal_t2_001.jpg)

### Termografie, termovize

Termografie je metoda, která podává informaci o rozložení teplot na povrchu zkoumaného tělesa. Používá metody kontaktní a bezkontaktní.

Kontaktní termografie využívá vlastnosti kapalných krystalů (přechod mezi kapalinami a pevnými látkami), závislosti jejich barvy na teplotě.

Bezkontaktní termografie využívá detekce IČ záření vyzařovaného povrchem těla. Snímání se uskutečňuje na dálku pomocí optoelektronických systémů – termovizní kamera. Získáme barevně rozlišené rozložení povrchových teplot.



Termovizní záznam

Zdroj: [http://www.fsps.muni.cz/pages/termo\\_pic/termografie\\_clip\\_image006.jpg](http://www.fsps.muni.cz/pages/termo_pic/termografie_clip_image006.jpg)

### 8.3.3 Další metody využívající fyzikální principy

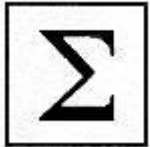
#### **Elektrická impedanční tomografie (EIT)**

Mnohé nádory a patologické změny tkání mají odlišnou elektrickou vodivost (schopnost propouštět elektrický proud) od elektrické vodivosti okolních zdravých tkání.

Elektroimpedanční počítačový mamograf umožňuje znázornit rozložení elektrické vodivosti v několika příčných řezech a má řadu předností v porovnání se systémy s dvourozměrným zobrazením. U těchto systémů není zajištěno prostorové hloubkové zobrazení a na výsledný obraz mohou mít vliv stav kůže a podmínky skenování. Tomograf ale umožňuje detailnější zobrazení s možností přesného určení hloubky a místa patologického procesu.



*Je určen k vizualizaci a diagnostice patologických změn v prsu a jiných měkkých tkání těla. Prostřednictvím sondy s pozlacenými elektrodami vtéká do tkáně elektrický proud, který, pokud narazí na nějakou překážku, jako je třeba zánět, cysta, nádor a podobně, se zpomalí. Počítačový program posléze umožní vyhodnotit naměřené hodnoty elektrické vodivosti a zobrazit je na monitoru ve formě 3D obrázku. Tato metoda může být doplněk stávajících diagnostických metod, vyšetření prsu, štítné žlázy, jater, ledvin, dělohy, vaječníků ...*



## Shrnutí kapitoly

- Biosignál je zdrojem informací o biologickém systému.
- Biosignály vznikající v organismu jeho aktivní činností nazýváme biosignály vlastní.
- Pokud organizmus svou činností ovlivňuje (moduluje) impuls vyslaný do organismu z vnějšího zdroje, nazýváme tyto biosignály modulované (zprostředkované).
- Mezi metody měřící a záznamové patří měření mechanických veličin (tlak, viskozita, hustota), měření teploty, elektrodiagnostické metody (EKG, EMG, EEG), optické metody (mikroskopie, refraktometrie, spektrofotometrie, polarimetrie) a detekce ionizujícího záření.
- Moderní zobrazovací metody umožňují lékařům pohlédnout do nitra lidského těla bez nutnosti invazivního zásahu. Patří mezi ně zejména ultrasonografie, zobrazování rentgenovým zářením, radionuklidové metody (SPECT, PET), využití jevu nukleární magnetické rezonance.



## Kontrolní otázky a úkoly:

1. Jaký je rozdíl mezi tzv. vlastním a modulovaným biosignálem?
2. Jaké mechanoelektrické měniče využíváme pro měření tlaku?
3. Kterého fyzikálního jevu využívá bezkontaktní termografie?
4. Jaké znáte zobrazovací metody světelné mikroskopie?
5. Kterou fyzikální veličinu měří refraktometrie?
6. Jaké frekvenční pásmo ultrazvuku se využívá v lékařské diagnostice?
7. Jaké spektrum elektromagnetického záření využívá počítačová tomografie (CT)?
8. Jaké jsou výhody zobrazení pomocí jevu NMR?

### **Korespondenční úkoly**

1. Zpracujte přehledně (nejlépe v tabulce) frekvence využívané v ultrazvukové diagnostice včetně dopplerovských metod. Řešení si dopište i zde v textu na zbývající volné místo na stránce.





### Citovaná a doporučená literatura

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Grada, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3

### Elektronické zdroje

- <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>
- [http://www.eyecentrum.cz/mr\\_faq.html](http://www.eyecentrum.cz/mr_faq.html)
- přehledně zpracované porovnání CT a MRI (v angličtině)  
[http://www.diffen.com/difference/CT\\_Scan\\_vs\\_MRI](http://www.diffen.com/difference/CT_Scan_vs_MRI)

## 9 Léčebné metody využívající fyzikální působení

**V této kapitole se dozvíte:**

- jak je možné využít fyzikální efekt působení na živý organismus k terapii

**Po jejím prostudování byste měli být schopni:**

- vysvětlit jaké fyzikální efekty můžeme terapeuticky využít,

**Klíčová slova kapitoly:** kardiostimulátor, litotripse, gama nůž

### Průvodce studiem

*Fyzikální působení na živý organismus můžeme využít nejenom k diagnostice, ale také k terapii. V následující kapitole najdete jenom ty nezákladnější principy využití – mechanické působení, ionizující záření, teplo, chlad ...Je to poslední krátká kapitola, na jejíž zvládnutí vám postačí jedna hodina studia.*



Fyzikální léčebné metody (fyzikální terapie) je soubor metod využívajících fyzikálních energií jako jsou např. světlo (LASER, Biolampa), ultrazvuk, elektrická energie, indukční pole, tepelná energie a další.

Při aplikaci se využívají různé fyzikální jevy:

- využití mechanické energie
  - ultrazvuková terapie
  - litotripse rázovými vlnami
- využití účinků elektrického proudu
- léčba magnetickým polem
- teploléčebné metody
- léčba optickým zářením
- léčba ionizujícím zářením

## 9.1 Využití částí spektra elektromagnetického vlnění

### 9.1.1 Elektrické pole

#### Léčebné metody využívající elektrický proud



*Stejnoseměrný proud:*

- iontoforéza – vpravování léků s elektrickým nábojem do tkání, aplikuje se pomocí dvou elektrod
- galvanizace – zvýšení místního metabolismu, urychlení tkáňové difuze, snížení bolestivosti.

*Střídavý proud:*

Využívá se dráždivých účinků pro elektrostimulace:



- proudy s rychlým nástupem – elektrogymnastika, léčení poruch srdečního rytmu,
- proudy s pomalým nástupem – dráždění denervovaných svalů, dráždění hladkého svalstva,
- defibrilátor – obnovení srdeční akce při její zástavě, jeden velký impuls způsobí současnou depolarizaci všech vláken myokardu,
- kardiostimulátor – stimulace,
- neurostimulátor – uplatní se diagnosticky i léčebně,
- elektrostimulace periferních nervů a kosterních svalů,
- elektrostimulační dýchání - působením proudu na dráždivý bod
- elektrošok – v psychiatrii, využívá nízkofrekvenční proud.

Léčebně se využívá i tepelného efektu vysokofrekvenčního proudu při průchodu tkání (diatermie).

K léčbě se využívají také tzv. diadynamické proudy, které kombinují galvanickou a pulsační složku. Účinky jsou analgetické, resorpční, antiedematické, tonizační.

Interferenční proudy jsou proudy, kdy používáme dva okruhy s malým rozdílem frekvencí, a směřujeme je tak, aby docházelo v požadované oblasti ke



křížení proudů. Dochází ke zvýšení prokrvení, další účinky jsou analgetické a tonizační, s rostoucí frekvencí tepelné.

### 9.1.2 Magnetické pole

Magnetoterapie je poměrně nová metoda, opírající se především o empirické poznatky. Používají se statická nebo střídavá magnetická pole. Účinky jsou magnetoelektrické, v elektricky vodivém prostředí vznikají elektrické proudy, mají však nízká napětí oproti membránovému napětí buněk. U polí vysokých intenzit se projeví účinky magnetomechanické.

*Využití  
magnetického  
pole*

Léčebné účinky:

- Zvýšení prokrvení
- Uvolnění svalových spasmů
- Snížení bolestivosti
- Protizánětlivé působení
- Protiedémové působení

Aplikace probíhá pomocí elektromagnetů. Hodnota magnetické indukce se pohybuje v rozsahu 5 – 80 mT, doba působení 1 až 45 minut.

### 9.1.3 Infračervené záření

#### **Teploléčebné metody**

Pomocí programovaného zásahu do termoregulačního systému člověka můžeme vyvolat pozitivní odezvu. Teploléčba tedy využívá tepelné podněty, které můžeme rozdělit na pozitivní (teplo dodáváme) a negativní (teplo odebíráme). Podle aplikace se dělí na lokální a celotělové.

Léčebné metody využívají převodu tepla:

- vedením – zábaly a obklady
- prouděním – vodoléčba, kombinuje se i s působením mechanickým (koupele, skotské stříky, vířivé koupele, podvodní masáž, sauna)
- sáláním – př. solux
- využívá se také tepelného účinku vysokofrekvenčních proudů (>100 kHz) – diatermie a tepelného působení ultrazvuku.

*Teploléčebné  
metody*

### *Léčba chladem*

Na extrémně nízké teploty reaguje organismus celkovou mobilizací. Dochází k zvýšení prokrvení a tím zásobení tkání kyslíkem, aktivuje se metabolismus, odplavení škodlivin lymfatickou a krevní cestou. Stimuluje se tvorba hormonů podporujících dobrou náladu i ostatních, aktivuje se imunitní systém a protizánětlivé procesy, snižuje se vnímání bolesti.

Aplikace extrémního chladu neboli celotělová chladová terapie (CChT) patří mezi fyzikální lázeňské metody, které používají střídavých účinků vysokých a nízkých teplot obdobně jako sauna. V zařízení pro celotělovou kryoterapii (Polárium) je lidský organismus vystaven extrémnímu chladu  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pobyť ve speciální kryokomoře trvá 2 až 3 minuty a je velmi příjemný. Chlad účinkuje intenzivně na celé tělo, mobilizuje a aktivuje organismus a velmi příznivě působí na celkový zdravotní stav. Tělo se díky mrazu výrazně prokrví, zrychluje vyplavování škodlivých produktů metabolismu, urychluje hojení zranění a odstraňuje pozůstatky zánětů. Hluboký mráz návštěvníkovi kryokomory neublíží, neboť se jedná o upravený suchý vzduch, technicky absolutně zbavený vlhkosti.

#### 9.1.4 Viditelné záření

Léčba elektromagnetickým zářením *v rozsahu viditelné části spektra*, případně jeho ultrafialové a infračervené oblasti, využívající účinku energie fotonů nachází široké uplatnění v mnoha oborech moderní medicíny.

Léčba světlem – tzv. fototerapie využívá jednak nepolarizované záření (UV, nepolarizované světlo, IR) nebo záření polarizované (laser, biolampa). Využívá i účinků slunečního světla (pozitivní vliv na psychiku).

*Využití elmag.  
záření*

Při léčení laserovým zářením se používají lasery s výkonem max. do 500 mW, obvykle polovodičové lasery o vlnových délkách 630 – 900 nm. Účinky jsou zejména:

- analgetické – snížení dráždivosti buněčných membrán
- protizánětlivé – aktivace monocytů a makrofágů
- biostimulační – zvýšená syntéza kolagenu

Podobné účinky jako nízkovýkonový laser má léčba polarizovaným světlem (protizánětlivé, biostimulační).

Využití fotodynamického účinku je využití cytotoxického působení fotocitlivé látky na buňku; látka je aktivována působením světla vhodné vlnové délky (používají se deriváty hematoporfyrinu, ftalocyaniny). Fotodynamickým účinkem jsou porušeny energetické pochody v buňce, které vedou k její smrti. Využívá se při léčení nádorů, především kožních.

Mezi léčebné využití je možné zahrnout i využití laserového záření v chirurgii. Laserové záření je koherentní monochromatické záření, které má obvykle velkou hustotu energie. Podle energie pak můžeme pozorovat interakce s tkání:

- Fotochemická (10<sup>1</sup> - 10<sup>2</sup> Wcm<sup>-2</sup>)
- Fototermální (10<sup>2</sup> - 10<sup>6</sup> Wcm<sup>-2</sup>)
- Fotoablativní (10<sup>7</sup> - 10<sup>10</sup> Wcm<sup>-2</sup>)
- Fotoplazmatická (> 10<sup>11</sup> Wcm<sup>-2</sup>)

Fotochemických účinků se využívá při fotodynamické terapii a biostimulaci. Fototermálních účinků se využívá v chirurgii ke koagulaci až vaporizaci (řezání), vysokých intenzit se využívá k vaporizaci a drcení konkrémentů.

### 9.1.5 Ionizující záření

Léčba ionizujícím zářením (radioterapie) se uplatňuje především při léčbě nádorových onemocnění. Nejcitlivější na účinky ionizujícího záření jsou buňky nediferencované a buňky s vysokou mitotickou aktivitou a tedy negativních účinků ionizujícího záření se využívá pro odstranění nežádoucích novotvarů v organismu. Cílem je zničení nádoru a co nejmenší poškození okolní zdravé tkáně. Ozařování se provádí před operací i po ní, může být i samotným léčebným postupem u pokročilých neoperovatelných nádorů.

Účinky závisí na dávce záření a na dávkovém příkonu, na použitém druhu záření, na metabolickém stavu organismu. Ionizující záření poškozuje nejen buňky nádoru, ale i buňky normální tkáně, důležitá je správná lokalizace nádoru. Využívá se zdrojů radioaktivních i neradioaktivních – rentgenové záření.

Radioterapie (ozařování) je v současné době jednou z nejúčinnějších metod léčby onkologických onemocnění. V radioterapii se uplatňují moderní zobrazovací metody – výpočetní tomografie (CT), magnetická rezonance (MR), ultrazvuk nebo třeba pozitronová emisní tomografie (PET). S využitím těchto metod lze dobře stanovit rozsah onemocnění a zacílit tak ozáření s velkou přesností.

*Leksellův  
gama nůž*

### **Gama nůž**

K cílené radiační léčbě se používá tzv. Leksellův gama nůž. Používá se v radiochirurgii pro ozařování lézí v mozku, u něhož je potřeba maximální přesnosti zaměření. Přístroj využívá záření gama – elektromagnetické záření izotopu  $^{60}\text{Co}$ , které má vyšší energii než záření rentgenové. Hlava se upevní do speciální helmy, ve které jsou kobaltové zářiče, které jsou všechny zaměřeny na jedno místo, tedy nedochází k poškození okolní tkáně. Obdobným zařízením je ozařovací přístroj CyberKnife – kybernetický nůž – robotický ozařovač, který se ale nespécializuje pouze na oblast mozku.



*Pro zájemce: <http://cyberknife.fno.cz/>*

## **9.2 Využití mechanického působení**

### **Ultrazvuková terapie**

Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz, jeho účinky jsou způsobeny absorpcí energie v tkáních.

Intenzita do  $1,5 \text{ W cm}^{-2}$  má pozitivní účinek na funkci tkání, do  $3 \text{ W cm}^{-2}$  jsou změny reverzibilní, při intenzitě vyšší než  $3 \text{ W cm}^{-2}$  dochází k ireverzibilním změnám, destrukci buněk, jádra, denaturaci bílkovin.

Působení ultrazvukového vlnění na organismus:

- mechanické účinky – zhušťování a zředování prostředí, tlakové změny při kmitání molekul, mechanické poškození
- tepelné účinky – třením kmitajících částic
- fyzikálně chemické a disperzní účinky – excitace molekul, urychlení chemické reakce, příprava jemné suspenze
- chemické a elektrochemické účinky – depolymerizace nebo polymerizace

*Využití  
mechanické  
energie*

Následné biologické účinky jsou kombinace výše zmíněných účinků:

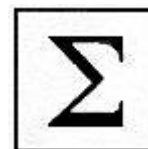
- zvýšení prostupnosti membrán, zrychlení difúze
- porušení vodivosti nervových vláken, útlum, analgetický účinek
- změna pH
- analgetický účinek
- změkčování vazivové tkáně
- zvýšení místního kr. oběhu, zvýšení metabolismu

### Litotripse rázovými vlnami

ESWL Extracorporeal Shock-Wave Litotripsy je metoda spočívající v rozrušení kamene mechanickým účinkem. Fyzikální princip je založen na rozdílu akustické impedance kamene a okolní měkké tkáně počet vln potřebných k rozrušení kamene je asi 1000.

### Shrnutí kapitoly

- Terapeuticky využíváme mechanickou energii (ultrazvuková terapie, litotripse), účinky elektrického proudu, magnetického pole, tepla a chladu, vybraných částí spektra elektromagnetického záření (optické, ionizující).



### Citovaná a doporučená literatura

- ROSINA J., KOLÁŘOVÁ H. a J. STANEK *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*, Garda, 2006, ISBN 80-247-1383-7
- NAVRÁTIL L. a J. ROSINA *Medicínská biofyzika*. 1. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4. (vybrané kapitoly)
- HRAZDIRA I., MORNSTEIN V. a J. ŠKORPÍKOVÁ *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006, ISBN 80-86850-01-3



**... na závěr**

*Pokud jste při svém studiu dospěli až na tuto poslední stránku, nezbyvá než popřát Vám hodně úspěchů u zkoušky nebo zápočtového testu.*

*Snad byl pro Vás předchozí text srozumitelný a přehledný, alespoň to bylo mým záměrem. Těm z vás, kteří mají dobré základy ze střední školy, se možná zdál hodně jednoduchý a příprava ke zkoušce bude jenom krátká.*

*Pokud byste měli zájem o další informace z oboru, v textu vám nějaká kapitola chybí, využijte nabídky doporučené literatury případně osobní nebo elektronické konzultace.*

*Stejně tak máte možnost konzultace i vy, kteří jste na tom obráceně – základy z fyziky ze střední školy máte slabé nebo téměř žádné a text se Vám zdál příliš složitý a ne vše je Vám úplně jasné.*

*autorka*

*hana.sochorova@osu.cz*

