

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

DISERTAČNÍ PRÁCE

PhDr. Jan Duršpek

Plzeň, 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta pedagogická

Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy

Studijní program: Specializace v pedagogice

Studijní obor: Teorie vzdělávání ve fyzice

Fyzika živých systémů

Optika a termodynamika živých systémů

Jan Duršpek

Školitel: RNDr. Jitka Prokšová, PhD.

Plzeň 2012

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a veškeré použité prameny uvedl v seznamu použité literatury.

V Plzni dne 20. 12. 2012

PhDr. Jan Duršpek

Děkuji všem, kteří mně umožnili vytvoření této práce, jmenovitě:

své školitelce, RNDr. Jitce Prokšové PhD., za obrovskou trpělivost a cenné rady,

své manželce Marušce a dceři Sofince za obětování mnoha hodin mého volného času této práci.

OBSAH

1. ÚVOD	12
1.1 BIOLOGIE, CHEMIE A FYZIKA	13
1.2 MOTIVACE	14
1.3 OPTIKA V ŽIVÉ PŘÍRODĚ	14
1.4 TECHNICKÉ A „PŘÍRODNÍ“ VYNÁLEZY	14
1.5 TERMODYNAMIKA V ŽIVÉ PŘÍRODĚ	15
2. STRUKTURA A METODIKA DISERTAČNÍ PRÁCE	16
2.1 TIŠTĚNÁ ČÁST	16
2.2 WEBOVÉ STRÁNKY	16
2.3 VIDEOZÁZNAMY NELINEÁRNÍCH NEŽIVÝCH SYSTÉMŮ	17
2.4 TÉMATICKÉ PROBLÉMY ŘEŠENÉ V PROGRAMU MS EXCEL	19
3. DIDAKTICKÉ ASPEKTY	20
3.1 MEZIOBOROVÉ VZTAHY A RÁMCOVĚ VZDĚLÁVACÍ PROGRAMY	20
3.1.1 RÁMCOVĚ VZDĚLÁVACÍ PROGRAMY	20
3.1.2 KLÍČOVÉ KOMPETENCE	21
3.1.3 VZDĚLÁVACÍ OBLASTI	21
3.2 DIDAKTIKA MEZIOBOROVÝCH VZTAHŮ A NEUROFYZIOLOGIE	23
3.2.1 NEUROFYZIOLOGIE KOGNITIVNÍCH PROCESŮ	23
3.2.2 DIDAKTIKA A NEURONOVÉ SÍTĚ	24
3.2.3 DIDAKTIKA, MOTIVACE, EMOCE A LIMBICKÝ SYSTÉM	25
3.2.4 CÍL VÝUKY, INTELIGENCE	26
3.3 FYZIKA – CESTA K OBECNÉ BIOLOGII?	27
3.4 APROXIMACE A MODELY VE FYZICE	29
4 TERMODYNAMIKA V PŘÍRODĚ	33
4.1 SYSTÉM A OKOLÍ	33
4.1.1 TEORETICKÉ ZÁKLADY	33
4.1.2 PŘENOS TEPLA	34
4.1.3 PŘENOS LÁTKY	35
4.2 ZMĚNY VNITŘNÍ ENERGIE	36
4.2.1 TEPLOTA	37
4.2.2 FÁZOVÉ PŘECHODY	38
4.2.3 CHEMICKÉ REAKCE	38
4.3 VÝVOJ SYSTÉMU	40
4.3.1 ENTROPIE	40
4.3.2 LINEÁRNÍ SYSTÉMY	41
4.3.3 NELINEÁRNÍ SYSTÉMY	41
4.4 DISIPATIVNÍ STRUKTURY	43
4.4.1 OSCILAČNÍ REAKCE	43
4.4.2 REAKČNĚ DIFÚZNÍ SYSTÉMY	45
4.4.3 HYDRODYNAMICKÉ NESTABILITY	45

5. OPTIKA V PŘÍRODĚ	46
5.1 GEOMETRICKÁ OPTIKA	47
5.1.2 ZRCADLO	48
5.1.3 ČOČKA	49
5.1.4 ABERACE	50
5.2 VLASTNOSTI ZOBRAZENÍ	52
5.2.1 ROZLIŠENÍ	53
5.2.2 CÍTLIVOST	54
5.2.3 DETEKCE	55
5.2.4 AKOMODACE	55
5.3 VLNOVÁ OPTIKA	57
5.3.1 VLNOVÁ DÉLKA	58
5.3.2 INTERFERENCE	58
5.3.3 DIFRAKCE	59
5.3.4 POLARIZACE	60
5.4 SVĚTLO A LÁTKA	62
5.4.1 ROZPTYL SVĚTLA	63
5.4.2 ABSORPCE	63
5.4.3 LUMINISCENCE	64
5.5 OKO	65
5.5.1 VÝVOJ OKA	66
5.5.2 KOMOROVÉ OKO	67
5.5.3 SLOŽENÉ OKO	67
6 BIOLOGIE A TECHNIKA	69
6.1 OPTICKÉ VLNOVODY	69
6.2 ZRCADLO, NEWTONŮV TELESKOP A KOUTOVÉ ODRAŽEČE	69
6.3 ČOČKA	71
6.4 ČOČKA S NEHOMOGENNÍM INDEXEM LOMU (OPTIKA GRIN)	71
6.5 OBJEKTIV A ACHROMATICKÁ ČOČKA	72
6.5 FOTOAPARÁT A DÍRKOVÁ KOMORA	73
6.6 OPTICKÁ CLONA	74
6.7 OPTICKÉ FILTRY V PŘÍRODĚ	74
6.8 EXPOZICE	75
6.9 DETEKTORY OBRAZU	75
6.10 AKOMODACE A ZOOM	76
6.11 DIFRAKČNÍ MŘÍŽKY	76
6.12 VYUŽITÍ POLARIZACE SVĚTLA K NAVIGACI	77
6.13 FLUORESCENCE	78
6.14 TEPELNÝ VÝMĚNÍK	79
7 ZÁVĚR	80
8 POUŽITÁ LITERATURA	81
8.1 OPTIKA	81
9.2 TERMODYNAMIKA	87
9.3 WEBOVÉ STRÁNKY	89

Abstract

Physics of Living Systems

The aim of my PhD thesis is to present physical laws, as applied in nature. The resulting texts are trying to explain many phenomena that can be observed in living organisms by physical laws. The work focuses on two areas of physics: thermodynamics and optics. The thesis is connected to creation of two web projects „Thermodynamics in Nature“ and „Optics in Nature“. MS Excel was used for the calculation of some tasks and part there was created some video recordings of experiments of open nonlinear systems for the thermodynamics. In the optical part of the thesis we show the parallel application of the same principles in technology and in biology.

The resulting website should be a tool for students and teachers of secondary schools, and for teaching of interdisciplinary courses at some universities (biophysics, physiology of plants and animals, etc.). There are several motivations for this work. Living world around us is part of our experience from birth. Names of the parts of the body are our first words and animals are favorite topics of child images. In elementary school we get first answers to the questions why and how things „work.“ In the higher grades, the individual subjects of natural sciences (biology, chemistry and physics) are taught. The division into these disciplines corresponds to the level of description surrounding world and the methodology, which is applied to them.

Abstrakt

Fyzika živých systémů

Cílem mé disertační práce je představit uplatnění fyzikálních zákonů v živé přírodě. Hlavním výstupem jsou webové stránky, které se snaží vysvětlit mnoho jevů, které lze pozorovat v živé přírodě fyzikálními zákony. Práce se zaměřuje na dvě oblasti fyziky: termodynamiku a optiku. Práce je spojena s vytvořením dvou internetových stránek „Termodynamika v přírodě“ a „Optika v přírodě“.

Součástí disertační práce je popis a videozáznamy nelineárních neživých systémů (Bénardových buněk, chemických oscilací a vln), které byly provedeny jako experimenty v laboratoři Katedry chemie ZČU již v rámci diplomové práce. Součástí zejména optické části práce je prezentace paralelního uplatnění fyzikálních principů v přírodě a technice. Některé problémy byly kvantitativně analyzovány pomocí programu MS Excel. V optické části práce ukážeme souběžné použití stejných principů v technologii a v biologii. Webové stránky jsou určeny studentům a učitelům středních škol i pro výuku interdisciplinárních kurzů na univerzitní úrovni (biofyzika, fyziologie rostlin a živočichů, atd.).

1. Úvod

Živý svět, který nás obklopuje, je součástí naší zkušenosti od narození. Pojmenování částí těla patří mezi naše první slova a zvířata jsou oblíbeným námětem dětských obrázků. Na základní škole získávají žáci první poznatky o přírodě nejprve v hodinách přírodovědy, později se vyprofilují jednotlivé předměty přírodních věd – biologie, chemie a fyzika, které se dále vyučují v různé míře na jednotlivých typech středních škol. Rozdělení na tyto disciplíny odpovídá úrovni popisu okolního světa i metodologii, která se v nich uplatňuje.

1.1 Biologie, chemie a fyzika

V biologii se studenti učí pojmenovat, poznat a utřídit organizmy do jednotlivých skupin na základě podobných znaků, zasazené do paradigmatu evoluční teorie. Součástí výuky biologie jsou i obecné informace o základní jednotce živého organismu – buňce o jejím dělení, funkci, a roli v mnohobuněčném organismu a o funkci vyšších celků – tkání (plektiv) a orgánů. V chemii je hlavním předmětem zájmu látka a její složení. Učivo obecné chemie se do značné míry překrývá s učivem fyziky. V systematické chemii se studenti zabývají anorganickými látkami o jednoduchém chemickém složení a nahlédnou i do světa složitých organických molekul, včetně základních enzymatických reakcí probíhajících v buňkách.

V jednotlivých disciplínách fyziky se studenti na středních školách seznamují se základními fyzikálními zákony a snaží se je interpretovat. Měří fyzikální veličiny a učí se vztahy mezi nimi. Svět, který popisují pomocí fyzikálních veličin a na jehož pozadí interpretují fyzikální zákony je většinou neživý, z prostého důvodu – je výrazně jednodušší. I tento svět je obvykle dále zjednodušován idealizacemi jako je hmotný bod, nestlačitelná tekutina, ideální plyn, rovnoměrný přímočarý pohyb, aby jeho popis matematický popis odpovídal úrovni střední školy.

Ačkoliv přírodu poznáváme prostřednictvím zmíněných disciplín, příroda sama je pouze jedna. Nedělí se na biologii, chemii a fyziku. Tvar těla, možnost pohybu, i schopnost živočichů či rostlin vnímat okolní svět podléhá fyzikálním zákonům stejně jako příroda neživá. I přes složitost živého světa, můžeme některé jeho zákonitosti popsat jednoduchými fyzikálními poučkami odpovídajícími úrovni středoškolské fyziky.

1.2 Motivace

Disertační práce se snaží přispět k myšlenkovému propojení oborů fyziky a biologie. Snaží se hledat odpovědi na takové otázky, které si naši žáci a studenti mohou klást např. při nedělní procházce jarní přírodou. Proč se to vlastně na jaře začíná zelenat a ne třeba červenat nebo modrat? A to listí, kolik tvarů listu existuje? Je některý tvar výhodnější než jiný, proč jich neexistuje jen několik odpovídající základním klimatickým podmínkám? A co ten brouk co leze přes cestu? Je to první brouk, kterého letos vidíte. Kde v zimě byl, jak je možné, že nezmrzl? Teploty byly v zimě často pod nulou, v těle brouka by voda zamrzla a krystaly by buňky porušily. A proč jsou vlastně brouci tak malí, proč nejsou stejně velcí jako ptáci?

1.3 Optika v živé přírodě

Disertační práce se zaměřuje na dvě oblasti fyziky – optiku a termodynamiku. Proč byly zvoleny právě tyto dvě disciplíny? Pro námi vytyčený cíl je optika velmi vděčná disciplína. Světlo, které je předmětem zájmu této disciplíny, je definováno na základě optického vjemu zprostředkovaného našimi smysly. Optika je tedy již svou podstatou na pomezí fyziky a biologie. Z hlediska moderní fyziky je to pouze malá, tradiční část nauky o elektromagnetizmu. Využívá s výhodou aproximací na několika úrovních, pomocí nichž lze velmi dobře vysvětlit např. zobrazování optickými soustavami. Diverzita vnímání světla u živočichů či způsob vzniku barev, nebo jevy jako luminiscence či fotosyntéza poskytují obrovské množství materiálu, jehož reprezentativní a pokud možno přehledný vzorek se snaží disertační práce prezentovat.

1.4 Technické a „přírodní“ vynálezy

V části práce zabývající se optikou ukazujeme paralelní uplatnění stejných fyzikálních principů v technice a biologii. Analogie mezi technickými vynálezy a „vynálezy“ přírody je zdrojem dvojí inspirace. První je inspirace přírodními „vynálezy“ k rozvoji techniky. Druhá inspirace vede k novému náhledu na biologii, včetně její didaktiky. Studenti se v hodinách biologie učí zejména druhové rozmanitosti v rámci evoluční teorie, v rozumném měřítku podle stupně školy či jejího zaměření, podle geografické oblasti, ve které žijí. Uvažujme však jinou rozmanitost, rozmanitost struktur a jejich funkcí odpovídající různým fyzikálním principům. Mohl by být tento pohled alternativou k podobě obecné biologie, tak jak je dnes vyučována na středních školách, nebo její částí?

1.5 Termodynamika v živé přírodě

Středoškolská fyzika se termodynamiky dotýká pouze prostřednictvím termiky a molekulové fyziky. Je to fenomenologická disciplína, za jejíž kostru můžeme považovat šest základních axiomů (čtyři zákony termodynamiky a dva termodynamické postuláty). Některé základní pojmy jako např. teplo či entropie jsou definovány právě až na základě těchto axiomů. Pojem teplo úzce souvisí s 1. termodynamickým zákonem a pojem entropie s 2. termodynamickým zákonem. Pojem práce dostává nový obsah odlišný od toho, jaký se studenti učí v mechanice, více se vzdaluje laickému obsahu pojmu práce, který známe z naší každodenní zkušenosti. Termodynamika je v rámci disertační práce prezentována ve dvou oblastech. První oblast odpovídá klasické termodynamice, překrývající se s úrovní popisu na střední škole a na nižším stupni vysoké školy. Ústředními tématy jsou teplota, přenos tepla a látky, fázové přechody, z nichž je pro živočichy nejdůležitější krystalizace vody (jako limit přežití v chladném podmínkách), a chemické reakce jako základní zdroj energie.

Druhá oblast využívá poznatky nerovnovážné termodynamiky a navazuje na diplomovou práci „Moderní termodynamika v biologických a chemických procesech“ obhájenou autorem na KOF ZČU v Plzni v roce 2005.

2. Struktura a metodika disertační práce

2.1 Tištěná část

Tištěnou část disertační práce tvoří kromě úvodních a technických kapitol několik základních oblastí, které budou probrány v dalším textu:

- aproximace v optice a termodynamice
- problematika mezioborových vztahů a její využití při výuce
- biologie a technika
- úvodní texty jednotlivých kapitol webových stránek optiky a termodynamiky

2.2 Webové stránky

Text webových stránek je strukturován do čtyř (u termodynamiky) nebo pěti (u optiky) okruhů. Každý okruh zahrnuje čtyři témata. Každé téma se dělí na tři až deset kapitol. Dané téma uvádí vždy krátký shrnující text. Shrnující texty jsou součástí tištěné práce (kap. 5 a 6). Každá kapitola představuje jednu webovou stránku.

Oko	Vlastnosti zobrazení	Geometrická optika	Vlnová optika	Světlo a látka
Vývoj oka	Rozlišení	Základní principy	Vlnová délka	Rozptyl
Komorové oko	Citlivost	Zrcadlo	Interference	Absorpce
Složené oko	Detekce	Čočka	Difrakce	Luminiscence
Pohyby oka	Akomodace	Aberace	Polarizace	Fotosyntéza

Tab.1: Struktura projektu „Optika v přírodě“.

Projekt „Optika v přírodě“ je rozdělen do pěti hlavních okruhů (viz tabulka výše). Okruhy geometrická a vlnová optika jsou základní aproximace elektromagnetického záření, tak jak jsou vyučovány na střední škole. Geometrická optika zahrnuje též téma aberace popisující vady zobrazení optických soustav, která obvykle není součástí středoškolské výuky, ale v případě zraku živých organismů hraje velmi důležitou roli. Jednotlivé interakce záření a látky popisuje poslední okruh. Součástí tohoto okruhu je samostatné téma fotosyntéza, zařazené vzhledem ke svému významu pro život na Zemi. Okruh „Vlastnosti zobrazení“ se úzce dotýká teorie fotografování. Rozlišení a citlivost jsou dvě veličiny popisující „výkonnost“ jak oka, tak i fotoaparátu. Akomodace odpovídá „zoomu“ u fotoaparátu. Vzhledem k ústřednímu tématu optiky živých systémů – zraku – je samostatný okruh věnován oku, tento okruh má více biologický, doplňující charakter.

System a okolí	Změny vnitřní energie	Transportní jevy	Disipativní struktury
Teoretické základy	Teplota	Entropie	Oscilační reakce
Přenos tepla	Fázové přechody	Lineární systémy	Reakčně-difúzní systémy
Přenos látky	Chemické reakce	Nelineární systémy	Hydrodynamické nestability

Tab.2: Struktura webových stránek „Termodynamika v přírodě“.

Struktura webových stránek „Termodynamika v přírodě“ je znázorněn v tabulce 2, zahrnuje dvě části. První tvoří dva okruhy System a okolí a Změny vnitřní energie. Tato část se zabývá klasickou termodynamikou. Ústředními tématy jsou teplota, přenos tepla a látky, fázové přechody, z nichž je pro živočichy nejdůležitější krystalizace vody (jako limit přežití v chladném podmínkách), a chemické reakce jako základní zdroj energie.

Druhá část je tvořená okruhy Vývoj systému a Disipativní struktury představuje oblast nerovnovážné termodynamiky. Tato část navazuje na předchozí diplomovou práci (viz. následující kapitola).

Webové stránky najdeme na:

<http://jandur.cz/optics/index.htm>

<http://jandur.cz/thermodynamics/uvod.htm> .

2.3 Videozáznamy nelineárních neživých systémů

Součástí disertační práce je popis a videozáznamy nelineárních neživých systémů (Bénardových buněk, chemických oscilací a vln), které byly provedeny jako experimenty v laboratoři Katedry chemie ZČU již v rámci diplomové práce. Experimenty byly zaznamenány digitální kamerou a digitálním fotoaparátem. Videosnímky byly zkomprimovány DivX kodekem do formátu AVI. Kodek je třeba nainstalovat do PC při spuštění videosnímků v programu Windows Media Player. Kodek je součástí přiloženého CD disku.

Biologické systémy jsou z termodynamického hlediska otevřené a nelineární. Liší se tak od rovnovážných struktur běžně popisovaných v klasické termodynamice. Krystal můžeme od okolí izolovat, ale buňky umírají, jsou-li od svého okolí odděleny. Živé systémy vytvářejí nedílnou součást okolního světa, ze kterého čerpají potravu, a nemohou být odděleny od toků energie a látky, které nepřetržitě přeměňují. Jinými slovy využívají okolní energii na udržení (a zvýšení) své vlastní uspořádanosti. Živé systémy mohou tedy existovat právě jen proto, že jsou otevřené.

Není to jen živá příroda, která je modelům termodynamické rovnováhy vzdálená. Také u hydrodynamických procesů a chemických reakcí dochází k výměně částic a energie s vnějším světem. Proudící tekutina může za určitých podmínek vytvářet prostorové a časové struktury – Bénardovy buňky. Koncentrace složek autokatalytických reakcí mohou oscilovat a ve spojení s difúzí vznikají prostorově uspořádané chemické vlny.

Konvekční (Bénardovy) buňky byly pozorovány ve vývěvovém a parafínovém oleji. K zlepšení viditelnosti buněk byl do oleje přimíchán hliníkový prášek. Jako nádoba byla použita skleněná Petriho miska. Dno misky bylo zahříváno elektrickým ohříváčem. Nádoba nebyla uzavřena. Průběh experimentu byl zaznamenán digitální kamerou ve dvou fázích: při zahřívání na ohříváči a poté po přesunutí nádoby na nezahřívanou podložku. Vzhledem k nehomogenitě zahřívání a příliš rychlému vzestupu teploty, bylo lepší demonstrace Bénardových buněk dosaženo při fázi nižšího teplotního gradientu po přesunutí Petriho misky na podložku.



Obr. 1: Vznik Bénardových buněk, vlevo větší vertikální gradient teploty T , vpravo menší [foto autor].

Dalším příkladem otevřeného systému a vzniku struktur jsou chemické oscilační reakce. Jde o autokatalytické reakce, přičemž se současně s autokatalytickou látkou vytváří postupně látka inhibiční, který tuto autokatalytickou reakci inhibuje. Dochází tak k periodické oscilaci jednotlivých chemických komponent, včetně jednotlivých forem redoxních katalyzátorů, které se projevují barevným zbarvením. Pokud bychom dodávali do reakční směsi neustále reaktanty a odebírali produkty, šlo by o oscilace netlumené. Vzhledem k neustálému promíchávání systému koncentrační změny nastávají prakticky v celém objemu najednou. V tomto případě vznikají časové struktury. Tyto reakce se též nazývají chemické hodiny.

Nejznámější je Bělousovova-Žabotinského reakce. Jde o oxidaci organické látky (např. kyseliny malonové) bromičnanem, katalyzovanou redoxním katalyzátorem. Autokatalytickým meziproduktem je zde kyselina bromitá, jako inhibitor zde působí vznikající bromid. Nejčastěji používanými redoxními systémy jsou $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (bezbarvá/žlutá) a ferrin (Fe^{2+})/ferroin(Fe^{3+}) (červená/modrá), $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$ (bezbarvá/růžová). Briggsova-Rauscherova reakce je oxidace peroxidu vodíku a kyseliny malonové jodičnanem katalyzovaná manganatými ionty. Vznik jodidu a jodu lze zviditelnit přidáním škrobu (modrofialové zabarvení), perioda 10s. Perioda je různá řádově v desítkách sekund. Byly prováděny a zaznamenány následující chemické oscilační reakce:

- Bělousovova-Žabotinského reakce s manganatými ionty jako katalyzátorem,
- Bělousovova-Žabotinského reakce katalytickými systémy $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$, Ferroin (Fe^{2+}) / Ferrin (Fe^{3+}).
- Oscilace jodičnanů (Briggsova-Rauscherova reakce).

Vznik chemických vln, jako příklad nerovnovážné prostorové struktury, můžeme pozorovat v tenké vrstvě reakčního média pro Bělousovovu-Žabotinského reakci například na Petriho misce. Jde o spojení oscilační reakce a difúze.

Chemické oscilace začínají v tzv. iniciačních centrech. Ta jsou způsobena buď heterogenitami (např. prachovými částicemi, plynovými bublinkami apod.), nebo vznikají v důsledku fluktuace koncentrací reagentů, které generují chemickou vlnu. Vznik iniciačního centra v důsledku fluktuace je typický případ citlivé závislosti na výchozích podmínkách u nerovnovážných systémů. Z iniciačního centra se šíří reagenty difúzí a autokatalyticky je spuštěna oscilační reakce v určité vzdálenosti od iniciačního centra.

2.4 Tématické problémy řešené v programu MS Excel

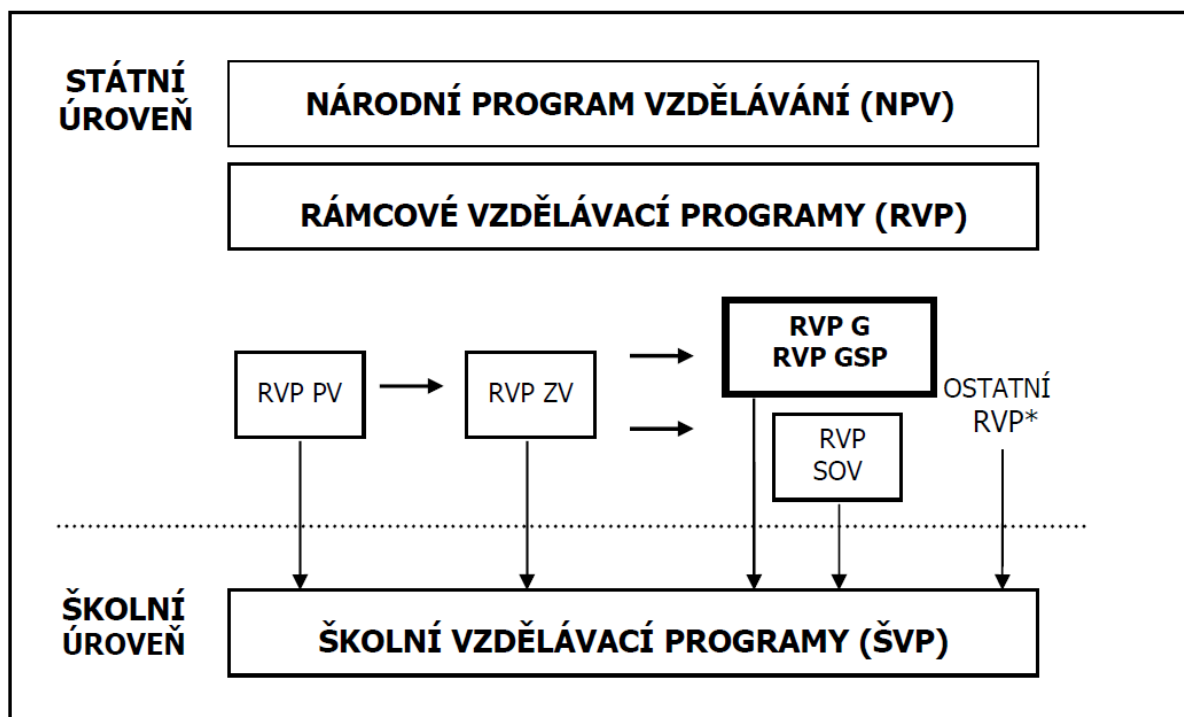
Některé komplexnější úlohy z termodynamiky a optiky živého světa byly zpracovány pomocí tabulkového programu MS Excel. Tento program jako součást balíčku Microsoft Office dnes patří k běžné softwarové výbavě počítačů. Jeho výhodou je kromě dobré dostupnosti i možnost jednoduchého přenosu dat mezi jednotlivými aplikacemi MS Office, zejm. MS Word. Výuka tohoto programu patří k základním dovednostem střední školy. Jedná se o poměrně silný matematický nástroj, kromě tabulkových vzorců můžeme prostřednictvím Maker využít programovacího jazyka Visual Basic. Řešené úlohy jsou ve formě sešitů MS Excel součástí [www stránek](http://www.stránek).

3. Didaktické aspekty

3.1 Mezioborové vztahy a rámcově vzdělávací programy

3.1.1 Rámcově vzdělávací programy

V souladu s novými principy kurikulární politiky, zformulovanými v Národním programu rozvoje vzdělávání v ČR (tzv. Bílé knize) a zakotvenými ve školském zákoně č. 561/2004 Sb, se do vzdělávací soustavy zavádí nový systém kurikulárních dokumentů pro vzdělávání žáků od 3 do 19 let. Kurikulární dokumenty jsou vytvářeny na dvou úrovních – státní a školní. Státní úroveň v systému kurikulárních dokumentů představují Národní program vzdělávání (NPV) a rámcové vzdělávací programy (RVP). Zatímco NPV formuluje požadavky na vzdělávání, které jsou platné v počátečním vzdělávání jako celku, RVP vymezují závazné rámce vzdělávání pro jeho jednotlivé etapy (pro předškolní, základní a střední vzdělávání). Školní úroveň představují školní vzdělávací programy (ŠVP), podle nichž se uskutečňuje vzdělávání na jednotlivých školách. Školní vzdělávací program si vytváří každá škola podle zásad stanovených v příslušném RVP.



Obr.2: Systém kurikulárních dokumentů: Legenda: RVP PV – Rámcový vzdělávací program pro předškolní vzdělávání; RVP ZV – Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání; RVP G – Rámcový vzdělávací program pro gymnázia; RVP GSP – Rámcový vzdělávací program pro gymnázia se sportovní přípravou; RVP SOV – Rámcový vzdělávací program (programy) pro střední odborné vzdělávání. * Ostatní RVP – rámcové vzdělávací programy, které kromě výše uvedených vymezuje školský zákon (zdroj MŠMT).

3.1.2 Klíčové kompetence

Ústředním pojmem RVP jsou tzv. klíčové kompetence. Ty představují soubor vědomostí, dovedností, schopností, postojů a hodnot, které jsou důležité pro osobní rozvoj jedince, jeho aktivní zapojení do společnosti a budoucí uplatnění v životě. Jejich výběr a pojetí vychází z toho, jaké kompetence jsou považovány za podstatné pro vzdělávání na gymnáziu. Škola by měla navrhnout a v ŠVP popsat vlastní postupy, které budou všichni učitelé využívat k cílenému rozvíjení klíčových kompetencí žáků. Tyto postupy se v ŠVP označují jako výchovné a vzdělávací strategie a uplatňují se při vyučování i v mimo výukových aktivitách. Na čtyřletých gymnáziích a na vyšším stupni víceletých gymnázií by si žák měl osvojit.

- kompetenci k učení,
- kompetenci k řešení problémů,
- kompetenci komunikativní,
- kompetenci sociální a personální,
- kompetenci občanskou,
- kompetenci k podnikavosti.

(RVP G, VÚP v Praze, 2007).

3.1.3 Vzdělávací oblasti

Vzdělávací obsah na čtyřletých gymnáziích a na vyšším stupni víceletých gymnázií je v RVP G orientačně rozdělen do osmi vzdělávacích oblastí. Jednotlivé vzdělávací oblasti jsou tvořeny jedním vzdělávacím oborem nebo více obsahově blízkými vzdělávacími obory. Obor fyzika patří spolu s chemií, biologií, geografii a geologií do oblasti Člověk a příroda, určitou blízkost lze (i vzhledem k tématu práce) vysledovat v oblastech Člověk a svět práce a Matematika a její aplikace.

Každá vzdělávací oblast obsahuje charakteristiku vzdělávací oblasti, cílové zaměření vzdělávací oblasti a vzdělávací obsah. Charakteristika vzdělávací oblasti vyjadřuje postavení a význam vzdělávací oblasti na gymnáziu a její návaznost na koncepci oblastí v základním vzdělávání.

Cílové zaměření vzdělávací oblasti vyjadřuje, jak vzdělávací oblast a její obory přispívají k rozvíjení klíčových kompetencí žáků. Jsou to vlastní postupy, které si učitelé naplánují a které podle jejich zkušeností povedou k cílenému utváření a rozvíjení klíčových kompe-

tencí žáků. Může se jednat například o různé metody a formy práce, nejrůznější aktivity, které se uplatňují v jednotlivých předmětech.

Vzdělávací obsah je propojený celek očekávaných výstupů a učiva. Očekávané výstupy vyjadřují, jaké úrovně osvojení učiva mají žáci na konci vzdělávání na gymnáziu v daném oboru dosáhnout, tzn. jakými žádoucími vědomostmi, dovednostmi, postoji a hodnotami mají disponovat. Vypovídají nejen o znalostech, ale hlavně o schopnostech a dovednostech využívat osvojené znalosti při komplexnějších myšlenkových procesech a v praktických činnostech. Představují výsledky vzdělávání, které jsou využitelné v životě a v dalším studiu a ověřitelné vhodnými evaluačními nástroji (RVP G, VÚP v Praze, 2007).

3.1.4 Vzdělávací oblast „Člověk a příroda“

„Základní prioritou každé oblasti přírodovědného poznávání je odkrývat metodami vědeckého výzkumu zákonitosti, jimiž se řídí přírodní procesy. Odkrývání přírodních zákonitostí je hodnotné jednak samo o sobě, neboť naplňuje přirozenou lidskou zvědavost poznat a porozumět tomu, co se odehrává pod povrchem smyslově pozorovatelných, často zdánlivě nesouvisejících jevů, a jednak člověku umožňuje ovládnout různé přírodní objekty a procesy tak, aby je mohl využívat pro další výzkum i pro rozmanité praktické účely. Má-li být přírodovědné vzdělávání na gymnáziu kvalitní a pro žáky prakticky využitelné, je zapotřebí, aby je orientovalo v první řadě na hledání zákonitých souvislostí mezi poznanými aspekty přírodních objektů či procesů, a nikoli jen na jejich pouhé zjištění, popis nebo klasifikaci. Takový přístup též v žácích podněcuje touhu po hlubším poznávání řádu okolního světa a nabízí jim možnost intenzivního prožitku z vlastních schopností tento řád hledat a poznávat“ (RVP G, VÚP v Praze, 2007).

Příspěvní DP: Využitím www stránek mohou učitelé biologie poskytnout vysvětlení mnohých biologických jevů, které by jinak zůstaly na popisné úrovni, která je v biologii dominantní. Biologii tak můžeme obohatit o nový úhel pohledu, pohledu na rozmanitost tvarů a z nich vyplývajících funkcí a fyzikálních principů.

„Obsah a metodologie přírodovědného poznávání velmi zřetelně odráží systémový charakter přírody a víceúrovňovost její organizace. Přírodní objekty jsou totiž vesměs systémy nebo tyto systémy vytvářejí. Zkoumání přírody tak nezbytně vyžaduje komplexní, tj. multidisciplinární a interdisciplinární přístup, a tím i úzkou spolupráci jednotlivých přírodovědných oborů a odstraňování jakýchkoli zbytečných bariér mezi nimi. Vzdělávací

oblast Člověk a příroda má proto také umožnit žákům poznávat, že bariéry mezi jednotlivými úrovněmi organizace přírody reálně neexistují, jsou často jen v našem myšlení a v našich izolovaných přístupech. Svým obsahovým, strukturním i metodickým pojetím má oblast vytvářet prostředí koordinované spolupráce všech gymnaziálních přírodovědných vzdělávacích oborů (RVP G, VÚP v Praze, 2007).

Příspěvní DP: Je v tomto případě dáno samotným předmětem práce na pomezí biologie, fyziky a chemie. Uplatnění fyzikálních principů může alespoň na kvalitativní úrovni objasnit mnohé jevy v živé přírodě. Kvantitativní popis je na středoškolské úrovni někdy příliš komplikovaný, ale i zde se můžeme pokusit o vhodnou fyzikální aproximaci, poskytující dostatečný výsledek.

Vzdělávací oblast Člověk a příroda tím, že žákovi ukáže i využívání poznatků a metod přírodních věd pro inspiraci a rozvoj dalších oblastí lidské aktivity, počínaje nejrůznějšími technologiemi a konče filozofií, představuje mu současně přírodní vědy též jako neoddelitelnou a nezastupitelnou součást lidské kultury a zvyšuje tak zájem žáků o ně (RVP G, VÚP v Praze, 2007).

Příspěvní DP: Srovnání fyzikálních mechanismů v přírodě s technikou, zejm. v oblasti optiky (oko/fotoaparát) může být jednak inspirativní z hlediska vize přírody jako potenciálního zdroje technických řešení, jednak jako možnost k propojení vědomostí známých z běžného života (parametry fotoaparátu / parametry oka).

3.2 Didaktika mezioborových vztahů a neurofyzologie

V duchu tématu disertační práce – vztahu fyziky a biologie – můžeme uchopit i didaktickou část práce. Souvislost didaktiky s neurofyzologií člověka je zřejmá a od neurofyzologie už je pouze krok k chemii a fyzice.

3.2.1 Neurofyzologie kognitivních procesů

Duševní aktivita člověka má podklad v kooperaci neuronů lidského koncového mozku. Podkladem této kooperace, jsou mimo jiné elektrochemické děje na membránách, které můžeme popsat fyzikálními zákony. Popsat chování člověka z této úrovně fyzikálními rovnicemi je samozřejmě nemožné. Mezi elektrochemickými procesy a výsledným lidským chováním stojí bariéra několika úrovní (biochemické změny na synapsích, přenos náboje na membránách, morfologické změny synapsí, kooperace mezi neurony, kooperace mezi mozkovými centry) a obrovská složitost lidského mozku. Vždyť v centrálním

nervovém systému je kolem 30 miliard buněk, každá může vytvářet až 10 000 synapsí, tedy celkem dostáváme vsuktu astronomické číslo 3×10^{14} synapsí, které mohou ohromnou masu buněk propojovat nejrůznějšími způsoby. Právě nevyčerpatelná kombinatorika této sítě je zdrojem rozmanitosti naší duševní činnosti.

Lidskou duševní aktivitu můžeme zjednodušeně rozdělit na následující procesy: kognitivní procesy (vnímání, paměť a myšlení), motivace a emoce. Výsledkem duševní aktivity je chování.

3.2.2 Didaktika a neuronové sítě

Podobně jako u jiných kognitivních procesů je tedy podkladem lidské paměti nesmírně rozsáhlá a hustá síť neuronů spojených mezi sebou obrovským množstvím spojů (synapsí). Srovnajme tuto síť s jinou sítí a to sítí sémantickou (síť zmiňovaná např. v lingvistice, logice, kde body¹ sítě představují jednotlivé pojmy a spojky resp. vzdálenosti tvoří významové – sémantické vztahy), podobnou síť známe v pedagogice, označuje se pojmová mapa. Mezi sítí neuronů a sítí sémantickou (resp. pojmovou mapou) existuje zřetelná analogie. Zjednodušeně si lze představit, že podkladem pojmové mapy je právě síť neuronů. Z toho vyplývá důležitý pedagogický poznatek ověřený v naší každodenní praxi. Lépe si zapamatujeme informaci, která má co nejvíce vztahů (spojů) k našim původním znalostem – jakoby se lépe ukotví v sémantické popř. „neuronové“ síti. Naopak, pokud je informace (např. nový pojem) izolovaná, velmi obtížně si ji dokážeme zapamatovat. Nyní je již zřejmý cíl této úvahy. Mezioborové vztahy umožňují propojení informací z různých oblastí lidského vědění na dané úrovni znalostí. Živá příroda je běžnou součástí naší zkušenosti již od dětství často s určitým emocionálním podtextem. Tomu odpovídá i neurologický substrát – neurologické sítě. Bylo by škoda nevyužít tyto již stávající sítě k implementaci nových poznatků. Pokud budeme učit úplný odraz a optické vlnovody, je vhodná též poznámka o omatídích složeného oka hmyzu. Pokud se zmíníme o interferenci, bylo by škoda neukázat krásné strukturální barvy, které vidíme např. na křídlech motýlů rodu *Morpho*. Pokud budeme hovořit o polarizaci, byla by škoda nezmínit se o schopnosti hmyzu orientace či navigace pomocí polarizovaného světla. Ačkoliv se nám tyto odbočky při výuce fyziky mohou zdát příliš vzdálené, zabírající čas, měli bychom zvážit jejich potenciál lepšího zapamatování si vyučované látky. Látka tak získá v očích žáků větší smysl, nepůjde jen o izolované, „umělé“ informace.

¹ Ve skutečnosti se nejedná o body ale jakési obláčky, význam určitého pojmu není 100% jednoznačný, obvykle každý pojem nabízí více interpretací, význam je jakoby rozmazaný.

Určitého propojení můžeme dosáhnout již v průběhu vnímání. Nutnosti zapojení všech smyslů je stará didaktická pomůcka propagovaná již klasikem J.A. Komenským. Není nejšťastnějším řešením, pokud větší část vyučovací hodiny na našich středních školách zapojují studenti především ruce při opisování z tabule, nebo toho co je jim diktováno ve smyslu filosofie „kdo zapisuje, nezlobí“.

3.2.3 Didaktika, motivace, emoce a limbický systém

Důležitým předpokladem výuky je udržení pozornosti studenta, jeho motivace ke studiu, zájem o vyučovanou látku. Pokud je student dostatečně motivován ke studiu daného předmětu, daná problematika ho „zajímá sama o sobě“, učitel má již 90% práce za sebou, nemusí ho totiž ke studiu nutit. Motivace závisí na mnoha faktorech, jednak na obsahu vykládané látky, jednak na formě výkladu.

Pozornost, emoce a motivace jsou tři úzce související duševní procesy. Ze zkušenosti i četných psychologických experimentů (Koukolík, 2005) vyplývá, že čím větší je emocionální složka informace, tím větší jí věnujeme pozornost, a tím lépe se nám ukládá do paměti. Proč? Lze to vysvětlit jednak z pohledu evoluční teorie: informace, které jsou pro nás důležité, tj. jsou důležité k našemu přežití, je výhodné si zapamatovat. Jednak z pohledu fyziologie: výběr informací k uložení do paměti probíhá ve stejném místě mozku, které slouží jako centrum emocí, totiž v limbickém systému.

Člověk si informaci ukládá do paměti daleko snáze jako součást nějakého „příběhu“². Příčinou je zřejmě emoce, či napětí, které jsou nedílnou součástí každého příběhu, a které pak stimulují prostřednictvím limbického systému pozornost a paměť. Při výuce proto využíváme historií objevů, vynálezů. Stále častěji jsou v interaktivních textech fyziky např. zmiňované krátké životopisy jednotlivých fyziků, příběhy typu Archimédes ve vaně, Newton pod jabloní, Galileo na věži, či Einstein ve výtahu.³ Emoci, napětí lze do výuky vnést také vhodným pokusem, či pomůckou. Opakujeme vhodným pokusem. Totiž příliš mnoho příliš jednoduchých a nedobře objasněných pokusů, s jakými se setkáváme v různých populárních technocentrech, dostává spíše podobu show, samotná fyzika se někdy vytratí.

Vhodné jsou příběhy o vývoji pohledu na určitý jev. Příkladem je složení hmoty počínaje Démokritem a táhnoucím se až k moderní fyzice, ke Schrödingerovi, nebo vývoj názorů týkající se podstaty světla či tepla. Najdeme je i v jiných oborech – v biologii vzpomeňme

² Záleží zde na přesné definici slova příběh, výstižnější je snad anglický ekvivalent „story“

³ Ačkoliv historická realita je často nejistá, obvykle se jedná spíše o myšlenkové pokusy.

např. příběhy o objevování bakterií (Paster, Koch), evoluční teorie je sama o sobě obrovský a bezesporu napínavý příběh. V matematice zvýšíme zájem žáků vyprávěním o Archimedovi a jeho výpočtu čísla π , vepisováním a opisováním kružnic pravidelným mnohoúhelníkům (pěkný začátek výkladu infenitezimálního počtu). Učitel by měl být současně vypravěč, dramatik, který dokáže studenty „vtáhnout“ do příběhů o biologii, fyzice, matematice či chemii. Metodu příběhů využívá mnoho populárních knih. Z oblasti fyziky jmenujme snad tu nejlepší „Pan Tompkins v říši divů“ od George Gamowa. Nicméně i „Feynmanovy přednášky z fyziky“, která je neoficiální biblí fyziků, často využívá formu vyprávění.

Větší emocionální složky dosáhneme při výuce předmětů méně abstraktních, jako je biologie, kde si k objektům studia daleko snáze vytváříme určitý emocionální vztah. Právě zde však můžeme využít mezioborové vztahy, vždyť fyzice podléhají i živé organizmy a na mnoho otázek týkající se jejich tvaru či funkce nám odpoví právě fyzika. Fyzikální interpretace vlastností živých systémů tak může výrazně usnadnit výuku fyzikálních zákonitostí.

Cílem motivace při studiu přírodovědných oborů by neměla být pouze pragmatičnost, tj. vidina následné práce v oboru, ať už na vědecké, aplikované, nebo didaktické úrovni. Nechť je motivací prostá radost z poznání, radost z pochopení (osvětlení) jak to či ono funguje. Snad nejdůležitější chvíle ve vzdělávání jsou právě ony okamžiky pochopení různých problémů, to když najednou prohlédneme a řekneme si: ... „jo takhle to tedy je“, ... „takhle to funguje“ ... ty okamžiky „projasnění“ podobné tomu, když vylezeme na kopec a najednou přehlédneme krajinu pod námi.

3.2.4 Cíl výuky, inteligence

Cílem výuky (nejen) na střední všeobecně vzdělávací škole je schopnost studenta zapamatovat si předkládané informace, ale především schopnost s těmito informacemi pracovat, interpretovat a rozvíjet je a nalézat souvislosti. Vzdělání ani inteligence není pouze prosté penzum informací, které člověk má, ale (v souladu s předchozí analogií) hustota spojek mezi jednotlivými pojmy (či neurony) v sémantické (či neuronové) síti. Vzdělání je schopnost vidět skutečnost či nějaký problém pod různými úhly pohledu, umět dávat data do různých i neobvyklých souvislostí. Ne si data pamatovat a dokázat je na počkání memorovat. S tím souvisí rozvoj kritického myšlení, tak důležitý nejen ve vědě, ale i společenském a politickém životě.

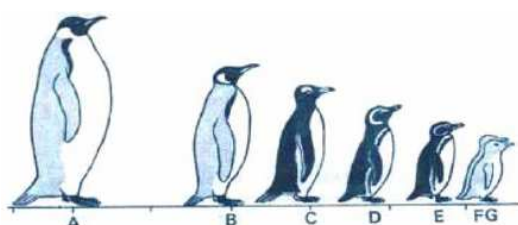
3.3 Fyzika – cesta k obecné biologii?

Biologie, tak jak se vyučuje na střední škole, kromě výjimečných případů nevyužívá fyziku k vysvětlení ať už vzniku, tak podoby života. Zákonitosti, které využívá, jsou evoluční teorie, zákony genetiky či ekologická pravidla. V hodinách středoškolské biologie se pak studenti učí zejména pojmenovat, poznat a utřídit organizmy zasazené do paradigmatu evoluční teorie. Systematická biologie na vědecké úrovni je dnes více zaměřena na genetickou příbuznost než na morfologii organismů. Se získáváním informací o genetickém kódu jsou původní systematické vztahy vzniklé na základě morfologických znaků nahrazeny těmi odpovídající genetické příbuznosti. Studenti se tedy učí zejména druhové rozmanitosti (diverzitě). Pokusme se však vzít v úvahu jinou rozmanitost – rozmanitost tvarů, struktur a jejich funkcí odpovídající různým fyzikálním principům.

Nakolik můžeme vysvětlit tvar nebo z něho vyplývající funkci těla určitého organismu pomocí zákonitostí (i středoškolské) fyziky? Tušíme, že se nám to bude lépe dařit u neživých (abiotických) faktorů (teplota a její změny, intenzita světla, vodní nebo suchozemské prostředí apod.). Hůře se nám bude dařit, budeme-li uvažovat živé (biotické) faktory – tedy zejména ekologické vztahy k jiným organismům, či evoluční vztahy. Příkladem biotických faktorů mohou být dvě následující ekologická pravidla:

Bergmanovo pravidlo

Toto pravidlo říká, že endotermní živočichové jsou v chladnějších oblastech větší než jejich příbuzné formy žijící v oblastech teplejších. Tato skutečnost souvisí s větší tepelnou kapacitou spojenou s větším tělem větších živočichů a větším relativním povrchem menších živočichů, kterým ztrácejí relativně více tepla. Příkladem mohou být jednotlivé druhy tučňáků. Větší druhy osídlují chladnější jižnější oblasti jižní polokoule, než menší druhy.



	Název	Výška	Oblast osídlení
A	tučňák císařský	115	pobřeží antarktidy
B	tučňák patagónský	95	subantarktické ostrovy
C	tučňák oslí	81	Jižní Georgia, Falklandy
D	tučňák magellánský	70	Chile, Patagonie, Ohňová země
E	tučňák galapážský	53	Galapágy
F	tučňák nejmenší	40	jižní a jihovýchodní Austrálie
G	tučňák bělopásý	40	Nový Zéland

Obr.3: Bergmanovo pravidlo. Druhy tučňáků jsou v chladnějších oblastech větší než jejich příbuzné formy žijící v oblastech teplejších (Kostkan, 2009).

Allenovo pravidlo

Závislost vedení tepla na povrchu resp. tvaru těla. Pro ztráty tepla je důležitý poměr povrchu k objemu těla. Na velikosti povrchu závisí tepelná kondukce a na velikosti objemu tepelná kapacita. Nejmenší je tento poměr u koule. Proto zaujmutí kulového tvaru těla minimalizuje tepelné ztráty. Tělní výrůstky u příbuzných živočichů se zmenšují směrem k pólu. To můžeme vidět na příkladu příbuzných druhů lišek (polární – *Vulpes lagopus*, liška obecná – *Vulpes vulpes* v mírném pásmu a fenek – *Vulpes zerda*, obyvatel pouštních oblastí). Podobný princip můžeme vidět u hibernujících živočichů stočených do klubíčka, kteří minimalizují tepelné ztráty, stejnou polohu zaujímáme i my pokud nám je zima.



Obr. 4: Allenovo ekologické pravidlo: tělní výrůstky se u příbuzných živočichů zmenšují směrem k pólu, to můžeme vidět na příkladu příbuzných druhů lišek: polární – *Vulpes lagopus*, liška obecná – *Vulpes vulpes* v mírném pásmu a fenek – *Vulpes zerda*, obyvatel pouštních oblastí (Kostkan, 2009).

Fyzika a podstata života

Podnětem pro vznik „fyzikální“ biologie mohou být i vědy týkající se existence života ve vesmíru (astrobiologie). Jistě nás napadnou následující otázky: jaké podmínky musí daná oblast vesmíru splňovat pro vznik života, do jaké podoby by se mohl vyvinout, jak by se mohl lišit od života na Zemi?

V tomto ohledu je velmi inspirativní kniha „Investigation“ amerického teoretického biologa a matematika Stuarta Kauffmana z roku 2001.⁴ Zavádí zde pojem autonomní agens, který definuje jako systém schopný sebereprodukce a zároveň schopný vykonávat alespoň jeden druh uzavřeného pracovního cyklu. Poslední podmínka hraje v Kauffmanových úvahách klíčovou roli. Nestačí, aby se systém pouze utvářel na úkor disipace volné energie. Má-li konat práci, musí stupně volnosti pro disipaci volné energie snížit, jinými slovy postavit strukturu, zařízení ke konání práce. To samo však už vyžaduje investici práce.

⁴ Do češtiny ji přeložil Anton Markoš v r. 2004 pod názvem Čtvrtý zákon – cesta k obecné biologii (podle tohoto názvu byl zvolen i název této kapitoly)

Kauffman ukazuje, jak mohl současný život povstat coby kolektivní emergentní chování organizovaných chemických sítí, které samy už jsou autonomními agenty. Šířící se organizovanost není uchopitelná žádnými zavedenými koncepty typu hmota, energie, informace, entropie apod., ale přesto jde o fyzikální systém. Známe molekulární uspořádání živých tvorů, metabolické dráhy či funkci membrán, ale netušíme, co způsobuje, že to vše je živé.

Kauffman se domnívá, že by mohly existovat společné zákony pro otevřené a sebekonstruující systémy, jimž dává jméno biosféry. Ty jsou souborem autonomních agent, maximalizují jejich diverzitu a také způsoby, jimiž jsou agenta schopna se uživit (tj. nacházet zdroje energie a využívat je k práci) a dále se šířit. Jinými slovy, biosféry se samy konstruují, a to tak, že neustále zvyšují diverzitu (dimenzionalitu) toho, co má nastat v dalším okamžiku. Tento trend pokládá Kauffman za tak důležitý, že jej nazývá čtvrtým zákonem termodynamiky. Z celé teorie vyplývá ještě jeden důležitý závěr: autonomní agenta mají zkušenost zabudovanou do své struktury, organizace.

3.4 Aproximace a modely ve fyzice

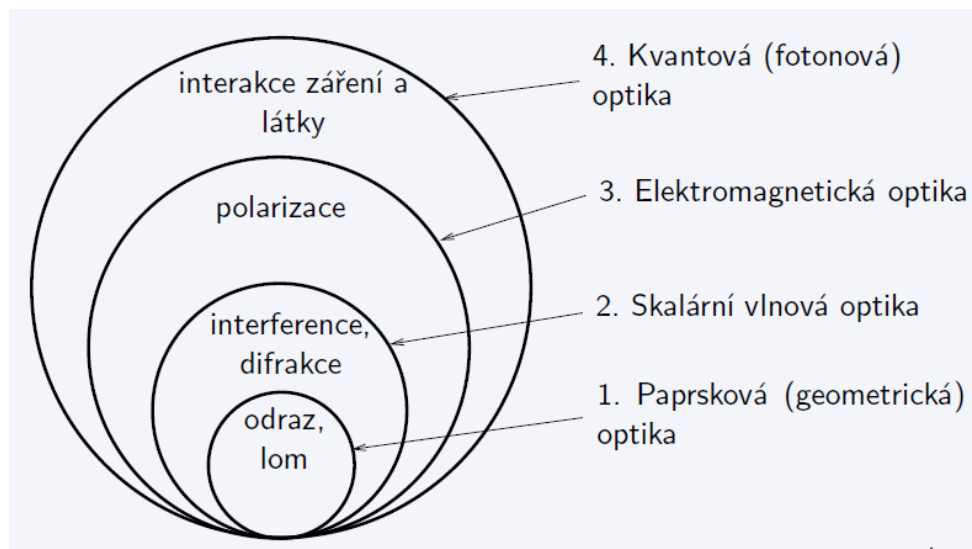
Středoškolská optika je podobně jako jiné oblasti fyziky příkladem využití aproximace ve výuce. Každý si uvědomuje, že bez aproximace by výuka fyziky byla de facto nemožná. Obecně fyziku samotnou můžeme chápat jako aproximaci, popis přírody, více nebo méně se přibližující realitě⁵.

Při kvantitativním popisu přírodních dějů se často setkáváme s mnoha vlivy, které se uplatňují různou měrou v závislosti na měřítkových škálách. Chceme-li se dopracovat k relevantnímu výsledku a jsme-li omezeni středoškolskou matematikou, jsme nuceni určité jevy zanedbat a vliv jiných zahrnout do úvah ve zjednodušené podobě. Při vhodném výběru měřítek dostáváme i tak poměrně dobrý výsledek.

Mnohdy se však použití aproximace se zkušeností žáků výrazně rozchází (příkladem mohou být optické aberace), a úkolem učitelů je na to studenty upozorňovat. Pokud si studenti limity aproximací neuvědomí, získají jednak zkreslenou představu, jednak se školská fyzika příliš vzdálí jejich každodenní zkušenosti a studenti v ni ztratí víru. Živá příroda je z fyzikálního hlediska natolik komplexní, že se o její kvantitativní popis na středních školách téměř nepokoušíme. O to větší důležitosti zde nabývají aproximace. Jako příklad uvedeme aproximace v optice.

⁵ To je klasické (moderní) vnímání vědy, postmodernista či zastánce teorie vědeckých revolucí (Thomas Khun) by s tímto závěrem nesouhlasil.

V geometrické optice se světlo šíří ve formě paprsků (trajektorie částic světla). Jedná se o nejjednodušší popis šíření světla, kde vlnové délky a energie fotonů jsou velké ve srovnání s rozměry a energetickou citlivostí zařízení, jež se používá pro jejich studium. Za těchto podmínek platí princip přímočarého šíření světla v izotropním prostředí či princip nezávislosti světelných paprsků. Oba principy (aniž si to uvědomujeme) používáme při popisu průchodu paprsku optickými soustavami – čočkami, či při jejich odrazu od zrcadel.



Obr. 5: Aproximace optiky.

V rámci geometrické optiky je důležitou aproximací paraxiální aproximace. Reálné optické soustavy jsou konstruovány na základě komplikovaných výpočtů. Zákony, kterými se řídí průchod paprsku soustavou, se podstatně zjednoduší, omezíme-li se na paprsky jdoucí v blízkosti optické osy. Budeme-li předpokládat, že paprsky vycházející z předmětu jdou velmi blízko optické osy a svírají s ní jen velmi malé úhly, pak bude přibližně platit:

$$\theta \approx \sin \theta$$

$$\theta \approx \tan \theta$$

Snellův zákon v paraxiální aproximaci nabývá velmi jednoduché podoby $n_1\theta = n_2\theta'$.

Toto zjednodušení se nazývá paraxiální aproximace a má široké použití v celé geometrické optice. Právě díky němu zobrazovací rovnice tenké čočky nebo zrcadla nabývá jednoduchý tvar, vyučovaný na střední škole:

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1,$$

ke a a a' jsou po sobě předmětová a obrazová vzdálenost, f a f' jsou předmětová a obrazová ohnisková délka. Tuto aproximaci lze dobře použít při jednoduchých pokusech v hodinách fyziky, v optice živých organismů (ale i v technice) jsou však jevy spojené s neparaxiálními paprsky a příliš velikou a příliš silnou čočkou nezanedbatelné. Jevy, kte-

ré vznikají, uvažujeme-li zobrazení neparaxiálními paprsky, nazýváme – aberace. Ty se obvykle na střední škole nevyučují. Jedná se např. o komu nebo astigmatismus. Se zvětšujícím se průměrem a tloušťkou čočky roste i tzv. sférická aberace. Díky těmto aberacím by byl reálný obraz vznikající na sítnici mnoha živočichů rozmazaný. Proto se většina z nich naučila tyto aberace korigovat různým způsobem (gradientem indexu lomu, eliminací periferních paprsků, kombinací více čoček, sférickým tvarem čočky apod.).

Při průchodu světla štěrbinou, kde vlnová délka není zanedbatelná vzhledem k rozměru štěrbin, již aproximaci přímočarého šíření světla uvažovat nemůžeme, princip neplatí. Dochází totiž k ohybu (difrakci) světla, na stínítku bychom pozorovali difrakční obrazce. K jevu difrakce se dostaneme, budeme-li se zabývat rozlišením oka s čočkou, průchodem světla příliš tenkými omatídií – jednotkami složeného hmyzího oka, sloužícími jako vlnovody. Difrakce se uplatní též jako jedna z příčin vzniku strukturální barvy na difrakční mřížce.

Porušení principu nezávislosti chodu světelných paprsků pozorujeme při koherenci světla skutečně v přírodě obvykle na tenké vrstvě (např. bubliny, olejové skvrny). Příroda využila tuto vlastnost tenkých vrstev opravdu bohatě. Díky souborům periodicky se opakujících tenkých vrstev s vhodnou šířkou získali živočichové zrcadla. Ta fungují v několika případech živočichů podobně jako Newtonův dalekohled. Na rozdíl od Keplerova dalekohledu byla zde funkce čoček nahrazena zrcadly. Jindy byla zrcadla využita jako tzv. tapeta, vrstvy za sítnicí umožňující opakovaný průchod fotonů receptory, zvyšující tak citlivost očí nočních a hlubokomořských živočichů. Pokud je výška interferenčních vrstev stejně široká, z bílého světla dostáváme barevné. To je snad nejrozšířenější způsob vzniku strukturálního zbarvení těl živočichů. Při změně šířky vrstev se může měnit i barva – to je jedním z principů barvoměny živočichů.

Polarizace světla je jevem, který vysvětlujeme na úrovni elektromagnetické vektorové optiky.

V přírodě se běžně nesetkáme s polarizací úplnou, ale pouze s částečnou. Tu živočichové využívají ve třech případech vzniku částečně polarizovaného světla – odrazu od vodní hladiny a lomu v atmosféře (k orientaci, navigaci) a při průchodu světla průhlednými mořskými organizmy (lov medúz některými predátory). Ačkoliv je schopnost vnímání polarizovaného světla popsána u některých obratlovců, je typická především pro hmyz.

Vlnová optika je další aproximací optiky, která neuvažuje interakci vlnění s látkou. K té však může za určitých okolností docházet, vznikají jevy jako absorpce, rozptyl, nebo foto-

luminiscence. Tyto jevy popisuje již kvantová optika, světlo pak chápeme jako kvanta energie, fotony.

K absorpci světla látkou dochází ve výjimečných případech, kdy absorbovaná energie přechodu elektronu mezi dvěma energetickými stavy je natolik malá, že odpovídá vlnění ve viditelném spektru podle vzorce $E = h \cdot f$, kde h je Planckova konstanta a f je frekvence vlnění. Dopadá-li na takové látky bílé světlo, část spektra se absorbuje a část se odráží, ta udává látce i barvu.

Toho je dosaženo ve třech skupinách přírodních látek: anorganických látkách tvořených přechodnými kovy, komplexních sloučeninách a organických látkách obsahující systém konjugovaných dvojných vazeb. V živé přírodě se samozřejmě nejvíce uplatní poslední ze jmenovaných. Ač bychom to možná nečekali, barvy přírody tvoří nevelký počet typů chemických látek označovaných jako barviva. Posuďme sami: mezi hlavní skupiny patří karotenoidy, chinonová, pyranová, indolová, pyrolová a pteridinová barviva. V rámci těchto skupin najdeme i pro život tak důležité látky jakou jsou zrakové pigmenty, krevní pigmenty přenášející kyslík, chlorofyly – absorbující sluneční záření a umožňující tak fotosyntézu. Látky nepříliš odlišné od organických barviv jsou i podstatou fotoluminiscence, také zde najdeme omezenou skupinu molekul, které zajišťují fotoluminiscenci u organismů.

4 Termodynamika a život

4.1 Systém a okolí

Struktura webových stránek

Kapitoly

Teoretické základy

- Termodynamické zákony
- Termodynamický systém
- Stavové rovnice a potenciály
- Vnitřní energie
- Teplo
- Práce

Přenos tepla

- Kondukce
- Konvekce
- Tepelné výměníky
- Přenos tepla zářením
- Život ve vesmíru

Přenos látky

- Difúze
- Velikost buňky
- Osmóza a transport vody

4.1.1 Teoretické základy

Impulsem ke vzniku klasické termodynamiky byly snahy o sestavení tepelného stroje s co největší účinností, studium vratnosti a nevratnosti dějů či studium energetiky chemických reakcí. Vznikala na základě objevů S. Carnota, W. Thomsona (lorda Kelvina), R. Clausia, J. P. Joula a H. Helmholtze a mnoha dalších. Její statistická interpretace je spjata se jmény J. W. Gibbse a L. Boltzmannova.

Termodynamika je fyzikální disciplína vytvářející vztahy mezi různými vlastnostmi makroskopických systémů bez studia jejich vnitřní struktury. Zjednodušeně můžeme říci, že

se zabývá transformací a transportem energie a látky. Její axiomatická výstavba je založená na šesti základních tvrzeních (čtyři zákony termodynamiky a dva termodynamické postuláty).

Klasická termodynamika umožňuje popsat izolované systémy, které po určitém čase dosáhnou rovnovážného stavu. Ten lze dobře charakterizovat extrémními hodnotami různých termodynamických potenciálů (vnitřní energie, entalpie, Gibbsova volná energie, Helmholtzova energie, entropie). Výběr potenciálu závisí na podmínkách probíhajících procesů.

Zkoumáme-li živé systémy, je situace odlišná. Tyto systémy jsou otevřené a nerovnovážné. Takové systémy však nacházíme i v neživé přírodě. Příkladem mohou být příklady systémů z dynamiky tekutin či katalytické chemické reakce. Studium těchto systémů se zabývá nerovnovážná termodynamika. Její rozvoj je spojen především se jmény Larse Onsagera a Ilyi Prigogina.



Obr. 6: Lars Onsager (1903-1976), Ilya Prigogine (1917-2003)

4.1.2 Přenos tepla

Přenos tepla probíhá třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací). Povrch těla organismů je neustále ve styku s okolím, se kterým probíhá nepřetržitě výměna tepla. Stykem těla s vodou či vzduchem dochází ke dvěma způsobům přenosu tepla: vedením (kondukcí) a prouděním (konvekcí). Přenos tepla probíhá v souladu s 2. termodynamickým zákonem, tedy pouze z teplejších těles na chladnější.

Teplokrevní živočichové (zejména savci a ptáci) mají obvykle vyšší teplotu těla než okolí a ztrátám tepla se brání vrstvou tuku, srstí, peřím nebo v případě člověka oblečením. Získávají teplo výkonným metabolismem, vnitřní přenos je zajištěn krevním systémem a jeho přenos do okolí mohou regulovat vnitřními mechanismy.

Studenokrevní živočichové (bezobratlí, ryby, plazi a obojživelníci) jsou naopak životně závislí na přenosu tepla z okolí, teplota jejich těla je nanejvýš stejná jako teplota vnější, teplotu těla regulují zejména chováním.

Přenos tepla zářením má základní význam pro vznik života ve vesmíru a jeho dostatek je předpokladem vzniku vody v kapalném skupenství, a tedy i života.

4.1.3 Přenos látky

Z termodynamického hlediska jsou živé systémy otevřené. Buňky, základní jednotky živé hmoty, získávají živiny ze svého okolí aktivním transportem, na základě koncentračního gradientu, nebo prostou difúzí. Toto platí pro jednobuněčné organizmy stejně jako pro diferencované (specializované) buňky, které jsou součástí tkání.

Z hlediska energetiky je difúze velmi vhodný transportní mechanismus umožněný rozdílem koncentrace určité látky ve dvou sousedních oblastech, k transportu totiž dochází bez dodání vnější energie. Osmóza je klíčový mechanismus umožňující transport vody přes buněčnou membránu.

4.2 Změny vnitřní energie

Struktura webových stránek

Kapitoly

Teplota

- Teplotní prostředí živočichů
- Teplota a voda
- Vysoké teploty a makromolekuly
- Teplota a rychlost chemické reakce
- Ektotermie a endotermie
- Poikilotermie, homo a heterotermie

Fázové přechody

- Fázové přechody
- Termodynamika krystalizace
- Homogenní nukleace
- Heterogenní nukleace
- Krystalizace vody
- Kryoprotektanty
- Nukleátory a antinukleátory
- Kryobioza
- Vypařování a kondenzace

Chemické reakce

- Endergonické a exergonické reakce
- Přenašeče energie
- Redoxní reakce
- Zdroje energie organismů
- Metabolický poměr

4.2.1 Teplota

Pro živé organismy je teplota jeden z nejdůležitějších faktorů, na němž závisí tvar a velikost těla, možnost existence v daných podmínkách či intenzita životních funkcí. Výskyt vody v kapalném stavu je nutnou podmínkou pro život na Zemi.

Rotace Země, sklon ekliptiky a excentricita její trajektorie při obíhání kolem Slunce jsou příčinou různých teplot a jejich periodických změn na různých místech planety. To je jedna z příčin vysoké rozmanitosti biosféry – vzniklo mnoho způsobů jak se organismy změnám teploty přizpůsobily. Klimatické změny v geologických periodách spustily významnou část evoluce, ovlivnily vývoj nových druhů a v některých případech způsobily masové vymírání.

Těla živých systémů tvoří složité makromolekuly bílkovin, nukleových kyselin a lipidů. Pro jejich funkci je důležité prostorové uspořádání dané slabými elektrostatickými silami mezi jednotlivými částmi makromolekul. Při vyšších teplotách, kdy je kinetická energie molekul srovnatelná se slabými elektrostatickými silami, může být energie těchto slabých chemických interakcí narušena a tím i funkce molekulových systémů.

Živočichové využívají dvě hlavní strategie adaptace ke změnám teplot. Ektotermní organismy (rostliny, bezobratlí, ryby, obojživelníci a plazi) se snaží optimální teplotu těla přizpůsobit okolní teplotě, přenos tepla je umožněn díky dobré teplotní vodivosti tělesného povrchu. Svoji aktivitu tak omezují na příznivé podmínky s výhodou nízké spotřeby potravy. Teplotu těla regulují především svým chováním.

Endotermní organismy (ptáci a savci) udržují danou optimální teplotu intenzivním metabolismem a díky izolační vrstvě na povrchu těla, která brání tepelným ztrátám. Mohou být aktivní při širokém rozsahu teplot ovšem za dostatečného přísunu potravy. Teplotu těla regulují vnitřními mechanismy.



Obr.7: Největší ektotermní živočichy najdeme v oblasti rovníku, to je dané vhodnými okolními podmínkami, na kterých jsou ektotermní živočichové závislí (Kostkan, 2009).

4.2.2 Fázové přechody

Skupenské fázové přeměny jsou pro organizmy velmi důležité. Při poklesu teploty pod 0°C se organizmy vyrovnávají s problémem vzniku krystalů ledu v těle, které mohou poškodit strukturu buňky. Tento problém řeší rozmanitými způsoby – endotermií, oddálením vzniku ledu do nižších teplot, či řízeným zamrznáním extracelulárního (vněbuněčného) prostoru.

Krystal je příkladem rovnovážné struktury. Při jeho vzniku dochází k poklesu entropie. Ideální krystal by měl nulovou entropii. Při krystalizaci nevzniká pevné skupenství okamžitě. Podmínkou je přítomnost krystalizačních jader. To jsou buď cizorodé částice (heterogenní nukleace) nebo vznikají v podchlazené kapalině (homogenní nukleace).

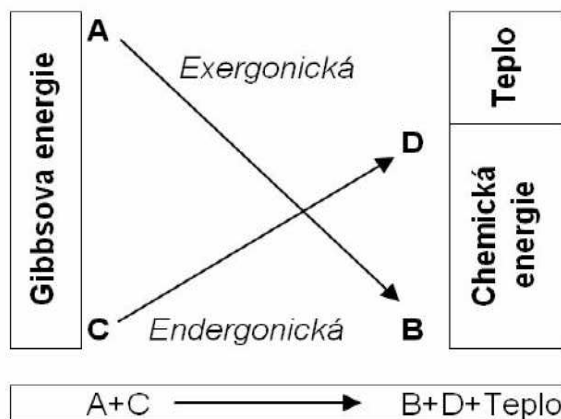
Jedním ze způsobů přečkávání zimy je řízené promrznání mimobuněčné tekutiny při vyšších teplotách za využití nukleátorů (zárodečných jader). Krystaly rostou pomalu za ztrátou molekul vody do krystalu se zahušťuje vnitrobuněčný obsah, čímž se tak stává odolný proti zmrznutí. Jinou metodou je oddalování zamrznutí extracelulární tekutiny odstraněním nukleátorů, využitím antinukleátorů, které nukleátory „deaktivují“, a využitím kryoprotektantů.

Kryobioza je takový pokles teploty, kdy se snižuje energie částic a jejich schopnost vstupovat do biochemických reakcí natolik, že se metabolismus resp. život zcela zastaví, tento stav je pouze přechodný a při zlepšení podmínek se organizmus vrátí k normálnímu životu. Teplota, kdy k tomu dochází je $-139\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy se zastavují všechny fyzikální změny krystalů ledu. Vypařování může být v teplých podmínkách jedinou možností udržení nízké tělesné teploty.

4.2.3 Chemické reakce

Chemická energie se uvolňuje při rozpadu molekul, a je nutná dodat k jejich výstavbě. Lze ji vyjádřit množstvím tepla, které se při vzniku vazby uvolní nebo spotřebuje v hodnotách veličiny entalpie. Pro posouzení samovolného průběhu reakce musíme uvažovat entropii. Zvýšení entropie je provázeno snížením uspořádanosti systému a uvolněním energie. Oba členy entalpie a entropie jsou zahrnuty v Gibbsově (volné) energii. Zda-li proběhne reakce mezi dvěma látkami posoudíme ze znaménka rozdílu Gibbsovy energie. Podle toho dělíme reakce na exergonické a endergonické. Exergonická reakce probíhá samovolně za uvolnění energie, endergonická reakce probíhá pouze při dodání energie. Protože endergonické procesy nemohou probíhat samovolně, jsou v organizmech spojeny s procesy exergonickými tak, že výsledná změna je exergonická. Přenos energie mezi

endergonickými a exergonickými procesy je u organismů uskutečněn vysokoenergetickými fosfáty. Nejvýznamnější je molekula adenosintrifosfátu (ATP).



Obr.8: Životní pochody např. získávají energii sprážením s exergonickými oxidačními reakcemi (autor podle Murray, 2001)

Základem existence života jsou redoxní (oxidačně-redukční) reakce. Fotosyntetizující organismy využívají navíc speciální proteinové oxidoredukční soustavy, kde je potřebná energie nutná k proběhnutí reakce (uvolnění elektronu) získávána ze světelné energie. Při oxidaci v organizmech je uvolněný elektron postupně předáván z molekuly na molekulu obvykle na buněčných membránách za vzniku elektrochemického potenciálu na membráně.

Pokud bychom diverzitu biosféry posuzovali podle způsobu získávání energie dostáváme nový pohled na živý svět podstatně odlišný od běžného - biosféra velkých organismů se nám pak jeví jako jednodušší skupina využívající k získávání energie buď mitochondrie nebo chloroplasty tedy buněčné organely, které byly původně zřejmě endosymbiotické bakterie. Z tohoto pohledu se nám celá biosféra vynoří jako svět soužití různých typů bakterií, z nichž rozeznáváme tři hlavní skupiny eukaryonta, archea a bakterie.

Podle zdroje energie (sluneční energie x oxidace látek) a zdroje uhlíku (oxid uhličitý x organické látky) můžeme organismy rozdělit do 4 kategorií: organismy fotolitotrofní, chemolitotrofní, fotoorganotrofní, chemoorganotrofní.

4.3 Vývoj systému

Struktura webových stránek

Kapitoly

Entropie

- Mikrostav a makrostav systému
- Pravděpodobnost makrostavu
- Pravděpodobnost a entropie
- Entropie a II. TZ
- Entropie a nevratnost
- Entropie v nerovnovážných systémech

Lineární systémy

- Lineární zákony
- Smíšené transportní jevy
- Minimální produkce entropie
- Optimální režimy I.
- Optimální režimy II.
- Glykolýza a dýchací cyklus
- Svalová kontrakce

Nelineární systémy

- Stabilita
- Bifurkace
- Disipativní struktury

4.3.1 Entropie

První termodynamický zákon umožňuje popsat energetickou bilanci v termodynamickém systému. To však nepostačuje k vyjádření všech jeho vlastností, především jeho časového vývoje. Při studiu nevratných procesů, jakými jsou například přechod tepla z tělesa teplejšího na chladnější nebo míšení látek, vyvstává potřeba zavést další veličiny, které by tyto procesy kvalitativně i kvantitativně popisovaly. Podobně jako I. termodynamický zákon

zavedl vnitřní energii, II. termodynamický zákon vnáší do termodynamiky novou stavovou funkci - entropii.

Entropie je termodynamický potenciál, který v rovnovážném stavu izolovaného systému dosahuje svého maxima. Entropie je mírou neuspořádanosti i nevratnosti vývoje systému.



Obr. 9: Ilustrativní obrázek (zdroj: http://sciphilos.info/docs_pages/docs_Golden_cartoon_css.html)

4.3.2 Lineární systémy

V lineární nerovnovážné termodynamice můžeme na základě principu lokální rovnováhy použít některé poznatky rovnovážné termodynamiky. Systém nespěje jako u rovnovážného systému k nulové produkci entropie, ale pouze k její minimální hodnotě slučitelné s hraničními podmínkami systému. Dosažený stav se nazývá stacionární.

Aproximace lineární závislosti termodynamických toků na vnějších silách představují lineární zákony: Fourierův zákon vedení tepla, Fickův zákon difúze, Ohmův zákon vodivosti, nebo Newtonův zákon viskozity. Při smíšených transportních jevech je několik toků vyvoláno několika zobecněnými silami, dochází tak k termodifúzním, termoelektrickým, reakčně -difúzním procesům. V lineární oblasti pro tyto procesy platí Curieův-Prigoginův a Onsagerův princip.

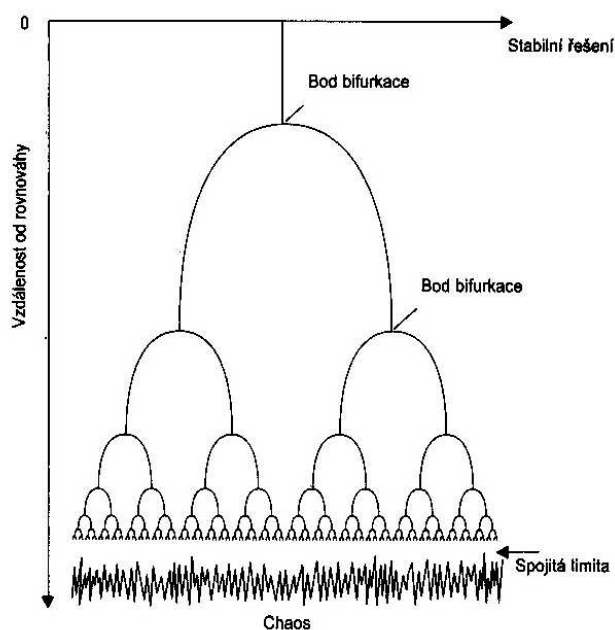
4.3.3 Nelineární systémy

V nelineární nerovnovážné termodynamice jsou termodynamické síly působící na otevřený systém příliš veliké a systém se ve stacionární stavu stává nestabilní a vlivem fluktuací se od něj vzdaluje. V nerovnovážných systémech může docházet k vytváření makroskopických struktur, a tedy k lokálnímu poklesu entropie.

Dosáhnou-li termodynamické síly, působící na otevřený systém, jisté mezní hodnoty, opouští systém stabilitu stacionárního stavu a vlivem různých fluktuací se od něj vzdaluje. Případný potenciál, který charakterizuje chování systému, má pak vlastnosti Ljapunovovy funkce. Vztahy mezi termodynamickými silami a toky u systémů vzdálených od rovnováhy jsou nelineární a stabilita takových systémů již není důsledkem obecných fyzikálních zákonů.

Pokud se systém nachází daleko od rovnovážného stavu, roste prudce počet možných stavů, které může zaujmout. Existenci více možných stavů představuje ve stavovém diagramu bifurkační bod. Systém se od tohoto bodu může vyvíjet některým z ramen bifurkace podle výchozích podmínek.

U složitějších systémů při vzdalování se od rovnováhy roste počet bifurkačních bodů, až se bifurkace objevují tak hustě, že vytváří téměř spojitý sled možných stavů. Nedokážeme předem určit do kterého stavu systém přejde, neboť nelze přesně určit výchozí podmínky.



Obr. 10: Bifurkační kaskáda mívající k chaosu v nelineárním systému (Coveney, Highfield, 2003).

4.4 Disipativní struktury

Struktura webových stránek

Kapitoly

Oscilační reakce

- Bromičnanové oscilační reakce
- Jodičnanové oscilační reakce
- Jiné anorganické oscilační reakce
- Enzymové oscilace
- Epigenetické oscilace
- Teorie oscilací

Reakčně – difúzní systémy

- Chemické vlny
- Cyklus hlenky (*Dictyostelium*)
- Vznik barevných vzorů v přírodě
- Teorie RD systémů

Hydrodynamické nestability

- Rayleighova - Bénardova
- Bénardova - Marangoniova
- Taylorova - Couettova
- Vtokové nestability

4.4.1 Oscilační reakce

V přírodě můžeme pozorovat periodické změny veličin charakterizujících stav biologických systémů bez působení vnějšího periodického podnětu. S takovými oscilacemi se setkáváme prakticky na všech biologických úrovních – od periodických změn koncentrací chemických sloučenin v buněčné cytoplazmě a oscilací biopotenciálů ve svalových (srdce) a nervových buňkách (mozek), přes denní, týdenní, měsíční až několikaleté rytmy projevující se ve fyziologické regulaci mnohobuněčných jedinců, až po periodické kolísání počtu příslušníků ekologických společenstev. Popis oscilací na všech biologických úrovních vede na podobný matematický formalismus.

Vývoj života na Zemi byl poznamenán cyklickými interakcemi mezi Sluncem, Zemí a Měsícem. Existence rytmických změn v žijících organismech je známkou adaptace na tyto vztahy. Organismy si musely vytvořit zásobu energie během doby slunečního světla pro její spotřebování během tmy. Tato základní – cirkadiánní („přibližně denní“) periodičita byla inkorporována a je uchována v genomech všech organismů.



Obr. 11: Briggsova-Rauscherova oscilační reakce (foto autor).

Chemické oscilační reakce jsou autokatalytické systémy, u nichž se s autokatalytickou látkou (podporující vznik sebe sama) vytváří postupně látka, která reakci naopak inhibuje. Výsledkem jsou periodické oscilace koncentrací jednotlivých chemických komponent, včetně jednotlivých forem redoxních katalyzátorů. Pokud jsou katalyzátory barevné ionty, můžeme celou reakci sledovat jako efektní chemický experiment - periodicky se zabarvující reakční směs. Nejznámější chemickou oscilační reakcí je Bělousovova - Žabotinského reakce.

Chemické oscilace jsou příkladem samouspořádávání, v případě kontinuálního dodávání výchozích látek a odebrání produktů (průtokový reaktor) dostáváme příklad otevřeného neživého systému s lokálním poklesem entropie.

Vzhledem k tomu, že velká část biochemických reakcí probíhajících v živých organismech je autokatalytických, můžeme pozorovat oscilace na úrovni enzymů i v živém organismu. Nejlépe byly prozkoumány oscilace glykolýzy, jednoho z nejdůležitějších pochodů metabolismu.

Epigenetické oscilace jsou oscilace na úrovni transformace genetické informace do molekul proteinů. Jsou podstatou tzv. biologických hodin, které se projevují víceméně pravidelným opakováním určitých procesů v tělech organismů nezávisle na vnějších podmínkách.

4.4.2 Reakčně difúzní systémy

Reakčně difúzní systémy nacházíme v oblastech fyziky (růst krystalu, tuhnutí látek, modelování plazmatu) v chemii (chemické vlny), v biologii (morfogeneze, vznik barevných vzorů u mnoha živočichů (na schránkách měkkýšů, u tropických ryb či na kůži některých savců), při přenosu vzruchu v tkáních), v ekologii (např. model dravec - kořist) i v mnoha jiných vědách.

Všechny tyto jevy můžeme popsat jednotným matematickým formalismem – pomocí reakčně difúzních rovnic. Dynamika reakčně-difúzních systémů je vlivem nelineárních členů velmi pestrá. Nalézt analytické řešení však bývá velice komplikovaná úloha, proto jsou numerické nebo grafické (např. buněčné automaty) metody mnohdy jedinými prostředky, jak získat představu o časoprostorovém chování daného problému.

Vznik chemických vln můžeme pozorovat v tenké vrstvě reakčního média pro Bělousovovu - Žabotinského reakci. Chemickou vlnou se pak rozumí šíření změny lokální koncentrace vrstvou reakčního systému. Šíření vln chemické aktivity je jedním z příkladů samouspořádávání a vytváření struktury, které je podmíněno spojením procesu difúze s chemickou reakcí. Tyto systémy se také označují jako chemicko-difúzní systémy.

4.4.3 Hydrodynamické nestability

Za aplikaci nerovnovážné termodynamiky v hydrodynamice považujeme tzv. hydrodynamické nestability, které jsou jedním z příkladů vzniku disipativních struktur. Vznikají v otevřených hydrodynamických systémech. Okamžik vzniku disipativních struktur je obvykle určen kritickou hodnotou bezrozměrného čísla charakterizujícího systém (Reynoldsovo, Rayleighovo, Marangoniovo, Taylorovo, aj.). Při tomto přechodu dochází k uspořádání systému, k samoorganizaci do prostorových struktur (konvekční válce, Bénardovy buňky, Taylorovy víry). Toto uspořádání, započaté z nestabilního stavu fluktuací systému, je docíleno následným zesílením fluktuace kladnou zpětnou vazbou.

Konvekční (Bénardovy buňky) jsou didakticky velmi zajímavý příklad vzniku uspořádání (disipativní struktury). Ohřev dna nádoby ve které se nachází tenká vrstva viskózní kapaliny s volným povrchem, může vést nejdříve k neuspořádanému pohybu molekul, teplo je přenášeno vedením (kondukcí). Při určité velikosti teplotního gradientu přejde kondukcce v proudění (konvekci). Při konvekci vznikají struktury ve tvaru obrazce složeného z šestihranných buněk. Na průřezu těchto buněk bychom pozorovali uspořádaný pohyb kapaliny.

Vznik konvekčních buněk můžeme velmi zjednodušeně chápat jako analogii existence živého systému. Podobně jako Bénardovy buňky existující pouze při trvajícím gradientu teploty, existuje živý organismus závisle na dodávce energie přicházející ze Slunce zářením (záření „pohání“ fotosyntézu díky níž se pak energie využívá k zajištění existence dalších živých organizmů). Přestane-li přenos energie systémem (přestaneme zahřívat dno nádoby, vyhasne Slunce) zaniknou jak buňky Bénardovy tak buňky živé.

5. Optika v přírodě

Hlavním tématem webových stránek Optika v přírodě je zrak, zbarvení těla živočichů i barvy rostlin a další jevy jako např. luminiscence či fotosyntéza. Zrak se vyvinul na planetě Zemi asi před půl miliardou let, a to během poměrně krátké doby. Je úzce spjat s vývojem aktivně se pohybujících živočichů. Pohyb za potravou, partnerem nebo při útěku před predátorem vyžadoval informace o okolí i dobrou orientaci v prostoru, kterou zrak dokázal zajistit. S barevným viděním souvisí jak zbarvení těla živočichů, tak i zbarvení květů či plodů rostlin.

U člověka je zrak bezesporu nejdůležitějším smyslem i hlavním prostředníkem, kterým člověk poznává okolní svět. Omezení biologických možností lidského zraku dokázal člověk překlenout vynálezem optických přístrojů. Pomocí nich mohl pak poznat jak strukturu buněk, tak vzdálené kouty Vesmíru. Optika se tak stala "pomocníkem" ostatních přírodních věd. Webové stránky jsou strukturované do dvaceti základních témat, uspořádané do pěti okruhů. Každému tématu odpovídá několik kapitol. Krátký souhrny jednotlivých témat a seznam kapitol uvádíme níže.

5.1 Geometrická optika

Struktura webových stránek

Základní principy

Kapitoly

- Principy geometrické optiky
- Index lomu světla
- Optické vlnovody v přírodě
- Základní principy zobrazení
- Základní vývojové typy oka
- Typy komorového oka
- Typy složeného oka

Souvislosti v technice

- Optické vlnovody v technice
- Camera obscura

Zrcadlo

Kapitoly

- Zobrazení dutým zrcadlem
- Oko hřebenatky
- Parabolické oči korýšů
- Reflexně superpoziční oko
- Parabolicky superpoziční oko
- Tapetum

Souvislosti v technice

- Historie zrcadel
- Newtonův teleskop
- Koutové odražeče

Čočka

Kapitoly

- Zobrazení kulovou plochou
- Zobrazení tenkou čočkou
- Čočka vodních živočichů
- Přejít na souš, vznik rohovky
- Život ve vodě i na souši
- Čočka apozičního oka
- Čočka superpozičního oka
- Gullstrandův model lidského oka

Souvislosti v technice

- Historie čoček
- Optika GRIN

Aberace

Kapitoly

- Princip a typy aberací
- Korekce sférické aberace
- Korekce chromatické aberace
- Korekce astigmatismu

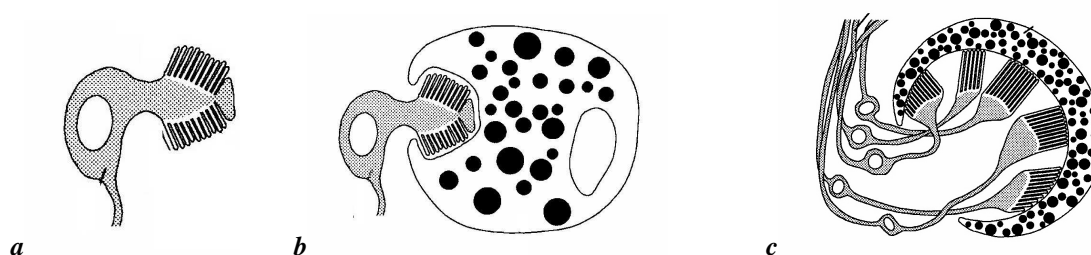
Souvislosti v technice

- Optika s indexem lomu (GRIN)
- Asférická čočka
- Achromatické soustavy
- Objektivy fotoaparátů

5.1.1 Základní principy

K popisu optického aparátu jednotlivých typů očí živočichů můžeme využít principy geometrické optiky. Optické vlastnosti různých prostředí určuje index lomu světla. Život v různém prostředí – ve vodě nebo na souši – je proto faktorem, který výrazně ovlivňuje stavbu oka. Lom světla je sám o sobě podstatou zobrazení čočkou, která je podmínkou kvalitního zobrazení, a je proto součástí většiny očí.

Aby mohl být optický signál doveden až k receptorům s minimálním rozptylem, využívají různé struktury očí úplný odraz a fungují tak jako optické vlnovody. Tento princip nacházíme u omatídií složených očí i u fotoreceptorových a Mülerových buněk komorového oka obratlovců.



Obr. 12 a) Samotná fotoreceptorová buňka umožňující vnímání intenzity světla, b) fotoreceptorová a pigmentová buňka umožňují navíc vnímání směru c) větší počet receptorů a pigmentová vrstva uspořádané od tvaru komory umožňují vnímat obraz (upraveno podle Land, Nilsson, 2009).

Nejjednodušší fotoreceptory vnímají pouze intenzitu světla. Aby bylo možné vnímat i směr světla je nutné stínění smyslových buněk absorbujičím pigmentem. Přítomnost pigmentových buněk je mimo jiné důvod, proč nemůžeme být neviditelní, pokud sami chceme vidět. O oku v pravém smyslu slova však mluvíme až při vzniku obrazu. Předpokladem je větší počet smyslových buněk, které dokáží srovnat intenzitu světla přicházející z různých směrů.

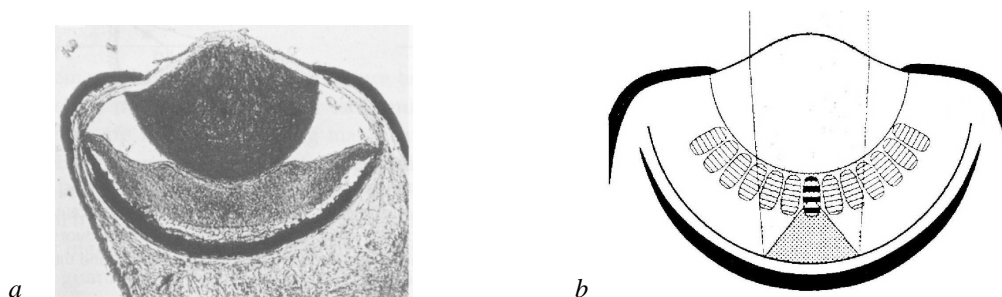
Můžeme rozeznat dva základní typy oka. Komorové oko, běžné u hlavonožců, obratlovců a pavouků, funguje podobně jako fotoaparát, resp. jako jeho předchůdce – dírková komora. Druhým typem je složené oko, běžné u hmyzu, fungující spíše jako panel fotobuněk. Kromě tohoto dělení můžeme rozdělit oči podle toho, zda využívají ke zobrazování přímého stínu, čočky nebo zrcadla.

5.1.2 Zrcadlo

Neschopnost vytvářet povrchy z lesklých kovů na první pohled vylučuje u živočichů existenci orgánů s funkcí zrcadel. Přírodní zrcadla jsou v přírodě u živočichů široce rozšířena, fungují však na principu interference. Jsou tvořena mnoha vrstvami střídavě s nízkým a

vysokým indexem lomu. Princip zrcadla spočívá v pozitivní interferenci mezi světlem odraženým z horního a spodního povrchu každé vrstvy. Vedlejším důsledkem je, že mnoho přírodních zrcadel je monochromatických – barevných.

Malá skupina živočichů dala při zobrazování okem přednost konkávním zrcadlům před čočkami. Významnější kvality obrazu však tyto oči dosáhly jedině u mořského mlže hřebenatky (*Pecten*), kde fungují podobně jako Newtonův dalekohled. Parabolická zrcadla nalezneme také u některých hlubokomořských korýšů sice s minimální rozlišovací schopností nicméně dobrou citlivostí, která je v tomto prostředí klíčová.



Obr. 13 a) průřez zmrazeným okem hřebenatky ukazující velkou čočku pod níž je vrstva sítnice vyplňující prostor mezi čočkou a odrazovou vrstvou (*argentea*). Průměr oka je 1mm. **b)** schéma oka hřebenatky (*Pecten*) s konkávní zrcadlovou vrstvou (Land & Nilsson, 2009).

Zrcadla využívají také dva typy superpozičních složených očí. Reflexně superpoziční oči u některých dekapodních korýšů využívají princip koutových odražečů. Parabolicky superpoziční oči fungují na principu parabolického zrcadla. Ty se vyskytují se pouze u krabů (*Brachyura*) a poustevníčků (*Anomura*).

Tapeta jsou zrcadlové interferenční multivrstvy umístěné za sítnicí. Jejich funkcí je odrážet světlo soustředěné čočkou zpět skrz sítnici. Zdvojnásobují šanci zachycení fotonů receptory a zvyšují tak výrazně citlivost oka na světlo. Tapetum je běžné v komorových očích obratlovců i pavouků žijících v hloubce nebo aktivních v noci.

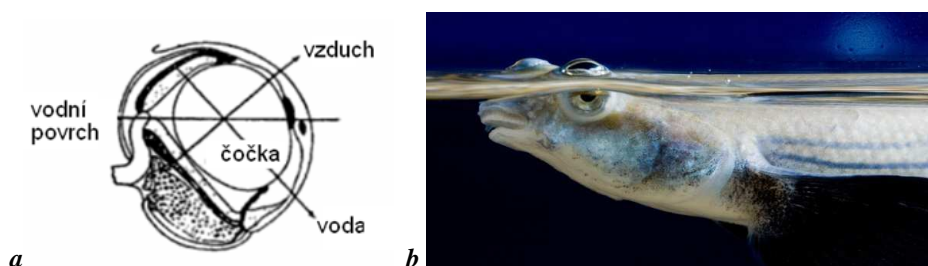
5.1.3 Čočka

Dobrý zrak většiny živočichů je umožněn přítomností optických čoček. Oči s čočkou se vyvinuly během evoluce nezávisle u nejméně čtyř živočišných kmenů. Zjednodušeně můžeme oko považovat z fyzikálního hlediska považovat za samotnou kulovou plochu, a pomocí tohoto jednoduchého modelu odvodit některé vlastnosti optického aparátu oka.

Vzhledem k nízkému rozdílu indexu lomu mezi čočkou a vodním prostředím slouží u vodních živočichů (zejm. ryb a hlavonožců) k zajištění dostatečné optické mohutnosti

(„lámavosti“) čočky co nejmenší poloměr křivosti. Toho je dosaženo, pokud má čočka tvar koule. Další zvýšení optické mohutnosti a eliminaci sférické aberace dosáhla příroda vytvořením nehomogenní čočky s rostoucím indexem lomu od periferie směrem do středu. Evoluční přechod živočichů z vody k suchozemskému způsobu života byl současně důležitou změnou oka. Rohovka získala díky rozdílu indexu lomu mezi vzduchem a vodou optickou mohutnost srovnatelnou s čočkou. Oko s takovou rohovkou a současně rybím typem čočky by však mělo příliš velkou optickou mohutnost, a různé skupiny živočichů se s touto změnou různým způsobem vypořádaly.

Důležitým kritériem řešení problému byla především denní nebo noční aktivita. Denní živočichové preferovali redukci čočky a ponechání zakřivené rohovky, u nočních živočichů s velkýma očima je hlavním nositelem optické mohutnosti silná čočka umístěná velmi blízko před sítnicí a plošší rohovka.



Obr.13 a) „Čtyřoká“ ryba rodu *Anableps* dosahuje simultánního vidění ve vzduchu a ve vodě ovoidním tvarem čočky s rozdílným zakřivením v různých osách, a oddělenou sítnicí (upraveno podle Land & Nilsson, 2009). **b)** *Anableps anableps* (<http://www.practicalfishkeeping.co.uk/content.php?sid=4009>).

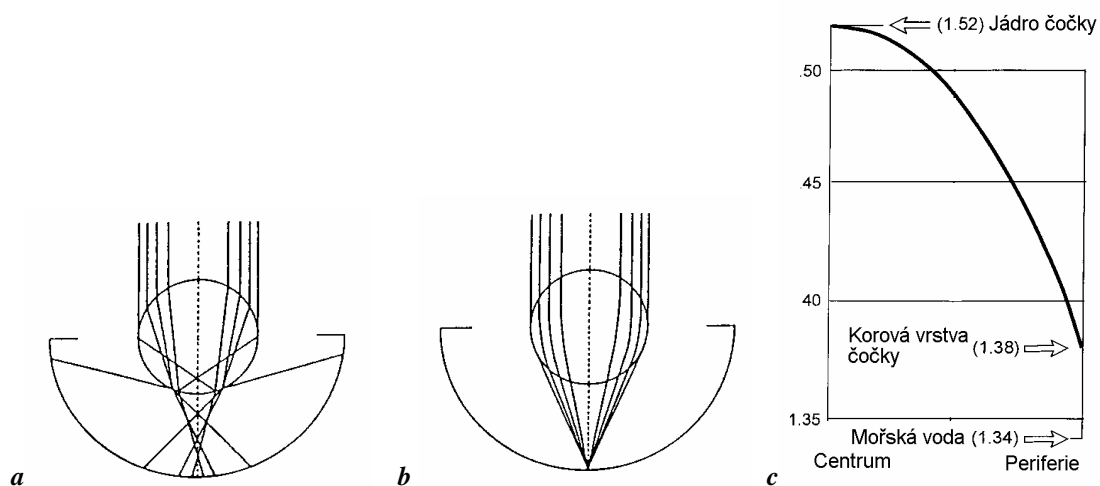
5.1.4 Aberace

Při popisu zobrazení čočkou nebo zrcadlem obvykle bereme v úvahu úzký svazek monochromatických paprsků v blízkosti optické osy (tzv. paraxiální paprsky). To platí pro zobrazení malého předmětu při malém průměru čočky vzhledem k ohniskové vzdálenosti. Vyrůstá-li zorné pole nebo účinný průměr čočky při téže ohniskové vzdálenosti, nastávají výrazné odchylky od ideálního zobrazení. Obrazem bodu se stává ploška. Závislost indexu lomu na vlnové délce vede k rozmazání obrazu při průchodu složeného světla.

Tyto odchylky nazýváme optické vady (aberrace). Mohou se do určité míry různým způsobem korigovat. Jsou problémem většiny komorových očí. U složených očí (např. u hmyzu) se prakticky nevyskytují díky malým rozměrům čoček jednotlivých omatidí. Nejvýznamnějšími optickými vadami jsou sférická a chromatická aberrace.

Sférickou aberaci se živočichové během evoluce naučili korigovat různými způsoby. U vodních živočichů s kulovitým tvarem čočky je korekce dána především gradientem indexu lomu, u suchozemských živočichů, kde hlavní podíl optické mohutnosti nese rohovka je důležitý její asférický tvar. Unikátní řešení vynalezl koryš rodu *Pontella*. Využívá soustavy čoček podobně jako je tomu u objektivů fotoaparátů. Mezi další mechanismy korekce patří eliminace periferních paprsků jednak zornicí, jednak samotnými čípkami v sítnici. Zbytková aberace je korigována nervovými centry mozku.

Korekce chromatické aberace je důležitá pouze u živočichů s vyvinutým barevným viděním. U kostnatých ryb vzniká specifickou úpravou indexu lomu čočky. U člověka a dalších obratlovců se uplatňuje především rozložení čípků a stejně jako u sférické vady eliminace periferních paprsků.



Obr.14: Korekce sférické aberace **a)** Lom paprsků homogenní čočkou, **b)** lom paprsků Mathiessenovou čočkou (upraveno podle Pumphrey, 1961) **c)** závislost indexu lomu na vzdálenosti od středu Mathiessenovy čočky (upraveno podle Jagger, 1992)

5.2 Vlastnosti zobrazení

Struktura webových stránek

Rozlišení

Kapitoly

- Rozlišení oka - bez čočky / - s čočkou
- Srovnání rozlišení očí
- Snellenovy optotypy
- Rozlišení komorových očí obratlovců
- Rozlišení komorových očí pavouků
- Rozlišení apozičních složených očí
- Rozlišení superpozičních očí

Souvislosti v technice

- Mikroskop, lupa a dalekohled
- Camera obscura a fotoaparát

Citlivost

Kapitoly

- Intenzita světa kolem nás
- Kontrast a počet fotonů
- Clona, filtr a expozice
- Různá citlivost očí
- Komorové oči
- Apoziční oči
- Neurálně superpoziční oči
- Superpoziční oči

Souvislosti v technice

- Závěrka, clona a optický filtr

Detekce

Kapitoly

- Princip zrakového vjemu
- Zrakové receptory
- Rozložení receptorů na sítnici
- Sítnice lidského oka
- Skotopické a fotonické vidění
- Tapetum

Souvislosti v technice

- Detektory obrazu
- Citlivost detektorů, ISO

Rozlišení

Kapitoly:

- Akomodace u obratlovců
- Akomodace u člověka
- Poruchy akomodace

Souvislosti v technice:

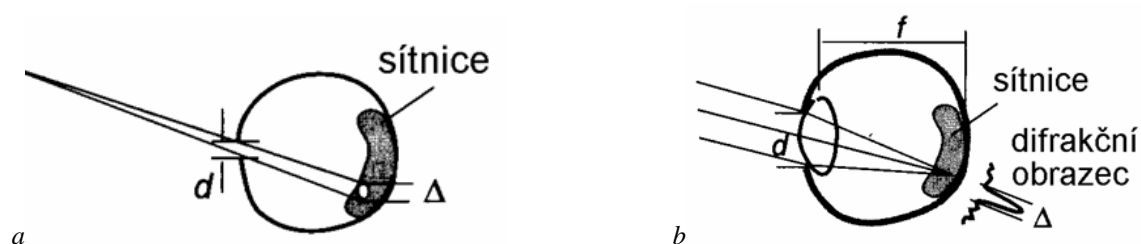
- Teleobjektiv, zoom

5.2.1 Rozlišení

"Kvalita" očí stejně jako fotografických přístrojů může být charakterizována rozlišovací schopností a citlivostí. Rozlišovací schopnost je přesnost, s jakou dokážeme vnímat obrysy a detaily pozorovaných předmětů, jaká musí být velikost, resp. vzdálenost dvou sousedních bodů, abychom je dokázali rozlišit.

Rozlišovací schopnost oka určují dvě vlastnosti – kvalita obrazu daná optickým aparátem oka a hustota a uspořádání receptorů sítnice. Rozlišení komorového oka bez čočky limituje průměr zornice, který odpovídá velikosti obrazového bodu. Čím je zornice menší, tím je lepší rozlišení. Se zmenšující se zornicí však klesá světelnost obrazu.

Rozlišení komorového oka s čočkou limituje difrakce. Velikost obrazového bodu závisí nepřímo úměrně na průměru zornice, přímo úměrně závisí na vlnové délce procházejícího světla a ohniskové vzdálenosti čočky. Difrakční limit je tím menší, čím větší je průměr zornice resp. čočky (apertura). S rostoucí aperturou však roste sférická a chromatická aberace.



Obr.15: Srovnání rozlišení oka a) typu dírkové komory a b) komorového oka s čočkou. Limitem u oka typu dírkové komory je velikost štěrbinu d , u oka s čočkou je limitem velikost difrakčního maxima (upraveno podle Ahlborn, 2006).

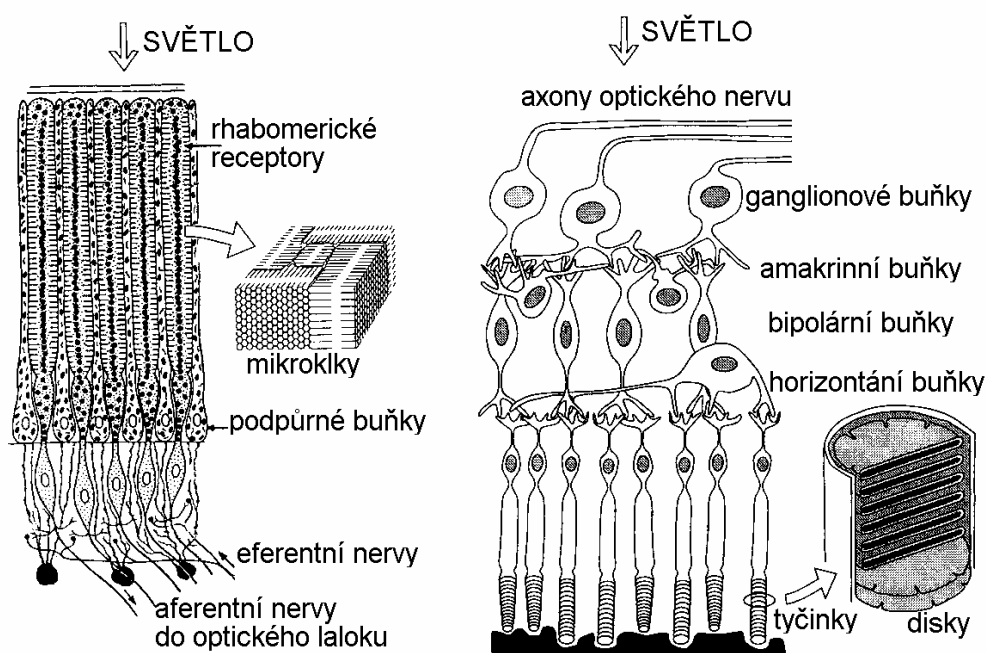
Vzhledem k velmi malému průměru čoček omatídií ve srovnání s komorovým okem se daleko více uplatňuje difrakce a rozlišení očí bezobratlých živočichů je obecně výrazně horší. Snaha o zlepšení rozlišení odpovídá výrazné velikosti složených očí bezobratlých (relativně ve srovnání s tělem), další zvětšení limituje velikost hlavy. Určitým řešením je zvětšení omatídií pouze v určité oblasti oka s nejdůležitějším zorným polem, vzhledem k životním potřebám živočicha.

5.2.2 Citlivost

Intenzita světla významně ovlivňuje naši schopnost optického vjemu i vývoj a stavbu oka v různých světelných prostředích. Noční a hlubokomořští živočichové jsou k horším světelným podmínkám adaptováni různým způsobem.

U člověka stoupá potřebné množství světla nepřímo úměrně druhé mocnině kontrastu. Čím více fotonů oko může zachytit tím lépe i v normálních světelných podmínkách. Na všech nižších hladinách osvětlení oči nevyužívají plně svůj potenciál.

Vnímání člověka ani většiny ostatních živočichů není zaměřeno na vjem absolutní hodnoty intenzity záření různých objektů, ale spíše na rozdíly intenzity záření (jasový kontrast). Cílem je schopnost rozeznat objekty při širokém rozmezí světelných podmínek. Ačkoliv rozsah světelných podmínek, které vnímá lidské oko je obrovské, je schopno rozlišit pouze 50 stupňů šedi.



Obr.16: Uspořádání sítnice u složených očí bezobratlých (vlevo) a komorových očí obratlovců (vpravo) (upraveno podle Land & Nilsson, 2009).

Citlivost oka podobně jako u fotografických přístrojů je dána velikostí apertury (průměr zornice), dobou expozice (daná reakční dobou receptoru), a citlivostí samotných receptorů. Některé ryby a ptáci využívají filtry buď pigmentové, nebo založené na interferenci. Expozici u fotoaparátu odpovídá reakční doba receptorů, která je u různých živočichů různě dlouhá. U člověka je frekvence snímků vyšší než 40/s vnímána jako kontinuální pohyb. Na tom je založena filmová projekce.

5.2.3 Detekce

Detekce obrazu a přeměna světelného signálu na elektrický probíhá na sítnici oka. Podobně tomu je i v moderní technice, kde je světelný signál transformován na elektrický např. pomocí CCD prvků. Receptory sítnice ovlivňují obě hlavní kvality detektoru – citlivost a rozlišení. Tyto vlastnosti jsou kromě fyzikálních limitů optického aparátu určeny i velikostí, hustotou a rozložením receptorů.

Na rozdíl od detektorů v technice, jsou receptorové buňky na sítnici očí živočichů rozmístěny nerovnoměrně. Signál z receptorových buněk je často navíc nerovnoměrně komprimován do menšího počtu nervových buněk. Toto nerovnoměrné rozložení a přenos signálu závisí na důležitosti jednotlivých částí zorného pole živočicha a jeho životním stylu.

U primátů včetně člověka je oblast s nejvyšší hustotou čípků představována tzv. centrální skvrnou (fovea centralis), kde je vysoká hustota čípků zajišťující vidění s vysokou rozlišovací schopností. To je však možné při vyšší intenzitě světla. Jedná se o fotopické vidění. Naopak tyčinky rozložené i v periferii sítnice zajišťují vidění při nižším osvětlení – skotopické.

Tapeta jsou zrcadlové interferenční multivrstvy umístěné za sítnicí. Jejich funkcí je odrážet světlo soustředěné čočkou zpět skrz sítnici. Zdvojnásobují šanci zachycení fotonů receptory a zvyšují tak výrazně citlivost oka na světlo. Tapetum je běžné v komorových očích obratlovců i pavouků žijících v hloubce nebo aktivní v noci.

5.2.4 Akomodace

Světelné paprsky odražené od předmětů ve větší vzdálenosti přicházejí do oka prakticky již navzájem rovnoběžné a po lomu spojnou soustavou oka se protínají v ohniskové rovině, která leží právě v úrovni fotoreceptorů sítnice.

Pokud se nazíraný objekt přiblíží k oku pozorovatele do menší vzdálenosti, budou světelné paprsky z něho vyzařované nebo odrážené přicházet do oka jako rozbíhavé. Pokud by nedošlo ke změně v optickém aparátu oka, světelné paprsky by se protnuly a vytvořily obraz v rovině, která by ležela za sítnicí, a obraz by byl rozmazaný. Vzrůst optické mohutnosti oka při pohledu na blízké předměty se označuje jako akomodace. Různé organismy jí dosahují různým způsobem, nejčastěji změnou zakřivení čočky, rohovky, nebo změnou obrazové vzdálenosti tj. vzdálenosti mezi čočkou a sítnicí podobně jako zoom u fotoaparátu.

V přírodě můžeme sledovat vývoj akomodačních mechanismů. U kruhoustých (mihule) čočka není fixována a akomodace se děje pouhými změnami tlaku v přední a zadní komo-

ře oka. U ostatních obratlovců je již čočka zavěšena na ciliárním tělese, akomodace vzniká posouváním čočky směrem do přední komory oční, čočka je však nepružná. U plazů, ptáků a savců se uplatňuje změna tvaru čočky, přičemž hlavní úlohu má ciliární sval.

Mezi poruchy akomodace oka patří myopie (krátkozrakost) a hypermetropie (dalekozrakost). Jde o vady zraku, které vznikají nerovnováhou mezi délkou očního bulbu a optickou mohutností oka.

5.3 Vlnová optika

Struktura webových stránek

Vlnová délka

Kapitoly:

- Elektromagnetické vlnění
- Vnímání IR záření
- Vnímání UV záření
- Zrakové pigmenty
- Vnímání barev
- Včely a květy

Souvislosti v technice:

- IR záření v technice
- UV záření v technice
- Technické modely barev

Interference

Kapitoly:

- Interference na tenké vrstvě
- Interferenční multivrstvy
- Spektrální odrazivost
- Maskování
- Interferenční barvy
- Barva těla hlavonožců
- Interference umožňující vidění

Souvislosti v technice:

- Dielektrická zrcadla
- Protiodrazové vrstvy

Difrakce

Kapitoly:

- Ohyb světla na kruhovém otvoru
- Difrakční limit optického rozlišení
- Minimální velikost receptoru
- Difrakční mřížka

Souvislosti v technice

- Rozlišení optických přístrojů
- Difrakční mřížka v technice

Polarizace

Kapitoly:

- Polarizace světla
- Vnímání polarizovaného světla
- Význam polarizovaného světla

- Znečištění polarizovaným světlem

Souvislosti v technice

- Objev a technické využití

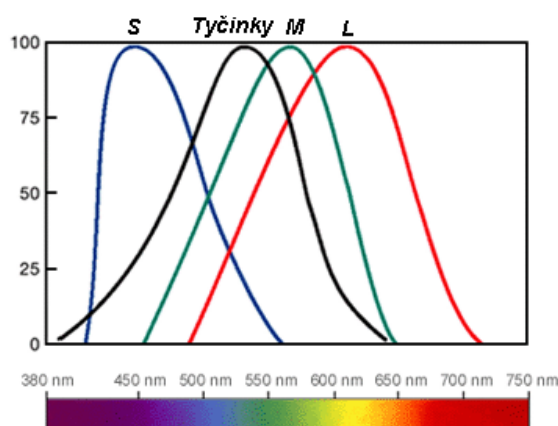
5.3.1 Vlnová délka

Světlo je elektromagnetické vlnění, na které je citlivý lidský zrakový orgán – oko. Jde o oblast ohraničenou vlnovými délkami přibližně 390 až 760 nm. Kratší vlnové délky se označují jako ultrafialové záření (UV) a delší vlnové délky jako infračervené záření (IR).

Maximum vyzařování těla teplokrevných živočichů spadá do oblasti IR záření (vlnové délky kolem 10 μm). Oči savců a ptáků nemohou být citlivé na tyto vlnové délky, protože by byly oslepeny zářením svého vlastního těla. Vnímání infračerveného záření slouží naopak některým studenokrevným živočichům k detekci teplokrevných, kteří jsou jejich kořistí či hostiteli. K dokonalosti dovedli toto vnímání chřestýšovití hadi.

Pro mnoho živočichů zahrnující ptáky, ryby a hmyz je spektrum vidění oproti člověku rozšířeno o UV oblast (jde o tzv. o UVA oblast od 315 nm do 400 nm). Mnoho květů rostlin je „zbarveno“ v této oblasti, což je významné pro opylující hmyz.

Objekty kolem nás odrážejí světlo různých vlnových délek. To poskytuje živočichům včetně člověka důležitou informaci o jejich identitě. Barevný vjem je výsledkem působení světla dané vlnové délky nebo spektra vlnových délek na receptory sítnice. Vjem téže barvy může vyvolat větší množství spektrálních kombinací. Snad největší barevné rozmanitosti je v přírodě dosaženo u květů rostlin, z nichž naprostá většina je opylována včelami.



Obr. 17: Spektrální citlivost lidských čípků typu S, M a L a tyčinek (wikipedia.org).

5.3.2 Interference

Pokud se dvě vlnění setkávají v jednom bodě, může docházet k jejich skládání (interferenci). Podmínkou je, aby vlnění byla koherentní. Koherence lze u přirozených zdrojů světla dosáhnout mimo jiné odrazem na tenké vrstvě. Jednoduchá tenká vrstva odráží několik procent původního světla. Odrazivost můžeme zvýšit až na téměř 100% přidáním

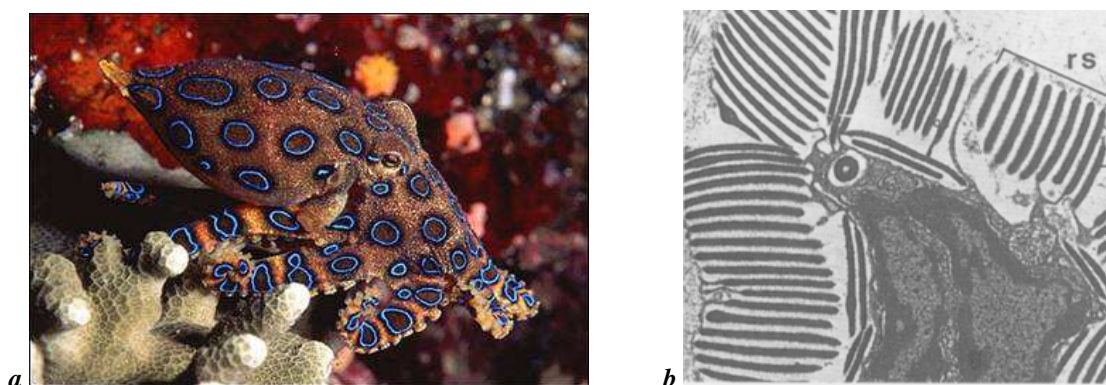
více vrstev nad sebe. Strukturu pak tvoří střídatě vrstvy s vysokým a nízkým indexem lomu.

Vedle vysoké odrazivosti je další důležitou vlastností multivrstevnatých struktur barva, odráží záření o vlnové délce rovné čtyřnásobku optické tloušťky vrstev. To je jeden z mechanismů strukturální barvy, které využívá mnoho druhů živočichů.

Při změně tloušťky barev či kombinaci s pigmenty se barva může měnit - dochází k barvoměně, kterou s mistrností využívají hlavonožci. Různé rozmístění vrstev vede k odrazu bílého světla, které se v přírodě využívá u různých typů maskování.

Pouze u malého počtu druhů mají interferenční multivrstvy funkci zrcadel podléjící se na optickém zobrazení komorového oka na místo čočky. Princip interferenčních zrcadel využívají také dva typy složených očí koryšů (reflexní a parabolická superpozice).

Široce rozšířená tapeta (vrstvy za sítnicí) u nočních a hlubokomořských živočichů zvyšující citlivost oka při nízké intenzitě osvětlení principem opakovaného průchodu primárně nezachycených fotonů sítnicí.



Obr.18 a) chobotnice (Octopus), b) řez kůže chobotnice zobrazený elektronovým mikroskopem, multivrstva tvořená střídatě proteinem a cytoplazmou (Brocco a Cloney 1980).

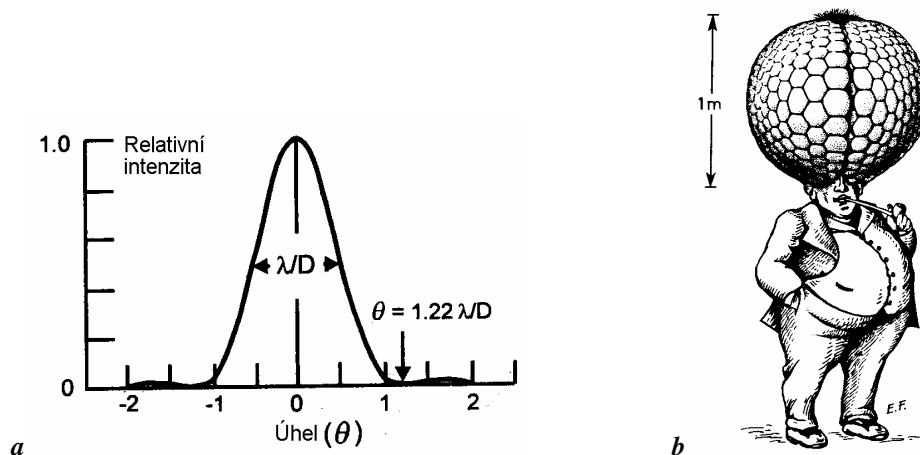
5.3.3 Difrakce

Světlo dopadající do komorového oka přes zornici a čočku podléhá ohybu – difrakci a výsledkem zobrazení na sítnici není bod, jak bychom očekávali, ale difrakční obrazec tvořený světlými maximy a tmavými minimy.

Za velikost obrazového bodu a s ním související limit rozlišovací schopnosti oka můžeme považovat průměr prvního minima (tzv. Airyho disk). Podobně můžeme určit rozlišovací schopnosti optických přístrojů.

Difrakci u oka můžeme popsat Fraunhoferovým ohybem na kruhovém otvoru. Výsledný poloměr Airyho disku závisí přímo úměrně na průměru zornice a vlnové délce. U komo-

rových očí přibližně odpovídá průměru fotoreceptorů. Složené oči hmyzu mají velmi malé čočky a tím relativně velký průměr Airyho disku a tedy velmi malé rozlišení. Pokud bychom si představili složené oči dosahující rozlišení lidských očí, průměr takového oka by byl zhruba 1 až 2 metry.



Obr. 19 a) Závislost relativní intenzity dopadajícího světla na mezním úhlu θ . První interferenční maximum intenzity světla představuje hlavní pík, poloha inflexních bodů hlavního píku odpovídá meznímu úhlu při prvním interferenčním minimu $\theta = \lambda/D$, hodnota $\theta = 1,22 \lambda/D$ ohraničuje plochu, která se nazývá Airyho disk a soustřeďuje přibližně 84 % světla dopadajícího na čočku. **b)** Velikost hypotetického lidského složeného oka s rozlišením stávajícího oka komorového (upraveno podle Land & Nilsson, 2009).

Optické receptory fungují jako optické vlnovody. Pokud by jejich průměr byl příliš malý (tak aby bylo teoreticky dosaženo co nejvyššího rozlišení) dochází opět k difrakci. Při ní se významná část světelné energie přenáší vně vlnovodu a může tak dopadnout na sousední receptor a naopak snížit rozlišení oka. Využití difrakční mřížky ke vzniku strukturální barvy bylo objeveno u mořských koryšů lasturnatek. Jejich tykadla jsou pokryta chlupy s periodicky utvářeným povrchem.

Využití difrakční mřížky ke vzniku strukturální barvy bylo objeveno u mořských koryšů lasturnatek. Antireflexní mřížky využívají na povrchu rohovky např. motýli rodu *Vanessa*.

5.3.4 Polarizace

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, v němž vektor intenzity elektrického pole je v rovině kolmé na směr šíření světla, v této rovině je však u přirozeného světla umístěn zcela nahodile. V případě že vektor intenzity elektrického pole kmitá stále v jedné přímce, je světlo lineárně polarizované.

V přírodě vzniká většinou částečně lineárně polarizované světlo charakterizované určitým stupněm a úhlem polarizace. K částečné polarizaci dochází při průchodu atmosférou, odrazem od vodní hladiny nebo při průchodu průhlednými vodními organismy.

Polarizace je vlastnost světla, kterou náš zrak (s výjimkou tzv. Heidingerova snopu) ani zrak jiných savců nedokáže detekovat. Naproti tomu mezi bezobratlými je tato vlastnost světla hojně využívána (především hmyzem, korýši a hlavonožci). Byla popsána i u některých zástupců ostatních skupin obratlovců (mimo savce) obvykle ve spojitosti s vodním prostředím. Vnímání polarizovaného světla využívají živočichové k detekci vodní hladiny, navigaci a orientaci podle oblohy, k lovu a komunikaci.

Lidskou činností vzniká velké množství materiálů, které polarizují dopadající světlo.

Umělé zdroje polarizovaného světla mohou spouštět takové chování živočichů vedoucí až k jejich hromadnému úhynu.

5.4 Světlo a látka

Struktura webových stránek

Rozptyl světla

Kapitoly

- Podstata a druhy rozptylu
- Rayleighův a Mieův rozptyl
- Rozptyl světla v atmosféře
- Tyndalova modř u živočichů

Souvislosti v technice

- Analýza částic rozptylem

Absorpce

Kapitoly:

- Absorpce látek
- Teorie barevnosti
- Přehled bar. látek
- Zrakové pigmenty

Přírodní barviva

- Polyenová
- Indolová
- Pyrrolová
- Pyranová
- Pteridinová
- Chinolonová

Souvislosti v technice:

- Historie používání barviv
- Potravinářská barviva
- Malířské barvy

Luminiscence

Kapitoly

- Luminiscence
- Fotoluminiscence - absorpce
- Fotoluminiscence - emise
- Fluorescence
- Bioluminiscence

Souvislosti s technikou:

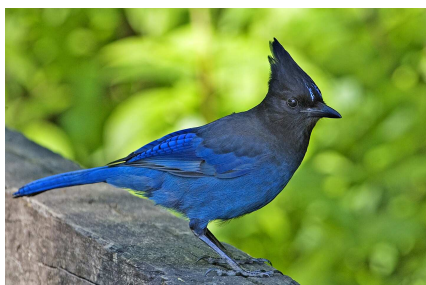
- Historie výzkumu
- Fluorescenční mikroskop
- Elektroluminiscenční folie

5.4.1 Rozptyl světla

Rozptyl světla je charakterizován změnou směru a intenzity světla dopadajícího na předmět jako výsledek kombinovaného vlivu odrazu, lomu a ohybu. Mezi základní typy rozptylu podle relativní i absolutní velikosti vlnové délky a částice patří rozptyl Comptonův, Thomsonův, Rayleighův, Tyndallův, Mieův, Ramanův a Brillouinův. V živé přírodě se nejvíce uplatňuje Rayleighův a Mieův rozptyl často jako zdroj zbarvení.

Modrá barva oblohy a červené zapadající slunce jsou důsledkem Rayleighova rozptylu v atmosféře Země. Rayleighův rozptyl na koloidních částicích nazýváme Tyndallův. Projeví se jako typická Tyndallova modř, která je u živočichů poměrně běžná. Využívá ji mnoho ryb, plazů, ptáků i savců. Obvykle je způsobena přítomností guaninových částíček. Ty jsou také klíčem k modrému povrchu peří ptáků. Mezi savci se vykytuje Tyndallova modř zejména v očích a na kůži.

V koloidálním systému, kde jsou částice větší než vlnová délka světla, dochází k bílému Mieovu rozptylu. Ten můžeme najít např. u šupin motýlího křídla, kde je světlo rozptýleno rovnoměrně a kompletně ve všech směrech díky náhodnému uspořádání a velikosti koloidních částic. Jestli bude bílá barva matná nebo perleťová závisí na složitosti a uspořádání struktur, které ovlivňují relativní stupeň rozptylu.



Obr.20: a) Rozptylem způsobené modré zbarvení peří severoamerické sojky Stellerovy (*Cyanocitta stelleri*) (<http://www.wildlifenorthamerica.com/Bird/Stellers-Jay/Cyanocitta/stelleri.html>)

Obr.21: modré zbarvení tváří některých zástupců primátů čeledi kočkodanovitých (*Cercopithecidae*) (<http://betaphilings.com/?p=828>).

5.4.2 Absorpce

Absorpce světla je jedním z důvodů barevnosti látek, pozorovaná barva je doplňková k barvě absorbované. Molekula látky přijímá takové kvantum světelné energie, která se rovná přechodu molekuly ze základního stavu do stavu vzbuzeného (přechod z jedné energetické hladiny na druhou). Této excitační energii odpovídá podle Planckova vztahu daná frekvence resp. vlnová délka.

Meze, ve kterých se jeví látka barevná, odpovídají hodnotám relativně nízké excitační energie. Toho je dosaženo u třech skupin chemických látek: anorganických látek tvořené přechodnými kovy, komplexních sloučenin a u organických látek obsahující systém konjugovaných dvojných vazeb. V živé přírodě se nejvíce uplatňuje poslední skupina tj. organické látky s konjugovanými dvojnými vazbami. Chemicky se jedná se o nevelký počet typů molekul a jejich derivátů. Mezi nejvýznamnější patří karotenoidy, chinonová, pyranová, indolová, pyrolová a pteridinová barviva.

Některé z těchto látek mají významnou biologickou funkci. Tvoří zrakový pigment rhodopsin, umožňující vnímání světla u většiny živočichů. Karotenoidy spolu s chlorofylem přijímají sluneční energii při fotosyntéze, umožňující tak život mnoha organismů na Zemi. Hem jako součást krevních barviv umožňuje transport kyslíku a oxidu uhličitého v krevním systému. Melanin tvoří pigmentovou vrstvu sítnice, a tak umožňuje vidění. Zesiluje buněčné stěny rostlin a kutikulu hmyzu.

5.4.3 Luminiscence

Luminiscence je schopnost některých látek světélkovat po dodání energie různého druhu. Pokud je dodávaná energie ve formě záření, dochází k fotoluminiscenci (fluorescence a fosforescence). Pokud jde o energii chemické reakce, mluvíme o chemiluminiscenci, v biologických systémech o bioluminiscenci.

Fotoluminiscenci pozorujeme u týchž molekul, u kterých pozorujeme také absorpci ve viditelném záření. Tyto látky umožňují energetický přechod s dostatečně nízkou energií, které odpovídá vlnová délka dostatečně velká, tak že zasahuje do viditelného spektra. Toho je dosaženo zejm. u aromatických uhlovodíků často spolu s atomy dusíku nebo síry. Ačkoliv byla fluorescence v přírodě objevena ojedinele u mořské medúzy *Aequorea victoria*, význam tohoto objevu byl vskutku revoluční. Fluorescenci umožňuje tzv. zelený fluorescenční protein (GFP), ten byl nedlouho po objevu využit k výzkumu všech možných organismů a stal se podkladem fluorescenční mikroskopie. Nyní se nalézá v laboratořích téměř celého světa.

Bioluminiscence je v přírodě daleko častější, využívají ji zejm. noční a hlubokomořští živočichové, tedy v podmínkách s nízkou intenzitou světla. Slouží jim k lepšímu vidění, ke komunikaci, ochraně před predátory i k lákání kořisti. V přírodě můžeme najít více jak třicet chemicky nepříbuzných bioluminiscenčních systémů u různých skupin organismů v rozmezí emise od modrofialové barvy až po červenou.

5.5 Oko

Struktura webových stránek

Vývoj oka

Kapitoly

- První oči
- Kolikrát se oko vyvinulo?
- Vývojové typy oka
- Vývoj komorového oka žahavců
- Vývoj komorového oka měkkýšů
- Vývoj komorového oka obratlovců
- Vývoj složeného oka

Komorové oko

Kapitoly

- Anatomie oka obratlovců
- Typy komorových očí
- Srovnání oka ryb a hlavonožců
- Velikost oka
- Oči hlubokomořských živočichů
- Komorové oči pavouků
- Komorové oči hmyzu

Složené oko

Kapitoly

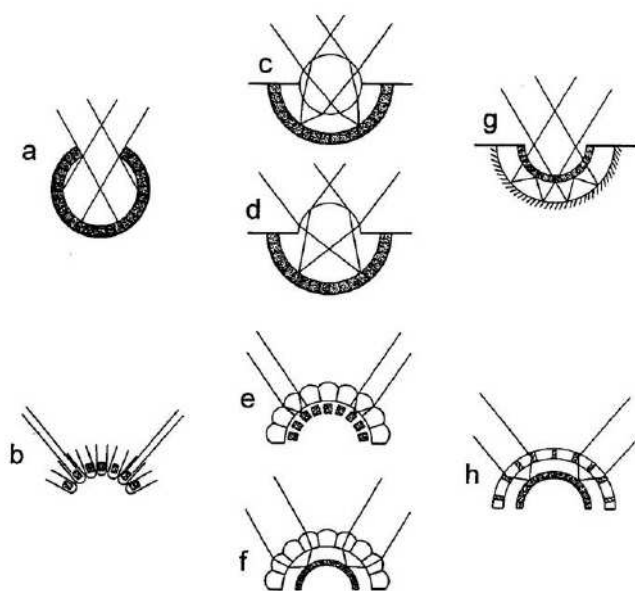
- Anatomie složeného oka
- Fyziologie složeného oka
- Typy složeného oka
- Pseudozornice

5.5.1 Vývoj oka

Ačkoliv život existuje více než 3,5 miliardy let, zrak se u živočichů vyvinul zhruba před pouhou půl miliardou let. Vznik oka je spjatý s kambrijskou explozí. Tak je označována přelomová evoluční událost, kdy se během několika milionů let vyvinula bohatá fauna velkých, aktivně se pohybujících živočichů. Právě aktivní pohyb byl důležitým impulzem k vývoji oka.

Často diskutovanou otázkou je kolikrát se oko vyvinulo. Souhrnně můžeme říci, že molekuly fotopigmentu – opsinu – mají zřejmě původ u společného předka všech organismů, fotoreceptorové buňky se vyvinuly nezávisle minimálně dvakrát, a celé oko se vyvinulo několikrát. Všechny vývojové typy komorového oka můžeme pozorovat u měkkýšů. Nacházíme zde jednoduché miskovité oči (přilipka) i vysoce vyvinuté komorové oko s akomodující čočkou u hlavonožců. Vyvinuté komorové oko bez čočky nalézáme u loděnky, které je příbuzná amonitům, skupině, která dominovala prvohorní a zejm. druhohorní fauně po dobu asi 500 milionů let.

Složené oko tvoří konvexní strukturu. U apozičního složeného oka (většina denního hmyzu) každá z čoček vytváří malý obraz. U superpozičních očí (nočního hmyzu a hlubokomořští korýši) čočky nebo zrcadla vytvářejí společně jeden hluboko ležící obraz.



Obr.22: Typy oka

a) primitivní komorové oko bez čočky - u ploštěnců, některých kroužkoců a měkkýšů, své dokonalosti dosáhlo u loděnky (*Nautilus*).

b) primitivní složené oko - každý receptor je chráněn od svého okolí jednoduchou pigmentovanou trubicí - u některých mlžů.

c) komorové oko vodních živočichů - u ryb a hlavonožců

d) komorové oko suchozemských živočichů - suchozemský obratlovci, pavouci a některé larvy hmyzu

e) apoziční složené oko - denní hmyz a

korýši (např. včely a krabi), každý receptor má svoji vlastní čočku f) refrakční superpoziční složené oko - u živočichů žijící v tmavého prostředí (můry, korýši – krill), mnoho čoček přispívá k celkovému obrazu v odpovídacích bodech sítnice g) komorové oko s konkávním zrcadlem - prakticky jediným příkladem je hřebenatka rodu *Pecten* h) reflexní superpoziční oko - využívá zrcadel, u dekapodních korýšů (Land, Nillson, 2009).

5.5.2 Komorové oko

U oka obratlovců můžeme rozeznat tři základní vrstvy: vazivovou vnější vrstvu tvořenou rohovkou a bělimou, cévnatou střední vrstvu tvořenou cévnatkou, řasnatým tělesem a duhovkou a vnitřní vrstvu tvořenou sítnicí. Vnitřní struktury oka představují čočka, sklivec a komorový mok. O těchto strukturách pojednává úvodní kapitola.

Komorové oči můžeme rozdělit s ohledem na přítomnost čočky nebo zrcadla. V případě přítomnosti čočky se jednotlivé typy očí liší především životním prostředím (suchozemští x vodní živočichové). U vodních se liší způsobem eliminace sférické aberace.

Funkční podobnost očí hlavonožců a ryb je až překvapivě podobná navzdory odlišnému evolučnímu vývoji. Velké oko obratlovců je výhodné jak z hlediska citlivosti tak z hlediska rozlišovací schopnosti. Důležitějším kritériem je zřejmě druhá vlastnost. Velikost oka především určuje možnosti vodních živočichů lovit v noci nebo ve velké hloubce. Oči hlubokomořských živočichů jsou typicky přizpůsobeny malé intenzitě světla, obvykle mají nízkou rozlišovací schopnost.

Komorové oko se ze skupiny bezobratlých živočichů nachází zejm. u pavouků. Pavouci mají 3 až 4 páry očí. Díky rozdělení funkce mezi primární oči umístěné blízko sebe s vysokým rozlišením a dlouhou ohniskovou vzdáleností a sekundární, mnohem menší oči, sloužící k perifernímu vidění a tak vyžadující nižší rozlišení, jsou někteří pavouci schopni zachytit velkou část prostoru v dobré kvalitě.

5.5.3 Složené oko

Z hlediska počtu druhů, které je užívají, jsou složené oči zdaleka nejpopulárnější typ očí. Oko tvoří konvexní strukturu složenou z mnoha optických systémů na rozdíl od konkávních komorových očí, které tvoří jednotný optický systém.

Složené oči dělíme na apoziční a superpoziční. Typy apozičních očí se dále liší uspořádáním čočky u suchozemských a vodních bezobratlých. Adaptací na tmou je neurální superpozice apozičního oka. U superpozičního oka rozeznáváme podle mechanismu tři podtypy: refrakční, reflexní a parabolickou superpozici, které využívají jednak čočky jednak zrcadla.

Složené oko funguje zjednodušeně jako soubor fotobuněk. U apozičního složeného oka, například u mnoha zástupců denního hmyzu, každá z čoček vytváří malý obraz. U superpozičních očí, které jsou mnohem běžnější u nočního hmyzu a hlubokomořských korýšů, čočky (nebo někdy zrcadla) vytvářejí společně jeden hluboko ležící obraz. Velká část složených očí umožňuje vnímání polarizovaného světla.

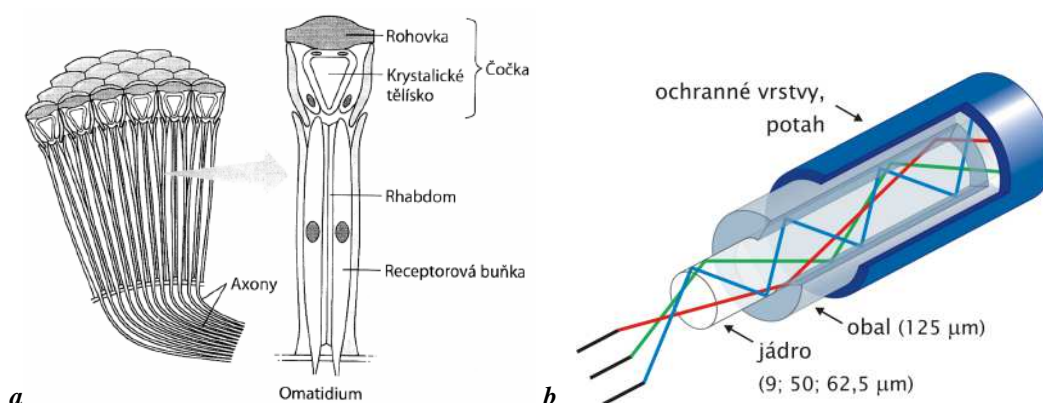
Pseudozornice představuje zvětšený splývající obraz opakujících se struktur v okolí ústí rhabdomů ve společné ohniskové rovině facetových čoček, který můžeme pozorovat na složených očích hmyzu. Jedná se o tmavou skvrnu, jež se pohybuje přes oko spolu s pozorovatelem. Tento jev umožňuje neinvazivními metodami studium struktury apozičního oka.

6 Biologie a technika

Příroda je významným zdrojem inspirací pro techniky. V následujícím souhrnu uvedeme čtrnáct příkladů paralelního uplatnění aplikace fyzikálních principů v živé přírodě a v technice.

6.1 Optické vlnovody

Aby mohl být optický signál doveden až k receptorům s minimálním rozptylem, využívají různé struktury očí úplný odraz a fungují tak jako optické vlnovody. Tento princip nacházíme u omatídií složených očí i u fotoreceptorových a Mülerových buněk komorového oka obratlovců. Pokud šířka fotoreceptoru, omatídiu začíná být blízká vlnové délce viditelného světla od 0,3 do 0,8 μm , receptor není déle schopný plně zachytit světlo.



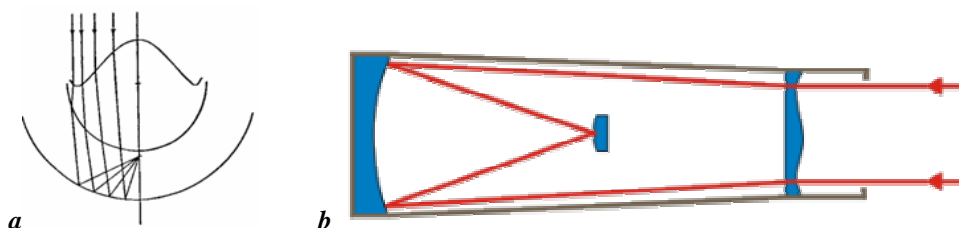
Obr. 23) Hmyzí omatídium, využívající princip optického vlákna b).

V úzkých vlnovodech, podobně jako ve fotoreceptorech, procházející světlo vytváří difrakční obrazce, které jsou známé jako vlnovodné módy. Především jednoduché módy charakteristické pro nejužší trubice mají značnou část své energie vně těchto trubic, proto v technice využívají silné pláště (část energie se šíří pláštěm), to však není možné u receptorů. Nejenomže světlo není zachyceno molekulami rhodopsinu uprostřed receptoru, ale také může být absorbováno pigmentovými granulemi nebo sousedními receptory. Tyto jevy pak vedou k rozmazání obrazu a jsou limitem optického rozlišení.

6.2 Zrcadlo, Newtonův teleskop a koutové odražeče

Neschopnost vytvářet povrchy z lesklých kovů na první pohled vylučuje u živočichů existenci orgánů s funkcí zrcadel. Přírodní zrcadla jsou v přírodě u živočichů přesto široce rozšířena, fungují však na principu interference. Jsou tvořena mnoha vrstvami střídaně s nízkým a vysokým indexem lomu. Princip zrcadla spočívá v pozitivní interferenci mezi

světlem odraženým z horního a spodního povrchu každé vrstvy. Barevnost monochromatických zrcadel je jedním z principů strukturálního (fyzikálního) zbarvení živočichů.

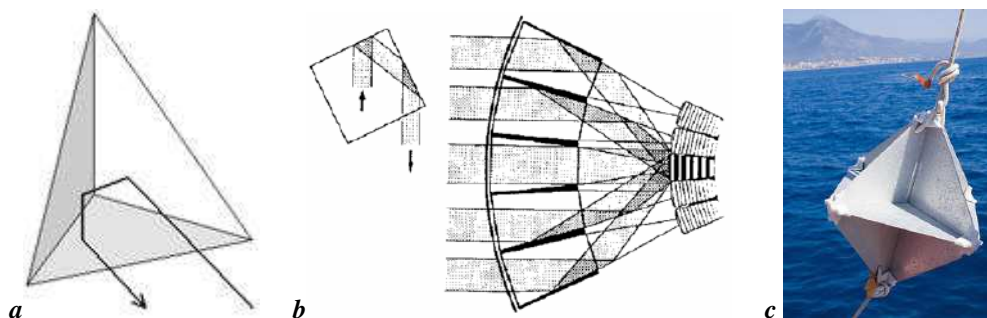


Obr. 24) Průchod paprsku okem hřebenatky upraveno (Land & Nilsson, 2009), **b**) Newtonův teleskop (wikipedia.org).

Podobně jako Newtonův dalekohled v technice jsou konkávní zrcadla alternativou k využití čoček. Tuto alternativu však využila pouze malá skupina živočichů. Významnější kvality obrazu tyto oči dosáhly jedině u mořského mlže hřebenatky (*Pecten*), kde fungují právě jako Newtonův dalekohled. Parabolická zrcadla nalezneme také u některých hlubokomořských korýšů sice s minimální rozlišovací schopností nicméně dobrou citlivostí. Dále tento typ využívá i jeden druh složených očí – parabolicky superpoziční oči vyskytující se u krabů (*Brachyura*) a poustevníčků (*Anomura*).

Zrcadla využívají také dva typy superpozičních složených očí bezobratlých. Reflexně superpoziční oči u některých dekapodních korýšů využívají princip koutových odražečů. Ty se obvykle skládají ze tří navzájem kolmých ploch. Představují elegantní způsob jak odrazit vlnění zpět ve směru přicházejících paprsků. V technice se využívají na lodích jako radarové terče, či značky ke zvětšení bezpečnosti v automobilismu či cyklistice. Pracují i na mikrovlnné úrovni. V optice je tvoří tři kolmá zrcadla, nebo reflektivní prizma.

Daleko běžnější jsou tapeta – zrcadlové interferenceční multivrstvy umístěné za sítnicí. Jejich funkcí je odrážet světlo soustředěné čočkou zpět skrz sítnici. Zdvojnásobují šanci zachycení fotonů receptory a zvyšují tak výrazně citlivost oka na světlo. Tapeta obsahují komorové oči obratlovců i pavouků žijících v hloubce moře nebo aktivní v noci.



Obr. 25) Princip koutového odražeče, **b**) Princip reflexní superpozice, **c**) koutový odražen na lodi (upraveno podle Land & Nilsson, 2009).

6.3 Čočka

Dobrý zrak většiny živočichů je umožněn přítomností optických čoček. Vzhledem k nízkému rozdílu indexu lomu mezi čočkou a vodním prostředím slouží u vodních živočichů (zejm. ryb a hlavonožců) k zajištění dostatečné optické mohutnosti („lámavosti“) čočky jednak co nejmenší poloměr křivosti (čočka má tvar koule), jednak rostoucí index lomu od periferie směrem do středu. V technice má na rozdíl od přírodních materiálů korunové a zejména flintové sklo o něco vyšší index lomu. Gradientu indexu lomu se využívá u tzv. optiky GRIN.

Evoluční přechod živočichů z vody k suchozemskému způsobu života byl současně důležitou změnou oka. Rohovka získala díky rozdílu indexu lomu mezi vzduchem a vodou optickou mohutnost srovnatelnou s čočkou. Oko s takovou rohovkou a současně rybím typem čočky by však mělo příliš velkou optickou mohutnost, a různé skupiny živočichů se s touto změnou různým způsobem vypořádaly.

Důležitým kritériem řešení problému byla především denní nebo noční aktivita. Denní živočichové preferovali redukci čočky a ponechání zakřivené rohovky, u nočních živočichů s velkýma očima je hlavním nositelem optické mohutnosti silná čočka umístěná velmi blízko před sítnicí a plošší rohovka.

6.4 Čočka s nehomogenním indexem lomu (optika GRIN)

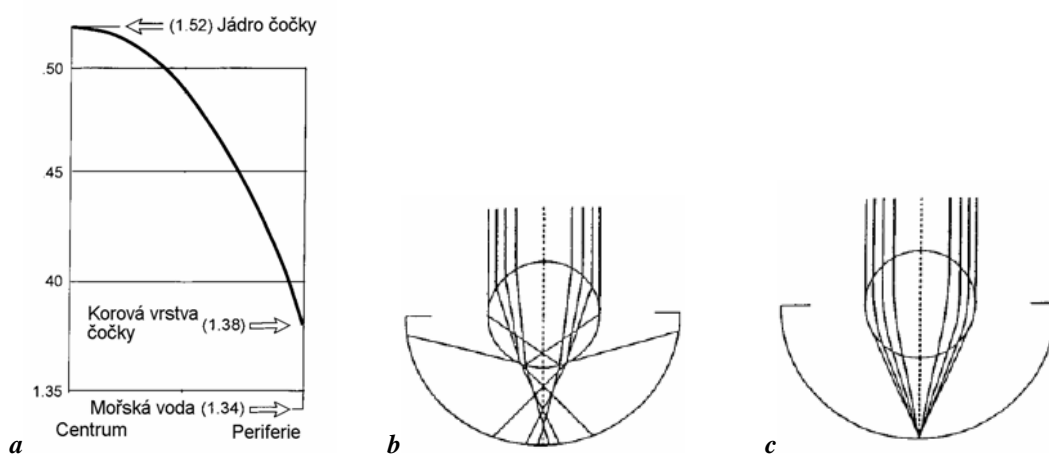
Pokud by kulovitá čočka ryb a jiných vodních živočichů byla homogenní (v celém objemu se stejným indexem lomu), sférická aberace byla natolik výrazná, že by obraz na sítnici byl úplně zkreslen (paprsky z jednoho bodu v nekonečnu by po průchodu čočkou nedopadaly do společného ohniska). Většina vodních živočichů vyřešila tento problém vývojem čočky s gradientem indexu lomu (tzv. Mathiessenova čočka). U této čočky rovnoběžné paprsky monochromatického světla dopadají do společného ohniska na sítnici.

Protože jsme my, lidé, stejně jako ostatní savci, evolučními "potomky" ryb, také naše čočka má gradient indexu lomu, i když v daleko menší míře. U člověka má jádro oční čočky index lomu 1,42, periferie 1,37. Vzhledem k většímu podílu optické mohutnosti rohovky než čočky je u suchozemských obratlovců klíčová korekce sférické aberace asférickým tvarem rohovky.

Jinak je tomu u krys a ostatních savců s nočním typem oka s velkou sférickou čočkou. Většina těchto savců totiž potřebuje široké zorné pole k zajištění co největší citlivost a plošší rohovka nemůže plně využít asférické korekce jako u denních obratlovců. Čočka

má výrazný gradient indexu lomu podobný jako rybí čočky. Tak čočka koriguje nejen vlastní aberaci, ale i aberaci rohovky.

V technice se analogicky využívá optických prvků s nehomogenním indexem lomu. (tzv. optika GRIN). Paprsky procházející čočkou s homogenním indexem lomu mají tvar přímky resp. úsečky. Jestliže však světelný paprsek prochází prostředím, ve kterém hodnota indexu lomu závisí na souřadnicích $n = n(x, y, z)$, vykazuje dráha paprsku tvar obecné křivky. Tento typ čoček nazýváme gradientními, často označovány jako prvky GRIN (GRadient INdex). Pod tímto označením je myšleno rotační symetrické rozložení indexu lomu kolem optické osy. Čočky, u nichž je index lomu proměnný v závislosti na poloze ve směru osy z , jsou označovány zkratkou AGRIN (Axial GRadient INdex). Gradient indexu lomu se využívá u čoček s plochým povrchem (součásti soustavy čoček používaných u fotokopírek a scannerů) nebo jako způsob eliminace sférické aberace u sférických čoček ve zobrazovacích přístrojích. Plochý povrch také umožňuje GRIN čočkám jednoduché zapojení do optických vláken k produkci souběžného paprsku. Optická vlákna (graded index fibros) tvořená materiálem s gradientem indexu lomu mají některé výhody oproti klasickým vlnodům založeným na totálním odraze.

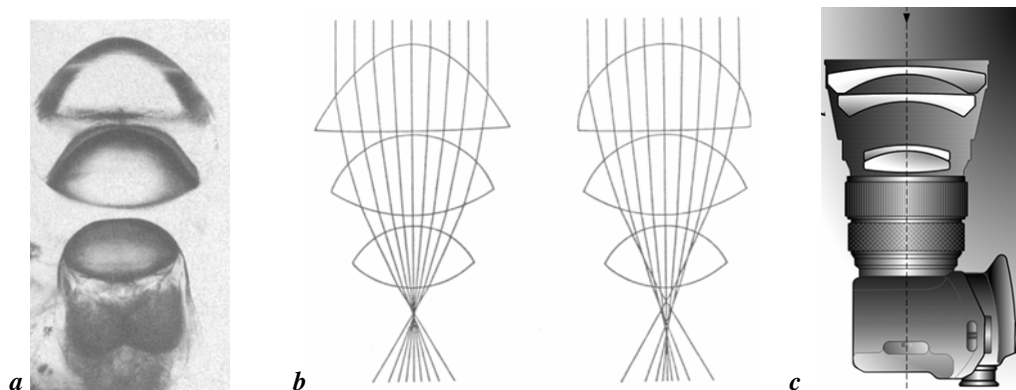


Obr. 26 a) Gradient indexu lomu (Land and Nilsson, 2009), **b)** Rybí čočka s homogenním indexem lomu (projevuje se sférická aberace), **c)** rybí čočka s gradientem indexu lomu. (upraveno podle Pumphrey, 1961).

6.5 Objektiv a achromatická čočka

Optické aberace jsou u optických přístrojů eliminovány soustavou čoček – objektivem. Jak již bylo zmíněno výše, většina živočichů eliminuje sférickou aberaci gradientem indexu lomu. U koryše rodu *Pontella* ze skupiny klanonožců (*Copepoda*) optický systém sameček tvoří tři čočky, u samic pouze dvě – přední čočka chybí. Přední povrch první čočky je navíc parabolický, další dvě čočky tvoří sférické povrchy.

Z optického hlediska se zdá, že Pontella vynalezla alternativní způsob jak se vyhnout sférické aberaci. Místo gradientu indexu lomu využila soustavu čoček podobně jako u objektivů fotoaparátů, první čočka je navíc asférická – s parabolickým povrchem.



Obr. 27 a) Tři čočky korýše Pontella **b)** Průchod paprsku touto optickou soustavou homogenních čoček, u kterých předpokládáme stejný index lomu 1,52, je znázorněn na obrázku vlevo, uvažujeme-li ve stejném uspořádání sférický tvar předního povrchu čočky (vpravo), uplatňuje se sférická aberace a rovnoběžné paprsky nedopadají do jednoho ohniska. Parabolickým povrchem je vada eliminována a získáme ostrý obraz (Land and Nilsson, 2009).

c) analogie s objektivem (http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Lens_diagrams).

6.5 Fotoaparát a dírková komora

Srovnání fotoaparátu (fotokamery) a oka napadne každého z nás. I vývoj fotoaparátu koresponduje s evolucí oka. Předchůdce fotoaparátu – dírková komora (camera obscura) odpovídá evolučně primitivním očím amonitů – skupině měkkýšů široce rozšířené v prvohorách a druhohorách, jejichž recentním příbuzným (živou fosílií) je loděnka hlubinná. Jedná se o oko bez čočky, tedy o kulovitý prostor ohraničený pigmentovým epitelem s malým otvorem, kterým dopadají paprsky na zadní stěnu tvořenou receptory a vytvářející zde nepřilíš kvalitní obraz.

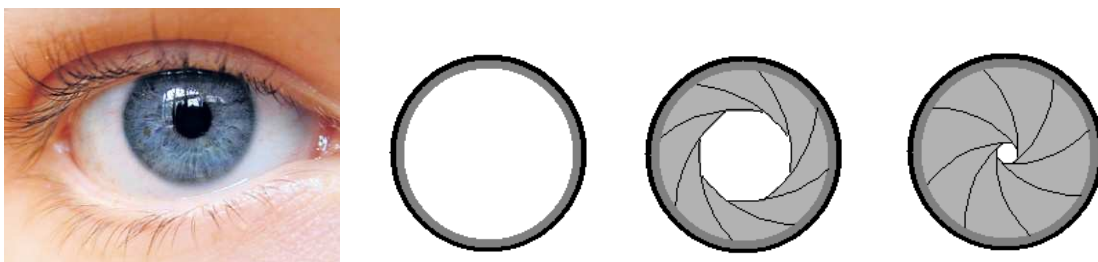
Aby bylo dosaženo většího rozlišení vývoj oka i vývoj fotoaparátu vedl k doplnění čočky do otvoru. Pokročilejší fotoaparáty a kamery podobně jako evolučně vyspělejší oči využívají optickou clonu či filtr.



Obr. 29 a) Dírková komora (camera obscura) (<http://bodytechnologies.blogspot.cz/2011/02/we-are-never-just-there-reading-history.html>) b) Loděnka (Nautilus) (<http://ucivo.webnode.cz/album/mekkysi/mekkysi-hlavonozci-lodenka-hlubinna-jpg/>).

6.6 Optická clona

Podobně jako u fotoaparátu je intenzita světla dopadajícího do oka regulována změnou průměru zornice (clony). U skutečně nočních živočichů jako jsou sovy a vačice je zornice téměř tak široká jako oko samo. Díky tomu, že průměr zornice nemůže být větší než průměr oka, velikost oka je základní parametr limitující jeho citlivost. Větší citlivost vyžaduje větší oko a skutečně většina nočních zvířat má velké oči. Mechanismus clony nacházíme u jednotlivých omatídiích apozičních očí.



Obr. 30: Zornice a optická clona (<http://www.naturess.net/>).

6.7 Optické filtry v přírodě

Některé mělko vodní ryby nebo rejnoci jako ochranu před sluncem využívají absorpce pigmentového opercula umístěného nad okem. Někteří hlavonožci (např. sépie) užívají duhovku s podobnou funkcí. Mnoho dalších ryb užívá místo pigmentového filtru interferenční zrcadlo umístěné vně oka, jejichž funkcí je eliminovat přímé sluneční světlo. Tato zrcadla mají nejčastěji zelené zbarvení, a ačkoliv jsou si podobná, je známo nejméně 6 různých uspořádání naznačující různý původ (Lythgoe, 1979). Zrcadla jsou nasměrována

tak, že světlo shora dopadá na interferenční vrstvy v pravém úhlu, čímž je dosažena vysoká odrazivost.

Jako barevné filtry slouží mnoha obratlovcům (plazi, ptáci) barevné kapénky s karotenoidy na povrchu čípků. Olejové kapénky posunují spektrální citlivost tří ze čtyř čípků ptáků k delším vlnovým délkám a zužují absorpční spektrum zrakových pigmentů, tak snižují spektrální přesah mezi pigmenty a zvyšuje počet barev, kterou jsou ptáci schopni rozlišit.

6.8 Expozice

Expozici u fotoaparátu odpovídá reakční doba receptorů, která je u různých živočichů různě dlouhá. Lidské oči rozlišují střídání jen 15 až 20 obrázků za sekundu a při rychlosti 20 až 24 obrázků za sekundu nám obraz splývá a začneme vnímat sled obrazů jako pohyb. Na tomto faktu je založen film a pohyb elektronů na obrazovce televize. Kdybychom však otočili filmy pro psy a kočky, musela by se frekvence promítání zvýšit na 30 až 40 obrázků za sekundu. Jinak tato zvířata sledují naše filmy jako rychlý sled jednotlivě promítaných diapozitivů. Ptáci jsou schopni vnímat až 150 obrazů za sekundu. Rychle létající hmyz – včely, vážky a mouchy – rozlišují 250 až 300 obrázků za sekundu a díky tomu se mohou i při nejprudším letu mistrně vyhýbat překážkám a lidská snaha plácnout je se jim jeví jako pohyb nesmírně pomalý.

6.9 Detektory obrazu

Detekce obrazu a přeměna světelného signálu na elektrický probíhá na sítnici oka. Podobně tomu je i v moderní technice, kde je světelný signál transformován na elektrický např. pomocí CCD prvků. Receptory sítnice ovlivňují obě hlavní kvality detektoru – citlivost a rozlišení. Tyto vlastnosti jsou kromě fyzikálních limitů optického aparátu určeny i velikostí, hustotou a rozložením receptorů.

Na rozdíl od detektorů v technice, jsou receptorové buňky na sítnici očí živočichů rozmístěny nerovnoměrně. Signál z receptorových buněk je často navíc nerovnoměrně komprimován do menšího počtu nervových buněk. Toto nerovnoměrné rozložení a přenos signálu závisí na důležitosti jednotlivých částí zorného pole živočicha a jeho životním stylu.

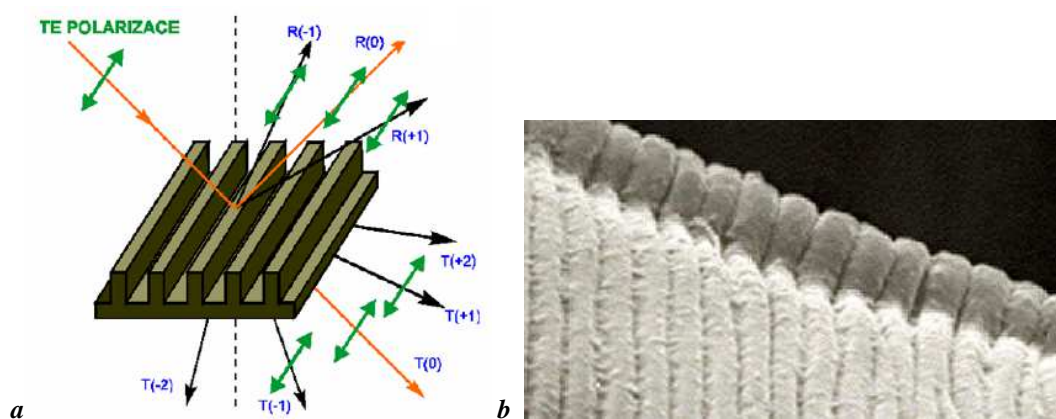
U primátů včetně člověka je oblast s nejvyšší hustotou čípků představována tzv. centrální skvrnou (fovea centralis), kde je vysoká hustota čípků zajišťující vidění s vysokou rozlišovací schopností. To je však možné při vyšší intenzitě světla. Jedná se o fotopické vidění. Naopak tyčinky rozložené i v periférii sítnice zajišťují vidění při nižším osvětlení – skotopické.

6.10 Akomodace a zoom

Světelné paprsky odražené od předmětů ve větší vzdálenosti přicházejí do oka prakticky již navzájem rovnoběžné a po lomu spojnou soustavou oka se protínají v ohniskové rovině, která leží právě v úrovni fotoreceptorů sítnice. Pokud se nazíraný objekt přiblíží k oku pozorovatele do menší vzdálenosti, budou světelné paprsky z něho vyzařované nebo odražené přicházet do oka jako rozbíhavé. Pokud by nedošlo ke změně v optickém aparátu oka, světelné paprsky by se protnuly a vytvořily obraz v rovině, která by ležela za sítnicí, a obraz by byl rozmazaný. Vzrůst optické mohutnosti oka při pohledu na blízké předměty se označuje jako akomodace. Různé organizmy jí dosahují různým způsobem, nejčastěji změnou zakřivení čočky, rohovky, nebo změnou obrazové vzdálenosti tj. vzdálenosti mezi čočkou a sítnicí podobně jako zoom u fotoaparátu.

V přírodě můžeme sledovat vývoj akomodačních mechanismů. U kruhoustých (mihule) čočka není fixována a akomodace se děje pouhými změnami tlaku v přední a zadní komoře oka. U ostatních obratlovců je již čočka zavěšena na ciliárním tělese, akomodace vzniká posouváním čočky směrem do přední komory oční, čočka je však nepružná. U plazů, ptáků a savců se uplatňuje změna tvaru čočky, přičemž hlavní úlohu má ciliární sval.

6.11 Difrakční mřížky



Obr. 31: a) princip difrakční mřížky (<http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/optika/optika.html>)

b) elektronový snímek struktury chlupu tykadel lasturnatky *Azygocypridina lowryi*, šířka jedné vrstvy je 600 nm (Parker 2006).

Difrakční mřížky jsou struktury periodicky se opakujících elementů (štěrbín, proužků, vrypů) ve vzdálenosti srovnatelné s vlnovou délkou dopadajícího světla. Na každém z elementů mřížky dochází k difrakci při dopadu světla a výsledný difrakční obrazec je dán

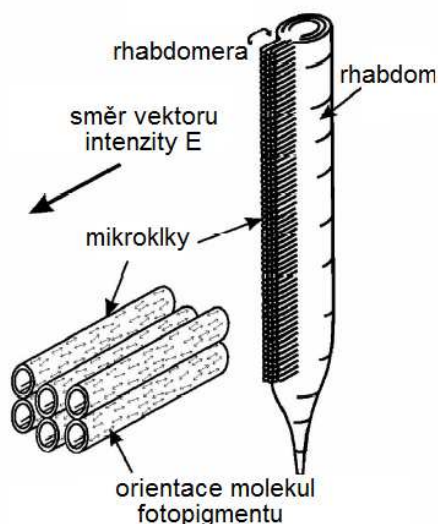
konstruktivní interferencí. Mechanismus difrakční mřížky byl v přírodě poprvé objeven teprve nedávno, v roce 1995 u koryše *Azygocypridina lowryi* ze skupiny lasturnatek (*Ostracoda*). Od té doby byla popsána u různých druhů bezobratlých často se vyskytující na povrchu chlupů.

Chlupy na prvních tykadlech lasturnatky *Azygocypridina lowryi* vykazují iridescenci díky difrakci obdobně jako můžeme pozorovat na CD nebo hologramech. Mění barvy od fialové k červené podle změny úhlu pohledu pozorovatele. Snímek z elektronového mikroskopu ukazuje periodickou strukturu o periodě 600 nm. Tento druh žije na východním pobřeží Austrálie v hloubce od 100 do 500 m.

6.12 Využití polarizace světla k navigaci

Světlo ze slunce je nepolarizované, to znamená, že obsahuje fotony, jejichž vektor intenzity elektrického pole kmitá ve všech možných směrech kolmo na směr šíření. K polarizaci dochází dvěma způsoby – rozptylem a odrazem. Při průchodu slunečního záření atmosférou dochází jednak k rozptylu za vzniku modrého světla, současně vzniká také polarizované světlo. Výsledkem jsou polarizační obrazce na obloze, které přetrvávají i při zatžené obloze.

Tyto obrazce pak slouží pro navigaci a orientaci mnoha organismů, ta pak umožňuje jejich migraci a rozšíření. Nejlépe je jejich vjem doložen u včel a mravenců. Popsané jsou však u mnoha dalších živočichů z různých skupin (ptáci, plazi, ryby, hmyz, koryši).

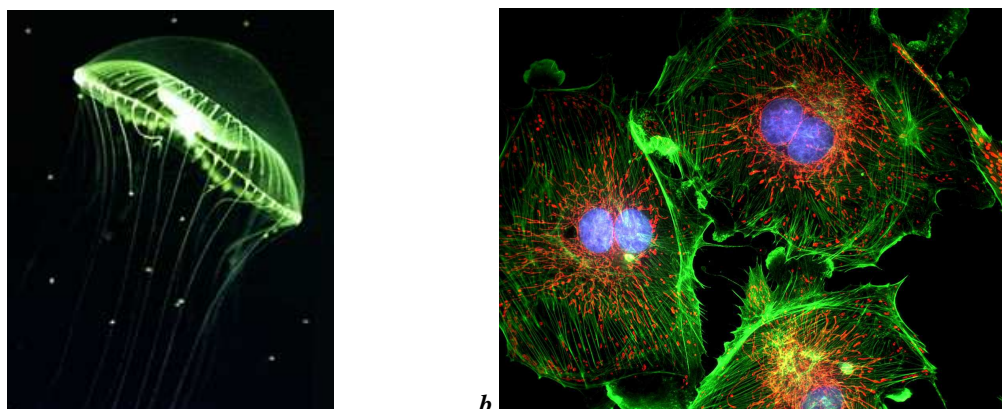


Obr. 32: Receptory hmyzu jsou schopné díky orientaci molekul fofopigmentu vnímat lineární polarizaci světla (podle Repper, 2004).

6.13 Fluorescence

Fluorescence je typ luminiscence (schopnosti emitovat světlo), kdy zdrojem excitace je UV záření nebo viditelné světlo. Vyzáření energie vzniká přechodem mezi nejnižší vibrační hladinou S_1 na jednu z vibračních hladin S_0 . V přírodě je fluorescence zastoupena ojediněle, nicméně s obrovským významem u zeleného fluorescenčního proteinu (GFP protein). Ten byl objeven r. 1962 u medúzy *Aequorea victoria*. Nejdříve byl izolován protein odpovědný za bioluminiscenci – aequorin. Ten v přítomnosti kladně nabitých vápníkových iontů emituje modré světlo. Následně byl izolován další protein, který silně zeleně fluoreskoval. Jeho absorpčnímu maximu odpovídá 400 nm a emisnímu maximu 505 nm. Bylo zjištěno, že modré světlo aequorinu je absorbováno GFP proteinem, který jej vysvítí jako zelené. Ve skutečnosti je situace složitější – aequorin neemituje světlo, ale nezářivým přenosem (FRET) předá energii zelenému fluorescenčnímu proteinu, který ji pak vyzáří ve formě zeleného světla.

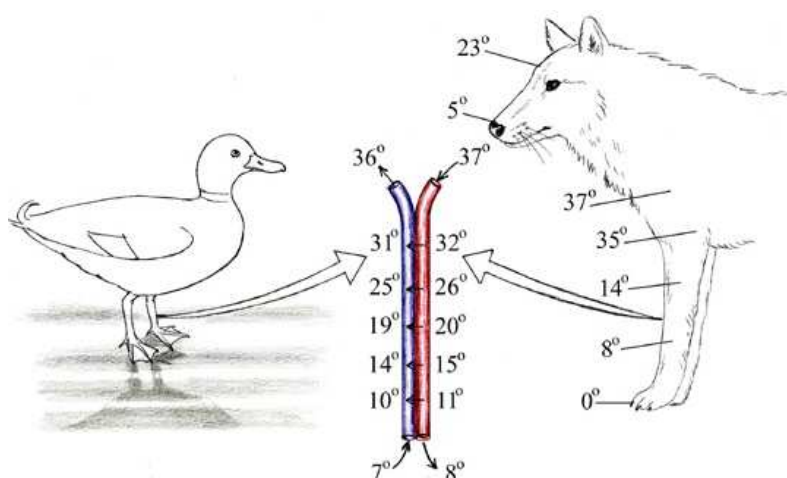
Objev GFP proteinu představoval přelom ve studiu buněčné fyziologie, biochemie a histologie. Pokud vneseme genovou sekvenci kódující zelený fluorescenční protein do zvolené buňky a necháme protein syntetizovat, za přístupu kyslíku se stane fluoroforem. To umožňuje připojit zelený fluorescenční protein k téměř libovolným proteinům, v buňce je „rozsvítit“ a pozorovat další osud studovaného proteinu mikroskopem po osvětlení modrým světlem. Po genetické modifikaci GFP proteinu bylo možné rozšířit emisní spektrum i na jiné vlnové délky. GFP protein se tak stal podkladem fluorescenční mikroskopie. Nyní se nalézá v laboratořích téměř celého světa.



Obr. 33: *a) medúza Aequorea victoria b) Mnohobarevná fluorescence pomocí fluorescenčního mikroskopu, obrázek dělících se buněk, dvě jádra modře, zeleně cytoskelet, červeně mitochondrie (<http://www.dvcco.com/resources/applications/life-sciences/fluorescence-microscopy/>).*

6.14 Tepelný výměník

Princip tepelného výměníku v sobě slučuje oba způsoby přenosu tepla, tedy proudění i vedení. Jedná se o dvě proudící tekutiny (kapalinu nebo plyn) oddělené tepelně vodivou přepážkou. V přírodě se vyskytuje poměrně často zejména jako tzv. protiproudový systém. Jedná se o mechanismus regulace teploty těla – zamezení úniku tepla vedením při kontaktu těla s chladným povrchem (princip tepelných výměníků – nohy ptáků, polární šelmy (lišky, vlci), ploutve tuleňů, mořských želv, ryb,...), u hmyzu – udržení vyšší teploty thoraxu – umožnění letu v nepříznivých podmínkách, zamezení přehřátí u přímorožce – chlazení mozku.



Obr. 34: Protiproudový výměník tepla v noze arktického vlka a v noze kachny nocující na ledě. Uprostřed schéma přestupu tepla z arteriální krve (červeně) směřující na periferii do venózní krve (modře) vracející se do centra těla. To přispívá k zabránění úniku tepla do prostředí a udržení tepla v tepelném jádru těla. (JK podle Hickmana et al., 2004 a Millera a Harleye, 2005).

7 Závěr

Disertační práce se zabývá aplikací optiky a termodynamiky v živé přírodě. Hlavním výstupem disertační práce jsou dva webové projekty: Termodynamika v přírodě a Optika v přírodě. Jedná se o strukturované komplexy webových stránek s tematikou na pomezí fyziky, biologie a chemie. Je v nich prezentováno uplatnění fyzikálních principů a zákonitostí ze dvou výše zmíněných oblastí fyziky v živé přírodě. Součástí optické části je i přehled technických vynálezů, které principiálně odpovídají některým jevům v živé přírodě.

Součástí termodynamické části práce jsou prezentace a rozbor některých neživých disipativních struktur (hydrodynamické nestability, chemické oscilační reakce a chemické vlny). Jsou uvedeny jako inspirace k pochopení živých organizmů z hlediska nerovnovážné termodynamiky. Také jsou zde analyzovány souvislosti disipativních struktur s živým světem.

Součástí webových stránek jsou i excelovské aplikace kvantitativně popisující některé fyzikální principy. Webové stránky vznikly jako studijní a vyučovací pomůcka pro studenty středních a vysokých škol i jako pomůcka pro širokou veřejnost zajímající se o fyziku.

Jak už jsem zmínil v úvodu práce, cílem disertační práce tedy je přispět k mezioborovému propojení fyziky, biologie, chemie a techniky. Proto jsem při její tvorbě kladl důraz především na nacházení mezioborových souvislostí, na orientaci v různorodých aspektech některých fyzikálních jevů a procesů.

Snažil jsem se klást otázky týkající se fyzikálních jevů v přírodě a hledal na ně odpovědi, příklady a aplikace. Myslím si, že právě tento přístup může poskytnout vysvětlení a nový úhel pohledu na některé přírodovědné problémy, které by jinak zůstaly v rámci učebních textů na popisné úrovni.

Podobně jsem usiloval o srovnání fyzikálních mechanismů v přírodě s technikou, které podle mého názoru může být jednak přínosné z hlediska vize přírody jako potenciálního zdroje technických řešení, jednak jako možnost k nalezení souvislostí s jevy známými z běžného života. Věřím, že obsah i forma vytvořených webových stránek vytýčený cíl disertační práce splňují.

8 Použitá literatura

Soupis literatury použitý na www stránkách uvádíme níže.

8.1 Optika

- Ahlborn: Zoological Physics, Springer – Verlag, Heidelberg, 2006.
- Alonso-Alvarez C., Doutrelant C., Sorcia G.: Ultraviolet reflectance affects male-male interactions in the blue tit (*Parus caeruleus ultramarinus*), *Behavioral Ecology* Vol. 15 No. 5: 805–809, 2004.
- Baccetti, B. and Bedini, C.: Research on the structure and physiology of the eyes of a lycosid spider I.- Microscopic and ultramicroscopic structure. *Archives Italiennes de Biologie* 102, 97-122, 1964.
- Bajgar, A.: Optoelektronický senzor polarizačního stavu prošlého světla, bakalářská práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2009.
- Bennet A.T.D, Innes C. Cuthill I.C., Partridge J.C., Lunau K.: Ultraviolet plumage colors predict mate preferences in starlings, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol. 94, pp. 8618–8621, 1997.
- Bernard, G.D. and Miller, W.H.: Interference filters in the corneas of Diptera. *Investigative Ophthalmology*. 7,416-434, 1968.
- Blest, A.D.: The fine structure of spider photoreceptor in relation to function. *Neurobiology of arachnids* 79-102, Springer, Berlin 1985.
- Brocco, S.L. and Cloney, R.A.: Reflector cells in the skin of *Octopus dofleini*. *Cell & Tissue Research* 205, 167-86, 1980.
- Bryceson, K.P. and McIntyre, P.: Image quality and acceptance angle in a reflecting superposition eye. *Journal of Comparative Physiology* 151, 367-80, 1983.
- Brusca, R.C., Brusca, G.J.: *Invertebrates*. Sinauer Associates, Sunderland. 1-922, 1990.
- Buchar J., Kůrka A.: *Naši pavouci*, Academia, Praha 2001.
- Burkhardt D.: Birds, Berries and UV, A Note on some Consequences of UV Vision in Burda, *Naturwissenschaften* 69. Jahrgang Heft, 1982.
- Burkhardt D.: UV vision: a bird's eye view of feathers, *J Comp Physiol A*, 164:787-796, 1989.
- Campbell N.A., Reece J.B.: *Biology*, 8th edition, Benjamin Cummings, 2006.
- Collet, T. S. and Land, M.P.: Visual control of flight behaviour in the hovertly *Syrirta pipiens* L. *Journal of Comparative Physiology* 99, 1-66, 1975.
- Collin, S.P., and Pettigrew, J.O.: Retinal topography in reef teleosts. I & II. *Brain Behavior & Evolution* 31, 269-95, 1988.
- Černý, Jan: Zelený fluorescenční protein, *Vesmír* 88, 228, 2009/4.
- Čopíková, J., Uher, M., Lapčík, O., Moravcová, J. a Drašar P.: Přírodní barevné látky. *Chemické listy* 99, 802 – 816, 2005.
- Dacke M., Nilsson D., E., Warrant, E.J., Blest A.D., Land M.F. and O'Carroll D.C.: A new compass organ in spiders, using built – in polarizers, *Nature* 401, 470-2, 1999.
- Delhey K.: Sexual selection and blue tit (*Parus caeruleus*) crown coloration, *Dissertation der Fakultät für Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität, München* 2005.

- Denton, E.J.: On the organization of reflecting surfaces in some marine animals. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 258, 285-313, 1970.
- Denton, E.J. and Nicol, J.A.C: Reflexion of light by external surfaces of the herring, *Clupea harengus*. *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 45, 711-38, 1965.
- Douglas R.H. and Thorpe A.: Spectral transmission and short-wave absorbing pigments in the fish lens, Effects of age, *Vision Research*, Volume 33, Issue 3, Pages 301-307, 1993.
- Duke-Elder, S.: *The eye in evolution*, Henry Kimpton, London, 1958.
- Eakin, R.M.: Continuity and diversity in photoreceptors. In *Visual cells in evolution*, edited by J.A. Westfall, 91-105, Raven Press, New York, 1982.
- Eaton, M.D.: Human vision fails to distinguish widespread sexual dichromatism among sexually “monochromatic” birds. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102: 10942-10946, 2005.
- Estep L.K., Mays H. Jr., Keyser A.J., Ballentine B., Hill G.E.: Effects of breeding density and plumage coloration on mate guarding and cuckoldry in blue grosbeaks (*Passerina caerulea*), *Canadian Journal of Zoology*, 83(9): 1143-1148, 2005.
- Feynman, R. P.: *Feynmanovy přednášky z fyziky I*, 1. vyd. Praha: Fragment, 2000.
- Franze K. et al.: Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina. *PNAS*, 104(20), 8287–8292, 2007.
- Franceschini, N: Sampling of the visual environment by the compound eye of the fly: fundamentals and applications. In: *Photoreceptor optics*, pp. 98-125. Springer, Berlin, 1975.
- Fuka J., Havelka B.: *Optika a atomová fyzika, I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV.*, SPN, Praha 1961.
- Goldsmith T.H.: What Birds See, *Scientific American*, July 2006.
- Goodman, L.J.: Organization and physiology of the insect dorsal ocellar systém, *Handbook of sensory physiology*. Vol VII/6C, pp. 201-86, Springer, Berlin, 1981.
- Görner P, and Class, B.: Homing behavior and orientation in the funnelweb spider, *Agalena labyrinthica*, *Neurobiology of arachnids*, pp. 257-97, Springer, Berlin 1985.
- Gross, H, Blechinger, F., Achnner, B.(2008): *Handbook of Optical Systems, Volume 4: Survey of Optical Instruments, Optical Systems (Band 4)*, Berlin, 2008.
- Grygar J.: *Purkyňův jev a astronomie*, *Živa* 5/2011, Praha 2011.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000.
- Hardy, A: *The open sea*. Collins, London, 1956.
- Hart N.S.: The visual ecology of avian photoreceptors. *Prog Retin Eye Res.* 20:675–703, 2001.
- Hausmann F. et al.: Ultraviolet Signals in Birds Are Special, *Proceedings of the Royal Society B*, Vol. 270, No. 1510, pages 61–67, 2003.
- Herring, P.J.: Reflective systems in aquatic animals. *Comparative Biochemistry & Physiology* 109A, 513-46, 1994.
- Hesse, R.: *Das Sehen der niederen Tiere*, Fischer, Jena, 1908.
- Horváth G., Kriska G., Malik P., Robertson B.: Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution, *Front Ecol Environ*, 7(6): 317–325, USA, 2009.

- Horváth G., Varju D.: *Polarized Light in Animal Vision: Polarization Patterns in Nature*, Springer, Heidelberg, 2004.
- Horváth G. et al.: Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects, *Conservation Biology* 2010.
- Hošek, P.: Jak chameleoni vidí svět, *Vesmír* 74, 556, 1995/10.
- Hughes, A.: The topography of vision in mammals of contrasting life style: comparative optics and retinal organization. In: *Handbook of sensory physiology*, Vol. VII/5 (ed Crescitelli, F.), pp. 613-756. Springer, Berlin, 1977.
- Chalupský J.: Poštolky, které vidí ultrafialové světlo, *Vesmír* 74, 275, 1995/5.
- Chen D.M., Goldsmith T.H.: Four spectral classes of cone in the retinas of Burda, *J Comp Physiol A* 159:473-479, 1986.
- Chomoucká J.: Rozptyl (studijní text), Fakulta chemická, VUT v Brně, 2004.
- Jagger W.S. : The optics of the spherical fish lens, *Vision Research* 32, 1271-84, 1992.
- Johnson T.: Optical properties study of "Moth-eye" Anti-Reflective Metamaterials, University of Southampton, Faculty of Engineering, Science and Mathematics, 2007.
- Kinoshita S. et al.: Photophysics of Structural Color in the Morpho Butterflies, *Forma*, 17, 103–121, 2002.
- Kinoshita M. et al.: Spectral properties of identified polarized-light sensitive interneurons in the brain of the desert locust *Schistocerca gregaria*, *The Journal of Experimental Biology* 210, 1350-1361, 2007.
- Kirschfeld K. und Kunze P.: Nachruf auf Klaus Vogt, Tübingen, 2008.
- Koivula M., Korpima E., Viitala J.: Do Tengmalm's owls see vole scent marks visible in ultraviolet light? *Anim. Behav.*, 54, 873–877, 1997.
- Kortschak R. D. et al.: EST analysis of the cnidarian *Acropora millepora* reveals extensive gene loss and rapid sequence divergence in the model invertebrates, *Curr. Biol.* 13, 2190–2195, 2003.
- Kozmik Z. et al.: Assembly of Cnidarian Camera-type Eye from Vertebrate-like Components, *PNAS* 105, 8989–8983, 2008.
- Králíček, P.: Úvod do speciální neurofysiologie. Karolinum. Praha, 1995. Stran 233.
- Kröger, R. H. H., Campbell, M.C.W., Fernald, RD., and Wagner, H.-J.: Multifocallenses compensate for chromatic defocus in vertebrate eyes. *Journal of Comparative Physiology A* 184, 361-369, 1999.
- Land M.F.: The morphology and optics of spider eyes, *Neurobiology of arachnids*, 53-78, Springer, Berlin, 1985.
- Land, M.F.: Optics and vision in invertebrates. In: *Handbook of sensory physiology*, Vol. VII/6B (ed. Autrum, H.) pp. 471-592. Springer, Berlín, 1981.
- Land, M.F.: The resolving power of diurnal superposition eyes measured with an ophthalmoscope. *Journal of Comparative Physiology A* 154, 515-33, 1984.
- Land, M. F., Gibbon G., Horwood J., Zeil J.: Fundamental differences in the optical structure of the eyes of nocturnal and diurnal mosquitoes, *J Comp Physiol A* (1999) 185: 91-103, Springer-Verlag, 1999.
- Land, M.F., Nilsson, D.E.: *Animal eyes*, Oxford, 2009.

- Land, M.F., and Fernald, R.D.: The evolution of eyes. *Annual Review of Neuroscience* 15,1-29, 1992.
- Lythgoe, J.N.: *The ecology of vision*. Clarendon Press, Oxford, 1979.
- Lythgoe, J.N., and Shand, J.: The structural basis for iridescent colour changes in dermal and corneal iridophores in fish. *Journal of Experimental Biology* 141, 313-25, 1989.
- Lepil, O., Kupka, Z.: *Fyzika pro gymnázia – Optika*, Prometheus, Praha 2000.
- Marková K.: Zpracování světla očima medúzy, *Vesmír* 87, 836, 2008/12.
- Martin, G.R.: Eye. In: *Form and Junction in birds*, Vol. 3, pp. 311-73. Academic, London, 1985.
- Mäthger M.L. et al.: Mechanisms and behavioural functions of structural coloration in cephalopods, *J. R. Soc. Interface* 6, S149-S163, 2009.
- McIntyre, P., and Caveney, S.: Superposition optics and the time of flight of onitine dung beetles. *Journal of Comparative Physiology A* 183, 45-60, 1998.
- Melchior-Bonnet, Sabine: *The Mirror: A History*, Routledge, 2001.
- Messenger J. B.: Photoreception and vision in molluscs. In *Evolution of the Eye and Visual System*, pp. 364–397, 1991.
- Messenger J. B.: Cephalopod chromatophores: neurology and natural history. *Biol. Rev.* 76, 473 - 528, 2001.
- Moravcová Jitka: *Biologicky aktivní přírodní látky*. Interní studijní pomůcka, VŠCHT, Praha, 2006.
- Munk, O.: On the occurrence and significance of horizontal and band shaped retinal areas in teleosts. *Videnskabelige Meddelelser fra Dansk Natur historisk Forening* 133, 85-120, 1970.
- Nassau, K.: *The Physics and Chemistry of Color, The Fifteen Causes of Color*, John Wiley & sons, New York 2001.
- Nathans J, Thomas D, Hogness D.S.: Molecular genetics of human color vision: the genes encoding blue, green, and red pigments. *Science* 232: 193- 202, 1986.
- Newell G.E.: The eye of *Littorina littorea*. *Proceedings of Zoological Society of London* 144: 75-86, 1965
- Nicol, J.A.C.: *The eyes of fishes*. Oxford University Press, Oxford 1989.
- Nicol, J.A.C., and Arnott, H.J., and Best, A.C.G.: Tapeta lucida in bony fishes. *Canadian Journal of Zoology* 51, 69-81, 1973.
- Nilsson D. E. et al.: Advanced optics in a jellyfish eye, *Nature* 435, 201–205, 2005
- Nilsson, D. E.: Three unexpected cases of refracting superposition eyes in crustaceans. *Journal of Comparative Physiology A* 167, 71-8, 1990.
- Nilsson, D.E.: A new type of imaging optics in compound eyes, *Nature* 332, 76-8, 1988.
- Nilsson, D.E.: Optics and evolution of the compound eye. In: *Facets of vision* (eds Stavenga, D.G., and Hardie, R.C.), pp. 30-73. Springer, Berlin, 1989.
- Nilsson, D.E.: Eye ancestry – old genes for new eyes, *Current Biology* 6, 39-42, 1996.
- Nilsson, D.E., Pelger, S.: A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve, *Proceedings of the Royal Society of London* 256 53-8., 1994.
- Nilsson, D.-E. and Ro, A.-I.: Did neural pooling for night vision lead to the evolution of neural superposition eyes? *Journal of Comparative Physiology A* 175, 289-302, 1994.

- Ott M., Schaeffel, F: A negatively powered lens in the chameleon, *Nature* 373, 692-694, 1995.
- Parker, A. R.: The diversity and implications of animal – structural colours, *The Journal of Experimental Biology* 201, 2343–2347, 1998.
- Parker A.R., Martini N.: Structural colour in animals - simple to complex optics, *Optics & Laser Technology* 38, 315–322, 2006.
- Partridge, J. C., Archer, S. N. and van Oostrum, J.: Single and multiple visual pigments in deep-sea fishes. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 72, 113-130, 1992.
- Partridge, J.C. and Douglas, R.H.: Far-red sensitivity of dragon fish. *Nature* 375, 21-22, 1995.
- Pauluse, H.F.: Eye structure and the monophyly of the arthropoda, *Arthropod phylogeny*, 299-383, Van Nostrand Reinhold, New York, 1979.
- Pedler, C.: The fine structure of the tapetum cellulosum. *Experimental Eye Research* 2, 189-95, 1963.
- Pointer M. A. et al.: The visual pigments of a deep-sea teleost, the pearl eye *Scopelarchus analis*, *The Journal of Experimental Biology* 210, 2829-2835, 2007.
- Pointer, M. A., Carvalho, L. S., Cowing, J., A., Bowmaker J. K. and Hunt D. M. The visual pigments of a deep-sea teleost, the pearl eye *Scopelarchus analis*, *The Journal of Experimental Biology* 210, 2829-2835, Published by The Company of Biologists, 2007.
- Postava K.: Fyzika III – Optika, studijní text, Institut fyziky, VŠB Technická univerzita Ostrava, 2010
- Pumphrey, R.J.: Concerning vision. In: *The cell and the organism*, pp. 193-208. Cambridge University Press, Cambridge, 1961.
- Randal D., Burggren W., French K.: *Animal physiology*, New York 2002.
- Rajchard J.: Ultraviolet (UV) light perception by birds: a review, *Veterinarni Medicina*, 54, 2009 (8): 351–359, 2009.
- Repper S. M., Zhu H., White R. H.: Polarized Light Helps Monarch Butterflies Navigate, *Current Biology*, Vol. 14, 155–158, 2004.
- Roček, Z.: *Historie obratlovců*, Academia, Praha 2002.
- Rosypal, S.: *Přehled biologie*, Praha, 2003.
- Sivak, J.G., Hildebrand, T., and Lebert, C.: Magnitude and rate of accommodation in diving and non-diving birds. *Vision Research* 25, 925-33, 1985
- Schwind R.: A Variety of Insects are Attracted to Water by Reflected Polarized Light, *Naturwissenschaften* 76, 377- 378 (1989), Springer-Verlag 1989 (zde)
- Slabý P.: *Spektrální vidění členovců*, Bakalářská práce, Masarykova univerzita, Brno, 2009.
- Smith G.S.: The polarization of skylight: An example from nature, *Am. J. Phys.*, Vol. 75, No. 1, January 2007.
- Smith, C.U.M.: *Biology of sensory systems*, New York, 2000.
- Snyder, A.W. and Miller, W.H.: Telephoto lens system of falconiform eyes. *Nature* 275, 127-9, 1978.
- Somiya H.: Fishes with Eye Shine: Functional Morphology of Guanine Type Tapetum Lucidum. *Marine Ecology*, Vol. 2: 9-26. 1980.
- Stange G.: The ocellar component of flight equilibrium control in dragonflies, *Journal of Comparative Physiology A* 141, 335-47, 1981.

- Steinbrecht, R. A. et al.: Cuticular interference reflectors in the golden pupae of danaine butterflies. *Proceedings of the Royal Society of London B* 226, 367-90, 1985.
- Straka, J.: Včely a evoluce barev květů, *Vesmír* 82, 507, 2003/9, Praha, 2003.
- Stockman et al.: Spectral sensitivities of the human cones. *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 10, No. 12, 1993.
- Svoboda E. a kol.: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus, 1996.
- Šedivý, P.: Ohyb světla, studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku, ÚVFO Hradec Králové, 2007.
- Šedivý, P., Arnošt, V.: Difrakční jevy. GJKT Hradec Králové, 1994.
- Šesták, Zdeněk: Fytofluory, *Vesmír* 77, 302, 1998/6.
- Šulc M.: Role ultrafialového záření v komunikaci u ptáků, Bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha 2010.
- Tanner M. , Richter H.: Ultraviolet reflectance of plumage for parent–offspring communication in the great tit (*Parus major*): *Behavioral Ecology*, 2008.
- Trnka J.: Zobrazení čočkami, studijní text pro řešitele FO, 2005.
- Valeur, Bernard: Molecular fluorescence: principles and applications, Wiley-VCH, 2002.
- Vejražka, M.: Optické metody používané v biochemii. Studijní pomůcka, Ústav lékařské biochemie 1.LF UK, Praha 2008.
- Veselá, I.: Barvoměna živočichů, Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno, 2007
- Viitala J et al.: Attraction of kestrels to vole scent marks visible in ultraviolet light, *Nature* 373, 425-427, 1995.
- Walin, M.: Nature´s palette (How animals, including humans, produce colours). *Bioscience Explained*, 2002/1, 1-12, 2002
- Walls, G.L.: The vertebrate eye and its adaptive radiation, Cranbrook Institute, Bloomington Hilus, 1942, Reprinted 1967, Hafner, New York 1967.
- Warrant, E.J.: Seeing better at night: life style, eye design and the optimum strategy of spatial and temporal summation. *Vision Research* 39, 1611-30, 1999.
- Warrant, E., Porombka, T., and Kirchner, W.H.: Neural image enhancement allows honeybees to see at night. *Proceedings of the Royal Society of London B* 263,1521-26, 1996.
- White, R. H.: Insect visual pigments and color vision, In *Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology*, vol.6, 431-94, Oxford, 1985.
- Widder E. A.: Marine bioluminescence, *Bioscience explained* Vol.1, No1, 2001.
- Withers, P. C.: *Comparative Animal Physiology*, 1992.
- Young, J.Z.: *A model of the brain*, Oxford University Press, Oxford 1964.
- Zahradníková, H.: Barva v organických molekulách, studijní text, Fakulta chemická VUT v Brně,
- Zeil J., Al- Mutairy M.M.: The variation of resolution of ommatidial dimensions in the compound eyes of the Fiddler Crab *Uca lactea annulipes*, *The Journal of Experimental Biology* 199, 1569–1577, 1996

9.2 Termodynamika

- Ahlborn: Zoological Physics, Springer – Verlag, Heidelberg, 2006.
- Alpert N. R., Muliery L. A., Hasenfuss G. and Holubarsch, C. B., Basic Res. Cardiol., 88, Suppl. 2, 29, 1993.
- Bednář et al.: Lékařská mikrobiologie, Marvil, Praha 1996.
- Caplan S.R., Essig A.: Bioenergetics and Linear Nonequilibrium Thermodynamics, Harvard University Press, Cambridge 1983.
- Capra F.: Tkáň života, Academia, Praha 2004.
- Coveney P., Highfield R.: Mezi chaosem a řádem, Mladá fronta, Praha 2003.
- Dröschner V.B.: Magie smyslů v říši zvířat, přeložil J. Janovský, Orbis 1970.
- Duršpek J., Prokšová J.: The Nonequilibrium thermodynamics and its application in hydrodynamics, chemistry and biology, 16 th Conference of Czech and Slovak Physicists, Proceedings, Hradec Králové 2008.
- Duršpek J.: Moderní termodynamika v chemických a biologických procesech, diplomová práce, Plzeň, 2005.
- Duršpek, J.: Může termodynamika přispět k pochopení existence života?, Školská fyzika (IX), 14-21, Plzeň 2006.
- Duršpek, J.: Vznik konvekčních buněk, Veletrh nápadů učitelů fyziky 12, sborník s konference, MFF UK, Praha 2007.
- Dvořák I., Maršík I.: Biotermodynamika, Academia Praha 1998.
- Feynman, R. P.: Feynmanovy přednášky z fyziky I, 1. vyd. Praha: Fragment, 2000.
- Gleick J.: Chaos, Ando Publishing, Brno, 1996.
- Greksák, M.: Niektó to rád horúce Vesmír 79, 327, 2000/6.
- Harvard University Press, Cambridge 1983.
- Haynie T. Donald: Biological Thermodynamics, Cambridge University Press, Second Edition, 2007.
- Heinrich, B.: Heat exchange in relation to blood flow between thorax and abdomen in bumblebees, J.exp. Biol. 127:313-32, 1976.
- Hess, B.: The Glycolytic oscillator, Journal of exp. Biol., 8r, 7-14, 1979.
- Hill, A. V., Br. Med. Bull., 12, 165, 1956.
- Horák J., Krlín L.: Deterministický chaos, Academia, Praha 1996.
- Hošek P.: Netřesová termogeneze u včel, Vesmír 73, 630, 1994/11.
- Hošek P.: Čmeláčí inkubátory, Vesmír 74, 212, 1995/4.
- Illnerová H.: Blížíme se k poznání podstaty biologických hodin?, Vesmír 73, 425, 1994/8.
- Ivanickij G.R., Krinskij V.I., Selkov E.E.: Matematičeskaja biofizika kletki, Nauka, Moskva 1978.
- Jánský L.: Fyziologie živočichů a člověka, Přírodovědecká fakulta, UK Praha, 1988.
- Kauffmann S.: Čtvrtý zákon, cesty k obecné biologii, přeložil A. Markoš, Paseka, 2004.
- Kashchiev, D.: Nucleation. Basic theory with applications, Butterworth Heinemann, Sofia, 2000.
- Kratochvíl B.: Krystalizace farmaceutických substancí. Chem. Listy . 101, 3-12, 2007.
- Krempaský J.: Synergetika, VSAV, Bratislava 1988.

- Krieger, J.: *Oszillierende Chemische Reaktionen am Beispiel der Belousov-Zhabotinsky Reaktion*, 2001.
- Kostkan V: *Teplo - teplota*, studijní text, Katedra ekologie a životního prostředí PřF UP v Olomouci, 2009.
- Košťál, V.: Kryptobiotické stavy aneb Vratná zastavení životních dějů II, *Vesmír* 88, 368, 2009/6.
- Košťál, V.: Kryptobiotické stavy aneb Vratná zastavení životních dějů III, *Vesmír* 88, 480, 2009/7.
- Košťál, V. a kol.: Enzymatic capacity for accumulation of polyol cryoprotectants changes during diapause development in the adult red firebug, *Pyrrhocoris apterus*, *Physiological Entomology* 29, 344–355, 2004.
- Králíček, P.: *Úvod do speciální neurofyzologie*, Karolinum, Praha 2002.
- Markoš A.: *Povstání živého tvaru*, *Vesmír*, Praha 1997.
- Maršík F.: *Termodynamika kontinua*, Academia, Praha 1999.
- Meissner B., Zilvar V.: *Fyzika polymerů, struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, SNTL, Praha 1987.
- Moore, W.J.: *Fyzikální chemie*, SNTL, Praha, 1979.
- Murray R. K.: *Harperova biochemie*, H&H, Praha 2001.
- Nedvěd, O.: *Chladová odolnost hmyzu a tropy*, *Vesmír* 75, 669, 1996/12.
- Prigogine I., Kondepudi D.: *Modern Thermodynamics*, John Wiley & Sons, Chichester 1998.
- Prigogine I., Stengers I.: *Řád z chaosu*, Mladá fronta, Praha 2001.
- Prigogine I.: *Thermodynamic of Irreversible Processes*, John Wiley and Sons, New York 1961.
- Prokšová J.: *Entropie na středoškolské úrovni*, MFF UK, Praha 2004.
- Randall D., Burggren W., French K.: *Eckert Animal Physiology: Mechanismus and Adaptations*, W. H. Freeman and Company, New York, 5. vydání, 2002.
- Ragasová I.: *Krystalizace v podchlazeném roztoku saharozy*, diplomová práce, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice, 2012.
- Rusňák, R.: *Entropie*, Studijní text, ZČU v Plzni, 2010.
- Sacktor, B. and Wormser-Shavit, J.: *Biol. Chem.* 624, 1966.
- Sacktor, B. and Hurlbut E. C.: *J. Biol. Chem.* 632, 1966.
- Saito, Y.: *Statistical physics of crystal growth*, World Scientific Publishing, Singapore, 1996.
- Santillián M., Arias-Hernández L.A., Angulo-Brown F.: Some optimization criteria for biological systems in linear irreversible thermodynamics, *Il nuovo cimento* vol. 19, Gennaio 1997.
- Slavíček P.: *Kdy je voda nejtěžší a kdy nejlehčí*, *Vesmír* 87, 222, 2008/4.
- Starostová Z.: *Živočichové a podmínky prostředí*, studijní text, Katedra zoologie, PřF UK, 2012.
- Stucki J. W.: *Eur. J. Biochem.*, 109 (1980) 269.
- Ševčíková H.: *Chemické vlny v laboratoři i v přírodě*, *Vesmír* 75, 1996/3.
- Storchová, Z.: *Mikrosvět*, *Vesmír* 76, 612, 1997/11, Praha, 1997.
- Štrunc M., Kheilová M.: *Příklady vzniku disipativních struktur v nerovnovážných, nelineárních systémech*, VUT Brno, 1998.
- Tockstein A., Treindl L.: *Chemické oscilace*, Academia, Praha 1986.

- Uhrová I.: Termoregulace obratlovců, diplomová práce, Ústav experimentální biologie, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita v Brně, 2008.
- Vanag V. K., Míguez D.G., and Epstein I. R.: Designing an enzymatic oscillator: Bistability and feedback controlled oscillations with glucose oxidase in a continuous flow stirred tank reactor, The Journal Of Chemical Physics 125, 2006.
- Varady, M.: Přednášky z termodynamiky, učební texty, 2011.
- Videcký J.:Trojrozměrné modelování proudění mezi rotujícími koncentrickými válci, Ostrava 2001.
- Vodrážka Z.: Biochemie, Academia, Praha 1999.
- Volf I., Jarešová M., Ouhřabka M.:Přenos tepla: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku, 2008.
- Volkenstein, M. V.: Biofísica, Ed. MIR, Moscú, 1985.
- Weyda, F.: Kryptobiotické stavy aneb Vratná zastavení životních dějů I, Vesmír 88, 304, 2009/5.
- Withers, P. C.: Comparative Animal Physiology, 1992.
- Woledge, R. C., J. Physiol., 197, 685, 1968.

9.3 Webové stránky

Internetová učebnice fyziky

<http://www.ucebnice.krynicky.cz>

Výukový portál gymnázia (Gymnázium L.Jaroše, Holešov).

<http://www.gymhol.cz/projekt/>

Paleoherpetology and Evolutionary Morphology Group (Zbyněk Roček)

<http://rocek.gli.cas.cz>

Eye-design book

<http://www.eyedesignbook.com>

Earth History, a new approach (Twenty-four eyes but no brain).

<http://www.earthhistory.org.uk/corals-and-jellies/box-jellyfish>

Freshwater and Marine Image Bank, University of Washington.

<http://content.lib.washington.edu/fishweb/index.htm>

Eurospiders

<http://www.eurospiders.com/>

Encyclopedia of Life

<http://eol.org/>

Spiders of the United States and Canada

<http://www.spiders.us>

Koutové odražeče

<http://www.duckworksmagazine.com/07/howto/radar/index.htm4>

The Owl Pages

<http://www.owlpages.com/index.php>

Fuka J., Havelka B.: Optika a atomová fyzika, I., Praha 1961

http://www.opto.cz/fuka_havelka/index.html

Projekt Dobré světlo

<http://www.dobre-svetlo.cz/index.htm>

Projekt PALADIX foto-on-line:

<http://www.paladix.cz>

Proekt Fotografování

<http://www.fotografovani.cz>

Tima Laman (Wild-life photojournalist)

<http://timlaman.com/>

Optika a moderní technologie (Difrakce, difrakční struktury, holografie a mikrooptika):

<http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/optika/optika.html>

Polarization

<http://www.polarization.com/>

Chemický portál Michaela Canova

<http://canov.jergym.cz>

Laboratorní průvodce

<http://www.labo.cz/index.htm>

Chemický vzdělávací portál

<http://www.e-chembook.eu/>

Stránky Jana Preislera

<http://bart.chemi.muni.cz/>

Projekt chemické světlo

<http://projekt-cl.ujep.cz/>

Aequorea (C. E. Mills, University of Washington)

<http://faculty.washington.edu/cemills/Aequorea.html>

Green Fluorescent Protein

<http://www.conncoll.edu/ccacad/zimmer/GFP-ww/GFP-1.htm>

The Fluorescence foundation

<http://www.fluorescence-foundation.org/archives.aspx>

The Bioluminescence Web Page (Biological Science, University of California, Santa Barbara)

<http://www.lifesci.ucsb.edu/~biolum/>

Yellowstone park

www.yellowstone.net/

Dictyostelium discoideum

<http://dictybase.org>

Stéphanie Terrade: Overview of Hydrodynamic Instabilities, 2001

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optmfn/hi/01pa/hyb72/index.htm>