F7631 - Fyzikální principy přístrojů kolem nás

Petr Šafařík

19. prosince 2006

Obsah

Vytvořeno jako neoficiální pomocný učební text k předmětu *F7631 - Fyzikální principy přístrojů kolem nás* které přednášel *doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Dr.*.

Část I
Osnova

1. Pohyb suchozemských živočichů, lidská chůze
2. Malé a velké v přírodě
   (a) Geometrický pohled
   (b) Proudění tekutin a let zvířat
   (c) Zrak
3. Xerox a laserová tiskárna
4. Pohyb na kolech
5. Let letadel a vrtulníků

Část II
Přednášky

1 Pohyb suchozemských živočichů, lidská chůze

Rozdělení živočichů Většinu suchozemských kráčejících živočichů (obratlovců) můžeme rozdělit do dvou skupin podle umístění a stavby končetin. Byli by to:

- Kráčející – páteř se pravo-levě prohýbá (ještěrka (obrázek 1))
- Běžci – páteř se předozadně prohýbá (savci)

Obrázek 1: Čolek - Příklad kráčejících končetin

Práce při chůzi Když se na střední škole mluví o práci, tak se nezapomene nikdy zmínit fakt, že když táhnete těžký kufr, se kterým nepohybujete ve svislém směru, tak podle fyziky nekonáte žádnou práci... což je samozřejmě v čistém rozporu s každodenní zkušeností.

Podívejme se tedy, jak se mění těžiště kráčejícího člověka:
Hodnoty "normálního" (průměrného) člověka:
$l = 0,95m$ ... délka nohy
$d = 0,80m$ ... délka kroku
h... změna výšky těžiště.
$h = l - \sqrt{l^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$

$h = 0,1m = \frac{1}{10}d$

Z této jednoduché rovnice plyne, že pokud jdeme vodorovně dopředu, tak vykonáváme práci rovnu jedné desetině práce, kterou bychom vykonali, kdybychom se pohybovali svisle vzhůru!

Do této hodnoty jsme ovšem nezapočítali jisté prvky chůze, které jsou zde přítomny a které tento poměr ještě upravují.

Jsou to zejména:

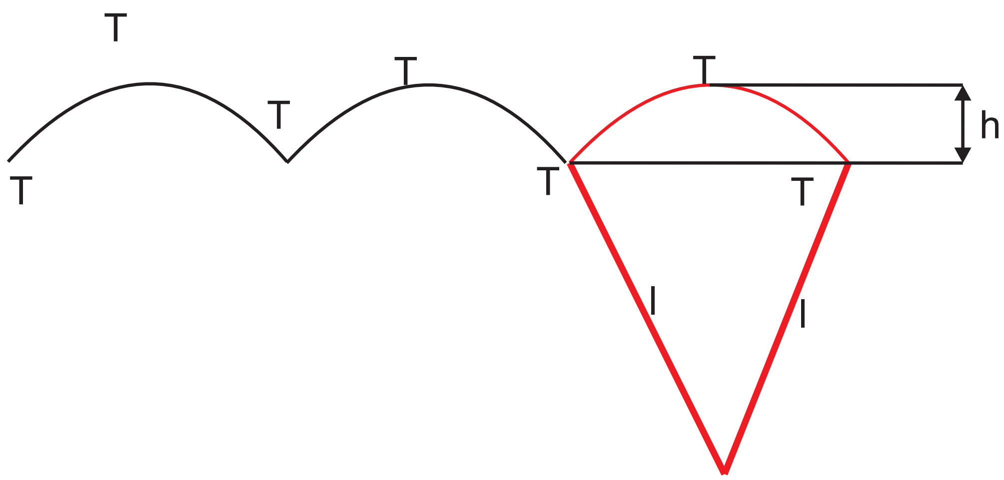
1. Ohýbání chodidla v kotníku (prodlužuje krok)
2. Natáčení pánve do boku (snižuje to těžiště)
3. Pohyb končetin

Biomechanická zásada Nejsme ovšem první, kdo se tímto jevem zabýval. Dokonce je tento jev pojmenován. Říká se mu *biomechanická zásada* a je dohodou určeh jako jedna patnáctina práce, kterou bychom vykonali, kdybychom se pohybovali svisle vzhůru.

Pokud byste to rádi matematicky, tak $E \approx \frac{1}{15}d$; kde d je délka kroku.

Mechanický výkon $P = \frac{1}{15}F_v = \frac{1}{15}mgv \doteq 60W$

Rychlost chůze V jistém sebekritickém pohledu, bychom mohli říci, že noha je matematické kyvadlo... jistě, není to hmotný bod na nehmotné niti, ale pro naši přesnost, se kterou zde budeme počítat, nám tato aproximace stačí.



Obrázek 2: Systematický nákres chůze člověka

Pokud se tedy smíříme s faktem, že naše noha není dokonalá z pohledu fyziky matematického kyvadla, ale pouze aproximativní dlouhá tyč, můžeme napsat, že perioda kmitu naší nohy je:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mga}}$$

kde a je vzdálenost těžiště nohy od osy otáčení (kyčle). Po dosazení nám pro délku nohy $l = 0,8m$ vyjde hodnota $T \doteq 1,8s$

Pro tuto hodnotu je poté snadné dopočítat rychlost chůze, která činní $v = 3,2km/h$

Proč při chůzi houpeme rukama? Jde o problém s momentem hybnosti. Když se noha (řekněme levá) posune dopředu, tak vzhledem k zákonu zachování hybnosti by se celé tělo natočilo doleva, aby byl výsledný moment hybnosti zachován. Abychom nechodili tak směšně (jen někoho přemluvte, aby se před vámi prošel a měl přitom upaženo) a taky pro spoustu dalších věcí, nám narostly ruce, kterými když mácháme, vyrovnáváme moment hybnosti.

Mechanická práce a energie Ovšem uznávám, že jsou jisté rozdíly mezi člověkem (svaly na nohou) a pružinou (kyvadlem). Dva, které nás napadnou by byly:

- Napjatá pružina nekoná práci, ale napjatý sval se unaví.
- Sval pracuje hospodárněji, podává-li menší výkon, narozdíl od pružiny, které je to celkem jedno.

Proč člověk nemá kola? Celkem nesmyslná otázka, ovšem pravý skeptik (jak bychom se dozvěděli na Filozofické Fakultě) by se zeptal: "Opravdu člověk nemá kola?" načež by pokračoval "a co je to člověk? A jsem já člověk? Jsem já vůbec já?" Naštěstí můžeme zanechat filozofie, neboť my, na fyzice, se zabýváme vědou a po jednoduchém experimentu (jsme s to se pohybovat tak, že bychom valili jen některou částí svého těla?... doufám, že nikdo nebyl s to odpovědět "ano") můžeme směle odpovědět: "*ano*".

V čem si je valení kola a chůze podobné?

Valení kola	Chůze
Těžiště zůstává v konstantní výšce	Pohyb těžiště je mírně zvlněn
Styčná plocha je vůči podložce v klidu	Styčná plocha je vůči podložce v klidu

Chůže je ekvivalentní smýkání dvou ploch s ekvivalentem tření $f = 0,07$ (přičemž koeficient smyku na rozmezí ocel – ocel se pohybuje mezi $f = 0,11$ až $f = 0,20$). Co z toho tedy plyne? Že tření nespotřebovává žádnou energii (není tam smyk) v našich svalech, ale bez něj by to samozřejmě nešlo (nebylibychom s to se hnout z místa).

2 Malé a velké v přírodě

Naše povídání o *malém a velkém v přírodě* začneme malým úvodem do historie evoluce:

Hmyz

- Etomologové hádají, že třída hmyz vznikla někdy před 350 - 400 miliony let.
- Hmyz má velice krátký reprodukční cyklus.
- Jsou skutečně malí. Nejmenší druh, parazitické vosičky, má velikost jen asi $0,2mm$.
- Je popsáno asi 1 milion druhů hmyzu, ale i tak to je asi jen jedna pětina až nanejvýš jedna polovina všech existujících druhů hmyzu.
- Odhaduje se, že je celkem miliarda miliard (10^{18}) jedinců hmyzu, což odpovídá, že na jednoho člověka (a kolik nás je) připadá asi 200milionů jedinců hmyzu.

2.1 Geometrie

Co se stane, když změníme všechny rozměry s koeficientem λ?

Co se tedy změní a jak?

1. Plocha je úměrná λ^2
   - Svalová síla
   - Síla odporu prostředí ($F \approx S$, kde S je aktivní průřez)
   - Povrch organismu
   - Pevnost těla (kostry)

Obrázek 3: Příklad změny velikosti s koeficientem λ

2. Objem je úměrný λ^3

   - Hmotnost (za předpokladu, že hustota organismu se nezmění, neboli $\rho =$ konst.).

- Setrvačná síla (spjato s hmotností; $F \approx m$).
- Zásoba vody.
- Akumulované teplo.
- Počet vyživovaných buněk.

Důsledky:

1. Svalová síla
   - Nosnost
     - Brouk unese mnohanásobek své hmotnosti.
     - Slon jen asi jednu čtvrtinu své hmotnosti.
   - Skoky
     - Blecha skočí 100násobek své délky.
     - Kobylka skočí 30násobek své délky.
     - Klokan skočí 5násobek své délky.
     - Člověk skočí 2násobek své délky.
2. Volný pád
   - Při volném pádu se zvyšuje rychlost a odporová síla. Rychlost se zastaví na určité hodnotě, když $F_g = F_{odpor}$, přičemž $F_{odpor} \approx v$, resp. $F_{odpor} \approx v^2$
3. Tělesná konstituce
   - Tímto se zabýval již Leonardo Da Vinci (ukažte mi něco, čím se nezabýval:) Uvažoval nad tím, jestli by bylo možné lineárně zvětšit psa na jeho dvojnásobek ($\lambda = 2$). Co by se stalo? Pevnost kosti je dána jejím aktivním průřezem, čili by se zvětšila jako $\lambda^2 = 4\times$, čili by měla čtyřnásobnou pevnost. Na druhou stranu by se objem psa změnil ve třech rozměrech a ne ve dvou, jako by tomu bylo u průřezu kosti, neboli by byla úměrná třetí mocnině λ ($V \approx \lambda^3$). O tom, že hmotnost závisí na objemu daného tělesa snad nikdo nepochybuje, proto můžeme směle tvrdit, že hmotnost psa také vzroste s třetí mocninou λ. V našem případě, když $\lambda = 2$ by tedy hmosnost vzrostla $8\times$. Kosti by už ovšem takovou

hmotnost neunesly (výše jsme spočítali, že unesou jen čtyřnásobek původní váhy) a pes by se tedy zhroutil vlastní vahou. Když to tedy shrneme, tak:

- Pevnost je úměrná druhé mocnině λ, ale tíhová síla třetí mocnině λ.

4. Povrch těla × objem

   - Zmenšením tělesných rozměrů klesá schopnost udržet stálou teplotu (malá tepelná kapacita) - rychlejší ztráty tepla.
   - Zásoba vody je malá a povrch k odpařování vody je veliký.
   - Moučný červ například nepotřebude pít (taky v mouce mnoho vody není, že ano). Vodu získává jen metabolickou přeměnou.
   - Brouci mají proti vysychání jistou ochranu. Na povrchu těla mají neprodyšný obal – kutikulu, která drží všechnu vodu uvnitř. U některých brouků může dokonce dojít protržením kutikuly k smrti... jednoduše uschnou, neboť nejsou s to dostatečně rychle (pokud vůbec) opravit trhlinu, kterou odchází (se vypařuje) velké množství vody.

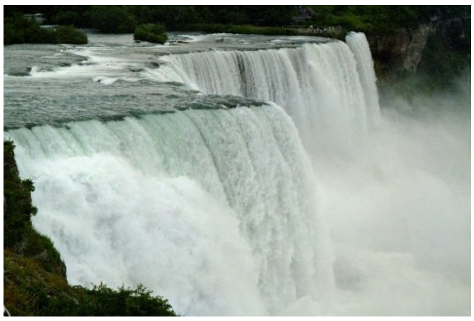
2.2 Proudění tekutin a let zvířat

2.2.1 Proudění tekutin

Na následujících obrázcích je na jednom bystřina a na jednom velká řeka:

A

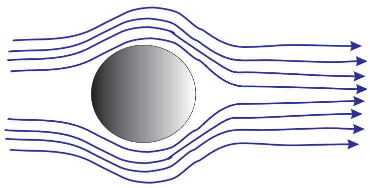
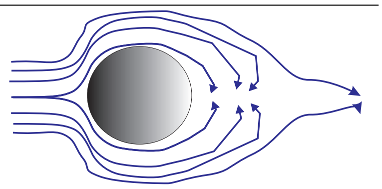
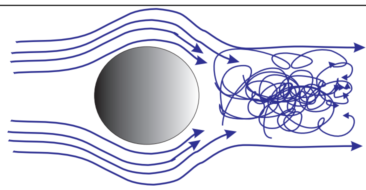
B



Zeptám se sice hloupě, ale na které fotce je amlý splávek a kde velký vodopád? **A** nebo **B**?

Podle čeho to víte? Obě jsem upravil, aby byly, stejně velké... jak? Podle čeho jste to zjistili?

Samozřejmě, že splávek na bystřině je na fotce **A**. A nyní podle čeho jsme to poznali? Ano, podle toho, jak ta voda teče.

$R = 0,01$	laminární proudění	
$R = 100$	Mírně turbulentní proudění	
$R = 10^6$	Silné turbulentní proudění	

Tabulka 1: Typy proudění při změně Reinoldsova čísla

Fyzikální vysvětlení A s čím tedy tento zajímavý jev souvisí? Ve fyzice je s tímto spojeno *Reynoldsovo číslo*, které definujeme jako

$$R = \frac{\rho v D}{\eta}$$

kde ρ je hustota kapaliny, v je její objem, D charakteristický rozměr tělesa, které musí kapalina obtékat a η je dynamická viskozita kapaliny.

Pokud by vás náhodou zajímalo, co to je onen "charakteristický rozměr", tak vězte, že nic obecně definovaného. U válce by to byl průměr, u krychle hrana a a tak dále.

Reynoldsovo číslo & pohyb vody Co nám vlastně toto číslo říká o chování kapaliny? Podívejme se na několik příkladů kapaliny vzhledem k různému Reynoldsovu číslu.

Hrnek vs. sud Nyní si trochu procvičíme představivost. Máme hrnek s kapalinou a filmovou kameru. A máme sud s kapalinou a filmovou kameru. Pokud bychom měli hrnek ve tvaru sudu, jak zajistíme, aby film, který bychom si mohli pojmenovat "vylévání hrnku" vypadal stejně jako ten, který se bude jmenovat "vylévání sudu"? Neboli, co musíme změnit, aby se hrnek vylil stejným způsobem, jako se vylévá sud s vodou.

Obrázek 4: Kolem trupu ponorky na obrázku je dole *laminární proudění* a nahoře *turbulentní proudění*

Nejdříve si představme, jak se vylévá tedy sud s vodou. Když jej překlopíme, vyvalí se jedna veliká vlna, která se nebude moc čeřit a rozleje se po okolí. A jak vypadá rozlití hrnku? Přesně naopak. Spousta malých a rychlých vlnek, plných bublinek z toho, jak se bude voda vířit.

V čem se liší po fyzikální stránce? Oním parametrem je právě Reynoldsovo číslo, které z toho, co již víme, bude u hrníčku mnohem nižší, než v případu se sudem.

Takže nyní je již řešení této malé hádanky nasnadě. Musíme zařídit, aby Reinoldsovo číslo v hrníčku bylo stejné, jako v případě sudu.

Nejjednodušší cestu nám nabízí změna viskozity. Takže pokud budeme rozlévat například olej a ne vodu, tak to na filmovém plátně nepoznáme. Snadné, krásné, elegantní.

2.2.2 Let živočichů

Základní způsoby letu, které nás nebudou moc zajímat

- Archiménův vztah

  Pohyb ve vodě – vznášení – nezajímavé.

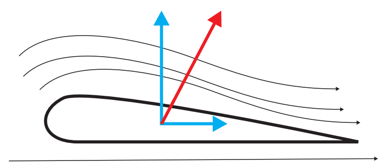
- Vznášení

  Například babí léto.

2.2.3 Dynamický vztah křídlového profilu

Jak se letadlo zvedne do vzduchu Boeing 747 nazývaný populárně Jumbo Jet, váží plně naložen přes 350 tun. Přesto se dostane do vzduchu a udrží se v něm. Jak to, že dokáže vzlétnout a letět?

Klíčem je profil křídla tvar jeho příčného průřezu. V předu, na náběžné hraně, je zaoblený, zespodu poměrně plochý, nahoře naopak značně vyklenutý; dozadu se jeho výška rychle zmenšuje - horní a dolní povrch se vzadu sbíhá do ostré odtokové hrany. Profil křídla, nebo také aerodynamický profil, umožňuje letadlu, aby se samo vzneslo od země. Při dopředném pohybu křídlo rozráží vzduch, který proudí nad a pod ním. Protože horní strana profilu je vyklenutá (a tedy delší než spodní), musí se při dané rychlosti letadla vzduch kolem ní pohybovat rychleji než kolem spodní strany. Podle Bernouillovy rovnice klesá v rychlejším proudu vzduchu tlak - nad křídlem vzniká sání (podtlak), pod křídlem přetlak. Tento rozdíl - vztlak - se s rostoucí rychlostí zvětšuje a křídlo nadnáší. Vztlak a hmotnost jsou dvě z hlavních opačně orientovaných sil, které působí na letoun. Další dvě jsou tah - dopředná síla, vytvářená motory (v klouzavém letu přitažlivostí zemskou) - a odpor, způsobovaný vzduchem, v němž se letadlo pohybuje.



Obrázek 5: Síly působící na křídlo

Vztlak vyvíjený křídlem roste s rychlostí. Vztlak rovněž vzrůstá se zvětšováním nosné plochy (půdorysné plochy křídla) a větším zakřivením (klenutím) profilu. Pomalá letadla proto potřebují pro vytvoření dostatečného vztlaku rozměrné křídlo se značně klenutým profilem. Rychlým letadlům naopak postačí menší křídlo s málo vyklenutým profilem.

Vztlak je významně ovlivňován úhlem, pod nímž se křídlo setkává s okolním vzduchem - úhlem náběhu. Letadla jsou konstruována tak, že jejich křídla jsou ve vodorovném letu nastavena vůči vzduchu v malém úhlu náběhu (jednotky stupňů). Klesá-li rychlost letu, lze vznikající ztrátu tlaku a tedy i klesání vyrovnávat postupným zvedáním přídě stroje - zvětšováním úhlu náběhu křídla vůči proudu vzduchu. Pokud se tento úhel zvětší na více než patnáct stupňů, přiléhající proud vzduchu se od horní strany křídla odtrhne, proudění okolo profilu se poruší a dojde ke ztrátě vztlaku. Letadlo prosekne a klesá. Rychlost, při níž k tomuto jevu dojde, se nazývá pádová rychlost.

Je životně důležité, aby letadlo bylo co nejlehčí - nesmí tomu však být na úkor pevnosti. Hliníkové slitiny umožňují zkonstruovat lehkou a pevnou kostru letadla. Používají se i kompozitní materiály s uhlíkovými a kevlarovými vlákny.

Tah, dopřednou sílu, která udržuje letadlo ve vzduchu, dodávají motory. Většina letadel dneška je poháněna proudovými motory, které vytvářejí tah spalováním leteckého oleje (kerosinu) a vyfukováním spalin vysokou rychlostí. Proud plynů tryská dozadu a letoun je reaktivní silou hnán vpřed; přirovnáme-li tryskový motor k pušce, pak plyny motoru jsou spalinami a střelou, která vylétá z hlavně, a tah je zpětným úderem pažby do střelcova ramene. Představa, že se spaliny "opírají" o vzduch a odstrkují se od něj, je zcela mylná - naopak okolní vzduch snižuje tah tryskového motoru tím, že snižuje výtokovou rychlost spalin. I to je důvod, proč se létá vysoko, kde je vzduch řidší.

Pták má jen křídla, takže vzhledem k tomu, že výsledná síla (červěně) působí dozadu, tak dopřednou sílu vyvolá, když v tempu (pohyb křídla dolů), křídla přetočí, čímž dojde ke změně letového větru. Na tomto principu tedy létají ptáci.

2.2.4 Čím se liší velký pták malý hmyz?

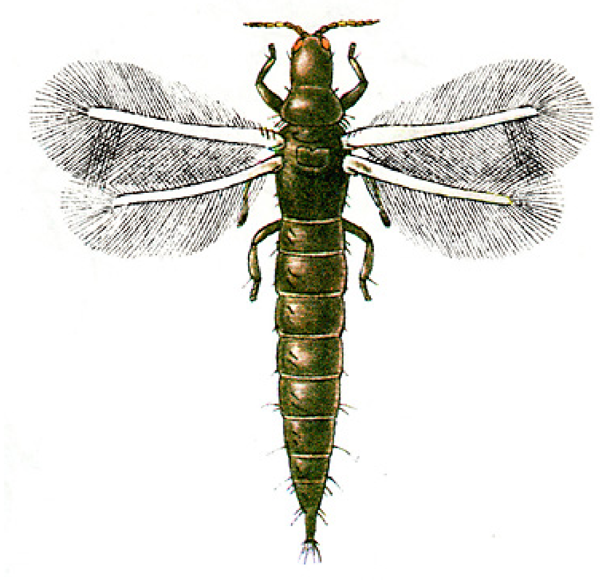
Ptáci jsou hezčí než mouchy, to snad ví každý. Já ovšem myslím ohledně vlastností podstatných pro let.

1. Poměr rozpětí křídek : veliskoti těla $F_{vztlak} \approx \lambda^2 : m \approx \lambda^3$
2. Liší se i frekvence kmitů křídel. Rychlost letu ptáků a hmyzu je přitom srovnatelná
3. Konstrukce křídel.

   Zatímco má pták křídlo klasického "křídlovitého" profilu, hmyz žádné křídlo nemá. Profil jeho křídla je pouhý obdélník.
4. Veslování

   Jednoduchý pohyb křídel přo letu, kdy při pohybu křídel dolů je křídlo je ve vodorovné poloze (—) a při pohybu křídla nahoru se křídlo otočí o 90° do svislé polohy (|). Toto se dá zevšeobecnit, že při pohybu dolů maximalizují plochu odporu, naopak při pohybu nahoru se plocha, která by vytvářela negativní sílu letu, minimalizuje.

Na tomto všeobecnějším principu létají třásnokřídlí (lat. thysanoptera)(obr 6). Jejich křídla nejsou pevnou deskou, jak jsme zvyklí třeba u mouchy, ale mnoho "štětin", které při pohybu nahoru se posouvají nespojeny, naopak při pohybu dolů svou blízkostí onu potřebnou opěrnou plochu vytvoří.



Obrázek 6: Třásněnka Vojtěšková - Třásnokřídlí

2.2.5 Jak létá velký hmyz — proč čmelák může létat

Od doby, kdy někdo prohlásil, že čmelák ani včela nemohou létat, rádi říkáme, že to dotyčný hmyz určitě neví, a proto létá. Nyní nastal čas, abychom řekli včelkám a čmelákům: Už můžete létat.

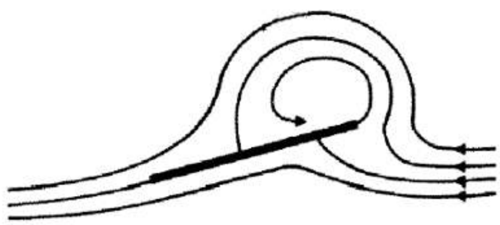
Klasická aerodynamika let čmeláka nevysvětlí Domněnka o nemožnosti letu čmeláka a včely pramení z toho, že kdosi použil aerodynamiku, která se osvědčila u všech současných letadel a vrtulníků, na malý hmyz. Je to něco podobného, jako byste šli s klasickou fyzikou na kvantové jevy – vycházely by úplné nesmysly. Jak jsme na začátku dvacátého století objevovali kvantovou mechaniku, tak teprve nyní pronikáme do záhad letu hmyzu. Dnes umíme zjistit chování letadel s komplikovaným tvarem křídla při různých rychlostech a úhlech náběhu. Výpočty dobře souhlasí s praxí. Co se stane, když totéž použijeme pro křídla včely? Proč to nefunguje? Teorie aplikované na velká letadla pracují zejména se statickým obtékáním profilu křídla. Nabíhající proud vzduchu má konstantní rychlost a nanejvýš zahrnujeme změnu úhlu náběhu v jednotkách stupňů. Ale obyčejná včela mávne křidélky asi dvěstěkrát za sekundu. Dokážete si jistě představit, jaké vzdušné víry, i když miniaturní, vznikají. A to je důvod, proč klasická aerodynamika selhává a zároveň v tom spočívá kouzlo čmeláčího letu.

Tři kouzla udrží čmeláka ve vzduchu Teprve na konci dvacátého století jsme začali pomalu pronikat do tajů hmyzího letu. Objevili jsme tři základní druhy vzniku vztlaku, které běžné teorie nezahrnují, ale pro včely a čmeláky jsou klíčové. Tyto tři jevy popisují síly vznikající za letu hmyzu s velmi malými odchylkami.

Nedříve vědci přišli na to, že hmyzí křídla nejsou obtékána laminárně ani turbulentně, nýbrž převážně vírově. Vírové proudění bylo poprvé popsáno až začátkem devadesátých let. Narozdíl od laminárního a turbulentního proudění zde nesledují proudnice ani přibližně tvar obtékaného profilu, ale na podtlakové (v běžné poloze horní) části se vytvoří vír. To nastane při velkém úhlu náběhu křídla vůči vzduchu. Při vírovém proudění je vztlak výrazně vyšší než u jiných druhů, ale dopředný odpor je také velký, tudíž křídla velkých letadel takto obtékaná nikdy nebudou.

Později výzkumníci objevili, že pouhé vírové proudění by stále včelu/čmeláka neuneslo a vypočtené hodnoty vztlaku se stále neshodovali s experimentálními naměřenými na modelu mávajících mušich křídel. Pátrali dále a přišli na to, že se křidélka při rychlém pohybu nahoru a dolů dostávají do oblasti, kde je vzduch rozvířen od předchozího mávnutí – takzvaného úplavu. Když to zahrnuli do výpočtů, výrazně se přiblížili naměřeným hodnotám. Včely už skoro mohly létat. Scházelo vysvětlit maxima sil v horní a dolní poloze křídel, kde rychlost mávání mění směr.

Tento jev je asi nejsložitější. Je způsoben tím, že včelka, čmelák nebo



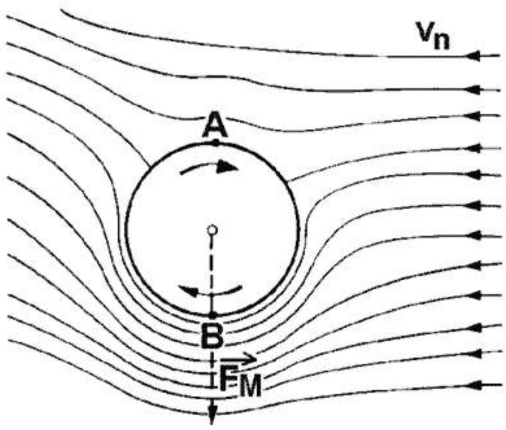
Obrázek 7: Proudnice kolem vírově obtékané desky

jakýkoliv "hmyzák" v horní a dolní "úvrati" natáčí křídlo kolem jeho nejdelší osy o poměrně velký úhel. Potom u křídla nastane obdoba Magnusova efektu, což je vznik boční síly při obtékání rotujícího tělesa proudícím plynem nebo kapalinou, který například způsobuje falše u vhodně nakopnutých fotbalových míčů či správně odehraných ping-pongových míčků. Na jedné straně rotujícího tělesa je rychlost pohybu vůči okolí vyšší než na druhé a to způsobí rozdíl tlaků na protilehlých stranách , a tím zatáčení ve směru kolmém na osu rotace. Válec rovnoběžný se zemí roztočený na velké otáčky (Flettnerův rotor) s nějakou počáteční dopřednou rychlostí by mohl nést i letadlo místo křídla. Takové pokusy probíhaly jak na letadlech, tak na lodích (válec umístěný svisle místo plachet). Mezi kulatým tvarem válce či koule a plochým hmyzím křídlem je zásadní rozdíl, ale princip vzniku síly je obdobný.

Po odhalení těchto tří jevů, jsme schopni vysvětlit let malého hmyzu s rychle mávajícími křídly. Vážky se dvěmi páry velkých křídel jsou něco jiného, i když výše uvedené se u nich projevuje také.

Jak létá včela Nedávno se vědci zaměřili přímo na let včely. Natáčeli její let kamerou rychlostí 2 tisíce snímků za sekundu. Záběry poté analyzovali a zjistili, že včela mává křídly v rozpětí pouhých 90° s frekvencí přibližně 230 mávnutí za sekundu. Mouchy a podobný hmyz mává v rozpětí přesahujícím 100°, někdy se přiblíží 180° s frekvencí v závislostí na velikosti. Čím menší "muška", tím rychleji mává. Moskyt zvládne v jedné sekundě 400 mávnutí. Vzhledem ke své velikosti mává včelka velmi rychle. Osmdesátkrát lehčí pestřenka v jedné sekundě stihne o 30 kmitů méně.

Co se stane, když včelka nabere zásobu nektaru a pylu a stane se skoro dvakrát těžší? Na první pohled by se zdálo, že začne křídly kmitat rychleji.



Obrázek 8: Principip Magnusova jevu

Obrázek 9: Schematický nákres včely

Pravdou je, že pouze zvětší oblouk, ve kterém křidélky mává. Energeticky efektivnější by při tom skutečně bylo zvýšení frekvence. To však včelka neumí, protože ji v tom brání konstrukce svalů, která je přizpůsobena kmitaní na 230 Hz. Ostatně právě svaly mají včely odlišné od jiných druhů hmyzu, takže si létají po svém.

Robotická včela Cílem výzkumu je poznat plně aerodynamiku a mechaniku letu hmyzu nejen z čisté zvědavosti, ale zvláště proto, abychom mohli v budoucnu vyrobit létajícího mikrorobota – robotickou včelu nebo mouchu. Ty by sice mohly sloužit pro zábavu, vybavené kamerou k vyhledávání lidí v nepřístupných prostorách nebo také pravděpodobněji k vojenským účelům. Malá dálkově ovládaná muška s kamerou a mikrofonem je ideální pro odposlech a špionáž. Velmi nepříjemné by bylo, kdyby místo kamery nesla chemické nebo biologické zbraně. Několik much by snadno zlikvidovalo přesně vybrané oběti.

Ať už se z robotického hmyzu vyvine cokoliv, už nikdo nemůže říct, že by čmelák nebo včela neměla létat. Už víme, že létat mohou a žádná teorie jim v tom nebrání.

Další informace, resp. zrdoje, ze kterých jsem čerpal najdete na webových stránkách: Další informace

- Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Fligh

  (http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/284/5422/1954) (18. 6. 1999)

– Rotace křídla a základy aerodynamiky letu hmyzu. Článek je přístupný po registraci zdarma.

- Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies

  (http://jeb.biologists.org/cgi/content/full/206/4/745) (29. 11. 2002)

  – Měření kinematiky křídel, trajektorie letu a tělesných poměru během dopředného letu a otáčení vážek

- The Flight of the Bumblebee

  (http://www.apologeticspress.org/articles/2528)

  – Let čmeláka – stručné shrnutí vývoje kolem "záhady" letu čmeláka

- Scientists Finally Figure Out How Bees Fly

  (http://www.livescience.com/animalworld/060110_bee_fight.html) (9. 1.2005)

  – Jeden z mnoha článků, který ohlašuje vyřešení "záhady" letu včely

- Dickinson Lab

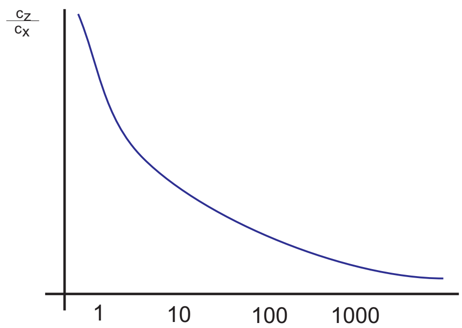
  (http://www.dickinson.caltech.edu/)

  – Laboratoř snažící se vyrobit robotický hmyz

2.2.6 Zmenšování rozměrů – sumarizace

Se změnou rozměrů se mění i Reinoldsovo číslo.

c_x	odpor	vzroste
c_z	vztak	klesne

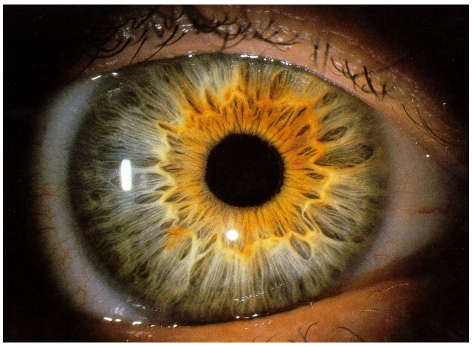


Obrázek 10: Poměr vztlak/odpor při změně Reinoldsova čísla

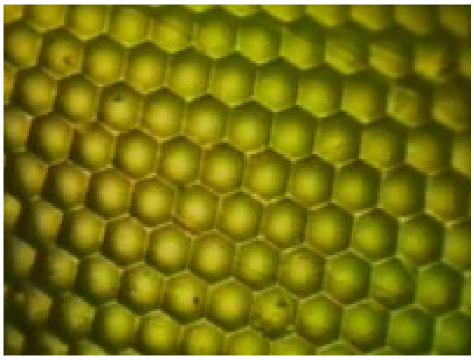
2.3 Zrak

Lidé mají komorové oko. Když se podíváme na menší živočichy, hmyz, zjistíme, že mají oko složené.

Lidské oko



Složené oko



2.3.1 Vady zobrazovacích soustav

Ať jsme již sebehrdější, tak si musíme přiznat, že oko je "jen" zobrazovací soustava. A tak, stejně jako všechny ostatní zobrazovací soustavy, trpí vadami (zobrazovacích soustav).

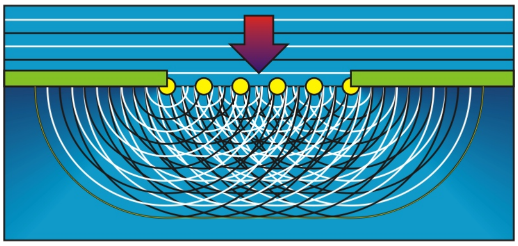
Opravitelné Některé chyby se dají opravit, resp. korigovat.

- Barevná vada – disperze světla
- Otvorová vada – lámavá plocha čočky není ideální tvar pro lámání d ohniska.

Neopravitelné Jisté chyby jsou přímo z kvantové podstaty světla. Jedná se o jev zvaný difrakce, který vzniká na obrubě čočky. Představme si, že máme nekonečně velkou čočku (do výšky) a před ni dáme obrubu (třeba černou lepenku s vystřiženou dírou). Tato soustava nám bude simulovat reálnou čočku.

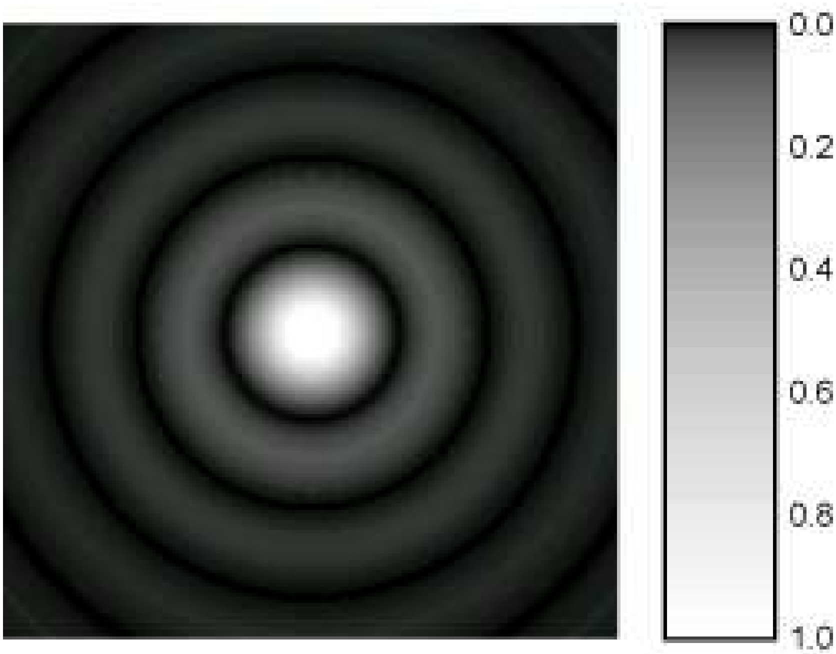
Na lepenku budeme nyní svítit bodovým zdrojem umístěným v nekonečnu tak, že k lepence se budou šířit dokonale rovnoběžné paprsky. Jevem difrakce na kruhovém otvoru se nebudeme hlouběji zabývat, pouze připomeneme, že se jedná o jev, kdy se světlo na překážce ohývá i do míst geometrického stínu (obrázek 11). Otvor (štěrbina) se následně chová jako nový (bodový) zdroj světla, který září do všech směrů.

Nyní již na čočku přichází nikoli rovinná vlnoplocha, ale vlnoplocha kulová. A vzhledem k tomu, že nemáme svazek rovnoběžných paprsků, ale



Obrázek 11: Difrakce na štěrbině

svazek různoběžných paprsků. jak všichni víme z optiky, tak do ohniska budou soustředěny jen ty paprsky, které se šíří rovnoběžně s optickou osou. Na stínítku vytváří tzv. Airiho disk. Na obrázku 12 je počítačem počítaný obrázek Airyho disku. Intenzity šedé byly nastaveny tak, aby zvýraznily i vzdálenější světlé kroužky.



Obrázek 12: Airiho disk

2.3.2 Rozlišovací schopnost oka

Rozlišovací schopnost je dána minimální vzdáleností dvou ještě rozlišitelných bodů.

V případě optického mikroskopu ji lze teoreticky odvodit spojením

Obrázek 13: Mez rozlišení – schematicky nakres

Rayleighova kritéria s teorií difrakce na kruhovém otvoru:

$$X_{\min} = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \theta}$$

kde:
λ je vlnová délka světla ve vakuu
n index lomu prostředí před objektivem
θ je polovina vrcholového úhlu kužele paprsků vstupujících do objektivu.

U lidského oka se vzorec změní na:

$$\Delta d = 1,22 \frac{xf}{D}$$

2.3.3 Mez rozlišení

Mez rozlišení $\Delta\varphi$ se spočítá jako:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta d}{f} = 1,22 \frac{P}{D} \,[\mathrm{rad}]$$

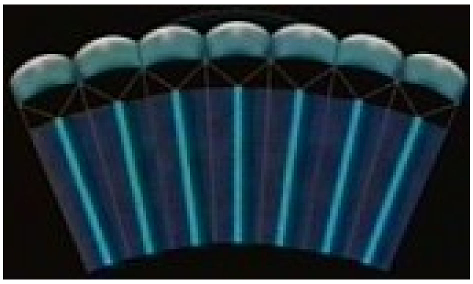
100× zmenšené oko tedy bude mít i 100× horší rozlišovací schopnost.

2.3.4 Zrak hmyzu

Složené oči hmyzu (obr. 14) jsou tvořeny řadou jednotlivých oček (obr. 15), to způsobuje, že obraz je mozaikovitý (obr. 16). Čočky v očkách nemohou zaostřovat, proto je obraz okolí pro hmyz neostrý. Umožňuje však snadno zpozorovat pohyb, což je důležité pro dravý hmyz při lovu a pro většinu hmyzu při útěku před predátory.

Napadá-li vás otázka, zda je tohle důvod, proč je tak těžké zasáhnout mouchu, pak odpověď zní, že to není důvod jediný. Dalším důvodem je stavba očí, na níž záleží velikost zorného pole. Právě mouchy totiž mají tak velké zorné pole, že vidí téměř na všechny strany a není možné se k nim přiblížit "zezadu". A třetím významným důvodem je frekvence nervových impulzů mezi očima a mozkem. Zatímco u člověka je tato frekvence okolo 24 impulzů za sekundu, u hmyzu může být až desetkrát vyšší, a proto se mu pohyby jeví pomalejší než nám. Neplatí to samozřejmě pro všechny druhy hmyzu, záleží na způsobu života. Jsou i druhy, u nichž je tato frekvence nižší než u člověka, např. jen 8-10 impulzů za sekundu.

Obrázek 14: složené oko hmyzu (vážka)

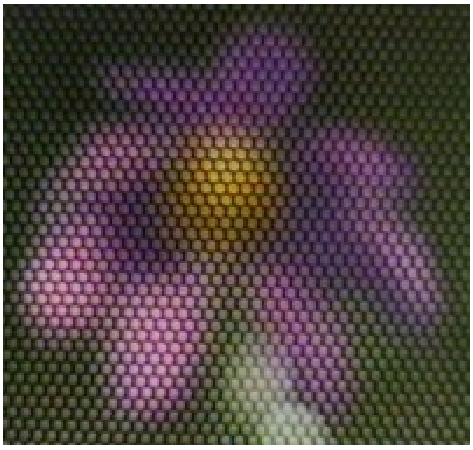


Obrázek 15: vnitřní staba složeného oka

Vnímání barev je u hmyzu jiné než u člověka. To je dáno tím, že hmyz má v očích jiné zrakové pigmenty než člověk. Většina hmyzu má v očích dva druhy pigmentů, jeden reaguje na zelené a žluté světlo (vlnová délka okolo 550 nm) a druhý na modré a ultrafialové světlo (méně než 480 nm, ultrafialové méně než 380 nm). Nevidí tedy červenou barvu (kolem 650 nm). Některé druhy vývojově pokročilého hmyzu (blanokřídlí, motýli) mají tři druhy pigmentů - pro ultrafialové (okolo 360 nm), pro modré až fialové (okolo 440 nm) a pro zelené světlo (okolo 580 nm) - a mohou vnímat celé barevné spektrum (v rámci své citlivosti na světlo) a dokonce rozlišují jednotlivé barvy a jejich směsi. Pro srovnání člověk vnímá vlnové délky v rozsahu (cca 400 - 750 nm).

Vnímání ultrafialového světla je pro hmyz důležité ve vztahu k potravě a k rozmnožování. Některé rostliny opylované hmyzem mají na květech barevné vzory viditelné pouze v ultrafialovém pásmu (a tedy neviditelné pro člověka), kterými lákají hmyz (obr. 17-18). Podobně některé druhy motýlů mají na křídlech vzory viditelné pouze v ultrafialovém pásmu, jejichž účelem je přilákat partnera.

Pro denní hmyz je také důležitá intenzita světla, kterou velmi dobře rozezná a spojuje ji s denní dobou. U létajícího hmyzu jsou oči také významné



Obrázek 16: Mozaikovité vidění hmyzu

pro navigaci. Dokáže vnímat tzv. polarizované světlo (odražené paprsky kmitající pouze v jedné rovině), což jim umožňuje určit pozici slunce i přes mraky.

Zrak je důležitý především pro hmyz aktivní ve dne. Noční druhy mohou mít oči méně vyvinuté a spoléhají se na jiné smysly (hmat, čich, popř. sluch). V této souvislosti je možná vhodné vysvětlit, proč zejména noční hmyz nalétává na umělé zdroje světla. Navigace hmyzu je vázána na přirozené zdroje světla, v noci je to například měsíc. Vzhledem k jeho velké vzdálenosti dopadá jeho světlo do obou očí hmyzu se stejnou intenzitou, což mu umožňuje udržovat přímý směr. Pochází-li ale světlo z blízkého umělého zdroje, dopadá do každého oka s jinou intenzitou. Ve snaze o kompenzaci tohoto vjemu začne hmyz mávat křídly na jedné straně těla rychleji a začne se po spirálovité dráze blížit ke zdroji, až do něj nakonec vletí.

2.3.5 Složené oko hmyzu

Proč tedy má hmyz složené oko, když to má:

- principiálně mezní rozlyšení
- zobrazovací systém je s čočkou, co se neumí přizpůsobit (akomodace)

Protože (jak bylo naznačeno):

- má značný zorný úhel (skoro 4π [sr])
- ostrost vidění do všech prostorových úhlů
- barevné vidění i v ultrafialové oblasti

Obrázek 17: Květ viděný lidským okem

- citlivost na směr polarizovaného světla

Můžeme se tedy vrhout na další kapitolu.

3 Xerox

3.1 Úvod

Co vlastně znamená Xerox? Xerografie? A jak xerox, obecněji kopírka, funguje? Slovo Xerox pochází z řečtiny, kde *xero* znamená suchý a *graphos* je zápis, protože při procesu kopírování není třeba žádných chemikálií ani jiných tekutých složek.

Xerographie (nebo také elektrographie) je fotokopírovací technika vymyšlená v roce 1938 vynálezcem Chesterem Carlsonem(obr. 19) a patentována v 6. října 1942 patentem číslo U.S. Patent 2,297,691.

Vznikl celkem nezvykle, neboť většinou jsou jisté (společenské) snahy o vylepšení stávající / vytvoření nových výrobních či jiných procesů (nižší ekonomické náklady atd.) O vytvoření "suché kopie" ovšem nikdo zájem neprojevoval. Dokonce zde byly využity technologie, postupy a procesy, o které se nikdo v té době moc nezajímal (elektrostatika, koronový výboj)

3.2 Historie

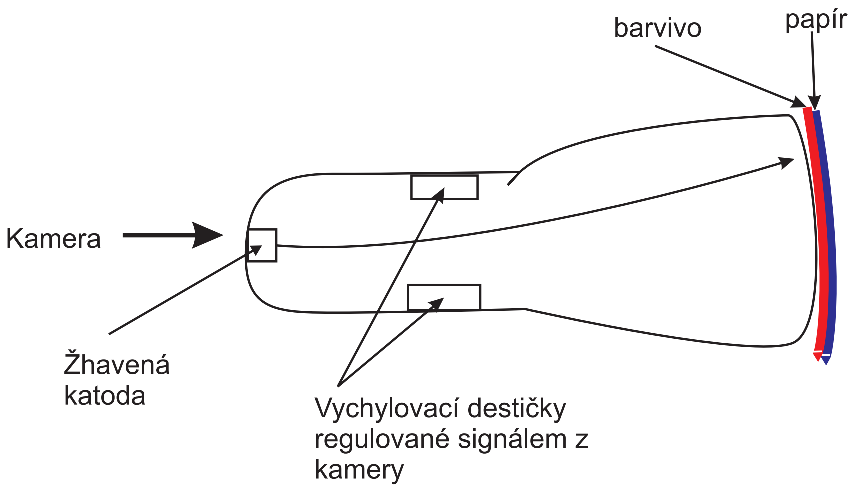
Krátká historie a vynálezy, co předcházely roku 1942:

Obrázek 18: Květ viděný okem hmyzu

Obrázek 19: Chester F. Carlson

- **1777:** Lichtenbergovy obrazce – Bylo zjištěno, že se prach, neutrální částice, usazuje na dialektriku v místech s vyšším potenciálem.
- **1842:** Ronaldův elektrograf – přístroj, který byl s to zaznamenávat nabití atmosféry vuzžíval Lichtenbergova jevu.
- **20.-30. léta 20. století:** P.Selegni – elektrografie

  Pomocí kamery (jejíž princip neznám) snímal obráz a poté jej přenesl na papír. Asi více poví schéma 20. Princip je velmi podobný dnešním televizím. Ze žhavené katody vylétaly urychlené elektrony. Ty následně fokusovat do úzkého elektronového paprsku (fokusační elektrody nejsou na obrázku znázorněny). Tento paprsek byl vychylován systémem vychylovacích destiček, řízených signálem z kamery. Elektrony tedy dopadaly pouze na některé místa v baňce. Zde vytvářely nehomogenní elektrické pole. Druhá strana baňky byla lehce poprášena barvou, která ve shodě s Lichtenbergovým pozorováním, se usazovala pouze v místech s vyšším potenciálem. Na barevnou vrstu nyní stačilo přiložit papír a zatavit barvu tak, aby se vpila do papíru.



Obrázek 20: Elektrograf

- **1959:** První komerčně úspěšný Xerox 21, který v roce 1959 (čili až 17let po patentu prvního) se nazýval Xerox 914. Mohl kopírovat z originálů velkých 9 × 14 palců = $229mm \times 356mm$ (odtud jméno 914). Dalšími modely byly 720, 1000, 813 a 2400.

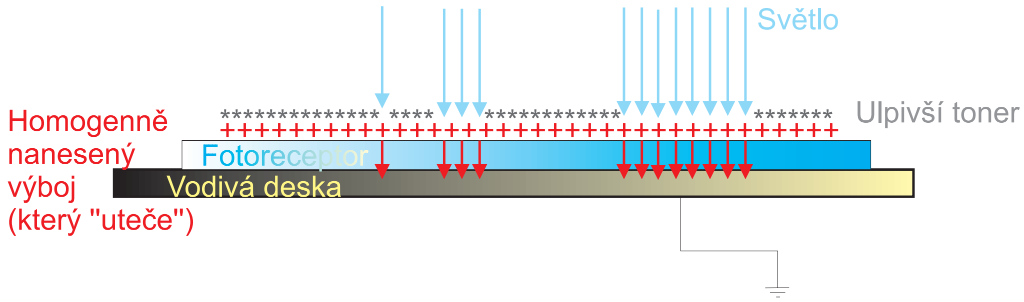
3.3 Xerox – jak funguje?

Fotovodivost Abychom se mohli vrhnout, tak si ještě řekněme, co znamená tento termín (neboť se s ním jistě setkáme v budoucím výkladu:). Fotovodivost je vlastností některých materiálů (síra, antracen, amorfní selen) měnit svůj odpor s ozářením, resp. s intenzitou dopadajícího světla a to tak, že při nízké intenzitě je odpor vysoký. Naopak při zvýšené intenzitě dopadajícího záření odpor klesá, resp. stoupá vodivost materiálu.

Obrázek 21: Xerox 914 - První komerčně úspěšný xerox

3.3.1 Obecně

Ve zkratce aneb letem světem Na uzeměnou vodivou desku se nanese tenká (v μm) vrstva fotoreceptoru vyrobeného z kvalitního materiálu s vysokou fotovodivostí. Fotoreceptor se koronovým výbojem nabije na jistou homogenní plošnou hustotu náboje. Při kopírování se na tuto vrstvu, fotoreceptor, opticky přenese originál (například prosvícení). Protože je vše uzavřeno ve tmě, tak je fotoreceptor nevodivý a tudíž si uchovává na svém povrchu náboj. Jakmile ovšem fotoreceptor osvítíme stane se v místech osvitu vodívým (ovšem pouze v místech osvitu). Máme tedy na fotoreceptoru kopii obrazu, ovšem nyní uchovanou pouze jako nehomogenní elektrické pole na povrchu, které je de facto neviditelné. Jak tento imaginární obraz přeneseme? Využijeme zde Lichtenbergova jevu. Celý povrch fotoreceptoru lehce poprášíme barvou, kterou následně lehce sfoukneme. Barva ovšem v místech s vyšším potenciálem ulpí! nyní již jen přiložíme papír. Do papíru barvivo – toner – zažehlíme a máme kopii. Neboli neexistuje negativ. V jednom kroku jsme získali rovnou positiv! Celé se to dá shrnout obrázkem 22



Obrázek 22: Letem světem Xeroxem

3.4 Některé detaily trochu obecněji

3.4.1 Fotoreceptor

Samotný Chester Carlson (obr. 19) používal Síru. Když přišel na její nezrovna-zdravé účinky přešel na antracen... tak dobře, ten na tom není o mnoho lépe, co se zdraví týče, ale rozhodně je lepší fotoreceptor (lepší vlastnosti fotovodivosti)

V roce 1961 si Bixby patentoval za fotoreceptor amorfní selen, který se používá dodnes. Selen se vyskytuje ve třech možnostech.

1. hexagonální selen je nejběžnější, kovově šedý. Vzhledem k tomu, že v této formě je klasický vodič, tak se hexagonální struktura nehodí.

2. monocemický selen je polovodič červené barvy s vysokým odporem. Další informace (vzhledem k tomu, že se nepoužívá do kopírek) si budete muset vyhledat sami.

3. amorfní selen – náš vítěz. Snadnější výroba než monochemický selen se stejnými vlastnostmi (ba lepšími, neboť i jeho fotocitlivost je výborná) z něj činní výbornýho kandidáta na fotoreceptor.

   Vyrábí se naprašováním tenkých vrstev

Srovnání rezistance selenu s jinými izolanty (ve tmě): tabulka 2.

3.4.2 Nabití fotoreceptoru

Využívá se koronového výboje. Tento výboj vzniká za atmosferického tlaku v místech s vysokou intenzitou elektrického pole $\vec{E}$.

Atmosferický tlak je výhodný, že se prostor nemusí evakuovat na snížený tlak.

Látka	$\rho\,[\Omega cm]$
Se (amorfní)	$10^{11} - 10^{13}$
Bakelit	10^{9}
Keramika	$10^{10} - 10^{13}$
Sklo	$10^{11} - 10^{12}$

Tabulka 2: Srovnání rezistance selenu s jinými izolanty

Vysoká intenzita elektrického pole se vyskytuje v blízkosti hrotů, což nám nevihovuje. Proto se používá drátek o průměru asi $\phi = 0,1mm$, který nabitý až na $U \approx 8kV$, přejede nad fotoreceptorem, který se takto nabije.

4 Pohyb na kolech

Kolo je běžné označení geometrických tvarů, které se matematicky nazývají kruh nebo kružnice, a předmětů odvozených z těchto tvarů. Etymologicky je obsaženo v několika slovech vyjadřujících prostorové vymezení nebo blízkost, například kolem, dokola, vůkol, okolí apod. a v označení bicyklu (kolo, jízdní kolo).

Kolo je jedním ze základních vynálezů v historii lidské civilizace. První doklady o používání kola v dopravě pocházejí již z doby cca 4000 let před Kristem ze starého Sumeru.

Jeho objev umožnil převést smykové tření na několikanásobně menší valivý odpor a tím zahájit éru kolových dopravních prostředků. Díky nim se zlevnila přeprava osob a zboží a tím umožnil rozvoj obchodu a výměny informací na velké vzdálenosti.

Zajímavé je, že například Incká civilizace kolo nepoužívala, ač využití kola u hraček je u nich archeologicky doloženo.

4.1 Valení kola

Jaké jsou výhody valení kola? Jaké jsou podmínky? Shrnu-li to pod několik bodů, získáme:

- Nutná existence třecí síly (která koná práci)
- V místě dotyku je kolo vůči podložce v klidu
- $\Downarrow$
- Třecí síla zde nekonná práci

- Síla (velikost) valivého odporu se často zanedbává
- $\vec{N} = -\vec{G}$
- $\left|\vec{F}\right| = \left|\vec{N}\right|$

Velikosti koeficientu smykového tření *mu*: tabulka 3

Materiál	μ
ocel na oceli	$0,002 - 0,05$
pneumatika na asfeltu	$0,02 - 0,03$

Tabulka 3: Velikosti koeficientu smykového tření μ

4.2 Valení kola s pneumatikou