

# Crookesův mlýnek

K. Syrokvaš, O. Kotal, M. Kovanda

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19  
Praha 1

karolina.syrokvas@email.cz, okotal@seznam.cz,  
kovanda.physics@email.cz

## Abstrakt

Světlo má samo o sobě mnoho využití. Dá se použít k výrobě energie, k přenosu dat, měření vzdálenosti apod. Je tu však jedno využití, které není příliš známé. Fotony jako nositele hybnosti mohou tuto hybnost předávat svému okolí, a proto mohou být využity např. k pohonu meziplanetárních sond. Jedním z experimentů, které měly tuto skutečnost dokázat, byl Crookesův mlýnek. Naším cílem je seznámit se s tímto experimentem a ukázat, v čem byl úspěšný a v čem mylný.

## 1 Úvod

Crookesův mlýnek je fyzikální přístroj, který vynalezl sir William Crookes, když vážil své chemické sloučeniny. Při tom zjistil, že když vážil vzorky na světlo, naměřil o něco větší hmotnost, než když je měřil ve stínu. Mylně se přitom domníval, že to způsobuje pouhý tlak záření a pokusil se to demostrovat na zařízení, kterému se říká Crookesův mlýnek.

## 2 Princip

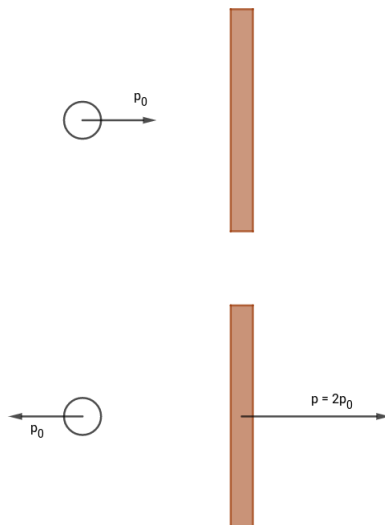
Lopatky Crookesova mlýnku se roztáčí vlivem dvou dějů. Na bílou stranu dopadají fotony elektromagnetického záření a předávají jim svoji hybnost. Černá strana lopatek naproti tomu lépe absorbuje světlo a následně ho tepelně vyzařuje. To má za následek vznik vířivých proudů, které roztáčí mlýnek. Jejich vliv je řádově výraznější než tlak záření.

## 3 Síla působící na lopatky

Pro hybnost elektromagnetického záření platí následující rovnost

$$dp = \frac{dE}{c}. \quad (1)$$

Nyní si uvědomme, že ze zákona zachování hybnosti vyplývá, že při zanedbání některých veličin bude hybnost předaná desce dvojnásobná, viz obr. 1.



Obr. 1: Předání dvojnásobku hybnosti fotonu desce

$$p_0 = 2p \quad (2)$$

Poté ze známých vzorců pro sílu a výkon dostaneme

$$F = \frac{dp_0}{dt} \quad (3)$$

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{dp \cdot c}{dt} = \frac{dp_0 \cdot c}{2dt} = \frac{Fc}{2} \quad (4)$$

Pokud uvažujeme bodový zdroj světla, např. Slunce nebo žárovka, musíme tento zářivý výkon rozdělit po kulové ploše ve vzdálenosti  $r$

$$P = \frac{P_0 \cdot S}{4\pi r^2} \quad (5)$$

$$F = \frac{P_0 \cdot S}{2\pi cr^2} \quad (6)$$

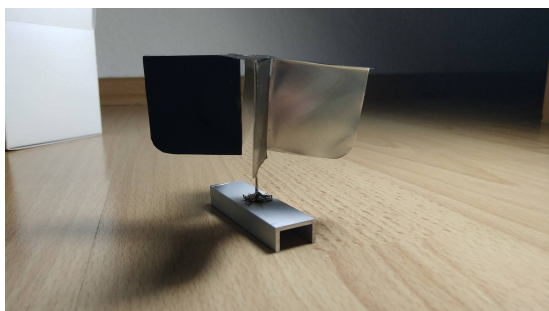
## 4 Schéma

1. Otočná část jehlového ložiska
2. Lopatky
3. Jehlové ložisko

4. Uchycení jehlového ložiska
5. Skleněná baňka
6. Uzávěr baňky
7. Podstavec

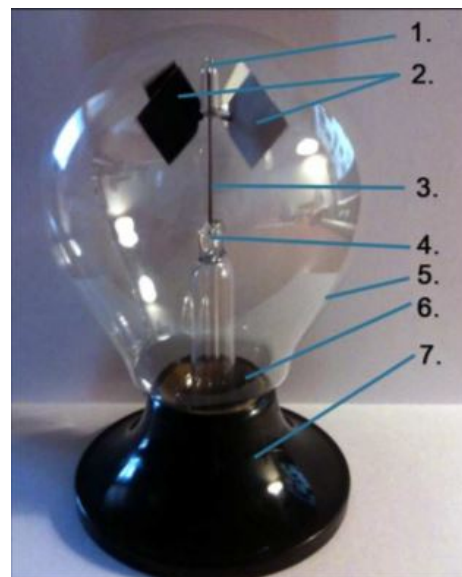
## 5 Experiment

První návrhy sestavení našeho Crookesova mlýnku (dále jen experiment) sestávaly z využití součástky mechanického budíku. Jednalo se o jehlu zavěšenou na dvou ložiscích a vyváženou diskem. Tato součástka byla velmi dobře vyvážená a měla velkou setrvačnost, avšak velikost konstrukce, ve které byla její ložiska, znemožňovala instalaci jakýchkoliv dobře viditelných lopatek. V tzv. alfa verzi experimentu byla využita jehla a jedno ložisko ze součástky mechanického budíku. Ložisko bylo vloženo do díry vyvrtané v kříži o stranách 5 cm z balsaového dřeva, jehla vložena do vyvrtané díry ve svislé tyči z balsaového dřeva, která byla následně upevněna do podstavce. Lopatky alfa verze experimentu měly výšku 10 cm, šířku 5,5 cm a byly vsunuty do rozříznutých otvorů v kříži. Každá lopatka měla jednu stranu obarvenou sprejem na černou barvu, druhou na bílou.



Obr. 3: Finální verze

Tzv. finální verze byla testována až na semináři ve středu 22. 11. 2017. Ve finální verzi bylo využito hliníkové fólie jakožto materiálu jak lopatek, tak i kříže a ložiska. Všechny tyto tři části experimentu byly z jednoho kusu fólie. Jako jehla posloužila skutečná jehla, která byla mnohem tenčí než jehla z Alfa verze a měla i menší plochu dotyku s ložiskem. Tlak ve vakuové baňce během testování finální verze není přesně znám, avšak odhaduje se pod 140 Pa. Při osvětlení vakuové baňky s finální verzí stejným výkonným zářičem, jakým byla osvětlena Alfa verze, došlo k točení lopatek finální verze, zvednutí tlaku nebylo pozorováno. Tím pádem považujeme průběh testování finální verze za úspěšné demontování funkce Crookesova mlýnku.



Obr. 2: Schéma radiometru [1]

Alfa verze byla testována ve vakuové baňce ve čtvrtek 16. 11. 2017. Podle tlakoměru připevněném k baňce byla pumpa schopna odsát vzduch pouze na tlak 230 Pa. To bylo pravděpodobně způsobeno „zavzdušněním“ alfa verze – a to jak samotným materiálem, balsou, která obsahuje sama o sobě mnoho vzduchových kaps, tak i výpary z barvy. Při osvětlení vakuové baňky velmi výkonným zářičem se tlak v baňce zvedl až na 340 Pa, což jsme považovali za účinek světla (resp. jeho tlaku) na celý experiment. Mlýnek se netočil.

## 6 Využití

Tlak záření je natolik silný, že může pohánět kosmické lodě. V roce 2010 se povedlo úspěšně odstartovat první vesmírnou plachetnici s názvem Ikaros. Plachetnice měla přibližně  $400 \text{ m}^2$  a jejím úkolem bylo pozorovat gama záblesky okolo Venuše. Výhodou tohoto typu cestování je nízká spotřeba energie a nevýhodou pak malý tah ve velkých vzdálenostech od Slunce, proto se vyplatí použít tento typ pohonu pouze na vnitřní oběžné dráze.

Využijeme závislost (6) a po vyjádření plochy získáme vztah

$$S = \frac{2\pi F cr^2}{P_0}. \quad (7)$$

Z té získáme parabolickou funkci závislosti plochy potřebné k vytvoření určité síly na vzdálenosti od Slunce. Výkon Slunce je změřen na  $3,827 \cdot 10^{26} \text{ W}$ .

## 7 Shrnutí

Crooksův mlýnek je založen na principu tlaku záření a vířivých proudů molekul vzduchu v řídké atmosféře. Fotony elektromagnetického záření, přestože nemají klidovou hmotnost, mají hybnost a mohou ji předávat ostatním objektům. Tohoto využívají např. solární plachetnice při své cestě Sluneční soustavou.

Jev lze pozorovat také u komet, a to konkrétně na vytvoření druhého ohonu tvořeného lehkými částicemi, na které působí tlak záření výrazněji.

## 8 Poděkování

Chtěli bychom poděkovat ing. Olegovi Syrokvaš za výraznou spolupráci na konstrukci našeho projektu a dále ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za vypůjčení vakuové komory.

## Reference

- [1] *Crookesův mlýnek*, [https://cs.wikipedia.org/wiki/Crookesův\\_mlýnek](https://cs.wikipedia.org/wiki/Crookesův_mlýnek)
- [2] Petr Kulhánek, *A budiž světlo*, <https://www.youtube.com/watch?v=ZrivSmWg0ZU&t=2325s>
- [3] David Černý, *Crookesův radiometr*, Technická univerzita v Liberci, 2012
- [4] *First Successful Solar Sail*, <https://www.space.com/25800-ikaros-solar-sail.html>