

Crookesův mlýnek

M. Albrecht, O. Ficker, J. Vejrosta, V. Větrovec
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1
oficker@gmail.com

Abstrakt

Cílem práce je seznámit posluchače fyzikálního semináře s jevy oprávněně i mylně spojovanými s existencí hybnosti fotonu. Zmíníme hlavní rozdíly mezi Crookesovým a Nicholsovým radiometrem, rovněž se budeme věnovat moderním aplikacím přeměny světelné energie na kinetickou (zvláště v oboru nanotechnologií). Krátce představíme náš model Crookesova mlýnku.

1 Úvod - o povaze světla

Otázka, co je to světlo, je stará jako lidstvo samo a i dnes máme k dispozici jen velmi mlhavou odpověď. Ve starověku existovalo několik teorií, jedna z nich předpokládala, že světlo má původ v oku. Na počátku novověku se optikou zabývalo velmi mnoho učenců a vznikly tak dva odlišné názory. Částicovou teorii zastával mimo jiné Newton - světlo mělo být složeno z částic chovajících se dle mechanických modelů. Naproti tomu vlnová teorie, kterou jako analogii k mechanickému vlnění podporoval třeba Huygens, byla v 19. století potvrzena řadou pokusů (např. Youngův pokus). Na počátku 20. století pak bylo díky mnoha dalším pokusům jasné, že jsou částečně správné obě teorie. Tak bylo vytvořeno úplně nové odvětví fyziky - fyzika kvantová.

2 Co otáčí Crookesovým mlýnkem?

Přestože byl William Crookes chemik, jeho jméno je spjato s přístrojem pro demonstraci fyzikálního jevu. Jev se projevil náhodou, když vážil sloučeniny za sníženého tlaku. Na základě tohoto pozorování sestrojil mlýnek s lopatkami, které jsou z jedné strany černé a z druhé bílé, a umístil ho na jehlové ložisko do nádoby se sníženým tlakem. Toto zařízení se v přítomnosti zdroje tepla nebo světla otáčí (viz obrázek 2).

Sám Crookes došel k závěru, že otáčení mlýnku způsobuje hybnost fotonů narážejících na lopatky. Mlýnek se ale točí černou stranou lopatek směrem od nás, což této domněnce odporuje (při odrazu foton předá více hybnosti než při pohlcení). Vysvětlení jevu tedy musíme hledat jinde. Musíme si uvědomit, že pokus neprobíhá při extrémně nízkých tlacích. Probíhá pouze při tlaku kolem 1 Pa. Je tedy jasné, že jev bude souviset se zbylými molekulami plynu. Černé strany lopatek se ohřívají rychleji než bílé a molekuly plynu, které se od nich odrazí, mají podle kinetické teorie plynů větší rychlost (tedy i hybnost). Ta musí být kompenzována pohybem lopatek opačným směrem. Zároveň ale tyto rychlé molekuly odrážejí ostatní a zabraňují jim tak v nárazu na černou stranu, takže se celý efekt vyruší.

Albert Einstein ale později zjistil, že na okrajích lopatek převáží kladná složka část výše zmíněného efektu. Osborne Reynolds a Maxwell objasnili celou situaci jevem tepelné transpirace - interakce mezi molekulami jsou takové, že plyn prostupuje materiálem (případnými póry či po okrajích) z chladnější strany k teplejší. Tedy plyn probíhá mezi hranou lopatky a stěnou nádoby tak, že na světlé straně vzniká podtlak a celý systém se začne otáčet (viz obrázek 1). Objasnění tohoto zdánlivě banálního problému bylo tedy hodno mnoha velkých fyziků.

3 Crookes vs. Nichols, Crookesova trubice

Crookesův mlýnek demonstruje tedy úplně jiné jevy, než by se mohlo na první pohled zdát. Zařízení, kterým lze skutečně měřit mechanický efekt energie záření se nazývá Nicholsův mlýnek. Bylo vyrobeno o třicet let později, protože má mnohem větší nároky na tlak vzduchu a přesnost konstrukce. Dvojice malých zrcátek je upevněna na vlákně ve vakuové komoře. Při výrobě je nutné snížit na minimum hmotnost pohybujících se částí a moment hybnosti - poloměr mlýnku musí být co nejmenší. Dopadající fotony jsou soustředěny na zrcátka a ta se lehce stočí a vytvoří v křemíkovém vlákně určitý moment hybnosti.

Crookesova trubice s mlýnkem je svým principem podobná domnělému principu Crookesova mlýnku (obecně můžeme Crookesovou trubicí nazvat jakoukoli katodovou trubicí). Na kinetickou energii nějakého tělesa zde není přeměněna energie fotonů, ale katodového záření - tedy elektronů. Ve vodorovné trubicí dlouhé obvykle asi dvacet centimetrů je na kolejničkách umístěn mlýnek, který koná složený pohyb.

K vývodům katody a anody připojíme zdroj vysokého napětí. Jak elektrony narážejí na lopatky, mlýnek se odvalí směrem k anodě. Toto byl jeden z důkazů existence elektronu. Elektrony mají samozřejmě mnohem větší hybnost než fotony, a proto není trubice tak náročná na snížení odporových sil jako Nicholsův mlýnek.

4 Crookesův mlýnek jako Feynmannova rohatka

Nyní, když víme, jak přibližně funguje Crookesův mlýnek, můžeme si všimnout zajímavé souvislosti s jednou s bájných abstrakcí termodynamiky, Feynmannovou rohatkou. Představme si hřídel, která má na jednom konci lopatky a na druhém ozubené kolečko s takovou zarážkou, aby se hřídel mohla otáčet jen na jednu stranu. Umístíme-li lopatkovou stranu do nádrže s plynem, budou na lopatky narážet molekuly plynu. Díky zarážce se lopatka začne otáčet na jednu stranu. Ovšem zarážka se začne zahřívat a "odskakovat". Řešením je zvýšit teplotu plynu v nádobě, pokud zde bude teplota vyšší než v okolí zarážky, můžeme dosáhnout stálé rotace a rohatka bude konat práci. Je to tedy prostý tepelný stroj, potřebuje tepelný spád, aby fungoval.

A jak to souvisí s Crookesovým mlýnkem? Velice úzce - nemá zarážku, ale má černé a světlé strany lopatek. Díky nim je dispozici potřebný tepelný spád (na černé straně větší teplota) a o úlohu zarážky se stará samotný jev tepelné transpirace. Nabízí se tedy otázka proč Crookes nevyužívat k práci či přímo výrobě elektrické energie. Bohužel, když se nad tím zamyslíme, energie záření se nejdříve přemění na tepelnou a až ta na kinetickou. A celé to stojí na jevu, který je spíš dílem drobné nerovnováhy, nedostatečně rychlého přenosu tepla materiálem lopatky. Je jasné, že účinnost takového zařízení je naprosto minimální. V případě výroby energie je přece jenom daleko lepší využít solární panely.

5 Naše konstrukce a výsledky experimentu

Vyrobili jsme celkem tři verze mlýnku. U první byla využita žárovka jako vakuová nádoba. Do ní byl umístěn mlýnek vyrobený z alobalu, s jednou stranou lopatek začerněnou. Mlýnek byl otáčivě umístěn na hrotu. Nádobu jsme uzavřeli tmelem a obráceným auto ventilkem, který umožňoval udržení podtlaku.

Zbylé dvě verze byly mlýnky bez nádoby - vyvážené lopatky (plastové resp. aluminiové) umístěné otáčivě opět na jehle. Tyto mlýnky jsme při pokusu umístili do válcové vakuové nádoby. Dále jsme při experimentu použili dvoustupňovou suchou vývěvu, měřič tlaku a zdroj světla/tepla (lampu) z vybavení fyzikálních praktik. Vývěva nám umožnila dosáhnout řádově tisíců Pascalů, proto byla malá pravděpodobnost, že jev nastane.

U verze bez nádoby byla ještě snížena nepoměrem velikostí mlýnku a vakuové nádoby. Na okrajích lopatek byly až příliš velké "díry", takže tepelná transpirace by ani za dostatečně nízkého tlaku nemohla nastat. První

verze se nám roztočila poměrně silně. Ale tento pohyb musel být způsoben vibracemi vývěvy a proudem vzduchu.

6 Moderní využití "světelných motorů"

Zařízení, která skutečně převádějí energii fotonů na energii kinetickou, můžeme nazvat světelnými motory, protože stejně jako například tepelné motory transformují energii nějakého druhu na energii pohybovou. Během posledního roku učinil tým vědců z university Berkley sérii objevů právě v této oblasti. Využili "rotujícího dutého" laserového paprsku (emitované fotony měly nenulový moment hybnosti) k otáčení mikroskopickým silikonovým diskem (průměr 100 nm) hvězdicového tvaru. Pomocí frekvenční regulace je možné u tohoto systému regulovat nejen směr, ale i rychlost otáčení disku.

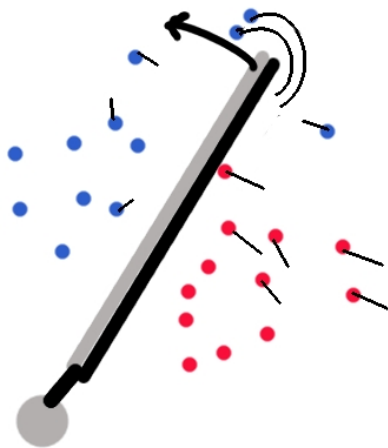
Podle vědců najdou poznatky získané při tomto experimentu uplatnění při tvorbě motorů případných nanorobotů (využití si jistě umíme představit - např. oprava molekuly DNA poškozené radiací,...). Dále zde existuje možnost uchování velkého množství energie - disky mohou být v podstatě miniaturními setrvačnicí, na které působí jen malé odporové síly. V nabitém prostředí pak jejich pohyb může vytvářet elektrický proud.

7 Poděkování

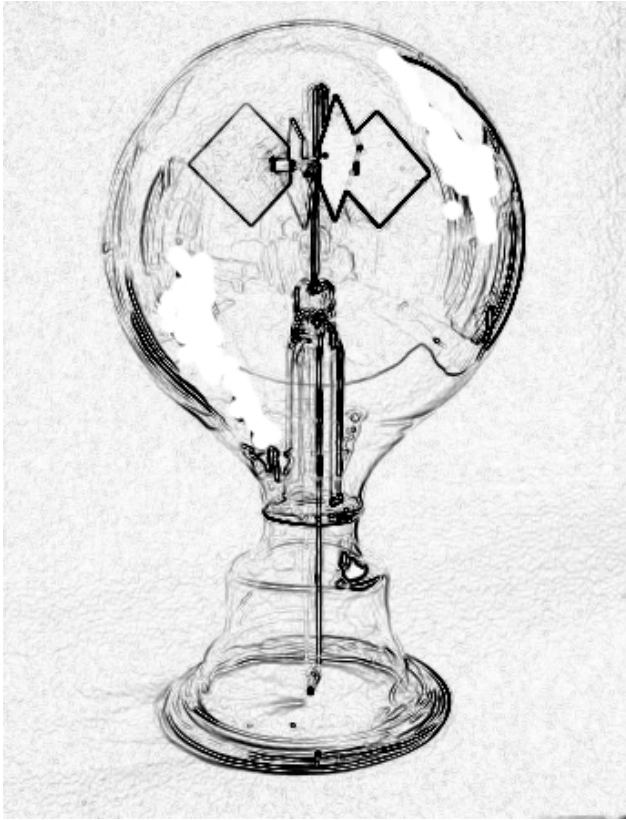
Děkujeme panu Ing. Vojtěchu Svobodovi za poskytnutí vývěvy a jeho drahocenného času.

Reference

- [1] R. P. Feynmann, *Přednášky z fyziky*, Fragment, Praha (2000)
- [2] Kolektiv autorů, *Crookes radiometer*, <http://en.wikipedia.org/Crookes radiometer>
- [3] I. Pelant a kol., *Fyzikální praktikum III - Optika*, Matfyzpress, Praha (2001)
- [4] J. Fuka, B. Havelka, *Fyzikální kompendium - Optika a atomová fyzika*, SPN, Praha (1961)
- [5] L. Yarris, *Nano-sized light mill drives micro-sized disk*, <http://www.physorg.com/news197555841.html>
- [6] Kolektiv autorů, *A memory of Ernest Fox Nichols*, <http://www.nap.edu/html/biomems/enichols12.pdf>



Obr. 1 Tepelná transpirace na okrajích lopatek



Obr. 2 Crookesův mlýnek