Měření tlakového účinku světla

J.Weiss, J.Roman, R.Schilhart
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1
weissji1@fjfi.cvut.cz

Abstrakt

Naším hlavním cílem bylo experimentálně určit sílu laserového svazku působícího na experimentální aparaturu a z tohoto pak určit jeho tlak. Potýkali jsme se jak s teoretickými, tak experimentálními problémy. Ačkoli celá problematika měření nebyla po teoretické stránce příliš složitá, experimentální stránka měření již tak jednoduchá nebyla a museli jsme často řešit poměrně závažné problémy. Podrobně jsme se seznámili s Cavendishovým experimentem, na jehož základě jsme uskutečnili naše měření.

1 Úvod

Tlak světla se již v roce 1900 pokusil změřit ruský fyzik P. N. Lebeděv. Co ho však vedlo k provedení tohoto experimentu? Byl to především J. C. Maxwell, teoretický fyzik, který předpověděl tlak světla. Tento tlak byl důsledkem jeho rovnic elektromagnetického pole. Maxwell nebyl ale prvním, kdo předpovídal tlak světla. Snad prvním kdo tento jev předpovídal, byl slavný Johanes Kepler. Ten ve svém díle "De Cometis" vyřkl doměrku zdůvodňující, proč ohon komet míří vždy směrem od slunce. Domníval se, že na ohon komety musí působit nějaká síla pocházející ze slunce. Dnes již víme, že ohon komety směřuje od slunce vlivem slunečního větru. To však není pouze tlak samotného světla, ale také tok částic vylétajících ze slunce. Další, kteří předpověděli tlak světla byli např. Newton či Bartoli na obecném základě termodynamiky. Ti však ještě nebyli schopní změřit tlak světla kvůli technické úrovni své doby. Teprve P. N. Lebeděvovi se v roce 1900 experiment povedlo realizovat.

2 Lebeděvův experiment

Aby P. N. Lebeděv mohl změřit tlak světla, musel k tomuto účelu použít aparaturu vlastní konstrukce. Lebeděv používal jako zdroj světla žárovku, tedy světlo nekoherentní. Světlo procházelo soustavou čoček a zrcadel, jimiž bylo fokusováno na pokovenou tyčku. Tato tyčka se vlivem působícího světla ohýbala a na tomto principu byl Lebeděv schopen změřit tlak působícího světla na tyčku. Tyčka byla pokovena slabými plátky různého kovu, tak mohl Lebeděv studovat torzi tyčky a vliv světla na různé kovy.

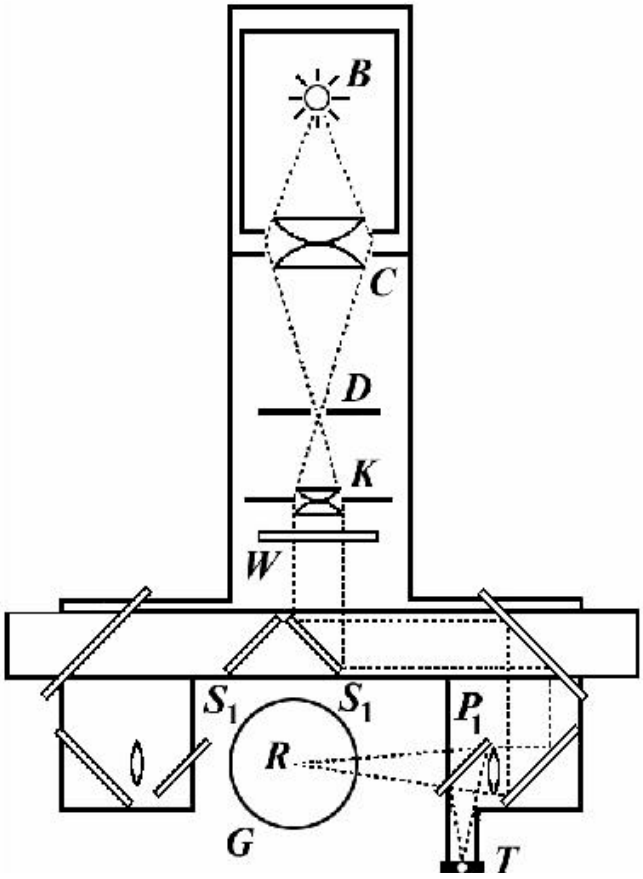
Lebeděv se při sém experimentu setkal se několika problémy. Závažným problémem bylo, že experiment byl ve velké míře ovlivněn okolním prostředím. Aparatura nebyla totiž evakuována. Docházelo tedy ke značnému vlivu vzduchu na experiment. Vzduch v aparatuře se ohříval působením světla a takto excitované molekuly vzduchu narážely do tyčky. To

negativně ovlivňovalo samotný experiment. Když se totiž snažíte změřit sílu řádově 10^{-11} N musíte mít velice přesnou a citlivou aparaturu a každá, i když nepatrná porucha, může ovlivnit experiment. Jediným řešením (a taky nejjednodušším a nejefektivnějším) bylo evakuovat celou aparaturu. Tak se Lebeděv zbavil vlivu molekul vzduchu na experiment.

Nastal však jiný problém. Tyčka, jež byla pokovena plátky různých kovů, byla při experimentu natolik ovlivňována právě těmito plátky, že byl donucen tyto plátky výrazně ztenčit. Funkce plátků spočívala pouze v tom, že měli odrážet ono fokusované světlo.

Po vyřešení všech těchto problémů byl konečně schopen určit tlak světla. Tento tlak byl $p = 4{,}7.10^{-6}$ Pa.

- zdroj nekoherentního světla (B)
- fokusace soustavou čoček a zrcadel (C-W)
- tyčka (R) různě pokovena, černé části
- posuvnými zrcátky S_1 měnil směr světla, čímž dosahoval torze tyčky R



Obrázek 1. Lebeděvova aparatura

3 Náš experiment

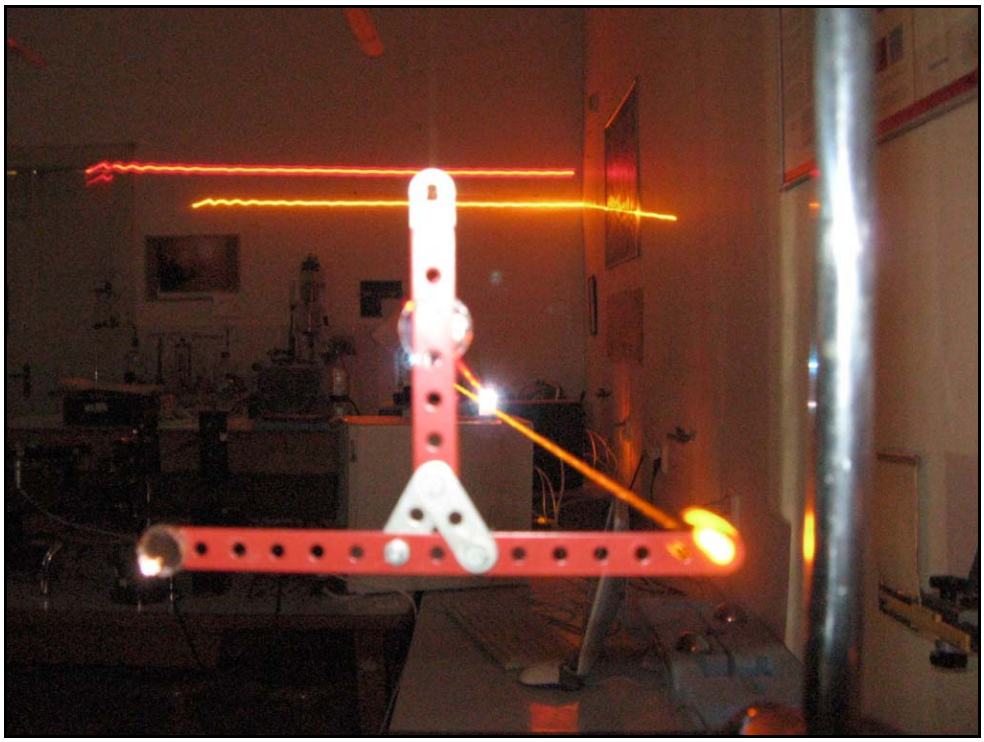
I když Lebeděvův experiment byl úspěšný, my jsme šli jinou cestou. Jako předloha nám posloužil známý Cavendishův experiment na měření gravitační konstanty. Rozhodli jsme se jít stejnou cestou jako Cavendish při měření gravitační konstanty. Postavili jsme tady podobnou aparaturu jako Cavendish, s jejíž pomocí jsme chtěli změřit tlak laserového svazku. Nejprve jsme však museli určit tuhost v torzi našeho vlákna, které jsme chtěli použít k vlastnímu experimentu.

Nejdříve bylo nutné jednoznačně určit rozměry našeho vlákna. Délka L = 0.7 m, průměr d = 132 μm. Když jsme znali tyto hodnoty, mohli jsme již změřit zmiňovanou tuhost v torzi vlákna. K tomu jsme použili Cavendishova experimentu. Tuhost v torzi jsme museli určit

experimentálně. Známe-li gravitační konstantu, můžeme pomocí výchylky ramen o známé hmotnosti (ramena samozřejmě visí na našem vlákně) a jednoduchého vzorce určit onu tuhost v torzi vlákna. Tuhost našeho vlákna byla $D \approx 4{,}2.\ 10^{-9}\ N.m^2.rad^{-1}$.

Nyní jsme již mohli přistoupit k vlastnímu experimentu s lasery. Aparatura se skládala z ramen ze známé stavebnice Merkur (pro svůj účel posloužila více než dobře). Tyto ramena, každé o délce 7.5 cm, visela na našem vlákně. Na koncích ramen byla připevněna zrcátka, která odrážela laserový svazek, jenž vychyloval celou aparaturu. Veprostřed ramen bylo připevněno ještě jedno zrcátko, díky němuž a jinému laseru, bylo možné odečítat výchylku ramen.

Přistoupili jsme k vlastnímu experimentu. Nejprve jsme museli určit rovnovážnou polohu, kolem níž kmitala ramen bez působení laseru. Stačí totiž sebemenší otřes a ramena se na vlákně o průměru 132 μm rozkmitají. Po určení této rovnovážné polohy jsme ramena začali vychylovat z této rovnovážné polohy pomocí laseru fokusovaného na zrcátko připevněné na konci ramen, 7.5 cm od osy otáčení ramen. Použili jsme He-Ne laser, $\lambda = 594$ nm.



Obrázek 2. Aparatura v akci

Ramena se opravdu vychýlila a začala kmitat kolem jiné rovnovážné polohy. Rovnovážná poloha se změnila o $\varphi_0 = 0{,}043909575$ rad $\approx 2°30$□. Díky tomuto údaji bylo možné vypočítat sílu působícího laseru a posléze i tlak laserového svazku. Tlak byl roven $p = 2{,}8.\ 10^{-4}$ Pa.

4 Závěr

K našemu experimentu jsme sestavili vlastní aparaturu. Museli jsme změřit tuhost v torzi vlákna, na němž byla připevněna ramena se zrcátky. Po úspěšném změření této veličiny jsme se plynně přesunuli k měření tlaku laserového svazku. Díky změně rovnovážné polohy jsme byli schopni vypočítat sílu a tlak potřebný k této výchylce. Tato síla byla rovna $F = 3{,}5.\ 10^{-9}$ N, a tlak $p = 2{,}8.\ 10^{-4}$ Pa. V porovnání s Lebeděvovým výsledkem kdy $p = 4{,}7.10^{-6}$ Pa byla naše výsledná hodnota o dva řády vyšší. Není se ale čemu divit. Lebeděv použil pro svůj experiment žárovku, my použili laser výkonu P = 5 mW.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali Ing. Svobodovi za trpělivost a ochotu nám pomáhat při experimentu. Zároveň se omlouváme za způsobené škody a oxidování v praktikách.

Reference

[1] Vassilis Lembessis, Lebedev and light radiation pressure, http://www.europhysicsnews.com/full/07/article4/article4.html
[2] Vassilis Lembessis, "*Lebedev and light radiation pressure*", *Europhysics News* (2001) Vol. 31
[3] S.V. Gryslov, "*The pressure of Light*", *Quantum*, July-August 1998, Greek Edition, str.47
[4] Wikipedia.org, Maxwell`s equations, neznámý autor, http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_Equations
[5] Ivan Štoll, *Mechanika*, vydavatelství ČVUT, 2003
[6] Ivan Štoll, *Elektřina a magnetismus*, vydavatelství ČVUT, 2003
[7] Scott Lilley, The Pressure of Light, The University of Arizona, Optical Sciences Center, http://www.u.arizona.edu/~lilley98/
[8] Arthur Ashkin, "*The Pressure of Laser Light," Scientific American* 226, str. 63-71 (1972)