

V. Pospíšil

Pokus o výklad silového účinku světla na drobnohledné částice

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 59 (1930), No. 4, 263--270

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/121544>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1930

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Pokus o výklad silového účinku světla na drobnohledné částice.

Dr. V. Pospíšil.

Účelem tohoto článku je ujasnit si, pokud to z dosavadních experimentálních výsledků je možné,¹⁾ podstatu zjevu a naléztí tak, kterým směrem se má bráti další badání. Sledujeme zde v prvé řadě cíle pracovní.

1. Vymezení úkolu.

V čem se shodují pokusné výsledky s teorií Brownova pohybu?

V ohledu kvalitativním dokazují opětně správnost našich představ o původu B. p., neboť v pozorovacích řadách, kde měření byl pohyb buď částic větších nebo v prostředí viskosnějším, nalezen byl též střední čtverec posunutí (s. č. p.) v souhlase se základní rovnicí Einsteinovou

$$\overline{\Delta^2} = \frac{RT \cdot t}{N 3\pi \xi r} \quad (1)$$

vždy též menší. K výpočtu Avogadrova čísla N nedá se jich dobře užítí, neboť částice uhlíkové mají různý tvar. Odpor prostředí pro takovéto zrnité částice je větší nežli pro částice kulové přibližně stejné velikosti, takže jejich absolutní posuv je menší. Počítáme-li N z prvních deseti pozorovacích řad s částicemi uhlíkovými, obdržíme tyto hodnoty: 79, 95, 134, 78, 69, 50, 87, 84, 108, 85.10²². Průměr z nich je 8.7.10²³, větší nežli hodnota 6.06.10²³ t. č. za nej-správnější uznávaná — jak se dalo očekávatí.

Co přinášejí nového?

V podstatě dva zjevy: A) Pohlčené světlo zvětšuje B. p. a zvětšení ono spadá do polarisační roviny světla, B) měkké záření tepelné vymazává nebo nedovoluje tomuto zvětšení pohybu.

¹⁾ Tento článek navazuje na poslední pojednání téhož autora „Pokusná badání o silovém účinku světla na drobnohledných částicích“, který vyšel v Rozpravách Čes. Akademie, XXXIX, č. 52, 1929.

Proč nebyly dosud tyto zjevy nalezeny?

Protože od vybudování kvantitativní teorie Einsteinovy a Smoluchowského nebyl vliv světla na B. p. měřen.

Byl sice Regnauldem a S. Exnerem v letech 50tých a 60tých min. stol. měřen účinek světla na B. p., s výsledkem pozitivním, avšak tyto práce upadly jednak v zapomenutí, jednak nebylo tehdy ani možno kladné výsledky správně zhodnotiti a oba badatelé byli jimi svedeni k nesprávnému výkladu o původu B. p., pokládajíce jej za výsledek mikroproudů v kapalině světlem zahráté. Teprve díky pracím jmenovaných dvou teoretiků a rozsáhlým měřením Perrinovým, Svedbergovým a četných jiných badatelů získali jsme ve vzorci (1) naprosto jisté základny, takže prvý náš zjev můžeme jasně prohlédnouti. Můžeme se připojiti k názoru, k němuž došel Gouy pouze na základě kvalitativních pozorování, že přirozený tepelný pohyb brownický na užitém světle nezávisí.

V čem tedy spočívá B. p. světlem zvětšený?

Vzbuzený B. p. ($\overline{A_i^2}$) je součtem dvou pohybů, přirozeného pohybu tepelného ($\overline{A_0^2}$) a jistého malého pohybu, který je vyvolán ponderomotorickým účinkem absorbovaného světla a jehož střední čtverec posunutí označíme $\overline{\Gamma_x^2}$, takže

$$\overline{A_i^2} = \overline{A_0^2} + \overline{\Gamma_x^2}. \quad (2)$$

A. O budícím účinku pohlceného světla.

2. Které úsudky lze z pokusných výsledků činit o vlastnostech silového účinku světla?

a) Pokusné výsledky, zvláště odstavce 6 a 8 uka zují přímo že běží o bezprostřední účinek světla na částice.

b) Z odstavce 7 o symetrii vzbuzeného pohybu a z té okolnosti, že poměrné zvětšení pohybu je na čase nezávislé, jak bylo ukázáno v prvému pojednání,²⁾ plyne, že přírůstek pohybu ($\overline{\Gamma_x^2}$) je právě tak molekulárně neuspořádaný jako je přirozený tepelný B. p. samotný. Kdyby totiž byl přírůstek pohybu vyvolán nějakým jednosměrným účinkem světla, jaký se na př. projevuje při Ehrenhaftově fotoforese, pak by čtverec zvětšeného posunutí nemohl býti lineárně úměrný času. Z toho plyne, že silový účinek světla při absorpci je molekulárně neuspořádaný.

c) Z odst. 8 plyne, že směr jednotlivých silových prvků spadá do roviny magnetického vektoru světla. — Jelikož se při buzení pohybu projevuje polarisační stav světla, což je jeho vysloveně transversální vlastnost, je nasnadě domněnka, že náš silový účinek je výlučně transversální.

²⁾ Spisy přírodověd. fak. Karlovy university č. 77, 1927.

V této otázce máme prvý pracovní úkol, vyšetřiti budící účinek světla též na třetí pohybovou složku z , spadající do směru světla.

d) Z řádově velikého rozdílu mezi zvětšením, vypočítaným z kvantových impulsů³⁾ a mezi zvětšením pohybu, skutečně nalezeným, lze soudit, že náš silový účinek projevuje se zvláště velikým přenosem pohybové energie na absorbující hmotnou částici.⁴⁾ Tento úsudek je tím spíše oprávněný, že podle tab. IV se dá očekávat, že při užití vhodného, užšího aktivního oboru spektrálního může se snad i při poměrně ještě menších intenzitách světla účinného docílit značného zvětšení pohybu.

3. Hypotéza o přímé přeměně zářivé energie v pohybovou.

Některými z předešlých úsudků byl jsem veden k tomu, zkusiti, zda by se dal zjev vyložiti kvantitativně na základě této hypotézy:

Absorpce světelného kvantu $h\nu$ může býti prováděna takovým silovým účinkem, že se buď část nebo celá jeho energie objeví po absorpci jako pohybová energie částice. Tato domněnka, jež byla mojí pracovní hypotésou, vyjádřena je rovnicí

$$ah\nu = \frac{1}{2} m v_0^2, \quad (3)$$

kdež m je hmota částice, v_0 její počáteční rychlost a a je zlomek ≤ 1 .

Rovnice tato opírá se o zákon o zachování energie a koeficient a připojen je z toho důvodu, aby zůstala jistá část $(1 - a)$ energie $h\nu$ k dispozici, která by se po případě mohla přenést na suspendující prostředí, aby byl splněn též princip o zachování hybnosti. Napodobuji zde evidentně osvědčenou Einsteinovu rovnici pro fotoelektrický zjev. Budeme proto krátce předpokládanou přeměnu energie světelné v pohybovou energii hmoty nazývat *fotokinetickým zjevem*.

4. Kvantitativní výklad budícího účinku světla.

Pokusíme se oň napřed na číselném příkladě, který nám umožní vniknouti lépe do podstaty zjevu, a potom na základě obecné úvahy najdeme, který pracovní užitek učiněná hypotéza může přinést.

a) *Číselný příklad.* Zvolíme k němu pozorovací řadu 29, tab.

³⁾ Časopis mat. a fys., t. roč. č. 2., str. 132—136.

⁴⁾ Tento závěr znovu poukazuje na transversálnost silového účinku. Neboť jinak by bylo těžko pochopitelné, že by mohli Lebeděv a Nicols a Hull při známých měřeních tlaku záření nalézt tak malý ponderomotorický účinek pohlceného světla, jaký skutečně v souhlase s Maxwellovým a Bartoliovým výpočtem nalezli.

IV, se světlem rtuťové lampy, která při poměrně slabém proudu světelném vyvolala značné zvětšení pohybu. S. č. p. fotokinetického pohybu v této řadě je $\overline{V}_x^2 = \overline{A}_i^2 - \overline{A}_0^2 = 110 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$, viskozita chloroformu $\zeta = 0.0055$, hmota m uhlíkových částic asi $7 \cdot 10^{-14} \text{ g}$, veličina $K = 6\pi\zeta r = 2 \cdot 10^{-6} \text{ g/sec}$. Světlo účinné považujeme zhruba za monochromatické o délce vlny 0.5μ . Koeficient α volme roven 1 nebo od 1 zanedbatelně odlišný. Podle předpokládané přeměny energie zářivé obdrží částice po fotokinetické absorpci světelného kvantu počáteční rychlost $v_0 = 11 \text{ cm/sec}$. Tato rychlost je sice značná, ale odpor prostředí je tak veliký, že již během $4 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$ klesne na 10^6 též díl své počáteční hodnoty, takže elementární posunutí γ , na něž vystačí energie $h\nu$, je pouze $3.5 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$.⁵⁾ Je-li fotokinetický děj výlučně příčný, jak se zdá, pak připadne do jedné osy ze čtverců γ^2 průměrně $\frac{1}{2}$, tedy $\overline{\gamma x^2} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$. Má-li částice docílit s. č. p. \overline{V}_x^2 , spotřebuje k tomu za 1 sec $\overline{V}_x^2/\overline{\gamma x^2} = \text{asi } 2 \cdot 10^5$ světelných kvantů. Intensita užitého světla byla 0.003 watt/cm^2 . Nalezneme snadno, že požadovaná spotřeba $2 \cdot 10^5$ světelných kvantů za sec činí pouze asi 2% oné energie, kterou částice mohla pohltnouti.

Pro ostatní pozorovací řady, ve kterých užito bylo silnějších proudů světelné energie, nalezneme přirozeně ještě menší fotokinetickou spotřebu zářivé energie, dosahující pouze zlomků promile. Můžeme tedy říci, což je *raison d'être* naší hypotézy, že účinný předpoklad dovoluje kvantitativní výklad zjevu.

b) *Obecná úvaha.* Budiž dJ_{at} energie fotokineticky účinné části spektrální světelného proudu Jt , a ν frekvence této části. Podle rovnice (6) umožní světelný kvant $h\nu$ elementární posunutí

$$\gamma = \sqrt{\frac{2mah\nu}{K^2}} \quad (7)$$

Předpokládáme-li transversalitu fotokinésy, máme pro elementární s. č. p.⁶⁾

⁵⁾ Počítáno z rovnic

$$m \frac{dv}{dt} = -Kv, \quad (4)$$

$$\log \text{nat } v/v_0 = -Kt/m, \quad (5)$$

$$\text{a } \gamma = v_0 \int_0^\infty e^{-\frac{K}{m}t} dt. \quad (6)$$

Viz odvození Einsteinových vzorců v Časopise mat. a fys., LVIII, tr. 315—318, 1929.

⁶⁾ Předpoklad transversality není ve zdejších počtech nic podstatného. Je-li náš účinek světla ve všech směrech stejně pravděpodobný, pak pravá strana rovnice (8) by byla násobena ještě $\frac{1}{2}$, což je pro naše úvahy bezvýznamné.

$$\overline{\gamma_x^2} = \frac{mahv}{K^2}, \quad (8)$$

a pro úplný s. č. p.

$$\overline{\Gamma_x^2} = \overline{\gamma_x^2} \cdot \frac{dJ_a t}{hv} = \frac{madJ_a t}{K^2}. \quad (9)$$

Dosadíme-li poslední výraz do rovnice (2), ve které zároveň nahradíme $\overline{\Delta_0^2}$ pravou stranou rovnice (1), obdržíme pro poměrné zvětšení G brownického pohybu v %

$$G = 100 \frac{madJ_a}{12\pi\zeta rkT}, \quad (10)$$

kdež $k = R/N$.

Poměrné vzbuzení pohybu má tedy býti úměrnó výrazu $madJ_a/r$. Protože neznáme závislost dJ_a na m a r , nemůžeme rozhodnouti, splňují-li pokusné výsledky tento požadavek. Dále je poměrné zvětšení G na čase nezávislé a nepřímó úměrnó viskositě, což odpovídá experimentálním výsledkům. Nepřímou úměrnost s absolutní teplotou T zbývá pokusně vyšetřiti.

5. Příbuznost fotokinetického a fotoelektrického zjevu.

Na formální podobnost základních rovnic pro oba zjevy bylo již svrchu poukázáno. Avšak oba fotoenergetické zjevy ukazují i hlubší vnitřní analogii, takže se zdá býti oprávněn závěr, že fotokinetická hypotéza nemá pouze cenu libovolné hypotézy pracovní, nýbrž též skutečnou.

Oba zjevy ukazují asymetrii ve vzbuzení světlem lineárně polarisovaným. Okolnost, že selektivní fotoelektrický zjev na alkalických kovech dává význačné maximum v elektrickém vektoru světla, kdežto v našem případě nalezeno bylo maximum v magnetickém vektoru (správněji v rovině tohoto vektoru), ukazuje, že jde o dva individuální, příbuzné zjevy.

Se stanoviska ekonomického docilují oba zjevy stejně špatného využití zářivé energie.

Považujeme-li fosforescenci v souhlase s Lenardem a Seelandem za důsledek vnitřního zjevu fotoelektrického, pak máme další analogii: Oba zjevy jsou vyhášeny měkkým zářením tepelným.

B. O tlumícím účinku měkkého záření tepelného.

6. Tento zjev dá se velmi těžko pochopiti. Tážeme-li se, nebylo-li snad tlumení zvětšeného pohybu způsobeno přílišným zahřátím kapaliny, pak nalezneme v tab. VII, III a IV odpověď

zápornou. Neboť při teplotě $23\cdot7^{\circ}$ bylo již vzbuzení pohybu tlumeno, kdežto při teplotách vyšších, $28\cdot3^{\circ}$ atd., tab. III a IV, vzbuzení ještě bylo nalezeno. Avšak i kdyby tomu tak nebylo, není jasno, kterak bychom mohli obvyklého výkladu o vyhášecím účinku tepla a měkkého záření tepelného na fosforescenci v našem případě užítí.

Jsem spíše nakloněn názoru, že výklad o vyhášení fosforescence měkkým zářením (na základě představy o mocnějších kolísáních vzbuzených molekul a atomů) je sice zatím pro svoji jednoduchost uspokojivý, že však pravou podstatu zjevu dobře neinterpretuje. Než však bude možno učiniti si o vyhášecím účinku spolehlivější úsudek, bude ještě třeba v našem případě pokusně rozhodnouti tyto otázky: Jak známo, jsou saze pro infračervené záření šedé (Lummer), nebo dokonce i průhledné (Helmholtz, Physiologische Optik, II. vyd., p. 283). Je nutno experimentálně vyšetřiti, nemá-li tlumícího účinku na vzbuzení každé záření, i tvrdší, které není užitou látkou pohlcováno. Za druhé je třeba vyšetřiti úlohu, kterou zde hraje vodné prostředí, jež měkké záření dobře pohlcuje.

Závěr.

Přehlédneme-li pokusná badání pod zorným úhlem daného výkladu, můžeme je takto interpretovati.

Běží v podstatě o vyšetřování ponderomotorického účinku světla, který je následkem kvantové struktury energie zářivé molekulárně neuspořádaný, takže ho nelze měřiti obvyklými fyzikálními makroaparáty, které i v nejjemnějším provedení (jako např. Lebeděvovo zařízení k měření tlaku záření) jsou pro náš účel obrovsky veliké. Fotokinésa projevuje se sice v poměru k Maxwellovu tlaku záření velikým ponderomotorickým účinkem, přesto však lze ji zjistiti pouze na částicích, jejichž hmota činí jenom zlomky biliontiny gramu.

Brownův pohyb částic je při našich měřeních vlastně věcí vedlejší. B. p. přebírá zde úlohu vlákna, zavěšujícího pozorovanou částici. B. p. je při našich měřeních do jisté míry zlem, neboť působí co do velikosti větší posunutí částice nežli fotokinetický účinek světla. Doufám, že se nalezne taková látka, (snad pigmentová zrnka ze sítnice) a takové podmínky, které umožní pozorovati fotokinésu přímo jako zjev, převyšující přirozený pohyb brownický.

Spekulativní cestou došel jsem k názoru, že fotokinésa může býti zjev velmi obecný a v přírodním dění významný. Budiž k tomu na vysvětlenou poznamenáno aspoň toto:

Fotokinésa je pravděpodobně onen proces, dosud nám scházející, který přeměňuje absorbovanou energii

zářivou v pohybovou energii tepelnou. Vezměme konkrétní případ, očazená křídélka, zavěšená na vlákne ve vakuu, na nichž Lebeděv měřil tlak záření. Absorbované světlo projevuje zde dvojí ponderomotorický účinek, jeden velmi malý ve směru longitudinálním, t. j. tlak záření, druhý veliký, kterému říkáme zahřívání, o němž ale víme, že je to neuspořádaný tepelný pohyb, v našem případě oscilační pohyb molekul absorbující vrstvy. Vyložiti, kterak si máme představití vznik tohoto obrovského pohybu tepelného, se, pokud vím, dosud nepodařilo. Zmínky, jež se mi podařilo tu a tam o této otázce naléztí, jsou velmi neurčité a dokazují, jak těžký problém máme před sebou. Planck upřímně říká „das dunkle Gebiet der Absorption“. Jsou-li výklady tohoto článku správné, pak snadno pochopíme oba ponderomotorické účinky světla. Transversální a molekulárně neuspořádaná (což závisí na polarisačním stavu jednotlivých zářivých kvantů) fotokinésa působí to, čemu říkáme zahřívání tělesa, absorbujícího energii zářivou, kdežto ve směru longitudinálním sčítají se nepatrné, jednosměrné longitudinální komponenty kvantových impulsů $h\nu/c$ a dávají výsledný tlak záření, měřitelný z pohybu křídélka jako celku.

Jiná, trochu úzká aplikace fotokinésy, jež však je pro nás nadmíru důležitá, spočívá v tom, že nám umožňuje vidění. Z našich pokusných a početních výsledků nutně plyne, že černá pigmentová zrnka na vnější straně sítnice jsou pohlceným světlem uváděna do fotokinetického, submikroskopického a — následkem kvantové struktury světla — kvasivibračního pohybu, čímž jsou konečky zrakového nervu v sloupcích a čípcích mechanicky drážděny. A jak je známo, každé mechanické podráždění zrakového nervu vyvolává zvláštní, specifické počitky, které označujeme slovem „světlo“. — Že tato myšlenka mnoho do sebe má, to ukazuje předně stavba sítnice, která je k této úloze velmi účelně provedena (obrácení sloupců a čípků od světla k zadní pigmentové vrstvě zdálo se dosud nepochopitelné), za druhé nasvědčují tomu známé fyziologické pohyby pigmentových zrněk ve výběžcích pigmentových buněk, jimiž se dostávají při dopadu světla do oka pigmentová zrnka mezi sloupky a čípky, a ještě některé důvody, které uvádím v jiném článku o vzniku zrakových počitků.⁷⁾

I. fyzikální ústav českého vysokého učení technického v Praze.

*

⁷⁾ Časopis lékařů českých, 69., č. 9 a 10, 1930.

Essai d'explication de la force motrice de la lumière sur des particules microscopiques.

(Extrait de l'article précédent.)

Les résultats expérimentaux, récemment publiés par l'auteur (Voir *Bulletin internat. de l'Académie des sc. de Bohême*, séance de 6^e décembre 1929, ou *Physikal. Zeitschr.* 31, p. 65—78, 1930), sont expliqués de la manière suivante: Le mouvement brownien $\overline{\Delta_i^2}$, augmenté par la lumière, est considéré comme la somme d'un mouvement brownien naturel calorifique $\overline{\Delta_0^2}$ et d'un mouvement accessoire $\overline{T_x^2}$ produit par la lumière, $\overline{\Delta_i^2} = \overline{\Delta_0^2} + \overline{T_x^2}$. De même que le mouvement brownien naturel, le mouvement accessoire $\overline{T_x^2}$ n'est pas moléculairement ordonné. On doit conclure de là que l'état moléculaire non ordonné est la propriété cardinale de la nouvelle force de lumière.

Pour parvenir à une explication quantitative, l'auteur se trouve obligé d'introduire l'hypothèse photocinétique suivante: Après l'absorption, l'énergie d'un quantum de lumière $h\nu$ peut se manifester comme l'énergie cinétique d'une particule microscopique, $\alpha h\nu = \frac{1}{2} m v_0^2$, où $\alpha \leq 1$, m = la masse et v_0 = la vitesse initiale de la particule. Le mouvement photocinétique $\overline{T_x^2}$ de la particule se produit dans le plan du vecteur magnétique de la lumière, et il est, probablement, exclusivement transversal à la lumière. La photocinèse semble être un effet très voisin de l'effet photo-électrique.

En considérant la quantité d'énergie de radiation, utilisée dans les recherches expérimentales, et l'augmentation respective du mouvement, on trouve que l'utilisation photocinétique de la lumière n'est que très faible. Deux pour cent seulement ou encore moins de l'énergie de la lumière se transforme en l'énergie photocinétique de la particule. — D'après l'équation 10, on peut s'attendre à ce que l'accroissement relatif G du mouvement brownien par la lumière soit réciproque de la température absolue T .

Dans les recherches de l'auteur, le mouvement brownien n'a qu'une importance secondaire. Il ne constitue qu'un inconvénient qu'on ne saurait éviter dans les mesures de la nouvelle force de lumière. — La photocinèse est probablement un effet très commun qui détermine la transformation de l'énergie de radiation en l'énergie calorifique du corps qui l'absorbe. — Les mouvements photocinétiques des grains pigmentaires dans la rétine de l'oeil excitent d'une manière purement mécanique les cônes et les bâtonnets du nerf optique. Voici l'origine des sensations visuelles.