

Oponentský posudek bakalářské práce

Michal Almáši: Fotometrická kalibrácia detektorov veľmi nízkych svetelných tokov

Je na místě pochválit, že autor se pustil do studia oblasti, která je opomíjená, ale velmi důležitá: velká, většinou řádová změna nočního prostředí vlivem umělých zdrojů světla je významnou složkou [globální změny](#). Zásadně ovlivňuje mnoho dějů v živočišné říši, počítaje v to i lidstvo. Záleží i na malých množstvích světla, jež se v technické praxi neměřívají, neb ani „není čím“. Astro-nomové si sice desítky let stěžují na rostoucí jas noční oblohy, ale jak velký onen jas je, se málokdy obtěžují zjišťovat a jen několik z nich výsledky i publikovalo.

Pustit se do opomíjené oblasti znamená zvládnout mnoho věcí najednou, což není snadné. Autor to v potěšující míře dokázal, dost se asi naučil a získal i zajímavé výsledky. I text jeho . bakalářské práce může jiným pomoci – pokud nepřeberou i jeho chyby. Aby tak neučinili, píšu následující posudek dosti podrobně. Číním tak i proto, že jsem k práci kdysi dal podnět a rád bych, aby byla co nejlépe využita. Výsledek mého posudku viz na konci, na str. 3.

Už jen vyznat se ve světelných fyzikálních veličinách není samozřejmostí ani pro zkušené fyziky, asi proto, že to je již něco tak starého, že se tím už dnes nikdo nezabývá. M. Almáši se s tím v kap. 2 uspokojivě vypořádal, i když, asi vinou anglické terminologie, smíchal na str. 8 veličiny *zářivá energie* a *světelné množství* (to se anglicky bohužel většinou označuje *luminous energy* místo přesnějšího *quantity of light*; jiné jazyky to nečiní: *Lichtmenge*, *svetelné množstvo*) užitím sousloví *světelná energie*, které je jako název veličiny nevhodné – nejde totiž o energii, ale o veličinu s úplně jiným rozměrem. To jej pak vedlo k podivnému zápisu $[J] = [eV] = [lm.s]$, v němž vystupují v hranatých závorkách zjevně jednotky (co zde vlastně ony hranaté závorky znamenají? – mělo by jít o operátor, který z veličiny vyrobí její jednotku) . Pro další text to ale nevádí, užívají se v něm veličiny běžné (svítivost, jas, osvětlenost).

Dále autor sepsal obvyklá tvrzení o oku, vč. obvyklých matoucích klišé. Např. že zrovna žlutá skvrna zprostředkovává barevné vidění – ale barvy přece rozlišujeme, i když neupřeme zrak zrovna na danou barevnou scénu, jak si každý může obratem ověřit. Nebo že z funkčního hlediska je sítnice podobná detektorům v kamerách – spíš není, vnímání elementů obrazu zrak zajišťuje pomocí rychlých změn osvětlenosti světločivých buněk při velmi rychlých pohybech očí (tremoru), které probíhají na rozhraní prostorových úhlů různého jasu. Nebo pasáž o tyčinkách a čípcích (funkčně odlišné tyčinky asi doopravdy [neexistují](#)).

V části o umělých zdrojích světla se tvrdí, že před užíváním petroleje byly svíčky těmi hlavními (to byly olejové lampy či louče – svíčky byly zdroji luxusními). Hrubou chybou je jen tvrzení, že svíčka vyzařuje do prostoru světelný tok 1 lm (prosím o propočítání ze správného údaje, že má svítivost 1 cd, a to jak o hrubý odhad – kdyby byla zdrojem izotropním, tak i o mírné zpřesnění s uvážením tvaru plamene). Nelíbí se mi označení „LED dioda“ na str. 16 a 17. Když už ne prostě LED (ledka), tak alespoň „LE dioda“. Není mi jasné, jak byla při měření ona svítící dioda napájena (u LED bývá potřeba limitovat proud, nestačí je připojit na zdroj napětí, nemá-li vhodný vnitřní odpor).

Kap. 3 popisující elektrické detektory tvoří více než třetinu práce. Vychází z fyzikálních textů dnes hojných, kterým autor dobře porozuměl. Obsahuje málo chyb (luxmetr měří proud, neintegruje náboj, s. 18; vodivost polovodičů s teplotou roste, tepelná ani světelná energie neexistují, s. 19; patří Diracova místo Diracotova, Fermiho hladina leží u typu P blízko pásu valenčního). Nesmyslný mi připadá vztah 3.11 a tvrzení, že filtr „I odpovídá infračervené oblasti elmag. spektra“, na s. 27 a 28 – jako pramen je uveden Hroch, F. : *Astronomické praktikum*, Brno 2006, ten se ale nedá nalézt. S. 31 uvádí legrační tvrzení, že některé luxmetry, známe-li přesnou vzdálenost zdroje světla, dokáží udávat jeho svítivost (kolmou osvětlenost čidla oním jediným zdrojem násobit kvadrátem jeho vzdálenosti asi neumí přístroj sám, ten tu vzdálenost nezná...). Footcandle je přežívající americká jednotka osvětlenosti (zdrojem o svítivosti 1 cd ve vzdálenosti 1 ft, čili 1 lm/ft², přepočítání na luxy je triviální) se nevhodným názvem (ten naznačuje, že její rozměr by měl být ft.cd, to asi zmátlo i autora); bylo by milé, kdyby takovou funkci měly luxmetry na trhu EU zakázanou, neb je zdrojem

zbytečných řádových chyb. Obr. 3.13 má chybně udaný zdroj (jistě jde o informaci výrobce). Spektrální chyba luxmetru (s. 33) nemůže vzniknout ničím jiným než neshodou spektrální citlivosti přístroje a kodifikované fotopické spektrální světelné účinnosti záření.

Skutečné kameny úrazu se vyskytují až na s. 35. Přístroj označovaný SQM udává ne *jasnost*, ale údaj odpovídající *jasu* scény. Nesmyslné užití pojmu jasnost se opakuje i leckde dále, asi vinou trapné astronomické hatmatilky, kdy fyzikálně zaostali autoři místo normálního *luminance* či *radiance* píší *brightness*, což navíc bývá veličina, již nedefinují. Údaj SQM není v jednotkách SI (cd/m^2), ale je to číslo, které udává, jaká hvězdná velikost (kolik magnitud) připadá na jednu čtvereční vteřinu. To ale v žádném případě nelze zapsat formou „mag/arcsec²“! To je takový nesmysl, jako říci o silnici, poblíž které naměříme 70 db a náhodou je na ní zrovna 70 aut, že emise z aut jsou 1 db na auto. Nebo o hvězdokupě, která má 3 mag a 6 viditelných hvězd (řekněme Plejády), že na každou z nich připadá 0,5 mag. Ač je takový nesmysl v astronomické hatmatilce zakořeněný, v žádné solidní práci by se neměl vyskytnout jinak, než jako varovná poznámka o nesprávném vyjadřování. Operátor lomítka by automaticky znamenal, že $21 \text{ mag/arcsec}^2 = 3600 \cdot 21 \text{ mag/arcmin}^2$, atd. Jednotkou pro onu udávanou veličinu (hvězdnou velikost čehosi) je jen magnituda (mag).

Dalším neduhem (již na téže stránce a pak leckde dále) je bezbřehé užívání pojmu *citlivost*. Co znamená věta „Smerová citlivosť prístroja na bodový zdroj je približne 19°, mimo osi, v ktorej sa nachádza senzor, je citlivosť 10krát nižšia“?

Nakonec je uvedena zmatená tab. 3.3, kde se jas udává v $\mu\text{W/m}^2$ (nejde jistě o jas, ale asi o efektivní ozáření, čili integrál spektrální ozáření přes spektrální citlivost diody, kromě toho tam patří hodnoty o čtyři řády vyšší, neb výrobce užívá jednotky $\mu\text{W/cm}^2$).

To, že zacházení s tak podivnou jednotkou, jako je magnituda (natož lomenou čtvereční vteřinou...) je složité a může vést k úplnému neporozumění, ilustruje nesmyslná diskuse ve dvou posl. odst. s. 37. SQM prostě měří s nejistotou deseti procent, což je ve fotometrii nejistota běžná.

S. 38 obsahuje sousloví „eletrickej energie“; to je sice běžné, ale co si pod ním autor představuje? O jakou stavovou veličinu (jíž energie vždy je) se jedná? Fotovoltaické články nevyrábějí elektrickou energii, ale konají elektrickou práci (viz závěrečné odkazy z textu <http://amper.ped.muni.cz/eave/veliciny.pdf>, zejména [Kolik práce dá nemlžit?](#)).

Tab. 3.4 má nejasný původ (asi jde o údaje prodejce fotočlánků, ale možná to autor naměřil...), ale i smysl – jaké maximální napětí či proud? Nezávisí to náhodou na tom, kolik na článek dopadá světla? Je to pro 1000 W/m^2 slunečního záření a nějakou nevysokou teplotu? Na konci téže s. 39 se opět nesprávně operuje s pojmem citlivost. To jistě není podíl proudu či napětí a spektrálního toku dopadajícího na fotočlánek. Teprve derivaci takové funkce (nejde obecně o přímou úměrnost, podíl tedy není konstantní) lze nazvat [responsivita](#).

S. 41 ukazuje kousek z velkého objemu měření, které autor vykonal. Nalezené minimum spektrální citlivosti na 700 nm, třikrát nižší než na 500 nm nebo 1000 nm, je ale šokující. Je to výsledek zhruba opačný, než by člověk čekal... mělo by tam být ploché maximum.

Konec kapitoly na s. 42 používá asi poprvé v textu zcela nesprávné označení „chyba“ pro nejistotu, konkrétně *standardní nejistotu*. Chyba je rozdíl zjištěného údaje a hodnoty správné, obecně bývá neznámá. Odhad standardní nejistoty dává nástroj, jak její možné meze odhadnout. Více viz NIST Technical Note 1297, Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, <http://www.nist.gov/pml/pubs/tn1297/index.cfm> – to by pro všechny, kteří se pouštějí do bakalářských a dalších prací, měla být povinná četba, z níž jsou zkoušeni (termín *error* je uveden v části <http://physics.nist.gov/Pubs/guidelines/appd.1.html>).

Hlavní část měření je ale v kap. 4. Hned její úvodní část ukazuje, že jsem selhal coby úvodní konzultant. Pro měření úhlových charakteristik přístrojů bylo nezbytné vymezit úhel vyzařování kalibračního zdroje (svíčky), ne ji nechat svítit do celé laboratoře, byť začerněné. Omezit světlo jen na úzký kužel je snadné, stačí na to začerněné krabice kolem svíčky, se dvěma clonami vymezujícími onen kužel. To, že přitom svítivost v takovém směru mírně vzroste, nevadí, nárůst může být mnohem menší než samotná nejistota svítivosti plamene. Vinou nedokonalého experimentálního uspořádání dostal autor výsledky, které jsou pro velké úhly otočení detektorů od svíčky téměř nesmyslné – nejde o citlivost pro daný úhel dopadu, ale o reakci na světlo rozptýlené od stěn

laboratoře. Tím lze snadno vysvětlit geometricky nemožné nenulové citlivosti i pro úhel otočení 90 stupňů (kdy na detektor žádné světlo ze zdroje nedopadá). Do grafů pro detektory, které jsou přibližně „kosínové“ by bylo velmi žádoucí onu funkci kosinus pro názornost doplnit. Zajímavé je, že použité levné PV články jsou žádoucímu průběhu úhlové citlivosti možná bližší než luxmetry.

Další část o teplotních závislostech přístrojů je velmi pěkná, tvoří asi nejcennější výsledek autorů. Jen na s. 51 doporučuji užít slova signál místo citlivost (signál z digitálního fotoaparátu s teplotou roste, citlivost detekce jistě ne, fotoaparát spolehlivěji zaznamená velmi malé změny světla, když je detekční čip chladný, podobně, jako je tomu u vědeckých kamer). Co je doopravdy citlivost viz např. [http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_(electronics)).

Vážné nedostatky má bakalářská práce až v poslední experimentální části 4.3, Meranie premenlivej jasnosti. Počínaje vysvětlením, proč Slunce slábne, když klesá k obzoru: Rayleighův rozptyl působí shluky molekul plynu, ne nějaké tajemné „částice“ (aerosol rozptyluje jinak úhlově i spektrálně), vzduch světlo prakticky nepohlcuje, jen rozptyluje. Stmívání netrvá na rovníku jen několik minut (jak dlouho trvá doopravdy, je výpočet na deset sekund). Nic proti užívání obratu jasnost oblohy, jen by měla taková veličina být zavedena; pochybuji, že je v tomto případě užitečná, jasnost je nejspíše integrál jasu přes prostorový úhel (viz mou starší práci Veličiny a jednotky v astronomii, zvláště v astronomické fotometrii, http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/a_papers/si_fot/si_fot.pdf) a ten je pro oblohu trochu moc veliký, lepší její charakteristikou je horizontální osvětlenost, již působí. Přístroj SQM s čočkou jistě neměří jasnost oblohy, ale jen jas prostorového úhlu zhruba 1 sr. Klíčový je ale předposlední odst. na s. 52. Proč autor přepočítává hodnoty z fotometrických přístrojů (vycházejících z jednotky kandela – to je jak luxmetr, tak i SQM) na veličiny energiové, asi na nějakou ozářenost (jak lze odhadnout z použité jednotky W/m^2), a co ta ozářenost znamená v případě SQM s úzkým „zorným polem“? Odkud takový přepočet vzal? Proč naopak triviálně nekalibroval pomocí luxmetru ony dva fotovoltaické články, aby jejich výstup mohl přepočítat „na luxy“? Jak doopravdy na luxmetr / PV panel při kalibraci svítil (zakrývat část čidla je postup zavádějící, zato jít postupně dále od okna za zataženého dne by byl postup správný, stejně jako měření přímého záření Slunce klesajícího k obzoru). Není divu, že pak graf 4.11 dává hodnoty v rozmezí dvojkového řádu... V další č. 4.4: jak lze měřit jas nebe detektorem, který „zabírá“ celý poloprostor, v nenulových zenitových vzdálenostech? Lze jas udávat v luxech? V 4.5: jasnost ani jas nelze vyjadřovat v magnitudách. Hvězdnou velikost čtvereční úhlové vteřiny samozřejmě ano – ale takový přepočet z údajů fotočlánků v tab. 4.5 je zjevně nesmyslný, nemohou dávat výsledky odlišné o tři až pět magnitud, tedy jasy větší o jeden až dva řády. Povzbuzující je v tabulce naopak ne tak velký nesouhlas autorových vlastních výsledků z měření digitálním fotoaparátem a přístrojů SQM.

Tyto závěrečné nedostatky jen potvrzují obtížnost úkolu, naučit se doopravdy pracovat s fotometrickými veličinami. Něco jiného je, některé na začátku stručně popsat, něco jiného je s nimi opravdu počítat, natož s přehazováním mezi fotometrickými a radiometrickými doménami a navíc s komplikací, že astronomové i výrobci přístroje SQM užívají naprosto nefyzikální pseudojednotku „magnituda na čtvereční vteřinu“. Jak se ta připlete, žádné výpočty už dělat nelze... a pokud se do nich někdo pustí, tak pohoří. Použit autorova data, i zatím nepublikovaná, s normálním způsobem počítání (v rámci fotometrie SI) by dalo jistě i pro části 4.3 až 4.5 výsledky vesměs přesvědčivé. To ale není chyba, kterou je na místě vyčítat adeptovi na bakalářský diplom, na vině jsou popletení profesori astronomie po celém světě spolu s jinými zralými osobnostmi, které by už přece měly elementární fyziku znát a astronomii před ní nechránit.

Práci Michala Almášiho proto hodnotím jako velmi důkladnou, s rozsáhlými experimentálními výsledky, výborně napsanou s minimem překlepů a věcných chyb. Pro bakalářskou práci to bylo velké sousto. I přes nedostatky výše sepsané proto práci

navrhuji známku C a doporučuji práci k obhajobě.