

Václav Dolejšek; A. Brandejský

O limitní citlivosti spektrální při užití čítače fotonů a fotografické desky

Časopis pro pěstování matematiky a fyziky, Vol. 70 (1941), No. 2, 73--88

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/121889>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1941

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>

ČÁST FYSIKÁLNÍ.

O limitní citlivosti spektrální při užití čítače fotonů a fotografické desky.

V. Dolejšek a A. Brandejský, Praha.

(Došlo 26. IX. 1940.)

Rušivý vliv kosmických paprsků a přirozené radioaktivity při měření čítači. Snížení tohoto vlivu na 1 impuls za 100 sec. Souvislost rušivého vlivu s limitní citlivostí. Účinný prostorový úhel spektrálního čítače pro paprsky X a paprsky γ . Praktické srovnání citlivosti fotografické desky s citlivostí uvedeného čítače. Spektrální měření, a užití čítače ve spojení s Kunzlovou fokusační metodou. Docílená rozlišovací mohutnost.

Viditelný obor záření. Při stanovení nepatrných stop energie zářivé pomocí fotografické desky spočívá, jak známo, hlavní výhoda fotografické desky v tom, že její účinek je sumační. To znamená, že i nepatrná záření lze fotograficky stanovit tím způsobem, že fotografická deska vystaví se účinkům takového slabého záření dostatečně dlouhou dobu a to takovou, až prah citlivosti desky čili minimální stanovitelná hustota černání je dosažena.

V oboru záření viditelného (fialového resp. blízkého ultrafialového, používaného v astrofysice) nejmenší hodnota energie zářivé, která je schopna způsobiti za normálních podmínek na fotografické desce právě znatelnou stopu černání, zvaná prah citlivosti, udává se v nejpříznivějším případě 10^{-2} ergů na 1 cm^2 . (Někteří autoři udávají tuto hodnotu ještě asi 10krát menší, t. j. 10^{-3} ergů na 1 cm^2 .) Poněvadž energie jednotlivých fotonů v tomto oboru: $h\nu = 10^{-15}$ ergů, znamená to, že teprve 10^9 fotonů na 1 cm^2 způsobí právě viditelné černání fotografické desky. Je přirozeno, že nelze z různých důvodů pro dosažení prahu citlivosti dobu expozice libovolně dlouho prodlužovati a tak stanovit fotograficky libovolně malé hodnoty energie zářivé. Jako typický příklad nejdelší doby v praxi používané k fotografickému stanovení nepatrných stop záření právě ještě rozeznatelných, lze označiti několikadenní fotografické expozice při zjišťování Ramanova efektu. Jak známo, při Ramanovu zjevu k zjištění slabých (komponent) Ramanovských čar je zapotřebí i při užití velmi světelných spektrografů u některých látek až několikadenních expozic. Expozice jsou při tom voleny

co nejkratší, čili právě takové, že pro nejslabší čáry příslušná, právě rozpoznatelná černání příslušných čar odpovídají uvedené minimální energii 10^{-2} ergů na 1 cm^2 . To znamená, že bylo-li toto černání obdrženo na př. během expozice jednoho dne, odpovídá to záření 10^5 vteřin. Jestliže ploška příslušné spektrální čáry zaujímá při tom $0,1 \text{ cm}^2$ pak to znamená, že tímto způsobem byla stanovena energie záření, odpovídající $\frac{10^{-2} \cdot 0,1}{10^5} = 10^{-8}$ ergů za sec, čili to odpovídá asi 1000 až 10 000 fotonů za sec.

Výsledek této úvahy nám ukazuje, proč dosud nebylo používáno fotocel ke studiu Ramanova zjevu, neboť energie uvedené leží právě na hranici limitní citlivosti fotocel. Obecně můžeme říci, že pro obor 2500 až 8500 Å lze vždy najít vhodnou fotocelu s limitní citlivostí několikrát 10^{-7} erg za sec.

[Pomocí počítače pokusila se zjišťovat Ramanův zjev Kudrjawzewa,¹⁾ bližší data však nelze zjistit, neboť literatura není k dispozici. Patrně se jedná o zapojení fotocely jako čítače (viz později).]

Jako případ krajní citlivosti v tomto směru lze uvést práci Johnsona, Mocka a Hopkina.²⁾ Tito autoři za užití fotocely s extrémní citlivostí (20 miliampér na watt), dále zesilování střídavého proudu a všech optimálních podmínek ukázali, že lze u fotocel stanovit proudy $3 \cdot 10^{-17}$ ampér.

Při udané citlivosti fotocely odpovídá to asi energii $5 \cdot 10^{-8}$ erg za sec. Při vlnové délce 2600 Å, kde $h\nu = 6 \cdot 10^{-12}$ ergů to odpovídá asi 1000 fotonům za sec. Je patrné, že tato krajní udávaná citlivost je právě na hranici energií, které při Ramanově efektu přicházejí. Fotografická deska pro takovéto zjevy, dostatečně dlouho trvající, je tedy dosud citlivější nežli fotocely. Nutno ovšem uvážiti, že zvláště k spektrálním měřením v okolí limitní citlivosti je fotocela nevýhodná též proto, že pouze nepatrná plocha fotocely se využívá, takže vlastně většina účinné plochy fotocely zůstává nevyužita.

Při stanovení minimálních stop energie je tento fakt proto velmi důležitý, že neozářená plocha fotocely nejen nepřispívá k fotoproudu, nýbrž působí rušivě.

(Tato otázka nebyla dosud blíže diskutována, učiníme tak na jiném místě v práci s J. Bednářem.)

Ultrafialový obor. Jak známo, citlivost fotocel značně lze zvýšiti při zapojení jejich jako fotoelektrické čítače, typu Geiger-Müllera, jak ukázal první Rajewský.³⁾ Největší citlivosti v praktických výsledcích v tomto směru docílil Audubert.⁴⁾ V oboru ultrafialových

¹⁾ Kudrjawzewa, Acta physico-chemica U. K. S. S., 3 (1938), 613.

²⁾ Johnson, Mock, Hopkin, Journal of the Opt. Soc. Am., 29 (1939).

³⁾ Rajewski, Phys. Zeit., 32 (1931), 121.

⁴⁾ Audubert, Comptes Rendus, 196 (1933), 1883; 200 (1935), 918 a 389.

paprsků měřil se svými fotocelami aluminiovými a CuJ tak slabé záření, že bylo registrováno fotocelami, jichž citlivost byla 10^{-11} erg/sec/cm².

Audubert později zvýšil citlivost svých fotocel, zapojených jako počítačů tak, že může měřiti energie až 10^{-14} erg/sec/cm².

Toto uspořádání Audubertovo lze označiti jako nejcitlivější vůbec. Energie 10^{-14} erg/sec znamená citlivost 1 fotonu za 100 sec (to je aequiv. 1 elektron/100 sec $\sim 10^{-21}$ coul/sec).

Vedle značně zvýšené citlivosti proti fotografické desce má toto uspořádání ovšem i tu výhodu, že lze jím stanoviti i tak slabá záření, která netrávají dostatečně dlouho, aby sumačně mohl býti docílen prah černání na fotografickou desku. Audubert mohl tak studovati i záření vznikající na př. při chemických reakcích nebo biologických pochodech.

Toto záření samo je již tak slabé, že nebylo je možno spektrálně rozložiti. Vlnový rozsah ultrafialového oboru, v němž záření se nachází, určoval Audubert právě z toho, zda Al nebo CuJ fotocela (které byly selektivně citlivé pro různé části ultrafialového záření) na dotyčné záření reagovaly.

Lze tedy říci, že v ultrafialovém oboru přesahuje na rozdíl od oboru optického fotocela zapojená jako čítač značně citlivost fotografické desky i pro měření, která mohou trvati značně dlouho, tak, aby prah citlivosti fotografické desky byl dosažen. Ovšem pokud se týče měření spektrálních, nejsou dosud experimentální data, z nichž by bylo možno citlivost obou metod zhodnotiti. Je zřejmé, že pro spektrální měření citlivost čítače fotonů se značně snižuje, neboť nehledě k okolnostem, o nichž se zmíním později, pouze nepatrná část jeho volumu se zužitkuje.

Paprsky X a paprsky γ . Při ještě kratších vlnových délkách v oboru paprsků X a radioaktivního záření byly již učiněny pokusy upravit čítače typu Geiger-Müllerova pro účely spektrální. Je jisté, že v tomto oboru a v oboru kosmických paprsků jsou čítače nejcitlivějšími detekčními i měřicími přístroji, které značně převyšují citlivost registrace metodou fotografickou,⁵⁾ ne ovšem spektrálně.

Čítače upravené pro spektrální účely v oboru paprsků X jsou v principu shodné s čítači normálními. Srovnávají-li se však výsledky jimi docílené s výsledky fotografických metod ukazuje se dosud, že nebylo docíleno žádných lepších výsledků s čítači oproti registraci fotografické a i s metodami s ionizačními komorami. Mluvíme-li zde o citlivosti metod fotografických, znamená to, že nemáme na mysli pouze určitý druh desek nebo pouhé přímé půso-

⁵⁾ Porovnání citlivosti metody s ionizační komorou bude podána v jiné práci.

bení na fotografickou desku, nýbrž takovou úpravu, která i třeba nepřímo je schopna způsobit na fotografické desce největší černání. To znamená, že nevylučujeme i použití difusního záření, resp. zesilovacích folií, silných vrstev emulze atd., krátce všech prostředků, aby se využilo co nejvíce toho záření, které se při průchodu fotografickou deskou neabsorbovalo, a zužitkování jeho k působení na fotografickou desku.

Při konstrukci čítačů určených pro spektrální účely, kde se měří záření pouze ve velmi malém prostorovém úhlu, nebylo dosud respektováno několik faktorů, z nichž hlavní jsou snížení, pokud je možno, rušivého vlivu rozptýlené radioaktivity, obsažené ve hmotě čítače, a snížení rušivého vlivu kosmického záření. Rušivý vliv kosmických paprsků projevuje se totiž nejenom v samotném prostoru čítače užitém k měření, kde jej nelze vyloučit, ale stejně v účinném k spektrálním měřením nevyužitém prostoru, který v čítačích pro spektrální účely byl dosud vždy značně veliký. Platí to jak o čítačích normálního typu Geiger-Müllerova (válcových), ale i o čítačích t. zv. hrotových.

Z prací zabývajících se použitím čítačů pro spektrální měření paprsků X jsou to v první řadě práce K. Molina⁶⁾ a J. Jonssona.⁷⁾ Uvedení autoři pracovali jednak s čítačem, jednak s ionizační komorou, a oběma metodami stanovili vlastní šířku čar *M*-serie a našli asymetrii vzhledem k větším vlnovým délkám. Tato asymetrie byla později fotografickými metodami potvrzena. Molin užil na rozdíl od tehdy normálně používaných válcových čítačů čítače, kde elektrody byly hrot a deska proti sobě umístěné.

Záření X dopadalo na desku, v níž se absorbovalo, čímž má býti zmenšen účinný prostor válcového čítače, kdežto u čítačů bez desky za účelem absorpce paprsků X je nutné, aby účinný prostor čítače byl větší. Rušivý vliv přirozené radioaktivity materiálu a kosmických paprsků měl by se tedy projevit v tomto čítači značně méně než u válcových čítačů. Jak udávají tito autoři, v jejich uspořádání byl tento vliv čili podklad 8—10 impulsů za min. Zajímavá je modifikace čítačů, kterou udal Donald P. Le. Galley.⁸⁾ Tento autor užíval trubicového čítače, u kterého však, jak uvádí, dosáhl velmi nízkého podkladu 6,66 impulsů za min. Srovnáme-li tento typ válcový s předchozím počítacem hrotovým, který udal K. Molin, je zřejmé, že je vlastně tento čítač k spektrálním účelům výhodnější, než hrotový. Praktické použití jeho ukázal Galley tím, že aplikoval čítač na spektrální měření metodou Debye-

⁶⁾ K. Molin, Disertace Upsala, 1927; Ark. f. mat. astr. ok. fys., 19, (1927), 4.

⁷⁾ A. Jonsson, Z. Phys. 41, 221, 1927.

⁸⁾ Donald P. Le. Galley, Rev. Sc. Instr., 6 (1935), 279.

Scherrerovou. Výsledky jím obdržené jsou stejnocenné s metodou fotografickou, prakticky vyznačují se kratší dobou nutnou k měření.

Rok později učinili pokus o užití čítače pro paprsky X Pahl a Faessler.⁹⁾ Tito autoři pokusili se stanovit poměr mezi registrací fotografickou a registrací pomocí čítače a došli k výsledku, že pomocí jejich čítače lze stanovit v několika minutách záření, odpovídající intenzitě čáry, k jejíž fotografické registraci, t. j. k dosažení takové hustoty, aby čára byla právě ještě patrná, bylo by zapotřebí expozice asi 100 hodin, zatím co registraci pomocí čítače lze provést během několika minut. Vráťme se k jejich výsledkům později.

Podklad rušivý podle jejich údajů činil 66 impulsů za min. Při měření používali tak široké štěrby, že čára vstupovala do čítače celá.

K měřením spektrálních intenzit röntgenových čar v oboru středních vlnových délek asi 3 Å (vakuový obor) použil čítače Per Ohlin.¹⁰⁾ Ohlin studoval $\text{CaK}\alpha$ dublet za užití fokusační metody s deformovaným krystalem. Rušivý podklad autor přímo neudává, ale lze ho odhadnouti z křivky, kterou udává pro průběh intenzit studovaných čar α . Za použití štěrby 0,03 mm a vakuového spektrografu dosáhl na vrcholu $\text{CaK}\alpha$ linie 240 impulsů za min. a z průběhu křivky je zřejmé, že křivka přestává býti definována v oboru asi 100 impulsů za min. a nutno tedy tuto hranici označiti za rušivý podklad čítače.

Rušivý podklad čítačů fotonů a jeho vliv na mez citlivosti. Srovnáme-li rušivé podklady, je z uvedených prací zřejmo, že ve všech je podklad rušivý, omezující citlivost metody, značně vysoký. Lze ukázati výpočtem, pokud autoři udávají rozměry svých čítačů, že rušivý podklad je způsobován specifickým rozptýlením radioaktivních látek materiálu katody a kosmickým zářením objemu počítače. Jak známo specifické rozptýlení hlavních radioaktivních látek Ra, U a Th, v kůře zemské je toto: Ra — 10^{-12} , U — 10^{-6} , Th — 10^{-5} g na gram.

Tyto radioaktivní látky při svém dopadu působí v počítači rušivé impulsy a podle velikosti užití hmoty katody, kde se vliv hlavně projevuje, lze odhadnouti jejich rušivý vliv. Še zřetelem na praktickou účinnost jednotlivých složek (Ra, U, Th) vzali jsme podle návrhu F. Běhouka pro výpočet 10^{-12} g na gram pro hmotu katody. Vliv kosmického záření podle údajů v literatuře projevuje se tak, že proletí průměrně 1 částice 1 cm^2 za 1 min. Jestliže s těmito daty spočítáme rušivý vliv čítačů autorů, které jsme uvedli — pokud ovšem tito autoři udávají rozměry a hmoty svých počítačů —

⁹⁾ Pahl a Faessler, Zts. für Physik, 562 (1936), 102.

¹⁰⁾ Per Ohlin, Phys. Z. S., 567 (1938), 39.

uvidíme, že rušivý vliv skutečně je způsoben převážně oběma uvedenými faktory. Tak na př. Ohlin, jak udává, používal čítače válcového, jehož rozměry byly: průměr 23 mm, výška 100 mm, síla stěny (mosaz) 1 mm. Z uvedených dat plyne, že za předpokladu, že téměř polovina paprsků γ^{11}) proletí čítačem (polovina mimo čítač), proletí čítačem 140 paprsků γ za min. Při uvedených rozměrech kosmické záření způsobí 23 impulsů/min. Tedy celkový podklad tohoto čítače podle výpočtů by měl býti asi 163 impulsů/min., zatím co náš odhad činil asi 100 impulsů/min.

Rovněž lze srovnati výpočtem rušivý podklad čítače D. P. Galleyho. Udával rozměry katody: průměr 10 mm, výška 30 mm, síla stěny (zlato) 0,1 mm. Z toho plyne obsah čítače 107 mm² a váha 1,9 g a četnost paprsků γ , procházejících čítačem 4,3 impulsy/min. Vliv kosmického záření dá se odhadnouti asi 3 impulsy/min., čili celkový rušivý podklad 7,3/min., zatím co Galley udává 6,6 impulsů/min. Jak je patrné ze srovnání impulsů, lze říci skutečně, že počítaný rušivý podklad čítače souhlasí se skutečně měřeným podkladem rušivým. (Vezmeme-li v úvahu, že při síle katody 0,1 mm, část paprsků γ se ještě absorbovala ve stěně, můžeme říci, že účinnost tohoto čítače obnáší nejméně 90%.)

V prvním počítaném případě čítače Ohlinova činil rozdíl měřeného a počítaného rušivého podkladu 40%. Síla tloušťky katody byla u Ohlina 1 mm, a v ní také absorpce paprsků γ způsobila určitou ztrátu, takže lze říci, že souhlas měřených a počítaných hodnot je velmi dobrý a že tento čítač byl účinný aspoň na 60% (patrně více). Z obou uvedených výpočtů je též zřejmo, že vliv rozptýlené radioaktivity na rušivý podklad je větší, než vliv kosmického záření. Zdá se, že u počítačů objemových i hrotových teprve v poslední době byl tento vliv respektován zmenšením za katodu použitých hmot. Zmenšování účinného prostoru čítače za účelem zmenšení rušivého vlivu kosmických paprsků, nelze rovněž libovolně prováděti, a nutno dbáti toho, aby snižování rušivého vlivu podkladu nebylo na úkor účinnosti čítače. Jak ukázaly výsledky naší práce, jest možno zvláště při užití čítačů s hrotem při zachování velké účinnosti na základě předchozích úvah konstruovati čítače takové, že rušivý podklad projeví se: 1 impulsem za 2 min., to znamená, že můžeme stanoviti 1 kvantum za 100 vteř. v určitém malém prostorovém úhlu, odpovídajícím šířce spektrální čáry. Citlivost metody použité odpovídá rušivému podkladu, jak se obecně předpokládá asi v tom poměru, že lze stanoviti kvanta energie, přesahující 50—100% rušivého podkladu (impulsů).

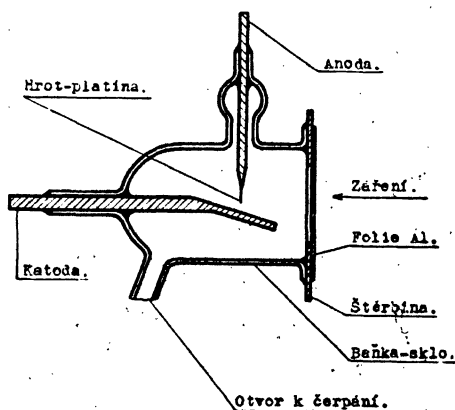
V našem případě činil, jak jsme uvedli, podklad 1 kvantum

¹¹⁾ Působení paprsků α a β v tomto případě nepřichází v úvahu.

(imp.) asi za 100 sec, čili to odpovídá citlivosti v coulombech: $1,4 \cdot 10^{-21}$ coulombů/sec.

Jak velký při tom je prostorový úhel, v němž náš čítač je vůbec účinný, to znamená i ta část čítače, na níž případným odcloněním štěrbin nedopadá záření, stanovili jsme způsobem dále popsáním.

Účinnost čítače, stanovení prostorového úhlu čítače pro paprsky X.
Hrotový čítač byl v principu používaného typu, jak je patrné z obrázku čís. 1.¹³⁾ Na aluminiovou folii čítače dopadalo charakteristické záření na př. $\text{CuK}\alpha_{1,2}$. Záření vycházející z trubice X bylo vymezeno prvou štěrbinou šířky 0,007 mm, dopadalo na krystal v symetrickém uspořádání Braggově; poloměr spektrografu byl 40 cm. Po nastavení krystalu do polohy pro Braggovskou reflexi bylo posunováno čítačem tak, až byl nalezen vrchol čáry (na př. α_1) čili až telefonní počítač impulsů zaznamenal maximální počet. Pak těsně před čítač byla postavena do cesty paprsků X clona, kterou postupně byla plocha linie zužována co do šířky i co



Obr. 1. Schema čítače.

od výšky až asi na 1 setinu plošky čáry zjištěné fotograficky. Tímto způsobem bylo pak nalezeno, že prakticky účinnou v čítači je skutečně část, odpovídající prostorovým úhlům, jaké mají spektrální čáry. Tak na př. při dopadu čáry $\text{CuK}\alpha$ bez druhé štěrbinou bylo registrováno 1800 impulsů za min. Při vložení druhé štěrbinou široké rovněž 0,007 mm, čímž byla vyřazena asi $1/50$ plochy čáry, klesl počet impulsů, pouze na 1300 impulsů za min. Poměr těchto záznamů jest tedy 1,4 čili snížení o $1/3$. Srovnáme-li tento poměr poklesu impulsů s poměrem příčných řezů svazků paprsků X do čítače vstupujících v obou případech, odpovídá to poměru ploch asi 1 : 50. Poněvadž při tomto poměru 1 : 50 se počet impulsů snížil pouze asi v poměru 2 : 3 je zřejmé, že průmět aktivní plochy do roviny kolmé na směr paprsků může být pouze asi o $1/3$ širší než šířka štěrbinou 0,007 mm, čili může být asi 0,01 mm. Při tom rovněž vertikálně byl rozměr štěrbinou clonkami zmenšován tak dlouho, dokud počet impulsů nepočal klesat. Maximální účinná

¹³⁾ Princip zapojení byl uveřejněn jedním z autorů v Elektrotechnickém obzoru.

výška štěrbin byla nalezena 1,8 mm. Velikost pracovní plochy P na katodě se pak rovná součinu minimální výšky štěrbin a průmětu zvětšené šířky štěrbin na katodu, t. j.

$$P = 1,8 \cdot \frac{0,01}{\sin \alpha}$$

Zde úhel α značí sklon katody od směrů paprsků a jest roven 1° , takže $P = 1,8 \text{ mm}^2$, to je přibližně $P = 2 \text{ mm}^2$.

Poněvadž je možno předpokládat, že účinná plocha na katodě čítače je kruhová, lze z uvedeného měření účinné výšky $2R = 1,8 \text{ mm}$ rovněž určit účinnou plochu katody, která vychází souhlasně s uvedeným výsledkem $\bar{P} = 2,5 \text{ mm}^2$.

Účinný prostor čítače mezi katodou a hrotem (viz obraz 1). může obnášeti maximálně 4 mm^3 . Z toho je zřejmo, že zbytečný účinný prostor, přispívající registrováním kosmických paprsků jím procházejících rušivě na výsledek, je velmi nepatrný. Naopak z uvedených dat plyne, že při užití čítače pod úhlem 1° je čítač účinný v prostorovém úhlu 10^{-6} steradiánu, čili právě v prostorových úhlech spektrálních linií.

Účinnost čítače, stanovení prostorového úhlu čítače pro paprsky γ . Verifikace prostorové citlivosti čítače provedli jsme pomocí radioaktivit smolince. Jak známo, vysílá gram Ra $7,3 \cdot 10^{10}$ paprsků γ/sec . Specifické rozptýlení Ra v Jáchymovském smolinci jest $2,3 \cdot 10^{-7}$.¹³⁾ Je-li tedy smolinec umístěn v určité vzdálenosti od aktivního místa čítače, lze vypočítati i změřiti, kolik paprsků γ projde každým kvadrátním milimetrem jeho účinné plochy. Podle uvedených dat znamená to, že na př. ve vzdálenosti 30 mm bude počet impulsů, připadajících na mm^2 a g tento:

$$\frac{N}{\text{mm}^2} = \frac{7,3 \cdot 10^{10} \cdot 2,35 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 30^2} = 1,4 \text{ imp/mm}^2/\text{g/sec}$$

Při umístění různě velikých kousků smolince v této vzdálenosti 30 mm zjistili jsme dlouhodobým měřením, že průměrný počet paprsků γ , který čítač zaznamenává, je jak udává tabulka čís. 1.

Tabulka 1.

Měření četnosti gamma paprsků vyslaných preparáty smolince z Jáchymova (vzdál. 30 mm).

Váha smolince g	Střední množství imp. za min.	Imp. za sec	Imp. za sec/g
10	240	4	0,40
0,632	78	1,3	2,1
0,251	42	0,7	2,8
0,172	30	0,5	2,5

¹³⁾ V. H. Matula, A method of dissolving pitchblende for the preparation of radium standards.

Z měření uvedených v této tabulce je zřejmo, že při užití značnějšího množství smolince (10 g) projevuje se značný nesouhlas s ostatními hodnotami, získanými s množstvím smolince pod 1 g. K tomu je nutno dodat, že při použití ještě větších kvant smolince počet impulsů, t. j. střední množství impulsů/min. čítačem znameenané, v tabulce maximálně 240, již vůbec nestoupal nad tuto hodnotu. Zdá se, že teprve menší kvanta smolince pod 1 g lze považovati za prakticky bodové zdroje a proto k měření s většími kvanty zatím v dalším není brán zřetel. Střed hodnot s menšími kvanty smolince 2,5 impulsů/sec/g ukazuje ve srovnání s hodnotou 1,4 impulsů/sec/mm², že účinná plocha čítače (ne katody čítače) odpovídá pro paprsky γ za předpokladu normální účinnosti (asi 90%) asi 2 mm². To znamená, že účinný prostorový úhel čítače pro paprsky γ je asi $3 \cdot 10^{-4}$. To je asi 50krát větší hodnota než pro paprsky X. I když je pravděpodobné, že vzhledem k obtížím při clonění paprsků γ vlivem difuse se tato hodnota zdánlivě zvětšila a že patrně při těchto nedokončených měřeních mohly zvětšiti uvedenou hodnotu i paprsky β , zůstává i tento poměrně malý prostorový úhel pro spektrální měření stále výhodný. V nefiltrovaném záření je, jak známo, paprsků β asi tolik jako paprsků γ a při těchto předběžných pokusech nebyl brán na filtrování zřetel, takže ani poměr tvrdé a měkké složky není určen. Proto též v dalším při srovnávání čítače s fotografickou registrací není brán zřetel na filtrování, nýbrž podmínky při fotografické registraci byly upraveny pokud možno analogicky jako byly u čítače.

Měření minimální energie prahu černání fotografické desky. Jako krajní případ registrace minimálních stop paprsků X fotograficky lze označiti práci Kirk Patrickovu,¹⁴⁾ v níž zaznamenával fotograficky čáry Comptonova efektu za užití t. zv. multikrystal-spektrometru. Záření rozptýlené na látce, jejíž Comptonův zjev zkoumal, dopadalo na 50 krystalů, určitým způsobem uspořádaných tak, že Comptonovské čáry jednotlivých vlnových délek po reflexi na všech krystalech dopadaly do jediného místa. Tím se značně intenzita čáry zesilovala, avšak přesto nutná doba expoziční obnášela v různých případech 200—800 hodin čili až 33 dnů pro jedinou expozici. O tom, jaké energii záření odpovídá takto registrované záření můžeme si učiniti představu, jestliže si určíme nejdříve prah citlivosti fotografické desky pro vlnové délky tohoto oboru.

Z měření, která jsme konali za tímto účelem, podáváme tato:

Záření vycházející ze smolince dopadalo na počítač, kde byl stanoven průměrný počet impulsů připadajících na min. Témuz záření byla pak vystavena fotografická deska a hledána taková expozice, při níž právě byl docílen prah černání fotografické desky.

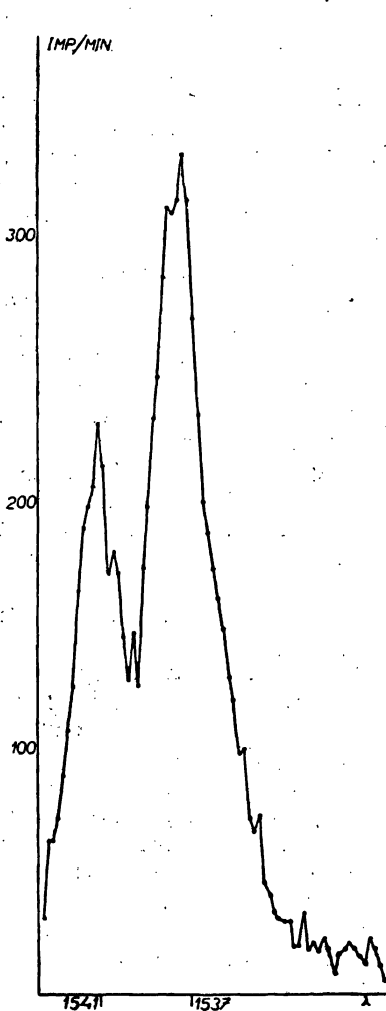
¹⁴⁾ Kirk Patrick, Phys. Rev., 37 (1931), 136.

To znamená takové černání, kde případná spektrální čára byla by ještě patrna. Poněvadž známe účinnou plochu čítače, na kterou záření dopadalo a způsobilo určitý počet impulsů za jedničku času, můžeme vypočítat, kolik impulsů resp. jaká energie odpovídá té době, která je nutná k dosažení prahu černání. Tento počet se normálně vztahuje na 1 cm^2 , jak jsme již dříve uvedli. Tak na př. určitý kus smolince způsobil 240 impulsů za min., t. j. 8 impulsů za sec. Jako doba působící prah černání byla nalezena doba 10 hodin. Poněvadž účinná plocha čítače je, jak bylo uvedeno, 2 mm^2 , znamená to, že prah citlivosti byl dosažen při dopadu $1,5 \cdot 10^7$ paprsků γ na 1 cm^2 . Je zřejmo, že toto číslo je asi 100krát menší, t. j. že asi 100krát menšího počtu fotonů na 1 cm^2 je zapotřebí k způsobení prahu černání v oboru těchto délek vlnových, nežli v oboru ultrafialovém, kde teprve 10^9 fotonů dosáhne prah černání. Je zajímavé odhadnout, oč je pro paprsky γ celková energie nutná k dosažení prahu citlivosti větší nežli v oboru ultrafialovém. K tomu můžeme však zatím udati pouze předběžný výsledek, neboť, jak jsme uvešli, při dopadu na čítač nefiltrovali jsme záření, takže neznáme přesné efektivní délku vlny, ze smolince vycházející. Za předpokladu, že působí i u čítače i u desky převážně měkkí složka záření, jejíž efektivní vlnová délka je $\lambda = 0,015 \text{ \AA}$, odpovídají jednotlivé fotony energii $h\nu = 1,2 \cdot 10^{-6}$ ergů. To by odpovídalo energii celkové připadající na 1 cm^2 při uvedeném počtu paprsků γ : $E = 18 \text{ ergů/cm}^2$.

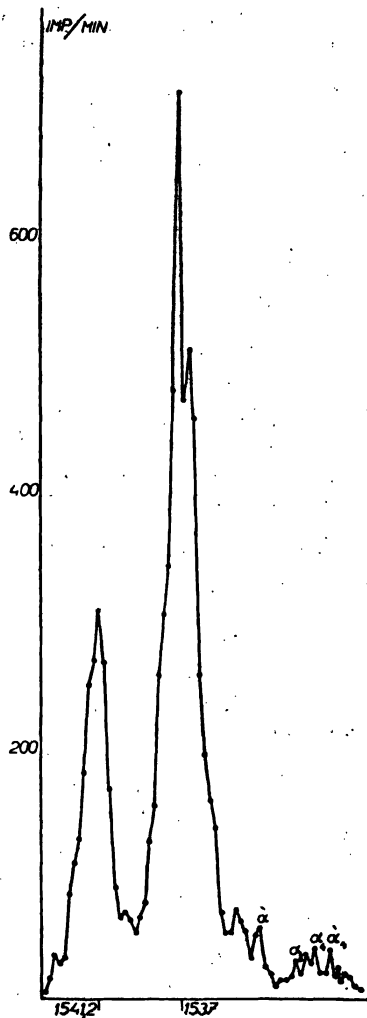
To jest ovšem energie fotonů dopadlých resp. registrovaných čítačem. Jaký počet fotonů při dopadu na fotografickou desku zůstává nezužitkován, lze si učiniti snad z představy, že při užití desek se silnou emulsi k dosažení větší absorpce, při užití zesilovacích folií a případné zpětné reflexe na olovu lze docíliti asi 10krát zmenšení expoziční doby. Lze tedy z našich výsledků říci, že pro tento obor vlnových délek, t. j. paprsků X a delších paprsků γ je zapotřebí sice 100krát menšího počtu fotonů, ale při tom asi 100krát větší energie než jak je udáváno pro obor ultrafialový.

Uvedená vlnová délka je řádově shodná s vlnovou délkou používanou při studiu Comptonova efektu. Přepočtením Kirk Patrickovy expozice 800 hodin podle uvedených výsledků na počet kvant, připadajících na min, vychází, že možnost registrace tohoto zjevu pomocí čítače odpovídala by 3 impulsům za min. Tento výsledek ukazuje, že námi udaným čítačem, který dovoluje stanovení 1 kvanta za 100 sec, mělo by býti možno tento zjev registrovati, což zatím nebylo možno verifikovati. Za účelem verifikace vhodnosti čítače pro tak slabé spektrální záření postupovali jsme v dosavadních měřeních takto:

Spektrální měření. Čítač i s předzesilovačem byl umístěn na segment spektrografu, jehož poloměr byl 30 cm. Prvá štěrbina byla



Obr. 2.
 $\text{CuK}\alpha$ grupa. 48 kV, 20 mA,
 1. štěrba 0,1 mm, 2. štěrba
 0,007 mm, krystal NaCl rov.,
 poloměr 300 mm.



Obr. 3.
 $\text{CuK}\alpha$ grupa. 48 kV, 20 mA,
 štěrby 0,007 mm, krystal kře-
 men.

umístěna těsně u lampy, druhá těsně před čítačem. Jako mřížky byly použity krystaly NaCl (rovinné a plasticky deformované podle Bačkovského a Neprašové) a krystaly křemenné, broušené kolmo

k elektrické ose. Poněvadž aparát byl improvizován a ani krystal ani segment s čítačem neměl precísní škály, bylo postupováno tím způsobem, že nejprve byl čítač nařizen na přibližné maximum a pak posouván krystal i čítač tak, že empiricky byla nalezena správná poloha jak pro krystal tak pro čítač. Pro měření v malém úhlovém rozmezí byl pak krystal již ponechán v klidu a na segmentu posouván mikrometrickým šroubem čítač. Při každém posunu měřil se počet impulsů připadajících na min. a hodnoty, vyneseny na graf v závislosti na obloukových sec. Posouváno bylo v intervalech 9 obloukových vteřin. Grafy, v nichž jako pořadnice je uveden počet impulsů (při stálé posici krystalu), jako úsečky vlnové délky (resp. příslušné stupně), udávají nám tedy relativní měření, z nichž možno jednak stanovit průběh intensity čar, resp. odlehlost nediagramových čar od středu černání hlavních čar. Příklad měření průběhu intenzit linií $\text{CuK}\lambda_1$ a λ_2 udává nám graf na obr. 2.

Jak patrné z tohoto grafu, maximální počet impulsů na vrcholu čáry odpovídá asi 350 impulsům za min. Vrchol nebylo možno v tomto případě registrovat proto, poněvadž telefonní počítač nebyl schopen zaznamenat tak veliký počet impulsů za min. Rovněž v průběhu rozdělení intenzity obou čar jeví se určité nepravidelnosti, o nichž se zmíním později.

Ukázalo se velmi nutným při identifikaci čar vždy užití většího počtu grafů s různými krystaly, aby bylo možno uvedené nepravidelnosti rozeznati od skutečných čar. Možnost registrace slabých čar skupiny $\alpha_{3,4}$ pomocí čítače je patrná z uvedeného grafu na obr. 3. Tato skupina nalézá se napravo od vrcholu α_1 v místech odpovídajících asi 20 impulsům/min. Stejně vypadaly i grafy ostatní s rovinným krystalem a je zřejmo, že studium těchto čar neukázalo se metodou s čítačem proti metodě fotografické nijak výhodné. Proto užili jsme ve spojení s čítačem fokusační metodu Kunzlovu¹⁵⁾ ve spojení s plasticky deformovaným krystalem podle Bačkovského.¹⁶⁾ Výsledky jsou patrné z grafu na obr. 4. Předně je z grafu zřejmo, že počet impulsů stoupl asi 10krát, t. zn., že Kunzlovou fokusační metodou bylo docíleno asi 10krát větší světelnosti spektrografu. Střed čáry α_1 v tomto případě nebylo možno zaznamenati, poněvadž zvýšením světelnosti stoupl počet impulsů tak, že telefonní počítač to nebyl schopen zaregistrovat.

Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce čís. 2. V prvním sloupci tabulky jsou udána měření dřívějších autorů, jimž podařilo se separovati čáry α_3 a α_4 . V druhém sloupci jsou udány výsledky práce Dolejšek-Ježek,¹⁷⁾ nedávno uveřejněné v tomto časopise, kde

¹⁵⁾ V. Kunzl, *Comptes Rendus*, 201 (1935), 656.

¹⁶⁾ J. Bačkovský, *Nature*, 141 (1938), 872; J. Bačkovský, M. Neprašová, *Čas. pro pěst. mat. a fys.*, 67 (1938), 176.

¹⁷⁾ Dolejšek-Ježek, *Časopis pro pěst. mat. a fys.*, 69 (1940), 180.

za použití velkých vzdáleností podařilo se jim fotograficky separovat obě tyto čáry a najít ještě další čáry α' a α'_4 , které dosud do té doby nalezeny nebyly.

Tabulka 2.

Porovnání výsledků spektrálních měření.

Rozdíl vlnových délek čar	Dřívější autoři X. j.	Dolejšek-Ježek X. j.	Dolejšek-Bran-dejský X. j.
1 — α'	—	3,9	4,0
1 — α_3	5,7	5,5	5,4
1 — α_4	6,9	6,5	6,6
1 — α'_4	—	7,2	7,3

V této práci za použití fokusační metody jsou jejich výsledky verifikovány pomocí čítače. Znamená to tedy, že pomocí čítače bylo docíleno velké rozlišovací mohutnosti a výhod, které docílili Dolejšek a Ježek v uvedené práci. Je nyní otázkou, proč právě tam, kde se zdálo, že metoda čítače bude nejvýhodnější, nelze docílit nových výsledků, t. j. při malém počtu záznamů čili při slabých čarách.

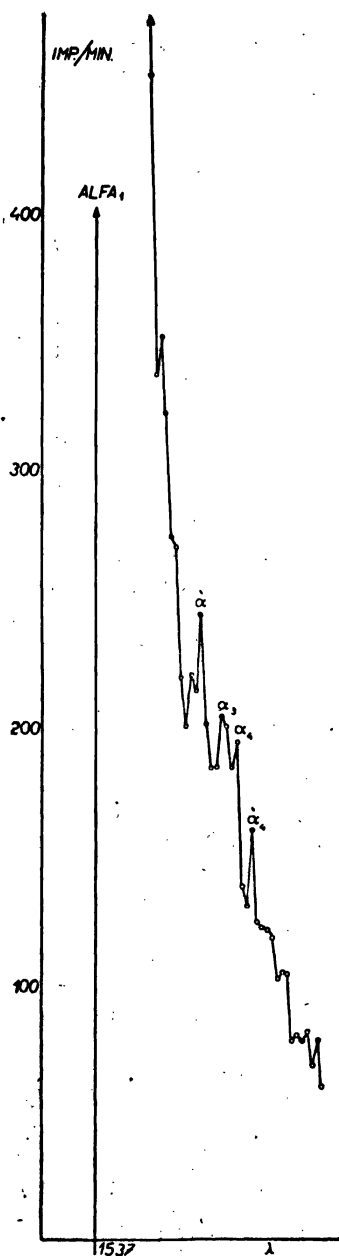
Srovnání všech výsledků ukázalo, že nehledě ke vlivu statistického kolísání mez stanovitelnosti spektrální čáry je omezena dalším rušivým podkladem a to spojitým spektrem a difusním, vznikajícím při reflexi na krystalu. Ze srovnání našich výsledků a výsledků, které obdrželi Dolejšek a Vranský¹⁹⁾ při studiu nedigramových čar serie L, se ukázalo, že fotografická metoda spíše dovoluje odlišení charakteristického záření spektrálního od spojitého a difusního záření na nedokonalostech krystalu vždy vystupujícího,¹⁹⁾ nežli metoda s čítačem.²⁰⁾ Proto předpoklad o citlivosti metody čítače na základě rušivého podkladu je správný pouze potud, pokud zde uvedený rušivý podklad nepřistupuje (na př. při studiu Comptonova zjevu).

Naproti tomu v našem případě, nebo v případě použití čítače k hledání stop látek pomocí paprsků X, nelze tento předpoklad učiniti. Proto patrně není správný předpoklad Pahl-Faesslera (l. c.), kteří zeslabili hlavní čáru tak, že obdrželi za rušivého podkladu 66 impulsů/min., celkem 95 impulsů/min. a z toho určili, že tím je

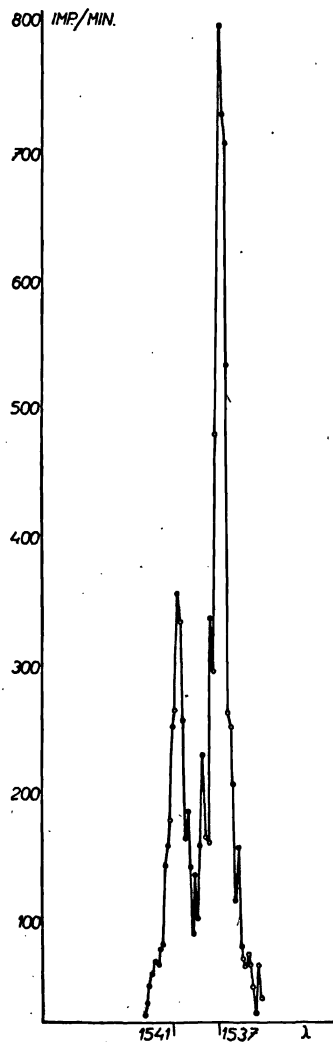
¹⁹⁾ Dolejšek, Vranský, Časopis pro pěst. mat. a fys. 69 (1939), 61.

¹⁹⁾ M. Bačkovský, Journal de Phys., 7, (1938), 471.

²⁰⁾ Rušivé záření ovšem vzniká na krystalu i při fotografické registraci — ale na fotografické desce lze je daleko lépe rozeznat, a při vhodné volené expozici gradační křivka fotografické desky je výhodnější, než při užití čítače.



Obr. 4.
CuK α grupa. 48 kV, 20 mA,
štěrbinu 0,007 mm, krystal
NaCl plasticky deformovaný,
poloměr 300 mm.



Obr. 5.
CuK α grupa. 48 kV, 20 mA,
štěrbinu 0,007 mm, krystal
NaCl rov., poloměr 300 mm.
Ačkoliv byla i první štěrbinu
zúžena na 0,07 mm, zvýšením
citlivosti bylo dosaženo pro
vrchol α_1 800 impulsů za min.
(viz obr. 2).

stanoveno záření, odpovídající 100 hodinám expozice. Tím byly, vzhledem k uvedenému rušivému podkladu od difusního záření, ulehčeny experimentální podmínky tak, jak se ve skutečnosti nevyskytují. Neboť kdybychom místo zeslabené hlavní čáry chtěli pozorovat slabou ve stejné energii současně s ní, bude nám čítač registrovat rozptýlené záření, plynulý podklad a vady krystalu, což vše řádově bývá stejně veliké jako slabé čáry samotné. A tyto omezující faktory stanovitelnosti se právě čítačem hůře rozeznávají nežli cestou fotografickou.

Rozlišovací mohutnost. Ukázalo se, že rozlišovací mohutnost při užití čítače závisí značně na tom, jak je možno dokonale šterbiny paralelně najustovati, tedy na technickém provedení. Příklad jednoho z mnoha docílených výsledků ukazuje graf na obr. 5. Podle tohoto grafu, obdrženého s krystalem NaCl, vychází pro poloviční šířku čáry poloviční maximum, t. j. vlastní šířku čáry $\text{CuK}\alpha_1$ hodnota 1,1 X. J. Rozlišovací mohutnost je tedy asi 3krát menší než krajní rozlišovací mohutnost fotograficky obdržená.²¹⁾

Prakticky však tato rozlišovací mohutnost ve většině případů úplně dostačí, při čemž proti registraci fotografické je registrace pomocí čítače časově značně úspornější (asi 3krát).

Jak je na uvedených grafech patrné, vystupují na nich v průběhu určité nepravidelnosti, které nemají fyzikální realitu. Ukázalo se však, srovnáním všech grafů, že tyto nepravidelnosti při určité posici téhož krystalu nalézají se v určitém místě při užití jiného krystalu a jiné posice se teprve mění. Vzhledem k tomu, že bylo použito symetrického uspořádání podle Bačkovského, v němž se vady krystalu málo projevují a fotograficky nebyly nalezeny, nebylo možno zatím tyto nepravidelnosti vysvětliti a je odstraniti.

Pro registraci slabých čar, jak je patrné z uvedených výsledků, ukázala se rozlišovací mohutnost získaná pomocí čítače výhodnější než pomocí fotografické desky za stejných podmínek.

*

Über die spektrale Grenzempfindlichkeit bei der Verwendung des Photonenzählers und der photographischen Platte.

(Inhalt des vorigen Artikels.)

Die Diskussion der Daten der bisherigen Photonenzähler hat gezeigt, daß die störende Wirkung der kosmischen Strahlen und der allgemeinen natürlichen Radioaktivität in dem Spitzenzähler so erniedrigt werden kann, daß sein ganzer Wirkungsraum 4 mm^3 beträgt. Das entspricht dem Raumwirkungswinkel der Ordnungs-

²¹⁾ Viz na př. Bačkovský-Dolejšek, Časopis pro pěst. mat. a fys., 67 (1938), 211; Dolejšek-Tayerle, Jour. de Phys., 9 (1938), 465.

größe 10^{-6} Radians. Das ist gerade der Raumwinkel, der bei den Spektralmessungen vorkommt und der also bei solchen Messungen ganz ausgenützt ist.

Die störende Grundlage dieses Spektralphotonezählers etwa 1 Kvantum je 100 Sec., also etwa 10mal kleiner als bei den bisherigen Zählern. Unter der normalen Voraussetzung, daß man solche Spuren der Energie noch messen kann, die 50% bis 100% der störenden Grundlage betragen, wurde die Empfindlichkeit dieses Zählers nach den gemessenen und ausgezählten Ergebnissen mit den bisherigen Zählern verglichen.

Die Empfindlichkeitsschwelle der photographischen Platte wurde aus den Messungen für γ -Strahlen auf 18 Erg je cm^2 abgeschätzt.

Der Wert der Empfindlichkeitsschwelle der photographischen Platte ist für γ -Strahlen etwa 1000mal größer als für die sichtbaren S trahlen, wobei die nötige Anzahl der γ -Photonen etwa 1000 kleiner ist.

Der Zähler wird im Verbindung mit der Kunzls Fokussationsmethode zur Messung der schwachen nichtdiagramen X-linien verwendet. Man hat dieselben Ergebnisse und dasselbe Auflösungsvermögen wie bei der photographischen Methode nach Dolejšek und Ježek bei den extrem großen Entfernungen (Spektrograph 3 m) erhalten.

Das Auflösungsvermögen der Hauptlinien der X-Strahlen bei der bisherigen technischen Einrichtung ist etwa 3mal kleiner als Grenzauflösungsvermögen photographisch erhaltenes (Bačkovský-Dolejšek).

Es werden die weiteren Anwendungsmöglichkeiten des angegebenen Zählers diskutiert.