

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Aleš Fořt

Čerenkovovy počítače

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 3 (1958), No. 2, 173--180

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137399>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

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>

## Literatura

- [1] Fořt A., *Charakteristika scintilačních látek I*, Pokr. mat. fys. astr. 2 (1957).
- [2] Elliot J. O., Liebson S. H., Meyers R. D., Ravilious C. F., Rev. Sci. Instr. 21 (1950), 631.
- [3] Kallmann H., N. Y. University, Progress Report No. 6 (1952).
- [4] Sangster R. C., Massachusetts Inst. of Technology, Technical Report No. 55 (1952).
- [5] Koski W. S., Thomas C. O., J. Chem. Phys. 19 (1951), 1286.
- [6] Elliot J. O., Liebson S. H., Ravilious C. F., Phys. Rev. 79 (1950), 393.
- [7] Birks J. B., *Scintillation Counters*, Pergamon Press Ltd. London 1953.
- [8] Bowen E. J., Mikiewicz E., Nature 159 (1947), 706.
- [9] Bowen E. J., Lawley P. D., Nature 164 (1949), 572.
- [10] Bowen E. J., Mikiewicz E., Smith F. W., Proc. Phys. Soc. A 62 (1949), 26.
- [11] Taylor C. J., Jentschke W. K., Rembley M. E., Ely F. S., Kruger P. G., Phys. Rev. 84 (1951), 1034.
- [12] Frey H. B., Grim W. M., Preston W. M., Gray T. S., Phys. Rev. 82 (1951), 372.
- [13] Birks J. B., Proc. Phys. Soc. A63, (1950), 1294.
- [14] Birks J. B., Phys. Rev. 84 (1951), 364.
- [15] Wright G. T., Phys. Rev. 91 (1953), 1282.
- [16] Reynolds G. T., Harrison F. B., Salvani G., Phys. Rev. 78 (1950), 488.
- [17] Koski W. S., Phys. Rev. 82 (1951), 230.
- [18] Pichat L., Koechlin A., J. Chem. phys. 48 (1951), 225.
- [19] Pichat L., Pestèil P., Clement J., J. Chim. phys. 50 (1953), 26.
- [20] Buck W. L., Swank R. K., Nucleonics 11 (1953), 48.
- [21] Swank R. K., Buck W. L., Phys. Rev. 91 (1953), 927.
- [22] Frenkel J., Phys. Rev. 37 (1931), 17, 1276.
- [23] Frank J., Teller E., J. Chem. Phys. 6 (1938), 861.
- [24] Seitz F., J. Chem. Phys. 6 (1938), 150.
- [25] Harsaw J. A., Kremers H. C., Steward E. C., Warburton E. K., Hay J. O., Atomic Energy Commission Report No NYO-1577 (1952).
- [26] Lovberg R. H., Phys. Rev. 84 (1951), 852.
- [27] Hofstadter R., McIntyre J. A., West H. L., Phys. Rev. 82 (1951) 749.
- [28] Schardt A. W., Bernstein W., Atomic EC Report BNL-1156 (1953).
- [29] Schenk J., Nature 171 (1953), 518.

## ČERENKOVOVY POČITAČE

|Aleš Fořt

Při studiu radioaktivity se ukázalo, že existuje řada látek, který vykazují silnou luminiscenci při ozáření zářením  $\alpha$ ,  $\beta$  nebo  $\gamma$ . Mnohem větší skupina látek projevovala při ozáření slabou luminiscenci a tento jev se stal předmětem bádání Čerenkova v r. 1934 [1]. Čerenkov studoval viditelné světlo, které vznikalo ve vodě ozařované silným zdrojem záření  $\gamma$ . Podarilo se mu fotograficky registrovat toto světlo, které vykazovalo nečekané úhlové rozložení intenzity. Maximální intenzita se projevovala v kuželi o poloúhlu asi  $40^\circ$ , odkloněného od směru dopadajícího záření. Čerenkov dále zjistil, že když nahradil vodu benzenem, zůstal efekt stejný s tím rozdílem, že úhel kuželu se zvětšil o několik stupňů.

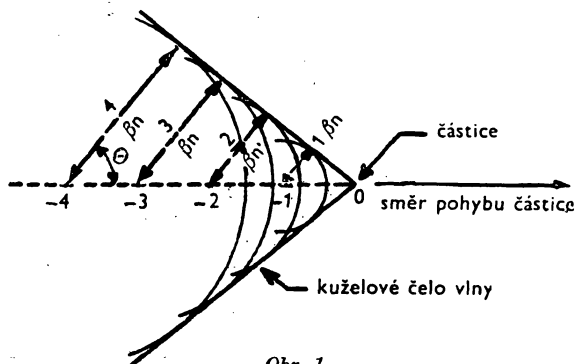
Tento t. zv. čerenkovský efekt nebyl dlouho vysvětlen; až v roce 1937 Frank a Tamm [2] publikovali práci, kde jej vysvětlili na základě klasické elektromagnetické theorie. Uvedení autoři ukázali, že efekt se dá vysvětlit nárazovou elektromagnetickou vlnou, která vznikne při průchodu nabitě částice dielektrickým prostředím s rychlostí větší než je rychlost světla v daném prostředí. Vzniklé spektrum má rozsah přes všechny frekvence, pro které

je rychlost elektromagnetického záření menší než rychlost částice. Intenzita a úhlové rozložení vzniklého záření je dáno rovnicemi (1) a (2):

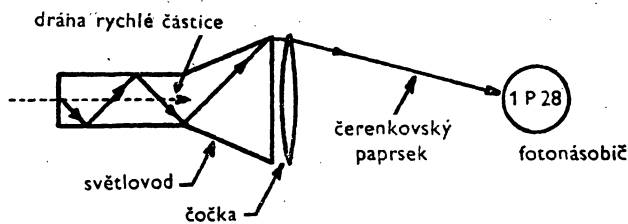
$$I = \frac{2\pi z^2}{137} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \sin^2 \Theta, \quad (1)$$

$$\cos \Theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (2)$$

kde  $I$  je počet fotonů emitovaných na cm dráhy,  $\lambda_1, \lambda_2$  koncové hodnoty uvažovaného intervalu vlnových délek,  $z$  náboj částice v jednotkách náboje elek-



Obr. 1.



Obr. 2.

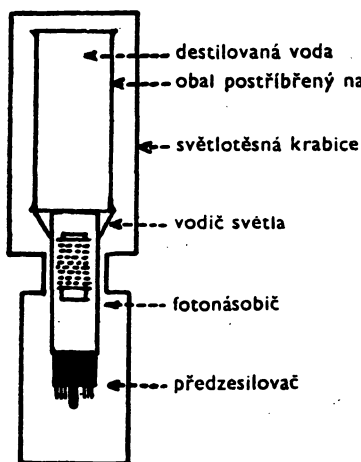
tronu,  $\beta$  poměr rychlosti částice k rychlosti světla ve vakuu,  $n$  index lomu dielektrického prostředí v uvažovaném intervalu vlnových délek,  $\Theta$  směr čerenkovského záření měřený od směru dopadající nabitě částice.

V roce 1938 provedli Collins a Reiling [3] opakování Čerenkovových pokusů se zlepšeným zařízením. Používali monoenergetických elektronů (2Mev) z elektrostatického generátoru a fotografovali světlo, které vzniklo při průchodu elektronů tenkými vrstvami skla, celofánu a slídy. Ukázali, že úhlové rozložení souhlasí s předpovědí theorie. V roce 1943 Wyckoff a Henderson [4] použili svazek elektronů s proměnlivou energií ke studiu závislosti úhlu  $\Theta$  na rychlosti elektronů a dosáhli souhlasných výsledků s teorií.

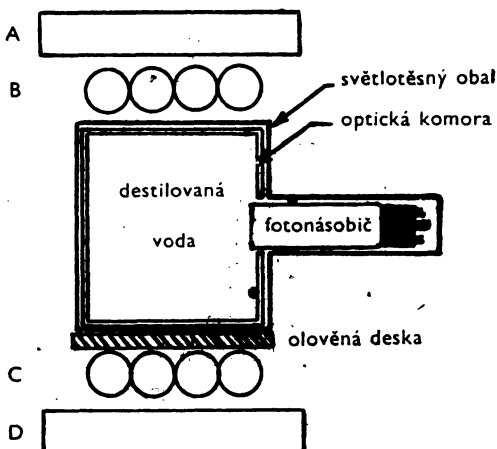
Jelikož podstatou čerenkovského záření je narázová vlna, obsahuje komponenty všech frekvencí, pro které je index lomu dostatečně velký pro reálné hodnoty  $\Theta$  v rovnici (2). V obvyklých optických látkách obsahuje záření viditelné spektrum a vyšší energií směrem k fialové části spektra modro-bílé.

zabarvení. Lze je na př. pozorovat přímo ve vodě, když se do ní ponoří dostatečně energetický zdroj částic  $\beta$ . Tento efekt je dobře znám u reaktorů používajících vody jako moderátoru. Rovnici (2) lze lehce odvodit z Huygensovy konstrukce načrtnuté na obr. 1.

Směr elektromagnetické nárazové vlny je analogický se směrem nárazové vlny, která vzniká při průchodu náboje vzduchem s rychlostí větší než rychlost zvuku. Nárazová vlna je kuželového tvaru a směr šíření je ve směru normály k vlně mířící dopředu. Vrchol kuželu je totožný s částicí, která způsobuje rozruch. Polouhél kužele je úhel uvedený v rovnici (2). Jestliže se částice pohybuje rychlostí menší, než je rychlost světla v daném prostředí, nevzniká Čerenkovovo záření. Jestliže je rychlost částice právě vyšší než rychlost světla v daném prostředí, je směr záření téměř totožný se směrem pohybu částice.



Obr. 3.



Obr. 4.

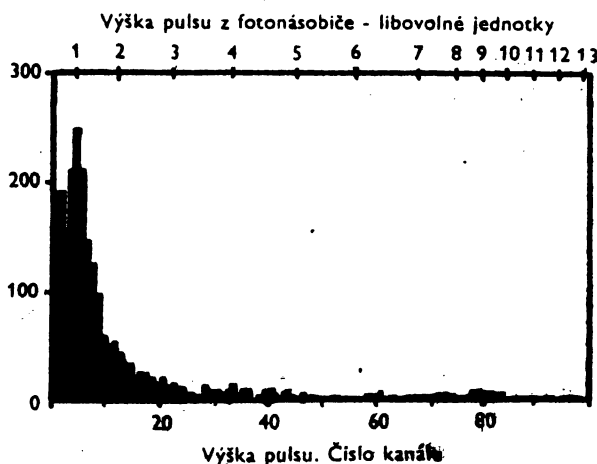
Když se zvýší rychlost částice, zvětší se úhel  $\theta$  a pro velmi relativistické částice dosáhne limitní hodnoty dané vztahem  $\cos \theta = 1/n$ .

Příchod fotonásobičů umožnil využít čerenkovského záření k počítání jednotlivých částic. Bylo možno použít techniky, praktikované při sledování scintilací z luminiscenčních materiálů s ohledem na to, že intenzita čerenkovského záření je mnohem menší než scintilace luminiscenčních látek. Dokonce byly určité obavy, jestli vůbec bude možno odlišit čerenkovské záření od slabé luminiscence, kterou jeví většina látek. Čerenkovovy počítače dělíme na dva typy: S fokusací a bez fokusace. S historického hlediska byly první počítače s fokusací, přestože jde o typ složitější a pravděpodobně méně užitečný. Tyto složitější počítače byly vyvinuty první proto, že se převážná část pracovníků obávala problému záměny čerenkovského záření za fosforenci či fluorescenci.

První Čerenkovův počítač byl postaven Dickem [5] a je uveden na obr. 2. Tento počítač měl řadu nevýhod, na př. malý citlivý prostor, a navíc byl Dickem brzděn tím, že neměl k dispozici dnešní zdroje relativistických částic a byl nucen používat 20 Mev betatronu jako zdroje záření. Od roku 1946, kdy Dicke sestavil první počítač, uplynula doba 4 let, kdy Jolley [6] sestavil první počítač bez fokusace (obr. 3).

Počítač bez fokusace se v principu skládá z nádoby obsahující průhlednou látku, k jejíž jedné stěně je přitisknuta fotokathoda fotonásobiče, který registruje světlo vznikající v nádobě. Stěny nádoby bývají postříbřeny, aby se dosáhlo co největší odrazivosti a co nejmenší ztráty světla. Z posledního důvodu je třeba, aby fotokathoda fotonásobiče byla co největší. Látka, která je obsažena v nádobě, má mít tu vlastnost, aby nedávala vznik světlu jiným způsobem než Čerenkovovým efektem. K zvýšení efektivity počítače se používá vodičů světla z plastické hmoty a vstupní strana nádoby bývá začerněna, aby bylo zabráněno registraci světla pocházejícího od částic přilétávajících ve směru od fotonásobiče.

Použití Čerenkovových počítačů bez fokusace je různé:



Obr. 5.

### 1) Jako obyčejný počítač:

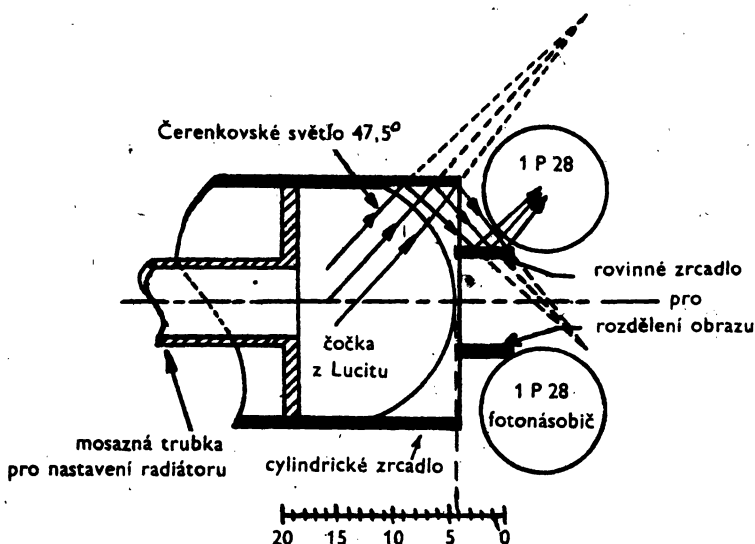
Dá se použít za předpokladu, že rychlost částice odpovídá možnosti vzniku čerenkovského záření o dostatečné intenzitě k registraci. Pokud není třeba dosáhnout obzvláště malých rozlišovacích dob (světelný puls z Čerenkovova počítače bývá kratší než  $10^{-9}$  sec), je výhodnější použít počítač scintilační.

### 2) K určování prahových rychlostí částic:

Pomocí vhodně zvolené absorpční (radiační) látky můžeme použít čerenkovského záření k určování prahových rychlostí částic. Na př. s Lucitovým absorbátorem (radiátorem) bude registrovat protony o energii 325 Mev ( $\beta = 0,67$ ) a větší. Podobně počítač obsahující vodu byl použit k počítání vysoce energetických elektronů za přítomnosti velkého množství neutronů až do energie 450 Mev. Na obr. 3 a 4 jsou znázorněny dva typy počítačů bez fokusace. Tyto typy se hodí pro registraci vysoce energetických částic (na př. elektronů nad 10 Mev), vzhledem k tomu, že tyto počítače mají dlouhou dráhu k dispozici v absorpční látce, která je zapotřebí pro vznik dostatečného počtu fotonů při části těchto energií.

### 3) Použití Čerenkovova počítače s analyzátozem pulsů k určování druhů částic:

Jednotkově nabitá částice dané rychlosti způsobí dobře definovanou intenzitu čerenkovského záření při průchodu radiační látkou (rov. 1). K určení druhu částice je dále ještě zapotřebí určit buď energii nebo hybnost částice. Duerden a Hyams' [7] provedli podobná měření v uspořádání uvedeném na obr. 4. Výstup Čerenkovova počítače byl spojen s diskriminátorem a anti-koincidenčním obvodem, který uřezával nežádoucí puls. Tímto zařízením bylo možno vybrat protony v určitém oboru energie, které byly potom vyfotografovány ve Wilsonově komoře. Tato aparatura sloužila k selekci částic určitých



Obr. 6.

rychlostí. Winckler a Anderson [8] sestavili Čerenkovovy počítače pro určování částic o atomové váze různé od 1. Rovnice (1) uvádí intenzitu čerenkovského záření pro danou rychlost částice, je závislá na  $Z^2$  a proto se dá předpokládat, že intenzita světla, způsobená průchodem relativistického jádra He bude asi  $4 \times$  větší než intenzita relat. protonů nebo mesonů a relativistické jádro Li způsobí intenzitu  $9 \times$  větší. Na obr. 5 jsou uvedeny výšky pulsů získané z balonového letu při vysokých výškách. Byla pozorována maxima od relativistických jader He a Li.

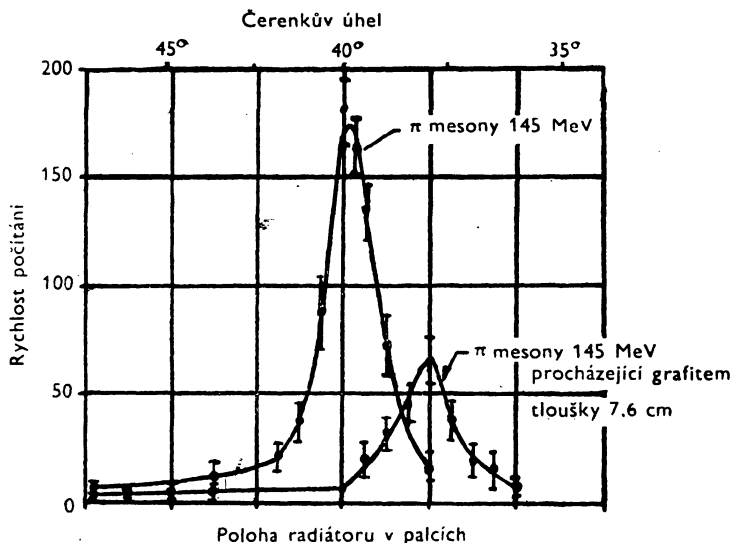
#### Intenzita

Podobně jako u scintilačních počítačů je třeba klást velký důraz na účinný přenos světla na katodu fotonásobiče a na účinnost samého fotonásobiče. Pro Čerenkovovy počítače je nutno použít fotonásobičů s fotokathodou o velké konverzní účinnosti (fotony na fotoelektrony) a citlivostí na rozsáhlou oblast vlnových délek. Nejlépe se osvědčují fotonásobiče s čelními fotokathodami, zabudovanými do skleněné obálky fotonásobiče (na př. RCA 5819). Spektrální rozložení Čerenkovova záření je posunuto směrem k fialové části, takže řada fotonásobičů se pro čerenkovské záření nehodí.

Použití silných vrstev radiátorů (absorpčních látek) ovlivňuje celkovou intenzitu proto, že částice procházející radiační látkou produkuje sekundární částice při srážkách s atomy radiátorů. To má za následek naměření jiných výšek pulsů než se předpokládá. Silné vrstvy se dají použít při studiu mesonů  $\mu$ , které se vyznačují malou interakcí nebo při detekci vysoce energetického záření  $\gamma$  a měření jeho energie.

### Plynové Čerenkovovy počítače

Čerenkovovo záření vzniká i v plynech zrovna tak jako v jiných látkách, za předpokladu, že částice, která způsobuje záření, má dostatečně velkou



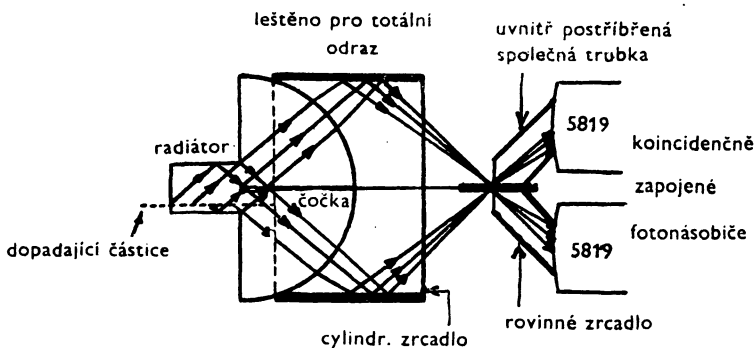
Obr. 7.

rychlost, takže součin  $\beta n$  je větší než jednička. Použití plynu jako radiační látky představuje určité obtíže, které vyplynou při výpočtu intenzity záření. Pro index lomu  $n$ , který je právě větší než 1, je intenzita přibližně dána rovnicí  $I = 900 (\beta n - 1)$  fotonů ve viditelné části na 1 cm dráhy. V případě vzduchu při tlaku 1 atmosféry je index lomu 1,0003, takže  $n - 1 = 3 \cdot 10^{-4}$ . Intenzita je potom  $I = 900 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 27 \cdot 10^{-2} = 0,27$  fotonu/cm pro relativistickou částici o náboji jednoho elektronu. Aby vzniklo čerenkovské záření, je třeba, aby rychlost částice byla alespoň 0,9997 c. To znamená, že musí jít o částici o energii více než  $40 \times$  větší, než je její klidová hmota, a aby se dosáhlo dostatečné intenzity je záhodno, aby částice měla energii ještě větší. Částice s energií  $60 \times$  klidová hmota má  $\beta$  rovno  $1 - 1,4 \cdot 10^{-4}$ , takže  $\beta n = 1 + 1,4 \cdot 10^{-4}$  a  $I = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 900 = 0,14$  fotonů na cm. Čerenkovovo záření, které vzniká v látce s tak malým indexem lomu má směr prakticky rovnoběžný se směrem dopadající částice. V úhlové míře je tento úhel asi  $\sqrt{2(\beta n - 1)}$  radiánů, takže ve vzduchu pro plně relativistickou částici je tento úhel asi  $1,4^\circ$ .

Řada autorů používala Čerenkovových plynových počítačů k různým účelům, na př. Tollestrup a Wentzel [10] měřili vysokoenergetické elektrony produkované brzdným zářením ze synchronocyklotronu pomocí heliového radiátoru. Pražová citlivost pro vzduch je 20 Mev, pro helium 60 Mev při normální teplotě a tlaku.

### Počítače s fokusací

Čerenkovův počítač s fokusací si můžeme představit jako počítač, ve kterém čerenkovské záření o určitém úhlu lze fokusovat na fotokathodu fotonásobiče, kdežto ostatní záření o jiných úhlech je odvedeno mimo. Tímto způsobem dosáhneme toho, že počítač je schopen registrace částic v úzkém vybraném oboru rychlostí. Hlavní fokusací zařízení se skládá z cylindrických optických



Obr. 8.

soustav, které fokusují světlo s rovnoběžnými svazky částic stejné rychlosti na katodu fotonásobiče. Výsledný svazek bývá někdy rozdělen zrcadly na dva fotonásobiče v koincidenčním zapojení.

První typ počítače s fokusací byl sestaven Dickem, jak již bylo uvedeno. Jakožto první Čerenkovův počítač vůbec měl řadu nevýhod a proto později sestavil Marshall [11, 12] řadu zlepšených počítačů (obr. 6).

Autor používal cylindrického zrcadla k vrácení divergujícího čerenkovského záření do osy čočkového systému, kde teprve byl svazek fokusován. V těchto počítačích je výsledný obraz rozdělen rovinnými zrcadly, paprsky dopadají na dva fotonásobiče zapojené v koincidenční. Toto uspořádání je velmi výhodné z toho důvodu, že koincidenční zapojení umožňuje oddiskriminovat pozadí, kde někdy právě tyto pulsy jsou vyšší než pulsy měřené. Obr. 7 ukazuje rozlišovací schéma počítače uvedeného na obr. 6 pro různé rychlosti částice. V tomto počítači se ještě projevují pulsy pozadí v tom smyslu, že zmenšují citlivost počítače na částice různých rychlostí. Tento vliv pozadí se dá odstranit optickým systémem uvedeným u počítače na obr. 8. S tímto typem počítače je možno provést analýzu svazku částic a zjistit jaký rozsah rychlostí je ve svazku zastoupen. Toto je možno provést proměřením různých úhlů fokusovaného světla pohybem fotonásobičů vůči optické soustavě. Citlivá plocha počítače je poměrně malá a proto je počítač trochu nevhodný pro obecné experimentální použití. Přesto byl podobný počítač použit Matherem a Martinellim [13] k detekci elektronů produkovaných rozpadem zářením  $\gamma$  z mesonů  $\pi^0$ ; autoři tím naměřili účinný průřez pro produkci mesonů.



## LITERATURA

- [1] Čerenkov P. A., *Compt. rend. acad. sci. URSS* 2 (1934), 451.
- [2] Frank I., Tamm I., *Compt. rend. acad. sci. URSS* 14 (1937), 109.
- [3] Collins G. B., Reiling V. G., *Phys. Rev.* 54 (1938), 499.
- [4] Wyckoff H. O., Henderson J. E., *Phys. Rev.* 54 (1938), 1.
- [5] Dicke R. H., *Phys. Rev.* 71 (1947), 737.
- [6] Jelley J. V., *Proc. Phys. Soc.* A64 (1951), 82.
- [7] Duerden T., Hyams B. D., *Phil. Mag.* 43 (1952), 717.
- [8] Wincler J. R., Anderson K., *Rev. Sci. Inst.* 23 (1952), 765.
- [9] Wincler J. R., Anderson K., *Phys. Rev.* 93 (1954), 596.
- [10] Tollestrup A. V., Wenzel W. A., *Phys. Rev.* 93 (1954), 950.
- [11] Marshall J., *Phys. Rev.* 86 (1952), 685.
- [12] Marshall J., *Phys. Rev.* 81 (1951), 275.
- [13] Mather J. W., Martinelly E. A., *Phys. Rev.* 92 (1953), 780.