

# Čerenkovovo záření

( Jiří Hrubý, 2. Ročník MTV 2001/2002, PF Č. Budějovice )

Čerenkovovo záření hraje klíčovou roli v současné fyzice elementárních částic. Cílem tohoto referátu je shrnout historické okolnosti související s objevem, popsat princip vzniku Čerenkovova záření, detektory tohoto záření a využití detektorů při sledování kosmického záření.

## Historie

Již v roce 1888 teoreticky předpověděl existenci Čerenkovova záření Anglický vědec – Oliver Heavisid. Což je několik desítek let předtím, než bylo toto záření skutečně objeveno P. A. Čerenkovem počátkem třicátých let dvacátého století. Podle Heavisidových představ měla částice, jenž se pohybuje v hmotném prostředí rychlostí větší, než je rychlost světla v tomto prostředí, produkovat záření zcela specifických vlastností.

V průběhu let 1900-1905 to byli manželé Curie, kteří poprvé pozorovali modře světélkující roztoky, obsahující radioaktivní radium, jenž se snažili z těchto roztoků izolovat. Hledali tehdy intenzivně radium a nenapadlo je, že by měli rovněž věnovat pozornost existenci „modravého“ záření, jenž také v roztocích pozorovali.

V roce 1926 Francouz M.L. Mallet publikoval práci, v níž popisoval tehdejší svá pozorování specifického záření, jenž vzniká ve vodním roztoku poté, kdy je tento roztok ozářen paprsky gamma. Domníval se ovšem chybně, že toto záření lze interpretovat jako luminiscenční záření.

Teprve v následujícím období bylo toto záření důkladně a systematicky experimentálně prostudováno P.A. Čerenkovem pod vedením S.I. Vavilova – odborníka v oboru luminiscenční záření. Oba tehdy po důkladných a vyčerpávajících analýzách společně došli k těmto fyzikálním závěrům :

- 1) pozorované záření nesouvisí s efektem luminiscence;
- 2) toto nové záření je vyvoláno rychlými elektrony, jenž vznikají při srážkách gama kvant (z radioaktivních rozpadů jader) s atomy dielektrického prostředí, případně elektrony, jenž vznikají rovněž a to přímo z radioaktivních rozpadů jader – beta rozpadů.

Na experimentální objev nového záření navázali bezprostředně poté významní Ruští teoretičtí fyzici I.E Tamm a I.M. Frank, kteří v letech 1937 – 1946 jev teoreticky popsali v rámci klasické elektrodynamiky.

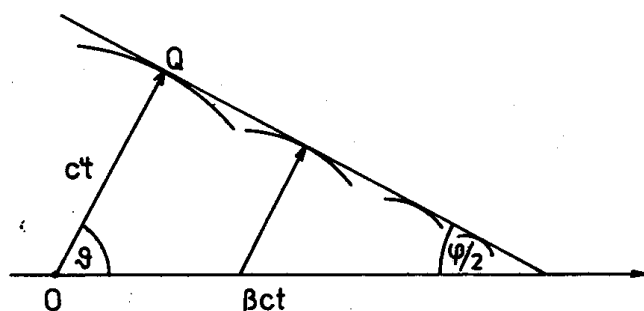
V roce 1950 J.V. Jelley zkonstruoval první praktický detektor Čerenkovova záření.

V roce 1958 P.A. Čerenkovov, I.E Tamm a I.M. Frank za vědecký výsledek obdrželi Nobelovu cenu za fyziku.

## Popis Čerenkovova záření

V prostředí s relativním indexem lomu  $n > 1$  se může elektron, ale také jiná nabitá částice s rychlostí  $\beta c$  pohybovat rychleji, než se šíří elektromagnetické záření v tomto prostředí. Rychlost elektromagnetického signálu je  $c' = c/n$ , kde  $n$  je index lomu a  $c$  je rychlost světla v daném prostředí.

Pokud je  $c' < \beta c$ , pak nabitá částice vysílá elektromagnetické záření v oblasti viditelného spektra – Čerenkovovo záření.



Na obrázku je ukázána Huygensova konstrukce vlnoplochy elektromagnetických vln vysílaných pohybující se částicí. Čelo vlny je obálkou vlnoploch vysílaných částicí v různých bodech její dráhy a je definováno kuželem s vrcholovým úhlem  $\varphi = 2 \arcsin 1 / (\beta n)$ . Světlo se šíří pod úhlem  $\nu$  vzhledem ke směru pohybu částice a platí :

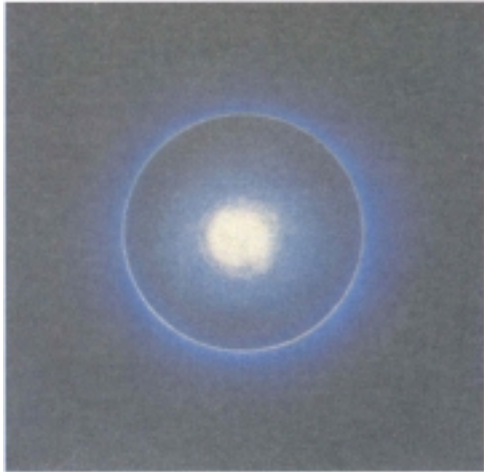
$$\cos \vartheta = \frac{c't}{c\hat{a}t} = \frac{c}{cn\hat{a}} = \frac{1}{n\hat{a}}$$

Pro každé prostředí tedy existuje prahová rychlost  $\beta_{min} = 1/n$  pro vznik Čerenkovova záření . Pro ultrarelativistickou částici ( $\beta \approx 1$ ) dostaneme:  $\cos \vartheta_{max} = \frac{1}{n}$  .

Pro vodu je  $n = 1,33$  , její  $\beta_{min} = 0,75$  , čemuž odpovídá relativně malá kinetická energie elektronu  $E_k = E - mc^2 = 0,26$  MeV. Maximální úhel pod kterým se záření ve vodě pozoruje je  $\vartheta_{max} = 41,5^\circ$  .

Počet fotonů Čerenkovova záření  $N(\nu) d\nu$  vysílaných v intervalu kmitočtů  $(\nu, \nu + d\nu)$  je charakterizován úměrností  $N(\nu)d\nu \approx Z^2 \sin^2 \alpha d\nu$  , která implicitně obsahuje závislost na  $\beta$ . Vyplývá z něho, že spektrum je spojitě a stejné pro částice se shodným nábojem.

Energetické ztráty částice v důsledku Čerenkovova záření jsou nepatrné, jev slouží k detekci a stanovení rychlosti relativistických nabitých částic. Ve vakuu se nemůže žádné záření šířit rychleji než je rychlost světla ve vakuu – nemůže zde vzniknout Čerenkovovo záření.



Fotografie čerenkovského kužele vyzařovaného záření, generovaného částicí při průchodu kvadrátem dielektrického materiálu a detekovaného fotografickou deskou.

## Detektory

Čerenkovův efekt je kolektivní reakce atomů média na elektrické pole pohybující se částice, když dosáhne rychlost  $v$ , která je větší, než je rychlost světla v tomto médiu. Je to elektromagnetický ekvivalent zvukového třesku, jenž slyšíme, když rychlost letadla přesáhne rychlost zvuku. Produkční práh nastane při rychlosti  $\beta_{min} = 1/n$ .

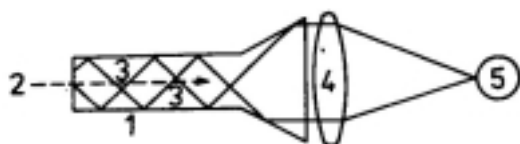
Refrakční index  $n$  závisí na vlnové délce, neboli na energii fotonu. Tato závislost limituje přesnost Čerenkovových detektorů ( tzv. chromatická chyba). Jedna možnost , jak zmírnit vliv chromatické chyby, je redukovat celkový obsah energií fotonů pomocí optických filtrů, ale to bohužel redukuje celkové množství použitelných fotonů. Jiný způsob by bylo měření energie každého fotonu, což zatím žádný existující Čerenkovův detektor není schopen udělat.

Klasický čerenkovův detektor se skládá z bloku opticky průzračné látky s velkým indexem lomu, který se nazývá radiátor, a dále z fotonásobiče , který registruje Čerenkovovo záření. Z konverzní účinnosti fotokatody fotonásobiče a vztahu udávajícího počet fotonů  $N(\nu)d\nu \approx Z^2 \sin^2 \alpha d\nu$  připadajících na interval kmitočtů (  $\nu, \nu+d\nu$  ) je možno určit elektrický puls  $S$  definovaný jako počet fotoelektronů připadajících na 1 cm dráhy částice v radiátoru,  $S \approx 25 \sin^2 \vartheta$ .

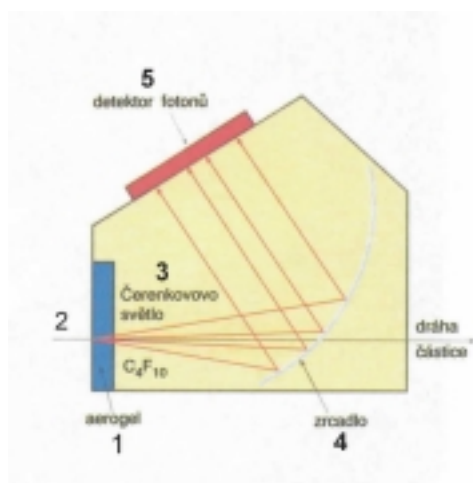
Pro částice  $\beta \sim 1$  hodnoty  $S$  pro vodu a lucit, což je látka často používaná jako radiátor uvedené v následující tabulce :

Látka	Index lomu	S fotoelektronů na 1 cm
Voda	1,333	10
Lucit	1,5	14

Čerenkovovy detektory se používají jako nefokusované, nebo jako fokusované. U nefokusovaných je k radiátoru opticky dokonale připojen fotonásobič a částice, jejíž rychlost splňuje podmínku  $\beta > 1/n$  vytvoří v radiátoru Čerenkovovo záření, které fotonásobič zaregistruje. Fokusované detektory využívají závislosti na úhlu  $\nu$  při daném indexu lomu  $n$ . Zaznamenávají pouze ty částice, jejichž rychlost leží buď v intervalu  $\beta_1 < \beta < \beta_2$ , nebo částice, jejichž rychlost je větší než daná hodnota  $\beta_0 < \beta$ .

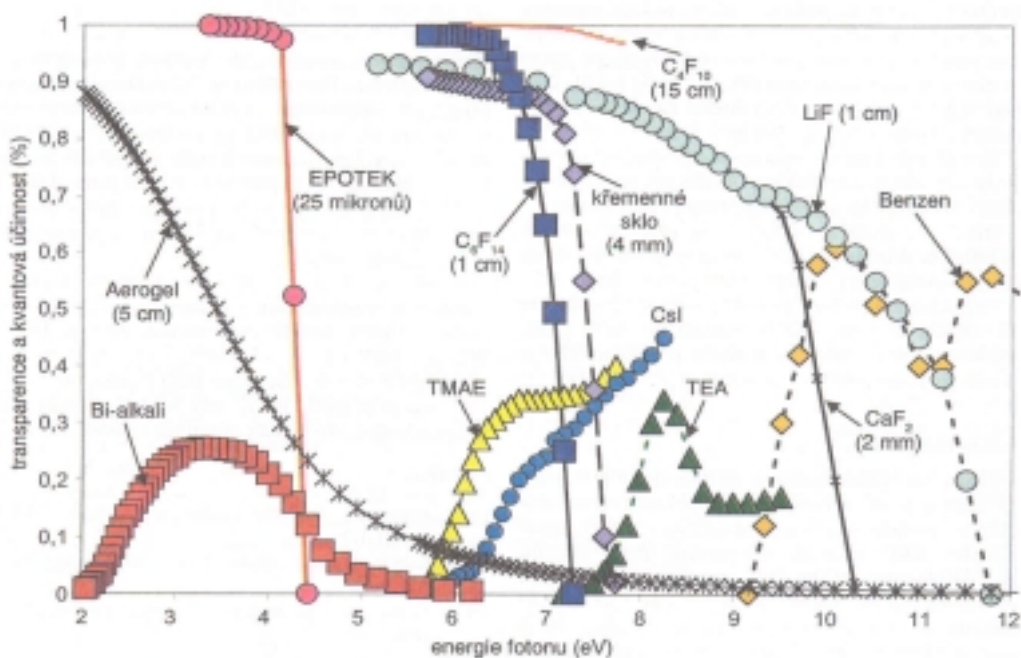


Na tomto obrázku je schéma jednoduchého fokusovaného detektoru. V radiátoru 1 se pohybuje nabitá částice 2, vzniklé Čerenkovovo záření 3 prochází fokusující čočkou 4 a dopadá na fotonásobič 5.



Na tomto obrázku je schéma nefokusovaného detektoru. V radiátoru 1 pohybující se nabitá částice 2 způsobí vznik Čerenkovova záření 3 a pomocí zrcadla 4 jsou fotony odraženy na detektor fotonů.

Vývoj Čerenkovových detektorů je úzce spojen s vývojem materiálů, které se používají na výrobu fotokatod citlivých na světlo. Typické fotokatody jsou citlivé na světlo s vlnovou délkou mezi 140 nm a 800 nm. Příklady kvantové účinnosti různých fotocitlivých materiálů a transparence typických oken používaných ke konstrukci jsou ukázány na následující obrázku :



První malé Čerenkovovy detektory používaly fotonásobiče, které pracovaly s fotokatodami citlivými ve viditelné oblasti vlnových délek. Fotonásobiče ale nepracují v magnetickém poli velkých selenoidů, které se používají k měření hybnosti nabitých částic. To byl hlavní důvod, proč se místo nich použily drátové detektory pracující s plyny.

## Čerenkovovy detektory –projekt Augher

Místa vzniku kosmického záření s nejvyššími energiemi jsou zatím neznámá. Většinou kosmické záření s nižšími energiemi, dopadající na Zemi, vzniká kdesi v naší Galaxii, v Mléčné dráze. Mnoho takových částic vzniká při výbuších supernov, tj. během katastrofického zániku hvězd. O kosmickém záření s extrémně vysokými energiemi však můžeme snad říci jen to, že vzniká mimo naši Galaxii.

Zatím neznáme s jistotou ani jediný proces, který by byl schopen produkovat částice s pozorovanými obřímími energiemi, dokonce ani ty nejdramatičtější výbuchy hvězd pro vysvětlení nestačí. Nevíme proto, ani o jaký typ částic se jedná. Mohou to být protony, jádra železa, ale také neutrino, nebo dokonce nějaký dosud neznámý druh částic.

Porozumění vzniku kosmického záření s extrémně vysokými energiemi by ale bylo velmi cenné – pronikáme totiž do oblastí, které jsou na Zemi zcela nedosažitelné – nejenergetičtější částice kosmického záření mají až stamiliónkrát vyšší energie než jsou energie dosahované pozemskými urychlovači částic, což může podstatně napomoci při odkrývání tajemství raného vývoje a snad i vzniku vesmíru.

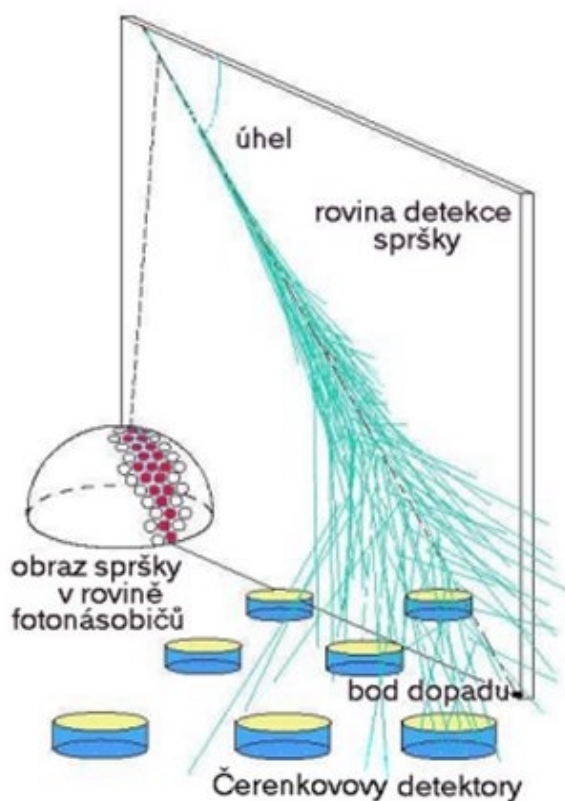
Každou vteřinu dopadá na plochu  $1 \text{ m}^2$  zhruba 1000 částic kosmického záření. Toto záření je tvořeno částicemi, které přicházejí z vesmíru a neustále bombardují Zemi ze všech směrů. Naprostou většinu z nich tvoří protony, atomová jádra a elektrony. Velká většina protonů pochází ze Slunce a jejich energie ani nestačí, aby pronikly zemskou atmosférou na povrch Země. Částice s většími energiemi vytvářejí v zemské atmosféře spršky. Sprška vzniká poté, co se částice s velmi vysokou energií srazí s molekulou atmosféry. Fragmenty této primární srážky se mohou znovu srazit s dalšími molekulami atmosféry, čímž dochází k vzniku dalších a dalších částic, k jakési řetězové reakci. Toto drobení pokračuje dokud není energie primární částice rozdělena mezi milióny částic dopadajících na zemský povrch. Některé částice kosmického záření však mají vyšší energie než jakákoli jiná částice pozorovaná v přírodě. Částice kosmického záření s extrémně vysokými energiemi se pohybují rychlostí velmi blízkou rychlosti světla a dosahují energií mnohamiliónkrát vyšších než částice urychlené v největších pozemských laboratořích.



Primární částice vyšších energií nelze účinně zachycovat za hranicemi zemské atmosféry např. z umělých družic, neboť tyto částice jsou tak vzácné, že by prakticky nikdy netrefily poměrně malou družici. Zemská atmosféra je naproti tomu dostatečně rozlehlá, aby se do ní primární částice občas střelily, a následná sprška sekundárních částic pokryje na povrchu Země už tak velké území, že to fakticky zvyšuje pravděpodobnost, že takový úkaz zachytíme. To je základní princip všech moderních zařízení pro detekci vysoce energetického kosmického záření.

To je základní princip všech moderních zařízení pro detekci vysoce energetického kosmického záření, mezi nimiž vyniká rozbíhající se projekt „The Pierre Auger Observatory“ jednak pro své rekordní rozměry detekční plochy a jednak pro komplexní způsob sledování zachycovaných spršek od částic o extrémně vysokých energiích.

Kosmické záření může být z povrchu Země pozorováno nepřímo prostřednictvím spršek či kaskád částic produkovaných v atmosféře. Studium těchto atmosférických spršek lze určit parametry původní primární částice (konkrétně její energii, směr dopadu a typ částice). Množství částic ve spršce, které dopadnou na zem, je totiž úměrné počáteční energii primární částice. Velikost zasažené plochy také odpovídá energii primární částice a rovněž závisí na tom, v jaké výšce došlo k první interakci. Tato výška, zastoupení různých druhů částic ve spršce a její tvar vypovídají také o typu primární částice. Nabitě částice spršky při průletu



zemskou atmosférou excitují molekuly dusíku  $N_2$ . Ty pak při deexcitaci vydávají fluorescenční záření. I v tomto případě je množství nabitých částic ve spršce a tedy i množství fluorescenčního světla úměrné energii primární částice. V obou případech přesnost měření závisí na tom, jak dobře jsme schopni popsat rozvoj spršky.

Všechny dosud detekované částice s rekordními energiemi byly zaznamenány v experimentech, které používaly buď pouze fluorescenční metodu, nebo jenom síť pozemních detektorů. Protože tyto techniky jsou založeny na různých fyzikálních dějích, které probíhají při rozvoji spršky, a závisí tedy také na naší znalosti těchto jevů, výsledky obou typů experimentů se poněkud liší. Snahou projektu Auger je co nejpřesnější měření a proto budou použity obě techniky současně. Jako pozemní detektory budou použity nádrže s čistou vodou. Sprška

vyvolaná částicí s energií  $10^{19}$  elektronvoltů zasáhne při dopadu na zemský povrch plochu několika  $km^2$ . Částice, které projdou nádobami vyzáří při průchodu vodou Čerenkovovo záření. To je registrováno pomocí tří fotonásobičů umístěných v každé nádobě. Veškerá komunikace mezi jednotlivými pozemními detektory, fluorescenčními detektory a řídicím centrem probíhá pomocí radiového spojení. Všechny pozemní detektory jsou autonomní, fotonásobiče i komunikační jednotka jsou napájeny bateriemi, které se ve dne dobíjejí pomocí fotočlánků.

Velikost území pokrytého pozemními detektory je dána vzácným výskytem částic s rekordními energiemi – na plochu  $1 km^2$  dopadne jedna taková částice zhruba jednou za 100 let. Zatímco pozemní detektory mohou sledovat kosmické záření 24 hodin denně, fluorescenční detektory mohou měřit pouze za jasných bezměsíčných nocí. Jsou však schopné získat údaje i o vývoji spršky v atmosféře a poskytnou nezávislé měření energie. Celkem asi 10 % všech případů bude měřeno oběma způsoby.

## **Závěrem**

Ačkoliv je fyzikální efekt nazývaný Čerenkovovým zářením známý fakticky již sto let, není dodnes popsán tak dobře, aby tento popis bylo možné považovat za definitivní. Stále se objevují nové články s cílem řešit otevřené problémy teoretického popisu tohoto jevu.

Čerenkovovy detektory vysokoenergetických částic patří téměř padesát let k naprosto zásadním a nezastupitelným experimentálním instrumentům, umožňujícím spolehlivě detekovat částice a stanovovat jejich kinematické vlastnosti – především energii. S postupem nových technologií je možno detekovat relativně slabé záření, což bude nepochybně pokračovat i v budoucnu dále.

## **Literatura :**

- [ 1 ] Úlehla, I., Suk, M., Trnka, Z.: „Atomy jádra částice“, Praha, Academia (1990 ); 423-424, 440-441
- [ 2 ] Bednář, M.: „Vavilovovo-Čerenkovovo záření – i nadále aktuální fyzikální problém“, Československý časopis pro fyziku 51 č.3 ( 2001 ); 185-194
- [ 3 ] Vávra, J.: “Čerenkovovy detektory ve fyzice vysokých energií “, Československý časopis pro fyziku 51 č.3 ( 2001 ); 195-212
- [ 4 ] Internet : „[www-hep.fzu.cz/~auger/](http://www-hep.fzu.cz/~auger/)“, J. Grygar, M. Hrabovský, J. Řídký.