

PRÉSIDENCE DU CONSEIL

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

LA RADIATION CERENKOV

P. HUBERT

Rapport C.E.A. n° 451

1955

Centre d'Études nucléaires de Saclay

Service de Documentation

Boite postale n° 2 Gif sur Yvette (S et O)

LA RADIATION CERENKOV

par **Pierre HUBERT**

Ingénieur E.P.C.I., Docteur ès sciences
Physicien au Commissariat à l'Énergie atomique

Dès la découverte de la radioactivité il avait été remarqué par plusieurs chercheurs que diverses substances : sels minéraux, solution, émettaient une faible lueur lorsqu'elles étaient soumises aux rayonnements émis par ces nouveaux atomes. Puis, on s'aperçut que c'était une lumière fluorescente qui était produite, car elle s'identifiait à celle que l'on obtient lorsque l'on soumet par exemple du sulfure de zinc, platinocyanure de baryum, quinine, strychnine etc... à l'ultra-violet.

En 1934, le physicien russe : Cerenkov, travaillant sur la luminescence de solutions de sels d'uranyle, provoquée par des rayons gamma, observe qu'un très faible rayonnement est émis même par les liquides purs. Il en essaya de nombreux et arrive à la conclusion que ce phénomène est différent de celui de fluorescence.

Depuis cette date, cet effet a pris le nom de son « découvreur » et trois ans après Frank et Tamm l'interprétèrent selon la théorie électromagnétique classique.

Pourtant, un de nos compatriotes : Mallet, maintenant fort injustement oublié, avait vu le phénomène 5 ans avant Cerenkov et l'avait décrit dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences en 1929. Il signalait en effet qu'un spectre ultra-violet est produit quand on irradie de l'eau par un rayonnement gamma.

Cerenkov avec un dispositif fort simple a pu, sur 16 liquides soigneusement purifiés, eau, paraffine, toluène, glycérine et divers alcools, observer sous l'effet des rayons gamma du radium, une faible luminosité dans le bleu et le violet.

Avec les énormes sources de rayonnement dont on dispose actuellement, l'effet Cerenkov se manifeste intensément. Une magnifique luminosité bleue auréole les « piles piscines » où le combustible nucléaire est placé au centre d'un grand volume d'eau servant à la fois pour le ralentissement des neutrons et pour la protection du personnel.

Les sources intenses de rayonnement gamma, telles que les barres d'uranium sortant des piles ou les kilocuries de cobalt 60, s'illuminent lorsqu'elles sont plongées dans les bassins remplis d'eau où on les entrepose, et peuvent être photographiées par la seule lumière qu'elles émettent.

L'explication est maintenant donnée et l'on connaît la nature de cette lumière qui fascinait le physicien.

L'effet Cerenkov : un phénomène général

Le spectacle offert par le sillage d'un navire avançant régulièrement à la surface de l'eau a pu être observé par chacun ; on sait qu'il apparaît une onde en forme de V accompagnant le bateau dans sa progression. Ce phénomène s'explique aisément en appliquant le principe d'Huyghens d'après la construction représentée sur la

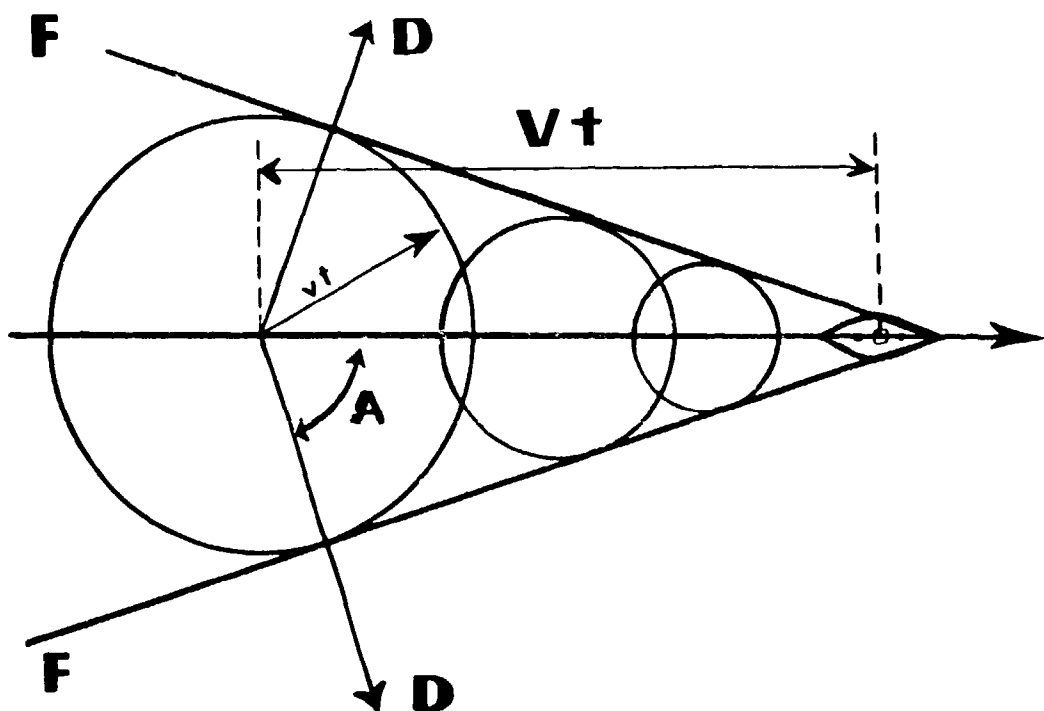


Figure 1. — Le navire se déplace vers la droite avec une vitesse V . En chaque point où il passe, la coque provoque un ébranlement qui se traduit par la formation d'une onde de surface de vitesse v , représentée par un cercle dont le rayon croît proportionnellement au temps.

On a démontré qu'il en résulte une onde unique, dont le front est constitué par la tangente commune à tous ces cercles, c'est-à-dire qu'elle se propage suivant une direction faisant avec l'axe du navire un angle A tel que \cos

$$A = \frac{v}{V}.$$

F = front de l'onde.

D = direction de propagation de l'onde.

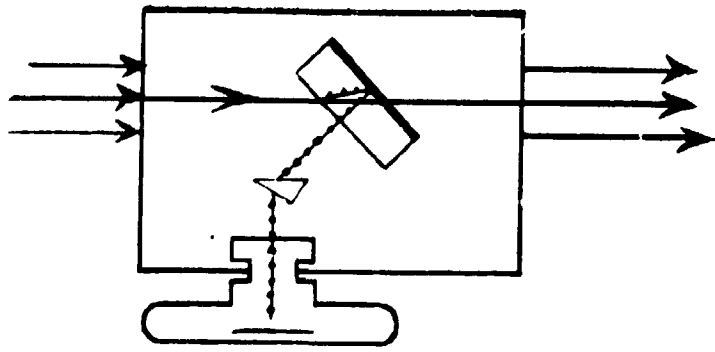


Figure 2. — Le faisceau de protons arrive à gauche et pénètre dans la chambre par une paroi mince. L'effet Cerenkov se produit à la traversée d'une plaque de verre d'indice élevé dont la face postérieure est aluminisée pour renvoyer la lumière dans l'objectif de l'appareil photographique.

Un prisme permet de corriger les effets chromatiques. La position de la tache sur le film dépend de l'angle d'émission de la radiation Cerenkov. Elle permet donc de déterminer l'énergie des protons.

Figure 3. — Compteur de particules. La particule arrive à gauche, pénètre dans le radiateur en plexiglass R. Les rayons lumineux produits par effet Cerenkov sortent par la face plane, après avoir subi quelques réflexions totales. Ils sont alors focalisés par la lentille L et tombent sur la photocathode d'un multiplicateur d'électrons P.

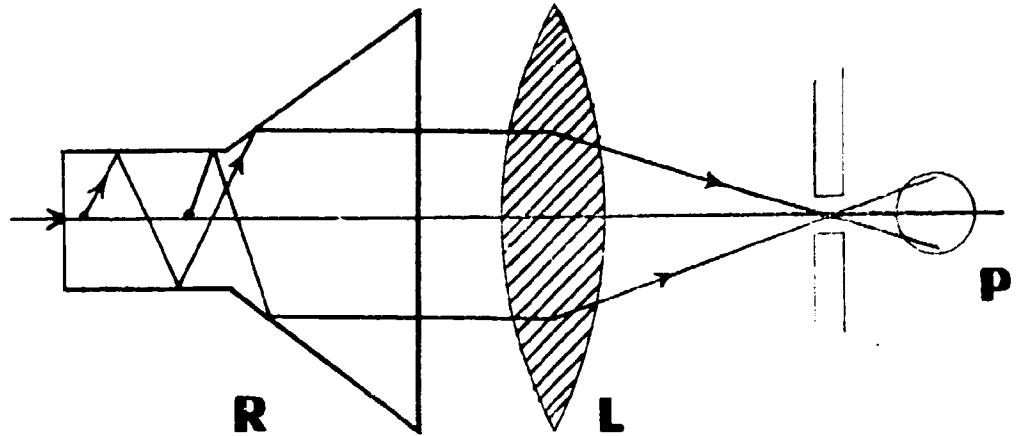


figure 1. Le sillage en forme de V ne peut apparaître que lorsque la vitesse du bateau dépasse la vitesse de propagation des ondes de surface. L'expérience courante montre que cette condition est fréquemment réalisée.

La production d'un sillage suivant le principe ainsi exposé a une portée tout à fait générale et peut s'appliquer, dans l'espace à trois dimensions, à tous les cas où un mobile traverse un milieu avec une vitesse supérieure à celle des ondes résultant de la perturbation qu'il provoque. La construction précédente s'applique encore en remplaçant les cercles par des sphères et les deux tangentes par un cône.

Dans le domaine des ondes acoustiques, le public commence à se familiariser avec les phénomènes particuliers qui se manifestent lorsqu'un avion a franchi le mur du son et dans le domaine des ondes électromagnétiques c'est un mécanisme analogue qui produit la radiation lumineuse observée par Cerenkov.

Quand se produit-il ?

La radiation de Cerenkov se produit lorsqu'une particule chargée traverse un milieu transparent avec une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce même milieu.

On sait que la théorie de la relativité interdit à une particule de posséder une vitesse égale ou supérieure à c , vitesse de la lumière dans le vide, mais les particules très énergiques, émises par certains radioéléments ou produites à l'aide des accélérateurs modernes, peuvent

avoir une vitesse voisine de c , qui est la valeur limite pour une énergie infinie.

D'autre part, lorsque la lumière traverse un milieu réfringent d'indice n , sa vitesse se trouve ramenée à $\frac{c}{n}$.

On pourra donc observer la radiation de Cerenkov à condition de disposer de particules très énergiques et d'un milieu très réfringent.

Vitesse de la lumière dans le vide $c = 299.770 \text{ km/sec.}$

Vitesse de la lumière dans l'eau
($n = 1,33$) 225.000 —

Vitesse de la lumière dans le verre
($n = 1,5$) 200.000 —

Vitesse d'électrons de 1 MeV 282.000 —

Voici à titre d'exemple les énergies minima nécessaires pour différents types de particules lorsque le radiateur est constitué par du plexiglass d'indice $n = 1,5$.

électrons	1,713 MeV (millions d'électron-volts)
mésons	5,2 MeV
protons	320 MeV
particules alpha	1.300 MeV

Les sources de rayons gamma énergiques peuvent également produire, comme nous l'avons vu, l'effet Cerenkov qui a d'ailleurs été découvert ainsi. Les rayons gamma, trajectoires de photons énergiques, entrent en collision avec les électrons qui se trouvent dans les atomes constituant la matière qu'ils traversent. Dans ces chocs violents

le photon cède une grande partie de son énergie à l'électron qui acquiert de ce fait une vitesse pouvant être voisine de c .

Pour observer l'effet Cerenkov, il suffit paraît-il d'approcher dans l'obscurité une source de rayons gamma suffisamment intense, au voisinage de l'œil pour ressentir une sensation lumineuse explicable par l'action des électrons rapides libérés dans les milieux transparents de cet organe. Toutefois, il est difficile, dans ce dernier cas, de faire la part de l'effet Cerenkov et des phénomènes de fluorescence, et l'expérience est trop dangereuse pour être recommandée.

Ses propriétés

L'explication théorique du phénomène a été donnée en 1937 par Franck et Tamm qui ont réussi d'emblée à mettre en évidence les propriétés de directivité, de polarisation et de composition spectrale de la lumière émise. La théorie a été perfectionnée par la suite pour être mise en accord avec les idées modernes, mais les caractères fondamentaux demeurent inchangés.

Les formules obtenues montrent que le rayonnement est constitué par un spectre continu avec prédominance des courtes longueurs d'onde, ce qui explique la teinte bleue observée. Les limites du spectre sont fixées seulement par la condition de transparence du milieu. C'est ainsi qu'il a été possible récemment de mettre en évidence un effet Cerenkov dans le domaine des ondes centimétriques.

Par ailleurs, Collins et Reiling en 1938, envoyant des électrons accélérés à 2 MeV sur diverses substances, réussirent à photographier des rayons lumineux, ce qui fournit bien la preuve expérimentale que la radiation Cerenkov n'est produite par les rayons gamma que par l'intermédiaire des électrons éjectés.

Applications de l'effet Cerenkov

Ce phénomène, jusqu'alors une curiosité scientifique, vient de donner lieu récemment à plusieurs applications qui intéressent le physicien nucléaire et de nombreux modèles de compteurs de particules utilisant l'effet Cerenkov ont déjà été proposés.

En général, ils présentent l'avantage de permettre une certaine sélection des particules en fonction de leur nature, de leur direction et de leur énergie.

La figure 3 montre un premier modèle de détecteur où la lumière produite dans un radiateur en plexiglass est concentrée par une lentille sur la photocathode d'un multiplicateur d'électrons. D'autres dispositifs plus étudiés ont été réalisés, notamment à l'université de Chicago.

Ces compteurs ont certainement un grand avenir dans les études de physique nucléaire grâce à l'extraordinaire brièveté de leurs impulsions. En effet, la durée de l'effet lumineux sur le photomultiplicateur est déterminée par

les temps de transit de la particule rapide et des rayons lumineux. La dimension du compteur étant de quelques centimètres, on a facilement des impulsions dont la durée ne dépasse pas un dix milliardième de seconde et il est facile d'imaginer un dispositif avec compensation des temps de transit donnant des impulsions de un cent milliardième de seconde. Ces durées sont mille fois plus brèves que celles obtenues avec les compteurs à scintillation usuels, qui sont eux-mêmes beaucoup plus rapides que les classiques compteurs Geiger-Müller.

Pour amplifier et mettre en coïncidence de telles impulsions sans les déformer, il est nécessaire d'imaginer des dispositifs nouveaux, mais on peut admettre avec confiance que les électroniciens sauront résoudre ce problème.

Dans le domaine des rayons cosmiques l'utilisation de l'effet Cerenkov a permis de réaliser de véritables télescopes capables d'analyser les propriétés directionnelles du rayonnement qui arrive à la surface du sol. D'autre part, il a été possible de montrer qu'une certaine fraction de l'intensité lumineuse du ciel nocturne est produite par les particules des grandes gerbes qui traversent l'atmosphère avec des énergies ultra-relativistes.

Dans le domaine des réacteurs nucléaires il est possible de faire des mesures intéressantes en analysant la radiation Cerenkov qui prend naissance dans le modérateur lorsque celui-ci est constitué par de l'eau naturelle ou de l'eau lourde. Des études sur ce sujet sont actuellement en cours autour de la première pile française ZOE.

Signalons également la possibilité de mesurer l'énergie des particules grâce à la relation très simple existant entre la vitesse, l'indice et l'angle d'émission. Ce procédé a été appliqué d'une façon remarquable par Mather pour déterminer avec précision l'énergie des protons produits par le synchrocyclotron de 4,60 mètres de Berkeley.

L'utilisation d'une plaque de verre d'indice élevé ($n = 1,88$) donne à l'angle d'émission une valeur de 38° environ pour des protons de 340 MeV. Le schéma du dispositif est représenté sur la figure 2. On remarque que le radiateur est assez mince pour éviter le ralentissement et la diffusion des protons qui le traversent. Un prisme aux caractéristiques soigneusement calculées, permet de corriger la dispersion chromatique. Grâce à ces précautions, l'énergie est mesurée avec une précision de $\pm 0,8$ MeV.

*
**

Ainsi, à partir d'un phénomène minime expliqué théoriquement, amplifié par les techniques actuelles, il a été possible de construire des appareils d'une très grande sensibilité qui permettent d'étendre considérablement notre champ d'investigation dans le domaine nucléaire et cosmique.

Le détecteur de Cerenkov est un appareil facile à construire, d'une très haute efficacité et d'une grande vitesse de détection. Son emploi se développera d'autant plus que l'intérêt des physiciens se concentre de plus en plus vers les hautes énergies.

FIN