

Construcción y caracterización de un Detector de Efecto Cherenkov mediante simulaciones Geant4: *Explorando las interacciones con partículas cargadas*

ANDRES F. GUERRERO^{1,*}, JAIME L. RIAPIRA^{2,*}, AND MARIA P. SILVA^{2,*}

^{*} Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Física

¹ afguerrerogu@unal.edu.co

² jriapira@unal.edu.co

² msilvaa@unal.edu.co

Compiled June 17, 2024

Este estudio explora las interacciones de partículas cargadas en un medio transparente mediante la simulación de un detector de efecto Cherenkov utilizando Geant4. El modelo de detector incorpora un radiador de aerogel de silicio, y se analiza la respuesta a partículas incidentes para varios escenarios. Con la simulación evaluamos las capacidades de identificación de partículas basándose en los patrones de anillos Cherenkov, considerando partículas incidentes tales como electrones, protones, muones, kaones y piones dentro del rango de energía de 10 MeV a 100 GeV. A pesar de las sutiles diferencias en las posiciones de los anillos para partículas con distintos momentos iniciales logramos diferenciar partículas con diferentes energías iniciales. Además, la investigación demuestra la importancia de tener en cuenta los procesos secundarios en los detectores Cherenkov, arrojando luz sobre las posibles complejidades en la identificación de partículas. Los resultados contribuyen a la comprensión de los fenómenos de la radiación Cherenkov y ponen de relieve la necesidad de realizar simulaciones exhaustivas a la hora de interpretar los resultados experimentales en aplicaciones de detección de partículas.

1. INTRODUCCIÓN

A. Radiación Cherenkov

Todos sabemos que nada puede viajar mas rápido que la luz en el vacío, pero ¿será posible en otro medio? ¿tal vez en el agua?.

Cuando una partícula cargada viaja a través de un medio transparente a la velocidad de la luz en ese medio, se producen fotones, este medio puede ser líquido o sólido pero debe ser transparente. A estos fotones se les denominó radiación Cherenkov en honor al físico ruso que investigó sobre este fenómeno.

En 1958 Cherenkov recibió el premio nobel de física junto a C. Frank y Tamm por el descubrimiento e interpretación del efecto Cherenkov. Cabe resaltar que la radiación Cherenkov fue observada por primera vez por Marie Curie en 1910. [1]

Cuando una partícula rápida cargada con velocidad uniforme viaja a través de un medio dieléctrico, el campo electromagnético cercano a la partícula polariza el medio a su paso, de modo que los electrones adheridos a los átomos siguen el frente de onda del pulso mientras la partícula pasa. Cuando la partícula es lenta, debido a la interferencia destructiva, no es posible ver

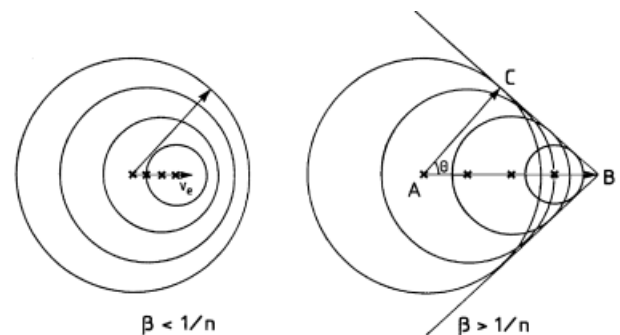


Fig. 1. Frentes de onda esféricos emitidos al paso de la partícula dependiendo de la velocidad de esta [2].

la radiación producida al desplazarse los electrones los cuales retornan inmediatamente a su posición después de que pasa la partícula.

Pero si la partícula tiene una velocidad en el medio más rápida que la velocidad de fase de la luz en el medio, cada una

de las ondas creadas a lo largo del camino estarán en fase entre sí. De la construcción de Huygens sabemos que solo hay un ángulo θ con respecto al camino de la partícula al cual es posible obtener un frente de onda constructivo, llamado ángulo Cherenkov y es así como se puede observar una radiación coherente. [3]

En la figura 1 podemos ver los frentes de onda esféricos de Huygens que se generan con la trayectoria de la partícula. Si esta viaja más rápido que la velocidad de la luz en el medio se genera un cono a partir de la combinación de los frentes de onda. El ángulo de apertura del cono depende de la relación entre la velocidad de la partícula en el medio y la velocidad de la luz.

La partícula viaja de A a B en el mismo tiempo t en que la luz alcanza el punto C con una velocidad de c/n . [2]

De modo que

$$\cos(\theta) = \frac{AC}{AB} = \frac{ct}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n} \quad (1)$$

Donde n es el índice de refracción del medio, $\beta = v/c$, v la velocidad de la partícula en el medio y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Teniendo el ángulo de interferencia como

$$\cos \theta = \frac{c}{nv} \quad (2)$$

Con el índice de refracción del agua $n = 1.337$ tenemos

$$\frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.337} \text{ m/s} \approx 2.2 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (3)$$

Esta velocidad es proporcional a 0.26 MeV , de modo que esta es la mínima velocidad que deben tener las partículas beta para tener radiación de Cherenkov en este medio. [4] Cabe destacar que dada la expresión (1) se puede establecer un relación de tipo umbral para la detección de partículas, considerando que varias llegan al detector con igual momento p , tendríamos que el termino β dependería de la masa de la partícula, y situándonos en el limite donde aparece el efecto cherenkov, es decir $\beta = 1/n$, se puede variar n para que las partículas con mayor masa no generen emisión de fotones, luego estaríamos filtrando las partículas que se detectan, lo cual puede contribuir a la clasificación de estas. [5]

En la radiación de Cherenkov la intensidad y la frecuencia son proporcionales. En la radiación Cherenkov se tienen altas energías, los fotones viajan con altas frecuencias y por lo tanto con longitudes de onda cortas, que corresponden a colores violetas y azules en el espectro visible. Es por esto que la radiación que se emite en el efecto Cherenkov se ve de color azul como vemos en la figura 2.

B. Detectores de efecto Cherenkov

En general la detección de partículas empleando radiación Cherenkov supone el conocimiento del momento de la partícula que incide en el detector, que junto a la información brindada por dicho detector sobre la velocidad de la partícula en la ecuación (2), nos da las herramientas necesarias para determinar la masa de las partículas, para mostrar esto partimos de la expresión de Einstein para el momento y la energía.

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad (4)$$

Donde E es la energía, p el momento y m la masa de la partícula a estudiar, y considerando que $E = \gamma mc^2$, donde $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ es el factor de Lorentz, podemos escribir lo siguiente.



Fig. 2. En esta foto puede observarse la luz azul emitida por la radiación Cherenkov rodeando el combustible de el núcleo del reactor RECH-1 en Chile. (Fotografía: E. Vargas /Comisión Chilena de Energía Nuclear).

$$m = \frac{p\sqrt{1 - \beta^2}}{c\beta} \quad (5)$$

Donde el valor de β se tiene de la ecuación (2) y p de un detector complementario. También podemos escribir la relación explícita entre el ángulo Cherenkov y el momento, lo cual nos permite asociar mas fácilmente el comportamiento del cono de luz a cierto tipo de partículas.

$$\cos(\theta) = \frac{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}}{np} \quad (6)$$

En la figura 3. tenemos justamente los resultados que se han obtenido para múltiples mediciones y como los puntos en las gráfica se asocian de acuerdo al tipo de partícula.

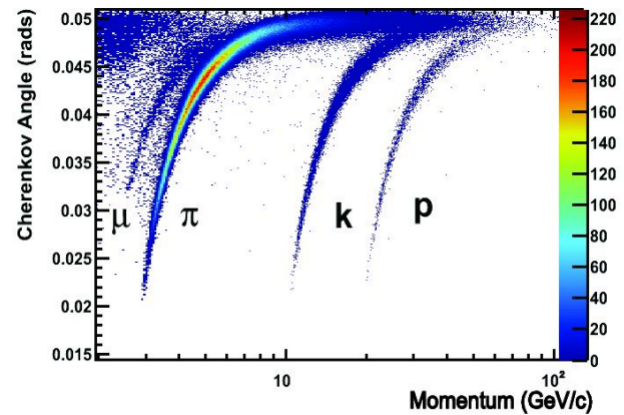


Fig. 3. Ángulo Cherenkov vs Momento. [6]

En la practica tenemos que los mecanismo mediante los cuales se obtiene la información pueden variar, por lo tanto cabe mencionar los tipos de detectores que se diferencian justo por estos mecanismo. Estos tipos son los siguientes. [7]

- **Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH):** Los detectores RICH permiten la formación de anillos de radiación Cherenkov en un plano focal. La forma y la posición de estos anillos se utilizan para identificar la velocidad de la partícula.

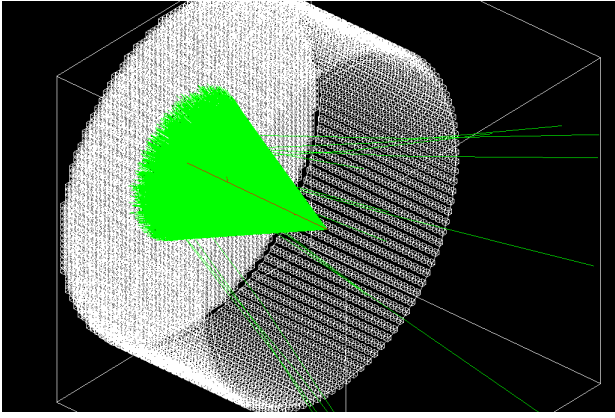


Fig. 4. Simulación de un detector de Efecto Cherenkov en GEANT4. La figura muestra la configuración cilíndrica del detector, compuesto por una serie de sensores que emulan fotomultiplicadores. En el núcleo del cilindro se encuentra el radiador compuesto de Argel, que desencadena la generación de fotones (representados en verde) a través del efecto Cherenkov al ser atravesado por la partícula cargada, en este caso, un muón.

- **Differential Cherenkov Detectors:** Estos detectores miden las diferencias en la intensidad de la radiación Cherenkov en diferentes direcciones.
- **Detector for Internally Reflected Light (DIRC):** Se detecta la radiación Cherenkov mediante un material transparente con índice de refracción adecuado, donde a partir de la reflexión interna total se pueden formar imágenes y medir el ángulo de emisión.

También existen diferencias en cuanto a los foto detectores empleados, sin embargo en su función todos se encargan de transformar la señal del fotón en una señal eléctrica que es procesada por otro equipo.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

En esta sección, describimos la configuración experimental de nuestra simulación de detectores de efecto Cherenkov, inspirada en el modelo Kamiokande. La simulación se desarrolló mediante Geant4, aprovechando su entorno y beneficiándose de ser una herramienta de software de código abierto.

La construcción experimental se desglosa en diversas etapas:

A. Mundo (World)

Este componente representa el entorno de simulación en el programa basado en Geant4. Para ello, se emplea la clase G4Box para generar un volumen con forma de caja. Sus dimensiones se establecen en 0.3 metros en cada dirección, dando como resultado un mundo cúbico con una longitud lateral de 0.3 metros. Este espacio se construyó utilizando el material G4_AIR, predeterminado en Geant4 para representar el aire, con una reflectividad de 1.

B. Radiador (Radiator)

El radiador es un objeto sólido en Geant4 que simboliza la geometría de un dispositivo donde se aloja el material que interactúa con las partículas. Creamos un objeto cilíndrico con un radio de 0.3 m y una altura de 0.14 m. El material de este cilindro

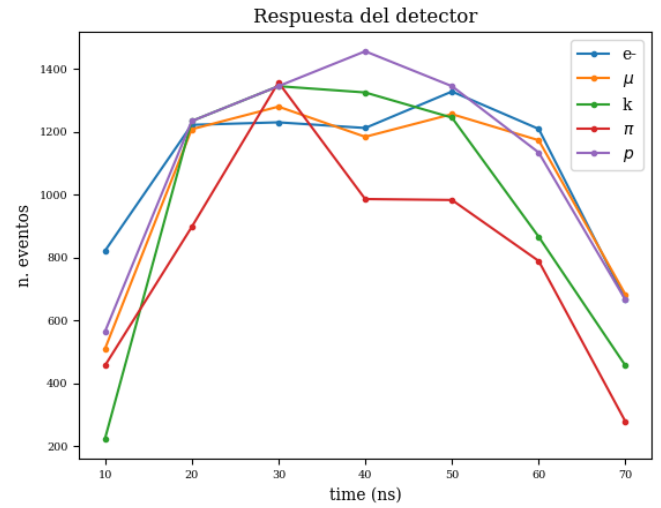


Fig. 5. Respuesta temporal del detector en términos del número de eventos registrados para cada tipo de partículas.

es un "Aerogel de silicio", que simula el agua ultrapura utilizada en detectores de neutrinos. El Aerogel tiene las siguientes propiedades:

- Densidad: 0.0200 g/cm^3
- Composición: SiO_2 : 62.5%, H_2O : 37.4%, C 0.1
- Reflectividad: 1.1 para fotones con energías entre $1.23 \text{ eV}/0.9$ y $1.239 \text{ eV}/0.2$

La última propiedad se seleccionó para garantizar que el material no sea absorbente, lo que maximiza la eficiencia en la detección de fotones.

C. Detector

Se implementó un arreglo de detectores que simulan fotomultiplicadores. Cada detector se modeló como una caja cúbica de 0.004 m de longitud. Estos detectores recopilan información sobre los fotones capturados, esta información es exportada en formato *root* el que es analizado en python. Finalmente, se ensambló un conjunto de estos sensores que cubren el tanque cilíndrico que contiene el aerogel. Este diseño tiene como objetivo captar todos los fotones de Cherenkov generados cuando las partículas de interés interactúan con el material.

El montaje utilizado se presenta en la figura 4. Además, se lleva a cabo una modificación en el experimento que implica la reducción del volumen del radiador con el objetivo de obtener un detector que simule a los detectores RICH en el LHCb. El arreglo experimental presenta limitaciones en cuanto a la resolución espacial, dado que está condicionado por las restricciones computacionales impuestas por el ordenador. No obstante, estas limitaciones son suficientes para asegurar una distinción en las curvas generadas por las diferentes partículas.

3. PARTICULAS

Una vez construido el modelo del detector en Geant4, se evaluó la respuesta de los detectores considerando las partículas contenidas en las cascadas atmosféricas. En este caso, se analizaron electrones, protones, muones y piones con energías fijas entre 10 MeV y 10 GeV, según sea el caso. Esta elección se debe a la

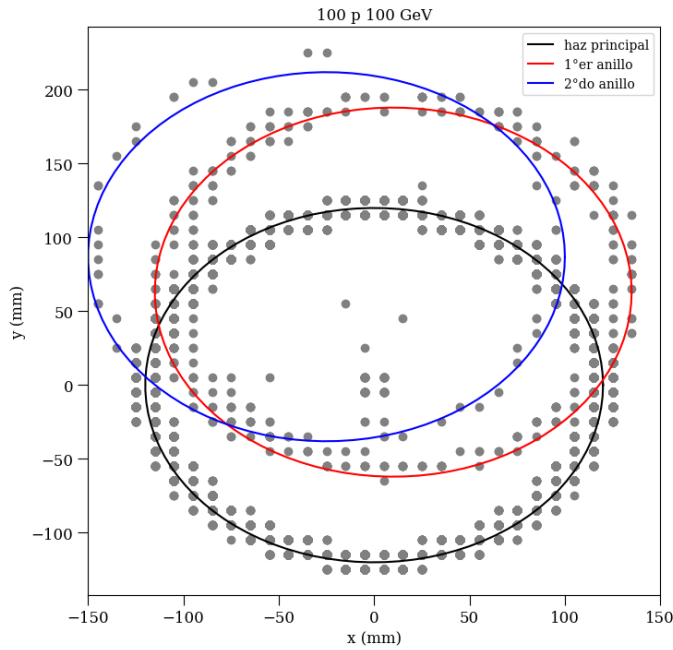


Fig. 6. Respuesta del detector a un haz de 100 protones con un momento de 100 GeV. Se puede observar además del anillo principal dos circunferencias de Cherenkov adicionales que son producto de partículas secundarias

respuesta de las partículas a los detectores RICH, que utilizan el efecto Cherenkov para identificarlas. Las energías de las partículas seleccionadas se encuentran dentro del rango de energías caracterizado por los grandes detectores de partículas mostrado en la figura 3.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Simulación Geant4

El análisis implica la emisión de partículas cargadas en dirección vertical hacia el detector. Estas partículas interactúan con el radiador, donde se desencadena el efecto Cherenkov, generando fotones en cascada (ver Figura 4). Los sensores registran información crucial, proporcionando detalles como el sensor que detecta un fotón, la energía depositada y el momento preciso de la detección del evento.

También se observa la emisión de fotones en dirección opuesta al movimiento de la partícula, conocida como radiación Backward (o radiación Cherenkov inversa), un tipo de radiación electromagnética que se produce cuando una partícula cargada se desplaza a través de un medio dieléctrico a una velocidad superior a la velocidad de la luz en ese medio [8]. En este contexto, la radiación Backward surge debido a la interferencia constructiva de la radiación de transición de resonancia en la dirección opuesta al movimiento de la partícula.

B. Respuesta del detector

En nuestro método propuesto, utilizamos un detector de efecto Cherenkov con un radiador de argel de silicio en un tanque de gran tamaño para rastrear la partícula a lo largo del tiempo. Con este enfoque, evaluamos la respuesta del detector en términos de resolución temporal, recopilando información de cada sensor para cada evento. En la Figura 5, presentamos la respuesta temporal para cada partícula con una energía de 10 GeV. Se espera

que el detector exhiba una respuesta exponencial para todas las partículas. En nuestro caso, observamos una distribución con un pico entre los 30 y 40 nanosegundos, seguido de un declive. Se anticipa que con más datos temporales, la distribución seguiría una tendencia exponencial. Notamos que se pueden observar distribuciones similares para todas las partículas, atribuyendo esto a las características de la simulación.

Exploramos la respuesta del detector frente a diversas partículas, considerando distintos momentos iniciales para cada una de ellas. Este análisis se presenta detalladamente en la Figura 7. Observamos que el ángulo de Cherenkov exhibe una dependencia significativa respecto al momento de la partícula incidente. Como se aprecia en la figura, las circunferencias formadas por los fotones generados por partículas con momentos más pequeños se sitúan en posiciones más internas en comparación con aquellas asociadas a momentos más grandes, patrón que se repite en la mayoría de las partículas. Aunque las diferencias son sutiles, resultan lo suficientemente discernibles para ser captadas por el modelo que hemos desarrollado.

Por otro lado, no conseguimos discernir de manera clara las circunferencias generadas por diferentes partículas en nuestro experimento. Los resultados obtenidos no son lo suficientemente concluyentes como para lograr una caracterización precisa de los distintos tipos de partículas como se muestra en la figura 3. Esta limitación podría deberse a las bibliotecas disponibles en nuestra simulación, las cuales, en nuestro caso, se reducen exclusivamente a Geant4, lo que podría afectar la precisión física deseada, la limitación impuesta por la capacidad de cómputo con la que contamos no permite una simulación más precisa debido a los tiempos de cómputo.

C. Otros resultados

En última instancia, dirigimos un haz de protones a una energía de 100 GeV con el objetivo de aumentar las interacciones entre partículas o entre las partículas y el medio. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6, donde se distingue un anillo central de Cherenkov que corresponde al haz principal. Sin embargo, se observan dos anillos adicionales. Este fenómeno se explica por el hecho de que los protones, especialmente las partículas altamente energéticas, inducen la ruptura de núcleos en un proceso conocido como "spallation". Este proceso genera neutrones rápidos e isótopos que experimentan desintegración beta, constituyendo el fondo en experimentos de baja energía y dando lugar a nuevos conos de Cherenkov.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestran los resultados de una simulación de un detector de efecto Cherenkov en Geant4 que proporciona una representación detallada de la interacción de partículas cargadas con un medio transparente, en este caso, un radiador de argel de silicio. Al emitir un haz de protones a 100 GeV, observamos el fenómeno de Cherenkov, caracterizado por anillos de radiación en el detector, la presencia de anillos adicionales sugiere la influencia de procesos secundarios, como la spallation de protones, generando neutrones rápidos e isótopos de desintegración beta.

La simulación permite una clara distinción entre los momentos de las partículas logrando así una separación clara entre partículas con diferentes energías. Sin embargo, Aunque nuestra simulación muestra resultados interesantes, la identificación clara de diferentes tipos de partículas a través de los anillos de Cherenkov presenta desafíos. Además, la limitación de utilizar exclusivamente Geant4 como biblioteca puede afectar la

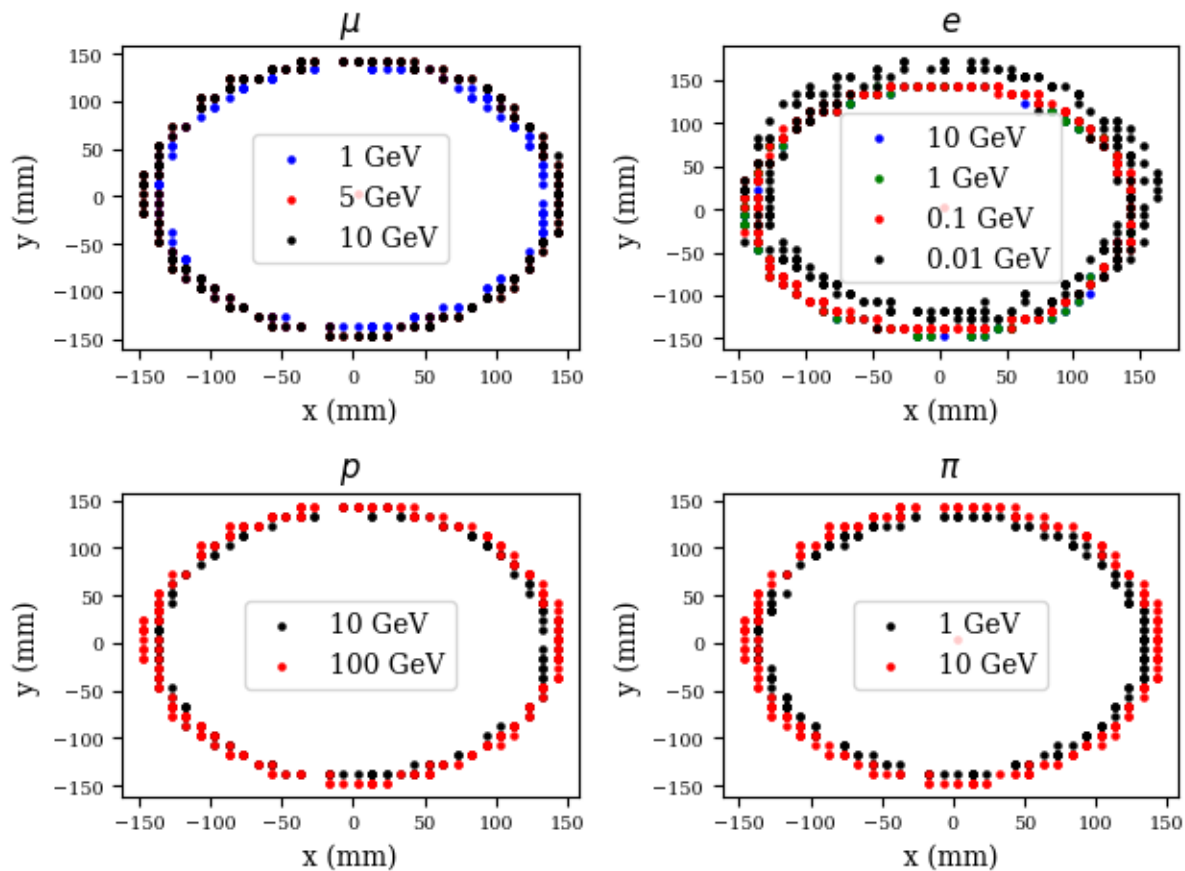


Fig. 7. Círculos de Cherenkov que representan la radiación óptica producida por 4 partículas cargadas con momentos de incidencia diferencia.

precisión física deseada.

Este estudio contribuye a la comprensión de la radiación Cherenkov y sus aplicaciones en la detección de partículas, destacando la importancia de considerar no solo la interacción principal sino también los procesos secundarios que pueden influir en los resultados experimentales.

REFERENCES

1. M. F. L'Annunziata, *Cherenkov Counting* (Handbook of Radioactivity Analysis (Third Edition), 2012).
2. E. Nappi and J. Seguinot, "Ring imaging cherenkov detectors: The state of the art and perspectives," *RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO* Vol. 28, N. 8-9 (2005).
3. J. V. Jelle, "Cherenkov radiation and its applications," *Br. J. Appl. Phys.* 6, 277 (1955).
4. J. Kónya and N. M. Nagy, *Interaction of Radiation With Matter* (Nuclear and Radiochemistry (Second Edition), 2018).
5. Particle Identification, Graduate Student Lecture, 2012.
6. V. LHCb, "group collaboration, m," Ferro-Luzzi VELO hardware interlocks, EDMS document <https://edms.cern.ch/document/706629>.
7. Pedro Ladrón de Guevara. Principios de los detectores de partículas, Universidad Autónoma de México, 2012.
8. X. Lin, S. Easo, Y. Shen, H. Chen, B. Zhang, J. D. Joannopoulos, M. Soljačić, and I. Kaminer, "Controlling cherenkov angles with resonance transition radiation," in *2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, (2018), pp. 1–2.