

¿Cómo funciona un detector?

Gil Estéfano Rodríguez Rivera
Guillermo Segura Gómez

División de Ciencias e Ingenierías
Universidad de Guanajuato

5 de julio del 2021

Contenido

- 1 Principios físicos
 - Resistividad
 - Fuerza de Lorentz
 - Inducción magnética
 - Producción de pares
 - Radiación Cherenkov
 - Radiación de frenado (Bremsstrahlung)
 - Transferencia de calor por radiación
- 2 ¿Cómo funciona un detector?
 - Aparatos de rastreo
 - Calorímetros
 - Métodos de identificación
- 3 El detector de LHCb
- 4 El detector de BES III

Principios físicos

Resistividad

- La **resistividad** cuantifica qué tan bien se pueden transportar los electrones en el material.
- Es una propiedad intrínseca del conjunto de partículas que componen al material. Depende de:
 - 1 La estructura microscópica del material.
 - 2 La temperatura de la muestra.
 - 3 La geometría y las dimensiones físicas de la muestra.

Resistividad

- La resistividad determina la **resistencia** de la muestra.
- Un alambre de longitud L y área de la sección transversal A con una resistividad ρ tiene una resistencia R dada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{L}{A}\rho \quad (1)$$

Resistividad

- Los materiales con *alta resisitividad* son **insuladores**.
- Los materiales con *baja resisitividad* son **conductores**.

Fuerza eléctrica

- Las cargas eléctricas experimentan fuerzas en presencia de campos eléctricos. Independientemente de si están en movimiento o no.
- Una carga eléctrica q en presencia de un campo eléctrico \mathbf{E} experimenta una fuerza \mathbf{F}_E que tiene la forma siguiente:

$$\mathbf{F}_E = q\mathbf{E} \quad (2)$$

Fuerza de Lorentz

- Las cargas en movimiento no sólo interactúan con campos eléctricos.
- Experimentan fuerzas en presencia de campos magnéticos.
- Estas fuerzas dependen de la velocidad de la carga.
- Una carga eléctrica q que viaja a velocidad \mathbf{v} y está en presencia de un campo magnético \mathbf{B} experimenta una fuerza \mathbf{F}_M que tiene la forma siguiente:

$$\mathbf{F}_M = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

Esta fuerza se conoce como **fuerza de Lorentz**.

Fuerza de Lorentz

- La fuerza de Lorentz es la responsable de que la trayectoria de una partícula cerca de un imán se curve.
- La fuerza que experimenta a la partícula es perpendicular al campo magnético y a la velocidad, por lo que la trayectoria se curva.
- Cuando una partícula es suficientemente rápida, su trayectoria se curva menos que una partícula con menor rapidez porque la fuerza de Lorentz que experimenta es mayor pero la experimenta por menos tiempo.

Ley de Ampere

- *Una corriente eléctrica produce un campo magnético.*
- La suma de las contribuciones de un campo magnético en un camino cerrado es proporcional a la corriente que corre a través de la sección transversal del camino;

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \mu \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

- \mathbf{B} y \mathbf{E} son el campo magnético y eléctrico.
- \mathbf{J} es la corriente eléctrica
- μ y ε son constantes que dependen del medio.
- La corriente eléctrica \mathbf{J} puede producir también un cambio en el campo eléctrico del medio, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ (la *corriente de desplazamiento*).

Producción de pares

- La **producción de pares** es una de las formas en las que un fotón interactúa con la materia.
- Sólo para fotones de altas energías. Dos veces mayor que la masa en reposo del electrón (1.02 MeV).
- El fotón es sustituido por una pareja electrón-positrón.
- Toda la energía del fotón pasa al par de partícula y antipartícula en forma de energía en reposo y energía cinética.

Aniquilación de pares

- También existe el proceso inverso, la **aniquilación de pares**.
- Es la aniquilación de un positrón con un electrón que da como resultado dos fotones de al menos 511 keV cada uno.

Explosión sónica

- Una **explosión sónica** ocurre cuando un objeto supera la velocidad del sonido.
- Cuando un jet viaja más lento que el sonido en el aire, el aire se desvía suavemente conforme el avión viaja.
- Cuando el avión supera la velocidad del sonido, hay un cambio súbito en la presión y eso produce ondas de choque.
- Las ondas de choque se alejan del jet al propagarse, formando un cono que crece a la velocidad del sonido.

La velocidad de la luz

- La velocidad de la luz **en el vacío** es la máxima velocidad alcanzable en el universo.
- La luz es una onda electromagnética.
- Las ondas electromagnéticas viajan a distintas velocidades dependiendo del medio en el que se propaguen.
- Una partícula con masa no puede viajar más rápido que la luz en el vacío.
- Pero puede viajar más rápido que la luz en un medio.

Radiación Cherenkov

- La **radiación Cherenkov** es el análogo de las explosiones sónicas.
- Es un efecto de partículas cargadas que superan la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio.

Radiación Cherenkov

- Cuando una partícula cargada se mueve dentro de un medio polarizable excita las moléculas.
- Cuando regresan a su estado basal, emiten fotones.
- Cuando la partícula se mueve lento, los fotones emitidos (en su faceta ondulatoria) se propagan pero no se cruzan entre sí.
- Cuando la partícula se mueve más rápido que la luz en el medio, los frentes de las ondas tienen una interferencia constructiva, por lo que se forma el cono de luz.

Bremsstrahlung

- La **radiación bremsstrahlung** (o *de frenado*) es producida cuando una partícula cargada emite un fotón al ser acelerada de forma súbita.
- Es un mecanismo importante de pérdida de energía en las partículas cargadas de altas energías y es una consecuencia de la conservación del momento de la partícula.

Radiación

- Todos los cuerpos con una temperatura superior a 0 K irradian energía en forma de fotones.
- La cantidad de energía depende del material, el medio y la temperatura del cuerpo.
- Si se tienen dos cuerpos, uno con una temperatura mayor que el otro, el primero transferirá calor al de menor temperatura a través de esa radiación.

Calor específico

- Es posible determinar el calor absorbido por medio del cambio en su temperatura. (Aplica cuando no hay transición de fase).
- Para un objeto con masa m con un calor específico c que experimenta un cambio de temperatura ΔT , la diferencia de calor ΔQ está dada por:

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (5)$$

¿Cómo funciona un detector?

Los detectores de partículas

- Los detectores dan indicios sobre las propiedades de las partículas que se producen en los aceleradores.
- El proceso de detección requiere de diversas capas de detectores más pequeños u otros instrumentos.
- Las partículas que se producen luego de una colisión viajan en línea recta.
- Un detector requiere de electroimanes para alterar la trayectoria de las partículas con carga eléctrica.
- Es posible calcular la velocidad y el momento de una partícula observando cuánto se curva su trayectoria en presencia de un imán.

Los detectores de partículas

- Los detectores también consisten en aparatos de rastreo, calorímetros y detectores que identifican partículas.
- Estos aparatos sirven para medir el momento y la energía de las partículas y otras características para identificar la entidad en cuestión.
- El conjunto de dispositivos que compone al detector permite que se pueda identificar qué había en el detector luego de una colisión.

Aparatos de rastreo

- Los **aparatos de rastreo** revelan el camino que las partículas con carga eléctrica siguen al interactuar con la sustancia apropiada.
- El camino no es directamente visible, pero se puede identificar a través de las pequeñas señales eléctricas que la partícula genera a su paso.

Calorímetros

- Los **calorímetros** miden la energía que una partícula pierde al pasar a través de este aparato.
- Se diseñan para absorber la totalidad de la energía de las partículas producidas.
- Los *calorímetros electromagnéticos* miden la energía de las partículas como los electrones o los fotones.
- Los *calorímetros hadrónicos* sirven para medir la energía de los hadrones (que son las partículas compuestas por quarks, como lo son los protones y los neutrones).

Métodos de identificación

- Los métodos para identificar una partícula consisten en identificar su velocidad.
- Con la velocidad de la partícula y su momento, se puede calcular su masa.

Métodos de identificación

- La manera más simple para medir la velocidad es medir cuánto tiempo tarda la partícula en recorrer cierta distancia: para eso se usan sistemas de *tiempo de vuelo*.
- Otra manera es ver cuánto ioniza la materia a su paso, cosa que se puede medir con ciertos dispositivos.
- Las partículas que viajan más rápido que la luz en un medio producen *radiación Cherenkov* (para medir la velocidad de una partícula suficientemente rápida).

El detector de LHCb

LHC

- El gran colisionador de hadrones por sus siglas en inglés "*Large Hadron Colider*" es el mas grande y mas poderoso acelerador de partículas en el mundo.
- Comenzó sus operaciones el 10 de septiembre de 2008 y permanece hasta el día de hoy. El LHC consiste en un anillo de 27 kilómetros de magnetos superconductores con un número de estructuras aceleradoras que empujan a las partículas a lo largo del camino. **[LHC definition]**.

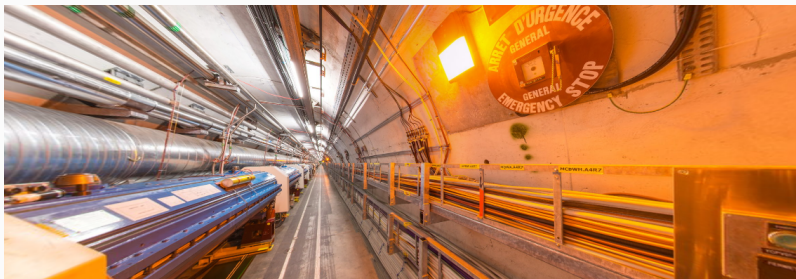


Figure: Gran colisionador de Hadrones (LHC). Foto: <https://home.cern/resources/360-image/accelerators/virtual-tour-lhc>

Dentro del LHC...

- Existen diferentes experimentos en forma de detectores, por ejemplo ATLAS, CMS o Alice cada uno de los cuales esta interesado en la detección de un proceso particular

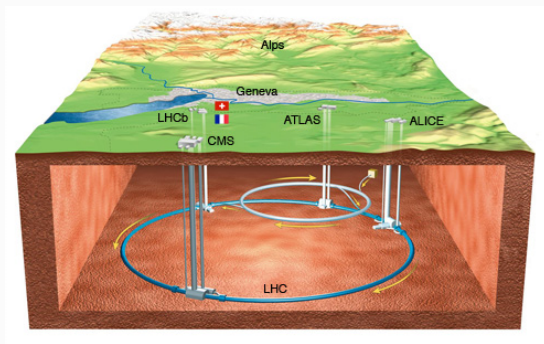


Figure: Geometría del LHC. Foto:

<https://lhcb-public.web.cern.ch/en/Detector/Detector-en.html>

LHCb

- El LHCb es un experimento que forma parte del LHC y está interesado en la detección de la desintegración de mesones b . Los cuales son un tipo de hadrón que esta formado por un quark con carga de color *bottom*. Además el experimento también esta diseñado para mediciones muy precisas acerca de la *violación CP* [**LHCb performance**].

Meson b : Hadrón que esta formado por un quark con carga de color *bottom*

- Además el experimento también esta diseñado para mediciones muy precisas acerca de la *violación CP*

Configuración experimental

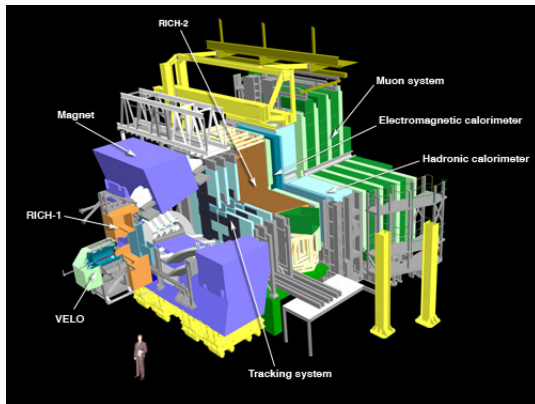


Figure: Detector LHCb. Foto:

<https://lhcb-public.web.cern.ch/en/Detector/Detector-en.html>

- LHCb es un espectrómetro de brazo único con una cobertura angular de aproximadamente 15 mrad a 300 mrad en el plano. La elección de la geometría del detector es dada por el hecho de que a altas energías la producción de b^- y b^- hadrones es altamente correlacionada, de manera que están predominantemente producidas de la misma forma hacia adelante o hacia atrás, es decir que no se requiere de una forma simétrica del detector, tal como pasa con otros experimentos (CMS, Atlas) sino que es suficiente con cubrir uno de los lados. Podemos observar el diseño del LHCb en la figura 3

Identificación de cada partícula

- La identificación de partículas esta dada por cuatro diferentes detectores: el sistema del calorímetro, los dos detectores RICH y la estación de muones.
- Por ejemplo, la detección de partículas neutras esta basada en la información proporcionada por los 4 componentes que forman el calorímetro: ECAL (calorímetro electromagnético), HCAL (calorímetro de hadrones), SPD (Scintillator Pad) y PS (Pre-Shower). Un calorímetro, es un dispositivo conocido desde hace muchos años, su función es determinar la energía en forma de calor suministrada o recibida por las colisiones. De esta manera, en función de la cantidad de energía detectada se pueden identificar distintas partículas producto de las colisiones.

Sistema calorímetro

- El principal rol del calorímetro en términos de la identificación de las partículas es proveer el reconocimiento de fotones, electrones y piones.
- La identificación de las partículas esta basada en la información proporcionada por los 4 sistemas del calorímetro. (Entre ellos tenemos un calorímetro electromagnético ECAL). El sistema de calorímetro mide la energía depositada de cada partícula en los diferentes subcomponentes, esto permite construir una función de probabilidad likelihood utilizando los cientos de datos proporcionados por los detectores. Con estas funciones likelihood (que es una función que mide la probabilidad de que un modelo se ajuste de la mejor forma a una serie de datos) se pueden identificar los fotones y los piones.

Identificación de electrones

- La identificación de los electrones en el sistema de calorímetro utiliza información de los sistemas ECAL, PS y HCAL. El procedimiento para combinar estas diferentes fuentes de información son basadas en el mismo proceso, construir funciones likelihood para cada detector. De esta manera podemos obtener gráficas como la siguiente:

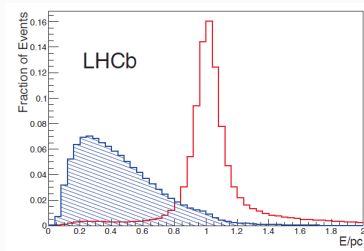


Figure: Distribución para el ECAL para los electrones (rojo) y los hadrones (azul) (Imagen recopilada de: [LHCb performance])

- La distribución de los hadrones fue hecha utilizando piones y kaones del decaimiento de mesones D^0 . Esto nos permite estudiar distintos temas como la violación de la simetría CP, además como el reciente descubrimiento de la ruptura de la universalidad leptónica.

El detector de BES III

BES III

- El **BES III (Beijing Spectrometer III)** es un experimento de física de partículas en el BEPC II (Beijing Electron-Positron Collider II) en el IHEP (Institute of High Energy Physics).
- Se investiga la física del quark charm y del lepton tau
- Se hacen pruebas sobre QCD (Quantum Chromodynamics).
- Se busca física más allá del Modelo Estándar.

Componentes de BES III

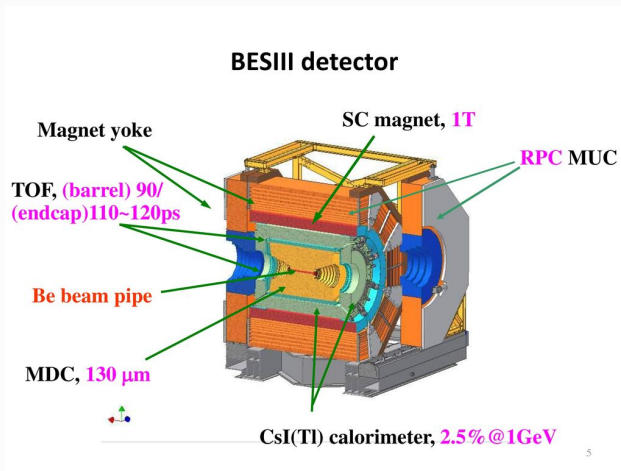


Figure: Diagrama del detector BES III. (Ming Shao, <https://slideplayer.com/slide/12849911/>)

Componentes de BES III

- 1 Un **magneto** superconductor solenoidal con un campo central de $1.0 T$. (Para hacer que las partículas se dirijan a los dispositivos del detector) → **Imán**
- 2 Una **cámara de multihilos** (multilayer drift chamber) de Helio gaseoso. (Para medir el momento y estimar la trayectoria) → **Aparato de rastreo**
- 3 Un **calorímetro** de cristal $CsI(Tl)$. (Para medir energía y posiciones) → **Calorímetro**
- 4 Un sistema de **tiempo de vuelo** (Time-of-flight). → **Método de identificación**
- 5 Una **cámara de muones**. (Para medir la posición de la partícula a un tiempo dado e identificar muones) → **Identificador de partículas**

Componentes de BES III

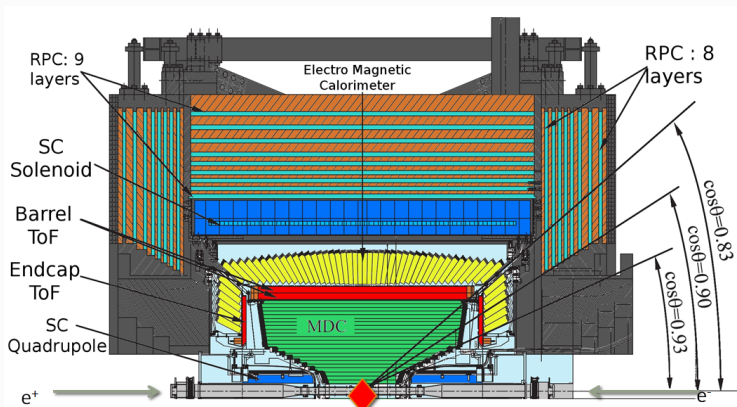


Figure: Diagrama del detector BES III en perspectiva lateral. (BESIII Experiment, <http://english.ihep.cas.cn/bes/doc/2124.html>)

La cámara de multihilos (MDC)

- La MDC se usa en BES III para reconstruir las trayectorias de las partículas cargadas producidas en las colisiones.
- Sirve para extrapolar sus trayectorias hacia otros subdetectores externos.
- Sirve para determinar su momento.

La cámara de multihilos (MDC)

- La MDC se compone de dos cámaras, la interna y la externa.
- Las dos caras se unen en las placas de los extremos y comparten un gas (Helio) en su volumen.
- La MDC es una cámara multihilos de células pequeñas. Cada cable sensor está rodeado por 8 cables de campo, formando así una célula.
- La cámara está compuesta por 43 capas de cables sensores que, a su vez, están acomodadas a modo de 11 súpercapas: 4 capas de cables sensores en las súpercapas del 1 al 10 y hay 3 capas en la última súpercapa.

La cámara de multihilos (MDC)

- La precisión depende de la dispersión múltiple de las trayectorias cargadas por causa de los materiales que conforman las cámaras y por la resolución misma de cada cable sensor.

La cámara de multihilos (MDC)

- Una cámara de hilos funciona gracias a la ionización.
- La partícula cargada viaja a través del gas de la cámara, ionizando los átomos del gas en el proceso.
- Los átomos ionizados sienten el campo eléctrico de los cables de campo y viajan hacia el cable sensor.
- Con la velocidad y el tiempo que tarda en llegar al sensor, se puede calcular la posición de la partícula cargada.
- Al colocar diversas cámaras de hilos juntas, se puede reconstruir la trayectoria de la partícula.
- La cámara de multihilos sigue una premisa idéntica.

El sistema de tiempo de vuelo (TOF)

- El TOF consiste en un barril de dos capas. Similar a un cilindro hueco con radio $r \in (a, b)$ donde $0 < a < b$ y que tiene tapas en los extremos que se encuentran en el eje perpendicular al plano de la circunferencia.
- Cada capa del barril tiene 88 plastic scintillation counters.
- Un *scintillation counter* de plástico, es un instrumento para detectar y medir radiación ionizante. Este dispositivo se compone de
 - 1 Un scintillator, que genera fotones al recibir radiación.
 - 2 Un fotomultiplicador, que convierte fotones en señales eléctricas.
 - 3 Los mecanismos electrónicos necesarios para procesar la señal.

El calorímetro electromagnético

- 1 La interacción de la partícula incidente con el calorímetro produce una cascada de partículas secundarias.
- 2 Las partículas tienen cada vez menos energía.
- 3 Eventualmente ya no queda suficiente energía para producir más partículas y se dice que se *absorbe* la partícula original.

El calorímetro electromagnético

- Para energías superiores a 1 GeV , los electrones producen fotones por bremsstrahlung. Los fotones producen electrones y positrones por medio de la producción de pares y la cadena sigue.
- Cuando la energía de los electrones es suficientemente baja, se disipa por ionización y excitación y no por medio de la generación de otras partículas. Mientras que los fotones pierden energía por medio del efecto fotoeléctrico y la dispersión de Compton.

El calorímetro electromagnético

- Independientemente del mecanismo, se va a producir una excitación en los componentes del calorímetro.
- La temperatura del objeto se va a incrementar.
- Se obtiene el calor producido en el proceso: que es la energía absorbida por el calorímetro.

El identificador de muones

- El identificador de muones de BES III se construye con resistive plate chambers (RPCs) insertadas en placas de acero.
- Con los impactos en el contador de muones, las trayectorias reconstruidas con la MDC y la energía medida en el calorímetro, se identifican muones con un momento bajo.

El identificador de muones

- Una RPC consiste en dos placas paralelas con electrodos de alta resistividad.
- Hay una región con un gas entre las placas.
- Se aplica una alta tensión entre las placas.

El identificador de muones

- 1 Cuando una partícula cargada pasa por la zona con el gas, ioniza a las moléculas del mismo y crea pares ion-electrón.
- 2 Los electrones liberados viajan hacia el ánodo (polo positivo) bajo la influencia del campo eléctrico.
- 3 Como los electrodos están hechos de un material resistivo, la avalancha de electrones no produce una señal.
- 4 Lo que produce la señal es el movimiento de las cargas en la zona con el gas.

REFERENCIAS:

- 1 lorentz DAS, A. (2013). *Lectures on Electromagnetism*. World Scientific. Second edition.
- 2 cherenkov ALAEIAN, H. (2014). *An Introduction to Cherenkov Radiation*. Recuperado el 26 de junio del 2021 de <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaedian2/>.
- 3 CERN. (s.f.). *How a detector works*. Recuperado el 20 de junio del 2021 de <https://home.cern/science/experiments/how-detector-works#:~:text=Accelerators%20at%20CERN%20boost%20particles,made%20to%20collide%20inside%20detectors.&text=Tracking%20devices%20reveal%20the%20path,pin%20down%20a%20particle%27s%20identity>.
- 4 LHC definition "The Large Hadron Collider." CERN, 21 June 2021, home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider. Accessed 23 June 2021.
- 5 Higgs Gelmini, Graciela B. "El boson de Higgs." arXiv preprint arXiv:1407.1741 (2014).

- 6 LHCb performance LHCb Collaboration. "LHCb detector performance." *International Journal of Modern Physics A* 30.07 (2015): 1530022.
- 7 Standard model Gaillard, Mary K., Paul D. Grannis, and Frank J. Sciulli. "The standard model of particle physics." *Reviews of Modern Physics* 71.2 (1999): S96.
- 8 Gauge Gross, David J. "Gauge Theory—Past, Present and Future." *Chinese Journal of Physics* 30.7 (1992): 955.
- 9 WIKIPEDIA. (s.f.). *BES III*. Recuperado el 21 de junio del 2021 de https://en.wikipedia.org/wiki/BES_III
- 10 LI, W.-D., MAO, Y.-J., & WANG, Y.-F. (2009). *Chapter 2: The BES-III Detector and Offline Software*. *International Journal of Modern Physics A*, 24(supp01), 9–21.
doi:10.1142/s0217751x09046424
- 11 THE BESIII COLLABORATION. (2010). *Design and Construction of the BESIII Detector*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and*

Associated Equipment, 614(3), 345-399. doi:
10.1016/j.nima.2009.12.050

- 12 FERREIRA, IX-B HERRERA, J VILLASENOR, LAURA. (2005). *The Drift Chambers Handbook, introductory laboratory course (based on, and adapted from, A H Walenta's course notes)*. Journal of Physics: Conference Series. 18. 346. 10.1088/1742-6596/18/1/010.
- 13 Wikipedia. (s.f.). *Scintillation counter*. Recuperado el 23 de junio del 2021 de https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_counter
- 14 FABJAN, C. W. & GIANOTTI, F.. (2003). *Calorimetry for Particle Physics*.
- 15 VINCENT FRANÇAIS. (2017). *Description and simulation of the physics of Resistive Plate Chambers*. Nuclear Experiment [nucl-ex]. Université Clermont Auvergne, 2017. English. ffNNT : 2017CLFAC035ff. fftel01727712f

IMÁGENES:

- 1 VIRTUAL TOUR OF THE LHC | CERN. Home.cern, 23 Junio 2021, home.cern/resources/360-image/accelerators/virtual-tour-lhc
- 2 LHCb - LARGE HADRON COLLIDER BEAUTY EXPERIMENT. Cern.ch, 2021, lhcb-public.web.cern.ch/en/Detector/Detector-en.html
- 3 MING SHAO. Recuperado el 14 de julio del 2021 de <https://slideplayer.com/slide/12849911/>
- 4 BESIII EXPERIMENT. Recuperado el 14 de julio del 2021 de <http://english.ihep.cas.cn/bes/doc/2124.html>
- 5 UNIVERSITY OF MÜNSTER. Recuperado el 16 de julio del 2021 de <https://www.uni-muenster.de/Physik.KP/AGKhoukaz/en/besIIIgroup.html>