イロト 不得 とくき とくきとう

1/57

# Experimentos en física de partículas y nuclear

Física Nuclear y subnuclear

12 de septiembre de 2023

## Partículas cargadas

- Interacción coulombiana
- Electrones o el núcleo
- Depositando energía
- Sufriendo dispersiones

#### Partículas cargadas



Figura: Esquema del paso de partículas a través de la materia

#### Distribución

- Suceden múltiples y pequeñas dispersiones
- Tenemos una distribución en energía y ángulo para las prtículas que salen.
- Rango R<sub>0</sub>

Grosor

$$x_{\rho} = x \rho [gr/cm^2] \tag{1}$$

イロト 不得 トイヨト イヨト 二日

4 / 57



Una fracción sale, otra es "atrapada"
 Camino libre medio

$$dN = -N(x)\mu dx$$
  
 $N(x) = N(0)e^{-\mu x},$ 

<ロト < 部 > < 言 > < 言 > 言 の < で 5/57

### Partículas cargadas pesadas

- Colisiones inelásticas con los electrones (las más)
- Colisiones elásticas con el núcleo (las menos)
- Otros procesos posibles
  - Radiación Cherenkov
  - Reacciones nucleares
  - Bremsstrahlung



- Electrones y positrones
- El resto de leptones, hadrones y núcleos ligeros
- Núcleos pesados

#### Poder de frenamiento

#### Pérdidas por ionización



Figura: Poder de frenamiento másico para anti-muones en cobre como función de  $\beta \gamma = p/Mc$  Tomada de PDG: P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), to be published in Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

#### Bethe-Bloch

$$W_{max} = \frac{2m_ec^2\beta^2\gamma^2}{1+2\gamma\frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}$$

$$-\frac{dE}{dx} = (4\pi N_A r_e^2 m_e c^2) z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \times \left[\frac{1}{2} ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{l^2}\right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right]$$

<ロト < 回 ト < 巨 ト < 巨 ト 三 の Q () 9/57

#### Valores

- $\blacksquare$   $N_A$ ,  $r_e$ ,  $m_e$  y  $c 
  ightarrow K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$
- z de partícula incidente
- Z y A de los núcleos del medio
- **\square**  $\beta$  y  $\gamma$  de la partícula incidente
- I potencial de ionización

#### Ecuación de Bethe-Bloch compacta

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{l} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (2)$$

 $K = 0,3071 \ MeVmol^{-1}cm^2$ 

 $K/A = 0,3071 \ MeVgr^{-1}cm^2 \ (con \ A = 1gr/mol)$ 

#### Pérdida de energía total

$$\Delta E_{perdida} = -\rho \int_0^d \frac{dE}{dx} dx$$

イロト 不得 トイヨト イヨト 二日

13 / 57



Qué distancia recorre un protón de 10GeV de energía cinética en una barra de plomo de bastante grosor.

$$ho_{Pb} = 11,34 rac{gr}{cm^3}$$
  
 $m_p = 0.938 GeV/c^2$ 

#### Obteniendo valores relativistas I

$$\begin{split} \gamma = & \frac{E_T}{E_R} \\ = & \frac{E_K + E_R}{E_R} \text{ ya que } E_T = E_K + E_r \\ = & \frac{E_k + m_p c^2}{m_p c^2} \text{ para el protón } E_R = M_p c^2 \\ = & \frac{E_k}{m_p c^2} + 1 \text{ distribuyendo la fracción} \\ = & \frac{10 \text{ GeV}}{0,938 \text{ GeV}} + 1 = & \mathbf{10}, \mathbf{6609}. \end{split}$$

#### Obteniendo valores relativistas II

Para obtener  $\beta = 0,9963$ 

$$\gamma = rac{1}{\sqrt{1-eta^2}}.$$

#### Calculamos la pérdida

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -0,3071 \frac{MeVcm^2}{gr} (1)^2 \frac{82}{207} \frac{1}{(0,9963)^2} \\ \left[ ln \left( \frac{2(5,11e5eV/c^2)c^2(0,9963)^2(11,6609)^2}{820eV} \right) \right] \\ ln \left( \frac{2(5,11e5eV/c^2)c^2(0,9963)^2(11,6609)^2}{820eV} \right) = 12,033 \\ \text{El resto} \\ -\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -0,3071 \frac{MeVcm^2}{gr} (1)^2 \frac{82}{207} \frac{1}{(0,9963)^2} \left[ 12,033 - 0,9963^2 \right] \\ = -1,35309 \frac{MeVcm^2}{gr} \\ \end{bmatrix}$$

16 / 57

# Últimos detalles

$$\rho \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = (11,34\frac{gr}{cm^3})(1,3531\frac{MeVcm^2}{gr}) = 15,3441\frac{MeV}{cm}$$

$$R = \int_{E_0}^{0} \frac{dE}{\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle} = \int_{10GeV}^{0} \frac{dE}{15,3441 \frac{MeV}{cm}}$$
  
=  $\frac{1}{15,3441 \frac{MeV}{cm}} \int_{10GeV}^{0} dE = \frac{1}{15,3441 \frac{MeV}{cm}} (10GeV)$   
=  $\frac{10000MeV}{15,3441 \frac{MeV}{cm}} = 651,7162cm = 6,5171m.$ 

#### Dispersión múltiple: ángulos pequeños

$$\theta_{0} = \theta_{plano}^{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{espacio}^{rms}$$
(3)  
$$\theta_{0} = \frac{13,6MeV}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_{0}}} \left[ 1 + 0,038 ln \left( \frac{xz^{2}}{X_{0}\beta^{2}} \right) \right]$$
(4)

<ロト < 回 ト < 目 ト < 目 ト 目 の Q () 18/57

#### Longitud de radiación

- La distancia para la cual la energía del electrón se reduce en 1/e
- 7/9 del camino libre medio de fotones para producción de pares

$$X_0 = 716.4 \frac{gr}{cm^2} \frac{A}{Z(Z+1)\ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)}$$

#### Radiación Cherenkov



Figura: Cono de luz de Cherenkov. Imagen de dominio público realizada por Pieter Kuiper, tomada de https: //commons.wikimedia.org/wiki/File:Cherenkov2.svg.

#### Cono de luz Cherenkov

$$v = \beta c = \frac{c}{n},$$
$$v_{part} > \frac{c}{n}.$$
$$cos\theta_{C} = \frac{1}{\beta n}$$

(5)



- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Producciones de pares  $(E > 2m_ec^2)$

Detectores

#### Efecto fotoeléctrico

$$T_e = h\nu - I_B$$

#### Dispersión de Compton



Figura: Dispersión de Compton, el fotón es marcado por  $\lambda = 1/\nu$ . Imagen tomada de This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.

#### Relaciones dispersión de Compton

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)},$$

$$T_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos\theta)}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)}$$
(6)

Límite de Compton

$$T_{max} = h\nu \left(\frac{2\gamma}{1+2\gamma}\right) \tag{7}$$

#### Producción de pares

- Fotón crea un par electrón-positrón
- Solo puede suceder dentro del medio
- Conservación de la energía y el momento
- Mínimo de energía de  $2m_ec^2$

#### Camino libre medio para producción de pares

$$X_{pares} = \mu_{pares}^{-1} pprox rac{9}{7} X_0$$

¿Qué sucede con el positrón después?

#### Coeficiente de absorción

 $\mu = \textit{n}\sigma$ 

#### Detectores de ionización

- Funcionan en el mismo rango de Bethe-Bloch
- Se aplica un campo eléctrico
- Medio ionizable y químicamente estable (bajo potencial de ionización)
- Eletrodos: ánodo y cátodo

#### Detectores de ionización



Figura: Regiones de operación de los detectores de ionización. Imagen adaptada de la original de Doug Sim con licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

#### Contadores de ionización

- En la región de ionización
- Poco sensible a los cambios de voltaje
- Sin amplificación
- Requiere filtros
- Respuesta rápida

#### Contadores proporcionales

- Región proporcional
- Campos eléctricos intensos  $\sim 10^4 V/cm$
- $\blacksquare$  Hay amplificación  $\sim 10^5$

#### Cámaras multilámbricas

- Diseñadas por George Charpak
- Alambres de  $10 50 \mu m$  separados por 2mm.
- Cátodos a 1*cm* por encima y debajo

Paso de partículas a través de la materia

Detectores

#### Cámara multialámbrica



Figura: Líneas de campo en cámara multialámbrica. This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 ■ Unported license

#### Detector Geiger-Muller

- Funciona en el límite
- Produce una descarga por cada partícula que produce una ionización

#### Detector Geiger-Müller



Figura: Detector Geiger-Müller. This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.

#### Detectores de centelleo

- Excitaciones de los átomos del material
- Al regresar al estado base: emiten un fotón
- Centelladores orgánicos: antraceno, naftaleno
- Centelladores inorgánicos: Nal, Csl dopados

#### PMT



Figura: Tubo fotomultiplicador. Imagen de Wiso con licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

¿Usos de centelladores?

#### Detector Cherenkov

- Partículas cargadas, pero el proceso no es ionización
- Viaja más rápido que la luz *en el medio v > c/n* o β > 1/n.

• 
$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

#### Detectores semiconductores

- Semiconductores
- Detectores de ionización
- 200 300µ*m* de grosor

#### Calorímetro

- Las partículas depositan toda su energía cinética
- Centelladores, contadores de ionizción o proporcionles
- Fotones: producción de pares
- Hadrones: procesos fuertes
- Problemáticos: neutrinos y  $\pi^0$

#### Aceleradores



Figura: Foto del Tevatrón en Fermilab. Imagen de Fermilab, Reidar Hahn, del dominio público



- De forma natural tenemos poca variedad
- Partículas de mayor masa requiere mayor energía
- ¿Límite?: posiblemente  $\hbar c/G_g \approx 1.22 \times 10^2 0 eV/c^2$

#### Estudios de estructura

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad \qquad \frac{E_{kin}}{m_p c^2} = \frac{1}{2d^2} \left(\frac{\hbar}{m_p c}\right)^2$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\hbar}{p} \qquad \qquad \bar{\lambda} \leq d \qquad \qquad \bar{\lambda}_p = \frac{\hbar}{m_p c} = \frac{\hbar c}{m_p c^2}$$

$$p \geq \frac{\hbar}{d} \qquad \qquad \bar{\lambda}_p = \frac{197,3 \text{ MeV fm}}{938 \text{ MeV}} = 0,210 \text{ fm}.$$

$$E_{kin} = \frac{p^2}{2\pi} = \frac{\hbar^2}{2\pi c^2} \qquad \qquad \frac{E_{kin}}{m_p c^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\lambda}_p}{d_p}\right)^2 = 0,02$$

$$m = 2m_p = 2m_p d^2$$
  $m_p c^2 = 2 \langle d \rangle$ 

#### Aceleración

#### $\bullet E = Fd = q|E|d = qV$



Figura: Foto de un cinescopio de televisión. Imagen de JMPerez commonswiki con licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

#### Conceptos útiles

 Flujo: la cantidad de partículas que cruzan un área unitaria perpendicular al eje del haz por unidad de tiempo

$$\mathcal{F}=n_i v, \qquad (8)$$

$$dN = \mathcal{F} N \sigma d\Omega$$

 Luminosidad: la cantidad de eventos por unidad de sección eficaz que tienen lugar en una sección de encuentro del haz por unidad de tiempo

$$\mathcal{L} = \frac{\mathcal{N}_s}{\sigma_{tot}} = \frac{N_1 N_2 f}{A},$$

46 / 57

#### Generadores elestrostáticos



Figura: Esquema de un generador Van de Graff. Tomado con fines educativos de Henley



- Llega a 30 40*MeV*
- Más energías con un Van de Graff tandem
- Un tandem en el IFUNAM

Paso de partículas a través de la materia

Detectores

#### Acelerdores lineales



Figura: Foto del acelerador lineal de Stanford, 3 km de longitud. Imagen de Victor Blacus en dominio público

#### Linac



Figura: Esquema de un acelerador lineal. Imagen adaptada de Chetvorno con licencia CC0



- Lentes magnéticas
- Dipolos pueden deflectar
- Cuadrupolos lo más parecido a una lente óptica

$$\overrightarrow{F} = q\left(\overrightarrow{E} + rac{1}{c}\overrightarrow{
u} imes \overrightarrow{B}
ight)$$

#### Ciclotrón



Figura: Esquema de funcionamiento de un ciclotron. Imagen de Ernest O. Lawrence - U.S. Patent 1,948,384, de dominio público

#### Resonancia y energía

$$\frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$
$$\omega = \frac{v}{r}$$
$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{q}{m}\right) B$$

~D

. .

$$T_{max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 R^2$$
$$= \frac{1}{2}m\left(\frac{qB}{m}\right)^2 R^2 = \frac{(qBR)^2}{2m}$$

<ロト < 団ト < 巨ト < 巨ト < 巨ト 三 の Q (や 53 / 57

#### Sincrotrón



Figura: Modelo de un acelerador sincrotrón. Imagen de EPSIM 3D/JF Santarelli, Synchrotron Soleil

#### Método Monte Carlo

- Tratamiento estadístico en experimentos
- Integración numérica
- Optimización

## Áreas por Monte Carlo



Figura: Ejemplo del cálculo de una área con Montecarlo. Imagende Mysid Yoderj con licencia Creative Commons CC0 1.0 UniversalPublic Domain Dedication

#### Generando a partir de distribución estadística

Valores al azar pero bajo cierta distribución



Figura: Ejemplo de integración Monte Carlo. Imagen de Femizban con licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0

#### Números pseudo-aleatorios

- Para acercarnos a la naturaleza necesitamos lo más aleatorio
- Las computadoras no pueden generar números aleatorios
- Mecanismos pseudo-aleatorios
- Complementos verdadero-aleatorios

#### Paso de partículas a través de la materia

- Los valores calculados por pedazos
- Propagación de la partícula por diversos procesos
- Comparación con el experimento