

# 1. Información de las prácticas

## 1.1. Datos del estudiante

- Daniel Vázquez Lago
- DNI: 35587279T
- Calle Paseo Matutino, N<sup>o</sup>13, Portal 4, 4<sup>o</sup>I. Ponteareas, Pontevedra
- E-mail: danielvazquezlago@gmail.com/daniel.vazquez.lago@rai.usc.es
- Teléfono de contacto: +34 698 17 06 00

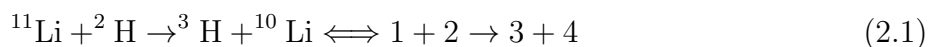
## 1.2. Datos de empresa y tutores

Prácticas realizadas en el IGFAE (Instuto Galego de Física de Altas Enerxías) perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela con página web: <https://igfae.usc.es/igfae/>, número de teléfono: +34 881814033 ext: 14033 y correo electrónico: [igfae@usc.es](mailto:igfae@usc.es), bajo la supervisión del tutor Miguel Lozano González, investigador en el IGFAE, y la tutora académica Beatriz Fernández Domínguez, responsable del grupo de Física Corpuscular y Aplicaciones (FICA). Las prácticas fueron realizadas entre el día 5 de Junio y el 25 de Julio del 2023 en horario de 10:00 a 14:00, realizando un total de 150 horas de trabajo.

# 2. Memoria de Actividades

## 2.1. Objetivos

El objetivo principal de estas prácticas es reproducir la respuesta real del detector ACTAR TPC para una reacción nuclear usando el lenguaje de programación C++ y apoyándose en la herramienta ROOT diseñada por el CERN. La reacción nuclear estudiada es la siguiente:

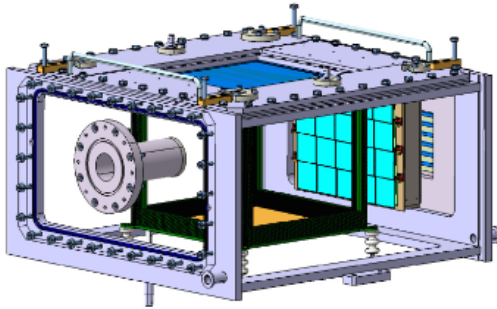


El motivo por el cual esta reacción es de interés para la física nuclear moderna es que nos permitirá comprender mejor la estructura atómica del litio 10, un isótopo muy inestable. Conocer con rigor la estructura para isótopos inestables es fundamental en la física nuclear, ya que nos permitirá crear mejores modelos para las excitaciones de los átomos (así como las de los estados fundamentales).

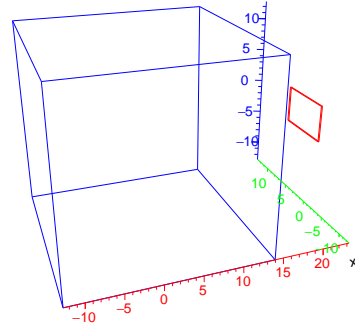
La estructura atómica podrá hallarse en función del ángulo de salida y de las energías  $(\theta, T)$  de las partículas pesadas. Consecuentemente es de vital importancia no solo tener los mejores detectores, si no poder predecir cuales cual es la mejor estructura para el detector (tamaño, grosor de los detectores de silicio...). En esta simulación nos centraremos principalmente en el cálculo de la  $s(\theta)$  (o al menos en parte de ella) sin olvidarnos de algunas de las fuentes de incertidumbre de la energía mas importantes, como presentaremos a continuación.

## 2.2. ¿Qué es el ACTAR TPC?

El ACTAR TPC (Active TARGet and Time Projection Chamber) es un detector gaseoso activo <sup>1</sup> de reacciones nucleares. La estructura es la siguiente:



(a) ACTAR TPC



(b) geometría implementada

En nuestro caso vamos enviar isótopos de Litio 11 hacia el gas de deuterio hacia un detector de silicio. A medida que el isótopo vaya avanzando perderá energía (regido por la **ecuación de Bethe-Bloch**), pudiendo chocarse con un deuterio en cualquier parte. Una vez choque el litio 11 se producirá la reacción mencionada antes y otras (es posible que se produzca litio 12 de la reacción, o que no llegue a producirse la reacción).

En función de la reacción que ocurra la partícula se emitirá con un ángulo (incluso si se produce la misma reacción, se emitirán con ángulos diferentes, ya que puede que se exciten) y con energías diferentes. En función de la energía podremos detectar que partícula (y su excitación) ha sido emitida, mientras que el ángulo dependerá de la estructura atómica. Al final del detector habrá detectores de silicio, que nos permitirán medir la energía con la que llegan. Es fundamental entender que los detectores no miden todos los ángulos de salida, si no que se encuentran en una región pequeña del centro, de tal modo que las partículas ligeras (tritio, hidrógeno, deuterio) no se detectan. A la hora de hacer la simulación esto será importante, ya que no todos los litios emitidos son detectados. En función del ángulo, la energía y la distancia recorrida, puede que sean detectados o no.

Por otro lado dentro de la caja, donde se encuentra contenido el gas, estará un campo eléctrico (región que llamamos *pad*) que nos permitirá medir el movimiento de los átomos a través del gas, ya que este excitará los electrones del gas, que debido al campo eléctrico, se moverán hacia unos detectores formados por condensadores, de tal modo que podremos no solo detectar el recorrido, si no que podremos saber el instante exacto en el que se detectaron los electrones. De este modo, a través de la ecuación correspondiente, podremos no solo saber el punto de la colisión, si no que también el recorrido de la partícula a través del tiempo. Lógicamente existirá una región entre el pad y el detector donde no existirá campo eléctrico, necesaria para poder evitar las interacciones entre el campo eléctrico del pad (3000 V) y la

---

<sup>1</sup>un detector gaseoso activo quiere decir que el gas actúa dentro de la reacción.

diferencia de potencial de los detectores de Silicio (150V). Una distancia suficiente entre estos sería de 3-5cm, pero como el detector real tiene, además, detectores de las partículas ligeras (en nuestro caso tritio), esta distancia es ampliada hasta unos 15 cm (aproximadamente).

El grosor de los detectores también es muy importante, ya que como vamos a ver, lo que nosotros medimos en el laboratorio es la energía que pierden nuestros átomos en los detectores de silicio. Unos detectores delgados harán que pasen ciertas partículas, por lo que obtendremos para diferentes ángulos mismos valores de la energía (ya que este tendrá un “máximo detectable”). Un tamaño de 1.5 mm será más que suficiente para la partícula pesada.

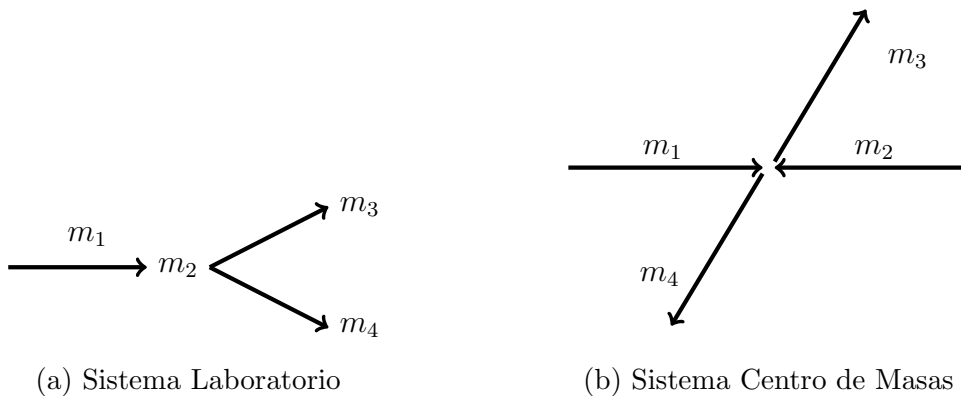
## 2.3. Trabajo Realizado

### 2.3.1. Cálculo de la cinemática

La primera tarea realizada fue calcular la cinemática de las partículas. Una buena aproximación de la colisión se puede hacer suponiendo una colisión elástica dentro de la relatividad especial, ya que debido a las altas energías y la baja masa de las partículas, usar la relatividad especial se hace obligatorio. Una mejor sería suponer que existe una energía perdida debido a la excitación de protones/neutrones en el núcleo de los átomos.

Resolver la cinemática de la colisión consiste en calcular las energías de las diferentes partículas. El sistema de referencia de más interés es el nuestro, que llamamos laboratorio (figura 2.2a), y es aquel en el que la partícula del litio 11 incide con una energía  $T_{beam}$  sobre la partícula de deuterio que suponemos quieta. El otro sistema de referencia de interés es el sistema centro de masas (figura 2.2b).

Tras un cálculo podemos obtener la energía cinética de las partículas y su ángulo de salida (respecto el eje de incidencia) en el sistema laboratorio a partir de dos parámetros: el ángulo de salida de la partícula en el sistema de centro de masas, y de  $T_{beam}$ . Dado que este último es un valor conocido, podríamos obtener  $\theta_4$  y  $\theta_3$  a partir de  $T_3$  y  $T_4$ .

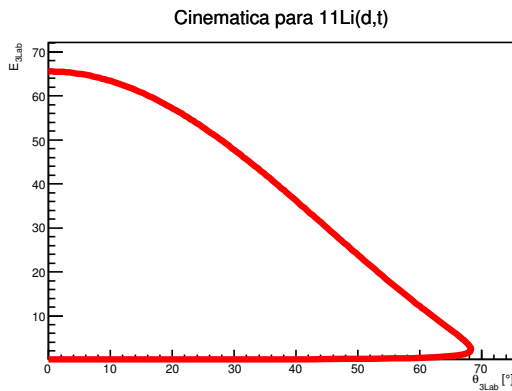


### 2.3.2. Introducción a C++

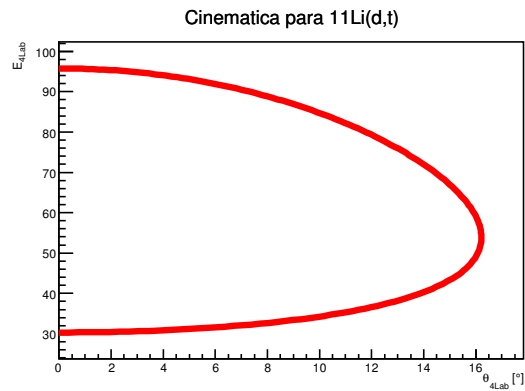
Nuestro segundo paso fue aprender la sintaxis básica de C++ y ROOT. Para esto realizamos algunos programas básicos, que consistían en realizar histogramas y algunas gráficas; así como la definición de variables y de funciones.

### 2.3.3. Implementación de la simulación

Una vez acabamos de introducirnos a C++ empezamos a implementar la simulación. Lo primero que hicimos fue comprobar si los cálculos de la cinemática realizados eran correctos. Para la implementación de estas ecuaciones se crearon diferentes clases, modularizando el programa principal, de tal modo que matuvimos bien organizadas las diferentes funciones. Dado que no conocemos el ángulo con el que van a salir las partículas, creamos un bucle for para recorrer todos los posibles ángulos. Así podemos ver que:



(a) cinemática tritio



(b) cinemática litio 10

Una vez comprobamos que la cinemática se calculó correctamente, podemos comenzar a construir la simulación. Esto implica implementar a la colisión los diferentes factores a tener en cuenta. Por orden fueron:

- En primer lugar tenemos que reformar la manera de obtener los ángulos. Dado que en la realidad no sabemos (aunque si podemos predecir) los ángulos con los que va a salir la partícula, lo que hacemos es crear una función aleatoria para el ángulo  $\theta_{CM}$  de la partícula pesada (partícula 3, litio 11). Es importante recalcar que el número de interacciones debe ser elevado.
- Lo segundo que tenemos que hacer es ver si el litio 11 que se emite en el punto de colisión llega. Como tampoco sabemos el punto exacto en el que van a reaccionar, también haremos aleatoria esta variable. Para saber si es detectado o no, basta con extender la trayectoria de la partícula (suponiendo que se mueve en una línea recta) y ver si llega al detector. Para esto hay que tener en cuenta las dimensiones del detector.
- También habrá que tener en cuenta las pérdidas de energía, ya que si la partícula llega con energía cero no podrá ser detectada. Para esto tenemos que implementar la ecuación

de Bethe-Bloch para la partícula incidente y para la partícula pesada dentro del detector de silicio. Siempre que la partícula llegue al detector con energía cero la partícula no podrá ser detectada, por lo que tendremos que incluir este factor. En la imagen 2.4 podemos ver la pérdida de energía de una partícula en función de la distancia.

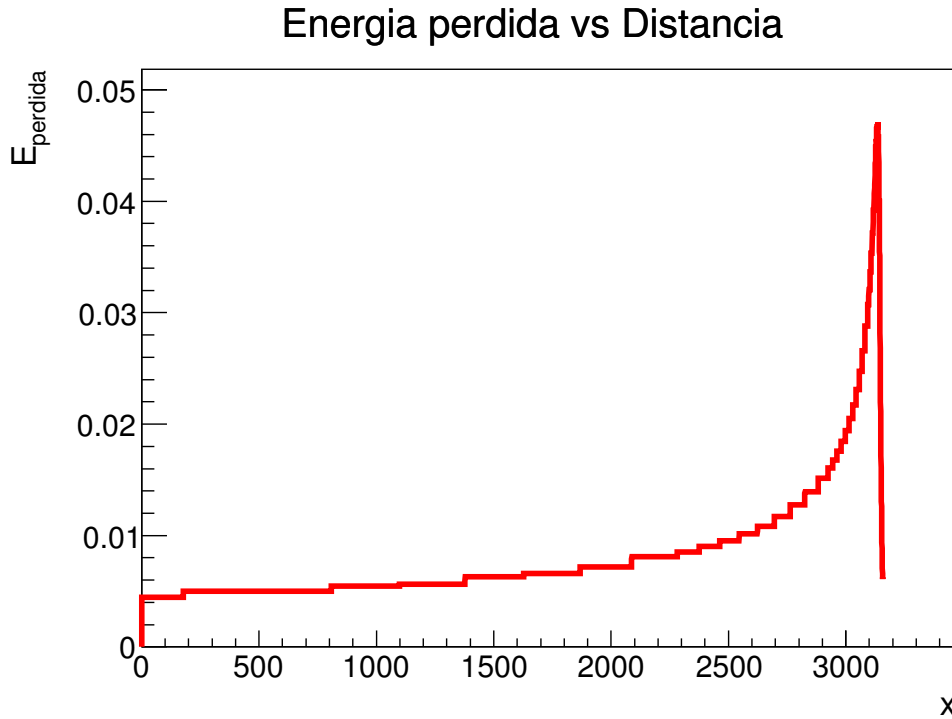


Figura 2.4: energía perdida frente a la distancia según la ecuación Bethe-Bloch.

Una vez acabamos con esto ya tendremos la simulación, en su versión más básica. Como esta es una simulación del experimento real, nosotros tendremos que volver a obtener, con los datos finales y medibles (energía pérdida en el silicio  $\Delta T$ , ángulo de la partícula 3) los datos que queremos obtener (energía al salir de la colisión de la partícula 3, ángulo de la partícula 3). Esto implicará una *reconstrucción* de la cinemática a partir de estos datos. En ese caso tendremos que incluir algún tipo de incertidumbre en la medida de la pérdida de energía dentro del silicio. Estas vendrán dadas por dos factores.

El primero de estos es considerar que la pérdida de energía es un proceso estadístico, por lo que dos partículas con la misma energía inicial no van a depositar la misma energía en el detector de silicio. El segundo es considerar la resolución de nuestros detectores de energía, ya que energías muy próximas no podrán ser distinguibles.

- Para incluir el fenómeno estadístico de la pérdida de energía tendremos que tener en cuenta la energía inicial y la distancia que va a recorrer por el medio. Para incluir la energía pérdida de un modo estadístico lo que haremos será lo siguiente: primero evaluaremos el rango de la partícula con la energía inicial ( $R_L$ ) (esto es, la distancia antes de que se pare la partícula) con su respectiva incertidumbre ( $u(R_L)$ ). Dado que la distancia que puede llegar a recorrer en el silicio es conocida ( $d = 1,5 \text{ mm}$ ) podremos evaluar cual es la distancia recorrida con una simple resta ( $R_{left} = R_L - d$ ). Luego

podremos evaluar  $u(R_{left})$  con la misma ecuación, de tal modo que podamos despejar  $u(d)$ . Con la incertidumbre y con  $d$  crearemos un nuevo valor  $d'$  como una gaussiana  $\mu = 1,5$  y  $\sigma = u(d)$ . Luego calcularemos  $R'_{left} = R_L - d'$ , pudiendo recuperar la nueva energía con la que sale del detector usando (conocido el rango y el medio, podremos calcular la energía inicial). Así luego solo tendremos que realizar la diferencia entre la energía entrante y la energía de salida para obtener la energía perdida ( $\Delta T$ ).

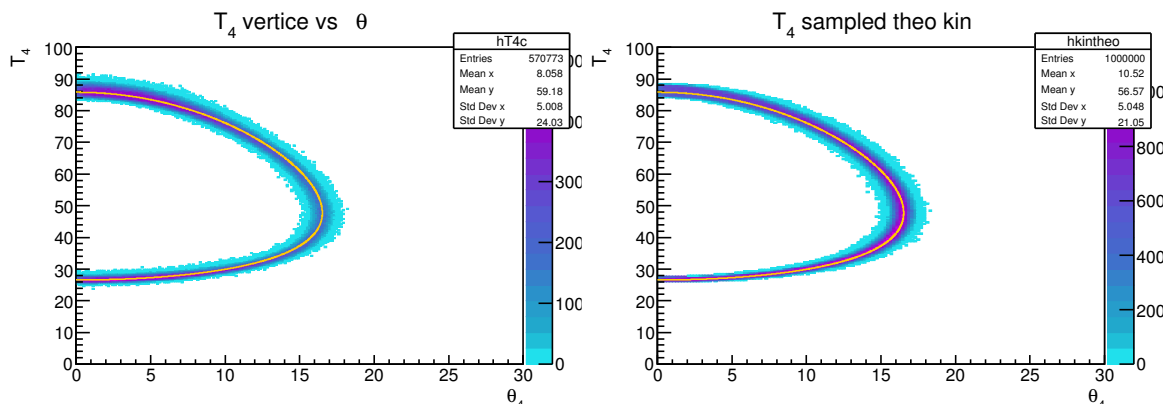
- La resolución debida a medir con detectores de silicio usando semiconductores p ha sido estudiado ampliamente por la física electrónica, por lo que simplemente usaremos datos ya tabulados para incluir. Con el grosor del detector de silicio (1.5 mm) podremos calcular la energía pérdida conociendo la energía inicial. De este modo tendremos la energía pérdida. Usando este dato como media, y  $\sigma$  dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{0,0213 \text{ MeV}}{2,35} \sqrt{E} \quad (2.2)$$

podremos obtener una  $\Delta E$  aplicando una gaussiana con dicha media y esa  $\sigma$  a través de la librería TRandom de ROOT.

Una vez tenemos todo esto ya tenemos una simulación del experimento mucho mas realista, donde podamos obtener los resultados tal y como los mediríamos en el laboratorio, y compararlos con los que obtenemos en la simulación. Idealmente ambos deberán coincidir, aunque como veremos, debido a los factores anteriores (resolución, pérdidas estadísticas) no se verificará. Como podemos ver en las figuras siguientes para dos distancias diferentes.

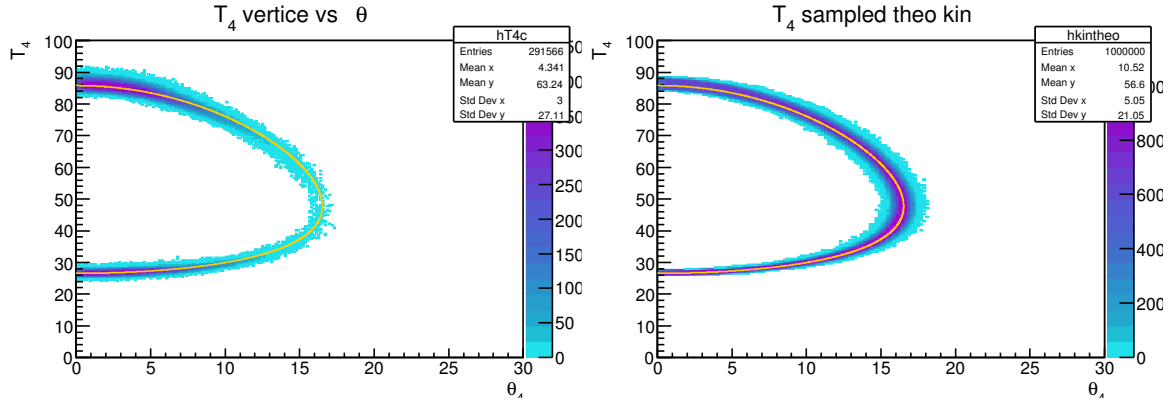
Se puede ver en la imagen para 5 cm [2.5a](#) y [2.5b](#) y en la imagen para 17 cm [2.6a](#) y [2.6b](#) que existe una diferencia real entre las colisiones “medidas” (las que llegan al detector, las llamadas reconstruidas) y las “realmente emitidas” (todas las que ocurren, creadas por la simulación), lo que era de esperar, y es una demostración de que la simulación implementa correctamente los pasos fundamentales anteriores. Además se puede ver que las partículas detectadas tienen una mayor dispersión respecto la línea amarilla, que es la *cinemática teórica* (que podemos comprobar que coincide con la imagen [2.3b](#)), lo que es correcto según hemos introducido.



(a) partículas reconstruidas para 5cm.

(b) partículas realmente emitidas para 5cm.

Figura 2.5: cinemáticas medidas vs reales emitidas para una distancia de 5 cm.

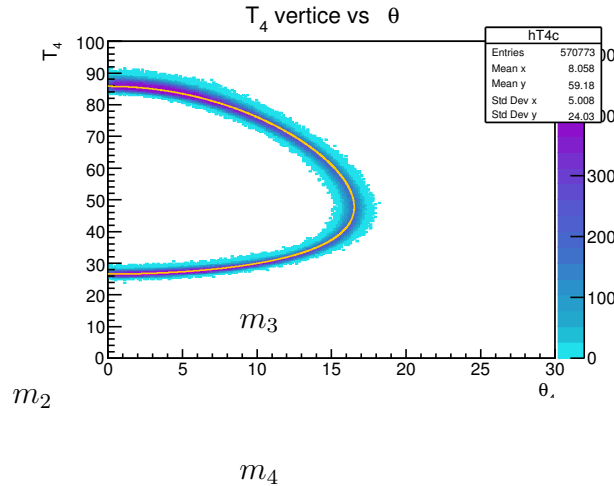


(a) partículas reconstruidas para 17cm. (b) partículas realmente emitidas para 17 cm.

Figura 2.6: cinemáticas medidas vs reales emitidas para una distancia de 17 cm.

## 2.4. Resultados

Como ya hemos dicho nos interesa reducir la incertidumbre de la parte angular lo máximo posible. La incertidumbre del factor ángulo, que es lo que estamos tratando de estudiar, está relacionada con la  $\sigma$  de la gaussiana que se forma para una determinada energía, por lo que en función de la energía de la partícula 4 tendremos una  $\sigma$  (y una  $s(\sigma)$ ). Sin embargo no todas los ángulos obtenidos para un rango de energías determinado se comportan de manera gaussiana, solo aquellas que se encuentran en la parte central, con ángulos grandes, tal y como podemos ver en la imagen



Entonces es fundamental tener las máximas medidas posibles de angulos grandes, para así obtener una  $\sigma$  con la incertidumbre lo mas pequeña posible. Para eso tenemos que hacer un estudio de la *eficiencia* del experimento, que es una relación calculada por ROOT a partir del número de partículas emitidas para un ángulo y el número de partículas *realmente* medidas.

A fin de maximizar la eficiencia, hemos tratado de calcular varias de estas gráficas para diferentes distancias entre el pad y el detector. Lógicamente cuanto mas cerca estén mejor se van a obtener los datos, ya que no estamos teniendo en cuenta el efecto del campo eléctrico.

En un estudio mas detallado deberíamos tenerlo en cuenta, interfiriendo el campo eléctrico del pad con el de los propios detectores de silicio/detectores de partículas ligeras. Por esa misma razón hemos estudiado distancias de hasta 17 cm e incluso 50 cm. Véase la imagen 2.7 para ver la eficiencia en función de la distancia.

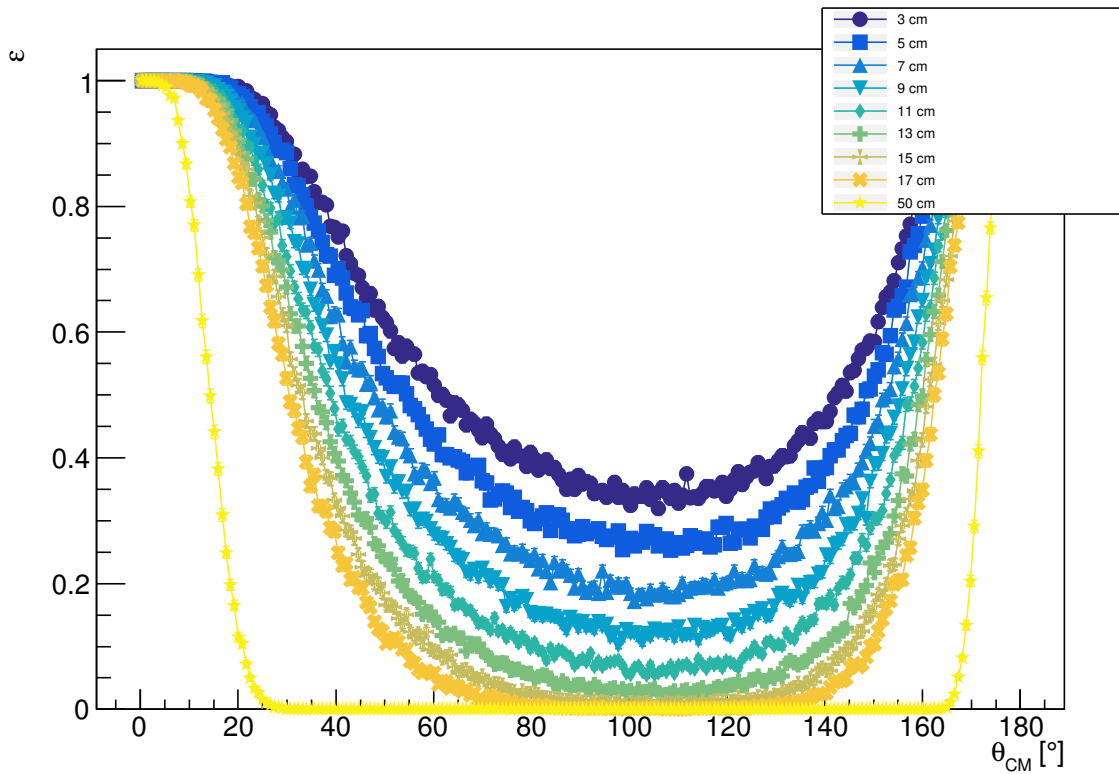


Figura 2.7: eficiencia en función de la distancia.

### 3. Conexión con el grado en física

Las asignaturas más relacionadas con estas prácticas son *Física nuclear y de partículas* y *Técnicas Experimentales IV*, ambas del 4º curso del grado. La relación que tiene esta práctica con la primera asignatura está, esencialmente, en la parte de las reacciones nucleares y su cinemática, una parte fundamental de dicha asignatura, la cual hemos podido implementar en un problema a la vanguardia científica, demostrando su validez. La relación con la segunda asignatura es clara, ya que hemos necesitado implementar histogramas y ciertas herramientas informáticas fundamentales en la asignaturas, así como conceptos relacionados con la física experimental (detectores de Silicio, estadística derivada de la colisión de partículas...) que también se ven en la misma.

### 4. Valoración personal

Mi valoración tras la realización de estas prácticas es muy positiva, ya que he podido conocer como funciona por dentro un grupo de investigación experimental, pudiendo ver de primera



mano cual es el poder de las herramientas informáticas y de simulación que existen hoy en día, para poder predecir el experimento e incluso mejorarlo sin necesidad de experimentar. Además de esto poder aprender un nuevo lenguaje de programación, tan útil en estos días como es C++, así como la herramienta ROOT para poder evaluar y rellenar histogramas, me parece fundamental para un físico.

Más allá de los conocimientos adquiridos, que es el motivo principal por lo que solicité estas prácticas, y los cuales, he de decir, han superado mis expectativas, me quedo con la experiencia de realizar un proyecto muy divertido, interesante y el cual me ha enseñado que la física nuclear e incluso la física experimental es mucho mas de lo que se valora en el ámbito académico.

## Dudas

Las dudas que tengo son las siguientes:

- Mencionar mejor cual es la distancia entre el pad y el detector, utilidad, razón de existir, estudio sobre ella.
- ¿Cuáles son las mejores ecuaciones que explicitar en el cálculo de la cinemática?
- ¿Conveniente poner la imagen de la pérdida de energía?
- ¿Imagen ampliando la región gaussiana?
- ¿Como era lo de la incertidumbre sigma relacionada con la incertidumbre global para el experimento? La razón por la que esto es importante es que está en el centro mismo del motivo de la creación de esta práctica.
- ¿Poner imagenes del fit de las gaussianas?
- Las partículas no se paran del todo en silicio ¿No?

Energías de excitación. De las variables  $\theta_4$  puedes obtener la energía de excitación. Para los mismos ángulos tendremos energías de excitación diferente. Dado que depende de  $\theta_4$  y  $\theta_4$ , dependemos de toda la incertidumbre de la energía y el ángulo. La sigma tiene que ver con la  $u_2(\theta_4)$  (contribución de esta parte a la incertidumbre total) (entre otras cosas).

Entre el pad y el detector hay una distancia (que tiene gas). ¿para que si idealmente sería conveniente hasta en la eficiencia? -¿para evitar la interacción entre los 3000 voltios del pad y el silicio a 150V, cambiando las direcciones del campo eléctrico.

Solo algunas partículas se paran. Eso es un problema, ya que solo medimos la pérdida de energía.

reconstrucción, mencionar mejor lo de las partículas reales detectadas.