

Detectores híbridos para visualizar partículas en educación secundaria

Anna Argudo, Rafael Ballabriga, David Corrons, Eugeni Graugés, Iolanda Huguet, Esther Pallares, Daniel Parcerisas, Hernan Pino, Francesc Salvat, Sonia Tarancon

Introducción a los detectores híbridos

Un detector híbrido es una matriz de elementos microscópicos sensibles a la radiación, cada uno de los cuales está conectado a su propia electrónica de procesado, en la que el sensor semiconductor y la electrónica de lectura están implementados en diferentes sustratos. El sensor realiza la conversión de la energía de la partícula a señal eléctrica y la electrónica de lectura se encarga del procesado (amplificación, comparación con un nivel umbral, digitalización) (ver Figura 1).

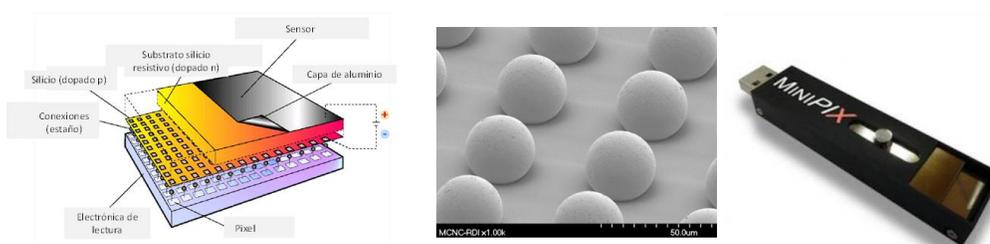


Figura 1. Ilustración de un detector híbrido (izquierda). Detalle de las interconexiones (centro). Detector MiniPIX con sensor Timepix2 utilizado, entre otros campos, en educación (derecha)

La tecnología de detectores híbridos se desarrolló en el CERN a finales de los años 80 y principios de los 90 para los detectores de trazas de los experimentos de colisionadores de partículas. Los detectores de trazas son los instrumentos más cercanos al punto de interacción y su misión es detectar e identificar las diversas partículas con carga eléctrica. La altísima densidad de trazas junto con una alta frecuencia de las colisiones en el LHC (Large Hadron Collider) hacen que el diseño de esos detectores sea un reto tecnológico. Los detectores de híbridos se utilizaron por primera vez en el experimento WA97 y, actualmente, los experimentos del LHC (ATLAS, CMS, ALICE y LHCb) están equipados estos detectores.

Las colaboraciones internacionales Medipix se crearon con el objetivo de diseminar la tecnología de detectores híbridos más allá de la física de altas energías. Algunos ejemplos (Figura 2)

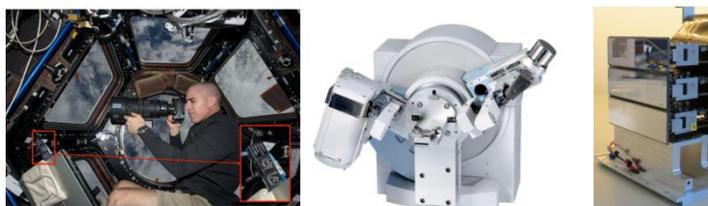


Figura 2. De izquierda a derecha: 1. Astronauta Chris Cassidy en la Estación Espacial Internacional donde un detector híbrido (Timepix) detecta la radiación en la capsula. 2. Instrumento de análisis de materiales por difracción de rayos X equipado con detectores

de aplicaciones en las que se han utilizado los distintos chips desarrollados son la radiografía médica, la inspección con rayos X, aplicaciones en sincrotrones y cristalografía, microscopía electrónica, análisis de materiales mediante difracción de rayos X, óptica adaptativa o dosimetría en el espacio.

La electrónica de lectura consiste en un amplificador de carga seguido de un discriminador que compara la señal depositada por la partícula con un nivel umbral. Un píxel individual solo registra la información de la partícula incidente cuando la energía depositada supera el nivel umbral. Esto significa que el

sistema de detección es inmune al ruido electrónico y permite que estos detectores sean adecuados para medir niveles de radiación muy bajos como la radiación natural o las señales de rayos cósmicos. En el sistema de detección basado en el chip de lectura Timepix, desarrollado por la colaboración Medipix2, la energía depositada por cada partícula se mide registrando el número de ciclos de reloj (que oscila a 100MHz) en el cual la amplitud del amplificador de carga está por encima del nivel de umbral. Esa medida es proporcional a la energía depositada.

La alta segmentación del detector lograda por los dispositivos Timepix gracias a sus píxeles de 55 micrómetros y los efectos relacionados con la inducción de señal depositada en el detector en los electrodos de colección de los píxeles, permiten identificar diferentes especies de partículas en el entorno de radiación, según la interacción de la partícula con el material detector que es característica para cada tipo de partícula (ver Figura 3). Esta característica hace que el dispositivo sea único en campos como la dosimetría de campos de radiación, especialmente en el espacio o en el ámbito educativo.

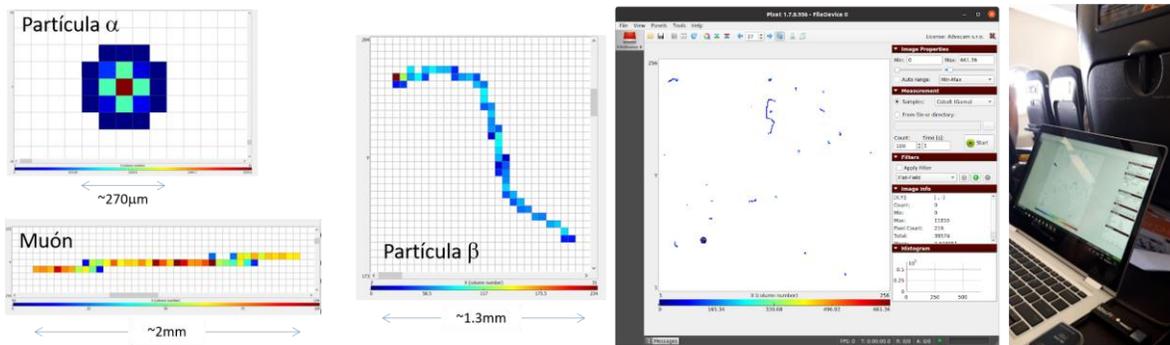


Figura 3. “Huellas” que diferentes partículas dejan en el detector semiconductor de silicio conectado al chip de lectura Timepix (izquierda), visualizadas con el programa Pixet PRO (centro). Detección de la radiación en un avión con un dispositivo Minipix (derecha)

Uno de los sistemas de lectura es el sistema Minipix (Figura 1), comercializado por la empresa Advacam, que tiene una licencia para comercializar el chip Timepix. El sistema es muy compacto, se puede conectar a un ordenador mediante el puerto USB y genera resultados en tiempo real. Un ejemplo se muestra en la Figura 3 donde se puede ver el detector adquiriendo datos en un avión. La imagen muestra una imagen tomada con un minuto de tiempo de adquisición a una altitud de ~5000 m.

Desde la sección de microelectrónica del CERN, se han impulsado diferentes iniciativas para promover la utilización de estos detectores en el aula, como la iniciativa ADMIRA (Actividades con Detectores Medipix para Investigar la Radiación en el Aula) en la que junto al CERN participan la Universidad de Barcelona y 25 escuelas e institutos catalanes compartiendo 5 detectores. También se está gestando la creación de una red a nivel europeo (Timepix Teachers Network) para introducir los detectores Timepix en el ámbito de la educación. En el mapa de la Figura 4 se puede ver la localización geográfica de los centros que han solicitado y recibido un detector para la utilización en el ámbito educativo.

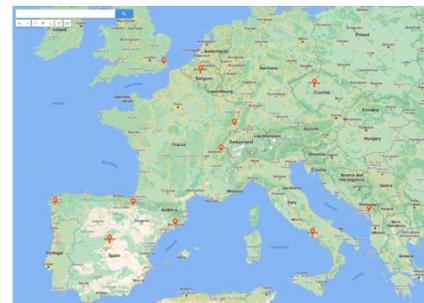


Figura 4. Localización de los centros escolares que han recibido un detector para estudiar la radiación

Esta solicitud se centra en la creación de elementos pedagógicos alrededor del detector, diseñados por

un equipo que integra profesores de educación secundaria que han realizado demostraciones y prácticas para sus estudiantes en estrecha colaboración con científicos del CERN.

Relación con el currículum, competencias y conceptos científicos

El rango de conceptos científicos que pueden abordarse con el detector es muy amplio y permite relacionar disciplinas científicas tan alejadas de la física de partículas como la biología o la inteligencia artificial. Evidentemente, la edad de los estudiantes limitará significativamente la cantidad y profundidad de los conceptos que se pueden trabajar experimentalmente con el detector.

Así, en física se pueden trabajar conceptos como cargas y campos eléctricos, que están íntimamente relacionados con el funcionamiento del detector. Por otro lado, su capacidad de medir directamente la energía de las partículas individuales, permite trabajar experimentalmente, no solo conceptos de radioactividad y radiación, sino también de relatividad, física de partículas y física cuántica. El propio proceso de detección se explica con conceptos sobre estructura química de la materia y sobre la interacción de las diferentes partículas ionizantes con el material de silicio del sensor. Esta propiedad, la capacidad de la radiación ionizante, tiene especial importancia en el concepto de daño biológico de la radiación. Así mismo, las aplicaciones médicas de la física de partículas, de la radiación y de la imagen médica permiten conectar el trabajo con el detector a conceptos biológicos, especialmente si se dispone de acceso a otros dispositivos como fuentes de rayos X. Los detectores Timepix también permiten trabajar conceptos tecnológicos sobre electrónica y microelectrónica y como las señales eléctricas se procesan para obtener información, junto al diseño y construcción de elementos que permitan controlar el movimiento y posición del detector. También se han trabajado conceptos de inteligencia artificial en la identificación de partículas a partir de la traza en el sensor. La relación con las matemáticas es evidente, no solo a través de todos los cálculos y funciones que se pueden trabajar con los datos - matrices 256x256- sino también a través del desarrollo de destrezas en análisis de datos con programas específicos como MatLab o Octave.

En conclusión, nos encontramos ante una herramienta STEM (por Science, Technology, Engineering and Maths) que promueve entre los alumnos el conocimiento interdisciplinar de una manera natural.

Material necesario para la realización de las actividades

Además de elementos comunes de laboratorio, se necesitan dos elementos para realizar las actividades: el propio detector y fuentes de radiación. A continuación se comentan algunos aspectos referentes a estos dos requerimientos.

El detector

El precio de un detector Minipix es actualmente 1750 Eur/unidad. El precio incluye el detector y el software de control. El precio disminuye con el volumen de la compra. Por una compra de 10 unidades el precio es de 1500 Eur/unidad. El precio es elevado para el ámbito académico –no así para la monitorización de la radiación en el espacio- y, en parte, depende del volumen de la demanda de estos dispositivos. Para hacer frente a ese coste, se está impulsando el trabajo con el dispositivo en forma de

préstamo temporal para que varias escuelas puedan compartir un mismo detector durante un periodo de tiempo limitado. El CERN también está trabajando para reducir el precio mediante el estudio técnicas de interconexión entre el sensor y la microelectrónica que podrían reducir el coste o mediante la generación de volumen de fabricación.

Fuentes radiactivas naturales

Gracias a la sensibilidad del Timepix, se pueden utilizar fuentes radioactivas de baja intensidad, como la radiación de fondo u otros objetos cotidianos, aptas en entornos escolares pues son totalmente seguras para el alumnado y que, sin embargo, permiten realizar mediciones muy visuales y precisas.

La radiación de fondo en el entorno procede básicamente de dos fuentes diferenciadas: de los isótopos radiactivos presentes naturalmente a nuestro alrededor por un lado, y de los rayos cósmicos y su interacción con la atmósfera por otro. El Minipix permite estudiar su dependencia con factores como la localidad, la altitud sobre el nivel del mar, la hora y el día, o incluso la orientación del detector. La primera fuente se suele estudiar midiendo el radón del aire, recolectado por los estudiantes de diferentes maneras: aspiradores con gasas, mascarillas faciales, globos cargados electrostáticamente... La segunda fuente es estudiada a través de los muones de los rayos cósmicos detectados por el Minipix.

Muchos objetos cotidianos tienen isótopos radioactivos como parte de su composición, como el polonio 210 de las hojas de tabaco. Además, aquellos productos ricos en potasio, como pueden ser fertilizantes de sales de potasio o algunos alimentos como los plátanos, las patatas o las espinacas, pueden estudiarse con el detector. Por otro lado, algunos dispositivos utilizan materiales radioactivos en su funcionamiento o para mejorar sus propiedades. Podemos encontrarlos en las barras de soldadura de tungsteno toriado, antiguos detectores de humo por ionización, o antiguas camisas de lámparas de gas. También pueden utilizarse antiguos elementos decorativos hechos de cristal de uranio, algunas cerámicas enriquecidas con torio o uranio, y algunos relojes cuyos elementos fosforescentes están hechos de radio. Merece la pena mencionar que, en muchos colegios, existen antiguos muestrarios de minerales, que pueden tener muestras de minerales con elementos radioactivos susceptibles de ser utilizados con experimentos en el detector.

Ejemplos de actividades didácticas realizadas con alumnos

A continuación se presentan dos experimentos diferentes llevados a cabo con un detector Minipix que utiliza el chip Timepix. Estas prácticas se han llevado a cabo con alumnos de edades diversas que abarcan desde los cursos de 3º de ESO a 2º de bachillerato, aunque partes de dichas prácticas pueden ser adaptadas para alumnos de cursos inferiores. Así, relacionando el funcionamiento del detector con otras situaciones similares más cercanas a la realidad cotidiana de los alumnos, como son las huellas de animales en la nieve, los estudiantes pueden entender qué están viendo y como esta medida se relaciona con el mundo subatómico y realizar deducciones por sí mismos, llegando a la conclusión de que hay 3 tipos de radiación básica, o que el modelo clásico de la energía cinética es insuficiente para explicar la radiación beta. Los guiones se pueden descargar de la página de ADMIRA (ADMIRA 2022).

Introducción al Timepix.

La práctica de introducción al Timepix es una actividad pensada para introducir a los alumnos de 2º de bachillerato y a los profesores de la red de la iniciativa ADMIRA en las capacidades del detector y el proceso de medición y tiene dos objetivos principales: distinguir las diferentes partículas por las trazas depositadas en el detector y relacionar la forma de dichas trazas con las propiedades de las partículas correspondientes por un lado, y calcular el valor de la velocidad para las partículas alfa y beta usando las expresiones relativista y no relativista de la energía cinética. A partir de los valores obtenidos se valora la idoneidad –o no- de ambos modelos para trabajar a velocidades cercanas a la de la luz. El guion de la práctica tiene 3 partes bien diferenciadas:

La introducción teórica

En ella se revisan algunos de los contenidos que el alumno ya conoce de sus clases de física de 2º de bachillerato acerca de la radioactividad, la relatividad especial y la física cuántica. A continuación se presenta una breve introducción al funcionamiento del detector y su interacción con las partículas ionizantes y como esta ionización produce una señal eléctrica susceptible de ser procesada por la electrónica del detector. Finalmente, se introduce el programa PixetPro para permitir a los alumnos configurar y operar el proceso de medida usando una muestra de mineral radioactivo. Una vez el proceso de medida ha finalizado, se procede al análisis de los datos.

Parte 1. Identificación de trayectorias

En primer lugar, se pide a los alumnos que realicen una lista de las propiedades de las partículas que, en su opinión, más afectan a la interacción entre la partícula y el detector. Esta lista debería incluir, al menos, la carga eléctrica, la velocidad, la masa... y se establecerá como hipótesis.

A continuación, los alumnos deben dibujar o hacer capturas de pantalla de las trazas dejadas por los diferentes tipos de partículas y buscar información sobre los valores que toman las propiedades que han listado anteriormente para cada partícula. Finalmente, deben explicar la forma de la traza a partir de cómo se produce la interacción de cada tipo de partícula con el material del sensor y valorar si su hipótesis inicial sobre qué propiedad de la partícula afecta más a la interacción era correcta.

Parte 2. Energía cinética, velocidad de las partículas en los modelos clásico y relativista y otras propiedades.

En la segunda parte de la práctica, se seleccionan cinco partículas de cada tipo y se anota el valor de la energía depositada en el detector. Suponiendo que dicho valor se corresponde con la energía cinética de la partícula, se usan las expresiones revisadas en la introducción teórica para calcular la velocidad usando la expresión clásica de la energía cinética (válida para velocidades muy inferiores a la velocidad de la luz) y usando la expresión relativista de la energía (válida para velocidades cercanas a la velocidad de la luz). Además, se pide a los

E_x [KeV]	1794	2807	1680	1319	1577	2006	1896	1991
E_x [J]	2,87E-13	4,49E-13	2,69E-13	2,11E-13	2,52E-13	3,21E-13	3,03E-13	3,19E-13
v [ms ⁻¹] (relat.)	2,923E+8	2,962E+8	2,915E+8	2,878E+8	2,907E+8	2,935E+8	2,929E+8	2,935E+8
v [ms ⁻¹] (classical)	7,938E+8	9,930E+8	7,682E+8	6,807E+8	7,443E+8	8,394E+8	8,161E+8	8,363E+8
v/c (relat.)	0,9751	0,9880	0,9724	0,9601	0,9695	0,9791	0,9772	0,9789
v/c (classical)	2,648	3,312	2,562	2,270	2,483	2,800	2,722	2,790
Deviation (class. vs relat., %)	172	235	164	137	156	186	179	185
Wavelength	2,49E-12	2,46E-12	2,50E-12	2,53E-12	2,50E-12	2,48E-12	2,48E-12	2,48E-12

Figura 5. Datos calculados en la práctica de introducción al Timepix para 8 partículas beta

alumnos que calculen la longitud de onda de De Broglie a partir del momento de la partícula, así como la frecuencia, la longitud de onda y el momento lineal de los fotones de la radiación gamma (Figura 5).

Para ayudar a los estudiantes a comprender el significado de estos resultados numéricos se les pide una representación gráfica de los valores obtenidos, comparados con la velocidad de la luz (Figura 6). Esta tarea les permite darse cuenta de que la velocidad de las partículas alfa es mucho menor que la de la luz y que los resultados obtenidos con la expresión clásica y relativista son equivalentes, mientras que se realza que la velocidad de las partículas beta es muy cercana a la velocidad de la luz calculada con la expresión relativista y superior a esta si la calculamos con la expresión clásica. La conclusión es, pues, que la expresión clásica no puede utilizarse para describir la radiación beta.

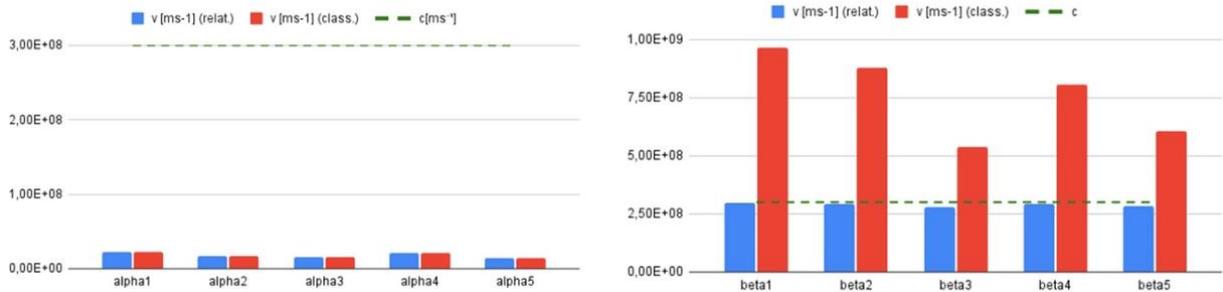


Figura 6. Representación gráfica de la velocidad calculada con el modelo clásico (rojo) y relativista (azul) para 5 partículas alfa (izquierda) y beta (derecha). La línea de puntos indica la velocidad de la luz

El resto de parámetros calculados permite comprender la naturaleza cuántica de los fotones gamma, a través de la relación de Plank, y que las partículas beta tienen un comportamiento ondulatorio más acusado que las partículas alfa, ya que en las primeras su longitud de onda es del orden del femtómetro, mucho menor que el núcleo del átomo de helio, y en las segundas, cientos de veces más grande, la longitud de onda es mucho mayor que el radio clásico del electrón.

La radioactividad que nos rodea

Las dos prácticas que se presentan a continuación trabajan con fuentes de radiación naturales (cloruro de potasio y gas radón), que no requieren de un conjunto de medidas de seguridad complejo, para identificar los diferentes tipos de radiación por el rastro que dejan en el detector y la energía depositada, lo que permite obtener la actividad y el periodo de semidesintegración.

En la práctica “Estudio de la actividad y el período de semidesintegración del isótopo potasio-40”, se hace un recuento de las partículas beta detectadas durante un periodo de 10 minutos procedentes de la radiación de fondo y de la sal que contiene el isótopo potasio-40 (Figura 7).

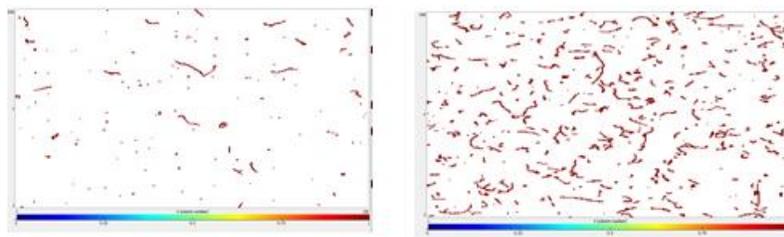


Figura 7. Izquierda: Radiación de fondo detectada. Derecha: Medida de la sal que contiene potasio 40.

Teniendo en cuenta las ecuaciones de desintegración radioactiva y la de la actividad, calculamos el número de átomos de potasio-40 presentes en la muestra y deducimos su período de semidesintegración.

En la práctica “Detectamos radón en un edificio. Estudio de la actividad y el período de semidesintegración del isótopo”, los alumnos utilizan un globo de goma cargado eléctricamente por rozamiento para capturar partículas radioactivas procedentes de la desintegración del Radón del aire. Su radiación alfa se mide en periodos de diez minutos, como se muestra en la imagen (Figura 8).

A partir del recuento de las partículas alfa detectadas en función del tiempo de muestreo se verifica que la gráfica correspondiente sigue una línea de tendencia exponencial. A partir de su ecuación, obtenida mediante una curva de regresión, deducimos el período de semidesintegración del radón.

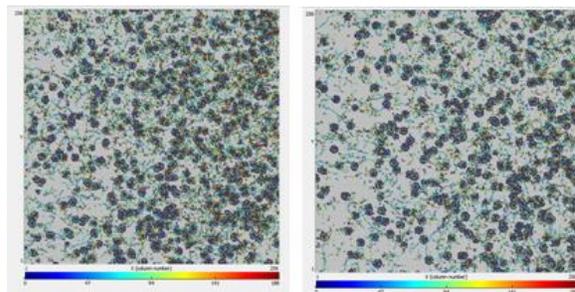


Figura 8. Detección de partículas alfa procedentes del radón acumulado en un globo cargado electrostáticamente

Atención a la diversidad en el aula y el uso del detector Timepix

Teniendo en cuenta el gran potencial de las posibles aplicaciones del sensor Timepix, nos encontramos con un reto importante para llevar todas esas experiencias al aula a niveles preuniversitarios. El Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, establece que los centros elaborarán sus propuestas pedagógicas para todo el alumnado de esta etapa, atendiendo a su diversidad, teniendo en cuenta los diferentes ritmos de aprendizaje del alumnado, favoreciendo la capacidad de aprender por sí mismos y promoviendo el trabajo en equipo. Así, la planificación de dicha acción educativa ha de ser capaz de articular con equidad las oportunidades para que cualquier alumno o alumna pueda compartir la actividad con el detector, sintiéndose parte de un grupo donde han de prevalecer las relaciones sociales positivas, el cuidado mutuo y el respeto a las diferencias que nos hace ser a cada uno iguales en la diversidad.

A modo de ejemplo se explica a continuación la implementación de una unidad didáctica de Radioactividad de Física y Química de 3º de la ESO, según el currículum de educación secundaria obligatoria del Decreto 187/2015, adaptando los experimentos de *la Radioactividad que nos rodea*, para un grupo de 28 alumnos y alumnas del instituto Mollerussa IV, en el cual se tuvo en cuenta las siguientes necesidades educativas especiales:

- Una alumna con trastorno de aprendizaje derivado de dificultades específicas en el aprendizaje de la lectura y escritura. (dislexia)
- Un alumno con necesidades educativas derivadas de altas capacidades.
- Dos alumnos con necesidades educativas derivadas de la incorporación tardía al sistema educativo español (de origen senegalés y origen oriental).
- Dos alumnos con necesidades educativas derivadas de un retraso global de desarrollo,

- Una alumna con necesidades educativas derivadas de discapacidad intelectual moderada con escolarización compartida con una escuela de educación especial.

Se evitó en todo momento reestructurar los objetivos de la unidad según el perfil del alumno, para no caer así en la creación de barreras derivadas de ciertas concepciones y actitudes que se concretan en determinadas formas de enseñar y evaluar dominadas por las bajas expectativas, los prejuicios y ciertas concepciones psicopedagógicas. Así pues, se optó por elaborar una secuenciación de sesiones según *el DUA* (Diseño Universal para el Aprendizaje) en el diseño de experimentos con el detector, para así garantizar que todo el alumnado tuviera acceso al aprendizaje de los objetivos específicos de dicha unidad didáctica. Para favorecer las relaciones sociales y limar las diferencias entre el alumnado, se realizaron sesiones previas utilizando la técnica de la personalización para explicar los modelos atómicos.

Como conclusiones de la implementación en el aula de las prácticas expuestas, se pueden remarcar varios aspectos. Por un lado, la sorpresa de los alumnos al comprobar que estamos rodeados de radiactividad, y que estas emisiones obedecen a un proceso aleatorio. Este factor sorpresa refuerza el primer principio del diseño del DUA, motivando e implicando a los estudiantes en su aprendizaje. Además, quedan asombrados al observar un número muy elevado de partículas alfa detectadas en la superficie del globo de goma. En este punto el detector permite un aprendizaje más por concreción que no por abstracción, siguiendo los principios de Vygotsky. Además, la interfaz proporcionada por el programa Pixet Pro, proporciona múltiples formas de representación del fenómeno que estamos estudiando y así se genera una estrategia para garantizar que todos los estudiantes tengan acceso a la información como componente y poder construir el aprendizaje. Disponer de una interfaz gráfica también permite a los estudiantes acceder a la información teniendo en cuenta las diferentes capacidades que tienen con relación al uso del lenguaje y de los símbolos. Cuando la información se aprecia de forma distorsionada o requiere un gran esfuerzo para acceder a ella, difícilmente se podrá producir el aprendizaje, por lo que es imprescindible eliminar las barreras y asegurar que es asequible a todos los estudiantes (principio II del DUA).

Finalmente, los estudiantes también observan la disminución del número de partículas alfa con el tiempo. Con la aplicación de las fórmulas y gráficos correspondientes les permite consolidar los principios de la física nuclear. Por tanto, se generan diferentes tareas para que los estudiantes puedan expresar qué han logrado interaccionando con la información, según el tercer principio de DUA.

Así pues, el detector se aprecia como una herramienta extremadamente útil y versátil para el trabajo experimental por parte del alumno, facilitando la adquisición de conocimientos según su nivel y capacidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ADMIRA (2022) Iniciació al Medipix. Estudi de la Radiació i les seves propietats. Comparació dels models clàssic i relativista en la radiació alfa i beta. <https://serviparticules.ub.edu/projectes/projecte-admira/activitats-per-aula>