



Reconstrucción de trazas en detectores tipo TRASGO para la medida e identificación de rayos cósmicos.

Detectores TRAGALDABAS y STRATOS

J.A. Garzón, S. Costa, M. Cruces

LabCAF / IGFAE
Universidade de Santiago de Compostela

1. Introducción

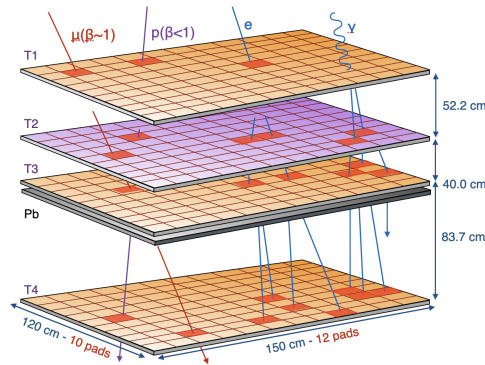
Presentamos en este informe un resumen de las actividades realizadas para la puesta a punto de un programa para la reconstrucción de trazas en detectores tipo TRASGO, como los detectores del proyecto STRATOS; en este caso se ha aplicado a detectores de electrodos rectangulares. Para ello se ha adaptado y mejorado una cadena de programas existente que genera datos aleatorios, los digitaliza y, finalmente, los reconstruye, permitiendo estimar tanto la eficiencia como la resolución de la reconstrucción realistas asociadas a un detector. Como novedad, hemos introducido la posibilidad de buscar candidatos a trazas mediante un algoritmo de filtrado de Kalman. Esto permitirá separar y reconstruir las cascada electromagnéticas asociadas a electrones y gammas con una gran eficacia.

2. Los detectores tipo TRASGO y la atmósfera

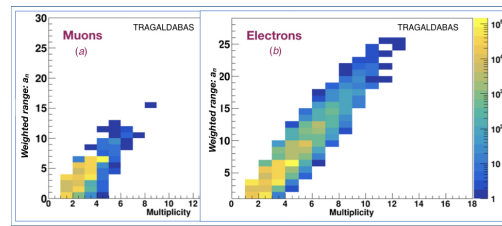
El desarrollo de la tecnología RPC (Resistive Plate Chambers) propia de experimentos de Física Nuclear y de Física de Partículas de Altas Energías y ha abierto la posibilidad de diseñar y construir detectores de rayos cósmicos de nueva generación capaces de medir con gran precisión

haces de electrones de alta multiplicidad y muones de origen cósmico a nivel del suelo. Sin duda, la propuesta mas interesante de dicho tipo de detectores a nivel mundial la constituyen los detectores tipo TRASGO [3, 4], desarrollados por la Universidad de Santiago de Compostela en colaboración con el LIP de Coimbra y en los que las empresas Hidronav y Digafer han tenido una papel muy destacado, proporcionando soporte técnico, material electrónico y desarrollo instrumental. Fruto de ello han sido los detectores TRAGALDABAS, actualmente tomando datos en la Univ. de Santiago de Compostela, el detector TRISTAN, instalado en una base española en la Antártida, y el detector MUTT, que estuvo instalado en los locales de Digafer, cerca de Porriño, siendo pionero en usar la tecnología de RPCs para la realización de tomografía mediante rayos cósmicos.

Es bien conocido el importante efecto que las condiciones atmosféricas, en particular la presión y el perfil de temperaturas de la atmósfera sobre el detector, ejercen sobre el resultado de la medida de rayos cósmicos medidos en tierra. En particular, es muy interesante la correlación observada entre la tasa de muones de muy alta energía medida en tierra y la temperatura efectiva de la atmósfera, en la que dominan las variaciones de la temperatura en la estratosfera. Ello abre la posibilidad de aprovechar las magníficas prestaciones que ofrecen los detectores tipo TRASGO, capaces de acceder a información vedada a los detectores de rayos cósmicos tradicionales, para estimar en tiempo real el perfil de temperaturas de la atmósfera en la vertical del detector. Esta posibilidad conlleva la necesidad de desarrollar y poner a punto algoritmos novedosos de reconstrucción de la dirección de llega de electrones y muones y que, además, permitan tanto su identificación como incluso la estimación de la energía de las cascadas electromagnéticas inducidas por los electrones de alta energía.



(a) Representación del detector TRAGALDABAS en su versión con cuatro RPCs. Partículas con distinta naturaleza dejan una huella diferente en el detector.



(b) Separación entre muones y electrones a partir de la topología del evento.

Figura 1: Capacidad de separación de los detectores de tipo TRASGO

La figura 1a resume el fundamento de la capacidad de los detectores tipo TRASGO para la identificación de los diferentes tipos de partículas. En relación con la separación entre muones y electrones, es de destacar que mientras los primeros deben de producir trazas rectilíneas proporcionando un buen ajuste, los electrones de alta energía tienen tendencia a producir cascadas electromagnéticas formadas por nuevos electrones y gammas activando un número elevado de electrodos. Dicho efecto queda bien reflejado en los resultados de simulación que se muestran en la figura 1b. En ella se observa la capacidad que un detector tipo TRASGO ofrece para separar electrones y muones analizando algunos observables; en concreto, el valor del chi cuadrado del

ajuste, el numero de celdas activadas y el alcance ponderado, que tiene en cuenta la distribución longitudinal de las celdas activadas. La capacidad de distinguir electrones de muones alcanza valores que superan el 90 por ciento.

TimTrack [5] y el filtrado de Kalman [2] son dos herramientas de reconstrucción de trazas ideales para sacar provecho de la magníficas prestaciones que ofrecen los detectores tipo TRASGO. La primera de ellas fue desarrollada específicamente para este tipo de detectores mientras que la segunda constituye un estándar ampliamente utilizado en la ciencia y en la técnica. Hemos aplicado ambas herramientas al desarrollo de un programa de reconstrucción de haces de partículas, necesario para su uso en el proyecto STRATOS, si bien lo hemos aplicado también a la estructura en electrodos planos del detector TRAGALDABAS de la Univ. de Santiago de Compostela, ya que para él disponemos ya de datos reales. Para ello nos hemos ayudado de la cadena de programas Genedigitana, que permite simular la respuesta de un detector cualquiera a la incidencia de partículas cargadas y proceder después a su reconstrucción y estimar la incertidumbre de los parámetros de la partícula incidentes, junto con su matriz de correlación.

3. Genedigitana

Genedigitana es un acrónimo de las tres palabras generación, digitalización y análisis y llamamos así a un programa, o cadena de subprogramas, desarrollado en el LabCAF y escrito en Matlab y en Python y que puede ser usado para el estudio de las prestaciones de cualquier detector de partículas de configuración conocida. El programa permite incluir efectos como zonas muertas en los detectores, ineficiencias o ruido de cualquier tipo, siendo así extremadamente útil para la simulación realista de un cierto detector.

Hemos partido de un script en Python de *genedigitana* diseñado por el Prof. Juan A. Garzón y editado por Sara Costa Faya, se acomodó para aplicar el proceso a la estructura del detector de tipo TRASGO, TRAGALDABAS, así como también se amplió el código para añadir funcionalidades y mayor flexibilidad y robustez.

El proceso *genedigitana* consta de tres partes:

- Generación: construcción aleatoria de rectas en tres dimensiones que emulan trazas de partículas, a las que llamamos *saetas*.
- Digitalización: conversión de las trazas en forma analítica a una serie de coordenadas correspondientes a las que serían medidas por otro detector de tipo TRASGO, TRISTAN¹.
- Análisis: a partir de las coordenadas digitalizadas, se reconstruyen las trazas originales mediante un algoritmo, que inicialmente era TimTrack y en el que hemos incluido la posibilidad de usar un algoritmo basado en el filtrado de Kalman.

La versión actual de Genedigitana se describe a continuación. En el apéndice se muestra una pequeña documentación de las clases utilizadas en el código informático.

3.1. Generación

Para definir las trazas de partículas se generan trazas, o rectas, con ángulo polar (θ y ángulo acimutal ϕ aleatorios, siguiendo una distribución elegida por el usuario. En general, lo mas habitual es elegir una distribución uniforme en ángulo sólido que se corresponde con una distribución

¹Trasgo para investigaciones antárticas: Detector desarrollado para complementar otros detectores del observatorio ORCA que ha sido instalado en una de las bases españolas en la Antártida.

uniforme en $\cos \theta$ y ϕ . También se genera el punto de incidencia (x_0, y_0) en cualquier punto del plano superior del detector.

Dado un detector, con un cierto número de planos activos para la medida de las partículas que lo atraviesan, asumimos que existe un cierto *trigger* entre planos por lo que, para simular un detector real, sólo se aceptan aquellas trazas que dejan señal en dichos planos, descartando todas las demás. Esto permite utilizar el programa también para el cálculo de aceptancias de un detector en función del tamaño del mismo y de la distancia entre los planos del trigger.

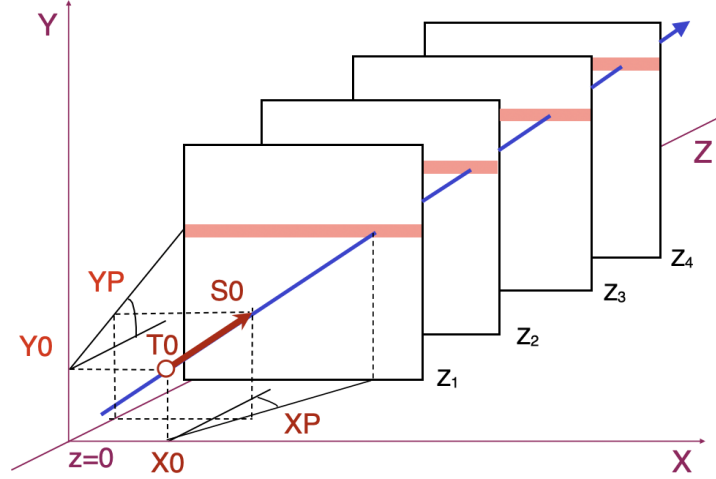


Figura 2: Representación gráfica de una saeta.

Cada traza o partícula se caracteriza por seis parámetros que constituyen lo que llamamos una SAETA, s .

$$s = (X0, XP, Y0, YP, T0, S0) \quad (1)$$

La definición de cada parámetro se muestra en la figura figSaeta ² y es la siguiente:

- X0: Coordenada X del punto de corte de la partícula con el plano en $z = 0$.
- XP: Pendiente proyectada de la partícula en el plano XZ.
- Y0: Coordenada Y del punto de corte de la partícula con el plano en $z = 0$.
- YP: Pendiente proyectada de la partícula en el plano YZ.
- T0: Tiempo de paso de la partícula por el plano $z = 0$, que se toma como el plano de referencia para los ajustes.
- S0: Slowness o lentitud. Es la inversa del módulo de la velocidad de la partícula en el plano $z = 0$, ($S0 = 1/v$). Se introduce para que las ecuaciones de generación y reconstrucción de trazas guarden una cierta simetría entre la parte espacial, pares $(X0, XP)$ y $(Y0, YP)$, y la parte temporal, par $(T0, S0)$.

²SmAllest sET of pArameters

Usando la definición de los cosenos directores de una recta en el espacio que a su vez constituyen los elementos del vector unitario en la dirección de la recta, $\mathbf{n} = (c_x, c_y, c_z)$, se verifica:

$$\begin{aligned} c_x &= \sin \theta \cos \phi, \\ c_y &= \sin \theta \sin \phi, \\ c_z &= \cos \theta, \end{aligned} \tag{2}$$

y las pendientes proyectadas de una saeta se definen como:

$$\begin{aligned} X0 &= c_x/c_z, \\ Y0 &= c_y/c_z. \end{aligned} \tag{3}$$

3.2. Digitalización

Se digitalizan las trazas en función de todos aquellos puntos que intersecan con alguno de los planos del detector en una celda concreta, cuyas coordenadas tienen unidades de fila y columna. La información almacenada para cada intersección (hit) es: identificador del plano, columna, fila, instante de tiempo digitalizado.

Cada uno de estos hits son de clase Hit, que también se almacenan en la clase SimEvent en una lista desordenada como ocurriría con los datos reales.

3.3. Análisis

El análisis se realiza mediante el algoritmo de Kalman filter descrito con mayor profundidad y generalidad en la sección homónima del estudio de Jose A. Hernando [2].

El método Kalman filter está destinado a encontrar la estimación óptima \mathbf{r} del vector desconocido \mathbf{r}^t , el cual describe la saeta \mathbf{s} de acuerdo con las medidas \mathbf{m}_k , $k = 1 \dots n$ conocidas del vector \mathbf{r}^t (medidas digitalizadas).

Se comienza con una aproximación inicial $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ y se refina el vector \mathbf{r} , consecutivamente añadiendo una medida después de la otra. El valor óptimo se alcanza después de añadir la última medida.

En este proceso se aplica para una combinación de hits que cumpla dos condiciones:

- Todos los hits deben pertenecer a un plano y cada plano debe tener un sólo hit.
- La partícula hipotética no debe superar c para poder llegar desde la celda golpeada en el k -ésimo plano hasta el $(k + 1)$ -ésimo.

3.3.1. Paso 1: INICIALIZACIÓN

Suponemos el valor inicial de la saeta situada en el plano T4 como un vector normal

$$\mathbf{r}_0 = (x_0, 0, y_0, 0, t_0, s_0)^T, \tag{4}$$

donde x_0, y_0 son las distancias desde el origen de coordenadas hasta el centro de la celda golpeada y t_0 el valor de tiempo en nanosegundos dados por uno de los objetos de la clase Hit pertenecientes al plano inferior. La lentitud se estima $s_0 = 1/c$, con c la velocidad de la luz.

Su matriz de covarianza se establece como $C_0 = \sigma^T \cdot I_{6 \times 6} \cdot \sigma$, donde σ es un vector vertical de las varianzas de las coordenadas de \mathbf{r} :

$$\sigma = (\sigma_x, \sigma_{x'}, \sigma_y, \sigma_{y'}, \sigma_t, \sigma_s)^T, \tag{5}$$

3.3.2. Paso 2: PREDICCIÓN

Comienzo de la iteración por planos. Se propaga el vector desde el $(k - 1)$ -ésimo hasta el k -ésimo plano mediante la matriz de transporte

$$F_k = \begin{pmatrix} 1 & \Delta z_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & ks_k \Delta z_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde Δz_k es la distancia entre dichos planos:

$$\Delta z_k = z_k - z_{k-1}, \quad (7)$$

y ks_k es

$$ks_k = \sqrt{1 + x_k'^2 + y_k'^2}, \quad (8)$$

así que,

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_k &= F_k \mathbf{r}_{k-1}, \\ \tilde{C}_k &= F_k C_{k-1} F_k^T. \end{aligned} \quad (9)$$

3.3.3. Paso 3: FILTRADO

En este punto el vector $\tilde{\mathbf{r}}_k$ se actualiza con la nueva medida \mathbf{m}_k para conseguir el estado óptimo de \mathbf{r}_k y de su matriz de covarianza C_k :

$$\begin{aligned} K_k &= \tilde{C}_k H_k^T (V_k + H_k \tilde{C}_k H_k^T)^{-1}, \\ \mathbf{r}_k &= \tilde{\mathbf{r}}_k + K_k (\mathbf{m}_k - H_k \tilde{\mathbf{r}}_k), \\ C_k &= \tilde{C}_k - K_k H_k \tilde{C}_k, \\ \chi_k^2 &= \chi_{k+1}^2 + (\mathbf{m}_k - H_k \tilde{\mathbf{r}}_k)^T (V_k + H_k \tilde{C}_k H_k^T)^{-1} (\mathbf{m}_k - H_k \tilde{\mathbf{r}}_k). \end{aligned} \quad (10)$$

Aquí, la medida k -ésima es

$$\mathbf{m}_k = (x_k, y_k, t_k)^T, \quad (11)$$

y su matriz de covarianza

$$V_k = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_t^2 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

La matriz del modelo es simplemente la matriz identidad $H_k = I_{3 \times 6}$

$$H_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

que convierte un vector del espacio de parámetros \mathbf{r}_k al espacio de medidas \mathbf{m}_k :

$$\begin{pmatrix} x_k \\ x'_k \\ y_k \\ y'_k \\ t_k \\ s_k \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ t_k \end{pmatrix}.$$

Deben iterarse desde el paso (2) hasta el (4) con k para todos los planos detectores.

La notación utilizada en esta sección se completa aquí: \mathbf{r}_{k-1} , C_{k-1} son la estimación óptima obtenida y la matriz de covarianza en el paso previo; La matriz F_k relaciona el estado en el paso $k-1$ con el k^3 ; $\tilde{\mathbf{r}}_k$, \tilde{C}_k son la estimación predicha de \mathbf{r}_k^t y su matriz de covarianza; \mathbf{m}_k , V_k es la medida y su matriz de covarianza k -ésimas; la matriz H_k es la transformación del espacio de parámetros al espacio de medidas; la matriz K_k es la llamada “matriz de ganancia”; el valor χ_k^2 es la desviación total de la estimación obtenida \mathbf{r}_k a partir de las medidas $\mathbf{m}_1, \dots, \mathbf{m}_k$ tal que:

$$\chi^2 = \sum_{j=0}^N \sum_{i=0}^n \frac{(x_{ij}^s - x_{ij}^m)^2}{\sigma_i^2} \quad (14)$$

siendo N el número de hits utilizados para calcularlo y $n=3$ el índice para las tres coordenadas espacio-temporales (x^s, y^s, t^s) de la saeta y (x^m, y^m, t^m) de las medidas.

El vector \mathbf{r}_n obtenido después del filtrado de la última medida es la estimación óptima obtenida de \mathbf{r}_n^t con la matriz de covarianza C_n .

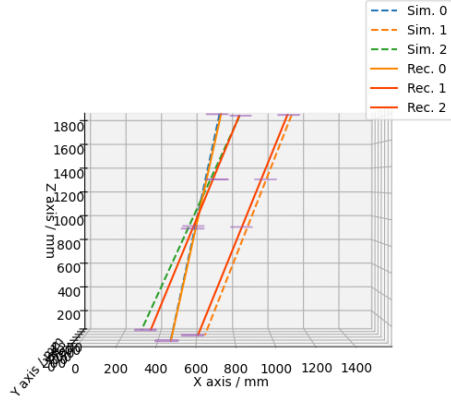
4. Resultados de las simulaciones

En esta sección, se muestran los resultados de reconstrucciones.

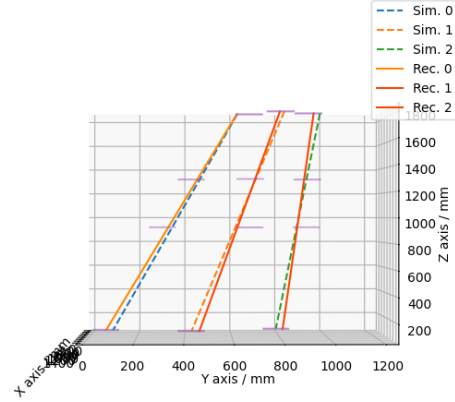
4.1. Representación gráfica

Esta versión de genedigitana tiene la opción de mostrar los resultados del proceso en forma de gráfico en 3D, donde las trazas reconstruídas se muestran como líneas continuas, las trazas simuladas como líneas discontinuas, y en color morado se intuye la topología de cada detector. Estas líneas continuas que representan las trazas reconstruídas, se colorean siguiendo un gradiente desde rojo a amarillo según el valor de χ^2 obtenido en la reconstrucción, siendo el color rojo para la mejor reconstrucción y el amarillo para la peor.

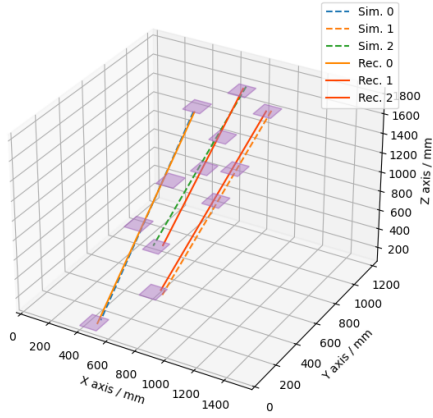
³Notar que se empieza desde el plano inferior hasta el superior



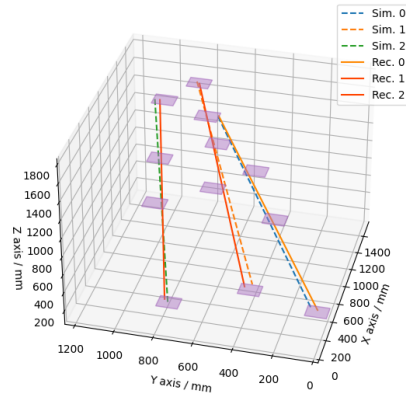
(a) Proyección sobre el eje X.



(b) Proyección sobre el eje Y.



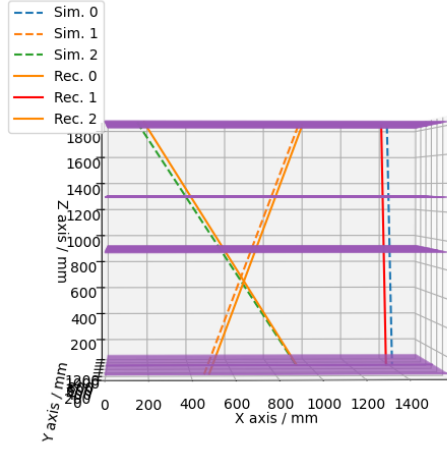
(c)



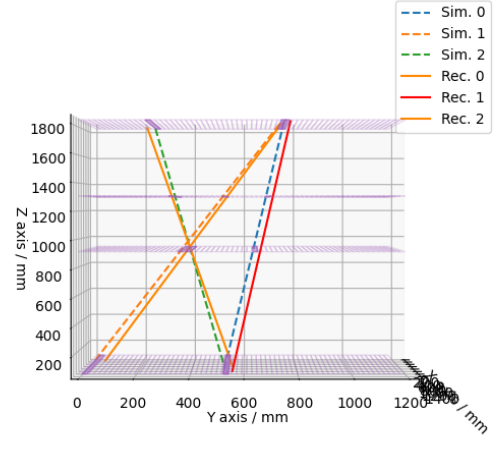
(d)

Figura 3: Evento de tres trazas en TRAGALDABAS reconstruido.

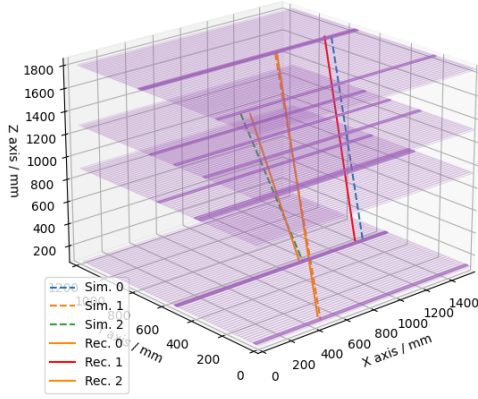
En la figura 3 está representado un evento en TRAGALDABAS con tres trazas que se reconstruyen sin dificultad. Se puede ver en las proyecciones sobre el plano XZ (figura 3a) y el plano YZ (figura 3b), así como en perspectiva (figuras 3c y 3d).



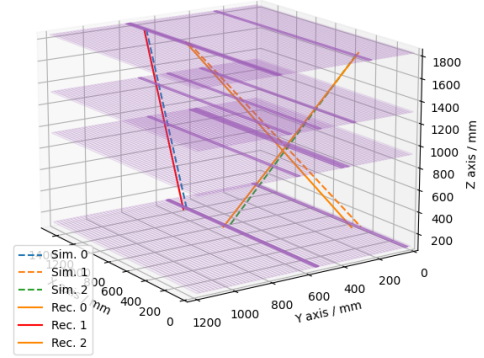
(a) Proyección sobre el eje X.



(b) Proyección sobre el eje Y.



(c)



(d)

Figura 4: Evento de tres trazas en STRATOS reconstruido.

Como se puede observar en la figura 4 que representa otro evento diferente simulado para el detector STRATOS, las imágenes están colocadas de la misma forma.

El detector STRATOS tiene 64 conductores en cada plano colocados de forma paralela entre sí que llegan de un extremo a otro llamados *strips*. La posición del hit en el eje Y se determina por el *strip* que recibe la señal. La posición en el eje X en cambio, se determina por el tiempo que dicha señal tarda en recorrer todo el conductor. El proceso de simulación para este detector es el mismo que para TRAGALDABAS, así como la reconstrucción una vez obtenidas las posiciones (x, y) en cada plano digitalizadas.

4.2. Resultados numéricos

Finalmente, se muestra a continuación como ejemplo algunos de los datos generados y reconstruidos para ambos detectores.

TRAGALDABAS

Parámetros iniciales			Incertidumbre en parámetros reconstruidos					
XP	YP	v/c	sX0/mm	sYP	sY0/mm	sYP	sT0/ps	sS0/%
0	0	1	29.2	28	28.0	27	226	6.47
0	0	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.81
0	0	0.8	29.2	28	28.0	27	226	5.17
0.1	0.1	1	29.2	28	28.0	27	226	6.40
0.1	0.1	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.76
0.1	0.1	0.8	29.2	28	28.0	27	226	5.12
0.2	0.2	1	29.2	28	28.0	27	226	6.22
0.2	0.2	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.60
0.2	0.2	0.8	29.2	28	28.0	27	226	4.98
0.3	0.3	1	29.2	28	28.0	27	226	5.95
0.3	0.3	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.36
0.3	0.3	0.8	29.2	28	28.0	27	226	4.76

Figura 5: Datos de la reconstrucción en el detector TRAGALDABAS.

Parámetros iniciales			Incertidumbre en parámetros reconstruidos					
XP	YP	v/c	sX0/mm	sYP	sY0/mm	sYP	sT0/ps	sS0/%
0	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.74
0	0	0.9	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.25
0	0	0.8	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.79
0.1	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.65
0	0.1	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.64
0.1	0.1	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.67
0.2	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.61
0	0.2	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.60
0.2	0.2	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.51
0.2	0.2	0.9	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.05
0.2	0.2	0.8	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.79
0.3	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.52
0	0.3	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.52
0.3	0.3	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.30
0.3	0.3	0.9	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.90
0.3	0.3	0.8	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.48

Figura 6: Datos de la reconstrucción en el detector STRATOS.

5. Apéndice

5.1. Código para la reconstrucción

El código destinado a la reconstrucción para este estudio se puede encontrar en el repositorio público de GitHub:

https://github.com/MCruces-fz/TRAGALDABAS-Kalman-Filter/tree/first_reconstruction

Aquí se pueden leer las clases utilizadas y mencionadas en este documento, así como interpretar el software con Python 3.

Referencias

- [1] **Studies on the Composition and Energy of Secondary Cosmic Rays with the Tragaldabas Detector**

Yanis Fontela Barba, departamento de Física de Partículas.

Universidade de Santiago de Compostela

- [2] **The Kalman Filter Technique applied to Track Fitting in GLAST**

Jose A. Hernando, Santa Cruz Institute for Particle Physics.

University of California. Santa Cruz

- [3] **jag**

Jose A. Garzón,

...

- [4] **Moscú**

Jose A. Garzón,

...

- [5] **Tim Track**

Jose A. Garzón,

...