

15. PRÁCTICA 3.- COINCIDENCIAS $\gamma\gamma$ Y CORRELACIONES ANGULARES CON UNA FUENTE DE ^{22}Na . MEDIDA DE VIDAS MEDIAS DE ESTADOS NUCLEARES

15.1 Introducción.

El trabajo que se propone en la presente práctica consta de dos partes bien diferenciadas, aunque ambas basadas en la técnica de coincidencias.

En la primera parte, se estudiará la correlación angular de los dos fotones emitidos en la aniquilación del positronio, que se forma como consecuencia de la desintegración beta positiva del ^{22}Na .

La segunda parte tiene como objetivo la medida de la vida media del estado excitado $(3/2)^-$ del ^{57}Fe de energía 0.0144 MeV, utilizando para tal fin una fuente de ^{57}Co .

15.2 Desintegración del ^{22}Na . Aniquilación del positronio.

Los núcleos que, en la parábola de masas nucleares, resultante al representar la energía de enlace de los núcleos con su número másico $A=\text{constante}$, no ocupan la posición del mínimo, sufren la que denominamos **desintegración beta nuclear**. Esta no es más que una transición nuclear a través de la interacción débil, como la típica desintegración del neutrón, en la que en el estado final existen tres cuerpos: el núcleo hijo, un electrón (positrón) y el antineutrino (neutrino) electrónico. Por su parte, los núcleos atómicos en estados excitados, se desexcitan a través de la interacción electromagnética.

En este trabajo nos vamos a centrar en la **desintegración beta positiva**, correspondiente al proceso: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$. Para ello utilizaremos una fuente encapsulada de ^{22}Na . El esquema de desintegración de este isótopo es el representado en la figura 38.

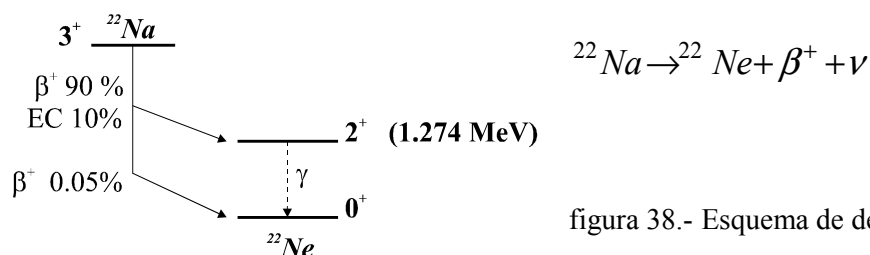


figura 38.- Esquema de desintegración del ^{22}Na .

En la figura 39 puede verse el esquema completo de niveles del ^{22}Ne , núcleo al cual se desintegra el ^{22}Na .

La emisión de los positrones de la desintegración del ^{22}Na es isotrópica, pero al atravesar el material del encapsulamiento de la fuente pierden rápidamente su energía, capturan un electrón y forman un estado ligado e^+e^- , denominado positronio.

El positronio posee niveles de energía similares a los del átomo de hidrógeno, pero con aproximadamente la mitad del espacio fásico debido al factor 2 que aparece en la masa reducida (figura 40).

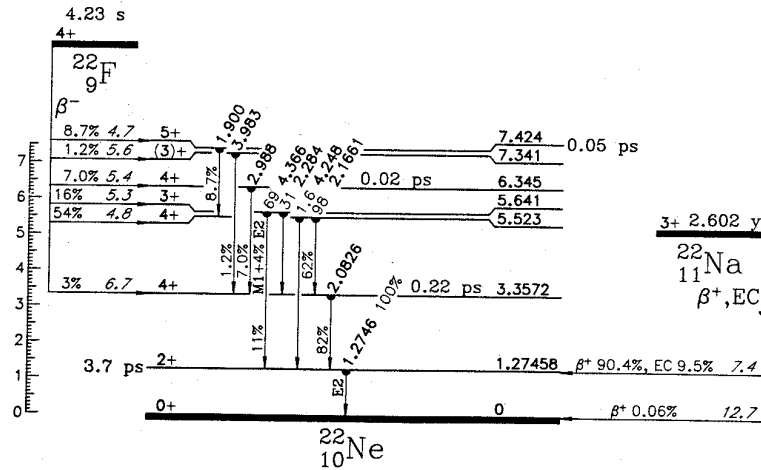


figura 39.- Esquema de niveles energéticos y de desintegración del ^{22}Na .

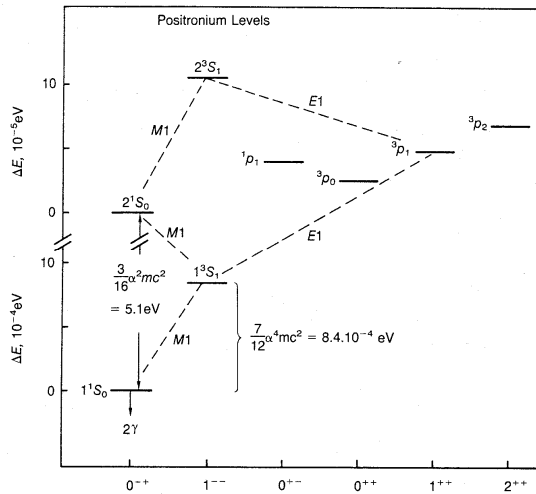


figura 40.- Niveles de energía del positronio.

La función de ondas total del positronio es:

$$\Psi(\text{total}) = \Phi(\text{espacial}) \cdot \alpha(\text{spin}) \cdot \chi(\text{carga})$$

Si el electrón y el positrón se consideran como partículas idénticas, la función de ondas total ha de ser antisimétrica bajo el intercambio de partículas. Las funciones de espín, correspondientes a la combinación de dos partículas de espín $\frac{1}{2}$ son:

$$\begin{aligned}\alpha(1,1) &= \psi_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \cdot \psi_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \\ \alpha(1,0) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\psi_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \cdot \psi_2\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) + \psi_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \cdot \psi_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) \right] \\ \alpha(1,-1) &= \psi_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) \cdot \psi_2\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) \\ \alpha(0,0) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\psi_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \cdot \psi_2\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) - \psi_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \cdot \psi_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) \right]\end{aligned}$$

donde las tres primeras combinaciones corresponden al estado triplete con $S=1$ y $S_z = 1, 0, -1$, y la cuarta al estado singlete antisimétrico con $S = S_z = 0$. El modo de desintegración del positronio, desde el estado fundamental ($l=0$), dependerá de que se trate del estado singlete o del triplete, pudiéndose tener las siguientes dos situaciones:

<i>desintegración</i>	$S=J$	l	<i>vida media (s)</i>
Singlete (1S_0) 2γ	0	0	1.25×10^{-10}
Triplete (3S_1) 3γ	1	0	1.4×10^{-7}

En el presente trabajo consideraremos únicamente la desintegración del estado singlete a dos fotones ($e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$) y no estudiaremos el problema de la polarización de estos dos rayos gamma (ver experimento de Wu y Shakhnov en Perkins).

Las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento imponen que ambos fotones se emitan bajo un ángulo de 180° y con una energía igual a la masa del electrón en reposo.

15.3 Desintegración del ^{57}Co .

El ^{57}Co es un isótopo que se desintegra vía captura electrónica con una vida media de 271 días al núcleo hijo ^{57}Fe , el cual queda predominantemente en el estado de energía 0.136 MeV. La vida media del estado es de 8.6 ns, desintegrándose el 11% de las veces al estado fundamental del ^{57}Fe . Sin embargo, en el 89% restante se desintegra a un estado excitado intermedio de energía 0.0144 MeV el cual a su vez se desintegra finalmente, con una vida media de 98 ns, al estado fundamental. En la figura 41 se puede ver el esquema de desintegración del ^{57}Co y los niveles energéticos del ^{57}Fe .

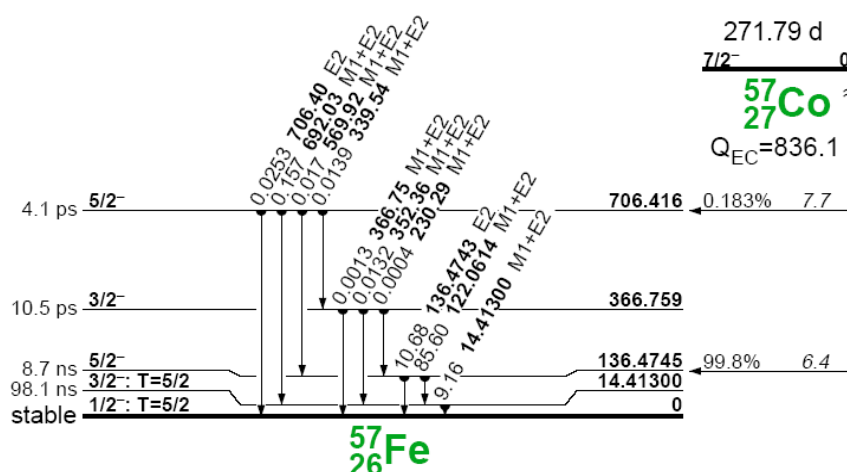


figura 41.- Esquema de niveles energéticos y de desintegración del ^{57}Co .

Una consideración importante respecto de las fuentes de radiación gamma es que su actividad nominal corresponde a la desintegración β original. Para calcular la actividad de una determinada transición γ hay que tener en cuenta la probabilidad de transición a cada uno de los niveles, y corregir por el tiempo transcurrido la actividad nominal. Advierta el alumno que las fuentes del laboratorio tienen un símbolo que las identifica, para conocer su fecha de fabricación y poder saber con exactitud la fuente con que se realiza la práctica ya que no es conveniente en general intercambiarla.

Se recomienda al alumno leer atentamente los apartados 3, 4 y 5 del manual, para una correcta comprensión de la fenomenología de las interacciones de fotones con la materia, así como de las estructuras presentes en un espectro de radiación γ .

15.4 Objetivos de la práctica.

Los objetivos básicos de la presente práctica son familiarizar al alumno en los siguientes aspectos de la espectroscopía γ :

- El estudio de las distintas formas de emisión de electrones y positrones por parte de los núcleos. En particular las características de la desintegración β^+ .
- Estudio de las características de los espectros de radiación γ .
- Generalidades de los detectores de centelleo mediante la utilización de detectores de INa(Tl) .
- Adquisición y tratamiento estadístico de datos experimentales.
- Técnicas experimentales de coincidencias, necesarias para el estudio de correlaciones angulares y temporales de la emisión γ de los núcleos.
- Aplicación de las técnicas de coincidencia al estudio de la aniquilación del positronio y a la medida de vidas medias de estados nucleares excitados.

15.5 El dispositivo experimental.

Para el desarrollo de la práctica se dispondrá del siguiente material:

- Dos detectores de INa(Tl) de 2"×2" con blindaje de Pb, acoplados a sendos tubos fotomultiplicadores con sus bases (ver apartado 6 y subapartados).
- Un detector de INa(Tl) de ventana de Berilio de 1"×1" con tubo fotomultiplicador y base.
- Dos preamplificadores TC 145, sensibles al voltaje.
- Fuente de alta tensión.
- Módulos de electrónica NIM para el tratamiento de señales (ver apartado 8 y subapartados):
 - ♦ dos módulos TC 241 AMPLIFIER
 - ♦ dos analizadores monocanal (SCA)
 - ♦ módulo generador de puertas (Delay/Gate Generator)
 - ♦ puerta lineal (Linear Gate)
 - ♦ módulo de coincidencias (Multipurpose Coincidence)
 - ♦ conversor tiempo-amplitud (TAC)
 - ♦ línea de retraso (Delay Amplifier)
 - ♦ contador doble con temporizador (Dual Counter/Timer)
 - ♦ generador de pulsos.
- *Crate* para soporte y alimentación de los módulos NIM.
- Sistema de adquisición y análisis de datos: ordenador personal con tarjeta PCA (ver apartado 8.11).
- Osciloscopio (ver 8.12).
- Juego de cables y conectores (ver 8.13).
- Fuentes radioactivas.

Para la medida de la correlación angular de los fotones emitidos en la desintegración del positronio, se dispone de una mesa sobre la cual se sitúan los detectores de INa y la fuente

radioactiva de ^{22}Na ; de modo que uno de los detectores permanece fijo y el otro puede girar sobre el plano de la mesa alrededor de un eje vertical fijo. Un esquema de dicho dispositivo se muestra en la figura 42.

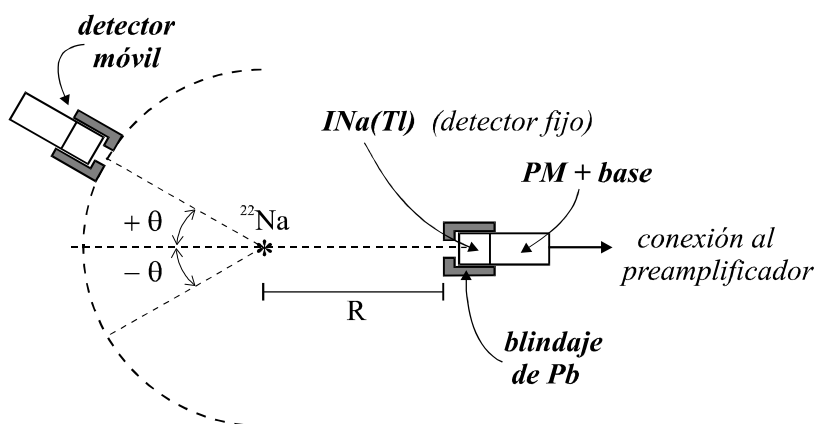


figura 42.- Esquema del montaje experimental para el estudio de correlaciones angulares.

A continuación pasamos a describir alguno de los elementos específicos que forman parte del dispositivo experimental.

15.5.1 Los detectores de centelleo.

Las características generales de los detectores de centelleo y de los fotomultiplicadores han sido ya expuestas en el apartado 6.

En esta práctica se dispone de tres detectores de INa(Tl) . Se trata de centelleadores inorgánicos, cuya principal ventaja radica en el elevado poder de frenado de la radiación, a causa de su alta densidad y número atómico, siendo especialmente útiles para estudios de espectroscopía γ . Uno de ellos (el más pequeño) está dotado de una ventana de berilio, lo cual es especialmente interesante para medidas de radiación γ en la región de bajas energías (rayos X).

15.5.2 La cadena electrónica para el análisis de los pulsos.

Se describen a continuación algunos de los módulos electrónicos que se utilizarán a lo largo de la práctica, el resto puede consultarse en el apartado 1 dedicado a la electrónica NIM. Su particular utilización dependerá del montaje y experimento que se pretenda llevar a cabo. Alguno de los módulos posee su propio manual de utilización, el cual deberá ser consultado por el alumno para su correcto manejo.

- ♦ Fuente de alta tensión con cuatro salidas independientes. Es muy importante seleccionar la polaridad de la tensión de acuerdo con el tipo de fotomultiplicador que se esté utilizando. Una tensión de polaridad opuesta origina la rotura del fotomultiplicador. **Se recomienda no sobrepasar los 1000 V. Cuando se utilice el detector de ventana de Berilio no debe sobrepasarse la tensión marcada en la etiqueta del detector.**
- ♦ Módulo de coincidencias (Multipurpose Coincidence). Se trata de un módulo con cinco entradas que pueden ser seleccionadas individualmente, para el establecimiento de coincidencias temporales entre ellas. Cada una de las entradas puede ser considerada en modo coincidencia o anticoincidencia. Un selector (1 a 5) permite fijar

el número de entradas que el módulo debe recibir en coincidencia. El tiempo de resolución puede variarse en un intervalo desde 50 ns a 6.25 μs .

- ♦ Contador doble con temporizador (Dual Counter and Timer). Módulo programable con dos entradas que actúa como escala y temporizador. El alumno deberá consultar el manual de este módulo.

15.6 Operaciones previas a la toma de datos.

Antes de comenzar con los siguientes apartados, el alumno deberá leer atentamente la información general correspondiente a las técnicas de coincidencia, que se da en el apartado 12 y subapartados de este manual.

15.6.1 Determinación de la actividad de una fuente y de las eficiencias absolutas de los detectores.

Para un núcleo como el ^{22}Na que se desintegra vía β^+ con un esquema de desintegración como el de la figura 38, consideremos las emisiones γ coincidentes a y b , correspondientes a la aniquilación del positronio, con intensidades $I_a = I_b$, relativas a la actividad de la fuente y detectadas en dos detectores de eficiencias \mathcal{E}_a y \mathcal{E}_b . De forma que si S es la actividad de la fuente y T el tiempo de medida, obtendremos en cada uno de los detectores un número de cuentas:

$$\begin{aligned} N_a &= \mathcal{E}_a I_a S T \\ N_b &= \mathcal{E}_b I_b S T \end{aligned} \quad (1)$$

Es importante indicar aquí que las eficiencias \mathcal{E}_a y \mathcal{E}_b incluyen tanto las eficiencias intrínsecas como las geométricas. Análogamente, si I_{ab} es la fracción de coincidencias ab y suponiendo que la eficiencia de detección de la coincidencia es 1, tendríamos para una emisión de los fotones no correlacionada:

$$N_{ab} = \mathcal{E}_a \mathcal{E}_b I_{ab} S T = (\mathcal{E}_{geo})_a (\mathcal{E}_{int})_a (\mathcal{E}_{geo})_b (\mathcal{E}_{int})_b I_{ab} S T \quad (2)$$

En el caso del ^{22}Na la emisión de los dos fotones está totalmente correlacionada, ambos se emiten formando un ángulo de 180° , con lo cual la fórmula anterior no es válida. En este caso habrá que sustituir el producto de las eficiencias geométricas por un factor geométrico global, f_{geo} , que tenga en cuenta el área de superposición de ambos detectores. Por ejemplo, en el caso de que ambos detectores estuvieran totalmente encarados, pero la eficiencia geométrica no fuese la misma, el factor geométrico coincidiría con la menor de las eficiencias geométricas. Si además existe un desplazamiento entre ambos habrá que tener en cuenta la fracción de área de superposición. Por tanto, la expresión (2) quedará como:

$$N_{ab} = f_{geo} (\mathcal{E}_{int})_a (\mathcal{E}_{int})_b I_{ab} S T \quad (3)$$

Como las coincidencias se miden con un *tiempo de resolución* $\sigma = 2\tau$, grande comparado con el retraso entre las radiaciones a y b , aparece un cierto número de coincidencias de tipo accidental o aleatorio que vale:

$$N_A \approx 2\tau r_a r_b T = 2\tau N_a N_b / T = 2\tau \mathcal{E}_a \mathcal{E}_b I_a I_b S^2 T \quad (4)$$

donde r_a y r_b son las frecuencias de cuentas en cada rama.

La relación entre las cuentas accidentales y las verdaderas es:

$$R = \frac{N_A}{N_{ab}} = 2\tau \frac{I_a I_b}{I_{ab}} F S \quad (5)$$

donde se ha definido F como:

$$F = \frac{(\epsilon_{geo})_a (\epsilon_{geo})_b}{f_{geo}} \quad (6)$$

con lo que el número total de cuentas registradas en coincidencia es

$$N_T = N_{ab}(1+R) \quad (7)$$

De las expresiones (1) y (2) se puede determinar la actividad S de la fuente,

$$S = \frac{I_{ab}}{I_a I_b} \frac{N_a N_b}{N_T} \frac{(1+R)}{FT} \quad (8)$$

y las eficiencias absolutas de los detectores:

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \frac{F}{(1+R)} \frac{I_b}{I_{ab}} \frac{N_T}{N_b} \\ \epsilon_b &= \frac{F}{(1+R)} \frac{I_a}{I_{ab}} \frac{N_T}{N_a} \end{aligned} \quad (9)$$

15.6.2 Eficiencia intrínseca de los detectores.

Por tratarse de fuentes puntuales y detectores con simetría cilíndrica, el cálculo de la eficiencia se puede llevar a cabo tal y como se describe en el apartado 10.

Cuando se tienen dos detectores en coincidencia, las expresiones (9) también permiten calcular las eficiencias absolutas de cada uno de ellos, a partir de las cuales pueden determinarse las eficiencias intrínsecas. Ténganse presente las dos siguientes recomendaciones:

- Calcúlese la aceptación del detector, para una determinada posición de las fuentes, que debe de permanecer inalterada a lo largo de la medida de eficiencias. Cuando se cambia de fuente, controlar que la posición es exactamente la misma.
- Téngase en cuenta que la actividad nominal de la fuente hace referencia a la actividad de la desintegración β , que en el núcleo hijo origina desintegraciones γ ; por tanto, habrá que evaluar cuantos fotones se emiten por cada desintegración β . En el caso particular del ^{22}Na son dos los fotones de 0.511 MeV los que se emiten por cada desintegración β^+ .

15.6.3 Descripción de las técnicas de coincidencia a desarrollar en la práctica.

Existen tres técnicas básicas para el estudio de coincidencias: la técnica del módulo de coincidencias, la técnica de coincidencia retrasada mediante el uso de un TAC (Convertidor Tiempo-Amplitud) y la técnica de la puerta lineal (Linear Gate). Todas ellas se describen en las siguientes secciones, si bien la técnica de la puerta lineal se llevará a cabo en función del tiempo de que se disponga para la realización de la práctica.

15.6.3.1 La técnica del módulo de coincidencias.

El sistema simplificado del montaje experimental utilizado en esta técnica es el indicado en la figura 43. La unidad de coincidencia realiza la función lógica de determinar si dos o más pulsos son simultáneos, es decir, selecciona de todos los intervalos sólo aquellos para los cuales la diferencia de tiempos entre dos entradas es menor que un parámetro del circuito que corresponde al *tiempo de resolución*.

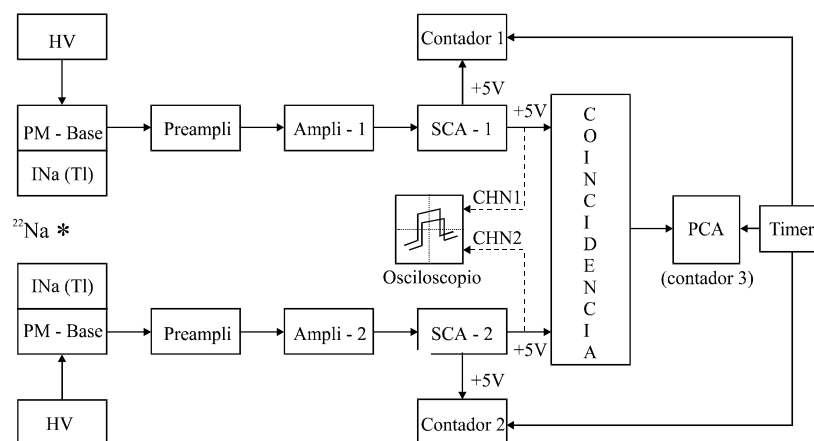


figura 43.- Esquema del montaje para la técnica del módulo de coincidencia.

Si se efectúan una serie de medidas de la tasa de coincidencias en función del tiempo de retraso t_v , se obtiene una curva que es exactamente equivalente al espectro temporal multicanal de la técnica de coincidencia retrasada (figura 45). Este tipo de representación se denomina *curva de coincidencia-retraso* (ver 12.2). La *FWHM* de esta curva es 2τ , siendo como siempre 2τ el *tiempo de resolución* de la unidad de coincidencias. La figura 44 ilustra la relación entre la tasa de coincidencias medias y la distribución diferencial dr/dT frente a T para el caso de un *tiempo de resolución* dado. Esta distribución diferencial es la misma que para el espectro multicanal de la figura 45. La tasa de coincidencias medias corresponde al área bajo el espectro entre los límites $t_v - \tau$ y $t_v + \tau$ para un t_v dado.

Idealmente, las medidas de coincidencias deben efectuarse colocando el retraso t_v en el punto 1. La tasa de coincidencias verdaderas corresponde al área bajo el pico de coincidencias, mientras que la tasa de coincidencias casuales corresponde al área del continuo sobre el que el pico está situado. Si el retraso t_v es elevado, en el punto 2 solamente serán medidas las coincidencias casuales. Así, la expresión (13) permite determinar el *tiempo de resolución* de cada unidad. Para ello colocamos dos entradas totalmente descorrelacionadas temporalmente y medimos las tasas r_a y r_b de cada detector, así como la tasa de coincidencias (que serán sólo las casuales), con lo cual ya podremos determinar 2τ .

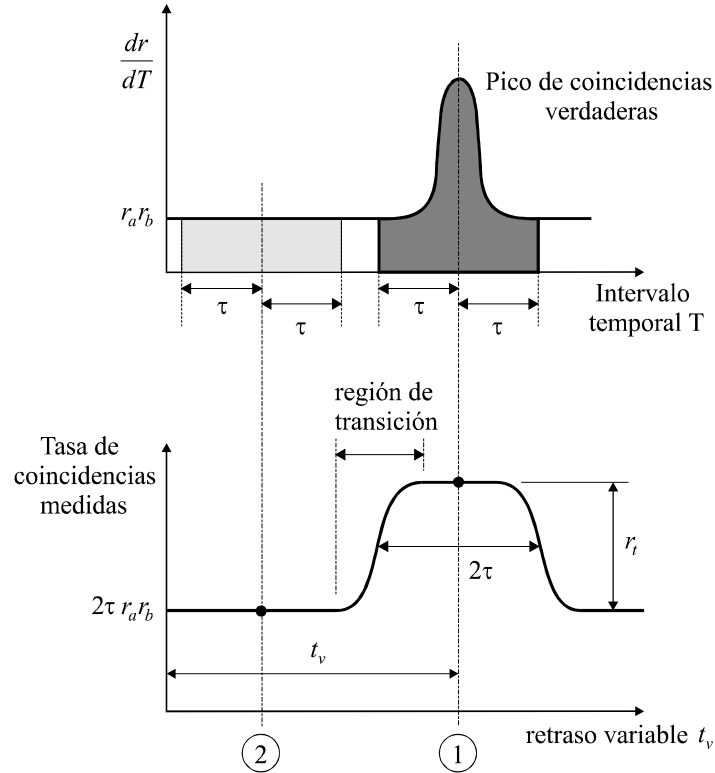


figura 44.- Relación entre la tasa de coincidencias y la distribución diferencial dr/dT frente a T para el caso de un tiempo de resolución τ dado.

15.6.3.2 La técnica de coincidencia retrasada (TAC).

El Convertidor Tiempo-Amplitud o TAC (ver apartados 8.9 y 8.9.1) es un dispositivo que produce un pulso analógico cuya amplitud es proporcional al intervalo temporal entre las señales de *START* y *STOP*. La distribución diferencial de amplitudes de los pulsos de salida es almacenada en el analizador multicanal o PCA, lo que permite medir la distribución de intervalos temporales entre las señales de *START* y *STOP*, es decir, el **espectro temporal** de las señales.

Sean r_a y r_b las tasas de cuentas en cada rama del TAC. La probabilidad de que en un tiempo T después de la llegada del *START* no haya un *STOP* es e^{-Tr_b} . La probabilidad diferencial de que el *STOP* llegue un dT después es $r_b dT$. Se sigue que la probabilidad de que el *STOP* llegue entre T y $T+dT$ es

$$P(T)dT = r_b e^{-Tr_b} dT \quad (10)$$

La tasa diferencial $dr = r dT$ de coincidencias casuales entre T y $T+dT$ será

$$dr = r_a P(T)dT = r_a r_b e^{-Tr_b} dT \quad (11)$$

Si Tr_b es pequeño se puede desarrollar en serie la exponencial, quedándonos sólo con el primer término, con lo que

$$dr = r_a r_b dT \quad (12)$$

es decir, $dr/dT = r_a r_b$. Que Tr_b sea pequeño significa que r_b es mucho menor que el inverso del *intervalo temporal* del TAC. Si la salida del TAC es almacenada en la PCA con una anchura temporal ΔT por canal, la tasa de coincidencias casuales será $r_a r_b \Delta T$. Si la *FWHM* del pico es 2τ , la tasa total de coincidencias casuales o aleatorias será

$$r_A = 2\tau r_a r_b \quad (13)$$

El sistema simplificado de almacenamiento del espectro temporal en la PCA es el indicado en la figura 45.a. En la figura 45.b se indica el aspecto general del espectro temporal, suponiendo que el retraso entre la emisión de las dos radiaciones es despreciable frente al retraso de la cadena electrónica.

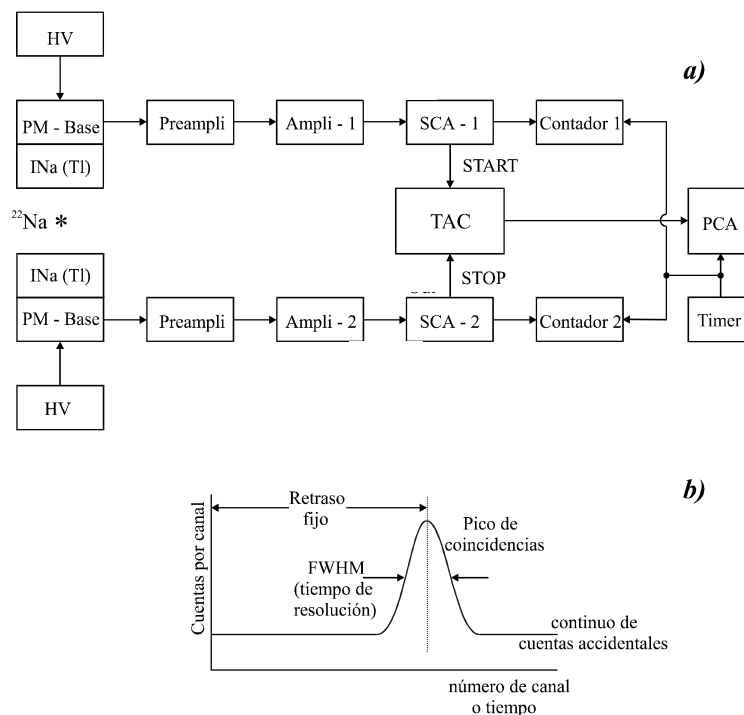


figura 45.- a) Esquema del montaje de almacenamiento del espectro temporal en la PCA; b) aspecto general de un espectro temporal obtenido con el esquema indicado en a).

15.6.3.3 La técnica de la puerta lineal (Linear Gate).

Este método es una simbiosis de los dos anteriores. Se trata de obtener un espectro en coincidencia de uno de los detectores cuando en el otro sea detectada una radiación. El esquema de montaje puede verse en la figura 46. El espectro así obtenido será el mismo que se obtendría con un solo detector pero sin el pico de radiación que abre la puerta para la coincidencia.

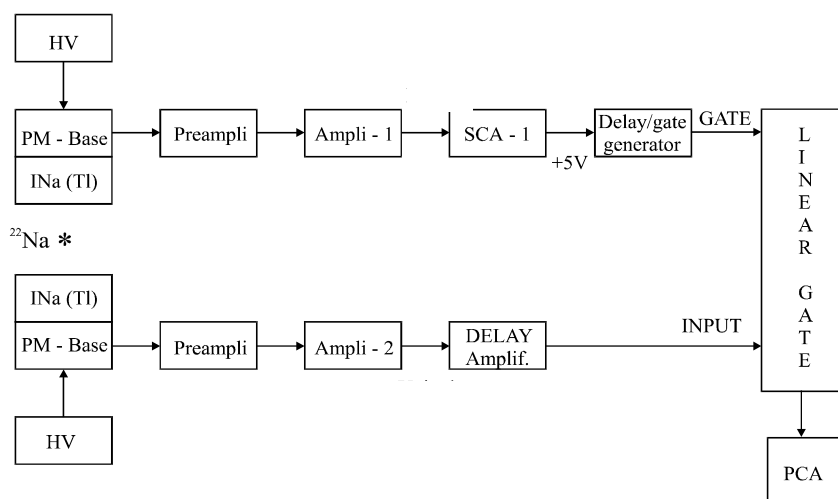


figura 46.- Esquema del montaje experimental para la técnica de la puerta lineal.

15.7 Preparación del experimento.

15.7.1 Determinación de las condiciones de trabajo.

Son dos los factores fundamentales que hay que determinar a la hora de establecer las condiciones de trabajo:

- Alta tensión aplicada al fotomultiplicador
- Factor de ganancia en el amplificador

El valor escogido para la alta tensión afecta directamente al proceso de multiplicación de electrones, que tiene lugar en el interior del fotomultiplicador, y por tanto a la resolución. Para el desarrollo de este apartado se deberán seguir las especificaciones dadas en (6.3.1).

Para la realización de este apartado mídase la resolución energética del sistema para un voltaje de aproximadamente 1000 V y una ganancia del amplificador tal que el fotopico del ^{22}Na se sitúe a la derecha de la escala de la PCA, disminúyase el voltaje progresivamente y calcúlese la resolución hasta encontrar su valor mínimo. Fijada la tensión de trabajo, puede modificarse el valor de la ganancia para que el resto de los espectros aparezcan en una zona conveniente.

15.7.2 Linealidad y calibración energética.

La calibración energética se puede llevar a cabo mediante la representación gráfica y ajuste de los picos de distintos isótopos, cuya energía es conocida, en función del canal del centroide del pico (ver apartado 9). Es por tanto una representación de **energías - canales**. Es recomendable que alguno de estos picos sea ajustado por el alumno fuera del entorno de la PCA: se trata de ajustar una curva gaussiana sobre un fondo lineal, parabólico o polinómico; compárese la bondad de los diferentes ajustes mediante el test estadístico CHI2. Para este ajuste tome a derecha e izquierda del pico gaussiano los datos correspondientes a dos o tres FWHM, si el entorno lo permite.

La calibración energética y linealidad se puede completar con el generador de pulsos: en efecto podemos atenuar las señales inyectadas por el generador por diferentes factores, de modo que se puede obtener una representación gráfica de amplitudes frente a canales, de forma que si hemos tenido la precaución de hacer coincidir alguna de las líneas generadas

con el centroide de alguna línea de energía conocida, nos sirve para obtener más puntos para la calibración y para el cálculo de la linealidad integral del sistema (ver Leo).

La anchura de los picos obtenidos con el generador se relaciona con la resolución característica de la cadena electrónica. Esta se suma cuadráticamente con la resolución intrínseca del detector para dar la resolución total de los picos, comentada previamente. La resolución electrónica debe ser apreciablemente mejor que la del detector. El alumno debe desarrollar el trabajo proporcionando gráficas de calibración con fotopicos y con el generador de pulsos, así como un estudio de la linealidad integral y resolución intrínseca de la cadena electrónica. El estudio de la linealidad integral se puede llevar a cabo haciendo un ajuste lineal y otro parabólico de los datos (ver apartado 11.1).

Los alumnos de Instrumentación Nuclear y de Partículas deben así mismo estudiar la **linealidad diferencial** de la PCA. Para ello puede usarse un **TAC** (*Time to Analogical Converter*), cuyo *Start* puede ser generado por un Pulsador y el *Stop* puede venir dado por una señal totalmente descorrelacionada con la anterior (por ejemplo la producida por un fotomultiplicador). Se espera una distribución uniforme para el tiempo de llegada de los *stops*, si el sistema electrónico y PCA son totalmente lineales. Véase el apartado 11.2 para su determinación. Las tareas que se proponen en este punto son:

1. Calibración energética: ajuste de la recta energía-canales, con estudio estadístico de la bondad del ajuste mediante el χ^2 .
2. Estudio de la linealidad integral de la PCA, mediante la comparación del ajuste lineal y parabólico de los datos de calibración. Usar el χ^2 .
3. Estudio de la linealidad diferencial.
4. Contribución de la electrónica a la resolución total del sistema. Buscar en la bibliografía cómo varía esta resolución en función de la energía. Substraerla cuadráticamente para representar gráficamente la resolución intrínseca del detector, la resolución total y la debida a la electrónica.

15.7.3 Coincidencias y correlación angular con el ^{22}Na .

El sistema de detección del experimento está constituido por dos cristales centelleadores de Ina(Tl) acoplados a sendos tubos fotomultiplicadores. La radiación γ es absorbida por el cristal centelleador, como consecuencia de la posterior desexcitación se produce un breve destello luminoso en el seno del cristal. El tubo fotomultiplicador (PM) transforma dicho destello luminoso en un pulso eléctrico, el cual es amplificado mediante la estructura de dínodos conectados a distinto potencial y alojados en su interior, produciéndose de este modo una avalancha de electrones y por tanto la amplificación del pulso.

Después de conectar los dos detectores de Ina(Tl) (en las conexiones indicadas como HV) a la fuente de alta tensión regulada previamente a la tensión óptima, las salidas de los PMs (indicadas como ANODE) se llevan directamente a los preamplificadores y de allí a los amplificadores. En estas dos secciones de amplificación el pulso producido por la radiación se desacopla del nivel continuo del voltaje de alimentación y se conforma la señal para su posterior análisis. La altura de las señales de salida del amplificador puede ser modificada utilizando el factor de ganancia del amplificador mediante los selectores: *FINE* (ganancia fina) y *COARSE GAIN* (ganancia gruesa). La ganancia establecida en el proceso de amplificación será el producto de la ganancia fina por la ganancia gruesa. Con la fuente colocada en la posición de medida, y sobre cada detector por separado, ajustamos la ganancia de su correspondiente amplificador teniendo en cuenta:

- que las señales de salida de los amplificadores no se saturen;
- dado que el *ADC* de la *PCA* acepta señales en el intervalo de 0 a 8 V, colocaremos el pico de 0.511 MeV del ^{22}Na en la zona de los 5 V (zona intermedia del espectro de la *PCA*). Por otra parte, el *TAC* suministra pulsos analógicos en el intervalo de 0 a 10 V, con lo cual podríamos tener problemas en el acoplamiento *TAC-PCA*. Este problema puede resolverse fácilmente colocando el selector *multiplier 0.5-1.5* del *TAC* en el valor 1.25.

Una vez esto realizado, y si fuese necesario, se ajustará el polo cero (*P/Z*) de las señales para eliminar al máximo su “undershoot” o “upershoot”, lo cual lo podemos conseguir viendo las señales en el osciloscopio en la menor escala de tiempos posible. Se recomienda medir la curva *plateau* de cada *PM* con el fin de determinar el voltaje óptimo de trabajo.

Con esto ya podemos conectar las salidas unipolares de los amplificadores al *ADC* de la *PCA* con el fin de observar el espectro del ^{22}Na .

El siguiente paso es el ajuste del retraso relativo de los dos *SCA* para que los caminos electrónicos de los dos detectores, hasta la coincidencia, sean iguales o como menos no inferior al *tiempo de resolución* del módulo de coincidencias. Para ello podemos utilizar el generador de pulsos. La máxima coincidencia la estableceremos con ayuda del osciloscopio y el criterio que puede usarse es la máxima verosimilitud del *tiempo de subida* (*rise time*) y del *tiempo total* (*full time*) de ambas señales. Finalmente ajustaremos el *tiempo de pico* (*peaking time*, *T_p*) del *SCA* en el intervalo adecuado según el ancho de las señales unipolares de los amplificadores que previamente habremos determinado en el osciloscopio.

15.7.3.1 Calibración de los SCA

Una vez completados los pasos de los apartados previos, podremos efectuar la calibración de los *SCA*, de tal manera que ambos seleccionen únicamente los fotones de 0.511 MeV. Para su calibración se deben seguir las instrucciones dadas en el apartado 8.7.

Posteriormente se debe calibrar en tiempos el sistema *TAC-PCA* (ver apartado 8.9.1). Es muy importante antes de realizar cualquier otra operación verificar que cuando en la cadena electrónica no tengamos ningún retraso establecido la diferencia entre el *START* y el *STOP* sea cero, aunque en tal caso la amplitud del pulso de salida del *TAC* es nula y por tanto habrá que introducir un retraso fijo y conocido en la línea del *STOP*. Se aconseja introducir retrasos hasta que el espectro temporal quede centrado en la *PCA*. En el proceso se puede hacer uso de los retrasos relativos de los *SCA* y también del módulo *línea de retraso* así como también del *generador de pulsos*, aunque puede utilizarse la propia fuente de ^{22}Na .

Se recomienda consultar los manuales de los módulos así como las referencias W. R. Leo y G. F. Knoll, para una descripción más detallada sobre su modo de operación y descripción de características técnicas.

15.7.4 Vidas medias de estados nucleares.

En esta parte del experimento lo que se pretende es aplicar las correlaciones temporales para medir la vida media del estado excitado $(3/2)^-$ de energía 0.0144 MeV del ^{57}Co , utilizando para ello uno de los dos detectores de *INa(Tl)* anteriores y el detector de *INa(Tl)* con ventana de berilio. Los pasos a seguir en este caso son exactamente los mismos que en el ejercicio anterior, con la diferencia de que al nuevo detector de ventana de berilio hay que

aplicarle una tensión que no exceda los +750 V. Dado que sólo se dispone de una fuente de alta tensión, se aplicará dicha tensión a ambos detectores. Con el fin de medir la vida media del estado anteriormente citado, la calibración de los *SCA* se hará de tal manera que con el detector de ventana de berilio seleccionemos los fotones provenientes de la desexcitación del estado en cuestión al estado fundamental (0.0144 MeV) y con el otro detector de *INa(Tl)* seleccionemos las γ que originan dicho estado excitado (0.122 MeV). Cada una de estas señales constituye el *STOP* y el *START* respectivamente del módulo TAC. Calibrado en tiempos el sistema *TAC-PCA* y tras verificar que no hay retrasos relativos, podemos ya conectar la adquisición para determinar la distribución en tiempos de la vida media del estado. Acumular suficiente estadística como para hacer una estimación suficientemente precisa de la vida media.

15.8 Resultados a presentar.

15.8.1 Verificación experimental de la desintegración $\gamma\gamma$ del positronio.

Una vez realizadas las tareas previas al experimento, pasamos a verificar experimentalmente la desintegración $\gamma\gamma$ del positronio. Para ello se sugiere llevar a cabo los siguientes pasos:

- Verificar la desintegración utilizando la técnica del módulo de coincidencias. Trazar las curvas de *coincidencia-retraso* para distintos *tiempos de resolución* del módulo de coincidencias y verificar en todos los casos que la *FWHM* de dicha curva coincide con el *tiempo de resolución* 2τ establecido en la unidad de coincidencias. Verificar entonces la ley de las coincidencias casuales.
- Verificar la desintegración utilizando la técnica de la coincidencia retrasada (*TAC*). Una vez acumulada suficiente estadística, calcular el *tiempo de resolución* de la coincidencia así como la tasa de coincidencias verdaderas y casuales. Calcular entonces la actividad de la fuente así como las eficiencias globales, intrínsecas y geométricas de los detectores.
- Verificar la desintegración utilizando el método de la puerta lineal.
- Comprobar que los resultados obtenidos por cualquiera de los tres métodos anteriores son compatibles.

15.8.2 Correlación angular $\gamma\gamma$ del ^{22}Na .

La correlación angular de los fotones emitidos en la desintegración del positronio, se obtendrá representando el número de coincidencias obtenidas mediante los métodos descritos anteriormente, en función del ángulo θ formado por los dos detectores de *INa*. A pesar de que teóricamente se espera una distribución muy estrecha y centrada alrededor de $\theta = 180^\circ$, el hecho de que el ángulo sólido subtendido por ambos detectores es finito y la fuente no es totalmente puntual, da origen a una distribución con una cierta anchura.

15.8.3 Vida media del estado $(3/2)^-$ del ^{57}Co .

Tras haber acumulado suficiente estadística, ajústese por un método de mínimos cuadrados, o máxima verosimilitud, el espectro obtenido a una función exponencial. A partir de los parámetros del ajuste obténgase el valor de la vida media y su error. Establézcase un test de χ^2 para determinar la bondad del ajuste.

15.9 Referencias

Introduction to high energy physics

D. H. Perkins, Ed. Addison Wesley, 1987.

Alpha, Beta and Gamma Ray Spectroscopy, Vol. 1 y 2

K. Siegbahn, North-Holland, Amsterdam, 1965.

The coincidence Method

A. H. Wapstra, pag. 539-555.

Angular Distribution of Nuclear Radiation

H. Frauenfelder et al., pag. 997-1195.

The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy

W. D. Hamilton, North-Holland, Amsterdam, 1975.

Angular Distribution and Correlation of Gamma Rays

R. M. Steffen et al., pag. 505-582.

Gamma Ray Angular Distribution and Correlation Measurements (I): Experimental Methods using Radioactive Sources

W. D. Hamilton, pag. 645-698.

Nuclear Radiation Detection

William J. Price. Ed. McGraw-Hill Book Company. (Second edition)

Introductory Nuclear Physics

K.S. Krane. Ed. John Wiley and Sons. 1987.

The atomic nucleus

R.D. Evans. Ed. Krieger Publishing Co. 1982.

A handbook of radioactivity measurements procedures

NCRP Report, No. 58, 1989.

Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments

W. R. Leo, Springer-Verlag, New York, 1994.

Radiation Detection and Measurement

G. F. Knoll, John Wiley-Sons, New York, 1988.

Data reduction and error analysis for the physical sciences

P. R. Bevington, McGraw-Hill Book Co, New York, 1969.

Mètodes Numèrics per a la Física

R. Guardiola, E. Higón, J. Ros, Ed. Universitat de València, 1995.

Probability and statistics in particle physics

A. G. Frodesen, O. Skjeggstad, H. Tofte, Ed. Universitetsforlaget, 1979.

Table of Isotopes

Edgardo Browne et al., John Wiley and Sons, New York, 1978.

Análisis de errores

C. Sánchez del Río. Ed. Eudema Universidad. 1989.

Manuales de los distintos módulos.

