

14. PRÁCTICA 2.- COINCIDENCIAS $\gamma\gamma$ Y CORRELACIONES ANGULARES CON UNA FUENTE DE ^{60}Co . MEDIDA DE VIDAS MEDIAS DE ESTADOS NUCLEARES

14.1 Introducción

Una de las principales herramientas para el estudio de la estructura de los núcleos atómicos la constituye la denominada **Espectroscopía γ** . Esta denominación acoge una serie de técnicas para medir diversas características de la radiación electromagnética emitida como consecuencia de la desexcitación de un cierto nivel nuclear a otro. Esta radiación lleva información sobre los niveles nucleares correspondientes. Las magnitudes medidas usualmente son la energía, intensidad y grado de polarización de la radiación así como su dependencia con ciertos parámetros.

La probabilidad de emisión de una partícula por un núcleo radiactivo depende en general del ángulo entre el eje de espín nuclear y la dirección de emisión. Bajo circunstancias normales, la radiación emitida por una fuente radiactiva es isótropa dado que los núcleos están orientados aleatoriamente en el espacio. Un patrón de radiación anisótropo solamente puede ser observado si procede de una muestra de núcleos que no están aleatoriamente orientados.

Un método de alcanzar tal propósito consiste en colocar la fuente radiactiva en el seno de un campo magnético o eléctrico intenso a muy baja temperatura, lo que permite polarizar o alinear los núcleos para después medir la distribución angular de la radiación emitida con respecto a la dirección de alineamiento dada por el campo aplicado.

Otro método, el cual es objeto de estudio en la presente práctica, consiste en tomar sólo los núcleos cuyos espines están en una determinada dirección. Este método puede realizarse si el núcleo que se desintegra lo hace a través de la emisión sucesiva de dos radiaciones R_1 y R_2 . La observación de R_1 en una dirección fija \vec{k} selecciona un conjunto de núcleos que tienen una distribución de espines anisótropa. La radiación R_2 mostrará entonces una *correlación angular* con respecto a \vec{k} .

Bajo el término *correlación angular* se comprende la *correlación direccional* y la *correlación de polarización*. En el primer caso sólo las direcciones de las dos radiaciones son observadas mientras en el segundo caso se determina también la polarización lineal o circular de una o de ambas radiaciones. A estos dos tipos de correlaciones angulares habría además que añadir las *correlaciones temporales* en las cuales lo único que se determina es la coincidencia de ambas radiaciones, la cual suministra valiosa información sobre el núcleo, permitiendo determinar, por ejemplo, vidas medias de estados excitados nucleares. En esta práctica sólo nos ocuparemos de las **correlaciones temporales** y las **angulares direccionales**. En el estudio de cualquiera de estos tipos de correlaciones las técnicas experimentales utilizadas se agrupan bajo la denominación de **técnicas de coincidencia**.

En estudios de correlación angular direccional, la situación típica es la siguiente: un núcleo emite en rápida secuencia dos fotones γ_1 y γ_2 . Nos preguntamos entonces por la probabilidad relativa $W(\theta)d\Omega$ de que γ_2 sea emitida en un ángulo sólido $d\Omega$ entorno al ángulo θ con respecto a \vec{k} . La comparación de la distribución medida experimentalmente con la teoría, suministra finalmente la información deseada sobre las propiedades de los niveles nucleares y las radiaciones.

14.2 Objetivos de la práctica.

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

- Generalidades de los detectores de centelleo mediante la utilización de detectores de INa(Tl) .
- Estudio de las características de los espectros de radiación γ .
- El tratamiento estadístico de datos experimentales y sus errores.
- Familiarización con las técnicas experimentales de coincidencia necesarias para el estudio de la correlación angular direccional y temporal de la emisión γ de los núcleos.
- Características de las correlaciones angular direccional y temporal de la radiación γ como fuente de información de los núcleos atómicos, en particular, de las paridades de los estados involucrados en las transiciones y de las cascadas de emisión radiactiva.
- Aplicación de las técnicas de coincidencia al estudio de vidas medias de estados nucleares excitados.

Dada la amplitud de la práctica, las tareas a realizar serán las propuestas por el profesor en cada caso. La práctica se puede subdividir en tres bloques:

- Preparación del experimento y verificación experimental de la cascada γ - γ del ^{60}Co , incluyendo la determinación de la actividad de la fuente y de las eficiencias de los detectores de INa(Tl) .
- Además de lo anterior realizar la medida de la correlación angular γ - γ del ^{60}Co , con los detectores de INa(Tl) , con el fin de determinar la multipolaridad de las dos γ emitidas, así como de los momentos angulares de los estados nucleares involucrados.
- Como aplicación de la técnica de correlación temporal se medirá la vida media del estado excitado $(3/2)^-$ de energía 0.0144 MeV del ^{57}Fe (núcleo hijo del ^{57}Co), utilizando para ello uno de los dos detectores de INa(Tl) anteriores y un nuevo detector de INa(Tl) con ventana de Berilio.

14.3 Fuentes de radiación γ

Las fuentes de radiación γ que, fundamentalmente, se utilizan en esta práctica son el ^{60}Co y el ^{57}Co .

El ^{60}Co se desintegra con una vida media de 5.26 años emitiendo una partícula β de energía 0.319 MeV al estado excitado de 2.5057 MeV del núcleo hijo ^{60}Ni . Este nivel se desexcita emitiendo radiación γ al nivel de 1.3325 MeV, lo cual da como resultado una γ de 1.1732 MeV. El estado de energía 1.3325 MeV se desintegra a su vez por el mismo mecanismo al estado fundamental del ^{60}Ni , dando lugar a una nueva γ de la misma energía que el estado anterior. La segunda γ es emitida con una vida media de 0.73 ps.

El ^{57}Co por el contrario 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 0.1365 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, el 89% restante se desintegra a un estado excitado intermedio de energía 0.0144 MeV el cual a su vez se desintegra finalmente al estado

fundamental. En la figura 31 se pueden ver los esquemas de niveles energéticos y de desintegración del ^{60}Co y ^{57}Co .

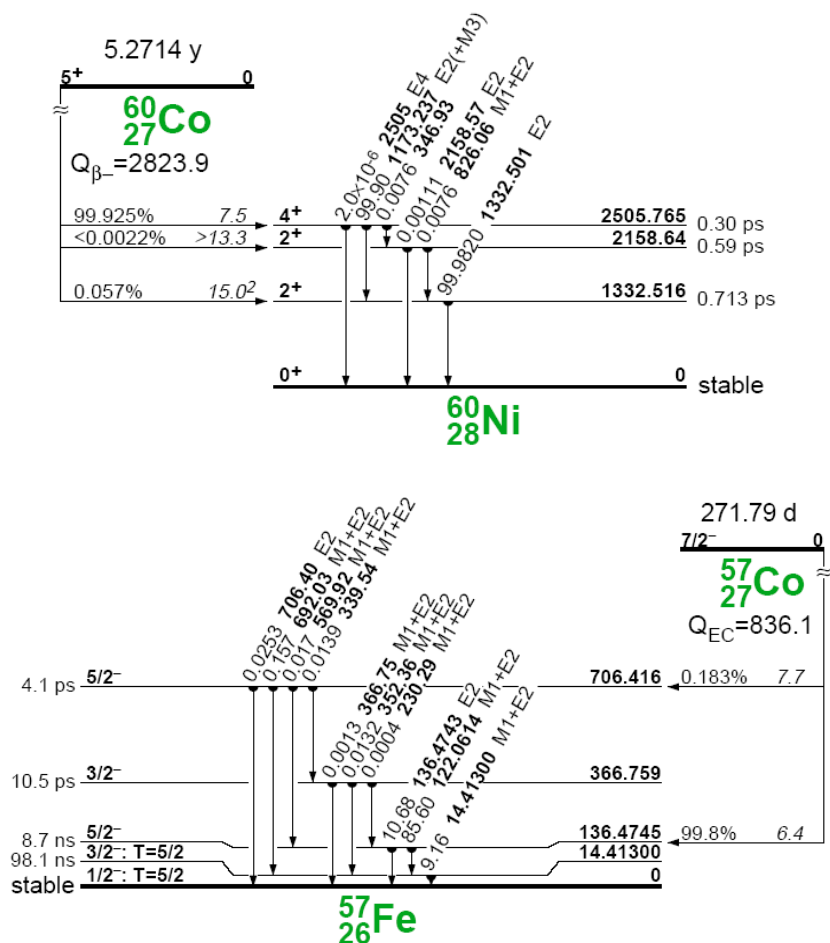


figura 31.- Esquemas de niveles energéticos y de desintegración del ^{60}Co y del ^{57}Co , respectivamente.

Una consideración importante respecto de las fuentes de radiación γ 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 .

14.4 El dispositivo experimental

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

- Dos detectores de INa(Tl) de $2'' \times 2''$ 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 $1'' \times 1''$ 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 ^{60}Co , se dispone de una mesa sobre la cual se sitúan los detectores de INa y la fuente radioactiva; 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 32.

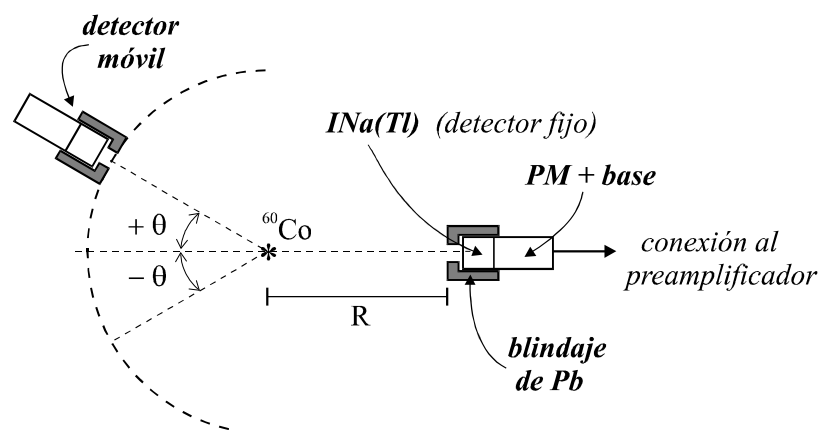


figura 32.- Esquema del montaje experimental para el estudio de correlaciones angulares.

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

14.4.1 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).

14.4.2 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.

14.5 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.

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

Para un núcleo como el ^{60}Co que se desintegra vía β con un esquema de desintegración como el de la figura 33, consideremos las transiciones γ coincidentes a y b , con fracciones de desintegración relativas a la actividad de la fuente I_a e I_b , 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 los números de cuentas:

$$N_a = \varepsilon_a I_a S T \quad (1)$$

$$N_b = \varepsilon_b I_b S T \quad (2)$$

Es importante indicar aquí que las eficiencias ε_a y ε_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, tendremos:

$$N_{ab} = \varepsilon_a \varepsilon_b I_{ab} S T \quad (3)$$

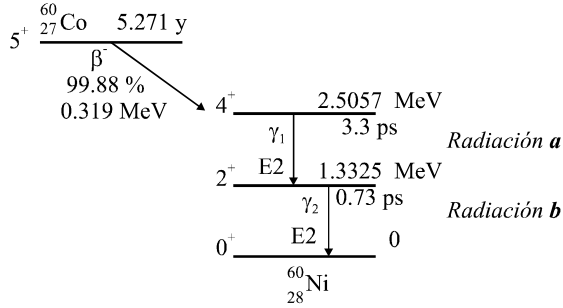


figura 33.- Esquema de desintegración de un emisor β , como es el caso del ^{60}Co .

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

$$N_A \approx 2\tau N_a N_b / T = 2\tau \varepsilon_a \varepsilon_b I_a I_b S^2 T \quad (4)$$

La relación entre las cuentas accidentales y las verdaderas es

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

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

$$N_T = N_{ab} (1 + R) \quad (6)$$

De las expresiones (1), (2) y (3) se puede determinar la actividad S de la fuente,

$$S = \frac{I_{ab}}{I_a I_b} \frac{N_a N_b}{N_T} \frac{1 + R}{T} \quad (7)$$

y las eficiencias absolutas de los detectores

$$\varepsilon_a = \frac{I_b N_T}{I_{ab} N_b (1 + R)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_b = \frac{I_a N_T}{I_{ab} N_a (1 + R)}$$

14.5.2 Eficiencia intrínseca de los detectores

Por tratarse de fuentes puntuales y un detector 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 (8) permiten calcular las eficiencias absolutas de cada uno de ellos, a partir de las cuales pueden determinarse las eficiencias intrínsecas y geométricas o de aceptación. 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 .

14.5.3 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.

14.5.3.1 La técnica del módulo de coincidencias

El sistema simplificado del montaje experimental utilizado en esta técnica es el indicado en la figura 34. 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*.

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 36). 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 35 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 36. 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.

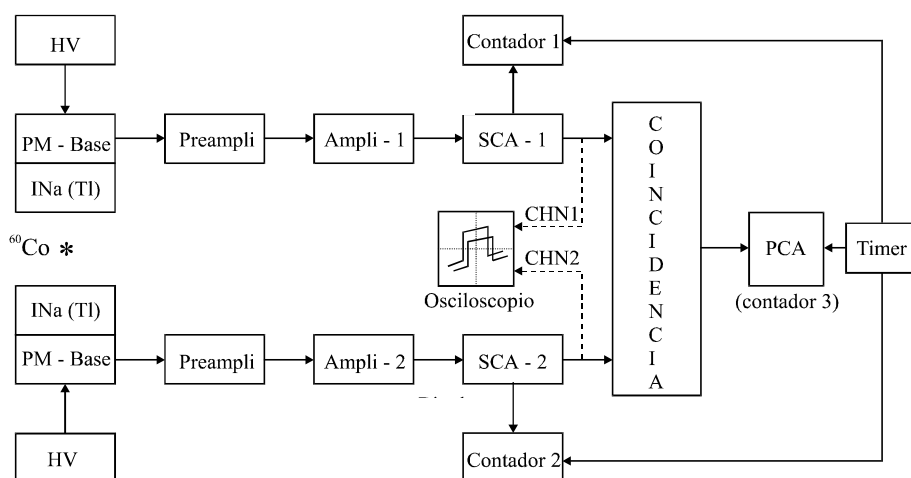


figura 34.- Esquema del montaje para la técnica del módulo de coincidencia.

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 (12) 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 .

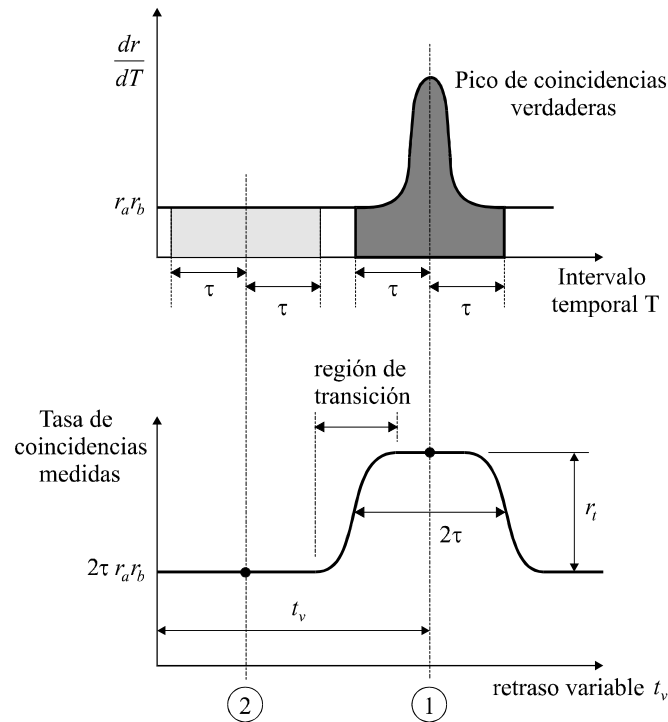


figura 35.- Relación entre la tasa de coincidencias y la distribución diferencial dr/dT frente a T para el caso de un tiempo de resolución τ dado.

14.5.3.2 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

$$P(T)dT = r_b e^{-Tr_b} dT \quad (9)$$

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

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

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

$$dr = r_a r_b dT \quad (11)$$

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

$$r_A = 2\tau r_a r_b \quad (12)$$

El sistema simplificado de almacenamiento del espectro temporal en la PCA es el indicado en la figura 36.a. En la figura 36.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.

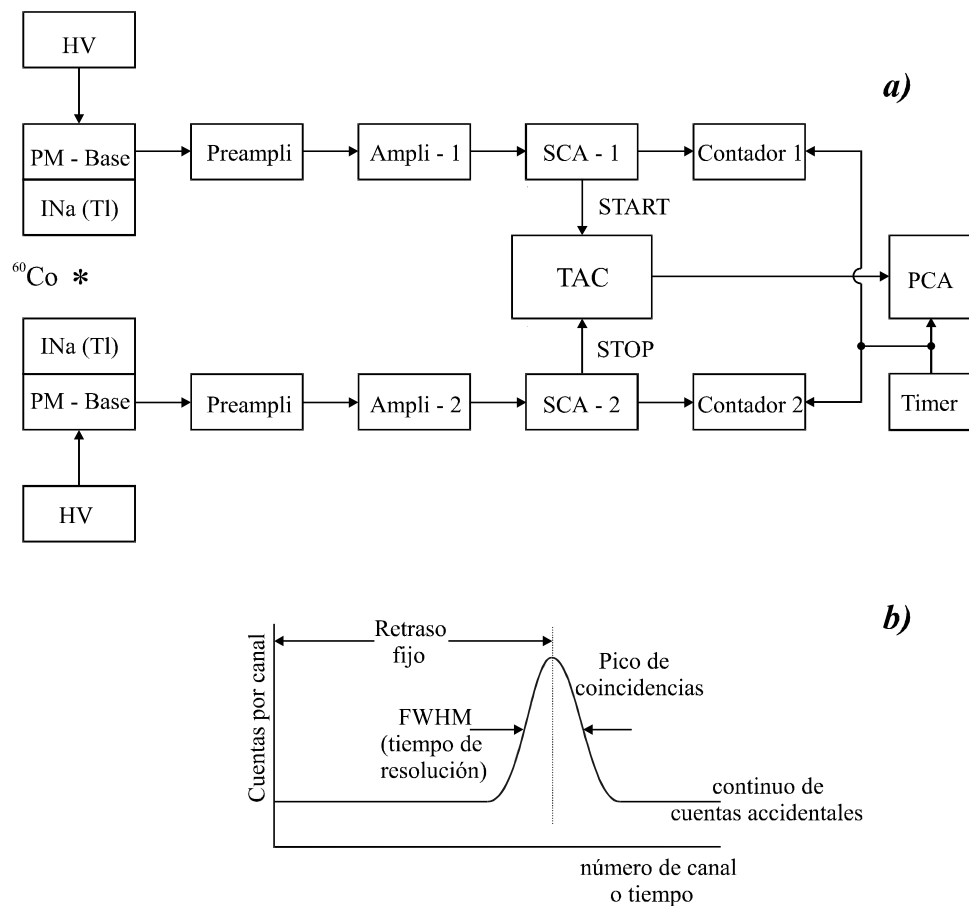


figura 36.- a) Esquema del montaje de almacenamiento del espectro temporal en la PCA; b) aspecto general de un espectro temporal obtenido con el esquema indicado en a).

14.5.3.3 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 37. 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.

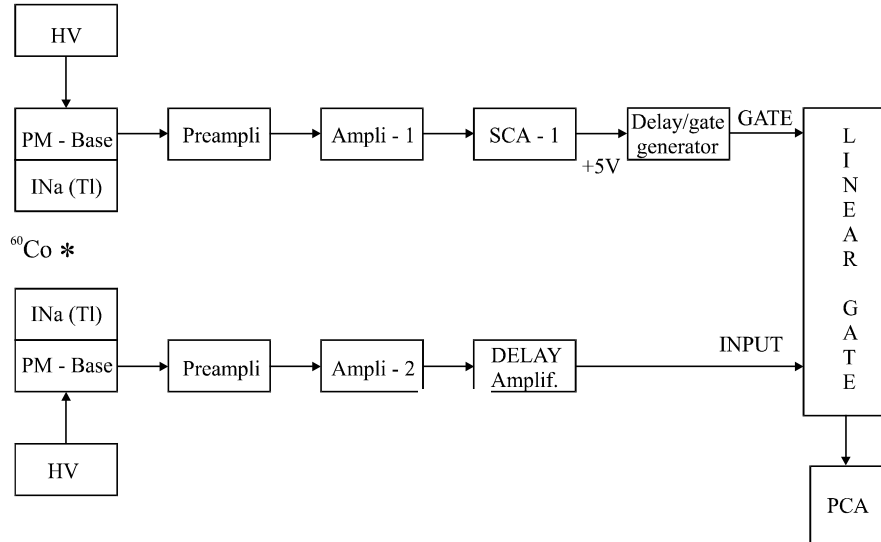


figura 37.- Esquema del montaje experimental para la técnica de la puerta lineal.

14.6 Distribución angular de la radiación nuclear

14.6.1 Generalidades

Como es sabido, las transiciones γ de los núcleos se dividen en dos tipos: eléctricas de multipolaridad L (EL) y magnéticas de multipolaridad L (ML). Éstas no tienen por qué ocurrir de forma separada (transiciones puras), sino que puede haber mezclas de ambas. Sin embargo, la teoría de las transiciones γ predice para transiciones entre dos niveles de espín-paridad

$$(I_i, \Pi_i) \xrightarrow{L} (I_f, \Pi_f)$$

las siguientes reglas:

- Por conservación de momento angular, $|I_i - I_f| \leq L \leq |I_i + I_f|$ (no $L=0$). El fotón γ emitido es entonces caracterizado por el número cuántico de momento angular o multipolaridad L , y el momento cuántico magnético M , con $L^2 = L(L+1)\hbar^2$, $L_z = M\hbar$. Los números cuánticos de los dos estados nucleares son I_i, m_i y I_f, m_f ;
- La paridad del campo de radiación es: $\Pi(ML) = (-1)^{L+1}$ y $\Pi(EL) = (-1)^L$. Notar que los multipolos eléctricos y magnéticos del mismo orden tienen siempre paridades opuestas;
- Si $I_i = I_f = 0$ no puede haber transición, por no haber gammas de $L=0$. Si $I_i = I_f \neq 0$, el multipolo más bajo será $L=1$, no $L=0$.

Dado que la probabilidad de desintegración es gobernada por el elemento de matriz

$$m_{fi}(\Pi L) = \int \phi_f^* \mathbf{O}(\Pi L) \phi_i dv \quad (13)$$

del *operador multipolar* $\mathbf{O}(\Pi L)$, sólo se podrán producir las dos mezclas siguientes de transiciones

$$\begin{aligned} EL, ML+1, EL+2, ML+3, \dots \\ ML, EL+1, ML+2, EL+3, \dots \end{aligned}$$

El análisis de Weisskopf de las probabilidades de transición indica que:

- 1) Las multipolaridades más bajas son las dominantes. Incrementando el orden multipolar en una unidad, la probabilidad de transición se reduce en un factor de aproximadamente 10^{-5} .
- 2) Para un orden multipolar dado, la radiación eléctrica supera a la magnética en cerca de dos órdenes de magnitud, para núcleos medios y pesados.

Para determinar el orden multipolar de la radiación γ es preciso efectuar medidas de la distribución angular de la radiación, y para distinguir si se trata de radiaciones eléctricas o magnéticas es preciso medir la polarización de la radiación.

14.6.2 Correlación angular direccional

Cada componente $m_i \rightarrow m_f$ entre subniveles magnéticos posee una distribución direccional característica $F_L^M(\theta)$ que es independiente de I_i e I_f . θ denota el ángulo entre el fotón emitido y el eje de cuantificación z . La distribución $F_L^M(\theta)$ se encuentra calculando el flujo de energía (vector de *Poynting*) como una función de θ , para cada multipolo caracterizado por los números cuánticos L y M . La distribución angular se reduce a

$$\begin{aligned} F_L^M(\theta) = \frac{1}{2}(L-M)(L+M+1)|Y_{L,M+1}|^2 + \\ \frac{1}{2}(L+M)(L-M+1)|Y_{L,M-1}|^2 + M^2|Y_{L,M}|^2 \end{aligned} \quad (14)$$

donde $Y_{L,M}$ son los armónicos esféricos. Por ejemplo, para un dipolo ($L=1$) se obtiene

$$\begin{aligned} F_1^0(\theta) &= \frac{3}{8\pi} \sin^2 \theta \\ F_1^{\pm 1}(\theta) &= \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta) \end{aligned} \quad (15)$$

y para un cuadrupolo

$$\begin{aligned} F_2^0(\theta) &= \frac{15}{8\pi} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ F_2^{\pm 1}(\theta) &= \frac{5}{16\pi} (1 - 3\cos^2 \theta + 4\cos^4 \theta) \\ F_2^{\pm 2}(\theta) &= \frac{5}{16\pi} (1 - 4\cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (16)$$

Sin embargo, lo que experimentalmente se observa es una mezcla de todos los posibles $m_i \rightarrow m_f$. Por consiguiente, para calcular la distribución direccional $F_L(\theta)$ debemos conocer no solamente $F_L^M(\theta)$ sino también la población relativa $P(m_i)$ para cada subnivel m_i y la probabilidad de transición $G(m_i, m_f)$ para cada componente $m_i \rightarrow m_f$. La distribución direccional $F_L(\theta)$ vendrá pues dada por

$$F_L(\theta) \propto \sum_{m_i, m_f} P(m_i) G(m_i, m_f) F_L^M(\theta) \quad (17)$$

donde $M = m_i - m_f$. La probabilidad relativa de transición para una componente $m_i \rightarrow m_f$ se puede escribir como el producto de un factor nuclear (dependiente de las propiedades específicas nucleares pero no de m_i y m_f) y un factor geométrico (que depende explícitamente de m_i y m_f), quedando finalmente como el cuadrado del coeficiente de Clebsch-Jordan para el vector suma $I_i = I_f + L$, $m_i = m_f + M$:

$$G(m_i, m_f) = \langle I_f m_f L M | I_i m_i \rangle^2 \quad (18)$$

Las poblaciones relativas $P(m_i)$ dependen de las energías de los diferentes estados m_i y de la manera con la que se ha poblado el nivel m_i . Si el núcleo está aleatoriamente orientado todos los niveles m_i estarán igualmente poblados y $F_L(\theta)$ será isótropa.

Hay dos procedimientos que pueden utilizarse para crear desiguales poblaciones $P(m_i)$. El primero consiste en colocar la fuente radiactiva en el seno de un campo magnético intenso a muy baja temperatura. Las poblaciones de los niveles m_i cumplen que

$$P(m_i) \propto e^{-m_i(\Delta E/kT)} \quad (19)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y ΔE es la variación de la energía que experimenta el estado m_i respecto al nivel degenerado antes de introducir el campo magnético.

El segundo, que será el que se utilizará en la práctica, consiste en establecer como dirección de cuantificación la definida por la dirección de emisión del primer γ . La correlación direccional $w(\theta)$ entre los dos fotones es entonces idéntica a la distribución direccional $F_L(\theta)$ del segundo γ con respecto al eje z , pero ahora con distintas poblaciones en los nuevos estados m_i . De las ecuaciones (17) y (18) se puede calcular cada nueva población $P(m)$, que corresponde a la suma de todas las transiciones $m_i \rightarrow m$ que dan lugar al estado m . Asumiendo que todos los estados m_i están igualmente poblados, tenemos, con $M_1 = m_i - m$:

$$P(m) \propto \sum_{m_i} G(m_i, m) F_L^{M_1}(\theta = 0) = \langle I m L M | I_i m_i \rangle^2 F_L^{M_1}(\theta = 0) \quad (20)$$

Además, dado que un fotón propagándose en una dirección definida lleva en su dirección de movimiento el momento angular $+\hbar$ ó $-\hbar$, y en nuestro caso el γ_1 viaja en la dirección z , se verifica que $M_1 = \pm 1$. Por tanto, tan sólo $F_L^{+1}(0)$ y $F_L^{-1}(0)$ aparecerán en la ecuación (20).

La función de correlación $w(\theta)$ se obtiene finalmente de las ecuaciones (17), (18) y (20), con $M_2 = m - m_f$:

$$W(\theta) \propto \sum_{m_f, m, m_i} \langle I m L_1 \pm 1 | I_i m_i \rangle^2 F_{L_i}^{\pm 1}(0) \langle I_f m_f L_2 M_2 | I m \rangle^2 F_{L_2}^{M_2}(\theta) \quad (21)$$

Esta expresión se rescribe y simplifica por operatividad en la forma:

$$W(\theta) = \sum_{k \text{ par}}^{\min(2I, 2L_1, 2L_2)} A_{kk} P_k(\cos \theta) \quad (22)$$

donde $P_k(\cos \theta)$ son los polinomios de Legendre de grado k , y los coeficientes A_{kk} se definen como

$$A_{kk} = F_k(L_1 L_1 I_i I) F_k(L_2 L_2 I_f I) \quad (23)$$

Los términos F_k se encuentran tabulados en el Apéndice (apartado 14.9), al final de este manual.

Para determinar si la radiación es eléctrica o magnética es preciso efectuar medidas adicionales de polarización, ya que los coeficientes A_{kk} son idénticos para transiciones E y M . Aunque este tipo de medidas puede realizarse aprovechando la dependencia de la difusión Compton con la polarización, no se efectuará en la presente práctica. Sin embargo se propone como ejercicio el diseño del experimento.

14.6.3 Efectos de tamaño de detector finito

La expresión (22) corresponde al caso ideal de detectores puntuales. Experimentalmente, uno debe registrar el número de coincidencias entre γ_1 y γ_2 como una función del ángulo θ subtendido por los ejes de los dos contadores. Dado el ángulo sólido finito de los contadores, el número de coincidencias son un promedio de la correlación verdadera $w(\theta)$ sobre el ángulo sólido $d\Omega$. Por tanto, la expresión (22) debe ser modificada con el fin de tener en cuenta el tamaño finito del detector,

$$W(\theta) = \sum_{k \text{ par}}^{\min(2I, 2L_1, 2L_2)} Q_k A_{kk} P_k(\cos \theta) \quad (24)$$

donde

$$Q_k = J_k / J_0 \quad (25)$$

Los coeficientes J_k son evaluados a partir del ángulo sólido subtendido por el detector sobre la fuente y

$$J_k = \int_0^\gamma P_k(\cos \alpha) \varepsilon(\alpha) \sin \alpha d\alpha \quad (26)$$

donde α es el ángulo entre la dirección del fotón y el eje fuente-detector. Asumiendo que la respuesta del detector es uniforme a lo ancho de toda su ventana y que la eficiencia intrínseca de detección, ε , es independiente del ángulo según el cual entra el fotón en el detector, entonces:

$$J_k = \varepsilon \int_{\cos\gamma}^1 P_k(\cos x) dx \quad (27)$$

Algunos valores particulares son

$$\begin{aligned} J_0 &= \varepsilon (1 - \cos \gamma) \\ J_2 &= \frac{1}{2} \varepsilon \cos \gamma (1 - \cos^2 \gamma) \\ J_4 &= \frac{1}{8} \varepsilon (-3 \cos \gamma + 10 \cos^3 \gamma - 7 \cos^5 \gamma) \end{aligned} \quad (28)$$

De esta forma, la evaluación de Q_k es directa una vez conocido el ángulo máximo γ según el cual un fotón penetra en el detector. Es importante remarcar en este punto que esta evaluación sólo se aplica cuando el fotón deposita la totalidad de su energía en el detector.

14.7 Preparación del experimento

14.7.1 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 los fotopicos del ^{60}Co se sitúen 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.

14.7.2 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 χ^2 . 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 generador de pulsos 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.

14.7.3 Coincidencias y correlación angular con el ^{60}Co

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 díodos 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, colocar los dos picos de 1.17 y 1.33 MeV del ^{60}Co 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 “uppershoot”, 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 ^{60}Co .

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.

14.7.3.1 Calibración de los SCA

Una vez completados los pasos de los apartados previos, podremos efectuar la calibración de los SCA, de tal manera que uno de ellos seleccione la γ de 1.17 MeV y el otro la de 1.33 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 ^{60}Co .

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.

14.7.4 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 una vez introducidos los retrasos relativos necesarios, 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.

14.8 Resultados a presentar

14.8.1 Verificación experimental de la cascada $\gamma\gamma$ del ^{60}Co

Una vez realizadas las tareas previas al experimento, pasamos a verificar experimentalmente la cascada $\gamma\gamma$ del ^{60}Co . Para ello se sugiere llevar a cabo los siguientes pasos:

- Verificar la cascada 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 cascada 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 cascada utilizando el método de la puerta lineal.
- Comprobar que los resultados obtenidos por cualquiera de los tres métodos anteriores son compatibles.

14.8.2 Correlación angular $\gamma\gamma$ del ^{60}Co

Para la medida de la correlación angular $\gamma\gamma$ del ^{60}Co se propone seguir los siguientes pasos:

- Tras tener en cuenta la tasa de coincidencias casuales ($W(\theta) \rightarrow W(\theta) - N_A$) y los efectos de tamaño de detector finito, calcular la cantidad $G_{exp}(\theta) = W_{exp}(\theta)/W_{exp}(90^\circ)$ para un número razonable de ángulos.
- Comparar con la distribución teórica $G_{teo}(\theta)$ para diversas combinaciones de espín y establecer los espines de los niveles involucrados en la desintegración. Se recomienda utilizar un test de tipo χ^2 para rechazar los esquemas no válidos y aceptar el correcto dando el nivel de confianza de cada resultado.
- Proponer un experimento que permita establecer la multipolaridad eléctrica o magnética de las transiciones.

14.8.3 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.

14.9 APÉNDICE. Tablas de Coeficientes de la Distribución Angular $F_k(LLJ_1J_2)$

TABLE I
Angular-Distribution Coefficients

$$F_k(L, L', j_1, j_2)$$

EXPLANATION OF TABLE

The F -coefficients, defined in Eq. (A-3), are tabulated separately for even and odd rank ($k \leq 8$). The nuclear spins, j_1 and j_2 , are given in the first two columns. L , equal to $|j_1 - j_2|$, is the lowest multipolarity allowed by j_1 and j_2 ; $L' = L + 1$. For $k = 0$, the F -coefficient is given by

$$\begin{aligned} F_0(L, L', j_1, j_2) &= 1, & L &= L' \\ &= 0, & L &\neq L'. \end{aligned}$$

*Práctica 2.-Coincidencias $\gamma\text{-}\gamma$.y correlaciones angulares con una fuente de ^{60}Co .
Medida de vidas medias de estados nucleares.*

Práctica 2.-Coincidencias $\gamma\gamma$ y correlaciones angulares con una fuente de ^{60}Co .
Medida de vidas medias de estados nucleares.

ANGULAR DISTRIBUTION COEFFICIENTS F(L,L',J1,J2)

J1	J2	K = 1			K = 3			K = 5			K = 7		
		LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'
0	1	-1.2247	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-0.7071	0.	0.	1.4142	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.5000	0.	0.	1.0801	0.	0.	-1.4434	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.3873	0.	0.	0.8581	0.	0.	-1.2481	0.	0.	1.4338	0.	0.
1	1	-0.6124	0.6124	-0.6124	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-1.0607	0.4743	-0.5893	0.	0.6325	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.6667	0.3563	-0.4583	0.9258	-0.2887	0.5401	0.	-0.7715	0.3608	0.	0.	0.
	4	-0.4841	0.2795	-0.3679	0.8740	-0.4129	0.6007	-0.7512	0.0600	-0.3120	0.	0.8278	-0.5735
	5	-0.3795	0.2288	-0.3057	0.7540	-0.4061	0.5672	-0.8691	0.3203	-0.5311	0.6175	0.1205	0.0888
2	1	0.6124	0.8216	-0.2041	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-0.3536	0.7246	-0.3536	0.	-0.4140	-0.8081	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-1.0000	0.5477	-0.5000	0.	0.5071	-0.4629	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.6455	0.4364	-0.4196	0.7491	-0.2955	0.1748	0.	-0.5079	0.7512	0.	0.	0.
	5	-0.4743	0.3536	-0.3479	0.7680	-0.4683	0.3770	-0.5230	0.0540	0.2173	0.	0.4602	-0.8233
	6	-0.3742	0.2954	-0.2940	0.6907	-0.4871	0.4268	-0.6866	0.3313	-0.1199	0.3751	0.0958	-0.4855
3	1	0.4082	0.8729	-0.1021	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0.7071	0.7746	0.	0.	0.1107	0.5051	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.2500	0.7500	-0.2500	0.	-0.4629	-0.6172	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.9682	0.5809	-0.4519	0.	0.4495	-0.5993	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5	-0.6325	0.4781	-0.3953	0.6583	-0.2903	0.0000	0.	-0.3954	0.7846	0.	0.	0.
	6	-0.4677	0.3953	-0.3341	0.7035	-0.4865	0.2467	-0.4132	0.0444	0.4168	0.	0.3170	-0.7503
	7	-0.3703	0.3350	-0.2855	0.6482	-0.5737	0.3352	-0.5809	0.3211	0.0897	0.2673	0.0782	-0.6341
4	1	0.3062	0.8839	-0.0612	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0.4714	0.7968	0.0589	-0.1010	-0.0996	0.4714	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	0.7500	0.7500	0.0833	0.	0.1543	0.6172	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.1937	0.7599	-0.1936	0.	-0.4811	-0.4903	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5	-0.9487	0.6000	-0.4216	0.	0.4163	-0.6583	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	6	-0.6236	0.5040	-0.3786	0.6030	-0.2843	-0.1005	0.	-0.3339	0.7674	0.	0.	0.
	7	-0.4629	0.4226	-0.3240	0.6602	-0.4931	0.1621	-0.3496	0.0442	0.5083	0.	0.2440	-0.6682
	8	-0.3674	0.3618	-0.2790	0.6177	-0.5433	0.2710	-0.5125	0.3044	0.2088	0.2086	0.0664	-0.6697
5	1	0.2449	0.8863	-0.0408	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0.3536	0.7906	0.0707	-0.1179	-0.2156	0.4050	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	0.5000	0.7559	0.1250	-0.1543	-0.1361	0.5401	0.	-0.0165	-0.0984	0.	0.	0.
	4	0.7742	0.7348	0.1291	0.	0.1809	0.6674	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5	-0.1581	0.7649	-0.1581	0.	-0.4899	-0.4051	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	6	-0.9354	0.6124	-0.4009	0.	0.3948	-0.6892	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7	-0.6172	0.5216	-0.3665	0.5659	-0.2790	-0.1650	0.	-0.2955	0.7429	0.	0.	0.
	8	-0.4593	0.4419	-0.3164	0.6291	-0.4953	0.1030	-0.3085	0.0411	0.5552	0.	0.2007	-0.6025
	9	-0.3651	0.3814	-0.2739	0.5947	-0.5548	0.2237	-0.4649	0.2967	0.2841	0.1724	0.0583	-0.6693
6	2	0.2828	0.7816	0.0707	-0.1157	-0.2856	0.3481	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	0.3750	0.7395	0.1250	-0.1800	-0.2905	0.4419	0.0109	0.0030	-0.1408	0.	0.	0.
	4	0.5164	0.7303	0.1614	-0.1907	-0.1573	0.5562	0.	-0.0297	-0.1628	0.	0.	0.
	5	0.7906	0.7246	0.1581	0.	0.1989	0.6945	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	6	-0.1336	0.7677	-0.1336	0.	-0.4949	-0.3446	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7	-0.9258	0.6210	-0.3858	0.	0.3796	-0.7074	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	8	-0.6124	0.5345	-0.3572	0.5393	-0.2746	-0.2097	0.	-0.2692	0.7198	0.	0.	0.
	9	-0.4564	0.4564	-0.3104	0.6058	-0.4956	0.0595	-0.2798	0.0387	0.5812	0.	0.1724	-0.5516
	10	-0.3633	0.3964	-0.2697	0.5769	-0.5621	0.1874	-0.4300	0.2866	0.3344	0.1482	0.0523	-0.6567
7	3	0.3000	0.7236	0.1167	-0.1767	-0.3808	0.3656	0.0182	0.0268	-0.1554	0.	0.	0.
	4	0.3873	0.7071	0.1549	-0.2225	-0.3323	0.4369	0.0210	0.0053	-0.2269	0.	0.0018	0.0130
	5	0.5270	0.7127	0.1845	-0.2170	-0.1712	0.5570	0.	-0.0408	-0.2112	0.	0.	0.
	6	0.8018	0.7171	0.1782	0.	0.2119	0.7107	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7	-0.1157	0.7694	-0.1157	0.	-0.4979	-0.2996	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	8	-0.9186	0.6275	-0.3742	0.	0.3684	-0.7190	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9	-0.6086	0.5443	-0.3499	0.5192	-0.2709	-0.2423	0.	-0.2503	0.6995	0.	0.	0.
	10	-0.4542	0.4677	-0.3055	0.5876	-0.4951	0.0262	-0.2588	0.0369	0.5961	0.	0.1526	-0.5119
8	4	0.3098	0.6865	0.1420	-0.2184	-0.4323	0.3491	0.0349	0.0473	-0.2454	-0.0010	0.0007	0.0251
	5	0.3953	0.6847	0.1739	-0.2532	-0.3588	0.4226	0.0302	0.0072	-0.2883	0.	0.0040	0.0270
	6	0.5345	0.6999	0.2004	-0.2369	-0.1809	0.5528	0.	-0.0500	-0.2443	0.	0.	0.
	7	0.8101	0.7115	0.1929	0.	0.2217	0.7213	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	8	-0.1021	0.7706	-0.1020	0.	-0.5000	-0.2649	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9	-0.9128	0.6324	-0.3851	0.	0.3597	-0.7270	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	-0.6055	0.5521	-0.3441	0.5036	-0.2678	-0.2671	0.	-0.2359	0.6822	0.	0.	0.
9	5	0.3162	0.6606	0.1581	-0.2486	-0.4638	0.3272	0.0501	0.0640	-0.3064	-0.0023	0.0016	0.0512
	6	0.4009	0.6681	0.1871	-0.2764	-0.3769	0.4070	0.0382	0.0088	-0.3332	0.	0.0064	0.0409
	7	0.5401	0.6900	0.2122	-0.2524	-0.1882	0.5469	0.	-0.0577	-0.2773	0.	0.	0.
	8	0.8165	0.7071	0.2041	0.	0.2294	0.7285	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9	-0.0913	0.7714	-0.0913	0.	-0.5014	-0.2374	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	-0.9083	0.6364	-0.3578	0.	0.3529	-0.7325	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0	6	0.3207	0.6414	0.1693	-0.2714	-0.4847	0.3062	0.0635	0.0776	-0.3490	-0.0038	0.0025	0.0766
	7	0.4050	0.6555	0.1967	-0.2945	-0.3900	0.3924	0.0451	0.0101	-0.3670	0.	0.0087	0.0538
	8	0.5443	0.6824	0.2211	-0.2849	-0.1937	0.5409	0.	-0.0641	-0.3006	0.	0.	0.
	9	0.8216	0.7036	0.2130	0.	0.2356	0.7337	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	-0.0826	0.7720	-0.0826	0.	-0.5025	-0.2150	0.	0.	0.	0.	0.	0.

*Práctica 2.-Coincidencias $\gamma\gamma$ y correlaciones angulares con una fuente de ^{60}Co .
Medida de vidas medias de estados nucleares.*

ANGULAR DISTRIBUTION COEFFICIENTS $F(L, L', J_1, J_2)$

		$K = 1$			$K = 3$			$K = 5$			$K = 7$		
J_1	J_2	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'
1/2	1/2	-1.0000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-1.1190	0.3873	-0.6708	0.	0.7746	0.8944	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-0.6831	0.2760	-0.4879	1.0954	-0.2582	0.9129	0.	-1.0911	-0.7715	0.	0.	0.
	7/2	-0.4910	0.2113	-0.3414	0.9574	-0.3371	0.7833	-0.9835	0.0586	-0.9532	0.	1.3089	0.6759
	9/2	-0.3830	0.1706	-0.3133	0.7989	-0.3178	0.6691	-1.0191	0.2773	-0.9058	0.8813	0.1270	0.9331
3/2	1/2	0.5000	0.8660	-0.5000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.4472	0.6928	-0.4472	0.	-0.3464	-0.8944	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-1.0247	0.5196	-0.5367	0.	0.5555	-0.3130	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.6547	0.4041	-0.4364	0.8207	-0.2955	0.3191	0.	-0.6070	0.6557	0.	0.	0.
	9/2	-0.4787	0.3227	-0.3569	0.8137	-0.4488	0.4721	-0.6133	0.0573	0.0232	0.	0.5942	-0.8012
5/2	1/2	0.3333	0.9428	-0.3333	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.6708	0.7937	-0.0745	0.	0.0756	0.3833	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-0.2928	0.7407	-0.2928	0.	-0.4454	-0.7042	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.9820	0.5669	-0.4728	0.	0.4738	-0.5471	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.6383	0.4600	-0.4062	0.6974	-0.2932	0.0740	0.	-0.4420	0.7806	0.	0.	0.
7/2	1/2	0.2500	0.9682	-0.2500	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.4472	0.8281	0.	-0.0639	-0.0690	0.3727	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	0.7319	0.7606	0.0488	0.	0.1355	0.5738	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.2182	0.7559	-0.2182	0.	-0.4738	-0.5471	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.9574	0.5916	-0.4352	0.	0.4309	-0.6340	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9/2	1/2	0.2000	0.9798	-0.2000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.3354	0.8292	0.0224	-0.0745	-0.1508	0.3293	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	0.4879	0.7737	0.0976	-0.1304	-0.1206	0.5173	0.	-0.0093	-0.0584	0.	0.	0.
	7/2	0.7638	0.7416	0.1091	0.	0.1690	0.6466	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.1741	0.7628	-0.1741	0.	-0.4862	-0.4438	0.	0.	0.	0.	0.	0.
11/2	1/2	0.1515	0.8068	-0.1515	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.6202	0.5136	-0.3721	0.5828	-0.2815	-0.1360	0.	-0.3127	0.7552	0.	0.	0.
	5/2	-0.4610	0.4330	-0.3200	0.6435	-0.4946	0.1301	-0.3776	0.0461	0.4706	0.	0.2753	-0.7075
	7/2	-0.4651	0.4102	-0.3287	0.6799	-0.4906	0.2003	-0.5434	0.3147	0.1563	0.2340	0.0718	-0.6592
	9/2	-0.3688	0.3495	-0.2820	0.6318	-0.5349	0.3005	0.	0.	0.	0.	0.	0.
13/2	1/2	0.2000	0.9798	-0.2000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.3354	0.8292	0.0224	-0.0745	-0.1508	0.3293	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	0.4879	0.7737	0.0976	-0.1304	-0.1206	0.5173	0.	-0.0093	-0.0584	0.	0.	0.
	7/2	0.7638	0.7416	0.1091	0.	0.1690	0.6466	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.1741	0.7628	-0.1741	0.	-0.4862	-0.4438	0.	0.	0.	0.	0.	0.
15/2	1/2	0.1515	0.8068	-0.1515	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.6202	0.5136	-0.3721	0.5828	-0.2815	-0.1360	0.	-0.3127	0.7552	0.	0.	0.
	5/2	-0.4610	0.4330	-0.3200	0.6435	-0.4946	0.1301	-0.3776	0.0461	0.4706	0.	0.2753	-0.7075
	7/2	-0.4651	0.4102	-0.3287	0.6799	-0.4906	0.2003	-0.5434	0.3147	0.1563	0.2340	0.0718	-0.6592
	9/2	-0.3688	0.3495	-0.2820	0.6318	-0.5349	0.3005	0.	0.	0.	0.	0.	0.
17/2	1/2	0.2000	0.9798	-0.2000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.3354	0.8292	0.0224	-0.0745	-0.1508	0.3293	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	0.4879	0.7737	0.0976	-0.1304	-0.1206	0.5173	0.	-0.0093	-0.0584	0.	0.	0.
	7/2	0.7638	0.7416	0.1091	0.	0.1690	0.6466	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.1741	0.7628	-0.1741	0.	-0.4862	-0.4438	0.	0.	0.	0.	0.	0.
19/2	1/2	0.1515	0.8068	-0.1515	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.6202	0.5136	-0.3721	0.5828	-0.2815	-0.1360	0.	-0.3127	0.7552	0.	0.	0.
	5/2	-0.4610	0.4330	-0.3200	0.6435	-0.4946	0.1301	-0.3776	0.0461	0.4706	0.	0.2753	-0.7075
	7/2	-0.4651	0.4102	-0.3287	0.6799	-0.4906	0.2003	-0.5434	0.3147	0.1563	0.2340	0.0718	-0.6592
	9/2	-0.3688	0.3495	-0.2820	0.6318	-0.5349	0.3005	0.	0.	0.	0.	0.	0.

*Práctica 2.-Coincidencias $\gamma\gamma$ y correlaciones angulares con una fuente de ^{60}Co .
Medida de vidas medias de estados nucleares.*

ANGULAR DISTRIBUTION COEFFICIENTS F(L,L',J1,J2)

J1	J2	K = 2			K = 4			K = 6			K = 8		
		LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'	LL	LL'	L'L'
0	1	0.7071	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-0.5976	0.	0.	-1.0690	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.8660	0.	0.	0.2132	0.	0.	1.3056	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.9687	0.	0.	0.6034	0.	0.	0.0674	0.	0.	-1.4409	0.	0.
1	1	-0.3536	-1.0607	-0.3536	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0.4183	-0.9354	-0.2988	0.	0.	0.7127	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.4949	-0.4629	-0.6495	-0.4467	1.0446	0.0355	0.	0.	-0.9792	0.	0.	0.
	4	-0.7835	-0.2714	-0.8234	0.1453	0.7549	0.3017	0.4214	-1.0218	-0.0034	0.	0.	1.1847
	5	-0.9099	-0.1775	-0.9171	0.4814	0.5322	0.5230	0.0387	-0.8987	-0.1127	-0.3893	0.9683	0.0563
2	1	0.0707	0.4743	0.3536	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-0.4183	-0.6124	0.1281	0.	0.	-0.3054	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	0.3464	-0.9487	-0.1237	0.	0.	0.6701	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.4477	-0.5297	-0.4701	-0.3044	0.9004	-0.0484	0.	0.	-0.7585	0.	0.	0.
	5	-0.7360	-0.3291	-0.6825	0.1159	0.7774	0.0802	0.2420	-0.7574	-0.0290	0.	0.	0.7785
	6	-0.8718	-0.2227	-0.8089	0.4140	0.5993	0.2891	0.0273	-0.8306	0.0531	-0.1926	0.6272	0.1473
3	1	-0.1010	0.3780	0.5303	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0.1195	0.6547	0.3415	0.	0.	0.0764	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.4330	-0.4330	0.2288	0.	0.	-0.4467	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	0.3134	-0.9402	-0.0448	0.	0.	0.6088	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5	-0.4206	-0.5563	-0.3680	-0.2428	0.8030	-0.0773	0.	0.	-0.6049	0.	0.	0.
	6	-0.7051	-0.3576	-0.5915	0.0997	0.7581	-0.0296	0.1708	-0.6062	-0.0342	0.	0.	0.5502
	7	-0.8449	-0.2473	-0.7333	0.3715	0.6161	0.1513	0.0214	-0.7465	0.1196	-0.1214	0.4528	0.1493
4	1	-0.1768	0.3062	0.6010	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-0.1707	0.5051	0.4482	-0.0085	-0.0627	-0.0297	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	0.1443	0.7217	0.3093	0.	0.	0.1489	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	-0.4387	-0.3354	0.2645	0.	0.	-0.4981	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5	0.2944	-0.9309	0.	0.	0.	0.5666	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	6	-0.4029	-0.5698	-0.3022	-0.2088	0.7383	-0.0902	0.	0.	-0.5124	0.	0.	0.
	7	-0.6834	-0.3743	-0.5281	0.0894	0.7349	-0.0929	0.1340	-0.5137	-0.0348	0.	0.	0.4248
	8	-0.8251	-0.2629	-0.6776	0.3424	0.6181	0.0620	0.0179	-0.6788	0.1506	-0.0871	0.3537	0.1386
5	1	-0.2186	0.2558	0.6764	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	-0.2988	0.4009	0.4618	0.0040	-0.0815	-0.1093	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.2062	0.5455	0.3608	-0.0203	-0.1343	-0.0549	0.	0.	-0.0099	0.	0.	0.
	4	0.1595	0.7568	0.2849	0.	0.	0.1937	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5	-0.4416	-0.2739	0.2831	0.	0.	-0.5230	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	6	0.2820	-0.9232	0.0288	0.	0.	0.5370	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7	-0.3905	-0.5776	-0.2563	-0.1874	0.6929	-0.0969	0.	0.	-0.4522	0.	0.	0.
	8	-0.6673	-0.3853	-0.4813	0.0924	0.7138	-0.1332	0.1119	-0.4522	-0.0343	0.	0.	0.3483
	9	-0.8097	-0.2736	-0.6348	0.3212	0.6150	0.	0.0156	-0.6263	0.1663	-0.0676	0.2915	0.1273
6	2	-0.3694	0.3303	0.4551	0.0168	-0.0852	-0.1645	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	-0.3608	0.4270	0.3346	0.0097	-0.1720	-0.1946	0.0008	0.0063	-0.0014	0.	0.	0.
	4	-0.2279	0.5641	0.2992	-0.0298	-0.1844	-0.0887	0.	0.	-0.0265	0.	0.	0.
	5	0.1698	0.7783	0.2649	0.	0.	0.2241	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	6	-0.4432	-0.2315	0.2935	0.	0.	-0.5370	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7	0.2734	-0.9169	0.0488	0.	0.	0.5154	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	8	-0.3813	-0.5825	-0.2224	-0.1727	0.6595	-0.1007	0.	0.	-0.4103	0.	0.	0.
	9	-0.6549	-0.3929	-0.4453	0.0773	0.6959	-0.1606	0.0973	-0.4088	-0.0335	0.	0.	0.2977
	10	-0.7975	-0.2815	-0.6009	0.3051	0.6102	-0.0452	0.0139	-0.5853	0.1746	-0.0554	0.2495	0.1174
7	3	-0.4461	0.3482	0.2998	0.0403	-0.1780	-0.2843	0.0001	0.0113	0.0121	0.	0.	0.
	4	-0.3989	0.4369	0.2466	0.0142	-0.2337	-0.2363	0.0024	0.0181	-0.0036	0.	0.	0.0010
	5	-0.2426	0.5742	0.2548	-0.0374	-0.2210	-0.0773	0.	0.	-0.0419	0.	0.	0.
	6	0.1773	0.7928	0.2533	0.	0.	0.2461	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7	-0.4442	-0.2004	0.3001	0.	0.	-0.5457	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	8	0.2669	-0.9117	0.0636	0.	0.	0.4989	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9	-0.3742	-0.5858	-0.1965	-0.1620	0.6340	-0.1031	0.	0.	-0.3796	0.	0.	0.
	10	-0.6451	-0.3986	-0.4169	0.0734	0.6808	-0.1803	0.0871	-0.3767	-0.0326	0.	0.	0.2621
8	4	-0.4931	0.3535	0.1933	0.0591	-0.2400	-0.3370	0.0004	0.0322	0.0309	-0.0001	-0.0006	0.0007
	5	-0.4246	0.4413	0.1838	0.0178	-0.2779	-0.2592	0.0041	0.0299	-0.0056	0.	0.	0.0035
	6	-0.2533	0.5803	0.2216	-0.0434	-0.2488	-0.0829	0.	0.	-0.0553	0.	0.	0.
	7	0.1829	0.8033	0.2426	0.	0.	0.2627	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	8	-0.4449	-0.1768	0.3044	0.	0.	-0.5514	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9	0.2620	-0.9075	0.0749	0.	0.	0.4860	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	-0.3686	-0.5881	-0.1759	-0.1539	0.6138	-0.1046	0.	0.	-0.3563	0.	0.	0.
9	5	-0.5250	0.3548	0.1176	0.0741	-0.2836	-0.3621	0.0007	0.0528	0.0472	-0.0002	-0.0020	0.0022
	6	-0.4432	0.4432	0.1370	0.0207	-0.3109	-0.2727	0.0058	0.0407	-0.0072	0.	0.	0.0066
	7	-0.2613	0.5843	0.1960	-0.0484	-0.2705	-0.0869	0.	0.	-0.0667	0.	0.	0.
	8	0.1873	0.8111	0.2341	0.	0.	0.2757	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9	-0.4453	-0.1581	0.3074	0.	0.	-0.5555	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	0.2580	-0.9039	0.0838	0.	0.	0.4757	0.	0.	0.	0.	0.	0.
10	6	-0.5479	0.3546	0.0614	0.0861	-0.3157	-0.3742	0.0009	0.0717	0.0605	-0.0005	-0.0039	0.0041
	7	-0.4573	0.4440	0.1010	0.0231	-0.3364	-0.2810	0.0074	0.0504	-0.0085	0.	0.	0.0098
	8	-0.2676	0.5870	0.1756	-0.0525	-0.2880	-0.0898	0.	0.	-0.0766	0.	0.	0.
	9	0.1909	0.8172	0.2272	0.	0.	0.2862	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	-0.4457	-0.1430	0.3096	0.	0.	-0.5584	0.	0.	0.	0.	0.	0.

Práctica 2.-Coincidencias $\gamma\gamma$ y correlaciones angulares con una fuente de ^{60}Co .
Medida de vidas medias de estados nucleares.

ANGULAR DISTRIBUTION COEFFICIENTS $F(L, L', J1, J2)$

J1	J2	K = 2			K = 4			K = 6			K = 8		
		LL	LL'	L'L	LL	LL'	L'L	LL	LL'	L'L	LL	LL'	L'L
1/2	1/2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.5000	-0.8660	-0.5000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-0.5345	-0.3780	-0.8018	-0.6172	1.0911	0.1543	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.8183	-0.2113	-0.9274	0.1709	0.6621	0.5128	0.6528	-1.1799	0.0435	0.	0.	0.
	9/2	-0.9358	-0.1348	-0.9909	0.5322	0.4345	0.7096	0.0492	-0.4442	-0.2954	-0.6623	1.2167	-0.1656
3/2	1/2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.4000	-0.7746	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	0.3742	-0.9487	-0.1909	0.	0.	0.7054	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.4676	-0.5051	-0.5455	-0.3582	0.9671	-0.0190	0.	0.	-0.8704	0.	0.	0.
	9/2	-0.7569	-0.3062	-0.7444	0.1281	0.7774	0.1693	0.3077	-0.8714	-0.0213	0.	0.	0.9633
	11/2	-0.8890	-0.2041	-0.8578	0.4434	0.5768	0.3891	0.0320	-0.8732	-0.0096	-0.2624	0.7681	0.1256
5/2	1/2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	0.1000	-0.5916	0.3571	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-0.4276	-0.5071	0.1909	0.	0.	-0.3968	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	0.3273	-0.9449	-0.0779	0.	0.	0.6367	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.4325	-0.5455	-0.6129	-0.2684	0.8465	-0.0660	0.	0.	-0.6714	0.	0.	0.
	11/2	-0.7191	-0.3454	-0.6326	0.1067	0.7692	0.0171	0.1998	-0.6718	-0.0325	0.	0.	0.6460
	13/2	-0.8573	-0.2365	-0.7680	0.3906	0.6107	0.2122	0.0240	-0.7869	0.0930	-0.1497	0.5267	0.1517
7/2	1/2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.1429	0.4629	0.5000	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	0.1336	0.6944	0.3245	0.	0.	0.1176	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.4364	-0.3780	0.2494	0.	0.	-0.4775	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	0.3028	-0.9354	-0.0197	0.	0.	0.5857	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	11/2	-0.4109	-0.5641	-0.3319	-0.2237	0.7676	-0.0849	0.	0.	-0.5533	0.	0.	0.
	13/2	-0.6934	-0.3669	-0.5572	0.0940	0.7464	-0.0651	0.1498	-0.5548	-0.0347	0.	0.	0.4791
	15/2	-0.8343	-0.2558	-0.7035	0.3557	0.6181	0.1023	0.0195	-0.7105	0.1378	-0.1015	0.3970	0.1444
9/2	1/2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3/2	-0.2500	0.3708	0.5409	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-0.1909	0.5297	0.4009	-0.0147	-0.1019	-0.0444	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	0.1528	0.7416	0.2961	0.	0.	0.1737	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	9/2	-0.4404	-0.3015	0.2752	0.	0.	-0.5125	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	11/2	0.2876	-0.9269	0.0158	0.	0.	0.5506	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	13/2	-0.3962	-0.5742	-0.2773	-0.1970	0.7138	-0.0940	0.	0.	-0.4793	0.	0.	0.
	15/2	-0.6748	-0.3803	-0.5031	0.0356	0.7240	-0.1151	0.1217	-0.4801	-0.0346	0.	0.	0.3823
	17/2	-0.8169	-0.2687	-0.6548	0.3310	0.6169	0.0284	0.0166	-0.6509	0.1597	-0.0761	0.3193	0.1328
11/2	3/2	-0.3091	0.3075	0.5538	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	5/2	-0.3341	0.4173	0.3924	0.0070	-0.1314	-0.1602	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.2162	0.5563	0.3273	-0.0253	-0.1614	-0.0627	0.	0.	-0.0183	0.	0.	0.
	9/2	0.1651	0.7687	0.2752	0.	0.	0.2102	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	11/2	-0.4425	-0.2509	0.2890	0.	0.	-0.5309	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	13/2	0.2774	-0.9199	0.0396	0.	0.	0.5254	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	15/2	-0.3856	-0.5803	-0.2382	-0.1794	0.6750	-0.0991	0.	0.	-0.4295	0.	0.	0.
	17/2	-0.6607	-0.3894	-0.4622	0.0797	0.7045	-0.1481	0.1039	-0.4288	-0.0339	0.	0.	0.3206
	19/2	-0.8033	-0.2778	-0.6169	0.3126	0.6127	-0.0243	0.0147	-0.6046	0.1711	-0.0609	0.2696	0.1222
13/2	5/2	-0.4130	0.3419	0.3700	0.0291	-0.1367	-0.2374	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	7/2	-0.3819	0.4330	0.2867	0.0121	-0.2056	-0.2188	0.0015	0.0121	-0.0025	0.	0.	0.
	9/2	-0.2359	0.5698	0.2752	-0.0338	-0.2040	-0.0735	0.	0.	-0.0344	0.	0.	0.
	11/2	0.1738	0.7862	0.2596	0.	0.	0.2359	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	13/2	-0.4438	-0.2148	0.2972	0.	0.	-0.5418	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	15/2	0.2699	-0.9142	0.0567	0.	0.	0.5066	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	17/2	-0.3776	-0.5843	-0.2087	-0.1670	0.6459	-0.1021	0.	0.	-0.3939	0.	0.	0.
	19/2	-0.6497	-0.3960	-0.4303	0.0753	0.6880	-0.1712	0.0918	-0.3917	-0.0331	0.	0.	0.2784
15/2	7/2	-0.4721	0.3516	0.2417	0.0502	-0.2119	-0.3156	0.0002	0.0216	0.0217	0.	0.	0.
	9/2	-0.4129	0.4395	0.2127	0.0161	-0.2575	-0.2493	0.0032	0.0241	-0.0046	0.	0.	0.0022
	11/2	-0.2483	0.5776	0.2371	-0.0406	-0.2358	-0.0804	0.	0.	-0.0488	0.	0.	0.
	13/2	0.1803	0.7984	0.2476	0.	0.	0.2550	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	15/2	-0.4446	-0.1879	0.3024	0.	0.	-0.5488	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	17/2	0.2643	-0.9095	0.0695	0.	0.	0.4921	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	19/2	-0.3713	-0.5870	-0.1856	-0.1577	0.6233	-0.1039	0.	0.	-0.3672	0.	0.	0.
17/2	9/2	-0.5104	0.3544	0.1524	0.0670	-0.2636	-0.3517	0.0005	0.0427	0.0394	-0.0001	-0.0012	0.0014
	11/2	-0.4346	0.4424	0.1587	0.0194	-0.2956	-0.2668	0.0050	0.0354	-0.0064	0.	0.	0.0050
	13/2	-0.2575	0.5825	0.2080	-0.0460	-0.2603	-0.0851	0.	0.	-0.0612	0.	0.	0.
	15/2	0.1852	0.8075	0.2381	0.	0.	0.2696	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	17/2	-0.4451	-0.1669	0.3060	0.	0.	-0.5536	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	19/2	0.2599	-0.9056	0.0796	0.	0.	0.4806	0.	0.	0.	0.	0.	0.
19/2	11/2	-0.5373	0.3548	0.0875	0.0804	-0.3008	-0.3692	0.0008	0.0625	0.0542	-0.0003	-0.0029	0.0032
	13/2	-0.4507	0.4437	0.1179	0.0220	-0.3245	-0.2773	0.0066	0.0457	-0.0079	0.	0.	0.0042
	15/2	-0.2646	0.5858	0.1852	-0.0506	-0.2798	-0.0885	0.	0.	-0.0718	0.	0.	0.
	17/2	0.1892	0.8143	0.2305	0.	0.	0.2812	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	19/2	-0.4455	-0.1502	0.3086	0.	0.	-0.5570	0.	0.	0.	0.	0.	0.

14.10 Referencias

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.

A handbook of radioactivity measurements procedures

NCRP Report, No. 58, 1989.

Mecánica Cuántica

A. Galindo y P. Pascual, Eudema Universidad, Vol. 2, Madrid, 1989.

Electrodinámica Clásica

J. D. Jackson, Ed. Alhambra, S.A., Madrid, 1980.

Introductory Nuclear Physics

K. S. Krane, John Wiley-Sons, New York, 1987.

The atomic nucleus

R. D. Evans, Krieger Publishing Co., New York, 1982.

Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments

W. R. Leo, Springer-Verlag, New York, 1987.

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.

