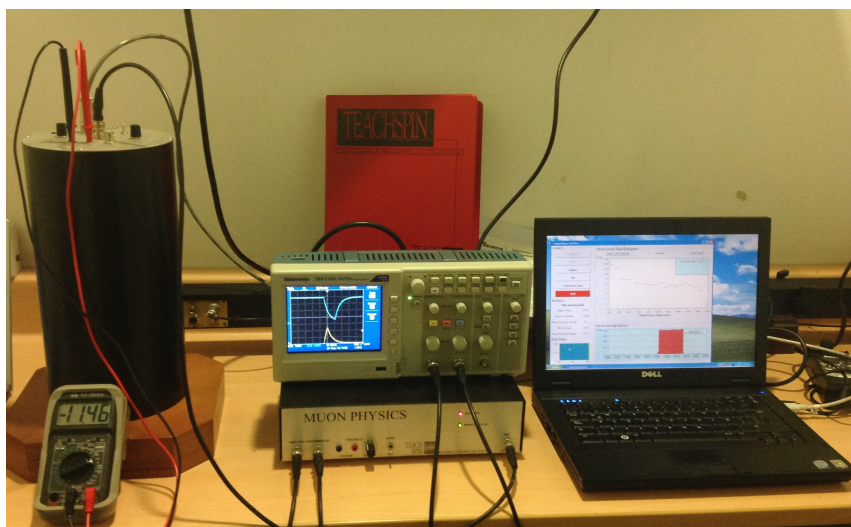


Física de muones

El premio Nobel en física en el año 1936 fue dividido equitativamente entre Victor Franz Hess “*por su descubrimiento de la radiación cósmica*” y Carl David Anderson “*por su descubrimiento del positrón*”.

Equipo

- Detector: Centellador plástico cilíndrico + tubo fotomultiplicador
- Módulo de amplificación y discriminador
- Osciloscopio
- Multímetro
- Computador + software para toma y análisis de datos.
- Cables BNC $\times 3$
- Cables de poder $\times 2$
- Cable USB A a B.



Objetivos

- Detectar muones producto de la interacción entre la radiación cósmica y la atmósfera terrestre.
- Medir experimentalmente el tiempo de vida medio (promediado para carga positiva y negativa) de los muones.
- Medir el flujo local de muones.
- Demostrar la dilatación temporal de la relatividad especial.

Conceptos Clave

Rayos cósmicos, modelo estándar de física de partículas, interacción débil, interacción fuerte, tiempo de vida medio, detectores, centellador, fotomultiplicador.

Bibliografía

- [1] M. Ackermann et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 339(6121):807–811, 2013.
- [2] Coan, T.E. and Ye, J. *Muon Physics*. Teach Spin.
- [3] Seth H. Neddermeyer and Carl D. Anderson. Note on the nature of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.*, 51:884–886, May 1937.
- [4] B.B. Rossi. *High-energy Particles*. Prentice-Hall physics series. New York, 1952.
- [5] J A Simpson. Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 33(1):323–382, 1983.
- [6] Timo van Ritbergen and Robin G. Stuart. On the precise determination of the fermi coupling constant from the muon lifetime. *Nuclear Physics B*, 564(3):343 – 390, 2000.

Marco teórico

El muon fue descubierto en 1937 por Seth Henry Neddermeyer y Carl David Anderson¹ cuando se encontraban estudiando la radiación cósmica mediante el uso de una cámara de niebla [3]. Bajo el modelo estándar de física de partículas, el muon μ^- es una partícula elemental masiva y cargada negativamente perteneciente a la familia de los leptones. Su masa es alrededor de 200 veces mayor a la del electrón y su respectiva antipartícula es el antimuon μ^+ .

Los muones que se detectarán en este experimento serán el producto de una reacción

¹Quien había descubierto el positron años antes y gano el premio Nobel en 1936 por su descubrimiento.

en *cascada* ocasionada por rayos cósmicos incidentes en la atmósfera. Gran parte de estos rayos cósmicos son protones o partículas α [1, 5]. Estos rayos cósmicos interactúan con los núcleos de las moléculas presentes en la atmósfera produciendo una serie de partículas como: piones, neutrones, fotones, kaones, electrones y positrones. Tiempo después de ser creadas, estas partículas secundarias decaen mediante interacción electromagnética o interacción débil para obtener partículas adicionales como neutrinos, muones y fotones. En la Fig. 1 se muestra esquemáticamente el proceso de creación de la *cascada* de partículas a partir de rayos cósmicos.

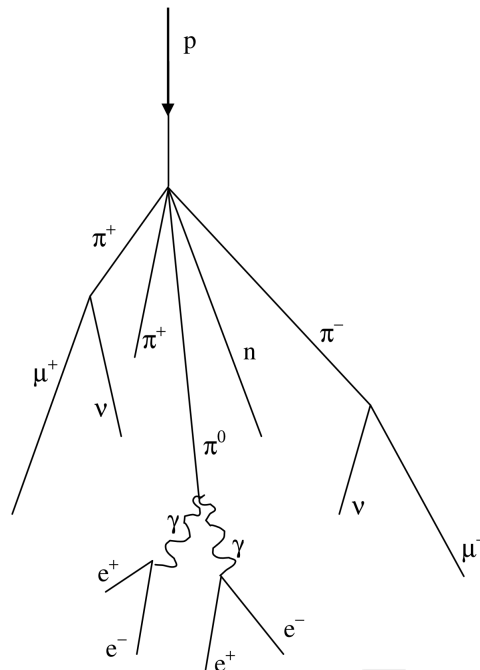


Figura 1: Cascada de partículas generadas por un proton p de alta energía. En la figura, π representan los piones (positivo, negativo y neutro), ν los neutrinos, γ los fotones, μ los muones, e los electrones y n el neutrón. Tomada de [2]

Para este experimento es de particular interés el decaimiento espontaneo mediante la interacción débil de los piones positivo π^+ y negativo π^- representados por los diagramas mostrados en las Fig. 2 y 3.

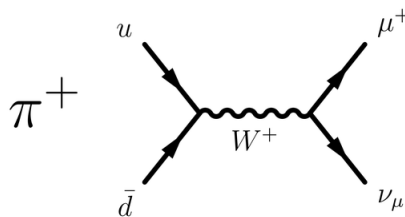


Figura 2: Decaimiento para el pion con carga positiva mediante el boson W^+

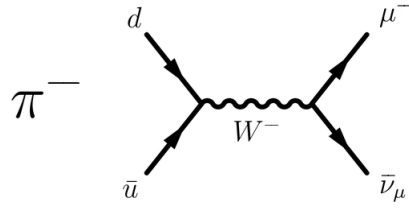


Figura 3: Decaimiento para el pión con carga negativa mediante el boson W^-

Posteriormente, estos muones decaen espontáneamente mediante la interacción débil en electrones/positrones y sus respectivos neutrinos/antineutrinos como se muestra en forma de diagrama en las Fig. 4 y 5.

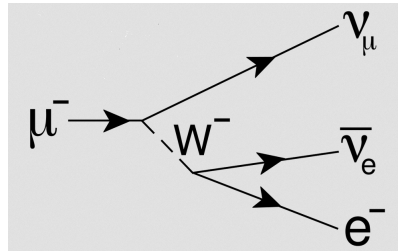


Figura 4: Decaimiento de μ^- mediante el boson W^-

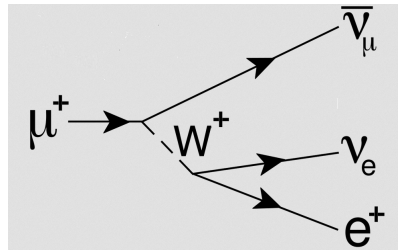


Figura 5: Decaimiento de μ^+ mediante el boson W^+

Es precisamente algunos de estos decaimientos de los muones que se medirán con la ayuda del detector provisto con el laboratorio. Este decaimiento se puede describir mediante una ley exponencial de acuerdo a la ecuación diferencial

$$dN = -N\lambda dt, \quad (1)$$

donde dN será el cambio en el número de muones, N es el número de muones, λ es la tasa de decaimiento, relacionada con el tiempo de vida medio τ a través de la fórmula $\tau = 1/\lambda$. Al resolver la ecuación diferencial se obtiene un decaimiento exponencial

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (2)$$

donde N_0 es el número inicial de muones y $N(t)$ es el número de muones después de un tiempo t . Es por este comportamiento que se puede medir el tiempo de vida medio del muon, incluso cuando este no fue generado dentro del detector. De hecho, como se ha mencionado previamente, los muones resultantes por la radiación cósmica secundaria (π^+ y π^-) se generan a una altura promedio de 15000 m.s.n.m y con una energía de aproximadamente 4GeV.

Ejercicio 1

1. Un muon con una energía de 4GeV tendrá una velocidad aproximada de $0,98c$. Usando cinemática no relativista, calcule cuánto tiempo se demoraría el muon en llegar desde el sitio donde se generó en la atmósfera hasta el detector. Compare este tiempo con la vida media del muon $\tau_\mu = 2,1969811 \pm 0,000002 \mu s$.² Calcule un estimado de detecciones (teniendo un 100 % de eficiencia) si el número inicial de muones a 15000 m.s.n.m es de 10^6 .
2. Realice el mismo cálculo pero ahora relativista teniendo como sistema de referencia el laboratorio. En este caso el tiempo para el muón se dilata. Repita el cálculo teniendo como sistema de referencia el muon, en este caso la distancia que recorre debe contraerse. Compare ambos resultados con el tiempo de vida medio del muon y calcule un estimado de detecciones (teniendo un 100 % de eficiencia) si el número inicial de muones a 15000 m.s.n.m es de 10^6 .

De acuerdo al Ejercicio 1, se tendrán muones llegando al detector en principio a tiempos aleatorios. De hecho, el flujo al nivel del mar es de aproximadamente 1 muon por minuto por cm^2 ³ y aumenta con la altura. Si se quiere calcular la probabilidad de que un muon decaiga entre un tiempo t y $t + dt$ se puede aplicar el enfoque *frecuentista* e indicar que esta probabilidad es igual a $-dN/N_0$, es decir, el número de muones que decayeron en el intervalo dt comparado con el número inicial de muones. De acuerdo a la ecuación (2) se puede mostrar que

$$-\frac{dN}{N_0} = \lambda \exp(-\lambda t) dt, \quad (3)$$

por lo que la densidad de probabilidad será $\lambda \exp(-\lambda t)$, una expresión independiente de N_0 . Por esta razón, la distribución de tiempos de decaimiento será la misma independiente del momento inicial de la creación de los muones. En consecuencia, los muones entrando al detector tendrán la misma distribución de tiempos de decaimiento, siendo posible así, medir la tasa de decaimiento λ y el tiempo de vida medio τ .

Las interacciones de los muones μ^- y antimuones μ^+ con la materia que compone el detector serán relevantes a la hora de evaluar los resultados para el tiempo de decaimiento. A continuación se realiza un breve resumen de estos efectos y posteriormente las cantidades físicas que se pueden obtener a partir del análisis de los datos obtenidos durante el experimento.

Los muones μ^- podrían interactuar ligándose a los núcleos de los átomos que componen el detector. Debido a que su radio de Bohr es unas 200 veces menor al de un electrón, el muon se encontraría mucho más cerca al núcleo del átomo, de hecho, podría interactuar con un protón mediante la interacción débil teniendo el proceso

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu. \quad (4)$$

Debido a este efecto de acople, el tiempo de vida medio en el muon μ^- en el detector es relativamente más corto que el tiempo de vida medio de su antipartícula μ^+ la cual

²<http://pdg.lbl.gov/2016/listings/rpp2016-list-muon.pdf>

³http://www.matphys.com/muon_manual.pdf

no sufre de este efecto (puede consultar la referencia [4] donde se muestra la evidencia experimental). De hecho, ya que el material del detector está compuesto principalmente de átomos de carbono y en una menor proporción de hidrógeno (el material base es polivinil tolueno) se puede considerar que el tiempo de decaimiento de el muon μ^- es de $\tau^- = 2,043 \pm 0,003 \mu s$ ⁴.

Durante el laboratorio se medirá el promedio muones μ^- y antimuones μ^+ del tiempo de decaimiento. Este tiempo promedio observado lo podemos calcular a partir del inverso de la tasa de decaimiento promedio, $\tau_{obs} = \langle \lambda \rangle^{-1}$, con

$$\langle \lambda \rangle = \frac{N_+ \lambda^+ + N_- \lambda^-}{N_+ + N_-} = \frac{\rho \lambda^+ + \lambda^-}{\rho + 1}, \quad (5)$$

donde λ^+ (λ^-) es la tasa de decaimiento para μ^+ (μ^-) y N^+ (N^-) es el número de antimuones(muones) que inciden en el detector por unidad de tiempo. La cantidad $\rho = N^+/N_-$ es la razón entre el número de antimuones y muones, la cual en principio podremos medir en el experimento. En consecuencia el tiempo de decaimiento que se espera observar estará dado por la expresión

$$\tau_{obs} = (1 + \rho) \frac{\tau^- \tau^+}{\rho \tau^- + \tau^+}, \quad (6)$$

donde $\tau^- = 1/\lambda^-$ y $\tau^+ = 1/\lambda^+$. Adicionalmente, ya que el decaimiento de los muones ocurre debido a la fuerza débil, es posible calcular el valor de la constante de Fermi G_F relacionada con la intensidad de la interacción débil a partir del tiempo de decaimiento del muon (consulte la referencia [6] para detalles teóricos y experimentales) de acuerdo a la relación

$$\tau_\mu = \frac{192 \pi^3 \hbar^7}{G_F^2 m_\mu^5 c^4}. \quad (7)$$

Ejercicio 2

1. Suponga que la cantidad de muones y antimuones que entran al detector es la misma ($\rho = 1$) y que $\tau^+ = \tau_\mu$ ya que este no se ve afecta por el acople a los núcleos atómicos. Estime, cuánto sería τ_{obs} y calcule la constante de Fermi G_F con este valor. Compárela con el valor reportado en el *Particle Data Group* <http://pdg.lbl.gov/>. Investigue sobre las correcciones teóricas a esta constante (términos de *loops* radiativos y masa del electrón no nula) y cómo afectan el valor obtenido con la fórmula en la ecuación (7).

Montaje y Experimento

El montaje experimental consiste en un módulo de detección, módulo de amplificación con un discriminador incorporado y el computador que recogerá y organizará los datos.

⁴Según el artículo por Reiter *et al.* *Precise measurements of the mean lives of μ^+ and μ^- mesons in carbon*. Disponible en <http://sites.fas.harvard.edu/~phys191r/References/b4/Reiter1960.pdf>

Módulo de detección

Este modulo consiste en el detector el cual es un centellador plástico cilíndrico de unos 15cm de diámetro y 12.5cm de altura, el fotomultiplicador y la fuente de alto voltaje, todos estos envueltos en un tubo de aluminio anodizado. El centellador esta compuesto de tolueno de polivinilo como base dopado con moléculas fluorescentes. Este produce luz en las regiones azul y ultravioleta del espectro electromagnético cuando se deposita energía sobre él. Esta luz es detectada por un tubo fotomultiplicador (Photo Multiplier Tube, PMT por sus siglas en inglés) el cual usará alto voltaje (HV) para su funcionamiento y cuya salida se enviará al módulo de amplificación a través de un cable BNC conectado en *PMT output*. El alto voltaje puede ser medido usando un multímetro en las ranuras *HV Monitoring*, el factor de conversión entre el monitor y el alto voltaje será de 1 a 100. Adicionalmente, el módulo de detección cuenta con un LED incorporado con el fin de calibrar y evaluar el desempeño del detector. El LED envía dos pulsos con una diferencia de tiempo ajustable por una perilla. El par de pulsos se envían 100 veces en 1 segundo y los pulsos de voltaje se pueden monitorear con el uso de un osciloscopio conectado a la salida rotulada como *Pulse Output* como se puede ver en la figura 6.

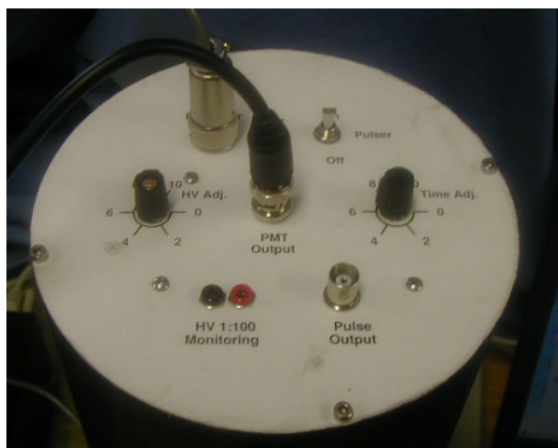


Figura 6: Ajustes del módulo de detección. Tomada de [2]

Módulo de amplificación

Como se ha mencionado previamente, los eventos de interés para el experimento son aquellos en donde el muon entra al detector, frena y eventualmente decae espontáneamente (dentro del detector). En la primera parte de este proceso, cuando el muon entra y frena en el detector, el detector emitirá luz que será detectada por el PMT debido a que el muon es una partícula cargada. La señal lógica que envía el PMT es amplificada y luego comparada con un umbral de detección ajustable (con la perilla *Control*) para producir un pulso TTL cada vez que se supere este umbral. El pulso TTL activará en un circuito integrado un contador de tiempo. Eventualmente el muon decaerá en un electrón (positrón) y sus respectivos neutrinos (antineutrinos) como se muestra en las figuras 4 y 5. El electrón (positrón) tendrá una energía considerable (debido a la diferencia de masas m_μ y m_e)

generando luz en el detector a lo largo de su trayectoria. Esta luz es detectada por el PMT, amplificada y comparada de acuerdo al umbral establecido para finalmente generar un pulso TTL. Cuando el pulso TTL llegue al circuito integrado, el contador de tiempo se detendrá, se reiniciará y enviará la información sobre el intervalo de tiempo que midió al computador via USB.

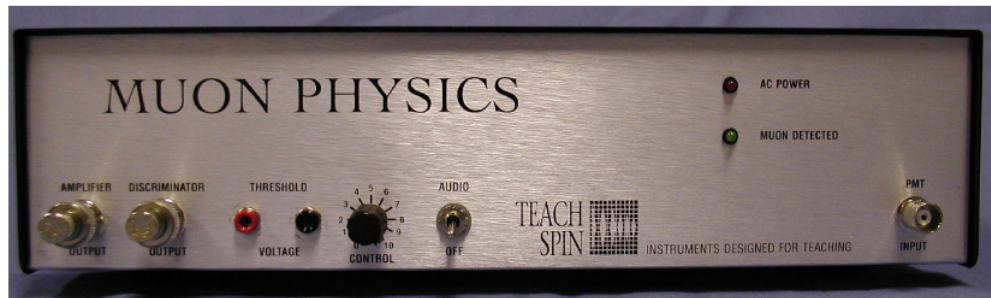


Figura 7: Módulo de amplificación. Tomada de [2]

En la figura 7 se puede ver que el umbral puede ser monitoreado a través de un multímetro conectado en las salidas *Threshold voltage*. Las salidas del amplificador y del comparador se encuentran a la izquierda del módulo y serán usadas para ajustar un umbral adecuado mediante el osciloscopio. En el extremo derecho se observa también la entrada del cable que lleva la señal que sale del PMT.



Figura 8: Módulo de amplificación. Tomada de [2]

En la figura 8 se observa la parte trasera del módulo de amplificación. En este se encuentra la conexión para la fuente de poder y el suministro de energía que irá conectado a el módulo de detección *DC power output*. Además cuenta con un parlante incorporado que emite un sonido cada vez que se tiene una detección y el puerto USB para comunicarse con el computador. Un diagrama mostrando el flujo de señal se muestra en la figura 9

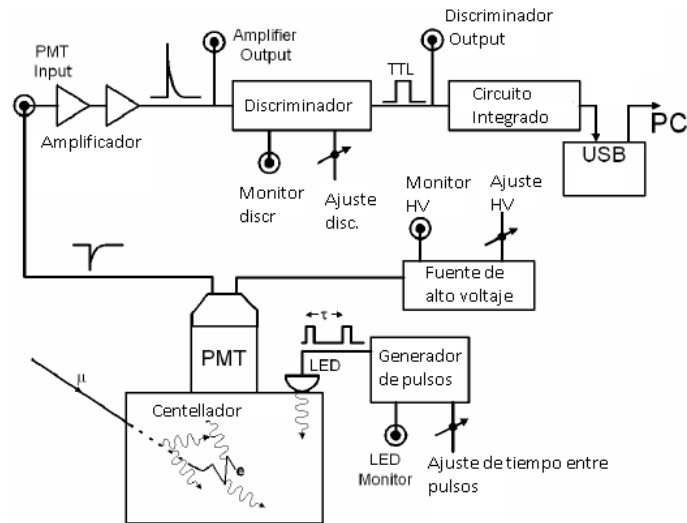


Figura 9: Flujo de señal. Tomada de [2]

Software

El software suministrado contiene la aplicación para configurar y ejecutar la toma de datos, adicionalmente cuenta con un programa de monitoreo y análisis de los datos tomados. Por lo general la aplicación se encuentra en el escritorio del computador suministrado en el laboratorio ⁵. La interfaz se puede ver en la figura 10, en donde a continuación se explicará cada panel y cómo es relevante para la toma de datos.

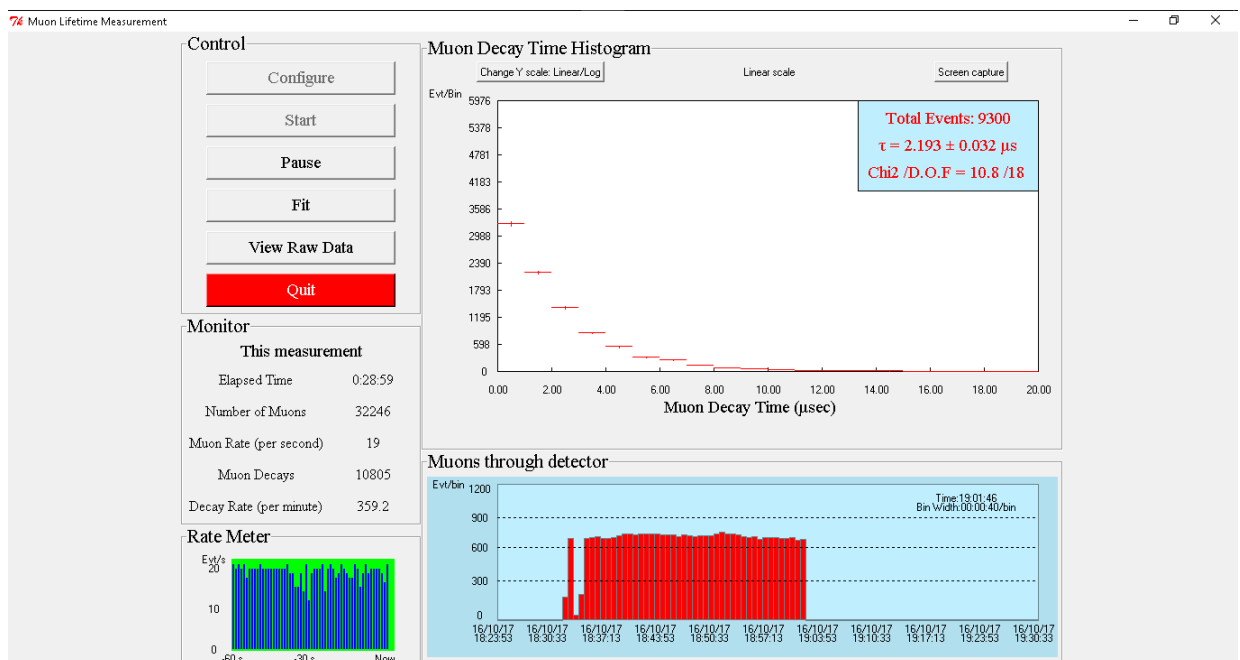


Figura 10: Interfaz del software para la detección de muones.

⁵De lo contrario, podría descargarlo en <http://www.matphys.com/>

En el panel *Control* se permite configurar la adquisición y presentación de los datos como se muestra en la figura 11. Esta ventana emerge cuando se hace clic en *Configurar*. En ella se podrá configurar que puerto de USB se usa para la transmisión de datos (*com1, com2,...*), el rango temporal en el que se tomarán los datos, es decir, el tiempo máximo entre llegadas de pulsos TTL al circuito integrado y el ancho temporal del intervalo donde se agruparán los datos obtenidos.

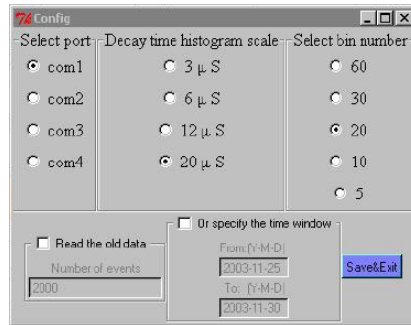


Figura 11: Ventana de configuración

También se encontrarán en el panel *Control* las opciones de empezar y pausar la toma de datos, la de realizar un ajuste de tipo

$$A \exp(-t/\tau) + B \quad (8)$$

a los datos adquiridos y la opción de obtener los datos para su posterior análisis (*View Raw Data*).

En el panel *Monitor* se indican los parámetros correspondientes a la medición como el tiempo total, el número de muones que han pasado por el detector, el número de muones que han decaído y sus respectivas tasas por unidad de tiempo. En la parte inferior de este panel se puede visualizar la tasa de llegada de muones al detector en función del tiempo, a la izquierda en un intervalo de tiempo de 1 minuto y a la derecha en un intervalo de tiempo de más de 10 minutos. Por último, se encuentra en la parte superior derecha el panel *Muon Decay Time Histogram* el cual mostrará información acerca de la distribución de tiempos de decaimiento durante el experimento. La escala en la que se presentan los resultados puede cambiarse de lineal a logarítmica y el resultado del ajuste (*Fit*) aparecerá en este panel.

Ejercicio 3

1. Investigue cómo funciona un detector de tipo centellador plástico e indique por qué es adecuado para este experimento donde la variable de interés es el tiempo.
2. Investigue cómo funciona un tubo fotomultiplicador. ¿En qué condiciones es interesante usar un tubo PMT? ¿Qué ventajas y desventajas tiene con respecto a un fotodiodo? ¿Porqué no se usaría un detector de Geiger en vez de un fotomultiplicador?

Procedimiento experimental

Comience conectando el módulo de amplificación al módulo de detección con el cable de poder y de la salida del PMT a la entrada de este en el módulo de amplificación. Conecte el módulo de amplificación a la fuente de poder y con el osciloscopio conecte canales diferentes para la salida del amplificador y del discriminador. Ahora conecte mediante USB el módulo de amplificación al computador.

Recomendación: Asegúrese que la perilla de alto voltaje se encuentra en el mínimo antes de encender cualquier equipo.

Cuando encienda el módulo de amplificación se encenderá un LED rojo y puede que el LED verde también. Con el multímetro conectado al monitor del alto voltaje, gire la perilla lentamente hasta alcanzar un valor entre -1100V y -1200V . Ajustando la escala de tiempo y amplitud en el osciloscopio debería observar una serie de pulsos como los que se muestran en la figura 12. Con ayuda del multímetro conectado a las terminales para el monitoreo del voltaje del discriminador selecciona con la perilla un voltaje entre 180mv y 220mv . Verifique que el LED verde en el módulo de detección empieza a prenderse aleatoriamente.

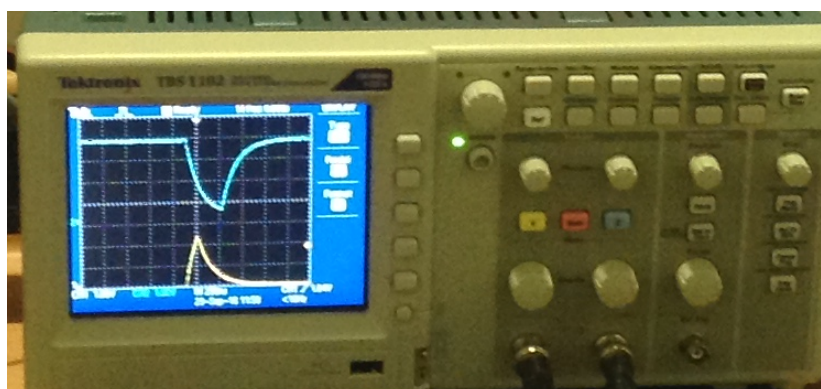


Figura 12: Señal de amplificador y del discriminador

Encienda el computador y ejecute el programa *muon.exe*, asegúrese de seleccionar el *com* adecuado en la configuración. Para verificar que sí está recibiendo información puede hacer clic en el botón *Start*. Si obtiene un aviso indicando que el programa no puede abrir determinado *com*, cámbielo en los ajustes hasta encontrar el puerto correcto. Cuando ya esté en capacidad de tomar datos, monitoree el *Rate Meter*, debería tenerlo a una tasa de aproximadamente 6-8 eventos por segundo. Para disminuir esta tasa puede cambiar lentamente el valor del alto voltaje y observar en tiempo real qué sucede con esta, de igual manera podría cambiar el valor del discriminador y observar los cambios. Para guardar los datos para su posterior análisis haga clic en *View Raw Data* y guárdelos en el formato de su preferencia.

Recomendación: Debido a la tasa promedio de decaimiento, para tener un conjunto de datos significativo debería dejar el detector la mayor cantidad de tiempo posible. Por ejemplo, para los datos mostrados en la figura 13 se dejó el detector durante 68 horas aproximadamente. Adicionalmente, para realizar el ajuste, el programa pedirá una contraseña, esta es: *muon*.

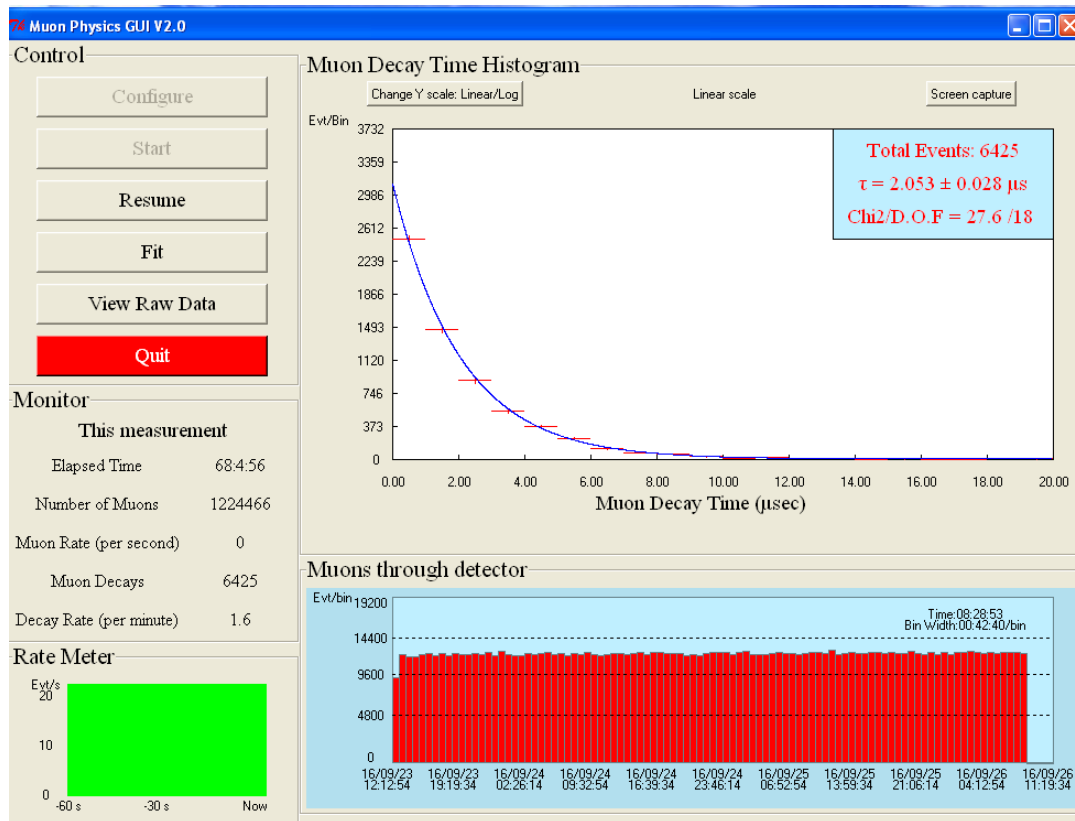


Figura 13: Datos obtenidos durante 68 horas. $\tau_{\text{obs}} = 2,053 \mu s$

Actividad 1

Para entender y caracterizar el proceso de amplificación y el discriminador realice el siguiente procedimiento:

1. Con un generador de señales sinusoidales, mida la ganancia del amplificador. Para realizar esto, envíe desde el generador una señal de 100kHz con 100mV de voltaje pico-pico a la entrada del módulo de amplificación. Calcule la razón $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$, use un osciloscopio para ver la salida del amplificador. Incremente la frecuencia de la señal. ¿Cómo es la respuesta en frecuencia del amplificador? ¿Qué puede decir acerca del tiempo mínimo entre eventos que puede detectar?
2. Mida la saturación del amplificador. Para hacerlo, incremente la amplitud desde el generador de señal y monitoree la salida del amplificador. ¿Qué sucede con los tiempos que registra el programa con una señal saturada? Compárela con los tiempos que registra una señal sin saturar.

3. Ahora debe caracterizar el discriminador. Con el generador de señales envíe una señal sinusoidal a la del módulo de amplificación. Monitoree la salida del discriminador con un osciloscopio y varíe el *threshold*. Describa el comportamiento y su forma.
4. Con el alto voltaje en su mínimo valor, conecte la salida del detector a la entrada del módulo de amplificación. Encienda el LED incorporado en el módulo de detección. Con ayuda del osciloscopio mida el tiempo (el cual usted puede ajustar con la perilla *Time Adj.*) entre los dos pulsos enviados, debe conectar el osciloscopio a la salida del detector *pulse output*. Ahora mida este tiempo con ayuda del software y compare los resultados. ¿Qué puede decir acerca del tiempo de respuesta del circuito integrado? ¿Tiene un comportamiento lineal? Use una gráfica entre el tiempo medido con el osciloscopio vs el tiempo medido con el programa para sustentar sus resultados. ¿Qué sucede si aumenta demasiado el tiempo entre los dos pulsos? ¿Qué puede decir sobre el intervalo de tiempo mínimo entre dos eventos que puede registrar el detector? ¿Para qué valor de tiempo entre pulsos, el detector no lo muestra en el software? ¿Qué sucede si disminuye demasiado el tiempo entre los dos pulsos? Discuta lo que observó y cómo esto afecta sus resultados.
5. Ajuste el valor del alto voltaje HV y observe la salida del amplificador (del análisis del discriminador, se sabe que una señal óptima debe ser de unos 200mV aproximadamente antes de llegar al discriminador). Con un *threshold* fijo, cambie el HV y observe en el software cómo cambia el *muon rate* y la curva de decaimiento.
6. Conecte el PMT directo al osciloscopio y observe cómo cambia el número de pulsos a medida que aumenta o disminuye el alto voltaje. Anote la amplitud promedio de estos voltajes y compárela con los valores que se obtienen después del proceso de amplificación. ¿Por qué se debe tener un proceso de amplificación?
7. Con un valor de alto voltaje fijo, conecte el osciloscopio a la salida del amplificador y del discriminador. ¿Qué relación observa entre las dos señales? Describa lo que sucede si cambia el valor del voltaje umbral del discriminador. Ajuste este valor para tener una toma de datos óptima, es decir, que por cada salida del amplificador se obtenga un pulso del discriminador (ver Fig .12).

Actividad 2

1. Con los valores de HV y *threshold* óptimos para la medición del decaimiento de muones, tome una serie de datos con la mayor cantidad de tiempo que le sea posible. Realice varias tomas de datos.
2. Los decaimientos de los muones que observamos son aquellos de muones que se generan fuera del detector (en la atmosfera) y por lo tanto pasan una cantidad de tiempo indeterminada desde su creación hasta que llegan al detector. Sin embargo en el experimento podemos medir la vida media de un muon. Explique cómo es esto posible.
3. Note que la ecuación de ajuste tiene la forma $A \exp(-t/\tau) + B$, donde B será la radiación de fondo. De acuerdo a lo que observa en sus datos intente estimar la

radiación de fondo y realice una corrección respectiva, luego ajuste una exponencial del tipo $A \exp(-t/\tau)$ a los datos corregidos.

4. Calcule el valor de τ_{obs} y compárelo con el valor estimado en el Ejercicio 1. También calcule ρ y la constante de Fermi G_F con sus respectivas incertidumbres.

Ejercicio 4

1. ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento? -
 - Altura sobre el nivel del mar a la que se realiza el experimento.
 - Partículas cargadas externas que sean detectadas por el centellador y PMT.
 - El tiempo que se demora la señal en los circuitos de amplificación y discriminación.
 - Filtración de luz en el detector.
2. ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?