

缈子生命期(muon lifetime)的測量

高師大物理系 97 級 49333020 蘇益弘

壹、摘要.....	3
貳、簡介.....	3
參、原理.....	3
1.有關繆子.....	3
2.有關偵測器.....	6
3.有關電子儀器.....	9
肆、實驗設計.....	10
1.PMT 的 plateau 測量.....	10
2. 宇宙射線單位時間內通量測量.....	11
3.繆子生命期量測.....	11
伍、實驗裝置與步驟.....	15
1.PMT 的 plateau 測量.....	15
2. 宇宙射線單位時間內通量測量.....	15
3.繆子生命期量測.....	15
陸、實驗結果與分析.....	17
1.PMT 的 plateau 測量.....	17
2.宇宙射線單位時間內通量測量.....	18
3.繆子生命期量測.....	18
柒、討論.....	20
捌、參考資料.....	20
玖、附錄.....	21
A. 繆子從高空到達地面的相對論性修正.....	21
B. 有關 module 操作的詳細敘述.....	21
C. 最初欲使用的閃爍體探測器.....	23
D. 進行分析的 perl 跟進行繪圖 fitting 的 perl 的程式碼.....	24
E. vector/fit 與 histogram/fit 結果比較.....	26
F. 數據處理的額外資料.....	28

壹、摘要

本次實驗最後是測量繃子的生命期(muon lifetime)，繃子的來源是宇宙射線。實驗總共進行了三項：1.光電倍增管 plateau 的測量以確定所需要的 PMT 及工作電壓。2.宇宙射線的通量測量，使用三塊閃爍體疊放測量計數率，計算後得到通量。3.繃子的生命期測量，測量衰變所需時間，透過式子 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 去 fitting 出繃子的 lifetime。最後我們得到 cosmic ray flux = $0.6526(\text{counts}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ，以及繃子 lifetime = $2.315 \pm 0.3286 \times 10^{-1} \mu\text{s}$ 。實驗中的誤差主要來自於衰變時間較短(0~200ns)時的計數，屬於儀器本身的限制。

貳、簡介

繃子生命期的量測是一項常見到的實驗，藉著實際操作實驗，大要的去瞭解粒子物理實驗上的原理與其實際測量上的設計與操作。從一開始了解繃子(muon)的相關知識。還有實驗中會用到設備的相關操作與原理知識，並實際設計實驗線路與實際操作實驗。最後學習使用 perl 跟 paw 進行分析結果，得到繃子生命期。

參、原理

1.有關繃子

■ 繃子簡介

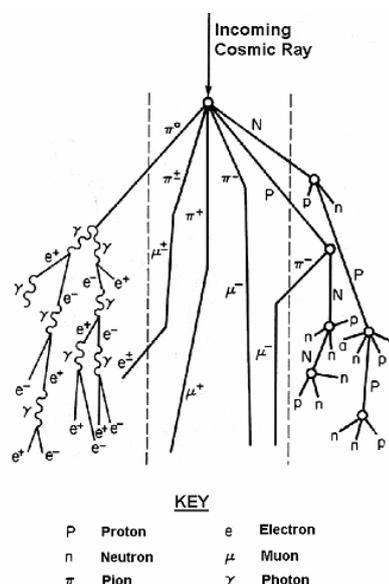
繃子是基本粒子的輕子之一。它帶有-1 的基本電荷及 1/2 的自旋。它的符號是 μ^- 。在 1936 年由卡爾·安德森研究宇宙射線時發現的。它的質量是 $105.6 \text{ MeV}/c^2$ 為電子的 207 倍。繃子的生命期為 $2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$ 。[1]

■ 宇宙射線中的繃子

本次實驗偵測的繃子是來自宇宙射線中的繃子，以下淺談宇宙射線。

宇宙射線是來自太空的高能量粒子射線，其能量可以達到 10^{20} eV 。主要成分是由核子構成，其中包括約 87%質子，12% α 粒子，其餘原子核、電子、 γ 射線和超高能微中子也構成一小部分宇宙射線。

當宇宙射線在進入大氣層後，高能粒子會與大氣層中的核子產生作用，進而產生許多新的粒子(次級粒子 or 次級宇宙射線)。而這



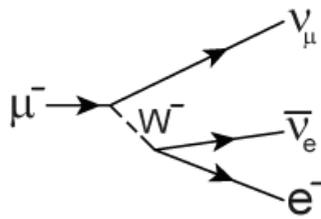
圖一 空氣簇射[2]

部份的粒子如果能量夠高，則將繼續與大氣層中的核子產生作用，產生更多次級粒子。直到粒子的能量低於一個臨界值，才停止繼續產生新粒子。而這現象我們稱之為空氣簇射。

在空氣簇射的過程中，產生很多 π 介子和 K 介子，這些粒子很快衰退為繃子。接下來繃子因為與大氣層中的核子沒有發生作用而不會繼續產生新的粒子。加上時間膨脹的相對論性效應(參照附錄 A)，所以能在衰變之前到達地面。這部份就是我們所接收的繃子來源。[3]

■ 繃子衰變

繃子為第二世代的輕子，他在一定的機率下會進行衰變，如下：



圖二 繃子衰變[3]

夸克	上	u	c	t
	下	d	s	b
輕子	e- 中子	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ	
	電子	μ 介子	τ 介子	
		I	II	III
		物質的世代		

圖三 基本粒子[4]

本實驗偵測到衰變後放出的電子，記錄他衰變的時間去 fitting 出 muon lifetime。[1]

■ 生命期

粒子的衰變是隨機產生的，每一個粒子衰變所花的時間是不一樣的，我們能確定的是衰變有一個固定的機率 $P(t)$ ，我們可以用下列的微分式表示：

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

其中 λ 代表單位時間內的衰變機率，N 代表粒子數，將等號左邊 N 與右邊 dt 移位

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda dt.$$

將上式兩邊做積分，可得：

$$\ln N(t) = -\lambda t + D$$

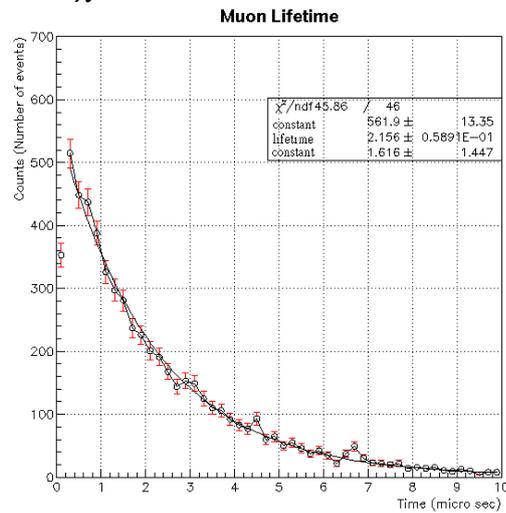
D 是積分後的常數，接下來兩邊一起放入 e 中

$$N(t) = C e^{-\lambda t}$$

上式 C 當 $t=0$ 時， $N_0(t) = C e^0 = C$ ，故改寫如下

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

其中 N_0 代表粒子原本總數， λ 代表單位時間內的衰變機率， N 代表衰變的粒子數。我們令 $t = \tau = \frac{1}{\lambda}$ ，這邊的 τ 即為我們所用到的生命期(lifetime)



實驗中測量的是繻子衰變的時間 t 與其對應的 count 數 N ，作 t 對 N 的關係圖，如上圖。將所做的數據依 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 去 fitting，則可能到我們想要的生命期。

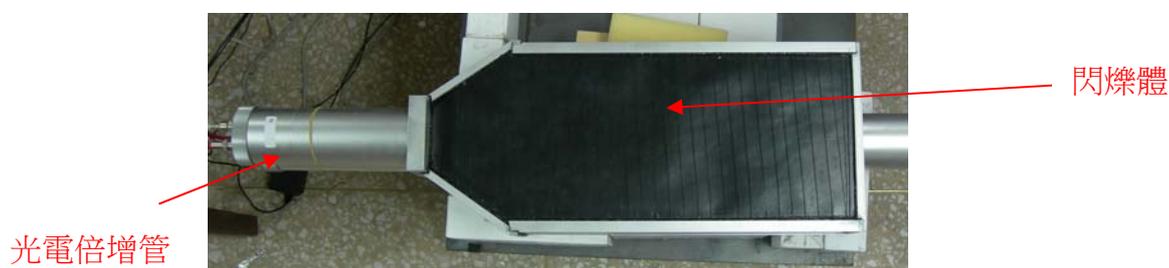
2.有關偵測器

■ 如何探測宇宙射線

在偵測宇宙射線上，常見到氣泡室和閃爍體探測器兩種探測器。氣泡室可以用來觀看宇宙射線的軌跡，而閃爍體探測器則可以偵測宇宙射線的通量。在本次實驗中我們使用到的是閃爍體探測器。

■ 閃爍體探測器

利用粒子進入引起閃爍體的發光而進行記錄的探測器。它是 1947 年由 J.W. 科爾特曼和 H.P. 卡爾曼發明的。它由閃爍體、光電倍增管和電子儀器等組成。



圖四 實驗中所用的閃爍體探測器

它的工作原理是粒子同閃爍體相互作用，使閃爍體的原子、分子的外層電子被電離或激發，被激發的電子變回基態時發射光子。而這部份所發射的光子則用反射物質和光導把盡可能地送到光電倍增管的光陰極上，接下來由於光電效應，光子在光陰極上打出光電子。光電子在光電倍增管中倍增，經過倍增的電子流在陽極負載上產生電信號，可送出一個脈衝的訊號。

閃爍體

在閃爍體部分，很多物質都可以在粒子入射後而激發發光，因此閃爍體的種類很多，可以是固體、液體或氣體。我們通常按化學性質可分為無機閃爍體和有機閃爍體兩大類。在這裡我們使用的是有機閃爍體中的塑料閃爍體，以下簡介有機閃爍體。

有機閃爍體大多屬於苯環結構的芳香族碳氫化合物，其發光機制主要由於分子本身從激發態回到基態的躍遷。有機閃爍體又可分為有機晶體閃爍體、液體閃爍體和塑料閃爍體。有機晶體主要有**蒽**、**芪**、**萘**等，具有比較高的螢光效率，但體積不易做得很大。液體閃爍體和塑料閃爍體可看作是一個類型，都是由溶劑、溶質和波長轉換劑三部分組成，所不同的只是塑料閃爍體的溶劑在常溫下為固態。液體和塑料閃爍體還有易於製成各種不同形狀和大小的優點。

光導

光導，是塗於閃爍體與光電倍增管連接面上的一種導光物質，是為了盡可能減少連接處空氣對光子的全反射、折射，以有效將光子傳遞給光電倍增管光陰極。

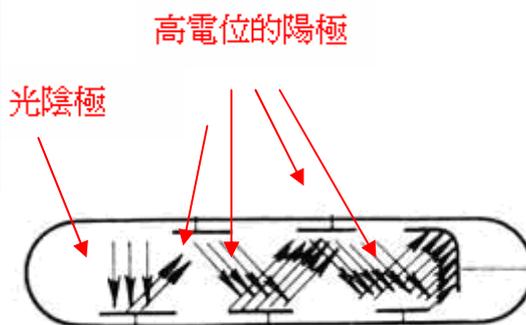
光電倍增管

光電倍增管是一種具有高靈敏度與超快反應時間的光探測元件，在一般典型的光電倍增管中，在其反應範圍最佳的近紅外光區到紫外光區，可以將只有數百個光子的光訊號轉換為有用的電子脈衝訊號，進而利用此脈衝訊號來做訊號的分析。

光陰極在光子作用下發射光電子(光電效應)，這些電子被外電場(或磁場)加速，聚焦於第一次極。這些衝擊次極的電子能使次極釋放更多的電子，它們再被聚焦在第二次極。這樣，一般經十次以上倍增，放大倍數可達到 $10^8 \sim 10^{10}$ 。最後，在高電位的陽極收集到放大的光電流；輸出電流和入射光子數成正比。[5]



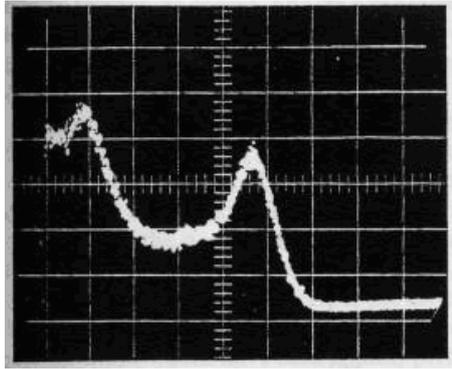
圖五 光電倍增管



圖六 光電倍增管內部放大示意圖[8]

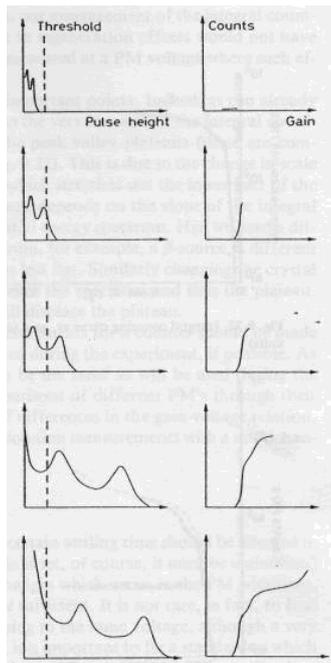
■ PMT 的工作電壓

光電倍增管所施加的高壓電源大小，會受到光電管的特性、射入射線的能譜、閃爍體對此能譜的反應等影響。而為了調整適當的高壓值，我們會做 PMT 的平區(plateau)量測。



圖七 ^{207}Bi 不同 pulse high 對應各自的 count 數[6]

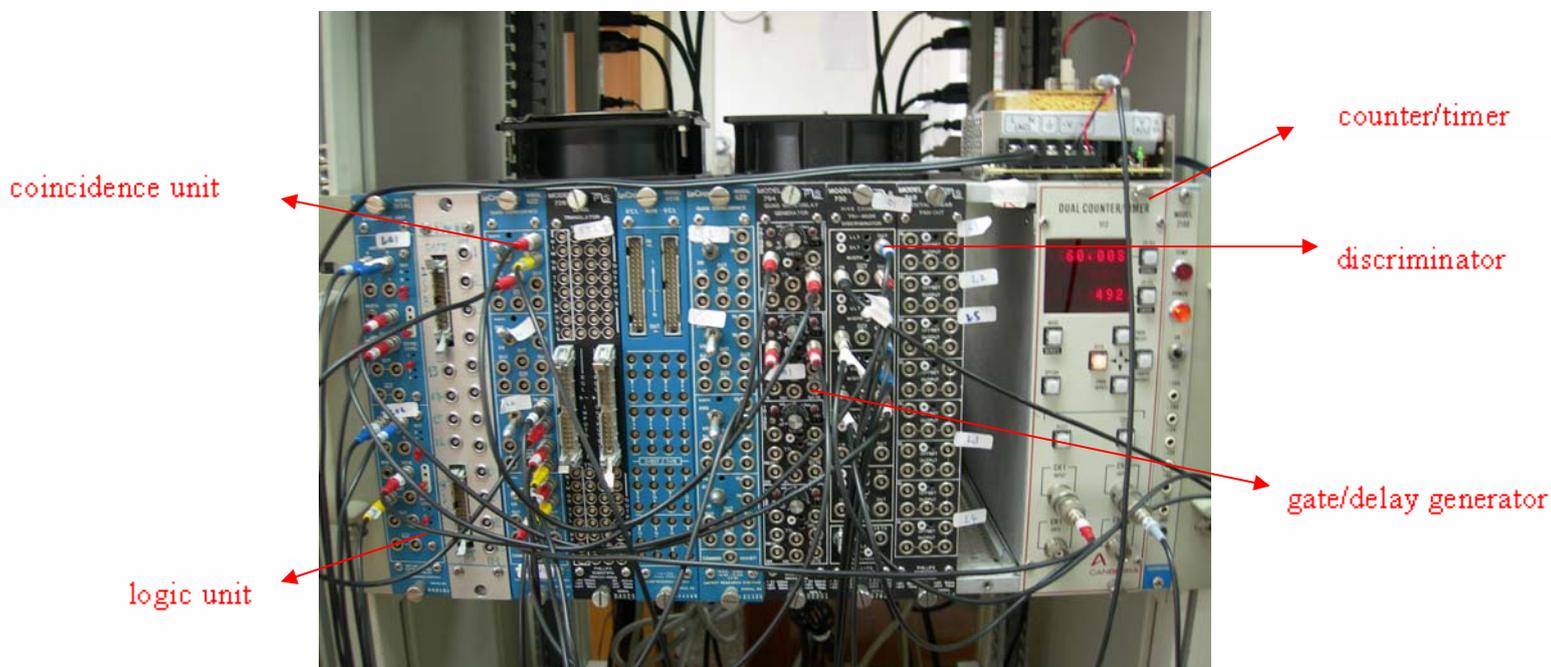
觀看上圖，上圖是不同 pulse high 對應各自的 count 數，在圖中可以明顯看到有兩個峰，代表的是射線源(在這裡是 ^{207}Bi)所產生的訊號，而其他的部份則為 PMT 內部電子訊號的雜訊。觀看下圖，左邊的部分是工作電壓改變後，不同 pulse high 對各自 pulse high 的 count 數，右邊的部分則是不同工作電壓對 count 數的對數圖。你可以發現在一開始工作電壓不夠時，訊號放大的不夠，左圖訊號能通過 threshold 進來的都只是雜訊，而真正的訊號還沒被放大到足夠通過 threshold 此時右邊 count 數也是呈現攀升的狀態。而在工作電壓慢慢加大後，訊號才會真正的進來。在你把工作電壓加大到訊號都進來了，觀看右邊 count 數會出現一個較為平緩的平區。這一部份就是適合的工作電壓。通常我們取 plateau 的中間值為工作電壓。過了 plateau 後，當你把手電壓繼續往上加，這時候 PMT 內部的許多雜訊都會被放大到通過 threshold，以致於 count 數又飆升了上去。[6]



圖八 改變 HV，count 數的變化[6]

3.有關電子儀器

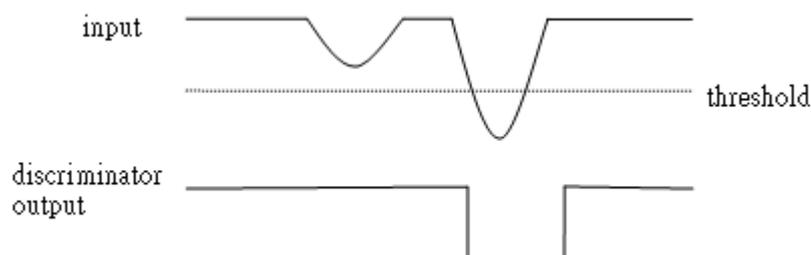
以下是簡介實驗會用到的 module 與其工作方式，詳細操作與圖片可參照附錄 B。



圖九 使用中的 module

■ discriminator

用來處理類比的脈衝訊號，將其改變成 1/0 的電子訊號，可選定 threshold 來過濾實驗所需要的訊號。其處理方法是當送入的脈衝訊號高過你所選定的 threshold 時，會送出 1 的電子訊號。



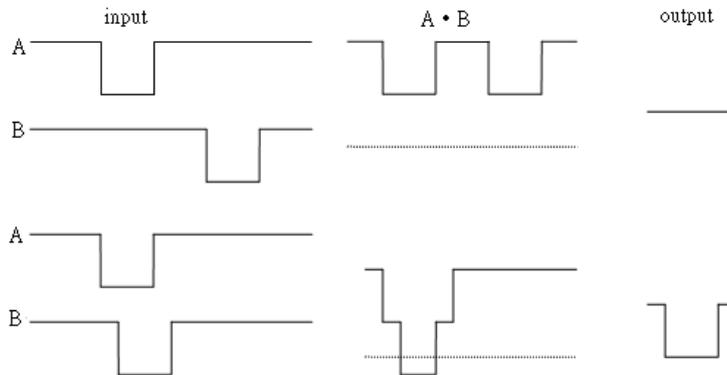
圖十 discriminator 訊號運作

■ gate/delay generator

它有兩個功能，一個是開啟 gate，一個是 delay。gate 功能：當訊號輸入 input 後，將會送出一個 gate，gate 的寬度則可由你選定。delay 功能：訊號輸入 input 後，會 delay 所設定的時間後，送出訊號。Delay 時間的設定同 gate 寬度的設定。

■ coincidence unit

用來判斷兩個以上的訊號，是否同時有訊號。是的話則會送出訊號，而否則不會。常見到以下判斷方法：



圖十一 coincidence 訊號運作

把訊號疊加在一起，讓它去通過 discriminator 的處理，threshold 恰好定兩個訊號最大值的疊加，如果有過 threshold 則會送出訊號，相反則否。

coincidence unit 算是屬於多種邏輯處理的一種，屬於 and。其他還有多種邏輯，Ex：or、not。

■ logic unit

邏輯處理，可以把送入的訊號進行 and 和 or 的處理。又因訊號孔數不同，可以做出多種不同的處理。Ex：使用 A、B、C、D 四孔，用 3fold-majority，則你得到的 output 是 $A \otimes B \otimes C + B \otimes C \otimes D + A \otimes B \otimes D + A \otimes C \otimes D$ 。

■ counter/timer

counter/timer 就是負責計數和計時，可以將讀入的訊號進行計數，計時方面它可以計到 $0.1 \mu S$ 。但他有許多不同種的模式，可供做不同計數計時。

肆、實驗設計

1.PMT 的 plateau 測量

如前面所說，PMT 的工作電壓可以透過觀察它的 plateau 得知。所以在使用 PMT 之前，先進行 plateau 的測量以確定工作電壓。已選定適當的閃爍體探測器。實驗開始我們先測量一個自己動手接合的探測器，但因為探測器的面積過小，計數率只有 100 個/min，這樣取數的工作天會太長。這部份的相關參照附錄 C。

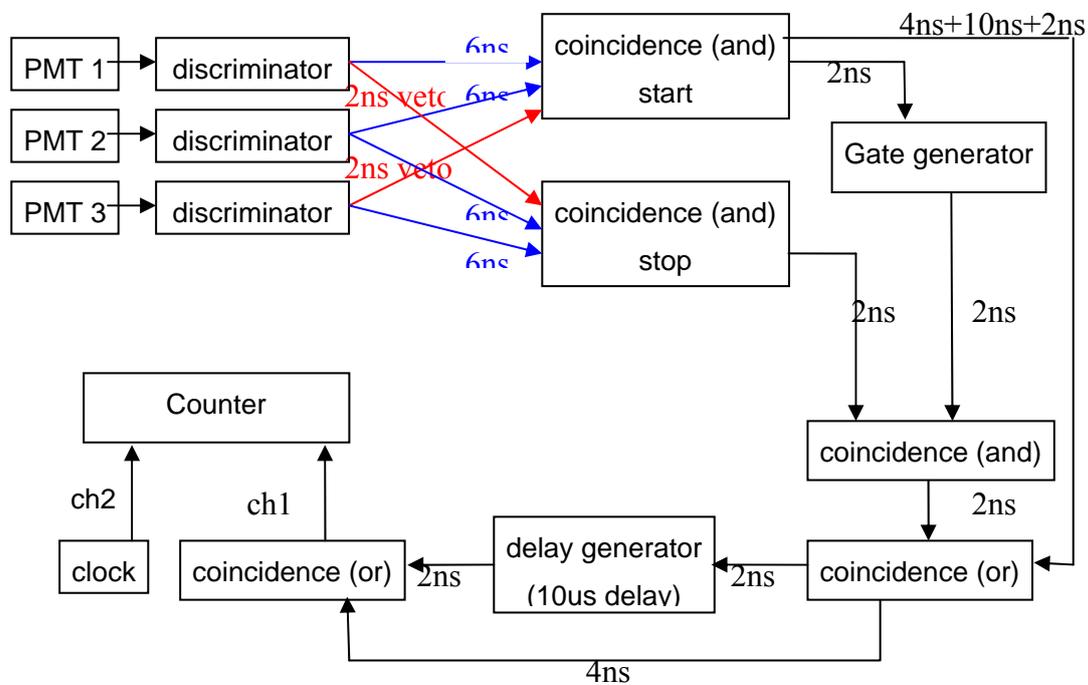
2. 宇宙射線單位時間內通量測量

本次的源是宇宙射線中的渺子，所以在實驗前需要對實驗地點的渺子通量進行量測。實驗使用三塊塑料閃爍體進行同時符合(coincidence)，讀取 60 秒內渺子通量。

同時符合(coincidence)是實驗中常用來有效消除雜訊的一種訊號處理方法。使用的方法就是在測量一放射源時，使用兩個以上的探測器，只有當三個探測器同時皆有訊號時，才會送出訊號。而三個探測器上的雜訊是各自獨立的，所以雜訊在做 coincidence 時會被有效的消除掉。

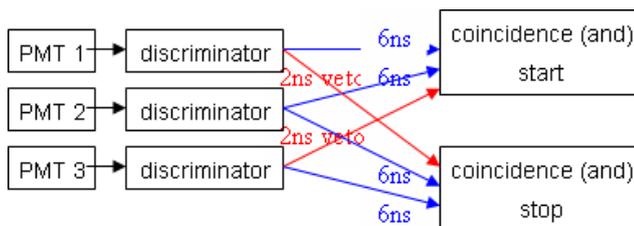
3. 渺子生命期量測

■ 線路配置圖



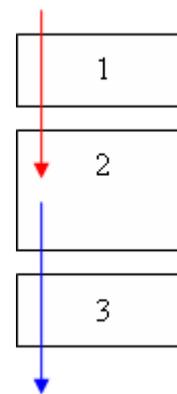
圖十二 線路配置圖

■ 訊號接收判斷



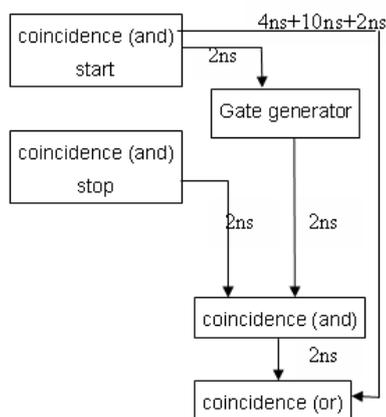
圖十三 訊號接收判斷部份線路

本次實驗用到了三塊塑料閃爍體去做偵測與訊號讀取的判斷，示意圖如右(其中 2 號閃爍體比較厚，但三者的面積是相同的)。我們取的事件是發生在當繚子射入 1 號 2 號兩塊塑料閃爍體後，在 2 號發生衰變，此時為開始的訊號，也就是取 $1 \otimes 2 \otimes \bar{3}$ 時為開始。而渺子在 2 號內部衰變後釋放出電子，電子通過 2 號 3 號兩塊閃爍體後射出，此時為停止訊號，也就是取 $\bar{1} \otimes 2 \otimes 3$ 時為停止。然後訊號經過 module 處理進行計數。之所以不只使用一個閃爍體去做量測，是為了需要兩個以上的訊號去做同時符合。



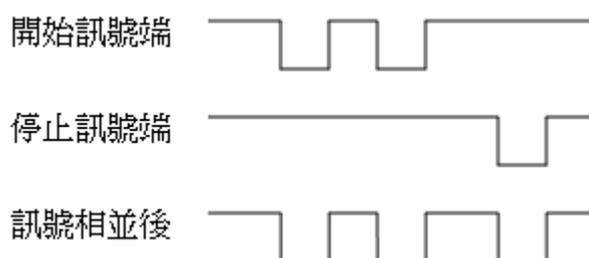
圖十四
所取的繚子的進入方向
與衰變後電子方向

■ 開始與停止分辨處理



圖十五 開始停止分辨的線路

經由上面的訊號接收後，我們會接收到分別來自開始與停止的訊號，但是不能直接把兩個訊號並在一起，以免會發生下列情況。

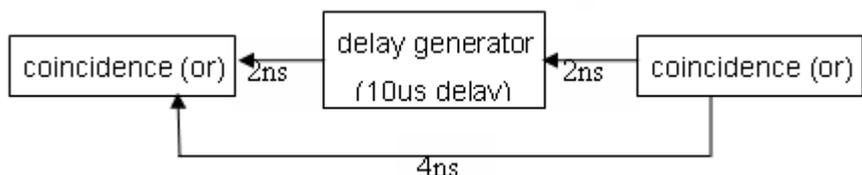


圖十六 開始訊號連續輸入導致誤判

以上是因為開始訊號端連續輸入兩個訊號，最後訊號相並後，在停止訊號上就會出現誤判。所以我們要做一些相關的訊號處理，避免以上情形發生。

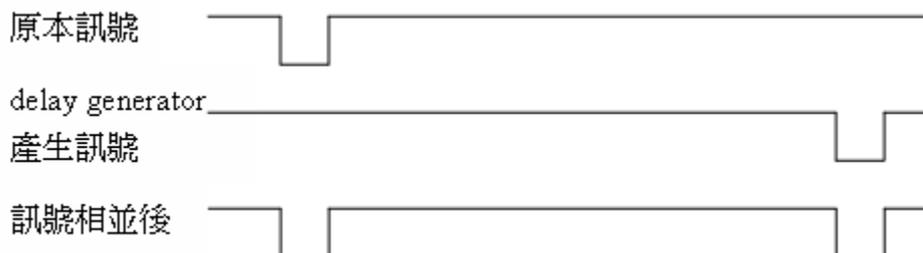
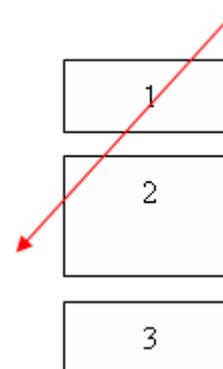
這裡的處理方式是用開始訊號端的訊號去開一個 $10\mu\text{S}$ 的 gate，再用這個 gate 去跟停止訊號端的訊號去做 and，挑選出在開始訊號後 $10\mu\text{S}$ 內冒出的停止訊號。最後在把挑選出的訊號與原本的開始訊號並在一起送出。

■ $10\mu\text{S}$ 後的自動停止

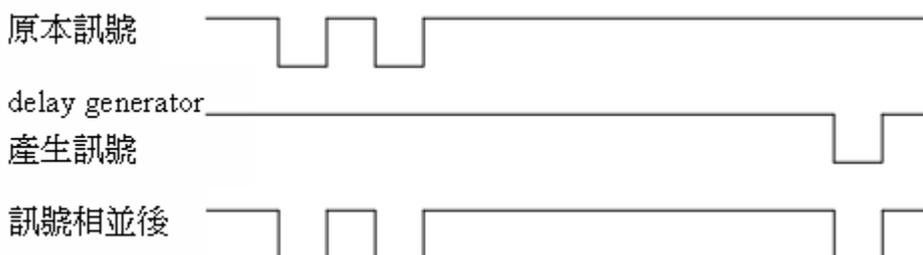


圖十七 自動停止的線路

以上訊號處理後，在一種情況下仍有問題，那就是當有了開始訊號後，沒有停止的訊號。這是很有可能發生的，因為大部分的開始訊號有可能是如右圖被觸發的(繃子斜射通過了1號與2號閃爍體)。所以利用 delay generator 產生一個訊號在開始訊號的 $10\mu\text{S}$ 後，如此一來在 $10\mu\text{S}$ 內如果沒有停止訊號的話，則會自動停止，繼續讀取下一個開始訊號。



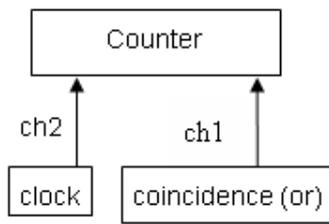
圖十八 自動停止的線路—停止端沒有接收到訊號



圖十九 自動停止的線路—停止端有接收到訊號

以上為有停止訊號，當讀取到停止訊號後，後面的訊號會因為 counter 所需要的 recycle 時間 0.01s 而被忽略掉。

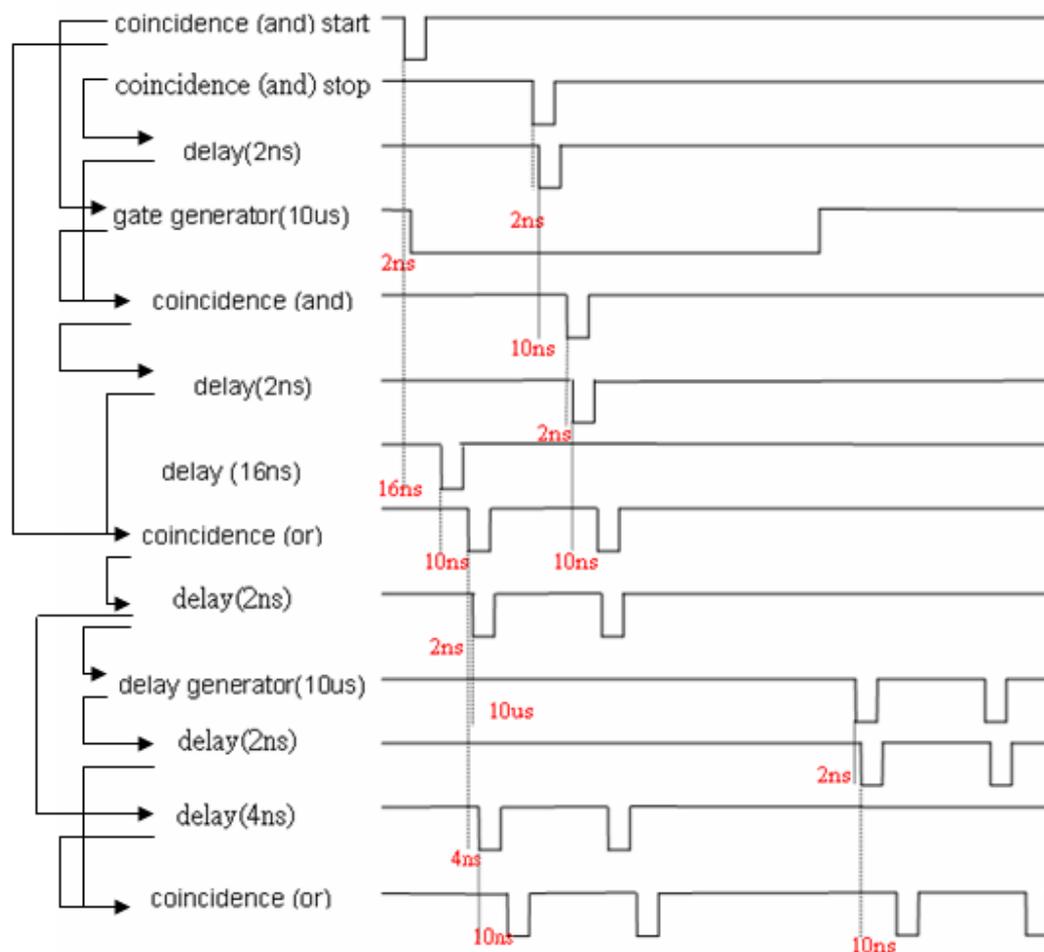
■ 計時方式



圖二十 計時部分的線路

雖然 module 裡本來就有 counter/timer，不過為了使實驗的刻度再精準一些，我們使用一個 100MHz 的 clock，它會不停的送訊號給 counter，每 10ns 一個訊號，利用它來計時。

■ 訊號 delay 上的處理及示意圖



圖二十一 線路 delay 圖—左方為訊號的輸入與輸出，右方為延遲的表示。

在實驗中，訊號每經過 module、cable 線，都會產生訊號的 delay，所以在設計線路上必須考慮到 delay 的問題，使每個訊號符合你原先設想的情況。以上訊號圖是在線路圖中間的部份，因為其他部分訊號在 delay 上完全相同，故不在這裡表示。

伍、實驗裝置與步驟

1.PMT 的 plateau 測量

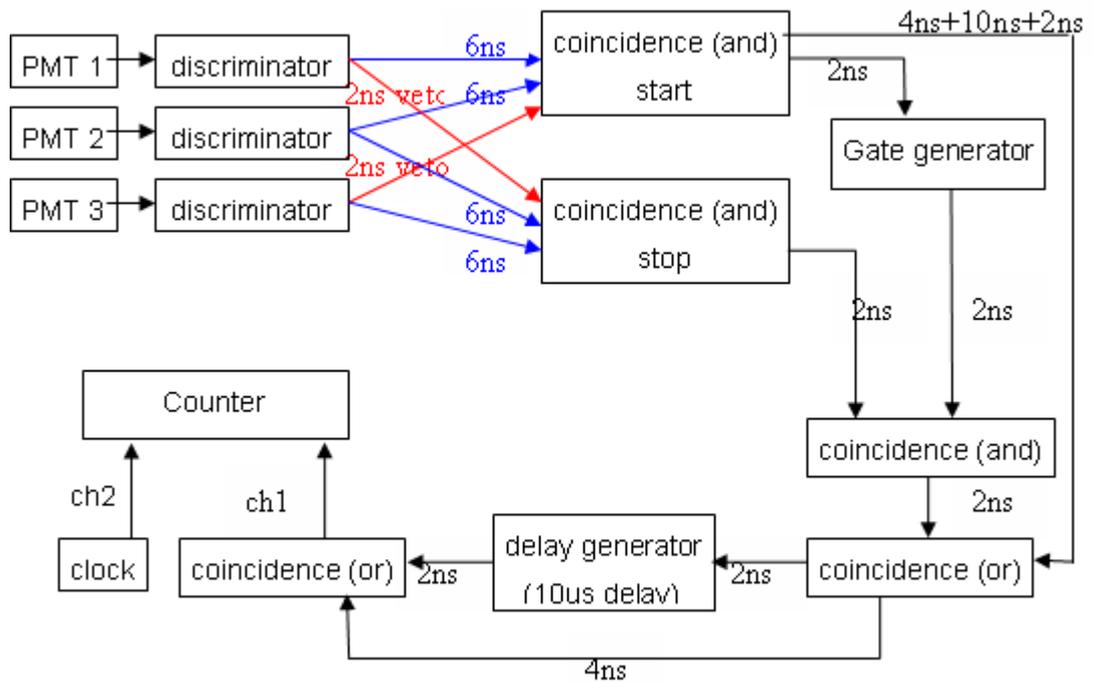
1. 選取一個閃爍體偵測器，閃爍體面積為 750cm^2 。
2. 將 PMT 接上 HV。
3. 將 PMT 的訊號分別接入 discriminator 做訊號處理。
4. 將 discriminator 送出的訊號送進 counter。
5. 調整 counter 的模式為 timer/counter，計時時間設定為 60S，量測每一分鐘內的 count 數。
6. 改變不同 HV，測量其一分鐘內的 count 數。作不同 HV 對每分鐘 count 數的對數圖。
7. 調整 discriminator 的 threshold，重覆上步步驟，觀看 threshold 對圖形的影響。

2. 宇宙射線單位時間內通量測量

1. 選取三個個閃爍體探測器，兩者的閃爍體面積皆為 750cm^2 。
2. 將 PMT 接上各自合適的 HV
3. 將三個 PMT 訊號各自送入 discriminator 後，一起送入 coincidence(and)，然後再送到 counter。
4. 將三塊閃爍體疊放在一起。
5. 調整 counter 的模式為 timer/counter，計時時間設定為 60S，量測每一分鐘內的 count 數。

3. 繆子生命期量測

1. 選取三個閃爍體探測器，三者的閃爍體面積皆為 750cm^2 。其中兩塊後度一樣編號為 1 號、3 號，一塊厚度較大編號為 2 號。
2. 將 PMT 接上合適之 HV。
3. 將 1.2.3 號由上至下疊放
4. 將訊號依照設計圖的方法連接。



圖二十二 線路配置圖

5. 調整 timer/counter 的模式為 preset/counter，設定由 ch1 為觸發，ch2 計數，ch1 計數達 1 時停止計數，並重新下一次計數。
6. 取數 7 天後，將數據取出，用 perl 進行分析，並做衰變時間對衰變數量關係圖。(paw 的程式碼參照附錄 D)
7. 用 paw 進行 fittingting 後，讀出鈷子的生命期(paw 的程式碼參照附錄 D)

陸、實驗結果與分析

1.PMT 的 plateau 測量

閃爍體面積 750cm^2 ，計數 60s。

threshold 100mV

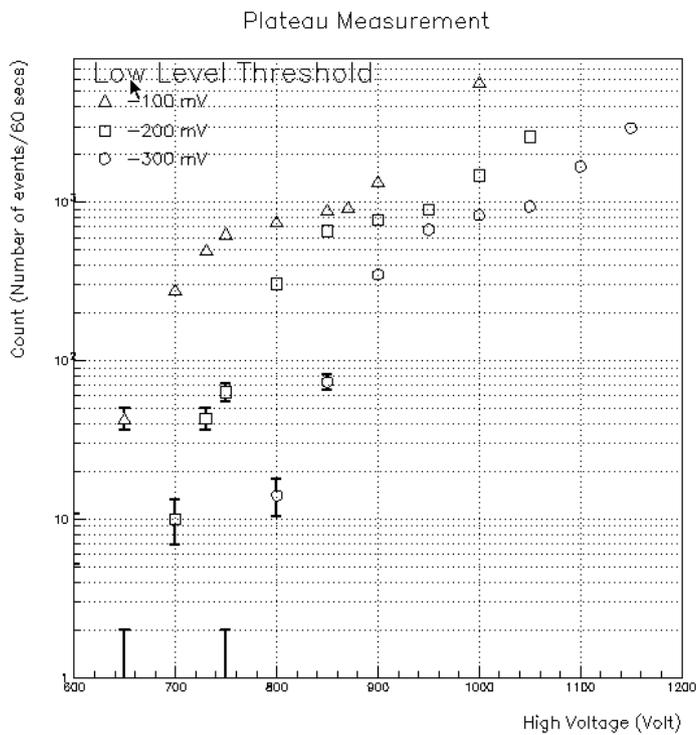
HV(volt)	600	650	700	730	750	800	850	870	900	1000	1100
count 數(個)	8	43	280	505	636	755	897	931	1354	5732	12682

threshold 200mV

HV(volt)	650	700	730	750	800	850	900	950	1000	1050
count 數(個)	1	10	43	63	306	657	772	895	1480	2593

threshold 300mV

HV(volt)	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150
count 數(個)	1	14	73	350	670	831	944	1688	2940



觀看上圖，因為實驗中 discriminator 使用的 threshold = -100mV，所以觀看 threshold = -100mV 那條曲線，可以得到適合的工作電壓應該在 850V 上下。

2. 宇宙射線單位時間內通量測量

總共進行了 10 次測量。discriminator 的 threshold 設定為 100mV。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	總和	平均
474	475	491	482	534	510	486	490	488	492	4922	492.2

所用板子面積為 750cm^2 ，故宇宙射線單位時間單位面積內通量表示為

$$flux = \frac{492.2(\text{count})}{750(\text{cm}^2) \cdot 1(\text{min})} = 0.6526(\text{counts}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$$

與 SLAC(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/cosmicrays/crdatacenter.html>)上

的資料做比較，垂直的 $flux_{\perp} = 0.570(\text{counts}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ，所測到的較多，應該

是由於實驗中除了垂直角度的粒子可以通過三塊板子，仍有其他角度的粒子也可以通過，所以 flux 較大。

3. 繃子生命期量測

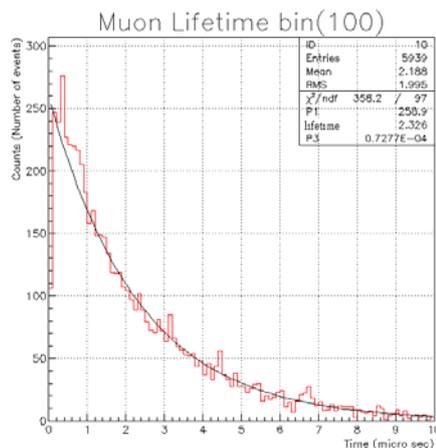
取數七天後，用 perl 去分析，挑選 lifetime 在 $10\mu\text{s}$ 內的數據，得到了 5938 個數據。

接下來分取不同的 bin size 去做 fitting，求取 lifetime。比較之下選用 bin size 最小的 100ns 來求 lifetime。

在使用 paw 作 fitting 時，有 vector/fit 與 histogram/fit 兩種，在分析時一開始先使用 vector/fit 進行 fitting，但發現對同一筆資料分不同的 binsize 之下，vector/fit 會 fitting 出不同 lifetime，原因是在 vector/fit 無法選用 likelihood，所以放棄 vector/fit 的方法(有關 vector/fit 與 gistogram/fit 的結果比較參照附錄 E)。以下是以 histogram/fit 進行分析：

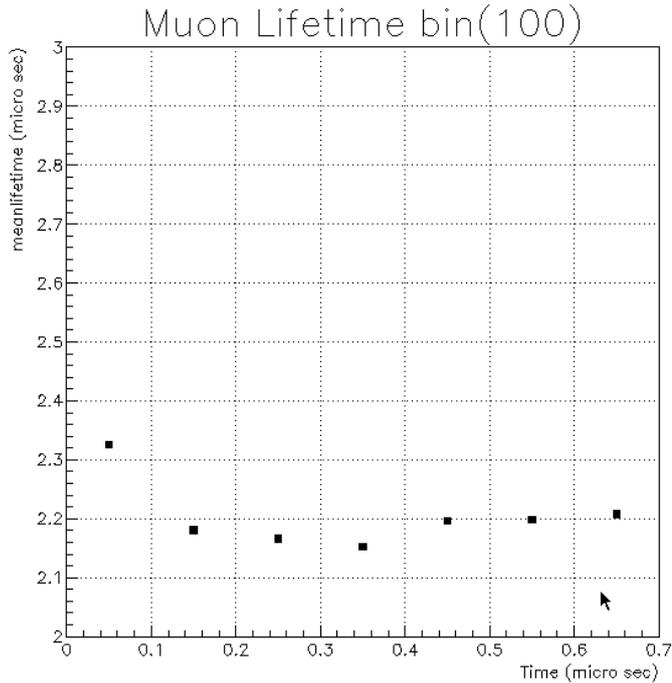
bin size=100ns 的數據資料參照附錄 F。

用 paw 畫 bin size = 100ns 的時間對 count 數關係圖

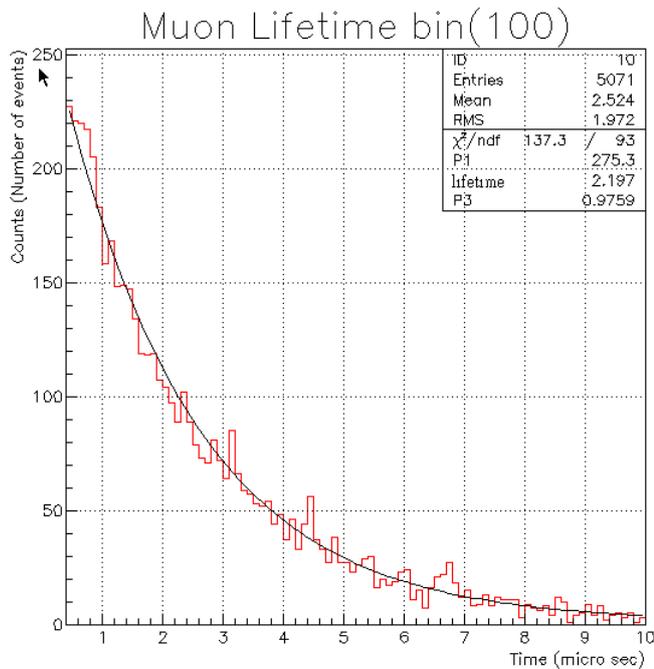


$$lifetime = 2.326 \pm 0.4931 \times 10^{-1} \mu\text{s}$$

接下來我們移除前面幾個點分別去做 fitting，觀察期 lifetime 變化



由上面可以看出在去掉 $0.35 \mu\text{s}$ 以前的數據點去做 fitting 後，lifetime 會趨於穩定。判斷出現的問題可能是在 $0.35 \mu\text{s}$ 數據點之前 400ns 內的訊號在儀器內會來不及反應，所以數據量會下降。所以把 $0.35 \mu\text{s}$ 之前的數據點去掉做 fitting。如下：



$$\text{lifetime} = 2.196 \pm 0.6265 \times 10^{-1} \mu\text{s}$$

其他不同 bin size 的處理，參照後面附錄 F。

柒、討論

這過程中實際操作過 PMT plateau 測量、宇宙射線 flux 測量、繃子生命期測量。整個實驗並沒有也無法實際看到繃子與其衰變，而是設計了實驗方法間接的去從探測器得到的數據去符合，從得到的數據中推測須要的結果。且因為實驗相關的物理尺度很小，所以在設計實驗上也要考慮到微小尺度上的許多問題，Ex：訊號的 delay。以下是有關這次實驗的一些延伸與改進。

在宇宙射線 flux 測量上可以做很多方向的延伸，不同的時間、地點、海拔高度、溫度、氣壓，對 flux 影響的關係。

最主要的繃子生命期測量中可以分兩方向進行改進，一個方向是取數效率的增加：1.衰變事件條件的放寬，Ex:這次實驗中我們測量到的衰變一律是從繃子從上面入射→中間衰變→電子往下射出，可是衰變後的電子並不一定是往下方射出，也有可能是往上，重新設計衰變訊號判取的條件，可以加大取數的效率。2.可以在閃爍體上方放置合適厚度的鉛板來降低繃子的能量，使停在中間發生衰變的繃子數目增加。另一方向是縮小測量得到的誤差：1.使用單位刻度更小 clock 來作測量。

捌、參考資料

[1]<http://en.wikipedia.org/wiki/Muon>

[2]<http://neutronm.bartol.udel.edu/catch/cr2.html>

[3]http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray

[4]<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/particleadventure/frameless/generations.html>

[5]<http://library.mit.edu.tw:8080/Content.asp?ID=44913>

[6]Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments,9.7,p209

[7]http://www.matphys.com/muon_manual.pdf

[8]<http://library.mit.edu.tw:8080/Content.asp?ID=38271&Query=1>

玖、附錄

A. 繆子從高空到達地面的相對論性修正

已知繆子生命期為 $2.19703 \pm 0.00004 \mu s$ ，而高空落下的繆子它的速度約為 $0.998c$ ，在這裡會有一個錯誤的思考，繆子以 $0.998c$ 前進了 $2.19703 \mu s$ ，則它在前進了 $\Delta d = (2.19703 \times 10^{-6} s) \cdot (0.998 \times 3 \times 10^8 m/s) \cong 660m$ ，就會衰變，所以繆子根本無法到達地面(在這裡假設高空到地面的距離 $\Delta d = 10000m$ 。在這方面我們要考慮相對論性修正，如下：

$$\beta = 0.998 \qquad \gamma = \sqrt{\frac{1}{1-\beta^2}} \cong 15.82$$

時間膨脹，首先以地球為靜止座標，繆子相對地球以 $0.998c$ 的速度前進，則我們觀測到的繆子生命期為 $\Delta T = \gamma \cdot \Delta T_0 = 15.82 \cdot 2.19703 \mu s = 34.8 \mu s$ ，所以繆子可以在前進 $\Delta d = (34.8 \times 10^{-6} s) \cdot (0.998 \times 3 \times 10^8 m/s) \cong 10419m$ 後，才會發生衰變，足以使繆子到達地面。

長度收縮，以繆子為靜止座標，地球相對繆子以 $0.998c$ 接近，繆子觀測到的高空到地表的長度 $\Delta d = \frac{\Delta d_0}{\gamma} = \frac{10000m}{15.82} = 632m < 660m$ ，所以繆子可以在衰變前抵達地面。

B. 有關 module 操作的詳細敘述

本次實驗中有運用到的 module 如下，discriminator、gate/delay generator、coincidence、4-fold logic unit、dual counter/timer。以下分別介紹：

■ discriminator

用來處理 PMT 送出的脈衝訊號，將其改變成 1/0 的電子訊號，然後再進行後面一系列的訊號處理。

這一個 module 有三種模式，本次實驗使用的是 LED MODE，這模式是當脈衝訊號的前緣(leading edge)達到了你選定的 LLT(Lower Level Threshold)，則會送出一個訊號。而用 width 孔旋轉調整實驗需要送出的訊號寬度。



■ gate/delay generator

在本次實驗有用到這個 module 有兩個功能，一個是開啟 gate，一個是 delay。Gate 功能：當訊號輸入 input 後，將會送出一個 gate，gate 的寬度則由時間刻度旋鈕和 width 孔的調整而定。delay 功能：訊號輸入 input 後，會 delay 設定的時間後，送出訊號。Delay 時間的設定同 gate 寬度的設定。



■ 4-fold logic unit

我們用這 module 來做一開始 PMT 訊號進來後的 coincidence。這個 module 的功能有很多，下面簡單介紹到會運用到的幾個操作。首先是右邊的一堆小孔：off 孔顧名思義代表把它插上塞子以後相對應的 input 將會關閉。coin-level 孔代表需要幾個 input 有訊號 output 才會送出訊號，Ex：送進了 ABCD 四個 input。當 module 的 level 插在 3，則在 $A \otimes B \otimes C + B \otimes C \otimes D + A \otimes B \otimes D + A \otimes C \otimes D$ ，output 會送出訊號。當 level 插在 4，則在 $A \otimes B \otimes C \otimes D$ 才會送出訊號時。而再來要提到的是中間部分的 veto，當有訊號送入 veto 後，它會停止訊號的輸出。最後送出訊號的寬度，則由 width 孔的旋轉調定。



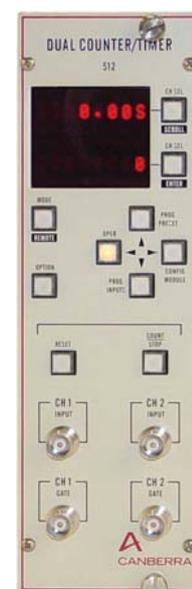
■ 2 input logic unit

比較上個 module 它只有兩個 input，所以實驗中在處理 PMT 訊號時無法使用它，實驗中用這個 module 來做 PMT 訊號以外部份的 coincidence。左方的小桿用來選定你需要的是 and 或者 or。輸出的訊號寬度一樣由 width 孔的旋轉調定。



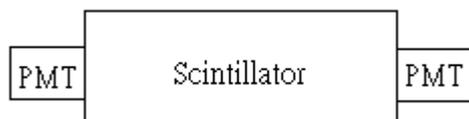
■ dual counter/timer

counter/timer 就是負責計數和計時，但它有許多不同種的模式，可供實驗做不同的用途。實驗中用到的是 timer/counters 和 preset/counter 兩種模式：timer/counters，它會在你設定的時間內，去計算 input 進來的訊號數目，可把它拿來做 plateau 測量與 flux 測量。preset/counter，它會由 ch1 的訊號作為觸發，開始去對兩個 input 計數，當 ch1 的訊號數目達到 preset 的量時，則停止計數，實驗中用這個做 muon lifetime 的測量。



C. 最初欲使用的閃爍體探測器

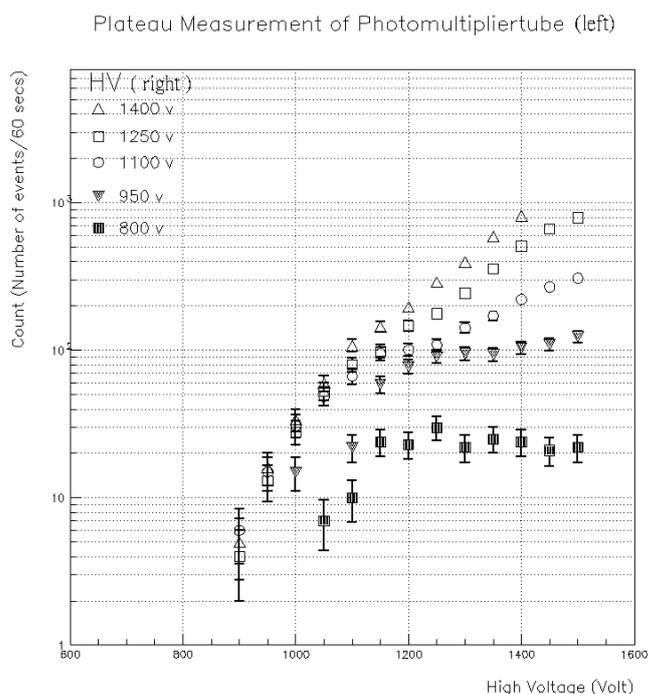
原本實驗設計是使用單一塊 scintillator，透過兩個 PMT 去做 coincidence，用來測量緲子的生命期。以下是動手連接的示意圖與實際照片：



■ PMT(左)的 plateau 量測

1. 將兩個 PMT(左.右)的訊號 coincidence 送入 counter。
2. 選定一個 PMT(右)的 HV
3. 改變 PMT(左)HV，紀錄 60s 內 count 數的變化。
4. 選定不同的 PMT(右)的 HV，重複步驟 3。

■ 實驗結果



左圖在 HV(左)=950V 的曲線，可以明顯看到 plateau 的區域，但是觀察在 plateau 時的 count 數，計數率為 100 個/min。根據以往的取數紀錄，計數率在 500 個/min，五天可以取 4000 多個數據點。如果改為計數率=100 個/min，則要二十五天才能取到。工作時間太長，所以放棄。

最後改為使用面積較大的閃爍體，使用三塊去偵測訊號並做 coincidence。

D. 進行分析的 perl 跟進行繪圖 fitting 的 perl 的程式碼

■ 分析用的 perl

```
$csv="expvectordata3-100ns.kumac";
@count;
open(W, "> $csv") || die "!!\n";

while (my $line=<>) {
    chomp $line;
    ($f1,$f2,$time)=split(/,/, $line);
    if ( $time < 1000 )
    {
        out:
        for ($i=1; $i<51 ; $i++){
            $number= $i *10;
            if( $time > $number){ }
            else
            {
                $count[$i - 1]=$count[$i - 1 ] + 1;
                last out;
            }
        }
    }
}

$data = join ', ',@count;
print W "ve/cr yaxis(100) 'r'  @count \n";
close(W);
```

■ 繪圖 fitting 用的 paw

```
set *
hi/del *
Ve/del *
close 0
zone 1 1
clr
title_global ''
opt nbox
opt grid
fort/file 70 muonlifetime.ps
meta 70 -111

set gfon 2 ; set gsiz 0.7 ; set ygti 1
set ywin 2.0 ; set xwin 2.0 ; set vsiz 0.3 ; set asiz 0.3 | unknown; unknown;
coordinate size;atitle size
set xval 0.10 ; set xlab 1.2 ; igset txci 1 ; set hcol 2

exe expvectordata3-100ns

h/cre/1d 10 '' 100 0 10

histogram/put_VECT/CONTENTS 10 yaxis(2:)

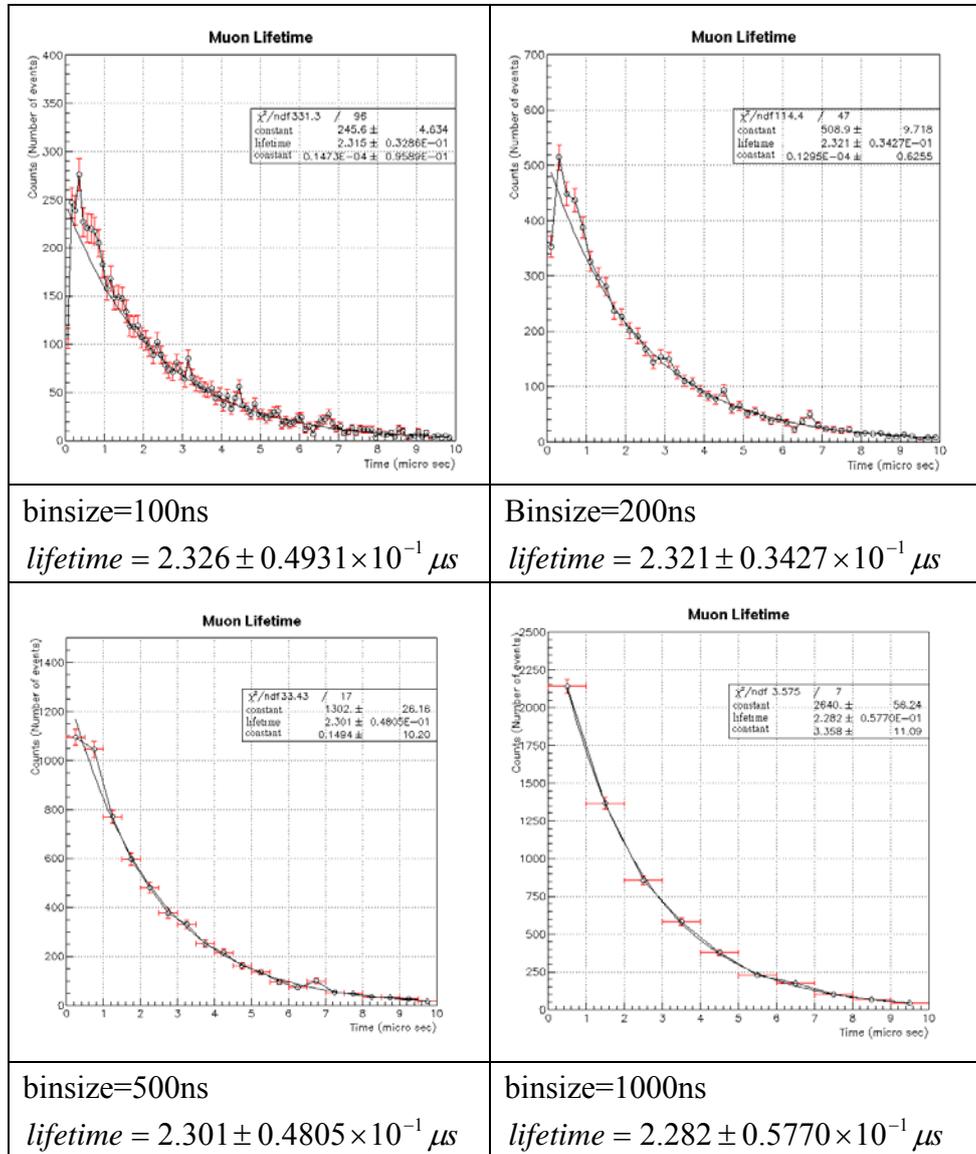
title 'Muon Lifetime bin(100)'

ve/cre par(3) 'R' 1. 1. 0.
ve/cre step(3) 'R' 0.0001 0.0001 0.0001
ve/cre pmin(3) 'R' 0.1 1. -10.
ve/cre pmax(3) 'R' 1000. 3. 20.
ve/cre errpar(3) 'R'

h/fit 10 expthree.f 'BLE' 3 par step pmin pmax errpar
```

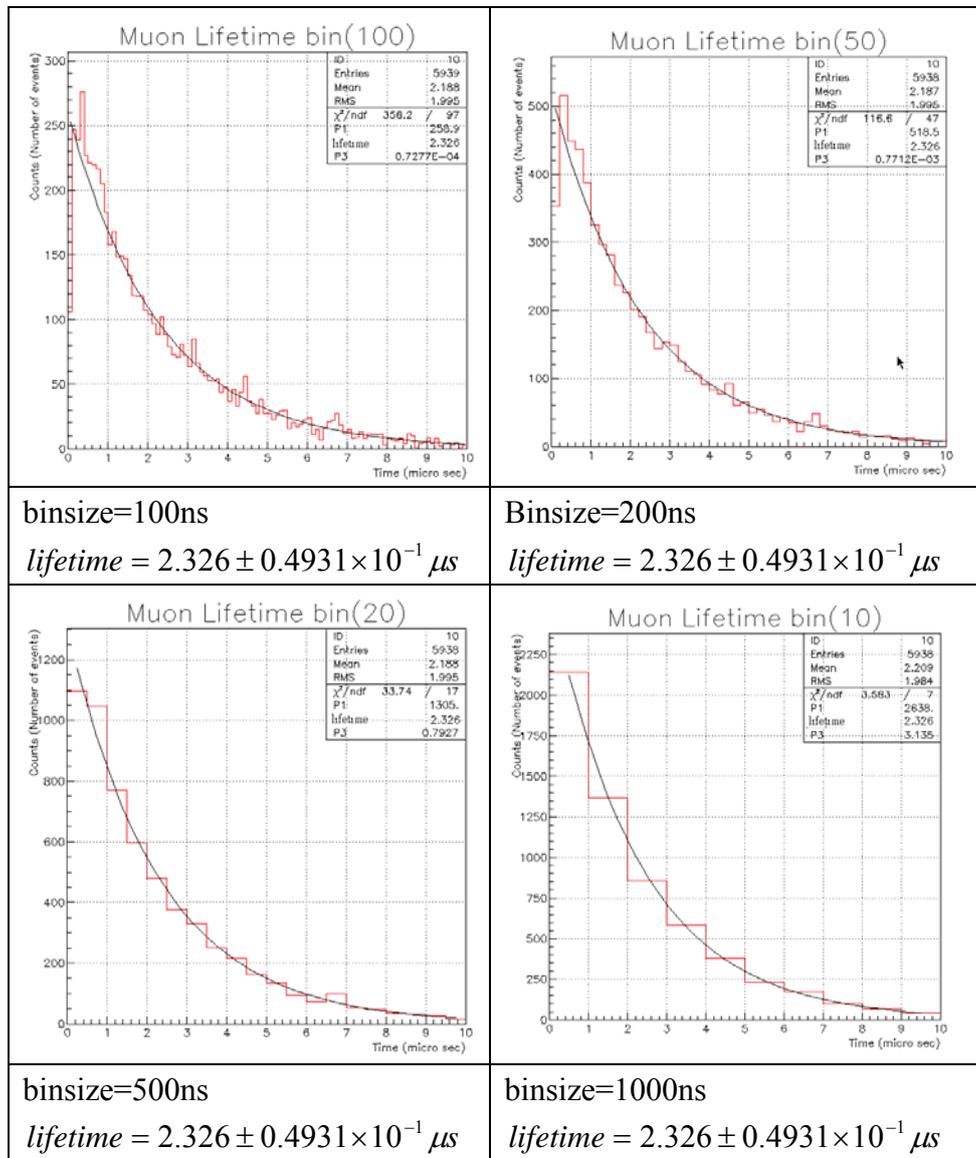
E. vector/fit 與 histogram/fit 結果比較

■ Vector/fit 的結果



以上是分不同的 binsize，fitting 的範圍都是全部的數據點，但 lifetime 並不相同，所以不適用。

■ Histogram/fit 的結果



同 vecotor/fit 一樣做相同的處理，histogram/fit 有加上選項 L=likelihood，得到的 lifetime 是符合的

F. 數據處理的額外資料

■ binsize=100ns 的數據

time (μs)	Count 數
0.05	106
0.15	247
0.25	239
0.35	276
0.45	227
0.55	221
0.65	220
0.75	217
0.85	205
0.95	183
1.05	158
1.15	168
1.25	148
1.35	149
1.45	147
1.55	134
1.65	119
1.75	118
1.85	119
1.95	107
2.05	104
2.15	97
2.25	89
2.35	102

2.45	89
2.55	79
2.65	73
2.75	71
2.85	81
2.95	72
3.05	64
3.15	85
3.25	66
3.35	59
3.45	57
3.55	53
3.65	52
3.75	54
3.85	44
3.95	48
4.05	37
4.15	46
4.25	33
4.35	44
4.45	56
4.55	37
4.65	33
4.75	27
4.85	38
4.95	27

5.05	27
5.15	23
5.25	26
5.35	29
5.45	30
5.55	16
5.65	20
5.75	17
5.85	19
5.95	23
6.05	24
6.15	11
6.25	15
6.35	7
6.45	16
6.55	21
6.65	22
6.75	27
6.85	18
6.95	12
7.05	15
7.15	8
7.25	9
7.35	13
7.45	8
7.55	12

7.65	11
7.75	11
7.85	11
7.95	3
8.05	9
8.15	7
8.25	6
8.35	8
8.45	4
8.55	12
8.65	10
8.75	1
8.85	4
8.95	5
9.05	9
9.15	4
9.25	8
9.35	2
9.45	4
9.55	5
9.65	3
9.75	5
9.85	3
9.95	1

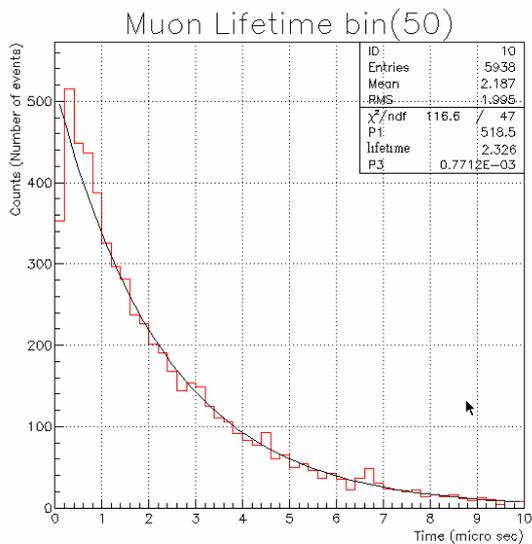
■ binsize=200ns 的數據與相關作圖

time (μs)	Count 數
0.1	353
0.3	515
0.5	448
0.7	437
0.9	388
1.1	326
1.3	297
1.5	281
1.7	237
1.9	226
2.1	201

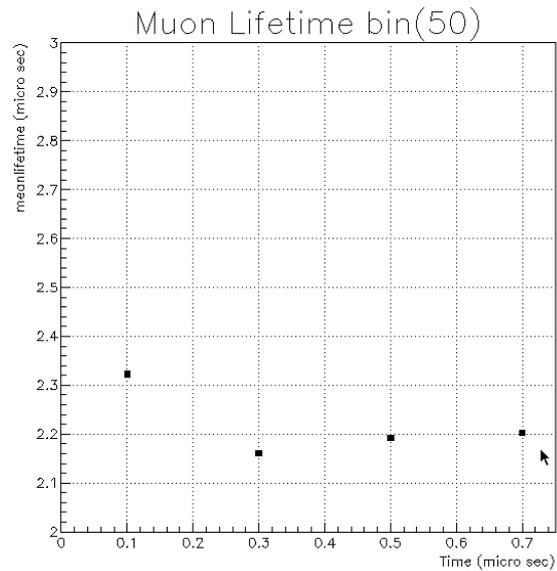
2.3	191
2.5	168
2.7	144
2.9	153
3.1	149
3.3	125
3.5	110
3.7	106
3.9	92
4.1	83
4.3	77
4.5	93
4.7	60

4.9	65
5.1	50
5.3	55
5.5	46
5.7	37
5.9	42
6.1	35
6.3	22
6.5	37
6.7	49
6.9	30
7.1	23
7.3	22

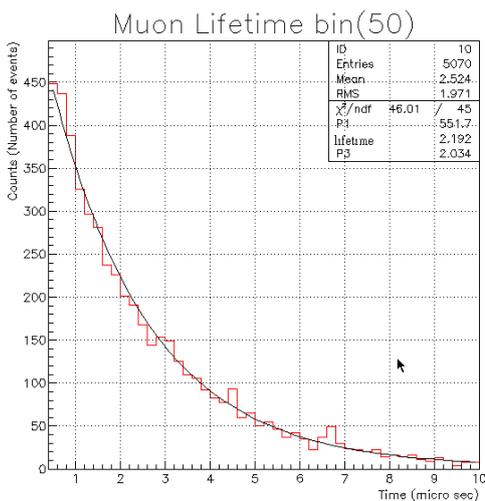
7.5	20
7.7	22
7.9	14
8.1	16
8.3	14
8.5	16
8.7	11
8.9	9
9.1	13
9.3	10
9.5	4
9.7	8
9.9	8



原始圖片 $lifetime = 2.326 \pm 0.4931 \times 10^{-1} \mu s$



分別移除前面幾個點，lifetime 的變化可以看出移掉 2 個點後 lifetime 趨於穩定。

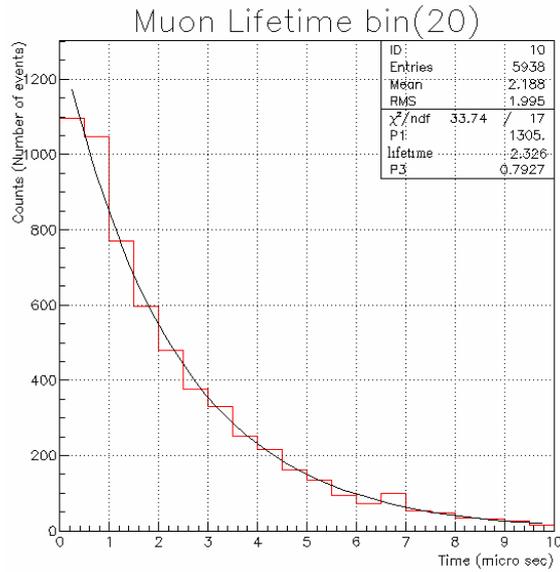


移掉前 2 個點作 fitting 的結果

$lifetime = 2.192 \pm 0.5933 \times 10^{-1} \mu s$

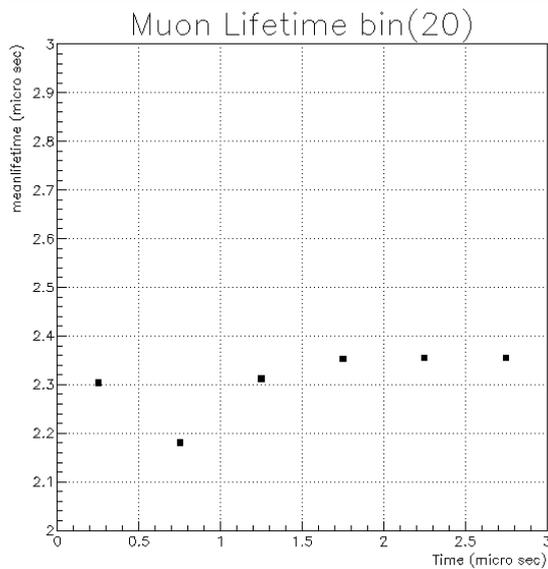
■ binsize=500ns 的數據與相關作圖

time (μs)	Count 數
0.25	1095
0.75	1046
1.25	770
1.75	597
2.25	481
2.75	376
3.25	331
3.75	251
4.25	216
4.75	162
5.25	135
5.75	95
6.25	73
6.75	100
7.25	53
7.75	48
8.25	34
8.75	32
9.25	27
9.75	16

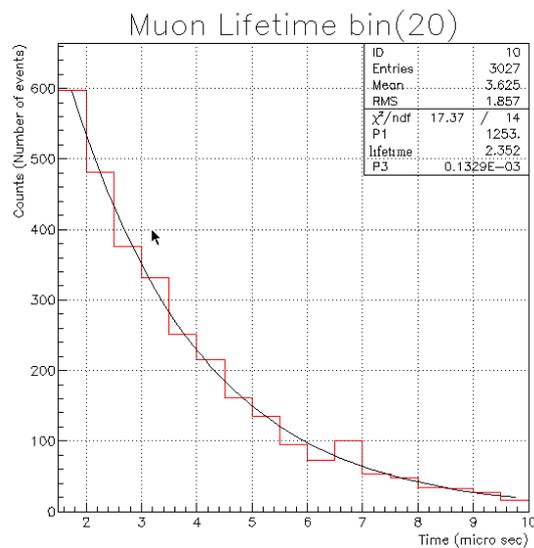


原始圖片

$$lifetime = 2.326 \pm 0.4931 \times 10^{-1} \mu s$$



分別移除前面幾個點，lifetime 的變化可以看出在移掉 3 個點後，lifetime 趨於穩定。

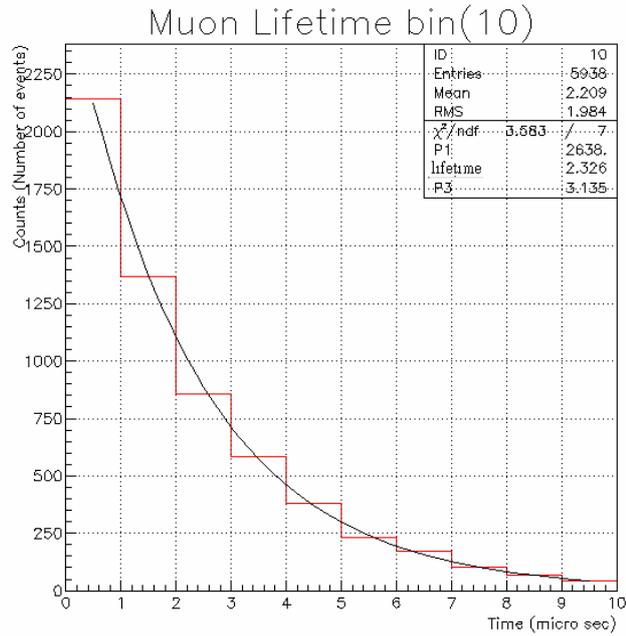


移掉前 3 個點作 fitting 的結果

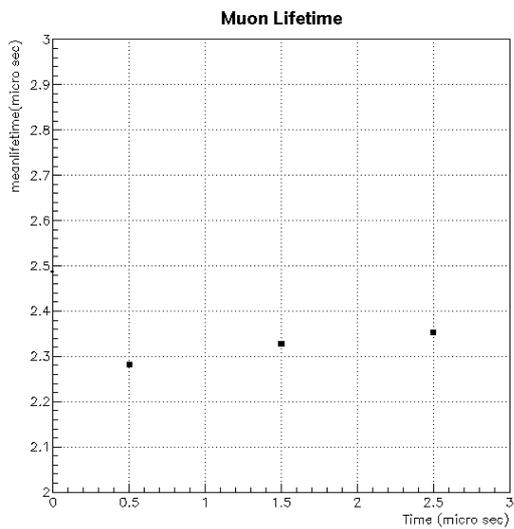
$$lifetime = 2.352 \pm 0.7155 \times 10^{-1} \mu s$$

■ binsize=1000ns 的數據與相關作圖

time (μs)	Count 數
0.5	2141
1.5	1367
1.5	857
1.5	582
1.5	378
1.5	230
1.5	173
1.5	101
1.5	66
1.5	43



原始圖片 $lifetime = 2.282 \pm 0.577 \times 10^{-1} \mu s$



分別移除前面幾個點，lifetime 的變化
因為沒什麼變化，所以就不移除點重做 fitting。