

緲子平均生命期的量測

The Measurement of the Mean Lifetime  
of Cosmic Muons

高師大物理系 江柔婷

指導老師 章文箴 老師

鄧炳坤 老師

June & July, 2007

# 目錄

壹、摘要.....	2
貳、簡介.....	2
參、原理.....	4
肆、儀器.....	5
伍、實驗步驟.....	9
陸、實驗結果.....	17
柒、參考資料.....	20
捌、實驗結果討論.....	20
附錄 A.....	22
附錄 B.....	錯誤! 尚未定義書籤。
附錄 C.....	錯誤! 尚未定義書籤。 3
附錄 D.....	24
附錄 E.....	錯誤! 尚未定義書籤。 6
附錄 F.....	錯誤! 尚未定義書籤。 7
附錄 G.....	錯誤! 尚未定義書籤。 8

## 壹、摘要

本實驗的主要研究對象是繃子(muon)，它是物質最基本的組成之一，實驗目的在量測 muon 的平均生命期(mean lifetime)。已知 muon 以指數衰變(exponential decay)，開始進行實驗的設計，利用 A、B、C 三層由塑料閃爍體(plastic scintillator) 搭配光電倍增管(photomultiplier)構成的探測器，訊號由探測器送出後搭配 NIM modules 的邏輯處理，再以 clock 量測計數後由 counter 紀錄數據。取數七天，以 paw 分析作圖並加上 fitting 衰變曲線(decay curve)，為了減少所得 lifetime 的誤差，再提高 fitting 的限制範圍，得到 muon 的平均生命期為  $2.135 \pm 0.05482 \mu s$ ，實驗結果加上 error bar 後落在 PDG 值內。

## 貳、簡介

物理學家一直在探索物質的最基本組成，至今已經發展出一個名為“標準模型”(standard model)的理論，以解釋組成世界上所有物質的基本粒子和發生的作用力。本實驗的目的在於測量 muon 的平均生命期。繃子(muon)在 1936 被 Carl D. Anderson 發現，是一種基本粒子，屬於輕子，muon 測量的主要來源是宇宙射線(cosmic ray)。較重的輕子如 muon 和  $\tau$  子，在普通的粒子中很難被找到，因為當它們生成之後很快就衰變成其他的粒子組成，或者是變成較輕的輕子。為了測量 muon 的平均生命期，必須先對基本粒子、宇宙射線及 muon 有一定的認識：

### 一、基本粒子(fundamental particle)

基本粒子是構成物質的最小單位，可以分為夸克(quarks) (參考圖一)、輕子(leptons) (參考圖一)、規範玻色子(gauge bosons)以及希格斯粒子(Higgs bosons)四大類。其中已經發現的 leptons 包括電子( $e^-$ )、繃子( $\mu^-$ )、 $\tau$  子( $\tau^-$ )三種帶一個單位負電荷的粒子，以及它們分別對應的不帶電微中子，分別以  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  表示。加上以上六種粒子各自的反粒子，共計十二種輕子。

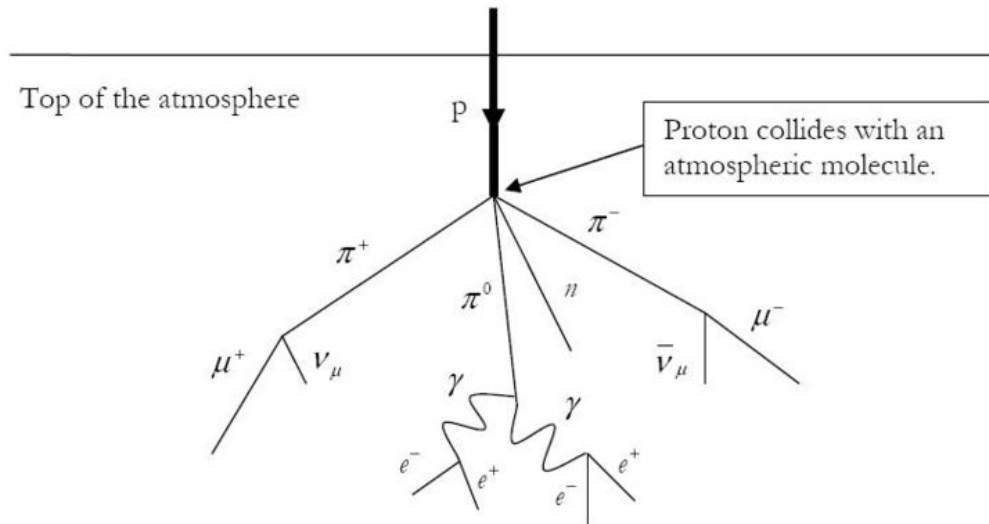
Organization of Fermions						
	Generation 1		Generation 2		Generation 3	
Quarks	Up	$u$	Charm	$c$	Top	$t$
	Down	$d$	Strange	$s$	Bottom	$b$
Leptons	Electron Neutrino	$\nu_e$	Muon Neutrino	$\nu_\mu$	Tau Neutrino	$\nu_\tau$
	Electron	$e$	Muon	$\mu$	Tau	$\tau$

圖一 夸克與輕子 ([http://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model](http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model))

### 二、宇宙射線(cosmic ray)

宇宙射線是由來自外太空的高能粒子射線。主要由核子構成，其中包括約 90% 質子，9%  $\alpha$  粒子(helium nuclei)，其餘是原子核、電子、 $\gamma$  射線和超高能微中子 [2]。

粒子物理中，將高能粒子與密集的物质撞擊產生二次粒子稱作 shower。當宇宙射線接近地球時，撞擊大氣層氣體中的核子，在空氣簇射(air shower) (參考圖二)的過程中產生很多不穩定的  $\pi$  介子和 K 介子，很快的衰變為 muon，可以被粒子探測器檢測到，於是宇宙射線變成為本實驗測量的 muon 來源(source)。

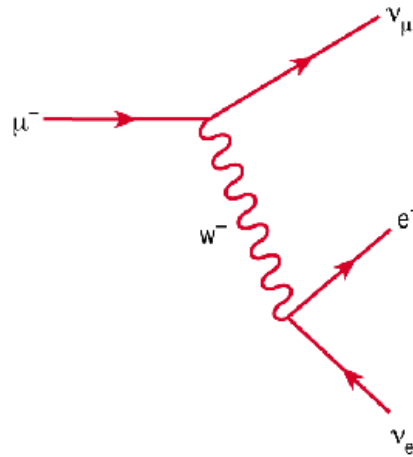


圖二 空氣簇射 (air shower)示意圖 ([http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray))

### 三、muon 的物理特質

muon 帶有-1 的基本電荷(electric charge)及 1/2 的自旋(spin)，在宇宙射線中的  $\pi$  介子衰變時產生，即  $\pi^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$ ，muon 平均生命期的世界平均值(world average) 約為 2.2 $\mu$ s；而 muon 的反粒子是  $\mu^+$ ，稱為反繃子(anti-muon)，anti-muon 的衰變也在宇宙射線中發生，即  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ，因為實驗使用的 source 是宇宙射線，會測量到  $\mu^+$  及  $\mu^-$  的衰變，因此實驗最後得到的會是 muon 的平均生命期。

muon 的衰變，主要模式是  $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$  (見圖三) 或  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ ，占了約 98.6%，另外還有  $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$  或  $\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  等不產生微中子的衰變模式，占了約 1.4% [1]。



圖三 muon 衰變主要模式 ([http://www.matphys.com/muon\\_manual.pdf](http://www.matphys.com/muon_manual.pdf))

由於產生的 muon 接近光速，因此在狹義相對論中的時間膨脹(time dilation)效應之下，muon 衰變時間延長，使 muon 有機會到達地球表面 (詳細說明參照附錄 A)。

本實驗的目的在測量 muon 的平均生命期，必須先了解 muon 衰變的特性，構思實驗概觀，接著架設儀器進行測量取數，另一方面必須使用 perl、paw 等軟體將數據分析，得到結果。

## 參、原理

### 一、muon 的平均生命期

#### 1. muon 與物質的交互作用

muon 在自發性衰變(spontaneously decay)前有機會和質子(protons)交互作用，進行繃子捕捉(muon capture)，即  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ 。在量測 muon 生命期時，因為只有帶負電的 muon 有機會被捕捉，以致量測到的 muon 平均生命期小於單純發生 decay 的生命期理論值。

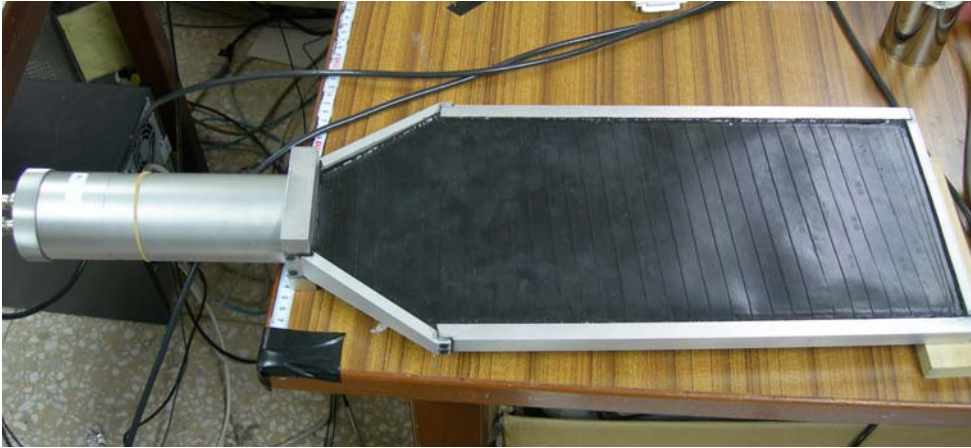
#### 2. 衰變(decay)

衰變率定義為單位時間內衰變的個數，與個數成正比，即  $-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$ ，其中  $\lambda$  是衰變常數， $N(t)$  表示粒子在時間內衰變的個數；將方程式積分得到  $N(t) = Ce^{-\lambda t}$ ，其中  $C$  是積分常數。將數學給予物理意義，如果一開始有  $N_0$  個粒子，則以時間表示粒子數的方程式為隨時間做指數衰減，即  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ ，其中  $N_0$  為在時間  $t = 0$  時的個數。

提到單一粒子，我們定義  $\tau$  為生命期(lifetime) ，而  $\tau = 1/\lambda$  ，則  $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$  ；雖然本實驗在測量時，宇宙射線中的 muon 個數是未知，但是 muon 衰變是隨機的，所以  $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$  亦成立。

## 肆、儀器

### 一、探測器(見圖四)



圖四 探測器

#### 1. 塑料閃爍體(plastic scintillator)

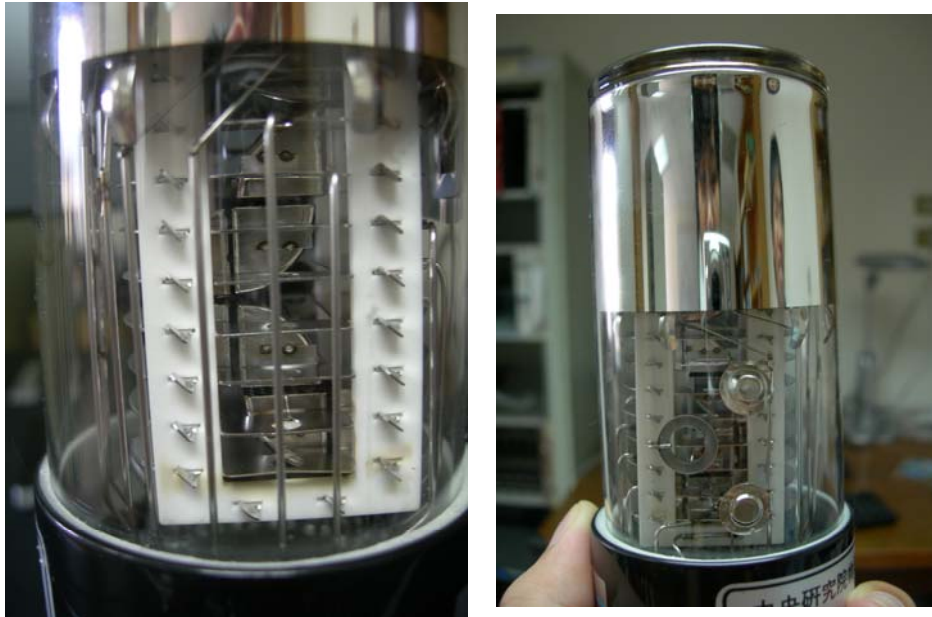
閃爍探測器(scintillation detector)是一種將閃爍體直接或透過光導與光電倍增管組成的粒子探測裝置，當帶電粒子進入閃爍體，閃爍體吸收高能量電磁波，材料的外層自由電子受激發，再從激發態躍遷回基態放出光子(photons)。

閃爍體以使用材料可分成有機晶體、無機晶體、塑料、玻璃、液體、氣體等種類。有機晶體閃爍體(organic crystal scintillator)大多屬於苯環結構的芳香族碳氫化合物的材質，塑料閃爍體屬於有機閃爍體，都是由溶劑、溶質和波長轉換劑三部分組成，不同之處在於塑料閃爍體的溶劑在常溫下為固態。塑料閃爍體還有易於製成各種不同形狀和大小的優點。

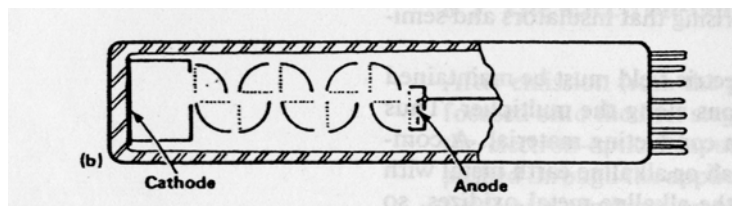
#### 2. 光導

可使用光導等光收集元件當媒介連接閃爍體及光電倍增管，但並非必須。

#### 3. 光電倍增管(photomultiplier) (見圖五-1)



圖五-1 光電倍增管 (左) 可見內部構造  
(右) 外觀



圖五-2 光電倍增管原理示意圖

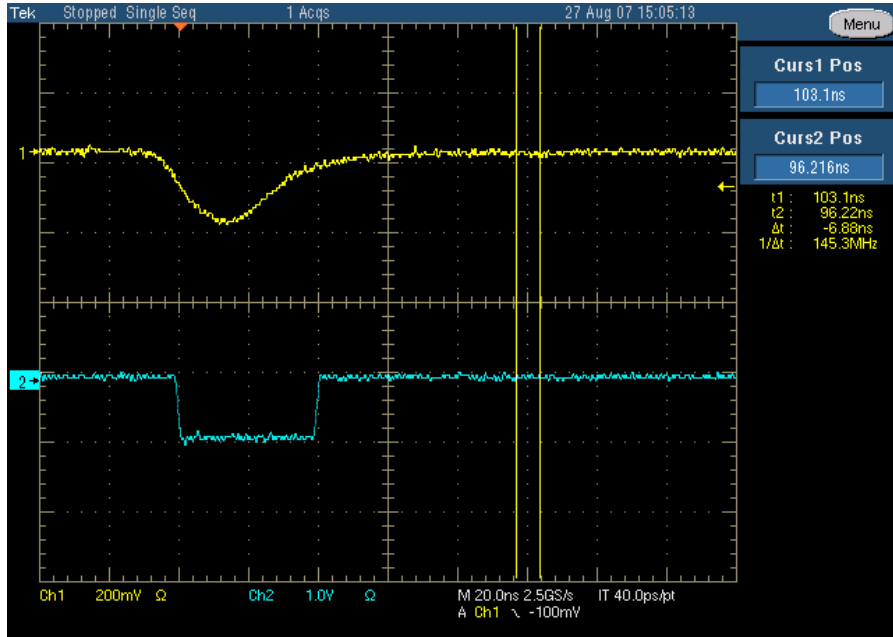
光電倍增管是一種真空光電元件，主要原理是光電效應和二次電子發射效應。當光子入射到陰極室的陰極板上發生光電效應產生光電子，產生的電子聚焦進入二次發射倍增系統（見圖五-2），二次發射倍增器由較高的靈敏度和二次發射係數的材料製成，電子開始倍增，最後由陽極蒐集電子，輸出形成電脈衝。

## 二、NIM modules

NIM (Nuclear Instrumentation Methods)：由核物理及高能物理組織在 1964 年建立，目的在幫助系統模組(modules)有互換性，而 NIM modules 有固定的外觀大小限制，使用時必須裝在機櫃(NIM crate)上，由機櫃提供電源。

### 1. 鑑別器(discriminator) (見圖六)

一個類比訊號輸入，將訊號強度與 discriminator 內部的 threshold 值比較，強度大於 threshold 就輸出一個數位訊號，反之則不輸出。

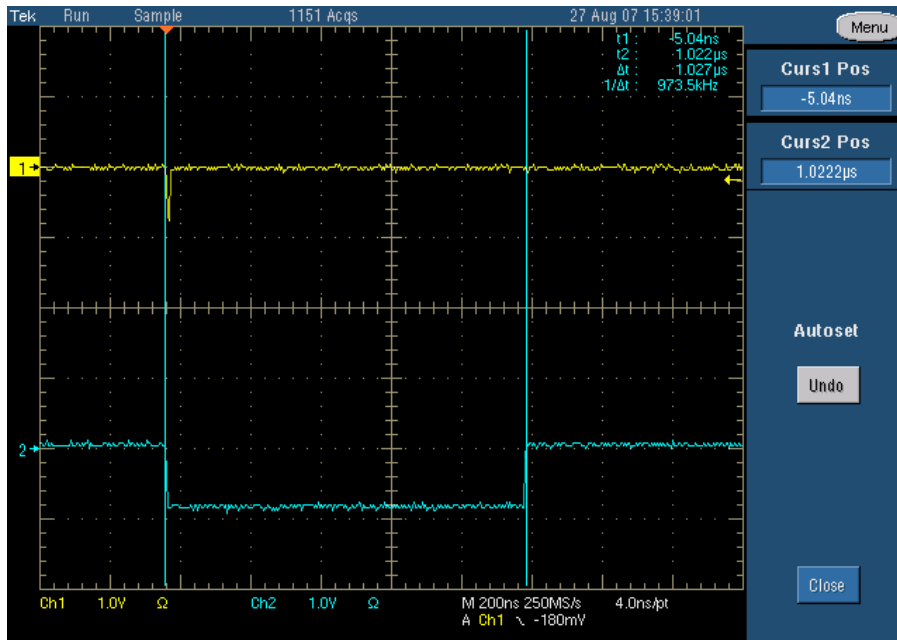


圖六 discriminator (上方為原始訊號；下方為經過 discriminator 的訊號)

## 2. gate/delay generator

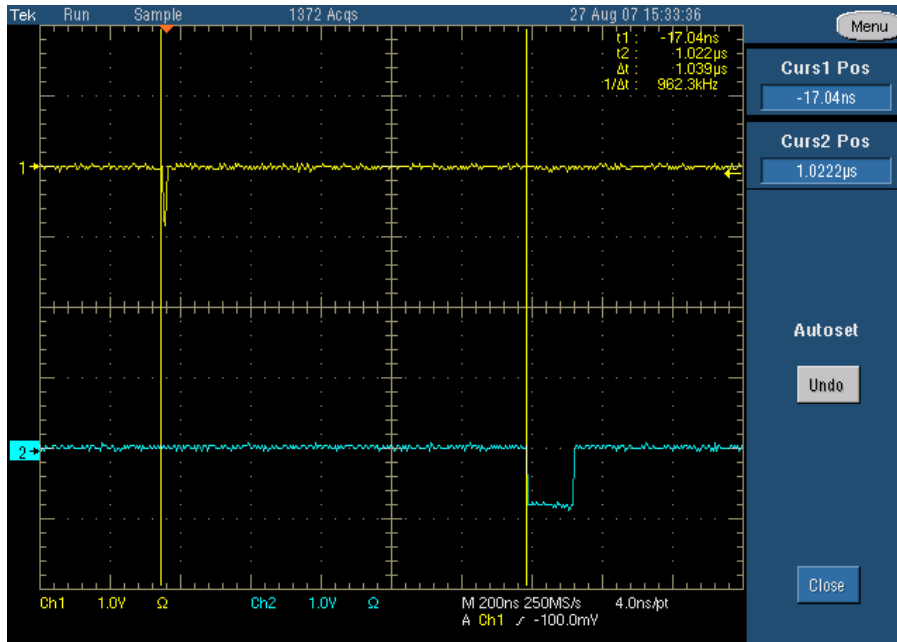
gate：訊號輸入，在訊號輸入的同時開出一個 gate 輸出。(見圖七-1)

delay：可以將輸入的訊號延遲輸出。(見圖七-2)



圖七-1 gate generator (上方為原始訊號；下方為同時開出的 gate)

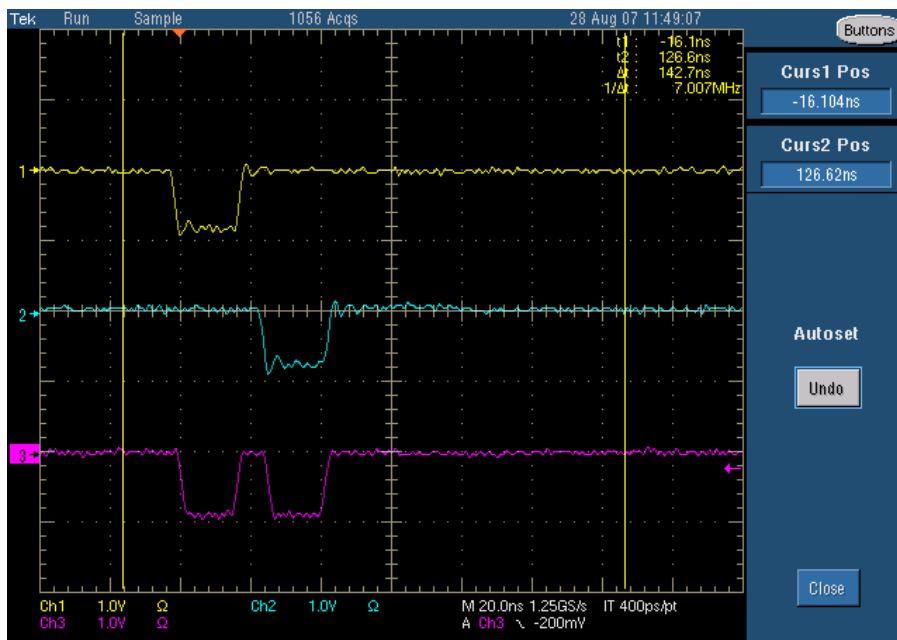




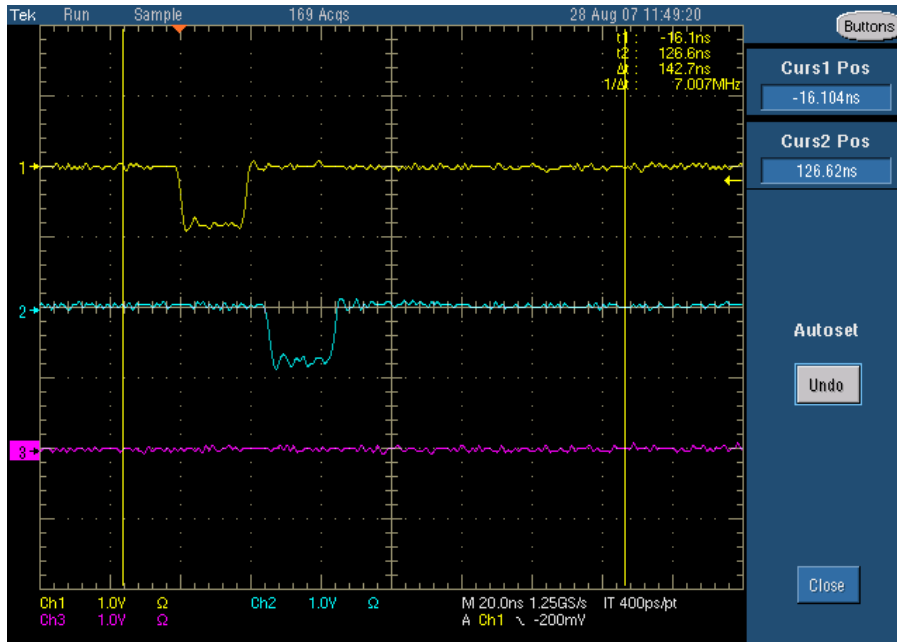
圖七-2 delay generator (上方為原始訊號；下方為 delay  $1\mu s$  後輸出的訊號)

### 3. coincidence

- (1) and：輸入的數位訊號，在時間性上同時符合，則有訊號輸出，反之則沒有訊號輸出。(見圖八-1)
- (2) or：將所有輸入的數位訊號，合併轉換成同一個訊號輸出。(見圖七-2)



圖八-1 coincidence (and) (上、中為原始訊號；下為 and 後輸出的訊號)



圖八-2 coincidence (and) (上、中為原始訊號；下為 or 後輸出的訊號)

4. counter/timer (見圖九)

可以計數、計時或搭配使用。

5. paw (Physics Analysis Workstation)：高能物理領域用於數據分析處理或繪製圖表的軟體，由 CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire 歐洲核子研究組織) 在 1986 年開發出，更在處理大量數據有高效率。



圖九 counter 外觀

伍、實驗步驟

一、實驗的設計認知

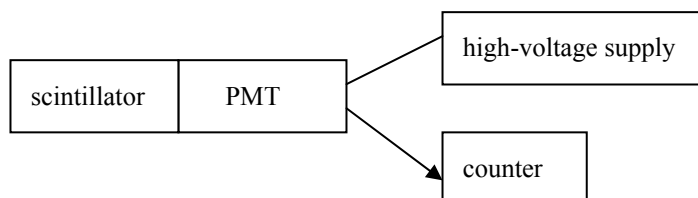
供應光電倍增管的高壓決定了整體訊號的放大以及輸出訊號的高度，一般來說，光電管可能的工作電壓範圍很廣，當供應光電管的高壓落在平區 (plateau)，是讓訊號完整且最佳的呈現，並且雜訊不會被放的太大，以致被判斷成訊號。根據本實驗的需求，必須先做出光電管的 plateau，再調整讓探測器量到的宇宙射線通量接近海平面所測的通量。

muon 被塑料閃爍體偵測送出訊號，利用 NIM (Nuclear Instrumentation Methods)

modules 讓訊號進入一連串的邏輯處理，並以 paw 作圖、fitting 做出 muon 平均生命期。

## 二、 實驗設備與裝置

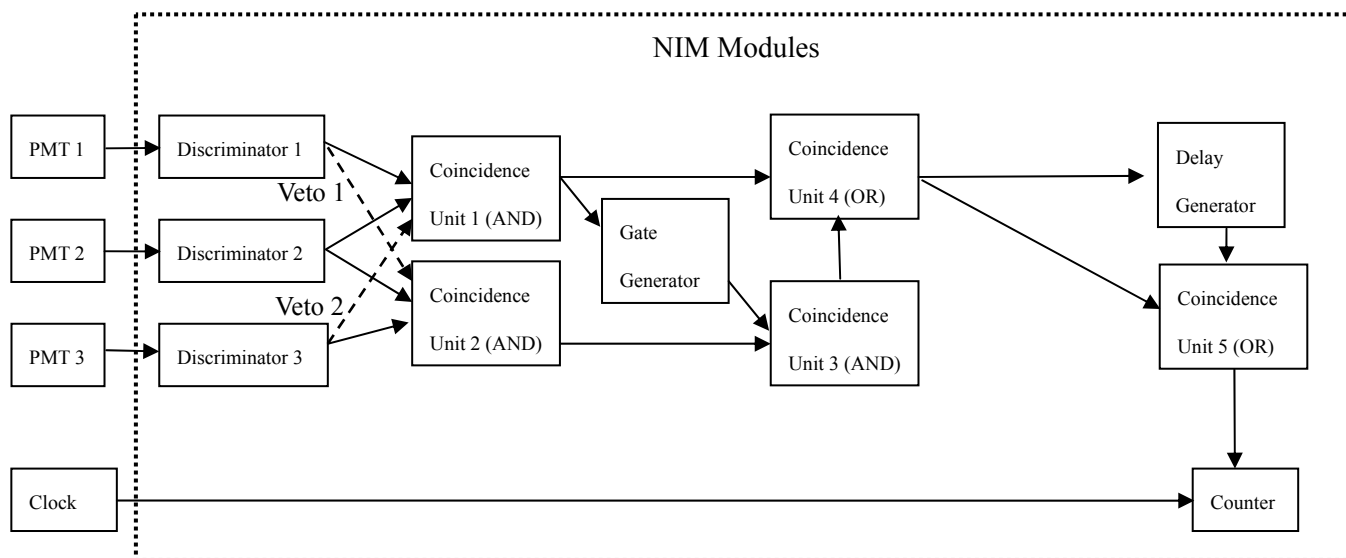
1. 測量光電倍增管工作電壓(plateau)。設備以光電倍增管(PMT)為主，需提供高壓電源供應器 (high-voltage supply)並接上 counter 計數 (如圖十)。



圖十 測量 plateau 示意圖

光電管必須提供高壓 (high-voltage)，先固定 discriminate 的 low level threshold (代稱 threshold)值，在供應不超過負荷電壓最大值下，每調整一次電壓值重複五次取數，設定每 60 秒取數一次，改變 threshold，繼續取數。

2. muon 平均生命期的量測。設備以探測器(scintillator-PMT)為主，配合 NIM modules 取數，如圖十一：



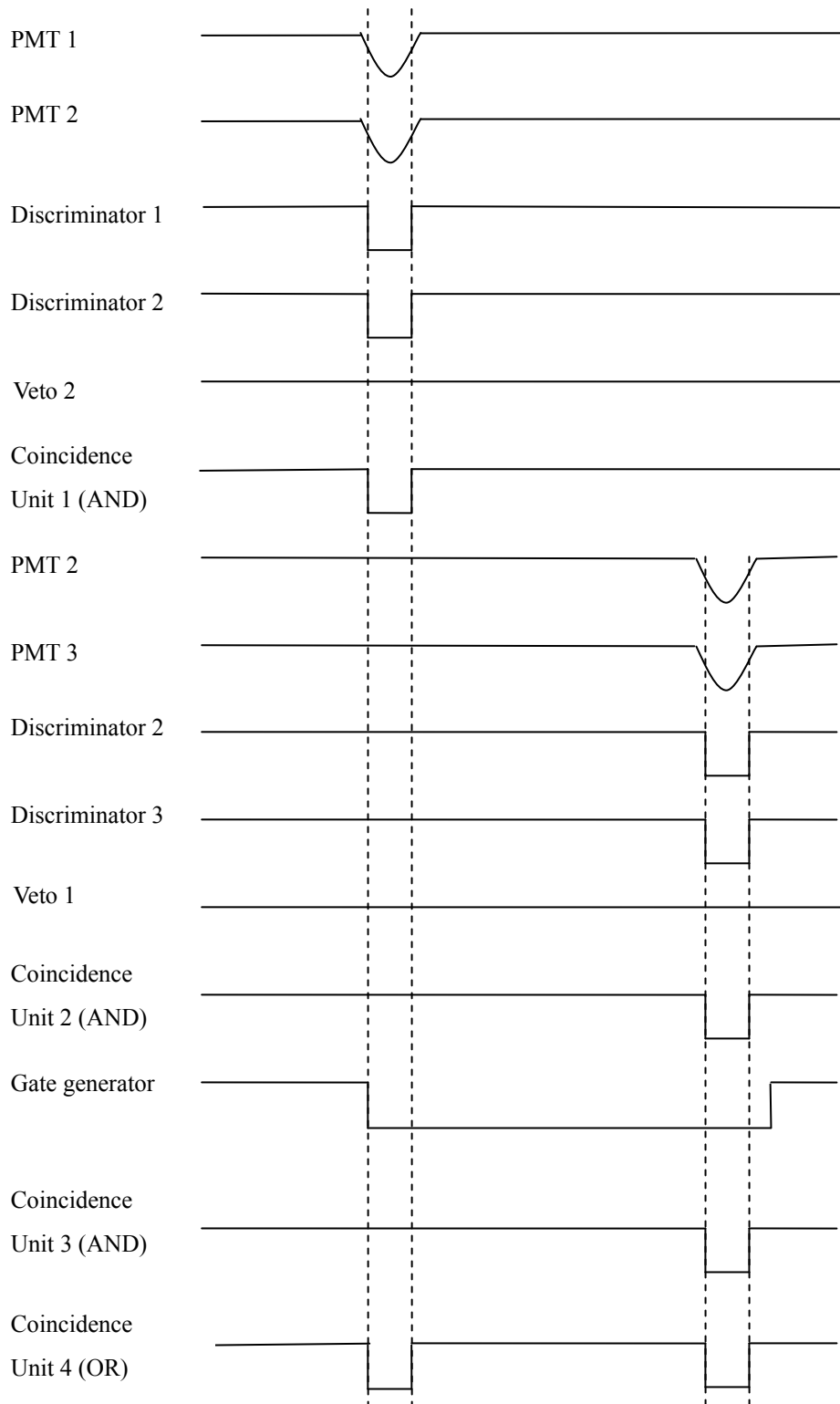
圖十一 線路流程圖 (block diagram of experiment setup)

三組相同塑料閃爍體接上光電倍增管，分別接上高壓(PMT1：1200V，PMT2：1150V，PMT3：1030V) (參考圖十二)，重疊放置成為三層探測器，偵測到的訊號由光電倍增管送出，三組探測器都分別接上 discriminator 判斷訊號，再將訊號送入邏輯分析(logic unit)產生開始(start)以及結束(stop)的訊號並過濾雜訊，最後接上 counter 將訊號送進 channel 1，另一方面利用一個 100MHz 的 clock 也接上 counter

將訊號送進 channel 2，最後由 counter 紀錄在 start 到 stop 區間的 clock 計數，再轉換得到 muon 的平均生命期。



圖十二 光電倍增管接上的高壓



圖十三 訊號示意圖 (timing chart of the NIM modules)

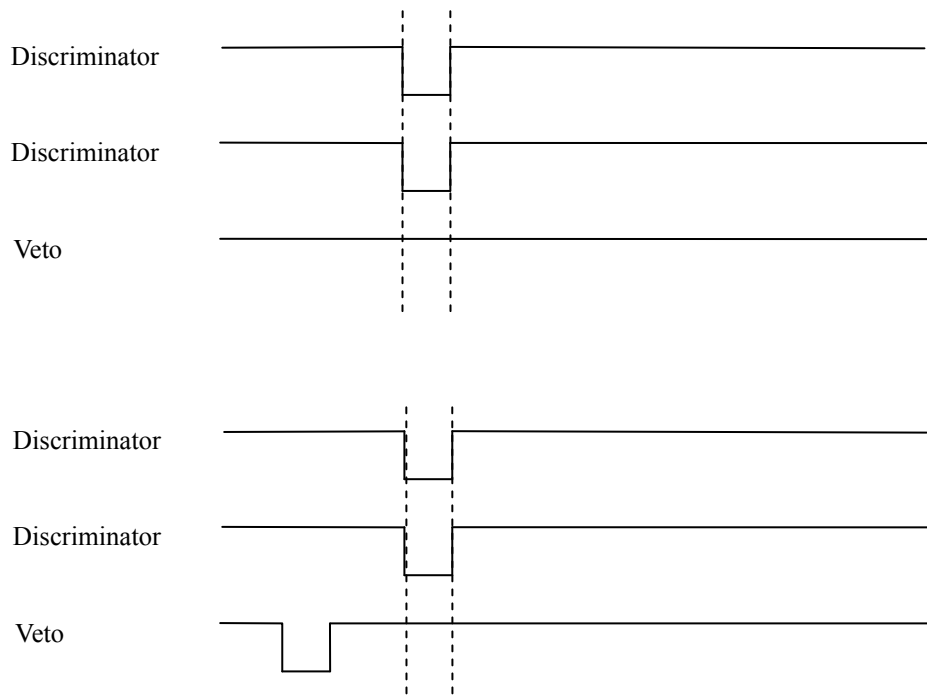
三、 muon 平均生命期的量測 (參考圖十三)

1. 探測器(如圖十四)



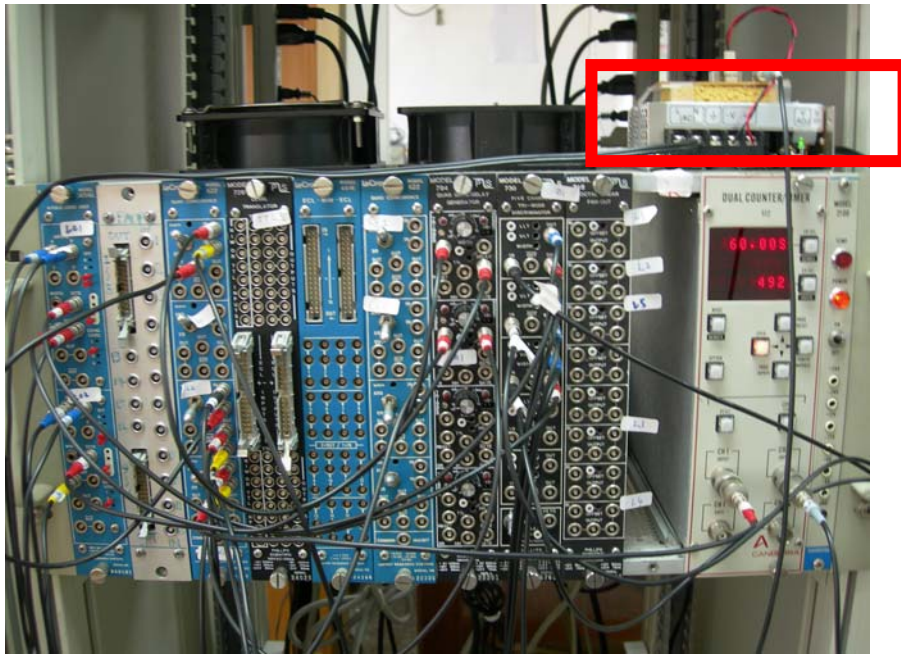
圖十四 探測器 (左) 側面圖  
(右) 俯視圖

調整光電倍增管工作電壓，測試探測器量到的宇宙射線通量約每分鐘 1000 個，三組 coincidence (and)後約相等於海平面上通量(每分鐘約 600 個)。當 muon 穿過探測器 A 與探測器 B 稱為 start，muon 靜止並開始衰變放出電子，主要取電子通過探測器 C 稱為 stop。



圖十五 veto 功能訊號示意圖 (上) 沒有觸發 veto  
(下) 觸發 veto

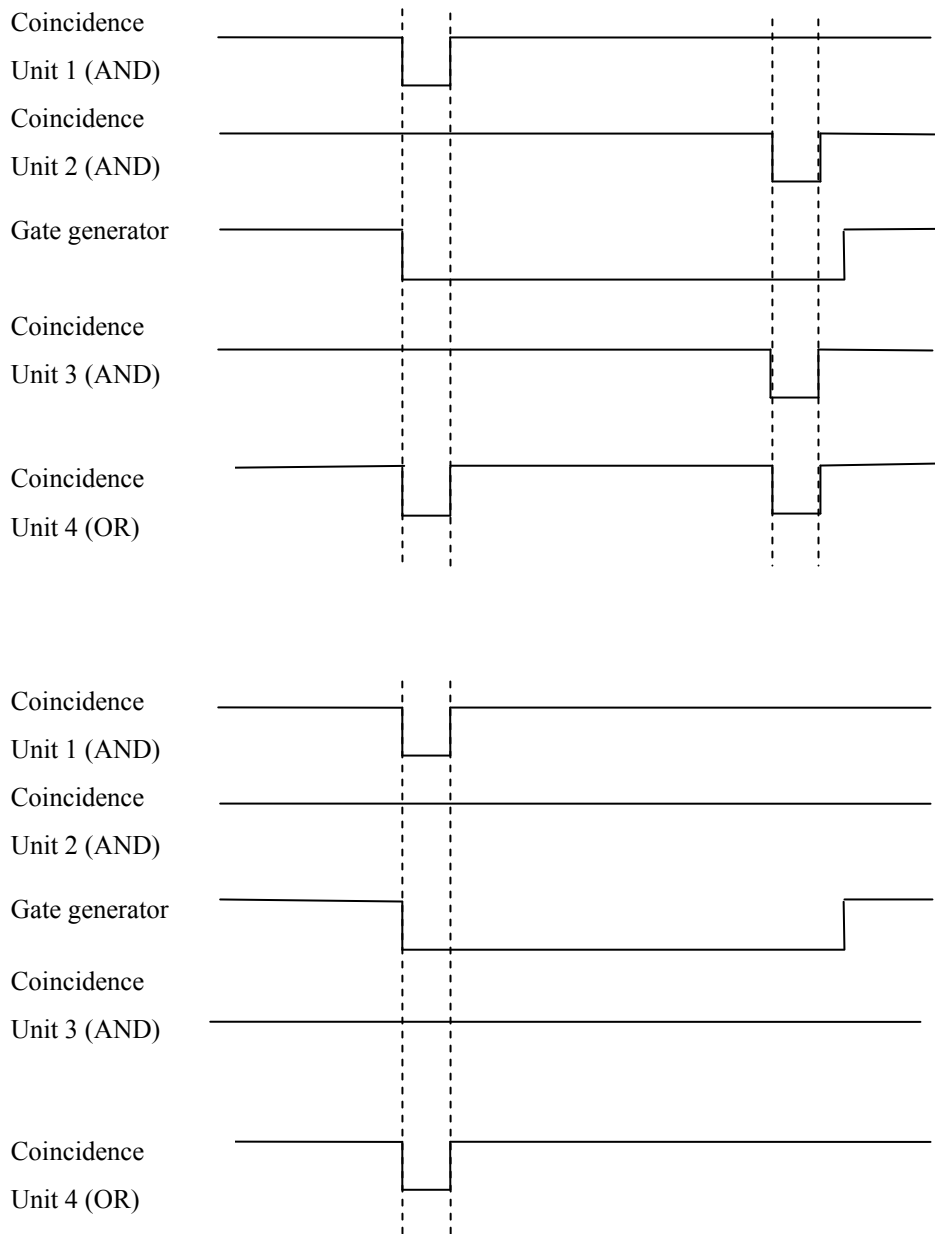
## 2. NIM modules(如圖十六)



圖十六 NIM modules 外觀 (紅框部分是 clock)

訊號經過 discriminator 由類比訊號轉變為數位訊號,將 A、B、C 訊號 coincidence (and) : 當 A and B 有而 C 沒有( $A \otimes B \otimes \bar{C}$ ), 觸發 start ; 當 A 有而 B and C 有( $\bar{A} \otimes B \otimes C$ ), 觸發 stop。其中 veto 功能在於截斷訊號輸出, 使用 veto 如圖十五, 在 start 時 C 為沒有粒子通過, 不會觸發 veto, 有訊號輸出; 當 C 有粒子通過, veto 被觸發, 不符合邏輯  $A \otimes B \otimes \bar{C}$ , 就沒有訊號輸出; 而在 stop 時 A 為沒有粒子通過, 不會觸發 veto, 有訊號輸出; 當 A 有粒子通過, veto 被觸發, 不符合邏輯  $\bar{A} \otimes B \otimes C$ , 就沒有訊號輸出。為了要求當觸發 veto 時訊號準確被截斷不輸出, veto 送的訊號要比 discriminator 更早送到, 特別需要注意的是連接 discriminator 與 coincidence 的 LEMO 線, 聯接 veto 的線長度必須比較短。

在 start 同時開了 gate, stop 落在 gate(10ns)內 coincidence (and)後送出 stop, 將 start 與 stop 送進 coincidence (or)在一起成為完整的訊號, 如圖十七(上)。

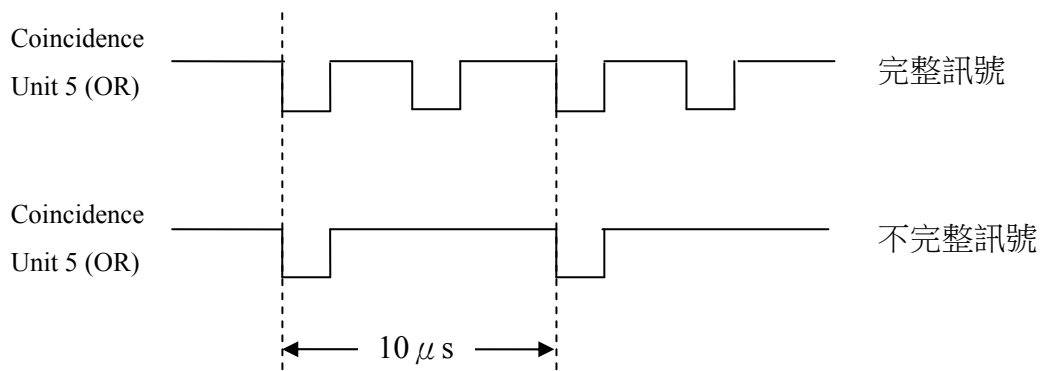


圖十七 (上) 完整訊號 (start and stop)

(下) 不完整訊號 (start only)

存在不完整的訊號，如圖十七(下)，訊號只觸發 start，而 gate 內沒有 stop 的訊號，造成不是我們所需的訊號。為了過濾掉不完整訊號，又參考海平面通量，考慮在  $10\mu\text{s}$  內連續有兩顆 muon 經過機率只有  $10^{-8}\%$ ，所以將所有訊號一分為二，其一接上 delay generator( $10\mu\text{s}$ )，再將兩訊號送進 coincidence (or)在一起，如圖十八，接上 counter，最後利用程式分析篩選出完整訊號。





圖十八 開 delay 的目的是篩選出完整的訊號

### 3. clock (參考圖十五之紅框部分)

100MHz 表示每秒輸出  $10^8$  個連續且完整的方波，即 1 個方波的週期為  $0.01\mu\text{s}$ ，可計數換算成時間。

### 4. counter

訊號送進 counter，start 開始計數，stop 停止計數，計算在此時間間隔內有幾個 clock。

### 5. LEMO 線

每種顏色對應的長度決定訊號傳送的時間，邏輯處理時訊號必須要求高準確的對應，訊號送進 modules 前的 LEMO 線使用是考慮實驗完整性的重點。

## 四、數據處理與分析

### 1. 測量光電倍增管的 plateau

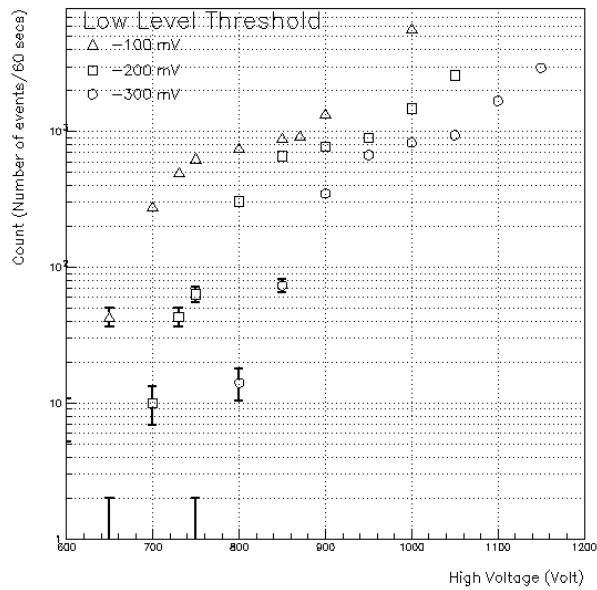
起初測量閃爍體面積比較小的光電倍增管 B，但是基於量測速率(counting rate)的考量 (見表一)，最後實驗儀器選擇閃爍體面積較適當的光電倍增管 A (詳細說明參照附錄 B)。

	塑料閃爍體面積( $\text{cm}^2$ )	量測速率(個/min)
光電倍增管 A	750	600
光電倍增管 B	100	100

表一 比較光電倍增管 A、B 的塑料閃爍體面積以及量測速率。

(1) 以 paw 作圖 (一支光電管，三個 threshold) (見圖十九)，判斷 plateau。

Plateau Measurement of Photomultiplier tube s3



圖十九 供應電壓對粒子數作圖(high voltage-count)

結果：得到三隻光電倍增管的 plateau，再將三隻光電管重疊組成本實驗的探測器，並且將訊號 coincidence(AND)濾掉雜訊，先分別在 plateau 範圍內合理的調整工作電壓，讓探測器量到的宇宙射線通量接近海平面的通量。

## 2. 測量 muon 的平均生命期。

(1) 取數七天。

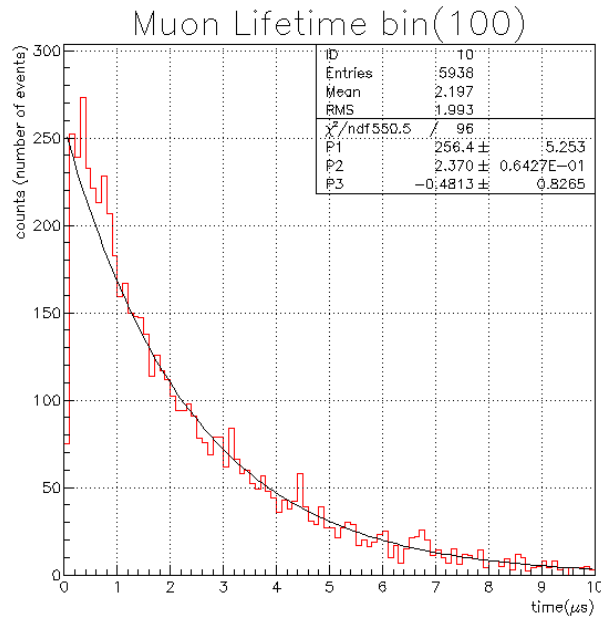
(2) 已知 clock 是 100MHz，則計數的結果如為 1000 表示時間間隔  $10 \mu s$ ，因為 delay 開  $10 \mu s$ ，代表完整的訊號計數會小於 1000。寫 1 個 perl 篩選計數小於 1000 的數據，並取範圍統計點數，切成數種大小的 bin(10, 20, 50, 100, 200)。

(3) 以 paw 作圖(time-count)。

(4) 已知  $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$ ，則以  $par(1)e^{-x/par(2)} + par(3)$  做 fitting，其中 par(1)、par(2)、par(3) 為設定的變數。其中 par(2) 即為所求之 mean lifetime，par(3) 為 background。

## 陸、實驗結果

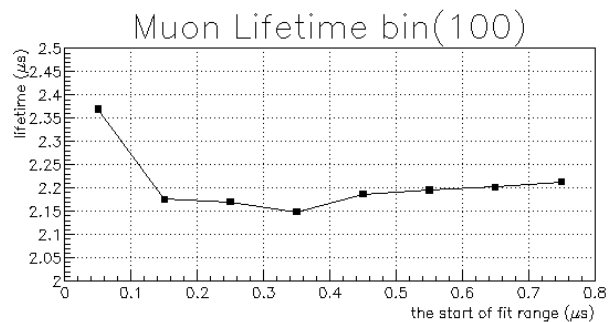
一、實驗日期是 2007 年 8 月 20 日到 2007 年 8 月 27 日。以下是依實驗數據(見附錄 C) 用 paw 作的圖 (見圖二十)，選擇分成的 bin 大小為 100 的原因是，在 bin(200) 時明顯數據量是不夠多的，所以採用可以將數據分到最細的 bin 大小 (其他 bin 大小的結果參照附錄 D)。從圖十九可看出 fitting 的結果。以 paw 用 vector 做 fitting 發生一個問題，即得到的 lifetime 會隨著分成的 bin 大小改變而不同，換成用 histogram 做 fitting，得到 lifetime 不會隨著 bin 大小而改變 (用 vector 做 fitting 的結果參照附錄 E)，所以採用 histogram 做 fitting。



圖二十 時間對粒子數作圖

分析：取數的第一點有明顯掉落的現象，判斷此點會影響到 fitting 的結果。

二、理論上所分析數據為同一組，不同的 fitting 時間起點，得到的 lifetime 結果應相同。重新選取 fitting 的範圍，做不同時間起點的 fitting，把不同時間起點對 lifetime 作圖。(見圖二十一)



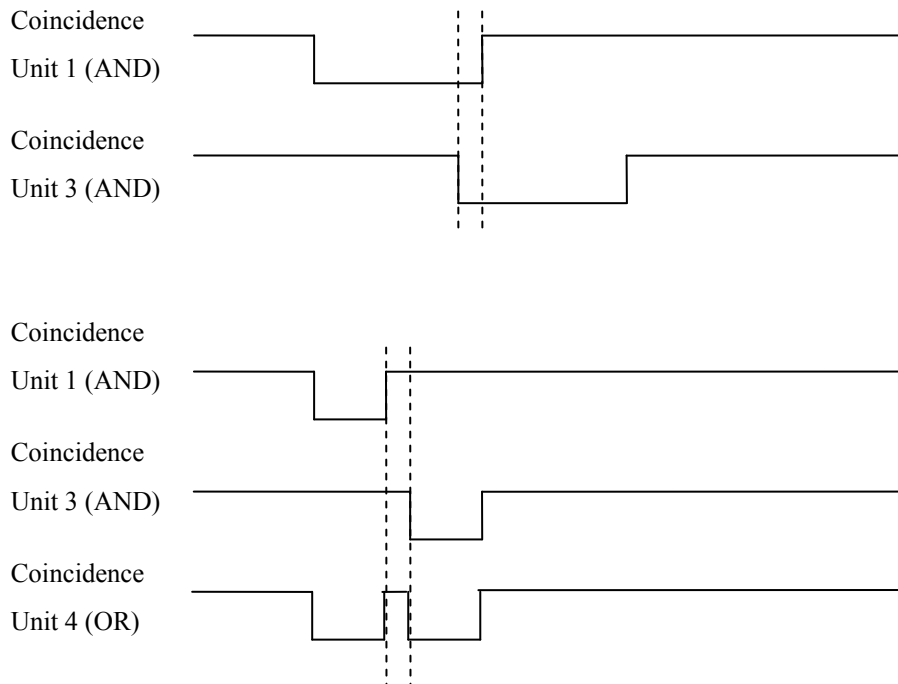
圖二十一 fitting 的起始時間對得到的 lifetime 作圖

分析：範圍含  $0.1 \mu s$  去做 fitting 得到 lifetime 很明顯有問題。從  $0.1 \mu s$  開始 fitting，對 lifetime 影響便不大，整個關係線漸趨平緩。判斷應從  $0.1 \mu s$  開始 fitting，降低 lifetime 誤差。

三、結果：

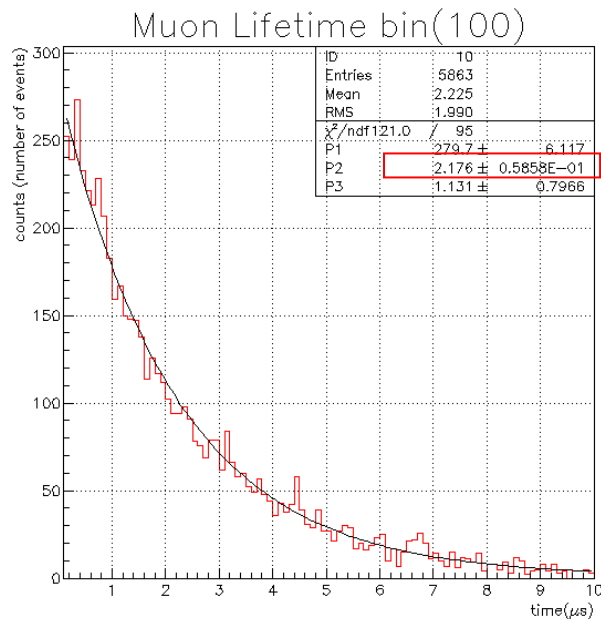
1. 在數據的第一點與整體的比較有明顯往下掉，表示在  $0.1 \mu s$  內的計數結果不符和預期，且可能嚴重影響 fitting 結果，推測有兩個可能性：一是 counter 的反應時間不夠靈敏，或者是 start 與 stop 開出來的 width 太寬，導致在 coincidence

unit 4 (OR)後，導致完整訊號變成不完整訊號，如圖二十二。



圖二十二 (上) width : 40ns  
(下) width : 10ns

2. 做了 width 的調整後，只增加了在  $0.1 \mu s$  內的 counts，fitting 問題仍然存在，所以推測是 counter 的反應到達極限，因為資源有限，所以試圖在 fitting 時加入限制條件以解決問題。
3. 實驗結果(參考圖二十三)：



圖二十三 時間對粒子數作圖 (fitting 起始時間是  $0.1 \mu s$ )

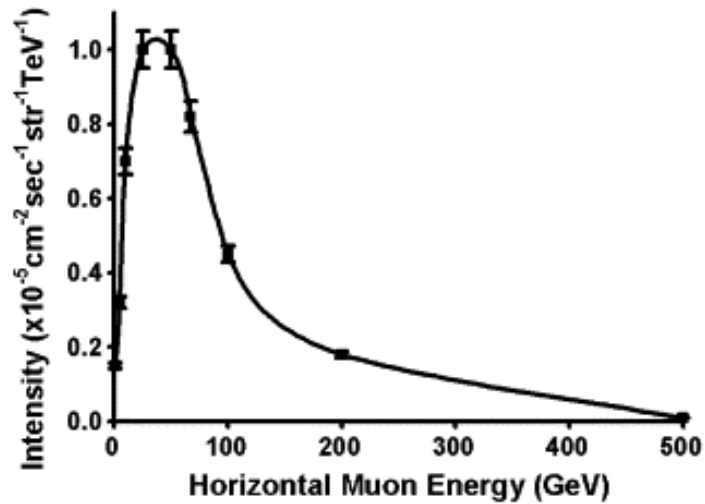
得到的 muon 平均生命期為  $2.176 \pm 0.05858 \mu\text{s}$ ，比對 PDG 值 ( $2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$ )，實驗的結果加上 error bar 後落在 PDG 值內。

## 柒、參考資料

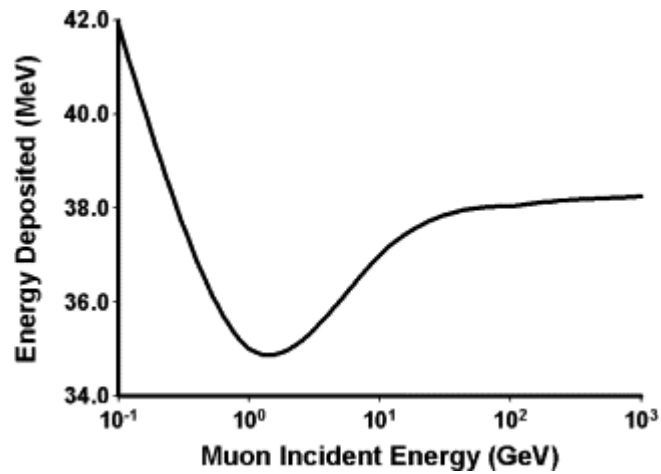
- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Muon>
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray)
- [3] <http://pdg.lbl.gov/>
- [4] <http://www.particleadventure.org/frameless/leptons.html>
- [5] <http://www-esd.fnal.gov/esd/catalog/intro/intronim.htm>
- [6] [http://www.matphys.com/muon\\_manual.pdf](http://www.matphys.com/muon_manual.pdf)
- [7] [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6TFJ-4KJV3CN-1&\\_user=2446484&\\_coverDate=06%2F01%2F2007&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000053459&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=2446484&md5=01c018efe4c4bc3ab068268ed89cdb97](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TFJ-4KJV3CN-1&_user=2446484&_coverDate=06%2F01%2F2007&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000053459&_version=1&_urlVersion=0&_userid=2446484&md5=01c018efe4c4bc3ab068268ed89cdb97)
- [8] Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments William R. Leo

## 捌、實驗結果討論

- 一、高壓電源供應器的使用電源要穩定，否則供應輸出的電壓與顯示值不符合。
- 二、進行本實驗就是在學習高能物理實驗的方法，實驗研究的對象與探討物質最基本構造相關，高能實驗的特色是看不到實驗發生的過程，因為實驗的粒子都是肉眼所不能見，實驗中的發生過程是否如我們假設都是未知，只能以實驗量測到的結果解釋可能發生的過程，最後在結果與假設不符的地方進行更深的探討，合理的改進實驗，減少誤差得到所求。
- 三、實驗設計可以再衍伸：
  1. 增加 counting rate：
    - (1) 直接加大閃爍體的面積。
    - (2) 考慮 muon 能量對粒子數的分佈 (見圖二十四)以及 muon 每單位能量可以穿過材質的厚度對 muon 總能量的關係(見圖二十五)，可以在探測器上方放置消耗 muon 能量的材料，用以挑選高粒子數 muon 進入被探測。



圖二十四 muon 的能量分布



圖二十五 對單一材質，muon 入射能量與消耗能量的分布圖

- (3) 實驗中藉著量測 muon 衰變產生的電子當成是 stop，在邏輯方面只考慮  $\bar{A} \otimes B \otimes C$ ，事實上產生的電子是空間全同分佈，並沒有固定的方向，實驗可以考慮採用更複雜的邏輯產生多一點 stop。
2. 增加實驗精準度：計時方面，使用頻率較高的 clock，將時間單位降到更精細。

## 附錄 A

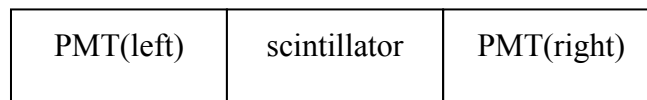
在座標系沒有定好下存在的迷思概念：muon 的速度為接近光速( $3 \times 10^8$  m/s)，但是 muon 的生命期為( $2.2 \times 10^{-6}$ ) s，在 muon 未衰變前可飛行的距離為 660m，認為 muon 無法到達海平面被觀測。

要澄清迷思概念必須定好座標系。另外已知  $v = 0.999c$ ，帶入  $\beta = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$ ，得到  $\beta = 22$ 。

- (1) 在地球上人類的座標系，muon 的生命期不是靜止生命期( $2.2 \times 10^{-6}$ ) s，以狹義相對論修正，muon 的飛行時間是( $\beta \times 2.2 \times 10^{-6}$ ) s，而 muon 仍以接近光速飛行，得到 muon 衰變前可飛行距離為 14000m，大於大氣層頂端到海平面的高度，muon 可到達海平面被觀測。
- (2) 在飛行中 muon 的座標系，muon 只能在靜止生命期( $2.2 \times 10^{-6}$ ) s 內飛行，但是被觀測到所需飛行的距離必須以 muon 角度出發，以狹義相對論修正，大氣層頂端到海平面的高度是( $\frac{9900}{\beta}$ ) m，而 muon 仍以接近光速飛行，得到 muon 需要被觀測只需飛行  $1.5 \times 10^{-6}$  s，小於靜止生命期，可到達海平面被觀測。

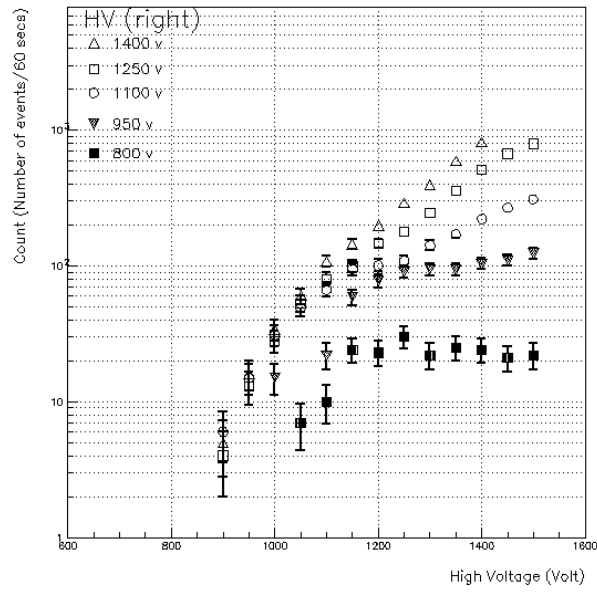
## 附錄 B --測量光電倍增管 B 的 plateau

裝置如圖二十六，固定光電管-right 的供應高壓(HV，共五種)，在高壓不超過負荷電壓最大值下調整光電管-left 的供應高壓，將兩端光電管的訊號 coincidence(and)，過濾雜訊，以 paw 作圖 (見圖二十七)，找出 plateau，判斷兩隻光電管的工作電壓。



圖二十六 光電倍增管 B 的裝置圖

Plateau Measurement of Photomultiplier tube (left)



圖二十七 供應電壓對粒子數作圖(high voltage-count)

結果：光電管-right 的工作電壓約取 950V，光電管-right 的工作電壓約取 1200V。

### 附錄 C – 實驗數據

time( $\mu$ s)	count	time( $\mu$ s)	count	time( $\mu$ s)	count	time( $\mu$ s)	count
0.1	74	2.6	78	5.1	27	7.6	12
0.2	252	2.7	76	5.2	21	7.7	11
0.3	239	2.8	69	5.3	27	7.8	9
0.4	273	2.9	79	5.4	30	7.9	14
0.5	233	3.0	79	5.5	29	8.0	4
0.6	221	3.1	62	5.6	17	8.1	8
0.7	213	3.2	84	5.7	20	8.2	8
0.8	228	3.3	66	5.8	16	8.3	5
0.9	207	3.4	58	5.9	19	8.4	9
1.0	183	3.5	60	6.0	23	8.5	3
1.1	159	3.6	52	6.1	25	8.6	12
1.2	167	3.7	49	6.2	10	8.7	10
1.3	150	3.8	57	6.3	17	8.8	2
1.4	148	3.9	48	6.4	7	8.9	4
1.5	147	4.0	44	6.5	15	9.0	5
1.6	138	4.1	36	6.6	21	9.1	8
1.7	114	4.2	43	6.7	22	9.2	4

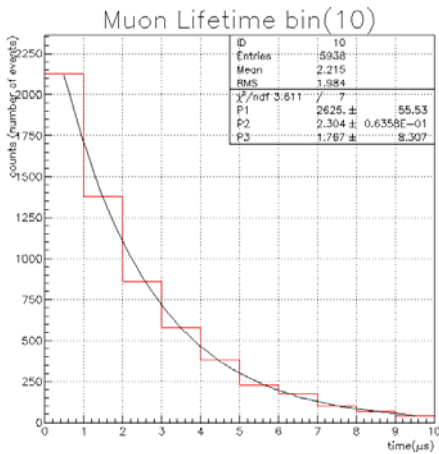


1.8	126	4.3	38	6.8	26	9.3	8
1.9	117	4.4	42	6.9	20	9.4	3
2.0	112	4.5	58	7.0	11	9.5	4
2.1	102	4.6	39	7.1	14	9.6	0
2.2	94	4.7	31	7.2	10	9.7	4
2.3	94	4.8	29	7.3	7	9.8	4
2.4	98	4.9	39	7.4	15	9.9	5
2.5	91	5.0	27	7.5	6	10.0	3

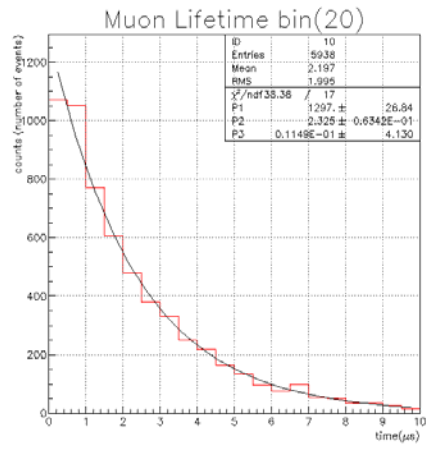
## 附錄 D – paw 分析採用 histogram 做 fitting

一、其他 bin 大小的時間對粒子數作圖：

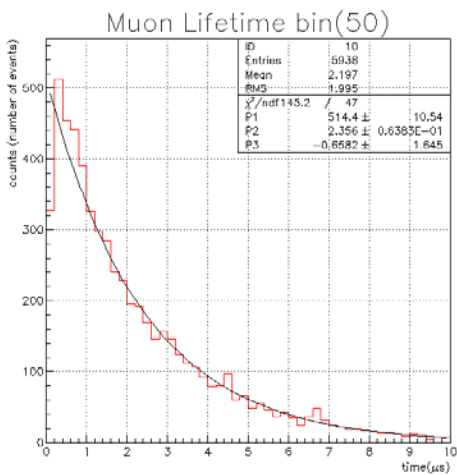
### 1. bin(10)



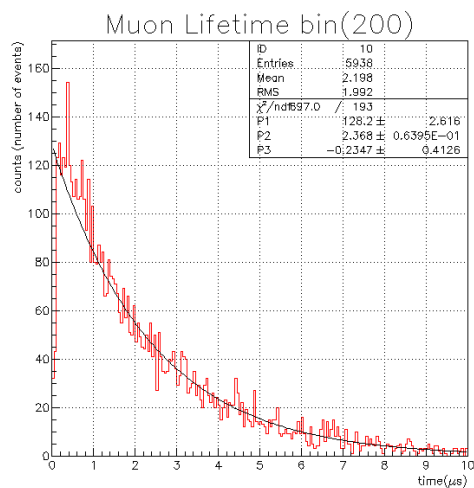
### 2. bin(20)



### 3. bin(50)



### 4. bin(200)



分析：理論上所分析數據為同一組，所以不論分成幾個 bin，結果應相同。從以上的圖發現，分成的 bin 越大，在取數的第一點越有明顯掉落的現象（見表二），推測會影響到 fitting 的結果。

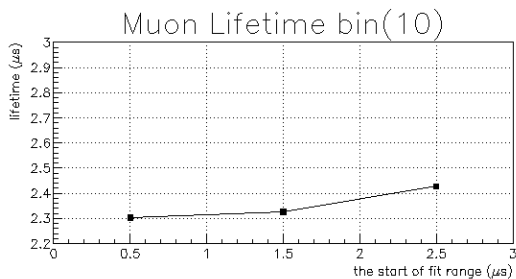
	bin(10)	bin(20)	bin(50)	bin(100)	bin(200)
lifetime( $\mu s$ )	2.304	2.325	2.356	2.370	2.368
error bar	0.6358E-1	0.6342E-1	0.6383E-1	0.6427E-1	0.6395E-1

表二 分成的 bin 大小得到的 lifetime

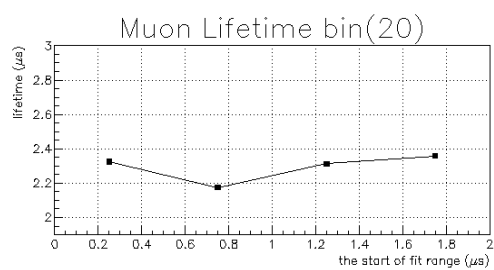
二、理論上所分析數據為同一組，所以不論取幾個點做 fitting，得到的 lifetime 結果應相同。

1. 每一種 bin 都重新選取 fitting 的範圍，做不同時間起點的 fitting，把不同時間起點對 lifetime 作圖，附上其他 bin 大小的 fitting 起始時間對得到的 lifetime 作圖：

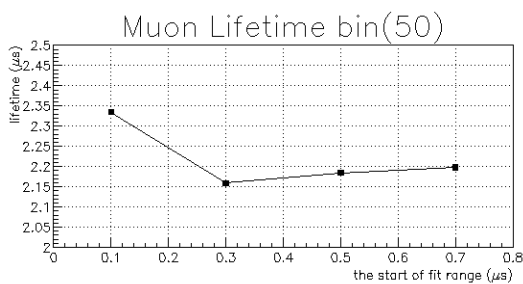
(1) bin(10)



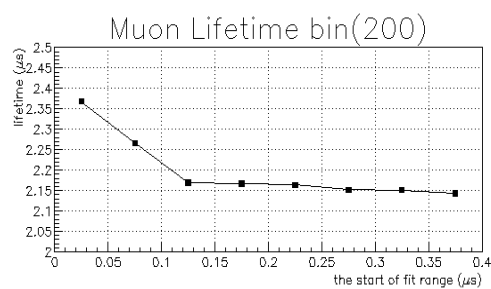
(2) bin(20)



(3) bin(50)



(4) bin(200)

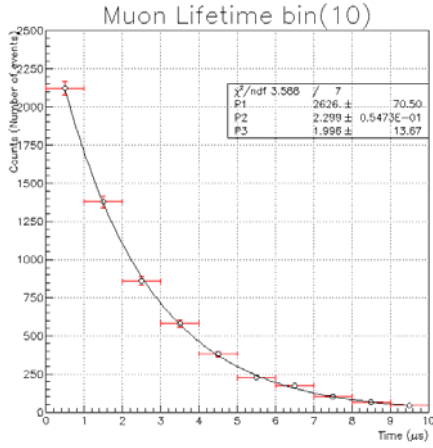


分析：判斷 bin(10)從  $1 \mu s$  開始 fitting，在 bin(20)從  $0.5 \mu s$  開始 fitting，在 bin(50)從  $0.1 \mu s$  開始 fitting，在 bin(100)從  $0.125 \mu s$  開始 fitting，降低 lifetime 誤差。

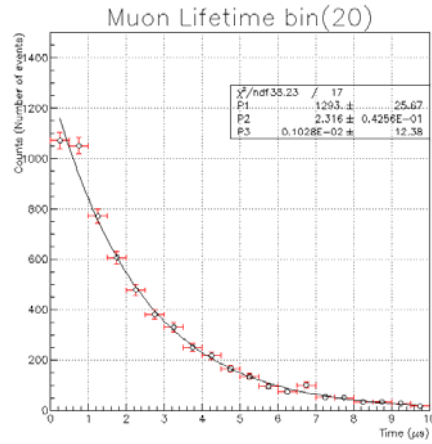
# 附錄 E – paw 分析採用 vector 做 fitting

時間對粒子數作圖：

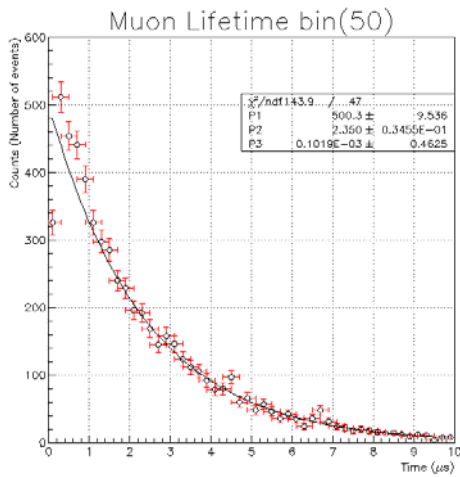
(1) bin(10)



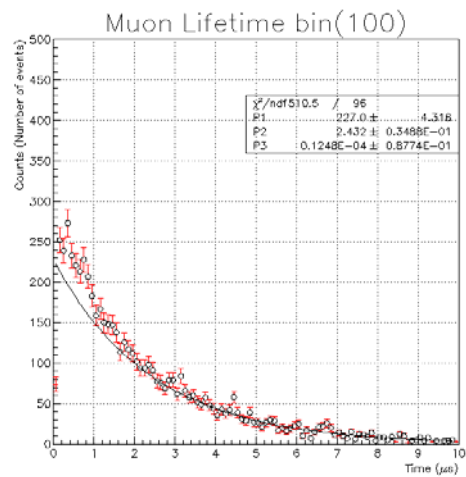
(2) bin(20)



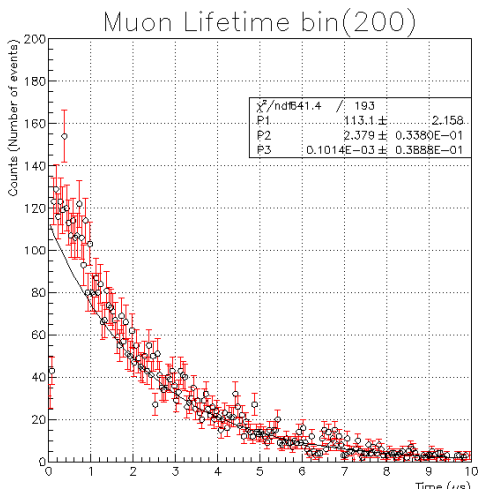
(3) bin(50)



(4) bin(100)



(5) bin(200)



分析：得到的 lifetime 會隨著切成的 bin 大小改變而不同（見表三），不採用 vector 做 fitting。

	bin(10)	bin(20)	bin(50)	bin(100)	bin(200)
lifetime( $\mu$ s)	2.299	2.316	2.350	2.432	2.379
error bar	0.5473E-1	0.4256E-1	0.3455E-1	0.3488E-1	0.3380E-1

表三 切成的 bin 大小得到的 lifetime

附錄 F –附上 paw 分析(vector 做 fitting)的程式碼

```

set * |
hi/del * |
ve/del * |
close 0 |Make the paw in a clean state
zone 1 1 |
clr |
title_global '' |
opt fit |
set fit 111 |
opt nbox |
opt grid |make the picture with grid
fort/file 70 muonlifetime.ps |To start establishing the ".ps" file
meta 70 -111 |
set gfon 2 ; set gsiz 0.7 ; set ygti 1 |title font;size;position
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 | unknown; y atitle
position; title atitle color; error bar color
exe data-100
h/cre/1d 10 " 100 0 10
HISTOGRAM/put_VECT/CONTENTS 10 yaxis(1:)
h/plot 10
title 'Muon Lifetime bin(100)'
ve/cre par(3) 'R' 1. 1. 0.
ve/cre step(3) 'R' 0.1 0.01 0.001
ve/cre pmin(3) 'R' 0.1 1. -10.
ve/cre pmax(3) 'R' 1000. 30. 2000.
ve/cre errpar(3) 'R'

```

