

渺子平均生命期的量測
The Measurement of the Mean
Lifetime of Muons

指導老師 郭榮升 老師

章文箴 老師

鄧炳坤 老師

高師大物理系 戴淑真

July & August, 2008

摘要

要使費米耦合常數 $(1.16639 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ 的理論預測儘可能準確，需要由最佳的實驗測量提供數值。渺子平均生命期即為費米耦合常數的參數之一。本實驗利用現有的三個探測器及原子核儀器模組(Nuclear Instrument Module, 簡稱 NIM)，設計一套邏輯來逼近目前已知的 Particle Data Group(PDG) 值 $(2.19703 \pm 0.00004 \mu \text{ sec})$ 。透過好的設計來補強資源的不充足，我們得到了 $2.201 \pm 0.03967 \mu \text{ sec}$ 的值。也意外的從不同的接線方式來證實實驗邏輯設計的影響力。

目錄

1	簡介	
1.1	基本組成.....	1
1.2	標準模型.....	1
1.3	宇宙射線.....	2
1.4	muon.....	4
1.5	量測 lifetime 的意義.....	5
2	實驗儀器	
2.1	閃爍體探測器.....	6
2.1.1	閃爍體(Scintillator).....	6
2.1.2	光導 (Light Guide).....	7
2.1.3	光電倍增管 (Photomultiplier Tube).....	7
2.2	原子核儀器模組 (Nuclear Instrument Module 簡稱 NIM) ...	8
2.2.1	鑑別器 (Discriminator).....	8
2.2.2	Linear Fan-out.....	9
2.2.3	4-Fold Logic Unit.....	9
2.2.4	Gate/Delay Generator.....	9
2.2.5	Quad Coincidence.....	9
2.2.6	Dual Counter/Timer.....	10
2.3	Physics Analysis Workstation (PAW).....	10
3	實驗步驟	
3.1	量測各光電倍增管的工作平區.....	11
3.2	設計量測渺子的邏輯.....	12
3.3	NIM 的運用.....	14
3.4	訊號輸出的檢驗.....	15
3.5	數據整理.....	20
4	實驗結果與分析	
4.1	工作平區.....	21
4.2	渺子的生命週期.....	23

5 討論

5.1 時間膨脹.....	28
5.2 實驗的衍伸-增加計數的速率.....	28
5.3 邏輯設計完備性對整體的影響性.....	29

附錄 A.....	32
-----------	----

附錄 B.....	33
-----------	----

附錄 C.....	34
-----------	----

附錄 D.....	35
-----------	----

附錄 E.....	37
-----------	----

1 簡介

1.1 基本組成

「物質是由什麼組成？」「又是什麼使他們結合在一起？」這是長久以來，人們不斷探究的問題，從原子模型中的電子、質子、中子，到現階段發展出標準模型裡的夸克、輕子、載力粒子，人們不斷的在尋找基本粒子。然而這些理論的建立還須實驗結果的支持，但在微觀的世界裡該要如何試驗這些理論呢？

拉塞福的實驗為粒子物理的實驗國度奠下基石，拉塞福在設計的實驗中建立了一套方法，突破無法用顯微鏡看到原子內部的窘境。實驗是利用一放射源產生一束 α 粒子撞擊金箔，周圍有一圈螢幕，當 α 粒子打到螢幕會在撞擊點發出閃光，然而卻得到令人吃驚的結果，雖然大部分的 α 粒子都穿過金箔，只有少數從原來的方向被偏轉，但有些卻被反向彈回，拉塞福對此結果做了結論：在原子內部，使 α 粒子彈回的東西一定是帶有正電，佔有很小的體積，且幾乎具有所有原子的質量，這就是我們稱的原子核，而湯姆森發現的電子以球形的軌道分布在原子核的外圍。幾乎今日所有的粒子物理實驗都用拉塞福用過的基本元件（粒子束、靶、偵測器）及實驗模式，推論粒子的本質與交互作用。

在太空內，粒子物理學家尋找在原子及次原子規模物質簡單而規則的行為模式，利用加速器來探測小於原子核範圍的新領域，以費米實驗室質子-反質子加速器為例，它是利用密集的反質子（antiproton，帶有負電荷的反物質），形成P棒(P-bars)，反質子會先在儲存積蓄環內加速，再導入質子-反質子加速器內，若成功導入，質子束與反質子束會沿加速器跑道的相反方向環繞產生對撞，對撞所釋放出的高能量足以產生新粒子，以此我們能夠對標準模型中所敘述的粒子和力量的性質，做更好的量測。然而，分別在地球兩端的地下礦坑深處，科學家在阻隔太陽光和宇宙射線的探測器中，第一次接收到數個在特定時間有著特定樣式的訊號，天文學家在當天觀察到爆炸星球，將所有跡象湊在一起，意外發現太空內外原來有著密切的關聯—就是對於基本粒子的探究。這些具有高能量的基本粒子，它們的來源主要有三種：1) 核反應 2) 宇宙射線 3) 粒子加速器。本實驗所採用的高能粒子是以宇宙射線為來源。

1.2 標準模型

隨著基本尺度的縮小，原本的古典規則也漸漸被量子力學所取代，其中的標準模型是一套描述力與基本粒子的理論。標準模型包含費米子及玻色子，費米子為擁有半整數的自旋（ $1/2, 3/2 \dots$ ）且遵守泡利不相容原理的粒子；玻色子為擁有整數（ $0, 1, 2 \dots$ ）自旋且不須遵守泡利不相容原理。基本費米子包含了六種夸克和六種輕子（如表一），每一種費米子都有相對應的反粒子存在。而玻色子是負責傳遞弱作用力、強作用力及電磁作用力的載力粒子（如表二）。換言之，費米子是組成物質的粒子而玻色子則是負責傳遞各種作用力。

粒子	種類(Flavour)			電荷量
夸克 (quarks)	上(up)	魅(charm)	頂(top)	+2/3
	下(down)	奇異(strange)	底(bottom)	-1/3
輕子 (leptons)	電子	μ 介子	τ 介子	-1
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0

表一：費米子的種類與特性

在表一系列的粒子中，夸克是我們到目前為止發現未能單獨存在的基本粒子，他們總是成群結隊。由夸克作為主要構成而能參與強作用力的粒子稱為強子，雖然個夸克都有分數的電荷量，但是彼此的結合使強子有淨整數的電荷量。強子又可分為重子與介子。重子是由任三個夸克(qqq)所組成的強子，如質子(uud)、中子(udd)；介子是由一個夸克(q)和一個反夸克(\bar{q})組成，如 π 介子。強子的另一個性質是即使夸克帶有自己的色荷，但強子並不會有淨色荷。

交互作用力	載力粒子
強作用力	膠子
弱作用力	W^\pm, Z^0
電磁力	光子

表二：交互作用力對應的載力粒子

夸克和膠子都是色荷粒子，每個夸克帶有三種色荷（紅、綠、藍）的其中一種，在強作用力中，兩顆粒子色荷互相作用時便會交換膠子，當兩顆夸克交換膠子時，他們自身的色彩也會改變，而且會產生非常強的色力場，若夸克離得越遠，色力場強度就越強，這能解釋夸克不單獨存在是因為在他們被拉離的同時色力在增加，當加至色力場的能量夠大，色力場的能量會轉變為新的夸克質量，產生新的夸克-反夸克對。

色荷粒子不會單獨被發現，基於這個理由，色荷粒子和其他夸克被限制在群體(強子)之中，這樣的組合是色中性的（三個不同顏色或色彩和反色彩），不能結合成色中性的狀態的粒子像 **ud** 或 **uddd** 就永遠不會出現。

1.3 宇宙射線

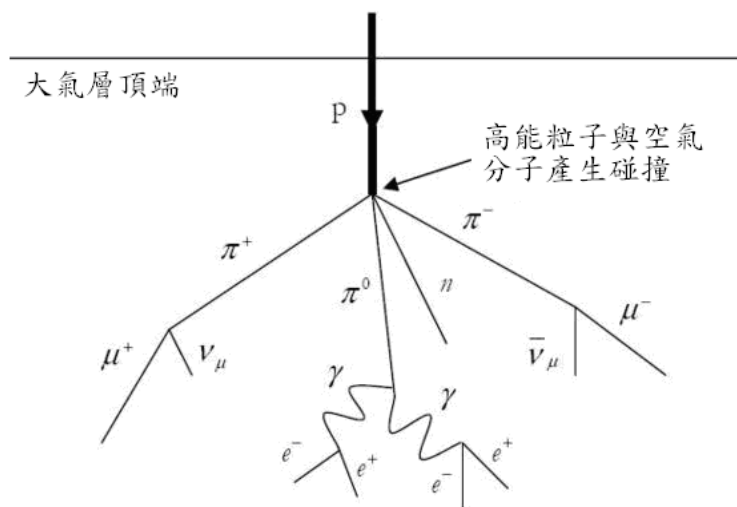
在 1896 年貝克勒耳發現放射性後，許多人認為大氣層的電離僅來自地表放射性物質或產生出的放射性氣體的輻射。1903 年，科學家發現果把所有放射源移走，在驗電器中每立方釐米內，每秒鐘還會有大約十對離子不斷產生。用鐵和

鉛把驗電器完全遮罩起來，離子的產生幾乎可減少十分之三。他們提出假設，也許有某種貫穿力極強，類似於 γ 射線的輻射從外面射進入驗電器，從而激發出二次放射性。為了搞清這個現象的緣由，科學家逐漸增加高空的電離率測量。奧地利物理學家赫斯設計了一套裝置，將密閉的電離室吊在氣球下，將高壓電離室帶到 5300 米的高空。

他發現離開地面 700 米時，電離度有些下降（地面放射性造成的背景減少所致），800 米以上似乎略有增加，而後隨著氣球的上升，電離持續增加。在 1400 米~2500 米之間顯然超過海平面的值。在海拔 5000 米的高空，輻射強度竟為地面的 9 倍。由於白天和夜間測量結果相同，因此赫斯得出的結論是「我的觀察結果最好的解釋是設想一種高穿透力的射線從上部進入大氣層。」

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 87% 質子，12% α 粒子（氦核子），其餘大部分是原子核、電子、 γ 射線和超高能微中子也構成一小部分宇宙射線。宇宙線粒子的動能跨越十四個數量級，而地球表面的宇宙線流量大約隨著能量的反平方而降。大量不同的粒子能量反映著多樣性的源頭。

宇宙射線中的核子之所以能夠從他們遙遠的源頭一直到達地球，是因為宇宙中物質的低密度。核子與其他物質有著很高的反應機率，所以當宇宙線接近地球時，便開始與大氣層氣體中的核子撞擊。將高能粒子與密集的物质（大部分是氧和氮的分子）撞擊產生二次粒子（稱為次級宇宙射線），這些次級粒子再繼續作用產生更多的次級粒子，數目持續增加至能量低於某臨界值，這樣的情形稱作空氣簇射（air shower）。過程中會產生很多不穩定的 π 介子(pions)和 K 介子(kaons)，這些介子(mesons)很快的衰變為 muon，可以被粒子探測器偵測到，本實驗就是利用宇宙射線當作測量的粒子來源。在大氣簇射過程中，能量低於 10^{14} 電子伏特的粒子很難到達 3000 米以下的低空，而是在 4000 米處超高能粒子群發展到極大。



圖一：空氣簇射

今天，仍然不能準確說出宇宙射線是由什麼地方產生的，一般認為，宇宙射線的產生可能與超新星爆炸有關。對此，一部分科學家認為，宇宙射線產生於“死亡”的恆星在爆發之時放射出大能量的帶電粒子流，射向宇宙空間；另一種說法則認為宇宙射線來自於爆發之後超新星的殘骸。

1.4 渺子

安德生在新的磁性雲霧室發現了軌跡與電子或質子行為不相稱的情形，這種粒子與電子有相同的電荷量，也因為它的質量介於電子和質子之間，靜質量為電子的 207 倍（約 $105.6 \text{ MeV}/c^2$ ），因此最初這種粒子被取名為「介子（mesotron）」（中間的粒子之意），不久，有電子和質子性質之間的粒子陸續被發現，而這些粒子統稱作“介子”。因此原 Mesotron 改名為「muon」，即為渺子。

在一空氣簇中有質子、中子、K 介子、 π 介子、光子、電子與正電子，有一些會經由強相互作用力與空氣分子發生相互作用，一些則經由弱相互作用力衰變成 muon 和微中子或反微中子：



muon 是一種輕子，有 $1/2$ 的自旋態，只經由弱相互作用力或電磁力與物質產生作用，當它經過了一段長的路徑損失了動能，就會衰變成電子與微中子和反微中子。muon 是海平面宇宙射線的主要成分，平均在 15km 高的大氣產生，在海平面的通量約為 $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ，他的動能可以從 0 到幾個 GeV。

Muon 不管正負，其平均生命週期為 $2.19703 \pm 0.00004 \mu \text{ sec}$ 。其中 μ^- 有兩種型態的衰變：1. 被原子核的正電吸引住而產生的衰變，伴隨著放出中子與微中子，而這樣被原子捕捉住的機率與原子序成正比，若原子序越大被捉住的機率也越大。2. 自發的衰變，產生電子及其微中子和 μ^- 的反微中子 $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ 。

而 μ^+ 則只有自發的衰變 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ 。Muon 的自發衰變約佔所有衰變模式的 98.6%，其他模式如 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$ 約佔了 1.4%。由於 μ^- 與質子之間有弱相互作用力的關係，生命週期會比 μ^+ 小。因為反粒子的存在非常短暫，因此不容易被量測，本實驗應該只能探測到帶負電的 muon。

Muon 的生命週期 (lifetime) 可以利用簡單的數學加以描述，假如時間 t ，有 $N(t)$ 個 muons。Muon 在很短的時間 dt 衰變的機率為 λdt ， λ 為「衰變速率」的常數，因此變化的數目 dN 就可以描述成 $dN = -N(t) \lambda dt$ 。積分後得

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

這裡的 $N(t)$ 為在 t 時，muon 的個數，而 N_0 為 $t=0$ 的 muon 數目。生命期 (lifetime) τ 定義為 λ 的倒數， $\tau = 1/\lambda$ 。

1.5 量測 lifetime 的意義

究竟為什麼要量測 muon 的生命週期呢？量測結果的好壞會影響什麼？

量測 muon lifetime 是為了要驗證費米常數 G_F ，費米常數 G_F 是一個描寫弱相互作用強度的一個常數。

量子場論在量子修正的計算上出現許多無限大的結果，這些無限大都是出現在對虛粒子動量積分時，高能量的貢獻。然而物理學家發現如果假設拉氏函數中的參數 (Parameters)，例如質量、耦合常數等原本就是無限大，那麼在某些理論中就可以抵消掉計算中出現的無限大，也就是所有可觀察量最後的計算結果都是有限的，這樣的理論稱為可重整化 (Renormalizable)。所以可重整化是表示我們對無限小距離的物理世界的無知可以被吸收到拉氏函數的有限個參數之中，而這些參數對無限大動量的物理非常敏感，因此是無限大。雖然無限大是物理直覺上難以理解的，但是因為這些參數並非可直接觀察量，而只要所有計算出來的預測都是有限值，這樣的理論就可以有效地 (Effectively) 來描述某個能量範圍的基本粒子物理。

為了使理論預測儘可能的準確，這些參數都需要由最佳的實驗測量提供數值。在標準模型的電弱作用力中，費米耦合常數公認的最佳值為 $(1.16639 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ ，在這樣高精準度的情況下，費米耦合常數需要有一個明確的定義

$$\tau_{\mu}^{-1} = \frac{G_F^2 m_{\mu}^5}{192\pi^3} (1 + \Delta q)$$

其中 τ_{μ} 為 muon 的生命期 (此次實驗的主要目的)， m_{μ} 為 muon 的靜止質量， Δq 概括了高階量子電動力學的校正且在電磁耦合常數中可表示為冪級數的擴充。

2 實驗儀器

2.1 閃爍體探測器

主要由閃爍體、光導和光電倍增管組成的輻射探測器。當粒子進入閃爍體時，閃爍體的原子或分子受到激發產生光子。利用光導等光的收集部件使光子儘量射到光電轉換器件的光敏層上並打出光電子。這些光電子經過倍增後形成電脈衝。早在1903年就有人發現 α 粒子照射在硫化鋅粉末上可產生螢光的現象。但是，一直到1947年，才將光電倍增管與閃爍體結合起來後才製成現代的閃爍探測器。

2.1.1 閃爍體(Scintillator)

閃爍體是一種能吸收高能電磁波或帶電粒子輻射而激發放光子的物質，當閃爍體中的軌道電子從入射粒子接受足夠大的能量時，價帶電子被激發到導帶。然後，再經過一系列物理過程回到基態並發射一個光子，因著退激的機制不同會發射出衰落時間很短的螢光（約10ns）或較長的磷光（約1ns或更長）。閃爍體的訊號可以給予很多訊息，其最突出的特點為：

- 1) 對於能量很敏感，光輸出的能量會與激發的能量成正比。
- 2) 響應時間較其他類型的探測器快。
- 3) 對於固定的閃爍體，能夠借由分析光訊號輸出的形狀，來分辨出進入的粒子種類。

好的探測閃爍體應符合下面幾個條件：

- 1) 能將激發的能量高效的轉換成螢光輻射。
- 2) 具有透光性。
- 3) 激發出的光譜範圍要能夠與連接的光電倍增管響應。
- 4) 衰減時間短（此一因素影響光子傳播時的衰減程度）。

一般來說，閃爍體可分為無機閃爍體和有機閃爍體：

無機閃爍體：簡單的固體晶體，如氧化晶體、碘化晶體。發光時間約為10ns，受外界影響小，但是光子的衰減時間較長，發光弱。晶體中摻雜金屬或雜質作為發光中心，例如：NaI(Tl)、CsI(Tl)、CaF₂(Eu)、ZnS(Ag)。雜質的混入使晶格導帶和價帶之間的禁帶變窄，電子激發產生光子的機率升高。大比重的晶體，具有對粒子高的阻止能力，可以將探測的體積縮小。而氣體和液體的無機閃爍體，多用惰性氣體及其液化態製成。

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，發光的衰減時間段，約3~5ns。有機晶體不宜生產大尺寸的閃爍體，使用性較差。有機液體和塑膠可看作是一個類型，都是由溶劑、溶質和波長轉換劑三部分組成，不同點在於塑膠閃爍體的溶劑在常溫下為固態。

綜合比較起來，兩大類的閃爍體其特點為：有機閃爍體透明度好，而無機閃爍體發射波段較豐富。

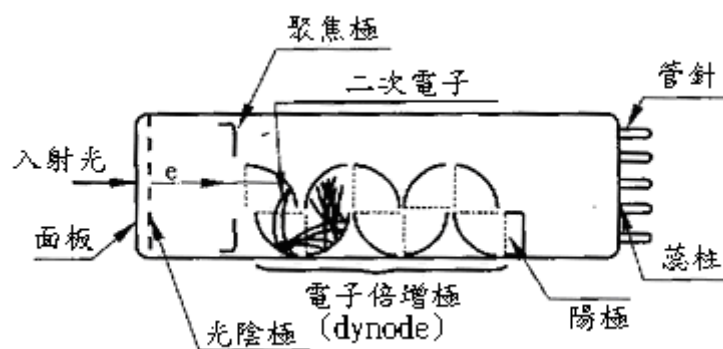
本實驗所用的為塑膠閃爍體，塑膠閃爍體除了包含有機閃爍體的優點，在形狀大小上也容易塑形，且價格亦比有機晶體、液體閃爍體便宜。

2.1.2 光導(Light Guide)

探測器需將閃爍體與光電倍增管做連接，但兩者或許因為存在磁場或是接合大小不相符，因此為避免光從閃爍體散逸，利用光導將閃爍體與光電倍增管連接在一起，作為光收集元件，使閃爍體激發出的光能有效傳遞到光電倍增管。他工作的原理是利用內反射，只有部分光在入射角度大於 Brewster 角時才會利用此方式轉換。

2.1.3 光電倍增管(Photomultiplier Tube)

光電倍增管是依據光電子發射、二次電子發射和電子光學的原理製成的，它包括陰極室 (cathode) 和由若干二次發射極 (dynode) 組成的倍增系統。陰極室作用是把陰極在光照下由外光電效應產生的電子聚焦在面積比光陰極小的第一 dynode。在各 dynode 和陽極上依次加有逐漸增高的電壓。這樣，光陰極發射的電子在第一 dynode 電場的作用下以高速射出，產生更多的二次發射電子，於是這些電子又在第二 dynode 電場的作用下向其飛去。如此繼續下去，每個光電子將激發成倍增加的二次發射電子。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，整個過程時間約 10^{-8} 秒。



圖二：光電倍增管

光電倍增管的靈敏度和工作光譜區間主要取決與於光電倍增光陰極和 dynode 的光電發射材料。短波回應的極限主要取決於窗的材料，而長波向應極限主要取決於陰極和 dynode 材料的性能。

所謂靈敏度是指在入射光通量為 1 流明時，輸出光電流強度的數值。光電倍增管的靈敏度隨入射光的波長而變化。這種靈敏度，稱為光譜靈敏度。描述光譜靈敏度的曲線，稱為光譜回應曲線。根據光譜回應曲線，可以確定光電倍增管的

工作光譜區和最靈敏波長。

在全暗的條件下，陽極所收集到的電流稱為暗電流。暗電流的來源有極間的歐姆漏阻（低電壓時的主要來源），陰極或其他部件的熱電子發射（高電壓時的主要來源）以及殘餘氣體的離子發射，導致發射和玻璃閃爍等引起的。歐姆漏阻是玻璃芯柱和管座絕緣不良所引起，暗電流隨工作電壓的升高成正比增加。熱電子發射，是由於光電陰極和倍增極材料的電子不需大能量即可脫離材料，甚至在室溫也可能有熱電子發射，這種熱電子發射隨電壓升高暗電流成指數倍增；另外工作電壓高時，不儘管內的殘餘氣體可被光電離，引起很大的輸出雜訊脈衝，若在強電場作用下可產生場致發射電子（工作電壓過高時，產生的尖端放電電子引起）引起雜訊。這一些暗電流均隨工作電壓升高而急劇增加，使光電倍增管工作不穩定。要減少暗電流，可對最高工作電壓加以限制。降低光電倍增管的使用環境溫度可以減少熱電子發射。但光電倍增管的靈敏度也會受到溫度的影響。在紫外和可見光區，光電倍增管的溫度係數為負值，到了長波截止波長附近則呈正值。所以在一些應用中應當嚴格控制光電倍增管的環境溫度。

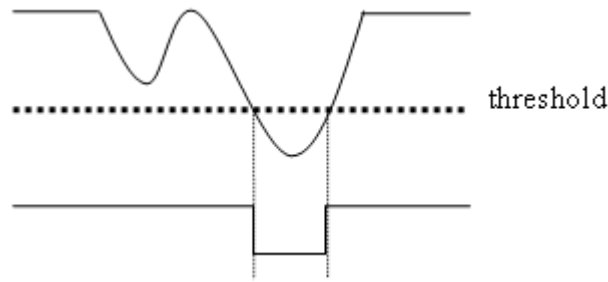
限制高壓除了可減少暗電流，也可防止光電倍增管在高壓產生自發放電使光電元件受到損壞。然而入射光強度較大或照射時間較長，會引起光電流的衰減。這種現象稱為疲勞現象。疲勞後在黑暗中經過一些時間可以恢復靈敏度的稱為可逆疲勞；反之稱為不可逆疲勞或老化。

2.2 原子核儀器模組 (Nuclear Instrument Module 簡稱 NIM)

NIM 是由核子和高能物理組織在 1964 年所設計出的第一個模組，其目的是在幫助系統模組(modules)有互換性。這樣形式的模組有著標準的機械和用電規範，像是有標準的寬度和高度，分別為 3.43cm 和 22.225cm，各模組的設計可為此標準的整數倍，而使用這些 modules 時，將其裝置在 NIM crate 上，這 NIM crate 也提供了固定的標準電源，分別為 $\pm 6V$ 、 $\pm 12V$ 、 $\pm 24V$ 。NIM module 在運用的靈活性，更換的便利性有著很好的優勢，這也是這些模組一直被實驗室使用的原因。下面將介紹實驗中用到的 module：

2.2.1 鑑別器(Discriminator)

Discriminator 是一種可用來區分類比訊號是否比閾值 (threshold) 值大的一種裝置，當類比訊號比 threshold 值大，discriminator 就會輸出一個邏輯訊號。反之，若類比訊號小於 threshold 值，那就不會有訊號輸出。因此利用 discriminator 調整我們要的 threshold 值可幫助我們去除不要的雜訊。我們也可以藉由旋鈕調整邏輯訊號的寬度。



圖三： discriminator 示意圖

啟動的時間對 discriminator 來說是很重要的，因為它通常用在與時間選擇有關的實驗上，所以輸入訊號到達時與輸出訊號發出這之間的時間差要是固定的。另外兩訊號距離很近時，discriminator 的解析能力也是很重要的。

2.2.2 Linear Fan-out

Linear Fan-out 能夠將輸入的訊號複製成多個相同高度和形狀的訊號再輸出到其他不同的模組上。Fan-out 這樣的模組有線性與邏輯兩種不同的形式，線性模組能夠接受類比訊號和邏輯訊號；但邏輯的模組只能接受邏輯訊號。

2.2.3 4-Fold Logic Unit

4-Fold Logic Unit 可將多個輸入的邏輯訊號做「AND」的判別，若能同時接收到每一個輸入的訊號，那 4-Fold Logic Unit 就會輸出一個訊號；反之，則不會輸出訊號。

2.2.4 Gate/Delay Generator

Gate generator 在接收到的輸入的訊號同時能夠依所需的調整而輸出不同寬度的 gate 訊號，調整的範圍可從數奈秒 (ns) 到數秒 (s)。Delay generator 可將輸入的訊號做不同程度時間的延遲再輸出一個邏輯訊號。

2.2.5 Quad Coincidence

Quad Coincidence 有兩種邏輯閘：

AND：它有兩個輸入端和一個輸出端，當任何一個輸入端無邏輯訊號時，則必無訊號輸出，只有在兩輸入端皆有邏輯訊號時，輸出端才會產生訊號。

OR：它有兩個輸入端和一個輸出端，當任何一個輸入端有邏輯訊號產生時，輸出端必產生訊號，只有在輸入端皆無邏輯訊號時，輸出端也無訊號產生。

2.2.6 Dual Counter/Timer

Counter/Timer 有計數與計時的功能，依著不同的需要，可調整設定，使 CH1 與 CH2 分別有不同的取數功能。此次實驗在 CH1 與 CH2 都是利用計數的功能，但計數方式不同，CH1 是設定當計數到兩個訊號後，就再重新來過。CH2 的設定則是利用外接 100MHz 的 clock，在 CH1 紀錄的這兩個訊號間，clock 共數了多少單位。

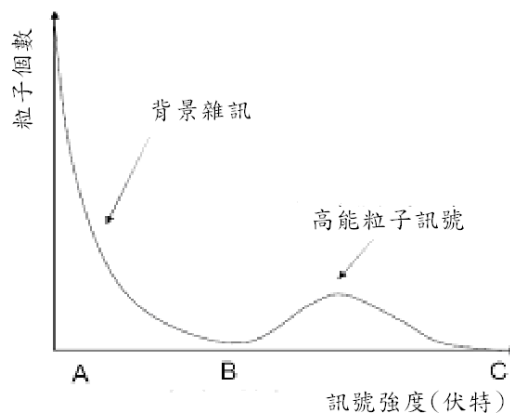
2.3 Physics Analysis Workstation (PAW)

高能物理領域用於數據分析處理或繪製圖表的軟體，由 CERN（法語：Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire；英語：European Organisation for Nuclear Research 歐洲核子研究組織）在 1986 年開發出。

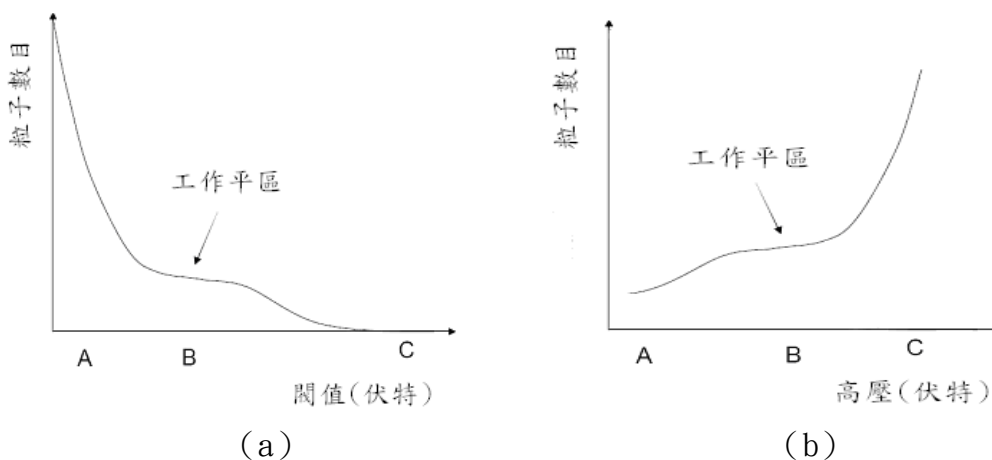
3 實驗步驟

3.1 量測各光電倍增管的工作平區

供應光電倍增管的高壓決定了整體訊號的放大。光電倍增管的工作平區 (plateau) 是入射粒子的強度不變時，計數器的計數率隨工作電壓變化的曲線。從圖四可看出，當電壓不足時，所要擷取的訊號無法跨越過閾值 (threshold) (B 點)，此時所計數到的訊號量就明顯不足，隨著電壓的增加，能夠跨越 threshold 的數目也越多，當高壓落在 plateau，是讓訊號最完整且最佳的呈獻，並且雜訊不會被過度放大，以致被判斷成我們要的訊號；此時若再加大電壓，雜訊被放到足夠大後也跨越了 threshold，摻雜在真正的訊號當中，此時的訊號便不是我們想要擷取的真正內容。在不同的電壓下固定 threshold 可找到 plateau；而在固定電壓改變不同的 threshold 亦能找到 plateau。

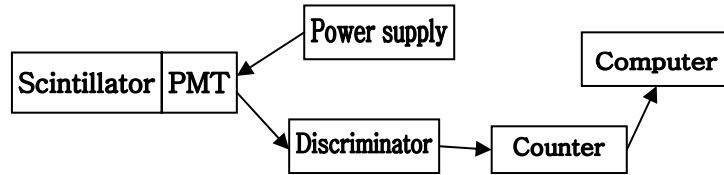


圖四：利用探測器找尋的粒子通常是高能粒子，故粒子在電壓上的表現也就會比背景產生的雜訊來的高



圖五：(a) 固定電壓找尋不同 threshold 產生的 plateau
(b) 固定 threshold 找不同電壓下產生的 plateau

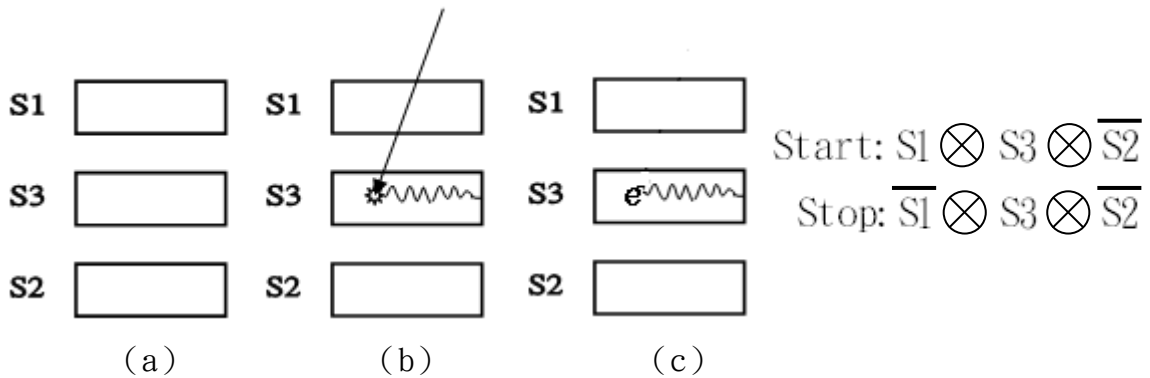
找尋 plateau 的方法，先將光電倍增管外接上高壓電源供應器，再將光電倍增管與 Discriminator 做連結，將 Discriminator 的訊號輸出至 counter 計數器上。1. 固定 Discriminator 的 threshold 調整不同的電壓值(從 700V 到 1450V)，分別計數不同電壓下一分鐘接收到的個數，每一組電壓重複取數五次並平均。2. 調高 threshold 值，重複 1 的步驟。分別將 1 和 2 做圖畫出固定 High voltage，不同 threshold 的工作平區；及固定 threshold，不同 High voltage 工作平區。



圖六：測量 plateau 示意圖

3.2 設計量測 muon 的邏輯

因為實驗本身所量測的粒子我們無法肉眼觀測到，事件的發生是屬於機率的問題，因此我們寧可去除無法判定的不確定訊息，選擇少部分我們能夠加以判定的訊號來增加實驗的準確性，透過好邏輯的設計我們可以達到此一效果。圖七為此次實驗的邏輯設計。S1、S2、S3 分別為三支不同的光電管和閃爍體所組成的探測器，其中閃爍體的大小一致。設計將三個板子疊在一起是為了降低接收到不符合我們要求的訊號(降低背景所產生的影響)。Start 觸發的條件為當 S1 和 S3 有訊號且 S2 無訊號輸入時，即輸出訊號；Stop 觸發的條件為當 muon 粒子在 S3 發生 decay 放出電子，此時 S1 和 S2 皆無訊號，且 S3 有訊號輸入時，即輸出訊號。



圖七：訊號示意圖。(a) 表探測器的組合情形 (b) 當 muon 打進來停留在 S3
(c) muon 發生衰變產生了電子在 S3 發出了訊號

在邏輯設計上大略分為下面三個概念與下表三作對照

- 1) 粒子確實入射但未被捕捉 (見下表 1.2) ——> 以為產生衰變 (見下表 2.4)
——> 完成事件記錄
- 2) 被誤判的粒子產生訊號 (見下表 3) ——> 產生假訊號停止事件
- 3) 粒子確實入射並被捕捉 ——> 粒子衰變 (見下表 5) ——> 完成事件記錄

可能產生的情況	圖例	避免方法
1. muon 在探測器上是否真的停留且產生訊號的粒子是否真為 muon		若有足夠的探測器就儘量少用只有一組探測器的方式來判斷訊號，若要用這樣的方式那就要在模組的應用多花點功夫設計。
2. 高能粒子若是也能從下往上跑		類似 1，這種情形需要多一些的探測器，或加上適當屏蔽，來過濾這些恰巧可以符合某一觸發條件的情形。
3. Muon 斜著打進來，沒有在探測器上衰變，但卻符合觸發的條件	<p>雖然滿足了 start 訊號但卻不是我們想要的</p>	此次實驗最多只能使用到三組探測器，若這樣的情形發生，我們無法用訊號來判定 muon 的真實路徑，因此我們只能透過 stop 的方式來檢查 muon 是否有停留在探測器上產生衰變放出訊號。
4. 在設定的時間內 (20 μs) 有兩個 muon 跑進來		經過計算，發生這樣的事件機率很小，然而這樣的事件當然使用多一點的探測器，使訊號觸發條件較嚴謹，會有較好的防止效果，若用一個探測器的話，這樣的情形是最不可避免的。
5. 衰變產生的電子的方向不能確定 (衰變產生的電子可能不會停留在 muon 停留的探測器上)，可能滿足 start 的觸發條件。	<p>Start : $S1 \otimes S2$ Stop : $\overline{S1} \otimes S2$</p>	電子可能往上跑或往下跑，能量足夠的時候更可能同時在兩個以上的探測器內激發出光電子，雖然此一訊號在數量夠多時可預期為一背景常數，但如果能做到減少其影響的效果，那是較好的設計。因此如果能選定電子產生在 muon 停留的探測器上為 stop 的觸發條件，那能有較大的確定性來保證 stop 的訊號是由 muon 衰變的電子而來。

表三：可能發生的非良好訊號

綜合上述所列，採用三組探測器是比較好的組合，而三組探測器之間的邏輯，

$Start: S1 \otimes S3 \otimes \overline{S2}$, $S2$ 可使我們多點資訊判定 muon 是否有停留在 $S3$ 探測器上, 而 $S1$ 則可以過濾掉上表三的情形 1。

$Stop: \overline{S1} \otimes S3 \otimes \overline{S2}$, 而我們只採用停留在 $S3$ 探測器上 muon 衰變產生的電子, 這樣可以避免掉表中第 3 點, 若第 3 點的情形發生時, 在 $20 \mu s$ 有其他粒子來滿足此條件的機率較小, 因為 $S1$ 及 $S2$ 有阻隔其他粒子跑進來剛好符合此條件的作用。

3.3 NIM 的運用

有了整體的邏輯設計後, 要再透過一連串 NIM module 的處理來加強邏輯訊號的判別, 最後在以 clock 計時, counter 計數。

圖八為整個實驗架設的線路圖, 將三組相同塑料閃爍體接上光電倍增管重疊在一起, 分別接上高壓 ($S1: 960V$; $S2: 980V$; $S3: 800V$), 開始的箭頭表示偵測到的訊號從光電倍增管輸出, 而後全都經過 Discriminator 加以判別, 再依前述的邏輯架構去組合, 4-Fold Logic Unit 1 是滿足 Start 的觸發, 4-Fold Logic Unit 2 則是滿足 Stop 的觸發。

Start 的邏輯訊號分接出四個部份, 由上而下分別為 1 到 4,

「1」直接與 Coincidence 連接作為 Start 的訊號。

「2」與 Delay Generator 做連接, 當有 Start 的訊號時產生一個與原訊號相差 $20 \mu s$ 的訊號, 其作用在 $20 \mu s$ 內等不到 Stop 訊號時, 作為假的 Stop 訊號, 以停止此次事件(一個事件是指觸發 Start 到 Stop 為止)。因此將其輸出與 Stop 訊號做 Coincidence (OR), 但無須擔心真正的 Stop 訊號和假的 Stop 訊號都發生時, 假的訊號會被誤判成另一個事件的 Start 條件, 因為在每個被記錄的事件之間設定其反應時間為 $0.01s$, 而真假 Stop 訊號之間不超過 $20 \mu s$, 故不影響所擷取的訊號正確性。

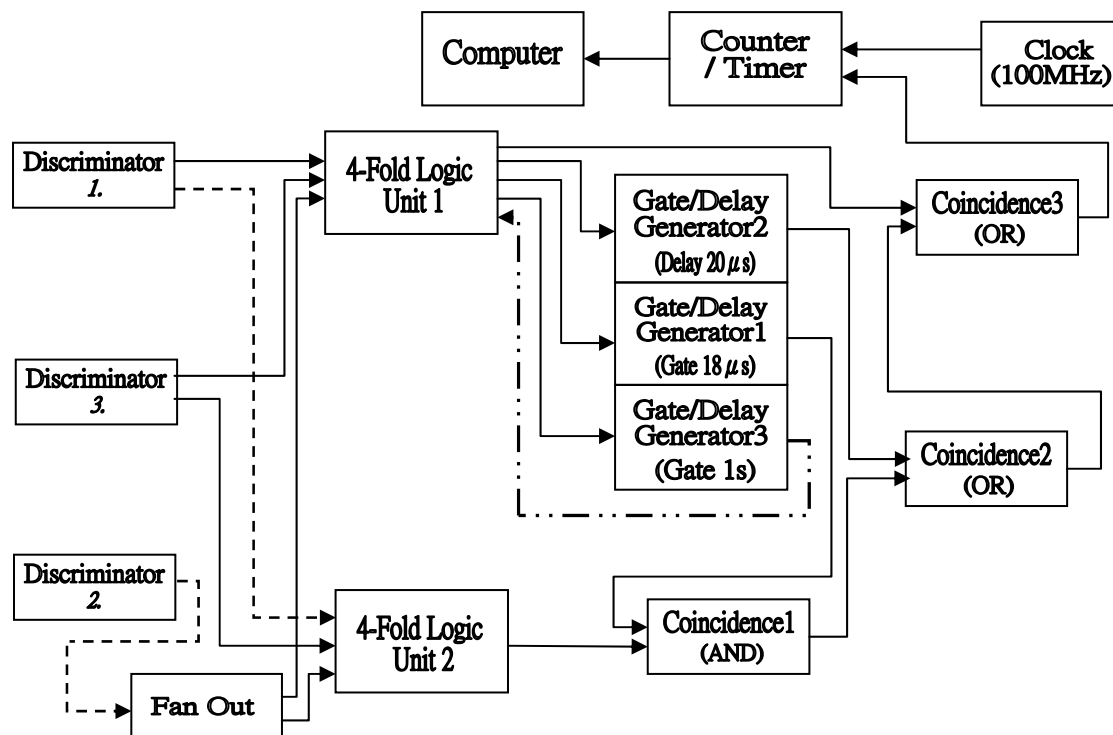
「3」與 Gate Generator 連接, 當 Start 訊號被觸發的同時也產生了一個寬度為 $18 \mu s$ 的訊號, 此訊號輸出後與 Stop 的訊號做 Coincidence 的 AND, 也就是當有 Start 訊號後, 在 $18 \mu s$ 內符合 Stop 的訊號才能被接受。

「4」與 Gate Generator 做連接, 當 Start 訊號被觸發後, 產生一個寬度 $1s$ 的訊號去 veto(見附錄)Start 的訊號, 使一個 Start 訊號進入後, 需經過 $1s$ 才能接收下一個 Start 訊號, 此一動作是為了避免在一個事件還在處理中, 另一個 Start 的訊號跑進來卻沒被接收, 反而不小心把 Stop 訊號當成 Start 的訊號來處理。開到 $1s$ 的寬度是因為每個事件被記錄的間隔為 $0.01s$, 再加上每個事件被觸發的緩衝時間, 因此開寬 $1s$ 是必要的。

最後將 Start 與 Stop 的訊號做 Coincidence (OR), 將訊號輸出至 counter

的 channel 1，並外接一個 100MHz 的 clock 至 counter 的 channel 2，將電腦與 Counter/Timer 做連接，利用自動化的程式將 Start 到 Stop 之間 clock 的數值記錄下來。

將電腦記錄下的數據，透過所編寫的 perl 程式，從大量的數據中抓取我們想要的部份，再利用 paw 做圖找出我們所要的 muon lifetime。



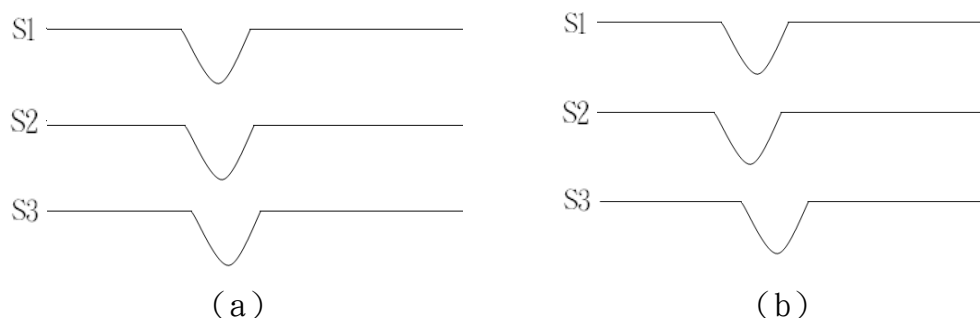
圖八：實驗所用的 module 及線路圖

圖中 ----▶ 表輸出的形式為「out bar」，而 -...-▶ 則表示輸出後的訊號是做「veto」用。

3.4 訊號輸出的檢驗

Muon decay 的過程是短暫的 (μs 為單位)，所以實驗儀器間輸入輸出後彼此時間的 delay 與聯接線的長短所造成的時間差，對實驗的準確性有不可忽略的影響，因此除了要檢查每一個模組輸出後的訊號是否與預期的相同，還要將訊號之間的時間延遲調整好。

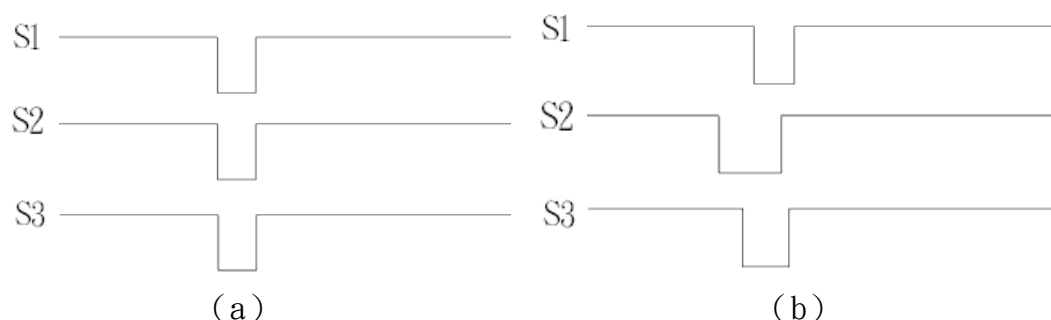
Step1：將三支探測器接收到的訊號直接由示波器讀入



圖九：(a) 預期的圖形 (b) 實際的圖形

這樣的情況無法避免，也就是說我們不可能將訊號調整至完全同時輸出，因為 muon 進入探測器是以隨機的方式，其入射的角度也是各種情況都有，造成的路程差也就無法確定，muon 激發閃爍體放出光電子這個過程所造成的時間差異也無法確定，故在這個部分我們只能儘量做到同時。

Step2：檢查經過 Discriminator 後的訊號寬度以及三支探測器時間延遲

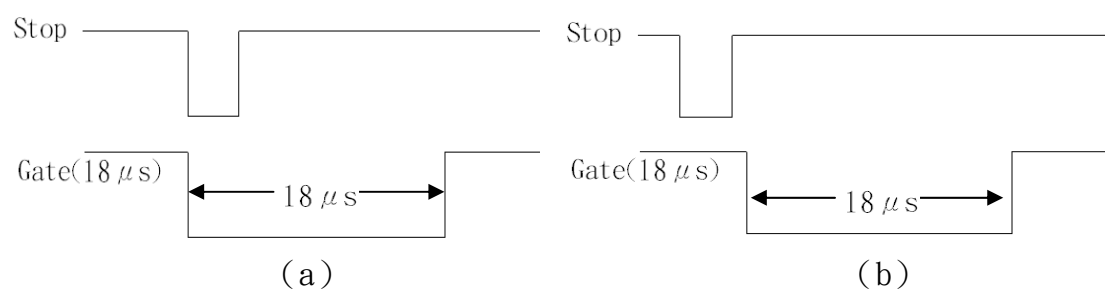


圖十：(a) 預期的圖形 (b) 實際的圖形

除了在 step1 所說的無法避免的時間差外，在後面經過所有模組的訊號造成的時間差都是可以調整的。另外訊號開的寬度不宜過小，訊號因不可避免的時間差而容易無法滿足觸發的邏輯。但不管開的寬或窄都存在時間定義過分嚴謹的問題，也就是說如果訊號穿過了三個探測器，但因為 S3 觸發的時間較 S1、S2 晚，故 start 的邏輯是可以被滿足的。為降低這樣的情況發生，本次實驗中選擇將 S3 的訊號開的較 S1、S2 寬，並且將 S1 和 S2 的訊號利用延遲線延後觸發的時間。

Step3：處理過後的訊號是否正確

利用 Gate/Delay Generator 產生假訊號，代替探測器發出的訊號連接至 Discriminator，檢查假訊號經由圖八的線路，在 4-Fold Logic Unit 2 和 Gate/Delay Generator1 輸出至 Coincidence 時，有無時間差且 Gate/Delay Generator1 產生出的訊號是否開寬 $18\mu\text{s}$ 。

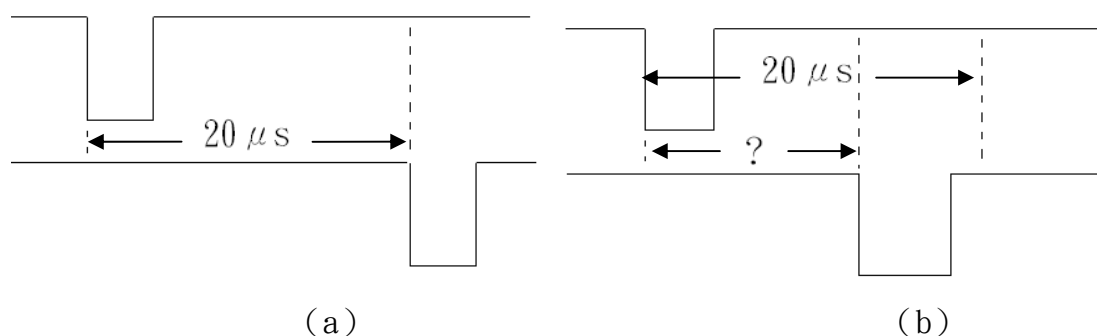


圖十一：(a) 預期的圖形 (b) 實際的圖形

若 gate 產生的訊號沒有與 stop 的訊號同時觸發，可能會因為不符合邏輯而失去了很多正確的資訊。

Step4：處理過後的訊號是否正確

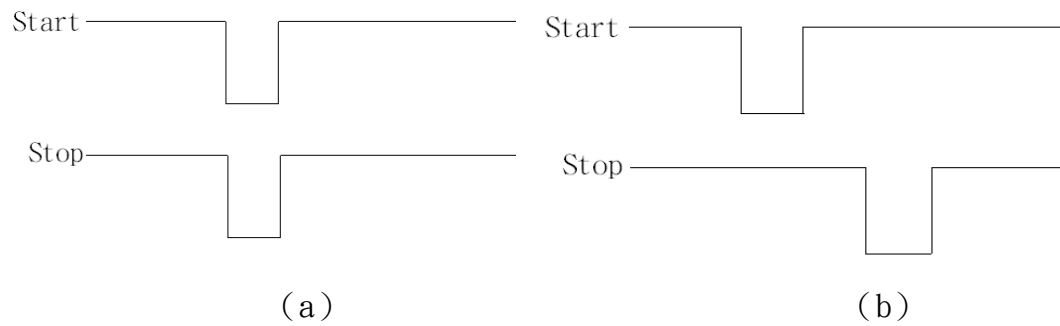
利用 Gate/Delay Generator 產生假訊號，代替探測器發出的訊號連接至 Discriminator，檢查假訊號經由圖八的線路，經 Coincidence1 與 Gate/Delay Generator2 輸出的訊號之間是否相差 $20\mu\text{s}$ 。



圖十二：(a) 預期的圖形 (b) 實際的圖形

Step5：處理過後的訊號是否正確

利用 Gate/Delay Generator 產生假訊號，代替探測器發出的訊號連接至所有的 Discriminator，檢查 Start 與 Stop 訊號經過多個模組後送進 Coincidence 時，有無時間差。

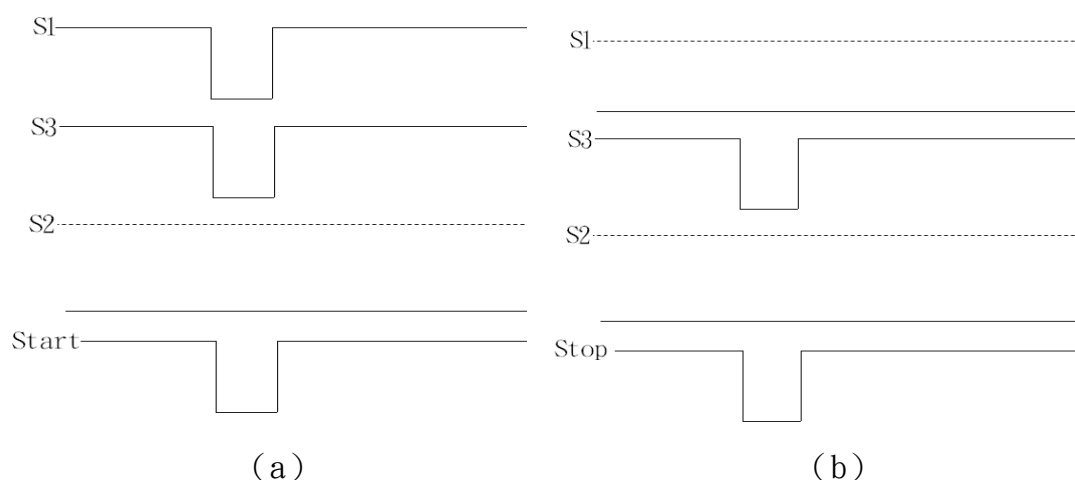


圖十三：(a) 預期的圖形 (b) 實際的圖形

此步驟對於時間延遲的調整最為重要，我們利用可同時觸發的假訊號來檢驗，因此能夠調整到兩輸出的訊號完全同時。

上述 1 到 5 的步驟是將 module 和接線產生的 delay 做修正，以降低實驗的誤差。然而最重要的一步檢查，就是整個實驗設計的邏輯訊號輸出的結果是否符合預期。

Step6 : Start 和 Stop 邏輯訊號的檢驗



圖十四：(a) 滿足 start 的訊號 (b) 滿足 stop 的訊號。

Start 的觸發條件為 $S1 \otimes S3 \otimes \overline{S2}$ ，由圖 a 可看到 S2 的顯示方式與 S1 和 S3 不同，S2 的探測器經過 Discriminator，以 bar 的形式輸出，也就是本來的輸出方式是有邏輯訊號表示 1，無邏輯訊號表示 0；bar 則相反，有邏輯訊號通過表示 0，無邏輯訊號表示 1。所以由圖 a 可知 S1、S3 和 S2 皆有訊號，故滿足 AND 而放出訊號，而 S2 是以 bar 輸出，故實際上 S2 是無接收到訊號。

Stop 的觸發條件為 $\overline{S1} \otimes S3 \otimes \overline{S2}$ ，由圖 b 可看到 S1 與 S2 都是以 bar 的形式輸出，故當兩個訊號表現方式都為 1 時，即表示無訊號通過。

圖十四 (a) 的訊號很容易從示波器上看到，但要看到 (b) 的機會則非常小。我們可以從透過 (a) 中所有訊號的正確性，以及上述的所有步驟經調整後的可靠性來輔助判定 (b) 的正確性。

3.5 數據整理

當所有的線路都檢查無誤後，就可以進行取數的動作。取數時間為 8 天，所得數據量龐大，但並非全都是我們所需要的資訊，大部分的訊息都是 delay 後造成的假 stop ($20 \mu\text{s}$) 訊號。而我們希望得到的資訊為時間小於 $18 \mu\text{s}$ ，因此利用 100MHz 的 clock 所計算到的數目小於 1800 才是我們需要的。寫一個 perl 的程式從龐大的數據中抓取符合我們需要的數據，再依不同大小的區間 (bin size) 做統計。利用 paw 將整理好的數據作圖，已知衰變的曲線為

$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} + N_b$ ，這裡 $N(t)$ 為衰變時間為 t 的 muon 個數， N_0 為全部的 muon 數， t 為衰變時間， τ 為 lifetime， N_b 為背景個數。故利用 paw 以

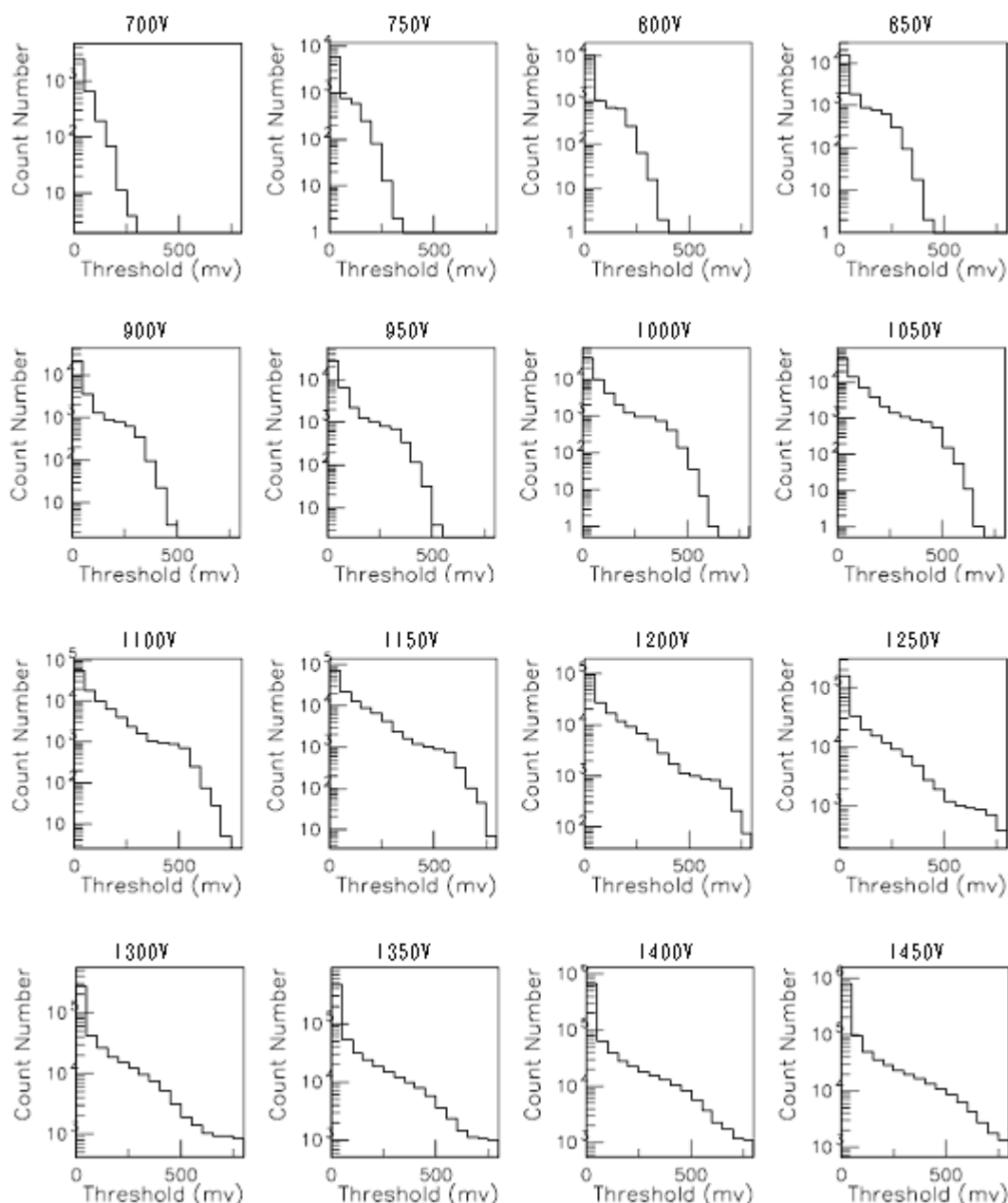
$$par(1)e^{-x/par(2)} + par(3)$$

做 fitting 找出 $par(1)$ 、 $par(2)$ 、 $par(3)$ ，其中 $par(1)$ 、 $par(2)$ 、 $par(3)$ 為設定的變數。 $par(1)$ 對應方程式中的 N_0 ，在為 $t=0$ 的 muon 數目， $par(2)$ 對應方程式中的 τ ，即為所求之 lifetime， $par(3)$ 則對應 N_b ，為實驗的背景值 (background)。

4 實驗結果與分析

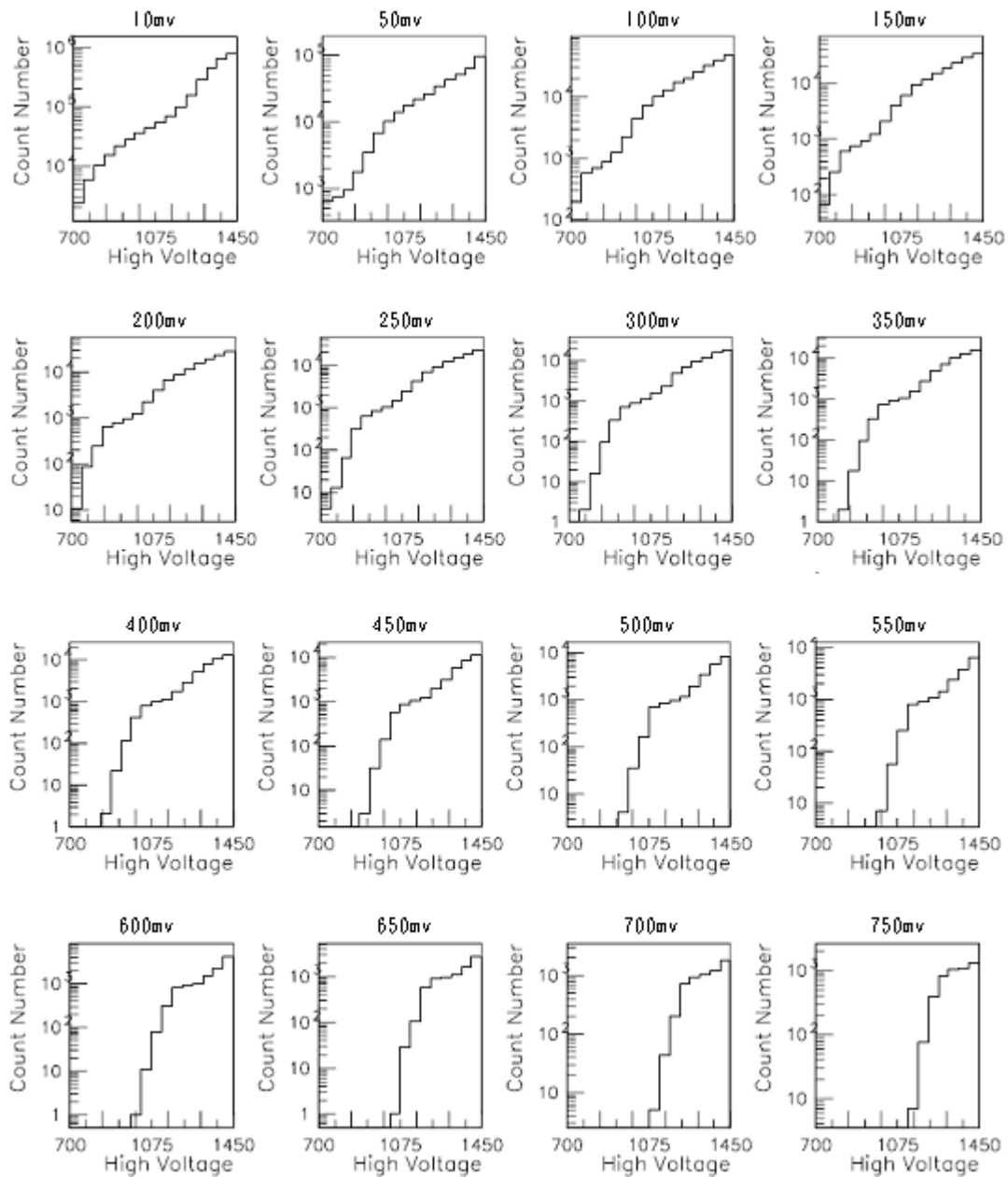
4.1 工作平區

在測量光電倍增管的工作平區後，將所得數據分兩種形式做圖，從圖中我們可以驗證在圖五中



圖十五：固定電壓設定不同的 threshold 取數

分析：可以看到當高壓再 700V 時，plateau 的表現並不明顯，從 750V 後開始可以看到 plateau。隨著電壓增加，可以看見越多的訊號跨越過 threshold，plateau 出現的高度也從 10^3 逐漸增至 10^4 。但當電壓超過 1150V 後，plateau 漸漸無法看出來，因為這時候雜訊也開始被過度放大了。

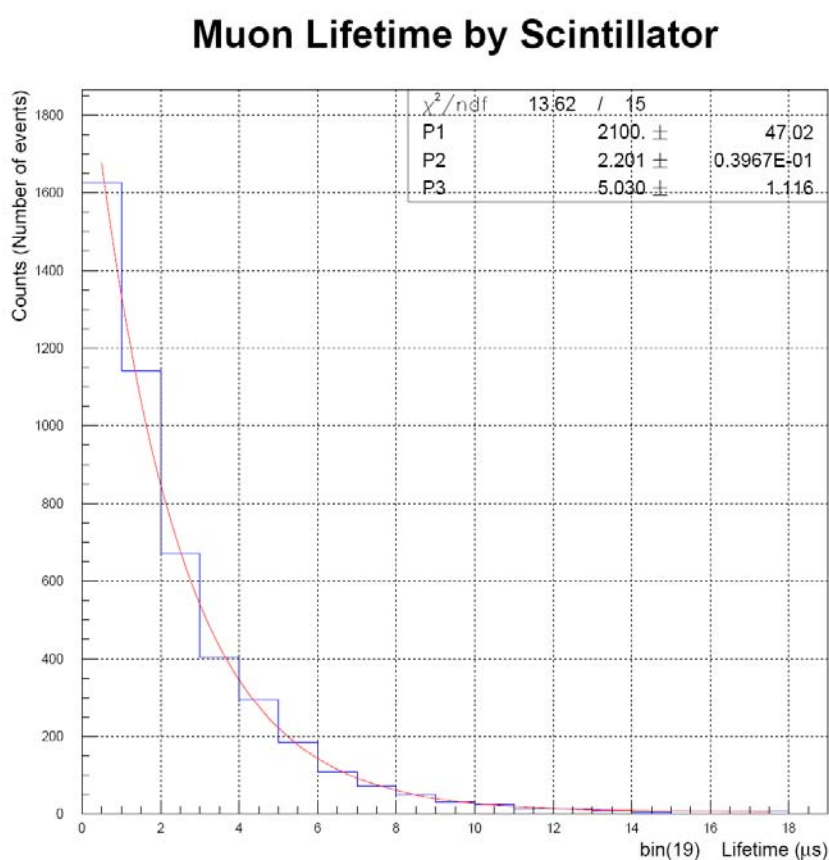


圖十六：固定 threshold 設定不同的電壓取數

分析：同樣在 threshold 為 10mv 時，我們無法看出 plateau，因為雜訊也能輕易跨越過 threshold 值，隨著 threshold 漸漸增加，plateau 也隨之明顯，出現的位置也越來越偏向較高的電壓，並且取到的數量也隨之減少。

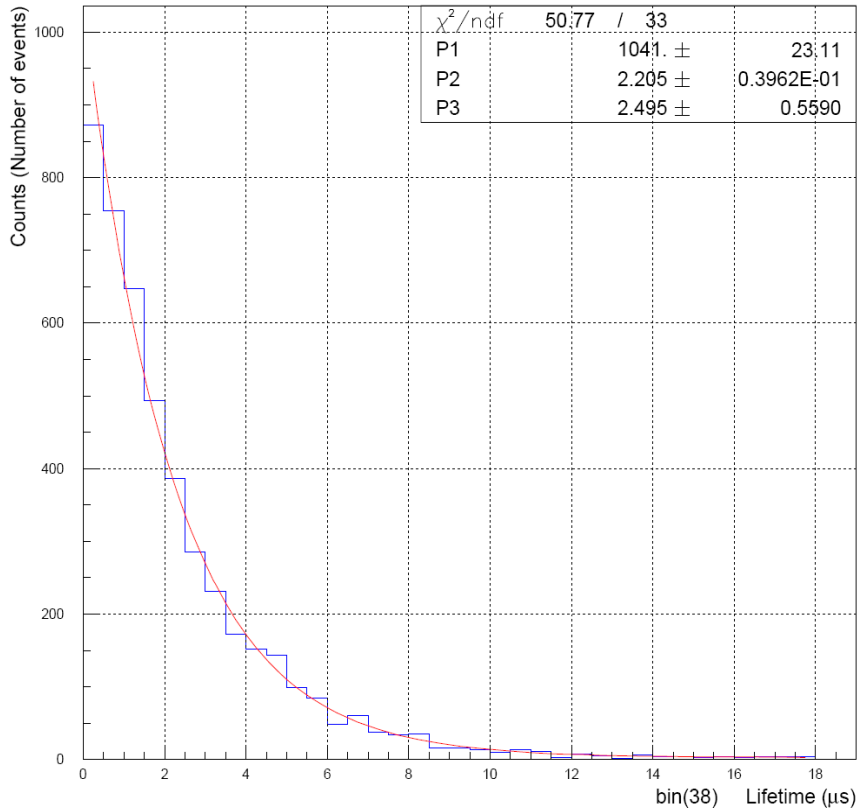
4.2 渺子的生命週期

實驗日期是 2008 年 8 月 8 日到 2008 年 8 月 15 日。以下是依實驗數據(見附錄 B) 利用 paw 作圖，並顯示 fitting 的變數值 (見圖十七、十八)，這四張圖是將同一組數據分為不同的 bin size。bin size 分的太大或是太小對於數據的分析都不佳，太大的 bin size 我們無法看出實驗結果要告訴我們的訊息，太小則需考慮到儀器是否達到這樣的精準度，但是如果分析數據量非常的大，需要花很長的時間才能將數據歸類完成，此時就適宜採用很小的 bin size，因為從小的 bin size 我們可以得到大 bin size 的資訊，但反過來則無法推知。



圖十七：bin size 為 $1 \mu s$

Muon Lifetime by Scintillator



圖十八： bin size 為 $0.5 \mu s$

時間間格	數目	時間間格	數目	時間間格	數目
6.0-7.0	109	6.0-6.5	85	12.0-12.5	3
7.0-8.0	72	6.5-7.0	49	12.5-13.0	8
8.0-9.0	51	7.0-7.5	60	13.0-13.5	5
9.0-10.0	30	7.5-8.0	38	13.5-14.0	2
10.0-11.0	24	8.0-8.5	34	14.0-14.5	7
11.0-12.0	14	8.5-9.0	35	14.5-15.0	4
12.0-13.0	13	9.0-9.5	16	15.0-15.5	1
13.0-14.0	9	9.5-10.0	16	15.5-16.0	3
14.0-15.0	5	10.0-10.5	14	16.0-16.5	4
15.0-16.0	7	10.5-11.0	10	16.5-17.0	3
16.0-17.0	7	11.0-11.5	14	17.0-17.5	4
17.0-18.0	8	11.5-12.0	11	17.5-18.0	4

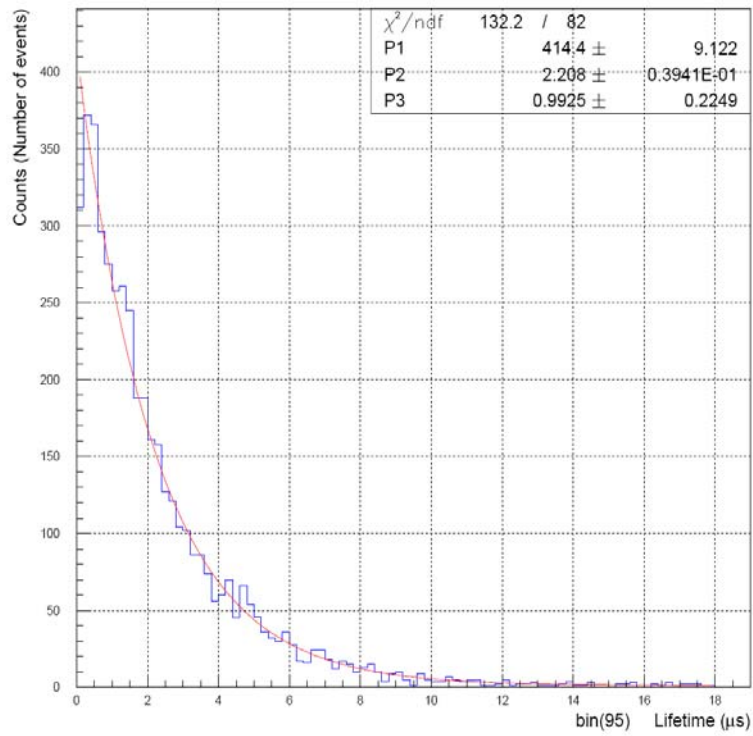
(a)

(b)

表四：(a) bin size 為 $1 \mu s$ 後半部數據 (b) bin size 為 $0.5 \mu s$ 後半部數據

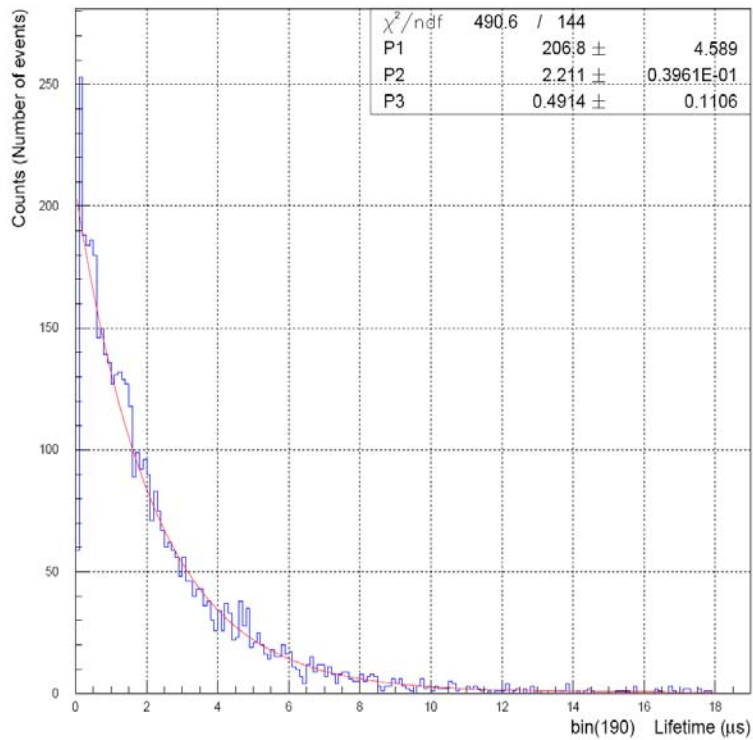
分析：由圖十七、十八及表四可看到當衰變的時間大於 $6 \mu s$ 後，漸漸的數值不會成穩定的遞減狀態，bin size 為 $1 \mu s$ 要到 $13.0 \mu s$ 後才漸漸有感覺。但若 bin size 分的更小一些， $7 \mu s$ 後開始有些不規則，到了 $9 \mu s$ 數值下降的很慢，且更不規則，可以判定在 $9 \mu s$ 後的數值受 background 主導較多。

Muon Lifetime by Scintillator



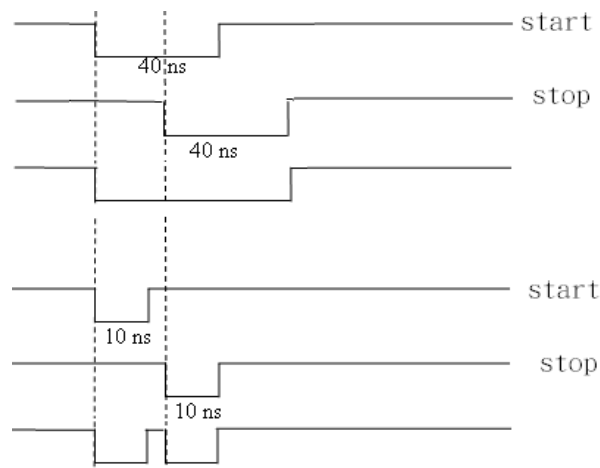
圖十九：bin size 為 $0.2 \mu s$

Muon Lifetime by Scintillator

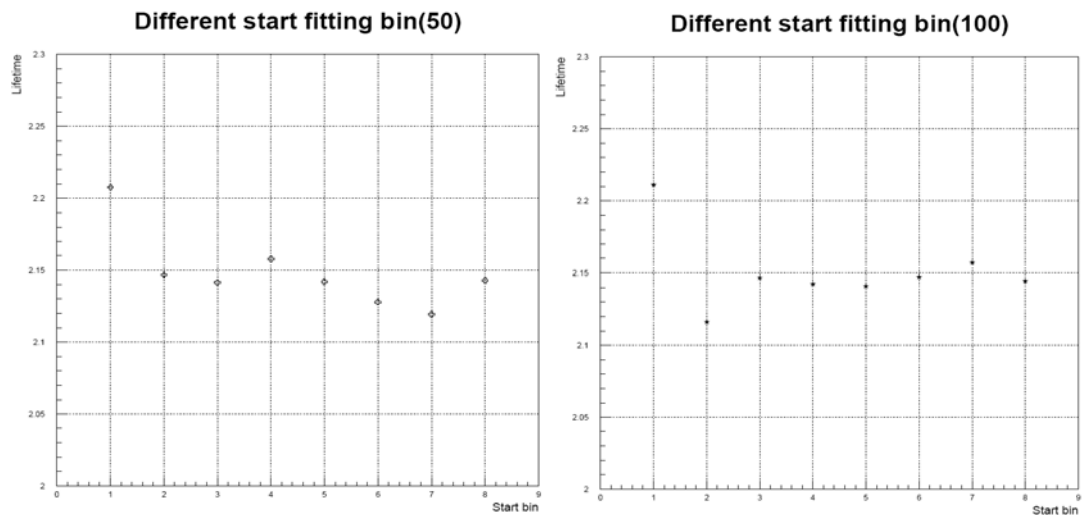


圖二十：bin size 為 $0.1 \mu s$

分析：圖十九、圖二十這兩個 bin size 在第一個 bin 出現了與整體趨勢不吻合的下降，另外在 bin size 為 $0.1 \mu s$ 時，第二個 bin size 出現了突然增高的趨勢，推測可能性有三：1. counter 的反應時間不夠靈敏。 2. start 與 stop 開出來的訊號寬度 (width) 太寬，因此若 start 與 stop 的時間間隔短，訊號容易 coincidence 成一個訊號 (如圖二十一)。但若要將第一個與第二個奇怪的 bin 不納入 fitting 的結果，那麼又會發現 fitting 的結果，muon lifetime 的值會下降 (如圖二十二)。



圖二十一：Width 影響輸出結果

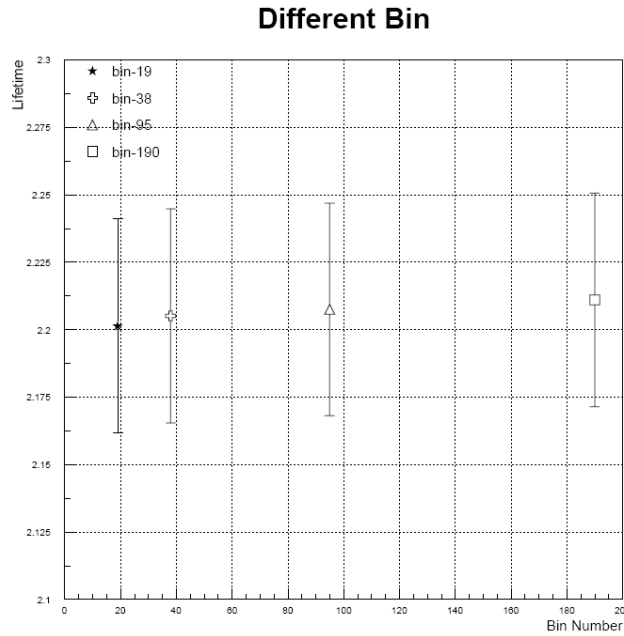


(a)

(b)

圖二十二：(a) bin size 為 $0.2 \mu s$ 時，從不同的 bin 開始 fitting 的結果
(b) bin size 為 $0.1 \mu s$ 時，從不同的 bin 開始 fitting 的結果

將所得的資訊整理如下，可看出不同的 bin size 得到的 lifetime 差異並不大，而實驗值若加上 error bar 後，都有落在 PDG ($2.19703 \pm 0.00004 \mu s$) 內。



圖二十三：不同的 bin size 所得的 lifetime 並標上 error bar

Bin size (μs)	1	0.5	0.2	0.1
Muon lifetime (μs)	2.201	2.205	2.208	2.211
Error bar (μs)	0.03967	0.03962	0.03941	0.03961

表五：Muon lifetim 的比較

5 討論

5.1 時間膨脹

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 3×10^8 m/s，但是 muon 的生命期為 2.2×10^{-6} s，在 muon 未衰變前可飛行的距離為 $(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (2.2 \times 10^{-6} \text{ s}) = 660 \text{ m}$ ，按照這樣的算法，在大氣高度 15km 所產生的 muon 是無法到達海平面被觀測；或者考慮 muon 原始數量非常多的情況，還是會有極少數的 muon 在衰變前到達地面被觀測，但是對於已知的 muon 通量來看 $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ，這樣的結果似乎不太相符。要澄清迷思概念必須定好座標系。因此從新修正計算：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 (2.2×10^{-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 大多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 (2.2×10^{-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 1.5×10^{-6} s，小於靜止生命期，muon 大多可到達海平面被觀測。

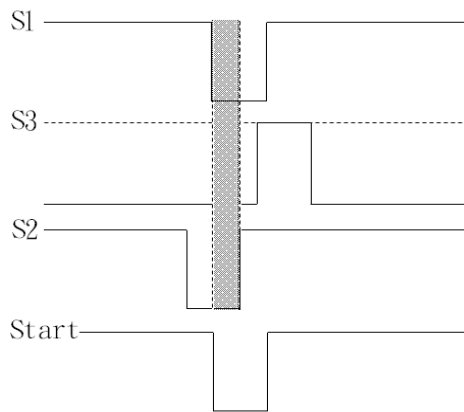
5.2 實驗的衍伸-增加 counting rate

- (1) 直接加大閃爍體的面積。
- (2) 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

$\overline{A} \otimes B \otimes \overline{C}$ ，基本上產生的電子所行進的方向是隨機的，並沒有固定的方向，因此實驗可以多方考慮採用更複雜的邏輯產生多一點 stop。

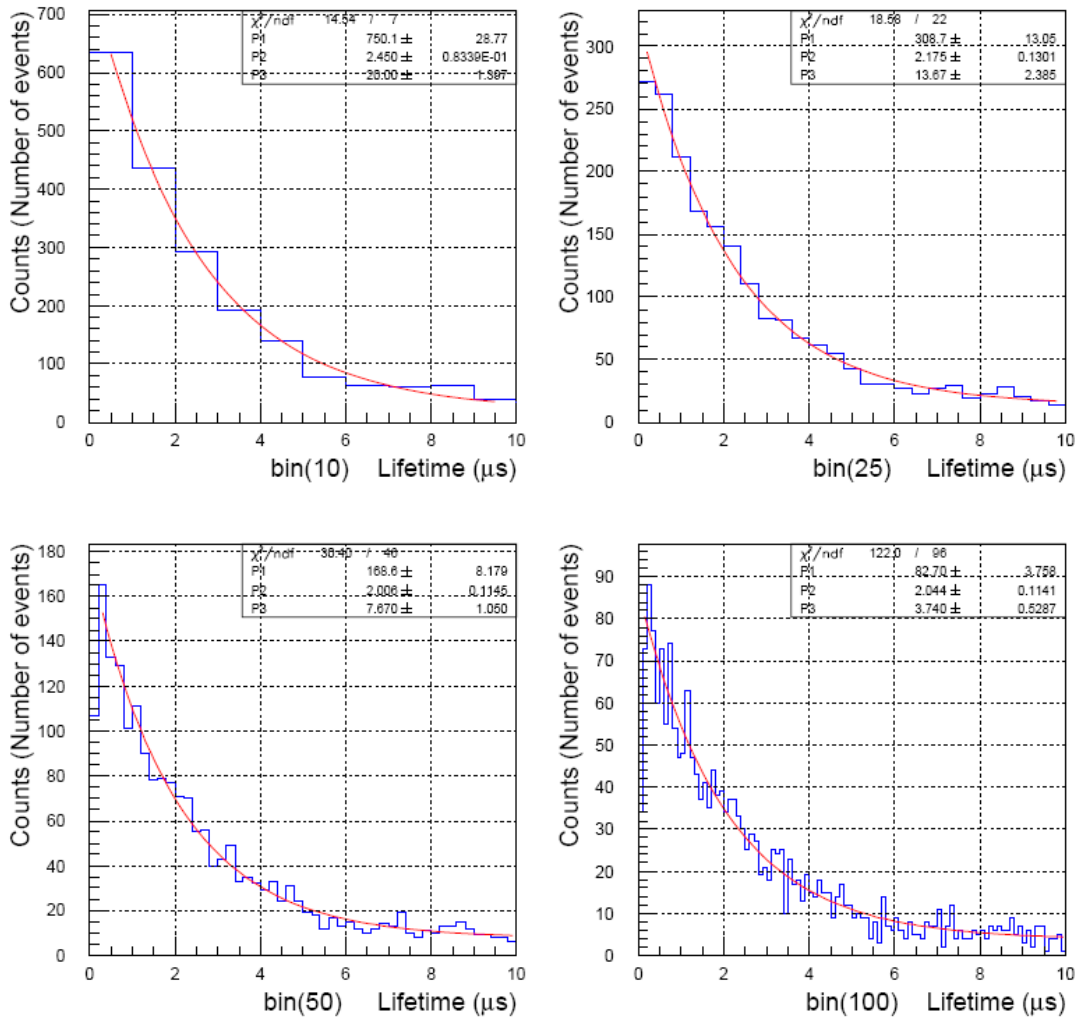
5.3 邏輯設計完備性對整體的影響性

在實驗進行的過程中，取數時間約進行十天後，發現了一個嚴重的錯誤，在 start 與 stop 的邏輯訊號部份接線錯誤了，本來 start 該是 $S1 \otimes S3 \otimes \overline{S2}$ ，stop 為 $\overline{S1} \otimes S3 \otimes \overline{S2}$ ；結果接成 start 為 $S1 \otimes \overline{S3} \otimes S2$ ，stop 為 $\overline{S1} \otimes \overline{S3} \otimes S2$ 。這樣的一個邏輯看起來，不但符合我們的要求，而且不太可能有滿足的條件可以被觸發，意外的卻仍然能夠取到數值，且 fitting 的結果雖無後來的結果漂亮，但加入 error bar 後卻也能符合 PDG，因此合理的推論是因為時間定義的過分嚴謹所造成。光電倍增管產生的訊號即使經過調整也無法達到完全同時觸發，然而像錯誤的 start 條件中，若 S3 被觸發但卻比 S1、S2 的時間來的延遲些，那麼這個錯誤的 start 即可被觸發，如圖所示，陰影部份即為符合錯的邏輯條件 $S1 \otimes \overline{S3} \otimes S2$ ；stop 的觸發也有可能是因為時間嚴謹所造成，但機率很小，因為要在 start 觸發後這麼短的時間再有 muon 打進來的機會不大，因此變成了在 S2 板 decay 的 muon 滿足觸發條件，這樣的設計就好比簡化成只剩 S2 板，因此背景的影響就會加大。因為多了 S1 及 S3 板兩道阻隔，這樣的形式會比單純設計一塊板子所擷取到的資訊少。故取了十天的數據量還較後來調整成正確邏輯所取的八天數據要少一倍。



圖二十四：錯誤邏輯卻能夠觸發的可能性推斷，圖中陰影處即為滿足條件的結果

Muon Lifetime by Scintillator



圖二十五：錯的邏輯接線數據作圖

時間區間	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	總數
Right	1627	1141	672	404	295	184	109	72	51	30	4585
Wrong	635	435	392	192	141	79	63	61	63	40	2101

表六：正確與錯誤的接線所得到的數據比較

	Par (1)	Par (2)	Par (3)	總數	天數
Right	2100±47.02	2.201±0.03967	5.030±1.116	4585	8天20時
Wrong	750.1±28.77	2.450±0.08339	20.00±1.397	2101	10天3時

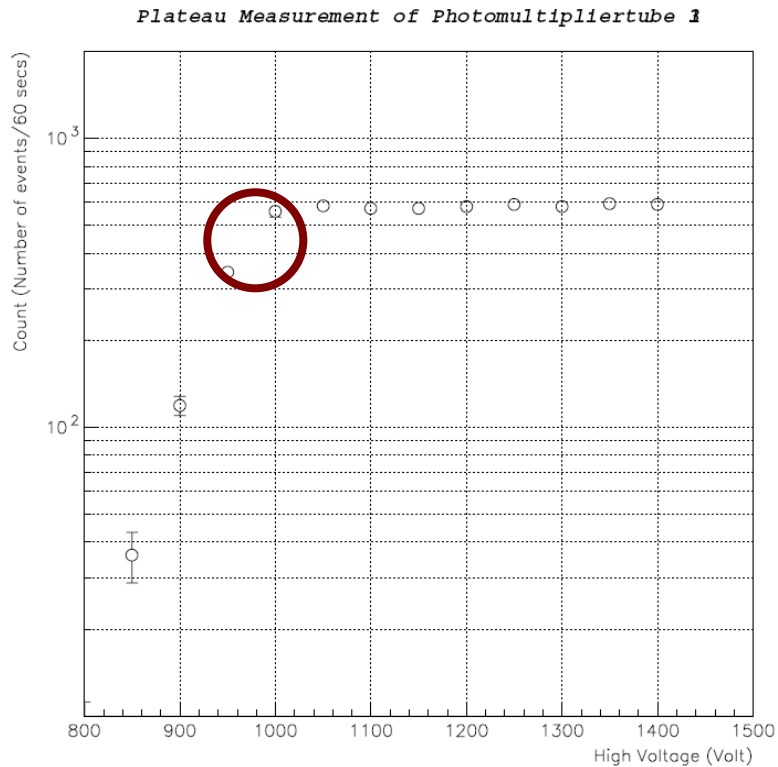
表七：正確與錯誤接線的 fitting 結果

由上兩表可發現；(1) 取數的時間 right 為 8 天，wrong 為 10 天，但 right 的邏輯接線卻明顯得到多一倍的數據量。(2) wrong 的數據中，8~9 這一個凸起的數值對整體來說是較為奇怪，但在前面我們也討論過，約在 $9\mu\text{s}$ 後受到 background 的影響會漸增，且明顯 wrong 比 right 衰減的慢，顯示 wrong 受背景的影響較 right 大。(4) 由 fitting 的結果可看出正確的邏輯接線所得到的結果較漂亮，受背景的影響比較小。

因此從上述的例子可以發現，邏輯設計的好壞對實驗的結果有一定程度上的影響。

附錄 A

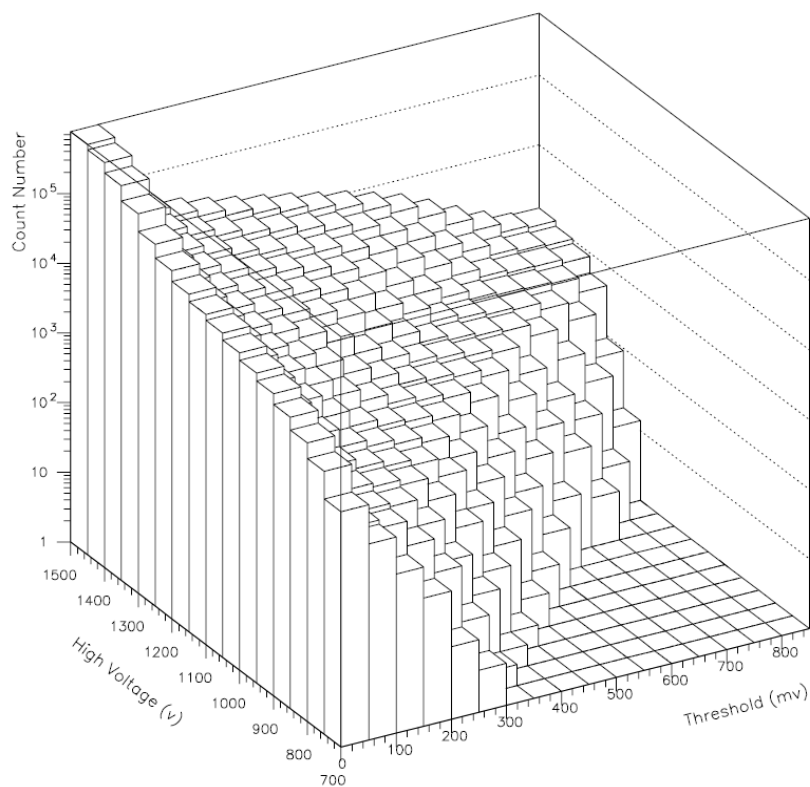
在前面我們只副上了 S3 光電倍增管的 plateau，而另外兩支光電倍增管在測量後發現找不到明顯的 plateau，未了解決這樣的問題，可以利用可信賴（以找出工作平區）的光電倍增管與無法找到 plateau 的光電倍增管 coincidence。將可信賴的 S3 選定一個 plateau 上的工作電壓與 threshold，固定後將 S1 (S2) 與 S3 coincidence，將 S1 (S2) 固定一 threshold 開始調整電壓，會得到圖二十四的結果，最後會成水平的分布是因為數目被 S3 coincidence 後限制住了。此一方式利用的概念就是在 S3 為可信的狀況下，S3 所計算到數目就該是 S1 所計算到的數目，所以在圖二十四中所框的咖啡色圈圈，是我們可以選定的 S1 工作電壓。同理 S2 也可利用此方法得到工作電壓。



圖二十六：S1 與 S3 coincidence 的結果

附錄 B

使用 3-D 圖形來分析數據對棧值及高壓的相依性，但從圖二十五中，plateau 的表現並不如預期明顯可見。



圖二十七：尋找 S3 plateau 之 3-D 圖

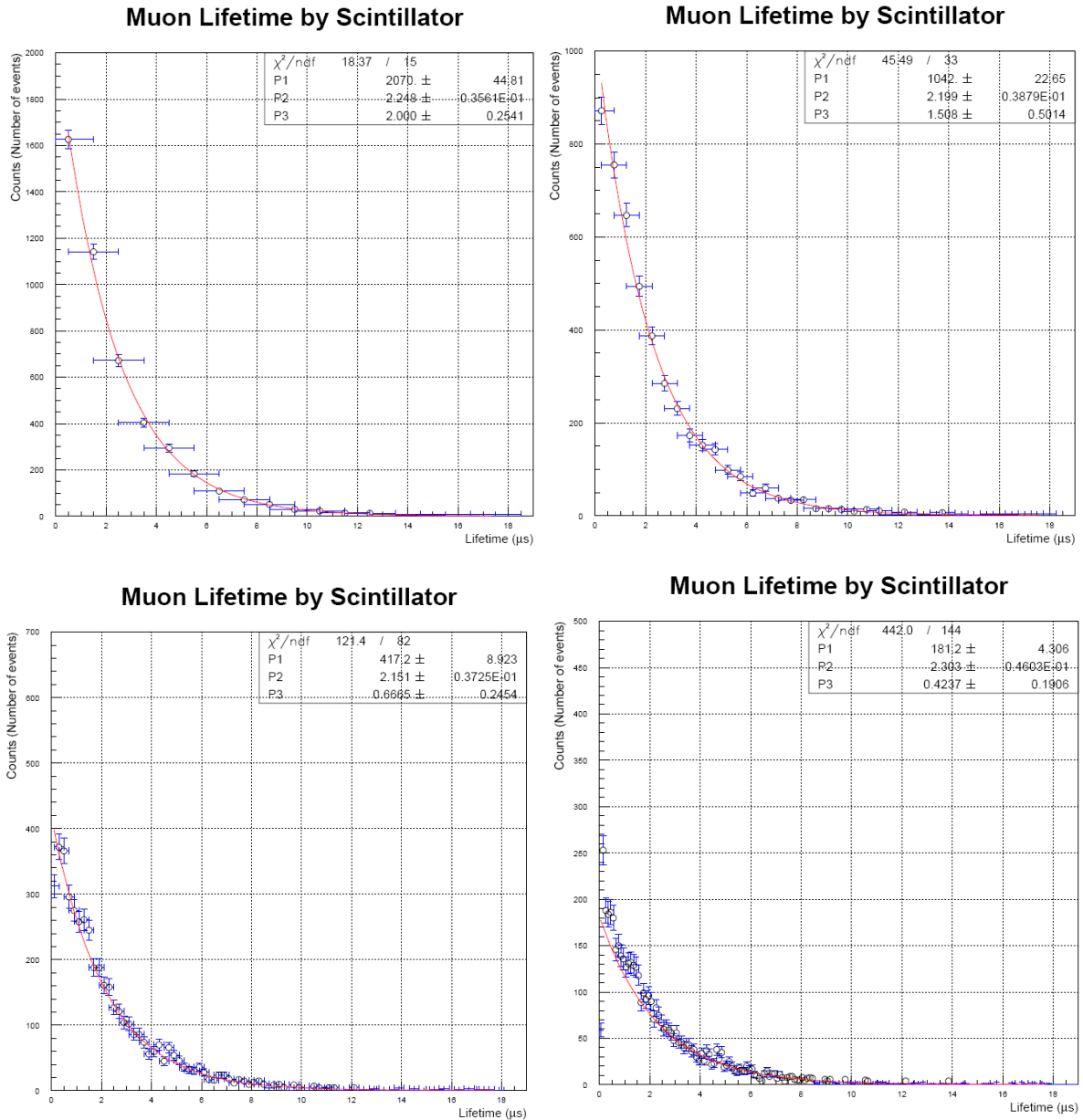
附錄 C

時間 (μs)	個數	時間 (μs)	個數	時間 (μs)	個數	時間 (μs)	個數	時間 (μs)	個數	時間 (μs)	個數
0.1	59	3.1	56	6.1	17	9.1	6	12.1	4	15.1	0
0.2	253	3.2	46	6.2	11	9.2	3	12.2	0	15.2	1
0.3	188	3.3	46	6.3	7	9.3	2	12.3	1	15.3	1
0.4	184	3.4	40	6.4	4	9.4	1	12.4	2	15.4	1
0.5	186	3.5	43	6.5	12	9.5	0	12.5	0	15.5	1
0.6	180	3.6	43	6.6	15	9.6	3	12.6	2	15.6	0
0.7	146	3.7	36	6.7	9	9.7	6	12.7	0	15.7	3
0.8	150	3.8	38	6.8	12	9.8	2	12.8	3	15.8	0
0.9	139	3.9	30	6.9	12	9.9	3	12.9	0	15.9	0
1.0	136	4.0	26	7.0	7	10.0	1	13.0	0	16.0	0
1.1	127	4.1	34	7.1	11	10.1	3	13.1	1	16.1	0
1.2	131	4.2	26	7.2	8	10.2	2	13.2	1	16.2	0
1.3	132	4.3	37	7.3	4	10.3	2	13.3	0	16.3	2
1.4	129	4.4	33	7.4	8	10.4	2	13.4	0	16.4	1
1.5	127	4.5	22	7.5	9	10.5	5	13.5	1	16.5	0
1.6	118	4.6	23	7.6	9	10.6	4	13.6	1	16.6	0
1.7	89	4.7	38	7.7	6	10.7	1	13.7	1	16.7	3
1.8	99	4.8	28	7.8	5	10.8	2	13.8	4	16.8	1
1.9	92	4.9	35	7.9	5	10.9	2	13.9	0	16.9	0
2.0	96	5.0	19	8.0	8	11.0	3	14.0	0	17.0	0
2.1	90	5.1	21	8.1	5	11.1	2	14.1	1	17.1	2
2.2	71	5.2	25	8.2	7	11.2	3	14.2	0	17.2	2
2.3	83	5.3	20	8.3	8	11.3	2	14.3	1	17.3	0
2.4	75	5.4	16	8.4	7	11.4	1	14.4	2	17.4	0
2.5	67	5.5	14	8.5	3	11.5	0	14.5	1	17.5	2
2.6	60	5.6	18	8.6	1	11.6	1	14.6	0	17.6	0
2.7	62	5.7	15	8.7	3	11.7	0	14.7	0	17.7	1
2.8	59	5.8	15	8.8	3	11.8	1	14.8	0	17.8	1
2.9	56	5.9	20	8.9	6	11.9	1	14.9	0	17.9	0
3.0	48	6.0	16	9.0	4	12.0	1	15.0	0	18.0	0

表八：本實驗數據

附錄 D

用 paw 對數據作處理有兩種形式，一是前面採用的 histogram fitting，另外一種是用 vector fitting，兩種形式沒有絕對的好壞，對於不同的實驗數據，找尋較合理的 fitting 結果是我們的目的。

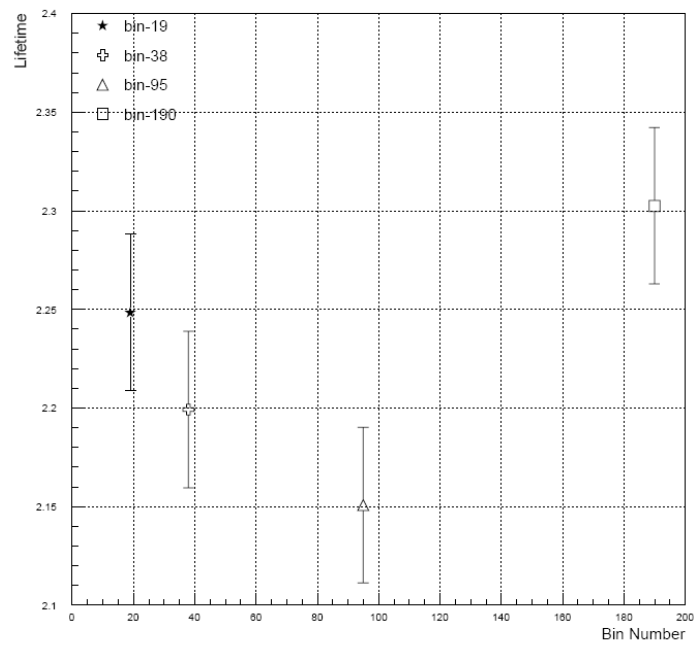


圖二十八：vector fitting

bin size(μs)	1	0.5	0.2	0.1
lifetime(μs)	2.248	2.199	2.151	2.303
error bar	$0.3561E-1$	$0.3879E-1$	$0.3725E-1$	$0.4237E-1$

表九：不同 bin size 得到的 lifetime

Different Bin



圖二十九：：不同的 bin size 所得的 lifetime 並標上 error bar

由上面的結果可以看出，vector 的 fitting 跳動性較大，甚至分成不同 bin size 加上 error bar 後有些並不在 PDG 裡頭，且由圖二十七可以清楚的看出，分成最細的 bin 其 lifetime 加上 error bar 後，只能與分成最粗的 bin 有重疊的部份。因此我們使用 histogram 來處理我們數據。

附錄 E

寫一個 Perl 將實驗所得到的數據整理並歸類

```
#!/usr/bin/perl -w
#use strict;
#my (@life,$a);
#@life;
#$a;

$bin=38;
$bmax=$bin+1;
for($month=8 ; $month<9 ; $month+=1){
for ($day =7 ; $day <25 ; $day+=1){
    for($time =0 ;$time <24 ; $time+=1){
        open(ALL, "<2008\_ $month\_ $day\_ $time\_ .txt");# or die "Unable to open
file.";
        open(INFO, ">counts-38.kumac"); # Open for output
        while($line=<ALL>){
            chomp($line);
            @data = split /,/, $line ;
            chomp($data[2]);
            if($data[2] < 1901) {
                $counts = $data[2]*10 ;
#                print INFO "$counts\n";
                for ($a =1 ; $a <$bmax ; $a+=1){
                    $step=19000/$bin;
                    $l_bound=0+($a-1)*$step;
                    $u_bound=0+$a*$step;
                    if (($counts<=$u_bound) and ($counts>$l_bound)) {
                        $life[$a]+=1;
                    }
                }
            }
        }
        print INFO "vector\creat yaxis($bin) 'r' ";
        for ($a =1 ; $a <$bmax ; $a+=1){
            if ($life[$a]== "0" ){
                print INFO "0 ";
            }
        }
    }
}
}
```

```

    }else{
    print INFO "$life[$a] ";
    }
}
close(INFO);
close(ALL);
}
}
}

```

利用 paw 做圖

```

Opt *
Set *
Hi/del *
Ve/del *
Close 0
Clr
title_global ''
title_global '' U
opt grid
fort/file 70 finmuonlifetime20.ps
meta 70 -111
    set gsiz 0.6 ; set tsiz 0.1 ; set asiz 0.3 ; set vsiz 0.2
    set xsiz 20 ; set ysiz 20 ; set csiz 0.3
    set ygti 1.0 ; set yhti 1.0 ; set ymgu 2.5
    set hcol 4 ; set bcol 1 ; igset chhe 0.3
    set gfon 69 ; set plci 2 ; igset txfp 29
    set xlab 1.2 ; set ylab 0.6
    set cfon 49 ; set lfon 49 ; set tfon 69 ; set vfon 49
    opt nbox ; opt utit
    zone
    TITLE 'Muon Lifetime by Scintillator'
* -----
    exe counts-19
    creat/ldhisto 100 " 19 0. 19.
    PUT/CONTENTS 100 yaxis

```

```

opt FIT
set FIT 111
ve/cre a(1) 'r'
ve/cre ax(1) 'r' 19
ve/cre aerr(1) 'r' 0.03973
ve/cre par(3) 'R' 1. 1. 0.
ve/cre step(3) 'R' 0.1 0.01 0.0001
ve/cre pmin(3) 'R' 0.001 0.01 0.0001
ve/cre pmax(3) 'R' 10000. 100. 20.
ve/cre errpar(3) 'R'
application comis quit
real function muon(x)
common/pawpar/par(3)
muon=par(1)*(exp(-1.*x/par(2)))+par(3)
return
end
QUIT
zone 1 1
hi/fit 100(0:18) muon 'BL' 3 par step pmin pmax
* hi/fit 100(0:10) muon 'BL' 3 par step pmin pmax
* zone
* opt logy
* hi/fit 100(0:18) muon 'BL' 3 par step pmin pmax
value=par(2)
ve/input a(1) [value]
atitle 'bin(19) Lifetime ([m]s)' 'Counts (Number of events)'
wait
* -----
exe counts-38
creat/1dhisto 200 " 38 0. 19.
PUT/CONTENTS 200 yaxis
ve/cre b(1) 'r'
ve/cre bx(1) 'r' 38
ve/cre berr(1) 'r' 0.03968
ve/cre par(3) 'R' 1. 1. 0.
ve/cre step(3) 'R' 0.1 0.01 0.0001
ve/cre pmin(3) 'R' 0.001 0.01 0.0001
ve/cre pmax(3) 'R' 10000. 100. 20.

```

```

ve/cre errpar(3) 'R'
application comis quit
real function muon(x)
common/pawpar/par(3)
muon=par(1)*(exp(-1.*x/par(2)))+par(3)
return
end
QUIT
hi/fit 200(1:36) muon 'BL' 3 par step pmin pmax
value1=par(2)
ve/input b(1) [value1]
atitle 'bin(38)      Lifetime ([m]s)' 'Counts (Number of events)'
wait
* -----
  exe counts-95
  creat/1dhisto 300 " 95 0. 19.
  PUT/CONTENTS 300 yaxis
  ve/cre c(1) 'r'
  ve/cre cx(1) 'r' 95
  ve/cre cerr(1) 'r' 0.03941
  ve/cre sx(8) 'r' 1 2 3 4 5 6 7 8
  ve/cre s(8) 'r'
  ve/cre par(3) 'R' 1. 1. 0.
  ve/cre step(3) 'R' 0.1 0.01 0.0001
  ve/cre pmin(3) 'R' 0.001 0.01 0.0001
  ve/cre pmax(3) 'R' 10000. 100. 20.
  ve/cre errpar(3) 'R'
  application comis quit
  real function muon(x)
  common/pawpar/par(3)
  muon=par(1)*(exp(-1.*x/par(2)))+par(3)
  return
  end
  QUIT
  hi/fit 300(1:90) muon 'BL' 3 par step pmin pmax
  value2=par(2)
  ve/input c(1) [value2]
  do i=1,10

```

```

hi/fit 300([i]:90) muon 'BL0' 3 par step pmin pmax
startfit=par(2)
ve/input s([i]) [startfit]
enddo
atitle 'bin(95)      Lifetime ([m]s)' 'Counts (Number of events)'
wait
* -----
exe counts-190
creat/1dhisto 400 " 190 0. 19.
PUT/CONTENTS 400 yaxis
ve/cre d(1) 'r'
ve/cre dx(1) 'r' 190
ve/cre derr(1) 'r' 0.03961
ve/cre s1x(8) 'r' 1 2 3 4 5 6 7 8
ve/cre s1(8) 'r'
ve/cre par(3) 'R' 1. 1. 0.
ve/cre step(3) 'R' 0.1 0.01 0.0001
ve/cre pmin(3) 'R' 0.001 0.01 0.0001
ve/cre pmax(3) 'R' 10000. 100. 20.
ve/cre errpar(3) 'R'
application comis quit
real function muon(x)
common/pawpar/par(3)
muon=par(1)*(exp(-1.*x/par(2)))+par(3)
return
end
QUIT
hi/fit 400(1:180) muon 'BL' 3 par step pmin pmax
value3=par(2)
ve/input d(1) [value3]
do i=1,8
  hi/fit 400([i]:180) muon 'BL0' 3 par step pmin pmax
  startfit=par(2)
  ve/input s1([i]) [startfit]
enddo
atitle 'bin(190)      Lifetime ([m]s)' 'Counts (Number of events)'
* -----
zone 1 1

```

```
title 'Different start fitting bin(50)'
null 0 9 2. 2.3
igset mtyp 28
graph 8 sx s p
atitle 'Start bin' 'Lifetime'
wait
title 'Different start fitting bin(100)'
null 0 9 2. 2.3
igset mtyp 29
graph 8 slx sl p
atitle 'Start bin' 'Lifetime'
wait
```

```
* bin-par(2)-----
```

```
title 'Different Bin'
zone 1 1
ve/cre zeroa(1) 'r' 0.
ve/cre zerob(1) 'r' 0.
ve/cre zeroc(1) 'r' 0.
ve/cre zerod(1) 'r' 0.
null 0 200 2.1 2.3
set hcol 1
h/err ax a zeroa aerr 1 29 0.28 1
h/err bx b zerob berr 1 28 0.28 1
h/err cx c zeroc cerr 1 26 0.28 1
h/err dx d zerod derr 1 25 0.28 1
atitle 'Bin Number' 'Lifetime'
```

```
null 0. 10. 0. 10. 'SA'
key 0.5 9.8 29 'bin-19'
key 0.5 9.3 28 'bin-38'
key 0.5 8.8 26 'bin-95'
key 0.5 8.3 25 'bin-190'
```

```
close 70
return
```
