

宇宙線正負ミューオンの寿命 の測定

東北大学 理学部物理学科 原子核物理

平成10年 4月 9日

成田 烈

1 実験の概要

大面積プラスチックシンチレータを用いて宇宙線に含まれるミュオン
の寿命を測定する。負のミュオンは止まる物質によって寿命が違ってくる。
この実験ではシンチレータ内で止まるミュオンの寿命と Fe 内で止まる
ミュオンの寿命を求める。

2 ミュオンについて

2.1 ミュオンの特性

ミュオンは、スピン $1/2$ 、質量 $m_\mu c^2 = 106 \text{ MeV}$ (電子の質量の約 206 倍) を持ち、電荷は正のものと負のものがある。ミュオンは不安定で、自由なミュオンは平均寿命が約 2.2×10^{-6} 秒で、それぞれ次のように 3 体崩壊する。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

放出される電子のエネルギースペクトルは連続スペクトルで、エネルギーの
最大値は 52.8 MeV となる。

2.2 宇宙線中のミュオン

地球大気に入射した高エネルギーの一次宇宙線は大気中で原子核と相互
作用して多数の中間子を作り出す。このうち電荷を持つパイオン (一部のケー
オンも) はさらにミュオンとニュートリノに崩壊する。

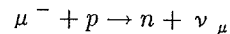
ミュオンは大気中での透過力が強く、また高エネルギーのミュオンは相
対論的な時間の伸びのため崩壊しないで地表に到達するので地表付近の宇宙
線の主成分になる。1948年頃に Rossi の行なった実験によると地表付近
でのミュオンの強度分布は、運動量が $0.4 \sim 0.6 \text{ GeV}/c$ の間で最大となり、
そこから運動量が増すにつれて減少していく。したがって、たいていの宇宙
線ミュオンは今回の実験で用いるシンチレータや鉄を簡単に通過し、そ
の中に止まるミュオンの数はかなり少なくなる。

正のミュオンと負のミュオンの数の比 N_{μ^+}/N_{μ^-} は $1.25 \sim 1.35$ で正の
ミュオンの数のほうが多くなっている。これは一次宇宙線の主成分が陽子
であることなどに原因があると思われる。

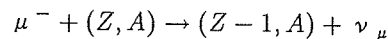
2.3 物質中の μ 粒子の寿命

物質の中で低エネルギーの負の μ 粒子は原子核に束縛される。これを μ 粒
子原子と呼ぶが、これはさらに μ 粒子の平均寿命に比べて短い時間で基底状

態まで落ちて、最終的に μ 粒子は原子核に捕獲されるかあるいは自然崩壊をする。 μ 粒子が原子核に捕獲される過程を μ 粒子の原子核捕獲というが、この過程は核内の陽子が μ^- を吸収して中性子に変わりニュートリノを放出するという過程、すなわち



あるいは



である。この捕獲の確率は原子番号に依存し、原子番号が大きい程大きくなる。このように負の μ 粒子が物質中に止まると、自然崩壊と μ 粒子の原子核捕獲の過程が競合して起きるので、その寿命は自由な μ 粒子のものよりも短くなる。過去の実験によると、鉄の中に止まる負のミューオンの寿命は約 $0.2 \mu\text{s}$ である。

3 物質を通過する荷電粒子のエネルギー損失

物質を通過する荷電粒子がエネルギーを失う過程には主に次の二つのものがある。

1. 原子核のまわりをまわる電子と非弾性的に衝突する。
2. 原子核によって弾性散乱される。

このほかにもいくつかの過程があるが、この二つの過程にくらべると稀にしかおこらない。さらにこの二つの過程にしても電子との非弾性衝突のほうが原子核による弾性散乱よりも多く起きる。

エネルギー損失を表す式は、(陽)電子に対するものと電子より重い粒子に対するものとは異なっている。ここで電子より重たい粒子とはミューオン、パイオン、陽子、 α 粒子そして軽い原子核などのことである。その理由は重たい粒子に対して成り立つ仮定が、それよりずっと軽い粒子に対しては成り立たなかったり、また入射粒子が電子の場合は同種粒子の衝突になるので不可弁別性も考慮に入れないといけないからである。

3.1 Bethe-Bloch Formula

3.1.1 重い粒子の場合

入射粒子が重い荷電粒子の場合、エネルギー損失の大部分は電子との非弾性衝突によっておきる。この衝突において、原子を励起するかイオン化するかして、荷電粒子からエネルギーが失われる。Bethe-Bloch Formula とは単位

長さ当たりのエネルギー損失 dE/dx に対する式を量子力学的に求めたものである。その式は

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

となる。ここで

$$2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2 / \text{g}$$

r_e : 古典電子半径	ρ : 吸収物質の密度
$= 2.817 \times 10^{-13} \text{ cm}$	z : 入射粒子の電荷
m_e : 電子の質量	(単位は e)
N_a : アボガドロ数 $= 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	β : 入射粒子の v/c
I : 平均励起電圧	$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
Z : 吸収物質の原子番号	δ : density correction
A : 吸収物質の質量数	C : shell correction
	W_{max} : 一回の衝突におけるエネルギー移行の最大値

である。入射粒子がミュオンの場合はエネルギーがだいたい 300MeV (β の値は約 0.96) のときに dE/dx の大きさが最小になるが、このエネルギー領域にある宇宙線ミュオンが厚さ 3 cm のプラスチックシンチレーターに落ちていくエネルギーをこの式から計算すると 5.85MeV になる。

3.1.2 電子, 陽電子の場合

入射粒子が電子や陽電子の時は、エネルギーは物質中の電子との非弾性衝突の他に制動輻射によっても失われる。よって単位長さ当たりのエネルギー損失 $(dE/dx)_{tot}$ は次のように表される。

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{coll}$$

● 衝突によるエネルギー損失

入射粒子が電子や陽電子の時の Bethe-Bloch の式は

$$-\left(\frac{dE}{dx} \right)_{coll} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_e c^2)^2} + F(\tau) - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

(ここで τ は $m_e c^2$ を単位にして測った運動エネルギーである。)

となる。また $F(\tau)$ は、電子に対して

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\frac{\tau^2}{8} - (2\gamma + 1)\ln 2}{(\tau + 1)^2}$$

4 実験装置

この実験で用いるプラスチックシンチレーターのサイズを図2に示す。これにライトガイドを通してフォトマルをつける。これを4枚用い、そのうち2枚には片側にだけフォトマルをつけ、後の2枚には両側にフォトマルをつける。ライトガイドとプラスチックシンチレーターは光洩れのないように黒いシートや黒いテープで全体を覆う。全体的な配置は図3に示してある。フォトマル P_i からの信号を S_i と表すことにする。

5 フォトマルにかける電圧

同じ大きさのエネルギーの信号に対する各フォトマルからのパルスの大きさをそろえるために、宇宙線がシンチレーターに落ちていくエネルギーのADCスペクトルのピークの位置を、フォトマルにかける電圧を調整することによって合わせる。しかし各フォトマルによって gain の違いが大きかったためにピーク位置を合わせることはできなかった。各フォトマルにかける電圧を表1のように決定した。電圧調整後の各フォトマルからのADCスペク

表 1: 各フォトマルにかける電圧

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
電圧 (mV)	2060	2600	2600	2580	2020	2100

トルは図4のようになる。ADCのGATEは、各フォトマルの信号をディスクリに通したものの6個全部のANDをとって作った。ディスクリのスレッシュホールドはノイズを拾わないぎりぎりのところまで下げた。

6 シンチレーター内に止まるミューオンの寿命

6.1 実験方法

図5, 6のように回路を作る。4枚のシンチレーターの内上から二番めのシンチレーターは使わなかった。S1, S3が同時に来てかつS4が来ない時、ミューオンが二枚目のシンチレーターに止まったということにする。その信号(S_ν と表す)はCoincidenceのinputにS1, S3を入れ、vetoにS4を入れて作る。次にS3, S4が同時に来てかつS1が来ない時、ミューオンが崩壊して下のほうに電子が飛んでいったということにする。その信号(S_e と表す)はCoincidenceのinputにS3, S4を入れ、vetoにS1を入れて作る。この S_ν をTDCのstartに入れ S_e をTDCのstopに入れて時間差を測る。

今回用いた TDC のチャンネル x と時間 t の関係は calibration の結果

$$t(\mu s) = 0.01x$$

となる。

6.2 実験結果

測定時間は 6 日間。得られたスペクトルを図 7 に示す。図から分るように一定の background が見られる。このスペクトルを exponential+定数という関数と exponential+exponential+定数という関数の二通りの方法で fitting した。まず exponential+定数で fitting した結果は

$$N(t) = 164.7 \exp\left(-\frac{t}{2.004}\right) + 21.32$$

となった(ただし時間は μs 単位)。次に exponential+exponential+定数で fit した結果は

$$N(t) = 75.30 \exp\left(-\frac{t}{1.921}\right) + 89.60 \exp\left(-\frac{t}{2.071}\right) + 21.31$$

となった。結果を表 2, 3 にまとめる。fit されたスペクトルを図 7 に示す。

表 2: exponential+定数で fit した結果

fit range(μs)	平均寿命 (μs)	χ^2
0.6~35.8	2.004±0.135	1.087

表 3: exponential+exponential+定数で fit した結果

fit range(μs)	短い成分の平均寿命 (μs)	長い成分の平均寿命 (μs)	$N_l/N_s(t=0)$	χ^2
0.6 ~ 35.8	1.921±0.206	2.071±0.080	1.190±0.269	1.089

6.3 考察

スペクトルには一定の background が見られるが、この background はなにによって起きるのかを自分なりに考えてみる。まずミューオンが崩壊してできる電子が上の方にとんでいってしまうとする。そうすると TDC の stop 信号は来ないはずであるが、その時に真上からじゃなく斜めから入射したミューオンが 1 枚目のシンチレータを通らずに 3 枚目と 4 枚目のシンチレータだけをつき抜けてしまうということがあれば、それが stop 信号になってしまう。また start 信号にしても似たようなことが起こり得る。しかもこの実験で

は2枚目のシンチレーターを使わなかったので1枚目と3枚目のシンチレーターの間の間隔があいていて、それでそういうことが起こりやすかったのではないだろうか。この background を、後で行なった鉄でミュオンを止める場合(シンチレーター間隔はこれより狭い)のものと比べてみてもその数が多くなっていることが分る。よってシンチレーター間隔をなるべく狭くすればそういう background は減ると思われる。

fitting の結果、1成分で fit したほうが2成分で fit するよりも χ^2 が小さくなったことから、このスペクトルは1成分から成っているということになる。その場合の平均寿命はシンチレーター中に止まる μ^- の寿命に近い。

2成分で fit した場合、 $t=0$ における数の比から長い方の成分が μ^+ に対応し、短い方の成分が μ^- に対応していると思われるが、短い方の $t=0$ における数の誤差が大きいためひよっとしたら $t=0$ での数の大小は逆転するかも知れずあまりあてにならない。また平均寿命は μ^+ も μ^- も両方とも予想される値よりも短くなっている。

7 Fe 内に止まるミュオンの寿命

7.1 実験方法

図8, 9のように回路を作る。S1, S2が同時に来てかつS3が来ない時、Fe内にミュオンが止まったということにする。次にS3, S4が同時に来てかつS2が来ない時、ミュオンが崩壊して下のほうにとんでいったということにする。

7.2 実験結果

測定時間は22日間。得られたスペクトルを図10に示す。このスペクトルにも一定の background が見られる。このスペクトルを次の二通りの方法で fitting した。1:exponential+exponential+定数, 2:exponential+定数。1番目のやり方で fitting するときは、最初に寿命の短い成分がほとんど0に近くて無視できると思われる範囲($2\mu\text{s}$ あたりから)で exponential+定数で fitting し、それで得られたパラメータを用いて今度は exponential+exponential+定数で、最初に得た寿命の長い成分に関するパラメータは固定しといて fitting した。その結果得られた関数は、二成分のものは

$$N(t) = 195.0 \exp\left(-\frac{t}{0.182}\right) + 222.0 \exp\left(-\frac{t}{2.189}\right) + 15.28$$

一成分のものは

$$N(t) = 235.1 \exp\left(-\frac{t}{2.081}\right) + 15.38$$

表 4: exponential+exponential+定数で fit した場合

fit range(μs)	短い成分の平均寿命 (μs)	長い成分の平均寿命 (μs)	$N_i/N_s(t=0)$	χ^2
0.14 ~ 40.8	0.182 ± 0.011	2.189 ± 0.090	1.138 ± 0.079	1.094

表 5: exponential+定数で fit した場合

fit range(μs)	平均寿命 (μs)	χ^2
0.14 ~ 40.8	2.081 ± 0.032	1.152

となった。この二通りの fitting 結果をまとめてそれぞれ表 4, 5 に示す。

7.3 考察

fitting の結果、このスペクトルは 2 成分からなることが分る。寿命の大きさや $t=0$ における数の比から寿命の長い成分が μ^+ に対応し、短い成分が μ^- に対応していると思われる。求まった寿命は予想される値よりも若干短くなった。しかしこの寿命は初めに長い成分を fitting で求める際の範囲によって少し変わるかも知れない。

8 まとめ

今回の実験で得られたミュオン寿命はいずれも予想された値よりも短くなり、その誤差も数 10 ns ~ 数 100 ns 程度の大きさがあつた。もっと精度をあげるには当然計数を増やさないといけないが、そのためには下にとんでいく電子だけでなく上の方にとんでいく電子も検出できるように回路を組んだり、あるいは大がかりなものになるが、エネルギースペクトルが最大になるあたりのエネルギー領域にあるミュオンが実験装置で止まるように、実験装置の上の方に何か原子番号の大きい物質をおくなどすれば良かったのではないかと。回路を組む方はやっでは見たがうまくいかなかった。回路の組み方をもう少し良く考えてみるべきだった。

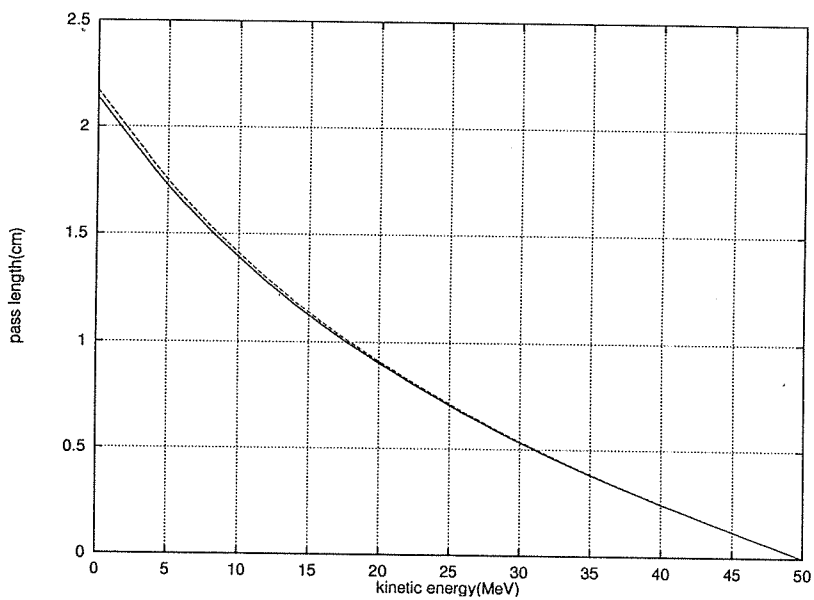


図 1: 電子, 陽電子が 50MeV の運動エネルギーを持って鉄に入射したときの通過した長さとその時点で持っている運動エネルギーとの関係。実線が電子に対するもので破線が陽電子に対するもの

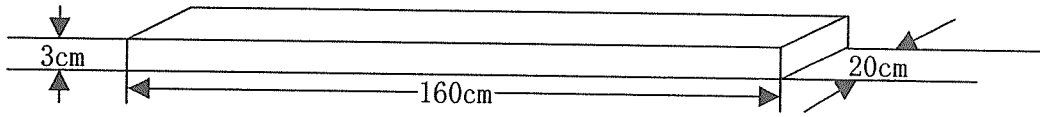


図2 プラスチックシンチレーターのサイズ

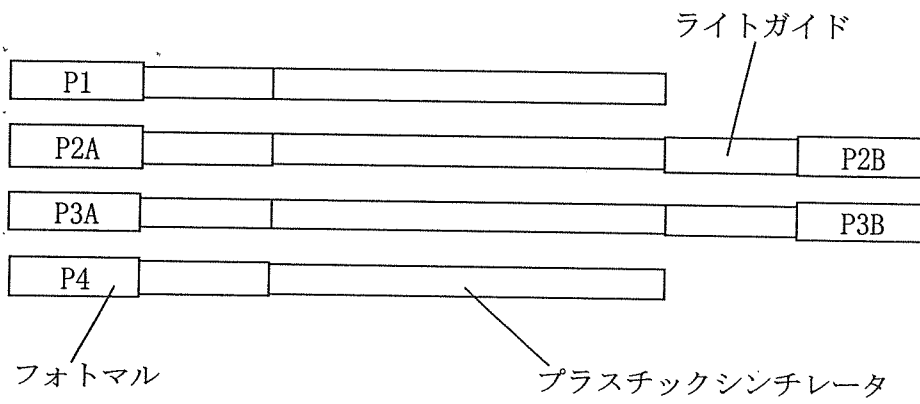


図3 実験装置の配置

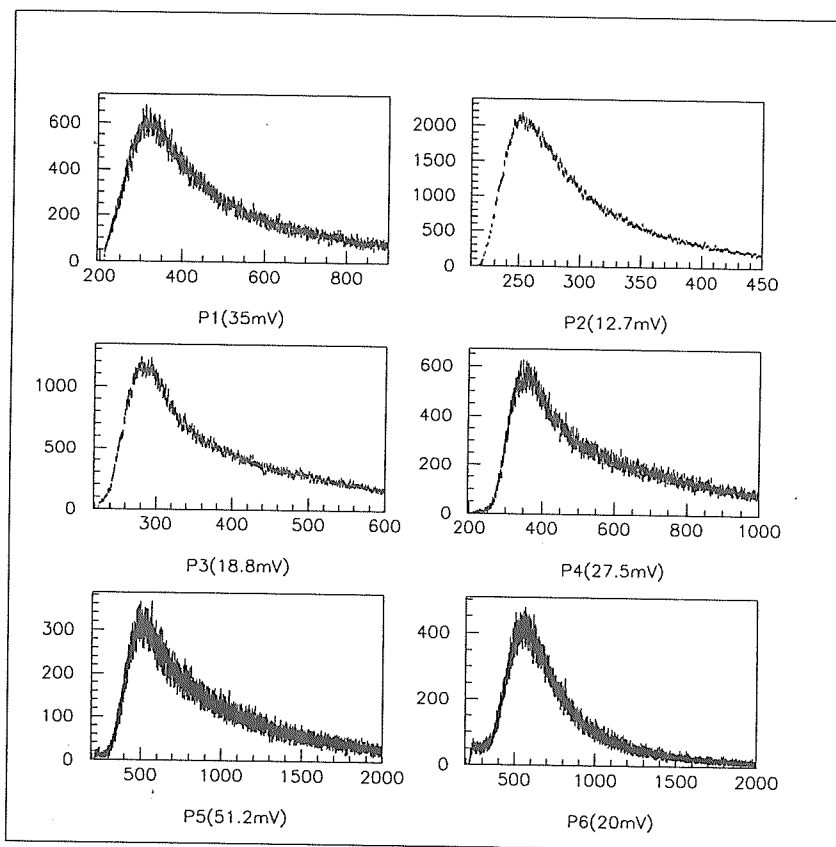


図 4: 電圧調整後の ADC スペクトル。() ないの数値はディスクリのスレッショルドの値。

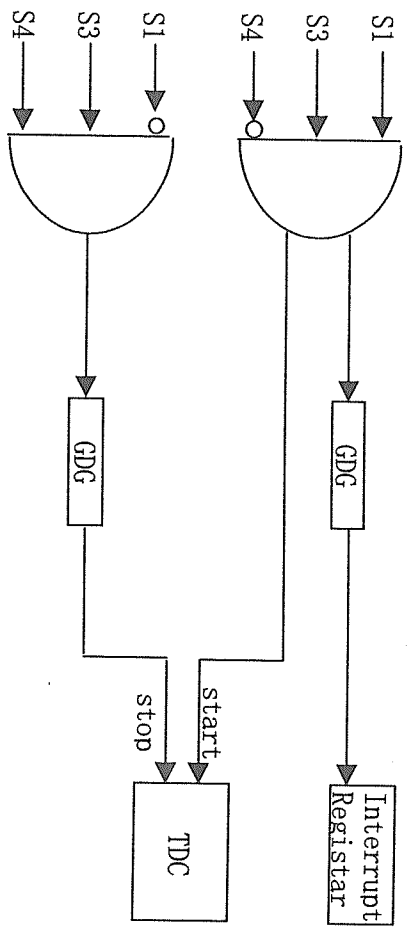
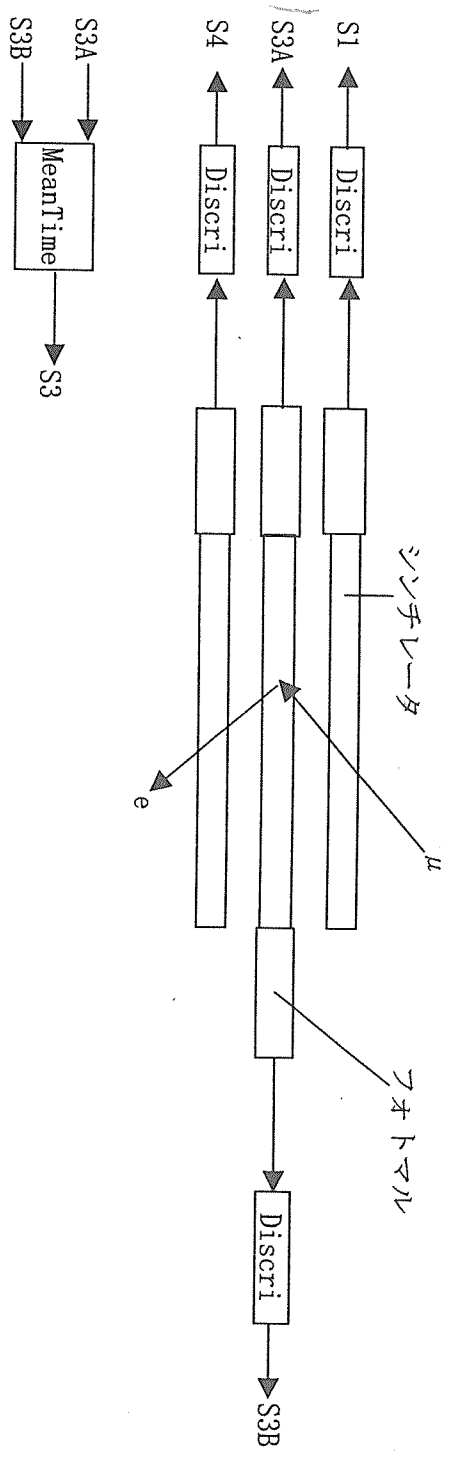


図5 シンチレータ中に止まるミューオンの寿命測定回路図

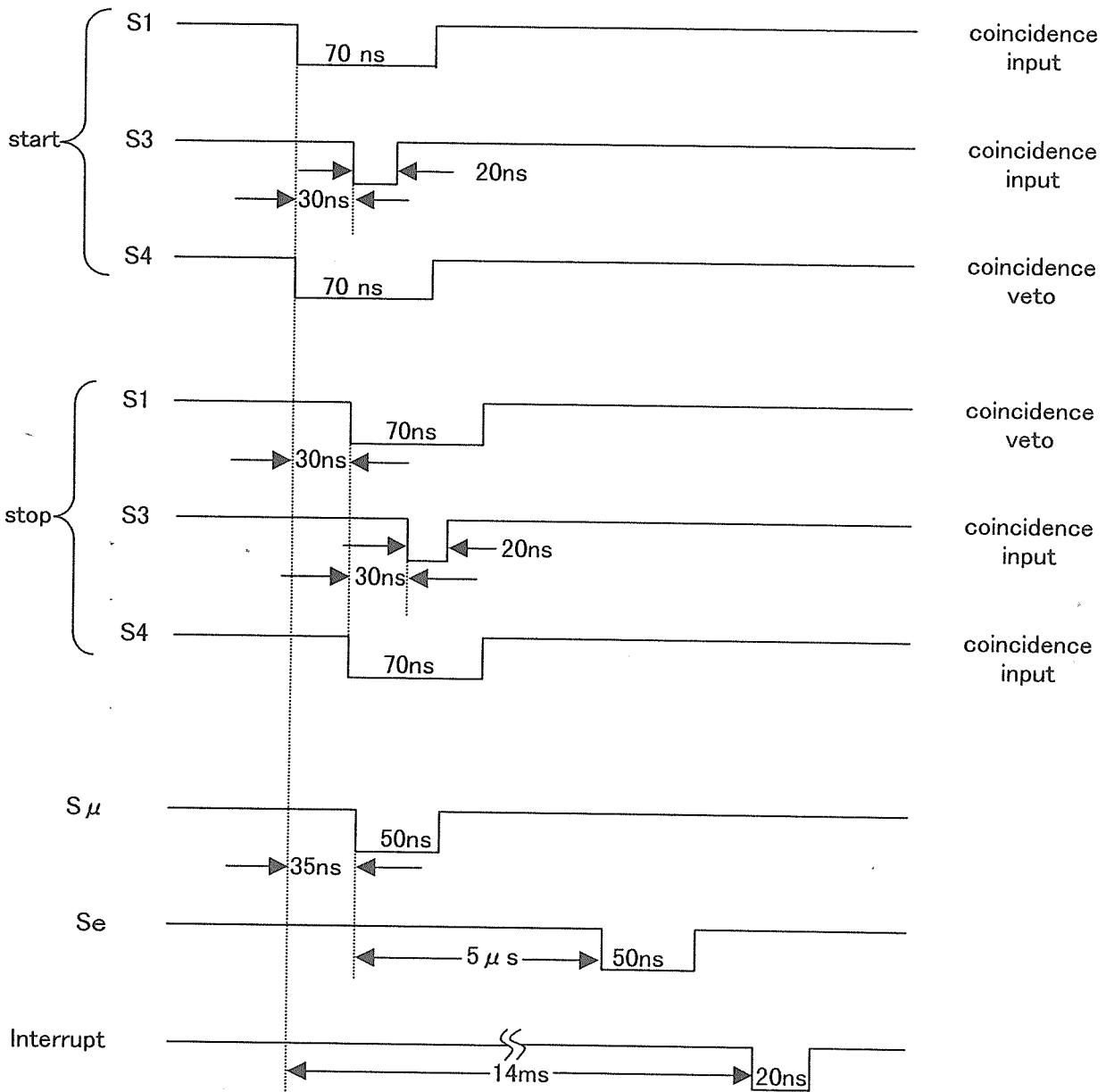


図6 シンチレータ内に止まるミュオンの寿命測定回路のタイミングチャート

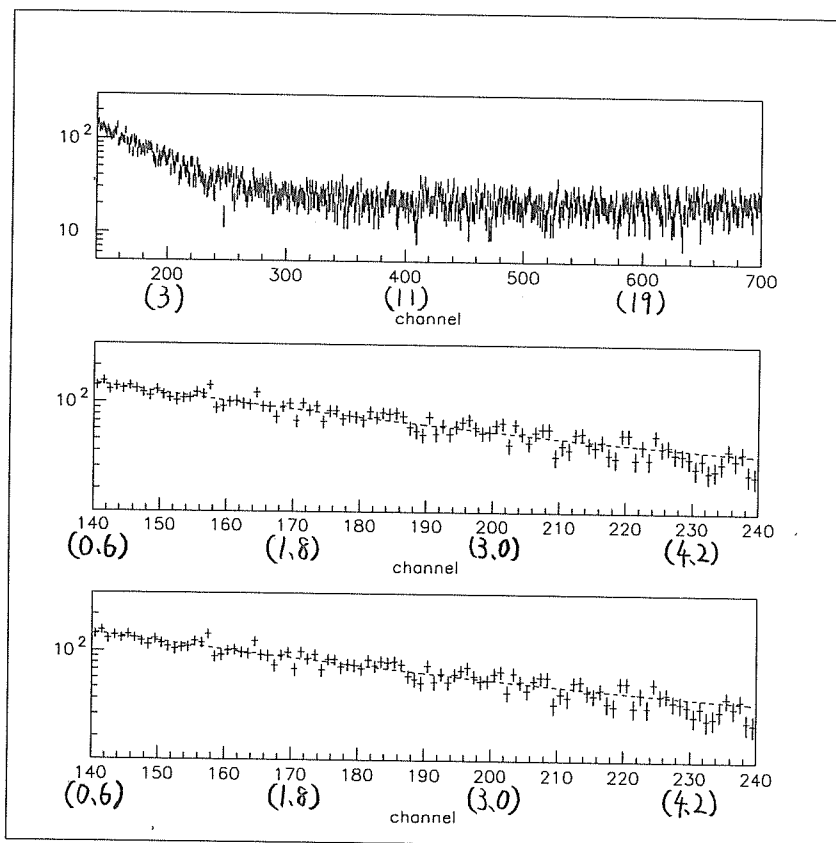


図 7: シンチレータ内に止まるミュオンの寿命スペクトル。上がスペクトルの全体的な形で、真中が exponential+定数で fit したもの、下は exponential+exponential+定数で fit したもの。channel 数のしたの () の中の数は時間 (μs 単位)

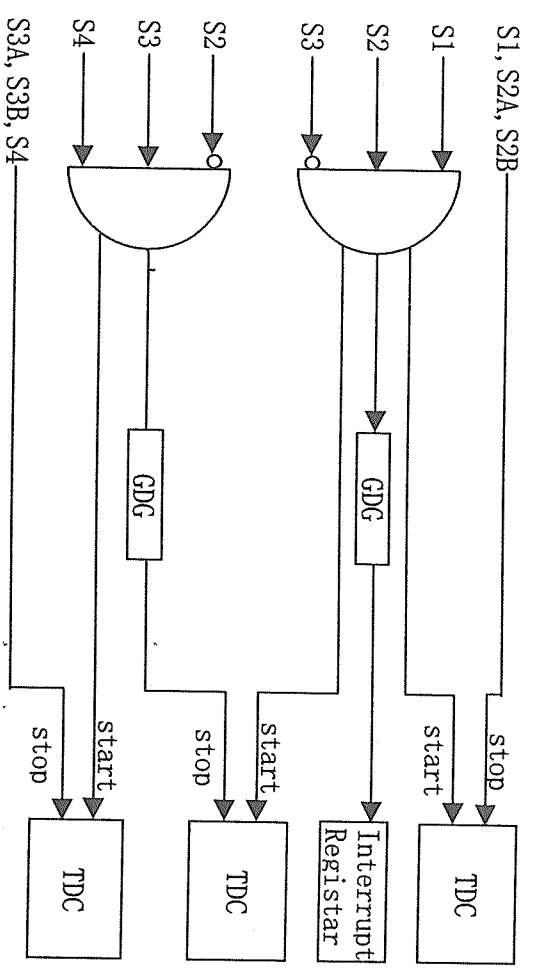
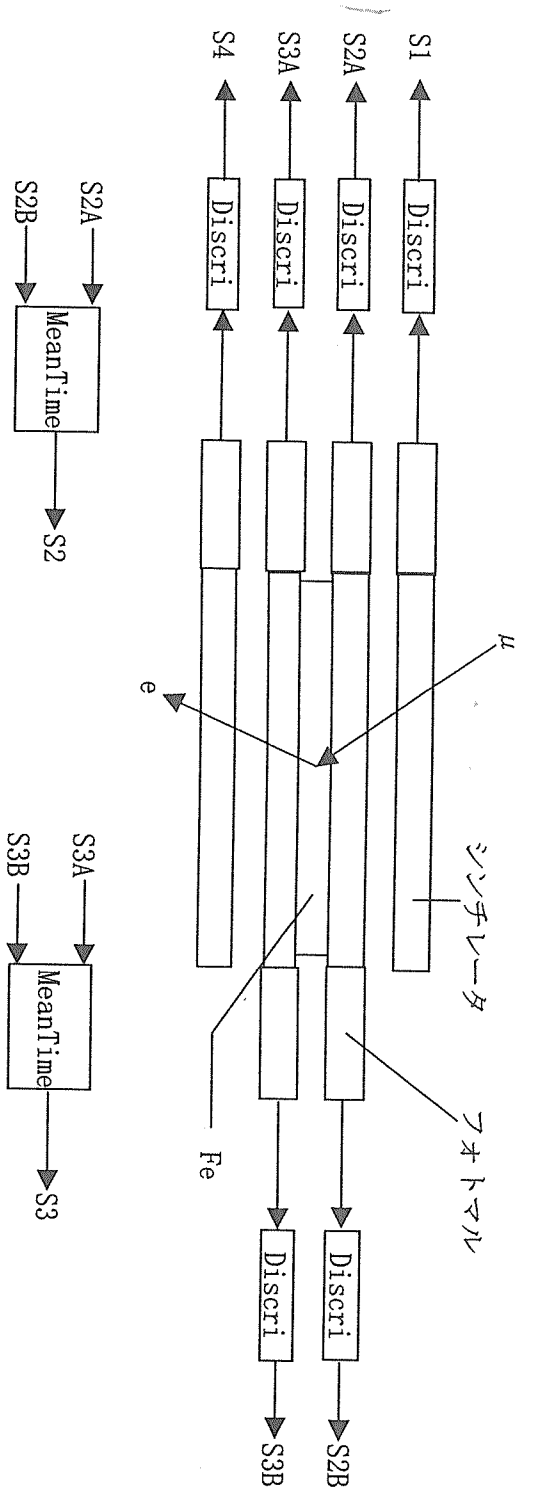


図8 Fe の中で止まるミューオンの寿命測定回路図

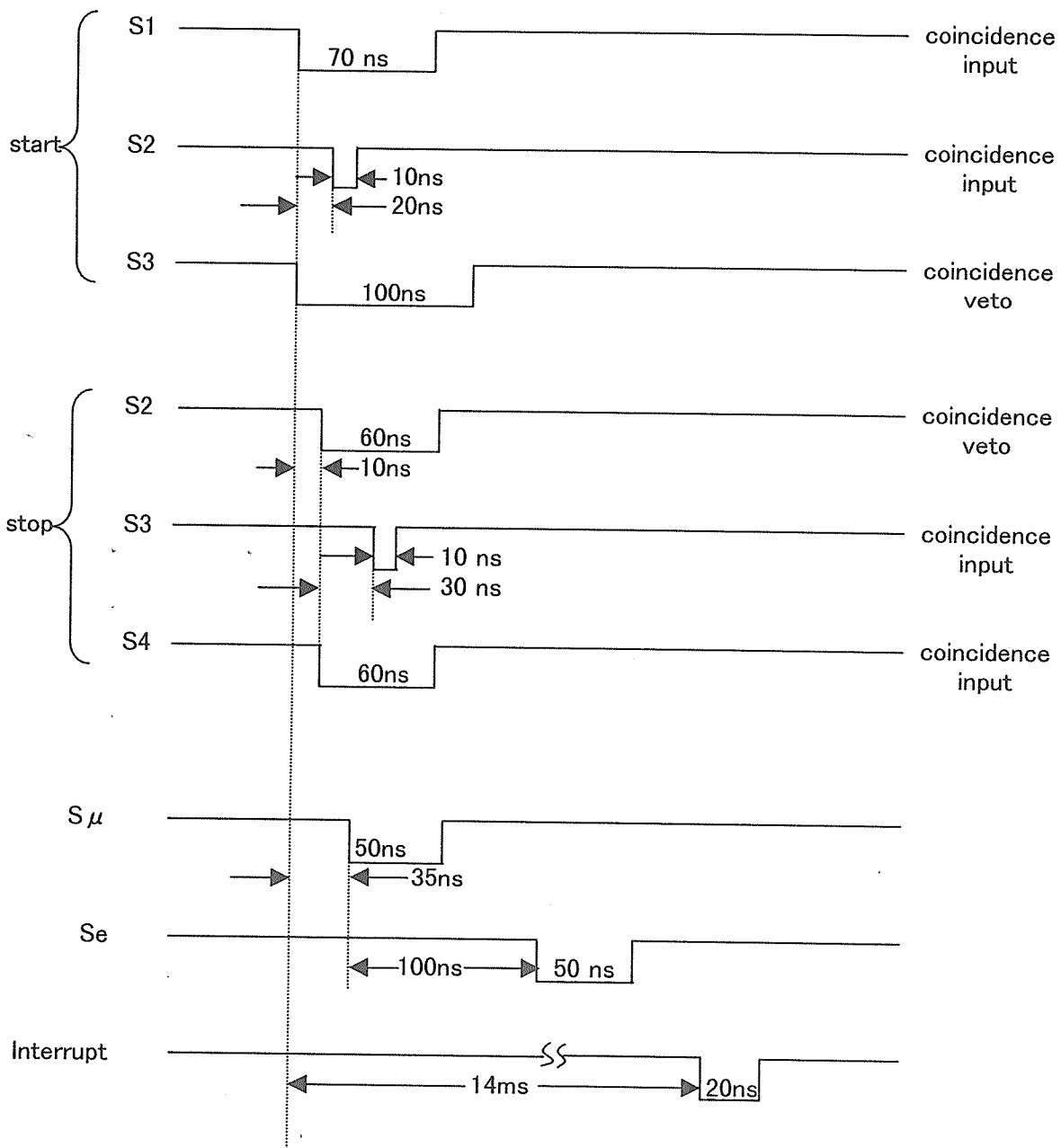


図9 Fe内に止まるミュオンの寿命測定回路のタイミングチャート

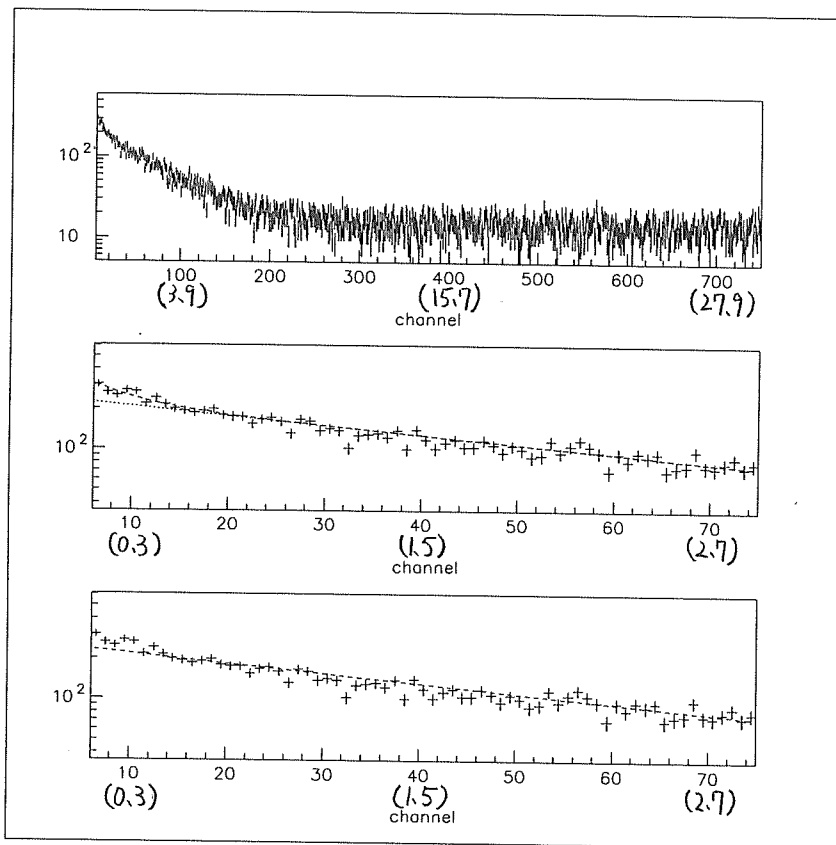


図 10: Fe に止まるミュオン寿命スペクトル。上は全体的な図で、真中は exponential+exponential+定数で fit したもの、下は exponential+定数で fit したもの。channel 数のしたの () の中の数は時間 (μs 単位)