

宇宙線ミューオンの偏極度の測定

防衛大学校数学物理学科

本科第46期 石黒 知法

指導教官 新川 孝男 助教授

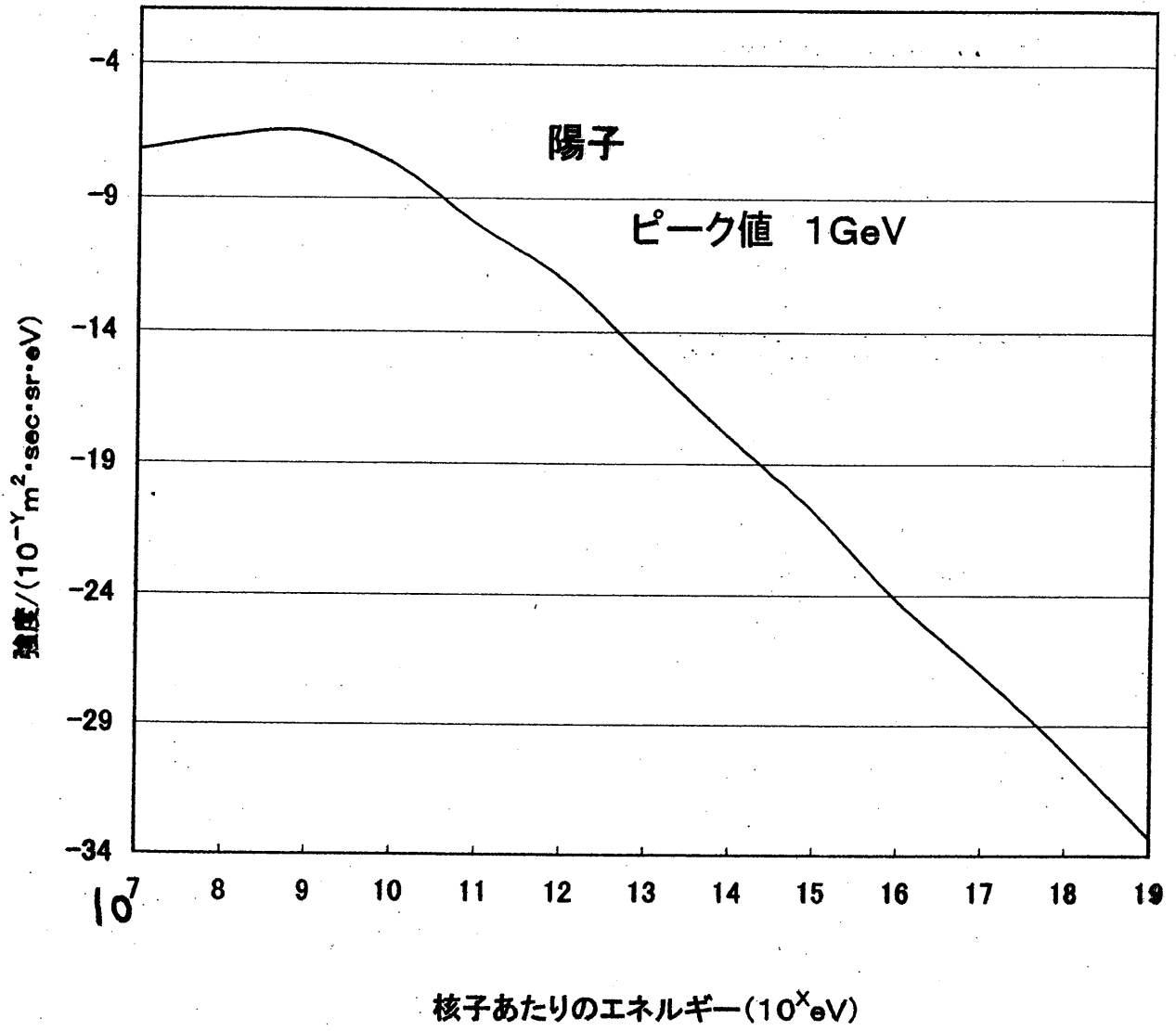
平成14年2月

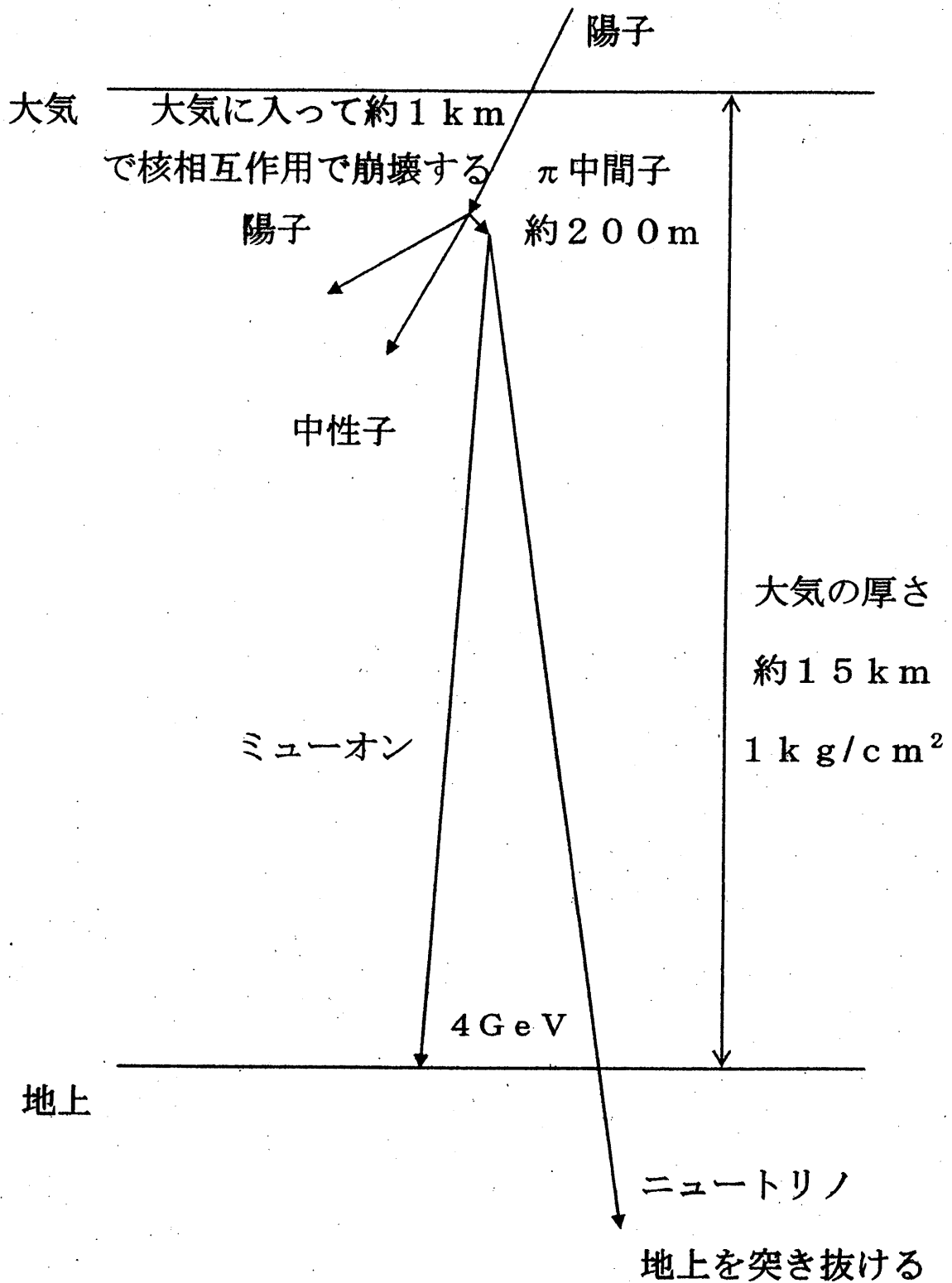
はじめに

実験の目的

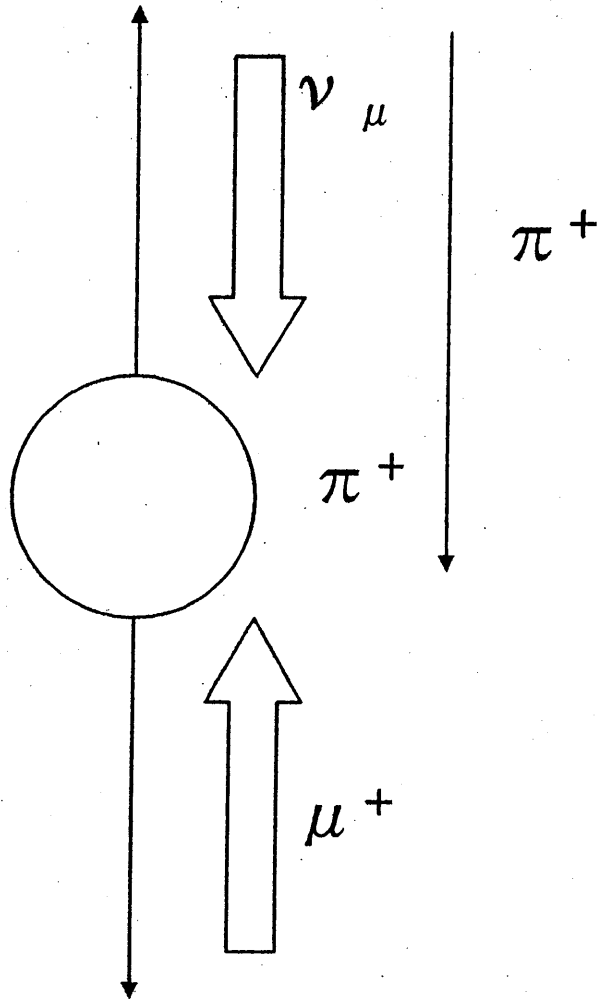
- 宇宙線の生成過程を調べるために、宇宙線ミューオンの偏極度を崩壊電子の飛方向非対称度から測定する。
- 地上で宇宙線ミューオンを止めて、崩壊の観測を10日間行った。

宇宙線のスペクトル



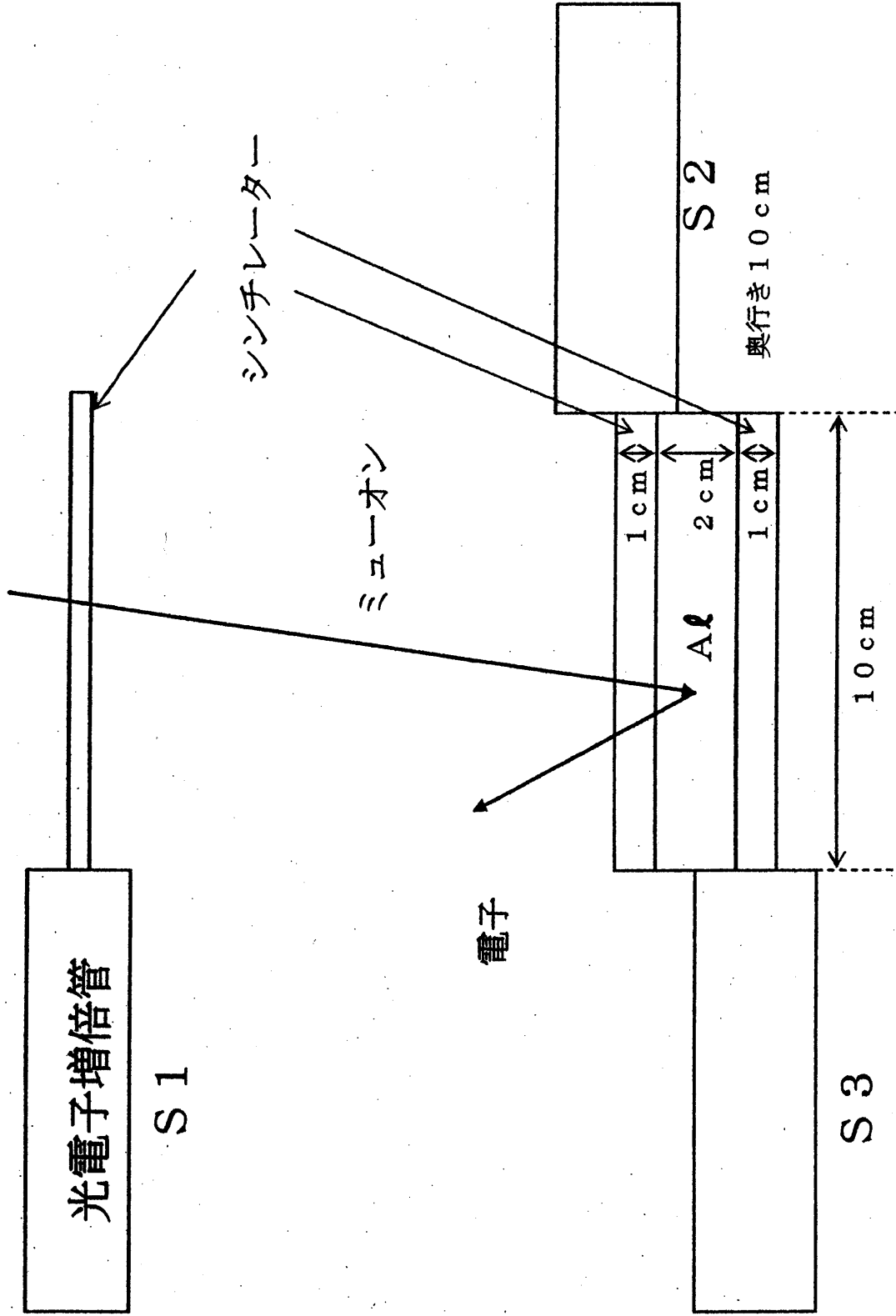


大気中での宇宙線の反応



π 中間子の崩壊

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- π^+ の角運動量 $L = 0$

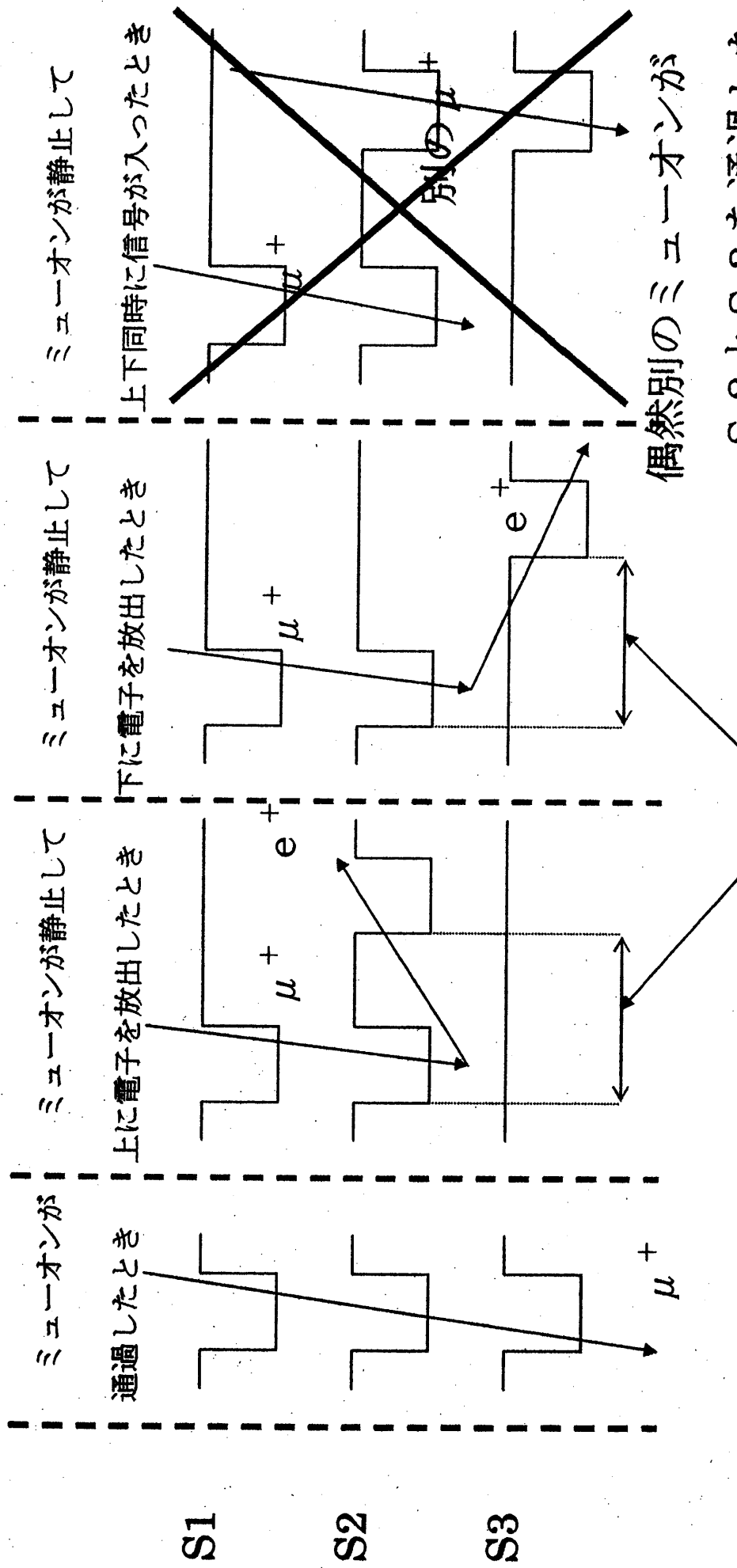


ミュオン静止・崩壊測定装置図

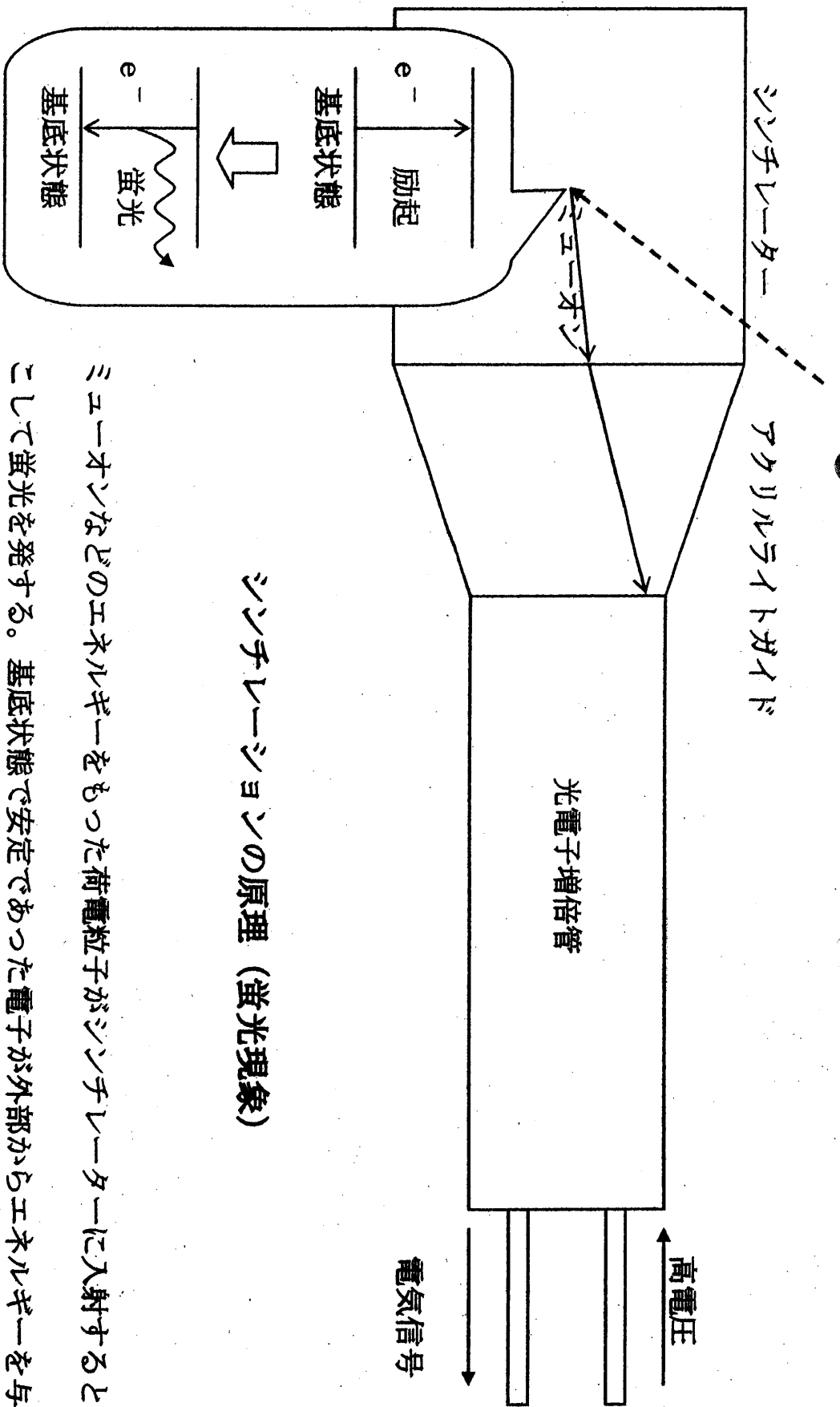
S1とS2で入射する宇宙線の方向を制限している。

S2とS3で崩壊して生成された電子を観測している。

ミューオン静止の条件



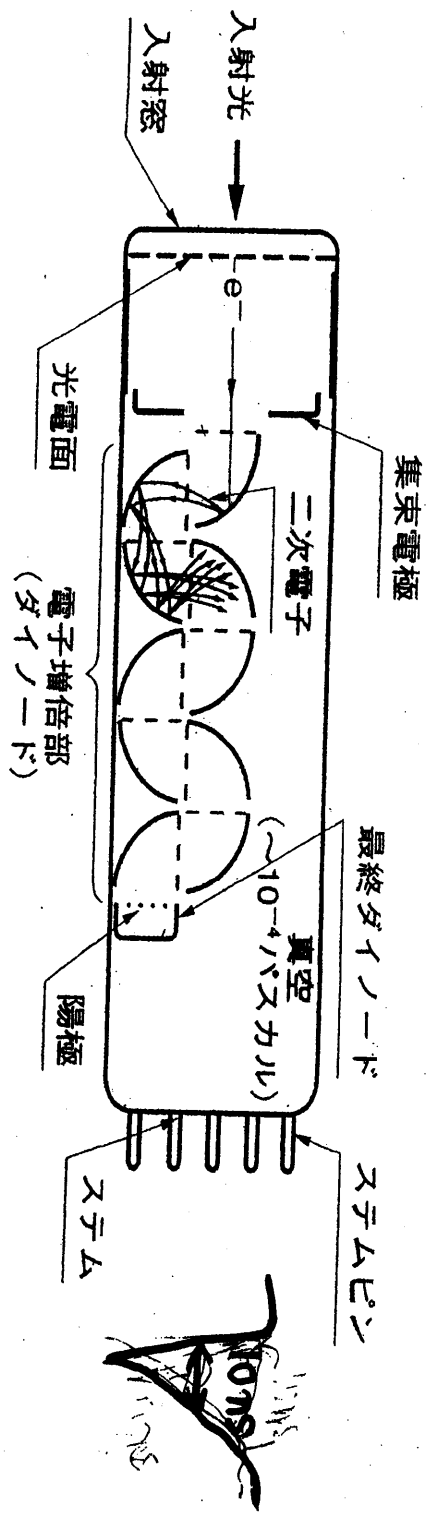
時間間隔 (寿命) を測定



シンチレーションの原理 (蛍光現象)

ミュオンなどのエネルギーをもった荷電粒子がシンチレータに入射すると電離を起して蛍光を発する。基底状態で安定であった電子が外部からエネルギーを与えられることでエネルギーの高い軌道に励起される。電子はある短い時間でもとの安定した基底状態へと戻る。このときにその差分のエネルギーを蛍光として外に発する。

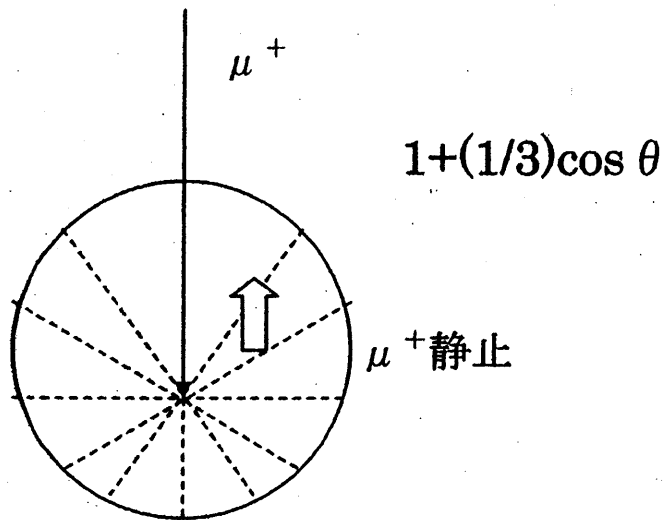
ヘッドオン型光電子増倍管(ボックス型ダイノード)の断面図



光電子増倍管の仕組み

光を光電効果を用いて電子へと変換して、高電圧で加速し、金属面にぶつけて二次電子を放出させて電流を増幅させる。これを12段階にわたって繰り返すことにより電気信号を取り出すことができる。なお、光電面にはバイアルカリを用い、量子効率約15%である。増幅率 $10^4 \sim 10^6$ 倍程度。

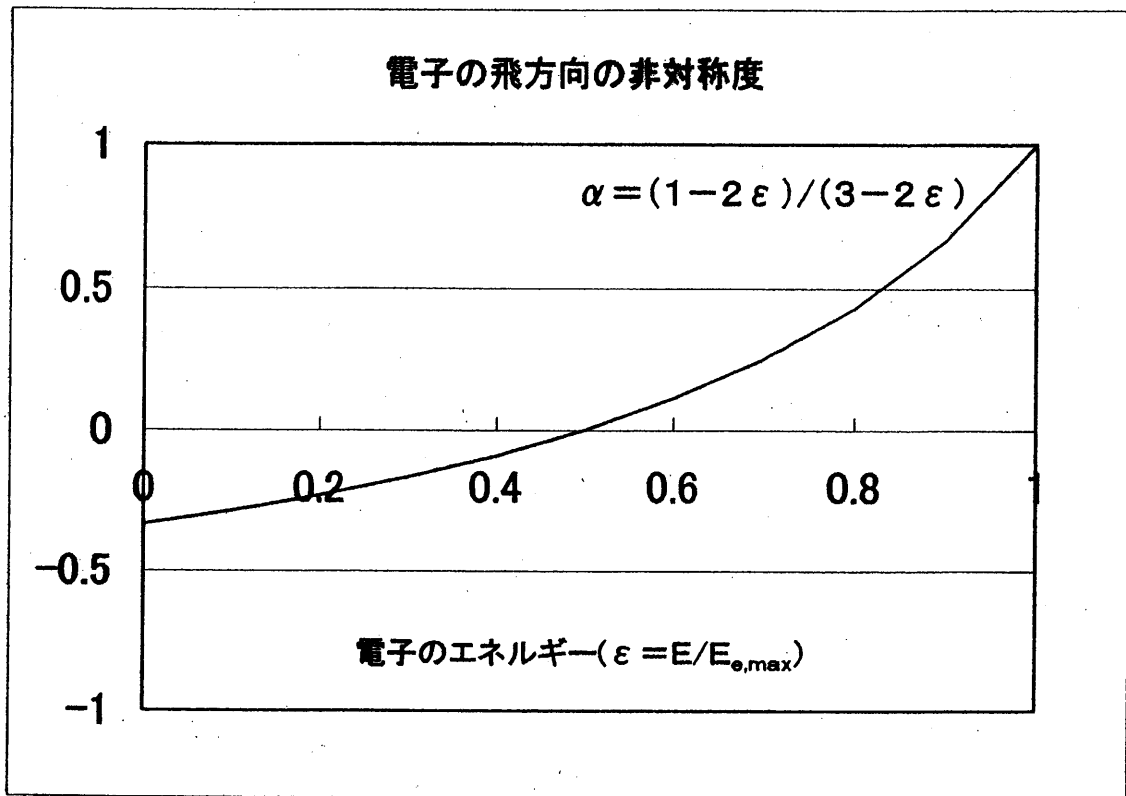
$$2 \varepsilon^2 (3 - 2 \varepsilon) (1 - \alpha \cos \theta) \sin \theta d\theta d\phi / 4\pi$$



ミューオンが静止するときの様子

太い矢印はスピンを表し、矢印は進行方向を示す。

ミューオンが大気中で静止するときの図を示す。進行方向に対して反対向き（左巻き）のスピンを持って静止する。また電子の放出方向にスピンをもっていることが図を見てわかる。進行方向とは逆向きにもっとも多く電子を放出しやすい。この割合は放出される電子のエネルギーによって異なる。



ミューオンが崩壊する際に放出される電子の飛方向の非対称度と電子エネルギーの関係である。

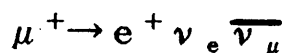
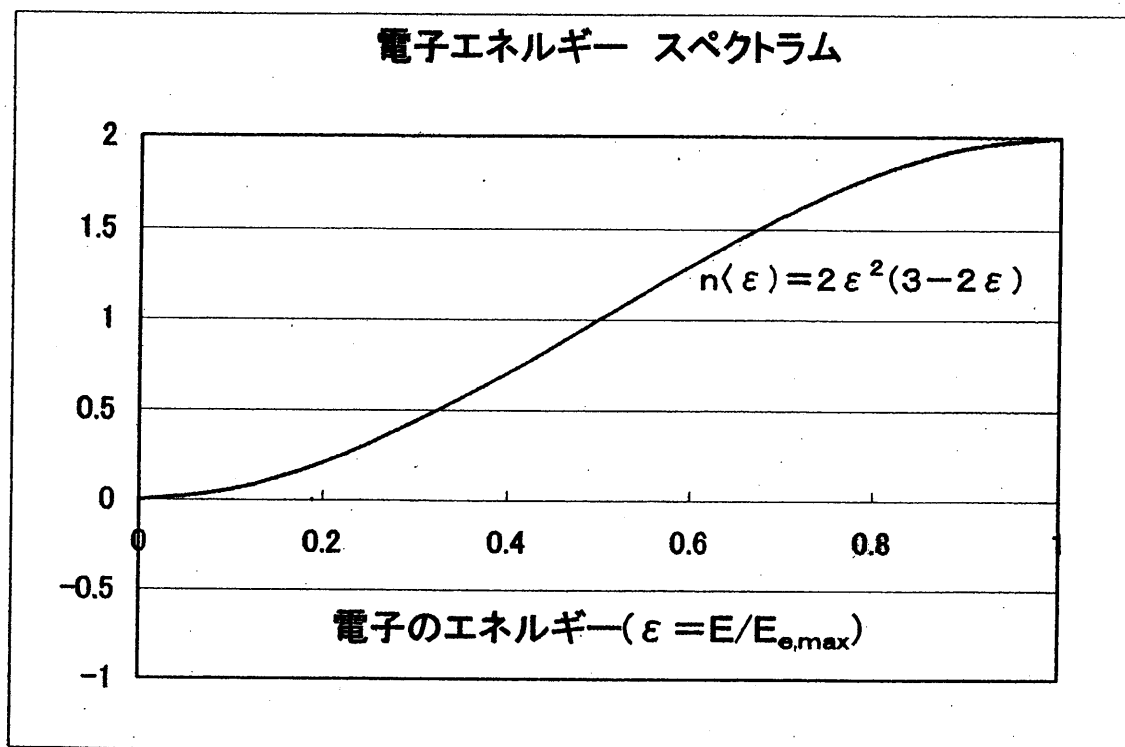
飛方向の非対称度Aは次のようにあらわす。

$$A = (N_{上} - N_{下}) / (N_{上} + N_{下})$$

$N_{上}$: 電子が上に放出された数

$N_{下}$: 電子が下に放出された数

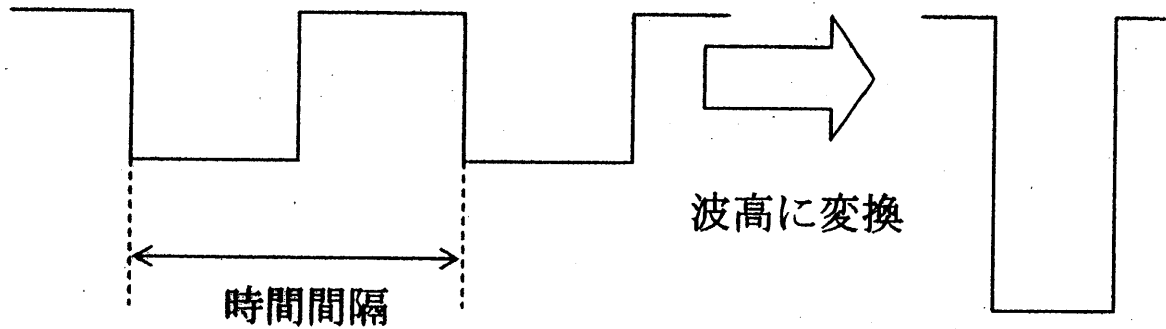
このグラフから電子が最大のエネルギーを持って放出されるときは、ミューオンの進行方向とは正反対に放出されることがわかる。



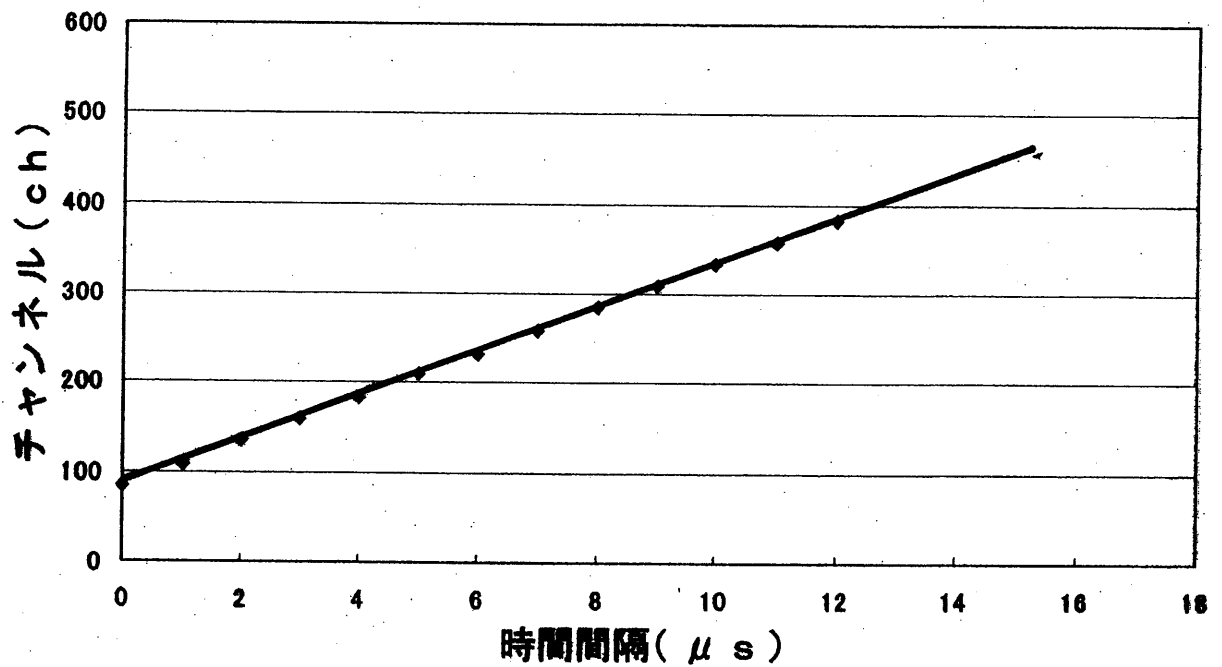
X軸には電子のエネルギーと放出される電子の最大エネルギーの比をとった。したがってX軸の範囲は0から1までとなっている。

電子が最大で放出されるときはミューオンが崩壊するときに、2つのニュートリノが1方向に放出され、電子がその反対方向に放出される時、電子は5.3 MeVのエネルギーをもって放出される。

時間の測定法



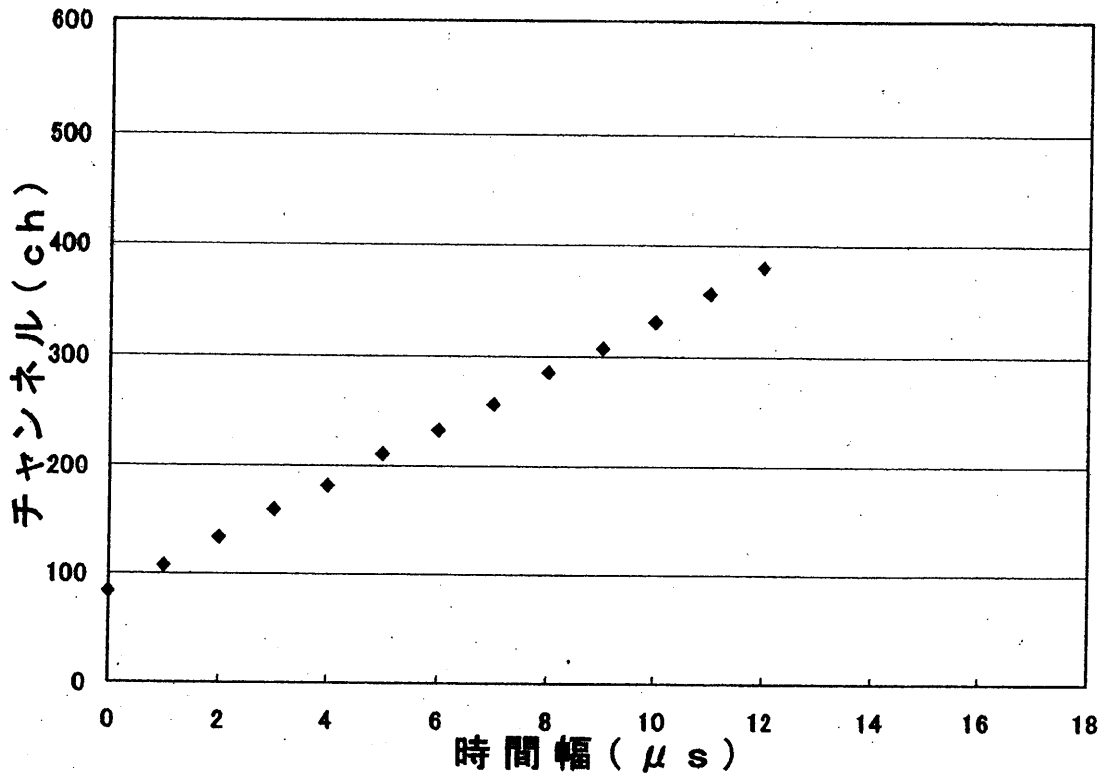
時間波高変換機の設定



直線から1ch当たりの時間間隔を測定

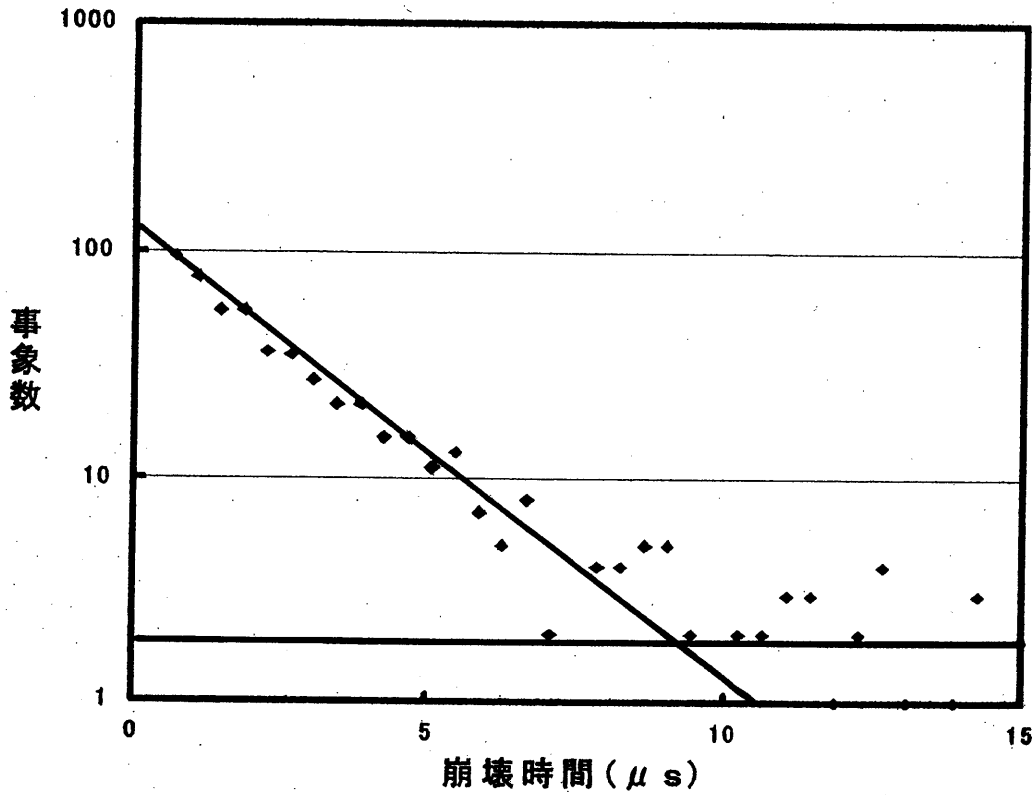
$$0.0403 \mu s / ch$$

時間波高変換機の設定



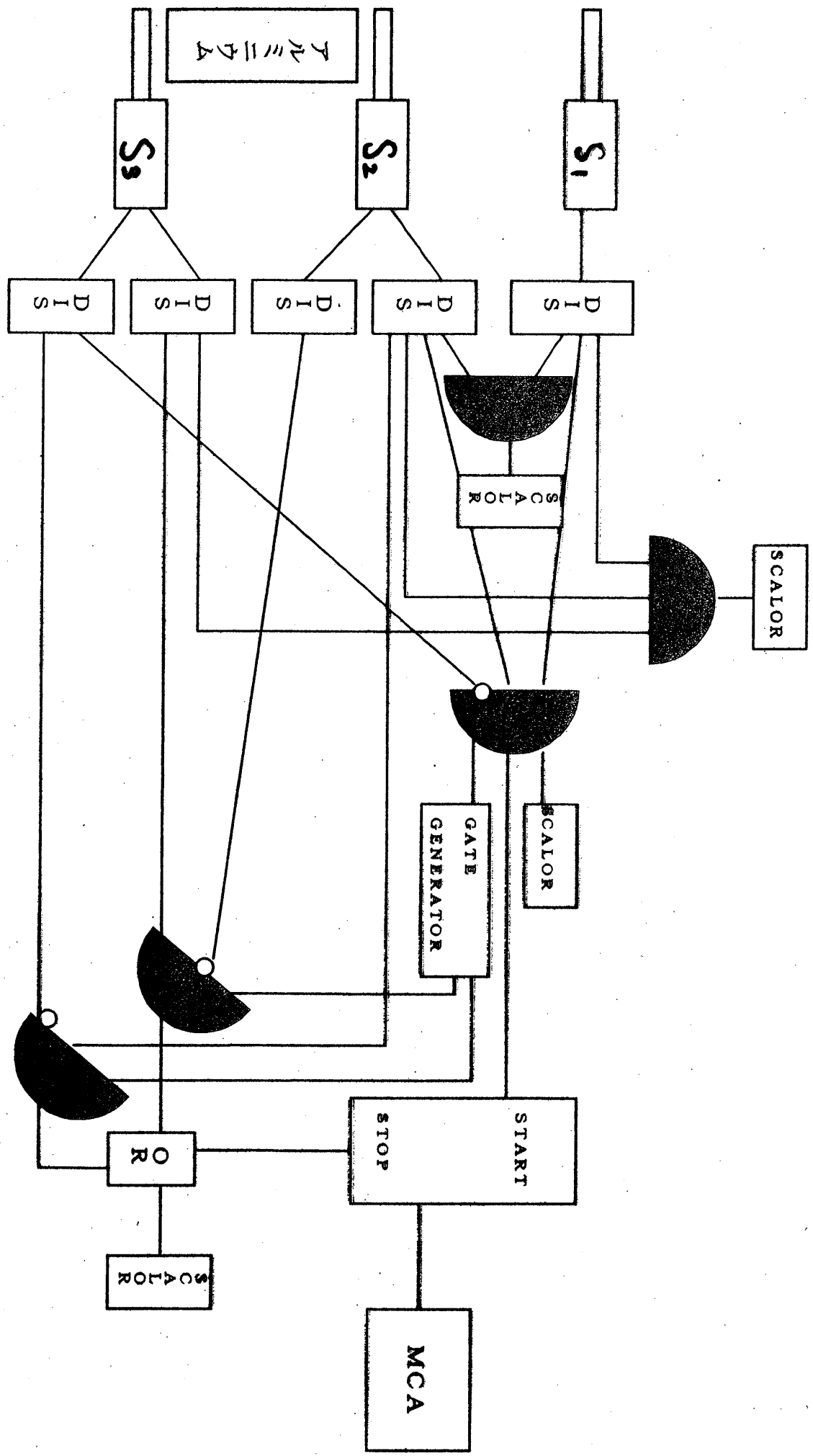
時間波高変換機は、時間の間隔をパルスの高さとして出力する機能をもった装置である。この波高を測定する装置が波高分析機という装置で、これにその時間幅に対応するチャンネルが表示される。上図は時間幅 (μs) に対する波高分析機の示すチャンネル数である。

ミューオンの崩壊時間



直線はミューオンの寿命 ($2.2 \mu\text{s}$) を示している。

BG は 1.8 であり、グラフの下に示す。



ミューオンの偏極度の測定

上方向に偏極した正ミューオンからの電子のエネルギー分布と
方向の角分布

$$2 \epsilon^2 (3 - 2 \epsilon) \{ 1 - \{ (1 - 2 \epsilon) / (3 - 2 \epsilon) \} \cos \theta \} \\ \sin \theta d\theta d\phi / 4\pi \quad \text{ただし } 0 \leq \epsilon \leq 1$$

電子エネルギーで積分すると

上向き	下向き
$1 + \cos \theta / 3$	$1 - \cos \theta / 3$

$$\text{偏極度 } P = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow})$$

N_{\uparrow} : 上方向のスピンをもっている電子の数

N_{\downarrow} : 下方向のスピンをもっている電子の数

角分布

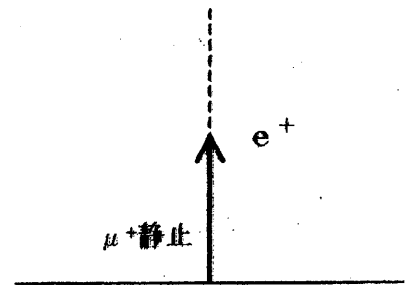
$$1 + p \cos \theta / 3$$

電子飛方向の上下非対称度

$$A = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow})$$

N_{\uparrow} : 上に入った電子の数

N_{\downarrow} : 下に入った電子の数



積分可能な場合

角分布 $1 + P \cos \theta / 3$ において θ は 0 でアルミニウム

も非常に薄く、逃げ出す電子がないようにシンチレータを

無限に大きくした場合、電子が上方または下方に来る確率を

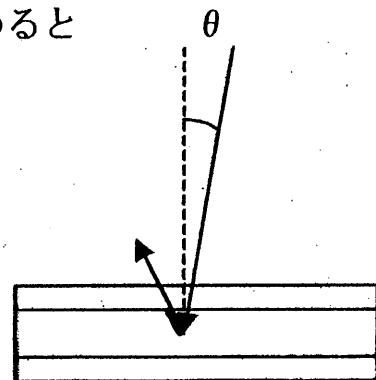
それぞれ積分して求めて A の式に当てはめると

$$P = 6 A$$

という関係が導かれる。

実際の場合

- 入射角分布を $\cos^2 \theta$
- 正ミューオンが一様に $A1 (10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm})$ 中で止まる
- 電子がアルミニウム中で失うエネルギーの割合を $2 \text{ MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2)$



モンテカルロシミュレーションにより偏極度を求める。

その結果 69% の電子がつかまることがわかり、

$$P = 5.18 A$$

となった。

結果

偏極度の測定においては

上方に入射した電子の数は 168個

下方に入射した電子の数は 107個

よって $A = 0.22$

飛方向非対称性の誤差の求め方

N_{\uparrow} 、 N_{\downarrow} は二項分布に従うことから

$$N_{\uparrow} = n p \pm \sqrt{(n p q)}$$

$$N_{\downarrow} = n q \pm \sqrt{(n p q)}$$

$$\sigma A = \sqrt{(2 n p q)} / n$$

ただし n : 上下に入射した電子の総数

p : 上方に入射する電子の割合

q : 下方に入射する電子の割合

となり $A = 0.22 \pm 0.042$ 、偏極度 $P = 5.18 A$ より

$$P = 1.14 \pm 0.22$$

この結果より宇宙線ミュオンはほぼ100%偏極していることがわかった。

まとめ

10日間で57万個の宇宙線を観測

宇宙線強度は0.59/s

ミューオンが止まる割合はほぼ 10^{-3} /s

以上の実験結果から偏極度Pは

$$P = 1.14 \pm 0.22$$

となり、ほぼ100%偏極しているといえる。

したがって、地上で観測される宇宙線ミューオンは π 中間子から放出されたものであるといえる。