

マルチパラメータ・マルチチャンネル波高分析器の製作

中 本 俊 輔*, 河 合 吉 文*

Multi-parameter Multi-channel Pulse Height Analyzer

Shunsuke NAKAMOTO* and Yoshifumi KAWAI*

(Received September 19, 1968)

We have designed and fabricated a two-parameter multi-channel pulse height analyzer for nuclear experiment. All the circuits are transistorized and the power supplies for them are +12, +6, -6V. The total number of channels is 99×99 , and the coincidence widths are 0.2, 0.4, 1.2, and $2\mu\text{s}$. The analyzable maximum input pulse height is +4.5V. The dead time is almost occupied by the printing time, being 0.2s.

The input pulses are stretched for $5\mu\text{s}$ and are put into the pulse height to time converter (PHTC) circuit when a coincidence may happen. The coincidence pulses are digitized by the oscillator of 25KC. The output of the PHTC circuit is read out by the dekatron scalers and the printer. Since the data is handled by the direct read-out system, the analyzer can be designed very simply and fabricated at a less cost.

The analyzer has been tested by using γ -rays from the sources of ^{22}Na , ^{60}Co , and ^{137}Cs , and proved to be quite satisfactory so long as the coincident rates are much low compared with the printing speed.

We are planning to fabricate the four-parameter analyzer as an extension model of the present one in the near future, which can make coincident counts very few.

1. 序 論

核実験の分野においては、反応に関与する粒子の種類、エネルギー、角相関、などを測定するために種々のエレクトロニクス技術を必要とする。逆にエレクトロニクスが放射線計測を支配するといっても過言でない。その中で1940年代の終りに出現したマルチチャンネル波高分析器は核実験の分野を飛躍的に、精密、迅速、簡素化し、また現代のエレクトロニクスの進歩によって手軽な測定器となりつつある。しかも、より高度な操作が可能になり、2現象を同時に分析することもできる。しかし2現象の相関は根本的に扱えない構造になっている。これは測定座標が1次元のためである。2現象の相関を測定するためには2次元座標表示、3現象の相関には3次元座標表示が必要である。海外ではすでに、記憶回路内蔵、ブラウン管表示の2パラメータ・マルチチャンネル

波高分析器や、オンライン化したマルチパラメータ・マルチチャンネル波高分析器が製作、^(1~3)市販**されている。これらの分析器は、例えば

- (1) 核分光学におけるベータ、ガンマ線を使つての核構造解析
- (2) 核分裂における2体、3体分裂の解析
- (3) 粒子選別におけるdE, E, およびその角相関の解析などに応用される。

ここでは主にガンマ線角相関、dE, E測定などの学生実験にも使用でき、しかも極度に簡素化した2パラメータ波高分析器の製作を行なってみた。この分析器の特徴は、電源の一部、および計数管を除いてトランジスタを使用しているため、小型、軽量であること、記憶なしのプリンタ読み出しであるため、安価なこと、A-D変換は電荷放電式であるため、回路が簡素化されているこ

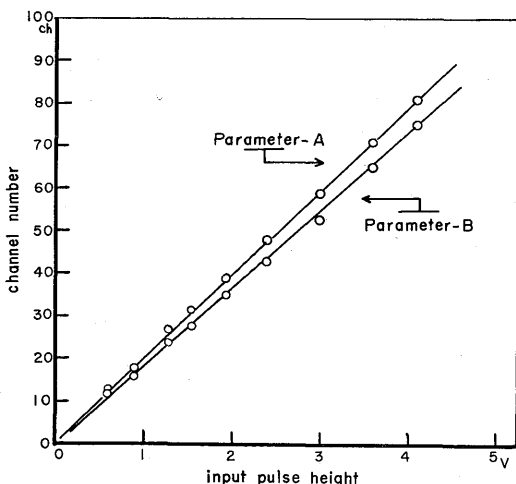
* 本学工業物理学科 (Department of Engineering Physics)

** 例えば Nuclear Data Inst. (U.S.A)
Victoreen Inst. (U.S.A)

つ正の矩形波に整形され、ゲイト・シグナルとなってリニア・ゲイト回路に入り、リニア・ゲイトをオープンにする。同時に $2\mu\text{s}$ 巾のパルスの後端微分によって、一方はフリップ・フロップ回路に入り、ブロッキング・ゲイトをオフにする。これによって入力パルスの分析が終了するまで後続パルスの遮断を行なう。他方は整形されてプリント指令用パルスとなる。プリント指令は時間的に入力パルスの分析前に出されることになるが、プリンタの打ち出し時間の遅れを考慮すると問題にならない。リニア・ゲイトがオープンされると、ストレッチされた入力パルスは $2\mu\text{s}$ の巾をもってリニア・ゲイトを通過し、パルス高-時間変換器 (PHTC) に入る。PHTC によってパルス高が時間巾に変換され、発振器出力とミキサ回路によってデジタル化され、これはデカトロン計数管に入って計数される。この計数管出力はプリンタの印字用コネクタに連結され、プリント指令用パルスによって印字される。プリンタの印字が終了すると、内蔵されたリレイの接点信号がパルス化され、計数管をリセットし、同時に $20\mu\text{s}$ の正の矩形波に整形され、その後端微分によってリセットパルスになる。このパルスはフリップ・フロップを反転し、ブロッキング・ゲイトをオンに戻す。これで同時にパラメータ端子に入った入力パルスの分析を完了する。その間、約 0.2s であり、これが不感時間となる。

2.2 リニアリティおよび分解時間、不感時間

入力パルス高とデジタル量、すなわちチャンネル数の比例関係を第3図に示す。パラメータAはBに比べて勾配が急であるが、これは回路素子の交換によって変化でき、現在のところ不便を感じることはない。入力が



第3図 パルス高とチャンネル数のリニアリティ

4.5V を越えるときリニアリティが悪くなるため、入力の最高は 4.5V に押える。この原因は回路構成上、さけ難いものである。発振器の発振周波数は現在 25KC であるが、これはデカトロン計数管の計数能力の最高値に近い。パラメータA, Bのチャンネル数は各々、 $20\times$ パルス高 (単位: V), および $18\times$ パルス高 (V) で表わされ、誤差は ± 1 チャンネル以内である。

分解時間はディスクリミネータ回路の出力であり、コインシデンス回路の入力であるパルスの中によって決まる。理論的にはパルス巾を τ とすると 2τ が分解時間になる。ダブル・パルサーによる試験、および ^{137}Cs のガンマ線のランダム・コインシデンスによる試験によって測定した結果、 τ は $0.2, 0.4, 1.2, 2.0\mu\text{s}$ であった。一方、不感時間は、コインシデンス数とプリンタによる分析数の比較より決定でき、 0.2s となる。これはプリンタの印字速度と一致する。

3. 回路

3.1 パルス・ストレッチャ

入力パルスは前段の出力特性によって種々の波形が考えられるが、ここでは入力が正パルスで、パルス巾が $0.3\mu\text{s}$ 以上であればピーク値を $5\mu\text{s}$ ストレッチした。これはコインシデンスによって $2\mu\text{s}$ のゲイト・シグナルを出してリニア・ゲイトをオープンしたときの時間遅れが入力パルスの分析に誤差を生ずることを防ぐためである。

第4図にストレッチャ回路を示す。入力パルスは分岐され、一方は Tr1 に入り、他方はディスクリミネータ回路に入る。ディスクリミネータ回路を経由して整形されたパルスは Tr26 に入り、Tr27, Tr28 によるユニバイレータで $5\mu\text{s}$ 巾の正の矩形波に再整形される。このパルスを Tr29 で反転し、FET トランジスタ, Tr2 ソースに入れて、Tr1 の遮断パルスとする。Tr1 の入力パルスは、Tr2 によって遮断されなければ単なるエミッタフォロアとして、次段のダブルエミッタフォロア, Tr3, Tr4 に結ばれるのであるが、Tr2 が遮断されると、コンデンサ C_1 に電荷が蓄えられた状態が続き、Tr3 の入力としては Tr2 の遮断時間に相当したパルス巾をもつ。従って Tr4 の出力パルスは高さが入力パルスに比例し、巾が $5\mu\text{s}$ になる。このパルスは次段のリニア・ゲイト回路に入る。

この回路の特徴は Tr2 が FET であるため、遮断電流が小さく、また Tr3 への入力インピーダンスが大きくなっているため、波形が忠実にストレッチされることである。簡単な回路を試みたがストレッチャとして充分使用できる。なお、このストレッチャ出力は可変抵抗によ

れると、スイッチが切れ、大きな抗抵 R を通して放電を行なうものとする。そして放電電圧が E_0 に等しくなるとコンデンサの放電は停止する。このとき、放電は

$$E = E_0 \exp(-t/RC)$$

で行なわれる。放電時間 t を短かくして、 $RC \gg t$ とすると $E = E_1(1 - t/RC)$

で表わされる。 $E=E_0$ で放電が停止するようにすると

$$t_1 = RC(E_1 - E_0)/E_1$$

の時間で放電が停止する。 $E_1 - E_0 = \Delta k \cdot E_0$ Δk :微小
とすると $t_1 = RC\Delta k / (1 + \Delta k) \approx RC\Delta k$

となり、 t と Δk がある範囲で比例することになる。すなわち、 E_0 を基準電圧とし、充電電圧 E_1 を E_0 に近くしてこれを大きな RC で放電してやると、 E_1 の E_0 までの放電時間は $(E_1 - E_0)$ に比例すると考えられる。この放電時間を発振器で計数してディジタル化を行なうと、 $A-D$ 変換が成立する。

製作した PHTC の回路を第 7 図に示す。静状態では Tr9 ベースはダイオード SD46, SD103 によって 0V に保たれ、Tr11 ベースも Tr12 によって 0V に保たれている。Tr9, Tr10, Tr11 は Tr12 によってフィードバックを施した差動増幅器になっている。リニア・ゲート回路からの巾 $2\mu\text{s}$ の正パルスは Tr9 ベースに入り、Tr12 を通してコンデンサ C_2 にピーク電圧を蓄える。入力パルスがピーク電圧をすぎても、 C_2 の電荷によって Tr10 エミッタの電圧が上っているため、Tr9, Tr12 は遮断され、Tr11 ベースに入るダイオード SD103 は

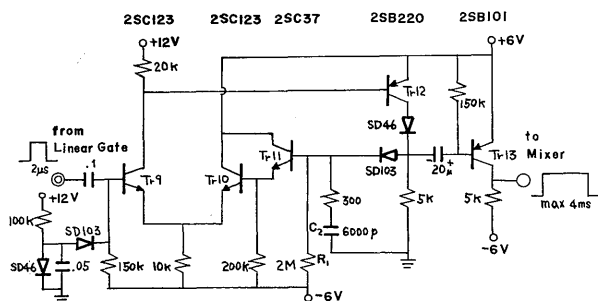
逆バイアスされる。このとき C_2 の電荷はほとんど R_1 を通して $-6V$ に向って放電してゆく。放電が進み、Tr11 ベース電圧が元の電圧に戻ると、Tr9, Tr12 は再び導通して静状態に戻る。Tr12 コレクタには入力パルス高に対応する時間巾をもつ負の矩形波が生ずる。この矩形波を Tr13 で反転、整形を行ない、出力はミキサに導かれ、同時にミキサに導かれた発振器出力によってデジタル化する。

3. 4 ディスクリミネータ

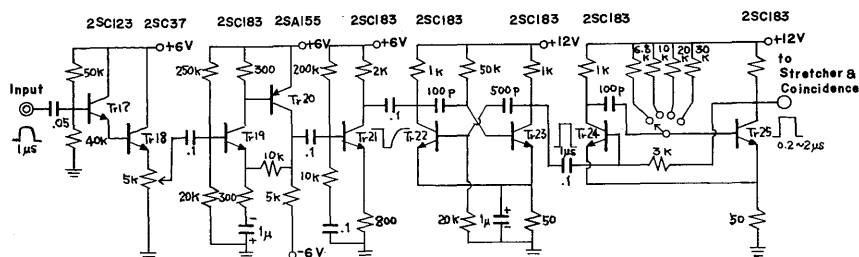
入力パルスの内、一定波高以上のものを矩形波に整形し、一方はストレッチャ回路に、他方はコインシデンス回路に入るようにする。これは放射線計測で分析するパルスの中には、低波高部分を遮断しておいた方が便利なのが多いためである。ディスクリミネタ回路を第8図に示す。入力は Tr17, Tr18 のダブルエミッタフォロアを通過し、一定波高以上のものを Tr19, Tr20 のブートストラップ増巾器によって増巾し、Tr21 で反転、増巾した後、Tr22, Tr23 のユニバイブレータに入れ、巾 $1.2\mu\text{s}$ の矩形波に整形する。このパルスを改めて、Tr24, Tr25 のユニバイブレータでパルス巾を4段切り換えにして、その出力をコインシデンス回路、およびパルス・ストレッチャ回路に入れる。ディスクリ・レベル用の可変抵抗、およびコインシデンス巾切り変えスイッチは前面パネルに具えている。なお、コインシデンス巾は 0.2, 0.4, 1.2, $2.0\mu\text{s}$ である。

3. 5 コインシデンス

第 9 図は現象の同時性を判定するコインシデンス回路である。パラメータ A, および B のディスクリミネータ回路からの正の矩形波は、各々 Tr32, Tr33 のエミッタフォロアを通り、ダイオード SD46 を出た点で加算される。この加算パルスは Tr34 エミッタで出力調整を行なった後、Tr35 で反転して負パルスにしてブロッキング・ゲイト、およびコインシデンス・モニタ用増巾器に導かれる。なお、Tr34 での出力調整は単独パルス入力でも、加算される部分に出力パルスが現



第7図 パルス高一時間変換器 (PHTC) 回路図

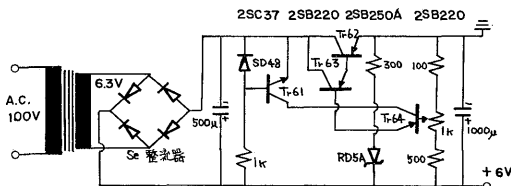


第8図 ディスクリミネータ回路図

負パルスであるが、これの整形に SCR 素子を使うと回路構成が簡単になる。終了信号は SCR(Tr51) のゲートに入ると、静状態でオンであった SCR をオフ状態にする。そのため、SCR アノードの電圧は 0V から +10V に移る。その電圧によって $6\mu\text{F}$ のコンデンサは $5\text{k}\Omega$ とツェナ・ダイオード RD5A を通して充電される。そして SD46 アノードの電圧が上り、順バイアスに戻ると SCR は再びオンになる。この場合、アノードには +10V、巾 20ms の正の矩形波が出る。SCR はスイッチング素子としてすぐれているため、リレーのチャタリングに影響されずに長い時間巾のユニバイプレータ回路を作ることが可能である。この出力パルスは後端微分されて、フリップ・フロップ回路に入る。

3. 9 電 源

電源はトランジスタ回路用に +12, +6, -6V, デカトロン計数管用に +380, +90, +30V を製作したが、安定に働いている。第13図にその一部を示す。



第13図 トランジスタ用電源回路図 (+6V)

3. 10 雑

以上は回路の主要部分であるが、これらの回路の接続には、トランジスタのインピーダンスの関係から、おおむねエミッタフォロアを使用している。なお、波形整形は、コレクタ接地、ユニバイプレータ回路を使用した。また、微分回路はRC回路とダイオードを使った。電源と回路の接続はチョークコイルと $10\mu\text{F}$ 程度の電解コンデンサを直列、並列に使用して、不要パルスの発生を防いでいる。発振器は現在、周波数 25KC のマルチバイプレータを使用しているが、これは安定性の点で問題があるが、経費の関係でやむをえなかった。将来は低周波用水晶発振器に変えたいと思っている。なお、末尾に回路図と使用トランジスタを示す。

4. 分析器による放射線の測定

分析器の試験のため、ガンマ線源を使って若干の測定を行なってみた。パルス発生器によるリニアリティの試験によってガンマ線スペクトルは、入力波高の最高値に注意すれば測定可能である。この試験において分析器の動作がほぼ満足できるものであることが分った。動作上注意したのは次の点であった。

(1) ランダム入力であるため、不感時間中の入力完全に阻止できるか。また、不感時間解除の直後に入るパルスによって回路が窒息しないか。

(2) 同じくランダム入力でランダム波高のパルスが大量に入った場合、例えば波高の高いものを優先的に分析するようなことがなく、全く平等な確率で抜き取り分析するか。

(3) 入力パルスが大量に入ってきて、パルスのパイルアップ、アンダシュートが生じて誤差を生ずることはないか。

(4) プリンタの印字終了信号が回路にフィードバックして、回路の誤動作を生じないか。

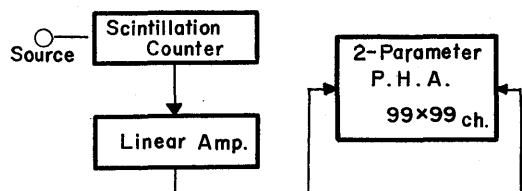
(5) 大きなパルス、例えば宇宙線によるパルスが電源部に入って、回路の誤動作を生じないか。

(6) 全回路の温度変化による安定性はよいか。

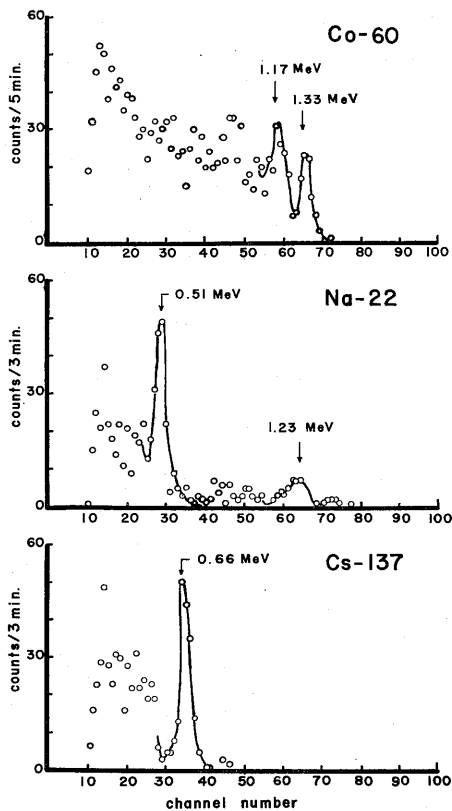
以上であったが、(5)、(6)を除いて問題はなかった。

4. 1 ^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs ガンマ線のシングルスペクトル

ガンマ線源をシンチレーション・カウンタでうけて、その出力をリニア・アンプで反転、増巾、整形した正パルスを分析器入力とする。この入力を同時に2つのパラメータ端子に分岐して入れる。このとき、当然全ての入力パルスはコインシデンスするわけであるが、分析器の不感時間が 0.2s であるため、入力パルス数がいくらか多くてもカウント数は毎秒 300 カウントを越えることはない。従って分析は多数のパルスに対する抜き取り分析になるが、計測時間を増せば統計的誤差は小さくなってゆく。ただし入力パルス数がストレッチャ回路でのストレッチ巾 $5\mu\text{s}$ より短い間隔で入るとパイルアップが必然的に生ずるようになるため、余りに多い入力パルスは避けねばならない。これはこの分析器に限った問題ではない。第14図は測定系のブロック図で、第15図はそのときの ^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs のシングル・スペクトル図である。この計測中の入力パルス数は毎秒約 500 カウントであったから、入力パルスの内 1% の抜き取り分析になる。3分程度の計測で波高分析は忠実になされていることが分る。エネルギーとチャンネル数の対応も良好である。しかし、シングル・チャンネルとしての使用はあくまで



第14図 シングル・スペクトル用測定系のブロック図

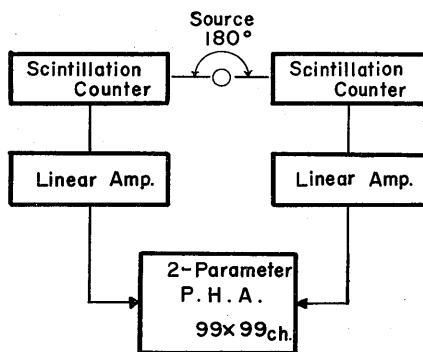


第15図 ^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs のシングル・スペクトル図

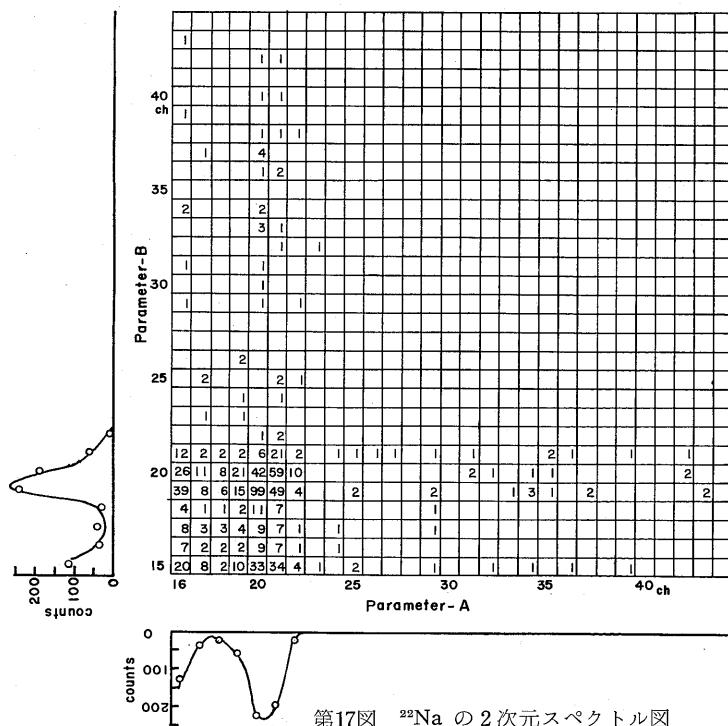
この分析器の目的でないため、定量的分析は不感時間によって制限される。その上、プリントされたデータは手で積算するため、データ整理に膨大な時間を消費する。

4. 2 ^{22}Na , ^{60}Co ガンマ線の2次元スペクトル

ガンマ線を2本のシンチレーション・カウンタで受けて、その出力を各々リニア・アンプに入れ、反転、増巾整形した正パルス进行分析器の各々のパラメータ端子入力とする。 ^{22}Na のガンマ線は、陽電子放出によるアニヒレーション・ガンマ線であるが、180度方向に0.51MeVのガンマ線が2つ同時に飛び出す。また、 ^{60}Co は1.33 MeV と 1.17MeV のガンマ線がほとんど同時にカスケード・ガンマ線として色々な角度をもって飛び出すこと



第16図 2次元スペクトル用測定系のブロック図



第17図 ^{22}Na の2次元スペクトル図

がよく知られている。 ^{22}Na , ^{60}Co のガンマ線の角相関は理論的, 実験的に確立されたものであるが, 分析器の試験には適当な線源となり得る。第16図は測定系のブロック図であり, シンチレーション・カウンタは180度方向で使用し, 分析器のコインシデンス巾は $0.2\mu\text{s}$ に選んだ。第17図は ^{22}Na の2次元スペクトル図であるが, パラメータA, B共に20チャンネルあたりにカウント数の多いことが分る。これは 0.51MeV のガンマ線の光電ピーク同志がコインシデンスすることを示している。低いチャンネルでのコインシデンスは 0.51MeV のコンプトン・ピーク同志, またはコンプトン・ピークと光電ピークのコインシデンスが大部分を占める。高いチャンネルでのコインシデンスは全くランダムなコインシデンスであり, これは各々のパラメータ端子入力パルスの積に比例して増加するものである。しかも, その大部分が 0.51MeV のガンマ線とのランダムなコインシデンスであることが分る。図の下部, 左部のスペクトルは各々のパラメータについて, チャンネルごとに積算したものである。なお, ^{22}Na のガンマ線は180度方向に出るものが大部分であるため, いくら入力パルスが少なくてもコインシデンスはひんぱんに起る。従って, 不感時間の補正が大きくなるような時には, やはり使用できない。第18図は ^{60}Co の2次元スペクトル図である。この図においても, 40チャンネルあたりに2つのピークがあることが分る。これは 1.33MeV と 1.17MeV のガンマ線の光電ピークがコインシデンスすることを示し, 1.33MeV 同志のコインシデンスが図では皆無であることを示している。 1.17MeV のガンマ線同志の部分には相当量のカウント数があるが, これは 1.17MeV の光電ピークと 1.33MeV のコンプトン・ピークのコインシデンスが大部

分を占めているはずである。従って, 角相関を確実に調べるためには, 光電ピーク同志のコインシデンスのカウント数を積算して, それにランダム・コインシデンス, 不感時間の補正をしてやればよい。図のデータではカウント数が毎秒0.2カウント程度であったので, 不感時間の補正は小さい。また, データの整理の都合上, 例えば光電ピークのみスペクトルでよいなら, 図の場合, 各パラメータの35チャンネル以下はディスクリミネータでカットしてやることもできる。なお, 図の下部, 左部のスペクトルは各々のパラメータについて, チャンネルごとに積算したものである。

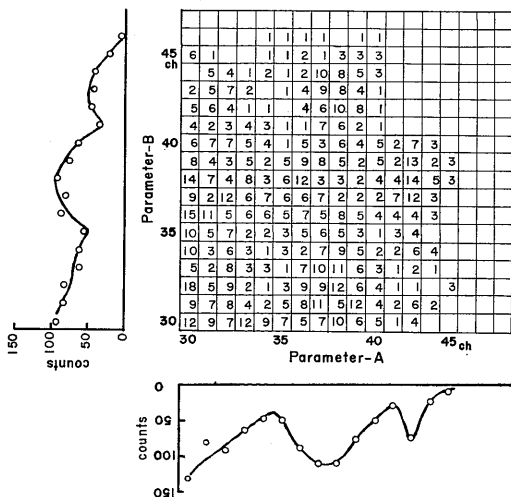
5. 結 語

分析器は現在, 2パラメータであるが, 近い将来4パラメータまで拡張する。それまでに問題点, 改良点がいくつかあるので述べる。

2現象の分析器は高度なエレクトロニクス, 多額の費用を必要とするのであるが, データ処理の問題を考えず, パラメータ数の増加と共に現象の生ずる確率の減少することを期待すると, 記憶回路なしのプリンタ読み出しにすれば, 分析器の製作は簡易, 安価になると考えられた。しかも, チャンネル数が簡単に増加できる。現在すでに 99×99 チャンネルであり, これを記憶装置にするとその複雑さ, 費用は莫大なものになる。従って, 本分析器の製作はデータから判定しても初期の目的を満足するものとなった。しかし, データ処理には相当の時間を必要とする。また ^{22}Na のアンニヒレーション・ガンマ線のように, 現象自体がひんぱんにコインシデンスするのは定量的計測が困難である。例えば, 各々の入力端子への入力パルス数の積が毎秒 10^6 カウントであれば, コインシデンス巾を $0.2\mu\text{s}$ に選んでも, ランダム・コインシデンスのみで2.5sに1回起る。そして, そのことに対して0.2sの不感時間が生ずるのであるから, 不感時間の補正は相当大きなものになり, 必然的に誤差が大きくなる。1sの実際のコインシデント・カウント数を N_0 とすると, プリントされるカウント数 N は $N = N_0 / (1 + 0.2N_0)$ となり, N_0 が増加するにつれて N は5カウントに飽和してゆく。従って N_0 の許容限界をどのようにするかは, 実験題目, ジオメトリー, スペクトルの必要部分の範囲, 誤差範囲, などによって決定しなければならない。現在の分析器の使用できる領域は, 2現象の相関測定, しかも現象の起る確率の少ないものに限られる。

分析器の改良すべき点, また改良の望ましい点を掲げると次のようになる。

- (1) 宇宙線に限らず, 大きな波高, 減衰時間をもった



第18図 ^{60}Co の2次元スペクトル図

パルスが入ると、誤動作を起すことがある。これは入力パルスが電源部にまで影響を及ぼすか、ある回路部分でフィードバックを生じているものと思われる。これは入力段にリミッタをつけるか、電源との接続に考慮を施すことで改良できるであろう。

(2) 回路を簡易になるよう製作したため、温度特性に対しては充分考慮していない。そのため、発振器周波数のみでなく、全回路で温度に対して若干の変動があるものと思われる。まだ正確に温度特性は求めているが、少なくとも発振器は水晶発振器に変えたいと思っている。

(3) もし、入力パルスが99チャンネルを越える場合、それを判定する手段がないため、デカトロンの最終段にフリップ・フロップのような簡単な判定回路をつけ加えることが望ましい。

(4) スケーラ用電源が簡単すぎるため、デカトロンの不安定になる恐れがあるので、安定化電源にするのが望ましい。

(5) ディスクリミネータは現在、パルスの小さな方をカットするだけであるが、大きな方もカットできるようにすればなお便利であろう。

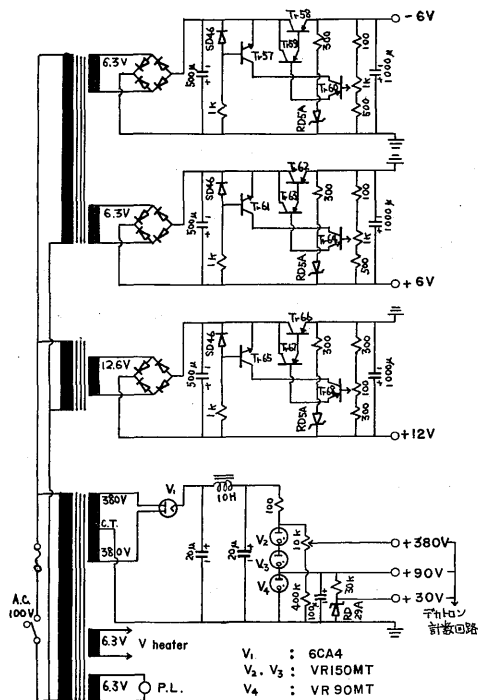
この分析器製作に対して、京都大学向坂正勝教授のご指導、プリンタ、線源などを快く借用させて頂いた向坂研究室の方々に心より感謝致します。

なお、製作はすべて中部工業大学特別研究費によるものであり、大学当局と学科主任安達竜三教授のご尽力に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) R. Littauer, L. Tepper; Nucl. Instr. and Methods, 26, 285 ('64).
- 2) S. Way, D.R. Stilwell, S.L. Jones; IEEE Trans. on Nucl. Science, NS-13, 1, Feb., 523 ('66).
- 3) C.J. Ewald, A.A. Sarkady; IEEE Trans. on Nucl. Science, NS-13, 1, Feb., 537 ('66).
- 4) R.L. Chase; Nuclear Pulse Spectrometry, ('61) McGraw-Hill.

<附2> 電源部回路図



<附3> 使用トランジスタ名 <全てNEC製>

Tr 1	2SC37	Tr35	2SC183
Tr 2	2SK12y	Tr36	2SA153
Tr 3	2SC183	Tr37	2SC183
Tr 4	2SC183	Tr38	2SA154
Tr 5	2SC123	Tr39	2SA154
Tr 6	2SC123	Tr40	2SA202
Tr 7	2SB220	Tr41	2SA154
Tr 8	2SB101	Tr42	2SC184
Tr 9	2SC123	Tr43	2SC184
Tr10	2SC123	Tr44	2SC184
Tr11	2SC37	Tr45	2SC183
Tr12	2SC220	Tr46	2SC183
Tr13	2SB101	Tr47	2SC183
Tr14	2SB101	Tr48	2SC183
Tr15	2SB101	Tr49	2SC183
Tr16	2SA204	Tr50	2SB220
Tr17	2SC123	Tr51	2SF101
Tr18	2SC37	Tr52	2SA205
Tr19	2SC183	Tr53	2SC183
Tr20	2SA155	Tr54	2SC183
Tr21	2SC183	Tr55	2SC183
Tr22	2SC183	Tr56	2SC183
Tr23	2SC183	Tr57	2SC37
Tr24	2SC183	Tr58	2SB250A
Tr25	2SC183	Tr59	2SB220
Tr26	2SB101	Tr60	2SB220
Tr27	2SC183	Tr61	2SC37
Tr28	2SC183	Tr62	2SB250A
Tr29	2SC37	Tr63	2SB220
Tr30	2SA205	Tr64	2SB220
Tr31	2SA205	Tr65	2SC37
Tr32	2SC183	Tr66	2SB250A
Tr33	2SC183	Tr67	2SB220
Tr34	2SC183	Tr68	2SB220