

気球による等方X線の観測

深尾正之*** 早川幸男* 加藤隆子**
楨野文命** 小川英夫** 田中靖郎**

概 要

1966年8月9日飛揚の気球を用いて、7 mbの高度でX線を観測した。X線検出器はNaI(Tl)シンチレータで、これをプラスチック・シンチレータで囲んで宇宙線の影響を除き、さらにX線を吸収するふたを開閉してバックグラウンドを除いた。X線のエネルギーはシンチレーション・カウンターの波高に変換され、それをデジタル化して電送した。30~100 keV領域でのX線のエネルギー分布は $E^{-(2.0 \sim 2.3)}$ dE のべき法則で表わされる。

1. ま え が き

われわれは L-3-3 [1], L-3 H-1 [2] ロケットを用いて宇宙X線の等方成分を観測し、5~40 keV 領域でのエネルギー分布を得た [3]。われわれの一人 (田中) は Delft で気球を用いて 30~80 keV の等方X線を観測し、ロケット観測の結果となめらかにつながるスペクトルを得た [4]。これらの実験結果をまとめると、等方宇宙X線の強度とエネルギー分布はべき法則は

$$j(E)dE = KE^{-\gamma}dE \quad (1)$$

$$K = 4.8 \pm 1.4 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}, \quad \gamma = 1.7 \pm 0.4, \quad E \text{ は keV 単位}$$

で表わされる。これを延長すると Ranger, Mariner で観測された γ 線 [5] のスペクトルとつながるようである。

このように強い等方X線の存在は解釈に苦しむものである。宇宙全体のX線源の寄与を集めても (1) の強度に一けた以上足りない [6]、特にスペクトルが MeV 領域までつながり、それがX線と共通の起源をもつとすれば、その発生機構を理解するには従来の常識を越えた宇宙空間の状態を想定しなければならない。

しかし γ 線の観測は実験技術的にいろいろな疑問が持たれている。むしろX線の強度とつながるから本当かもしれないと思われている程度である。それゆえ、つながりの領域である 100 keV 付近のX線観測は重要な意味をもつ。田中らがオランダで行なった実験はこれに答えるものである。しかし、観測は大気中で行なわれたから、上層大気で発生したX線が混入する。大気X線の原因として宇宙線と precipitated electrons が考えられる。これらは緯度が高くなると共に増えるが、後者については、はっきりした知識が得られていない。それゆえオランダで測られたX線が宇宙X線であるかいは再検討を要する。

* 宇宙研併任教授 (名古屋大学理学部)

** 名古屋大学理学部

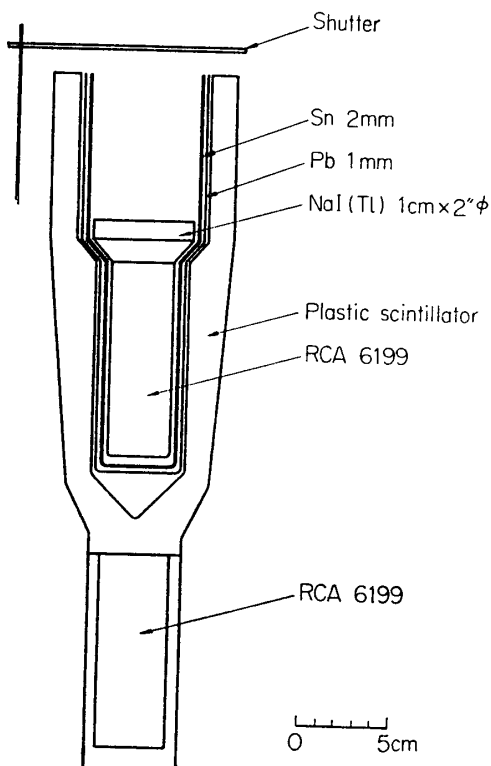
*** 京都大学工学部 (流動研究員)

そこで緯度の低い日本で行なえば、大気X線の強度は小さいと予想されるから、宇宙X線について、より信頼できる強度が得られるであろう。この目的に応ずるために、オランダで用いたものと本質的に同じ測定器を用い、日本で観測を行なった。その結果、オランダで得たのとはほぼ同じ強度とスペクトルを得た。したがって、(1)に与えた宇宙X線強度は 100 keV まで成り立つとしてよい。ただスペクトルがエネルギーと共にやや急になる傾向が見えるので、 γ 線スペクトルとぴったりつながるかどうかはまだ結論できない。

2. 観測装置

X線をとらえるのは $1\text{ cm} \times 2^\circ\phi$ の NaI (Tl) シンチレータである。これは上方からのX線以外に各種、各方向の放射線にも感じるので、次のくふうで上からのX線を選び出す。カウンターのまわりを厚さ 1 mm Pb と 2 mm Sn の筒でおおい、X線の入射する方向を限る。そのまわりをプラスチック・シンチレータで囲み。それを anticoincidence にして荷電粒子を避ける。しかし、上方の穴から入る粒子や、中性子、 γ 線が anticounter の内部でつくる放射線は避けられない。そこで全系の上部にふたを設け、これを開いたときと閉じたときとの計数の差をとれば、上の穴から入ったX線の計数が得られる。ふたは厚さ 1 mm の鉛の下に 3 mm の黄銅を重ねたもので、鉛で発生する KX 線は影響しない。ふたで発生する他の二次放射線の影響は A で示すように無視できる。

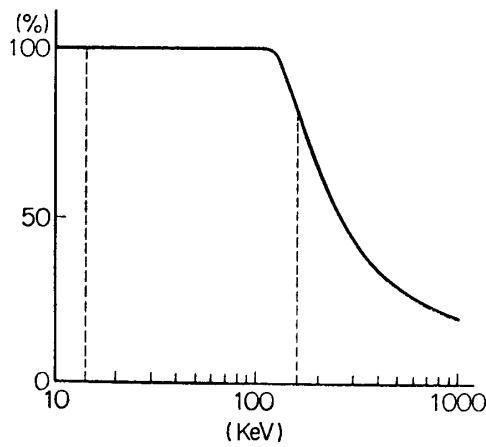
この測定装置の側面図を図1に示す。これはオランダで用いたものと本質的に同じである。以下にその各構成部分の性質を述べる。



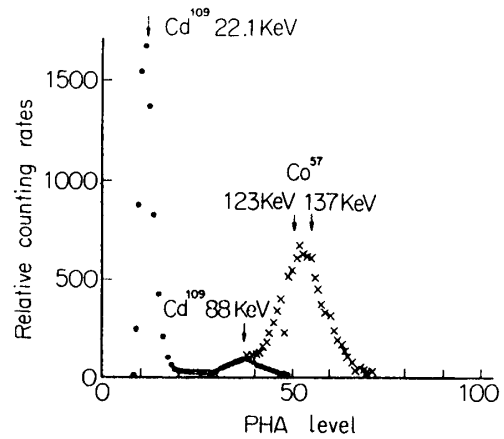
第1図 X線測定器

NaI (Tl) シンチレータ $1\text{ cm} \times 2^\circ\phi$, $30\ \mu\text{ Al}$ で封じられ、光電子増倍管 RCA 6199 の上端にアクリライトの light guide を通じて光学的に接している。NaI (Tl) の面に垂直に入射するX線に対する計数効率、図2に示したようにX線のエネルギー 120 keV まで 100% だから、これ以下のエネルギー領域では効率の補正を要しない利点がある。また垂直入射に対するエネルギー分解能は、 ^{109}Cd (22.1 keV, 88 keV) と ^{57}Co (123 keV, 137 keV) を用いて測定された。その結果を図3に示す。相対半値幅は 22 keV で約 30% でエネルギーと共に徐々に小さくなる。

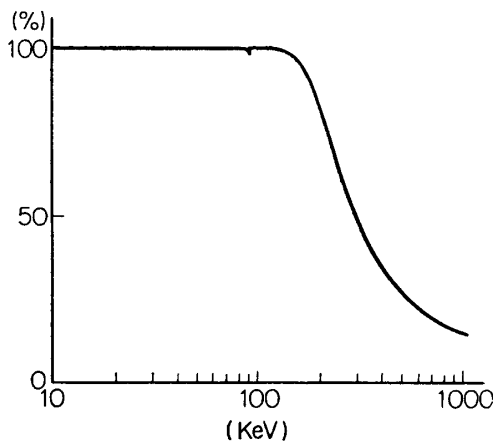
コリメーターとふた。 鉛 1 mm の内側にそれぞれ 2 mm の錫と 3 mm の黄銅を張ってある。内側の軽い物質は、鉛の K 吸収端 (88 keV) における吸収係数の谷をうずめる役をする。しゃへい効果 (1-透過率) を図4に示したが、この谷の影響が、わずかに見られる。内側の物質はまた、鉛の K 線を吸収する役をする。これは測定するエネルギー



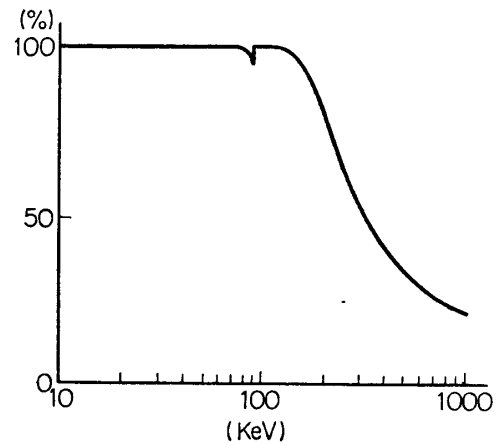
第2図 NaI(Tl) の計数効率



第3図 エネルギー分解能



(1) コリメータ



(2) ふた

第4図 シャヘイ効率

領域に入るので、除く必要があるが、銅の KX 線は 7 keV だからじゃまにならない。シャヘイも 120 keV まで実際上完全であるから、このエネルギーまでは補正が重要でない。

カウンターの方向分解能、このカウンター系の方向分解能を図5に示す。これより有効面積×立体角は

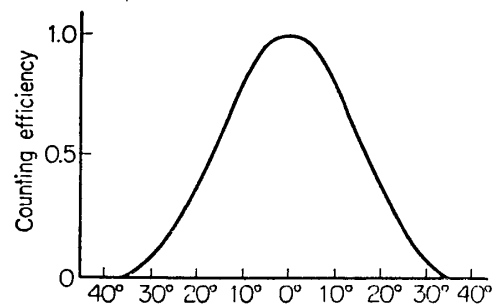
$$S\Omega = 8 \text{ cm}^2 \text{ str} \quad (2)$$

X線源を見るときには面積と半値角が問題になるので、その値も与えておく。

$$S = 20.3 \text{ cm}^2 \quad \Delta\theta = \pm 18^\circ \quad (3)$$

電気回路

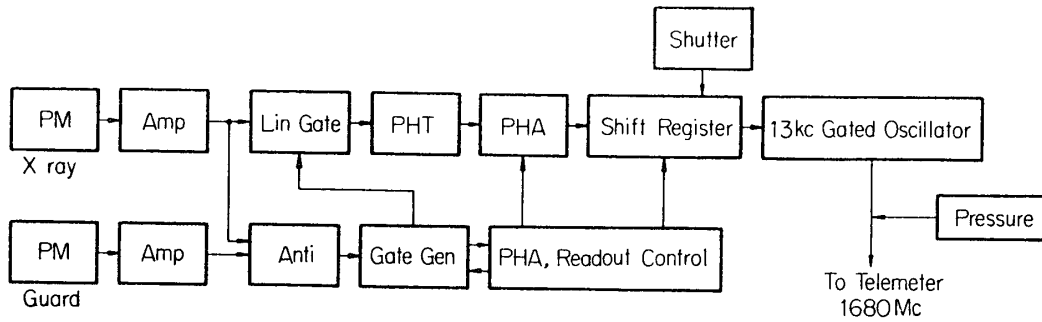
回路系の温度特性は 25°C ~ -20°C の間で測定しドリフトは 0°C のときは無視でき -15°C ではそれぞれ 5%, 10% であった。装置全体はスチロフォームで保温している。



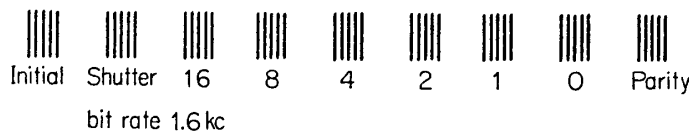
第5図 方向分解能

このように保温して中に温度計を入れて飛揚した実験より 0°C 以下には下がらないことが確かめられている。よって、ドリフトは無視できるだろう。

2つの光電子増倍管の anticoincidence によって NaI(Tl) の信号の gate を開く。波高は時間幅に変換され、それを 200 kc/s の時計の刻みで digital に測られる [7]。これによって 14.5 keV~162.5 keV を 32 チャネルに分けた。回路系の block diagram を図6に示す。



第6図 回路系の block diagram



第7図 1カウントの信号の形 (shutter は閉じているとき数字はすべて0の時の状態を示す)

情報伝達. パルス高は 6 bits, それにイニシャル・マーク, ふたの開閉, 出力のパリティを示す情報を入れ, 9 bits 一組として図7に示すような時系列にする. Bit rate は 1.6 kc/s で, S/N をよくするために, さらに 13 kc/s で振幅変調し, さらに気圧計からの信号を混合し, 1680 Mc/s の FM 送信機で送った. これを FM 受信器で受け, 図7のような信号をテープ・レコーダに記録した.

情報処理. テープ・レコーダから読み出された信号を逆にパルス高に変換し, これを TMC 100 channel 波高分析器によって読んだ. この変換回路についてはBに述べる.

3. 気球 飛揚

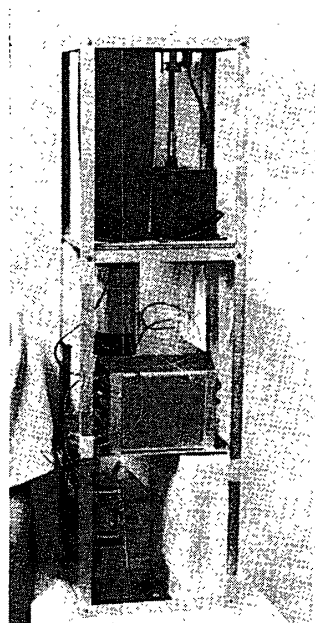
測定装置を Al わくに組みこんだのを図8に示す. これをスチロフォームでおおい, 電池その他を備えると, 全重量は 11.5 kg になる. 気球系の各部分の重量を表-1 にまとめた.

気球は茨城県鹿島郡大洋村の宇宙航空研究所大気球実験所で放球された. 放球位置は北緯 36°8' 東経 140°35' である.

放球時刻は, 1966年8月9日午前4時3分であった. 気球は容積 15,000 m³ で, 平均上昇速度 242 m/min で上昇し, 約2時間後に最高高度 33.4 km (7mb)

表-1 測定装置の重量

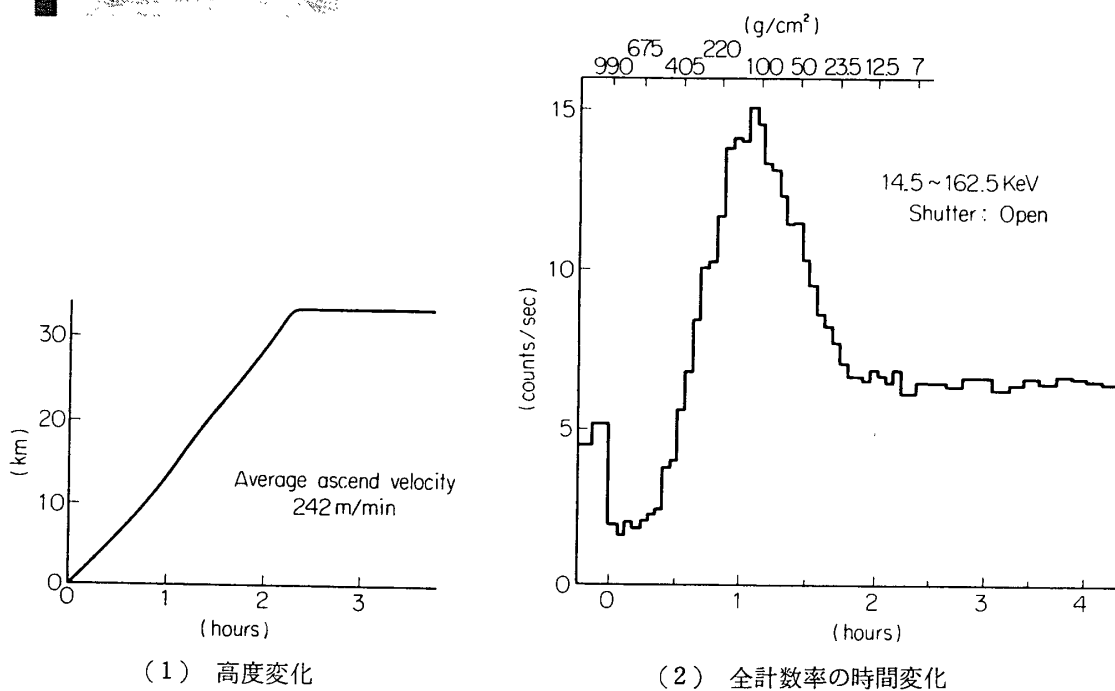
| | |
|----------|----------|
| 回路系 | 1.5 (kg) |
| X線検出器 | 2.7 |
| 電池 | 4.1 |
| ふたおよびモータ | 0.9 |
| スチロフォーム | 1.2 |
| ゴンドラフレーム | 1.1 |
| 計 | 11.5 |



に達した。その後気球は西に流れ、約1時間半後にテレメータが到達しなくなった。気球は塩尻付近に落下し、測定器は大きな損傷なく回収された。これからふたの開閉は正常に動作したことが確かめられた

放球後の高度変化および全計数率の変化を図9に示す。Pfortzer 極大を過ぎて一次線がおもな寄与になる高さに達したことがわかる。

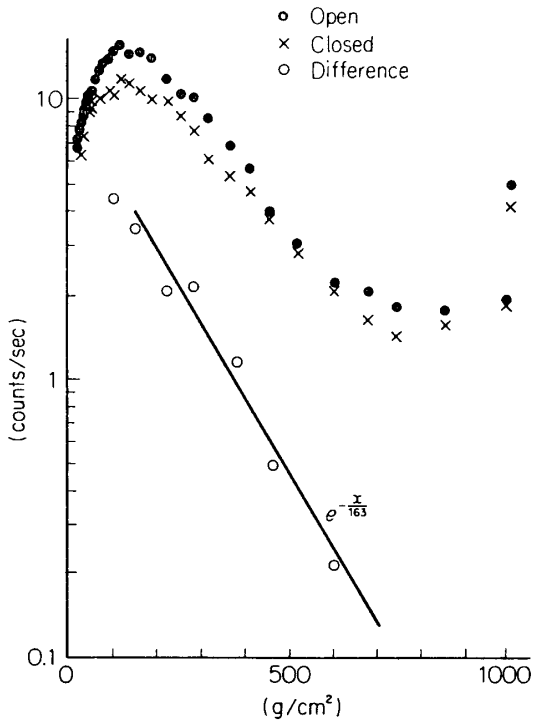
第8図 測定装置



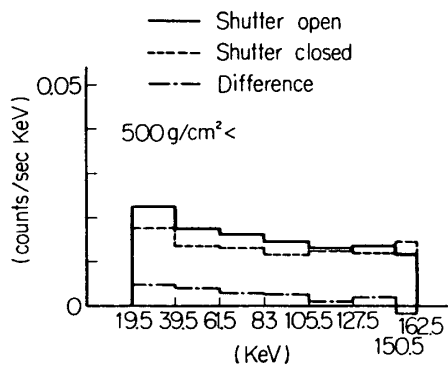
第9図

4. 観測結果

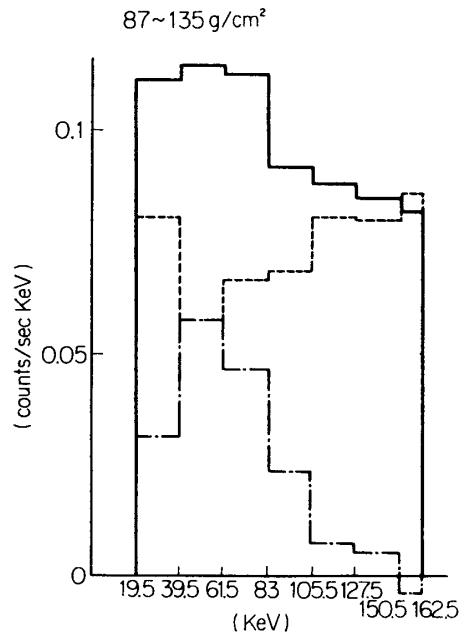
計数率と大気の深さとの関係をふた開と閉の場合について図10に示した。両者の差をとると、X線の強度



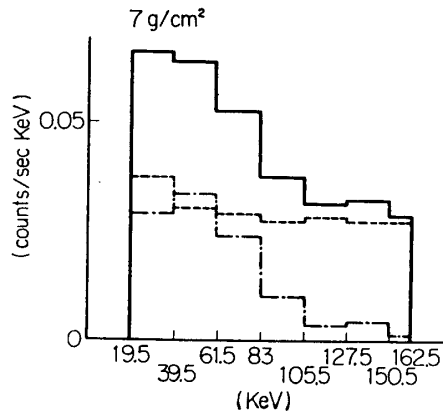
第10図 計数率の高度変化(14.5~162.5 keV)



(1) $>500 \text{ g cm}^{-2}$



(2) $87 \sim 135 \text{ g cm}^{-2}$



(3) 7 g cm^{-2}

第11図 X線のエネルギー分布

$$J_x = J_x(0) \exp(-x/L) \quad (4)$$

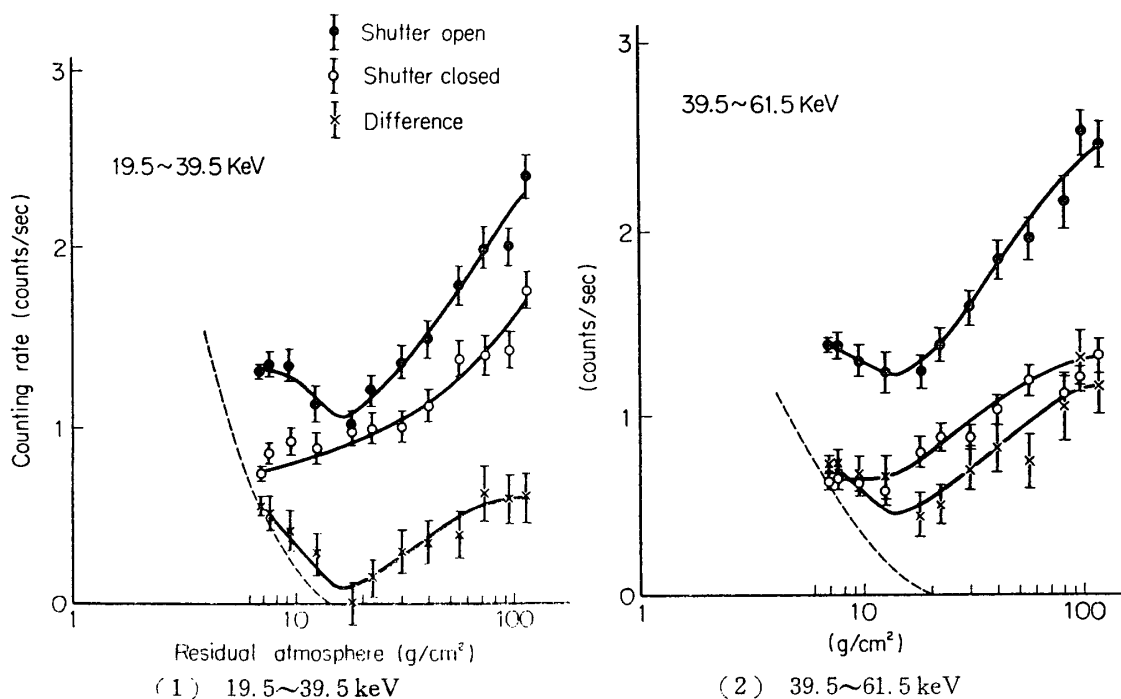
$$J_x(0) = 10.0 \text{ sec}^{-1}, \quad L = 163 \pm 43 \text{ gcm}^{-2}$$

が得られる。

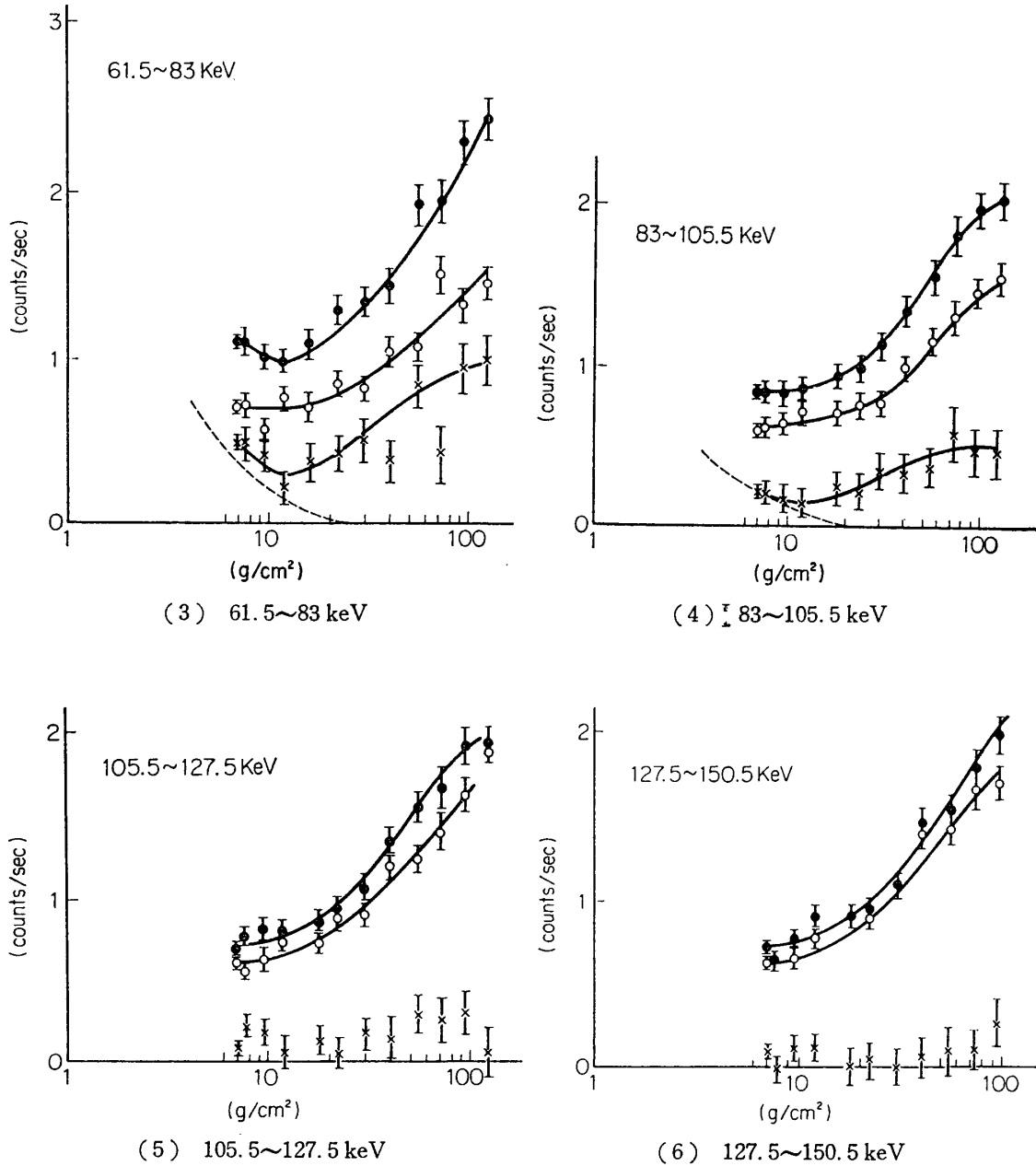
このX線がどのエネルギー範囲に対応しているかを見るため、大気の下半 ($x > 500 \text{ gcm}^{-2}$), Pfozter 極大付近 ($x = 87 - 135 \text{ gcm}^{-2}$), 最高高度 ($x = 7 \text{ gcm}^{-2}$) でのエネルギー分布を図11に示した。エネルギー範囲として $20 \sim 160 \text{ keV}$ をとったが、 100 keV 以上では統計誤差のためX線強度は有意とはいえない。

$x = 7 \text{ gcm}^{-2}$ におけるX線のスペクトルは、大気の深い所におけるものと明らかに異なり、 $40 \sim 60 \text{ keV}$ における山が鋭くない。これは低エネルギー部で強い一次X線の寄与を示している。大気中ではスペクトルは 50 keV 付近に山をもっている。このエネルギーは Compton 断面積と光電吸収断面積とが等しくなる場所に相当する。

一次X線の寄与を知るために、各エネルギー領域での高度変化を図12に示す。 $E < 83 \text{ keV}$ ではふた開の計数率が極小を持ち、一次X線の存在を示すが、 $E > 105 \text{ keV}$ では統計誤差にかくされて、高度と共にX線が増すかいないかが明らかでない。ふた開と閉の差をとり、それを大気頂上まで延長すれば、一次X線の強度が得られるはずである。しかし、一次X線の測られているのは $7 \sim 12 \text{ gcm}^{-2}$ のせまい範囲で、それを図の曲線から延長するのは危険である。そこで一次X線のスペクトルを $E^{-2} dE$ と仮定して、図13に示した吸収曲線を用い、期待される一次X線の計数率の高度変化を求めた。これは図12に示すように、観測値と大体一致する。理論的高度変化はせまいエネルギー領域で求められているので、エネルギー分布の形を少し変えてもあまり変化しない。



第12図(a) 高度変化 ($< 100 \text{ gcm}^{-2}$)



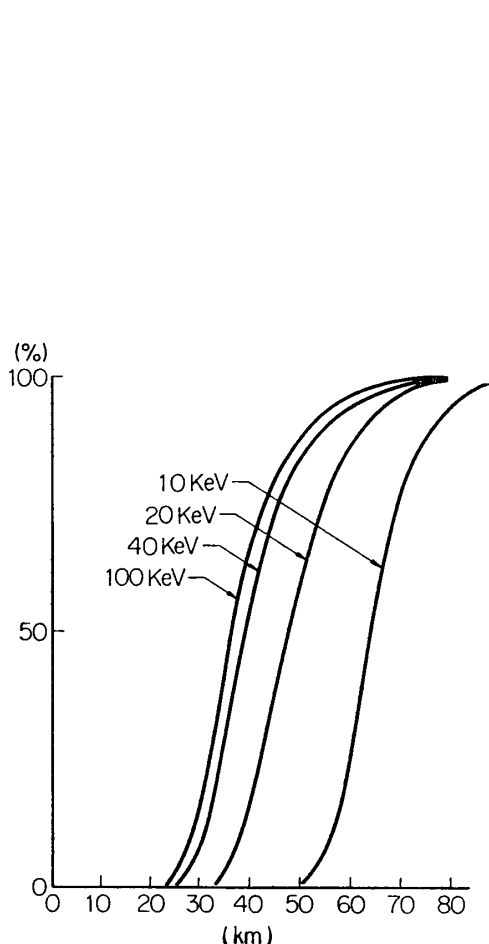
第12図 (b) 高度変化 (<math>100 \text{ gcm}^{-2}</math>)

こうして大気頂上における X 線強度を求めたものを図 14 に示した。これはベキ法則で表わされ

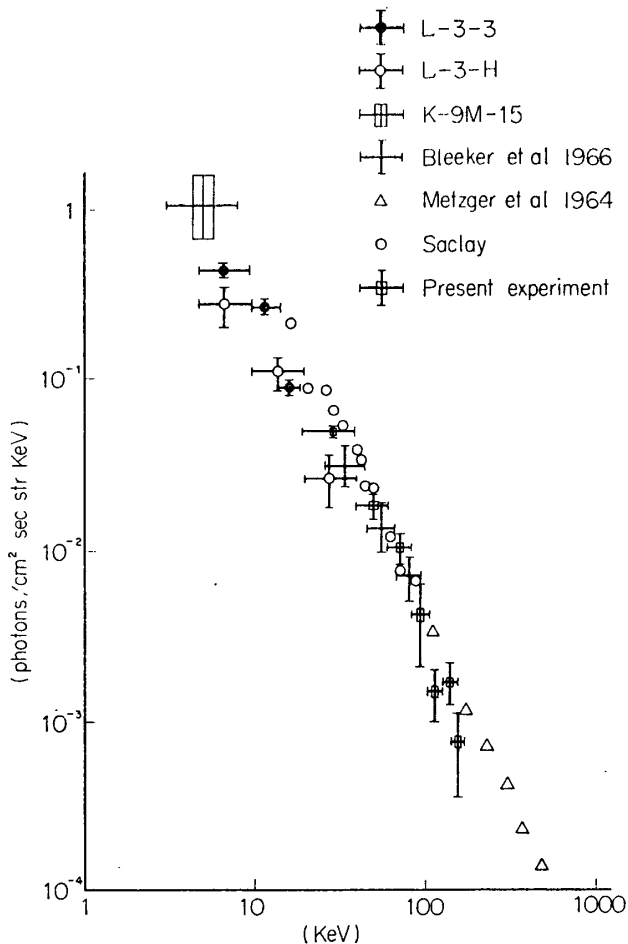
$$j_x(E) dE = KE^{-\gamma} dE \quad (5)$$

$$K = 63.5 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}, \quad \gamma = 2.1 \pm 0.7, \quad E \text{ は keV 単位}$$

なお、上のスペクトルを求めるとき 105.5 keV 以上は大気成分との分離がよくできていないのではずした。



第13図 大気による大気外X線の吸収



第14図 宇宙X線の等方成分のスペクトル
(105.5 keV 以上は大気成分を含む)

5. 他の実験結果との比較

大気中のX線、 γ 線強度の観測は何度か行なわれた。エネルギーまで測定したものは文献[4, 8~11]にある。大気X線の高度変化はわれわれのと大体一致しているが、エネルギー分布の極大は、われわれのよりやや高く100 keV 近辺に現われている。彼らはふたの開閉を用いなかったので、測定器の物質で生じたX線をも測っている。一般にそれらの物質は原子番号が大きいので、Compton 断面積と光電断面積の等しくなるエネルギーが高い。われわれの場合でも、ふた開のときのスペクトルの極大はやや高い方にずれている。

高度変化は電子成分の高度変化とよく一致している。電子成分中の γ 線は Compton 散乱で、しだいにエネルギーを失い、低いエネルギーの方にたくわえる。そして終りに光電効果で吸収される。大気X線の強度とスペクトルの定量的解釈は別のところで論ずる。

一次X線のスペクトル図14に、他の実験値[1~5, 12]も比較した。われわれの結果は田中ら[4]がオランダで得た結果とよく一致し、緯度効果は認められないから、宇宙X線を測っていると結論できる。低エネルギー部分では L-3 H-1 の結果[2, 3]より高く、Saclay

グループ [12] のより低い。この領域での答は L-3 H-1 の実験によって解決されるであろう。われわれの実験では、気球高度が期待したよりやや低かったため、100 keV 以上の強度を求めることができなかった。この分については K-10-3 による実験結果が待たれる。

なお、この観測時間中、顕著な X 線源がカウンターの視野には入らなかったこと、太陽活動は静穏であったことを付記しておく。

最後に、この実験の開発段階で原子核研究所の援助を得たこと、実験費の一部を科学研究費準宇宙線班から補助されたこと、大気球飛揚について宇宙航空研究所の全面的援助のあったことに対して感謝する。特に西村 純教授が 1963 年以来、気球飛揚のみならず、物理ならびに技術の各面で有効なご援助をして下さったことに対して厚くお礼を申し上げる。

1967 年 4 月 1 日

A. ふたで生ずる X 線

そとからの X 線強度をふたの開と閉との差で定義したが、ふた自身が X 線を発生するので、その分が大きくなり過ぎると役に立たなくなる。そこで、ふたから発生する X 線の強度を推定しておく。

計算の基礎は [13] に与えられている。それによると、大気頂近くで X 線をつくる粒子として次の二成分が重要である：

- (a) 一次宇宙線中の陽子
- (b) 大気で発生した宇宙線中性子

これらはそれぞれ、次の過程で γ 線をつくる。

- (a-1) 陽子が核反応を起こし、その際に γ 線をつくる。
- (a-2) 陽子が中性子をつくり、その中性子が核反応を起こして γ 線をつくる。
- (b-1) おそい中性子が核に捕獲されて γ 線を出す。
- (b-2) 中性子の核反応で γ 線をつくる。

陽子は >10 GeV の相対論的粒子で、中性子はおもに非相対論的で、(b-2) は実際上非弾性散乱と考えてよい。 γ 線としては、核 γ 線だけを考えた。X 線領域では KX 線が強く出るが、2 に述べた理由で無視できる。四つの過程のうち (a-2) はふたの厚さに比例し、ほかは 100 keV 以下の X 線に対して厚さに無関係である。

ふたの物質としては、実際に使った Pb, Cu のほかに Ta を考えた。Sn は核構造上 Pb に似ている。Ta は密度が高くて実用上重要である上、Pb と対照的で変形の大きい核なので、比較のためにあげた。ふたは直径 10 cm、厚さは Pb と Ta は 1 mm、Cu は 3 mm とし、立体角 0.08π でシンチレーターを望む場合を考えた。

エネルギー E と $E+dE$ の間にある X 線の計数率は

$$C(E)dE = C_i e^{-E/T} dE / T \quad (\text{A-1})$$

で表わされる。これは蒸発過程で X 線が発生すると仮定したため、 T は核によって定まる温度である。 T と C_i の値を表 A-1 に示す。

これを見ると、Ta では中性子捕獲がきくので、ふたの物質としては適当でない。一般には中性子の影響が強くきいている。

表 A-1 ふたから生ずる γ 線の計数率 (C_i MeV⁻¹ sec⁻¹)

| 過程 | 物質(厚さ) | Cu (3 mm) | Pb (1 mm) | Ta (1 mm) |
|-----|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | T (MeV) | 0.32 | 0.20 | 0.15 |
| a-1 | | 2.1×10^{-2} | 3.2×10^{-2} | 4.4×10^{-2} |
| a-2 | | 1.7×10^{-2} | 3.9×10^{-2} | 1.6×10^{-2} |
| b-1 | | 9.6×10^{-2} | ~0 | 1.4 |
| b-2 | | 1.8×10^{-1} | 1.6×10^{-1} | 1.6×10^{-1} |
| 計 | | 3.1×10^{-1} | 3.3×10^{-1} | 1.6 |

表 A-2 Cu のふたで生ずる X 線の計数率

| エネルギー (keV) | 19.5 ~39.5 | 39.5 ~61.5 | 61.5~83 | 83~105.5 | 105. ~127.5 | 127.5 ~150.5 | 150.5 ~162.5 | 19.5 ~162.5 |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 計 数 率 (sec ⁻¹) | 2.1×10^{-4} | 1.2×10^{-3} | 2.6×10^{-3} | 3.8×10^{-3} | 4.4×10^{-3} | 4.7×10^{-3} | 2.5×10^{-3} | 1.9×10^{-2} |

われわれの実験では、鉛で発生した 100 keV 以下の X 線は事実上その下の銅で吸収されるから、銅で発生する分のみを考えればよい。その計数率を各エネルギー範囲について表 A-2 に示す。これから、ふたで生ずる二次 X 線について心配しなくてよいことがわかる。

B. Decoder

テープ・レコーダに読みこんだ情報は、オシロスコープの面に読み出して写真にとって解析することもできる。しかし、多数の計数をこの方法で処理するには時間と人手を要するので次のような Decoder を用いた。その回路図を図 B に示す。

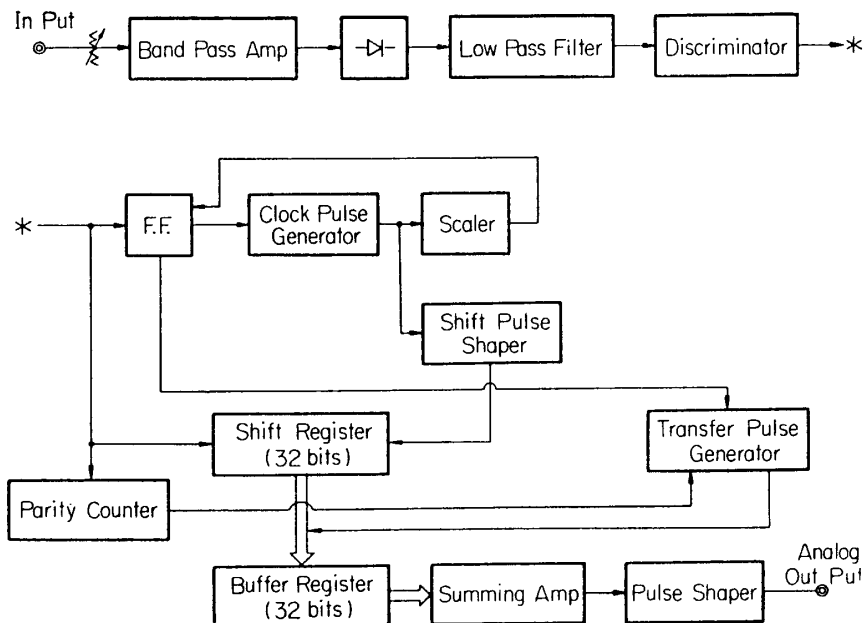


図 B Decoder の Block diagram

参 考 文 献

- [1] S. Hayakawa, M. Matsuoka and K. Yamashita: The Sixth COSPAR Symposium at Mar del Plata (1965).
- [2] 早川幸男, 松岡 勝, 山下広順: 宇宙航空研究所報告, **2**, (1966) 488.
- [3] S. Hayakawa, M. Matsuoka and K. Yamashita: Rep. Ionos. Res. Japan **20**, (1966) 480.
- [4] J. A. M. Bleeker, J. J. Burger, A. Scheepmaker, B. N. Swanenburg and Y. Tanaka: Phys. Letters, **21**, (1966) p. 301.
- [5] A. E. Metzger, E. C. Anderson, M. A. Van Dilla and J. R. Arnold: Nature, **204**, (1964) 766.
- [6] S. Hayakawa, M. Matsuoka and D. Sugimoto: Space Sci. Rev. **5**, (1966) 109.
- [7] R. Kajikawa, F. Makino, M. Matsuoka and Y. Tanaka, : Jap. J. Apl. Phys. **3**, (1961) 724.
- [8] K. A. Anderson: Phys. Rev. **123**, (1961) 1435.
- [9] F. C. Jones: J. Geophys. Res. **66**, (1961) 2029.
- [10] J. I. Vette: J. Geophys. Res. **67**, (1962) 1732.
- [11] L. E. Peterson: J. Geophys. Res. **68**, (1963) 979.
- [12] R. Rocchia, R. Rotheuflug, D. Boclet, D. Ducros, J. Labeyrie, : The Seventh COSPAR Symposium at Vienna (1966).
- [13] 菊池 健: 宇宙線研究, **11** (1966) 1.