

仁科芳雄・淺野芳廣・竹内 証
關戶 彌太郎・一宮 虎雄

宇 宙 線 1

宇 宙 線

1

理化學研究所研究員，理學博士
仁 科 芳 雄
東京帝國大學理學部，理學士
淺 野 芳 廣
理化學研究所
竹 內 枉
理化學研究所，理學士
關 戶 彌 太 郎
理化學研究所，理學士
一 宮 虎 雄
共 著

合 資 會 社

東 京 共 立 社 神 田

加1章
2000
1981
07

目 次

| | | |
|---------|----------------------|----|
| 第 I 章 | 歴史的叙述 | 1 |
| 1. | 宇宙線の発見 | 1 |
| 2. | 宇宙線の研究 | 4 |
| 3. | 宇宙線強度の時間的變化—宇宙線の源の探索 | 7 |
| 4. | 地球物理學的現象との關聯—宇宙線の本質 | 9 |
| 5. | 宇宙線の飛跡, シヤワー並に中間子 | 10 |
| 第 II 章 | 宇宙線の測定方法 | 12 |
| 1. | 電離函 | 12 |
| 2. | Geiger-Müller 計數管 | 22 |
| 3. | Wilson 霧函 | 27 |
| 4. | 寫真乾板 | 29 |
| 5. | 無線探測 | 31 |
| 第 III 章 | 宇宙線の強度觀測 | 35 |
| 1. | 磁氣緯經度と宇宙線強度 | 35 |
| 2. | 上空に於ける宇宙線強度 | 46 |
| 3. | 湖海底並に地下に於ける宇宙線強度 | 57 |
| 4. | 宇宙線強度の時間的變化 | 63 |

序

今日の物理学に於ける中心問題の一をなすものは宇宙線の研究である。その關聯する處は極めて廣汎且つ深遠であつて、純物理学のみならず地球物理学、天文学、生物学等に寄與する所鮮くない。

その研究の成果たるや宇宙線本質の難問題を解きつゝあるのみならず、理論物理学進展の試金石ともなり又指針ともなつて來た。即ち Dirac の電子理論の歸結は陽電子の發見によつて實證を得、湯川理論は中間子の發見によつて自己を見出したのである。これ等は Maxwell の理論が Hertz の電磁波發見によつて實體化されたことと共に、物理学史上永遠に語り傳へられるであらう。

宇宙線が發見せられてから既に 30 年、その間物理学者の歩んで來た道は決して平坦なものではなかつた。一時は研究が進めば進む程迷路に踏み込む様に思はれた。殊に宇宙線の本質が物質粒子であることが確認せられた時、又シャワー現象の發見せられた際に此感を深うしたものである。

處がシャワー現象の理論的解説が量子論の立場から與へられるや、問題は急轉直下して解決の峠を降りて行つた。そして中間子の發見に至つて其本質は殆ど闡明せられたかの感がある。とは云へ今尚ほ透徹の域に達しない部分が残つて居る。これが更に驚異を藏して居ないとは誰か斷言出来るであらうか。殊に其發生機構に至つては全くの闇である。それと天體物理学との關聯の究明せられる日は又偉大なる曉であらう。

以下述べる處は此宇宙線の實驗並に理論の概説であるが、限られた時間と紙面とでの表現には拙いことが多い。殊に數人の共著であることからして起る不統一は讀み苦しいことであらうと、讀者諸君の寛恕を請ふ次第である。

昭和 15 年 3 月

著 者 識

第 I 章 歴史的叙述

1. 宇宙線の発見

密閉した電離函の電極に與へた電荷は、自然に放置しても徐々ではあるが放電するのは誰でも知つて居ることである。これは絶縁の不完全によるものと思はれたが、今世紀の初頭 Geitel¹⁾ (1900) 並に C. T. R. Wilson²⁾ (1900) は絶縁を完全にしてもやはり放電することを知り、これを電離函内の空氣の電離によるものとした。

それでは此電離が何によるものであるかといふのが問題であつて、先づ考へられるのは電離函の壁及び中の瓦斯から出す放射線であるが、多くの人々³⁾の研究によれば、色々の注意により放電を著しく減すことは出來たが、これを全く無くすることは不可能であつた。そこで次に考へられるのは空氣及び土壤中にある放射性物質から出す放射線が、電離函を透過してその中の瓦斯を電離することである。實際色々の人⁴⁾は電離函を水や鉛で包

-
- 1) H. Geitel, *Phys. Z.* 2, 116 (1900).
 - 2) C. T. R. Wilson, *Proc. Camb. Phil. Soc.* 11, 52 (1900); *Proc. Roy. Soc.* 68, 151 (1901); 69, 277 (1901).
 - 3) N. R. Campbell, *Jahrb. Rad. u. Elektr.* 2, 434 (1905). D. Pacini, *Lincei. Rend.* (5a) 18, 123 (1909). K. Bergwitz, *Habil. (Braunschweig, 1910)*. C. G. Simpson and C. S. Wright, *Proc. Roy. Soc.* 85, 175 (1911). J. C. McLennan and A. R. McLeod, *Phil. Mag.* (6), 26, 740 (1913). E. v. Schweidler, *Sitzungsber. Wien* (IIa), 122, 137 (1913). J. C. McLennan and H. G. Murray, *Phil. Mag.* (6), 30, 428 (1915). G. Hoffmann, *Phys. Z.* 26, 40 (1925).
 - 4) J. C. McLennan and E. F. Burton, *Phys. Z.* 4, 553 (1902); *Phys. Rev.* 16, 184 (1903). E. Rutherford and H. L. Cooke, *Am. Phys. Soc. Dec.* 1902; *Phys. Rev.* 16, 183 (1903). H. L. Cooke, *Phil. Mag.* (6), 6, 403 (1903).

圍して電離の減ることを認めた。然しそれでも尙殘留する電離のあることは否定し得なかつた。そこで C. T. R. Wilson¹⁾ (1901) は既に、地球外から何か透過力の大きな放射線が來てゐるのではないかといふ事を考へてこれを調べて居る。後に Richardson²⁾ (1906) も同様な推測をした。

所が他の方面から此の説を支持する研究結果が出て來た。それは高い塔の上に電離函を持つて登りその放電を調べたものである。かうすると土壤中にある放射性物質からの放射線は、途中に介在する空氣により吸收せられるから、電離函の電離は減少する筈である。處が Bergwitz (1910) 並に McLennan と Macallum³⁾ (1911) の結果によれば、その減り方が豫期より少ないことが知れた。又 Wulf⁴⁾ (1909) がエッフェル塔に上り同様な實驗をした結果によると、電離は地上の 64% であつた。地から出る放射線の吸收係數から豫期せられるのは僅に 10% であつたから、6 倍も強いこととなる。そこで彼はガンマ線の源が大氣の上層にあるか、又は空氣の吸收が豫期よりも少いのであらうと結論して居る。

次に此問題に一步を進めたのは Gockel⁵⁾ (1910) であつた。彼は氣球に電離函を載せ 4,500 m 迄昇つて電離を測つた處が、その減少が甚だ少かつたと云つて居る。Gockel の使つた電離函は氣密でなかつたことが後から知れた。従つて上昇するにつれて氣壓は減少した譯で、その補正をすると電離は高い處で却つて増加して居たことになる。孰れにしても土壤から出る放射線以外のものが上空に來て居ることはこれで明となつた。Gockel は放射性元素の崩壊して出來た放射性の瓦斯が大氣の上層に蓄積し、これ

1) C. T. R. Wilson, *Proc. Roy. Soc.* 68, 151 (1901).

2) O. W. Richardson, *Nature*, 73, 607 (1906); 74, 55 (1906).

3) J. C. McLennan and E. N. Macallum, *Phil. Mag.* (6), 22, 639 (1911).

4) Th. Wulf, *Phys. Z.* 10, 997 (1909); 11, 811 (1910); *Radium* 7, 1 (1910).

5) A. Gockel *Phys. Z.* 11, 280 (1910); 12, 595 (1911); *Jahrb. Rad. u. Elektr.* 9, 1 (1912).

が源となると考へたが、實驗結果を説明するには少過ぎることがすぐ解つた。

これ等の結果に最後の歩を加へて宇宙線の存在を示したのは Hess¹⁾ である。彼は氣球により Gockel と同様の測定を行つた。即ち先づ 1,070 m 迄昇つた處 (1911), 放射線の強度が地上と大差ないことを認め、次いで 5,350 m 迄昇つた處 (1912), 低い處では電離の減少を見たが 800 m の邊から増し始め、1,400~2,500 m の高さで地上の値を越え、4,000 m では既に地上の 6 倍になり、5,000 m では 9 倍に迄なつた。此結果は到底放射性瓦斯の上空に於ける蓄積といふ様なことでは説明出來ない。どうしても地球外から一種の放射線が來て居るといふ結論に到達した。さうだとするとその放射線の透過力は吾人に未知の強大なものであるといふ事になる。

といふのは地球の外部から 5,000 m の上空に到達するには、水に直して 5.5 m 位の厚さの空氣の層を通る必要があり、地上に達く爲には 10 m の厚さの水に相當する空氣を貫かねばならぬ。實驗室で取扱ふ X-線やガンマ線は、水 1 m もあれば殆ど吸収し盡されることを思へば、此放射線の透過力の如何に大きいかといふ事が知れる。

これが宇宙線の発見であつて、高い處に多く存在するから獨逸では Höhenstrahlung と呼んだが、Hess'sche Strahlung 或は Ultrastrahlung とも唱へて居る。英米では cosmic rays といふ。そして此ものの研究が物理學界注目目的となり、各國先を争つてその本質の究明に努めたのであるが、一時は其研究が進めば進む程不思議な存在であることが示されて來た。そして劃期的の発見を重ねて遂に今日は其解決に近づきつゝあるの觀

1) V. F. Hess, *Sitzungsber. Wien* (IIa), 120, 1575 (1911); *Phys. Z.* 12, 998 (1911); *Sitzungsber. Wien* (IIa), 121, 2001 (1912); *Phys. Z.* 13, 1084 (1912); *Sitzungsber. Wien* (IIa), 122, 1053 (1913); *Phys. Z.* 14, 610 (1913).

をなして居る。

2. 宇宙線の研究

Hess の使つた Wulf の電離函は温度の影響があり又絶縁も不完全であつたが, Kolhörster¹⁾ はこれ等の點を改良して確實なもの 2 個を用ひ、5 回の氣球上昇を試み 9,300 m 迄昇つて正確な測定を行つた (1913~14). 此邊の高さで宇宙線は地上の強度の約 50 倍に達する。この Kolhörster の測定はその後今日迄行はれたものと高い處迄の測定値とよく一致して居る。又得られた高さと宇宙線強度との曲線から, Kolhörster は宇宙線の空氣に對する吸收係數を求め $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ を得、 $R_{\alpha C}$ のガンマ線に對する値 $4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ より著しく小さいことを明にした。

此興味ある研究も歐洲大戰の爲に其促進を妨げられた。然し Gockel²⁾ 並に Hess と Kofler³⁾ は此研究を続け、山の頂に登つたり氣球に乗つたりして、前述の Kolhörster の結果を裏書きした (1917). 又 Kolhörster⁴⁾ は戰爭中は從軍してアジャトルコに於て氣象觀測に携はり、Waniköi の測候所で觀測を續行した (1916~18).

大戰後は又此研究が復活した。そして米國に於ては Millikan 及びその共同研究者がこれに着手し、Millikan と Bowen⁵⁾ は氣球に宇宙線の自働

1) W. Kolhörster, *Phys. Z.* 14, 1153 (1913); *Verh. deutsch. phys. Ges.* 15, 1111 (1913); *Ber. Naturf. Vers Wien*, 218 (1913); W. Kolhörster, A. Wigand und R. Stoye, *Abh. Naturf. Ges. Halle*, Nr. 4 (1914); W. Kolhörster, *Verh. deutsch. phys. Ges.* 16, 719 (1914); *Beitr. Phys. fr. Atm.* 7, 87 (1914); C. Jensen, W. Kolhörster und P. Perlewitz, *Jahrb. Hamb. Wiss. Anst.* (1915).

2) A. Gockel, *Denkschr. Schweiz. Naturf. Ges.* 54, Nr. 1 (1917).

3) V. F. Hess und M. Kofler, *Met. Z.* 35, 157 (1917).

4) W. Kolhörster, *Z. f. Phys.* 11, 379 (1922).

5) R. A. Millikan and I. S. Bowen, *Phys. Rev.* (2) 22, 198 (1923).

記録装置を載せて 15,500 m の高さ迄飛ばせた (1921~22)。これが氣球探測の最初であつて、ある高度に達すると氣球が破れて下降し、これを拾つた人が送り返して呉れる記録から、高さと宇宙線との関係が得られる。此時の装置には不完全の點があつて、其記録は Hess, Kolhörster の得た強度の $1/4$ を示したに過ぎなかつたので、Millikan, Bowen は宇宙線の存在を疑つた。次いで Otis¹⁾ も飛行機及び氣球によつて 5,300 m 迄の観測を行ひ、又 Mt. Whitney²⁾ 及び Pikes Peak³⁾ に於て 4,500 m 迄の高さで測定を行つて居るが、吸収係數の値が大きく出たので未だ宇宙線の存在を確認するに至らなかつた (1923)。

處がその後 (1925) Millikan と Cameron⁴⁾ は Muir Lake (3,900 m) と Arrowhead Lake (2,060 m) とで、宇宙線の水に對する吸収係數を求め $(1.8 \sim 3.0) \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ を得て、2年前 Kolhörster⁵⁾ の得た $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ との一致を示し、茲に宇宙線の存在を確認したのであつた。

其後研究は色々の方向に進められて行つた。宇宙線の透過力を調べるためには湖海底に測定器を沈め、又は隧道や坑道に入つて測定を行つた。最初に水底の實驗を行つたのは Myssowsky と Tuwim⁶⁾ (1925) 及び前述の Millikan と Cameron であつた。其後 Regener⁷⁾ は Boden. ee で水底 230 m 迄精密な測定を行ひ、又 Clay⁸⁾ は Aden 灣で深さ 250 m の處迄調べた。

1) R. M. Otis, *Phys. Rev.* (2), 22, 198 (1923).

2) R. M. Otis, *Phys. Rev.* (2), 22, 199 (1923).

3) R. M. Otis and R. A. Millikan, *Phys. Rev.* (2), 23, 778 (1924).

4) R. A. Millikan, *Science* (2), 445 (1925); R. A. Millikan and G. H. Cameron, *Phys. Rev.* (2), 23, 851 (1926).

5) W. Kolhörster und G. v. Salis, *Sitzungsber. Berlin*, 366 (1923).

6) L. Myssowsky u. L. Tuwim, *Z. f. Phys.* 35, 299, (1925); 44, 369 (1927).

7) E. Regener, *Naturwiss.* 17, 183 (1929); *Z. f. Phys.* 74, 433 (1932).

8) J. Clay, *Physica*, 1, 363 (1934).

地下の測定では Corlin¹⁾ が Kiirunavaara の鉄鑛山で水に直して殆ど 700 m に近い處迄下りて行つた。その後 Kolhörster²⁾ は Stassfurt の岩鹽坑で、水深 1,000 m に當る深さで Geiger-Müller の計數管によつて宇宙線の存在を認めて居る。その後 Barnóthy と Förro³⁾ は Budapest 近郊の鑛山で、水深 732 m に相當する地點に於て測定を行ひ、又最近 Wilson⁴⁾ は米國 Michigan の Mahawk 銅山で、水深 1,418 m に當る地點で研究を行ひ、更に Clay と Gemert⁵⁾ は和蘭の炭坑で、1,380 m H₂O に當る地下に於て宇宙線の強度、性質を調べて居る。

次に上空の測定も其後多くの人々によつて行はれたが、氣球に乗つて測定をしたのは Piccard 及びその共同研究者⁶⁾ が高度約 16 km、次で Fordney と Settle⁷⁾ は New York 近郊から昇つて高度 18.7 km、又 Prokofiew と Godunov⁸⁾ はロシアで高度 19 km、最後に Stevens と Anderson⁹⁾ は米國で Explorer II に乗り 22 km に達し、それぞれ貴重な結果を得て居る。

又自働的記錄装置による氣球探測は、其後 Regener¹⁰⁾ 及びその共同研究者¹¹⁾ によつて測定が著しく促進され、次いで Bowen, Millikan,

-
- 1) A. Corlin, *Ann. Obs. Lund*, No. 4, 1934.
 - 2) W. Kolhörster, *Sitzungsber. Berlin*, 689 (1933); *Forsch. u. Fortschr.* 10, 33 (1933); *IV. Int. Congress, Zürich* (1934); *Nature* 133, 419 (1934).
 - 3) J. Barnóthy u. M. Förro, *Z. f. Phys.* 104, 744 (1937).
 - 4) V. C. Wilson, *Phys. Rev.* 53, 357 (19'8).
 - 5) J. Clay and A. V. Gemert. *Physica*, 6, 497 (1939).
 - 6) A. Piccard, E. Stahel et P. Kipfer, *C. R.* 195, 71 (1932); *Naturwiss.* 20, 592 (1932).
 - 7) W. F. G. Swann and G. L. Locher, *Phys. Rev.* 47, 326 (1935).
 - 8) K. Wöicken, *Z. Geophysik* 10, 300 (1934).
 - 9) *National Geographic Society, Stratosphere Series No. 2*, 1936.
 - 10) E. Regener, *Naturwiss.* 20, 695 (1932); *Phys. Z.* 34, 305 (1933); 34, 820 (1933); *Nature*, 131, 130 (1933).
 - 11) E. Regener u. G. Pfofzer, *Phys. Z.* 35, 779 (1934); *Nature* 134, 325 (1934); 136, 718 (1935); E. Regener u. R. Auer, *Phys. Z.* 35, 784 (1934).

Neher¹⁾ によつては更に測定が精巧となり、又異なる緯度に於て観測を行ひ宇宙線の本質の究明に資する所が大であつた。

これ等は自働記録装置により得られた記録を、落ちた氣球と共に拾つた人が送り返して呉れる必要がある。然し氣球の回収が困難な場合には、無線により自働的に高度と宇宙線強度とを氣球から發信し、これを地上で受けて目的を達する所謂無線探測の方法が用ひられる。これも色々試みられたが、良い結果を得たのは Korff²⁾ であつて、大氣の 99.5% 迄昇つた結果も得られて居る。また Korff は此方法によつて、宇宙線の中にある中性子の強度は、大氣の頂に近づくと地上の 1,000 倍にもなることを認めた。³⁾

3. 宇宙線強度の時間的變化——宇宙線の源の探索

宇宙線は地球大氣の外では、孰れの方からも等しい強度を以てやつて来るものと考へられて居るが、大氣に入るとその吸収を受けるから、地上では吸収の最も少い垂直方向の宇宙線が最も強く、斜め方向は通過する大氣の通路が長くなるから弱い。従つて若し宇宙線がある特定の星から放射されて居るとすると、その星が頭上に來た時宇宙線の強度が最大となる筈である。それ故宇宙線強度と恒星時との關係を研究すれば、宇宙線の源泉が定められるであらうといふ。豫想の下に、宇宙線の時間的變化が多くの人により研究せられた。

前に Nernst (1922) は輻射のエネルギーが凝集して物質となり、それが新しい星を形成するものであると考へ、其場合にはウランよりも原子番号の高い元素が出來、それが崩壊して宇宙線を發生するものであるとした。

1) I. S. Bowen, R. A. Millikan and H. V. Neher, *Phys. Rev.* 52, 80 (1937); 53, 217 (1938); 53, 855 (1938).

2) S. A. Korff, L. F. Curtis and A. V. Astin, *Phys. Rev.* 53, 14 (1938).

3) S. A. Korff, *Rev. Mod. Phys.* 11, 218 (1939).

此説に従へば新しい星は宇宙線の源泉である筈である。これを試すために Kolhörster と Salis¹⁾ は Jungfraujoch (3,550 m) に於て、氷河の割れ目に入つて天空を限り、時間と宇宙線との關係を求めた。

その結果から銀河の中の若い星、殊にアンドロメダ及びヘルクレスが宇宙線の源であるといふ結論に達した。又 Corlin²⁾ は同じ論法でミラ星が源であると云つた。然し其後の精確な測定によれば斯様な恒星時との關聯は存在しないことが明となり、これ等の星は宇宙線の源ではないといふことになつた。従つて今日宇宙線は何處から來るものか全く不明であるが、只一つ残つて居るのは Baade と Zwicky³⁾ の説である。それは星の大爆發である超新星が宇宙線の源であると云ふのであるが、これも未だ確實な證據は得られて居ない。

又 Compton⁴⁾ は宇宙線と恒星時の日變化との關聯から、それが我々の銀河系以外から來たものであると考へたが、最近の研究結果によればそんな日變化が存在するか否か不明である。⁵⁾

次に宇宙線と太陽時との關聯であるが、これも多くの人々によつて研究せられた結果、僅かではあるが存在することが確認せられて居る。⁶⁾ 然し恐らくこれは太陽が宇宙線の源であるといふのではなく、間接の影響であらう。太陽が宇宙線の源でないといふことは、晝夜によつて強度の差の無いこと及び日蝕に影響せられぬことから推理せられる。

1) 第5頁脚註(5)及び W. Kolhörster und. G. v. Salis, *Naturwiss.* 14, 936 (1926); *Nature*, 118, 518 (1926).

2) A. Corlin. *Asir. Nachr.* 231, 151 (1927); 233, 350 (1928).

3) W. Baade and F. Zwicky, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 20, 259 (1934).

4) A. H. Compton and I. A. Getting, *Phys. Rev.* 47, 817 (1935).

5) E. O. Wollan, *Rev. Mod. Phys.* 11, 160 (1939).

6) V. F. Hess and H. T. Graziadei, *Terr. Mag. Atmos. Elec.* 41, 9 (1936); 上脚註(5)

4. 地球物理學的現象との關聯——宇宙線の本質

宇宙線は大氣に吸収せられることは明であるから、氣壓によつて宇宙線強度は變化する筈である。此氣壓効果を始めて的確に認めたのは Mysowsky と Tuwim¹⁾ であつた (1926)。彼等は水銀柱 1 cm の減壓に對して 7% の宇宙線増加の割合となることを述べて居る。然し此數値は寧ろ大き過ぎる方であつて、これは時により著しく變化するものである。その原因は氣象による影響であらう。

宇宙線は始めガンマ線と同様に電磁波で、只其波長が更に短いものと考へられたのであるが、Geiger-Müller 計數管の同時放電の方法により Bothe と Kolhörster²⁾ は直接宇宙線帶電粒子の吸収係數を求め、これが電離函で求められた宇宙線の吸収係數と一致することから、宇宙線の本質は帶電粒子であるといふ説を提唱した (1928)。

若しそれが事實であれば、宇宙線は地磁氣によつて影響される筈であるから、宇宙線強度は地磁氣緯度によつて變化することが Stormer の理論から豫期される。此緯度効果は Bothe, Kolhörster を始め Millikan その他の人々によつて調べられたが、始めてこれを認めたのは Clay³⁾ であつた。彼は Amsterdam から Java に至る航海中宇宙線を測定して、赤道地方で宇宙線強度の減少することを知つた。後に Compton⁴⁾ は更に廣汎な研究によつてこれを明確にした。そして今日では色々の方面からして宇宙線の大部分は帶電粒子であることが明となつた。

-
- 1) L. Missowsky u. L. Tuwim, *Z. f. Phys.* 39, 146 (1926).
 - 2) W. Bothe u. W. Kolhörster, *Naturwiss.* 16, 1045 (1928); *Phys. Z.* 30, 516 (1929); *Forsch u. Fortschr.* 5, 333 (1929); *Naturwiss.* 17, 271 (1929); *Nature*, 123, 638 (1929); *Z. f. Phys.* 56, 751 (1929).
 - 3) J. Clay, *Proc. Amsterdam*, 33, 711 (1930).
 - 4) A. H. Compton, *Phys. Rev.* 43, 387 (1933).

此結果から考へて宇宙線は地磁氣の變動と共に變化する筈である。これを始めて指摘したのは Corlin¹⁾ であつたが、1938 年の大きな磁氣嵐の際の觀測以來、今日では磁氣嵐と宇宙線との關聯は疑ふ餘地のないものとなつた。

季節と宇宙線との關聯のあることを始めて指摘したのは Kähler²⁾ であつたが (1920)、今日ではこれが確認せられ冬は夏に比べて宇宙線の強度が少し大きい。これは宇宙線の硬成分である中間子の壽命の短いことに基因するものであることは Blackett³⁾ の指摘した處である。

5. 宇宙線の飛跡、シャワー並に中間子

Wilson 霧函により宇宙線の飛跡を始めて認めたのは Skobelzyn⁴⁾ (1927) であつた。次で Anderson⁵⁾ は強い磁場中で Wilson 霧函を作動させ、宇宙線の通路を彎曲させてその飛跡を撮つた。此方法によつて陽電子が発見せられたのである (1933)。⁶⁾

その後 Blackett と Occhialini⁷⁾ とは後述の Geiger-Müller 計數管の同時放電を用ひて、宇宙線が來るとその飛跡を撮る装置を考案し、シャワー即ち宇宙線が物質に衝突して一時に多くの陰陽電子を發生させる現象の寫眞を簡単に撮れるやうにした。

1) A. Corlin, *Diss. Lund, Ann. Obs. Lund, Nr. 4*, 1934.

2) K. Kähler, *Phys. Z.* 21, 141 (1920).

3) P. M. S. Blackett, *Phys. Rev.* 54, 973 (1938).

4) D. Skobelzyn, *Z. f. Phys.* 43, 354 (1927); *Z. f. Phys.* 54, 686 (1929).

5) C. D. Anderson, *Phys. Rev.* 41, 405 (1932); C. D. Anderson and R. A. Millikan, *Phys. Rev.* 40, 325 (1932).

6) C. D. Anderson, *Phys. Rev.* 43, 491 (1933); 44, 406 (1933).

7) P. M. S. Blackett and G. P. S. Occhialini, *Proc. Roy. Soc.* 139, 699 (1933).

Geiger-Müller 計數管の同時放電を簡単に數へ得る回路が Rossi¹⁾ によつて考案せられてから、宇宙線の方向をある 範囲で定めることが出来る様になると共に、シャワーの研究に道を拓き、Rossi²⁾ を始め 多くの人々の夥しい業績が積まれて行つた。

其後シャワーの理論が Bhabha と Heitler³⁾ 並に Oppenheimer と Carlson⁴⁾ によつて明にせられ、其結果として 宇宙線の軟硬兩成分の存在が確かめられ、硬成分の粒子の質量が Wilson 霧函の飛跡から算出せられた。その値は今日では電子の質量の約 170~250 倍と考へられて居る⁵⁾。これに先つこと 3 年、我が湯川博士⁶⁾ は原子核の研究から斯様な粒子の存在を結論し、宇宙線中にはこれが認められるかも知れないことを豫告したのであるが、それが 斯様にして 實證せられたのである。此粒子を今日は中間子 (meson 又は mesotron) と呼んで居る。

次に寫眞乾板を用ひて宇宙線の飛跡を撮ることも、宇宙線研究の方法として今日重要視せられて居る。殊に宇宙線による原子核の破壊を見るに便である。これを始めたのは Wilkins と St. Helens⁷⁾ であつた。

-
- 1) B. Rossi, *Nature*, 125, 636 (1930); *Lincei Rend.* 11, 831 (1930).
 - 2) B. Rossi, *Z. f. Phys.* 82, 151 (1933); *Nature* 132, 173 (1933).
 - 3) H. J. Bhabha and W. Heitler, *Proc. Roy. Soc.* 159, 432 (1937).
 - 4) J. F. Carlson and J. K. Oppenheimer, *Phys. Rev.* 51, 220 (1937).
 - 5) S. N. Neddermeyer and C. D. Anderson, *Phys. Rev.* 54, 88 (1938); Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya, *Phys. Rev.* 55, 585 (1939); J. G. Wilson, *Proc. Roy. Soc.* 172, 517 (1939); E. J. Williams and G. E. Roberts, *Nature*, 145, 102 (1940).
 - 6) H. Yukawa, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* 17, 48 (1935).
 - 7) T. R. Wilkins and H. St. Helens, *Phys. Rev.* 49, 403 (1936); L. H. Rumbaugh and G. L. Locher, *Phys. Rev.* 49, 855 (1936).

第 II 章 宇宙線の測定方法

宇宙線に関する種々の研究を爲す場合に、その目的に従つて夫々の特長をもつた測定方法を使用する。その方法は大概四つであるが何れの方法も宇宙線の電離作用を利用してゐる。

其中最初に擧げられるものは電離函 (Ionization chamber) である。その原始的なものは宇宙線発見の端緒を開き、其後幾多の改良を経て宇宙線の研究に多くの貢献を爲して來た。この方法は電離函内へ這入つて來た宇宙線が函内に作るイオンの總和を測定するものである。この種類の宇宙線計の特長とする處は統計的變動が比較的少く、機能の變化少い事である。その爲に宇宙線の長日月に互る時間的變化、磁氣緯度効果、大氣・土壤・海湖水に依る宇宙線の吸收其他の測定に使用されて來た。次に重要なのは計數管 (Zählrohr) であつて、それを通る宇宙線を 1 本 1 本數へる事が出来る爲に、宇宙線を 1 個 1 個取り出して研究する場合に便利である。

次に宇宙線の存在を最も明確に認識せしめるものはウイリスン霧函 (Cloud chamber) で、これに依れば宇宙線の通つた跡を眼で見る事も出來れば寫眞に撮る事も出来る。今一つ寫眞乾板に直接宇宙線の飛跡を印させる方法もあり、それにより、宇宙線による原子核の破壊や、中性子が宇宙線中に在るか無いかを調べるなど、色々珍しい寫眞も得られてゐる。是等の方法には夫々長所もあれば短所もあつてこれを組合せて始めて目的を達する場合もある。

1. 電離函¹⁾

電離函の原理は密閉せられた容器の中で、電離線 (電離作用を有する放射

1) E. Steinke, *Handb. d. Physik.* XIII/2 Kap. 5 (1933); E. Miehlnickel, *Höhenstrahlung* (1938).

線)によつて作られるイオンを電気計に集めて、その量を測定するにある。イオンを集めるのに必要な電場を作る爲めに、驗電器を適當な電位に荷電して置いて、集つて来るイオンに依つて徐々に放電させる放電法 (Entlademethode) と、電離函の壁を一極となし、それと電気計につながつた電極の間に一定の電壓を加へて、電離函内に出來たイオンを集めて、電気計が荷電せられて行く割合を測定する集電法 (Auflademethode) とが有る。

Kolhörster, Wulf, Millikan, Regener, Hoerlin 等は前者の方法を用ひて多くの結果を出してゐる。此の方法は装置の構造が簡單で取扱ひ易い特長をもつて居る。可搬 (portable) 宇宙線計と稱せられるものにはこの原理に依るものが多い。

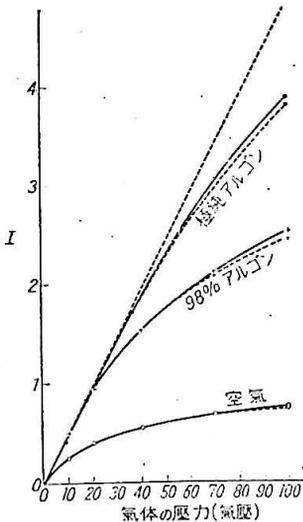
Hoffmann, Steinke, Compton 等は後者の集電法を用ひて精確な測定を爲してゐる。宇宙線に依つて作られるイオンの量は時間的に大きい變化を爲さないから、集つて來たイオンを適當な方法で反對の符號の電荷に依つて中和せしめ、平均値からの變動だけを測定する事にすれば、電気計の指針が零の近くを動くからその感度を増す事が出来る。又電気計の體系が放電法の場合の如く高電壓にならないから、絶縁の心配も少くなる。

しかし、装置が補償方法其他の爲めに色々と複雑化するので研究室内の据置用のものが多い。

電離函の感度を増す爲めにその容積を大きくするばかりでなく、その内部の瓦斯の壓力をも増してイオン電流を増加せしめる様になつて來た。近年使用せられてゐるのは大抵高壓電離函である。又函に入れる氣體に依つて壓力による電離電流の増加の仕方が異なる。¹⁾ 例へば空氣とアルゴンの差異は第 1 圖に示す通りで、極めて純粹なアルゴンは 50 氣壓を過ぎても飽和の状態に達しない。尙高壓電離函の場合には所謂殘留電流 (Restgang: 電

1) A. H. Compton, E. O. Wollan and R. D. Bennett, *Rev. Scient. Instr.* 5, 415 (1935).

離函の内面及び電極に含まれる微量の放射性物質に起因する電離電流及び絶縁體の漏洩電流、従つて宇宙線の存在しない處でもこれに相當するフレ



電離函内の氣體の壓力及び性質による電離電流の變化を示す

第 1 圖

が出る) が宇宙線による電離に比べて極めて小さくなる。従つて近年では宇宙線強度の精度は残留電離の變動に依つて定められないで、電離函内にはいつて來る宇宙線粒子の統計的變動に依つて定まる。その精度は例へば 20 立の電離函で海面上に於ける宇宙線一時間の平均強度を測定するときには 0.5~0.7% である。普通、高壓電離函で測定せられた値は標準状態の空氣の場合に換算して表す事になつてゐる。その表し方は標準状態(760 mm Hg, 0°C)に於ける空氣 1 立方匣内に毎秒 1 イオン對を作る強度を單位とし、これを 1 J とする。(1 I と書く事

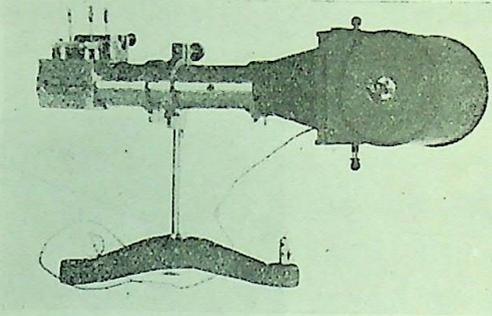
もある) 海面上の宇宙線は 2~1.5 J 程度である。次に實際に用ひられて來た電離函の代表的なものについて述べる。

a) **Kolhörster 型**¹⁾(第 2 圖) 容積 2~4 立程度の圓筒形の電離函で壁は厚さ 3 mm の鐵より成り、一氣壓の空氣が詰められてゐる。放電法を用ひ、二絃電氣計の指針を顯微鏡で見たり、或ひは寫眞で撮影出来る様になつてゐる。電氣容量 0.2~0.3 cm, 使用電壓 100~1,000 V で残留電流は平均 1 J 程度である。

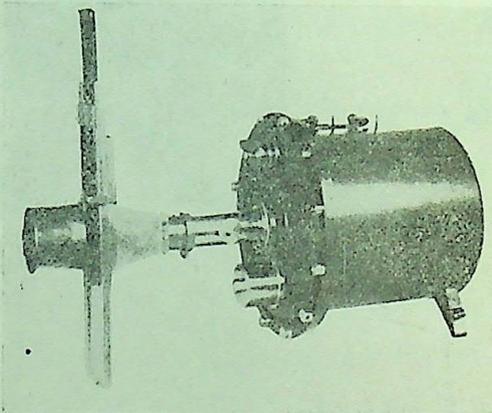
b) **Millikan-Neher 型**²⁾(第 3 圖、第 4 圖) 厚さ約 3 mm の鋼鐵より

1) *Ergebnisse der Kosmischen Physik*. 1.

2) R. A. Millikan and H. V. Neher, *Phys. Rev.* 50, 15 (1936).

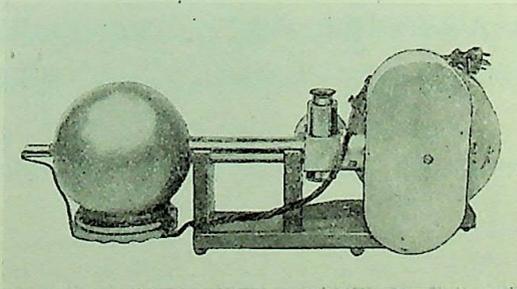


(a) フィルムに記録する装置



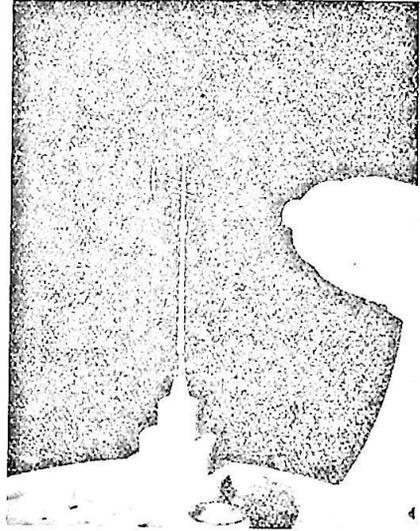
(b) 電 離 函

第 2 圖 Kolhörster 型宇宙線計



第 3 圖 Millikan-Neher 型宇宙線計

なる球形の電離函で容積約 0.7 立で 14 kg/cm^3 (0°C) のアルゴン瓦斯を満してある。放電法を用ひ、Neher 電気計を使用してゐる。これは震動に耐え得る特長をもつてゐる。電気容量約 0.4 cm 程度である。電離函は鉛 11 輦で覆はれる様に出てゐる。全世界を航海して宇宙線強度分布図を作るに用ひ、又成層圏の宇宙線測定に飛昇させた電離函はこの型のものである。



第 4 圖 Neher 電気計

c) Regener 型¹⁾ (第 5 圖, 第 6 圖, 第 7 圖) Regener が Bodensee に沈めて水に依る宇宙線の吸収を測定した電離函を、後に Weischedel が改良し

て更に大きくしたものである。これは厚さ 2 cm の鐵のポンペで容積 11± 立, 約 28 氣壓の CO_2 瓦斯を満してある。放電法を用ひ、600 V に荷電した電気計が次第に放電して 300 V になる迄の間に一定の時間を置いて何回も指針を撮影する様に出来てゐる。

d) Regener 型氣球用電離函 容積 2 立。放電法で絨電気計使用、一時間毎に溫度も氣壓も共に寫真に撮れる様になつてゐる。全重量 1.5 kg である。

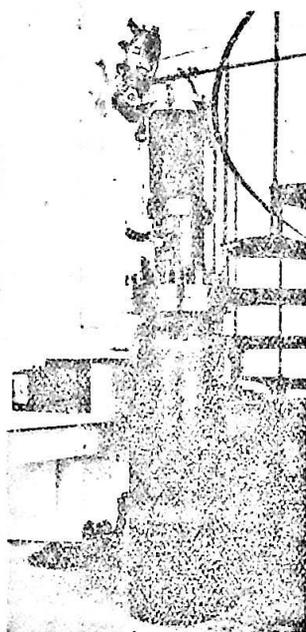
e) Compton 型³⁾ (第 8 圖, 第 9 圖, 第 10 圖) 鋼鐵の球形電離函で

1) E. Regener, *Z. f. Phys.* 74, 433 (1932); F. Weischedel, *Z. f. Phys.* 101, 732 (1936).

2) E. Regener, *Naturwiss.* 20, 695 (1932); *Phys. Z.* 31, 306 (1932).

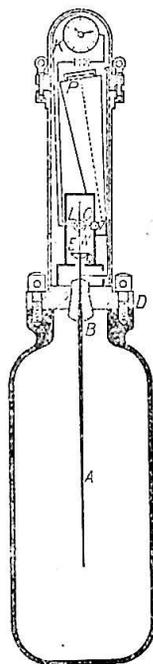
3) A. H. Compton and E. O. Wollan, *Rev. Sci. Instr.* 5, 415 (1934).

容積 19.3 立, 30~50 気壓のアルゴンが入れてある。集電法を用ひ、内部に補助電離函を置き、その中にあるウラニウム β 線に依り生ずる電離電流が宇宙線に依る電離電流を中和する様にしてある [β 線補償法¹⁾].



Regener 型宇宙線計を測に沈める處

第 5 圖



Regener 型宇宙線計の構造

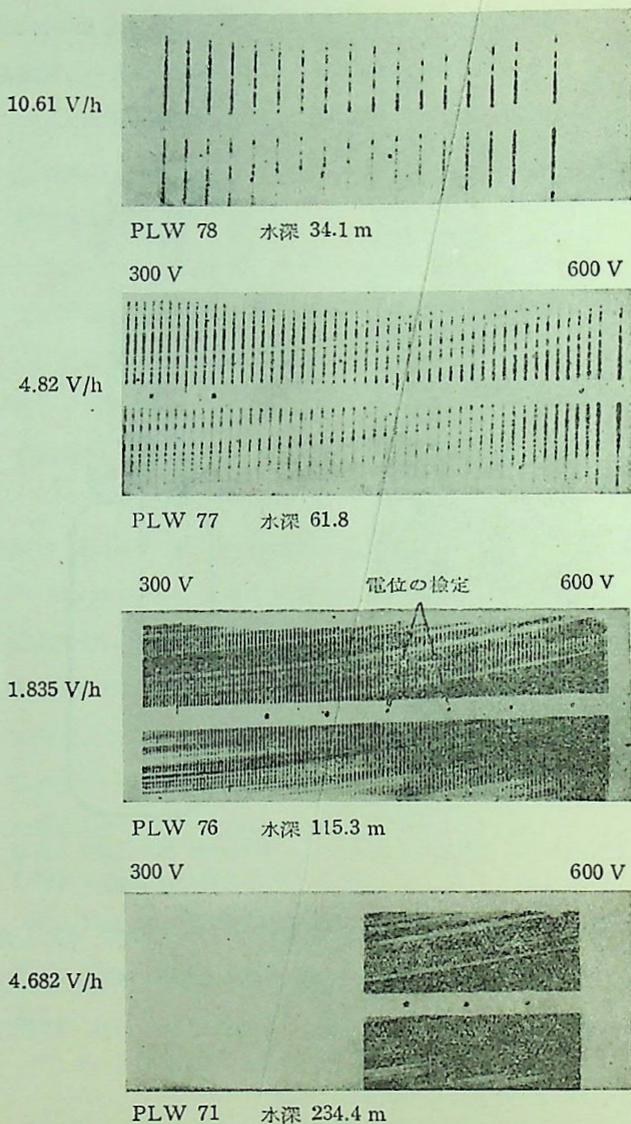
第 6 圖

f) Hoffmann 型²⁾ 第 11 圖) 20~40 気壓の CO_2 瓦斯を充たした 3~50 立の鋼鉄ボンベで集電法に依り、二絃電氣計を使用し、内部の電極は圖の様によくの圓板より成り、電場が充分強くなる様にしてある。電氣計

1) K. H. Strauss, *Z. f. Phys.* 100, 237 (1936).

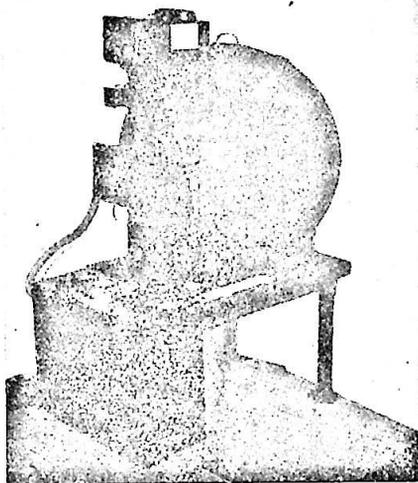
2) G. Hoffmann und F. Lindholm, *Gerland Beitr. z. Geophys.* 20, 12 (1928); 22, 141 (1929).

G. Hoffmann und W. S. Pforre*, *Phys. Z.* 31, 347 (1930).



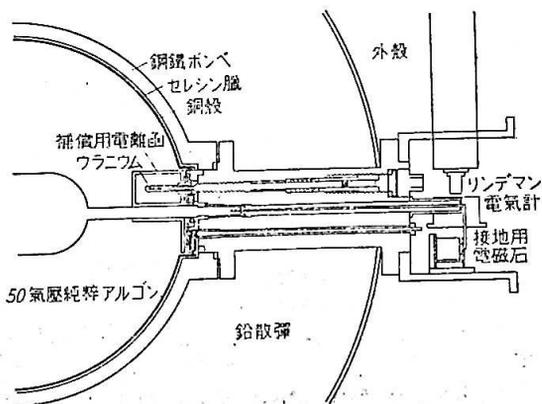
第 7 圖 Regener 型宇宙線計の記録，黒線と黒線との間隔が，放電して電気計の針の動いた 1 時間毎の間隔である。宇宙線の強度が強い程間隔が広い。

が荷電されて行くのを一方からコンデンサーを通じて反対の符號に荷電補償する (コンデンサー補償法).

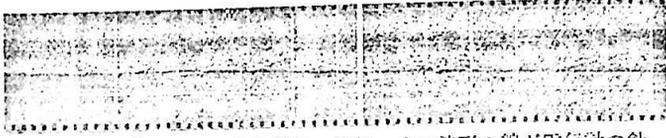


第 8 圖 Compton 型宇宙線計

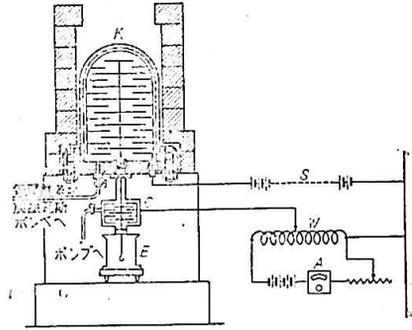
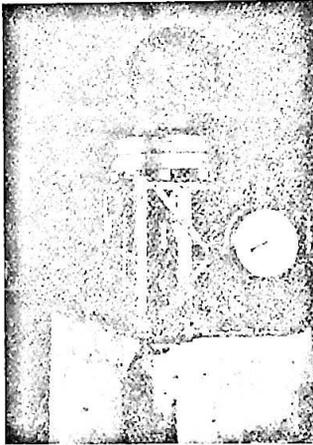
g) Steinke 型 (第 12 圖) 壁の厚さ 3mm, 容積 22.6 立の鋼鐵製圓錐形の電離函で 10 氣壓の CO_2 瓦斯が充されてゐる. 約 160 V で飽和



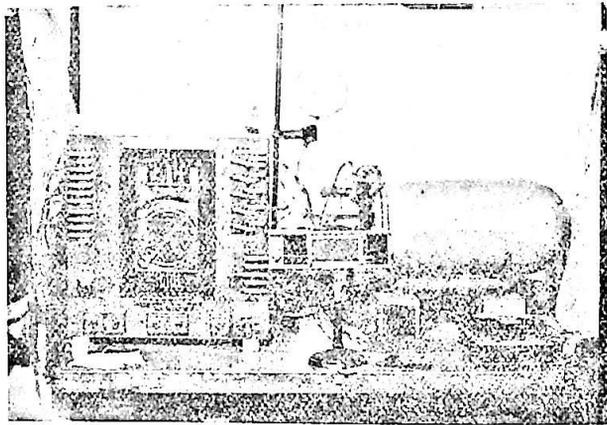
第 9 圖 Compton 型宇宙線計の構造



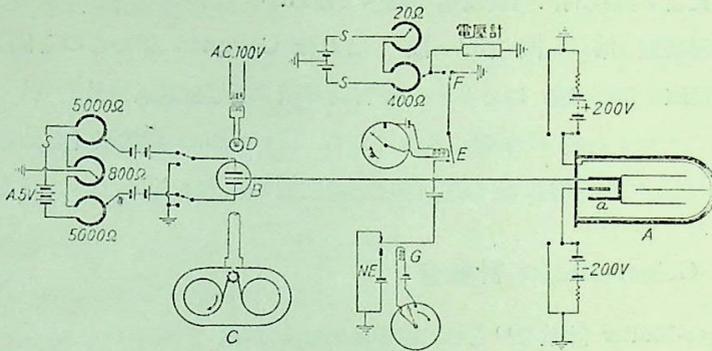
第 10 圖 Compton 宇宙線計の記録。白い波形の線が電気計の針の位置を示し、横の太い黒線は気圧を記録し、細い白線が温度の記録である。垂直の細い白線は 1 時間の終りを示し、太い垂直の白線は 24 時間の終りを示す。



第 11 圖 Hoffmann 型宇宙線計。右はその内部。

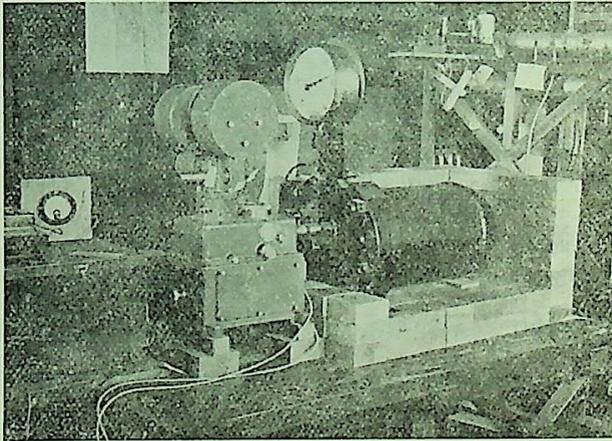


第 12 圖 Steinke 型宇宙線計



A 電離函. 左側小さい部屋 a がウラニウムのある場所. B リンデマン電気計. C カメラ. D ランプ. E 接地電鍵(時計に依つて開閉す). F 切換スイッチで一定のポテンシャルにも接地にも出来る. G 電気計の感度の變化なきを調べる爲めの一定電壓を與へる自動装置.

第 13 圖 理研型宇宙線計の構造略圖



第 14 圖 理研型宇宙線計の外形

電流に達する. 電気容量約 20 cm, 残留電流 0.2J 程度, 測定精度 0.7%. Lindemann 電気計を使用し, 半分間毎に荷電するコンデンサー補償法を用ひてゐる. 近年改良せられた型はコンデンサーを廻轉してその容量を變化

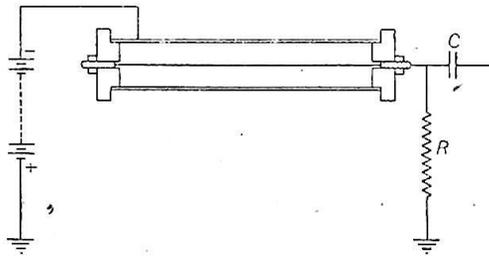
させ之により連続的に補償電圧を加へてゐる。

h) 理研型 (第 13 圖, 第 14 圖) これは Compton 型のものと同じく β 線補償法を用ひ, 壁の厚さ 6.5 mm, 有効容積 22.5 立, 電気容量約 38.5 cm, 95% のアルゴンを約 40 気壓に入れてある。Lindemann 型電気計を使用し, フィルムの上に宇宙線強度, 気壓, 温度を共に記録出来る様になつてゐる。

2. Geiger-Müller 計数管

Geiger-Müller 計数管¹⁾とは, 金属管 (通常, 眞鍮, アルミニウム) の中心軸に細い針金を管と絶縁して張つたもので, 管内には水銀柱數種の 壓力の空気がアルゴン等が入れてある。

第 15 圖の様に, 中心の針金に小容量のコンデンサーと高抵抗とを結合し



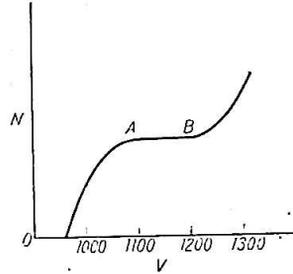
第 15 圖 計数管詳細圖

て, 管壁に 1,000 V 位の電圧を與へておく。宇宙線粒子が計数管を通ると管内にイオンを作り, イオンは與へられた電圧により加速され, 管内の氣體分子を電離する。これを繰返して増加されたイオンに依り管壁と針金の間に放電が起るが, 針金には高抵抗が結合されて居り, コンデンサーは小容量である爲, 針金は直ちに高電圧となり, 放電が中止される。此の針金に起る

1) H. Geiger und W. Müller, *Naturwiss.* 16, 617 (1928); *Z. f. Phys.* 29, 839 (1928); *Forsch. u. Fortschr.* 5, 57 (1929); *Phys. Z.* 30, 489 (1929).

脈動電壓を増幅器を用ひて擴大すれば、宇宙線が計数管を通る度毎に、増幅器を鳴らし、或は電話の度數計の様な計数器を動かす事が出来る。かうして一秒間に宇宙線粒子が幾つ来たかを數へて宇宙線の強度を測り得る。

管壁に與へる電壓を變へると、數へる數が第 16 圖の様に變るから、實際使用する時には管壁に加へる電壓が少しは變化しても數の變らぬ様な範圍の電壓を使用する(圖の AB 間の電壓)。勿論其電壓の數値は管の太さ及び中の瓦斯によつて



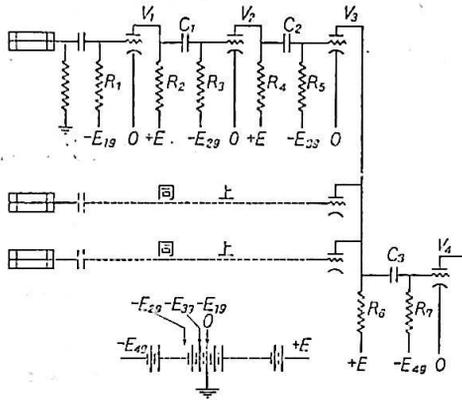
第 16 圖

異なる。尙、ここに問題となるのは、計数管の脈動電壓の持続時間 τ である。一つの宇宙線が計数管を通つてから τ 時間内に又一つの宇宙線が通ると、前の脈動電壓と次の脈動電壓とが連続してしまひ、二つを一つと數へる事となる。それ故 τ は出来る限り小さくする必要がある。その爲には計数管に結合するコンデンサーを小さくすればよいが、これに接続した増幅器への入力小さくなる爲、餘り小さくは出来ず、通常 $10 \mu. \mu. F.$ 位が用ひられてゐる。又同じ目的のために漏洩抵抗を小さくしてもよい譯であるが、これ亦入力小さくなり且つ計数管内に一度放電が起ると持続放電状態になつて、計数管の用をなさなくなる故餘りに小さくは出来ぬ。普通 10^8 ohm 位が用ひられるが、特にアルコール蒸氣を入れた計数管では 10^6 ohm 位でもよい事がある。

第 15 圖の接続方法ではこれが極限であつて、非常に數多くの宇宙線を數へる場合、例へば大きな計数管を用ひる時には、宇宙線を數へ落す事がある。

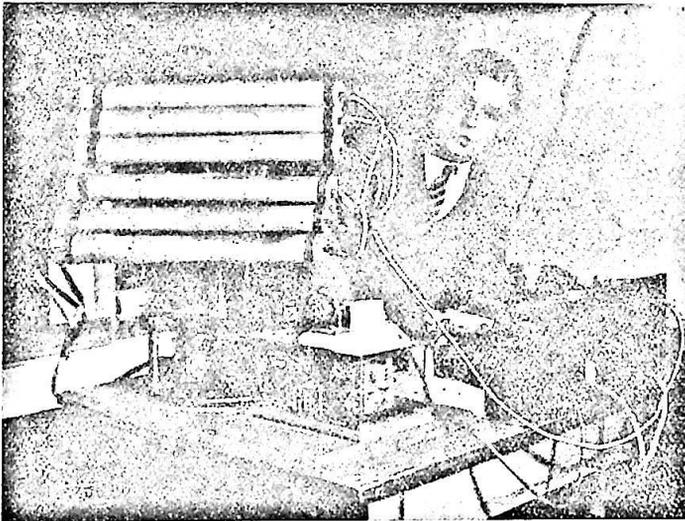
そこで Neher と Harper¹⁾ とは第 17 圖の様な回路を考案して、 τ を

1) H. V. Neher and W. W. Harper, *Phys. Rev.* 49, 940 (1936).



第 18 圖 3 個の同時放電を測る場合の回路。多くの同時放電を測る場合も同様で V_3 迄の一系列の増幅回路が深山並列になるだけである。

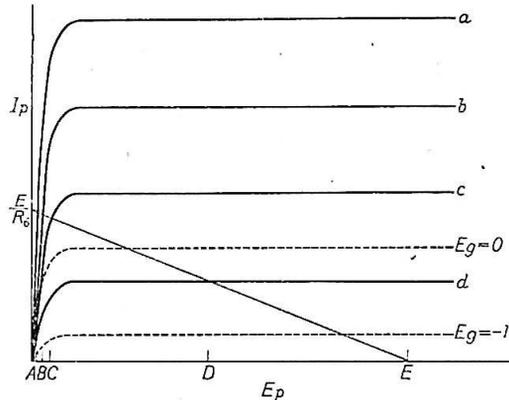
V_3 を 3 個並列に使用した時の $E_p - I_p$ 曲線は、各真空管のグリッド電圧 E_g により第 20 圖の a, b, c, d となる。



第 19 圖 多くの計数管を用ひて宇宙線の来る方向を定める

第 18 図の C_0 の左側の電圧 E_0 は第 20 図で $E_p = E$, $I_p = \frac{E}{R_0}$ を結ぶ直線と, $E_p - I_p$ 曲線との交点から求められる. 真空管 V_3 全部を $E_0 = 0V$ としておけば A なる電圧になるわけである.

計数管が働いた時に, V_3 への入力が一 $1V$ だとすれば, 計数管のどれか



点線は V_3 1 個の時

實線は 3 個並列に用ひた時で

a は 3 個共 $E_g = 0V$

b は 2 個が $E_g = 0V$ 1 個が $E_g = -1V$

c は 1 個が $E_g = 0V$ 2 個が $E_g = -1V$

d は 3 個共 $E_g = -1V$

第 20 図 Rossi 回路の特性曲線

1 個が働けば E_0 は B となり, いづれか 2 個が同時に働けば C となり, 3 個共同時に働けば D となる. 真空管 V_3 と結合抵抗 R_0 を適當に選べば, 1) $B-A$, $C-A$ は小さく, $D-A$ は非常に大きくする事が出来る. そこで次の真空管 V_4 のグリッドに相當高い負電壓を與へておけば, 3 個の計数管が同時に働いた時のみ V_4 が作働する様になるのである.

此の同時放電回路を使用する時に問題となるのは, V_3 に入る脈動電壓の持続時間 τ_a である. 即ち一つの計数管が働いてから τ_a 時間内に他の計

1) 嵯峨根・堀: 數物會誌, 九卷, 三一七頁参照.

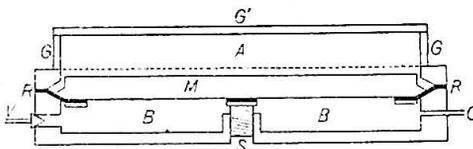
數管が働くと、實際は同時に放電が起きたのでないのに、これをも同時放電として V_0 が作働して終ふ。それ故て e_0 を出来るだけ小さくする必要がある。この爲には V_{1-2} に與へるグリッド・バイアス電壓と C_{1-2} , R_{1-2} を適當に選ばねばならぬ。

3. Wilson 霧函

これは過飽和状態の蒸氣中にイオンがあると、イオンを中心核にして蒸氣が凝結し液滴を作る事を利用した方法である。荷電粒子が瓦斯の中を通ると、その通路にイオンを作つてゆくので、若し過飽和蒸氣のある瓦斯中を通れば、通路が液滴で示される。此の液滴で示された筋、即ち飛跡は肉眼で見ることが出来、又寫眞に撮る事も出来る。

Wilson 霧函といふのは飛跡を得る爲に、瓦斯（空氣、アルゴン、炭酸瓦斯等）と蒸氣（水蒸氣、アルコール蒸氣等）の混合物を急激に膨脹させ、斷熱變化によりその温度を降下させ、瓦斯中に過飽和状態の蒸氣を作る装置である。

瓦斯を膨脹させる機構には種々あるが、宇宙線研究によく用ひられる型の一例をとれば第 21 圖の如くである。



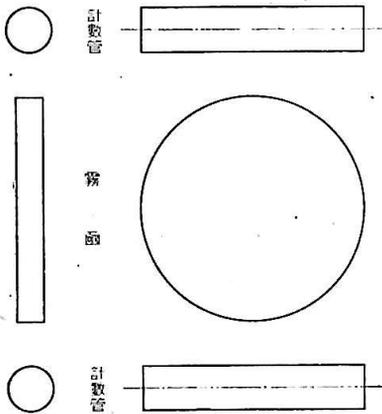
G 硝子の圓筒 G' 硝子板
M 金屬板 R ゴム
V 栓 S 止め金

第 21 圖 Wilson 霧函略圖

圖に於て、平たい圓筒形の二室 A, B は可動部分 M (金屬板), R (ゴム) で境され、A は十分氣密になつてゐる。細孔 C から壓搾空氣を入ると

B 室は壓力が高くなり、 M の表面は點線の所まで押出される。 A 室には前以て適量の水或はアルコールを入れておく。この押出した状態で放置すれば、 A の中は丁度その時の溫度に相當した飽和蒸氣で満たされる。次に栓 V を開くと、 B の空氣は急激に逃げ去り、 A は今まで壓縮されてゐた故 M を押戻して急激に膨脹する。その爲 A 室は溫度が降下し少時の間蒸氣は過飽和状態となる。 M の動く長さに依り膨脹の度合が異り、従つて溫度の降下する度合も違ふから、荷電粒子の通つた跡が判然とする様に止め金 S を調節する。一例としてプロピール・アルコールと空氣を用ひる時は、膨脹前後の容積の比が約 1.1 になる様にすればよい。微細の調節はその時々適當にする。

通常、瓦斯中には塵埃やイオンが澤山に存在し、これらは凝結の核となるので塵埃は沈ませて了ひ、イオンは MG' 間に僅かの電壓を與へて除去し



第 22 圖 Wilson 霧函の設計管制御法

て了ふ。この様な清淨にした瓦斯を用ひれば蒸氣は過飽和状態を少時保つてゐて、この間に丁度荷電粒子が通ればその飛跡が得られるのである。

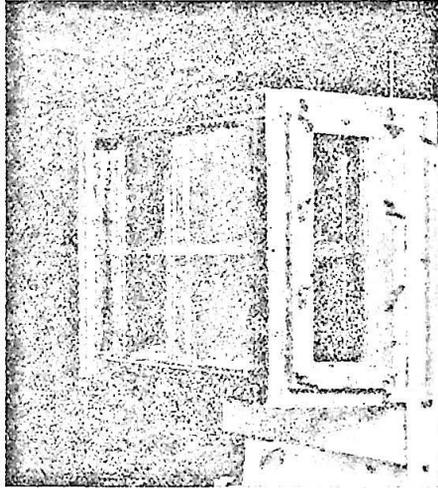
丁度過飽和状態にある短時間内に都合よく宇宙線が通ればよいが、なかなか通らないので、多くの人々は計數管制御法を用ひてゐる。これは第 22 圖の様な配置に依り、宇宙線が計數管全

部を通れば、必ず霧函内を通る様にしておいて、計數管の同時放電回路により繼電器を作働させ、依て霧函を膨脹させるのである。

霧函の型式には第 21 圖以外の型のも種々あるが、宇宙線研究には強磁場

の中で使用される事が多く、強磁場を得る爲には鐵の磁極を用ひ、その極間隔を成可く短かくする必要がある。その爲磁極間に挿入する霧函は出来る限り厚さの薄い形とすべきで、第21圖の型式が多く用ひられるのである。

然し磁場を用ひずに行ふ實驗、例へばシャワー現象に就いての研究の或場合には、大きな箱形のものも作られてゐる。例へばStevenson, Street の使用した第23圖の様なものがある。



Street-Stevenson の Wilson 霧函

第 23 圖

4. 寫眞乾板

特殊の處理¹⁾をした寫眞乾板を包裝のまま放置して宇宙線に曝し、現像すれば宇宙線の飛跡を見る事が出来る。但し電子の様な軽い粒子は作るイオンの密度が小さいから感ぜず、感じるのはエネルギーが 10^7 eV 以下のプロトン、 α 粒子の様な重い荷電粒子だけである。此の方法が霧函よりも優れてゐる點は、第 1: 直接に飛跡が残る事。第 2: 粒子が何時來ても記録される、従つて稀に起る現象の觀測に便利な事。第 3: 乾板は軽いから氣球に乗せるに便利な事。第 4: 適當の高速度のプロトンと α 粒子とを區別し得る事である。此の方法では粒子のエネルギーが適當であれば感光

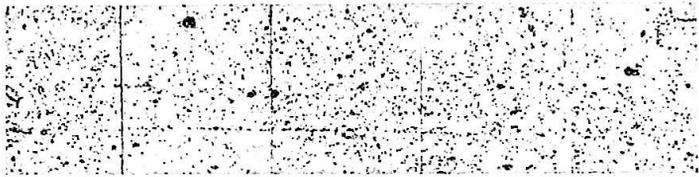
1) M. Blau u. H. Wambacher, *Sitzungsber. Wien*, IIa, 143, 285 (1934).

した乳剤粒子の間隔が荷電粒子の種類によつて異なるのである。例へば¹⁾ α 粒子: 1.63μ , 重水素核: 1.89μ , プロトン: 2.7μ 位の差がある。従つてこの方法は宇宙線による原子核破壊の研究に特に有効である。此の方法はまだ割合に活用されてゐないが、現在までに得られた結果には次の様なものがある。

a) 高度による変化 Explorer II によつて成層圏探險が行はれた際 Rumbaugh 及 Locher²⁾ は寫真乾板を託載して研究した。此の時 22 km の上空 (氣壓 $0.5 \text{ m H}_2\text{O}$) で 2 時間に得られた飛跡の数は、Pike's Peak (4 km , $6 \text{ m H}_2\text{O}$) で一ヶ月間に得られる筈の數に相當してゐた。

b) 中性子の検出 Rumbaugh と Locher は上の實驗の際に、乾板を種々の物質で囲んだ場合を併せ行つた。その結果パラフィンで囲んだ乾板には鉛や炭素で囲んだものに比べて、上空では著しくプロトンの飛跡が多かつた。之は中性子の衝突による反衝プロトンと考へられる。

c) 長い飛跡 第 24 圖は Explorer II の成層圏上昇の際、Wilkins 及 St. Helens³⁾ が得た水平な飛跡を示す。感光した乳剤粒子の數が 350 個



第 24 圖 寫真乾板による宇宙線の飛跡 (Wilkins, Helens)

に及ぶ長いもので、乳剤に吸収されたエネルギーは約 10^8 e.V. である。長い飛跡は α 粒子、小枝はプロトンと考へられる。

-
- 1) T. R. Wilkins and H. J. St. Helens, *Phys. Rev.* 51, 1026 (1937).
 - 2) L. H. Rumbaugh and G. L. Locher, *Phys. Rev.* 49, 855 (1936).
 - 3) T. R. Wilkins and H. St. Helens, *Phys. Rev.* 49, 403 (1936).

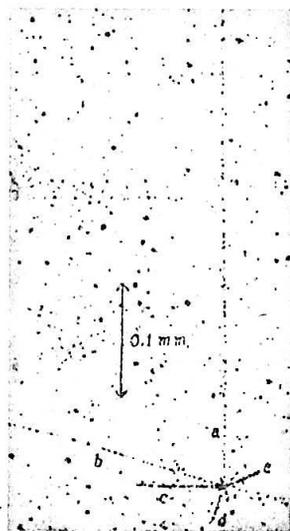
d) 粒子を捕獲しない原子核破壊 Wilkins¹⁾ は上の実験に用いた乾板を調べて、 3° 乃至 5° の小角度で散乱してゐる飛跡を數例見た。その中、乳劑粒子 4 乃至 5 個の小枝を數個、而も主な飛跡の偏倚と同じ側に出してゐる場合が數例あつた。即ち此の小枝は衝突による反衝とは考へられず、従つて高速度粒子を捕獲しない原子核破壊によるものと云つてゐる。

e) 數個の重粒子を同時に放出する原子核破壊 乳劑中の一點から重粒子數個を放出する例は 1937 年以來屢々認められてゐる。

第 25 圖は Schopper²⁾ が 18 km の高空に探測氣球を上げて得たもので重粒子 10 個を放出する例である。a, b はプロトン, d は α -粒子, e は原子核と考へられる。之等は放射性物質には見られない事で、宇宙線による原子核破壊に特有な現象と考へられる。霧函の場合では Blackett³⁾ 及び Brode⁴⁾ が重粒子 3 個を放出したものを各一例認めてゐるに過ぎない。

5. 無線探測 (Radio-zonde)

宇宙線を直接に検出する方法は、現在の所上述の 4 種に盡きるのであるが、電離函及び計數管によつて測定する宇宙線強度は、所謂無線探測の方法によつて傳達される事が屢々あるから、之に就いて少しく述べよう。

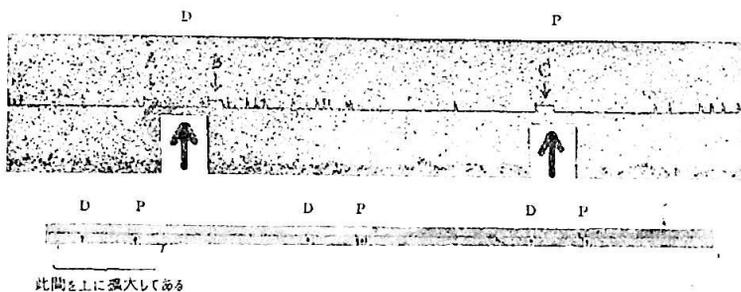


寫眞乾板による宇宙線の原子核破壊
第 25 圖

- 1) T. R. Wilkins, *Phys. Rev.* 50, 1099 (1937).
- 2) E. M. Schopper und E. Schopper, *Phys. Z.* 40. 22 (1939).
- 3) P. M. S. Blackett, *Kernphysik*, 108 (Berlin, 1936).
- 4) R. B. Brode, *Phys. Rev.* 50, 581 (1936).

無線探測は無線によつて上空の氣象状態を探測する爲に近年發達した技術であるが、上空に於ける宇宙線の觀測にも此の方法が必要であり、且つ經濟的でもある。それは後章に述べる様に成層圏の宇宙線強度を知る爲には探測氣球を世界各地に於て約 30km の高空に上げる必要があり、従つて氣球は成層圏の西風に流されて多くの場合數百料の遠方に落下するので、自記装置を氣球によつて飛昇させ、それが落下したのから記録を回収する方法では、之を拾ふ必要上觀測地の選定に甚しい制限を受けるからである。

Compton の此の様な考に基づいて、Doan¹⁾ 及び Keen²⁾ は各々 Compton 型電離函による宇宙線強度を、探測氣球から短波によつて地上に傳へる装置を作つた。それは、電氣計の荷電に従つて小さい鏡が廻轉し、之によつて反射されるランプの光が遂に光電管の窓に入ると、リレーが働いて電波が變調され且つ電氣計が放電するといふ方式で、此の變調の時間的頻度によつて宇宙線強度を知る事が出来る。然し兩者共未だ十分な結果を得るに至つてゐない。



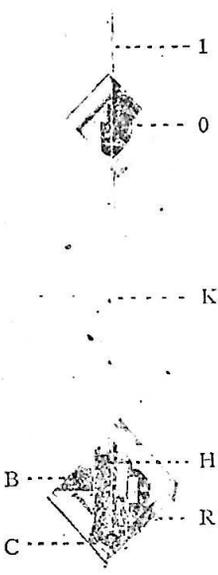
第 26 圖 Korff 等の Geiger-Müller 計數管による無線探測記録

一方 Geiger-Müller 計數管は、元來宇宙線の入射する毎に電氣的衝撃を起すものであるから、その衝撃をその儘電波の變調に用ひれば、無線探測の

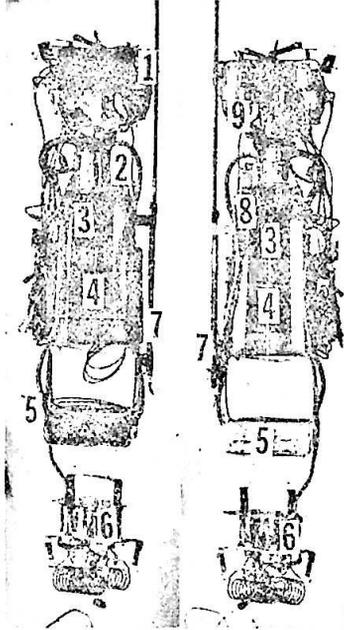
1) R. L. Doan, *Rev. Sci. Instr.* 7, 400 (1936).

2) C. D. Keen, *J. Frank. Inst.* 223, 355 (1937).

爲には最も便利である。Korff 等¹⁾は 1 個の小計數管に起る電氣的衝撃を 1 個の SG 管で増幅し、それによつて小さなリレーを働かせて、その度に電波が發射される方式を採つた。そして此の同じ發信器が又、氣壓計に屬する電氣的接點の接觸によつて時々電波を發射する様になつてゐて、此の接點はアネロイド氣壓計の動きを機械的に擴大する事によつて少しづつ移動する様になつてゐる。第 26 圖は受信の記録であつて、細かい衝撃は宇宙線、A, B, C は氣壓の信號である。D は凡そ等間隔に繰返す様になつてゐて、 $\overline{DP}/\overline{DD}$ から氣壓がわかる様になつてゐる。第 27 圖は送信機



Korff 等の無線探測用送信機
第 27 圖



Johnson の無線送信機
第 28 圖

1) S. A. Korff, L. F. Curtiss and A. V. Astin, *Phys. Rev.* 53, 14, 23 (1938).

第 III 章 宇宙線の強度観測

宇宙線の強度は色々の自然現象によつて影響されるからその影響を分離して考察する爲めに種々の測定が行はれる。例へば地球へはいつて来る宇宙線粒子のエネルギーを知る爲めに種々の緯度で種々の高さに於ける強度を測定するが如きである。

1. 磁気緯經度と宇宙線強度

先づこれから述べるのは、宇宙の一方より宇宙の他方へ光に近い速度で飛び交ふ荷電粒子の群の中に地球が存在する時に、どんな現象が生ずるかと言ふ問題である。これは三十年以前から Birkeland, Störmer 其他の人々に依つて研究せられて来た極光の問題に於いて、電子の速度を光に近いものとすれば解き得られる。

a) 緯度効果

磁気双極子場内に於ける荷電粒子の運動の問題を解決する爲めに Störmer¹⁾ は理論的研究に多くの年月を費した。これに基づいて Lemaitre と Vallarta²⁾ は更に具體的な計算を行つて宇宙線の緯度効果を説明した。その概観を述べる事にする。

荷電粒子の位置を (r, λ, φ) で表はす。但し r は地球の中心からの距離、 φ, λ は地磁気緯經度を表し、その方向は第 30 圖に示す通りである。

r, λ 及び φ の増す方向にとつた地球磁場の成分は夫々

$$H_r = \frac{2M}{r^3} \sin \lambda, \quad H_\lambda = -\frac{M}{r^3} \cos \lambda, \quad H_\varphi = 0 \quad (3.1)$$

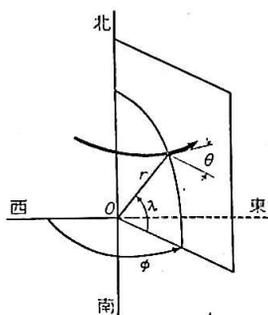
こゝに M は地球の磁気能率である。

- 1) C. Störmer *Z. f. Astrophys.* 3, 31, 227, 312 (1931); 4, 290 (1932); 6, 333 (1933).
- 2) G. Lemaitre and M. S. Vallarta. *Phys. Rev.* 43, 87 (1933); 49, 719 (1936); 50, 493 (1936)

この磁場内で質量 m , 荷電 e なる粒子が V なる速度で動くとき,
 $F = e[V, H]$ なる力を受ける。従つて運動

の方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}(m\dot{r}) - mr(\dot{\lambda}^2 + \cos^2 \lambda \dot{\phi}^2) &= F_r \\ \frac{d}{dt}(mr^2 \dot{\lambda}) + mr^2 \sin \lambda \dot{\phi}^2 &= rF_\lambda \\ \frac{d}{dt}(mr^2 \cos^2 \lambda \dot{\phi}) &= r \cos \lambda F_\phi \end{aligned} \right\} (3.3)$$



第 30 圖

これに F の (r, λ, ϕ) 成分を入れて簡単にすれば

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{r} - mr(\dot{\lambda}^2 + \dot{\phi}^2 \cos^2 \lambda) &= \frac{eM}{r^2} \cos^2 \lambda \dot{\phi} \\ 2mr\dot{r}\dot{\lambda} + mr^2\ddot{\lambda} + mr^2 \sin \lambda \cos \lambda \dot{\phi}^2 &= \frac{2eM}{r} \cos \lambda \sin \lambda \dot{\phi} \\ \frac{d}{dt}(mr^2 \cos^2 \lambda \dot{\phi}) &= -r \cos \lambda \left(\frac{eM}{r^3} \cos \lambda \dot{r} + \frac{2eM}{r^2} \sin \lambda \dot{\lambda} \right) \end{aligned} \right\} (3.3)$$

となる。

最後の方程式は直ちに積分出來て

$$-\frac{m}{eM} r^2 \dot{\phi} \cos^2 \lambda = 2r + \frac{1}{r} \cos^2 \lambda \quad (3.4)$$

こゝに r は積分常數であつて、無限遠に於ける粒子の角運動量の ϕ 成分に比例する。無限遠では粒子が任意の方向に動いて居るであらうから r は $-\infty$ から $+\infty$ までの總べての値を取り得る。尙地球の磁場内に於ける運動は二つの運動に分ち得るもので、それは子午面内の運動と磁氣軸の周圍に於ける子午面の廻轉運動とである。

子午面に對する粒子の軌道の傾きを θ とすれば、次の關係がある。

$$\sin \theta = \frac{r \cos \lambda}{v} \frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

こゝに v は粒子の速度である。この場合單位を變へて長さを次の様に表はすと、もつと簡単に議論する事が出来る。

$$x = \left(\frac{mv}{\pm eM} \right)^{\frac{1}{2}} r \quad (3.6)$$

但し分母の符號は正荷電の粒子のとき +, 負荷電の粒子のとき - を取る, 粒子の運動勢力が電子ボルト (electron-volt) で表される時は次の如く書かれる。

$$x = r \left[\frac{V}{300 M Z e} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{600 m_0 c^2}{eV} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.7)$$

こゝに V は電子ボルトで測つた粒子のエネルギー, c は真空中に於ける光の速度, $Z e$ は粒子の荷電の絶対値, e は電子の電荷, m_0 は粒子の静止質量である。同じ様に r の代りに次の如く定義した新しい r_1 を使用すれば便利である。

$$r_1 = - \left(\frac{\pm eM}{mv} \right)^{\frac{1}{2}} r \quad (3.8)$$

故に (3.5) は (3.4) に依つて次の様になる。

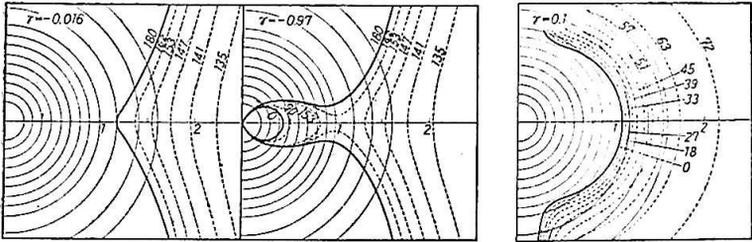
$$\mp \sin \theta = \frac{\cos \lambda}{x^2} - \frac{2 r_1}{x \cos \lambda} \quad (3.9)$$

(3.9) に於いて $|\sin \theta| < 1$ でなければならぬから陽電荷粒子の場合には

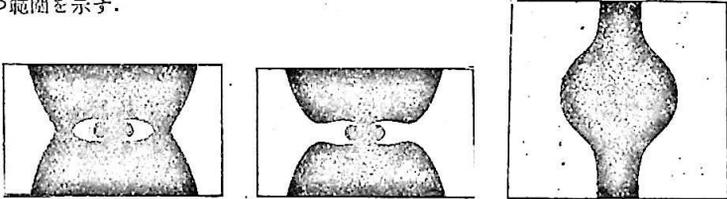
$$-\frac{\cos \lambda}{x^2} + \frac{2 r_1}{x \cos \lambda} > 1 \quad (3.10)$$

の範圍へは粒子が這入つて來られない事となる。その範圍の形は r_1 に依つて變化する。これは Störmer に依つて詳しく計算せられてゐるが、その例を擧げて見ると第 31 圖の如きものである。但し此曲線は (3.10) の x と λ とを極座標として描いたものである。

此圖上に地球の半徑に相當する圓を描けば、或範圍の緯度では地球表面が禁止區域の外に顯れてゐることがわかる。又全然顯れない事もある。前の場合では宇宙線は地球表面に達し後の場合には地球表面に達しない。



上圖の点線上の数字は粒子の入射方向と、其粒子の到達點に於て西より東に引いた地球面への接線との角。下圖の間黒部は上圖に相當して、粒子の到達不可能の範圍を示す。



第 31 圖 Störmer による粒子の到達範圍

圖では長さが x で目盛つてあるから圓を畫く爲めには地球の半徑 $R=6,370$ km を x で表はさねばならぬ。(3.7) 式の r に R を代入した時の x を x_0 と書けば、これが圓の半徑を示すのであるがこれは尙 V, Z, m_0 が含まれてゐる。 Z, m_0 は宇宙線の粒子の種類で定まる故、結局 x_0 は V のみの函数となる。これを表示すれば第 1 表の如くなる。例へば $0.54 \times 10^{10} eV$ の電子の場合には、表により $x_0=0.3$ であるから、第 31 圖に於て $x=0.3$ の半徑の圓が地表を示す事になる。圖の多くの圓は第 1 表の x_0 で描いたものである。

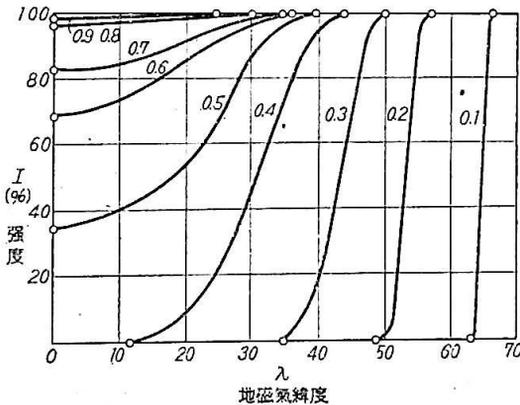
この様にして或エネルギーの粒子が地表に到達出来る緯度の範圍が、各 r_1 に對して求められる、理論の結果から分ることであるが、地表の各一點に到達し得る粒子の通路に對する包絡面は、粒子のエネルギーと r_1 とを與へれば其點の近くに於て一つの錐面をなす。このエネルギーを持ち凡ゆる可能な r_1 の粒子の通路は一つの錐の内部を一樣に充すから、錐の立體角の 2π に對する % を求めれば、各緯度に對してそのエネルギーを有する粒子の中、其點に到達し得るものが幾 % であるかが求められる。これが第 32

圖である。實際我々の緯度効果として測定するのは、色々のエネルギーのものを全部纏めた強度であるから、第 32 圖の各曲線の表はす強度分布に宇宙線粒子のエネルギー分布を乗じて積分したものである。

第 1 表

| x_0 | 電子 (10^{10} eV) | 陽子 (10^{10} eV) | 粒子 (10^{10} eV) |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.1 | 0.06 | 0.017 | 0.018 |
| 0.2 | 0.24 | 0.16 | 0.23 |
| 0.3 | 0.54 | 0.45 | 0.76 |
| 0.4 | 0.95 | 0.85 | 1.56 |
| 0.5 | 1.49 | 1.40 | 2.63 |
| 0.6 | 2.15 | 2.05 | 3.93 |
| 0.7 | 2.92 | 2.82 | 5.46 |
| 0.8 | 3.82 | 3.72 | 7.25 |
| 0.9 | 4.83 | 4.73 | 9.27 |
| 1.0 | 5.96 | 5.85 | 11.52 |

其結果はもし宇宙線粒子のもつエネルギーに最低限がないものとすれば第 33 圖 ABC 曲線の如き形となる筈である。もし大氣の吸収とか其他の原因で小さいエネルギーの粒子が地表面へ來ないならば ABD の如くなる筈である。

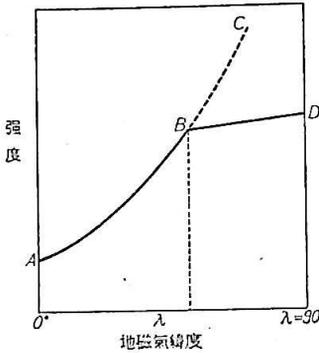


色々のエネルギーの粒子の強度が緯度と共に何う變化するかを計算したもの (Lemaître-Vallarta).
曲線に付けた數字は x_0 にて表したエネルギー

第 32 圖

實際の測定値は ABD 曲線を作るが果して大氣の吸収なりや否やは問題

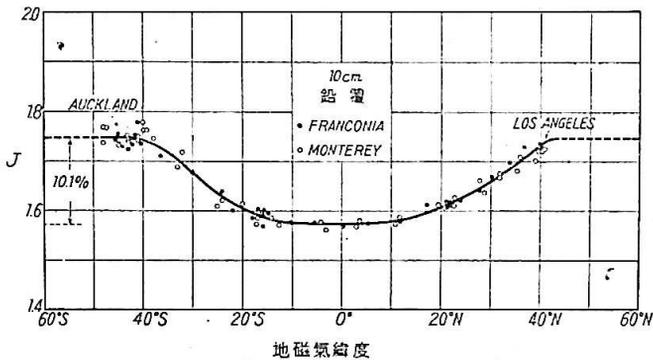
でこれについては後に述べる。



第 33 圖 緯度効果

計算の精しい事は原論文にゆづつて宇宙線緯度効果に關して爲された測定結果を述べる事とする。先づ最初に緯度効果を實驗的に示したのが和蘭の Clay¹⁾で 1927 年の事であつた。彼が発見する前にも多くの人々によつて試みられたのであるが、皆緯度の高い處に於いてのみ爲されて

ゐたので、下に述べる理由によりその結果は否定的のものばかりであつた。しかし Clay は Amsterdam から Java 島の Bandoeng まで赤道を越えて航海し、その観測の結果からここに緯度効果を実證して宇宙線の本質を

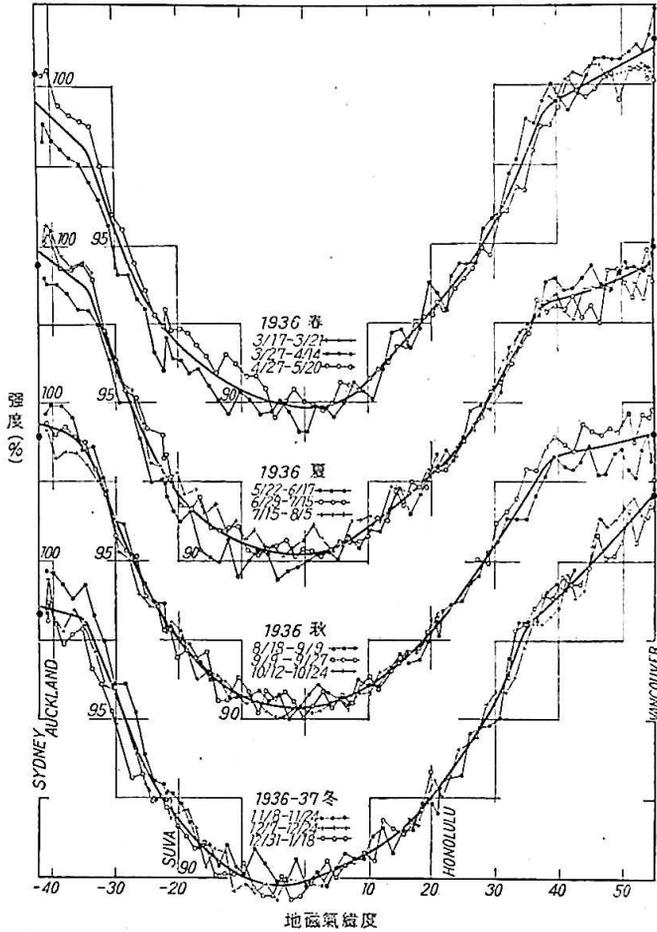


Millikan Neher に依つて汽船 Franconia と Monterey とで測定せられた緯度効果の一例を示す

第 34 圖

1) J. Clay, *Proc. Amsterdam*, 33, 711 (1930)

知る爲めの新しい鍵を一つ増したのである。後 Clay 及び Berlage¹⁾ は緯度効果は地理的緯度よりも寧ろ磁氣的緯度の函数である事を明かにした。



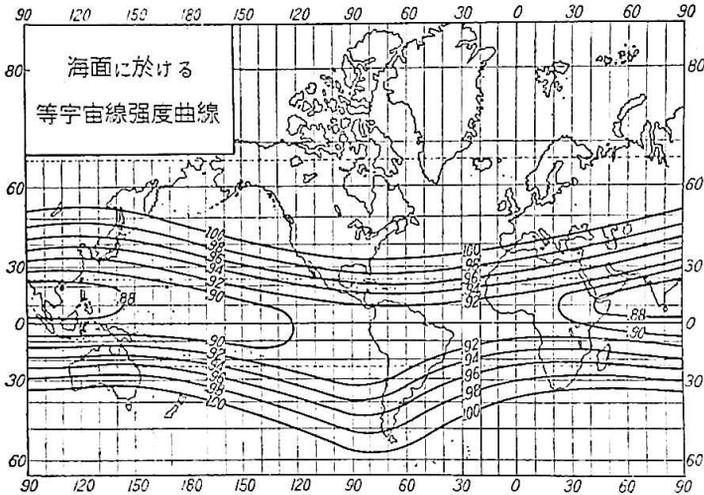
Compton 及び Turner に依つて測定された東太平洋に於ける緯度効果で四季に分つて行つたものである。

第 35 圖

1) J. Clay and H. P. Berlage. *Naturwiss.* 20, 687 (1932)

1932年までの一見矛盾するが如く見へた結果は、次に示す様に 40° ~ 50° 以上の地では宇宙線強度がほぼ一定で、それから赤道に行くに従つて 13% 位減少することが知れて解釋が付いた。緯度効果は多くの實驗者に依つて確められて居るがその一例として第 34 圖、第 35 圖をかゝけて置く。

其結果で重要な事は地理的緯度ではなく地磁氣緯度に強度が依存する事である。地表で等しい宇宙線強度を示す曲線を第 36 圖に圖示したが是に



等宇宙線強度曲線は大體に於て地磁氣緯度に平行であるが、南亞米利加と經度效果を示す地磁氣赤道は例外である。

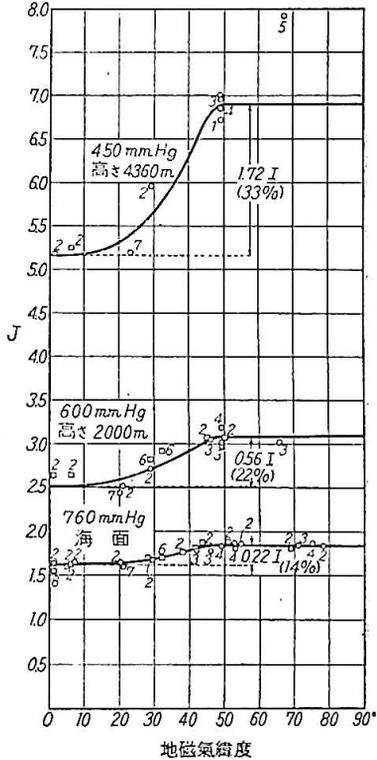
北の 1.00 線以北及び南の 1.00 線以南は強度ほぼ一定である。

第 36 圖

依れば東半球の方が西半球よりも強度が弱く印度・馬來邊にその最弱の處がある(經度効果)。この事は地球磁氣の中心と地球の中心とが一致しない事に依つて説明せられる。尙 Compton 及び其協力者, Clay, Millikan, Bowen, Korff, Neher, Hoerlin 等に依つて高さと共に緯度効果の増す事が示された。地上で 15% の緯度効果が 4,300 米の高地では 33% になつてゐる。(第 37 圖, 詳しくは上空に於ける宇宙線の強度 (49 ~ 52 頁) の項参照)

Compton¹⁾ は 69 の測定地點に於ける観測に依つて、宇宙線に對して地磁気緯度が決定的なものであつて、地上の局所的磁場も 100 km の高さまでの磁場は影響を及ぼさない。即ち緯度効果は地球の近くの大氣の層で出來た粒子によつて生ずるものでない事を示してゐる。従つて Clay 及び Compton は彼等の緯度効果の結果より Bothe と Kolhörster²⁾ の説を確めたものと見てゐる。即ち一次の宇宙線は既に地球の大氣に入る前に荷電粒子よりなると云ふ事である。

最後に Jánossy³⁾ は太陽の磁場 (1.7×10^{34} ガウス・糶³ と推定せられてゐる) に依つて、地球の磁場及び大氣に依る吸収がなくても 2.3×10^{10} eV から 3.9×10^9 eV のエネルギーの宇宙線は到達を妨げられる事を示した。第 33 圖の處で述べた様に、ある緯度以上は宇宙



Compton 及び其協同者に依つて測定せられた緯度効果の高さに依る變化。

第 37 圖

線強度に變化のないのはこれによるのかも知れない。この太陽の磁場は地

- 1) A. H. Compton, *Phys. Rev.* 43, 387 (1933).
- 2) W. Bothe u. W. Kolhörster, *Naturwiss.* 16, 1045(1928); *Phys. Z.* 30, 516 (1929)
- 3) L. Jánossy, *Z. Phys.* 1.5. 334 (1937)

球上で宇宙線強度に太陽時の周期を與へるかも知れない。

b) 経度効果¹⁾ 宇宙線の緯度効果を測定してゐる間に最初に注意を惹いたのは Hoerlin²⁾ の結果である。彼が 1932 年, 1933 年に Bremen から Peru まで航海して得た宇宙線強度は, 北半球と南半球とで地磁気緯度に對しても地理緯度に對しても對稱でない事を示した。Clay, Van Alphen

第 2 表

| 番號 | 地磁気緯度 | 地理的緯度 | 地理的經度 | 観測の位置 | $\Delta I_0/I_0$ 計 算 | $\Delta I_0/I_0$ 観 測 | $\Delta I_1/I_1$ 計 算 | $\Delta I_1/I_1$ 観 測 | 観 測 者 |
|----|-------|-------|-------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0 | 12S | 76W | Lima, Peru | 1.9 | 1.2 | — | — | Millikan and Neher |
| 2 | 0 | 0 | 160W | SS route Honolulu to Sydney or Melbourne | -3.7 | -0.8 | — | — | " |
| 3 | 0 | 10N | 75 E | SS route Bombay to Colombo | 0 | 0 | — | — | Clay, van Alphen and 't Hooft |
| 4 | 0 | 6S | 15W | SS route Southamp- ton to Cape Town | 4.2 | 4.2 | — | — | " |
| 5 | 0 | 12N | 110E | SS route Honkong to Singapore | -2.5 | -3.8 (?) | — | — | Millikan and Neher |
| 6 | 0 | 10 S | 100W | 1000 miles SW of Galapagos | — | — | — | — | |
| 7 | -10 | 2 N | 104E | Singapore | — | — | -5.4 | -5.2 | Millikan and Neher |
| 8 | +10 | 2S | 80W | Guayaquil | — | — | — | — | " |
| 9 | -20 | 6S | 106E | Batavia | — | — | -4.0 | -7.0 (?) | Clay, van Alphen and 't Hooft |
| 10 | 20 | 9N | 76W | Panama | — | — | — | — | Millikan and Neher |

(Vallarta に依る)

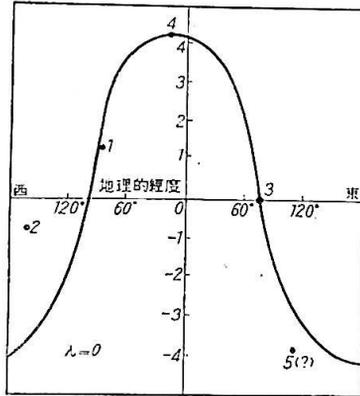
1) M. S. Vallarta. *Phys. Rev.* 47. 647 (1935)

2) H. Hoerlin. *Naturwiss.* 21, 822 (1933); *Nature.* 132, 61 (1933); *Z. f. Phys.* 102, 652 (1936)

及び 't Hooft¹⁾ はこの非對稱を、地球磁場の非對稱に依る經度効果であると説明した(第 36 圖参照). 其後

Millikan 及び Neher²⁾ は Los Angeles 及び Mollendo, Peru) の間の航海及び世界觀測航海に依つても經度効果のある事を示した.

Vallarta に依つて爲された計算と觀測値の比較を第 2 表, 第 38 圖に示さう. $\Delta I_0/I_0$ は地磁氣赤道に沿つて, $\Delta I_1/I_1$ は夫々 $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ に沿つての變化を表す.



地磁赤道に沿つての經度効果

第 38 圖

c) 東西効果³⁾ 荷電粒子は地

球磁場内に於いて緯經度効果を示すばかりでなく、赤道に近い磁氣緯度では方位角に依つても非對稱性を示すものである。これは低緯度、高地に於ける Johnson⁴⁾ の測定、並びに Alvarez 及び Compton⁵⁾ の測定に依つて見出されたもので、東からよりも西からの方が宇宙線が多く來るのである。

東西効果に関しては多くの研究者が色々の結果を出してゐるが、それを一つづつ擧げてゐては煩雜するから、天頂角と共に東西効果がどう變化するかを示した實驗を第 3 表に表示しよう。この効果は荷電粒子の荷電の正負により (3.9) 式に \pm 符號がある爲めに起る事で、西方より多く來るのは正荷電の粒子の多い事を示して居る。

1) J. Caly, P. M. van Alphen and C. G. 't Hooft. *Physica*. 1, 829 (1934)

2) R. A. Millikan and H. V. Neher. *Phys. Rev.* 47, 205 (1935)

3) G. Lemaitre and M. S. Vallarta *Phys. Rev.* 50, 493 (1936)

4) T. H. Johnson, *Phys. Rev.* 48, 287 (1935)

5) L. Alvarez and A. H. Compton, *Phys. Rev.* 43, 835 (1933)

第 3 表

| 観測者 | 場所 | 地磁気緯度 ϕ_m | 高さ m | 東西差異 (%) | | | |
|--------------------|------------|-------------------|---------|----------|-------|--------|-------|
| | | | | 150° * | 30° * | 450° * | 60° * |
| Johnson, Stevenson | Swarthmore | +51 | 0 | +1 | +3.2 | +2.5 | |
| Stearns, Froman | Mt. Evans | +50 | 4400 | +1.6 | +2.1 | +1.9 | |
| Stevenson | Colorado | +48 | 3100 | | +2.2 | +2.3 | |
| Ehmert | Zugspitze | +45 | 3000 | -1.36 | 0 | 0 | +3.9 |
| Alvarez, Compton | Mexico | +29 | 2310 | +3 | +5.5 | +12 | |
| Johnson | Mexico | +29 | 2250 | | +6.8 | +10.2 | |
| Rossi | Asmara | +11 | 2370 | +11 | +15.7 | +18.8 | |
| Johnson | Peru | 0 | 0 | +6 | +8 | +10 | |
| | | 0 | 3500 | +6.5 | +10 | +13 | +12 |
| | | 0 | 4500 | +7 | +13 | +14 | +13 |
| Korff | Peru | -3 | 2400 | +6 | +9.5 | +13.8 | +12 |

* 角度は天頂角を表す

d) 南北効果 Johnson¹⁾ は 1934 年に Mexico (+29°, 2,280m 及び 4,300 m) で、北より来る宇宙線粒子よりも南の方からのものが僅かに多い事を観測した。この値は天頂角及び測定場所の高さに依つて異なる。その説明は Lemaitre, Vallarta 及び Bouckaert²⁾ に依つて爲されてゐる。即ち正粒子の入射する主な方向は磁気赤道に於ては西であり、赤道面に對して南北對稱であるが、北半球へ行くに従つて南からの方がよく来る様になり、南半球へ行くに従つて北から餘計に来る様になる。實際 Clay³⁾ は Bandoeng (-18° 磁気緯度) で 20° の天頂角で 4% だけ北から多く来る事を示してゐる。

2. 上空に於ける宇宙線強度

a) 高さによる強度變化 密閉した電離函内に起る電離の強度が上空に

1) T. H. Johnson, *Phys. Rev.* 47, 91 (1935)2) G. Lemaitre, M. S. Vallarta and L. Bouckaert, 1935 *Phys. Rev.* 47, 434 (1935)3) J. Clay, *Physica.* 2, 861 (1935)

昇るに従つて著しく増加する事は、それ自體が宇宙線の發見を導いた事實である。第 I 章に述べた通り Gockel, Hess に次いで Kolhörster は、既に 1913 年に 9 km の上空にまで氣球を上げて觀測し、宇宙線は空氣による見掛けの吸収係数が $0.55/\text{mH}_2\text{O}$ に相當する非常な透過性を持つたものである事を知つた。その後間もなく歐洲大戰に入つて研究が一時停頓した。大戰後 Millikan は、宇宙線の本源は地球外部より入射する高勢力の光子であらうと想像し、それならば宇宙線強度は上空に昇れば遂に極大に達し、再び減少するであらうと考へた。そして 1922 年、彼は 15.5 km の成層圏に探測氣球を上げて測定を試みたが、實驗が不正確であつたことは第 I 章に述べた通りである。

其の後 1926 年頃から世界各地で飛行機による宇宙線の強度測定が盛になつて、前の Kolhörster の結果を確めなどしてゐたが、1931 年及 1932 年に Piccard¹⁾ が氣球に乗つて成層圏に昇るに及んで、宇宙線に關する知識は一躍 70 mmHg (16 km) の上空にまで擴げられた。そして、前に Kolhörster が得た吸収係数は 9 km 以上の上空にまでも適用されるものでなく、見掛けの吸収係数は高さと共に次第に減じ、宇宙線強度は遂に一定の値に達するかの様に見えた。之に力を得て、翌 1933 年の 11 月には Fordney 及 Settle²⁾ が New York 近郊で更に大掛りな成層圏探險を行ひ、宇宙線の他氣象光學、生物學等に互る研究を併せ行つた。此の 2 人乗の氣球は、容積 17,000 m³、バラスト以外の重量 1,700 kg に達するもので、45 ノットの速度で上昇し、18.7 km 即 49.5 mmHg の上空に達し、8 時間後に着陸した。その際 Millikan³⁾ は Neher 型自記耐震電離函を積込み、第 39 圖に示す様な精密な記録を取る事が出来た。此の氣球は頂上の 18.7 km 附近で 3 時

1) A. Piccard et M. Cosyns, *Comptes Rendus*, 195, 604 (1932)

2) W. F. G. Swann and C. L. Locher, *Phys. Rev.* 47, 326 (1935)

3) I. S. Bowen, R. A. Millikan and H. V. Neher, *Phys. Rev.* 46, 641 (1936)

間以上も動かずにゐたから、その點でも観測は後述の探測氣球によるもの



Neher 型電離函の記録。線の傾斜が宇宙線強度を表はす、左端は高度 20,000 呎、それより四つ目(20 分後)は高度 45,000 呎。

第 39 圖

よりも精密である。然し宇宙線強度の極大を見出すには未だ至らなかつた。

次に米國の Captain A. W. Stevens と Captain O. A. Anderson¹⁾ (1935) は、氣球 Explorer II に乗り南 Dakota の上空 21.9 km に達し、宇宙線の強度、爆發現象、寫眞乾板による宇宙線粒子の飛跡、その他氣象學的並に生物學的研究を行つて貴重な收獲を得た。

氣球に塔乗して達し得る高さには限りがあるから、更に上層の強度を観測するには探測氣球による他はない。これは宇宙線、氣壓、溫度の自働記録器を氣球に載せて昇飛させ、ある高さに達すると自働的に氣球が破れて下降するやうにしたもので、落下した氣球を發見した人から記録を送り返して貰ふものである。Bowen と Millikan²⁾ は既に 1932 年の夏、輕便な自記電離函を附けた探測氣球を上げて記録をとつた處、氣球は 32 mmHg まで上つて居り、宇宙線強度は 62 mmHg までの所を知る事が出來た。一方 Regener³⁾ は同年暮より翌春にかけてやはり自記電離函を上げ、Fordney-Settle より先に 17.6 mmHg に至るまでの宇宙線強度を測定し、漸く強度に極大のあることを確める事が出來た。

次いで Bowen, Millikan, Neher は極めて精巧な装置を用ひて多くの氣

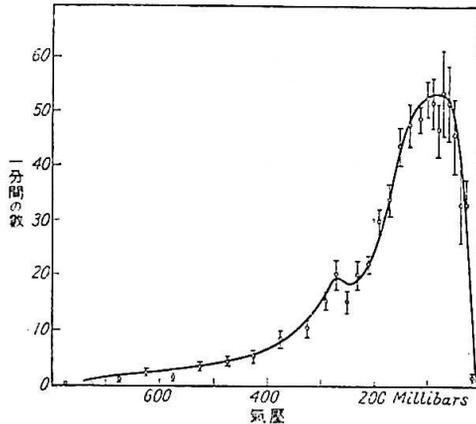
1) *National Geographic Society, Stratosphere Series, No. 2, 1936*

2) I. S. Bowen and R. A. Millikan, *Phys. Rev.* 43, 695 (1933)

3) E. Regener, *Phys. Z.* 34, 306, 820 (1933)

球探測を行つた。其結果は b) に於て述べる。

第 11 章 5 で述べた通り探測気球による記録の回収が困難な場合には無線探測を行ふ。第 40 圖は Korff 等¹⁾ が 1937 年に Washington で Geiger-



第 40 圖 Korff の無線探測の結果

Müller 計數管を用ひて行つた 18 回の無線探測の中 10 回分の結果を平均したもので、或る場合には 3.8 mmHg 即ち大氣の 99.5 % にまで達してゐる。結果は大體に於て前述の電離函による結果と一致してゐるが、大氣最上層の宇宙線強度が極度に小さいことゝ、200 mmHg 邊に強度の瘤があることは、將來吟味すべき點である。

b) 上空に於ける緯度効果 大戰後世界各地で飛行機による觀測が盛になつた爲に、上空に於ける緯度効果に關する材料が次第にふえて來た。就中 Millikan は宇宙線の本源は光子であるとの先入観を持つてゐた爲に、當時地上乃至高山に於ける緯度効果に對しては疑を抱いてゐたが、上空で精密な測定を行へば或は緯度効果のある成分を見出す事が出来るかと思ひ、

1) 33 頁註¹⁾

1931年に北米より南米に亘る五ヶ所で飛行機による観測を行つた。¹⁾前に述べた Neher 型自記耐震電離函は此の目的の爲に作られたもので、その記録から水柱 4.5 m の上空に至るまでの緯度効果を明かにする事が出来た。

以後 Millikan は、此の軽くて精巧な測定器を更に軽くする爲に、電気計の充電には Neher-Hynes の作つた蓄電器を用ひ、探測気球によつて大氣の頂上に至るまでの緯度効果を調べ上げる事を目指した。第 4 表及第 41 圖 a は今日までに得られた結果²⁾である。何れの場合も、低空の部分は氣

第 4 表

| | 観測地 | 地磁気緯度 | 観測時 | 高度記録 |
|---|--------------------|-------|------------|-----------|
| A | Saskatoon, Canada | 60° N | 1937 年 8 月 | 14.3 mmHg |
| B | Omaha, U. S. A. | 51° N | " 8, 9 | 9.9 |
| C | San Antonio, Texas | 38° N | 1936 7 | 12.9 |
| D | Madras India | 3° N | " 10 | " |

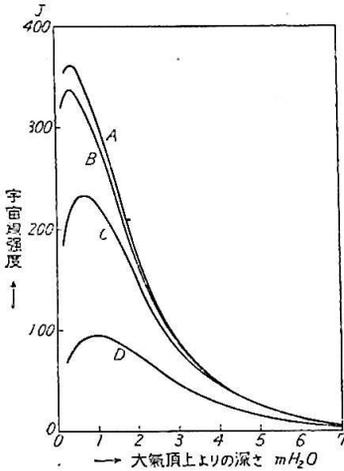
球が急速に上昇して測定が不精密となるから、夫々前に飛行機で測定した結果によつて補つてある。

又一方では 1937 年の夏に Wordie の探險隊が Greenland の北西方に向けて出發した。その際に Carmichael と Dymond³⁾ は地磁気緯度 85° の地點で探測気球を上げ、宇宙線による電離を測定した。結果は Regener の曲線と共に第 41 圖 b に掲げてある。

地球外部から入射する荷電粒子の $\left| \frac{e}{m} \right|$ を假に一定のものとする、地磁

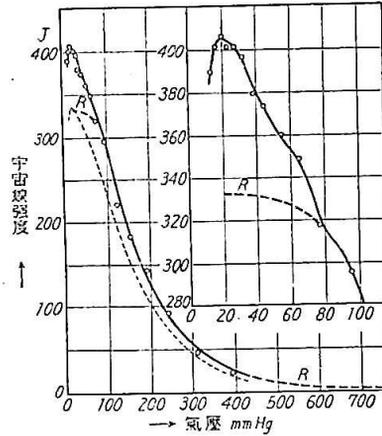
- 1) R. A. Millikan, *Phys. Rev.* 39, 391 (1932); *Carnegie Inst. Year Book*, 32, 341 (1932); I. S. Bowen, R. A. Millikan, S. A. Korff and H. V. Neher, *Phys. Rev.* 50, 579 (1936)
- 2) I. S. Bowen, R. A. Millikan and H. V. Neher, *Phys. Rev.* 53, 855 (1938)
- 3) H. Carmichael and E. G. Dymond, *Nature*. 141, 910 (1938)

氣緯度の異なる二地點の宇宙線強度の差は、略一定の勢力を以て入射した荷電粒子に起因する電離に等しい。例へば入射する荷電粒子を電子と假定すれば、第41圖 a の曲線 D は光子及び入射勢力 17.10^9 eV 以上の電子によ



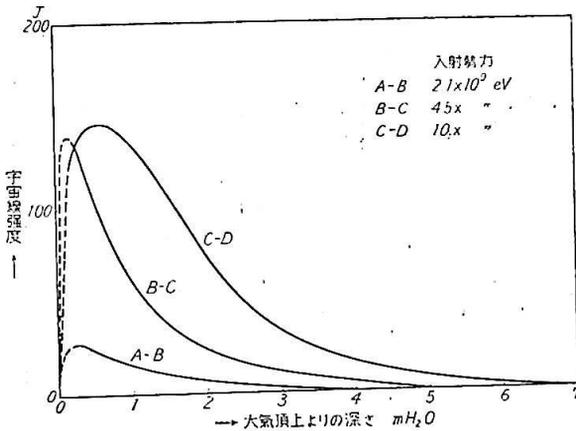
Millikan-Neher の高度曲線

第 41 圖 a



----- Regener $\lambda=45^\circ$
 Carmichael $\lambda=85^\circ$ 實測値
 ——— Carmichael の曲線を 20% 増加し
 低空部に於て Regener と一致させたもの
 Regener 及 Carmichael の高度曲線

第 41 圖 b

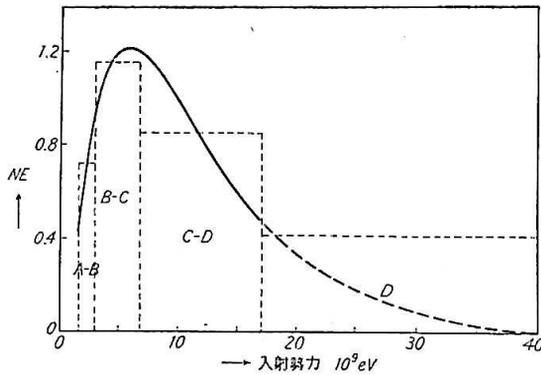


入射勢力
 A-B 2.1×10^9 eV
 B-C $4.5 \times$ "
 C-D $10 \times$ "

第 42 圖

る電離であり、同圖 C は光子及び入射勢力 $7 \cdot 10^9$ eV 以上の電子による電離である。従つて兩曲線の差、第 42 圖 C-D は入射勢力 (7~17) 10^9 eV の電子のみによる電離の高度曲線である。同様にして得られた第 42 圖の諸曲線は、宇宙線の本質を究明する最も重要な材料である。

又第 42 圖の各曲線によつて夫々囲まれた面積は、夫々の勢力を以て入射した粒子の作るイオンの總量を表はし、従つて夫々の勢力を以て入射す

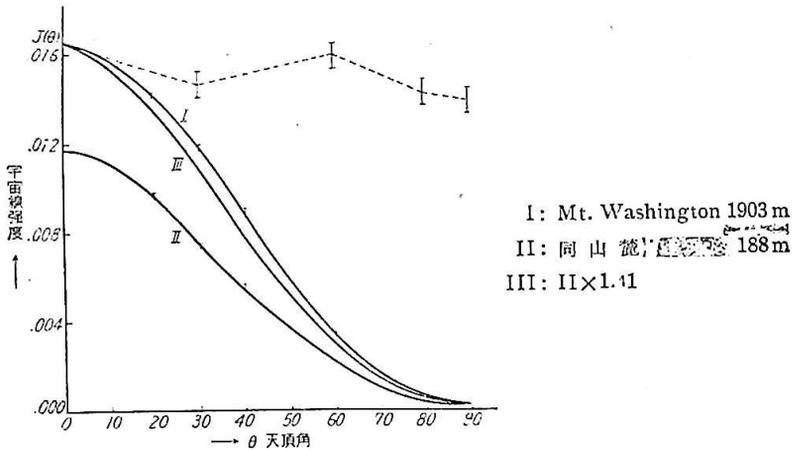


横軸の勢力は入射する帯電粒子を電子と假定した時の値。縦軸は NE. 但し N は $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ に入射する電子の $1 \cdot 10^{10}$ eV 當りの数, E はその電子の勢力。

第 43 圖 地球外部より入射する宇宙線のエネルギー分布

る粒子の全エネルギーに比例してゐる。之に依つて入射する宇宙線の勢力分布を求めれば第 43 圖の様になる。即ち地磁氣の影響を受けぬ成分 (面積 D) は全體の $\frac{1}{3}$ であり、若しその半分を光子と考へるならば、宇宙線の勢力の $\frac{5}{6}$ は荷電粒子として入射してゐる事となる。又荷電粒子の勢力分布の極大は $6 \cdot 10^9$ eV の邊に在り、低勢力の方向には急激に減少してゐる。之は太陽の磁場の影響とも考へられるが、現在の理論では、その影響を受けるのは $2 \cdot 10^9$ eV 以下の低勢力の成分に過ぎないと思はれる。

c) 天頂角に対する強度分布 以上述べた所は總て電離函又は 1 個の計數管を用ひる 觀測であるから、測られたものは總ての方向よりその測定器に入射する宇宙線の總和を示すものである。然るに宇宙線は入射する方向によつて、地磁氣の影響の受け方も違へば大氣を通過する厚みも異なるから、上述の高度曲線を理解する爲にも方向に対する宇宙線の強度分布に就て知らねばならぬ。但し同じ天頂角の中の方角による相違は、天頂角による



第 44 圖 天頂角に対する強度分布

效果よりも少いし、且つ原因は直接地磁氣に關係するものであるから、前の緯度效果の節で述べた。* 第 44 圖は T. H. Johnson¹⁾ が 1933 年に、一平面上に並べた 3 個の計數管の同時放電によつて、天頂角に対する強度分布を測定した結果である。

又同圖の點線は前述の 1935 年に行はれた氣球 Explorer II による成層圏探險の際に、21.9km 即ち水柱 50cm の上空で測定された強度分布である。²⁾

* 東西效果及び南北效果

1) T. H. Johnson, *Phys. Rev.* 43, 307 (1933)

2) W. F. G. Swann, *J. Frank. Inst.*, 222, 23, 669 (1936)

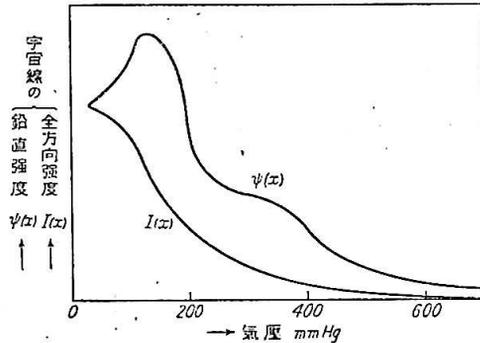
之等の結果を見ると、大気外より入射する宇宙線の強度が方向にかかはりなく凡そ一定であり、且つ宇宙線は二次線放出等によつて其の方向を餘り變へないものらしく思はれる。

ところで此の二點を假定すると、電離函又は一個の計數管で測つた“全方向強度”の高度曲線 $I(x)$ 、又は鉛直に並べた數個の計數管の同時放電によつて測つた“鉛直強度”の高度曲線 $\Psi(x)$ の中、何れか一方を測定すれば他方は計算出来るのであつて、Gross¹⁾ に従へば其變換の式は

$$\Psi(x) = \frac{1}{2\pi} \left[1 - x \frac{d}{dx} \right] I(x)$$

となる。但し x は氣壓である。

例へば第 45 圖の曲線 $I(x)$ は Regener が 1932 年に電離函によつて測定した結果であるが、之に Gross の變換を施して鉛直強度を求めると、



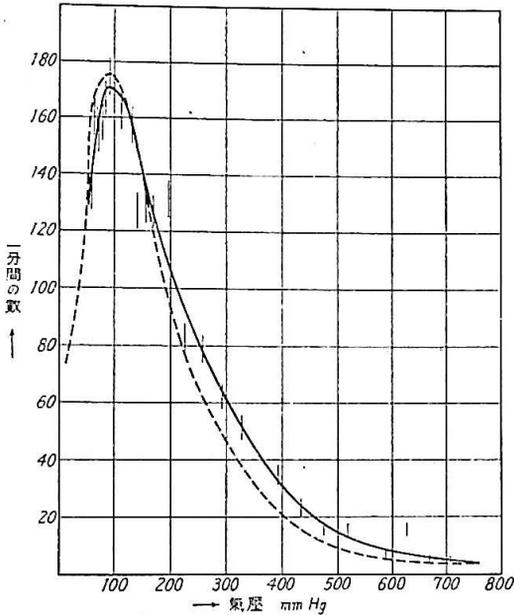
第 45 圖 Gross の變換

同圖 $\Psi(x)$ となつて曲線の形は著しく變る。Pfofzer²⁾ は既に 1935 年、Regener の指導によつて自働記録式の探測氣球を上げ、鉛直に並べた 3 組の計數管の同時放電を測定した。結果は第 46 圖點線に示す様であつて、

1) B. Gross, *Z. f. Phys.* 83, 214 (1933)

2) G. Pfofzer, *Z. f. Phys.* 102, 23 (1936)

彼は Gross の變換の凡そ正しい事を確めると同時に、20 km 即ち氣壓



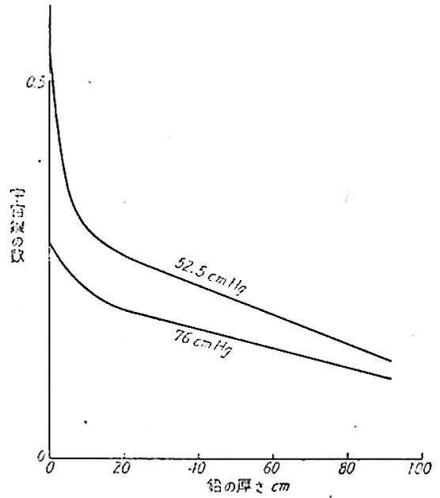
第 46 圖 鉛直強度の高度曲線

10 mmHg の上空に至るまでの鉛直強度を直接に知る事が出来た。尙同圖實線は Carmichael が前に述べた北極探險の際に無線探測によつて得た鉛直強度である。但し 760 mmHg の所を合せてある。

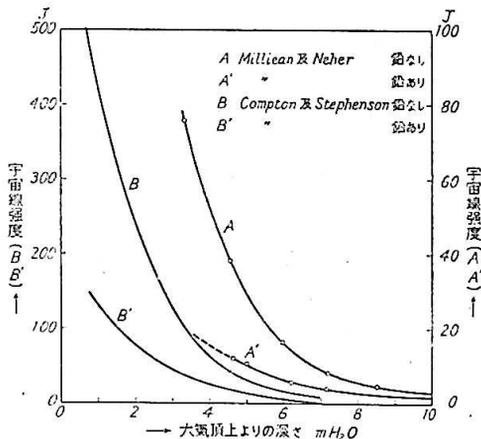
此の鉛直強度の高度曲線 $\Psi(x)$ は一次宇宙線と大氣との相互作用として直接に理論と比較されるべき曲線であるが、Pfozter の測定の後間もなく、高勢力の電子及光子に關する理論が進歩し、Bhabha, Heitler 及び Carlson, Oppenheimer 等は後章に詳述する様に所謂階段シャワーの理論を提出し、之によつて Pfozter の曲線の大部分を説明する事が出来た。

d) 上空に於ける硬成分の強度 第 47 圖は計數管の同時放電を用ひて鉛による宇宙線の吸収を調べたものであるが、圖より直ちに判る様に宇宙

線には約 10 cm の鉛によつて吸収される成分と、約 10 cm の鉛を容易に透過する成分とがある。吾々は Auger に従つて前者を軟成分、後者を硬成分と呼んでゐる。* 従つて今迄述べた様な鉛を用ひない測定では兩成分の和を測つてゐたのであるが、低空では硬成分が優勢であり、高空に昇るに従つて軟成分が優勢となる。その點は 1932 年 Millikan 及 Neher が Neher 型耐震電離箱を用ひ飛行機で測定した結果(第 48 圖 A, A') によつて明かである。硬成分に就て今日までに知られた最も高い所までの強度は 1933 年 Fordney-



第 47 圖 宇宙線の鉛による吸収 (Woodward と Street)



第 48 圖 硬成分の高度曲線

* 第 VI 章参照

Settle が氣球に乗つて上昇した際に Compton¹⁾ が自記電離函を託して測定したものである(第 48 圖 BB'). 彼は當時 Mt. Evans (4,300 m) 上で行つた豫備實驗に基いて、軟成分を遮斷する爲に鉛 6 cm を用ひたのであるが、今日から見ると之は上空の高勢力の軟成分を遮斷し盡すには少々足りない様に思はれる。

3. 湖海底並に地下に於ける宇宙線強度

湖海底並に地下に於ける觀測は大氣中に於ける觀測の延長であるが、今日にして見れば、吾々の大氣は丁度本來の宇宙線軟成分の大部分を吸収し盡すから、水中・地下の觀測は宇宙線硬成分の研究といふ獨立した意味を持つてゐる。又技術的にも、宇宙線強度の非常に微弱な處であるから、放射性物質其他による殘留電流に最も注意を拂はねばならぬ。

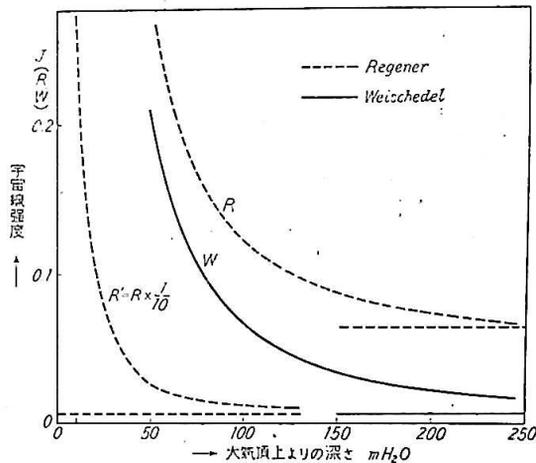
Mill'kan と Cameron は大戰後の 1925 年より、放射性物質を含む虞のない雪解け水の湖水を選んで觀測を始め、1928—29 年²⁾には加洲 Arrowhead 湖(海拔 1,545 m)及び Gem 湖(海拔 2,764 m)で水深 70 m までの電離を測定した。その結果は、等質量の水と空氣は宇宙線に對して殆ど同じ吸收作用をする事と、宇宙線は次第に吸收されつつ深い水中に達してゐる事を示してゐる。又見掛けの吸收係数は、湖水上部では $0.27/\text{mH}_2\text{O}$ であるが、大氣頂上より積算して $10 \text{ mH}_2\text{O}$ 邊で急に $0.16/\text{mH}_2\text{O}$ に減少し、以下次第に減少して $0.028/\text{mH}_2\text{O}$ に及んでゐる事も解つた。

a) 湖海底に於ける電離函の實驗 更に深部の微弱な宇宙線を測る電離函は、容積も大きく、詰める瓦斯の壓力も高いものでなければならぬ。

1) A. H. Compton and R. J. Stephenson, *Phys. Rev.* 45, 441 (1934)

2) R. A. Millikan and G. H. Cameron, *Phys. Rev.* 37, 235 (1931)

Regener¹⁾ は容積 33.5 立, CO₂ 29.4 気圧を詰めた自記電離函を作り, 1928 年 Friedlichshafen 近郊の Bodensee に沈め, 水深 230 m までの測定を行つた。然し湖水の含む放射性物質の影響が深さと共に變化する事を慮れたので, 1929—30 年には直径 2.5 m の水タンクに此の電離函を収め, タンクごと沈めて實驗を繰返した結果, 湖水の含む放射性物質は極めて微量である事を知つた。其後 Regener の指導によつて, Weischedel²⁾ は更に大きな自記



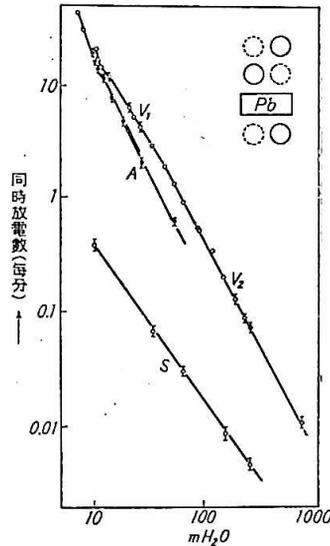
第 49 圖 Bodensee に於ける電離

電離函 (114 立, 28 気圧) を作り, 漏洩電流にも特に注意を拂ひ, 1934—36 年に Bodensee の測定を繰返した。第 49 圖 (實線) はその結果で, 水深 235 m に於ける測定値は水面の 0.5 % にまで減少してゐる。彼は“見掛けの吸収係数 μ は深さと共に増加する事はない”といふ假定の下に吸収曲線の形から残留電流を推定して吸収係数を求めた所, 水深 145 m までは $\mu=0.025$, 215 m までは $\mu=0.0165$, それ以下では $\mu=0.009/\text{mH}_2\text{O}$ となつた。

1) E. Regener, *Phys. Z.* 34, 306 (1933)

2) F. Weischedel, *Z. f. Phys.* 101, 732 (1936); 16 頁 c 参照

b) 湖底に於ける計數管の實驗 Regener は 1928 年に Bodensee に電離函を沈めた際に計數管による測定をも併せ行ひ、兩者の結果が大體一致する事を知つた。その後 Regener の指導によつて Ehmert¹⁾ は計數管 3 組の同時放電装置を用ひ、1936—37 年に Bodensee で水深 243 m までの測定を行つた。計數管は第 50 圖の様に配列し、鉛直強度を測るには 6 個全部、シャワー*を測るには實線で描いた 3 個を用ひた。計數管の分解能は $9.4 \cdot 10^{-5}$ sec で、偶然の同時放電は鉛直強度を測る場合に 0.3 % 以下、シャワーを測る場合には 1% 以下と推定される。測定には浅い所で各々 1 時間、深い所では 1 日乃至 5 日を費した。結果は第 50 圖に示す様である。即ち鉛直強度は冪函数的に減少し、水深 43 m まで (V_1) は深さの 1.56 乗、それよりも深い所 (V_2) では深さの 1.87 乗に逆比例してゐる。ところが Zugspitze 海拔 3 km) 及 Stuttgart (海拔 400 m) で天頂角に



Bodensee に於ける同時放電

第 50 圖

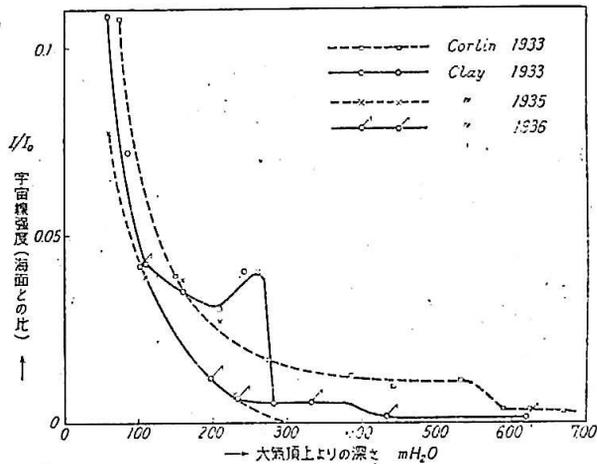
對する強度分布を測定した結果によると、空氣による吸收 (第 50 圖 A) は V_2 と平行してゐる。従つて V_1 の部分は宇宙線が空氣から水に入る爲の遷移現象と考へられるが、その機構は未だ明かでない。然し空氣を通つて來た宇宙線が等質量の水を通つて來た宇宙線よりも少いといふ事は、空氣では距離が長くなるから中間子の自然崩壊が起る爲であらうと説明されてゐ

* 第 IV 章. 3 を参照

1) A. Ehmert, Z. f. Phys. 106, 751 (1937)

る.* 又水中のシャワー頻度 (S) も累函数的に減少してゐるが、深さの 1.40 乗に逆比例してゐるから、シャワーと鉛直強度の比は深い所程大きくなつてゐる。なほ計數管の間に鉛 5 cm を挿むと、鉛直強度はどの深さでも約 15~20 % 減少した。

c) 地下に於ける電離函の實驗 一方坑道、トンネル 等によつて地下に潜る時は、吸収體の厚さの勘定が幾分不正確になるのは免れないが、遙に深い所へ而も容易に達する事が出来る。Corlin¹⁾ は 1933 年に北瑞典の Kiirunavaara の鐵坑に Steinke 型電離函を運び込み、これを恒溫に保つて地下 160 m (800 mH₂O) までの測定を行つた。そして附近の鑛石がラヂウムを含む事を知つたので、次には氣密にした大きな鐵の函に装置を入れ、遮蔽の鉛も 20 cm に増して測定を繰返した。結果は第 51 圖 (點線) に示す様に 440—530 mH₂O 間は強度が殆ど減少せず、530—600 mH₂O の間で急激に



第 51 圖 地下に於ける電離

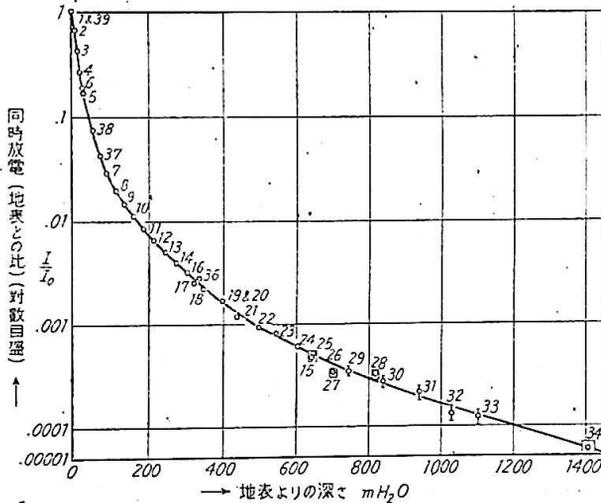
* 第 VI 章参照

1) A. Corlin, *Ann. Obs. Lund.* 4(1934)

減少してゐる。

之に類した異常は Clay¹⁾ も報告してゐる。Clay は同じ 1933 年紅海及 Aden 灣で水深 270 m まで電離函を沈めて観測した。その結果第 51 圖に示す様な異常があつたので、之は宇宙線の電離によるイオン密度が飛程の終りの方で變るためではないかと思ひ、1935 年には北海の Bergen 近海で電離函及計數管を水深 300 m まで沈めて測定した。更に 1936 年には Kerkrade の炭坑に電離函及計數管を持込み、地下 260 m まで測定した。結果は第 51 圖に見る様にやはり幾分の異常を示してゐる。

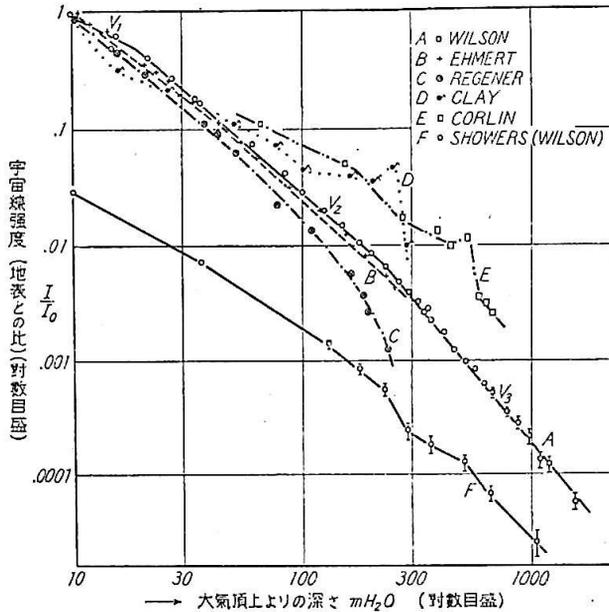
d) 地下に於ける計數管の實驗 Clay 及 Corlin が報告した此の異常を確める爲に、Wilson²⁾ は 1937 年 Michigan 洲 Mohawk の銅山に大きな



○は装置を鉛直に對し傾斜させて吸收盤の厚さを増したもの
第 52 圖 地下に於ける Wilson の測定

1) J. Clay, *etc. Physica*, 1, 363 (1933) ; 2, 1042 (1935) ; 4, 121 (1937)
2) V. C. Wilson, *Phys. Rev.* 53, 337 (1938)

計数管 4 個の同時放電装置を持込み、地下 1,100 m に至る 34 箇所測定を行つた。第 52 圖は結果の半對數圖であつて、見掛けの吸収係數 μ (曲線の傾斜) は次第に減少する一方である。従つて Clay や Corlin の言ふ様な著しい異常は認められない。鉛直強度は 1,418 mH₂O で地表の 5.7×10^{-5} に減少して居り、 μ は地表で 0.07 最深部では 0.0025/0.0025/mH₂O まで減少してゐる。結果を兩對數圖に描くと第 53 圖の様になる。即ち鉛直強度は



第 53 圖 地下に於ける宇宙線強度

累函数的に減少し、20 mH₂O まで (V_1) は深さの 1 乗、以下 250 mH₂O まで (V_2) は深さの 1.77 乗、以下 1,418 mH₂O まで (V_3) は深さの 2.52 乗に逆比例してゐる。又大氣を種々の傾斜で通過する宇宙線の強度測定から考へても、 V_1V_2 は Ehmer の V_1V_2 に相當するものと考へられるが、たゞ境界點が Ehmer は 45 mH₂O、Wilson は 20 mH₂O である。 V_2V_3 の境界點、

即ち 250 mH₂O ではシャワー (4 個の計數管を水平にして測つたもの) も類似の變化を示してゐる。従つて此の深さは Clay の言ふ程の極端な異常はなくとも、一つの硬成分の飛程の終りではないかと思はれる。250 mH₂O までの所にある成分は, Ehmert が實驗した様に, 80 % 以上は鉛 5 cm を透過する透過性ある荷電粒子であるが, 更に深い所にある成分に對しては Barnóthy 及 Forró は異つた實驗結果を得てゐる。

Bornóthy 及 Forró¹⁾ は 1936 年の夏に Budapest 近郊の Droger 鑛山に入り, 地下 315 m (732 mH₂O) の所で計數管を種々の配置にしてシャワー並に鉛直成分等を測定し, 更に比較の爲に地上で炭坑内と幾何學的條件が同じになる様に 20 g/cm² の炭素板を翳して實驗した。その結果は次の様である。

1. 地下では鉛よりも寧ろ炭素の方がシャワーを作り易く見える。
2. 地下のシャワー粒子は地上のものよりも吸収され易い。
3. シャワー: 鉛直強度の比は地上よりも地下で大きいのは勿論, 地下ではシャワー粒子の量が鉛直強度の全部と凡そ等しくなる。

従つてシャワー發生線 (Shower producing ray) が大きな透過性をもつ事となり, その爲にはこれがシャワーを作る確率が甚だ小さくなければならぬ。従つて地下ではシャワー粒子に比べて甚だ多量のシャワー發生線が存在する筈であるのに, 地下の同時放電は凡そシャワー粒子だけで説明が出来るのであるから, 此のシャワー發生線は電離能を持たぬもの一恐らくは neutrino—であらう, と彼等は結論した。之等の點は今後大いに吟味すべき興味ある事柄と思はれる。

4. 宇宙線強度の時間的變化

以上述べた様に宇宙線の強度は, 地下, 地上, 上空等, 高度の變化に応じて

1) J. Barnóthy u. M. Forró, *Z. f. Phys.* 104, 744 (1937)

は地上の数百倍又は数千分の一の變化を示すが、同一地點に停つて観測する時にはその時間的變化は數%を出でず、時には0.1%以下の變化をも問題にする。従つて之の観測には最も精密な測定器を必要とするので、多くは大型の電離函が用ひられる。又測定場所は大抵地上乃至山上であるから、地殻及大氣中の放射性物質の影響を避ける爲に電離函を約10cmの鉛で遮蔽してあるのが普通である。従つて大抵の場合は宇宙線硬成分の時間的變化を測定してゐる事を豫め承知しなければならない。

宇宙線強度の時間的變化は現在次に列擧する様なものの集りと考へられてゐる。

1. 氣壓効果, 2. 氣温效果(又は季節變化), 3. 濕度其他の大氣の状態による變化, 4. 太陽時及恒星時の日週變化, 5. 磁氣嵐の影響,
6. 第二種變化(原因不明の變動), 7. 統計的變動

然し此の様な分析には多分に統計的方法を用ひてゐるのであり、又或原因による變化の量を算出して、それは他の原因による變化の爲に大なり小なり妨害を受けてゐる事を常に考へに置かねばならぬ。

統計的變動(Statistical fluctuation) 一定時間 T 毎に宇宙線の平均強度 I を測定してゆくと、 I は平均値 I_0 の兩側に Gauss の標準分布をしてゐる。又 Doan¹⁾ が6個の Compton 型電離函を一室に並べて同時観測をした結果(第54圖)によると、毎日の平均値 I_0 は6個の測定器を通じて夫々一定であるが、相對應する1時間毎の測定値 I は互に一致してゐない。此の I の散布が所謂統計的變動であつて、その目安

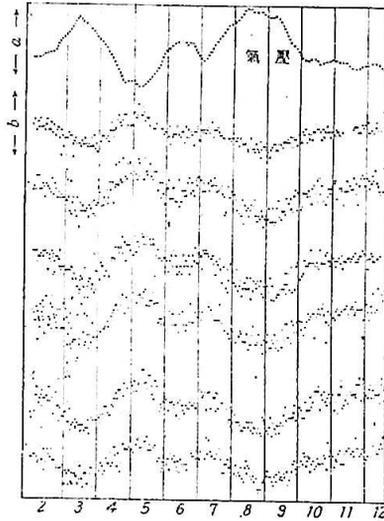
$$\sigma = \frac{1}{I_0} \sqrt{\frac{\sum (I - I_0)^2}{n}}, \quad n: \text{測定値の數}$$

は時間 T が長い程、又測定器が大きい程小さくなる。容積20立級の大型

1) R. L. Doan, *Phys. Rev.* 49, 107 (1936)

電離函では $T=1$ 時間で、 $\sigma=0.5$ % 程度となる。統計的變動は時間 T 内にその電離函に宇宙線が入射する回数 N が有限である事から起るもので、 σ から N を求め、更に 1 本のものとしヤワーとの割合 (霧函より) を考に入れると、宇宙線の入射は cm^2min 毎に約 1 個となり、計數管による結果と大體一致する。

氣壓效果 (Barometer effect) 大氣壓が増すに従ひ宇宙線強度が減少する事は既に 1926 年 Myssowsky 及 Tuwim によつて發見された事實である。その關係は第54



6 個の Compton 宇宙線計によつて得られた同時記録 (Doan)

第 54 圖

圖にも明かに現れて居り、例へばその中の一つに就て見ると、宇宙線強度と氣壓の間の相關係數は -0.786 であり、氣壓效果は氣壓 1 cmHg に就き 1.89 % の減少となつてゐる。此の値は電離函の形式によつて多少相違がある。又同一の電離函でも遮蔽を減らし、又は之を高山に持ち上れば氣壓效果が増大する。

地上から山上までの宇宙線強度を氣壓を横軸にして描くと、その曲線の各點の傾斜は夫々の地點に於ける氣壓效果と凡そ相等しい。

氣壓が上ると宇宙線強度が減る事は、從來單純に頭土の大氣の量が氣壓に比例して増す爲に、宇宙線がそれだけ吸收される爲と考へられてゐた。然し水による硬成分の吸收は 0.9 %/cmHg に相當するのに、氣壓效果は一般に之よりも大きく、且つその値が季節によつて變る事や、宇宙線強度が

気温によつて變る事の原因を考へ合はすと、氣壓効果も單なる吸収はその原因の一部に過ぎない様に思はれる。

第 54 圖にも見られる様に氣壓効果は宇宙線強度の時間的變化の最も主要な部分である。それで氣壓効果以外の時間的變化を論ずる場合には、先づその測定器の氣壓効果の係数を用ひて、測定値を一應標準氣壓に於て有すべき値に補正した上で扱ふ事になつてゐる。然し嚴密には手數でも氣壓効果と他の効果とを、同時に重複相關の方法で決定するのが當り前であるから、近頃此の方法も少しづつ用ひられ始めてゐる。

氣溫效果 之は測定器自體の溫度に因るものでなく、測定器を恒溫室中で運轉した場合でも戶外の氣溫の變化につれて宇宙線強度が増減する事を指すのであるから、特に戶外溫度效果 (Out door temperature effect) とも呼ばれてゐる。從來は之の説明が考へつかなくなつた許りでなく、事實此の効果が存在しない様にも思はれたり、或は増減の方向が逆に現れたりして誠に疑はしいものであつた。然し Compton 及 Turner¹⁾ が 1936—37 年に太平洋上で緯度効果を測定した際、かなり明かに季節による強度の差を認めた。^{*} 即ち北半球では夏は強度少く冬は多い。南半球ではその逆になつてゐるのであるから、宇宙線強度は氣溫が昇ると減少してゐる。第 55 圖は日本學術振興會²⁾ が Steinke 型電離函を用ひ東京で觀測してゐる結果を一ヶ年半に亙つて整理したもので、甚だ明瞭に氣溫効果を見る事が出来る。之によれば氣溫 1°C の上昇毎に宇宙線 0.15 % の減少となつてゐる。

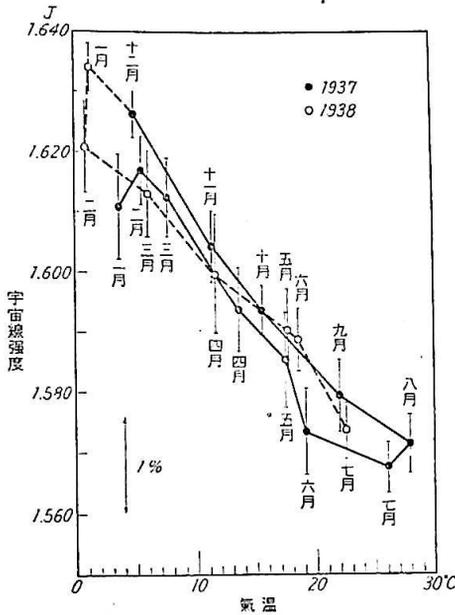
今日宇宙線硬成分は中間子より成ると考へられて居る。此の粒子の壽命は短いもので、地上に到達する前に自然に崩壊して電子即ち軟成分となるものである。この性質に基いて氣溫効果を次の様に説明することが

1) A. H. Compton, and R. N. Turner, *Phys. Rev.* 52, 799 (1937)

2) 石井, 淺野, 關戸, 島村, 理研彙報, 18, 1066 (1939)

* 第 35 圖 (41 頁) 参照

Blackett¹⁾ により提唱された、それは気温が昇ると大気は全體に上昇する。



第 55 圖 気温效果

中間子は成層圏に於て作られた二次線と考へられるから、大気が上昇してゐればそれだけ高い位置で發生する。従つて地表までの距離が増すから、その間に自然崩壊する中間子が多くなり強度が減少するといふのである。

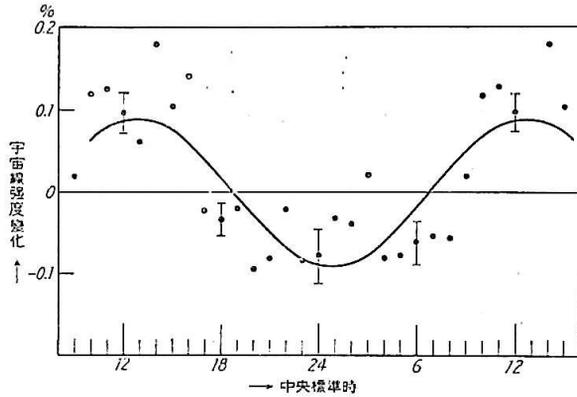
気温效果が緯度によつてどう變るかは未だ明かでないが、緯度效果として測定されてゐるものの全部が地磁氣によるものではなく、一部は此の気温效果その他大氣の狀態に基づく緯度效果に相違ない。Compton 及 Turner²⁾ は緯度效果の三分の一は大氣の狀態に基づくものとしてゐる。

太陽時の日週變化 宇宙線強度の晝夜の差は極めて少く、一見統計的變動の中に蔽ひ隠されてゐる。第 56 圖は東京に於ける一年間の觀測結果に

1) P. M. S. Blackett, *Nature*, 142, 992 (1938)

2) A. H. Compton and R. Turner, *Phys. Rev.* 52, 799 (1937)

気圧効果の補正だけを施し、相對應する太陽時で夫々平均したものである。



第 56 圖 太陽時の日週變化

之によつて正午には正午よりも 0.18% だけ強度の増してゐる事がわかる。日本に限らず歐米でも夫々の地方の正午に同程度だけ宇宙線が増加してゐる。然し之が直接太陽から來る放射線によるか、或は大氣や地磁氣の状態を通じての二次的影響であるかは今の所わからない。

太陽の自轉に伴ふ強度の週期的増減に就ては Hess, Kolhörster が早くから報告してゐるが、最近の結果によれば 27 日の週期が確かに存在するらしい。¹⁾

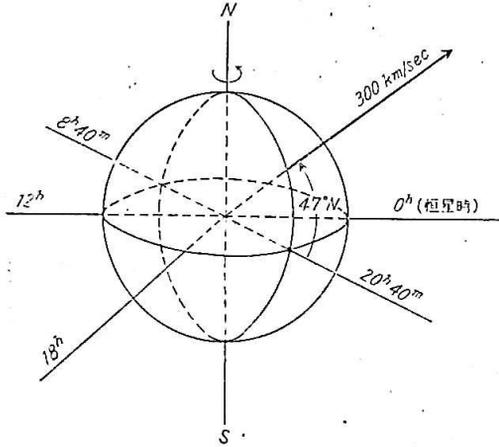
日食の影響に就ても古くから観測され、我が國でも観測が行はれたが何等影響が認められなかつた。

恒星時の日週變化 之も極めて微小であつて、観測者によつて結果が一致してゐない。1935年に Compton 及 Getting²⁾ は銀河系廻轉 (Galactic Rotation) の説を提出した。それによると、銀河系の廻轉の爲にその一部である地球は第 57 圖に示すやうに、恒星時 20 h 40 m、赤緯 47°N の方向に約 300 km/sec の速度で運動してゐる。従つて、もし宇宙線が銀河系以外の

1) W. Kolhörster. *Phys. Z.* 40, 107 (1939); G. R. Miczaika, *Z. Astrophys.* 18, 146 (1939); 石井, 淺野, 關戸, 島村, 理研彙報, 18, 1066 (1939)

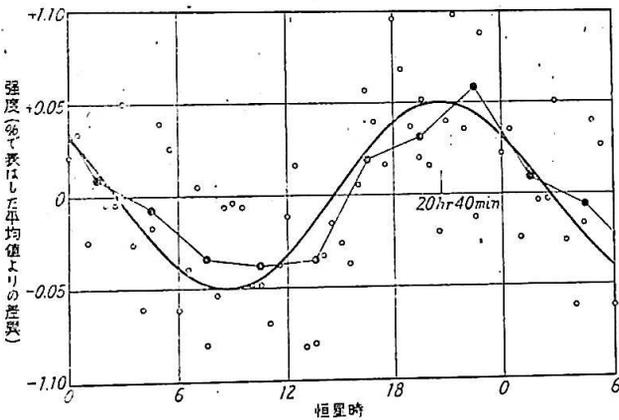
2) A. H. Compton and I. A. Getting, *Phys. Rev.* 47, 817 (1935)

遠い所で發生されてゐるものとすれば、計算の結果地球上の強度は此の運



第 57 圖 限河系廻轉に基く地球の運動

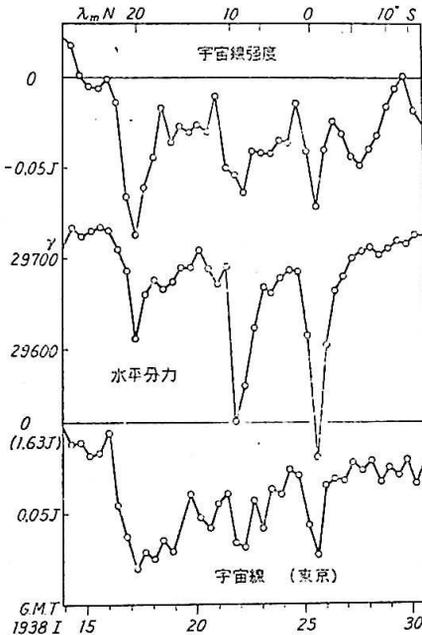
動の前面に於ては背面に於けるよりも約 1.2 % 多くなる。そして、同一地點に於て觀測しても地球の廻轉の爲に恒星時の日週變化を生じ、20 h 40 m に於て極大となる。此の極大と極小との強度差は、地磁氣の影響によつて相當に減少するが、それでも緯度 45° に於て約 0.1 % に達するものと推定



第 58 圖 恒星時の日週變化

される。そこで前に Hess 及 Steinmaurer が 1 年間に亙つて實測した恒星時の日週変化を見ると、極大の時刻も振幅も大體此の推定に合つてゐるから (第 58 圖)、一面には銀河系の廻轉を實證する新しい材料となり、他面には宇宙線の大部分が銀河系以外の遠い所から來てゐる事を立證すると云ふのである。然し測定者によつては此の日週変化の現れてゐない場合もあり、又解釋にも疑問があるので今の所あまり確實なことは云へない。

新星の影響 1934 年の 12 月有名な新星 Nova Herculis の現れた際、Steinke¹⁾ は歐洲の山地平地數ヶ所に配布してあつた Steinke 型電離函の



一番上の曲線は漆洲航路で測つたもの、緯度効果は補正してある。

第 59 圖 磁氣嵐の影響

観測結果を整理し、宇宙線強度の日週変化、日平均、月平均等に就いて前の一年と比較してみたが、0.1%の増加をも認める事が出来なかつた。

磁氣嵐の影響 磁氣嵐の中でも全世界的な磁氣嵐、殊に低緯度までオーロラの現象を伴ふ様な磁氣嵐では、宇宙線強度に著しい影響を持つてゐる場合が多い。今までに知られた最も著しい例は 1938 年 1 月の後半に起つた磁氣嵐である。第 59 圖²⁾ はその際の宇宙線強度及地磁氣の水平分力で、我が國に限らず世界各

1) E. G. Steinke, *Phys. Z.* 36, 791 (1935)

2) 石井, 浅野, 關戸, 島村, 理研彙報, 18, 1066 (1939)

地で同時に殆ど同様な増減が観測されてゐる。圖にも見られる様に磁氣嵐の時には地磁氣水平分力の減少に伴つて宇宙線強度が減少する。今單純に地磁氣の原因が地球内部にあり、磁氣嵐の際にはその磁氣能率が増減する様に考へると、其の効果は實測と逆になる。然し磁氣嵐の時には太陽から飛來する電子によつて地球をめぐる環狀（又は球殻狀）の電流が出來ると考へられてゐるから、適當な電流を考へれば、その磁場は、環の外側では地球の磁氣能率を増加した様になつて宇宙線強度を減少させ、又環の内側にある地表では水平分力を減少する様に働く。之によつて磁氣嵐の影響を説明し、又環狀電流の存在する位置の高低によつて、同程度の磁氣嵐でも宇宙線強度に及ぼす影響に著しい大小のある事を説明する事が近時試みられてゐる。

宇宙線強度の第二種變化 (Variation of 2nd kind) 之は古い言葉で、宇宙線の強度變化の中氣壓効果を補正し去つた残りの原因不明の變化といふ意味である。今日になつて見ればその一部は氣温効果や磁氣嵐の影響であるが、未だに原因のわからない不規則な變動が残つてゐる。

Forbush⁵⁾の研究によると、Compton 型の電離函を北米より New Zealand に亙る四ヶ所に据ゑて同時觀測した結果、及 Hafelekar に於ける Steinke 型電離函の結果から、氣壓効果及年週變化を除去した値(10日平均)は各地で並行に増減して居り、第二種變化の大部分は全世界的なものである事を示してゐる。此の全世界的な變動は同一緯度では高度によつて著しく増し、地磁氣緯度に対しては 0° より 30° に至るまでは凡そ南北對稱に増加し、以後は著しい増加を見せない様である。

1) S. E. Forbush, *Phys. Rev.* 54, 975 (1938)

昭和15年4月15日印刷
昭和15年4月20日發行

— 量子物理學 —

宇 宙 線 1

別 刷

著 者 仁 科 芳 雄
淺 野 芳 廣
竹 內 祇 郎
關 戶 彌 太
一 宮 虎 雄

代表者

發行者 南 條 初 五 郎
東京市神田區駿河臺3ノ9

印刷者 福 田 三 郎
東京市澁谷區頂樂町51

發 行 所

合 資 社 共 立 社

東京市神田區駿河臺3丁目9

電話 神 田 (25) 1518・2624

振 替 口 座 東 京 4 6 0 7 4

廣興社印刷・菊地製本

量 子 物 理 學

| | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 量 子 力 學 (概 論) ○ | 仁寶 昭 科山 永 芳 小 芳 大 一 | 雄 郎 郎 |
| 量 子 力 學 (各 論) ○ | 仁小 玉 科 林 芳 英 | 雄 彦 彦 |
| 量 子 化 學 (化 學 反 應) | 佐々 木 中 | 二 |
| 量 子 化 學 (原 子 價 と 化 學 反 應 の 理 論) ○ | 小 谷 正 | 雄 |
| 量 子 化 學 (分 子 構 造 論) ○ | 水 島 三 一 | 郎 |
| 原 子 核 物 理 學 (實 驗) ○ | 杉 浦 義 | 勝 |
| 原 子 核 物 理 學 (理 論) | 梅 田 | 魁 |
| 新 粒 子 論 ○ | 湯 川 秀 樹 | |
| 固 體 論 ○ | 武 藤 俊 之 助 | |
| 磁 性 體 論 ○ | 茅 誠 司 | |
| 衝 突 現 象 ○ | 堀 健 夫 | |
| 原 子 ス ペ ク ト ル ○ | 藤 荒 田 岡 本 中 山 源 太 善 | 夫 郎 雄 |
| 分 子 ス ペ ク ト ル ① | 藤 荒 田 岡 本 中 山 源 太 善 | 夫 郎 雄 |
| X 線 ○ | 仁 田 男 | |
| 陰 極 線 ○ | 菊 池 正 士 | |
| 同 位 元 素 ○ | 堀 健 夫 | |
| 宇 宙 線 ① | 仁 岡 科 戸 ・ 遠 野 ・ 一 宮 ・ 竹 内 | |
| 重 水 ○ | 千 谷 利 三 | |
| 量 子 物 理 學 と 天 文 學 ○ | 一 柳 壽 一 | |

○印は既刊を示す