

宇宙線 (Cosmic ray ; Höhenstrahlung, Hesssche Strahlung,
Ultra- γ -Strahlung, Ultrastrahlung) 研究の現状

理學博士 仁科芳雄

拔刷
日本學術協會報告第六卷
(昭和五年度)
東京

宇宙線 (Cosmic ray; Höhenstrahlung, Hessche Strahlung, Ultra- γ -Strahlung, Ultrastrahlung) 研究の現状

理學博士 仁科芳雄

緒言。 宇宙線とは天體の何處からか地球に間断なく降り注いで来る、非常に貫透力の強い一種の線 (ray) であつて、Regener の實驗に依れば、其最も貫透力の強い成分は約 230 米の水の層を通つて尚吸收し盡されぬといふ。これは鉛の厚さにすれば約 29 米に相當する。それは今日知られて居る最も短い波長、即ち最大の貫透力を有する γ -線の約 240 倍位の貫透力を有するものである (吸收係數が 1/240 の意)。斯んなものに對しては凡ての生物は勿論、此講堂の様な建築物も、普通の光に對する硝子製同然である。斯う云ふものが晝となく夜となく吾々の頭上に降り掛つて居ると云ふ事が、色々の人の約廿年間の研究で判つて來た。勿論其強度は大きいものではないが、夫れでも地球及び大氣の受けるエネルギーは、空にある全體の星 (太陽を除く) から光及び熱の形として受けるエネルギーの 1/10 乃至は同等位である。

元來私は此研究には直接携はつた事はありません。只間接に私のやつた事に關係があつた爲めに、平常より注意して居たと云ふに過ぎません。然し係のお方から私の携はつて居る事よりは此方をお話した方が面白からうと云ふ仰せに従つて此題を掲げた次第であります。

先づ其歴史から申述べます。地球の表面に非常に貫透力の強い一種の線 (以後貫透線と呼ぶ) の存在する事は以前より知られて居つた事で、既に Elster, Geitel (1900) 及 C. T. R. Wilson (1900) に依つて、密閉せられた器内の空氣が電離せられる事が認められた。而して Rutherford, McLennan 等 (1902) は其器全體を鉛の様な重い金屬で包む時は、其電離が減少する事、従つて此電離は外部より来る貫透線に起因するものである事を示した。此線の一部は周圍の建物、土壤及び空氣中等にある放射性能物質より出す放射線であつて、他の一部は器を形成する物質よりの放射線であるが、残りのものは茲に述べる宇宙線に依るものである。此三者共に其電離作用の強さは略同じ程度であるから、従つてこれを分離する事が非常に困難であつて、其爲めに今日迄色々の人の得た結果の間に不一致を生じた譯である。

宇宙線發見の由來を述べれば、Wulf (1910) は巴里のエツフェル塔で銳敏な電位計を用ひて空氣の電離を検べ、地上 300 米の所で 3J である事を知つた。J とは 1cm^3 の中に 1 秒間に生

する陰陽イオンの對(pairs)數である。此値は地上の値 6J から中間 300 米の空氣層の吸收による減少を考へて計算して得られるものより著しく大であつた。依つて Wulf は地より出る放射線が γ -線よりも貫透力の大なるものであるか、又は何等か新しい線が存在するものであらうと論じて居る。次に Gockel (1910) は輕氣球で 4.5 基米の高さ迄昇つて、同様に空氣の電離度が高さと共に豫期通りに減少せぬ事著しいのを認めた。勿論電離が高さと共に増加したとは述べては居ないが、然し氣壓の減少による空氣の密度を考に入れるに、事實は地上よりも大きい電離を與へて居る。是等は皆貫透力の強い新しい線の存在を推憶せしめたものであるが、これを實證したのは Hess (1912) であつた。彼は矢張り氣球に乗つて地上 3 基米よりは電離の増加する事、而して 5.4 基米では地上の約三倍に達する事を示し、從つて上空より一種の貫透線が大氣層を通して降つて來て居るといふ事を證明した。而して其貫透力の驚くべき大きなものである事を述べて居る。今日宇宙線を Hess-線とも呼ぶのは此發見に基くものである。Kolhörster (1913) は更に改良した測定器を用ひ、地上 9.3 基米迄の觀測を行つた。これは今日迄の最高の測定である。此高さに於ては空氣の電離度は地上の 7 倍に達した。これに依つて宇宙線の空氣に對する吸收係數をも求める事が出來た。

歐洲大戰により此研究は一時途絶えたが、戰後は歐洲、米國、南洋などの諸地に於て盛に其研究が行はれ、高山の頂、飛行機の上、又は平地に於て其強さを測定し、空氣、水、氷、鐵、鉛等に對する吸收係數が求められ、其やつて來る方向を檢べ、又其強さの週期的並に非週期的の變動が近來は頻りに研究せられ、殊に恒星時と關聯する週期的變化は、此線が大空の何處に源を發して居るかと云ふ問題を決定するものとして注目せられて居る。今日では多くの人は此恒星時に從ふ週期的變動の實在を信する様になり、從つて此線の根源が地球外の Cosmos に存する事が實證せられたと考へて居る。而してこれは Nernst の假説と合致するものであらうと云ふ。此説によると、輻射エネルギーの凝集により生れる新しい星に於ては、簡單な元素より複雜な元素が創造せられ、これは地上に存在せぬ、原子番號の高い從つて放射性能作の強い元素であつて、これから非常に貫透力の強い線を放射するものであると云ふ。從つてこれは赤い光を出す新しい星が其源泉たるべきであると考へられる。Kolhörster は其觀測した恒星時的週期よりして「天の川」、「アンドロメダ星座」、「ヘルクレス星座」が其重要な中心であるとすれば、大氣層の吸收により、觀測の週期を生ずると結論した。然し Corlin は更に精密な考察を行つて「ミラ星」を主なる放射體とすると實驗の週期に合ふと云つて居る。然し是等は未だ確定的のものとは云へない。殊に最近に至つて宇宙線の本體が何であるかと云ふ事が問題となつた。從來はこれは γ -線と同様な電磁波の波長の極短いものと考へるのが一般であつた。然しこれには別に動かすべからざる實驗的根據のあるものではなかつた。最近の Bothe, Kolhörster の實驗によればこれは物質波(電子又はプロトン)と考へなくてはならぬと云ふ。然しこれには反

第一表

Observer	Height (km) from sea-level	J (reduced to sea-level & normal pressure)	Direction	$\mu_{H_2O} \cdot 10^3$ cm ⁻¹	$\mu_{air} \cdot 10^6$ cm ⁻¹	$\mu_{Pb} \cdot 10^3$ cm ⁻¹	Absorber	Thickness
Kolhörster 1914 calculated by: Schweidler 1915 Linke 1916 Seeliger 1918	0~9.3	—	↓	5.5	7.1	—	air	0~9.3km
Kolhörster & v. Salis, 1923	2.3~3.55	2	↓	2.6	3.4	—	air	2.3~3.55km
	2.3	"	↓	1.6	2.1	—	ice	3m
	3.55	"	↓	2.7	3.5	—	"	9.7m
	0	"	↓	2.0	2.6	—	water	0~10m
Millikan & Cameron 1925	3.59 & 2.06	1.4	↓↙	1.8~3.0	2.3~3.9	—	water	0~20m
Myssowsky & Tuwin 1925	0	—	↓	3.6	4.7	—	water	0~10m
"	"	—	↓↙	2.8	—	—	"	"
Millikan & Cameron 1926	3.82 & 4.57	1.4~1.6	↓↙	1.5~2.5	—	—	water	0~20m
Büttner 1926	3.5	2	↓	3.4	—	—	ice	0~5.6m
	2.8	"	↓	2.2	—	—	"	2~6.5m
Millikan & Cameron 1927	2.06 & 2.75	1.4	↓↙	3.5, 0.8 & 0.4	—	—	water	0~70m
Myssowsky & Tuwin 1926	0	—	↓↙	2.9	—	—	water	0~3.25m
" 1927	0	—	↓↙	—	—	104	Pb	0~4.5cm
"	"	—	"	—	—	23	"	7~22cm
Hoffman 1927	0	max. 1.1	↓	—	—	4.6	Pb	20~40cm
Steinke 1927	0	1.85	↓↙	—	—	51	Pb	0~10cm
"	1 behind 20 cm Pb	—	↓↙	—	—	4.2	"	20~60cm
0~2.5	—	—	↓↙	2.8~3.1	—	22~25	air	0~2.5km
0	—	—	↓↙	—	—	42	Fe	0~12cm
v. Salis 1927	3.5~4.1	—	—	5.21	7.99	—	air	3.5~4.1km
Clay 1927	0	1.55 (mean)	↓	—	—	198	Pb	0~10cm
"	"	"	↓	—	—	45	"	24~48cm
Hess & Mathias 1928	3.16	—	↓	2.07	—	—	ice	0~9.8m
"	—	—	↓↙	1.05	—	—	"	"
0.39~3.16	—	—	↓	—	6.3	—	air	.39~3.16km
Regener 1928	0	—	↓	min. 0.18	—	—	water	0~230m

論を唱へる人もあつて未だ確定的ではない様である。此問題が決定せられない以上は、夫れが何處でどんな方法に依つて生じるかと云ふ様な事も、只一種の憶測に過ぎない恐れがある。

強度並に吸收係数。 今日迄に其測定せられたものを示せば第一表の通りである。表中の矢印↓は宇宙線が地上に垂直に来るものとして吸收係数を計算した事を、↓↗はこれが大氣圈外の空間の一點に於ては、孰れの方向にも均一の強さを有するものとし、大氣の吸收を考に入れて吸收係数を計算した事を示してある。

第一表で見る通り、吸收係数 μ は厚い吸收層を通つて濾過される程小さくなる。これに依つて宇宙線は均一なものではなく、貫透度の異つたものの集合である事が知れた。又密度の小なる物質より大なる物質に移る境界に於ては、後者の吸收係数は甚だ大きな値を示して居る。これは Compton-効果による散亂に起因するものと考へられて居る。

波長。 今宇宙線が γ -線の波長の短いものと考へる時は、上の吸收係数よりして其波長を求め得る。但し γ -線の場合に行はれる波長と吸收係数との關係式が、宇宙線にも適用し得るといふ假定の下に於いてである。 γ -線などの様に波長の短いものにあつては、光電効果による吸收は無視せられ、吸收係数は専ら Compton-効果による散亂係数 σ と見て好い。此係数と波長との關係を表はす式は Compton-効果の理論より導き出される。これは今日迄に三つ提唱せられた。即ち一の電子の散亂係数 σ_e は

$$\text{Compton} \dots\dots\dots \sigma_e = \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^4} \frac{1}{1+2\alpha}$$

$$\text{Dirac} \dots\dots\dots \sigma_e = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \cdot \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left\{ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \log_e(1+2\alpha) \right\}$$

$$\text{Klein-Nishina} \dots \sigma_e = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \left[\frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left\{ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \log_e(1+2\alpha) \right\} + \frac{1}{2\alpha} \log_e(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right]$$

但し $\alpha = \frac{h\nu}{mc^2}$ 、茲に m , e は夫々電子の質量と電氣量、 c は光の速度、 h は Planck の常數、 ν は宇宙線の振動數である。此三式は波長が長い場合には、皆一致した結果を與へるものであるが、短くなると其相異が著しくなる。其例を示せば第二表の通りである。此最初の三つの吸

第 二 表

σ_{H_2O} in 10^{-3} cm^{-1}	3.5	0.8	0.4	0.18
λ in X. U. (10^{-11} cm)	Compton	0.757	0.173	0.0863
	Dirac	.505	.115	.0577
	Klein-Nishina	.173	.0343	.0133
Energy in electron- 10^6 volts	Compton	16.3	71.4	143
	Dirac	24.5	107	214
	Klein-Nishina	90.0	360	920
				2100

收係數は、第一表の通り Millikan が其測定結果を分析して得たもの、最後のものは Regener の測定値で今日知られて居る最小の係數である。上記三式の孰れに依るかに従ひ著しい相異のある事が判る。今日では實驗の結果、Klein-Nishina 式が γ -線の範圍では最も事實に近いといふ事になつて居る。現今知られて居る γ -線の最も波長の短いものは約 4 X. U. 程度のものであるから、これに比べて如何に短い波長を有するものが窺はれる。最後の三列に掲げたものは此波長の光量子のエネルギーを電子ヴオルトで表はしたものである。

強度の變動。 宇宙線の強度は一定のものではなく常に變動を示して居る。Myssowsky, Tuwim, Steinke 等は、之れが大氣壓と共に變化する事を示した。即ち大氣壓が昇れば強度が減少する。これは宇宙線が大氣の吸收を受ける事に依つて説明せられるものであつて、これよりして空氣の吸收係數を求める事が出来る。其結果第一表のものと同程度のものを得る。これに依つても字字線は地球外より来るものである事が推論される。然し大氣壓による變動は、其他の原因不明の變動のために隠されて居るから、これを明瞭に分離する事が困難な状態にある。

次に最近非常に議論せられたものは、緒言に於て述べた通り恒星時に關聯する變動である。Kolhörster は 1923 の測定に於て既にこれを認め、緒言に述べた様に宇宙線の源を指摘した。Büttner も同様の結果を得た。然し Millikan, Hoffmann, Steinke は其實驗によりこれを否定した。Corlin は其後 Steinke の結果もこれを精細に點検する時は、矢張り同様の動搖のある事を指摘した。然し最も精密と考へられる Hoffmann, Lindholm の實驗では矢張りこれが現はれて來なかつた。又 Hess, Mathias の結果も同様であつた。是等の否定的結果を得た實驗の特長とする所は、Fe 又は Pb で測定装置を包み、宇宙線の中の貫透力の小さい部分を除いて居ると云ふ事である。これより推憶される事は、恒星時的變化を示して居るのは、此除かれた軟い成分であつて、貫透力の大きい成分は變動しないものであらうと云ふ事である。最近のSteinke, Steinmauerer の實驗は、果してさうであると云ふ事を實證した。勿論此變動の大きさは Kolhörster の場合の様に高山の頂では 30% 位にも及ぶが、平地では 1~2% に過ぎない。

此變動は宇宙線の源が大空の限られた部分に存在し、其爲めに空間的分布が均一でなく、これによる大氣の吸收の變動により生ずるものと考へられて居る。然らば果して大空の孰れの部分に起因するかと云ふにそれは緒言に於て述べた通りである。

此外に不規則な變動が同じ大きさの程度に存在する。それは日々の變動と、數日又はそれ以上に亘るものとがある。其原因是全く不明である。或は氣象殊に温氣が影響するのではないかと考へられて居る。

太陽時との間には何等の關係がなく、又日蝕の影響も全然ない所よりして、太陽が宇宙線の源ではないと一般に信ぜられて居る。尤もこれが後述の様に若し γ -線と異り、物質波であつた場合には、上の結論の根據が薄弱となる。何となれば物質波は地球磁氣の爲めに甚だしく散亂

されて空間に廣く分布されるからである。

Millikanの説. Millikan は前述の Compton 散亂係數の式に基き，宇宙線の生ずる機構に關する説を提唱した。即ちプロトンと電子とよりして種々の元素の核が合成せられたる時，其餘つた質量が電磁波として放射されるものが宇宙線であると云ふ。Klein-Nishina 式によれば四個のプロトンと二個の電子とよりして，一個の He 原子核が合成せられるとすれば，彼の實驗値と一致する μ_{H_2O} を得ると云ふ。而して彼の觀測した恆星時的變化存在の否定よりして，此合成の行はれるのは星の内部ではなくして，星と星との間の空間であると云ふのである。然しこれは今の處只一個の憶説と見られるに過ぎない。

Skobelzyn の實驗. Skobelzyn (1928) は，RaC の γ -線に依つて生ずる Compton-反動電子の，磁場に於ける運動を，C. T. R. Wilson の cloud-chamber で寫眞に撮つて居る際，613 の反動電子の中，強い磁場でも殆ど曲げられないものが 32 ある事を見出した。而して其エネルギーを概算して見ると約 4×10^8 電子ヴオルト程度のものである。これは正に宇宙線が γ -線と同類のものであつて，これに依つて生ずる Compton 反動電子であると結論した。而して其數は 1 cm^2 の水平面へ平均 1 分間に 1.2 個宛を生じて居る事となり，其電離を求めて見ると大約上述の宇宙線の J の値と一致する。

宇宙線の本體. 以上は皆宇宙線を電磁波と見る立場に立つたものであるが，其正否は點検を要する。以上の多くの實驗は Shobelzyn のものを除いては皆電位計により空氣の電離度を測つたものである。此場合電離に直接與かるものは，宇宙線の本體が何であらうとも物質波（電子はプロトン等）である。何となれば電磁波であるとしても，それが直接測定器の内部で電離を生ずる確率は極めて小さいからである。夫れ故宇宙線が γ -線と同類であつたとしても，測定に直接關與するものは Compton 効果に依つて生ずる電子である。然し地上の大氣は最早此電子で飽和されて居るから，此電離を測定しても，結局は元の宇宙線電磁波の吸收係數を求める事になるものである。そこで Bothe, Kolhörster は此電離に與かつて居る電子其物の吸收係數を直接求めて見た。若しこれが宇宙 γ -線により生じた Compton 反動電子とすれば，其吸收係數は當然宇宙線のものよりも大なるべきである。何となれば物質波の吸收係數は電磁波のものよりも非常に大である筈である。此實驗に用ひた方法の詳細は省くが，要は Geiger-Müller の高速度電子を一つ宛數へる裝置を二つ上下に重ねて用ひ，此兩者に同時に數へられるものは正に物質波であるから，此者の吸收係數を求めたものである。斯くて得た結果は此吸收係數が全く宇宙線のものと一致して出て來た。これよりして得る結論は宇宙線其物が物質波であると云ふ事になる。然らば電子かプロトンの孰れであるかと云ふ事は尙不明であるとして居る。只其エネルギーは $10^9 \sim 10^{10}$ 電子ヴオルト又は其以上であらうと云ふ。又地球上に到達する數は 1 cm^2 の面積に平均 1 秒間に $1/100$ 個の割合であるといふ。これは前述の Skobelzyn の結果と

大體一致して居る。

此實驗は更に Rossi, Curtis に依つて繰り返され同様の結果を得て居る。又 Tuve, Mott-Smith も同様の實驗を行つて居る。

此結果よりして推理さるべきは、物質波は地球磁氣の影響を受けるから、緯度に依つて宇宙線の強度に變化があるべきだと云ふ事である。最近の Corlin の實驗によれば果して磁氣の北緯 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の處に強度の max. が存在すると云ふ。これが果して上述の磁氣作用であるかどうかは更に實驗を要する。

此物質波の説に對しても反対する人々がある。Steinke, Millikan 等はこれである。又 Epstein は、若しこれが 10^9 電子ヴオルトのエネルギーを有する電子でありとすれば、地球の磁極より約 32° 以上に離れた所には来る事を得ぬ筈であるべきに、今日迄殆どそれよりも離れた處のみで觀測せられて居るのは此説に反するものであると云つて居る。勿論 10^9 ヴオルト以上のエネルギーを有すれば遠くにも来る事になる。要するに此點は未だ解決されぬ問題である。

以上述べた様に宇宙線の本體、性質、起源等の問題は尙一部のものを除いては渾沌たる状態にあつて、將來の研究を俟つて闡明せらるべきものである。而して目下此研究の方法が三種ある。Kolhörster, Steinke, Büttner, Hess 等の様に電位計により其電離作用を測るものと、Sobelzyn の様に其電離の足跡を見るものと、又 Bothe, Kolhörster の様に其電離作用を生ずる直接の主體を明にして宇宙線の本體を捉へんとするものである。これに依つて上記の諸問題が解かるれば宇宙物理學に或る種の大進歩を促す事であらう。