

## 銀河系外の電波星雲

大谷 浩\*

宇宙電波源には、天の川のような広い面積をもつものと、点源（完全な点ではなく、一般に小さい面積をしめる）の2種類がある。点源のほとんどは、銀河系外星雲であり、少数は銀河系内の天体である。これらの天体からの電波は、熱的放射によるものと、非熱的放射によるものとのわけることができ、点源のうち、銀河系外星雲と銀河系内の超新星の残骸からの電波は非熱的なものである。ここでは、電波をだす、銀河系外星雲—電波星雲—の性質を、主に統計的な資料をもとにして、調べてみる。

## §1. カタログと観測される物理量

電波源のカタログは多くの研究者が、おのおのの目的に応じてつくっているが、一般的なカタログの主なもの挙げると第1表のとうりである。IAU カタログは、これができるまでのおのおのの観測者の資料を整理したものであるから、内容は統一を欠いているが、歴史的意味があるので挙げておいた。第3番目に挙げてある3C カタログは、ケンブリッジの第3回掃天観測によるものである。これより以前に、1C, 2C カタログが発表されている筈であるが、手もとに文献がないので挙げていない。

い。なお、3C 補遺、および、SRH は筆者が便宜的につけた名称であって、普通は、観測者の名前で引用されている。これらすべてのカタログには、当然のことながら、銀河系内の点源も含まれている。

電波源の物理的性質を知るための、観測から直接得られる量は、流量密度といわれる量であり、これから間接的に、物理的性質を示す他の量が導かれる。これらを次に簡単に説明しておこう。

i. 流量密度 地球上で、単位時間内に、単位面積当たり単位周波数巾内に受けとられる、電波のエネルギーの量である。

ii. 電波等級 星の光度等級と同じように、流量密度を等級であらわしたものである。天体までの距離が知られている場合には絶対等級も定義される。みかけの電波等級  $m_r(\nu)$  の定義は

$$m_r(\nu) = -53.4 - 2.5 \log F_\nu$$

である。ここに  $F_\nu$  は、周波数  $\nu$  Mc/s (メガサイクル) での流量密度である。

iii. 電波指数  $m_r - m_{pg}$  ( $m_{pg}$  は写真等級) で定義される量であり、空間吸収や赤方変移のない場合には、絶

第 1 表

カ タ ロ グ	IAU	MSH	3C	3C 補遺	SRH	
製 作 者	パウジー 1955 年	ミルスその他 1958 年	エッジその他 1959 年	エルスマアその他 1959 年	スコットその他 1961 年	
電 波 望 遠 鏡 周 波 数 (波 長)	観測者により異なる	十字型干渉計 86 Mc/s (3.5 m)	4素子干渉計 159 Mc/s (1.9 m)	干渉計 178 Mc/s (1.7 m)	干渉計 178 Mc/s (1.7 m)	
掃 天 領 域 (赤 緯)		$-20^\circ \sim +10^\circ$	$-22^\circ \sim +71^\circ$	$-0.6^\circ \sim +65^\circ$	(I) $+50^\circ \sim +52^\circ$ (II) $+40^\circ \sim +44^\circ$	
点 源 の 数	88	1159	471	64 (3C に含まれる)	(I) 67 (II) 175	
電 波 の デ ー タ	位 置	$\alpha, \delta$ (1950)	$\alpha, \delta$ (1950)	$\alpha, \delta$ (1950)	$\alpha, \delta$	
	位 置 の 精 度	観測者により異なる	(確率誤差の平均) $\alpha: \pm 0.4$ $\delta: \pm 0.7$	$\alpha: 1'$ まで $\delta: 1'$ まで	(確率誤差の平均) $\alpha: \pm 1.5$ $\delta: \pm 1.5$	
	極 限 流 量 密 度 (ワット) (平方米)(サイクル)		$4 \times 10^{-26}$	$8 \times 10^{-26}$	$20 \times 10^{-26}$	(I) $3 \times 10^{-26}$ (II) $2 \times 10^{-26}$
	そ の 他	観 測 者 角 直 径 位 置		角 直 径 2C 番 号, MSH 番 号	角 直 径	
光 学 的 同 定	同 定 の 数	21	14 (明るい星雲)	6		
	光 学 的 デ ー タ	メシエー番号 NGC 番号 位置 ( $\alpha, \delta$ ), 角直径 長径の位置角 写真等級	NGC 番号 星雲の型 電波指数		位置 ( $\alpha, \delta$ )	

\* 京大理学部

H. Otani: Radio Galaxies.

対等級の差に等しい。電波と可視光線の強さの比をあらわす。

iv. **スペクトル指数** 非熱的放射の場合、流量密度  $F_\nu$  と、周波数  $\nu$  のあいだに、

$$F_\nu \propto \nu^{-\alpha} \quad (\alpha \text{ は定数})$$

という関係が、ほぼ成立つことが、観測から知られている。この指数  $\alpha$  をスペクトル指数といい、天体の距離に無関係であるばかりでなく、§5 に述べるように、電波源の本質的性質の一つをあらわす重要な量である。

これらの諸量の統計によって、電波を出す星雲の性質を調べるまえに、電波源と星雲との同定について述べておく。

## §2. 光学的同定

電波点源は第1表にみられるように、非常にたくさんあるが、これらのうちで、光学的に見える天体に同定されているものは多くない。この原因は、点源である天体が、ほとんど光学的に暗いためと、電波望遠鏡の分解能が低い(第1表の位置の精度の項を参照)ためである。したがって、同定されているもの多くは、特殊な星雲である。たとえば、バーデとミンコフスキー(1954)は、非常に電波の強い、光学的にも特異な4個の星雲(白鳥座 A, NGC 4486, 1275, 5128)と、光学的には正常な7個の星雲の同定をし、電波的、および光学的性質を詳しく調べている。この他に個々の点源について、多くの人が星雲との同定をしている。光学的同定を比較的にたくさんまとめたカタログとしては、ミルス(1960)のものしかない。これには、46個の星雲と、55個の星雲団が点源に同定されている。

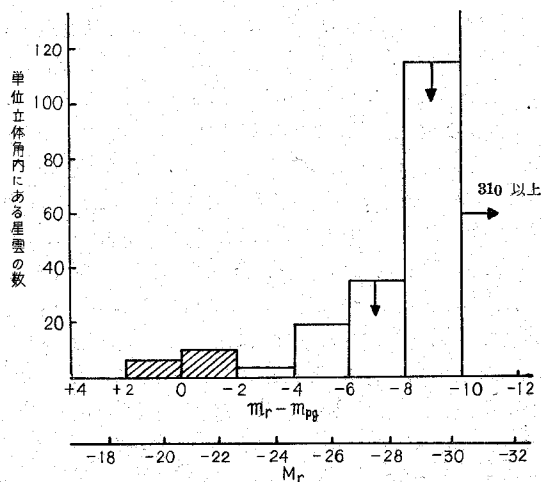
光学的同定をする場合、先に述べた望遠鏡の分解能の問題があるので、ある一定の基準にもとづいておこなわ

れる。この基準は、現在のところ、統一されていないが、ミルスの基準を一例として示そう。このカタログをつくるための、光学的な資料として、パロマ・スカイ・アトラスが、電波の資料として、MSH カタログがそれぞれ用いられた。まず(1)銀緯が  $\pm 12^\circ 5'$  より高く(銀河系外星雲である可能性が大きい)、電波流量密度が、ある一定の値より大きい点源と、これより低銀緯のものや電波の弱いものうち、3C カタログにも記載されている点源(250個)をえらびだした。それぞれの点源の位置を中心に、その位置の確率誤差の3倍の半径の円内に、16等級より明るい星雲、または19等級より明るい二重以上の星雲、あるいは、暗くても形状が特異な星雲があれば、それを電波源の星雲であるとした。次に(2)上のもの以外でも点源近くの空からの電波が弱く、しかも明るい星雲の集まっていない領域(二つの領域をえらんだ)にある点源については、その位置から角度  $10'$  以内にある特異な形の星雲、あるいは二重以上の星雲を電波源であるとしている。このような方法では、点源と光学的に見える星雲との偶然の一致が起りうる。統計的な推定によると、(1)の同定では、平均20%程度の偶然性がある。しかし、このうちでも、二重以上の星雲では、偶然性はさらに低い。

## §3. 電波指数の統計

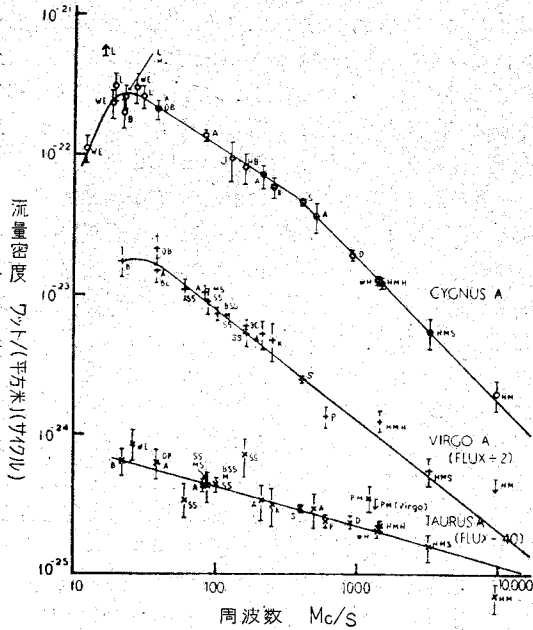
H・ブラウンとハザード(1961)は、光学的に正常な星雲について、電波指数と、その写真等級の関係を調べた。それによると、20個の Sb, Sc 型星雲では、電波指数は写真等級の大小によらずほぼ一定で、平均  $m_r - m_{pg} = +1.3 \pm 0.8$  等級である。また E 型と Ir 型星雲では、それぞれ4個ずつしか資料がないので、Sb, Sc 型と同様に、電波指数が一定で、且つその偏差が同じであると仮定すれば、E 型では電波指数の平均値は2.0等級より大きく、Ir 型では3.0等級より大きいということが推定される。ミルス(1955)も同じような結果をこれより以前に得ている。

電波指数と星雲の数との関係は、ロングとマークス(1961)により研究されている。約250個の電波星雲の統計の結果、電波指数が  $-1$  から  $+3$  のものと、 $-8$  より小さい(電波が強い)ものとの二種類に大別され、しかも後者の種類のものの方がたくさんあることがわかった(第1図)。前者に属する星雲は、電波が比較的弱く、しかも光学的に正常なものばかりであるので、これらを“正常な(電波)星雲”と名づけている。先の H・ブラウンとハザードの結果はこれに含まれるものである。後者に属する星雲は、電波が非常に強いばかりでなく、光学的に異常なものが多いので“特異な(電波)星雲”とよんでいる。第1図は、電波指数の頻度分布(天球の単位立体角内にある数)である。下向きの矢印は示



第1図

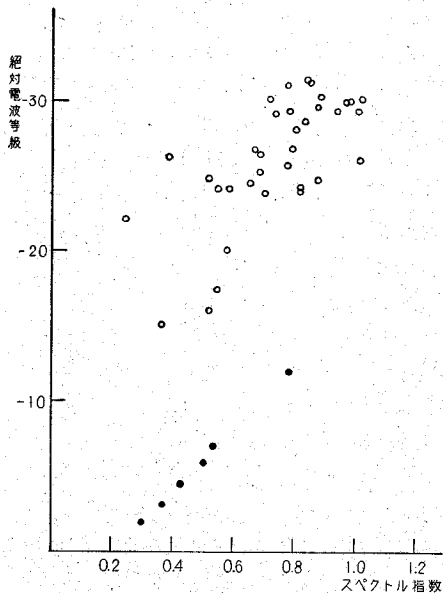
斜線の部分は正常な星雲絶対電波等級の値は、絶対写真等級を  $-20.6$  等級と仮定したもの(ロング、マークス)



第2図 非熱的電波源のスペクトル  
 CYGNUS A, VIRGO A, TAURUS A はそれぞれ  
 白鳥座 A, 乙女座 A, 牡牛座 A (カニ星雲) である。(ホイ  
 ットフィールド)

されている値が上限であることを示し、右向きの矢印は電波指数が  $-10$  よりも小さなものが 310 個以上あるという意味である。これらの、上限、下限は、光学的同定の不確かさによるものである。

さらに、“特異な星雲”のうち、赤方変移によって距離の決められた 10 個の星雲の絶対写真等級  $M_{pg}$  が、すべて  $M_{pg} = -20^m \pm 1^m$  のあたりの値であるという



第3図 ○電波星雲, ●II型超新星の残骸  
 (ブスコフスキー)

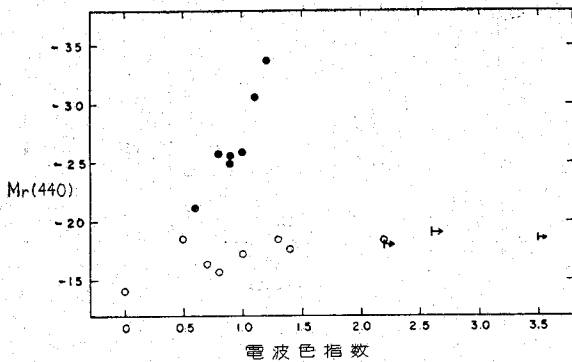
結果を、ロングとマークスは得た。ブスコフスキー (1962) も 5 個の特異な星雲について、同じく赤方変移から、平均  $M_{pg} = -20^m \pm 0^m 7$  となるという。したがって、“特異な星雲”の絶対写真等級は、どれでもだいたい  $-20$  等級で、個々の差は少いと考えられる。“特異な星雲”の赤方変移が測れない場合、 $M_{pg} = -20^m 0$  と仮定して、みかけの明るさから距離を推定するということがおこなわれている。

なお、ここで説明した“特異な電波星雲”を単に“電波星雲”ということが多いことをつけ加えておく。

§4. スペクトル指数の統計

第2図は白鳥座 A, 乙女座 A (NGC 4486), 牡牛座 A (カニ星雲: 1054 年超新星の残骸) の電波スペクトルである。たて軸は、流量密度の対数、横軸は周波数の対数である。乙女座 A と牡牛座 A のスペクトルは、ほとんど完全な直線と考えられる。この直線の勾配を  $-\alpha$  とすると  $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$  となり、この  $\alpha$  をスペクトル指数ということは §2 で述べたとおりである。したがって、この図から、乙女座 A は牡牛座 A より、スペクトル指数が大きいということになる。白鳥座 A と乙女座 A のスペクトルの、20 Mc/s ぐらいより低周波数のところで、急激に流量密度が減少している。これは、電波源と我々との間に、電離水素ガスの雲があり、この雲によって、電波が吸収されているためであると、考えられている。また、白鳥座 A の 350 Mc/s 付近でスペクトル指数が変わっているらしい。これについては、よくわかっていないが、§5 で簡単に触れる。

スペクトル指数を、多くの星雲についてまとめて調べたのは、ホイットフィールド (1959), ハリスとロバート (1960), ブスコフスキー (1962) たちである。ホイットフィールドは、銀河系内外の電波点源 31 個について、多くの人の観測資料を整理し、スペクトル指数を決めた。その結果電波星雲の平均の値は  $+0.9$  で、銀河系内の点源の平均値  $+0.6$  よりも大きいことがわかった。しかし、光学的同定のされていないものの平均が  $+1.2$  という値で、上の両者のどちらよりも大きく、しかも同定されていない点源の数が多いことを考えると、この数値は、まだ十分に信頼することはできない。それにしても、銀河系内の点源と、外の点源のスペクトル指数には、違いがあることは、ブスコフスキーによっても指摘されている。第3図はスペクトル指数と絶対電波等級の相関図である。これによると、明るいものほどスペクトル指数が大きいという傾向が、銀河系内のものでも、外のものでもみられる。それぞれのスペクトル指数の平均値を考えることはあまり意味がないようであるが、一般に銀河系外星雲の方が、大きいスペクトル指数をもつようであり、ホイットフィールドの示した傾向と同じであ



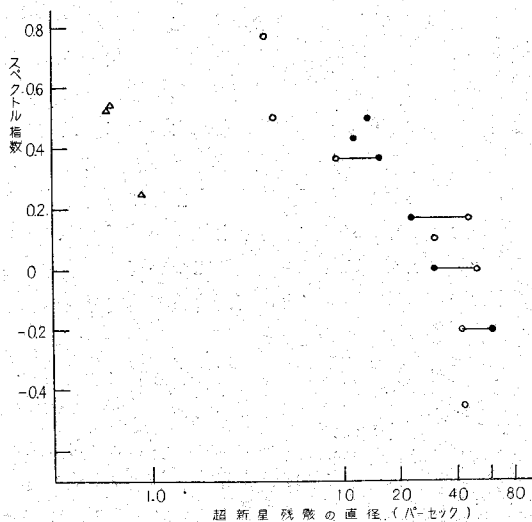
第4図 電波色指数は  $m_r(1400) - m_r(440)$  で定義されている (ヒーシェン)

る。

ヒーシェン (1960) は、同じ相関図上で、電波星雲だけを調べて、それらが二つの系列にわかれると述べている。すなわち、第4図において、○印の系列では、電波等級は、ほぼ一定であり、●印の系列は、指数が大きいほど電波も強い。(横軸の電波色指数は、スペクトル指数と物理的に同じ性質の量である。) ○印の系列、および●印の系列は、くらべてみると、§3 で述べた“正常な星雲”と“特異な星雲”にそれぞれ対応している。このように電波星雲が、正常型と特異型に分類できることは、次節で述べるように、電波星雲の電波発生の原因などと関係するらしく、興味ある問題である。

### §5. 電波星雲の進化

現在、非熱的な電波とは、光速に近い高速電子が、磁場の中を走りまわるときにだす、シンクロトロン輻射と考えられている。もしそうなら、非熱的な電波の強さは、電波源中の高速電子と、磁場の状態に依存することにな



第5図 △ 第I型超新星 ○ 第II型超新星 (●はシュクロフスキーの直径の値)

る。いま、高速電子のエネルギースペクトル (電子のエネルギーと数との関係) を、宇宙線から類推して、

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

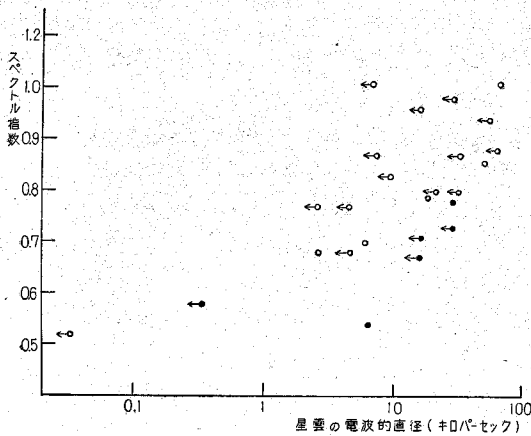
(但し、 $E$  は電子のエネルギー、 $N(E)$  はエネルギー  $E$  の電子の個数、 $K$  と  $\gamma$  は定数) と仮定すると、定数  $\gamma$  とスペクトル指数  $\alpha$  のあいだに

$$\gamma = 2\alpha + 1 \quad (2)$$

が成立つ。ホイットフィールドによれば、銀河系内の点源および電波星雲のスペクトル指数がそれぞれ、0.6, 0.9 であるから、(2) によって、おのおの  $\gamma = 2.2$ ,  $\gamma = 2.8$ , となる。この値は、宇宙線で、ふつう採用されている  $\gamma \approx 2.5$  にくらべると、少し異なるが、(1) 式のエネルギースペクトルを仮定することは、妥当であるとされている。

我々の銀河系や、アンドロメダ大星雲のハローから、弱い非熱的な電波が観測されているので、“正常な星雲”の非熱的な電波をだす場所は、ハローであると考えられている。一方、“特異な星雲”は、正常なもの1000倍以上の電波エネルギーを放射しており (第1図)、電波源は、ハローと考えられる領域よりもずっとひろがっている。なかには、白鳥座 A とかセンダウルス座 A (NGC 5128) のように、電波源の中心が、本体の星雲を中心に、数十キロパーセックも離れた対称な二点にあるものもある。白鳥座 A は、周知のように、バーデとミンコフスキー (1954) が、その形と電波の強さから、衝突しつつある二つの星雲と考えたものである。シュクロフスキーは、はじめこの考えに賛成したが、観測される衝突の速さの割には、電波のエネルギーが強すぎるし、この星雲は“両方”とも、光学的にかなり特殊な性質のものであるから、このような星雲どうしが衝突する確率が、非常に小さいことなどの不都合を指適した。そうして、白鳥座 A は一個の星雲であるということ、光学的な議論と並行して、電波星雲の進化の問題を考えることにより、示そうと試みている。

シュクロフスキー (1961) は、まず、超新星の残骸の進化を考えた。残骸の中で、磁場が凍結しており、さらに、高速電子は、主に残骸の膨張によってエネルギーを失うものと仮定すると、スペクトル指数は、いつまでも変化しない。そうすると、放射される電波の強さは、残骸の大きさだけでできまり、大きいものほど弱い、すなわち、古いものほど電波が弱いという。この考えで計算された値と、観測とが、だいたい一致する。この理論を、電波星雲白鳥座 A と、これと同じぐらいのスペクトル指数をもち、しかもずっと大きな半径をもつ NGC 5128 とに適用したところ、やはり、理論と観測がほぼ一致する。NGC 5128 は太い吸収帯をもつ E0 型星雲である。白鳥座 A も、これと同じような吸収帯のある

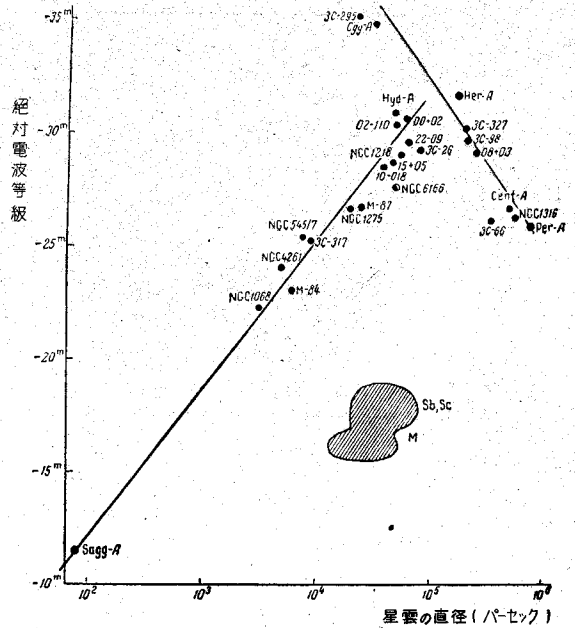


第6図 特異な電波星雲の大きさとスペクトル指数の相関図。  
 アスコフスキーおよび 3C 補遺のデータによる  
 (●は 3C のデータ) 矢印は直径が示されている値より小さいことを示す

星雲であって、距離が遠いために、二つの星雲であるかのごとくに見えるのではないかということなどを考え、白鳥座 A は NGC 5128 と同じ特異な一個の星雲で、白鳥座 A が若く、NGC 5128 が古いものであるとされている。

その後ハリス (1962) は、超新星の残骸の半径が大きいくほど、スペクトル指数が小さいという結果 (第5図) を得た。ところが、“特異な星雲”では、第6図のように、半径が大きいくほど、スペクトル指数が大きいく、全く逆の傾向にある。この二つの結果は、矛盾するようであるが、シンクロトロン輻射によって、高速電子がエネルギーを失う (シュクロフスキーは無視した。) ことをも考慮すれば、電波源のはじめの状態によって、上の両方の変化のし方が考えられるという可能性がある。もし、このように、スペクトル指数が変化するならば、シュクロフスキーの理論は一部分訂正されなければならない。

さらに、シュクロフスキー (1962) は、電波の大きさと電波の強さとの関係を調べてみると、“特異な星雲”は二つの種類に分けられるという。第7図の、右あがりの直線であらわされる系列の星雲は、電波的な大きさと光学的な大きさがほぼ同じであるので、これを“主系列”，右上隅の右あがりの系列は、電波での大きさが、光学的なそれよりずっと大きいので“巨星雲列”とそれぞれ名づけている。斜線の領域は、“正常な星雲”で、系列らしいものはみられない。星の HR 図表で、種々の系列が、星の進化のみちすじであるとされていることに類似して、第7図での二つの系列が、電波星雲の進化のみちすじであろうと考えた。シュクロフスキーによれば、主系列の星雲は右上へ、すなわち、だんだんと明るくなり、やがて巨星雲列との交点に到達し、その後は、巨星雲列に沿って、次第に暗くなるらしい。主系列の星



第7図 Sagg-A は我々の銀河系の核 (シュクロフスキー)

雲は、ある時期に、電波の強さの最大値をもつわけである。巨星雲列の星雲は、系列に沿って暗くなる一方であるらしいという、先のシュクロフスキーの進化論は、とりもなおさず巨星雲列に関するものであることがわかる。

§6. 今後の問題

現在観測されている電波点源の数は、第1表をみてもわかるように、かなりたくさん数である。電波源の光度函数の議論 (例えば ライル 1959) によると、ほとんどの点源は電波星雲であると考えられる。しかるに、光学的同定のされているものは少く、これが電波星雲の研究に大きな障害となっていることは明らかである。したがって、なによりもまず、同定をおしすすめることが、当然のことながら切望される。それと同時に、電波指数やスペクトル指数の資料を豊富に、且つ精確に測定し、光学的な資料と照らして、“正常星雲”と“特異星雲”の違いを、統計的に、はっきりと知る必要がある。さらに、個々の星雲、ことに特異星雲について、電波的、光学的両方の詳しい観測によって、物理的性質を調べなければならない。

電波星雲と超新星の残骸の電波発生機構は、だいたいいシンクロトロン輻射で説明がついているようである。しかし、これには、電子のエネルギースペクトルとして、§5の (1) 式が仮定されているということに注意しておかねばならない。この式の背景には、フェルミの加速というものがあ、宇宙線においても、この加速の是非に