

守山史生\*

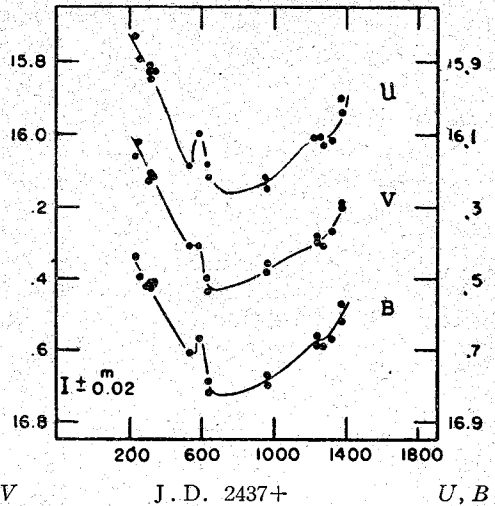
## §1. 発見に至る経緯

数年前までは、全天に散在して観測される数多くの電波天体のうち、銀河面の近くにみられる少数の“超新星のなれの果て”を除いた大部分は、銀河系外の星雲 (galaxies) に対応すると考えられていた。しかし、電波源と明らかに対応のつく星雲の見付かった例はそう多くはなく、せいぜい数十個にすぎなかった。これはひとつには、電波の観測では、位置決定の精度が悪かったためである。

そこで、カリフォルニア工科大学のオウエンス・ヴァレイ電波天文台では、口径 27m のパラボラ・アンテナ 2 基よりなる干渉計を使って、電波源の位置ならびに輝度分布を精密に測定し、パロマ山天文台の大望遠鏡による光学的観測の助けを得て、電波源の正体解明を強力にすすめる計画をたてた。その最初の目標として選ばれたのが radio brightness の高い (つまり天球上の狭い領域から強い電波の出ている) 三個の天体、3C 48, 3C 196, 3C 286 である。

まず 1960 年秋、グリーンシュタイン達は、オウエンス・ヴァレイで精密に測定した電波源 3C 48 の方向 ( $\alpha_{1950} = 01^{\text{h}}34^{\text{m}}50.^{\text{s}}.3$ ,  $\delta_{1950} = +32^{\circ}54'20''$ ) に 200 インチ望遠鏡をむけ、写真をとった。彼等は、当時知られていたもっとも遠い銀河系外星雲-3C 295 (赤方変移=0.461) のような galaxy が見つかることを期待していたが、予想に反して乾板上には、光度 16 等の淡い星の像しかうつっていなかった。ただこの星の南の方約 3" のところに、もやもやした星雲状のものがみえる。もしこれが実際に恒星状の天体と関係があるとすれば、後者は普通の星ではないのかも知れない。

そこで 3C 48 の性質をくわしくしらべる仕事が始められた。色の測定によると、著しい UV excess が認められ、普通の星や galaxy とは明らかに違っている。どちらかといえば old nova や白色矮星に近い。またスペクトルには非常に幅の広い emission feature が幾つかみつけたが、そのうちとくにいちじるしいのは、波長 4686 Å および 3832 Å にみえるもので、half-half-width を速度に換算すると 1000 km/sec の程度である。λ4686 Å を He II の輝線だと解釈すると、赤方変移は 100 km/sec



第1図 3C 48 の変光

以下になるが、λ 3832 Å の線を同定することができない。

さらに optical image を分解しようとして、seeing のよい時、10 分から 15 秒までの露出で写真をとってみたが、どの乾板でも 3C 48 の像は鋭く、同じ光度の星の像と区別することはできなかった。その後 1961 年 1 月、パロマ山天文台では、48 インチ・シュミット・カメラで 3C 48 方向の第 2 次 Sky survey plate を撮影した。この乾板を 1949 年にとった第 1 次 Sky survey plate と比較したが、検出できる程度の固有運動はなく、このことから、固有運動は 0.05/年以下であることが知られた。

また 1961 年以来、精密なフォトメトリーが、かんけつ的に続けられたが、約 1 年の間に、U, V, B の三領域でほぼ似た形の変光をしていることが分った。(第 1 図参照) 一方この期間 1420 Mc/s の電波強度をしらべたところでは、3% 以上の変動は認められない。

こうして、3C 48 に同定される恒星状の天体が、何か特別なものらしいということが、次第に明らかになってくると共に、3C 196 や 3C 286 に対応する恒星状の天体も同様な過程でみつけられたのである。この 2 つはどちらも 18 等くらいのかすかな天体であるが、色はいづれも青く、顕著な UV excess をもっており、3C 196 には淡いガス雲状のものが附随している。またどちらのスペクトルにも emission および absorption feature が認

\* 東京天文台

F. Moriyama: Quasi-stellar Objects Identified with Radio Sources.

められるが、既知のスペクトル線に同定できない点は 3C 48 の場合と同じであり、昔の survey plate とくらべて固有運動の見つからない点も似ている。

このような観測事実は、3C 48 などに同定される天体が、銀河系外の星雲や、銀河系内の超新星のなれのはてのようなものではなく、今までわれわれの知らなかった新しい種類の天体ではないかということを暗示している。パロマ山天文台の人達は、恐らく銀河系内の天体、それも普通の星とは全く異質の、正真正銘の radio star ではないかと考えた。

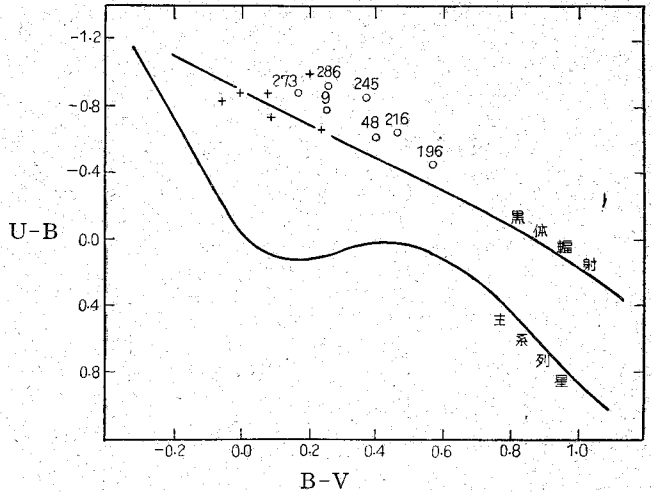
## §2. スペクトル線の同定

一方オーストラリアでは、パークスに新設された口径 60m の大電波望遠鏡を用い、月のえんべいを利用して、radio brightness の高い 3C 273 という未同定の電波源の位置と輝度分布を測定した。1962 年のことである。その結果によると、3C 273 は約 20 秒はなれた A・B 2つの部分（どちらも直径は数秒の程度）から成り立っていることが分った。電波源の精密な位置を知ったシュミットは、早速 200 インチで写真をとり、3C 273-B の位置に明るさ 13 等の星の像、A のところにジェット状の星雲が写っているのを見つけたのである。

このうち B は、3C 48 などと同じく青味をおびた色をもちスペクトルには数本の幅の広い emission feature が認められた。幸なことに、3C 273 の場合には、いくつかの emission feature は規則的に並んでいて、その波長の関係はいかにも水素的な構造をもった原子から放出されたスペクトルであることを暗示している。

この事実を手がかりに、シュミットは、3C 273 にみられる輝線が、非常に大きな赤方変移 ( $\Delta\lambda/\lambda=0.158$ ) をうけた  $H_{\beta}$  以下の水素のバルマー系列線や Mg II, [O III] の輝線としてうまく説明されることを示した。つづいてオークは、3C 273 の赤外部の測光を行い、波長 7600 Å 附近に強い emission feature のあることを見つけたが、シュミットの求めた赤方変移の値を使うと、 $H_{\alpha}$  に見事に一致し、シュミットの解釈の正しさを裏書きした。

そこでグリーンシュタインは 3C 48 のスペクトルをしらべ直し、 $\lambda 4686$  Å の輝線を [Ne V]  $\lambda 3426$  Å が  $\Delta\lambda/\lambda=0.367$  という赤方変移をうけたものと考えれば、 $\lambda 3832$  Å は Mg II の 2798 Å に同定され、他の何本かの輝線も [O II], [Ne V], [Ne III] などの、稀薄なガス状天体に普通にみられる禁制線に同定されることを示した。こうして、恒星状の天体のスペクトルにあらわれた未同定の輝線は、大きな赤方変移を考えることによって、めでたく正体をつかむことができたのである。



第2図  $Q_s$  の色 ○:  $Q_s$  数字は 3C 番号 ×: old nova

## §3. 観測的特徴

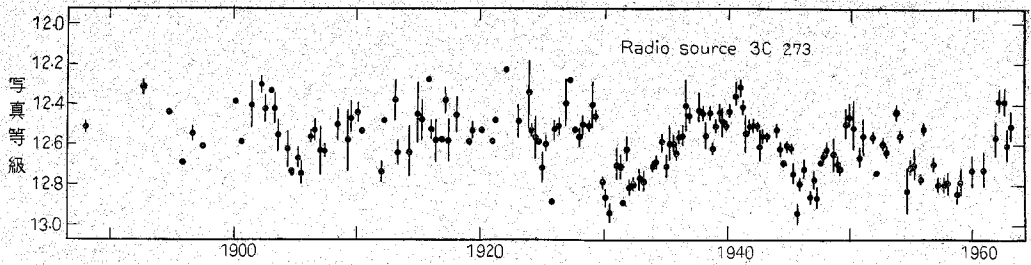
その後、干渉計や月のえんべいによる電波源の位置の精密測定が進むにつれ、恒星状の天体に同定される電波源 (quasi-stellar object identified with a radio source) ——以後略して  $Q_s$  と呼ぶ——の数はふえ、現在では 10 個以上に達している。これらすべてについて、光学的なスペクトル線の同定や赤方変移の測定が行なわれているわけではないが、今までに分った観測結果をまとめると、大雑把につぎのようになる。

### (a) 光

すでに述べたように  $Q_s$  は普通の星や galaxy にくらべて、いちじるしく青い連続スペクトルを持っている。(U-B)-(B-V) 図上に三色測光の結果をプロットしたのが第2図で、この図には、比較のため、主系列星や黒体輻射の色および幾つかの old nova の実測値を記入してある。

つぎに 3C 48 や 3C 273 にみられるように、恒星状の天体のそばに星雲状のものが附随していることも、一つの特徴であろう。しかし  $Q_s$  に必ずこのようなガス雲状の天体がともなっているかどうかは明らかでない。なにぶん  $Q_s$  の本体自身が 3C 273 や 3C 48 を除けば 18 等程度の暗い天体であるから、その附近にひろがった光度の低い天体が存在していても、仲々見きわめることが困難である。

$Q_s$  の光学的性質でいちじるしいことは、変光である。3C 48 の変光についてはすでに述べた。3C 273 は  $Q_s$  の中では 13 等という比較的明るい光度をもっており、昔の survey plate の中にも写っていて、80 年程の間の光度変化をしらべることができる。その結果によると、永年的な変化は認められないが、十数年を周期とする振幅 0.4 等級くらいの変動があり、これに 1 週間



第 3 図 3C 273 の変光

乃至 1 ヶ月程度続く 1 等級ほどの急激な増光 (flash) や、0.4 等級くらいの急激な減光が不規則に重畳しているようである。また最近の観測によると、1963 年 2 月より 63 年 12 月までの間に、ほぼ系統的に 0.2 等の減光を示している。3C 196 については 1962 年 4 月より 63 年 12 月までの間に 3 回測定が行われたが、この期間に約 0.3 等級の増光が記録されている。

現在までに輝線スペクトルの同定が行なわれている  $Q_s$  は 3C 47, 3C 48, 3C 147, 3C 273 の 4 個で、それをまとめると第 1 表のようになる。この表をみて分る通り  $Q_s$  のスペクトルは、radio galaxy にみられる輝線スペクトルと同じ様に、大雑把にいて惑星状星雲の輝線スペクトルに似ている。(ただ Mg II の  $\lambda 2798 \text{ \AA}$  は紫外域にあるため惑星状星雲では見えない。 $Q_s$  では非常に大きな赤方変移をうけて実視領域に移り、観測が可能になっている) しかし詳細にみれば  $Q_s$  相互間のスペクトル線の表われ方には、かなり大きな差がある。例え

ば [OII]  $\lambda 3727 \text{ \AA}$  は、3C 48, 3C 147 ではいちじるしく強いが、3C 47 では弱く、3C 273 には見えない。また Mg II,  $\lambda 2798 \text{ \AA}$  は 3C 48 や 3C 273 にはいちじるしく強くあらわれ、3C 47 にも明瞭にみえているが、3C 147 ではよくわからない。

#### (b) 電 波

発見に至るいきさつからわかるように、 $Q_s$  は一般に電波源の視直径が小さく、radio brightness が高い。しかし電波の輝度分布はバリエティに富んでいて、radio galaxies にみられる、double, single, core and halo などの型をいずれも含んでいる。また電波のスペクトルについていえば、 $C_L$ -型 (低周波帯でスペクトル指数が小さくなる) が多いことが特色であろう。今までに知られている電波的特性を集めたのが、第 2 表である。

#### § 4. 赤方変移の解釈

$Q_s$  の輝線スペクトルにみられる大きな赤方変移を、銀河系内の星の後退速度と解釈することは到底不可能で

第 1 表

Identification	観測された輝線スペクトルの波長 (Å)			
	3C 273	3C 48	3C 47	3C 147
Mg II 2798	3239	3832	3986	
[NeV] 2975		4066		
OIII 3133				4839
[NeV] 3346		4575		
[NeV] 3426		4685	4885	5290
[OII] 3727		5097	5310	5760
[NeIII] 3869		5288	5510	5976
[NeIII] 3968				6132
$H\epsilon$ 3970	4595			
$H\delta$ 4101	4753			
$H\gamma$ 4340	5032	5935	} 6200	
[OIII] 4363				
$H\beta$ 4861	5632	6646		
[OIII] 4957			7072	
[OIII] 5007	5792		7136	
平均の赤方変移	0.158	0.367	0.425	0.545

第 2 表

	400 Mc/s における Flux		スペクトル		輝度分布		
		$10^{-26} \text{Wm}^{-2}(\text{c/s})^{-1}$	型	指数	型	視直径	間隔
3C 47	13		S	0.89	H	core~4'', halo~2''	
48	38		$C_L$	0.3~0.8		<1''	
147	45		$C_L$	0.2~0.8	D	<1''	2.4
196	38		$S(C_H)$	0.73	H	core<1'', halo~12''	
216	12		S	0.83			
245	7		S	0.61	D		3''
273A	40		S	0.90	H	core~2'', halo~6''	
B	20		$C_L?$		H	core~0.5'', halo~3''	
286	24		$C_L$	0.0~0.5	H	core<1'', halo~20''	
MSH 14-121	10		S	0.83	D	<0.5	37''

S: simple C: curved H: core and halo D: double

ある。第1に銀河系内の重力場では光速の1000分の1以上の速度をもった星を、銀河系内にとどめておくことはできない。第2にもしこのように後退速度の大きい星なら、固有運動も大きく、すぐに見付かるはずである。しかるに3C 273について、1888年以来の乾板をしらべた結果では、この天体の固有運動は0.001/年以下にすぎない。もし視線に直角方向の速度が後退速度と同程度であると仮定すると、距離は10Mpc以上、つまり銀河系外の天体ということになるし、また絶対等級も-16等となって普通の星とは考えられない。

つぎにスペクトル線のずれを、高密度あるいは大質量の星の重力による赤方変移とする可能性を考えてみよう。いま質量  $M$ 、半径  $R$  の星の大气で生じた波長  $\lambda$  の輝線が、重力によつて赤方変移  $\Delta\lambda$  をうけたとすると、

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{Rc^2} = 1.47 \times 10^5 \frac{M/M_\odot}{R \text{ cm}}$$

の関係がある。ここに  $G$  は万有引力常数、 $c$  は光速、 $M_\odot$  は太陽質量である。

一方輝線の幅 ( $w$ ) が重力ポテンシャルの変化だけで生じたと仮定すれば、輝線を生ずる層の幾何学的厚さ  $\Delta R$  は、

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{w}{\Delta\lambda}$$

で与えられる。3C 273については、 $H_\beta$  の幅が50Åの程度であるから、 $\Delta R/R$  は0.07となる。

つぎに  $H_\beta$  の単位体積あたりの輻射能を  $E(H_\beta)$  とすると、観測される  $H_\beta$  の強さ  $I(H_\beta)$  は

$$I(H_\beta) = \frac{R^2}{r^2} \Delta R E(H_\beta)$$

但し  $r$  は  $Q_s$  までの距離で、 $E(H_\beta)$  は電子温度 ( $T_e$ ) および電子密度 ( $N_e$ ) の函数として表わされる。輝線スペクトルの見え方から  $T_e$  のもっともらしい値として、

$10^4$  度を仮定し、3C 273 の観測値を用いると、

$$N_e^2 R^3 r^{-2} = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-5}$$

の関係を得る。

スペクトルに禁制線のみえていることは、輝線の生じている層の電子密度が  $10^5/\text{cc}$  以下であることを示している。いま3C 273が質量  $1M_\odot$  程度の高密度星(したがって  $R \sim 10^8 \text{ cm}$ ) だと考えて距離を求めると、何と月よりも近い天体ということになってしまつて、他の観測事実と全く矛盾する。またもしかかる天体が実際に存在していたら、ケプラーが見逃すことはしなかつたであろう。

つぎに質量も半径も大きい超巨大質量の星を仮想した場合には、この星が太陽附近におよぼす重力が銀河系全体の重力にくらべてはるかに小さいであろうことを考慮して、上述の計算と組合せると、3C 273 に対して、

$$M/M_\odot > 7 \times 10^8 \quad r > 2500 \text{ pc}$$

を得る。したがって、3C 273 の銀緯の高いこと ( $\sim 60^\circ$ ) からこの場合にも銀河系の円板外の天体ということになる。またこのように大質量の星だと考えることは、星の構造上からも恐らく難点があるであろう。しかし、もし galaxies に匹敵するような大質量と1pc以下の直径をもった安定な星が存在し得るならば、 $Q_s$  のスペクトルを大質量の星の重力による赤方変移と解釈する可能性もありうる。だが、いまだかかる星の安定な構造が知られていない現在では、 $Q_s$  の赤方変移を重力に帰することは妥当ではないであろう。

このように考えてくると、もっともらしい可能性として残るのは、宇宙の膨脹による cosmological effect だけになる。

##### §5. 遠距離の天体

いまハッブル常数を  $100 \text{ km/sec (Mpc)}^{-1}$  と仮定する

第 3 表

	距 離	$M_0$	radio luminosity
3C 47	1275 Mpc	-23 等	$1.5 \times 10^{44}$ erg/sec
48	1100	-25	$4.7 \times 10^{44}$
147	1635	-25	$2.0 \times 10^{45}$
273	470	-26	$3.1 \times 10^{44}$

と、現在までに赤方変移の測られた  $Q_0$  の距離や絶対光度・電波強度などは、第3表のようになる。

質量が  $10^{11} M_0$  程度の giant galaxy の放つ光のエネルギーは  $10^{44}$  erg/sec (絶対光度で表すと -20 等級くらい) ほどである。また電波を強く発射している Cyg A などの radio galaxy は  $10^{41} \sim 10^{44.5}$  erg/sec のエネルギーを電波領域で放出している。これらと比べてみると、 $Q_0$  がいかに大きなエネルギーを発射している天体であるかが分るであろう。

第3表の距離を使い、 $H_0$  線の強度や諸種のイオンの輝線スペクトルの見え合から、グリーンシュタイン達は、 $Q_0$  の輝線をだしている領域 (つまり H II 領域) の物理量を推定している。その結果によると、

3C 48	3C 273
$N_e (\text{cm}^{-3}) \leq 3 \times 10^4$	$3 \times 10^6$
$M/M_0 \geq 5 \times 10^6$	$3 \times 10^5$
半径(pc) $\geq 10$	1

$Q_0$  を銀河系外の非常に遠距離にある天体と考えたとき、一番問題になるのは、そのエネルギー源と変光のメカニズムであろう。すでにふれた如く、 $Q_0$  の光の放出量は galaxies にくらべて 100 倍も大きい。 $Q_0$  の連続光が、熱輻射によるのか或いは高エネルギー電子のシンクロトロン輻射によるのかは、いまだ明らかでないが、いづれにせよ莫大なエネルギーが如何にして発生したかを解くことは大変重要である。

また電波の起源がシンクロトロン輻射であることは、間違いないところであろう。したがって  $Q_0$  は磁場と高エネルギー粒子の形で、非常に大きなエネルギーを貯え

ているはずである。3C 273 の電波を説明するに必要な磁場と高エネルギー粒子に含まれる最少のエネルギーは、 $3 \times 10^{57}$  erg の程度で、このエネルギーを水素の核融合反応でまかなおうとすると、 $10^6 M_0$  に近い質量が要求される。この値は radio galaxies に比べれば小さいけれども、radio galaxies の場合と同様に、磁場と高エネルギー粒子の起源は、今後解きあかすべき重要な課題である。また  $Q_0$  が radio galaxies と全然無関係な存在なのか、それとも進化の過程でお互い関連をもった現象なのかは、ひろく galaxies の進化ともからんでおり、将来議論の白熱するところと思われる。

さらに、可視光が短い周期で変光することも、大変理解に困難な点である。たとえば 3C 273 は、十数年で周期的な変光をするが、この事實は、少なくとも全光量の 40% を生ずる領域が 10 光年以下の大きさであることを物語っている。また 3C 273 の flash では、毎秒  $10^{45} \sim 10^{46}$  erg/sec の輻射をだしている勘定になるが、これは超新星の極大光度時の略  $10^2$  倍の光量に相当する。増光のみとめられる期間が 1 カ月以下であることから、増光を生ずる領域の大きさは 1 光月以下でなければならない。

一体このように狭い領域から強烈な光を放っているのは、太陽のような星の数多くの集まりなのか、それとも 1 個にまとまったガスの塊 (いわば巨大な星) なのか、今後の研究にまたねばならないが、この辺の問題も非常に興味深いところで、天文学が新しい展開をみせることが大いに期待される。

#### (9 頁より続く)

いたことが国際的にも極めて明確な形をとったといえましょう。

IPMS の問題は今後も面目一新した新しい第 19 委員会で議論されることになりました。わたくしは IPMS が地球自転軸にまつわる数多くの問題を解決してゆく有力な事業として今後ますます重要となり、発展してゆくで

あろうことを疑いません。

なお 1967 年の IAU 総会直前あるいは直後の時期をえらんで“地球自転シンポジウム”を開くことが組織委員会できまりましたが、場所と日次、シンポジウムに運営の細部は未定であります。