物をはかる話 ⑦

星間雲の距離

宮島一彦*

星の形をしていない不定形のガスや塵の集合体の距離の測定には，星およびその集団である星団までの距離（本誌5,6月号の今川氏の記事参照．以後それぞれ文献[I]，[II]とする）以上に困難が伴なう．これらの天体そのものについて距離のよい目やすとなるような量が見つからない場合には，その方向に見える，あるいはその星雲と結びついた星に関する量を借りるとか，銀河構造との関連から推定するといった方法しかない．

1. 暗黒星雲の距離

背後の星の光を吸収することにより天にぽっかり穴があいたように見えることからしか，その存在を認めることのできない暗黒星雲では，ちょっと歯が立たないような気がするが，マックス・ウォルフ（Max Wolf，1923以後）は星の計数から，次のようにして，へびつかい座 θ 星，ρ 星附近の暗黒星雲や他のいくつかのものの距離を得た．

文献[II]で星間吸収を星のUBV三色測光から求める方法が述べられているが，ここでは吸収の波長依存のことは考えないことにして，みかけの明るさに対する吸収の影響が星の計数にどう現われるかを取り扱う．吸収物質通過後の光量の，入射光量に対する比は，入射光量の大小に依存せず，また，星の等級は光量の対数に関係した量だから，同じ吸収層を通過した星の光は，明るい星でも暗い星でも同じ A 等級だけ暗くなる．この吸収 A は星から我々までの間に存在する全ての吸収物質によるものだから，距離の関数であり，星間吸収物質を通して観測される星のみかけの等級 m と，絶対等級 M，距離 r との関係は，星間吸収がない場合の文献[I]第(2)式：

$$\log r = 0.2(m-M)+1 \qquad (1)$$

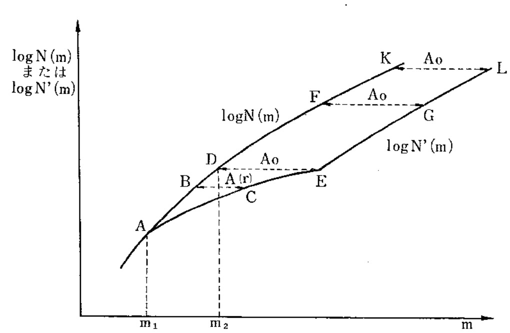
の代りに，

$$\log r = 0.2(m-A(r)-M)+1 \qquad (2)$$

とせねばならない．今，空間は一般に透明で，星の光は暗黒星雲を横切る際にだけ吸収を受けるとしよう．暗黒星雲の前面が我々から距離 r_1，後面が距離 r_2 のところにあるとすると，その方向に見える星までの距離 $r<r_1$，つまり星が星雲より手前にある時には，星の光は全く吸収を受けないから，$A(r)=0$．星雲中に存在する星の場合には，r が r_1 から r_2 まで変ると，$A(r)$ は $A(r_1)=0$ からある値 $A(r_2)=A_0$ まで，その間の吸収物質の分布状態に応じた変化をしながら単調に増加する．星が星雲のむこう側（$r>r_2$）にあれば，距離や絶対等級にかかわらず，吸収は A_0 で一定である．ここで星の絶対等級はすべて M で等しいと仮定すると，暗黒星雲の存在しない天域に見える星の距離は(1)を用いて，みかけの等級だけから求めることができるが，星雲と同じ方向に見える個々の星については，吸収 $A(r)$ の大きさがわからないため，みかけの等級だけからは距離を知ることができない．しかし，この方向の同じみかけの等級 m をもつ星はすべて同じ距離にあるはずだし，もし吸収がなかったら $m-A(r)$ 等に見えるべき星である．星雲方向における単位立体角内の，みかけの等級 m までの星数 $N'(m)$ と，天球上でそのすぐそばの，星雲による吸収のない比較星野方向での単位立体角内の，みかけの等級 $m-A(r)$ までの星数 $N(m-A(r))$ とは，どちらも，我々から同じ距離までの星を数えていることになるから，星雲方向と比較星野の方向とで，全ての距離 r に対し，その距離での星の分布密度 $D(r)$ が互いに等しいとすると，

$$N'(m) = N(m-A(r)) = \int_0^r r^2 \cdot D(r) \cdot dr \qquad (3)$$

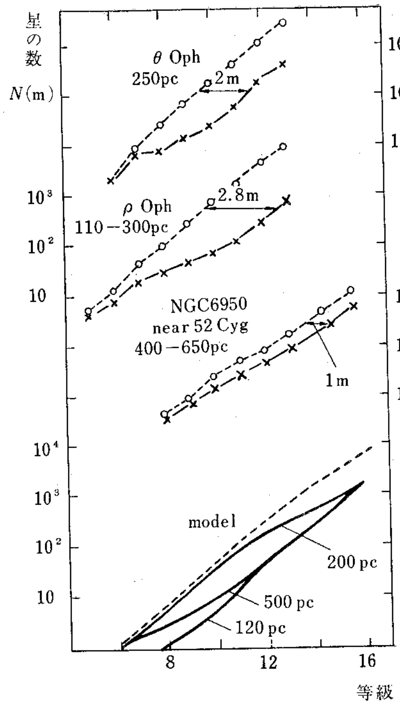
そこで，それぞれの方向での $N'(m)$ および $N(m)$ の対数を縦軸に，みかけの等級 m を横軸にとると，第1図のようなグラフができるはずである．$r<r_1$ では，どちらの方向でも条件は同じで(3)式の $A(r)=0$ だから，



第1図

---

* Kazuhiko Miyajima; 京大理
Distance of Galactic Nebulae



第２図

$N'(m)=N(m)$，すなわち２つのグラフは一致する．みかけの等級 $m_1=M+5\log r_1-5$ から先は $A(r)$ の増加につれて２つのグラフが分離し，$m_2=M+5\log r_2-5$ からは，$A(r)=A_0$ で一定となるため，$\log N'(m)$ のグラフは $\log N(m)$ のグラフを横軸方向に A_0 だけ平行移動したものとなる（m_2 は $\log N(m)$ のグラフに対応する値）．こうして，m_1，m_2 をグラフから読み取れば，M がわかっている時には，暗黒星雲の前面と後面までの距離がわかり，２つのグラフの開きぐあいから星雲物質の吸収量に関する情報が得られる．m 等までの累算星数 $N(m)$，$N'(m)$ の代りに，みかけの等級幅 $(m\pm{}^1\!/_2)$ に属する星数 $n(m)$，$n'(m)$ を用いることもあるが，統計的な質は劣る．第２図はウォルフとミューラー（Müller）の結果を示している．

以上のマックス・ウォルフのグラフ的方法で用いられた，すべての星に対し，絶対等級 M は一定という仮定が正しくないことは明らかで，M には幅があるから，あるみかけの等級 m の星の中には，遠いが絶対等級の明るい星や，近いが絶対等級の暗い星がまじっている．このことは絶対等級に対する星の頻度分布つまり光度関数 $\phi(M)$ がどの方向でも同じならば，大して問題にならないが，実際には方向および距離によって異なる．この問題を解消するのに２つの方法が考えられる．

ウォルフより前に既に1921年にパネコック（Pannekoek）が提唱した方法は実は M の分散を式の中に含ませた，より一般的な方法であった．$\int_{-\infty}^{+\infty}\phi(M)dM=1$ と規格化しておくと，吸収がない方向では，

$$n(m)=\int_0^\infty r^2\cdot D(r)\cdot\phi(M)dr \qquad (4)$$

絶対等級 M の星がこれに寄与するために有すべき距離は(1)により決るから，

$$n(m)=\int_0^\infty r^2\cdot D(r)\cdot\phi(m+5-5\log r)\cdot dr \qquad (5)$$

吸収のある方向では，吸収がないと見なしてみかけの等級 m から求めた“みかけの”距離 r_0 を

$$\log r_0=5\log r+A(r) \qquad (6)$$

と定義すれば，基本方程式(5)の形は保存され，

$$n'(m)=\int_0^\infty r_0{}^2\cdot D_0(r_0)\cdot\phi(m+5-5\log r_0)dr_0 \qquad (7)$$

みかけの距離に対する空間密度の分布関数 $D_0(r_0)$ と真の空間密度 $D(r)$ との間には

$$\begin{aligned}D(r)&=D_0(r_0)\cdot\frac{r_0{}^2}{r^2}\cdot\frac{dr_0}{dr}\\&=D_0(r_0)\left(1+0.2\mu r\frac{dA(r)}{dr}\right)\cdot 10^{0.6A(r)}\end{aligned} \qquad (8)$$

という関係がある．なぜなら，みかけの距離 r_0 までの単位立体角内に含まれる星数は，r までのそれに他ならないからである．ここで $\mu=\ln 10=2.302\cdots$ である．$\phi(M)$ は知られているから，それぞれの方向で $n'(m)$ と $n(m)$ を調べ，基本方程式(6)，(7)から空間分布 $D(r)$ と $D_0(r_0)$ のようすがわかる．これを(8)に入れて(6)を考慮すると $A(r)$ が知れる．こうして距離に対する吸収量の変化がわかるが，吸収が０からある一定値に達するまでが暗黒星雲の存在する範囲である．

もう１つの方法は M の範囲を絞ることで，マルムキスト（Malmquist, 1943）はスペクトル型別，しかも光度階級別に星を数えることを考えた．２次元分類された各クラス内での絶対等級（文献［Ｉ］p. 118 の表）の分散は小さいから，この場合には，ウォルフの方法におけるみかけの等級を安心して距離に置きかえることができる．

なお，より厳密には，一般星間吸収も考慮しなければならない．

暗黒星雲の距離を決定するもう１つの方法は，それと共存する HII 領域の距離を求めることであり，また，場合によっては，散光星雲までの距離によって，それを背景とするグロビュールの距離の上限が押えられることもある．

2．HII および HI 領域の距離

HII 領域の距離は主としてそれを励起している OB 星の距離を求めることによって知られる．三角視差が得

られないような遠距離の OB 星に対しては分光視差を求めることになり（文献［I］参照）多くの人が OB 星の MK 分類や Hamburg-Cleveland 分類の各クラスに対する絶対等級・色指数を求めているが，スペクトルの得られない遠方の OB 星で用いられる測光的方法では文献［II］で述べられているような A_v/E_{B-v} の値に問題があるため精度はよくない．

HII領域の距離決定のもう1つの方法は，スペクトルから視線速度を測定して銀河回転の理論にあてはめるやり方で，HI領域に対する波長 21 cm での観測による距離決定と原理は同じである．このためには，銀河中心からの距離 R における銀河系の回転速度を示すいわゆる回転曲線 $\Theta(R)$ が既知であることが前提となる．

問題を簡単化して，太陽および星間HIまたはHII雲（太陽からの距離 d，銀経 l）が共に銀河系の一般回転（円運動）に従うとする．銀河中心からの距離をそれぞれ $R=R_0$, $R=R$ とすれば，我々から見た星間雲の視線速度 v_R は第3図より，

$$v_R=\Theta(R)\cdot\cos\alpha-\Theta(R_0)\cdot\sin l \qquad (9)$$

太陽・星間雲・銀河中心のなす三角形に正弦法則と余弦法則を適用すると，

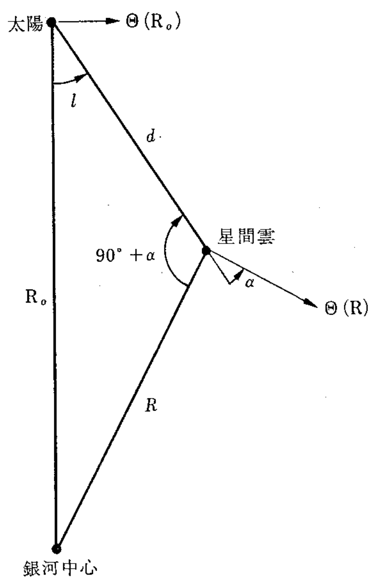
$$\begin{aligned} v_R&=\left\{\frac{R_0}{R}\Theta(R)-\Theta(R_0)\right\}\cdot\sin l \\ &=\left\{\frac{R_0\cdot\Theta(R)}{\sqrt{R_0^2+d^2-2R_0d\cos l}}-\Theta(R_0)\right\}\cdot\sin l \qquad (10)\end{aligned}$$

よって，R_0 がわかっておれば，星間雲の距離 d は，v_R, l より求めることができる．この R_0 の値および $\Theta(R)$ の形も実は，星の距離・視線速度および星間HI雲の視線速度の観測から決めるのであるが——．ただ上の方法の場合，$90°\leq l\leq 180°$，つまり星間雲が太陽の円軌道外にある時には，d は v_R から一意的に決るが，星間雲が太陽より銀河中心に近い場合には，1つの v_R に対して2つの d が存在する．この場合には，各星間雲のみかけの大きさ（銀緯方向のひろがりなど）を遠近いずれの d をとるかの判断基準とすることがある．

3. 惑星状星雲の距離

「星間雲の距離」という表題からはずれるが惑星状星雲についても距離の決定方法を考えてみると，(a) 三角視差 (b) 固有運動（τ, v 成分）からの統計的視差 (c) 視直径やみかけの等級の利用，などがある．また，銀河系の中心域内とか星団内とか（球状星団M15）ギャラクシー内（M31，マジェラン雲）にある場合には，それらの各天体までの距離が横流しできる．

更に，惑星状星雲が普通の星と連星系をなしている場



第3図

合（NGC 246）には，相手の星に対する距離が使える．殻のみかけの膨張率（″/年——視線に対し直角な方向）が測定可能な場合には，膨張が等方的であると考え，視線速度観測からの視線方向の真の膨張速度（km/秒）と組みあわせて，距離を求めることができる．これはカニ星雲，竜骨座 η 星周囲の星雲，鷲座新星周囲の膨張ガスなど，超新星や新星の残骸にも適用された距離決定法である（この視線速度が果して，殻の外縁のものかどうかが問題になる）．

(a) は比較星野の星より遠くにあって，視差の値が負になったりするため，みずがめ座の大きいが淡い NGC 7293（85光年）を除いては絶望的．(b) は古くはカーティス (Curtis) やファン・マーネン (van Maanen)，アンダーソン (Anderson) などの決定があり，その後，固有運動そのものの測定精度は向上しているが，τ, v 成分の運動学的解釈の問題もあるし，この方法では個々の惑星状星雲の距離を知ることができない．(c) はたとえば中心星や星雲全体の絶対等級，星雲の質量などを，統計ないしは電離の理論などに照らして距離を指定するものだが，ここでは深入りしないことにする．

文献［I］［II］および本稿に述べられたような方法で，星，星団，ガス星雲その他の距離が求まると，銀河系全体の構造と大きさとが明らかになる．それは次回の本シリーズで紹介されるだろう．