

K型超巨星からの質量放出

齊 藤 衛*

銀河系内での星間ガス量

太陽が太陽風として質量を星間空間へ放出している様子は近年よく知られてきた。星間ガスから生れた星は、このようにその一生の間に星間空間へ質量を返しながらか進化するが、どの段階で最も多量の放出をするかは星の進化の問題からだけではなく、銀河の進化の問題との関連でも興味がある。

銀河系での星の統計から、過去に星の生れた割合はほぼ見当がつくが、この生成率を保証するために星から星間空間へのガスの流れに量的制約が課せられることになる。ポタッシュによれば、星の種類別の総量でみた場合、準定常的な放出では惑星状星雲の中心星、OB星、M型輝巨星などで最も多く、M型超巨星、M型巨星が次いでいる。太陽など主系列星からの放出はこれらの場合よりずっと少ない。爆発的な放出の場合には、超新星が先のOB星と同程度に多く、また、ふたご座U星型の星からも総量では超新星からと同じくらいかそれ以上の質量放出があると考えられている。以上の全部を加えても、星から星間空間への質量の流れ方は、星の統計から要請される量にまだ足りないとされている。この不足分を担う星の一種と期待されているのがK型巨星および超巨星である。

M型巨星との関連

M型巨星が定常的に質量放出をしていることを確認したのはドイツである(1956年)。実視連星ヘルクス座 α 星は主星がM型巨星(M5)で伴星がまたG型星とA型星の連星系を構成している。彼はこの伴星の分光観測をして、大部分の吸収線は二重連星としての公転に従って変化を示すのに対し、カルシウム原子の共鳴線は動かないことを見出した。これは、M型主星のうすい大気がこの伴星をおおうほどに広がっている(1000 AU以上)ためである。そのガスは星間空間へむかって膨張をつづけており、流量は1年あたり 10^{-9} — 10^{-8} 太陽質量と概算された。

ドイツやワイマン等はその後、M型巨星のスペクトルのいくつかの原子、イオンの共鳴線には星から流れ出つつあるガスによる吸収線が出ていることを見出し、定常的質量放出はM型巨星、超巨星の一般的性質であるとした。

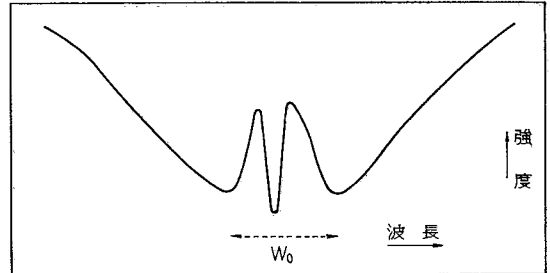


図1 カルシウムK線の輪郭

一方、ウィルソンとバップは、スペクトル型GからMまでのすべての光度の星について、カルシウムイオンK線の輝線幅 W_0 (図1)はその星の実視絶対光度の1/6乗に比例するという、有名な相関を1957年に発表した。この相関の原因についてはいまだに明確な説明が与えられていない。

これらのK線は図1のように中心付近に細い吸収線を持つ。彼らはこの吸収線の位置が星からどれくらいずれているかを W_0 と同時に測定した。そのずれの程度とスペクトル型および絶対等級の関係を巨星と超巨星について示したのが図2である。丸印は吸収線のずれが最も大きい星で6 km/s以上、四角印はずれが2~5 km/sの星を示している。ずれはいずれも短波長よりである。バツ印はずれがないか1 km/s以下の星である。M型では巨星・超巨星とも吸収線のずれが見え、K型では輝巨星($M_0 \sim -2$)より上ではほとんどの星にずれが見える。このことからK型輝巨星、超巨星でもM型巨星と同じよ

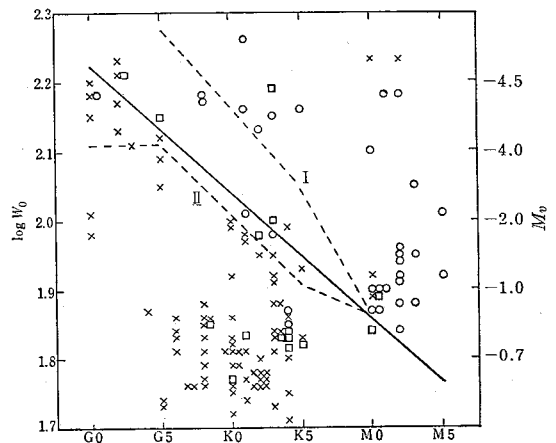


図2 カルシウムK吸収線の変位の大きさとスペクトル型と光度の関係

* 東京天文台

Mamoru Saitō: Mass Loss of the K-Type Supergiant Stars

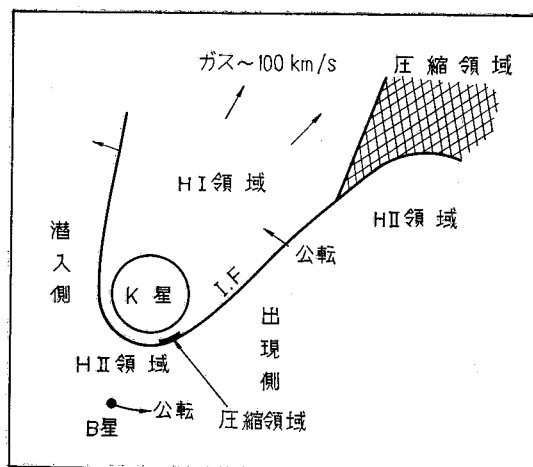


図3 公転面での I.F. の形と圧縮領域分布 (ぎょしゃ座ゼータ星)

うな質量放出が起っていることが予想される。

ぎょしゃ座ゼータ星

この星は長周期食連星で主星はK型超巨星 (K4Ib または II), 伴星はB型主系列星 (B6V) である。図2上では主星の位置はほぼ実線上にあり, M型巨星のような質量放出があるかどうかの境目にある。われわれは観測結果の解析により主星からの質量放出の量を知ることができた。

B型伴星はその紫外放射によって周囲にHII領域 (水素電離領域) をつくるが, K型主星はその中にHI領域の長い影を引いて埋没している (図3)。HI領域とHII領域の境界は, K星とB星が向いあった側では, K星の彩層深くまでくい込んでいる。このHI領域は星と共に公転するので, HI領域とHII領域の境界をガスがよぎって流れ, いわゆる電離フロント (以下 I.F. と略す) または再結合フロントとなっている。

I.F. では水素原子が急激にイオン化されるので圧力が増し, 一種の爆発面になっている。もし I.F. のすすむ速さがある値の範囲 (およそそのところ, そのままのHIガスの音速より大きい, そのガスが I.F. での圧縮で熱くなった時の音速よりは小さい) にあれば, I.F. の前方に圧縮領域が形成され, その一方の境界はショックフロントになる。ぎょしゃ座ゼータ星の場合, 公転による I.F. の速さは, 出現側の彩層附近 (図3) でちょうどこの速度の範囲内にある。B星に近いので紫外線の放射量は十分ある。

一方, 観測によれば, K星彩層ガスの視線速度が彩層の高さと共に変る様子は潜入側と出現側でかなり異なることが以前から知られていた。(4000Å 附近より短波長ではB星がK星より明るいので, B星への視線がK星の彩層を通る時はこの波長域のスペクトルはB星の連続光の上にK星彩層ガスによる吸収線が現われる。これが大気食である。この吸収線を調べると, 視線上でガスの量とか視線速度がわかる。) 視線速度の代表的な例として, ウィルソンとアプトによる 1947—48 年食の観測結果を図4に示した。横軸は視線の位置を星の中心からの距離として半径単位で測ったもの, たて軸はガスの視線速度の星からのずれを表わす。いろいろの印は異なる元素に対応する。

図4の潜入側にも出現側にも (5/r) km/s の線が直線で近似して書いてある。何の注釈も付いてない直線がそれである。潜入側で観測される視線速度は, このくらいの回転に大規模な乱流のあったものを見ているとしてよい。出現側はこの回転だけでは説明できない。ずれは系統的である。I.F. が彩層ガスをかき集めるといふ加速機構を入れて計算すると系統的なずれが出てくるが, 実際の観測結果とよく合うようにするこめには, さらにK星からのガスの吹き出しを考慮しなければならない。視線

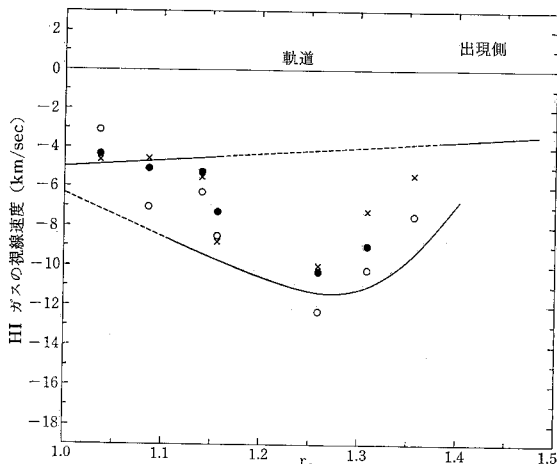
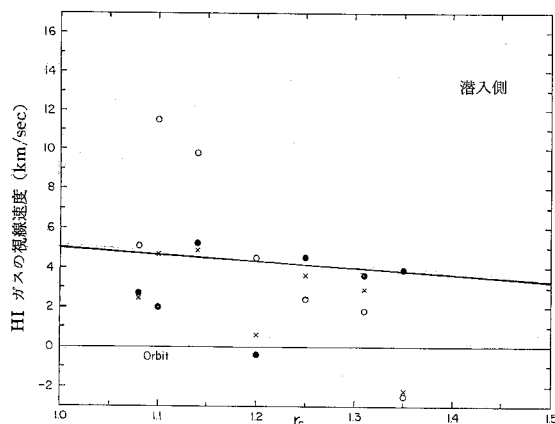


図4 彩層ガス視線速度の高さによる変化 (ぎょしゃ座ゼータ星)

速度のずれが彩層の高さと共に増し再び小さくなるのは、この付近で I.F. による加速が小さくなるためではなく、I.F. と視線のなす角がだんだん小さくなる、従って視線と加速の方向が直角に近くなるためである。なお出現側でも、視線が光球表面近くを通る場合には、圧縮領域のガスの量は彩層ガスの量にくらべて少ないので、彩層そのものが見え、そこはふつうに回転している(図 4)。

彩層での密度分布は観測的にだいたい求められるのでそれを使って質量放出の量を計算すると 1×10^{-8} 太陽質量/年 となる。対応するガスの流出速度は光球表面から 0.3 K 星半径の高さで 4 km/s, 0.45 K 星半径のところでは 23 km/s で光球表面近くでは 1 km/s よりずっと小さい。完全な食の時に観測されるカルシウム K 輝線の幅 W_0 は、大気食中の彩層下部での K 吸収線の幅に相当する。従って K 輝線は主に彩層下部でつくられるが 0.45 K 星半径附近からの寄与も少しはある。このことから K 輝線の中心は星から短波長へ多少ずれていることが期待されるが、観測的にもそうになっている。

ぎょしゃ座ゼータ星の主星からの質量放出を示すもう 1 つの事実がある。1971—72 年の食において、われわれはカルシウム原子 6572 Å を観測したところ、出現側第 4 接触直後の 3 日間にわたってこの吸収線は非常に強くなり、しかも視線速度は K 星に対し約 -100 km/s であった。この波長域では K 星が B 星より圧倒的に明るいので、この吸収線は K 星をおおうガスによってつくられたものである。この線は基底状態からの遷移によるものであるが、遷移確率は小さく準禁制線であるので、このガスは低温・希薄である。3 日間だけ出現したことからこのガスは雲状に分布していて、K 星からその半径の 50—100 倍だけ離れたところにあることがわかる。吸収線輪郭の解析と K 星の輻射場を与えることにより、ガスの密度は 10^{11} — 10^{10} 原子/cm³ と求まる。

出現の位相から考えて、このガス塊は B 星の紫外輻射による I.F. がつくった H I 圧縮領域であろう。B 星から遠くなったところでは輻射量が小さくなるため、I.F. は図 3 のように変形することにより単位面積当りの輻射量をかせごうとする。この場合、I.F. の垂直方向の速度は小さくなり再び前方のガスを圧縮出来るような速さの範囲内に入ることになる。

K 星からは等方的にガスが流れ出しているのだが、この位相では I.F. でガスがかき集められたために見えたのだと考えて質量放出の量を概算すると約 10^{-7} 太陽質量/年 となる。

ところが今回 (1974 年) の食において同じ位相のところをさらに高分散 (5 Å/mm) で観測したところ、星からの膨張ガスによるカルシウム原子の吸収線は弱く、しか

も約 30 km/s のずれしか示さない。さらにこの弱い吸収線は別の位相でも同じように現われている。この線の解析によって質量放出の量を別に求めることができるであろう。しかし、1971—72 年食で観測した強い吸収線はなぜ現われなかったのか、別の位相で現われたのか、今後の検討が必要である。

質量放出の機構

図 2 をもう 1 度見ていただきたい。左側のたて軸は K 輝線の幅 W_0 を km/s 単位で測った値の対数である。いま、それぞれの星について星の表面での脱出速度を計算して、その速度の $1/\sqrt{2}$ と観測された W_0 が等しくなる星の位置を 図 2 上に実線で示した。この実線より上では W_0 は脱出速度の $1/\sqrt{2}$ より大きく、下では小さい。図 2 では、実線より上にある星でのみ K 線中心部の吸収線が短波長へずれていると言ってよいほど強い相関を示している。なお実線より上の星のほとんどにおいて、輝線そのものも全体として数 km/s 短波長へずれていることを注意しなければならない。

実際のガスの乱流速度は W_0 の $1/5$ くらいであるから、図 2 実線附近の星において彩層ガスの乱流速度は脱出速度の $1/7$ くらいである。従って彩層ガスが直接とび出しているわけではない。しかし乱流速度と脱出速度の比に比例して彩層のひろがりは大きくなるであろう。この比が大きな星の光球表面から出た衝撃波 (これはおそらく乱流と同じ原因でつくられる) は比較的強いそのため彩層上部までとび出し、ついには脱出速度に達してしまう、ということが考えられる。乱流速度と脱出速度の比が小さい場合、彩層のひろがりはいわゆる運動エネルギーから熱エネルギーへの転化が光球表面近くでおこり熱いコロナができて、太陽風の質量放出がおこる。

エネルギー的にみると、質量放出の量は 1 年当り太陽質量単位で、 $3 \times 10^{-8} \epsilon \cdot RLM^{-1}$ と表わせる。ここで R, L, M は星の半径、光度、質量を太陽の値を単位にして測ったもの、 ϵ は質量放出に使われるエネルギーと輻射エネルギーの比である。

ϵ の値は太陽では約 10^{-6} であるが、図 2 実線附近の M 型巨星とぎょしゃ座ゼータ星ではともに約 10^{-5} 、図 2 実線のかなり上方に位置する M 型超巨星では約 10^{-4} である。エネルギー的にみても質量放出の機構は図 2 の実線の上と下の星では異っているようである。

質量放出の機構は基本的には、星の光球表面での構造 (重力、対流、輻射) に依存しながらも、恒星風存在の条件にも影響される。この機構は、結局は、これらの星の彩層、コロナの構造と共に明らかにされるはずであり、それと同時にウィルソン・バップの相関の本質もまた明らかにされるであろう。