

オリオン・ブライトバーと衝撃波

林 正 彦*・面 高 俊 宏**・長 谷 川 哲 夫***

はじめに

オリオン・ブライトバーはトラペジウムの南東約 2' のところにある顕著な電離波面である。大口径望遠鏡で見たオリオン星雲は美しい緑色をしているが、その南東側の鋭い縁に相当する。北東から南西方向に約 3' にわたって伸びているその形態からは、電離波面を真横から見た姿が想像される。

私たちはここ数年来、H II 領域によって作られる衝撃波や、それによって圧縮された領域を観測しようとしてきた。H II 領域によって分子雲内に作られる衝撃波は、H II 領域の進化や、分子雲のダイナミクス、星生成といろいろな関係をもっていて興味深い。巨大分子雲中で OB 型星が誕生し、H II 領域が作られると、それがやがて分子雲をつき破って出現する。この時期の H II 領域は人によってブリストア (blister) とかジャンペン・フェイズにあるとか言われるが、これらの名前は H II 領域出現の様子をよく表わしている。このとき星を生んだ母分子雲内には衝撃波が伝わって行き、つき破れた方には破壊された分子雲が飛び散る。このような分子雲片は数十 km/s にまで加速される可能性も指摘されている。衝撃波は分子雲の安定性についても重要な役割を果たすであろう。衝撃波によって分子雲内の乱流にエネルギーが与えられ、分子雲の収縮を妨げるかと思えば、他方で衝撃波によって圧縮された領域が重力不安定性を起こして次の星生成を引き起こすという有名な話もある。このように、H II 領域と分子雲との相互作用の結果作られる衝撃波はいろいろな現象と関連している。しかし、理論的には存在していて当然と思われる衝撃波も、「これこそ分子雲中を伝わる衝撃波だ」という形で確実な証拠をもって発見されるようになったのは、ここ 1~2 年のことなのである。

私たちは、H II 領域のまわりで衝撃波のありそうな場所を探し、そこを適当な分子輝線で観測してみることにした。たとえば CS などは水素分子密度が 10^4 cm^{-3} 程度を超えると励起されるから、衝撃波によって圧縮された領域を見るのに適していると思われた。また HCO^+ のように、超新星残骸による衝撃波内で存在度が大きくなると言われている分子を使うこともあった。分子輝線の色変化は極めて重要な情報になる。H II 領域によってドライブされた衝撃波は秒速数キロの速度をもつと

思われるので、衝撃波面のところで急激な速度変化が見られるはずである。

衝撃波の存在を示すには、やはり水素分子輝線を検出することが最も確実な方法と思われた。水素分子輝線は若い星からの星風によって作られる衝撃波の中でいくつも見つかった。H II 領域によって作られる衝撃波は弱くて広がっているため、なかなか見つからなかったが、昨年夏にギャトラーらが M17 で初めて検出した。私たちは、日英協力のもと幸いにも UKIRT に行きオリオン・ブライトバーを水素分子輝線で観測する機会を得た。ここではオリオン・ブライトバーについて、私たちがこれまで行ってきた観測をもとに、衝撃波の存在とその物理状態について述べることにする。

オリオン・ブライトバーに付随した分子雲

ほとんど真横から見ているという形態からして、オリオン・ブライトバーは H II 領域によって作られる衝撃波を研究するのに適していると思われる。シュレーブとローレンが観測した分解能 50" の CO マップでは、光のバーに沿って H II 領域の南東側に速度 11 km/s の成分が見られた。この速度はまわりの分子雲の速度に比べると 2 km/s だけ赤方偏移していた。この事実から、オリオン・ブライトバーの南東側に衝撃波によって加速された平板状の分子雲が付随していることが予期される。この分子雲が本当に H II 領域と関係しているのかどうかを確かめる目的で、私たちは図 1 に示した 5 点を CS ($J=1-0$) と $\text{H}51\alpha$ とで観測した。この図で破線で示したのは 6 cm 連続波 (ジョンストンらによる) で、その縁に実線で示した 10 μm 連続波 (ベックリンらによる

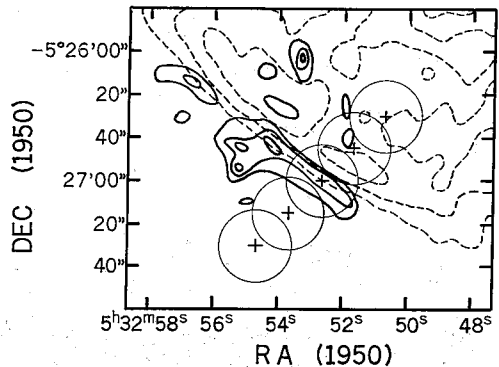


図 1 オリオン・ブライトバー領域の 6 cm 連続波 (破線, ジョンストン他 1983 による) と 10 μm 連続波 (実線, ベックリン他 1976 による) の分布。プラス印は図 2 の観測点, 円はビームを示す。

*東大理学部 Masahiko Hayashi・**鹿児島大教養部 Toshihiro Omodaka・***東京天文台 Tetsuo Hasegawa: Orion Bright Bar and the Associated Shocks

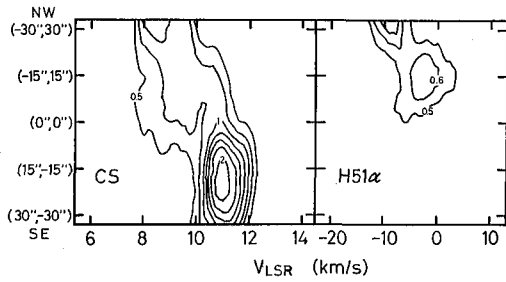


図 2 図 1 で示したブライトバーを横切る 5 点での CS と H51 α の位置-速度図。電離波面の位置 (0'', 0'') で CS の強度も速度も急激に変化している (面高他 1984 による)。

る) の峰が存在する。10 μm の放射は電離波面近傍の暖い (300 K) 塵粒子から出ているものと考えられている。

図 2 に観測結果を位置-速度図にして表わした。(0'', 0'') が 10 μm 連続波のピーク位置で、ここが電離波面と思ってさしつかえない。この位置を境にして CS も H51 α も様子が全然違っている。CS は電離波面の北西側 (図 1 の上方) で 9 km/s の速度をもっているが、南東側では 11 km/s の速度になる。しかも、その速度変化は電離波面の位置で突然起こる。CS の強度は電離波面の南東側でより強くなっている。一方 H51 α は北西側の H II 領域中でだけ受かっており、その速度は分子雲の速度に比べて約 10 km/s だけ私たちに近づく向きである。

電離波面のところで突然 CS の速度や強度が変化していることから考えると、シュレープとローレンが指摘した 11 km/s 成分は H II 領域と直接に接触していると思われる。しかもその成分は、H II 領域から力を受けてまわりの分子雲に比べ 2 km/s だけ (視線方向成分) 加速されたと考えるのが自然であろう。その後の観測により、11 km/s の速度を持つ分子雲は約 50'' (0.1 pc) の幅をもち、電離波面に平行に伸びていることが分かった。**分子雲内の衝撃波**

1976 年にオリオン星雲と NGC 7027 で水素分子輝線が発見された。水素分子輝線は K バンド全体にわたっていくつも存在しており、最も強いのが $v=1-0\text{S}(1)$ 輝線である。これらの輝線から求めた励起温度は約 2000 K、また輝線を出している水素分子ガスの厚みは 10^{18} cm 以下と推定された。それ以来水素分子輝線といえば衝撃波面から出ているものと解釈されるようになった。水素分子輝線は双極流中や惑星状星雲でいくつも発見されてきた。

私たちは OB 型星の H II 領域によって分子雲中に作られる衝撃波からも $v=1-0\text{S}(1)$ 輝線が受かるものと考えていた。またこの輝線を検出することが衝撃波の存在を実証する最も確実な方法だった。幸いにも昨年度か

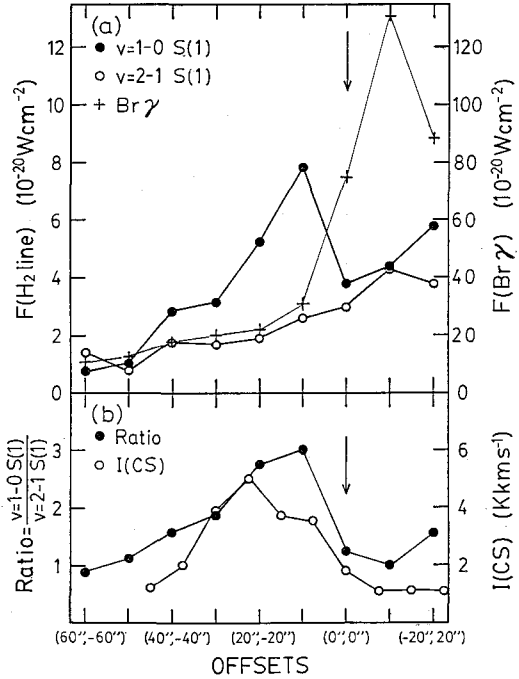


図 3 (a) 図 1 で示した同じ線上での水素分子輝線と Br γ の強度変化。矢印の位置が電離波面である。 $v=1-0\text{S}(1)$ 輝線は (10'', -10'') の位置で鋭いピークを持つ。

図 3 (b) 同じ線上での $v=1-0\text{S}(1)$ の $v=2-1\text{S}(1)$ に対する比と、CS (J=2-1) の強度変化。両方とも似た空間変化を示す (林他 1985 による)。

ら野辺山と UKIRT (英国赤外線望遠鏡) とを中心とする日英協力が始まり、オリオン・ブライトバーからの水素分子輝線を観測することができた。

図 3 (a) に示したのが、図 1 と同じ線に沿って観測した $v=1-0\text{S}(1)$, $v=2-1\text{S}(1)$, Br γ の強度変化である。当然ながら Br γ は H II 領域内で強く、ブライドバーを南東に横切るところで急に弱くなる。 $v=1-0\text{S}(1)$ 輝線はいたるところで受かっているが、バーの南東側 14'' のところで鋭いピークをもつ。その強度は H II 領域側で急激に減少し、分子雲側にはゆっくりと減少していく。一方 $v=2-1\text{S}(1)$ 輝線の様子は $v=1-0\text{S}(1)$ 輝線とは全く異なっており、北西から南東にかけて単調に弱くなっていく。同じ水素分子輝線なのになぜ $v=1-0\text{S}(1)$ と $v=2-1\text{S}(1)$ とでこんなに分布が違うのか。この疑問は両輝線の比をプロットしてみると明らかになる。

図 3 (b) には、 $v=1-0\text{S}(1)$ の $v=2-1\text{S}(1)$ に対する比がブライトバーからの距離によってどう変化するのが示してある。同時に野辺山で得られた CS (J=2-1) の 11 km/s 成分の強度変化も重ねてある。水素分子輝線どうしの比は励起温度に強く依存する。この比が 1 に近

いときは励起温度が非常に高い (10,000 K 以上) ことを意味する。比が 10 程度で励起温度は 2,000 K になる。図 3 (b) を見ると、H II 領域内とバーから遠く離れた分子雲内で比が 1 近くになっており、ブライトバーから南東にかけて $50''$ くらいの間は比が 2 以上になっている。このような線比の違いを単一の励起メカニズムで説明するのは困難である。比が 1 に近い場合は励起温度が非常に高くなるため、熱的励起ではありえない。考えられるのはライマンバンドやワナーバンドを経由した紫外光による励起である。この種の紫外励起による螢光水素分子輝線はギャトレーが NGC 2023 で発見した。このメカニズムは、オリオン星雲のように紫外光の強いところではあらゆる場所で働いているものと思われる。

$v=1-0S(1)$ と $v=2-1S(1)$ の線比が 2 以上の場合には、理論的に言って紫外励起はありえない。このときは衝撃波面での熱的励起が働いているものと考えられる。比が 10 近くにならないのは、いたるところに存在する螢光輝線が混じっているためだろう。したがって図 3 (b) から、オリオン・ブライトバーでは電離波面からその南東 $50''$ 程度にかけての水素分子は衝撃波によって励起されていることが分かる。やはりここには衝撃波が存在していたのである。

衝撃波によって圧縮された分子雲の物理状態

水素分子輝線の観測から、オリオン・ブライトバーに付随した分子雲中に衝撃波のあることが分かった。その分布は CS で見られた 11 km/s 成分の分布とよく一致している (図 3 (b))。その後のギャトレーらによるオリオンの $v=1-0S(1)$ マップと、野辺山で観測した CO や CS のマップとを比較すると、両マップはたいへん良い一致を示した。このような傾向は M17 の電離波面によって、作られる衝撃波の分布についても確かめられた。

水素分子輝線を実際に観測する前に私たちが予期していたことは、オリオン・ブライトバーのようにほとんど真横から電離波面を見ている場合には、濃く圧縮された分子雲の先端部分でのみ水素分子輝線が受かるだろうということだった。そこに衝撃波面があると考えられたからである。水素分子輝線は衝撃波面付近の非常に狭い領域からしか出ない。ところが実際に観測してみると、衝撃波面で励起された水素分子輝線の分布は、ミリ波帯の分子で観測される衝撃波によって圧縮され冷えた領域の分布とよく一致するのである。

この一致については幾何学的効果だと考えるのが単純である。電離波面や衝撃波面が視線に対して傾いていた曲がっていたりすれば、衝撃波面の分布と圧縮領域の分布は同じに見える。実際ブライトバーに付随する分子

雲の示す 2 km/s という赤方偏移は、電離波面が少しだけ手前に向いていることを示している。光の観測からもこの傾向は言われている。

もちろん他のもっと物理的に興味ある現象のために水素分子輝線の分布が濃いガスの分布と一致することもありえる。そのひとつは濃いガスの塊が薄いガス中につぶつぶになって存在するという、いわゆる群塊性である。電離波面付近の H II 領域を高分解能の連続波で観測すると、電離ガスの分布は滑らかではなく、いくつもの小さい塊になっていることが分かる。このような群塊は、その寿命から考えて濃い電離ガスに囲まれた中性ガス塊だと言われており、分子雲中で作られるらしい。分子雲内の密度が一律でなく群塊性があると、衝撃波面はきれいにそろわなくなり、たとえ真横から見てもいたるところから水素分子輝線が受かることになる。一方圧縮されたガスもいたるところに存在する。分子雲中の群塊性は直接観測するのはむずかしいが、たとえば高励起の分子線を使って求めた質量が低励起の分子線を使った場合よりもかなり大きくなることなどの理由により間接的にその存在が示唆されている。

さて、オリオン・ブライトバーに付随する分子雲の密度と柱密度を求めてみよう。図 4 には CS の $J=1-0$ と $J=2-1$ の強度から計算される水素分子密度と CS の柱密度の値を、位置と速度の関数と示してした。ガス温度は 100 K と仮定した。ブライトバーに付随する分子雲の密度と柱密度が、まわりの分子雲の密度や柱密度と比べて大きいことが分かる。密度の絶対値についてはアンテナ温度較正上の問題があって誤差が大きいが、 10^8 cm^{-3} 以上はあると考えられる。この値は水素分子輝線などから推定される値とよく一致する。

ブライトバーの奥行きをその長さと同じで $3'$ だと仮定すると、付随する分子雲の質量は $80 M_{\odot}$ となり、まわりの分子雲に対して 1.2×10^{47} erg の運動エネルギー

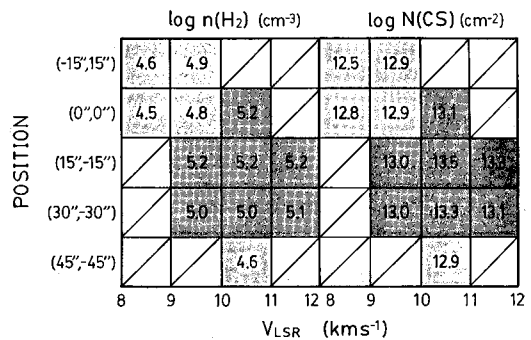


図 4 図 1 に示した線上での密度と柱密度を速度ごとに示した。ブライトバーに付随する 11 km/s 成分の密度と柱密度は、まわりに比べて大きくなっていることが分かる (面高他 1985 による)。

を持っている。ただし、ブライトバーの視線に対する傾きを 10° と仮定した。仮りにブライドバーまでやって来る電離光子すべてがこの分子雲を加速するのに使われたとすれば、1,300年で十分である。

今までは分子雲の温度を100 Kと仮定して話を進めてきたが、これはCOの観測から推定される値である。遠赤外の色温度は60 Kを与える。どちらにせよ、この分子雲の温度は異常に高い。オリオンKLのように内部に熱源がある場合にはその近くで30~100 Kという高温の分子ガスが観測されるが、それ以外の場合には20 K以下である。ブライトバーに伴う分子雲内には点状の赤外線源が見つかっていない。この分子雲の温度が高い理由はふたつ考えられる。ひとつは衝撃波による加熱であり、もうひとつは電離波面付近の暖いダスト(300~1000 K)による加熱である。

一般に放射性衝撃波の後方は極めて急速に冷えるが、ガス温度が100 K程度にまで下がると冷却に要するタイムスケールは 10^5 年と長くなる。この温度ではCOの回転遷移が主に冷却にきいている。オリオン星雲の年齢を考えると、ブライトバーに付随する分子雲は衝撃波によって加熱された後でまだ完全に冷えきっていない可能性がある。

一方紫外域の非電離光子によって暖められた電離波面近くのダストは300 Kから1000 Kの熱放射を出す。この赤外線が分子雲内部のダストを再加熱して、その温度を100 K近くに保つことができる。ダストはガスをほぼ同じ温度にまで加熱する。このような領域は赤外放射に対してダストが光学的に厚くなるまで広がるはずで、その幾何学的厚みを計算するとブライトバーの場合には約0.1 pc ($50''$)になる。

このような二種類の加熱機構のどちらが強く働いているのかは結論できない。遠赤外の色温度が電離波面から分子雲内に向かってゆっくりと下がっていくのを見ると、ダストの赤外放射による加熱もかなりきいているものと思われる。一方で衝撃波による加熱が起こっていることも事実である。どちらにせよ100 Kという温度は実現可能である。

最後にオリオン・ブライトバーに付随する分子雲の化学組成について触れておく。理論計算によると衝撃波圧縮領域ではイオウを含む分子が増加し、 HCO^+ などは減少すると言われている。ところが実際観測してみると、 HCO^+ という分子は衝撃波などの相互作用のある場所では他の分子より相対的に強くなる。一方CSは他の分子と比べて特に異常は見られない。ブライトバーの場合も、 HCO^+ だけ電離フロント側で強度超過を示す。今後の化学計算ではこのような HCO^+ の振舞いを正しく追えるかどうか問題となる。

おわりに

オリオン・ブライトバーのような電離波面によって作られる衝撃波は、ようやくその存在が確かめられたところである。これからは衝撃波によって圧縮された領域の温度・密度構造や化学組成などが詳しく研究されていくべきだろう。それによって衝撃波圧縮領域での星生成の問題等の興味深い謎が解明されていくに違いない。それには特に赤外からミリ波にかけての観測が重要になる。JNLTができるころには、中間赤外域での撮像も十分可能になると思われるが、そのような先進的な機器を用いてこの分野でも飛躍的に研究が進むものと期待できる。

最後に、オリオン・ブライトバーの観測を今日まで行なってくるにあたって、多くの人々の御世話になった。ギャトラーとガーデンの両氏には赤外観測をするときに細かい点までめんどろを見てもらった。海部さんには日英協力でいろいろと私たちに便宜をはかってもらった。その他にも多くの人々から適切な助言をいただいた。これらの人々に感謝します。

学会だより

昭和61年度科学研究費補助金審査委員候補者

日本学術会議より標記の件について推薦の依頼がありましたので、本学会として評議員の書面投票により下記の方々を推薦いたしました。

第1段審査委員候補者：内田 豊，奥田治之，小暮智一
第2段審査委員候補者：古在由秀，早川幸男

内地留学奨学金

年会中に開かれた内地留学奨学金選考委員会において、申請のあった2名の候補について選考を行った結果、次のように決定した。

◎ 大島 修 岡山県立蒜山高校教諭

研究題目：変光星の観測的研究

留 学 先：東京天文台 測光部

岡山天体物理観測所

◎ 伊藤芳春 宮城県角田女子高校教諭

研究題目：自作光電測光システムのキャリブレーション

留 学 先：福島大学 教育部地学教室

東京天文台 測光部

計 報

本会元副理事長、日本学術会議会員、田中春夫氏は、去る10月27日午後1時、63歳で逝去されました。

謹んで御冥福をお祈りするとともに、会員諸氏にお知らせ致します。