

接 触 連 星

中 村 誠 臣*

1. はじめに

接触連星とは、その名のごとく、2星が互いに接触しているような連星をさす。すなわち、両星が内部臨界ロッシュ・ローブにおさまりきれず、外層の一部分がそれからはみ出しているような系である(図1)。ここで、ロッシュ・ポテンシャルについて説明しておく。両星が質点として共通重心のまわりを円軌道を描いて回転しているとして、この公転と同じ角速度で重心のまわりを回る座標系で見る。この座標系で、2星からの重力と遠心力を考慮して得られるポテンシャルをロッシュ・ポテンシャルという。等ポテンシャル面は、各成分星に近い所ではそれぞれの星を包む球面に近い形をしている。両星から遠去かかっていくと両星を包み込む瓢箪型に変化する。両星を包み込むようになる最初の面を内部臨界ロッシュ面、その作る立体を内部臨界ロッシュ・ローブという。臨界ロッシュ面上、力の釣り合いの成り立っている点が L_1 点である。臨界ロッシュ面から外側へ移動していくと、2星を結ぶ直線の延長上、軽い方の星の側に力の釣り合いの成り立つ点(L_2 点)が現われる。 L_2 点を通り、両星を包む瓢箪型の等ポテンシャル面の作る立体を外部臨界ロッシュ・ローブと呼ぶ。

接触連星には、大ぐま座 W 型星と早期型接触連星がある。大ぐま座 W 型は、晩期型(FO あたりより晩期)の系に集中しており、その光度曲線は図2に見られるように連続的変化を示し、主極小と副極小の深さが殆ど等

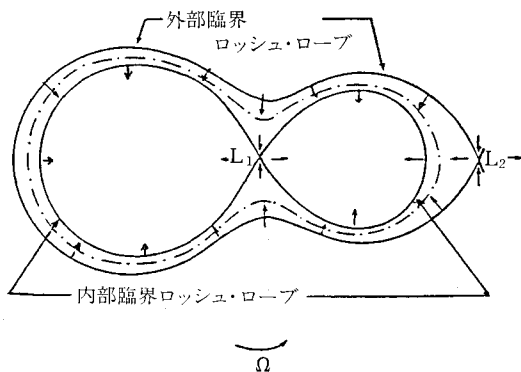


図1 軌道面上の断面図。1点鎖線は共通外層表面。矢印は等ポテンシャル面に垂直で、有効重力の方向を表わす。

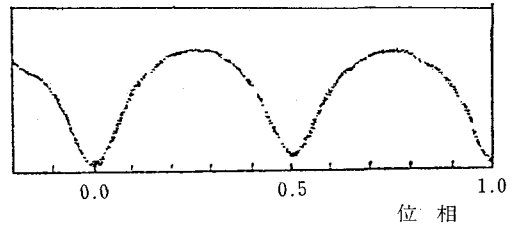


図2 大ぐま座 W 型星の光度曲線

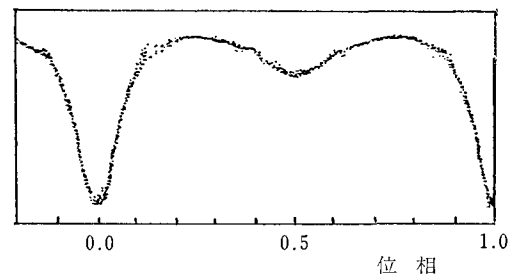


図3 こと座ベータ型星の光度曲線

しいという特徴をもつ。一方、早期型接触連星には、大ぐま座 W 型のもの、こと座ベータ型(図3)のものがある。このことからわかるように、早期型接触連星の分類基準は、光度曲線ではなくて、スペクトル型である。ただし、何型より早期型の系というような、はっきりした基準はないようである。

2. 大ぐま座 W 型星

接触連星の構造と進化の研究は、大ぐま座 W 型星の観測的特徴を説明しようとする試みから始まった。大ぐま座 W 型の系は、光度曲線の解析から、ほぼ同一の表面温度をもつ2つの主系列星から成っていると考えられる。このような系の構造は、単一星の内部構造の理論では理解できない。

両星が熱平衡にあるとすると、ポテンシャルをロッシュ・ポテンシャルで近似するとき、両星の表面が同一ポテンシャル面上にあるという条件から、両星の半径に $R_I/R_{II} \sim (M_I/M_{II})^{0.46}$ という関係が成り立つ必要がある。ところで、化学組成が一樣な星については、 $R_I/R_{II} \sim (M_I/M_{II})^n$ という質量-半径の関係がある。 n は、上部主系列では 0.6、晩期型の主系列では 1.0 程度の値をとり、一般には、両関係式を同時には満たしえない。また、主系列では、星の質量が小さい程表面温度が低くなるのだが、大ぐま座 W 型の系では、両星の質量比の典

* 東北大理 Masaomi Nakamura: Contact Binaries

型的値が 0.5 あたりであるにもかかわらず、表面温度が両星でほぼ一致している。この困難を克服するために、共通対流外層というモデルが提案されている。これは次のようなものである。接触連星の両星が、それぞれ、質量 M_I, M_{II} 、半径 R_I, R_{II} を持っているとする。両星の表面が同一のポテンシャル面上にあるとすると、 $R_I/R_{II} \sim (M_I/M_{II})^{0.46}$ という関係式が成り立っている。従って、両星の表面重力 $-GM/R^2$ がほぼ等しいということになる。そこで、もし表面对流層でのエントロピーが両星で等しくなっていると仮定するならば、両星の外層は類似の構造をとり、同じような表面温度を持つことになる。このような外層を作るために、共通外層を通じて重い方の星から軽い方の星へとエネルギーの移動が起きていると考える。このようなモデルが作れるかどうかについては、ルーシにより調べられている。その結果を図 4 に示した。図の点線は、条件式 $R_I/R_{II} = (M_I/M_{II})^{0.46}$ を、実線は対流外層中のエントロピーが一定であるような星についての質量 - 半径の関係式を表わしている。実線と点線とが 2 回交わるとき、その交点が接触連星の 2 成分星に対応する。図からわかるように、このようにして得られる両星の質量の範囲が限られていて（系の質量が大きい方に偏っている）、観測を説明しきれない。この欠点を補うものとして、TRO (thermal relaxation oscillation) モデルと DSC (discontinuity) モデルがあり、接触連星のモデルとして有力視されている。

TRO モデルでは、両星が熱平衡にあるという仮定が取り除かれている。このモデルの進化の様子は、ルーシ (1976)、フランネリ (1976)、およびロバートソンとエグルトン (1977) らにより調べられた。このモデルでは、次のような仮定がなされる。(1) 一方の星 I が内

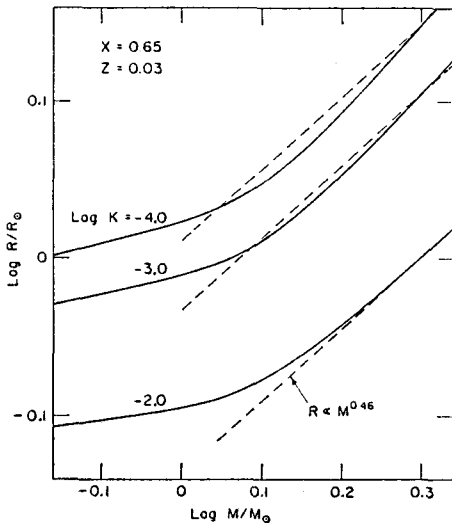


図 4 ルーシ (1968) より

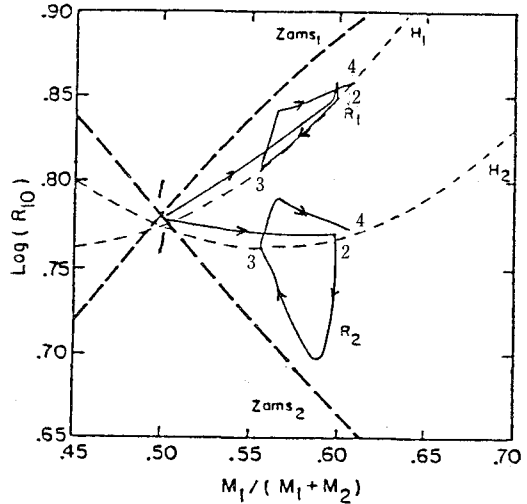


図 5 主星の質量比に対する半径図上での TRO モデルの進化 Z_{ams1}, Z_{ams2} は、主星及び伴星についての原始主系列での質量-半径の関係を、 H_1, H_2 は、主星及び伴星についての内部臨界ロッシュ・ローブ半径を表わす。フランネリ (1976) より。

部臨界ロッシュローブを満たし、他方の星 II は満たしていないような半分離期では、星 I の半径は臨界ロッシュ・ローブの半径に等しいとする。(2) 両星が内部臨界ロッシュ・ローブを満たしている接触期には、両星の表面ポテンシャル、および、表面对流層内のエントロピーが一致する。すなわち、そうなるように、質量およびエネルギーの移動率を決定する。

TRO モデルの計算結果を図 5 に示した。熱平衡にある 2 つの星 ($0.98M_{\odot} + 0.97M_{\odot}$) を点 1 で接触させると、主星からのエネルギー移動により伴星は膨張し始め、質量は主星へと移っていく。従って、系は、接触したまま、点 1 から点 2 へと進化する。そして、ついには、伴星が点 2 で臨界ロッシュ面から分離する。この時点で主星からのエネルギー移動がなくなるので、伴星は急速に収縮して熱平衡へ落ち着こうとする。一方、主星は、伴星へのエネルギー移動がなくなるので膨張し始めるが、臨界ロッシュ・ローブを越えた物質は伴星へと流れる。この時期は速い質量交換の半分離期となっており、系は点 2 から点 3 へと進化する。伴星は臨界ロッシュ・ローブから分離した後、一旦半径が減少するが、主星からの質量移動によって再び半径を増大させていき、点 3 で接触系が形成される。ここで、主星から伴星へのエネルギー移動が始まり、質量移動は伴星から主星へと向かい始める。これから後の進化は、始めの部分に書いたのと同様に進み、一種のサイクルが形成される。

このモデルに特徴的なことは、系が熱的時間尺度で、接触期と半分離期とを交互に繰り返すこと、質量逆転が

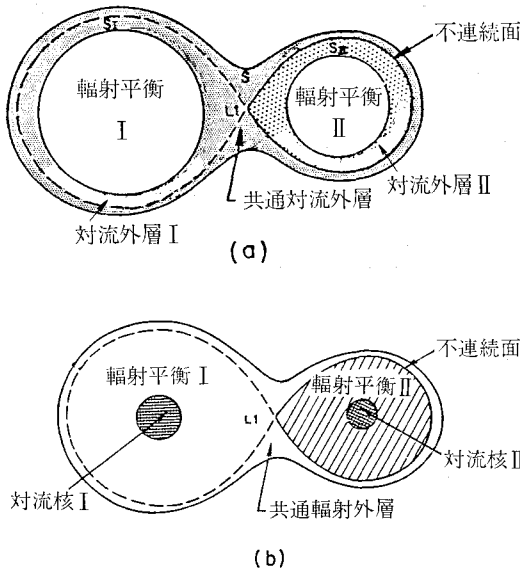


図 6 DSC モデルの構造。シューら (1979) より。

起きないことである。このモデルのおもな問題点は、進化のサイクルの半分離期に対応するような系が殊ど見つかっていないことである。

DSC モデルでは、両星が熱平衡にあるという仮定をとり、そのために、内部臨界ロッシュ面でそのすぐ外側と内側の物理量に不連続があってもよいとする。静水圧平衡にあるために、圧力は連続とするが、温度は不連続となっている。このモデルは、シューら (1979) によって作られている。彼らのモデルの概念図を図 6 に示した。(a) 図は、対流外層を持つ晩期型の 2 星からなる接触連星のモデルである。臨界ロッシュ面より内側にある対流層内では、両星はそれぞれ別々のエントロピー S_I , S_{II} を持ち、共通対流外層内では一定のエントロピー S を持つとする。安定条件から、 S は、 S_I と S_{II} の大きい方と同じとする。(b) 図は、輻射平衡の外層を持つ上部主系列の 2 星から成る接触連星のモデルを示している。臨界ロッシュ面のすぐ内側では、両星は別々の温度 T_I ,

T_{II} を持つが、すぐ外側では共通の温度 T をもつ。安定であるために、 T は T_I と T_{II} の大きい方と一致するものとする。

DSC モデルでは、物理量に不連続の存在する方の星で、臨界ロッシュ面のすぐ外側に内側の物質より温度の高い物質がのっており、このような構造を維持するような機構が存在し得るのかということが、これまで度々議論されてきている。

3. 早期型接触連星

早期型接触連星の存在がはっきりしだしたのは比較的最近のことであり、その構造と進化については、定説はまだない。ここでは、TRO モデルや DSC モデルと異なる、早期型接触連星に有効と考えているモデルについて述べたい。

DSC モデルによると、早期型接触連星においても、主星から伴星へのエネルギー移動が有効に作用していて、両星は熱平衡状態にある。そのような星においては、表面温度は von Zeipel の法則により、 $T_{\text{eff}} \propto g^\beta$ と表わされる。ここで、 T_{eff} は局所有効温度、 g は局所重力加速度である。 β は定数で、輻射外層であれば、 $\beta \sim 0.25$ である。従って、伴星は、 $T_{\text{II}}^0 \sim T_I^0 (g_{\text{II}}/g_I)^{0.25}$ という表面温度を持つことが予想される。一方、スペクトル型から主星の表面温度 T_I を仮定して光度曲線の解析を行なうことにより、実際の伴星の温度 T_{II}^0 が得られる。もし $T_{\text{II}}^0 \sim T_I^0$ であれば、DSC モデルが正しいことになる。そのような比較の例を表 1 に示した。全体的に見て、(5) と (6) の値は食い違っている。よく一致している系として、AO Cas, V701 Soc, BH Cen, AU Pup, V535 Ara, V1023 Cyg があるが、このうち、AO Cas, V701 Sco, BH Cen は両星の質量比が 1 に近いので一致していて当然である。AU Pup, V535 Ara, V1073 Cyg は、両星の質量がかなり違っているにもかかわらず、(5) と (6) の値がよく一致している。ただ、これらの系は、やや晩期型である。

早期型接触連星を考えるうえで考慮に入れなければな

表 1 ルーシィとウィルソン (1979) より

| Star (1) | q_{II}^0/q_I^0 (2) | f (%) (3) | T_I (K) (4) | $T_I - T_I^0$ (K) (5) | $T_I - T_{II}^0$ (K) (6) | Source (7) |
|----------------|----------------------|-------------|---------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| AO Cas..... | 1.186 ± 0.041 | 3.4 ± 0.7 | 34700 | -333 ± 51 | -60 ± 41 | Schneider and Leung 1978 |
| SV Cen..... | 1.15 ± 0.04 | 67.4 ± 9.9 | 23000 | +6947 ± 149 | -125 ± 51 | Wilson and Starr 1976* |
| V701 Sco..... | 1.00† ± 0.03† | 51.4 ± 0.9 | 20500 | -86 ± 59 | +0 ± 21 | Wilson and Leung 1977 |
| BH Cen..... | 0.969 ± 0.015 | 20.6 ± 1.5 | 17900 | +60 ± 50 | +10 ± 4 | Leung and Schneider 1977 |
| UW CMa..... | 0.751 ± 0.024 | 23.5 ± 3.8 | 43000 | +3806 ± 984 | +228 ± 26 | Leung and Schneider 1978b |
| AU Pup..... | 0.644 ± 0.007 | 71.6 ± 3.2 | 9600 | +533 ± 16 | +158 ± 6 | Leung and Schneider 1978a |
| V1010 Oph..... | 0.489 ± 0.002 | 18.2 ± 1.4 | 8200 | +2529 ± 30 | +94 ± 3 | Leung and Wilson 1977 |
| BV 845..... | 0.399 ± 0.001 | 2.6 ± 2.2 | 8500 | +3804 ± 63 | +257 ± 5 | Leung and Darland 1978 |
| V535 Ara..... | 0.361 ± 0.004 | 2.5 ± 3.6 | 8750 | +178 ± 14 | +108 ± 11 | Leung and Schneider 1978a |
| V1073 Cyg..... | 0.340 ± 0.009 | 7.0 ± 1.5 | 8750 | +543 ± 21 | +129 ± 19 | Leung and Schneider 1978a |
| V729 Cyg..... | 0.237 ± 0.018 | 31.0 ± 4.0 | 34300 | +11565 ± 258 | +1083 ± 238 | Leung and Schneider 1978c |

らないのは、大質量アルゴル系と呼ばれる早期型のアルゴル型半分離系の存在である。このグループは、早期型接触連星と類似のスペクトル型・周期を持っている。このグループの系は、分離系として原始主系列から進化を始め、主星がより速く進化膨張し、臨界ロッシュ・ローブを満たして質量交換が始まり、質量逆転が起きた後の系であると考えられる。ところで、輻射外層を持つ主系列星に大きい質量移動率で物質を降らせると、星が降着物質を同化するよりも速く物質が降り積もるので、星は急速に半径を増大させることが知られている。したがって、大質量アルゴル系は、質量移動の初期に、伴星が質量降着によって半径を増大させ、その結果、接触系を形成した可能性が大きい。この時期は、早期型接触連星として観測されるであろう。そうであれば、早期型接触連星の進化的位置付けは、現在、質量移動の初期の速い進化段階にあり、将来は大質量アルゴル系へと進化する系であるということになる。このような接触系の進化は、主に大ぐま座型星のモデルとして考え出された TRO モデルや DSC モデルでは説明できない。先に述べた表 1 の結果は、両星間のエネルギー交換が、早期型接触連星においては、大ぐま座 W 型の系ほど有効ではないことを示しているように思われる。また、TRO モデルで質量比の逆転が起きないのは、エネルギー移動の結果である。

以上のことを考慮に入れると、早期型接触連星のモデルとしては、エネルギー交換を無視して、両星の外層は、それぞれ、その内部で発生するエネルギーによって特徴付けられる別々の構造をしているのがよさそうである。しかし、臨界ロッシュ・ローブより外側の部分では、両星の外層はつながっているのだから、これらをつなぐ関係式を次のように導く。主星から伴星へ質量が移動しているとして、この流れをベルヌーイの式で近似する。

$$\phi + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 = \text{const.}$$

ここで、 ϕ , p , ρ , v は、ポテンシャル、圧力、密度、速度である。 p と ρ には、 $p = k\rho^\gamma$ という関係を仮定している。速度が L_1 点近傍を除いて小さくなっているとすると、共通外層中で流線の大部分において、

$$\phi_I + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{p}{\rho} \right)_I = \phi_{II} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{p}{\rho} \right)_{II}$$

と近似できる。大まかなことがわかればよいので、式を共通外層全体について平均して、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{M_{Ie}^{ce}} \int_{R_{Ie}^{ce}}^{R_I} \left(\phi_I + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_I}{\rho_I} \right) \cdot 4\pi r^2 \rho_I dr \\ &= \frac{1}{M_{IIe}^{ce}} \int_{R_{IIe}^{ce}}^{R_{II}} \left(\phi_{II} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_{II}}{\rho_{II}} \right) \cdot 4\pi r^2 \rho_{II} dr. \end{aligned}$$

ここで、 M_{Ie}^{ce} は、内部臨界ロッシュ面の外部にある両星の外層部分の質量で $M_{Ie}^{ce} = \int_{R_{Ie}^{ce}}^{R_I} 4\pi r^2 \rho_I dr$; $i=1,2$. この式を両星を結びつける関係式とする。主星から伴星への流れに伴うエネルギーの移動は大きくないことが評価できるので無視する。また、上に導いた関係式は、實際上、両星の表面ポテンシャルを等しいとおくことと違わない。

以上のような、早期型接触連星のモデルを使って、その進化をシュミレートする。系の全質量と軌道角運動量(両星のスピン角運動量は無視)の保存を仮定する。これまで、中村泰久氏(都立駒場高)と共に、早期型系の進化を系統的に調べてきたが、その一例を図 7 に示す。系の初期条件は、 $M_I + M_{II} = 13.4 + 7.0 M_\odot$ ($q = M_{II}/M_I = 0.52$)、両星間距離 $A = 19.5 R_\odot$ である。(a) 図、(b) 図はそれぞれ、質量-半径図、HR 図である。(c) 図には、主星の質量に対して質量移動率が描いてある。両星は原始主系列点 1 から進化を始め、2 まで進化したところで主星が臨界ロッシュ・ローブを満たし、質量移動が始まる。主星は、臨界ロッシュ・ローブに従って半径を減少させていく。一方、伴星は、降り積もった物質を同化しきれず、急速に半径を増大させていき、たちまち臨界ロッシュ・ローブを満たし(点 3)、接触系となる。このとき、質量移動率は、増加から減少へと転ずる。接触期へ入ると、主星の熱的時間尺度と伴星のそれとの中間の時間尺度で質量移動が進む。なぜなら、主星の熱的時間尺度で質量移動が起きると、伴星は質量流入に対して強く応答し、半径を増大させて質量移動率を下げようとするし、逆に、伴星の熱的時間尺度で質量移動が起きると、主星は熱平衡を回復しようとして膨張し、質量移動率を上げようとするからである。質量移動率はいったん極小に達して、その後非常にゆっくりと増大する。系の接触度 f は、着実に増大してゆき、質量逆転が起きるところあたりで、最大 $f \sim 0.8$ ($f = 1.0$ のときに外部臨界ロッシュ・ローブを満たし尽くす) となり、その後は減少してゆき、ついには点 4 で伴星が内部臨界ロッシュ・ローブから分離して接触期が終わる。この時、主星および伴星の光度は、それぞれ最小、最大となっている。また、質量移動率は、増加から減少へと転ずる。これは、この時には、主星の熱的進化の時間尺度が伴星のそれに比べて長くなっているためである。このあとは、両星は、それぞれ別々に熱平衡へ向けて進化し、点 5 で両星は熱平衡状態となる。それからは、核反応の時間尺度で進化を始める。この時期は、アルゴル型の半分離期となっている。点 7 で主星は対流核内の水素を燃やし尽くして巨星へと進化し始める。

早期型接触連星のこのような進化のモデルは観測と矛盾しない。まず、早期型接触連星 SV Cen は、点 3 と

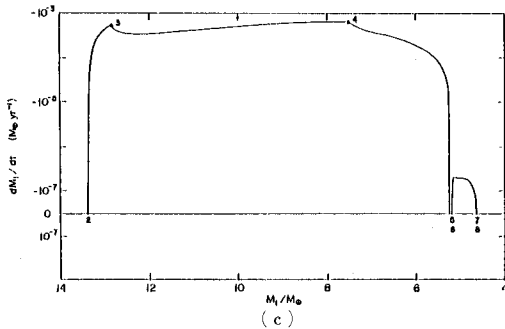
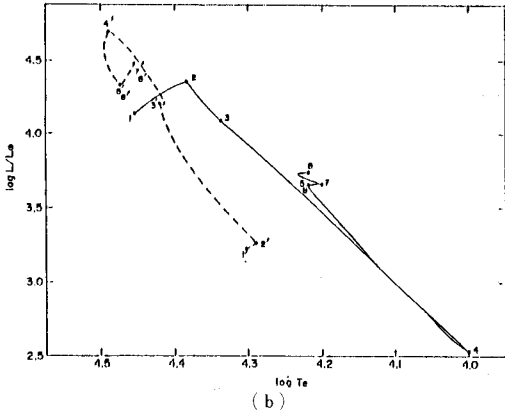
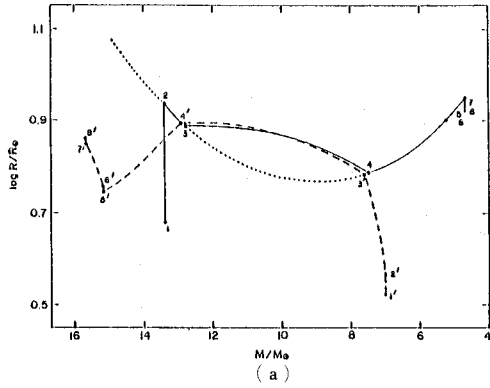


図 7

4 との間の速い質量交換の時期にある接触期のモデルで観測量をほぼ再現できる。また、アルゴル半分離期のモデルは、大質量アルゴルの観測量を矛盾なく説明できる。図 8 には、いくつかの大質量アルゴル系と早期型接触連星系について、観測量を実現できるような初期条件を示してある。横軸は初期質量比 q_0 の対数、縦軸は初期両星間距離を表わす指標である。この指標 $d_{1,0}$ は、主星が原始主系列にあるときにすでに、ぎりぎり限界ロッシュ・ローブを満たしている場合が 0.0 に、また、主星が進化膨張して主系列にあるうちに限界ロッシュ・ロ

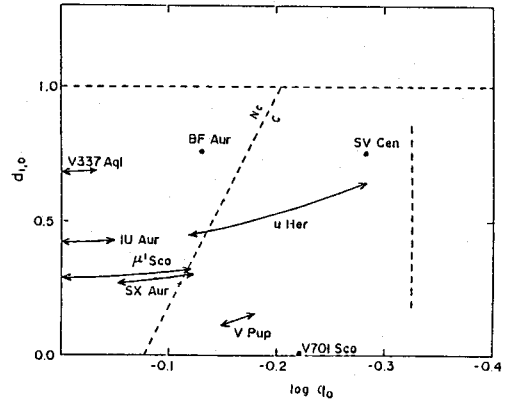


図 8

ープを満たすことのできるぎりぎりの限界が 1.0 になるように定義されている。中央の線は、質量移動によって接触系を形成する領域 (c) と、接触系を形成しない領域 (N_c) とを分ける線である。モデルの結果は、系の全質量を $20.4M_\odot$ に固定した計算に基づいて、それを規格化したものであり、厳密には、他の質量の系には適用できないけれども、各系の質量がそれ程 $20.4M_\odot$ と違わないので、大まかなところは間違っていないと考えられる。系の数が少なく統計的意味はそれほど強くないけれども、接触期を経ないで大質量アルゴル系へと進化する系が意外と多そうである。これは、初期質量比がかなり 1 に近い場合には接触系を形成しにくいという理論の結果、および質量交換を経験していない分離系の質量比に対する個数分布が $q \sim 1$ 近くにピークを持っているという観測の結果と符号していると考えられる。しかし、u Her や V Pup などのように、接触期を経て現在に到っていると考えられる系も、確かに存在している。SV Cen と V701 Sco は接触系である。

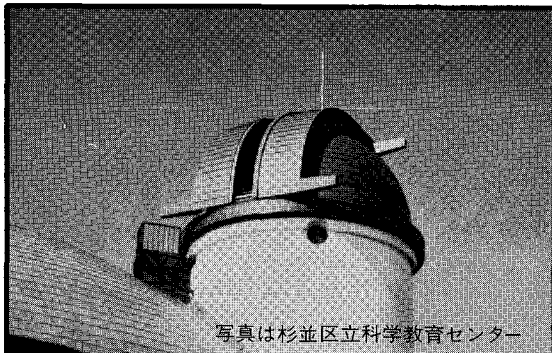
4. おわりに

接触連星について、そのモデルの話を中心に書いてきたが、最後に 2, 3 付け加えておわることとする。大ぐま座 W 型星の 2 つのモデルについては、甲乙をつけるのにどちらも理論的にも観測的にも決定打を欠き、これからはしばらく論争が続けられていくものと思われる。早期型接触連星の進化についての 3 節で述べたような描像は、まだ一般的に受け入れられているわけではないが、その無矛盾性から言って、ほぼ正しいものとする。ただし、全く問題がないわけではない。ひとつには、早期型接触連星の数が多過ぎはしないかということである。モデルによると、分離期、半分離期の進化は核反応の時間尺度で進むのに対して、接触期の進化は熱的時間尺度で進む。しかし、観測される分離系や半分離系の数

は、接触系に比べて圧倒的に多くはなっていない。ただ、観測されている系の数全体が少ないので、それ程深刻に考える必要はないのかも知れない。また、最近、ドゥレヒゼルら(1982)が、SV Cenの観測をやり直し、その結果に基づいて、軽い方の星から重い方の星へ質量移動が起きていて、一部分が系外へ失われているというモデルを提案している。しかし、彼らの言うモデルでは、軽い方の星が重い方の星より明るくなっているという観測事実の説明が明らかでない。彼らの与えた系のパラメータは、以前のものと最大30%ほど食い違っているが、全体的に一樣に小さい方へずれているので、もし系からの質量放出量が大きくないのであれば、以前と同様の初期質量比をとって、質量と角運動量保存の仮定で矛盾なく再現できると考える。

☆ ☆ ☆

☆ ☆



写真は杉並区立科学教育センター

★営業 **ASIBO** 品目★
天体望遠鏡と双眼鏡
ドームの設計と施工

▶主なドーム納入先◀

東京大学宇宙航空研究所/東京大学教養学部/東京学芸大学/埼玉大学/福島大学/川崎市青少年科学館/杉並区立科学教育センター/駿台学園高校(北軽井沢)/船橋市立高校/高知学園/土佐市公民館/刈谷市中央児童館等の他、日本全国に100余基の実績。

ASTRO 光学工業株式会社

東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321

丸善の出版書

一頁一頁から新しい発見を!

理科年表

60年版

東京天文台 編 A6/定価 980円

机上版……………A5/定価 1,900円

科学知識として日常に必要な種々の定数、資料を、暦・天文・気象・物理化学・地学・生物の各分野にわたって完全に集約。本年版より、活字の大きな机上版を同時に発売いたします。

理科年表をより深く理解するための読本シリーズ

理科年表読本

気象と気候 高橋浩一郎・宮沢清治 著 B6/定価 1,200円

地震と火山 宇佐美龍夫・木村敏雄 編著 定価 1,200円

こよみと天文・今昔 いまむかし 内田正男 著 定価 1,200円

銀河と宇宙 石田薫一 著 定価 1,300円

雪の話・氷の話 木下誠一 著 定価 1,200円

地球から宇宙へ プラズマの海の孤島 小口高・河野長 著 定価 1,500円

●予約募集中/内容見本送呈

科学万博一つくば'85記念出版

科学大辞典 ●60年3月刊

編集：国際科学振興財団 B5/1800頁

特価 25,000円(定価28,000円)60年9月16日まで

現代社会における科学・技術の基礎から最先端のものまで32,000語を収録したわが国初の科学技術総合辞典。

丸善

[出版事業部]

〒103 東京都中央区日本橋3-9-2 第二丸善ビル

☎(03)272-0391