

# 渦状銀河の化学進化と種族合成

有本 信雄

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

銀河は星の世代交替に伴い化学進化し、その痕跡を星の化学組成に記録します。星の重元素量の頻度分布は銀河系のバルジとディスクとで異なり、それぞれでの星の生成史が違っていることを語っています。銀河系以外の渦状銀河の星の生成史は種族合成法で銀河の色・スペクトルを再現して考察します。それによれば、銀河系の進化は渦状銀河の典型的なタイプであること、そして一般の渦状銀河の特性の多様性はバルジとディスクの大きさの比が違うために発生していることなどが分かります。

## 1. はじめに

銀河の化学進化という言葉は一般には馴染みが薄いかと思います。化学進化と聞いてみなさんはどんなことを思い浮かべるでしょうか。銀河の星間空間に漂う分子雲、その中で進行する化学反応。銀河は理科の実験室。そんなことを想像されるかも知れませんが、残念ながらここでいう銀河の化学進化はそれとは少し違います。銀河の化学進化とは星の原子炉で合成された元素が星の死とともに撒き散らされ、周囲の星間ガスを汚染することを言います。なんだ、銀河の環境汚染か、などと言ってははいけません。銀河が化学進化をしなかったら、炭素や窒素、酸素、鉄といった大事な元素が太陽系の近くで作り出されることもなければ、石器や鉄器文明の生まれようもなく、そもそも人類が、ついでに言えばこれを書いている私も読んでいるみなさんも、この宇宙に存在しないはずなのです。

ビッグバン宇宙では、銀河が生まれる前に原子核反応によってヘリウムやリチウム、ホウ素、ベ

リリウムなどの軽い元素が合成されます。銀河は大部分が水素とヘリウム、それに今ここで名前のでてきた元素が僅かに含まれているガスを母体にして生まれると考えられます。これを原始ガスと言います。原始銀河の中ではガス塊の崩壊や衝突による衝撃で星が生まれ、生まれた星はその重さに応じてそれぞれに異なる進化の道筋を辿り、あるものは白色わい星として静かにその生涯の幕を閉じ、またあるものは超新星として華やかに爆発して散ります。星の内部の原子炉では、水素からヘリウムが作られ、更に、炭素、窒素、酸素、ネオン、マグネシウム、シリコン、硫黄、カルシウム、鉄、コバルト、ニッケル、銅、といった重い元素が次々と合成され、星が死んだ時にはこれらの元素の大部分が吹き飛ばされて周りの星間ガスに取り込まれます。重元素で汚染されたガスから次の世代の星が生まれます。この第二世代の星が死ねば、新たに合成された重元素を周囲に撒き散らします。銀河ではこのようにしてガスから星が生まれ、進化し、爆発し、環境を汚染し、そこから再び星が生まれるという、星の世代交替が繰り返されています。これを銀河の化学進化とよびます。

Nobuo Arimoto: Chemical evolution and population synthesis of spiral galaxies



## 2. 星の生成史

銀河の化学進化はどこで、どんな星が、どれだけ生まれたかによって決まります。これを星の生成史と言います。どれだけ星が生まれるかを表す量を星の生成率とよび、銀河の化学進化モデルでは星の生成率は星間ガスの量に比例するとします。実際には星の生成率はガスの量以外にも、重元素量とか、ガス中を通過する衝撃波の頻度や強さ、更にまた、磁場の強さや星の密度にも左右されるかも知れませんが、星がどのようにして誕生するのかの理解がまだまだ不十分ですので、これらの効果の影響は比例係数の大きさの違いで表されるとします。

どんな星が生まれるか、つまり、どんな重さの星がどういう割合で生まれるか、これを初期質量関数とよびます。これは星の生成史を綴る基本となるものです。重い星ばかり生まれる銀河と、軽い星のみ生まれる銀河とでは、その進化の様子がまるで違います。太陽系近傍では星の計数観測から、経験的に、重い星ほど生まれる割合が小さいことが分かっています。これらから、一般に、銀河で生まれる星の割合はその星の重さの巾乗に逆比例すると考えられます。この巾の大きさを初期質量関数の傾きとよびます。ちなみに、太陽系の近くでの星の生まれる割合は星の質量の1.35乗に逆比例していることが1955年にサルピータによって明らかにされました<sup>1)</sup>。生まれる星の質量は太陽の0.05-60倍と思われま

す。銀河のなかには初めから大きなガスの塊だったのでなくて、周りからガスが降り積もって成長したのもあるかも知れません。同様のことは銀河の中のある部分に限っても言えます。つまり、最初はガスの無かった領域に周囲からガスが流れ込み星の生成が始まった。そういうことは十分にあり得るでしょう。銀河の化学進化は、はじめからガスに満ちていた場合と、徐々にガスが降り積もって銀河が成長してきた場合とでは大きく違いま

す。このガスの降ってくる速度をガスの降着率とよびます。

ガスの降着率と星の生成率の大小で、銀河のなかでどんどんガスの割合が増えるか、それともガスがあつという間に星に変換されてしまうかが決まります。その時、次にお話するように、どんな重さの星がもっとも多く生まれるか、即ち、初期質量関数の傾きがどうであるかによって、重元素の合成される量が決まります。逆に言えば、ガスの降着率と、星の生成率、初期質量関数が分かれば、星の生成史が決まり、銀河の化学進化の描像を定めることが可能となります。

## 3. 星の役割：原子炉と貯蔵庫

星の内部の原子炉ではどんな元素が合成されるのでしょうか。それは星が生まれた時の重さによります。最近の星の進化計算によれば、まず、太陽の0.08倍よりも軽い星は中心部の温度が低すぎて核反応が起こりません。0.08-0.8倍の星では水素の核反応が起こりますが、これらの星の寿命は宇宙の年令よりも長く、内部で出来る核生成物は星の外部には放出されません。0.8-8倍の星は、単独星と連星の場合に分かれます。単独星の場合には、内部で合成されたヘリウムや、炭素、窒素が恒星風や惑星状星雲に乗って周囲に撒き散らされます。これに対して連星の場合には、Ia型の超新星爆発を起こし、シリコン、硫黄、カルシウム、鉄、コバルト、ニッケル、銅などを放出します。8-100倍の星の最後はIb型、II型の超新星とよばれ、主に酸素、ネオン、マグネシウム、シリコン、硫黄、カルシウム、そして少量の鉄を飛ばします。太陽の100倍以上の重さを持つ星の場合はどうでしょう。中心部で多量の酸素が作り出される事は分かっていますが、それがブラックホールの中に吸い込まれてしまうのか、それとも爆発して周囲を汚染するのか、まだ良く分かっていません。いずれにせよ、そういう星の数は僅かですから、銀河の化学進化に及ぼす影響は無視して



もかまいません。

作りだされる元素の種類だけでなく、星の寿命も星が生まれた時の重さによって大体決まっています。星の進化は原子炉で起こる熱核反応の速さで決まります。ですから、重い星は内部の温度が高く反応率が高い。言い替えれば、燃料を早く消費してしまう。即ち、寿命が短いのです。太陽の寿命が約 120 億年、10 倍の重さの星で 1 億 2 千万年、100 倍で 120 万年位です。

星が死ぬとその外側を吹き飛ばし、中心部は崩壊して白色わい星や中性子星、或いは、ブラックホールといった星の残骸となります。吹き飛ばされた星の外郭は再び星間ガスに戻りますが、崩壊した星の残骸からガスが外にでてくることはありません。この星間ガスに還元される質量と残骸に取り込まれる質量の比率は重い星ほど大きいことが分かっています。また、太陽よりも軽い星の寿命は宇宙の年令よりも長いのですから、そういう星に取り込まれたガスも二度と星間空間に戻されることはありません。言ってみれば、星はガスの貯蔵庫でもあるのです。

以上のことから、銀河の化学進化で果たす星の役割についての三つの定理が得られます。

定理一：重い星ほど多量の重元素を生成する。

定理二：重い星ほど早く死ぬ。

定理三：重い星ほど多量のガスを還元する。

この三つの定理を組み合わせると、例えば、重い星が沢山生まれる銀河では重元素の量が急速に増加して、ガスも星も重元素に富んだ化学組成を持ち、星に比べてガスの量がいつまでも多い、と言うことや、或いは逆に、軽い星が重い星と比べて遙かに数多く生まれる銀河ではガスがすみやかに星に取り込まれ、しかも作られる重元素の量が僅かであるために、ガスや星がいつまでも原始ガスに近い化学組成を保つ、と言うことなどが直ちに分かります。実際の銀河ではこのように極端ではないでしょうが、近年恒星の進化計算の目覚しい進展のおかげで、ある質量を持つ星の寿命、作

りだされる元素の量と種類、そして死んだ時に残骸として残る部分とそうでない部分の比率を正しく知ることができるようになり、それを基に銀河の化学進化のモデルを築き、様々な星の生成史のシミュレーションを行なって、多種多様な現実の銀河の進化を考えることが可能となりました<sup>2),3)</sup>。ここでは銀河系と渦状銀河の星の生成史についてお話しします。

## 4. 銀 河 系

私達の銀河系は円盤状に星とガスが分布するディスクと、中心に星が密集するバルジ、そしてそれら全体を大きく球状に包むハローとからなっています。太陽系は銀河中心から約 8 キロパーセク離れたディスクの中にあります。太陽系の上下左右約 1 キロパーセクのディスクを太陽系近傍とよびます。星は固有の空間運動をしていますが、その運動範囲はこれよりは狭く、太陽系近傍で生まれた星の殆んど全てが逃げ出さずにこの中に留まっていると考えて良い大きさです。

銀河系の年令を正しく見積もるのは難しい問題ですが、ハローに点在する球状星団は銀河系のなかでは一番古い天体と考えられていますから、銀河系の年令もこれと同じ位と考えてよいとすれば、約 150 億年位でしょう。すると、重さが太陽に近い星は、その寿命が銀河系の年令とほとんど同じか少し長いことが分かります。このような星は分類学では G 型わい星とよばれています。G 型わい星は生まれてからずっと太陽系近傍に住んでいるわけです。言うなれば化石のような星で、その化学組成を調べれば、太陽系近傍の環境汚染がどのように進んで来たのかが分かります。どの重元素量を持つ G 型わい星がどれだけの割合であるか、これを知れば汚染の様子が直接迎れます。太陽系近傍のディスクにある G 型わい星の重元素量の頻度分布を示したのが第 1 図です。最多頻度の重元素量は太陽値の半分位、太陽よりも重元素量の多い星は稀である事等が分かると思いま



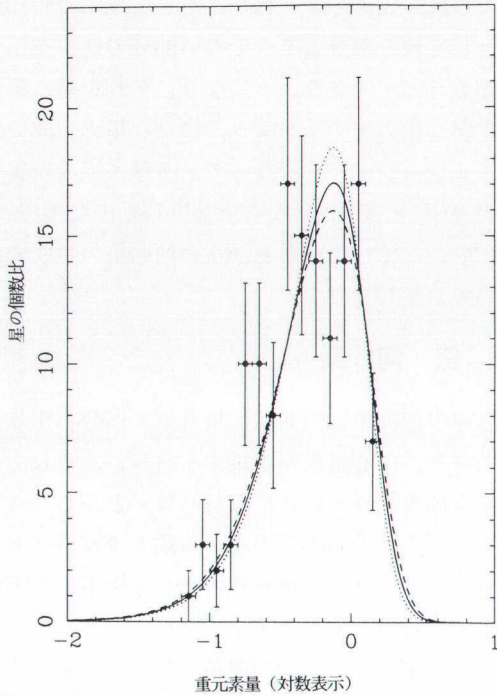


図1 太陽系近傍におけるG型わい星の重元素量の頻度分布(黒丸). 重元素量は太陽の値を1として対数表示してある. 曲線は理論値. 初期質量関数の傾き1.35, 星の生成のタイムスケール33億年, ガスの降着のタイムスケール53億年(点線), 43億年(実線), 36億年(破線). 文献(4)より.

す. もっとも重要なのは太陽の0.1倍以下の重元素量の少ない星が殆んどない事です. 太陽系近傍には現在重さにして約80パーセントの星と20パーセントのガスが存在しています. 単純に考えれば, はじめは100パーセントガスだけであったのが, 150億年の間にこれだけの星に転換されたはずです. もしそうならば, ビッグバン直後の原始ガスから生まれた重元素量が少ない星の割合がもっと大きくなるはずです. なぜそうならないのか. これは「G型わい星の謎」とよばれています. この謎を解く鍵は太陽系近傍のディスクがどうやって成長したかを考える事にあります. ディスクは原始銀河の赤道面にハローからガスが降着して形成されたはずです. ですから, もしガスがゆっく

りと赤道面に降ってきて, ディスクが徐々に成長してゆき, その中で星が生まれたとすれば, 生まれる星の量はガスの量に比例しますから, 重元素量が低かったはじめの頃に生まれた星の数が少ないのは自然のなりゆきでしょう. 降ってくるガスが既になんらかの原因で汚染されていたならば, 「G型わい星の謎」はもっと容易に解ける事になります. 詳しい数値計算によれば, 太陽系近傍のディスクは太陽の重元素量の20パーセントまでなんらかの原因で既に汚染されたガスが50億年くらいの時間をかけて降りつもり, それと同じくらいにゆっくと星が生成されてきた事が分かります. 重元素の頻度分布のピークの位置は初期質量関数の傾きに非常に敏感で, シミュレーションの結果ではサルピータの関数が最も良く第1図の観測結果を再現します. つまり, 実際に星の計数観測で求められた質量関数と化学進化の考察で妥当とされる初期質量関数とは見事に一致するのです<sup>4)</sup>.

ディスクはどこでも太陽系近傍と同じだというわけではありません. 銀河系のディスクに点在するHII領域と呼ばれる現在活発に星が生まれている星間ガス雲の酸素の量を測定すると, 銀河系の中心部にあるHII領域程酸素の組成比が高い事が分かります. これはハローから銀河面に降り積もるガスの降着率が銀河系中心に近い程大きかったという事で理解されます<sup>5)</sup>. この他に, ハローから降ってきたガスがディスクの回転に合わせるように銀河面上を中心に向けて流れるという現象もこれに関係していると言われていす<sup>6)</sup>.

銀河系の中心にあるバルジには殆んどガスがありません. いったい, バルジはどのようにして出来たのでしょうか. バルジでの星の生成史は太陽系近傍のディスクと同じだったのでしょうか. それとも全く違うのでしょうか. それを知る手がかりを与えてくれるのがバルジのK型巨星の重元素量の頻度分布です. 銀河系の中心にあるバルジは地球からは途中にある星間物質に遮られて良く見



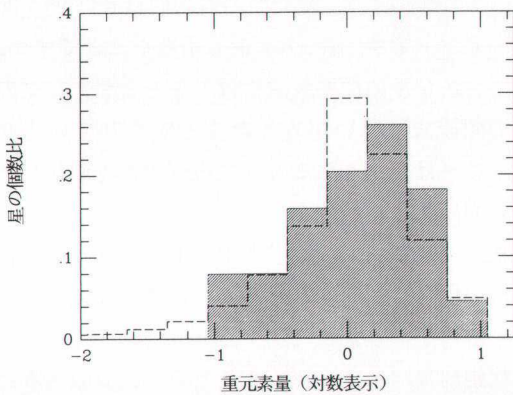


図2 銀河系バルジにおけるK型巨星の重元素量の頻度分布(斜線部分)。重元素量は太陽の値を1として対数表示してある。破線は楕円銀河の化学進化モデル<sup>3)</sup>。初期質量関数の傾き0.95, 星の生成のタイムスケール1億年, ガスの降着のタイムスケール1億年以下。文献(7)より。

えませんが、けれども幸いな事に、バーデの窓と呼ばれる方向には殆んどガスがなくて、そこからバルジを覗く事が出来ます。第2図はそのバーデの窓から見えるK型巨星の重元素量の頻度分布図です<sup>7)</sup>。太陽系近傍と随分違います。全体に重元素量の値が大きい方にずれています。平均で太陽の約2倍、最高で10倍あります。これは汚染が太陽系近傍よりも遙かにひどかった事を示します。つまり、重い星の出来る割合が大きい、言い替えれば、初期質量関数の傾きがサルピータの関数に比べて小さい事を表しているのです。第2図は更にガスの降着率と星の生成率がいずれも非常に高かった事を示しています。シミュレーションによれば、バルジがはじめての10億年の間に殆んどできあがってしまい、その間に大部分のガスが星に急速に転換された場合にのみ、観測された重元素量の頻度分布を再現する事が出来ます。

バルジにガスがないのはなぜでしょう。銀河の進化モデルによれば、バルジの年齢が10億年であった時にはバルジにはまだ10パーセント程度のガスが残っていたはずですが。そのガスはどこに行ったのでしょうか。その原因はバルジで相対的にたくさんの重い星が生まれた事にあります。これ

らの星は生まれると100万年から1億年の間に直ちに超新星として爆発します。その時に放出される熱は周囲のガスを加熱し、ガスの熱エネルギーは増加します。ガスは部分的には冷却されますが、バルジのように超新星の爆発率が高くて、次々に加熱がなされる場合には、遂にはガスの熱エネルギーがガスをバルジ内に閉じ込めようとする重力の束縛エネルギーよりも大きくなって、ガスをバルジの外に吹き飛ばします。これをバルジ風と呼びます。このバルジ風が吹くとバルジはガスを失い、そこではそれ以上星は生まれません。バルジの星の生成史はそこで終わります。

太陽系近傍のG型わい星とバルジのK型巨星の重元素量の頻度分布から次のような銀河系の進化の様子が明らかになりました。即ち、銀河系は原始ガスから初めにバルジが生まれ、重い星が沢山生まれた結果バルジ風が10億年位経った頃に発生し、多量の重元素を含むガスをハローに吹きあげてハローに残っていた原始ガスを汚染し、それが赤道面に衝突や摩擦などでエネルギーを失いながら徐々に落ちて、太陽系近傍を含むディスクをバルジの十倍以上というゆっくりとした時間をかけて形成したのです。

## 5. 渦状銀河

銀河系は分類上は渦状銀河に属します。渦状銀河には早期型から晩期型まであり、銀河系はその中間型です。いったい、前節でお話した銀河系の進化の過程は、他の渦状銀河の特徴を正しく説明できるのででしょうか。

銀河系の星の生成史を調べるのに、恒星の重元素量の頻度分布を化学進化のシミュレーションで再現するという手法を使いましたが、このアプローチの方法は銀河系以外の渦状銀河には使えません。銀河系以外の渦状銀河は遠すぎて、個々の星のスペクトルからその化学組成を求め、重元素量の頻度分布を議論するということができないのです。



銀河系以外の渦状銀河の星の生成史を調べるのには星の種族合成とよばれる手法を化学進化と組み合わせて適用します。化学進化は死んだ星が残した重元素という情報を手がかりに星の生成史を決定しますが、種族合成は生き残っている星からの紫外から赤外域までの光の情報を使って星の生成史を割り出します。星は一般に主系列星から、準巨星、赤色巨星、水平分枝星、漸近分枝星、惑星状星雲中心星、白色わい星（但し重い星の場合は主系列星から超巨星）へと進みますが、その各々の進化の位相で特徴的なスペクトルを出します。通常、若い星は青く古い星は赤くなります。更に、重元素量の多い星は同一の進化の位相にある重元素の少ない星と比べてより赤く見えます。このことを知って、恒星の進化計算に基づいて、銀河の中でどの重さでどれだけの重元素量をもつ星が、どの割合で、どこで、どの時期に生まれたかを化学進化のシミュレーションで求め、そのような星の生成史を持つ銀河が全体としてどのようなスペクトルを示すかを更にシミュレートすることができます。これを種族合成法とよびます。

この種族合成法を考案したのはティンスレイです<sup>8)</sup>。ティンスレイは全ての銀河の年齢は同じで、銀河内のあらゆる地域で星は同一の初期質量関数で作られ、銀河内の全ての星は均一の重元素量を持つと仮定して、渦状銀河の色が一般に早期型と晚期型とで異なるという事実は星の生成率が違うのが原因であると提唱しました<sup>9)</sup>。この仮説は明解で単純であるという理由で銀河の星の生成史のなかば通説となっていますが、実は詳しく調べてみると様々な矛盾を含んでいることが分かります。第一に化学進化の基本を無視しています。銀河の中の星は一定でない様々な値の重元素量を持っているはずで、第二に渦状銀河の色の違いを星の生成率の違いだけで説明しようとする、早期型と晚期型の差は30倍にもなります。これでは早期型のガス量は10パーセントと正しく予測しても、晚期型に対する予測値は80パーセントにも

なってしまいます。晚期型の観測値はせいぜい30パーセントです。第三に、最も重要なことですが、ティンスレイの標準仮説にはバルジとディスクの星の生成史の違いがまったく考慮されていません。これは後で触れるように誤解を招く結論を導く原因になったのです。

私たちは銀河系の化学進化の考察を基に、渦状銀河の色やスペクトルを再現する新たな仮説を提唱することにしました<sup>10),11)</sup>。簡単に言うと、全ての渦状銀河はバルジとディスクという二つの明るい成分を持ち、渦状銀河の色やスペクトル、その他の特質の示す様々な多様性はバルジとディスクの大きさの比によって決まっている、と言うのがその仮説です。バルジとディスクの星の生成史は銀河系での生成史とそれぞれ同じとします。ディスクでのガス量を正しく再現するために、早期型より晚期型ディスクでの星の生成率がやや低い（数倍）としますが、これはこの仮説では本質的ではありません。銀河系の場合と同じように、先ずバルジができ、バルジ風がハローのガスを汚染し、そのガスからディスクができるとして化学進化のモデルを作り、それを基に様々なバルジとディスクの比を持つ渦状銀河の色・スペクトルを種族合成法でシミュレートしました。

渦状銀河のバルジとディスクの大きさや星の集中度は光の表面輝度分布の解析から求めることができます<sup>12)</sup>。これらから私たちは形態の異なる約80個の渦状銀河のバルジとディスクの構造を計算し、その各々の銀河について上記の仮説に従って種族合成シミュレーションを実行し、得られたモデル銀河と実際に観測された渦状銀河の諸特性を比較しました。その一例を第3図に示します。この図は渦状銀河の二色図のモデルと観測を比べたものです。銀河の二色図上の分布が良く再現されています。詳しく調べると、次のようなことが分かります。1) 渦状銀河のディスクの質量は大体太陽の1000億倍位で、これは銀河の形態によってそんなに変わりません。けれども、2) バルジの



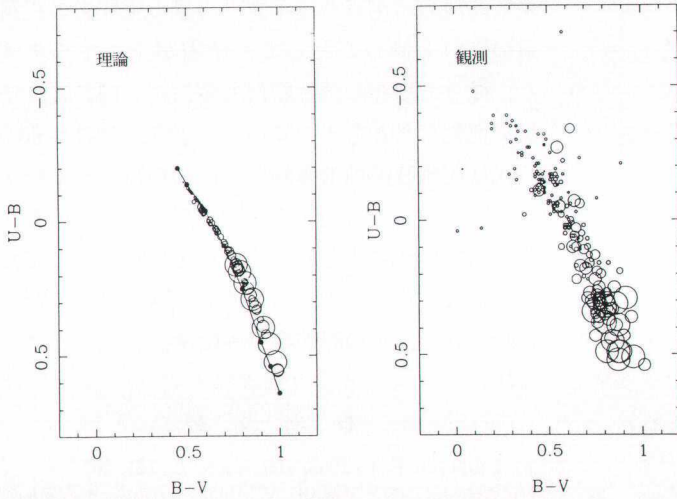


図3 渦状銀河の二色図。理論(左), 観測(右)。円の大きさは銀河の形態を表す。最大の円はS0/a型, 最小はSd型。左図実線はラルソン・ティンスレイ<sup>9)</sup>のモデル。観測はシャープレイ・アムスカタログ中の通常銀河。文献<sup>10)</sup>

質量は最も早期型の銀河で太陽の1兆倍, 晩期型になるにつれて徐々に小さくなり, 10億倍かそれ以下になります。3) バルジの質量は銀河の形態とかなり明瞭な相関を示しますが, 同一の型の銀河でも一桁以上のばらつきがあります。これは銀河の形態分類が正しく機能していない一例です。4) バルジとディスクの明るさの比で見ると, この比は最大4-10, 最低は0.03以下, 早期型ほど一般に大きいですが, 同じ形態でも大きく違うのは既にお話しした通りです。

バルジの明るさの大部分は年齢が100億年以上の重元素を多量に含む赤色巨星から出る光からなっています。従ってバルジの合成色は巨大な楕円銀河と同じように赤くなります。これに対して, いまも若い星が沢山生まれているディスクの合成色は青くなります。この為に, 5) バルジの大きな銀河は赤く, ディスクの明るい銀河は青く見えます。つまり銀河の色が違って見える原因はバルジとディスクの比が異なることにあります。これまで同じ型の銀河でも色やスペクトルが違って理由が明らかではありませんでしたが, これは既存の銀河の形態分類に捕らわれずに, 渦状銀河をバルジとディスクの比だけが互いを区別する銀河であると考えれば理解できます。6) 近赤外の波長で渦状銀河の色を見ると, 皆同じに見えま

す。これはこの波長域ではディスクの若い星の影響が現れず, バルジもディスクも赤色巨星からの光で輝いていて同じ色を持つ為なのです。7) 可視域(Bバンド)と赤外域(Hバンド)の明るさの違いを表す色をB-Hと定義すると, Hバンドで明るい渦状銀河ほどB-Hが赤く見えます。これを渦状銀河の色一等級関係とよびます。一般に長い波長で渦状銀河を見るとバルジの大きい銀河ほど明るく見えます。ところが, 短い波長で見ると, ディスクの青い星からの光ばかりを捉え, 1) の理由からどの銀河も似たような明るさになります。この為にこのように可視光と赤外光とを組み合わせた測光ではバルジの大きな銀河は明るく赤く見えるのです。当然のことながら可視域の範囲だけでは色一等級関係は現れません。

私たちのシミュレーションとティンスレイのモデルの違いがはっきりと現れるのが第4図です。この図は渦状銀河の質量と光度(Hバンド)の比とB-Hの関係を示したものです。ティンスレイのモデルでは銀河が青くなるにつれて質量・光度比が減少しています。これに対して, 観測値は逆に増加しています。モデルの計算した銀河の質量は星とガスの総質量ですが, 観測値にはこれ以外のダークマターの質量も含まれています。このモデルと観測値の食い違いから, ティンスレイはじ



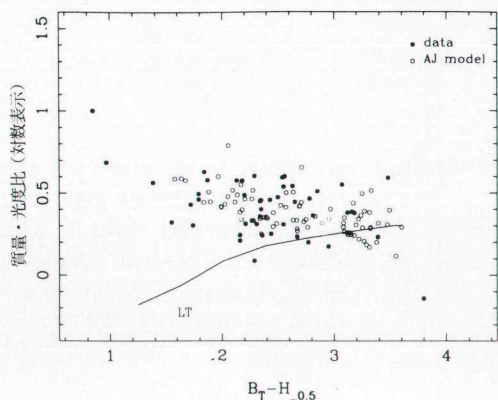


図4 渦状銀河の質量・光度比 (Hバンド) とB-H色指数の相関(黒丸). 白丸は理論値. 実線はラルソン・ティンスレイモデル<sup>9)</sup>. 文献(1)より.

め多くの研究者たちは、青い渦状銀河ほどダークマターをより沢山含むと主張し、それが銀河の形態を決める第一要素であると考えました。けれども、私たちの結果では銀河の質量・光度比は青い銀河ほど大きくなり観測と一致します。これはバルジの大きい(つまり赤い)銀河ほどHバンドでの光度が大きくなるためです。従って、渦状銀河のダークマターと星やガスなどの見える物質との割合はどの銀河でも一定であるというのが私たちの主張です<sup>11)</sup>。

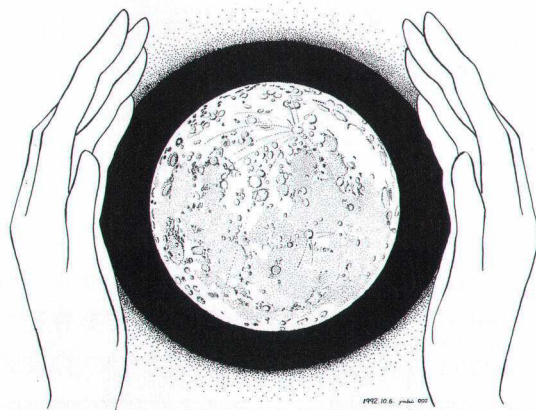
## 6. おわりに

どうやら、渦状銀河の色とスペクトルはバルジとディスクの比で決まっている様子です。そして、

渦状銀河のバルジとディスクの星の生成史は銀河系のそれと同じだとしても矛盾が全く生じません。従ってほかの渦状銀河も銀河系と同じようにして進化したと考えて良いでしょう。これからの時代は観測装置の飛躍的な発展が期待されています。遠方の若い銀河を直接観測してバルジのできる現場を押えることも可能になるでしょう。私たちの銀河進化モデルも数多くの挑戦を受けるかもしれません。その時が楽しみです。

## 参 考 文 献

- 1) Salpeter, E. E. 1955, *Astrophys. J.*, **121**, 161.
- 2) Arimoto, N., Yoshii, Y. 1986, *Astron. Astrophys.*, **164**, 260.
- 3) Arimoto, N., Yoshii, Y. 1987, *Astron. Astrophys.*, **173**, 23.
- 4) Arimoto, N., Yoshii, Y., Takahara, F. 1992, *Astron. Astrophys.*, **253**, 21.
- 5) Matteucci, F., François, P. 1989, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **239**, 885.
- 6) Sommer-Larsen, J., Yoshii, Y. 1989, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **238**, 133.
- 7) Rich, R. M. 1990, *Astrophys. J.*, **362**, 604.
- 8) Tinsley, B. M. 1972, *Astron. Astrophys.*, **20**, 383.
- 9) Larson, R. B., Tinsley, B. M. 1979, *Astrophys. J.*, **219**, 46.
- 10) Arimoto, N., Jablonka, P. 1991, *Astron. Astrophys.*, **249**, 374.
- 11) Jablonka, P., Arimoto, N. 1992, *Astron. Astrophys.*, **255**, 63.
- 12) Kodaira, K., Watanabe, M., Okamura, S. 1986, *Astrophys. J.*, **62**, 703.



手中のLUNA  
大森幸子(東京都)