

# 赤外銀河計数と背景放射から探る銀河進化

## — 光と闇の年代記 —

竹内 努

〈国立天文台光学赤外線天文学・観測システム研究系／東京大学天文学教育研究センター  
〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉  
e-mail: takeuchi@optik.mtk.nao.ac.jp

宇宙進化の歴史とは、銀河進化ないし宇宙の星形成史と見ることができ、長い間銀河の星形成は可視光の観測量を通じて語られてきた。しかし、遠赤外線観測が大発展している現在、可視光では見えてこなかったダストに隠された星形成の歴史、いわば銀河の闇の歴史が注目されている。ここでは赤外線での銀河計数と宇宙赤外背景放射という二つの基本的かつ重要な観測量からモデルを通じて銀河の進化を研究する方法について紹介する。そして実際の解析で生じる厄介な問題について触れたうえでASTRO-FやALMAなど将来の観測計画への展望を述べる。

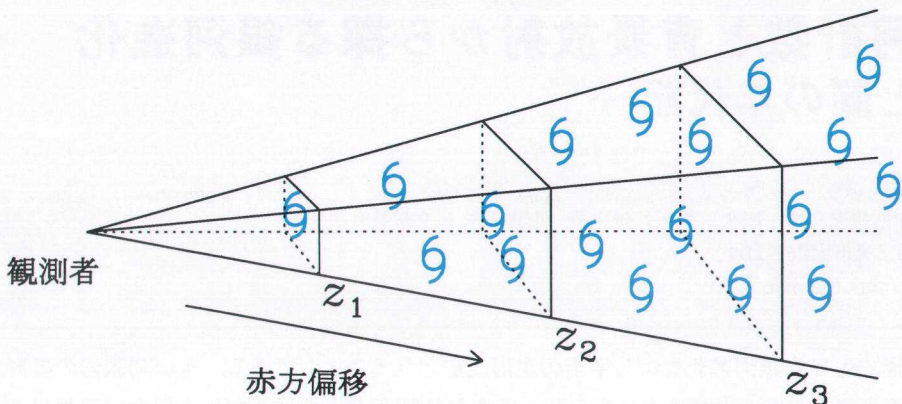
### 1. 銀河進化と宇宙の星形成史

宇宙の歴史の中で銀河がどう形成・進化してきたかは、銀河物理学の中心的課題であり続けてきた。銀河の形成とは即ち星の形成であり、宇宙進化とは宇宙の星形成史であると言い替えることもできる。星のエネルギーは基本的に可視光で放射されているため、歴史的に銀河の進化も可視光での性質の変化を通じて研究されてきた。銀河における星形成率は、寿命の短い（数百万年）大質量星の紫外線放射を元に推定するのがこれまでの標準的方法である。紫外線は星間ガスを電離するので、星形成領域には電離ガス領域が形成される。この電離ガスから放射される再結合線や、星からの紫外連続光そのものの強度から大質量星の数を算出し、初期質量関数を仮定して全星形成率を推定するのである。可視光・紫外線による宇宙の星形成史は最近の観測データの充実にともない、赤方偏移が5に及ぶ宇宙初期まで求められるに至っている<sup>1)</sup>。いわば、我々はこれまで銀河宇宙の歴史

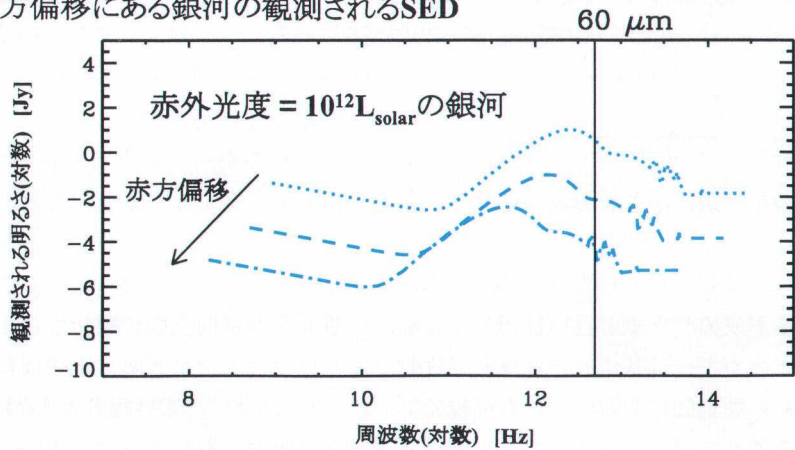
の光の側面を見てきたのである。

ところが、一見成功を取めているこの方法は、何も補正をしないままだと星形成率を相当に過小評価してしまう。大質量星が形成されると、超新星爆発などの質量放出によって、星で合成された重元素が星間空間に還元される。星間空間の重元素はダスト（星間塵）と呼ばれる固体微粒子を形成するため<sup>2)</sup>、紫外線のような短波長の放射はダストに吸収・散乱されてしまい、外部から観測される可視・紫外光は本来の強度よりもずっと小さいものになってしまう。ダストに吸収された放射は遠赤外線<sup>3)</sup>として再放射されるので、赤外線観測によるデータを加味しなくては偏りのない星形成率の評価はなし得ないわけである。特に、非常に激しい星形成をする銀河ではダスト形成も活発であり、ほとんどのエネルギーが遠赤外域で放射されているものも少なくない。このようなダストの温度はだいたい数十Kであり、日常的な常識からすると大変低温である。つまりこれらの銀河は我々の目では見えない冷たい‘闇’にその姿を隠しているのである。

a) 波長が大体 50  $\mu\text{m}$  から 200  $\mu\text{m}$  の電磁波。蛇足だが、家電製品で用いられる‘遠赤外線’よりもずっと長波長である。



様々な赤方偏移にある銀河の観測されるSED



赤外銀河の光度関数と銀河の光度進化

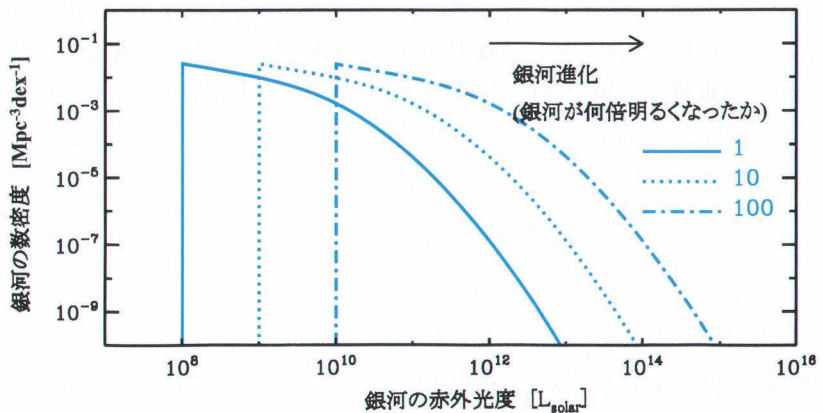


図1：銀河計数の概念とモデルの概要。



赤外データの重要性にもかかわらず遠赤外観測の進歩が可視光に比べて遅く、比較的最近になって発展してきたことの原因はその観測の難しさにある。地球大気は遠赤外線透過しないため、気球やロケット、人工衛星による観測が必要であり、技術的な進歩を待たなくてはならなかった。遠赤外線での銀河の活動性が精力的に研究されるきっかけとなった重要な観測はやはり赤外線天文衛星 *IRAS* による全天サーベイであろう。このサーベイによって、多くの銀河が遠赤外で光っており、赤外放射が銀河の普遍的、基本的性質のひとつであるという認識が定着したといえる。厳密な定義ではないが、本稿では中間・遠赤外で見える銀河をひとくくりには赤外銀河と呼ぶことにしよう。

そして、背景放射観測衛星 *COBE* による宇宙赤外線背景放射の検出、宇宙赤外線天文台 *ISO* による赤方偏移 $\sim 1$ までの赤外銀河の探査など、ここ数年で続々と報告され続けている新しい観測データは、中間・遠赤外線での銀河の理解を飛躍的に進め、同時に多くの新たな謎を我々に突きつけた。詳細は次節で説明するが、遠赤外銀河探査および宇宙赤外線背景放射の観測結果はみな、激しい銀河進化を示唆していたのである。また、近傍宇宙での可視-赤外光度比と比べ、赤方偏移が1より大きい遠方宇宙では宇宙の赤外光度密度が増大していることを示す観測も増えてきており、これは遠赤外線放射が銀河進化における重要な過程をなしている証拠といえる<sup>3)</sup>。また、形成初期の銀河ではこのような激しい星形成が行なわれていると考えられる。このような昔の天体から来る放射は、宇宙膨張の効果により我々のもとに届くときには本来よりもずっと長い波長になっており、このため高赤方偏移銀河のダスト放射はサブミリ波<sup>b)</sup>・ミリ波で検出される。これも最近数年ほどで、JCMT サブミリ波望遠鏡の *SCUBA* などの装置によってこのような激しい星形成を行っている天体の候補が発見され、

活発な議論を呼んでいる<sup>4)</sup>。

次節より、宇宙の闇の歴史即ちダストに隠された銀河の星形成史を、赤外銀河計数及び宇宙赤外線背景放射という二つの観測量を通じて研究する方法について解説する。そして現時点での問題点を明らかにした上で、*ASTRO-F* や *ALMA* などの将来計画によって期待される成果について展望することにしたい。

## 2. 赤外銀河計数・宇宙赤外線背景放射と銀河進化

ある検出限界よりも明るい銀河の天球上単位面積当たりの数を銀河計数と呼ぶ。銀河計数は我々が検出する銀河の個数の期待値であり、さまざまな光度の銀河、さまざまな距離の銀河の情報が視線方向に積分された統計量である(図1:上段)。銀河計数と関係の深いもう一つの観測量として、宇宙背景放射がある。紫外から赤外までの背景放射には、近傍からはるか遠方までの全ての銀河からの光が視線方向に足し合わせられた積分光が主に寄与している。宇宙赤外線背景放射もまた、基本的に銀河の赤外スペクトルの重ね合わせであると考えられている<sup>5), 6)</sup>。つまり、これらの観測量は赤外銀河進化の歴史を刻んだ記録、年代記なのである。

世の歴史書が概ねそうであるように、この赤外銀河の記録をひもとく作業もまた大きな困難を伴う。銀河進化史を刻んでいるとはいえ、肝心な年代の記録、即ち銀河までの距離の情報は縮退してしまっているため、赤外銀河計数や背景放射から銀河進化の情報を引き出すためにはモデルを介在させねばならないのである。銀河計数モデルの構成法にはさまざまな方法があるが、どういうモデルでも元になる構成要素は1. 宇宙論モデル, 2. 銀河のスペクトル概形 (SED), 3. 光度関数, 4. 銀河進化の4つである。大雑把に言って銀河計数モデルには経験的モデルと第一原理型モデルの二

b) 波長  $200 \mu\text{m}$  から  $1 \text{mm}$  くらいまでの電磁波。

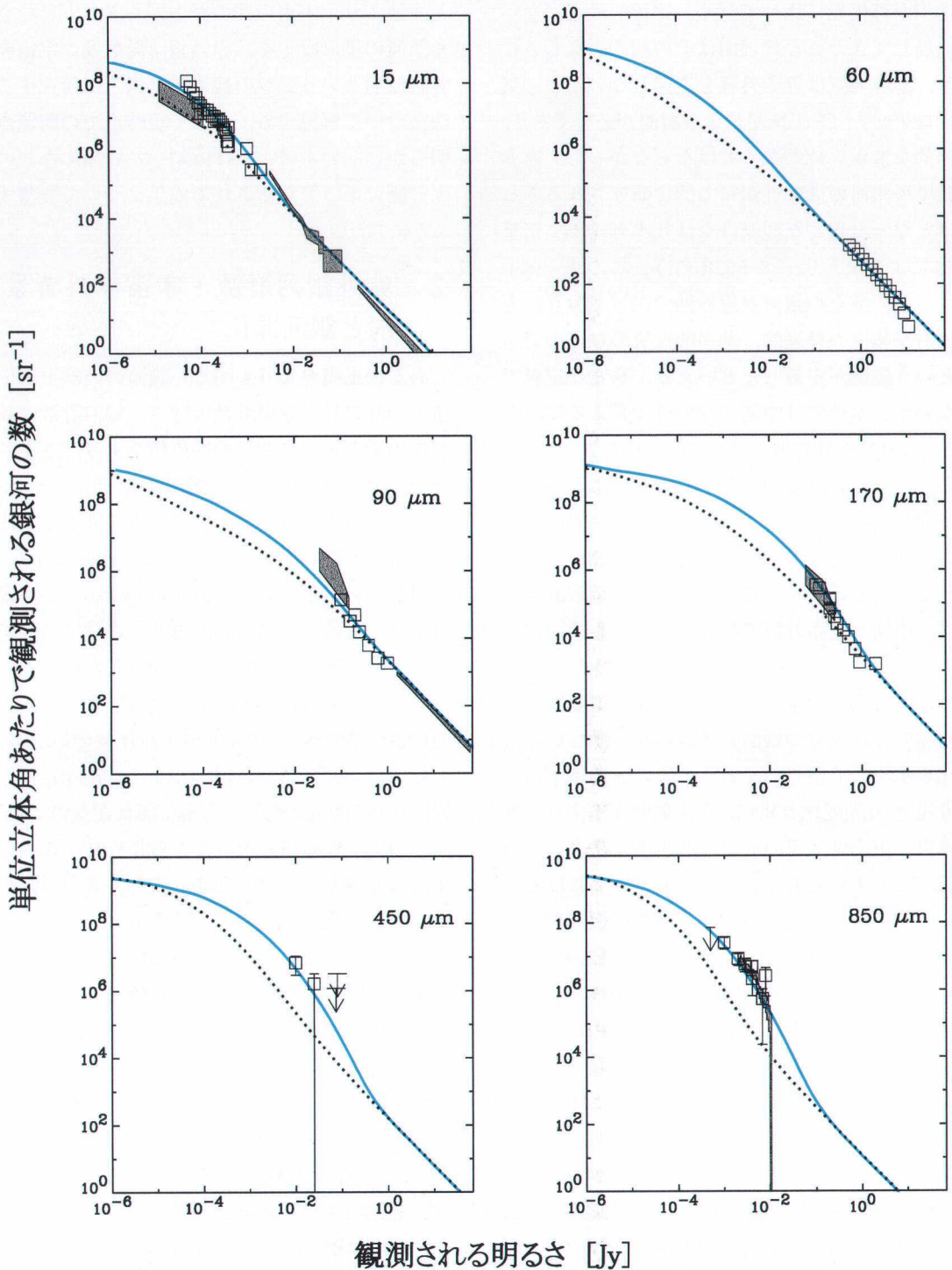


図2：赤外からサブミリ波帯までの銀河計数。点線は銀河が全く進化していないとした場合であり、実線は遠赤外線観測から求められたベストフィットモデルである。



つがある。経験的モデルでは近傍銀河の観測的性質を仮定し、現在得られるデータを用いて進化の強度を推定する。第一原理モデルでは銀河進化ないし構造形成モデルを元に銀河進化を求め、観測データと比較して興味ある素過程のパラメータを求める。これらはそれぞれ長所短所があり、お互いに相補的な方法である。特に赤外銀河進化モデルの研究はまだ歴史が浅く、統一的理解もないため、観測データ主導で試行錯誤してモデルを構成しているというのが現状である。ASTRO-FやALMAなどの将来計画で期待される銀河の予想検出個数はこれらのモデルを用いて計算されているが、データが得られれば逆にモデルに対して理解が進んでゆくことになるであろう。

ここではまず経験的方法に沿って、竹内他<sup>7)</sup>を元に議論する。他のモデルを用いた場合でも原理的な方法論はほぼ同じである。近傍赤外銀河のSEDはゆるく赤外光度と相関することが知られており、SEDモデルはこの経験則を元に構成する。ちなみに現時点では、第一原理型の理論モデルでもこの経験則を採用しているものが大多数である。しかし後述するように、この仮定自体将来の観測によって検証されるべきものであり、最終的には整合的な理論に置き換えられると期待したい。光度関数の形にはIRAS銀河のそれを仮定し、進化は近傍での60 μmでの光度関数を基本として光度のみ時間変化するとし、光度関数の関数形は保存すると仮定している(図1:下段)<sup>c)</sup>ある宇宙論パラメータの下で、これらの仮定を用いて以下のように銀河計数を計算することができる:

$$N(>S(\nu)) = \int_0^{z_{\max}} dz \frac{d^2V}{dz d\Omega} \int_{L_{60}(S(\nu), z)}^{\infty} \phi(z, L'_{60}) dL'_{60} \quad (1)$$

ここで $N(>S(\nu))$ が検出限界フラックス $S(\nu)$ の銀

河計数、 $\phi(z, L'_{60})$ が赤方偏移 $z$ での銀河の60 μm光度関数、 $d^2V/dz d\Omega$ は単位赤方偏移・単位立体角当りの体積要素、 $L_{60}(S(\nu), z)$ は赤方偏移 $z$ で検出限界に対応する銀河の60 μmでの光度であり<sup>d)</sup>、そして $z_{\max}$ は便宜上設定する銀河の赤方偏移の上限である。これまでの経験的モデルでは、銀河進化にも何らかの単純な関数形(例えば $\propto (1+z)^{\gamma}$ )を仮定して、データと整合的なパラメータを推定する方法が採られることが多かった。しかし赤外での銀河進化については未知の部分が殆どであり、また関数形に物理的意味を持たせることも難しいため、<sup>7)</sup>では関数形を仮定せずにデータから統計的に直接銀河進化の強度を推定している。もしダストの性質が遠方でも近傍銀河のそれとさほど変わらないならば、ここで求められた‘進化の強さ’は隠された星形成史そのものを求めていることになり、宇宙赤外背景放射と併せて遠方銀河の寄与への制限なども求められる。無論、銀河の金属量及びダスト量は星形成史に伴い時々刻々と変化してきているはずであり、この議論は単純化のしすぎであることには注意が必要である<sup>2)</sup>。その代り、経験的モデルは仮定が単純であるためパラメータが少なく、検出される天体の赤方偏移分布などが簡単に求められることから観測戦略を考える際にも便利である。

では赤外銀河計数と背景放射のスペクトルがどうなっていれば進化があると言えるのか? 基準となるのは銀河進化が全くない場合の赤外銀河計数・背景放射スペクトルである。特に背景放射の議論では、宇宙膨張の効果をきちんと分離して考えるためにも進化なしでのモデルの予言を帰無仮説として検定することが必要である。これはまた、進化のあるなしの微妙な議論は若干モデルに依存することも意味している。進化なしモデル、及び現在得られている観測データを最もよく再現する進

c) 経験的モデルの中にはやたらにフリーパラメータを増やし、観測を全て再現したと称するものが散見する。図2で見て頂ける通り、データ点の数は増えてきたとはいえまださほど多くはない。理論モデルで光度関数の進化が演繹できる場合ならともかく、経験的方法で光度関数の形まで変えてフィットを議論しても現時点では統計学的に安定な解は得られない。

d) ここでSEDモデルが使われている。



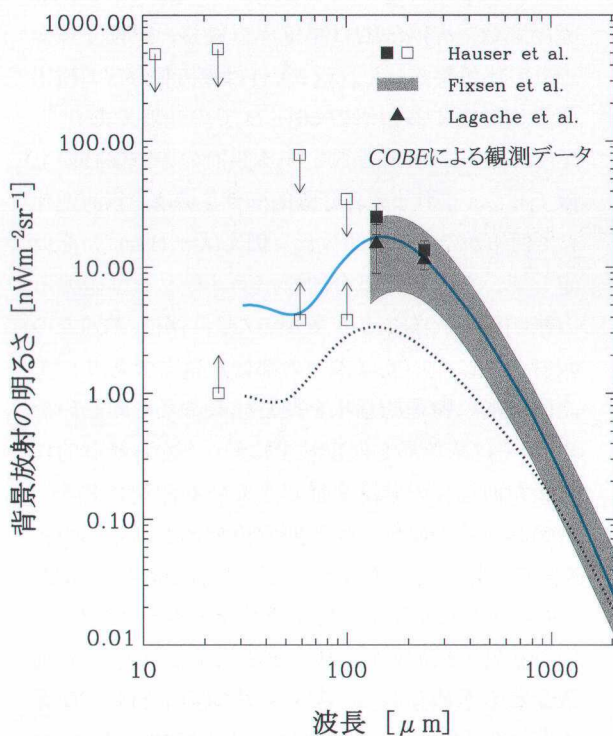


図3 宇宙赤外背景放射の観測されたスペクトルとモデル。点線及び実線は図2と同じ。

化史（ベストフィットモデル）での赤外銀河計数、背景放射を図2及び図3に示す。銀河計数の場合、銀河進化があると進化なしモデルと比較したときに傾きがより急、つまり暗い方に行くに従い天体が急速に増えてゆくことになる。また赤外背景放射なら、銀河進化が激しい時期に対応して検出される背景放射の強度が強くなる。ベストフィットモデルでの銀河進化（赤外銀河が近傍に比べ何倍明るくなったか）を表したのが図4である。詳細を議論するには時期尚早と考えられるが、赤方偏移 $z \sim 1$ より若干小さいところにピークが来ていることが見て取れる。つまり、遠赤外銀河計数・背景放射へ主に寄与するのは比較的近傍の銀河ということになる。経験的方法では、赤外銀河の進化から見積もった星形成史は可視光・紫外データから求めたそれとあまり大きな矛盾はなく、全体的

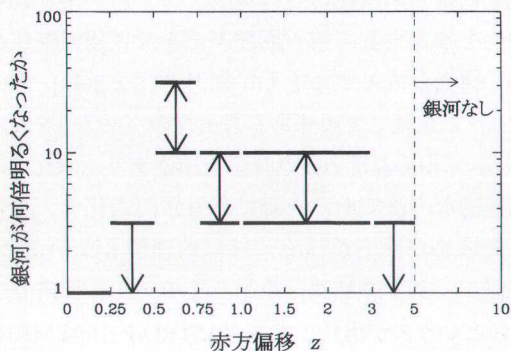


図4 赤外銀河計数と宇宙赤外背景放射から求めた銀河進化の様子。

に一致している。そして、近傍の赤外銀河のSEDを仮定する限り、赤方偏移 $z \geq 2$ の遠方宇宙にはあまり多くの大光度赤外銀河は存在してはならないという重大な制限が得られる。無制限に多くの赤外銀河を遠方に置きすぎると、現実的な宇宙論パラメータの下ではモデルの方がサブミリ波での背景放射の観測値を超過してしまうのである<sup>6), 7), 8)</sup>。これは、遠方宇宙では激しい星形成は行われていなかったということ、また宇宙初期には赤外銀河が卓越した‘闇’の時代はなかったということをも暗に意味しているのだが…。

### 3. 解釈に潜む陥穽と克服すべき問題

数年前、筆者らがこの結果に初めて到達した頃は、この問題は全くといって良い程意識されておらず、遠方のダストに隠された爆発的星形成銀河(=原始銀河)というシナリオに皆が酔い痴れていた。ところが現在では、かなりの研究者が宇宙の星形成のピークは $z \sim 1$ で、赤外と可視・紫外で矛盾がなくめでたしという考えを持つに至っているようである。では、現に見つかっている遠方のサブミリ波源との整合性はどうかだろうか？ 楢岡銀河の色-等級関係<sup>4)</sup>はどうか、巨大銀河の力学的性質との整合性は？

Cesarsky<sup>9)</sup>が指摘するように、赤外銀河計数・背



景放射は何種類かの本質的に異なったモデルで再現されている<sup>e)</sup>。繰り返し指摘するが、銀河までの距離の情報は縮退しており、解釈は特定のモデルを介したものであることを失念してはいけない。少なくとも銀河までの距離を観測的に決定するまでは最終的な決着はつかないといえる。

現時点での問題を列挙していこう。まず、宇宙論への依存性をきちんと把握しておかねばならない。少し昔のモデルが遠方宇宙に大光度の赤外銀河を許容できたのは、基本的に物質の密度パラメータ  $\Omega_0$  を1としていたことが大きい。密度の高い宇宙では遠方の宇宙の体積は小さくなり、背景放射や銀河計数の予言も小さくなるからである。現在次第に現実視されるようになってきている宇宙項の卓越した宇宙では、サブミリ波背景放射の観測は厳しい上限となっている。ここでは経験的モデルや古典的化学進化モデルを基にした銀河計数・背景放射モデルを念頭に置いている。最近発展著しい準解析的モデルによるアプローチでは、構造形成理論を出発点とするため密度パラメータ依存性はもう少し複雑である。

そして、モデルの赤外 SED への依存性は距離の問題と密接に関っている。高温のダストを持つ遠方銀河と低温のダストを持つ近傍銀河の識別は、フラックスだけからでは大変困難なのである。ということは、輻射場とダストのモデルの匙加減によって赤外銀河の進化史、そして宇宙の星形成史の解釈は変わってくるということを意味する。先に述べたように、現在仮定されている SED はどれも近傍赤外銀河を基にしたもので、別の研究グループによるモデル間でも互いに類似している。ところが遠方の、形成から時間の経っていない銀河においてこれが正しいかどうかは全く自明ではない。金属量、ダスト量も輻射場も近傍銀河とは異なっていると考えるのが自然であろう。

さらに同じ高赤方偏移銀河でも、SCUBA で検出

されているようなダストを大量に持つ銀河と、ライマンブレイク銀河（これについては1)を参照)のような金属量・ダスト量の小さい銀河とではその輻射輸送に関する性質は全く違っている。前者は輻射の大部分が一旦ダストに吸収され赤外で再放射されているが、後者では電離光子の実に50%が吸収されずに外に出てしまっているという報告もある<sup>10)</sup>。このように、異なった進化史、異なった輻射輸送構造を持ついくつかの種族の銀河が存在することも動かしがたい事実である。銀河のダスト輻射と星形成率の関係の金属量依存性は、平下氏の記事<sup>2)</sup>に解説されている処方を用いて議論するのが適切であろう。金属量が非常に低い銀河の場合、十分に金属汚染の進んだ近傍銀河に比べ同じ赤外光度に対して星形成率は高くなるため、これはライマンブレイク銀河のような銀河の赤外放射から星形成を考える際に特に重要である。逆にサブミリ波観測で検出されるタイプの銀河では、高赤方偏移であっても金属量進化は既に相当進行している。戸谷と竹内<sup>11)</sup>は、銀河のサイズ-光度関係を導入することで、赤外光度と SED の相関関係を用いない銀河の温度-光度関係を導出した。得られた関係は、近傍の赤外銀河に見られる程度の光度では経験則と整合的で、大光度になると経験則に比べダストがずっと高温になるというものであった。これを化学進化モデルに組み込むことによって、11)は巨大銀河の形成を扱える銀河計数モデルとなっている。銀河のダスト温度が近傍のスターバーストに比べ著しく高い場合、近傍銀河の経験則を元にした見積りに比べ遠方銀河の赤外銀河計数・背景放射への寄与が大きくなるため、このような銀河が宇宙初期に卓越しているならば、宇宙の星形成史の解釈もまた変更されることになる。即ち、このモデルは宇宙初期の銀河がダストに覆われた時代を予言する。

銀河計数などで用いられる宇宙の平均星形成率<sup>2)</sup>

e) 中にはなぜ観測と合うのか甚だ理解に苦しむようなものもある。



という考え方は、これまできわめて多くの知見をもたらしてきた。しかし我々は間もなく到来する観測の新時代に向けて、その適用限界も認識しておく必要がある。

#### 4. 新たな時代への展望と課題

これから10年程の間に、実に多くの魅力的な赤外線、サブミリ、そしてミリ波の観測ミッションが計画されている。わが国が主導ないし重要な役割を果たすプロジェクトも多い。そして、その性能はこれまでの機器のそれをはるかに上回っており、質・量ともに未曾有のデータをもたらしてくれるであろう。これら新しい観測データから我々は何を知ることができるだろうか？ いささか簡単ではあるが、ここでは著者らの仕事から、赤外線天文衛星ミッション ASTRO-F<sup>12)</sup>、及び国際大型干渉計 ALMA<sup>13)</sup>による銀河計数の研究と課題について解説する<sup>7), 14)</sup>。

再び経験的銀河計数モデルを用いるが、検出個数の見積もり自体はどのような種類のモデルを用いても大差はない。まず ASTRO-F の遠赤外線全天サーベイでは、検出される銀河は一千万個程度と期待される。ところで、銀河計数の明るい部分は銀河のクラスタリングの影響により分散が大きいので、これを平均化するだけの面積が必要となる。これは、近傍から中間赤方偏移 ( $z \sim 0 - 1.5$ ) にかけての銀河進化の情報は、浅く非常に広いサーベイが効果的であることを意味する。IRAS 銀河のクラスタリングを基に必要な天域を計算すると、現在提示されているような銀河進化モデルによって銀河進化を詳しく知るためには、遠赤外では数百平方度が最低限必要である。このことは、全天サーベイが本質的に重要であることを端的に示している<sup>7)</sup>。

ALMA では  $850 \mu\text{m}$  で1平方度当たり30万個の銀河が検出できると期待される<sup>f)</sup>。よく知られてい

ることだが、サブミリからミリ波にかけての波長には遠方のダストを大量に持つ赤外銀河の観測に有利な点がある。遠方の銀河は大きく赤方偏移しているため、銀河から放射される光の本来の波長よりも長い波長で観測される。赤外銀河の場合、サブミリ波はダスト輻射のレイリー-ジーンズ側を見ており、赤方偏移の効果で遠方でも検出されるフラックスが下がらないのである。これはネガティブ K-コレクションと呼ばれる。この特徴により、サブミリ・ミリ波の銀河計数は遠方銀河の寄与が赤外のそれに比べて大きくなり、また銀河進化の影響の表れ方も異なっている。このように、多波長の情報を組み合わせることによっても、ある程度距離の縮退を解くことができる。

この種の評価をする場合、ビームサイズに対して天体の面密度が高くなり過ぎて個々の天体が分離できなくなる‘ソースコンフュージョン’による限界が問題になる。これは赤外やサブミリ波に固有の問題ではなく、天体の密度が非常に高ければ可視光などでも生じる現象である。ソースコンフュージョンは位置やフラックスの特定を著しく困難にし、特に SCUBA のような単一アンテナによるサブミリ波銀河計数で深刻である<sup>14), 15)</sup>。厄介なのは、検出限界に近い部分の銀河計数はこの現象が原因となって生じるノイズのために実際よりも傾きが急であるように観測されてしまうことである。これは実は古くから知られている効果だが、様々な試みにも関わらずまだ対処の仕方は試行錯誤の段階である。また遠赤外では、我々の銀河系に付随するダスト(シラスと呼ばれる)からの輻射と銀河が混合してしまう‘シラスコンフュージョン’がより効いてくるため、特にシラス輻射の弱い領域でない限り検出限界はこちらで決まってしまう。シラスコンフュージョンの方は銀河計数の傾きをなだらかにしてしまう傾向があるため、遠赤外銀河計数はさらに複雑な事情になっている。

f) ALMA の検出限界は <http://iram.fr/~guilloto/alma/alma-372.ps> を基にした。



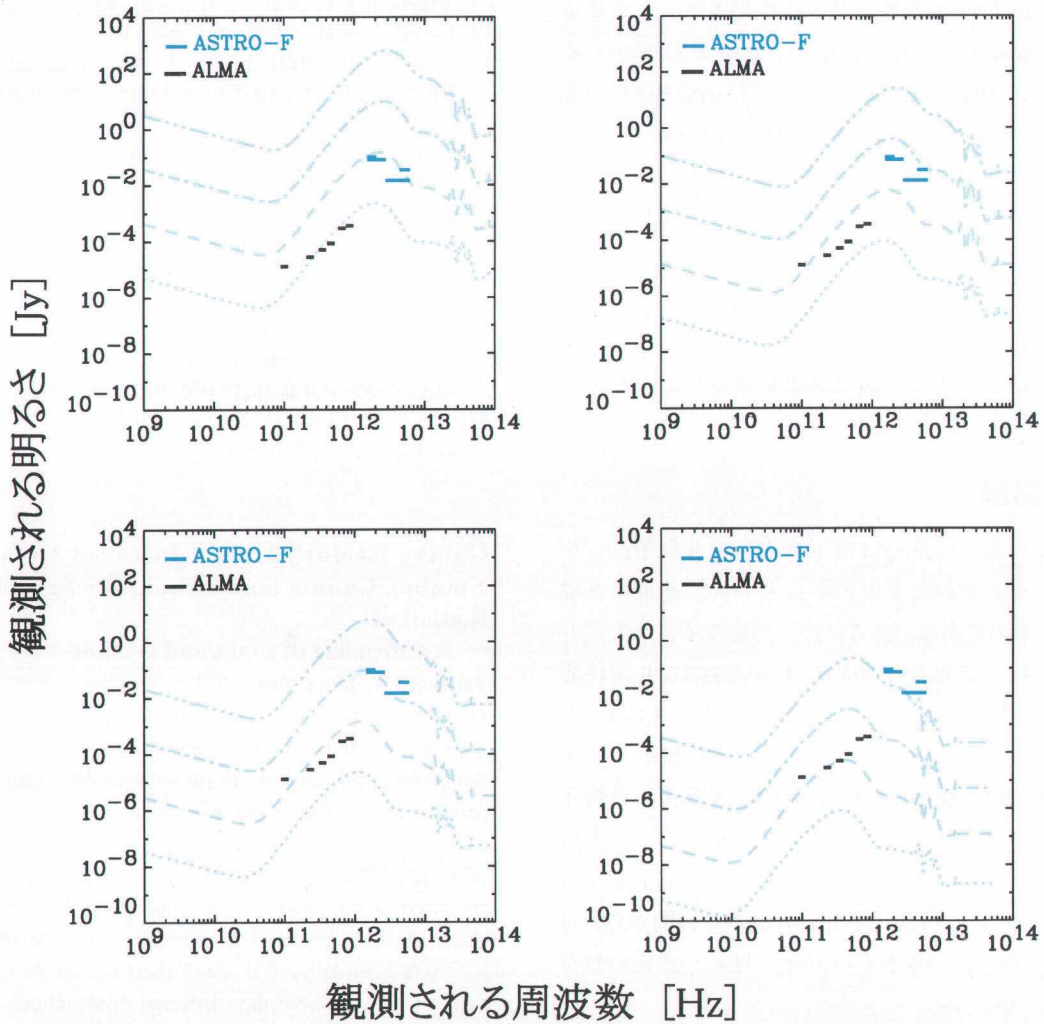


図5 ささまざまな光度・赤方偏移の銀河のSEDとASTRO-F(全天サーベイ), ALMAの各波長帯での検出限界. 点線, 破線, 一点鎖線, 三点鎖線はそれぞれ  $60 \mu\text{m}$ での光度  $L_{60} = 10^8, 10^{10}, 10^{12}$ , 及び  $10^{14} L_{\odot}$ の銀河のSEDである.

これは, ASTRO-F などではサーベイのデータを解析する際に, どの天域を見ているのかに依存して解析法を変えていく必要があることを意味している. このような状況を理想的に回避するには, 遠赤外ではさらに大型の宇宙望遠鏡ないし干渉計が必要となる. ヨーロッパの *Herschel Space Observatory*<sup>16)</sup> やわが国の *SPICA* 計画<sup>17)</sup> に期待が持たれるところである. また, コンフュージョンの評価から,  $5\sigma$  以下のソースは銀河計数を決める目的には使えないことが分かっている<sup>18)</sup>. SCUBA によるサブミ

リ波銀河計数の研究のなかには  $3\sigma$  以下のソースで行われているものがあるが, 実はこれはもつての他であって, 結果は全く信用できない. ところでALMAの場合について評価してみると, コンフュージョン限界はカバーする波長帯のほとんどで大気吸収による限界を下回っており, 特に問題は生じない. 即ち, 高赤方偏移の原始銀河の統計的研究でさえ可能になるかも知れない.

赤外銀河のダスト温度を検証するには多波長での同時観測が不可欠である. 図5ではASTRO-F及



び ALMA の検出限界とさまざまな光度、さまざまな赤方偏移を持つ銀河の観測される SED を示している。この図から、特に  $z < 1$  では ASTRO-F の波長帯で、 $z > 1$  の遠方銀河は ALMA の観測波長帯によってダスト輻射のピークをとらえることができ、赤外銀河のダスト温度の決定という基本的問題に解答を与えると期待される。これは銀河進化、ひいては原始銀河の輻射過程・物理状態の研究に計り知れない進歩をもたらすことは間違いない。読者諸賢がこれらの問題に興味を持たれることを切に願いつつ、本稿の結びとしたい。

## 5. 謝辞

本稿の多くの部分は平下博之、石井貴子、吉川耕司、そして戸谷友則の各氏との共同研究に基礎を置くものである。ここに深く感謝する。また芝井広氏、松原英雄氏を始めとする ASTRO-F 関係者の方々、川辺良平氏、河野孝太郎氏ら ALMA 関係者の方々には常に各プロジェクトに関して貴重な情報、示唆を頂いている。浅井 歩氏、石井貴子氏、及び平下博之氏には原稿を査読していただき、貴重なコメントを頂いた。また全ての名前を挙げることはできないが、筆者との議論に日頃からお付き合い頂いている多くの方々に対し、感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 例えば Steidel C., et al., 1999, ApJ, 519, 1
- 2) 平下博之 2001, 天文月報 94, No.8
- 3) Lagache, G., 2001, in *Infrared and Submillimeter Space Astronomy: An International Colloquium to Honor the Memory of Guy Serra*, in press
- 4) 高木俊暢 2001, 天文月報 94, No.9
- 5) Bond J.R., Carr B. J., Hogan C. J., 1986, ApJ, 306, 428
- 6) Hauser M. G., Dwek, E., 2001, ARA & A, in press (astro-ph/0105539)

- 7) Takeuchi T.T., et al., 2001, PASJ, 53, 37
- 8) Dwek E., et al., 1998, ApJ, 508, 106
- 9) Cesarsky C., 2001, in *The Extragalactic Infrared Background and Its Cosmological Implications*, p.305
- 10) Deharveng J.-M., 2001, in *Gaseous Matter in Galaxies and Intergalactic Space*, in press
- 11) Totani T., Takeuchi, T. T., 2001, in preparation
- 12) <http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/>
- 13) <http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/>
- 14) Takeuchi T. T., et al., 2001, PASP, 113, 586
- 15) 例えば Eales S. et al., 2000, AJ, 120, 2244
- 16) <http://astro.estec.esa.nl/First/>
- 17) <http://www.ir.isas.ac.jp/SPICA/>
- 18) 例えば Murdoch H. S., Crawford D. F., Jauncey, D. L., 1973, ApJ, 183, 1

## Galaxy Evolution from Infrared Galaxy Number Counts and Cosmic Background Radiation

### — A Chronicle of Light and Darkness —

Tsutomu T. TAKEUCHI

*Optical and Infrared Astronomy Division, National Astronomical Observatory of Japan/Institute of Astronomy, the University of Tokyo 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, Japan 181-8588*

Abstract: The evolution of the Universe can be regarded as the evolution of galaxies or the cosmic star formation history. Star formation in galaxies has long been studied through their optical properties. However, these days infrared observations are developing rapidly, so that the star formation history of galaxies hidden by dust, say, the dark side of galaxy evolution attracts considerable attention. Here we introduce the method to investigate the galaxy evolution with two fundamental observational data, the infrared galaxy number counts and the cosmic infrared background radiation via model calculations. After discussing some delicate problems in actual analyses, we review the prospects for future observational missions, e.g. ASTRO-F and ALMA.