

「あかり」で探るダストに隠された 宇宙の星形成史*



後藤 友嗣・「あかり」北黄極ディープサーベイチーム

〈Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA〉

e-mail: tomo@ifa.hawaii.edu

宇宙開闢以来、いつごろ、どのくらいの星が生まれたか、宇宙の星形成史を理解することは、現代天文学の大きなテーマである。しかしながら、従来の紫外線を用いた観測では一番重要なダストに覆われた激しい星形成を見通すことができない。「あかり」衛星の中間赤外帯に連続なフィルターをもつというユニークな特性を活かして、106億年前 ($z < 2.2$) までの宇宙の星形成史を、より信頼性の高い方法で明らかにしたので以下に紹介する。

1. 宇宙の星形成史

想像していただきたい。宇宙はビックバンの火の玉から生まれて、一気に膨張して大きくなり、やがて星や銀河が生まれ、成長し、暗い夜空にぼつりぼつりと銀河が浮かぶ今日の宇宙に至る。この宇宙の歴史の中で、星はいつ頃生まれたのであろうか。ビックバン直後に爆発的に生まれたのか、それとも最近まで星はほとんどなかったのか。

星がいつ頃どのくらい生まれたのか—宇宙の星形成史—を明らかにすることは現代天文学の最重要課題の一つである。

マダウプロットという言葉聞いてピンとくる方もあるかもしれない。宇宙の星形成密度を赤方偏移の関数としてプロットした一番最初の論文は Tinsley ら¹⁾で、その後、Lilly ら²⁾および Madau ら³⁾らによって遠方へ拡張され、約70億年前 ($z \sim 1$) に急激に星が形成されたことが示された。以来、この図は Madau ら³⁾の著者の名をとってマダウプロットと呼ばれることが多く、人々は先を

挙ってこの図にデータ点を打つことに躍起になった。実に今日現在 Madau ら³⁾の論文は1,316回も引用されている。

マダウのプロットを作るのによく採られる方法はできるだけ大きな望遠鏡を用いて遠方銀河の紫外線を観測し、星形成率を探る方法である。しかし、この方法には大きな問題点がある。星はガスやダストの密度の高いところで生まれる。しかし、紫外線はダストによって大きく吸収されてしまうために大部分の若い星形成は紫外線では見えないのである。しかもわれわれが知りたい遠方のより激しい星形成ほどダストに埋もれていることが示唆されている。Takeuchi ら⁴⁾は約70億年前ですでに80%の紫外線がダストに吸収されてしまっていると見積もっている。つまり紫外線を用いては、どんなに大きな望遠鏡を用いて観測しても、星形成率の下限値しか得られないことになる。

2. 答えは赤外線衛星「あかり」

それでは、ダストによって吸収されてしまった

* この原稿中では宇宙論パラメーターは、 $(\Omega_m, \Omega_\Lambda, h) = (0.3, 0.7, 0.7)$ という値を用いている。

紫外線の分を補って、正味の星形成率を見積もるにはどうすれば良いだろうか？ ダストによって吸収された紫外光は、当然ながらダストによって赤外線として再放射される。つまり、赤外線で観測すれば、ダストに吸収されてしまった星形成を見通すことができるはずだ。実際に銀河の全赤外線光度 ($8\text{--}1,000\ \mu\text{m}$) は銀河の星形成率と非常によく相関することが知られている⁹⁾。

つまり、宇宙の星形成史を探るには地球大気に邪魔されない宇宙に望遠鏡を打ち上げて赤外線を観測すればよい。ここで「あかり」衛星の登場である。従来の赤外線衛星 IRAS や ISO は遠方銀河を検出するに足るだけの感度がなかったが、近年打ち上げられた日本の「あかり」衛星および NASA の Spitzer 望遠鏡ならば、遠方の銀河を赤外線でもとらえることができるはずだ。「あかり」による宇宙星形成史解明に期待がかかる。

3. 「あかり」北黄極ディープサーベイ

「あかり」は北黄極領域において、 $2.4, 3.2, 4.1, 7, 9, 11, 15, 18, 24\ \mu\text{m}$ の各フィルターで $0.38\ \text{deg}^2$ の領域について深い撮像観測を行った^{6)–8)}。中間赤外線帯に六つもの連続なフィルターをもっていることは、Spitzer や ISO 衛星にはなかった「あかり」のユニークかつたいへん重要な特徴である。この領域は同時にすばる、CFHT、GALEX、KPNO/Flamingos などの他波長の望遠鏡でも観測を行い、紫外–可視–近赤外のデータをもとに銀河の photometric redshift を測定した。「あかり」北黄極ディープサーベイについての詳細は本号の高木、松原らの記事に譲る。SED (spectral energy distribution) フィットで AGN と判定された銀河は本解析から除いている。

4. $8\ \mu\text{m}$, $12\ \mu\text{m}$, 全赤外光度、光度関数

宇宙の星形成史という大きなテーマはひとまず脇に置いて、まずはこのデータを用いて $8\ \mu\text{m}$ の

光度関数 (LF) を測定してみる。 $8\ \mu\text{m}$ は星形成を探るにはたいへん重要な波長帯である。というのは星形成にたいへん敏感な PAH (多環式芳香族炭化水素) 分子の輝線がこの波長帯に存在するからである。実際に $8\ \mu\text{m}$ 光度は、遠方でも近傍でも銀河の星形成率とたいへんよく相関することが知られている⁹⁾。

過去、赤外線の光度関数を作成する際に一番大きな不定要素となっていたのは、SED モデルを使った外挿作業であった。Spitzer 望遠鏡を使った論文ではフィルターの数が限られるために、観測された $24\ \mu\text{m}$ の光から SED モデルを用いて外挿して静止系 $8\ \mu\text{m}$ の光度を求めなければならない。この変換の際に大きなエラーがのってしまう。「あかり」は中間赤外帯に連続的なフィルターをもっているため、銀河がどの赤方偏移にあるとも、いずれかのフィルターを用いて、静止系の $8\ \mu\text{m}$ の光をとらえることができる。直接 $8\ \mu\text{m}$ の光を観測できれば、SED を用いた外挿など必要ない。つまり、「あかり」は従来の一番大きな不定性を取り除くことができるのだ。

光度関数の作成によく用いられる V_{max} 法を用いて体積の効果の補正、completeness の補正を行い描いた $8\ \mu\text{m}$ の光度関数が図 1 である。エラーは 1,000 回モンテカルロシミュレーションを行って決めている。 $z=0$ から $z=2$ まで銀河の $8\ \mu\text{m}$ の光度関数は強い進化を示していることがわかる。従来、 $8\ \mu\text{m}$ の光度関数は論文によってばらつきが大きかった。図 1 でいずれも Spitzer 望遠鏡による文献 10 と文献 11 の結果の間には、同じ望遠鏡を用いた結果であるにもかかわらず 1 桁以上の大きな隔りがある。これは輝線が強い $8\ \mu\text{m}$ 波長帯の光度を SED モデルを用いて Spitzer $24\ \mu\text{m}$ から外挿することの難しさを表している。

「あかり」衛星の連続的なフィルターのおかげで SED モデルによらない今回の結果は、この点においてより信頼度が高いと言える。

同様の方法で $12\ \mu\text{m}$ の光度関数も描くことが

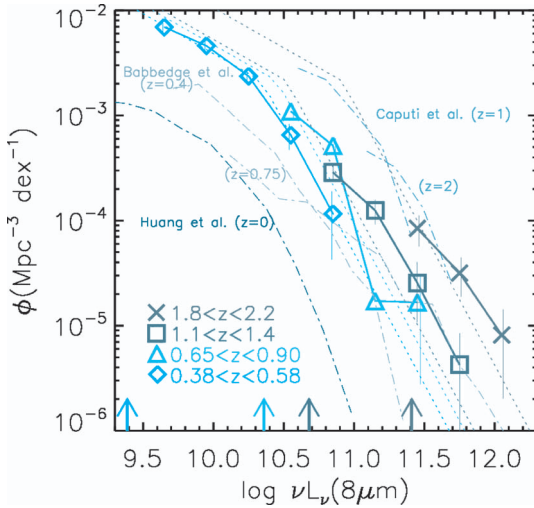


図1 「あかり」北黄極領域における静止系 $8\ \mu\text{m}$ の光度関数。ダイヤモンド、三角、四角、クロスの記号はそれぞれ、 $0.38 < z < 0.58$, $0.65 < z < 0.90$, $1.1 < z < 1.4$, $1.8 < z < 2.2$, における静止系 $8\ \mu\text{m}$ の光度関数を示している。破線はダブルパワーローによるフィットの結果。矢印はそれぞれの z でのデータの深さ (5σ) を示す。文献 10, 11, 17 の結果が同時に破点線で示されている。AGN はサンプルから除かれている。

できる。今度は、静止波長 $12\ \mu\text{m}$ に対応するフィルターを各赤方偏移で選んで、光度に焼き直してやれば良い。 $12\ \mu\text{m}$ 帯は連続光がより卓越的で、銀河の星形成率と $12\ \mu\text{m}$ 光度はよく相関を示す¹²⁾。体積効果補正、completeness 補正して得られた光度関数を図 2 に示す。 $8\ \mu\text{m}$ のときと同じように光度関数は過去にさかのぼるにつれて明るいほうへ大きく進化していることがわかる。しかも、今回の結果は破点線で示した Spitzer の論文¹²⁾と非常によく一致している。これは $12\ \mu\text{m}$ が PAH 輝線の卓越した $8\ \mu\text{m}$ 帯に比べてモデルで外挿しやすい点、また Spitzer 望遠鏡も $z=1$ では $24\ \mu\text{m}$ バンドを用いて、静止系 $12\ \mu\text{m}$ を観測できるためであろう。同時に、「あかり」が行ったようにモデルに頼らず直接静止波長で観測することの重要性を示している。

最後に全赤外線光度 ($8\text{--}1,000\ \mu\text{m}$) の光度関数

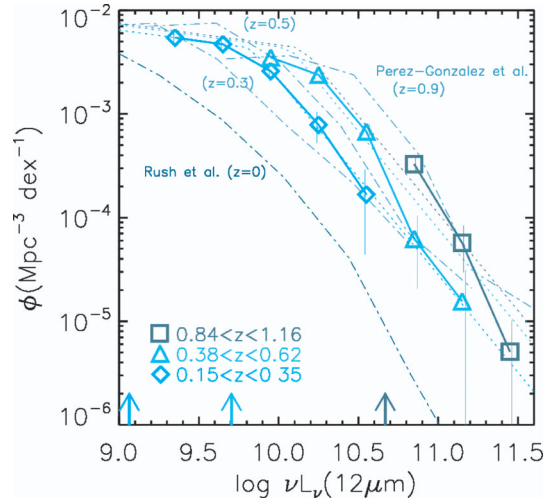


図2 「あかり」北黄極領域における静止系 $12\ \mu\text{m}$ の光度関数。ダイヤモンド、三角、四角の記号はそれぞれ $0.15 < z < 0.35$, $0.38 < z < 0.62$, $0.84 < z < 1.16$ における静止系 $12\ \mu\text{m}$ の光度関数を示している。破線はダブルパワーローによるフィットの結果。矢印はそれぞれの z でのデータの深さ (5σ) を示す。文献 12, 18 の結果が同時に破点線で示されている。AGN はサンプルから除かれている。

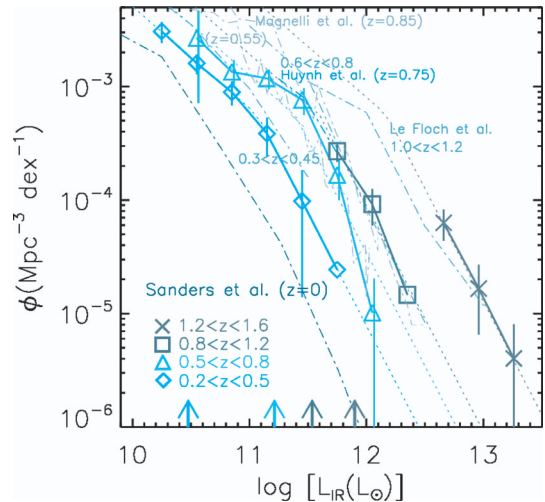


図3 トータル赤外線光度関数。ダイヤモンド、三角、四角、クロスの記号はそれぞれ、 $0.2 < z < 0.5$, $0.5 < z < 0.8$, $0.8 < z < 1.2$, $1.2 < z < 1.5$, における静止系 $8\ \mu\text{m}$ の光度関数を示している。矢印はそれぞれの z でのデータの深さ (5σ) を示す。AGN はサンプルから除かれている。文献 13, 14, 19, 20 の結果が同時に破点線で示されている。

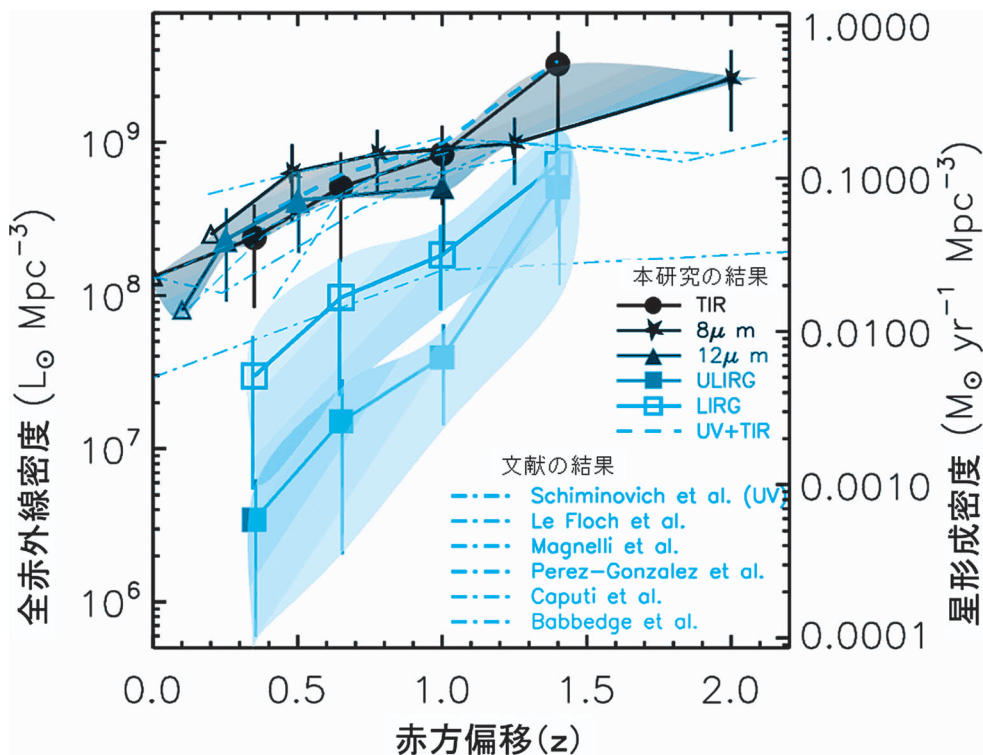


図4 宇宙の星形成史. 宇宙の赤外線密度 (左軸) すなわち宇宙の星形成密度 (右軸) が赤方偏移 (z) の関数として示されている. 丸, 星, 三角はそれぞれ, 全赤外線, $8\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$ 光度関数から得られた値である. 四角, 中抜き四角はそれぞれ, LIRG, ULIRGs のみを用いて測った結果を示している. 破点線はさまざまな文献 8-13 からの値をプロットしている. 破線は赤外線と紫外線で測った星形成密度を合計した値を示している.

を求めてみる. 遠赤外線の深いデータはこの領域はないので, 「あかり」をもってしても全赤外線光度は従来の研究と同じく SED フィットを用いて求めざるをえない. それでも, 中間赤外 $24\mu\text{m}$ のデータだけに頼っている *Spitzer* の結果と比べれば, 「あかり」は中間赤外帯に六つもバンドがあるから信頼性は格段に向上している. 得られた結果は図3に示す. やはり赤外線光度は過去にさかのぼるにつれて明るい側に大きく進化していて, 過去赤外線で見える銀河がたくさんあったことを示している. *Spitzer* の結果と比べると文献 13 と結果は非常によく一致している. 文献 14 より光度関数が少し小さいことが気になるが, これはおそらく文献 14 が AGN を取り除いていないことが一因であろう.

5. いよいよ星形成史

「あかり」で宇宙の星形成史を探るはずだったのに, ごちゃごちゃと線の入り交じった光度関数を計算していったい何をしているのであろうか. 否, これは星形成史を調べるための下準備である. 光度関数とはある光度の銀河がどのくらいの密度で存在するかを表したものであるから, 光度関数に光度をかけて積分してやれば, その z でのトータルでどのくらい赤外線が放射されているか, 全赤外線密度がわかる. 赤外線密度は星形成密度と直接関連しているから⁹⁾, これがわかれば星形成史がわかるという寸法だ. 早速計算してみよう.

まずは, これまで作ってきた銀河の光度関数を各 z ごとに解析的な式でフィットする. これに全

赤外線光度を掛けて積分し、その z での全赤外線密度を求める。ただし全赤外線密度と言っているのは、明るい側および暗い側に光度関数を外挿して積分しているからである。8 μm , 12 μm の結果は変換式^{9), 12)}を用いて全光度に変換する。これを各 z について計算し、いよいよ図 4 に「あかり」のデータで作ったマダウプロットを示す。全赤外線密度、すなわち星形成密度は、現在から 106 億年前 ($z=2.2$) まで過去にさかのぼるにつれて急激に大きくなっていくことがわかる。過去の論文には $z > 1.5$ において全赤外線密度が逆に小さくなると報告しているものもあるが^{10), 13)}、あかりの結果はもっと過去にさかのぼって大きくなっているのも興味深い。星形成の最盛期を見るには、もっと過去にさかのぼらなければならないようである。

ここで注意すべきは、赤外線で測った星形成密度は、ダストに吸収されなかった紫外線の分は見逃している点である。実際に、紫外線で測った星形成密度¹⁵⁾と比べてみる。点線で示された紫外線の結果はどの z においても赤外線の結果よりもおよそ 1 桁程度小さく、実際 $z > 1$ においては 90% 以上の星形成が赤外線波長で観測されている。これは、実は赤外線で観測すればトータルの星形成密度をほぼ網羅して観測できることを示している。

6. 将来に向けて

われわれが汗水垂らして作り、運用してきた「あかり」衛星によってダストに隠された宇宙の星形成史が明らかにされたことは、たいへん喜ばしい。早朝 5 時前から寝ぼけ眼をこすりながら衛星運用を行った苦労も報われる思いである。しかしながら、赤外線による光度関数の見積もりは、可視光線の光度関数のように匠の域に達していないこともまた事実である。エラーは一般的な可視光線の光度関数に比べて桁違いに大きいし、遠方でも暗い銀河を検出できる可視光と違って、最新の衛星を用いても赤外線は遠方では本当に明るい

超光度クラスの赤外線銀河しか検出できていない。SED モデルも赤外線の波長では 5 倍程度もばらつきがあり、まだまだ向上の余地がある。何よりも全赤外線光度の推定にはダストの放射のピークがある遠赤外線帯の感度を向上させることが重要だ。中間赤外線から推定する現在の方法には限界がある。

本当に精度良く、またより過去にさかのぼって、赤外線宇宙の星形成史を明らかにするには、「あかり」の感度をもってしてもまだ不十分で、次世代の赤外線衛星の登場を待たねばならないであろう。幸いにして赤外線分野では多くの宇宙望遠鏡が計画されており将来は明るい。ヨーロッパの *Herschel* や NASA の *JWST* に加えて、日本で計画されている「すぴか」衛星に大いに期待したい。

謝 辞

本稿は論文 16 の一部を元に作成したものです。「あかり」北黄極デープサーベイグループのメンバーの皆様にご感謝いたします。また、あかりの建築ならびにデータの取得に多大に貢献された「あかり」チームの皆様、本稿に関して貴重なコメントをいただいた中川貴雄氏、竹内 努氏にご感謝いたします。

参考文献

- 1) Tinsley B. M., Danly L., 1980, *ApJ* 242, 435
- 2) Lilly S. J., Le Fevre O., Hammer F., Crampton D., 1996, *ApJ* 460, L1
- 3) Madau P., Ferguson H.-C., Dickinson M.-E., et al., 1996, *MNRAS*, 283, 1388
- 4) Takeuchi T. T., Ishii T. T., Dole H., Dennefeld M., Lagache G., Puget J.-L., 2006, *A&A* 448, 525
- 5) Kennicutt R. C., Jr., 1998, *ARA&A* 36, 189
- 6) Takagi T., et al., 2007, *PASJ* 59, 557
- 7) Matsuhara H., et al., 2007, *PASJ* 59, 543
- 8) Wada T., et al., 2007, *PASJ* 59, 515
- 9) Bavouzet N., Dole H., Le Floch E., Caputi K. I., Lagache G., Kochanek C. S., 2008, *A&A* 479, 83
- 10) Caputi K. I., et al., 2007, *ApJ* 660, 97
- 11) Babbidge T. S. R., et al., 2006, *MNRAS* 370, 1159
- 12) Pérez-González P. G., et al., 2005, *ApJ* 630, 82

- 13) Magnelli B., Elbaz D., Chary R. R., Dickinson M., Le Borgne D., Frayer D. T., Willmer C. N. A., 2009, *A&A* 496, 57
- 14) Le Floch E., et al., 2005, *ApJ* 632, 169
- 15) Schiminovich D., et al., 2005, *ApJ* 619, L47
- 16) Goto T., Takagi T., Matsuhara H. et al., *A&A*, AKARI Special Issue, in press, arXiv:1001.0013
- 17) Huang J.-S., et al., 2007, *ApJ* 664, 840
- 18) Rush B., Malkan M. A., Spinoglio L., 1993, *ApJS* 89, 1
- 19) Sanders D. B., Mazzarella J. M., Kim D.-C., Surace J. A., Soifer B. T., 2003, *AJ* 126, 1607
- 20) Huynh M. T., Frayer D. T., Mobasher B., Dickinson M., Chary R.-R., Morrison G., 2007, *ApJ* 667, L9

Revealing the Cosmic Star Formation History Hidden by Dust with AKARI
Tomotsugu GOTO

*Institute for Astronomy, University of Hawaii,
2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA*

Abstract: We reveal cosmic star formation history hidden by dust at $0.15 < z < 2.2$, using the AKARI NEP-Deep data. AKARI's continuous mid-infrared filter coverage allows us to measure infrared luminosities without using a large extrapolation based on a SED fit, which was the largest uncertainty in previous work. Resulting cosmic star formation density shows a steep, continuous increase from $z=0.15$ to $z=2.2$. At $z > 1$, more than 90% of star formation is observed in infrared, suggesting total infrared luminosity is a good approximation of the total star formation density.